

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**UÇ PROFİLİ GELİŞTİRİLMİŞ SAVONIUS ÇARKLARIN
PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜŞRA ŞENGÜL

DENİZLİ, NİSAN 2020

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



UÇ PROFİLİ GELİŞTİRİLMİŞ SAVONIUS ÇARKLARIN
PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜŞRA ŞENGÜL

DENİZLİ, NİSAN 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Büşra ŞENGÜL tarafından hazırlanan “**Uç Profili Geliştirilmiş Savonius Çarkların Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 21.04.2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

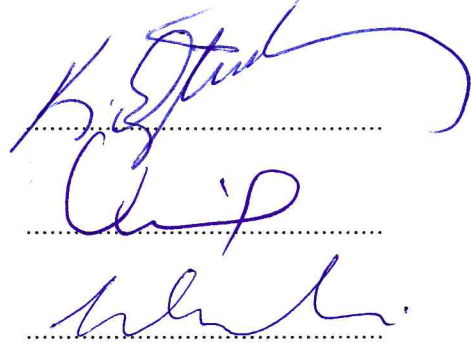
Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK

Üye

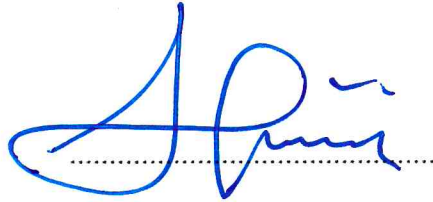
Doç. Dr. Gülay YAKAR

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Utkucan ŞAHİN



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/05/2020 tarih ve 21/04... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

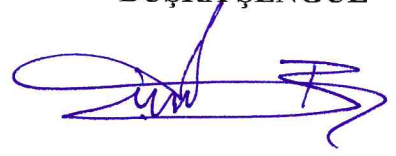


Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

BÜŞRA ŞENGÜL



ÖZET

**UÇ PROFİLİ GELİŞTİRİLMİŞ SAVONIUS ÇARKLARIN
PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BÜŞRA ŞENGÜL
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HARUN KEMAL ÖZTÜRK)

DENİZLİ, NİSAN 2020

Günümüzde enerji kullanımının artışı enerji talebini arttırmıştır. Fosil kaynakların giderek azalması ve enerji tüketiminin de artmasıyla yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları giderek önem kazanmaktadır. Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biridir. Savonius rüzgar türbini düşey eksenli bir rüzgar türbinidir. Savonius rüzgar türbininin düşük rüzgar hızlarında çalışabilmesi, bakım ve onarımının kolay olması, kendi kendine çalışmaya başlaması, rüzgarın yönünden bağımsız çalışması en önemli avantajlarıdır. Bu avantajlar Savonius rüzgar türbininin geliştirilmesine yönelik çalışmaları arttırmıştır.

Bu çalışmada klasik Savonius rüzgar türbinin uç profilinin geliştirilerek üretilen gücün artışı amaçlanmıştır. 3 ayrı kanat profili geliştirilerek bu kanat profilleri klasik Savonius rüzgar türbini ile kıyaslanmıştır. Geliştirilen profiller NACA AIRFOIL 'den seçilmiştir. Savonius rüzgar çarkı için NACA 9412 AIRFOIL, NACA 9430 AIRFOIL ve NACA 6515 AIRFOIL seçilmiştir ve kanatlar bu uç profilleri ile geliştirilmiştir. Yapılan çözümlemelerde çarklar statik durumda olmakla birlikte, 0° den 180° e kadar her bir 30° lik dönme açısı için sayısal analizlerle güç hesaplamaları yapılmıştır. Sayısal analizler ile güç katsayıları hesabı, ANSYS programı CFD (CFX) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; NACA 9412 AIRFOIL geliştirilen diğer profillere göre daha iyi sonuç vermiştir. NACA 9412 AIRFOIL 0°, 60°, 90° ve 180°lik Savonius çark konumlandırmalarında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç üretmiştir. Ayrıca 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s 'lik rüzgar hızlarında klasik ve geliştirilen Savonius çark profili için her bir 30 derecelik açı için sayısal analiz yapılmıştır. Farklı hızlara sahip 4 farklı Savonius rüzgar türbininde elde edilen en yüksek güç değerinin 90°lik konumlandırılmada ve en düşük güç değerinin ise 0° ve 180° konumlandırılmada olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Savonius rüzgar çarkı, Rüzgar enerjisi, NACA, Rüzgar hızı

ABSTRACT

NUMERICAL INVESTIGATION OF PERFORMANCE OF SAVONIUS IMPELLERS WITH IMPROVED END PROFILES

MSC THESIS

BÜŞRA ŞENGÜL

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR:PROF. DR. HARUN KEMAL ÖZTÜRK)**

DENİZLİ, APRIL 2020

Nowadays, the increase in energy use has increased the demand for energy. New and renewable energy sources are becoming increasingly important as the fossil resources decrease and energy consumption increases. Wind energy is one of the most important renewable energy sources. Savonius wind turbine is a vertical axis wind turbine. The most important advantages of Savonius wind turbine is that it can operate at low wind speeds, it is easy to maintain and repair, it starts to work on its own, it works independently from the direction of the wind. These advantages have increased work on the development of the Savonius wind turbine.

In this study, it is aimed to increase the power produced by developing the end profile of the classical Savonius wind turbine. By developing 3 different wing profiles, these wing profiles were compared with the classic Savonius wind turbine. The developed profiles are selected from NACA AIRFOIL. NACA 9412 AIRFOIL, NACA 9430 AIRFOIL and NACA 6515 AIRFOIL were chosen for the Savonius wind wheel and the blades were developed with these end profiles. In the analysis, while the rotors are in static state, power calculations are made by numerical analysis for each 30° degree rotation angle from 0° to 180°. Numerical analysis and power coefficients calculation was carried out using ANSYS program CFD (CFX).

As a result; NACA 9412 AIRFOIL has given better results than other developed profiles. NACA 9412 AIRFOIL produced more power than conventional Savonius wind turbines at 0°, 60°, 90° and 180° Savonius rotor positions. In addition, numerical analysis was performed for each 30° degree angle for the classical and developed Savonius rotor profile at wind speeds of 3, 5, 7, 11 and 13,3 m/s. It was observed that the highest power value obtained in 4 different Savonius wind turbines with different speeds was 90° positioning and the lowest power value was 0° and 180° positioning.

KEYWORDS: Savonius wind rotor, Wind energy, NACA, Wind speed

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	2
2. RÜZGAR ENERJİSİ	3
2.1. Rüzgar Enerjisinin Avantajları	3
2.2. Rüzgar Enerjisinin Çevresel Etkileri	4
2.3. Dünya’da Rüzgar Enerjisi	5
2.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	7
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	11
3.1. Rüzgar Türbinlerinin Tarihçesi	11
3.2. Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensipleri.....	12
3.3. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	14
3.3.1. Dönme Eksenlerine Göre Rüzgar Türbinleri	15
3.3.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)	15
3.3.1.2. Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)	15
3.3.1.2.1. Darrieus tipi Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri... 16	
3.3.1.2.2. Savonius Tipi Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri. 17	
3.3.1.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri (EERT).....	17
3.3.2. Kanat Sayılarına Göre Rüzgar Türbinleri	18
4. SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ LİTERATÜR TARAMASI	19
4.1. Savonius Rüzgar Türbinleri Avantajları ve Dezavantajları.....	20
4.2. Savonius Rüzgar Türbinlerinin Kullanım Alanları	21
4.3. Savonius Rüzgar Türbinlerinin Literatür Özeti	22
5. SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNİNİN HESAPLAMALARI	36
5.1. Savonius Rüzgar Türbinlerinde Güç ve Performans Hesaplamaları ..	36
5.2. Savonius Rüzgar Türbininin Güç ve Tasarım Parametrelerinin Açıklanması.....	41
5.3. Savonius Rüzgar Türbininde Farklı Hızlarda Güç Hesabı	42
5.4. Savonius Rüzgar Türbininde Farklı Çark Çaplarında Güç Hesabı	45
5.5. Savonius Rüzgar Türbininde Farklı Güç Katsayılarında Güç Hesabı 48	
5.6. Savonius Rüzgar Türbininde Alt ve Üst Plakanın Etkisi	50
6. SAVONIUS ÇARKLARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ	52
6.1. Yöntem ve Metot.....	52
6.2. Savonius Çarkların Sayısal Analiz ile Doğruluğunun İspatlanması... 58	
6.3. Uç Profili Geliştirilmiş Savonius Çarkların Güç Hesaplamalarının Yapılması.....	62
6.3.1. NACA 9412 AIRFOIL Kodu ile Geliştirilmiş Uç Profilinin Güç Hesabı.....	62

6.3.2.	NACA 9430 AIRFOIL Kodu ile Geliştirilmiş Uç Profilinin Güç Hesabı.....	65
6.3.3.	NACA 6515 AIRFOIL Kodu ile Geliştirilmiş Uç Profilinin Güç Hesabı.....	68
6.4.	Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Karşılaştırılması.....	71
6.5.	Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Basınç ve Hız Dağılımlarının Karşılaştırılması	76
6.5.1.	Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Basınç Dağılımlarının Karşılaştırılması	76
6.5.2.	Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Hız Dağılımlarının Karşılaştırılması	87
7.	GELİŞTİRİLMİŞ VE KLASİK SAVONIUS ÇARKLARIN DÖNME AÇILARINA GÖRE FARKLI HIZLAR İÇİN GÜÇ HESABI.....	97
7.1.	Geliştirilmiş Savonius Çarkların Dönme Açılarına Göre Farklı Hızlar için F_n ve F_t Değerlerinin Hesaplanması	97
7.2.	Klasik Savonius Çarkların Dönme Açılarına Göre Farklı Hızlar için F_n ve F_t Değerlerinin Hesaplanması	99
7.3.	Geliştirilmiş ve Klasik Savonius Çarkların Dönme Açılarına Göre Farklı Hızlar İçin Karşılaştırılmalı Güç Hesabı	99
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	104
9.	KAYNAKLAR.....	106
10.	ÖZGEÇMİŞ.....	111

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücü	6
Şekil 2.2. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası.....	8
Şekil 2.3. Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin MW olarak yıllara göre kurulu güçlerinin değişimi.....	10
Şekil 2.4. Bölgelere göre işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güçleri bakımından yüzdelik dağılımı.....	10
Şekil 3.1. Charles Brush'ın 1888'de elektrik üretimi için yaptığı değirmen.....	11
Şekil 3.2. Poul la Cour'un tasarladığı rüzgar türbini.....	12
Şekil 3.3. Rüzgar türbinleri çalışma mekanizması.....	13
Şekil 3.4. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması.....	14
Şekil 3.5. Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	15
Şekil 3.6. Darrieus tipi düşey (dikey) eksenli rüzgar türbinleri.....	16
Şekil 3.7. Savonius tipi düşey (dikey) eksenli rüzgar türbinleri.....	17
Şekil 3.8. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinlerinin görünüşleri.....	18
Şekil 4.1. Savonius rüzgar türbini.....	19
Şekil 4.2. Savonius rüzgar türbini.....	20
Şekil 4.3. Perdeleme sistemine sahip Savonius rüzgar türbini	23
Şekil 4.4. Savonius rüzgar çarkının değişken güç katsayıları için tork grafiği	23
Şekil 4.5. Şaftlı sarmal Savonius çark ve şaftsız sarmal Savonius çark profilleri....	24
Şekil 4.6. Savonius çark profilleri farklı bıçak açıklıkları.....	25
Şekil 4.7. Farklı bıçak açıklıklarına sahip Savonius rotorun güç katsayılarının karşılaştırılması.....	25
Şekil 4.8. a) 2 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı b) 3 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı....	25
Şekil 4.9. Perdeleme yapılmış 2 ve 3 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı	26
Şekil 4.10. Güç ve hızın alt ve üst plaka olup olmamasına bağlı olarak değişimi...26	
Şekil 4.11. Sarmal Savonius çark profili	27
Şekil 4.12. Perdeleme yapılmış Savonius çark profili.....	28
Şekil 4.13. Farklı bıçak sayılarına sahip Savonius rüzgar çark profilleri.....	28
Şekil 4.14. Kavisli Savonius rüzgar çarkı	29
Şekil 4.15. Farklı tiplerdeki Savonius çark modelleri	29
Şekil 4.16. Klasik Savonius rüzgar türbininin hız profili	30
Şekil 4.17. Farklı uç plakalarına sahip Savonius rüzgar türbinleri	30
Şekil 4.18. Farklı şekillere sahip türbin kanatlarının gösterimi	31
Şekil 4.19. Üst plaka olup olmasının etkisinin grafiği	31
Şekil 4.20. Dikey eksenli Savonius rüzgâr türbini.....	32
Şekil 4.21. Farklı helezon açılardaki sarmal Savonius rüzgâr türbini.....	33
Şekil 4.22. Savonius çark profilinde bıçak modelleri	33
Şekil 4.23. Güç katsayısı kanat hız oranı grafiği	34
Şekil 4.24. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini	34
Şekil 5.1. İç bükey ve dış bükey yüzeylerdeki hızlar.....	36
Şekil 5.2. C_p katsayısının λ 'ya etkisinin grafiği.....	39
Şekil 5.3. Analitik olarak hesaplanan $C_p - \lambda$ eğrisi.....	40
Şekil 5.4 Savonius Çark Parametrelerinin Gösterimi.....	40
Şekil 5.5 Farklı rüzgar hızları için hesaplanan hız değerlerine göre moment ve güç değerlerinin değişimi	45

Şekil 5.6 Farklı çark çaplarına göre moment ve güç değerlerinin değişimi ($v = 10$ m/s sabit değeri için).....	48
Şekil 6.1. Savonius rüzgar çarkının boyutlandırılması a) Çark parametreleri b) Yükseklik parametresi	53
Şekil 6.2 Analizi yapılan sistemin boyutlandırılması.....	54
Şekil 6.3 Elementlerin sayısının dönme derecesi ile ilişkilendirilmesi.....	54
Şekil 6.4 Boyutlandırmalar değiştirilerek sistemin uygun boyutlarının çözümlenmesi.....	56
Şekil 6.5. Element sayısına bağlı olarak sistem çözümlemesinin yapılması.....	57
Şekil 6.6 C_n ve C_t parametrelerinin gösterimi....	58
Şekil 6.7. Savonius rüzgar çarkının dönme açısına göre gösterimi a) 0° b) 15° c) 30° d) 90° e) 135°	59
Şekil 6.8. α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi	60
Şekil 6.9. α ($^\circ$) 'e göre C_t değerlerinin değişimi	60
Şekil 6.10. NACA 9412 AIRFOIL kodu	62
Şekil 6.11. Uç profili NACA 9412 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini gösterimi a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° e) 150°	63
Şekil 6.12. NACA 9412'nin α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi	64
Şekil 6.13. NACA 9430 AIRFOIL kodu	65
Şekil 6.14. Uç profili NACA 9430 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini gösterimi a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° e) 150°	66
Şekil 6.15. NACA 9430'un α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi	67
Şekil 6.16. NACA 6515 AIRFOIL kodu.....	68
Şekil 6.17. Uç profili NACA 6515 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini gösterimi a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° e) 150°	69
Şekil 6.18. NACA 6515'in α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi	70
Şekil 6.19. Farklı rüzgar türbinleri için C_t 'nin α ($^\circ$) ile değişimi.....	72
Şekil 6.20. Farklı rüzgar türbinleri için C_n 'nin α ($^\circ$) ile değişimi.....	74
Şekil 6.21. Farklı rüzgar türbinleri için gücün α ($^\circ$) ile değişimi.....	75
Şekil 6.22. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 0°	77
Şekil 6.23. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 30°	79
Şekil 6.24. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 60°	80
Şekil 6.25. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 90°	82
Şekil 6.26. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 120°	83
Şekil 6.27. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 150°	85
Şekil 6.28. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 180°	86
Şekil 6.29. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 0°	88
Şekil 6.30. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 30°	89
Şekil 6.31. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 60°	91

Şekil 6.32. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 90°	92
Şekil 6.33. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 120°	94
Şekil 6.34. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 150°	95
Şekil 6.35. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 180°	96



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Ülkelere göre Dünyada rüzgar santrali kurulu güç listesi.....	7
Tablo 2.2. 50 metre yükseklik için Türkiye'nin karadaki rüzgar potansiyeli.....	9
Tablo 2.3. Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan illerin MW olarak gösterimi.....	9
Tablo 3.1. Rotor büyüklüğüne göre güç çıktısı.....	14
Tablo 3.2. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinleri hakkında genel bilgilendirme.....	18
Tablo 4.1. Perdeleme sisteminin ölçülendirilmesi.....	23
Tablo 4.2. Savonius rüzgar çarkları ile ilgili yapılan çalışmalar.....	35
Tablo 5.1 Farklı rüzgar hızlarına göre elde edilen optimum güç değerleri	44
Tablo 5.2 Farklı çark çapına göre elde edilen optimum güç değerleri	47
Tablo 5.3 Sabit tutulan Savonius rüzgar parametre değerleri	48
Tablo 5.4. Farklı güç katsayısı için elde edilen uç hız oranı, güç, açısal hız, devir sayısı ve moment değerleri	50
Tablo 6.1. Savonius çark parametreleri	53
Tablo 6.2. Hesaplanan Savonius rüzgar türbini parametreleri.....	55
Tablo 6.3. Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan optimum güç değerleri	61
Tablo 6.4. Farklı dönme açıları için NACA 9412 ile hesaplanan değerler	64
Tablo 6.5. Uç profili NACA 9412 ile geliştirilmiş Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan güç değerleri	65
Tablo 6.6. Farklı dönme açıları için NACA 9430 ile hesaplanan değerler	67
Tablo 6.7. Uç profili NACA 9430 ile geliştirilmiş Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan güç değerleri	68
Tablo 6.8. Farklı dönme açıları için NACA 6515 ile hesaplanan değerler	70
Tablo 6.9. Uç profili NACA 6515 ile geliştirilmiş Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan güç değerleri.....	71
Tablo 6.10. Klasik Savonius rüzgar türbini ile geliştirilmiş uç profilli rüzgar türbinlerinin C_t yönünden karşılaştırılmaları.....	72
Tablo 6.11. Klasik Savonius rüzgar türbini ile geliştirilmiş uç profilli rüzgar türbinlerinin C_n yönünden karşılaştırılmaları.....	73
Tablo 6.12. Klasik ve kanat ucu geliştirilmiş rüzgar türbinlerinin farklı dönme açılarındaki güç değerlerinin karşılaştırılması.....	74
Tablo 7.1. Geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkların farklı hızlardaki F_n , F_t , C_n ve C_t 'nin tablo halinde gösterimi.....	98
Tablo 7.2. Klasik Savonius rüzgar çarkların farklı hızlardaki F_n , F_t , C_n ve C_t 'nin tablo halinde gösterimi.....	99
Tablo 7.3. NACA 9412 AIFOIL farklı hızlarda güç hesabı.....	100
Tablo 7.4. NACA 9430 AIFOIL farklı hızlarda güç hesabı.....	101
Tablo 7.5. NACA 6515 AIFOIL farklı hızlarda güç hesabı.....	102
Tablo 7.6. Klasik Savonius rüzgar çarkının farklı hızlarda güç hesabı.....	103

SEMBOL LİSTESİ

C_p	:	Güç katsayısı
F	:	Kuvvet (N)
ρ	:	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
A	:	Süpürme alanı (m^2)
V_r	:	Rüzgarın hızı (m/s)
v	:	Çarkın hızı (m/s)
λ	:	Kanat uç hız oranı
e	:	Kayma mesafesi (m)
d	:	Kanat çapı (m)
H	:	Çark yüksekliği (m)
P	:	Güç (W)
d	:	Bıçak yarıçapı (m)
S	:	Kayma oranı (%)
D_o	:	Kanat uç plakası çapı (m)
W	:	Açısal hız (rad/dk)
M	:	Moment (Nm)
n	:	Devir sayısı (d/dk)
r	:	Savonius rüzgar çarkının taradığı alanın yarıçapı (m)
c_1	:	İç bükey yüzeyin direnç katsayısı
c_2	:	Dış bükey yüzeyin direnç katsayısı
F_n	:	Normal kuvvet (N)
F_t	:	Teğetsel kuvvet (N)
C_n	:	Normal yöndeki sürüklenme katsayısı
C_t	:	Teğetsel yöndeki sürüklenme katsayısı
D	:	Çark çapı (m)

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan Savonius rüzgar türbini ile enerji üretimi üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, düşey eksenli rüzgar türbinlerinde biri olan Savonius rüzgar türbininin sayısal analizi yapılmıştır. Uç profili geliştirilerek uç profilinin Savonius rüzgar çarkına etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkıda bulunan değerli hocam Prof. Dr. Harun Kemal ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen ve her zaman destek olan sevgili babam Bekir AVCI, sevgili annem Safiye AVCI ve sevgili eşim Arif ŞENGÜL'e de teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

Dünyada giderek artan nüfus, gelişen ve gelişmekte olan sanayi ile enerji talebi günden güne daha da artış göstermektedir. Dünyadaki fosil yakıt (kömür, petrol ve doğalgaz) rezervleri ise günden güne azalmaktadır. Bu artış ve azalış sebepleriyle ve enerjiye olan büyük gereksinim nedeniyle yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları daha çok önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak adlandırılan bu enerji kaynaklarından birisi de rüzgardır. Rüzgar ile ürettiğimiz enerji ise rüzgar enerjisi olarak adlandırılır. Rüzgar enerjisi tükenmekte olan fosil yakıtların yerine enerji sorununa çözüm olarak görülen enerji kaynaklarından birisi olmaktadır.

Rüzgar enerjisinden faydalanabilmek için farklı tiplerde rüzgar türbinleri geliştirilmiştir. Günümüzde rüzgar türbinleri boyut ve tip gibi çeşitlilikler göstermekte olsa bile genellikle dönme eksenine göre sınıflandırılmaktadır. Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine bağlı olarak üçe ayrılmaktadırlar. Bunlar; “Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri” (YERT), "Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri" (DERT) ve "Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri" (EERT)'dir. Düşey eksenli rüzgar türbinleriye kendi içerisinde Savonius ve Darrieus olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada Savonius rüzgar türbinleri ele alınmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımları son yıllarda çok daha önemli olduğu için Savonius rüzgâr çarkları da daha fazla kullanım alanı bulmuştur. Savonius rüzgâr çarkları elektrik üretimi amaçlı olarak da kullanılmaya başlamıştır.

Finlandiyalı bir mühendis olan Sigurd Savonius tarafından Savonius rüzgâr çarkı 1925 yılında keşfedilmiştir (Ushiyama ve Nagai, 1988). Savonius rüzgâr çarkı genellikle iki ya da daha fazla kepçeye benzer kesitin birleşimi şeklinde olmaktadır. Genellikle Savonius rüzgâr çarkının şekli iki adet kepçenin birleşimi halinde olmaktadır. Savonius rüzgâr çarkı “S” şeklini anımsatmaktadır. Savonius rüzgâr türbinin mili düşey yapıdadır ve rüzgârın geliş yönüne dik konumlandırılmıştır.

Savonius çarklarının en büyük üstünlüklerinden biri üretim kolaylığı, kendi kendine ilk harekete başlaması ve üretim maliyetinin düşük olması ayrıca kurulum kolaylığıdır. Ek olarak düşük rüzgâr hızlarında çalışabilirler. Bu avantajlar Savonius rüzgar türbinlerinden elektrik üretiminin yaygınlaşmasına olanak sağlamaktadır.

Bu çarklar uygulama alanı olarak, sulama amaçlı su pompalanmasında, havuzların havalandırılmasını sağlamak için suyun hareketlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca rüzgâr çarkı jeneratör sistemlerinin ilk harekete başlamasında yardımcı düzenek olarak kullanılmaktadır. Son zamanlardaki gelişmelere bağlı olarak, Savonius rüzgâr çarkları elektrik üretimi amaçlı olarak da kullanılmaya başlamıştır. Elektrik üretimi amaçlı kullanımında üretilen gücün fazla olması için Savonius rüzgar türbinleri geliştirilmeye çalışılmaktadır (Deda Altan, 2006).

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında amaç; rüzgar enerjisini, rüzgar türbinlerini ve dişey eksenli rüzgar türbinlerinden biri olan Savonius rüzgar türbininin hesaplamalarını ve sayısal analizlerini yapmaktır. Ayrıca uç profili geliştirerek, geliştirilen uç profiline sahip Savonius çarklarını sayısal analizle incelemektir. Ayrıca geliştirilen uç profillerine sahip Savonius rüzgar türbinlerini, klasik Savonius rüzgar türbinleri ile kıyaslayarak geliştirilen uç profillerinin etkilerini görmektir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

Alçak basınç ile yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştirmekte olan hava akımı rüzgar olarak adlandırılmaktadır. Her zaman rüzgar hareketi yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına doğru olmaktadır. Yüksek basınç alanı ile alçak basınç alanı arasındaki basınç farkı ne kadar artarsa, hava akım hızı da o kadar artmaktadır. Rüzgar hızına bağlı olarak rüzgarlar, esinti, fırtına gibi adlandırmalar almaktadır.

Yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına doğru rüzgar hareket ederken; dünyanın dönüşü, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı yayılması, atmosferik olaylar, yeryüzünün topoğrafik yapısı rüzgarın yönü ve türbülansın varlığı veya yokluğu gibi faktörler rüzgarın niteliğini değiştirmektedir. Rüzgarın bu hareketliliği rüzgardan enerji üretimi için büyük önem kazanmaktadır. Ve yenilenebilir enerjinin en önemli kaynaklarından biri olan rüzgardan, elektrik üretimi için birçok çalışmaya imkan vermiştir. Bu durumlardan kaynaklı olarak havanın içindeki parçacıkların hareket halindeyken ki kinetik enerjisine “Rüzgar Enerjisi” denir. Rüzgarın enerjisi, rüzgar gücüne ve rüzgarın hızına bağlı olmaktadır. Rüzgar gücü ile hızı arasında, rüzgar gücü rüzgar hızının üçüncü kuvveti ile orantılıdır.

Rüzgar enerjisi, temiz, güvenilir, doğa dostu, yenilenebilir ve sonsuz bir enerji kaynağı olmaktadır. Bu durum çok fazla alanda kullanımına olanak sağlamıştır. Rüzgar enerjisi mekanik enerjiye çevrilerek, tarımsal sulama ve su temini için su pompasında kullanımı örnek olarak verilebilir. Rüzgar enerjisi elektrik enerjisine çevrilerek, elektrik şebekesinin ulaşamadığı uzak yerleşim merkezlerinde, kırsallarda, adalarda ormanlık ve dağlık bölgelerde kurulmuş yerleşim birimlerinde kullanımı örnek olarak verilebilir. Rüzgar enerjisi ısı enerjisiye çevrilerek, yerel ısıtma, sıcak su hazırlama gibi amaçlar için kullanılan rüzgar enerjisi bu sebepler ile geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmaktadır.

2.1. Rüzgar Enerjisinin Avantajları

Temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisinin pek çok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekildedir;

1. Rüzgar enerjisi, tükenmeyen ve herhangi bir ücreti olmayan bir enerji kaynağıdır. Zaman içerisinde tükenme ve fiyatının artma riski yoktur. Güvenilir enerjidir.

2. Rüzgar enerjisi, kirlilik yaratmamaktadır ve doğaya zararı az olmaktadır. Temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Çevreci ve atmosferi kirletmez.

3. Fosil enerji kaynaklarının tükenme sürecini azaltır.

4. Yerli kaynak kullanıldığından dışa bağımlılığı yoktur.

5. Dönüştürme teknikleri kolaydır.

6. Rüzgar hava hareketi ile oluştuğu için, enerjinin iletim sorunu yoktur. Rüzgar enerjisi tesislerinin kurulması ve aynı zamanda işletilmesi diğer tesislere kıyasla daha kolay olmaktadır.

7. Gelişen aerodinamik malzeme ve konstrüksiyon teknikleriyle, rüzgar enerjisi çevrim sistemlerinin yaygın kullanım olanakları vardır.

8. Gelişen teknoloji ile, enerji birim maliyetleri düşmektedir (Deda Altan, 2006).

2.2. Rüzgar Enerjisinin Çevresel Etkileri

Rüzgar enerjisinin çevresel etkileri sıralandığında;

1. Rüzgar enerjisinin kurulumu için çok büyük bir alana ihtiyaç vardır. Kurulum için gerekli alanın yerleşim yerlerinden uzak bir yerde olması gerekmektedir, dağlık alanlara kurulduğunda ormanlara zarar verebilmektedir.

2. Çoğunlukla ormanlık alanlara kurulmaktadır, bu yüzden yıldırım düştüğünde parçalanıp yangın çıkarma risklerine sahiptir.

3. Kurulduğu alanlarda rüzgarı kestiğinden ayrıca farklı alanlara dağıttığından dolayı, mekanik etkilere neden olmaktadır ve buda birkaç derecelik sıcaklık

değişimleri yaratmakta ve doğallığı bozmaktadır. Kurulduğu alanlarda 2 km- 3 km alanında radyo ve televizyon sinyallerini bozmaktadır.

4. Rüzgar enerjisi zararlı gaz salınımı yapmadığından dolayı atmosferde herhangi bir etkisi olmamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları dan biri olan rüzgar enerjisinin ayrıca su kirliliği için de hiçbir etkisi olmaktadır. Rüzgar enerjisi santrallerinin atıkları olmamaktadır. Buna bağlı olarak çevresel etkileri de yoktur.

5. Çok gürültülü çalıştıklarından dolayı ses kirlilikleri vardır.

6. Rüzgar türbinleri sebep oldukları hava akımı yüzünden kuşları kendisine doğru çekebilmektedir. Kuşlar, oluşan hava akımından kurtulamadığından dolayı türbinlere çarparak ölmektedirler (Sarıkaya, 2015).

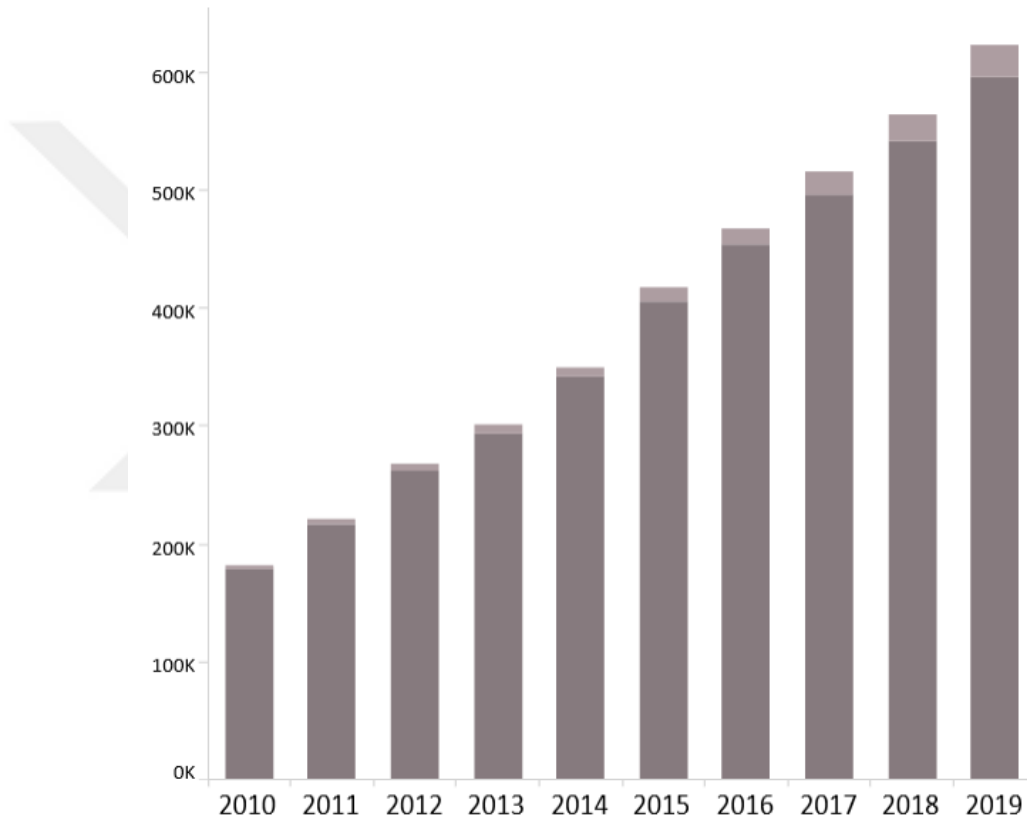
2.3. Dünya’da Rüzgar Enerjisi

Rüzgarın gücü, kullanımının yaygınlaşmasına neden olan en önemli nedenlerden birisidir. Rüzgar enerjisi, git gide yaygınlaşan ve potansiyeli keşfedilmiş olan tükenmeyen bir enerji kaynağı olmaktadır. Dünya rüzgar enerji potansiyelini belirlemek için Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ‘ı araştırmalar yapmaktadır.

5,1 m/s’nin üzerinde rüzgar hızı kapasitesine sahip olan yerlerin, uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni baz alınarak %4’ünün kullanılacağı varsayımına dayandırıldığında, dünya teknik rüzgar enerjisi potansiyeli 53000 TWh/yıl olarak hesaplanmaktadır.

Rüzgar enerjisi potansiyeli fazla olan kıtalar ve bölgeler sıralandığında; Kuzey Amerika (14000TWh/yıl), Doğu Avrupa ve Rusya (10600 TWh/yıl), Afrika (10600 TWh/yıl), Güney Amerika (5400 TWh/yıl), Batı Avrupa (4800 TWh/yıl), Asya (4600 TWh/yıl) ve Okyanusya (3000 TWh/yıl) olmaktadır. Sıralanan veriler, Kuzey Amerika, Doğu Avrupa ve Rusya ve Afrika’nın dünya rüzgar enerji potansiyelinin %66’sını kapsadığını göstermektedir. 2013 yılında toplam kapasite ve üretimin ilk 5’i Çin, ABD, Almanya, İspanya ve Hindistan olarak sıralanmaktadır (Koç ve Şenel, 2013).

