

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

**HAVA AKIŞ KANALLI KANAT TASARIMININ S-ROTOR  
SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNİ PERFORMANSI  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre VARİŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cemil YİĞİT**

**Aralık 2021**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA AKIŞ KANALLI KANAT TASARIMININ S-ROTOR  
SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNİ PERFORMANSI  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre VARİŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**

**Bu tez .../.../2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Jüri Başkanı**

**Üye**

**Üye**

## **BEYAN**

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

Emre VARİŞ

25.06.2021

## TEŞEKKÜR

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

Hayatımın her alanında bana destek olan ve özellikle eğitim hayatımda benim için fazlasıyla fedakârlık yapan aileme teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                |      |
|----------------------------------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR .....                                                 | i    |
| İÇİNDEKİLER .....                                              | ii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....                          | v    |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                         | vi   |
| TABLolar LİSTESİ .....                                         | viii |
| ÖZET .....                                                     | ix   |
| SUMMARY .....                                                  | x    |
| BÖLÜM 1.                                                       |      |
| GİRİŞ .....                                                    | 1    |
| BÖLÜM 2.                                                       |      |
| RÜZGAR ENERJİSİ .....                                          | 2    |
| 2.1. Rüzgar Enerjisinin Üstünlükleri .....                     | 3    |
| 2.2. Rüzgar Enerjisinin Kullanım Alanları .....                | 3    |
| BÖLÜM 3.                                                       |      |
| RÜZGAR TÜRBİNLERİ .....                                        | 5    |
| 3.1. Rüzgar Türbinlerinin Tarihçesi .....                      | 5    |
| 3.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması .....              | 8    |
| 3.2.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri .....                   | 8    |
| 3.2.1.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin avantajları .....  | 10   |
| 3.2.1.2. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dezavantajları ... | 10   |
| 3.2.2. Düşey eksenli rüzgar türbinleri .....                   | 10   |
| 3.2.2.1. Darrieus rüzgar türbinleri .....                      | 12   |
| 3.2.2.2. Savonius rüzgar türbinleri .....                      | 12   |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.2.2.1. Savonius rüzgar türbinleri avantajları .....           | 14 |
| 3.2.2.2.2. Savonius rüzgar türbinleri dezavantajları...           | 15 |
| 3.3. Rüzgar Türbinlerinin Karşılaştırılması .....                 | 15 |
| <br>BÖLÜM 4.                                                      |    |
| LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....                                         | 17 |
| <br>BÖLÜM 5.                                                      |    |
| SAVANİUS TÜRBİNLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ .....                  | 21 |
| 5.1. Hava Akış Kanallı Profil Geometrileri .....                  | 21 |
| 5.1.1. Dairesel hava akış kanallı model .....                     | 22 |
| 5.1.2. Altıgen hava akış kanallı model .....                      | 23 |
| 5.1.3. Dörtgen hava akış kanallı model .....                      | 23 |
| 5.1.4. Açık kanal profilli hava akış kanallı model .....          | 24 |
| 5.2. Overlap Oranını 0.10,0.15,0.20,0.25,0.30 Olan Modeller ..... | 25 |
| 5.2.1. Overlap oranı 0.10 olan türbin modeli.....                 | 25 |
| 5.2.2. Overlap oranı 0.15 olan türbin modeli.....                 | 26 |
| 5.2.3. Overlap oranı 0.20 olan türbin modeli .....                | 27 |
| 5.2.4. Overlap oranı 0.25 olan türbin modeli .....                | 27 |
| 5.2.5. Overlap oranı 0.30 olan türbin modeli .....                | 27 |
| 5.3. Sistemin Boyutlandırılması .....                             | 27 |
| 5.4. Mesh Yapısı .....                                            | 28 |
| 5.4.1 Katman sayısı hesabı .....                                  | 30 |
| 5.4.2. Mesh sayısı ve skewnes değeri.....                         | 32 |
| 5.5. Frozen Rotor Modelin Oluşturulması .....                     | 34 |
| 5.5.1 Kanat açısız hızlarının hesaplanması .....                  | 36 |
| 5.5.2 Türbülans yoğunluklarının hesaplanması .....                | 37 |
| 5.6. 0,25 Overlap Oranı İçin 6-DOF Modelin Oluşturulması .....    | 38 |
| <br>BÖLÜM 6.                                                      |    |
| VALİDASYON ÇALIŞMASI .....                                        | 41 |

## BÖLÜM 7.

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| ARAŞTIRMA BULGULARI .....                                              | 45 |
| 7.1. Hava Akış Kanallı Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ...   | 45 |
| 7.2. Overlap Oranının Değiştirildiği Modellerin Değerlendirilmesi..... | 46 |
| 7.3. 0,25 Overlap Oranında 6-DOF Analizinin Değerlendirilmesi .....    | 48 |

## BÖLÜM 8.

|                         |    |
|-------------------------|----|
| TARTIŞMA VE SONUÇ ..... | 53 |
| KAYNAKLAR .....         | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ .....          | 59 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|               |                                         |
|---------------|-----------------------------------------|
| $A$           | : Alan                                  |
| $C_p$         | : Güç Katsayısı                         |
| $\mathcal{C}$ | : Çevre                                 |
| $D$           | : Çark çapı (m)                         |
| $D_h$         | : Kanat Hidrolik Çapı                   |
| $D_s$         | : İlk Katman Kalınlığı                  |
| $d$           | : Kanat çapı (m)                        |
| $e$           | : Kanatların rotora olan uzaklığı (m)   |
| $h$           | : Türbin Yüksekliği (m)                 |
| $I$           | : Türbülans Yoğunluğu                   |
| $Re$          | : Reynolds sayısı                       |
| $r$           | : Kanat yarıçapı (m)                    |
| $t$           | : Et kalınlığı (m)                      |
| $v$           | : Rüzgâr Hızı (m/s)                     |
| $\rho$        | : Havanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ) |
| $\lambda$     | : Kanat uç hız oranı                    |
| $\mu$         | : Mü sayısı                             |
| $\omega$      | : Kanat Açısal Hız Oranı                |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Charles Brush'ın 1888'de elektrik üretimi için yaptığı değirmen ... | 6  |
| Şekil 3.2. La Cour'un tasarladığı rüzgar türbini .....                         | 6  |
| Şekil 3.3. 1250 MW Kapasiteli Smith-Putnam rüzgar türbini .....                | 7  |
| Şekil 3.4. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması .....                        | 8  |
| Şekil 3.5. Yatay eksenli rüzgar türbinleri .....                               | 9  |
| Şekil 3.6. Düşey eksenli rüzgar türbinleri .....                               | 11 |
| Şekil 3.7. Darrieus tipi rüzgar türbinleri .....                               | 12 |
| Şekil 3.8. Savonius tipi rüzgar türbinleri .....                               | 13 |
| Şekil 3.9. Savonius tipi rüzgar türbini .....                                  | 14 |
| Şekil 5.1. Savonius rüzgar türbini boyutlandırması .....                       | 21 |
| Şekil 5.2. Savonius rüzgar türbini hava akış kanalları .....                   | 22 |
| Şekil 5.3. Dairesel hava akış kanalları .....                                  | 23 |
| Şekil 5.4. Dörtgen hava akış kanalları .....                                   | 24 |
| Şekil 5.5. Açık kanal profilli hava akış kanalı .....                          | 24 |
| Şekil 5.6. 0,10 Overlap oranına sahip model .....                              | 26 |
| Şekil 5.7. 0,15 overlap oranına sahip model .....                              | 26 |
| Şekil 5.8. Sistemin boyutlandırması .....                                      | 28 |
| Şekil 5.9. Poly elemanlı hacim mesh yapısı .....                               | 29 |
| Şekil 5.10. Hava akış kanallı sınır tabaka yapısı .....                        | 32 |
| Şekil 5.11. Rüzgar hızı-kanat uç hız oranı deneysel verileri .....             | 35 |
| Şekil 5.12. Meshin ayrılması .....                                             | 39 |
| Şekil 5.13. Moment hesabı ölçüleri.....                                        | 39 |
| Şekil 6.1. Deney Düzeneği .....                                                | 41 |
| Şekil 6.2. Sürtünme kuvveti ile savonius türbini .....                         | 42 |
| Şekil 6.3. Kanat uç hızı-cp, deneysel verileri .....                           | 43 |
| Şekil 6.4. Yapılan analiz sonucunda ulaşılan cp-tsı grafiği .....              | 43 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7.1. Hava akış kanallı analizlerin cm-tsr grafiği .....                 | 46 |
| Şekil 7.2. Overlap oranı değişik analizlerin cm-tsr grafiği .....             | 47 |
| Şekil 7.3. Overlap oranı 0,25 için 6-Dof analizinin cm-iterasyon grafiği..... | 48 |
| Şekil 7.4. Overlap oranı 0,25 için 6-Dof analizinin grafiği .....             | 49 |
| Şekil 7.5. Statik basınç grafiği .....                                        | 50 |
| Şekil 7.6. Yapılan analizdeki basınç ayrılmaları .....                        | 51 |
| Şekil 7.7. Yapılan analizdeki basınç ayrılmalarının yakın görünüşü .....      | 51 |



## TABLolar LİSTESİ

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.1. Rüzgar Türbinlerinin karşılaştırması.....                               | 16 |
| Tablo 5.1. Savanius rüzgar türbini boyutları.....                                  | 22 |
| Tablo 5.2. 0,10 overlap oranına sahip Türbin boyutları .....                       | 25 |
| Tablo 5.3. Katman sayısı belirleme tablosu.....                                    | 31 |
| Tablo 5.4. Değişik hızlardaki katman sayıları.....                                 | 32 |
| Tablo 5.5. Daire hava akış kanallı modelin eleman sayısı ve skewnes verileri....   | 33 |
| Tablo 5.6. Dörtgen hava akış kanallı modelin eleman sayısı ve skewnes verileri.... | 33 |
| Tablo 5.7. Altıgen hava akış kanallı modelin eleman sayısı ve skewnes verileri.... | 34 |
| Tablo 5.8. Rüzgar hızı-Tsr değerleri.....                                          | 35 |
| Tablo 5.9. Rüzgar hız-w değerleri.....                                             | 36 |
| Tablo 5.10. Rüzgar hızı-türbülans yoğunluğu verileri.....                          | 38 |
| Tablo 6.1. Yapılan analiz sonucunda ulaşılan cp değerleri.....                     | 43 |
| Tablo 7.1. Hava akış kanallı analizlerin cm ve cp değerleri.....                   | 45 |
| Tablo 7.2. Overlap oranı değişik analizlerin cm ve cp değerleri.....               | 47 |
| Tablo 7.3. Tsr-cm-cp değerleri.....                                                | 49 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Rüzgar enerjisi, savanius rüzgar türbini, hava akış kanalı, overlap oranı

Günümüzde enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıtların ömrü sınırlıdır ve çevreye olan zararı çok fazladır. Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi ele alınmıştır. Rüzgâr enerjisini kullanılabilir hale getirebilmek için türbin çeşitlerinden savanius rüzgâr türbini seçilmiştir. Bu türbinin seçilmesinin sebebi; ilk hareket motoruna ihtiyaç duymadan düşük rüzgâr hızlarında da devreye girebilmesi, rüzgâr yönünden bağımsız olması, bakım ve onarım maliyetinin düşük olması ve basit geometriye sahip olduğu için üretim maliyetinin düşük olmasıdır. Bunun yanı sıra, dikey eksenli rüzgâr türbinleri estetik görüntüleri ve yatay eksenli türbinlere kıyasla daha sessiz çalışmalarından dolayı yerleşim yerlerinde de kullanılabilmesi önemli bir artı olmakla birlikte, verimlerinin düşük olması yaygın kullanımları hususunda kısıtlayıcı bir etken olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada; s-rotor savanius rüzgâr türbininin verimini arttırmak için hava kanalları kullanılmıştır. Optimum hava kanalı geometrisini belirlemek amacıyla, türbin Ansys/Fluent yazılımı kullanılarak modellenmiş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri (HAD) gerçekleştirilmiştir. Sayısal model literatürde gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

HAD analizleriyle gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasının neticesinde, açık kanal profilli hava kanalının, daire, dörtgen ve altıgen hava kanallarından daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Açık kanal profilli hava kanalında kanal açıklığının kepçe çapına oranının (overlap oranı) türbin performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Maksimum gücün 0,25 overlap oranında olduğu tespit edilmiştir.

# **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF THE AIRFLOW DUCTED VENT DESIGN ON THE PERFORMANCE OF THE S- ROTOR SAVONIUS WIND TURBINE**

## **SUMMARY**

**Keywords:** Wind power, savanius wind turbine, air flow duct, overlap rate

Today, the need for energy is increasing day by day. Fossil fuels have a limited lifetime and are very harmful to the environment. Wind energy, which is a renewable energy source, has been discussed. In order to make the wind energy usable, the savanius wind turbine was chosen from among the turbine types. The reason for choosing this turbine; It can be activated at low wind speeds without the need for a first motion engine, it is independent of the wind direction, its maintenance and repair costs are low, and its production cost is low due to its simple geometry. In addition, the fact that vertical axis wind turbines can be used in residential areas due to their aesthetic appearance and quieter operation compared to horizontal axis turbines is an important plus, but their low efficiency is considered to be a limiting factor in their widespread use.

In this study; Air ducts are used to increase the efficiency of the s-rotor savanius wind turbine. In order to determine the optimum air duct geometry, the turbine was modeled using Ansys / Fluent software and computational fluid dynamics analysis (HAD) was performed. The numerical model has been verified by experimental studies in the literature.

As a result of the optimization study carried out with HAD analysis, it has been determined that the monolithic air duct performs better than circle, rectangular and hexagonal air ducts. The effect of the ratio of the duct opening to the bucket diameter (overlap ratio) on the turbine performance in the monolithic air duct was investigated. It was determined that the maximum power was at the rate of 0.25 overlap.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir, çevre ile dost ve temiz enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Yenilenebilir özelliğe sahip olan bu enerji kaynağı atmosferde hem bol miktarda bulunmakta hem de temin edilmesi kolay bir enerji kaynağıdır. Günümüzde yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak ilk akla gelen uygulamalardan biri rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisi, dünyada birçok ülkenin yararlandığı ve son zamanlarda Türkiye’de büyük önem kazanmaya başlayan bir enerji türüdür [1].

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisini kullanılabilir hale getirmek için büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr türbinleri farklı kullanım alanlarının olmasından dolayı epeyce çeşitlendirilmiştir. Bu çeşitlilik içerisinde yer alan türbinlerden bir tanesi de dikey eksenli rüzgâr türbinleridir. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin tercih edilmesinin pek çok sebebi vardır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin üretilmesi ve montajı kolaydır ayrıca düşük rüzgâr hızlarında dönmeye başlama özellikleri en büyük avantajlarından bir tanesidir. Boyutlarının küçük olması ve estetik yapıya sahip olmalarından dolayı sosyal alanlarda, kamu aydınlatmalarında, küçük işletmelerde, çiftliklerde ve bazı evlerin elektrik ihtiyacının karşılanması gibi pek çok farklı kullanım alanına sahip olabilmektedirler.

Dünyada nüfusu her geçen gün fazlasıyla artmaktadır. Bu sebeple enerjiye duyulan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Gelecekte enerji gereksinimi daha da artacağından dolayı savanius rüzgâr türbinleri üzerinde çalışılması gereken önemli konulardan bir tanesidir. Çünkü işletme ve bireysel kullanımı oldukça basit olan savanius rüzgâr türbinleri ülkemiz üzerindeki enerji ihtiyacı yükünü azaltacak ve yenilenebilir enerji kullanımından dolayı çevre kirliliğinin önüne geçilmiş olacaktır.

