



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Tasarımı ve  
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi ile  
DeneySEL Olarak Performans Değerlendirmesi**

Yüksek Lisans Tezi

**Ahmet Faik Yüce**

Aralık 2024



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Tasarımı ve  
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi ile  
DeneySEL Olarak Performans Değerlendirmesi**

Yüksek Lisans Tezi

**Ahmet Faik Yüce**

Danışman

**Doç. Dr. Yasin Karagöz**

Aralık 2024

## TEZ JÜRİSİ ONAYI

Ahmet Faik Yüce tarafından hazırlanan Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi ile Deneysel Olarak Performans Değerlendirmesi" başlıklı bu Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

### JÜRİ ÜYELERİ

### İMZA

#### **Tez Danışmanı:**

Unvanı Adı Soyadı: Doç. Dr. Yasin Karagöz

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Makine Mühendisliği

#### **Üyeler:**

Unvanı Adı Soyadı: Prof. Dr. Erkan Şahinkaya

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Biyomühendislik

Unvanı Adı Soyadı: Prof. Dr. Şaban Pusat

Kurumu: Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Unvanı Adı Soyadı

Kurumu

Unvanı Adı Soyadı

Kurumu

Tez Savunma Tarihi: 31/12/ 2024

## **BEYANLAR**

### **Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı**

Danışmanlığımda yazılan bu tezin APA yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir.

İmza

Doç. Dr. Yasin Karagöz

### **Etik İlkelere Sadakat Beyanı**

Hazırladığım bu tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

Ahmet Faik Yüce

## ÖZET

### **Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Tasarımı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi ile Deneysel Olarak Performans Değerlendirmesi**

Yüce, Ahmet Faik

Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Yasin Karagöz

Aralık 2024

Gün geçtikçe artan dünya nüfusuyla birlikte ortaya çıkan enerji problemi, beraberinde mevcut kaynakların sınırlı oluşu ve birtakım çevresel kısıtlar sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Bu sebeple günümüzde ortaya çıkan enerji ihtiyacını yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmenin önemi artmıştır. Sonuç olarak, fosil yakıtların tükenmesi ve kullanımından kaynaklı oluşan birtakım zararlar göz önünde bulundurulduğunda günümüzde alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyacın arttığı ve bu sebeple yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Bu çalışmalar içinde yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda dikey eksenli bir rüzgâr türbininin enerji üretim performansı, bu tez çalışması kapsamında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıyla analiz edilmiştir. Test edilebilecek şekilde türbin sistemi tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Bu çalışmada ayrıca bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarının önemine değinilmiş, türbinin 3 boyutlu modeli oluşturulup 8, 10 ve 12 m/s rüzgâr hızlarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapılmıştır ve ayrıca tasarımı yapılan türbin üretimi yapılmış deney sistemi kurulmuştur. Buna ek olarak bu çalışma , enerji ihtiyacının son derece arttığı bu zamanlarda düşük güç gerektiren basit olarak bir çok yerde kolay uygulanabilir basit konstrüksiyona sahip olması diğer türbin çeşitlerine göre düşük maliyetli olması ve her yönden rüzgar alabilmesi ayrıca düşük başlangıç rüzgar hızlarında çalışabilmesi sayesinde yüksek rüzgar hızı gerektiren bölgelere ihtiyaç duymadan birçok çeşitli alanda enerji ihtiyacını karşılayabilmek için iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr Enerjisi, Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Performans Katsayısı, Yenilenebilir Enerji

## ABSTRACT

### Vertical Axis Wind Turbine Design and Experimental Performance Evaluation with Computational Fluid Dynamics Analysis

Yüce, Ahmet Faik

Master's Thesis, Department of Environmental and Energy Systems Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yasin Karagöz

December 2024

The energy problem that arises with the increasing world population has led to an increase in interest in renewable energy sources due to the limited available resources and some environmental constraints. For this reason, the importance of obtaining today's energy needs from renewable energy sources has increased. As a result, considering some of the damages caused by the depletion and use of fossil fuels, the need for alternative energy sources has increased today, and therefore, studies on renewable energy sources have increased. Among these studies, wind energy, which is a renewable energy source, is of great importance. In this context, the energy production performance of a vertical-axis wind turbine was analyzed with computational fluid dynamics software within the scope of this thesis study. The turbine system was designed and manufactured so that it could be tested. In this study, the importance of computer-aided engineering software was also mentioned, a 3D model of the turbine was created, computational fluid dynamics analysis was performed at 8, 10, 12 m/s inlet air velocity. In addition, the designed turbine was manufactured and an experimental setup was established. In addition, this study is a turbine that requires low power, has a simple construction that can be easily applied in many places, is low-cost compared to other types of turbines, can receive wind from all directions, and can operate at low initial wind speeds, thus requiring high wind speeds. It has been concluded that it is a good alternative to meet the energy needs in many various areas without the need for regions.

**Keywords:** Wind Energy, Vertical Axis Wind Turbine, Computational Fluid Dynamics, Coefficient of Performance, Renewable Energy

## İÇİNDEKİLER

|                                                                            |      |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                                 | iv   |
| ABSTRACT .....                                                             | v    |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                     | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                      | ix   |
| KISALTMALAR VE SİMGELER .....                                              | xiv  |
| 1. Giriş .....                                                             | 1    |
| 2. Literatür Özeti .....                                                   | 2    |
| 2.1. Rüzgâr Enerjisi .....                                                 | 2    |
| 2.2. Rüzgâr Enerjisi Tarihsel Gelişimi .....                               | 2    |
| 2.3. Rüzgâr Türbinleri ve Çeşitleri .....                                  | 3    |
| 2.3.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri .....                               | 4    |
| 2.3.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri .....                               | 5    |
| 2.4. Savonius Rüzgâr Türbini .....                                         | 6    |
| 2.5. Savonius Rüzgâr Türbininin Performansını Etkileyen Parametreler ..... | 9    |
| 2.5.1. En-Boy Oranı (AR) .....                                             | 9    |
| 2.5.2. Örtüşme Oranı (OR) .....                                            | 10   |
| 2.5.3. Kanat sayısı .....                                                  | 10   |
| 2.5.4. Kanat geometrisi.....                                               | 10   |
| 3. Materyal ve Yöntem .....                                                | 13   |
| 3.1. Modelleme ve Deney Düzeneği .....                                     | 13   |
| 3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi.....                          | 18   |
| 4. Bulgular .....                                                          | 24   |
| 4.1. 8 m/s Rüzgâr Hızı İçin.....                                           | 24   |
| 4.1.1. 0 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi .....                  | 24   |
| 4.1.2. 10 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi .....                 | 26   |
| 4.1.3. 20 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi .....                 | 27   |

|         |                                                     |    |
|---------|-----------------------------------------------------|----|
| 4.1.4.  | 30 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 28 |
| 4.1.5.  | 40 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 29 |
| 4.1.6.  | 50 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi:..... | 30 |
| 4.1.7.  | 60 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 31 |
| 4.1.8.  | 70 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 32 |
| 4.1.9.  | 80 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 33 |
| 4.1.10. | 90 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi.....  | 34 |
| 4.2.    | 10 m/s Rüzgâr Hızı İçin.....                        | 35 |
| 4.2.1.  | 0 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi .....  | 35 |
| 4.2.2.  | 10 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 36 |
| 4.2.3.  | 20 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 37 |
| 4.2.4.  | 30 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 38 |
| 4.2.5.  | 50 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 40 |
| 4.2.6.  | 60 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 41 |
| 4.2.7.  | 70 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 42 |
| 4.2.8.  | 80 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 43 |
| 4.2.9.  | 90 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi.....  | 44 |
| 4.3.    | 12 m/s Rüzgâr Hızı İçin.....                        | 46 |
| 4.3.1.  | 0 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi .....  | 46 |
| 4.3.2.  | 10 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 48 |
| 4.3.3.  | 20 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 49 |
| 4.3.4.  | 30 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 50 |
| 4.3.5.  | 40 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi.....  | 51 |
| 4.3.6.  | 50 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 51 |
| 4.3.7.  | 60 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 52 |
| 4.3.8.  | 70 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi ..... | 53 |
| 4.3.9.  | 80 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi.....  | 54 |
| 4.3.10. | 90 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi.....  | 55 |
| 5.      | Tartışma .....                                      | 57 |
|         | Kaynakça .....                                      | 60 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> 8 m/s Rüzgâr Hızındaki HAD Simülasyon Sonuçları .....  | 24 |
| <b>Tablo 2.</b> 10 m/s Rüzgâr Hızındaki HAD Simülasyon Sonuçları ..... | 35 |
| <b>Tablo 3.</b> 12 m/s Rüzgâr Hızındaki HAD Simülasyon Sonuçları ..... | 46 |
| <b>Tablo 4.</b> Analiz Sonuçları .....                                 | 58 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1</b> .....                                                    | 3  |
| Rüzgâr Türbini Güç Hesabı Yöntemi (Physics Forums, 2024).....           | 3  |
| <b>Şekil 2</b> .....                                                    | 5  |
| Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (Şenel ve Koç, 2014).....                  | 5  |
| <b>Şekil 3</b> .....                                                    | 7  |
| Savonius Türbin Yapısı (Dewan vd., 2021).....                           | 7  |
| <b>Şekil 4</b> .....                                                    | 11 |
| Savonius Türbin Farklı Geometri Çeşitleri (Alom ve Saha, 2019).....     | 11 |
| <b>Şekil 5</b> .....                                                    | 12 |
| Rüzgâr Türbinlerinin Performansı Ve Betz Limiti (Atılgan vd., n.d)..... | 12 |
| <b>Şekil 6</b> .....                                                    | 13 |
| Türbin Modelinin Üstten Görünümü.....                                   | 13 |
| <b>Şekil 7</b> .....                                                    | 14 |
| 3-Boyutlu Türbin Modeli .....                                           | 14 |
| <b>Şekil 8</b> .....                                                    | 15 |
| Türbin Sistemi için Gerekli Olan Diğer Malzemelerin Autocad Çizimi..... | 15 |
| <b>Şekil 9</b> .....                                                    | 15 |
| Türbin Sistemi ve Deney Düzeneği .....                                  | 15 |
| <b>Şekil 10</b> .....                                                   | 16 |
| Çift Rulmanlı Taşıyıcı Türbin Ayağı .....                               | 16 |
| <b>Şekil 11</b> .....                                                   | 16 |
| Deneyde Kullanılan 95 Watt 70 rpm Keskinler Marka 24v DC Motor .....    | 16 |
| <b>Şekil 12</b> .....                                                   | 17 |
| Dc Motor Tork Ölçme Sistemi.....                                        | 17 |
| <b>Şekil 13</b> .....                                                   | 17 |
| Deneydeki Ölçüm Ekipmanları.....                                        | 17 |
| <b>Şekil 14</b> .....                                                   | 19 |
| Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi Türbin Geometrisi .....         | 19 |
| <b>Şekil 15</b> .....                                                   | 19 |
| Dış Akış Analizi İçin Kontrol Hacim Oluşturma.....                      | 19 |
| <b>Şekil 16</b> .....                                                   | 20 |
| Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Yöntemi.....                     | 20 |
| <b>Şekil 17</b> .....                                                   | 20 |
| Analiz İçin Malzeme Tanımlama .....                                     | 20 |
| <b>Şekil 18</b> .....                                                   | 21 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Analiz İçin Giriş Hızı Tanımlama .....                                                     | 21 |
| <b>Şekil 19</b> .....                                                                      | 21 |
| Analiz İçin Basınç Tanımlama .....                                                         | 21 |
| <b>Şekil 20</b> .....                                                                      | 22 |
| Kaymaz Duvar Sınırı.....                                                                   | 22 |
| <b>Şekil 21</b> .....                                                                      | 22 |
| Simülasyon Ayarları.....                                                                   | 22 |
| <b>Şekil 22</b> .....                                                                      | 23 |
| Simülasyon Öncesi Son Ayarlar .....                                                        | 23 |
| <b>Şekil 23</b> .....                                                                      | 23 |
| Simülasyon Ağ Yapısı.....                                                                  | 23 |
| <b>Şekil 24</b> .....                                                                      | 25 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                         | 25 |
| <b>Şekil 25</b> .....                                                                      | 25 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması .....  | 25 |
| <b>Şekil 26</b> .....                                                                      | 26 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 26 |
| <b>Şekil 27</b> .....                                                                      | 26 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 26 |
| <b>Şekil 28</b> .....                                                                      | 27 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 27 |
| <b>Şekil 29</b> .....                                                                      | 27 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 27 |
| <b>Şekil 30</b> .....                                                                      | 28 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 28 |
| <b>Şekil 31</b> .....                                                                      | 28 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 28 |
| <b>Şekil 32</b> .....                                                                      | 29 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 29 |
| <b>Şekil 33</b> .....                                                                      | 29 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 29 |
| <b>Şekil 34</b> .....                                                                      | 30 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 30 |
| <b>Şekil 35</b> .....                                                                      | 30 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 30 |
| <b>Şekil 36</b> .....                                                                      | 31 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 31 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 37</b> .....                                                                      | 31 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 31 |
| <b>Şekil 38</b> .....                                                                      | 32 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 32 |
| <b>Şekil 39</b> .....                                                                      | 32 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 32 |
| <b>Şekil 40</b> .....                                                                      | 33 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 33 |
| <b>Şekil 41</b> .....                                                                      | 33 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 33 |
| <b>Şekil 42</b> .....                                                                      | 34 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 34 |
| <b>Şekil 43</b> .....                                                                      | 34 |
| 8 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 34 |
| <b>Şekil 44</b> .....                                                                      | 36 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                        | 36 |
| <b>Şekil 45</b> .....                                                                      | 36 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ..... | 36 |
| <b>Şekil 46</b> .....                                                                      | 37 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                       | 37 |
| <b>Şekil 47</b> .....                                                                      | 37 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ...  | 37 |
| <b>Şekil 48</b> .....                                                                      | 38 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                       | 38 |
| <b>Şekil 49</b> .....                                                                      | 38 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ...  | 38 |
| <b>Şekil 50</b> .....                                                                      | 39 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                       | 39 |
| <b>Şekil 51</b> .....                                                                      | 39 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ...  | 39 |
| <b>Şekil 52</b> .....                                                                      | 40 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                       | 40 |
| <b>Şekil 53</b> .....                                                                      | 40 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ...  | 40 |
| <b>Şekil 54</b> .....                                                                      | 41 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                       | 41 |
| <b>Şekil 55</b> .....                                                                      | 41 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 41 |
| <b>Şekil 56</b> .....                                                                     | 42 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 42 |
| <b>Şekil 57</b> .....                                                                     | 42 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 42 |
| <b>Şekil 58</b> .....                                                                     | 43 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 43 |
| <b>Şekil 59</b> .....                                                                     | 43 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 43 |
| <b>Şekil 60</b> .....                                                                     | 44 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 44 |
| <b>Şekil 61</b> .....                                                                     | 44 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 44 |
| <b>Şekil 62</b> .....                                                                     | 45 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 45 |
| <b>Şekil 63</b> .....                                                                     | 45 |
| 10 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 45 |
| <b>Şekil 64</b> .....                                                                     | 47 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                       | 47 |
| <b>Şekil 65</b> .....                                                                     | 47 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması .... | 47 |
| <b>Şekil 66</b> .....                                                                     | 48 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 48 |
| <b>Şekil 67</b> .....                                                                     | 48 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 48 |
| <b>Şekil 68</b> .....                                                                     | 49 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 49 |
| <b>Şekil 69</b> .....                                                                     | 49 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 49 |
| <b>Şekil 70</b> .....                                                                     | 50 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 50 |
| <b>Şekil 71</b> .....                                                                     | 50 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 50 |
| <b>Şekil 72</b> .....                                                                     | 51 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 51 |
| <b>Şekil 73</b> .....                                                                     | 51 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 51 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 74</b> .....                                                                     | 52 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 52 |
| <b>Şekil 75</b> .....                                                                     | 52 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 52 |
| <b>Şekil 76</b> .....                                                                     | 53 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 53 |
| <b>Şekil 77</b> .....                                                                     | 53 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 53 |
| <b>Şekil 78</b> .....                                                                     | 54 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 54 |
| <b>Şekil 79</b> .....                                                                     | 54 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 54 |
| <b>Şekil 80</b> .....                                                                     | 55 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 55 |
| <b>Şekil 81</b> .....                                                                     | 55 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu .....                      | 55 |
| <b>Şekil 82</b> .....                                                                     | 56 |
| 12 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması ... | 56 |

## KISALTMALAR VE SİMGELER

$A$ : Türbin Kanadı Yüzey Alanı  
 $AR$ : En-Boy Oranı (Aspect Ratio)  
 $C_P$ : Performans Katsayısı  
 $C_T$ : Tork Katsayısı  
 $D$ : Kanat Çapı  
 $d$ : Tek Kanat Genişliği  
 $DC$ : Doğru Akım  
 $DETR$ : Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini  
 $e$ : İki Kanadın Çakışma Mesafesi  
 $F$ : Kuvvet  
 $H$ : Kanat Yüksekliği  
 $HAD$ : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği  
 $kg$ : Kilogram  
 $m$ : Metre  
 $mm$ : Milimetre  
 $N$ : Devir Sayısı  
 $N$ : Newton  
 $N.m$ : Newton metre  
 $OR$ : Örtüşme Oranı (Overlap Ratio)  
 $P_{available}$ : Maksimum Türbin Gücü  
 $P_{turbine}$ : Türbin Gücü  
 $R$ : Kanat Yarıçapı  
 $r$ : Yarıçap  
 $rpm$ : Dakikadaki devir sayısı  
 $TSR$ : Uç hız Oranı (Top Speed Ratio)  
 $V$ : Rüzgar Hızı  
 $V_{Rotor}$ : Kanat Hızı  
 $W$ : Watt  
 $WAGNER$ : Eğik Eksenli Rüzgâr Türbini  
 $YERT$ : Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini  
 $\lambda$ : Uç Hız Oranı  
 $\mu_{mekanik}$ : Mekanik Kayıp Kat Sayısı  
 $\mu_{motor}$ : Jeneratör Kayıp Kat Sayısı  
 $\rho$ : Hava Yoğunluğu  
 $\omega$ : Açısal Hız

## 1. Giriş

Bu çalışmanın amacı, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinden olan bir S tipi Savonius rüzgâr türbini tasarlamak, imalatını yapmak ve bilgisayar destekli mühendislik yazılımı kullanarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiziyle birlikte sistemi gerçek şartlarda test edebilecek bir deney düzeneği oluşturup, Savonius rüzgâr türbinini performans yönünden incelemektir. Simülasyonu ve testi yapılacak türbin sistemi tasarlarken kolay kurulabilir ve hafif olması amaçlanmakta olup, hızlı bir şekilde devreye alınabilecek ve enerji üretebilme potansiyelini ortaya çıkarmak için dikey eksenli S şeklinde tek rotorlu olacak şekilde bir rüzgâr türbini tasarlanacak ve bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak 3 boyutlu modeli oluşturulacak. Nihai tasarıma karar verilip türbinin imalatı gerçekleştirilecek.

Savonius rüzgâr türbininin farklı rüzgâr hızlarında ve türbin rotorunun farklı açılardaki konumu için ayrı ayrı HAD simülasyonunu yapılması ve geleneksel literatürde de birçok örneği olan dinamik HAD analizine karşı alternatif bir yöntem olması hedeflenmektedir. S tipi şeklinde tasarlanacak ve üretimi yapılacak Savonius rüzgâr türbininin test sonuçlarıyla analiz sonuçlarının benzer olması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda türbinin enerji üretim miktarını tespit edebilmek için bir tork kolu olan bir sistem tasarlanmak amaçlanmakta olup, bu sayede elektriksel güç hesabı yapabilmek hedeflenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması ve verimlilik konusunun git gide daha fazla önem kazanması sebebiyle mevcut rüzgâr türbinlerinin daha çok düşük güç ihtiyacı gerektiren ve verimli olması amaçlanmayan sulama gibi farklı alanlarda kullanılmasına karşı enerji performansını ve verimliliğini arttırabilecek parametrelerini tespit edebilecek en uygun sistem tasarımı ve testi yapılacaktır. Dikey eksenli rüzgâr türbininin performans açısından sürdürülebilir olup olmadığı hakkında karar verebilmek adına çalışmanın en sonunda sistemin performans yönünden incelemesi ve sistemin sürdürülebilirliği tartışılacak.

## 2. Literatür Özeti

### 2.1. Rüzgâr Enerjisi

Dünya'daki sıcaklık farkından kaynaklı oluşan hava hareketine rüzgâr denir. Dünya yüzeyinde hava hareketine izin vererek ve rüzgâr hızını etkileyerek rüzgârı oluşturan birincil atmosferik kuvvetler sürtünme, santrifüj, Coriolis ve basınç gradyanı kuvvetleridir.

Dünya yüzeyinin eşit olmayan şekilde ısınması ve soğuması havanın hareket etmesine neden olur ve bu da rüzgârı yaratır. Hareket eden havanın enerjisine rüzgâr enerjisidir. Rüzgârın oluşumu ve hızı birkaç önemli atmosferik kuvvetten etkilenir. Bunlar şu şekildedir, basınç Gradyan Kuvveti bu kuvvet, havayı yüksek basınç bölgelerinden düşük basınç bölgelerine hareket ettirerek rüzgâr akışını başlatır. Diğer Coriolis kuvveti bu kuvvet Dünya'nın dönüşünden kaynaklanan Coriolis etkisi ile rüzgârı saptırır ve bunu Kuzey Yarımküre 'de sağa, Güney Yarımküre 'de sola doğru yapar. Santrifüj Kuvveti ise örneğin siklon sistemlerde rüzgâr genellikle bir merkezin etrafında daire şeklinde döner (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

### 2.2. Rüzgâr Enerjisi Tarihsel Gelişimi

Tarihsel olarak, rüzgâr enerjisi antik çağlardaki başlangıcından bu yana çeşitli amaçlar için ana güç kaynağı olmuştur. Rüzgâr enerjisi karada yel değirmenlerini ve rüzgarla çalışan makineleri çalıştırmak ve denizde yelkenli gemileri hareket ettirmek gibi çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisi özellikle tarım alanında su pompalama ve tahıl ve buğday öğütme gibi faaliyetler için de önemliydi. Orta Doğu'da rüzgâr enerjisi yaklaşık M.Ö 2800'den beri kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisi, Babil Kralı Hammurabi'nin hüküm sürdüğü MÖ 17. yüzyılda Mezopotamya'da sulama için kullanılıyormuş. Çin de aynı zamanda bu yöntemi benimsemiş. İskenderiye yakınlarında ilk yel değirmenleri inşa edilmiş. M.S 7. yüzyılda, en eski yel değirmenleri Türkler ve İranlılar tarafından kullanıldı. Bu tarihsel arka plan, rüzgâr enerjisinin birçok medeniyette uzun süredir devam eden önemini gösterir ve çağdaş teknik atılımlardan önce bile ulaşım, tarım ve su yönetiminde kullanımının önemini vurgular.