Uluslararası yenilenebilir enerji ajansı (IRENA) ‘nın vermiş olduğu Dünyadaki rüzgar enerjisi kurulu güç verileri Şekil 2.1 de gösterilmektedir. Şekil 2.1 de de gösterildiği gibi rüzgar enerjisi kurulu gücü giderek artmaktadır. 2019 yılında rüzgar enerjisi kurulu gücü 594396 MW olmaktadır. 2019 yılında Dünyada işletmeye alınan santrallerin kurulu gücü ise 28308 MW olarak verilmektedir. Şekil 2.1 de gösterilen koyu renkli sütunlar şekilde verilen yıllarda kıyıdaki kurulu gücü gösterirken, koyu renkli sütunların üzerindeki açık renkli sütunlar şekilde verilen yıllarda açık denizlerdeki kurulu gücü göstermektedir.



Şekil 2.1. Dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücü (Irena, 2020)

Dünya’da 2017 yılında toplam rüzgar enerjisi kurulu gücünün ve rüzgardan elektrik enerjisi üretiminin en büyük payını sırasıyla Çin, ABD, Almanya, Hindistan ve İspanya oluşturmaktadır. Dünyada rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi yapan ülkelere bakıldığında Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya ilk üç sırada yerlerini korumaktadırlar. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üreten 100’den fazla ülke vardır. Tablo.2.1’de gösterildiği gibi Türkiye, rüzgar enerji santrali kurulumunda Dünyada 11’inci sırada bulunmaktadır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Ülkelere göre Dünyada rüzgar santrali kurulu güç listesi (Keleş Çetin ve diğ., 2019)

Ülkelere Göre Dünyada Rüzgar Santrali Kurulu Gücü Listesi			
1	Çin	2017	187730 MW
2	ABD	2017	88927 MW
3	Almanya	2018	59240 MW
4	Hindistan	2017	32879 MW
5	İspanya	2017	23026 MW
6	Birleşik Krallık	2017	17852 MW
7	Fransa	2017	13760 MW
8	Brezilya	2017	12763 MW
9	Kanada	2017	12239 MW
10	İtalya	2017	9700 MW
11	Türkiye	2019	7010 MW

2.4. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Türkiye’de var olan rüzgar enerjisinin analiz edilebilmesi ilk olarak rüzgar enerji potansiyelinin değerlendirilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Türkiye’deki rüzgar enerji potansiyelini belirleyebilmek için gerekli olan rüzgar ölçümleri ve diğer meteorolojik ölçümler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yapılmaktadır. Öncelikle belirlenen ve rüzgar açısından zengin olan yerlerde etütler yapılmaktadır. Daha sonra ise rüzgar enerjisinden, enerji üretmeye uygun olan bölgelerde Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonları (RGİ) kurulmaktadır ve böylelikle veri toplanmaya başlanılmaktadır.

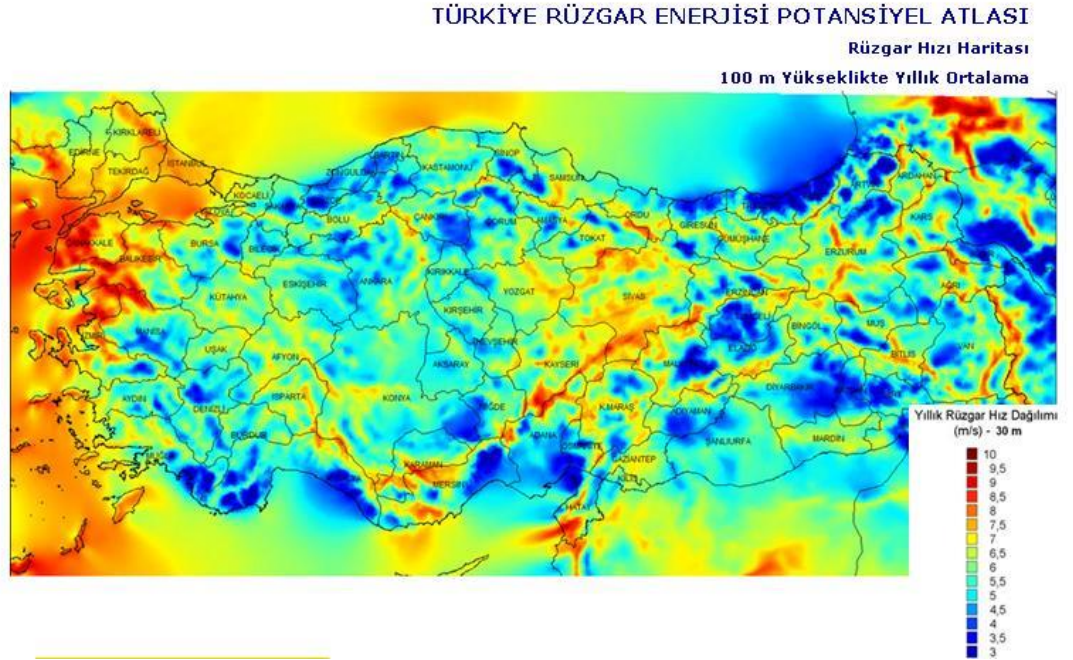
Rüzgar hız ölçümleri genellikle 10 m yükseklikte alınmaktadır. Bunun haricinde 30 m yükseklikte alınan rüzgar hız ölçümleri de vardır. Ölçülen veriler ise bir saatlik ve 10 dakikalık periyotlarla toplanmaktadır. Bu veriler yazılım programı kullanılarak işlenmektedir daha sonra ölçümler arşivlenmektedir.

MGM tarafından yapılmakta olan rüzgar hızı ölçümlerine bağlı olarak 6,5 m/s’nin üzerindeki rüzgar hızları ele alındığında, Türkiye’de karada bulunan rüzgar potansiyeli 131756,4 MW olmaktadır. Ayrıca rüzgarın hızı 6,5- 7,0 m/s olduğu

alanlardaki rüzgar potansiyeli göz ardı edilip rüzgar hızının 7,0 m/s'nin üzerinde olduğu alanlar göz önüne alındığında, Türkiye'deki kara rüzgar potansiyeli 48000 MW olmaktadır. Rüzgar hızının 6,5 m/s'nin üzerinde olduğu bölgelerde ise, Türkiye deniz rüzgar potansiyeli 17393,2 MW olarak belirlenmiştir. Türkiye'de rüzgar potansiyeli en yüksek bölge Marmara ve Ege bölgesidir. En az rüzgar potansiyeline sahip bölge ise Doğu Anadolu bölgesidir (Şekil 2.2).

Deniz üzerine kurulan rüzgar enerji santrallerinin maliyeti yüksektir. Bunun yanı sıra karaya kurulan rüzgar enerjisi santrallerinin maliyeti daha düşüktür. Bu yüzden ilk olarak kara rüzgar potansiyeli değerlendirilmektedir.

50 metre yükseklikte Türkiye'de ölçülmüş olan rüzgar hızlarına göre, toplam kara rüzgar potansiyelleri YEGM tarafından belirlenmiştir (Tablo 2.2). Rüzgar potansiyeli fazla olan iller sırasıyla; Balıkesir, Çanakkale, İzmir, Manisa, Samsun, Muğla ve Tekirdağ olarak belirlenmiştir (Tablo 2.3). Bu illere ek olarak İstanbul, Bursa, Mersin, Edirne, Hatay, Kırklareli, Tokat, Aydın gibi illerin de fazlasıyla iyi kara rüzgar potansiyeline sahip olduğu YEGM tarafından belirlenmiştir.



Şekil 2.2. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası (Akdağ, 2019)

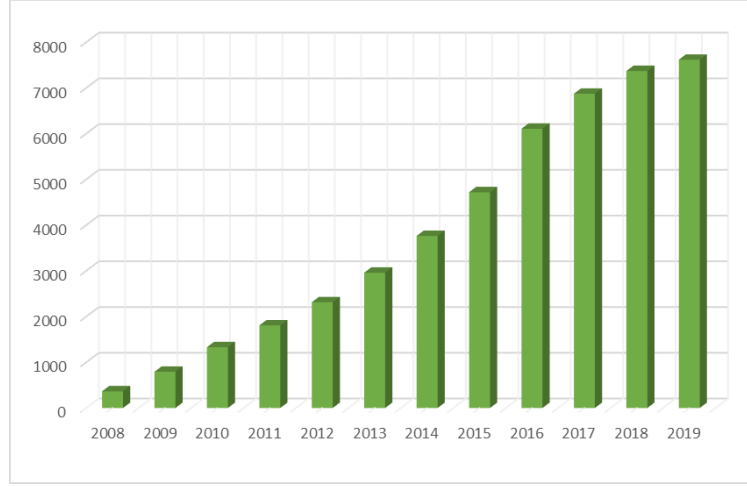
Tablo 2.2. 50 metre yükseklik için Türkiye'nin karadaki rüzgar potansiyeli (Keleş Çetin ve diğ., 2019)

Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Potansiyel (MW)
6,5 – 7,0	83906,96
7,0 – 7,5	29259,36
7,5 – 8,0	12994,32
8,0 – 9,0	5399,92
> 9,0	195,84
Toplam	131756,4

Tablo 2.3. Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan illerin MW olarak gösterimi (Koç ve Şenel, 2015)

50 m'de Rüzgar Hızı(m/s)	Balıkesir (MW)	Çanakkale (MW)	İzmir (MW)	Manisa (MW)	Samsun (MW)	Muğla (MW)
6,8 – 7,5	7557,12	4318,48	4665,44	2371,76	4499,92	4519,36
7,5 – 8,1	4254,8	4014,96	4341,52	1507,84	722,56	650,96
8,1 – 8,6	1422,56	3805,44	1588,40	969,28	0,00	0,64
8,6 – 9,5	576,16	873,68	1258,88	453,44	0,00	0,00
> 9,5	16,72	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00
Toplam	13827,36	13012,56	11854,32	5302,32	5222,48	5170,96

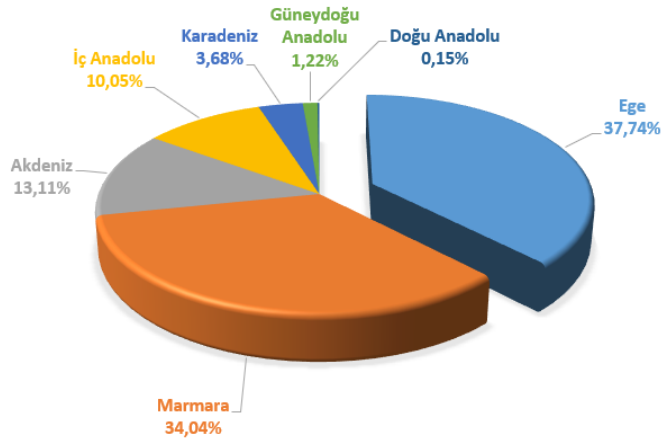
Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin (RES) kurulu güçleri her yıl giderek artmaktadır. 2008 yılında Türkiye'deki rüzgar enerji santralleri kurulu gücü 364 MW'tır. 2014 yılından itibaren Türkiye'deki rüzgar enerji santralleri kurulu gücü 3762.10 MW olarak belirlenmiştir (Şekil 2.3). Bu durum, rüzgar enerjisi santrallerine yönelik yapılan yatırımların önemli miktarda artış gösterdiğini göstermektedir. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi rüzgar kurulu gücü Türkiye'de giderek artmaktadır.



Şekil 2.3. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin MW olarak yıllara göre kurulu güçlerinin değişimi (Keleş Çetin ve diğ., 2019).

2019 yılı temmuz ayı itibari ile Türkiye’de toplam kurulu rüzgar gücü 7615 MW ’dır. İşletmedeki rüzgar elektrik santral sayısı 183’ dür. İşletmede olan santrallerin bölgelere göre dağılımı Şekil 2.4’te verilmektedir. Kurulu türbin sayısı 3155 tanedir. İnşa halindeki rüzgar elektrik santral sayısıysa 17 olmaktadır. Türkiye’de var olan kurulu rüzgar enerji santrallerinden üretilen elektrik, Türkiye’nin toplam elektrik ihtiyacının %7,40’a karşılık gelmektedir (Keleş Çetin ve diğ., 2019).

Şekil 2.4’de gösterildiği gibi işletmedeki santrallerin yüzdelik dağılımı %37.74 ile Ege bölgesi, %34,04 ile Marmara bölgesi ardından %13,11 ile Akdeniz bölgesi ve ardından İç Anadolu, Karadeniz, Güneydoğu Anadolu ve son olarak Doğu Anadolu bölgesi olarak verilmektedir.



Şekil 2.4. Bölgelere göre işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güçleri bakımından yüzdelik dağılımı (Keleş Çetin ve diğ., 2019).

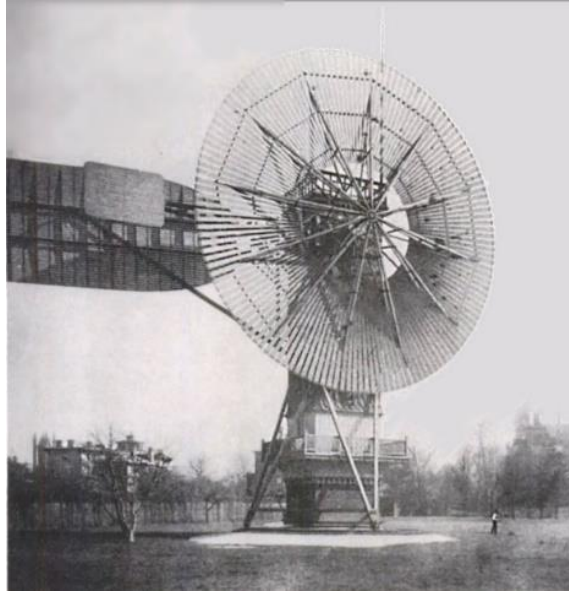
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

3.1. Rüzgar Türbinlerinin Tarihçesi

İnsanoğlu, yelkenlileri hareket ettirmek ve gemileri yürütmek için uzun yıllardır rüzgarın gücünden faydalanmaktadır. Yel değirmenleri, sulama işlemi ve tahıl ezmek gibi işlemler içinde rüzgarın gücünden faydalanılmıştır.

İskoç Akademisyen Profesör James Blyth 1887 Temmuz ayında rüzgar gücüyle elektrik üreten ilk değirmeni inşa etmiştir. İskoç Akademisyen Profesör James Blyth 1891'de İngiltere'de patent almıştır (Eldridge, 1980).

Charles Francis Brush, 1887-1888'de Amerika Birleşik Devletleri'nde, James Blyth'in yapmış olduğu değirmenden oldukça büyük ve daha fazla mühendislik yapılmış olan bir değirmen yaparak elektrik üretmiştir. Böylelikle Şekil 3.1 de gösterilen rüzgar değirmeni ile Charles Francis Brush 1900 yılına kadar evinin ve aynı zamanda laboratuvarının da elektriğini sağlamıştır (Eldridge, 1980).



Şekil 3.1: Charles Brush'ın 1888'de elektrik üretimi için yaptığı değirmen (Ro, 2014)

Şekil 3.2 de gösterilmekte olan rüzgar türbinini hayata getirmiş olan ayrıca 1890'larda rüzgar türbinlerinin gelişmesinde yapmış olduğu deney, araştırma ve

alışmalarla büyük bir bilgi birikimi oluşturan Danimarkalı bilim adamı Poul la Cour'dur (Eldridge, 1980).



Şekil 3.2: Poul la Cour'un tasarladığı rüzgar türbini (Jensen, 2015)

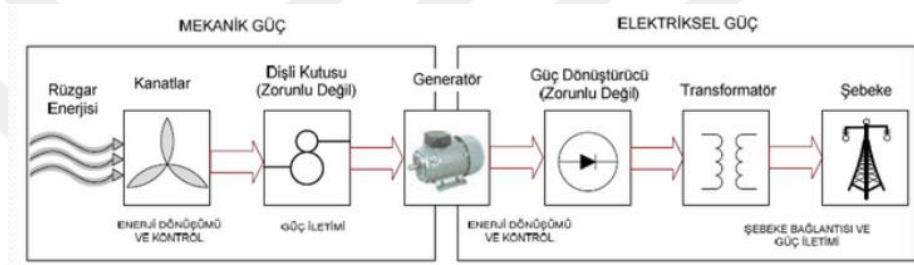
Danimarka'da 1970'lerde fosil yakıt haricinde enerji kaynağı arayışının artış göstermesiyle ve çevre aktivistlerinin baskı kurmasıyla ilk modern rüzgar türbinleri üretilmiştir. Üretilen ilk rüzgar türbinleri 20-30 kW güç üretebilmekteydiler. 2015'den sonra 7 MW'lık rüzgar türbinleri prototip halinde geliştirilmiştir. Avrupa'nın çeşitli yerlerinde ilk uygulamalar yapılmaya başlanılmıştır. Günümüzde rüzgar türbinleri; bahçe, park, akü depolamalı mini sistemler, fabrikalar gibi enerji tüketicilerine elektrik tedarik edip, buradan üretilen fazla elektriğı şebekeye veren sistemlerden, şehirlere elektrik tedariğı yapan santrallere kadar bütün ölçeklerde uygulanabilmektedir (Eldridge, 1980).

Danimarka 2015 yılından sonra kendi elektriğinin %40'ını rüzgardan üretmiştir ve dünya üzerindeki en az 83 ölkede elektrik şebekesini rüzgar enerjisiyle desteklemiştir. 2014 yılından sonra dünya üzerindeki rüzgar enerji santralleri (RES) kapasitesi 369553 MW'a (MegaWatt) erişmiştir. Bu rüzgar enerji santralleri (RES) kapasitesi, dünyada kullanılmakta olan elektriğın %4'üne karşılık gelmektedir. (Eldridge, 1980).

3.2. Rüzgar Türbinlerinin Çalışma Prensipleri

Rüzgar türbinleri, rüzgarda bulunan kinetik enerjiyi ilk olarak mekanik enerjiye sonra ise elektrik enerjisine dönüştürebilen sistemlerdir.

Şekil 3.3’de gösterildiği gibi rüzgar türbinlerinde enerji üretimi kanatlardan başlamaktadır. Havanın türbine gelmesiyle ve türbin kanatlarını döndürmesiyle kanatlar dönmeye başlamaktadır. Kanatların dönmesi ile birlikte orta kısımda bulunan birleşim bölgesine bağlı olan şaft da dönmeye başlamaktadır. Buradan dişli kutularıyla dönme hızı artırılmaktadır. Artan dönme hızıyla birlikte hızlı şaft, jeneratöre kinetik enerjiyi aktarmaktadır. Kanatlar dev bir rüzgar gülünü andırmaktadır. Kanatların dönmesi ile birlikte pervanelerin arkasında bulunan, kafanın içerisindeki mekanizma aktif hale gelmektedir. Böylelikle rüzgarın kinetik enerjisi güç dönüştürücüsünde mekanik enerjiye çevrilmekte ve jeneratöre aktarılmaktadır. Jeneratörde, elektromanyetik indüksiyonla enerji üretimi gerçekleştirilmektedir ve trafolarla şebekeye elektrik enerjisi iletilmektedir.



Şekil 3.3: Rüzgar türbinleri çalışma mekanizması (Kelsoy ve Soysal, 2015)

Türbinin çıkış gücü; rüzgar hızına ve türbin kanat çapına bağlı olmaktadır. Rotor çapına bağlı olarak üretilen güç miktarları değişmektedir (Tablo 3.1). Türbinde kullanılmakta olan kanatlar, jeneratör ve dişli kutusu gibi parçalarda türbinin verimini etkilemektedir.

Türbinlerin kurulacağı alanların seçimleri de önemli olmaktadır. Yerleşim bölgelerinde türbinler kuruluyor ise ‘rüzgar güç yoğunluğu’ değerlerine bakılmakta ve türbinin gücüne göre uygun olan bölgeler seçilmektedir. Türbinin gücüne bağlı olarak daha düşük rüzgar hızlarına sahip bölgelerde kurulum yapıldığında ise verim azalmaktadır. Daha yüksek rüzgar hızlarına sahip bölgelerde ise şaftın hızlı dönmesi ile birlikte rüzgar türbini tehlike durumuna girdiği için frenleme sistemleri devreye girmektedir. Rüzgar türbinlerinde, rüzgar hızının ölçümü anemometre ile yapılmaktadır. Genellikle büyük rüzgar türbinlerinde rüzgarın hızı 15 metre/saniye olduğu zaman en fazla güç üretimi gerçekleşmektedir. Rüzgarın hızı 20 metre/saniye

ve üzeri olduğu durumlarda rüzgar türbinleri kendilerini kontrol altına almakta ve güvenlik amaçlı durmaktadır (Kesayak, 2015).

Tablo 3.1: Rotor büyüklüğüne göre güç çıktısı (Kesayak, 2015)

Rotor Büyüklüğü ve Maksimum Güç Çıktısı	
Rotor Çapı (m)	Güç Çıktısı (kW)
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500

3.3. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri; devirlerine, kanat sayılarına, dönme eksenlerine, kurulum yerlerine göre ve benzeri birkaç etmene bağlı olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.4). Bu sınıflandırmalardan en çok kullanılan sınıflandırma ise dönme eksenlerine göre yapılan sınıflandırmadır.



Şekil 3.4. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Leblebicioğlu, 2019)

3.3.1. Dönme Eksenlerine Göre Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine bağlı olarak 3'e ayrılmaktadır. Bunlar;

- 1- "Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri" (YERT),
- 2- "Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri" (EERT) ve
- 3- "Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri" (DERT) olarak sınıflandırılmaktadır.

3.3.1.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT)

Şekil 3.5'de de gösterildiği gibi yatay eksenli rüzgar türbinlerinde; dönme eksenini rüzgar yönüne paralel olmakla birlikte, kanatlarda rüzgar yönüne dik konumlandırılmıştır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanatların sayısı azaldığında rotor daha hızlı dönmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin verimi yaklaşık olarak %45 olmaktadır. YERT, çoğunlukla yerden 20-30 metre yükseklikte ve çevredeki engellerden de 10 metre yükseklikte olacak biçimde yerleştirilmelidir (Elibüyük ve Üçgül, 2014).



Şekil 3.5. Yatay eksenli rüzgar türbinleri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

3.3.1.2. Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT)

Pervane görünümüne sahip olmamasının nedeni milin düşey yapıda konumlandırılmış olmasıdır. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinde dönme yönü, rüzgarın

yönüne dik konumlandırılmakta ve pervaneleri de dikey konumlandırılmaktadır. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin bazı avantajları olmaktadır. Bu avantajlar ise, rüzgar yönünden etkilenmemesi ve böylelikle yönlendirici parçalara ihtiyacı olmamasıdır. Bu türbinlerin elektronik ve elektro-mekanik kısımları yerde bulunmaktadır. Bu durumda bakımlarının daha kolay ve masrafsız olmasını sağlamaktadır. Bu türbinlerin çeşitleri şu şekildedir;

1. Darrieus Tipi Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri

2. Savonius Tipi Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri

3.3.1.2.1. Darrieus tipi Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri

Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde, düşey şekilde yerleştirilmiş olan en az iki tane kanat bulunmaktadır. Fransız bilim adamı George Darrieus tarafından geliştirilmiştir. Şekil 3.6’da da gösterildiği gibi kanatlar, türbin milinden uzun eksenli olan bir elips olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu durum kanatlardaki iç bükey ve dış bükey yüzeyleri arasında çekme kuvveti farkı sebebiyle dönme hareketi oluşturmaya neden olmaktadır. Darrieus rüzgar türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilmektedir. Rüzgar tek bir yönden estiği için, Darrieus rüzgar türbininin verdiği güç, sinüs eğrisi oluşturmaktadır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).



Şekil 3.6. Darrieus tipi düşey (dikey) eksenli rüzgar türbinleri (Özkılınç 2010)

3.3.1.2.2. Savonius Tipi Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri

Finlandiyalı bir mühendis olan Sigurd Savonius tarafından Savonius rüzgar çarkı 1925 yılında keşfedilmiştir (Ushiyama ve Nagai, 1988). Savonius rüzgar çarkı genellikle iki ya da daha fazla kepçeye benzer kesitin birleşimi şeklinde olmaktadır. Genellikle Savonius rüzgar çarkının şekli iki adet kepçenin birleşimi halinde olmaktadır. Savonius rüzgar çarkı “S” şeklini anımsatmaktadır. Savonius çarklarının en büyük üstünlüklerinden bazıları; üretim kolaylığı, kendi kendine ilk harekete başlaması ve üretim maliyetinin düşük olması ayrıca kurulum kolaylığıdır. Ek olarak düşük rüzgar hızlarında çalışabilmektedirler (Elibüyük ve Üçgül 2014). Enerji talebinin gitgide artması Savonius türbinin kullanımını arttırmıştır ve böylelikle bu türbin çeşidini geliştirmek için iyileştirmeler yapılmaktadır. Şekil 3.7’de gösterilen helikal tipi bir Savonius türbin tipidir.



Şekil 3.7. Savonius tipi düşey (dikey) eksenli rüzgar türbinleri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

3.3.1.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri (EERT)

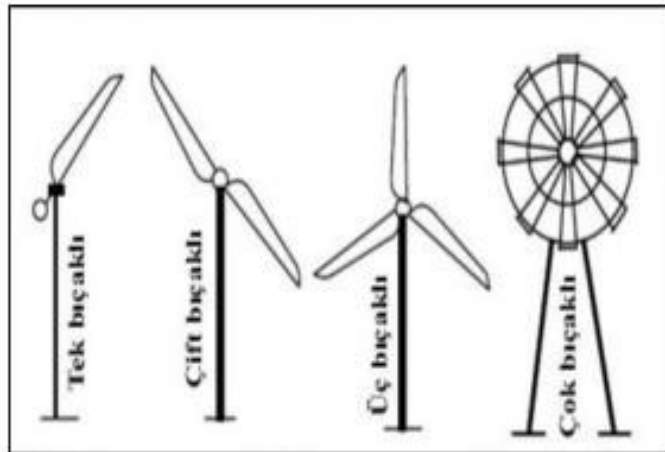
Dönme eksenleri düşeyle rüzgar yönünde bir açı yapan rüzgar türbinleridir. Eğik eksenli rüzgar türbinlerinin kanatları ve türbinin dönme eksenini arasında belirli bir açı bulunmaktadır.

3.3.2. Kanat Sayılarına Göre Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, kanat sayıları ile maliyet, estetik ve benzeri özelliklerine göre Tablo 3.2’de gösterilmektedir. Rüzgar türbinleri, kanat sayılarına göre tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olarak 4 sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 3.8).

Tablo 3.2. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinleri hakkında genel bilgilendirme (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

	YERT			
	Tek Kanatlı	Çift Kanatlı	Üç Kanatlı	Çok Kanatlı
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Kule İhtiyacı	Var	Var	Var	Var
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az elektrik ve su pompalaması
Günümüzde Kullanımı	Yok	Yok	Var	Var

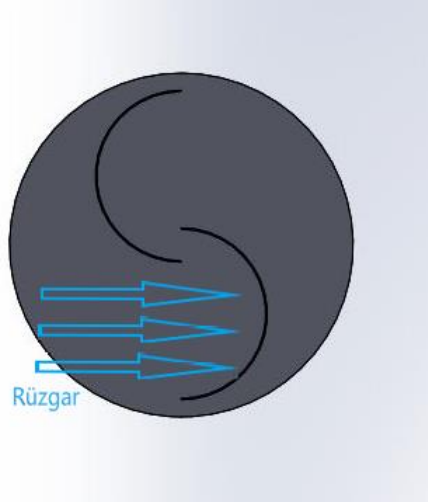


Şekil 3.8. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinlerinin görünümleri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

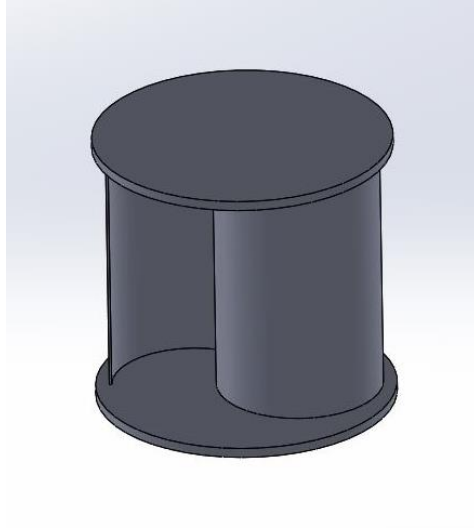
4. SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNLERİ LİTERATÜR TARAMASI

Finlandiyalı bir mühendis olan Sigurd Savonius tarafından Savonius rüzgar çarkı 1925 yılında keşfedilmiştir (Ushiyama ve Nagai, 1988). Savonius rüzgar çarkı genellikle iki ya da daha fazla kepçeye benzer kesitin birleşimi şeklinde olmaktadır. Genellikle Savonius rüzgar çarkının şekli iki adet kepçenin birleşimi halinde olmaktadır. Savonius rüzgar çarkı “S” şeklini anımsatmaktadır (Şekil 4.1 ve 4.2). Savonius çarklarının en büyük üstünlüklerinden biri üretim kolaylığı, kendi kendine ilk harekete başlaması ve üretim maliyetinin düşük olması ayrıca kurulum kolaylığıdır. Ek olarak düşük rüzgar hızlarında çalışabilirler. Savonius rüzgar türbinin mili düşey yapıdadır ve rüzgarın geliş yönüne dik konumlandırılmıştır.

Savonius rüzgar çarkı, iki yatay silindir şeklindeki diskin aynı doğrultuda simetrik olarak kaydırılmasıyla oluşmaktadır. Savonius rüzgar çarkında; çalışma prensibi ise rüzgarın geldiği taraftan, çarkı oluşturan silindirlerden birinin iç kısmında pozitif ve diğerinin dış kısmında ise negatif moment oluşmaktadır. Silindirin iç kısmında oluşan pozitif moment, diğer silindirin dış kısmında oluşan negatif momentten daha büyük olduğunda, dönme hareketi başlamaktadır ve bu dönme hareketi pozitif moment yönünde sağlanmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Savonius rüzgar türbini



Şekil 4.2. Savonius rüzgar türbini

4.1. Savonius Rüzgar Türbinleri Avantajları ve Dezavantajları

Savonius rüzgar çarkları; aerodinamik performans açısından bakıldığında diğer düşey eksenli rüzgar çarkları (Darrieus) ve yüksek kanat hızlı rüzgar çarkları ile kıyaslanamaz. Bunun yanı sıra Savonius rüzgar çarklarının diğer düşey eksenli rüzgar çarklarına göre birçok avantajları olmaktadır, bunlar;

- 1) Savonius rüzgar çarklarının konstrüksiyonları basittir ve ucuz olmaktadır. Kule masrafları yoktur.
- 2) Düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahiptirler.
- 3) Harekete başlaması sırasında ek bir kuvvete ihtiyaç yoktur, kendi kendine çalışmaya başlarlar.
- 4) Yatay eksenli rüzgar çarklarında rüzgar yönü değiştiğinde çark yönünü değiştiren bir mekanizma ihtiyacı olurken Savonius rüzgar çarkları, rüzgarın yönünden bağımsız olarak çalışmaktadır. Rüzgarın yönü değiştiğinde çarkın yönünü değiştirmeye gerek olmamaktadır. Dümene ihtiyaç yoktur.
- 5) Kırsal kesimlerde düşük miktarlardaki güç ihtiyacını karşılamak için ekonomik ve ideal bir rüzgar çarkıdır.

6) Türbin mili hariç Savonius rüzgar türbinindeki parçaların bakım ve onarımı kolay olmaktadır.

7) Üretilen güç toprak seviyesinde çıktığı için, gücün nakliyesi kolay olmaktadır (Deda Altan, 2006).

Dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1) Aerodinamik performansları düşüktür. Bu sebepten dolayı fazla kullanım alanı bulamamıştır.

2) Hız kontrolü gerektirmektedir.

3) Güç faktörü düzenlenmesi yapılması gerekmektedir (Deda Altan, 2006).

4.2. Savonius Rüzgar Türbinlerinin Kullanım Alanları

Savonius tipi rüzgar çarklarının ilk uygulamaları, düşük çevresel hız ve verime sahip olmalarından dolayı çok kısıtlı alanlarda olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımları son yıllarda çok daha önemli olduğu için Savonius rüzgar çarkları da daha fazla kullanım alanı bulmuştur.

Bu çarklar uygulama alanı olarak, sulama amaçlı su pompalanmasında, havuzların havalandırılmasını sağlamak için suyun hareketlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca rüzgar çarkı, jeneratör sistemlerinin ilk harekete başlamasında yardımcı düzenek olarak kullanılmaktadır. Son zamanlardaki gelişmelere bağlı olarak, Savonius rüzgar çarkları elektrik üretimi amaçlı olarak da kullanılmaya başlamıştır.

Bunlara ek olarak, gelişmekte olan ülkelerin kırsal kesimlerinde küçük güç ihtiyaçlarını karşılamak ve küçük çiftlik ile bahçelerde sulama ve elektrik ihtiyacını karşılamak için de kullanılmaktadırlar (Deda Altan, 2006).

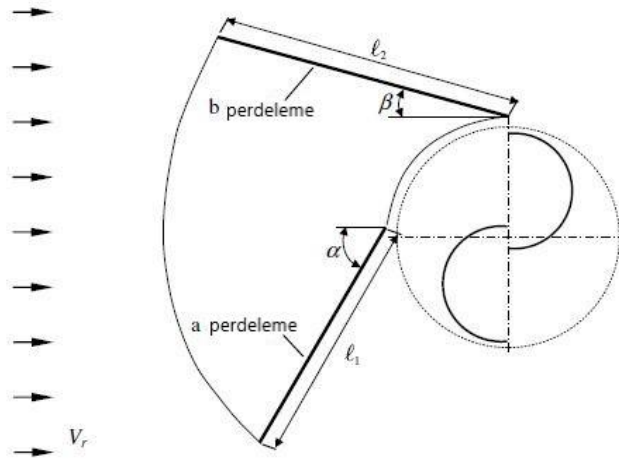
4.3. Savonius Rüzgar Türbinlerinin Literatür Özeti

Islam ve diğ. (1993) yaptıkları çalışmada, statik durumda olan Savonius çarkın aerodinamik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizle normal kuvvet (F_n) ve teğetsel kuvvet (F_t) her 15 derecelik dönme açısı için 0 ile 360 derece aralığında hesaplanmıştır. Bu hesaplar sonucunda en yüksek güç katsayısı 120 derecede en düşük güç katsayısı ise 0 derecede elde edilmiştir. Maksimum statik tork 45 derecelik dönme açısı için elde edilmiştir.

