



**SAVONIUS RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİK PERFORMANSININ  
TAGUCHİ METODU İLE ARTIRILMASI**

**Ahmet Fatih KAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2021**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Fatih KAYA

02/11/2021

# SAVONIUS RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİK PERFORMANSININ TAGUCHİ METODU İLE ARTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Fatih KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2021

## ÖZET

Savonius rüzgâr türbinleri bir dikey eksenli rüzgâr türbini çeşididir. Bu türbinler kanatları sayesinde rüzgârı toplar ve elektrik jeneratörleri vasıtasıyla elektrik üretirler. Bu çalışmada kanat tipi, kanat örtüşme oranı, kanat ayrılma mesafesi ve kanat kalınlığının bir savonius rüzgâr türbini aerodinamik performansına olan etkisi realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Her bir parametre için 3 farklı değer belirlenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için ANSYS Fluent, Taguchi optimizasyon metodunun uygulanması için ise Minitab yazılımı kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek aerodinamik performans 0,15 kanat örtüşme oranı, -7,5 mm kanat ayrılma mesafesi, 2 mm kanat kalınlığı ve eliptik kanatlara sahip rüzgâr türbininden elde edilmiştir. Yüksek kanat uç-hız oranlarında modifiye edilmiş türbin ve klasik türbin arasındaki aerodinamik performans farkının düşük kanat – uç hız oranlarına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Kanat uç-hız oranı 1,4 iken güç katsayısında yaklaşık %92,2 artış gözlemlenmiştir. Ayrıca optimizasyon sonucunda türbinin optimum kanat-uç hız oranı değeri değişmiştir.

Bilim Kodu : 92806  
Anahtar Kelimeler : Savonius rüzgâr türbini, fluent, HAD, taguchi optimizasyon metodu  
Sayfa Adedi : 49  
Danışman : Prof. Dr. Adem ACIR

# ENHANCING THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF A SAVONIUS WIND TURBINE WITH TAGUCHI METHOD

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Fatih KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2021

## ABSTRACT

Savonius wind turbines are a type of vertical axis wind turbines. They catch wind with their blades and produce electricity with electric generators. In this research, effect of some design parameters such as blade type, overlap ratio, separation distance and blade thickness to the aerodynamic performance of a savonius wind turbine was investigated numerically with using realizable k-epsilon turbulence model. 3 Different values were selected for all parameters. Computational fluid dynamics analyses were performed with using Fluent software and Taguchi method was used for the optimization process through Minitab software. It was seen that a savonius rotor with the elliptical blade which has 2 mm thickness, 0,15 overlap ratio and -7,5 mm separation distance shows the best aerodynamic performance. In higher tip speed ratio values, it was observed that the difference between aerodynamic performances of conventional and optimized rotor is greater than in lower tip speed ratios. Power coefficient was raised almost 92,2% for tip speed ratio = 1,4. Optimum tip speed ratio value was changed after the optimization process.

Science Code : 92806  
Key Words : Savonius wind turbine, CFD, fluent, taguchi optimization method  
Page Number : 49  
Supervisor : Prof. Dr. Adem ACIR

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana olan desteğini ve güvenini esirgemeyen ve vermiş olduğu fikirler ile beni yönlendiren değerli danışmanım sayın Prof. Dr. Adem ACIR'a teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda bilgilerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen ve beni her türlü alanda destekleyen sayın Arş. Gör. Himmet Erdi TANÜRÜN'e teşekkür ederim.

Lisans eğitimimde tanıştığım, bana olan güveni ve inancı sayesinde elde ettiğim başarıların mimarı eşim Elif KAYA'ya sevgilerle.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ.....	11
2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması .....	11
2.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	12
2.1.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri.....	13
2.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Aerodinamiği .....	16
3. MATERYAL VE METOT .....	19
3.1. Akış Alanı Tasarımı .....	20
3.2. Ağ Yapısından Bağımsızlığın Kontrolü.....	21
3.3. $Y^+$ Değeri.....	23
3.4. Türbülans Modeli ve Sayısal Ayarlar .....	24
4. OPTİMİZASYON SÜRECİ .....	29
4.1. Taguchi Metodu .....	29
4.2. Seçilen Parametrelerin Optimizasyonu .....	30
4.3. Akış Analizi .....	38
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	43
KAYNAKLAR .....	45

ÖZGEÇMİŞ ..... 49



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Modellenen türbinin ölçüleri .....	19
Çizelge 3.2. Referans değerleri.....	19
Çizelge 3.3. Eleman sayısına göre gözlemlenen $C_p$ değerleri.....	22
Çizelge 3.4. Ağ kalitesini gösteren bazı detaylar.....	23
Çizelge 4.1. Optimizasyon sürecinde kullanılan parametreler ve seviyeler .....	30
Çizelge 4.2. $L_9$ ortogonal dizisi için S/N oranları ve $C_p$ değerleri.....	31
Çizelge 4.3. Delta değerleri ve seçilen parametrelerin önemi .....	33
Çizelge 4.4. Regresyon denklemi ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	34
Çizelge 4.5. Güç katsayısı değerleri için ANOVA sonuçları .....	35
Çizelge 4.6. Klasik ve optimum dizayn kullanılarak elde edilen güç katsayıları ve farkları .....	37

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. a) Rüzgârı önden alan 3 kanatlı rüzgâr türbini b) rüzgârı arkadan alan 2 kanatlı rüzgâr türbini.....	12
Şekil 2.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri a)savonius tip b)darrieus tip c)h-darrieus tip	14
Şekil 2.3. Bir H - Darrieus rüzgâr türbini şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.4. 2 boyutlu bir savonius rüzgâr türbininin şematik gösterimi .....	18
Şekil 3.1. Akış alanı tasarımı .....	20
Şekil 3.2. Kanatlar ve arayüzün adlandırılması .....	21
Şekil 3.3. Ağ yapısı.....	22
Şekil 3.4. Kanat etrafındaki $y +$ dağılımı.....	23
Şekil 3.5. Türbülans modellerine göre hesaplanan $C_p$ değerleri .....	25
Şekil 3.6. Zamana bağlı moment katsayısı ( $C_m$ ) grafiği .....	26
Şekil 4.1. Eliptik kanat b) klasik yarım daire kanat c) yarı eliptik kanat.....	31
Şekil 4.2. Ortalama S/N oranları.....	32
Şekil 4.3. Regresyon doğrusu .....	34
Şekil 4.4. A1B2C3D1 dizaynı .....	36
Şekil 4.5. Klasik ve A1B2C3D1 türbinlerin aerodinamik karakteristiği.....	36
Şekil 4.6. Farklı $\lambda$ değerleri için azimut açısı ( $\Theta$ ) ve $C_p$ değerleri .....	38
Şekil 4.7. Basınç konturları a) A1B2C3D1 $\lambda=0,8$ b) klasik dizayn $\lambda=0,8$ c) A1B2C3D1 $\lambda=1$ d) klasik dizayn $\lambda=1$ .....	39
Şekil 4.8. Hız konturları a) A1B2C3D1 $\lambda=0,8$ b) klasik dizayn $\lambda=0,8$ c) A1B2C3D1 $\lambda=1$ d)klasik dizayn $\lambda=1$ .....	41

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

$C_m$	Moment Katsayısı
$C_p$	Güç Katsayısı
$P_t$	Türbinden Elde Edilen Güç
$P_w$	Rüzgâr Gücü
$n_{mean}$	Sinyal / Gürültü Oranlarının Ortalaması
$\bar{y}$	Gözlem Verilerinin Ortalaması
$D$	Türbin Çapı
$n$	Toplam Gözlem Sayısı
$s$	Kanat Ayrılma Mesafesi
$S/N$	Sinyal / Gürültü Oranı
$T$	Tork
$\beta$	Kanat Örtüşme Oranı
$y$	Gözlem Verisi
$A$	Kanat Süpürme Alanı
$H$	Türbin Yüksekliği
$N$	Kanat Sayısı
$R$	Kanat Çapı
$U$	Rüzgâr Hızı
$e$	Kanat Örtüşme Mesafesi
$\lambda$	Kanat Uç-Hız oranı
$\rho$	Hava Yoğunluğu
$\omega$	Türbin Açısız Hızı

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>CFD</b>	Computational fluid dynamics
<b>HAD</b>	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

**Kısaltmalar****Açıklamalar****HAWT**

Yatay eksenli rüzgâr türbini

**RNG**

Renormalization group

**SST**

Shear stress transport

**TSR**

Kanat uç-hız oranı

**VAWT**

Dikey eksenli rüzgâr türbini



## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu var olduğundan bu yana nüfusun artması ve teknolojik gelişmeler ile birlikte enerji ihtiyacı da sürekli olarak artış göstermiştir. Özellikle sanayi devriminin ardından kas gücüne olan ihtiyacın azalması, yerine endüstriyel makinaların kullanılması bu enerji ihtiyacının artışında büyük bir rol oynamaktadır.

Binlerce yıl önce insanlar yalnızca kas gücünü kullanırken ihtiyaç duyulan enerji besinlerden karşılanabiliyordu. Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir kısmı petrol ve doğalgaz gibi fosil kökenli yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu yakıtların kullanılması ile birlikte karbondioksit, metan gibi sera gazları açığa çıkmakta, bu ise küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Bunun sonucunda ise iklimler değişmekte, ortalama sıcaklıklar artmakta, buzullar erimekte ve binlerce canlı türünün hayatı tehlikeye girmektedir. Aynı zamanda ortaya çıkan bu gazlar insan ve diğer canlıların sağlığı açısından tehlike yaratmakta, özellikle akciğer olmak üzere kanser, astım gibi hastalıkların insidansında artışa neden olmaktadır. Günümüz devletleri fosil kökenli yakıtların sebep olduğu bu olumsuz etkileri en aza indirmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yatırım yapmaktadır. Bu sayede sera gazı salınımının azaltılması, küresel ısınmanın durdurulması ve fosil kökenli yakıtların çevre ve canlı sağlığı üzerindeki bu olumsuz etkisi azaltılmaya çalışılmaktadır.

Dođal kaynaklardan elde edilen, tükenme tehlikesiyle karşı karşıya olunmayan ve sıfır veya sıfıra yakın sera gazı salınımı yapan enerji kaynaklarına yenilenebilir enerji kaynakları adı verilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kısaca şunlardır;

- Rüzgâr Enerjisi
- Güneş Enerjisi
- Hidroelektrik Enerji
- Jeotermal Enerji
- Biokütle Enerjisi
- Hidrojen Enerjisi
- Dalga Enerjisi
- Gelgit Enerjisi

Güneş enerjisi sistemleri, güneşten gelen fotonların sahip olduğu enerjinin güneş panelleri sayesinde toplanıp bu enerji ile elektrik veya ısı enerjisi elde edildiği sistemlerdir. Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde bulunan yüksek sıcaklık sayesinde oluşan sıcak su, buhar ve gazların sahip olduğu enerjidir. Tarımsal veya hayvansal atıklardan biyolojik süreçler ile elde edilen yakıtların yakılması sonucu oluşan enerji türüne biokütle enerjisi denilmektedir. Hidroelektrik enerji, dalga enerjisi ve gelgit enerjisi sistemleri akan suyun gücünün elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerdir. Hidrojen ise doğada tek başına bulunmadığından dolayı doğrudan bir enerji kaynağı değil, enerji taşıyıcısı olarak adlandırılmaktadır.

Güneşin dünyamızı farklı miktarda ısıtmasından dolayı rüzgâr oluşmaktadır. Isınan hava yükselir, soğuyan hava ise alçalır. Oluşan yüksek ve alçak basınç bölgeleri arasında yer değiştiren hava akımına rüzgâr denilmektedir. Rüzgâr enerjisi, rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu kinetik enerjidir. Rüzgârın sahip olduğu bu kinetik enerji türbin kanatları tarafından toplanır ve mekanik enerjiye dönüştürülür. Ardından elektrik jeneratörleri vasıtasıyla bu mekanik enerji kullanılarak elektrik üretilmiş olur.

Rüzgâr enerjisi temelli yenilenebilir enerji santrallerinin ilk yatırım maliyetleri yüksektir ve enerji üretimi rüzgâr hızına göre değişiklik gösterir. Bunun yanı sıra üstünlükleri şöyle sıralanabilir;

- Temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle çevre dostudur.
- Kaynağının tükenme riski yoktur.
- İlk yatırımdan sonra bakım-işletme maliyetleri yüksek değildir.
- Kısa bir sürede işletmeye alınabilir.

Rüzgâr türbinleri dönüş yönüne göre yatay eksenli rüzgâr türbinleri ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri olarak ikiye ayrılırlar. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde türbin kanatları rüzgâr ile dik açı yaparlar. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin ise dönüş yönü rüzgâr yönüne paraleldir. Her iki türbin tipinin de birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin dikey eksenli rüzgâr türbinlerini rüzgâr yönüne döndürmeye gerek yoktur. Boyutlarının küçük olması sayesinde mobiliteleri yüksektir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin ise verimleri daha yüksektir. Bu sayede daha yüksek enerji ihtiyacının olduğu yerlerde kullanılabilirler.

### Araştırmanın amacı ve yöntemi

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin verimlerinin düşük olması kullanımlarının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Bu çalışmada kanat kalınlığı, kanat tipi, kanat örtüşme oranı ve kanat ayrılma mesafesi olmak üzere 4 farklı parametrenin bir savonius rüzgâr türbini aerodinamik performansına olan etkisi sayısal olarak ANSYS Fluent yazılımında incelenecek ve rüzgâr türbini veriminin artırılması için Taguchi metodu kullanılarak bir optimizasyon çalışması yapılacaktır. Her bir parametre için 3 farklı değer kullanılacaktır. Taguchi metodu, aynı anda birden fazla değişkenin değerlendirilip aralarında en uygun olanların belirlendiği bir optimizasyon metodudur. Bu metot ile deney sayısı azaltılır ve çözümler daha kısa sürede tamamlanır. Çalışmanın sonunda türbin kanatları etrafında meydana gelen basınç ve hız konturları da yorumlanacaktır. Literatürde bulunan çalışmaların çoğunda rüzgâr türbinlerinin performansına etki eden parametreler ayrı ayrı incelenmiş olup, bu parametreler aynı anda değerlendirilmemiştir. Bu çalışma ile birlikte literatüre hem Taguchi metodu, hem de savonius rüzgâr türbinleri ile ilgili bir yenilik kazandırılacaktır.

### Literatür taraması

Literatür incelendiğinde, özellikle son yıllarda dikey eksenli rüzgâr türbinleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda türbin kanat sayısı, türbin yarıçapı, kanat şekilleri, rüzgâr türbülans oranı, rüzgâr hızı gibi bazı şartların rüzgâr türbini aerodinamik katsayısına olan etkileri HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımları ile veya deneysel olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, Fujisawa ve Gotoh tarafından yapılan çalışmanın deneysel verileri kullanılmıştır. Çalışmalarında farklı rotor açıları ve kanat uç-hız oranlarında bir savonius rüzgâr türbini aerodinamik performansını kanat yüzeyindeki basınç dağılımlarını ölçerek hesaplanmışlardır. Kullandıkları türbin 2 kanatlıdır ve kanat örtüşme oranı 0,15'tir. Rotor çapı ve yüksekliği 300 mm ve kanat kalınlığı 4 mm olacak şekilde deneyler yürütülmüştür. 6 m/s rüzgâr hızında deneylerini gerçekleştirmişlerdir [1].

Akwa ve diğerleri, kanat örtüşme oranının bir rüzgâr türbininde gözlemlenen moment ve güç katsayısı değerine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında SST (Shear Stress

Transport) k-omega türbülans modelini kullanmışlardır. Kanat örtüşme oranının etkisi incelenirken Reynolds sayısı sabit tutulmuştur. Yapmış oldukları sayısal analizlerde kullanılan metotlar hakkında bilgi verdikten sonra HAD analizlerinde zaman aralığının ortalama güç katsayısı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Referans aldıkları deneysel veriler ile gözlemledikleri sayısal analiz sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Ardından kanat örtüşme oranı 0, 0,15; 0,3; 0,45 ve 0,6 olacak şekilde türbin geometrilerini değiştirmişlerdir ve ortalama moment ve güç katsayıları hesaplanmıştır. Sonuç olarak kanat örtüşme oranının 0,15'e kadar yükseltilmesi güç katsayısını artırmış, daha büyük kanat örtüşme oranı değerleri ise güç katsayısını azaltmıştır. Yapılan bu hesaplamalara ek olarak türbin kanatları etrafındaki rüzgâr hızı dağılımları gösterilmiştir [2].

