



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORU HATLARINA ENTEGRE EDİLMEK
ÜZERE KÜRESEL HİDROKİNETİK TÜRBİN
TASARIMI VE HAD ANALİZLERİ**

Muhammed Sungur DEMİR

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Kasım-2019
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Sungur DEMİR tarafından hazırlanan “Boru Hatlarına Entegre Edilmek Üzere Küresel Hidrokinetik Türbin Tasarımı ve HAD Analizleri” adlı tez çalışması 08/11/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç Dr. Necati KAYAALP

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah MURATOĞLU

Üye

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK
FBE Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Muhammed Sungur DEMİR

Tarih: 08/11/2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

BORU HATLARINA ENTEGRE EDİLMEK ÜZERE KÜRESEL HİDROKİNETİK TÜRBİN TASARIMI VE HAD ANALİZLERİ

Muhammed Sungur DEMİR

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah MURATOĞLU

2019, 83 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah MURATOĞLU

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK

Doç. Dr. Necati KAYAALP

Teknolojik gelişmeler ile birlikte enerji talebi, son yıllarda hızla artmıştır. Bu doğrultuda, enerji arz-talep dengesinin sağlanabilmesi ve son yüzyılda artan fosil yakıt kullanımı ile oluşan küresel ısınma etkilerinin azaltılması amacı ile bilim insanları temiz, yenilenebilir ve süreklilik arz eden enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşmışlardır. Hidroelektrik enerji kaynakları, tahmin edilebilirlik ve güç yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynakları arasında özel bir konuma sahiptirler. Hidrokinetik türbinler ise, özellikle son yıllarda geliştirilen ve herhangi bir baraj inşası gerektirmeden suyun enerjisini direkt olarak kinetik enerjiye çeviren cihazlardır. Bu çalışmanın temel amacı, boru hatlarındaki fazla basıncın elektrik enerjisine dönüştürülmesi için küresel bir hidrokinetik türbin tasarımıdır.

Tasarım aşamasında türbinin kanat sayısı, kanat profili, kord uzunluğu, soliditesi, uç hız oranı gibi geometrik ve dinamik parametreler göz önünde bulundurularak QBlade programında numerik optimizasyon sağlanmıştır. QBlade analizlerinin ve literatürdeki benzer çalışmaların ışığında, NACA 0020 kanat profiline ve 12 cm kord uzunluğuna sahip, 5 kanatlı küresel hidrokinetik türbin, mevcut çalışmanın nihai geometrisi olarak seçilmiştir. ANSYS CFX programı yardımı ile nihai geometrinin basınçlı boru hattında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılarak akım ortamı görselleştirilmiştir. Son tahlilde, blokaj oranının türbin performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve literatürdeki çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrokinetik, türbin, küresel, QBlade, ANSYS CFX, Boru hatları, blokaj

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

DESIGN AND CFD ANALYSES OF A SPHERICAL HYDROKINETIC TURBINE FOR ENERGY PRODUCTION IN PRESSURIZED WATER TRANSMISSION LINES

Muhammed Sungur DEMİR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
ENGINEERING**

Assist. Prof. Dr. Abdullah MURATOĞLU

2019, 83 Pages

**Jury
Assist. Prof. Dr. Abdullah MURATOĞLU
Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK
Assoc. Prof. Dr. Necati KAYAALP**

Energy demand has increased rapidly in recent years, with the technological developments. In this respect, scientists have focused on clean, renewable and sustainable energy sources in order to achieve a balance of energy supply and demand and to reduce the effects of global warming caused by increasing fossil fuel use. Hydropower sources have a special position among renewable energy sources due to their high predictability and high power potential. Hydrokinetic turbine technology has been developed in the recent years and hydrokinetic turbines do not need the construction of dam directly converging the energy of water to kinetic energy. The main purpose of this study is to design a spherical hydrokinetic turbine for converting excess pressure in gravity flowing water transport and transmission lines to electrical energy.

In the design stage, numerical optimization of QBlade code has been achieved by considering geometric and dynamic parameters such as number of blades, blade profile, chord length, solidity, and tip speed ratio. Based on QBlade analyses and similar studies in the literature, 5-bladed spherical hydrokinetic turbine with NACA 0020 blade profile and 12 cm chord has been specified to be the final geometry of the present study. Computational fluid dynamics analysis of the proposed turbine have been provided by ANSYS CFX software inside on the pressurized water transmission pipeline domain and the fluid flow have been visualized. Finally, the effect of blockage on turbine performance has been analyzed and compared with the results of the previous literature studies.

Keywords: Hydrokinetic, turbine, Spherical, QBlade, ANSYS CFX, Pipelines, Blockage

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca her türlü desteği benden esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Abdullah MURATOĞLU'na ve kıymetli hocam Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmama olan katkılarından dolayı sayın Doç. Dr. Necati KAYAALP hocama, aileme, mesai ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammed Sungur DEMİR
BATMAN-2019

SİMGELER VE KISALTMALAR

A_d	: Disk alanı
α	: Eksenel indiksiyon faktörü
α'	: Aşağı akım bölgesinde indiksiyon faktörü
B	: Blokaj oranı
C_L	: Kaldırma katsayısı
C_D	: Sürüklenme katsayısı
C_M	: Moment katsayısı
C_t	: Teğetsel kuvvet katsayısı
C_n	: Normal kuvvet katsayısı
C_p	: Blokajsız ortamda güç katsayısı
C_p^*	: Blokajlı ortamda güç katsayısı
C_T	: İtme katsayısı
C_Q	: Tork katsayısı
c	: kord uzunluğu
d	: Boru çapı
D	: Türbin çapı
F_N	: Normal kuvvet
F_T	: Teğetsel kuvvet
h	: Kanat uzunluğu
$\dot{m}$	: Momentum
N	: kanat sayısı
N_θ	: Akım tüpü sayısı
P_0	: Serbest akımın basıncı
P_u	: Diskin hemen öncesindeki akımın basıncı
P_d	: Diskin hemen sonrasındaki akımın basıncı
P'	: Diskin hemen öncesi ve sonrası arasındaki basınç farkı
R	: Türbin yarıçapı
T	: İtme kuvveti
T_i	: Anlık itme kuvveti
T_{ort}	: Ortalama itme kuvveti
U_∞	: Serbest akım hızı
U_d	: Disk üzerindeki akım hızı
U_w	: Disk sonrasında akım hızı
U_1	: Diskin hemen önündeki akım hızı
U_2	: Diskin hemen sonrasındaki akım hızı
U_e	: Dengelenmiş hız
Q_i	: Anlık tork
Q_{ort}	: Ortalama tork
W	: Bağlı hız
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
θ	: Azimut açısı
ω	: Açısal hız
λ	: Uç hız oranı
σ	: Solidite

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİL ÇİZELGESİ	x
TABLO ÇİZELGESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİYE GİRİŞ.....	3
2.1. Enerjinin tarihçesi	3
2.2. Enerji Kaynakları.....	4
2.2.1. Yenilenemez enerji kaynakları	4
2.2.2 . Yenilenebilir enerji kaynakları	5
2.2.3. Elektrik enerjisi.....	8
3. HİDROELEKTRİK ENERJİ VE TÜRBİN TEKNOLOJİSİ	9
3.1. Hidrostatik Türbinler	10
3.1.1. Aksiyon tipi türbinler.....	12
3.1.2. Reaksiyon tipi türbinler	13
3.2. Hidrokinetik Türbinler	14
3.2.1. Yatay eksenli hidrokinetik türbinler	15
3.2.2. Dikey eksenli hidrokinetik türbinler	15
3.2.2.1. Darrieus türbinler.....	16
3.2.2.2. Gorlov sarmal türbinler.....	16
3.2.2.3. Lucid küresel türbinler.....	17
3.3. Kanat Kesitleri	17
3.3.1. Kanat kesiti üzerindeki kuvvetler	19
3.3.2. Kanat kesiti türleri	19
3.3.3. Hücüm açısının önemi ve stol durumu	20
4. KAYNAK ARAŞTIRMASI	22
4.1. Kanat Kesiti Araştırması.....	22
4.2. Solidite	23
4.3. Kanat Sayısı	25
4.4. Helik ve Düz Kanatlı Türbinler	26
4.5. Lucid ve Gorlov Türbinleri.....	27

4.6. Blokaj Etkisi	28
5. MATERİYAL VE YÖNTEM.....	31
5.1. QBlade	31
5.2. Tek Tüplü Aktüatör Disk Teorisi.....	31
5.3. Dikey Eksenli Türbinlerin Aerodinamik İncelemesi	35
5.4. Çoklu Akım Tüpü	37
5.5. Çift Aktüatör Disk Teorisi	39
5.6. Çift Çoklu Akım Tüpü Metodu	40
5.7. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve ANSYS.....	42
5.7.1. ANSYS CFX-Fluent çözüm aşamaları	43
6. HAD MODELİNİN OLUŞTURULMASI	47
6.1. Türbin Geometrisi.....	47
6.2. Çözüm Ağı.....	47
6.2.1. Çözüm ağının doğruluğu	47
6.6.2. Analizlerde kullanılan ağ yapısını detaylı incelemesi	48
6.3. Sınır Şartları ve Çözüm Algoritmasının Tanımlanması	50
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
7.1. Türbin Tasarım Aşamaları ve QBlade Sonuçları.....	52
7.1.1. Kanat kesiti seçimi.....	52
7.1.2. Kanat sayısının belirlenmesi.....	54
7.1.3. Solidite ve kord uzunluğu	55
7.2. HAD Sonuçları	56
7.2.1. Hız ve basınç konturlarının oluşturulması	56
7.2.1. Tasarlanan türbin performansının incelenmesi	60
7.3. Blokaj Etkisinin İncelenmesi	61
8. SONUÇ	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	72

ŞEKİL ÇİZELGESİ

Şekil 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması	4
Şekil 2. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları	5
Şekil 3. Yel değirmeni, rüzgar türbini, su değirmeni.....	6
Şekil 4. Türkiye’de yıllara göre rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi.....	7
Şekil 5. Hidrostatik türbinlerin uygulama alanının genel görünümü.....	10
Şekil 6. Hidrostatik Türbinlerin sınıflandırılması.....	12
Şekil 7. Turgo, Pelton ve Francis türbinleri.....	13
Şekil 8. Hidrokinetik türbin çeşitleri	14
Şekil 9. Seagen ve Verdant Power hidrokinetik türbinleri	15
Şekil 10. Darrieus, Gorlov ve Lucid küresel türbini.....	17
Şekil 11. Kanat profili terminolojisi	18
Şekil 12. Kanat kesitinde basınç dağılımı ve kanat üzerindeki kuvvetler	18
Şekil 13. Hücüm açısının kanat profili performansına etkisi.....	20
Şekil 14. Aerodinamik stol durumunun görselleştirilmesi	21
Şekil 15. Farklı blokaj oranındaki sistemlerin karşılaştırılması	29
Şekil 16. Sabit uç hız oranında ve farklı blokajlarda türbin performanslarının karşılaştırılması.....	29
Şekil 17. Blokajlı ve blokajsız ortamlarda akım çizgilerinin şematığı	30
Şekil 18. Blokaj oranına göre türbin performanslarının karşılaştırılması.....	30
Şekil 19. QBlade programının menü çubuğu.....	31
Şekil 20. Aktüatör disk metodu	32
Şekil 21. Dikey eksenli türbinlerin üstten görünümü	35
Şekil 22. Çoklu akım tüpü modeli	37
Şekil 23. Çift aktüatör disk şematığı.....	39
Şekil 24. DMST modeli şematik gösterimi	40
Şekil 25. ANSYS CFX çözüm aşamaları	42
Şekil 26. Dörtüzlü, altıyüzlü ve prizma şeklindeki ağlar.....	43
Şekil 27. Hücrelerde çarpıklığın belirlenmesi	44
Şekil 28. HAD tasarımı geometrisinin genel görünümü ve 1.1, 1.2, 1.3 metre çaplı sistemin ön görünüşü	47
Şekil 29. Geometrinin ağ yapısının farklı kesitlerden görselleştirilmesi.....	49
Şekil 30. Ağ kalitesini gösteren parametrelerin grafikleri	50
Şekil 31. CFX çözüm bölümünün oluşturulması.....	50
Şekil 32. Simetrik ve asimetrik kesitlerin performans karşılaştırması	53
Şekil 33. Kanat kesiti-güç katsayısı grafiği	53
Şekil 34. Kanat sayısının türbin performansına etkisi	54
Şekil 35. Kord uzunluğunun türbin performansına etkisi.....	56
Şekil 36. Farklı serbest akım hızlarında türbin kanatlarına göre oluşan hız vektörleri.....	57
Şekil 37. Farklı akım şartlarında oluşan hız konturlarının görselleştirilmesi	58
Şekil 38. Farklı akım şartlarında oluşan basınç konturlarının görselleştirilmesi....	59
Şekil 39. HAD ve QBlade analizleri ile elde edilen C_P - λ grafiği	60
Şekil 40. hız-güç ve hız- C_P , λ -güç grafiği	61
Şekil 41. Farklı blokaj oranına sahip sistemlerin C_P - λ grafiği.....	62
Şekil 42. Sabit uç hız oranında blokaj etkisinin karşılaştırılması	62

TABLO ÇİZELGESİ

Tablo 2.1. Dünyada genelinde kaynak bazında elektrik üretim oranları (%)	8
Tablo 3.1. Çeşitli bölgelerde hidroelektrik potansiyeller	9
Tablo 4.1. Solidite ve maksimum verim ilişkisi	25
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan GHT ve LKT'nin geometrik özellikleri.....	27
Tablo 6.1. Aynı geometrinin farklı ağ yapılarında analizi.....	48
Tablo 6.2. Akımın ve modelin tasarım parametreleri	51
Tablo 7.1. Nihai türbin parametreleri ve görüntüsü.....	56
Tablo 7.2. Tasarlanan türbinin HAD sonuçları.....	61

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Enerji kelimesi köken olarak iç iş anlamını taşımaktadır. Enerji kelimesinin terim anlamı da literatürde iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır. Sanayi devrimiyle beraber enerjinin önemi giderek artmış ve günümüzde insanlığın en önemli ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir. Teknolojik gelişmelerin katlanarak hızlanması, nüfus artışı gibi nedenlerle enerji talebinin artması ve bu talebin karşılanmasındaki zorluklar, bilim adamlarını ve mühendisleri, enerji kaynakları ve teknolojileri üzerinde daha çok araştırma yapmaya yönlendirmiştir.

Geçtiğimiz yüzyıl boyunca kömür ve petrol gibi fosil yakıtların kullanımının artmasıyla beraber sera gazı salınımında da önemli ölçüde artış görülmüştür. Bu gazların atmosfere olumsuz etkileri ile beraber küresel ısınma gibi insanlığı ve bilim adamlarını endişelendiren problemler ortaya çıkmıştır. Ayrıca fosil yakıtların çok uzak olmayan bir zamanda bitebileceğinin ön görülüyor olması, gelecekteki enerji tedariki kaygısını ortaya çıkarmıştır. Bu gelişmeler ışığında son yıllarda rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir kaynaklar üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır.

Rüzgâr enerjisi teknolojisinde önemli mesafeler kat edilmiş, verimi nispeten yüksek rüzgâr türbinleri tasarlanmıştır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin bu alandaki yatırımları artmış, dikkate değer miktarlarda enerji tedariki sağlanmıştır. Güneş enerjisi teknolojisinin ise ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve büyük güneş panelleri gerektirmesi gibi sebeplerden dolayı emekleme aşamasında olduğu görülmektedir.

Hidroelektrik enerji teknolojisi üzerinde ciddi çalışmalar yapılmış ve önemli mesafeler kat edilmiştir. Özellikle hidrostatik türbin teknolojisinde yüzde 95'e varan verimler elde edilerek, suyun potansiyel enerjisinin büyük bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Bu alanda yapılan yatırımların elektrik üretimi dışında Bölüm 3.1'de de bahsedildiği üzere birçok avantajının bulunmasından dolayı dünya genelinde en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynağı olmasını sağlamıştır. Öte yandan hidroelektrik enerji üretiminde nispeten yeni bir alan olan kinematik yöntemler, henüz teknolojik olgunluğuna erişmemiş olup, bu alanda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Hidrokinetik yöntemlerin statik yöntemlerden temel farkı, akım alanına doğrudan

entegre edilebiliyor olması ve dolayısıyla rezervuar ve baraj inşası gerektirmemesidir. Bu yöntemlerin klasik yöntemlerle detaylı karşılaştırması Bölüm 3.2’de incelenmiştir.

Hidrokinetik yöntemler kullanılarak dalga enerjisinden, gel-git akımlarından, açık kanallardan ve isale hatlarından elektrik enerjisi üretimi amaçlı türbinler tasarlanmış ve bunlardan bazıları uygulanmıştır. Bu tez kapsamında cazibe ile akan, kot farkının yüksek olduğu ve basınç kırıcılara ihtiyaç duyulan iletim hatlarındaki fazla su enerjisinin, elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlamak amacıyla, boru içine entegre edilebilecek küresel hidrokinetik türbin tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk aşamada türbin tasarım ve analiz programı olan QBlade kullanılarak türbinin kanat sayısı, kanat profili tipi, veter uzunluğu ve türbinin soliditesi gibi parametreler optimize edilip en verimli tasarım oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise tasarımı yapılan hidrokinetik türbinin ANSYS CFX programı kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapılmış, QBlade programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmış ve türbin etrafındaki akım alanı görselleştirilmiştir.

Mevcut çalışmanın ikinci bölümünde enerji kaynakları hakkında genel bilgiler verilerek bazı önemli istatistiki bilgiler paylaşılmıştır. Üçüncü bölümde hidroelektrik enerji ve potansiyeli ile ilgili tanımlamalar yapılmış ve türbin teknolojisi incelenmiştir. Yine bu bölümde hidroelektrik enerji üretiminde kullanılan hidrokinetik ve hidrostatik türbinler incelenmiş ve kanat kesiti terminolojisi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde dikey eksenli türbinler ile ilgili detaylı bir şekilde kaynak araştırması yapılmıştır. Bu bölümde türbin tasarımında önemli parametreler olan kanat kesiti, solidite, kanat sayısı, blokaj oranı gibi parametreler araştırılmış ve yapılan çalışmalar karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde mevcut tez kapsamında kullanılan QBlade ve ANSYS CFX programları tanıtılmış ve türbin performans analizlerinin teorik alt yapısı incelenmiştir. Altıncı bölümde HAD analizlerinde kullanılan geometri, ağ yapısı ve sınır şartları tanıtılmıştır. Ayrıca kullanılan ağ yapısının kalitesi ve doğruluğu detaylı olarak incelenmiştir. Yedinci bölümün ilk kısmında QBlade programı ile yapılan analizler sonucunda 1 m çaplı küresel türbinin kanat profili, kanat sayısı, kanatların kord uzunlukları belirlenmiş ve alınan sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. İkinci kısmında nihai geometrinin HAD sonuçları verilmiş ve akım durumu görselleştirilmiştir. Yedinci bölümün son kısmında HAD analizleri ile blokaj etkisinin, tasarlanan türbin üzerindeki etkisi incelenmiş, grafiklerle açıklanmıştır. Sekizinci bölümde çalışma kısaca özetlenerek temel bulgular verilmiş ve çalışmanın nerelerde kullanılacağı ifade edilmiştir.

BÖLÜM 2

ENERJİYE GİRİŞ

2.1. Enerjinin tarihçesi

Enerji hem insan hayatının devamı hem de kolaylaştırması açısından vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Tarih öncesi zamanlarda sadece barınma ve ısınma için kullanılan enerji günümüzde yaşamımızın her alanında ve yaptığımız her işte ihtiyaç haline gelmiştir.

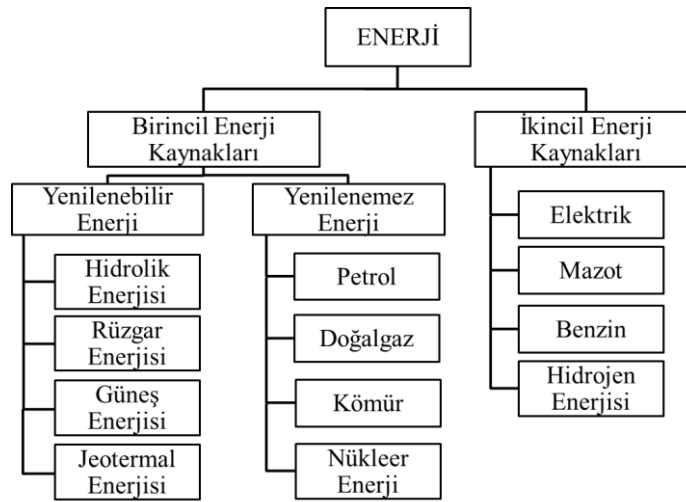
İnsanlık tarihinde, ateşin bulunması ile ilk olarak enerji ihtiyacı odun ile karşılanmaktaydı. Medeniyetlerin oluşması ve yerleşik hayata geçilmesi ile enerji ihtiyacı artmaya başladı ve o dönemin insanını farklı enerji kaynakları arayışına itti. Bu sebeple su gücü ve rüzgâr gücü, enerji ihtiyacının temininde alternatif kaynak olarak kullanılmaya başlandı. Medeniyetlerin gelişmesi ve ihtiyaçtan doğan arayışların artmasıyla fosil kaynaklar (kömür, linyit, petrol vb.) bulundu. Son olarak da nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi yeni ve modern enerji kaynakları kullanılmaya başlandı. (Yılmaz, 2015)

Enerji tarihinin dönüm noktalarından biri 17. yüzyılın sonlarına doğru bulunan buhar makinesi olmuştur. Aynı zamanlarda İngiltere’de zengin kömür yatakları keşfedilmiş ve demir-çelik endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır (Fernihough ve Rourke, 2014). Bu gelişmeler insanlık tarihinde yeni bir çağın başlangıcı olan sanayi devrimine yol açmıştır. Sanayi devrimiyle üretim ve teknolojik gelişmeler katlanarak ivmelenmiş ve enerji ihtiyacı insanlık için uğruna savaşlar açılacak kadar önemli hale gelmiştir. Nitekim 1861 yılında Amerika’nın Pensilvanya eyaletinde açılan ilk petrol kuyusu ile birlikte 20. ve 21. yüzyılda büyük enerji savaşları yaşanmış ve bu durum milyonlarca insanın ölmesi ile sonuçlanmıştır. Günümüzde de enerji, dünya siyasetine yön veren ve ülkeler arası ilişkilerde en önemli bir kavram haline gelmiştir (Gürsoy, 2011 ; Karadağ, 2009).

Bu gelişmeler ışığında son yıllarda bilim insanları çevreci ve sürdürülebilir olmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu kapsamda büyük ölçekli rüzgâr türbinleri, hidroelektrik türbinler, güneş enerjisi panelleri gibi birçok alanda enerji üretimi sağlanmıştır.

2.2. Enerji Kaynakları

Enerji kaynakları genellikle birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak iki alt kategoride incelenmektedir (Şekil 1). Doğada var olduğu şekilde kullanılabilen kaynaklara birincil enerji kaynakları denir. Bu kaynaklar yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere iki ana başlıktan oluşur (Yılmaz, 2012).



Şekil 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması

2.2.1. Yenilenemez enerji kaynakları

Enerji üretiminde, kullanıldıkça tükenen ve çok uzun yıllar boyunca kendini tamamlayamayan enerji kaynaklarına yenilenemez enerji kaynakları denir. Dünya üzerinde tüketilen enerjinin yaklaşık yüzde 86'lık kısmı fosil yakıtlar ve yüzde 4'lük kısmı da nükleer kaynaklar olmak üzere toplamda yüzde 90'lık kısmı yenilenemez enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır. (BP, 2018). Petrol, doğal gaz, kömür ve nükleer enerji ise yenilenemez enerji kaynaklarını oluşturmaktadır.

Bu kaynaklardan petrol, ilk olarak M.Ö 3000'li yıllarda Mezopotamyalılar tarafından keşfedilmiştir. Petrol eski çağlarda mumyalama işlemlerinde, gemi kalafatlanması gibi basit şekillerde kullanılmıştır (İsmayılov, 2006). Günümüzde ise daha çok enerji kaynağı olarak ulaşımda, sanayide, konutlarda vb. birçok alanda kullanılmaktadır. 2018 yılı verilerine göre dünya genelinde 1730 milyar varillik ispatlanmış petrol rezervi bulunmaktadır (BP, 2018).

Diğer bir yenilenemez enerji kaynağı olan kömür, daha çok ısınma ve elektrik üretimi amacıyla kullanılan; karbon, hidrojen, azot, kükürt ve oksijenden oluşan fosil enerji kaynağıdır (Cleveland ve Morris, 2006). Bölüm 2.1'de de bahsedildiği üzere

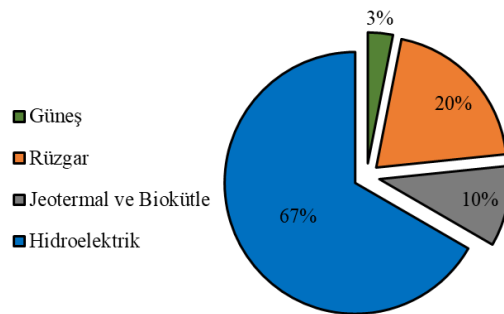
kömür madenleri 18. yüzyılda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde doğalgaz kullanımının yaygınlaşması ile konutlarda kullanımı azalan kömürün, elektrik üretiminde ise önemi devam etmektedir. Dünya genelinde toplam elektrik üretiminin yaklaşık %38'lik kısmı kömürden karşılanmaktadır (BP, 2018 ; Özmen, 2018) .