Atılğan ve diğ. (2000) çalışmalarında, dış bükey yüzeye gelen momenti azaltmak amacıyla Savonius çarkın giriş ve çıkışlarına perdeleme yaparak dönme hareketine ters yönde oluşan moment değerinin ortadan kaldırılması ve Savonius rüzgar çarklarında momentin arttırılmasını amaçlamışlardır. Perdeleme ile iç bükey kanat yüzeyindeki dönel akışları engellemiş ve güç performansı arttırmışlardır. Perdelemenin ayarlanabilir olması ile yararlı enerji miktarının arttırılabileceğini gözlemlemişlerdir.

Kamal ve Islam (2008) yaptıkları çalışmada, 5 bıçaklı bir Savonius çarkın aerodinamik performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar 2, 3, ve 4 bıçaklı Savonius çarklarla kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, rotor açısına göre çarkı etkileyen akışın değiştiği gözlemlenmiştir. Kanat uç hız oranı 1 iken en yüksek güç katsayısı 2 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı için elde edilmiştir.

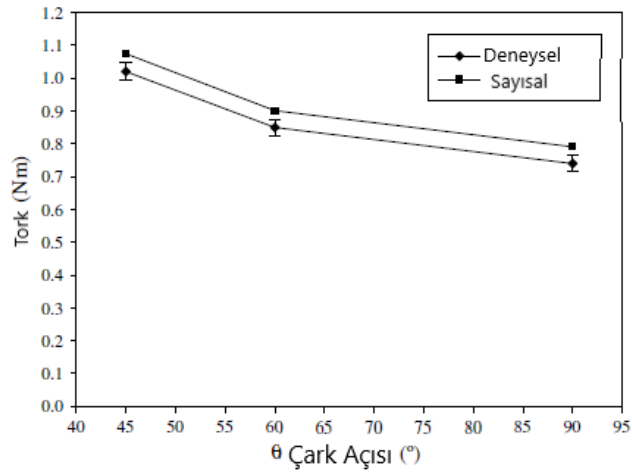
Deda Altan ve Atılğan (2008) çalışmalarında, düşük performanslı Savonius rüzgar çarklarının performansını artırmak için rüzgarın giriş kısmına bir perdeleme sistemi tasarlamışlardır (Şekil 4.3 ve Tablo 4.1). Savonius çarkın 45, 60 ve 90 derecedeki konumu için tork katsayılarındaki değişimler incelenmiştir. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi yerleştirilen perdelemeler sayesinde Savonius rüzgar çarkının performansının arttığı gözlemlenmiştir. Performans artışı, deneysel ölçümler ve sayısal analizler yapılarak elde edilmiştir. En iyi tork değeri β açısı 15 derece ve α açısı 45 derece iken ölçülmüştür. Perdeleme ile tork değerinde de bir artış gözlenmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. Perdeleme sistemine sahip Savonius rüzgar türbini

Tablo 4.1. Perdeleme sisteminin ölçülendirilmesi

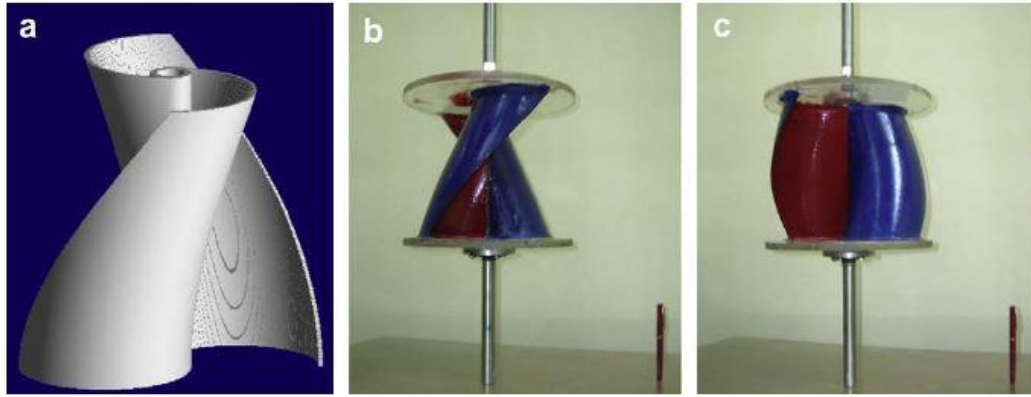
Perde Düzenleme Tipleri	Uzunluk (cm)	Uzunluk (cm)	Yükseklik H (cm)	Kalınlık (mm)
Perde 1	45	52	32	2
Perde 2	34	39	32	2
Perde 3	22	26	32	2



Şekil 4.4. Savonius rüzgar çarkının değişken güç katsayıları için tork grafiği

Kamoji ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmalarında, şaftlı sarmal Savonius çark ve şaftsız sarmal Savonius çarkı karşılaştırmışlardır. Şaftlı sarmal çarklar şaftsız sarmal çarklara göre daha düşük güç katsayısına sahip olduğu deneysel ve nümerik ölçümlerle gözlenmiştir. Şekil 4.5’de a da şaftlı sarmal Savonius çark, Şekil 4.5’de b ve c’de ise

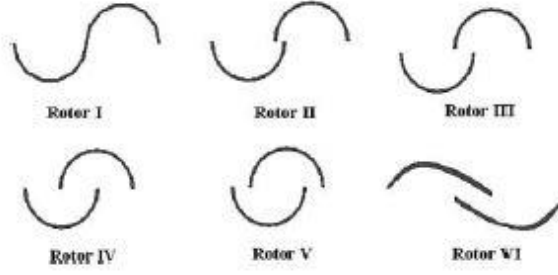
şaftsiz sarmal Savonius çark görülmektedir. Şaftsiz sarmal Savonius çarkın daha büyük bir güç katsayısına sahip olduğu sonucu elde edilmiştir.



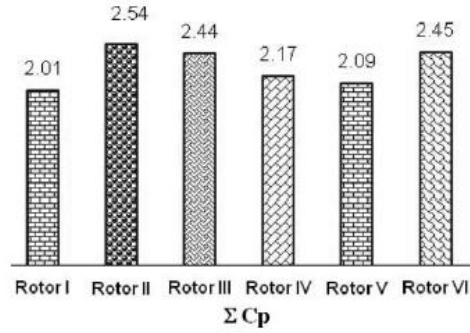
Şekil 4.5. Şaftlı sarmal Savonius çark ve şaftsiz sarmal Savonius çark profilleri

Mohammed ve diğ. (2009), dalga hareketinden faydalanarak Savonius çark ile enerji üretimi sağlanması amaçlanmıştır. Değişik dalga boylarına yönelik olarak da 5 bıçaklı bir Savonius çark geliştirilmiş ve iki boyutlu bir dalga kanalında sinüsel dalga üreten jeneratörün frekansını değiştirerek ölçümler yapılmıştır. Dalga boylarındaki artışın kinetik enerjiyi arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu ölçümler sonunda maksimum dönme hızı yüzeye yakın alanlarda elde edilmiştir.

Kianifar ve Anbarsooz (2010) çalışmalarında, Savonius çarklarda bıçaklar arası farklı açıklıklar oluşturarak 6 ayrı Savonius çark profili geliştirmişlerdir (Şekil 4.6). Bu profillerde bıçaklar 16 cm çapında ve bıçaklar arası açıklıklar; 0.3, 2, 3.8, 6.4 ve 7.2 cm'dir. Bu açıklıkların güç katsayısına etkisini, rüzgar tüneli ve nümerik analiz ile incelemişlerdir. Klasik Savonius çark profili (rotor 2) açıklığının diğer çark açıklıklarına sahip Savonius çarklarındaki bıçak profillerine göre daha yüksek C_p (güç) katsayısına sahip olduğu ve performansının daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 4.7).

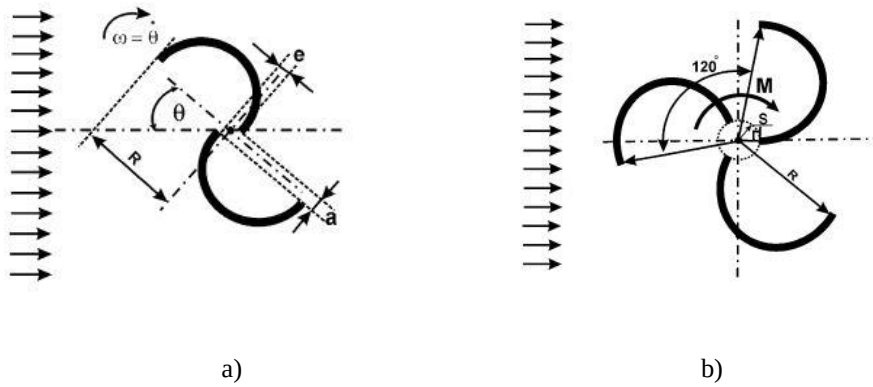


Şekil 4.6. Savonius çark profilleri farklı bıçak açılıkları

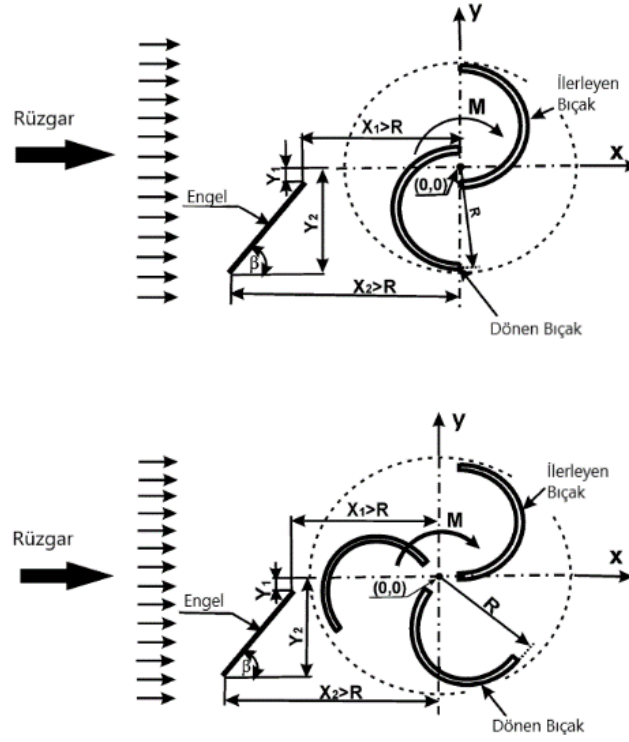


Şekil 4.7. Farklı bıçak açılıklarına sahip Savonius rotorun güç katsayılarının karşılaştırılması

Mohamed ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmalarında, 2 ve 3 bıçaklı Savonius çark modellerini karşılaştırmışlardır. 2 ve 3 bıçaklı Savonius çarklar deneysel ve sayısal ölçümler yapılarak incelenmiştir (Şekil 4.8). Bu inceleme sonucunda, iki bıçaklı Savonius çarkların 3 bıçaklı Savonius çarklara göre daha verimli ve daha yüksek performansa sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu profillerin önüne perdeleme yapıldığında da iki bıçaklı Savonius çarkın güç katsayısının üç bıçaklı Savonius çarkın güç katsayısından %27,3 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 4.9).

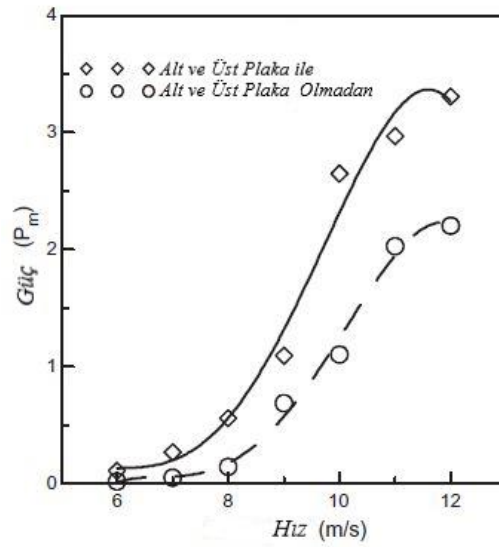


Şekil 4.8. a) 2 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı b) 3 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı



Şekil 4.9. Perdeleme yapılmış 2 ve 3 bıçaklı Savonius rüzgar çarkı

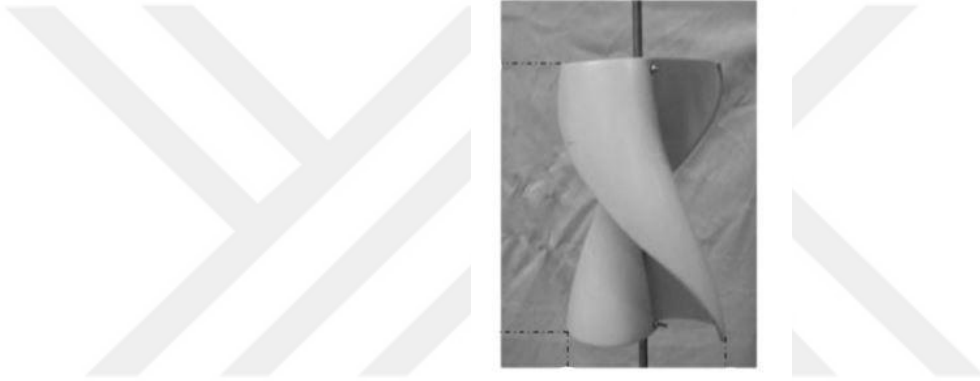
Mahmoud ve diğ. (2010), alt ve üst plakaya sahip çarkların olmayanlara göre daha yüksek mekanik güce sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 4.10). Bunu ise, alt ve üst plakaya sahip çarklara çarpan hava miktarının daha fazla olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 4.10. Güç ve hızın alt ve üst plaka olup olmamasına bağlı olarak değişimi

Mahmoud ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, 2, 3 ve 4 bıçaklı Savonius çark profilleri incelenmiştir. Uç plakaları; 0.5, 1, 2, 4 ve 5 en-boy oranları ve farklı 0'dan 0.35'e kadar örtüşme oranları deneysel olarak araştırılmıştır. Her bir Savonius profili için yapılan deneysel çalışmada; 2 bıçaklı Savonius çark profilinin performansının 3 ve 4 bıçaklı Savonius türbine göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Damak ve diğ. (2012) çalışmalarında, Savonius rüzgar türbininin performansını sarmal çark profili ile arttırmayı amaçlamışlardır (Şekil 4.11). Deney sonucunda 180 derece sarmal yapı ile oluşturulmuş Savonius çark profili klasik çark profiline göre daha yüksek bir performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir.



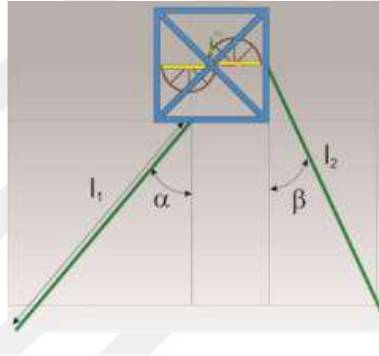
Şekil 4.11. Sarmal Savonius çark profili

Driss ve Abid (2013) bu makalede, sarmal Savonius rotorlarının aerodinamik davranışları incelenmiştir. Açık jet rüzgar tüneline çalışmaları yürütülmüştür. Savonius rotorunun performansı sarmal ile klasik çarklar için karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sarmal Savonius rüzgar türbininin maksimum güç katsayısının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, sarmal Savonius çarklar için performansın daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Sukanta ve UjjwalK. (2013), Savonius çarkta parametreler birçok duruma bağlılık göstermektedir. Bunlar; çark şekli, çark açısı, çark sayısı, hız oranları gibi örneklendirilebilmektedir. Bu durumların dışında perdeleme yapmak veya çarkın önüne engel koymak gibi yenilikler yapılarak Savonius çark performansında değişiklikler gözlemlemek mümkündür. Bu çalışmada, perdeleme yapılarak 2 ve 3 bıçaklı Savonius çarkların performans analizleri incelenmiştir. 2 bıçaklı çark

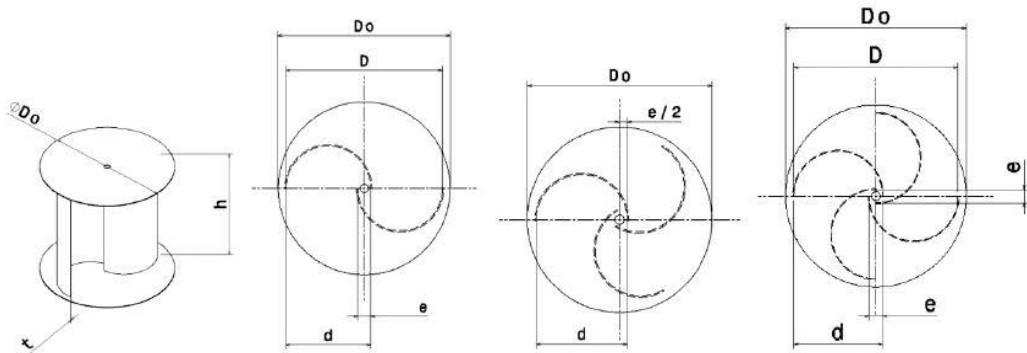
modelinin güç katsayısı daha yüksekken tork değeri 3 bıçaklı çark modeliyle karşılaştırıldığında yaklaşık olarak aynı olmaktadır. Sarmal yapıdaki Savonius çarkların performansında büyük bir ilerleme kat edilmiştir. Perdeleme yapmak ise güç katsayısında büyük bir artışa sebep vermiştir ve çarkın performansını yüksek oranda arttırmıştır. Ayrıca perdeleme ile tork oranında yükselme gözlenmiştir.

Maldonado ve diğ. (2013), çeşitli perdeleme açıları yapılarak Savonius çarklar için en uygun perdeleme açısı incelenmiştir (Şekil 4.12). $\alpha = 30^\circ$ ve $\beta = 40^\circ$ açılarında en yüksek hızlara ulaşılmıştır. Bu perdeleme açıları ile çarka giren hava miktarı %62 artmış, 5 m/s olan hız 8,18 m/s ye çıkmıştır ve böylelikle üretilen güç miktarı da artmıştır.



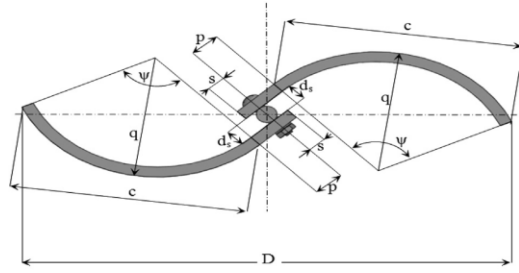
Şekil 4.12. Perdeleme yapılmış Savonius çark profili

Wenehenubuna ve diğ. (2014) çalışmalarında, Savonius tipi rüzgar türbini modeli performansı üzerinde bıçak sayısı 2, 3 ve 4 olan çark modellerini karşılaştırmışlardır (Şekil 4.13). Ölçümler sayısal olarak ANSYS ve deneysel olarak rüzgar tüneli kullanılarak yapılmıştır. 3 bıçaklı rüzgar türbinlerinin 2 ve 4 bıçaklıya göre daha yüksek dönme hızına sahip olduğunu belirlemişlerdir.



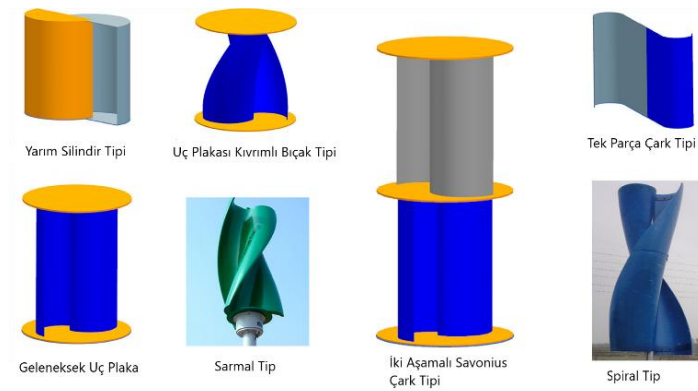
Şekil 4.13. Farklı bıçak sayılarına sahip Savonius rüzgar çark profilleri

Driss ve diğ. (2014) bu çalışmada ise, Savonius rüzgar rotorunun etrafındaki türbülanslı akış için sayısal simülasyon yapılmış ve ayrıca deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal modellemede, Navier- Stokes denklemlerinin standart k-ε türbülans modeli ve sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Küçük bir kavisli Savonius rüzgar çarkı için deneyler, açık bir rüzgar tüneli üzerinde yürütülmüş ve sayısal yöntem kullanılarak doğrulanmıştır. Deneylerin ve sayısal çözümlerin yürütüldüğü Savonius rüzgar çarkı Şekil 4.14’de gösterildiği gibidir.

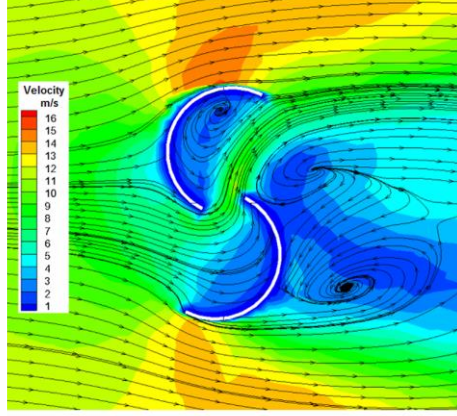


Şekil 4.14. Kavisli Savonius rüzgar çarkı

Kang ve diğ. (2014), Savonius rüzgar türbinlerinde kanat yapısının performans üzerindeki etkisi incelenmiş ve kanat yapısının performans üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca kanat yapısının tork ve gücü büyük ölçüde etkilediğine vurgu yapılmıştır. Bu yeniden inceleme çalışmasında, daha önce yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Çalışmada, Şekil 4.15’de gösterildiği gibi, en çok üzerinde çalışma yapılan kanat profilleri üzerinde durulmuştur. Kanat yapıları ve kanatlar arasındaki akış sayısal olarak incelenmiştir (Şekil 4.16). Bu çalışma kapsamında da deneysel ve sayısal çalışmalar klasik ve geliştirilen Savonius modeller için yapılarak karşılaştırılmıştır.

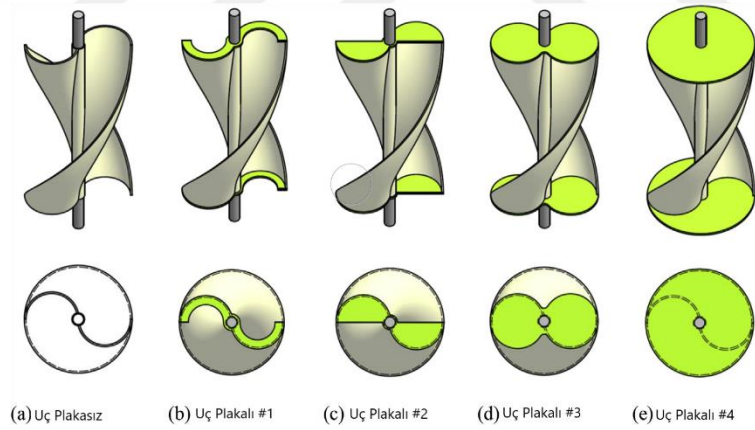


Şekil 4.15. Farklı tiplerdeki Savonius çark modelleri



Şekil 4.16. Klasik Savonius rüzgar türbininin hız profili

Jeon ve diğ. (2015) çalışmalarında, farklı şekil ve boyutlardaki 180° döndürme açısı ile döndürülmüş sarmal Savonius rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelenmişlerdir. Çalışmada dört farklı sarmallı Savonius rüzgar türbinini, rüzgar tüneline test etmişlerdir. Çalışmalarında farklı sarmallar ve sarmalların alt ve üst kısımlarına plaka konulmasının güce etkisi incelenmiştir. Bu durum Şekil 4.17’de görülmektedir.

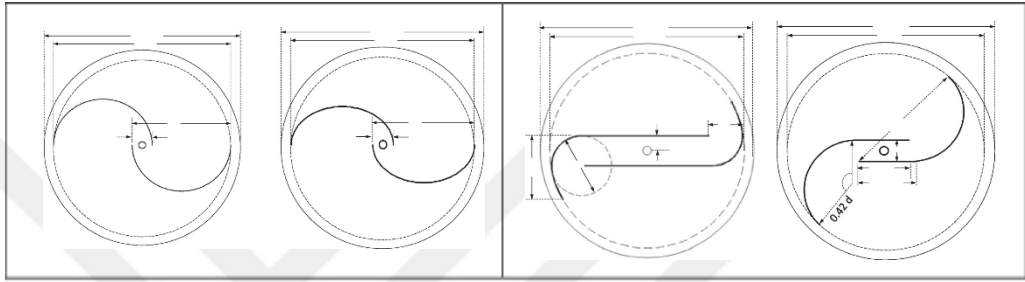


Şekil 4.17. Farklı uç plakalarına sahip Savonius rüzgar türbinleri

Yapılan çalışmalar hem üst hem de alt uç plaka kullanımı ile güç performansının yaklaşık olarak %36 oranında arttığını göstermektedir.

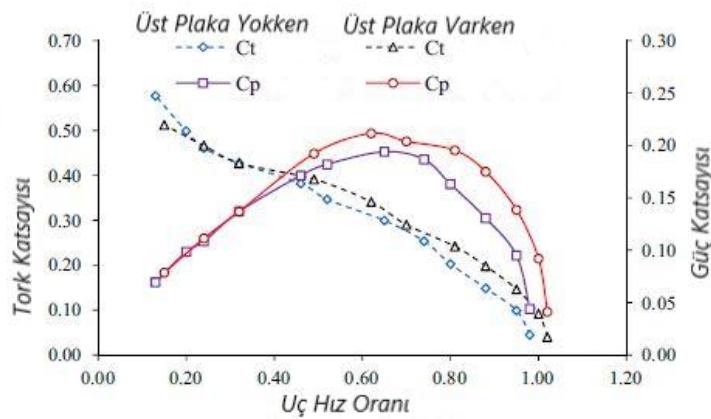
Mao ve Tian (2015) yaptıkları çalışmada, Savonius çarkın sayısal analizle dönme açılarını, analizi yapılan sistemin boyutlandırılmasını incelemişlerdir. Çalışmada, sayısal analiz için uygun boyutlandırma bulunmuştur. Belirli dönme açıları için güç ve tork katsayısı hesapları yapılmıştır. Bu açılardaki hız ve basınç etkileri incelenmiştir.

Roy ve Saha (2015) yaptıkları çalışmada, deneylerini rüzgar tüneline deneysel olarak yeni geliştirilmiş iki-kanatlı bir Savonius tarzı rüzgar türbini ile gerçekleştirmişlerdir. Türbin kanatları Şekil 4.18’de gösterildiği gibi farklı şekiller için gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen iki kanatlı türbin açık tip test bölümünde test edilmiş ve performansı güç ve tork katsayılarıyla değerlendirilmiştir. Doğrudan bir karşılaştırma yapmak için yarı dairesel, yarı eliptik, gibi diğer standart kanatlarla deneyler gerçekleştirilmiştir. Mevcut araştırma, yeni geliştirilen iki kanatlı türbin ile maksimum güç katsayısında %34,8’lik bir artış sağladığını göstermiştir.



Şekil 4.18. Farklı şekillere sahip türbin kanatlarının gösterimi

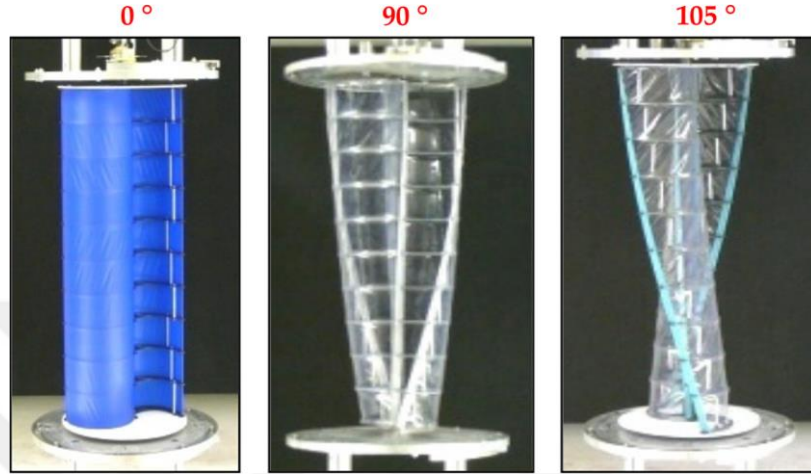
Al-Faruk ve Sharifian (2016) çalışmalarında, üst plakanın etkisini incelemişlerdir. Çarkın en boy oranı 0,94, çark çapı 319,2 mm ve kayma mesafesi oranı 0,2 iken üst plakanın olması ve olmaması durumunda güç ve tork katsayısı için ölçümler yapmışlardır. Bu ölçümlerde, üst plaka varken havanın çarka doğru yönlendirilmesinden dolayı güç ve tork katsayıları daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Üst plaka olup olmasının etkisinin grafiği

Ricci ve diğ. (2016), bu çalışmada dikey eksenli Savonius rüzgar rotorunun aerodinamik performansı incelenmiştir. Rüzgar türbinleri şehirlerde sokak

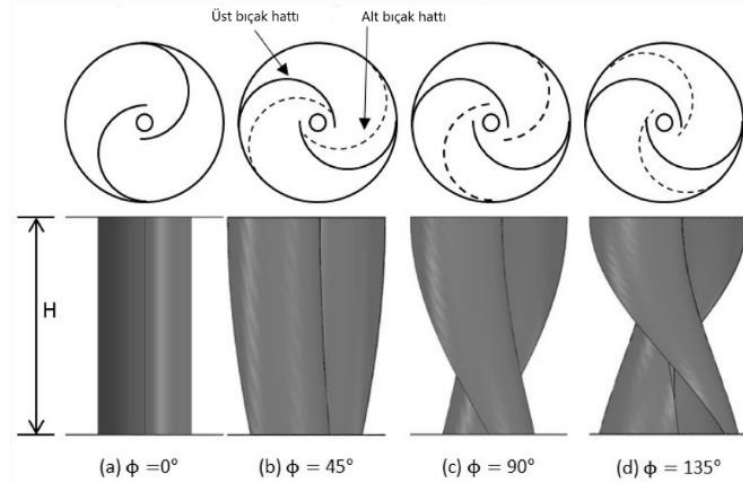
aydınlatılmasında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Hem güneş enerjisi hem de rüzgar enerjisi birlikte kullanılmıştır. Şekil 4.20’de gösterilen farklı rüzgar çarklarının performansları incelenerek, karşılaştırılması deneysel olarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, klasik Savonius rüzgar çarkı ile yeni geliştirilen modellerin karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Dikey eksenli Savonius rüzgar türbini

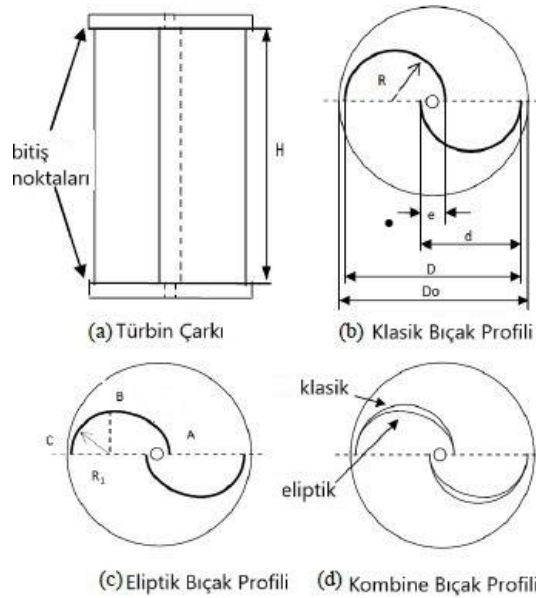
Frikha ve diğ. (2016), bu çalışmada çok kademeli bir Savonius rotorunun performansı üzerindeki etkisini incelemek için sayısal simülasyon ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Farklı kanat sayısına sahip beş konfigürasyonu test edilmiş ve hız dağılımı, statik basınç, dinamik basınç, türbülans kinetik enerji, türbülans dağılım oranı ve türbülans viskozite gibi değerler hesaplanmıştır. Sayısal akışkanlar mekaniği çözümlemesinde Navier-Stokes denklemlerinin standart k- ϵ türbülans modeli ile çözümü yapılmış sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Rüzgar tüneli deney sonuçları, hız profili ve güç katsayısı açısından sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Lee J. H. ve diğ. (2016) bu çalışmada, farklı helezon açılardaki bir sarmal Savonius rüzgar türbininin performansı ve şekillere bağlı değişimi incelenmiştir. Farklı helezon kanat açıları olan 0°, 45°, 90° ve 135° açıları için farklı yönlerde farklı uç hızı oranlarında güç katsayısı (C_p), sabit projeksiyon alanı ve en-boy oranı şartları için araştırılmıştır (Şekil 4.21). Sayısal çözümlemede Reynolds ortalama Navier-Stokes (k- ϵ RNG) modeli kullanılmıştır.

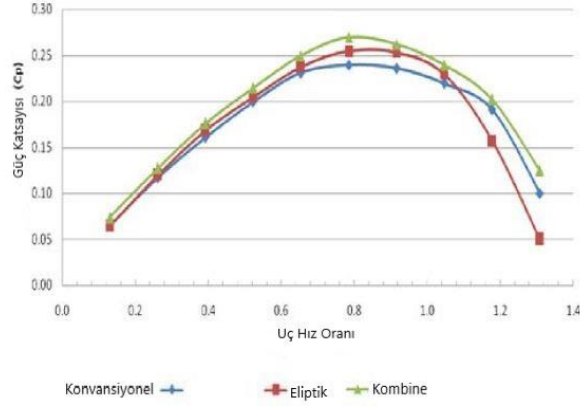


Şekil 4.21. Farklı helezon açılardaki sarmal Savonius rüzgar türbini

Sanusi ve diğ. (2016) çalışmalarında, Savonius çark profilinde bıçak modellerini klasik, eliptik ve kombine olarak tasarlamışlardır (Şekil 4.22). Bu üç farklı yapıdaki bıçak modellerinde yapılan deneysel testlerin sonucuna ve bıçak modelinin analizine bakarak kombine bıçağın güç ve tork katsayılarının eliptik bıçaklara göre %5,5 ve klasik bıçaklara göre %11 daha yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir (Şekil 4.23). Böylelikle Savonius çark da kombine bıçak kullanımının güç katsayısında meydana getirdiği artışı gözlemlemişlerdir.