Batı medeniyetleri, ilk olarak Doğu'da kullanılan en eski dikey eksenli yel değirmenlerini kademeli olarak değiştirdi ve geliştirdi ve yatay eksenli tasarımlara dönüştürdü. 1180'de Normandiya Krallığı'nın yönetimi sırasında, ilk yatay eksenli yel

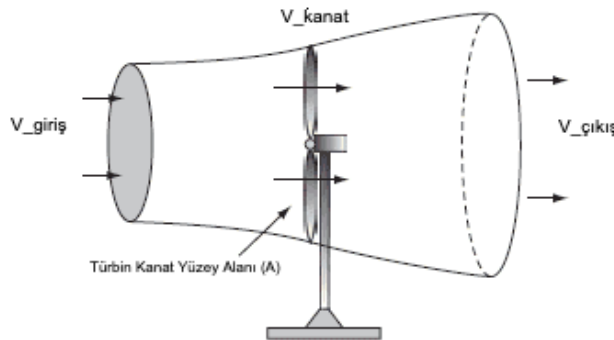
değirmeni inşa edildi. Daniel Halladay, 1850'de rüzgâr gülü olan Amerikan tipi yel değirmenini yarattı; mekanik enerji amaçlı diğer yatay eksenli yel değirmeni tipleri arasında direk değirmeni (Almanya), kule değirmeni (Akdeniz ülkeleri, Alaçatı gibi) ve döner çatılı önlük değirmeni (Hollanda) yer alır. Rüzgâr enerjisi ilk olarak 1800'lerin sonlarında güç üretmek için kullanıldı. 1882'de New York'ta bir elektrik santralini inşa edilmesiyle elektrik enerjisi kullanımı genişledi. Rüzgârdan üretilen ilk elektrik, 1891'de Danimarkalı akademisyen Paul La Cour tarafından yaratıldı. Doğru akım üretti ve hidrojen gazı üretmek için elektroliz kullandı, böylece rüzgâr enerjisini depoladı (Özgener, 2002).

### 2.3. Rüzgâr Türbinleri ve Çeşitleri

Rüzgâr türbini olarak bilinen bir aparat, rüzgâr enerjisini kinetikten mekanik ve ardından elektriksel forma dönüştürür. Kule, jeneratör, dişli kutuları (hız dönüştürücüler), elektrik-elektronik parçalar ve rotor, tipik bir rüzgâr türbininin ana parçalarıdır. Rotorda rüzgârın kinetik enerjisi öncelikle mekanik enerjiye dönüştürülür. Türbin gövdesi içinde rotor milinin dönme hareketi jeneratöre aktarılır ve doğrudan kullanım veya depolanarak elektrik enerjisi elde edilmiş olur. Kısaca açıklamak gerekirse rüzgâr türbini, rüzgârın kinetik enerjisinden yararlanarak onu mekanik harekete dönüştürerek ve daha sonra bu mekanik hareketi kullanılabilen veya depolanabilen elektrik enerjisine dönüştürerek çalışır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

#### Şekil 1

*Rüzgâr Türbini Güç Hesabı Yöntemi (Physics Forums, 2024)*



$$\dot{m} = \rho \times A \times V_{kanat}$$

$$V_{kanat} = \frac{V_{giriş} + V_{çıkış}}{2}$$

$$P = \frac{1}{2} \times \dot{m} \times (V_{giriş}^2 - V_{çıkış}^2)$$

Şekil 1’de bir rüzgâr türbininin gücünün nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir. Türbin gücü hesaplanırken havanın kütleli debisi ( $\dot{m}$ ), yukarıdaki kanat hızı ( $V_{kanat}$ ) eşitliğine göre rüzgârın giriş hızı ( $V_{giriş}$ ) ve çıkış hızının ( $V_{çıkış}$ ) ortalaması dikkate alınarak hesaplanmıştır (Nurbay ve Çınar, 2024). Rüzgâr türbinlerinin üç farklı çeşidi vardır:

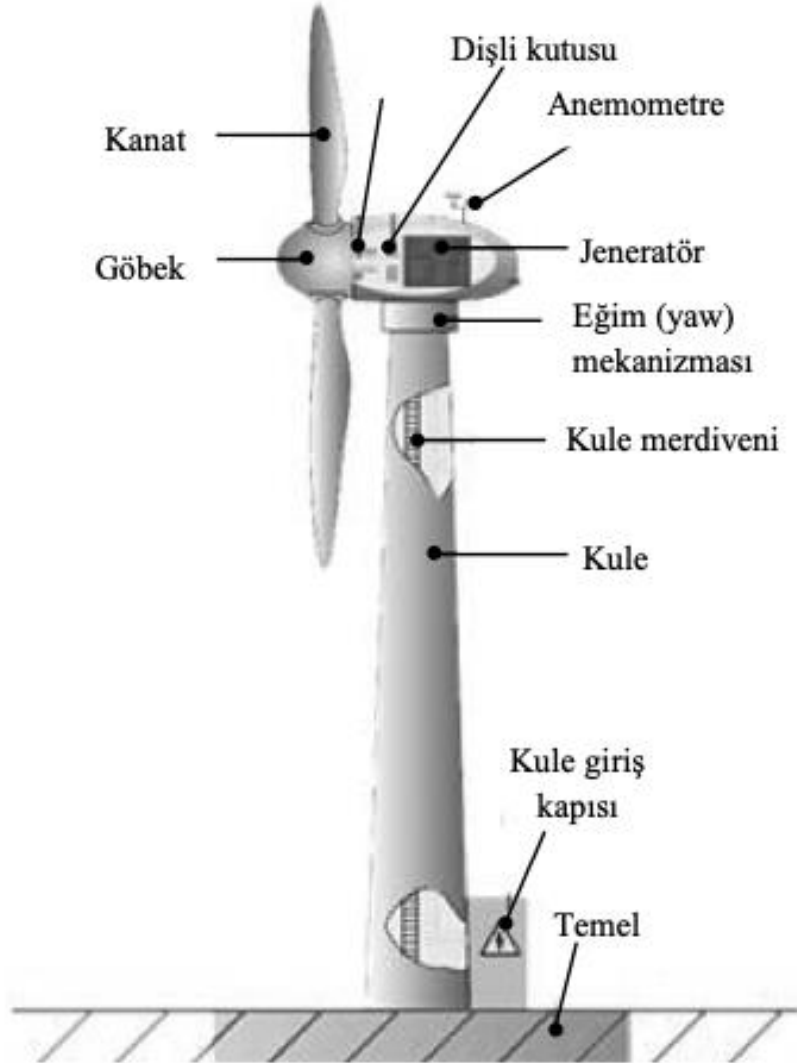
- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)
- Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)
- Eğik eksenli rüzgâr türbinleri (WAGNER)

### 2.3.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerin kanatları rüzgâr yönüne dik, dönme eksenini ise rüzgâr yönüne paraleldir. Şekil 2’de klasik yatay eksenli bir rüzgâr türbininin yapısı açıkça görünmektedir. Rotor üzerindeki kanat sayısı azaldıkça rotor hızı artar. Bu türbinlerin ortalama verimliliği %45 civarındadır. Tipik olarak rüzgâr türbinleri yerden 20 × 30 metre yüksekliğe kurulur ve rüzgâr toplamayı en üst düzeye çıkarmak için rotor yüksekliği yakındaki herhangi bir engelin en az bir metre üzerinde olmalıdır. Genelde 120 derece açılarla eşit bir şekilde konumlandırılan 3 kanatlı modelleri kullanılmaktadır. Rüzgârın kaldırma kuvveti prensibiyle çalışırlar ve kanat genişliği artarsa türbinin üreteceği güç miktarı da artar. Çünkü türbinin rüzgârdan yararlanacağı yüzey alanı artar. (Nurbay ve Çınar, 2024).

## Şekil 2

*Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (Şenel ve Koç, 2014)*



### 2.3.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Genel olarak, bu türbinlerin kanatlarının dönme eksenleri rüzgâr yönüne göre diktir. DERT her yönden gelen rüzgârı yakalayabilir. Bu türbinler rüzgârın sürüklemesiyle dönme hareketini gerçekleştirir. İlk hareketleri çok tutarlı değildir. Bu türbinlerin verimliliği %35 civarında olup, Jeneratör ve redüktör yer seviyesinde konumlandırılabilirdiğinden bir kuleye ihtiyaç duyulmaz. Sonuç olarak, daha düşük rüzgâr hızlarında çalışabiliyorlar ve Şekil 2’de görünen bir "Yaw" mekanizmasına ihtiyaç duymuyorlar. Bu sebeple yatay eksenli türbinlere göre avantajlı sayılabilirler (Nurbay ve Çınar, 2024).

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT'ler), kentsel ortamlardaki birçok faydalarından dolayı son yıllarda giderek daha popüler hale geldi. Bununla birlikte, DERT'ler aynı zamanda karmaşık aerodinamikleri ve dinamik durmalarıyla ilgili zorluklarla da karşı karşıyadır ve bu da verimliliğin düşmesine neden olur. Ek sorunlar arasında düşük veya sıfır başlangıç torku, gürültü, gibi endişeler yer alır. Dikey eksenli rüzgâr türbinleriyle ilgili bu önemli zorlukların ışığında, bu çalışma hem rotor hem de stator içeren artırılmış dikey eksenli rüzgâr türbinini araştırmaktadır. Araştırmanın bulguları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yoluyla kanatlara etki eden kuvvetlerin doğru bir şekilde belirlenmesinde ağ yapısının yoğunluğunun ve türbülans modeli seçiminin önemini altını çizdi. Çalışmanın sonuçları, ağ yapısının ve seçilen türbülans modelinin, hesaplamalı akışkanlar dinamiği tarafından belirlenen, kanat üzerine etki eden kuvvetleri nasıl etkilediğini vurgulamıştır. Zaman adımlarının etkisinin incelenmesi, bu faktörün bıçağın hesaplama performansı üzerinde minimal bir etkiye sahip olduğunu gösterdi. Yeni tasarlanan artırılmış türbin kanatları, açık rotorla karşılaştırıldığında 1,35 kat daha fazla güç çıkışı sağladı. Konik yüzeyin ve stator kanadının tasarımı da genel performansı etkilediği gözlemlenmiştir. Ek olarak, daha düşük uç hızı oranlarının daha önemli dinamik durma olaylarına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Araştırma, statorun dikey eksenli bir rüzgâr türbinindeki önemini vurgulayarak, rüzgârın hızlanmasını kolaylaştırma ve daha düşük bir basınç çıkışı oluşturmadaki rolünü ortaya koyarak sonuçta güç ve tork katsayılarını %36'nın üzerinde artırdığı sonucuna varılmıştır (Wilberforce ve Alaswad, 2022).

#### **2.4. Savonius Rüzgâr Türbini**

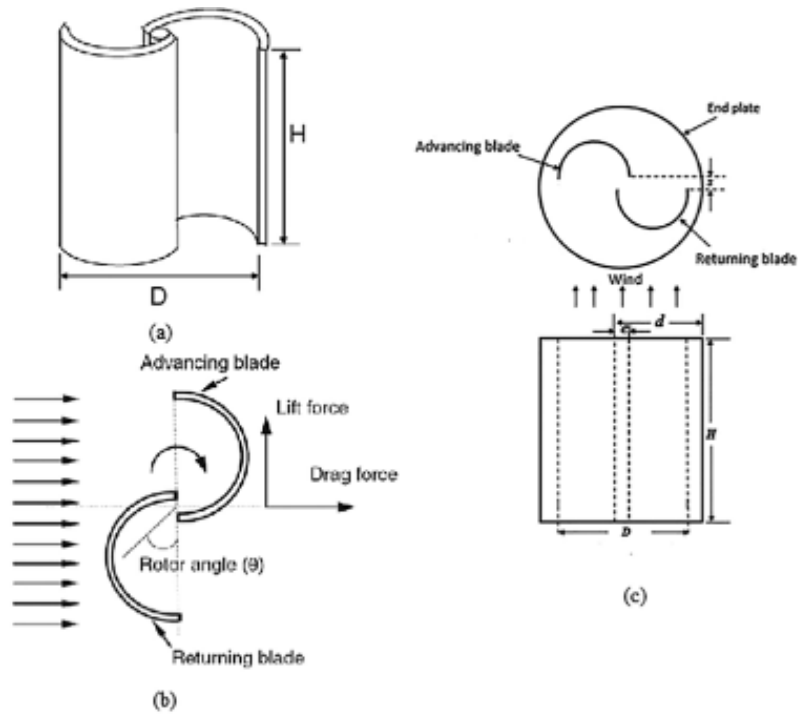
Savonius Rotor (RT), 1925 yılında Finli mühendis Sigurd J. Savonius tarafından icat edildi. Merkezleri simetrik olarak kaydırılmış, iki yatay disk arasına yerleştirilmiş iki yarı silindirik "bıçak"tan oluşur. Rüzgâr belirli bir hızda rotora çarptığında, silindirin iç kısmında pozitif bir tork üretilirken, dış kısmında negatif bir tork oluşur. Pozitif tork, negatif torktan daha büyüktür ve rotorun pozitif tork yönünde dönmesine neden olur. Bu tasarım özellikle düşük hızlı rüzgâr uygulamaları için etkilidir ve Savonius rotoru, basitliği ve türbülanslı rüzgâr koşullarında iyi çalışma yeteneği ile tanınır. Yarı silindirik kanatların asimetrik düzeni, dönmesi için gerekli kuvvet farkını yaratır (Ushiyama ve Nagai, 1988).

Savonius rüzgâr türbinlerinin genel olarak çalışma prensibi türbinin rotorları, Şekil 3'te görüldüğü gibi birbirine zıt S şeklide iki yarım silindir şeklinden meydana gelmektedir. Genel olarak S şeklindeki savonius türbininin rotorları da bir shaft ile sabitlenmiş olur. Dikey eksenli rüzgâr türbini olan S tipi Savonius türbinleri sürüklenme (drag) kuvveti prensibiyle

çalışır. Şekil 3'te olduğu gibi rüzgâr türbinin rotorunun içbükey ve dışbükey birbirine zıt olan yüzeylerinden biriyle temas eder ve rüzgârın sürüklenme kuvveti sayesinde rotor dönmeye başlar. Sürüklenme kuvvetine göre çalışan Savonius türbininin rotorunun dönme hızı rüzgâr hızını geçememe sınır şartını doğurmaktadır. Bu, uç hız oranlarının (TSR) 1'den büyük olmamasının birinci sebebidir (Dewan vd., 2021).

### Şekil 3

*Savonius Türbin Yapısı (Dewan vd., 2021)*



Güç katsayısı  $C_p$  ve tork katsayısı  $C_t$ , bir Savonius türbininin performansını tanımlayan iki ana parametredir ve her iki değer de belirli bir uç hızı oranı (TSR) lambda 'da tanımlanır. Türbinin uç hız oranı kanat ucu hızının kanatlar arasındaki rüzgâr hızına oranıdır ve şu aşağıdaki Uç Hız Oranı (TSR) formülüne göre hesaplanır:

$$\lambda = \frac{V_{\text{Rotor}}}{V} = \frac{\omega R}{V}$$

Türbinden elde edilen net gücün rotorun rüzgârdan maksimum faydalandığı durumdaki maksimum elde edilebilecek güce oranı, türbininin güç katsayısını tanımlar ve aşağıdaki denkleme göre belirlenir:

$$C_p = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{available}}} = \frac{P_{\text{turbine}}}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$P_{\text{turbine}} = T \times \omega_s = \frac{2\pi NT}{60}$$

$$P_{\text{available}} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Türbinin tork katsayısı  $C_t$  rüzgâr hızı sayesinde oluşacak torkun maksimum oluşabilecek tork değerine oranı olarak tanımlamak mümkün olup, aşağıdaki denkleme göre tespit edilir.

$$C_T = \frac{T_{\text{turbine}}}{T_{\text{available}}} = \frac{T_{\text{turbine}}}{\frac{1}{2} \rho A V^2 R} = \frac{F \times r}{\frac{1}{2} \rho A V^2 R}$$

$C_p$  ve  $C_t$  aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmaktadır:

$$C_p = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{available}}} = \frac{T \times \omega_s}{\frac{1}{2} \rho A V^3} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V^2 R} \times \frac{R \omega_s}{V} = C_T \times TSR$$

Savonius rüzgâr türbinleri diğer türbinlere kıyasla daha düşük verimlilikle çalışması ile bilinmekte olup düşük rüzgâr hızlarında enerji üretebilme, nispeten kolay üretim ve düşük operasyonel maliyetli olma gibi bazı avantajlı özellikleri vardır. Son yıllarda dikey eksenli türbin olan Savonius rotorunun verimliliklerini iyileştirmek için özellikle bir takım tasarım denemeleri yapılmıştır. Rotorun geometrisindeki değişiklikler türbinin verimliliğinde olumlu yöndeki sonuçları elde etmek için literatürde de mevcut birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Rotorun performansını etkileyen önemli parametreler en boy oranı (AR), örtüşme oranı (OR), kanat sayısı, kademe sayısı ve kanat geometrisindeki farklılıklar yapılan çalışmalarda optimize edilmiştir. Optimize edilmiş kanat sayısının kademe sayısından bağımsız olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, bükülmüş kanatlara sahip olan bir Savonius rotorunun S seklinde 2 yarı dairesel olana kıyasla 0,31 oranında daha iyi bir güç katsayısına sahiptir. Ayrıca Savonius türbininin kanat sayısı incelemiş ve aynı test

koşulları altında iki kanatlı bir Savonius rotorunun üç kanatlı bir rotordan daha verimli olduğu sonucuna varmıştır (Ali, 2013).

Kaldırma kuvveti prensibiyle çalışan rotora sahip yatay eksenli rüzgâr türbinleri (HAWT), tork ve güç değerleri açısından daha iyi performans sonuçları sunmaktadır. Sürüklenme kuvvetiyle çalışan S-tipi rotor modellerine sahip dikey eksenli rüzgâr türbini daha düşük performans değerleri sağlar ancak yapısal maliyet avantajlarından, kolay devreye alma ve daha düşük rüzgâr hızlarında çalışmalarından yararlanırlar. Savonius rotor tipi, yatay eksenli rotora kıyasla daha düşük güç katsayısı (CP) değerleri ile karakterize edilirken, düşük maliyetlerle elde edilebilen daha basit bir yapısal türü temsil ederler. Karşılaştırma yapıldığında, yatay eksenli türbinin rotoru %45 CP değerlerine ulaşır ve DARRIEUS dikey eksenli rotor tipi %35'e kadar CP değerlerine ulaşırken, %15 CP'ye sahip klasik SAVONIUS rotoru çok geride yer alır, ancak basit yapısı, düşük üretim maliyeti, rüzgâr yönünden bağımsızlığı ve düşük rüzgâr hızı değerlerinde iyi başlangıç torku gibi özellikleriyle birçok avantaj sağlar (Dorel vd., 2021).

## **2.5. Savonius Rüzgâr Türbininin Performansını Etkileyen Parametreler**

### **2.5.1. En-Boy Oranı (AR)**

En boy oranı, yukarıdaki Şekil 3'te gösterildiği gibi, rotorun yüksekliğinin (H) çapına (D) oranı olarak  $AR = H/D$  olarak tanımlanabilir. En boy oranı doğrudan rüzgârın temas edeceği rotorun yüzey alanını etkileyen bir parametre olduğu için AR oranı savonius rüzgâr türbininin enerji üretme performansını büyük ölçüde etkiler.

Yapılan bir çalışmada Savonius türbininin sırasıyla 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 ve 5.0 gibi farklı AR oranları için performans analizi yapılmış ve AR oranının türbininin performansını nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuç olarak, en boy oranının artmasıyla ve aynı zamanda diğer performans etkileyen parametrelerin sabit tutulduğunda türbinin güç veya performans katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir (Mahmoud vd., 2012).

AR oranı hakkında yapılan diğer bir çalışmada ise 0.7 en boy oranına sahip bir rotorun 0.21 gibi bir güç katsayısı olduğunu göstermektedir (Kamoji vd., 2009). Hidroelektrik üretimi için farklı en boy oranında Savonius rotorunun performans analizini yapan bir çalışmada AR'yi 1,5- 2,0 aralığında tutarak maksimum performans elde edileceğini savunmaktadır. Ancak mevcut rotorların çoğu için, yapısal kısıtlamalardan dolayı en boy oranı 1.0'a yakın olacak şekilde daha düşük değerlerde tutulmuştur (Pudur ve Authors, 2015).

### 2.5.2. Örtüşme Oranı (OR)

Örtüşme oranı, Şekil 3'te gösterildiği gibi, iki kanadın ( $e$ ) çakışma mesafesinin kanatların uzunluğuna ( $d$ ) oranı olarak ifade edilebilir ( $OR = e/d$ ). Kanatların örtüşmesindeki artışla birlikte kanat boşluğundan geçen rüzgâr miktarı da artar. Bu nedenle, rüzgârın ilk çarptığı dönen kanadın içbükey tarafından bir miktar rüzgârın geçmesine olanak sağlar ve bu da güçlü bir itme üretir (Gül ve Kolip, 2018).

Bir çalışmada, 0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 olacak şekilde farklı örtüşme oranına sahip dört S tipi rotora sahip Savonius rüzgâr türbininin yarı silindirik kanatlarının optimum örtüşme oranı incelenmiş ve en uygun örtüşme oranının 4,0 m/s'den küçük rüzgâr hızları için 0,15, 4,0 m/s'den fazla rüzgâr hızları için ise 0,30 olduğu tespit edilmiş. Örtüşme oranının türbin performansındaki değişimi öncelikle yüksek hızlardaki rüzgârın türbülanslı karakterinden kaynaklandığını ileri sürmektedir (Rus vd., 2018).

### 2.5.3. Kanat sayısı

Değişen çalışma koşullarıyla birlikte bir Savonius türbininin verimliliği rotor kanatlarının sayısı ile da önemli oranda değişmektedir. Genel olarak literatürde iki, üç ve dört kanatlı rotorlar incelenmiş. Savonius türbin rotorlarının 2 ve 3 kanatlı versiyonlarını kullanarak deneyler yapılmış bununla birlikte, bükülü olan kanatlara sahip iki kanatlı bir Savonius rotoru, yarım dairesel bükülü olmayan modele kıyasla 0,31'lik daha iyi bir güç katsayısı üretmiştir (Saha vd., 2008).

Yapılan farklı bir çalışmada Savonius rotorunun kanat sayısının performans üzerindeki etkisi incelenmiş ve aynı test koşulları altında iki kanatlı bir Savonius rotorunun üç kanatlı olandan daha üretken olduğu sonucuna varmıştır (Ali, 2013).