Nükleer enerji ise radyoaktif elementlerin atom çekirdeklerinin parçalanması (fısyon) veya birleştirilmesi (füzyon) ile açığa çıkan enerji olarak tanımlanmaktadır. Nükleer enerji ilk olarak 1945 yılında atom bombası olarak kullanılmıştır. Daha sonra 1951 yılında ilk nükleer enerji santrali kurulmuş ve elektrik üretimi başlamıştır (Erdöşemeci, 2014). 2018 yılı verilerine göre Dünya genelinde nükleer santrallerden yıllık 2635 TWh'lik enerji üretilmiştir. Bu da yıllık toplam elektrik üretiminin yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir (BP, 2018).

2.2.2.Yenilenebilir enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji, kısa sürede kendini yenileyebilen, doğrudan veya dolaylı olarak güneş enerjisinden ya da doğal işlemlerden elde edilen enerji olarak tanımlanmaktadır (Cleveland ve Morris, 2006). Eski çağlarda yenilenebilir kaynaklardan olan rüzgâr gücü ve su gücü, temel ihtiyaçları karşılamak üzere enerji kaynağı olarak kullanılmaktaydı. Günümüzde ise bu kaynaklar bilimsel ve teknik gelişmelerin ışığında daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmaktadır

Ülkemiz ve Dünya geneline bakıldığında en çok kullanılan enerji kaynağı olan fosil yakıtların, zamanla tükenmesi, ayrıca karbondioksit salınımların yüksek olması sebebiyle küresel ısınma gibi birçok çevresel zararları olmasından dolayı insanlığı tükenmeyen ve çevreci enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji başlıca hidrolik, rüzgâr, jeotermal, güneş, dalga ve biokütle kaynaklarından oluşmaktadır. Ülkemizde en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları (BP, 2018)

Suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin toplamına hidrolik enerji denir. Su enerjisi, eski çağlardan günümüze kadar pek çok kullanım alanı olan bir enerji kaynağıdır. Eski dönemlerde özellikle değirmenlerde buğday arpa gibi tahılları öğütmede kullanılan hidrolik enerji (Şekil 3c), günümüzde daha çok hidroelektrik enerjisi olarak kullanılmaktadır. Bölüm 3'te hidroelektrik enerji detaylı olarak incelenmiştir.

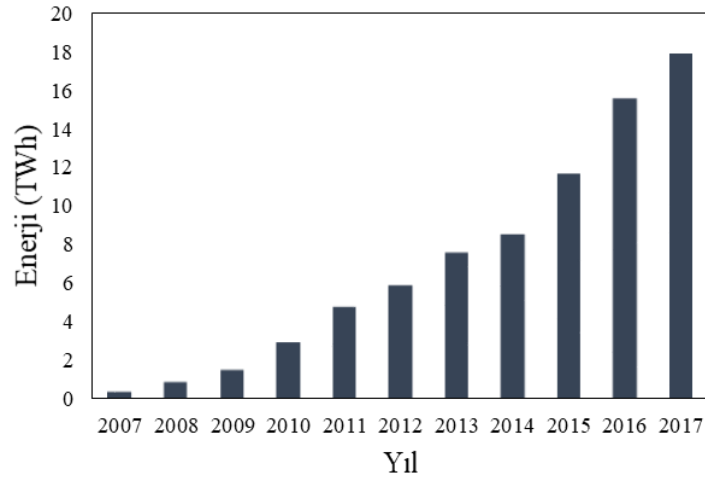
Diğer bir yenilenebilir enerji kaynağı ise rüzgâr enerjisidir. Güneş ışınlarının, homojen olmayan yeryüzünde farklı yansımaları sonucu, atmosferde konuma bağlı olarak sıcaklık ve basınç farkları oluşmaktadır. Bu farklılıklar sonucunda atmosferdeki hava kütlelerinin yer değiştirmesi ile rüzgârlar meydana gelmektedir. Belirli koşulları sağlayan rüzgârların da kinetik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Freris ve Infield, 2008). Rüzgâr enerjisi ilk çağlardan beri yel değirmenlerinde, gemilerde ve su pompalama amaçlı kullanılmıştır. Elektrik üretme amaçlı rüzgâr türbinleri ise 1890 yıllarında Poul la Cour öncülüğünde geliştirilmiştir (Hau, 2005 ; Yılmaz, 2012 ; Erdoğan, 2014). Şekil 3a ve 3b'de tahıl öğütmek amacıyla kullanılan yel değirmeni ile elektrik üretimi amaçlı kullanılan rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 3. Yel değirmeni (a) (Yetim Gürsoy, 2012), rüzgâr türbini (b) (Halbes, 2019), (c) Su değirmeni (Öztürk, 2017)

Rüzgâr enerjisinin santral kurulum maliyetinin yüksek olması, enerji üretiminde sürekliliğin sağlanamaması, fosil yakıtlarla üretilen elektrik enerjisine göre kapasitesinin düşük olması gibi dezavantajları bulunmasına rağmen karbon salınımının olmaması, işletme maliyetinin düşük olması, ham maddeye ihtiyaç duyulmaması gibi avantajlarından dolayı rüzgâr enerjisine olan yatırımlar Dünya'da ve ülkemizde yukarı yönlü bir ivmelenme göstermiştir (ETKB, 2018). Özellikle 2007-2017 yılları arasında

Dünya genelinde rüzgâr enerjisi ile elektrik üretiminin yaklaşık 7 kat arttığı, ülkemizde ise yaklaşık 45 kat arttığı görülmektedir (Şekil 4) (BP, 2018).



Şekil 4. Türkiye’de yıllara göre rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi

Güneş enerjisi ise Güneş’in çekirdeğinde bulunan hidrojen gazlarının helyum gazına dönüşmesi (füzyon tepkimesi) ile açığa çıkmaktadır. Bu enerjinin de bir kısmı yeryüzüne radyoaktif ışıma yoluyla gelmektedir (Gaur, 2008). Geçtiğimiz yüzyılda yapılan çalışmalar sonucunda da bu enerji fotovoltaiik ve yoğunlaştırıcı sistemler yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülebilmıştır. Yoğunlaştırıcı yöntemde, sistem içerisindeki sıvı, güneş enerjisi yardımıyla ısıtılıp kızgın buhar elde edilmesi yoluyla elektrik üretilmektedir. Fotovoltaiik sistemlerde ise paneller üzerinde bulunan yarı iletken maddeden oluşan hücrelere ışık düşürülmesi ile doğrudan elektrik üretilmektedir (Schlager ve Weisblatt, 2006). Teknolojik gelişmeler bu sistemlerin maliyetlerinin nispeten azalması ve verimlerinin artması sureti ile yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemini artırmıştır (Girgin, 2011; Gülay, 2008).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında diğer bir önemli kaynak jeotermal enerji olup yer ısısı anlamına gelmektedir. Dünya’nın var oluşundan beri yer kabuğunun iç kısımlarında bulunan bu yüksek ısı, geçmiş yüzyıllarda direk ısınma amaçlı olarak kullanılmış olup, günümüzde jeotermal enerji ile sıcak buhar elde edilerek elektrik enerjisi üretilmektedir (Dell ve Rand, 2004).

Şekil 1’de verilen ikincil enerji kaynakları, birincil enerjinin farklı işlemler sonucunda dönüştürülmesi ile oluşmaktadır. Petrolden benzin elde edilmesi veya hidrolik enerjiden elektrik enerjisi elde edilmesi ikincil enerji oluşumuna örnek olarak verilebilir. Başlıca ikincil enerji kaynakları ise elektrik, hidrojen enerjisi, mazot, fuel

oil, benzin, motorin, LPG vb. olarak gösterilebilir. Bu kaynaklardan sadece tez çalışması ile ilgili olan elektrik enerjisi ele alınmıştır.

2.2.3. Elektrik enerjisi

Elektrik enerjisi depolanmasında güçlükler yaşanmasına rağmen veriminin yüksek olması ve kısmen çevreci olması sebepleriyle günümüz sanayisinde ve günlük hayatta en çok kullanılan enerji türüdür. Elektrik enerjisi 1800’lü yılların sonlarında yaygınlaşmaya başlamış ve ampulün bulunması ile de insanlık tarihinin sınıf atlamasını sağlamıştır.

Elektrik enerjisinin üretiminde Tablo 1’de de verildiği üzere kömür, doğal gaz, petrol, nükleer kaynaklar, yenilenebilir kaynaklar vb. kullanılmaktadır.

Tablo 2.1. Dünya genelinde kaynak bazında elektrik üretim oranları (%) (BP, 2018)

	Petrol	Doğal gaz	Kömür	Nükleer Enerji	Yenilenebilir Enerji	Diğer	Toplam
Türkiye	0.7	36.7	32.9	0.0	29.8	0.0	100
ABD	0.5	32.0	30.7	19.8	16.7	0.3	100
Almanya	0.9	13.1	37.0	11.6	33.3	4.1	100
Rusya	1.7	48.4	14.0	18.6	16.9	0.4	100
Çin	0.2	3.0	67.1	3.8	25.1	0.7	100
Dünya	3.5	23.2	38.1	10.3	24.3	0.7	100

2018 yılı verilerine göre, gelişmiş ülkelerde kaynak bazında elektrik üretimi değişkenlik göstermekle beraber, dünya genelinde elektrik üretimin büyük çoğunluğu kömür ile termik santrallerden sağlanmaktadır. Elektrik üretiminde en büyük ikinci payı ise yenilenebilir kaynaklar almaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve bilimsel çalışmaların daha da artması ile beraber yenilenebilir kaynakların elektrik üretiminde payının daha da artacağı düşünülmektedir (Tablo 2.1).

Dünya genelinde yenilenebilir kaynakların elektrik enerjisi üretimindeki payına kıyasla daha yüksek olarak, ülkemizde üretilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık yüzde 30’luk kısmı yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır (Tablo 2.1). Bununla beraber ülkemizde elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir kaynaklar içerisinde yaklaşık yüzde 67’lik oranla hidrolik enerjisi en büyük paya sahiptir (BP, 2018).

BÖLÜM 3.

HİDROELEKTRİK ENERJİ ve TÜRBİN TEKNOLOJİSİ

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin mekanik elemanlar yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile oluşmaktadır. Su enerjisini çevreci ve yenilenebilir olmasının yanı sıra daha sonra bahsedilecek olan bir takım avantajlarından dolayı bu enerji, ülkemiz ve Dünya genelinde en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynağı çeşididir. Özellikle ülkemizin enerjide dışa bağımlı olması ve hidroelektrik potansiyelinin bölge ülkelerine nazaran daha yüksek olması sebebiyle, bu yenilenebilir enerji kaynağı ülkemizde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Yukarda belirtilen hidroelektrik enerji potansiyeli, bir bölgenin veya havzanın su varlığından elektrik üretebilme kapasitesini ifade etmektedir. Bu enerji potansiyeli; brüt, teknik ve ekonomik potansiyel olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bir havzadaki akışın mevcut durumdaki enerjisinin, herhangi bir kayıp olmaksızın %100 verimle elektrik enerjisine dönüştürüldüğü varsayılarak hesaplanan enerji potansiyeli, brüt hidroelektrik potansiyel olarak ifade edilmektedir. Havzada ve mekanik elemanlarda oluşacak kayıplar göz önüne alınarak, günümüz teknolojisiyle teknik açıdan elde edilebilecek elektrik enerjisi de teknik hidroelektrik potansiyel olarak adlandırılmaktadır (TMMOB, 2018). Ekonomik hidroelektrik potansiyel ise teknik potansiyelin kâr getirebilir kısmını temsil etmektedir. Tablo 3.1’de Türkiye ve Dünya genelinde Hidroelektrik potansiyeller verilmiştir. Burada Türkiye’nin toplam ekonomik potansiyelinin tüm Avrupa’nın potansiyelinin %20 kadarını oluşturduğu görülmektedir.

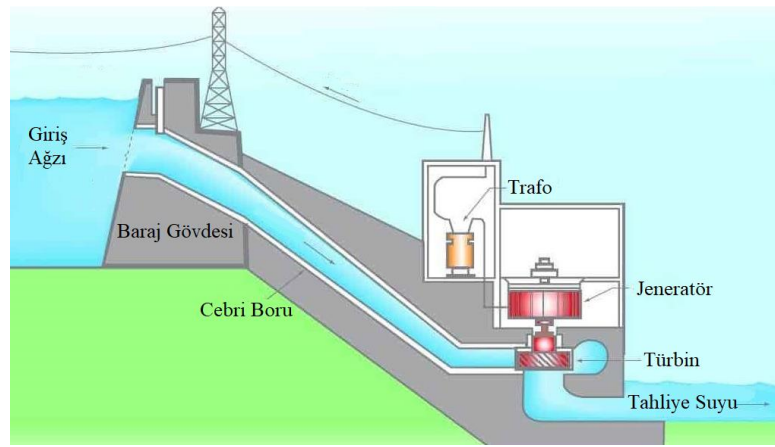
Tablo 3.1. Çeşitli bölgelerde hidroelektrik potansiyeller (TWh/yıl) (Bozkurt ve Tür, 2015; DEKTMK, 2007)

Bölge	Brüt Potansiyel	Teknik Potansiyel	Ekonomik Potansiyel
Afrika	4000	1665	1000
Asya	19000	6800	3600
Avustralya	600	270	105
Avrupa	3150	1225	800
K. Amerika	6000	1500	1100
G. Amerika	7400	2600	2300
Dünya	40150	14060	8905
Türkiye	433	216	160
Türkiye/Dünya %	1.05	1.54	1.80

Hidroelektrik enerji, bölgenin coğrafi özelliklerine ve akımın durumuna göre, hidrostatik ve hidrokinetik yöntemler olmak üzere iki farklı şekilde elde edilmektedir.

3.1. Hidrostatik Türbinler

Suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye çevrilip, daha sonra elektrik enerjisine çevrildiği yapılarda kullanılan türbinlere hidrostatik türbin denir (Şekil 5). Bu tip türbinlerde elektrik üretimi, enerjinin potansiyel enerji olarak depolanmasından dolayı sürekli. Fakat depolama tesisi inşaatı gerektirdiğinden dolayı her yerde uygulanamazlar.



Şekil 5. Hidrostatik türbinlerin uygulama alanının genel görünümü (Mallı, 2017)

Hidrostatik sistemlerin temel kullanım alanı olan barajlar, inşa edildiği bölgeye ve ülkeye aşağıda belirtildiği gibi ciddi etkileri olan ve detaylı planlama gerektiren, stratejik öneme sahip yapılardır. Bu yapıların, hidrokinetik potansiyeli yeterli olan ve kurulum maliyetini kısa sürede çıkartabilecek nehir yataklarına kurulması gerekmektedir. Ayrıca hidroelektrik enerji santrallerinin (HES) inşa edileceği bölgeye çevresel, ekonomik, ekolojik ve sosyal etkileri ile birlikte bölgenin coğrafi yapısı detaylı incelenmelidir. Yapılan saha çalışmalarının ardından bölgeye ve ülkeye sağlayacağı avantaj ve dezavantajlar analiz edilerek uygulamaya konmalıdır.

Genel olarak barajların ve hidroelektrik enerji santrallerinin başlıca avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Yılmaz, 2015);

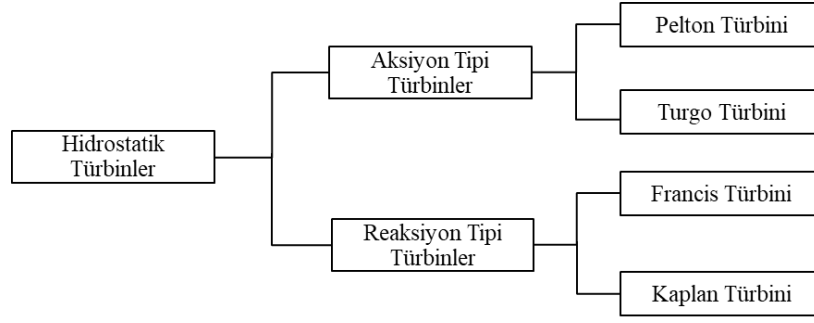
- Büyük miktarda elektrik üretim kapasitesine sahip olmaları
- İhtiyaç durumlarında enerji arz-talebini dengeleyici nitelikte olma
- Yenilenebilir enerji kaynağı olmaları ve karbon emisyonlarının olmaması

- İçme suyu ve sulama tedarikini sürdürülebilir bir şekilde karşılamaları
- Su ürünleri yetiştiriciliğine ve balıkçılığa olanak sağlamaları
- Taşkın kontrolünü sağlamaları
- İşletme ömürlerinin uzun olması ve bakım maliyetlerinin düşük olması
- Enerjide dışa bağıllığı azaltmaları

Bunların dışında mesire alanı olarak kullanılabilmeleri, su sporlarına ve turizme olanak sağlamaları ve akarsuların sebep olduğu erozyona engel olmaları gibi birçok avantajları bulunmaktadır.

Barajların yukarda belirtilen avantajlarına karşın önemli dezavantajları da vardır. Barajlar bölgenin yağış rejimi, sıcaklık ortalaması, nem miktarı gibi iklim koşullarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Baraj göleti alanı içerisinde bulunan karasal canlıların göç etmesine sebep olabilir. Ayrıca nehir yataklarının doğal akış rotasını değiştirebilir ve su kalitesinin düşmesine sebep olabilir. Bu durum bölgedeki canlı yaşamını olumsuz etkileyebilmektedir (Berkün ve ark. 2008). Baraj yapıları aynı zamanda besin yönünden zengin tortulların denize ulaşmalarını engellemekte ve deltaların erimesine sebep olmaktadır (WWF, 2013). Bunlarla birlikte bölgedeki nüfusu, yerleşim yerlerini, tarihi ve kültürel mirası ve bölge ekonomisini olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Baraj sularının toplanacağı alanda bulunan yerleşim yerleri taşınmak zorunda kalacak ve nehir yatağındaki verimli tarım arazileri gölet altında kalacaktır (Gezer, 2017). Bu durum bölgenin sosyolojik durumunu değiştireceği gibi ekonomik yükte oluşturacaktır. Ayrıca Ilısu barajı rezervuar alanında bulunan Hasankeyf örneğinde olduğu gibi tarihi, kültürel ve manevi mirasın kaybolmasına da sebep olabilmektedir. Son olarak, uzun vadede ekonomik getirilerinin yüksek olmasına karşın ilk yatırım maliyetleri yüksektir.

Yukarıda avantaj ve dezavantajları bahsedilen barajların en büyük ekonomik getirilerinden biri elektrik enerjisi olmaktadır. Bu enerji ise baraj gövdesine yerleştirilen hidrostatik türbinler ile elde edilmektedir. Barajlarda kullanılan bu türbinler suyun etki şekline göre aksiyon (etki) tipi ve reaksiyon (tepki) tipi türbinler olmak üzere ikiye ayrılırlar (Çengel ve Cimbala, 2012) (Şekil 6). Bunların çalışma prensiplerinin detayları Bölüm 3.1.1 ve 3.1.2’de verilmiştir.



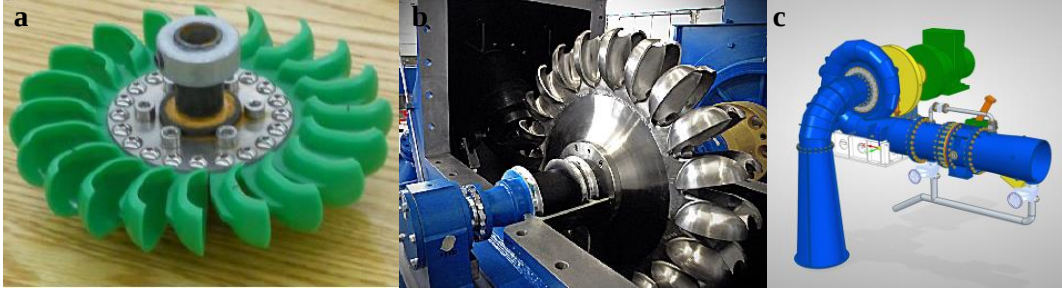
Şekil 6. Hidrostatik Türbinlerin sınıflandırılması

3.1.1. Aksiyon tipi türbinler

Aksiyon tipi türbinler, akımın lüle yardımıyla yüksek hızlı su jeti haline getirilerek, türbin kanatlarına çaptırılması prensibine dayanır. Bu tip türbinlerde akım, jet etkisinden dolayı kanatlara atmosfer basıncında etki eder (Çengel ve Cimbala, 2012). Uygulamada kullanılacak olan aksiyon tipi türbinin seçiminde su düşüşüne ve debiye göre karar verilmektedir. Aksiyon tipi türbinlere Pelton ve Turgo türbinleri örnek olarak gösterilebilir.

Pelton türbinlerinde akım, kinetik enerjiyi artırmak için çıkış kısmına doğru daralan bir borudan geçirilir ve su jeti oluşturulur. Su jeti pelton türbinine yatay bir biçimde çaptırılarak, suyun kinetik enerjisinin türbinde mekanik enerjiye dönüştürülmesi sağlanır. Bu dönüşümde maksimum verim alınabilmesi için, su jetinin türbinin kepçelerine akımda düzensizlik oluşturmada, sürekli pozitif moment oluşturacak şekilde çarpması gerekmektedir. Bunun için kepçelerin dış tarafa bakan kısımları, su jetinin bir kepçeye çarparken aynı zamanda konumunu tam almamış bir önceki kepçeye çarpmasını önlemek amacıyla kesilir (Şekil 7b). Bu şekilde sistemden maksimum moment elde edilmiş olur. Ayrıca sistem birden fazla su jeti ile de çalıştırılabilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2012 ; Bulut, 2013).

Pelton türbinleri çoğunlukla yüksek düşü ve küçük debilerde tercih edilmekte olup verimleri yüzde 90'a ulaşabilmektedir.



Şekil 7. (a)Turgo, (b) Pelton (Datuopinion, 2011) ve (c) Francis Türbin (Pentaflo, 2009)

Turgo türbinleri büyük oranda pelton türbinlerine benzemelerine karşın kepçe geometrileri farklılık göstermektedir. Turgo türbininde su jeti, pelton türbinindekinden farklı olarak tek parça halinde türbin kepçelerinden ayrılmaktadır (Şekil 7a) (Bulut, 2013). Turgo türbini teknik olarak pelton türbininde ayıran en büyük fark ise Turgo türbini daha yüksek debilerde çalışabilmekte ve Peltona göre düşük düşülerde daha iyi verimle uygulanabilmektedir. Bu sebeple daha geniş bir coğrafyada kullanılabilirliği mümkündür (Cobb ve Sharp, 2013).

3.1.2. Reaksiyon tipi türbinler

Reaksiyon tipi türbinlerde su, boru içerisinde ayrılmadan yüksek basınçta türbin sistemine aktarılır. Akım türbin kanatlarından geçerken yüksek basıncı kaybeder ve türbin çarkının dönmesini sağlar. Bu tip türbinlerin gövdesi tamamen su ile dolu olmasından dolayı aksiyon tipi türbinlere göre verimleri daha yüksektir. Yaygın olarak Francis ve Kaplan türbini olmak üzere iki çeşit reaksiyon türbini kullanılmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2012).

Ülkemizde ve Dünya’da hidroelektrik santrallerde en çok kullanılan türbin çeşidi Francis türbinidir. Veriminin yüksek olması ve geniş düşü aralıklarında çalışabilmesi, bu türbini tercih sebebi yapmaktadır (Sarıbuğa, 2012).

Francis türbinler, Şekil 7c’de görüldüğü üzere 5 kısımdan oluşmaktadır. Rezervuardan gelen akım, salyangoz diye adlandırılan kısımdan geçerken sabit kanatlar ve ayarlı kanatlar vasıtasıyla, türbin çarkının kanatlarına çarptırılır. Yüksek hızlı bu akımın enerjisi, momentumun korunumu prensibine göre türbin çarkına mekanik enerji olarak geçer. Ayrıca akım, atmosfere kapalı bir şekilde salyangozdan geçtiğinden dolayı akımın hız yüküne ilave olarak basınç yükü de bulunmaktadır. Akımdaki bu basınç yükü de yine türbin çarkına enerji olarak geçmektedir (Çetintürk, 2016).

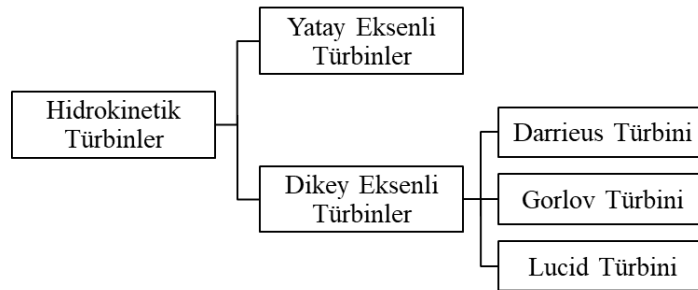
Francis türbinindeki salyangoz, akımın türbin kanatlarına sabit bir hızda girmesini sağlayacak şekilde giderek daralan bir yapıdan oluşmaktadır. Sabit kanatlar, salyangozun basınç yüklerine karşı dayanımını sağlamak, ayar kanatları da akımı uygun şekilde çarka iletmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Türbin girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkını artırmak ve suyu tahliye etmek amacıyla genişliği giderek artacak şekilde tasarlanan emme borusu ise Francis türbininin son kısmını oluşturmaktadır (Keçel, 2013; Elifkalfa Köksal, 2017).