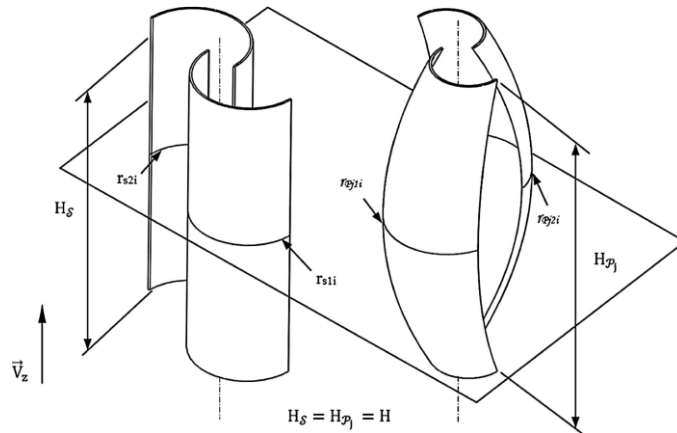
Şekil 4.22. Savonius çark profilinde bıçak modelleri



Şekil 4.23. Güç katsayısı kanat hız oranı grafiği

Zemamou ve diğ. (2017), 2 ve 3 bıçaklı Savonius rotorları incelemişlerdir. 2 bıçaklı Savonius rüzgar çarklarının güç katsayılarının 3 bıçaklılara göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bıçak yapıları ve Savonius çarkın boyutlandırması için yapılan araştırmalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. 2 bıçaklı Savonius çarkın perdeleme ile ürettiği güç miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Mercado-Colmenero ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmalarında, yeni geliştirilen ve Şekil 4.24'de gösterilen Savonius rotorundan uyarlanmış yeni bir rotor üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yeni modifiye Savonius rotor ve klasik Savonius rotorlar aynı boy oranında seçilmiş ve deneylerini açık jet rüzgar tüneline test etmişlerdir. Rotor performansı üzerindeki ürün tasarım parametrelerinin etkisini göstermek için güç katsayısını ölçmüşlerdir. Türbinin davranışı dönme açısı değiştirilerek analiz edilmiştir. 45°'lik bir dönme açısı kullanarak güç katsayısı değerleri karşılaştırıldığında %32 artış sağlandığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 4.24. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini

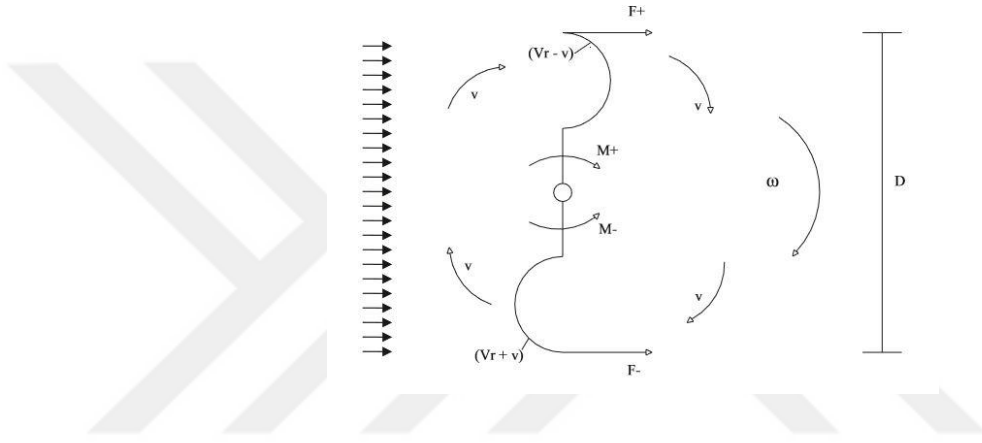
Tablo 4.2. Savonius rüzgar çarkları ile ilgili yapılan çalışmalar

Yazarlar	Çalışma	Yapılan çalışmanın etkisi
Islam ve diğ. (1993)	Statik durumdaki Savonius çarkın aerodinamik performansı incelenmiştir.	En yüksek güç katsayısı 120 derecede en düşük güç katsayısı ise 0 derecede elde edilmiştir.
Atulgan ve diğ. (2000), Deda Altan ve Atulgan (2008), Mohamed ve diğ. (2010), Maldonado ve diğ. (2013)	Dış büküye yüzeye gelen momenti azaltmak amacıyla Savonius çarkın giriş ve çıkışlarına perdeleme yaparak dönme hareketine ters yönde oluşan moment değerinin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.	Perdeleme ile güç performansı arttırılmışlardır.
Kamal ve Islam (2008), Mohamed ve diğ. (2010), Mahmoud ve diğ. (2012), Sukanta ve Ujjwalk. (2013), Wenehenubuna ve diğ. (2014), Zemamou ve diğ. (2017)	2 ve daha fazla bıçaklı Savonius çarkların performansları kıyaslanmıştır.	2 bıçaklı Savonius rüzgar türbinleri en yüksek performansa sahiptir.
Kamoji ve diğ. (2008)	Şaftlı sarmal Savonius çark ve şaftsız sarmal Savonius çarkı karşılaştırılmışlardır.	Şaftsız sarmal Savonius çarkın daha büyük bir güç katsayısına sahip olduğu sonucu elde edilmiştir.
Mohammed ve diğ. (2009)	Dalga hareketinden faydalanarak Savonius çark ile enerji üretimi sağlanması amaçlanmıştır. Değişik dalga boylarına yönelik olarak da 5 bıçaklı bir Savonius çark geliştirilmiş ve iki boyutlu bir dalga kanalında sinüsel dalga üreten jeneratörün frekansını değiştirilerek ölçümler yapılmıştır.	Dalga boylarındaki artışın kinetik enerjiyi arttırdığı gözlemlenmiştir.
Kianifar ve Anbarsooz (2010), Kang ve diğ. (2014), Mao ve Tian (2015)	Savonius çarklarda bıçaklar arası farklı açıklıkları incelemiştir. Bu açıklıkların güç katsayısına etkisini, rüzgar tüneli ve nümerik analiz ile incelemiştir.	$S = 0,2 \times D$ bıçak açıklığına sahip Savonius rüzgar türbinlerinin en yüksek güç katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir.
Mahmoud ve diğ. (2010), Jeon ve diğ. (2015), Al-Faruk ve Sharifian (2016)	Savonius rüzgar türbinlerinde alt ve üst plakanın etkisini incelemiştir.	Güç katsayısının fazla olmasının alt ve üst plakaya sahip çarklara çarpan hava miktarının daha fazla olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.
Damak ve diğ. (2012), Driss ve Abid (2013), Ricci ve diğ. (2016), Lee J. H. ve diğ. (2016)	Sarmal yapıya sahip çarkların etkisini incelemiştir.	Sarmal yapıya sahip çarkların daha yüksek güç ürettiği gözlemlenmiştir.

5. SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNİNİN HESAPLAMALARI

5.1. Savonius Rüzgar Türbinlerinde Güç ve Performans Hesaplamaları

Le Gourieres'e (1982) göre Savonius rüzgar türbinlerinde yaklaşık teori ile güç performans ifadeleri verilmiştir. V_r rüzgar hızı altında türbin kanatlarının, türbin kanat merkezleriyle aynı merkezli, sabit lineer v hızı ile döndüğü düşünülerek, kepçe üzerine gelen kuvvet aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 İç bükey ve dış bükey yüzeylerdeki hızlar (Le Gourieres, 1982)

Kanatlarda meydana gelen kuvvet;

$$F = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^2 \quad (5.1)$$

olarak ifade edilir. Burada:

F: Kuvvet (N)

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

A: Süpürme alanı (m^2)

c: Direnç katsayısı

V_r : Rüzgarın hızı (m/s)

v: Çarkın hızı (m/s)

ile simgelenir.

Yarım küre için $c_1 = 1,4$ (iç bükey yüzey için), $c_2 = 1,4$ (dışbükey yüzey için), yarım silindir için $c_1 = 2,3$ (iç bükey yüzey için), $c_2 = 1,2$ (dış bükey yüzey için) olarak belirlenmiştir (White 2004).

$$P = F \cdot v \quad (5.2)$$

olduğundan Denklem (5.1) ve (5.2) birlikte çözüldüğünde,

$$P = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^2 \cdot v \quad (5.3)$$

İç bükey yüzey için;

$$P_r^+ = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A [c_1 \cdot (V_r - v)^2] \cdot v \quad (5.4)$$

Dış bükey yüzey için;

$$P_r^- = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A [c_2 \cdot (V_r + v)^2] \cdot v \quad (5.5)$$

olarak tanımlanırsa ve net güç için;

$$P_{rnet} = P_r^+ - P_r^- \quad (5.6)$$

Denklem (5.1) ve (5.2) Denklem (5.3)'de yerine koyulduğunda,

$$P_{rnet} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A [c_1 \cdot (V_r - v)^2] \cdot v - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A [c_2 \cdot (V_r + v)^2] \cdot v \quad (5.7)$$

denklemini bulunur. Bu denklem düzenlendiğinde;

$$P_{rnet} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v [V_r^2 \cdot (c_1 - c_2) - 2 \cdot V_r \cdot v (c_1 + c_2) + v^2 \cdot (c_1 - c_2)] \quad (5.8)$$

$(c_1 - c_2) = K$ ve $(c_1 + c_2) = L$ ile gösterildiğinde P_{rnet} ;

$$P_{rnet} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v [V_r^2 \cdot K - 2 \cdot V_r \cdot v \cdot L + v^2 \cdot K] \quad (5.9)$$

Sabit bir rüzgar hızında optimum güç elde etmek için değişken v çark hızına göre alınan türevin sıfıra eşit olması gerekir. P_{rnet} 'in, v 'ye göre türevi alınırsa yani $\frac{dP}{dv} = 0$ olur.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot K \cdot V_r^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot L \cdot 2 \cdot V_r \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot K \cdot v^3 = 0$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot K \cdot V_r^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot L \cdot 4 \cdot V_r \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot 3 \cdot K \cdot v^2 = 0$$

$$3 \cdot K \cdot v^2 - 4 \cdot L \cdot V_r \cdot v + K \cdot V_r^2 = 0 \quad (5.10)$$

v çark hızına ikinci dereceden denklemin kökleri;

$$v_{1,2} = \frac{-(-4 \cdot L \cdot V_r) \pm \sqrt{(4 \cdot L \cdot V_r)^2 - 4 \cdot 3 \cdot K \cdot K \cdot V_r^2}}{2 \cdot 3 \cdot K} \quad (5.11)$$

Denklem (5.8)' den v_1 ve v_2 ;

$$v_1 = \frac{4 \cdot L \cdot V_r - \sqrt{16 \cdot L^2 \cdot V_r^2 - 12 \cdot K^2 \cdot V_r^2}}{6 \cdot K} = \frac{2 \cdot L \cdot V_r - V_r \sqrt{4 \cdot L^2 - 3 \cdot K^2}}{3 \cdot K} \quad (5.12.a)$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot L \cdot V_r + \sqrt{16 \cdot L^2 \cdot V_r^2 - 12 \cdot K^2 \cdot V_r^2}}{6 \cdot K} = \frac{2 \cdot L \cdot V_r + V_r \sqrt{4 \cdot L^2 - 3 \cdot K^2}}{3 \cdot K} \quad (5.12.b)$$

Dış bükey yüzeyin en az etkisi olduğu noktada güç optimumdur. Bu nedenle $c_2 = 0$ alınmalıdır.

$$L = c_1 + c_2 \text{ ise } L = c_1$$

$$K = c_1 + c_2 \text{ ise } K = c_1$$

$$v_{opt1} = \frac{2 \cdot c_1 \cdot V_r - V_r \sqrt{4 \cdot c_1^2 - 3 \cdot c_1^2}}{3 \cdot c_1} = \frac{2 \cdot c_1 \cdot V_r - V_r \cdot c_1}{3 \cdot c_1} = \frac{1}{3} \cdot V_r \quad (5.13.a)$$

$$v_{opt2} = \frac{2 \cdot c_1 \cdot V_r + V_r \sqrt{4 \cdot c_1^2 - 3 \cdot c_1^2}}{3 \cdot c_1} = \frac{2 \cdot c_1 \cdot V_r + V_r \cdot c_1}{3 \cdot c_1} = V_r \quad (5.13.b)$$

Denklem (5.13.b)' de elde edilen değer, çarkın rüzgar hızıyla aynı hızda dönmesi demektir, yani güç üretilmez, fiziksel bir anlamı yoktur. Bu nedenle optimum güç için $v_{opt} = \frac{1}{3} \cdot V$ olmalıdır. c_2 'nin sıfır alınmasının nedeni, iç bükey kanata çarpan havanın

dış bükey kanadın iç kısmına etkimesi ve dış bükey kanata önden etkiyen havanın etkisine eşitlenmesidir. $c_2 = 0$ alındığında net güç denklemi;

$$P_{net} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot c_1 [V_r^2 - 2 \cdot V_r \cdot v + v^2] \quad (5.14)$$

Optimum güç elde etmek için, $v_{opt} = \frac{1}{3} \cdot V$ yazıldığında;

$$P_{opt} = \frac{2}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot c_1 \cdot V_r^3 \quad (5.15)$$

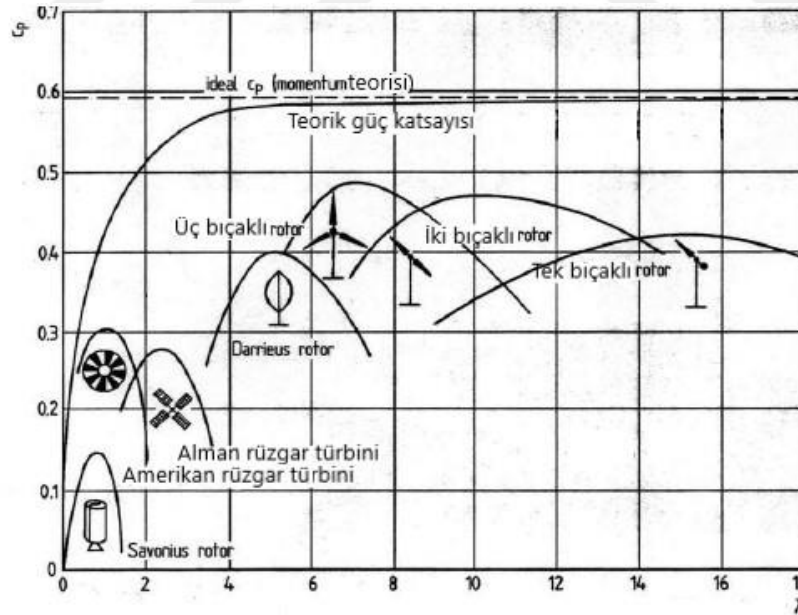
$\lambda = \frac{v}{V_r}$ olduğundan ve denklem (5.14) tekrar düzenlendiğinde;

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^3 [c_1 \left(1 - \frac{v}{V_r}\right)^2 \cdot \frac{v}{V_r}] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^3 [c_1 (1 - \lambda)^2 \cdot \lambda] \quad (5.16)$$

$$C_p = [c_1 (1 - \lambda)^2 \cdot \lambda]$$

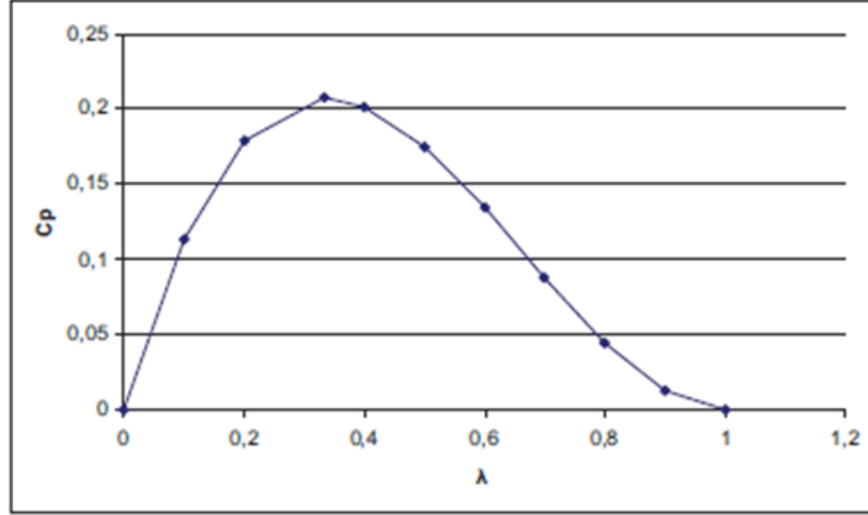
$v = \frac{1}{3} \cdot V$, iken $C_{pmax} = 0,2074$ ve $\lambda_{maks} = 1$ olmaktadır.

C_p katsayısının, λ 'ya etkisinin grafiği bütün rüzgar türbinleri ile karşılaştırılmalı şekilde Şekil 5.2'de verilmektedir.



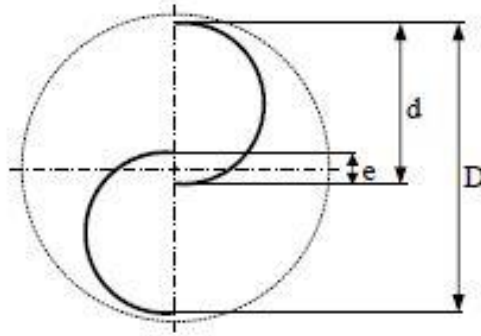
Şekil 5.2 C_p katsayısının λ 'ya etkisinin grafiği (Gonzales, 2012)

Savonius çarklarda olabilecek yaklaşık değerler belirtilmiştir. Şekil 5.3 de ise daha detaylandırılmış olarak gözlemlenen, Savonius rüzgar türbini için C_p değeri maksimum 0,21 olabilmektedir.



Şekil 5.3 Analitik olarak hesaplanan $C_p - \lambda$ eğrisi (Ziraman, 2009)

Ayrıca Denklem (5.15)'den elde edilen optimum güç değerinde, A süpürme alanının değeri Şekil 5.4'ten yazılabilir;



Şekil 5.4 Savonius çark parametrelerinin gösterimi (Altan ve diğ., 2015)

Süpürme alanı, $A = (2.d - e).H$ 'dir. Ve bu değer Denklem (5.15)'de yerine koyulduğunda,

$$P_{opt} = \frac{2}{27} \cdot \rho \cdot c_1 \cdot (2.d - e) \cdot H \cdot V_r^3 \quad (5.17)$$

olarak elde edilir. Şekil 5.4' deki Savonius çark parametreleri açıklandığında;

P_{opt} : Güç (W)

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

$$A: \text{Süpürme alanı (m}^2\text{)} = (2.d - e).H = D . H \quad (5.18)$$

$C_p \approx c_1$: Güç katsayısı

V_r : Rüzgarın hızı (m/s)

e : Kayma mesafesi (m)

d : Kanat çapı (m)

H : Çark yüksekliği (m)'dir.

5.2. Savonius Rüzgar Türbininin Güç ve Tasarım Parametrelerinin Açıklanması

Savonius çarklar, iç bükey ve dış bükey iki kanattan oluşmaktadır. Savonius rüzgar çarklarında, rüzgar yönüne ters yönde dönmekte olan dış bükey kanat üzerinde ve rüzgarla aynı yönde dönmekte olan iç bükey kanat üzerinde farklı direnç katsayılarından dolayı iki farklı moment oluşmaktadır. Bunlardan iç bükey kanat üzerinde oluşan moment daha büyük olmaktadır. Bunun sonucu olarak dönme hareketi meydana gelmektedir. Savonius rüzgar çarklarının verimini veya performansını yükseltmek için dönme momentinin artırılması gerekmektedir. Moment arttığında üretilen güç de artacaktır. Bu bağlamlardan yola çıkarak, bir rüzgar türbininin üretebileceği güç Denklem (5.17) ile belirlenebilir.

Daha önce yapılan çalışmalardan yola çıkılarak tasarım için en uygun değerler tespit edilmiş ve Savonius rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen eşitlikler şu şekildedir;

$$\text{Bıçak çapı}=d \text{ (m)} = 2 . r \quad (5.19)$$

$$\text{Kayma Mesafesi}= S \text{ (m)} = 0,2 . D \text{ (Kianifar ve Anbarsooz, 2010)} \quad (5.20)$$

$$\text{Kanat uç plakası çapı}= D_o \text{ (m)} = 1,1 . D \quad (5.21)$$

$$\text{Çark yüksekliği} = H \text{ (m)} = 1 . D \text{ (m) olarak bilinmektedir. (Fujisawa 1992, Fujisawa ve Gotoh, 1992b).} \quad (5.22)$$

Kanat uç hız oranı, gelen rüzgar hızına ve çarkın yarıçapına bağlı olmaktadır. Denklem (5.23)'deki formülle değeri hesaplanmaktadır ve birimsiz bir büyüklüktür. Buradan açısal hız hesaplanır.

Uç hız oranı, $\lambda = \text{Kanat uç hızı} / \text{Rüzgar hızı}$

w: Açısal hız (rad/s)

V: Rüzgar hızı (m/s)

r: Savonius rüzgar çarkının taradığı alanın yarıçapı (m) = D / 2

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{r \cdot w}{V} \quad (5.23)$$

Açısal hız formülünden ise devir sayısı hesaplanmaktadır.

$$w = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (5.24)$$

n: Devir sayısı (d/dk)

Moment ise güç ve açısal hızın hesaplanmasından sonra ve Denklem (5.25) de yerine konulmasıyla hesaplanmaktadır.

$$P_{opt} = M \cdot w \quad (5.25)$$

M: Moment (Nm)

5.3. Savonius Rüzgar Türbininde Farklı Hızlarda Güç Hesabı

Savonius rüzgar türbininde çark çapı D = 35 cm yani 0,35 m olarak alınmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre çark boyutları;

Çark çapı= D= 0,35 m

Kanat Uç Plakası Çapı= D_o =0,385 m

Çark Yüksekliği = H = 0,35 m

Kayma mesafesi = $e = S = 0,07$ m olarak alınmıştır.

3 m/s, 5m/s, 7 m/s, 10 m/s, 12 m/s ve 13,3 m/s hızları için güç hesabı gerçekleştirilmiştir. Havanın yoğunluğu, $\rho = 1,225$ kg/m³ olarak sabit alınmıştır. Süpürme alanı Denklem (5.18) kullanılarak $A = 0,123$ m² olarak hesaplanmıştır. C_p değeri Şekil 5.3'de alınmış olup maksimum alabileceği değer 0,21 olarak belirlenmiştir. C_p , ρ ve A değerleri sabit tutularak güç denklemi olan Denklem (5.17) de yerine konulmaktadır. Bir önceki bölümdeki hesaplamalarda yola çıkarak Şekil 5.3'teki grafikte $C_p = 0,21$ olduğunda yaklaşık olarak eşdeğer gelen değer $\lambda = 0,35$ olarak okunmaktadır ve bu değer sabit olarak alınmıştır. λ , Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır.

Hız ise Denklem (5.17) de 3 m/s, 5m/s, 7 m/s, 12 m/s ve 13,3 m/s hızları için yerine konularak her bir hız için güç hesabı yapılmıştır.

$V = 3$ m/s için güç hesabı Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 0,063$ W güç elde edilmiştir. $w = 6$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 57,33$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,011$ Nm olarak hesaplanmıştır.

$V = 5$ m/s için güç hesabı Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 0,293$ W güç elde edilmiştir. $w = 10$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 95,54$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,0293$ Nm olarak hesaplanmıştır.

$V = 7$ m/s için güç hesabı Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 0,803$ W güç elde edilmiştir. $w = 14$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 133,76$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,057$ Nm olarak hesaplanmıştır.

$V = 10$ m/s için güç hesabı Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 2,34$ W güç elde edilmiştir. $w = 20$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24)

de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 191,08$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,12$ Nm olarak hesaplanmıştır.

$V = 12$ m/s için güç hesabı Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 4,05$ W güç elde edilmiştir. $w = 24$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 229,3$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,169$ Nm olarak hesaplanmıştır.

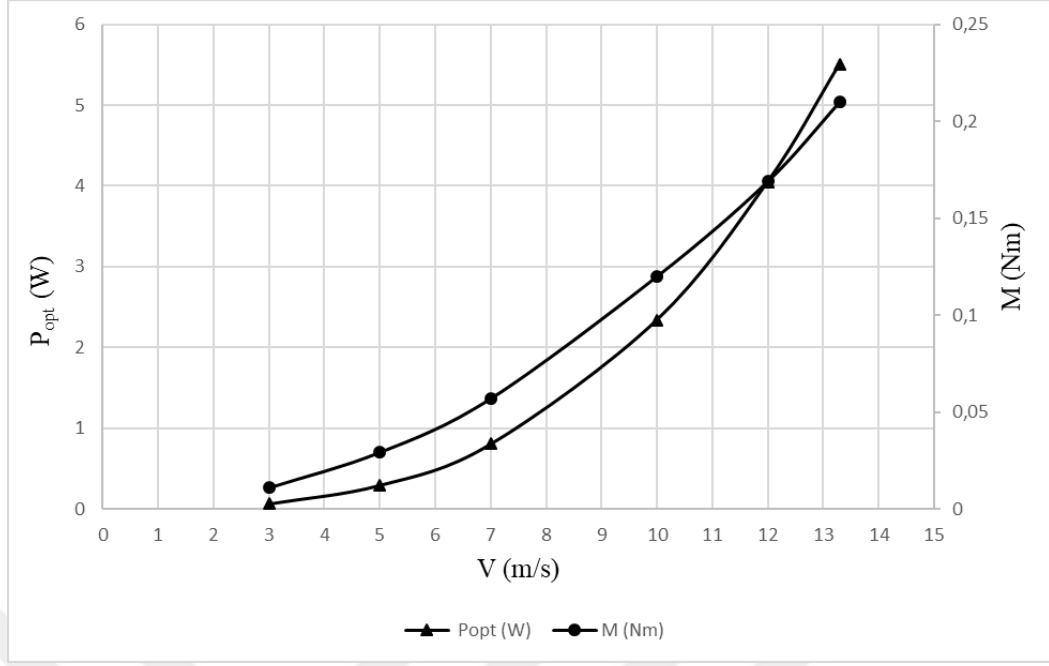
$V = 13,3$ m/s için güç hesabı Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 5,51$ W güç elde edilmiştir. $w = 26,6$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 254,14$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,21$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Farklı rüzgar hızları için hesaplanan değerler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Farklı rüzgar hızlarına göre elde edilen optimum güç değerleri

V (m/s)	P_{opt} (W)	w (rad/s)	n (d/dk)	M (Nm)
3	0,063	6	57,33	0,011
5	0,293	10	95,54	0,0293
7	0,803	14	133,76	0,057
10	2,34	20	191,08	0,12
12	4,05	24	229,3	0,169
13,3	5,51	26,6	254,14	0,21

Farklı rüzgar hızlarına göre hesaplanan hız, moment ve güç değerleri Şekil 5.5’de grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 5.5 de Savonius rüzgar türbininde 5 farklı hızda güç ve moment incelendiğinde hız arttıkça gücün ve momentinde arttığı görülmektedir.



Şekil 5.5 Farklı rüzgar hızları için hesaplanan hız değerlerine göre moment ve güç değerlerinin değişimi

5.4. Savonius Rüzgar Türbininde Farklı Çark Çaplarında Güç Hesabı

Bu bölümde çark çapının moment ve güç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hız, 10 m/s için güç hesabı gerçekleştirilmiştir. Havanın yoğunluğu, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak sabittir. C_p değeri Şekil 5.3’de alınmış olup maksimum alabileceği değer 0,21 olarak belirlenmiştir. C_p , ρ ve V değerleri sabit tutularak güç denklemi olan Denklem (5.17) de yerine konulmaktadır. Bir önceki bölümdeki hesaplamalarda yola çıkarak Şekil 5.3’teki grafikte $C_p = 0,21$ olduğunda yaklaşık olarak eşdeğer gelen değer $\lambda = 0,35$ olarak okunmaktadır ve bu değer sabit olarak alınmıştır. λ , Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır.

Çap ise ise Denklem (5.17) de 0,35 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,7 m, 0,818 m ve 1,1 m çapları için yerine konularak her bir çap için güç hesabı yapılmıştır.

Savonius rüzgar türbininde çark çapı $D = 35 \text{ cm}$ yani 0,35 m olarak tasarlanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) ‘e göre çark boyutları hesaplanmıştır. Süpürme alanı $0,123 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. $D = 0,35 \text{ m}$ için hesaplanan değerler güç hesabı için Denklem (5.19) de değerler yerine konulduğunda,

$P_{opt} = 2,34$ W güç elde edilmiştir. $w = 20$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 191,08$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,12$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Savonius rüzgar türbininde çark çapı $D = 40$ cm yani $0,40$ m olarak tasarlanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre çark boyutları hesaplanmıştır. Süpürme alanı $0,16$ m² olarak hesaplanmıştır. $D = 0,4$ m için hesaplanan değerler güç hesabı için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 3,05$ W güç elde edilmiştir. $w = 20$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 167,2$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,17$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Savonius rüzgar türbininde çark çapı $D = 50$ cm yani $0,50$ m olarak tasarlanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre çark boyutları hesaplanmıştır. Süpürme alanı $0,25$ m² olarak hesaplanmıştır. $D = 0,5$ m için hesaplanan değerler güç hesabı için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 4,764$ W güç elde edilmiştir. $w = 14$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 133,76$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,34$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Savonius rüzgar türbininde çark çapı $D = 70$ cm yani $0,70$ m olarak tasarlanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre çark boyutları hesaplanmıştır. Süpürme alanı $0,49$ m² olarak hesaplanmıştır. $D = 0,7$ m için hesaplanan değerler güç hesabı için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 9,34$ W güç elde edilmiştir. $w = 10$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 95,54$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,934$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Savonius rüzgar türbininde çark çapı $D = 818$ cm yani $0,818$ m olarak tasarlanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre çark boyutları

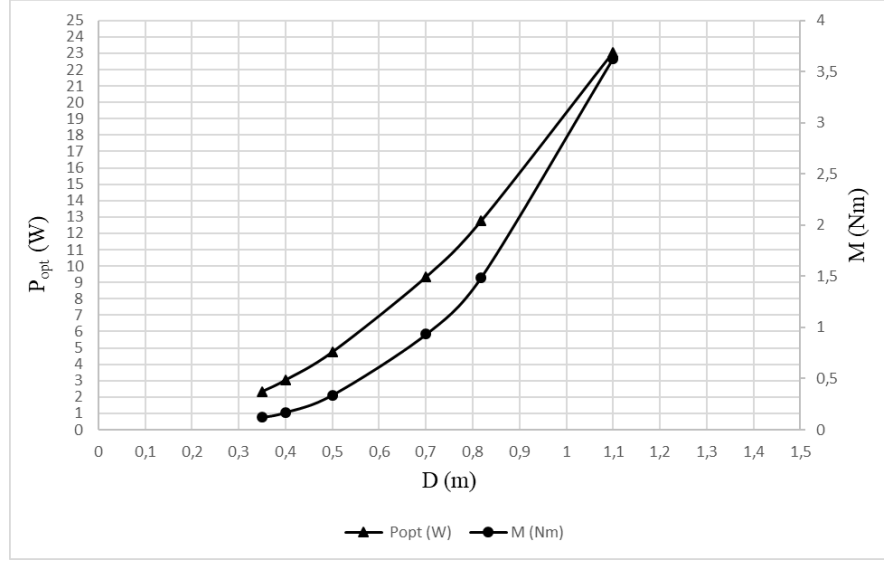
hesaplanmıştır. Süpürme alanı $0,67 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. $D = 0,818 \text{ m}$ için hesaplanan değerler güç hesabı için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 12,77 \text{ W}$ güç elde edilmiştir. $w = 8,56 \text{ rad/s}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 81,75 \text{ d/dk}$ olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 1,49 \text{ Nm}$ olarak hesaplanmıştır.

Savonius rüzgar türbininde çark çapı $D = 110 \text{ cm}$ yani $1,1 \text{ m}$ olarak tasarlanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre çark boyutları hesaplanmıştır. Süpürme alanı $1,21 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. $D = 1,1 \text{ m}$ için hesaplanan değerler güç hesabı için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 23,06 \text{ W}$ güç elde edilmiştir. $w = 6,36 \text{ rad/s}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 60,76 \text{ d/dk}$ olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 3,63 \text{ Nm}$ olarak hesaplanmıştır.

Farklı çark çaplarına göre hesaplanan değerler Tablo 5.2'de verilmektedir. Şekil 5.6'da Savonius rüzgar türbininde ölçüleri değiştirilip hız sabit tutulup güç ve moment incelediğinde çark çapı arttıkça gücün ve momentinde artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Böylelikle çark çapı arttığında üretilen gücün artacağı da hesaplamalarla elde edilmiş bulunmaktadır.

Tablo 5.2 Farklı çark çapına göre elde edilen optimum güç değerleri

D (m)	P_{opt} (W)	w (rad/s)	n (d/dk)	M (Nm)
0,35	2,34	20	191,08	0,12
0,40	3,05	17,5	167,2	0,17
0,50	4,764	14	133,76	0,34
0,70	9,34	10	95,54	0,934
0,818	12,77	8,56	81,75	1,49
1,10	23,06	6,36	60,76	3,63



Şekil 5.6 Farklı çark çaplarına göre moment ve güç değerlerinin değişimi ($v = 10$ m/s sabit değeri için)

5.5. Savonius Rüzgar Türbininde Farklı Güç Katsayılarında Güç Hesabı

Bu bölümde güç katsayısının moment ve güç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hız değeri sabit olarak alınmıştır. Hız, 10 m/s için güç hesabı gerçekleştirilmiştir. Havanın yoğunluğu, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak sabittir. Süpürme alanı Denklem (5.18) kullanılarak $A = 0,123 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) 'e göre Savonius rüzgar türbini tasarımı yapılmıştır. Tablo 5.3'te sabit tutulan Savonius rüzgar parametre değerleri verilmektedir.

