

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

**FARKLI KANAT TİPLERİNDE SAVONIUS RÜZGAR ÇARKI  
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ŞAİKA MAİDE SERT**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2019**

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



**FARKLI KANAT TİPLERİNDE SAVONIUS RÜZGAR ÇARKI  
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ŞAİKA MAİDE SERT**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**ŞAİKA MAİDE SERT** tarafından hazırlanan “**FARKLI KANAT TIPLERİNDE SAVONIUS RÜZGAR ÇARKI TASARIMI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 08.08.2019 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  
DOÇ. DR. BURÇİN DEDA ALTAN



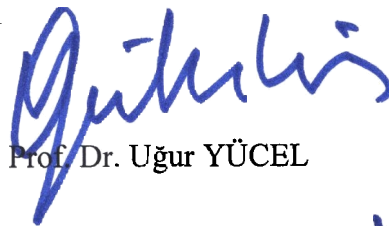
Üye  
Doç. Dr. UTKU ŞENTÜRK



Üye  
DR.ÖĞR.ÜYESİ GÜLAY YAKAR



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **28/08/2019** tarih ve **34/18** .... 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.**

  
**ŞAİKA MAİDE SERT**

## ÖZET

**FARKLI KANAT TİPLERİNDE SAVONIUS RÜZGAR ÇARKI TASARIMI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ŞAİKA MAİDE SERT**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. BURÇİN DEDA ALTAN)**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2019**

Son yıllarda, kömür, doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynaklarının tükenmeye başlaması ve artan maliyet nedeniyle enerji kaynaklarının önemi tartışma konusu haline gelmiştir. Aynı zamanda bu geleneksel enerji kaynakları, sera etkisi, ozon tabakasının incelmeye ve küresel ısınma gibi çevresel sorunlara yol açan kirliliğin oluşmasının bir nedenidir. Bu durum araştırmacıları, biyokütle, rüzgar, güneş ve su gibi çevreyi kirletmeyecek yenilenebilir enerji kaynaklarını keşfetmeye teşvik etmiştir. Bunlar arasında rüzgar enerjisi; çevre üzerinde minimum etkiye sahip, bol, ucuz ve temizdir. Bu zengin enerji kaynağını verimli kullanmak için çeşitli rüzgar türbini tasarımları geliştirilmiştir.

Bu çalışmada düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç özelliklerine sahip Savonius rüzgar rotorunun statik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak klasik Savonius rüzgar çarkının tasarım parametreleri tespit edilmiştir. Rotor yüksekliğine göre hava ortamının boyutları belirlenmiştir. Rüzgar hızı 7,5 m/s seçilerek çarkların statik performansı incelenmiştir. Öncelikle  $b / d$  parametresine dayalı tasarımlar yapılmıştır. 0,207 tork katsayısı değerine ulaşılarak klasik Savonius çarkı performansına en yakın değeri verebilecek kanat tipi belirlenmiştir. İkinci adım olarak elde edilen kanat tipine benzeyen altıgen formda kanatlar tasarlanmış ve çözümlenmeleri yapılmıştır. YA3 isimli tasarıma ait kanat tipinden elde edilen statik tork değerinin, klasik Savonius rüzgar çarkından elde edilen tork değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Rüzgar Enerjisi, Yenilenebilir Enerji, Savonius Rüzgar Türbini, Kanat Tasarımı

## **ABSTRACT**

### **SAVONIUS WIND ROTOR DESIGN IN DIFFERENT BLADE TYPES**

**MSC THESIS**

**ŞAİKA MAİDE SERT**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:DOÇ. DR. BURÇİN DEDA ALTAN)**

**DENİZLİ, JULY 2019**

In recent years, the importance of energy has become a topic of debate due to its increased cost and depletion of traditional energy sources like coal, natural gas. These traditional sources of energy have also become a reason for creating pollution that lead to environmental problems like the greenhouse effect, global warming and ozone depletion. This encouraged researchers to explore renewable energy sources such as biomass, wind, solar and water that would not pollute the environment. Among renewable energy sources, wind energy; it is abundant, cheap and clean with minimal impact on the environment. Various wind turbine designs have been developed to efficiently use this rich energy source.

In this study, it is aimed to improve the static performance of Savonius rotor which has good starting characteristics at low wind speeds. The design parameters of the classic Savonius rotor have been determined by considering the studies in the literature. The dimensions of the air environment were determined according to the rotor height. Static performance of turbines was investigated by selecting wind speed 7,5 m/s. Firstly, designs based on  $b/d$  parameter were made. By reaching 0,207 of torque coefficient, the blade type which has the closest value to the classical Savonius rotor performance has been determined. As a second step, hexagonal blades similar to the blade type found before, were designed and analyzed. The static torque value obtained from the blade type of YA3 design was found to be higher than that obtained from the classic Savonius rotor.

**KEYWORDS:** Wind Energy, Renewable Energy, Savonius Wind Turbine, Blade Design

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
SEMBOL LİSTESİ VE KISALTMALAR .....	v
ÖNSÖZ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. RÜZGAR ENERJİSİ .....	10
3.1 Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları .....	10
3.2 Rüzgar Enerjisinin Kullanım Alanları.....	11
3.3 Rüzgar Türbinleri .....	12
3.3.1 Sürüklenme Kuvveti .....	12
3.3.2 Kaldırma Kuvveti .....	13
3.3.3 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	13
3.3.3.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri .....	13
3.3.3.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri .....	15
3.4 Rüzgar Türbinlerinin Performansı.....	17
3.5 Rüzgar Türbinlerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması.....	19
4. SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNİ.....	21
4.1 Savonius Rüzgar Çarklarının Avantajı ve Dezavantajı.....	22
4.2 Savonius Rüzgar Çarklarının Kullanım Alanları .....	22
4.3 Farklı Kanat Tiplerinde Savonius Rüzgar Çarkı Tasarımı .....	26
5. SONUÇ .....	36
6. KAYNAKLAR.....	37
7. ÖZGEÇMİŞ .....	40

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: (a) Rüzgarı önden alan türbin, (b) Rüzgarı arkadan alan türbin .....	14
Şekil 3.2: Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	15
Şekil 3.3: Yaw Mekanizması .....	16
Şekil 3.4: Dikey eksenli rüzgar türbinleri .....	17
Şekil 3.5: Yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin süpürme alanı..	18
Şekil 3.6: Çeşitli rüzgar türbini tiplerinin performansı (güç katsayısı).....	19
Şekil 4.1: İki kanatlı Savonius rüzgar türbini.....	21
Şekil 4.2: Savonius çarkının geometrik özellikleri .....	22
Şekil 4.3: Savonius rotoru ile çalışan sokak lambası .....	23
Şekil 4.4: Sokak lambaları için elektrik üreten micro Savonius türbini çizimi	24
Şekil 4.5: Klasik Savonius rotoru ve 0, 22,5, 45 derece burulma açılarında modifiye edilmiş Savonius rotoru .....	25
Şekil 4.6: Farklı kanat yay açılarında sahip Savonius rüzgar türbinleri.....	26
Şekil 4.7: Klasik Savonius rüzgar çarkı geometrik parametreleri.....	28
Şekil 4.8: Savonius rüzgar çarkının ortam parametreleri .....	29
Şekil 4.9: Düz levhalı Savonius rüzgar çarkı geometrik parametreleri.....	29
Şekil 4.10: Kanat tiplerine göre ( $b/d$ oranı) Savonius rüzgar çarkları .....	30
Şekil 4.11: Kanat tiplerine göre ( $b/d$ oranı) statik tork katsayıları.....	31
Şekil 4.12: Yarım altıgen kanat tipli Savonius rüzgar çarkı .....	32
Şekil 4.13: Kanat tiplerine göre (yarım altıgen formülü) Savonius rüzgar çarkları .....	32
Şekil 4.14: Yarım altıgen formülü düz levhalı kanat tiplerine göre statik tork katsayıları .....	33
Şekil 4.15: Klasik Savonius rüzgar çarkının hız profili .....	34
Şekil 4.16: 0,15m2 modelinin hız profili .....	34
Şekil 4.17: YA3 modelinin hız profili.....	35
Şekil 4.18: İlave düz levha ile modifiye edilmiş YA3 Savonius rüzgar çarkı ..	35



## SEMBOL LİSTESİ VE KISALTMALAR

$C_p$	:	Güç katsayısı
$C_t$	:	Tork katsayısı
$W_k$	:	Kullanılabilir rüzgar gücü (W)
$W_\zeta$	:	Mil çıkış gücü (W)
$\lambda$	:	Uç hız oranı
$e$	:	Kayma mesafesi (cm)
$\delta$	:	Burulma açısı ( $^0$ )
$\psi$	:	Kanat yay açısı ( $^0$ )
$U$	:	Kanat uç hızı (m/s)
$V_r$	:	Rüzgar hızı (m/s)
$d$	:	Kanat çapı (cm)
$D$	:	Çark çapı (cm)
$D_0$	:	Kanat uç plakası çapı (cm)
$H$	:	Çark yüksekliği (cm)
$r$	:	Kanat yarıçapı (cm)
$k$	:	Türbülans kinetik enerjisi ( $m^2/s^2$ )
$\varepsilon$	:	Türbülans dağılma oranı
$A_R$	:	En boy oranı
$G$	:	Kayma oranı (%)
$A$	:	Süpürme alanı ( $m^2$ )
$T$	:	Çarktan elde edilen statik tork (N.m)
$\rho$	:	Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$YERT$	:	Yatay eksenli rüzgar türbinleri
$DETR$	:	Dikey eksenli rüzgar türbinleri
$RH$	:	Rotor house

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını öneren; çalışmanın hazırlanması sırasında benden yardım ve desteğini hiç esirgemeyen, danışman hocam Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında; her zaman yanımda olan, sevgi ve desteklerini esirgemeyen annem, babam ve kardeşime çok teşekkür ederim.

Şaika Maide Sert

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu hayatını kolaylaştırmak ve sürdürmek için enerjiye daima ihtiyaç duymuştur. Her bilim dalı enerji tanımını kendine göre yapsa da enerji; “Herhangi bir hareketi yapan ya da yapmaya hazır olan kabiliyet” şeklinde genel bir ifadedir. Kısaca enerji, “iř yapma yeteneği” olarak da tanımlanabilir (Adaçay, 2014). İnsanoğlunun sınırsız gereksinimlerinin karşılanması için kaynak sağlamada enerji önemli rol oynamaktadır. Bu maksatla enerji, çeşitli miktar ve usullerle her an üretilmekte ve tüketilmektedir. Üretimde girdi unsuru, tüketimde maliyet unsuru olarak yer alır. Bu sebeple ekonomide bir değer haline gelmiştir. Ülkelerin gelişmişlik seviyesini gösteren ve kalkınmayı etkileyen en önemli etkenlerden biri enerjidir.

Gelişmekte olan ülkeler kalkınmak için, gelişmiş ülkeler ise refah seviyesini yüksek tutabilmek için enerjiye ihtiyaç duyar. Enerji fiyatlarındaki sansasyonların hassas birçok ekonomiyi nasıl etkilediği, dolayısıyla enflasyon, durgunluk ve işsizlik gibi çeşitli sorunların oluştuğu dünya gündeminde sık sık gözlenmektedir. Ayrıca çevre problemlerinin başında enerji kullanımına bağlı olarak doğan sera etkisi, iklim değişikliği ve küresel ısınma gelmektedir. Ülkeler, enerjide dışa bağımlılıklarını azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak isterler. Bu ancak “sürdürülebilir enerji politikaları” ile mümkün olabilir.

Enerji kaynakları ‘Yenilenemeyen Enerji Kaynakları’ ve ‘Yenilenebilir Enerji Kaynakları’ olarak sınıflandırılmaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları fosil kökenli kaynaklardır. Bu kaynakları tükenebilir yapan tekrar oluşumlarının uzun süreler almasıdır. Enerji talebinin büyük bir kısmı; petrol, kömür, doğalgaz ve nükleer enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Nükleer enerjinin bu sınıfa girmesinin sebebi radyoaktif elementlerin tükenebilir olmasıdır. Bu kaynakların kullanım oranı %95’in üzerindedir. Geriye kalan %5’lik kısmı “hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git” gibi yenilenebilir enerji kaynakları oluşturur. Önümüzdeki 50 yıllık dönemde yenilenemeyen enerji kaynaklarının tükenebileceği gerçeği karşısında temiz enerji

kaynağı kullanımının yaygınlaşacağını söylemek doğru olur. Yenilenebilir enerji, “doğanın kendi evrimi içinde bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı” olarak tanımlanabilir (Adaçay, 2014). Yenilenebilir enerji kaynakları daha ekonomik, daha çevreci ve daha güvenilir kaynaklardır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi atmosferi kirletmemesi ve asit yağmurlarına sebep olmaması nedeniyle önemli bir temiz enerji kaynağıdır. Rüzgar santrallerinin yatırım maliyeti yüksek olsa da işletme ve onarım maliyeti düşüktür. İşletme sırasında yakıt gereksinimi yoktur. Rüzgar enerjisi sistemlerinin hızla gelişmesi, ihtiyaca yönelik tasarımların artması, rüzgar enerjisini vazgeçilmez bir enerji kaynağı haline getirmiştir.

Günümüzde rüzgar santrallerinin maliyeti, gelişen teknolojiyle verimin arttırılması ve türbini oluşturan parçaların maliyetinin düşmesi ile azalmıştır. Rüzgardan enerji üretimini sağlayan en önemli parça türbindir. Bu sebeple günümüze kadar, trbın tasarımı ihtiyaca ve şarlara yönelik geliştirilmiştir ve çok çeşit tasarım mevcuttur.