3.2. Hidrokinetik Türbinler

Serbest akan suyun kinetik enerjisini, doğrudan elektrik enerjisine çevirmeye yarayan elektromekanik dönüştürücülere hidrokinetik türbin denir. Hidrokinetik türbinler nehir, akarsu, kanal vb. akımın olduğu sistemlere doğrudan entegre edilerek elektrik enerjisi üretilir. Bu yüzden hidrostatik türbinlerden farklı olarak baraj inşaatı gerektirmezler (Muratoğlu ve Yüce, 2015a).

Açık kanallarda veya nehirlerde kullanılan hidrokinetik türbinlerde kanatların hidrodinamik verimi % 59.3'ü geçmemektedir. Uygulamada, genellikle türbin verimi 0.3-0.5 arasında olmaktadır. Hidrokinetik türbin verimlerinin, güç katsayısı 0.90-0.95 civarında olan hidrostatik türbinlerle kıyaslandığında düşük kaldığı görülmektedir. Buna rağmen hidrokinetik türbinler elektrifikasyonun sağlanamadığı, rezervuar veya baraj inşaatının yapımına müsait olunmadığı küçük yerleşim yerlerinin elektrik ihtiyacını karşılamada pratik ve uygun çözümdür.

Hidrokinetik türbinler akım yönüne ve rotor konumuna bağlı olarak yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olarak ikiye ayrılır (Şekil 8).

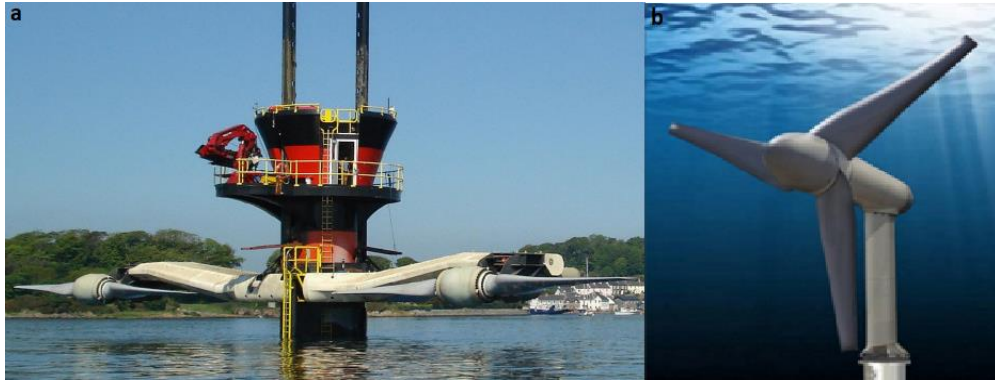


Şekil 8. Hidrokinetik türbin çeşitleri

3.2.1. Yatay Eksenli hidrokinetik türbinler

Akımın yönü ile rotor çapının birbirine dik olduğu türbinlere yatay eksenli türbinler denir. Yatay eksenli türbinler sadece akımın rotora karşıdan geldiği durumlarda faaliyet gösterebilirler. Bu türbinlerin verimleri 0.40-0.45 civarındadır. (Nurbay ve Çınar, 2005). Yatay eksenli hidrokinetik türbin tasarımı üzerine birçok çalışmalar yapılmış olup Seagen, Verdant Power gibi birçok şirket tarafından sahada uygulanmıştır.

Seagen türbini (Şekil 9a) 18 m kanat çapında, 2.4 m/s tasarım hızı ile 1200 KW güç kapasitesine sahip olarak projelendirilmiştir. Verdant Power türbini (Şekil 9b) ise 5 m kanat çapında, 35.9 KW güç kapasitesine ulaşacak şekilde tasarlanmıştır (Muratoğlu, 2011).



Şekil 9. (a) Seagen (Nastu, 2010) ve (b) Verdant Power hidrokinetik türbinleri (Sinclair, 2014)

Yatay eksenli türbinlerin tasarımında en çok karşılaşılan problem stol durumudur. Çünkü türbin kanatlarının rotor eksenine yakın kısmı, devir sırasında nispeten küçük bir yörüngeye sahipken dış kısımları daha büyük bir yörünge etrafında dönmektedirler. Bu durumda rotor ekseninden itibaren kanat boyunca, açısız hız artmakta, dolayısıyla hücum açısı da artmaktadır. Kanat uçlarında oluşacak büyük hücum açılarını ve stol durumunu önlemek amacıyla genellikle kanatlara burulma açısı (twist) verilmektedir.

3.2.2. Dikey eksenli hidrokinetik türbinler

Dikey eksenli türbinler akım yönü ile rotor çapının paralel olduğu türbinler olarak tanımlanmaktadır. Akım yönüne paralel bir dönüş mekanizmasıyla

çalışmasından dolayı bu türbinler yatay eksenli türbinlerin aksine akımı her yönden alabilmektedirler. Bu türbinlerin verimi yaklaşık 0.3-0.4 civarındadır. Fakat gerek stabilite açısından gerek maliyet açısından tercih sebebi olmaktadır.

Dikey eksenli türbinlerin yatay eksenlilere göre bir dizi avantaj ve dezavantajları vardır. Bunlar (Nurbay ve Çınar, 2005);

- Verimleri nispeten düşüktür.
- Düşük akış hızlarında daha iyi performans gösterirler.
- Daha az titreşim ve gürültü oluştururlar.
- Bakım onarım maliyetleri düşüktür.
- Akışı her yönden alabilir.
- Stabiliteleri yüksektir.

3.2.2.1. Darrieus türbinleri

Darrieus türbini, adını aldığı Fransız mühendis Georges Darrieus tarafından rüzgâr türbini olarak 1925 yılında tasarlanmıştır. Nispeten basit tasarıma sahip olması, şanzıman ve jeneratörün zemine yerleştirilebilmesi, rüzgârı her yönden alabilmesi nedeniyle eğim (yaw) mekanizmasına ihtiyaç duymaması başlıca avantajlarını oluşturmaktadır. Tork dalgalanmaları, kendi kendine başlama problemi ve nispeten düşük güç çıkışı ise başlıca dezavantajlarını oluşturmaktadır (Mohamed, 2012).

Tipik bir dikey eksenli Darrieus türbini Şekil 10a'da gösterilmiştir. Bu türbinlerin çalışma mekanizmaları ve aerodinamiği Bölüm 5'te anlatılmıştır.

3.2.2.2. Gorlov sarmal türbinler

İlk sarmal türbin, Alexander Gorlov tarafından 1925 yılında Darrieus türbinlerinin titreşim problemlerini çözmek amacı ile geliştirilmiştir. Sarmal türbinler, dikey eksenli türbinlerin kanatlarının kendi eksenleri etrafında döndürülmesi sonucu helik bir yapı kazandırılması ile oluşturulmuşlardır (Şekil 10b). Bu türbinler kullanım yerlerine göre yatay veya dikey şekilde konumlandırılabilirler (Muratoğlu, 2011).

Darrieus türbinlerinin kanatları, devir sırasında azimut açıları değiştiğinde farklı hücum açlarına maruz kalmalarından dolayı, bu türbinlerin kanatlarında tork salınımları oluşmaktadır. Gorlov türbinlerinde ise sarmallık sayesinde kanatlar tek bir konumdayken, aynı kanat üzerinde farklı hücum açlarının oluşması sağlanarak, devir sırasında tork dalgalanmalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu sayede

kendi kendine başlama probleminin de üstesinden gelinmiştir. Bunlara karşın kanatlardaki sarmallık, kanatlar üzerindeki kuvvet dağılımının varyansını artırarak, kanatlarda ekstra moment oluşmasına dolayısıyla stabilite problemlerine sebep olmaktadır.



Şekil 10.(a) Darrieus türbini (Wu ve ark., 2014), (b) Gorlov sarmal türbin (Swik, 2019), (c) Lucid Küresel Türbini (Hopman, 2017)

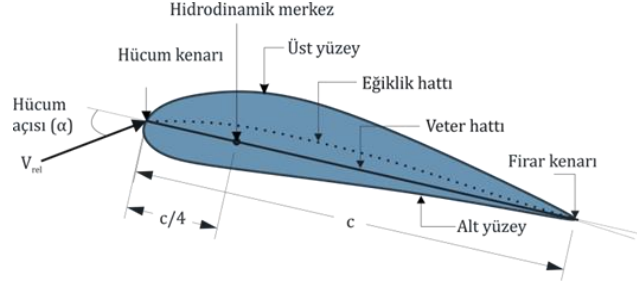
3.2.2.3. Lucid küresel türbinleri

Lucid küresel türbinleri, cazibe ile akan isale hatlarına yerleştirilmek suretiyle fazla basıncın elektrik enerjisine çevrilmesi amacıyla geliştirilmiştir (Şekil 10c). Bu sistemler 60, 105 ve 150 cm çapında olmak üzere üç farklı tasarımdan oluşmaktadır. Çevreye zarar vermemesi, 7/24 öngörülebilir ve yenilenebilir enerji üretmesi, bölgenin tarihi dokusuna zarar vermemesi bu sistemin başlıca avantajlarını oluşturmaktadır. Bu sistem ilk olarak 2012 yılında ABD'nin Riverside kentinde 150 cm çaplı isale hattında 105 cm'lik türbin kullanarak uygulanmıştır. Bu sistemde bir tane Lucid küresel türbin kullanılmış ve yıllık yaklaşık 50-60 MWh'lik elektrik üretildiği rapor edilmiştir. Daha sonra 2015 yılında Portland kentinde 120 cm çapındaki isale hattına 4 tane 105 cm'lik Lucid küresel türbin entegre edilmiştir. Bu sistemden de yıllık 900 MWh'lik elektrik üretilmiştir (Lucid Energy, 2017).

3.3. Kanat kesitleri

Hidrokinetik türbin kanatlarının enine kesitleri hidrofoil olarak adlandırılmaktadır. Hidrofoillerin ön kısmı hücum kenarı, arka kısmı firar kenarı olarak tanımlanmaktadır. Hücum kenarı ile firar kenarı arasındaki hayali çizgiye kord hattı, hidrofoil kesitini ortalayan çizgiye ise kamburluk hattı denilmektedir (Şekil 11). Genellikle, kanat kesitlerinin hücum kenarı oval ve nispeten kalın; firar kenarı ise daha keskin ve dar olarak tasarlanmaktadır (Muratoglu ve Yüce, 2015b). Hidrokinetik

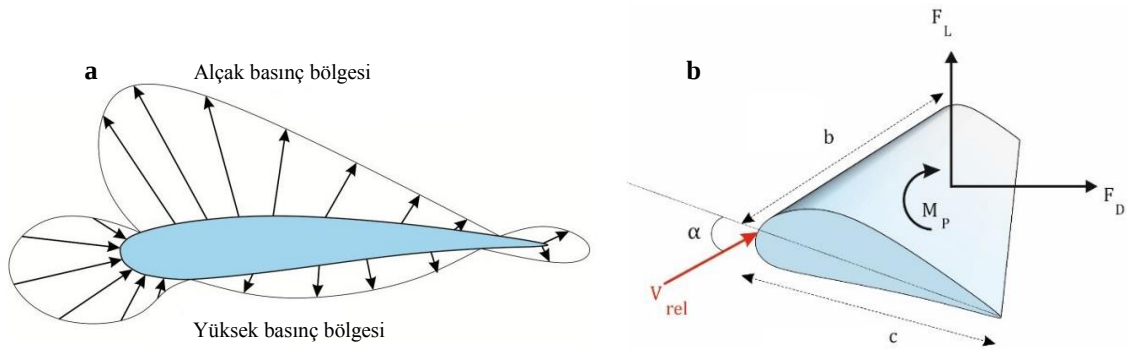
türbinlerde kullanılan hidrofoillerin kamburluk miktarı kullanım alanına göre değişmekle beraber, dikey eksenli türbinlerde genellikle kambursuz yani simetrik kesitler kullanılmaktadır.



Şekil 11. Kanat profili terminolojisi (Muratoğlu ve Yüce, 2015b)

Hidrokinetik türbinlerde hücüm kenarına gelen akım belirli bir açı ile kanat kesitini geçer. Bu açı hücüm açısı olarak tanımlanır. Hücüm açısına bağlı olarak kanat kesitinin üst tarafında alçak basınç, alt tarafında ise yüksek basınç alanı oluşur (Şekil 12a). Bu basınç farkı profil üzerinde kaldırma kuvveti oluşturarak, rotorun dönmesini sağlar (Kulunk, 2011). Ayrıca kanat profillerinde oluşan sürüklenme kuvveti de hücüm açısına bağlı olarak oluşmaktadır.

Kanat profillerinin hidrodinamik performansı, türbinin güç üretimi üzerinde direk olarak etki eden bir parametredir. Yatay eksenli, dikey eksenli ve helik türbinler gibi farklı konfigürasyona sahip sistemlerde kullanılan kanat kesitleri değişiklik arz etmektedir.



Şekil 12. (a) Kanat kesitinde basınç dağılımı, (b) Kanat üzerindeki kuvvetler (Muratoğlu, 2014)

3.3.1. Kanat kesiti üzerindeki kuvvetler

Hidrodinamik yükler; akışkanın yoğunluğu, hızı, kesitin şekli, yönelimi ve boyutu ile ilişkilidir. Kesit üzerinde oluşan kuvvetler (F_L ve F_D) bu parametrelere göre türetilir. F_L kaldırma kuvveti kesit üzerinde basınç farklılıklarından dolayı oluşan ve dönmeyi sağlayan kuvvettir. F_D ise akışkan tarafından akış yönüne paralel olarak kesit üzerinde uygulanan sürüklenme kuvvetidir (Şekil 12b).

Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3’de kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve kanatta oluşan moment formülleri verilmiştir (Muratoğlu, 2014).

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 (bc) C_D \quad (3.1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 (bc) C_L \quad (3.2)$$

$$M_P = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 (bc^2) C_M \quad (3.3)$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğunu, U_∞ serbest akım hızını, b kanat uzunluğunu, c kord uzunluğunu ifade etmektedir.

Kanat kesiti analizlerinde kesitin yönelimi ve pozisyonu ile ilgili birçok parametre kullanması yerine C_L kaldırma katsayısı ve C_D sürüklenme katsayısı kullanılmaktadır. Kanat tasarımlarının temel amacı C_L kaldırma katsayısını arttırmak, C_D sürüklenme katsayısını ise azaltmaktır.

3.3.2. Kanat kesiti türleri

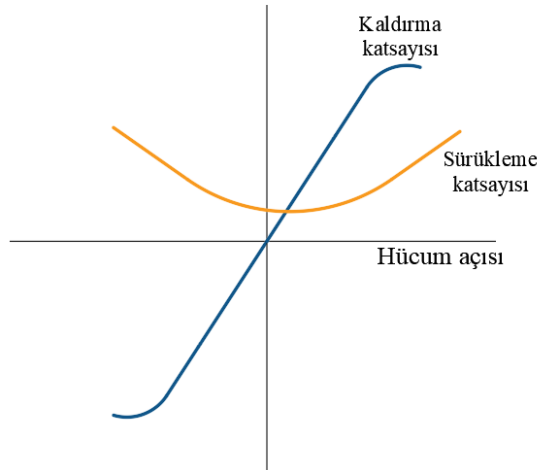
Kanat kesitleri ile ilgili ilk ciddi çalışmalar 19. yüzyılın sonlarında başlamıştır (Tamtank University, 2018). Bu tarihten günümüze kanat kesitleri ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve kullanım alanına göre farklı konfigürasyona sahip kanat kesitleri dizayn edilmiştir. Günümüzde kullanılan kanat kesitlerine; Danimarka’da rüzgâr türbinleri için geliştirilen RISØ profilleri, ABD Havacılık Ulusal Danışma Komitesi tarafından geliştirilen NACA ailesi ve ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından dikey eksenli rüzgâr türbinleri için geliştirilen NREL kanat kesitleri örnek olarak verilebilir. Mevcut kanat kesitleri arasında gerek havacılık endüstrisinde gerekse rüzgâr ve hidrokinetik türbinlerde en çok tercih edilen kanat kesitleri NACA profilleridir (Muratoğlu, 2014).

NACA profilleri, kesit özelliklerine göre dört, beş ve altı serili şekilde adlandırılmaktadır. NACA**** 4 rakam serili profillere bakılacak olursa, ilk rakam maksimum kamburluğun kord uzunluğuna göre yüzdesini, ikinci rakam maksimum kamburluğun kord üzerinde bulunduğu konumu, üç ve dördüncü rakam ise maksimum kalınlığın kord uzunluğuna yüzde oranını ifade etmektedir (Tamtank University, 2018). Örneğin NACA 1412 profili maksimum kamburluğun, kord uzunluğunun %1'i kadar olduğunu; maksimum kamburluğun hücum kenarından, kord uzunluğunun %40'ı kadar mesafede olduğunu ve profildeki maksimum kalınlığın %12 olduğunu göstermektedir.

Dikey eksenli türbinlerde Bölüm 7.1'de anlatılan sebeplerden dolayı kambursuz yani NACA 00xx kesitli kanat profilleri kullanılmaktadır.

3.3.3. Hücum açısının önemi ve stol durumu

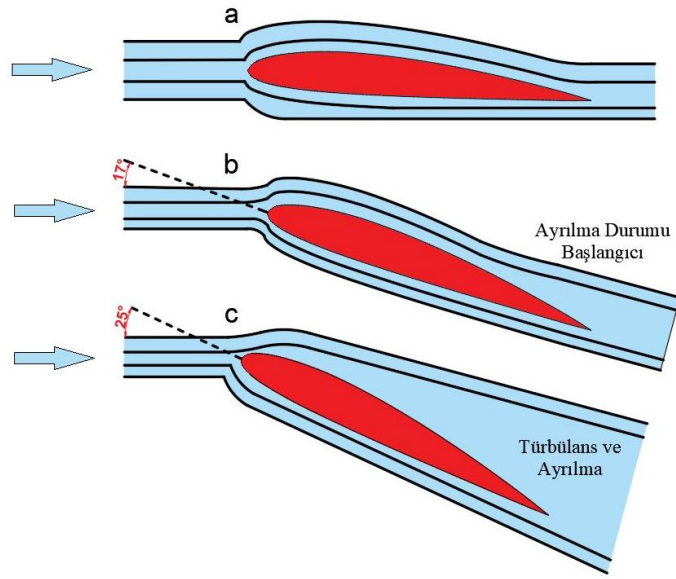
Hücum açısı, C_L ve C_D katsayıları gibi önemli performans kriterleri üzerine direkt olarak etki etmesinden dolayı, türbin tasarımının en önemli parametrelerinden biridir. Hücum açısı ile bu performans kriterleri arasındaki ilişki kanat profilinin simetrik veya asimetrik olmasına, kord uzunluğuna, kanat kalınlığına göre değişmektedir. Şekil 13'te kaldırma ve sürüklenme katsayılarının, hücum açısına bağlı genel şematiki gösterilmiştir.



Şekil 13. Hücum açısının kanat profili performansına etkisi

Genel olarak hücum açısı arttıkça, kaldırma ve sürüklenme katsayılarında artış görülmektedir. Fakat hücum açısı belirli bir değeri geçtikten sonra kanat kesitinin yüzeyinde ayrışma görülür bu duruma stol denir (Şekil 14). Stol durumunda kaldırma kuvveti katsayısında düşüş gözlenirken, sürüklenme kuvveti katsayısında ciddi artış ortaya çıkar (Muratoğlu, 2014). Ayrıca kanat profillerinde daima pozitif sürüklenme

katsayısı olurken, hücum açısına bağlı olarak negatif kaldırma katsayıları oluşabilmektedir (Şekil 13).



Şekil 14. Aerodinamik stol durumunun görselleştirilmesi

4. BÖLÜM

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde küresel türbinlerle ilgili çalışmalar kısıtlı olmasına karşın, bu türbinlere en yakın sistemler olan dikey eksenli türbinler üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu sebeple, mevcut çalışmanın literatür taraması bölümünü ağırlıklı olarak Darrieus ve Gorlov türbinleri oluşturmuş olup, bu kısım altı başlık altında ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde bahsedilen uç hız oranı (λ) türbinin açısal hızının serbest akım hızına oranını, solidite (σ) türbin kanatlarının alanının rotorun çevrelediği bölgedeki toplam alana oranını, C_P ve C_P^* ise bölüm 5'te anlatılan, sırasıyla blokajsız ve blokajlı ortamlar için güç katsayısını ifade etmektedir.

4.1. Kanat Kesiti Araştırması

Niblick (2012) genelde dikey eksenli türbinlerde simetrik NACA 4 serili kanat profillerinin kullanıldığını söylemesine karşın İslam ve ark. (2007)'nin yaptığı çalışmada NACA 4 serili kanat profiline sahip türbinlerin pozitif hücum açılarında (kaldırma/sürüklenme oranı) C_L/C_D oranının asimetrik kesitlere göre düşük olduğu ve bu sebeple daha düşük performans gösterdiği sonucuna varmıştır. Dağdevir (2015) Darrieus türbin tasarımı için karşılaştırdığı NACA 0021, NACA 0015 ve NACA 5520 profilleri arasında simetrik NACA kanat kesitlerinin daha iyi performans gösterdiği, NACA 0021 ve NACA 0015'in ise birbirine yakın maksimum C_P değerine sahip olduğu görülmüştür. Demircan (2014) tezinde nehir uygulaması için 3 kanatlı Darrieus türbin tasarımı yapmış ve NACA 0021, NACA 0018 ve NACA 0021 kanat profillerini karşılaştırmıştır. Bu profillerin birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini fakat NACA 0021'in düşük uç hız oranında daha iyi performans gösterdiğini bu sebeple NACA 0021 profilini seçtiğini ifade etmiştir. Ayrıca aynı çalışmada simetrik kesite sahip NACA 0021 ile asimetrik kesitli NACA profilleri karşılaştırılmıştır. Düşük uç hız oranlarında asimetrik kesitlerin daha iyi sonuç verdiği fakat maksimum verimliliğin simetrik kesitte elde edildiği sonucuna varılmıştır. Burada uç hız oranı (λ) türbin kanatlarının hızının, akım hızına oranını ifade etmektedir (Denklem 4.1).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (4.1)$$

Mohamed (2012) dikey eksenli Darrieus türbinleri için simetrik ve asimetrik olmak üzere 20 farklı kanat kesitinin 2 boyutlu HAD analizlerini yapıp optimum kanat profilini araştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda maksimum güç katsayısı, simetrik kanat profillerinden S-1046 ile 0.4 olarak elde edilmiştir. Daniel ve Nicklas (2013) tezinde NACA 0012 ve S-1046 kanat profillerini karşılaştırmış ve S-1046 kesitinin daha iyi performans gösterdiğini söylemiştir. Consul (2011) tezinde simetrik kanat kesitlerinin pozitif ve negatif hücum açılarında yüksek performans gösterdiğini fakat asimetrik profillerin negatif hücum açılarında düşük performans gösterdiğini söylemiştir. Dikey eksenli türbinlerin de akıma dik ekseninde 360 derece dönmelerinden dolayı, türbin kanatlarının negatif hücum açılara da maruz kaldığını ve dikey eksenli türbinlerin çoğunda simetrik kanat kesitlerin kullanılmasını sebebinin bu olduğunu ifade etmiştir.

Sheikh (2015) çalışmasında dikey eksenli su türbinlerinin, Bölüm 5'te bahsedilen QBlade programı yardımı ile optimizasyonunu yapmıştır. Bu çalışmada kamburlu kanat profillerinin düşük uç hız oranı (λ) aralığında iyi performans gösterdiğini fakat maksimum C_P değerinin simetrik profillerde daha yüksek olduğunu söylemiş ve simetrik NACA profillerini karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda performans ve türbin dayanımı açısından NACA 0018'in optimum kanat kesiti olduğuna karar verilmiştir.

Winchester ve Quayle (2009) Gorlov türbinlerinde kanat kalınlığı azaldıkça maksimum kanat kuvvetleri varyasyonlarının artacağını, dolayısıyla mümkün olduğunca kanatların kalın seçilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Fakat kanat kalınlığı arttıkça güç çıkışının da azalacağını belirtmişlerdir. Roh ve Kang (2013) yaptıkları çalışmada kanat kalınlığı arttıkça düşük uç hız oranlarında türbinin daha iyi performans gösterdiğini, fakat maksimum güç katsayılarının ince kanatlı profillere göre daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Samdan (2016) yaptığı çalışmasında kalın kanatlı profillerin kullanıldığı türbinlerde, kendi kendine dönmeye başlama konusunda daha iyi performans gösterdiğini söylemiştir. Castillo (2011), çalışmasında Samdan (2016) ile aynı sonuca varmıştır. Ayrıca NACA 0015 ve NACA 0021 profillerini karşılaştırmış ve NACA 0021'in daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Dağdevir (2015) tezinde düşük dönme hızında NACA 0021 gibi kalın ve simetrik kesitlerin uygun olacağını,

yüksek dönme hızlarında ise simetrik olmayan kesitlerin seçiminin daha uygun olacağını söylemiştir.