Tablo 5.3. Sabit tutulan Savonius rüzgar parametre değerleri

Çark çapı (D)	Kanat Uç Plakası Çapı (D_o)	Çark Yüksekliği (H)	Kayma mesafesi (S)
0,35 m	0,385 m	0,35 m	0,07 m

Aynı zamanda güç katsayıları ile ilgili Şekil 5.3 teki grafik üzerinden uç hız oranı ve moment hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'te de gösterildiği gibi Zıraman (2009) 'ın yayınlamış olduğu güç katsayıları grafiğinin kullanılmasının amacı güç katsayılarını bir parametre olarak farklı kanat uç hızlarında inceleyerek, güç ve

momente etkisini görmek içindir. A, ρ ve V değerleri sabit tutularak güç denklemi olan Denklem (5.17) de yerine konulmaktadır.

Güç katsayısı $C_p = 0,21$ seçilmiştir. $C_p = 0,21$ için Şekil 5.3'ten $\lambda = 0,35$ olarak belirlenmiştir. $C_p = 0,21$ için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 2,34$ W güç elde edilmiştir. λ , Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır. $w = 20$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 191,08$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,12$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Güç katsayısı $C_p = 0,15$ seçilmiştir. $C_p = 0,15$ için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 1,67$ W güç elde edilmiştir. $C_p = 0,15$ için Şekil 5.3'ten gelen iki farklı değer $\lambda = 0,19$ ve $\lambda = 0,59$ olarak okunmaktadır. İki farklı kanat uç hızı farklı moment, açısal hız ve devir sayısı değerlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

$\lambda = 0,19$, Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır. $w = 10,86$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 103,73$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,154$ Nm olarak hesaplanmıştır.

$\lambda = 0,59$, Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır. $w = 33,71$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 322,1$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,05$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Güç katsayısı $C_p = 0,1$ seçilmiştir. $C_p = 0,1$ için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $P_{opt} = 1,12$ W güç elde edilmiştir. $C_p = 0,1$ için Şekil 5.3'ten gelen iki farklı değer $\lambda = 0,1$ ve $\lambda = 0,68$ olarak okunmaktadır. İki farklı kanat uç hızı farklı moment, açısal hız ve devir sayısı değerlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

$\lambda = 0,1$, Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır. $w = 5,71$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 54,55$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,2$ Nm olarak hesaplanmıştır.

$\lambda = 0,68$, Denklem (5.23) de yerine yazılarak açısal hız hesabı her bir hız için yapılmaktadır. $w = 38,86$ rad/s olarak hesaplanmıştır. Denklem (5.24) de açısal hız yerine konulduğundaysa $n = 371,3$ d/dk olarak dakikadaki devir sayısı hesaplanmıştır. Denklem (5.25) de ise hesaplanan P_{opt} ve açısal hız değerleri yerine konularak moment $M = 0,03$ Nm olarak hesaplanmıştır.

Farklı güç katsayıları için elde edilen uç hız oranı, güç, açısal hız, devir sayısı ve moment değerleri Tablo 5.4’de gösterilmektedir. Kanat uç hız oranı 0,35 ’in altında olduğu zaman moment, kanat uç hız oranı 0,35 ’in üzerinde olduğundan daha yüksek olmaktadır. Güç ise değişmemektedir.

Tablo 5.4 Farklı güç katsayısı için elde edilen uç hız oranı, güç, açısal hız, devir sayısı ve moment değerleri

C_p	λ	P_{opt} (W)	w (rad/s)	n (d/dk)	M (Nm)
0,21	0,35	2,34	20	191,08	0,12
0,15	0,19	1,67	10,86	103,73	0,154
0,15	0,59	1,67	33,71	322,1	0,05
0,1	0,1	1,12	5,71	54,55	0,2
0,1	0,68	1,12	38,86	371,3	0,03

5.6. Savonius Rüzgar Türbininde Alt ve Üst Plakanın Etkisi

Mahmoud, El-Haroun, Wahba ve Nasef (2010), alt ve üst plakaya sahip çarkların olmayanlara göre daha yüksek mekanik güce sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni olarak, alt ve üst plakaya sahip çarklarda, çarka çarpan hava miktarının daha fazla olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Jeon, Jeong, Pan ve Ryu (2015) çalışmalarında, farklı şekil ve boyutlardaki 180° döndürme açısı ile döndürülmüş sarmal Savonius rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, dört farklı sarmallı Savonius rüzgar türbinini, rüzgar tüneline test etmişlerdir. Çalışmalarında farklı sarmallar ve sarmalların alt ve üst kısımlarına plaka konulmasının güç ve torka etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak da hem üst hem de alt uç plakaları ile güç performansındaki artışın %36 olarak önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir.

Al-Faruk ve Sharifian (2016) çalışmalarında, üst plakanın etkisini incelemişlerdir. Çarkın en boy oranı 0,94, çark çapı 319,2 mm ve kayma mesafesi oranı 0,2 iken üst plakanın olması ve olmaması durumunda güç ve tork katsayısı için ölçümler yapmışlardır. Bu ölçümlerde, üst plaka varken havanın çarka doğru yönlenmesinden dolayı güç ve tork katsayıları daha yüksek çıkmıştır.

6. SAVONIUS ÇARKLARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

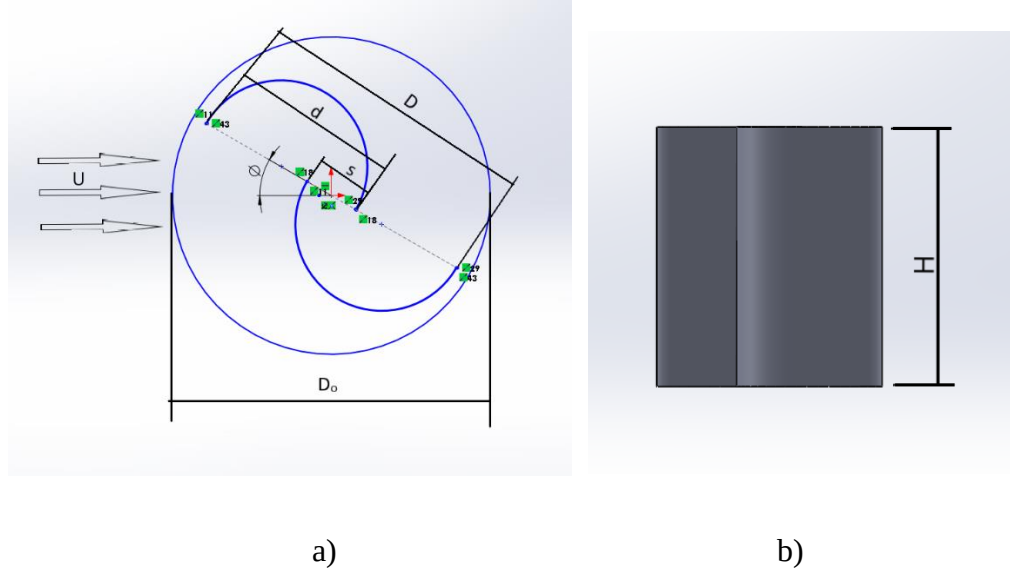
6.1. Yöntem ve Metot

Bu çalışmada; Savonius rüzgar çarklarının düşük olan çark performanslarını arttırabilmek amacı ile, klasik ve uç profili değiştirilmiş Savonius rüzgar çarklarında güç ve performans değerlerinin karşılaştırmasını yapabilmek için sayısal çalışmalar ANSYS programı ile yapılmıştır.

Statik durumda olan klasik Savonius rüzgar türbini ile ilgili makaleler incelenerek sonuçlar bu makalelerle karşılaştırılmış ve sonuçların doğruluğu ilgili makalelere dayandırılarak elde edilmiştir. 3 farklı kanat kalınlığına sahip NACA AIRFOIL 'ler seçilerek bütün profillerde boyutlar aynı kalacak şekilde klasik Savonius rüzgar çarkına eklenmiştir. Klasik ve uç profili değiştirilmiş Savonius rüzgar çarklarının, ANSYS programı kullanılarak CFD ile analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sayısal analiz sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

ANSYS programı ile çözümleme yapılırken sistemin iki ayrı parametresi vardır. Birincisi analizi yapılan sistemin boyutlandırması ve ikincisi de sistemin element sayısıdır. ANSYS programında elde edilen değerlerin doğruluğu için sistemin boyuttan ve elementten bağımsız olması gerekmektedir.

Mao ve Tian (2015) yaptıkları çalışmada, sistemin boyutlandırmasını ele almıştır. Çalışma, uygun boyutlandırmayı ve doğru hesaplama sonuçlarını elde edebilmek için sonuçların hücreden (elementten) ve boyuttan bağımsız olması gerektiğini ortaya koymuştur. Boyutlandırmalar Mao ve Tian (2015) tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaştırılabilmek için bu çalışmadaki boyutlar kullanılarak çözümlemeler yapılmıştır. Çalışmada, çark çapı 0,9 metre olarak alınmıştır. Şekil 6.1.a ve 1.b'de gösterilmekte olan Savonius çarkın boyutlandırılmaları Tablo 6.1'de verilen parametreler vasıtasıyla yapılmıştır. Tablo 6.1'de verilen parametreler, Denklem (5.20), (5.21) ve (5.22), giriş hızı, dönme açısı ve bıçak yarıçapından oluşmaktadır.



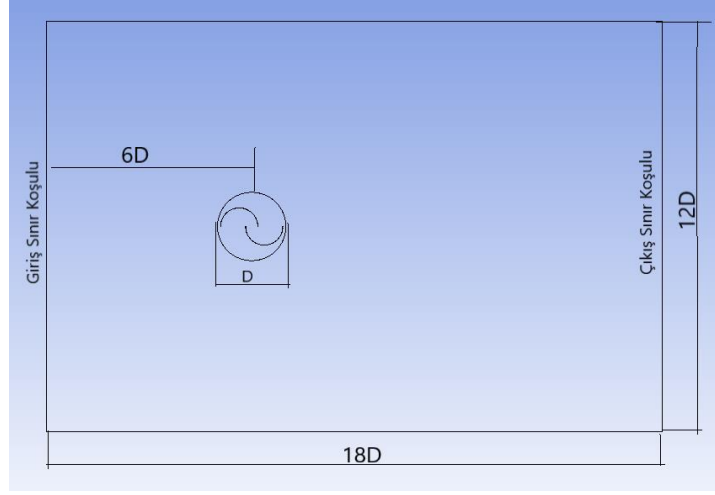
Şekil 6.1. Savonius rüzgar çarkının boyutlandırılması a) Çark parametreleri b) Yükseklik parametresi

Tablo 6.1. Savonius çark parametreleri

Bıçak Yarıçapı	Kayma Oranı	Kanat Uç Plakası Çapı	Çark Çap Yükseklik Oranı	Dönme Açısı	Giriş Hızı
d	$S=0,2 \cdot D$	$D_0=1,1 \cdot D$	$H = 1 \cdot D$	$\emptyset$	U

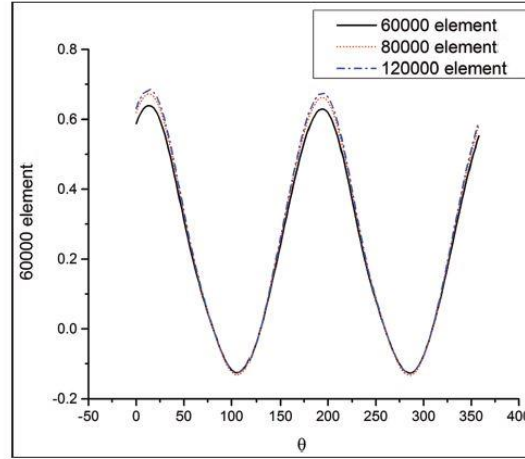
Mao ve Tian (2015)'nin çalışmasında boyuttan bağımsızlık için sayısal çözümlemede çözüm alanı Şekil 6.2'de de gösterildiği gibi, $18D \times 12D$ olacak şekilde bir dikdörtgen seçilmiştir. Burada rüzgarın giriş yerinden çarkın merkezinin uzaklığı $6D$ olarak alınmıştır. Akışın tam gelişmesine izin vermek ve aynı zamanda tıkanma etkisini azaltmak için hesaplama alanı $18D \times 12D$ olarak seçilmiştir. Böylelikle çözüm boyuttan bağımsız olacak ve sınır koşullarının çözüm alanında, akış üzerindeki etkisi ortadan kalkacaktır.

Kullanılan sınır koşulları, giriş sınır koşulu tarafında sabit bir hız sınır koşulundan (7 m/s), çıkış sınır koşulu tarafında bir basınç sınır koşulundan (1 Atm 25°) ve diğer yüzeylerde simetri sınır koşulundan oluşmaktadır.



Şekil 6.2 Analizi yapılan sistemin boyutlandırılması

İkinci parametre olan element sayısından bağımsızlık için farklı element sayılarında çözümlerler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3’de gösterildiğı gibi 80.000 elementten sonra eğriler birbirine çok yakın çıkmaktadır ve bu durumda 80.000 elementten sonra sistem her bir dönme derecesi için hücre sayısından bağımsız olmaktadır.



Şekil 6.3 Elementlerin sayısının dönme derecesi ile ilişkilendirilmesi (Mao ve Tian, 2015)

Çalışmadan yola çıkılarak çözümün boyuttan ve elementten bağımsız olduğı durumun analizi için sayısal analiz yapılmıştır. Sayısal hesaplamalar için çark boyutlandırması yapıldıktan sonra program ile analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.1’deki parametrelere göre çarkın boyutlandırılması çark çapı 0,9 metre için yapılmış ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Hesaplanan Savonius rüzgar türbini parametreleri

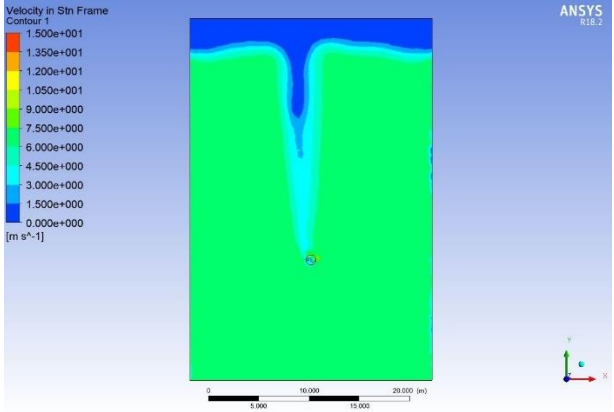
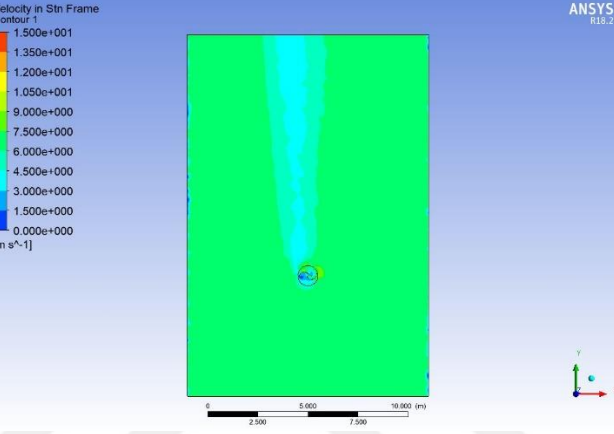
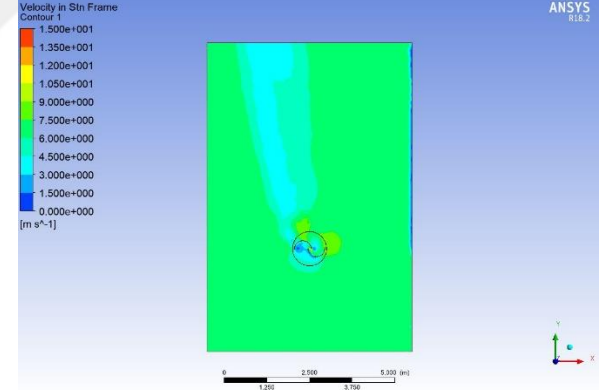
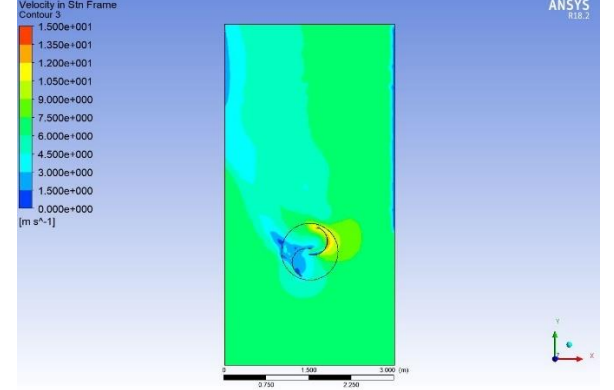
Çark Çapı (D)	Kanat Uç Plakası Çapı (D _o)	Çark Yüksekliği (H)	Kayma Mesafesi (S)	Tek Bir Çark Çapı (d)
81,8 cm	90 cm	81,8 cm	16,4 cm	49,1 cm

Boyuttan bağımsızlığı görmek için boyutlar değiştirilerek çözümlemeler yapılmıştır. Şekil 6.2’de gösterilen sistemin boyutlandırması kullanılarak ve sistemin değiştirilen diğer boyutları ile karşılaştırılarak, Şekil 6.4’de analiz sonuçları verilmektedir. Mao ve Tian (2015)’in çalışmasına benzer olarak, boyuttan bağımsızlık için sayısal çözümlemede çözüm alanı Şekil 6.2’de de gösterildiği gibi, 18D x 12D olacak şekilde bir dikdörtgen seçilmiştir.

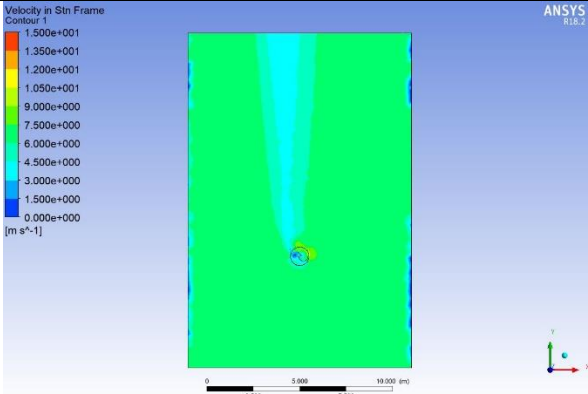
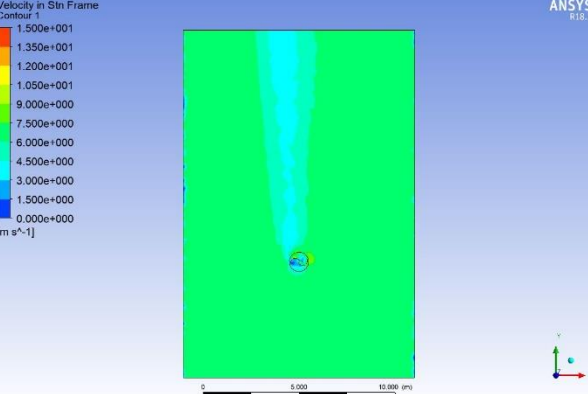
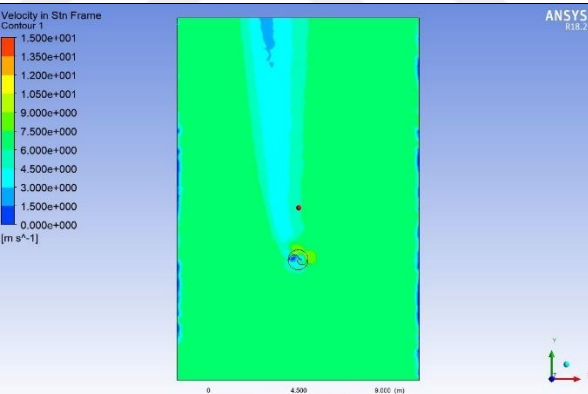
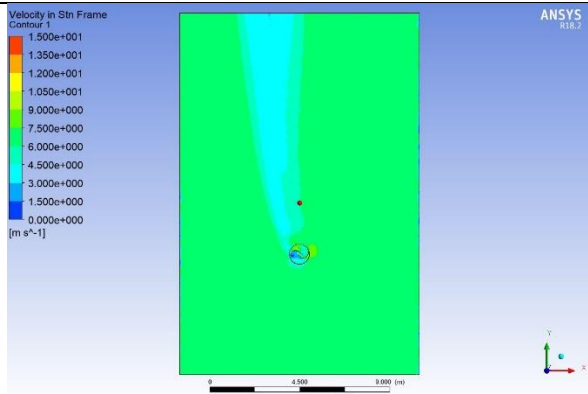
Şekil 6.4 de de gösterildiği gibi, 3000 mm x 6000 mm olduğu zaman akış gelişmemektedir. 6000 mm x 9000 mm olduğu zaman akışın çözüm alanına etkisinden dolayı boyuttan bağımsızlık gerçekleşmemektedir. 10800 mm x 16200 mm olan sistem bütün hava hareketlerinin en iyi şekilde gözlemlendiği durumdur ve çözüm alanında akışın etkisi yoktur. 24000 mm x 36000 mm de uygundur fakat çözümlemenin normalden daha uzun sürmesine neden olmaktadır bu da zaman kaybına neden olmaktadır. Zaman ve çözüm açısından en uygun durum 12D x 18D olarak görülmektedir. Bu çözümleme Mao ve Tian (2015) tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırıldığında ise analiz sonuçlarının çözümlemesi için gerekli olan alanın uygunluğunu göstermektedir. Çözümde kullanılan element sayıları ise 80000 element olarak aynı tutulmuştur.

Çözümün elementten bağımsız olduğu durumun bulunması için element sayıları değiştirilerek sayısal analiz yapılmıştır. Çözümde kullanılan boyutlandırmalar ise 10800 mm x 16200 mm olarak ölçülendirilmiştir. Şekil 6.5’de gösterildiği gibi 90000 elementten sonra çözümleme kalitesi giderek birbirine yakın çıkmaktadır. 50000 elementte ise element sayısının çözümü etkilediği gözlemlenmiştir Mao ve Tian (2015)’in yapmış olduğu çalışma ile benzer sonuçlar elde edilmiştir ve sayısal analiz yapılarak sistemin boyuttan ve elementten bağımsızlığı elde edilmiş olmaktadır.

ANSYS ’e etki eden parametrelerin analizi yapıldıktan sonra Savonius rüzgar çarkı için sonuçların doğru olup olmadığını görmek amacıyla Islam ve diğ. (1993)’nin deneysel olarak yaptıkları çalışma ile sayısal analiz sonuçları Bölüm 6.2 ‘de karşılaştırılmıştır.

Boyutlandırmalar	Çözümler
24000 mm x 36000 mm	
10800 mm x 16200 mm	
6000 mm x 9000 mm	
3000 mm x 6000 mm	

Şekil 6.4. Boyutlandırmalar değiştirilerek sistemin uygun boyutlarının çözülmesi

Element Sayısı	Sistem Çözümü
50.000	
90.000	
125.000	
500.000	

Şekil 6.5. Element sayısına bağlı olarak sistem çözümlemesinin yapılması

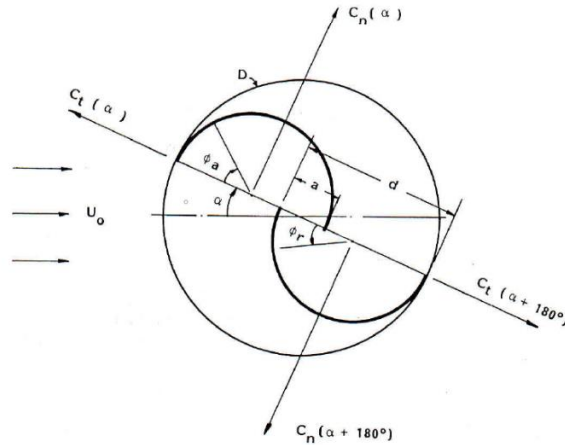
6.2. Savonius Çarkların Sayısal Analiz ile Doğruluğunun İspatlanması

Islam ve diğ. (1993), tarafından yapılan deneysel çalışmada statik durumdaki Savonius çarkın aerodinamik performansı incelenmiştir. Burada amaç, statik durumdaki Savonius çarkı rüzgar giriş hızı 13,3 m/s olduğunda her 15 derece için 0° ile 180° arasında normal sürüklenme kuvveti (F_n) ve teğetsel sürüklenme kuvveti (F_t) parametrelerini sayısal olarak elde etmektir (Şekil 6.7). Elde edilen F_n ve F_t parametrelerinden C_n ve C_t değerleri Denklem (6.1) ve (6.2)'den hesaplanarak normal sürüklenme katsayısı (C_n) ve teğetsel sürüklenme katsayısı (C_t), Islam ve diğ. (1993) 'nin yapmış olduğu çalışma ile kıyaslanarak ve uç profili ekleyerek sisteme etkisini incelemektir.

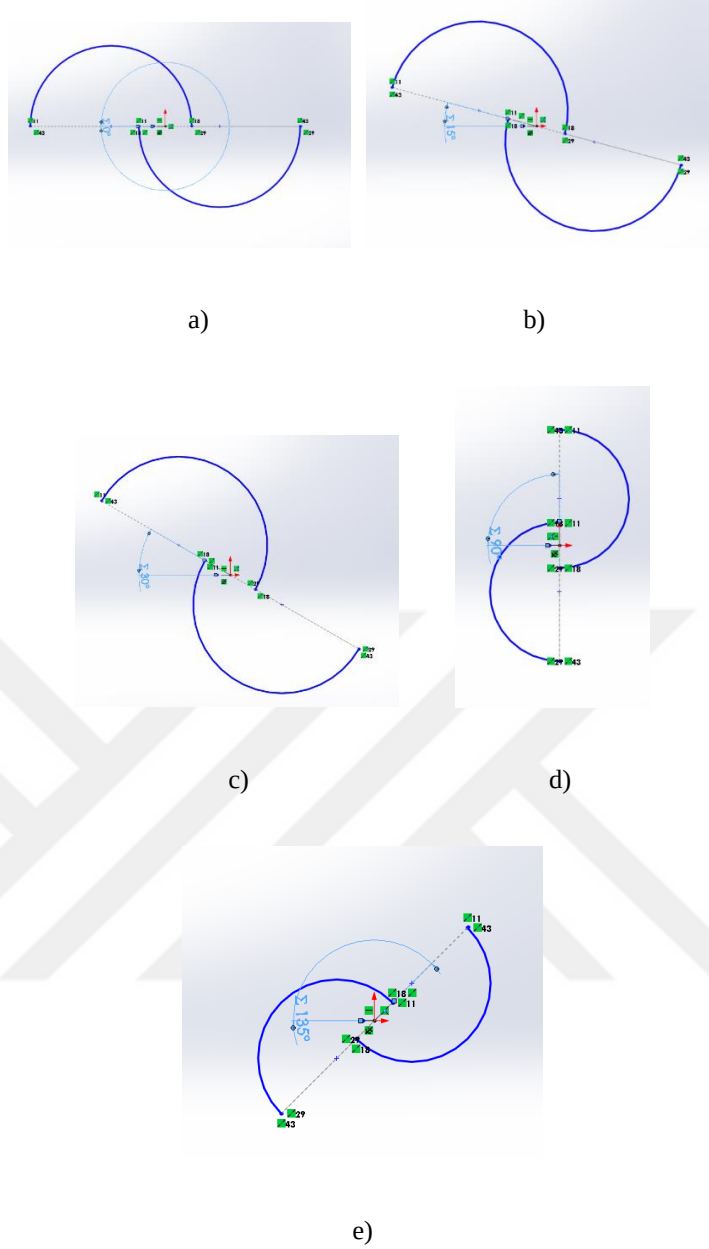
Yapılan çalışmada Tablo 6.1 kullanılarak hesaplanan Savonius çark değerleri Tablo 6.2'de gösterildiği gibidir. Şekil 6.6'da normal sürüklenme katsayısı (C_n) ve teğetsel sürüklenme katsayısı (C_t) değerlerinin Savonius rüzgar çarkı üzerindeki doğrultuları gösterilmiştir. Yapılan çalışmada her 30° için sayısal çözümleme yapılmıştır. C_n ve C_t denklemleri Islam ve diğ. (1993)'nin yapmış olduğu çalışmadan alınmış bulunmaktadır. Bu denklemler statik durumdaki Savonius rüzgar çarkındaki sürüklenme katsayılarını hesaplamak için alınan denklemlerdir. Normal sürüklenme katsayısı, güç katsayısını ($C_n \approx C_p$) ifade etmektedir.

$$C_n = \frac{F_n \cdot 2}{U \cdot U \cdot d \cdot \rho} \quad (6.1)$$

$$C_t = \frac{F_t \cdot 2}{U \cdot U \cdot d \cdot \rho} \quad (6.2)$$



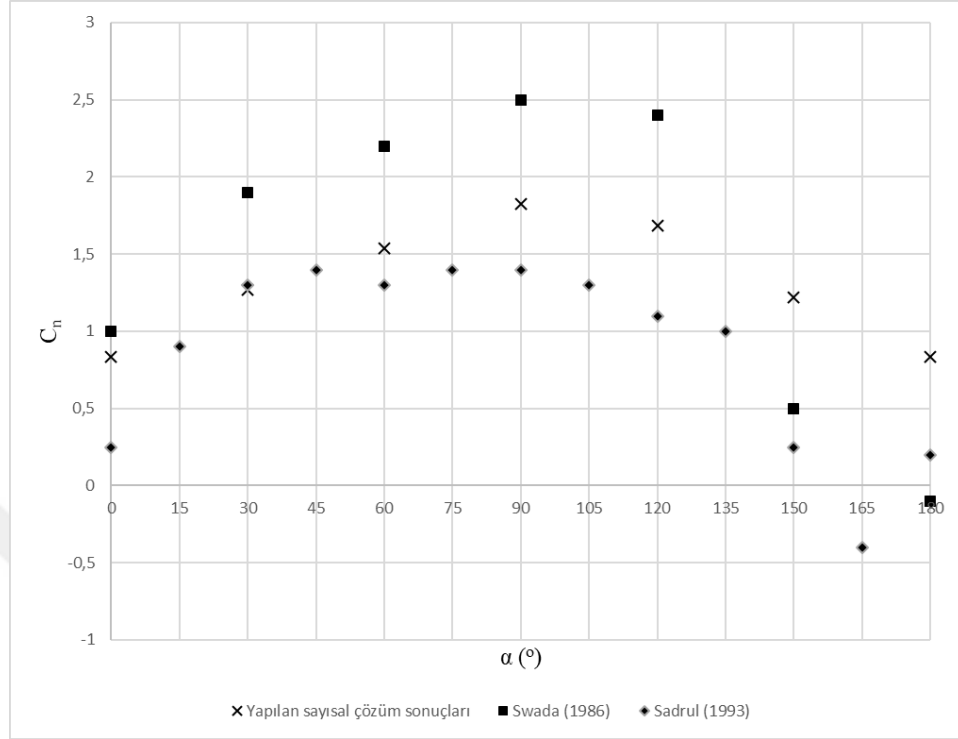
Şekil 6.6. C_n ve C_t parametrelerinin gösterimi (Mao ve Tian, 2015)



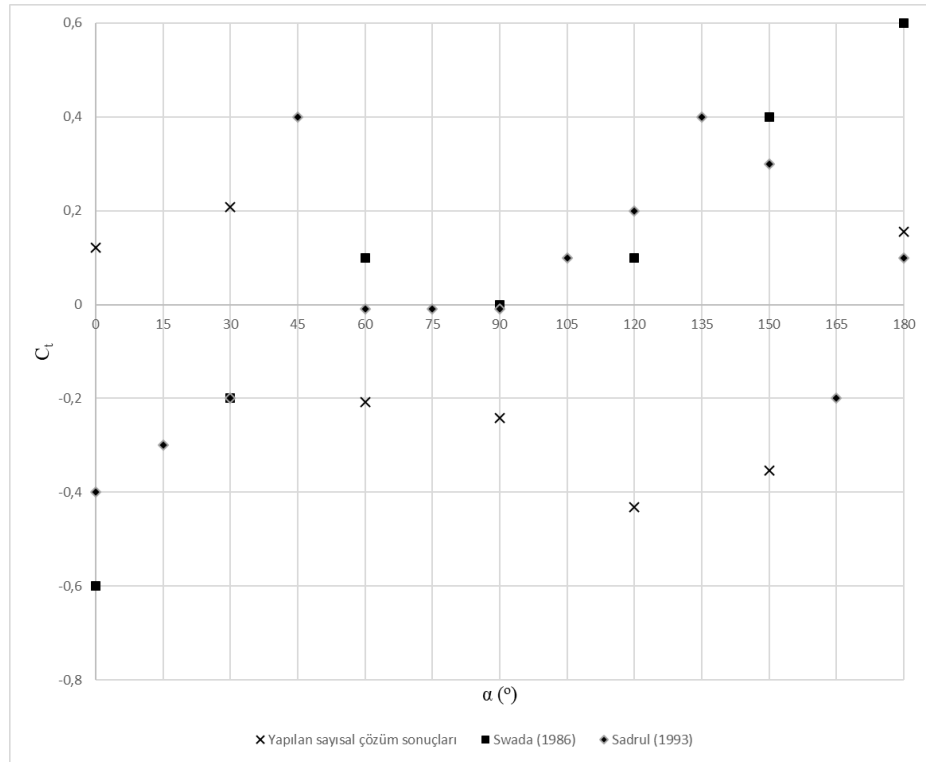
Şekil 6.7 Savonius rüzgar çarkının dönme açısına göre gösterimi a) 0° b) 15° c) 30° d) 90° e) 135°

Tablo 6.2’de hesaplanan Savonius rüzgar türbini parametreleri ile sonuca ulaşılmıştır. Bu çözümler her 30 derecelik değişim için statik durumda 0 ile 180 derece aralığındadır. Giriş hızı 13,3 m/s’dir. F_n ve F_t değerleri sayısal çözümleme ile bulunmuş, C_n ve C_t değerleri ise programda Denklem (6.1) ve (6.2) vasıtasıyla hesaplatılmıştır. Sayısal çözümler sonucunda elde edilen değerler Şekil 6.8 ve 6.9’da gösterilmiştir. Sonuçlar, Islam ve diğ. (1993) ve Sawada (1986) tarafından yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.8 de gösterildiği gibi yapılan sayısal çözümler ile elde edilen sonuçlar Islam ve diğ. (1993) ve Sawada

(1986)'nın deneysel sonuçları ile uyum gösterdiği elde edilmektedir. Bu sonuçlar yapılan çalışmada elde edilen sayısal sonuçların doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 6.8. α (°)'e göre C_n değerlerinin değişimi



Şekil 6.9. α (°) 'e göre C_t değerlerinin değişimi

Bu deneysel çalışma sonuçları ile yapılan sayısal analiz sonucunun çok yakın olduğu Şekil 6.8 ve 6.9 da görülmektedir.