Bu çalışmada, üretimi ve kurulumu oldukça kolay olan, düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç özelliklerine sahip olan, çok yer kaplamaması sebebiyle kk işletmeler ve çiftlikler tarafından tercih edilen, hatta günümüzde kamu aydınlatmalarında ve bazı evlerin elektrik ihtiyacını karşılamakta kullanılan Savonius rüzgar türbininin, düşük olan aerodinamik performansını geliştirmek için kanat tasarımı yapılmış ve Ansys Fluent programında çözümlenmiştir. Dünya nüfusu her geçen gün artmaktadır ve buna paralel olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Doğacak enerji sıkıntısından dolayı, Savonius türbinleri üzerinde çalışılması gereken önemli bir konudur. Çünkü kk işletmelerin, evlerin ve bazı kamu alanlarının enerji ihtiyaçlarını temiz enerji kaynakları ile kendilerinin karşılaması ülkemiz üzerindeki enerji ihtiyacı yükünü azaltacaktır. Ayrıca evre kirliliğinin nlenecek olması ve enerjide dışa bağımlılığımızın azalması ülkemizin enerji alanında gelişmesinde rol oynayacaktır. Fakat bu sistemlerin tercih edilebilmesi için uygun tasarımların ve iyileştirmelerin yapılması oldukça önemlidir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Menet (2004) prototip bir Savonius rüzgar türbini üretmiş ve sınırlı elektrik üretimi için tasarlanan bu türbini test ederek incelemiştir. Tasarladığı türbinin 0.29 güç katsayısı ile yüksek verimli olduğunu tespit etmiştir.

Avşar ve diğ. (2001) çalışmalarında, Savonius rüzgar türbinin Türkiye'deki uygulamalarını araştırmışlardır. Afyon ilinin rüzgar potansiyelini incelemiştir. Bu potansiyele göre bir Savonius türbini tasarlayarak, türbininin sorunsuz çalıştığını saptamışlardır.

Saha ve Rajkumar (2006) düşük hızlı bir rüzgar tüneline; kıvrılmış üç kanatlı Savonius rüzgar rotoru ile geleneksel üç kanatlı rüzgar rotorunun performansını incelemiştir. 15° kıvrılmış kanatlı Savonius rotorunun 8,23 m/s uç hızında güç katsayısının 0,14 olduğunu ve geleneksel Savonius rotorunun aynı uç hızında güç katsayısının 0,11 olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca kıvrılmış kanatlı Savonius rotorunun ilk harekete başlayabilme özelliğinin daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Hayashi ve diğ. (2005) Savonius rüzgar rotorunun performansını iyileştirmek için rüzgar tüneline çalışmalar yapmışlardır. Tek katlı klasik Savonius rüzgar rotoru ile üç katlı Savonius rüzgar rotorunun statik ve dinamik performansı üzerinde deneyler yapmışlardır. Tek katlı rotorun güç katsayısı 0,18 bulunurken üç katlı rotorun güç katsayısı 0,12 civarında bulunmuştur.

Deda (2000) Savonius rüzgar rotorlarının performanslarını arttırmak için çalışmalar yapmıştır. Dış bükey yüzeye gelen momenti azaltmak amacıyla perde fikrini öne sürerek perdenin performans üzerindeki etkisini teorik olarak araştırmıştır.

Atılgan ve Altan (2004) Savonius rüzgar rotorunun performansını arttıran perde sistemini tanıtmışlar ve literatürde bu konuda yapılan çalışmalarını incelemiştir.

Çolak ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada hız arttırıcı bir lüle tasarlamışlardır. Savonius rüzgar rotorunu lüleli ve lülesiz olarak test etmiş ve karşılaştırmışlardır. Lüleli rotorun daha verimli olduğunu bulmuşlardır.

Ishimatsu ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmalarında geleneksel Savonius rotoru ile Bach tipi kanatlı Savonius rotorunun performansını sayısal olarak incelemiş ve karşılaştırmışlardır.

Grinspan ve diğ. (2001) üç kanatlı Savonius rüzgar rotoru tasarımını geliştirmek istemişlerdir. Bunun için iki tip kanat şeklini incelemişlerdir. Airfoil tip kanatlı ve kıvrımlı tip kanatlı Savonius rüzgar rotorlarını deneysel olarak test etmişlerdir.

Percival ve diğ. (2004) çalışmalarında, bir evin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere Savonius rüzgar türbini tasarlamışlardır. Bu rotorun inşa edileceği yeri seçerek ve seçilen yere rotoru kurarak yapım aşamalarını anlatmışlardır. Kurulan Savonius rüzgar rotorunu test etmişlerdir. Güç katsayısını 0,25 olarak saptamışlardır.

Göktaş ve Kılıç (2019) çalışmalarında, Solidworks yazılımı kullanarak Savonius rüzgar türbini tasarlamış, Ansys programı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözümler yapmışlardır. Dört farklı açıda ve üç farklı rüzgar hızı girilerek toplam on iki durum için kanat etrafındaki hız ve basınç dağılımını hesaplamışlardır. En büyük hava giriş hızı 9 m/s için, kanat çevresi ve gerisinde en fazla rüzgar hızını 21,33 m/s olarak elde etmişlerdir. Tüm basınç grafikleri için en yüksek basıncı  $0^0$  ve  $45^0$  de saptamışlardır.

Altan ve diğ. (2008) çalışmalarında Savonius rüzgar türbinin performansını geliştirmek için yeni bir perde sistemi önermişlerdir. Perde düzenlemesi rotorun karşısındaki negatif torkun önlenmesi için rotorun önüne yerleştirilmiştir. Farklı perde düzenlemesine sahip Savonius rotoru ile geleneksel Savonius rotoru rüzgar tüneline test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Optimum perde düzenlemesi ile Savonius rotorunun güç katsayısını yaklaşık %38,5'e yükseltmişlerdir.

Kamoji ve diğ. (2009) çalışmalarında modifiye şaftsız Savonius rotorunu, modifiye şaftlı Savonius rotorunu ve geleneksel Savonius rotorunu açık jet rüzgar tüneline test ederek güç katsayısı, tork katsayısı ve statik tork katsayısı açısından

karşılaştırmışlardır. Şaftsız modifiye Savonius rotorun en yüksek güç katsayısına sahip olduğunu bulmuşlardır. Şaftsız modifiye Savonius rotorunun güç katsayısını 0,21, geleneksel Savonius rotorunun güç katsayısını 0,175 ve şaftlı modifiye Savonius rotorunun güç katsayısını 0,143 olarak saptamışlardır.

Kamoji ve diğ. (2009) çalışmalarında negatif statik torkun etkisini engellemek için  $90^0$  kıvrımlı helisel Savonius rotorunu önermişlerdir. Şaftsız helisel Savonius rotoru, şaftlı helisel Savonius rotoru ve geleneksel Savonius rotoru farklı kayma oranlarında performans açısından karşılaştırılmıştır. Şaftlı helisel rotorların, şaftsız helisel rotordan daha düşük bir güç katsayısına sahip olduğunu saptamışlardır. Kayma oranı 0,0 ve en boy oranı 0,88 olan şaftsız helisel rotorun, klasik Savonius rotor ile karşılaştırıldığında neredeyse aynı güç katsayısına sahip olduğunu bulmuşlardır.

Mohamed ve diğ. (2011) Savonius rotorunun çıktı gücünü ve kendi kendine başlamasını etkileyen statik torku daha da geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Perde sisteminin varlığında kanat şeklini optimize etmişlerdir. Geleneksel Savonius türbininden çok daha iyi konfigürasyonlar CFD kullanılarak tanımlanmıştır. Optimum tasarım ile  $\lambda=0,7$ 'ye bağlı olarak güç katsayısını %38,9 oranında arttırmışlardır. Ayrıca optimum konfigürasyonun herhangi bir açıda kendi kendine başlama kabiliyeti olduğunu bulmuşlardır.

Damak ve diğ. (2013) Savonius rotorunun performansını arttırmak için  $180^0$  kıvrımlı helisel Savonius rotorunu önermişlerdir. Reynolds sayısındaki değişimin ve kayma oranının modifiye Savonius rotorunun performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Açık jet rüzgar tüneline yaptıkları deneylere dayanarak helisel geometrinin geleneksel geometriden daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır. Helisel Savonius rotorunun Reynolds sayısına duyarlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Helisel geometride 0,242 kayma oranının, 0,0 kayma oranından daha iyi olduğunu saptamışlardır.

Kacprzak ve diğ. (2013) çalışmalarında, Savonius rüzgar rotorlarının üç geometrisini; klasik, Bach tipi ve eliptik tasarımları sayısal olarak analiz etmişlerdir. İncelenen tüm rotorların, 0,8'lik bir uç hız oranında maksimum güce ulaştığını bulmuşlardır. Güç katsayısı bakımından Bach tipi rotorun diğer test edilen

geometrilerden daha üstün olduğunu ve aynı zamanda eliptik Savonius türbininin klasik olandan daha iyi güç özellikleri sergilediğini saptamışlardır. Ancak eliptik Savonius rotorunun, 0,2 ile 0,4 uç hızı oranları aralığında, Bach tipi ve klasik Savonius rotorundan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Wang ve Zhan (2013) çalışmalarında, Savonius tipi bir mikro rüzgar türbinini nilüferleri taklit ederek tasarlamışlardır. CFD simülasyonunu ve analizini, nilüfer şeklindeki mikro kanatlı rüzgar rotorunun kanatlarının performansı üzerinde yapmışlardır. Mikro rüzgar rotorunun yarı dairesel kanatlarının performansını, rotorun yarı silindirik veya helisel kıvrılmış kanatlarının performansı ile karşılaştırmışlardır. Yarı dairesel kanatlı rüzgar rotorunun performansının yarı silindirik kanatlı rüzgar rotorununkiyle benzer olduğunu ancak helisel kıvrılmış kanatlı rüzgar rotorununkinden biraz daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Fakat yarım daire biçimli rüzgar rotorunun daha kolay çalıştığını tespit etmişlerdir.

Maldonado ve diğ. (2014) çalışmalarında, Savonius rüzgar rotorunda kayma oranının (G) uygulanmasının, dış bükey kanadın ters yüzeyine hava akışını sağladığını ve akışın Savonius rotorunun lehine bir torka sebep olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca hava akışını kanatlara yönlendirmek için Savonius rotorunun önüne bir hava saptırıcısı yerleştirmişlerdir. Bu konfigürasyonun, rüzgarın giriş hızını %62 oranında arttırdığını tespit etmişlerdir.

Roy ve Saha (2015) çalışmalarında, iki kanatlı Savonius rüzgar türbinini geliştirmişlerdir. Tasarladıkları türbini, yarı dairesel, yarı eliptik, Bach ve Benesh türbinleri ile yaptıkları testlerle karşılaştırmışlardır. Yeni geliştirilen türbinin sırasıyla Bach, Benesh, yarı eliptik ve geleneksel türbinin güç katsayılarından %3,3, %6,9, %19,2 ve %34,8 fazla güç katsayısı elde ettiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yeni tasarımın kendi kendine başlama potansiyelinin hepsinden daha iyi olduğunu bulmuşlardır.

Wenehenubun ve diğ. (2015) çalışmalarında, Savonius tipi rüzgar türbini modelinin performansında kanat sayısının etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler ile iki, üç ve dört kanatlı Savonius rüzgar rotorlarını karşılaştırmışlardır. Üç kanatlı rüzgar türbininin, iki ve dört kanatlı türbinden daha yüksek dönme hızına ve



uç hızı oranına sahip olduğunu bulmuşlardır. Uç kanatlı rüzgar türbinin 7 m/s rüzgar hızı için en yüksek uç hızı oranının 0,555 olduğunu saptamışlardır.

Tartuferi ve diğ. (2015) alışmalarında, iki farklı yaklaşım ile Savonius rüzgar türbininin performansını arttırmak istemişlerdir. Airfoil tip şeklindeki kanatların geliştirilmesini, diğer seçenek olarak perde sisteminin kullanmasını önermişlerdir. Airfoil tipli kanatların geliştirilmesinin daha yüksek enerji performansı elde etmek için umut verici bir yol olduğunu deneylerle doğrulamışlardır. Perde sisteminin uygun bir şekilde bağlanması, akışı içbükey kanada doğru daha iyi bir şekilde kanalize ettiğini, aynı zamanda dışbükey kanat üzerinde dinamik basınç tarafından indüklenen sürüklemeyi önlediğini tespit etmişlerdir.

Ricci ve diğ. (2016) alışmalarında, bir kamu aydınlatma sisteminde (sokak lambasında) kullanılacak Savonius rüzgar rotorunun aerodinamik performansını incelemek için farklı rüzgar hızlarında ve farklı yapı kombinasyonlarında deneysel testler yapmışlardır. Uç plakaların her zaman iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Destek direkleri ve tel örgünün performans üzerinde olumsuz etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. En iyi sonuçları, uç plakalı ve açık aralık durumda, 105 dereceli bir helisel rotor için elde etmişlerdir. Bu durumda  $\lambda=0,899$ 'da 0,251'lik bir güç katsayısı ölçmüşlerdir.

Driss ve diğ. (2015) alışmalarında, geleneksel olmayan Savonius rüzgar rotorları etrafındaki türbülanslı akışı incelemek için sayısal ve deneysel araştırmalar yapmışlardır. Diğer geometrik parametreleri sabit tutarken,  $\psi= 60^0$ ,  $\psi= 75^0$ ,  $\psi= 90^0$  ve  $\psi =130^0$  kanat yay açıları ile karakterize edilen farklı rotor tasarımlarını karşılaştırmışlardır. Maksimum türbülanslı karakteristik değerlerin hareket ettirici özelliklerinin, kanat yay açısının ( $\psi$ ) artmasıyla daha da geliştirici olduğunu tespit etmiştir.

Al-Kayiem ve diğ. (2016) alışmalarında, Savonius rotor tasarımında kullanılan kayma oranı, en boy oranı, kanat sayısı, kat sayısı ve kanat profili gibi geometrik parametrelerin karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Savonius rotorların performansının değişken geometrik parametrelerden ve kanat profillerinden oldukça etkilendiğini gözlemlemişlerdir. 0 ila 0,15 arasında kayma oranlı, iki kanatlı rotorlar

ile iki kademeli yüksek en boy oranlarına sahip rotorların iyileştirilmiş güç katsayısı ile sonuçlanabildiğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, sınır şartları altında veya harici bir akış yoğunlaştırma düzeneği ile güç katsayısının 0,52'ye çıkabileceğini öne sürmüşlerdir.

