



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**DİKEY EKSENLİ SU TÜRBİNLERİNDE ART
İZİ BÖLGESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Sercan YAĞMUR

DOKTORA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sercan YAĞMUR tarafından hazırlanan “Dikey Eksenli Su Türbinlerinde Art İzi Bölgesinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 13/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Faruk KÖSE

.....

Üye

Prof. Dr. Hüseyin KURT

.....

Üye

Doç. Dr. Levent A. KAVURMACIOĞLU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ş. Ulaş ATMACA

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi, ÖYP Koordinatörlüğü tarafından 2018-ÖYP-001 nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

Sercan YAĞMUR

Tarih: 13.07.2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DIKEY EKSENLİ SU TÜRBİNLERİNDE ART İZİ BÖLGESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Sercan YAĞMUR

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Faruk KÖSE

2021, 126 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Faruk KÖSE

Prof. Dr. Hüseyin KURT

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Doç. Dr. Levent A. KAVURMACIOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Ş. Ulaş ATMACA

Dikey eksenli su türbinleri genellikle akıntı enerjisinden elektrik üretmek için kullanılmaktadırlar. Bu türbinlerin en yaygın kullanılanlarından olan Darrieus tipi türbinler, uzun yıllardır rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için kullanılırken son yıllarda su akıntı türbini olarak kullanımları da gittikçe artmaktadır. Suyun yoğunluğu, havanın kine kıyasla çok yüksek olduğundan, birim alandan elde edilen su akışının enerjisi de havaya kıyasla çok daha yüksektir. Bundan dolayı daha fazla güç elde etme potansiyeline sahiptir. Darrieus türbinleri, özellikle kanal içi akışlarda konstrüksiyon kolaylıkları ve basit tasarımları nedeniyle hidrokinetik türbin olarak kullanılabilir en iyi seçeneklerden biridir. Tez kapsamında, deneysel ve HAD yönteminin kullanıldığı araştırmalar, farklı kalınlıktaki; NACA 0012, NACA 0018 ve NACA 0024 ve farklı kamburluktaki NACA 2418 ve NACA 4418 kanat profillerinin kullanıldığı üç kanatlı H-tipi Darrieus türbininin hidrodinamik performansını incelemek için gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, literatürde NACA 0018 kanat profilinin kullanıldığı H-tipi Darrieus hidrokinetik türbininin deneysel performans sonuçları kullanılarak HAD yöntemi ile 2-D ve 3-D analizler SST k- ω türbülans modeli kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulan 2-D HAD yöntemi ile farklı kalınlık ve kamburluktaki kanat profili konfigürasyonları için performans ve art izi bölgesindeki akış yapıları karşılaştırılmıştır. Uç hız oranının $\lambda=0.9-1.4$ aralığında yapılan 2-D analizlerde maksimum güç katsayısı $\lambda=1.2$ uç hız oranında NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbin konfigürasyonundan elde edilmiştir. Her bir türbin için maksimum güç katsayısının elde edildiği çalışma noktasında, türbinlerin art izi bölgesindeki akış yapıları karşılaştırıldığında ise NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbinde hız geri kazanımının en erken olduğu belirlenmiştir.

Hidrokinetik türbin çiftliği uygulamasında birim alandan transfer edilen enerji miktarını arttırmak için hem performansın hem de art izi bölgesinde hız geri kazanımının hızlı olması gerekmektedir. Bu kapsamda 2-D analiz sonuçlarına bağlı olarak NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbinin prototip imalatı yapılarak mevcut deney düzeneğine uyarlanmıştır. NACA 4418 profilinin kullanıldığı türbin $\lambda=0.5-1.4$ uç hız oranı aralığında 3-D LES türbülans modeli kullanılarak analiz edilmiş ve açık su kanalı içerisinde performans deneyleri tork ölçümü ile yapılmıştır. Serbest akış hızının 0.3m/s olduğu sistemde hem deneysel hem de LES sonuçlarında NACA 4418 profili için maksimum güç katsayısı $\lambda=1.0$ uç hız oranında elde edilmiştir. Maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranı $\lambda=1.0$ 'da art izi bölgesindeki akış yapısı Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (PIV) yöntemi

kullanılarak taranmış ve LES türbülans modelinden elde edilen ortalama hız bileşenleri, girdap ve türbülans kinetik enerji sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Art izi bölgesindeki akış yapısı incelenen türbinin alt akış yönüne aynı geometrik özelliklerde bir türbin daha yerleştirilerek, iki türbin arasındaki mesafenin, uç hız oranının ve iki türbinin birbirine göre eş/zıt dönüş yönünün ikinci türbinin performansı üzerine etkisi deneysel tork ölçümü ve LES türbülans modelinin kullanıldığı analizlerle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda iki türbin arasındaki mesafe arttıkça ikinci türbinin performansı artmıştır. İkinci türbin için maksimum güç katsayısı genel olarak uç hız oranının $\lambda=1.0-1.1$ aralığında elde edilmiştir. Birinci türbinin art izi bölgesindeki asimetric akış yapısına bağlı olarak, türbinlerin birbirine göre zıt yönde dönmesi durumunda elde edilen güç katsayısı, eş yönlü dönüşte elde edilen güç katsayısına göre daha yüksek çıkmıştır. Hem deneysel hem de LES sonuçlarında, alt akış bölgesindeki ikinci türbin $x/D=11$ konumunda iken, eş yönlü dönüşte üst akış bölgesindeki birinci türbinin performansının yaklaşık % 72'sine ulaşırken, bu değer zıt yönlü dönüşte % 78 civarında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Art izi, Darrieus türbini, HAD, Hidrokinetik, PIV, Türbin çiftliği, Türbin dizilimi, Yenilenebilir enerji.



ABSTRACT

PhD THESIS

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE WAKE REGION OF VERTICAL AXIS WATER TURBINE

Sercan YAGMUR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Faruk KOSE

2021, 126 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Faruk KOSE

Prof. Dr. Huseyin KURT

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Assoc. Prof. Dr. Levent A. KAVURMACIOGLU

Asst. Prof. Dr. S. Ulas ATMACA

Vertical axis water turbines are generally used to generate electricity from current energy. Darrieus type turbines, one of the most widely used of these turbines, have been used to generate electricity from wind energy for many years, and their use as water flow turbines has been increasing in recent years. Since the density of water is very high compared to that of air, the energy of the water flow obtained per unit area is much higher than that of air. Therefore, it has the potential to extract more power. Darrieus turbines are one of the best options to be used as hydrokinetic turbines, especially in open water channel flows, due to their ease of construction and simple design. Within the scope of the thesis, studies in which experimental and CFD methods are used, with different thicknesses; NACA 0012, NACA 0018 and with different camber; NACA 0024 and NACA 2418 and NACA 4418 profiles were used to examine the hydrodynamic performance of a three-bladed H-type Darrieus turbine.

In the study, the experimental performance results of the H-type Darrieus hydrokinetic turbine using the NACA 0018 profile in the literature were verified by using the 2-D and 3-D CFD method using the SST $k-\omega$ turbulence model. Performance and flow structures in the wake region were compared with the validated 2-D HAD method for different thickness and camber blades configurations. In the 2-D analysis with the tip speed ratio $\lambda=0.9-1.4$, the maximum power coefficient was obtained from the turbine configuration using the NACA 4418 profile at the tip speed ratio of $\lambda=1.2$. The flow structures in the wake region of the turbines were compared at the operating point where the maximum power coefficient was obtained for each turbine, and it was determined that the velocity recovery was the fastest in the turbine where the NACA 4418 blade profile was used.

In the application of a hydrokinetic turbine farm, both the performance and the velocity recovery in the wake region must be fast in order to increase the amount of energy transferred from the unit area. In this context, based on the results of the 2-D analysis, the prototype of the turbine using the NACA 4418 profile was manufactured and adapted to our existing experimental setup. The turbine in which NACA 4418 profile is used has been analyzed using 3-D LES turbulence model in the tip speed ratio range of $\lambda = 0.5-1.4$ and performance experiments in the open water channel have been performed by dynamic torque measurement. In the system where the free stream velocity is 0.3m/s, the maximum power coefficient for the NACA 4418 profile was obtained at the tip speed ratio of $\lambda = 1.0$ in both experimental and LES

results. At the tip speed ratio of $\lambda = 1.0$, where the maximum power coefficient was obtained, the flow structure in the wake region of turbine was examined with the results obtained from the Particle Image Velocimetry (PIV) method and the LES turbulence model to compare the time-average velocity fields, vorticity patterns and turbulence kinetic energy. A turbine with the same geometric characteristics was placed downstream of the turbine whose flow structure in the wake region was examined. The effect of the streamwise distance between the two turbines, the tip velocity ratio and the co-/counter rotation of the two turbines on the performance of the second turbine was investigated by using experimental torque measurement and the analysis using the LES turbulence model. In the results obtained, as the distance between the two turbines increased, the performance of the second turbine increased. The maximum power coefficient for the second turbine was generally obtained in the range of $\lambda = 1.0-1.1$ of the tip speed ratio for all downstream locations. Due to the asymmetric flow structure in the wake of the first turbine, the power coefficient of the second turbine obtained when the turbines rotate in counter-rotating with respect to each other is higher than the power coefficient obtained in the co-rotating arrangement. In both experimental and numerical analysis results, while the second turbine was positioned at $x/D=11$ in the downstream, it reached approximately 72 % of the performance of the upstream turbine in the co-rotation, while this value increased and was obtained around 78 % in the counter-rotation.

Keywords: Darrieus turbine, hydrokinetic, LES, PIV, renewable energy, turbine array configuration, turbine farming, wake region.

ÖNSÖZ

Doktora sürecim boyunca bilgi birikimi ve tecrübelerini benimle paylaşan, değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Faruk KÖSE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kıymetli fikir ve önerilerinden dolayı tez izleme komitesi üyesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Hüseyin KURT ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ş. Ulaş ATMACA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmaların yapıldığı Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidrolik/PIV Laboratuvarında bulunan açık su kanalı ve PIV ölçüm sisteminin kurulum aşamasında emeği geçen Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarımda bilgisini, tecrübesini, desteğini ve özellikle deneysel çalışmalardaki yardımını esirgemeyen kıymetli arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Sercan DOĞAN'a teşekkür ederim. Ayrıca fikir alış verişinde bulunarak bana bu süreçte yardımcı olan değerli Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Hilmi AKSOY, Dr. Öğr. Üyesi M. Numan KAYA ve Arş. Gör. İlker GÖKTEPELİ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve üzerimde sonsuz emekleri olan değerli aileme, çalışmalarım boyunca beni sabır ve anlayışla karşılayan ve her koşulda destekleyen değerli eşim Ece YAĞMUR'a ve canım oğlum Çınar'a ithaf ediyorum.

Sercan YAĞMUR
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Hidrokinetik Türbinler	3
1.2. Darrieus Türbinin Çalışma Prensipleri	6
1.3. Tez Çalışmasının Önemi, Amacı ve Kapsamı	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	14
2.1. Türbin Performansının İncelendiği Çalışmalar	14
2.2. Türbin Akış Karakteristiğinin İncelendiği Çalışmalar	18
2.3. Türbin Çiftliği Uygulamaları için Yapılan Çalışmalar	25
3. KANAT PROFİL ETKİSİNİN İNCELENMESİ	29
3.1. Türbin Tasarım Parametreleri	29
3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi	31
3.2.1. Akış hacmi	33
3.2.2. Sınır koşulları ve çözüm ayarları	35
3.2.3. Ağ yapısı oluşturma ve ağdan bağımsızlık çalışması	36
3.2.4. Zaman adımı bağımsızlık çalışması	41
3.3. Araştırma Sonuçları	43
3.3.1. HAD analizlerinin doğrulanması	44
3.3.2. $\lambda=1.05$ 'de kanat profilinin performans ve akış karakteristiğine etkisi	48
3.3.3. Türbin çiftliği uygulaması için kanat profillerinin karşılaştırılması	54
4. DENEYSEL ÖLÇÜMLER ve 3-D HAD ANALİZLERİ	63
4.1. Deneysel ve Sayısal Çalışmalar için Türbin Tasarımı	63
4.2. Deneysel Yöntem	63
4.2.1. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (PIV) yöntemi	66
4.2.2. Dinamik tork ölçümü	70
4.3. NACA4418 Profili için 3-D HAD Analizleri	71
4.3.1. Türbülans modeli	71
4.3.2. Akış hacmi, sınır koşulları ve çözücü ayarları	74
4.3.3. Ağ yapısı ve zaman adımından bağımsızlık çalışması	76
4.3. Araştırma Sonuçları	80
4.3.1. Türbin performansının karşılaştırılması	80
4.3.2. Art izi bölgesindeki akış yapısının PIV ve LES yöntemi ile incelenmesi	87
5. TÜRBİN ÇİFTLİĞİ UYGULAMASI	94

5.1. Eş Eksenli Sıralı İki Türbin Konfigürasyonu	94
5.2. Araştırma Sonuçları	96
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
6.1. Sonuçlar	99
6.2. Öneriler	102
KAYNAKLAR	104
EKLER	112



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Kanat veter uzunluğu (m)
α	: Hücüm açısı ($^{\circ}$)
N	: Kanat sayısı
L	: Kanat uzunluğu (m)
D	: Türbin çapı (m)
A	: Türbin süpürme alanı (m^2)
R	: Türbin yarıçapı (m)
σ	: Katılık oranı
θ	: Azimut açısı ($^{\circ}$)
U_{∞}	: Serbest akış hızı (m/s)
Re_D	: Reynolds sayısı
V	: Türbin teğetsel hızı (m/s)
W	: Kanat bağıl hızı (m/s)
λ	: Uç hız oranı
Ω	: Türbin açısal hızı (rad/s)
F_T	: Teğetsel kuvvet (N)
F_N	: Normal kuvvet (N)
F_D	: Sürüklenme kuvveti (N)
F_L	: Kaldırma kuvveti (N)
T	: Türbin torku (Nm)
ρ	: Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
P_T	: Türbin gücü (W)
P	: Akışkanın gücü (W)
C_p	: Güç katsayısı
V_c	: Düzeltilmiş hız (m/s)
H_w	: Kanal içerisindeki su yüksekliği (m)
W_w	: Kanal genişliği (m)
m	: Blokaj oran sabiti
u	: Akış yönündeki anlık hız (m/s)
$\bar{u}$	: Akış yönündeki ortalama hız (m/s)
u'	: Akış yönündeki çalkantı hızı (m/s)
μ	: Dinamik viskozite ($kg/m.s$)
ν	: Kinematik viskozite (m^2/s)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
$\bar{p}$	: Ortalama basınç (Pa)
f_i	: Yerçekimi veya merkezkaç kuvveti (N)
τ	: Gerilme (Pa)
y^+	: Boyutsuz duvar mesafesi
Δt	: Zaman adımı büyüklüğü (s)
u^*	: Akış yönündeki boyutsuzlaştırılmış anlık hız
ω^*	: Boyutsuzlaştırılmış anlık girdap
$\langle u^* \rangle$	: Akış yönündeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız
$\langle v^* \rangle$	: Akışa dik yöndeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız
$\langle \omega^* \rangle$	: Akış yönündeki boyutsuzlaştırılmış ortalama girdap
$\bar{S}_{ij}$	: Gerilme hızı tensörü
C_w	: Wale model sabiti

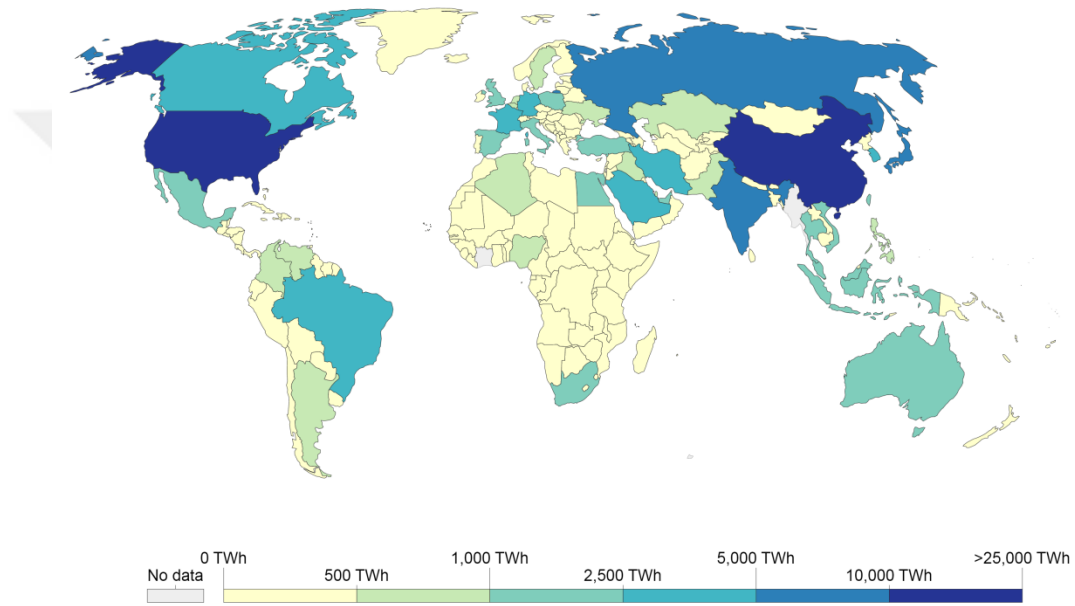
δ_{ij} : Kronecker deltası
 w_R : Sistem belirsizliği

Kısaltmalar

2-D	: İki boyutlu
3-D	: Üç Boyutlu
BR	: Blokaj oranı
CAD	: Computer aided design (Bilgisayar destekli tasarım)
CMOS	: Complementary Metal–Oxide–Semiconductor (Tamamlayıcı Metal Oksit-Yarı İletken)
DAQ	: Data Acquisition (Veri toplayıcı)
DDES	: Delayed Detached-Eddy Simulations (Gecikmeli Bağımsız Girdap Simülasyonu)
DES	: Detached Eddy Simulation (Bağımsız Girdap Simülasyonu)
fov	: field of view (Görüntü alanı)
HAD	: Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Girdap Simülasyonu)
LDV	: Laser Doppler Vibrometer (Lazer Doppler Vibrometre)
MRV	: Magnetic Resonance Velocimetry
NACA	: ABD Ulusal Havacılık Danışma Komitesi
Nd YAG	: Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet (Neodimiyum Katkılı İttriyum Alüminyum Garnet)
PIV	: Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü)
PLA	: Poliaktik Asit
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantık Denetleyici)
RANS	: Reynolds averaged Navier Stokes (Reynolds ortalımalı Navier Stokes)
RPM	: Revolution Per Minute (devir/dakika)
SA	: Spalart-Allmaras
SGS	: Sub-Grid Scale (Alt Izgara Ölçeği)
SST	: Shear Stress Transport (Kayma Gerilmesi Taşıma türbülans modeli)
TKE	: Türbülans Kinetik Enerji
TWh	: TeraWatt-saat
U-RANS	: Unsteady Reynolds averaged Navier Stokes (Kararsız Reynolds ortalımalı Navier Stokes)
WALE	: Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (Duvara Uyarlamalı Yerel Eddy-viskozitesi)

1. GİRİŞ

Sanayi devriminin artmasıyla birlikte teknolojik gelişmelere bağlı olarak insanlığın yaşam standartlarının arttığı açıkça görülmektedir. Bu durumun en net örneklerinden birisi, gelişmiş ülkelerin, daha az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere göre kişi başına tüketilen enerji miktarının daha yüksek olmasıyla gözlemlenmiştir (Şekil 1.1). Dünya nüfusunun son yüzyılın yarısında yaklaşık iki katına çıktığı dikkate alındığında, enerji tüketiminin de gün be gün arttığı ve artacağı öngörülmektedir.



Şekil 1.1. 2019 yılı itibariyle dünya genelinde ülkelere göre enerji tüketimi TeraWatt-saat (TWh) (Looney, 2020)

Dünya üzerindeki mevcut enerji kaynakları arasında fosil kaynaklar birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Fosil kaynakların çevresel faktörleri dikkate alındığında ise havadaki karbondioksit salınımı yaklaşık %74 ile en büyük orana sahiptir. Bu durum çevre kirliliğini artırmakta ve küresel ısınmayı tetiklemektedir. Yapılan bilimsel çalışmalar sonucunda, mevcut fosil kaynakların kullanımının zirvesine ulaşıldığı da vurgulanmaktadır (Höök ve Tang, 2013). Günümüzde ise enerji ihtiyaçlarının karşılanması için ülkeler birçok sorunla karşılaşmaktadırlar. Elektrik üretiminin yetersizliğinden doğan krizler, doğalgaz ve petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar, dışa bağımlı enerji kullanımı konusunda ortaya çıkan endişeler nedeniyle ülkeler için enerji politikalarının oluşturulması öncelikli planlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, dışa bağımlılığın önüne geçebilmek için insanlar alternatif

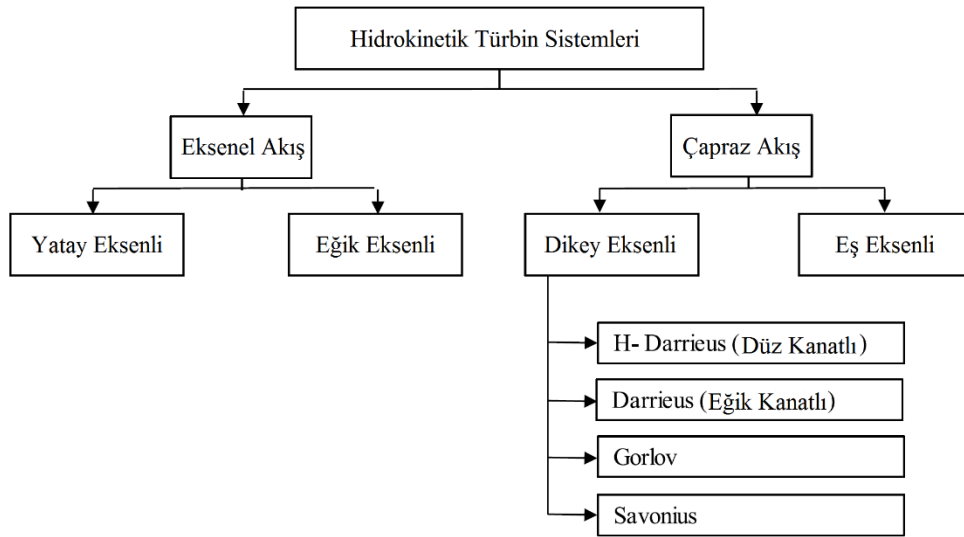
enerji kaynaklarına yönelerek sürdürülebilir ve ucuz teknolojik enerji kaynaklarını keşfetmeye yönelmişlerdir. Güneş, rüzgar, hidrolik, biokütle, jeotermal, dalga vb. enerji türleri dünya genelinde fosil kaynaklara alternatif olarak kullanılan en yaygın yenilenebilir enerji türlerindendir.

Yenilenebilir enerji çözümleri özellikle insanların yaşam alanlarında popülerlik kazanmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi, piyasadaki mevcut en gelişmiş yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. Bu nedenle de uygun maliyetli teknolojilerin geliştirilmesi amacı ile birçok araştırma projesine konu olduğundan, güneş ve rüzgar sistemlerine her yıl milyarlarca dolar yatırım yapılmaktadır. Ancak, güneş enerjisi dönüşüm sistemleri, meteorolojik değişikliklere bağlı olarak günlük ve aylık üretimdeki dalgalanmalar nedeniyle bireysel ihtiyaçları karşılamak için en uygun çözümleri kısmen temsil etmemektedir. Bu sistemlerden elde edilen enerjinin sürekliliğini sağlayabilmek için ekstra yatırım maliyetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri ise birçok ülkenin uzun vadeli enerji planlarında önemli bir rol oynamasına rağmen, temel enerji ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin yerine kullanılması hala tam olarak öngörülememektedir. Bu nedenle hidrolik enerji kaynakları, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha iyi enerji potansiyeli sunmaktadır ve meteorolojik şartlardan daha az etkilenmektedir.

Hidrolik enerji antik çağlardan beri yenilenebilir enerji kaynağı olarak yel değirmenlerinde, madenlerde cevher hazırlamada, asansör sistemlerinde ve çeşitli makineleri çalıştırmak için kullanılmıştır. Kararlı ve sürdürülebilir bir enerji üretim portföyünde hidrolik enerji çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle gelişen teknoloji ile birlikte hidrokinetik enerji dönüşüm sistemleri en yeni ve gelecek vaat eden hidrolik enerji dönüşüm sistemleri arasındaki yerini almıştır. Hidrokinetik enerji dönüşüm sistemleri, konvansiyonel hidroelektrik santralleri gibi suyu belirli bir yükseklikte tutarak akışkanın potansiyel enerjisini kullanmak yerine, akan suyun kinetik enerjisini doğrudan mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar özellikle nehir akıntılarının, insan yapımı su kanallarının, baraj suyu atıklarının, gel-git akıntılarının ve dalgaların kinetik enerjisini kullandığından, su akışının doğal yolunda önemli bir değişiklik gerektirmezler. Bu nedenle barajlar ve cebri borular gibi büyük konstrüksiyonlara ihtiyaç duyulmaksızın mekanik güç çıkışı sağlarlar.

1.1. Hidrokinetik Türbinler

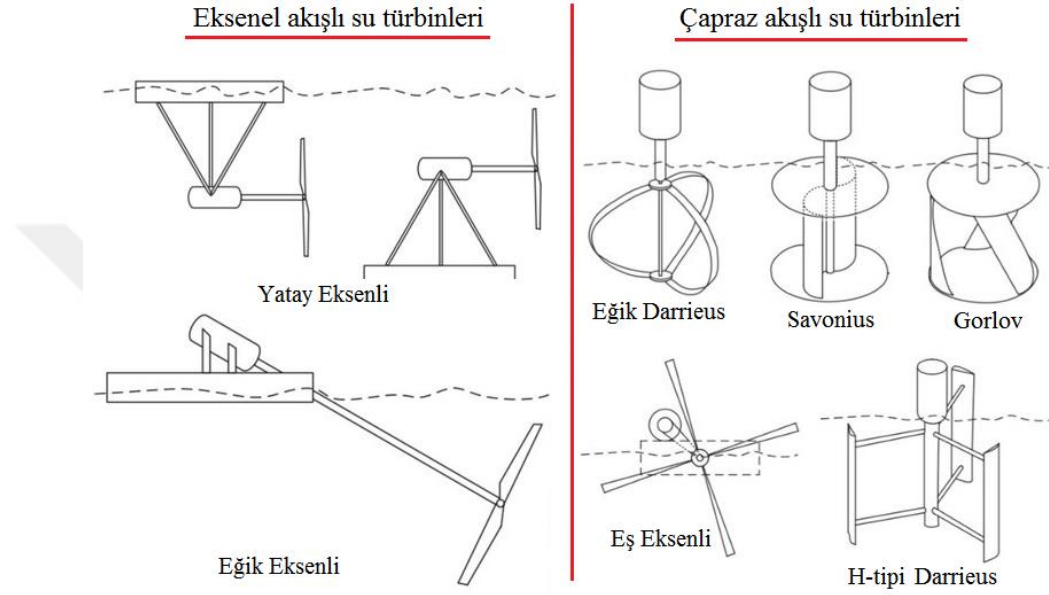
Günümüzde modernize edilmiş hidrokinetik türbinlerin teknolojileri, prensip ve tasarım yönünden rüzgar türbinlerine benzemektedirler. Aralarındaki en önemli fark olarak suyun yoğunluğunun havanın yoğunluğuna oranla yaklaşık 850 kat daha fazla olması söylenebilir. Ülkemizde henüz yaygın olmasa da dünya genelinde rüzgar türbinlerine benzer su türbinleri sabit akış hızına sahip derin kanallarda enerji üretiminde kullanılmaktadır. Bu türbinler akan bir akışkanın enerjisini kullanmak üzere tasarlanmışlardır. Hidrokinetik türbinler su akış yönüne göre dönme eksenine yönelimi ile Şekil 1.2'deki gibi eksenel akış ve çapraz akış olarak iki ana grupta sınıflandırılırlar (Khan ve ark., 2006). Yatay eksenli türbinlerin dönme eksenini akışa paralel, rotor düzlemi ise akışa dik olarak tasarlanmıştır. Dikey eksenli türbinlerde ise dönme eksenini akış yönüne diktir. En yaygın olarak kullanılan dikey ve yatay eksenli türbinler Şekil 1.3'te sunulmuştur.



Şekil 1.2. Hidrokinetik türbinlerin sınıflandırılması

Eksenel akışlı türbin sistemleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan türbinler yatay eksenli türbinlerdir. Yatay eksenli türbinler tasarım açısından günümüz modern rüzgar türbinlerine çok benzemektedirler. Yatay eksenli su türbinleri ise kendi içerisinde tabana montajlı ve yüzen sistemler olarak ayrılmaktadır. Eğik eksenli türbinler ise genellikle küçük ölçekli, debisi ve su yüksekliği küçük olan nehirlerde ve insan yapımı su kanallarında kullanılırlar. Küçük çaplı sistemler olduğu için yerleşim bölgelerinden uzak bölgelerde kısmi elektrik ihtiyacını karşılamada kullanılmışlardır. Çapraz akışlı

türbinler içerisinde en yaygın olarak kullanılan türbinler ise Darrieus türbinleridir. Kaldırma kuvveti prensibi ile çalışan Darrieus türbinleri bilim insanları tarafından farklı kanat örneğin; eğik kanat, düz kanat vb. yapılarında tasarlanarak geliştirilmişlerdir. Çapraz akışlı türbin sınıflandırması içerisinde Darrieus türbinlerine alternatif olarak Gorlov türbinleri ve itki türbinleri olarak adlandırılan Savonius tipi türbinler de kullanılmışlardır.



Şekil 1.3 Eksenel ve çapraz akışlı hidrokinetik türbinlerin şematik gösterimi (Khan ve ark., 2009)

Dikey eksenli türbinlerden özellikle H-tipi Darrieus türbinleri hem bilimsel çalışmalarda hem de uygulama alanlarında büyük ilgi görmüştür. Darrieus türbinler ile ilgili ilk araştırma faaliyetleri 1970'lerin başlarında İngiltere tarafından Nil nehri üzerinde yapılmıştır. Sonrasında ise H-tipi Darrieus hidrokinetik türbin uygulamalarına olan ilgi artmış ve Kanada, Japonya ve Amerika başta olmak üzere, yenilenebilir enerji sistemleri arasında bu türbinlere küresel bir eğilim olmuştur (Paraschivoiu, 2002). H-tipi Darrieus türbinlerinin avantajlarını sıralayacak olursak;

- Yatay eksenli türbin kanatlarının aksine, kanat tasarımında düz kanatların kullanılması ve bu kanatların imalatlarının basit olması nedeniyle üretim maliyetleri düşüktür (Mohamed, 2012).
- Özellikle elektrik üretiminde hidrokinetik türbinler için en büyük problem jeneratörlerin konumlandırılmasıdır. Yatay eksenli türbinlerde elektrik jeneratörü ya iyi bir yalıtım yapılarak su altında türbine doğrudan monte edilir, ya da eğimli şaft/dik açılı dişli uzantıları ile su üzerine çıkarılarak jeneratörlere

bağlanırlar. Dikey eksenli türbinlerde ise herhangi bir aktarma organına gerek kalmaksızın türbin şaftı su üzerine uzatılarak jeneratör bağlantısı yapılabilir. Bu nedenle hem bakım maliyetleri azalmış olur hem de su altı sistemlerde sızdırmazlığın sağlanabilmesi için gerekli olan yatırım maliyetleri azalmış olur (Khan ve ark., 2009).

- Dikey eksenli türbinlerin kanat ucu girdaplarının yatay eksenli türbinlere göre daha zayıf olması nedeniyle hidro-akustik olarak daha sessiz çalışmaktadırlar ve bu nedenle doğal habitata daha az zarar vermektedirler (Riegler, 2003).
- Sınır tabaka nedeniyle hız profili değişmektedir. Hız profilindeki bu değişim, özellikle sığ sularda ve tabana monte edilen türbinlerde, yatay eksenli türbinin üst bölümü alt bölümüne göre daha yüksek bir hıza maruz kalacaktır. Dikey eksenli türbinlerde ise bütün kanatlar aynı hız profiline maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle dikey eksenli türbinler sınır tabaka etkisinde çalışmaya daha uygundurlar (Mertens ve ark., 2003).
- Dikey eksenli türbinler silindirik yapıya sahip olduklarından dolayı akış yönünden bağımsız olarak çalışabilirler. Bunun için kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duymazlar. Ancak yatay eksenli türbinler akışa karşı çalışırlar. Bu nedenle gelen akışa doğru yönelmek için özel (yaw) mekanizmalara ihtiyaç duyarlar (Hwang ve ark., 2009).

Dikey eksenli türbinlerin yatay eksenli türbinlere göre birçok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları da aşağıdaki gibi sıralanabilir.

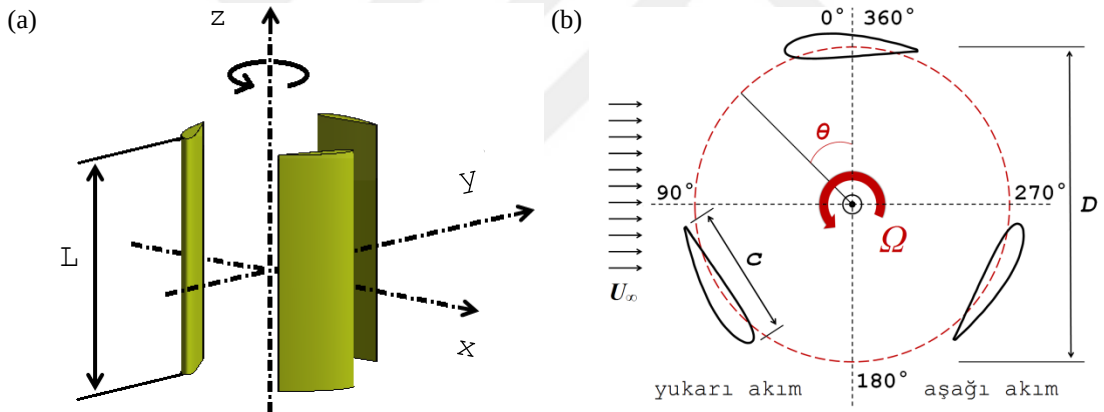
- ❖ Dikey eksenli türbinler düşük başlangıç torkuna sahiptirler. Bu nedenle türbinlerin çalışmaya başlaması için elektrikli ve/veya mekanik başlatma mekanizmalarına ihtiyaç duyarlar. Bu kapsamda ekstra enerji tüketimine karşın dikey eksenli türbinlerde itki ve kaldırma türbinleri birleştirilerek hibrit sistemler oluşturulup başlangıç torkları yükseltilebilmektedir (Sahim ve ark., 2014).
- ❖ Dikey eksenli türbinler akışa teğetsel çalıştığından dolayı bir çevrim boyunca kanat sayısına bağlı olarak güç üretiminde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Kararsız bu hidrodinamik yüklerden dolayı türbinler yapısal olarak hem yorulmaya hem de kavitasyona maruz kalmaktadırlar (Bachant ve Wosnik, 2015).

Yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı, özellikle küçük ölçekli sistemlerde Darrieus türbinleri hidrokinetik enerji dönüşüm sistemleri için uygundur.

1.2. Darrieus Türbinin Çalışma Prensibi

H-tipi Darrieus türbini, hem rüzgar hem de su akışında kullanılan en basit dikey eksenli türbin türüdür. Literatürde sıklıkla kullanıldığı gibi, tez çalışmasında da Şekil 1.4'deki gibi bir shaft etrafına eşit aralıklarla yerleştirilmiş dikey eksenli üç kanatlı H-tipi Darrieus türbini kullanılmıştır. Bu tip türbinlerde türbin performansına etki eden en önemli parametreler türbinlerde kullanılan kanatların şekli, türbin katılık oranı ve türbinin uç hız oranı olarak vurgulanmaktadır. Bu parametreler ve etkileri birbirinden tamamen bağımsız değildir, aksine birbirleriyle bağlantılıdır ve karmaşıktır.

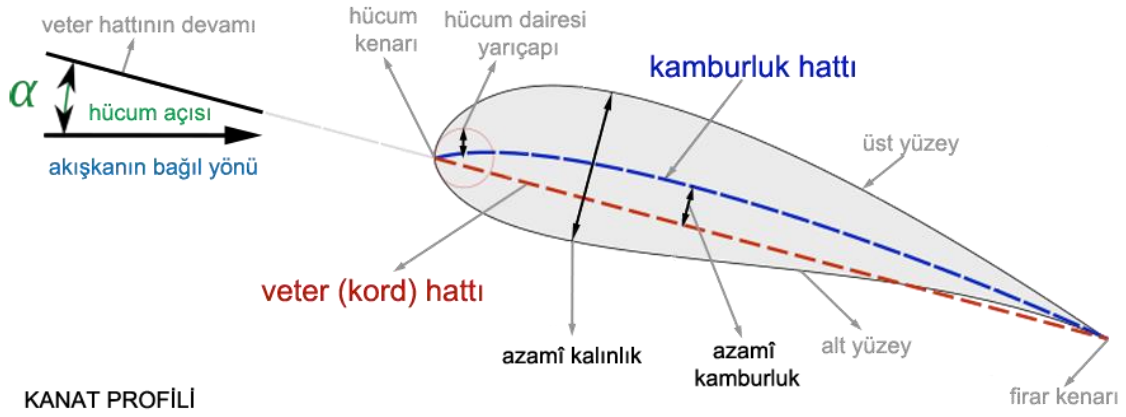
H-tipi Darrieus türbinleri, çalışma prensipleri gereği kaldırma kuvveti tahrikli türbinlerdir. Kanat üzerinde oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvvetinin ortaya çıkan teğetsel bileşeni, türbine tahrik kuvvetini sağlar. Bu nedenle gücü en üst düzeye çıkarmak için türbin kanadının profili yüksek kaldırma ve düşük sürtünme kuvveti üretecek şekilde tasarlanması gerekmektedir (Genç, 2009).



Şekil 1.4. Üç boyutlu H-tipi Darrieus türbininin; (a) izometrik görünümü, (b) üstten görünümü

Hava, su gibi herhangi bir akışkan içinde hareket eden taşıta en uygun taşıma/sürüklenme oranını vermek için tasarlanmış, kıvrımlı veya düz, genellikle damla şeklindeki kesitler kanat profili olarak adlandırılmaktadır. Kanat profili, akan akışkan su olduğunda hidrofoil, hava olduğunda aerofoil olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.5'te görüldüğü gibi kanadın ön kısmına hücum kenarı, arka kısmına firar kenarı denilmektedir. Hücum kenarı ile firar kenarı arasındaki düz çizgi veter (kiriş, kord) hattı olarak bilinir ve "c" ile gösterilir. Üst ve alt yüzeyler arasındaki orta noktalarda yer alan orta çizgi, kamburluk hattı olarak adlandırılır. Kamburluk hattı ile veter hattı arasındaki maksimum genişlik kanat profilinin kamburluğu olarak ifade edilir. Veter hattının akışın

bağıl yönü ile yaptığı açı hücum açısı olarak bilinir ve “ α ” ile gösterilir. Kanat profilinin kamburluğu yani alt ve üst yüzeyler arasındaki maksimum kalınlık, veter hattının yüzdesi cinsinden ifade edilir (Manwell ve ark., 2010). NASA (ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), NREL (ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı), Göttingen, Eppler, Wortmann ve RISØ gibi dünyaca ünlü kuruluşlar teorik ve deneysel çalışmalarla kanat profilinin akış karakteristiğini incelemektedirler ve optimum kanat profilini bulabilmek (yüksek kaldırma/sürüklenme oranına sahip kanat profilini) için çalışmalarını sürdürmektedirler. Illinois Üniversitesi Uygulamalı Aerodinamik Grubu, 1500'den fazla kanat profil koordinatının yayınlandığı bir veri sitesi vardır ve buradan farklı profiller tercih edilebilmektedir (Selig, 2018).



Şekil 1.5. Kanat profili kesiti ve tanımları

Türbin performansına etki eden önemli bir diğer parametre de katılık oranıdır. Katılık oranı, su türbininin boyutlarının, şeklinin ve kanat sayısının etkisini gösteren önemli bir parametredir. Türbinin tüm kanatlarının toplam alanının, türbinin süpürdüğü alana oranı katılık oranı olarak ifade edilir ve dikey eksenli türbinler için:

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{\pi \cdot D} \quad (1.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada Şekil 1.4'te de gösterildiği gibi N kanat sayısını, c kanat veter uzunluğunu, D ise türbin çapını ifade etmektedir.

