

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE LÜLE VE YAYICI KULLANIMI İLE VERİM
İYİLEŞTİRMENİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ertuğrul MAZ

EYLÜL 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE LÜLE VE YAYICI KULLANIMI İLE VERİM
İYİLEŞTİRMENİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ertuğrul MAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 / 08 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 13 / 09 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Dünyada ve ülkemizde giderek artan enerji taleplerinin ve bu taleplere cevap veren enerji dönüşüm sistemlerinin çevreye zarar vermemesi elzemdir. Bilindiği üzere her geçen yıl küresel ısınmanın etkilerinin artmakta olduğu bilimsel olarak kanıtlanmıştır. Bu nedenle yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı bir tercih olmaktan çıkarak zorunluluk haline gelmiştir. Ülkemizin de bu konudaki atılımları giderek artmaktadır. Rüzgar enerjisi ise yerkürede sınırsız sayılabilecek kadar kaynağa sahip olduğundan, hem çevreye hem de insanoğluna faydalı olduğu bir gerçektir. Ayrıca birçok avantajı nedeniyle en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi, 2021 yılında dünyada üretilen enerjinin sadece %3'ünü oluşturmaktadır.

Bu diliminin artırılmasını sağlamak amacıyla, literatürde “lens” adı verilen lüle ve/veya yayıcı (nozzle ve diffuser) kullanımının enerji dönüşüm sistemi olan rüzgar türbinlerinin verimine olan etkisi önemli bir araştırma konusudur. Yapılan literatür araştırması göstermiştir ki, lenslerin hem geometrilerinin hem de malzemelerinin verim üzerinde etkisi vardır. Bu çalışmada bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulaması olan ANSYS Fluent Workbench 2020 R2 programı kullanılarak lens-verim ilişkisi sayısal olarak incelenmiş ve verimin artırılmasına yönelik parametrik bir çalışma yapılarak literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu tezde yapılan çalışmadan elde edilen bulguların rüzgar enerjisi teknolojisinde kullanılabilir olmasını ve uygulamada çevresel etkilere yol açmadan daha fazla güç üretilmesini ümit ederim.

Rüzgar enerjisiyle ilgili fikirlerimi ilk paylaştığım andan itibaren beni destekleyen, her konuda yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Öte yandan, lisansüstü çalışmalarımda bana destek olan işyerimdeki tüm yöneticilerime, aileme, eşime ve arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

Ertuğrul MAZ

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Rüzgar Türbinlerinde Lüle ve Yayıcı Kullanımı ile Verim İyileştirmenin Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 13/09/2023

Ertuğrul MAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Rüzgar Enerjisi	2
1.3. Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları	2
1.4. Rüzgar Türbinleri.....	3
1.4.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	3
1.4.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	4
1.5. Rüzgar Türbinlerinde Güç Hesabı	5
1.6. Eksenel Momentum Teorisi ve Betz Limiti	8
1.7. Rüzgar Türbinlerinde Verimi Etkileyen Faktörler	11
1.7.1. Türbin Çeşidinin Verime Etkisi	12
1.7.2. Yerden Yüksekliğin Verime Etkisi.....	14
1.7.3. Aerodinamik Tasarımın Verime Etkisi	14
1.7.4. Çiftlik Yerleşiminin (Micro-siting) Verime Etkisi	16
1.7.5. Lüle & Yayıcı Eklentisinin Verime Etkisi	18
1.8. Rüzgar Türbinlerinde Lüle ve Yayıcı Kullanılan Çalışmalar.....	19

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	26
2.1.	Sade Rüzgar Türbin Modeli (A)	31
2.2.	Basit Kanallı Rüzgar Türbin Modeli (B)	34
2.3.	Basit Difüzörlü Rüzgar Türbin Modeli (C)	36
2.4.	Basit Flanş (Brim) Difüzörlü Rüzgar Türbin Modeli (D).....	39
2.5.	Basit Lensli Rüzgar Türbin Modeli (E)	41
2.6.	Basit Flanş (Brim) Lensli Rüzgar Türbin Modeli (F).....	43
2.7.	Eğimli Lens Rüzgar Türbin Modeli (G)	45
2.8.	Eğimli Flanş (Brim) Lens Rüzgar Türbin Modeli (H).....	47
2.9.	Çift Eğimli Flanş (Brim) Lens Rüzgar Türbin Modeli (I)	49
2.10.	Eğimli Flanş (Brim) Ayrılmış Lens Rüzgar Türbin Modeli (J)	51
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	53
4.	SONUÇLAR.....	62
5.	ÖNERİLER	64
6.	KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE LÜLE/YAYICI KULLANIMI İLE VERİM İYİLEŞTİRMENİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ertuğrul MAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

2023, 67 Sayfa

Bu çalışmada; günümüzdeki çevresel nedenlerle kullanılması zorunluluk haline gelen yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisini yararlı enerjiye çevirmede kullanılan rüzgar türbinlerinin; lüle ve yayıcı gibi pasif donanımlarla performanslarının artırılması sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan ANSYS Workbench 2020 R2 programı kullanılmıştır. Yaklaşık 1 metre çapındaki rotora sahip yatay eksenli rüzgar türbininde (YERT) farklı tip ve kombinasyonlarda oluşturulmuş olan lüle ve yayıcılar (nozul ve difüzör) kullanılarak toplamda 10 farklı durum için sayısal analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ANSYS CFD Post modülü ile görselleştirilerek, kesit alanlarındaki ortalama hız ve basınç değerleri elde edilmiştir. Sonuçların rüzgar gücü ve rüzgar performans katsayısı denklemlerinde kullanılması ile elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; belirli tasarımlardaki lüle, yayıcı ve flanş (brim) kombinasyonları, rotor kesitindeki hızı % 37 artırarak toplam rüzgar gücünü 1.5 kat, rüzgar performans katsayısını ise 2 kattan fazla artırmıştır. Bu artışın lüle ve yayıcı geometrilerinin akış eksen doğrultusundaki basınç farkını düşürücü etkisinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yatay eksenli rüzgar türbini, Rüzgar türbini sayısal analizi, Rüzgar türbin veriminin artırılması, Rüzgar lensi

Master Thesis

SUMMARY

NUMERICAL INVESTIGATION OF WIND EFFICIENCY IMPROVEMENT BY USING NOZZLE/DIFFUSER IN WIND TURBINES

Ertuğrul MAZ

Karadeniz Technical University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering Graduate Program

Supervisor: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

2023, 67 Pages

In this study; Increasing the performance of wind turbines, which are used to convert wind energy into useful energy which is one of the renewable energy sources which has become a necessity due to environmental reasons today with passive equipment such as nozzles and diffusers has been numerically examined. ANSYS Workbench 2020 R2 program which is a Computational Fluid Dynamics (CFD) program was used within the scope of the study. A total of 10 different numerical analyzes were performed by using nozzles and diffusers created in different types and combinations in a horizontal axis wind turbine (HAWT) with a rotor of approximately one meter in diameter. Analysis results were visualized with the ANSYS CFD Post module, and average velocity and pressure values were obtained. The findings obtained by using the results in the wind power and wind performance coefficient equations were evaluated. According to the findings obtained from the study, The nozzle, diffuser and flange (brim) combinations in certain designs increased the speed in the rotor section by 37%, increasing the total wind power by 1.5 times and the wind performance coefficient more than 2 times. It has been concluded that this increase is due to the effect of nozzle and diffuser geometries reducing the pressure difference in the direction of the flow axis.

Key Words: Horizontal axis wind turbine, Numerical analysis of a wind turbine, Increasing the efficiency of a wind turbine, Wind lens

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 2001-2021 yılları arasında üretilen enerjinin yıllara göre oransal dağılımı (BP, 2022)	2
Şekil 2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması (Elibüyük & Üçgül, 2014)	3
Şekil 3. YERT yapısı ve enerji üretim şeması (Kaya & Koç, 2015)	4
Şekil 4. DERT yapısı (Gezegen Solar, 2021)	5
Şekil 5. DERT çeşitleri (Castellini, ve diğerleri, 2019).....	5
Şekil 6. Rüzgar türbinine doğru hareket eden hava parseli (Mathew, 2006).....	6
Şekil 7. Kanal içinde yer alan temsili rüzgar türbini referans noktaları	8
Şekil 8. Eksenel akış tübü modeli (Mathew, 2006)	9
Şekil 9. Kanat sayısının Cp'ye etkisi (Wang & Chen, 2008)	13
Şekil 10. Onshore offshore türbin kıyaslaması (Huang, Tee, Li, & Wu, 2020).....	13
Şekil 11. Optimum türbin gövde yüksekliği (Lee, Lee, & Kim, 2015)	14
Şekil 12. Değişen hücum açısının kaldırma/sürüklenme oranına etkisi (Thumthae & Chitsomboon, 2009)	15
Şekil 13. Kanat profilinin verime etkisi (Hazmoune, Lazaroïu, Ciupageanu, & Debbache, 2021).....	15
Şekil 14. İz (Wake) etkisi şematik gösterimi (Bader, Inguva, & Perot, 2018)	16
Şekil 15. İz (wake) etkisinin bir aktüatör ile azaltılması (Bader, Inguva, & Perot, 2018) ..	17
Şekil 16. İz (Wake) etkisinin farklı türbin yükseklikleri ile azaltılması (Wu, Liao, Chen, & Chen, 2018)	17
Şekil 17. Nozulun rüzgar türbinine etkisi deneyi (Pampudi, ve diğerleri, 2017).....	18
Şekil 18. Difüzörün rüzgar türbinine etkisi deneyi (Ohya & Kradusani, 2010).....	18
Şekil 19. Basit yapıli rüzgar lensi geometrisi (Kishore, Coudron, & Priya, 2013)	19
Şekil 20. Basit yapıli rüzgar lensi deney sonuçları (Kishore, Coudron, & Priya, 2013).....	20
Şekil 21. Kompleks yapıli rüzgar lensi geometrisi (Watanabe & Ohya, 2021).....	20
Şekil 22. Kompleks yapıli rüzgar lensi deney sonuçları (Watanabe & Ohya, 2021)	21
Şekil 23. Ohya ve Karasudani'nin deneysel çalışması	21
Şekil 24. 500W YERT rüzgar lensi geometrisi.....	22
Şekil 25. Ohya ve Karasudani (2010) 500W YERT rüzgar lensi deney sonuçları	22
Şekil 26. 5 kW'lık brimli lens geometrisi.....	23

Şekil 27. 5 kW'lık brimli lens deney sonuçları	23
Şekil 28. Kosasih ve Tondelli'nin deney geometrileri. (a) sadece difüzör, (b) difüzör & nozzle kombinasyonu (Kosasih & Tondelli, 2012)	24
Şekil 29. Kosasih ve Tondelli'nin deney sonuçları (Kosasih & Tondelli, 2012).....	24
Şekil 30. Hesaplama konfigürasyonlarına ait ekran görüntüleri	26
Şekil 31. A'dan H'ye kadar olan modellerinin ortak analiz modeli ve çözüm yöntemi.....	30
Şekil 32. I ve J modellerinin ortak analiz modeli ve çözüm yöntemi	31
Şekil 33. Ortak sınır koşulları temsili görseli	31
Şekil 34. Model ölçüleri	32
Şekil 35. Sade rüzgar türbini modeli ölçüleri	32
Şekil 36. Sade rüzgar türbini mesh yapısı	33
Şekil 37. Sade rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	34
Şekil 38. Basit kanallı rüzgar türbin modeli ölçüleri ve mesh yapısı	35
Şekil 39. Basit kanallı rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	36
Şekil 40. Basit difüzörlü rüzgar türbini model geometrisi	37
Şekil 41. Basit difüzörlü rüzgar türbini model ağ görüştüsü	37
Şekil 42. Basit difüzörlü rüzgar türbini modeli görsel sonuçları.....	38
Şekil 43. Basit flanş difüzörlü rüzgar türbin model geometrisi.....	39
Şekil 44. Basit flanş difüzörlü rüzgar türbin modeli mesh yapısı	39
Şekil 45. Basit flanş lensli rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	40
Şekil 46. Basit lensli rüzgar türbin modeli ölçüleri	41
Şekil 47. Basit lensli rüzgar türbin modeli mesh yapısı	41
Şekil 48. Basit lensli rüzgar türbin modeli görsel sonuçları.....	42
Şekil 49. Basit flanş lensli rüzgar türbin model geometrisi.....	43
Şekil 50. Basit flanş lensli rüzgar türbin modeli mesh yapısı	43
Şekil 51. Basit flanş lensli rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	44
Şekil 52. Eğimli lens rüzgar türbin model geometrisi	45
Şekil 53. Eğimli lens rüzgar türbin modeli mesh yapısı.....	45
Şekil 54. Eğimli lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	46
Şekil 55. Eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin model geometrisi	47
Şekil 56. Eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin modeli mesh yapısı.....	47
Şekil 57. Eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	48
Şekil 58. Çift eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin model geometrisi	49

Şekil 59. Çift eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin model mesh yapısı	49
Şekil 60. Çift eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları.....	50
Şekil 61. Eğimli flanş (brim) ayrılmış lens rüzgar türbin model geometrisi	51
Şekil 62. Eğimli flanş (brim) ayrılmış lens rüzgar türbin model mesh yapısı.....	51
Şekil 63. Eğimli flanş (brim) ayrılmış lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları	52
Şekil 64. Modellerin ölçüm alanlarının örnek görseli	53
Şekil 65. Modellere göre ortalama hız değişimi.....	55
Şekil 66. Modellere göre teorik güç değişimi.....	56
Şekil 67. Modellere göre performans katsayısı (C_p) değişimi.....	60



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Mesh sayısının hız, güç ve performans katsayısına etkisi	33
Tablo 2. Modellere göre hız ve güç değerleri	54
Tablo 3. Modellere göre basınç ve performans katsayısı (C_p) değerleri	59



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ANP	: Yıllık Net Güç Üretimi
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DERT	: Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HAWT	: Horizontal Axis Wind Turbine
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini
C_d	: Rüzgar Sürüklenme Katsayısı
C_p	: Rüzgar Performans Katsayısı
C_l	: Rüzgar Kaldırma Katsayısı
P	: Basınç (Pa)
ΔP	: Basınç değişimi (Pa)
Q_a	: Havanın debisi (m ³ /h)
V	: Hız (m/s)
W	: Enerji (J)
$\dot{W}$	: Güç (W)
ρ_a	: Havanın yoğunluğu (1,225 kg/m ³)
$\forall$	: Hacim (m ³)
m	: Kütle (kg)
$\dot{W}_{\text{teorik}}$	: Teorik güç (W)
$\dot{W}_{\text{türbin}}$	: Rüzgardan dönüştürülen türbin gücü (W)
$\dot{W}_{\text{rüzgar}}$	: Serbest rüzgarın sahip olduğu güç (W)
$\dot{W}_{\text{türbin_MAKS}}$	: Türbinin dönüştürebileceği maksimum güç (W)
A_T	: Türbin rotor alanı (m ²)
V_T	: Türbin rotor hızı (m/s)
V'	: Türbin kanal çıkış hızı (m/s)
F	: Kuvvet (N)
Re	: Reynolds sayısı
p_U	: Kanal giriş rüzgar basıncı (Pa)
p_D	: Kanal çıkış rüzgar basıncı (Pa)
λ	: Kanat uç hız oranı

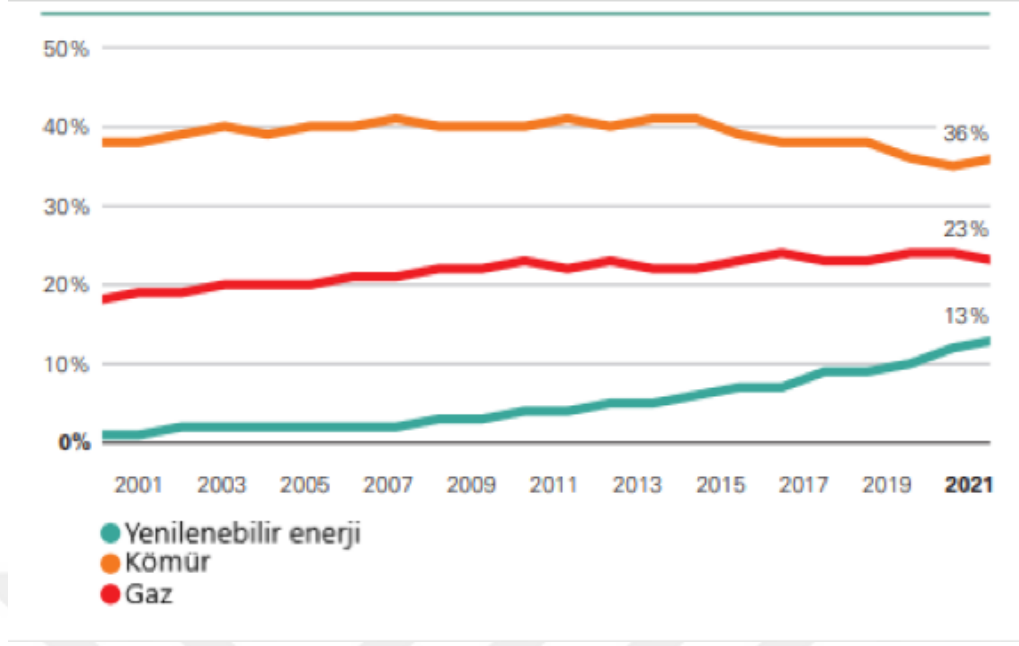
a	: Eksenel indüksiyon parametresi
u	: Hızın x eksenindeki bileşeni (m/s)
v	: Hızın y eksenindeki bileşeni (m/s)
w	: Hızın z eksenindeki bileşeni (m/s)
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
μ_t	: Girdapçık viskozitesi (kg/ms)
ϑ	: Kinematik viskozite (m^2/s)
ϑ_t	: Kinematik girdapçık viskozitesi (m^2/s)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
k	: Türbülans kinetik enerji katsayısı
ε	: Türbülans kinetik enerjisinin yutulma miktarı
ω	: Türbülans kinetik enerjisinin özgül yutulma hızı
C_ε	: k- ε türbülans model kapatılma katsayısı
a	: k- ω türbülans model kapatılma katsayısı
β	: k- ω türbülans model kapatılma katsayısı
Pr	: Prandtl sayısı
P_k	: Türbülans kinetik enerji üretimi
P_b	: Kaldırma kuvveti
S	: Ortalama gerilme oran tensör modülü
β	: Isıl genleşme katsayısı
T	: Sıcaklık (K)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji; modern insanoğlunun var olduğu ilk günden itibaren her zaman önemli bir ihtiyaç olmuştur ve insanlık tarihi boyunca sürekli artan bir talep görmüştür. Uzun yıllardır oluşan bu talep için çok farklı şekillerde çözümler geliştirilmiş ve enerjinin sürdürülebilirliği sağlanmaya çalışılmıştır. 20. yüzyıla kadar modern anlamda faydalı iş için ihtiyaç duyulan enerjinin neredeyse tamamı sürdürülebilirliği uzun vadede imkansız olan fosil yakıtlardan oluşmaktaydı. 20. yüzyılda ise güvenliğinin sağlanması zor olan nükleer enerji kaynağı popüler olmuştur. Günümüzde ise hem güvenli hem de uzun vadede sürdürülebilir olan ve neredeyse tükenmez olan yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı bir yöneliş söz konusudur. Bunlardan başlıcaları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik enerji, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisidir. Bu enerji kaynaklarının en büyük avantajı ise özünde karbon üretiminin olmamasıdır. 21. yüzyılda etkilerinin giderek arttığı ispatlanmış olan küresel ısınma ve iklim değişikliğinin yeryüzündeki canlı popülasyonlarına etkileri göz önüne alındığında, çevreyi kirletmeyen net karbon üretimi sıfır olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı tercih olmaktan çıkarak zorunluluk haline gelmiştir.

Dünya genelinde üretilen enerji kaynakları göz önüne alındığında, 20 yıllık süreçte giderek artan yenilenebilir enerji kaynaklarının tüm enerji kaynaklarına oranı %13 ile sınırlı kalmıştır (Şekil 1). Geri kalan %87'lik enerji üretiminin neredeyse tamamı kömür ve petrol gibi fosil yakıtlardan veya nükleer enerji gibi güvensiz enerji kaynaklarından üretilmiştir.



Şekil 1. 2001-2021 yılları arasında üretilen enerjinin yıllara göre oransal dağılımı (BP, 2022)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığında Rüzgar Enerjisi öne çıkmaktadır. 2021 yılında dünya enerji tüketiminin yaklaşık %3'ü rüzgar enerjisinden karşılanmıştır (BP, 2022).

1.2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr enerjisi; yer kürenin farklı bölgelerinin güneş ışınları tarafından farklı miktarda ısınması sonucu oluşan sıcaklık farkından kaynaklanan hava hareketi ile ortaya çıkar. Özellikle kara ile deniz arasında ve yüksek rakım ile alçak rakım arasında oluşan bu sıcaklık farkları, basınç farkının doğmasına ve dolayısıyla yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru hava hareketi oluşturmaktadır.

Günümüzde rüzgar enerjisi mekanik harekete veya elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır. Bu dönüşümü sağlayan cihazlar ise rüzgar türbini olarak adlandırılmaktadır.

1.3. Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Her enerji kaynağının olduğu gibi rüzgar enerjisinin de avantajları ve dezavantajları vardır. Avantajları:

- Sınırsız enerji kaynağına sahip olması
- Sera gazı üretimi açısından en temiz enerji kaynaklarından biri olması
- Geliştirilebilir teknolojiye sahip olması
- Çiftçilik ve tarım uygulamalarını etkilememesi
- Fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltması
- Amortisman süresinin nispeten kısa olması

Dezavantajları:

- Rüzgarı kullanarak hareket eden kuş gibi canlıların zarar görmesine neden olarak doğal yaşamı olumsuz etkilemesi
- Gürültülü olması
- İlk kurulum maliyetinin yüksek olması (Anonim, 2023)

1.4. Rüzgar Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, genel olarak Şekil 2'deki gibi birçok özelliğine göre sınıflandırılmaktadır.

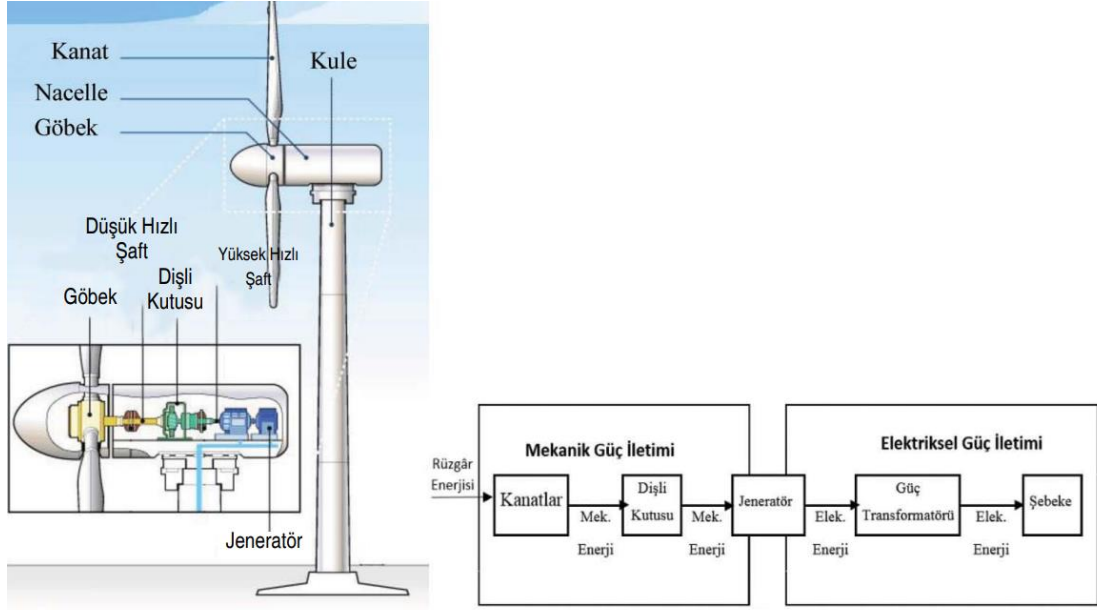


Şekil 2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması (Elibüyük & Üçgül, 2014)

1.4.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve bu çalışmada da göz önüne alınmış olan yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT); rüzgarı önden veya arkadan olmak üzere yatay eksenden

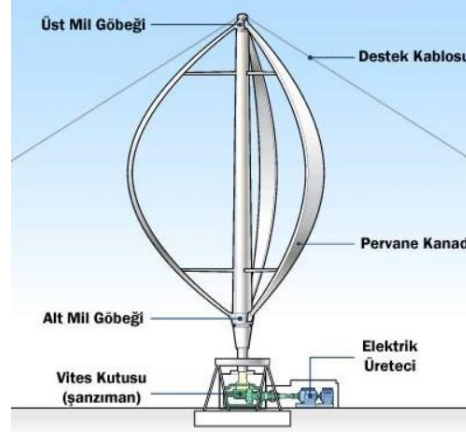
alırlar ve genel olarak kanat, göbek, nacelle ve kuleden oluşurlar (Şekil 3). Ayrıca, rotorun rüzgarı tam karşıdan alabilmesi amacıyla nacelleyi çeviren bir YAW mekanizması bulunur. Nacelle içerisindeki mekanizmada ise düşük hızlı şaft, dişli kutusu, yüksek hızlı şaft ve jeneratör bulunur. Günümüzde rüzgar enerjisi (kinetik enerji) çoğunlukla elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır. Bu dönüşüm için rüzgar enerjisi önce kanatlar aracılığıyla mekanik enerjiye ardından jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek genelde şebekeye, bazı durumlarda ise kurulu alanın günlük kullanımına aktarılmaktadır.



Şekil 3. YERT yapısı ve enerji üretim şeması (Kaya & Koç, 2015)

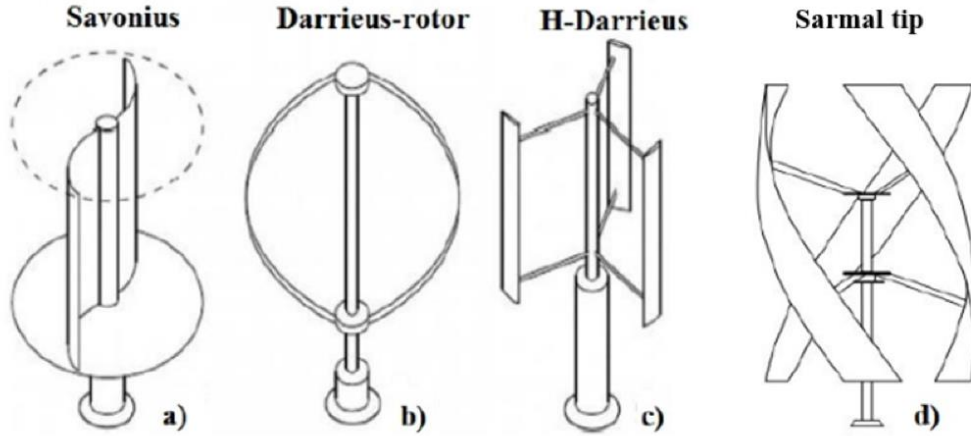
1.4.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin (DERT) çalışma prensibi temel olarak YERT'ler ile aynıdır. Ancak jeneratör ve dişli kutusu gibi ana parçaları zemine yakındır (Şekil 4). Bu sayede bakım ve onarımı daha kolaydır. Öte yandan rüzgara yönelmesi için bir mekanizmaya ihtiyacı olmadığından YAW mekanizması bulunmamaktadır.