Tian ve diğ. (2018) güç verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için farklı dışbükey ve içbükey taraflara sahip modifiye edilmiş bir Savonius rotoru üzerinde çalışmışlardır. Optimal Savonius ve Klasik Savonius arasındaki tork, güç ve akış yapılarının kapsamlı karşılaştırmasını yapmışlardır. Optimal Savonius rotorunun  $\lambda \geq 0,7$  olduğunda klasik tasarımdan daha üstün olduğunu bulmuşlardır. Maksimum ortalama güç katsayısının 0,258 olduğunu ve bunun klasik tasarımdan %4,41 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Sharma ve Sharma (2017) çalışmalarında, sayısal simülasyon yazılımı Ansys CFX 13 kullanarak Savonius rotorunun performans katsayısının iyileştirilmesine odaklanmıştır. İyileştirmenin ölçülmesi; geleneksel Savonius çarkı ile çoklu minyatür kanatlar eklenerek modifiye edilmiş Savonius çarkının performans katsayısının karşılaştırılmasına dayanmıştır. Modifiye edilmiş konfigürasyon ile güç katsayısında %8,1 ile %11,34 arasında bir iyileşme sağlamışlardır.

Zhao ve Han (2018) çalışmalarında, üç boyutlu baskı tekniği uygulayarak minyatür bir türbin imal etmiş ve kapalı döngü rüzgar tüneline deneysel olarak değerlendirmiştir. Deneyi simüle etmek ve rüzgar türbini tasarımını optimize etmek için üç boyutlu sayısal çalışma yapmışlardır. Sağlam uç plakalı, merkezi bir shaft ve en boy bütünlüğü olan saat yönünün tersine yönde yerleştirilmiş “ üç kanatlı türbin ” modelinin maksimum verim elde eden optimum tasarım olduğunu bulmuşlardır. Maksimum enerji verimliliğini; tam bir enerji dönüşüm süreci için, deneysel olarak  $\eta = \%6,59$  tespit etmişlerdir.

Colmenero ve diğ. (2018) çalışmalarında, Savonius rotorundan uyarlanan yeni bir rotorun sayısal, deneysel araştırmalarını yapmışlardır. Geleneksel Savonius rotoru ile çeşitli burulma açıları verilmiş yeni tasarım rotorları karşılaştırmışlardır. Burulma açısının değeri ( $\delta$ ) arttıkça, üretilen mekanik güç ile rotorun hızının, güç katsayısının ve uç hızı oranının arttığını gözlemlemişlerdir. 45°'lik bir burulma açısı

için güç katsayısı değerlerinin,  $0^\circ$ 'lik açı için elde edilen değerlere kıyasla %32 arttığını tespit etmişlerdir.

Bethi ve diğ. (2019) çalışmalarında, Savonius rotorlarını, trenlerin yanına yerleştirerek tünellerin içinde hareket eden trenlerin ürettiği ani rüzgardan, rüzgar enerjisi elde etmeye odaklanmıştır. Sayısal simülasyon, geleneksel S şeklindeki Savonius rotorunun bu koşullar altında enerji toplayamadığını göstermiştir ve bu nedenle hareketli trenlerin verimliliğinden ödün vermeden yararlı bir güç üretmek için yeni bir tasarım önermişlerdir. Savonius rotorun yeni geliştirilmiş tasarımının (kanatların S şeklinde küçük bir boşluk bulunur, şaft yoktur), boşluksuz geleneksel rotor tasarımından daha verimli olduğunu tespit etmişlerdir. Trenden 0,5 m mesafeye yerleştirilen 0,75 m çapındaki türbinin, olası tüm çap ve yerleştirme kombinasyonlarından daha fazla güç ürettiğini bulmuşlardır.

Manganhar ve diğ. (2019) çalışmalarında, mikro rüzgar teknolojisinin dezavantajlarını aşmak amacıyla dikey Savonius türbini için bir Rotor House (RH) önermişlerdir. RH'nin, rotorun yayıldığı alandan neredeyse iki kat büyük alanı kullanacağını ve rotor bölgesindeki hız büyüklüğünü, serbest akış hızının 1,52 katına kadar yükselteceğini öne sürmüşlerdir. RH, rotor bölgesindeki rüzgar akışını hızlandırdığını ve akışı, yapının içinde bulunan rotor kanadının etkin konumuna yoğunlaştırdığını görmüşlerdir. RH sistemi ile, rotorun güç katsayısını, 0,125'ten 0,218'e yükseltmişlerdir.

Bai ve diğ. (2019) çalışmalarında, bir bina içi kanalın rüzgar hızının artırılması ve dolayısıyla rüzgar enerjisi üretimi için faydalı olduğunu öne sürmüşlerdir. Kanalın üç farklı genişliği, 2D, 3D ve 4D, kanaldaki farklı rüzgar türbini konumları ile ele alınmıştır. Savonius türbininin uzun kanaldaki performansı, basınç düşüşünün elektrik üretimine katkısı dikkate alınarak tartışılmış ve açık alandakilerle karşılaştırılmıştır. En dar 2D genişliğindeki kanalda, uç hız oranı  $\lambda=0,8$ 'de çalışan rüzgar türbininin güç çıkışının, açık alanda çalışan rüzgar türbininin güç çıkışından üç kat fazla olduğunu ortaya koymuşlardır.

### 3. RÜZGAR ENERJİSİ

Kaynağı güneş olan rüzgar enerjisi doğal, yenilenebilir, temiz ve tükenmez bir güç kaynağıdır. Rüzgar enerjisi; güneşin dünyaya gönderdiği enerjinin %1-2'lik miktarından oluşur. Güneş yer yüzeyini ve atmosferi eşit bir şekilde ısıtmaz. Dolayısıyla ortaya çıkan sıcaklık ve basınç farkı hava akımını oluşturur. Mevcut durumundan daha fazla ısınan bir hava kütlesi atmosferin yukarısına doğru yükselir ve bu hava kütlelerinin yükselmesiyle oluşan boşluğa, aynı hacimdeki soğuk hava kütlesi yerleşir. Rüzgar bu hava kütlelerinin yer değiştirmesine verilen isimdir. Başka bir ifadeyle rüzgar; birbirine komşu olan iki basınç bölgesi arasında basınç farkı olması sebebiyle meydana gelen ve yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımıdır.

Yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine hava akımı gerçekleşirken rüzgarlar şekillenir. Bunun sebebi yerel ısı yayılımı, dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi, yüzey sürtünmeleri, rüzgar önündeki farklı atmosferik olaylar ve arazinin topoğrafik yapısı gibi nedenlerdir. Hız ve yön rüzgarı ifade eden iki parametredir. Yerden yükseldikçe rüzgar hızı artar ve rüzgarın teorik gücü de hızının küpü ile orantılıdır.

#### 3.1 Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları;

- Atmosferde bol ve serbest olarak bulunur.
- Tükenmeyen temiz bir enerji kaynağıdır.
- Çevre dostudur.
- Kaynağı güvenilirdir, yenilenebilir olmasından dolayı zamanla fiyatı artmaz.
- Rüzgar türbinlerinin bakım ve işletme masrafları yok denecek kadar azdır.
- İstihdam oranını arttırır.
- Dışa bağımlılık oluşturmaz, hammaddesi tamamen yerlidir.

- Rüzgar türbinleri basit bir teknolojiye sahiptir, rüzgar enerjisi tesislerinin işletilmesi kolaydır.
- Rüzgar enerjisi santralleri kısa bir sürede kurulup faaliyete geçirilebilir.

Dezavantajları;

- Rüzgar bedava ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen, modern rüzgar türbinleri pahalıdır ve sadece rüzgar olduğunda güç üretirler, bu yüzden rüzgar türbini güç çıktısının sürekliliği yoktur, bu nedenle diğer güç üretim ünitelerinin çoğuna göre dezavantajlıdır.
- Bundan başka rüzgar türbinlerinin rüzgarlı yerlere konumlandırılmasının gerekli olması; ticari güç iletim ağlarından oldukça uzak olmasına neden olur ve yüksek gerilim güç hatlarını gerektirir.
- Rüzgar türbinleri gürültü ve görüntü kirliliği oluşturabilir.

Rüzgar türbinlerinin gürültü ve görüntü kirliliği göreceli bir kavramdır. Bu sorun rüzgar türbininin tasarımında ve yerleştirilmesinde estetik faktörlerin göz önüne alınmasıyla çözülebilir. Yapılan çalışmalar ile rüzgar türbinlerinin oluşturduğu gürültünün çok yüksek düzeyde olmaması sebebiyle büyük çevresel etki göstermediği tespit edilmiştir. Ayrıca fosil yakıtların kullanılması sonucu oluşan çevresel etkilerle karşılaştırıldığında rüzgar enerjisinin kullanılmasından kaynaklanabilecek sorunların önemsiz kaldığı görülmektedir. Avantajlı yönlerinin olması sebebiyle rüzgar türbinlerinin gelecekte küresel ölçekte enerji arzında önemli bir rol oynayacağı beklenmektedir.

### **3.2 Rüzgar Enerjisinin Kullanım Alanları**

Rüzgar enerjisinin pek çok kullanım alanı vardır;

- Rüzgar enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek su pompalamasında kullanılır. Tarımsal alanların sulanması, evsel kullanım ve hayvanların su gereksinimi için oldukça tercih edilen bir enerji kaynağıdır.
- Kırsal alanlarda elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Ayrıca üretilen enerji elektrik şebekesini besler.

- Elektrik şebekesinin ulaşamadığı yerleşim yerlerinde, dağlık ve ormanlık alanlarda, yüksek yerlerdeki iletişim birimlerinde, yangın gözetleme kulelerinde ve deniz fenerlerinde rüzgar enerjisinden faydalanılır.
- Rüzgar enerjisinin ısı uygulamaları da bulunmaktadır. Rüzgar enerjisinden elde edilen mekanik enerjiyi ısı enerjisiye dönüştüren sistemler mevcuttur. Bu sistemler, suyun tankta ısıtılmasıyla enerji depolar ve yerel ısıtma, sıcak su hazırlama gibi amaçlara hizmet eder.

### **3.3 Rüzgar Türbinleri**

Rüzgar enerjisinin kullanımı, yel değirmenlerinden modern rüzgar santrallerine dayanan teknolojik bir süreçle değişmiştir. Önceleri sadece mekanik enerjiye çevrilebilen rüzgar enerjisi şimdilerde rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisine çevrilebilmektedir. Günümüze kadar pek çok yenilikçi rüzgar türbini tasarımı önerilmiş ve yüzyıllar boyunca test edilmiştir. Bir rüzgar türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur.

Modern rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için kanat profili ve kanat profili üzerine etkiyen iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir.

#### **3.3.1 Sürüklenme Kuvveti**

Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti, hava akışının  $90^0$  dik geldiği durumda meydana gelirken; minimum sürüklenme kuvveti hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir (Durak ve Özer, 2008). Kısaca sürüklenme kuvveti, rüzgar yönünde herhangi bir alana gelen kuvveti ifade eder.

### **3.3.2 Kaldırma Kuvveti**

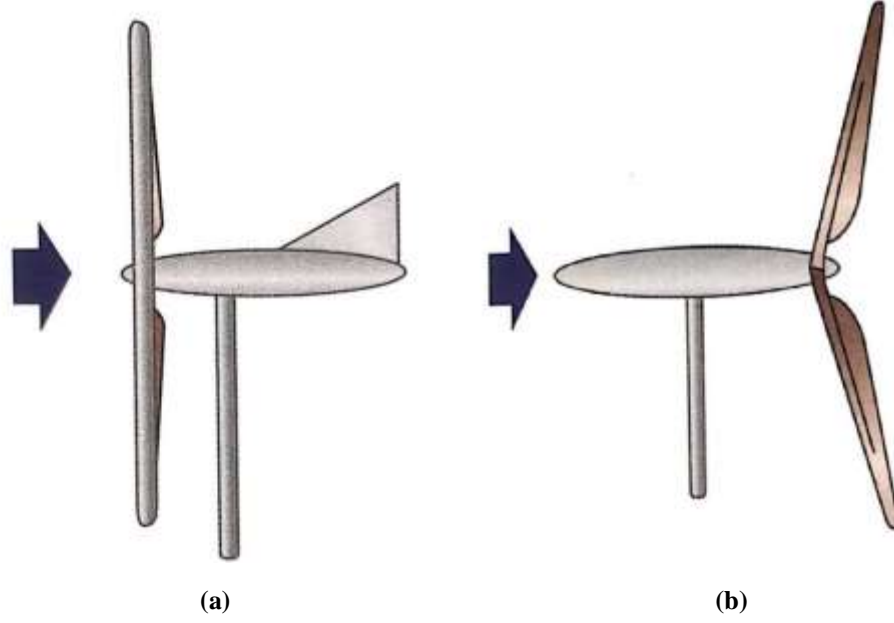
Kaldırma kuvveti, akışa dik olarak etkimektedir. Uçların yerden havalanmasına da bu kuvvet neden olmaktadır. Düz bir plaka üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine  $0^0$  açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Hava akışı hızlandıkça basınç düşer, hava akışı yavaşladıkça da basınç artar (Durak ve Özer, 2008). Bu olay sayesinde kaldırma kuvveti cisim üzerinde çekme meydana getirir.

### **3.3.3 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması**

Rüzgar türbinleri genellikle dönme eksenlerinin yönelimine göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmaya göre rüzgar türbinleri yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT) ve dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT) olmak üzere ikiye ayrılır. Bir başka alternatif sınıflandırma, dönen mile torku sağlayan mekanizmaya (kaldırma veya direnç) göre yapılabilir. Ayrıca türbinler yapısal özelliklerine göre de sınıflandırılabilirler.