H-tipi Darrieus türbininin geometrisi basit olmasına rağmen, kanat hücum açısının α , türbin azimut açısına θ bağlı olarak sürekli değişmesi nedeniyle türbindeki akış alanı son derece karışıktır. Hücum açısı α , Şekil 1.5 ve 1.6'da da gösterildiği gibi

akışkanın bağıl hızının yönü ile türbin merkez çizgisinin yaptığı açığı ifade etmektedir. Azimut açısı θ , kanadın hareket yönünün üniform hız yönüyle yaptığı açı olarak tanımlanır. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi pozitif y bölgesi, türbin başlangıç konumu $\theta=0^\circ$ olarak kabul edilip türbin dönüş yönüne bağlı olarak ifade edilmektedir. Darrieus türbinlerindeki karmaşık akış yapısının anlaşılması, türbin performansını artırmak için son derece önemlidir. Bu kapsamda türbin dönerken herhangi bir azimut açısında kanat üzerindeki hız üçgeni ve etkiyen kuvvetler Şekil 1.6'daki gibidir. Burada herhangi bir R yarıçapı üzerine yerleştirilen kanat dönmeye başladığında akışkanın hızı U_∞ ve kanadın teğetsel hızı $V=R.\Omega$ 'nin bileşkesi olan kanadın bağıl hızı W ortaya çıkmaktadır. Kanadın herhangi bir azimut pozisyonundaki bağıl hızı:

$$W = \sqrt{(U_\infty + V \cos \theta)^2 + (V \sin \theta)^2} \quad (1.2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Türbinlerde performansın bir fonksiyonu olan ve kanadın teğetsel hızının akışkan hızına oranı olarak ifade edilen uç hız oranı:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot D}{2U_\infty} \quad (1.3)$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada Ω türbinin açısal hızını ifade etmektedir. Bu nedenle, kanat üzerindeki bağıl hız şu şekilde ifade edilebilir:

$$W = U_\infty \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2} \quad (1.4)$$

Uç hız oranı ile türbin azimut açısı arasındaki bağıntı ise kanat hücum açısı, α , cinsinden Eşitlik 1.5'teki gibi ifade edilir.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda}\right) \quad (1.5)$$

Akışkan türbin etkileşimi ile türbin kanatları üzerine bağıl hız doğrultusunda sürüklenme kuvveti F_D ve bağıl hıza dik doğrultuda kaldırma kuvveti F_L etki etmektedir. Kanat yörüngesine teğet olan bileşen teğetsel kuvvet F_T ve kanat üzerine

türbin merkezine doğru etkiyen kuvvet bileşeni normal kuvvet F_N , kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine bağlı olarak hesaplanır.

$$\begin{aligned} F_T &= F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \\ F_N &= -F_L \cos \alpha - F_D \sin \alpha \end{aligned} \quad (1.6)$$

Normal kuvvet F_N türbin merkezine doğrudur ve türbin güç üretimine doğrudan bir etkisi yoktur, bu nedenle türbin konstrüksiyonu için önem arz etmemektedir. Ancak teğetsel kuvvet F_T , türbinin tork ve buna bağlı olarak güç üretiminde kullanılan kuvvet bileşenidir. Üç kanatlı bir Darrieus türbini için toplam teğetsel kuvvet, kanatlar üzerine etkiyen kuvvetin azimut açısına bağlı değişimi olarak:

$$F_T = F_{T1}(\theta) + F_{T2} \left[\theta + \frac{2\pi}{3} \right] + F_{T3} \left[\theta - \frac{2\pi}{3} \right] \quad (1.7)$$

eşitliği ile ifade edilir. Çünkü türbin bir devri boyunca her 120° 'de bir aynı konuma gelmektedir. Kanat üzerine etkiyen teğetsel kuvvet, türbinin herhangi bir pozisyonunda azimut açısı θ 'nın bir fonksiyonudur ve türbinden bir devir boyunca üretilen ortalama tork:

$$T = \frac{D}{4\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\theta) d\theta \quad (1.8)$$

ile hesaplanır ve türbinden üretilen güç ise:

$$P_T = T\Omega \quad (1.9)$$

ile hesaplanır. Kanal içerisinde akan akışkanın gücü ise;

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 \quad (1.10)$$

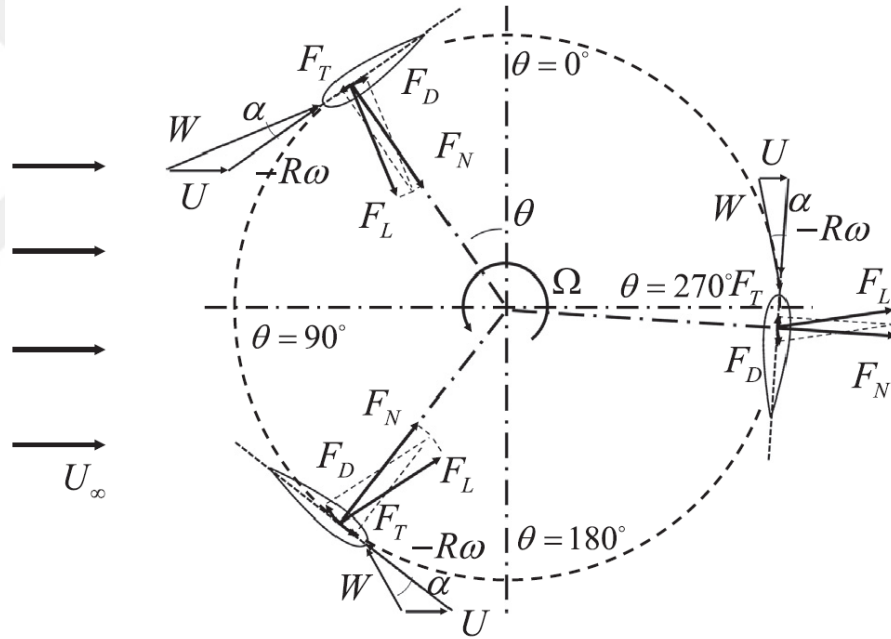
eşitliği ile ifade edilir. Burada ρ akışkanın yoğunluğunu, A ise türbinin süpürme alanını $A=D.L$, Şekil 1.4'teki gibi D ve L 'de sırasıyla türbinin çapını ve kanat uzunluğunu ifade

etmektedir. Türbinlerde performans, genellikle güç katsayısı C_P ile karakterize edilir ve türbinden elde edilen gücün, akışkanın gücüne oranı olarak:

$$C_P = \frac{P_T}{P} = \frac{T\Omega}{0.5\rho AU_\infty^3} \quad (1.11)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Literatürde katılık oranı, uç hız oranı ve kanat yapısı gibi türbin tasarımında yapılan değişiklikler ile türbin performansını artırmaya yönelik çalışmalar son yıllarda artmıştır. Türbin performansını artırmaya yönelik, akışkan türbin etkileşimine bağlı olarak türbin etrafında ve alt akış bölgesine ait akış karakteristiği ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı literatür araştırması bölümünde sunulmuştur.



Şekil 1.6. Darrieus tipi türbinlerde azimut pozisyonuna bağlı olarak kanat üzerindeki hız üçgeni ve kanada etkiyen kuvvet bileşenleri (Su ve ark., 2020)

1.3. Tez Çalışmasının Önemi, Amacı ve Kapsamı

Önem: Literatürde yapılan araştırmalarda dünya enerjisinin %80'inden fazlasının fosil yakıt kaynaklarından sağlandığı görülmektedir. Bu fosil yakıtların iklim değişikliği, çevre kirliliği ve artan enerji ihtiyaçları sonucu hızlı tükenmesi gibi sorunlar insanları alternatif enerji kaynakları gibi farklı çözüm yolu bulmaya yöneltmiştir.

Günümüzde insanlar kendi enerji ihtiyaçlarını karşılamak için küçük ve büyük ölçekli çalışmalarda bulunmuşlardır. Mühendisler ve bilim insanları, özellikle temiz ve yenilenebilir olan alternatif enerji kaynaklarını kullanabilmek için cihazlar icat etmişlerdir ve icat ettikleri bu cihazları daha verimli hale getirebilmek için araştırma-geliştirme faaliyetlerinde bulunmuşlardır.

Hidroelektrik santralleri, jeotermal enerji santralleri, rüzgar türbinleri, güneş panelleri ve biokütle sistemleri günümüzde yenilenebilir enerjiyi elektriğe dönüştürmek için kullanılan en yaygın araçlardandır. Diğer alternatif enerji kaynaklarından mekanik veya elektriksel güç elde edilecek sistemler üzerinde de çalışmalar devam etmektedir. Ancak, enerji transferiyle ilgili teknolojilere yönelik araştırma ve projeler çoğunlukla zengin ülkelerden gelen büyük şirketler tarafından yapılmaktadır. Yoksul ülkelerin enerjiye ulaşmalarına yardımcı olmak, ucuz teknolojiyi kullanarak enerji elde etmelerini sağlamak için çabalar sarf edilmiştir. Bu nedenle hızla büyüyen dünyada enerji kalkınmanın anahtarı olmuştur. Son zamanlarda bu yöndeki çalışmalardan bir tanesi de hidrokinetik türbinlerdir.

Hidrokinetik türbinler, hareketli sıvı ile etkileşime giren ve çalışan tüm cihazları kapsamaktadır. Fonksiyon ve çalışma prensibi olarak birbirinden farklı birçok hidrokinetik türbin çeşidi bulunmaktadır. İlk kullanımı 3. yüzyılda Perachora tekeri olarak adlandırılan akarsu yatağı üzerine yerleştirilmiş bir su tekeri şeklindedir. Bu hidrokinetik türbinler bir güç kaynağı olarak nehir veya insan yapımı kanaldan akan suyu kullanırlar. Nehirler ve kanallardaki akarsu seviyesi bölgelere göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle, farklı ölçekte hidrokinetik türbinler kullanılarak akarsu yatağındaki potansiyelden optimum şekilde enerji dönüşümü sağlanmış olur. Ülkemizde ve dünyada farklı büyüklük ve akıntı debilerinde akarsular, sulama kanalları ve su nakil hatları bulunmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, dünyanın dört bir yanındaki insanların ucuz, güvenilir ve sürdürülebilir enerjiye erişmelerine yardımcı olabilir. Ayrıca bu sistemler özellikle fakir ülkelerdeki toplumları ekonomik olarak geliştirmekle kalmayacak, ekosistem üzerindeki zararı azaltmaya da yardımcı olacaktır.

Amaç: İdeal olarak, bir yenilenebilir enerji dönüşüm teknolojisinin, yıllık ortalama enerji üretimi başına minimum maliyet ve maksimum güç çıkışıyla, çevresel etkileri minimum düzeyde olmalıdır. Bu kapsamda hidrokinetik türbinler akarsu yatağında herhangi bir değişiklik yapılmadan doğal olarak akışkanın gücünü mekanik güce dönüştürebilen sistemlerdir. Bu da hem inşaat ve işletme maliyetlerini önemli

ölçüde azaltır hem de su tutulmasından kaçınarak çevresel etkileri en aza indirir. Tüm yıl boyunca belirli bir su doluluk oranına sahip nehirler ve kanallar çevresel etkilerden minimum düzeyde etkilenirler. Böylelikle kapasitelerine göre büyük, orta ve küçük ölçekli hidrokinetik türbinler doğal veya insan yapımı bu akarsu yataklarına yerleştirilerek hidrokinetik gücün kullanımı için potansiyel artırılabilir. Enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla bu doğal kaynaklar üzerinden optimum güç elde edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda araştırmanın temel amacı, birim alandan elde edilen güç miktarını artırmak için dikey eksenli türbinlerden oluşan bir türbin çiftliği senaryosu oluşturmak ve türbinlerin maksimum güç sağlayacağı dizilim ve çalışma koşullarını belirlemektir.

Kapsam: Hidrokinetik teknolojisi ile ilgili araştırmalar son yıllarda artmıştır ancak türbinlerin hidrodinamik akış karakteristiği konusunda ki çalışmalar henüz başlangıç aşamasındadır ve deneysel çalışmalardaki yetersizlikler nedeniyle araştırmalar genellikle sayısal ve teorik analizler ile sınırlı kalmıştır. Yapılan literatür araştırması doğrultusunda tez kapsamında su kanalı içerisine yerleştirilecek olan 3 kanatlı H-tipi Darrieus türbini için kanat yapısının performans ve akış karakteristiğine etkisinin incelenmesi, türbin çiftliği uygulaması için ideal çalışma şartlarının araştırılması hedeflenmiştir. Literatürde Patel ve ark. (2017) tarafından tamamlanan çalışmanın çıktılarının kullanıldığı tez çalışması üç aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşama:

- NACA 0018 kanat profilinden oluşan H-tipi Darrieus türbinin iki ve üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ANSYS-Fluent programında yapılarak Patel ve ark. (2017) bulmuş oldukları deneysel performans sonuçları ile karşılaştırılıp doğrulanmıştır.
- Doğrulan HAD yöntemi kullanılarak NACA 0018 kanat profiline göre daha ince ve kalın olan NACA 0012 ve NACA 0024 profilleri ve NACA 0018 profili ile aynı kalınlıkta olan ancak kambur olan NACA 2418 ve NACA 4418 profilleri kullanılarak türbinlerin $\lambda=0.9-1.4$ uç hız oranı aralığında performans analizleri yapılmıştır.
- Elde edilen performans sonuçları dikkate alınarak önce aynı uç hız oranında kanat profilinin art izi bölgesindeki akış karakteristiğine etkisi incelenmiş, sonrasında ise her bir kanat profili için maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranında art izi bölgesindeki akış yapısı

türbin çiftliği uygulaması için iki boyutlu analizler ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

İkinci aşama:

- İki boyutlu HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda hem performans hem de art izi bölgesindeki akış karakteristiğine bağlı olarak NACA 4418 profilinin kullanıldığı türbin prototip imalatı yapılarak mevcut deney düzeneğine uyarlanmıştır. Hem deneysel tork ölçümleri hem de 3-D HAD analizleri $\lambda=0.5-1.4$ aralığında ortalama güç katsayısı sonuçları karşılaştırılmıştır.
- NACA 4418 profili için hem deneysel hem de HAD analiz sonuçlarında türbinin maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.0$ çalışma noktasında, art izi bölgesindeki akış yapısı türbin merkezinden alt akış yönünde $12D$ uzaklığa kadar Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm sistemi (PIV) yöntemiyle görüntülenmiş ve 3-D HAD analizi sonuçları ile hem nicel hem de nitel sonuçlarla karşılaştırılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Üçüncü aşama:

- Art izi bölgesindeki akış alanı incelendikten sonra alt akış yönüne, üst akış yönündeki türbin ile aynı özellikte ve aynı hızda bir türbin daha yerleştirilmiştir. İki türbin arasındaki mesafenin, uç hız oranının ve iki türbinin birbiri ile eş/zıt yönlü dönüşünün alt akış bölgesindeki türbinin performansına etkisi deneysel ve sayısal analiz sonuçları ile araştırılmıştır.

Deneyler ve sayısal analizlerden en kapsamlı sonuçları elde etmek için, deneyler ve analizler iki yönlü geri bildirimlerle sürekli koordine edilmiştir. Böylelikle dikey eksenli bir türbinin art izi bölgesindeki akış yapısı karakterize edilerek bir kanal veya nehir içerisinde oluşturulacak türbin çiftliği uygulaması için deneysel ve sayısal sonuçlar sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde Darrieus türbinleri ile ilgili araştırmaların çoğu akışkanın rüzgar olduğu uygulamalarda yapılmıştır. Araştırmacılar türbin tasarım parametrelerinde yaptıkları değişikliklerle türbinlerin çalışma şartlarını iyileştirerek türbin verimlerini arttırmaya çalışmışlardır. Türbin tasarımındaki değişiklikler türbin performansını etkilediği kadar türbin çiftliği uygulamaları için türbin art izi bölgesindeki akış karakteristiğini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu araştırmalar, deneysel, analitik ve son zamanlarda mühendislik tasarımlarında sıklıkla kullanılan HAD yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

2.1. Türbin Performansının İncelendiği Çalışmalar

H-tipi Darrieus türbinlerinde uç hız oranı, katılık oranı, kanat profili, kanat sayısı, kanat helis açısı, kanat yüzey pürüzlülüğü, kanat-şaft bağlantı elemanlarının etkisi gibi parametreler performans artırımına yönelik çalışmaların başında gelmektedir.

Shiono ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada rüzgar türbini olarak kullanılan H-tipi Darrieus türbinini bir kanal içerisine yerleştirerek akıntı türbini gibi çalıştırmışlar ve kanat sayısı ve katılık oranının türbin performansı üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Aynı kanat sayısında katılık oranı arttıkça türbinde üretilen gücün arttığını, aynı katılık oranında ise üç kanatlı türbinin iki kanatlı türbine göre veriminin %20 daha az olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca kanat sayısının dört ve fazla olması durumunda türbinin bir devir boyunca hiç negatif tork değerine ulaşmadığını ve kanat sayısının artmasıyla türbinin başlangıç torkunun yükseldiğini vurgulamışlardır.

Hwang ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada kanat sayısının, kanat kamburluğunun, kanat kalınlığının ve kanat aktif kontrolünün H-tipi Darrieus hidrokinetik türbin performansı üzerine etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Düşük katılık oranlarında, türbin maksimum performansına düşük uç hız oranlarında ulaşırken, yüksek katılık oranında ise yüksek uç hız oranlarında türbinin maksimum performans sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca kanat üzerindeki aktif kontrol ile kanat yunuslama hareketini kontrol etmişler ve sabit kanada göre performansın yaklaşık %25 daha iyi çıktığını tespit etmişlerdir.

Howell ve ark. (2010) kanat sayısının ve kanat yüzey pürüzlülüğünün türbin performansına etkisini rüzgar tüneline deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. İki

kanatlı türbin performansının üç kanatlı türbin performansına göre daha yüksek çıktığını, ayrıca kanat yüzey pürüzlülüğün türbin performansını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Yüzey pürüzlülük oranı için kritik Reynolds sayısını $Re=3 \times 10^4$ olarak belirlemişler ve Reynolds sayısının kritik değerden düşük olduğunda yüzey pürüzlülüğünün türbin performansına pozitif etkisinin olduğunu, yüksek olduğunda ise negatif etkisinin olduğunu vurgulamışlardır.

Mohamed (2012) yaptığı çalışmada Realizable k- ϵ türbülans modelini kullanıp, en iyi performansı veren kanat profilini bulmak için 20 farklı simetrik ve simetrik olmayan kanat profilini üç kanatlı H-tipi Darrieus türbininde 2-D HAD yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Kanat profilinin türbin performansını önemli ölçüde etkilediğini vurgulayan Mohammed, S-1046 kanat profilinin geleneksel NACA serisi kanat profillerine göre yaklaşık %10 daha iyi performans sergilediğini belirtmiştir.

Yang ve Shu (2012)'da hidrokinetik türbin üzerinde kanat heliselliğini optimize ettiği deneysel çalışmasında, optimize edilmiş helisel kanat yapısı ile türbin performansının %40 civarında arttığını belirtmişlerdir. Helisel kanat sayesinde türbin güç üretimindeki dalgalanmaların azaldığını ve kanat etrafında yaptıkları PIV deneylerinde helisel kanatlarda hız geri kazanımının daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir.

Deshpande ve Li (2013) yaptıkları çalışmada katılık oranının türbin performansını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Türbinin yüksek katılık oranı-düşük uç hız oranlarında maksimum güç üretirken, düşük katılık oranında daha yüksek uç hız oranında maksimum güç ürettiğini vurgulamışlardır.

Maître ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada H-tipi Darrieus türbininde performansın uç hız oranına bağlı değişimini deneysel ve sayısal analizler ile incelemişlerdir. Hem deney hem de 2-D ve 3-D analizlerde maksimum güç katsayısının $\lambda=2$ uç hız oranında elde etmişlerdir. Uç hız oranının $\lambda < 2$ olduğu değerlerde, 2-D analizlerin başarısız olduğunu ve 2-D analizlerde kanatların stol durumunu tam olarak modelleyemediğini vurgulamışlar.

Guang ve ark. (2013) ise kanat hücum açısının H-tipi Darrieus hidrokinetik türbininin performansı üzerine etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kanadın stol durumunu dikkate alarak türbin kanadına verdikleri pozitif hücum açısı ile, hücum açısı sıfır olan türbin konfigürasyonuna göre türbin performansını %33 artırmışlardır.

Lee ve Lim (2015) yaptıkları çalışmada, veter uzunluğunun, türbin çapının, kanat kalınlığının ve kanat helis açısının 3 kanatlı H-tipi Darrieus türbin performansı

üzerine etkisini incelemişlerdir. Referans aldıkları modelin performans deneylerini rüzgar tüneline tork ölçümü yaparak belirlemişler ve HAD analizlerinde kullandıkları yöntemi doğrulamışlardır. RNG k- ϵ türbülans modelinin kullanıldığı HAD analizlerinde, veter uzunluğunun uzun olduğu ve türbin çapının düşük olduğu yüksek katılık-düşük uç hız oranlarında türbinin yüksek performans sergilediğini, katılık oranının düşük olduğu durumlarda yüksek uç hız oranlarında ise türbin yüksek performans sergilemiştir. Ayrıca, türbin performansının incelendiği uç hız oranlarında kullanılan kanat kalınlığının türbin performansına önemli bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Kanat helis açısının ise sadece türbinin başlangıç torkunu arttırdığını, ancak türbin performansı üzerinde olumlu etkisinin olmadığını ve düz kanat yapısının helisel kanatlara oranla daha iyi performans sergilediğini belirlemişlerdir.

Maeda ve ark. (2015) ise NACA 0021 kanat profilinin kullanıldığı H-tipi Darrieus türbinde kanat sayısının türbin performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Türbin üzerindeki diğer bütün parametrelerin ve çalışma koşullarının aynı olduğu deneylerde kanat sayısının artmasıyla türbin katılık oranının arttığını ve bunun türbin performansını olumsuz etkilediğini belirlemişlerdir. Öte yandan kanat sayısının yüksek olduğu durumlarda, türbinin düşük hızlarda bile güç üretimi sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca H-tipi Darrieus türbinlerde güç üretiminin azimut açısının $\theta=0^{\circ}-180^{\circ}$ aralığında olduğunu vurgulamışlardır.

Kanat yapısının, akışkan hızının ve kanat bağlantı kollarının türbin performansı üzerindeki etkisini Elkhoury ve ark. (2015) deneysel ve Large Eddy Simulation (LES) türbülans modeli kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Yüksek katılık oranlarında ince kanatların stol durumunun daha düşük olmasından dolayı daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir. Simetrik kanatların ise asimetric kanatlara göre daha iyi performans sergilediğini ancak başlangıç torku için kayda değer bir etkisi olmadığını vurgulamışlardır. Yüksek akışkan hızının ise karmaşık akış yapısına sebep olduğundan dolayı türbin performansını olumsuz yönde etkilediğini, ayrıca bağlantı elemanlarının düşük uç hız oranlarında türbin performansını çok etkilemediği, ancak yüksek uç hız oranlarında ihmal edilemeyecek kadar etkisinin olduğunu vurgulamışlardır.

Kanat kamburluğunun türbin performansına etkisini sayısal olarak inceleyen Bausas ve Danao (2015), kanat kamburluğunun itki kuvvetine önemli bir etkisinin olmadığını ancak kaldırma kuvveti üzerinde pozitif etkisinin olduğunu ve bundan dolayı türbin performansını artırdığını vurgulamışlardır. Ayrıca aynı uç hız oranında akışkan hızı arttıkça türbin performansının arttığını belirtmişlerdir.

Nguyen ve Tran (2015) yaptıkları 2-D analizlerde farklı kalınlıklardaki kanat profillerinin ve akışkan hızının başlangıç torkuna etkisini incelemişlerdir. Kanat kalınlığının arttıkça ve akışkan hızının azaldıkça başlangıç torkunun arttığını belirtmişlerdir.

Marsh ve ark. (2015) üç kanatlı H-tipi Darrieus tipi hidrokinetik türbinlerde kanat-şaft bağlantısında kullanılan aparatların türbin performansı üzerine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Bağlantı aparatlarını dikdörtgen kesitli bir aparat yerine kanat profili şeklinde bir bağlantı elemanı ile bağladıklarında türbin performansının %50 civarında arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca kanat yapısına sahip bağlantı aparatını kanadın ortası yerine kanat ucuna bağladıklarında uç girdaplarını engellediği için türbin performansında yaklaşık %12'lik bir artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Kanat heliselliğinin türbin performansı üzerine etkisinin incelendiği bir diğer çalışma da Alaimo ve ark. (2015) tarafından yapılmıştır. 3-D analizlerle inceledikleri çalışmada düz kanada göre 60° helis açısının olduğu durumlarda türbin performansının yaklaşık %9 arttığını vurgulamışlardır.

Sengupta ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada simetrik ve simetrik olmayan kanat profillerinde oluşan üç kanatlı H-tipi Darrieus türbininin performansını rüzgar tüneline deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan araştırmada simetrik olmayan kanat yapılarının kullanıldığı türbinlerde yüksek katılık oranlarında türbinlerin başlangıç torkunun artırılabilceğini vurgulamışlardır. Ayrıca simetrik olmayan kanat yapısının aynı çalışma şartları altında simetrik olanlara göre daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir.

Maeda ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada ise farklı uç hız oranı ve akışkan hızlarında türbin kanatları üzerine gelen kaldırma ve itki kuvvetlerini, rüzgar tüneline kanat yüzeyindeki basıncı ölçerek belirlemişlerdir. Güç katsayısının akışkan hızına ve uç hız oranına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Kanadın maksimum hız bileşenine $\theta=20^\circ$ maruz kalırken, minimum hız bileşenine $\theta=180^\circ$ azimut açısında kaldığını belirtmişlerdir.

Katılık oranının farklı uç hız oranlarında türbin performansına etkisini Patel ve ark. (2017) açık su kanalında deneysel olarak incelemişlerdir. NACA 0015, NACA 0018 ve NACA 4415 kanat profilinin kullanıldığı deneylerde, maksimum güç katsayısına NACA 0018 kanat profilinin kullanıldığı ve katılık oranının $\sigma=0.382$ olduğu $\lambda=1.05$ değerinde ulaşılmıştır. Katılık oranının çok düşük olduğu durumlarda türbinin

başlangıç torkunun çok yüksek olduğunu, aksine çok yüksek olduğu durumlarda da enerji dönüşümünün düşük olduğunu vurgulamışlardır.

Akış kontrolünün uygulandığı diğer bir çalışma da Kumar ve ark. (2017) tarafından rüzgar tüneline yapılmıştır. NACA 0021 profilinden oluşan H-tipi Darrieus türbininin de kanatların emme yüzeyinde oyuk oluşturarak, yüksek hücum açılarındaki yüzeyden kopan girdapları kırarak türbin performansını simetrik kanada göre yaklaşık %19 arttırmışlardır.

Priegue ve Stoesser (2017) yaptıkları deneysel çalışmada, dikey eksenli H-tipi Darrieus hidrokinetik türbininde kanat yüzey pürüzlülüğünün türbin performansına etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada dikey eksenli türbinlerin bir tam dönüş esnasında kanat yüzeyindeki akış ayrılmasına bağlı olarak birden fazla kez stol olmasından dolayı ve kanat yüzey pürüzlülüğünün akış ayrılmasını ötelediği için stol durumuna karşı önlem alınabileceğini ve bu şekilde türbin performansını artırılabileceklerini kurgulamışlardır. Ancak kanat pürüzlülüğünün türbin performansını olumsuz etkilediğini ve kanat pürüzlülüğü arttıkça türbin performansının azaldığını görmüşlerdir. Yüzey pürüzlülüğü yüksek Reynolds sayılarında türbin performansını daha olumsuz etkilerken, düşük Reynolds sayılarında daha az olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir.

Chen ve ark. (2018) hidrokinetik türbin için yaptıkları sayısal analizlerde türbin kanadına dönüş esnasında aktif akış kontrolü uygulayıp performans arttırmayı hedeflemişlerdir. Dinamik kanat kontrolü ile türbin performansında önemli bir iyileşme olduğunu belirlemişler ve güç üretimindeki çalkantıyı azaltmışlardır. Sabit kanada göre dalma hareketi yapan kanatlar üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerin daha az olduğunu vurgulamışlardır.

Kanat kalınlığının türbin performansı üzerine etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada, Mazarbhuiya ve ark. (2020) yüksek kanat kalınlığında emme yüzeyindeki akış ayrılmasına bağlı olarak türbin performansının düştüğünü sayısal analizlerle belirlemişlerdir.

2.2. Türbin Akış Karakteristiğinin İncelendiği Çalışmalar

Türbin tasarım parametrelerinin literatürdeki çalışmalarda da görüldüğü gibi türbin performansını artırmaya yönelik birçok değişken ile deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak incelenmiş ve araştırılmıştır. Türbin performansının artırılmasının

yanı sıra, bu parametrelere bağılı olarak türbin art izi bölgesindeki akış yapısı da incelenerek optimum türbin dizilimiyle türbin çiftlikleri kurularak toplam enerji yoğunluğu artırılabilir. Yapılan araştırmalarda yatay eksenli türbinlerin art izi bölgesinde hız geri kazanımı yaklaşık olarak türbin çapının 15 katı kadar mesafede gerçekleşirken, dikey eksenli türbinlerde bu mesafenin yaklaşık 6-8 katı mesafede gerçekleştiğini vurgulamıştır (Kinzel ve ark., 2012; Meyers ve Meneveau, 2012). Dabiri (2011) ve Ryan ve ark. (2014) yaptıkları çalışmalarda yatay eksenli türbinlerin bireysel olarak veriminin yüksek olmasına rağmen türbin çiftliklerinin optimum dizilimi durumunda birim alandan elde edilen enerji miktarının, dikey eksenli türbinlerden oluşan türbin çiftliklerinde daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Bu kapsamda dikey eksenli türbinlerin performans iyileştirmelerine ek olarak, art izi bölgelerindeki akış yapısını inceleyerek hız geri kazanım oranını araştırmak enerji dönüşüm potansiyelini artırmak için son derece önemlidir.

Dikey eksenli türbinlerde akış türbin çevresinden geçerken türbin kanatları ile birden fazla kez temas halinde olur. Dönüş anında akış yönündeki kanat/kanatlar türbin sistemindeki alt akıştaki diğer kanat/kanatlar etrafındaki akış yapısını etkilediği için hız oldukça bozulur ve bu durum türbin içerisinde ve art izi bölgesinde daha karmaşık bir akış yapısına neden olmaktadır. Dikey eksenli türbinler güç üretimi esnasında, kanatların azimut açısına bağılı olarak kararsız akış yapısı ve stol durumu ile karşılaştıkları için türbin performansı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu nedenle türbin bir devri boyunca farklı azimut açılarındaki kanat etrafındaki akış yapısını farklı uç hız oranlarında Ferreira ve ark. (2009) rüzgar tüneline PIV yöntemiyle incelemişlerdir. Kanadın arka ucundan kopan girdapların görüntülenmesini yaptıkları çalışmada faz ortalamalı görüntüler almışlar ve $\lambda=2-4$ uç hız oranı aralığında inceledikleri akış bölgesinde, uç hız oranının $\lambda=2$ olduğu değerde kanat uç kısmından kopan girdapların en güçlü olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, kopan girdapların sadece azimut açısına değil türbin çalışma şartlarına da bağılı olduğunu vurgulamışlardır.

Aynı şekilde türbin akışkan etkileşiminin PIV yöntemi ile incelendiği bir diğer çalışmada Gorle ve ark. (2014) tarafından açık su kanalında dört kanatlı H-tipi Darrieus türbini için yapılmıştır. Farklı azimut açılarındaki yaptıkları incelemede, kanat etrafındaki akışın çok karmaşık olduğunu ve bunun uç hız oranı ve değişken Reynolds sayısına bağılı olduğunu vurgulamışlardır.

Ryan ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada duran ve farklı iki uç hız oranının da çalışan dikey eksenli beş kanatlı H-tipi Darrieus türbininin art izi bölgesindeki akış

yönündeki hız dağılımını Magnetic Resonance Velocimetry (MRV) ile incelemişlerdir. Art izi bölgesinde $7D$ uzaklığa kadar yaptıkları ölçümde yüksek uç hız oranlarında türbinin hemen arkasındaki bölgede hız düşüşünün maksimum olduğunu, ancak hız geri kazanımının da yüksek uç hız oranlarında daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca uç hız oranı $\lambda=0$ olduğunda, yani türbin çalışmaz iken art izi bölgesindeki akış simetrik iken, türbin döndüğündeki art izi bölgesinde ki akış yapısının asimetrik olduğu görülmüştür.

Parker ve Leftwich (2016) ise uç hız oranının, türbin etrafındaki ve türbin çapının iki katı mesafeye kadar alt akış bölgesindeki akış yapısına etkisini PIV yöntemi ile rüzgar tüneline incelemişlerdir. Zaman ve faz ortalamalı sonuçlar ile akış yapısını incelediklerinde art izi bölgesinde asimetrik bir akış yapısının oluştuğu ve uç hız oranı arttıkça art izi bölgesindeki hız düşüşünün daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Uç hız oranı arttıkça art izi bölgesinde ters akış bölgesinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca uç hız oranının türbin art izi bölgesindeki akış yapısının önemli derecede etkilemesine rağmen, Reynolds sayısının akış yapısı üzerinde uç hız oranı kadar etkisinin olmadığını vurgulamışlardır.

Araya ve Dabiri (2015) yaptıkları çalışmada su kanalı içerisine yerleştirilmiş bir su türbini için motorla tahrik verilen ve kendi kendine suyun enerjisiyle dönen türbinin $3D$ 'ye kadar olan art izi bölgesindeki akış yapısını farklı uç hız oranlarında incelemişlerdir. Kayma tabakasına bağlı olarak art izi bölgesinde asimetrik akış yapısının oluştuğunu ve uç hız oranının artmasıyla hız düşüşünün arttığını vurgulamışlardır. Parker ve Leftwich (2016) vurguladığı gibi Reynolds sayısının art izi bölgesindeki akış yapısında kayda değer bir değişikliğe sebep olmadığını vurgulamışlardır. Ayrıca türbinin bir motor ile tahrik edilmesinin veya kendi kendine çalışmasının akış yapısına etkisinin olmadığını, türbin kinematikini ve hidrodinamiğini etkilemediğini belirtmişlerdir.

Posa ve ark. (2016) PIV ve LES yöntemini kullanarak üç kanatlı bir H-tipi Darrieus türbinin art izi bölgesindeki hız, girdap ve türbülans kinetik enerji gibi akış bileşenlerini iki farklı uç hız oranında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Hem nitel hem de nicel anlık, faz ve zaman ortalamalı akış sonuçlarını karşılaştırdıklarında, PIV ve LES sonuçlarının birbirleriyle iyi bir uyum içerisinde olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca düşük uç hız oranında hücum açısına ve daha güçlü stol durumuna bağlı olarak kanat yüzeylerinden daha büyük girdaplar kopmakta olduğunu

ve bundan dolayı art izi bölgesindeki akış yapısının daha asimetric olduğunu vurgulamışlardır.

Somoano ve Huera-Huarte (2017) yaptıkları çalışmada uç hız oranının türbinin yakınındaki art izi bölgesinde akış karakteristiğine etkisini su kanalında PIV yöntemi ile incelemişlerdir. $\lambda=0.7-2.3$ uç hız oranı aralığında yaptıkları PIV deneylerinde uç hız oranının arttıkça art izi bölgesindeki hız düşüşünün arttığını belirtmişler. Farklı azimut pozisyonunda kanat etrafındaki akış yapısını incelediklerinde ise uç hız oranı azaldıkça kanat akışkan etkileşimi artarak büyük girdap bileşenlerinin oluşmasına yol açtığını vurgulamışlardır.

Hohman ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada rüzgar tüneline sınır tabakaya yerleştirilen 3 kanatlı H-tipi Darrieus türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını farklı uç hız oranlarında PIV kullanarak incelemişlerdir. Uç hız oranının artmasının hız düşüşünü ve türbülans kinetik enerji değerini arttırdığını vurgulamışlardır. Art izi bölgesindeki türbülansın üç türbin çapından sonra azalmaya başladığı ve hız geri kazanımının başladığını belirtmişler.

Ouro ve ark. (2019) ise akustik doppler hız ölçüm sistemi ile helisel kanat yapısına sahip dikey eksenli Gorlov türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını incelemişlerdir. Dikey eksenli türbinlerde art izi bölgesini 3 bölgeye ayırmışlardır. Birinci bölgeyi, maksimum hız düşüşünün ve türbin kanatlarından kopan girdapların enerjisinin en yüksek olduğu bölge olarak tanımlamışlar ve yaklaşık türbin çapının iki katına kadar olan mesafe olarak belirtmişlerdir. İkinci bölgede, geçiş bölgesidir ve 2D-5D aralığındadır. Bu bölgede akış tekrar toparlanmaya başlar ve türbülans bu bölgede yüksektir. Üçüncü bölge ise 5D'den sonradır. Bu bölümde akış toparlanmaya başlar ve 5D bölgesinde akış yönündeki hız bileşeni üniform hızın yaklaşık %80'i mertebesinde olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca türbinin çalışma şartlarına göre hız çalkantılarının 10D'ye kadar uzayabildiği vurgulanmıştır ve yaklaşık 14D'de üniform şartlara geldiği belirtilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi türbin performansına etki eden en önemli parametrelerden bir tanesi de katılık oranıdır. Parker ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada katılık oranının art izi bölgesindeki akış yapısına etkisini PIV yöntemiyle incelemişlerdir. Katılık oranını belirlerken kanat sayısını ve kanat veter uzunluğunu sabit tutarak türbin çapını değiştirmişlerdir. Uç hız oranında olduğu gibi katılık oranı arttıkça da art izi bölgesindeki hız düşüşünün yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü uç hız oranı arttıkça türbinin dinamik katılığı arttığını ve türbinin yüksek katılık

oranında küt cisim gibi davranarak yüksek hız düşüşüne sebep olduğunu vurgulamışlardır.

Katılık oranının art izi bölgesindeki akış yapısına etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada Zou ve ark. (2020) tarafından yüksek hızlı çoklu basınç probu ile ölçülerek incelenmiştir. Çalışmalarında katılık oranına etki eden bütün parametrelerin farklı kombinasyonlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda katılık oranının artmasıyla türbinin bir küt cisim gibi davrandığını belirtmişlerdir.

Ross ve Polagye (2020) ise kanal blokaj etkisinin türbin performansına ve art izi bölgesindeki akış yapısına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Blokaj oranı arttıkça türbin etrafındaki ve türbin içerisinden geçen akışın hızlandığı için güç katsayısının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, blokaj oranı arttıkça art izi bölgesi kısalmış ve art izi bölgesindeki türbülans kinetik enerji seviyesinin yükseldiğini görmüşlerdir. Artan blokaj her ne kadar akış hızını ve buna bağlı performansı artırsa da, kanal boyunca yanal hızı yükselttiği ve türbülansı artırdığı için türbin çiftliği uygulaması için uygun olmadığını vurgulamışlardır.

Tamamlanan bu deneysel çalışmalarda deney düzeneğindeki kısıtlamalara bağlı olarak akış karakteristiği genelde türbin akışkan etkileşiminin olduğu dinamik bölge veya hemen türbinin yakın art izi bölgesi incelenmiştir. Bu nedenle de türbin çiftliği uygulamalarında türbinlerin optimum dizilimi için bu sonuçlar yeteri kadar net değildir.

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, HAD yöntemleri, türbin performansının ve türbin etrafındaki akış yapısının incelenmesine yönelik ana araştırma yöntemlerinden biri olmuştur. Bu kapsamda takip eden çalışmalarda da türbin art izi bölgesindeki akış yapısının 2-D/3-D analizlerle incelendiği bazı sonuçlara yer verilmiştir. Shamsoddin ve Porté-Agel (2014) yaptıkları 3-D analizlerde LES türbülans modelini kullanarak iki kanatlı dikey eksenli türbinin art izi bölgesindeki anlık ve ortalama akış karakteristiğine ait özellikleri incelemişlerdir. LES modelinin iki farklı subgrid-scale stress ve Smagorinsky modülünün kullanıldığı analizlerde art izi bölgesindeki akış yapısı alt akış yönünde yaklaşık $14D$ 'ye kadar incelenmiş ve hem hız bileşenlerinin hem de türbülans yoğunluğu karşılaştırıldığında subgrid-scale stress modülünün, Smagorinsky modülüne göre deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Art izi bölgesinde $11.7D$ mertebesinde akış yönündeki hız bileşeni üniform hızın yaklaşık %80 değerine ulaştığı görülmüştür.

Shamsoddin ve Porté-Agel (2016) LES türbülans modelini kullandıkları araştırma sonuçlarını ilk çalışmalarındaki deneysel akış yapısı ile karşılaştırarak

doğrulamışlar ve bu çalışmalarında da doğruladıkları model ile atmosferik sınır tabakaya yerleştirdikleri H-tipi Darrieus türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmalarında akış karakteristiğini incelemekten önce farklı uç hız oranı ve katılık oranlarında analizler yaparak, türbinin performansının en iyi olduğu çalışma şartlarında akış karakteristiğini incelemişlerdir. Art izi bölgesindeki ortalama hızın geri kazanımı için uzun bir mesafeye ihtiyaç olduğunu ve türbin orta ekseninde $14D$ mesafede üniform hızın yaklaşık %85'ine ulaştığını belirtmişlerdir. Maksimum hız düşüşünü, türbin merkezinin $2.7D$ uzaklıkta alt akış yönünde meydana geldiği görülmüştür. Türbülans yoğunluğunun ise maksimum değerine alt akış yönünde $3.8D$ 'de ulaştığı gözlemlenmiştir.

Lam ve Peng (2016) ise iki kanatlı H-tipi Darrieus rüzgar türbininin art izi bölgesindeki akış yapısını Transition Shear Stress Transport (SST) ve Detached Eddy Simulation (DES) türbülans modellerini kullanarak 2-D ve 3-D boyutlu analizlerle $1D$ 'den $10D$ 'ye kadar incelemişlerdir. 3-D tamamladıkları çalışmalarda DES ve SST türbülans modelleri arasında belirgin bir fark olmamasından dolayı analizlerini SST türbülans modeli kullanarak tamamlamışlardır. Hem 2-D hem de 3-D analiz sonuçlarında maksimum hız düşüşü yaklaşık üniform hızın % 85 oranında türbinin yakınındaki art izi bölgesinde yaklaşık $3D$ uzaklıkta meydana gelmiştir. Art izi bölgesinde alt akış yönünde ilerledikçe akış geri kazanıma başlamıştır. Ancak 2-D analiz sonuçları 3-D analiz sonuçlarından uç girdapları ve akışın üçüncü boyutu nedeniyle türbinden uzak bölgede farklılık göstermiştir. 3-D analiz sonuçları gerçeğe daha yakın olduğu için bu uç girdaplarının ve akışın üçüncü boyuttaki hareketinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Boudreau ve Dumas (2017) ise yatay eksenli ve dikey eksenli türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını Delayed Detached-Eddy Simulations (DDES) türbülans modelini kullanarak 3-D analizlerle incelemişlerdir. İki türbinin art izi bölgesindeki akış yapısındaki baskınlığının tamamen birbirinden farklı olduğunu görmüşler. Yatay eksenli türbinlerin art izi bölgesi, akışın türbülans karakteristiğinden etkilenirken, dikey eksenli türbinlerde akış karakteristiğinden çok türbinin katılık oranı, kanat en boy oranı gibi geometrik özelliklerinden etkilendiğini belirtmişlerdir.