Wenehenubun ve diğerleri, kanat sayısının bir savonius rüzgâr türbini aerodinamik performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. 2, 3 ve 4 kanada sahip olan rüzgâr türbinlerinin verimlerini farklı rüzgâr hızlarında karşılaştırmışlardır. Aynı zamanda kanatlar etrafındaki basınç dağılımlarını gözlemek için ANSYS yazılımını kullanmışlardır. Kullandıkları türbinlerin kanat örtüşme oranları 0,15 ve türbin çap ve yükseklikleri eşit olarak belirlenmiştir. Deneyler tüm türbin tipleri için 1 m/s-10 m/s rüzgâr hızı aralığında yapılmıştır. Yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre, 3 türbin tipi için de optimum dönüş hızına sahip olunması için rüzgâr hızının 7 m/s ve üzeri olması gerektiği görülmüştür. Gözlemlenen en yüksek kanat uç-hız oranı 3 kanatlı rüzgâr türbininin 7 m/s rüzgâr hızında döndürülmesi ile 0,555 olarak hesaplanmıştır. 4 kanatlı rüzgâr türbininden elde edilen torkun tüm neredeyse rüzgâr hızlarına göre 2 veya 3 kanatlı rüzgâr türbininden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Düşük kanat uç-hız oranlarında 4 kanatlı rüzgâr türbini, yüksek kanat uç-hız oranlarında ise 3 kanatlı rüzgâr türbini en iyi aerodinamik performansı göstermiştir [3].

Tian ve diğerleri, modifiye edilmiş kanatlara sahip bir savonius rüzgâr türbininde kanat doluluk oranının türbin aerodinamik performansına etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. 0,5 ile 3 aralığında 7 farklı doluluk oranına sahip çeşitli kanat modelleri kullanmışlardır. Türbin çapı ve yüksekliği sabit tutulmuştur. 7 m/s rüzgâr hızı ve %1 türbülans yoğunluğu ile yapılan simülasyonlarda RNG (Renormalization group) k-epsilon türbülans modelini kullanmışlardır. Ağ sayısından bağımsızlığın da analiz edildiği bu çalışmada, 80 000 ve 120 000 ağ sayıları arasında analiz sonuçları bakımından pek bir fark görülmediği için çalışma 80 000 ağ sayısında tamamlanmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre 0,4 ve 0,9 kanat uç-hız oranı aralığında en düşük aerodinamik performans kanat doluluk oranı 0,5 olan türbinde

gözlemlenmiştir. Daha yüksek kanat uç-hız oranlarında ise kanat doluluk oranı 3 olan türbin en düşük performansı göstermiştir. Kanat uç-hız oranı 0,4-0,6 arasında en yüksek aerodinamik performans 1,5 kanat doluluk oranına sahip türbinde ölçülmüşken, daha yüksek kanat uç-hız oranlarında 1 kanat doluluk oranına sahip türbinde en fazla güç katsayısı izlenmiştir [4].

Roy ve Saha, bir rüzgâr türbininde hesaplanan güç katsayısı değerine 5 farklı kanat yapısının (bach, benesh, yarı eliptik, klasik yarım daire ve kendi tasarladıkları model) etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerini farklı rüzgâr hızlarında yapmış, kullandıkları türbin modellerinin çapı ve yüksekliğini 230 mm ve kanat kalınlıkları 0,63 mm olacak şekilde tasarlamışlardır. Yapmış oldukları bu çalışma sonucunda, 5 farklı Reynolds sayısında da ( $6,0 \times 10^4$ ,  $8,3 \times 10^4$ ,  $9,0 \times 10^4$ ,  $1,2 \times 10^5$  ve  $1,5 \times 10^5$ ) kendi tasarladıkları kanat modeline sahip türbinden en yüksek aerodinamik performansı elde etmişlerdir. Tüm bu Reynolds sayılarında en düşük güç katsayısı ise klasik yarım daire kanat yapısına sahip türbin modelinde gözlemlenmiştir [5].

Sanusi ve diğerleri klasik yarım daire, eliptik ve bu ikisinin bir arada kullanıldığı birleşik kanat ismini verdikleri 3 farklı kanat yapısına sahip türbin modelini sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır. 3 farklı türbin modelinin çapları ve yükseklikleri eşit (200 mm), ve kanat örtüşme oranları 0,15'tir. 5,999 m/s rüzgâr hızında gerçekleştirilen sayısal analizler için ANSYS Fluent yazılımını kullanmışlardır. 40 000, 80 000 ve 130 000 ağ sayısında yapılan ağ sayısından bağımsızlık testlerinde 80 000 ve 130 000 ağ sayıları arasında gözlemlenen fark çok az olduğu için sayısal analizler 80 000 ağ sayısında tamamlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tüm kanat uç-hız oranlarında birleşik kanat adını verdikleri kanat yapısına sahip türbin modelinde gözlemlenen güç katsayısı değeri diğer iki kanat modelini kullanan rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek olmuştur [6].

Mahmoud ve diğerleri, en yüksek aerodinamik performansın yakalanması için farklı geometrik özelliklere sahip türbin modellerini deneysel olarak test etmişlerdir. Farklı rüzgâr hızlarında yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda, 2 kanatlı türbin modeli 3 ve 4 kanatlı türbin modellerine göre daha yüksek performans göstermiştir. Kanat örtüşme oranı 0 olan rüzgâr türbini modellerinde kanat örtüşme oranı 0'dan büyük olan modellere göre daha fazla güç katsayısı gözlemlenmiştir. Türbin kanat yüksekliği / çap oranı arttıkça hesaplanan

güç katsayısı değeri de artmıştır. Aynı zamanda 2 katlı rüzgâr türbini kullanıldığında, tek katlı rüzgâr türbinine göre daha fazla aerodinamik performans elde edilmiştir [7].

Sahim ve diğerleri, bir savonius-darrieus kombine rüzgâr türbininde türbin yarıçap oranlarının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarda, sadece darrieus rüzgâr türbininin kullanılması ile daha yüksek kanat uç-hız oranlarında daha yüksek güç katsayısı elde edilebileceği belirtilmiştir. Savonius rüzgâr türbini yarıçapı / darrieus rüzgâr türbini yarıçapı olarak adlandırdıkları 3 farklı RL değeri için (0,33; 0,52; 0,76) bu türbin tiplerinin beraber kullanıldığı durumlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre darrieus türbin yarıçapının değiştirilmesi ile birlikte RL oranının artırılması daha düşük güç katsayısı ve daha yüksek tork katsayısı hesaplanmasına sebep olmuştur. Aynı zamanda savonius rotor yarıçapının artması da güç katsayısını azaltmış ve tork katsayısını artırmıştır [8].

Puspitasari ve Sahim, bir darrieus rüzgâr türbini içerisine yerleştirilmiş savonius rüzgâr türbini tasarımında savonius rüzgâr türbini yüksekliğinin toplam güç katsayısına olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada hem savonius, hem darrieus türbini 2 kanatlı modellenmiştir. Savonius rüzgâr türbini kanat kalınlığı 0,5 mm, kanat örtüşme oranı 0 ve kanat çapı 30 mm olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Aynı zamanda kullanılan darrieus rüzgâr türbini çapı 180 mm, savonius rüzgâr türbini çapı ise 60 mm'dir. Yapılan deneysel analizlerde  $\delta$  olarak tanımladıkları savonius rüzgâr türbini yüksekliği / darrieus rüzgâr türbini yüksekliği oranının 0,4; 1,0 ve 1,4'e eşit olduğu 3 farklı türbin tipi ve sadece darrieus rüzgâr türbini test edilmiş, en yüksek güç kat sayısı 10 m/s rüzgâr hızı için  $\delta = 1,4$ 'a eşit olduğu türbin modelinde gözlemlenmiştir. Bu türbinde farklı rüzgâr hızlarında (10 m/s, 7 m/s, 5 m/s) yapılan deneylerde, en yüksek güç katsayısı rüzgâr hızının 10 m/s'ye eşit olduğu, en düşük güç katsayısı ise rüzgâr hızının 5 m/s'ye eşit olduğu zaman gözlemlenmiştir. Aynı zamanda  $\delta = 1,4$  olan türbin modelinin düşük rüzgâr hızları için de geniş çalışma aralığına sahip olduğundan en uygun türbin modeli olduğu belirtilmiştir [9].

Rogowski ve Maronski, savonius rüzgâr türbinleri ile ilgili 2 boyutlu bir HAD çalışması yapmışlardır. Kullanılan türbülans modellerinin doğruluğu deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış, standart k-epsilon ve standart k-omega türbülans modelleri hariç diğer tüm modellerin düşük kanat uç-hız oranlarında gerçeğe yakın bir sonuç verdiği, 0,8 ve 2,0 kanat uç-hız oranları aralığında ise Spalart Allmaras ve RNG k-epsilon türbülans modelinin deneysel sonuçlara en çok yaklaşan türbülans modelleri olduğu belirtilmiştir [10].

Alit ve diğçerleri, savonius rüzgâr türbininde kanat çapı, kanat sayısı ve akışı hızlandırmak için kullanılan akış yoğunlaştırıcısının rüzgâr türbini aerodinamik performansına olan etkisini gözlemlemek için bir deneysel çalışma yapmışlardır. Kanat çapı 6 cm, 12 cm ve 18 cm, kanat sayısı 2, 3 ve 4 olacak şekilde tasarladıkları modelleri farklı geometrik şekillere sahip yoğunlaştırıcı etkisine dayalı olarak incelemişlerdir. Rüzgârın yoğunlaştırıcıya girdiği alan uzunluğuna a, rüzgârın türbine giriş yaptığı noktadaki alan uzunluğuna b demiş ve a/b oranını yoğunlaştırıcı oranı olarak isimlendirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, yoğunlaştırıcının rüzgâr hızını artırmasından dolayı türbin dönüş hızını artırdığı, bunun sonucunda da türbinden elde edilen gücün ve güç katsayısının arttığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda 2 kanatlı savonius rüzgâr türbininin daha kararlı bir dönüş sergilediği ve 3 ve 4 kanatlı rüzgâr türbinine göre daha yüksek aerodinamik performans gösterdiği, 12 cm kanat çapı ve 6:1 yoğunlaştırıcı oranına sahip rüzgâr türbini modelinin optimum model olduğu gözlemlenmiştir [11].

Alom ve Saha, kanat yapısının savonius rüzgâr türbini güç katsayısına etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında 4 farklı kanat yapısı ( klasik yarım daire kanat, benesh kanat, eliptik kanat ve modifiye bach kanat) kullanmışlardır. Sayısal çalışmada öncelikle 4 farklı ağ sayısı için ağdan bağımsızlık testleri uygulanmıştır. 163 984 ve 242 832 ağ sayılarında elde edilen sayısal analiz sonuçları birbirine oldukça yakın hesaplanmış ve çalışmalarına 163 984 ağ sayısında devam etmişlerdir. Ardından analizler 0,5, 1, 2 ve 3° aralıklarla bir tam tur için yapılmış, 0,5 ve 1° çözüm aralığında hesaplanan değerler birbirine yakın bulunmuş ve sayısal analizler 1° çözüm aralığında gerçekleştirilmiştir. 6,2 m/s rüzgâr hızının ve %0,04 türbülans yoğunluğunun kullanıldığı modelde türbülans modeli SST k-omega olarak seçilmiştir. Yapılan 2 boyutlu analizler sonucunda kanat uç-hız oranı – güç katsayısı grafiği çıkartılmış, aerodinamik performanslar en yüksekten en düşüğe doğru sırasıyla eliptik, modifiye bach, benesh ve klasik yarım daire kanat yapısına sahip olan rüzgâr türbini modellerinde gözlemlenmiştir. Tüm türbin modelleri için Reynolds sayısının artması, hesaplanan maksimum güç katsayısı değerini artırmıştır [12].

Damak ve diğçerleri, 180° açığa sahip kıvrımlı (helical) yapıya sahip bir savonius rüzgâr türbininin aerodinamik davranışına reynolds sayısı ve kanat örtüşme oranının etkisini bir açık jet rüzgâr tüneline incelemişlerdir. 4 farklı Reynolds sayısı için yapılan deneylerde Reynolds sayısının artması ile birlikte gözlemlenen güç katsayısı değeri de artmıştır. Aynı

zamanda kanat örtüşme oranı 0,242 ve kanat yükseklik / çap oranı 1,57 iken güç katsayısı değeri tüm Reynolds sayıları için en yüksek değerde hesaplanmıştır [13].

Mohamed ve diğerleri, 2 ve 3 kanatlı savonius türbin modellerinin aerodinamik davranışına rüzgâr akış hızını kanatlara yönlendirmek için tasarlanmış olan bir yönlendiricinin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları HAD analizleri ile referans aldıkları deneysel analiz sonuçları birbirine oldukça yakın hesaplanmıştır. Yapılan sayısal analiz sonuçlarında, her iki modelde de (2 ve 3 kanatlı) yönlendiricinin kullanılması özellikle yüksek kanat uç-hız oranlarında türbin aerodinamik performansını önemli ölçüde artırmıştır. Kullanılan yönlendirici, türbin self-start yeteneğini yükseltmiştir. Aynı zamanda 2 kanatlı rüzgâr türbininin 3 kanatlı rüzgâr türbinine göre aerodinamik performansının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [14].

El-Askary ve diğerleri, 3 farklı yönlendirici modeli ile rüzgâr akış yönünü kontrol ederek bir savonius rüzgâr türbini performansını iyileştirmeye çalışmışlardır. Çalışmalarındaki temel düşünce, rüzgârı yarım daire şeklinde kanatları olan savonius rüzgâr türbininin konkav kısmına yönlendirmek ve pozitif tork oluşumunu artırmak ve rüzgârı türbinin konveks kısmından uzak tutarak negatif tork üretimini azaltmaktır. Bu amaçla farklı yönlendirici modellerini test etmek için SST k-omega türbülans modelini kullanarak ANSYS Fluent yazılımı ile sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu sayısal analizler sonucunda kullandıkları 1 yönlendirici modeline sahip olan türbinin çalışma aralığında 0,52 güç katsayısı değerinin gözlemlendiği ve aerodinamik performansın önemli ölçüde arttığını hesaplamışlardır. Yalnız kullanılan bu yeni yönlendiricili türbin modellerinin türbin arkasında wake adı verilen rüzgâr hızının çok düştüğü ve diğer türbinlerin performansını azalttığı alanları meydana getirebileceği, birden fazla sayıda rüzgâr türbini kullanılacaksa bunun göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir [15].

Ahmed ve diğerleri, farklı kanat örtüşme oranlarına sahip 2 ve 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinin aerodinamik karakterlerini kıyaslamışlardır. Çalışmalarında aynı kanat çapı ve yüksekliğine sahip 0, 0,2 ve 0,3 kanat örtüşme oranındaki türbinleri kullanmışlardır. Hesaplanan sayısal değerler ile referans alınan deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve birbirine yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Analizler sonucunda daha az kanat sayısına sahip olan rotorun daha fazla pozitif tork ürettiği ve kanat örtüşme oranı 0 olan türbin modelinin daha fazla negatif tork oluşturduğunu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Reynolds sayısının artırılması ile rotorun statik torkunun arttığını belirtmişlerdir [16].

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde optimizasyon çalışmaları yapılırken bu tez çalışmasında da olduğu gibi Taguchi optimizasyon metodu kullanılan araştırmalar az sayıda da olsa bulunmaktadır. Khanjanpour ve Javadi, bir darrieus dikey eksenli rüzgâr türbininin hidrodinamik performansının optimizasyonu için Taguchi metodunu kullanarak HAD çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında 4 farklı parametrenin (bükülme açısı, türbin kanadındaki kamburluk pozisyonu, maksimum kamburluk ve kord/yarıçap uzunluğu oranı) etkisini incelemişlerdir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, türbin hidrodinamik performansına en çok etkileyen parametrenin bükülme açısı, en az etkileyen parametrenin ise kord/yarıçap uzunluğu oranı olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda optimizasyon çalışmasından sonra rüzgâr türbini performansı yaklaşık %24 artmıştır [17].





## 2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgâr enerjisinin ve rüzgâr türbinlerinin kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji türbinler sayesinde önce mekanik enerjiye dönüşmekte, bu enerji sayesinde pervane mili hızlanmakta ve jeneratöre aktarılmaktadır. Jeneratörler sayesinde elde edilen elektrik enerjisi ise aküler ile depolanarak kullanılmakta veya doğrudan şebekeye ulaşmaktadır.