## BÖLÜM 2. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgâr, güneşin yeryüzünü eşit ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve basınç farkından kaynaklanan hava akımıdır. Rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisine rüzgâr enerjisi denilmektedir. Havanın dünya yüzeyinde hareket edebilmesinin bazı nedenleri; basınç gradyan kuvveti, merkezkaç kuvveti ve sürtünme kuvvetidir. Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki eden kuvvettir. Merkezkaç kuvveti; rüzgarların genel olarak bir merkez etrafında dolanması ve bu hareketin neticesi olarak da kendilerini dolanım merkezlerinden uzaklaştırmak isteyen bir kuvvet etkisi altında bulunurlar. Sürtünme kuvveti ise rüzgârın meydana getirilmesinde etkili olmayan, rüzgâr hızını yavaşlatmaya çalışan kuvvete denir. Bu kuvvet, yer yüzüne yaklaştıkça büyümektedir. Rüzgârın sürtünmesinden doğan bu kuvvet, yer üstünde 450-600 m yüksekliğe kadar rüzgârı yavaşlatmaktadır [2].

Rüzgâr enerjisi milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlamış olup, yelkenli gemilerden yel değirmenlerine kadar birçok alanda güç kaynağı olmuştur. Buğday, mısır gibi tahılların öğütülmesinde ve su pompalama gibi zaruri ihtiyaçlar uzun yıllar rüzgâr enerjisi kullanılarak çözümlenmiştir. Rüzgâr enerjisi kullanımı, M.Ö. 2800'lü yıllarda Orta Doğu'da başlamıştır. M.Ö. 17. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla rüzgâr enerjisinin kullanıldığı belirtilmektedir. Ardından rüzgârdan enerji elde etme gereksinimi artmış ve rüzgâr türbinleri 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üreten ilk türbin ise 1891'de modern aerodinamiğin önemli mühendisi olan Paul la Cour tarafından Danimarka'da inşa edilmiştir [3].

## 2.1. Rüzgâr Enerjisinin Üstünlükleri

Enerji kaynakları arasında temiz bir enerji kaynağı olan ve yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinin birçok üstünlüğü bulunmaktadır ve üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

- Temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olması sebebiyle çevreye zarar vermez.
- Tükenmeyen bir enerji kaynağıdır.
- Atmosferde serbest halde bulunmaktadır. Kullanmak için işlemeye gerek yoktur.
- Kullanımı bedavadır. Hiçbir yere ve kimseye ödeme yapılmaz.
- Farklı koşullarda çalışabilen çeşitlerinden dolayı kullanım alanı geniştir.
- Rüzgârdan enerji elde edilmesi ile fosil yakıt gibi tükenme tehlikesi olan ve çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tükenme süresi azaltılabilir.
- Enerji santralleri kısa sürede kurulup faaliyet göstermeye başlayabilir.
- Enerji santralleri basit teknolojiye sahip oldukları için bakımları düzenli yapıldığında işletmesi gayet kolaydır.
- Hammadde yerli olduğu için dışa bağımlılık oluşturmaz.
- Gelişen teknoloji ile enerji üretim maliyetleri düşmektedir ve bakım ve işletme maliyetleri çok azdır.
- Enerjinin taşınması imkânı olmayan yerlere kurulumu yapılarak enerji elde edilebilir.
- İstihdamı arttırmaktadır.

## 2.2. Rüzgâr Enerjisinin Kullanım Alanları

Rüzgâr enerjisinin kullanım alanları epeyce geniştir. Bunlar;

- Elektriğin enerjisinin taşınmasının gerçekleştirilemediği uçra yerleşim yerlerinde rüzgâr enerjisi kullanılarak enerji üretilebilir. İhtiyaç fazlası elektrik enerjisi şebekeye verilerek hem ekonomiye katkı hem milli kaynaklardan tasarruf edilmiş olur.

- Rüzgâr ısıt uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Rüzgârdan elde edilen enerji ısıt enerjiye dönüştürölür ve suyun ısıtılmasıyla, yerleşkelerin ısıtılmasının yanında sıcak su ihtiyacını karşılamada kullanılabilir.
- Dağlık ve ormanlık alanlarda bulunan radar kulelerinde, daha farklı iletişim radarlarında, gözetleme kulelerinde, deniz fenerlerinde ve elektriğın olmadığı farklı birimlerde rüzgâr enerjisinden faydalanılmaktadır.
- Çeşitli ortamların havalandırılmasında ve çiftçilerin ürünlerinin kurutulmasında rüzgâr enerjisinden faydalanılmaktadır.
- Geçmişte deniz taşıtlarında yelken kullanılarak deniz taşıtının hareket etmesinde sıklıkla kullanılmasına rağmen günümüzde yelkenli araçlar spor amaçlı kullanılmaktadır.

## **BÖLÜM 3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ**

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisinin kullanılabilir hale gelmesini sağlamaktadır. İlk başlarda yel değirmenleri ile sadece mekanik enerjiye dönüştürülmüş olmasına rağmen sonrasında rüzgâr türbinleri ile elektrik enerjisine çevrilmiştir. Günümüzde pek çok rüzgâr türbini çeşidi bulunmaktadır. Bu çeşitliliğin olmasındaki temel etken farklı kullanım şartlarında çalışması gerektiği ve türbin veriminin yapılan çalışmalarla günümüze kadar arttırılmış olmasıdır.

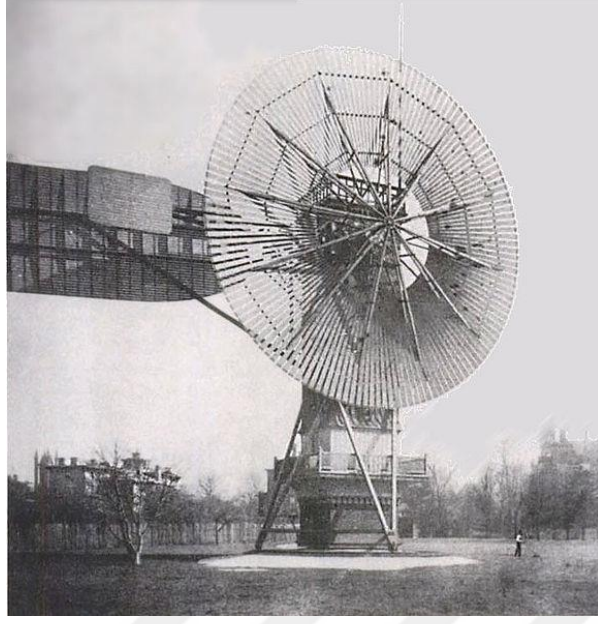
### **3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Tarihçesi**

İnsanoğlu geçmişte çok uzun yıllar boyunca yel değirmenleri, sulamanın yapılması ve tahıl ezme gibi işlemler için rüzgârın gücünden faydalanılmıştır

Rüzgâr gücüyle elektrik üreten ilk değirmeni İskoç Akademisyen Profesör James Blyth 1887 yılında inşa etmiştir ve 1891 yılında İngiltere’de patentini almıştır [4].

İskoç Akademisyen Profesör James Blyth 1887 Temmuz ayında rüzgâr gücüyle elektrik üreten ilk değirmeni inşa etmiştir. İskoç Akademisyen Profesör James Blyth 1891’de İngiltere’de patent almıştır [4].

ABD ’de 1887-1888 yılında Charles Francis Brush daha önce yapılmış olan James Blyth'in değirmeninden fazlasıyla büyük ve daha fazla bilimsellik taşıyan değirmenden elektrik üretmeyi başarmıştır. Bunun sonucunda şekil 3.1.’de ki rüzgâr değirmeni ile 1900 yılına kadar laboratuvarının ve evinin elektrik ihtiyacını karşılamıştır [4].



Şekil 3.1. Charles Brush'ın 1888'de elektrik üretimi için yaptığı değirmen [5]

1890'larda Danimarkalı bilim adamı ve mucit Poul la Cour elektrik üretmek için rüzgâr türbinlerini inşa etti. Bu, daha sonra hidrojen üretmek için kullanıldı.

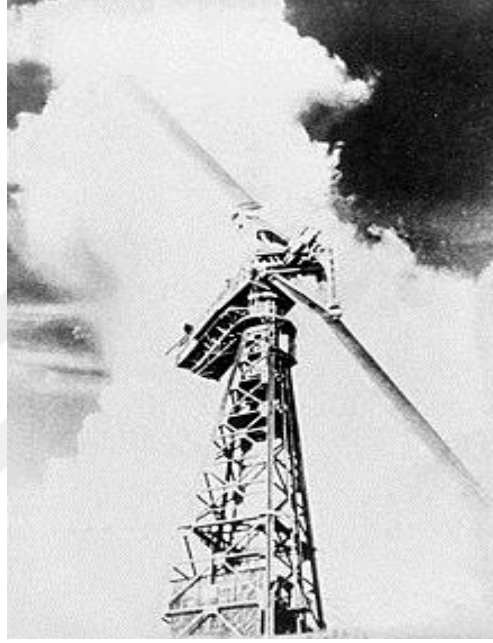


Şekil 3.2. Poul La Cour'un tasarladığı rüzgâr türbini [6]

Modern rüzgâr güç sanayisi 1979'da Danimarkalı Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketlerinin rüzgâr türbinlerini seri üretmesi ile başladı. Üretilen türbinler bugünkü standartlardan küçüktü 20-30 kW'lıklardı. Bir süre sonra kapasitelerini 7 MW'a çıkarttılar ve birçok ülkeye yayılmış oldular.

Rüzgâr türbinlerinin dönüm noktalarını basitçe sıralayacak olursak;

1939 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 53 metre çapında 1,25 MW'lık Smith Putnam rüzgâr türbini kuruldu. Rüzgâr türbini geliştirilmesinde bir sonraki dönüm noktası Gedser rüzgâr türbinidir. 1956 – 1957 tarihinde Danimarka'nın güney doğusunda Gedser adasında 200 kW'lık 24 metre çapında bir rüzgâr türbini kuruldu.



Şekil 3.3. 1.250 MW kapasiteli Smith-Putnam rüzgâr türbini [7]

1960'lı yılların başında Prof. Ulrich Hütter 100 kW kapasiteli 34 metrelik 2 kanatlı, kararsız pervanesi olan Hütter Allgaier rüzgâr türbinini geliştirdi.

Günümüzde ise tek bir rüzgâr türbininin gücü megawattlarla ifade edilecek kadar artmış ve artmaya devam etmektedir. Günümüzde kullanılan 7-10 MW kapasiteli güçlü rüzgâr türbinleri vardır. Rüzgâr türbinlerinin yapısında ve mekanik kısmında yapılan geliştirmeler sayesinde yakın zamanda bu değerlerin daha da artması hedeflenmektedir. Yüksek güçlü olmasının yanında tasarımı ile de dikkat çeken Aerogenerator X türbini yeni nesil yüksek güçlü türbine örnek olarak verilebilir [8].

### 3.2. Rüzgâr Türbinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması birkaç etmene bağlı olabilmektedir. Rüzgâr türbinleri; devir sayısı, kanat sayısı, dönme eksen, kurulum yeri gibi birkaç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.4.). Bu sınıflandırma yöntemlerinden en çok kullanılan sınıflandırma şekli ise dönme eksenlerine göre yapılan sınıflandırmadır.



Şekil 3.4. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırması [9]

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

- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)
- Eğik eksenli rüzgâr türbinleri (EERT)
- Düsey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) olarak sınıflandırılmaktadır.

#### 3.2.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, yel değirmenine benzer bir yapıya sahiptir. Yatay eksenli türbinde dönüş yapan pervaneye benzeyen bıçakları bulunmaktadır. Yatay eksenli

türbinlerde; rotorun dönüş ekseninin yönü, rüzgâr geliş doğrultusuna paralel biçimdedir. Rotor kanatları rüzgâr geliş doğrultusuna dik şekildedir. Türbin kulesinde, rotor mili ve jeneratör bulunmaktadır. Küçük ebattaki rüzgâr türbinleri, türbinin arka tarafına konumlandırılmış yönlendirme vasıtasıyla rüzgârı yakalamaktadır. Büyük yapıdaki rüzgâr türbinleri ise türbini rüzgâra çevirmek için dönmesini sağlayacak servo motora ve sensörlere sahiptir. Yatay eksenli türbinlerin rotorunda bulunan kanat sayısı azaldıkça rotor hızı artmaktadır. Rüzgâr hızının, rotor kanadının uç hızına bölünmesi sonucu ortaya çıkan değere kanat uç hız oranı denir ve  $\lambda$  ile gösterilir. Eğer;

- $\lambda$  değeri 1 ile 5 arasındaysa kanat sayısı çok olan rotoru ifade etmektedir.
- $\lambda$  değeri 6 ile 8 arasındaysa kanat sayısı 3 olan rotoru ifade etmektedir.
- $\lambda$  değeri 9 ile 15 arasındaysa kanat sayısı 2 olan rotoru ifade etmektedir.
- $\lambda$  değeri 15' den büyük ise kanat sayısı 1 olan rotoru ifade etmektedir [10].



Şekil 3.5. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri [10]

### 3.2.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin avantajları

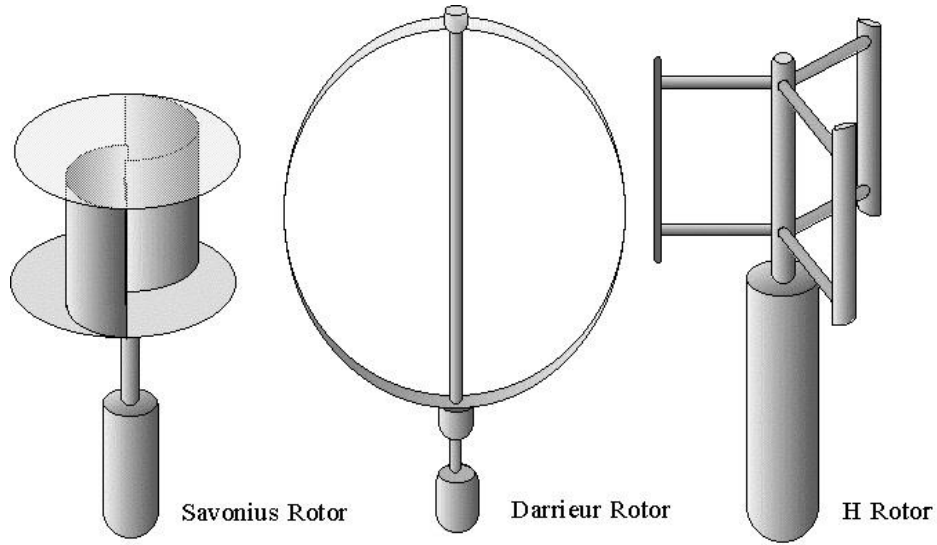
- Uzun kulelere sahip olduğundan dolayı güçlü rüzgârlara erişebilmektedir. Bazı bölgelerinde, her on metre yüksekteki rüzgâr hızı %20 oranında artabilmektedir. Kule yüksekliğini fazla olmasından dolayı yükseklerdeki artan rüzgâr hızlarını daha iyi kullanabilmektedir.
- Yatay eksenli türbinlere göre yüksek verimliliğe sahiptir çünkü kanatlar rüzgâr yönüne dik olarak hareket eder. Bu hareket sayesinde dönüş yapan kanat bir tam turu tamamlarken yatay eksenli türbinlerdeki gibi kanat uç hızında çok fazla değişiklik olmaz.

### 3.2.1.2. Yatay eksenli rüzgâr türbininin dezavantajları

- Dişli kutusunu, jeneratörü, türbin kanatları taşımak için büyük kule inşaatı gerekmektedir.
- Yüksekliklerinin fazla olmasından dolayı görüntü kirliliğine sebep olabilmektedir.
- Büyük yapıya sahip oldukları için ses kirliliğine sebep olabilmektedir.
- Düşük rüzgâr hızlarında kanat hareketinin başlayabilmesi için dikey eksenli rüzgâr türbinlerine ek olarak yaw kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır.
- Yüksek rüzgâr hızlarında türbin kanatları eğilerek gövdeye çarpar ve türbin zarar görür. Zarar görmemesi için frenleme sistemi gereklidir.