4.2. Solidite

Solidite, türbinin çevrelediği bölgedeki kanat alanının, bu bölgedeki toplam alana oranını ifade eden boyutsuz bir parametredir. Dolayısıyla solidite türbin çapının, kanat sayısının ve kord uzunluğunun bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Düz kanatlı Darrieus türbinlerde solidite Denklem 4.2’de verilen şekilde bulunabilmektedir.

$$\sigma = \frac{Nc}{2\pi R} \quad (4.2)$$

Burada R türbin yarıçapını, c kord uzunluğunu ve N kanat sayısını ifade etmektedir.

Twidell ve Weir (2006) yüksek soliditeli türbinlerde ($\sigma > 0.3$) kendi kendine başlamanın daha kolay olacağını fakat türbinin düşük uç hız oranında çalışacağını, düşük soliditeli türbinlerde ise ($\sigma < 0.15$) kendi kendine başlama probleminin yaşanacağını ve yüksek uç hız oranında çalışılabileceğini söylemiştir. Ayrıca düşük soliditede türbin maksimum verimliliğe daha yüksek uç hız oranında ulaşmaktadır. Strickland (1975) yaptığı çalışmada Darrieus türbinlerinin solidite 0.2-0.3 aralığındayken maksimum verimlilikle çalıştığını belirtmiştir. Helik türbinlerde ise Shiono ve ark. (2002) optimum soliditenin 0.3-0.4 aralığında olduğunu söylemiştir. Winchester ve Quayle (2009)’de yaptıkları çalışmada düşük uç hız oranında solidite arttıkça enerji üretimi artmış, yüksek uç hız oranında ise solidite arttıkça enerji üretiminin azaldığını belirtmişlerdir. Brusca, ve ark., (2015) NACA 00xx kanat kesitlerini kullanarak dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde yaptıkları çalışmada Tablo 4.1’de gösterildiği üzere solidite bir noktaya kadar artırıldığında maksimum güç katsayısının arttığını fakat daha fazla artırıldığında ise düştüğünü göstermişlerdir. Yine aynı çalışmada solidite arttıkça maksimum güç katsayısına daha düşük uç hız oranında ulaşıldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca adı geçen çalışmada Reynolds sayısının türbin performansına olan etkisini incelenmiş ve Reynolds sayısı arttıkça verimliliğin arttığı sonucuna varılmıştır (Samdan, 2016; Brusca ve ark., 2015).

Tablo 4.1 Solidite ve maksimum verimlilik ilişkisi (Brusca ve ark., 2015)

Airfoil	σ_{cpmax}	λ_{Cpmax}	C_{Pmax}
NACA 0012	0.3	2.95	0.43
NACA 0015	0.4	2.50	0.45
NACA 0018	0.4	2.54	0.51
NACA 0021	0.4	2.50	0.45
NACA 0025	0.5	2.20	0.51

Roh ve Kang (2013) farklı soliditeye sahip NACA 0015 kanat kesitli Darrieus türbini ile yaptıkları çalışmada, maksimum verimliliği solidite 0.25 iken 0.46 olarak bulmuşlardır. Macit (2015) ANSYS Fluent programını kullanarak yaptığı çalışmada aynı soliditeye sahip fakat kord uzunlukları ve türbin çapları farklı olan üç türbini karşılaştırmıştır. Solidite sabit kaldığında kord uzunluğu ve türbin çapının değişmesinin türbin performansını etkilemediğini sonucuna varmıştır. Aynı çalışmada farklı soliditede türbinler karşılaştırılmış. Maksimum C_P 0.56 olarak uç hız oranı 2.25 ve solidite 0.8 iken elde edilmiştir. Samdan (2016) çalışmasında kord uzunluğu arttıkça soliditenin artacağını ve bunun sonucunda maksimum C_P değerine daha düşük uç hız oranlarında ulaşılacağını söylemiştir. Adı geçen çalışmada üç kanatlı, yarıçapı 1.36 m ve kord uzunluğu 0.136 m olan türbin tasarlanmış ve C_P 0.51 olarak bulunmuştur. Sheikh (2015) kord uzunluğu azaldıkça maksimum verimin arttığını fakat düşük λ değerlerinde kord uzunluğu arttıkça daha iyi performans elde edildiğini söylemiştir.

4.3. Kanat Sayısı

Sabaeifard ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada kanat sayısının Darrieus türbininin verimine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada iki, üç ve dört kanatlı türbinler karşılaştırılmış ve üç kanatlı Darrieus türbininin daha iyi performans gösterdiğini söylemişlerdir. Benzer şekilde Castelli ve ark. (2012) üç kanatlı Darrieus türbininin maksimum performans gösterdiğini söylemişlerdir (Samdan, 2016). Daniel ve Nicklas (2013), dikey eksenli türbinleri incelemiş; maksimum verimin iki kanatlı türbinde elde edildiğini fakat tork salınımının çok fazla olduğunu, kanat sayısı üç ve dört olarak seçildiğinde C_P değerinin anlamlı bir şekilde düşmemesine rağmen tork salınımının oldukça azaldığını söylemişlerdir. Helms (2011) de DMST metodunu kullanarak bir, iki ve üç kanatlı türbinleri karşılaştırmış ve kanat sayısı arttıkça türbin performansının

arttığını söylemiştir. Consul (2011) çalışmasında dikey eksenli türbinlerin hidrodinamik analizini yapmıştır. Çalışmada iki, üç ve dört kanatlı türbinler karşılaştırıldığında dört kanatlı türbinin daha yüksek güç katsayısına ulaştığı görülmüştür. Öte yandan Lucid Energy şirketi tarafından yapılan çalışmada boru içi küresel hidrokinetik türbin tasarlanmış ve bu uygulamada beş kanatlı türbin tercih edilmiştir.

4.4. Helik ve Düz Kanatlı Türbinler

Shiono ve ark. (2002) yaptığı deneysel çalışmalarda, helik eğim açısı arttıkça performansın arttığını tespit etmiştir. Buna karşın eğim açısıyla beraber tork varyasyonlarının da arttığı belirtilmiştir.

Winchester ve Quayle (2009) yaptıkları çalışmada helik türbinlerde tork salınımının ve türbinde oluşan titreşimin azaldığını, bu sebeple türbin ömrünün arttığını söylemişlerdir. Fakat aynı çalışmada helik türbinlerde kanat üzerindeki kuvvet dağılımı varyasyonunun fazla olmasından dolayı kanat dayanımında problemlerin yaşanabileceği belirtilmiştir. Niblick (2012) helik türbinlerin kanat yapısından dolayı azimut pozisyonuna bağlı olmaksızın daha düzenli başlangıç torkuna sahip olacağını ve bunun sonucunda kendi kendine başlangıç (self-start) konusunda Darrieus türbinlerine göre daha başarılı olacağını ifade etmiştir. Ayrıca helik türbinlerin rotasyon sırasında tork salınımlarının daha az olacağını, dolayısıyla titreşim probleminin oluşmayacağını raporlamıştır.

Gorlov (1998) NACA 0020 kanat kesitine sahip sarmal türbin ile yaptığı deneysel çalışmada maksimum verimi %35 olarak bulmuştur. Ayrıca Darrieus türbinleriyle kıyasladığında performans açısında helik türbinlerin daha üstün olduğunu ifade etmiştir. Shiono ve ark. (2002) ise soliditesi ve yüksekliği farklı helik türbinlerle yaptığı çalışmada maksimum verimi %24 bularak Gorlov'a göre daha düşük sonuçlar elde etmiştir. Buna ek olarak Darrieus türbinleriyle karşılaştırmış ve Darrieus türbinlerinin daha verimli oldukları sonucuna varmışlardır. Marsh ve ark. (2015) yaptıkları HAD analizleri sonucunda dikey eksenli türbinlerde sarmallık arttıkça kanatlar üzerinde kaldırma kuvvetlerinin azaldığı, sürüklenme kuvvetlerinin arttığı ve bunun sonucunda maksimum verimin düştüğünü söylemişlerdir. Ayrıca literatürdeki diğer çalışmalardaki gibi helik türbinlerin tork salınımlarının Darrieus türbinine göre daha az olduğunu göstermişlerdir. Jagtap ve Navale (2017) QBlade programını kullanarak farklı eğim açlarına sahip dikey eksenli türbinleri karşılaştırmışlardır.

Çalışmalarında simetrik kesite sahip NACA 0018 ve NACA 0021 profillerini ve asimetrik kesite sahip DU-06-W200 profilini kullanmışlardır. Türbin yüksekliklerini 2.4 m, çaplarını 1.9 m kord uzunluğunu 0.03 m olarak seçmişlerdir. 30, 60, 70, 90 ve 120 derece burkulma açılara (twist) sahip türbinlerde Marsh ve ark., (2015)'dan farklı olarak sarmallığın artmasıyla maksimum güç çıkışının arttığını söylemişlerdir. Kullanılan kanat profillerinden ise simetrik kesite sahip NACA 0018'in maksimum performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Pongduang ve ark., (2015) çalışmalarında 0.5 m çapına, 1.25 m yüksekliğine, 0.07 m kord uzunluğuna ve farklı helik eğime sahip NACA 0020 profilli dikey eksenli türbinleri karşılaştırmışlardır. 120, 135 ve 150 derece helik açıya sahip türbinlerin incelendiği çalışmada 135 derece helik açıya sahip türbinin en iyi performans gösterdiği söylenmiştir.

4.5. Lucid ve Gorlov Türbinleri

Bachant ve Wosnik (2011) yaptıkları çalışmada Gorlov helik türbin (GHT) ile Lucid küresel türbini (LKT) deneysel olarak karşılaştırmıştır. Kord uzunlukları ve kanat profilleri aynı olan iki türbinin tasarım parametreleri Tablo (4.2)'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Çalışmada kullanılan GHT ve LKT'nin geometrik özellikleri
(Bachant ve Wosnik, 2011)

Türbin Parametreleri	GHT	LKT
Çap	1.00	1.14
Yükseklik	1.32	0.97
Ön yüzey alanı	1.32	0.96
Kanat sayısı	3.00	4.00
Solidite	0.14	0.22
Kanat profili	NACA 0020	NACA 0020
Kanat eğim açısı	0.5	2.0

Çalışmanın sonucunda GHT için maksimum C_p 0.35 olarak λ 2.3 iken, LKT için ise maksimum C_p 0.24 olarak λ 2.2 iken bulunmuştur. Lucid küresel türbinin veriminin daha düşük olmasının nedeni bu türbinin yüksek blokalı akım koşulları için tasarlandığı fakat deney koşullarının bu durumu sağlamadığı olarak açıklanmıştır. Bachant ve Wosnik (2011) başka bir çalışmalarında bu durumu LKT'nin ortalama yarıçapının daha düşük olmasıyla da ilgili olduğunu ifade etmişlerdir.

Casini (2015) Lucid türbininin uygulamalarından ve tasarım kriterlerinden bahsetmiştir. Lucid türbinlerin pilot uygulamasının 2012 yılında Riverside'da

yapıldığını ve 2015 yılında Portland'da 4 lucid türbin kullanılarak yıllık 1100 MWh enerji elde edildiğini belirtmiştir. Lucid türbinlerin akım hızına bağlı olarak 1-4 m basınç düşüşüne neden olduklarını, boru içerisindeki gerekli minimum basınç göz önüne alınarak yerleştirilmesi gerektiğini söylemiştir. Ayrıca bu türbinlerin aralarında minimum, türbin çaplarının 3-4 katı kadar mesafe olması gerektiğini söylemiştir. Mayaka (2017) tezinde Casini (2015)'i destekleyen ifadelerinin yanında Lucid türbininde kanat sayısı arttıkça güç çıkışının arttığını fakat bununla birlikte boru içi akımının basınç düşüşünün de arttığını söylemiştir.

Biadgo ve ark. (2013) DMST modeli ile HAD sonuçlarını karşılaştırmak üzere yarıçapı 2 m, kord uzunluğu 0.2 m ve yüksekliği 4 m olan ve NACA 0012 kanat kesitinin kullanıldığı dikey eksenli türbin tasarlamışlardır. DMST modeli ile maksimum C_P 0.4 bulunurken bu değere yakın bir şekilde HAD analizi ile de 0.36 olarak hesaplanmıştır.

4.6 Blokaj Etkisi

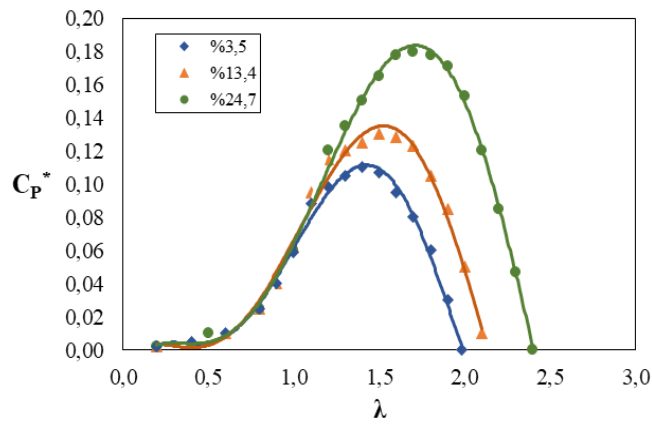
Blokaj; türbinin iz düşüm alanının, akımın geçtiği kanal veya borunun en kesit alanına oranını ifade etmektedir. Denklem 4.2'de blokaj oranının matematiksel ifadesi gösterilmiştir. Burada B blokaj oranını, A_B türbini çevreleyen kanal veya borunun en kesit alanını, D türbin çapını ifade etmektedir.

$$B = \frac{\pi D^2}{4A_B} \quad (4.2)$$

Houlsby ve Vogel (2017) yaptıkları çalışmada blokaj etkisinin güç çıkışı üzerinde önemli etkilerinin olduğunu, blokajın artmasıyla güç katsayısının artacağını söylemişlerdir. Blokaj etkisi ile türbinin aşağı akım ve yukarı akım bölgelerinde oluşan basınç farkının ve dolayısıyla itme kuvvetinin artacağını rapor edilmiştir. Bu suretle türbinin, blokajsız ortamda yüksek hız değerlerinde maruz kalacağı itme kuvvetine, blokajlı akım için daha düşük hız aralıklarında ulaşılacaktır. Yani türbin mevcut durumda çalıştığı akım hızından daha büyük hızlarda çalışıyormuş gibi karakter sergileyebileceği ve dolayısıyla güç katsayısının birin üstüne çıkabileceği söylenmiştir. Ancak bu durumun, akımda var olan toplam enerjiden daha fazlasının elde edildiği anlamına gelmeyeceği vurgulanmıştır. Benzer şekilde Polagye ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada blokajlı ortamların, akıdaki potansiyel enerjiden yararlanılmasına izin verdiği

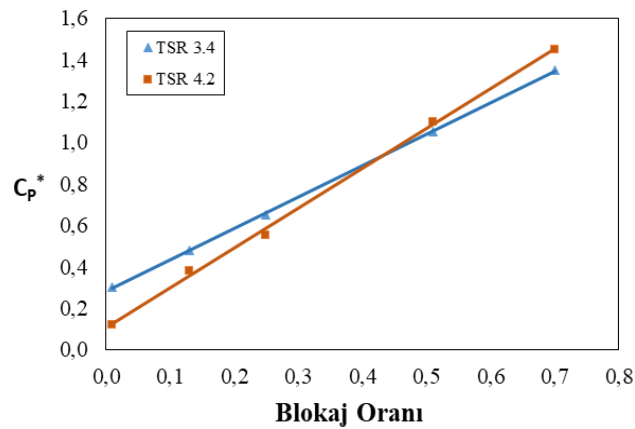
için bu ortamlarda çalışan türbinlerin güç katsayılarının Betz limitini aşabileceğini ifade etmişlerdir.

Jeong ve ark. (2018) Darrieus türbininin farklı blokaj oranlarındaki performanslarını incelemişlerdir. %3.5, %13.4 ve %24.7 blokaj oranlarına sahip deney düzeneklerinde yaptıkları çalışmada, %13.4 blokaj oranına sahip sistemin %3.5 oranındaki sisteme göre 1.3 kat daha fazla verimliliğe sahip olduğunu görmüşlerdir. %24.7 blokajlı sistemin ise 2 kat daha verimli çalıştığını göstermişlerdir. Ayrıca C_P^* - λ grafiğinde blokaj arttıkça eğrinin sağa doğru kaydığını raporlamışlardır (Şekil 15). Burada C_P^* Bölüm 5.2’de anlatıldığı üzere blokajlı ortamdaki güç katsayısını ifade etmektedir



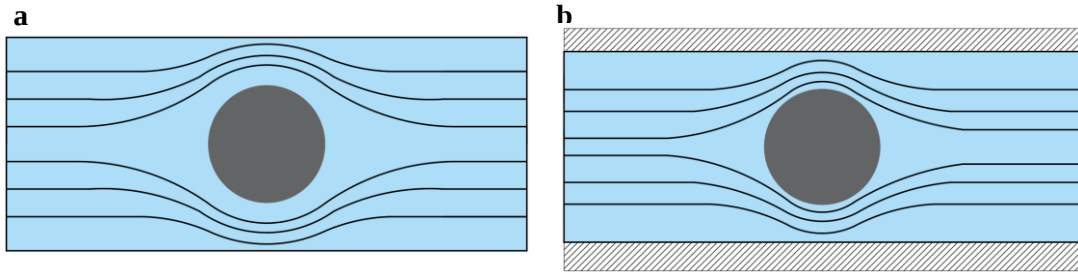
Şekil 15. Farklı blokaj oranındaki sistemlerin karşılaştırılması (Jeong ve ark., 2018)

Kinsey ve Dumas (2017) farklı blokaj oranına sahip yatay ve dikey eksenli türbinlerin HAD analizlerini yaparak karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada aynı uç hız oranında blokaj oranı arttıkça C_P^* değerinin de lineer bir şekilde arttığı görülmüştür (Şekil 16).



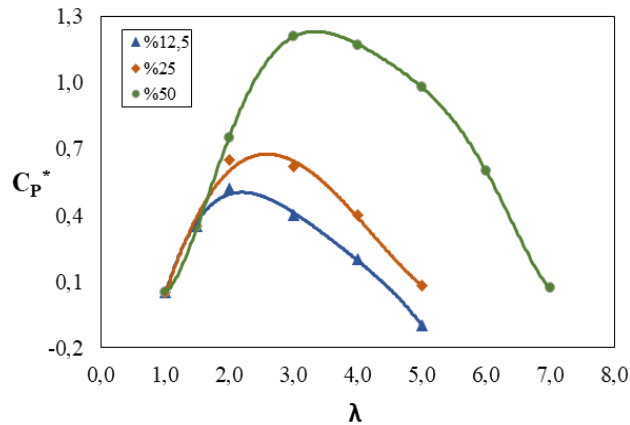
Şekil 16 Sabit uç hız oranında ve farklı blokajlarda türbin performanslarının karşılaştırılması (Kinsey ve Dumas, 2017)

Du ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada blokaj arttığı zaman akımın kısıtlanacağı ve dolayısıyla kanatlardaki ayrışmaların daha da azalacağını ifade etmişlerdir. Bu da stol durumunun oluşmasına nispeten engel olacak ve geciktirecektir. Blokaj etkisinin anlaşılabilmesi için Şekil 17 a ve b’de akım alanında dairesel bir engelin bulunduğu, sırasıyla blokajsız ve blokajlı iki ortamda akım çizgileri şematize edilmiştir. Blokajsız ortamda akım serbestçe hareket edebilecek ve akım alanında bulunan katı cisimler üzerinde daha fazla ayrışma gösterecektir.



Şekil 17. Blokajlı ve blokajsız ortamlarda akım çizgilerinin şematizi (Komarla, 2016)

Modi ve ark. (1984) yaptıkları çalışmada blokajın Savanious türbini üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Adı geçen çalışmada da blokaj arttıkça C_P^* artmış ve $\lambda-C_P^*$ grafiği sağa doğru ötelenmiştir. Benzer bir çalışmayı Ross (2010) yapmış olup, bir önceki çalışmaya paralel sonuçlar elde etmiştir. Consul ve ark. (2013) ANSYS Fluent ile blokaj durumunun Darrieus hidrokinetik türbinleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Adı geçen çalışmada NACA 0015 kanat profili kullanılarak %12.5, %25 ve %50 blokaj oranına sahip türbinler tasarlanıp $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Diğer çalışmalarla paralel bir şekilde blokaj oranının artması ile C_P^* değerinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 18).



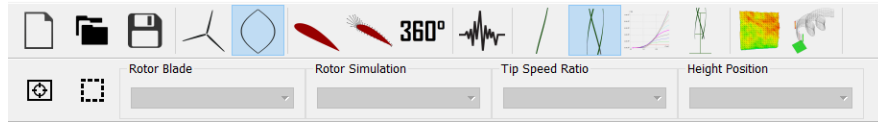
Şekil.18 Blokaj oranına göre türbin performanslarının karşılaştırılması (Consul ve ark., 2013)

5. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

5. QBlade

QBlade Berlin Teknik Üniversitesi rüzgâr enerjisi grubu tarafından geliştirilen ve blokajsız ortamda türbin performansının hesaplanmasında kullanılan bir yazılımdır. Bu program dikey eksenli ve yatay eksenli türbin performanslarını analiz etmekte kullanılabilmektedir. Şekil 19’da görülen menü çubuğunda yatay veya dikey eksen opsiyonu seçilerek gerekli analizler yapılabilmektedir. Program içerisinde NACA kanat kesitlerinin geometrileri hazır bulunmaktadır. Bu profillerin analizleri QBlade’e entegre edilmiş olan XFOIL programı ile yapılabilmektedir. Ayrıca türbin geometrisi de QBlade içerisinde koordinatlar girilerek oluşturulabilmektedir (Marten ve Wendler, 2013).



Şekil 19. QBlade programının menü çubuğu

QBlade yatay eksenli türbinlerin analizinde kanat elemanı momentum teorisini (-ing; Blade Element Momentum Theory, BEM), dikey eksenli türbinlerin analizinde ise çift çoklu akım tüpü (-ing; Double Multiple Stream Tube, DMST) yöntemini kullanmaktadır. Mevcut çalışmada kullanılan DMST metodu ve bu teorinin altyapısı Bölüm 5.6’da anlatılmıştır.

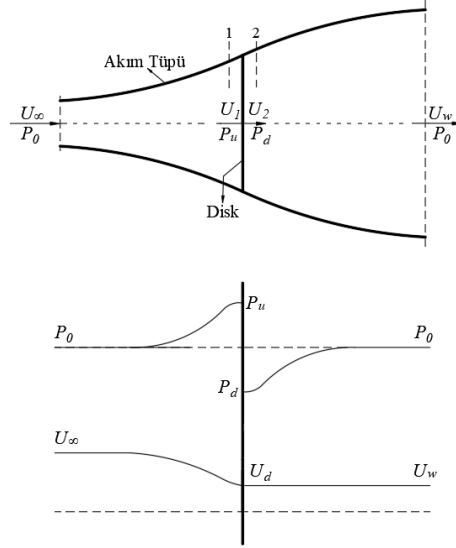
5.1. Tek Tüplü Aktatör Disk Teorisi

Aktuatör disk teorisi momentum teorisi tabanlı bir metottur. Bu metotta türbin gövdesinin sonsuz sayıda kanata sahip düz bir disk olduğu varsayılır (Şekil 20). Bu teoride sistem rotor öncesi alt akım ve rotor sonrası üst akım olmak üzere iki kısımda incelenir. Akım tüpüne giren sıvının, tüp dışındaki sıvıyla etkileşime girmeden kontrol hacmi içinde sürekli aktığı düşünülür. Dolayısıyla bu modelde türbinin dönme eksenine

göre sadece normal akış hızı dikkate alınır (Daniel ve Nicklas, 2013; Manwell ve ark., 2009; Muratoğlu, 2014)

İdeal aktüatör disk için yapılan varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Akışkan homojen, sıkıştırılamaz ve daimî akımdır.
- Sistemdeki sürtünmeler ihmal edilir.
- Sonsuz sayıda türbin kanadı vardır.
- Disk üzerindeki itme disk alanının tümünde sabittir.
- Sistemin aşağı ve yukarı akışındaki statik basınç bozulmamış ortamın statik basıncına eşittir.
- Akışkanın hızı rotor boyunca sabittir.



Şekil 20. Aktüatör disk metodu (Daniel ve Nicklas, 2013; Muratoğlu, 2014)

Akım tüpü içerisindeki akımın dışarıyla etkileşiminin olmadığı varsayımından dolayı disk üzerindeki hız, diskin hemen öncesi ve sonrasındaki hıza eşittir (Denklem 5.1).

$$U_1 = U_2 = U_d \quad (5.1)$$

İdeal aktüatör disk varsayımlarından yola çıkarak akım tüpü boyunca kütlelin korunduğu söylenebilir (Denklem 5.2). Doğrusal momentumun korunumundan dolayı ise yukarı akış ve aşağı akış bölgesindeki hız farkına bağlı olarak Denklem 5.3’de ifade edildiği gibi disk üzerinde itme kuvveti oluşur.