Rüzgâr enerjisi kullanılırken fosil kökenli yakıtlarda olduğu gibi çevreye CO<sub>2</sub>, CO veya NO<sub>x</sub> gibi gazlar salınmamakta, bu sayede sera gazı emisyonlarının önüne geçilmektedir. Yalnız her enerji kaynağında olduğu gibi rüzgâr enerjisinin ve kullanılan rüzgâr türbinlerinin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle çevrede yaşayan canlılar için türbinlerin oluşturduğu gürültü rahatsız edici olabilmektedir. Rüzgâr türbinleri sürü halinde uçan kuşlar için tehlike oluşturmakta, aynı zamanda baz istasyonu sinyallerini bozarak iletişim aksaklıkları meydana getirebilmektedir. Alınan bazı önlemler ile bu dezavantajlar olabildiğince azaltılabilir. Örneğin; kuşların göç yolları üzerine türbin kurmaktan kaçınılması veya baz istasyonu yakınlarına türbin inşa edilmemesi bunlara örnek olarak verilebilir.

Her ne kadar avantajları dezavantajlarının üzerinde olsa da, rüzgâr türbinlerinin son yıllarda güneş panelleri ile rekabeti giderek artmaktadır. Bunun sebebi güneş panellerinde kullanılan malzemelerin son yıllarda çok ucuzlamasıdır. Bu sayede geri ödeme süreleri azalmakta, yatırımcıların güneş panellerine yönelmesi artmaktadır. Aynı zamanda panellerin kurulumu ve enerji üretim hesaplamaları daha kolaydır. Verimleri %20'ler seviyesinde olması bir dezavantaj gibi görünmesine rağmen son yıllardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak bu verim günden güne artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin verimi ise en fazla 'Betz Limiti' adı verilen yaklaşık %59,3'e ulaşabilmektedir.

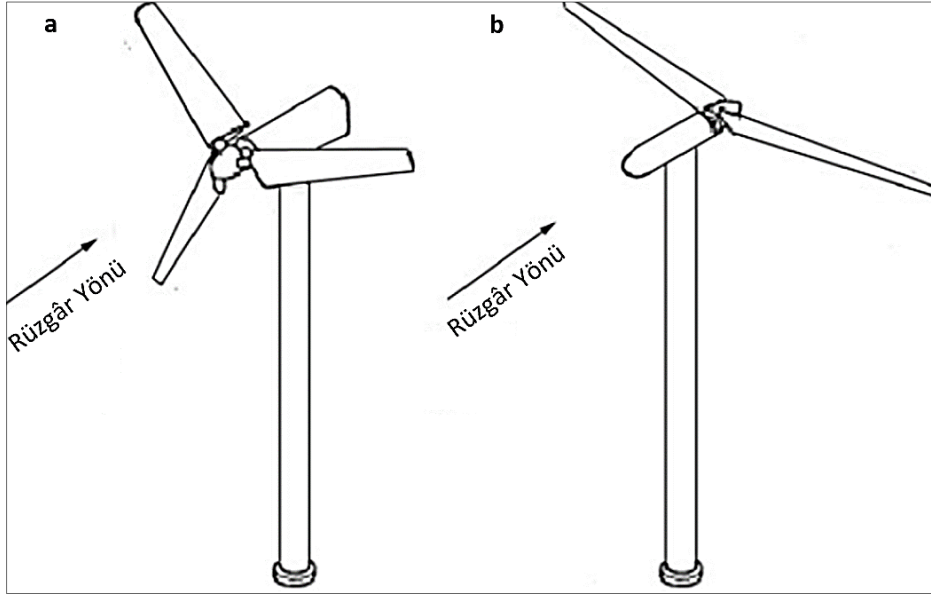
### 2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Tarih boyunca çeşitli amaçlar doğrultusunda farklı tipte ve boyutta rüzgâr türbinleri kullanılmış ve bunların bazıları ticari hale gelmiştir. Rüzgâr türbinleri çalışma prensibi ve yapısının daha kolay anlaşılabilmesi için dönüş yönüne göre genellikle yatay eksenli rüzgâr

türbinleri ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki türbin çeşidinin de birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

### 2.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerin dönme eksenini rüzgâr yönüne dikler. Aynı zamanda kanatları dönme yönüne paraleldir. Verimleri yatay eksenli rüzgâr türbinlerine oranla daha fazladır (Yaklaşık %40 – %45 civarı). Şekil 2.1’de yatay eksenli rüzgâr türbinlerine ait şematik gösterime yer verilmiştir [18].



Şekil 2.1. a) Rüzgârı önden alan 3 kanatlı rüzgâr türbini b) rüzgârı arkadan alan 2 kanatlı rüzgâr türbini [18]

Bu türbin çeşitleri günümüzde ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle yüksek enerji ihtiyacı olan yerlerde site halinde yani birden fazla sayıda yer alırlar. Daha yüksek çalışma hızlarına sahip olması ve verimlerinin daha yüksek olması yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin sahip olduğu bazı avantajlara örnek olarak verilebilmektedir.

#### Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerin kullanılmasının sebebi, dönme hızının kanat sayısına oranla daha hızlı olması ve toplam ağırlığın azaltılması sayesinde rotorun döndürme momentinin düşürülmesidir. Buna karşın kanatların karşı tarafında bir ağırlık kullanılarak türbinin aerodinamik olarak

dengelenmesi gerekmektedir. Aksi halde kanat mekanizma hareketleri sorunlu olacaktır. Bu türbinlerin dönüş hızı üç kanatlı türbinlere oranla daha fazladır, ancak daha yüksek gürültüye sebep olurlar. Bu nedenle kullanımları kısıtlıdır.

### İki kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre maliyetleri daha azdır, daha yüksek dönüş hızlarına sahiptirler, daha düşük rüzgâr hızlarında dönüş sağlayabilmektedirler ve aerodinamik dengeleri daha düşüktür. Bu dengenin sağlanabilmesi için türbinde pahalı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Maliyet / fayda açısından üç kanatlı rüzgâr türbinlerine kıyasla daha kötü olmalarından dolayı günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadırlar. İki kanat, daha çok dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır.

### Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Bu türbinler, atalet momentlerinin düzgün olması, estetik açıdan göze hoş gelmesi ve yüksek verimlilikleri dolayısıyla günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Tek ve iki kanatlı rüzgâr türbinlerine oranla daha sessiz ve sarsıntısız çalışırlar. Momentlerinin düzgün olmasından dolayı daha az kanada sahip diğer türbinlerde olduğu gibi bu momentin dengelenmesi için kullanılan pahalı parçalara gerek yoktur.

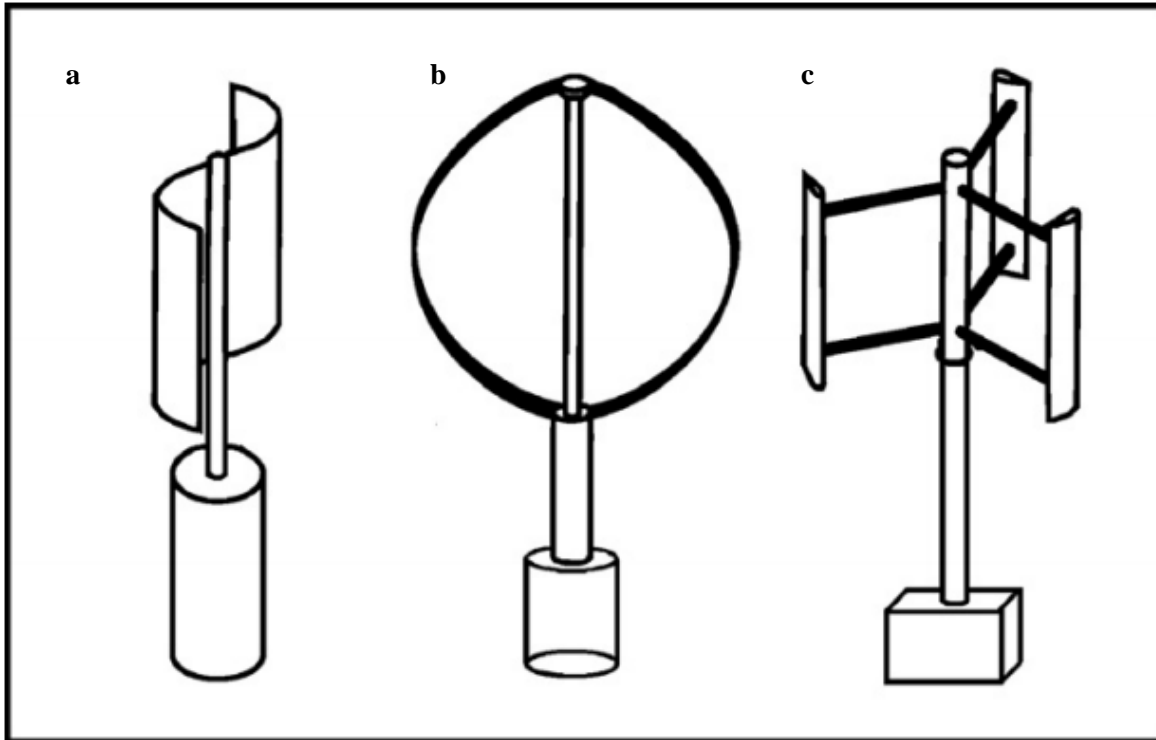
### **2.1.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri**

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenini rüzgâr yönüne paraleldir. Bu türbinler rüzgârı her yönden alırlar ve türbin kanatlarını rüzgâr yönüne doğru döndürmeye ihtiyaç yoktur. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajlarından bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Rüzgâr yönüne döndürülmesine gerek yoktur. Rüzgârı her yönden alırlar.
- Daha küçüktürler. Bu sebeple enerji ihtiyacının göreceli olarak daha az olduğu yerlerde kullanılabilirler.
- Kolay taşınabilirler.
- Maliyetleri daha düşüktür.

- Tamirata ve bakımı kolaydır. Bunun sebebi hem küçük boyutta olmaları, hem de kule gibi ekipmanlara ihtiyaç duyulmamasındandır.

Bu türbinlerin verimleri yatay eksenli rüzgâr türbinlerine oranla daha düşüktür. Yapılan çalışmalarda kanat uç-hız oranı – güç katsayı grafiklerinde yatay eksenli rüzgâr türbinlerine kıyasla daha düşük güç katsayısına sahip oldukları ve daha düşük kanat uç-hız oranlarında çalıştıkları görülmektedir. Bu türbinler de kendi aralarında kanat yapısına göre farklı türlere ayrılmaktadırlar. Drag type adı verilen, kanatlara etkileyen aerodinamik güçler sayesinde dönen türbinlere savonius rüzgâr türbini, lift type adı verilen kanatların üst ve alt yüzeyleri arasındaki basınç farkından dolayı dönme meydana gelen rüzgâr türbini modellerine ise darrieus rüzgâr türbini adı verilmektedir [19]. Şekil 2.2’de dikey eksenli rüzgâr türbinlerine örnek gösterilmiştir [20]. Burada en solda yer alan türbin 2 kanatlı bir savonius rüzgâr türbinidir. Ortadaki darrieus, en sağdaki ise h-darrieus rüzgâr türbinlerine bir örnektir.

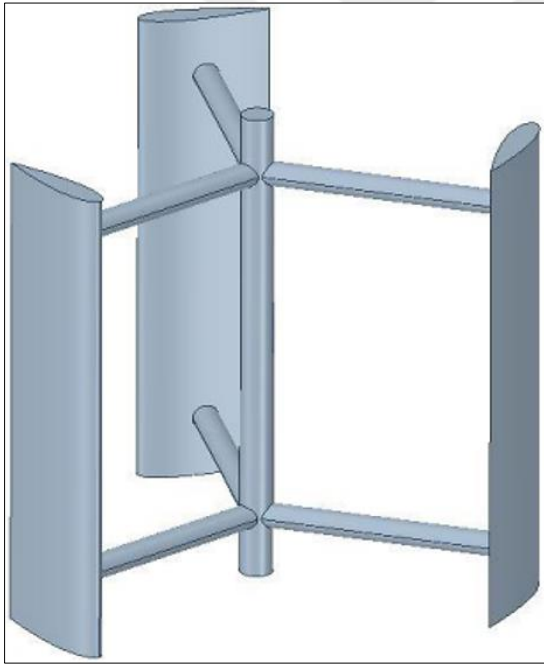


Şekil 2.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri a)savonius tip b)darrieus tip c)h-darrieus tip [20]

### Darrieus rüzgâr türbinleri

Bu türbinler genellikle 3 kanatlı olarak kullanılırlar. Kanat profilleri genelde Naca 0015, Naca 4412 gibi simetrik veya asimetric airfoil yapısına sahiptir. Burada ilk hane maksimum

kamburluğu yüzde olarak göstermektedir. İkinci hane ise bu kamburluk noktasının airfoilde rüzgârın ilk temas ettiği noktaya (leading edge) olan uzaklığı belirtmektedir. Son 2 hane ise, airfoil maksimum kalınlığının kord uzunluğuna oranını yüzde olarak ifade etmektedir. Örnek vermek gerekirse, Naca 0015 kanat profilinde kamburluk mevcut değildir. Kamburluk mevcut olmadığı için bu kamburluğun da konumu 0 olarak gösterilmiştir. Bu tip kamburluğa sahip olmayan kanatlara simetrik kanat adı verilmektedir. Maksimum kanat kalınlığı ise kord uzunluğunun %15'i kadardır. Darrieus rüzgâr türbinleri, savonius rüzgâr türbinlerine oranla daha yüksek kanat uç-hız oranı aralığında daha yüksek verimle çalışmaktadırlar. Kanat uç-hız oranı – güç katsayısı grafikleri incelendiğinde, darrieus rüzgâr türbinlerinin savonius rüzgâr türbinlerine oranla daha sağ tarafta yer aldığı görünmektedir. Verimleri savonius rüzgâr türbinlerine göre daha yüksektir. Kanatları kollar sayesinde dönen şafta bağlanırlar. Şekil 2.3'te bir h- darrieus rüzgâr türbininin 3 boyutlu şematik gösterimi verilmiştir [21].



Şekil 2.3. Bir H - Darrieus rüzgâr türbini şematik gösterimi [21]

### Savonius rüzgâr türbinleri

Savonius rüzgâr türbinlerinin yapısı darrieus rüzgâr türbinlerine göre daha basittir. Herhangi bir airfoil kanat yapısı kullanmaktan ziyade genelde klasik yarım daire, benesh, bach gibi kanat yapıları kullanılır. Verimleri darrieus rüzgâr türbinlerine veya yatay eksenli rüzgâr türbinlerine oranla daha düşüktür. Bu nedenle verimlerinin artırılması gerekmektedir. Kanat

uç-hız oranı – güç katsayısı grafiğinde genelde en sol altta yer alırlar. Yapımı ve işletilmesi kolaydır. Bu türbinler genelde iki kanatlı olarak kullanılırlar. Sessiz çalışırlar ve küçüktürler, bu nedenle şehir içlerine, bina aralarına veya çatılara dahi kurulabilirler.

Bu türbinler içbükey kanatları ile rüzgârı toplarlar ve pozitif tork sayesinde dönmeye başlarlar. Yalnız dışbükey kanatlara gelen rüzgâr da negatif tork üretimine sebep olmaktadır. Bu nedenle kanatların dizaynı türbin verimi açısından büyük önem taşımaktadır. Pozitif torkun negatif torktan yüksek olması ile kanatlar dönmeye başlar. Bu türbin tipinde verimi etkileyen en önemli faktörlerden bazıları kanat sayısı ve kanat açıklık oranı denilen kanatlar arasındaki mesafenin kanat çapına oranı olarak belirtilebilir.

## 2.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Aerodinamiği

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri için yapılan aerodinamik hesaplamalar yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre farklılık göstermektedir.

Literatürde özellikle kanat örtüşme oranının ( $\beta$ ) rüzgâr türbini aerodinamik performansına etkisi incelenmektedir. Bu ifade aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [1];

$$\beta = \frac{e}{2R} \quad (2.1)$$

Burada  $e$  kanat örtüşme mesafesini,  $R$  ise kanat yarıçapını göstermektedir. Güç katsayısı ifadesi ( $C_p$ ), rüzgâr türbininde üretilen gücün ( $P_t$ ) rüzgârın sahip olduğu güce ( $P_w$ ) oranıdır [7].