### 2.5.4. Kanat geometrisi

Yapılan bir çalışmada Savonius rüzgâr türbinlerinin performans katsayıları üzerinde değişen kanat profillerinin etkisini araştırmak için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmış. Şekil 4, yarı dairesel, eliptik, Benesh ve modifiye edilmiş Bach'ın farklı kanat profillerini göstermektedir. 2 boyutlu analizler, ANSYS Fluent'te (SST) türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş. Sayısal yöntem kullanılarak elde edilen  $C_p$ ; max değerleri yarı dairesel, Benesh, modifiye edilmiş Bach ve eliptik profiller için sırasıyla 0,272, 0,294, 0,304, 0,34 ve

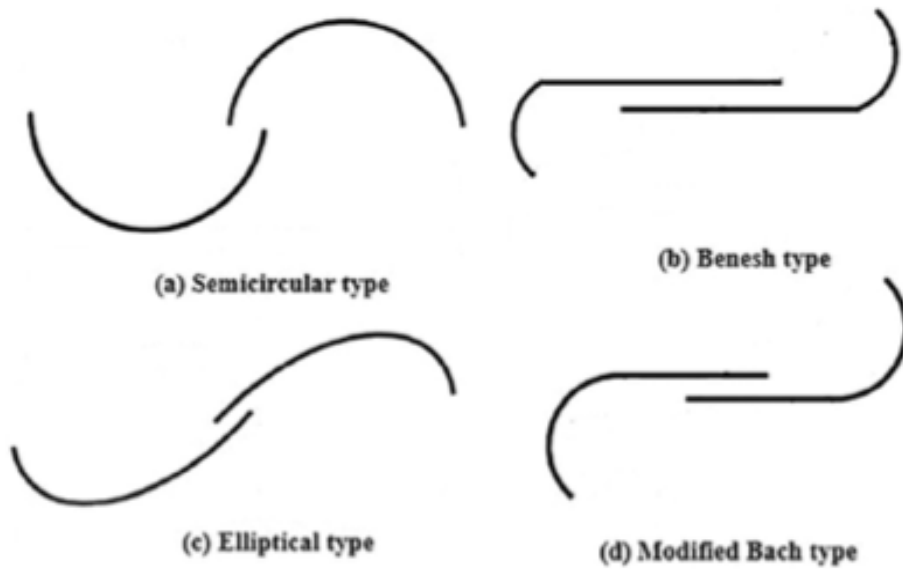
deneysel olarak rüzgâr tüneline yapılan test de elde edilen değerler ise 0,158, 0,159, 0,162, 0,19 olarak bulunmuştur (Alom ve Saha, 2019).

Yapılan farklı bir çalışmada, en yüksek güç katsayıları değerini elde etmek için kanat geometrik tasarımının etkisini incelemek amacıyla iki boyutlu bir analiz yapılmıştır. Çalışmanın tamamında uç hızı oranının (TSR) 0,7 olarak ele alınmış çünkü bu nokta tüm kanat testleri için bir tepe değeri olduğu öne sürülmüştür. Eliptik ve klasik dairesel kanat modellerinin birleşik kombinasyonlarında %6,3, %4,6 ve %3,6 aralığında hafif bir güç katsayıları artışı vardır (Saeed vd., 2019).

Ek olarak türbin çeşitlerinin performans katsayıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şekil 5'te anlaşılabileceği üzere bir türbinin en fazla yaklaşık 0.59 oranında bir verime sahip olacağı bu oranda aslında literatürde Betz Limiti olarak geçmektedir.

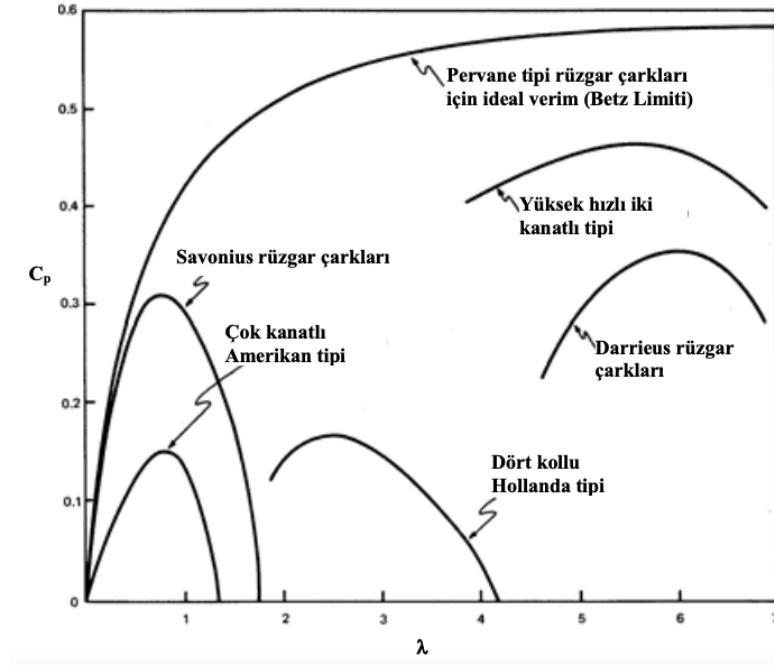
#### Şekil 4

*Savonius Türbin Farklı Geometri Çeşitleri (Alom ve Saha, 2019)*



## Şekil 5

*Rüzgâr Türbinlerinin Performansı ve Betz Limiti (Atılğan vd., n.d)*



### 3. Materyal ve Yöntem

#### 3.1. Modelleme ve Deney Düzeneği

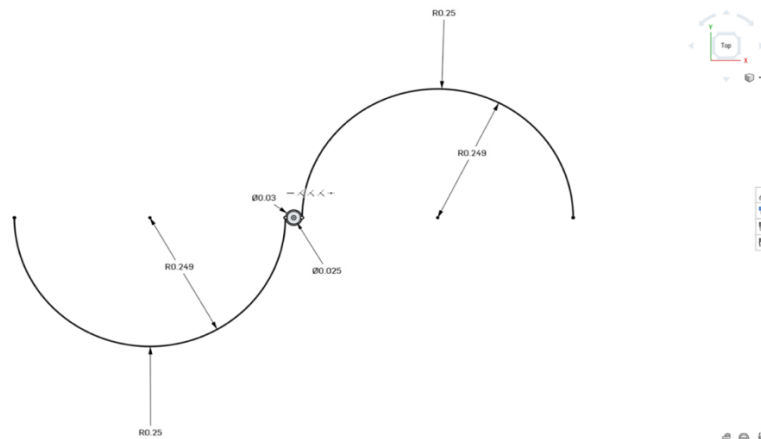
Bu çalışmada dikey eksenli ve S şeklinde olan bir Savonius rüzgâr türbini tasarlanacak ve imalatı yapılacaktır. Dikey eksenli rüzgâr türbini tasarımında 1 adet S şeklinde rotor olacak ve bu rotor gijon demirleriyle bir şafta bağlanacaktır. Daha sonra tasarlanmış rulmanlı bir ayak üzerine monte edilip dönebilir hale gelecektir. Rotorların dönme hareketi kama yardımıyla DC motora aktarılacaktır.

Dikey eksenli Savonius rüzgâr türbini tasarımı yapmak için 3-Boyutlu (3-B) bilgisayar destekli bulut tabanlı yazılım olan OnShape kullanılacaktır. Türbin tasarımı ve imalatı için gerekli olan malzeme listesi aşağıdaki gibidir. Aşağıda resmi olan deney düzeneğinde fanla türbin üzerine hava verilmiş. DC motora yapılan kelepçe üzerinde bulunan M10 somuna gijon bağlanmıştır. Bu gijon demirine de Esit marka STCS-50 kg C3 hassasiyet sınıfında olan S tipi bir yük hücresi takılmıştır. Rotor dönerken gijon demirinden yapılan kolun üzerindeki yük hücresindeki kuvvet verileri, Esit marka Smart-2 model indikatör kullanılarak elde edilebilecek ve bu sayede DC motorun tork değeri hesaplanabilir olacaktır.

Şekil 6'da görüldüğü gibi 'S' şeklindeki türbin rotorunun bir kanadı 0.5 m çapında 0.001 m et kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ek olarak iki kanadı birbirine bağlayan ana boru ise 0.3 m çapında 0.005 m et kalınlığına sahiptir. İki kanadın toplam genişliği 1 metredir.

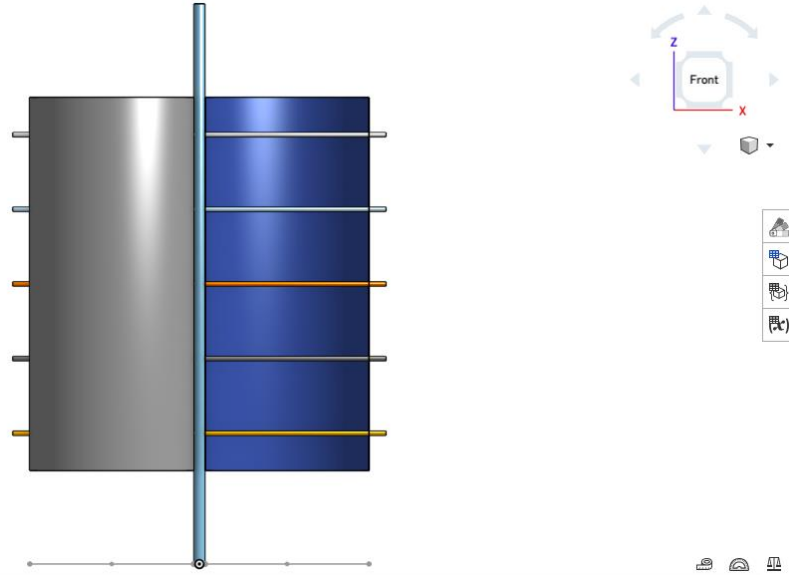
**Şekil 6**

*Türbin Modelinin Üstten Görünümü*



## Şekil 7

### 3-Boyutlu Türbin Modeli



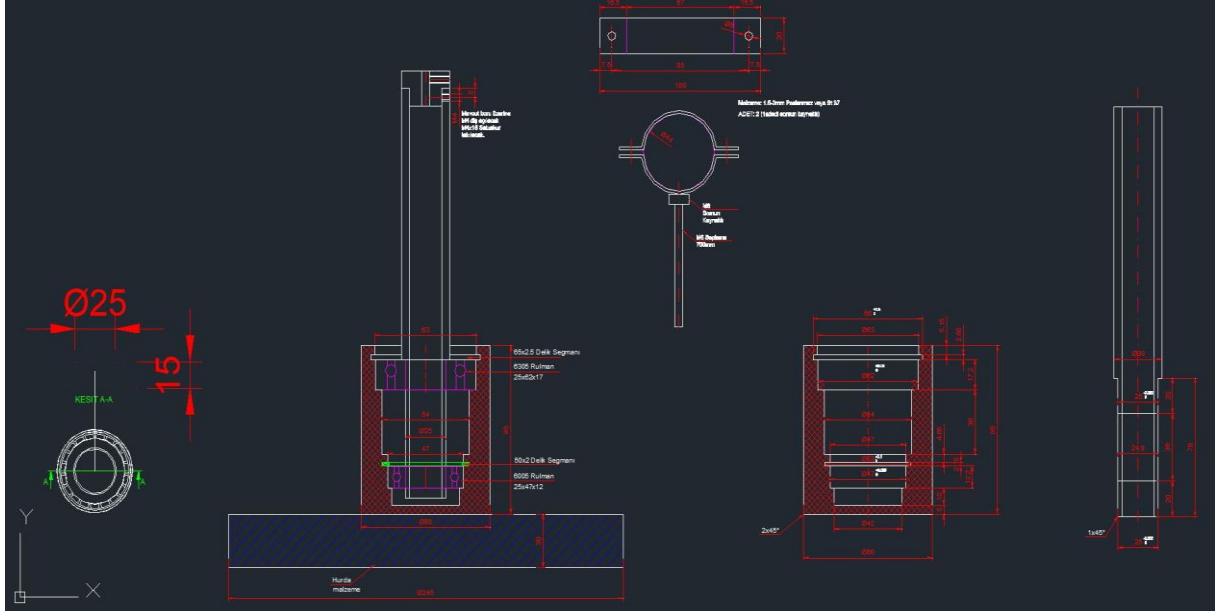
Şekil 7’de Savonius türbininin 3-boyutlu modeli görünmektedir. Türbin hafif olması için Alüminyum malzemeden Şekil 7’deki 3 boyutu modele göre imal edilecektir.

Ek olarak aşağıdaki Şekil 8’de savonius türbininin sabitleneceği sabit bilyalı rulmanlı ayağının ve testte kullanılacak Keskinler marka 70 RPM 95 Watt gücünde planet redüktörlü DC motorunu sabitleyecek bilezik tasarımı ve DC motorun dönmesini engellemek ve aynı zamanda Esit marka STCS-50 model yük hücresinin kullanılacağı tij/gijon demirinin AutoCad çizimi mevcuttur. Ek olarak rulmana geçecek ana şaftın teknik çizimi aşağıdaki resmin en sağında bulunmaktadır.

Savonius türbinin sisteminin imal edilmiş hali Şekil 9’daki gibidir. Savonius türbinini taşıyan ve içinde serbest şekilde dönebilmesi için iki tane rulmanı olan Şekil 8’de teknik çizimi mevcut olan parçanın hurda malzemeden imal edilmiş son hali aşağıdaki Şekil 10’daki gibidir. Türbini taşıyabilmesi devrilmesini engellemesi için yaklaşık 10 kg bir malzeme kullanılmıştır. Türbin sisteminde Keskinler marka 70 rpm 95 watt gücünde planet redüktörlü 24V DC motor kullanılmış olup montaj edilmiş hali Şekil 11’de mevcuttur. Ek olarak türbin sistemindeki DC motorun ürettiği tork değerini hesaplayabilmek için kullanılan ESİT marka yük hücresi ve indikatörünün olduğu sistem Şekil 12’de mevcuttur. Son olarak türbinin dönmesi sonucu oluşacak akım ve voltaj değerini okuyabilmek için multimetre, ampermetre ve reosta gibi cihazlar sırasıyla Şekil 13’te görünmektedir.

Şekil 8

*Türbin Sistemi için Gerekli Olan Diğer Malzemelerin AutoCad Çizimi*



Şekil 9

*Türbin Sistemi ve Deney Düzenneği*



**Şekil 10**

*Çift Rulmanlı Taşıyıcı Türbin Ayağı*



**Şekil 11**

*Deneyde Kullanılan 95 Watt 70 RPM Keskinler Marka 24V DC Motor*



Şekil 12

*DC Motor Tork Ölçme Sistemi*



Şekil 13

*Deneydeki Ölçüm Ekipmanları*



$$P(kW) = \frac{T(N.m) \times N(rpm)}{9550}$$

$$P_e = \mu_{mekanik} \times \mu_{motor} \times P_{türbin}$$

$$P_{türbin} = \frac{P_e}{\mu_{mekanik} \times \mu_{motor}}$$

Tasarımı ve imalatı yapılan ve türbin sisteminde Şekil 12'deki DC motorun tork değerini ölçebilmek için geliştirilen ölçüm yöntemi sayesinde türbinin gücü yukarıdaki denklemlere göre hesaplanabilmektedir. Türbin gücü hesaplanırken sistemin mekanik kayıp ve motorun kayıpları dikkate alınmalıdır (Altınbaş, 2024).

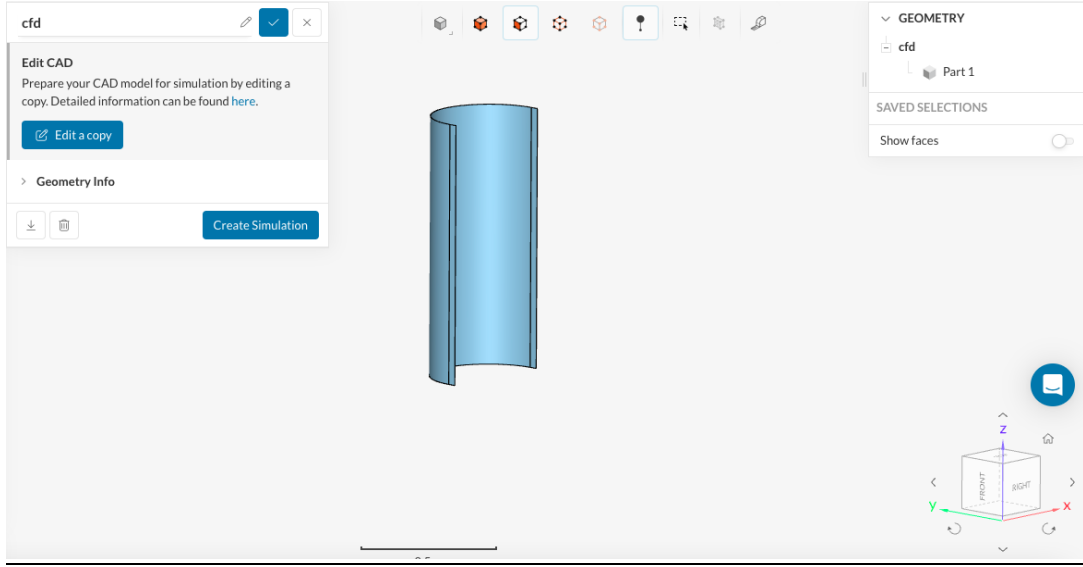
### 3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

İlk olarak analize OnShape üzerinde tasarlanan türbin rotorunun 3-boyutlu modelini yükleyerek başlanmıştır. Daha sonra aynı prosedür rotorun 0,10,20,30,40,50,60,70,80 ve 90 derece açıyla döndürülmüş modelleri için yapılmıştır. Şekil 14'te analizi yapılacak rotor modelinin geometrisi eklenmiştir. Analizi yapılacak türbin rotorunun geometrisi oluşturulduktan sonra analiz için bir kontrol hacmi oluşturulmuştur. Şekil 15'te, kontrol hacminin ölçüleri resimde mevcuttur.

Daha sonra yapılacak simülasyonun türü belirlenmiştir. Sıkıştırılamaz akış analizi k-omega SST türbülans modeli seçilmiştir. Ekran resmi Şekil 16'daki gibidir. Simülasyona başlanmış ve ardından akış analizinde simülasyon programının malzeme kütüphanesinden hava olarak tanımlanmıştır. Şekil 17'de belirtilmiştir. Analizin sınır koşullarını belirlemek gerekmekte olup, 8,10 ve 12 m/s giriş hızı tanımlanmıştır. 10m/s giriş hızında yapılan simülasyona ait ekran resmi Şekil 18'deki gibidir. Analiz için tanımlanması gereken çıkış basıncı, atmosfer basıncı olarak 101325 Pascal tanımlanmıştır (Şekil 19). Simülasyonda viskoz akış ve duvardan serbest akışa doğru bir hız gradyanının olduğu, duvardaki hızın sıfır olduğu gerçek yüzeylerin simülasyonu için kullanılan o-slip wall kaymaz duvar fonksiyonu tanımlanmıştır. İlgili yüzeyler Şekil 20'de mevcuttur.