### 3.2.2. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin rotoru düşey konumlandırılmış ve kanatlar bu rotora sabitlenmiştir. Genellikle iki tipte bulunmaktadır. Bunlar Darrieus ve Savonius tipi rüzgâr türbinleridir. Darrieus tipi sürüklenme ve kaldırma kuvveti ile dönen rüzgâr türbinidir. Savonius tipi ise sürüklenme etkisi ile dönen rüzgâr türbinidir.



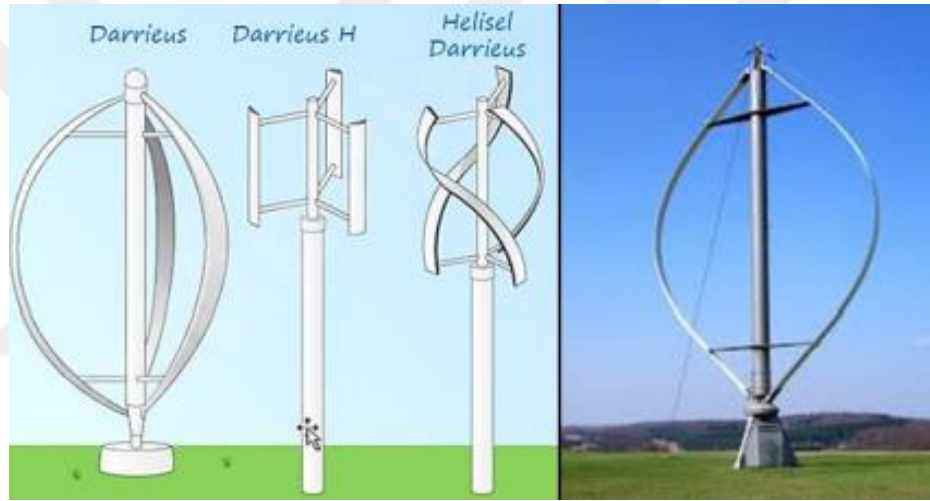
Şekil 3.6. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri [11].

Kanatlarının düşey konumlandırılmasından dolayı rüzgâr hangi yönden gelirse gelsin yön değiştirmelerine gerek yoktur. Ayrıca yön değiştirmek için çeşitli ekipmanlara ihtiyaç yoktur. Ekipmanlar için kuleye ihtiyaç duyulmaz. Bakımları makine kutusu yer seviyesinde olduğu için kolaylıkla yapılabilir. Tasarımları, imalatı, montajı ve nakliyesi kolay olduğu için uygulanabilirlikleri basittir. Dönmeye başlama torku düşüktür. Bu nedenle yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşük rüzgâr hızlarında dönmeye başlayabilirler ve yaw mekanizması gibi dönüş başlatıcı sistemlere ihtiyaç duymazlar. Ancak güç katsayıları düşük olduğu için çiftliklerde vb. yerlerde su pompalamak gibi basit işlerde kullanılmaktadırlar.

Yapılan çalışmalarda güç katsayıları artırılarak elektrik üretiminde kullanımları amaçlanmaktadır. Dönme hızlarını yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha az olması sebebiyle dönüşlerinde ses çıkarmazlar. Bu sebeple şehirlerde kullanımı gayet güvenli ve estetik yapıya sahip olmalarından dolayı görüntü kirliliğine yol açmazlar. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre çok az parçadan oluştukları için kurulum maliyetleri düşüktür. Tasarımları ve boyutları sayesinde akım ve onarım maliyetleri de düşüktür.

### 3.2.2.1. Darrieus rüzgâr türbinleri

Darrieus rüzgâr türbini Fransız bilim adamı George J.M. Darrieus tarafından 1931’de icat edilmiştir. Bu rüzgâr türbininin yüksek performansa sahip olmasındaki en büyük neden kanatlarının düzgün bir aerodinamik yapıya sahip olmasıdır. Türbininin kanatları üzerindeki çekme gerilimi hafif bir eğime sahiptir ve bu nedenle kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma inmektedir. Bu türbinler yüksek hızlarda çalışmaya devam edebilir. Türbin; 2 veya 3 kanatlı olmaktadır. Bu türbinlerin ilk harekete başlayabilmesi için tahrik motoru gerekmektedir.



Şekil 3.7. Darrieus tipi rüzgâr türbinleri [9]

Düşey eksenli Darrieus tipi rüzgâr türbininde, iki kanat düşey şekilde yerleştirilmiştir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgâr türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir.

### 3.2.2.2. Savonius rüzgâr türbinleri

Savonius rüzgâr türbini 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından icat edilmiştir. Rüzgârın geliş yönü fark etmeksizin silindirin iç kısmında

pozitif bir moment meydana gelirken dış kısmında negatif bir moment oluşturmaktadır. Oluşan momentlerden pozitif moment negatif momentten daha yüksek olduğundan dönme başlar ve bu dönme hareketi pozitif moment yönünde olmaktadır. Bu türbinlerin ilgi geçmesinin sebebi geometrilerinin basit olması ve kurulumunun kolay olmasının yanında başlangıç torklarının yüksek olmasıdır. Bunun nedeni, aerodinamik yapılarından dolayı herhangi bir yönde esen rüzgârı kullanabilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Savonius rüzgâr türbinlerinin diğer türbinlere göre alçakta olması ve küçük yapıya sahip olmalarından dolayı bakımı ve işletmesi oldukça ucuz ve kolaydır.



Şekil 3.8. Savonius tipi rüzgâr türbinleri [9]

Yapılan çalışmalar incelendiğinde ilk olarak Savonius rüzgâr türbininin performansını değerlendirmek ve geliştirmek için Aldoss ve Najjar'ın yapmış oldukları çalışmada hem rüzgârın gerisinde hem de rüzgâra doğru, çark kanatlarının bir optimum açı ile geriye doğru salınmasına müsaade ederek geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın yanı sıra Savonius rüzgâr türbinin çalışma etkinliğini artırmak için Reupke ve Probert ise türbin kanatlarının kavisli kısımlarının yerine bir sıra menteşelenmiş kanatçıklar yerleştirmiştir. Yerleştirdikleri bu kanatçıklar rüzgâra doğru ilerlerken, rüzgâr basıncının etkisinde otomatik olarak açılmış ve daha az akış direnci elde edilmiştir.

Kanatçıkların ilk konuma gelirken, tekrar otomatik olarak kapandığını tespit edip, çok düşük uç hız oranlarında, düzeltilmiş parçalı kanatlı çarklardan, klasik Savonius türbinlerine oranla daha yüksek momentler elde edildiğini gözlemlemişlerdir.



Şekil 3.9. Savonius tipi rüzgâr türbinleri [9]

Rüzgâr türbinlerinin performans eğrileri hesaplanırken hız katsayısı ve güç katsayısına bakılmaktadır ve ona göre değerlendirme yapılmaktadır. Bu bağlamda Savonius rüzgâr türbinlerinin performans eğrisi üzerinde Mahmoud'un yapmış olduğu deneysel çalışmalarında türbinin en boy oranı üzerine de incelemeler yapmıştır ve bu çalışmada en-boy oranının yükselmesiyle güç katsayısında bir artış olduğu sonucuna varmıştır. Bu sonuca dayanarak performansta artış gözlemlenmişti [11].

#### 3.2.2.2.1. Savonius rüzgâr türbinleri avantajları

- Savonius rüzgâr türbinlerinin geometrileri basittir ve ucuza imal edilebilir.
- Dikey eksenli türbinlerdeki gibi birçok elemana sahip değildir ve kuleye ihtiyaç duymazlar.
- Rüzgâr hızının düşük olduğu durumlarda başlangıç karakteristikleri iyidir.
- Harekete başlaması sırasında ek bir kuvvete ihtiyaç yoktur, kendi kendilerine çalışabilirler.

- Savonius rüzgâr türbinleri, rüzgârın yönünden bağımsız çalışabilmektedir. Rüzgârın yönü değiştiğinde çarkın yönünü değiştirmeye gerek duyulmamaktadır.
- Şehir merkezlerine uzak yerlerde az miktarda olan enerji ihtiyacını karşılamak için ucuz ve basit bir rüzgâr çarkıdır.
- Bu rüzgâr türbinindeki parçaların bakım ve onarımı kolay olmaktadır.
- Üretilen enerji toprak seviyesinde olduğu için, gücün taşınması kolay olmaktadır.
- Estetik yapıya sahip olmalarından dolayı şehir merkezlerinde dahi kullanılabilir ve görüntü kirliliğine yol açmaz.
- Çalışması sırasında rahatsız edici ses çıkarmaz bu sayede ses kirliliğine yol açmazlar [12].

#### **3.2.2.2. Savonius rüzgâr türbinleri dezavantajları**

- Aerodinamik performansları yatay eksenli türbinlere göre düşüktür. Bundan dolayı havalandırma, su pompalama gibi kısıtlı kullanım alanına sahiptirler.
- Ticari kullanım amaçlı olarak sıklıkla kullanılmazlar.
- Aerodinamik yapılarının geliştirilmesi için günümüzde çalışmalar yapılmaktadır.
- Yüksek bölgelerdeki daha fazla rüzgâr hızlarından faydalanamayan yere yakın konumlanmış rotorlara sahiplerdir [12].

### **3.3. Rüzgâr Türbinin Karşılaştırılması**

Tek kanatlı ve çift kanatlı rüzgâr türbinleri estetik görünümünün kötü, gürültü oranlarının yüksek olması ve maliyetlerinin de fazla olmasından dolayı kullanılmamaktadır. Üç kanatlı rüzgâr türbinleri düşük maliyetli, estetik görünümünün iyi olması, düşük gürültü düzeyinde çalışması ve yüksek çalışma hızlarından dolayı günümüzde en çok tercih edilen türbin çeşididir.

Tablo 3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Karşılaştırılması [9]

|                              | YERT        |              |            |                             | DERT                        |                             |
|------------------------------|-------------|--------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                              | Tek Kanatlı | Çift Kanatlı | Üç Kanatlı | Çok Kanatlı                 | Savonius                    | Darrieus                    |
| Maliyet                      | Yüksek      | Yüksek       | Düşük      | Düşük                       | Düşük                       | Düşük                       |
| Estetik Görünüm              | Kötü        | Kötü         | İyi        | İyi                         | İyi                         | İyi                         |
| Çalışma Hızı                 | Yüksek      | Yüksek       | Düşük      | Az                          | Az                          | Az                          |
| Kule ihtiyacı                | Var         | Var          | Var        | Var                         | Yok                         | Yok                         |
| Kullanım Amacı               | Elektrik    | Elektrik     | Elektrik   | Az elektrik ve su pompalama | Az elektrik ve su pompalama | Az elektrik ve su pompalama |
| Günümüzde Kullanımı          | Yok         | Yok          | Var        | Var                         | Az                          | Az                          |
| Rotorun Dönmesi İçin Rüzgârı | Kaldırır    | Kaldırır     | Kaldırır   | Kaldırır ve sürükler        | Kaldırır ve sürükler        | Kaldırır ve sürükler        |

Çok kanatlı rüzgâr türbinleri, Savonius ve Darrieus rüzgâr türbinleri ise düşük çalışma hızlarından dolayı günümüzde kişisel kullanımlarda (çiftliklerde elektrik üretimi ya da su pompalama) kullanılmaktadır [9].

Savonius rüzgâr türbinleri estetik görünümüne sahip olmasından dolayı bireysel kullanımının uygun olmasının yanında şehir merkezlerinde, en işlek caddelerde dahi aydınlatma gibi amaçlarla kullanılabilir.

## BÖLÜM 4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kullanım alanını yaygınlaştırmak ve daha ekonomik hale getirmek için, türbinin performansını arttırmaya yönelik literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları perde uygulaması üzerine iken, bazıları kanat sayısını incelemişlerdir. Bazı araştırmacılar da helisel kanat tasarımı ile performans artışı elde etmeye çalışmıştır.

Atılğan ve Deda Altan (2004) çalışmalarında, Savonius rüzgâr türbininin performansını arttırmak için daha önceden yapılan çalışmaları inceleyip kendi rüzgâr çarklarının önüne perde uygulaması yapmışlardır. Bunun yanında farklı projeler ile yaptıkları projenin karşılaştırmasını yapmışlardır [13].

Deda vd. (2001) çalışmalarında, perde uygulaması yapılan Savonius rüzgâr türbininin güç performansında ki değişikliği, değişik kanat açılarında ve değişik perde giriş uzunluklarında, perdesiz Savonius rüzgâr türbini baz alarak matematiksel olarak çalışma yapmışlardır [14].

Ushiyama ve Nagai (1988) çalışmalarında, Savonius rüzgâr türbininin optimum tasarım şekli ve performansı üzerine çalışarak, optimum tasarımı belirlemek için farklı prototipleri rüzgâr tüneline test etmişlerdir. Rotorun uçlarında ki levhaların varken ve yokken, kepçe sayısını göz önünde bulundurarak, akış ayrılmaları ile rotorun çevresinde ki akışın üzerine çalışarak en yüksek momenti ve güç değerini veren çark modelini belirlemeye çalışmışlardır [15].

Aldoss (1984) yaptığı çalışmasında, rotordaki kanatların rüzgârı karşısına aldığı zamanlarda, rüzgâr direncini azaltma fikrini kullanarak, sallanan kanata sahip

Savonius rüzgâr çarkı için deneysel olarak güç artırma yöntemini incelemiştir. Sallanan kanata sahip Savonius rüzgâr türbininin geleneksel bir Savonius rüzgâr çarkına göre incelemesini yapmıştır. Optimum sallanma açısında gücün artışının sağlanabildiğini belirlemiştir [16].

Menet (2004) çalışmasında, Savonius rüzgâr türbini prototipi tasarımı yaparak sınırlı elektrik üretimi için testini gerçekleştirmiştir. Savonius rüzgâr türbininin optimizasyonu yapmıştır. Optimize ile tasarlanan çarkın 0.29 güç katsayısı ile veriminin yüksek olduğunu tespit etmiştir [17].

Roy ve diğerleri (2013) çalışmalarında, Savonius rüzgâr türbini rotorunu geliştirme ve tasarımı üzerine sayısal olarak çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada değişik hesaplama yöntemlerini uygulayıp problem için uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Uygun bulunması sonucunda Savonius rüzgâr türbininin performansını iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Savonius rüzgâr çarkı parametrelerini değiştirerek farklı modelleri yapılan deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Bunlara bağlı olarak en iyi performansa sahip modeli geliştirip karşılaştırmalarını yapmışlardır. Hesaplama yöntemlerinin ve modellerin Savonius rüzgâr türbininde güç ve tork katsayısı değerlerini tahmin etmede önem taşıdığını belirlemişlerdir. Savonius rüzgâr türbini performansının kanat sayısı, en boy oranı, hız oranı, kanat yay açısı, kanatların örtüşme oranı gibi pek çok değişkene bağlı olduğu sonucuna varmışlardır [18].

Göktaş ve Kılıç (2019) çalışmalarında, Savonius rüzgâr çarkını Solidworks programı kullanarak tasarlamış, sonlu elemanlar yöntemini Ansys yazılımı ile çözümler yapmıştır. Kanadın çevresindeki hız ve basınç dağılımını üç farklı rüzgâr hızı ve dört farklı türbin açısında değerlendirerek hesaplama yapmıştır. Basınç grafikleri içinde en yüksek basıncın 0 ve 45 derecede olduğunu tespit etmiştir [19].

Fujisawa (1996) çalışmasında, Savonius rüzgâr türbininin içinde ve etrafındaki akışın gerçekleştiği alana, akış modellerindeki kayma oranının etkisini çeşitli kayma oranlarında incelemiştir. Partikül resimleme ölçeri tarafından hız dağılımını yapmış ve sonucu değişik vorteks yöntemi ile yapılan çalışmalarla karşılaştırmıştır. Hız

dağılımının akış üzerinde ve rotorun çıkışındaki vorteks bölgesindeki sonucu gösterdiğini belirlemiştir [20].