Mendoza ve Goude (2017) yaptıkları çalışmada ise yer pürüzlülüğünün sınır tabaka ya yerleştirilen dikey eksenli bir rüzgar türbininin art izi bölgesindeki akış yapısına etkisini LES Smagorinsky modelini kullanarak analiz etmişlerdir.

Rezaeiha ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada ise ANSYS-Fluent yazılımını kullanarak 2 kanatlı dikey eksenli türbin için 8 farklı türbülans modeli kullanarak literatürde Tescione ve ark. (2014) yaptıkları deneysel sonuçlar ile kıyaslayarak bu tip türbinlerin analizlerinde kullanılması gereken en iyi türbülans modelini belirlemeyi hedeflemişlerdir. Spalart-Allmaras (SA), RNG k- ϵ , realizable k- ϵ , SST k- ω ve SST k- ω modelinin kullanıldığı 2-D analizlerde, SST k- ω modeli ve türevlerinin dışındaki türbülans modellerinin türbinin aerodinamik karakteristiğini belirleme konusunda başarılı olamadığını belirtmişlerdir. SST k- ω modeli ve türevlerinin ise art izi bölgesindeki akış yapısını diğer türbülans modellerinin kullanıldığı sonuçlara göre deneysel daha benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Posa (2020) LES modelini kullanarak yaptığı 3-D analizde üç kanatlı H-tipi Darrieus türbinin akış yapısını türbin merkezinden $10D$ kadar aşağı akış yönündeki art izi bölgesinde farklı uç hız oranlarında incelemiştir. Posa ve ark. (2016) yılında yaptıkları deneysel çalışma sonuçları ile doğruladığı modelinde, uç hız oranının art izi bölgesindeki akış yapısını önemli ölçüde etkilediğini, uç hız oranının arttıkça art izi bölgesindeki hız kaybının arttığını ancak türbinin alt ve üst bölgesinden gelen akışla birlikte hız geri kazanımının daha önde meydana geldiğini vurgulamıştır. Türbülans kinetik enerji ve türbülans üretimi yüksek uç hız oranlarında daha yüksek çıkmıştır ve maksimum değerlerine yüksek hız bileşenlerinin olduğu kayma tabakası bölgesinde ulaştığını belirtmiştir. Düşük uç hız oranlarında ise art izi bölgesindeki akış yapısının daha kararlı olduğunu vurgulamıştır.

Posa (2020) bir diğer çalışmasında ise aynı kanat yapısının kullanıldığı aynı türbin çapında kanat sayısının değişmesine bağlı olarak değişen katılık oranının art izi bölgesindeki akış yapısına etkisini LES türbülans modeli kullanarak incelemiştir. Doğrulama çalışması yine Posa ve ark. (2016) yaptıkları deneysel sonuçlar ile yapılmıştır. 2-5 arası kanat kullanarak yaptığı analizlerde uç hız oranında olduğu gibi katılık oranının artmasıyla da hız düşüşünün türbinin hemen yakınındaki bölgede daha yüksek olduğunu, ancak art izindeki hız geri kazanımının daha hızlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca kanatlı yapıların art izi bölgesindeki akışın enerjisinin, aynı ölçülerdeki temsili bir katı modelin enerjisinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Shamsoddin ve Porté-Agel (2020) türbin en-boy oranının art izi bölgesindeki akış karakteristiğine etkisini LES türbülans modelini kullandıkları analizlerle incelemişlerdir. Farklı en-boy oranındaki türbinlerin ortalama akış karakteristiklerini incelediklerinde ciddi farklılıkların olduğunu gözlemlemişler. Ancak türbin boyuna

bağlı değişiklikleri benzer şekilde boyutlandırdıklarında sonuçların birbirine benzediğini vurgulamışlardır. Momentum çapı tanımlayıp boyutsuzlaştırdıkları sonuçlarda en-boy oranının türbin yakın art izi bölgesinde etkili olduğu, ancak alt akış yönünde ilerledikçe etkisinin azaldığını vurgulamışlardır.

Villeneuve ve ark. (2020) ise tek kanatlı dikey eksenli bir türbinde uç plakasının (kanat ucu) art izi bölgesindeki akış yapısına ve türbin performansına etkisini DDES türbülans modelini kullanarak HAD analizleriyle incelemişlerdir. Uç plakaları kanat ucundan kopan girdapların olumsuz etkilerini ortadan kaldırdığı için türbin performansını belirgin bir şekilde iyileştirmiştir. Dairesel uç plakası olan türbinin uç plakasız türbine göre performansı %31 daha iyi çıkmıştır. Yarım dairel uç plakasının verimi ise plakasız türbine göre %20 daha iyi çıkmıştır. Ayrıca tam dairel uç plakası art izi bölgesindeki akış geri kazanımını olumsuz etkilerken, yarım dairel plaka akış geri kazanımını olumlu yönde etkilemiştir. Bunun nedenini ise türbinin dönme eksenini boyunca akış yönündeki hızın plaka bölgesine nüfuz etmesinden kaynaklandığıyla açıklamışlardır.

2.3. Türbin Çiftliği Uygulamaları için Yapılan Çalışmalar

Dikey eksenli türbinlerin art izi ve türbin bölgesindeki akış yapısına ilişkin literatürde kısıtlı da olsa çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle akışkanın hava olduğu durumlar için araştırmalar yapılmıştır ve bir kısmında türbin çiftliği uygulamasına yönelik tavsiyelerde bulunulmuştur. Ancak türbin çiftlikleri için yapılan çalışmalar hem hava hem de su uygulamaları için oldukça sınırlıdır ve bu araştırmaların çoğu, türbinlerin yan yana diziliminin incelendiği çalışmaları kapsamaktadır. Dikey eksenli türbinlerin, türbin çiftliği uygulamaları için yapılan bazı araştırmalar ve sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

Shaheen ve Abdallah (2017) yaptıkları çalışmada SST k- ω türbülans modelini kullanarak 2-D analizlerle birbirine paralel yerleştirilmiş eş eksenli ve çapraz diziliimli üç kanatlı türbinlerin eş yönlü ve zıt yönlü dönüşü için performansı ve türbinin hemen yakınındaki bölgede akış yapısını incelemişlerdir. Ayrıca çapraz dizilim için üçgen formunda türbin kümesi oluşturarak enerji potansiyelini artırmaya çalışmışlardır. Yaptıkları kapsamlı çalışmada birbirine paralel eş eksenli yerleştirilen türbinlerde türbinler birbirine göre zıt yönde dönme durumunda, eş yönlü dönme durumuna göre daha yüksek performans elde etmişlerdir. Ayrıca türbinler arasındaki mesafe arttıkça

türbinlerin performansının azaldığını vurgulamışlardır. Türbin çapraz diziliminde de aynı sonuçlarla karşılaşmışlardır. Türbinlerin üçgen dizilim konfigürasyonunda ise iki türbin eş bir türbin zıt yönde döndürülmüştür ve üçlü türbin diziliminin ortalama güç katsayısının tek türbinin ortalama güç katsayısından %30 fazla çıktığını belirtmişlerdir.

Chen ve ark. (2017) 2-D HAD analizleriyle türbin çiftliği uygulaması için iki türbin arasındaki uzaklığı, iki türbin arası açığı, iki türbinin birbirine göre dönüş yönünü, kanat açısını ve uç hız oranını Taguchi yöntemi kullanarak maksimize etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada türbin performansına etki eden en etkili parametrelerin sırasıyla; uç hız oranı, türbinler arası açı, türbin dönüş yönü, türbinler arası uzaklık ve kanat açısı olarak belirlemişlerdir. Kanat açısının türbin performansına bir etkisi olmadığını vurgulamışlardır. Yaptıkları optimizasyon çalışmasında en ideal uç hız oranını $\lambda=2$, türbin açısını $\beta=120^\circ$, türbin dönüş yönünü birinci türbin saat yönü; ikinci türbin saat tersi, türbinler arası uzaklığı $S/d=3$ ve kanat açısını 0 olarak belirlemişlerdir. Tekli türbinle kıyasladıklarında maksimize ettikleri parametrelerle performansı yaklaşık %9.97 arttırdıklarını belirtmişlerdir.

Posa (2019) yaptıkları çalışmada paralel eş eksenli yerleştirilen türbinin üç farklı dönüş konfigürasyonu için; eş yönlü, zıt yönlü içe, zıt yönlü dışa, iki farklı uç hız oranında LES türbülans modelini kullanarak art izi bölgesindeki akış yapısını detaylı bir şekilde incelemiştir. İkili türbin sisteminde girdap etkileşiminin zayıf olduğunu ancak alt akış yönüne doğru akışın hızında bir artışın olduğunu belirtmiştir. Bunun türbin çiftliği uygulaması için avantaja dönüştürülebileceğini vurgulamıştır. Uç hız oranının artmasıyla hız artışının da olduğunu vurguladığı çalışmada iki türbinin zıt yönde dışa doğru dönmesinin türbin çiftliği uygulamaları için daha iyi olduğunu belirtmiştir.

Lam ve Peng (2017) aynı şekilde eş yönlü, zıt yönlü içe, zıt yönlü dışa üç farklı dönüş konfigürasyonu için beş kanatlı dikey eksenli türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını rüzgar tüneline üç yönlü çalışan ve noktasal hız ve basınç ölçebilen ölçüm sistemi ile tarayarak incelemişlerdir. Eş yönlü dönen türbinlerin art izi bölgesindeki akış yapısı asimetric bir yapıdayken, zıt yönlü dönen türbinlerin simetric bir yapıda olduğunu görmüşlerdir. Posa (2019) çalışmasında belirttiği gibi zıt yönlü dışa doğru dönen türbinlerde art izi bölgesindeki hız geri kazanımın daha hızlı olduğunu vurgulamışlardır.

Brownstein ve ark. (2019) yaptıkları deneysel çalışmada çapraz yerleştirilen türbinlerde dönüş yönünün türbin yakınındaki akış karakteristiğine ve türbin performansına etkisini incelemişlerdir. Türbin çiftliği uygulamalarında türbinlerden

kopan girdapların türbin performansı üzerinde etkili olduğunu vurgulamışlar. Türbin çiftliği uygulamalarındaki çalışma ve dizilim parametreleri ile verimin arttırılabileceğini ve kendi çalışmalarında %14'e varan performans artışının olduğunu vurgulamışlardır.

Jin ve ark. (2020) LES türbülans modelini kullandıkları sayısal çalışmalarında yan yana konumlandırılan iki türbin arasındaki uzaklığın ve türbinlerin farklı azimut açılarında pozisyonlandırıldığında türbin performansına etkisini incelemişlerdir. İki türbinin zıt yönlü çalıştırıldığı analizlerde, türbinler arasındaki mesafe kısaldıkça türbin performansının arttığını belirtmişlerdir. Bunun sebebi ise türbinler birbiri üzerinde blokaj etkisi yaratarak hız yükselmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca türbinlerin azimut açısının performans üzerine etkisinin yaklaşık %1.2 olduğunu ve bu parametrenin ihmal edilebilir olduğunu vurgulamışlardır.

Vergaerde ve ark. (2020) yaptıkları deneysel çalışmada türbin dönüş yönünün art izi bölgesindeki akış yapısını incelemişlerdir. Yan yana koydukları türbinlerde türbinlerin eş yönlü dönüşünün tek türbinin art izi bölgesindeki akış yapısına benzediğini, zıt yönlü dönüşlerde de art izindeki hız geri kazanımının yaklaşık aynı olmasına rağmen, art izi genişliğinin farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda yan yana dizilmiş eş eksenli veya çapraz paralel dizilmiş türbinlerin, dönüş yönünün ve birbirine uzaklığının türbin performansı ve art izi bölgesindeki akış yapısına etkisi incelenmiştir. Özellikle akışkanın su olduğu insan yapımı veya doğal bir kanal içerisinde arka arkaya yerleştirilerek performans ve akış yapısının incelendiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Zuo ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada arka arkaya yerleştirilen iki türbinin performans ve akış karakteristiğini 2-D analizler ile sayısal olarak incelemişlerdir. Eş yönlü ve aynı uç hız oranında çalışan türbinlerde, alt akış yönündeki uzaklık arttıkça alt akış bölgesine yerleştirilen türbinin performansının arttığını belirtmişlerdir. Alt akış yönündeki mesafe arttıkça ikinci türbin üzerine etkileyen kararsız akış yapısının etkisini yitirdiğini ve dikey eksenli türbinlerde art izi bölgesinde hız geri kazanımı için türbin çapının 15 katı mesafeye ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Patel ve ark. (2017) performans ölçümü yaptıkları deneysel çalışmada ise türbine yakın bölgede konumlandırılan alt akış türbininin, üst akış türbininin art izi bölgesindeki akış yapısından önemli derecede etkilendiğini, aradaki mesafe arttıkça alt akış türbininin performansının arttığını belirtmişlerdir. Alt akış türbini için türbin çapının yedi katı mesafenin yeterli olacağını vurgulamışlardır. Türbinlerin yan yana

dizilimi için ise türbin çapının dört katı mesafenin maksimum güç üretimi için yeterli olduğunu vurgulamışlardır.

Yapılan literatür araştırması kapsamında H-tipi Darrieus türbinleri ile ilgili yapılan performans çalışmaları yıllardır popüler iken, enerji yoğunluğunu artırmak için yapılan türbin çiftliği uygulamasına yönelik çalışmalar son zamanlarda değer kazanmıştır ve araştırmacıların bu konular üzerinde yoğun çalışmaları, son zamanlarda yapılan çalışmalarda açıkça görülmektedir.



3. KANAT PROFİL ETKİSİNİN İNCELENMESİ

3.1. Türbin Tasarım Parametreleri

Patel ve ark. (2017) yaptıkları deneysel çalışmada, NACA 0018 kanat profilinin kullanıldığı üç kanatlı H-tipi Darrieus türbini için uç hız oranı ve katılık oranının türbin performansına etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda kullanılan türbin geometrisi ve su kanalına ait detaylar Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kanat veter uzunluğunun sabit ve $c=0.1\text{m}$ olduğu türbinde, türbin çapını $D=0.22\text{m}-0.37\text{m}$ aralığında değiştirerek farklı katılık oranları elde etmişlerdir (Şekil 3.1(a)). Çalışmalarında kanal içerisine yerleştirilen türbinin akışa blokaj etkisi yaratarak türbinin hemen ön bölgesinde lokal hız artışlarına sebep olduğunu belirlemişler ve budan dolayı Maskell'in hız düzeltme yöntemini kullanmışlardır. Maskell yönteminde düzeltilmiş hız bileşenini üniform hız cinsinden türbin blokaj oranına bağlı olarak:

$$\frac{V_c^2}{U_\infty^2} = \frac{1}{1 - m * (BR)} \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplamışlardır. Burada V_c düzeltilmiş hız bileşenini, U_∞ ise üniform hız bileşenini, BR ise blokaj oranını ifade etmektedir. Blokaj oranı türbinin akışkana karşı taradığı alanın kanal akış alanına oranı olarak ifade edilmektedir:

$$BR = \frac{D \cdot L}{H_w \cdot W_w} \quad (3.2)$$

Blokaj oranı eşitlik 3.2'deki gibi hesaplanır ve m ise blokaj oranına bağlı olarak

$$m = 8.14 * (BR)^2 - 7.39 * (BR) + 3.23 \quad (3.3)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Üniform akış hızının $U_\infty=0.46\text{m/s}$ olduğu deneysel çalışmada Maksell yöntemine göre düzeltilmiş hız bileşeni $V_c=0.58$ olarak hesaplanmıştır. Uç hız oranının $\lambda=0-1.4$ olduğu aralıkta türbinin performans deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.1(b)'de görüldüğü gibi katılık oranının $\sigma=0.382$ olduğu türbinde maksimum güç katsayısı $\lambda=1.05$ uç hız oranında yaklaşık $C_p=0.16$ olarak elde etmişlerdir.

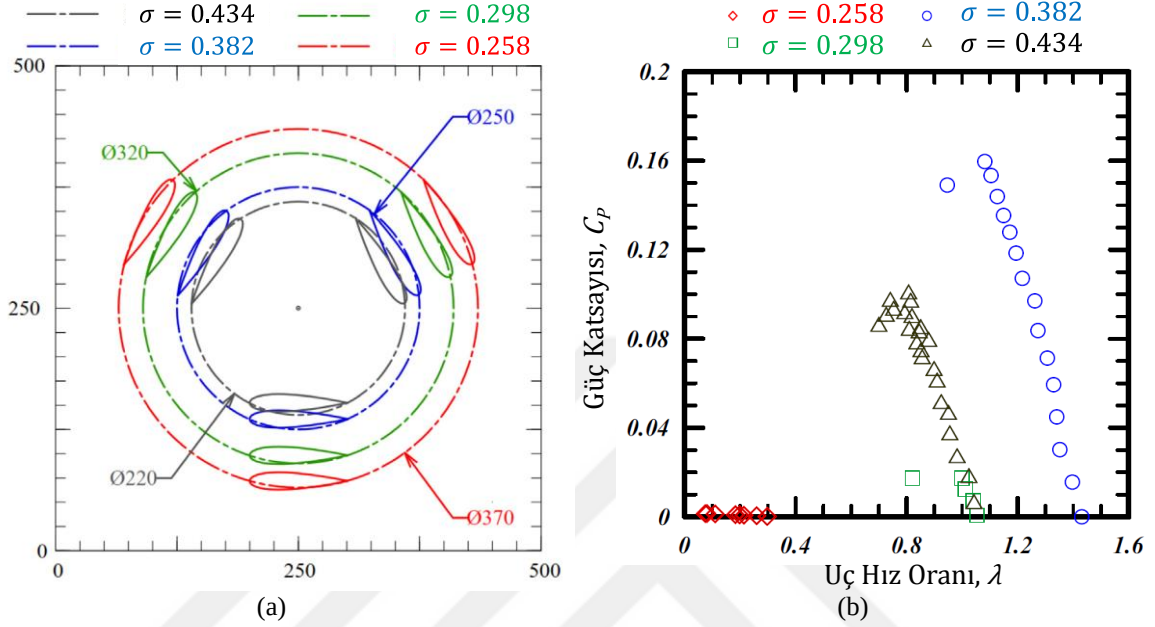
Bu çalışma kapsamında öncelikle NACA 0018 kanat profilinin kullanıldığı deney sonuçları referans alınarak, kanat kalınlığının ve kanat kamburluğunun türbinin güç katsayısına ve art izi bölgesindeki akış karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, farklı kalınlık ve kamburluktaki kanatlar için NACA 0018 profiline göre, sırasıyla %33 daha kalın ve daha ince profiller NACA 0024 ve NACA 0012, sırasıyla %2 - %4 kambur profiller NACA 2418 ve NACA 4418 kanat profilleri seçilmiştir. Kanat profilleri her iki yüzeyin koordinatları ile karakterize edilir. Bunlar genellikle maksimum kalınlık, maksimum kamburluk, maksimum kalınlığın konumu, maksimum kamburluk ve burun yarıçapı konumu gibi çeşitli parametreler kullanılarak numaralandırılmaktadır. ABD Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (NACA) (bugün NASA olarak bilinen) kanat profillerinin en çok kullanıldığı kategoridir. NACA kanat profillerini özellikle dört, beş ve altı haneli rakamlarla bölümlere ayırmıştır. Örneğin; NACA 4415 kodundaki ilk rakam maksimum kamburluğun veter uzunluğunun %4’ü kadar olduğunu, ikinci rakamın maksimum kamburluğun konumunun veter uzunluğunun hücum kenarından %40’ı kadar uzaklıkta olduğunu, son iki rakam ise veter uzunluğunun % 'sindeki maksimum kalınlığı temsil etmektedir. Yani NACA 4415 kanat profilinin kullanıldığı bir tasarımda veter uzunluğunun 100mm olması durumunda profil üzerindeki azami kalınlığının 15mm olduğunu belirtmektedir. Eğer NACA profili 0015 olsaydı, kamburluğun olmadığını ve kanat profilinin simetrik olduğunu ifade edecekti (Kroo, 2007).

Çizelge 3.1. Patel ve ark. (2017) performans deneylerini yaptıkları türbine ait geometrik özellikler ve çalışma koşulları

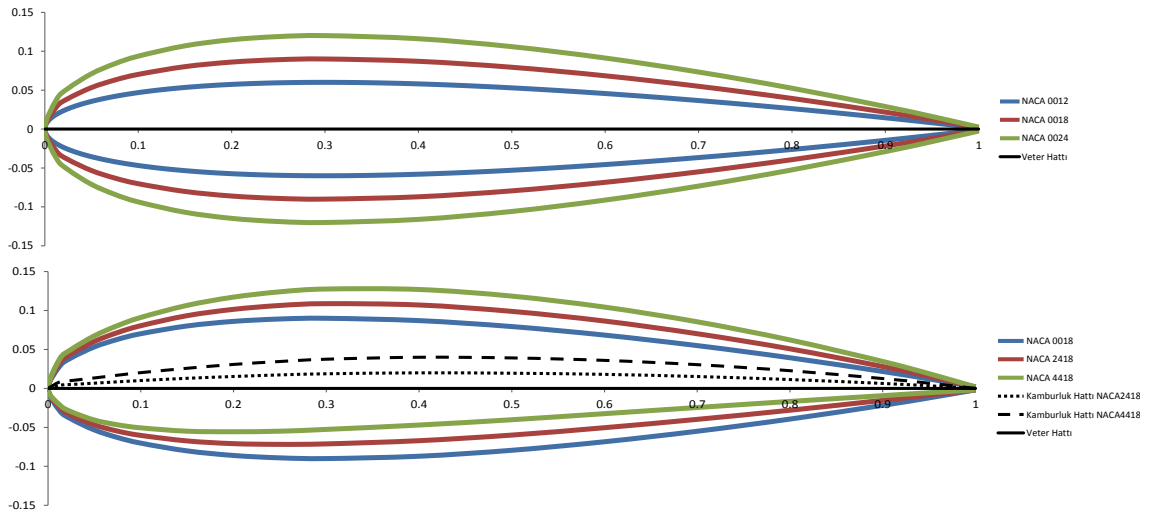
Parametre	Değer
Kanat profili	NACA 0018
Türbin çapı, D	0.25 m
Kanat uzunluğu, L	0.15 m
Kanat veter uzunluğu, c	0.1 m
Kanat sayısı, N	3
Üniform akış hızı, U_∞	0.46 m/s
Maskell yöntemine göre düzeltilmiş akış hızı, V_c	0.58 m/s
Reynolds sayısı, Re_D	$\sim 11.5 \times 10^4$
Katılık oranı, σ	0.382
Uç hız oranı, λ	0 - 1.4
Su kanalı genişliği, W_w	0.75 m
Su yüksekliği, H_w	0.3 m

NACA 0018 kanat profili için, üç boyutlu analiz sonuçlarından elde edilen performans değerleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulama çalışması yapılan 3-D HAD analizlerinde kullanılan yöntem

kullanılarak, NACA 0018 profili ve türevleri için türbin performansı ve art izi bölgesindeki akış karakteristiğinin karşılaştırılması 2-D analizlerle yapılmıştır. Bu kapsamda 2-D ve 3-D analiz sonuçları arasındaki farklar ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.



Şekil 3.1. NACA 0018 kanat profilinin kullanıldığı üç kanatlı H-tipi Darrieus türbininde katılık oranının performans üzerindeki etkisi (Patel ve ark., 2017)



Şekil 3.2. Farklı kalınlıktaki ve kamburluktaki kanatların kesit görünüşü

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi

Tez çalışmasında hidrokinetik türbinin HAD analizleri için akışkan sıkıştırılmaz ve tamamen türbülanslı olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, hız ve basınç

bileşenleri Navier-Stokes denklemleri kullanılarak çözülmüştür. Türbülanslı akış yapısını çözmek içinde, kararsız Reynolds ortalama Navier Stokes (U-RANS) yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda HAD analizlerinde sıkıştırılamaz akış için süreklilik ve momentum denklemleri Denklem 3.4 ve 3.5'deki gibi verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \bar{f}_i \quad (3.5)$$

Burada;

$u, \bar{u} \text{ and } u'$	Anlık, ortalama ve çalkantı hızları
$\bar{p}$	Ortalama basınç
ρ	Yoğunluk
ν	Kinematik viskozite
f_i	Kütle kuvveti

Türbinlerdeki kararsız ve karmaşık akış yapısı nedeniyle, performans ve art izi bölgesindeki akış yapısını araştırmak için, gelişmiş bir türbülans modelinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle sınır tabaka ve serbest akış bölgesindeki akış özelliklerini başarılı bir şekilde belirleyebilmesi nedeniyle ve literatürde de birçok dikey eksenli türbin çalışmasında kullanılarak deneysel çalışmalar ile doğrulandığı için SST k- ω türbülans modeli HAD analizlerinde kullanılmıştır (Hwang ve ark., 2009; Lain ve Osorio, 2010; Nobile ve ark., 2011; Lanzafame ve ark., 2020). SST k- ω türbülans modeli, cidara yakın bölgelerde k- ω modelini kullanmakta, ancak serbest akış bölgesinde k- ϵ modelinin bir fonksiyonunu etkinleştirmektedir. Bu nedenle k- ϵ ve k- ω türbülans modelleri kombinasyonundan oluşan hibrit bir modeldir.

Menter (1994) çalışmasında SST k- ω türbülans modelinin, girdap-viskozite formülasyonuna taşıma etkilerinin dahil edilmesiyle akış ayrılmasını ve ters basınç gradyanlarını iyi bir şekilde modelleyeceğini belirtmiştir. SST k- ω modelini k- ϵ 'dan ayıran en temel fark, $\omega = \epsilon / k$ olarak belirlenen ω türbülans frekansıdır. SST k- ω için transport denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir:

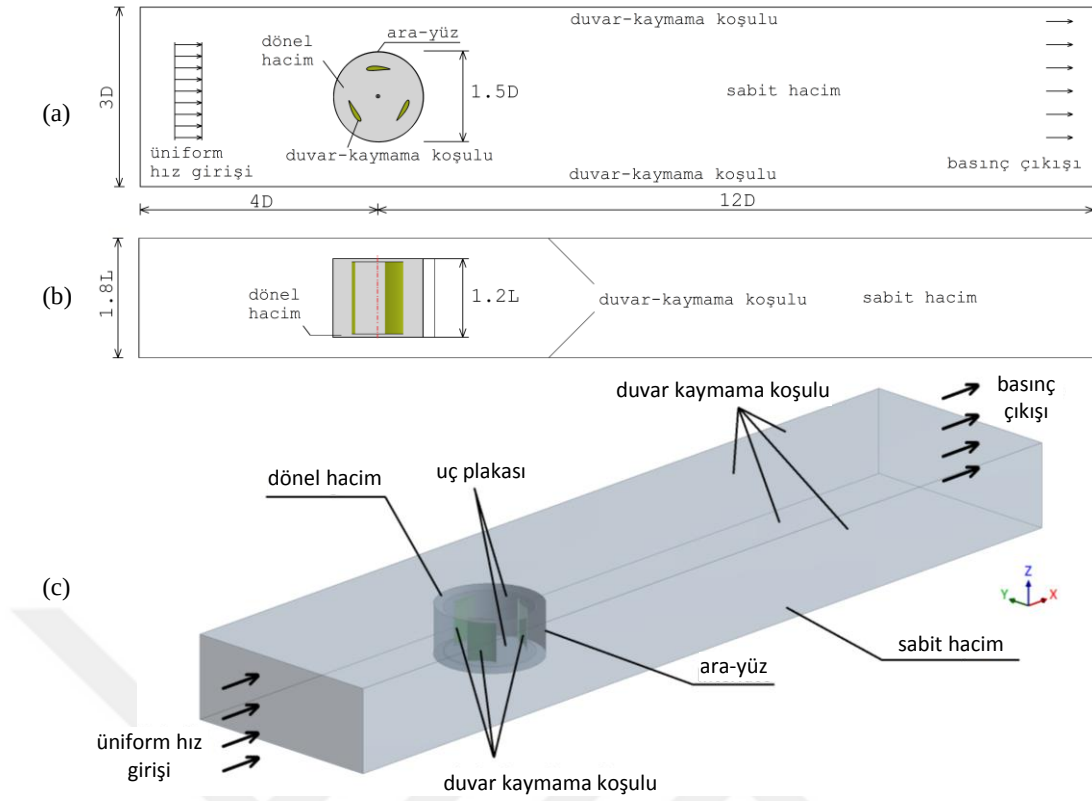
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + 2\rho(1 \\ &- F_1) \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Denklem 3.6'da, denklemin solundaki birinci ve ikinci terimler, sırasıyla türbülans kinetik enerji için zamana bağlı ve konveksiyon terimleridir, k ; denklemin sağ tarafındaki terimler ise sırasıyla difüzyon, üretim ve dağılım terimleridir. Denklem 3.7'de de soldaki iki terim ve sağdaki ilk üç terim, türbülanslı kinetik enerji denkleminde olduğu gibi türbülans frekansı ω için kullanılan terimlerdir. Ek olarak, çapraz difüzyon terimi ve kaynak terimi Denklem 3.7'ye dahil edilmiştir. Bu terim, modellemenin ϵ 'dan ω 'ye geçişini sağlamaktadır (Mohamed ve ark., 2015). 2-D ve 3-D analizler de SST k - ω türbülans modeli denklemleri ANSYS-Fluent 19.0 yazılımı kullanılarak zamana bağlı olarak çözülmüştür ve türbülans modelinde kullanılan model sabitleri, ANSYS-Fluent 19.0'da varsayılan seçenekler olarak kabul edilmiştir.

3.2.1. Akış hacmi

H-tipi Darrieus hidrokinetik türbininin performans ve art izi bölgesindeki akış karakteristiğini incelemek için iki ve üç boyutlu akış hacimleri oluşturulmuştur. Literatürde incelenen çalışmalarda dikey eksenli türbinlerde uç girdabı ve bağlantı aparatlarının etkilerinin ihmal edilerek dikey eksenli türbinlerde yapılacak araştırmaların 2-D analizler kullanılarak yapılabileceği vurgulanmıştır (Balduzzi ve ark., 2015; 2016; Bianchini ve ark., 2017). Bu nedenle çözüm süresi ve bilgisayar kapasiteleri dikkate alındığında, 2-D analizlerin uygun akış hacmi şartlarının oluşturulması durumunda performans ve hidrokinetik türbin çevresindeki akış alanının belirlenmesi konusunda bir tahmin sağlayabileceği vurgulanmıştır (Guerri ve ark., 2007; Howell ve ark., 2010; McLaren ve ark., 2012; Balduzzi ve ark., 2015; 2016; Wang ve ark., 2016; Bianchini ve ark., 2017; Jain ve Saha, 2020).



Şekil 3.3. Akış hacmi ve sınır koşulları: (a) 2-D ve 3-D'nin üstten görünümü; (b) 3-D'nin önden görünümü; (c) 3-D izometrik görünümü

Şekil 3.3'te, deneysel çalışmanın yapıldığı kanal boyutları dikkate alınarak 2-D ve 3-D akış hacimleri ANSYS 19.0'nin CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) ara yüzü olan Design Modular modülünde oluşturulmuştur. 2-D ve 3-D akış hacimleri dönel hacim ve sabit hacim olmak üzere iki akış alanından oluşmaktadır. Dikey eksenli türbinlerde, dönel simülasyonu gerçekleştirmek için, türbin rotoru etrafında dönel bir bölgeyi temsil eden dairesel kesitli silindirik hacim oluşturulmuştur. Bu dönel akış hacmi 2-D analizlerde türbin kanatlarını, 3-D analizler de ise türbin kanatlarını ve kanat uç plakasını kapsamaktadır. Sabit akış hacmi için giriş sınırından türbin dönüş merkezine $4D$; dönüş merkezinden çıkış sınırına olan mesafe ise $12D$ olacak şekilde dikdörtgen kesitli bir hacim oluşturulmuştur (Şekil 3.3(a)). Kanal genişliği ise referans alınan çalışmadaki gibi türbin çapının üç katı olarak $3D$ alınmıştır. Dönel hacim ve sabit hacim arasındaki temas yüzeyi, kütle transferi ve akışın sürekliliği için ara-yüz (interface) olarak tanımlanmıştır. Dönel hacmin çapı ise Rezaeiha ve ark. (2017) tarafından bir parametre olarak incelenmiş, ancak elde ettikleri analiz sonuçlarında dönel akış hacminin türbin performansına önemli bir etkisinin olmadığını ve ihmal edilebilir bir parametre olduğunu vurgulamışlardır. Bundan dolayı analizlerdeki hatayı mümkün

olduğunca azaltmak ve iki hacim arasındaki sürekliliği sağlamak amacıyla, literatürde de birçok çalışmada kullanıldığı gibi dönel hacmin çapı türbin çapının 1.5 katı alınarak modellenmiştir (Li ve ark., 2013; Hasan ve ark., 2014; Asr ve ark., 2016; Kumar ve Saini, 2017; Rezaeiha ve ark., 2017; Mejia ve ark., 2018; Saini ve Saini, 2018; Rezaeiha ve ark., 2019). 3-D analizler için kullanılan akış hacminde ise 2-D analizlere göre akış hacmine derinlik verilmiştir. Referans çalışmada kanal içerisindeki su yüksekliği 0.3 m olduğundan akış hacminin yüksekliği $2L$, dönel hacmin yüksekliği ise $1.2L$ olarak Şekil 3.3(b, c)'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2. Sayısal analiz için sınır koşulları

Konum	Sınır Şartı Tipi	Sınır Şartı
Giriş	Hız girişi	Üniform akış
Çıkış	Basınç çıkışı	Sıfır fark basıncı
Kanal yan duvarları	Kaymama koşulu	Duvar
Kanat ve uç plakası yüzeyleri	Kaymama koşulu	Hacimle birlikte dönel yüzey
Dönel ve sabit hacim arasındaki temas yüzeyi	Ara-yüz	Eş yüzey

3.2.2. Sınır koşulları ve çözüm ayarları

HAD analizleri için ANSYS-Fluent 19.0 versiyonu kullanılmıştır. Şekil 3.3'de gösterildiği gibi sınır koşulları ve türbinin çalışma koşulları Fluent modülünde tanımlanmış ve ilgili çözücü ayarları seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca analizlerde kullanılan sınır koşulları Çizelge 3.2'de özetlenmiştir. Fluent'te yapılan analizlerde hidrokinetik türbin sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi için çalışma akışkanı su seçilmiştir. Akış hacminin giriş bölgesi üniform hız girişi (velocity inlet) olarak deneysel çalışmadaki hız değeri ile aynı olarak $U_{\infty} = 0.46$ m/s tanımlanmıştır. Akış hacminin çıkışı ise sıfır fark basıncıyla basınç çıkışı (pressure outlet) sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Sabit hacmin yan duvarlarına kaymama koşulu ile duvar sınır şartı tanımlanmıştır. Dönel hacmin kapsadığı ve analizlerde dönel hacim ile birlikte dönen kanat yüzeyleri ve 3-D analiz için oluşturulan akış hacmindeki kanat uç plakalarının yüzeylerine de kaymama koşulu ile duvar sınır şartı tanımlanmıştır. Zaman bağımlı yapılan analizlerde basınç tabanlı çözücü kullanılmış ve 3-D analizlerde yerçekimi ivmesi $-z$ yönünde 9.81m/s^2 olarak tanımlanmıştır. Tüm konveksiyon terimleri için ikinci dereceden ayrıklaştırma şemaları kullanılmıştır. Basınç-hız bağlantısını çözmek için ise COUPLED algoritması kullanılmıştır. Bu algorithmada momentum ve süreklilik denklemleri birlikte çözülmektedir ve ayrılmış

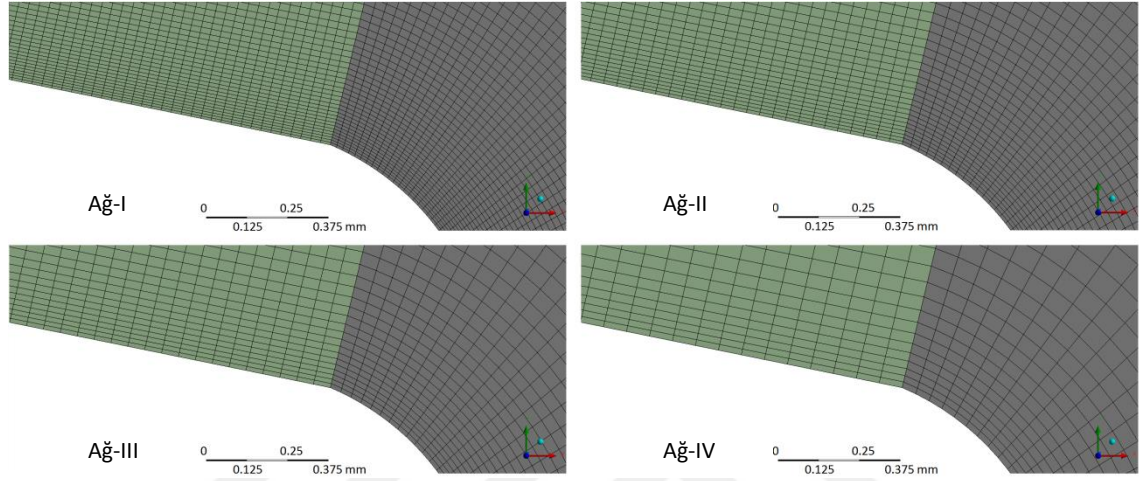
Akış hacmi hazırlanan modellerin ağ yapısı ANSYS-Mesh modülünde oluşturulmuştur. Hem 2-D hem de 3-D analizlerde dönen ve sabit akış hacimleri, ağ yapısının çarpıklığını (skewness) minimum seviyede tutmak ve dikey (orthogonal) kalitesini yükseltmek için yapısal dörtgen elemanlardan oluşturulmuştur. Genel akış hacmi bir dış sabit hacim ve kanatları içeren dönel iç hacimden oluşmaktaydı. Yapısal ağ yapısı oluşturulurken de bu akış hacimleri ayrıca geometrik özelliklere göre alt hacimlere bölünmüştür. Ağ-II durumu için türbinin kanat yüzeyine yakın bölgedeki ağ yapısının ayrıntılı bir görünümü, 2-D için Şekil 3.4(a) ve 3-D için Şekil 3.4(b) 'de gösterilmiştir. Şekil 3.4 incelendiğinde, sınır tabaka nedeniyle özellikle kanat yüzeyi ve önemli bölgelerde yüzey ve kenar kontrolü sayesinde, küçük elemanlar oluşturulmuştur. Kanat yüzeylerinden uzaklaştıkça çözüm süresi de dikkate alınarak büyük boyutlu elemanlar oluşturulmuştur. Kenar boyutlandırması sayesinde akış hacmi üzerinde alt bölümlere ayrılan hacimlerin elemanlarının boyutları rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Böylelikle ağdan bağımsızlık çalışması basit bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Ağdan bağımsızlık çalışması, hem 2-D hem de 3-D akış hacimlerinde NACA 0018 profilinin kullanıldığı türbin konfigürasyonu için dört farklı eleman boyutu ile test edilmiştir. Kanadın fırrar kenarındaki yerel ağ dağılımları Şekil 3.5'de sunulmuştur. Kanat yüzeyindeki ağ boyutu, basınç ve hız gradyanlarının çözülmesinde önemli bir rol oynadığından, oluşturulan dört farklı ağ yapısı yüksek oranda kanat yüzeyinde artırılan ve azaltılan eleman boyutu ile ayarlanmıştır. Bazı boyutuz parametrelere bağlı olarak ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları ayrıntılı eleman boyutları ve toplam eleman sayıları ile birlikte Çizelge 3.3'de sunulmuştur. Akış analizinde ağ yapıları oluşturulurken bazı önlemler ve kritik değerler dikkate alınmıştır. Bunlardan bir tanesi, boyutsuz duvar mesafesi parametresi y^+ 'dır ve Denklem 3.8'deki gibi hesaplanır.

$$y^+ = \frac{\rho \mu_\tau y}{\mu} \quad (3.8)$$

Burada y duvar yüzeyinden eleman merkezine olan dik uzaklık, $\mu_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ sürtünme hızı ve τ_w duvar yüzeyindeki normal hız gradyanı ile tanımlanan duvar kayma gerilmesidir (Li ve ark., 2013; Hasan ve ark., 2014; Asr ve ark., 2016; Kumar ve Saini, 2017; Rezaeiha ve ark., 2017; Mejia ve ark., 2018; Saini ve Saini, 2018; Rezaeiha ve ark., 2019). Bu nedenle, viskoz alt tabakayı simüle etmek için simülasyondaki y^+

değerleri kullanılan türbülans modeline uygun olmalıdır (Le Maitre, 2013). Bu kapsamda, literatürde de belirtildiği gibi SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı analizlerde viskoz alt katman çözümünün kabul edilebilir olması için $y^+ < 1$ olmalıdır (Balduzzi ve ark., 2016; Marsh ve ark., 2017; Li ve ark., 2018; Mosbahi ve ark., 2020; Yagmur ve ark., 2020). Bu nedenle analizlerde tüm kanat yüzeylerindeki ilk elemanın yüksekliği, viskoz alt tabaka içinde $y^+ < 1$ eşitliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur.