Sonuçların doğruluğu kabul edilip Tablo 6.2’de verilen değerler için güç hesapları yapılmıştır. Bu hesaplar uç profili geliştirilmiş Savonius çarklar ile kıyaslanmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi, sayısal çözümleme sonucu bulunan F_n değeri kullanılarak hesaplanan C_n değeri ile güç hesabı yapılmıştır.

Örnek olarak 0° için Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda;

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$A = \text{Süpürme alanı (m}^2\text{)} = D \times H = 0,818 \times 0,818 = 0,669 \text{ m}^2$$

$$C_n = 0,833409774$$

$$V = 13,3 \text{ m/s}$$

$$P_{opt} = \frac{2}{27} \cdot (1,225) \cdot (0,833409774) \cdot (0,669) \cdot 13,3^3$$

$$P_{opt} = 119,0276 \text{ W güç elde edilmiştir.}$$

Hesaplanan her bir açı için sonuçlar benzer olarak hesaplanmış ve Tablo 6.3 de gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan optimum güç değerleri

Derece	Güç (W)
0	119,0276
30	181,1653
60	219,6228
90	260,5746
120	240,4557
150	174,4012
180	119,474
Ortalama	187,82

Klasik Savonius rüzgar çarkı için hesaplanan güçlerin ortalaması 187,82 W olmaktadır.

6.3. Uç Profili Geliştirilmiş Savonius Çarkların Güç Hesaplamalarının Yapılması

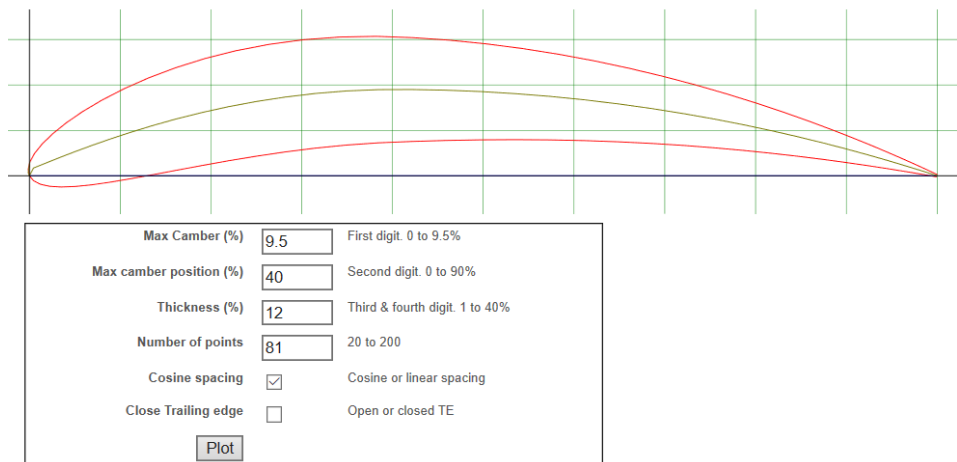
Klasik Savonius rüzgar çarkını geliştirmek ve ürettiği gücü arttırmak için 3 farklı NACA kodu seçilmiştir. Kodlar, 3 farklı kanat kalınlığına sahip olmaktadır. NACA AIRFOIL 'ler bütün profillerde boyutlar aynı kalacak şekilde klasik Savonius rüzgar çarkına eklenmiştir. Bu uç profilleri ile üretilen gücün ve performansın artması hedeflenmektedir. Seçilmiş olan 3 farklı NACA kodu şu şekildedir;

- 1- NACA 9412 AIRFOIL
- 2- NACA 9430 AIRFOIL
- 3- NACA 6515 AIRFOIL

Bu 3 profil içinde tasarım ve hesaplamalar yapılmıştır ve karşılaştırılmıştır.

6.3.1. NACA 9412 AIRFOIL Kodu ile Geliştirilmiş Uç Profilinin Güç Hesabı

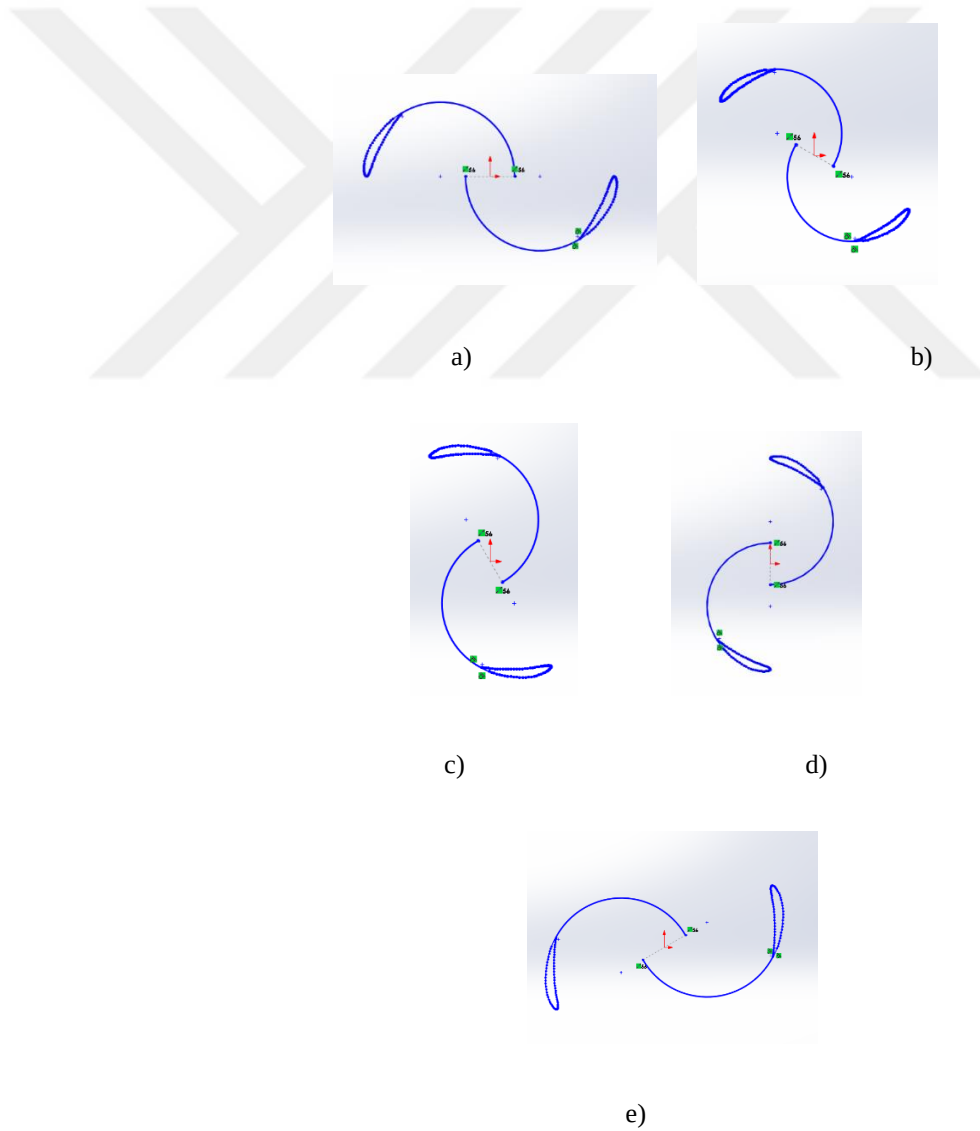
NACA 9412 AIRFOIL kodu Şekil 6.10'daki gibidir.



Şekil 6.10. NACA 9412 AIRFOIL kodu

Bu kod NACA 'nın koordinatlarını vermektedir. Burada statik durumdaki uç profili geliştirilmiş Savonius çarkı rüzgar giriş hızı 13,3 m/s olduğunda her 30 derecelik değişim için 0° ile 180° arasında F_n ve F_t parametreleri sayısal olarak elde edilmiştir (Şekil 6.11). Daha sonra buradan her bir F_n ve F_t parametreleri C_n ve C_t değerleri Denklem (6.1) ve (6.2)'den hesaplanarak elde edilen değerler Şekil 6.12 'de gösterilmiştir. Boyutlandırmalar klasik uçlu Savonius çark boyutlandırmalarıyla aynıdır. Sadece uç profili eklenmiştir.

ANSYS ile elde edilen değerler Tablo 6.4'de gösterildiği gibidir. Burada NACA 9412 ile elde edilen değerleri tablo halinde gösterilmiştir. C_n ve C_t değerleri programa Denklem (6.1) ve (6.2) vasıtasıyla hesaplatılmıştır.

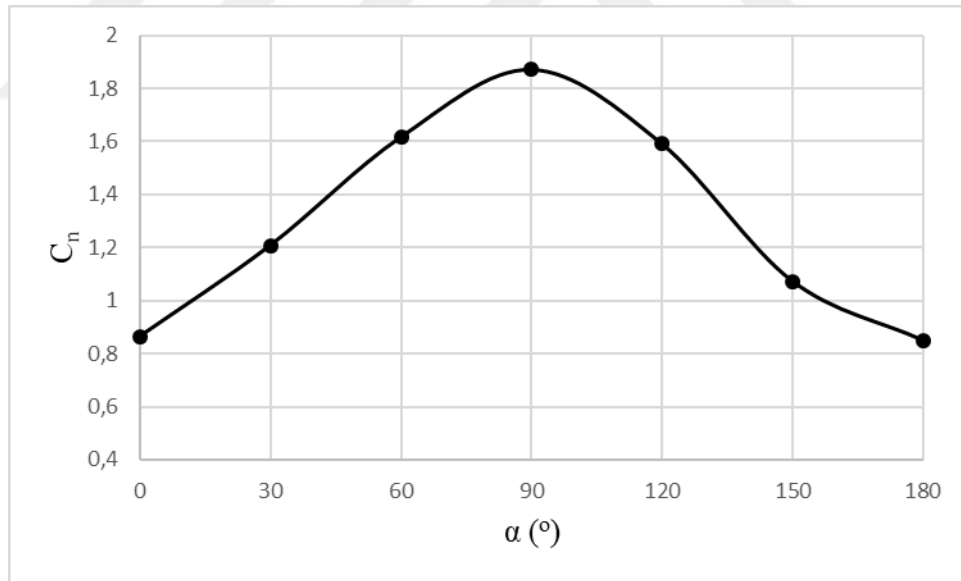


Şekil 6.11. Uç profili NACA 9412 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini gösterimi a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° e) 150°

Tablo 6.4. Farklı dönme açıları için NACA 9412 ile hesaplanan değerler

Derece	F_t (N)	F_n (N)	C_t	C_n
0	11,2472	45,9442	0,211414	0,863612
30	11,8807	64,2512	0,223322	1,20773
60	19,7301	86,0172	0,370866	1,61686
90	-24,1073	99,6284	-0,45315	1,87271
120	-38,7559	84,7188	-0,7285	1,59246
150	-13,3324	57,0893	-0,25061	1,07311
180	11,2338	45,1779	0,211162	0,849208

Şekil 6.12 'de NACA 9412 AIRFOIL'ın α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Çark kanatları 0 dereceden 90 dereceye kadar rüzgarı alma eğiliminde olduğu için normal sürüklenme katsayısı 90 dereceye kadar artmaktadır. 90 dereceden sonra çark kanatlarının rüzgar alma potansiyeli düştüğü için normal sürüklenme katsayısı değeri azalmaktadır.



Şekil 6.12. NACA 9412'nin α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi

Tablo 6.2'de verilen değerler için güç hesapları yapılmıştır. C_n değeri Tablo 6.4 de gösterilen 0 dereceden alınmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi, sayısal çözümleme sonucu bulunan F_n değeri kullanılarak hesaplanan C_n değeri ile güç hesabı yapılmıştır. Denklem (5.17) de değerler yerine konularak benzer olarak hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplanan her bir açı için sonuçlar benzer olarak hesaplanmış ve Tablo 6.5 ‘de gösterilmiştir.

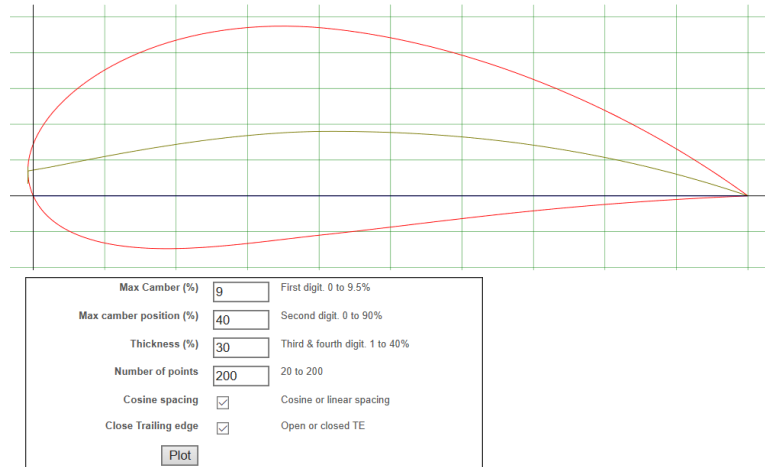
Tablo 6.5. Uç profili NACA 9412 ile geliştirilmiş Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan güç değerleri

Derece	Güç (W)
0	123,3411
30	172,488
60	230,9199
90	267,4604
120	227,4351
150	153,2616
180	121,2839
Ortalama	185,2

Uç profili NACA 9412 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı için hesaplanan güçlerin ortalaması 185,2 W olmaktadır.

6.3.2. NACA 9430 AIRFOIL Kodu ile Geliştirilmiş Uç Profilinin Güç Hesabı

NACA 9430 AIRFOIL kodu Şekil 6.13’deki gibidir.

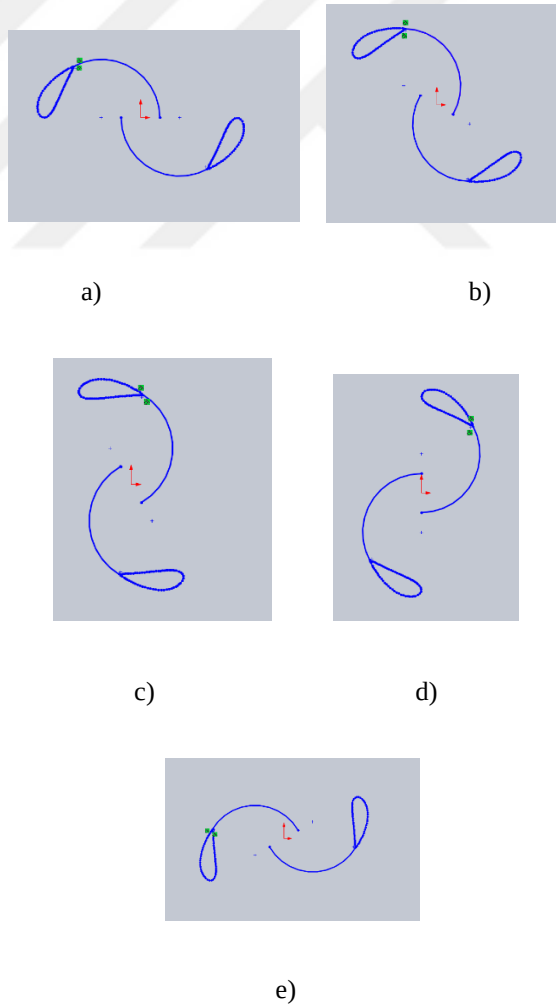


Şekil 6.13. NACA 9430 AIRFOIL kodu

Bu kod NACA ’nın koordinatlarını vermektedir. Burada statik durumdaki uç profili geliştirilmiş Savonius çarkı rüzgar giriş hızı 13,3 m/s olduğunda her 30

derecelik değişim için 0° ile 180° arasında F_n ve F_t parametreleri sayısal olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.14). Daha sonra buradan her bir F_n ve F_t parametreleri ile C_n ve C_t değerleri Denklem (6.1) ve (6.2)'den hesaplanarak elde edilen değerler Şekil 6.15 'de gösterilmiştir. Boyutlandırmalar klasik uçlu Savonius çark boyutlandırmalarıyla aynıdır. Sadece uç profili eklenmiştir.

Elde edilen değerler Tablo 6.6'da gösterildiği gibidir. Burada NACA 9430 ile elde edilen değerleri tablo halinde gösterilmiştir. C_n ve C_t değerleri programa Denklem (6.1) ve (6.2) vasıtasıyla hesaplatılmıştır. Tablo 6.2'de verilen değerler için güç hesapları yapılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi, sayısal çözümleme sonucu bulunan F_n değeri kullanılarak hesaplanan C_n değeri ile güç hesabı yapılmıştır. Denklem (5.17)'de değerler yerine konularak benzer olarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplanan her bir açı için sonuçlar benzer olarak hesaplanmış ve Tablo 6.7 de gösterilmiştir.

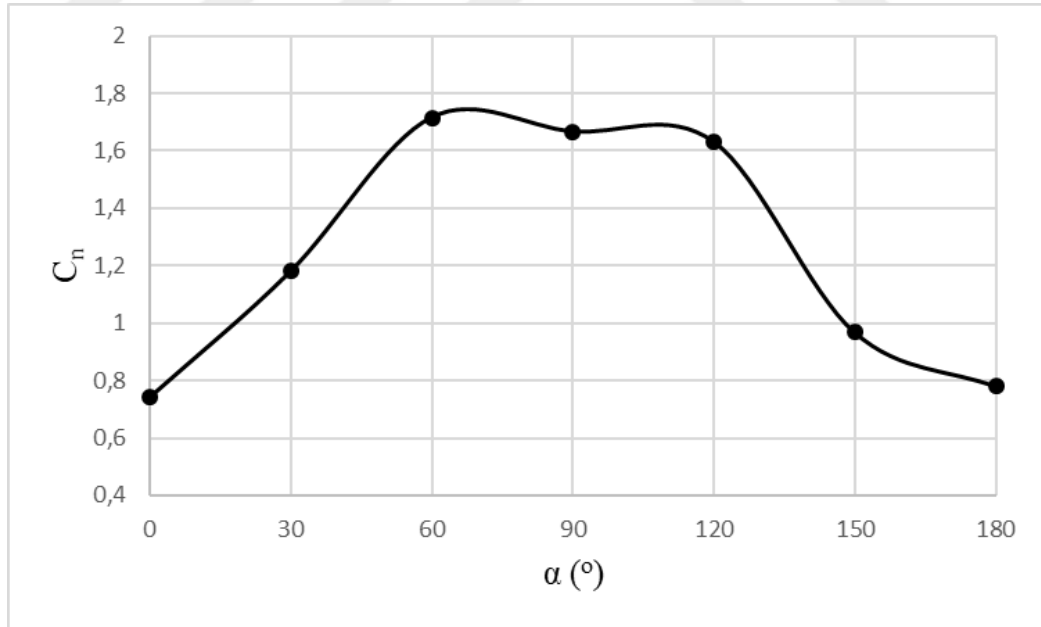


Şekil 6.14. Uç profili NACA 9430 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini gösterimi a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° e) 150°

Tablo 6.6. Farklı dönme açıları için NACA 9430 ile hesaplanan değerler

Derece	F_t (N)	F_n (N)	C_t	C_n
0	11,525	39,4427	0,21664	0,7414
30	8,101	62,7785	0,15227	1,18005
60	30,1649	91,2706	0,56701	1,71561
90	-13,448	88,6989	-0,2528	1,66727
120	-10,141	86,7903	-0,1906	1,6314
150	-9,2929	51,5	-0,1747	0,96805
180	12,3643	41,4773	0,23241	0,77965

Şekil 6.15 'de NACA 9430 AIRFOIL'ın α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Çark kanatları 0 dereceden 60 dereceye kadar rüzgarı alma eğiliminde olduğu için normal sürüklenme katsayısı 60 dereceye kadar artmaktadır. 90 derecedeyse kanat uç kalınlığı fazla olduğu için sürüklenme katsayısında azalma gözlemlendiği söylenebilir. 120 dereceden sonra çark kanatlarının rüzgar alma potansiyeli düştüğü için normal sürüklenme katsayısı değeri azalmaktadır.



Şekil 6.15. NACA 9430'un α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi

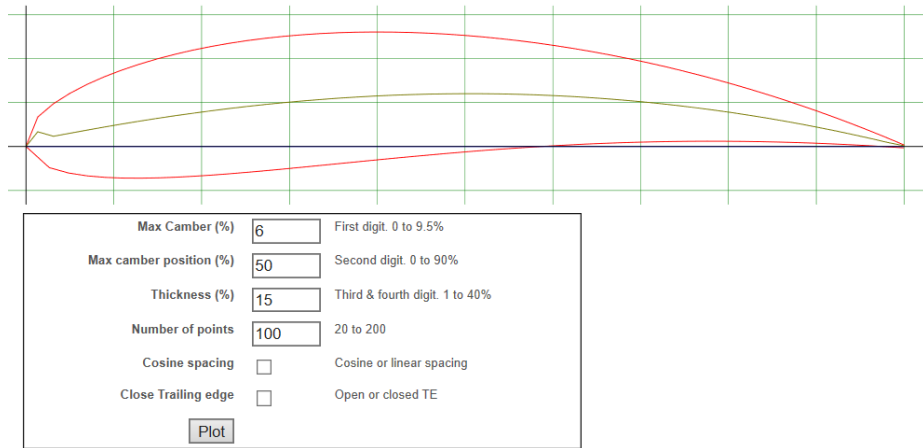
Tablo 6.7. Uç profili NACA 9430 ile geliştirilmiş Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan güç değerleri

Derece	Güç (W)
0	105,8872
30	168,5347
60	245,0234
90	238,1195
120	232,9965
150	138,2562
180	111,3495
Ortalama	177,2

Uç profili NACA 9430 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı için hesaplanan güçlerin ortalaması 177,2 W olmaktadır.

6.3.3. NACA 6515 AIRFOIL Kodu ile Geliştirilmiş Uç Profilinin Güç Hesabı

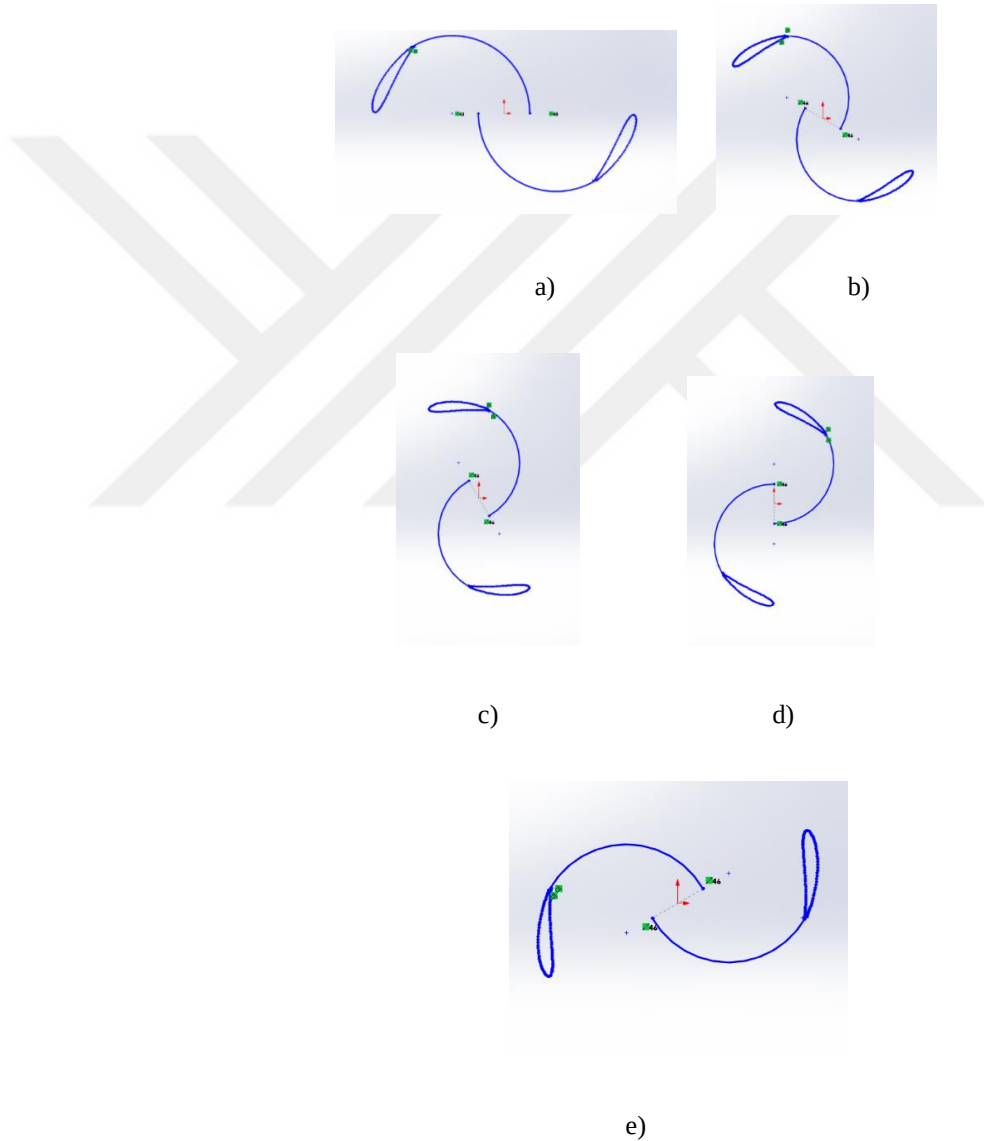
NACA 6515 AIRFOIL kodu Şekil 6.16'daki gibidir.



Şekil 6.16. NACA 6515 AIRFOIL kodu

Bu kod NACA 'nın koordinatlarını vermektedir. Burada statik durumdaki uç profili geliştirilmiş Savonius çarkı rüzgar giriş hızı 13,3 m/s olduğunda her 30 derece için 0° ile 180° arasında F_n ve F_t parametreleri sayısal olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.17). Daha sonra buradan her bir F_n ve F_t parametreleri ve C_n ve C_t değerleri Denklem

(6.1) ve (6.2)'dan hesaplanarak elde edilen değerler Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Boyutlandırmalar klasik uçlu Savonius çark boyutlandırmalarıyla aynıdır. Sadece uç profili eklenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 6.8'de gösterildiği gibidir. C_n ve C_t değerleri programa Denklem (6.1) ve (6.2) vasıtasıyla hesaplatılmıştır. Tablo 6.2'de verilen değerler için güç hesapları yapılmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi, sayısal çözümleme sonucu bulunan F_n değeri kullanılarak hesaplanan C_n değeri ile güç hesabı yapılmıştır. Denklem (5.17) de değerler yerine konularak benzer olarak hesaplamalar yapılmıştır.

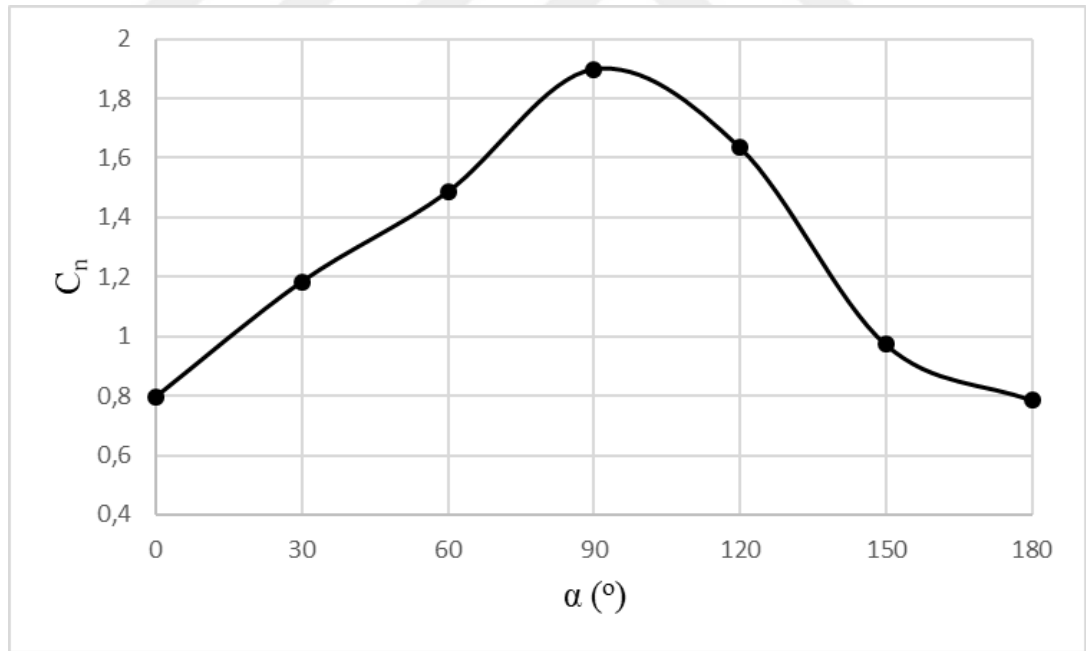


Şekil 6.17. Uç profili NACA 6515 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbini gösterimi a) 0° b) 30° c) 60° d) 90° e) 150°

Tablo 6.8. Farklı dönme açıları için NACA 6515 ile hesaplanan değerler

Derece	F_t (N)	F_n (N)	C_t	C_n
0	8,86179	42,4026	0,166575	0,797042
30	14,164	62,996	0,26624	1,1841
60	6,94791	79,0779	0,1306	1,48643
90	-16,9861	101,015	-0,31929	1,89878
120	-36,0983	87,0554	-0,67854	1,63638
150	-7,4935	51,7678	-0,14086	0,973078
180	10,0501	41,7645	0,188912	0,785046

Şekil 6.18 'de NACA 6515 AIRFOIL'ın α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Çark kanatları 0 dereceden 90 dereceye kadar rüzgarı alma eğiliminde olduğu için normal sürüklenme katsayısı 90 dereceye kadar artmaktadır. 90 dereceden sonra çark kanatlarının rüzgar alma potansiyeli düştüğü için normal sürüklenme katsayısı değeri azalmaktadır.



Şekil 6.18. NACA 6515'in α ($^\circ$) 'e göre C_n değerlerinin değişimi

Hesaplanan her bir açı için sonuçlar benzer olarak hesaplanmış ve Tablo 6.9 da gösterilmiştir.

Tablo 6.9. Uç profili NACA 6515 ile geliştirilmiş Savonius çarkın statik durumdayken her bir dönme açısı için hesaplanan güç değerleri

Derece	Güç (W)
0	113,8335
30	169,1132
60	212,2919
90	271,1838
120	233,7078
150	138,975
180	112,1203
Ortalama	178,75

Uç profili NACA 6515 ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı için hesaplanan güçlerin ortalaması 178,75 W olmaktadır.

6.4. Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Karşılaştırılması

Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri için C_t , C_n ve güç değerleri karşılaştırılmıştır.

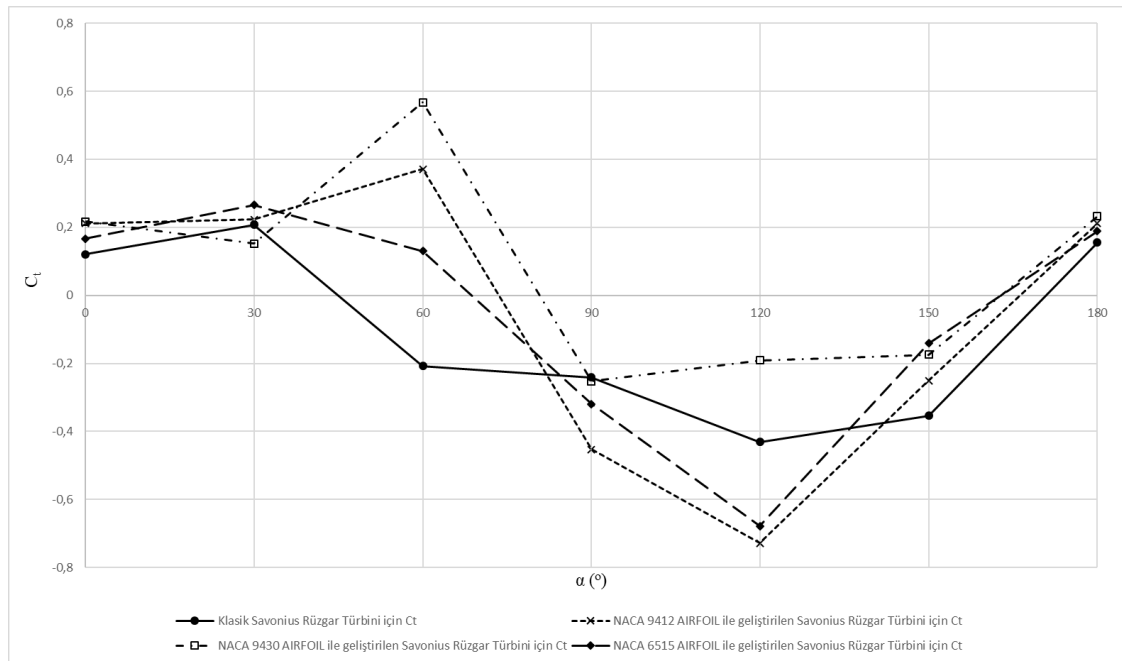
Tablo 6.10, 11 ve 12’de klasik ve uç profili geliştirilmiş Savonius rüzgar türbinleri sırasıyla C_t , C_n ve güç ile değişimleri Şekil 6.19, 20 ve 21 ‘de gösterilmektedir.

