

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

**HAVA KANALLI RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMININ  
AERODİNAMİK VERİME ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Adem Akın DURAN**

**Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

**HAZİRAN 2024**



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVA KANALLI RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMININ  
AERODİNAMİK VERİME ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem Akın DURAN

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cemil YİĞİT

HAZİRAN 2024



Adem Akın DURAN tarafından hazırlanan ‘‘HAVA KANALLI RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMININ AERODİNAMİK VERİME ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ’’ adlı tez çalışması 26.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :**      **Doç. Dr. Ufuk DURMAZ**      .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :**      **Doç. Dr. Cemil YİĞİT** (Danışman)      .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :**      **Doç. Dr. Beytullah ERDOĞAN**      .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “HAVA KANALLI RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMININ AERODİNAMİK VERİME ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(26/06/2024).

Adem Akın DURAN





*Sarıyar Hasan Polatkan Hidroelektrik Santrali'ne..*



## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans tez çalışmamın sonuna gelmiş olmanın onur ve gururunu yaşıyorum. Bu vesileyle bana bu çalışmanın yürütülmesinde katkı sağlayan herkese teşekkür etmek isterim.

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Cemil YİĞİT'e, yoğun uğraşlarla üzerine çalıştığım deneylerde yardımını esirgemeyen başta Bahattin KABAY, Yağız SAĞIR ve Emre HİTİT olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma, beni yetiştiren aileme, öğretmenlerime ve bu çalışmada bana olan desteğini esirgemeyen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

Adem Akın DURAN



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER</b> .....	<b>xv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xxi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı .....	1
1.2. Tezin Kapsamı .....	1
1.3. Literatür Araştırması .....	1
<b>2. METODOLOJİ</b> .....	<b>7</b>
2.1. Teorik Rüzgar Gücü .....	7
2.2. Güç Katsayısı ve Betz Limiti .....	7
2.3. Kanat Uç Hızı Oranı ( $\lambda$ ) .....	9
2.4. Sabit Miknatıslı Senkron Jeneratör Devir Sayısı, Açısal Hız Ve Kanat Uç Hız Oranı İlişkisi .....	10
2.5. Yıldız – Üçgen Bağlı Sistemlerde Güç Hesabı .....	11
<b>3. DENEY DÜZENEGİ VE MODELLEME</b> .....	<b>15</b>
3.1. Rüzgar Türbin Kanatlarının Tasarımı .....	15
3.2. Güç Katsayısı Tayini İçin Deney Düzenegi .....	17
3.2.1. Jeneratöre ait yükün deneysel belirlenmesi .....	17
3.2.2. Formülizasyon ve parametreler .....	21
3.2.3. Deney uygulaması .....	24
3.2.4. Deneysel hata analizi .....	29
<b>4. OPTİMİZASYON</b> .....	<b>33</b>
4.1. Taguchi Teoremi .....	33
4.2. Taguchi Teoremini Uygulama Yöntemi .....	33
4.3. Hava Kanalı Sayısı ve Açısal Hız Optimizasyonu .....	34
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>39</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>41</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>43</b>



## **KISALTMALAR**

<b>SMSJ</b>	: Sabit mıknatıslı senkron jeneratör
<b>RMS</b>	: Root mean square
<b>TSR</b>	: Tip speed ratio
<b>RPM</b>	: Revenue per minute
<b>CAD</b>	: Computer-aided design
<b>3D</b>	: 3-dimensional
<b>S/N</b>	: Sinyal gürültü oranı
<b>DOF</b>	: Serbestlik derecesi





## SİMGELER

$C_p$	: Güç katsayısı
$U$	: Kinetik enerji [Joule]
$v$	: Hız [m/s]
$A$	: Rüzgar türbininin süpürme kesit alanı [m <sup>2</sup> ]
$P_w$	: Rüzgardan elde edilebilir toplam güç [Watt]
$\omega$	: Açısal hız [rad/s]
$\lambda$	: Kanat uç hız oranı
$F$	: Kuvvet [N]
$P_R$	: Rüzgar türbini rotoru gücü [Watt]
$\rho$	: Hava yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]
$v_d$	: Rotor düzlemindeki akım hızı [m/s]
$\Omega$	: Direnç [ohm]
$m$	: Kütle [kg]
$\omega_R$	: Türbin rotorunun açısal hızı [dev/s]
$R$	: Türbin rotorunun süpürdüğü alanın yarıçapı [m]
$n_s$	: Senkron devir sayısı [rpm]
$f$	: Frekans [Hz]
$p$	: Kutup çifti sayısı
$S$	: Görünür güç [VA]
$P$	: Aktif güç [Watt]
$Z$	: Empedans
$V$	: Elektrik potansiyeli [Volt]
$I$	: Elektrik akımı [Amper]
$\theta$	: Güç faktörü açısı
$W$	: Watt [Birim]
$\eta$	: Verim
$T$	: Parametre ortalamaları
$P_{x,y}$	: Parametre seviye ortalaması
$W_R$	: Toplam hata hesabı



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1.</b> Hava Kanalı Bulunmayan Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (330 $\Omega$ ..	18
<b>Tablo 3.2.</b> Hava Kanalı Bulunmayan Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (4700 $\Omega$ )	19
<b>Tablo 3.3.</b> Hava Kanalı Bulunmayan Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (Boşta)..	19
<b>Tablo 3.4.</b> 10 Hava Kanallı Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (Boşta).....	20
<b>Tablo 3.5.</b> 10 Hava Kanallı Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (330 $\Omega$ ) .....	20
<b>Tablo 3.6.</b> 10 Hava Kanallı Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (4700 $\Omega$ ) .....	21
<b>Tablo 3.7.</b> SMSJ'ye ait nominal çalışma etiket değerleri.....	22
<b>Tablo 3.8.</b> Rüzgar kaynağına ait nominal çalışma değerleri .....	24
<b>Tablo 3.9.</b> Kanat Tasarımları İçin Açısal Hız-Güç Katsayısı Değerleri.....	25
<b>Tablo 3.10.</b> Hava kanalı sayısına göre en büyük $CP_{maks} - \omega$ değerleri.....	27
<b>Tablo 3.11.</b> Oluşturulan eğilim çizgilerine göre $CP_{maks} - \omega$ değerleri.....	29
<b>Tablo 4.1.</b> L16 Ortogonal Dizi Tablosu .....	35



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Rüzgar Enerjisine Dayalı Kurulu Güç (MW) [1]. .....	2
Şekil 1.2. Rüzgar Enerjisinin Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranı [1] .....	3
Şekil 2.1. Rüzgar türbinine ait rotorun önünde ve arkasında rüzgar hızının değişimi [8] .....	8
Şekil 2.2. $C_p - \lambda$ grafiği .....	10
Şekil 2.3. Jeneratör çıkışı, hat ve yük devre şeması.....	12
Şekil 3.1. Rüzgar türbin rotorunun önden görünüşü.....	15
Şekil 3.2. Hava kanalı bulunmayan rotor kanadı.....	16
Şekil 3.3. 5 hava kanalı bulunan rotor kanadı.....	16
Şekil 3.4. 10 hava kanalı bulunan rotor kanadı.....	17
Şekil 3.5. 15 hava kanalı bulunan rotor kanadı.....	17
Şekil 3.6. SMSJ'e ait rotor ve stator görüntüsü .....	22
Şekil 3.7. Rüzgar türbinine akuple SMSJ görseli .....	23
Şekil 3.8. SMSJ çıkış yükleri ve ölçüm noktaları .....	24
Şekil 3.9. Hava Kanalı Bulunmayan Türbin Rotor Kanadına Ait $C_p - \omega$ grafiği .....	26
Şekil 3.10. 5 Hava Kanallı Türbin Rotor Kanadına Ait $C_p - \omega$ grafiği .....	26
Şekil 3.11. 10 Hava Kanallı Türbin Rotor Kanadına Ait $C_p - \omega$ grafiği .....	26
Şekil 3.12. 15 Hava Kanallı Türbin Rotor Kanadına Ait $C_p - \omega$ grafiği .....	27
Şekil 3.13. Hava Kanalı Sayısına Göre $CP_{maks}$ Değerleri Eğilim Çizgisi.....	28
Şekil 3.14. Kanat Tasarımlarının En Verimli Çalıştığı Açısal Hız Değerleri Eğilim Çizgisi .....	28



# HAVA KANALLI RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT TASARIMININ AERODİNAMİK VERİME ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

## ÖZET

Rüzgar enerjisi, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak dünya genelinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu enerji kaynağını elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla kullanılan rüzgar türbinlerinin verimliliği, özellikle kanatların aerodinamik performansına bağlıdır. Kanatlar üzerindeki basınç ve viskoz kuvvetler, türbinin rotorunda üretilen torku doğrudan etkiler. Bu çalışmada, kanatlara açılan hava kanallarının viskoz kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmekte olup ve optimum performans için ideal hava kanalı sayısını belirlenmiştir.

Çalışmada öncelikle hava kanalı bulunmayan bir kanat tasarlanmış, ardından 5, 10 ve 15 hava kanallı kanatlar deneysel olarak incelenmiştir. Her kanat geometrisi için elde edilen verilerle güç katsayıları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Aynı jeneratör üzerinde ve aynı yataklama sistemi kullanılarak farklı hava kanalı sayılarına sahip kanatlar çalıştırılmıştır.

Güç katsayısı belirlenirken, kanata etki eden rüzgar hızı, jeneratör çıkış gerilimi ve çıkış akımı gibi parametreler ölçülmüştür. Rüzgar hızı ölçümü için kanat önüne anemometre yerleştirilmiş ve jeneratör çıkışındaki gerilim ve akım parametreleri deney düzeneğiyle ölçülmüştür. Her kanat için güç katsayıları, farklı açısal hızlarda incelenmiş ve bu verilere göre analiz edilmiştir. Türbin kanatına ait açısal hızın belirlenmesi için jeneratör çıkış frekansı ölçülerek senkron makinelere ait senkron hız eşitliği kullanılmıştır. Rüzgar kaynağının çalışma frekansı bir sürücü yardımıyla değiştirilerek kanat üzerinde farklı rüzgar hızları elde edilmiş ve türbin kanatının farklı açısal hızlarda dönmesi sağlanmıştır.

Taguchi metodolojisi kullanılarak, hava kanalı sayısı ve kanat açısal hızı kontrol edilebilir değişkenler olarak seçilmiş ve optimum kanat tasarımı belirlenmiştir. Açılan hava kanallarıyla beraber kısmi basınç kuvveti kaybı yaşansa da, ekstra viskoz kuvvetlerle kanat performansı artırılmıştır. Hava kanalsız kanat ile kıyaslandığında daha düşük açısal hızlarda yaklaşık %1'lik bir performans artışı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, aerodinamik optimizasyon ve viskoz kuvvetlerin etkili kullanımıyla tasarlanan hava kanallı kanatlar, rüzgar enerjisi türbinlerinin verimliliğini artırmak için önemli bir potansiyele sahiptir. Gelecekteki çalışmalar, farklı hava kanalı düzenlemelerinin ve aerodinamik iyileştirmelerin daha da verimliliği artırıp artıramayacağını incelemeye odaklanabilir.

Bu metin, rüzgar enerjisi teknolojilerindeki mühendislik çalışmalarının önemini vurgulayarak, yenilenebilir enerjiye yönelik sürdürülebilir çözümler arayan araştırmacılar ve endüstri uzmanları için bir kaynak sağlamaktadır.





## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AIR DUCTED WIND TURBINE DESIGN ON AERODINAMIC EFFICIENCY**

### **SUMMARY**

Electricity generation from wind energy has become increasingly popular in our country and around the world in recent years. This intense interest in wind energy has led to an increase in studies on wind turbine performances.

The aerodynamic performance of the wing is extremely effective on the power produced by wind turbines used to obtain electrical energy from wind energy. Pressure and viscous forces on the blade have a direct effect on the torque produced in the rotor. In this study, the effect of changing viscous forces on the wing performance was investigated, although there was a decrease in the pressure force acting on the wing by opening an air channel on the wing. As a result of experimental observations, the optimum number of air ducts that can operate at optimum angular speed was examined. In determining the optimum wing design, the largest power coefficient value ( $C_p$ ) of the wings was taken into account.

Within the scope of this thesis, an experimental setup was created to examine the performance of wings without air ducts, with 5 air ducts, with 10 air ducts and with 15 air ducts. The wings, which differ only in the number of air channels, are coupled to the synchronous generator via the same bearing device, and the same load is connected to the generator output for each wing design. The load connected to the synchronous generator output was chosen to allow the wide operating speed range of the generator.

During the experiment phase, electrical outputs read from the generator were used to determine the power coefficient ( $C_p$ ) and angular velocity values of the wind turbines. Since the power coefficient value is the ratio of the power obtained in the turbine rotor to the power that can be obtained from the wind, the wind speed to which the blade was exposed was measured by placing an anemometer in front of the blades to determine the wind power. Thus, since the area swept by the wing was known, the wind power acting on the wing was found by using the cube of the wind speed. While calculating the power in the turbine rotor, generator internal impedances and line impedances were neglected and the power drawn from the delta connected load was taken as reference. Neglecting friction and wind losses, core losses, copper losses and other losses, the mechanical power of the generator rotor is considered equal to the electrical power measured on the load. For the electrical power measured on the load, measurement was made on one phase since the system works with a balanced and three-phase load. The generator output voltage was measured with the help of a voltmeter connected in parallel to the load, and the output current was measured with the help of an ammeter connected in series with the load. Generator output power was found using the measured parameters. The measuring instruments used are those that measure RMS quantities.

While determining the speed of the rotor blades, the synchronous speed formula used in synchronous generators was used. The synchronous speed formula gives

information that the output frequency changes according to the rotor speed in generators with a known number of pole pairs. When the synchronous speed formula is rearranged, the speed information in rpm of the generators whose frequency is measured can be obtained. Since it is known that the synchronous generator used in this experimental study has 6 pole pairs, the turbine rotor speed was determined using the frequency value measured at the generator output. The determined data were converted into cycles per second and used in the study.

When the experimental data were examined, it was seen that the wing with 5 air ducts reached lower speeds at the same wind speed compared to the wing without air ducts. In addition, the maximum power coefficient it produces is lower than the wing without air ducts. The largest power coefficient produced for the wing with 10 air ducts is almost the same as the largest power coefficient of the wing without air ducts. It has been observed that the wing with 15 air channels has a largest power coefficient slightly higher.