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} \quad (2.2)$$

Rüzgârın sahip olduğu güç ise Eş. 2.3'te açıklanmıştır [7].

$$P_w = \frac{1}{2} * \rho * A * U^3 \quad (2.3)$$

Burada  $\rho$  havanın yoğunluğu,  $A$  kanat süpürme alanı,  $U$  ise rüzgâr hızıdır. Kanat süpürme alanı ise aşağıdaki şekilde ifade edilir [1];

$$A = D * H \quad (2.4)$$

$D$  rotor çapı ve  $H$  türbin yüksekliğidir.  $P_t$  aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir [22].

$$P_t = T * \omega = \frac{2\pi NT}{60} \quad (2.5)$$

Burada  $T$  türbin çıkış torku,  $N$  türbinin dönüş hızı (rpm cinsinden),  $\omega$  ise türbinin açısal hızını göstermektedir. Moment katsayısı ( $C_m$ ) ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanır [3];

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{4} * \rho * A * D * U^2} \quad (2.6)$$

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.7)$$

Torkun hesaplanması için Eş. 2.8 kullanılabilir [2,23];

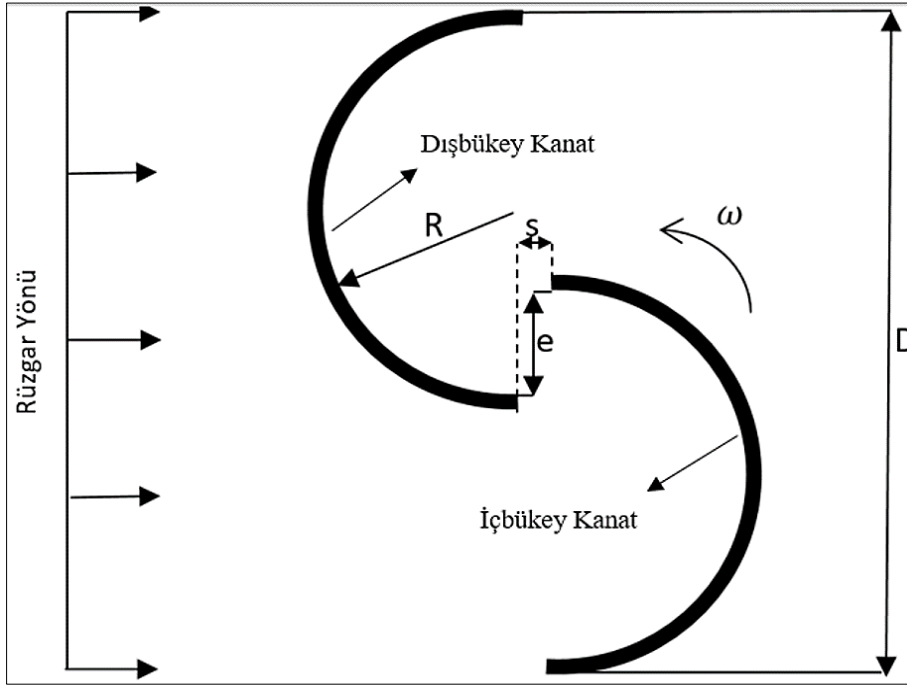
$$T = \sum_f (F_f^{pressure} + F_f^{shear}) * n = \sum_f [(p_f - p_{ref})A_y + (-\tau_f * A_y)]_{concave} * n - [(p_f - p_{ref})A_y + (-\tau_f * A_y)]_{convex} * n \quad (2.8)$$

$F_f^{pressure}$  ve  $F_f^{shear}$  ifadeleri,  $A_y$  yüzeyine uygulanan basınç ve kesme gerilmesi ( $\tau$ ) kuvvet vektörleri,  $n$  ise momentin alındığı dönüş ekseninden gelen yerel tork vektörünü göstermektedir.  $p_f$  statik basıncı ve  $p_{ref}$  referans alınan basıncı ifade eder.

Kanat uç-hız oranı ( $\lambda$ ) ifadesi ise Eş. 2.9 ile gösterilir [8];

$$\lambda = \frac{\omega * \frac{D}{2}}{U} \quad (2.9)$$

Şekil 2.4'te 2 kanatlı bir rüzgâr türbininin şematik gösterimi 2 boyutlu olarak verilmiştir. Aynı zamanda aerodinamik hesapların yapılması için kullanılan terimler aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.4. 2 boyutlu bir savonius rüzgâr türbininin şematik gösterimi

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada bir savonius rüzgâr türbininin aerodinamik performansına kanat kalınlığı, kanat örtüşme oranı, kanat ayrılma mesafesi ve kanat tipinin etkisi sayısal olarak ANSYS-Fluent yazılımında 2 boyutlu bir şekilde incelenmiştir. Öncelikli olarak Fujisawa ve Gotoh'a ait olan çalışmada [1] kullanılan türbin modeli, CATIA v5 yazılımında 2 boyutlu olarak çizilmiş ve ANSYS yazılımına yüklenmiştir. Akış alanı oluşturulduktan sonra realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılarak ağ yapısından bağımsızlık hesaplanmış, uygun türbülans modeli belirlenerek deneysel çalışma ile sayısal analiz sonuçları doğrulanmıştır. Daha sonra Minitab yazılımı ile belirlenmiş olan 4 farklı parametre, her parametre için 3 farklı seviye için Taguchi optimizasyon metodunda kullanılan  $L_9$  ortogonal dizaynı oluşturulmuş, her bir dizaynda analizler tekrarlanmıştır. Ardından her bir parametrenin etkisi değerlendirilmiş ve önerilen en optimum kombinasyona sahip olan rüzgâr türbininin aerodinamik performansı hesaplanmış ve Fujisawa ve Gotoh'a ait olan çalışmada hesaplanan güç katsayısı ( $C_p$ ) değerleri ile kıyaslanmıştır. Tezin son aşamasında türbin kanatları etrafındaki basınç ve hız dağılımı grafikleri incelenmiştir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de türbinin bazı geometrik özellikleri ve referans değerleri verilmiştir. Havanın yoğunluğu, uluslararası standart atmosfer şartlarında (deniz seviyesinde, +15 °C sıcaklıkta ve 1013,25 mb atmosfer basıncında) alınmıştır.

Çizelge 3.1. Modellenen türbinin ölçüleri

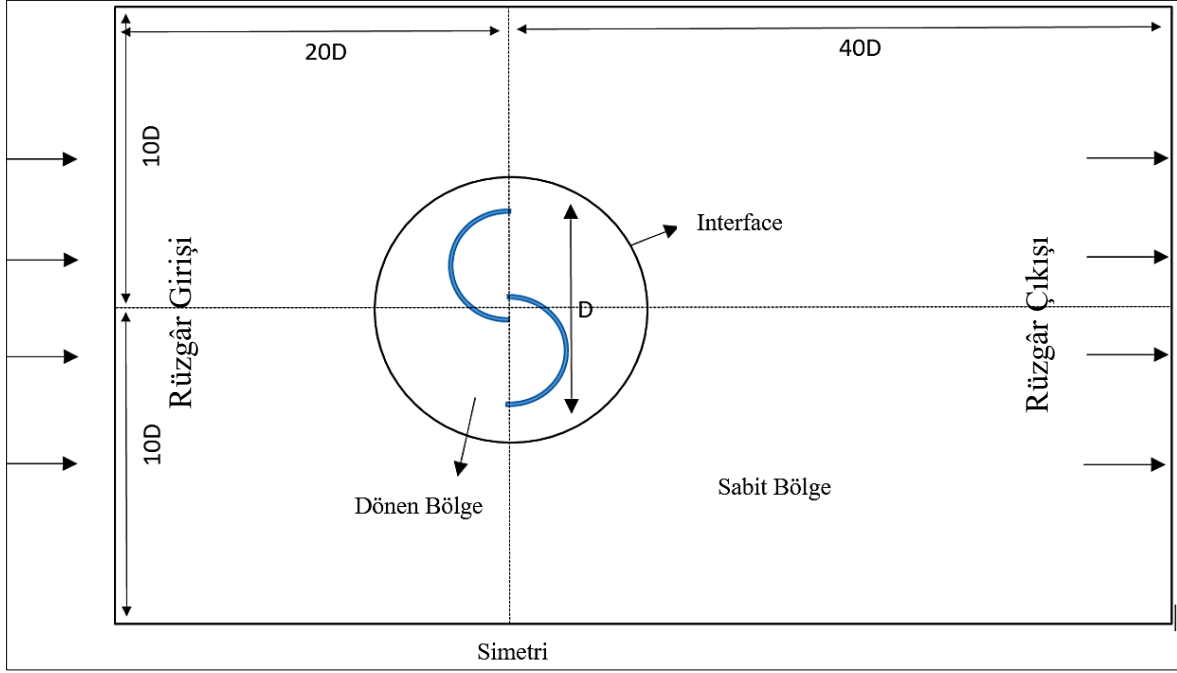
Parametre	Değer
Kanat Sayısı, N	2
Rotor Çapı, D [m]	0,3
Kanat Örtüşme Oranı, $\beta$	0,15
Kanat Ayrılma Mesafesi, s [m]	0
Rotor Yüksekliği, H [m]	0,3
Kanat Tipi	Klasik
Kanat Kalınlığı [mm]	4

Çizelge 3.2. Referans değerleri

Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	Rüzgâr hızı (m/s)	Basınç (atm)	Sıcaklık (K)	Viskozite ( $\text{kg/ms}$ )
1,225	6	1	288,16	$1,7895 \cdot 10^{-5}$

### 3.1. Akış Alanı Tasarımı

Tezin ilk aşamasında deneysel çalışmada modellenmiş olan 2 kanatlı, 30 cm çapında ve 0,15 kanat örtüşme oranına sahip savonius rüzgâr türbini 2 boyutlu olarak Catia yazılımında çizildikten sonra ANSYS Fluent modülüne yüklenmiştir.

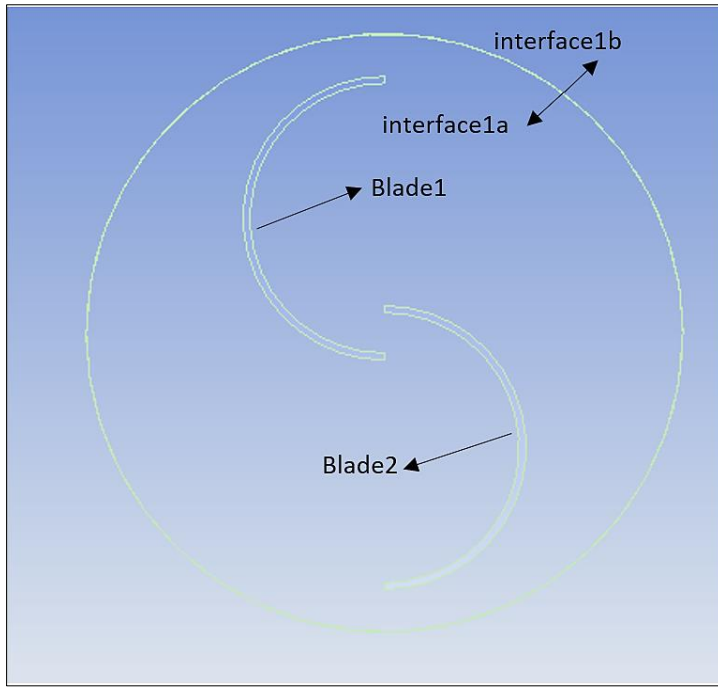


Şekil 3.1. Akış alanı tasarımı

Fluent yazılımında adlandırmalar İngilizce olarak yapılmıştır. HAD çalışmalarından mantıklı sonuç alabilmek için akış alanı düzgünce tasarlanmalıdır. Akış alanı gereğinden çok küçük tanımlanırsa sonuçlar gerçeklikten uzaklaşacaktır. Akış alanının çok büyük çizilmesi ise ağ sayısını artıracak ve analizlerin çözüm süresi uzayacaktır. Bu nedenle uygun bir akış alanı tasarlamak analizlerin doğruluğu ve çözüm süresi için çok önemlidir. Şekil 3.1'de modellenen akış alanı ve sınır şartları gösterilmiştir. Akış alanında yukarı ve aşağı sınırlar çapın 10 katı olacak şekilde modellenmiştir. Rüzgârın giriş yaptığı yer türbin merkezinden 20D uzaklıkta, rüzgârın akış alanından çıktığı yer ise türbin merkezinden 40D uzaklıktadır. Literatür incelendiğinde bu uzaklıkların analizlerden gerçekçi sonuçlar alınması için uygun olduğu görülmektedir [2,10,24].

Kanatın etrafındaki alan kanat ile beraber dönecek şekilde modellenmiş ve rotating zone (dönen bölge) adı verilmiştir. Kanatın biraz uzağında ise hareket etmeyen bölgeye stationary

zone (sabit bölge) denilmiştir. Dönen ve hareketsiz bölgedeki rüzgâr akışının devamlılığının sağlanması için bu iki bölge arasına 'Interface' komutu ile arayüz atılmıştır. Rüzgâr, akış alanına sol taraftan 6 m/s hızla girmekte (velocity inlet) ve sağ taraftan çıkmaktadır (pressure outlet). Reynolds sayısı  $1,2 * 10^5$  olarak hesaplanmıştır. Üst ve alt sınırlara simetri sınır şartı uygulanmıştır. Şekil 3.2'de Fluent yazılımı ağ kısmında adlandırılması yapılan kanat ve akış alanı gösterilmiştir.

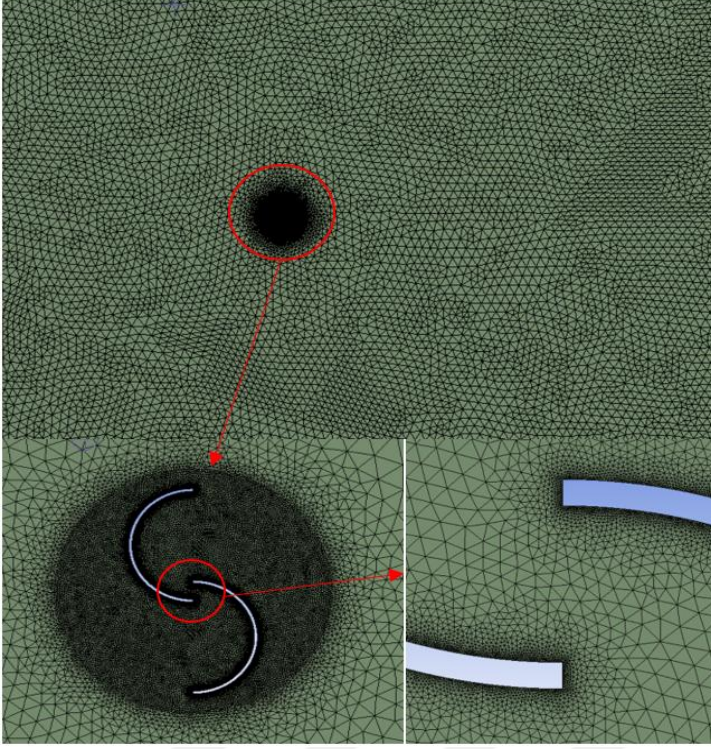


Şekil 3.2. Kanatlar ve arayüzün adlandırılması

### 3.2. Ağ Yapısından Bağımsızlığın Kontrolü

Sayısal analizlerde en doğru sonuca en kısa sürede ulaşmak için tasarlanan ağ yapısı çok önemlidir. Akış alanında olduğu gibi ağ elemanı sayısının çok az olması sonuçların gerçeklikten uzaklaşmasına, ağ elemanı sayısının çok fazla olması ise çözüm süresinin uzamasına sebep olacaktır. Bu nedenle en uygun ağ elemanı sayısının hesaplanması gerekmektedir. Belirli bir ağ elemanı sayısından sonra analiz sonuçlarının değişmesi beklenmemektedir. Analiz sonuçlarının sabit kaldığı en düşük ağ elemanı sayısının yakalanması hedeflenmektedir. Böylelikle çözümler en kısa sürede bitirilebilecektir. Bu çalışmada, realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılarak kanat uç-hız oranı 0,6 için 96 968 ve 437 975 aralığında toplam 6 farklı ağ sayısı ile gerçekleştirilen analizler ile ağ sayısından bağımsızlık yakalanmaya çalışılmıştır. Yapılan sayısal analiz sonuçlarında,

174 880 ağ sayısından sonra hesaplanan güç katsayısı değerlerinin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışmaya bu ağ sayısında devam edilmiştir.