Tablo 6.10’ da verilen değerlerin C_t ile değişimleri Şekil 6.19’da gösterildiği gibidir. Tablo 6.10’ da elde edilen C_t değerleri karşılaştırıldığında geliştirilen uç profillerinde birçok dönme derecesinde klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha yüksek teğetsel yöndeki sürüklenme katsayısına (C_t) sahip olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 6.19’da görüldüğü üzere NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius rüzgar çarkı için elde edilen C_t değerleri klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha yüksektir. NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbininden sonra en fazla C_t değerleri NACA 9430 AIRFOIL için elde edilen C_t değerleri olduğu gözlemlenmektedir. NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbininden sonra ise en fazla C_t değerleri NACA 6515 AIRFOIL için elde edilen C_t

değerleri olduğu gözlemlenmektedir. Böylelikle klasik Savonius rüzgar türbininden daha yüksek C_t değerlerinin geliştirilmiş Savonius çarklarda elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 6.10. Klasik Savonius rüzgar türbini ile geliştirilmiş uç profilli rüzgar türbinlerinin C_t yönünden karşılaştırmaları

Derece	Klasik Savonius Rüzgar Türbini için C_t	NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için C_t	NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için C_t	NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için C_t
0	0,120835	0,211414	0,21664	0,166575
30	0,207235	0,223322	0,15227	0,26624
60	-0,20827	0,370866	0,56701	0,1306
90	-0,24147	-0,45315	-0,2528	-0,31929
120	-0,4308	-0,7285	-0,1906	-0,67854
150	-0,35422	-0,25061	-0,1747	-0,14086
180	0,155167	0,211162	0,23241	0,188912



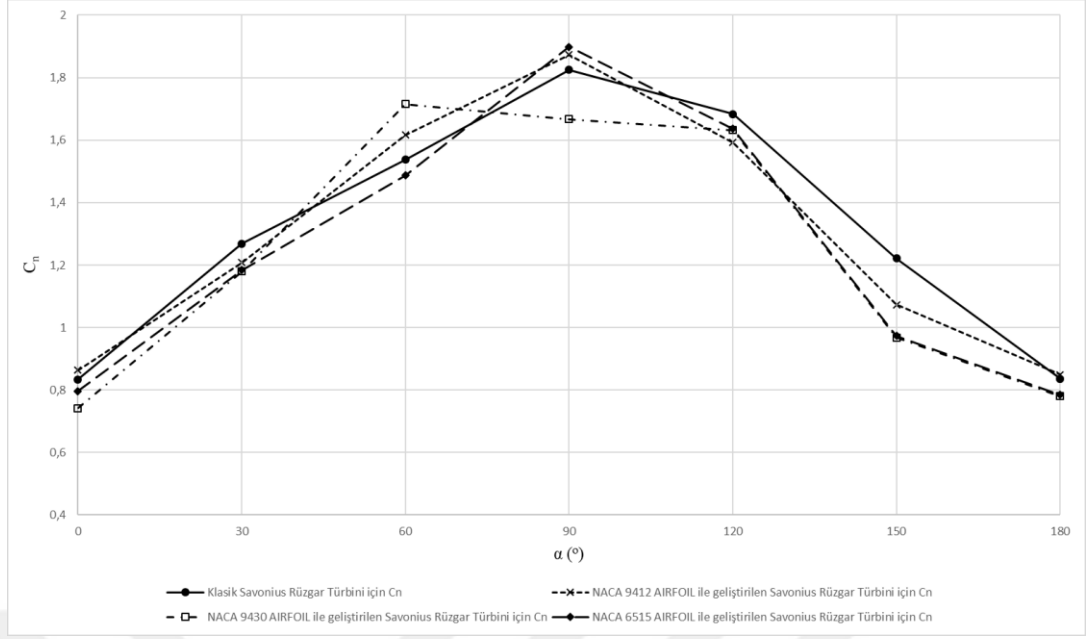
Şekil 6.19. Farklı rüzgar türbinleri için C_t 'nin α (°) ile değişimi.

Tablo 6.11’ de verilen değerlerin C_n ile değişimleri Şekil 6.20’de gösterildiği gibidir. Tablo 6.11’ de elde edilen C_n değerleri karşılaştırıldığında, geliştirilen uç profillerinde farklı dönme derecelerinde, klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha yüksek normal yöndeki sürüklenme katsayılarının (C_n) elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 6.11 Klasik Savonius rüzgar türbini ile geliştirilmiş uç profilli rüzgar türbinlerinin C_n yönünden karşılaştırmaları

Derece	Klasik Savonius Rüzgar Türbini için C_n	NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için C_n	NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için C_n	NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için C_n
0	0,83341	0,863612	0,7414	0,797042
30	1,268487	1,20773	1,18005	1,1841
60	1,537759	1,61686	1,71561	1,48643
90	1,824496	1,87271	1,66727	1,89878
120	1,683628	1,59246	1,6314	1,63638
150	1,221126	1,07311	0,96805	0,973078
180	0,836536	0,849208	0,77965	0,785046

Şekil 6.20’de görüldüğü üzere NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius rüzgar çarkı için elde edilen C_n değerleri klasik Savonius rüzgar türbinine en yakındır. NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbininden sonra en yüksek C_n değerleri NACA 6515 AIRFOIL için elde edilmiş C_n değerleri olduğu gözlemlenmektedir. NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbininden sonra ise en fazla C_n değerleri NACA 9430 AIRFOIL için elde edilmiş C_n değerleri olduğu gözlemlenmektedir. Klasik Savonius rüzgar türbininin çoğunlukla en yüksek değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.20. Farklı rüzgar türbinleri için C_n 'nin α (°) ile değişimi.

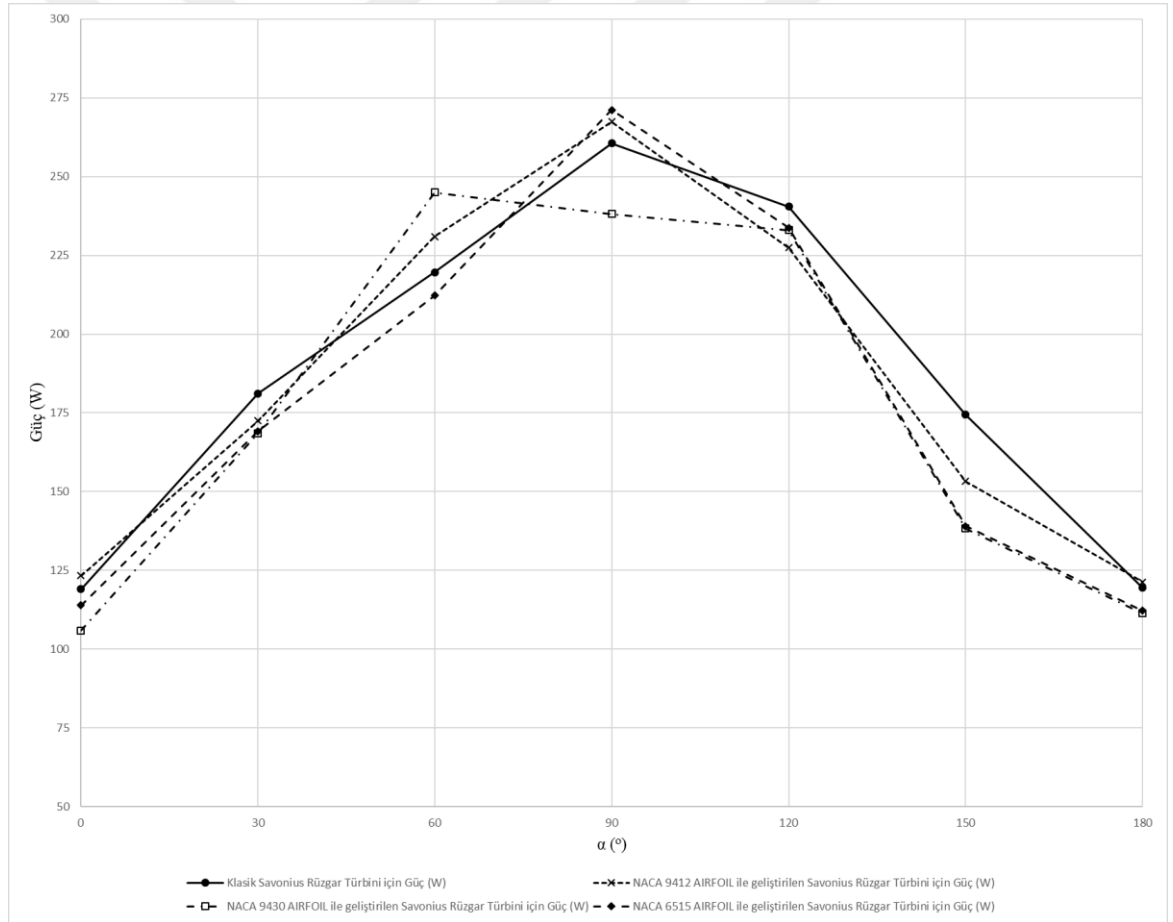
Tablo 6.12' de verilen değerlerin güç ile değişimleri Şekil 6.21'de gösterildiği gibidir. Tablo 6.12' de elde edilen güç değerleri karşılaştırıldığında, geliştirilen uç profillerinde farklı dönme derecelerinde, klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha yüksek güçlerin elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 6.12. Klasik ve kanat ucu geliştirilmiş rüzgar türbinlerinin farklı dönme açılarındaki güç değerlerinin karşılaştırılması

Derece	Klasik Savonius Rüzgar Türbini için Güç (W)	NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için Güç (W)	NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için Güç (W)	NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius Rüzgar Türbini için Güç (W)
0	119,0276	123,3411	105,8872	113,8335
30	181,1653	172,488	168,5347	169,1132
60	219,6228	230,9199	245,0234	212,2919
90	260,5746	267,4604	238,1195	271,1838
120	240,4557	227,4351	232,9965	233,7078
150	174,4012	153,2616	138,2562	138,975
180	119,474	121,2839	111,3495	112,1203

Şekil 6.21’de klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar türbinlerinin güç değerleri her 30 derecelik değişim için 0 ile 180 derece aralığında karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.21’de görüldüğü üzere NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilen Savonius rüzgar türbini, geliştirilen diğer profillere göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir. NACA 9412 AIRFOIL ’in 0, 60, 90 ve 180 derecedeki çark konumlandırmalarında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç ürettiği gözlemlenmiştir. NACA 9430 AIRFOIL ’in 60 derecelik çark konumlandırmasında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç ürettiği gözlemlenmiştir. NACA 6515 AIRFOIL ’in 60 ve 90 derecelik Savonius çark konumlandırmalarında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç ürettiği gözlemlenmiştir. Bu durumda NACA 9412 AIRFOIL ’in diğer geliştirilen uç profillerine göre daha iyi olduğu gözlemlenebilmektedir.



Şekil 6.21. Farklı rüzgar türbinleri için gücün α (°) ile değişimi

6.5. Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Basınç ve Hız Dağılımlarının Karşılaştırılması

Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız ve basınç dağılımları karşılaştırılmıştır. Burada klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkları için her 30 derecelik değişim için 0 dereceden 180 dereceye kadar ANSYS programı kullanılarak, elde edilen basınç ve hız dağılımları gösterilmiştir. Böylelikle basınç ve hızın çark üzerindeki etkileri görülebilir.

6.5.1. Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Basınç Dağılımlarının Karşılaştırılması

Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç dağılımları karşılaştırılmıştır. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarklarında her 30 derecelik değişim için 0 dereceden 180 dereceye kadar ANSYS programı kullanılarak elde edilen basınç değişimleri açıklanmıştır. Böylelikle basıncın çark üzerindeki etkileri gözlemlenebilmektedir. Rüzgarın çarka giriş hızı her bir dönme derecesi için 13,3 m /s'dir. 1 Atm basınçta sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Toplam basınç statik ve dinamik basıncın toplamıdır. Statik basınç atmosfer basıncına bağlıyken, dinamik basınç rüzgar hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Dinamik basınç rüzgar hızı arttıkça artarken, rüzgar hızı azaldıkça da azalmaktadır. Dinamik basınç arttığında statik basınç azalır, dinamik basınç azaldığında ise statik basınç artar bu toplam basıncın sabit bir değer olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Bernoulli enerji korunumu yasasından dolayı meydana gelmektedir.

Şekil 6.22'de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 0 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak basınç değerleri farklılık göstermektedir. Rüzgar çarka sol taraftan gelmektedir. Rüzgarın çarka temas ettiği noktalar durgunluk noktalarıdır. Durgunluk noktaları iç bükey kanadın uç kısmı ve dış bükey kanadın profil kısmı olduğu gözlemlenebilmektedir. Durgunluk noktalarında rüzgar hızı sıfırdır. Hız sıfır olduğundan dolayı dinamik basınç yüksektir. Bu yüzden durgunluk noktalarında yüksek basınç olduğu klasik ve geliştirilmiş Savonius çarklarında Şekil 6.22 de gözlemlenebilmektedir. Hızın sıfır olduğu yerlerde statik basınç vardır. Hızın yüksek

0 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.22. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 0°

olduğu yerlerde ise alçak basınç alanları olduğu gözlemlenmiştir. Çarkın dış yüzeyinin alçak basınca maruz kaldığı gözlemlenmektedir. Alçak basınç bölgelerinde dinamik basınç daha yüksektir. Çarkın içinde oluşan yüksek basınç alanı en fazla NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş olan Savonius rüzgar türbininde görülmektedir. Bu yüzden en yüksek C_n değerine 0 derecelik açıda NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar türbinini sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.23’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 30 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak basınç değerleri farklılık göstermektedir. Rüzgar çarka sol taraftan gelmektedir. Rüzgarın çarka temas ettiği noktalar durgunluk noktalarıdır. Durgunluk noktaları, çark içine hava alma pozisyonunda olduğu için çarkın iç bükey kanadının iç yüzeyi ve dış bükey kanadın dış yüzeyi olduğu gözlemlenebilmektedir. Hız sıfır olduğundan dolayı basınç yüksektir. Hızın düşük olduğu yerlerde yüksek basınç olduğu klasik ve geliştirilmiş Savonius çarklarında Şekil 6.23 de görülebilmektedir. Hız sıfır olduğu yerlerde statik basınç vardır. Hızın yüksek olduğu yerlerde ise alçak basınç alanları olduğu gözlemlenebilmektedir. Çarkın dış yüzeyinin alçak basınca maruz kaldığı gözlemlenmektedir. Alçak basınç bölgelerinde dinamik basınç daha yüksektir. Çarkın içinde oluşan yüksek basınç alanı en fazla klasik Savonius rüzgar türbinini ve NACA 9412’de olduğu gözlemlenmektedir. Çarkların içlerinde oluşan dönel akışlardan dolayı basınç değişimleri gözlemlenmektedir.

Şekil 6.24’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 60 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak basınç değerleri farklılık göstermektedir. Rüzgar çarka sol taraftan gelmektedir. Rüzgarın çarka temas ettiği noktalar durgunluk noktalarıdır. Durgunluk noktaları çark içine hava alma pozisyonunda olduğu için iç bükey kanadın iç yüzeyi ve dış bükey kanadın dış yüzeyi olduğu gözlemlenmektedir. Hız sıfır olduğundan dolayı basınç yüksektir. Çark havayı karşıladığı için iç bükey kanat içerisinde yüksek basınç alanı olduğu gözlemlenmektedir. Oluşan yüksek basınç alanları klasik ve geliştirilmiş Savonius çarklarında Şekil 6.24 de görülebilmektedir. Hızın sıfır olduğu yüksek basınç alanlarında statik basınç vardır. Hızın yüksek olduğu yerlerde ise alçak basınç alanları olduğu gözlemlenebilmektedir. Çarkların uç kanat yüzeylerinin alçak basınca maruz kaldığı gözlemlenmektedir.

30 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.23. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 30°

60 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.24. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 60°

Alçak basınç bölgelerinde dinamik basınç daha yüksektir. Akışın hız kazandığı yerlerde alçak basınç alanları gözlemlenebilmektedir.

Şekil 6.25’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 90 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak basınç değerleri farklılık göstermektedir. Rüzgar çarka sol taraftan gelmektedir. Rüzgarın çarka temas ettiği noktalar durgunluk noktalarıdır. Durgunluk noktaları çark içine hava alma pozisyonunda olduğu için iç bükey kanadın iç yüzeyi ve dış bükey kanadın dış yüzeyi olduğu gözlemlenmektedir. Hız sıfır olduğu için basınç yüksektir. Çark havayı tamamen karşıladığı için iç bükey kanat içerisinde yüksek basınç alanı olduğu gözlemlenebilmektedir. Oluşan yüksek basınç alanları klasik ve geliştirilmiş Savonius çarklarında Şekil 6.25 de görülebilmektedir. Hızın sıfır olduğu yerlerde statik basınç vardır. Hızın yüksek olduğu yerlerde ise alçak basınç alanları olduğu gözlemlenebilmektedir. Çarkın uç kanat yüzeyleri alçak basınca maruz kaldığı gözlemlenebilmektedir. Akışın hız kazandığı yerlerde alçak basınç alanları gözlemlenebilmektedir. Akışın hız kazandığı yerlerde dinamik basınç daha yüksektir.

Şekil 6.26’da gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 120 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak basınç değerleri farklılık göstermektedir. Rüzgar çarka sol taraftan gelmektedir. Rüzgarın çarka temas ettiği noktalar durgunluk noktalarıdır. Durgunluk noktaları çark içine hava alma pozisyonunda olduğu için iç bükey kanadın iç yüzeyi ve dış bükey kanadın dış yüzeyi olduğu gözlemlenmektedir. Çark havayı karşıladığından dolayı iç bükey kanat içerisinde yüksek basınç alanı olduğu gözlemlenebilmektedir. Oluşan yüksek basınç klasik ve geliştirilmiş Savonius çarklarında Şekil 6.26 da görülebilmektedir. Hızın sıfır olduğu yerlerde statik basınç vardır. Hızın yüksek olduğu yerlerde ise alçak basınç alanları oluşmuştur. Hızın yüksek olduğu bölgelerde dinamik basınç daha yüksektir. Alçak basınç alanları 120 derecelik açıda konumlanmış olan çarkların rüzgara engel şeklinde konumlanmış olan iç bükey kanadın iç kısmında olduğu gözlemlenebilmektedir. Dönel akışlardan kaynaklı çark içlerinde basınç farklılıkları gözlemlenebilmektedir. Silindirik yapı, türbülans ve kanat yapılarındaki farklılıklardan dolayı çarkların dışında dönel ard izleri gözlemlenebilmektedir.

90 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.25. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 90 °

120 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.26. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 120°

Şekil 6.27’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 150 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak basınç değerleri farklılık göstermektedir. Rüzgar çarka sol taraftan gelmektedir. Rüzgarın çarka temas ettiği noktalar durgunluk noktalarıdır. Durgunluk noktaları iç bükey kanadın iç yüzeyi ve dış bükey kanadın dış yüzeyi olduğu gözlemlenmektedir. Hız sıfır olduğu için basınç yüksektir. Oluşan yüksek basınç alanları klasik ve geliştirilmiş Savonius çarklarında Şekil 6.27 de görülebilmektedir. Hızın sıfır olduğu yerlerde statik basınç vardır. Hızın yüksek olduğu yerlerde ise alçak basınç alanları oluşmuştur. Hızın yüksek olduğu bölgelerde dinamik basınç daha yüksektir. Akışın hız kazandığı yerlerde dinamik basınç daha yüksektir.

Şekil 6.28’de klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin basınç değişimleri 180 derece için karşılaştırılmıştır. 180 derecede klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarklarının 0 derecedeki basınç dağılımı sonuçları ile benzer sonuçları vermiştir. Benzer sonuçlardan kaynaklı olarak 0 derecedeki basınç dağılımı ile aynı yorumlar yapılabilmektedir.

150 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.27. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 150°

180 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

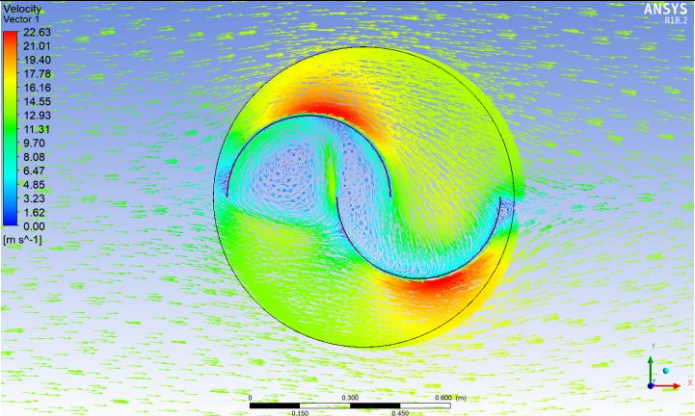
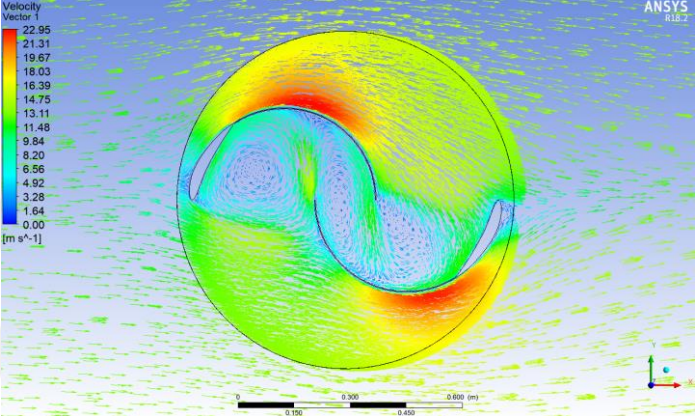
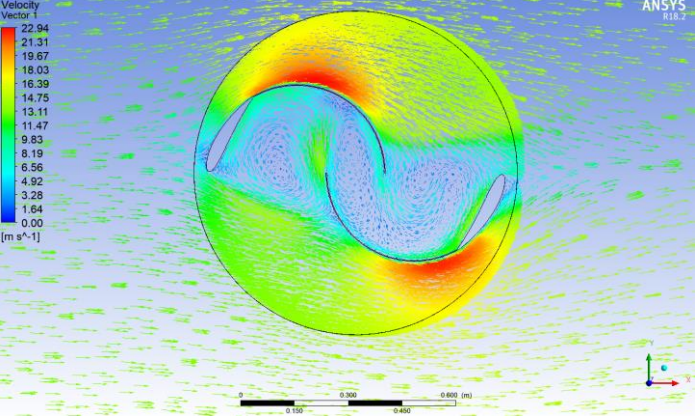
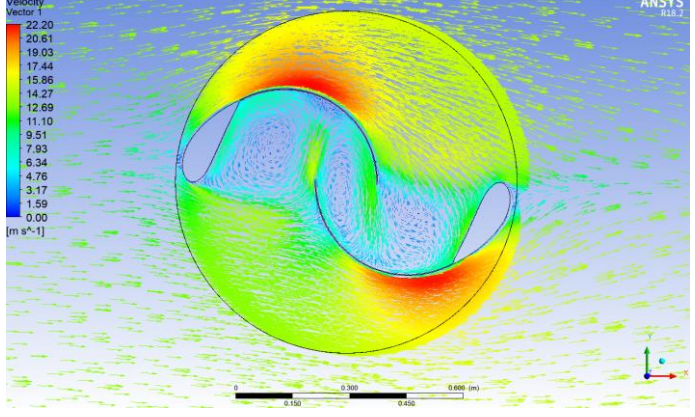
Şekil 6.28. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri basınç dağılımları 180°

6.5.2. Klasik ve Geliştirilmiş Savonius Rüzgar Çarkı Profillerinin Hız Dağılımlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları karşılaştırılmıştır. Burada klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkları her 30 derecelik değişim için 0 dereceden 180 dereceye kadar ANSYS programı kullanılarak çözümlenen hız değişimleri açıklanmıştır. Böylelikle hızın çark üzerindeki etkileri gözlemlenebilmektedir. Rüzgarın çarka giriş hızı her bir dönme derecesi için 13,3 m /s'dir. 1 Atm basınç altında sayısal analiz yapılmıştır.

Şekil 6.29'da gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları 0 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak hız değerleri farklılık göstermektedir. Geliştirilen uç profillerine sahip ve klasik Savonius rüzgar türbini için hız dağılımlarının benzer olduğu gözlemlenmektedir. Çarkların içerisinde kanat yapılarından, silindirik yüzeyden ve türbülانstan kaynaklı olarak dönel akışlar oluşmuştur. Dönel akışların rüzgar hızını düşürdüğü gözlemlenebilmektedir. Rüzgar ilk hıza sahiptir fakat rüzgarın çarptığı noktada hız sıfırdır. Çarkın içerisinde rüzgar hızı dönel akış kaynaklı düştüğü gözlemlenebilmektedir. Çarkın dışına etkiyen yüzeylerde ise rüzgar hızının fazla olduğu görülmektedir. İç bükey kanat içerisindeki dönel akışlar gücü düşürebilmektedir.

Şekil 6.30'da gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları 30 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak hız değerleri farklılık göstermektedir. Geliştirilen uç profillerine sahip ve klasik Savonius rüzgar türbini için hız dağılımlarının benzer olduğu gözlemlenmektedir. Çarkların içerisinde kanat yapılarından, silindirik yüzeyden ve türbülانstan kaynaklı olarak dönel akışlar oluşmuştur. Rüzgar ilk hıza sahiptir fakat rüzgarın çarptığı noktada hız sıfırdır. Çarkın dışına etkiyen yüzeylerde ise rüzgar hızı kazandığı için rüzgar hızının fazla olduğu görülebilmektedir.

0 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.29. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 0 °

30 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.30. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 30°

Şekil 6.31’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları 60 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak hız değerleri farklılık göstermektedir. Geliştirilen uç profillerine sahip ve klasik Savonius rüzgar türbini için hız dağılımlarının benzer olduğu gözlemlenmektedir. Rüzgar ilk hıza sahiptir fakat rüzgarın çarptığı noktada hız sıfırdır. Çarkların içerisinde kanat yapılarından, silindirik yüzeyden ve türbülانstan kaynaklı olarak dönel akışlar oluşmuştur. Dönel akışlardan kaynaklı rüzgar hızı düşmektedir. Kanat uçlarında rüzgar hızı, rüzgar hız kazandığı için fazla olduğu görülebilmektedir.

Şekil 6.32’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları 90 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak hız değerleri farklılık göstermektedir. Burada geliştirilen uç profillerine sahip ve klasik Savonius rüzgar türbini için hız dağılımlarının benzer olduğu gözlemlenmektedir. Rüzgar ilk hıza sahiptir fakat rüzgarın çarptığı noktada hız sıfırdır. Çarkların içerisinde kanat yapılarından, silindirik yüzeyden ve türbülانstan kaynaklı olarak dönel akışlar oluşmuştur. Dönel akışlardan kaynaklı rüzgar hızı düşmektedir. Kanat uçlarında rüzgar hızı, rüzgar hız kazandığı için fazla olduğu görülebilmektedir. Kanat yapıları değişmesine rağmen rüzgar profili geliştirilmiş ve klasik Savonius rüzgar türbininde değişmemiştir. Savonius rüzgar türbinlerinden sonra ard izlerinin oluşmaya başlamasının nedeninin çarkın silindirik yapısı olduğu gözlemlenebilmektedir.

60 derece	Çözümlmeler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.31. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 60 °

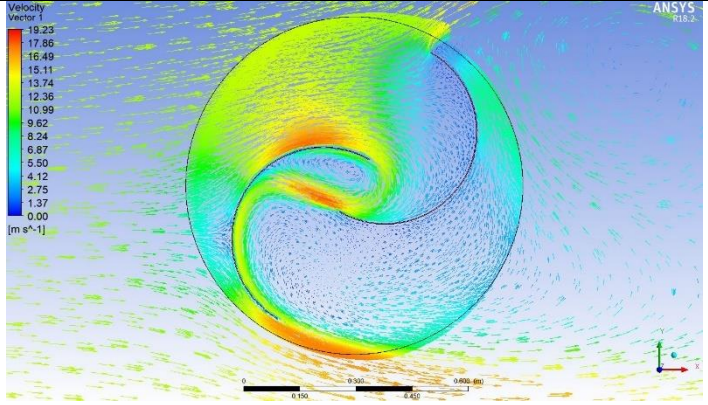
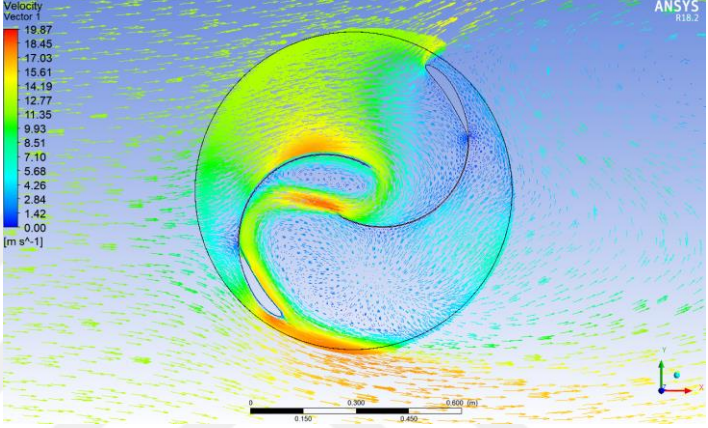
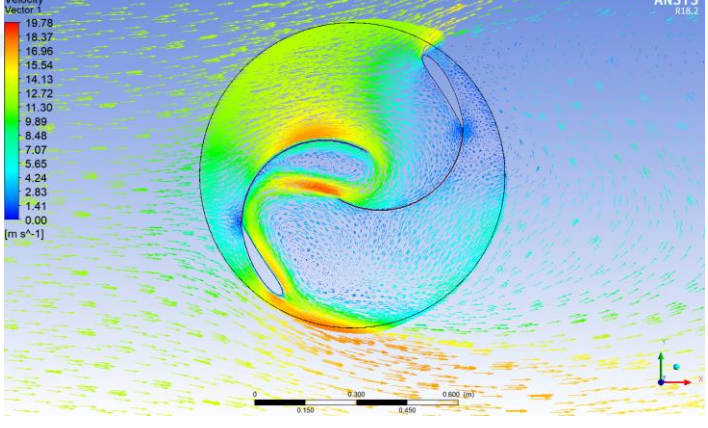
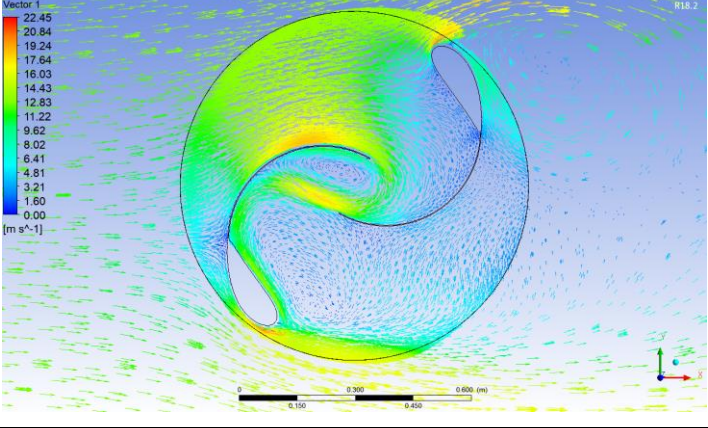
90 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.32. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 90 °

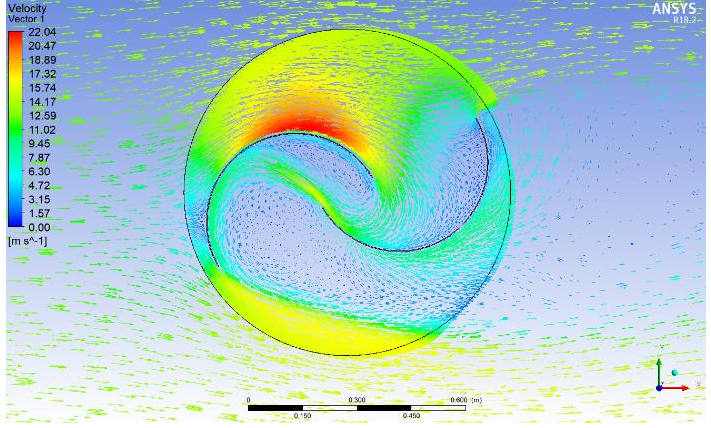
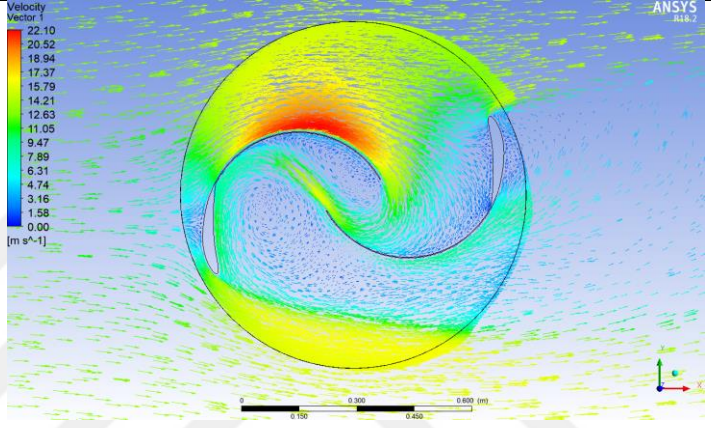
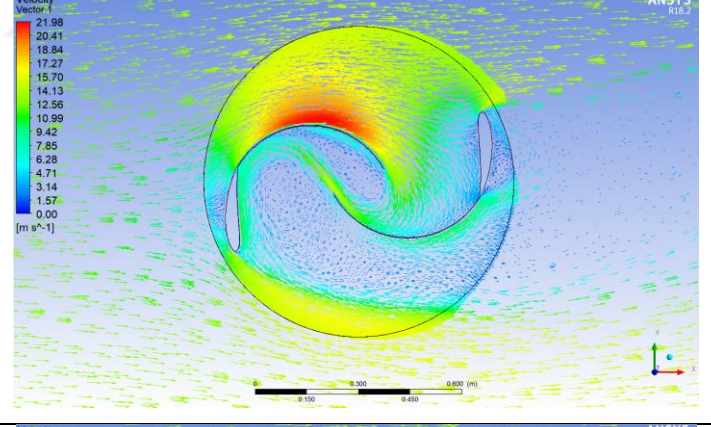
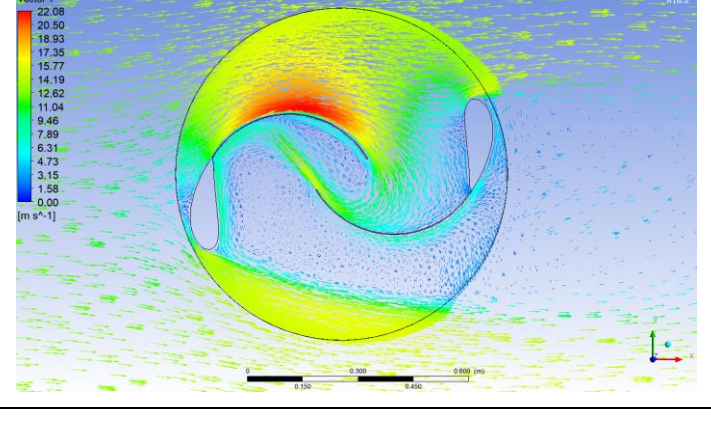
Şekil 6.33’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları 120 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak hız değerleri farklılık göstermektedir. Geliştirilen uç profillerine sahip ve klasik Savonius rüzgar türbini için hız dağılımlarının benzer olduğu gözlemlenmektedir. Rüzgar ilk hıza sahiptir fakat rüzgarın çarptığı noktada hız sıfırdır. Çarkların içerisinde kanat yapılarından, silindirik yüzeyden ve türbülans kaynaklı olarak dönel akışlar oluşmuştur. Dönel akışlardan kaynaklı rüzgar hızı düşmektedir. Kanat uçlarında rüzgar hızı, rüzgar hız kazandığı için fazla olduğu görülebilmektedir. Çarktan sonraki rüzgar hızında düşüş ve kanatlardan sonra çarkın silindirik yapısından kaynaklı olarak ard izleri gözlenmektedir. Kanat yapıları değişmesine rağmen rüzgar profili geliştirilmiş ve klasik Savonius rüzgar türbininde değişmemiştir.