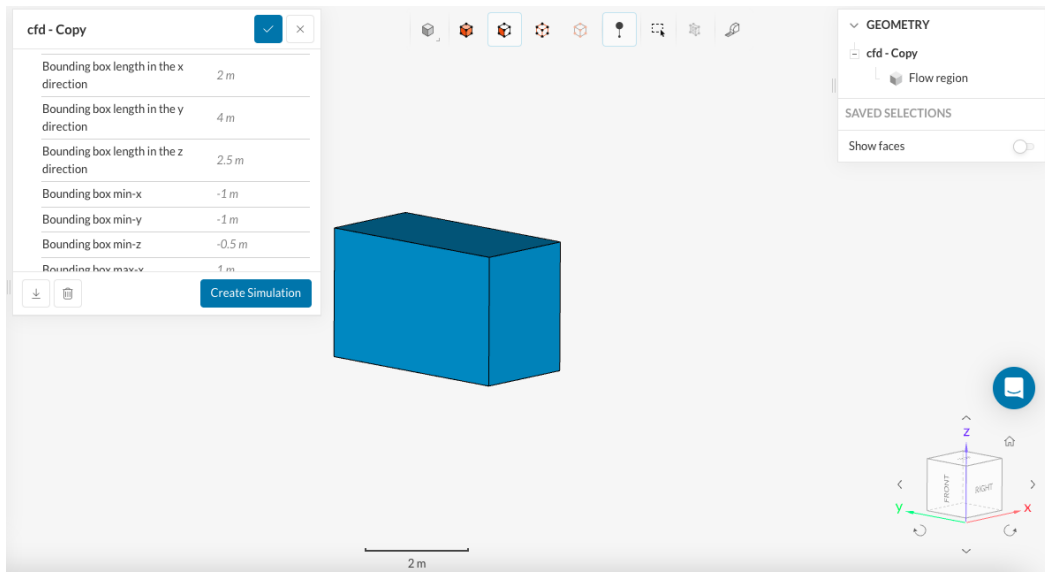
## Şekil 14

### *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi Türbin Geometrisi*



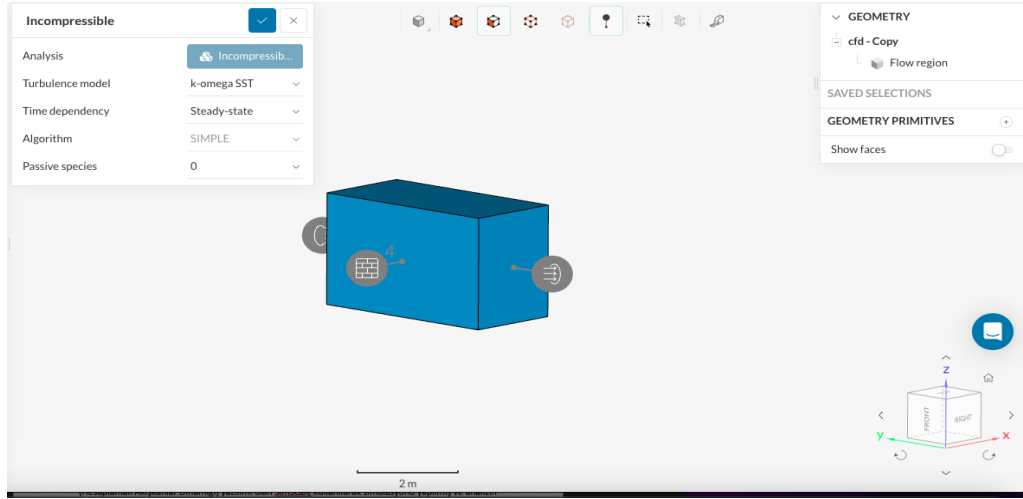
## Şekil 15

### *Dış Akış Analizi için Kontrol Hacim Oluşturma*



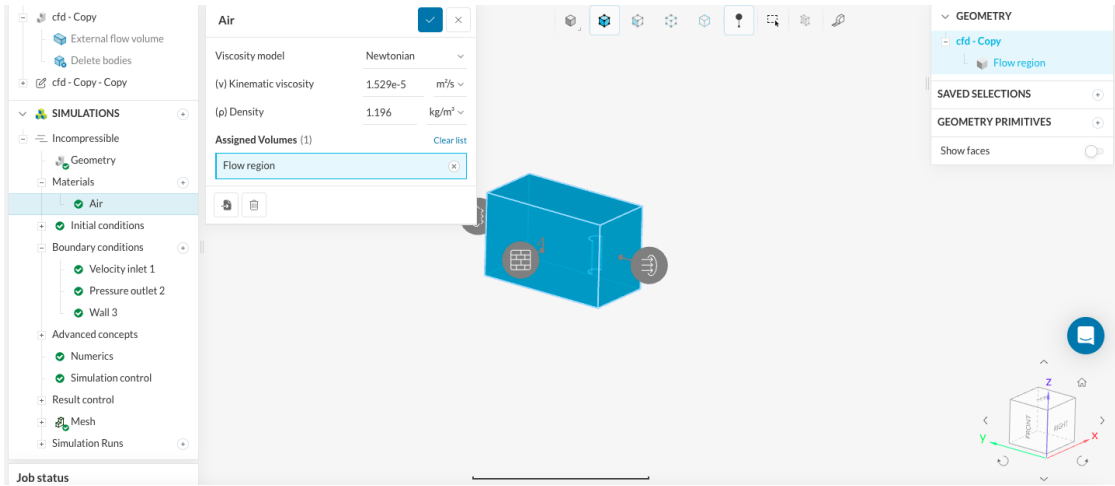
Şekil 16

## Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Yöntemi



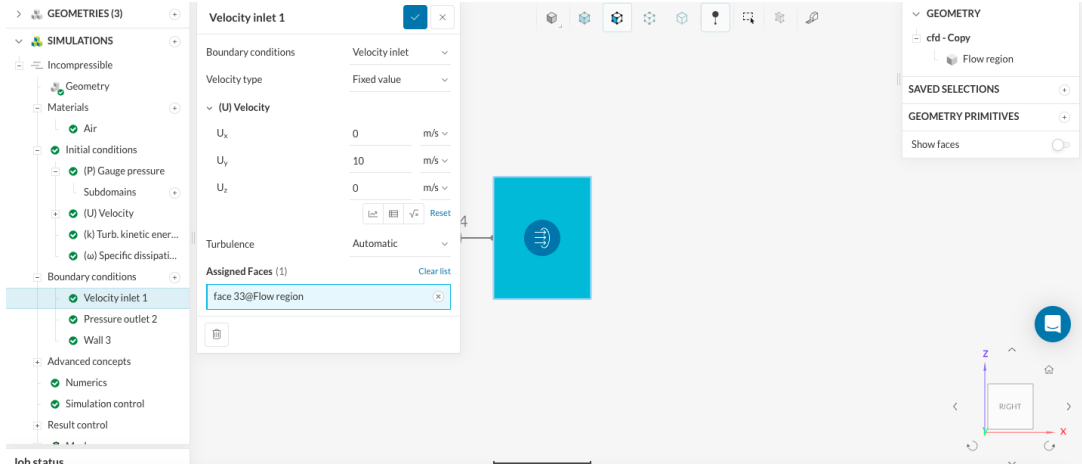
Şekil 17

## Analiz için Malzeme Tanımlama



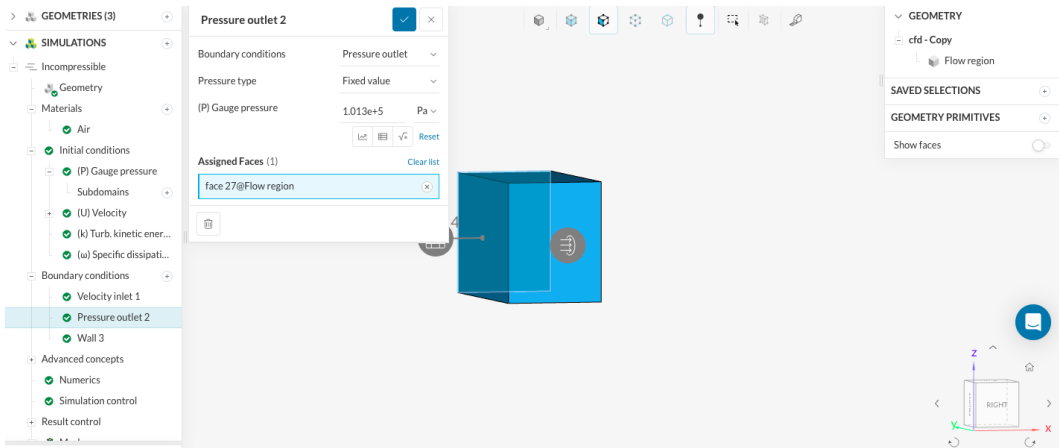
## Şekil 18

### *Analiz için Giriş Hızı Tanımlama*



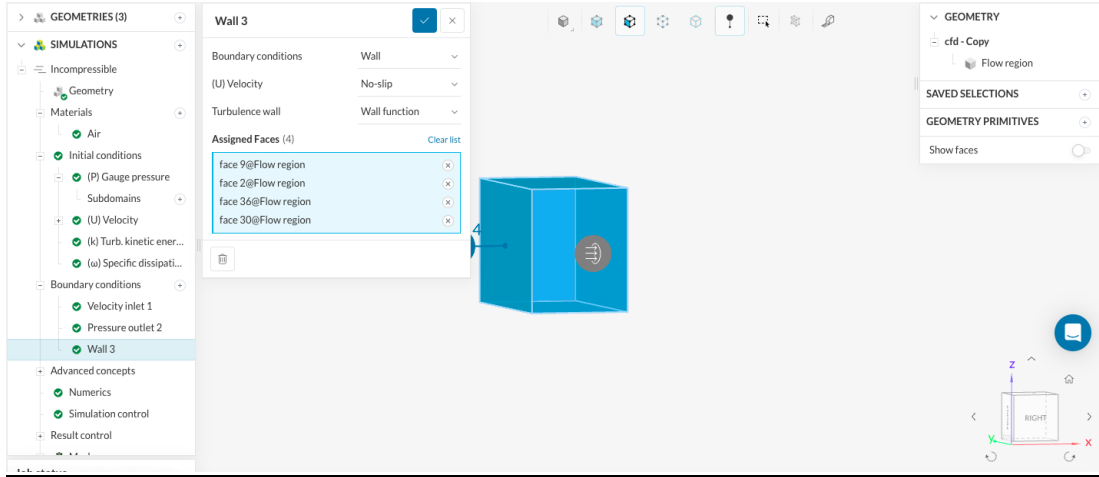
## Şekil 19

### *Analiz için Basınç Tanımlama*



## Şekil 20

### Kaymaz Duvar Sınırı



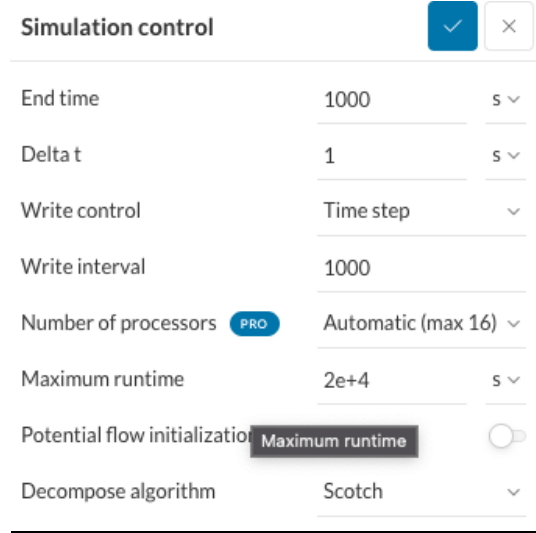
## Şekil 21

### Simülasyon Ayarları

| Numerics                             |        |
|--------------------------------------|--------|
| Relaxation type                      | Manual |
| > Relaxation factor                  |        |
| Number of non-orthogonal co...       | 1      |
| Pressure reference cell              | 0      |
| Pressure reference value             | 0 Pa   |
| <b>Residual controls</b>             |        |
| <b>(U) Velocity</b>                  |        |
| Absolute tolerance                   | 1e-6   |
| <b>(P) Pressure</b>                  |        |
| Absolute tolerance                   | 1e-6   |
| <b>(k) Turb. kinetic energy</b>      |        |
| Absolute tolerance                   | 1e-6   |
| <b>(ω) Specific dissipation rate</b> |        |
| Absolute tolerance                   | 1e-6   |

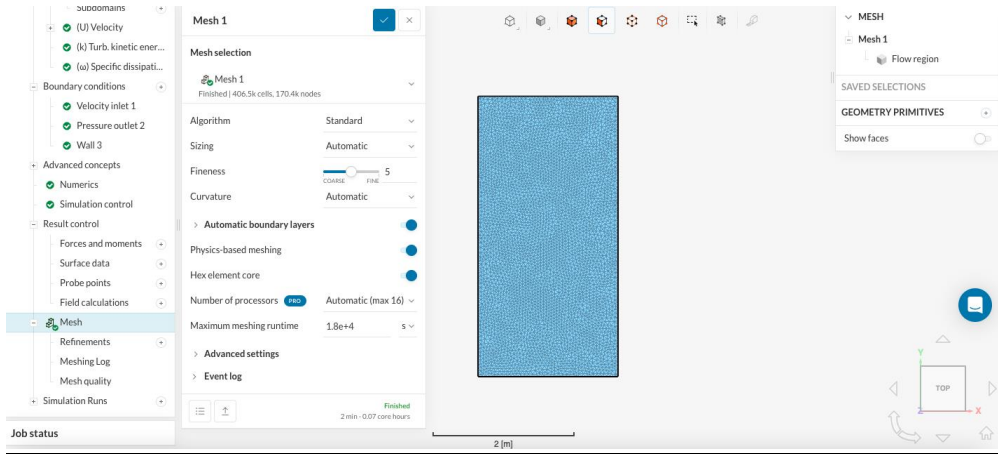
## Şekil 22

### Simülasyon öncesi son ayarlar



## Şekil 23

### Simülasyon Ağ Yapısı



En son, Şekil 21, 22, ve 23'teki gibi sırasıyla simülasyon için hesaplanacak iterasyon sayısı ve ağ yapısı belirlenip oluşturulmuştur. Bunların sonucunda her bir farklı giriş hızı ve rotorun farklı açıları için simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

#### 4. Bulgular

Bulut tabanlı bilgisayar destekli yazılım programı olan OnShape tarafından 3-boyutlu modeli oluşturulan yukarıdaki Savonius türbininin rotorunun 0,10,20,30,40,50,60,70,80 ve 90 derece açılardaki her konumu için 8,10 ve 12 m/s rüzgâr hızlarında aynı şekilde bulut tabanlı HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımı olan SimScale kullanılarak simülasyonu yapılmış ve analizin sonuçları Tablo 1’de detaylı şekilde mevcuttur.

##### 4.1. 8 m/s Rüzgâr Hızı İçin

###### 4.1.1. 0 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

8 m/s rüzgâr hızı için türbin rotorunun 0 derecede olduğu pozisyonda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi yapılmış ve sonuçları Şekil 24’te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Analizde giriş hızı 8 m/s olarak girilmiş ve Savonius türbin rotorunun çıkış hızı ortalama 5.5 m/s olarak tespit edilmiştir. Şekil 25’te simülasyon sonuçlarının yakınsadağı görünmektedir.

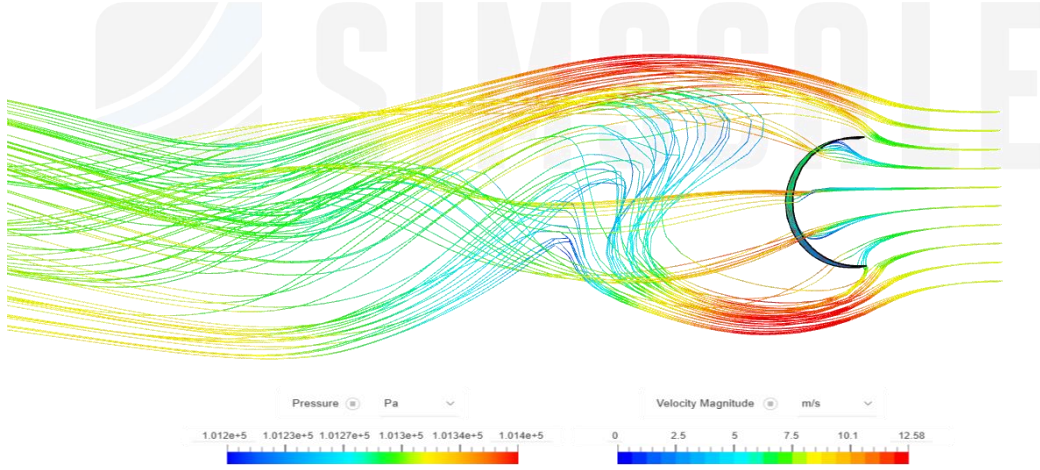
**Tablo 1**

*8 m/s Rüzgâr Hızındaki HAD Simülasyon Sonuçları*

| Derece   | Çıkış Hızı (m/s) | Güç (Watt) | Performans Katsayısı |
|----------|------------------|------------|----------------------|
| 0        | 5,50             | 68,57      | 0,44                 |
| 10       | 5,65             | 65,89      | 0,43                 |
| 20       | 5,82             | 62,66      | 0,41                 |
| 30       | 6,00             | 58,99      | 0,38                 |
| 40       | 6,40             | 49,93      | 0,32                 |
| 50       | 7,00             | 33,86      | 0,22                 |
| 60       | 7,40             | 21,41      | 0,14                 |
| 70       | 7,55             | 16,37      | 0,11                 |
| 80       | 7,70             | 11,12      | 0,07                 |
| 90       | 7,80             | 7,51       | 0,05                 |
| Ortalama |                  | 39,63      | 0,26                 |

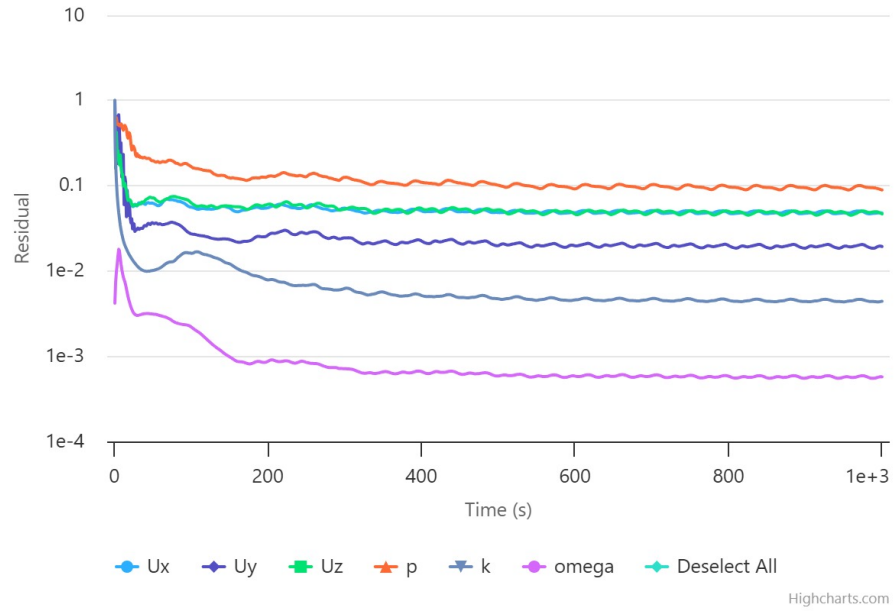
Şekil 24

8 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



Şekil 25

8 m/s Rüzgâr hızında 0 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması

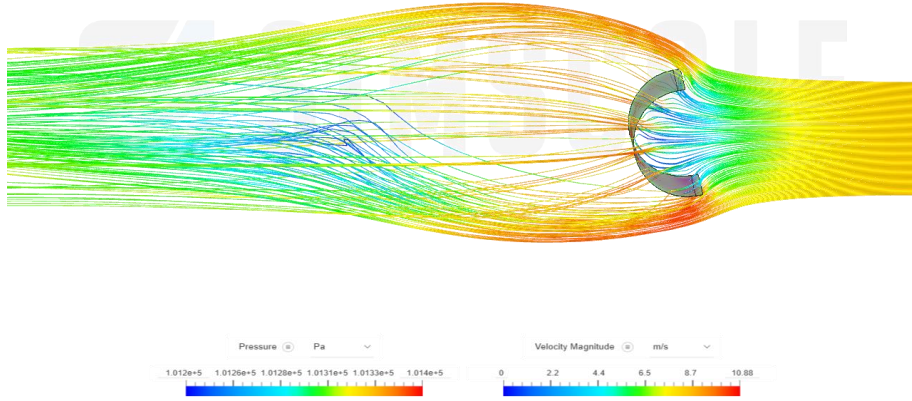


#### 4.1.2. 10 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Aynı şekilde giriş hızı olarak 8 m/s rüzgâr hızı seçilmiş ve türbin rotorunun 10 derecedeki konumu için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi koşturulmuş ve sonuçları Şekil 26’da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu doğrultuda rotorunun çıkış hızı ortalama 5.65 m/s olarak tespit edilmiştir.

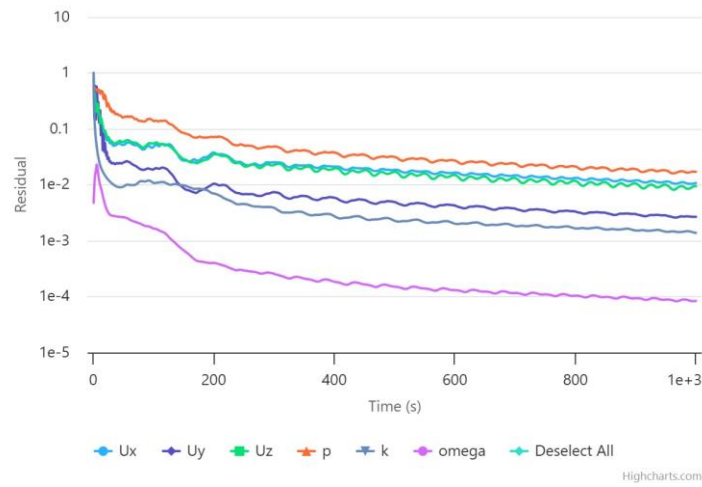
Şekil 26

*8 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 27

*8 m/s Rüzgâr hızında 10 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

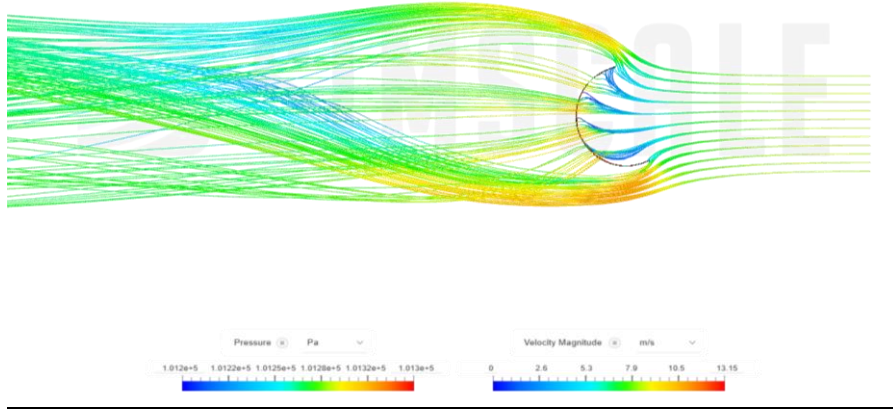


#### 4.1.3.20 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Analizde giriş hızı 8 m/s olarak tanımlanmış ve türbin rotorunun 20 derece döndürülmüş halinin 3-boyutlu modeli analiz programına eklenmiş ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi koşturulmuş ve sonuçları Şekil 28’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 28’de mevcut olup, iterasyon çözümlerinin yakınsam grafiği de Şekil 29’dadır aşağıdaki Şekil 28’de görüldüğü gibi rotorunun çıkış hızı ortalama 5.82 m/s olarak tespit edilmiştir.

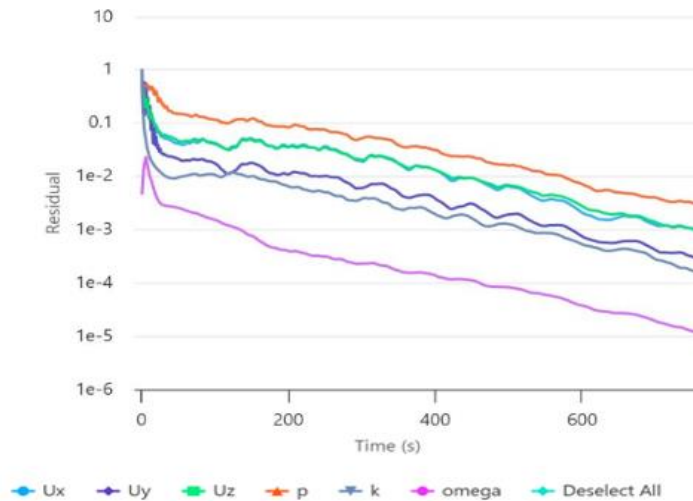
Şekil 28

*8 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 29

*8 m/s Rüzgâr hızında 20 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

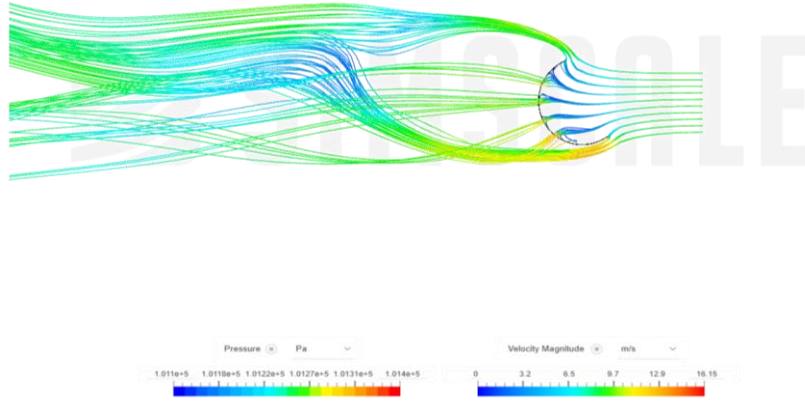


#### 4.1.4. 30 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Şekil 30’da görüldüğü gibi 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında yapılan analiz sonucuna göre rotorunun çıkış hızı ortalama 6 m/s olarak tespit edilmiştir.

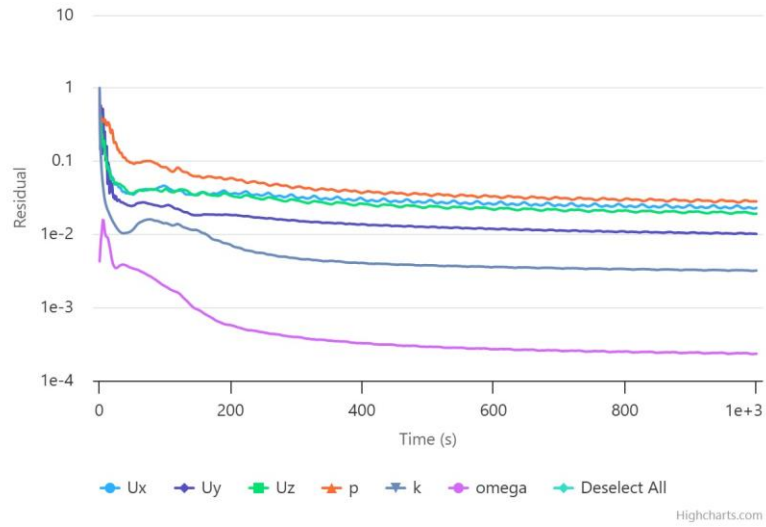
Şekil 30

*8 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 31

*8 m/s Rüzgâr hızında 30 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

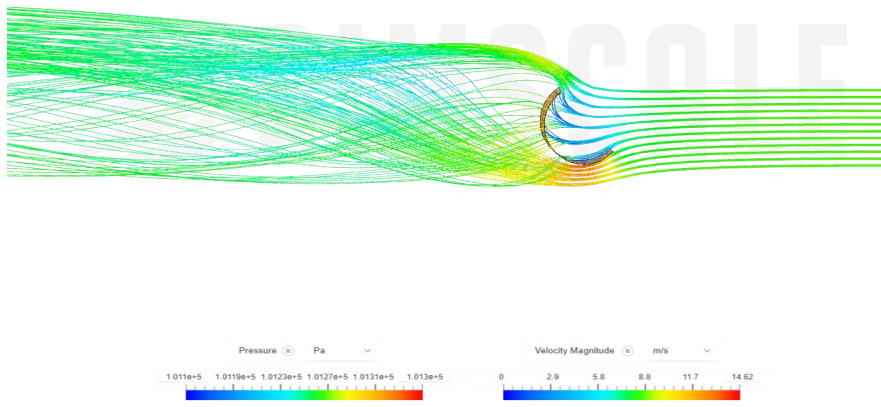


#### 4.1.5. 40 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Şekil 32’de görüldüğü gibi 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında yapılan analiz sonucuna göre rotorunun çıkış hızı ortalama 6.4 m/s’dir. Simülasyon sonucuna ait grafik aşağıda olup sonuçların yakınsadığı açıkça görülmektedir.