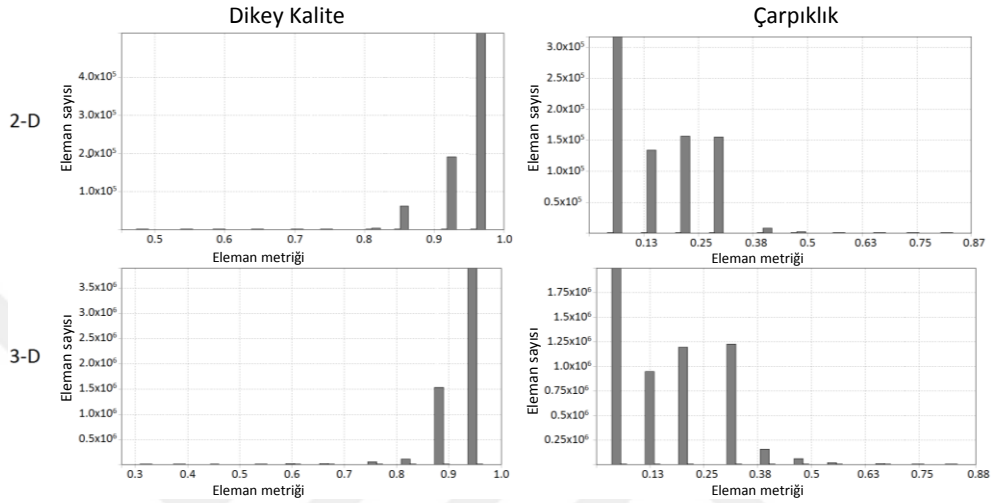
Şekil 3.5. Ağdan bağımsızlık çalışması için firar kenarı bölgesindeki ağ yapısı yoğunluğunun karşılaştırması

Çizelge 3.3. Ağdan bağımsızlık çalışması için kullanılan boyutlar ve elde edilen sonuçlar

	Ağ-I	Ağ-II	Ağ-III	Ağ-IV
	2-D / 3-D	2-D / 3-D	2-D / 3-D	2-D / 3-D
İlk eleman kalınlığı	6.2 μ m	9.8 μ m	13.1 μ m	17.2 μ m
Artış oranı	1.1	1.1	1.1	1.1
Sınır tabaka katman sayısı	40	40	40	40
Eleman sayısı	762,356 / 7,573,480	603,458 / 5,578,900	415,781 / 3,556,572	281,628 / 2,439,402
Ortalama güç katsayısı, C_p	0.216/ 0.166	0.221/ 0.154	0.238/ 0.138	0.271 / 0.128
3-D referans deneysel çalışma arasındaki % fark	+3.6	-3.6	-15	-20
Ortalama y^+	0.12/0.25	0.22/0.34	0.34/0.48	0.56/0.64
Maksimum y^+	0.46 / 0.63	0.59 / 0.84	0.74 / 0.93	0.97 / 1.17

Çizelge 3.3'te verildiği gibi, kanatların yüzeyinde, ilk eleman kalınlığı başlangıçta oluşturulan referans ağ yapısı Ağ-II için 9.8 μ m olarak ayarlanmıştır. Diğer durumlar için, ilk eleman kalınlıkları hesaplanmış ve referans Ağ-II'ye göre %33 artan veya azalan bir oranla ayarlanmıştır. Bütün ağ yapıları için, ardışık iki eleman yüksekliği arasındaki artış sabit ve 1.1 katı kadardır. Kanat yüzeylerindeki, sınır tabaka bölgeleri 40 alt tabakadan oluşturulmuş ve Ağ-I'den Ağ-IV'e ilk eleman kalınlığının artmasıyla sınır tabaka kalınlığı artmıştır. Bu çalışmada, 2-D analizleri için tüm ağ

yapısı varyasyonlarında, ortalama ve maksimum $y^+ < 1$ eşitliği sağlanmıştır ve maksimum y^+ değerleri kanadın hücum kenarına yakın bölgede meydana gelmiştir. 3-D analizlerde ise sadece Ağ-I, Ağ-II ve Ağ-III için $y^+ < 1$ eşitliği sağlanmıştır. Ancak, Ağ-IV için maksimum $y^+ = 1.17$ civarında elde edilmiştir ve bu $y^+ < 1$ gerekliliğine çok yakındır ve kabul edilebilir bir değer elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Ağ-II için dikey kalite ve çarpıklık sonuçları: 2-D için birinci satır ve 3-D için ikinci satır

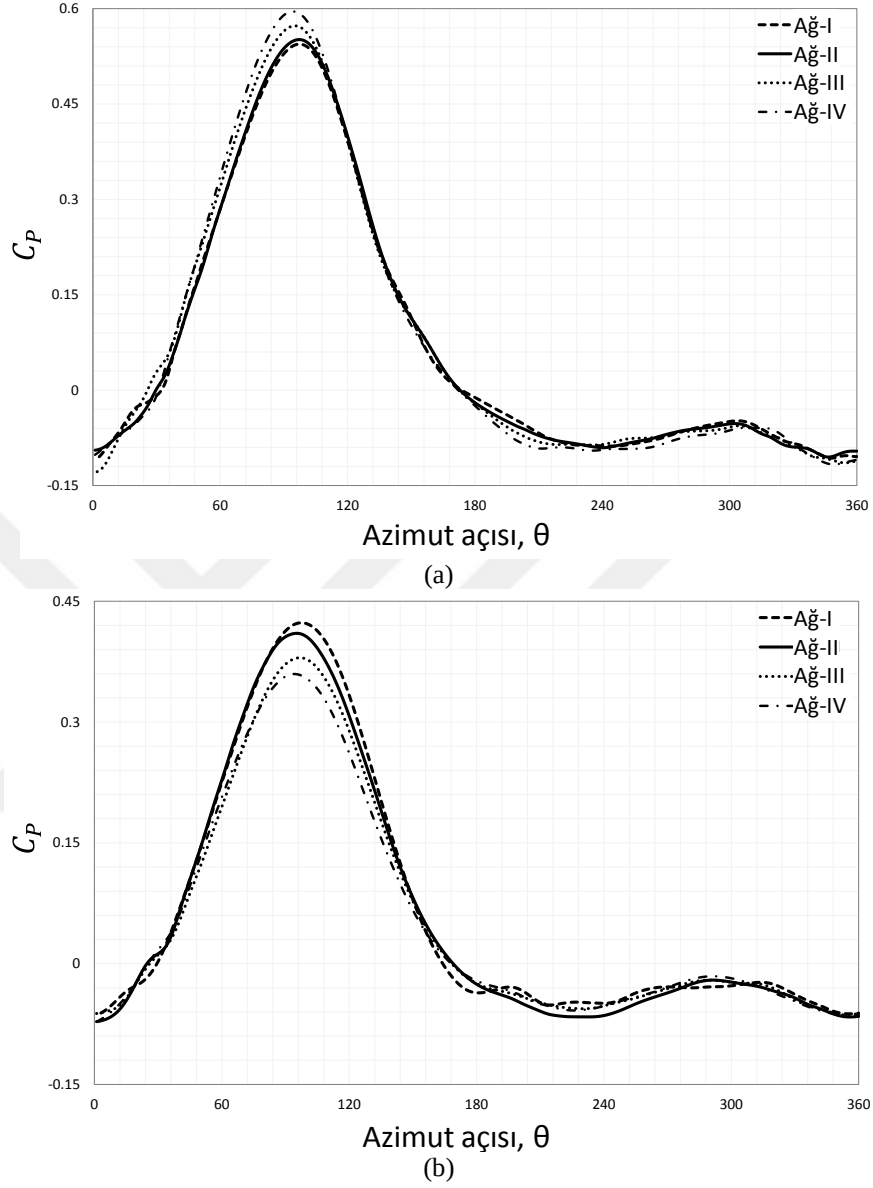
Ağ yapısı oluştururken bir diğer dikkat edilmesi gereken hususta her bir hücrenin kalitesidir. Bu durumda ağ kalitesini belirlemek için dikey kalite ve çarpıklık değerleri ANSYS-Mesh modülünde ağ yapısı oluşturulduktan sonra 0-1 aralığında kontrol edilmiştir. İyi bir ağ kalitesinin ve hücre yoğunluğunun elde edilebilmesi için, her bir eleman çarpıklığının sıfıra yakın, dikey kalitenin ise bire yakın olması gerekmektedir. Ayrıca literatürde düşük dikey kalite veya yüksek çarpıklık değerleri tavsiye edilmemektedir. Genellikle minimum dikey kaliteyi >0.1 veya maksimum çarpıklığın <0.95 sınırları içinde tutulması önerilmektedir (Ansys, 2013). Şekil 3.6'da açıkça görüldüğü üzere 2-D ve 3-D için oluşturulan akış hacimlerinde Ağ-II konfigürasyonu için sırasıyla 0.14 ve 0.16 elde edilen çarpıklığın ortalama sonuçları oldukça iyi ağ kalitesi elde edildiğini göstermektedir. Çarpıklığın maksimum değerleri ise 2-D ve 3-D ağ yapısı sonuçları için sırasıyla 0.87 ve 0.88 seviyesindedir. Ağ yapısını oluşturan elemanların dikey kalitesi ise 2-D akış hacminde minimum 0.46 ve maksimum 1.0 değerleri arasındadır ve ortalama 0.96 dikey kalite elde edilmiştir. Bu da yüksek bir ağ yapısı kalitesini göstermektedir. 3-D akış hacmi içinde, dikey kalite 0.27-1.00 aralığında kabul edilebilir aralıkta sonuç elde edilmiştir. Dikey kalitenin ortalama değeri ise 3-D akış hacmi için 0.95'tir.

Ağdan bağımsızlık çalışmasının yapılması için oluşturulan dört farklı ağ yapısının boyutu ve kalitesi karşılaştırıldıktan sonra sonuçlar Çizelge 3.3'te türbin için ortalama güç katsayısı, Şekil 3.7'de ise türbinin bir kanadının bir devir boyunca güç katsayısının azimut açısına bağlı anlık değişimi karşılaştırılarak sunulmuştur.

Farklı ağ yapılarından oluşan 2-D ve 3-D akış hacimlerinin analizleri NACA 0018 için deneysel referans çalışmada maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranı $\lambda = 1.05$ 'te yapılmıştır. Daha önce de vurgulandığı gibi, 2-D ve 3-D ilk analizler Ağ-II konfigürasyonunun kullanıldığı akış hacimleri için tamamlanmıştır. Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi eleman sayısının azalmasıyla güç katsayıları arasındaki fark artmıştır. 2-D analiz için sırasıyla 762,356 ve 603,458 elemandan oluşan Ağ-I ve Ağ-II arasındaki ortalama güç katsayısı farkı en küçük ve yaklaşık % 2.3'tür. 3-D akış hacmi için oluşturulan ağ yapısında ise Ağ-I ve Ağ-II konfigürasyonları, sırasıyla yaklaşık 7.5 ve 5.6 milyon elemandan oluşmaktadır ve ortalama güç katsayıları arasındaki fark % 7.2 civarındadır. Ağ-III ve Ağ-IV kullanılarak yapılan analiz sonuçları, Ağ-II'nin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ise güç katsayısı farkı hem 2-D hem de 3-D'de analizlerde % 10'nun üzerindedir. Ayrıca, Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi, 3-D analizlerle dört farklı ağ yapısı kullanılarak elde edilen ortalama güç katsayısı değerleri, Patel ve ark. (2017) yaptıkları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Eleman sayısının artmasıyla analiz sonucu elde edilen güç katsayıları deneysel sonuçlara yaklaşmaktadır. 3-D analizlerden Ağ-I ve Ağ-II ağ yapılarının kullanıldığı analiz sonuçlarından elde edilen ortalama güç katsayısı değerleri, deneysel verilere en yakın sonuçları vermiştir ve fark $\pm\%$ 3.6 civarındadır. Ağ-III ve Ağ-IV analiz sonuçlarından elde edilen ortalama güç katsayısı değerleri ise, referans alınan deneysel çalışmanın sonuçlarından sırasıyla %15 ve %20 daha küçük çıkmıştır. Bir devir boyunca anlık güç katsayısının azimut açısına bağlı değişimi ise 2-D ve 3-D akış hacimleri için Şekil 3.7'de sunulmuştur. Anlık güç katsayıları arasındaki en belirgin fark, kanadın hem 2-D hem de 3-D analizlerde maksimum güç katsayısına ulaştığı azimut açısı $\theta = 96^\circ$ civarında meydana gelmiştir.

Oluşturulan ağ yapılarındaki eleman sayısının, incelenen Ağ-I ve Ağ-II konfigürasyonları için elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu ve artan eleman sayısının neredeyse sonucun doğruluğunu arttırmadığı düşünülebilir. Bu nedenle bilgisayar kapasitesini göz önünde bulundurarak (Bilgisayar Özellikleri:64 GB RAM, Intel Xeon CPU E5-2630, 2.6 GHz iş istasyonu) işlem süresi, boyutsuz duvar mesafesi, güç katsayısının değişimi, çözümün doğruluğu ve analiz dengesinin sağlanabilmesi için

Ağ-II konfigürasyonu için belirlenen eleman boyut ayarları hem 2-D hem de 3-D analizler de standart olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.7. $\lambda=1.05$ 'te ağdan bağımsızlık çalışması için güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısına bağlı değişimi : (a) 2-D; (b) 3-D

3.2.4. Zaman adımı bağımsızlık çalışması

Zaman bağımlı HAD analizlerinde hesaplamalara başlamadan doğru bir şekilde tanımlanması gereken önemli bir parametrede zaman adımı büyüklüğüdür. Zaman adımı büyüklüğü hem hesaplama hassasiyetini hem de çözüm süresini önemli derecede etkilemektedir. Çok küçük bir zaman adımı çok fazla çözüm süresine mal olabilir ve çok büyük bir zaman adımı gerçekçi olmayan sonuçlara neden olabilir. Toplam çözüm

süresinin etkisinden dolayı 3-D analizler için zaman adımından bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle, üniform akış hızının $U_\infty=0.46\text{m/s}$ ve uç hız oranının $\lambda=1.05$ olduğu 2-D analizlerde zaman adımından bağımsızlık çalışması tamamlanmıştır. Kanat profil yapısının etkisinin incelendiği mevcut çalışmada dört zaman adım büyüklüğü zaman adımından bağımsızlık çalışması için kullanılmıştır ve sonuçlar güç katsayıları karşılaştırılarak sunulmuştur. Dönel hacimlerin HAD analizlerinin yapıldığı çalışmalarda zaman adımının büyüklüğü dönel hacmin dönüş derecesi ile ifade edilmektedir. Literatürde de birçok çalışmada vurgulandığı gibi, dikey eksenli türbinlerde zaman adımı büyüklüğü azimut açısının 0.25° , 0.5° , 1.0° ve 2.0° artışına karşılık gelecek şekilde analiz edilmiştir (Lei ve ark., 2017; Marsh ve ark., 2017). Bu kapsamda uç hız oranını $\lambda=1.05$ değeri için HAD analizlerinde zaman adımı büyüklükleri $\Delta t_1 = 0.000895\text{s}$, $\Delta t_2 = 0.00179\text{s}$, $\Delta t_3 = 0.00358\text{s}$ ve $\Delta t_4 = 0.00716\text{s}$ olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.8’de, farklı zaman adımı büyüklüklerinde bir kanat için güç katsayısının azimut açısına bağlı değişimi verilmiştir. Genel olarak, güç katsayısı dağılımları tüm zaman adımı büyüklükleri için yakın sonuçlar göstermiştir. En göze çarpan farklılıklar maksimum güç üretiminin gerçekleştiği, kanadın azimut açısının $\theta=96^\circ$ pozisyonunda görülmektedir. Δt_1 ve Δt_2 zaman adımlarının kullanıldığı analizlerde C_p eğrilerinin neredeyse birbiri üzerine bindiği görülmektedir. Zaman adımı büyüklüğünün artması ile, C_p ’nin eğrisi, özellikle tepe konumunda çok az da olsa farklı davranış göstermiştir. Çizelge 3.4’te de türbinin farklı zaman adımlarındaki ortalama güç katsayıları verilmiştir. Çözüm süresi ve analizin doğruluğu arasındaki denge dikkate alındığında, çalışmada incelenecek bütün uç hız oranları için 0.5° açisal artışa karşılık gelen zaman adımı büyüklüğü kullanılmıştır. Dolayısıyla, zaman adımı büyüklüğü farklı uç hız oranlarında devir sayısına bağlı olarak Denklem 3.9’daki gibi hesaplanır:

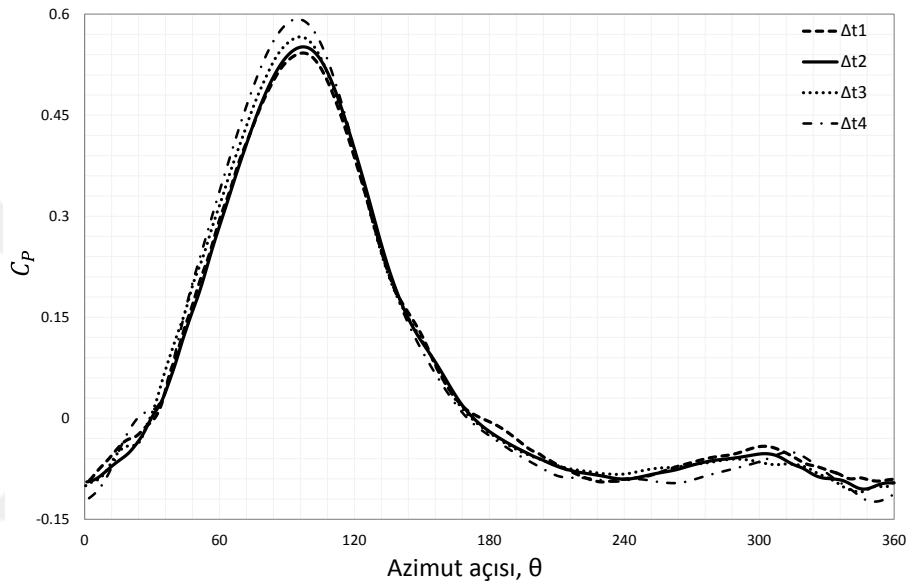
$$\Delta t = \frac{\pi}{\Omega \cdot 360} \quad (3.9)$$

Analizin başlatılmadan önceki son adımı ise iterasyon sayısıdır. Zaman adımı başına yetersiz iterasyon analizin belirlenen yakınsama değerine ulaşmadığını ve istenilen çözümün sağlanamadığının bir göstergesidir. Bu nedenle her bir zaman adımında, bir sonraki zaman adımına geçmeden önce analiz 50 iterasyon yapılacak şekilde ayarlanmıştır (Lei ve ark., 2017). Ancak, analizler genel olarak 37 iterasyonda

yakınsamıştır. Bütün durumlar için analizler türbinin 10 devrini tamamlayacağı şekilde çalıştırılmıştır.

Çizelge 3.4. 2-D analizlerde için zaman adımı büyüklüğünden bağımsızlık çalışması

Zaman adımı büyüklüğü	Eleman sayısı	Ortalama güç katsayısı
$\Delta t_1=0.000895s$	603,458	0.2218
$\Delta t_2=0.00179s$	603,458	0.221
$\Delta t_3=0.00358s$	603,458	0.238
$\Delta t_4=0.00716s$	603,458	0.265



Şekil 3.8. $\lambda=1.05$ 'te zaman adımından bağımsızlık çalışması için güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısına bağlı değişimi

3.3. Araştırma Sonuçları

Hidrokinetik türbin etrafındaki süreksiz akış, ANSYS-Fluent 19.0'daki dönel ve sabit hacim oluşturularak çözülmüştür. 2-D ve 3-D analizlerinden elde edilen güç katsayıları, referans alınan deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 2-D analiz sonuçları 3-D ve deneysel sonuçlar ile doğrulandıktan sonra kanat etkisinin araştırıldığı çalışmalar 2-D analizler kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi için boyutsuzlaştırma işlemlerinde, düzeltilmiş hız $V_c=0.58$ m/s kullanılmıştır.

3.3.1. HAD analizlerinin doğrulanması

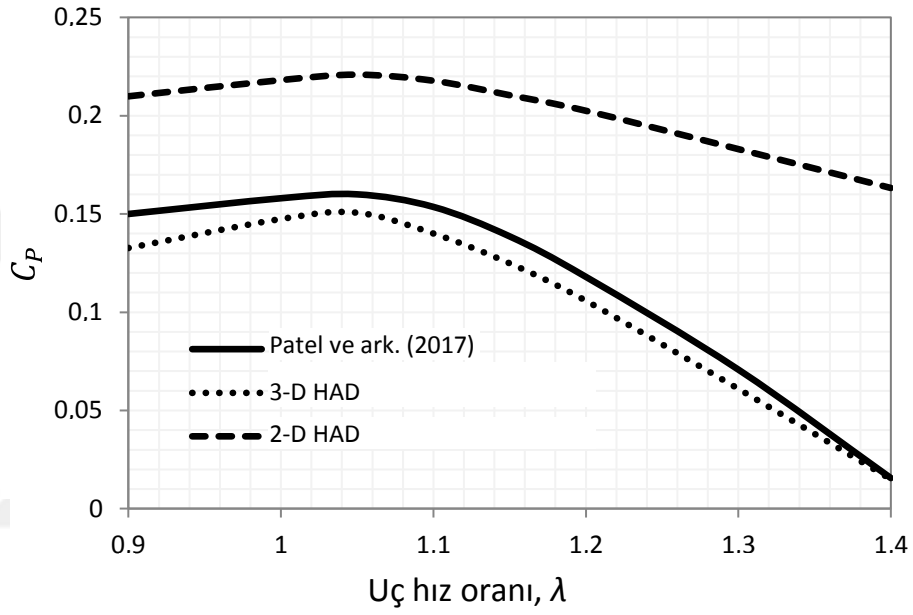
Ağ ve zaman adımı bağımsızlık çalışmasında vurgulandığı gibi, türbin verimliliği olarak tanımlanan güç katsayısı, hidrokinetik türbin için en önemli parametrelerden biridir. Literatürde farklı çözüm yöntemleri ile kamburluk, kalınlık, üniform hız büyüklüğü, katılık oranı ve uç hızı oranı koşullarının türbin performansına etkisinin incelendiği çalışmaların sonuçları Çizelge 3.5'deki gibi özetlenmiştir. Çizelge 3.5, H-tipi Darrieus hidrokinetik türbinlerin maksimum performansının elde edildiği çalışma koşulları için hazırlanmıştır. Yapılan araştırmalardan da görüldüğü gibi, her bir parametrenin hidrokinetik türbinlerde performans artışı için önemli olduğu görülebilmektedir. Çizelge 3.5'den çıkarılan sonuçlardan bir diğeri de katılık oranları birbirine yakın olan çalışmalarda, akışkan hızı arttıkça türbin maksimum performansına, yüksek uç hızı oranlarında ulaşmaktadır.

Çizelge 3.5. Literatürde H-tipi Darrieus hidrokinetik türbin performansının araştırıldığı çalışmaların ayrıntılı bir özeti

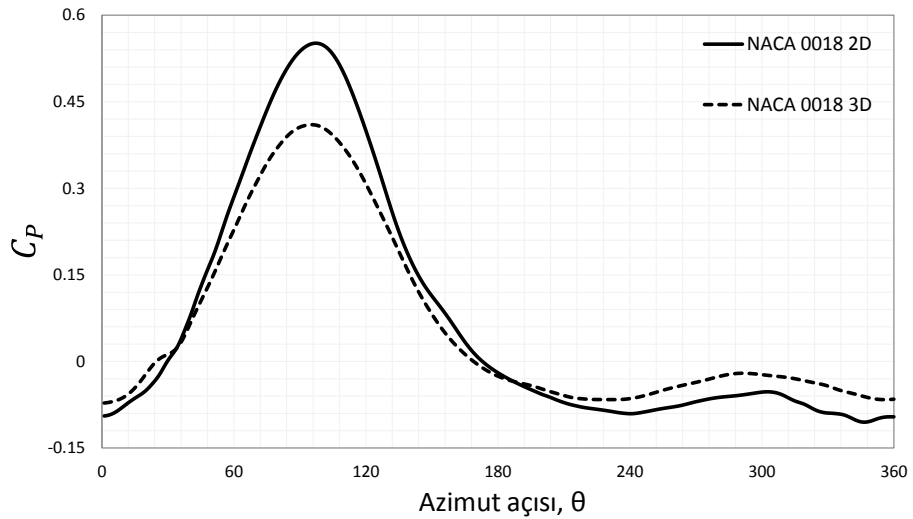
Referans	Yöntem	N	U_∞ (m/s)	Kanat tipi	σ	λ	C_p
Shiono ve ark. (2000)	Dny.	3	0.6	NACA 63 ₃ -018	0.36	1	0.12
Dai ve Lam (2009)	2-D	3	0.99	NACA 0025	0.17	1.1	0.28
				NACA 0015			0.1
Wenlong ve ark. (2013)	2-D	3	0.5	NACA 0014	0.072	2	0.08
				NACA 0012			0.06
Maître ve ark. (2013)	2D/ Dny.	3	2.8	NACA 0018	0.175	2	0.58/0.33
Fleisinger ve ark. (2014)	3-D/ Dny.	3	1.2	NACA 63 ₃ -018	0.4	1.2	0.25/0.23
Araya ve Dabiri (2015)	Dny.	3	0.26	NACA 0018	0.32	1	0.13
Bachant ve Wosnik (2015)	Dny.	3	1.0	NACA 0020	0.13	1.7	0.26
Bachant ve Wosnik (2016)	2-D/3-D/ Dny.	3	1.0	NACA 0020	0.13	1.9	0.52/0.33/0.25
Wang ve ark. (2016)	2-D/3-D/ Dny.	2	1.0	NACA 0018	0.095	2.5	0.45/0.25/0.25
Bianchini ve ark. (2017))	2-D/ Dny.	3	1.0	NACA 0020	0.13	1.9	0.34/0.25
Marsh ve ark. (2017)	2-D/3-D	3	1.5	NACA 63 ₄ -021	0.068	3/2.5	0.41/0.11
Gaywala ve ark. (2017)	Dny.	3	0.5	NACA 0021	0.32	1.5	0.18
Zanforlin (2018)	2-D/3-D	3	2.8	NACA 0018	0.175	2.0	0.55/0.35
Chen ve ark. (2018)	2-D	3	1.0	NACA 0018	0.143	1.4	0.30
Patel ve ark. (2017)(Referans)	Dny.	3	0.46	NACA 0018	0.382	1.05	0.16
Tez çalışması	2-D/3-D	3	0.46	NACA 0018	0.382	1.05	0.22/ 0.15

Bu bölümde, 2-D ve 3-D HAD analizlerinden elde edilen performans, hidrodinamik akış yapısı sonuçları, farklı uç hız oranlarında referans alınan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmaktadır. Şekil 3.9'daki güç katsayısı sonuçları, incelenen uç hız oranı aralığında SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı 3-D analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ancak incelenen bütün uç hız oranlarında 2-D analizlerden elde edilen güç katsayısının, 3-D HAD ve deneysel sonuçların aksine, daha yüksek çıktığı görülmüştür. Ortalama değerler birbiri ile uyuşmasa da, 2-D analizlerden farklı uç hız oranlarında elde edilen

güç eğrisi, deneysel çalışmanın ve 3-D analizlerden elde edilen güç eğrisi ile aynı trenddedir ve benzemektedir. 2-D analiz sonuçları, neredeyse sabit bir farkla 3-D analiz ve deneysel sonuçlarından yaklaşık bir buçuk kat daha fazlasına karşılık gelen iyi bir eğim yakalamıştır. 3-D analizler ve deneysel çalışmada $\lambda=1.05$ 'te türbin maksimum güç katsayısına ulaşmıştır. 2-D analizlerden elde edilen ortalama güç katsayısı sonuçları her ne kadar 3-D ve deneyselden yüksek çıksa da, 2-D ile elde edilen maksimum güç katsayısı da $\lambda=1.05$ 'te elde edilmiştir ve bu değer 3-D ve deneysel sonuçlarla tutarlıdır.



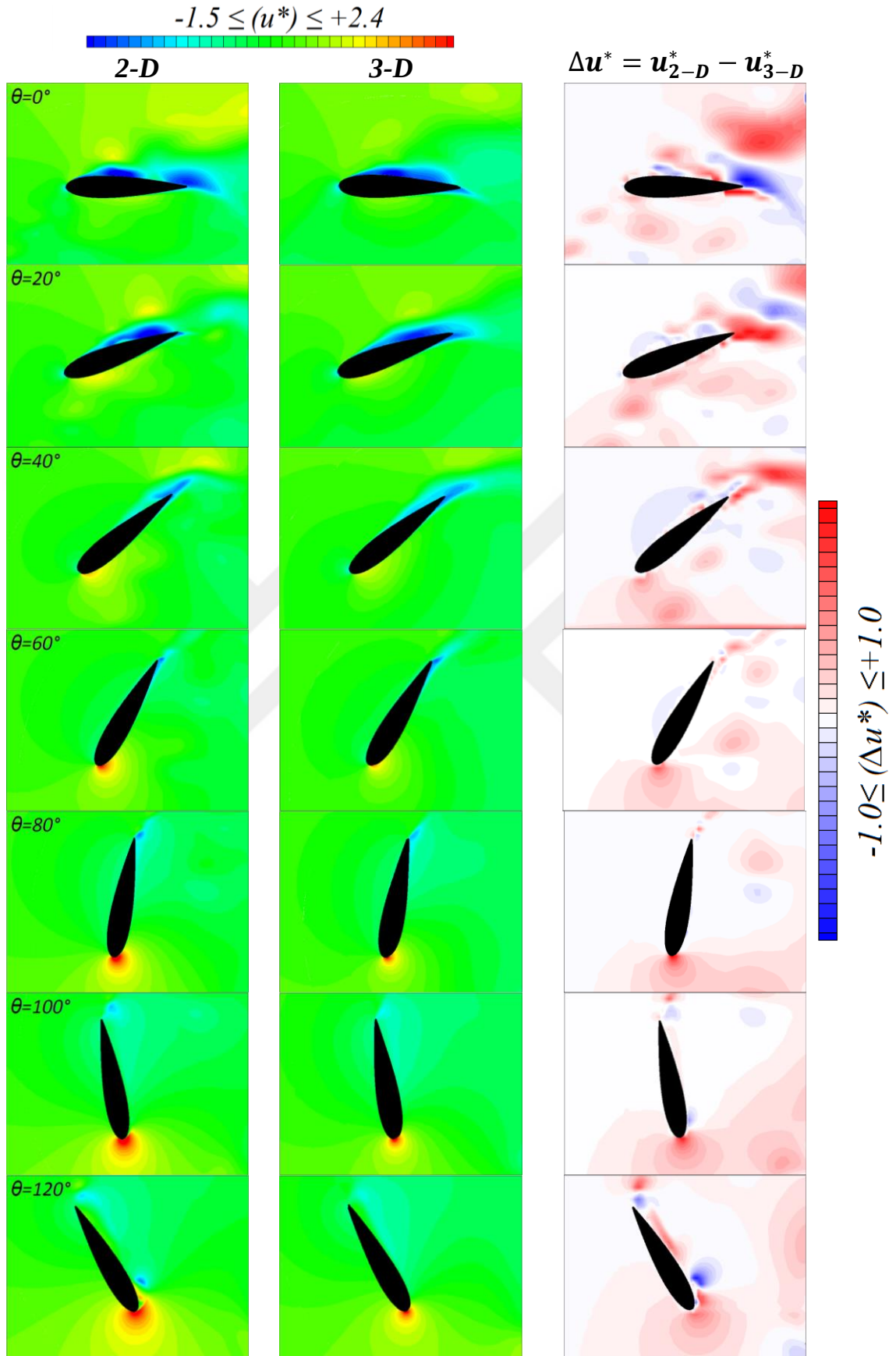
Şekil 3.9. 2-D ve 3-D analizlerin referans deneysel çalışma sonuçları ile doğrulanması



Şekil 3.10. $\lambda=1.05$ 'te 2-D ve 3-D analizlerden elde edilen güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısına bağlı değişimi

$\lambda=1.05$ 'te 2-D ve 3-D analizler için bir kanadın anlık güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısı ile değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir. Ortalama güç katsayısındaki gibi, 2-D'nin anlık güç katsayısı eğrisi de, 3-D analizlere benzer bir eğilim sergilemiştir. Her iki analiz sonucu için, güç katsayısı maksimum değerine $\theta=96^\circ$ civarında ulaşmıştır. Bir devir boyunca her iki analiz sonucunda $\theta=0^\circ-30^\circ$ aralığında ve 2-D için ($\theta=173^\circ-360^\circ$), 3-D için ($\theta=168^\circ-360^\circ$) aralığında, neredeyse bir devirin yarısı boyunca türbin negatif tork üretmektedir. Bir devir boyunca her iki analiz için güç katsayısının negatif fraksiyonu pozitif fraksiyonundan daha büyük olmasına rağmen, ortalama performans değeri pozitif ve 2-D ve 3-D için yaklaşık olarak sırasıyla % 22.1 ve % 15.4 elde edilmiştir. 2-D ve 3-D analizler arasındaki temel farklılıklar, literatürde vurgulandığı gibi kanat ucu girdapları, dikey akış sapması, bağlantı kolları, türbin şaftı vb. gibi etkenlerin 2-D analizlerde dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır (Nabavi, 2008; Howell ve ark., 2010; Li ve Calisal, 2010; Mukinović ve ark., 2010; Castelli ve ark., 2011; Mohamed, 2012; Almohammadi ve ark., 2013; Wenlong ve ark., 2013; Le ve ark., 2014; Balduzzi ve ark., 2016; Wang ve ark., 2016; Bianchini ve ark., 2017; Boudreau ve Dumas, 2017; Li ve ark., 2018; Nazari ve ark., 2018; Mazarbhuiya ve ark., 2020; Sun ve Huang, 2020; Sun ve ark., 2021). Bu nedenle 2-D analizlerden elde edilen güç katsayısı C_p değerlerinin 3-D analizlerden ve deney sonuçlarından daha yüksek olması kabul edilebilirdir. Üç boyutlu analiz sonuçları, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki doğruluğu artırsa da, ağ yapısındaki eleman sayısı nedeniyle işlem süresi bilgisayar kapasitesine bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle, düz kanatlı H-tipi Darrieus türbinlerini 3-D HAD analizleri optimize çalışmaları için tercih edilen yöntemler olmadığı literatürde vurgulanmıştır (Maître ve ark., 2013; Peng ve ark., 2016; Wang ve ark., 2016). Pratik hızlı çözümlerden dolayı kanat profilinin performans ve akış karakteristiğine etkisinin incelendiği çalışmalar 2-D HAD analizleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmaların hidrokinetik türbin uygulamaları için ön fikir sağlayacağı düşünülmektedir.

2-D ve 3-D analizler arasındaki farklılıklar Şekil 3.11'de kanat etrafındaki anlık akış yönündeki hız bileşeni verilerek karşılaştırılmıştır. Şekil 3.11'de kanada yakın bölgedeki boyutsuz anlık akış yönündeki hız ($u^*=u/V_c$) dağılımı, 120° 'de bir tekrarladığı için $\theta=0^\circ$ azimut açısından $\theta=120^\circ$ azimut açısına kadar 20° aralıklarla yedi farklı pozisyonda karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu analizde, akış alanları türbinin tam ortasında $z=0$ düzleminde alınmıştır. Şekil 3.11'in ilk satırında gösterildiği gibi, birinci



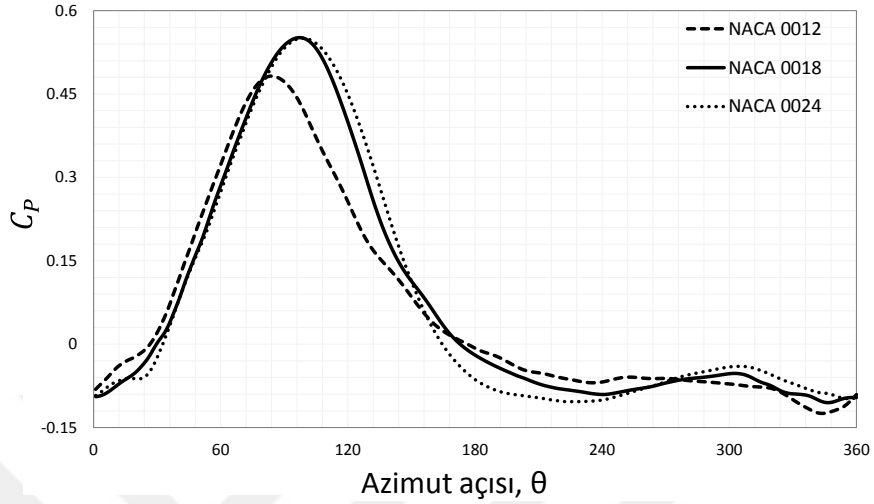
Şekil 3.11. Türbin devrinin üçte bir hareketi boyunca bir kanat etrafındaki boyutsuzlaştırılmış anlık akış yönündeki hız, u^* dağılımı; birinci sütun 2-D sonuçlarını, ortadaki sütun 3-D sonuçlarını, üçüncü sütun ise 2-D/3-D arasındaki fark

kanat $\theta=0^\circ$ konumundadır. $\theta=0^\circ$ 'de, her iki analiz sonucunda da kanadın üst yüzeyinde, akış ayrılmış ve bir ters akış bölgesi oluşmuştur. Azimut açısının artması ile akış, kanadın emme tarafında hızlanmış ve yüksek hızlı bölge hücum kenarına yaklaşmıştır. Azimut açısının artması nedeniyle, kanadın basınç yüzeyindeki hız artmış ve düşük hız bölgesi kanadın basınç yüzeyinden emme yüzeyine doğru kaymıştır. Türbin ilk çeyrek devrini tamamladıktan sonra $\theta=100^\circ$ 'de akış hem hücum hem de firar kenarından ayrılmaya başlamıştır. Kanadın hem hücum hem firar kenarından kopan akış bir sıra girdap oluşturmuş ve $\theta=120^\circ$ 'de kanat diğer kanadın konumunu almıştır. 2-D ve 3-D analiz sonuçlarına göre kanat etrafındaki anlık akış yönündeki farklılıklar ise Şekil 3.11'in üçüncü sütununda verilmiştir. Görüntü alanına yaklaşık 3100 nokta tanımlanmış ve noktasal hız değerleri alınarak fark konturları oluşturulmuştur. 2-D ve 3-D analiz sonuçlarına ait birinci ve ikinci sütunda akış yönündeki hız konturları aynı görünüme sahip gibi görünmektedir. Ancak üçüncü sütunda fark konturlarında, ortalama ve anlık performans eğrilerinde olduğu gibi, anlık akış yönündeki hız dağılımları bazı bölgelerde farklılık göstermektedir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi de 3-D analizlerde üçüncü boyuttaki hız bileşeninden kaynaklanmaktadır. Azimut açısının $\theta=0^\circ-40^\circ$ aralığında kanadın firar kenarında, $\theta=60^\circ-120^\circ$ aralığında ise kanadın hücum kenarında hız farkı yüksektir. 2-D analizlerde kanadın hücum kenarı bölgesindeki hız yüksek olduğundan dolayı, Şekil 3.10'daki bir kanadın anlık güç üretimi incelendiğinde, $\theta=60^\circ-120^\circ$ azimut aralığında 3-D analize göre daha yüksek güç ürettiği görülmüştür. HAD analizleri ile yapılan literatürde ki çalışmalarda da görüldüğü gibi, 3-D analizlerin deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olduğu, 2-D analizlerin ise belirli kabuller altında kullanılmasının, türbinin hidrodinamik özellikleri konusunda araştırmacılara bir ön fikir sağlayacağı düşünülmüştür.

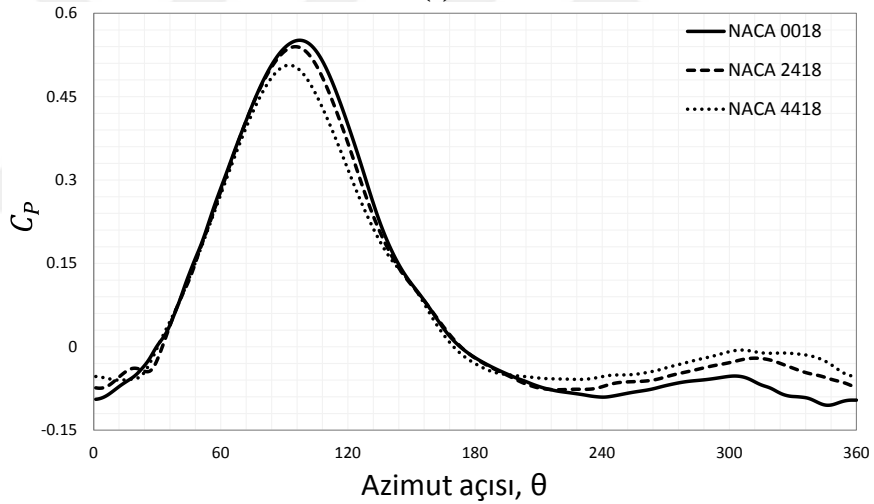
3.3.2. $\lambda=1.05$ 'de kanat profilinin performans ve akış karakteristiğine etkisi

Kanat şekli, türbin güç üretimini ve art izi bölgesindeki akış karakteristiğini Çizelge 3.5'de de görüldüğü gibi önemli ölçüde etkilemektedir. Tez kapsamında da, türbin güç katsayısı ve akış özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için NACA 4 basamaklı farklı kalınlık ve kamburluktaki kanat profilleri seçilmişti. Şimdiye kadar yapılan ağdan ve zaman adımıyla bağımsızlık, 2-D ve 3-D doğrulama çalışmaları referans alınan NACA 0018 kanat profili için yapılmıştı. Kanat yapısının incelendiği 2-

D analizlerde ise karşılaştırma için sırasıyla % 2 ve % 4 kambur kanat profili NACA 2418 ve NACA 4418; % 33 daha kalın ve daha ince NACA 0024 ve NACA 0012 kanat profilleri kullanılmıştır.