Using the data obtained, power coefficient graphs corresponding to the number of revolutions were created for each wing. When the graphs are examined, it is seen that a different polynomial trend line is formed for each wing. This has shown that while the power coefficient value of the air ducts opened in the wings changes, it also causes changes in the working regions of the wings. Taking the largest power coefficient value of the wing without air ducts as a reference, a polynomial trend line was created for the points where the wings with air ducts gave the largest power coefficient. Based on the trend line, a prediction can also be made for a wing design with 20 air ducts. It was estimated that the power coefficient for the wing with 20 air ducts would produce a lower power coefficient than the design with 15 air ducts. Using the trendline equation, it was found that the peak value of the trendline would result in the largest power coefficient for the 13 air duct design.

Since this thesis is the product of an experimental study, the availability of measurement instruments used to obtain data in the experiments made error analysis necessary. By determining the criteria used when determining the experimental data, an attempt was made to reach conclusions about the degrees and amounts of errors. The error values of the measured quantities were calculated theoretically, assuming that there was no error during the manufacturing of the measuring instruments used in the experiment, and using the error values promised by the manufacturer companies and experimental experiences. As a result, there is an uncertainty of 4.3% for the power coefficient ( $C_p$ ) values obtained as a result of the measured experimental parameters.

It was decided to use the Taguchi method to find the most optimum solution for turbines with blade designs. For the designed turbine blades, blade design and blade angular speed that may affect the electrical power obtained from wind energy are discussed. The number of air channels on the rotor blade and the rotor angular speed were selected as controllable factors. The controllable variable was intended to be optimized with relatively less experimental work using the Taguchi method.

The optimization phase was started by using the test data obtained from the experimental setup. Two-parameter four-level Taguchi method was used for optimization. The first parameter was the number of air ducts designed before the experiment, while the second parameter was determined as the angular speed values of the wind turbine.

In this study, the effect of the number of air ducts and angular velocity on wind turbine blades on blade performance was determined using the Taguchi method. According to

the Taguchi method, it has been determined that the wing with 15 air ducts has the most efficient operating state when operating at a speed of 6 rps. The operating conditions and wing design obtained as a result of optimization can operate with 15.13% efficiency in the system.

Air ducts opened in the wing cause a decrease in the air pressure acting on the wing. It also changes the viscous forces acting on the wing. According to the measurement values, the wing with 5 air channels gives the largest power coefficient ( $C_p$ ) value of 0.1336 at an angular speed of approximately 6.6 rps. The wing with 10 air channels gives the largest power coefficient ( $C_p$ ) value of 0.1502 at an angular speed of approximately 6.3 rps. The wing with 15 air channels gives the largest power coefficient ( $C_p$ ) value of 0.1508 at an angular speed of approximately 6.2 rps. The largest power coefficient for the wing without air ducts is approximately 0.1498 at 6.8 rps.

When the results are examined, it is seen that the air ducts opened in the wings change the working regions of the wings. It is seen that the air ducts opened in the wings first reduce the power coefficient value, and then, as the number of air ducts increases, the power coefficient increases. It has been observed that the increase in the number of air ducts in the designed wings brings the region where the wings have the largest power coefficient to lower speeds.

As a result of the optimization, it was determined that the design with 15 air ducts had a performance increase of approximately 1% at 6 rps compared to the design without air ducts. For the area swept by the wing used in this study, there is approximately 142 W energy in the wind beam with a speed of 8 m/s. This 1% increase in the power coefficient provides an additional 1.42 W energy gain in the generator rotor. In addition, the fact that the 15 air duct design gives the highest power coefficient value at lower speeds compared to other blades can prevent problems caused by noise and vibrations in terms of working conditions.



## **1. GİRİŞ**

### **1.1. Tezin Amacı**

Tezin amacı, kanat tasarımında farklı hava kanalı sayısı bulunan rüzgar türbinlerinin güç katsayısı üzerindeki etkisini araştırmak ve optimum çalışma koşullarında, optimum hava kanalı sayısını belirlemektir.

### **1.2. Tezin Kapsamı**

Bu tez kapsamında rüzgar türbinine akuple edilmiş kalıcı mıknatıslı senkron jeneratör çıkışındaki gerilim, akım ve frekans parametreleri uygun ölçü aletleriyle tespit edilecektir. Böylece türbin rotorundaki güç değeri ve türbinin açısız hızı tespit edilecektir. Bunun yanında türbinin maruz kaldığı rüzgar hızı sıcak telli anemometre ile ölçülecektir. Böylece rüzgardan elde edilebilecek güç değeri bulunacaktır. Türbin rotoru gücünün, rüzgar gücüne oranı olan güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri bulunan sonuçlarla saptanacaktır. Her bir farklı hava kanalı sayısı bulunan kanat için rotorun açısız hızına göre  $C_p$  değerleri elde edilecektir. Elde edilen test verilerinin birbiriyle ilişkileri incelenecek ve sonuç olarak elde edilen  $C_p$  verileri değerlendirilip, hava kanalı sayısı ve açısız hız değerleri kontrol edilebilen değişken seçilerek Taguchi metoduyla optimizasyon gerçekleştirilecektir. Optimal çalışma koşullarında optimal hava kanallı rüzgar türbini tasarımının belirlenmesi hedeflenmektedir.

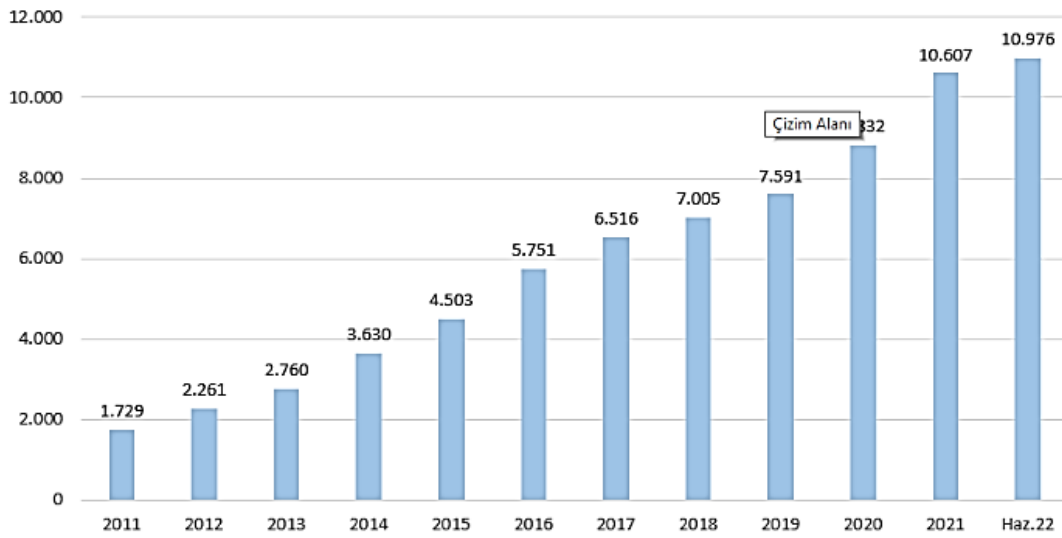
### **1.3. Literatür Araştırması**

Dünyada son yıllarda artan enerji talebi nedeniyle kullanılabilir enerji kaynaklarının alternatif kaynaklar eklenerek çeşitlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında yüksek karbon salınımı meydana getiren petrol, kömür gibi yakıtlar kullanılarak üretilen enerjiye alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları düşünülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en popüler kullanımları su, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle potansiyelleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

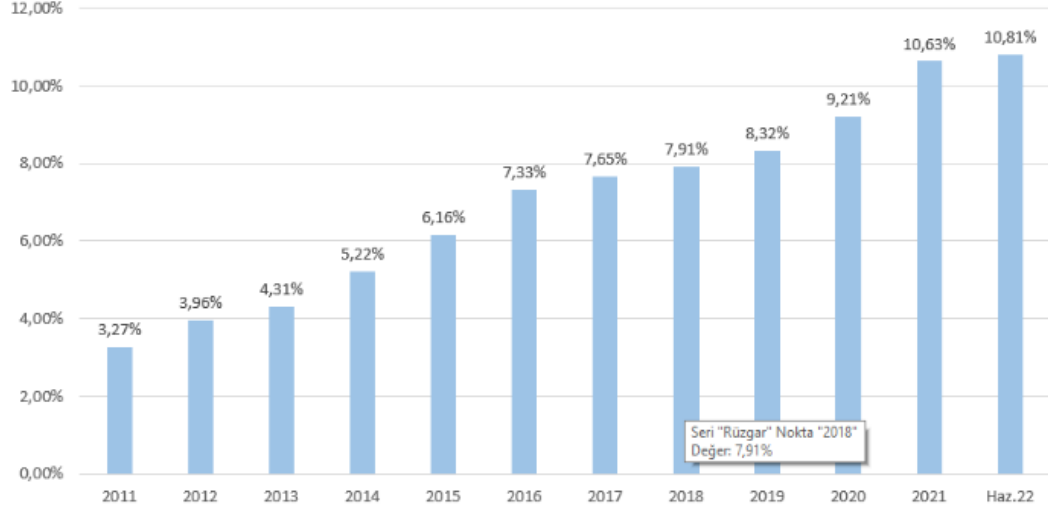
Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgarın özellikleri, yerel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün homojen olmayan ısınmasına bağlı olarak, zamansal ve yöresel değişiklik

gösterir. Rüzgar hız ve yön olmak üzere iki parametre ile ifade edilir. Rüzgar hızı yükseklikle artar ve teorik gücü de hızının küpü ile orantılı olarak değişir. Rüzgar enerjisi kaynaklı elektrik üretim uygulamalarının ilk yatırım maliyetinin yüksek, kapasite faktörlerinin düşük oluşu ve değişken enerji üretimi gibi dezavantajları yanında avantajları da mevcuttur. Bunlar; yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olması, tükenme riskinin olmaması, maliyetinin günümüz güç santralleriyle rekabet edecek düzeye gelmesi, bakım ve işletme maliyetlerinin düşük olması, işletmeye alınmasının kısa sürede gerçekleşmesi olarak sayılabilir[1].

Türkiye’de ve dünyada rüzgar enerji santrallerinin sayısı artmakta ve rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin toplam kurulu güce oranı son yıllarda hızla yükselmektedir. (Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.)



**Şekil 1.1.** Rüzgar Enerjisine Dayalı Kurulu Güç (MW) [1].



**Şekil 1.2.** Rüzgar Enerjisinin Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranı [1]

Rüzgar türbinleri, rüzgar enerji santrallerinin ana yapı elemanı olup hareket halindeki havanın kinetik enerjisini öncelikle mekanik enerjiye ve sonrasında elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir[1].

Rüzgar türbinleri genel olarak rotor ekseninin konumuna göre, rüzgara maruz kaldığı yöne göre ve çalışma hızlarına göre isimlendirilirler. Bu tez kapsamında yatay eksenli üç kanatlı, rüzgarı önden alan rüzgar türbini kanat optimizasyonu yapılacaktır. Literatürde yatay eksenli rüzgar türbinlerinin geliştirilmesi adına yüksek rüzgar gücü elde edilmesi için türbin ekipmanları üzerinde çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Abbasi ve ark., STAR-CCM+ yazılımını kullanarak hesapladıkları farklı rüzgar türbini kanat modellerinin güç ve itme katsayılarını araştırmışlardır. Bu araştırmada bükülme açıları, kanat sayıları ve kesit profilleri değişen 9 farklı türbin modeli tanımlanmıştır. Tanımlanan üç kanatlı ilk model referans alınarak diğer modeller türetilmiştir. Öncelikle ilk model ile aynı bükülme açısına ve kesit profiline sahip iki kanatlı ve dört kanatlı model türetilmiştir. İki kanatlı model yüksek kanat uç hız oranlarında (TSR'lerde) diğer modellere göre daha iyi performansa sahip, dört kanatlı modelin ise düşük TSR'lerde daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Bu durum kanat sayısının artırılmasının düşük TSR değerlerinde daha iyi performans vereceği sonucuna ulaştırmıştır. Sonrasında ilk modele göre bükülme açısı %20 azaltılmış dördüncü model ve yine ilk modele göre bükülme açısı %20 artırılmış beşinci model incelenmiştir. Türetilen iki modelinde ilk modele göre verimliliğinin büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Son olarak ilk model ile aynı kanat sayısı ve

bükülme açısında farklı kesit profilleri denenmiştir. NACA2418 kesit profil performansının en iyi olduğu görülürken, NACA4455 kesit profil performansının ise diğer modeller arasında en zayıf performansı gösterdiği görülmüştür[2].

Chi-Jeng Bai ve ark., yatay eksenli rüzgar türbini güç katsayısına sinüzoidal hücum kenarının etkisini rüzgar tüneli deneyleri ile araştırmışlardır. Temel olarak belirlenen kanadı bükülmemiş ve konikleşmemiş rüzgar türbininden türetilen dört model, farklı rüzgar hızlarında rüzgar tüneli deneylerine tabi tutulmuştur. Türetilen modeller hücum kenarı sinüzoidal çıkıntılı olarak farklı dalga boyu ve genlik özelliklerine sahiptir. Sonuç olarak hücum kenarı sinüzoidal çıkıntılı olarak değiştirilmiş kanada ait güç katsayısının, özellikle kanat yüksek hücum açısında çalıştığında kesinlikle arttığı sonucuna varılmıştır. Hücum kenarındaki sinüzoidal şekli kısa dalga boyuna sahip kanatlar yüksek kanat uç hız oranlarında (TSR'lerde) iyi performansa sahipken, sinüzoidal şekli uzun dalga boylu kanatlar düşük TSR'lerde daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca sinüzoidal şeklin genliği büyük ve dalga boyu uzun haline sahip olan kanatların nispeten yüksek rüzgar hızlarında çalışmaya uygun olduğu anlaşılmıştır[3].

Yoones Noorollahi ve ark., yaptıkları çalışmada difüzör kanalı kullanımının rüzgar türbini için güç çıkışının yükselmesine ve bununla büyük ölçüde kanalın şekline bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Difüzör kanalı kullanılarak elde edilen güç katsayısı yaklaşık olarak %70'lik bir artışa işaret etmektedir. Bu çalışmada farklı difüzör kanalı boyutları değerlendirilerek optimum kanalın boyutlandırılması yapılmıştır[4].

Bilgili, M., yaptığı çalışmada rotor çapı 1 m olan küçük bir rüzgar türbini seçilmiş, daha sonra bu rüzgar türbini akış hızlandırıcılı olarak modellenerek performans değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara ve seçilen aerodinamik karakteristiklere göre, serbest akış rüzgar hızı 10 m/s iken akış hızlandırıcılı türbininden elde edilen güç değerinin, açık akıştaki türbin üzerinden elde edilen güç değerinden daha yüksek olduğu hesaplanmıştır [5].