#### **3.3.3.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri**

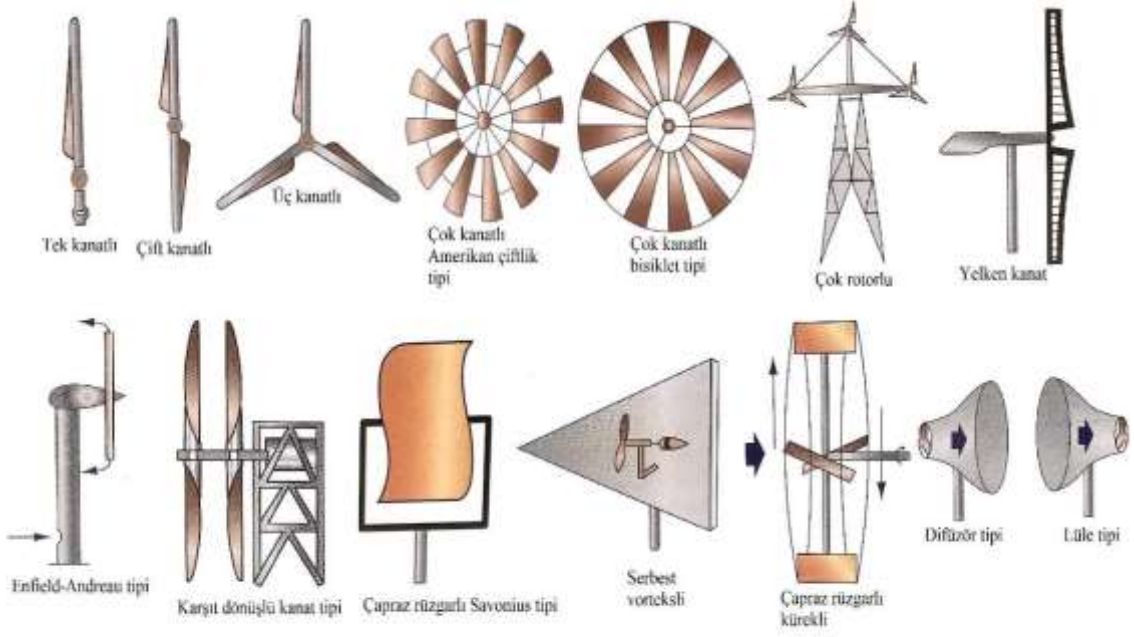
Dönme eksenini rüzgar yönüne paralel olan rüzgar türbinleri yatay eksenli rüzgar türbinleri olarak adlandırılmaktadır. Türbin, rüzgarı en iyi alabilecek konumda, kule eksenini etrafında dönebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Kanat sayısının azalması bu türbinlerin daha hızlı dönmesini sağlar. YERT'in kanatlarının tasarımı yüksek performans elde etmek amacıyla gittikçe incelen burulmuş kanat biçimindedir. Rüzgarın geldiği yön (upwind) ve rüzgarın geldiği yönün tersine bakan yön (downwind) olmak üzere iki tür kanat tasarımı vardır. Şekil 3.1'de bu iki temel tasarım görülmektedir. Günümüzdeki modern rüzgar türbinleri rüzgarı önden alan tip yapılmaktadır.



**Şekil 3.1:** (a) Rüzgarı önden alan türbin, (b) Rüzgarı arkadan alan türbin (Çengel ve Cimbala, 2018)

Yatay eksenli türbinler kanat sayılarına göre de isimlendirilmektedir. Buna göre tek, çift ve üç kanatlı çeşitlerinin yanında Amerikan çok kanatlı ve bisiklet tipi çok kanatlı şeklinde tiplere ayrılmaktadır. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinin verimi %45 civarındadır. Şekil 3.2’de çeşitli yatay eksenli türbinler gösterilmiştir.





**Şekil 3.2:** Yatay eksenli rüzgar türbinleri (Çengel ve Cimbala, 2018)

Şu ana kadar dikey eksenli rüzgar türbini tasarımlarının hiç birisi, yatay eksenli rüzgar türbini tasarımlarının verimliliklerine ulaşamamıştır. Rüzgar çiftlikleri olarak adlandırılan ve bir arada kümelenmiş çok sayıda rüzgar türbini bulunduran yerlerde yatay eksenli rüzgar türbininin seçilme sebebi diğerlerine nazaran sahip olduğu bu yüksek verimliliğidir.

### 3.3.3.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

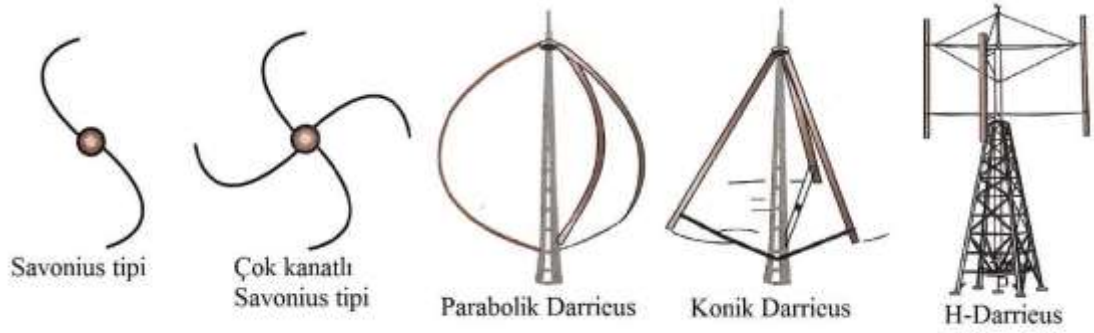
Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenleri ve kanatları rüzgar yönüne diktir. Kanatların yüzeyine gelen itme kuvveti farkı, dönme hareketini oluşturur. Genellikle kuleye ihtiyaç duymazlar çünkü türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabilir. Yaw mekanizmasına ihtiyaçları yoktur. Kaportanın tepesinde rüzgarın yönünü ve hızını ölçen bir sensör bulunur. Rüzgardaki sapmalar tespit edildikten sonra denetleyiciden uygun mesajla yaw mekanizmasına gönderilir. Hidrolik ya da mekanik aksamı olabilen Yaw mekanizması; türbinleri rüzgarı alacak şekilde döndürür. Şekil 3.3'te Yaw Mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Yaw Mekanizması (Rexroth Bosch Group, 2019)

Dikey eksenli türbinlerin avantajlarından ilki, kule ve dümen masrafının olmamasıdır. Mil parçası dışında diğer tüm parçaların bakım ve onarımı kolaydır. Dikey eksenli türbinlerde elde edilen enerjinin nakledilmesi daha kolaydır çünkü, birincisi elde edilen güç toprak seviyesinde çıkar, ikincisi yerleşim yerlerine yakın kurulabildiklerinden yeni yüksek gerilim güç hatlarını gerektirmezler.

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin önemli tipleri; Savonius rüzgar türbinleri, Darrieus rüzgar türbinleri, H-Darrieus rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir. Şekil 3.4'te dikey eksenli rüzgar türbinleri gösterilmiştir. Darrieus rüzgar türbini Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir (Durak ve Özer, 2008). Geometrik formlu aerodinamik kanatlar yüksek performanslı olmasını sağlar. Kanatların hafif eğimli olması kanatlardaki çekme gerilimini en aza indirir. İki veya üç kanatlı olabilen bu türbin yüksek rüzgar hızlarında çalışabilir. Darrieus tipi türbinin verimi yaklaşık %35'i bulabilmektedir. Harekete başlayabilmek için Savonius rotoruna veya tahrik motoruna ihtiyaç duyar. Darrieus rüzgar türbinlerinin geliştirilmesiyle H-Darrieus rüzgar türbinleri ortaya çıkmıştır. Daha karmaşık bir yapıya sahip olan bu türbin, aerodinamik profilinin düz olmasıyla Darrieus türbininden ayrılır.

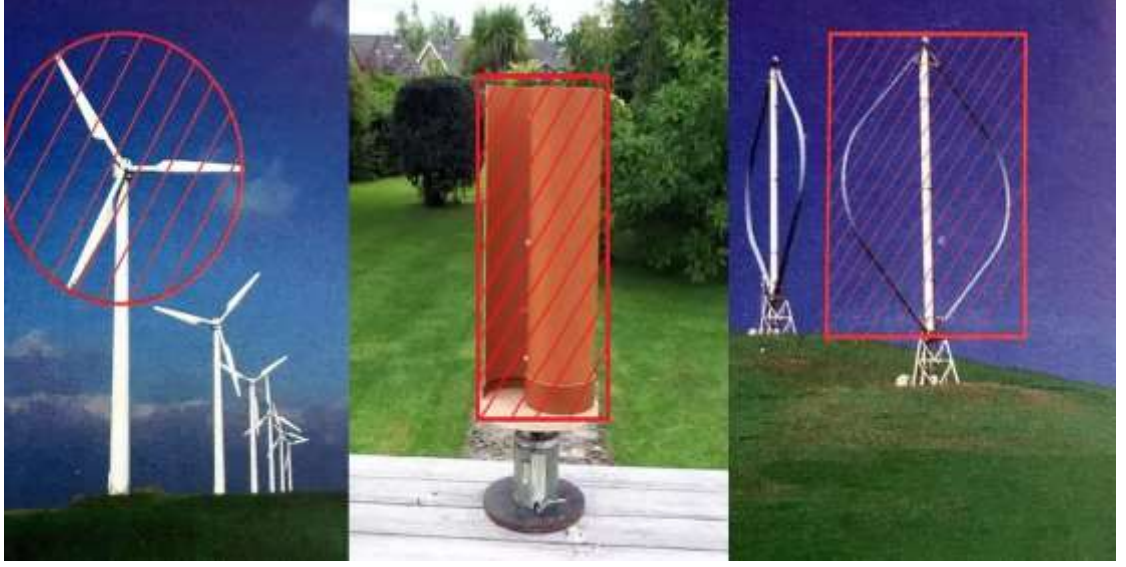


Şekil 3.4: Dikey eksenli rüzgar türbinleri (Çengel ve Cimbala, 2018)

### 3.4 Rüzgar Türbinlerinin Performansı

Rüzgar türbinlerinin performansı; güç katsayısı ve tork katsayısı ile ölçülür. Güç katsayısı ve tork katsayısının hesaplanabilmesi için öncelikle kullanılabilir rüzgar gücü ve rüzgar kuvvetinin oluşturduğu tork dolayısıyla da süpürme alanı bulunmalıdır.

Bir rüzgar türbininin süpürme alanı ( $A$ ), türbin kanatları dönerken kanatlar tarafından süpürülen rüzgar yönüne dik alan olarak ifade edilir. Yatay eksenli rüzgar türbini için süpürme alanı dairesel iken, dikey eksenli rüzgar türbini için süpürme alanı dikdörtgen kesitlidir. Şekil 3.5'te yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin süpürme alanları gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin süpürme alanı

Süpürme alanındaki kullanılabilir rüzgar gücü ( $W_k$ ), rüzgarın kinetik enerjisinin değişim hızı olarak hesaplanır. Kullanılabilir rüzgar gücü süpürme alanı ile orantılıdır. Rüzgar türbinleri veya türbinlerin kurulum yerleri birim alana düşen kullanılabilir rüzgar gücü bakımından karşılaştırılmalıdır. Bu kavram rüzgar güç yoğunluğu olarak adlandırılır ve kullanılabilir rüzgar gücünün süpürme alanına bölünmesi ile elde edilir.

Bir rüzgar türbininin aerodinamik verimi güç katsayısı ile ölçülür ve  $C_p$  ile gösterilir. Güç katsayısı, mil çıkış gücünün ( $W_c$ ) kullanılabilir rüzgar gücüne bölünmesi ile elde edilir. Bir diğer performans ölçütü olan tork katsayısı  $C_t$  olarak gösterilir ve elde edilen döndürme momentinin, rüzgar kuvvetinin oluşturduğu momente bölünmesi ile elde edilir.

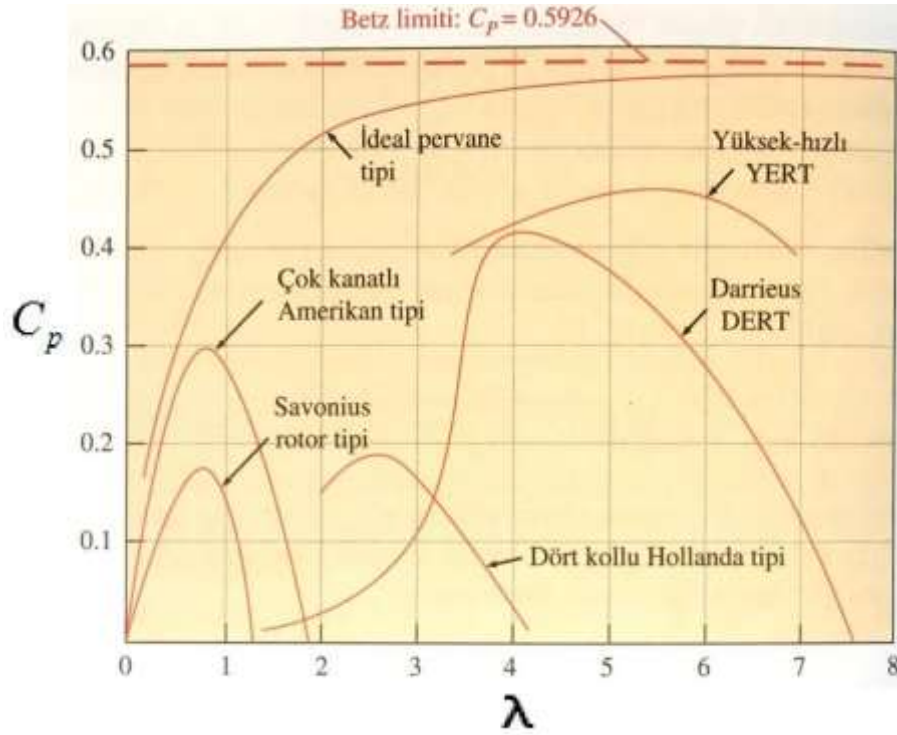
Rüzgar türbinlerinin performans katsayıları, kanadın hızının bir fonksiyonu olarak değişir ve buna uç hız oranı ( $\lambda$ ) denir.  $\lambda$ , kanat uç hızının rüzgar hızına bölünmesi ile bulunur.