Şekil 4. DERT yapısı (Gezegen Solar, 2021)

DERT'ler *Savonius* tip ve *Darrieus* tip olmak üzere 2 ana grup altında incelenmektedir. *Savonius* tip DERT'ler kova yapılı (bucket) kanatları ile daha basit tasarıma sahiptir ancak diğer tipler ile kıyaslandığında daha düşük verime sahiptirler (Şekil 5). Bu nedenle daha küçük uygulamalarda kullanılırlar (Castellini, ve diğerleri, 2019).



Şekil 5. DERT çeşitleri (Castellini, ve diğerleri, 2019)

Darrieus tip DERT'ler yumurta şekilli, H-Darrieus ve sarmal şekilli olmak üzere 3 farklı konfigürasyona sahiptir (Şekil 5). *Savonius* tip ile kıyaslandıklarında yüksek hızda dönmeleri sebebiyle daha iyi verime sahiptirler. (Castellini, ve diğerleri, 2019)

1.5. Rüzgar Türbinlerinde Güç Hesabı

Rüzgarın sahip olduğu enerji temel olarak dünyanın yüzeyinde hareket eden havanın kinetik enerjisidir. Türbin kanatları bu kinetik enerjiyi türbin tiplerine göre değişen mekanik

veya elektrik enerjisi formuna dönüştürür. Akan m kütleli, V hızlı, $\forall$ hacimli, ρ_a yoğunluğunda havanın sahip olduğu kinetik enerji şu şekilde ifade edilir:

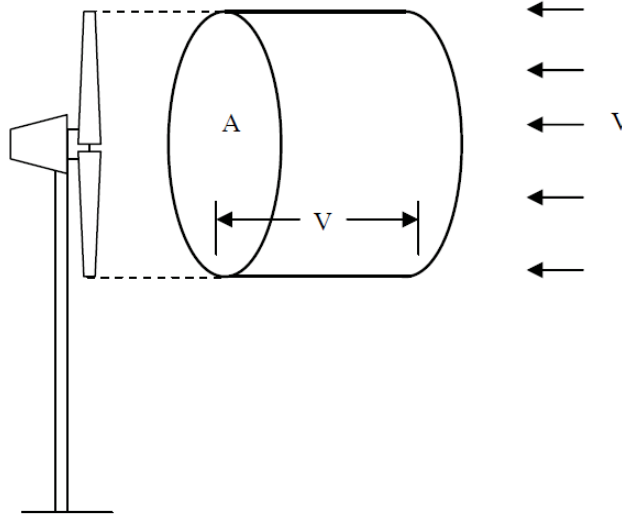
$$W = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2}\rho_a\forall V^2 \quad (2)$$

Tarama alanı A_T olan kanatlardan geçen rüzgarın birim zamandaki kinetik enerjisi, diğer bir ifade ile gücü şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{W}_{\text{teorik}} = \frac{1}{2}\rho_a A_T V^3 \quad (3)$$

Denklem (2)'de yer alan $\forall$ ifadesi, Şekil 6'da gösterildiği gibi birim zamanda A alanı ve V kalınlığı kadar yol alacağından, Denklem (3) elde edilir.



Şekil 6. Rüzgar türbinine doğru hareket eden hava parseli (Mathew, 2006)

Türbinden elde edilen mekanik gücün, rüzgarda mevcut olan kinetik güce oranlanmasıyla rüzgar güç performans katsayısı (C_p) elde edilir (4). Bu katsayı, rüzgar türbininin teorik kinetik gücü ne oranda mekanik güce dönüştürdüğü parametresidir.

$$C_p = \frac{\dot{W}_{türbin}}{\dot{W}_{rüzgar}} = \frac{\dot{W}_{türbin}}{\frac{1}{2} \rho_a A_T V^3} \quad (4)$$

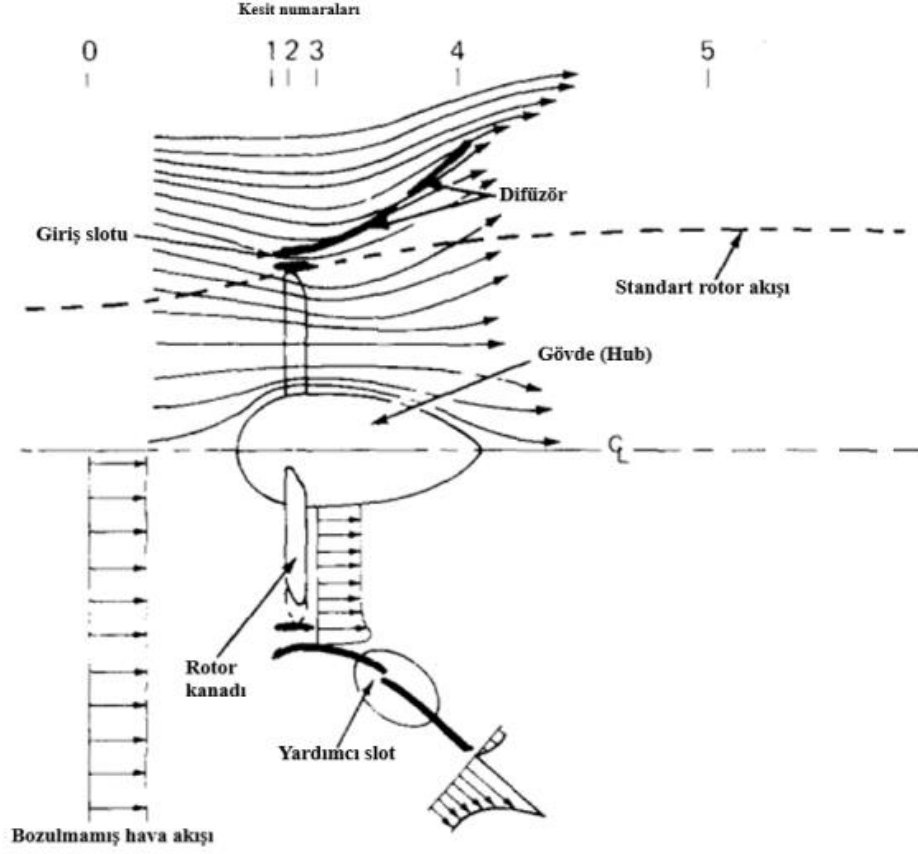
$$\dot{W}_{türbin} = C_p \rho_a A_T V^3 \quad (5)$$

Rüzgar güç performans katsayısının kullanılmasıyla bir rüzgar türbininden elde edilen faydalı güç Denklem (5)'teki gibi hesaplanabilir. Denklem (5)'den yola çıkılarak, rüzgar enerjisindeki verimliliğin performans katsayısına, havanın yoğunluğuna, tarama alanına ve özellikle hıza bağlı olduğu çıkarımı yapılabilir. Hatta hız ile güç üretimi arasında kübik bir ilişki söz konusudur ki; bu onu en önemli parametre yapmaktadır (Mathew, 2006).

Öte yandan, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile yapılacak olan sayısal çalışmalarda C_p katsayısının ideal olarak hesaplanabilmesi için analiz sonrası giriş ve rotor kesitinde elde edilecek olan basınç (P) ve debi (Q) değerlerinin çarpımıyla elde edilecek ideal türbin gücünün ideal rüzgar gücüne olan oranına bakılır. (Foreman, Gilbert, & Oman, 1978).

$$C_p = \frac{\dot{W}_{türbin}}{\dot{W}_{rüzgar}} = \frac{\Delta P_{1-2} Q_a}{\frac{1}{2} \rho_a A_T V^3} \quad (6)$$

Denklem (6)'da yer alan 1. ve 2. kesit alanları Şekil 7'deki gibi sırasıyla rotor önündeki kesit ve rotor kesitidir.



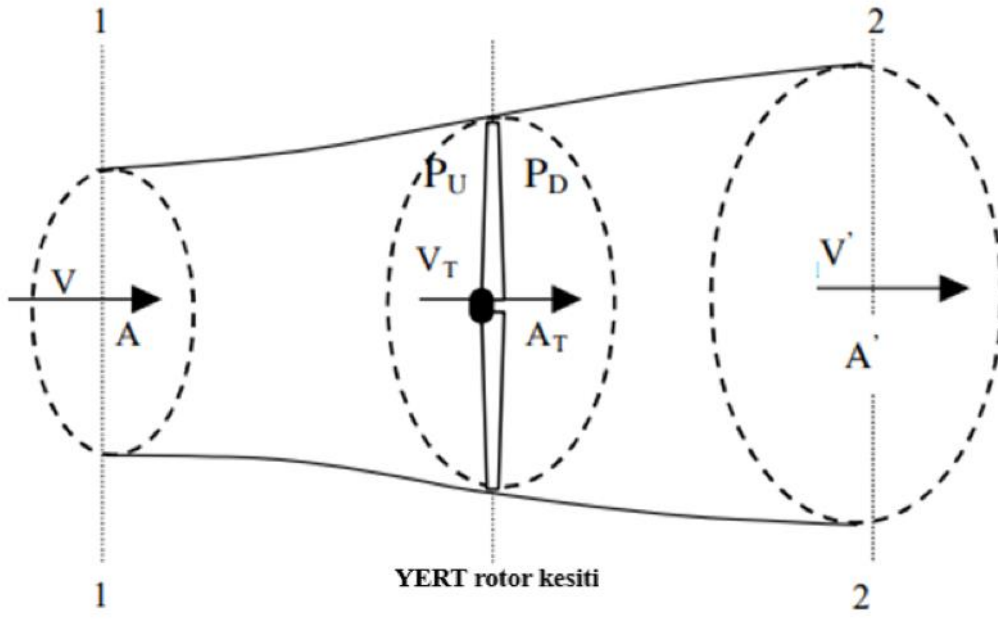
Şekil 7. Kanal içinde yer alan temsili rüzgar türbini referans noktaları

1.6. Eksenel Momentum Teorisi ve Betz Limiti

Geleneksel bir YERT analizi Rankine tarafından önerilen ve daha sonra Froudes tarafından geliştirilen eksenel momentum teorisi ile yapılmaktadır. Bu teori, akışı ideal akış olarak kabul etmiştir. Sıkıştırılamaz ve homojen olarak kabul edilen akışın sonsuz sayıda kanada sahip bir rotor üzerinden geçtiği, rotorun önünde ve arkasındaki basınçların eşit ve atmosfer basıncında olduğu, kanatlara etki eden sürüklenme kuvvetinin ve rotor arkasındaki iz etkisinin ihmal edildiği durumlar göz önüne alınarak analiz edilmektedir.

Şekil 8’de gösterildiği gibi rotor kesitindeki alanı A_T , hızı V_T olan eksenel akış hattındaki bir YERT’in 1 kesitindeki alanı A , hızı V ve 2 kesitindeki alanı A' , hızı V' olarak göz önüne alınırsa, kütle korunumu yasasına göre (1-1), rotor ve (2-2) kesitlerindeki kütleli debi sabit kalacağından:

$$\rho_a A V = \rho_a A_T V_T = \rho_a A' V' \quad (7)$$



Şekil 8. Eksenel akış tübü modeli (Mathew, 2006)

yazılır. Rotora giren ve çıkan rüzgarın momentum farkından kaynaklanan itme kuvveti ise Denklem (8)'deki gibidir.

$$F = \rho_a A V^2 - \rho_a A' V'^2 \quad (8)$$

$A V = A' V' = A_T V_T$ olduğundan, itme kuvveti Denklem (9)'daki gibi ifade edilebilir.

$$F = \rho_a A_T V_T (V - V') \quad (9)$$

İtme kuvveti rotorun giriş (upstream) ve çıkışındaki (downstream) basınç değişimi ile de ifade edilebilir. p_U rotor giriş basıncı, p_D rotor çıkış basıncı olmak üzere itme kuvveti:

$$F = (p_U - p_D) A_T \quad (10)$$

(1-1) ve (2-2) kesitlerinde atmosfer basıncı etkili olduğundan Bernoulli eşitliği uygulandığında Denklem (11) ve (12) elde edilir.

$$p + \frac{\rho_a V^2}{2} = p_U + \frac{\rho_a V_T^2}{2} \quad (11)$$

$$p + \frac{\rho_a V'^2}{2} = p_D + \frac{\rho_a V_T^2}{2} \quad (12)$$

Denklem (11) ve (12)'den yola çıkarak Denklem (13) elde edilir.

$$p_U - p_D = \frac{\rho_a (V^2 - V'^2)}{2} \quad (13)$$

Denklem (13)'ün Denklem (10) içindeki $p_U - p_D$ yerine yazılmasıyla Denklem (14) elde edilir.

$$F = \frac{\rho_a A_T (V^2 - V'^2)}{2} \quad (14)$$

Denklem (9) ile (14)'ün eşitlenmesi sonucu Denklem (15) elde edilir.

$$V_T = \frac{V + V'}{2} \quad (15)$$

Böylelikle, rotor kesitindeki hızın giriş ve çıkış kesitlerindeki hızların aritmetik ortalaması olduğu anlaşılır.

Rüzgar türbülerinin teorik analizinde kullanılan bir diğer önemli parametre ise eksenel indüksiyon faktör (a) parametresidir. Bu faktör rotor girişindeki rüzgar hızının ne kadar yavaşlatıldığının bir derecesidir.

$$a = \frac{V - V_T}{V} \quad (16)$$

V_T yerine Denklem (15) eşitliği yazılırsa, Denklem (17) ve (18) elde edilir.

$$V_T = V(1 - a) \quad (17)$$

$$V' = V(1 - 2a) \quad (18)$$

Daha önce de ifade edildiği gibi rüzgar türbinine aktarılan güç, havanın kinetik enerjisinin rotora transfer edilmesi anlamına gelmektedir. Rotordan birim zamanda geçen kütleli debi Denklem (19)'da verilmiştir.

$$m = \rho A_T V_T \quad (19)$$

Rüzgar türbininin kinetik enerjiiyi transfer ederek ürettiği güç ise Denklem 20'deki gibidir.

$$\dot{W}_{turbine} = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_T (V^2 - V'^2) \quad (20)$$

V_T ve V yerine Denklem (17) ve (18) yazılırsa, Denklem (21) elde edilir.

$$\dot{W}_{turbine} = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 4a(1-a)^2 \quad (21)$$

Denklem (21), Denklem (5) ile karşılaştırılırsa C_p değeri Denklem (22)'deki gibi olacaktır.

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (22)$$

C_p 'nin maksimum olduğu nokta ise Denklem (23) ile verilen ifadenin türevinin sıfıra eşitlenmesi ile belirlenir.

$$\frac{dC_p}{da} = 0 \quad (23)$$

Bu türevin alınarak elde edilen denklemin çözülmesi ile $a = 1/3$ elde edilir. Bu değerin Denklem (21)'de yerine yazılmasıyla maksimum türbin gücü elde edilir.

$$\dot{W}_{turbine_MAKS} = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \frac{16}{27} \quad (24)$$

Burada elde edilen 16/27 değeri ise *Betz Limiti* olarak adlandırılır. (Mathew, 2006)

1.7. Rüzgar Türbinlerinde Verimi Etkileyen Faktörler

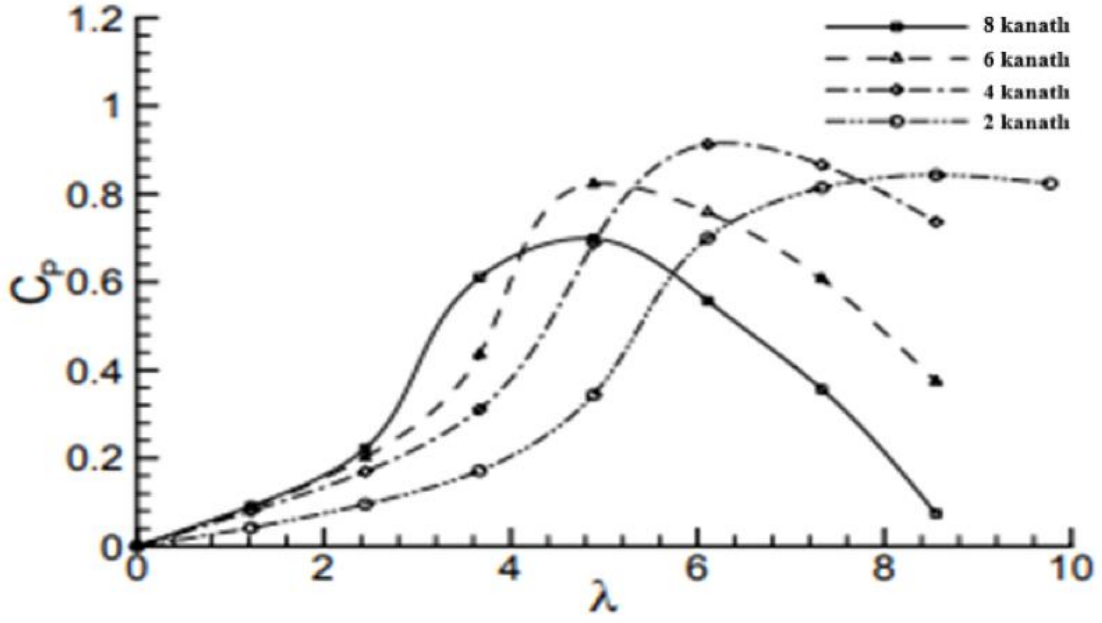
Rüzgar türbinlerinin verimi, güç performans katsayısıyla C_p ilişkilendirilmektedir. Bu ilişkinin temelinde rüzgar türbininin kinetik enerjiyi ne ölçüde mekanik enerjiye çevirdiği vardır. Rüzgar türbinlerinde verimi etkileyen başlıca faktörler ise şunlardır:

- Türbin çeşidi
- Yerden yüksekliği
- Aerodinamik tasarımı
- Çiftlik yerleşimi (Micro-siting)
- Lüle & yayıcı eklentisi

1.7.1. Türbin Çeşidinin Verime Etkisi

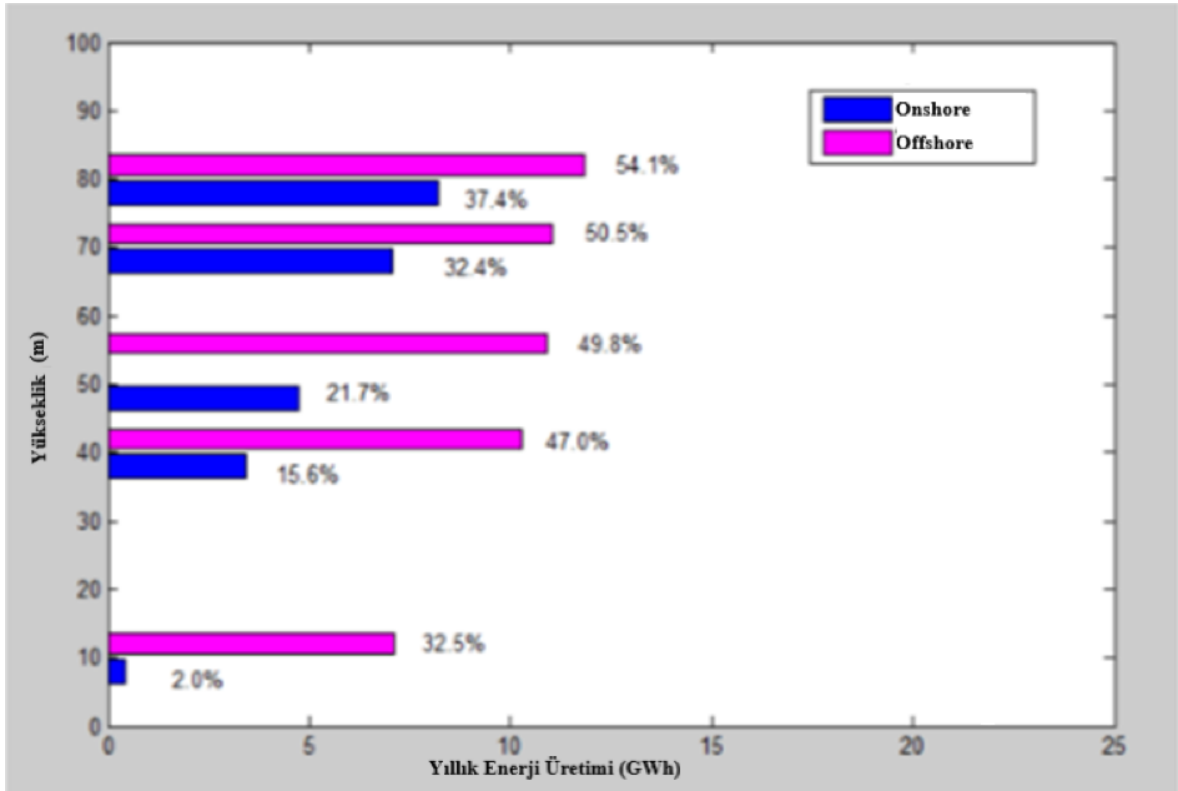
Şekil 2’de verildiği üzere rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde (YERT), dönme eksenli rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Bu türbinlerde rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45’dir. Düşey eksenli rüzgar türbinler (DERT), yatayda olduğu gibi bir pervane görünümüne sahip değildir çünkü mili düşey yapıya sahiptir. Ticari kullanımdan ziyade deneyler için üretilmektedir. Yere yerleştirilebildikleri için kule ihtiyacı ve maliyeti ortadan kalkmakta, sistem istenilen rüzgâr yönüne çevrilebildiği için dümen sistemine gerek kalmamasına rağmen verimlerinin düşük olduğu da bilinmektedir. (Elibüyük & Üçgül, 2014)

DERT’lerin çok düşük verimlerde olması sebebiyle, YERT’lerin kanat sayılarının C_p ’ye etkisi Wang ve Chen tarafından (2008) bir tünel içerisindeki türbinin kanat sayıları HAD ile incelenmiş ve artan kanat sayısının yüksek moment ve düşük devreye girme hızı sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında ise kanat sayısının artması rüzgara blokaj uyguladığı için giriş rüzgar hızının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle güç katsayısı C_p düşmektedir. Şekil 9’da da göüldüğü gibi bulgular göstermektedir ki; en ideal kanat sayısı 3 ‘tür.



Şekil 9. Kanat sayısının C_p 'ye etkisi (Wang & Chen, 2008)

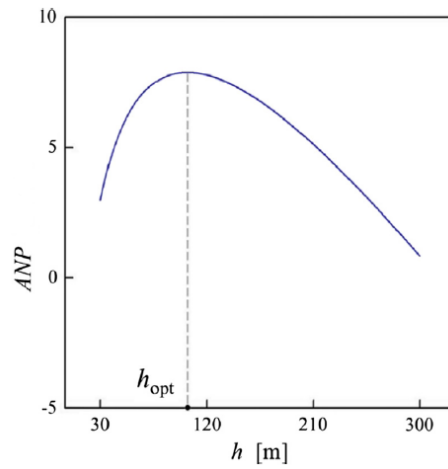
Öte yandan yapılan bir çalışmanın (Huang, Tee, Li, & Wu, 2020) sonuçlarına göre; offshore rüzgar türbinlerinin kurulu oldukları alanın açık deniz olması ve bu nedenle günlük kümülatif rüzgar miktarının onshore rüzgar türbinlerinden fazla olması sebebiyle enerji verimliliği daha fazladır (Şekil 10).



Şekil 10. Onshore offshore türbin kıyaslaması (Huang, Tee, Li, & Wu, 2020)

1.7.2. Yerden Yüksekliğin Verime Etkisi

Teorik olarak yerden yükseldikçe atmosferik sınır tabakanın etkisi azalır ve bu etkinin azalmasıyla rüzgar hızı artar. Fakat günümüz türbin teknolojilerinin enerji dönüşümü yapabileceği maksimum rüzgar hızının (cut-out) 25-35 m/s civarında olması nedeniyle en iyi verim için bir optimizasyon gereklidir. Bunu destekleyen ve Şekil 11’de görülen bir çalışmaya göre yıllık net gücün (ANP) belirli bir yükseklikten sonra artmadığı anlaşılmaktadır (Lee, Lee, & Kim, 2015).



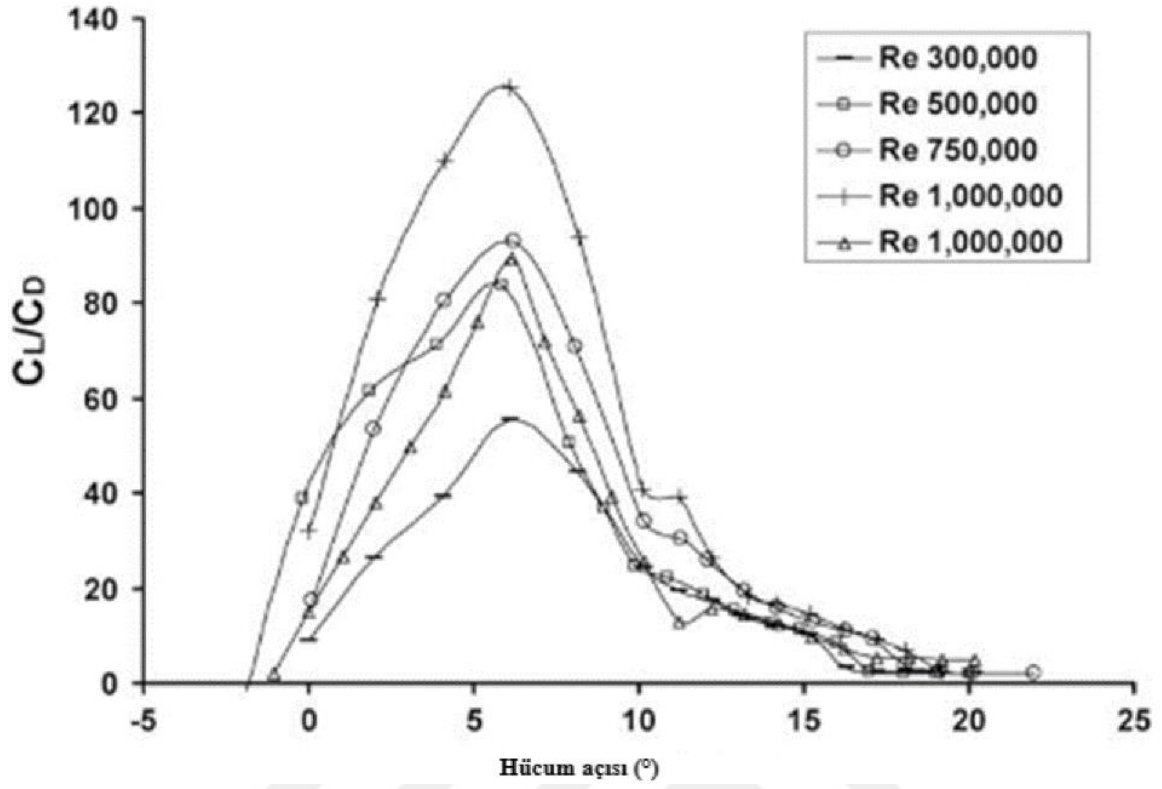
Şekil 11. Optimum türbin gövde yüksekliği (Lee, Lee, & Kim, 2015)

1.7.3. Aerodinamik Tasarımın Verime Etkisi

Aerodinamik tasarım verime etki eden önemli parametrelerden biridir ve literatürde bugüne kadar en çok bu alanda verim iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bunlardan başlıcaları hücum açısı, kanat profili ve direk aerodinamik tasarımlarıdır.