Hongfu Zhang ve ark., bu çalışmada iki, üç, dört ve beş kanatlı rüzgar türbini rotorunun aerodinamik performansını ve LES simülasyonu kullanılarak kanat türbülanslarını araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda TSR değerinin artmasıyla rotorların güç katsayısının önce arttığı sonra azaldığı görülmüştür. Dört rotor arasında üç kanatlı rotorun maksimum güç katsayısının en yüksek olduğu saptanmıştır. İki, üç, dört ve beş kanatlı rotorların güç katsayıları maksimum değerlere ulaştığında karşılık gelen



TSR'ler sırasıyla 3.7, 3.0, 2,8 ve 2,5 olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, rotor kanat sayısı arttıkça maksimum güç katsayısına karşılık gelen TSR'nin küçüldüğünü göstermektedir. Ayrıca aynı TSR altında rüzgar türbininin sağlamlığının artması nedeniyle kanat sayısı arttıkça itme katsayısının da arttığı anlaşılmıştır[6].



## 2. METODOLOJİ

### 2.1. Teorik Rüzgar Gücü

Teorik rüzgar gücü hesabı yapılırken kütlesi  $m$ , akış hızı  $v$  olan rüzgar paketinin kinetik enerji eşitliğinden hareket edilir.

$$U = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (\rho A x) v^2 \quad (2.1)$$

olarak verilebilmektedir. Burada  $A$  rüzgar türbininin süpürme kesit alanı,  $\rho$  hava yoğunluğu,  $x$  rüzgar paketinin kalınlığıdır. Elde edilebilir toplam güç için kinetik enerji denkleminin zamana göre türevi alınır;

$$P_W = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.2)$$

bulunur[7].

### 2.2. Güç Katsayısı ve Betz Limiti

Rüzgar türbin rotoru gücünün, rüzgardan elde edebileceği güce oranına güç katsayısı ( $C_p$ ) denir.

$$C_p = \frac{P_R}{P_W} \quad (2.3)$$

formülü ile ifade edilir. Buradan hareketle;

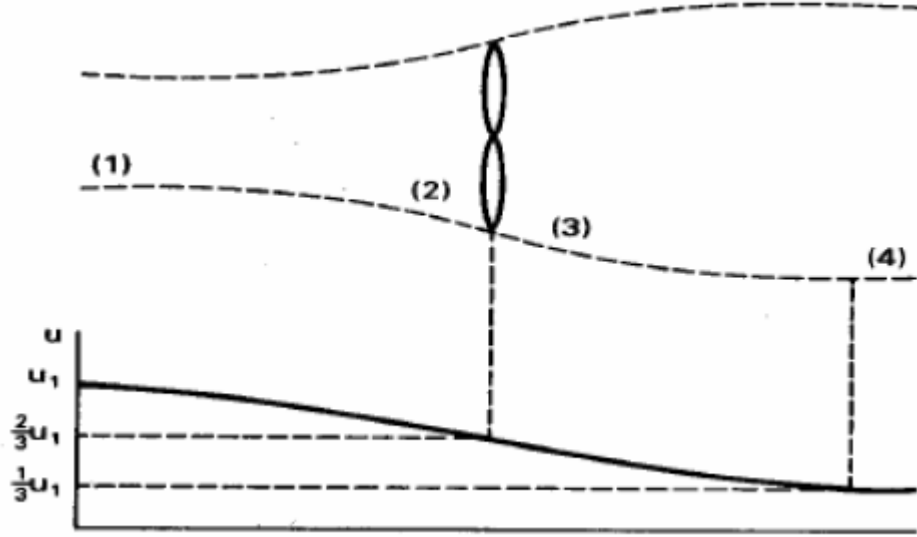
$$P_R = C_p \cdot P_W = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4)$$

olarak hesaplanır. Burada  $A$ , rüzgar türbin kanatlarının süpürdüğü alandır. O halde,

$$P_R = C_p \cdot P_W = C_p \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \quad (2.5)$$

olarak formül güncellenir.

İdeal şartlarda rüzgar türbinine etki eden rüzgar profili Şekil 2.1.'deki gibidir.



**Şekil 2.1.** Rüzgar türbinine ait rotorun önünde ve arkasında rüzgar hızının değişimi [8]  
Newton'un ikinci yasası cisme etki kuvvetin kütlesi ve ivmesinin, çıktısına eşit olduğu söylemektedir.

$$F = m \cdot v_1 - m \cdot v_2 = m \cdot (v_1 - v_2) \text{ [N]} \quad (2.6)$$

olup rotor üzerinde birim zamanda yapılan iş ( $N_r$ ):

$$P_R = F \cdot V_d = m \cdot (v_1 - v_2) \cdot v_d \text{ [Watt]} \quad (2.7)$$

Burada  $m$ , rüzgar türbinin rotorlu durumdaki kütleli debisi;  $v_d$  ise rotor kanadı üzerindeki akım hızıdır.

$$m = \rho \cdot A \cdot v_d \text{ [kg/s]} \quad (2.8)$$

Rotor üzerinde birim zamanda yapılan iş, rotor üzerindeki birim zamandaki kinetik enerji değişimine eşit olduğundan;

$$m \cdot (v_1 - v_2) \cdot v_d = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.9)$$

Rotor üzerinde birim zamanda yapılan iş, rotor üzerindeki birim zamandaki kinetik enerji değişimine eşit olduğundan;

$$m \cdot (v_1 - v_2) \cdot v_d = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.10)$$

Buradan anlaşıldığı üzere rotor düzlemindeki akım hızı rotora yaklaşan ve uzaklaşan rüzgar hızlarının ortalamasıdır.

$$v_d = (v_1 + v_2)/2 \text{ [m/s]} \quad (2.11)$$

Denklem 2.7’de verilen ifadeye 2.8 ve 2.11 denklemleri yazılırsa 2.12 eşitliği elde edilir.

$$P_R = \rho \cdot A/4 \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.12)$$

Maksimum rotor gücü ifadesi için, buradaki ifadenin  $v_2$  hızına göre türevi alınır;

$$\frac{dP_R}{dv_2} = (\rho \cdot A/4) \cdot (v_1^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3 \cdot v_2) = 0 \quad (2.13)$$

Burada  $v_1^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 - 3 \cdot v_2$  ifadesi  $v_2$ ’ye göre ikinci dereceden bir denklemdir, bu denklemin kökleri;  $(v_1 - 3 \cdot v_2) \cdot (v_1 + v_2) = 0$  olup, gerçek kökü  $v_2 = v_1 / 3$  olarak bulunur.

$$P_{Rmaks} = (\rho \cdot A/4) \cdot (v_1 + \frac{v_1}{3}) \cdot (v_1^2 - (\frac{v_1}{3})^2) \quad (2.14)$$

olarak bulunur.

$$C_{Pmaks} = \frac{P_{Rmaks}}{P} = (\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3) / (\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3) = 0,593 \quad (2.15)$$

Denklem 2.15’de bulunan eşitlikten anlaşılacağı üzere ideal koşullarda rüzgar türbin rotoru, rüzgar enerjisinin maksimum % 59,3’lük miktarını kullanılabilir hale getirebilmektedir. Bu sınır değere Betz Limiti denilmektedir. Pratikte bu değer daha düşük katsayılarla karşımıza çıkmaktadır[8].

### 2.3. Kanat Uç Hızı Oranı ( $\lambda$ )

Kanat uç hızı oranı, rüzgarın hızına ve pervanenin açısal hızıyla beraber yarıçapına bağlıdır.

$$\lambda = \frac{\omega_R \cdot R}{v} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16’da ifade edilen  $\lambda$ ; kanat uç hız oranını,  $\omega_R$ ; türbin rotorunun açısal hızını, R; türbin rotorunun süpürdüğü alanın yarıçapını,  $v$ ; türbin rotoruna etki eden rüzgar hızını ifade etmektedir. Kanat uç hızı oranı, iki hızın birbirine göre oranı olduğundan birimsizdir.

Sabit bir rüzgar hızı için biri çok büyük biri çok küçük iki farklı hız oranında bir rüzgar türbininin çalıştığı düşünüldüğünde nispeten küçük hız oranlarında türbin rotoru yavaş

dönecek ve rüzgar gücünün büyük bir kısmı rotor kanatları arasından serbest geçiş yapacaktır. Bu durumda rüzgar gücünün, türbin rotoruna aktarımına nispeten daha az olacaktır. Yüksek kanat uç hızı oranlarında, türbin rotoru nispeten daha hızlı dönecek ve rotor kanatları pervane alanından geçen rüzgara engel teşkil edeceğinden hava akımı kütlesi azalacaktır. Bu durumda da rüzgar gücünün, türbin rotoruna aktarımına nispeten daha az olacaktır. Buradan hareketle her bir rüzgar türbini için optimum kanat uç hızı oranı olduğu ortaya çıkmaktadır[9].

Rüzgar türbinlerinin aerodinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde güç katsayısının kanat uç hızına göre grafikleri üzerinden yorum yapılabilir. Şekil 2.2’de örnek bir  $C_p - \lambda$  grafiği görülmektedir.



Şekil 2.2.  $C_p - \lambda$  grafiği

#### 2.4. Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör Devir Sayısı, Açısız Hız Ve Kanat Uç Hız Oranı İlişkisi

Dünyada elektrik üretiminin neredeyse tamamı üç fazlı jeneratörler ile sağlanmaktadır. Genellikle acil durumlarda kullanılmak üzere motorla çalıştırılan tek fazlı jeneratörler 50 kW'a kadar olan küçük boyutlarda kullanılırlar. Tek fazlı jeneratörler rüzgar türbinleri için yalnızca güç gereksinimlerinin küçük olduğu ve şebeke hizmetinin yalnızca tek fazlı olduğu durumlarda kullanılmaya uygundur. Sonuç olarak rüzgar türbini üç fazlı bir iletim veya dağıtım hattına paralel olarak bağlı olduğunda genel olarak üç fazlı jeneratörler kullanılır. Üç fazlı makineler, aynı güç derecesine sahip tek fazlı makinelerden daha küçük, daha ucuz ve daha verimli olma eğilimindedir; bu durum onların mümkün olan her yerde kullanılmasını açıklamaktadır[10].

Üç fazlı senkron makinenin kutup tekerleğindeki uyarma bobinleri doğru akım ile beslenir ve bu doğru akım bobinlerinin meydana getireceği magnetik alan, senkron jeneratörün ( $n_s$ ) senkron devir sayısı ile tahrik edilmesi sonucunda endüvi çevresinde bu senkron hız ile döner[11]. Bu uyarma bobinleri yerine sabit mıknatıslarda kullanılabilir. Uyarma bobinlerinde sabit mıknatıs kullanılan senkron jeneratörler “Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör” olarak isimlendirilir. Bu tez çalışmasında kullanılan generatör Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör’dür ve kısaltma olarak “SMSJ” olarak bahsedilecektir.

Dışardan tahrik suretiyle döndürülen bu döner alan stator sargılarında muhtelif fazlarda gerilimler endükleyecektir. Bu gerilimlerin frekansına (f) bilinirse, makinanın kutup çifti sayısı (p) ve dakikadaki devir sayısı cinsinden bunun değeri;

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} \text{ (Hz)} \quad (2.17)$$

dır[11].

Bir başka ifadeyle kutup çifti sayısı bilinen ve jeneratör çıkış frekansı ölçülen senkron jeneratör rotorunun dakikada kaç devir tamamladığı tayin edilebilir. Aşağıdaki gibi formül yeniden düzenlenir.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [devir/dakika]} \quad (2.18)$$

Buradan hareketle dev/dak. cinsinden değeri bilinen senkron hız 2.18’de bulunan denklemde kullanılırsa;

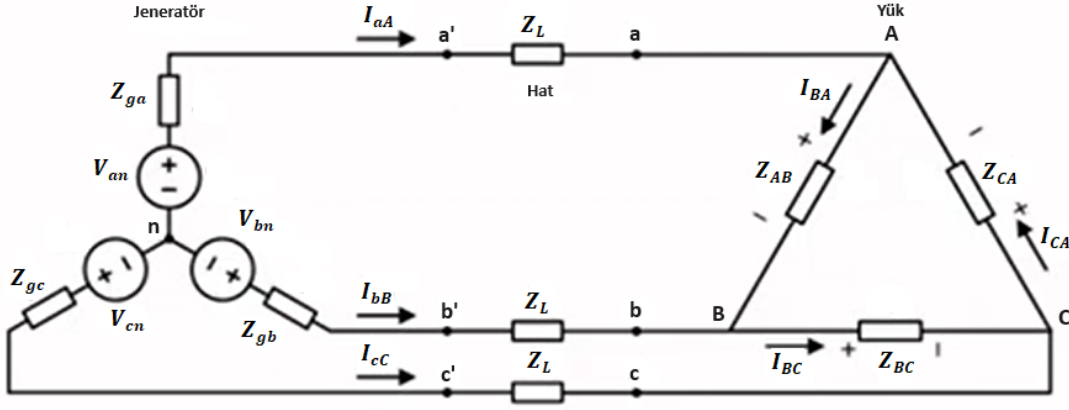
$$\omega_R = \frac{n_s}{60} \text{ [devir/saniye]} \quad (2.19)$$

$$\lambda = \frac{((n_s/60) \cdot R)}{V} \quad (2.20)$$

eşitlikleri elde edilir.

## 2.5. Yıldız – Üçgen Bağlı Sistemlerde Güç Hesabı

Deneyde kullanılan SMSJ yıldız bağlı imal edilmiş olup yıldız noktası dışarı çıkarılmamıştır. Yıldız bağlı gerilim kaynağına üçgen bağlı yük bağlanmıştır. Senkron jeneratörün ürettiği güç, üçgen bağlı yük üzerinden incelenmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan jeneratör-yük bağlantısı Şekil 2.3.’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Jeneratör çıkışı, hat ve yük devre şeması

Şekil 2.3.'de a',b' ve c' harfleri ile gösterilen uçlar jeneratör çıkış uçları; A,B ve C harfleri ile gösterilen uçlar sisteme üçgen bağlı yük uçlarıdır. Bu sistemde  $Z_{ga}$ ,  $Z_{gb}$  ve  $Z_{gc}$  jeneratör iç empedanslarını;  $Z_L$  hat empedanslarını;  $Z_{AB}$ ,  $Z_{CA}$  ve  $Z_{BC}$  yük empedanslarını ifade etmektedir. Sistemde kullanılan yük saf omik bir yüküdür. Yıldız üçgen bağlı sisteme ait güç eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

Burada jeneratör ve hat empedansları ihmal edilecek olursa; Burada yük uçlarındaki gerilimler gerilim kaynağı gerilimlerine eşit olur. Sistem dengeli olduğuna göre gerilim kaynağı gerilim değerleri;

$$V_{a'n} = V_P \angle 0^\circ = V_A \text{ (A noktası gerilimi)} \quad (2.21)$$

$$V_{b'n} = V_P \angle -120^\circ = V_B \text{ (B noktası gerilimi)} \quad (2.22)$$

$$V_{c'n} = V_P \angle +120^\circ = V_C \text{ (C noktası gerilimi)} \quad (2.23)$$

O halde  $I_{CA}$ ,  $I_{AB}$  ve  $I_{BC}$  akımlarını bulmak için ilgili empedansların üzerine düşen gerilimleri bulmak gerekir.