$C_{p,max}$  herhangi bir rüzgar türbininin mümkün olabilen maksimum güç katsayısını gösterir ve Betz limiti olarak bilinir. Gerçekte rüzgar türbinleri, ideal analizde ihmal edilen tersinmez kayıplardan dolayı, Betz limitinden daha küçük bir

maksimum güç katsayısına sahiptirler. Üç temel unsur Betz limitinden daha küçük ulaşılabilir maksimum güç katsayısı elde edilmesine neden olur:

- Rotorun arkasındaki art izi bölgesinin dönmesi (girdap)
- Sonlu sayıda rotor kanatlarının olması ve bu kanatlarda uç vortekslerinin kaldırma üretmesinden dolayı uç kayıpları olması
- Rotor kanatları üzerinde sıfırdan farklı aerodinamik direnç oluşması

Şekil 3.6’da çeşitli rüzgar türbini tipleri için türbin kanat uç hızı oranının fonksiyonu olarak güç katsayısı  $C_p$  ’nin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Çeşitli rüzgar türbini tiplerinin performansı (güç katsayısı) (Çengel ve Cimbala, 2018)

### 3.5 Rüzgar Türbinlerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması

Rüzgar çiftlikleri kurulumunda ciddi kayıplardan kaçınmak için rüzgar türbinlerinin özellikleri iyi bilinmelidir. Türbinler; kanat çeşitlerine, rüzgarı alış şekillerine ve kullanım alanlarına göre birkaç çeşitte üretilebilmektedir.

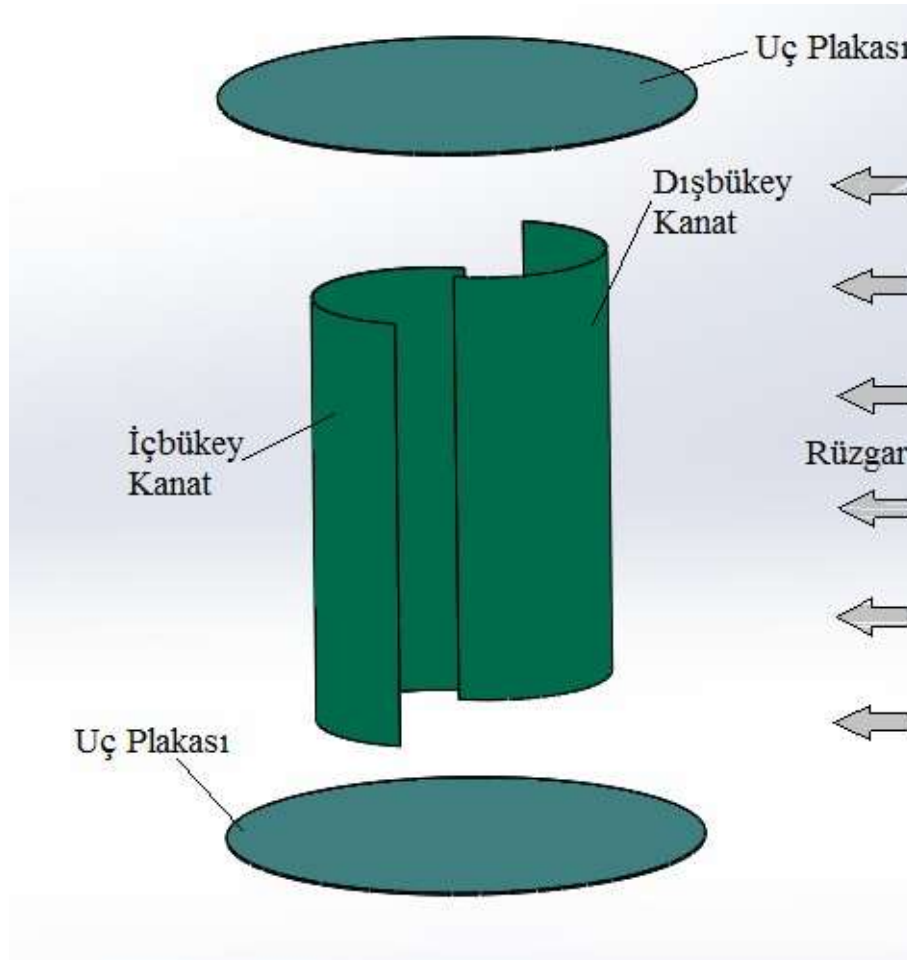
Rüzgar türbinlerini büyüklüklerine göre karşılaştırdığımızda; büyük rüzgar türbinleri endüstriyel alanlarda kullanılırlar. Türbin gücü 50 kW ile 8,8 MW

aralığındadır. Ayrıca Mitsubishi Heavy'nin Danimarka'lı rüzgar sistemleri lideri Vestas ile ortaklaşa kurduğu MHI Vestas, 2020'ye kadar 10 MW gücündeki dünyanın en büyük türbinlerini üreteceğini duyurmuştur. Devasa türbinlerden sadece bir tanesinin on bin civarında evin bir günlük enerji ihtiyacını karşılayabilecek güçte olduğu tahmin edilmektedir. Aynı şirket 2018 bahar ayında 8,8 MW gücündeki V164 rüzgar türbinlerini İskoçya açıklarında kurarak faaliyete geçirmiştir (Aygünoğlu, 2019). Büyük rüzgar türbinleri ürettikleri enerjiyi şebekeye verirler. Bu türbinlerin akü ihtiyacı olmamakla birlikte bakım masrafı ve kurulum masrafı yüksektir. Küçük rüzgar türbinleri ise kişisel kullanım amaçlıdır. Türbin gücü 50 W ile 30 kW arasındadır. Küçük rüzgar türbinleri; çiftlik evleri, radyo kuleleri, seralar ve telekomünikasyon alıcıları gibi düşük elektrik ihtiyacı gerektiren yerlerde kullanılır. Küçük rüzgar türbinlerinin akü ihtiyacı vardır. Bu türbinlerin bakım masrafları olmamakla birlikte, kurulum masrafları düşüktür.

Türbinleri rüzgarı alış yönüne göre de karşılaştırabiliriz. Rüzgarı önden alan türbinler Yaw mekanizmasına ihtiyaç duyarlar. Çünkü rüzgara karşı çalışan türbinler rüzgarın geliş yönüne dönük olmadan dönme hareketi yapamaz. Yaw mekanizması rüzgarın yönünde olan değişikliklere bağlı olarak türbini sürekli rüzgara döndürür. Rüzgarı önden alan türbinlerin kanatları sert malzemelerden yapılmalıdır bu sebeple kuleye binen yük fazladır. Rüzgarın türbine verdiği zarar azdır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise Yaw mekanizmasına ihtiyaç yoktur. Kanat malzeme yapısı esnek olabilir. Kuleye binen yük azdır. Fakat rüzgar türbine önemli ölçüde zarar verir.

#### 4. SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNİ

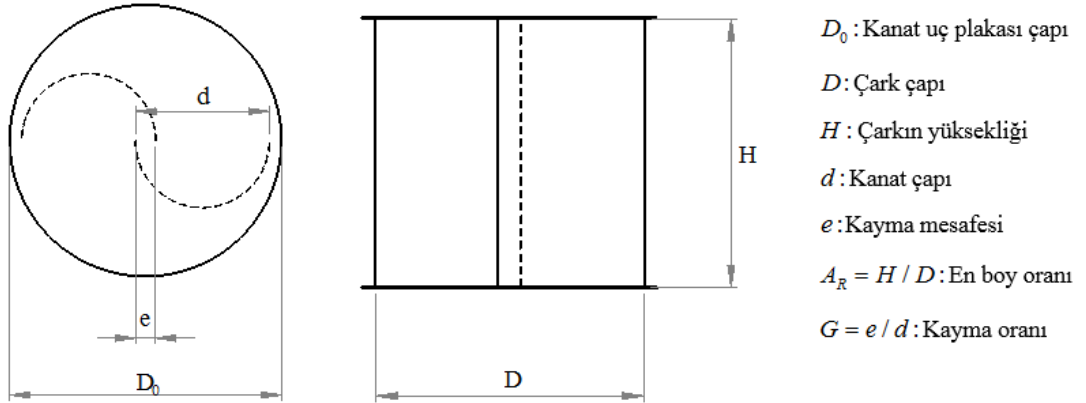
Dikey eksenli Savonius rüzgar türbini Finlandiya'lı mühendis Sigurd Savonius tarafından 1925 yılında bulunmuştur (Altan, 2006). Bu rotor; kepece görünümlü iki yarım daire şeklindeki kanatlardan oluşur. Üstten görünümü bir S'ye benzer. Esas olarak sürüklenme kuvveti ile çalışır. Mekanik güç; Savonius rotorun içbükey ve dışbükey kanatları arasındaki tork farkının bir sonucudur. Belirli bir hızda gelen rüzgar; rotorun içbükey kanadında pozitif tork oluştururken, dışbükey kanadında negatif tork oluşturur. Pozitif torkun negatif torktan büyük olmasından dolayı dönme hareketi oluşur. Tork farkı ne kadar yüksek olursa, mekanik güç o kadar fazla üretilir. Savonius rüzgar türbinin kanatları sac levha, plastik levha ve kompozit malzemelerden üretilebilir. Şekil 4.1'de bu tez kapsamında katı modellemesi yapılan Savonius rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 4.1: İki kanatlı Savonius rüzgar türbini

#### 4.1 Savonius Rüzgar Çarklarının Avantajı ve Dezavantajı

Savonius rüzgar türbinleri; diğer dikey eksenli emsallerinden ve yüksek kanat hızlı yatay eksenli türbinlerden aerodinamik performans açısından dezavantajlıdır. Buna rağmen Savonius rotorun pek çok avantajı da bulunmaktadır. Savonius türbinin imalatı basit ve ucuzdur. Düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç özelliklerine sahiptir. Herhangi bir yönden rüzgarı kabul eder ve ilk hareket için ek bir kuvvete ihtiyaç duymadan çalışmaya başlar. Bir Savonius rotorun performansı güç katsayısı  $C_p$  ve tork katsayısı  $C_t$  ile değerlendirilir. Savonius rotorun yüksekliği, uç plaka çapı, rotor çapı ve kayma mesafesi rotorun performansını etkileyen bazı geometrik özelliklerdir. Şekil 4.2’de çizimini gerçekleştirdiğim Savonius rotorun geometrik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Savonius çarkının geometrik özellikleri

#### 4.2 Savonius Rüzgar Çarklarının Kullanım Alanları

Savonius rotorun geniş bir uygulama alanı vardır. Yüksek verimli rüzgar türbinlerinin ve gel git güç jeneratörlerinin ilk harekete başlama elemanı olarak kullanılırlar. Savonius rotorunun en önemli avantajlarından biride düşük gürültüye sahip olmasıdır. Bu öne çıkan özelliği sayesinde türbin; yerleşim bölgelerinin yanına bağımsız güç sistemi olarak monte edilebilir. Savonius türbinleri; havuzların havalandırılması için suyun hareketlendirilmesinde, tahıl öğütülmesinde, tarımsal



alanların sulanması ve hayvanların su ihtiyacı için su pompalanmasında kullanılır. Kırsal kesimlerde çiftlikler elektrik ihtiyacını karşılamak ve bahçe sulamak için Savonius türbinini kullanırlar. Günümüze kadar gelen teknolojik gelişmeler sayesinde Savonius türbinleri elektrik üretimi içinde tercih edilmeye başlanmıştır. Evlerin küçük çaptaki elektrik ihtiyacını karşılayabilirler. Kamu aydınlatma sistemlerinde, binaların ısıtılmasında, havalandırılmasında ve iklimlendirilmesinde çeşitli Savonius türbini uygulamaları mevcuttur. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te Savonius rotorunun sokak lambası uygulamaları gösterilmiştir.