(a)



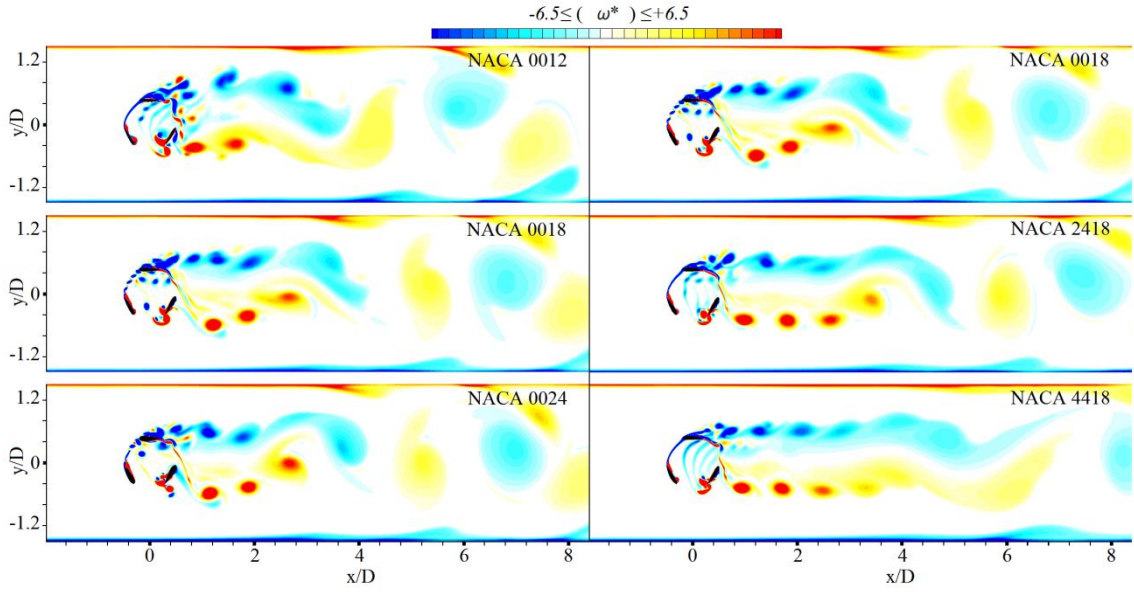
(b)

Şekil 3.12. $\lambda=1.05$ 'te farklı kanat yapılarından elde edilen güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısına bağlı değişimi

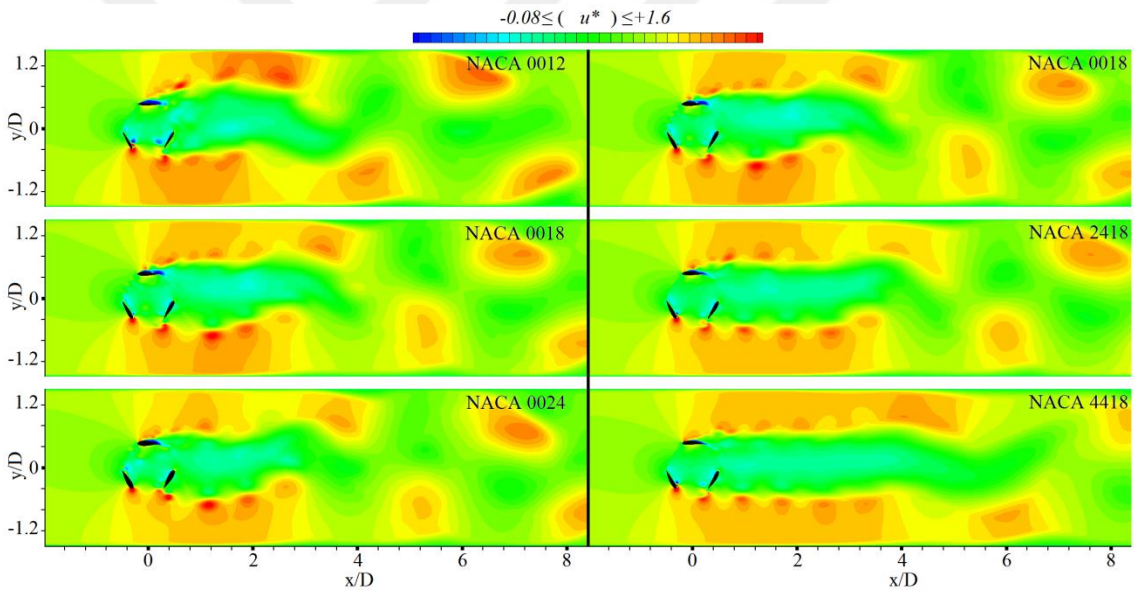
Farklı kanat yapıları için karşılaştırmalar öncelikle, NACA 0018 referans modeli için maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.05$ aynı uç hızı oranında yapılmıştır. Şekil 3.12, farklı kalınlık ve kamburluğa sahip bir kanadın azimut açısına bağlı bir devir boyunca güç katsayısı değişimini göstermektedir. Şekil 3.12(a)'da kalınlık etkisi incelendiğinde, NACA0018 ve NACA0024 profillerinin performans eğrileri birbirlerine çok yakın sonuçlar gösterirken, NACA 0012 modelinin performans eğrisi bunlardan biraz farklıdır. Kanat, NACA 0018 ve NACA 0024 profillerinde yaklaşık $\theta=96^\circ$

azimutta maksimum güç katsayısı $C_p=0.55$ civarındayken, NACA 0012 profillerinde $\theta=84^\circ$ 'de $C_p=0.48$ değerindedir. Şekil 3.12(b)'de de açıkça görüldüğü gibi, maksimum güç katsayısının elde edildiği kanat pozisyonu (türbin azimut açısı), artan kamburluk etkisiyle değişmemektedir. Ancak kamburluğun artmasıyla maksimum noktadaki güç katsayısı değeri azalmaktadır. Kanadın ilk yarım döngüsünden sonra ($\theta>180^\circ$), kambur kanatların güç üretimi, NACA 0018'e göre daha az etkili bir negatif tork üretmiştir. Bu nedenle, kamburluk arttıkça türbinin ortalama güç katsayısı NACA0018'e göre daha yüksek elde edilmiştir.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de ise $\lambda=1.05$ uç hız oranında, farklı kalınlık ve kamburluk için art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış anlık girdap ($\omega^* = \omega D/V_c$) ve akış yönündeki hız bileşeni ($u^*=u/V_c$) konturları türbinin $\theta=0^\circ$ pozisyonu için verilmiştir. Akış karakteristiğine ait konturlarda; mavi, girdabın saat yönünde döndüğü, kırmızı ise girdabın saat yönünün tersine döndüğü anlamına gelmektedir. Boyutsuz kontur ölçekleri bütün akış yapıları için 30 parçaya bölünmüştür. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, art izi bölgesindeki akış iki bölgeye ayrılmaktadır. Üst bölge, türbinin hemen arkasındaki ana art izi bölgesini ve alt bölge ise alt akış bölgesinde türbinden uzak olan bölgeyi temsil etmektedir. Tüm kanatlarda, pozitif y bölgesindeki negatif girdaplar kanat yüzeyinden kopan girdaplardan, negatif y bölgesindeki girdaplar ise kanadın ilk çeyrek dönüşünü tamamladıktan sonra stol durumu sonucu oluşan girdaplardır. Stol durumunda kanadın hücum kenarından pozitif girdaplar, firar kenarından ise negatif girdaplar koparak art izi bölgesine doğru ilerlemişlerdir. Küçük boyutlu girdap çiftleri ise akış yönünde ilerlemiş ve türbinin hemen yakınındaki art izi bölgesinde yok olmuştur. Farklı kalınlıktaki türbinlerden kopan anlık girdaplar incelendiğinde ise NACA 0012 profilinin negatif girdap çiftlerinin kararsızlığı, NACA 0018 ve NACA 0024'e göre art izinde daha çok uzamaktadır ve türbin merkezinden alt akış yönünde $3D$ 'ye kadar etkindir. Kanat profil kalınlığının artmasıyla birlikte, negatif girdap çiftlerinin alt akış yönünde uzaması sırasıyla NACA 0018 ve NACA 0024 için $2.4D$ ve $2.0D$ civarındadır. Kamburluğun anlık girdap üzerindeki etkisi incelendiğinde ise, artan kamburluk ile girdap çiftleri art izi bölgesinde daha da uzamaktadır. Negatif girdap çiftleri art izinde, NACA0018 için yaklaşık $2.4D$ meydana gelirken ve NACA2418 ve NACA4418 için sırasıyla $2.8D$ ve $3.5D$ 'ye kadar uzamıştır.



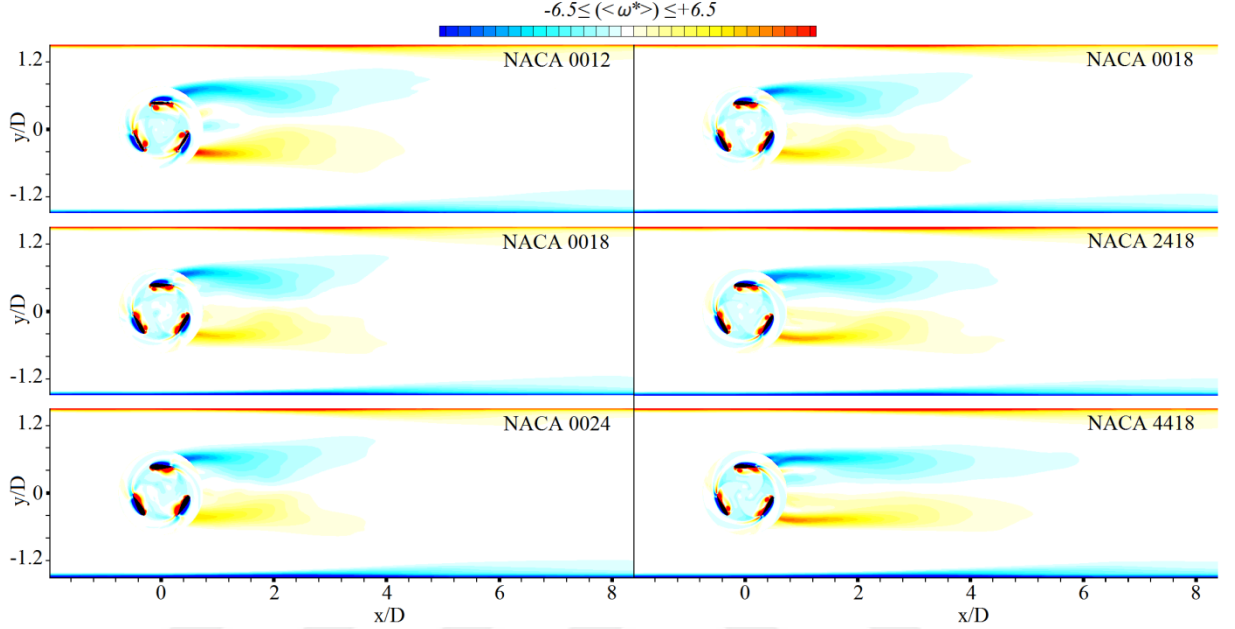
Şekil 3.13. $\lambda=1.05$ 'te farklı kalınlık ve kamburluk için art izi bölgesindeki anlık girdap, (ω^*) konturları



Şekil 3.14. $\lambda=1.05$ 'te farklı kalınlık ve kamburluk için art izi bölgesindeki akış yönündeki anlık hız (u^*) konturları

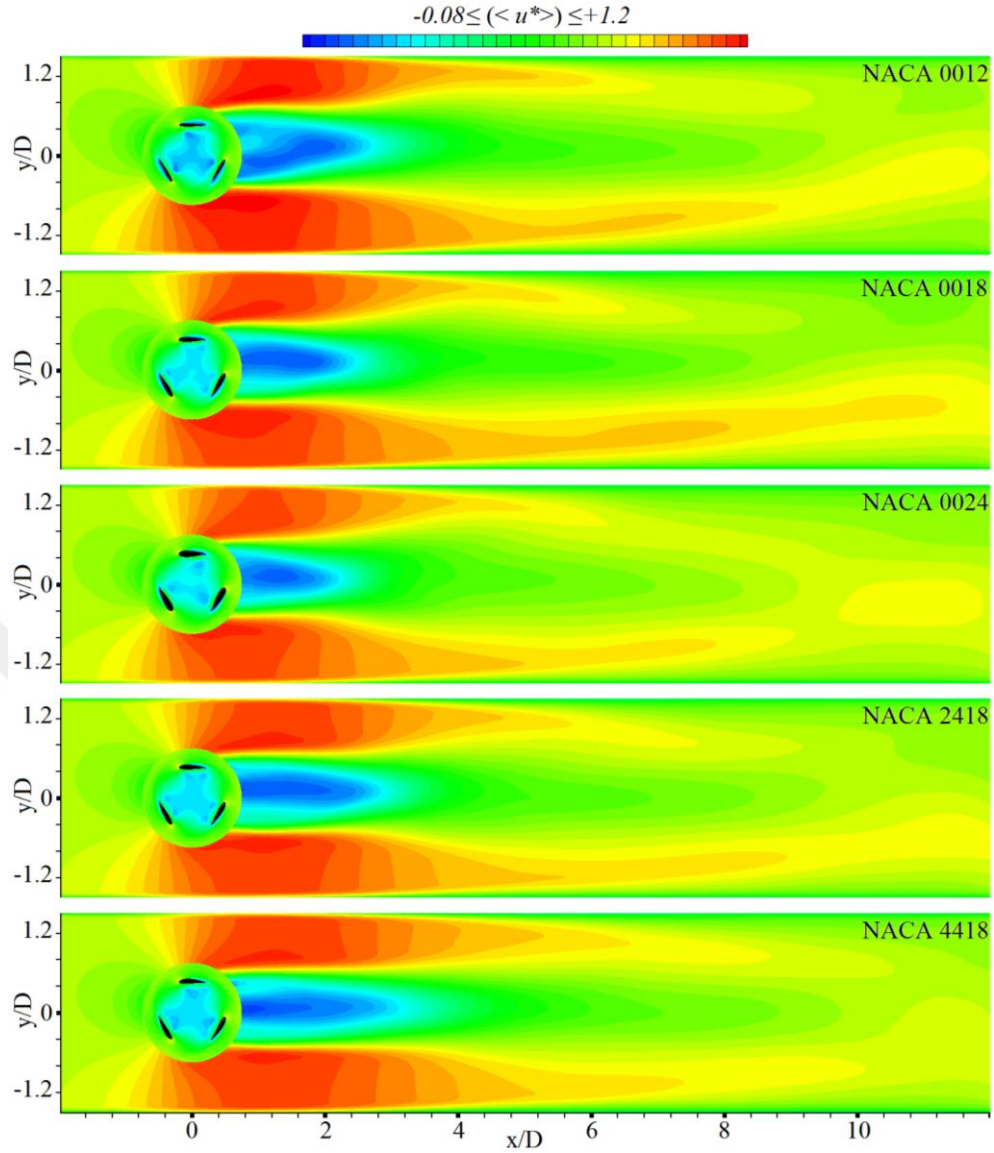
Şekil 3.14'te, akış yönündeki anlık hız bileşeninin (u^*) , simetri ekseninin aşağısındaki dalgalanmaların, kanatlardan kopan güçlü girdaplarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Art izi bölgesindeki akış yapısı, büyük ölçekli girdap kopmalarından kaynaklanan salınımları göstermektedir. Yüksek hızlı dalgalanmalar, $\theta=120^\circ-180^\circ$ azimut açıları arasında kanat yüzeyinden ayrılır ve aşağı akış bölgesinde yayılmaktadır. Türbinin saat yönünün tersine dönmesi ve $\theta=0^\circ$ pozisyonunda kanat akışa dik yönde hareket etmesinden dolayı art izindeki düşük hız bölgesi hafifçe yukarı, pozitif y tarafına doğru, sapmaktadır. Akış yönündeki anlık hızın u^* karakteristik uzunluğu

girdap alanına benzemektedir. Şekil 3.12'de vurgulandığı gibi kanat etrafındaki akış yapısı kanat profiline göre farklılık gösterdiği için türbinlerin performansları farklılıklar göstermektedir. Farklılıklar, Şekil 3.14 ve 3.15'teki ortalama girdap ve akış yönündeki hız bileşenlerinde daha açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.15. $\lambda=1.05$ 'te farklı kalınlık ve kamburluk için art izi bölgesindeki ortalama girdap, $\langle \omega^* \rangle$ konturları

Boyutsuzlaştırılmış ortalama girdaplar ($\langle \omega^* = \omega D / V_c \rangle$) Şekil 3.15'te $\lambda=1.05$ uç hız oranında sunulmaktadır. Ortalama sonuçlar, 10 devirlik bir süre boyunca her bir zaman adımı için anlık akış alanlarının zaman ortalaması alınarak elde edilmiştir. Anlık girdap konturlarında da vurgulandığı gibi, art izi bölgesindeki ortalama girdap bölgeleri simetrik değildir. Art izi bölgesindeki negatif girdaplar, bütün kanat profilleri için pozitif girdaplardan daha güçlüdür. Ortalama girdap bölgesinin uzunluğu kalın kanat profilinden ince kanat profiline doğru artmıştır. Negatif ortalama girdap bölgesinin minimum değeri NACA 0012 için yaklaşık $4.8D$ 'de meydana gelirken, NACA 0018 ve NACA 0024 kanat profillerinde sırasıyla $4.0D$ ve $3.8D$ 'de meydana gelmiştir. Kambur kanatlarda ise ortalama negatif girdap bölgesinin minimum değeri, NACA 2418 ve NACA 4418 kanat profilleri için sırasıyla $4.5D$ ve $6.0D$ 'ye kadar uzanmaktadır. Türbin dönüşüne bağlı olarak kopan ve anlık girdap konturlarında görünen küçük negatif ve pozitif girdap kümeleri birbirine karışarak sönmüşler ve alt akış yönünde sıfıra yaklaşmışlardır.



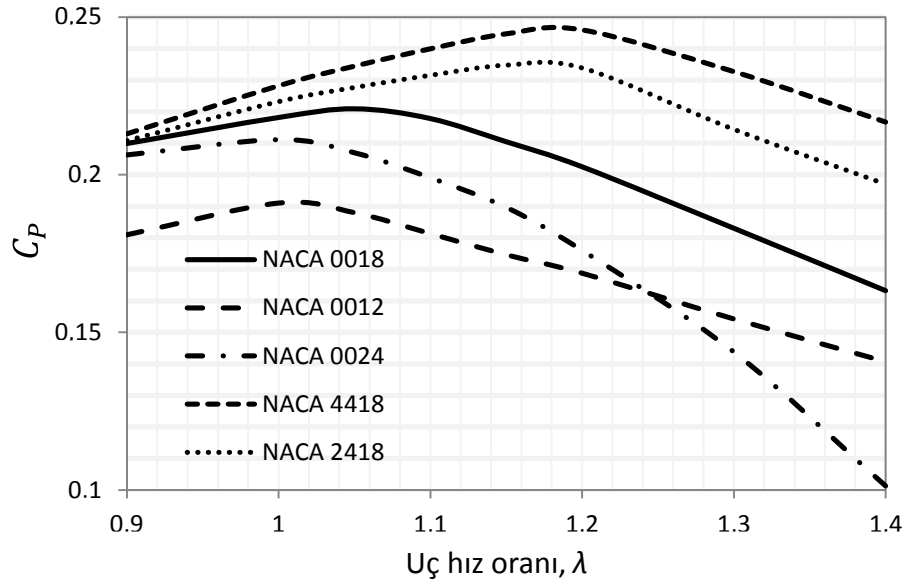
Şekil 3.16. $\lambda=1.05$ 'te farklı kalınlık ve kamburluk için art izi bölgesindeki akış yönündeki ortalama hız, $\langle u^* \rangle$ konturları

Şekil 3.16'da, boyutsuzlaştırılmış ortalama akış yönündeki hız bileşeni ($\langle u^* = u/V_c \rangle$), $\lambda=1.05$ 'te farklı kalınlık ve kamburluktaki kanat profilleri için karşılaştırılmıştır. Akış yönündeki ortalama hız konturları incelendiğinde, tüm NACA serileri için türbinden hemen sonraki art izi bölgesinde üniform akışa göre akış yönündeki hızda büyük bir azalma vardır ve asimetrik yapıdadır. Asimetrik akış yapısı, literatürde de Brochier ve ark. (1986), Simão Ferreira ve ark. (2006) ve Battisti ve ark. (2011) tarafından da vurgulandığı gibi magnus etkisi ve türbinin yukarı akış bölgesinde akışa zıt yönde dönmesine bağlı olarak oluşmuştur. Bu nedenle saat yönünün tersine dönen türbin için art izi bölgesindeki düşük hız bölgesi pozitif y bölgesine doğru hareket etmiştir. Türbinde kullanılan kanat profil kalınlığının artmasıyla art izi

bölgesindeki düşük hızlı bölge daralmış ve aşağı akış yönünde hız geri kazanımı daha önde olmaya başlamıştır. Kambur kanatlar için ise, simetrik kanada göre kanat kamburlaştıkça düşük hız bölgesi genişlemiştir ve art izi bölgesindeki akış daha geç toparlanmaya başlamıştır. Farklı kanat profillerinin aynı çalışma koşulları altında (aynı uç hız oranı ve geometrik büyüklükler) akış özellikleri üzerindeki etkisini özetlemek gerekirse, aynı kalınlıktaki simetrik kanat profilinin art izi bölgesindeki akış geri kazanımı kambur kanatlara göre daha iyidir. Simetrik kanat profilleri içinde kanat kalınlığı arttıkça akış geri kazanımı ince kanat profillerine göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.

3.3.3. Türbin çiftliği uygulaması için kanat profillerinin karşılaştırılması

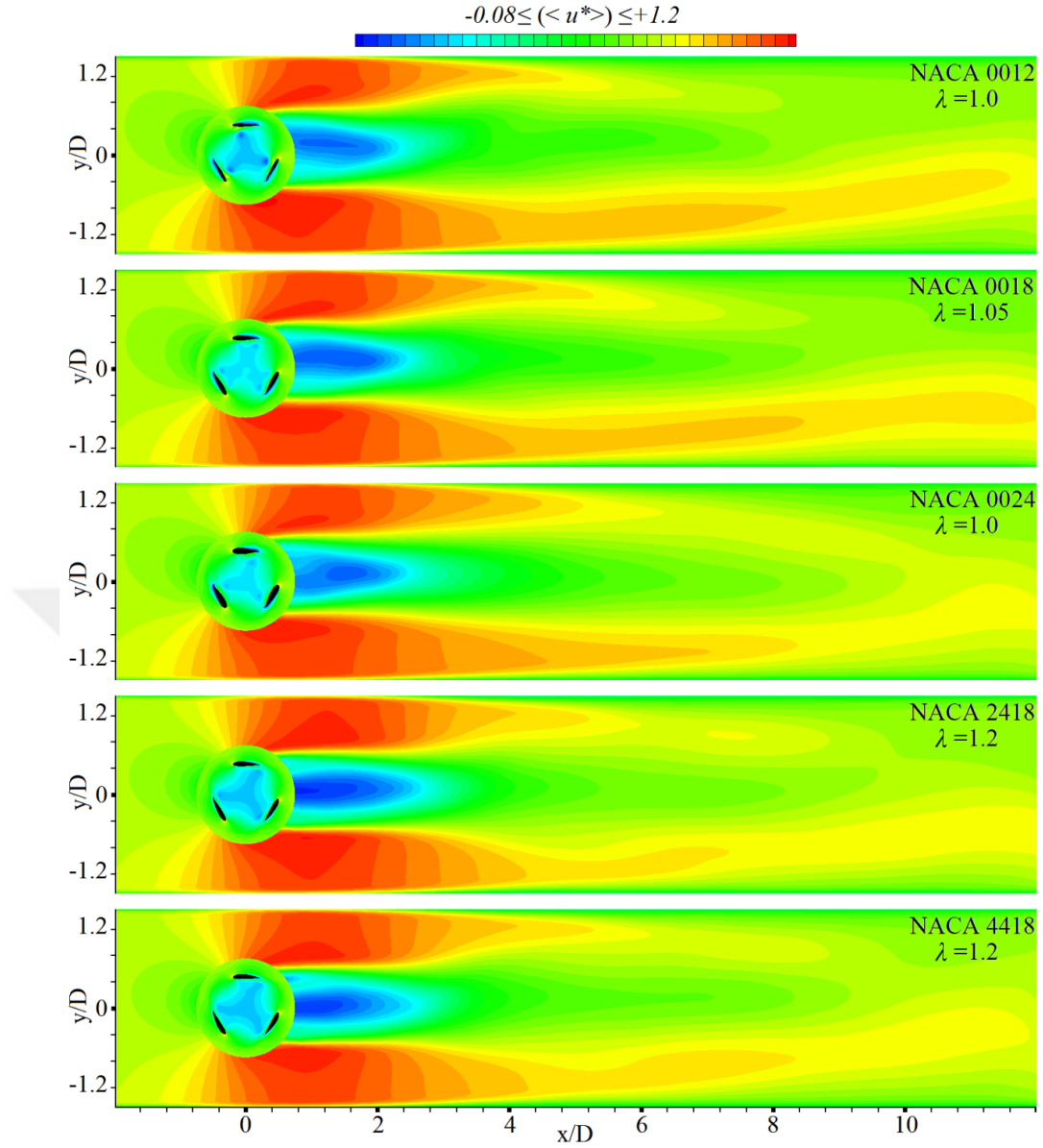
Tork üretimi, hidrokinetik türbinlerin kapasitesinin değerlendirilmesinde önemli parametrelerden biridir ve uç hız oranı ile doğrudan ilişkilidir. Tez kapsamında da kanat profilinin incelendiği çalışmalarda referans alınan deneysel temel çalışmada olduğu gibi, uç hız oranı $\lambda=0.9-1.4$ aralığında değişmektedir. Şekil 3.17’de farklı kanat profilleri için 2-D analizlerden elde edilen türbin performans eğrileri verilmiştir. Genel olarak, tüm kanat profilleri için maksimum güç katsayısı $\lambda=1.0-1.2$ aralığında elde edilmiştir. Simetrik NACA 0018 kanat konfigürasyonundan oluşan türbinin maksimum güç katsayısı $\lambda=1.05$ 'te yaklaşık $C_p=0.221$ 'dir. İncelenen uç hız oranı aralığında simetrik kanatların performans eğrilerinin trendleri birbirine yakındır ve $\lambda = 1.05$ 'ten sonra uç hız oranı arttıkça türbinlerin güç katsayısının azaldığı görülmektedir. Maksimum güç katsayısı, NACA 0024 ve NACA 0012 için aynı uç hız oranı $\lambda = 1.0$ 'da sırasıyla 0.21 ve 0.182 elde edilmiştir. Kambur kanatlar için performans eğrisi simetrik kanatlara göre farklılık göstermiştir. NACA 0018 konfigürasyonunda türbin maksimum güç katsayısına $\lambda = 1.05$ 'te ulaşırken, kambur kanatlar NACA 2418 ve NACA 4418 için maksimum güç katsayısına $\lambda = 1.2$ 'de ulaşmış ve sırasıyla $C_p=0.237$ ve $C_p=0.248$ elde edilmiştir. NACA 0018 konfigürasyonunda güç katsayısı $\lambda = 1.05$ 'ten sonra keskin bir şekilde azalırken, NACA 2418 ve NACA 4418 konfigürasyonunda yavaşça azalmaktadır. Bu durum, aynı kalınlıktaki kambur kanat konfigürasyonundaki türbinin, simetrik profil NACA0018'in kullanıldığı türbin konfigürasyonuna göre daha geniş bir uç hız oranı aralığında çalışacağını göstermektedir.



Şekil 3.17. Farklı kanat profillerinin kullanıldığı türbinlerin performans eğrileri

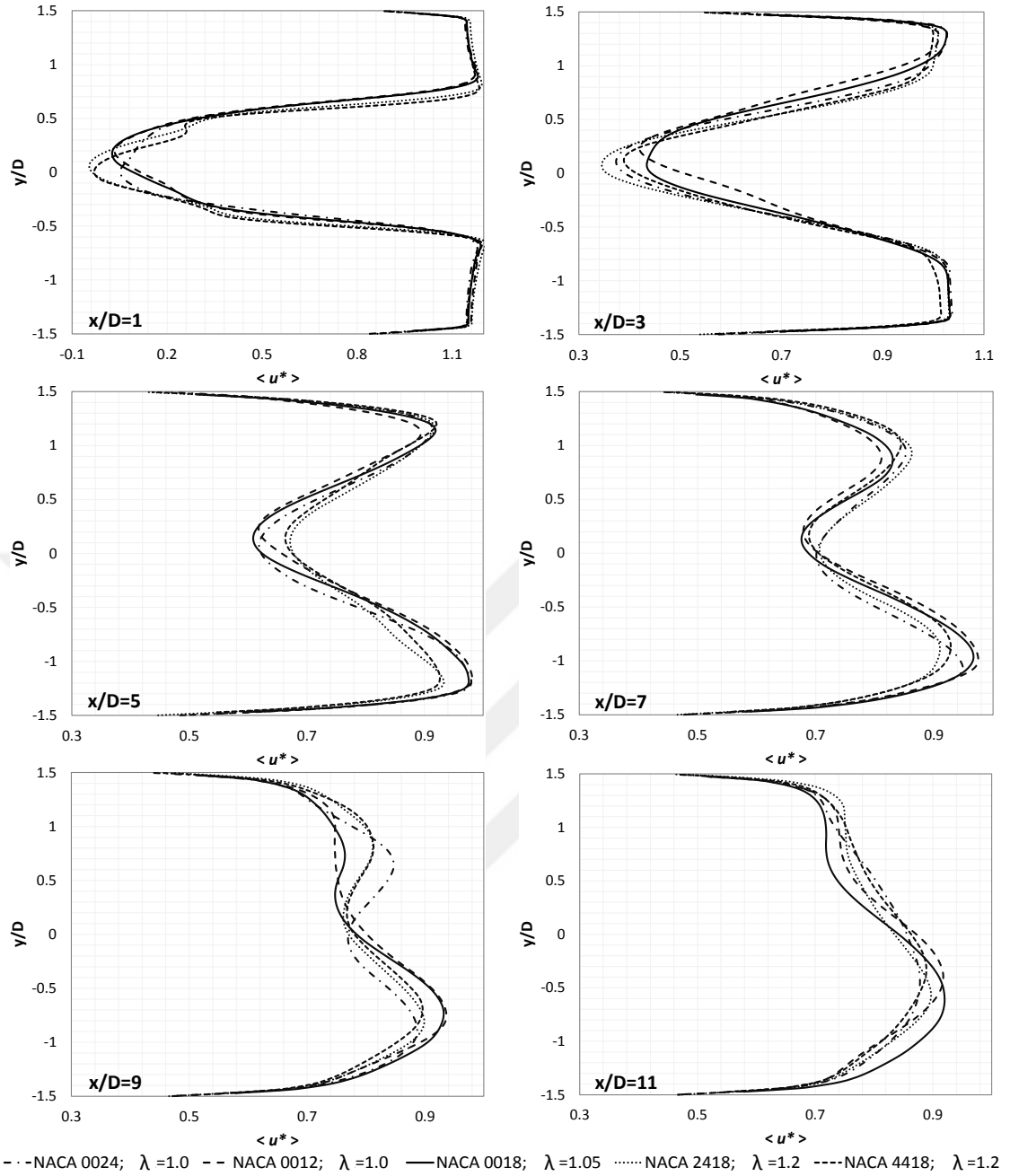
Şekil 3.17'de farklı kalınlık ve kamburluktaki kanat yapısının türbin performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve türbinlerin kanat profiline bağlı olarak maksimum güç katsayısına farklı uç hız oranlarında ulaştığı belirlenmiştir. NACA 0018 için $\lambda = 1.05$ ve NACA 0024 ve NACA 0012 için $\lambda = 1.0$ 'dir; NACA 2418 ve NACA 4418 için ise $\lambda = 1.2$ 'dir. Bu çalışmanın ana amacı, olası bir hidrokinetik türbin çiftliği uygulaması için art izi bölgesindeki akış yapısı ve performans özellikleri en iyi olan kanat profilinin belirlenmesi olduğundan, bu bölümde türbinlerin maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranında akış karakteristikleri 2-D analizler ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.18'de, farklı kalınlık ve kamburluktaki NACA kanat profilleri için boyutsuzlaştırılmış akış yönündeki ortalama hız dağılımları ($\langle u^* = u/V_c \rangle$) her bir kanadın maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranında karşılaştırılmıştır. Akış yönündeki ortalama hız konturlarından ve hız profillerinden görüldüğü gibi, akışkan türbin ile karşılaştıktan sonra, türbin ile duvar arasındaki bölgede kanalın dar olmasından dolayı blokaj etkisiyle hızlanır ve üniform hız değerinin üstüne çıkmıştır. Hızlanan akışkan türbin bölgesini geçtikten sonra türbinin art izine doğru yönelir ve art izi bölgesindeki akışkanın geri kazanımı gerçekleşir. Akış yönündeki ortalama hız konturlarından görüldüğü üzere, simetrik profiller için art izi bölgesinde ters akış gerçekleşmezken, kambur kanat profilinin kullanıldığı konfigürasyonlarda, ters akış bölgesi x-ekseni etrafında oluşmuştur. Bu bölgede, akış yönündeki ortalama hız bileşeninin minimum değeri $\langle u^* \rangle = -0.08$ civarındadır. Akış yönündeki ortalama hız



Şekil 3.18. Farklı kanat profilleri için türbinlerin maksimum performans şartlarında art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış akış yönündeki ortalama hız bileşenin ($\langle u^* \rangle$)

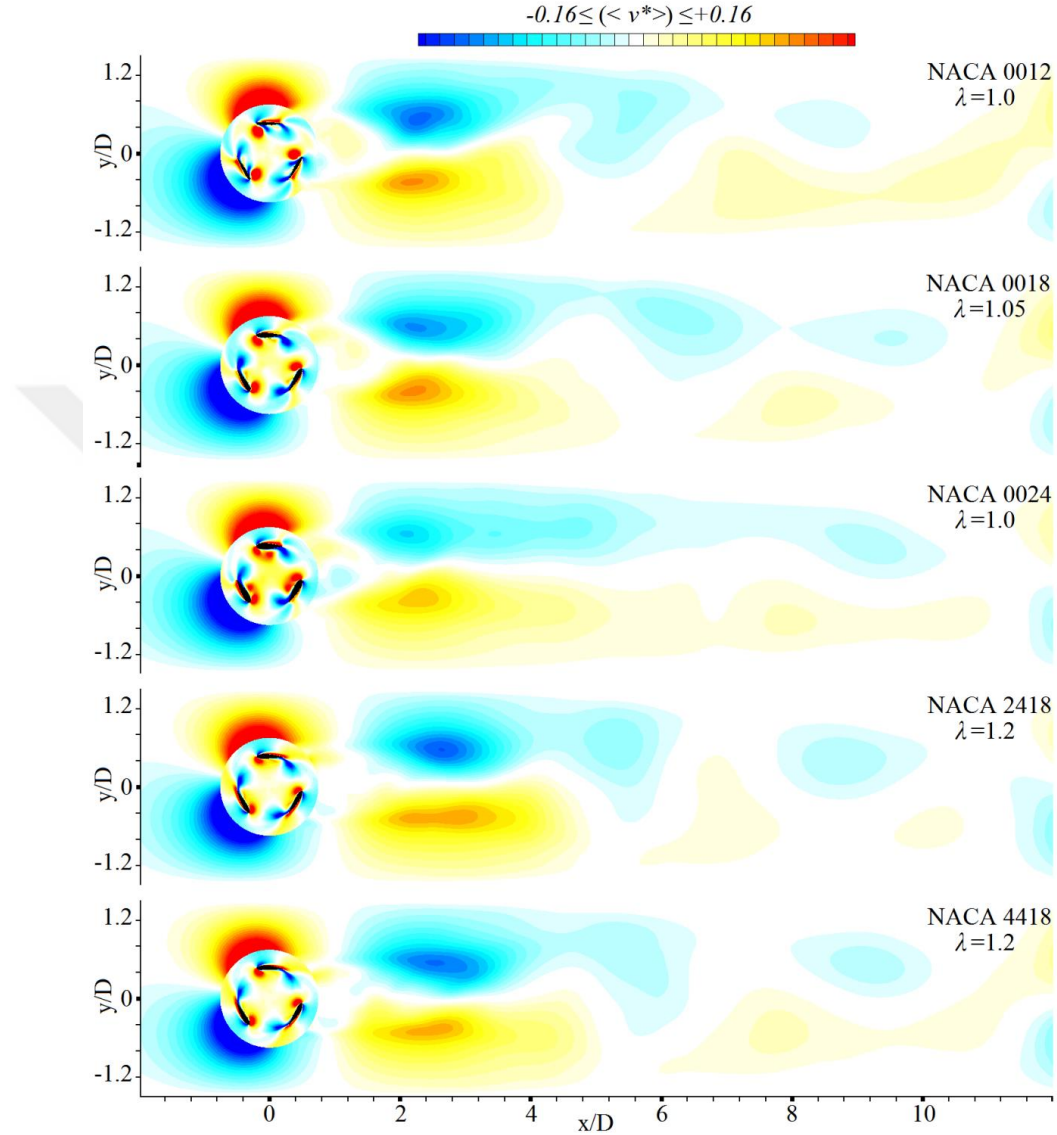
bileşenini nicel olarak daha iyi karşılaştırabilmek için art izi bölgesinde $x/D=1-11$ aralığında $2D$ aralıklarla Şekil 3.18 üzerinden hız profiller çizdirilerek Şekil 3.19’da sunulmuştur. Bu hız profilleri x -ekseni boyunca serbest akışa dik olacak şekilde noktasal değerler alınarak çizilmiştir. Türbinin hemen arkasında $x/D=1$ konumunda



Şekil. 3.19. Farklı kanat profilleri için türbinlerin maksimum performans şartlarında art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış akış yönündeki ortalama hız profilleri

maksimum hız düşüşü NACA 2418 ve NACA 4418 konfigürasyonundan oluşan türbinlerin art izi bölgesinde meydana gelmiştir. Bu bölgedeki akış hızı düzeltilmiş hız V_c 'nin yaklaşık % 13.79'una karşılık gelmektedir. Bütün kanat profilleri için $x/D=5$ 'ten sonra art izi bölgesindeki asimetric akış yapısı açıkça görülmektedir. Negatif y bölgesindeki akış yönündeki ortalama hızın değeri, pozitif y bölgesindeki hıza göre daha yüksektir ve $x/D=9$ civarında, art izi bölgesindeki akış yapısı homojenik bir akış yapısına dönmeye başlamıştır. Bu konumdan sonra, hız profili üniform hız profiline benzemeye başlamıştır ve bütün kanat yapıları için minimum hız düzeltilmiş hızın

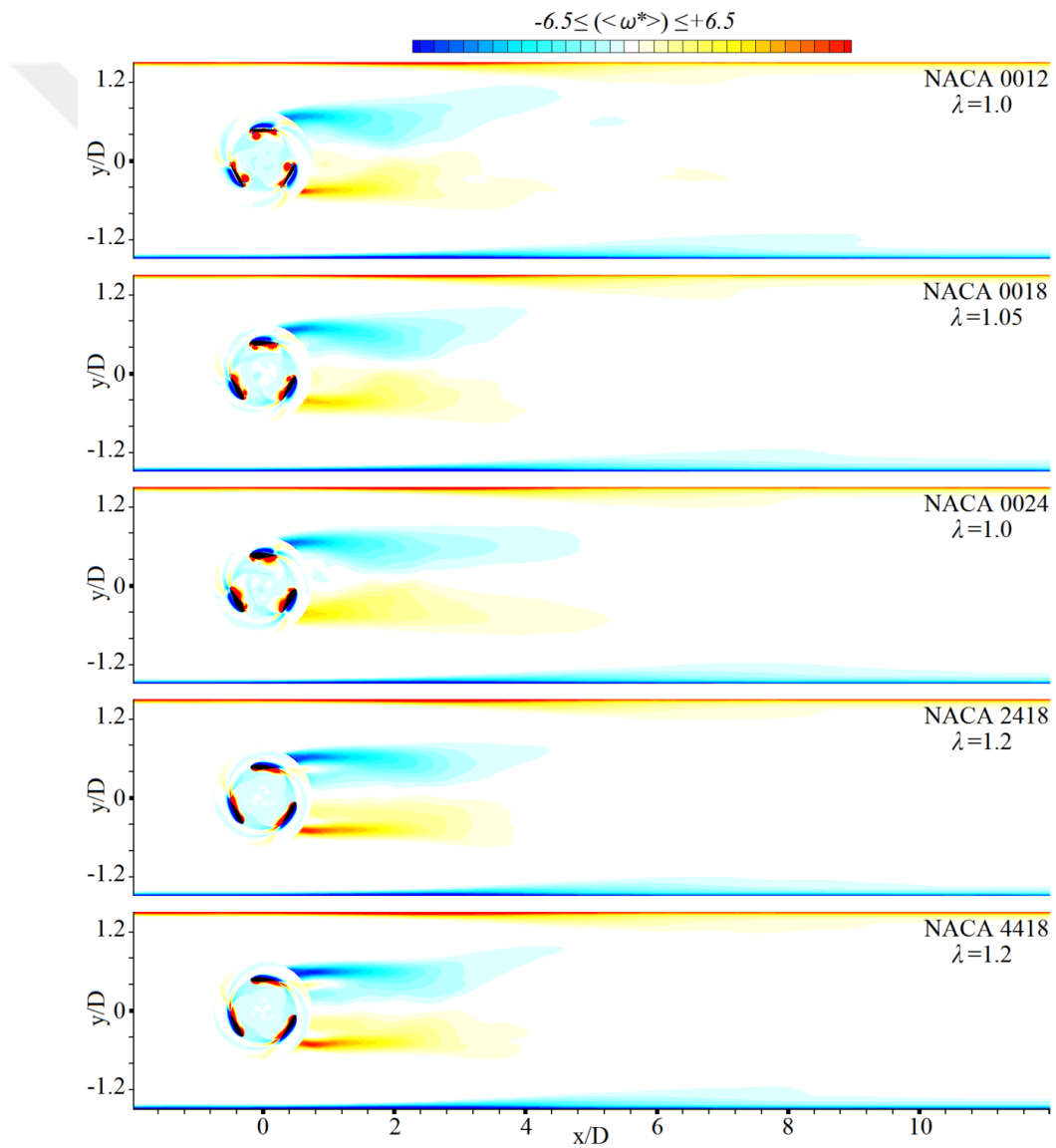
yaklaşık % 80'ine ulaşmıştır. Her ne kadar kalınlık ve kamburluk için elde edilen hız profilleri birbirine benzese de kısmi farklılıklar mevcuttur. Buda hem kanat profili etkisinden hem de türbinlerin maksimum güç katsayısına bağlı çalıştığı uç hız oranından kaynaklanmaktadır.