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B = V_P \angle 0^\circ - V_P \angle -120^\circ = V_P (1 + j*0 + 1/2 + j*\sqrt{3}/2) = \\ & \sqrt{3} V_P \angle 30^\circ \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} V_{BC} &= V_B - V_C = V_P \angle -120^\circ - V_P \angle 120^\circ = V_P (-1/2 - j*\sqrt{3}/2 + 1/2 - j*\sqrt{3}/2) = \\ & \sqrt{3} V_P \angle -90^\circ \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} V_{CA} &= V_C - V_A = V_P \angle 120^\circ - V_P \angle 0^\circ = V_P (-1/2 + j*\sqrt{3}/2 - 1 + j*0) = \\ & \sqrt{3} V_P \angle 150^\circ \end{aligned} \quad (2.26)$$



Buradan anlaşılacağı üzere yıldız-üçgen bağlı sistemde yük üzerine düşen gerilim fazları, jeneratör gerilim fazlarından  $\sqrt{3}$  kat daha büyük ve  $30^\circ$  ileridedir. Yüklere ait bu gerilimlere artık  $V_L$  diyebiliriz.

$$\sqrt{3} V_p \angle 30^\circ = V_L \angle 30^\circ \quad (2.27)$$

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{V_L \angle 30^\circ}{Z \theta^\circ} \quad (2.28)$$

$$I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{V_L \angle -90^\circ}{Z \theta^\circ} \quad (2.29)$$

$$I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{V_L \angle 150^\circ}{Z \theta^\circ} \quad (2.30)$$

$I_{aA}$  hat akımını bulmak için Kirchhoff akımlar yasasını uygularsak;

$$I_{aA} = I_{AB} - I_{CA} = I_p \angle (30^\circ - \theta) - I_p \angle (150^\circ - \theta) = \sqrt{3} I_p \angle \theta^\circ \quad (2.31)$$

$$I_{bB} = \sqrt{3} I_p \angle (-\theta^\circ - 120^\circ) \quad (2.32)$$

$$I_{cC} = \sqrt{3} I_p \angle (-\theta^\circ + 120^\circ) \quad (2.33)$$

elde edilir.

Burada dengeli üçgen bağlı yükler saf omik direnç olduğundan  $\theta = 0^\circ$ 'dir.

Dengeli üçgen bağlı yükün çektiği tek faz gücü;

$$S = V_{AB} \times I_{AB} = V_L \times I_p \angle \theta^\circ \quad (2.34)$$

Üç faz için çekilen güç;

$$S = 3 \times V_{AB} \times I_{AB} = 3 \times V_L \times I_p \angle \theta^\circ \quad (2.35)$$

Burada yük saf omik ( $\theta = 0^\circ$ ) olduğundan S görünür gücü, P aktif gücüne eşittir[12].

$$P = 3 \times V_{AB} \times I_{AB} \quad (2.36)$$

Bu tez kapsamında rüzgar türbin rotorundan elde edilen güç bulunurken, jeneratör iç empedansları ve hat empedansları ihmal edilecek olup üçgen bağlı yük üzerinden çekilen güç değeri referans alınacaktır. Sürtünme ve rüzgar kayıpları, çekirdek kayıpları, bakır kayıpları ve diğer kayıplar ihmal edilecek olup jeneratör rotoruna ait mekanik güç, yük üzerinden ölçülen elektriksel güce eşit kabul edilecektir. Ayrıca ölçülen akım ve gerilim değerleri için RMS büyüklükleri ölçen ölçü aletleri kullanılmıştır.



### 3. DENEY DÜZENEĞİ VE MODELLEME

#### 3.1. Rüzgar Türbin Kanatlarının Tasarımı

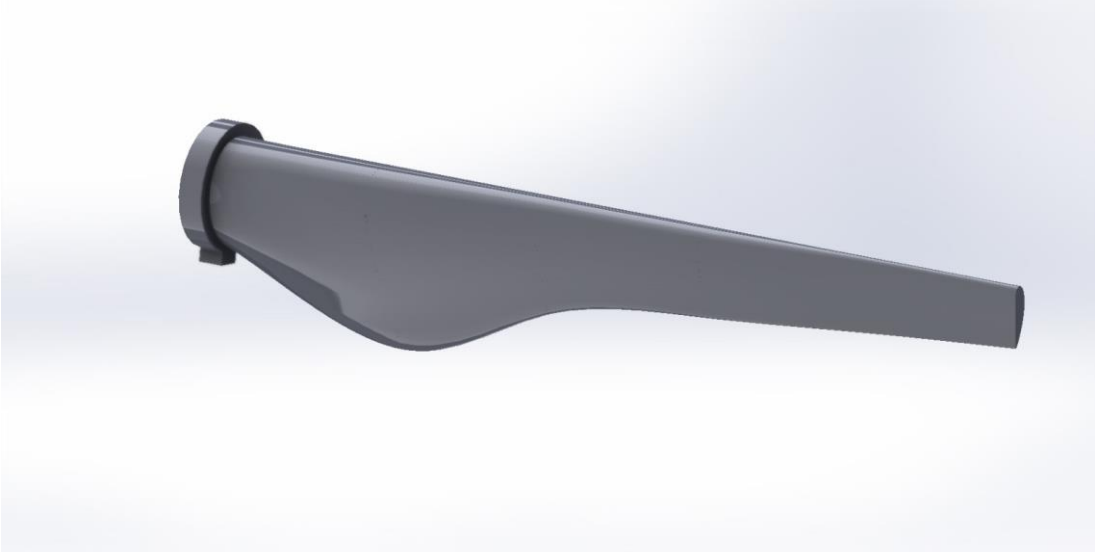
Bu tez kapsamında kullanılan rüzgar türbin rotoruna ait kanatlar; hava kanalı olmayan, 5 hava kanallı, 10 hava kanallı, 15 hava kanallı geometriye sahip 4 adet olmak üzere öncelikle CAD programında geometrisi oluşturulmuş ardından 3D printer kullanılarak meydana getirilmiştir.

Mevcut bulunan 4 adet adet türbin rotorlarının hepsi yatay eksenli, rüzgarı önden alan, üç kanatlı yapıya sahiptir. Birbirlerine göre hava kanalı sayısından başka farklılık göstermediğinden, Denklem 2.5.'te bahsedilen rüzgar süpürme alanları da eşittir. Şekil 3.1.'de hava kanalı bulunmayan rüzgar türbin rotorunun önden görünüşü görülmektedir.

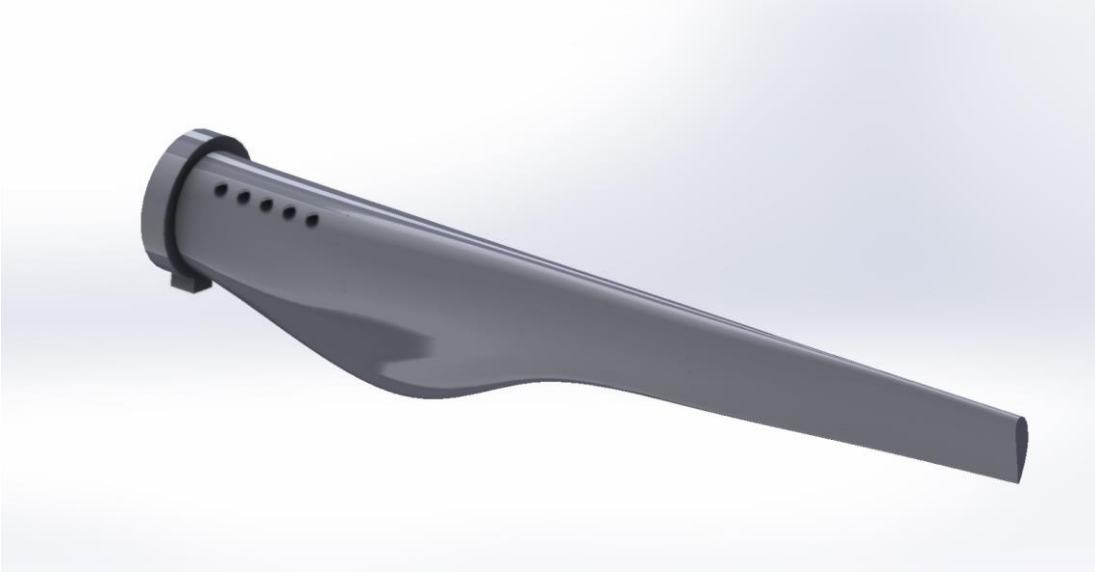


**Şekil 3.1.** Rüzgar türbin rotorunun önden görünüşü

Rüzgar türbin rotorunda hava kanalı sayısı değişen kanatlar sırasıyla Şekil 3.2., Şekil 3.3., Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'te olmak üzere görülmektedir.



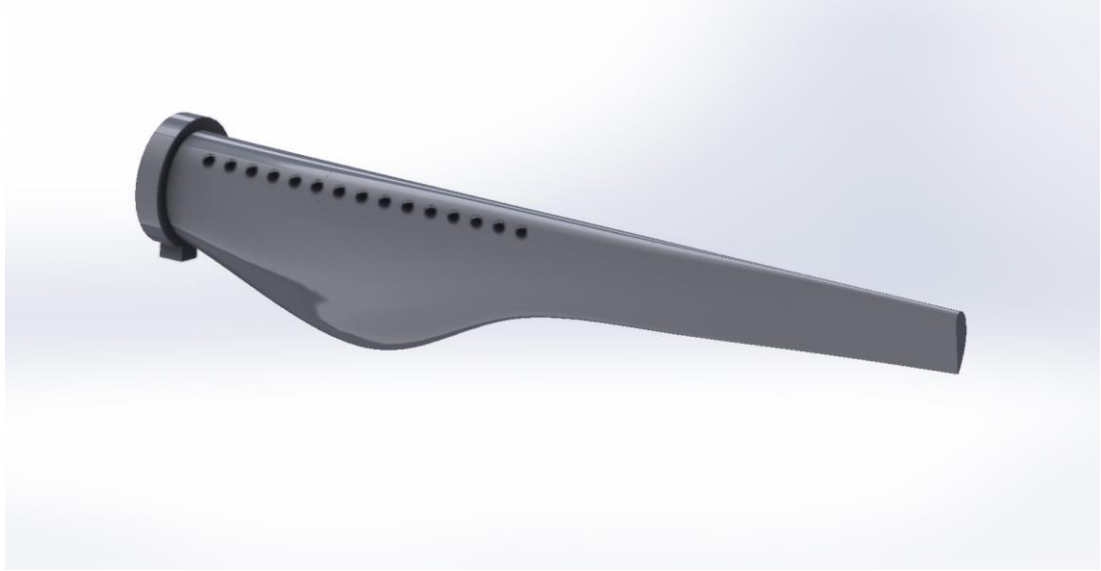
**Şekil 3.1.** Hava kanalı bulunmayan rotor kanadı



**Şekil 3.2.** 5 hava kanalı bulunan rotor kanadı



**Şekil 3.3.** 10 hava kanalı bulunan rotor kanadı



**Şekil 3.5.** 15 hava kanalı bulunan rotor kanadı

## **3.2. Güç Katsayısı Tayini İçin Deney Düzeneği**

### **3.2.1. Jeneratöre ait yükün deneysel belirlenmesi**

Rüzgar türbinine ait güç katsayısının elde edilmesi amacıyla senkron jeneratör için uygun yük değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için senkron jeneratöre rüzgar türbinleri akuple edilerek farklı yüklerde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerde hava kanalı bulunmayan kanat ve 10 hava kanallı kanat rotora bağlanmak suretiyle kullanılmıştır. İki farklı kanat içinde boşta, 330  $\Omega$  yükte ve 4700  $\Omega$  yükte olmak üzere deney gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta boşta çalıştırılan

SMSJ maksimum devrine ulaştıktan sonra bir anahtar takımı yardımıyla fazlar arası 330  $\Omega$  olacak şekilde üçgen bağlı yüke bağlanmıştır. SMSJ uçlarındaki yük, akım çekmeye başladığında SMSJ endüvi sargılarından bir akım akmaktadır. Endüvide meydana gelen bu akım değeri sabit miktarlarda fren etkisi göstermektedir. Bunun sonucunda SMSJ devri bir miktar düşmekte, buna bağlı olarak jeneratör uçlarında okunan gerilim ve frekans parametrelerinde de bir miktar düşüş olmaktadır. Hava kanalı bulunmayan rüzgar türbini için jeneratör uçlarında yük bulunmadan, ardından fazlar arası 330  $\Omega$  üçgen bağlı yükte, sonrasında ise fazlar arası 4700  $\Omega$  üçgen bağlı yükte deney verileri Tablo 3.1, Tablo 3.2. ve Tablo 3.3.'te verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Hava Kanalı Bulunmayan Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (330  $\Omega$ )

Dakika	Hava Akış Hızı	L1 – L2	L1-L3	L2-L3
1	7,9	36,5 Hz / 9,17 V	36,7 Hz / 9,22 V	36,8 Hz / 9,1 V
2	7,9	36,3 Hz / 9,12 V	36,4 Hz / 9,1 V	36,1 Hz / 8,92 V
3	7,9	36,4 Hz / 9,15 V	36,6 Hz / 9,2 V	36,6 Hz / 9,05 V
4	7,9	36,6 Hz / 9,2 V	36,7 Hz / 9,25 V	36,2 Hz / 8,99 V
5	7,9	36,5 Hz / 9,17 V	36,5 Hz / 9,17 V	36,6 Hz / 9,06 V
6	7,9	37,4 Hz / 9,3 V	36,9 Hz / 9,3 V	37,2 Hz / 9,28 V
7	7,9	36,8 Hz / 9,52 V	36,8 Hz / 9,24 V	36,8 Hz / 9,12 V
8	7,9	36,3 Hz / 9,12 V	36,6 Hz / 9,2 V	36,8 Hz / 9,11 V
9	7,9	36,4 Hz / 9,1 V	36,5 Hz / 9,13 V	36,4 Hz / 9,02 V
10	7,9	36,3 Hz / 9,14 V	36,3 Hz / 9,15 V	36,5 Hz / 9,1 V