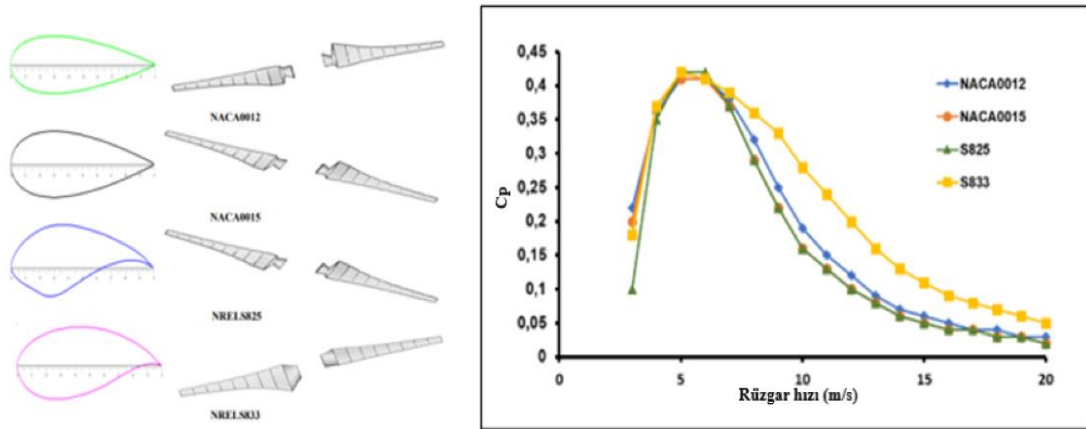
Teorik olarak hücum açısının artırılması kaldırma katsayısının (Cl) sürüklenme katsayısına (Cd) oranını artırdığından, verimi artırması beklenmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, Cl/Cd oranının belli bir noktadan sonra artmadığını göstermiştir. Bunun nedeninin belli bir hücum açısından sonra stall adı verilen ani kaldırma kaybının yaşanması olduğu öngörülmektedir.

Error! Reference source not found.'de değişimi görülen bir çalışma sonucuna göre farklı Reynolds sayısına sahip akışların simüle edildiği bir rüzgar türbininde ideal hücum açısının yaklaşık 7° olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 12. Değişen hücum açısının kaldırma/sürüklenme oranına etkisi (Thumthae & Chitsomboon, 2009)

Kanat profili de verimi etkileyen bir başka önemli parametredir. Buna örnek olarak yapılan bir çalışmada 1.5 kW'lık bir türbin üzerinde 4 farklı kanat profili kullanılmış ve kanat geometrisinin verime olan etkisi Şekil 13'de görüldüğü üzere net bir şekilde ortaya konulmuştur.



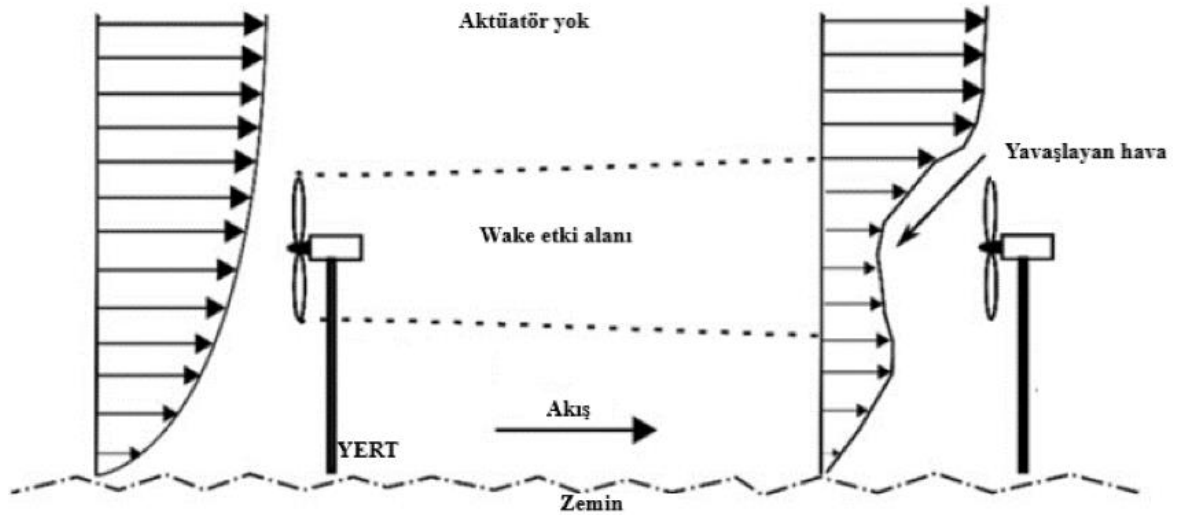
Şekil 13. Kanat profilinin verime etkisi (Hazmoune, Lazaroïu, Ciupageanu, & Debbache, 2021)

Literatürde ‘Tower shadow’ olarak bilinen rüzgar türbini direklerinin geometrisi de verimi etkilemektedir. Fourier analiziyle bir rüzgar çiftliğindeki direk etkisinin incelendiği bir çalışmada, bu etkinin rüzgar hızında türbülansa ve dolayısıyla güçte dalgalanmalara neden olarak verimi düşürdüğü gösterilmiştir (McSwiggan, Littler, Morrow, & Kennedy, 2008).

Bu alanda yapılan bir başka çalışmada direk çapının artmasıyla oluşan güç kaybının arttığı gözlemlenmiştir (Wen, Wei, Wei, & Yang, 2017).

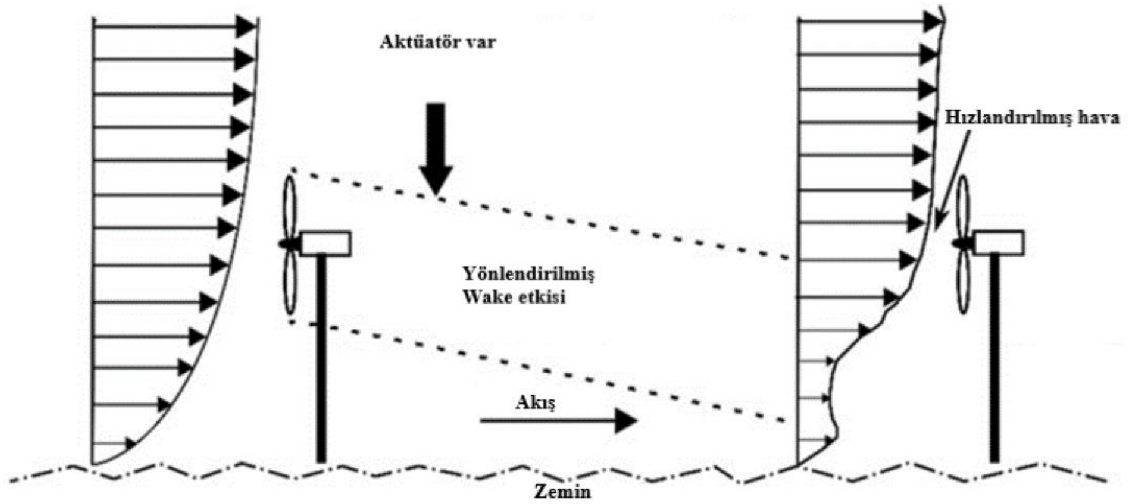
1.7.4. Çiftlik Yerleşiminin (Micro-siting) Verime Etkisi

Günümüzde modern rüzgar çiftlikleri 6 ile 10 rotor çapındaki aralıklarla yerleştirilen toplu rüzgar türbinlerinden oluşmaktadır. Bir türbin gelen rüzgar akımından bir miktar enerjiyi dönüştürdükten sonra, arkasında rüzgar gölgesi denilen bir iz bırakmaktadır. Buna iz etkisi denilmektedir. Bu etki sonucunda türbin rotorunun hemen arkasında Şekil 14’deki gibi girişteki akışa göre yetersiz ve aşırı türbülanslı bir akış meydana gelir.



Şekil 14. İz (Wake) etkisi şematik gösterimi (Bader, Inguva, & Perot, 2018)

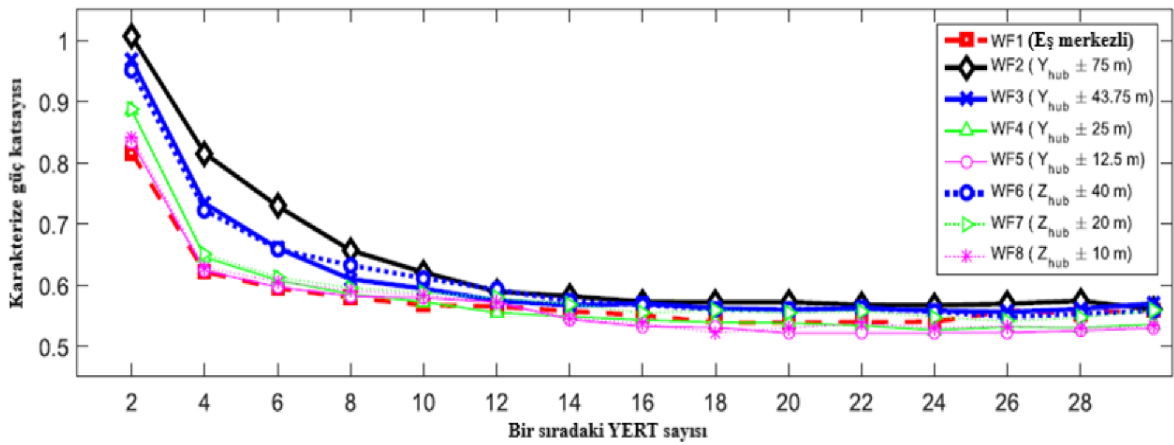
Bu durum arkada bulunan türbin için bariz bir güç çıktısı kaybı anlamına gelmektedir. Büyük offshore rüzgar çiftliklerinde ortalama iz kaybı toplam güç çıktısını %10 ile %20 arasında kayba uğratar. Aynı çalışmaya bir aktüatör eklenerek sonuca olan etkisi incelenmiş ve Şekil 15’deki gibi bir durum ile karşılaşılmıştır (Bader, Inguva, & Perot, 2018).



Şekil 15. İz (wake) etkisinin bir aktüatör ile azaltılması (Bader, Inguva, & Perot, 2018)

Kanat arkasına yerleştirilen bir aktüatörün rüzgarı farklı açılara yönlendirmesiyle arkadaki türbinin iz etkisini azalttığı gözlemlenmiştir. İz etkisi nedeni ile türbinler çiftliklere birbirlerini etkilemeyecek şekillerde yerleştirilmektedir. Türbinler farklı açılarda konumlandırıldığı gibi farklı yüksekliklerde de konumlandırılabilir.

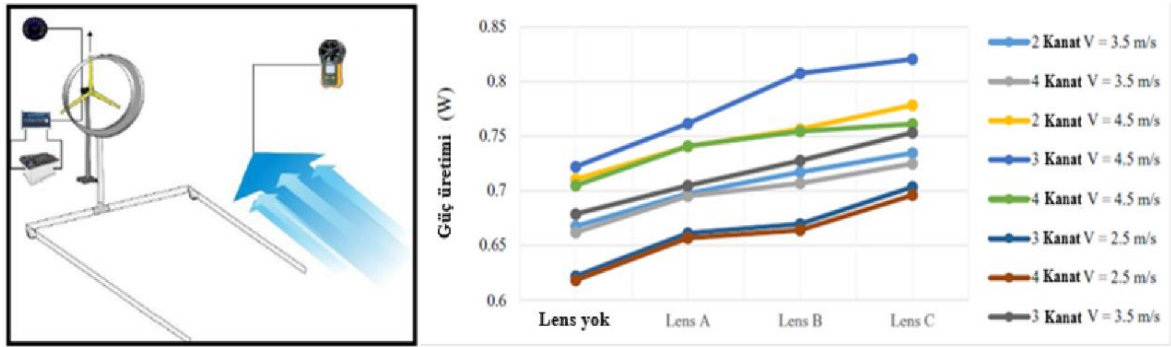
Diğer yapılan bir çalışmada türbinler arası 2 farklı yükseklik seviyeleri incelenmiştir. WF 1,2,3,...,8 olarak sıralanarak seviye farklılıkları WF 2 de 75 m başlayıp, WF 8 'de 10 m'ye kadar düşmektedir. Tüm bu seviye farklılıkları değerlendirildiğinde, Şekil 16'de bulunan sonuç ortaya çıkmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki; türbinler arası seviye farklılığı iz etkisini azaltarak güç çıktısını artırmaktadır. Hatta bu seviye farkının artması da özellikle az sayıdaki türbin konfigürasyonlarında büyük fark yaratmaktadır.



Şekil 16. İz (Wake) etkisinin farklı türbin yükseklikleri ile azaltılması (Wu, Liao, Chen, & Chen, 2018)

1.7.5. Lüle & Yayıcı Eklentisinin Verime Etkisi

Lüle (nozul) ve/veya yayıcı (difüzör) kullanımının da son yıllarda yapılan çalışmalara göre verime etki ettiği anlaşılmaktadır. Rüzgar türbininin girişine nozul eklenerek, birim zamanda rüzgar türbin kanatlarının üzerinden geçen hava miktarının artırılması sağlanabilmektedir. Bu alanda yapılan bir çalışmaya göre nozul eklenen rüzgar türbinin rotor dönme hızı ve dolayısıyla güç üretimi artmaktadır. Ayrıca nozul giriş çapının artmasıyla verim daha da artmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Nozulun rüzgar türbinine etkisi deneyi (Pampudi, ve diğerleri, 2017)

Öte yandan, çıkışına difüzör eklenen rüzgar türbininin de arkada düşük bir basınçlı bölge oluşturarak birim zamanda kanatlar üzerinden geçen hava miktarını artırdığı bilinmektedir. Bu alanda yapılan bir çalışmaya göre, 5 kW kapasiteli bir rüzgar türbinin arkasına bir difüzör yerleştirmiş ve farklı kenar (brim) tasarımlarıyla deneyler yapmıştır. Bu çalışmalar Şekil 18'deki gibi Çin'in bir kentinde denize çok yakın bir bölgede gerçekleştirilmiştir.

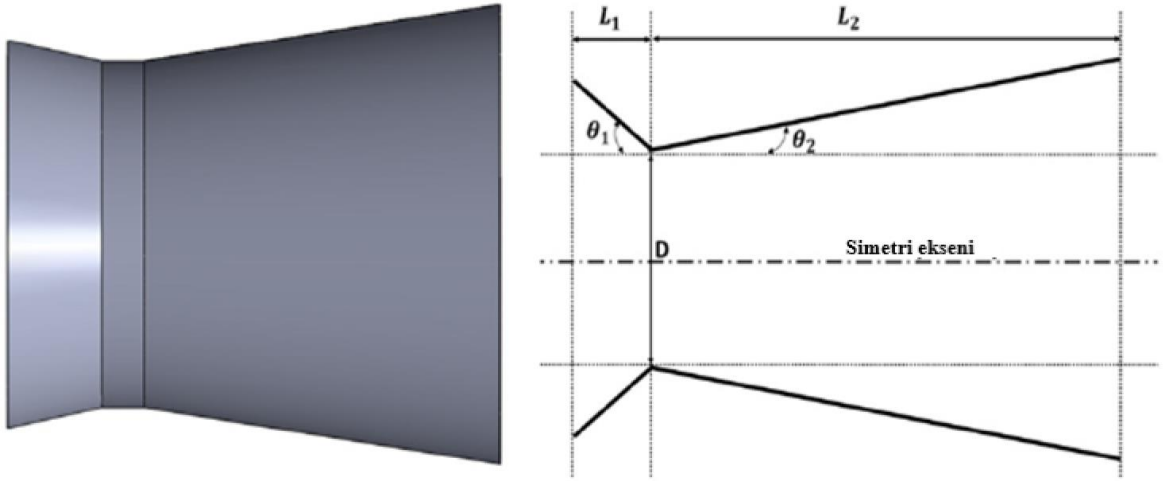


Şekil 18. Difüzörün rüzgar türbinine etkisi deneyi (Ohya & Kradusani, 2010)

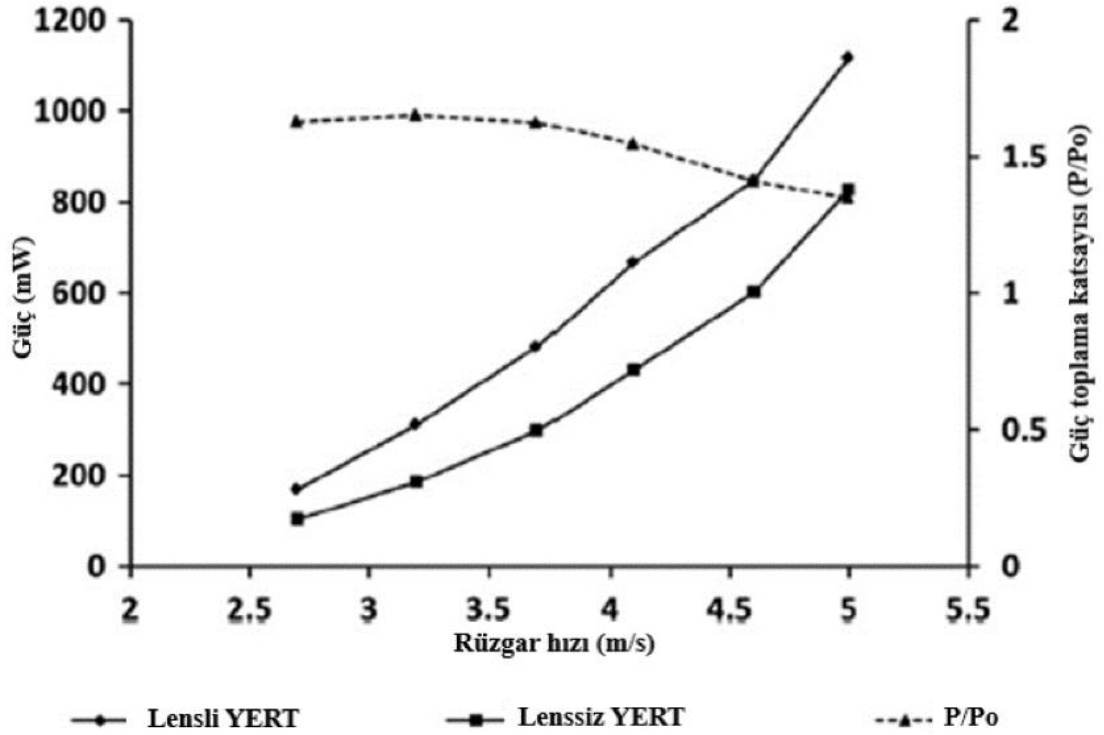
Deney göstermiştir ki, difüzör eklenen rüzgar türbinlerinin arkasındaki brim yapısı girdaplar oluşturarak düşük basınç bölgesi oluşturur ve bu durum daha fazla havanın çekilmesini sağlayarak güç katsayısını bariz bir şekilde arttırmaktadır. (Ohya & Kradusani, 2010)

1.8. Rüzgar Türbinlerinde Lüle ve Yayıcı Kullanılan Çalışmalar

YERT’lerde verimi etkileyen önemli faktörlerden biri ve gelişime açık olan lüle ve yayıcı (nozul ve difüzör) kullanımı ile ilgili literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Çok küçük ölçekli YERT ile yapılan deneysel bir çalışmada basit yapılı bir nozul ve yine basit yapılı bir difüzör kullanılarak taşınabilir bir YERT elde edilmiştir (Şekil 19). Açıları ve uzunlukları belirlenen nozul ve difüzörün (rüzgar lensi) rüzgar tüneline yapılan deney sonrası elde edilen sonuçlar incelendiğinde üretilen gücün 1.4 ile 1.6 kat arttığı görülmüştür (Kishore, Coudron, & Priya, 2013).



Şekil 19. Basit yapılı rüzgar lensi geometrisi (Kishore, Coudron, & Priya, 2013)



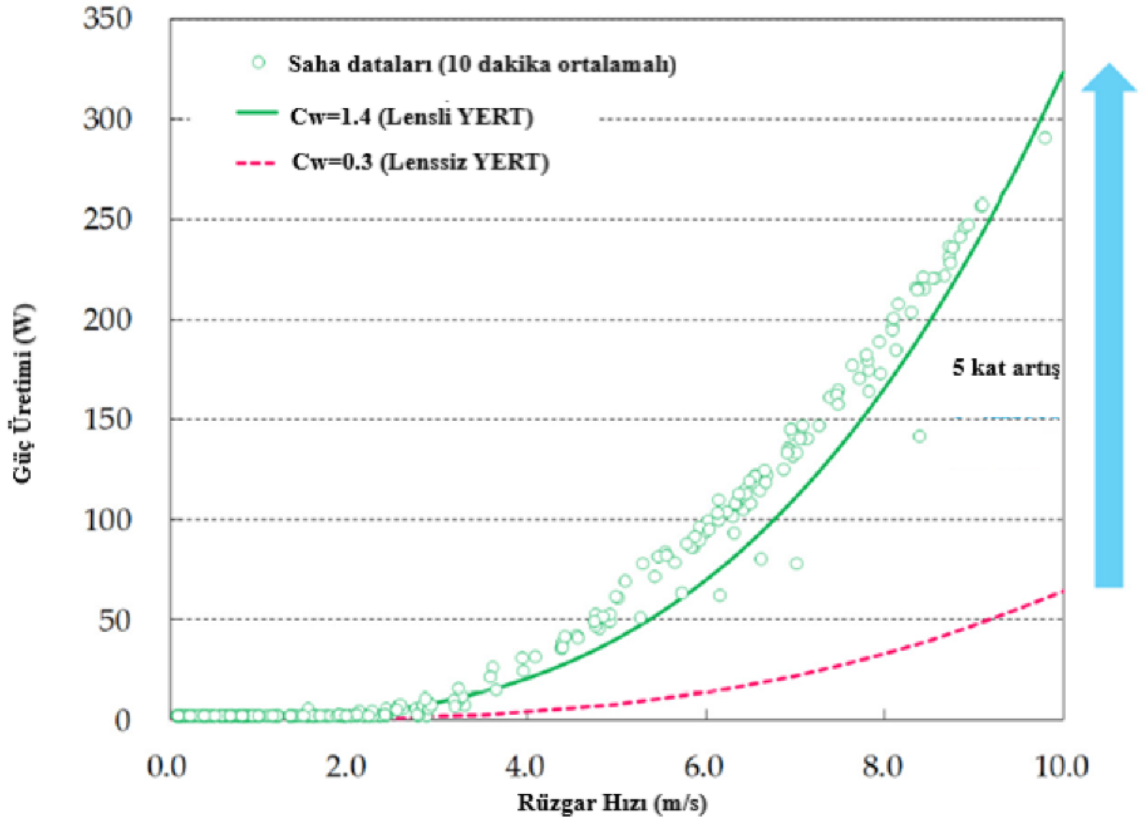
Şekil 20. Basit yapılı rüzgar lensi deney sonuçları (Kishore, Coudron, & Priya, 2013)

Yapılan bir başka çalışmada, Şekil 21’de geometrisi yer alan çıkışına flanş monte edilen orta ölçekli bir rüzgar lensinin gücü ne oranda artırdığı deneysel olarak incelenmiştir.



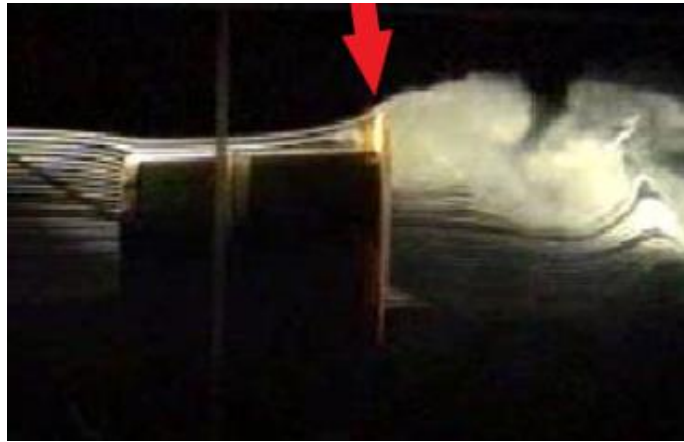
Şekil 21. Kompleks yapılı rüzgar lensi geometrisi (Watanabe & Ohya, 2021)

Difüzörün arkasına bir flanş eklenmesiyle girdaplar oluşturulmuş ve böylelikle türbin rotoru arkasında düşük basınç bölgesi oluşturularak akış hızı artırılmaya çalışılmıştır. Şekil 22’de yer alan sonuçlar incelendiğinde kompleks yapılı bir rüzgar lensinin güç üretimini, hiç lens kullanılmamış olan yalın YERT’e kıyasla neredeyse 5 kat artırdığı gözlemlenmiştir (Watanabe & Ohya, 2021).



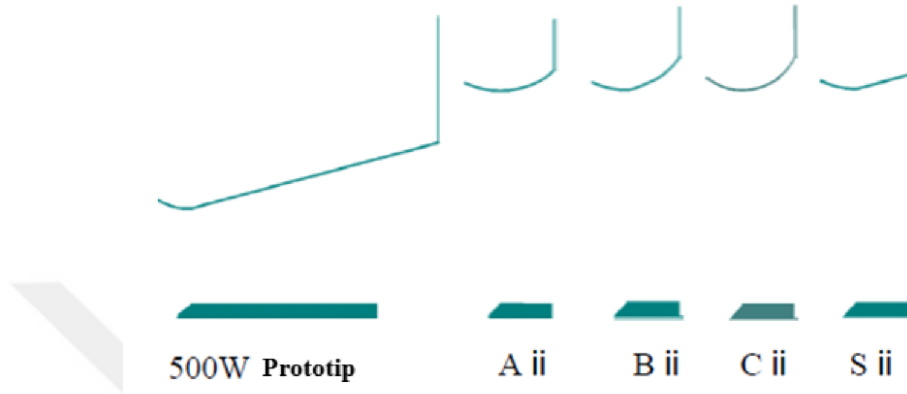
Şekil 22. Kompleks yapılı rüzgar lensi deney sonuçları (Watanabe & Ohya, 2021)

Ohya ve Karasudani (2010) bu çalışmalara boyut açısından farklı bir ölçek kazandırarak yaptıkları bir başka çalışmada brimli (flanşlı) lensin, yalın lense göre olan etkisi ve bu etkide brim geometrisinin ne kadarlık bir payı olduğu analiz edilmiştir. Şekil 23’de görseli yer alan rüzgar tüneli deneyine göre, brimin oluşturduğu girdap sayesinde arka alanda oluşan düşük basıncın kütle debisini net bir şekilde artırarak türbin kanatlarına etki eden akışı artırdığı anlaşılmıştır. (Ohya & Kradusani, 2010)



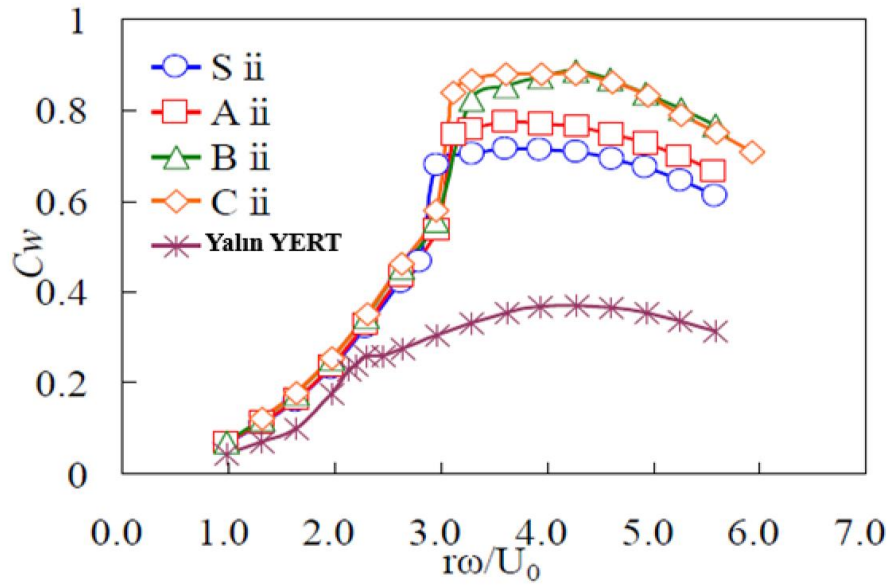
Şekil 23. Ohya ve Karasudani’nin deneysel çalışması

Öte yandan brim geometrisinin rüzgar performans katsayısı üzerindeki etkisini de araştıran Ohya ve Karasudani (2010), 500W'lık prototip üzerine Şekil 24'da yer alan brim yapılarını monte ederek deneyi tekrar ederek yine aynı şekilde yer alan sonuçları elde etmiştir.