Şekil 6.34’de gösterildiği gibi klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız dağılımları 150 derece için karşılaştırılmıştır. Kanat profillerinden kaynaklı olarak hız değerleri farklılık göstermektedir. Geliştirilen uç profillerine sahip ve klasik Savonius rüzgar türbini için hız dağılımlarının benzer olduğu gözlemlenmektedir. Rüzgar ilk hıza sahiptir fakat rüzgarın çarptığı noktada hız sıfırdır. Çarkların içerisinde kanat yapılarından, silindirik yüzeyden ve türbülans kaynaklı olarak dönel akışlar oluşmuştur. Dönel akışlardan kaynaklı rüzgar hızı düşmektedir. Çarkın dışında rüzgar hızının, rüzgar hız kazandığı için fazla olduğu görülebilmektedir. Çarkın silindirik yapısından kaynaklı olarak ard izleri gözlenmektedir. Kanat yapıları değişmesine rağmen rüzgar profili geliştirilmiş ve klasik Savonius rüzgar türbininde değişmemiştir.

Şekil 6.35’de klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profillerinin hız değişimleri 180 derece için karşılaştırılmıştır. 180 derecede klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarklarının 0 derecedeki hız dağılımı sonuçları ile benzer sonuçları vermiştir. Benzer sonuçlardan kaynaklı olarak 0 derecedeki hız dağılımı ile aynı yorumlar yapılabilir.

120 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.33. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 120 °

150 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.34. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 150 °

180 derece	Çözümler
Klasik Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	
NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius Rüzgar Türbini	

Şekil 6.35. Klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı profilleri hız dağılımları 180 °

7. GELİŞTİRİLMİŞ VE KLASİK SAVONIUS ÇARKLARIN DÖNME AÇILARINA GÖRE FARKLI HIZLAR İÇİN GÜÇ HESABI

Geliştirilmiş ve klasik Savonius çarkların dönme açılarına göre ardışık olarak seçilmiş 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m /s olmak üzere 5 farklı rüzgar hızında geliştirilen uç profillerinin 0 dereceden 180 dereceye kadar her bir 30 derecelik dönme açısında F_n ve F_t değerleri elde edilerek güç hesabı gerçekleştirilmiştir. Her bir dönme açısı için rüzgar hızı arttıkça üretilen güç miktarının artacağı da böylelikle gözlemlenmiş olmaktadır.

7.1. Geliştirilmiş Savonius Çarkların Dönme Açılarına Göre Farklı Hızlar için F_n ve F_t Değerlerinin Hesaplanması

Sırasıyla NACA 9412 AIRFOIL, NACA 9430 AIRFOIL, NACA 6515 AIRFOIL ve klasik Savonius rüzgar çarkları için 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m /s rüzgar hızında çözümler yapılmıştır. Ve böylelikle ardışık olarak seçilen 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m /s hızları için güç hesapları gerçekleştirilmiştir.

NACA 9412 AIRFOIL, NACA 9430 AIRFOIL, NACA 6515 AIRFOIL ve klasik Savonius rüzgar çarkların dönme açılarına göre farklı hızlardaki F_n ve F_t değerleri sayısal analizle elde edilmiştir.

3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s olmak üzere ardışık olarak seçilmiş 5 farklı rüzgar hızında geliştirilen uç profillerinin Tablo 7.1 de gösterildiği gibi 0'dan 180 dereceye kadar NACA 9412 AIRFOIL için 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s hızlarında ANSYS programı kullanılarak F_n ve F_t değerleri elde edilmiştir.

C_n ve C_t değerleri programa Denklem (6.1) ve (6.2) vasıtasıyla hesaplattırılmıştır. Tablo 7.1 de gösterildiği gibi rüzgar hızı arttıkça F_t ve F_n giderek artmaktadır. Tablo 7.1 de gösterildiği gibi normal sürüklenme kuvvetinin (F_n) rüzgar hızı arttıkça arttığı gözlemlenebilmektedir.

Tablo 7.1. Geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkların farklı hızlardaki F_n , F_t , C_n ve C_t 'nin tablo halinde gösterimi

NACA Kodu	Açı	Rüzgar hızı (m/s)											
		3				5				7			
		F_t	F_n	C_t	C_n	F_t	F_n	C_t	C_n	F_t	F_n	C_t	C_n
9412 AIRFOIL	0°	0,88	2,24	0,33	0,83	1,75	5,82	0,23	0,78	2,63	11,31	0,18	0,77
	30°	0,92	3,4	0,34	1,26	2,28	9,35	0,3	1,24	4,55	18,39	0,31	1,24
	60°	1,13	4,12	0,42	1,52	3,54	11,19	0,47	1,49	7,26	21,73	0,49	1,48
	90°	-0,9	5,09	-0,4	1,88	-2,4	15,74	-0,3	2,09	-3,6	28,59	-0,3	1,94
	120°	-1,5	4,73	-0,6	1,75	-3,5	13,03	-0,5	1,73	-4,6	24,9	-0,3	1,69
	150°	-0,6	2,95	-0,2	1,09	-1,3	7,51	-0,2	0,99	-2,7	15,59	-0,2	1,06
9430 AIRFOIL	180°	0,88	2,27	0,32	0,84	1,62	5,93	0,22	0,79	2,42	11,45	0,17	0,78
	0°	0,76	2,08	0,28	0,77	2,15	5,81	0,29	0,77	3,25	11,02	0,22	0,75
	30°	0,71	2,08	0,26	0,77	2,03	5,91	0,27	0,79	3,42	11,56	0,23	0,79
	60°	1,67	4,69	0,62	1,73	3,97	12,7	0,53	1,69	7,93	25,05	0,54	1,70
	90°	-0,2	4,84	-0,1	1,79	-0,5	12,42	-0,1	1,65	-4,3	25,52	-0,3	1,73
	120°	-1,5	4,38	-0,5	1,62	-3,1	11,71	-0,4	1,56	-6,6	23,16	-0,5	1,57
6515 AIRFOIL	150°	-0,5	2,64	-0,2	0,98	-1,6	7,59	-0,2	1	-2,7	14,4	-0,2	0,98
	180°	0,77	2,05	0,29	0,76	1,95	5,37	0,26	0,72	3,21	11,2	0,22	0,76
	0°	0,74	2,22	0,28	0,82	1,79	5,82	0,24	0,77	2,71	11,55	0,18	0,78
	30°	1,29	3,45	0,48	1,27	3,29	9,24	0,44	1,23	6,15	17,70	0,42	1,20
	60°	0,53	4,16	0,19	1,54	1,53	11,03	0,2	1,47	3,44	21,46	0,23	1,46
	90°	-0,7	5,09	-0,3	1,88	-2,1	14,44	-0,3	1,92	-1,8	30,26	-0,1	2,05
	120°	-1,5	4,75	-0,6	1,75	-3	12,89	-0,4	1,72	-6,1	24,16	-0,4	1,64
	150°	-0,4	2,57	-0,1	0,95	-2,3	8,86	-0,3	1,18	-5	17,56	-0,3	1,19
	180°	0,76	2,24	0,28	0,83	1,74	5,89	0,23	0,78	2,58	11,5	0,18	0,78
		11				13,3							
		F_t	F_n	C_t	C_n	F_t	F_n	C_t	C_n	F_t	F_n	C_t	C_n
		8,18	29,74	0,23	0,82	11,25	45,94	0,21	0,86	11,88	64,25	0,22	1,21
		13,87	58,72	0,38	1,61	19,73	86,01	0,37	1,62	24,1	99,63	-0,5	1,87
		-7,8	67,75	-0,2	1,86	-38,7	84,7	-0,7	1,59	-13,3	57,09	-0,3	1,07
		6,15	29,47	0,17	0,81	11,23	45,18	0,21	0,85	7,97	28,29	0,22	0,78
		7,84	26,46	0,22	0,73	8,10	62,78	0,15	1,18	20,47	62,16	0,56	1,71
		-9	62,27	-0,3	1,71	-13,5	88,69	-0,3	1,67	-11,2	59,44	-0,3	1,63
		-7,8	37,04	-0,2	1,02	-9,3	51,5	-0,2	0,97	8,33	28,32	0,23	0,78
		4,66	54,16	0,13	1,49	6,95	79,08	0,13	1,49	5,69	29,59	0,16	0,81
		-4,5	70,47	-0,1	1,94	-16,9	101,02	-0,3	1,89	-21,5	59,74	-0,6	1,6
		-11,6	41,74	-0,3	1,15	-7,5	51,77	-0,1	0,97	-11,6	41,74	-0,3	1,15
		6,11	28,95	0,17	0,79	10,05	41,77	0,19	0,79	6,11	28,95	0,17	0,79

7.2. Klasik Savonius Çarkların Dönme Açılarına Göre Farklı Hızlar için F_n ve F_t Değerlerinin Hesaplanması

Klasik Savonius rüzgar çarkının dönme açılarına göre farklı hızlardaki F_n ve F_t değerleri hesaplanmıştır.

3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s olmak üzere ardışık olarak seçilmiş 5 farklı rüzgar hızında geliştirilen uç profillerinin Tablo 7.2 de gösterildiği gibi 0°'dan 180 dereceye kadar klasik Savonius rüzgar çarkı için 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s hızlarında ANSYS programı kullanılarak F_n ve F_t değerleri elde edilmiştir.

C_n ve C_t değerleri programa Denklem (6.1) ve (6.2) vasıtasıyla hesaplatılmıştır. Tablo 7.2 de gösterildiği gibi rüzgar hızı arttıkça F_n ve F_t giderek artmaktadır. Tablo 7.2 de gösterildiği gibi normal sürüklenme kuvvetinin (F_n) rüzgar hızı arttıkça arttığı gözlemlenebilmektedir.

Tablo 7.2. Klasik Savonius rüzgar çarkların farklı hızlardaki F_n , F_t , C_n ve C_t 'nin tablo halinde gösterimi

		Rüzgar hızı (m/s)																			
	Açı	3				5				7				11				13,3			
		F ₁	F ₂	C ₁	C ₂	F ₁	F ₂	C ₁	C ₂	F ₁	F ₂	C ₁	C ₂	F ₁	F ₂	C ₁	C ₂	F ₁	F ₂	C ₁	C ₂
Klasik Savonius rüzgar türbini	0°	0,57	2,16	0,21	0,8	1,71	6,51	0,22	0,86	2,86	12,3	0,19	0,83	7,13	31,3	0,19	0,86	6,42	44,33	0,12	0,83
	30°	0,93	3,59	0,34	1,32	1,77	9,49	0,23	1,26	3,7	18,83	0,25	1,27	8,16	46,32	0,22	1,27	11,02	67,48	0,20	1,26
	60°	0,148	4,21	0,05	1,55	-1,3	11,47	-0,1	1,52	-0,2	21,24	-0,1	1,44	1,46	52,92	0,04	1,45	-11	81,8	-0,2	1,53
	90°	-0,8	5	-0,3	1,84	-2,1	14	-0,2	1,86	-2,6	29,14	-0,1	1,97	-8,7	66,72	-0,2	1,83	-12,8	97,06	-0,2	1,82
	120°	-1,5	4,85	-0,5	1,79	-2,9	12,63	-0,3	1,68	-8	23,42	-0,5	1,59	-22	58,24	-0,6	1,60	-22,9	73,6	-0,4	1,68
	150°	-0,5	2,85	-0,2	1,05	-1,9	7,54	-0,2	1	-2,4	15,52	-0,1	1,05	-7,4	37,49	-0,2	1,03	-18,8	64,96	-0,3	1,22
	180°	0,58	2,11	0,21	0,78	1,64	6,24	0,21	0,83	2,8	11,85	0,19	0,8	5	31,78	0,13	0,87	8,25	44,5	0,15	0,83

7.3. Geliştirilmiş ve Klasik Savonius Çarkların Dönme Açılarına Göre Farklı Hızlar İçin Karşılaştırılmalı Güç Hesabı

Geliştirilmiş ve klasik Savonius çarkların dönme açılarına göre farklı rüzgar hızları için karşılaştırılmalı güç hesabı yapılmıştır. Hesaplamalar, örnek olarak NACA 9412 AIRFOIL için 3 m/s rüzgar hızında 180 derecelik çark pozisyonunda Denklem (5.17) de değerler yerine konulduğunda, $C_n = 0,849208$ için $P_{opt} = 1,391886$ W güç elde edilmiştir. 5, 7, 11 ve 13,3 m/s hızları için de sonuçlar benzer olarak hesaplanmış ve Tablo 7.3 de gösterilmiştir. Tablo 7.3'de de gösterildiği gibi rüzgar hızı arttıkça üretilen güç miktarı da artmaktadır. NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç

değerlerini verdiği görülmektedir. En az güç değerlerini ise 0 ve 180 derecelik konumlandırmalarında verdiği görülmektedir. Ortalama güçler, 3 m/s hız için yaklaşık olarak 2,2 W olmaktadır. 5 m/s hız için yaklaşık olarak 9,9 W olmaktadır. 7 m/s hız için yaklaşık olarak 26,7 W olmaktadır. 11 m/s hız için yaklaşık olarak 105,3 W olmaktadır. 13,3 m/s hız için yaklaşık olarak 185,2 W olarak elde edilmiştir. Elde edilen güç değerleri rüzgar hızının artmasıyla üretilen artacağının sayısal olarak doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 7.3. NACA 9412 AIFOIL farklı hızlarda güç hesabı

Derece	3 m/s rüzgar hızı için güç (W)	5 m/s rüzgar hızı için güç (W)	7 m/s rüzgar hızı için güç (W)	11 m/s rüzgar hızı için güç (W)	13,3 m/s rüzgar hızı için güç (W)
0	1,354033	5,877156	15,9853	66,0359	123,3411
30	2,059589	9,441278	25,98765	98,43095	172,488
60	2,495963	11,2965	30,70965	130,3897	230,9199
90	3,080689	15,88838	40,40494	150,4285	267,4604
120	2,864535	13,15225	35,20242	130,355	227,4351
150	1,786942	7,582948	22,04182	96,03386	153,2616
180	1,374393	5,987585	16,18546	65,43368	121,2839
Ortalama	2,14516	9,88944	26,64532	105,30108	185,2

NACA 9430 AIRFOIL için 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s hızlarında sonuçlar benzer olarak hesaplanmış ve Tablo 7.4 de gösterilmiştir. Tablo 7.4’de de gösterildiği gibi rüzgar hızı arttıkça üretilen güç miktarı da artmaktadır. NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 60 ve 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini verdiği gözlemlenebilmektedir. En az güç değerlerini ise 0, 30 ve 180 derecelik konumlandırmalarında verdiği gözlemlenmektedir. Ortalama güçler, 3 m/s hız için yaklaşık olarak 1,97 W olmaktadır. 5 m/s hız için yaklaşık olarak 8,9 W olmaktadır. 7 m/s hız için yaklaşık olarak 24,6W olmaktadır. 11 m/s hız için yaklaşık olarak 96,4 W olmaktadır. 13,3 m/s hız için yaklaşık olarak 177,2 W olmaktadır. Elde edilen güç değerleri rüzgar hızının artmasıyla üretilen artacağının sayısal olarak doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 7.4. NACA 9430 AIFOIL farklı hızlarda güç hesabı

Derece	3 m/s rüzgar hızı için güç (W)	5 m/s rüzgar hızı için güç (W)	7 m/s rüzgar hızı için güç (W)	11 m/s rüzgar hızı için güç (W)	13,3 m/s rüzgar hızı için güç (W)
0	1,26014	5,865153	15,56925	62,81409	105,8872
30	1,257433	5,963358	16,33572	58,75205	168,5347
60	2,839132	12,85694	35,40271	138,0472	245,0234
90	2,931418	12,53789	36,05542	138,2588	238,1195
120	2,650085	11,81571	32,71858	131,9934	232,9965
150	1,601599	7,659126	20,35023	82,23787	138,2562
180	1,238944	5,422748	15,82752	62,89537	111,3495
Ortalama	1,96839	8,87442	24,60849	96,42839	177,167

NACA 6515 AIRFOIL için 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s hızlarında sonuçlar benzer şekilde hesaplanmış ve Tablo 7.5 de gösterilmiştir. Tablo 7.5 de de gösterildiği gibi rüzgar hızı arttıkça üretilen güç miktarı da artacağı görülmektedir. NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini vermiştir. En az güç değerlerini ise 0 ve 180 derecelik konumlandırmalarında vermiştir. Ortalama güçler, 3 m/s hız için yaklaşık olarak 2,1 W olmaktadır. 5 m/s hız için yaklaşık olarak 9,8 W olmaktadır. 7 m/s hız için yaklaşık olarak 27,1 W olmaktadır. 11 m/s hız için yaklaşık olarak 104,04 W olmaktadır. 13,3 m/s hız için yaklaşık olarak 178,8 W olmaktadır. Elde edilen güç değerleri rüzgar hızının artmasıyla üretilen artacağının sayısal olarak doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 7.5. NACA 6515 AIFOIL farklı hızlarda güç hesabı

Derece	3 m/s rüzgar hızı için güç (W)	5 m/s rüzgar hızı için güç (W)	7 m/s rüzgar hızı için güç (W)	11 m/s rüzgar hızı için güç (W)	13,3 m/s rüzgar hızı için güç (W)
0	1,345042	5,874675	16,32348	65,70256	113,8335
30	2,086992	9,3283	25,01139	96,21484	169,1132
60	2,518317	11,13268	30,32073	120,2706	212,2919
90	3,080755	14,57893	42,75512	156,4669	271,1838
120	2,874598	13,01848	34,14351	132,66	233,7078
150	1,558397	8,940958	24,80528	92,67858	138,975
180	1,358804	5,947409	16,25523	64,27166	112,1203
Ortalama	2,11755	9,83163	27,08782	104,03787	178,7465

Klasik Savonius rüzgar çarkı için 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m/s hızlarında sonuçlar benzer şekilde hesaplanmış ve Tablo 7.6 da gösterilmiştir. Tablo 7.6 da gösterildiği gibi rüzgar hızı arttıkça üretilen güç miktarı da artmaktadır. Klasik Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini vermiştir. En az güç değerlerini ise 0 ve 180 derecelik konumlandırmalarında verdiği gözlemlenmektedir. Ortalama güçler, 3 m/s hız için yaklaşık olarak 2,2 W olmaktadır. 5 m/s hız için yaklaşık olarak 9,8 W olmaktadır. 7 m/s hız için yaklaşık olarak 26,7 W olmaktadır. 11 m/s hız için yaklaşık olarak 103,05 W olmaktadır. 13,3 m/s hız için yaklaşık olarak 187,8 W olmaktadır. Elde edilen güç değerleri rüzgar hızının artmasıyla üretilen artacağının sayısal olarak doğruluğunu göstermektedir.

Farklı hızlara sahip 4 farklı Savonius rüzgar türbininde elde edilen en yüksek güç değerlerinin 90 derecelik konumlandırılmada olduğu gözlemlenmiştir. En düşük güç değerlerinin 0 ve 180 derecelik konumlandırılmalarında olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 7.6. Klasik Savonius rüzgar çarkının farklı hızlarda güç hesabı

Derece	3 m/s rüzgar hızı için güç (W)	5 m/s rüzgar hızı için güç (W)	7 m/s rüzgar hızı için güç (W)	11 m/s rüzgar hızı için güç (W)	13,3 m/s rüzgar hızı için güç (W)
0	1,3137	6,5743	17,3926	69,52263	119,0276
30	2,1756	9,5875	26,6120	102,8736	181,1653
60	2,5520	11,5776	30,0196	117,5212	219,6228
90	3,03173	14,1400	41,1802	148,1533	260,5746
120	2,9427	12,7477	33,1043	129,3410	240,4557
150	1,7259	7,6166	21,9368	83,2493	174,4012
180	1,2797	6,3035	16,7538	70,5805	119,474
Ortalama	2,14590	9,79245	26,71418	103,0345	187,817

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan rüzgar enerjisi ele alınmıştır. Savonius rüzgar türbini, düşey eksenli bir rüzgar türbin çeşididir. Savonius rüzgar türbininin düşük hızlarda çalışabilmesi, bakım ve onarımının kolay olması, türbin üretiminin ucuz olması, kendi kendine çalışmaya başlaması, rüzgarın yönünden bağımsız çalışması en önemli avantajlarıdır. Bu avantajlar Savonius rüzgar türbininin geliştirilmesine yönelik çalışmaları arttırmıştır.

Bu çalışmada, klasik Savonius rüzgar türbinin uç profilinin geliştirilerek üretilen gücün artışı amaçlanmıştır. Sonuçların doğruluğunu kanıtlamak amacıyla sayısal analizle elde edilmiş sonuçları olan klasik Savonius rüzgar türbini, Islam ve diğ. (1993) ve Sawada (1986) tarafından klasik Savonius rüzgar türbini için yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar Islam ve diğ. (1993) ve Sawada (1986)'nın deneysel sonuçları ile büyük uyum göstermektedir. Böylelikle yeni uç profili ile geliştirilen Savonius rüzgar çarkları için yapılan sayısal analizler doğruluk kazanmıştır. Statik durumdaki klasik ve geliştirilmiş Savonius rüzgar türbinleri için sayısal analizler yapılmıştır. 3 farklı uç profili kanat kalınlıklarına bağlı olarak NACA AIRFOIL ile belirlenmiştir. Belirlenen uç profilleri; NACA 9430 AIRFOIL, NACA 9412 AIRFOIL ve NACA 6515 AIRFOIL olmaktadır. 3 farklı NACA profili ile geliştirilen ve klasik Savonius rüzgar türbinleri, 0 dereceden 180 dereceye kadar her bir 30 derecelik dönme açısı için ANSYS programı kullanılarak CFX ile sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. NACA 9412 AIRFOIL, geliştirilen diğer profillere göre daha iyi sonuç vermiştir. NACA 9412 AIRFOIL 0, 60, 90 ve 180 derecelik Savonius çark konumlandırmalarında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç üretmiştir. NACA 9430 AIRFOIL ise 60 derecelik Savonius çark konumlandırmasında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç üretmiştir. NACA 6515 AIRFOIL 90 derecelik Savonius çark konumlandırmasında klasik Savonius rüzgar türbinine göre daha fazla güç üretmiştir. Bu durumda NACA 9412 AIRFOIL 'in diğer geliştirilen uç profillerine göre daha iyi olduğu gözlemlenebilmektedir.

Ayrıca geliştirilmiş ve klasik Savonius çarkların dönme açılarına göre 3, 5, 7, 11 ve 13,3 m / s olmak üzere ardışık olarak seçilmiş 5 farklı rüzgar hızında geliştirilen

uç profillerinin 0 dereceden 180 dereceye kadar her bir 30 derecelik dönme açısında F_n ve F_t değerleri elde edilerek güç hesabı gerçekleştirilmiştir. Her bir 30 derecelik dönme açısı ve Savonius rüzgar türbini çeşidi için rüzgar hızı arttıkça üretilen güç miktarının artacağı da böylelikle sayısal analiz yapılarak gözlemlenmiş olmaktadır. 4 farklı Savonius rüzgar türbini kendi içerisinde 0 dereceden 180 dereceye kadar her bir 30 derecelik dönme açısında kıyaslanmıştır. NACA 9412 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini vermiştir. NACA 9430 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 60 ve 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini vermiştir. NACA 6515 AIRFOIL ile geliştirilmiş Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini vermiştir. Klasik Savonius rüzgar çarkı her bir farklı rüzgar hızında 90 derecelik sabit konumda en yüksek güç değerlerini vermiştir. Bu durumda farklı hızlara sahip 4 farklı Savonius rüzgar türbininde elde edilen en yüksek güç değerlerinin 90 derecelik konumlandırılmalarında olduğu gözlemlenmiştir. En düşük güç değerlerinin 0 ve 180 derecelik konumlandırılmalarında olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çözümlemelerin sonucunda, 0'dan 180 dereceye kadar her bir 30 derecelik dönme açısı için yapılan çözümlemeler daha net bir sonuç için 5 derecelik dönme açısı konumlandırmaları ile yapılarak daha iyi gözlemlenebilir.

Ayrıca sayısal çözümlemeler haricinde deneysel olarak da çözümlemeler yapılabilir. Deneysel yapılan çözümler ile güç artışı olup olmadığı daha detaylı olarak incelenebilir.

Özellikle düşük olan değerlerde sebepler araştırılarak, yeni bir NACA uç profili geliştirilebilir. Ayrıca bu uç profili ile güç artışı olup olmayacağı gözlemlenebilir.

9. KAYNAKLAR

‘Rüzgar Enerjisi Nedir? Rüzgar Enerjisinin Kullanım Alanları’, (05.02.2019), <http://www.nenedirvikipedi.com/fizik/ruzgar-enerjisi-nedir-ruzgar-enerjisinin-kullanim-alanlari-11778.html>, (2014).

Çoşkun İ., (2018), ‘Türkiye’nin Enerji Kaynakları: Rüzgar’, (10.02.2019), <https://ankaenstitusu.com/turkiyenin-enerji-kaynaklari-ruzgar/>.

YEGM, ‘Rüzgar Enerjisi (RES)’, (10.02.2019), <https://www.enerjigazetesi.ist/enerji-kutuphanesi/yenilenebilir-enerji-kaynaklari/ruzgar-enerjisi/>.

Koç, E., ve Şenel M. C., “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Durumu- Genel Değerlendirme,” Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 639, s. 32-44, (2013).

Koç, E., ve Şenel M. C., “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu- Genel Değerlendirme,” Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 663, s. 46-56, (2015).

Ülkelere Göre Rüzgar Enerjisi, (10.02.2019), <http://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html>.

WEB_1.(11.02.2019). EİE’s web site. www.eie.gov.tr (2019).

WEB_2.(11.02.2019). MGM’s web site. www.mgm.gov.tr (2019).

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB), ‘Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu’, Ankara, (2014).

‘Rüzgar Gücü’, (11.02.2019), <https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvUsO8emfDonJfZ8O8Y8O8>

Geçmişten Bugüne Rüzgar Enerjisi, (12.02.2019), <http://www.bideburdanbak.net/gecmisten-bugune-ruzgar-enerjisi/> (2015).

Kesayak B., ‘Rüzgar Türbini Nasıl Çalışır’, (13.02.2019), <http://www.kuark.org/2015/09/ruzgar-turbini-nasil-calisir/> (2015).

Leblebicioğlu E., ‘Rüzgar Türbini Nedir? Nasıl Çalışır?’, (13.09.2019), <https://www.muhendisbeyinler.net/yatay-eksenli-uc-kanatli-ruzgar-turbinleri/> (2019).

Kelsoy M.E., ve Soysal M.A., ‘Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbinleri’, (24.04.2019), <https://kontrolotomasyon.files.wordpress.com/2015/09/rucc88zgar-tribucc88nleri.pdf>] (2015).

Deda B., ‘Rüzgar Enerjisi ve Savonius Rüzgar Çarklarının Performanslarının Arttırılması’, PAÜ, *Yüksek Lisans Tezi*, Denizli, (2000).

Islam S. ve diğ., ‘Durağan Savonius Rotorun Aerodinamik Karakteristiği’, RERIC International Energy Journal, Vol.15 No,2, (1993).

Kamal F.M. ve Islam Q., ‘Durağan 5 Bıçaklı Düşey Rüzgar Türbininin Aerodinamik Karakteristiği’, Journal of Mechanical Engineering, Vol. ME39, No,2 (2008).

Tian W. ve Mao Z., ‘Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine’, Advances Mechanical Engineering, Vol 7(5) 1-10, (2015).

Deda B., Atılğan M., ve Öztürk H.K., ‘Savonius Rüzgar Çarklarının Performanslarının İncelenmesi’, **III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu**, İstanbul, Cilt I, İstanbul (2000).

Zemamou M., Aggour M. ve Toumı A., ‘Review of Savonius Wind Turbine Design and Performance’, Energy Procedia 141 (2017) 383-388.

Deda B., ve Atılğan M., Savonius Rüzgar Çarklarının Performansının Geliştirilmesi ve Karşılaştırılması, Mühendis ve Makina- Cilt: 45 Sayı: 533, 30-34.

Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., “Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri”, Yekarum e-Dergi, Cilt:2 Sayı:3, Isparta (2014).

Nurbay, N., ve Çınar, A., ‘Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması’, (19.04.2019), http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, (2015).

Deda Altan B., Altan G., ve Kovan V., ‘Investigation of 3D printed Savonius rotor performance Renewable Energy’, 99 (2016) 584e591.

Eldridge, F.R., ‘Wind Machines Second Edition’, Van Nostrand. Co. New York, 214s (1980).

Ushiyama, İ. ve Nagai, H., ‘Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors’, **Wind Engineering**, 12(1): 59-75 (1988).

N.H. Mahmoud, A.A. El-Haroun, E. Wahba, ve M.H. Nasef, Alexandria Engineering Journal (2012) 51, 19–25.

Al-Faruk A., ve Sharifian A., **Alexandria Engineering Journal** 55, 2055–2064 (2016).

Jeon K.S., Jeong J.I., Pan J.K., ve Ryu K.W., ‘Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines’, Renewable Energy, 79 167e176, (2015).

Mao Z., ve Tian W., ‘Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind’, DOI: 10.1177/1687814015584247, (2015).

Gonzales P., ‘How Much Water Does Ewicon Electrostatic Wind Energy Converter Use’, (08.09.2019), <http://renewable-energy-events.blogspot.com/2012/07/how-much-water-does-ewicon.html>, (2012).

Ziraman N.N., (12.08.2019), <http://acikerisim.ege.edu.tr:8081/jspui/bitstream/11454/4396/1/nurullahnazimziraman2009.pdf> (2009).

WEB_3, Dünya Enerji’s web site. (12.02.2020), <https://www.dunyaenerji.org.tr/yenilenebilir-enerjiler-2018-kuresel-durum-raporu/> (2018).

WEB_4, STATİK-DİNAMİK-TOPLAM BASINÇ, (15.02.2020), <http://imco.com.tr/icerik/RWcTE370327680016.pdf>.

Eşkin Özgüncü P., (10.02.2020), ‘Rüzgar Enerjisi ve Türkiye’, <http://ekolojist.net/ruzgar-enerjisi-ve-turkiye/> (2018).

Akdağ S., (17.01.2020), ‘Türkiye Fiziki Coğrafya’, <https://suatakdag.wordpress.com/2013/12/25/turkiye-ruzgar-enerjisi-potansiyel-haritasi/>. (2019).

Petroturk (18.01.2020) <http://petroturk.com/yenilenebilir/turkiyenin-ruzgar-kurulu-gucu-7-bin-mw-oldu/attachment/2-18>, (2018).

Jensen J.O., ‘Hydrogen Energy by Means of Proton Conductors’, Inaugural Lecture, DTU, Denmark, (2015).

Özkılınç H. H., (01.02.2020), ‘Çok kanatlı rüzgar türbinleri’, <https://hilalhavvaozkilinc.tr.gg/11-.-Hafta-Hava-Grubu.htm>, (2010).

Sarıkaya C., (08.06.2019) ‘Rüzgar Enerjisinin Çevreye Verdiği Zararlar’, <http://sosyalsorunlumusun.blogspot.com/>, (2015).

White, F.M., Akışkanlar Mekaniği, Kırkköprü, K., ve Ayder, E., LiteratürYayıcılık, İstanbul, 1034s, (2004).

WEB_5.(09.12.2019). Anova’s web site. <http://www.anova.com.tr/fluent.asp>. (2006).

Keleş Çetin ve diğ., (26.04.2020), ‘Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar’,<http://static.dergipark.org.tr:8080/articledownload/5373/3a7e/7cf5/5e036b3220dcc.pdf>, 6(2), 539-551, (2019).

RO S., (19.01.2020), <https://www.businessinsider.com/first-wind-turbine-1887-2014-3>, (2014).

Deda Altan B., ‘Perdeleme Yöntemi ile Savonius Rüzgar Çarkının Performansının İncelenmesi’, PAÜ, Doktora Tezi, Denizli, (2006).

WEB_6, IRENA (26.04.2020), <https://www.irena.org/wind> (2020).

Gavalda, Jna., Massons, J., and Diaz, F., Drag and Lift Coefficients of the Savonius Wind Machine. *Wind Engineering*, 15(5): 240-246, (1991).





EKLER

10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Büşra ŞENGÜL

Doğum Yeri ve Tarihi : Yenimahalle / 05-05-1993

Lisans Üniversite : Beykent Üniversitesi- Pamukkale Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite (varsa) : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : avcibusra3@gmail.com

İletişim Adresi : Servergazi mahallesi 211 sokak No:20
Merkezefendi /Denizli