Burada A_∞ akım tüpünün girişindeki, A_w akım tüpünün dışındaki ve A_d ise disk üzerindeki akım alanını ifade etmektedir. U_∞ , U_w , U_d sırasıyla akım tüpü girişindeki, çıkışındaki ve disk üzerindeki akım hızını göstermektedir. Ayrıca ρ akım yoğunluğunu, T itme kuvvetini, $\dot{m}$ ise momenti ifade etmektedir.

$$\dot{m} = \rho A_\infty U_\infty = \rho A_w U_w = \rho A_d U_d \quad (5.2)$$

$$T = U_\infty(\rho A_\infty U_\infty) - U_w(\rho A_w U_w) \quad (5.3)$$

$$T = \dot{m}(U_\infty - U_w) \quad (5.4)$$

Aşağı akım bölgesi ile diskin hemen öncesi ve yukarı akım bölgesi ile diskin hemen sonrası arasında Bernoulli enerji eşitliği yazılıp (Denklem 5.5, 5.6), bu denklemler taraf tarafa çıkartılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa disk öncesi ve sonrası arasındaki basınç farkı Denklem 5.7'deki gibi bulunur. Burada P_0 akım tüpü girişindeki ve çıkışındaki basıncı, P_u diskten hemen önceki basıncı, P_d diskten hemen sonraki basıncı, P' ise disk öncesi ve sonrası arasındaki basınç farkını ifade etmektedir

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 = P_u + \frac{1}{2} \rho U_d^2 \quad (5.5)$$

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho U_w^2 = P_d + \frac{1}{2} \rho U_d^2 \quad (5.6)$$

$$P' = P_u - P_d = \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (5.7)$$

Diskten öncesi ve sonrasındaki bu basınç farkından dolayı disk alanına bağlı olarak itme kuvveti oluşur (Denklem 5.8, 5.9).

$$T = A_d P' = A_d (P_u - P_d) \quad (5.8)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A_d (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (5.9)$$

Denklem 5.4'de ve 5.9'da bulunan itme kuvvetleri birbirine eşitlenirse disk üzerindeki akım hızının ifadesi Denklem 5.11'de gösterildiği gibi bulunur.

$$T = \rho A_d U_d (U_\infty - U_w) = \frac{1}{2} \rho A_d (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (5.10)$$

$$U_d = \frac{U_\infty + U_w}{2} \quad (5.11)$$

Akışkan, akım tüpü içerisinde ilerlerken kinetik enerjisinin bir kısmı türbin üzerinde mekanik enerjiye dönüşür. Bu sebeple rotor üzerinde akım hızı serbest akım hızına göre daha düşük olur. Akım hızındaki bu azalma Denklem 5.12’de gösterilen aksenal indüksiyon faktörü (α) ile ifade edilmektedir.

$$\alpha = \frac{U_{\infty} - U_d}{U_{\infty}} \quad (5.12)$$

Denklem 5.11 ve 5.12 düzenlenirse rotor üzerindeki ve aşağı akımdaki hız Denklem 5.13 ve 5.14’deki fonksiyonlarla ifade edilebilir.

$$U_d = U_{\infty}(1 - \alpha) \quad (5.13)$$

$$U_w = U_{\infty}(1 - 2\alpha) \quad (5.14)$$

Türbindeki güç çıkışı, itme kuvveti ile rotor üzerindeki akımın hızının çarpımı ile ifade edilir (Denklem 5.15).

$$P = T U_d = \frac{1}{2} \rho A_d (U_{\infty}^2 - U_w^2) \times U_d \quad (5.15)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (5.16)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3 \quad (5.17)$$

Türbin performansı, boyutsuz bir büyüklük olan güç katsayısı (C_P) ile ifade edilir. C_P akımdan elde edilen gücün, akımın toplam güç potansiyeline oranıdır (Denklem 5.18). Denklem 5.17’de akımdaki toplam güç potansiyeli (P_T) verilmiştir.

$$C_P = \frac{\frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3 4\alpha(1 - \alpha)^2}{\frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3} \quad (5.18)$$

$$C_P = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (5.19)$$

Buradan elde edilen güç katsayısı blokajsız ortamlar için verimin ifadesi olmasına karşın, blokajlı ortamlarda Bölüm 4.6’da bahsedilen sebeplerden dolayı akımın toplam güç potansiyeli Denklem 5.17’de verilen ifadeden daha büyük

olmaktadır. Bu sebeple Denklem 5.18’de verilen C_P ifadesi blokajlı ortamlarda türbinin veriminin ifadesi olmaktan çıkmaktadır. Bundan dolayı blokajlı ortamlar için güç katsayısı C_P^* ile sembolize edilmiş olup, Denklem 20’de ifade edilmiştir.

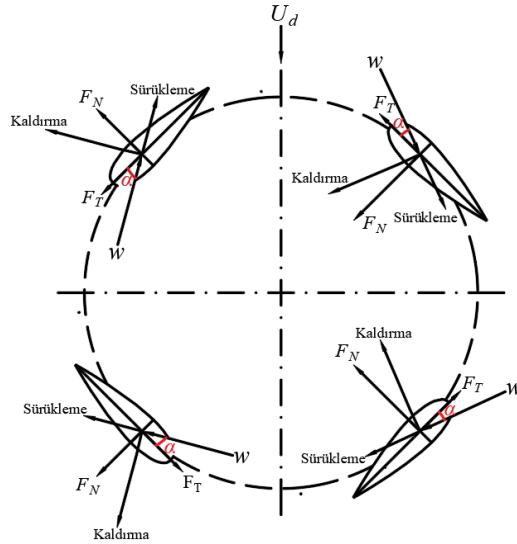
$$C_P^* = \frac{\text{Türbinden elde edilen güç}}{\frac{1}{2} \rho A_d U_\infty^3} \quad (5.20)$$

Denklem 5.18’e benzer şekilde itme katsayısı (C_T) da Denklem 5.21’ de gösterilmiştir.

$$C_T = \frac{\frac{1}{2} \rho A_d U_\infty^2 4\alpha(1-\alpha)}{\frac{1}{2} \rho A_d U_\infty^2} \quad (5.21)$$

$$C_T = 4\alpha(1-\alpha) \quad (5.22)$$

5.2. Dikey Eksenli Türbinlerin Aerodinamik İncelemesi



Şekil 21. Dikey eksenli türbinlerin üstten görünümü (Daniel ve Nicklas, 2013)

Kanatlar türbin eksenini etrafında dönerken serbest akıma göre bağıl hızları w olarak ifade edilir. Bağıl hız, kanatların türbinin yatay eksenine yaptığı açının (azimut açısı, θ) fonksiyonu olarak değişmektedir (Denklem 5.23).

$$w = \sqrt{(U_d \sin(\theta))^2 + (U_d \cos(\theta) + \omega R)^2} \quad (5.23)$$

Burada denklemin her iki tarafını serbest akım hızına bölünürse;

$$\frac{w}{U_\infty} = \sqrt{\left(\frac{U_d}{U_\infty} \sin(\theta)\right)^2 + \left(\frac{U_d}{U_\infty} \cos(\theta) + \frac{\omega R}{U_\infty}\right)^2} \quad (5.24)$$

Denklem 5.13'deki ifade Denklem 5.24'de yazılırsa bağıl hız, indüksiyon faktörü ve uç hız oranı (λ) cinsinden ifade edilebilir (Denklem 5.25).

$$\frac{w}{U_\infty} = \sqrt{((1-\alpha)\sin(\theta))^2 + ((1-\alpha)\cos(\theta) + \lambda)^2} \quad (5.25)$$

Hücum açısı daha önce ifade edildiği gibi bağıl hız ile kanat kesiti eksenindeki açı olarak tanımlanmaktadır. Bu açı Şekil 21'de gösterilen geometriye uygun olarak Denklem 5.26'da ifade edilmiştir.

$$\tan(\alpha) = \frac{U_d \sin(\theta)}{U_d \cos(\theta) + \lambda} \quad (5.26)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{(1-\alpha)\sin(\theta)}{(1-\alpha)\cos(\theta) + \lambda}\right) \quad (5.27)$$

Bölüm 3.3.1'de anlatıldığı üzere türbinin her bir kanadında, bağıl hız doğrultusunda sürüklenme kuvveti ve buna dik doğrultuda kaldırma kuvveti oluşur. Sırasıyla C_L ve C_D bunların kuvvet katsayılarını ifade etmektedir. Denklem 5.28'de kaldırma ve sürüklenme katsayılarının hücum açısına bağlı olarak teğetsel (C_t) ve normal (C_n) bileşenleri gösterilmiştir.

$$C_n = C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha) \quad (5.28)$$

$$C_t = C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \quad (5.29)$$

Kanatlar üzerinde oluşan teğetsel ve normal kuvvetler;

$$F_N = \frac{1}{2} \rho w^2 h c (C_n) \quad (5.30)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho w^2 h c (C_t) \quad (5.31)$$

Burada h kanat uzunluğu c kord uzunluğunu ifade etmektedir. Türbinin dönmesini ve dolayısıyla elektrik üretimini sağlayan en önemli parametre türbin üzerinde oluşan torktur. Kanatlar üzerindeki teğetsel kuvvetler torku oluştururken, normal kuvvetler dönme ekseninden geçtiği için tork üzerinde etkileri olmaz. Denklem 5.32 ve 5.33’de tek bir kanadın türbine sağladığı anlık torkun (Q_i) ifadesi görülmektedir.

$$Q_i = F_T R \quad (5.32)$$

$$Q_i = \frac{1}{2} \rho w^2 h c (C_t) R \quad (5.33)$$

Kanatların rotor eksenini etrafında devri sırasında türbin üzerinde bir itme kuvveti (T) oluşacaktır. Denklem 5.34’de her bir kanatta azimut açısına bağlı olarak oluşan itme kuvveti gösterilmiştir.

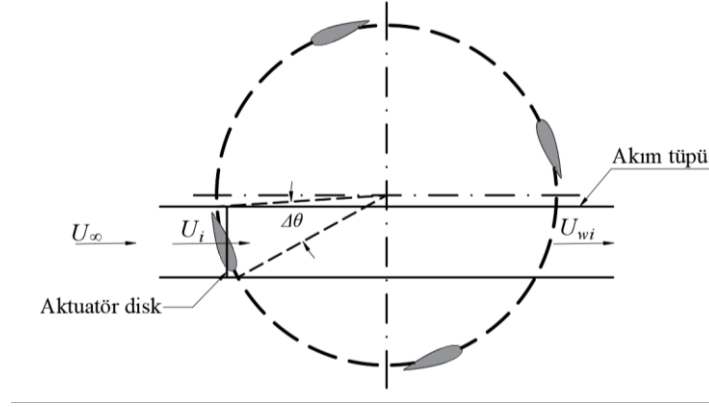
$$T_i = F_T \cos(\theta) - F_N \sin(\theta) \quad (5.34)$$

$$T_i = \frac{1}{2} \rho w^2 (h c) (C_n \sin(\theta) - C_t \cos(\theta)) \quad (5.35)$$

5.3. Çoklu Akım Tüpü

Bölüm 5.2’de anlatılan tek akım tüplü modelde indüksiyon faktörü türbin genişliği boyunca sabit olarak kabul edilmişti. Fakat kanatlar, azimut açısı değiştikçe akımla farklı şekilde kesişirler. Dolayısıyla akım hızındaki düşüşü gösteren indüksiyon faktörü azimut açısına bağlı olarak değişir.

Türbin performansının ölçülmesinde daha kesin sonuçlar elde etmek için çoklu akım tüpü modelini geliştirilmiştir (Şekil 22). Bu modelde türbin, birden fazla akım tüpüne bölünmüş ve her biri ayrı ayrı çözülmüştür (Daniel ve Nicklas, 2013).



Şekil 22. Çoklu akım tüpü modeli (Daniel ve Nicklas, 2013)

Çoklu akım tüpü modelinde akım tüpleri, türbin rotasyon ekseninin $\Delta\theta$ kadar eşit açılara bölünmesi ile N_θ kadar akım tüpü oluşturulur (Denklem 5.36).

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_\theta} \quad (5.36)$$

Tek kanat için anlık itme kuvveti Denklem 5.35’de gösterilmiştir. Türbinde oluşan ortalama itme kuvveti ise Denklem 5.37’de ifade edilmiştir. Burada N kanat sayısını, $\Delta\theta/\pi$ her bir kanadın rotor ekseninde dönüşü sırasında akım tüpünde geçirdiği zaman oranını ifade etmektedir.

$$T_{ort} = 2 \left(\frac{N\Delta\theta}{\pi} T_i \right) \quad (5.37)$$

Denklem 5.37’deki ortalama itme kuvveti kullanılarak, C_T (itme kuvveti katsayısı) Denklem 5.38’ de bulunmuştur.

$$C_T = \frac{T_{ort}}{0.5\rho U_\infty^2 h R \sin(\theta)(\Delta\theta)} \quad (5.38)$$

$$C_T = \frac{2}{\pi} \left(\frac{Nc}{2R} \right) \left(\frac{w}{U_\infty} \right)^2 \left(C_t \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} - C_n \right) \quad (5.39)$$

Benzer şekilde ortalama tork (Q_{ort}), Denklem 5.33’de gösterilen tek kanadın ürettiği anlık tork vasıtasıyla Denklem 5.40’da hesaplanmıştır.

$$Q_{ort} = N \times \sum_{i=1}^{2N_\theta} \frac{(0.5\rho w^2 hc(C_t)R)}{2N_\theta} \quad (5.40)$$

Buradan da tork katsayısı;

$$C_Q = \frac{Q_{ort}}{0.5\rho U_\infty^2 DhR} \quad (5.41)$$

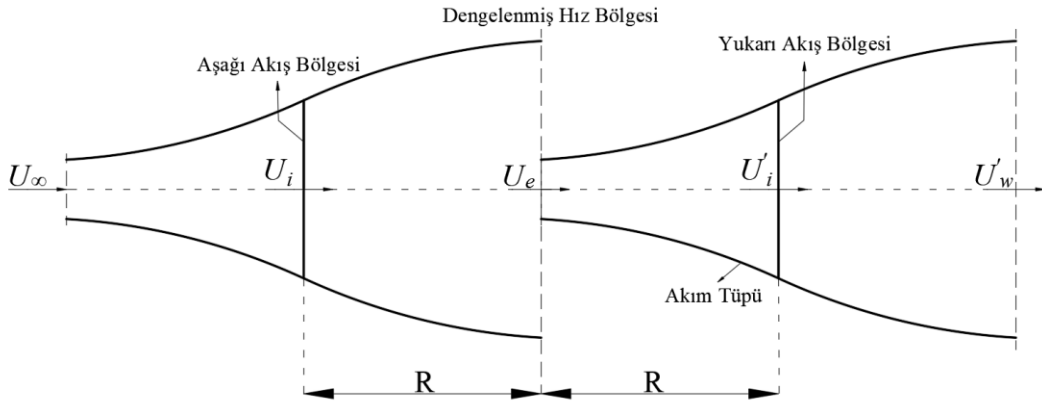
$$C_Q = \left(\frac{Nc}{D} \right) \sum_{i=1}^{N_\theta} \frac{\left(\frac{w}{U_\infty} \right)^2 C_t}{N_\theta} \quad (5.42)$$

olarak bulunur. Güç katsayısı (C_P) da tork katsayısına (C_Q) ve uç hız oranına bağlı olarak elde edilmiştir (Denklem 5.43).

$$C_P = C_Q \lambda \quad (5.43)$$

5.4. Çift Aktüatör Disk Teorisi

Tek aktüatör disk teorisinin dikey eksenli türbinlerde ana dezavantajı türbinin yukarı akım ile aşağı akımı arasında ayırım yapamamasıdır. Bu sorunu çözmek için çift aktüatör disk teorisi geliştirilmiştir (Şekil 23) (Daniel ve Nicklas, 2013). Dikey eksenli türbinlerde kanatlar kesit üzerinde yukarı akışta ve aşağı akışta olmak üzere iki defa geçmektedirler. Çift aktüatör disk teorisinde ise kanatların her geçişi için ayrı bir disk modellenmiştir. Sonuç olarak bu teoride iki farklı indüksiyon faktörü ve disk üzerindeki hız hesaplanmaktadır (Biadgo ve ark., 2013).



Şekil 23. Çift aktüatör disk şematiği (Daniel ve Nicklas, 2013)

Denklem 5.11'de tek aktüatör disk üzerindeki hızı veren denkleme benzer şekilde, aşağı akım bölgesindeki disk üzerindeki hız Denklem 5.44'de gösterilmiştir.

$$U_i = \frac{U_\infty + U_e}{2} \quad (5.44)$$

$$U_i = (1 - a)U_\infty \quad (5.45)$$

Burada U_i aşağı akım bölgesinde disk üzerindeki hızı, U_e ise iki diskin birleşim noktasındaki akım hızını ifade etmektedir. Denklem 5.46'dan dengelenmiş bölgedeki hız elde edilir.

$$U_e = (2U_i - U_\infty) = U_\infty(1 - 2a) \quad (5.46)$$

Benzer işlemler üst akım bölgesi için yapılarak yukarı akım bölgesinde disk üzerindeki hız (U_i') ve indüksiyon faktörü (a') Denklem 5.47 ve 5.48'de gösterilen şekilde bulunur.

$$U_i' = \frac{U_e + U_w'}{2} \quad (5.47)$$

$$a' = \frac{U_e - U_i'}{U_e} \quad (5.48)$$

Buradan aşağı akım bölgesindeki disk hızı için Denklem 5.49'daki bağıntı elde edilir.

$$U_i' = (1 - a')(1 - 2a)U_\infty \quad (5.49)$$

5.5. Çift Çoklu Akım Tüpü Metodu

Çift çoklu akım tüpü metodu (double multiple streamtube, DMST), çoklu akım tüpü yöntemi ve çiftli aktüatör disk modelinin birleşimiyle geliştirilmiştir (Biadgo ve ark., 2013). Çoklu akım tüpü (multiple streamtube) metodunda, akımın türbine giriş kısmı ile çıkış kısmını beraber analiz edilmektedir. Fakat akım türbine girdikten sonra arka kanatlara ulaşınca kadar enerjisinde, dolayısıyla hızında bir miktar düşüş yaşanır. DMST metodunda ise türbin eşit açılarda akım tüplerine ayrılıp, giriş ve çıkış kısımları ayrı ayrı analiz edilir. Bu modelde akım ön kanatlardan U_i hızıyla geçerken

$$C_Q = \left(\frac{Nc}{D} \right) \sum_{i=1}^{N_\theta} \frac{\left(\frac{w}{u_\infty} \right)^2 C_t}{N_\theta} \quad (5.54)$$

Buradaki N_θ akım tüpü sayısını, N kanat sayısını, D türbin çapını, C_t ise teğetsel kuvvet katsayısını göstermektedir.

Tork katsayısı DMST modeline uygun olarak w ve w' için ayrı ayrı çözülerek nihai güç katsayısı, uç hız oranına (λ) bağlı olarak elde edilmiştir (Denklem 5.55).

$$C_P = C_Q \lambda \quad (5.55)$$

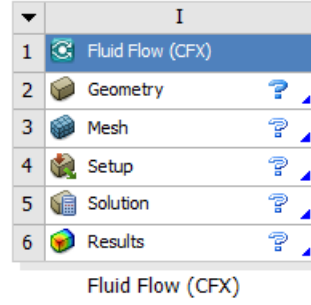
5.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve ANSYS

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkanların akım boyunca noktasal olarak hız, basınç ve ısı değişimleri gibi fiziksel özelliklerini çözümleyen ve görselleştirilmesini sağlayan bilim dalıdır.

Akışkanların hareketi, fiziğin temel konularından olan kütle, momentum ve enerjinin korunum denklemleri yardımıyla genel olarak çözülebilmektedir. Kütle korunum, enerji korunum ve momentum korunum denklemlerinden türetilen Navier-Stokes denklemleri hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Akışkanın hareketini ifade eden bu diferansiyel denklemlerin çözümü sayısal sonlu farklar, sonlu hacim, sonlu elemanlar ve spektral yöntemler ile sağlanmaktadır. Mühendislik uygulamalarında ve HAD analizlerinde daha çok sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir. HAD algoritmalarında kullanılan temel prensip, hesaplama alanı çok küçük ağlar ile bölünerek hücreler oluşturulur. Akış hareketini belirleyen denklemler de bilgisayar yardımı ile her bir hücre için belirlenen sınır şartlarında ayrı ayrı iteratif olarak çözülür. Bu durumda da karmaşık geometrilere çok sayıda hücre oluşacak ve dolayısıyla bu denklemleri çözmek zaman alacak, hatta yeterince donanıma sahip olmayan bilgisayarlar ile çözülemeyecektir (Muratoğlu, 2014). Fakat akışın hareketini anlamada bir diğer yöntem olan, deneysel çalışmalara göre çok daha az maliyetle ve daha kısa zamanda çözüme ulaşılabilmektedir. Ayrıca deneysel

çalışmalarda akımın her noktasında veri alınamaması dezavantajına karşın HAD analizleri ile akış alanı içerisindeki her noktadan veri alınabilmektedir (Bakırcı, 2018).

HAD algoritması genel olarak geometrinin tanımlanması, akış alanının hücrelere bölünmesi, çözüm ve sonuç olmak üzere 4 bölümden oluşur. Bu bölümler birçok farklı program tarafından yapılabilmektedir. ANSYS bu 4 kısmı Fluent ve CFX paketi altında birleştirmiş ve akış alanı analizine olanak sağlamıştır (şekil 25).



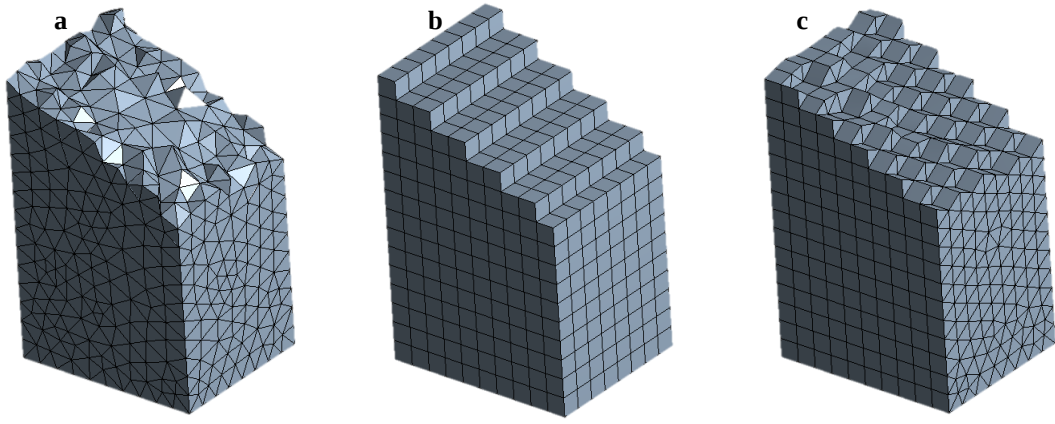
şekil 25. ANSYS CFX çözüm aşamaları

5.6.1. ANSYS CFX-Fluent çözüm aşamaları

İlk aşamada sistemin geometrisinin oluşturulması gerekmektedir. Burada, çözülmek istenen geometri AutoCad, SolidWorks gibi ticari programlarda çizilip ANSYS'e aktarılacağı gibi ANSYS'in içerisinde bulunan DesignModeler yardımı ile de çizilebilmektedir.

HAD analizlerinin en önemli kısımlarından biri de geometriye uygun ağ yapısını ve hücrelerin oluşturulmasıdır. HAD kodları korunum denklemlerini hücreler arasında iteratif olarak çözerek sonuca ulaştığı için, hücrelerin birbiri ve geometri ile uyumu, hücrelerin sayısı ve şekilleri sonucu önemli ölçüde etkilemektedir.

İki boyutlu analizlerde genellikle üçgen ve dikdörtgen şeklinde hücreler kullanılmakta olup, basit geometrilerde ve akımın çok rahatsız edilmediği durumlarda çoğunlukla dikdörtgen hücreler tercih edilirken, karmaşık ve akımda ani değişikliklerin olduğu geometrilerde üçgen hücreler tercih edilmektedir. Üç boyutlu analizlerde ise dörtyüzlü, piramit, prizma ve altıyüzlü elemanlar kullanılmaktadır. İki boyutlu analizlere benzer şekilde basit geometrilerde altıyüzlü hücreler tercih edilirken, kompleks geometrilerde dörtyüzlü hücreler daha çok tercih edilmektedir (Kaba, 2011). Başlıca hücre çeşitleri şekil 26'da gösterilmiştir.

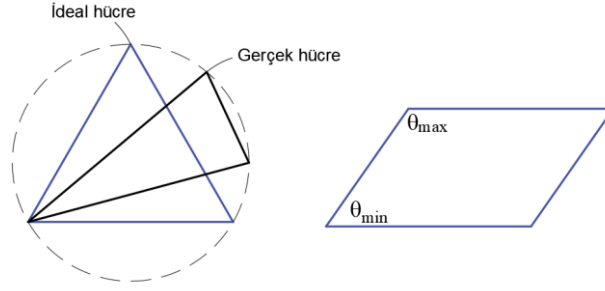


Şekil 26. Dörtüzlü (a), altıyüzlü (b) ve prizma (c) şeklinde ağ yapıları

Ağ yapısı oluşturulurken, geometriye bağlı olarak ağ yapısında lokal veya genel olarak sıklaştırma ve yüzey katmanı oluşturma gibi bir takım iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Akım özelliklerinde büyük değişikliklerin yaşandığı akım alanındaki kritik bölgelerde doğru sonuç elde etmek için, bu bölgelerde daha yoğun bir ağ yapısı oluşturulur. Bu durum sıklaştırma olarak adlandırılır. Sıklaştırma bölgesindeki komşu hücreler arasındaki büyüme oranı genel olarak 1.2 olarak alınır. Ayrıca, türbin kanatlarının çevresi gibi akım alanında yüksek eğriliklerin bulunduğu bölgelerde, viskoz etkilerini doğru bir şekilde görmek için yerel bir sıklaştırma yapılır buna yüzey katmanı (inflation layer) denir.