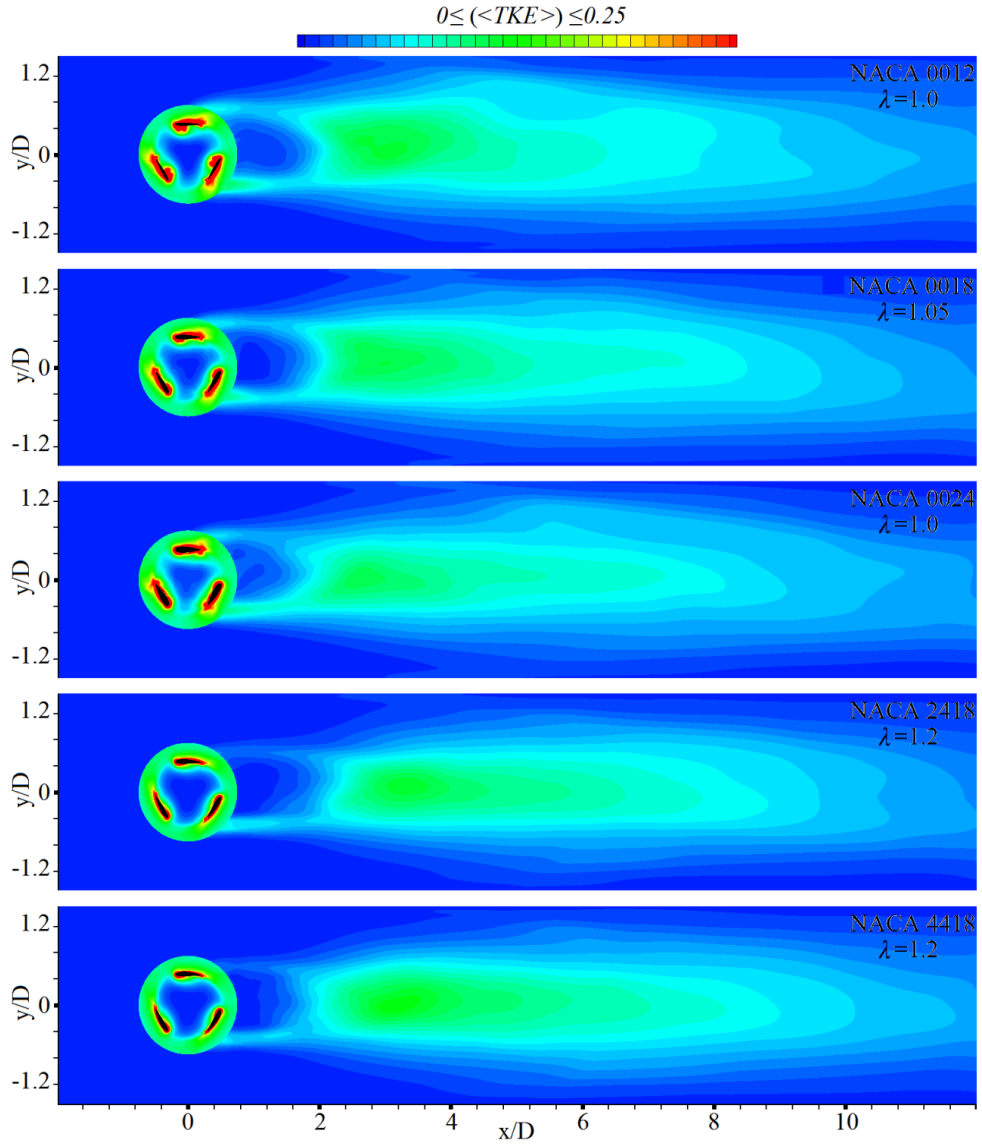
Şekil 3.20. Farklı kanat profilleri için türbinlerin maksimum performans şartlarında art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış akışa dik yönündeki ortalama hız bileşenin ($\langle v^* \rangle$)

Şekil 3.20'de, farklı kalınlık ve kamburluktaki NACA kanat profilleri için boyutsuzlaştırılmış akışa dik yönündeki ortalama hız ($\langle v^* \rangle = v/V_c$) konturları verilmiştir. Bütün kanat konfigürasyonları için art izi bölgesindeki asimetric akış yapısı, akışa dik yöndeki hız bileşeninin pozitif y bölgesindeki negatif değerlerinin negatif y bölgesindeki pozitif değerlere göre daha yüksek olduğu ile gösterilmiştir. Art izi bölgesinde, akışa dik yöndeki hız bileşeni, NACA 4418 konfigürasyonu için $x/D=2.6$;

$y/D=\pm 0.5$ civarında yaklaşık $\langle v^* \rangle = \pm 0.13$ 'dür. Bu durum neredeyse NACA 0018, NACA 0012 ve NACA 2418 konfigürasyonlarında da benzerdir. Ancak, NACA 0024 için, negatif ve pozitif tepe noktalarının konumu türbine daha yakındır ve $x/D=2.1$ civarındadır. NACA 0024'ün art izi bölgesindeki, akışa dik yöndeki hız bileşeninin maksimum pozitif ve negatif değeri, diğer kanat konfigürasyonunda elde edilen değerlerin neredeyse yarısı kadardır. Akışa dik yöndeki hız bileşeni, art izi bölgesinde aşağı akış bölgesinde ilerledikçe yayılır ve sifıra doğru yaklaşmaktadır. Yayılma, kambur kanat konfigürasyonları için $x/D=7$ civarında başlarken, simetrik kanat konfigürasyonları için $x/D=10$ civarında çalkantılar devam etmektedir.



Şekil 3.21. Farklı kanat profilleri için türbinlerin maksimum performans şartlarında art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış ortalama girdap dağılımı ($\langle \omega^* \rangle$)



Şekil 3.22. Farklı kanat profilleri için türbinlerin maksimum performans şartlarında art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış Türbülans Kinetik Enerji (TKE) konturları

Şekil 3.21’de ise boyutsuzlaştırılmış ortalama girdap ($\langle \omega^* = \omega D / V_\infty \rangle$) konturları farklı kanat ve çalışma konfigürasyonları, büyük ölçekli ortalama girdapların uzunluğundaki değişiklikleri açıkça göstermektedir. Minimum pozitif ve negatif ortalama girdap bölgeleri x -ekseni boyunca birbirine yaklaşmaktadırlar. Şekil 3.13’te anlık girdap konturlarında görülen küçük ölçekli girdap kümeleri, kararsız akış yapısı ve yön değiştirerek sönmüldükleri için zaman ortalamalı girdap konturlarında görünmemektedir. Bütün kanat konfigürasyonları için, negatif girdap bölgesi, pozitif girdap bölgesine göre biraz daha baskındır ve art izi bölgesinde neredeyse bir türbin çapı kadar daha uzundur. Kambur kanat konfigürasyonları için girdap bölgeleri birbirine benzemektedir ve yaklaşık $x/D=4.4$ ’e kadar uzanmıştır. Simetrik konfigürasyonlar için,

girdap bölgeleri, NACA 0024 için $x/D=4.8$ 'e, NACA 0018 için $x/D = 3.9$ 'a, NACA 0012 için ise $x/D=4.5$ 'e kadar uzamıştır.

Hız değişiminin yanı sıra, türbin art izi bölgesindeki akış yapısı türbülans seviyesindeki artışla da karakterize edilir. Boyutsuzlaştırılmış Türbülans Kinetik Enerjisinin ($\langle TKE \rangle = TKE/V_c^2$) konturları Şekil 3.22'de verilmiştir. TKE, türbülanslı bir akışta çalkantı seviyesine bağlı birim kütle başına ortalama kinetik enerji olarak tanımlanmaktadır. Maksimum TKE değeri bütün kanat konfigürasyonları için, art izi bölgesinde kayma tabakalarının olduğu türbine yakın bölgede simetri eksenini üzerinde oluşmuştur. Yani TKE'nin maksimum olduğu bölgede hız çalkantıları maksimum seviyede olduğunun göstergesidir. Ayrıca türbin bölgesinden kayma tabakasına doğru uzanan TKE'si yüksek iki bölge bulunmaktadır. Kanat konfigürasyonu için, negatif y bölgesindeki TKE değerleri, pozitif y bölgesindeki TKE değerlerinden daha yüksektir. Bu durum, kanatların $\theta=96^\circ$ hücum açısından sonra stol olması nedeniyle kanat yüzeyinden kopan girdaplar negatif y bölgesindeki TKE değerinin yüksek olmasına sebep olmasıyla açıklanabilir. Alt akış bölgesindeki maksimum TKE değerleri NACA 0024 profili dışındaki kanat profilleri için $x/D=3$ civarında meydana gelmiştir. NACA 0024 için ise türbine biraz daha yakındır ve yaklaşık $x/D=2.8$ civarındadır. TKE değerinin art izi boyunca etkin olduğu ama alt akış yönünde ilerledikçe azaldığı görülmektedir.

Özet olarak kanat profili etkisinin türbin performansına etkisinin 2-D ve 3-D analizlerle doğrulanmış, aynı uç hız oranı ve maksimum performansın elde edildiği uç hız oranında türbinin art izi bölgesindeki akış yapısı 2-D analizlerle incelenerek karşılaştırılmıştır. İncelenen kanat profilleri arasında maksimum güç katsayısı NACA 4418 profilinde elde edilmiştir. Art izi bölgesindeki akış yapısı karşılaştırıldığında ise aynı uç hız oranında NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbinin hız geri kazanımı aynı kalınlıktaki simetrik NACA 0018 ve kambur NACA 2418 profiline göre daha uzundur. Ancak literatürde de vurgulandığı gibi uç hız oranının artmasıyla hız geri kazanım uzunluğu kısalmaktadır. Bu nedenle NACA 4418 profilinden maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.2$ uç hız oranındaki hız geri kazanım uzunluğu ile diğer kanatların kullanıldığı durumlardaki hız geri kazanım uzunluğu birbirine yakındır. Hem güç katsayısı hem de art izi bölgesindeki akış karakteristiği sonuçlarına göre, NACA 4418 profilinin kullanılacağı türbinlerin, kanal akışı üzerine kurulacak bir hidrokinetik türbin çiftliği uygulaması için daha uygun olacağı belirlenmiştir. Bu kapsamda gelecek bölümlerde NACA 4418 profilinin kullanıldığı türbinlerin 3-D analizlerinin, akış

görüntüleme ve tork ölçüm deneyleri ile doğrulandığı karşılaştırmalı sonuçlara ve alt akış bölgesine yerleştirilen ikinci türbinin sayısal ve deneysel performans sonuçlarına yer verilmiştir.



4. DENEYSEL ÖLÇÜMLER ve 3-D HAD ANALİZLERİ

4.1. Deneysel ve Sayısal Çalışmalar için Türbin Tasarımı

Patel ve ark. (2017) tarafından tamamlanan deneysel çalışmanın sonuçları kullanılarak 2-D ve 3-D analiz sonuçları doğrulanmıştır. Kalınlık ve kamburluk etkisinin 2-D analizlerle araştırıldığı çalışmada hem performans hem de maksimum performansın elde edildiği uç hız oranında türbinin art izi bölgesindeki hız geri kazanımı dikkate alındığında hidrokinetik türbin çiftliği uygulamaları için NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbinin daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Deneysel ve 3-D analizlerde kullanılacak türbinin geometrik özellikleri ve çalışma koşulları

Parametre	Değer
Kanat sayısı, N	3
Türbin çapı, D (m)	0.25
Veter uzunluğu, c (m)	0.1
Kanat uzunluğu, L (m)	0.3
Kanat profili	NACA 4418
Katılık oranı, σ	0.382
Serbest akış hızı, U_{∞} (m/s)	0.3
Reynolds sayısı, Re_D	$\sim 7.5 \times 10^4$
Devir sayısı aralığı, (rpm)	11.5 – 32.1
Uç hız oranı aralığı, λ	0.5 – 1.4

Bu bölümde ise NACA 4418 profilinin kullanıldığı H-tipi Darrieus türbini için referans alınan çalışmadaki katılık oranı $\sigma = 0.382$ kullanılarak, türbin çapının $D = 0.25$ m kanat uzunluğunun $L = 0.3$ m ve kanat veter uzunluğunun $c = 0.1$ m olduğu bir türbin modeli oluşturulmuştur. Türbin modeline ait geometrik ve çalışma şartlarına ait detaylar Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Oluşturulan bu türbin modeli LES türbülans modeli kullanılarak 3-D analizlerde ve imalatı yapılarak performans ve akış görüntüleme deneylerinde kullanılmıştır.

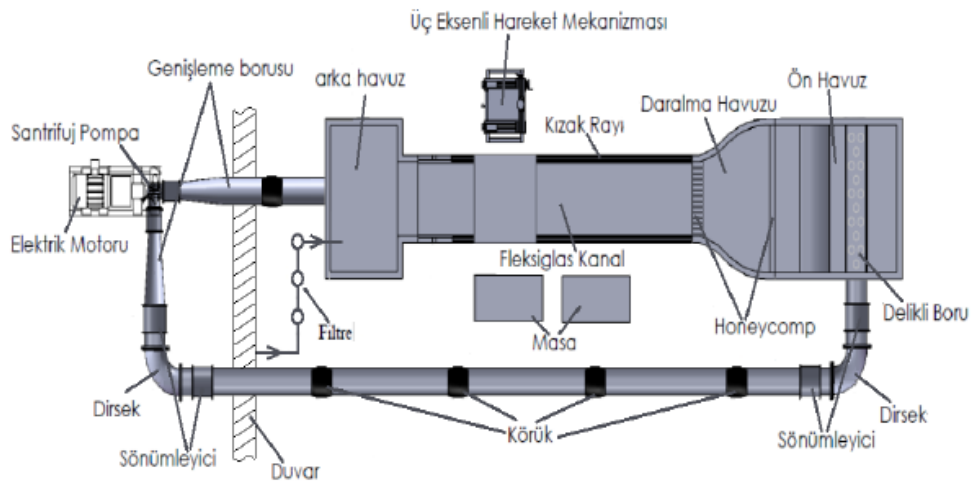
4.2. Deneysel Yöntem

Akış görüntüleme ve dinamik tork ölçüm deneyleri, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterildiği gibi kapalı devre pompalama sistemine sahip bir açık su kanalında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı açık su kanalı, 0.75 (genişlik) $\times$ 0.6 (derinlik) m² ve 6.0 m uzunluğunda dikdörtgen bir kesite sahiptir. Su kanalının tabanı ve yan

duvarları 15mm kalınlığında pürüzsüz camdan oluşmaktadır. Kanal içerisindeki su, bir santrifüj pompa ile sistemde devir-daim ettirilmektedir. Kanaldaki akışın hızını ayarlamak için santrifüj pompanın dönüş hızını kontrol eden bir ABB değişken frekanslı sürücü kullanılmaktadır. Kanal içerisindeki su hızı bu kontrolcü sayesinde yaklaşık 0-0.45m/s aralığında ayarlanabilmektedir. Deneyler yapılırken, kanal içerisindeki suyun hızı 0.3m/s'ye ayarlanmıştır ve kanal içerisindeki su yüksekliği 0.54 m seviyesinde sabit tutulmuştur.



Şekil 4.1. Açık su kanalı genel görünümü



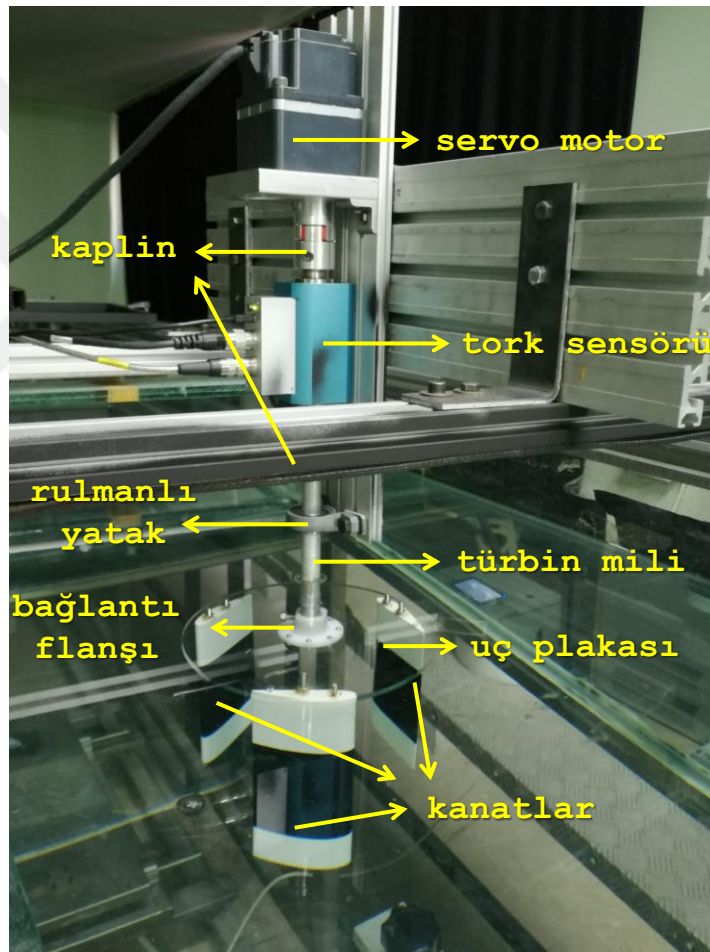
Şekil 4.2 Açık su kanalının üstten şematik görünümü

Pürüzsüz ve düzgün bir yüzeye sahip olan kanatlar PLA (Poliaktik Asit) malzemeden üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir (Şekil 4.3). Deneyler sırasında parçalı

kanatları birbirine rijit bir şekilde montajlamak ve titreşimi önlemek için Şekil 4.3'te gösterildiği gibi kanatların merkezine iki adet 6mm çapında paslanmaz çelik gijon



Şekil 4.3. Üç boyutlu yazıcı ile PLA malzemenen imal edilen farklı uzunluktaki NACA 4418 kanatlar



Şekil 4.4. Üç boyutlu yazıcı ile PLA malzemenen imal edilen farklı uzunluktaki NACA 4418 kanatlar

yerleştirilmiştir. Kanatlar, bu gijonlar ile uç plakasına somun-cıvata bağlantısıyla rijit bir şekilde sabitlenmiştir. Uç plakası, 0.28m çapında ve 10mm kalınlığında şeffaf pleksiglas malzemenen kanat pozisyonları 120° açılı olacak şekilde lazer kesim ile üretilmiştir. Uç plakası ise türbin miline bir flanşla bağlanmıştır. Türbin mili olarak rijit

ve hafif olması için içi boş alüminyum çubuk kullanılmıştır. Mil, bilyeli bir rulman ile yataklanmış ve kaplin ile döner tork sensörüne bağlanmıştır. Tork sensörünün diğer ucundaki mil ise yine kaplin kullanılarak türbine hareket sağlayan servo motora bağlanmıştır (Şekil 4.4). Türbin için gerekli olan devir sayısını sağlayan servo motor 1/100 redüktör ile çalışmaktadır ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi PLC tarafından kontrol edilmektedir. Bu sayede dijital kontrol paneli üzerinden farklı uç hız oranlarındaki devir sayısı kolaylıkla ayarlanabilmekte ve türbinden ölçülen anlık tork değeri de bu panel üzerinden takip edilebilmektedir.

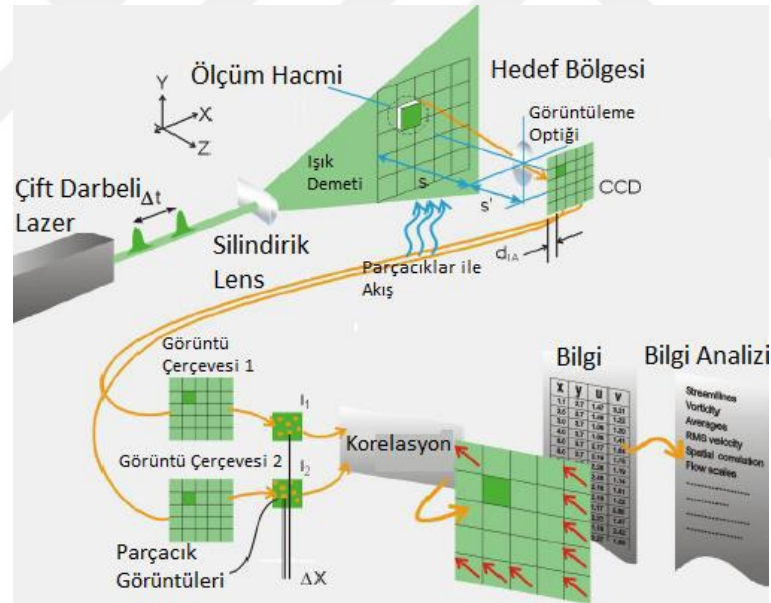


Şekil 4.5. Servo motor, servo motor sürücüsü ve kontrol sistemi

4.2.1. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm (PIV) yöntemi

Su kanalı içerisine yerleştirilen hidrokinetik türbinin art izi bölgesindeki akış özelliklerini incelemek için 2-D PIV sistemi kullanılarak akış görüntüleme yapılmıştır. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) yöntemi optik bir akış hızı ölçüm tekniğidir. Şekil 4.6'da şematik resimde gösterildiği gibi, içerisine yoğunluğu akışkan yoğunluğuna eş, ışığı yansıtan parçacıklar atılmış bir akış alanı, ince bir lazer düzlemi tarafından

aydınlatılarak kameralar aracılığıyla art arda bir görüntü çifti kaydedilmesi prensibine dayanan bir hız ölçüm tekniğidir. PIV'nin diğer akış ölçüm sistemlerine göre avantajları; ölçüm esnasında akış alanına müdahale edilmediği için ölçüm alanındaki akış bozulmamış olur. Bir diğer avantajı ise özellikle noktasal ölçümde sadece bir noktadaki zamanla hız değişimi ölçülür. PIV ölçme yöntemi ile belirli bir düzlemsel yüzey alanı aydınlatılarak birçok noktada hız vektörleri aynı anda görüntülenerek ölçülmektedir. Bu nedenle noktasal ölçüm yapan cihazlara göre deney süresi azalır. PIV yönteminde, akışkanla doğrudan temas olmadığı için paslanma, kirlenme veya tıkanma gibi tehlikeler söz konusu değildir. Son olarak literatürde, PIV sisteminin kullanıldığı deneysel çalışmalarda ölçüm sisteminin doğruluğunun %1-4 aralığında olduğu vurgulanmıştır (Westerweel, 1995; Seal ve ark., 1997; Landreth ve ark., 2004). Bu nedenle, günümüzde yüksek teknoloji içeren PIV yöntemiyle elde edilen sonuçlar, akış fiziğinin temelini kavramada, hesaplamalı akışkanlar mekaniği araştırma sonuçlarının değerlendirilmesinde ve tasarım uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar.



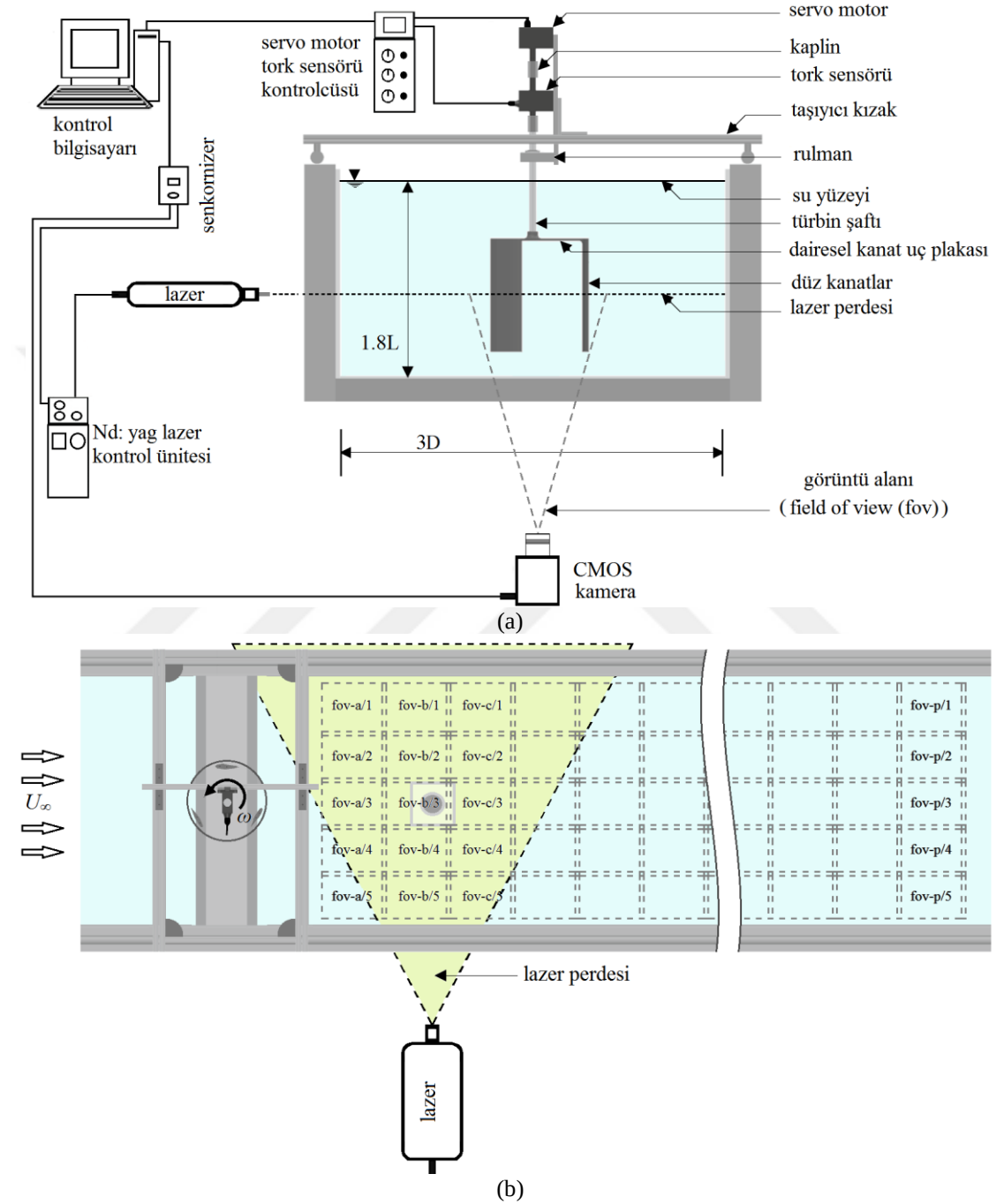
Şekil 4.6. PIV sisteminin çalışma prensibi (Dynamics, 2021)

PIV yöntemi ile akış ölçümü, akışkanı partikülleme, ölçüm alanını aydınlatma, görüntüleme, işleme ve analiz olmak üzere beş aşamadan oluşmaktadır (Firat ve ark., 2017). Kanal içerisindeki su hareketinin takip edilebilmesi için, 10 μm çapında gümüş kaplı içi boş cam küre şeklindeki partiküller su içerisine katılmıştır. Bu partiküllerin yoğunluğu, suda asılı kalabilmeleri için su yoğunluğuna yakındır. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi türbin orta düzleminde ($z=0$) kanal tabanına paralel olan bir lazer

perdesi, bu parçacıkları görüş alanında (field of view, fov) aydınlatmıştır. 135 mJ maksimum gücünde 15 Hz tekrarlama hızına sahip çift kaviteli Nd: YAG lazer, yaklaşık 1 mm kalınlığında yeşil lazer perdesi oluşturur. Lazer ve kamera arasındaki tetikleme darbelerini kontrol etmek için bir senkronizasyon ünitesi PIV sisteminin ekipmanı olarak kullanılmaktadır. Lazer huzmesi ile akış alanında aydınlatılan parçacıklar, 1632×1200 piksel çözünürlüğe sahip yüksek hızlı Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, CMOS) kamera ile görüntülenir. Her bir imajda vektör haritasını oluşturmak için lazer arka arkaya iki defa atış yapmaktadır ve bu esnada kamera iki görüntü olarak parçacıkların hareketine bağlı olarak vektörler oluşturmaktadır. İki görüntü arasındaki bu süre 1750µs'ye ayarlanmıştır ve görüntüler 15 Hz'de kaydedilmiştir. Elde edilen ham PIV görüntüleri, Dantec Dynamics'in DynamicStudio yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Ham görüntülerden anlık hız ve girdap vektör alanlarını oluşturmak için 32x32 piksel akış alanlarında ve % 50 üst üste binen adaptif korelasyon yöntemi kullanılmıştır. Adaptif korelasyon yöntemi kullanılarak vektör alanları oluşturulduktan sonra, yansımalar, titreşimlerden ve gölgelerden kaynaklanan bozuk hız vektörlerini temizlemek için ortalama filtreleme tekniği uygulanarak hatalı hız vektörleri düzeltilmiştir. Ortalama filtrelemenin boyutları ve etki alanları görüntüdeki vektörlere uygun olarak seçilmiştir. Her vektör alanı 7474 (101×74) hız vektörlerinden oluşmaktadır. Görüntü alanı ile ilgili anlık vektör alanları işlendikten sonra, akış karakteristiğine ait zaman ortalamalı hız, girdap vb. bileşenlerini oluşturmak için toplam 500 anlık vektör haritası kullanılmıştır.

PIV ölçümünün konfigürasyonu, Şekil 4.7'deki gibi türbinin orta düzleminde x ve y eksenleri boyunca yatay bir düzlemde görüntülenecek şekilde ayarlanmıştır. Türbinin art izi bölgesindeki ölçüm alanı $0.5 < x/D < 11.6$ ve $-1.2 < y/D < 1.2$ aralığındadır. Akış alanındaki görüntüyü yakalayan CMOS kamera, yaklaşık $0.48D$ (genişlik) $\times$ $0.70D$ (uzunluk) dikdörtgen kesitli bir görüş alanına sahiptir ve su tünelinin altına yerleştirilmiştir. X -ekseni boyunca yapılan PIV ölçümlerinde, lazer ve kamera sistemi sabit tutulmuş, türbinin pozisyonu Şekil 4.8'de gösterilen kanal üzerine monte edilen kızak üzerinde hareket ettirilerek akış yönünde değiştirilmiştir. Y -ekseni boyunca yapılan PIV ölçümlerinde ise kamera, akış yönüne dik olarak kanal altındaki iki yönlü hareket mekanizması ile y -ekseninde ileri-geri hareket ettirilmiştir. Bu sayede, türbinin orta düzleminde türbine yakın ve uzak art izi bölgelerindeki akış karakteristiğini belirlemek için 80 (a'dan p'ye x -ekseni boyunca 16 konum, 1'den 5'e y -ekseni boyunca 5 konum) görüntü alanında PIV yöntemi ile hız ölçümü Şekil 4.7(b)'de gösterildiği gibi

yapılmıştır. Elde edilen bu görüntü alanları aynı değer aralıklarında ölçeklendirilip birbirine birleştirilerek, türbin art izi bölgesindeki akış yapısı geniş bir aralık için oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. Deneysel akış ve tork ölçüm sistemine ait şematik görünüm; (a) sol yan görünüş, (b) üstten görünüş



Şekil 4.8. Kanal üzerinde türbin mekanizmasının konumunu ayarlayacak sigma profilden imal edilen hareket mekanizması

4.2.2. Dinamik tork ölçümü

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda bir diğer hedef tork ölçümü yaparak türbinin performansının uç hız oranına bağlı değişimini belirleyip, performans eğrisi oluşturmaktır. Dinamik stol ve kararsız akış karakteristiği nedeniyle, dikey eksenli türbinlerin performansının doğrudan belirlenmesi zordur. Şekil 4.4.'deki deney düzeneği ve Şekil 4.7(a)'daki şematik diyagram, tork ölçüm sisteminin ayrıntılarını göstermektedir. Türbinin dönüş hızı servo motor aracılığı ile sağlanır ve PLC ünitesi tarafından kontrol edilir, aynı zamanda türbin devir sayısı hem tork sensörü hem de servo motor ile ölçülür. Türbin şaftındaki dinamik torku, dönüş hızını ve azimut açısını (θ) ölçmek için yüksek hassasiyetli Kistler Dual Range Torque Sensor 4503B model tork sensörü kullanılmıştır. Tork sensörünün ölçüm aralığı, tam ölçek aralığının % 0.1'i hassasiyetle 10 Nm'dir. Tork sensörünün gecikme dahil olmak üzere doğrusallık hatası, nominal torkun $\pm\% 0.1$ 'inden azdır. Sensörden alınan tüm ölçümler (tork, dönme hızı ve azimut konumu), bir bilgisayara bağlı USB DAQ kullanılarak 135Hz örnekleme hızında servo motor kontrolünü de sağlayan PLC sistemi üzerinden kayıt edilmiştir.

Türbin pozisyonunun belirlenmesi için deneylere başlamadan önce azimut açısı $\theta=0^\circ$ başlangıç konumuna getirilmiştir. Daha sonra kanaldaki suyun hızı ve yüksekliği

ayarlanarak sistem istenilen uç hız oranında çalıştırılmıştır. Sistem üniform koşullara ulaştıktan sonra, türbinin torku, azimut konumu ve dönüş hızı ölçümleri kaydedilmiştir. İncelenen her uç hız oranı için tork ölçümleri 60 saniye süreyle yapılmış ve ölçülen torkun doğruluğunu artırmak için her deney üç kez tekrarlanmıştır. Türbinin tork ölçümleri yapılarak elde edilen güç katsayısına ait belirsizlik analizi performans sonuçlarının incelendiği bölümde sunulmuştur.

4.3 NACA4418 Profili için 3-D HAD Analizleri

4.3.1. Türbülans modeli

NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbin modeli mevcut deney düzeneği için uyarlanmış ve analizleri Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation, LES) türbülans modeli kullanılarak ANSYS-Fluent 19.0 programında 3-D analizlerle yapılmıştır. Sonlu hacimler ayrıklaştırma yöntemini kullanarak çözülen üç boyutlu kararsız sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemleri için süreklilik ve momentum denklemleri Denklem 3.4 ve 3.5'deki gibidir. LES türbülans modelinde temel olarak büyük ölçekli girdapların uzunluğunu karakterize eden denklemler kullanılmaktadır. LES türbülans modelinin temel prensibi düşük geçişli filtreleme yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntem kullanılarak Navier-Stokes denklemlerindeki küçük ölçekli girdaplar modellenir, büyük ölçekli girdaplar belirlenen parametrelere bağlı olarak doğrudan hesaplanır. Büyük ölçekli ve küçük ölçekli bu girdapları ayırmak için LES türbülans modelinde filtreleme tekniği kullanılır.

LES türbülans modelinin kullanıldığı HAD analizleri literatürde bir çok çalışmada deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Posa ve ark., 2016; Yagmur ve ark., 2017; Yagmur ve ark., 2020). Dikey eksenli türbinlerdeki performans ve akış yapısının incelendiği bir çok çalışmada da LES türbülans modeli kullanılmıştır. Elkhoury ve ark. (2015) dikey eksenli türbinlerde akış hızının ve kanat yapısının türbin performansına etkisini deneysel ve LES türbülans modeli kullanarak incelemişler ve LES modelinin türbin performansını hesaplamada çok başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Mendoza ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada dikey eksenli ve yatay eksenli türbini LES türbülans modeli kullanarak analiz etmişlerdir. Literatürdeki deneysel çalışma ile performans sonuçlarını doğrulayıp, dikey ve yatay eksenli türbinlerin art izi bölgesindeki akış yapısını ve hız geri kazanımını LES modeli sonuçları ile

karşılaştırmışlardır. Guillaud ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise LES türbülans modeli kullanarak çalışmalarını doğrulamış ve katılık oranının türbin performansına ve kanat etrafındaki akış yapısına etkisini incelemişlerdir. Shamsoddin ve Porté-Agel (2014) LES türbülans modeli kullanarak dikey eksenli türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını incelemişler ve Brochier ve ark. (1986) yaptıkları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. LES sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ve art izi bölgesindeki akış yapısını incelemede kullanılabilir olduğunu vurgulamışlardır. Posa ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada dikey eksenli türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını PIV ve LES yöntemi ile farklı uç hız oranlarında inceleyerek karşılaştırmışlardır. Genel olarak LES sonuçlarının deney sonuçları ile niteliksel olarak iyi bir uyum içinde olduğunu vurgulamışlardır. Dikey eksenli türbinde, uç hız oranının türbin performansına ve art izi bölgesindeki akış yapısına etkisini Ouro ve Stoesser (2017) LES türbülans modelini kullanarak incelemişler ve performans sonuçlarını Maître ve ark. (2013) yaptıkları deneysel çalışma sonuçları ile, art izi bölgesindeki akış yapısını ise Mercier ve ark. (2014) LDV yöntemi kullanarak inceledikleri deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. LES türbülans modelinin büyük girdapları doğrudan çözdüğü için RANS modellerine göre deneysel sonuçlarla çok daha iyi uyum içerisinde olduğunu vurgulamışlardır. Bazı diğer çalışmalarda da Posa ve Balaras (2018) uç hız oranının art izindeki akış yapısına etkisini, Shamsoddin ve Porté-Agel (2020) kanat uzunluğunun türbin çapına oranının art izi bölgesindeki akış yapısına etkisini, LES türbülans modeli ile literatürdeki deneysel çalışmalar ile doğrulayıp incelemişlerdir. LES türbülans modeli büyük ölçekli girdapları doğrudan çözüp küçük ölçekli girdapları modellediğinden, RANS modellerine göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği bir çok çalışmada kanıtlanmıştır. LES türbülans modelinin RANS modellerine göre dezavantajı ise analizlerin 3-D ve zaman bağımlı çözülmesidir. Hem akış hacmi için oluşturulan eleman sayısından hem de zaman bağımlı analiz gereği işlem süresini arttırmakta ve eleman sayısına bağlı olarak yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır.

LES yaklaşımında ağ yapısındaki eleman boyutundan daha küçük girdaplar Sub-Grid Scale (SGS) modeli kullanılarak hesaplanır ve şu şekilde tanımlanır:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4.1)$$

Burada deviatorik SGS tensörü, SGS girdap viskozitesi ile modellenir:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{kk} = -2v_t\bar{S}_{ij} \quad (4.2)$$

burada τ_{kk} SGS gerilme kalıntılarını, v_t akışkanın viskozitesini ve $\bar{S}_{ij}$ ise gerilme hızı tensörünü belirtmekte ve Denklem 4.3'teki gibi ifade edilir:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \quad (4.3)$$

Duvara uyarlanan yerel girdap viskozitesi (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity, WALE) modeli SGS'yi belirlemek için kullanılmıştır. Bu modelde, SGS viskozitesi, hız gradyan tensörünün karesi kullanılarak değerlendirilir; laminar akış bölgelerinde ve viskoz alt tabakada da ihmal edilebilir ve uygun duvara yakın davranışa sahiptir (Nicoud ve Ducros, 1999). Girdap viskozitesi, hız gradyan tensörünün değişmezlerine göre değerlendirilir ve Denklem 4.4'deki gibi ifade edilir:

$$v_t = C_w^2 \Delta^2 \frac{(\bar{S}_{ij}^d + \bar{S}_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} + \bar{S}_{ij})^{5/2} + (\bar{S}_{ij}^d + \bar{S}_{ij}^d)^{5/4}} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikteli, Δ subgrid karakteristik uzunluk ölçeğidir ve hücre hacminin küp kökü olarak tanımlanır. C_w ise WALE modelinin sabitidir, Fluent programında varsayılan olarak $C_w=0.325$ alınır ve hız gradyan tensörünün karesi:

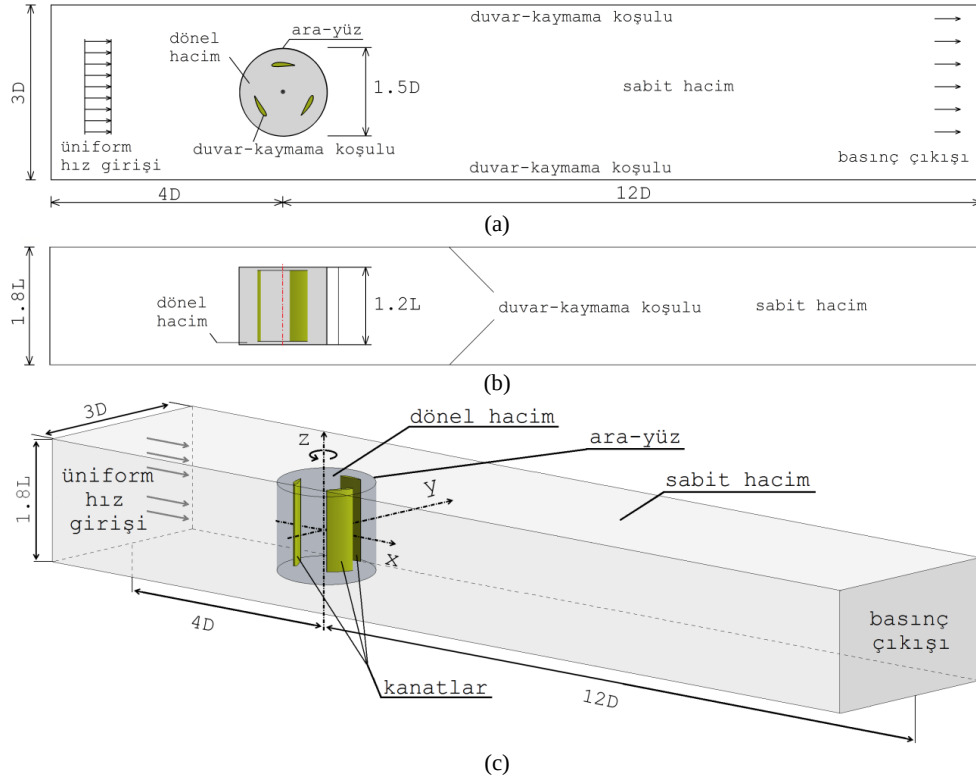
$$\bar{S}_{ij}^d = \frac{1}{2}(\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3}\delta_{ij}\bar{g}_{kk}^2 \quad (4.5)$$

$$\bar{g}_{ji}^2 = \bar{g}_{ik}\bar{g}_{kj} \quad (4.6)$$

ile hesaplanır. Burada δ_{ij} Kronecker deltasıdır ve $\bar{g}_{ij} = \partial \bar{u}_i / \partial x_j$ 'dir. LES türbülans modelinin kullanıldığı analizlerde WALE modelinin üstünlüğü bir çok çalışmada kullanılmış ve özellikle kanal içerisindeki türbülanslı akış yapısının çözüldüğü analizlerde başarılı olduğu vurgulanmıştır (Ma ve ark., 2009; Weickert ve ark., 2010; Yuen ve ark., 2014; Ben-Nasr ve ark., 2017; Liao ve ark., 2020).