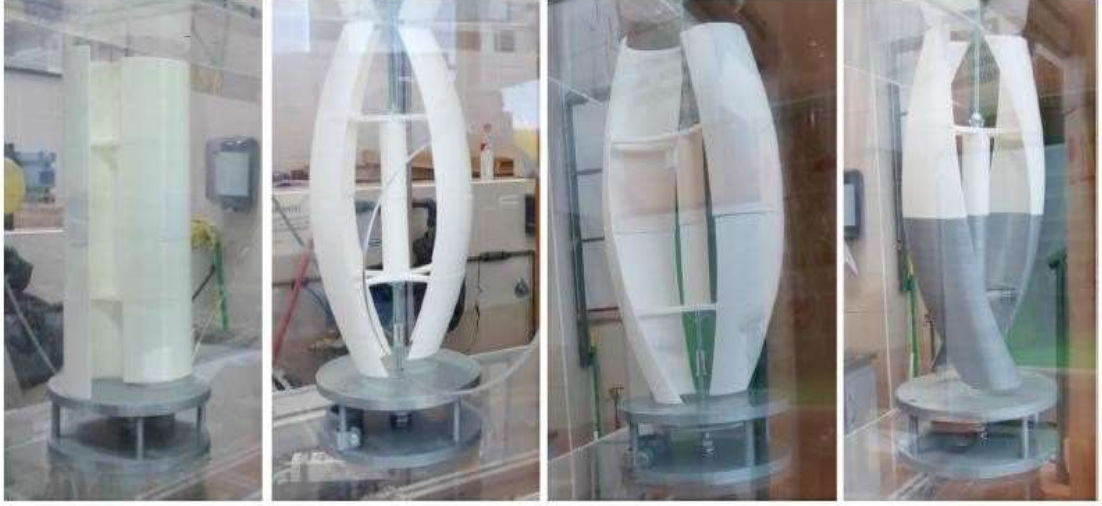


**Şekil 4.3:** Savonius rotoru ile çalışan sokak lambası (Ricci ve diğ. 2016)



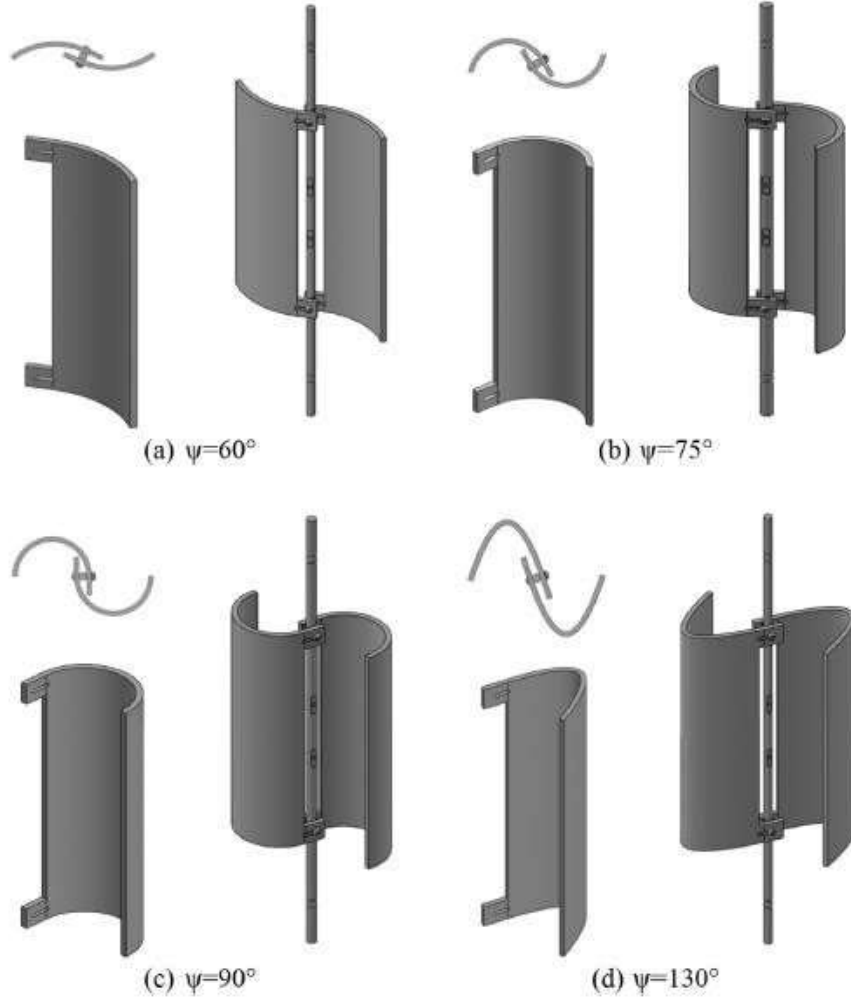
**Şekil 4.4:** Sokak lambaları için elektrik üreten micro Savonius türbini çizimi (Wang ve Zhan, 2013)

Savonius rotorunun düşük olan performansını arttırmak için günümüze kadar pek çok sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır. Farklı kanat tiplerinin tasarlanması, perde sistemlerinin denenmesi ve konstrüksiyonun katlı yapılması gibi çalışmalar yapılmıştır. Colmenero ve diğ. (2018) çalışmalarında, Savonius rotorunu modifiye ederek incelemişlerdir. Geleneksel Savonius rotoru ile çeşitli burulma açıları verilmiş modifiye rotorları karşılaştırmışlardır. Burulma açısının değeri  $\delta$  arttıkça, üretilen mekanik güç ile rotorun hızının, güç katsayısının ve uç hızı oranının arttığını tespit etmişlerdir.  $45^\circ$ 'lik burulma açılı rotorun güç katsayısının,  $0^\circ$ 'lik burulma açılı rotorun güç katsayısından %32 fazla olduğunu bulmuşlardır. Şekil 4.5'te klasik Savonius rotoru ve çeşitli burulma açılarında modifiye edilmiş Savonius rotoru gösterilmektedir.



**Şekil 4.5:** Klasik Savonius rotoru ve 0, 22,5, 45 derece burulma açılarında modifiye edilmiş Savonius rotoru (Colmenero ve diğerleri, 2018)

Driss ve diğ. (2015) çalışmalarında, geleneksel olmayan Savonius rüzgar rotorları etrafındaki türbülanslı akışı incelemişlerdir.  $\psi=60^0$ ,  $\psi=75^0$ ,  $\psi=90^0$  ve  $\psi=130^0$  kanat yay açlarına sahip dört farklı rotor tasarımını diğer parametreleri sabit tutarak incelemiş ve kıyaslamışlardır. En yüksek kanat yay açısına ( $\psi$ ) sahip çarkın, türbülanslı akış ortamında daha iyi performansa sahip olduğunu bulmuşlardır. Şekil 4.6’da farklı kanat yay açlarına sahip Savonius rüzgar türbinleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Farklı kanat yay açlarına sahip Savonius rüzgar türbinleri (Driss ve diğerleri, 2015)

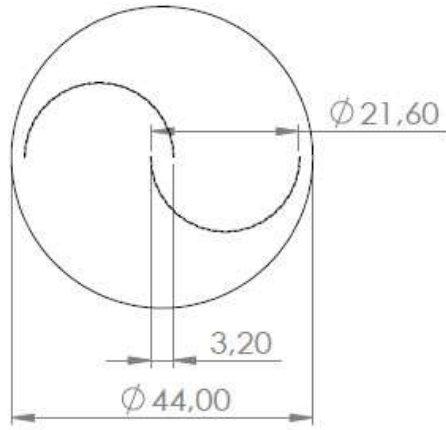
### 4.3 Farklı Kanat Tiplerinde Savonius Rüzgar Çarkı Tasarımı

Bu tez çalışmasında klasik Savonius rüzgar çarklarının performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla Savonius rüzgar çarklarının performansları farklı kanat profil tasarımları ile araştırılmıştır. Bu kapsamda kanat profilleri üzerinde yapılan literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmada; çark kanat profillerinin tasarımı, değişik geometrik parametrelerde düz levhalar ile yapılmıştır. Böylelikle Savonius rüzgar çarklarının performansları araştırılmıştır.

Çalışmada incelenecek olan modelin ve akış alanının geometrisi ve ağ yapısı oluşturulup gerekli sınır şartları ile çözümü için, Ansys workbench ile Fluent

programını kullanılmıştır. Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Sayısal Akışkanlar Dinamiği yazılımıdır. Ansys Fluent programında akışın fiziksel özellikleri tanımlanarak; çözüm tekniği ve türbülans modeli seçilmiş, sınır şartlarının değerleri girilerek, iterasyon sayısı ve yakınsama değeri belirlenip çözümler yapılmıştır. Türbülanslı akışın çözümünde standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Türbülans modeli ve sınır şartları değerleri literatürdeki çalışmalara dayanarak seçilmiştir. Tez kapsamında çözümlenmeleri yapılan tüm modeller için aynı çözümleme koşulları kullanılarak, kanat profil geometrilerinin statik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak klasik Savonius rüzgar çarkının tasarım parametreleri tespit edilmiştir. Buna göre; kanat uç plakası çapı  $D_0 = 1.1 \times D$  olarak alınmıştır.  $D_0$  kanat uç plakası çapıdır.  $D$  çark çapıdır. Şekil 4.7'de gösterildiği gibi çark çapı  $D = 40$  cm, çark yüksekliği  $H = 40$  cm ve alt, üst kanat uç plakaları çapı  $D_0 = 44$  cm yapılmıştır. Kayma oranı  $(e/d)$  literatür çalışmalarına dayanarak 0,15 olarak belirlenmiştir. Burada  $e$ ; kayma mesafesi ve  $d$ ; kanat çapıdır. Çalışmasında kayma mesafesi  $e = 3,2$  cm ve kanat çapı  $d = 2r = 21,6$  cm olarak alınmıştır.



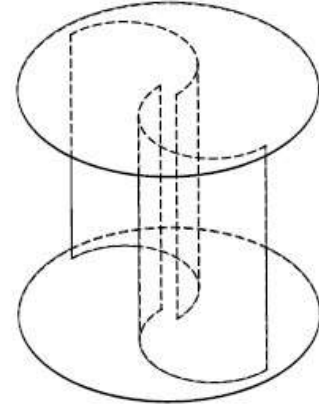
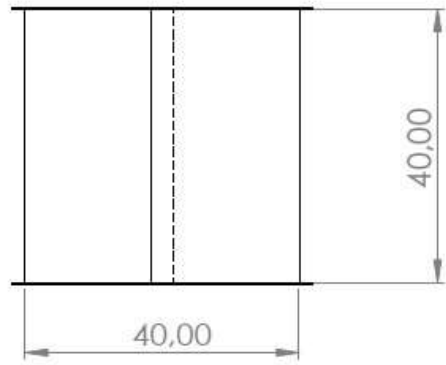
$$D_0 = 44 \text{ cm}$$

$$D = 40 \text{ cm}$$

$$H = 40 \text{ cm}$$

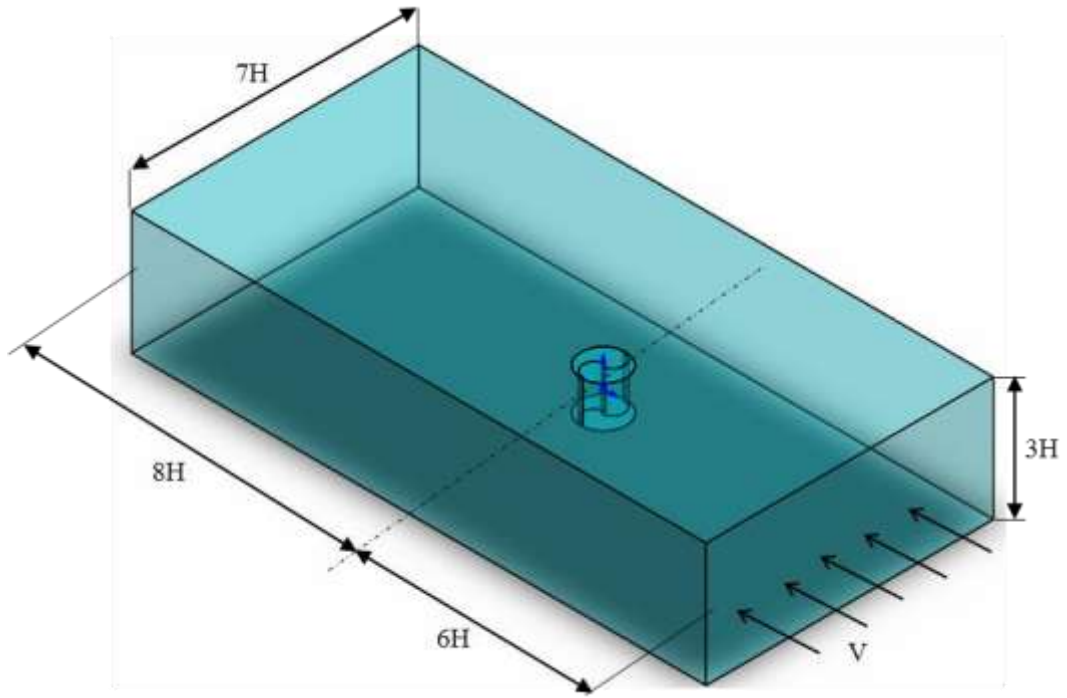
$$e = 3,2 \text{ cm}$$

$$d = 21,6 \text{ cm}$$



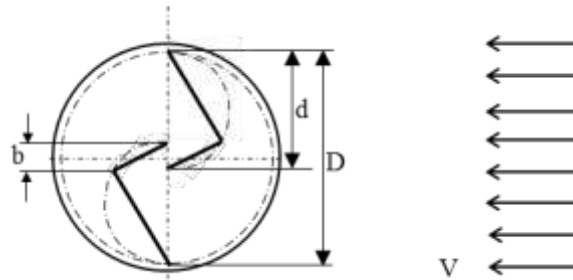
**Şekil 4.7:** Klasik Savonius rüzgar çarkı geometrik parametreleri

Buna ilave olarak kullanılan hava ortamının boyutları ise çark yüksekliğine göre belirlenmiştir. Tez kapsamında klasik Savonius rüzgar çarklarına alternatif olabilecek kanat profilleri araştırıldığı için rüzgar hızı olarak, Savonius rüzgar türbinlerinin çalışma hız aralığına uygun olan 7,5 m/s'lik rüzgar hızı seçilmiştir. Kullanılan hava ortamının boyutları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Çalışmada üzerinde durulan Savonius rüzgar çarklarının performansları; statik olarak, çarkın rüzgara tümüyle maruz kaldığı durumda, yani rüzgar ile çark arasında  $90^0$ 'lik açı olacak şekilde çarkın yerleştirildiği durumda incelenmiştir.



Şekil 4.8: Savonius rüzgar çarkının ortam parametreleri

Tasarlanan düz levhalı Savonius rüzgar çarkının geometrik parametreleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Bu tasarıma göre düz levhalardan üçgen formu oluşturularak klasik Savonius rüzgar çarkının statik performansının eş veya üst değerlerine ulaşmak hedeflenmiştir. Klasik Savonius rüzgar çarkının kanat çapı sabit tutularak değişik üçgen formları oluşturulmuştur. Savonius rüzgar çarkının; çarkın merkezine yakın olan kenardan çark çapının dışına doğru değişen farklı  $b$  geometrik parametrelerinde, düz levhalı üçgen formları tasarlanmıştır.  $b / d$  değeri 0,15, 0,50 ve 0,85 arasında değiştirilerek, üçgen formların statik performans değerleri Ansys Fluent programında çözümlenmeler gerçekleştirilerek bulunmuştur.