Şekil 24. 500W YERT rüzgar lensi geometrisi

Sonuç incelendiğinde brim geometrisi de güç üretimine kayda değer derecede etki ettiği anlaşılmaktadır (Şekil 25). Daha yumuşak eğrilere sahip olan B ii ve C ii şekilleri, daha keskin geometriye sahip olan A ii ve S ii geometrilerinden daha iyi performans göstermektedir (Ohya & Kradusani, 2010).

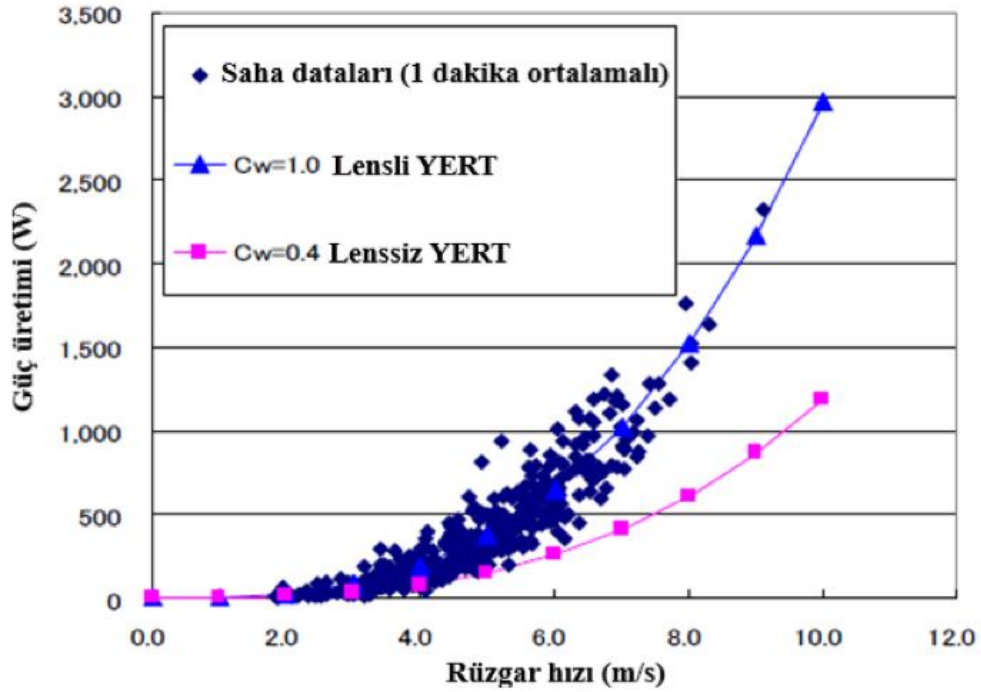


Şekil 25. Ohya ve Karasudani (2010) 500W YERT rüzgar lensi deney sonuçları

Yine Ohya ve Karasudani (2010) tarafından 5 kW'lık büyük ölçekli bir YERT'te brimli rüzgar lensinin ne kadar etkili olduğunu analiz etmek üzere Şekil 26'da yer alan rüzgar türbini sisteminden toplanan data'lara göre ise bu ölçekte dahi brimli rüzgar lensinin bariz bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 27). Bu çalışma özelinde bu etki 2-2.5 kat aralığındadır. (Ohya & Kradusani, 2010)

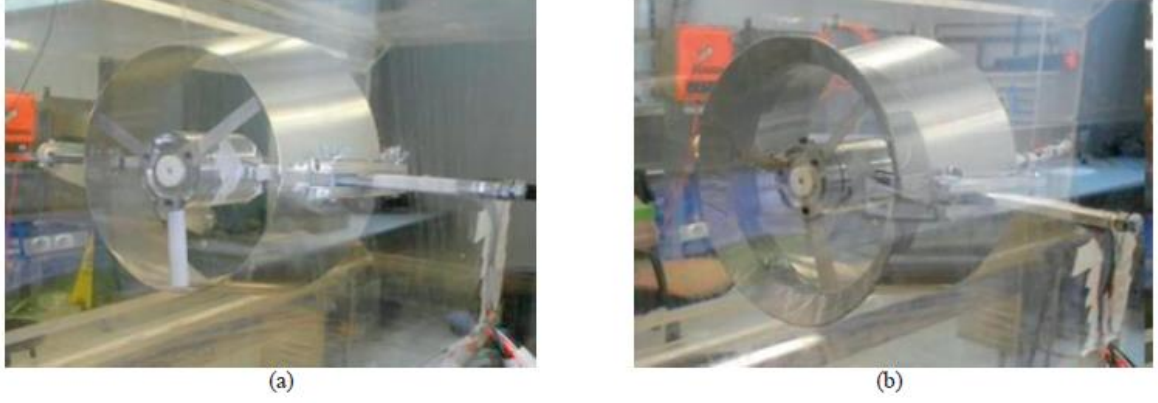


Şekil 26. 5 kW'lık brimli lens geometrisi



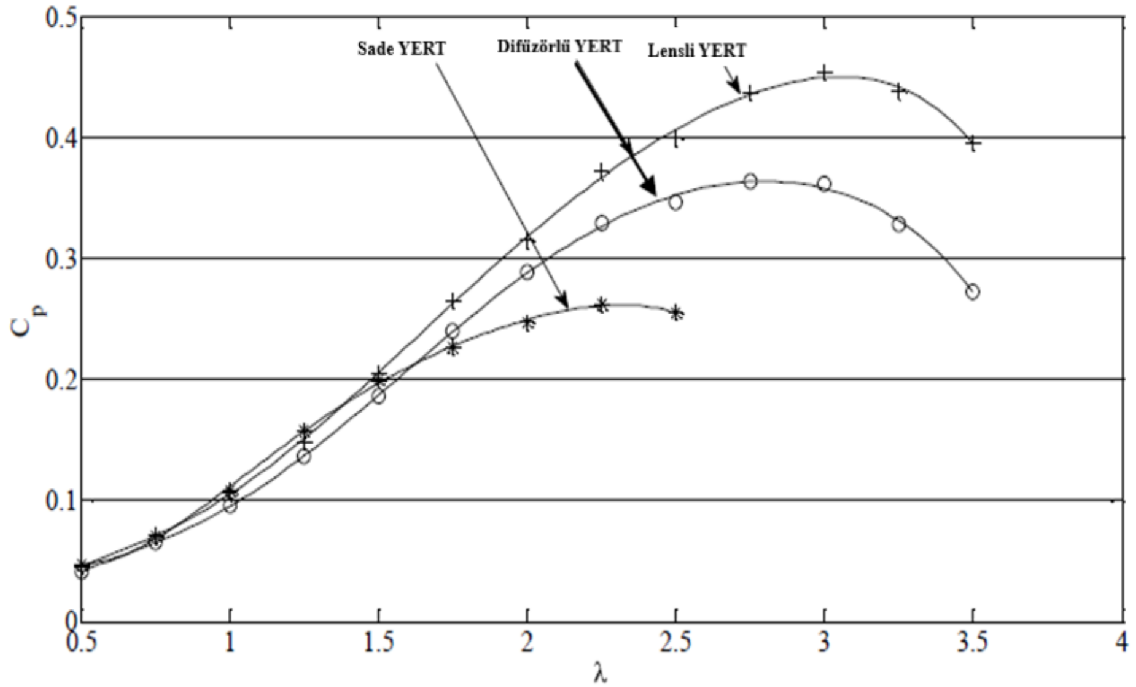
Şekil 27. 5 kW'lık brimli lens deney sonuçları

Diğer bir örnekte ise küçük ölçekte tasarlanan deneysel bir çalışmada yalın türbin, sadece difüzör ve difüzör-nozzle (rüzgar lensi) kombinasyonları teste tabi tutularak, kombinasyonların verime olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır (Şekil 28).



Şekil 28. Kosasih ve Tondelli'nin deney geometrileri. (a) sadece difüzör, (b) difüzör & nozzle kombinasyonu (Kosasih & Tondelli, 2012)

Bu çalışmanın sonuçları incelendiğinde basit bir konik difüzör eklemenin yalın türbine göre sistem performansını %60, difüzör-nozzle kombinasyonunun %63 artırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 29).



Şekil 29. Kosasih ve Tondelli'nin deney sonuçları (Kosasih & Tondelli, 2012)

Literatürde yapılan bu çalışmalar genel olarak rotor kesitinden geçen eksenel rüzgar hızının artırılmasını amaçlamaktadır. Farklı ölçeklerde yapılan bu çalışmalarda basit ve

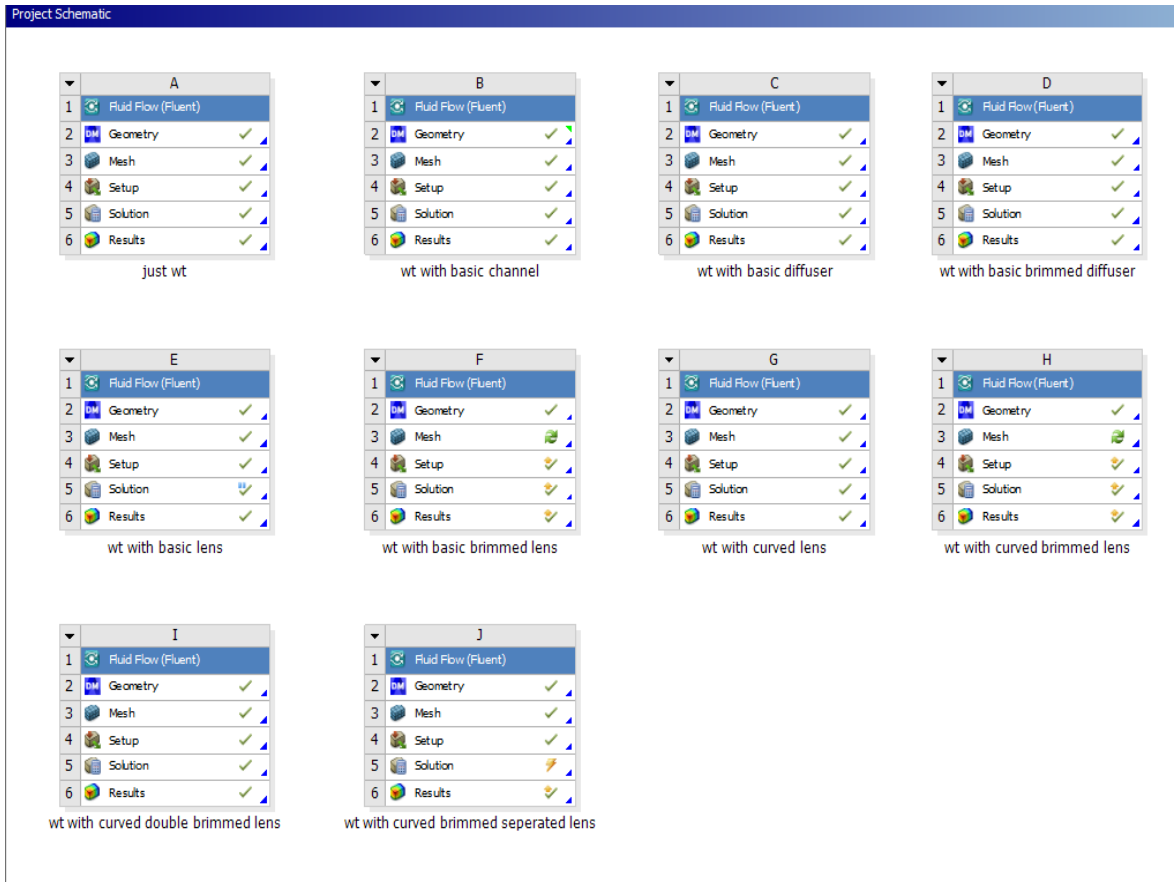
kompleks yapılı olmak üzere birçok tasarım test edilerek, verim veya üretilen faydalı gücün ne oranda değiştiği sonucu incelenmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yalın bir YERT'in veriminin artırılması amacıyla 3 kanatlı 0,52922 metre yarıçapa sahip bir rotoru çevreleyen; nozul, difüzör ve lens kombinasyonları kullanılarak ve yalın şekilde toplamda 10 farklı modele 3 boyutlu sayısal analiz yapılmıştır. Yapılan sayısal analizlerde ANSYS Workbench 2020 R2 Fluent kullanılmıştır.

Bu çalışmada Şekil 30'da ekran görüntüleri yer alan kombinasyonlar için hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 30. Hesaplama konfigüresyonlarına ait ekran görüntüleri

HAD yazılımında momentumun ve kütleinin korunumunu denklemlerinin yanı sıra standart k-ε ve k-ω SST türbülans modeli denklemleri kullanılmıştır. Kütleinin korunumu ilkesine dayanan süreklilik denkleminin kapalı formu bilindiği gibi şu şekildedir:

$$\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (25)$$

Yapılan analizlerde hava sıkıştırılamaz ve sabit yoğunlukta (1,225 kg/m³) kabul edildiğinden, süreklilik denkleminin sıkıştırılamaz akışkanlar için şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (26)$$

Yapılacak çalışmada Reynolds sayısı ise şu şekildedir:

$$Re = \frac{\rho V D_T}{\mu} = \frac{1,225 \frac{kg}{m^3} \cdot 7 \frac{m}{s} \cdot 5m}{1,85 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s} = 2,32 \cdot 10^{-6} \quad (27)$$

Reynolds sayısı boru içi akışlardaki laminar sınırının çok üzerinde olduğundan, türbülans modellemelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sıkıştırılamaz türbülanslı akışlarda momentumun korunumu denklemi olarak bilinen Navier-Stokes denklemlerinin üç boyutlu türbülanslı akış için bileşenleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

Birim kütle için türbülanslı çalkantıların meydana getirdiği kinetik enerji ise şu şekilde ifade edilir:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'u'} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (29)$$

Türbülansın etkisinin de dikkate alındığı analizlerde kullanılan türbülans modellerinden ilki olan ve Fluent programında Şekil 31'deki ekran görselinde görülen seçim

ile kullanılmış olan standart k-ε türbülans model denklemleri Denklem (30) ve (31)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon + Y_M + S_k \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ P_k &= -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \\ P_k &= \mu_t S^2 \\ S &\equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \\ P_b &= \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \\ \beta &= -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1,44 \quad C_{2\varepsilon} = 1,92 \quad C_{3\varepsilon} = -0,33 \quad C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Kullanılan türbülans modellerinden ikincisi olan olan ve Fluent programında Şekil 32'deki ekran görselinde seçimi yapılmış olan k-ω SST türbülans modeli denklemleri ise Denklem (32) ve (33)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= P_k + \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\vartheta + \sigma_k \vartheta_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\
\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} &= a S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\vartheta + \sigma_\omega \vartheta_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\
&\quad + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}
\end{aligned} \tag{32}$$

$$\vartheta_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$$

$$\begin{aligned}
F_2 &= \tanh \left[\left[\max \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y} \frac{500 \vartheta}{y^2 \omega} \right]^2 \right] \\
P_k &= \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega \right) \\
F_1 &= \tanh \left[\left(\min \left\{ \max \left[\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y} \frac{500 v}{y^2 \omega} \right], \frac{4 \sigma_{\omega^2} k}{C D_{kw} y^2} \right\} \right)^4 \right]
\end{aligned} \tag{33}$$

$$C D_{kw} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

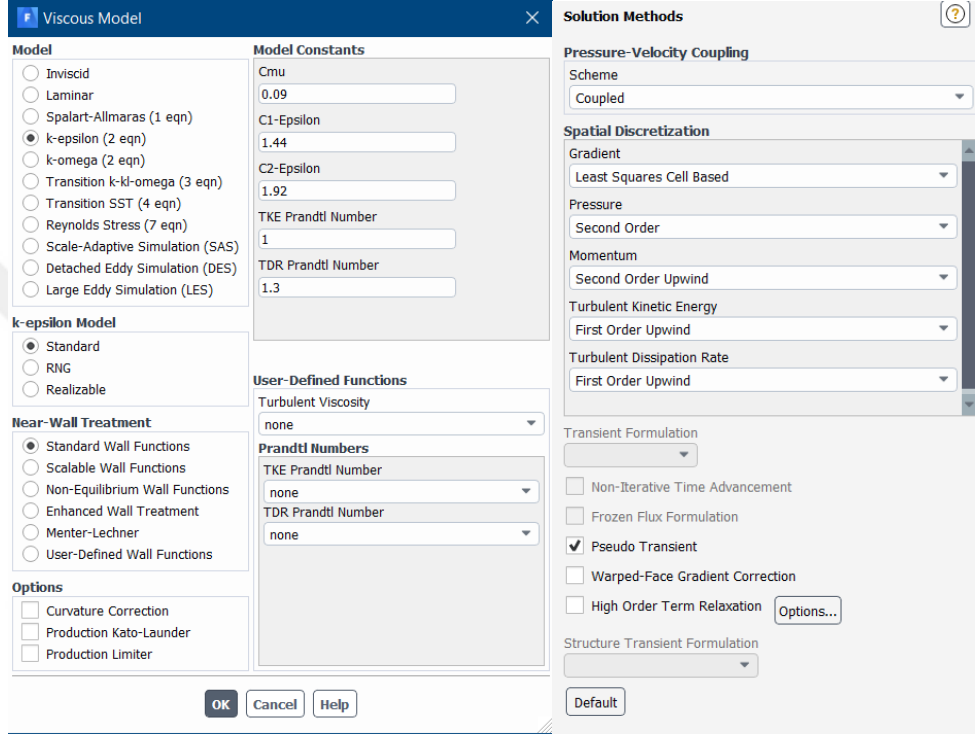
$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{5}{9} & a_2 &= 0,44 & \beta_1 &= \frac{3}{40} & \beta_2 &= 0,0828 & \beta^* &= \frac{9}{100} \\
\sigma_{k1} &= 0,85 & \sigma_{k1} &= 1 & \sigma_{w1} &= 0,5 & \sigma_{w2} &= 0,856
\end{aligned}$$

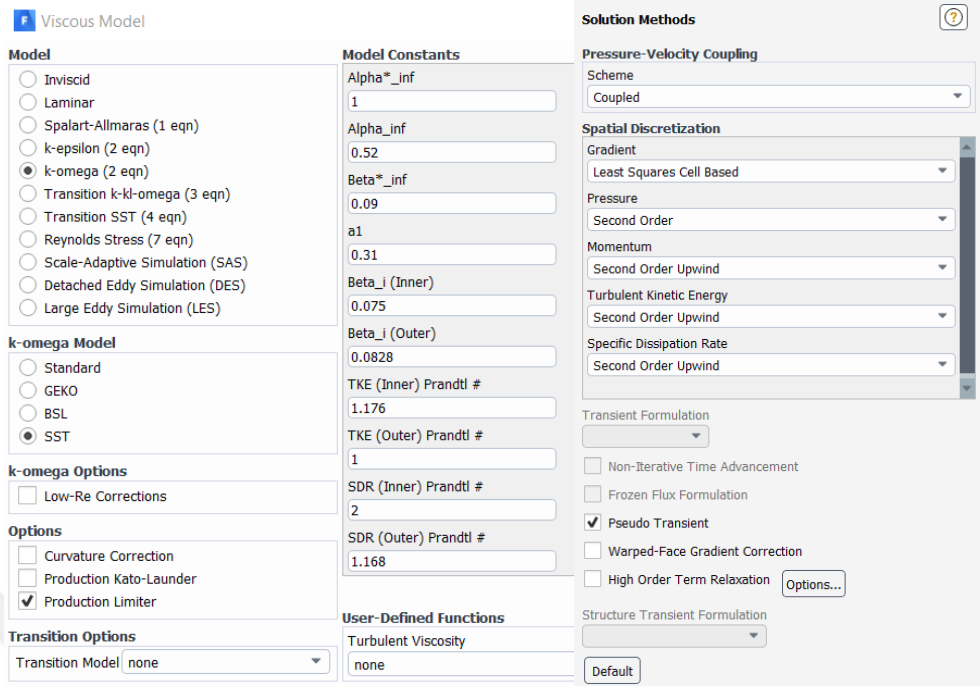
Burada verilen denklemlerin, HAD modelinin her bir hücresinde nümerik olarak çözülmesiyle bulgular elde edilmiştir.

Sıralama düşük verimli modelden yüksek verimli modele doğru olacak şekilde sıralanmıştır. Yapılan tüm analizlerde ortak olarak Şekil 31 ve Şekil 32’de detayların yer aldığı analiz modeli ve çözüm yöntemi kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar

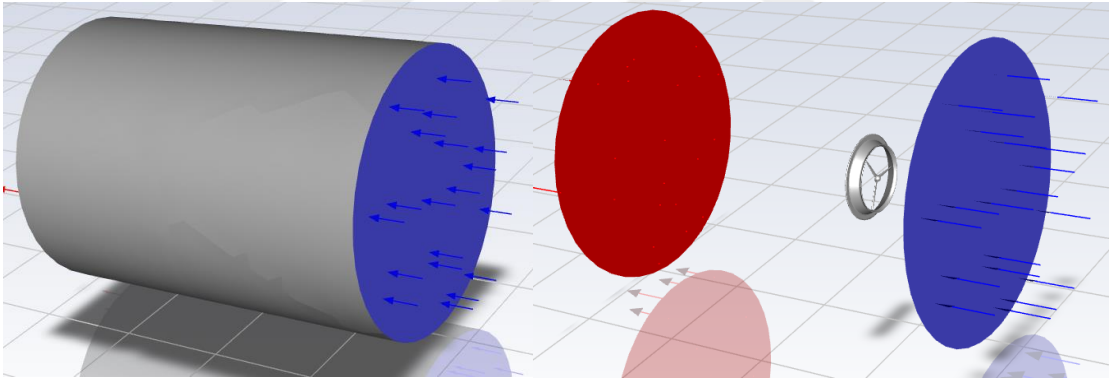
incelendiğinde genelde standart k- ϵ türbülans modelinin uygulandığı görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada da k- ϵ türbülans modelinin uygulanması amaçlanmıştır ancak I ve J modellerindeki yoğun girdaplar nedeniyle bu model yakınsamamıştır. Bu nedenle bu iki modelde k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Ayrıca tüm çalışmalarda “velocity inlet” ve “pressure outlet” sınır koşulları kullanılmıştır (Şekil 33). Giriş rüzgar hızı sabit 7 m/s ve havanın yoğunluğu sabit 1,225 kg/m³ olarak alınmıştır.



Şekil 31. A'dan H'ye kadar olan modellerinin ortak analiz modeli ve çözüm yöntemi



Şekil 32. I ve J modellerinin ortak analiz modeli ve çözüm yöntemi

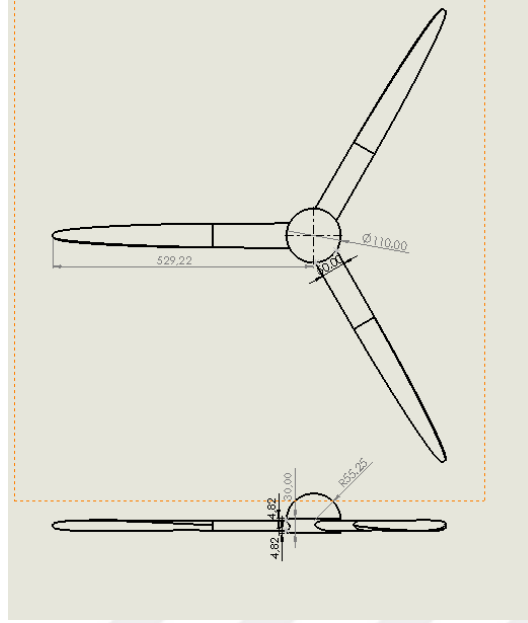


Şekil 33. Ortak sınır koşulları temsili görseli

2.1. Sade Rüzgar Türbin Modeli (A)

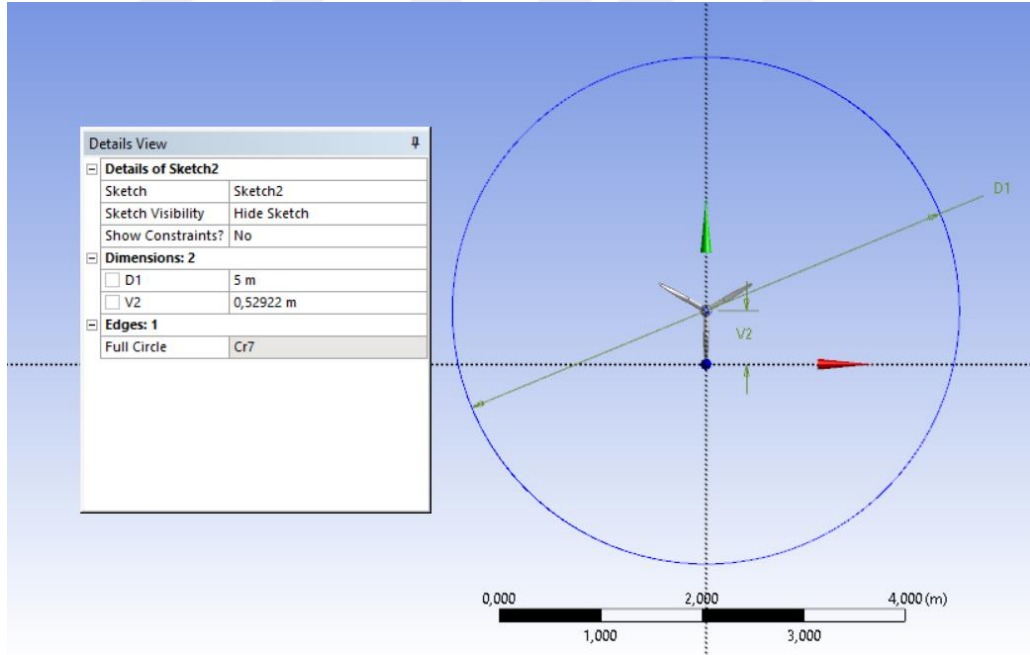
Yapılan çalışmada ilk etapta nozul ve lens etkilerinin rüzgar hızına etkisinin ortaya konulabilmesi amacıyla dairesel bir kanal içerisine sade bir rotor yerleştirilmiş ve sonuçlar alınmıştır.