**Tablo 3.2.** Hava Kanalı Bulunmayan Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (4700  $\Omega$ )

Dakika	Hava Akış Hızı	L1 – L2	L1-L3	L2-L3
1	7,9	42,4 Hz / 10,7 V	42,4 Hz / 10,67 V	41,8 Hz / 10,37 V
2	7,9	41,6 Hz / 10,44 V	41,5 Hz / 10,54 V	42 Hz / 10,5 V
3	7,9	41,8 Hz / 10,51 V	41,9 Hz / 10,65 V	42 Hz / 10,62 V
4	7,9	41,4 Hz / 10,44 V	41,3 Hz / 10,44 V	41 Hz / 10,26 V
5	7,9	42,1 Hz / 10,63 V	41,9 Hz / 10,55 V	41,9 Hz / 10,55 V
6	7,9	41,8 Hz / 10,55 V	42,3 Hz / 10,44 V	41,9 Hz / 10,59 V
7	7,9	41,3 Hz / 10,47 V	41,2 Hz / 10,38 V	41,5 Hz / 10,37 V
8	7,9	41,4 Hz / 10,46 V	41,8 Hz / 10,56 V	42 Hz / 10,45 V
9	7,9	42,1 Hz / 10,66 V	41,8 Hz / 10,45 V	41 Hz / 10,25 V
10	7,9	41,8 Hz / 10,6 V	42,1 Hz / 10,66 V	42,1 Hz / 10,50 V

**Tablo 3.3.** Hava Kanalı Bulunmayan Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (Boşta)

Dakika	Hava Akış Hızı	L1 – L2	L1-L3	L2-L3
1	7,9	42,7 Hz / 10,8 V	42,5 Hz / 10,85 V	42 Hz / 10,5 V
2	7,9	42,2 Hz / 10,68 V	41,8 Hz / 10,53 V	42,6 Hz / 10,58 V
3	7,9	42,6 Hz / 10,75 V	42,6 Hz / 10,8 V	42,6 Hz / 10,67 V
4	7,9	42,7 Hz / 10,78 V	42,5 Hz / 10,72 V	42 Hz / 10,52 V
5	7,9	42,2 Hz / 10,64 V	41,1 Hz / 10,6 V	42,3 Hz / 10,6 V
6	7,9	42,6 Hz / 10,84 V	43,5 Hz / 11 V	43 Hz / 10,71 V
7	7,9	42,6 Hz / 10,78 V	42,2 Hz / 10,68 V	42 Hz / 10,5 V
8	7,9	42,3 Hz / 10,7 V	42,5 Hz / 10,6 V	42,1 Hz / 10,55 V
9	7,9	42,8 Hz / 10,8 V	42,7 Hz / 10,82 V	42,8 Hz / 10,72 V
10	7,9	42,5 Hz / 10,75 V	42,4 Hz / 10,74 V	42,5 Hz / 10,63 V

10 hava kanallı rüzgar türbini için jeneratör uçlarında yük bulunmadan, ardından fazlar arası 330  $\Omega$  üçgen bağlı yükte, sonrasında ise fazlar arası 4700  $\Omega$  üçgen bağlı yükte deney verileri Tablo 3.4, Tablo 3.5. ve Tablo 3.6.'da verilmiştir.

**Tablo 3.4.** 10 Hava Kanallı Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (Boşta)

Dakika	Hava Akış Hızı	L1 – L2	L1-L3	L2-L3
1	7,9	42,6 Hz / 10,7 V	43,2 Hz / 10,9 V	43,1 Hz / 10,8 V
2	7,9	42,5 Hz / 10,8 V	43,7 Hz / 11 V	42,9 Hz / 10,7 V
3	7,9	42,8 Hz / 10,8 V	42,8 Hz / 10,8 V	43,3 Hz / 10,8 V
4	7,9	43 Hz / 10,9 V	43,1 Hz / 10,9 V	43,1 Hz / 10,8 V
5	7,9	43,3 Hz / 10,9 V	43,4 Hz / 11 V	43,2 Hz / 10,8 V
6	7,9	43,1 Hz / 10,9 V	43,1 Hz / 10,9 V	42,7 Hz / 10,6 V
7	7,9	42,9 Hz / 10,8 V	43,7 Hz / 11 V	43,3 Hz / 10,8 V
8	7,9	42,3 Hz / 10,7 V	42,7 Hz / 10,8 V	42,8 Hz / 10,7 V
9	7,9	42,7 Hz / 10,8 V	43,6 Hz / 11 V	43,2 Hz / 10,8 V
10	7,9	43,1 Hz / 10,9 V	42,7 Hz / 10,8 V	41,8 Hz / 10,4 V

**Tablo 3.5.** 10 Hava Kanallı Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (330  $\Omega$ )

Dakika	Hava Akış Hızı	L1 – L2	L1-L3	L2-L3
1	7,9	37,4 Hz / 9,3 V	37,5 Hz / 9,4 V	37,9 Hz / 9,3 V
2	7,9	35,4 Hz / 8,8 V	37,2 Hz / 9,2 V	35,9 Hz / 8,9 V
3	7,9	37,6 Hz / 9,3 V	37,4 Hz / 9,3 V	36,1 Hz / 8,9 V
4	7,9	36,4 Hz / 9 V	37,2 Hz / 9,3 V	36,8 Hz / 9 V
5	7,9	37,2 Hz / 9,3 V	36,5 Hz / 9,1 V	37 Hz / 9,05 V
6	7,9	36,9 Hz / 9,1 V	37,2 Hz / 9,3 V	37,2 Hz / 9,1 V
7	7,9	36,5 Hz / 9 V	36 Hz / 9 V	36,3 Hz / 8,9 V
8	7,9	36,1 Hz / 9 V	36,6 Hz / 9,1 V	36,3 Hz / 8,9 V
9	7,9	35,9 Hz / 8,9 V	36,7 Hz / 9,2 V	36,7 Hz / 9 V
10	7,9	35,8 Hz / 8,9 V	36,8 Hz / 9,2 V	37,1 Hz / 9,1 V



**Tablo 3.6.** 10 Hava Kanallı Rüzgar Türbini Deneysel Sonuçları (4700  $\Omega$ )

Dakika	Hava Akış Hızı	L1 – L2	L1-L3	L2-L3
1	7,9	42 Hz / 10,6 V	41,7 Hz / 10,5 V	41,7 Hz / 10,4 V
2	7,9	41,7 Hz / 10,5 V	41,7 Hz / 10,5 V	40,8 Hz / 10,2 V
3	7,9	41,5 Hz / 10,4 V	41,7 Hz / 10,5 V	42,3 Hz / 10,1 V
4	7,9	40,7 Hz / 10,2 V	41,4 Hz / 10,4 V	41,3 Hz / 10,3 V
5	7,9	41,1 Hz / 10,3 V	41,1 Hz / 10,3 V	40,9 Hz / 10,2 V
6	7,9	41,4 Hz / 10,4 V	41,4 Hz / 10,4 V	41,5 Hz / 10,3 V
7	7,9	40,9 Hz / 10,3 V	41,4 Hz / 10,4 V	42,2 Hz / 10,5 V
8	7,9	42,3 Hz / 10,7 V	41,8 Hz / 10,5 V	41 Hz / 10,3 V
9	7,9	41,3 Hz / 10,3 V	41,4 Hz / 10,4 V	42,3 Hz / 10,5 V
10	7,9	40,9 Hz / 10,3 V	40,6 Hz / 10,2 V	41,6 Hz / 10,3 V

Yapılan deneyler sonucu Tablo 3.1. ve Tablo 3.5'te bulunan veriler incelendiğinde türbinin gerilim ve frekansının dolayısıyla devrinin fazlar arası 330  $\Omega$  omik yükte düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi jeneratör ucundaki yükün, rotoru yavaşlatacak kadar akım çekmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum verileri elde etmede geniş bir kanat hızı aralığında çalışma fırsatı vermemektedir. Bunun yanında fazlar arası 4700  $\Omega$  omik yük ise düşük bir akım akmasına ve akımdaki değişimin takibinin anlaşılır olmamasına sebep olmaktadır.  $C_p$  verileri için uygun yük olarak 1000  $\Omega$  seçilmiştir. Dört farklı türbin için akım, gerilim, frekans ve rüzgar hızı bilgilerinin 1000  $\Omega$  yük kullanılarak ölçülmesi ve  $C_p - \omega$  verileri elde edilmesi, verilerin incelenmesi adına daha belirgin sonuçlar vereceği anlaşılmıştır.

### 3.2.2. Formülizasyon ve parametreler

Bu tez kapsamında stator sargıları yıldız bağlantılı imal edilmiş SMSJ kullanılmıştır. SMSJ'e ait nominal çalışma bilgileri Tablo 3.7.'de verilmiştir.

**Tablo 3.7.** SMSJ'ye ait nominal çalışma etiket değerleri

Gerilim (Faz-Faz)	Frekans	Devir	Kutup Sayısı
12 V	50 Hz	500 rpm	12



**Şekil 3.6.** SMSJ'ye ait rotor ve stator görüntüsü

Şekil 3.6.'da verilen SMSJ kullanılarak daha önce tasarımı gerçekleştirilen farklı hava kanalı sayısına sahip dört farklı rüzgar türbin kanadı için  $C_p - \omega$  grafikleri elde edilmek üzere deney düzeneği oluşturulmuştur. Oluşturulan deney düzeneğinde jeneratör çıkış parametrelerinin kolay ölçülmesi için  $1000 \Omega$  değerinde dengeli üçgen bağlı omik yük kullanılmıştır. Deney düzeneği kullanılarak  $C_p$  değerinin elde edilmesi için denklem 2.5 ve denklem 2.36 eşitlikleri beraber kullanılır.

$$P_R = C_p \cdot P_W = C_p \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 = 3 \times V_{AB} \times I_{AB} \text{ [Watt]} \quad (3.1)$$

$$C_p = \frac{3 \times V_{AB} \times I_{AB}}{\frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3} \quad (3.2)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $V_{AB}$ ; Şekil 2.3.'te verilen A ve B terminalleri arasındaki yük üzerine düşen gerilimi,  $I_{AB}$ ; A ve B terminalleri arasındaki yük üzerine düşen akım

değerini,  $\rho$ ; havanın özgül kütleini,  $r$ ; kanat alanının süpürdüğü yarıçap değerini,  $v$ ; türbin rotoruna etki eden rüzgar hızını ifade etmektedir.

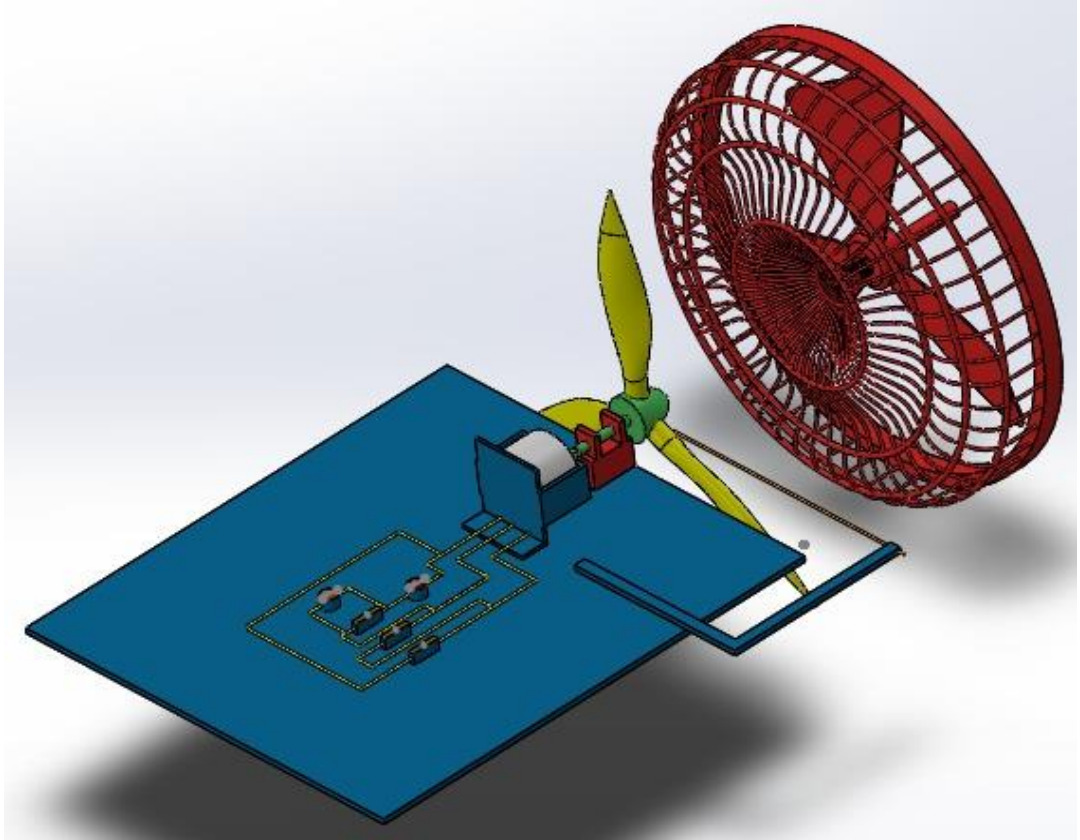
$C_p - \omega$  verilerinin elde edilmesi için ihtiyaç duyulan  $\omega$  değeri denklem 2.18 ve denklem 2.19 eşitlikleri beraber kullanılır.

$$\omega_R = \frac{f}{p} \text{ [devir/saniye]} \quad (3.3)$$

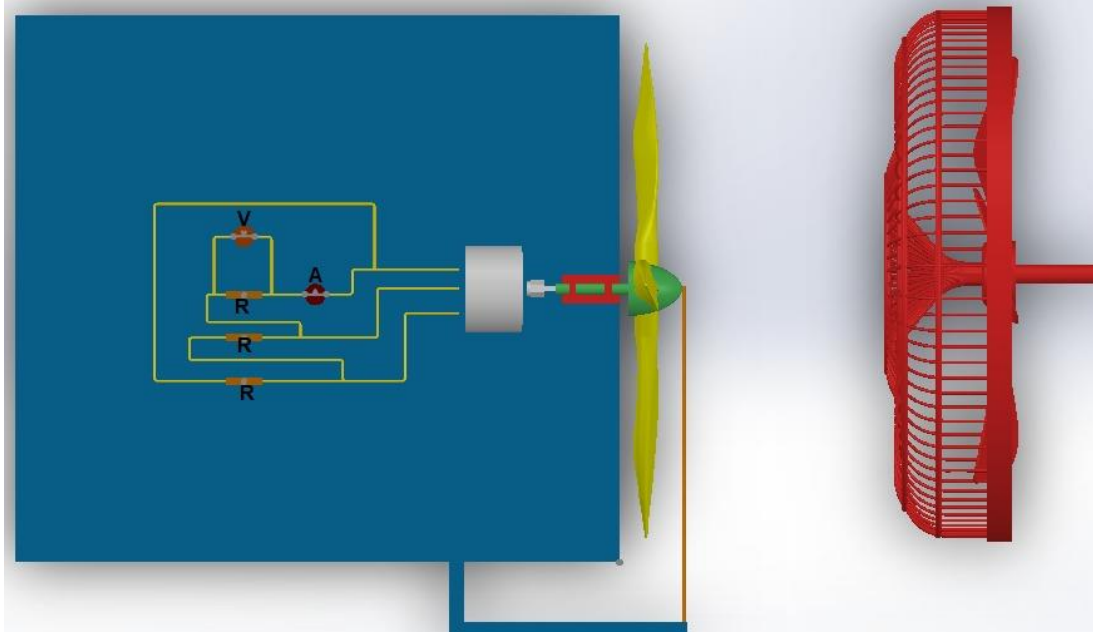
elde edilir.