Şekil 3.3. Ağ yapısı

Şekil 3.3'te sayısal analizlerde kullanılan ağ yapısının görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, kanatların etrafına yaklaştıkça ağ yoğunluğu artırılmıştır. Bunun amacı, analiz sonuçlarını en çok etkileyen bölgelerin kanat ve yakın çevresi olmasıdır. Buralarda ağ eleman sayısı artırılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Çizelge 3.3'te kullanılan eleman sayıları ve kanat uç-hız oranı ( $Tsr$ ) 0,6'da ay yapısından bağımsızlığı yakalamak için yapılan sayısal analizlerden elde edilen  $C_p$  değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Eleman sayısına göre gözlemlenen  $C_p$  değerleri

Eleman Sayısı	Gözlemlenen $C_p$
96 968	0,17693
122 963	0,17443
148 213	0,17550
174 880	0,17938
300 378	0,17971
437 975	0,17995

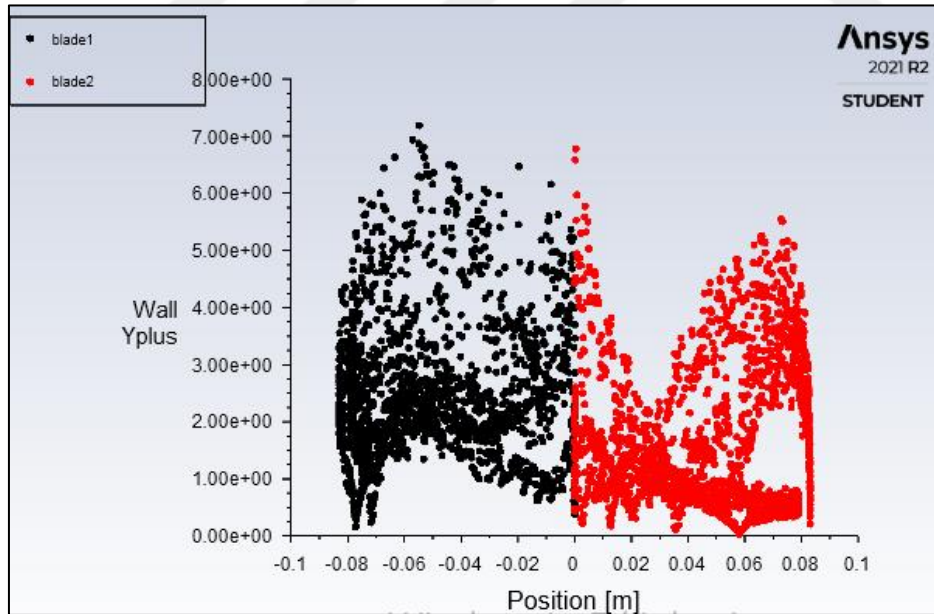
Ağ kalitesini gösteren sayısal değerler Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Burada çarpıklık değerinin 0'a, eleman ve ortogonal kalitenin ise 1'e yaklaşması oluşturulan ağ yapısının daha düzgün olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda, maksimum çarpıklık değerinin 0,7'den düşük olmasının ağ yapısı kalitesi açısından yeterli olduğu görülmektedir [25,26].

Çizelge 3.4. Ağ kalitesini gösteren bazı detaylar

Maksimum Çarpıklık	0,68508
Ortalama Eleman Kalitesi	0,95637
Ortalama Ortogonal Kalite	0,95951

### 3.3. $Y^+$ Değeri

$Y^+$  değeri, HAD analizlerinde sınıra yakın ağ yapısı, sürtünme hızı, viskozite ve akış yoğunluğu ile ilgili boyutsuz bir uzaklık birimidir. Şekil 3.4'te türbin kanatları etrafındaki  $y^+$  değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kanat etrafındaki  $y^+$  dağılımı

Boyutsuz bir ifade olan  $y^+$  değeri Eş. 3.1 ile hesaplanır [22];

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu} \quad (3.1)$$

Burada  $u_t$  sürtünme hızı,  $y$  dikey eksenli rüzgâr türbini kanat yüzeyine yakın ilk hücrenin kalınlığı,  $\rho$  akış yoğunluğu ve  $\mu$  akışkanın viskozitesini göstermektedir. Sınır tabakalarının sınıflandırılmasında  $0 < y^+ < 5$  olan akış bölgesine viskoz alt tabaka,  $5 < y^+ < 30$  olan akış bölgesine ise tampon (geçiş) tabaka adı verilmektedir.  $30 < y^+ < 500$  olan akış bölgesine ise türbülanslı akış veya log-law bölgesi adı verilmektedir. Literatürde farklı türbülans modelleri karşılaştırılarak savonius rüzgar türbini aerodinamik performansının incelendiği bazı çalışmalarda  $y^+$  değeri 5'in altında olacak şekilde ağ yapılarının oluşturulduğu görülmektedir [23,30]. Bu tez çalışmasında da kanatlar etrafındaki  $y^+$  değeri  $< 5$  olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur.

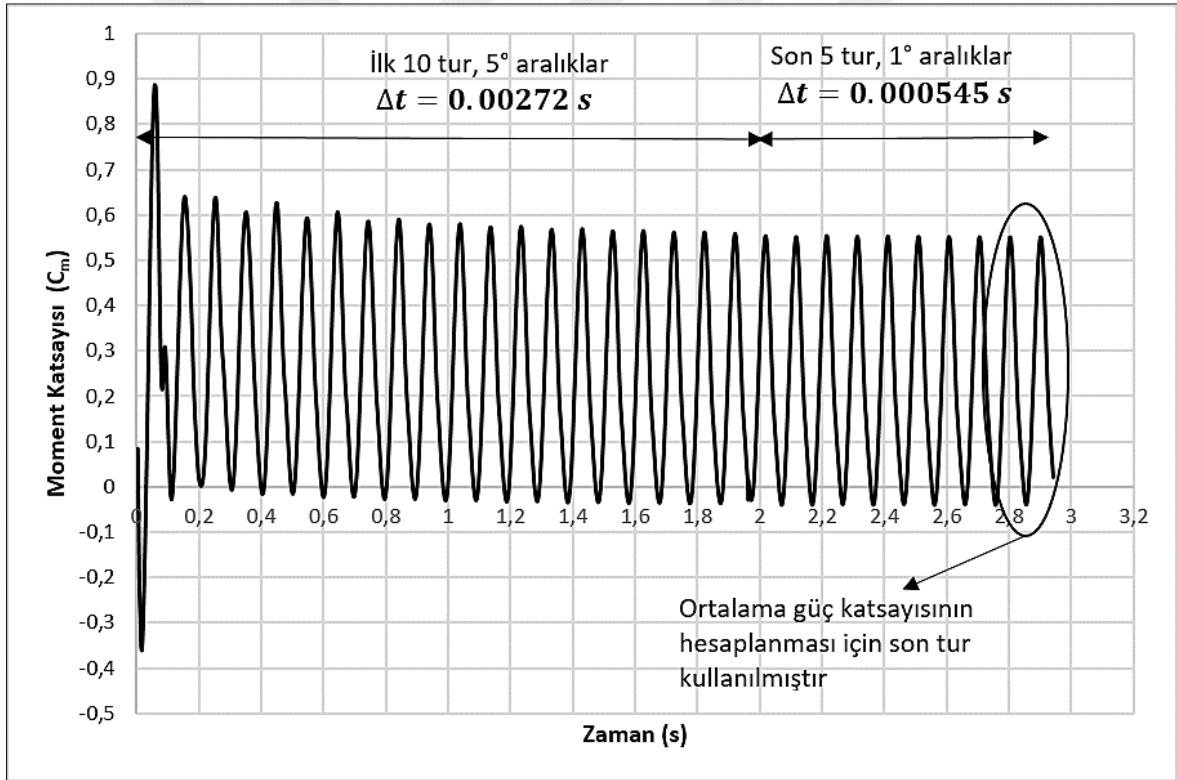
### 3.4. Türbülans Modeli ve Sayısal Ayarlar

Dikey ve yatay eksenli rüzgâr türbinleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, SST k-omega ve realize edilebilir k-epsilon türbülans modellerinin 2D çalışmalarda türbin güç katsayıları hesaplamaları için sık sık kullanıldığı gözlemlenmektedir [14,24,27,28].

Fujisawa ve Gotoh'a ait olan deneysel çalışmayı [1] sayısal analizler ile doğrulamak için SST k-omega ve realize edilebilir k-epsilon olmak üzere iki farklı türbülans modeli kullanılmıştır. Şekil 3.5'te kullanılan türbülans modellerine göre değişen sayısal analizlerden elde edilmiş olan  $T_{sr} - C_p$  grafiği ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde,  $T_{sr}(\lambda) = 0,2$  için ve  $\lambda = 1,2$  için SST k-omega türbülans modelinin realize edilebilir k-epsilon türbülans modeline göre deneysel veriler ile kıyaslandığında daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir.  $\lambda > 1,2$  için, SST k-omega türbülans modeli kullanıldığında ANSYS Fluent yazılımında kararlı sonuçlar alınamamıştır. Bu tür çalışmalarda türbin 7-8 tur döndükten sonra gözlemlenen güç katsayısı değeri kararlı hale gelmektedir. Yalnız SST k-omega türbülans modeli ile türbin ne kadar dönerse dönsün,  $\lambda > 1,2$  olduğu zamanlarda son turlarda son  $360^\circ$  için ortalama hesaplanan  $C_p$  sabit hale gelmemiştir. Aynı zamanda  $0,4 < \lambda < 1,2$  olduğu zamanlarda realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılarak elde edilen analiz sonuçları, deneysel verilere SST k-omega türbülans modelinden elde edilen verilere göre daha yakındır. Bu sebeple analizlerin ileriki aşamalarında realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılmaya



Momentum, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılma oranlarının hesaplanması için 'second order upwind' formülasyonu kullanılmıştır. Türbülans yoğunluğu %0,5 olarak ayarlanmıştır. Bütün  $\lambda$  değerleri için, türbin 15 tam tur, yani  $5400^\circ$  döndürülmüştür. İlk 10 turda güç katsayısı değerleri  $5^\circ$  aralıklarla alınmıştır. Bunun sebebi, bu tur sayılarındaki güç katsayısı değerlerinin önemsiz olması ve türbinin bir an önce 7-8 tur dönerek kararlı hale gelmesini sağlamaktır.  $360^\circ$  bir tam turda  $5^\circ$  aralıklarla analizleri gerçekleştirmek, çözümün yaklaşık 5 kat daha kısa sürmesini sağlamaktadır. Son 5 turda ise  $1^\circ$  aralıklarla sonuçlar hesaplanmıştır. Yani toplam 2520 farklı açı için analizler tamamlanmış ve bunun son turu, son  $360^\circ$  açıdaki her bir güç katsayısı değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 3.6'da  $\lambda = 0,8$  için realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılarak hesaplanan zamana bağlı  $C_m$  değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Zamana bağlı moment katsayısı ( $C_m$ ) grafiği

Realize edilebilir k-epsilon türbülans modelinde, türbülans kinetik enerjisinin ( $k$ ) ve türbülans yayılım hızının ( $\epsilon$ ) hesaplanması için kullanılan taşınım denklemleri, standart k-epsilon türbülans modeline göre değişiklik göstermektedir. Bu modelin eşitlikleri aşağıdaki gibi gösterilebilir [29,30];

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_m + G_n - \rho \epsilon - Y_G + S_K \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_n + S_\epsilon \quad (3.4)$$

$$C_1 = \max \left[ 0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.5)$$

Burada  $G_m$  ve  $G_n$  sırasıyla hız gradyanları ve kaldırma kuvveti sebebiyle üretilen türbülans kinetik enerjiyi göstermektedir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\epsilon$  türbülans prandtl sayılarıdır.  $Y_G$ , sıkıştırılabilir türbülanstaki genişlemenin türbülans yayılım hızına katkısıdır.  $\mu$  dinamik viskozite,  $\mu_t$  ise türbülans viskozitesidir.  $C_{1\epsilon}$  ve  $C_{3\epsilon}$  ifadeleri sabit iken,  $S_\epsilon$  ve  $S_K$  kullanıcıya bağlı değişkenlerdir.

Kütlenin korunumu eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i + u'_i) = 0 \quad (3.6)$$

Burada  $\bar{u}_i$  hava akışının ortalama hızı,  $u'_i$  türbülans nedeniyle meydana gelen hız dalgalanmaları ve x akış yönünü göstermektedir.

Momentum korunumu eşitliği ise;

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} \quad (3.7)$$

Burada  $t$  zamanı,  $\bar{p}$  basınç ortalamasını,  $\rho$  hava yoğunluğunu ve  $\mu$  havanın dinamik viskozitesini göstermektedir [2].



## 4. OPTİMİZASYON SÜRECİ

### 4.1. Taguchi Metodu

Taguchi metodu sadece endüstriyel uygulamalar için değil, aynı zamanda bilimsel çalışmalar için de kullanılan, optimum sonuca deney sayılarını azaltarak en kısa sürede ulaşılmasını sağlayan bir optimizasyon metodudur. Bu çalışmada da sayısal analizlerin sayısını azaltarak optimum sonuca en kısa zamanda ulaşılması için kullanılmıştır. Taguchi metodunda seçilen parametre ve bu parametrelerin seviyeleri arasından en uygun kombinasyonu bulmak için bir ortogonal dizayn belirlenir ve bu dizayn üzerinde yapılan çalışmalar sayesinde optimizasyon süreci gerçekleştirilmiş olur.

Taguchi metodu, optimizasyon esnasında ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranına eşit olan sinyal / gürültü oranını (S/N) kullanır. Bu oran, bir prosesin veya dizaynın kalitesini göstermektedir [31].

S/N oranı 3 farklı eşitlik ile gösterilmektedir [32]. Bunlar;

Daha küçük daha iyi;

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

Daha büyük daha iyi;

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

Nominal daha iyi;

$$S/N = 10 \log \frac{\bar{y}}{s_y^2} \quad (4.3)$$

Bu eşitliklerde  $y$  gözlemlenmiş veriyi,  $\bar{y}$  ortalama  $y$  değerini,  $s_y^2$   $y$ 'nin varyansını ve  $n$  ise toplam gözlem sayısını ifade etmektedir.

Bu tez çalışmasında rüzgâr türbininde gözlemlenen güç katsayısı değeri artırılmak istendiğinden ve daha yüksek güç katsayısı değerleri daha optimum olduğundan Taguchi optimizasyonda daha büyük daha iyi formülasyonu kullanılmıştır.

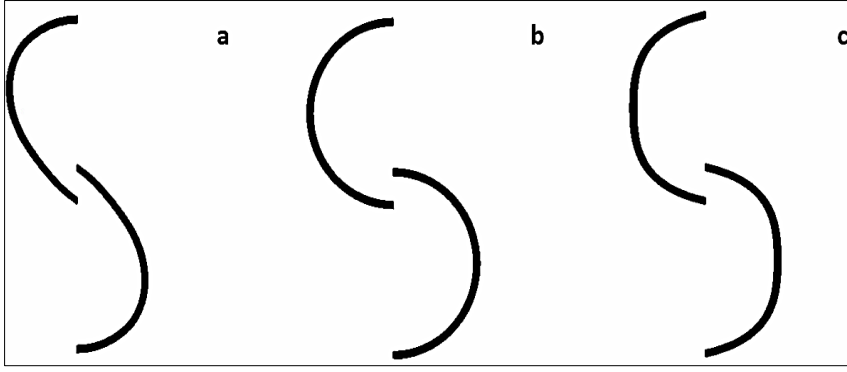
#### 4.2. Seçilen Parametrelerin Optimizasyonu

Modellenen rüzgâr türbininin aerodinamik performansının artırılması için 4 farklı parametre üzerinden optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bunlar kanat örtüşme oranı, kanat ayrılma mesafesi, kanat tipi ve kanat kalınlığıdır. Aynı zamanda her bir farklı parametre için 3 farklı seviye belirlenmiştir. Kanat tipleri klasik yarım daire, eliptik ve yarı eliptik, kanat kalınlıkları 2, 4 ve 6 mm, kanat örtüşme oranı 0,1; 0,15; 0,2 ve kanat ayrılma mesafesi 7,5 mm, 0 mm ve -7,5 mm olmak üzere bu seviyeler ile türbin performansının optimum olacağı türbin dizaynı yakalanmaya çalışılmıştır. Normal şartlarda her bir türbin modelinin analizlerini tamamlayıp aralarında en yüksek aerodinamik performansa sahip olan türbin modelinin belirlenebilmesi için  $3^4 = 81$  adet farklı sayısal analiz yapılmalıdır. Taguchi optimizasyon metodu ile toplam deney sayısı azaltılmıştır ve en kısa sürede optimum türbin geometrisine ulaşılabilmektedir. Çizelge 4.1'de kullanılan parametreler ve bu parametrelere ait seviyeler gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Optimizasyon sürecinde kullanılan parametreler ve seviyeler

Parametre	Birimler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kanat Tipi	Eliptik	Klasik	Yarı Eliptik
B	Kanat Örtüşme Oranı	0,1	0,15	0,2
C	Kanat Ayrılma Mesafesi	7,5 mm	0 mm	-7,5 mm
D	Kanat Kalınlığı	2 mm	4 mm	6 mm

Çalışmanın ileriki aşamalarında sıkça denk gelinecek olan isimlendirmelere örnek verilecek olursa, örneğin A1B3C2D3 dizaynı eliptik kanat (A = kanat tipi, 1 ise seviye 1'i işaret etmektedir) 0,2 kanat örtüşme mesafesi, 0 mm kanat ayrılma mesafesi ve 6 mm kanat kalınlığını göstermektedir.