Şekil 34’de detayları yer alan modelde 52,922 cm yarıçapa sahip bir rotor Solidworks programında modellenerek analizin yapıldığı programa aktarılmıştır.



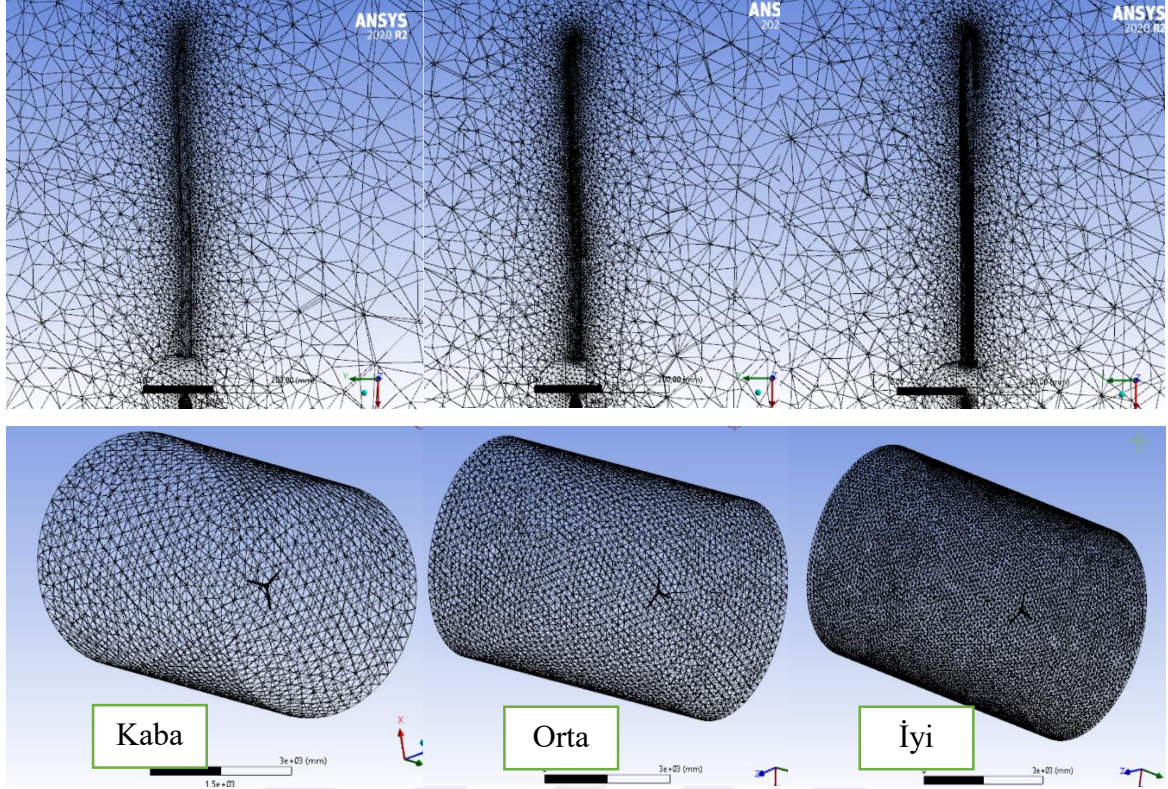
Şekil 34. Model ölçüleri

Modelin çevresi ise Şekil 35’deki gibi 5 metre çapında 7 metre uzunluğunda (2 metre rotor öncesi, 5 metre rotor sonrası) bir hava ile kaplanarak “domain” oluşturulmuştur.



Şekil 35. Sade rüzgar türbini modeli ölçüleri

Şekil 36’da olduğu gibi 3 farklı ağ oluşturma sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 1’deki gibidir.



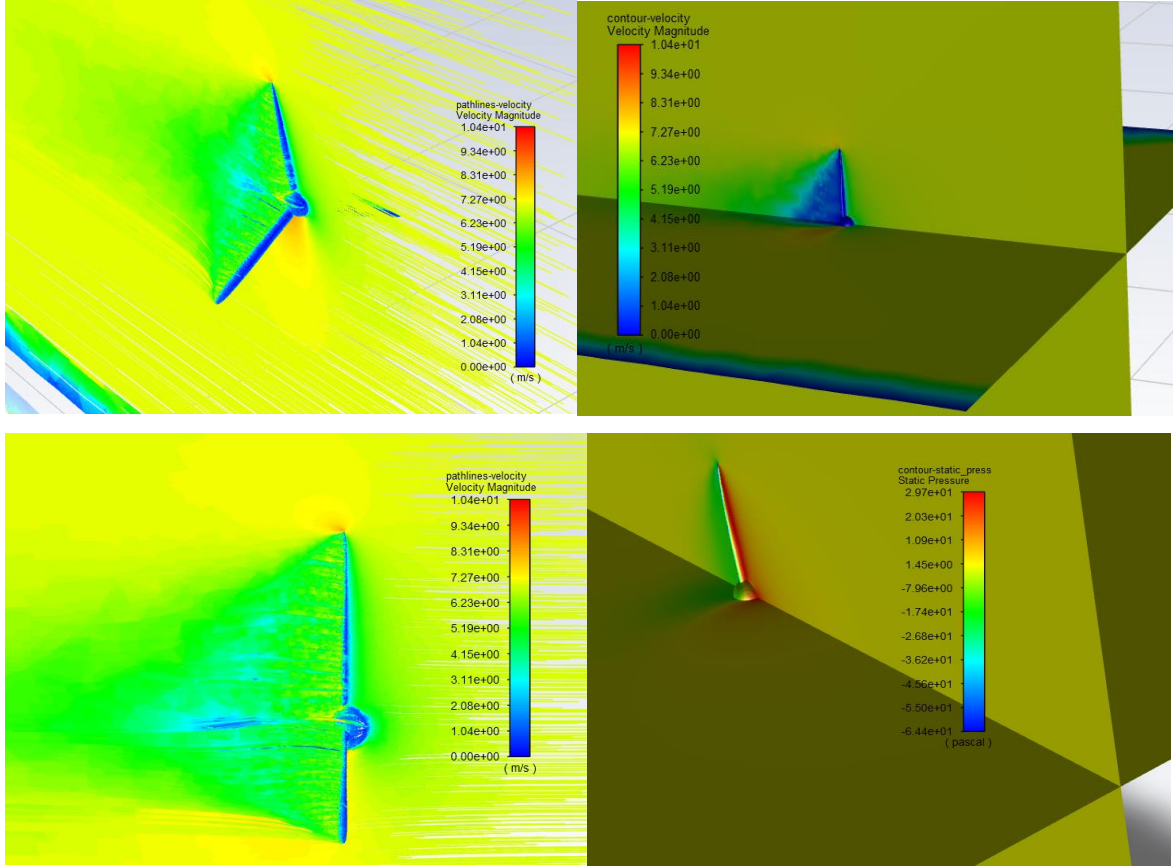
Şekil 36. Sade rüzgar türbini mesh yapısı

Tablo 1. Mesh sayısının hız, güç ve performans katsayısına etkisi

Mesh Sayısı	Rotor kesiti hız (m/s)	Teorik güç (W)	Cp
606.263 (Kaba)	7,16	198,00	0,12
923.385 (Orta)	7,01	186,00	0,13
1.514.493 (İyi)	7,00	185,00	0,13

Tablo 1’deki mesh sayısının sonuçlara etkisi incelendiğinde, mesh sayısı arttıkça elde edilen sonuçtaki değişim azalmaktadır. İyi mesh yapısı, orta mesh yapısıyla kıyaslandığında Cp’nin hiç değişmediği, kesit hızı ve gücün de oldukça küçük değiştiği anlaşılmıştır. Analiz sonuçlarının mesh sayısından bağımsız ilerleyebilmesi amacıyla, tüm analizlerde en az bir buçuk milyon mesh sayısı ve ağ yapısı kullanılmıştır.

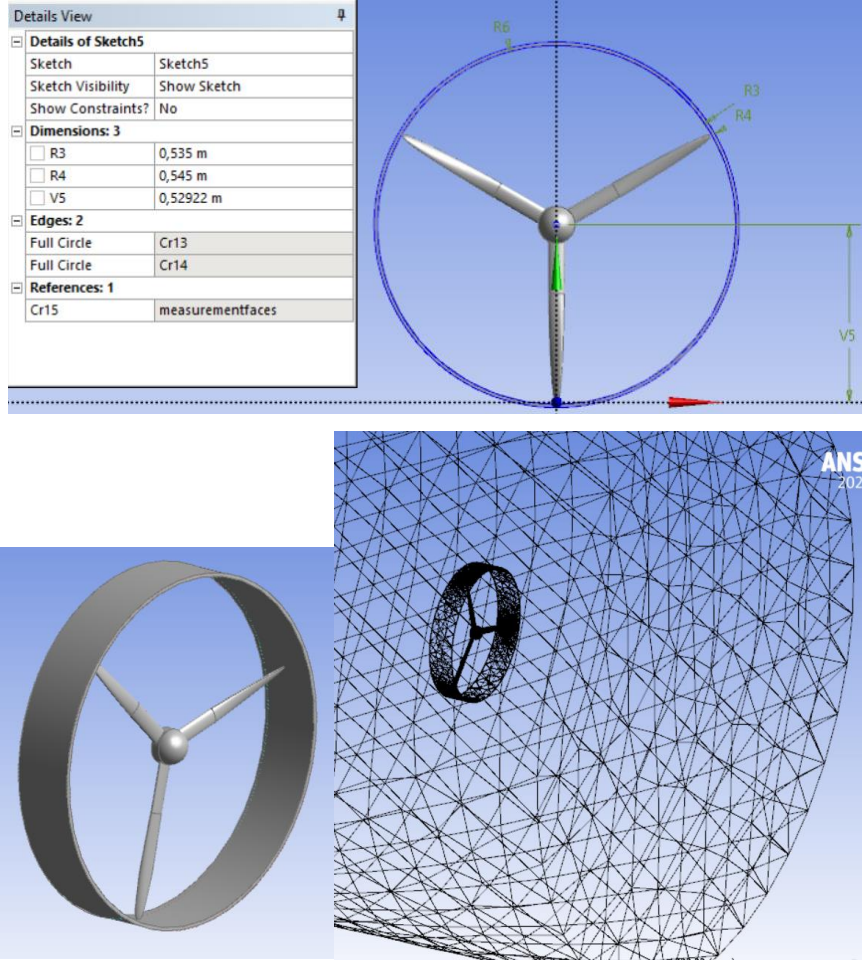
Analiz tamamlandıktan sonra ortak parametreler kullanılarak yapılan analizde ise Şekil 37'deki görsel sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 37. Sade rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

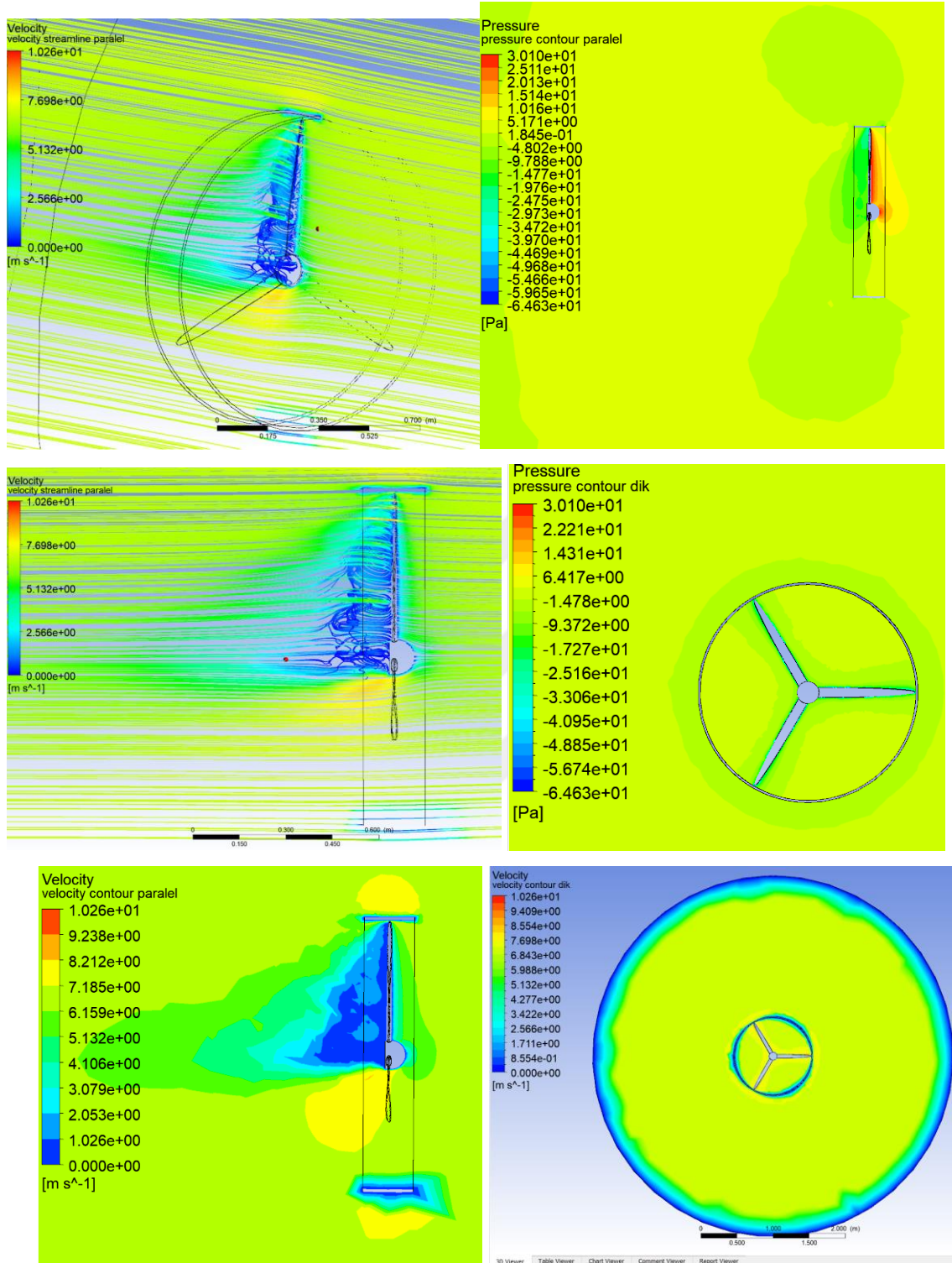
2.2. Basit Kanallı Rüzgar Türbin Modeli (B)

Bu modelde ise basit rüzgar türbini rotor çevresini saran 20 cm ene sahip bir kanal tasarımı yapılarak rotor etrafına simetrik olarak konumlandırılmıştır. Şekil 38'de geometri ve ağ detayları yer alan model ile rüzgar nozulu veya difüzörü olmadan sade bir kanalın sonuç üzerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 38. Basit kanallı rüzgar türbin modeli ölçüleri ve mesh yapısı

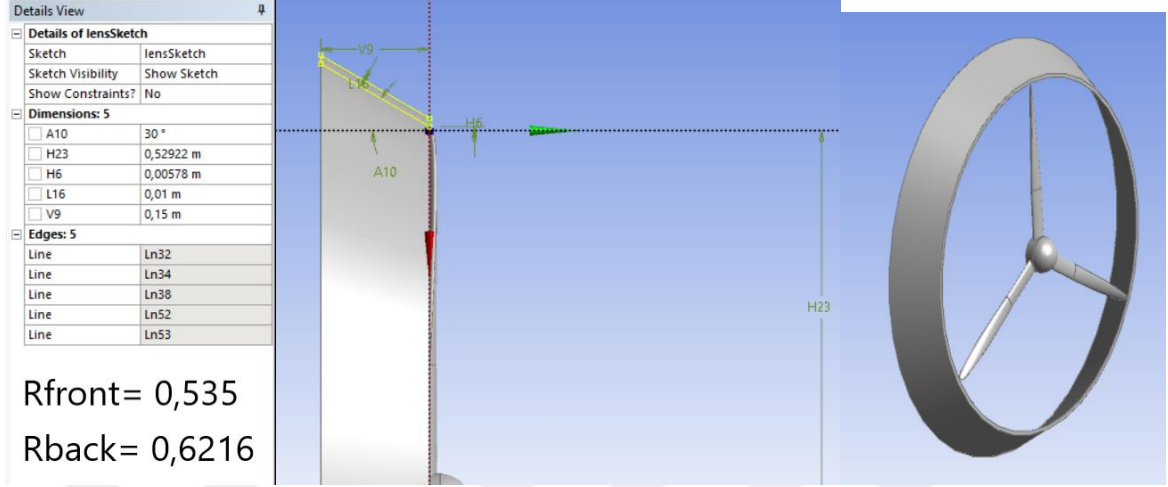
Düşük ağ sayısı ile tutarlı sonuçlar veren analizde yine ortak parametreler ve sınır koşulları kullanılarak Şekil 39'daki görsel sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 39. Basit kanallı rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

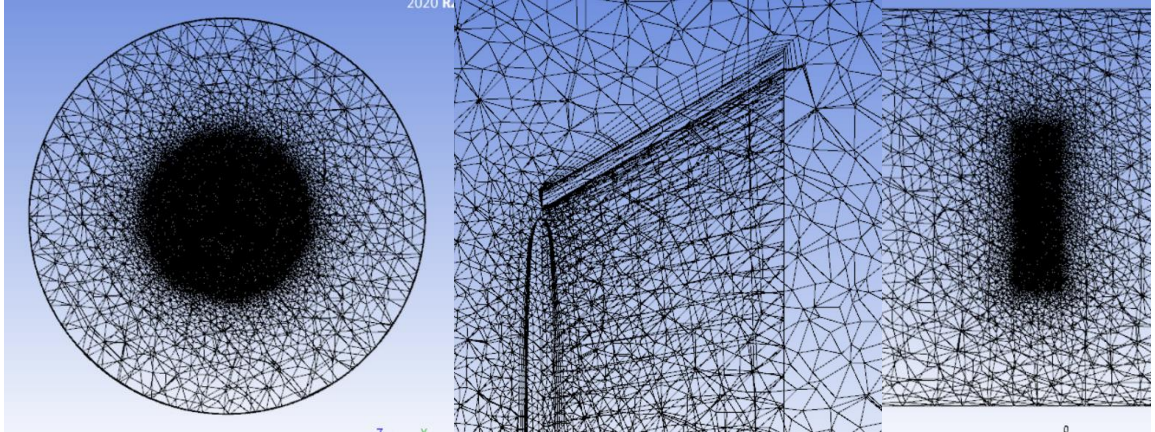
2.3. Basit Difüzörlü Rüzgar Türbin Modeli (C)

Bu modelde kanal kaldırılarak onun yerine geometrik detayları Şekil 40'da verilen bir difüzör rotor etrafına yerleştirilmiştir.

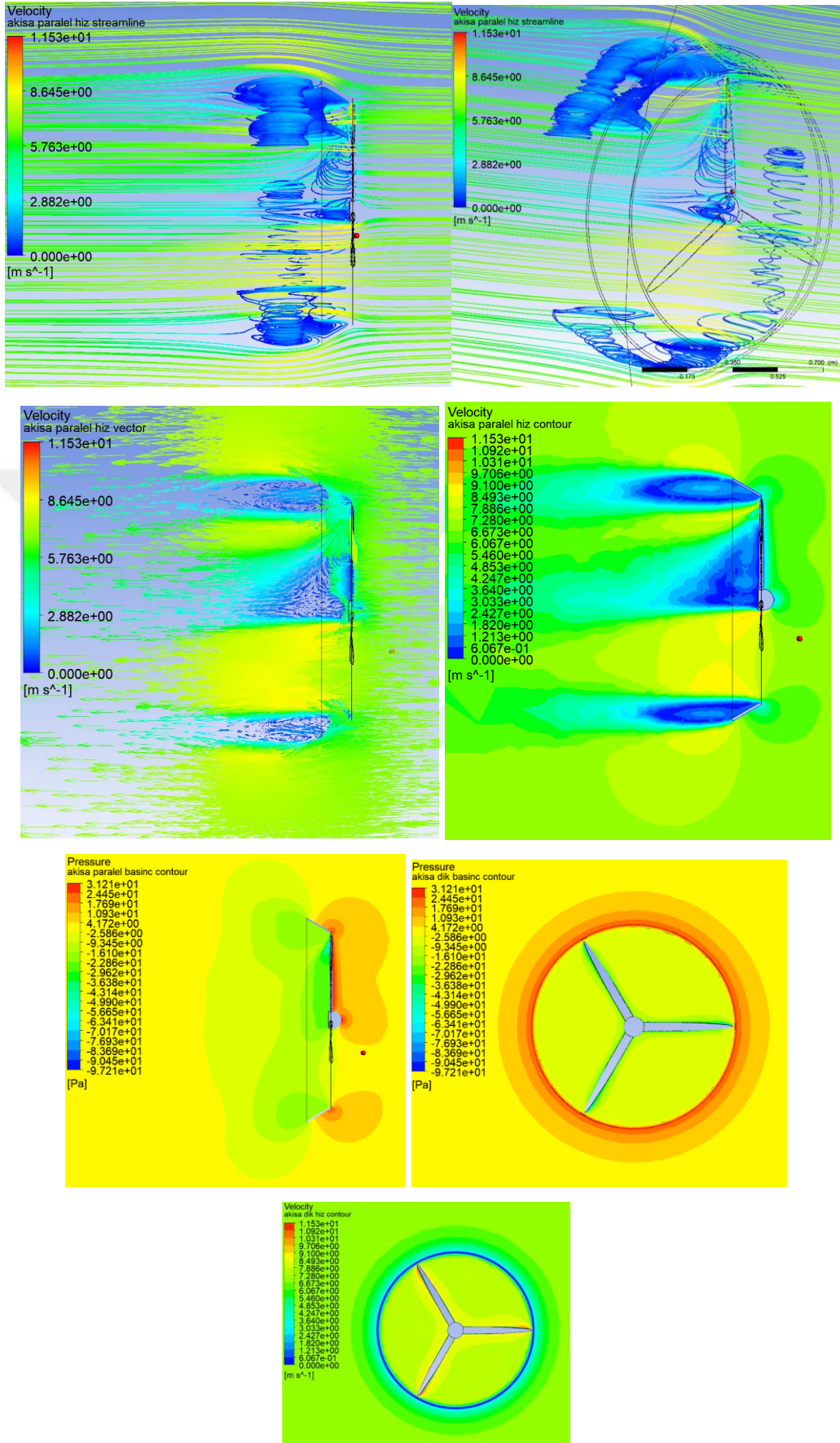


Şekil 40. Basit difüzörlü rüzgar türbini model geometrisi

Şekil 41'de ağ detayları yer alan model yaklaşık 1,5 milyon hücreden oluşmaktadır.



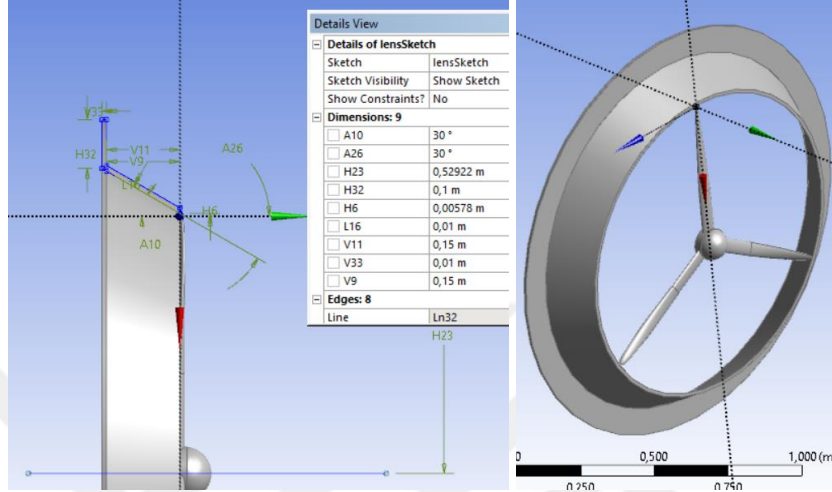
Şekil 41. Basit difüzörlü rüzgar türbini model ağ görüştüsü



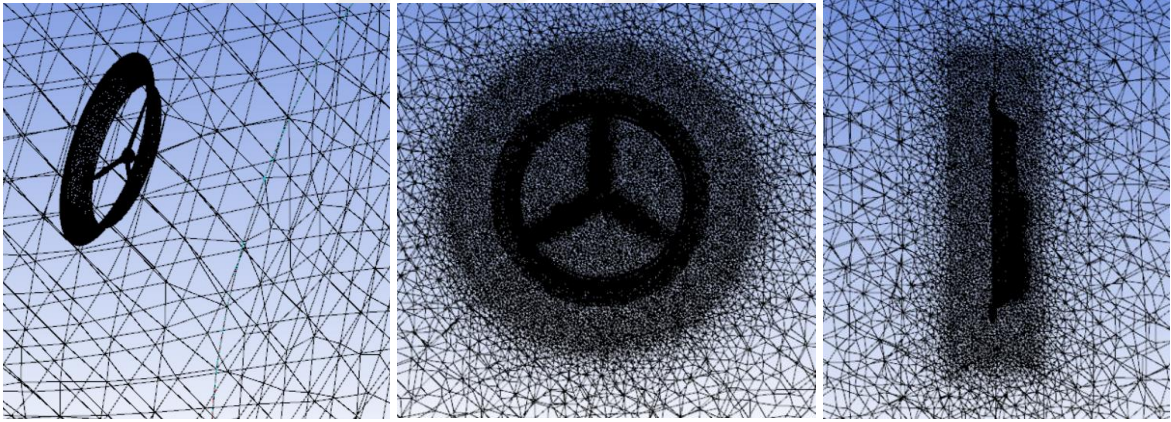
Şekil 42. Basit difüzörlü rüzgar türbini modeli görsel sonuçları

2.4. Basit Flanş (Brim) Difüzörlü Rüzgar Türbin Modeli (D)

Bu modelde ise rotor etrafındaki difüzöre flanş eklenerek sonuca olan etkileri incelenmiştir. Detayları Şekil 43 ve Şekil 44'de yer alan geometri'de ise 1,5 milyon ağ kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur.