Burada  $f$ ; senkron jeneratör çıkış frekansını,  $p$ ; senkron jeneratöre ait kutup çifti sayısını ifade etmektedir.

Elde edilen denklem 3.1, denklem 3.2 ve denklem 3.3 birlikte değerlendirildiğinde ölçülmesi gereken değişken parametreler omik yük üzerine düşen gerilim, akım ve frekans değerleri, aynı zamanda türbin rotoruna etki eden rüzgar hızıdır. Değişken parametrelerin ölçülmesi için oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Rüzgar türbinine akuple SMSJ görseli



**Şekil 3.8.** SMSJ çıkış yükleri ve ölçüm noktaları

Şekil 3.7.'de gösterilen görselde rüzgar türbini iki ayrı rulman vasıtasıyla SMSJ'e yataklanarak akuple edilmiş vibrasyonsuz bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Şekil 3.8.'de görüldüğü üzere SMSJ çıkışında omik yükler fazlar arası üçgen bağlanmış, tek faz üzerinden seri bağlanmış A ile ifade edilen ampermetre ve paralel bağlanmış V ile ifade edilen voltmetre yardımıyla akım, gerilim ve frekans değerleri ölçülmüştür. Bununla beraber sıcak telli anemometre kullanılarak rotora etki eden rüzgar hızı ölçülmüştür.

### 3.2.3. Deney uygulaması

Deney düzeneği oluşturulduktan ve ölçülmesi gereken parametreler saptandıktan sonra deney aşamasına geçilmiştir. Deneyin amacı olan  $C_p - \omega$  verilerinin oluşturulması için rüzgar hızının farklı değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu durumun sağlanabilmesi için nominal çalışma değerleri Tablo 3.8'de verilen rüzgar kaynağına frekans konvertörü eklenmiştir. Besleme frekansı değiştirilerek fan devri kontrol edilmiş, türbin rotoru farklı rüzgar hızlarına maruz bırakılmıştır.

**Tablo 3.8.** Rüzgar kaynağına ait nominal çalışma değerleri

Gerilim	Frekans	Güç	Devir
380 V	50 Hz	245 W	1335

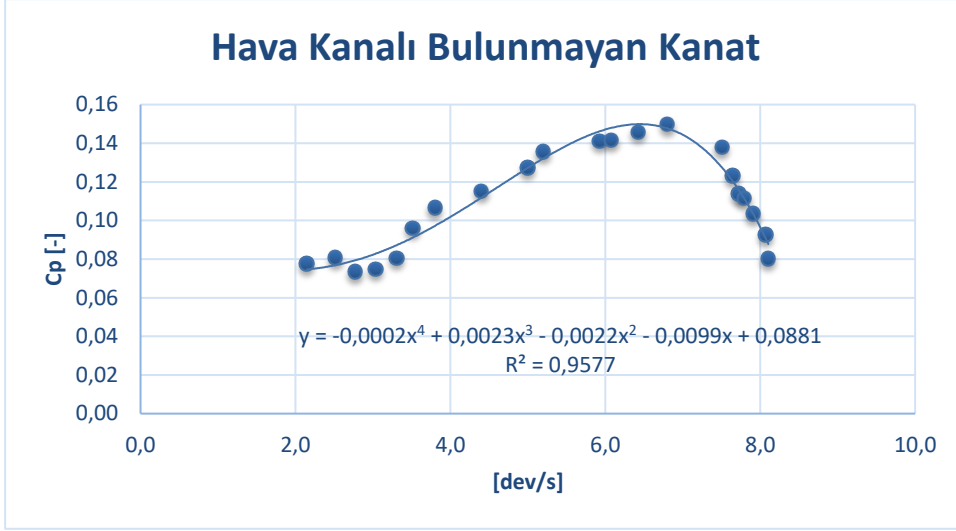
Frekans konvertörü yardımıyla rüzgar kaynağına 34 Hz'den başlamak üzere 60 Hz'e kadar değişen frekans uygulanmıştır. Rüzgar türbini her bir frekans değerine üç dakika boyunca maruz bırakılmış ve her dakika sonunda ilgili parametreler kaydedilmiştir

Rüzgar rotor türbinin süpürdüğü alanın yarıçapı 0,38 m, taradığı alan  $0,453646 m^2$  ve hava yoğunluğu ( $\rho$ )  $1,225 kg/m^3$ 'dir. Ayrıca türbin rotoru devri rpm (dev./dak.) cinsinden bulunduğundan 60 ile bölünerek devir/saniye cinsinden açısal hıza çevrilmiştir.

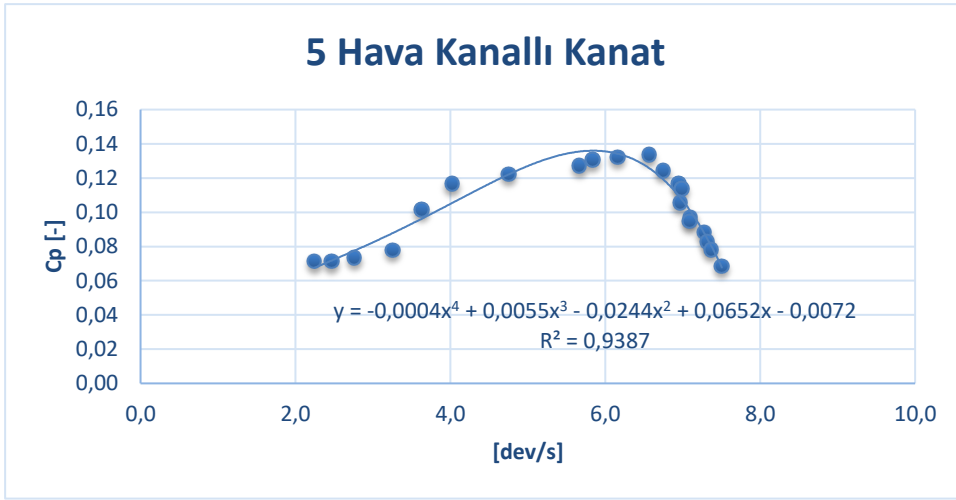
Aşağıdaki tablolarda dört farklı hava kanalı yapısına sahip rüzgar türbin rotoru için açısal hıza göre güç katsayısı değişimi gözlenmiştir.

**Tablo 3.9.** Kanat Tasarımları İçin Açısal Hız-Güç Katsayısı Değerleri

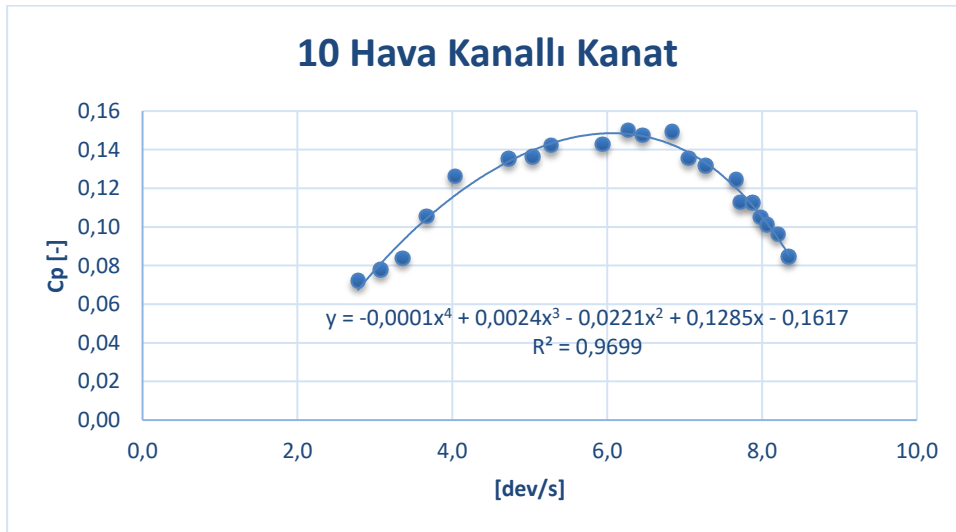
Hava Kanalı Bulunmayan Kanat		5 Hava Kanallı Kanat		10 Hava Kanallı Kanat		15 Hava Kanallı Kanat	
Açısal Hız ( $\omega$ )	Güç Katsayısı ( $C_p$ )	Açısal Hız ( $\omega$ )	Güç Katsayısı ( $C_p$ )	Açısal Hız ( $\omega$ )	Güç Katsayısı ( $C_p$ )	Açısal Hız ( $\omega$ )	Güç Katsayısı ( $C_p$ )
2,15	0,077	2,43	0,071	2,78	0,072	2,29	0,082
2,51	0,080	2,46	0,071	3,07	0,077	2,59	0,083
2,77	0,073	2,76	0,073	3,36	0,083	2,93	0,078
3,03	0,074	3,25	0,077	3,67	0,105	3,26	0,088
3,31	0,080	3,63	0,101	4,03	0,126	3,53	0,098
3,51	0,095	4,02	0,116	4,72	0,135	3,97	0,128
3,8	0,106	4,75	0,122	5,03	0,136	4,23	0,145
4,4	0,115	5,66	0,126	5,27	0,142	4,83	0,140
5	0,127	5,83	0,130	5,94	0,142	5,18	0,144
5,2	0,135	6,16	0,132	6,27	0,150	5,36	0,145
5,92	0,141	6,56	0,133	6,46	0,147	6,19	0,150
6,07	0,141	6,75	0,124	6,83	0,149	6,81	0,150
6,42	0,145	6,95	0,116	7,05	0,135	6,93	0,148
6,80	0,149	6,98	0,113	7,27	0,131	7,21	0,142
7,51	0,137	6,96	0,105	7,66	0,124	7,30	0,129
7,64	0,123	7,10	0,097	7,72	0,112	7,68	0,125
7,72	0,113	7,08	0,094	7,87	0,112	7,85	0,116
7,79	0,111	7,27	0,088	7,98	0,105	7,87	0,104
7,91	0,103	7,31	0,082	8,06	0,101	7,91	0,097
8,07	0,092	7,31	0,078	8,21	0,096	8,04	0,092
8,10	0,080	7,50	0,06	8,34	0,084	8,17	0,081



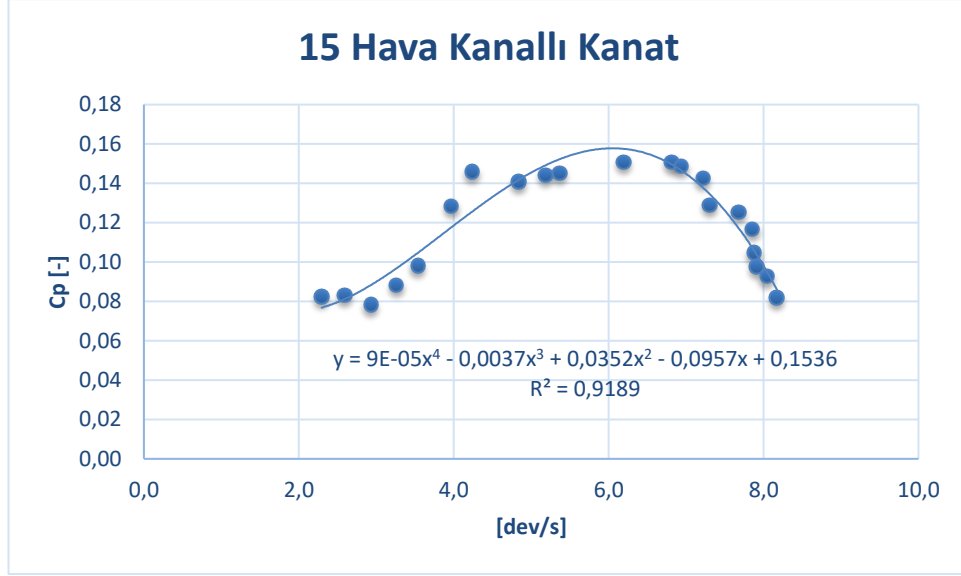
Şekil 3.9. Hava Kanalı Bulunmayan Türbin Rotor Kanadına Ait  $C_p - \omega$  grafiği



Şekil 3.10. 5 Hava Kanallı Türbin Rotor Kanadına Ait  $C_p - \omega$  grafiği



Şekil 3.11. 10 Hava Kanallı Türbin Rotor Kanadına Ait  $C_p - \omega$  grafiği



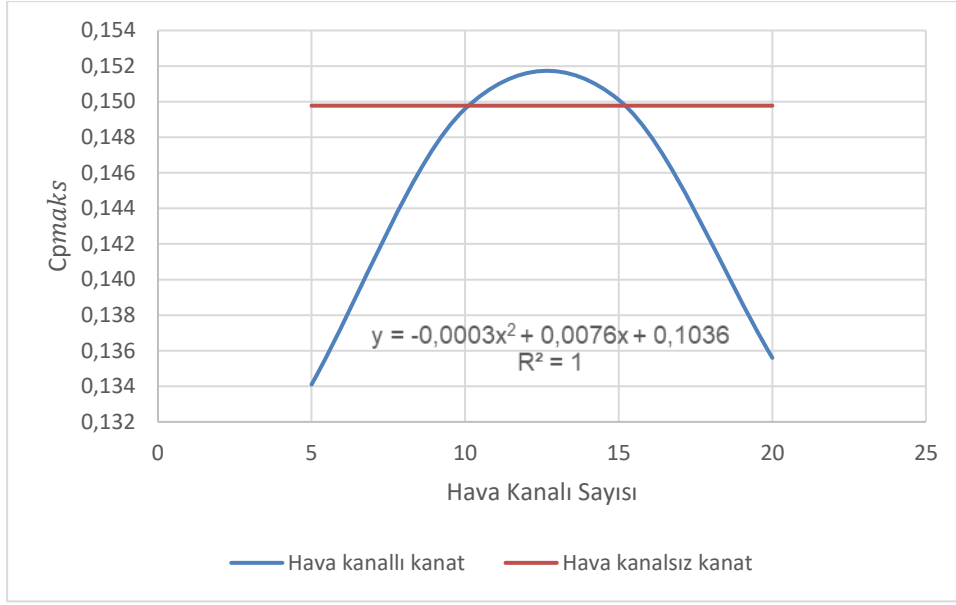
**Şekil 3.12.** 15 Hava Kanallı Türbin Rotor Kanadına Ait  $C_p - \omega$  grafiği

Elde edilen  $C_p - \omega$  verileri kullanılarak her bir kanata ait grafik oluşturulmuştur. Elde edilen verilere ilişkin en büyük  $C_p$  değerine karşılık gelen açısal hız değerleri Tablo 3.10.'da verilmiştir.