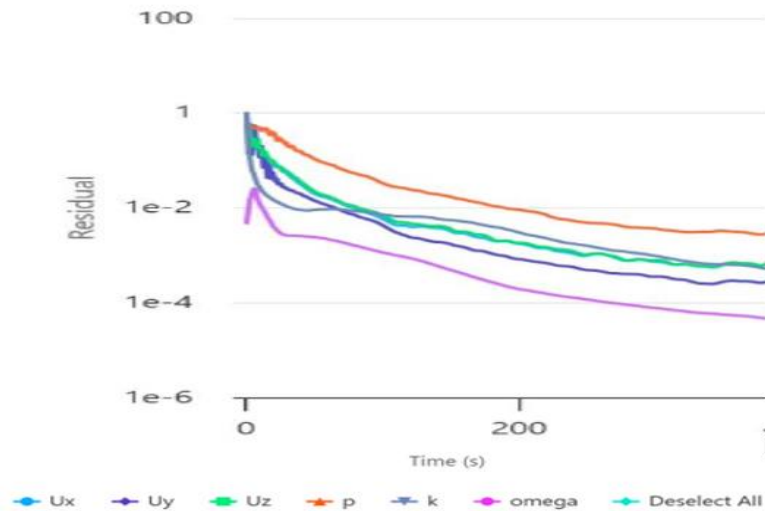
Şekil 32

*8 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 33

*8 m/s Rüzgâr hızında 40 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

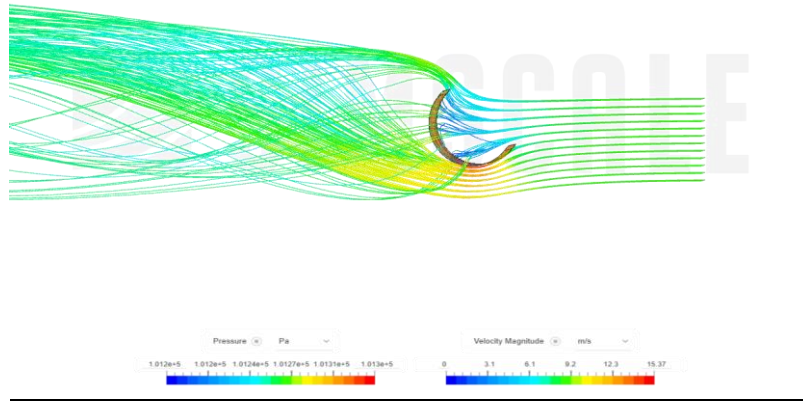


#### 4.1.6. 50 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi:

Aşağıdaki simülasyon sonucu 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında ve rotorun 50 derece döndürülmüş modelinde koşturulmuştur. Analiz sonuçları aşağıdaki Şekil 34 ve Şekil 35'teki gibidir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 7 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafikler de olup sonuçlar yakınsamıştır ve simülasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

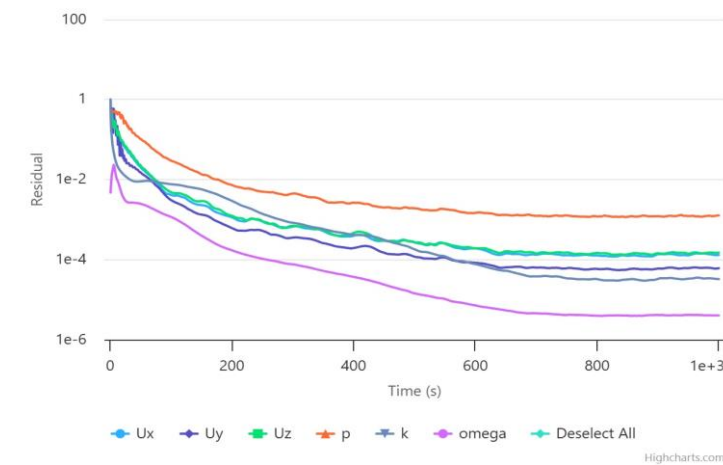
Şekil 34

*8 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 35

*8 m/s Rüzgâr hızında 50 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

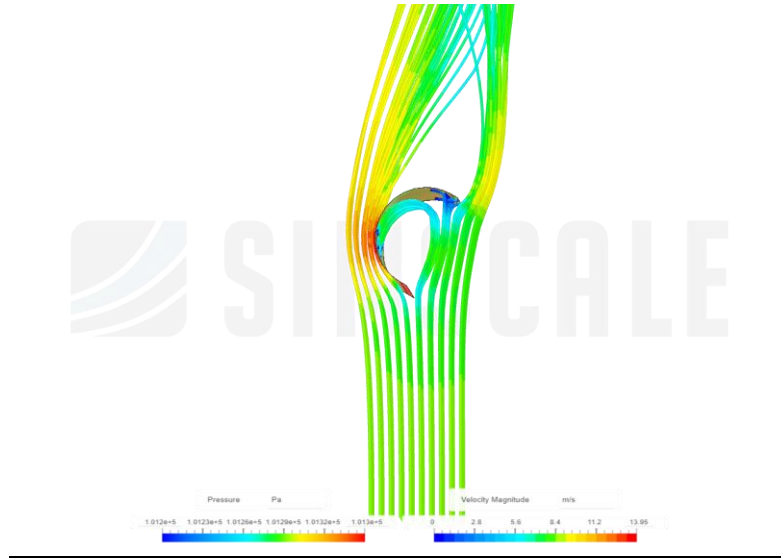


#### 4.1.7. 60 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Aşağıdaki simülasyon sonucu 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında ve rotorun 60 derece açı ile döndürülmüş modelinde koşturulmuştur. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 7.4 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de Şekil 36'da olup sonuçlar yakınsamıştır ve simülasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

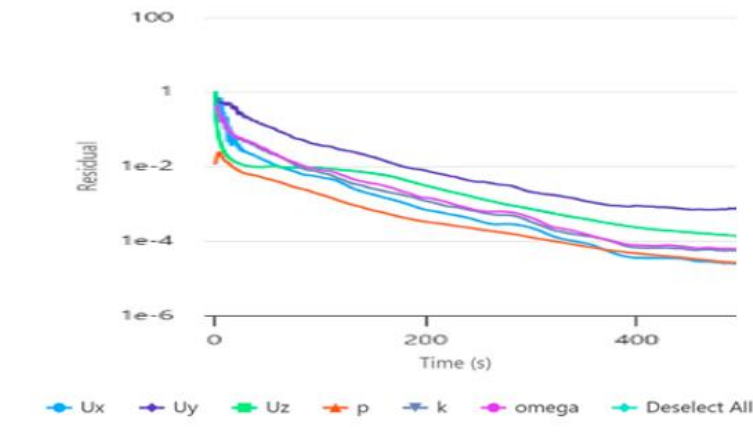
Şekil 36

*8 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 37

*8 m/s Rüzgâr hızında 60 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

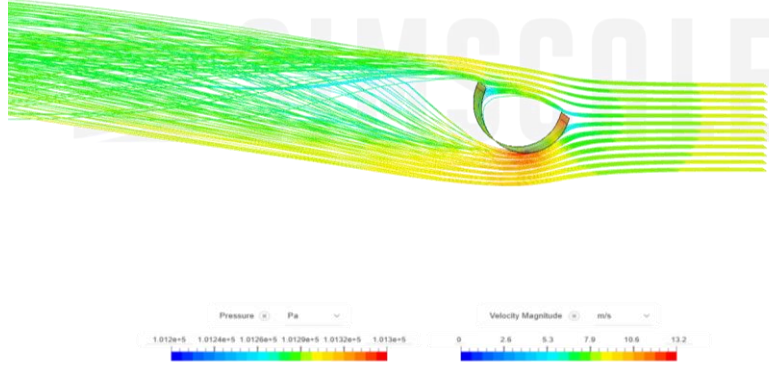


#### 4.1.8. 70 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Aşağıdaki simülasyon sonucu 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında ve rotorun 70 derece döndürülmüş modelinde koşturulmuştur. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 7.55 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de Şekil 38 ve Şekil 39'da olup sonuçlar yakınsamıştır ve simülasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

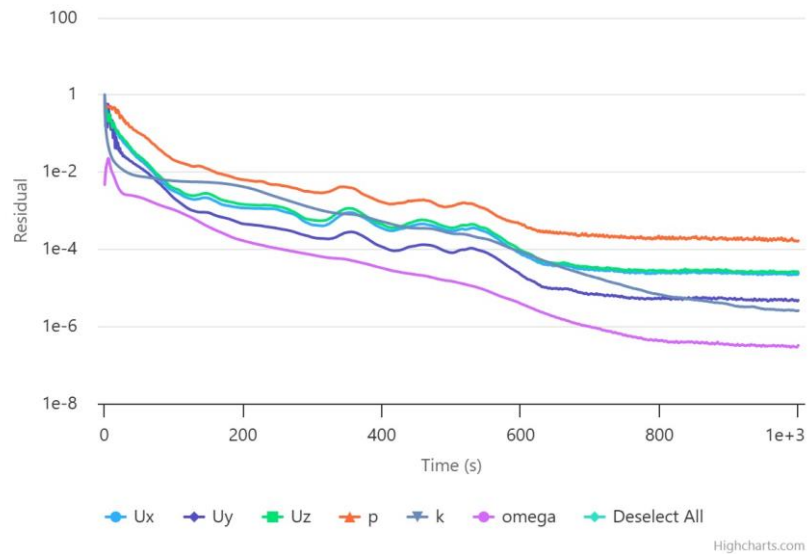
Şekil 38

*8 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 39

*8 m/s Rüzgâr hızında 70 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

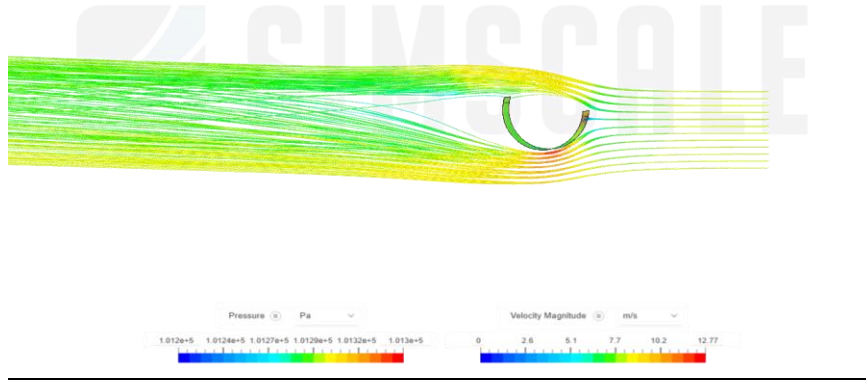


#### 4.1.9. 80 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Aşağıdaki simülasyon sonucu 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında ve rotorun 80 derece döndürülmüş modelinde koşturulmuştur. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 7.7 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafikler Şekil 40 ve Şekil 41'deki gibidir. Sonuçlar yakınsamıştır ve simülasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

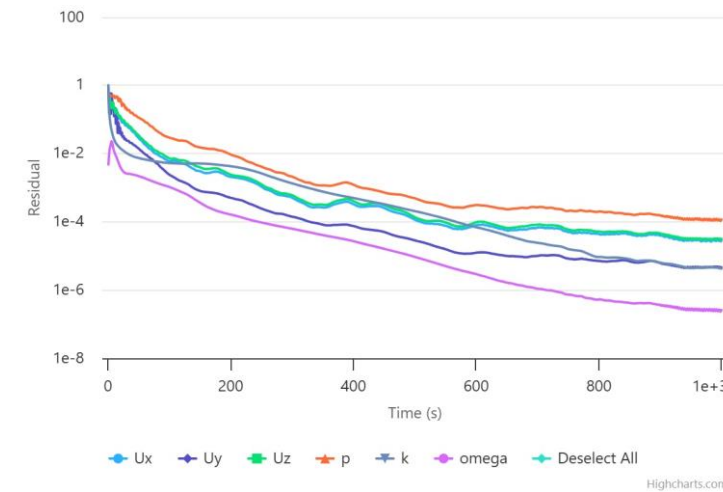
Şekil 40

*8 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



Şekil 41

*8 m/s Rüzgâr hızında 80 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

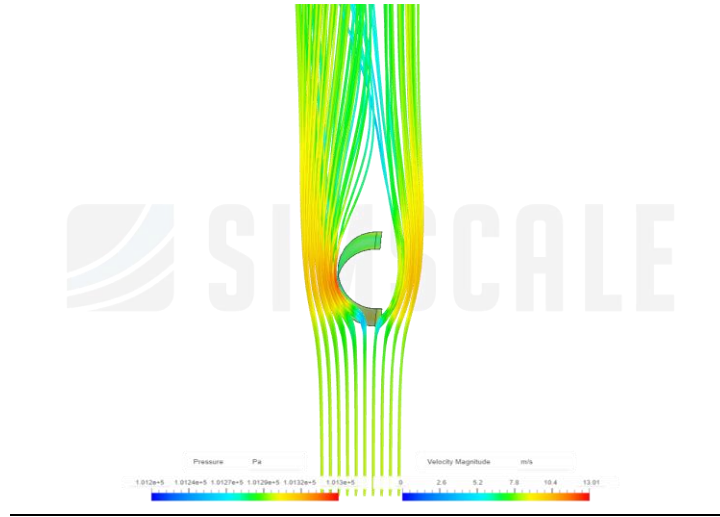


#### 4.1.10. 90 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi

Aşağıdaki simülasyon sonucu 8 m/s giriş hızı sınır koşulu altında ve rotorun 90 derece döndürülmüş modelinde koşturulmuştur. Analiz sonuçları Şekil 42 ve Şekil 43'tedir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 7.8 m/s'dir. Sonuçların yakınsamış olduğuna dair grafik aşağıdadır.

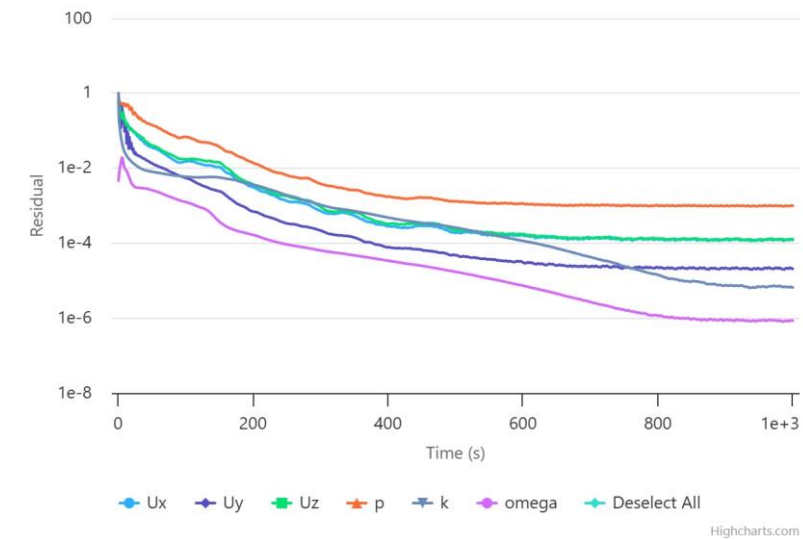
Şekil 42

8 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



Şekil 43

8 m/s Rüzgâr hızında 90 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması



#### 4.2. 10 m/s Rüzgâr Hızı İçin

Bulut tabanlı simülasyon programı olan SimScale üzerinde 0,10,20,30,40,50,60,70,80 ve 90 derece döndürülerek oluşturulan Savonius türbin rotorunun her bir 3 boyutlu modeli için 10 m/s giriş hızı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi koşturulmuş ve rotorun çıkış hızı tespit edilmiştir. Rotor çıkış hızına göre türbinin performans hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçlar ayrıntılı olarak Tablo 2’dedir.

##### 4.2.1. 0 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

Simülasyon sonucu 10 m/s giriş hızı sınır koşulu altında ve rotorun 0 derecede rotorun rüzgâra doğrudan dik olduğu konuma ait model için koşturulmuştur. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 6.8 m/s’dir. Simülasyon sonucuna ait grafikler Şekil 44 ve 45’te olup sonuçlar yakınsamıştır ve simülasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

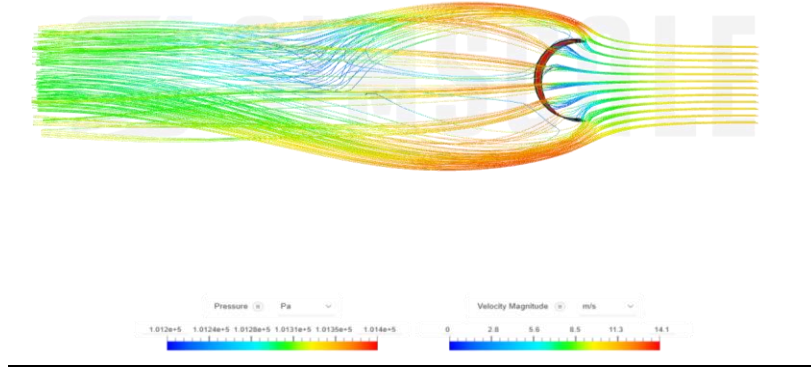
**Tablo 2**

*10 m/s Rüzgâr Hızındaki HAD Simülasyon Sonuçları*

| Derece   | Çıkış Hızı (m/s) | Güç (Watt) | Performans Katsayısı |
|----------|------------------|------------|----------------------|
| 0        | 6,80             | 135,93     | 0,45                 |
| 10       | 7,70             | 108,44     | 0,36                 |
| 20       | 8,00             | 97,52      | 0,32                 |
| 30       | 8,60             | 72,89      | 0,24                 |
| 40       | 8,70             | 68,42      | 0,23                 |
| 50       | 9,16             | 46,41      | 0,15                 |
| 60       | 9,20             | 44,38      | 0,14                 |
| 70       | 9,45             | 31,31      | 0,10                 |
| 80       | 9,50             | 28,61      | 0,09                 |
| 90       | 9,70             | 17,52      | 0,06                 |
| Ortalama |                  | 65,15      | 0,22                 |

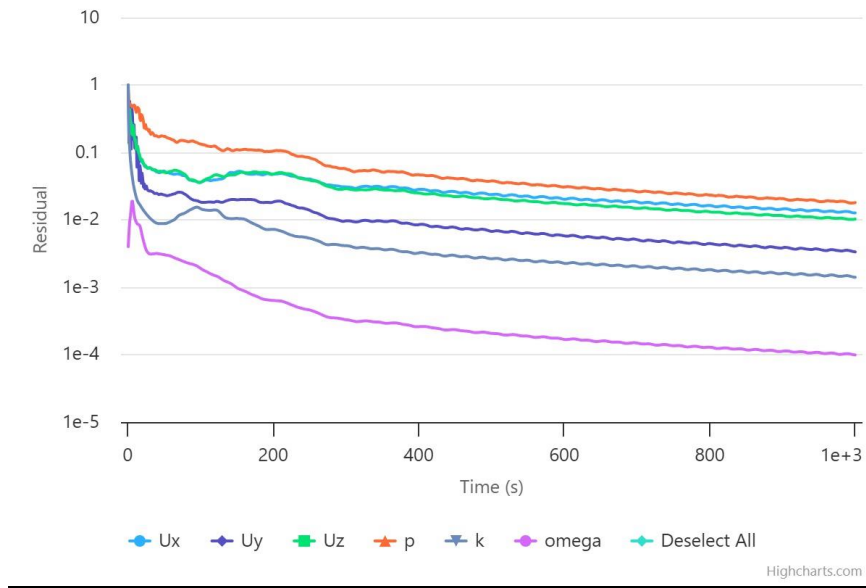
## Şekil 44

*10 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 45

*10 m/s Rüzgâr hızında 0 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

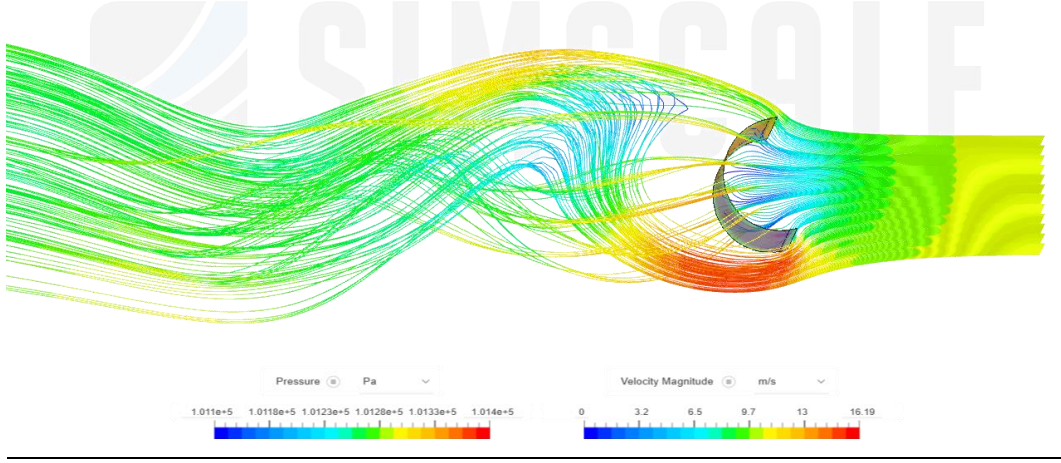


### 4.2.2. 10 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

10 m/s giriş hızında ve rotorun 10 derece döndürülmüş modelinde koşturulmuştur. Şekil 46 ve Şekil 47'deki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 7.7 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır ve simülasyon başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

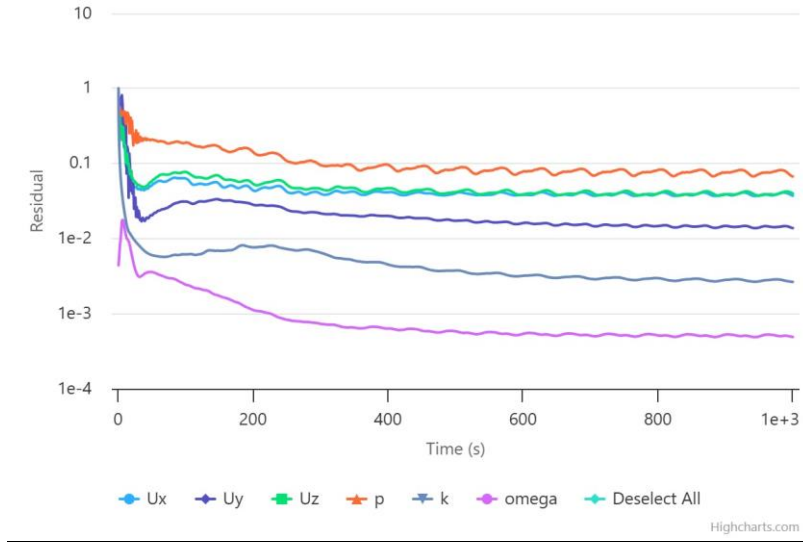
**Şekil 46**

*10 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



**Şekil 47**

*10 m/s Rüzgâr hızında 10 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

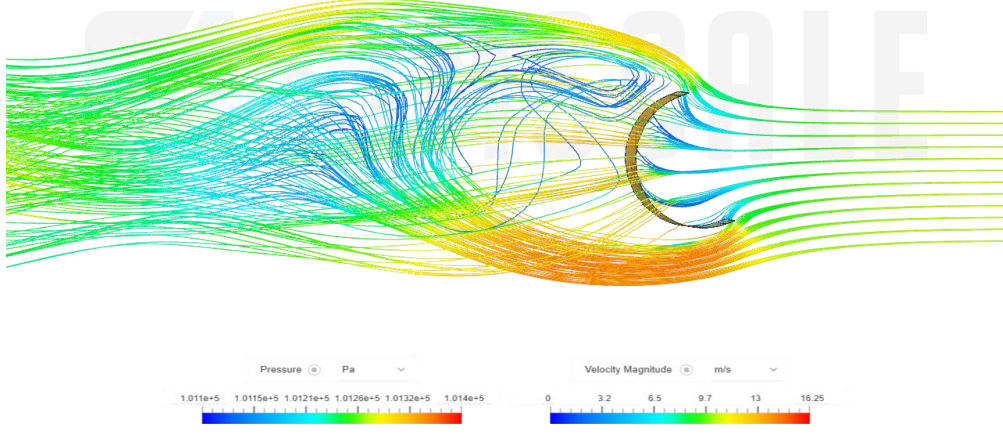


#### 4.2.3. 20 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

10 m/s giriş hızında ve rotorun 20 derece döndürülmüş modelinde simülasyon yapılmıştır. Aşağıdaki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 8 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafiklerde Şekil 48 ve Şekil 49'da olup sonuçlar yakınsamıştır.