4.3.2. Akış hacmi, sınır koşulları ve çözücü ayarları

Akış hacmi ve sınır koşulları, deney düzeneği dikkate alınarak ANSYS-Design Modeler modülünde Şekil 4.9'daki gibi yeniden oluşturulmuştur. Hesaplamalı akış alanı, türbini içeren dönen bir bölgeden ve sabit bir dış bölgeden oluşmaktadır. Şekil 4.9 (a), dönüş eksenine dik olan akış alanının enine kesitini temsil etmektedir. Akış alanının boyutu, sırasıyla akış yönünde ve akışa dik yönde sırasıyla $16D$ ve $3D$ 'dir. Giriş sınırının türbin dönüş merkezine uzaklığı ise $4D$ 'dir. Akış hacmi yüksekliği ise Şekil 4.9(b)'de gösterildiği gibi deneysel çalışmadaki ile aynı ve kanat uzunluğunun 1.8 katıdır. 3-D hesaplama alanının perspektif görünümü ise Şekil 4.9(c)'de gösterilmektedir. Dönen bölgenin çapı, 3. bölümde kanat profilinin etkisinin incelendiği analizlerde de vurgulandığı gibi önemli bir etkisi olmadığından dolayı daha önceki çalışmalarda dikkate alınarak $1.5D$ olarak kabul edilmiştir (Li ve ark., 2013; Hasan ve ark., 2014; Asr ve ark., 2016; Kumar ve Saini, 2017; Rezaeiha ve ark., 2017; Mejia ve ark., 2018; Saini ve Saini, 2018; Rezaeiha ve ark., 2019).



Şekil 4.9. HAD analizlerinde kullanılan akış hacmi ile ilgili boyutlar ve sınır koşullarının şematik gösterimi: (a) üstten görünüm, (b) yandan görünüm ve (c) perspektif görünüm

Analizlerde kullanılan sınır koşulları Çizelge 4.2'de özetlenmiş ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Literatürde önerildiği gibi türbinin dönme karakteristiğini analiz etmek için bir dönel hacim kullanılmıştır (Raciti Castelli ve ark., 2010; Maître ve ark., 2013; Alaimo ve ark., 2015). Analiz sırasında hem sürekliliğin hem de momentumun korunmasını sağlamak için dönen ve sabit bölgenin temas yüzeyleri ara yüz sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Akış hacmi giriş sınır koşulu, deney düzeneğindeki akış hızı ile aynı olacak şekilde $U_{\infty}=0.3$ m/s üniform hız olarak tanımlanmıştır. Akış hacmi çıkış sınır şartı olarak sıfır fark basıncı ile basınç çıkışı tanımlanmıştır. Kanat yüzeyleri kaymama koşulu ile duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Sabit hacmin dış dört yan duvarına da kaymama koşulu ile duvar sınır şartı tanımlanmıştır. Kanat profili incelemesinde de vurgulandığı gibi daha doğru bir sonuç elde etmek için çözücü ayarlarının da doğru tanımlanması gerekmektedir (Balduzzi ve ark., 2016). Zaman bağımlı yapılan analizlerde basınç tabanlı çözücü kullanılmış ve yerçekimi ivmesi $-z$ yönünde 9.81m/s^2 olarak tanımlanmıştır. Basınç-hız bağlantısını çözmek için ise COUPLED algoritması kullanılmıştır. İkinci dereceden ayrıklaştırma şeması tüm akış değişkenleri için kullanılmıştır. Ayrıca, Green-Gauss hücre temelli gradyan ve zamana bağlı çözüm için bağımlı ikinci derece seçilmiştir.

Çizelge 4.2. Sayısal analiz için sınır koşulları

Konum	Sınır Şartı Tipi	Sınır Şartı
Giriş	Hız girişi	Üniform akış
Çıkış	Basınç çıkışı	Sıfır fark basıncı
Kanal yan duvarları	Kaymama koşulu	Duvar
Kanat yüzeyleri	Kaymama koşulu	Hacimle birlikte dönel yüzey
Dönel ve sabit hacim arasındaki temas yüzeyi	Ara-yüz	Eş yüzey

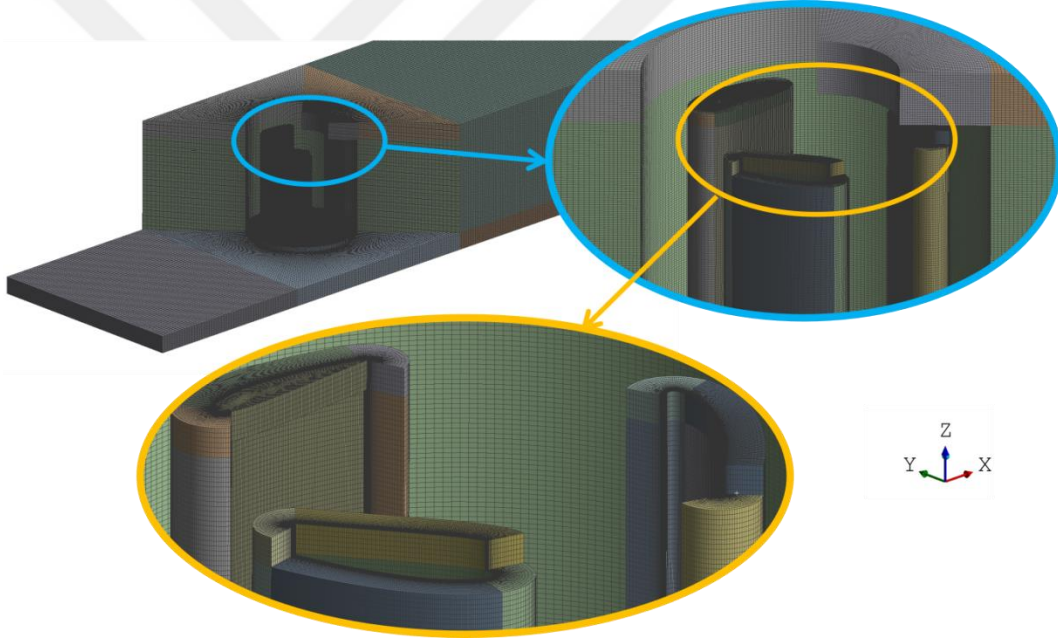
Deneylerde olduğu gibi, akış değişkenlerinin ortalaması alınarak performans ve akış bileşenlerine ait zaman ortalamalı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm denklemler için, yakınsama kriteri 10^{-6} olarak tanımlanmıştır. Analiz sırasında, bir sonraki adıma geçmeden önce zaman adımı başına 30 iterasyon ayarlanmıştır. Bununla birlikte, genel olarak, analizler yaklaşık 10 ila 15 iterasyonda yakınsamıştır. Herhangi bir geçici etkiyi ortadan kaldırmak için, ortalama veri toplama, ilk üç tam türbin dönüşünün tamamlanmasından sonra başlamıştır (Balduzzi ve ark., 2016). Ayrıca, çift türbin konfigürasyonunun analizleri içinde aynı sınır koşulları ve çözücü ayarları kullanılmıştır.

4.3.3. Ağ yapısı ve zaman adımından bağımsızlık çalışması

Hidrokinetik türbinlerin sayısal analizlerinde sınır koşulları ve çözücü ayarlarının etkisini incelemek için $\lambda=1.0$ uç hız oranında analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ağ yapısı ve zaman adımı büyüklüğü için bağımsızlık çalışması yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Ağ yapısından bağımsızlık çalışmasının detayları

Ağ yapısı	Eleman sayısı, $\times 10^6$	y^+	C_p	Fark (%)
Ağ-I	11.21	0.19	0.171	0
Ağ-II	7.85	0.21	0.168	1.75
Ağ-III	4.61	0.34	0.163	4.67
Ağ-IV	3.03	0.46	0.147	14.04
Ağ-V	1.53	0.69	0.132	22.81

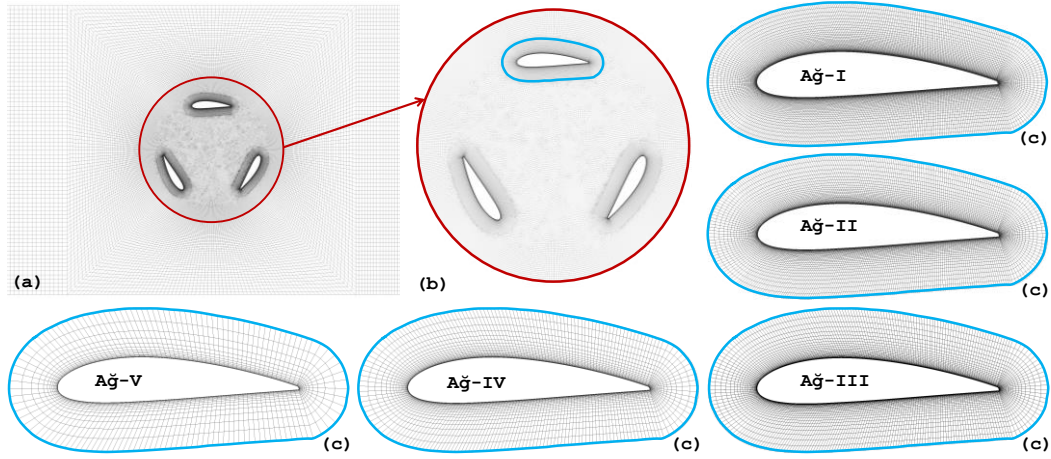


Şekil 4.10. Tüm akış hacmi için oluşturulmuş ağ yapısının 3-D ayrıntılı görünümü

Önceki HAD analizinde de belirtildiği gibi ağ yapısı, sayısal analiz sonuçlarının doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir, ancak gereğinden fazla eleman sayısı da aynı zamanda çözüm süresini uzatmaktadır (Lei ve ark., 2017; Bangga ve ark., 2020). Bu nedenle, uygun eleman sayısında ağ yapısının oluşturulması, herhangi bir sayısal analizin önemli bir parçasıdır. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, eleman boyutunu kontrol etmek için akış alanı ayrıca geometrik özelliklere göre alt hacimlere bölünmüştür. Böylelikle ağ sayısından bağımsızlık çalışması basit bir şekilde tamamlanmıştır. Ağ yapısını oluşturmak için yine ANSYS-Mesh modülü kullanılmış ve yapısal elemanlar

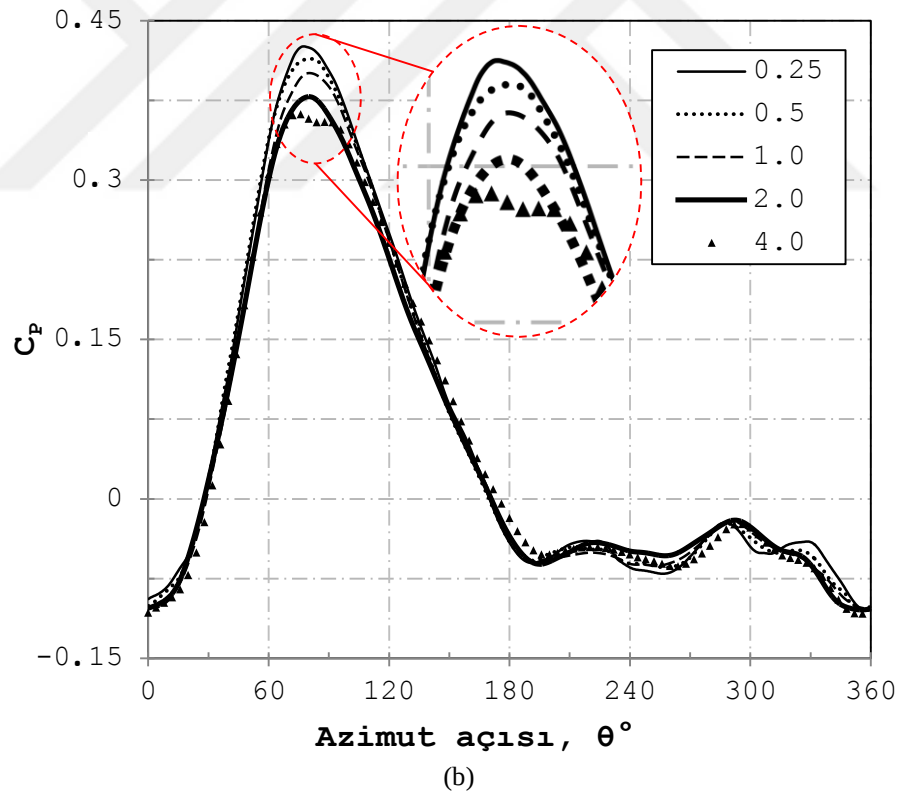
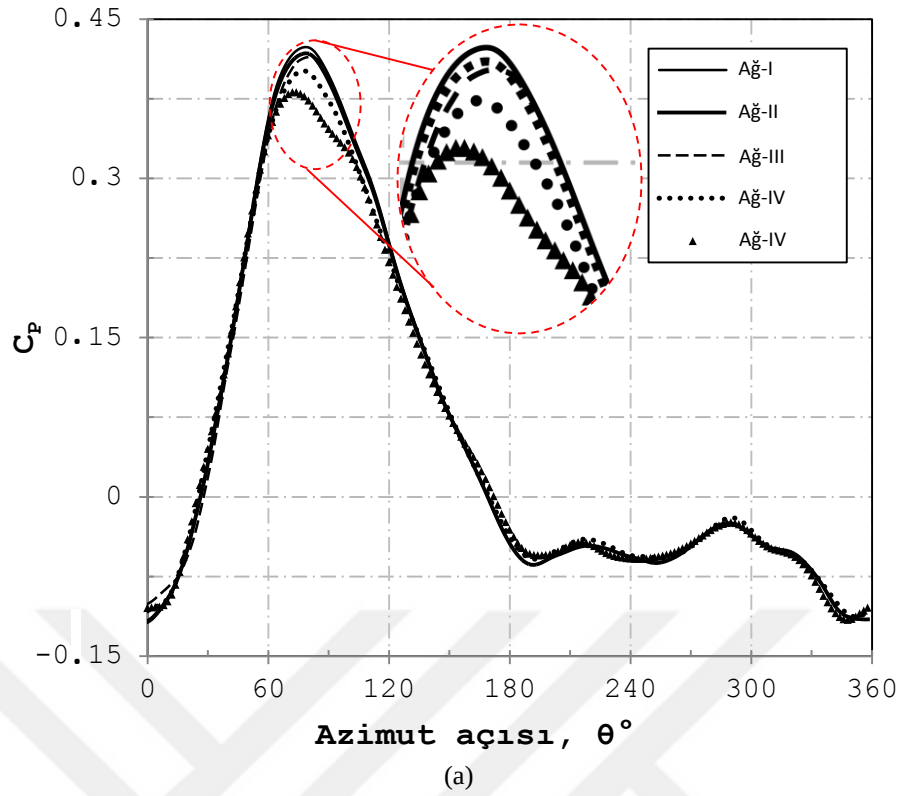
ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 4.10 ve 4.11, akış hacminin farklı bölgelerindeki ağ yapısını ve oluşturulan elemanları göstermektedir.

Analizler için doğru bir ağ yapısı elde etmek amacıyla, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi Ağ-I'den Ağ-V'e kadar beş farklı yoğunlukta ağ yapısından bağımsızlık çalışması incelenmiştir. Ağ yapıları karşılaştırılırken türbinin ortalama ve anlık güç katsayısı sonuçları dikkate alınmıştır. Farklı ağ yapılarından elde edilen güç katsayıları arasındaki fark önemsiz olduğunda analizlerin ağdan bağımsız olacağı düşünülmüştür. Ağ yapısından bağımsızlık çalışması, özellikle akış yapısını ve türbin performansını önemli derecede etkileyen kanat bölgelerindeki eleman boyutu değiştirilerek yapılmıştır. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi, hız ve basınç gradyanlarını tahmin etmek ve viskoz sınır tabakayı araştırmak için, kanadın yüzeyleri üzerinde prizmatik sınır tabaka elemanları oluşturulmuştur. İlk hücrenin yüksekliği, maksimum büyüme faktörü 1.2 olacak şekilde, Ağ-I'den Ağ-V'e sırasıyla 4.7µm'den 19.6µm'ye ayarlanmıştır. Bu şekilde, her ağ yapısı konfigürasyonu için ortalama $y^+ < 1$ gereksinimi sağlanmıştır. y^+ karşılaştırmasına ek olarak, ağ yapısının detayları ve ortalama güç katsayısına bağlı ağ yapısından bağımsızlık çalışmasının sonuçları $\lambda=1.0$ 'da Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Analizlerin çözümünde başlangıç olarak Ağ-III referans ağ yapısı olarak kullanılmıştır. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, eleman sayısının artmasıyla farklı ağ yapıları için elde edilen güç katsayıları arasındaki fark azalmıştır. Referans ağ yapısı Ağ-III ile Ağ-I ve Ağ-II'den elde edilen ortalama güç katsayıları arasındaki fark % 5'ten azdır. Ağ yapısı, Ağ-III'ten Ağ-IV ve Ağ-V'e doğru kabalaşırken, güç katsayıları arasındaki fark artmıştır ve % 10'dan fazladır. Ortalama güç katsayılarına ek olarak, Şekil 4.12(a)'da, bir kanat için bir devir boyunca güç katsayısının azimut açısına bağlı değişimi farklı ağ yapısı konfigürasyonları için verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda türbinin bir devri boyunca güç katsayılarında önemli bir farklılık gözlemlenmemiştir. Ağ-I, Ağ-II ve Ağ-III konfigürasyonlarının güç katsayısı eğrileri birbirine en yakın sonuçları göstermiş ve neredeyse üst üste binerken, Ağ-IV ve Ağ-V eğrilerinde çok az da olsa farklılık oluşmuştur. Güç katsayısı eğrileri arasındaki en belirgin fark, kanadın maksimum güç katsayısı değerine ulaştığı yaklaşık $\theta = 86^\circ$ 'lik azimut açısında gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ağ yapısından bağımsızlık çalışmaları sonucunda, nispeten yüksek doğruluk seviyesi ve hesaplama maliyetleri arasındaki denge dikkate alınarak, yapılan tüm analizler için Ağ-III konfigürasyonu kullanılmıştır. Hidrokinetik türbin çiftliği senaryosunun çift türbin dizisi içinde aynı ağ yapısı kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Ağ yapısının türbinin orta düzleminde detaylı görünümü: (a) hesaplama alanı, (b) dönen bölgenin yakınında, (c) kanadın yanında

Bölüm 3'te vurgulandığı gibi zaman bağımlı HAD analizleri için, zaman adımı büyüklüğü, hem çözüm süresini hem de analizin doğruluğunu etkileyen bir diğer önemli parametredir (Marsh ve ark., 2015). HAD analizine küçük zaman adım büyüklüğü ile başlamak çok fazla çözüm süresine mal olabilirken, yüksek zaman adım büyüklüğü yanlış sonuçlara neden olabilir (Lei ve ark., 2017; Celik ve ark., 2020). Bu nedenle, akış karakteristiğini doğru bir şekilde belirlemek için türbinin farklı azimut artışlarında zaman adımı büyüklüğünden bağımsızlık çalışması incelenmiştir. Zaman adımı büyüklüğünden bağımsızlık çalışması için $0.25^\circ - 4.0^\circ$ arasında beş farklı azimut artışı dikkate alınarak inceleme yapılmıştır (Danao ve ark., 2014). Öncesinde de belirtildiği gibi, zaman bağımlı dönen akış hacminin olduğu analizlerde, azimut artışı anlamına gelen zaman adımı büyüklüğü tanımı, her bir zaman adımında silindirik bir dönen bölgenin dönmesi için geçen süreyi ifade etmektedir. Zaman adım boyutu, Δt , 0.5° 'lik açısal artış Denklem 3.9 ile hesaplanır. $\lambda=1.0$ durumuna karşılık olarak, türbinin açısal hızı yaklaşık $\Omega = 2.4$ rad/s'dir. Bu nedenle, 0.5° 'lik açısal artışın zaman adım boyutu $\Delta t_{0.5^\circ} = 3.63757 \times 10^{-3}$ s olarak hesaplanmıştır. $\lambda=1.0$ 'daki her bir açısal artışa karşılık gelen zaman adımı büyüklükleri Çizelge 4.4'de listelenmiştir.



Şekil. 4.12. $\lambda=1.0$ 'da için güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısına bağlı değişimi : (a) ağ yapısından; (b) zaman adımından bağımsızlık çalışması

Zaman adım büyüklüğünün güç katsayısı üzerindeki etkisi, sırasıyla Çizelge 4.4 ve Şekil 4.12(b) 'de Ağ-III konfigürasyonu kullanılarak ortalama ve anlık güç

katsayıları karşılaştırılarak incelenmiştir. Çizelge 4.4'de gösterildiği gibi, ortalama güç katsayıları arasındaki fark, azimut açısındaki artışla artmıştır. $\Delta t_{0.25^\circ}$ ve $\Delta t_{0.5^\circ}$ arasındaki fark yaklaşık %2.97'dir ve kayda değer bir sonuç elde edilmiştir. Zaman adımı büyüklüğü $\Delta t_{0.25^\circ}$ ve $\Delta t_{0.5^\circ}$ olarak ayarlandığında anlık güç katsayısı eğrileri Şekil 4.12(b)'deki gibi neredeyse çakışmaktadır. En belirgin farklılıklar azimut açısının $\theta=86^\circ$ karşılık gelen maksimum güç katsayısının elde edildiği tepe noktasında meydana gelmiştir. Ancak 1.0° , 2.0° ve 4.0° azimut artışa sahip analizlerde ortalama güç katsayıları arasındaki fark % 10'un üzerindedir. Toplam çözüm süresi ve analiz hassasiyeti göz önüne alındığında, 0.5° 'lik azimut artışı, tüm analizler için zaman adımı büyüklüğü olarak kullanılmıştır. Bu nedenle, zaman adım büyüklüğü, tüm uç hız oranları için Denklem 3.9'a bağlı olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. Farklı azimut artışına bağlı olarak zaman adımı büyüklüğünden bağımsızlık çalışması

Azimut artışı	$\Delta t \times 10^{-3} s$	Ağ yapısı	C_p	Fark (%)
0.25°	1.81879	Ağ-III	0.168	0
0.5°	3.63757	Ağ-III	0.163	2.97
1.0°	7.27514	Ağ-III	0.151	10.12
2.0°	14.55028	Ağ-III	0.144	14.29
4.0°	29.10056	Ağ-III	0.139	17.26

4.3. Araştırma Sonuçları

Deneyler ve LES sonuçları bu bölümde karşılaştırılarak incelenmiştir. İlk olarak $\lambda=0.5-1.4$ aralığında deneysel ve LES sonuçlarından elde edilen performans eğrileri oluşturulmuştur. Sonrasında türbinin maksimum güç katsayısına ulaştığı çalışma noktasında türbin art izi bölgesindeki akış yapısı hem deneysel PIV yöntemi ile hem de LES türbülans modelinin kullanıldığı analiz sonuçları akış karakteristiğine ait bileşenler karşılaştırılarak incelenmiştir. Akış alanındaki sonuçlar hem akış konturları ile hem de akış bileşenine ait profillerle karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Türbin performansının karşılaştırılması

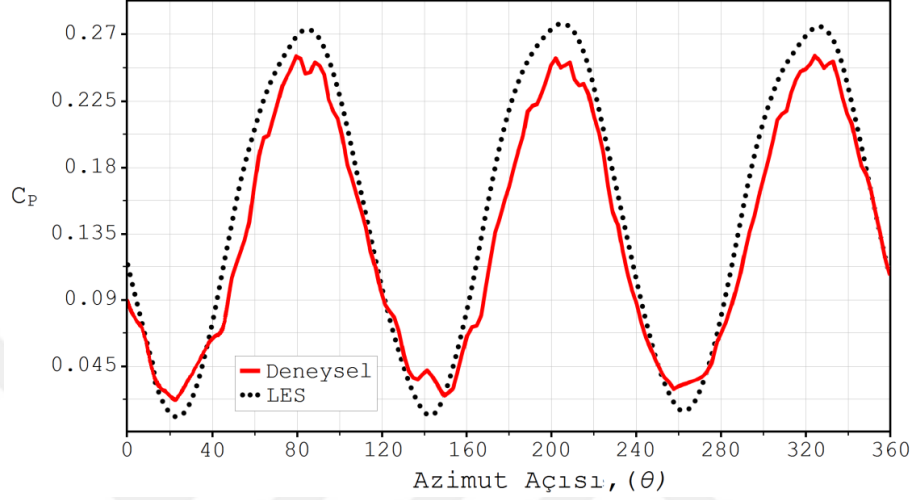
Türbin performansının boyutsuz ifadesi olan güç katsayısı, bir türbinin akış enerjisini ne kadar verimli bir şekilde dönüştürdüğünü ifade eden önemli bir parametredir. Literatürdeki deneysel çalışmalarda genellikle statik tork ölçümü yaptıkları için ortalama güç katsayılarının uç hız oranı ile değişimi sunulmaktadır. Tez

kapsamında ise dinamik tork ölçümüne bağlı olarak türbinin bir devir boyunca elde edilen torku kaydedilmiştir. Şekil 4.13’de, $\lambda=1.0$ ’de bir devir boyunca, deneysel ve LES modeli arasındaki güç katsayısının azimut açısına bağlı değişimi verilmiştir. Anlık güç katsayısı eğrilerinin hem deneysel hem de LES sonuçlarında yirmi devir boyunca kaydedilen anlık güç katsayılarının ortalaması alınarak oluşturulmuştur. LES analizlerinde Şekil 4.9’daki akış hacminde de görüldüğü gibi kanat uç plakası kullanılmamıştır. Deneylerde ise kanatlardan elde edilen gücü türbin şaftına aktarmak için Şekil 4.14’deki gibi bir uç plakası kullanılmıştır. Ancak, montaj halinde çalışırken ölçülen tork değeri, türbin şaftındaki destek, uç plakası ve mekanik sürtünmeyi içeren direnç torku nedeniyle türbin kanatlarının gerçek hidrodinamik performansını temsil etmemektedir. Böylelikle deneysel sonuçları, LES sonucundan elde edilen güç katsayısı sonuçları ile karşılaştırmak yanlış olacaktır. Bu nedenle, gerçek kanat performansını elde etmek için tork ölçümleri her uç hız oranında önce kanatların türbin uç plakasına bağlı ($T_{türbin}$) iken yapılmıştır. Sonrasında, uç plakası üzerinden kanatlar sökülerek ölçüm sistemi aynı uç hız oranlarında kanatsız ($T_{direnç}$) çalıştırılarak tork ölçümleri yapılmıştır. Tork ölçüm sırasında, tork sensörü konum (azimut açısı) ölçümü de yaptığından dolayı, ölçümlerden elde edilen sonuçlar aynı azimut açısına karşılık gelecek şekilde birbirinden çıkarılarak türbin kanatlarından elde edilen net tork ($T_{kanatlar}$) hesaplaması Denklem 4.7 kullanılarak yapılmıştır.

$$T_{kanatlar} = T_{türbin} - T_{direnç} \quad (4.7)$$

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi deneysel çalışmalarda direnç torku çıkarılan türbinden elde edilen kanat güç katsayısının azimut açısına bağlı değişimi ve LES türbülans modelinin kullanıldığı analiz sonuçlarından elde edilen güç katsayısı eğrileri ile iyi bir uyum içerisinde. Güç katsayısının anlık eğrileri incelendiğinde azimut açısının $22^\circ < \theta < 86^\circ$ aralığında, güç katsayısı azimut açısının artışı ile hızla artmaktadır. Azimut açısı $\theta=86^\circ$ ’de iken türbin maksimum güç katsayısına ulaşmıştır ve bundan sonra türbin kanadı stol olarak güç katsayısı hızla düşmüştür. Stol noktası geçildikten sonra, güç katsayısının değeri tekrar azalmıştır. Üç kanatlı türbin konfigürasyonu nedeniyle, güç katsayısındaki dalga boyu 120° azimut açısı aralığıyla bir devir boyunca tekrarlanmaktadır. Bu nedenle türbinin bir devri boyunca güç katsayısı eğrisinde, üç maksimum ve minimum tepe noktası meydana gelmektedir. Hem LES hem de deneysel sonuçlardan elde edilen güç katsayısının minimum değerleri, negatif değer almamıştır.

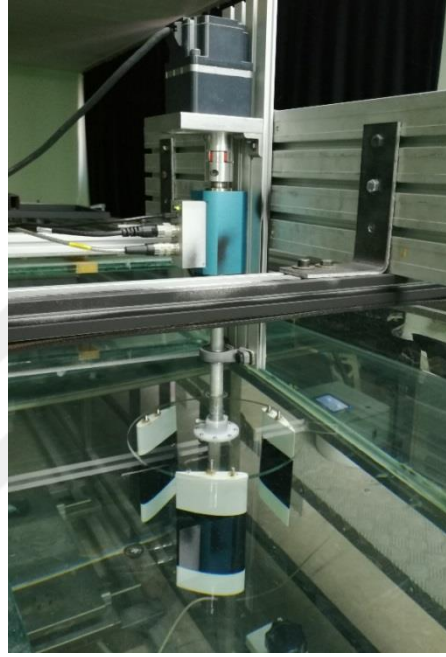
Bu durum türbinin, bu çalışma koşullarında kendi kendine çalışmaya başlama kabiliyetine sahip olduğunun da göstergesidir. Anlık sonuçlardan elde edilen güç katsayısının bir devir boyunca azimut açısına bağlı ortalaması deneysel ve LES modeli için $\lambda=1.0$ 'da sırasıyla $C_p=0.146$ ve $C_p=0.163$ olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve LES sonuçlarından elde edilen güç katsayıları arasındaki fark yaklaşık %10 civarındadır.



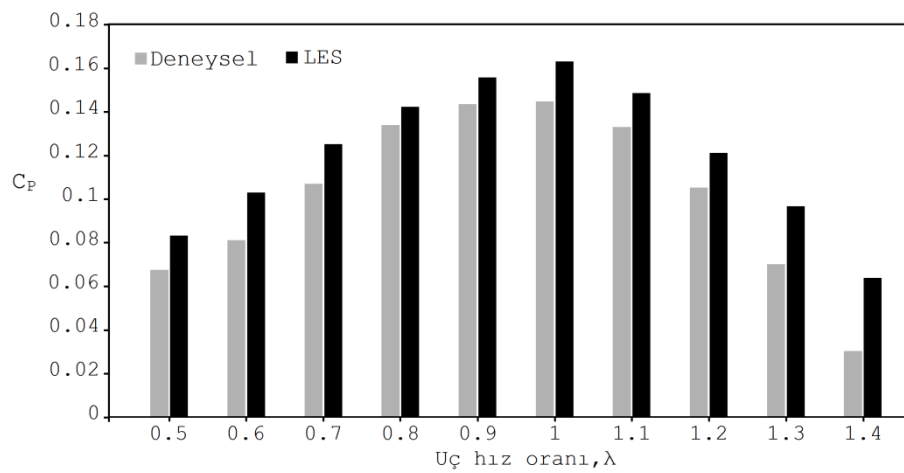
Şekil 4.13. $\lambda=1.0$ 'de türbin güç katsayısının azimut açısına bağlı değişimi

Şekil 4.15'de, uç hız oranının $\lambda=0.5-1.4$ aralığında, deneysel ve LES sonuçlarından elde edilen ortalama güç katsayısının, değişimi verilmiştir. Ortalama güç katsayısı eğrisinden, LES sonuçlarının deneysel sonuçlarla çok iyi uyduğu ve $\lambda=1.0$ 'da optimum uç hız oranını doğru bir şekilde elde ettiği açıkça görülmektedir. Optimum uç hız oranı, türbinin maksimum güç katsayısına karşılık gelen çalışma koşullarının belirlenmesi olarak ifade edilebilir. Türbin maksimum ortalama güç katsayısına $\lambda=1.0$ 'da ulaştıktan sonra uç hız oranının artmasıyla, türbin silindirik katı bir model gibi davranmaktadır. Bu nedenle türbinin akışkanın gücünü mekanik güce dönüştürme kabiliyeti azalmaktadır. Ayrıca incelenen uç hız oranı aralığında ortalama güç katsayısı değerlerinde, LES analiz sonuçları deneysel sonuçlardan biraz daha yüksek çıkmıştır. Uç hız oranının $\lambda=0.5-1.2$ aralığındaki güç katsayısı farklılıkları % 10'dan azdır. Deneysel ve LES sonucundan elde edilen ortalama güç sayısı farklılıkları $\lambda=1.3$ 'den sonra artmaktadır ve $\lambda=1.4$ 'de fark yaklaşık % 42.4 civarındadır. Yüksek uç hız oranlarında deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasındaki farklılıklar, Li ve ark. (2013) tarafından da vurgulanmış ve bu duruma birçok faktörün neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenlerden birinin, yüksek uç hız oranlarında türbinin bariyer etkisine neden olabilecek geometrik özellikleri ile ilgili olabileceği, diğerinin ise yine

yüksek uç hız oranlarında deneylerdeki bazı tespit edilemeyen güç kayıpları ve belirsizliklerden kaynaklanabileceğini vurgulamışlardır. Genel olarak, anlık ve ortalama güç katsayısı dikkate alındığında, LES sonucundan elde edilen değerlerin, deneysel tork ölçüm sonuçlarıyla iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, dikey eksenli türbinlerin performans araştırmasına dair gelecekteki çalışmalarda, LES türbülans modeli, HAD analizlerinde uygun ve uygulanabilir bir türbülans modeli olarak kullanılabilir.



Şekil 4.14. Su kanalın içerisinde türbin modeli, tork sensörü ve tahrik sistemi montajı



Şekil 4.15. Deneysel ve LES türbülans modeli için güç katsayılarının uç hız oranına bağlı değişimi

4.3.1.1. Performans deneylerindeki belirsizlik analizi

Tez kapsamında güç katsayısı için sonuçların doğru yorumlanabilmesi ve karşılaştırılması adına belirsizlik analizi yapılmıştır. Herhangi deneysel ölçümde sonuç, R , n adet ölçülmüş parametreye ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) bağlı olarak değişiyor ise sonuç bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak:

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.8)$$

ifade edilir. Ölçüm aletlerinin hassasiyeti ve belirsizliklerine göre ise bu sonucun belirsizliği, w_R :

$$w_R = \left[\sum \left(w_{x_i} \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

eşitliği ile hesaplanır (Kline, 1953; Cavagnaro ve Polagye, 2016).

Tez kapsamında sunduğumuz türbinin güç katsayısı Denklem 1.11’de belirtildiği gibi $C_p = \frac{T\Omega}{0.5\rho AU_\infty^3}$ türbinden üretilen torka, türbinin açısal hızına, türbinin taradığı alana, kanal içerisindeki akışkanın hızına ve akışkanın yoğunluğuna bağlıdır. Türbin çapı ve yüksekliğine bağlı olarak taradığı alan ve akışkanın yoğunluğunun önemli bir belirsizliğe sahip olmadığı varsayılmıştır. Çizelge 4.5’te ise güç katsayısının belirlenmesinde kullanılan ölçüm aletlerinin her biri için belirsizlik değerleri, üretici firmaların spesifikasyonlarına göre verilmiştir. Tork ölçümünde kullanılan Kistler marka tork sensörünün belirsizliği üretici kataloglarında $\pm 0.1\%$ olarak verilmiştir (EK-1). Vexta marka servo motor üzerinden yapılan açısal hız ölçümü için belirsizlik değeri ise yine üretici firma kataloglarında $\pm 0.5\%$ olarak verilmiştir (EK-2). Kanal içerisindeki akışkanın hızının ölçümünde kullanılan PIV ölçüm sisteminin toplam belirsizliği ise deneysel kurulum, akış özellikleri, kullanıcı girdileri ve PIV algoritması gibi çeşitli faktörlere bağlıdır ve bu nedenle sistemin toplam belirsizliğini doğru tahmin edilmesi zordur (Stanislas ve ark., 2005; Westerweel ve ark., 2013). Bunlardan bazıları; hız ölçümü için kullanılan gümüş kaplı partiküllerin çapı, bu partiküllerin birbirine yapışma durumu, görüntü alanındaki partikül yoğunluğu, kamera lenslerinin açısı, kamera-lazer odağı ve açısı, görüntü alanındaki lazer kalınlığı, lazerin kanal duvarından geçerken ki

kırılma miktarı, ölçüm alanındaki parlamalar ve yansımalar, ölçüm sistemini kullanan insan odaklı hatalar vb. gibi pek çok neden PIV sisteminin belirsizliğini büyük ölçüde etkilemektedir.