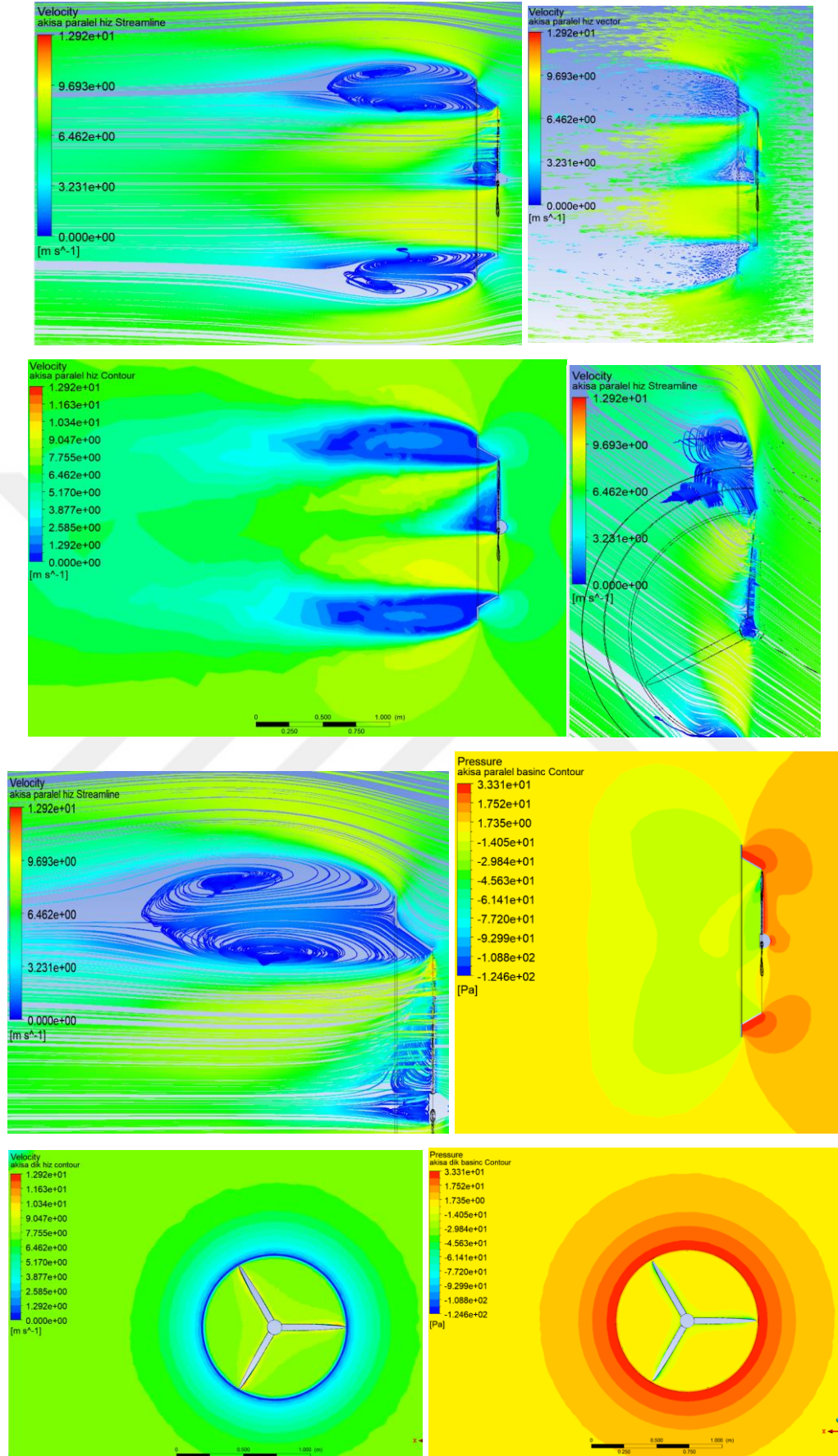


Şekil 43. Basit flanş difüzörlü rüzgar türbin model geometrisi



Şekil 44. Basit flanş difüzörlü rüzgar türbin modeli mesh yapısı

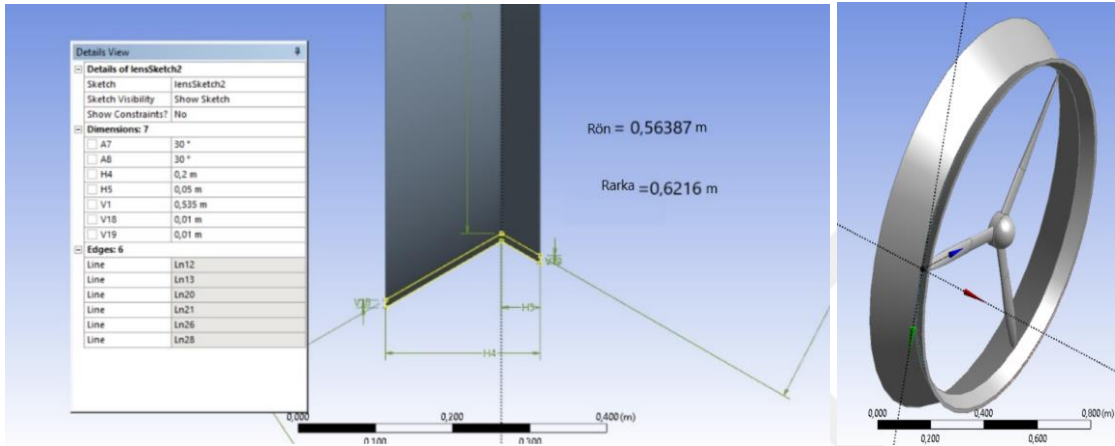
Diğer modellerde olduğu gibi yine ortak parametreler, çözüm metodu ve sınır koşulları kullanılarak analiz yapılmış ve Şekil 45'teki gibi görsel sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 45. Basit flanş lensli rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

2.5. Basit Lensli Rüzgar Türbin Modeli (E)

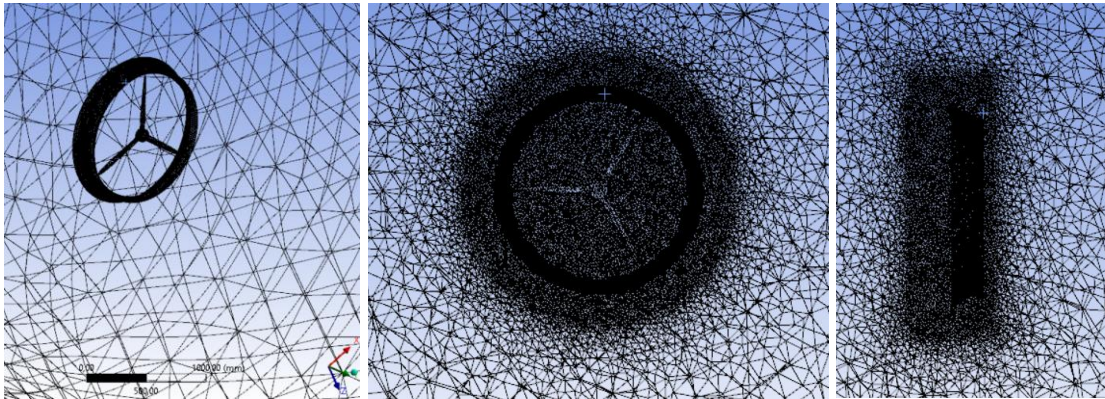
Bu modelde ise rotor etrafındaki difüzörün ucuna basit yapıda bir nozul eklenerek rüzgar lensi (nozul+difüzör kombinasyonu) elde edilmiş ve Şekil 46’de detayları yer alan yapının sonuç üzerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 46. Basit lensli rüzgar türbin modeli ölçüleri

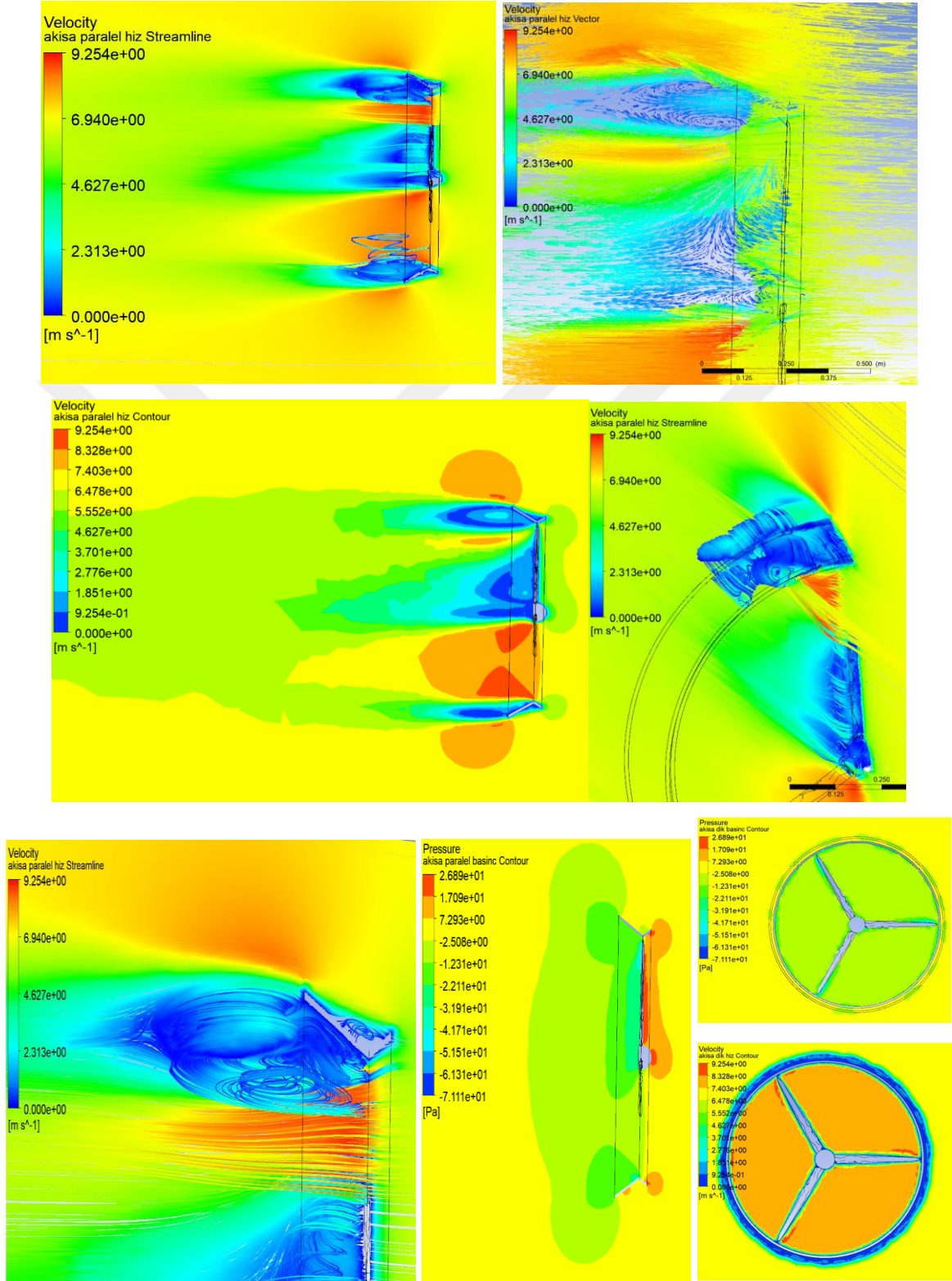
20 cm’lik kanalda olduğu gibi yatayda toplam 20 cm uzunluğundaki lensin nozul kısmı 5 cm, difüzör kısmı 15 cm olarak ve yatay eksene 30° açı yapacak şekilde tasarlanmıştır.

Ağ yapısı ilk denemede düşük hücre sayısı ile denenmiş ancak analiz sonucu tutarsız olduğundan, miktar 2-3 kat artırılarak Şekil 47’deki yapı ve 1,5 milyon ağ ile analize devam edilmiştir.



Şekil 47. Basit lensli rüzgar türbin modeli mesh yapısı

Yüksek ağ sayısı ile tutarlı sonuçlar veren analizde yine ortak parametreler ve sınır koşulları kullanılarak Şekil 48'deki görsel sonuçlar elde edilmiştir.

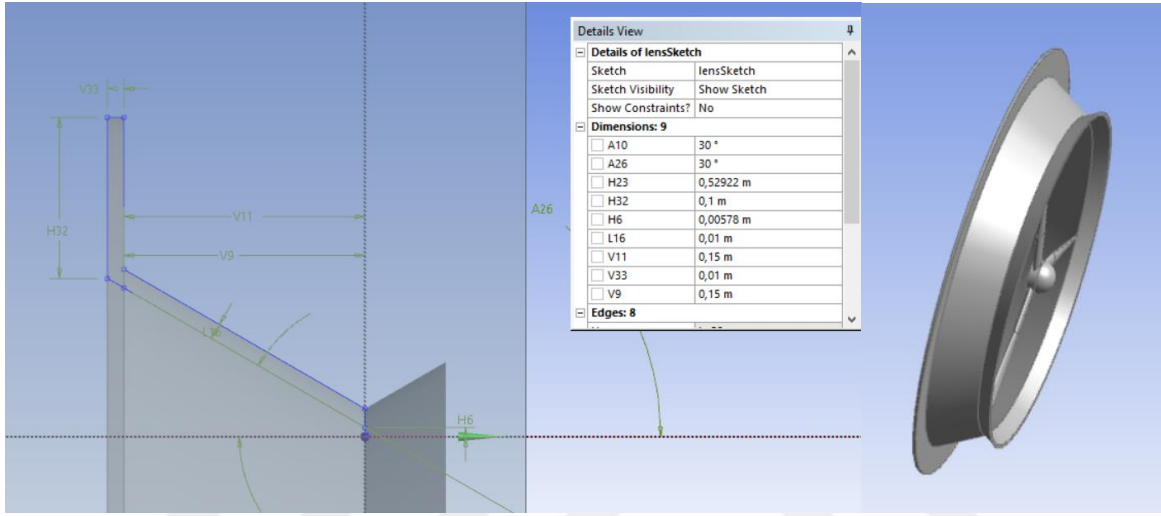


Şekil 48. Basit lensli rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

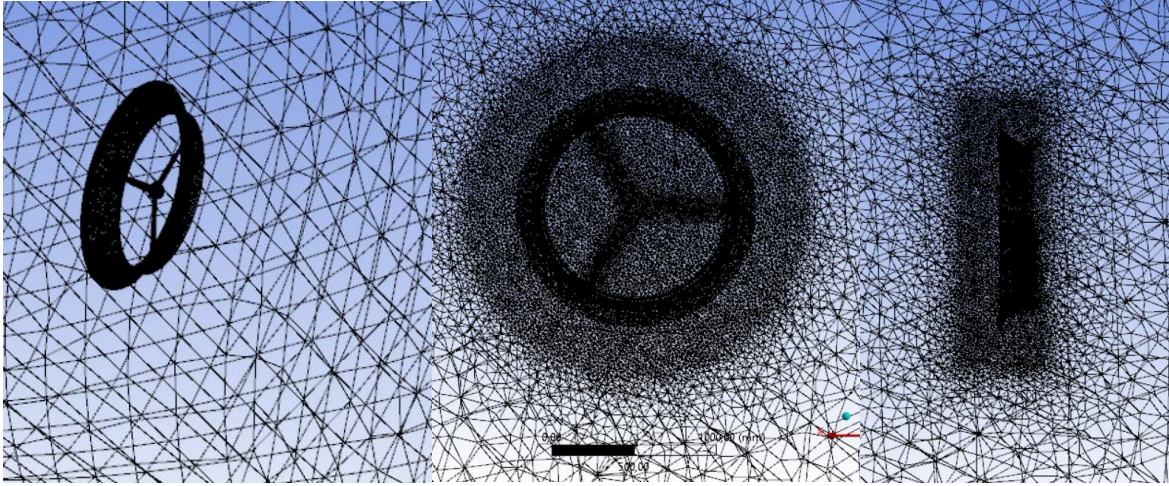
Görsellerden de anlaşılacağı üzere lens sonrasında girdaplar oluşmuştur.

2.6. Basit Flanş (Brim) Lensli Rüzgar Türbin Modeli (F)

Bu modelde ise E modelinde yer alan rotor etrafındaki lensin nozul kısmına dışa doğru 10 cm flanş eklenerek sonuç üzerindeki etkilere incelenmesi amaçlanmıştır. Detayları Şekil 49 ve yer alan modelde, 1,6 milyon sayıda ağ hücresi kullanılmıştır.

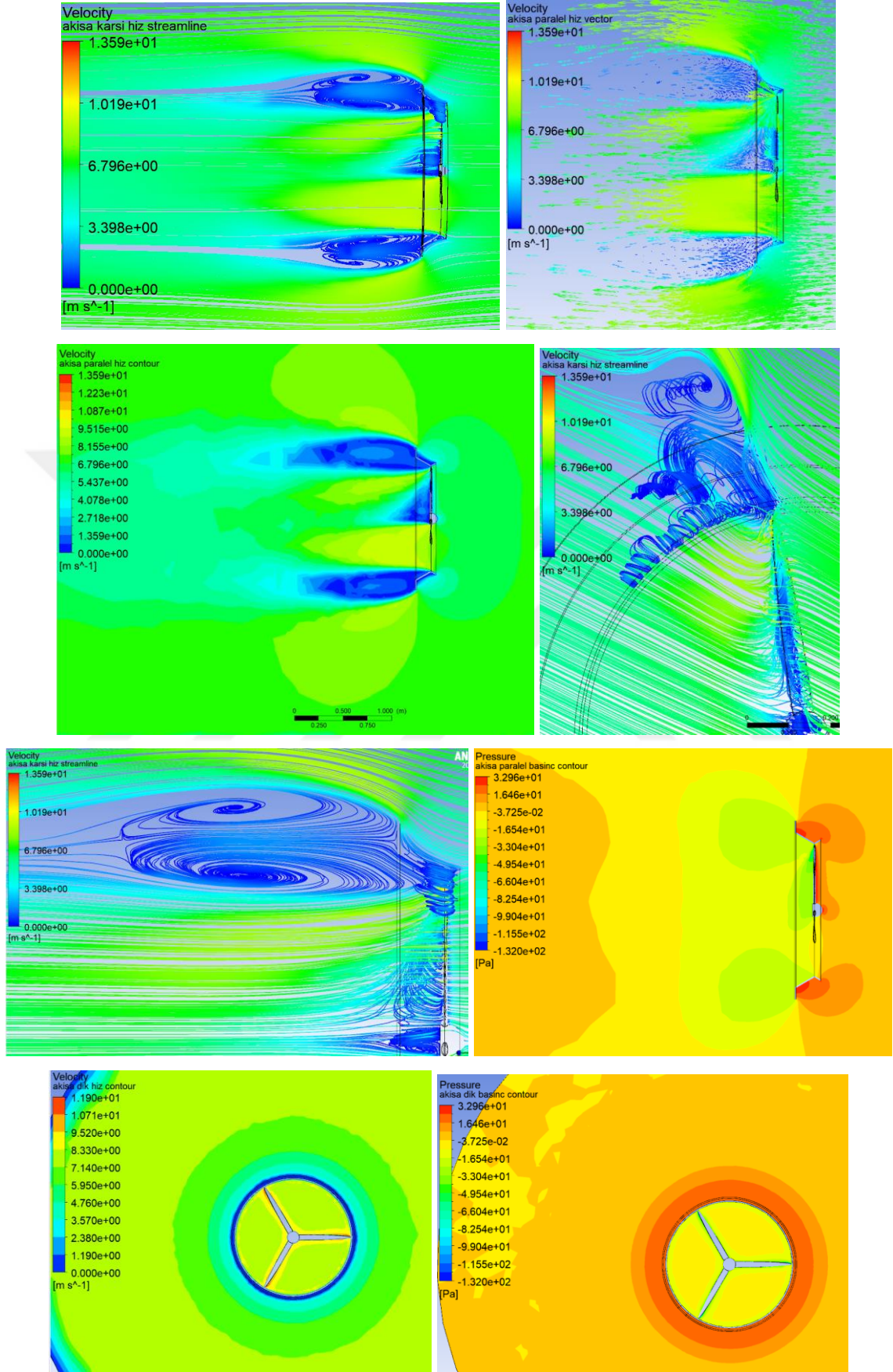


Şekil 49. Basit flanş lensli rüzgar türbin model geometrisi



Şekil 50. Basit flanş lensli rüzgar türbin modeli mesh yapısı

Ortak parametreler ve sınır koşullarının kullanıldığı analizde ise Şekil 51'deki gibi sonuçlar elde edilmiştir.

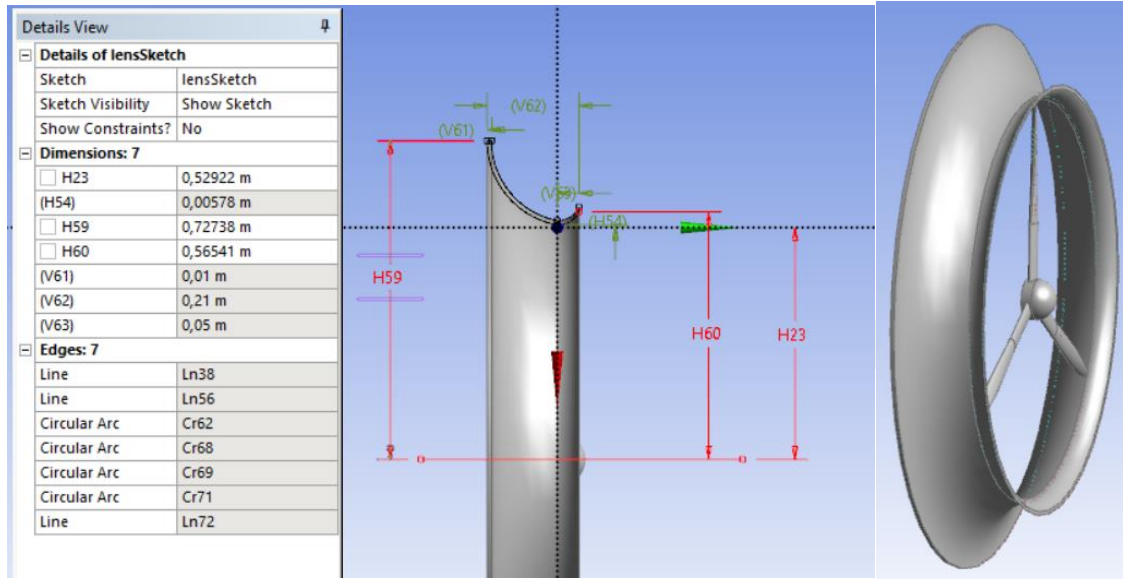


Şekil 51. Basit flanş lensli rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

Görsel sonuçlar incelendipinde, flanş etrafında oluşan girdapların E modelinde oluşan girdaplardan daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.

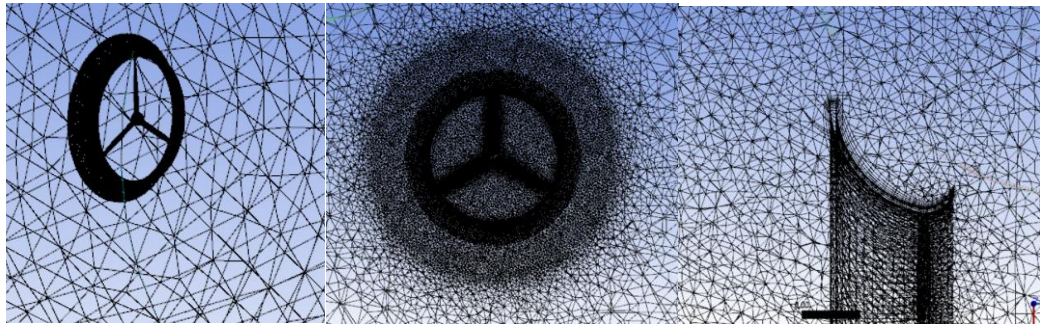
2.7. Eğimli Lens Rüzgar Türbin Modeli (G)

Bu modelde ise F modelinde yer alan flanş kaldırılarak, giriş ve çıkış nozul duvarları daha yumuşak geçişe sahip eğimli bir tasarım analiz edilmiştir. Detayları Şekil 52’de yer alan modelin, diğer modellerde olduğu gibi akışa paralel uzunluğu ve duvar et kalınlığı değişmemiştir.

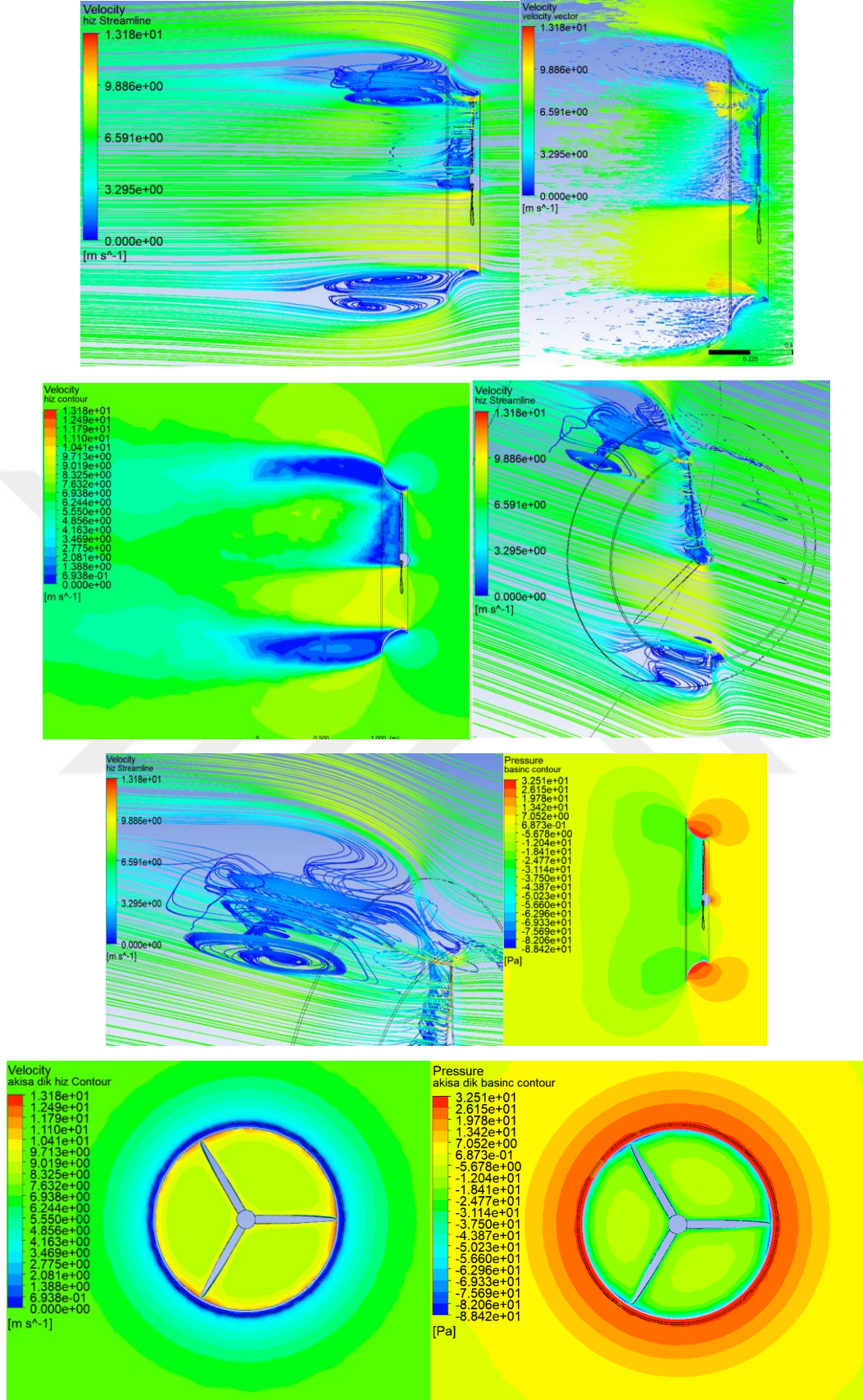


Şekil 52. Eğimli lens rüzgar türbin model geometrisi

Şekil 53’te görüldüğü üzere, modele uygulanan mesh ağ yapısında yaklaşık 1.6 milyon hücre yer almaktadır. Ortak parametreler ve sınır koşullarının kullanıldığı analizde ise Şekil 54’teki gibi sonuçlar elde edilmiştir.