Altan ve diğ. (2008) çalışmalarında, Savonius rüzgâr çarkının performansını arttırmak için perde sistemi önermişlerdir. Perde rotorun önündeki negatif torkun önlenmesi amacıyla rotorun önün tarafına yerleştirilmiştir. Değişik perde şekillerine sahip Savonius türbini ve geleneksel Savonius türbini rüzgâr tüneline testi yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Savonius rüzgâr türbini güç katsayısı %38,5'e optimum perde optimizasyonu ile yükseltilmiştir [21].

Damak ve diğ. (2013) çalışmalarında, Savonius rüzgâr türbininin performansını iyileştirmek için 180 derece helisel Savonius türbinini düşünmüşlerdir. Reynolds sayısındaki farklılığın ve kayma oranının optimize edilen Savonius rüzgâr türbininin performansına etkisi üzerine çalışmışlardır. Jet rüzgâr tüneline gerçekleştirdikleri deneylere istinaden helisel profilden, geleneksel profile göre daha iyi performans alındığı sonucuna varmışlardır. Helisel Savonius rüzgâr türbini Reynolds sayısına göre değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Helisel profilde 0,242 kayma oranının, 0,0 kayma oranına göre daha iyi sonuç verdiğini saptamışlardır [22].

Kamoji ve diğ. (2009) çalışmalarında, Savonius rüzgâr türbinine 90 derece helisel kanat tasarımı ile negatif torkun etkisini azaltabileceklerini önermişlerdir. Geleneksel Savonius rüzgâr türbini, saftsız helisel Savonius rüzgâr türbini ve şaftlı helisel Savonius rüzgâr türbinini değişik kayma oranlarında performansını karşılaştırmışlardır. Şaftsız helisel rotorların şaftlılara göre daha yüksek güç katsayısına sahip olduğunu tespit etmişlerdir [23].

Wenehenubun ve diğ. (2015) çalışmalarında, Savonius rüzgâr türbininin performansında kanat adedinin etkisini üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde iki, üç ve dört kanatlı Savonius rüzgâr türbinlerini karşılaştırmışlardır. Üç kanatlı türbinin, iki ve dört kanatlı rüzgâr türbininden daha fazla dönme hızına ve uç hızı oranına sahip olduğunu anlamışlardır. Üç kanatlı türbinin 7 m/s rüzgâr hızında en yüksek uç hızı oranının 0,555 olduğunu belirlemişlerdir [24].

Saha ve Rajkumar (2006) çalışmalarında, kıvrılmış üç kanatlı Savonius rüzgâr türbini ile geleneksel üç kanatlı rüzgâr türbininin performansını rüzgâr tüneline incelemişlerdir. 15 derece kıvrık kanatlı Savonius rüzgâr türbini 8,23 m/s uç hızında güç katsayısı 0,14 ve geleneksel Savonius rüzgâr türbininin aynı uç hızında güç katsayısının 0,11 olduğu sonucuna varmışlardır. İlk harekete başlayabilme karakterinin kıvrılmış kanatlı Savonius rüzgâr türbininde daha iyi olduğunu belirlemişlerdir [25].

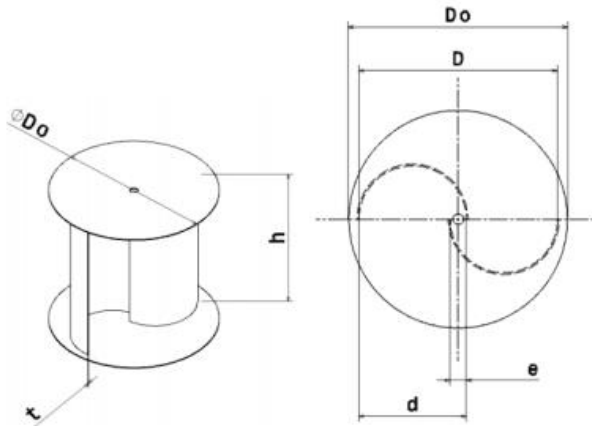
Bu çalışmada; s-rotor savanius rüzgâr türbininin verimini arttırmak için hava akış kanalları kullanılacaktır. Optimum hava kanalı geometrisini belirlemek amacıyla, türbin Ansys/Fluent yazılımı kullanılarak modellenecek ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri (HAD) gerçekleştirilecektir. Sayısal model literatürde gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalarla doğrulanacaktır. Doğrulanan çalışma parametreleri ile optimum hava akış kanalı üzerinde overlap oranının kanat performansı üzerine etkisi incelenecektir.

## BÖLÜM 5. SAVONIUS TÜRBİNİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Bu çalışmada; Savonius rüzgâr türbinlerinin düşük verimlerini arttırabilmek amacı ile, rotor dönme eksenine çeşitli profillerde hava akış kanalları açılarak ve açık kanal profilli hava kanalında kanal açıklığının kepçe çapına oranı (overlap oranı) ile türbin verimi üzerine etkisi araştırıldı. Rüzgâr çarklarındaki güç değerlerine Ansys programı kullanılarak ulaşılmıştır.

### 5.1. Hava Akış Kanallı Profil Geometrileri

Wenehenubuna ve diğ. (2015) yılında yayınladıkları “Kanat sayısının savanius rüzgâr türbini performansı üzerine etkisinin deneysel çalışması” adlı çalışmaları optimizasyon çalışmasının gerçekleştirildiği sayısal çalışma için referans alınmış ve HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile doğrulanmıştır.



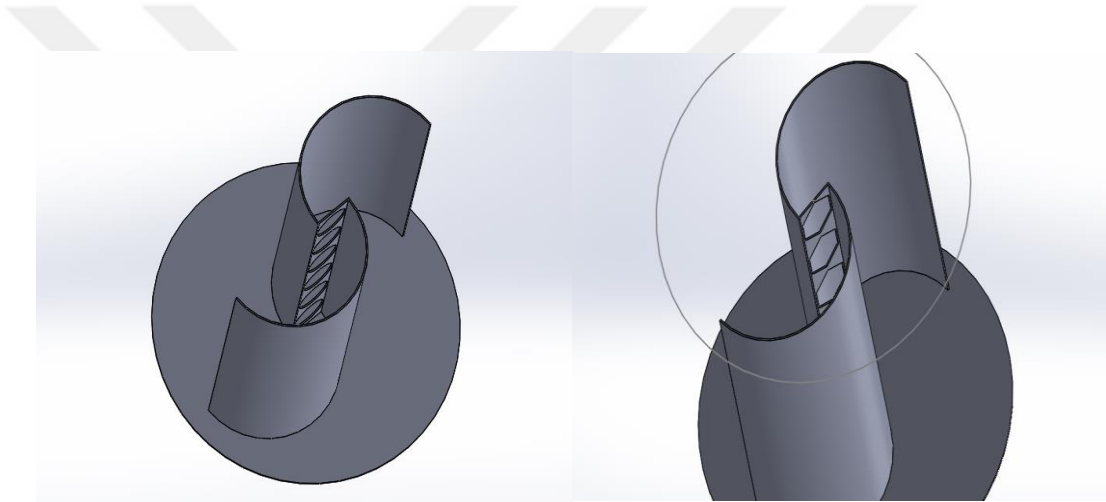
Şekil 5.1. Savonius rüzgâr türbini boyutlandırması

Şekil 5.1.'de Savonius rüzgâr türbininin ölçülendirme parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Savonius rüzgâr türbini boyutları

| $D_0$  | $h$    | $d$    | $e$   | $t$  |
|--------|--------|--------|-------|------|
| 407 mm | 370 mm | 200 mm | 30 mm | 2 mm |

Rotor dönme eksenine daire, altıgen, dörtgen ve açık kanal profilli hava akış kanalları açılarak, sayısal modelin hesaplama alanı Ansys/Design Modeler yazılımı kullanılarak oluşturuldu.



Şekil 5.2. Savonius rüzgâr türbini hava akış kanalları

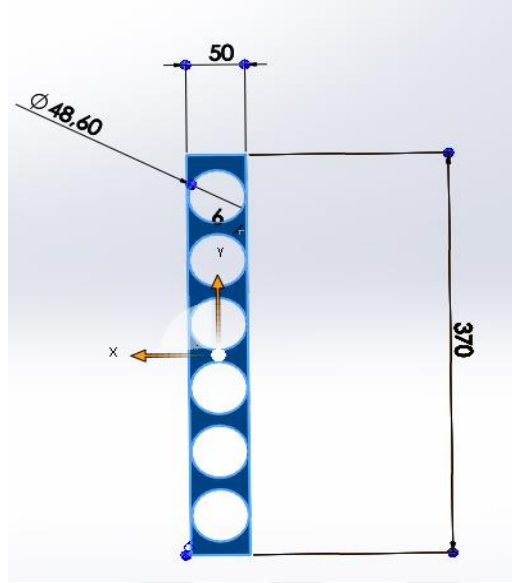
### 5.1.1. Dairesel kanal profilli model

Türbin üzerinde 6 adet dairesel kanal bulunmaktadır.

$$R=24,3 \text{ mm}=0,0243 \text{ m}$$

$$A = 6\pi r^2 = 0,0111 \text{ m}^2 \quad (5.1)$$

Rotor üzerinde ki toplam dairesel hava akış alanı bulunmuştur.



Şekil 5.3. Dairesel hava akış kanalları

### 5.1.2. Altıgen kanal profil model

Türbin üzerinde 6 adet altıgen kanal bulunmaktadır.

$$s = 26,72 \text{ mm} = 0,02672 \text{ m}$$

$$A = 6 \times \frac{3\sqrt{3} \times s^2}{2} = 0,0111 \text{ m}^2 \quad (5.2)$$

Rotor üzerinde ki toplam altıgen profil hava akış alanı bulunmuştur.

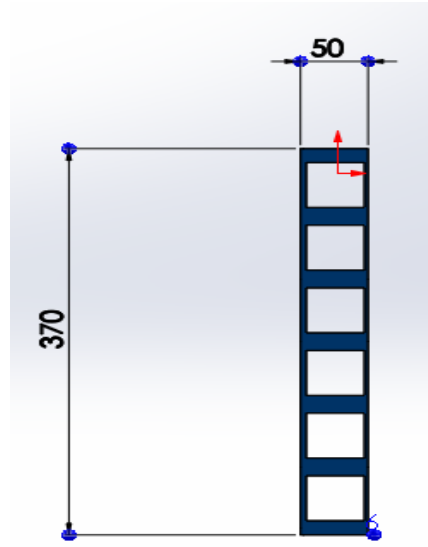
### 5.1.3. Dörtgen kanal profil model

Türbin üzerinde 6 adet dörtgen kanal bulunmaktadır.

$$A = 43,07 \text{ mm} = 0,04307 \text{ m}$$

$$A = 6 \times a \times a = 0,0111 \text{ m}^2 \quad (5.3)$$

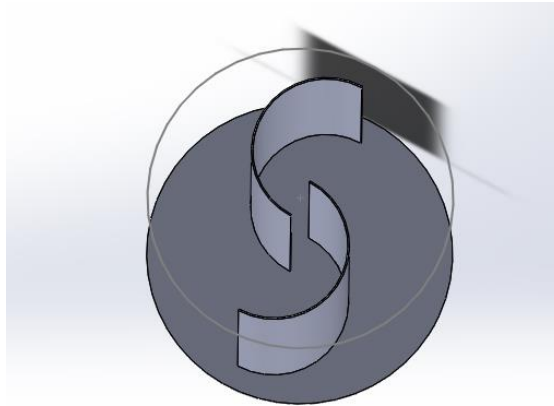
Rotor üzerinde ki toplam dörtgen profildeki hava akış alanı bulunmuştur.



Şekil 5.4. Dörtgen hava akış kanalları

#### 5.1.4. Açık kanal profilili model

Açık kanal profilili hava akış kanalında iki kanat arasında boşluk bulunmaktadır.



Şekil 5.5. Açık kanal profilili hava akış kanalı

$$A = h \times e = 0,370m \times 0,030m = 0,0111 m^2 \quad (5.4)$$

## 5.2. Overlap( $e/d$ ) Oranını 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 Olan Modeller

Savanius rüzgâr türbinlerinde overlap oranı iki kanadın arasındaki mesafenin kanat çapına oranıdır. Bu oranın optimum değerini bulabilmek için 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 ve 0.30 overlap oranı değerlerinin 2,4,6,8 m/s hızlarında analizleri yapılmıştır.

### 5.2.1. Overlap oranı 0,10 olan türbin modeli

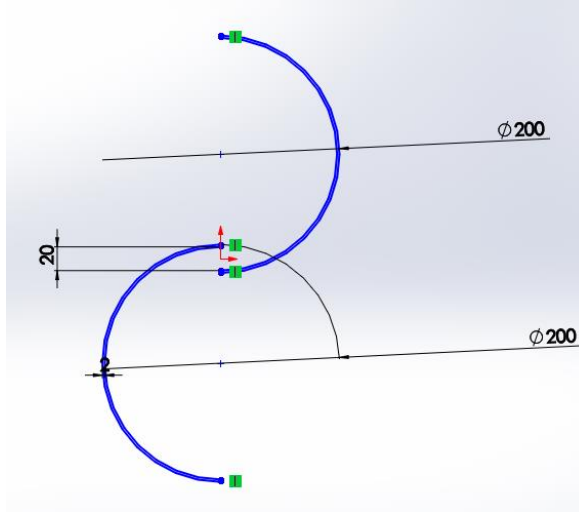
Kanatları arası mesafenin 20 mm ve kanat çapının 200 mm olduğu durumda overlap oranı 0,10 olmaktadır. Şekil 5.1.'de ki boyutlandırma parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 5.2. 0,10 overlap oranına sahip savonius rüzgâr türbini boyutları

| $D_0$  | $h$    | $d$    | $e$   | $t$  |
|--------|--------|--------|-------|------|
| 407 mm | 370 mm | 200 mm | 20 mm | 2 mm |

Overlap oranı kanatlar arasındaki mesafenin kanat çapına oranı ile bulunmaktadır.

$$\frac{e}{d} = \frac{20 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,10 \quad (5.5)$$

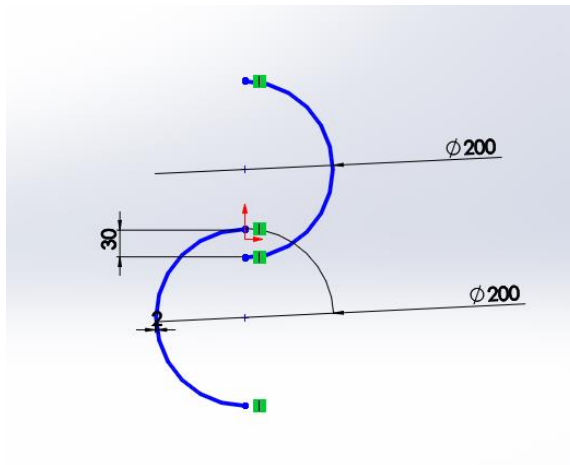


Şekil 5.6. 0,10 overlap oranına sahip model

### 5.2.2. Overlap oranı 0,15 olan türbin modeli

Kanatları arası mesafenin 30 mm ve kanat çapının 200 mm olduğu durumda overlap oranı 0.15 olmaktadır.

$$\frac{e}{d} = \frac{30 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,15$$



Şekil 5.7. 0,15 overlap oranına sahip model

### 5.2.3. Overlap oranı 0,20 olan türbin modeli

Kanatları arası mesafenin 40 mm ve kanat çapının 200 mm olduğu durumda overlap oranı 0.20 olmaktadır.

$$\frac{e}{d} = \frac{40 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,20$$

### 5.2.4. Overlap oranı 0,25 olan türbin modeli

Kanatları arası mesafenin 50 mm ve kanat çapının 200 mm olduğu durumda overlap oranı 0.25 olmaktadır.

$$\frac{e}{d} = \frac{50 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,25$$

### 5.2.5. Overlap oranı 0,30 olan türbin modeli

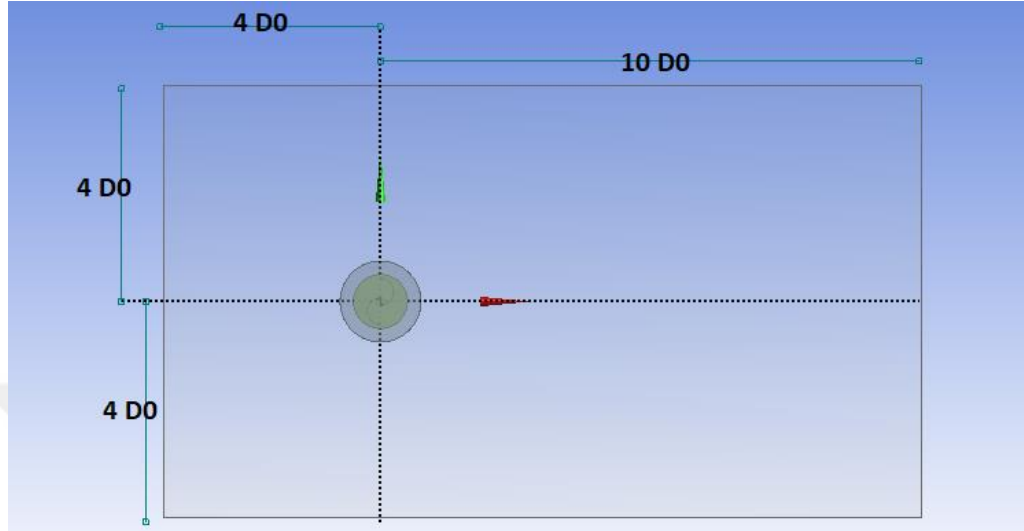
Kanatları arası mesafenin 60 mm ve kanat çapının 200 mm olduğu durumda overlap oranı 0.30 olmaktadır.

$$\frac{e}{d} = \frac{60 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,30$$

## 5.3. Sistemin Boyutlandırılması

Yapılan çalışmada boyuttan bağımsızlık için farklı ölçülerde bir dikdörtgen seçilmiştir. Burada rüzgârın giriş yerinden çarkın merkezinin uzaklığı 4D0 olarak alınmıştır. Akışın tam gelişmesine izin vermek ve aynı zamanda tıkanma etkisini azaltmak için hesaplama alanı 8D0 x 14D0 olarak seçilmiştir. Böylelikle

özüm boyuttan bağımsız olacak ve sınır koşullarının çözüm alanında, akış üzerindeki etkisi ortadan kalkacaktır.