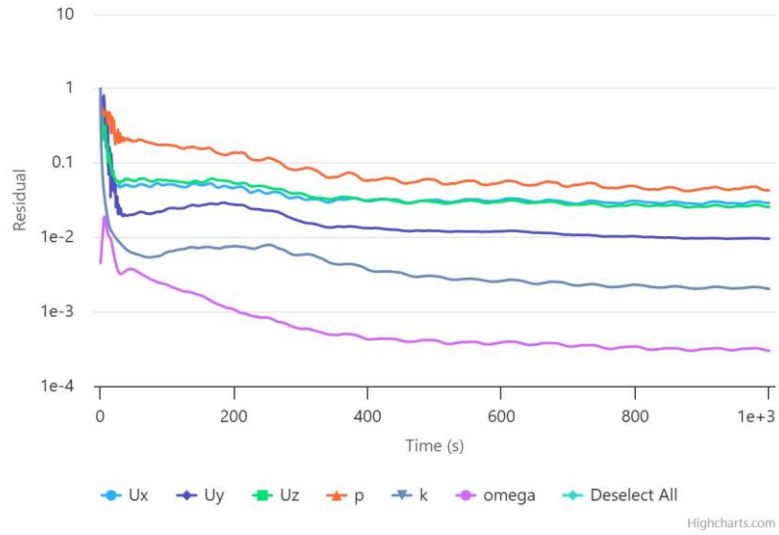
**Şekil 48**

*10 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



**Şekil 49**

*10 m/s Rüzgâr hızında 20 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

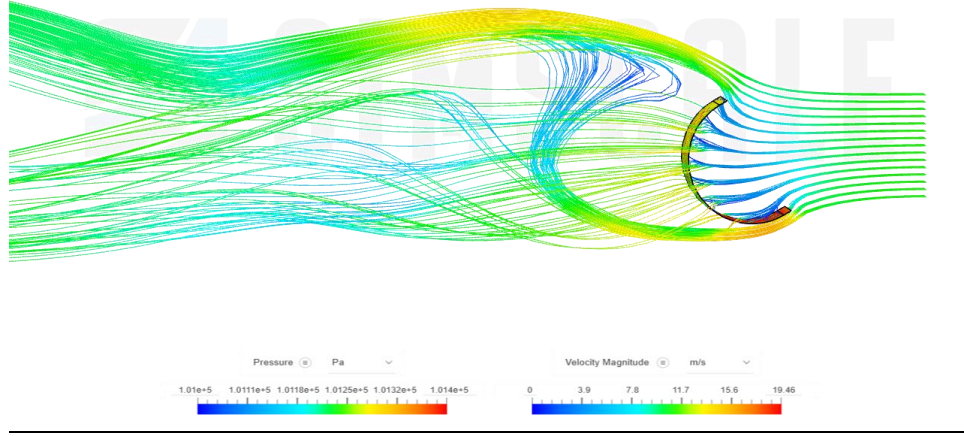


#### 4.2.4. 30 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

10 m/s giriş hızında ve rotorun 30 derece döndürülmüş modelinde simülasyon yapılmıştır. Şekil 50 ve Şekil 51'deki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 8.6 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

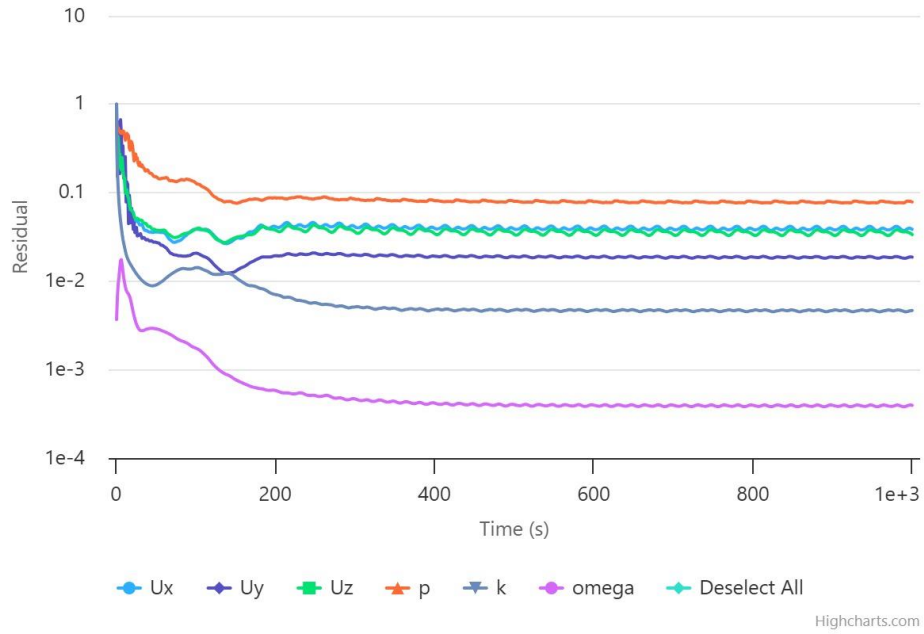
## Şekil 50

10 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



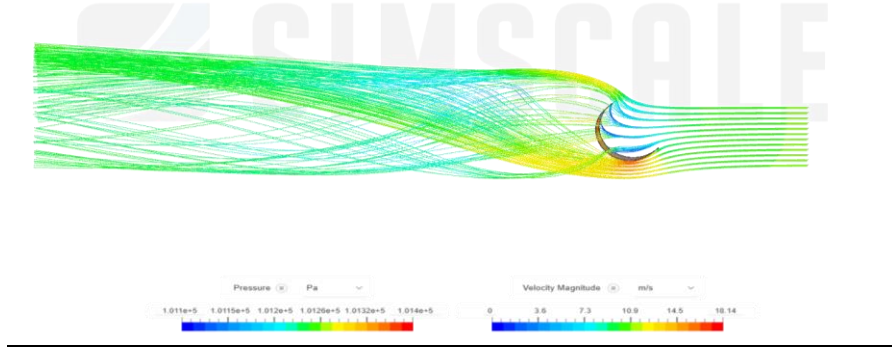
## Şekil 51

10 m/s Rüzgâr hızında 30 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması



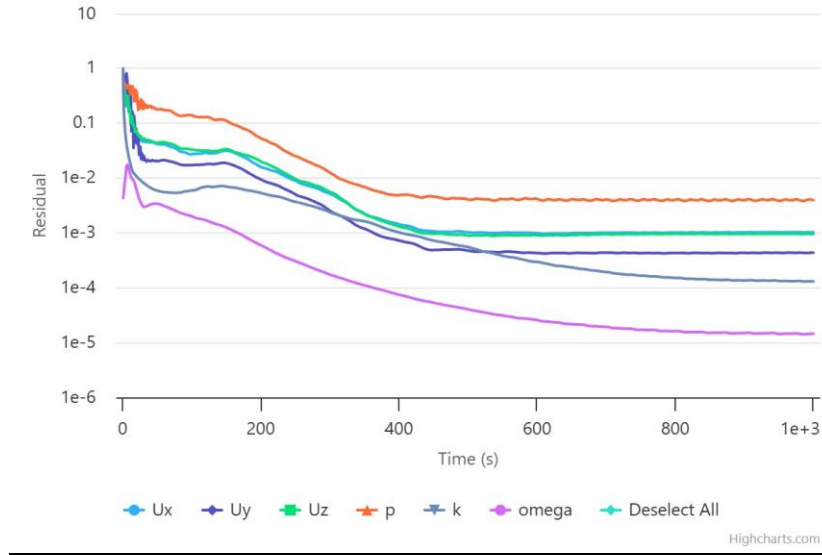
**Şekil 52**

*10 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



**Şekil 53**

*10 m/s Rüzgâr hızında 40 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

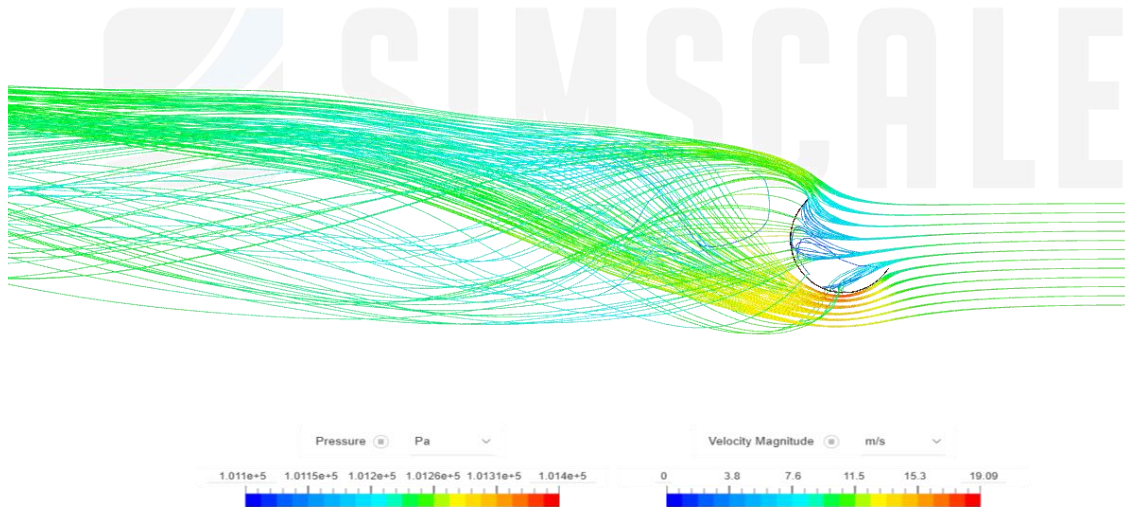


#### 4.2.5. 50 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

10 m/s giriş hızında ve rotorun 50 derece döndürülmüş modelinde akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 54 ve Şekil 55'teki gibidir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.16 m/s'dir. Yakınsamış simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıdadır.

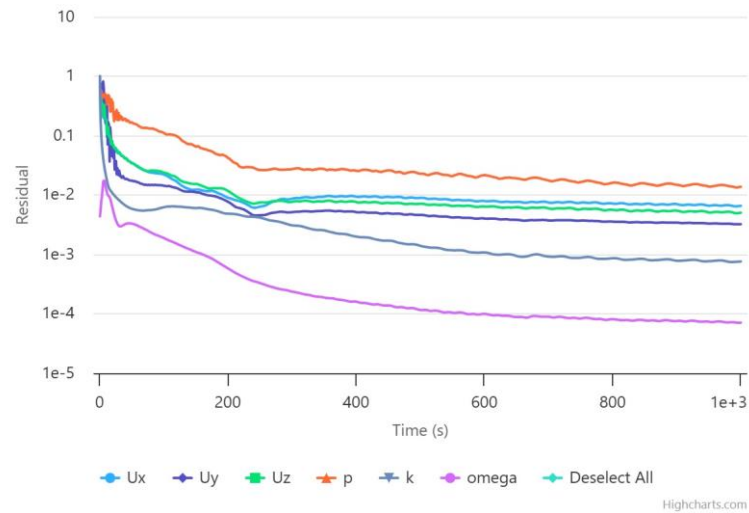
**Şekil 54**

*10 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



**Şekil 55**

*10 m/s Rüzgâr hızında 50 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

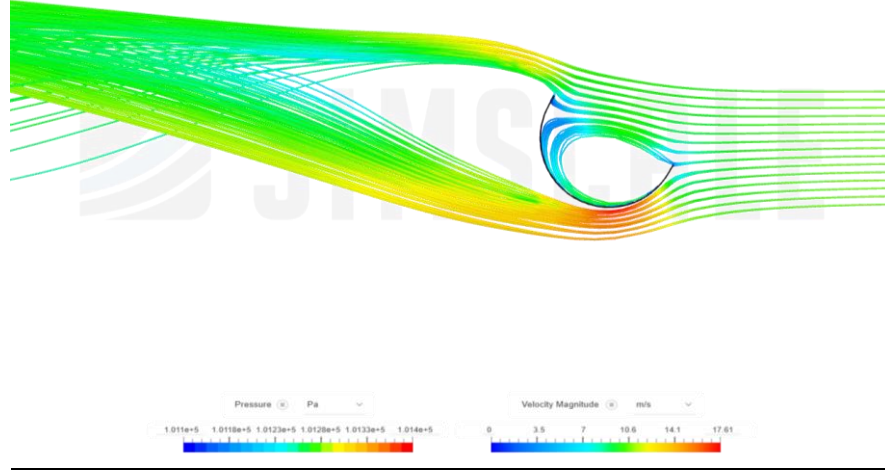


#### **4.2.6. 60 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi**

10 m/s giriş hızında ve rotorun 60 derecelik rotor modelinde akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 56 ve Şekil 57'deki gibi olup, sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.2 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

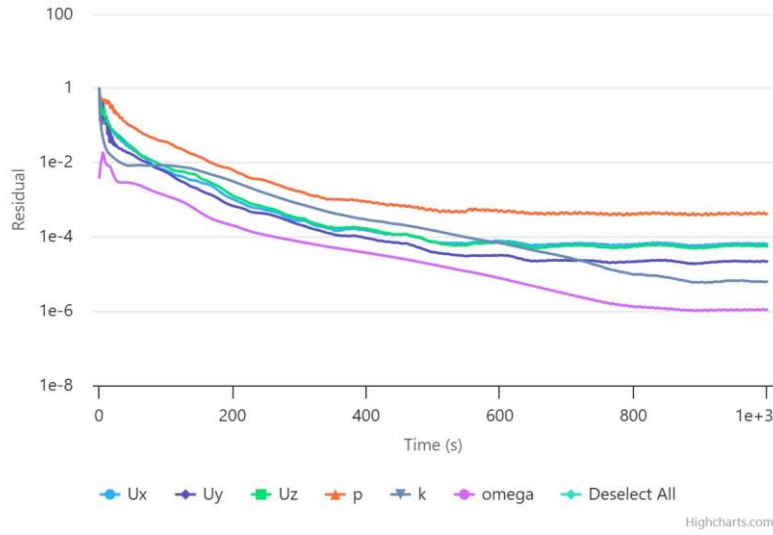
**Şekil 56**

*10 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



**Şekil 57**

*10 m/s Rüzgâr hızında 60 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

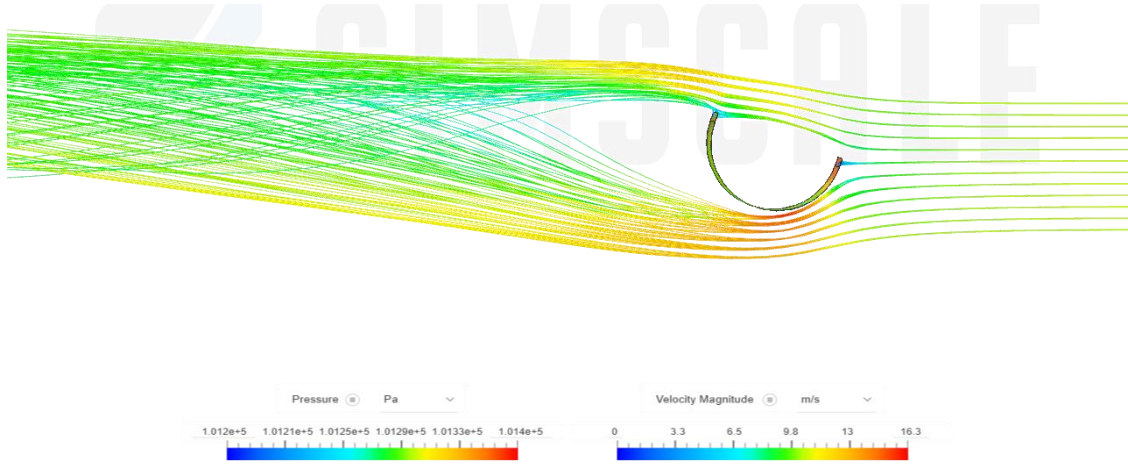


#### 4.2.7. 70 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

10 m/s giriş hızında ve rotorun 70 derecelik rotor modelinde akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 58 ve Şekil 59'dadır. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.45 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

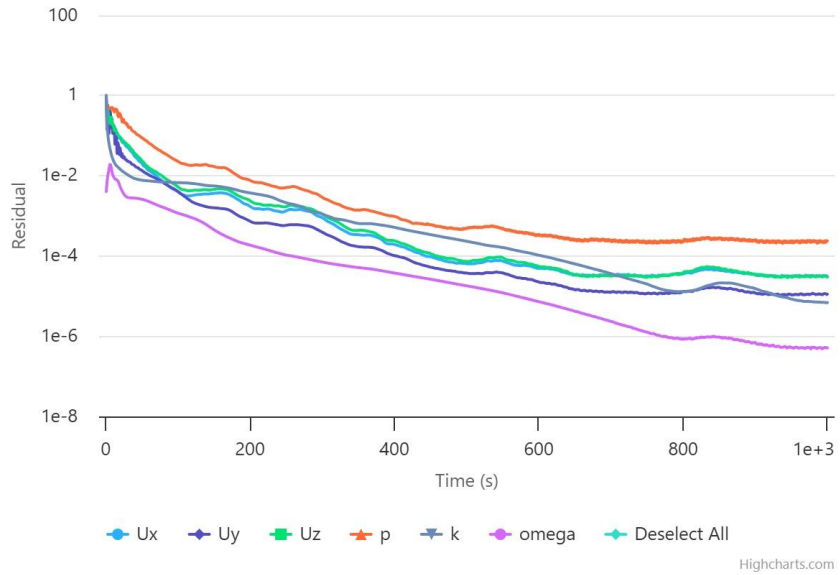
## Şekil 58

*10 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 59

*10 m/s Rüzgâr hızında 70 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

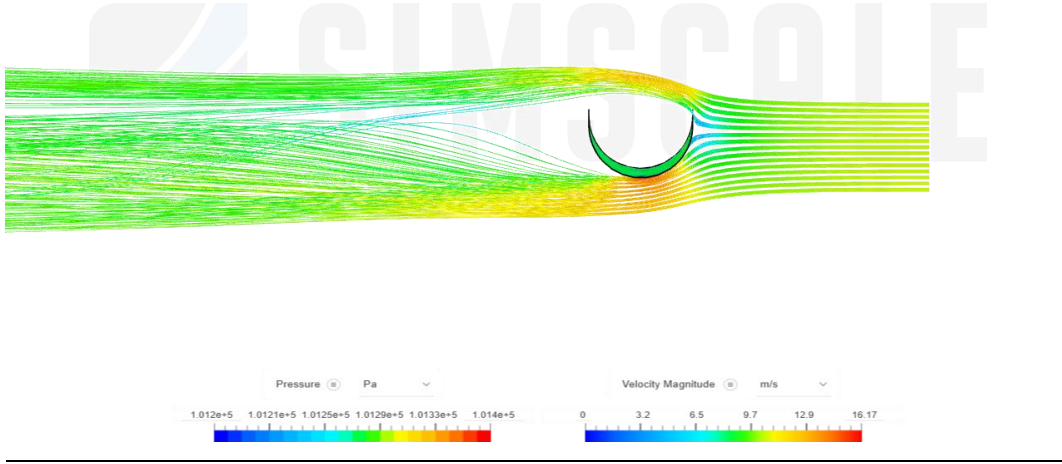


### 4.2.8. 80 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

10 m/s giriş hızında ve rotorun 80 derecelik rotor modelinde akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 60 ve Şekil 61’dedir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.5 m/s’dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