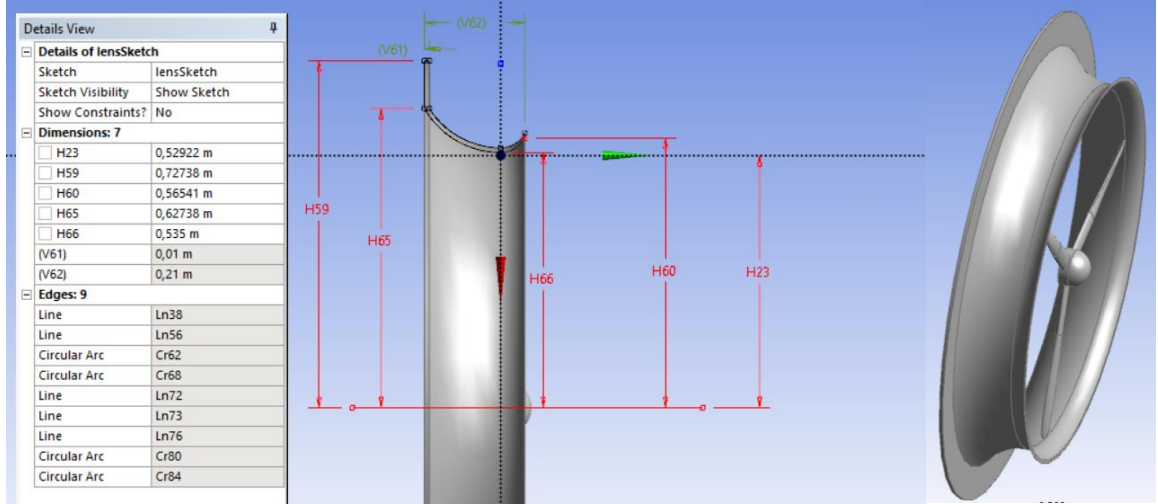
Şekil 53. Eğimli lens rüzgar türbin modeli mesh yapısı



Şekil 54. Eğimli lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

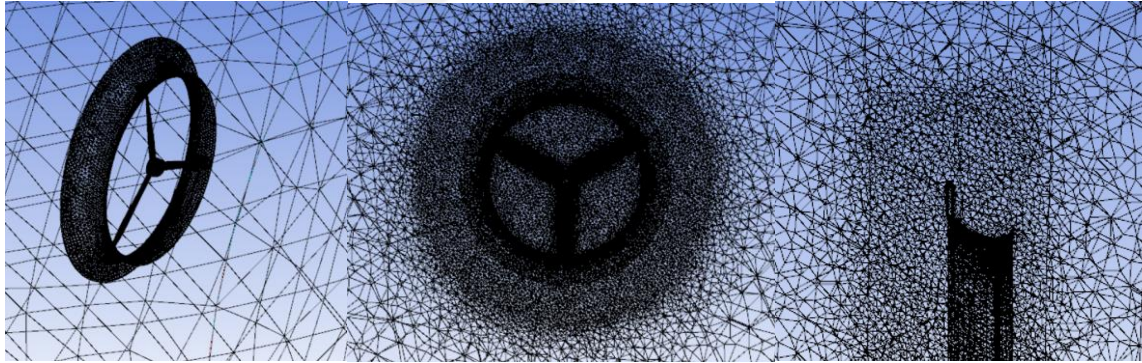
2.8. Eğimli Flanş (Brim) Lens Rüzgar Türbin Modeli (H)

Bu modelde ise G modelinde yer alan geometriye ilave olarak arka kısma 10 cm'lik flanş eklenerek detayları Şekil 55'te yer alan tasarım gerçekleştirilmiştir.



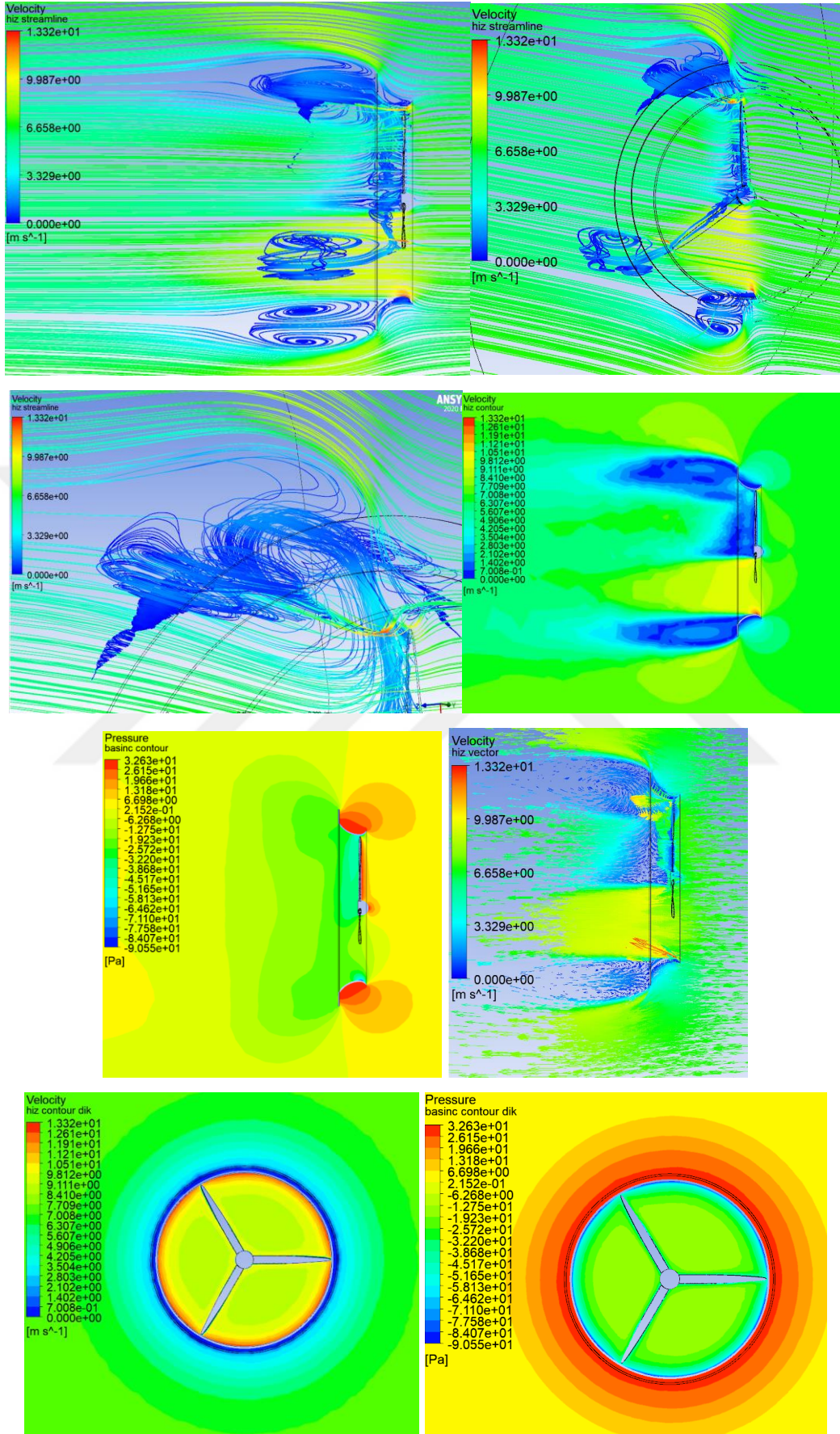
Şekil 55. Eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin model geometrisi

Şekil 56'da görüldüğü üzere, modele uygulanan mesh ağ yapısında yaklaşık 1.55 milyon hücre yer almaktadır.



Şekil 56. Eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin modeli mesh yapısı

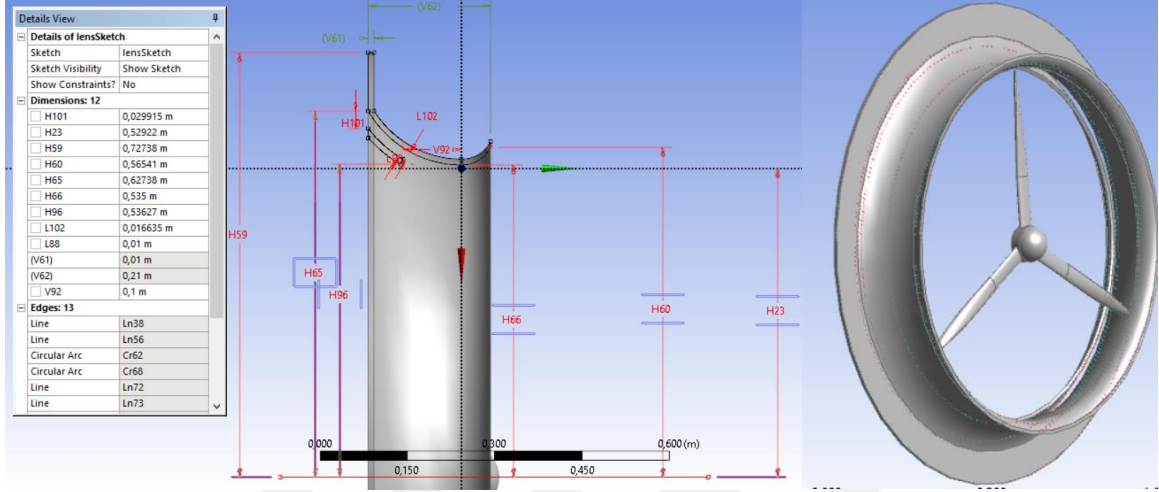
Ortak parametreler ve sınır koşullarının kullanıldığı analizde ise Şekil 57'deki gibi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 57. Eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

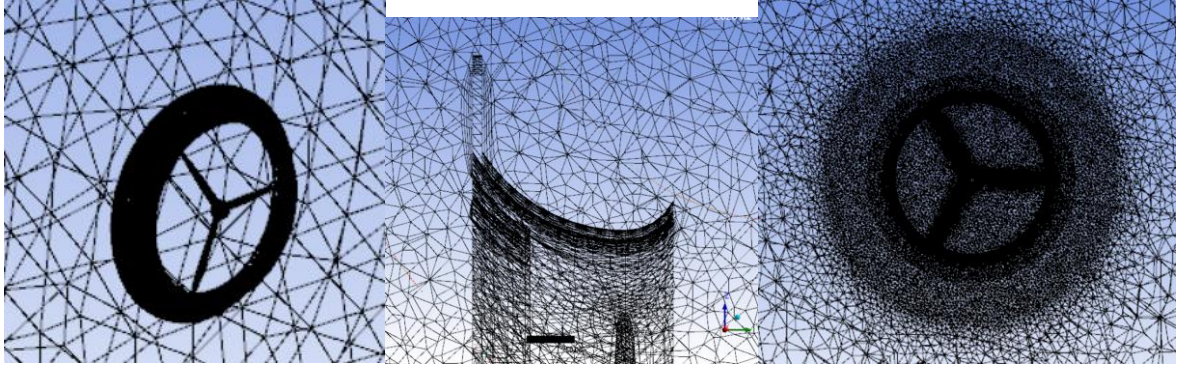
2.9. Çift Eğimli Flanş (Brim) Lens Rüzgar Türbin Modeli (I)

Bu modelde ise H modeline ek olarak difüzör kısmına ikinci duvarın eklenmesiyle detayları Şekil 58’de yer alan tasarım elde edilmiştir.



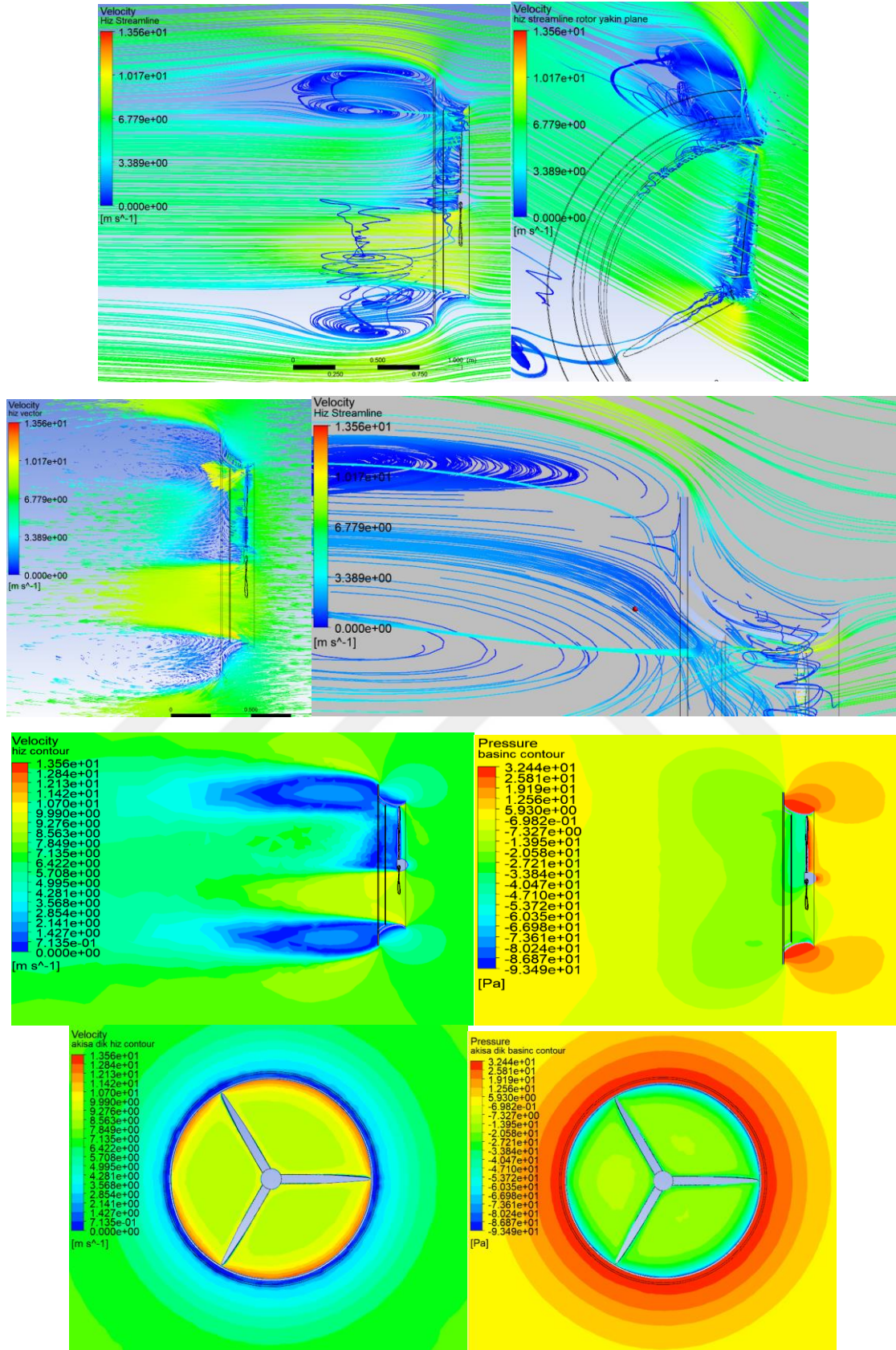
Şekil 58. Çift eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin model geometrisi

Şekil 59’da detayları yer alan modele uygulanan ağ yapısında yaklaşık 1.57 milyon hücre yer almaktadır.

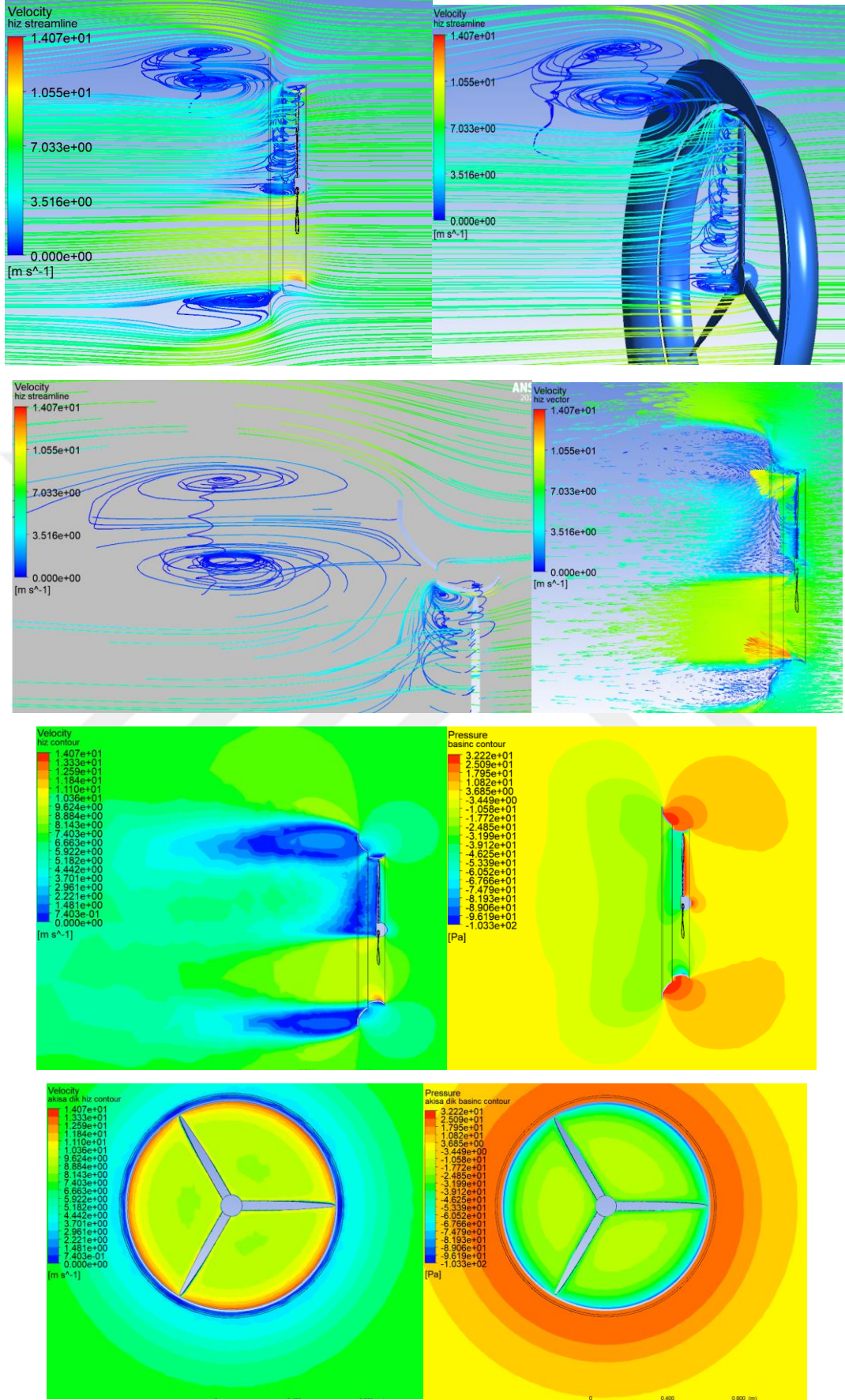


Şekil 59. Çift eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin model mesh yapısı

Şekil 31’deki çözüm modeli uygulanan model, 1000 iterasyon sonucu yakınsamamış ve Şekil 32’de detayları yer alan çözüm metodu uygulanmıştır. Bu metod sonrası elde edilen analiz sonuçları ise Şekil 60’daki gibidir.



Şekil 60. Çift eğimli flanş (brim) lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları



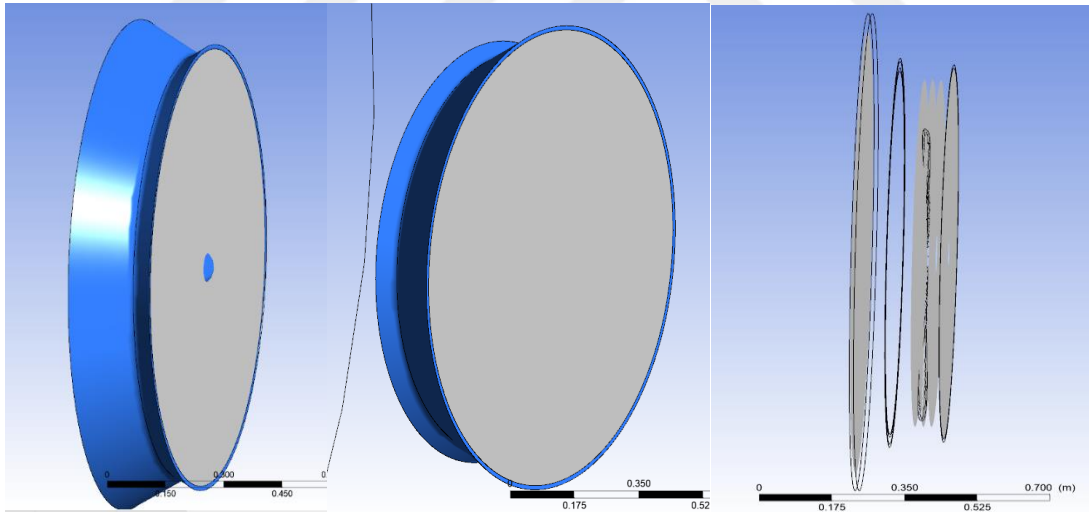
Şekil 63. Eğimli flanş (brim) ayrılmış lens rüzgar türbin modeli görsel sonuçları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 30’da görülen 10 farklı konfigürasyon için elde edilmiş olan sonuçlara ait görseller bir önceki bölümde yer almaktadır. ANSYS Workbench 2020 R2 paket programının CFD Post modülü yardımıyla Şekil 64’teki gibi modellerden 5 farklı kesit alanı oluşturulmuştur. Bu alanlar:

- Nozul giriş kesiti,
- Rotor giriş kesiti (Yatayda rotordan 2cm önce),
- Rotor kesiti,
- Rotor çıkış kesiti (Yatayda rotordan 2cm sonra),
- Nozul çıkış kesitidir.

Bu kesit alanları daha sonra CFD Post Functions modülü ile alan ortalaması için kullanılarak alan ortalamalı hız ve basınç değerleri elde edilmiştir.



Şekil 64. Modellerin ölçüm alanlarının örnek görseli

Şekil 64’teki kesit alanlarının ortalamasından elde edilen yatay eksen hız değerlerinin, serbest akım rüzgar hızı olan 7 m/s yatay hıza göre değişimleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Bazı modellerde nozul, difüzör veya her ikisi de olmadığından, ilgili hücreye x sembolü koyulmuştur. Buradan elde edilen rotor kesitindeki alan ortalamalı yatay hız değeri Denklem (3)’te yerine yazılarak teorik güç ($\dot{W}_{\text{teorik}}$) elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 2’de topluca yer almaktadır. Tabloda yer alan teorik güç değişim oranı, 7 m/s hıza sahip hiçbir

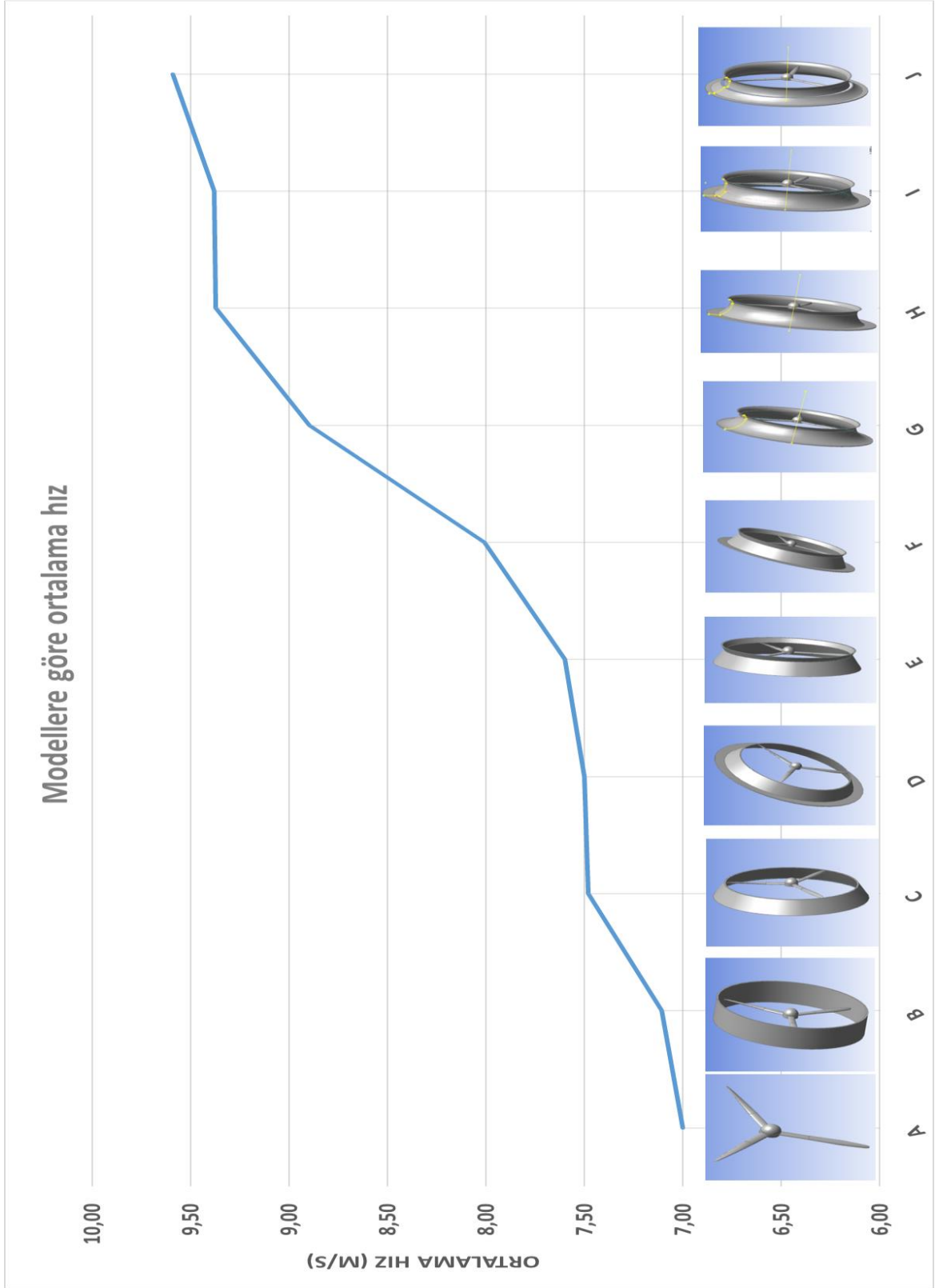
nozul veya difüzör gibi eklentilere sahip olmayan A modelinde elde edilen 184,85 W'a göre hesaplanmıştır.