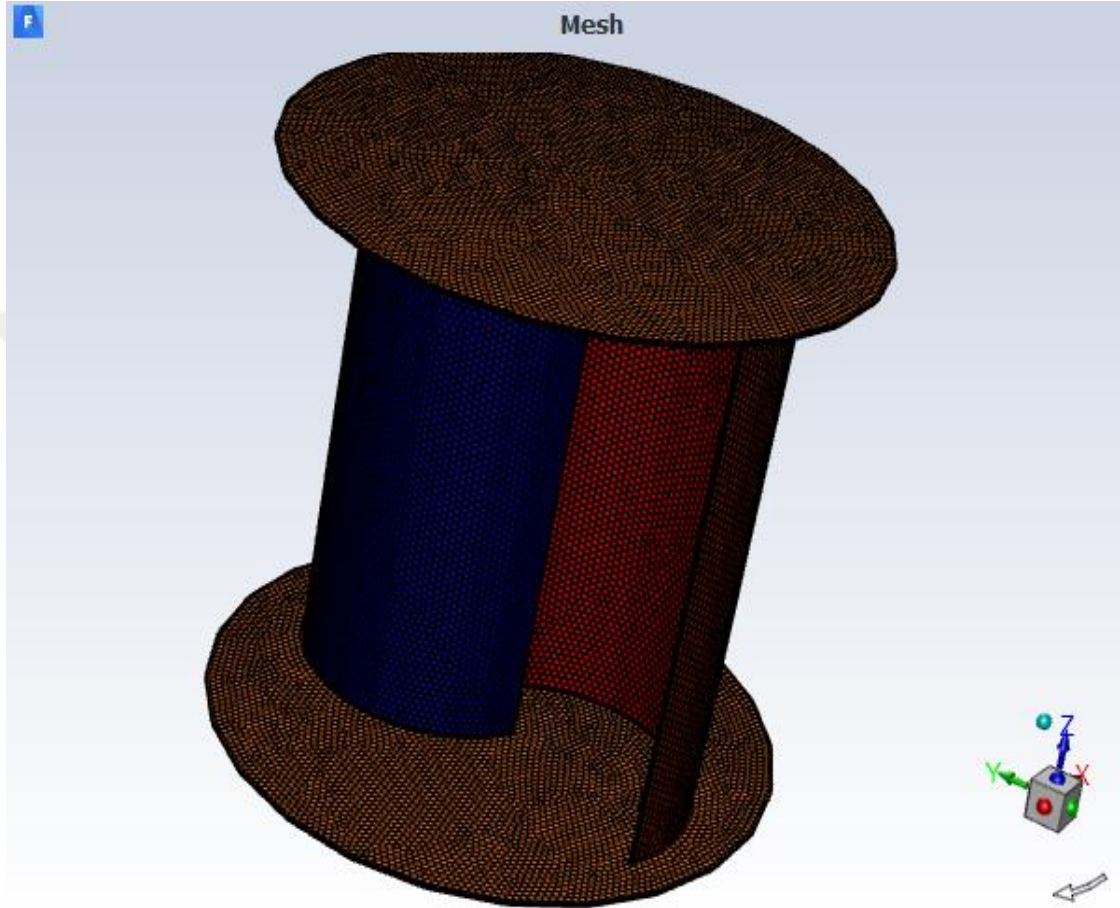
Şekil 5.8. Sistemin Boyutlandırılması

Dikdörtgen şekildeki alanın yüksekliği  $2h$  olarak belirlenip akış hacmi oluşturulmuştur.

#### 5.4. Mesh Yapısı

Ansys/Fluent Meshing yazılımı kullanılarak hesaplama bölgesinin ağ yapısı oluşturuldu. Meshin amacı, karmaşık bir hacmi, simülasyonunun yürütüleceği küçük parçalara ayırmaktır. Yapılan çalışmada daha doğru sonuçlar alabilmek için türbin kanatlarına sıkı mesh atılıp akışın gerçekleştiği alana daha az sayıda mesh atılmıştır. Her bölgeye çok sayıda mesh atmak doğru değildir. Önemli olan sistemi en az sayıdaki mesh ile sistemi çalıştırabilmektir. Bu bize zamandan ve enerjiden tasarruf sağlayacaktır.

Mesh işlemi Fluend Meshing ile gerçekleştirilmiştir. Bu bize daha az mesh sayısı ile skewnes değerinin daha düşük olmasını sağlayacaktır. Yani daha az eleman sayısı ile yüksek mesh kalitesine sahip yapı oluşturulmuştur.



Şekil 5.9. Poly elemanlı hacim mesh yapısı

Mesh işlemi üçgen elemanlarla yapıldığında yaklaşık 2000000 eleman sayısı olmaktadır. Bunun yerine poly eleman kullanılarak ortalama 650000 eleman sayısı ile hacim meshler oluşturulmuştur. Bu bize farklı yönlerden gelen hava akışının daha doğru çözülmesini sağlayacaktır.

### 5.4.1. Katman sayısı hesabı

Farklı hava akış kanalına sahip profiller 2,4,6,8 m/s hız için analiz yapılacağından sınır tabaka hesabı her bir hız için ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Çünkü katman sayısı ve boyu Reynolds sayısının hız faktörüne bağlı olması ile değişecektir. Aşağıda 4 m/s için sınır tabaka hesabı yapılmıştır.

$$V = 4 \frac{m}{s}$$

$$\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 1,8883 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$$

$$D = 200 \text{ mm} = 0,2 \text{ m}$$

$$Re = \frac{1,25 \frac{kg}{m^3} \times 4 \frac{m}{s} \times 0,2 \text{ m}}{1,8883 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}} = 52940,86 < 10^5 \quad (5.6)$$

Reynolds sayısı  $10^5$  ten küçük olduğu için akış laminar formdadır.

$$\delta_L = \frac{4,91 \times 0,2 \text{ m}}{\sqrt{52940,86}} = 4,267 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (5.7)$$

Toplam katman kalınlığı bulunmuştur.

$$1 \leq y^+ \leq 5$$

$y^+ = 3$  için 3 seçilmesinin sebebi katman sayısının fazla ya da az olması yerine optimum değerde çıkmasını istememizdir.

$$\Delta s = 0,2 \text{ m} \times 3 \times \sqrt{80} \times 52940,86^{-\frac{13}{14}} = 2,204 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (5.8)$$

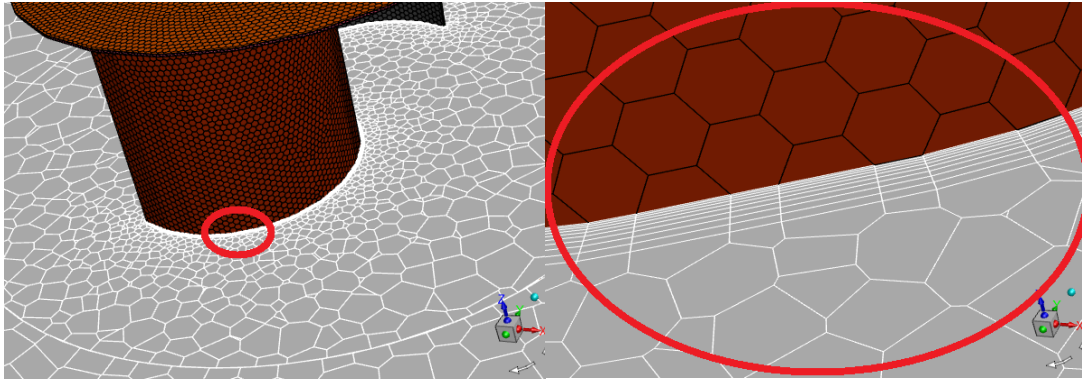
İlk katman kalınlığı 0,2204 m dir.

Tablo 5.3. Katman sayısı belirleme tablosu

| Katman sayısı | İlk Katman  | Katman Kalınlığı |
|---------------|-------------|------------------|
| 1             | 0,000220454 |                  |
| 2             | 0,000264545 | 0,000485         |
| 3             | 0,000317454 | 0,000802454      |
| 4             | 0,000380945 | 0,001183339      |
| 5             | 0,000457134 | 0,001640534      |
| 6             | 0,000548561 | 0,002189095      |
| 7             | 0,000658273 | 0,002847368      |
| 8             | 0,000789928 | 0,003637297      |
| 9             | 0,000947914 | 0,00458521       |
| 10            | 0,00113497  | 0,005722707      |
| 11            | 0,001364996 | 0,007087703      |
| 12            | 0,001637995 | 0,008725698      |
| 13            | 0,001965594 | 0,010691292      |
| 14            | 0,002358713 | 0,013050004      |

Katman sayısı belirleme tablosunda ki veriler Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Katman sayısı belirlenirken ilk katman yazan sütun her satırda 1.2 büyümektedir. Yani ikinci katman birinci katmanın 1.2 büyüktür ve ardışık olarak devam eder. Katman kalınlığı yazan sütun ise seçilen katman sayısına kadar bütün katmanların toplamıdır yani toplam katman kalınlığıdır.



Şekil 5.10. Hava akış kanallı sınır tabaka yapısı

Hesaplama katman kalınlığı 0,2204 m ve ilk katman  $4,267 \times 10^{-3}$  m olarak bulundu. Tabloda  $4,267 \times 10^{-3}$  m kalınlığına en yakın değer seçilmiş ve katman sayısı 9 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Değişik hızlardaki katman sayıları

| V | Re        | Sl       | St       | İlk Katman | Katman Sayısı |
|---|-----------|----------|----------|------------|---------------|
| 2 | 26470,43  | 0,006035 |          | 0,0004196  | 7             |
| 4 | 52940,86  | 0,004267 |          | 0,0002204  | 9             |
| 6 | 79411,29  | 0,003484 |          | 0,0001512  | 9             |
| 8 | 105881,73 |          | 0,007316 | 0,0001158  | 14            |

Yukarıdaki tabloda analizi yapılan hava akış kanallı modelin ilk katman kalınlığı ve toplam katman kalınlıkları ayrı ayrı hesaplanmış halde bulunmaktadır. 8 m/s hız için st ifadesini kullanılmasının sebebi Reynolds sayısının  $10^5$  ten küçük olması sonucu akışın laminar olmamasıdır.

#### 5.4.2. Mesh sayısı ve skewnes değeri

Mesh oluşturma işlemleri gerçekleştirildiğinde 2,4,6 m/s hızlarında olarak 650000 eleman varken 8m/s hızında katman sayısının fazla olmasından dolayı yaklaşık

930000 eleman bulunmaktadır. Bu eleman sayıları, modelin mesh oluşturma işleminden sonra kaç elemandan oluştuğunu ifade etmektedir.

Tablo 5.5. Daire hava akış kanallı modelin eleman sayısı ve skewnes verileri

| Bölge                  | Maximum-skewnes | Eleman Sayısı |
|------------------------|-----------------|---------------|
| Türbin Yüzeyi          | 0,51880         | 20304         |
| Akış Gerçekleşen Hacim | 0,79940         | 555205        |
| Genel                  | 0,79940         | 575509        |

Tablo 5.5.'de 2 m/s hız için daire hava akış kanallı modelin mesh sayısı ve skewnes verileri bulunmaktadır. Max-Skewnes 0.79 dur. Eleman sayısı 575509 dur. Oluşturulan model 575509 adet parçaya bölündüğü anlamına gelmektedir.

Şekil 5.6. Dörtgen hava akış kanallı modelin eleman sayısı ve skewnes verileri

| Bölge                  | Maximum-skewnes | Eleman Sayısı |
|------------------------|-----------------|---------------|
| Türbin Yüzeyi          | 0,52232         | 20570         |
| Akış Gerçekleşen Hacim | 0,79997         | 663820        |
| Genel                  | 0,79997         | 684390        |

Tablo 5.6.'da 4 m/s hız için dörtgen hava akış kanallı modelin mesh sayısı ve skewnes verileri bulunmaktadır. Max-Skewnes 0.79 dur. Eleman sayısı 684390 dır.

Şekil 5.7. Altıgen hava akış kanallı modelin eleman sayısı ve skewnes verileri

| Bölge                  | Maximum-skewnes | Eleman Sayısı |
|------------------------|-----------------|---------------|
| Türbin Yüzeyi          | 0,51466         | 20283         |
| Akış Gerçekleşen Hacim | 0,80098         | 677944        |
| Genel                  | 0,80098         | 698227        |

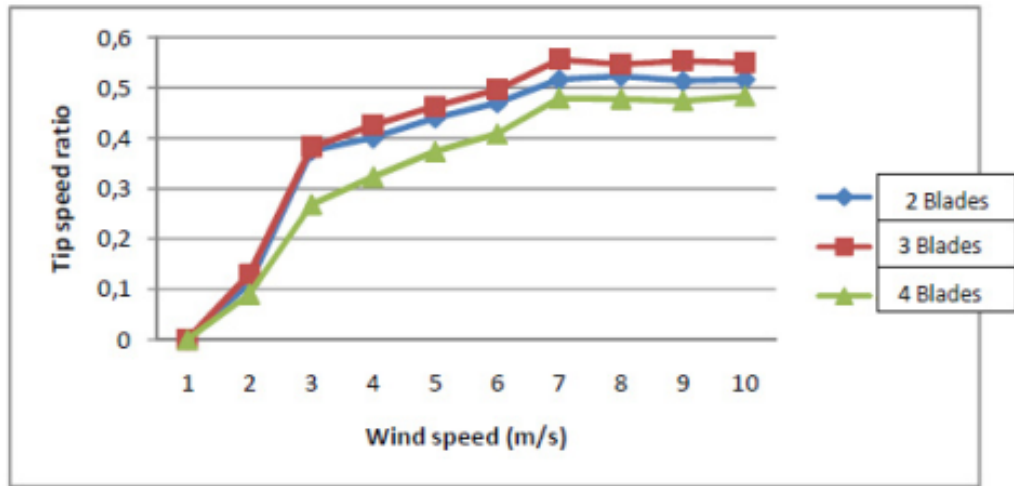
Tablo 5.7.'de 6 m/s hız için altıgen hava akış kanallı modelin mesh sayısı ve skewnes verileri bulunmaktadır. Max-Skewnes 0.80 dir. Eleman sayısı 698227 dir.