**Tablo 3.10.** Hava kanalı sayısına göre en büyük  $C_{Pmaks} - \omega$  değerleri

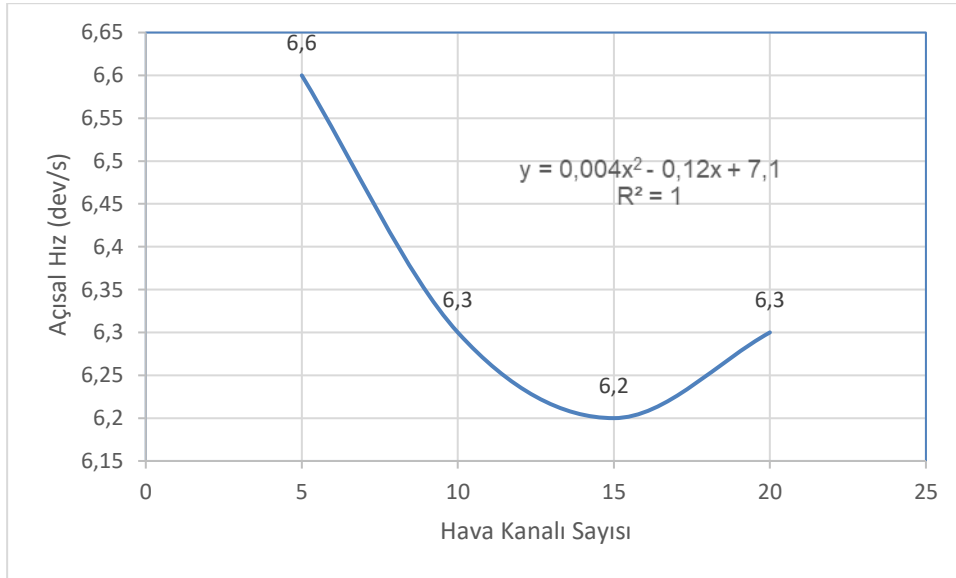
Hava kanalı sayısı	$C_{Pmaks}$	$\omega$ (dev./s.)
0	0,1498	6,8
5	0,1336	6,6
10	0,1502	6,3
15	0,1508	6,2

Tablo 3.10.'daki  $C_{Pmaks}$  verileri kullanılarak en küçük kareler prensibine dayanan tek değişkenli regresyon analizi yapıldığında 20 hava kanallı kanat için en büyük güç katsayısı değeri tahmini yapılabilir. Şekil 3.13.'de verilen egride hava kanalı sayısının  $C_{Pmaks}$  değerine nasıl etki ettiği görülmektedir. Oluşturulan polinomsal eğilim çizgisinde  $-\infty$  ile 1 arasında değer alabilen ve bire ne kadar yakın ise uyum iyiliği uygun olduğu anlaşılan  $R^2$  değeri bire eşit çıkmıştır[13]. Şekil 3.13'te görülen eğriye ait denklemin türevi alınıp sifıra eşitlendiğinde eğrinin tepe noktasının yaklaşık 13 olduğu bulunur. Bu durum 13 hava kanallı kanatın en büyük  $C_p$  değerini vererek en iyi performansı sağlayacağı sonucunu verir.



**Şekil 3.13.** Hava Kanalı Sayısına Göre  $C_{pmax}$  Değerleri Eğilim Çizgisi

Oluşturulan eğilim çizgisi yardımıyla hava kanalı sayısına göre en uygun aerodinamik verimde çalışılacak bölgeler de tespit edilebilir. Bunun için Şekil 3.14’de her bir tasarımın en iyi verime sahip olduğu açisal hız değerlerini gösteren eğilim çizgisi oluşturulmuştur.



**Şekil 3.14.** Kanat Tasarımlarının En Verimli Çalıştığı Açisal Hız Değerleri Eğilim Çizgisi

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te eğilim çizgilerinden hareketle 20 hava kanallı kanat tasarımının da tahmini yapılan en verimli çalışma bölgeleri Tablo 3.11.’de görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.14’te bulunan eğri grafiğine ait denklem kullanılarak en



iyi performansa sahip 13 hava kanallı kanat için optimum çalışma bölgesinin 6,21 dev/s olduğu sonucuna ulaşılabilir.

**Tablo 3.11.** Oluşturulan eğilim çizgilerine göre  $C_{Pmaks}$ -  $\omega$  değerleri

Hava kanalı sayısı	$C_{Pmaks}$	$\omega$ (dev./s.)
0	0,1498	6,8
5	0,1341	6,6
10	0,1496	6,3
13	0,1517	6,21
15	0,1501	6,2
20	0,1356	6,3

#### 3.2.4. Deneysel hata analizi

Bu tez deneysel bir çalışmanın ürünü olduğundan, yapılan deneylerde verileri elde etmede kullanılan ölçü aletlerinin mevcut olması hata analizi çalışmasını gerekli kılmıştır. Deney verileri saptanırken ele alınan kriterler belirlenerek, hataların dereceleri ve miktarları hakkında sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır.

Deney düzeneğinde Şekil 3.8.'de gösterilen ölçüm noktalarında bulunan ölçü aletleri kullanılmıştır. Jeneratör çıkışına paralel bağlı  $\pm\%$  0,3 doğrulukla ölçüm yapan bir voltmetre, gerilim ve frekans değerlerini ölçmek için kullanılmıştır. Jeneratör çıkışına seri bağlı  $\pm\%$  2 doğrulukla ölçüm yapan bir ampermetre, akım değerlerini ölçmek için kullanılmıştır. Rüzgar türbininin maruz kaldığı rüzgar hızını bulmak için kanatın hemen önüne monte edilmiş  $\pm\%$  5 okuma veya  $\pm\%$  1 full skala doğruluğa sahip sıcak telli anemometre kullanılmıştır.

Ölçülen büyüklüklerin hata değerleri, deneyde kullanılan ölçü aletlerinin imalatları sırasında herhangi bir hatanın olmadığı kabul edilerek, üretici firmalar tarafından taahhüt edilen hata değerleri ve deneysel tecrübelerden yararlanılarak teorik olarak hesaplanmıştır[14].

Gerilim ölçümü için hata miktarı;

- Gerilim ölçüm cihazından kaynaklanan hata =  $\pm 0,036$  V
- Gerilim ölçüm cihazının okunmasından kaynaklanan hata =  $\pm 0,036$  V

- Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata =  $\pm 0,036$  V

Burada deney sürecinde jeneratörün nominal çıkış geriliminin 12 V olduğu göz önüne alındığında hata hesabında 12 V değerinin % 0,3'ü kullanılmıştır.

Frekans ölçümü için hata miktarı;

- Frekans ölçüm cihazından kaynaklanan hata =  $\pm 0,15$  Hz
- Frekans ölçüm cihazının okunmasından kaynaklanan hata =  $\pm 0,15$  Hz
- Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata =  $\pm 0,15$  Hz

Deney sürecinde kullanılan jeneratör nominal çıkış frekansı 50 Hz olduğu göz alındığında hata hesabında 50 Hz değerinin % 0,3'ü kullanılmıştır.

Akım ölçümü için hata miktarı;

- Akım ölçüm cihazından kaynaklanan hata =  $\pm 0,011$  A
- Akım ölçüm cihazının okunmasından kaynaklanan hata =  $\pm 0,011$  A
- Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata =  $\pm 0,011$  A

Deney esnasında okunan en yüksek akım değeri 0,55 A olduğundan hata hesabında 0,55 A değerinin % 2'si kullanılmıştır.

Rüzgar hızı ölçümü için hata miktarı;

- Rüzgar ölçüm cihazının okunmasından kaynaklanan hata =  $\pm 0,05$  m/s
- Debi kaçaklarından kaynaklanan hata =  $\pm 0,05$  m/s
- Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata =  $\pm 0,05$  m/s

Deney esnasında okunan en yüksek rüzgar hızı yaklaşık 10 m/s olduğundan hata hesabında bu değer kullanılmıştır.

Ölçüm parametrelerinde sabit hatalar, rastgele hatalar ve üretici firmalar tarafından taahhüt edilen hatalar dikkate alınarak her bir parametreye ait toplam hata hesabı yapılabilir. Toplam hata hesabı yapılırken Denklem 3.4 kullanılır[14].

$$W_R = \sqrt{\left(\frac{dR}{dx_1} w_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{dR}{dx_n} w_n\right)^2} \quad (3.4)$$

Burada R ve x ile ifade edilenler bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu iken w ile ifade edilenler bağımsız değişkenlerin belirsizlik miktarıdır[14].

Ölçülen parametreler için toplam hata değerleri hesaplanmıştır.

$$W_{gerilim} = \sqrt{(0,036^2 + 0,036^2 + 0,036^2)} = \pm 0,062 \text{ V}$$

$$W_{frekans} = \sqrt{(0,15^2 + 0,15^2 + 0,15^2)} = \pm 0,259 \text{ Hz}$$

$$W_{akım} = \sqrt{(0,011^2 + 0,011^2 + 0,011^2)} = \pm 0,019 \text{ A}$$

$$W_{rüzgar hızı} = \sqrt{(0,05^2 + 0,05^2 + 0,05^2)} = \pm 0,086 \text{ m/s}$$

Bu çalışma için deneysel hata analizi yapıldığında en büyük hatanın frekans değerinde meydana gelebileceği bulunmuştur. Frekans değerinde meydana gelen 0,259 Hz'lik hata payı Denklem 3.3'de değerlendirildiğinde  $\pm 0,043$  dev/s kadar açısal hızda hatalı ölçüm yapılabileceği anlamına gelmektedir.  $C_p$  değeri diğer sabitler dışında gerilim ve akım değerinin kendisi ile ve rüzgar hızının küpüyle ters orantılı olduğu için  $C_p$  değerinin belirsizlik analizi buna göre yapılır[15].

$$\frac{W_{C_p}}{C_p} = \left[ \left( \frac{W_{gerilim}}{gerilim} \right)^2 + \left( \frac{W_{akım}}{akım} \right)^2 + 3^2 \left( \frac{W_{rüzgarhızı}}{rüzgarhızı} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{W_{C_p}}{C_p} = \left[ \left( \frac{0,062}{12} \right)^2 + \left( \frac{0,019}{0,55} \right)^2 + 3^2 \left( \frac{0,086}{10} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{W_{C_p}}{C_p} = 0,043$$

Sonuç olarak ölçülen deneysel parametreler sonucu elde edilen  $C_p$  değerleri için %4,3'lük kadar belirsizlik mevcuttur.



## **4. OPTİMİZASYON**

### **4.1. Taguchi Teoremi**

Taguchi yöntemi Genichi Taguchi tarafından 1950'li yıllarda süreç en iyileme tekniği olarak Japonya'da geliştirilmiştir. Taguchi yöntemi farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından en iyi kombinasyonu saptamak için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu kullanılarak çok daha az sayıda deneysel çalışmayla sonuca ulaşmak mümkündür[16].

Taguchi metodu, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur[17].

Bu tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen türbin kanatları için, rüzgar enerjisinden elde edilen elektriksel güce etki edebilecek kanat tasarımı ve kanat açısız hızı ele alınmıştır. Kontrol edilebilen faktör olarak rotor kanadında bulunan hava kanalı sayısı ve rotor açısız hızı seçilmiştir. Kontrol edilebilen değişken Taguchi yöntemi kullanılarak nispeten daha az deneysel çalışmayla optimize edilecektir.

### **4.2. Taguchi Teoremini Uygulama Yöntemi**

Taguchi metodunun yapılan deneylerde uygulanabilmesi için sistematik bir yaklaşımda bulunmak gerekir. Taguchi metodunun başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için uygulama adımları doğru takip edilmelidir. Öncelikle araştırılmak istenen parametreler belirlenmeli, kontrol edilebilir değişkenler net ve anlaşılır olmalıdır. Parametre seviyeleri en az iki adet olmakla birlikte deney sayısı artırılarak sayısı artırılabilir. Deney sayısı arttıkça rastgele etkilerin de ortaya çıkması mümkündür. Uygun test düzeninden elde edilen veriler ortogonal dizi tablosuna eklendikten sonra sonuç analizi yapılır[18].

Uygulama adımları gerçekleştirildikten sonra en iyi performansın elde edileceği parametreler belirlenebilecek ve optimum koşullarda elde edilebilecek çözüm öngürülebilecektir [18].

Taguchi yöntemi uygulamasında bir ortogonal dizi kullanır. Bu dizi birbirine dik sütunlardan oluşur ve kontrol parametleri bu sütunlara yerleştirilir. Deney sırasında bu kontrol parametrelerinin etkileri eşit olarak dikkate alınmalıdır. Eğer “b” parametreleri ve “c” seviyeleri varsa, tam faktöriyel deney sayısı “c<sup>b</sup>”dir[19].