Şekil 4.1. Eliptik kanat b) klasik yarım daire kanat c) yarı eliptik kanat

Şekil 4.1'de bu optimizasyon çalışmasında kullanılmış olan 3 farklı kanat tipi gösterilmiştir.

İlk olarak Minitab yazılımı ile 4 farklı parametre ve 3 farklı seviye için yapılacak analizlerde kullanılacak  $L_9$  ortogonal dizisi oluşturulmuştur. 9 Farklı geometri tasarlanarak standart dizaynda en yüksek  $C_p$  değeri gözlemlenmiş olan  $\lambda = 0,8$  için realize edilebilir k-epsilon türbülans modeli kullanılarak güç katsayıları hesaplanmış ve elde edilen güç katsayısı değerleri analiz edilerek S/N oranı hesaplanmıştır. Çizelge 4.2'de Minitab yazılımı ile yapılan analizler sonucu hesaplanmış olan sinyal / gürültü oranları (S/N) gösterilmektedir.

Çizelge 4.2.  $L_9$  ortogonal dizisi için S/N oranları ve  $C_p$  değerleri

Deney No	A	B	C	D	$C_p$	S/N (dB)
1	1	1	1	1	0,183246	-14,7393
2	1	2	2	2	0,19408	-14,2404
3	1	3	3	3	0,191016	-14,3786
4	2	1	2	3	0,175167	-15,1310
5	2	2	3	1	0,208705	-13,6093
6	2	3	1	2	0,166555	-15,5688
7	3	1	3	2	0,192227	-14,3237
8	3	2	1	3	0,162443	-15,7860
9	3	3	2	1	0,204251	-13,7967

Tezin önceki aşamalarında da belirtildiği gibi, larger is better komutunun kullanılması sinyal gürültü oranının büyük olması ile daha optimum bir sonuç elde edildiğini göstermektedir. Tablodan da görülebileceği gibi, en yüksek güç katsayısı 5. deneyde A2B2C3D1 dizaynında (klasik kanat, 0,15 kanat örtüşme oranı, - 7,5 kanat ayrılma mesafesi, 2 mm kanat kalınlığı) gözlemlenmiş ve burada sinyal-gürültü oranı en büyük -13,6093 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan analizler ile sadece S/N oranlarına değil, aynı zamanda her bir parametrenin hangi ölçüde rüzgâr türbini aerodinamik performansına etkilediği veya en optimum dizaynın hangisi olabileceği gibi sonuçlara da ulaşılmaktadır.

Şekil 4.2’de seçilen parametreler için ortalama sinyal-gürültü oranları gösterilmiştir. Bu grafik yine Minitab yazılımı tarafından oluşturulmuş, oluşturulurken 9 farklı deneyde hesaplanmış olan  $C_p$  değerleri kullanılmıştır. Daha yüksek S/N oranı daha yüksek güç katsayısı anlamına gelmektedir.

Bu şekilden ayrıca türbin aerodinamik performansının hangi dizayn ile en yüksek seviyeye ulaşabileceği anlaşılabilir. Görüldüğü üzere, A (kanat tipi) için 1. seviye yani eliptik kanatta en yüksek S/N oranı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde B (kanat örtüşme oranı) için 2. seviye yani 0,15, C (kanat ayrılma mesafesi) için 3. seviye yani -7,5 mm ve D (kanat kalınlığı) için 1. Seviye yani 2 mm kullanılması ile en yüksek  $C_p$  değerinin gözlemleneceği tespit edilmiştir. Yani optimum dizayn, bu grafikten de gözlemlenebileceği gibi A1B2C3D1 dizaynı olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Ortalama S/N oranları

Çizelge 4.3’de hesaplanan S/N oranlarına göre davranış tablosu gösterilmiştir. Bu çizelgedeki delta değeri, en büyük ve en küçük S/N oranları arasındaki farkı [33] ve sıra ise

parametrelerin önem sırasını belirtmektedir. İlk 3 satır, Şekil 4.2'nin de gösterdiği gibi S/N oranlarını göstermektedir. En büyük delta değeri, seçilen o parametredeki seviyeler arasındaki S/N oranı farkının en büyük olduğunu, yani o parametrenin türbin aerodinamik performansını en çok etkilediğini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Delta değerleri ve seçilen parametrelerin önemi

Level	A	B	C	D
1	-14,4528	-14,7313	-15,3647	-14,0485
2	-14,7697	-14,5452	-14,3894	-14,7110
3	-14,6355	-14,5814	-14,1039	-15,0985
Delta	0,3169	0,1861	1,2608	1,0501
Sıra	3	4	1	2

Bu çizelgeden açıkça görülebileceği üzere, rüzgâr türbini aerodinamik performansını en çok etkileyen faktörler sırasıyla C ( kanat ayrılma mesafesi), D (kanat kalınlığı), A (kanat tipi) ve B (kanat örtüşme oranı) olmuştur. S/N oranlarına göre, seçilen bir kombinasyondan elde edilecek güç katsayısı değerini tahmin etmek mümkündür [33];

$$n_{opt} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{C_{p,max}^2} \right) \quad (4.4)$$

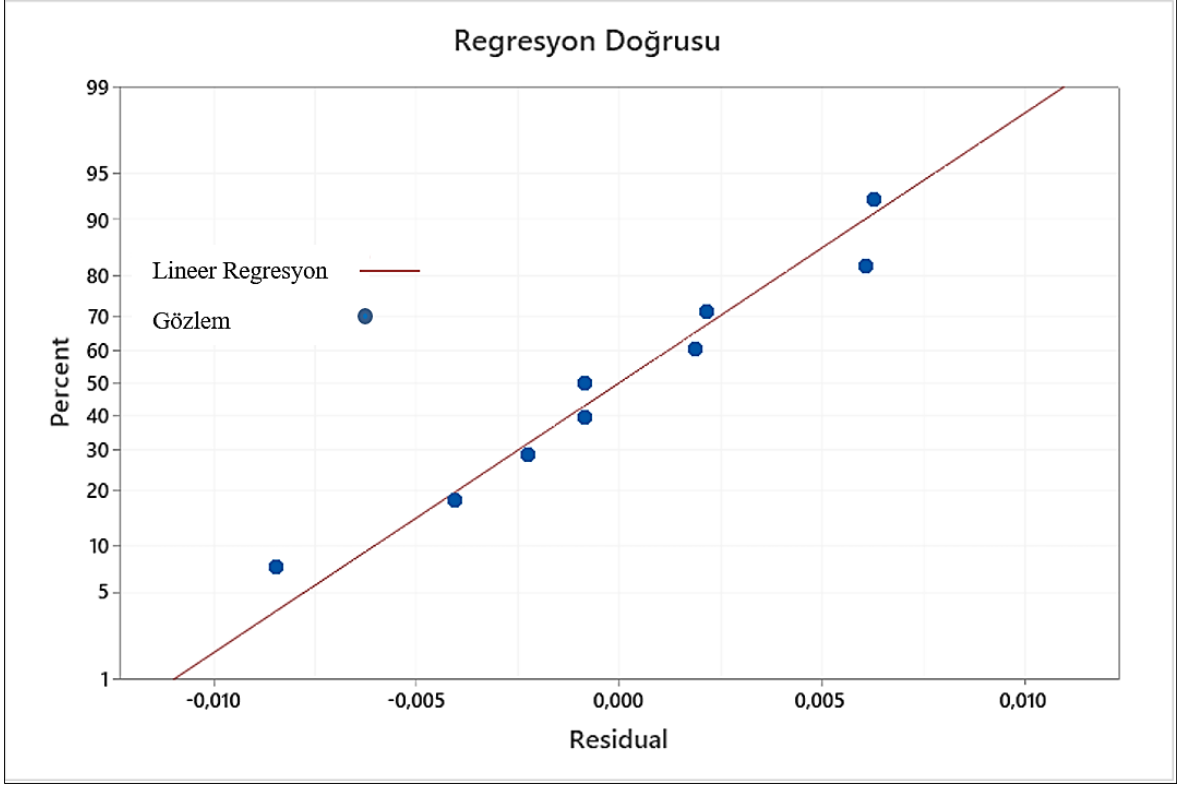
$$n_{opt} = n_{mean} + \Delta A1 + \Delta B2 + \Delta C3 + \Delta D1 \quad (4.5)$$

Burada,  $n_{mean}$  Çizelge 4.2'de gösterilen S/N oranlarının ortalamasıdır.  $\Delta A1$ , Çizelge 4.3'te görülen A1 dizaynında gözlemlenen S/N oranı ile  $n_{mean}$  arasındaki mutlak farka eşittir. Bu aynı zamanda  $\Delta B2$ ,  $\Delta C3$  ve  $\Delta D1$  için geçerlidir. Bu çalışma için,  $n_{mean} = -14,6193$ ,  $\Delta A1 = |(-14,6193) - (-14,4528)| = 0,1665$ ,  $\Delta B2 = 0,0741$ ,  $\Delta C3 = 0,5154$  ve  $\Delta D1 = 0,5708$  olarak hesaplanmıştır. Bu vasıta ile,  $n_{opt} = -13,2925$  olmaktadır.  $C_{p,max}$  0,21645 olarak tahmin edilebilmektedir (A1B2C3D1 dizaynı kullanılır ise).

Sayısal analizleri yapılmış  $L_9$  ortogonal dizaynı ile seçilen herhangi bir kombinasyondan elde edilebilecek güç katsayısı hesabının tahmini için regresyon denklemi oluşturulmuştur.

$$C_p = 0,1818 - 0,00157 A + 0,01328 C - 0,01126 D + 0,00186 B \quad (4.6)$$

Regresyon doğrusu şekil 4.3'te gösterilmiştir. A1B2C3D1 kombinasyonu kullanılarak elde edilebilecek güç katsayısı değeri, regresyon denklemi ile  $C_p = 0,21253$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Regresyon doğrusu

Çizelge 4.4. Regresyon denklemi ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Deney No	$C_p$ , Sayısal Analiz	$C_p$ , Regresyon	Sapma, %
1	0,183246	0,18411	0,471497
2	0,19408	0,18799	3,13788
3	0,191016	0,19187	0,447083
4	0,175167	0,1733	1,06584
5	0,208705	0,21096	1,080472
6	0,166555	0,175	5,070397
7	0,192227	0,19627	2,103243
8	0,162443	0,16031	1,31308
9	0,204251	0,19797	3,07514

Çizelge 4.4'te regresyon denkleminde seçilen parametrelerde tahmin edilen güç katsayısı değerleri ve aynı parametrelerin sayısal analiz sonuçlarından elde edilen değerler ile farkları gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde, 9 deney için de sapma oranının %5,07'den aşağıda

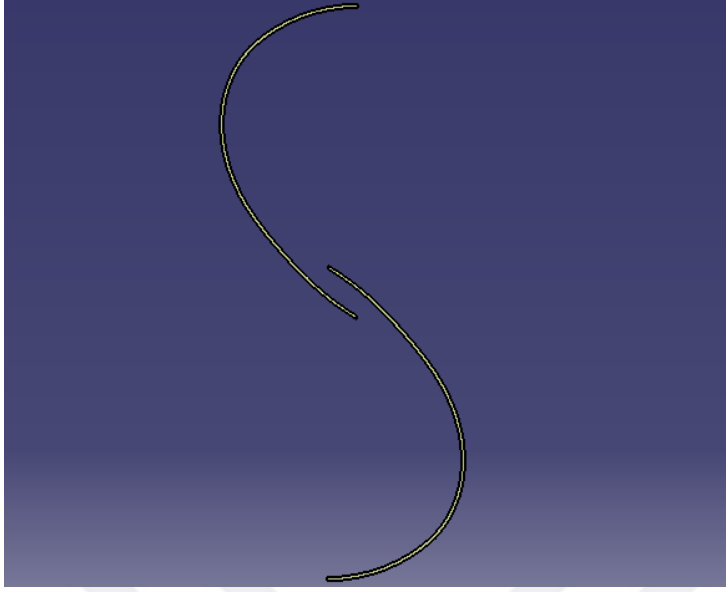
olduğu görülmektedir. Aynı zamanda ortalama sapma oranı %2,07'dir. Bu sonuç, regresyon denkleminin sayısal analiz sonuçlarını tahmin etmede tutarlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5. Güç katsayısı değerleri için ANOVA sonuçları

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	Katkı	F-Değeri	P- Değeri
A	2	0,000054	0,000027	%2,63	1,38	0,420
B*	2	0,000039	-	-	-	-
C	2	0,001161	0,000580	%57,05	29,89	0,032
D	2	0,000781	0,000391	%38,41	20,12	0,047
Hata	2	0,000039	0,000019	%1,91		
Toplam	8	0,002034		%100,00		

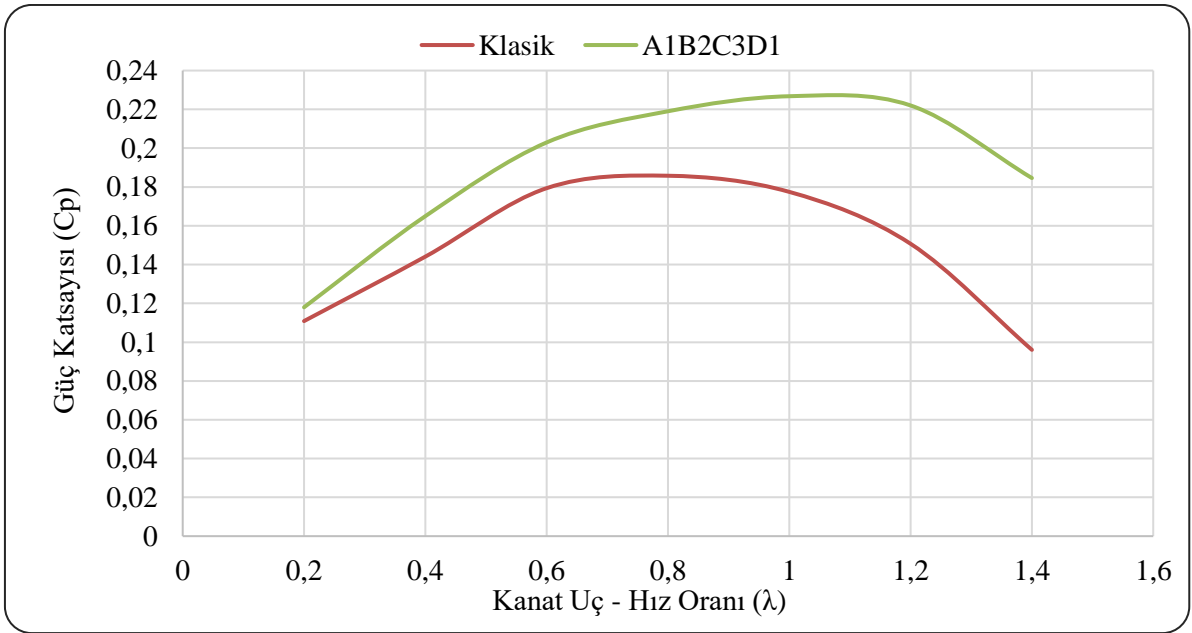
Çizelge 4.5'te hesaplanan  $C_p$  değerleri için yapılmış ANOVA analizi sonuçları gösterilmiştir. Kareler toplamı, verilerin ortalamadan sapmasını göstermektedir. Daha yüksek kareler toplamı değeri daha yüksek sapmayı, dolayısıyla daha yüksek etkiyi temsil etmektedir. Düşük kareler toplamı değeri ise ortalamadan pek fazla sapma olmadığını, dolayısıyla o parametrenin çok büyük bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Ortalama kareler toplamı, kareler toplamının serbestlik derecesine bölünmesi ile elde edilmektedir. Burada kareler toplamı en düşük olan yani türbin aerodinamik performansına en az etki eden B faktörünün etkisi dikkate alınmamış ve B faktörü için hesaplanmış kareler toplamı değeri hata bölümünde gösterilmiştir. Bu olaya literatürde birleştirme (pooling) adı verilmektedir [34]. Çizelge incelendiğinde her bir parametrenin türbin aerodinamik performansına katkısı yüzde olarak görülebilmektedir. C parametresi (kanat ayrılma mesafesi) %57,05, D parametresi (kanat kalınlığı) %38,41, A parametresi (kanat tipi) %2,63 ve B parametresi (kanat örtüşme oranı) %1,91 oranla türbin güç katsayısını etkilemektedir.