Açık kanal profilili hava akış kanallı modelin Max-Skewnes 0.80 dir. Eleman sayısı 931537 dir.

### 5.5. Frozen Rotor Modelin Oluşturulması

Sınır şartlarının tanımlanıp meshin yapısı kurulmasının ardından Frozen rotor analiz yapılması gerekmektedir. Bu bölümde model tanımlanır ve programa çözümleme yaptırılıp sonuçların alınması sağlanır.

Viscous model olarak k-epsilon kullanılmıştır. Bu model Frozen rotor analizde akış analizi için kullanıldığında doğru sonuç verebilmektedir.



Şekil 5.11. Rüzgâr hızı-kanat uç hız oranı deneysel verileri (Wenehenubuna, 2015)

Şekil 5.11.'de 2,3 ve 4 kanatlı savanius rüzgâr türbinin farklı hızlardaki kanat uç hızı oranı değerleri bulunmaktadır. Analizi yapılan bu çalışmada 2 kanatlı profil değerleri dikkate alınmıştır.

Tablo 5.8. Rüzgâr hızı-Tsr değerleri

| Rüzgâr Hızı | Tsr (Kanat uç hız oranı) |
|-------------|--------------------------|
| 1           | 0,01                     |
| 2           | 0,1                      |
| 3           | 0,38                     |
| 4           | 0,4                      |
| 5           | 0,44                     |
| 6           | 0,47                     |
| 7           | 0,52                     |
| 8           | 0,53                     |
| 9           | 0,51                     |
| 10          | 0,52                     |

Tablo 5.8.'de, 1'den 10'a kadar olan hızlar için kanat uç hız oranı değerleri şekil 5.11'den alınmıştır.

### 5.5.1. Kanat açısai hızlarının hesaplanması

Frozen rotor analizde her rüzgâr hızı için kanat açısai hızı modele tanımlanması gerekmektedir. Kanat açısai hızı makalede verilmemiştir ve şekil 5.12.' den çekilecektir.

$$\Lambda = \frac{\omega \times d}{v}$$

Hız=5  $\frac{m}{s}$  için;

$$\frac{0.44 \times 5 \frac{m}{s}}{0,2 m} = 11 \frac{rad}{s} \quad (5.9)$$

5  $\frac{m}{s}$  hız için kanat açısai hızı hesaplanmıştır. Burada  $\omega$  ibaresi tablo 5.3.' ten okunmuştur.

Tablo 5.9. Rüzgâr hızı-w tablosu

| Rüzgâr hızı | Tsr (Kanat uç hız oranı) | w (Kanat Açısai hızı) |
|-------------|--------------------------|-----------------------|
| 1           | 0,01                     | 0,054                 |
| 2           | 0,1                      | 1,081                 |
| 3           | 0,38                     | 6,162                 |
| 4           | 0,4                      | 8,649                 |
| 5           | 0,44                     | 11,892                |
| 6           | 0,47                     | 15,243                |
| 7           | 0,52                     | 19,676                |
| 8           | 0,53                     | 22,919                |
| 9           | 0,51                     | 24,811                |
| 10          | 0,52                     | 28,108                |

Tablo 5.9.'da her rüzgâr hızı için kanat açısai hızı hesaplanmıştır.

### 5.5.2. Türbülans yoğunluklarının hesaplanması

Türbülans yoğunluğu her hız değeri için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Çünkü Reynolds sayısı değiştiği için modeller farklılık gösterecektir.

$$B = z_1 + z_2 + 370 \text{ mm} = 1,85 \text{ m} \quad (5.10)$$

Burada 370 türbin yüksekliğini ifade ederken z ifadeleri interior olan hava akış yüzeyidir.

$$a = y_1 + y_2 = 1628 + 1628 = 3,256 \text{ m} \quad (5.11)$$

$$D_h = \frac{4A}{\zeta} \quad (5.12)$$

$D_h$  ifadesi hidrolik çapı ifade etmektedir.

A=Alan

$\zeta$ = Çevre

$$\frac{2 \times 3,256 \times 1,85}{3,256 + 1,85} = 2,3594$$

Hidrolik çap türbülans yoğunluğunu bulmak için gerekmektedir.

$$Re = \frac{1,25 \frac{kg}{m^3} \times 5 \frac{m}{s} \times 2,3594 \text{ m}}{1,8889 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}} = 780679,231 \quad (5.13)$$

$$l = 0.16 \times 780679,231^{-\frac{1}{8}} = 0,02934$$

Türbülans Yoğunluğu= %2,934

Hız ifadesi  $5 \frac{m}{s}$  için türbülans yoğunluğu 2,934 olarak bulunmuştur. Farklı hızlarda bu ifade değişecektir.

Tablo 5.10. Rüzgâr hızı-türbülans yoğunluğu tablosu

| Rüzgâr hızı | Re         | I        |
|-------------|------------|----------|
| 1           | 156127,581 | 0,035887 |
| 2           | 312255,161 | 0,032908 |
| 3           | 468382,742 | 0,031282 |
| 4           | 624510,323 | 0,030177 |
| 5           | 780637,904 | 0,029347 |
| 6           | 936765,484 | 0,028686 |
| 7           | 1092893,07 | 0,028138 |
| 8           | 1249020,65 | 0,027673 |
| 9           | 1405148,23 | 0,027268 |
| 10          | 1561275,81 | 0,026911 |

Tablo 5.10.'da farklı hızlar için hesaplanan türbülans yoğunluğu verileri bulunmaktadır.

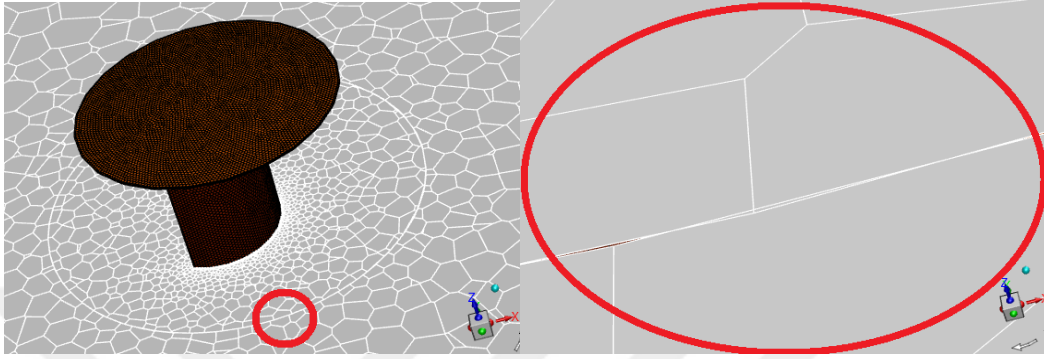
### 5.6. 0,25 Overlap Oranı İçin 6-DOF Modelin Oluşturulması

6-DOF analizler zamana bağlı analizlerdir. Frozen rotor analizlerde her rüzgâr hızı değeri için ayrı ayrı analizler yapılması gerekirken bu analizde sadece bir kez model kurularak rüzgâr hızlarının tamamı için sonuç alınabilir. Bu sebeple 6-DOF analizleri uzun sürmektedir. Fakat frozen rotor analizlerde her hız değeri için farklı modelleme yapıldığı düşünülürse zamana bağlı çözüm uzun sürmesine rağmen bütün sonuçları bir seferde verdiği için tercih edilebilmektedir.

6-DOF analizde frozen rotor analizdeki gibi açısal hız tanımlanmaz. Türbin serbest bırakılır ve gelen rüzgâr hızına bağlı olarak yavaş yavaş hızlanarak dönmeye başlar.

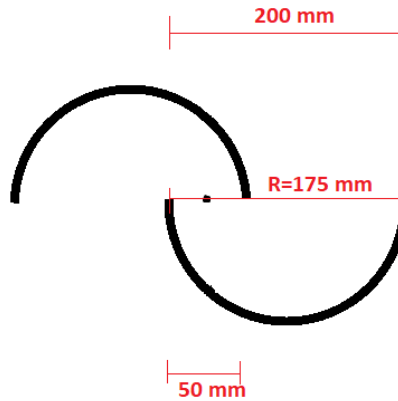
Viscous Model olarak spalart -almaras seçilmiştir. Çünkü katı yüzeylerdeki hava akışı için geliştirilen bir çözüm yöntemidir.

Türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap ifadeleri önceki hesaplamalar ile aynı olup değişmeyecektir.



Şekil 5.12. Meshlerin ayrılması

Frozen rotor analizde interface yüzeyi ortak kullanılırken 6-DOF analizde mesh yüzeylerinin ayrılması gerekmektedir. Bu işlem yapılmadığında Program hata vermektedir. 6-DOF analizde dinamik mesh kullanılmaktadır.



Şekil 5.13. Moment Hesabı Ölçüleri

$$I=m \times R^2 \quad (5.14)$$

$$I=7,85 \text{ kg} \times 0,175^2 \text{ m}^2$$

$$I=0,240406 \text{ kgm}^2$$

m ifadesi ağırlığı ifade etmektedir ve dikkate alınan makalede sac malzemesi kullanıldığı için 7,85 kg seçilmiştir.



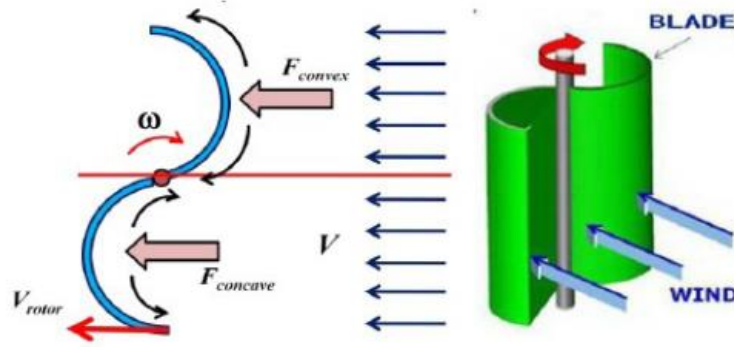
## BÖLÜM 6. VALİDASYON ÇALIŞMASI

Yapılan analizler Frederikus Wenehenubuna, Andy Saputraa ve Hadi Sutanto nun 2015 yılında yayınladıkları “Kanat sayısının savanius rüzgâr türbini performansı üzerine etkisinin deneysel çalışması” adlı makaledeki verilere göre optimize çalışması yapılmıştır. Bu makalede farklı rüzgâr hızları için türbin performansı incelenmiştir.



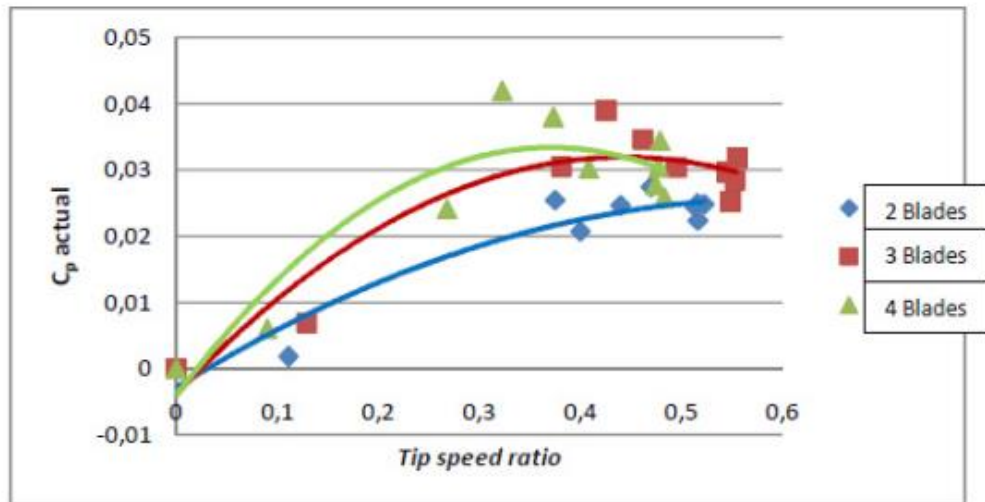
Şekil 6.1. Deney Düzeneği. (Wenehenubuna,2015)

Savanius rüzgâr türbinleri kanatlarına gelen sürüklenme kuvveti ile dönüş hareketinin sağlanmasından bahsedilmiştir. Rüzgârın geliş yönüne göre dışbükey olan kanada gelen rüzgârın bir kısmı diğer kanada kaymaktadır ve dönme hareketine yardımcı olmaktadır.



Şekil 6.2. Sürüklenme kuvveti ile savanius türbini. (Wenehenubuna,2015)

Şekil 5.1.'de ki ölçülendirme parametreleri dikkate alındığında validasyon yapılacak çalışmada ki savonius rüzgâr türbininin üst ve alt plakalarının çapı: 407 mm, türbin yüksekliği: 370 mm, türbin kanat çapı: 200 mm, kanatlar arası mesafe: 30 mm ve et kalınlığı 2 mm'dir.



Şekil 6.3. Kanat uç hızı-cp deneysel verileri (Wenehenubuna, 2015)

Şekilde deneysel sonuçlardan elde edilen 2,3 ve 4 kanatlı türbinlerin kanat uç hızı-cp grafiği verilmiştir. Bu çalışmada iki kanatlı türbin verileri kullanılmıştır.

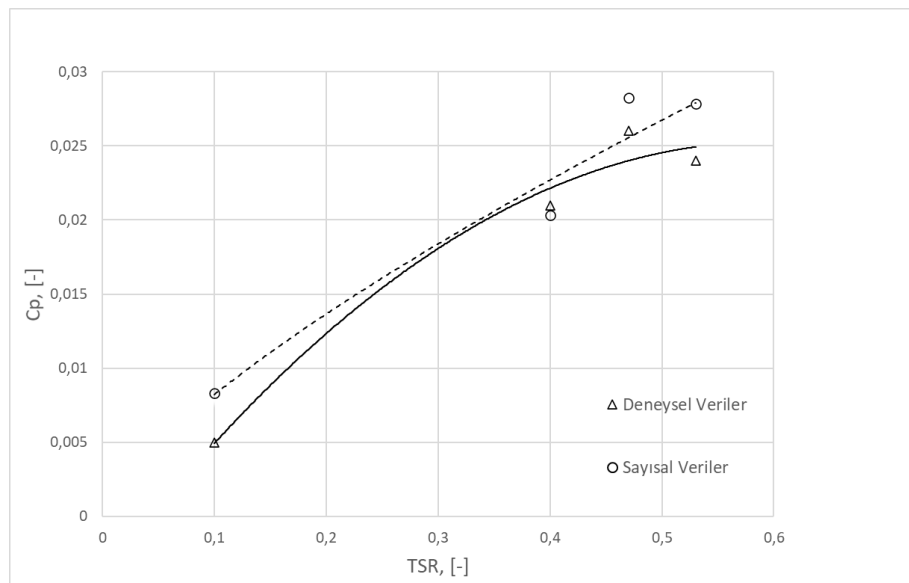
Yapılan optimizasyon çalışması aynı geometriye sahiptir ve 2,4,6, ve 8 m/s hızları için analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda  $c_p$  ifadesi;  $c_m$  ve  $t_{sr}$  ifadesinin çarpımına eşittir.

Tablo 6.1. Yapılan analiz sonucunda ulaşılan  $c_p$  değerleri

| $v$ | $T_{sr}$ | $C_m$  | $C_p$   |
|-----|----------|--------|---------|
| 2   | 0,1      | 0,0831 | 0,00831 |
| 4   | 0,4      | 0,0508 | 0,02034 |
| 6   | 0,47     | 0,06   | 0,02823 |
| 8   | 0,53     | 0,0525 | 0,02785 |

$T_{sr}$  değerleri Şekil 5.11.'den okunmuştur.  $C_m$  değerleri ise yapılan analizlerden elde edilmiştir.