Oluşturulan ağ yapısının kalitesi çarpıklık, ortogonal kalite ve en boy oranına (aspect ratio) bakılarak değerlendirilir. Çarpıklık, üçgen ve dörtüzlü elemanlar için, hücrelerin optimum hücreden ne kadar uzak olduğunun ifadesidir. Optimum hücre büyüklüğü, mevcut hücre ile eş dış teğet çembere sahip eşkenar üçgenin boyunu ifade etmektedir (Şekil 27). Dikdörtgen ve altıyüzlü hücrelerde ise çarpıklık köşegenlerde oluşan maksimum ve minimum açıya göre hesaplanmaktadır Denklem (5.56). Bu denklemde θ_e eşkenar yüzeyin açısını ifade etmektedir (Ansys, 2015).

$$\text{Çarpıklık} = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (5.56)$$



Şekil 27. Hücrelerde çarpıklığın belirlenmesi

Çarpıklık 0 ile 1 arasında değişmekle birlikte, 0'a yakınlığı nispetinde oluşturulan ağın kalitesi olduğunu göstermektedir. Genel olarak makul bir ağ yapısı oluşturmak için çarpıklığı 0.5-0.6'nın üzerinde olan hücrelerin sayısının nispeten çok daha az olması istenir.

Ağ kalitesinin bir diğer göstergesi olan ortogonal kalite Denklem 5.57'te 3 boyutlu hücrelerin yüzeyleri için ifade edilmiştir. Ortogonal kalite değeri de 0-1 arasında değişmektedir. Analizi yapılacak ağın kaliteli olması ve doğru sonuçları vermesi için ortogonal kalitenin, hücrelerin büyük çoğunluğunda 0.5-0.6 değerinden büyük olacak şekilde 1'e yakın olması istenir.

$$\text{Ortogonal kalite} = \min \left[\frac{A_i \cdot e_i}{\|A_i\| \|e_i\|} \right] \quad (5.57)$$

Burada A_i yüzeyin normal vektörünü ifade ederken, e_i ise yüzeyin merkezinden kenarın orta noktasına doğru olan vektörü ifade etmektedir. En boy oranı (aspect ratio) ise uzun kenarın kısa kenara oranını ifade etmektedir. Yüksek kaliteli ağ elde etmek için bu değeri 1'e yakın tutmak gerekmektedir.

HAD analizlerinin üçüncü kısmını çözüm bölümü oluşturmaktadır. Bu aşamada programa akış türü, akışkanın fiziksel özellikleri, çözümde kullanılacak olan algoritmalar, türbülans modelleri, türbülans yoğunluğu ve çözüm hassasiyeti gibi parametreler tanımlanarak sistem çözülmemektedir.

HAD analizlerinin çözümünde, basınç tabanlı ve yoğunluk tabanlı olmak üzere iki ana algoritma vardır. Düşük hız ve sıkıştırılamaz akışlar için basınç tabanlı algoritmalar uygunken, yüksek hız ve sıkıştırılabilir akışlar için yoğunluk tabanlı algoritmaların kullanılması daha uygun olmaktadır. Basınç tabanlı çözümler SIMPLE, SIMPLEC, COUPLED, PISO ve FSM olmak üzere 5 algoritmadan oluşmaktadır. Daimî

olmayan akışlarda genellikle PISO ve FSM kullanılırken daimî akışlarda daha stabil sonuçlar vermesinden dolayı genellikle SIMPLE algoritması seçilmektedir.

Çözüm kısmında tanımlanması gereken bir diğer önemli parametre ise akış türüdür. Reynolds sayısının 2000-2500 değerinden düşük olduğu akışlarda laminar çözüm kullanılırken, bu değerlerden daha büyük Reynolds sayısına sahip akışlarda ise türbülanslı çözüm kullanılmaktadır. Türbülanslı akışların Navier-Stokes denklemleri ile çözümünün çok zaman alması ve mevcut bilgisayarlar ile çözümünün pek mümkün olmaması gibi sebeplerden dolayı, deneysel verilerle elde edilen yarı ampirik türbülans modelleri geliştirilmiştir (Bakırcı, 2018).

Birçok türbülans modeli bulunmasına karşın bu modeller; 0 denklemlilik, bir denklemlilik ve 2 denklemlilik modeller olarak 3 başlık altında toplanabilir. Tek denklemlilik modellerde sadece türbülans kinetik enerjisi kullanılırken, iki denklemlilik modellerde türbülans kinetik enerjisinin yanında ε (türbülans yitirim hızı) ve ω (türbülans yitirim hızının kinetik enerjiye oranı) ifadelerinde kullanılarak daha doğru sonuçlar elde edilmektedir (Muratoğlu, 2014).

$k-\varepsilon$ modeli kısa sürede çözüme ulaşması, çeşitli akışlarda makul sonuçlar vermesi sebebiyle birçok türbülanslı akışlarda kullanılmaktadır. Fakat bu model sınır katmanları ile karşılaştıkları zaman, yüzeyde meydana gelen ayrışma noktasını geç tahmin etmesi ile beraber ayrılma miktarını da doğru hesaplayamaya bilmektedir. Türbin, uçak kanatları gibi ayrışmanın önemli olduğu analizlerde genellikle tercih edilmemektedir (ANSYS, 2006). $k-\omega$ modeli ise $k-\varepsilon$ modelinin aksine birçok aerodinamik durumda özellikle ayrılmaların gözlemlendiği akışlarda daha doğru sonuçlara ulaşmaktadır. Fakat bu model yakınsamada güçlük çekmektedir (Monk ve Chadwick, 2017). SST (shear stress transport) $k-\omega$ modeli ise $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ modellerinin birlikte çalıştırılması ile oluşturulmuştur. Bu modelde duvara yakın kısımlarda $k-\omega$ ile akış çözülürken duvardan uzak kısımda $k-\varepsilon$ ile çözülür (Bulat ve Bulat, 2013). Mevcut çalışmadaki analizlerde, doğruluğu yüksek ve yakınsama süresi daha kısa olması sebebiyle $k-\omega$ SST modeli kullanılmıştır.

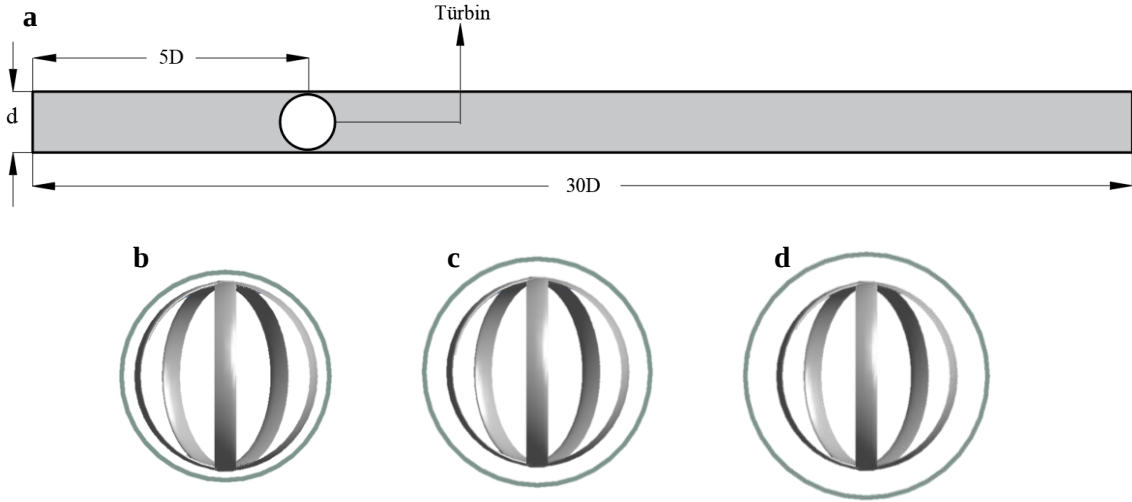
HAD analizlerinin son kısmı olan sonuç kısmında ise akım çizgileri, akım vektörleri, hız konturları, basınç konturları gibi sonuçlar görselleştirilebilmekte ve bunların grafikleri oluşturulabilmektedir.

6. BÖLÜM

HAD MODELİNİN OLUŞTURULMASI

6.1. Türbin Geometrisi

Bölüm 5.7’de bahsedildiği üzere ANSYS CFX paketi akış alanını geometri oluşturma, ağ oluşturma, çözüm ve sonuç kısmı olmak üzere 4 adımda analiz etmektedir. Mevcut çalışmada sistemin geometrisi ANSYS DesignModeler yardımı ile çizilmiştir. Geometri 30 m uzunluğunda boru hattı ile 1 m çaplı türbinden oluşturulmuş olup türbinin tasarım parametreleri Tablo 7.1’de verilmiştir (Şekil 28a). Bölüm 4.6’da literatürdeki çalışmalarla, blokaj etkisinin türbin performansı üzerindeki etkisi ifade edilmiş ve blokaj oranı arttıkça türbin performansının arttığı gösterilmiştir. Bu sebeple mevcut çalışmada boru hattının çapı 1.1 m olarak seçilmiştir (Şekil 28b). Bununla beraber blokaj etkisinin gözlemlenebilmesi amacı ile boru çapı 1.2 m (Şekil 28c) ve 1.3 m’ye (Şekil 28d) çıkartılarak analizler tekrarlanmıştır (Bölüm 7.3).



Şekil 28. HAD tasarımı geometrisinin genel görünümü (a), 1.1 (b) 1.2 (c) 1.3 (d) metre çaplı sistemin ön görünüşü

6.2. Çözüm Ağı

6.2.1. Çözüm ağının doğruluğu

Bölüm 5.7.1.’de bahsedildiği üzere çözüm ağının kalitesi simülasyon sonucunu önemli ölçüde etkilemektedir. Mevcut çalışmanın konusu olan türbin analizlerinde, kanatlar etrafında akım özelliklerinde ani değişiklikler gözlemlendiği ve bu bölgedeki ufak sapmaların bile güç, tork ve verimlilik gibi önemli parametreler üzerinde etkisinin

büyük olduğu göz önüne alındığında, özellikle bu bölgelerde ağ yapısının güçlü tutulması gerektiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte ağ yapısının gereğinden fazla sıklaştırılması, sonucu ihmal edilebilecek düzeyde etkilemesine karşın simülasyon süresini aşırı derecede artırabilmekte, hatta yakınsamanın gerçekleşmemesine sebep olabilmektedir. Bu sebeple mevcut tez kapsamında doğru ağ yapısının seçilebilmesi için Bölüm 6.2.2’de bahsedilen ağ yapısı kullanılmak suretiyle farklı hücre sayılarına sahip (ağ yoğunluğu) 3 farklı ağ yapısı oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır (Tablo 6.1).

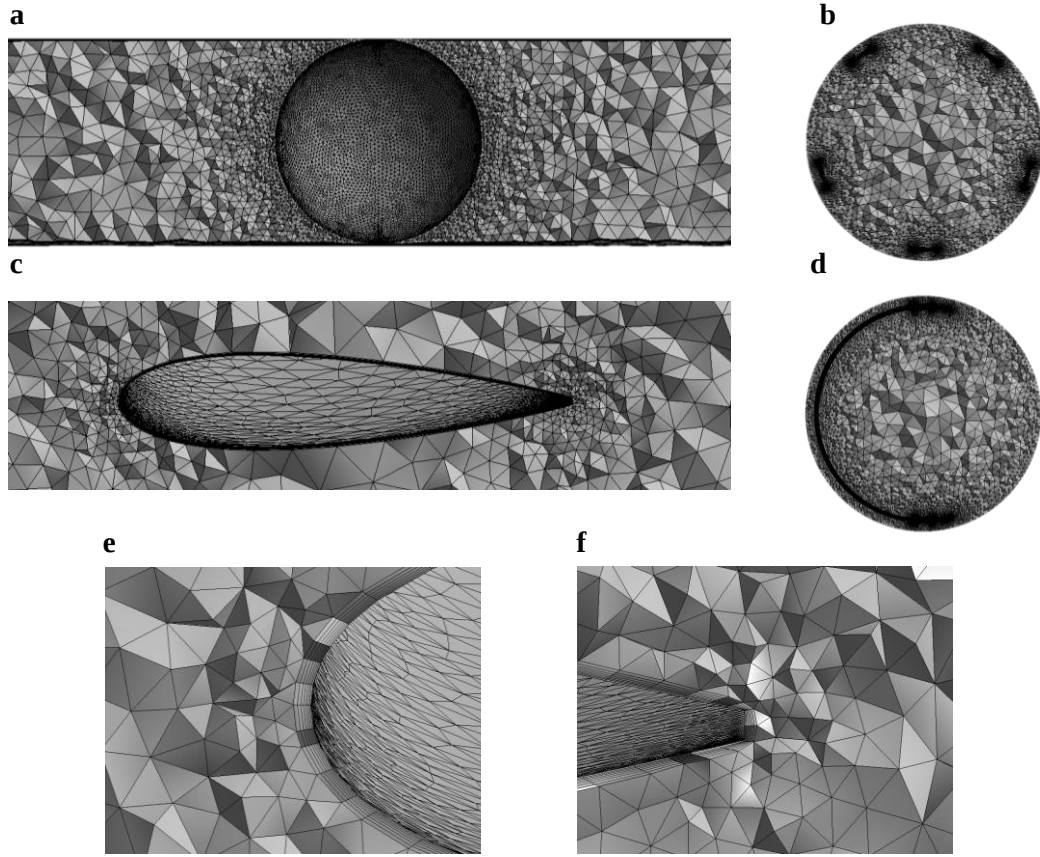
Tablo 6.1 Aynı geometrinin farklı ağ yapılarında analizi

Ağ Yapısı	Ağ Sayısı (10 ⁶)	Güç (Watt)
Zayıf	9.2	2399
Orta	9.9	2551
Güçlü	10.8	2540

Bu sonuçlar doğrultusunda zayıf ağ yapısından elde edilen güç ile orta ağ yapısından elde edilen güç arasında yaklaşık %6’lık bir fark görülmektedir. Fakat orta ve güçlü ağ yapıları karşılaştırıldığında aradaki farkın %0.5’e düştüğü görülmektedir. Orta seviyedeki ağ yapısının güçlendirilmesi ile sonucun dikkate değer şekilde değişmediği değerlendirilerek ve bilgisayar simülasyonlarının süre ve bellek ihtiyaçları göz önüne alınarak bundan sonraki analizlerde hücre sayısı, orta seviyedeki ağa benzer yapıların kullanılmasına karar verilmiştir.

6.2.2. Analizlerde kullanılan ağ yapısının detaylı incelenmesi

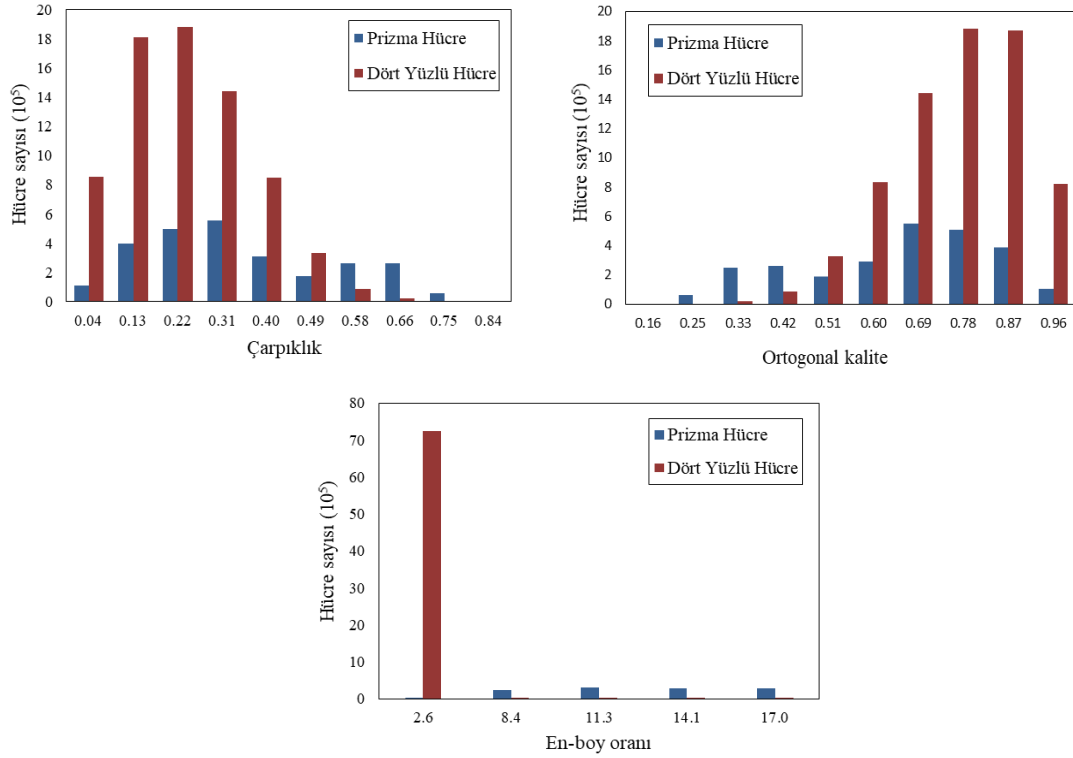
Sistem, kanatları çevreleyen küresel bir kısım ile borunun geri kalan kısmı olmak üzere iki parçaya ayrılarak ağ oluşturulmuştur. Küresel olarak seçilen kısım türbin kanatlarının döndüğü, dolayısıyla akım özelliklerinin ani değişimler yaşadığı kritik bölge olduğu için borunu diğer kısımlarına göre daha sık ağ yapısı oluşturulmuş olup, bu bölgede elaman boyutu 20 mm olarak seçilmiştir (Şekil 29a). Ayrıca kanatların hücum ve firar kenarlarında akım özelliklerinde ani değişimler görüleceği için, bu bölgelerde eğim açısı 13° tutularak ağ yapısı yoğunlaştırılmıştır (Şekil 29b). Sistemin ağ yapısı yaklaşık olarak 11 milyon hücre ve 3 milyon düğüm noktasından oluşturulmuştur.



Şekil 29. Geometrinin ağ yapısının farklı kesitlerden görselleştirilmesi

Kanatlar etrafında ve boru çeperi üzerinde akımda meydana gelecek viskoz etkilerini daha doğru hesaplayabilmek için, bu bölgelerde 7 tabakadan oluşan ve büyüme katsayısı 1.2 olan yüzey katmanı tanımlanmıştır (Şekil 29 e, Şekil 29 f).

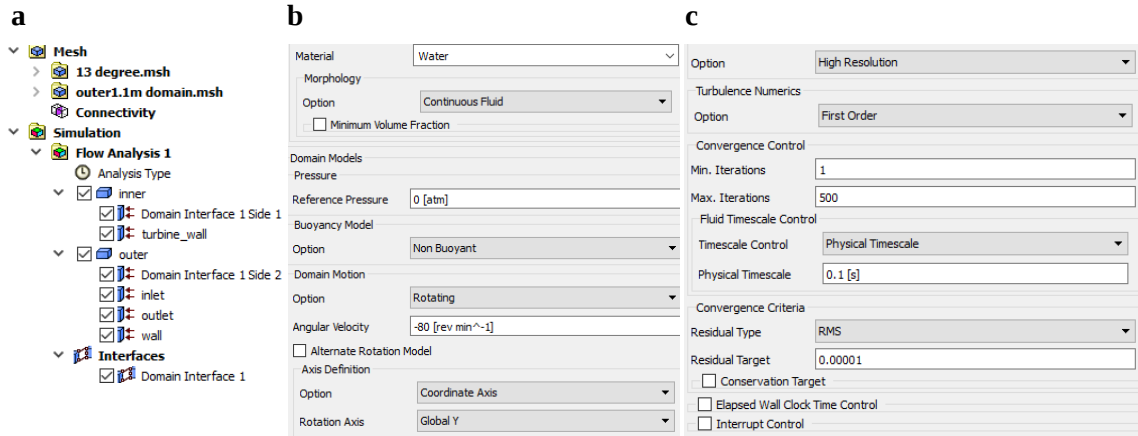
Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere oluşturulan ağın kalitesi ortogonal kalite, çarpıklık ve en-boy oranına bakılarak öngörülelebilmektedir. Mevcut çalışmada maksimum ve ortalama çarpıklık sırasıyla 0.88 ve 0.25 olarak bulunmuştur. Ayrıca çarpıklığın hücre sayısına göre dağılımı Şekil 30'da gösterilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, hücrelerin çok büyük bir çoğunluğunun çarpıklığının 0.5'den az olduğu ve hücrelerde sıfıra doğru yığılmaların olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum da ağ kalitesi açısından istenilen bir durumdur. Ortogonal kalitede ise tam tersi bir durum aranmaktadır. Şekil 30'da ortogonal kalite-hücre sayısı grafiğinde görüldüğü üzere mevcut çalışmada hücrelerin büyük kısmı 1'e yakın olarak kümelenmiş olup ortalama ortogonal kalite ise 0.78 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde kullanılan ağ yapılarında en-boy oranının da 1'den çok büyük olmadığı, makul bir grafik ortaya çıkmaktadır.



Şekil 30. Ağ kalitesini gösteren parametrelerin grafikleri

6.3. Sınır Şartları ve Çözüm Algoritmasının Tanımlanması

Simülasyon çalışmaları için modelin kurgusu ANSYS CFX paketi ile oluşturulmuştur. Bu aşamada iç ve dış olmak üzere 2 farklı akım bölgesi (domain) oluşturulmuştur (Şekil 31a). İç bölge programa dönen hacim olarak tanımlanmıştır. Literatür çalışmalarından yola çıkılarak, türbinin makul uç hız oranlarındaki (1-5) performansının incelenmesi adına, hareketli çerçevenin dakikada 80 devir yapacak şekilde y ekseninde dönmesi sağlanmıştır (Şekil 31b).



Şekil 31. CFX çözüm bölümünün oluşturulması

Sistem hız girişli ve basınç çıkışlı olarak çözdürülmüş olup boru duvarında ve türbin kanatlarında kaymazlık koşulu seçilmiştir. Analiz koşulları oluşturulurken CFX'in, SST türbülans modelini kullanarak, 0.1 saniye zaman aralıklarıyla geometriyi çözmesi sağlanmıştır. Ayrıca yakınsama kriteri olarak kalıntıların 10^{-5} e kadar düşmesi istenmiştir. (Şekil 31c). Daha detaylı çözüm parametreleri Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

Tablo 6.2 Akımın ve modelin tasarım Parametreleri

Kriterler	Parametreler
Akım hızı aralığı (m/s)	0.8, 1, 1.5, 2, 2.5, 3.5, 4, 4.5, 6.5
Akım yönü	z ekseninde
Çıkış basıncı (KPa)	686.7
Hareketli çerçevenin açısal hızı (dev/dk)	80
Max iterasyon sayısı	500
Türbülans modeli	<i>k-ω SST</i>
Yakınsama kriteri	1×10^{-5}

7. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

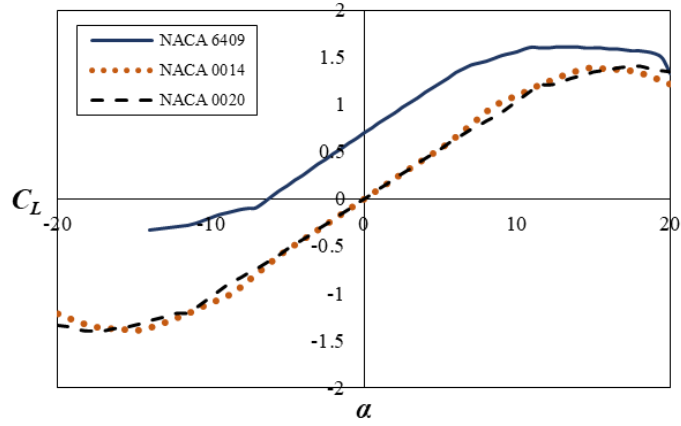
7.1. Türbin Tasarım Aşamaları ve QBlade Sonuçları

7.1.1. Kanat kesiti seçimi

Kanat kesitleri türbin kanatlarının en önemli bileşenini oluştururlar. Kullanılan profilin hidrodinamik performansı, türbinin güç üretme kapasitesini belirler. Genellikle, kanat profillerinde maksimum kaldırma/sürüklenme (L/D) oranı istenmektedir. Genel olarak hidrofoilin yüzde kalınlığı arttıkça L/D oranı düşmektedir. Fakat özellikle su ortamında çalışan hidrokinetik türbin kanatlarında meydana gelebilecek büyük hidrodinamik yüklerin, stabilite problemine sebep olmaması için nispeten daha kalın hidrofoil kesitlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Niblick, 2012).