Şekil 4.4'te, CATIA yazılımında çizilen A1B2C3D1 dizaynı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. A1B2C3D1 dizaynı

Çalışmanın sonraki aşamalarında, A1B2C3D1 dizaynı modellenmiş ve  $0,2 < \lambda < 1,4$  aralığı için Fluent yazılımında güç katsayıları hesaplanmıştır. Şekil 4.5'te A1B2C3D1 dizaynı ve klasik dizaynın (Bkz. Şekil 3.2) güç katsayılarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekil 4.5 incelenirse, A1B2C3D1 dizaynının tüm kanat uç-hız oranlarında klasik dizayna göre daha yüksek aerodinamik performans gösterdiği oldukça açıktır.



Şekil 4.5. Klasik ve A1B2C3D1 türbinlerin aerodinamik karakteristiği

Dikkat çekici noktalardan biri bu iki dizaynın kanat uç-hız oranları arttıkça aralarındaki güç katsayısı farkı da artmaktadır.  $\lambda = 0,2$  olduğunda güç katsayısı yeni dizaynın kullanılması ile sadece 6,4% artmışken,  $\lambda = 1,4$  iken güç katsayısı A1B2C3D1 dizaynının kullanılması ile neredeyse %92,2 artmıştır.

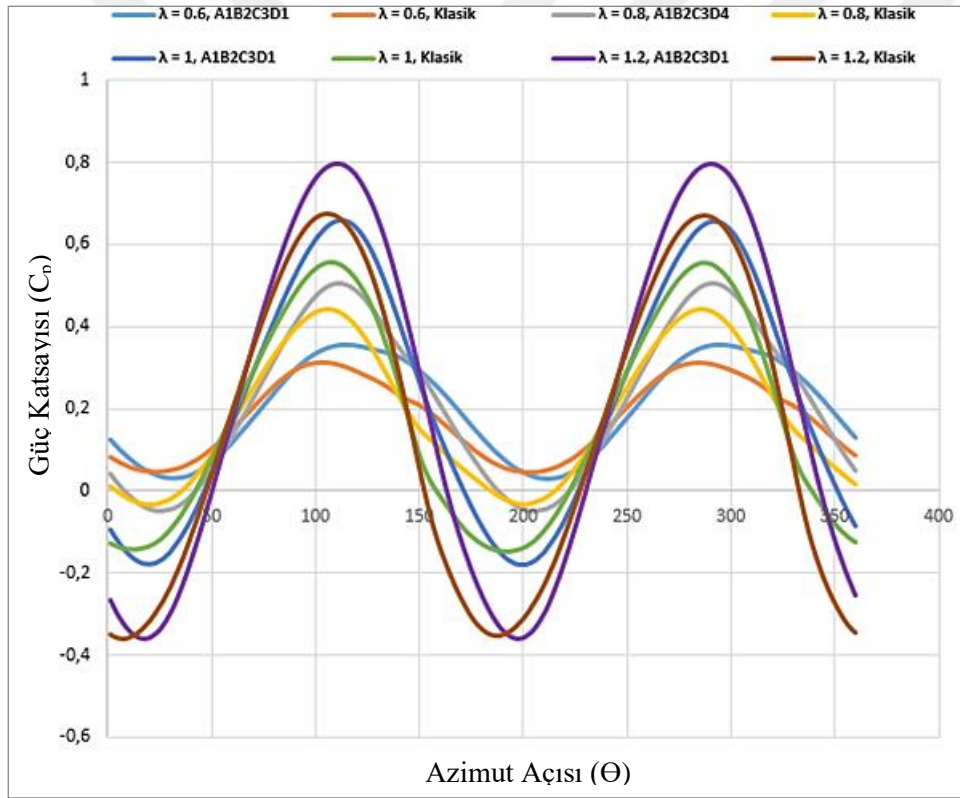
Çizelge 4.6'da, A1B2C3D1 dizaynı ve klasik dizayn kullanıldığında gözlemlenmiş olan kanat uç-hız oranı ve güç katsayısı değerleri ve aralarındaki farklar gösterilmiştir. Eş. 4.4 kullanılarak  $\lambda = 0,8$  için tahmini  $C_p$  değeri 0,21645 olarak bulunmuştu. Bu çizelgeden de görülebileceği üzere Fluent yazılımı kullanılarak  $\lambda = 0,8$  için  $C_p$  0,21903 olarak hesaplanmıştır. Bu iki güç katsayısı değeri arasında %1,178 fark vardır ve bu fark, HAD ve S/N oranı kullanılarak yapılan hesaplamalar arasındaki tutarlılığı göstermek için yeterlidir. Aynı zamanda regresyon denkleminin kullanılması ile birlikte  $C_p = 0,21253$  olarak hesaplanmıştır. A1B2C3D1 dizaynı için HAD analizi ve regresyon denkleminde elde edilen sonuçlar arasında ise %2,96'lık bir fark bulunmaktadır.

Çizelge 4.6. Klasik ve optimum dizayn kullanılarak elde edilen güç katsayıları ve farkları

$\lambda$	$C_p$ , Klasik	$C_p$ , A1B2C3D1	Fark, %
0,2	0,11086	0,11795	6,3954
0,4	0,14408	0,16495	14,485
0,6	0,17939	0,20295	13,133
0,8	0,18578	0,21903	17,897
1	0,17747	0,22678	27,785
1,2	0,15071	0,22201	47,309
1,4	0,09604	0,18461	92,222

Şekil 4.6'da klasik ve optimum dizayn (A1B2C3D1) için farklı azimut açılarında ve 4 farklı kanat uç-hız oranında gözlemlenen anlık  $C_p$  değerleri gösterilmiştir. Şekilde görülebileceği üzere, 0-360° derece arasında güç katsayısı değerinin pik noktaya ulaştığı 110-290° civarında 2 adet azimut açısı vardır. Bunun sebebi türbinin 2 kanatlı olmasıdır. Kullanılan türbin eğer 3 kanatlı olsa idi, gözlemlenen anlık güç katsayısı değerinin maksimum olduğu 0 – 360° arasında 3 farklı azimut açısı olması beklenirdi [21]. Azimut açısı 180° civarında iken tüm türbin modellerinde negatif tork gözlemlenmiştir. Türbinin 1 tam turu boyunca anlık olarak üretilen bu negatif tork değerleri toplamı pozitif tork değerleri toplamından daha az olduğu için ortalama güç katsayısı değeri 0'dan büyük olmaktadır. Negatif tork üretimi,  $\lambda = 0,6$  hariç diğer tüm kanat uç-hız oranı değerlerinde gözlemlenmiştir. Şekilden de

görülebileceği üzere,  $\lambda$  değerinin artması ile kanatlarda gözlemlenen anlık maksimum  $C_p$  değeri artmaktadır. Ancak optimum  $\lambda$ 'dan sonra, ortalama  $C_p$  değerinin azaldığı bilinmektedir. Bunun sebebi türbinde oluşan negatif torkun optimum  $\lambda$ 'dan sonra pozitif torktan daha hızlı artması ve bunun sonucunda ortalama güç katsayısı değerinin azalmasıdır.  $C_p$  değerinin 0'ın altında olduğu noktalarda türbinin self- start kabiliyeti bulunmamaktadır [35]. Kanat uç-hız oranının artması ile birlikte oluşan negatif torkun arttığı, dolayısıyla savonius rotorun self-start yeteneğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bütün  $\lambda$  değerlerinde A1B2C3D1 dizaynında klasik dizayna göre oluşan negatif tork değerleri daha fazladır. Ancak A1B2C3D1 dizaynında gözlemlenen pozitif tork değerlerinin çok daha fazla olması sayesinde ortalama  $C_p$  değeri de klasik dizayna göre daha yüksek olmaktadır.



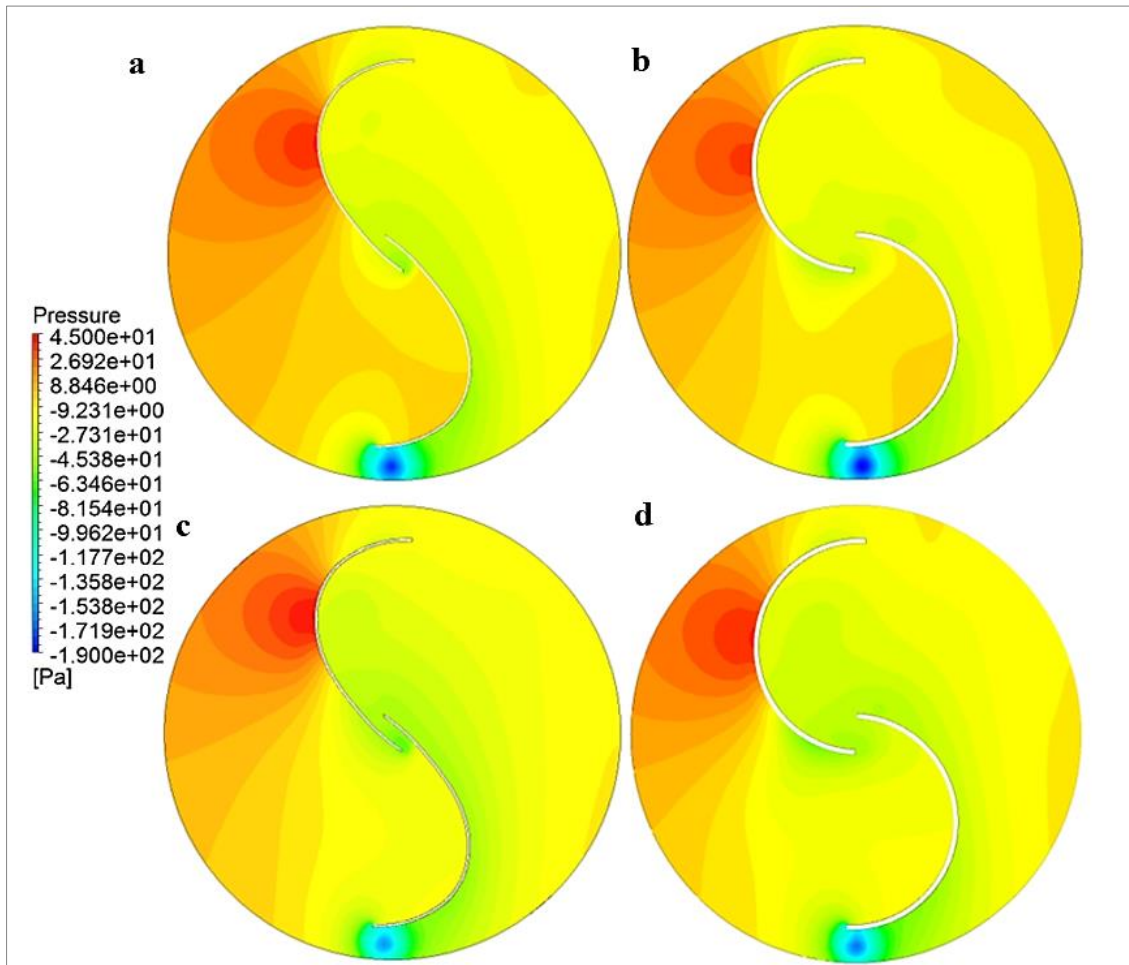
Şekil 4.6. Farklı  $\lambda$  değerleri için azimut açısı ( $\Theta$ ) ve  $C_p$  değerleri

### 4.3. Akış Analizi

A1B2C3D1 ve klasik dizayna sahip rüzgâr türbinleri etrafında gözlemlenen basınç konturları 2 farklı kanat uç-hız oranı için Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

$\lambda = 0,8$  iken, klasik ve A1B2C3D1 dizaynına sahip türbinler etrafındaki maksimum basınç değerleri sırasıyla 35,6 ve 40,07 Pascal olarak hesaplanmıştır ve bu maksimum basınç değerleri dışbükey kanatların etrafında oluşmuştur.

Pozitif basınç değerleri, içbükey kanadın iç kısımlarında gözlemlenmektedir. Diğer yandan negatif basınç değerleri ise daha çok dönüş eksenini etrafında, dışbükey kanatların iç kısmında ve içbükey kanatların dış kısmında oluşmaktadır. Benzer sonuçlar, Chan ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmada da gözlemlenmiştir [24].



Şekil 4.7. Basınç konturları a) A1B2C3D1  $\lambda=0,8$  b) klasik dizayn  $\lambda=0,8$  c) A1B2C3D1  $\lambda=1$  d) klasik dizayn  $\lambda=1$

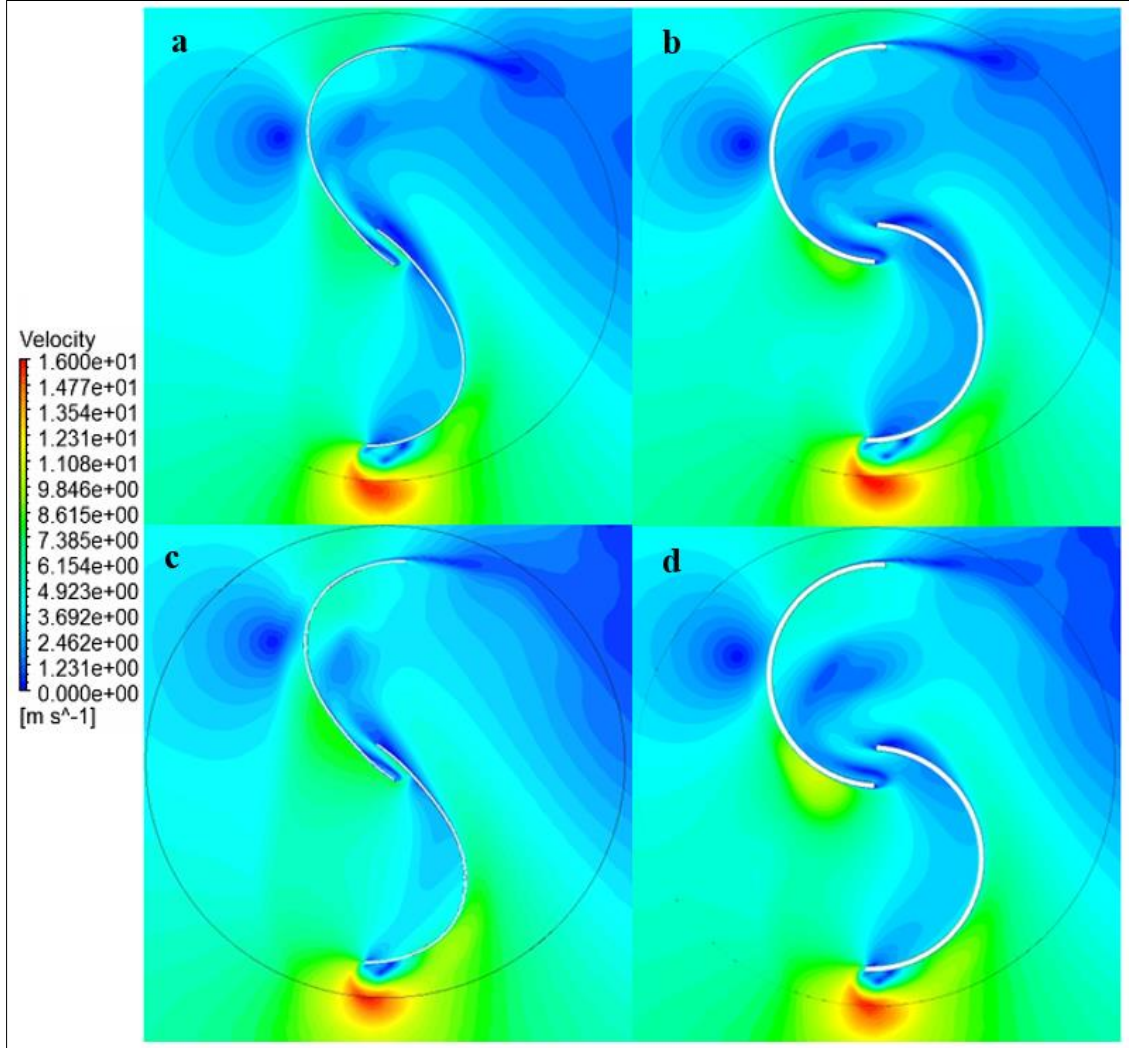
En yüksek negatif basınç değeri A1B2C3D1 dizaynı için -181,82 Pascal, klasik dizayn için ise -192 Pascal olarak hesaplanmıştır. Bu negatif basınç değerlerinin içbükey kanatların uç kısmında olduğu gözlemlenmiştir. Savonius rüzgâr türbinleri kanatların iç ve dış kısımlardaki basınç farkları sayesinde dönmektedir.  $\lambda = 1,0$  iken, klasik ve A1B2C3D1

dizaynına sahip türbinler etrafındaki maksimum basınç değerleri sırasıyla 40,16 ve 45,58 Pa olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda en yüksek negatif basınç değeri A1B2C3D1 dizaynına sahip türbinde -160,61 Pa, klasik kanat dizaynına sahip türbinde ise -169,42 Pa olarak hesaplanmıştır. Kanat uç-hız oranının artması ile birlikte iki türbin çeşidi için de gözlemlenen maksimum basınç değerleri artış göstermiş, minimum basınç değerleri ise azalmış yani 0'a yaklaşmıştır. Aynı zamanda, daha yüksek kanat uç-hız oranında dönüş eksenini etrafında, dışbükey kanatların iç kısmında ve içbükey kanatların dış kısmında daha fazla negatif basınç değerleri gözlemlenmiştir.