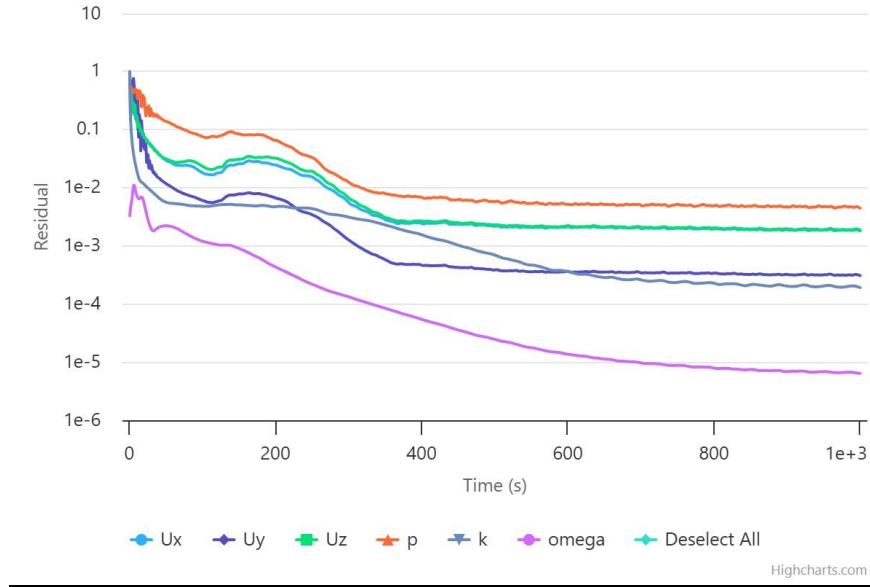
**Şekil 60**

*10 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



**Şekil 61**

*10 m/s Rüzgâr hızında 80 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

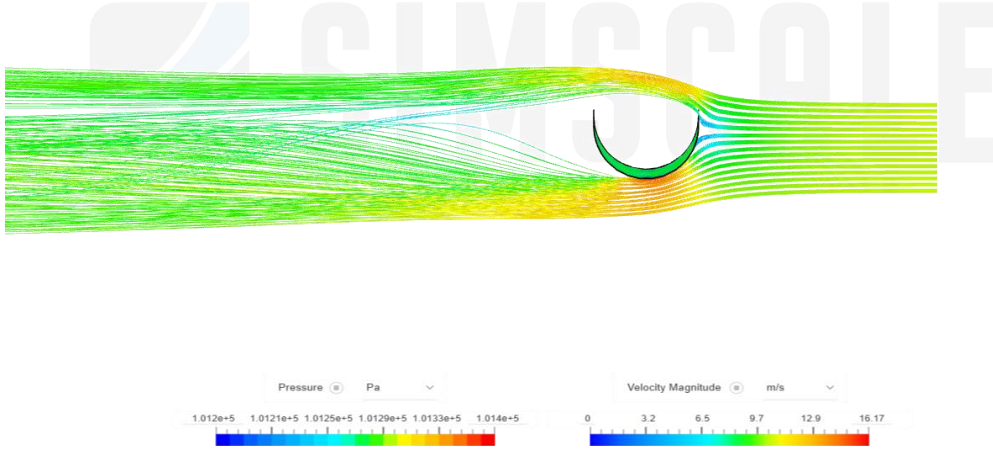


#### **4.2.9.90 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi**

10 m/s giriş hızında ve rotorun 90 derecelik yani rüzgârın rotora paralel olduğu rotor modelinde akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 62 ve Şekil 63'tedir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.7 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

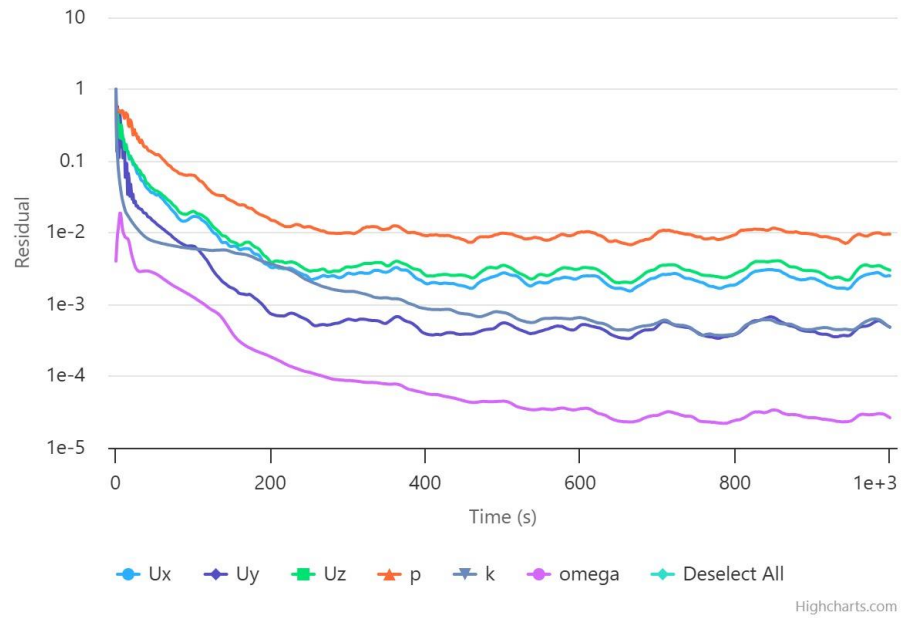
## Şekil 62

10 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



## Şekil 63

10 m/s Rüzgâr hızında 90 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması



#### 4.3. 12 m/s Rüzgâr Hızı İçin

HAD simülasyon programı olan SimScale üzerinde 0,10,20,30,40,50,60,70,80 ve 90 derece farklı rotor açılarında oluşturulan Savonius türbin modelinin her biri için 12 m/s giriş hızı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi koşturulmuş ve rotorun çıkış hızı tespit edilmiştir. Rotor çıkış hızına göre türbinin performans hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçlar ayrıntılı olarak Tablo 3'tedir.

##### 4.3.1. 0 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 0 derece olduğu konumda analiz koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 64 ve Şekil 65'teki gibi elde edilmiştir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.3 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

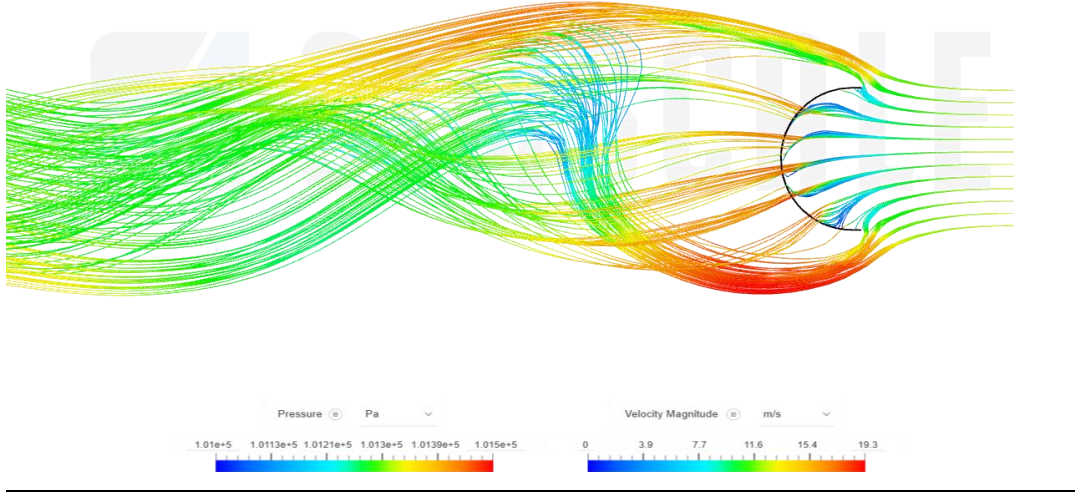
**Tablo 3**

*12 m/s Rüzgâr Hızındaki HAD Simülasyon Sonuçları*

| Derece   | Çıkış Hızı (m/s) | Güç (Watt) | Performans Katsayısı |
|----------|------------------|------------|----------------------|
| 0        | 9,30             | 184,36     | 0,35                 |
| 10       | 9,50             | 173,92     | 0,33                 |
| 20       | 9,55             | 171,24     | 0,32                 |
| 30       | 10,50            | 114,28     | 0,21                 |
| 40       | 10,75            | 97,37      | 0,19                 |
| 50       | 10,77            | 95,98      | 0,18                 |
| 60       | 10,90            | 86,82      | 0,17                 |
| 70       | 10,92            | 85,39      | 0,16                 |
| 80       | 11,47            | 43,94      | 0,08                 |
| 90       | 11,70            | 25,36      | 0,05                 |
| Ortalama |                  | 107,86     | 0,20                 |

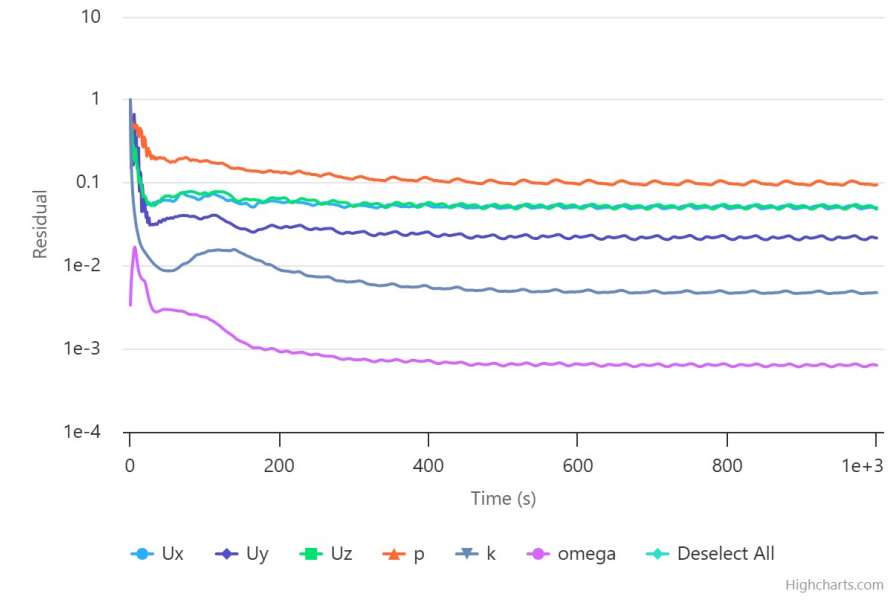
Şekil 64

12 m/s Rüzgâr Hızında 0 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



Şekil 65

12 m/s Rüzgâr hızında 0 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması

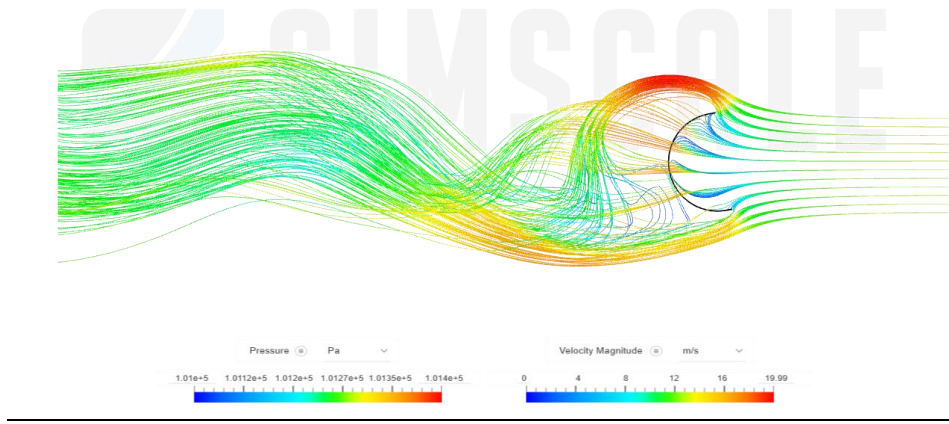


#### 4.3.2. 10 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 10 derecelik rotor konumunda akış analizi koşturulmuştur. Şekil 66 ve Şekil 67'deki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 9.5 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

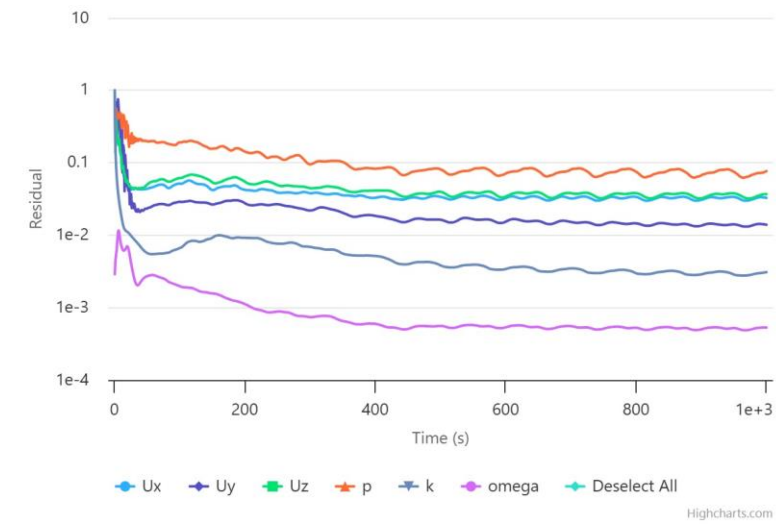
Şekil 66

12 m/s Rüzgâr Hızında 10 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



Şekil 67

12 m/s Rüzgâr hızında 10 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması

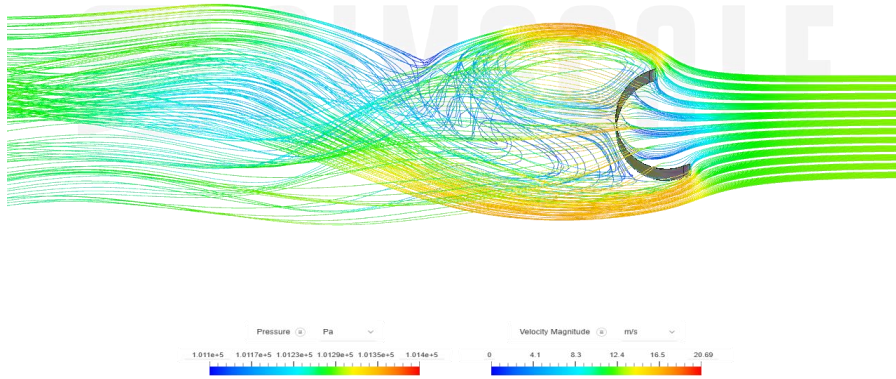


#### 4.3.3. 20 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 20 derecelik rotor konumunda akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 68 ve Şekil 69'daki gibi olup, rotorunun çıkış hızı ortalama 10.55 m/s'dir. Simülasyon sonucuna ait grafik de aşağıda olup sonuçlar yakınsamıştır.

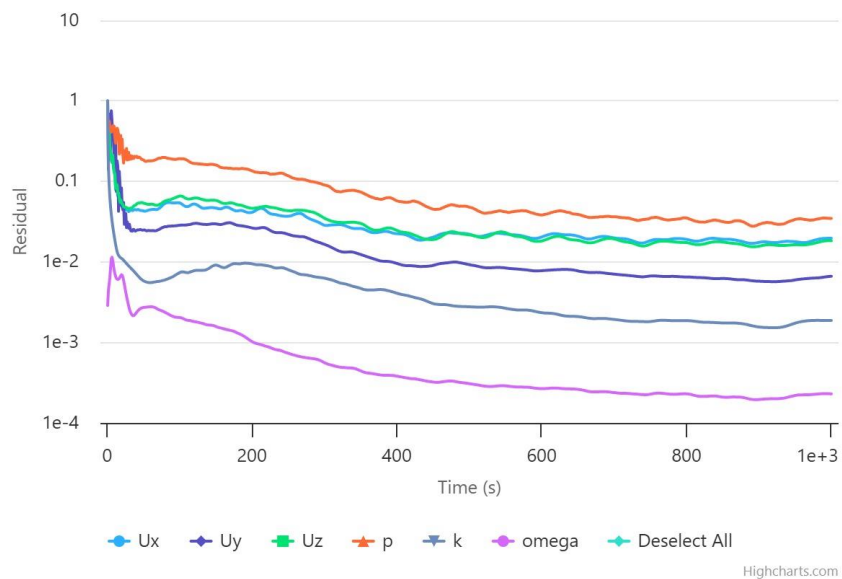
Şekil 68

12 m/s Rüzgâr Hızında 20 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



Şekil 69

12 m/s Rüzgâr hızında 20 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması

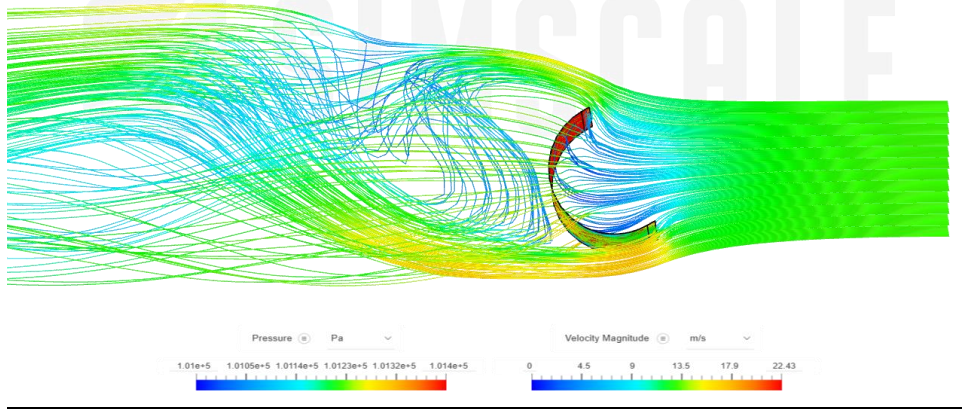


#### 4.3.4. 30 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 30 derecelik rotor açısında akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 70 ve Şekil 71'deki gibi olup, rotorunun çıkış hızı ortalama 10.5 m/s'dir.

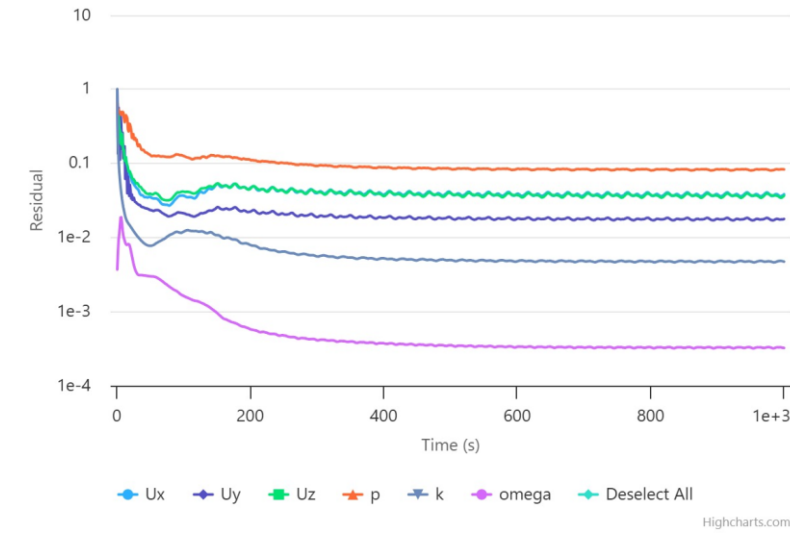
Şekil 70

12 m/s Rüzgâr Hızında 30 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu



Şekil 71

12 m/s Rüzgâr hızında 30 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması

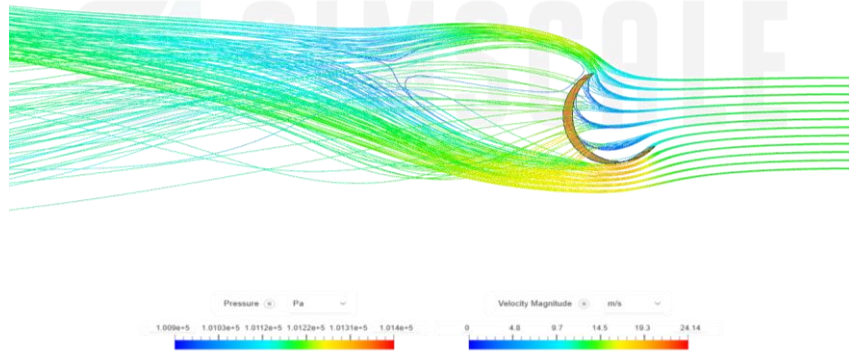


#### 4.3.5. 40 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 40 derecelik rotor açısında akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 72’de olup, rotorun çıkış hızı ortalama 10.75 m/s’dir.

Şekil 72

*12 m/s Rüzgâr Hızında 40 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*

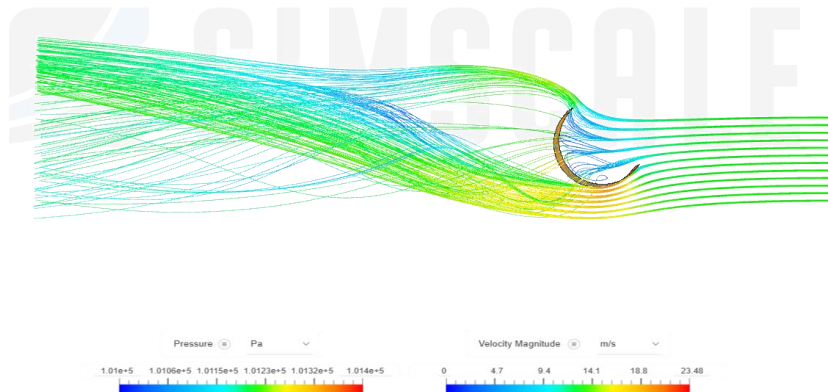


#### 4.3.6. 50 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 50 derecelik rotorun döndürülmüş modelinde akış analizi koşturulmuştur. Şekil 73 ve Şekil 74’teki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 10.77 m/s’dir.

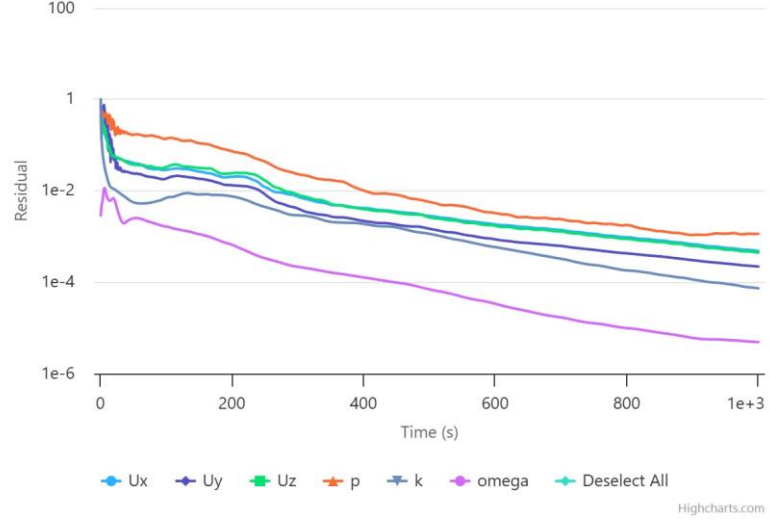
Şekil 73

*12 m/s Rüzgâr Hızında 50 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 74

*12 m/s Rüzgâr hızında 50 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

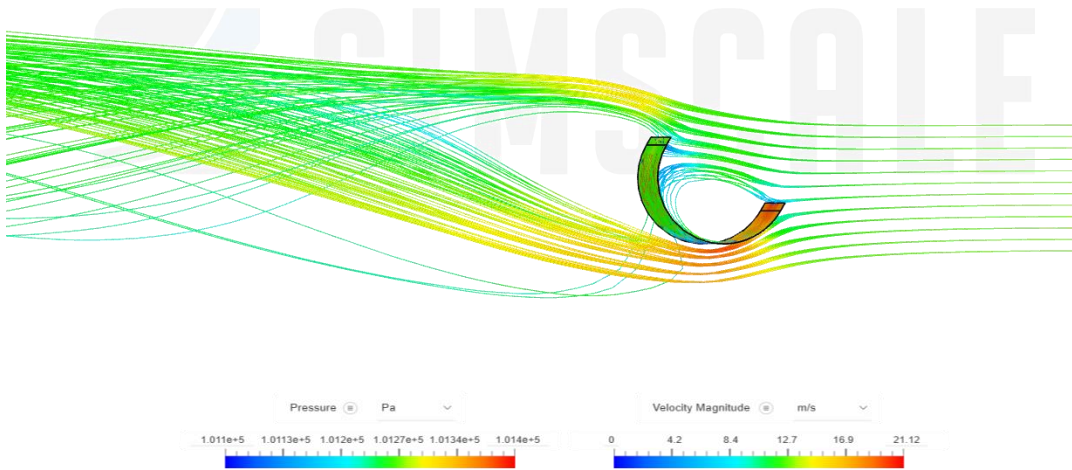


### 4.3.7. 60 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 60 derecelik rotor açısında akış analizi koşturulmuştur. Şekil 75 ve Şekil 76'daki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 10.9 m/s'dir.