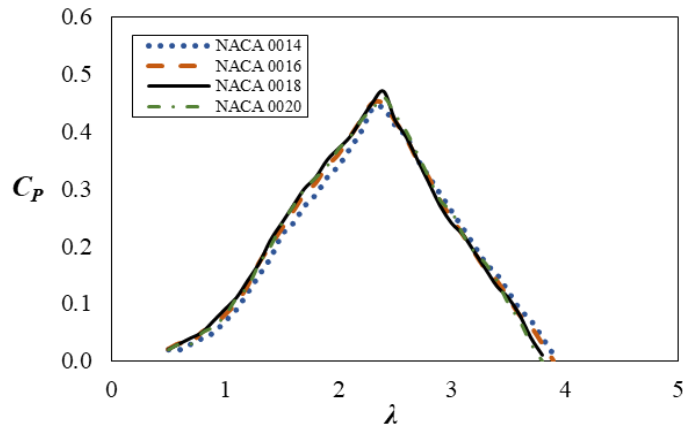
Küresel türbinler diğer hidrokinetik türbin sistemlerine nazaran daha yeni bir teknoloji olduğu için tasarım kriterleri tam olarak kendine has bir kimlik kazanmamıştır. Küresel türbin tasarımına en yakın sistemler Darrieus hidrokinetik sistemlerdir. Dolayısıyla Darrieus türbinlerinde kullanılan bazı yaklaşımlar küresel türbin teknolojisine de uygulanabilir. Dikey eksenli türbinlerde ve literatürdeki diğer bazı küresel türbinlerde genellikle simetrik kanat kesitleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi, dönme boyunca farklı azimut açılara sahip kanat kesitlerinin negatif hücum açılarında maruz kalmalarıdır. Kambur profiller negatif hücum açılarında elverişsiz kaldırma karakteristiği sergilerken, simetrik kesitlerin güç çıkışları değişmez (Consul, 2011).

Şekil 32’de simetrik ve asimetrik NACA profillerinin, hücum açısına bağlı olarak kaldırma karakteristikleri, XFOIL programı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Burada da görüldüğü üzere asimetrik NACA kesitinin negatif hücum açılarında performansı oldukça azalmaktadır.



Şekil 32. Simetrik ve asimetrik kesitlerin performans karşılaştırması

Benzer bir şekilde, daha önce yapılan çalışmalar, dikey eksenli türbin tasarımında simetrik kesitli hidrofoillerin kambur yapılı hidrofoil profillerine göre maksimum verimlerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir (Demircan, 2014). Bu bağlamda, çalışma konusu ile ilgili bilimsel literatürde en çok kullanılan kanat kesitleri % 14, 16, 18 ve 20 kalınlıklarında NACA kesitleridir. Şekil 33’de 5 kanatlı rotorda 0.18 m kord uzunluğuna sahip farklı kalınlıklardaki kesitlerden oluşturulan 4 farklı küresel türbinin analiz sonuçları ile ilgili λ -verim grafiği verilmiştir. Burada simetrik NACA 00xx ailesindeki kesitler benzer λ miktarlarında hemen hemen aynı performansı sergilemektedirler. Maksimum C_P yaklaşık 0.47 olarak λ 2.4 iken elde edilmiştir.



Şekil 33. Kanat kesiti-Güç katsayısı grafiği

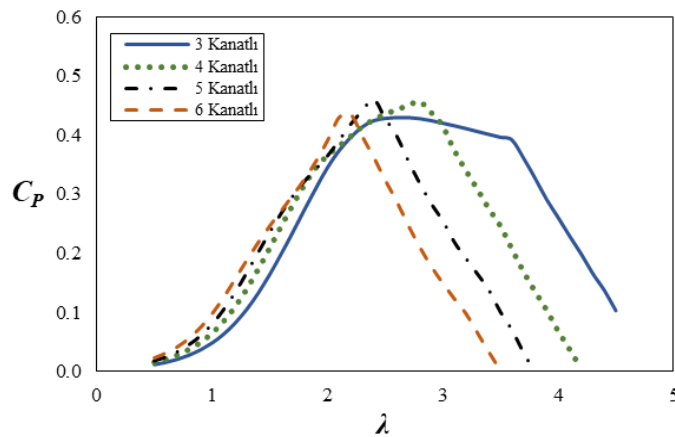
Benzer karşılaştırma literatürde Darrieus türbini için yapılmış ve NACA 0018, NACA 0020 ve NACA 0021 profilleri karşılaştırılmıştır. Maksimum verimlilik mevcut çalışmaya yakın bir şekilde 0.43 olarak λ 2.5 iken elde edilmiştir (Demircan, 2014). Su ortamındaki kanat profillerinin inceliği konusundaki dayanım problemleri yukarıda

ifade edilmişti. Dolayısıyla, su ortamındaki diferansiyel yüklemelerden oluşacak stabilite problemlerinin de hesaba katılması suretiyle bu çalışmada yukarıda gösterilen hidrofoil ailesinin en kalın bireyi olan NACA 0020 profilinin kullanılmasına karar verilmiştir.

7.1.2. Kanat sayısının belirlenmesi

Kanat sayısı türbin performansını ve akımın durumunu etkileyen önemli bir parametredir. Kanat sayısı arttıkça türbinde oluşan titreşim azalmaktadır (Daniel ve Nicklas, 2013). Fakat türbin performansı kanat sayısı ile doğru orantılı olarak artmamaktadır. Literatürde Darrieus türbinlerinde yapılan çalışmalarda Bölüm 4.3’de bahsedildiği üzere genel olarak üç ve dört kanat sayılı türbinlerin optimum sonuçlar verdiği söylenmiştir. Küresel hidrokinetik türbinlerle ilgili çok fazla çalışma olmamakla birlikte Lucid hidrokinetik türbinlerde beş kanatlı sistemler kullanılmıştır (Lucid Energy, 2017).

Mevcut çalışmada kanat sayısının türbin performansına etkisi Şekil 34’de gösterilmiştir. Buna göre yüksek kanat sayılarında bir miktar daha güç üretimi gözlenmektedir. Fakat kanat sayısının artmasıyla türbinin verimli olduğu λ aralığının azaldığı ve yüksek λ değerlerinde daha kötü performans elde edildiği görülmektedir. Maksimum güç katsayısının beş kanatlı türbinde elde edilmesi ve yukarıda bahsedildiği üzere titreşim probleminin daha az oluşmasından dolayı mevcut çalışmada beş kanatlı türbinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 34. Kanat sayısının türbin performansına etkisi

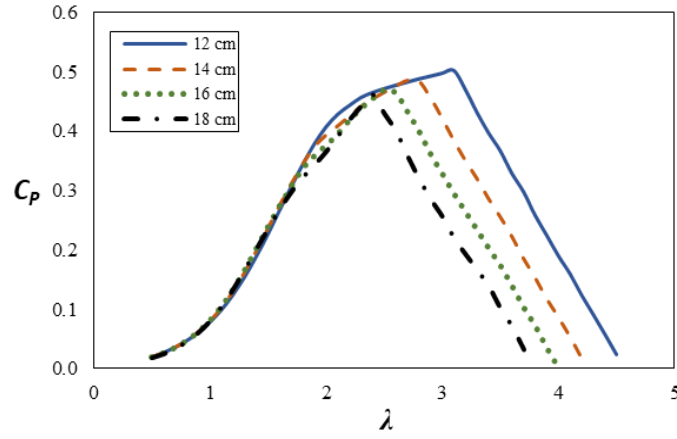
7.1.3. Solidite ve kord uzunluğu

Bölüm 4.2’de dikey eksenli Darrieus türbinler için solidite ifade edilmiş ve Denklem 4.2’de gösterilmiştir. Mevcut çalışmada küresel türbin kullanıldığı için kanat yüksekliği boyunca yarıçap değişecek olmasından dolayı bu denklemin kullanılması doğru olmayacaktır. Denklem 7.1’de küresel türbin için kullanılacak olan solidite ifadesi verilmiştir. Burada denklemin pay kısmında kullanılan πR tek bir kanatın uzunluğunu ifade ederken, payda kısmı da kürenin alanını ifade etmektedir.

$$\sigma = \frac{Nc(\pi R)}{4\pi R^2} \quad (7.1)$$

Bölüm 4.2’de literatürde solidite ile ilgili yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Buna göre optimum solidite değeri yaklaşık olarak 0.2-0.3 olması beklenilmektedir. Mevcut çalışmada çapı 1 m olan boru hatlarına göre tasarım yapıldığı için türbin çapı değişmeyecektir. Optimum soliditeyi ve tasarımda kullanılacak kord uzunluğunu tayin etmek için kanat sayısı sabit tutularak farklı kord uzunluklardaki türbin performansları DMST yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Şekil 35’te beş kanatlı ve aynı kanat profiline sahip, kord uzunlukları farklı beş hidrokinetik türbinin performans grafiği görülmektedir. Bölüm 4’de anlatılan literatürdeki diğer çalışmalara paralel bir şekilde solidite arttıkça maksimum güç katsayısına daha düşük uç hız oranlarında ulaşılmış ve düşük soliditede, yüksek verimin sağlandığı uç hız oranı aralığının genişlediği görülmüştür. Ayrıca düşük uç hız oranlarında türbin performansının, soliditeden dikkate değer ölçüde etkilenmediği anlaşılmıştır.

Karşılaştırılan beş hidrokinetik türbin arasında, kord uzunluğu 12 cm iken güç katsayısı maksimum değere ulaşmıştır. Bu durumda Denklem 6.2 kullanılarak solidite hesaplandığında, literatürdeki çalışmalara göre beklenen bir şekilde 0.3 olarak bulunmuştur. Şekil 35 göz önüne alındığında, daha yüksek verimle çalışabilmesinden dolayı bu çalışmada 12 cm kord uzunluğuna sahip profillerin kullanılmasına karar verilmiştir. Nihai türbin geometrisi ve parametreleri Tablo 7.1’de verilmiştir.



Şekil 35. Kord uzunluğunun türbin performansına etkisi

Tablo 7.1 Nihai türbin parametreleri ve görüntüsü

Kriterler	Parametreler	
Türbin tipi	Küresel hidrokinetik	
Çap	1 m	
Kanat sayısı	5	
Kanat kesiti	NACA 0020 (Simetrik)	
Kord uzunluğu	12 cm	
Solidite	0.3	
Uç hız oranı	0.5-4.5	

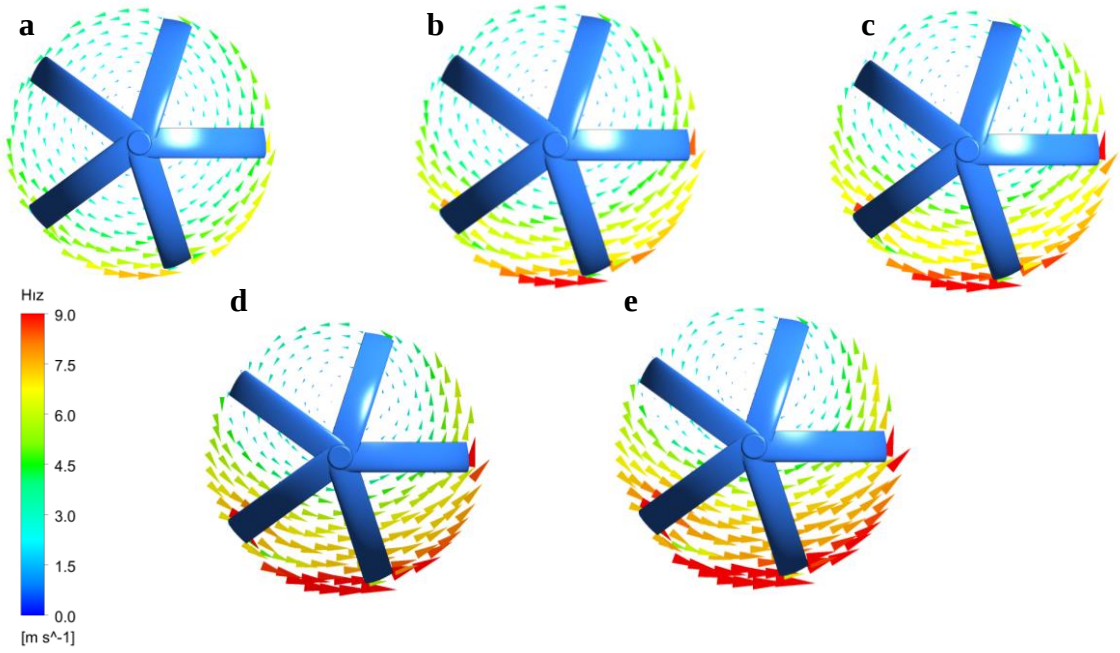
7.2. HAD Sonuçları

Bu bölümde 1.1 m çaplı boruya yerleştirilen nihai türbin geometrisinin 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 6.5 m/s akım hızlarındaki HAD analizleri yapılmıştır. Akım durumu görselleştirilmiş ve türbin performans grafikleri oluşturulmuştur.

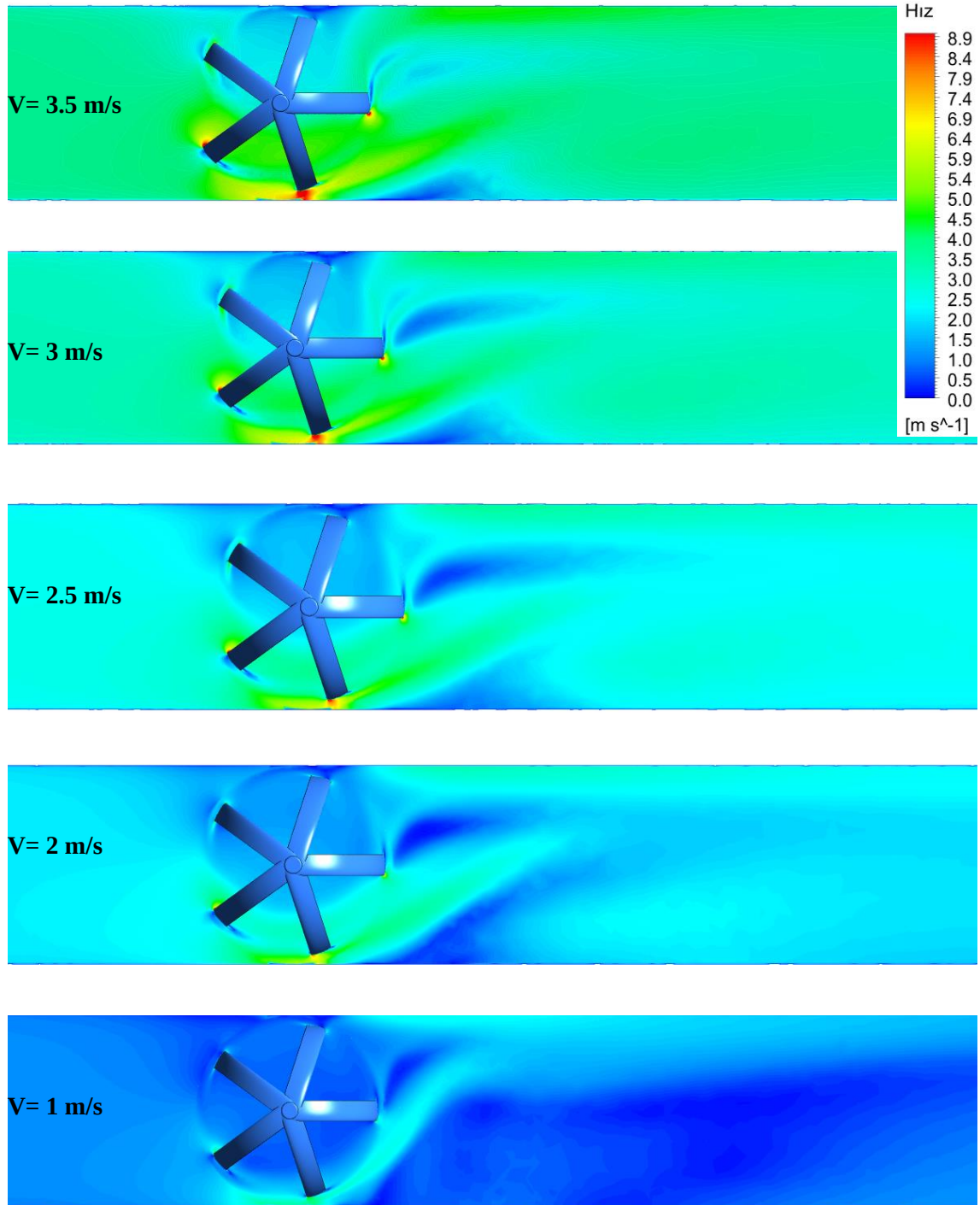
7.2.1. Hız ve basınç konturlarının oluşturulması

HAD analizleri sonucunda, türbin performansının belirlenmesinin yanı sıra kanatlar etrafındaki ve boru içerisindeki akım koşullarının simülasyonu yapılabilmektedir. Şekil 36'da kanatlar etrafında hız vektörlerinin farklı akım hızlarındaki durumu görülmektedir. Burada hız vektörlerinin tüm kanatlara hücum kenarından çarptığı görülmekle beraber, türbinin dönme ekseninden dolayı suyun, alt kanatlara daha hızlı çarptığı görülmektedir. Şekil 37 ve 38'de sırasıyla hız ve basınç konturları görselleştirilmiştir. Şekil 37'de görüldüğü üzere kanat geometrisinden ve hücum açısından dolayı kanatların iç ve dış yüzeylerinde hız farkları oluşmuştur. Bu durumda

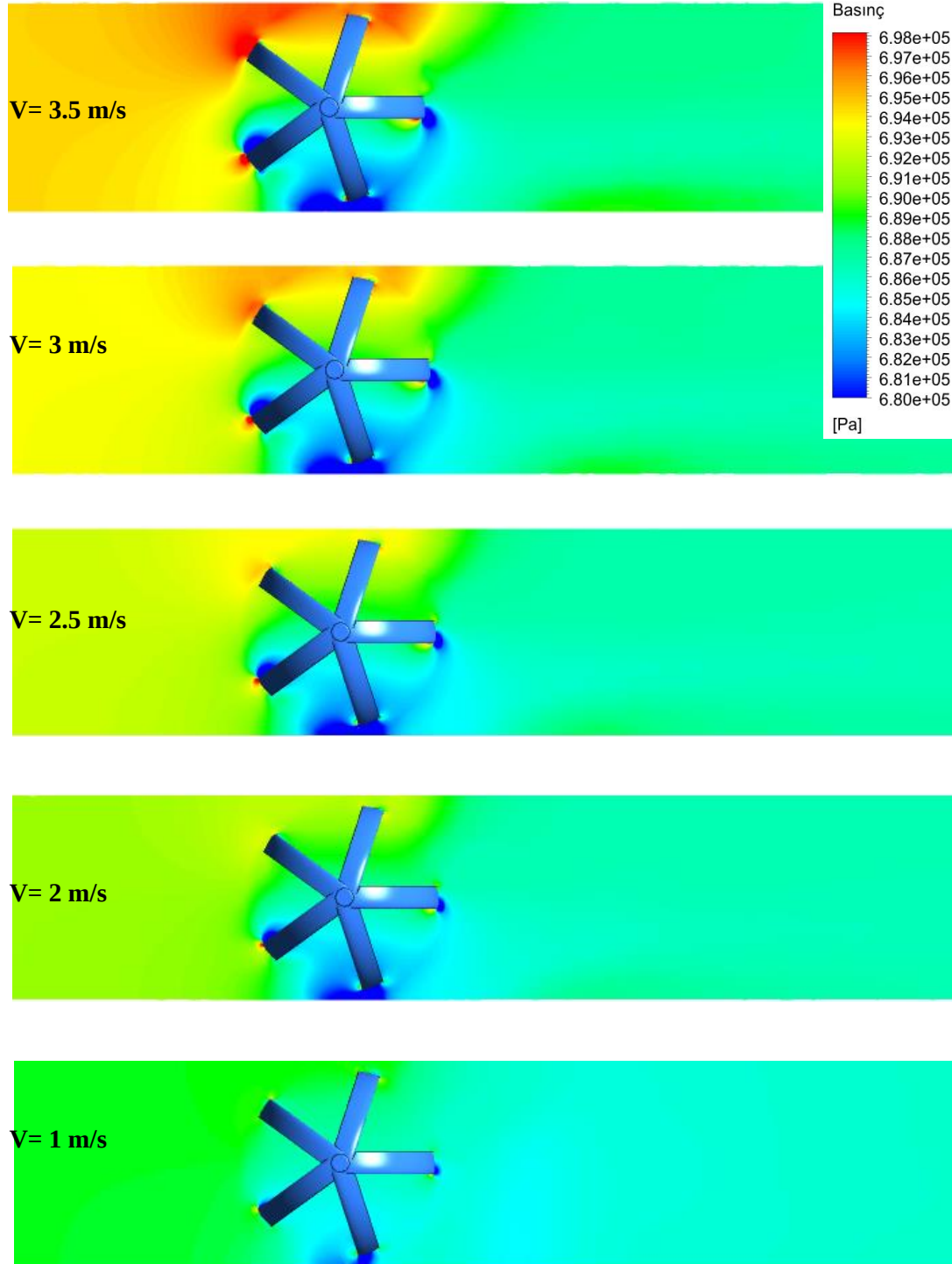
Denklem 5.5 de verilen Bernoulli eşitliği göz önüne alındığı zaman hız yükü ile basınç yükü ters orantılı olarak değişeceği dolayısıyla alçak ve yüksek basınç alanları oluşacağı anlaşılmaktadır. Şekil 38’de basınç konturları incelendiğinde kanatların iç ve dış yüzeylerinde, azimut pozisyonuna bağlı olarak yüksek basınç ve alçak basınç bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Bölüm 3.3’de de bahsedildiği üzere bu basınç farkları da türbin kanatlarında tork oluşturarak rotorun dönmesini sağlamaktadır.



Şekil 36. (a)1, (b)2, (c)2.5, (d)3, (e)3.5 m/s akım hızlarında türbin kanatlarına göre oluşan hız vektörleri



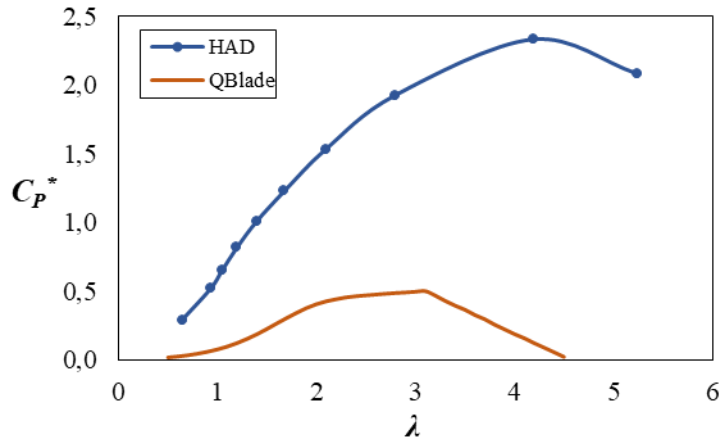
Şekil 37. Farklı akım şartlarında oluşan hız konturlarının görselleştirilmesi



Şekil 38. Farklı akım şartlarında oluşan basınç konturlarının görselleştirilmesi

7.2.2 Tasarlanan türbin performansının incelenmesi

HAD analizlerinde Tablo 6.1 ve 6.2’de verilen parametreler doğrultusunda, tasarlanan hidrokinetik sistemin verimi ve güç çıkışı incelenmiştir. Açısal hız (ω) ile giriş hızının (v) ifadesi olan uç hız oranının (λ) verim üzerinde doğrudan etkili olması sebebiyle Şekil 39’da HAD ve QBlade analizleri sonucunda elde edilen λ - C_P^* grafiği birlikte verilmiştir. QBlade analizinde maksimum güç katsayısı 0.50 olarak λ 3.0’iken elde edilmesine karşın HAD analizlerinde blokaj etkisinden dolayı çok daha yüksek bir şekilde 2.33 olarak λ 4.2’de elde edilmiştir (Tablo 7.1). Burada, QBlade sonuçlarının literatürdeki diğer çalışmalarda olduğu gibi maksimum verimin λ 2-3 arasında iken elde edildiği de görülmüş olmasına karşın Bölüm 4.6’da bahsedildiği üzere blokaj etkisinden dolayı HAD sonuçlarında, maksimum C_P^* değerinin grafikte bir miktar sağa kaydığı gözlemlenmiştir. Mevcut çalışmadaki blokaj etkisi Bölüm 7.3’de daha detaylı olarak ifade edilmiştir.