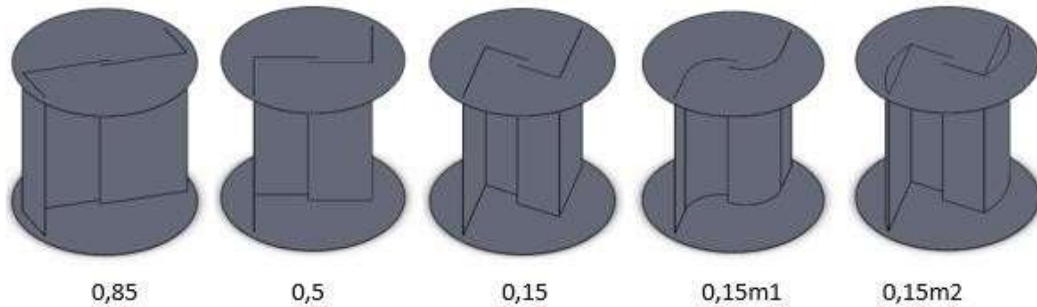
Şekil 4.9: Düz levhalı Savonius rüzgar çarkı geometrik parametreleri

Savonius rüzgar çarkına ait statik tork katsayısı ( $C_t$ ) denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_t = \frac{4T}{\rho \cdot H \cdot D^2 \cdot V_r^2} \quad (4.1)$$

Burada  $T$  ; çarktan elde edilen statik torku,  $V_r$  ; rüzgar hızını ve  $\rho$  ; havanın yoğunluğunu temsil etmektedir.

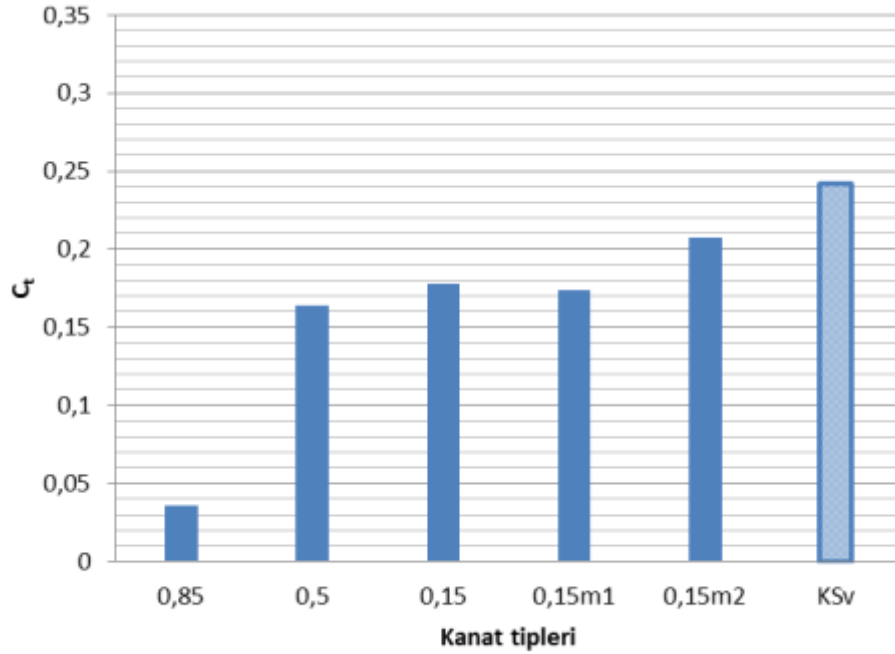
Yapılan çözümlere göre klasik Savonius rüzgar çarkının (KSv) statik tork katsayısı değeri yaklaşık olarak 0,242 bulunmuştur.  $b / d$  geometrik parametre oranının 0,85 olduğu durumda en düşük statik tork katsayısı değeri elde edilirken, 0,15 olduğu durumda klasik Savonius çarkına en yakın tork katsayısı değeri bulunmuştur. Bundan dolayı bu orandaki tasarıma modifiye yapılarak klasik Savonius çark performansına yakın değerler elde edilmek istenmiştir. İlk yapılan modifiye tasarımda üçgenin köşe kısmı yuvarlatılmıştır. Bu kapsam da radyus işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk modifiye tasarım 0,15m1 olarak adlandırılmıştır. İkinci yapılan modifiye tasarımda ise üçgenin uzun kenarının üzerine daire yay parçası eklenmiştir. Yeni modifiye çark 0,15m2 olarak adlandırılmıştır. Şekil 4.10'da çözümleri yapılan Savonius rüzgar çarkının kanat tipleri gösterilmektedir. Burada 0,15, 0,5 ve 0,85 değerleri  $b / d$  oranını göstermektedir.



Şekil 4.10: Kanat tiplerine göre ( $b / d$  oranı) Savonius rüzgar çarkları

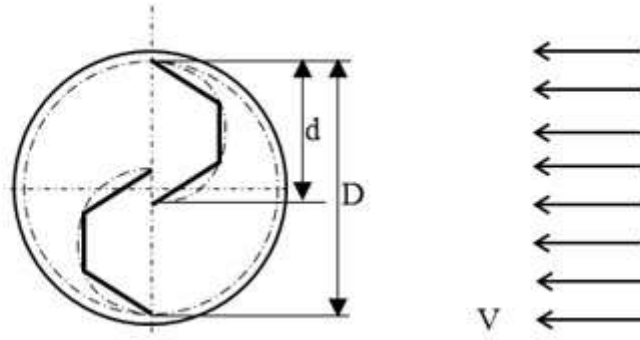


Şekil 4.11’de  $b/d$  oranının farklı değerlerinde yapılan kanat tiplerine göre statik tork katsayıları gösterilmiştir. Öncelikle 0,15, 0,5 ve 0,85  $b/d$  değerlerine sahip çarklar klasik Savonius çarkı ile statik tork katsayısı açısından karşılaştırılmıştır. 0,15 oranına sahip çarkın statik tork katsayısı değeri klasik Savonius çarkının tork katsayısı değerine yakın çıkmıştır. Bu sebeple 0,15  $b/d$  oranına sahip çark modifiye edilerek 0,15m1 tasarımı oluşturulmuştur. Ancak elde edilen tork katsayısı değeri daha da düşmüştür. Bu sebeple ikinci modifiye çark 0,15m2 tasarlanmış ve daire yay parçası takviyesinin etkisi incelenmiştir. Bu son tasarım ile 0,207 tork katsayısı değerine ulaşılarak klasik Savonius çarkı performansına en yakın değeri verebilecek kanat tipi belirlenmiştir.



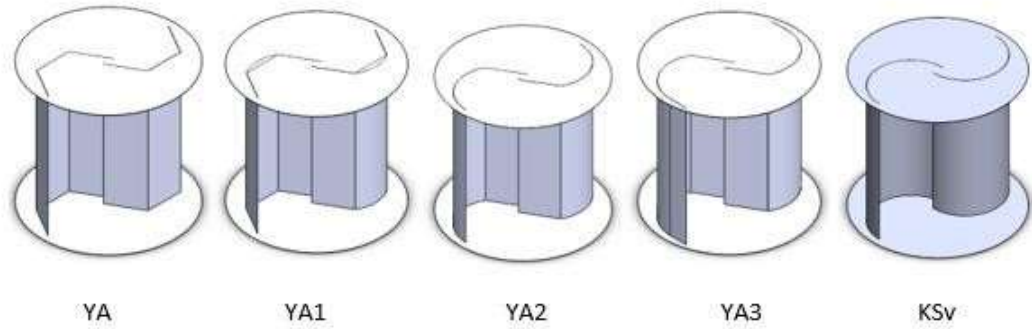
Şekil 4.11: Kanat tiplerine göre ( $b/d$  oranı) statik tork katsayıları

Şekil 4.12’de yarım altıgen kanat tipli Savonius rüzgar çarkının geometrik tasarımı gösterilmiştir. Yarım altıgen formundaki kanatların köşe kısımlarının sınırları, referans alınan klasik Savonius çarkındaki daire kanadının çapı kadar alınmıştır. Dolayısıyla üç eşit uzunluktaki düz levhanın birleşimiyle bir yarım altıgen kanat formu oluşturulmuştur.



**Şekil 4.12:** Yarım altıgen kanat tipli Savonius rüzgar çarkı

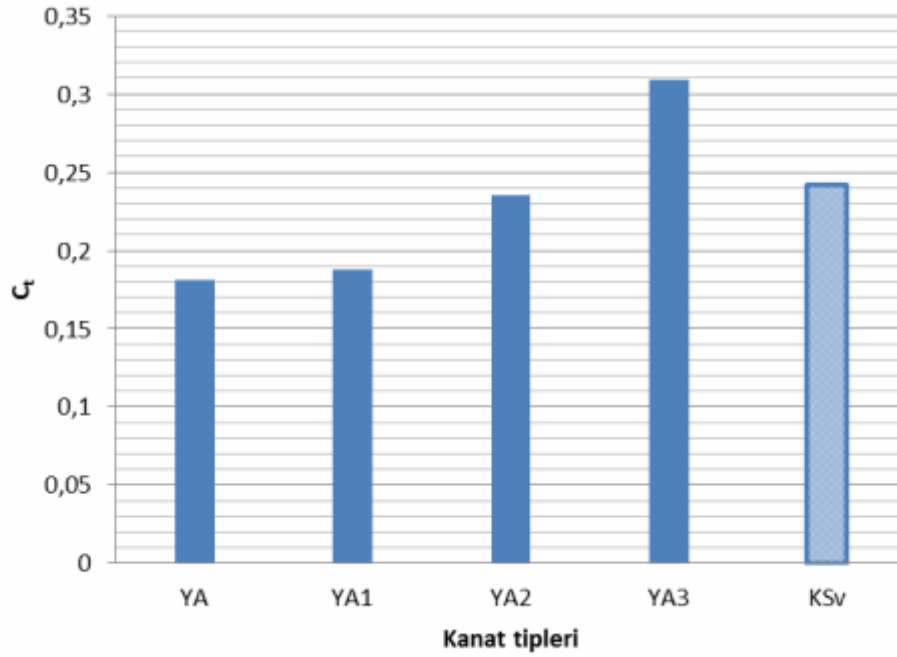
Şekil 4.13'te tasarlanan kanat tipleri gösterilmektedir. Burada kanat tipleri şu şekilde adlandırılmıştır: YA; yarım altıgen formlu kanat tipidir. YA1; rüzgarı ilk karşılayan uç kısmına daire yay parçası takviyeli yarım altıgen formlu kanat tipidir. YA2; yarım altıgen ile klasik yarım daire formlarının hibrit tasarımıdır. YA3; YA2 tasarımına ek olarak kanatlar düz levha takviyesi ile uzatılmıştır. KSv; klasik Savonius rüzgar çarkıdır.



**Şekil 4.13:** Kanat tiplerine göre (yarım altıgen formlu) Savonius rüzgar çarkları

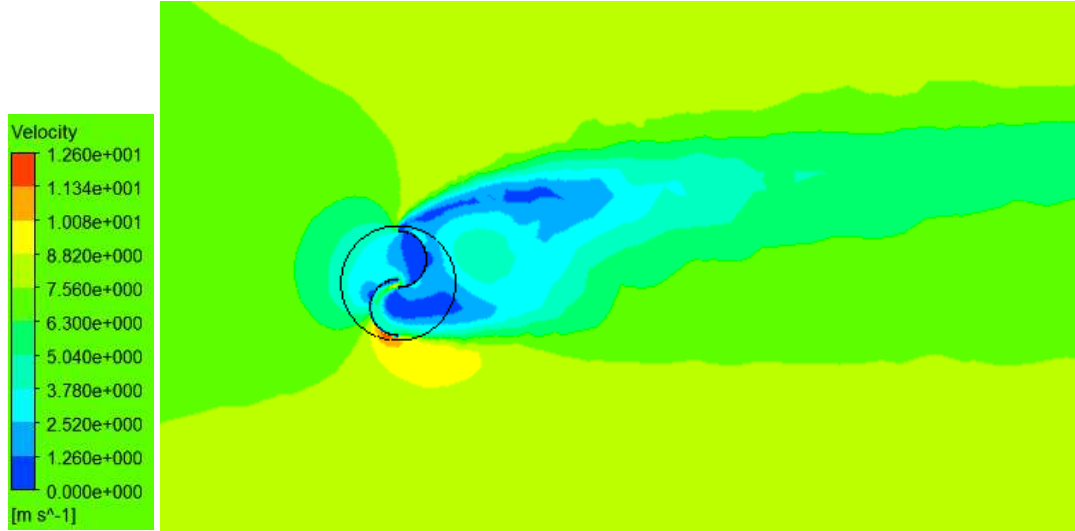
Şekil 4.14'te yarım altıgen formlu düz levhalardan oluşmuş ve daire yay parçalarıyla modifiye edilmiş kanat tiplerine ait statik tork katsayıları bulunmaktadır. YA isimli yarım altıgen formlu düz levhalı Savonius rüzgar çarkından en düşük statik tork katsayısı elde edilmiştir. Bu elde edilen sonucu, klasik Savonius rüzgar çarkının statik tork katsayısı ile karşılaştırdığımızda oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Bundan dolayı yarım altıgen kanat tipi de modifiye edilmiştir.