Makalede bulunan deneysel veriler ile yapılan analizdeki veriler karşılaştırıldığında sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Yani modelleme gerçek değerlere çok yakın olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 6.4. Yapılan analiz ve makale sonuçlarının  $c_p$ - $t_{sr}$  grafiği.

Analiz sonuçları ve deneysel verilerin sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Analiz sonuçlarının gerçek sonuçlara yakın çıkması ile modelin doğruluğu ispatlanmış olup optimizasyon çalışmaları bu çalışma şartlarına göre yapılmıştır.

Maximum % fark şekil 6.4'e bakıldığında Tsr'nin 0.1 olduğu durumda makale verisi için güç katsayısı 0.005 iken yapılan analiz çalışmasında 0.008'dir. Yani güç katsayısı 0.006 bulunması gerekirken 0.008 bulunmuştur. Max. Hata=%60'tır.

Minimum % fark şekil 6.4'e bakıldığında Tsr'nin 0.33 olduğu durumda makale verisi için güç katsayısı 0.02 iken yapılan analiz çalışmasında 0.0205'tir. Yani güç katsayısı 0.02 bulunması gerekirken 0.0205 bulunmuştur. Min. Hata=%2,5'tir.

## BÖLÜM 7. ARAŞTIRMA BULGULARI

İlk olarak validasyon çalışması için makaledeki veriler kullanılarak model oluşturulmuştur. Ardından 2,4,6 ve 8 m/s hızları için analizler yapılmıştır.

Hava akış kanallı olan dört farklı model kurulmuştur. Bu modeller dairesel, altıgen, dörtgen ve açık kanal profilli hava akış kanalıdır. Oluşturulan kanallar 2,4,6 ve 8 m/s hızları için frozen rotor analiz yapılmıştır.

Overlap oranı 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 olan modeller kurulmuştur ve 2,4,6 ve 8 m/s hızları için frozen rotor analiz yapılmıştır.

Overlap oranı 0.25 olan modelin en verimli şekilde çalıştığı tespit edilmiştir ve ardından 6-Dof analiz ile zamana bağlı çözümleme yapılarak cp-tsr grafiği çizilmiştir.

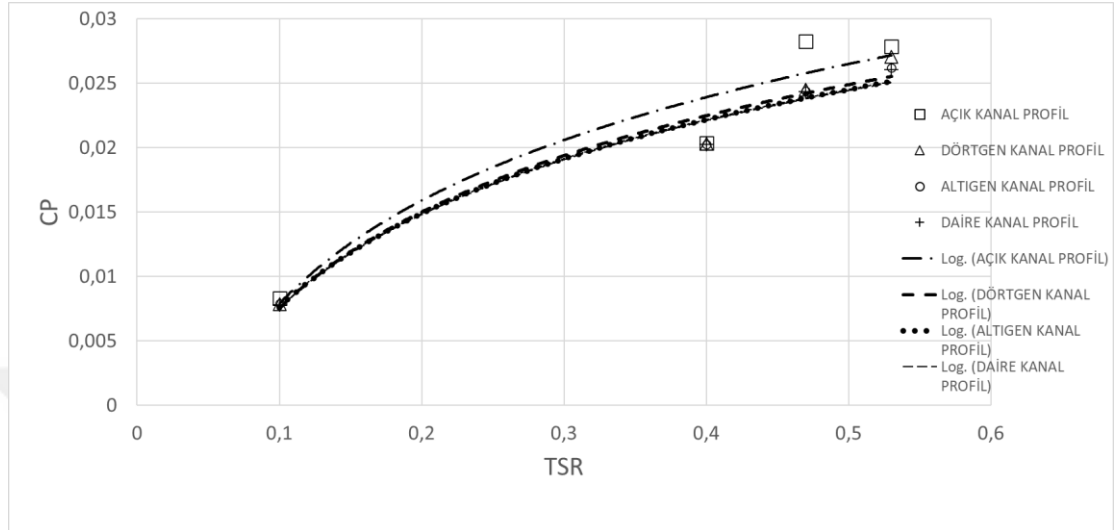
### 7.1. Hava Akış Kanallı Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan analizlerde türbin rotoruna açılan hava akış kanallarının ve türbin performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Tablo 7.1. Hava akış kanallı analizlerin  $C_m$  ve  $C_p$  değerleri.

| v | tsr  | $C_m$<br>(açık kanal<br>profilli) | $C_m$<br>(dörtge<br>n) | $C_m$<br>(altıgen) | $C_m$<br>(daire) | $C_p$<br>(açık kanal<br>profilli) | $C_p$<br>(dörtge<br>n) | $C_p$<br>(altıgen) | $C_p$<br>(daire) |
|---|------|-----------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|
| 2 | 0,1  | 0,0831                            | 0,07873                | 0,07877            | 0,0778           | 0,00831                           | 0,007873               | 0,00787            | 0,0077           |
| 4 | 0,4  | 0,0508                            | 0,0508                 | 0,05065            | 0,0506           | 0,02034                           | 0,02032                | 0,02026            | 0,0202           |
| 6 | 0,47 | 0,06                              | 0,05214                | 0,05191            | 0,0518           | 0,02823                           | 0,0245                 | 0,02439            | 0,0243           |
| 8 | 0,53 | 0,0525                            | 0,05103                | 0,04945            | 0,0491           | 0,02785                           | 0,02704                | 0,0262             | 0,0260           |

Analizler 2,4,6 ve 8 hızları için yapılmıştır ve tsr değerleri makaleden elde edilmiştir. Tsr ve analizlerden elde edilen cm değerleri çarpılarak cp değerleri bulunmuştur.



Şekil 7.1. Hava akış kanallı analizlerin cm -tsr grafiği.

Yapılan analizler sonucunda açık kanal profilli hava akış kanalına sahip modelin kanat performansının en iyi olduğu anlaşılmıştır. Dairesel hava akış kanallarının olduğu model en verimsiz şekilde çalışmaktadır. En iyiden kötü verime sıralandığında açık kanal profilli, dörtgen, altıgen ve dairesel hava akış kanallı modeldir.

Rotor bölümüne hava akış kanalları açılarak optimizasyon yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 7.1.'e bakıldığında açık kanal profilli hava akış kanallı model performansının diğer hava kanalı modellere göre açık bir şekilde daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

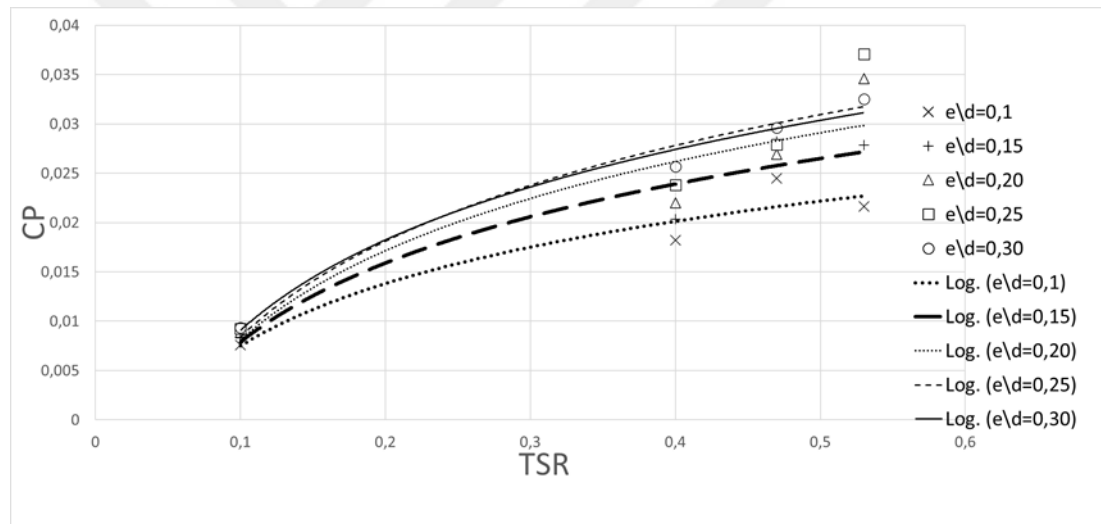
## 7.2. Overlap Oranının Değiştirildiği Modellerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan analizlerde açık kanal profilli model üzerinden overlap oranının türbin performansı üzerindeki etkisi araştırılmış ve optimum overlap oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 7.2. Overlap oranı değişik analizlerin cm ve cp değerleri

| tsr  | Cm<br>(0,1) | Cm<br>(0,15) | Cm<br>(0,20) | Cm<br>(0,25) | Cm<br>(0,30) | Cp<br>(0,1) | Cp<br>(0,15) | Cp<br>(0,20) | Cp<br>(0,25) | Cp<br>(0,30) |
|------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,1  | 0,076       | 0,0831       | 0,0891       | 0,0923       | 0,0935       | 0,0076      | 0,00831      | 0,00891      | 0,00923      | 0,00935      |
| 0,4  | 0,0456      | 0,0508       | 0,055        | 0,0597       | 0,0644       | 0,01824     | 0,02034      | 0,022        | 0,0238       | 0,0257       |
| 0,47 | 0,0521      | 0,06         | 0,0573       | 0,0594       | 0,063        | 0,02448     | 0,02823      | 0,02693      | 0,0279       | 0,0296       |
| 0,53 | 0,0408      | 0,0525       | 0,0654       | 0,0701       | 0,0615       | 0,02162     | 0,02785      | 0,0346       | 0,0371       | 0,0325       |

Analizler 2,4,6 ve 8 hızları için yapılmıştır ve tsr değerleri makaleden elde edilmiştir. Tsr ve analizlerden elde edilen cm değerleri çarpılarak cp değerleri bulunmuştur.



Şekil 7.2. Overlap oranı değişik analizlerin cm-tnr grafiğı.

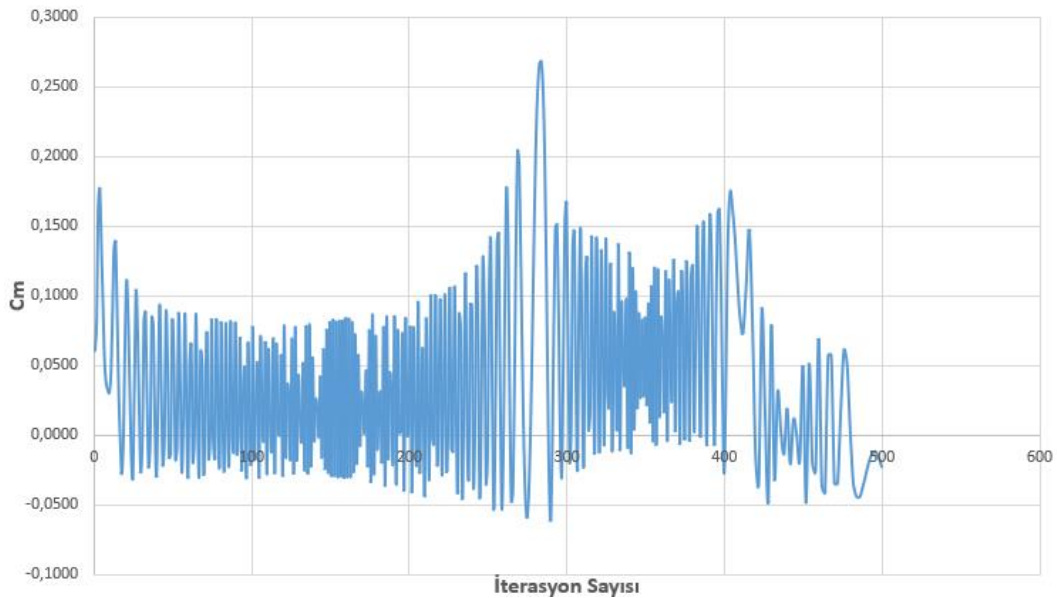
Yapılan analizler sonucunda 0,25 overlap oranına sahip modelin türbin performansının en iyi olduğu belirlenmiştir. 0,10 overlap oranına sahip modelin türbin performansı en kötü olduğu sonucuna varılmıştır.

Validasyon yapılan makalede overlap oranı 0,15 tir. Grafikten 0,10 overlap oranı hariç hepsinin makale modelinden iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

Overlap savanius rüzgâr türbinlerinde verimi etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi olduğu ve 0.25 değerinde optimum çalışma koşullarına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

### 7.3. 0,25 Overlap Oranında 6-DOF Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Optimum overlap oranının 0.25 olmasının belirlenmesinin ardından model 6-DOF analizi ile transient (zamana bağlı) olarak çözümlenmiştir. Zamana bağlı çözümleme rüzgâr hızındaki yükselişin bir süre sonra savanius rüzgâr türbininde veriminin azaldığı sonucunu vermektedir. Frozen rotor analizlerde grafik çizgisinin sürekli artan ve bir süre sonra yatayda gittiği tespit edildi, başka bir deyişle, stol etkisinin model tarafından yakalanamadığı görüldü. Frozen rotor analizlerde düşük kanat uç hız oranında iyi sonuç elde edilirken kanat ucu arttığında stol etkisini yakalayamamıştır. Fakat 6-DOF analiz daha doğru sonuç vereceğinden grafik bir süre sonra azalması beklenmektedir.



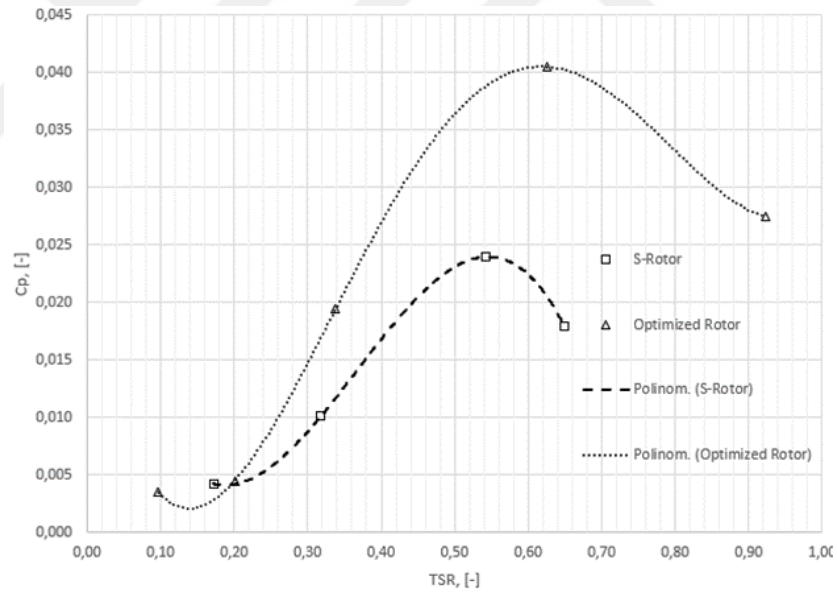
Şekil 7.3. Overlap oranı 0,25 olan 6-Dof analizinin 500 iterasyon için cm değerleri

Şekil 7.3.'te 500 iterasyon için cm değerleri verilmiştir.

Tablo 7.3. tsr-cm-cp verileri.