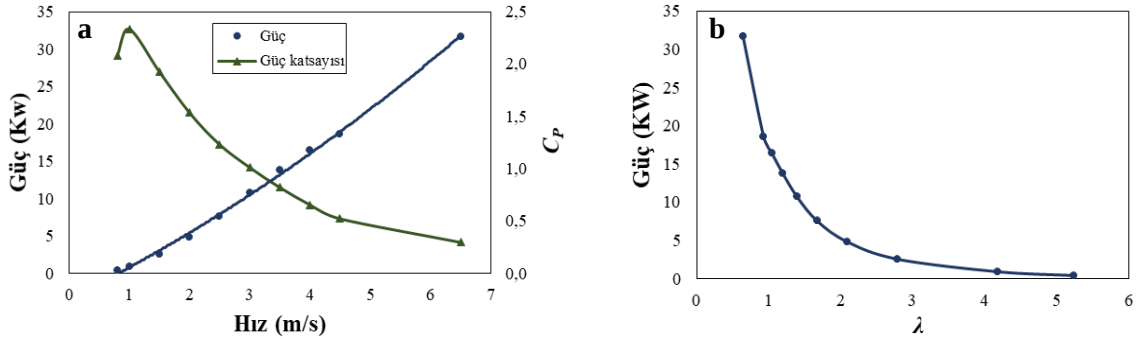


Şekil 39. HAD ve QBlade analizleri ile elde edilen C_P - λ grafiği

Nihai geometrinin güç-hız / C_P^* -hız ve güç- λ grafiği Şekil 40’da gösterilmiştir. Denklem 5.16’da verilen güç çıkışı fonksiyonu göz önüne alınırsa, güç çıkışının giriş hızının küpüyle orantılı olarak artış göstermesi gerekmektedir. Fakat giriş hızı arttıkça λ ters orantılı olarak düşmekte ve λ 4.2’nin altına düştüğünde güç katsayısı önemli ölçüde azalmaktadır (Şekil 39). Bu sebeple Şekil 40a’daki güç-hız grafiği lineere yakın bir eğri çizmektedir. Sonuç olarak, uç hız oranı mevcut türbin için 3.5-4.5 aralığında tutularak, giriş hızının ve açısal hızın orantılı bir şekilde artırılması ile güç çıkışının kübik bir şekilde artacağı ve maksimum performansla çalışacağı öngörülmektedir.

İsale hatlarının tasarımı yapılırken ileride oluşabilecek aşınmaların önüne geçilmesi amacıyla genellikle 0.8-1.8 m/s akım hızı tavsiye edilmektedir. Bunun

yanında, gerekli durumlarda akım hızı 5 m/s'ye kadar artırılabilir (Gedik, 2005). Fakat boru hattının, hidrokinetik türbin yerleştirileceği kısmında lokal daralma oluşturularak akım hızı artırılabilir. Bu şekilde türbinin güç kapasitesinin artırılacağı ve daha etkin bir şekilde kullanılacağı düşünülmektedir. Ayrıca Tablo 7.2'de verilen basınç düşüşleri de göz önüne alınarak, birden fazla türbin aynı hat üzerine seri şekilde entegre edilerek toplam güç çıkışı lineer olarak artırılacağı ön görülmektedir.



Şekil 40. hızı-güç ve hız- C_p (a), λ -güç (b) grafiği

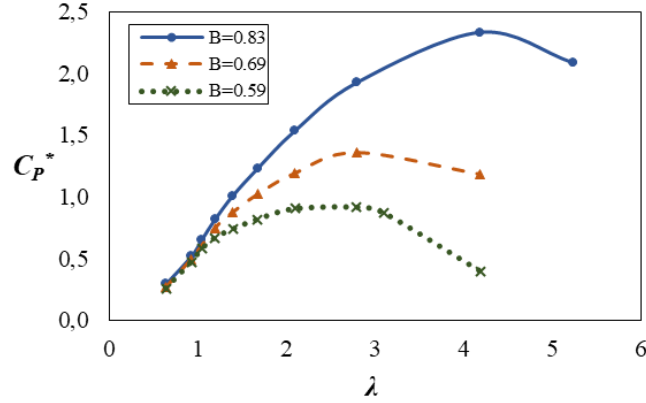
Tablo 7.2. Tasarlanan türbinin HAD sonuçları

Giriş Hızı (m/s)	λ	Güç (Kw)	C_p^*	ΔP (m)
6.5	0.6	31.7	0.29	2.01
4.5	0.9	18.6	0.52	1.26
4.0	1.0	16.4	0.65	1.12
3.5	1.2	13.8	0.82	0.98
3.0	1.4	10.7	1.01	0.84
2.5	1.7	7.5	1.23	0.70
2.0	2.1	4.8	1.53	0.56
1.5	2.8	2.6	1.92	0.44
1.0	4.2	0.9	2.33	0.31
0.8	5.2	0.4	2.08	0.26

7.3. Blokaj Etkisinin İncelenmesi

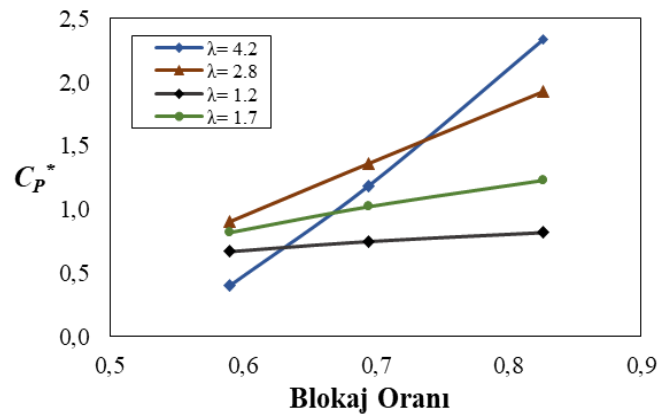
Bölüm 4.6'da blokaj miktarının türbin performansına etkisini inceleyen literatür çalışmaları verilmiştir. Yapılan çalışmalar blokajın türbin performansı üzerinde oldukça etkili olduğunu, blokajın artması ile güç katsayısının arttığını göstermiştir. Mevcut çalışmada Bölüm 6.1'de tasarımı anlatılan ve Bölüm 7.2'de analiz sonuçları verilen 1.1 m boru çapına ve döner iç hacme sahip geometrinin, iç hacmi değiştirilmeksizin boru çapı 1.2 m ve 1.3 m'ye çıkartılarak HAD analizler yapılmış ve blokaj etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. HAD analizleri sonucunda düşük λ değerlerinde, daha

önce yapılmış çalışmalara paralel bir şekilde blokajın türbin performansı üzerinde bir etkisi oluşmamıştır. Buna karşın λ arttıkça blokaj etkisi önemli ölçüde türbin performansını etkilemiştir (Şekil 41). Ayrıca yine literatürle aynı doğrultuda blokaj oranı arttıkça, $C_P^*-\lambda$ grafiğinde maksimum güç katsayısının elde edildiği nokta sağa doğru ötelenmiştir. Bu sebeple türbinin çalıştırılacağı λ aralığı, ortam şartlarına göre uygun seçilmesi büyük önem arz etmektedir.



Şekil 41. Farklı blokaj oranına sahip sistemlerin $C_P^*-\lambda$ grafiği

Şekil 42'de farklı blokaj oranına sahip sistemlerin aynı λ değerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Bölüm 4.6'da ifade edilen Kinsey ve Dumas (2017)'in çalışmalarında elde ettiği sonuçlara benzer bir şekilde mevcut çalışmada da sabit λ değerlerinde, blokaj oranının artmasıyla C_P^* lineer bir şekilde artış göstermiştir. Ayrıca Şekil 41'de yüksek uç hız oranlarında daha dik eğimli doğruların elde edilmesi de Kinsey ve Dumas (2017)'in çalışmasına paralellik göstermektedir.



Şekil 42. Sabit uç hız oranında blokaj etkisinin karşılaştırılması

8. BÖLÜM

SONUÇ

Mevcut tez kapsamında, NACA0020 kanat profiline ve 12 cm kord uzunluğuna sahip 5 kanatlı küresel hidrokinetik türbin tasarlanmıştır. Tasarım parametreleri, literatürdeki çalışmalardan elde edilen veriler ve QBlade programından alınan sonuçlar doğrultusunda oluşturulmuştur. QBlade sonuçlarına göre, tasarlanan türbinin blokajsız ortamda maksimum güç katsayısı 0.50 olarak uç hız oranı (λ) 3.0 iken elde edilmiştir. Ayrıca türbinin boru içerisindeki performansı ANSYS CFX programı kullanılarak incelenmiştir. Bu aşamada literatürdeki çalışmalar ışığında, yüksek blokajlı ortamın sağlanması amacıyla 1.1 m çaplı boru hattında analizler yapılmış ve maksimum güç katsayısı 2.33 olarak uç hız oranı (λ) 4.2 iken elde edilmiştir. Son aşamada, boru çapının 1.2 ve 1.3 m'ye çıkartılması ile blokaj oranı düşürülerek hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yapılmıştır. Blokaj oranının azalması ile güç katsayısının düştüğü ve güç katsayısı – uç hız oranı ($C_P^* - \lambda$) grafiğinin sola doğru ötelendiği görülmüştür.

Literatürde küresel hidrokinetik türbin tasarımı ve analizi ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Mevcut tez kapsamında küresel türbin tasarımı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri yapılarak literatüre yeni bir bakış açısı kazandırılmıştır. Ayrıca uluslararası alanda birkaç örneği bulunan bu teknolojinin yerli tasarımı ortaya konulmuştur. Tasarlanan sistem sayesinde boru hatlarında bulunan fazla yük, basınç kırıcılara gerek kalmaksızın, küresel türbin ile elektrik enerjisine çevrilebilmektedir. Bu sayede, kent merkezlerine uzak ve nüfus yoğunluğunun az olduğu yerleşim bölgelerinde, maliyeti yüksek olan elektrik hatlarına ve trafoları ihtiyacı duyulmadan enerji taleplerine karşılık verilebileceği ön görülmektedir.

KAYNAKLAR

- ANSYS. (2015). *Mesh Quality and Advanced Topics Introduction to ANSYS Meshing*.
- ANSYS. (2006). *SST Model in ANSYS. Nasa Technical Memorandum*.
- Bachant, P., ve Wosnik, M. (2011). Experimental Investigation of Helical Cross-Flow Axis Hydrokinetic Turbines Including Effects of Waves and Turbulence. In *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference* (pp. 1–12). Japan.
- Bakırcı, M. (2018). Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Optimum Uç Hız Oranının İncelenmesi. Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Berkün, M., Aras, E., ve Koç, T. (2008). Barajların ve Hidroelektrik Santrallerin Nehir Ekolojisi Üzerinde Oluşturduğu Etkiler. *Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı : 452*
- Biadgo, A. M., Simonović, A., Komarov, D., ve Stupar, S. (2013). Numerical and analytical investigation of vertical axis wind turbine. *FME Transactions*, 41(1), 49–58. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2559.9449>
- Bozkurt, S., ve Tür, R. (2015). Dünyada ve Türkiye’de Hidroelektrik Enerji Gelişimi ve Genel Değerlendirme. In *4. Su Yapıları Sempozyumu* (pp. 322–330). Antalya.
- BP. (2018). *Statistical Review of World Energy*.
- Brusca, S., Lanzafame, R., and Messina, M. (2015). Design and Performance of a Straight-Bladed Darrieus Wind Turbine. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(September), 3979–3982.
- Bulat, M. P., ve Bulat, P. V. (2013). Comparison of Turbulence Models In The Calculation of Supersonic Separated Flows. *World Applied Sciences Journal*, 27(10), 1263–1266. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.27.10.13715>
- Bulut, M. (2013). Hidroelektrik Enerji ve Hidroelektrik Santrallerde Türbin Tipi Seçiminin Verime Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gümüşhane.
- Casini, M. (2015). Harvesting Energy From İn-Pipe Hydro Systems at Urban and Building Scale. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 316–327. <https://doi.org/10.12720/sgce.4.4.316-327>
- Castelli, M. R., De Betta, S. ve Benini, E. (2012). Effect of blade number on a straightbladed vertical-axis Darrieus wind turbine. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 305-3011
- Castillo, J. (2011). Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine Design. Master of science, *Tampere University*, Finland.

- Çengel, Y. A., ve Cimbala, J. M. (2012). Fundamentals and Application of Fluids of Mechanics. (T. Engin, Ed.) (1. edition). İzmir: İzmir Güven Kitabevi.
- Çetintürk, H. (2016). Boru İçerisinde Francis Tipi Türbin Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Cleveland, C. J., ve Morris, C. (2006). Dictionary of Energy. Journal of Chemical Information and Modeling (First edit, Vol. 53). Italy: Elsevier. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cobb, B. R., ve Sharp, K. V. (2013). Impulse (Turgo and Pelton) Turbine Performance Characteristics and Their Impact On Pico-Hydro Installations. *Renewable Energy*, 50, 959–964. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.010>
- Consul, C. A. (2011). Hydrodynamic Analysis of a Tidal Cross-Flow Turbine. PhD Thesis, Oxford Üniversitesi, London.
- Consul, C. A., Willden, R. H. J., ve McIntosh, S. C. (2013). Blockage Effects On The Hydrodynamic Performance Of a Marine Cross-Flow Turbine. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1985). <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0299>
- Dağdevir, T. (2015). Darrieus Dikey Eksenli Rüzgar Türbininin Sayısal ve Deneysel Araştırması, Tasarlanması ve Üretilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Daniel, B., ve Nicklas, J. (2013). The Development of a Vertical Axis Tidal Current Turbine. Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm.
- Datuopinion. (2011). Opiniones de Turbina Pelton. Retrieved from <https://www.datuopinion.com/turbina-pelton> [Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2019]]
- DEKTMK. (2007). Hidrolik ve Yenilenebilir Enerji Çalışma Grubu Hidroelektrik Enerji Alt Çalışma Raporu, Ankara.
- Dell, R. M., ve Rand, D. A. . (2004). *Clean Energy*. (J. Clark, Ed.). England : Athenaem Press Ltd.
- Demircan, E. (2014). Design and Analysis of a Vertical Axis Water Turbine For River Applications Using Computational Fluid Dynamics. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Du, L., Ingram, G., and Dominy, R. G. (2019). Experimental Study Of The Effects Of Turbine Solidity, Blade Profile, Pitch Angle, Surface Roughness, and Aspect Ratio On The H- Darrieus Wind Turbine Self- Starting and Overall Performance. *Energy Science & Engineering*, (June), 1–16. <https://doi.org/10.1002/ese3.430>
- Elifkalfa Köksal, A. (2017). Francis Tipi Hidrotürbin Ayar Kanadı ve Çarkın Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği Bazlı Eniyilenmesi. Yüksek Lisans Tezi, TOBB

Ekonomi ve Teknoloji üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Erdoğan, M. (2014). Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Potansiyelinin Termodinamik Analiz Yöntemi İle İncelenerek, Yenilenebilir Enerji Kullanımının Gelecek Projeksiyonlarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Erdösemeci, F. (2014). Nükleer Güç Santrallerinin Çevre Etiği Açısından İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- ETKB. (2018). Rüzgâr. Retrieved from <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar> [Ziyaret Tarihi: 18 Ekim 2018]
- Fernihough, A., ve Rourke, K. H. O. (2014). Coal and The European Industrial Revolution, Discussion Papers in Economic and Social History, *Universty of Oxford* (124).
- Freris, L. ve Infield, D. (2008). Renewable energy in power systems (1. edition). England : Great Britain by Antony Rowe Ltd. *Choice Reviews Online* (Vol. 46). <https://doi.org/10.5860/choice.46-4469>
- Gaur, R. C. (2008). Basic Enviromental Engineering. New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Gedik, N. (2005). *Suların İletilmesi*, Ders notu, *Balıkesir Üniversitesi*
- Gezer, S. (2017). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kapsamında Hidroelektrik Santrallerinin Çevre Ve Turizme Etkileri, Norveç Modeli Çakıt Hes Örneği. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul.
- Girgin, M. H. (2011). Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralinin Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 MW'lık Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul.
- Gorlov, A. (1998). *Development Of The Helical Reaction Hydroulic Turbine: Final Technical Report*, Washington.
- Gülay, A. N. (2008). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Açısından Türkiye'nin Geleceği Ve Avrupa Birliği İle Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İzmir.
- Gürsoy, S. (2011). Buhar makinesi, *Beykoz Üniversitesi*
- Halbes. (2019). Rüzgar Türbinleri. Retrieved from <http://halbes.com/urun-ve-hizmetler/ruzgar-turbinleri/> [Ziyaret Tarihi: 26 Mart 2019]
- Hau, E. (2005). Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Spectrum (2. edition). Germany : Springer.

- Helms, S. (2011). Simulation of Vertical Axis Wind Turbine Blades. ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, *ES 2011*. Master of Science, *Drexel University, Philadelphia*. <https://doi.org/10.1115/ES2011-54602>
- Hopman, E. S. (2017). Lucid power. Retrieved May 29, 2019, from <https://www.yaleclimateconnections.org/2017/03/company-turns-piped-water-into-electricity/>
- Houlsby, G. T., ve Vogel, C. R. (2017). The Power Available To Tidal Turbines In An Open Channel Flow. In *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy* (Vol. 170, pp. 12–21). <https://doi.org/10.1680/jener.15.00035>
- Islam, M., Ting, D. S., ve Fartaj, A. (2007). Desirable Airfoil Features for Smaller-Capacity Straight-Bladed VAWT. *Wind Engineering*, 165–196.
- İsmayilov, R. (2006). Türkiye'nin Petrol Politikası. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Ankara.
- Jagtap, M., ve Navale, L. (2017). Twist Angle Analysis of Helical Vertical Axis Wind Turbine (Vawt) Using Q-Blade. *International Journal of Research Publications in Engineering and Technology*, 3(8), 2454–7875.
- Jeong, H., Lee, S., ve Kwon, S. D. (2018). Blockage Corrections For Wind Tunnel Tests Conducted On a Darrieus Wind Turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179(September 2017), 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.002>
- Kaba, R. (2011). Eksenel Türbin Tasarımı ve CFD Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Karadağ, H. İ. (2009). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Rüzgar Türbini Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Keçel, S. (2013). Francis Tipi Türbin Tasarımı ve Yönlendirme Kanat Açısının Türbin Tasarım Parametrelerine Etkisinin Sayısal Analizi. Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kinsey, T. ve Dumas, G. (2017). Impact of channel blockage on the performance of axial and cross-flow hydrokinetic turbines. *Renewable Energy*, 103, 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.021>
- Komarla, S. (2016). Quora. Retrieved Nov 15, 2019, from <https://www.quora.com/Aerodynamics-What-is-a-wind-tunnel-effect>
- Kulunk, E. (2011). Aerodynamics of Wind Turbines. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. <https://doi.org/10.5772/17854>
- Lucid Energy. (2017). Retrieved March 26, 2019, from <http://lucidenergy.com/>

- Macit, A. (2015). Numerical Investigation of The Effect of The Blade Type and The Chord Length on The Performance of The Vertical Axis Wind Turbines. Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Mallı, O. (2017). Hidroelektrik Enerji Nasıl Üretilir. Retrieved from <https://www.muhendisbeyinler.net/hidroelektrik-enerji-nasil-uretilir/> [Ziyaret Tarihi: 18 Mart 2019]
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. (2009). Wind Energy Explained Theory, Design and Application. *John Wiley and Sons Ltd, Ed. (2)*. USA-Washington.
- Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., ve Thomas, G. (2015). Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines. *Renewable Energy*, 81, 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.083>
- Marten, D., ve Wendler, J. (2013). QBlade Guidelines v0.6, 49. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3819.8882>
- Mayaka, N. K. (2017). In-Pipe Hydropower Potential: Case Of Nairobi City Water and Sewerage Company. Master of Science Thesis in Energy Management of The *University of Nairobi*, Republic of Kenya.
- Modi, V. J., Roth, N. J., ve Fernando, M. S. U. K. (1984). Optimum-Configuration Studies and Prototype Design Of a Wind-Energy-Operated Irrigation System. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16(1), 85–96. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(84\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(84)90050-3)
- Mohamed, M. H. (2012). Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 47(1), 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.044>
- Monk, D., ve Chadwick, E. A. (2017). Comparison of Turbulence Models Effectiveness for a Delta Wing at Low Reynolds Numbers. *7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, 1303. <https://doi.org/10.13009/EUCASS2017-653>
- Muratoğlu, A. (2011). Assessment of Tigris River Hydropower Potential. Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep.
- Muratoğlu, A. (2014). Design and Simulation of A Riverine Hydrokinetic Turbine. Doktora Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep.
- Muratoğlu, A., ve Yüce, İ. (2015a). Alternatif Bir Enerji Üretim Yöntemi Olarak Hidrokinetik Enerji Türbinleri. In *4. Su Yapıları Sempozyumu* (pp. 341–350). Antalya.

- Muratoğlu, A., and Yüce, M. I. (2015b). Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections. *Advances in Renewable Energy*, 2.
- Nastu, P. (2010). Verdant Power. Retrieved from <https://www.environmentalleader.com/2010/05/verdant-power-china-sign-mou/> [Ziyaret Tarihi: 19 Şubat 2019]
- Niblick, A. L. (2012). Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System. Master of Science Thesis, *University of Washington*, Washington.
- Nurbay, N., ve Çınar, A. (2005). Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması. *III. Yenilenebilir Enerji. Kaynakları Sempozyumu*, 164–168.
- Özmen, E. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımında model olarak Güneş Şehirler: Manisa Örneği. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Öztürk, Ö. (2017). Değirmen terminolojisi. Retrieved from <http://ozhanozturk.com/2017/08/29/degirmen-terminolojisi/> [Ziyaret Tarihi: 3 Nisan 2019]
- Pentaflo. (2009). Francis Turbine. Retrieved from <http://www.pentaflo.com/francis.html> [Ziyaret Tarihi: 4 Şubat 2019]
- Polagye, B., Cavagnaro, R., Niblick, A., Hall, T., Thomson, J., ve Aliseda, A. (2013). Cross-Flow Turbine Performance and Wake Characterization, *Proceedings of the 1st Marine Energy Technology Symposium*, Washington
- Pongduang, S., Kayankannavee, C., ve Tiaple, Y. (2015). Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists. *Energy Procedia*, 79, 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.511>
- Roh, S., ve Kang, S. (2013). Effects of a Blade Profile, The Reynolds Number, and The Solidity On The Performance of a Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine, *Journal of Mechanical Science and Technology* 27(11), 3299–3307. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0852-x>
- Ross, I. J. (2010). Wind Tunnel Blockage Corrections: an Application to Vertical-Axis Wind Turbines. Master of Science in Aerospace Engineering, *University of Dayton*, Ohio.
- Sabaeifard, P., Razzaghi, H., ve Forouzandeh, A. (2012). Determination of Vertical Axis Wind Turbines Optimal Configuration through CFD Simulations, *International Conference on Future Environment and Energy*, (Vol. 28, pp. 109–113), Singapore.
- Samdan, O. (2016). Darrieus Tipi Rüzgar Türbini Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

- Sarıbuğa, Y. E. (2012). Hidroelektrik Santrallerde Kullanılan Türbin Tipleri. Retrieved from <https://www.elektrikport.com/universite/hidroelektrik-santrallerde-kullanilan-turbin-tipleri/11544#ad-image-0> [Ziyaret Tarihi: 25 Ekim 2018]
- Schlager, N., ve Weisblatt, J. (2006). Alternative Energy. , *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). China. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sheikh, S. R. (2015). Hydrodynamic Design and Optimization of Vertical Axis Water Turbine for Shallow and High Velocity Water Streams of Pakistan. In *UMT National Multidisciplinary Engineering Conference 2015 (NMEC-15)* (pp. 1–18). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3358.1520>
- Shiono, M., Suzuki, K., ve Kiho, S. (2002). Output Characteristics of Darrieus Water Turbine with Helical Blades for Tidal Current Generations. In *Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference* (Vol. 3, pp. 859–864).
- Sinclair, R. (2014). SMRU Consulting. Retrieved February 19, 2019, from <http://www.smruconsulting.com/marine-current-turbines-seagen-in-the-news/> [Ziyaret Tarihi: 19 Şubat 2019]
- Strickland, J. H. (1975). The Darrieus turbine: A performance prediction model using multiple streamtubes (SAND75- 0431). Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Swik, M. (2019). Gorlov helical wind turbine. Retrieved from <http://thewiik.blogspot.com/2011/08/download-gorlov-helical-wind-turbine.html> [Ziyaret Tarihi: 26 Mart 2019]
- Tamtank University. (2018). Airfoil design, *Working Paper*.
- TMMOB. (2018). *TÜRKİYE'nin Enerji Görünümü 2018*. Retrieved from MMO/691, Ankara, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/EnerjiGorunumu2018_1.pdf
- Twidell, J., ve Weir, T. (2006). Renewable Energy Resources (second edi), *Routledge*, London. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780203478721>
- Winchester, J., ve Quayle, S. (2009). Torque Ripple and Variable Blade Force: A Comparison of Darrieus and Gorlov-Type Turbines For Tidal Stream Energy Conversion. In *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference* (pp. 668–676). Sweden.
- Wu, G., Sun, X., Cao, Y., An, Q., Huang, D., ve Wang, Y. (2014). Aerodynamic Performance and Characteristic of Vortex Structures for Darrieus Wind Turbine. I. Numerical Method and Aerodynamic Performance. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(4), 043134. <https://doi.org/10.1063/1.4893775>
- WWF. (2013). 10 Soruda Hidroelektrik Santraller. <https://doi.org/978-605-86596-2-9>

- Yetim Gürsoy, G. (2012). Bodrum Yarımadası'ndaki Tarihi Yel Değirmenleri ve koruma Önerisi. Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Yılmaz, A. (2012). Türkiye'de Sektörel Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler ve Alternatif Enerji Politikaları. Doktora Tezi, *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Aydın.
- Yılmaz, D. D. (2015). Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Rüzgar ve Hidroelektrik Enerji Üretiminde Birim Maliyetlerin Karşılaştırmalı Analizi ve Türkiye Uygulaması. Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Sungur DEMİR
Uyruğu : Türk
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya / 12.05.1994
Telefon : 04882173729
e-mail : muhammed.sungur@batman.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Malatya Anadolu Lisesi	2012
Üniversite	: Gazi Üniversitesi	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2018	Batman Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİLLER

İngilizce