Modifiye çalışmalarında ise yarım daire yay parçaları kullanılmıştır. YA1 isimli kanat tipinde yarım altıgen kanat tipinin rüzgarı ilk karşılayan yüzeyinin üstüne yarım daire yay parçası eklenmiştir. Yarım altıgen kanat tipine göre, statik tork katsayısının küçük bir miktar da olsa arttığı görülmüştür. YA2 isimli kanat tipinde yarım altıgen ile klasik Savonius rüzgar çarkı kanat tipinin tam bir karma tasarımı olan hibrit tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda çarkın merkezindeki düz levhaların açıları korunarak diğer iki düz levha yok edilmiştir. Yok edilen düz levhaların yerine de yarım daire kanat yay parçası eklenmiştir. Bu şekilde tasarlanan kanat tipinden elde edilen statik tork katsayısı değerinin, klasik Savonius rüzgar çarkından elde edilen değere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Hibrit tasarımın kanatlarına ekstra düz levhaların eklenmesiyle YA3 isimli kanat tipi tasarlanmıştır. Bu kanat tipinden elde edilen statik tork katsayısı değerinin 0,309 ile klasik Savonius rüzgar çarkından elde edilen değerden yani 0,242 değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



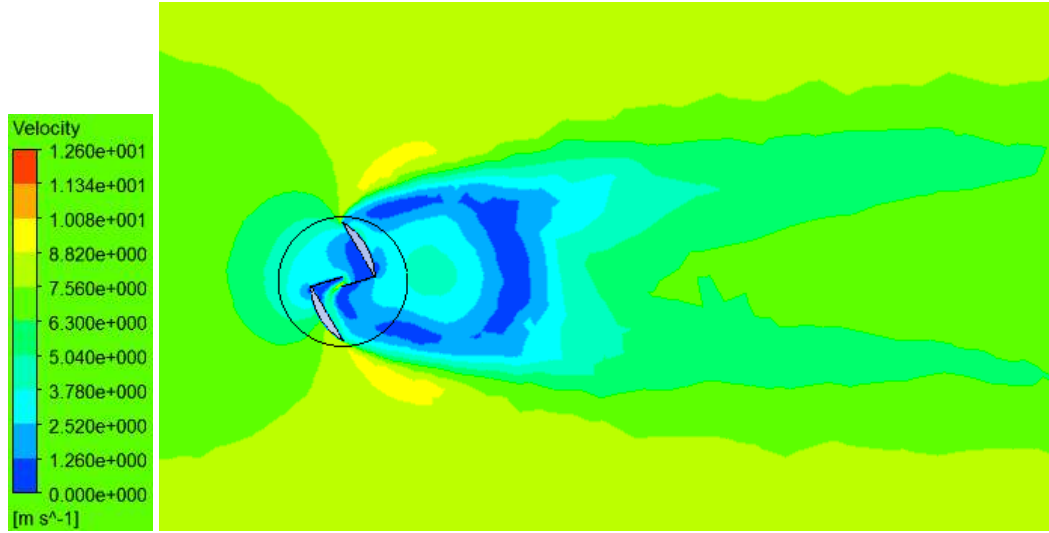
**Şekil 4.14:** Yarım altıgen formlu düz levhalı kanat tiplerine göre statik tork katsayıları

Klasik Savonius rüzgar çarkının nümerik çözümleme ile elde edilen hız profili Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



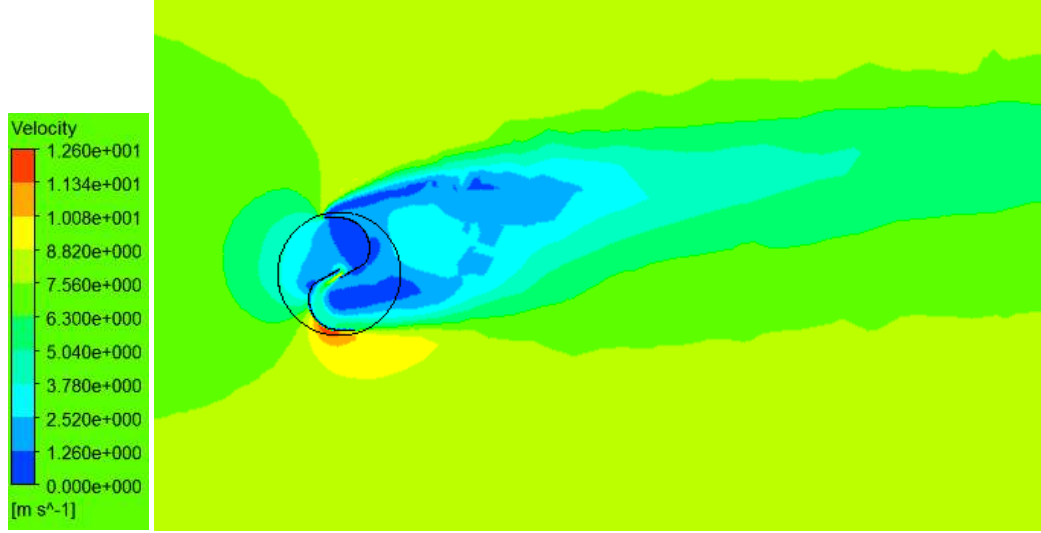
Şekil 4.15: Klasik Savonius rüzgar çarkının hız profili

Klasik Savonius rüzgar çarkından elde edilen statik tork değerine en yakın değeri veren 0,15m2 modelinin nümerik çözümleme ile elde edilen hız profili Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



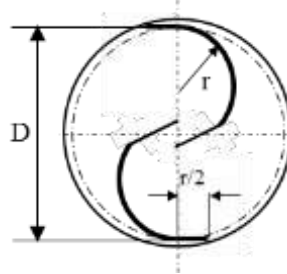
Şekil 4.16: 0,15m2 modelinin hız profili

Klasik Savonius rüzgar çarkından elde edilen statik tork değerinden daha büyük tork değeri veren YA3 modelinin nümerik çözümleme ile elde edilen hız profili Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17: YA3 modelinin hız profili

Tez çalışması kapsamında yapılan araştırmalara göre, klasik Savonius rüzgar çarkının statik performansının üzerinde elde edilen tork değeri, Şekil 4.18’de gösterilen düz levhalar ve yarım daire yay parçalarıyla modifiye edilmiş kanat tipinden elde edilmiştir. Burada kanat uçlarına ekstra  $L = r/2$  kadar düz levhalar eklenmiştir.



Şekil 4.18: İlave düz levha ile modifiye edilmiş YA3 Savonius rüzgar çarkı

Bu yapılan çalışma ile kanat profili üzerinde yapılan tasarım farklılıklarından en iyi performansın ilave düz levha ile modifiye edilmiş YA3 Savonius rüzgar çarkı ile elde edildiği tespit edilmiştir. Böylece klasik Savonius rüzgar çarkının kanat profillerinde basit değişiklikler yaparak, çarka ek ilave düzenek yapmadan, çarkın düşük olan performansında iyileştirmeler yapılabileceği tespit edilmiştir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada Savonius rüzgar çarklarının düşük olan performanslarını arttırmak için basit kanat tasarımları yapılarak Ansys Fluent programında çözümlenmeler yapılmıştır. Literatürde yapılmış olan çalışmalar incelenerek klasik Savonius rüzgar çarkının tasarım parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada çözüm alanının boyutları çark yüksekliğine göre tespit edilmiştir. Çarkların performansı statik olarak, 7,5 m/s'lik rüzgar hızında incelenmiştir.

Yapılan çalışmada ilk olarak  $b / d$  parametresine dayalı tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımla 0,207 tork katsayısı değerine ulaşılarak klasik Savonius çarkı performansına en yakın değeri verebilecek kanat tipi belirlenmiştir. İkinci adım olarak bu tasarıma benzeyen altıgen formda kanatlar tasarlanmış ve çözümlenmeleri yapılmıştır. YA3 tasarımına ait kanat tipinden elde edilen statik tork katsayısı değerinin, klasik Savonius rüzgar çarkından elde edilen 0,242 tork katsayısı değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu modifiye tasarımın statik tork katsayısı değeri 0,309 civarında bulunmuştur. Yani yapılan bu modifiye tasarım ile klasik Savonius çarkına göre statik tork katsayısı değerinin yaklaşık %28 civarında arttığı tespit edilmiştir.

Tez çalışması sonucuna göre; Savonius rüzgar çarklarına ayrıca yapılan eklemeleri ve düzenekleri kullanmadan, sadece basit bir kanat profili değişimi ile statik tork performansının iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Böylelikle bu tasarımın, düşük olan performansları sebebiyle diğer dikey eksenli rüzgar çarklarının yanında daha az kullanılan Savonius rüzgar çarklarının kullanımının artmasında etken olabileceği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Adaçay, F. R. (2014). Türkiye için enerji ve kalkınmada perspektifler. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 87-103.
- Al-Kayiem, H. H., Bhayo, B. A., & Assadi, M. (2016). Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotors. *Renewable Energy*, 1306-1317.
- Altan, B. D. (2006, Haziran). Perdeleme yöntemi ile Savonius rüzgar çarkının performansının incelenmesi. *Doktora Tezi*. Pamukkale Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. Denizli.
- Altan, B. D., Atılgan, M., & Özdamar, A. (2008). An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1673-1678.
- Atılgan, M., & Altan, B. D. (2004). Savonius rüzgar çarklarının performansının geliştirilmesi ve karşılaştırılması. *Mühendis ve Makina*, 30-34.
- Avşar, H., Çetinkaya, K., & Gökçaya, H. (2001). Afyon yöresi rüzgar potansiyeli ve elektrik enerjisi üretimi için Savonius tasarımı. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi* 171-178. Kayseri: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- Aygünoğlu, H. (2019). *Donanım Haber Elektronik Yayıncılık Ltd. Şti.* Donanım Haber Web Sitesi: <https://www.donanimhaber.com/dunyanin-en-buyuk-ruzgar-turbinleri-10-mw--102896> adresinden alındı
- Bai, H., Chan, C., Zhu, X., & Li, K. (2019). A numerical study on the performance of a Savonius-type vertical-axis wind turbine in a confined long channel. *Renewable Energy*, 102-109.
- Bethi, R. V., Laws, P., Kumar, P., & Mitra, S. (2019). Modified Savonius wind turbine for harvesting wind energy from trains moving in tunnels. *Renewable Energy*, 1056-1063.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. Ankara: Palme Yayınevi.
- Çolak, O., Dombaycı, A., & Üçgül, İ. (2001). Değişken rüzgar hızlarına uygun Savonius rüzgar türbin modelinin iyileştirilmesi. *Thermodynamic Journal*, 70-72.
- Damak, A., Driss, Z., & Abid, M. (2013). Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180. *Renewable Energy*, 136-142.

- Deda, B. (2000). Rüzgar enerjisi ve Savonius rüzgar çarklarının performanslarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. Denizli.
- Driss, Z., Mlayeh, O., Driss, S., Driss, D., Maaloul, M., & Abid, M. S. (2015). Study of the bucket design effect on the turbulent flow around unconventional Savonius wind rotors. *Energy*, 708-729.
- Durak, M., & Özer, S. (2008). *Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama*. Ankara: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği.
- Göktaş, M., & Kılıç, F. (2019). Savonius rüzgar türbini çevresindeki hava akışının hesaplanabilir akışkanlar dinamiği yöntemi ile analizi. *Politeknik Dergisi*, 11-17.
- Grinspan, A. S., Shanta, B. N., Mahanta, P., Saha, U. K., Rao, D. R., & Bhanu, G. V. (2001). Design, development and testing of Savonius wind turbine rotor with twisted blades. *Proceedings of 28th National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, 428-431. Chandigarh.
- Group Rexroth Bosch (2019). Industrial Hydraulics. *Hydraulic Control Technology for Wind Turbine Generators*. Germany.
- Hayashi, T., Li, Y., Hara, Y., & Suzuki, K. (2005). Wind tunnel tests on a three-stage out-phase Savonius rotor. *JSME International Journal Series B*, 9-16.
- Ishimatsu, K., Kage, K., & Okubayashi, T. (2002). Numerical study for the flow fields and performances of Savonius-type and Bach-type rotors. *The 10th International Symposium On Flow Visualization*, 1-7. Kyoto.
- Kacprzak, K., Liskiewicz, G., & Sobczak, K. (2013). Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 578-585.
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 1064-1073.
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009). Performance tests on helical Savonius rotors. *Renewable Energy*, 521-529.
- Maldonado, R. D., Huerta, E., Corona, J. E., Ceh, O., León-Castillo, A. I., Gómez-Acosta, M. P., & Mendoza-Andrade, E. (2014). Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico. *Energy Procedia*, 691-697.
- Manganhar, A. L., Rajpar, A. H., Luhur, M. R., Samo, S. R., & Manganhar, M. (2019). Performance analysis of a savonius vertical axis wind turbine integrated with wind accelerating and guiding rotor house. *Renewable Energy*, 512-520.
- Menet, J. L. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Renewable Energy*, 1843-1862.



- Mercado-Colmenero, J. M., Rubio-Paramio, M. A., Guerrero-Villar, F., & Martín-Doñate, C. (2018). A numerical and experimental study of a new Savonius wind rotor adaptation based on product design requirements. *Energy Conversion and Management*, 210-234.
- Mohamed, M., Janiga, G., Pap, E., & Thévenin, D. (2011). Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. *Energy Conversion and Management*, 236-242.
- Percival, M., Leung, P., & Datta, P. (2004). The development of a vertical turbine for domestic electricity generation. *European Wind Energy Conference & Exhibition*.
- Ricci, R., Romagnoli, R., Montelpare, S., & Vitali, D. (2016). Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems. *Applied Energy*, 143-152.
- Roy, S., & Saha, U. K. (2015). Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy*, 117-125.
- Saha, U. K., & Rajkumar, M. J. (2006). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 1776-1788.
- Sharma, S., & Sharma, R. K. (2017). CFD investigation to quantify the effect of layered multiple miniature blades on the performance of Savonius rotor. *Energy Conversion and Management*, 275-285.
- Tartuferi, M., D'Alessandro, V., Montelpare, S., & Ricci, R. (2015). Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: a computational study of new blade shapes and curtain systems. *Energy*, 371-384.
- Tian, W., Mao, Z., Zhang, B., & Li, Y. (2018). Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides. *Renewable Energy*, 287-299.
- Wang, Y.-F., & Zhan, M.-S. (2013). 3-Dimensional CFD simulation and analysis on performance of a micro-wind turbine resembling lotus in shape. *Energy and Buildings*, 66-74.
- Wenehenubun, F., Saputra, A., & Sutanto, H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy Procedia*, 297-304.
- Zhao, D., & Han, N. (2018). Optimizing overall energy harvesting performances of miniature Savonius like wind harvesters. *Energy Conversion and Management*, 311-321.

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şaika Maide SERT

Doğum Yeri ve Tarihi : Isparta 14/03/1990

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : ssert091@pau.posta.edu.tr

İletişim Adresi : Kervansaray mh. 3009 sk. No:26/5 DENİZLİ