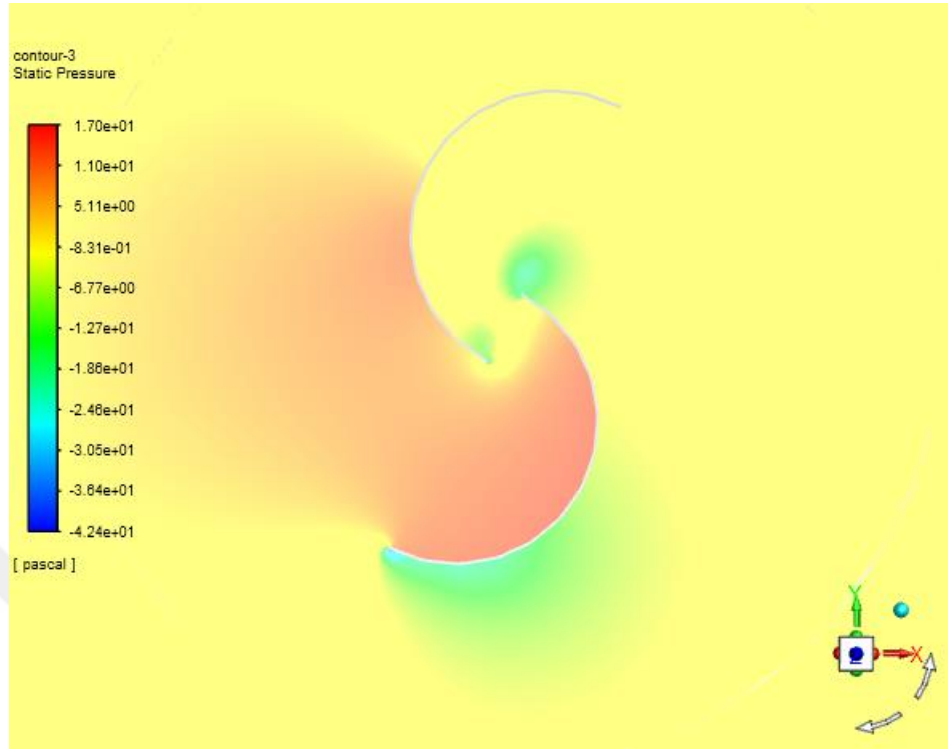
| Tsr-avg | Cm-avg  | Cp     |
|---------|---------|--------|
| 0,0970  | 0,0357  | 0,0035 |
| 0,2006  | 0,0224  | 0,0045 |
| 0,3376  | 0,0575  | 0,0194 |
| 0,6251  | 0,0647  | 0,0405 |
| 0,9232  | 0,02980 | 0,0275 |

Frozen rotor modelde farklı rüzgâr hızlarını ve kanat uç hızlarını tanımlamak gerekirken 6-DOF analizde sadece rüzgâr hızı tanımlanır. 6-DOF analizinde türbin kendiliğinden yavaş yavaş dönmeye başlar ve zamanla hızlanır. Kanat uç hız oranına bağlı olarak cm sonucu bulunur ve grafik çizilir.



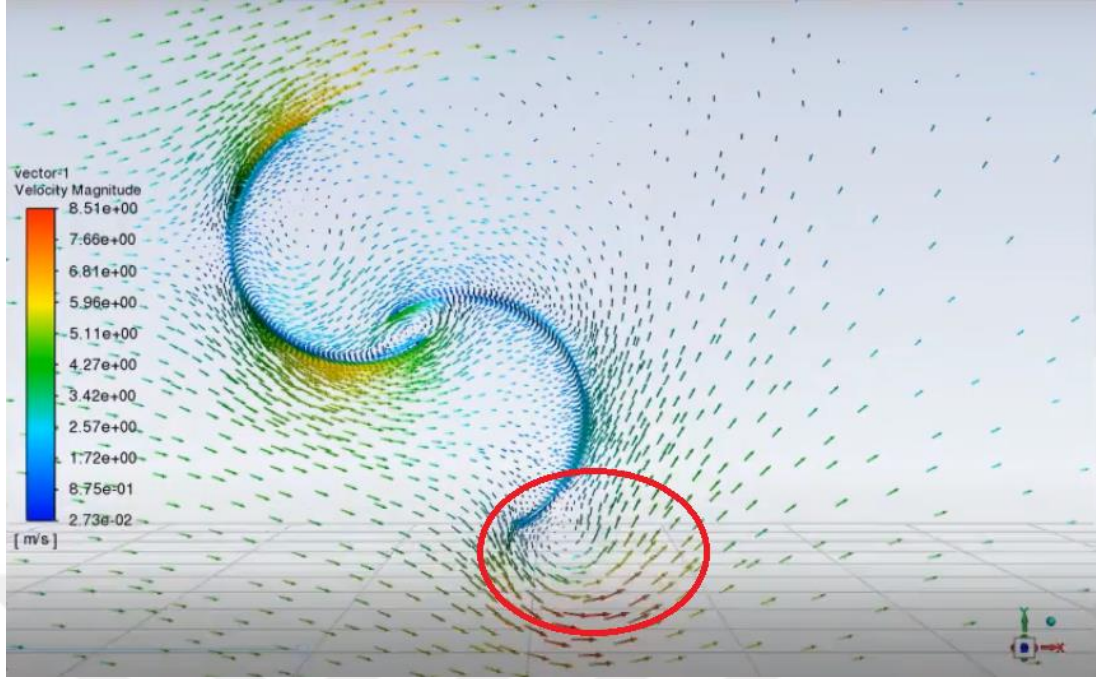
Şekil 7.4. Overlap oranı 0,25 için 6-Dof analizinin cm- tsr grafiği.

Grafikte görüldüğü gibi 6-DOF analizinin sonucunda parabolik bir eğri elde edilmiştir. Ayrıca optimize edilen türbin, hava akış kanalı bulunmayan türbine göre daha yüksek güç katsayısına sahip olmasının yanında yüksek kanat uç hız oranlarında daha iyi kanat performansı sergilediği tespit edilmiştir.



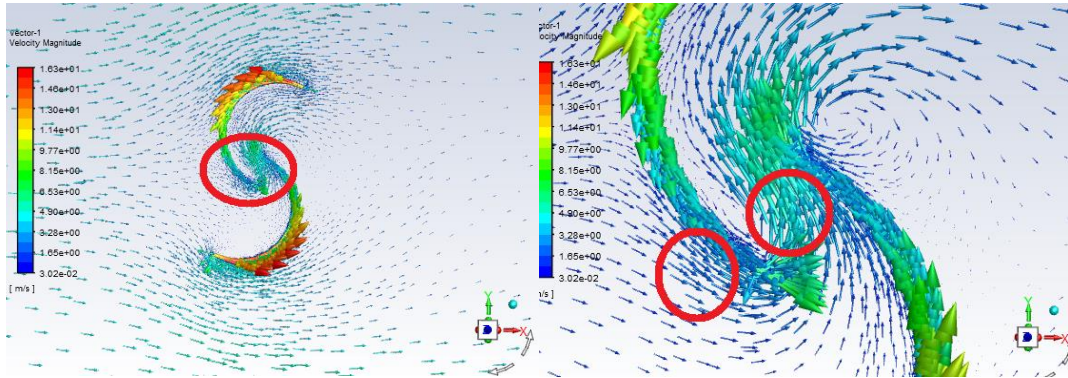
Şekil 7.5. Statik basınç görüntüsü

Şekil 7.5.'te türbin kanatları üzerindeki statik basınç büyüklükleri görülmektedir. Dönüş için rüzgârı toplayan kanadın rüzgâr tarafındaki bölüm kırmızı renk ile gösterilmiştir. Statik basıncın bu bölgede yüksek olduğu görülmektedir. Kanat arkasındaki bölgede basınç ön bölgeye göre düşüktür ve basınç farkından dolayı dönmenin gerçekleştiği anlaşılmıştır.



Şekil 7.6. Yapılan analizdeki akış ayrılmaları

Şekil 7.6.'da akış ayrılmaları görülmektedir. Burada ki akış ayrılması aslında türbin performansını arttırmaktadır. Çünkü rüzgâra toplayan kepçede ki direnç artmış ve kanadın dönmesi hızlanmıştır.



Şekil 7.7. Hava akış hareketlerinin yakınlaştırılmış görüntüsü

Şekil 7.7. incelendiğinde rüzgâr -x yönünden gelirken bir kanatta rüzgâr toplanıp dönme kuvveti toplanırken diğer kanat dönmeye karşı direnç göstermektedir.

Arkası dönük olan kanat üzerine gelen rüzgârın bir bölümü yüzeyde sürüklenerek ön tarafı dönük olan kanata çarpıp dönme hareketine yardımcı olmaktadır. İki kanadın hava akış kanalı sayesinde birbiri üzerine geçmiş olması dönmeye direnç gösteren kanat yüzeyindeki rüzgârın avantaja çevrilmesine olanak sağlamıştır. Bu akış hareketi sayesinde türbin performansı arttığı tespit edilmiştir.

Kanadın ön tarafına gelen rüzgâr, kepçenin dairesel yapısından dolayı sürüklenir. Oluşan bu sürüklenme ile rüzgârın bir bölümü hava akış kanalına girer ve diğer kanada geçerek ve arkası dönük olan kanadın dönmeye karşı gösterdiği direnç kuvvetini düşürür. Direnç kuvvetini düşürmesinden dolayı hava akış kanalının türbin performansını arttırdığı tespit edilmiştir.

Kanat uç hız oranının 0.63 olduğu değerde maksimum tork değerine ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

## BÖLÜM 8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada günümüz dünyasında enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün artması ve sınırlı olan fosil yakıtların çevreye olan zararını azaltabilmek için yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemlilerinden biri olan rüzgâr enerjisi ele alınmıştır. Rüzgâr enerjisini kullanılabilir hale getirebilmek için türbin çeşitlerinden savanius rüzgâr türbini seçilmiştir. Bu türbinin seçilmesinin sebebi; düşük hızlarda çalışıyor olabilmesi, kendiliğinden çalışmaya başlayabiliyor olması, rüzgâr yönünden bağımsız olması, bakım ve onarım maliyetinin düşük olması ve basit geometriye sahip olduğu için üretim maliyetinin düşük olmasıdır.

Bu çalışma; savanius rüzgâr türbininin gücünün düşük olmasından dolayı modelde iyileştirmeler yapılarak gücün arttırılmaya çalışıldığı optimizasyon çalışmasıdır. Elde edilen sonuçların doğruluğunu kanıtlamak amacıyla analiz sonuçlarının Wenheubuna ve diğ (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler ve karşılaştırılan deneysel veriler birbirine çok yakın çıkmıştır. Buna istinaden yapılan optimizasyon çalışması doğruluk kazanmıştır.

Hava akış kanallarına sahip dairesel, altıgen, dörtgen ve açık kanal profilli modeller oluşturuldu. Oluşturulan modeller için 2,4,6 ve 8 m/s hızları için Frozen rotor modeli ile analizler yapıldı. Yapılan analizler sonucunda açık kanal profilli hava akış kanalına sahip modelin daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Overlap oranı 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 olan modeller kuruldu ve 2,4,6 ve 8 m/s hızları için Frozen rotor modeli ile analizler yapıldı. Overlap oranı 0.25 olan modelin

en iyi şekilde çalıştığı tespit edildi. Overlap oranı savanius rüzgâr türbinlerinde önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

0,25 overlap oranı için 6-DOF analiz yapılarak zamana bağlı çözümleme yapılmıştır. Bu çözümleme yöntemi ile daha doğru sonuçlar alınacağı düşünülmüş ve kanat uç hızı 0.63 olduğunda maksimum torka ulaşılmıştır. Ayrıca optimize edilmiş türbin, hava akış kanalı bulunmayan türbine göre daha yüksek güç katsayısı değerlerine ulaştığı ve yüksek kanat uç hız oranlarında daha iyi kanat performansına sahip olduğu tespit edilmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] Bayrakçı C. H. (2007). Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi ve Potansiyel Belirleme Çalışmaları, Mühendis ve Makina, 48:78-80.
- [2] Avşar, H., Çetinkaya, K., ve Gökkaya H., (2001) Afyon yöresi rüzgâr potansiyeli ve elektrik enerjisi üretimi için Savonius tasarımı”, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, s.171-178.
- [3] Avcı, B., (2012). Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Ödevi, 41s, İzmir.
- [4] Eldridge, F.R., (1980), ‘Wind Machines Second Edition’, Van Nostrand. Co. New York, 214s.
- [5] [https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Wind\\_turbine\\_1888\\_Charles\\_Brush.jpg](https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Wind_turbine_1888_Charles_Brush.jpg)., Erişim Tarihi: 28.04.2021.
- [6] <https://www.ceyrekmuhendis.com/poul-la-cour-kimdir/>, Erişim Tarihi: 28.04.2021.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Smith%E2%80%93Putnam\\_wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Smith%E2%80%93Putnam_wind_turbine)., Erişim Tarihi: 28.04.2021.
- [8] <https://www.elektrikport.com/makale-detay/ruzgar-enerjisinin-gelisimi-ve-tarihi/4309#ad-image-0>, Erişim Tarihi: 28.04.2021.
- [9] Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., (2014) “Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri”, Yekarum e-Dergi, Cilt:2 Sayı:3, Isparta.
- [10] Elektrikport Mühendislik Portalı, <<http://www.elektrikport.com/teknikkutuphane/ruzgar-turbinlerinin-cesitleri-ve-birbirleriyle-karsilastirilmesi/8178#ad-image-0>>, Erişim Tarihi: 28.04.2021.

- [11] Keleş Çetin, S., Genç, M.S., Daldaban, F. (2019) “Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar” BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi 6(2), 539-551.
- [12] Modi, V. J., & Fernando, M. S. U. K. (1989). On the performance of the Savonius wind turbine, J. Sol. Energy Eng., 111(1): 71-81.
- [13] Atılğan, M., ve Deda Altan, B., (2004) Savonius Rüzgâr Çarklarının Performansının Geliştirilmesi ve Karşılaştırılması. Mühendis ve Makina, 533: 30-34.
- [14] Deda, B., Atılğan, M., ve Öztürk, H.K., (2001) Savonius rüzgâr çarklarının performanslarının artırılması”, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, s.157-164.
- [15] Ushiyama, İ. and Nagai, H., (1988) Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors. Wind Engineering, 12(1): 59-75.
- [16] Aldoss, T.K., (1984) Savonius Rotor Using Swinging Blades as an Augmentation System. Wind Engineering, 8(4): 214-220.
- [17] Menet, J.L., (2004) A Double-Step Savonius Rotor for Local Production of Electricity: a Design Study. Renewable Energy, 29: 1843-1862.
- [18] Roy, S., Saha, K. U. (2013). Review on the numerical investigation into the design and development of Savonius wind rotors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 73-83.
- [19] Göktaş, M., & Kılıç, F. (2019). Savonius rüzgâr türbini çevresindeki hava akışının hesaplanabilir akışkanlar dinamiği yöntemi ile analizi. Politeknik Dergisi, 11-17.
- [20] Fujisawa, N., (1996) Velocity Measurements and Numerical Calculations of Flow Fields in and Around Savonius Rotors. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 59: 39-50.
- [21] Altan, B. D., Atılğan, M., & Özdamar, A. (2008). An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. Experimental Thermal and Fluid Science, 1673-1678.
- [22] Damak, A., Driss, Z., & Abid, M. (2013). Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180. Renewable Energy, 136-142.
- [23] Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009). Performance tests on helical Savonius rotors. Renewable Energy, 521-529.

- [24] Wenehenubuna, F., Saputraa A., Sutanto H. (2015) An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades, Energy Procedia 68 (2015) 297 – 304.
- [25] Saha, U. K., & Rajkumar, M. J. (2006). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. Renewable Energy, 1776-1788.
- [26] Elektrikport Mühendislik Portalı,  
<<http://www.elektrikport.com/teknikkutuphane/ruzgar-turbinlerinin-cesitleri-ve-birbirleriyle-karsilastirilmesi/8178#ad-image-0>>, Erişim Tarihi: 28.04.2021.
- [27] Keleş Çetin, S., Genç, M.S., Daldaban, F. (2019) “Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar” BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi 6(2), 539-551.
- [28] Modi, V. J., & Fernando, M. S. U. K. (1989). On the performance of the Savonius wind turbine, J. Sol. Energy Eng., 111(1): 71-81.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Emre Varış

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece        | Eğitim Birimi                                                        | Mezuniyet Yılı |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|
| Yüksek Lisans | Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği | Devam ediyor   |
| Lisans        | Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği   | 2019           |
| Lise          | Yalova Anadolu Lisesi                                                | 2015           |

### YABANCI DİL

İngilizce

### ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. S-rotor rüzgâr türbini performansının sayısal olarak incelenmesi /Mühendis ve Makina