Ortogonal dizinin parametrelerine ait her bir deney tasarımı için en uygun seviyesinin belirlenmesinde, deneysel sonuçların ortalaması ve varyansı, sinyal gürültü oranı (S/N) olarak bilinen tek bir performans ölçütü ile birleştirilmektedir. S/N analizinde üç farklı performans kategorisi tanımlanmaktadır. Bunlar; en küçük en iyi, en büyük en iyi ve ağırlıklı (nominal) en iyi şeklindedir. Bunlar sırasıyla Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3’de verilmiştir[20].

$$S/N = - 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i^2 \right) \quad (4.1)$$

$$S/N = - 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (4.2)$$

$$S/N = - 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (4.3)$$

Burada;  $y$  gözlemlenen verileri,  $\bar{y}$  gözlemlenen verilerin ortalamasını,  $s_y^2$ ,  $y$ 'nin varyansını,  $n$  gözlem sayısını ifade eder. En büyük S/N oranı, performans kategorisine bakılmaksızın, en iyi performans karakteristiğine karşılık gelmektedir. Bu nedenle değişkenlerin en uygun seviyelerini en yüksek S/N oranı belirlemektedir. Her seviyede performansı incelenen bir değişken için en iyi sonuç, S/N oranlarının ortalaması kullanılarak, başlıca etkilerin analizi ile belirlenmektedir [21].

### 4.3. Hava Kanalı Sayısı ve Açısız Hız Optimizasyonu

Deney düzeneğinden elde edilen test verileri kullanılarak optimizasyon aşamasına geçilmiştir. Optimizasyon için iki parametrelili dört seviyeli Taguchi metodu kullanılmıştır. İlk parametre deney öncesi tasarımı gerçekleştirilen hava kanalı sayısı olurken ikinci parametre ise rüzgar türbinine ait açısız hız değerleri olarak belirlenmiştir. İlk parametre olan hava kanalı sayısı için kademeler hava kanalı bulunmayan (L1), 5 hava kanallı (L2), 10 hava kanallı (L3), 15 hava kanallı (L4) olacak şekilde oluşturulmuştur. İkinci parametre olan açısız hız değerleri için

kademeler, her bir kanat tasarımı için güç katsayısı değerine karşılık gelecek ortak açısal hızlar olarak karar verilmiştir. Bunlar 4 dev/s (L1), 5 dev/s (L2), 6 dev/s (L3), 7 dev/s (L4) kademeleridir.

P1: Hava kanalı sayısı ( L1 = 0; L2 = 5; L3 = 10; L4 = 15 )

P2: Açısal hız değerleri ( L1 = 4 dev/s; L2 = 5 dev/s; L3 = 6 dev/s; L4 = 7 dev/s )

Test verileri, rüzgar türbini için aerodinamik verimi (  $\eta$  ) temsil ettiğinden sinyal gürültü oranı (S/N) “en büyük en iyi” karakteristik tipine göre elde edilmiştir. Bu sebeple Denklem 4.2’de verilen formül ile parametrelere ait sinyal gürültü oranları (S/N) bulunmuştur. S/N değerleri bulunurken kanatlara  $C_p - \omega$  grafiklerinde belirli bir açısal hız değerinin etrafındaki üç adet  $C_p$  değeri dikkate alınmıştır.

İki parametrelili dört seviyeli tasarım sürecinde en az sayıda deneyle optimizasyon sürecinin gerçekleştirilmesi için toplam serbestlik derecesine (DOF) bağlı olarak ortogonal dizi tespit edilebilir. Bu çalışma için L16 ortogonal dizi seçilmiştir. Tablo 4.1.’de verilen ortogonal dizi kullanılarak parametrelerin her bir seviyesi ortalama etkisi bulunur[22].

**Tablo 4.1.** L16 Ortogonal Dizi Tablosu

Deney Tasarımı	Parametre		Testler (%)			Sinyal Gürültü Oranı (S/N)
	Parametre 1	Parametre 2	X1 ( $C_{p1}$ )	X2 ( $C_{p2}$ )	X3 ( $C_{p3}$ )	
1	1	1	10,6	10,8	11	20,665
2	1	2	12,3	12,7	13	22,046
3	1	3	14,1	14,1	14,1	22,984
4	1	4	14,5	14,4	14,3	23,166
5	2	1	11,4	11,6	11,8	21,286
6	2	2	12,2	12,3	12,4	21,797
7	2	3	13	13,1	13,2	22,344
8	2	4	11,6	11,3	10,5	20,909
9	3	1	12,5	12,6	12,7	22,006
10	3	2	13,5	13,6	13,6	22,670
11	3	3	14,4	14,5	14,6	23,226
12	3	4	14	13,5	13,4	22,687
13	4	1	12,6	12,8	13	22,142
14	4	2	14,2	14,2	14,1	23,025
15	4	3	14,7	14,8	14,9	23,404
16	4	4	14,5	14,7	14,6	23,286

$$P_{1,1} = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_1 + \left(\frac{S}{N}\right)_2 + \left(\frac{S}{N}\right)_3 + \left(\frac{S}{N}\right)_4}{4} = \frac{20.665 + 22.046 + 22.984 + 23.166}{4} = 22,215$$

$$P_{1,2} = 21,584$$

$$P_{1,3} = 22,647$$

$$P_{1,4} = 22,964$$

$$P_{1,2} < P_{1,3} < P_{1,1} < P_{1,4} = 22,964$$

Parametre seviye ortalamalarına sırasıyla bakıldığında  $P_{1,4}$  en büyük değere sahip olduğu görülür. Bu sonuç birinci parametrenin dördüncü kademesinin seçildiği yani 15 hava kanallı kanat tasarımını ifade eder.

İkinci parametre için;

$$P_{2,1} = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_1 + \left(\frac{S}{N}\right)_2 + \left(\frac{S}{N}\right)_3 + \left(\frac{S}{N}\right)_4}{4} = \frac{20.665 + 21.286 + 22.006 + 22.142}{4} = 21,524$$

$$P_{2,2} = 22,384$$

$$P_{2,3} = 22,989$$

$$P_{2,4} = 22,512$$

$$P_{2,1} < P_{2,4} < P_{2,2} < P_{2,3} = 22,989 \text{ (6 dev/s)}$$

Parametre seviye ortalamalarına bakıldığında  $P_{2,3}$  en büyük değere sahip olduğu görülür. Bu sonuç ikinci parametrenin üçüncü kademesinin seçildiğini yani 6 dev/s açışal hızı ifade etmektedir.

Optimum koşulda rotorun aerodinamik verimi ( $\eta_{opt}$ ) için öncelikle optimum sinyal gürültü oranı ( $\left(\frac{S}{N}\right)_{opt}$ ) bulunur[23].

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{opt} = \bar{T} + (P_{1,4} - \bar{T}) + (P_{2,3} - \bar{T}) \quad (4.2)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{n.m} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{i,j} \right) \quad (4.3)$$

Optimum verimi yani güç katsayısını bulmak için öncelikle optimum sinyal gürültü oranını bulmak gerekir. Denklem 4.2 ve Denklem 4.3'de verilen eşitlikler kullanılarak en iyi parametrelerin seçimindeki sonuç bulunur[24].

$$\bar{T} = \frac{22.215 + 21.584 + 22.647 + 22.964 + 21.524 + 22.384 + 22.989 + 22.512}{8} = 22,352$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{opt} = 22,352 + (22,964 - 22,352) + (22,989 - 22,352) = 23,601$$



$$\left(\frac{S}{N}\right)_{opt} = -10 \log \left( \frac{1}{\eta_{opt}^2} \right) = 23,601$$

$$\eta_{opt} = \sqrt{\frac{1}{10^{-2,3779}}} = 15,13$$

Yapılan optimizasyon sonucunda optimum aerodinamik verim %15,13 olarak tespit edilmiştir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada taguchi metodu kullanılarak rüzgar türbin kanatlarında hava kanalı sayısı ve açılma hızının kanat performansına etkisi tespit edilmiştir. Taguchi metoduna göre 15 hava kanallı kanat, 6 dev/s hızla çalışırken en verimli çalışma haline sahip olduğu tespit edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen çalışma koşulları ve kanat tasarımı sistemde %15,13 verim ile çalışabilmektedir.

Kanat üzerine açılan hava kanalları, kanat üzerine etki eden hava basıncında düşüşe neden olmaktadır. Aynı zamanda kanata etki eden viskoz kuvvetleri de değişime uğratmış olur. Yapılan ölçüm değerlerinde 5 hava kanallı kanat yaklaşık 6,6 dev/s açılma hızında en büyük güç katsayısı ( $C_p$ ) olan 0,1336 değerini vermektedir. 10 hava kanallı kanat yaklaşık 6,3 dev/s açılma hızında en büyük güç katsayısı ( $C_p$ ) olan 0,1502 değerini vermektedir. 15 hava kanallı kanat yaklaşık 6,2 dev/s açılma hızında en büyük güç katsayısı ( $C_p$ ) olan 0,1508 değerini vermektedir. Hava kanalı bulunmayan kanat için en büyük güç katsayısı 6,8 dev/s için yaklaşık 0,1498 değerini vermektedir.

Sonuçlar incelendiğinde kanatlara açılan hava kanalları kanatların çalışma bölgelerini değiştirdiği görülmektedir. Kanatlara açılan hava kanalları önce güç katsayısı değerini düşürdüğü görülürken sonrasında hava kanalı sayısı arttıkça güç katsayısının yükseldiği görülmektedir. Tasarımı yapılan kanatlardaki hava kanalı sayısının artması kanatların en büyük güç katsayısına sahip olduğu bölgeyi daha düşük devirlere getirdiği görülmüştür.

Yapılan optimizasyon sonucunda 15 hava kanallı tasarımın, hava kanalı olmayan tasarıma göre 6 dev/s'de performans artışı incelendiğinde yaklaşık %1'lik performans artışı olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada kullanılan kanatın süpürdüğü alan için 8 m/s hıza sahip rüzgar demetinde yaklaşık 142 W enerji mevcuttur. Güç katsayısındaki bu %1'lik artış jeneratör rotorunda fazladan 1,42 W enerji kazancı sağlamış olur. Ayrıca 15 hava kanallı tasarımın diğer kanatlara göre daha düşük devirde en büyük güç katsayısı değerini vermesi, çalışma şartları açısından ses ve titreşimlerden kaynaklı sorunların önüne geçebilir.

Bu çalışma farklı hücüm açılı kanat tasarımları için tekrarlanarak, kanata etki eden basınç ve viskoz kuvvetlerdeki değişimin güç katsayısına etkisi araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, [www.enerji.gov.tr](http://www.enerji.gov.tr), Erişim Tarihi: 31.03.2024.
- [2]. Abbasi, A., Ghassemi, H., Molyneux, D., (2019)., Power and thrust coefficients of the horizontal axis tidal stream turbine with different twist angles, blade numbers, and section profiles, Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Szczecin.
- [3]. Bai, C. -J., Wang, W. -J., Chen, P. -W., (2016). The effects of sinusoidal leading edge of turbine blades on the power coefficient of horizontal-axis wind turbine (HAWT). International Journal of Green Energy.
- [4]. Noorollahi, Y., Ghanbari, S., Tahani, M. (2019). Numerical analysis of a small ducted wind turbine for performance improvement. International Journal of Sustainable Energy.
- [5]. Bilgili, M., (2021)., Küçük Kapasiteli, Yatay Eksenli ve Akış Hızlandırıcılı Rüzgar Türbinlerinin Performans Analizi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 01950, Ceyhan-Adana.
- [6]. Zhang, H., Wen, J., Zhan, J., Xin, D., (2022)., Effects of blade number on the aerodynamic performance and wake characteristics of a small horizontal-axis wind turbine., *Energy Conversion and Management*.
- [7]. Yağmur, A.O., (2011). Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [8]. Karadağ, H. İ., (2009). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Rüzgar Türbini Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [9]. Karabacak, M., Kılıç, F., Cantaş, Y., Atmaca, Ö., Küçük, T. V., (2017), Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kanat ucu hız oranı tabanlı maksimum güç izleme denetimi; kapsamlı bir tasarım., *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.*, Sakarya.
- [10]. Johnson., G. L., (2006), Wind Energy Systems, Electronics Edition, Manhattan K.S., 10 October.
- [11]. Elektrik Yük. Müh., SANER, Y., (2016)., Güç Dağıtımı: 1, Dağıtım Dizgeleri, Senkron Generatörler, İSTANBUL.
- [12]. Prof Dr. ÖZBEY, Ş., (2010)., Elektrik Devre Analizi 2., Sakarya.
- [13]. Barut, Z., BİLGİN, T. T., (2023)., Konut Fiyatlarının Tahmini için Polinomsal Regresyon ve Yapay Sinir Ağları Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması., *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.

- [14]. Kavak Akpınar, E., (2005)., Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi, *Mühendis ve Makina*.
- [15]. Erken, N., (2008). Mikroboru Akışlarındaki Ölçüm Belirsizlikleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- [16]. İç, Y. T., Yıldırım., S., (2012)., Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Birlikte Taguchi Yöntemini Kullanarak Bir Ürünün Tasarımının Gerçekleştirilmesi.,Gazi Üniversitesi.
- [17]. Canyılmaz.,E.,Kutay.,F., (2003)., Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım.,Gazi Üniversitesi.
- [18]. Özdemir, İ., (2018)., Kesirli Faktöriyel Tasarım ve Taguchi Yönteminin Kompozit Malzeme Üzerine Uygulaması., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü., Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
- [19]. Kim., E. H., Hyun, K. H., Kwak, Y. K., (2005)., Optimal Design of Radial Basis Design Function Using Taguchi Method, *International Conference on Neural Networks and Brain*.
- [20]. Durmaz, U., Ozel, M. B., (2019), An Experimental Study On Extraction Of Sugar From Carob Using With Taguchi Method., *Sakarya University Journal Of Science.*, Sakarya.
- [21]. Baylan, K., (2003).,Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile Eniyilemesi ve Bir Uygulama., İstanbul Üniversitesi., Sosyal Bilimler Enstitüsü., Doktora Tezi, İstanbul.
- [22]. Ünverdi, M., Küçük, H., (2018), Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
- [23]. Sakarya, N., Göloğlu, C., (2005)., Taguchi Yöntemi ile Cep İşlemede Kullanılan Takım Yolu Hareketlerinin ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Belirlenmesi., Tasarım ve Konstrüksiyon Eğitimi Ana Bilim Dalı, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 78050, Karabük.
- [24]. Yiğit, C., (2018)., Improving the Horizontal Axis Wind Turbine Blades Profiles, *Sakarya University Journal Of Science.*, Sakarya.

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Adem Akın DURAN

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılından beri EÜAŞ Sarıyar Hasan Polatkan Hidroelektrik Santrali İşletme Müdürlüğünde çalışmaktadır.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- DURAN, A. A., YİĞİT C. (2024, 18-19, Mayıs). Hava Kanallarının Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Performansı Üzerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi. 9. *ULUSLARARASI AKADEMİK ÖĞRENCİ ÇALIŞMALARI KONGRESİ*, İstanbul, Türkiye.