Şekil 4.8'de A1B2C3D1 ve klasik dizayna sahip rüzgâr türbinleri etrafında gözlemlenen hız konturları 2 farklı kanat uç-hız oranı için gösterilmiştir.

Şekil incelendiğinde, dışbükey kanatların iç kısmında türbinin aerodinamik performansını negatif yönde etkileyen vorteks yapıları görülmektedir. Klasik dizayna sahip kanat yapısında bu vorteks yapıları daha yoğundur. İç bükey kanatların uç kısmında türbinin daha hızlı dönmesini sağlayan ve maksimum rüzgâr hızının meydana geldiği sürükleyici akış yapıları gözlemlenmektedir. Bu yapılar kaldırma efekti sayesinde bir dönüş torku oluşturmakta ve rüzgâr türbininin aerodinamik performansına pozitif yönde katkı sağlamaktadırlar [36,37].

Verilen görselde içbükey kanadın iç kısmından orijine doğru rüzgâr hızının arttığı görülmektedir. Bu artan rüzgâr hızı dışbükey kanadı etkilemekte, dönüş yönünün tersine uygulanan rüzgâr kuvveti sebebiyle türbinde üretilen negatif tork artmaktadır. Bu duruma 'overlap jet' adı verilmektedir [38]. 2 farklı kanat uç-hız oranında da overlap jet bölgelerinin A1B2C3D1 dizaynında klasik dizayna göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, Şekil 4.5'de görülen daha yüksek negatif tork oluşumunu açıklayabilmektedir. Aynı zamanda dışbükey kanatların dış kısmında rüzgâr hızının neredeyse 0'a yaklaştığı ve Şekil 4.7'de maksimum basınç noktalarının olduğu duraksama noktaları gözlemlenmektedir.  $\lambda = 0,8$  iken, en yüksek rüzgâr hızı klasik dizayn için 16,01 m/s, A1B2C3D1 dizaynı için ise 15,58 m/s olarak hesaplanmıştır.  $\lambda = 1,0$  iken klasik dizaynda gözlemlenen maksimum rüzgâr hızı 15,72 m/s'ye düşmüşken, A1B2C3D1 dizaynında ise 15,8 m/s'ye yükselmiştir.



Şekil 4.8. Hız konturları a) A1B2C3D1  $\lambda=0,8$  b) klasik dizayn  $\lambda=0,8$  c) A1B2C3D1  $\lambda=1$  d) klasik dizayn  $\lambda=1$



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri genellikle enerji ihtiyacının fazla olmadığı yerlerde kullanılmaktadır. Boyutlarının yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha küçük olması sebebiyle kurulumu daha kolaydır. Verimleri yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşüktür. Bu türbin çeşitlerinin kullanımının yaygınlaşması için aşılması gereken en önemli engellerden biri düşük verimlerinin yükseltilmesidir. Bu tez çalışmasında dikey eksenli rüzgâr türbini çeşidi olan bir savonius rüzgâr türbininin veriminin artırılması amacıyla en uygun kanat örtüşme oranı, kanat ayrılma mesafesi, kanat kalınlığı ve kanat tipi Taguchi optimizasyon metodu kullanılarak Fluent yazılımında 2 boyutlu bir HAD çalışması ile belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Deneysel çalışması yapılmış olan türbin ve akış alanı 2 boyutlu olarak modellendikten sonra 174 880 ağ sayısında ağ yapısından bağımsızlık yakalanmış ve çalışmanın sonraki aşamalarında bu ağ yapısı kullanılmıştır.
- Analizlerde 2 farklı türbülans modeli karşılaştırılmış, realize edilebilir k-epsilon türbülans modelinin SST k-omega türbülans modeline göre deneysel hesaplamalara daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.
- Ağ yapısından bağımsızlık sağlandıktan ve türbülans modeli belirlendikten sonra savonius rüzgâr türbininin aerodinamik performansının artırılması için Çizelge 4.1'de de görülebileceği üzere 4 farklı parametre ve her bir parametre için 3 farklı seviye belirlenmiştir.
- L<sub>9</sub> ortogonal dizaynı Minitab yazılımı ile oluşturulmuştur. Klasik dizaynda en yüksek aerodinamik performansın hesaplandığı  $\lambda = 0,8$  için yapılan 9 farklı HAD analizi sonucunda seçilen parametrelerin rüzgâr türbini aerodinamik performansına olan etki sırası hesaplanmıştır.
- Rüzgâr türbini performansını en fazla etkileyen parametre kanat ayrılma mesafesi iken rüzgâr türbini performansını en az etkileyen parametre ise kanat örtüşme oranı olmuştur.
- L<sub>9</sub> ortogonal dizaynı oluşturulduktan sonra yapılan analizler ile sinyal gürültü oranları hesaplanmış, bu sayede güç katsayısını maksimize etmek için kullanılacak parametre-seviye konfigürasyonu oluşturulmuştur. Sinyal/gürültü oranlarına bakıldığında Taguchi optimizasyon metodu ile rüzgâr türbini güç katsayısının A1B2C3D1 (eliptik kanat, 0,15

kanat örtüşme oranı, -7,5 mm kanat ayrılma mesafesi ve 2 mm kanat kalınlığı) modeli ile maksimum değere ulaşacağı tahmin edilmiştir.

- $\lambda = 0,8$  için yapılan 9 farklı deney için regresyon analizi yapılmış ve güç katsayısı değeri için  $C_p = 0,1818 - 0,00157 A + 0,01328 C - 0,01126 D + 0,00186 B$  denklemi oluşturulmuştur. Yapılan hesaplamalarda regresyon denklemi ile sayısal analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olmuş ve 9 farklı deney için maksimum %5,07 hata gözlemlenmiştir. Ortalama hata ise %2,07 olmuştur. Optimum dizayn (A1B2C3D1) için tahmin edilen  $C_p$  değeri 0,21253 olarak hesaplanmıştır.
- $L_9$  ortogonal dizisinden elde edilen güç katsayısı değerleri için ANOVA analizi ile birlikte her bir parametrenin türbin güç katsayısına olan etkisi yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Yapılan analiz sonucu türbin performansına C parametresinin (kanat ayrılma mesafesi) %57,05, D parametresinin (kanat kalınlığı) %38,41, A parametresinin (kanat tipi) %2,63 ve B parametresinin (kanat örtüşme oranı) % 1,91 oranla etkilediği gözlemlenmiştir.
- Klasik dizaynda en yüksek aerodinamik performansın hesaplandığı  $\lambda = 0,8$  için A1B2C3D1 dizaynı kullanılarak yapılan analizlerde güç katsayısının klasik dizayna göre %17,9 arttığı görülmüştür. Aynı zamanda bu dizayn için regresyon denklemi ve sayısal analiz sonuçları arasında %2,96'lık bir hata meydana gelmiştir.
- Bütün kanat uç-hız oranlarında optimum dizaynın kullanılması ile birlikte savonius rotorun aerodinamik performansı yükselmiştir.  $\lambda = 1,4$  için  $C_p$  değeri klasik kanat dizaynına sahip rüzgâr türbinine göre 92,2% artış göstermiştir.
- Optimum kanat uç-hız oranı değeri klasik kanat için 0,8 olurken, A1B2C3D1 dizaynına sahip rüzgâr türbini için 1,0 olmuştur.

Literatür incelendiğinde savonius rüzgâr türbinlerinde genellikle kanat örtüşme oranının ve kanat tipinin rüzgâr türbini aerodinamik performansına olan etkisinin araştırıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise kanat örtüşme oranı ve kanat tipine ek olarak kanat kalınlığı ve kanat ayrılma mesafesi gibi az sayıda çalışmaya konu olmuş parametrelerin önemi de incelenmiştir. Yapılan analizlerde rüzgâr türbini performansına kanat ayrılma mesafesinin ve kanat kalınlığının kanat örtüşme oranından daha çok etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple literatürde kanat kalınlığı ve kanat ayrılma mesafesi üzerine daha çok çalışma yapılması tavsiye edilmektedir. İlerleyen çalışmalarda savonius-darrieus hibrit türbinleri araştırılabilir veya 3 boyutlu analizler ile deneysel sonuçlara çok daha yakın ve gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Fujisawa, N., and Gotoh, F. (1994). Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor. *Journal of Solar Energy Engineering Transactions of the ASME*, 116(3), 148–152.
2. Akwa, J. V., Alves Da Silva Júnior, G., and Petry, A. P. (2012). Discussion on the Verification of the Overlap Ratio Influence on Performance Coefficients of a Savonius Wind Rotor Using Computational Fluid Dynamics. *Renewable Energy*, 38(1), 141–149.
3. Wenehenubun, F., Saputra, A., and Sutanto, H. (2015). An Experimental Study on the Performance of Savonius Wind Turbines Related with the Number of Blades. *Energy Procedia*, 68, 297–304.
4. Tian, W., Song, B., Van Zwieten, J. H., and Pyakurel, P. (2015). Computational Fluid Dynamics Prediction of a Modified Savonius Wind Turbine with Novel Blade Shapes. *Energies*, 8(8), 7915–7929.
5. Roy, S., and Saha, U. K. (2015). Wind Tunnel Experiments of a Newly Developed Two-Bladed Savonius-Style Wind Turbine. *Applied Energy*, 137, 117–125.
6. Sanusi, A., Soeparman, S., Wahyudi, S., and Yuliati, L. (2017). Performance Analysis of a Combined Blade Savonius Wind Turbines. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 10(1), 54–62.
7. Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., and Nasef, M. H. (2012). An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25.
8. Sahim, K., Santoso, D., and Puspitasari, D. (2018). Investigations on the Effect of Radius Rotor in Combined Darrieus-Savonius Wind Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*.
9. Puspitasari, D., and Sahim, K. (2019). Effect of Savonius Blade Height on the Performance of a Hybrid Darrieus-Savonius Wind Turbine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(4), 5832–5847.
10. Rogowski, K., and Maroński, R. (2015). CFD Computation of the Savonius Rotor. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(1), 37–45.
11. Alit, I. B., Sutanto, R., Mara, I. M., and Mirmanto, M. (2017). Effect of Concentrator, Blade Diameter and Blade Number on the Savonius Wind Turbine Performance. *Asian Journal of Applied Sciences*, 5(2).
12. Alom, N., and Saha, U. K. (2019). Influence of Blade Profiles on Savonius Rotor Performance: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Energy Conversion and Management*, 186(February), 267–277.
13. Damak, A., Driss, Z., and Abid, M. S. (2013). Experimental Investigation of Helical Savonius Rotor with a Twist of 180°. *Renewable Energy*, 52, 136–142.

14. Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., and Thèvenin, D. (2010). Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade. *Renewable Energy*, 35(11), 2618–2626.
15. El-Askary, W. A., Nasef, M. H., AbdEL-hamid, A. A., and Gad, H. E. (2015). Harvesting Wind Energy for Improving Performance of Savonius Rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 8–15.
16. Ahmed, W. U., Zahed, M. J. H., Rahman, M. A., and Mamun, M. (2014 September). *Numerical Study of Two and Three Bladed Savonius Wind Turbine*. 2nd International Conference on Green Energy and Technology ICGET, 36–40.
17. Khanjanpour, M. H., and Javadi, A. A. (2020). Optimization of the Hydrodynamic Performance of a Vertical Axis Tidal (VAT) Turbine Using CFD-Taguchi Approach. *Energy Conversion and Management*, 222, 113235.
18. Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application Second Edition*. Wiley Online Library
19. Wong, K. H., Chong, W. T., Poh, S. C., Shiah, Y. C., Sukiman, N. L., and Wang, C. T. (2018). 3D CFD Simulation and Parametric Study of a Flat Plate Deflector for Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 129, 32–55.
20. Eriksson, S., Bernhoff, H., and Leijon, M. (2008). Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1419–1434.
21. Kaya, A. F., Tanürün, H. E., and Acır, A. (Baskıda). Numerical investigation of radius dependent solidity effect on H-type vertical axis wind turbines. *Journal of Polytechnic*, 0900.
22. Sharma, S., and Sharma, R. K. (2016). Performance Improvement of Savonius Rotor Using Multiple Quarter Blades – A CFD Investigation. *Energy Conversion and Management*, 127, 43–54.
23. Nasef, M. H., El-Askary, W. A., AbdEL-hamid, A. A., and Gad, H. E. (2013). Evaluation of Savonius Rotor Performance: Static and Dynamic Studies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123, 1–11.
24. Chan, C. M., Bai, H. L., and He, D. Q. (2018). Blade Shape Optimization of the Savonius Wind Turbine Using a Genetic Algorithm. *Applied Energy*, 213, 148–157.
25. Mauro, S., Brusca, S., Lanzafame, R., and Messina, M. (2019). CFD Modeling of a Ducted Savonius Wind Turbine for the Evaluation of the Blockage Effects on Rotor Performance. *Renewable Energy*, 141, 28–39.
26. Al-Faruk, A., and Sharifian, A. (2017). Flow Field and Performance Study of Vertical Axis Savonius Type SST Wind Turbine. *Energy Procedia*, 110, 235–242.

27. Delbari, S. H., Nejat, A., Ahmadi, M. H., Khaleghi, A., and Goodarzi, M. (2019). Numerical Modeling of Aeroacoustic Characteristics of Different Savonius Blade Profiles. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 30(6), 3349–3369.
28. Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., and Thévenin, D. (2011). Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 236–242.
29. Roy, S., and Saha, U. K. (2013). Computational Study to Assess the Influence of Overlap Ratio on Static Torque Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine. *Procedia Engineering*, 51, 694–702.
30. Roy, S., and Saha, U. K. (2012). *Comparative Analysis of Turbulence Models for Flow Simulation around a Vertical Axis Wind Turbine*. Indo-Danish International Conference on Wind Energy: Materials, Engineering, and Policies.
31. Cheng, S.-J., Miao, J.-M., and Wu, S.-J. (2010). Numerical Optimization Design of PEM Fuel Cell Performance Applying the Taguchi Method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 4(5), 526–532.
32. Ghani, J. A., Choudhury, I. A., and Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi Method in the Optimization of End Milling Parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 84–92.
33. Karthikeyan, P., Muthukumar, M., Shanmugam, S. V., Kumar, P. P., Murali, S., and Kumar, A. P. S. (2013 December). Optimization of Operating and Design Parameters on Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Using Taguchi Method. *Procedia Engineering*, 64, 409–418.
34. Mousavi, S.M., Yaghmaei, S., Jafari, A., Vossoughi, M., and Ghobadi, Z. (2007). Optimization of ferrous biooxidation rate in a packed bed bioreactor using Taguchi approach. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46, 935–940.
35. Zhang, L. X., Liang, Y. Bin, Liu, X. H., and Guo, J. (2014). Effect of Blade Pitch Angle on Aerodynamic Performance of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Central South University*, 21(4), 1417–1427.
36. Alaimo, A., Esposito, A., Milazzo, A., Orlando, C., and Trentacosti, F. (2013) Slotted Blades Savonius Wind Turbine Analysis by CFD. *Energies*, 6(12), 6335–6351.
37. Deb, B., Gupta, R., and Misra, R. D. (2013). Performance Analysis of a Helical Savonius Rotor without Shaft at 45° Twist Angle Using CFD. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(1), 126–133.
38. Kacprzak, K., Liskiewicz, G., and Sobczak, K. (2013). Numerical Investigation of Conventional and Modified Savonius Wind Turbines. *Renewable Energy*, 60, 578–585.





*GAZİ GELECEKTİR..*