Tablo 2. Modellere göre hız ve güç değerleri

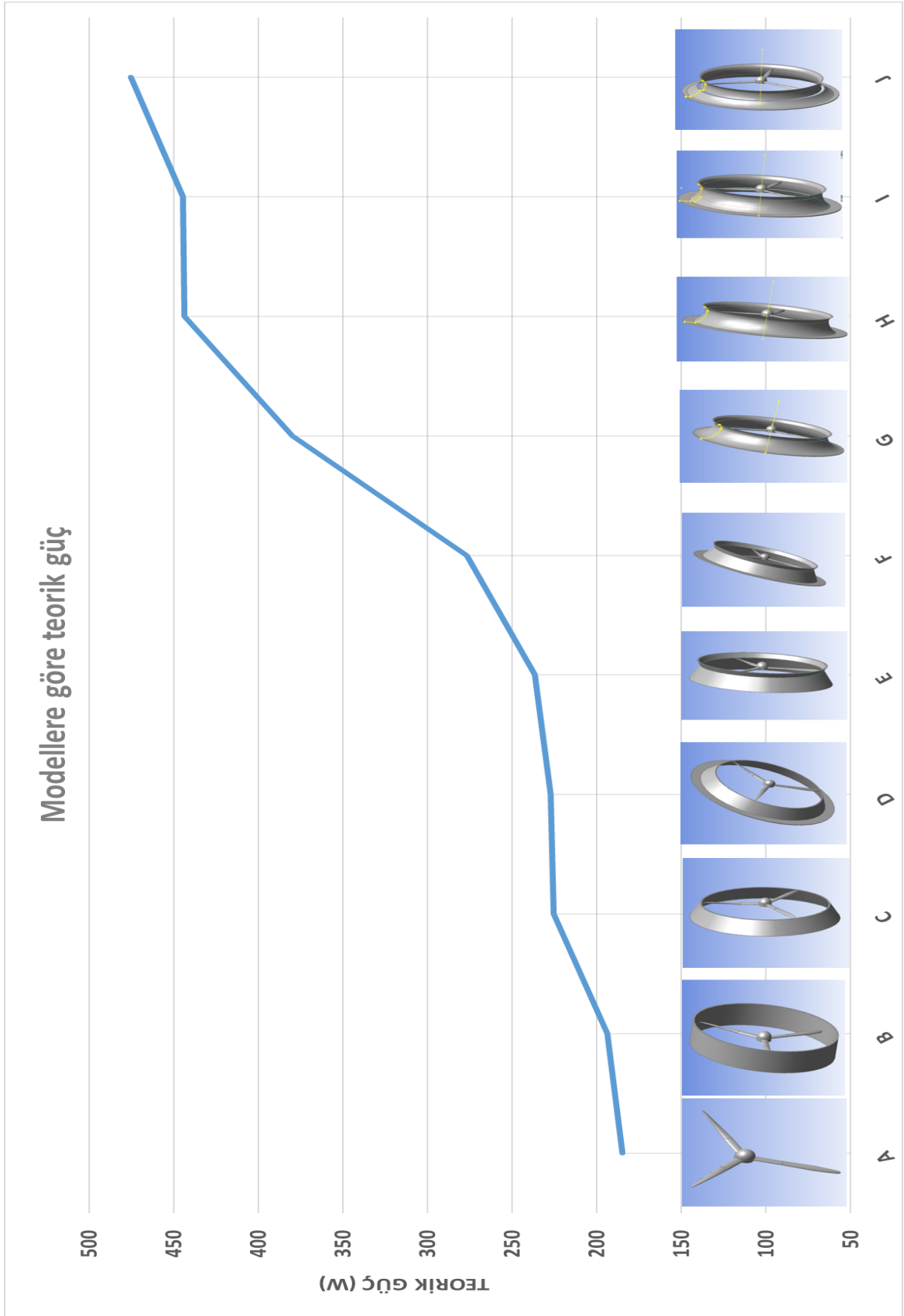
Model	Model Adı	Hız (m/s)						Teorik güç (W)	Teorik güç değişim oranı (%)
		Nozul Giriş	Rotor giriş	Rotor Kesiti	Rotor çıkış	Nozul Çıkış	Değişim (7 m/s'ye göre)		
A	Sade yatay eksenli rüzgar türbin (YERT) modeli	x	6,83	7,00	6,63	x	0	184,85	x
B	Basit kanallı YERT	6,60	6,67	7,11	6,60	6,61	0,11	193,70	4,8
C	Basit difüzörlü YERT	x	6,91	7,48	7,17	5,20	0,48	225,55	22,0
D	Basit flanş (Brim) difüzörlü YERT	x	6,75	7,50	7,10	5,15	0,50	227,36	23,0
E	Basit lensli YERT	6,46	6,95	7,60	7,23	5,29	0,60	236,58	28,0
F	Basit flanş (Brim) lensli YERT	6,73	7,28	8,01	7,58	5,53	1,01	276,97	49,8
G	Eğimli lensli YERT	7,50	8,17	8,90	8,24	5,50	1,90	379,67	105,4
H	Eğimli flanş (Brim) lensli YERT	7,87	8,60	9,37	8,69	6,39	2,37	443,63	140,0
I	Çift eğimli flanş (Brim) lensli YERT	7,86	8,61	9,38	8,71	6,69	2,38	444,77	140,6
J	Eğimli flanş (Brim) ayrılmış lensli YERT	8,06	8,83	9,59	8,89	6,07	2,59	475,32	157,1

Elde edilen bulguların daha açık kıyaslanabilmesi için 10 modelin hız değişimleri ve teorik güç (rüzgar gücü) değişimleri Şekil 65 ve Şekil 66'da verilmiştir. Tablo 2, Şekil 65 ve

Şekil 66 birlikte incelendiğinde A modelinden J modeline doğru gidildikçe rotor kesitindeki hızın arttığı ve dolayısıyla teorik gücün arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 65. Modellere göre ortalama hız değişimi



Şekil 66. Modellere göre teorik güç değişimi

İlk model olan sade rüzgar türbininde (A modeli) serbest rüzgar hızı olan 7 m/s'nin rotor kesitindeki hız olarak hesaplanmasından elde edilen 184,85 W rüzgar gücü değerinin; rotorun basit bir kanalın içerisine yerleştirilerek elde edilmiş olan B modelinde hızın 7,11 m/s'ye yükselmesine bağlı olarak 193,70 W değerine çıktığı görülmektedir. 0,11 m/s'lik bir hız farkının gücü yaklaşık 9 W artırarak % 2,6'lık bir iyileşme sağladığı görülmüştür.

Kanal kaldırılarak yerine koyulan basit bir difüzörün (C modeli) sonuçları incelendiğinde ise; hızın 7,48 m/s'yeye, gücün ise % 22'lik bir artış göstererek 225,55 W'a ulaştığı görülmektedir. C modelinin analiz sonuçlarının yer aldığı Şekil 42'deki görsel sonuçlar incelendiğinde difüzör çıkışında girdapların oluştuğu görülmüştür.

Bu girdapların etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla difüzörün arkasına 10 cm'lik bir flanş eklenerek elde edilen modelin (D modeli) rotor kesitindeki yatay hıza bakıldığında 7,50 m/s'ye yükseldiği dolayısıyla gücün ilk modele göre % 22'den % 23'e % 1'lik bir artış gösterdiği anlaşılmaktadır.

% 1'lik güç artışından dolayı flanşlı difüzör yerine dizayn edilen bir diğer modelde ise (E modeli) basit bir nozul ve difüzörün (lensin) analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde ise hız 7,60 m/s'yeye çıkarak gücü % 28'e yükseltmiş ve D modeline göre %5'lik bir artış sağlamıştır.

Flanşlı difüzör (D modeli) ve basit lensli modelin (E modelin) faydalı özellikleri birleştirilerek oluşturulan bir diğer hibrit model (F modeli) incelendiğinde ise rotor kesitindeki hızın 0,41 m/s'lik bir artış göstererek 8,01 m/s'ye çıktığı anlaşılmaktadır. Bu hız artışının rüzgar gücünü 276,97 W'a çıkararak sade bir türbine göre % 49,8; basit lensli modellerin artış yüzdesine göre % 21,8'lik bir artış daha sağladığı anlaşılmaktadır.

F modeli geometrisindeki flanşlı lens yapısının basit bir yapıdan eğimli bir yapıya dönüştürülerek ve flanş kaldırılarak oluşturulan G modeli (eğimli lens YERT) incelendiğinde, bu eğimin rotor kesitindeki ortalama hızı 0,81 m/s artırarak 8,90 m/s'yeye ulaştırdığı ve böylece gücün de sade YERT'e göre % 105,4 artarak 379,67 W'a ulaşmasını sağlamıştır. Eğimli yapı ile basit yapı kıyaslandığında, ilk modele göre % 49,8 olan artışın % 55,6 daha artarak %105,4'e ulaştığı anlaşılmıştır.

Flanşın G modeli üzerindeki etkisinin görülebilmesi amacıyla, flanşlı ve eğimli olan lens (H modeli) analiz edilmiştir. Analiz sonucunda rotor kesitindeki ortalama yatay hızın 8,90 m/s'den 9,37 m/s'ye ulaştığı ve dolayısıyla rüzgar gücünün 443,63 W'a yükselerek %

105,4 olan artışın %34,6 daha artarak %140'a ulaştığı anlaşılmaktadır. Böylece görülmüştür ki; flanş eklentisi hızın da artmasıyla birlikte bariz bir şekilde türbin verimini artırmaktadır.

H modeline ikinci bir difüzör duvarı eklenerek (çift eğimli) elde edilen I modelinin sonuçları incelendiğinde ise rotor kesitindeki hızın 9,37 m/s'den 9,38 m/s'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Bu modeldeki güç artış oranı; gücü % 140 artırmış olan H modeline göre % 0,6'lık bir artışla % 140,6 değerine çıkmıştır.

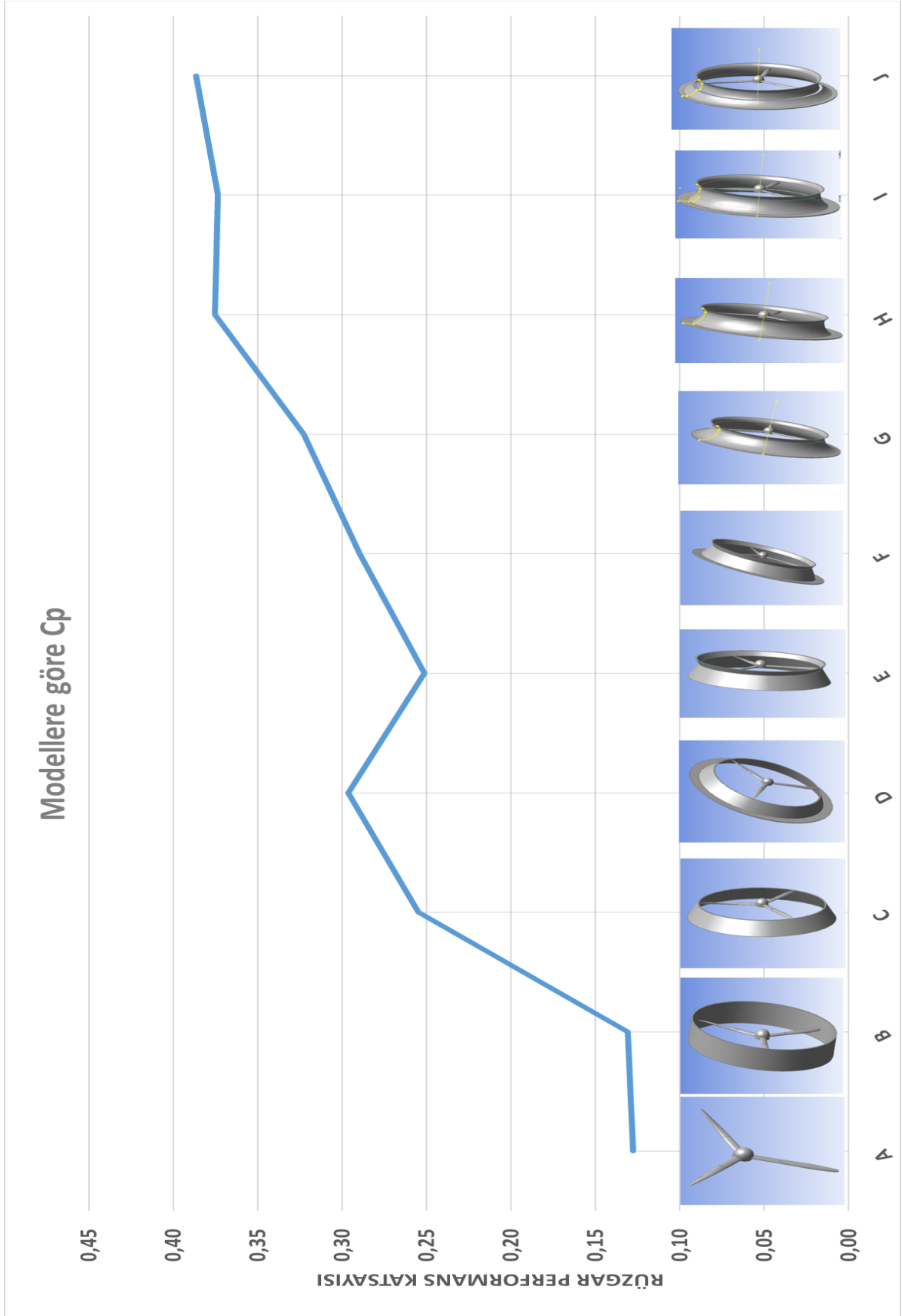
Düşük verim artışı sebebiyle I modelindeki 2. duvar kaldırılmış ve yerine difüzörün ayrılarak 2 parçadan oluştuğu ve o aradan da havanın geçebileceği J modeli düzenlenmiştir. Bu modelin analiz sonuçları incelendiğinde ise rotor kesitindeki yatay ortalama hızın I modelindeki 9,38 m/s'den 9,59 m/s'ye yükseldiği anlaşılmıştır. Böylece rüzgar gücünü sade bir YERT'e göre % 157,1 (1.5 kat) artırarak 475,32 W değerine ulaşmış olan J modelinin, 10 model arasından en çok teorik güce (rüzgar gücüne) sahip model olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı kesit alanlarında yine aynı modülün alan ortalamalı basınç fonksiyonu kullanılarak Tablo 3'teki basınç değerleri elde edilmiştir. Tablo 2'de olduğu gibi, değer olmayan hücreler yine x sembolü ile gösterilmiştir. Rotor girişi ile rotor kesitindeki basınç değişiminin Denklem (6)'da olduğu gibi kesit alanındaki debi ile çarpılarak elde edilen değerlerin rüzgar gücüne oranlanması ile rüzgar performans katsayısı olan (C_p) elde edilmiştir. Tablo 2'de olduğu gibi, Tablo 3'de de her model için elde edilmiş olan C_p değerleri ve kıyaslanması amacıyla A modeline göre olan oransal değişim değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3. Modellere göre basınç ve performans katsayısı (C_p) değerleri

Model	Model Adı	Basınç (Pa)						Teorik güç (W)	C_p	C_p değişim oranı (%)
		Nozul Giriş	Rotor giriş	Rotor Kesiti	Rotor çıkış	Nozul Çıkış	Rotor giriş - kesit değişimi			
A	Sade yatay eksenli rüzgar türbin (YERT) modeli	x	1,53	-2,30	-4,52	x	3,83	184,85	0,13	x
B	Basit kanallı YERT	3,69	2,00	-1,87	-4,20	-5,13	3,87	193,70	0,13	2,6
C	Basit difüzörlü YERT	x	0,59	-6,57	-11,92	-16,68	7,16	225,55	0,25	99,8
D	Basit flanş (Brim) difüzörlü YERT	x	3,35	-4,95	-11,28	-17,32	8,30	227,36	0,30	132,2
E	Basit lensli YERT	4,77	0,03	-6,92	-11,54	-15,52	6,95	236,58	0,25	97,0
F	Basit flanş (Brim) lensli YERT	3,71	-1,22	-8,82	-13,75	-17,89	7,60	276,97	0,29	127,1
G	Eğimli lensli YERT	-4,66	-10,44	-18,06	-21,25	-20,47	7,62	379,67	0,32	152,9
H	Eğimli flanş (Brim) lensli YERT	-9,41	-15,50	-23,91	-27,03	-22,91	8,41	443,63	0,38	194,1
I	Çift eğimli flanş (Brim) lensli YERT	-9,02	-15,33	-23,70	-27,26	-22,94	8,37	444,77	0,37	192,8
J	Eğimli flanş (Brim) ayrılmış lensli YERT	-11,63	-18,39	-26,86	-30,22	-22,24	8,47	475,32	0,39	203,0

Şekil 67 ise Tablo 3'te verilmiş olan performans katsayılarının değişimi grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 67. Modellere göre performans katsayısı (C_p) değişimi

Elde edilmiş olan bulgular göstermektedir ki; her modelin bir önceki modele göre rotor kesitindeki ortalama yatay rüzgar hızı artmakta, bazı modellerdeki artışın diğer modellerdeki artıştan daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu artış; Tablo 2’den de görüldüğü gibi her modelde nozul girişinden başlayarak rotor çıkışına kadar olan alan ortalama basınç düşmesinden kaynaklanmaktadır.

Her tasarımın farklı basınç değişimine sahip olması; nozulun çapı daraltarak basınç düşürmesi ve rüzgar hızını artırması, difüzörün arkasında oluşan girdapların basınçını düşürmesi ile açıklanabilir. Öte yandan, kanal içerisinde yaşanacak akış ayrılmasının da sistemi bloke ederek rüzgar hızının yeterince artmasına izin vermediği de modellerin karşılaştırılması ile anlaşılabilmektedir.

E modeli istisna tutularak bakıldığında, rüzgar hızını artıran her modelin daha yüksek C_p ’ye sahip olduğu görülmektedir. E modelindeki istisna ise Şekil 48’deki görsel sonuçtan da anlaşıldığı üzere, difüzör arkasındaki girdabın genişliğinin YERT girişine kadar uzanmasıyla akışı kanala girmeden dışarı çekmesinden kaynaklı olduğu anlaşılabılır. Bu sorunun difüzör uzunluğunun artırılarak veya eğim azaltılarak aşılabileceği öngörülmektedir. C ve E modeli birlikte incelendiğinde, nozul eklenen difüzörün basınç farkı artmadığından C_p değerinin de artmadığı görülmüştür.

C-D, E-F ve G-H modelleri kendi aralarında kıyaslandığında ise flanş eklenen D, F ve H modellerinin flanşsız olan C, E ve G modellerine göre % 25 ile % 55’lik bir C_p artışı sağladığı anlaşılmaktadır.

C_p değerinin artırılmasındaki tek faktörün rüzgar niteliği olmadığı, örneğin kanat tasarımı, hücum açısı, uç hız oranı vb. özellikler değiştirilerek C_p ’nin değiştiği bilinmektedir. Ancak kanal (nozul, difüzör veya lens kombinasyonları) içerisindeki sade YERT’in tasarımının değiştirilmeyerek, sadece rüzgar hızının artmasıyla C_p ’nin 2 kattan fazla artırılabilceği J modelinin sonuçları incelendiğinde anlaşılmaktadır. J modeline bakıldığında, sade bir YERT te 3,83 Pa olan basınç farkı, % 45 artarak 8,47 Pa’a ve dolayısıyla 0,13 olan C_p de % 203 artarak 0,39 değerine çıkmıştır.

4. SONUÇLAR

1. Sonuçlar incelendiğinde hiçbir eklentisi olmayan rotorun (a) etrafına sırasıyla;

- b) Basit bir kanal,
- c) Basit bir difüzör,
- d) Flanşlı basit bir difüzör,
- e) Basit bir lens,
- f) Basit flanşlı bir lens,
- g) Eğimli bir lens,
- h) Eğimli flanşlı bir lens,
- i) Eğimli ek duvarlı flanşlı bir lens,
- j) Eğimli duvarı ayrılmış flanşlı bir lens

koyulduğunda ortalama hız değerinin ve dolayısıyla teorik rüzgar gücünün hızın küpü ile doğru orantılı olarak arttığı ve bu kombinasyonların rüzgar gücüne direkt etkisi olduğu anlaşılmıştır.

2. YERT'e eklenen basit düz bir kanalın rüzgar verimini artırdığı ancak diğer kombinasyonlarla kıyaslandığında bu etkinin oldukça düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

3. Nozulun rotor girişinde çapın düşürülmesinin rüzgar hızını artırdığı, ancak basınç değişimine olumlu bir etkisi olmadığından C_p değerini doğrudan etkilememektedir.

4. Rotor çıkışındaki difüzör, girdaplar oluşturarak giriş ve çıkış arasındaki basınç farkını artırmakta ve dolayısıyla kanal veya lens yapısının içinden daha fazla debide hava geçmesi ve dolayısıyla rüzgar gücünün ve C_p değerinin artmasını sağlamaktadır.

5. Difüzör çıkışına eklenen flanş, girdap oluşumunu (şiddetini ve büyüklüğünü) artırarak basınç farkı artışına ve dolayısıyla rüzgar gücü ve C_p değerinin flanşsız difüzöre göre daha da artmasını sağlamaktadır.

6. Nozul ve difüzör kombinasyonlarının birlikte kullanımı ile elde edilen rüzgar lensi tasarımı her iki yapıdan da daha verimlidir.

7. Basit yapı diye adlandırılan sabit açılı tasarıma sahip modellerin, eğimli (curved) bir yapıyla değişimi verimi önemli oranda (%50'lere varan oranda) artırmaktadır.

8. Lensin difüzör kısmına eklenen ikinci bir duvar ile iki kanallı hava çıkışına sahip bir rüzgar lensi modelinin, olmayana göre basınç farkını artırmadığı hatta azalttığı

anlaşılmaktadır. Rotor kesitindeki hızı ise neredeyse hiç artırmadığı ve dolayısıyla rüzgar gücünü de neredeyse hiç artırmadığı sonucuna varılmıştır.

9. Eğimli bir lensin difüzör kısmının ikiye ayrılarak aradan ikinci bir hava akımına izin veren model hem rüzgar hızını hem de basınç farkını artırarak, rüzgar gücünü ve C_p 'yi artırmaktadır.



5. ÖNERİLER

1. Burada sayısal analizi yapılan modellerin yanılma payını minimum seviyeye indirmek amacıyla deneysel çalışmaların yapılmasına gereksinim vardır.
2. Kombinasyonlar artırılarak en iyi sonuç veren modelin geometrik dizaynının daha detaylı incelenerek (rotor difüzör arası mesafe, açılar, eğimler vb.) performansa olan etkileri incelenebilir.
3. Rüzgar lenslerinin maliyetleri ile elde edilen verimlerin kıyaslanması yapılabilmesi amacıyla, ekonomik analizlerin yapılması gerekir.
4. Aynı malzeme kullanılarak veya aynı malzeme maliyetine denk gelecek şekilde rüzgar lensi yerine rotor çapı artırılarak daha fazla güç elde edilmesi konusunda maliyet analizi ve optimizasyon çalışması yapılabilir.
5. Sayısal analizde seçilen malzeme olan alüminyum yerine, akış ile daha iyi uyum sağlayabilecek esnek malzemeler (membran, kauçuk kaplı malzemeler vb.) kullanılarak rüzgar verimine olan etkileri incelenebilir.
6. Çapı daha geniş olan büyük ölçekli YERT'ler kullanılarak, aynı etkinin ölçek büyüdüğünde değişimin nasıl olacağı incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Anonim. (2023). *Wind Energy: Pros and Cons*. Haziran 27, 2023 tarihinde Just Energy: <https://justenergy.com/blog/wind-energy-pros-and-cons/> adresinden alındı
- Bader, S. H., Inguva, V., & Perot, J. B. (2018). Improving the Efficiency of Wind Farms Via Wake Manipulation. *Wind Energy*, 21(12), 1236.
- BP. (2022, Mayıs 25). *Statistical Review of World Energy*. bp.com: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/primary-energy.html> adresinden alındı
- Castellini, F., Astolfi, D., Peppoloni, M., Natili, F., Butta, D., & Hirschl, A. (2019). Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use. *Machines*, 7(35). doi:<https://doi.org/10.3390/machines7020035>
- Elibüyük, U., & Üçgöl, İ. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama. *Journal of YEKARUM*, 2(3), 2-13.
- Foreman, K. M., Gilbert, B., & Oman, R. A. (1978). Diffuser Augmentation of Wind Turbines. *Solar Energy*, 20, 305-311.
- Gezezen Solar. (2021, Kasım 1). Haziran 30, 2023 tarihinde [gezegensolar.com: https://www.gezegensolar.com/blog/icerik/dikey-eksenli-ruzgar-turbini](https://www.gezegensolar.com/blog/icerik/dikey-eksenli-ruzgar-turbini) adresinden alındı
- Hazmoune, M., Lazaroïu, G., Ciupageanu, D., & Debbache, M. (2021). Comparative Study of Airfoil Profile Effect on the Aerodynamic Performance of Small Scale Wind Turbines. *12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*.
- Huang, X., Tee, K., Li, Q., & Wu, X. (2020). Comparative study of onshore and offshore wind characteristics and wind energy potentials: A case study for southeast coastal region of China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 11-12.

- Kaya, K., & Koç, E. (2015). Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları. *Mühendis ve Makina*, 56(670), 38-48.
- Kishore, R. A., Coudron, T., & Priya, S. (2013). Small-scale Wind Energy Portable Turbine (SWEPT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 116, 21-31.
- Kosasih, B., & Tondelli, A. (2012). Experimental Study of Shrouded Micro-wind Turbine. *Procedia Engineering*, 49, 92-98.
- Lee, J., Lee, K. S., & Kim, D. R. (2015). Optimum Hub Height of a Wind Turbine for Maximizing Annual Net Profit. *Energy Conversion and Management*, 100, 90-96.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Hollanda: Springer.
- McSwiggan, D., Littler, T., Morrow, D. J., & Kennedy, J. (2008). A Study of Tower Shadow Effect on Fixed-Speed Wind Turbines. *43rd International-Universities-Power-Engineering Conference*, 1-3, s. 910-+.
- Ohya, Y., & Kradusani, T. (2010). A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-Lens Technology. *Energies*(3), 634-649.
- Pampudi, N. A., Pristiandaru, D. L., Basori, A., Wijayanto, D. S., Bugis, H., Wahyudi, B. D., . . . Sriwardani, N. (2017). Experimental Investigation of Wind Turbine Using Nozzle-Lens at Low Wind Speed Condition. *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016, Energy Procedia*, 105, 1063-1069.
- Thumthae, C., & Chitsomboon, T. (2009). Optimal Angle of Attack for Untwisted Blade Wind Turbine. *Renewable Energy*, 34(5), 1279-1284.
- Wang, S., & Chen, S. (2008). Blade Number Effect For a Ducted Wind Turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(10), 7-9.
- Watanabe, K., & Ohya, Y. (2021). Prediction for a Shrouded Wind Turbine with a Brimmed Diffuser. *Energies*, 14(3661), 14-29.

- Wen, B., Wei, S., Wei, K., & Yang, W. (2017). Power Fluctuation and Power Loss of Wind Turbines Due to Wind Shear and Tower Shadow. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12(3), 321-332.
- Wu, Y., Liao, T., Chen, C., & Chen, P. (2018). Power Output Efficiency In Large Wind Farms With Different Hub Heights and Configurations. *Renewable Energy*, 132(Mart 2019), 941-949.



ÖZGEÇMİŞ

Ertuğrul MAZ, ilköğretim ve lise eğitimini Bursa’da tamamladı. 2020 Ocak tarihinde Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği (İngilizce) bölümünden lisans derecesini aldı. Vatani görevini Anıtkabir’de Rehber-Tercüman olarak yaptıktan sonra 2021 Mart tarihinde bir Enerji-petrol şirketinde İşletme Mühendisi olarak görev aldı. Aynı yılın Ağustos ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Makina Mühendisliği ABD’de yüksek lisans eğitimine başladı. 2022 Kasım tarihinde ise bir başka petrol şirketine Operasyon Mühendisi olarak transfer oldu. Halen bu görevi sürdürmekte olan Ertuğrul MAZ, iyi derecede de İngilizce bilmektedir.