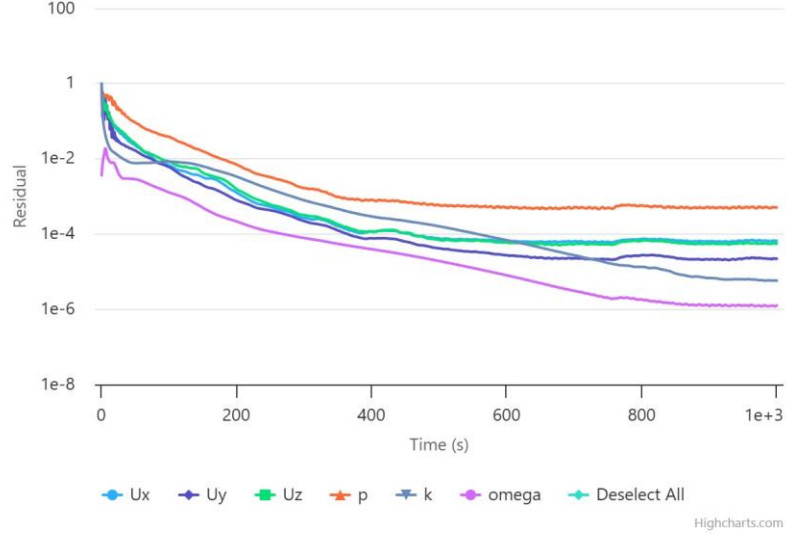
## Şekil 75

*12 m/s Rüzgâr Hızında 60 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 76

*12 m/s Rüzgâr hızında 60 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

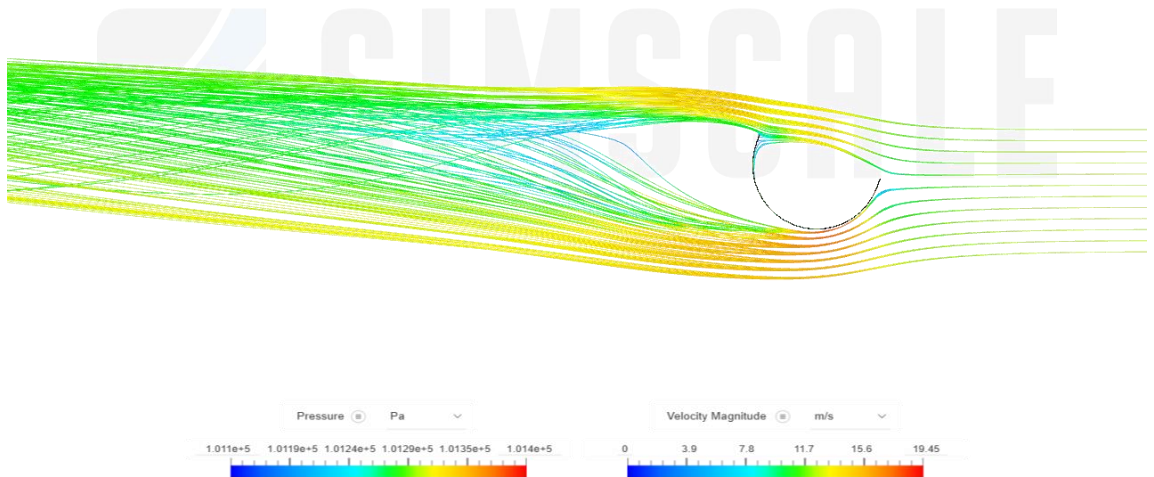


### 4.3.8. 70 derece rotor konumunda yapılan HAD analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 70 derecelik rotor açısında akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 77 ve Şekil 78'deki gibidir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 10.92 m/s'dir.

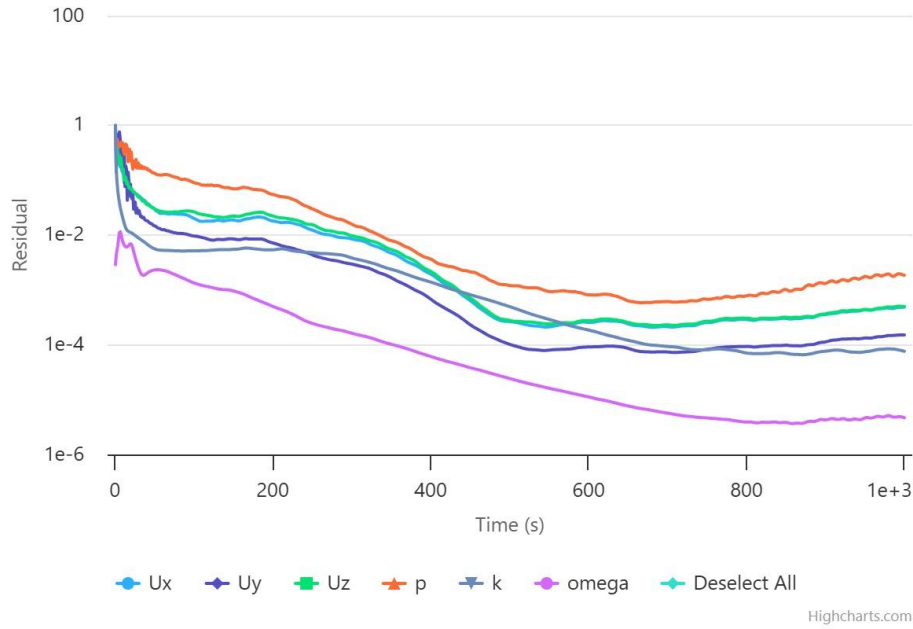
## Şekil 77

*12 m/s Rüzgâr Hızında 70 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 78

*12 m/s Rüzgâr hızında 70 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

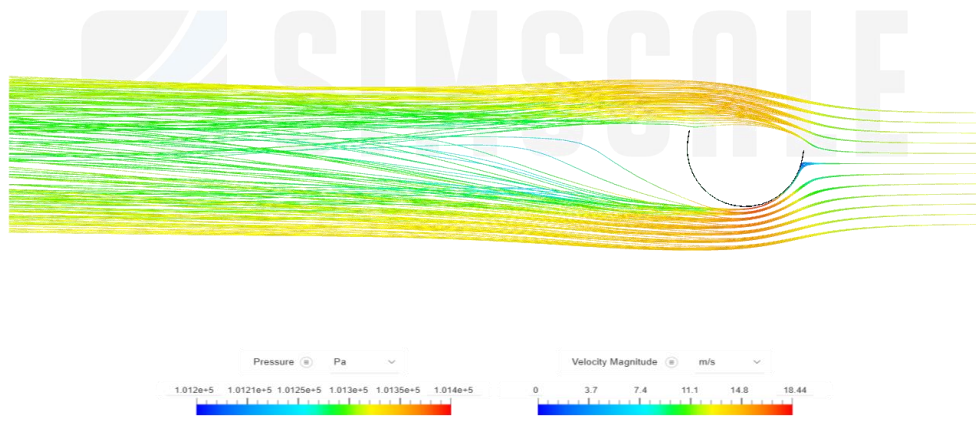


### 4.3.9.80 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 80 derecelik rotor açısında akış analizi koşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 79 ve Şekil 80'deki gibi elde edilmiştir. Sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 11.47 m/s' olup sonuçların yakınsadığı grafik aşağıdadır.

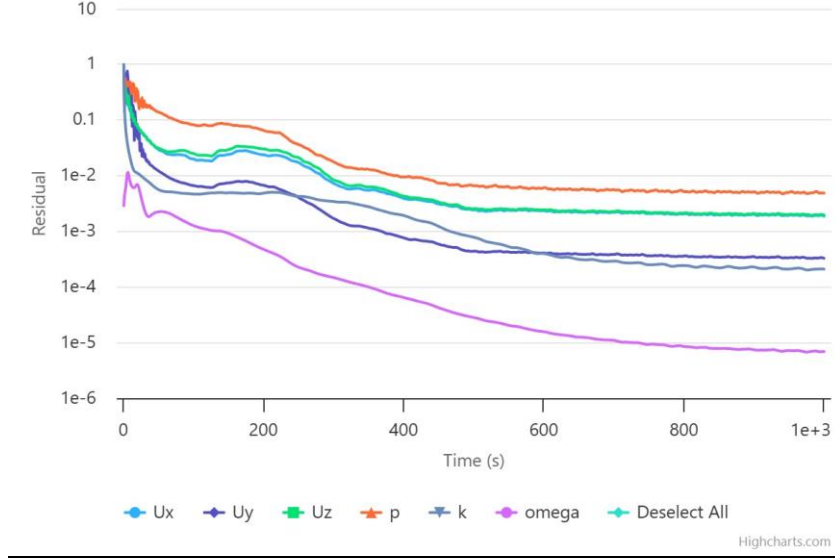
## Şekil 79

*12 m/s Rüzgâr Hızında 80 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 80

*12 m/s Rüzgâr hızında 80 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*

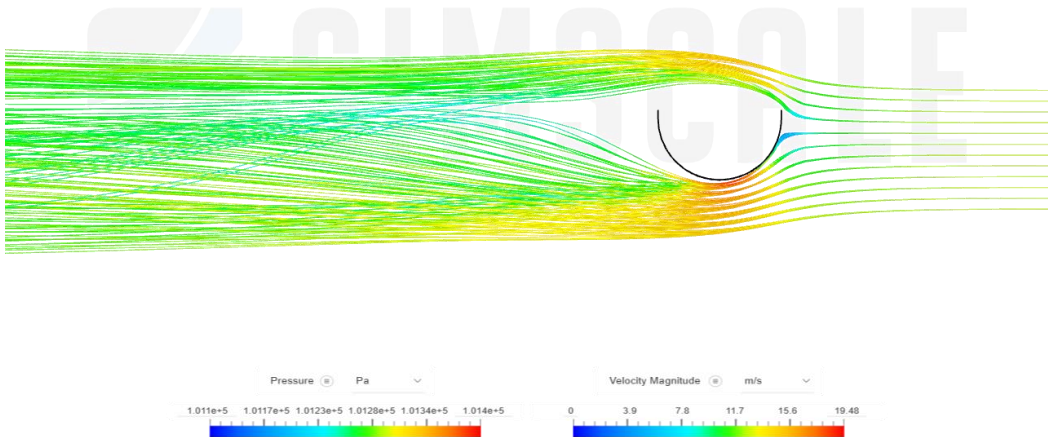


### 4.3.10. 90 Derece Rotor Konumunda Yapılan HAD Analizi

12 m/s giriş hızında ve rotorun 90 derecelik rotor açısında akış analizi koşturulmuştur. Şekil 81 ve Şekil 82'deki sonuçlara göre rotorunun çıkış hızı ortalama 11.7 m/s' olup sonuçların yakınsadığı grafik aşağıdadır.

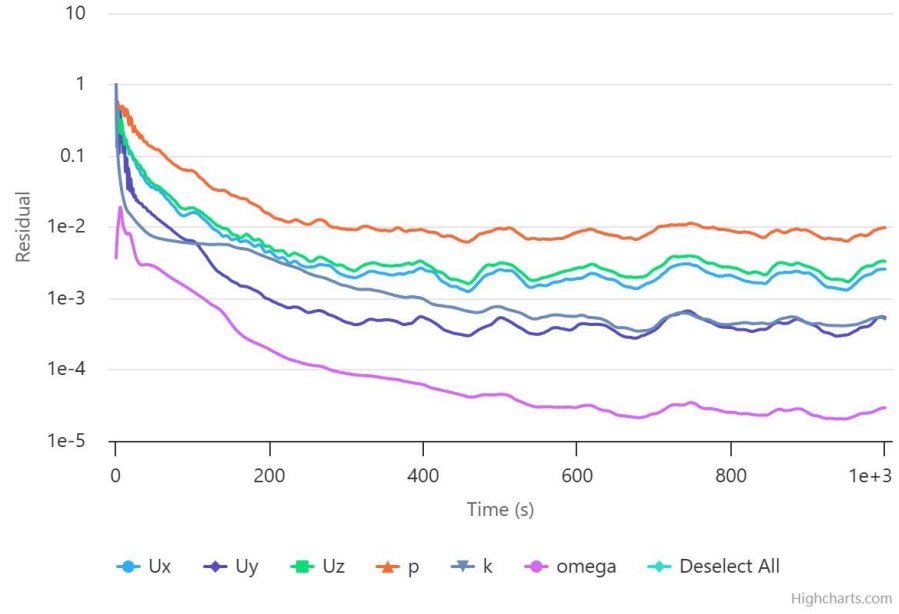
## Şekil 81

*12 m/s Rüzgâr Hızında 90 Derece Rotor Konumu HAD Analiz Sonucu*



## Şekil 82

*12 m/s Rüzgâr hızında 90 derecede HAD Analiz Sonucunun İterasyonlara Göre Yakınsaması*



## 5. Tartışma

Yapılan çalışma sonucunda bir dikey eksenli rüzgâr türbini tasarlanmış ve 3 boyutlu modeli üzerinde HAD analizi koşturulmuştur. Aynı zamanda tasarımı yapılan türbinin imalatı yapılmış ve test yapılabilecek bir sistem tasarlanmak üzere türbin sistemine uygun olacak şekilde ekipman seçimi yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan HAD analizi literatürde çok örneği olan dinamik analiz yerine alternatif ve özgün bir yöntem olarak kabul edilebilir. Bu çalışmada yapılan analiz

Türbin modelinin 0-90 derece arasında farklı açı konumları için ayrı ayrı koşturulmuş, hata oranını azaltmak ve daha doğru sonuca yaklaşmak için açı aralıkları 10 derece olarak belirlenmiştir. Böylece 0-90 derece arasında 10 derecelik açılarla toplam 10 adet simülasyon yapılmıştır. Ek olarak türbin performansını inceleyebilmek için aynı analiz yöntemini 8, 10 ve 12 m/s olmak üzere üç farklı rüzgâr hızı için uygulanmıştır. Böylece yapılan analizle birlikte dikey eksenli rüzgâr türbini performansını tartışabilmek için gerekli büyük bir veri kaynağı elde edilmiştir. Analiz sonuçları tablo 6'da özetlenmiştir.

Ek olarak bu çalışmanın özgünlüğü adına deneysel olarak test yapılabilmesi tasarlanan ve hazırlanan türbin test sistemi için de farklı bir yöntem kullanılmıştır. Bu doğrultuda özgün bir tasarım yapılmıştır. DC Motorun torkunu ölçen bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Kuvvet kolu olarak bir tij demir kullanılmış ve bu kol üzerinde Esit marka S tipi bir loadcell kullanılmıştır. Bu loadcell ile birlikte dc motorun tepki kuvveti ölçülmüş ve kolun mesafesine göre motorun tork değeri hesaplanmış ve gücü tespit edilmiş. Sonuç olarak bir tork sensörü mantığı ile ölçüm yapılmıştır.

Simülasyon sonuçlarına bakınca genel olarak türbin 0 derece konumundayken rüzgârı daha fazla keserek türbin arkasındaki hız önemli oranda düşmektedir. Beklenildiği gibi türbin 90 dereceye yaklaştıkça rüzgâr hızı giriş ve çıkışta birbirine çok yakın değerlerde olmaktadır.

Genel olarak dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin gerek geometrik yapısı olsun gerekse de kurulum ve uygulama açısından çok karmaşık olmayan yapıları vardır. Bu özelliklerine ek olarak, düşük rüzgâr hızlarında ve türbülans yoğunluğunun önemli olabileceği durumlarda bile çalışıyor olabilmesi ve maliyeti uygun olabilecek seviyelerde kurulabilmektedir. Bu yapıdaki türbinler havanın sürüklemeye kuvveti sayesinde çalışır. Im Heejon ve Kim Bumsuk tarafından yapılan bir çalışmada, yaşamın olduğu merkezlerde bile çok fazla rüzgâr hızı gerekmeden kullanılabilecek uygun bir rüzgâr türbini geliştirebilmek

amacıyla, Savonius rüzgâr türbini tasarımı incelenmiştir ve DERT'lerinin performansını etkileyen bazı en boy, örtüşme oranı ve farklı kanat tasarımları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi kullanılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda bir türbin rotoru tasarlanmış ve maksimum %18 oranında verim elde edilmiştir. Ayrıca, türbin performansını arttırmak amacıyla düzenlemeyi belirlemek için çeşitli türbin yerleşimlerine karşılık gelen akış değişiklikleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, türbinlerin maksimum verimliliğinin %17-%19 aralığında olduğunu ve önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Bu sonuçlara göre Tablo 4'teki simülasyon sonuçlarıyla benzer olduğu görülebilir. 8 m/s rüzgâr hızında yaklaşık %25 performans kat sayısına sahip olduğu durumda sonuçlar arasındaki fark önemsenmeyecek kadar azdır. Bu çalışmanın literatürden uzak olmadığını göstermektedir (Im ve Kim, 2022).

**Tablo 4**

*Analiz Sonuçları*

|                          | 8 m/s  | 10 m/s | 12 m/s |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| P_max (Watt)             | 154,11 | 301,00 | 520,13 |
| P_türbin (Watt)          | 39,63  | 65,15  | 107,86 |
| C_p (P_türbin/P_max) (%) | 25,72  | 21,64  | 20,73  |

Yapılan diğer bir HAD analizi çalışmasına göre geleneksel Savonius türbini ile derinlemesine bir karşılaştırma yapılarak, eş zamanlı olarak güç çıkış katsayısının 0,1 ve tork katsayısının 0,143 oranında arttırılmasına karşılık gelen optimizasyon işlemi ile optimum konfigürasyon elde edilmiştir. Ayrıca güç katsayısındaki göreceli artışın geleneksel Savonius türbinine göre %35,5 olduğu tahmin edilmektedir. Böylece literatürdeki HAD analizi çalışmalarına paralel olacak şekilde testler yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir (Mohamed vd., 2021).

Bir rüzgâr türbini maksimum 0.59 oranında rüzgardan faydalanabilmektedir. Bu oran Betz limit olarak geçer. Bu oranın üstünde performansa sahip bir türbin modeli yoktur. Özellikle dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin performans oranı maksimum %30 civarlarındadır. Böylece yapılan simülasyon sonuçlarının %30 performans kat sayısının altında olması sonuçların tutarlılığı ve doğruluğu açısından önemlidir (Atılğan vd., n.d.).

Genel olarak, dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin yapısı gereği 'S' şeklindeki rotorun iç bükey tarafı ile dış bükey tarafı arasında olan dirençten kaynaklı ve sistemsel kayıplardan

dolayı düşük rüzgâr hızlarında türbin düşük devirle dönebilmektedir. Türbin gücünün kanadın yüzey alanına da bağlı olmakla beraber rüzgâr hızının küpüyle orantılı bir şekilde artması sebebiyle 8 m/s, 10 m/s, ve 12 m/s olacak şekilde üç farklı rüzgâr hızında yapılması sistemin performansını değerlendirmek açısından daha tutarlıdır.

Sonuç olarak enerji ihtiyacının artmış olduğu bu zamanda birçok düşük güç gerektiren tarım ve kişisel kullanım alanlarında dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kolaylıkla uygulanabilecek bir sistem olduğu sonucuna varılmıştır (Im ve Kim, 2022).

## Kaynakça

- Ali, M. H. (2013). Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed. *International Journal of Modern Engineering Research*, 3(5), 2978-2986. ISSN: 2249-6645.
- Alom, N., & Saha, U. K. (2019). Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 186, 267-277. DOI:10.1016/j.enconman.2019.02.058.
- Atılğan, M., Altan, B. D., & Atılıhan, A. B. (tarih yok). Rüzgar Türbini Uygulamaları. Aralık 2024 tarihinde EMO: [https://www.emo.org.tr/ekler/6c86b75e0580378\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/6c86b75e0580378_ek.pdf) adresinden alındı.
- Dewan, A., Gautam, A., & Goyal, R. (2021). Anupam Dewan a,†, Adesh Gautam a, Rahul Goyal b. *Elsevier*.
- Dorel, S. F., Mihai, G. A., & Nicusor, D. (2021). Review of Specific Performance Parameters of Vertical Wind Turbine Rotors Based on the SAVONIUS Type. *MDPI*, 14, 1962. <https://doi.org/10.3390/en14071962> .
- Elibüyük, U., & Üçgül, I. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM e-DERGİ*, 2(3).
- Gül, G., & Kolip, A. (2018). Parça Kanatlı Savonius Rüzgâr Türbin Performansının İncelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(3), 816-827. <https://doi.org/10.31202/ecjse.425805>.
- Im, H., & Kim, B. (2022). Power Performance Analysis Based on Savonius Wind Turbine Blade Design and Layout Optimization through Rotor Wake Flow Analysis. *Energies*, 15(24), 9500. <https://doi.org/10.3390/en15249500>.
- Kamoji, M., Kedare, S., & Prabhu, S. (2009). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86(7-8), 1064-1073. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.019> .
- Mahmoud, N., El-Haroun, A., Wahba, E., & Nasef, M. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Elsevier*, 51(1), 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003> .
- Mohamed, G. M., Amer, A. M., Osman, N. H., Sedikc, M. Z., & Hussein, M. H. (2021). Effects of different gelling agents on the different stages of rice regeneration in two rice cultivars. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5738-5744.

- Nurbay, N., & Çınar, A. (2024). *Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması*. Kocaeli Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü. kocaeli: Elektrik Mühendisleri Odası.
- Özgener, O. (2002). Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 159-173.
- Physics Forums. (2024). Wind turbine power calculation equations. [https://www.physicsforums.com/threads/wind-turbine-power-calculation-equations.762157/#google\\_vignette](https://www.physicsforums.com/threads/wind-turbine-power-calculation-equations.762157/#google_vignette) adresinden alındı.
- Pudur, R., & Authors, S. G. (2015). Performance analysis of Savonius rotor on different aspect ratio for hydropower generation. *2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN)*. Itanagar, India: IEEE.
- Rus, T., Rus, L. F., Ilutiu-Varvara, D. A., Mare, R., Abrudan, A., & Domnita, F. (2018). Experimental Investigation on the Influence of Overlap Ratio on Savonius Turbines Performance. *International Journal of Renewable Energy Research-IJRED*, 8(3), 1791-1799. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i3.7764.g7480> .
- Saeed, H. A., Elmekawy, A. M., & Kassab, S. Z. (2019). Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 429-441. DOI:[10.1016/j.aej.2019.03.005](https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.03.005).
- Saha, U., Thotla, S., & Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8-9), 1359-1375. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.005> .
- Şenel, M. C., & Koç, E. (2014). Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dinamik davranışı teorik bir model. *Mühendislik Dergisi*, 5(1), 69-80.
- Ushiyama, I., & Nagai, H. (1988). Development of Optimum Design Configuration and Performance for Vertical Axis Wind Turbine. *Wind Engeeniring*, 12(1), 59-75.
- Wilberforce, T., & Alaswad, A. (2023). Performance analysis of a vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics. *Energy*, 263(PE). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125892> .