Çizelge 4.5. Güç katsayısı hesaplamada kullanılan cihazların belirsizliği

Cihaz	Ölçülen Büyüklük	Birim	Belirsizlik (%)
Dantec PIV	Hız	m/s	$\sim \pm 1.5$
Kistler Dual Range Torque Sensor 4503B model tork sensörü	Tork	Nm	$< \pm 0.1$
Vexta BLH5100KC servo motor hız sensörü	Açısal hız	rad/s	± 0.5

Literatürde PIV sisteminin kullanıldığı su kanalı içerisinde yapılan deneylerde bazı hesaplanan ve tahmin edilen belirsizlik değerlerinin Çizelge 4.6’da listelendiği gibi % 2-% 4 civarında olduğu belirtilmiştir. Träsch ve ark. (2020) $U_\infty=1\text{m/s}$ hızında su kanalı içerisinde yaptıkları PIV deneylerinde Dantec marka cihaz kullanmışlar ve hız belirsizliğini % 2.6 tahmin etmişlerdir. Bir diğer çalışmada Ikhennicheu ve ark. (2019) yılında yaptıkları çalışmada PIV sistemi için belirsizlik analizini hesaplamışlar ve akış hızının $U_\infty=1\text{m/s}$ olduğu su kanalı içerisinde PIV ölçüm sisteminin belirsizliğini bazı kabuller yaparak % 2.6 olarak hesaplamışlardır. Araya ve Dabiri (2015) dikey eksenli türbini inceledikleri çalışmalarında, su kanalı içerisindeki akış alanını PIV yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Kanal içerisindeki su hızının $U_\infty=0.26\text{m/s}$ olduğu deneylerde LaVision marka PIV cihazı kullanmışlar ve kanal içerisindeki hız için belirsizliği % 2 olarak tahmin etmişlerdir. Lust ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada yatay eksenli su türbini için kanat bölgesindeki akış yapısını TSI marka PIV sistemi ile görüntülemişlerdir. Akış hızının $U_\infty=1.68\text{m/s}$ olduğu su kanalında belirsizliği % 2 olarak belirlemişlerdir. Durhasan ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada Dantec marka cihaz kullanmışlar ve su hızının $U_\infty=0.1\text{m/s}$ olduğu deneylerde belirsizliğin % 3’ten düşük olduğunu kabul etmişlerdir. Aynı deney düzeneğinin kullanıldığı diğer bir çalışmada ise Firat ve ark. (2017) akış hızının $U_\infty=0.175\text{m/s}$ olduğu deneylerde belirsizliğin % 4’ten düşük olduğunu tahmin etmişlerdir. Ozkan ve ark. (2021) $U_\infty=0.4\text{m/s}$ olduğu deneylerde LaVision marka stereo-PIV kullanmışlar ve belirsizliği % 2’den küçük olarak tahmin etmişlerdir. Literatürde de yapılan birçok çalışma değerlendirildiğinde, akışkan hızından ve kullanılan cihazdan bağımsız olarak, PIV ile yapılan hız ölçümlerinde bazı çalışmalar da kabuller yaparak belirsizliği hesaplamışlar, çoğu çalışmada ise PIV ölçüm sisteminin belirsizliği tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.6. Literatürde su kanalı içerisinde yapılan deneylerde bazı hesaplanan ve tahmin edilen PIV sisteminin belirsizlik değerleri

Yazar	Marka	Akış hızı (m/s)	Belirsizlik (%)
Träsch ve ark. (2020)	Dantec	1.0	<2.6
Ikhennicheu ve ark. (2019)	Dantec	1.0	<2.6
Araya ve Dabiri (2015)	LaVision	0.26	<2.0
Lust ve ark. (2018)	TSI	1.68	<2.0
Durhasan ve ark. (2018)	Dantec	0.1	<3.0
Firat ve ark. (2017)	Dantec	0.175	<4.0
Ozkan ve ark. (2021)	LaVision	0.4	<2.0

Tez kapsamında kullanılan Dantec marka PIV cihazının çalıştırılma koşullarına bağlı olarak literatürdeki kabul edilen değerler dikkate alınmış ve hız ölçüm sisteminin belirsizliği %1.5 kabul edilmiştir. Güç katsayısı için toplam belirsizlik ise Denklem 4.10 kullanılarak hesaplanmıştır. Maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.0$ uç hız oranı için güç katsayısının belirsizliği örnek olarak hesaplanmış ve EK-3'te verilmiştir. Tez kapsamında incelenen uç hız oranının $\lambda=0.5-1.4$ aralığında deneysel güç katsayısı sonuçlarının belirsizlik sonuçları Çizelge 4.7'deki gibi hesaplanmıştır (Kline, 1953; Cavagnaro ve Polagye, 2016; Hilewit ve ark., 2019).

$$w_{C_P} = \pm \left[\left(\frac{\partial C_P}{\partial T} w_T \right)^2 + \left(\frac{\partial C_P}{\partial \Omega} w_\Omega \right)^2 + \left(\frac{\partial C_P}{\partial U_\infty} w_{U_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

$$\frac{w_{C_P}}{C_P} \times 100 \quad (4.11)$$

Çizelge 4.7. Farklı uç hız oranları için deneysel güç katsayısının belirsizlik analizi sonuçları

λ	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
C_P	0.067	0.081	0.107	0.134	0.143	0.146	0.132	0.105	0.072	0.031
% P Belirsizliği	1.78	1.76	1.55	1.41	1.48	1.61	1.93	2.66	4.21	10.52
% C_P Belirsizliği	15.41	15.40	15.38	15.36	15.37	15.38	15.42	15.54	15.89	18.68

Türbinden ölçülen gücün belirsizliği ise $\lambda=0.5-1.3$ aralığında % 5'in altındadır. $\lambda=1.4$ 'te ise türbinden elde edilen gücün belirsizliği % 10 civarındadır. PIV sistemi ile yapılan hız ölçümündeki belirsizlik % 1.5 kabul edildiğinde, deneysel çalışma sonucu elde edilen güç katsayısının belirsizliği $\lambda=0.5-1.3$ aralığında yaklaşık % 15, $\lambda=1.4$ 'te ise yaklaşık % 18 civarındadır. Literatürde dikey eksenli türbinlerin deneysel performanslarının incelendiği bazı çalışmalarda ise belirsizlik analiz sonuçları şu şekilde sunulmuştur: Howell ve ark. (2010) rüzgar tüneline yaptıkları Darrieus tipi türbinin belirsizlik analizlerinde türbin torkundaki belirsizliğin %5'e kadar, güç

katsayısındaki belirsizliğin ise %20'ye kadar çıktığını belirtmişlerdir. Maître ve ark. (2013) ise kapalı su tüneline yaptıkları deneylerde Darrieus türbini için maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=2.0$ 'da, güç katsayısının belirsizliğini yaklaşık % 11 civarında hesaplamışlardır. Araya ve Dabiri (2015) yaptıkları çalışmada PIV yöntemini kullanmışlar ve hız ölçümündeki belirsizliğin % 2 civarında olduğunu vurgulamışlardır. Güç ölçümü yaptıkları çalışmada ise torkun belirsizliğinin maksimum torkun elde edildiği $\lambda=1.0$ 'da yaklaşık olarak % 20 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Sabaeifard ve ark. (2012) ise Darrieus tipi türbin ile yaptıkları deneylerde güç katsayısının belirsizliği maksimum güç katsayısının elde edildiği çalışma noktasında % 12.5 civarında hesaplamışlardır.

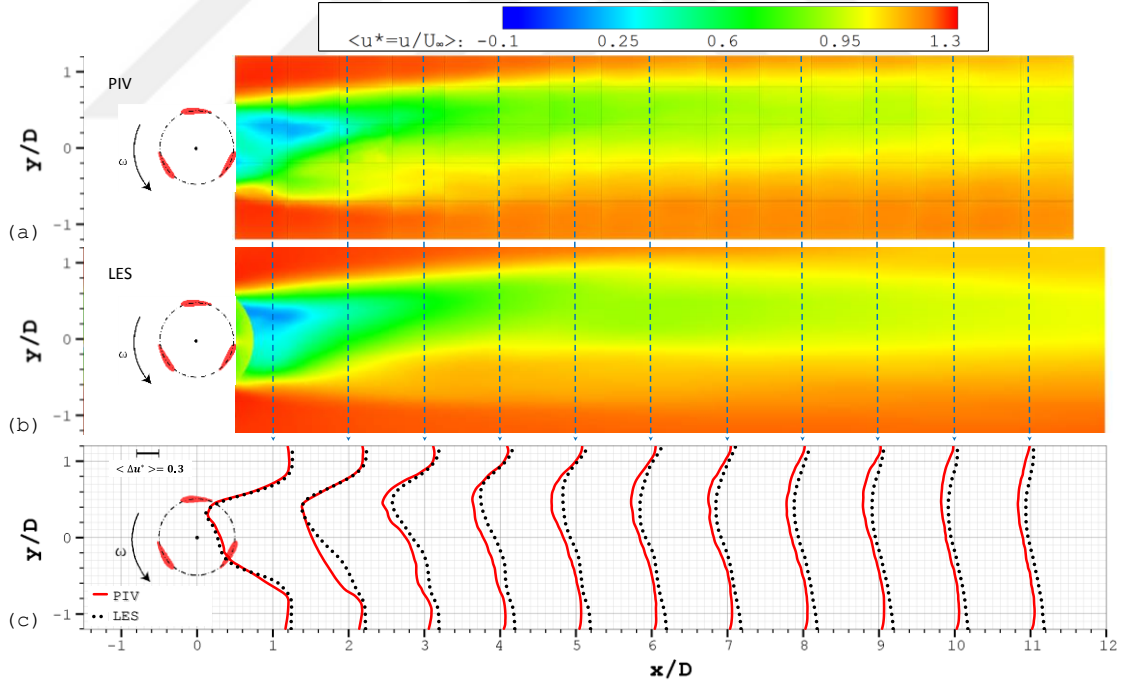
Cavagnaro ve Polagye (2016)'nın da vurguladığı gibi hesaplanan belirsizlik analizi sonuçlarında, güç katsayısı hızın küpüyle orantılı olduğundan, hız ölçümündeki belirsizlik güç katsayısı için en büyük deneysel belirsizliğe sebep olmaktadır.

4.3.2. Art izi bölgesindeki akış yapısının PIV ve LES yöntemi ile incelenmesi

Bu bölümde, türbinin art izi bölgesinde PIV ve LES sonuçlarından elde edilen ortalama akış özellikleri, Şekil 4.16-4.19 niteliksel ve niceliksel olarak karşılaştırılmıştır. Art izi bölgesindeki akış yapısını incelemek için türbinin maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranı $\lambda=1.0$ 'da çalıştırılmıştır. Ortalama akış özelliklerinin tümü türbinin yatay orta düzleminde türbin kanat yolunun sınırı $0.5D$ 'den alt akış yönünde $12D$ mesafeye kadar incelenmiştir. Akış yönündeki (x) ve akışa dik yöndeki (y) eksenler, türbin çapı D ile boyutsuzlaştırılmıştır. Türbin orijin noktasında merkezlenmiştir ve saat yönünün tersi yönde dönmektedir. Akış alanları üzerindeki dairesel siyah kesikli çizgi, türbin kanatlarının yolunu temsil etmektedir. Her akış bileşeninin boyutsuz değerleri, maviden kırmızıya doğru artan sürekli kontur grafikleri ile sunulmuştur.

Şekil 4.16'da, türbin art izi bölgesindeki serbest akış hızı U_∞ ile boyutsuzlaştırılmış akış yönündeki ortalama hız bileşeni $\langle u^* = u/U_\infty \rangle$ gösterilmektedir. Akış yönündeki ortalama hız bileşenlerinden görüldüğü üzere PIV ve LES sonuçları birbirleriyle iyi bir uyum içerisindedir. Hidrokinetik türbin, suyun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek enerjisini almaktadır ve böylece art izi bölgesinde düşük hızlı bir bölge oluşturmaktadır. Türbinin art izi bölgesindeki akış yapısı incelendiğinde, akış yönündeki hız dağılımının simetrik olmadığı açıkça görülmektedir (Şekil 4.16).

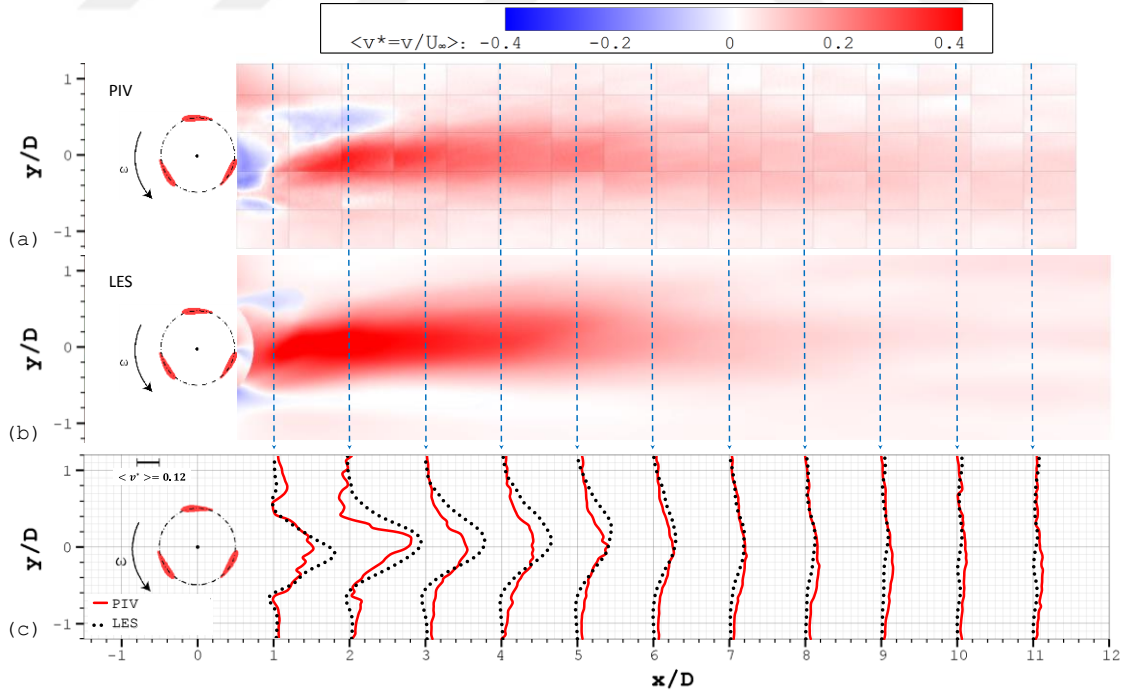
Türbin azimut açısının $270^\circ < \theta < 90^\circ$ (pozitif y bölgesi) aralığında olduğunda, üst bölgede kalan kanat serbest akışa ters yönde hareket ettiğinden dolayı hız düşüşü pozitif y bölgesinde daha yüksek olmaktadır. Bundan dolayı art izi bölgesinde simetrik olmayan akış yapısı oluşmaktadır. Türbin azimut açısının $90^\circ < \theta < 270^\circ$ (negatif y bölgesi) aralığında olduğunda, türbinin alt tarafındaki kanat serbest akış hızıyla aynı yönde hareket etmektedir. Bu nedenle, art izinde pozitif y bölgesindeki hız düşüşü negatif y bölgesine göre daha güçlüdür. Maksimum hız düşüşü, türbinin hemen yakınındaki art izi bölgesinde yaklaşık olarak $x/D=1.2$; $y/D=0.3$ 'te meydana gelmiştir. Bu bölgede aynı zamanda ters akış bölgeleri de oluşmuştur. Türbinin x -eksenine yakın bölgede büyük hız düşüşü olmasına rağmen, kanal duvarlarının blokaj etkisinden dolayı, akış türbin ile karşılaştıktan sonra, türbinin direnç etkisi nedeniyle duvarlara doğru yönelmiştir. Duvara yönelen akış hızlanmış ve serbest akış hızından yaklaşık % 30 daha yüksek bir değer almıştır. Kanal duvarları nedeniyle hızlanan yüksek hızlı akış türbinin art izi bölgesindeki düşük hızlı bölgeye yönelerek art izi bölgesindeki hız geri kazanımı başlamış olur.



Şekil 4.16. Türbinin orta düzleminde art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış akış yönündeki ortalama hız bileşeni ($\langle u^* \rangle$) (a) PIV; (b) LES; (c) akış yönündeki hız farkının profil dağılımı ($\Delta u^* = \frac{u^* - U_\infty}{U_\infty}$)

Akışa dik yönde, bir türbin çapı aralıklarla $1D$ 'den $11D$ 'ye kadar çizdirilen ortalama akış yönündeki hız profilleri (Şekil 4.16(c)), türbinin PIV ve LES

sonuçlarından elde edilen art izi bölgesindeki akış yapısı nicel olarak karşılaştırılmıştır. Akış konturlarından inen dikey mavi çizgiler, her profil istasyonu için serbest akışa karşılık gelen büyüklüğü vurgulamaktadır. PIV ve LES sonuçlarının hız profili değerleri birbirleriyle karşılaştırılarak şekil üzerinde gösterilen birim kare başına düşen büyüklük değeri ile ifade edilmiştir. Akış yapısındaki asimetriklik, hız profillerindeki dağılımdan açıkça görülmektedir. Hız profilleri arasında küçük farklılıklar olmasına rağmen, PIV ve LES arasındaki iyi uyum kabul edilebilir düzeydedir. $x/D=6$ konumundan sonra, hız profiline eğrileri PIV ve LES için birbirine çok yakındır. Türbin art izi bölgesindeki akışın geri toparlanması için uzunca bir mesafeye ihtiyaç olduğu hız profillerinden açıkça görülmektedir. PIV ve LES sonuçları için sırasıyla $x/D=6$; $y/D=0.5$ konumunda akış yönündeki minimum ortalama hız değerleri serbest akış hızının yaklaşık % 73 ve % 82'sine karşılık gelmektedir. Art izi bölgesinde alt akış yönünde ilerledikçe, hız değerleri serbest akış koşullarına yaklaşmaktadır ve pozitif y bölgesinde akış yönündeki ortalama minimum hız değeri, sırasıyla PIV ve LES için $x/D=11$ 'de serbest akış hızının % 84 ve % 94'üne karşılık gelmektedir. Negatif y bölgesinde ise $x/D=9$ pozisyonundan sonra, PIV ve LES sonuçlarından elde edilen akış yönündeki ortalama hızlar arasındaki fark azalmış ve serbest akış hızına yaklaşmıştır.

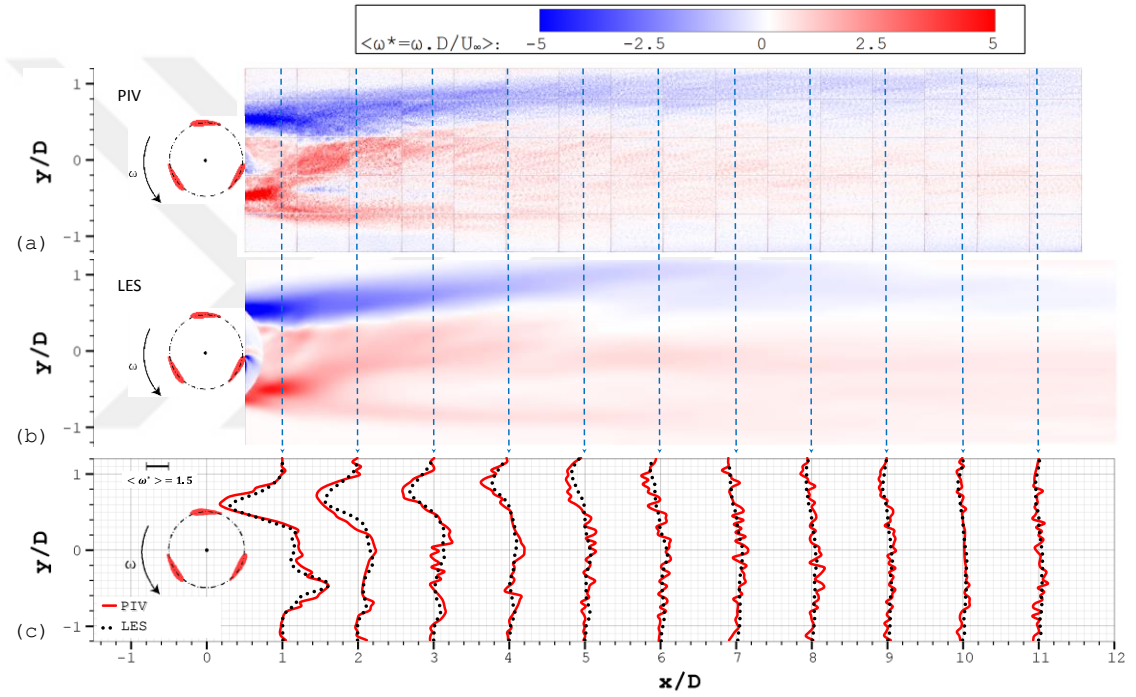


Şekil 4.17. Türbinin orta düzleminde art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış akışa dik yöndeki ortalama hız bileşeni ($\langle v^* \rangle$) (a) PIV; (b) LES; (c) akışa dik yöndeki hız profili

Şekil 4.17’de, akışa dik yöndeki boyutsuzlaştırılmış ortalama hız bileşeninin ($\langle v^* = v/U_\infty \rangle$) art izi bölgesindeki değişimi verilmiştir. Türbinin hemen yakınındaki art izi bölgesinde akışa dik yöndeki ortalama hız bileşeni serbest akış hızının yaklaşık % 40’ına kadar ulaşmıştır, bu nedenle incelenmesi gereken bir bileşendir. Türbinin dönmesiyle birlikte, türbin serbest akışa yanal bir kuvvet uygular ve bu da art izi bölgesindeki akışa dik yönde bir moment uygulamaktadır. Bu durum akışın dik yöndeki hızın artmasına neden olmaktadır. Akışa dik yöndeki negatif hız kümesi art izi bölgesinde pozitif y bölgesinde oluşmaktadır ve PIV’de $x/D=2.3$; $y/D=0.5$ ’ten ve LES’de $x/D=1.6$; $y/D=0.6$ ’dan sonra kaybolmuştur. Bu nedenle, akışa dik yöndeki hız bileşeni yön değiştirmiştir ve türbinin yakın art izi bölgesinde negatif y bölgesinde ki değeri azalmış, pozitif y bölgesine doğru kademeli olarak kaymıştır. Hem PIV hem de LES sonuçlarında $x/D=2.0$; $y/D=0.1$ ’de akışa dik yöndeki ortalama hız bileşeni türbinin art izi bölgesinde maksimum değerine ulaşmıştır. Bu bölgedeki PIV ve LES sonuçları arasındaki fark yaklaşık % 10 civarındadır. Negatif y bölgesindeki akışa dik yöndeki ortalama hız bileşenlerinin değeri, $x/D=9$ ’dan sonra sıfıra yaklaşmıştır. $x/D=10$ ’dan sonra, akışa dik yöndeki hız bileşeni değeri profil boyunca sıfıra çok yakındır. Türbinin alt akış bölgesindeki akışa dik yöndeki hız bileşeni sonuçları, PIV ve LES sonuçlarının iyi uyum içerisinde olduğunu göstermiş ve LES’in deneysel sonuçları iyi bir şekilde temsil ettiği görülmüştür.

PIV ve LES sonuçlarından elde edilen türbinin orta bölümündeki boyutsuzlaştırılmış ortalama girdapların $\langle \omega^* = \omega.D/U_\infty \rangle$ karşılaştırması Şekil 4.18’de verilmiştir. PIV ve LES sonuçları arasındaki ortalama girdapların uyumu, akış yönünde ve akışa dik yöndeki hız bileşenlerinde açıkça görülmektedir. Mavi renk ile gösterilen girdaplar saat yönünde döndüğünü; kırmızı renk ile gösterilenler ise saat yönünün tersine döndüğünü göstermektedir. Saat yönünde dönen negatif girdaplar, kanadın $\theta=0^\circ$ azimut açısına yaklaştığı bölgede, kanatların firar kenarından kopan girdapların ortalamasından oluşmaktadır. Pozitif girdaplar ise, kanadın yaklaşık $\theta=86^\circ$ azimut pozisyonundan sonra stol durumundan dolayı kanadın hücum ve firar kenarlarından kopan girdapların ortalamasından oluşmaktadır. Negatif girdaplar, pozitif girdaplardan önemli ölçüde daha büyük ve daha baskındır. Negatif girdaplar alt akış boyunca uzamıştır. Ancak yaklaşık $x/D=3$ ’ten sonra, pozitif girdaplar türbine yakın art izi bölgesinde yayılmaya başlamıştır ve negatif girdapları sönmeye başlamıştır. Her ne kadar negatif ve pozitif girdaplar maksimum değerlerine yaklaşık olarak $x/D=1$; $\pm y/D=0.5$ ’de ulaşsa da, ortalama girdap profillerinden açıkça görüldüğü gibi

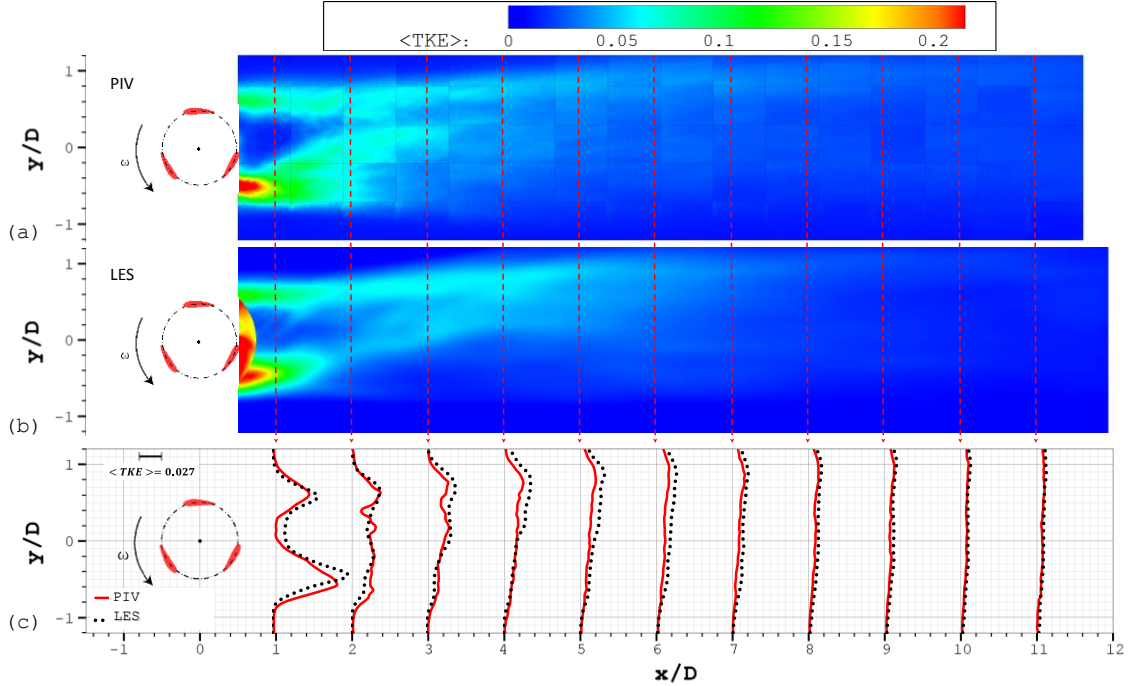
negatif ve pozitif girdap çiftleri birbirlerinden farklı büyüklükte dirler. Negatif girdapların maksimum büyüklükleri, PIV ve LES sonuçlarından sırasıyla $x/D = 1$ 'de yaklaşık $\langle \omega^* \rangle = -3.6$ ve $\langle \omega^* \rangle = -4.2$ olarak bulunmuştur. Ancak, pozitif girdapların maksimum değ erleri birbirine çok yakındır ve yaklaşık $\langle \omega^* \rangle = 3.0$ 'dır. Girdap konturlarından da görüldüğü gibi, pozitif girdaplar art izi bölgesinde ilerledikçe karışarak kaybolurken, negatif girdaplar art izi boyunca kanal duvarına doğru genişlemektedir. Art izi bölgesinde türbine yakın bölgede yüksek enerjili girdap kümeleri oluşmasına rağmen, $x/D=9$ 'dan sonra hem pozitif hem de negatif girdapların büyüklükleri neredeyse sıfırdır.



Şekil 4.18. Türbinin orta düzleminde art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış girdap konturları ($\langle \omega^* \rangle$) (a) PIV; (b) LES; (c) girdap profili

Türbülans kinetik enerji, TKE, bir türbin çiftçiliği uygulamasında türbin art izini karakterize etmek için önemli bir parametredir. Çünkü türbin çiftliklerinde üst akışa yerleştirilen türbinin art izi bölgesindeki hız geri kazanımı ve türbülansa bağlı ikinci türbin üzerindeki düzensiz yükleri, türbin performansını ve türbin ömrünü etkilemektedir. Ayrıca, TKE türbinin akış üzerinde nasıl bir türbülans oluşturduğunun anlaşılmasını da sağlamaktadır. Şekil 4.19, PIV ve LES sonuçları için serbest akış hızının karesiyle boyutsuzlaştırılmış türbülans kinetik enerjinin konturlarını ve akışa dik yöndeki profil dağılımını göstermektedir. Her iki yöntemde de, $y/D=\pm 0.5$ konumunda

türbine yakın iki tepe bölgesinin meydana geldiği açıkça görülmektedir. TKE'nin büyüklüğü negatif y bölgesinde daha yüksektir. Bunun en büyük nedeni kanadın stol olmasıyla açıklanabilir. Kanadın stol durumu büyük girdap kopmalarına neden olduğundan, bu bölgede hız çalkantıları artmaktadır. Pozitif y bölgesindeki türbülans kinetik enerji değeri ise, fırr kenarından kopan girdaplar nedeniyle daha düşüktür. TKE, $x/D=0.8$ 'e yakın noktada maksimuma ulaştıktan sonra, türbülanslı bölge alt akış yönünde de genişlemiştir ve TKE değeri azalmaya başlamıştır. Akış, alt akış yönünde ilerledikçe, $\pm y$ tarafındaki TKE'nin iki maksimum değeri PIV'de yaklaşık $x/D=2.6$; $y/D=0.35$ 'te ve LES sonuçlarında $x/D=3.0$; $y/D=0.4$ noktasında birbiri ile karşılaşmaktadır. TKE konturlarına ek olarak, akışa dik yönde çizdirilen TKE profilleri, TKE dağılımını nicel olarak daha açık bir şekilde göstermektedir. Türbinin hemen yakınındaki art izi bölgesinde, TKE profilleri, $y/D=\pm 0.6$ 'da iki maksimumdan oluşan akışa dik yönde 'W' şeklinde bir profile sahiptir. Hız ve girdap karşılaştırmasında olduğu gibi TKE için de LES sonuçları PIV sonuçlarıyla iyi bir uyum içindedir ve doğrulanmıştır. Bu iki tepe noktası, türbin art izinde alt akış yönünde ilerledikçe yok olmuştur. Türbinden uzakta ise, türbinden kopan girdapların enerjisi zayıfladığından, TKE'nin değeri azalır ve neredeyse sıfıra yakındır ve $x/D=10$; $y/D=1.0$ konumundaki maksimum TKE değeri yaklaşık 0.009'dur.



Şekil 4.19. Türbinin orta düzleminde art izi bölgesindeki boyutsuzlaştırılmış TKE (a) PIV; (b) LES; (c) TKE profili

Art izi bölgesindeki akış karakteristiklerine ait konturlar ve profiller dikkate alındığında, LES modeli ile hesaplanan 3-D HAD sonuçları deneysel PIV sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Art izi bölgesindeki akış karakteristiğine dair en büyük farklılıklar, türbinin hemen yakınındaki art izi bölgesinde meydana gelmiştir. Bunun nedenlerinden bir tanesi ise, bu bölgede üniform serbest akış yapısının kanatlar tarafından yüksek oranda engellenmesi ve bu nedenle akışın daha karmaşık yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.



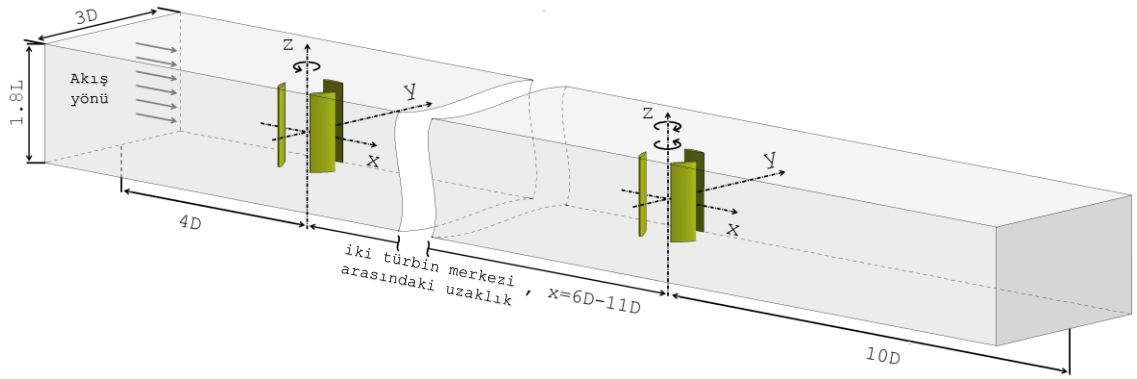
5. TÜRBİN ÇİFTLİĞİ UYGULAMASI

5.1. Eş Eksenli Sıralı İki Türbin Konfigürasyonu

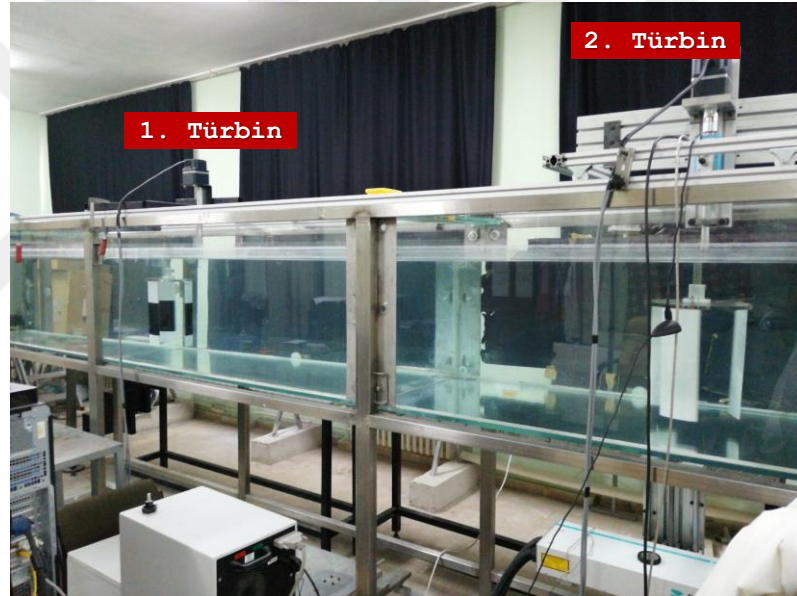
Hidro türbin çiftliği uygulamalarında, özellikle kanal akışı için, iki aynı tip türbin eş eksenli art arda sıralı bir konfigürasyonda yerleştirildiğinde, alt akış bölgesine yerleştirilen türbin, üst akış bölgesindeki türbinden daha az güç üretir. Bunun nedeni, üst akış türbininin art izi bölgesindeki hız düşüşleri ve türbülanslı akıştır. Bu nedenle, alt akış bölgesine yerleştirilen türbininden maksimum performans elde etmek için, üst akış ve alt akış türbini arasındaki mesafe doğru bir şekilde belirlenmelidir. Bu bölümde, PIV ve LES sonuçlarından elde edilen art izi bölgesindeki ortalama akış karakteristikleri dikkate alınarak konumlandırılan alt akış türbininin performansı aynı eksen üzerinde art arda dizilim düzeninde sunulmuştur. Çift türbin konfigürasyonunun şematik görünümü Şekil 5.1'de ve deney düzeneğindeki performans ölçüm sistemi ise Şekil 5.2'deki gibi gösterilmektedir. Türbin çiftliği senaryosu için kullanılan türbinlerin geometrik şekli ve tasarım parametreleri birbirleriyle ve Çizelge 4.1'de gösterilen tek türbin konfigürasyonunda kullanılan türbin ile aynıdır. Deneylerde ve analizlerde iki türbinin dönüş merkezleri arasındaki mesafe $6D$ 'den $11D$ 'ye bir türbin çapı aralıklarla ayarlanmıştır. İkili türbinin sayısal analizleri için, 4. Bölümde tek türbin konfigürasyonunda kullanılan Ağ-III ağ yapısının eleman boyutları çift türbin analizlerine uyarlanmıştır. İkili türbin analizlerinde farklı aşağı akış yönündeki aralıklar için akış hacmi değişiklik göstermiştir. Buna bağlı büyüyen akış hacmi üzerinde oluşturulan ağ yapısındaki eleman sayısında da artış olmuştur. HAD analizleri için ikili türbinde farklı alt akış mesafeleri için oluşturulan ağ yapılarından elde edilen eleman sayıları Çizelge 5.1'deki gibidir. Fluent analizleri için tek türbin konfigürasyonları ile aynı sınır koşulları ve 0.5° azimut artışına karşılık gelen zaman adımı büyüklüğü kullanılmıştır. Toplamda 120 farklı durum için yapılan HAD analizlerinde Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi bilgisayar laboratuvarındaki 12 çekirdek 32Gb RAM ve 3.40Ghz işlemci hızına sahip 24 adet iş istasyonu eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır.

Deneylerde ve HAD analizlerinde, suyun serbest akış hızı $U_\infty=0.3\text{m/s}$ ve saat yönünün tersine dönen üst akış türbininin açısız hızı, türbinin maksimum performansının elde edildiği $\lambda=1.0$ uç hız oranında sabit tutulmuştur. Alt akış bölgesine

yerleştirilen ikinci türbin ise, iki türbin arasındaki farklı her bir uzaklıkta $\lambda=0.5-1.4$ uç hız oranı aralığında çalıştırılmıştır.



Şekil 5.1. Hidrokinetik türbin çiftliği için art arda yerleştirilmiş türbin konfigürasyonunun şematik görünümü



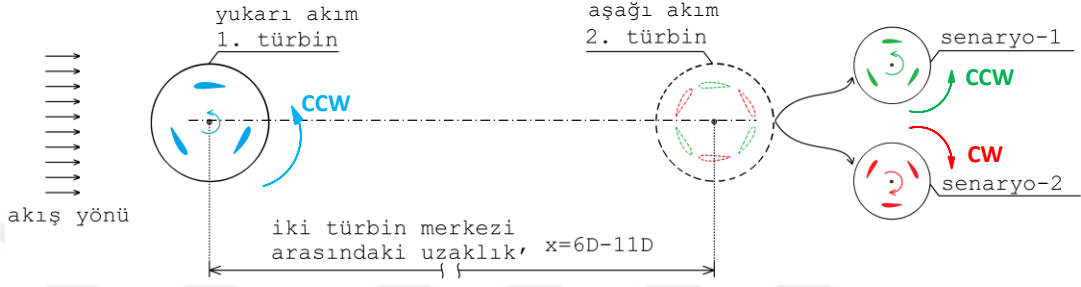
Şekil 5.2. İkili türbin konfigürasyonunun deneysel performans ölçüm düzeneği

Çizelge 5.1. İkili türbin konfigürasyonu için HAD analizlerinde farklı mesafelerde elde edilen eleman sayısı

Aşağı akış yönündeki uzaklık	Eleman sayısı, $\times 10^6$
$x/D=6$	7.87
$x/D=7$	8.07
$x/D=8$	8.10
$x/D=9$	8.29
$x/D=10$	8.38
$x/D=11$	8.47

İkili türbin performans araştırmasında bir diğer önemli parametrede, iki türbinin birbirine göre eş ve zıt yönde döndüğünde art izi bölgesindeki ikinci türbinin

performans sonuçlarının incelenmesidir. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, ikili türbin konfigürasyonu için iki dönüş yönü senaryosu vardır: eş yönlü dönüş ve zıt yönlü dönüş. İlk senaryoda, hem üst akış hem de alt akış bölgesine yerleştirilen birinci ve ikinci türbin, saat yönünün tersinde eş yönde dönmektedir. İkinci senaryo için ise: üst akış bölgesindeki birinci türbin saat yönünün tersine dönerken, alt akış bölgesine yerleştirilen ikinci türbin Şekil 5.3'te gösterildiği gibi saat yönünde dönmektedir.

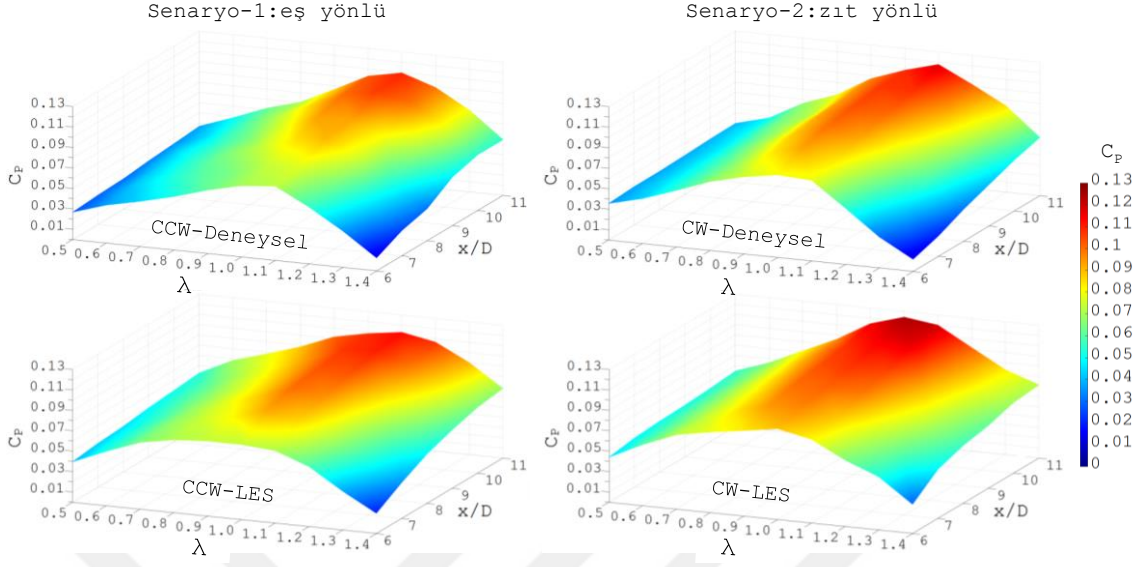


Şekil 5.3. Deneyel ve HAD analizlerinde ikili türbin konfigürasyonu için eş ve zıt yönlü dönüş senaryosunun şematik gösterimi

5.2. Araştırma Sonuçları

Alt akış bölgesine yerleştirilen ikinci türbinin, deney ve HAD analizlerinden elde edilen güç katsayısının akış yönündeki mesafe ve dönme yönüne göre farklı uç hız oranlarındaki değişimi Şekil 5.4'te yüzey grafikleri ile sunulmuştur. Artan akış yönündeki mesafe ile her iki dönüş senaryosunda da alt akış türbininin performansının arttığı açıkça görülmektedir. Yüzey grafiklerinde açıkça görülebilen bir diğer önemli sonuçta, alt akış türbininde maksimum güç katsayısı yaklaşık olarak $TSR = 1.0-1.1$ aralığında elde edilmiştir. Şekil 4.15'deki tek türbin performans eğrisinde olduğu gibi, ikili türbin konfigürasyonunda da LES performans sonuçları deneysel ölçüm sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Daha da önemlisi, alt akış bölgesindeki ikinci türbinin performansı, zıt dönüşlü ikinci senaryo için daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, incelenen bütün uç hız oranlarında ve akış yönündeki mesafelerde gerçekleşmiştir. Zıt yönde dönen türbinler için ikinci türbinin güç katsayısının eş yönde dönme durumundakine göre yüksek çıkmasının sebebi şu şekilde açıklanabilir. Tek türbin performansının azimut açısına bağlı değişiminin incelendiği Şekil 4.12 ve 4.13'te, türbinin bir devri boyunca her bir kanat azimut açısının $\theta=86^\circ$ olduğu değerde maksimum güç katsayısına ulaşmıştır ve ardından stol olmuştur. Art izi bölgesindeki

akış karakteristiği incelendiğinde, $x/D=3$ 'ten sonra pozitif y bölgesindeki akış, negatif y bölgesindeki akışa göre daha



Şekil 5.4. Akış yönünde iki türbin arasındaki mesafenin, uç hız oranının ve dönüş yönünün aşağı akış bölgesine yerleştirilen türbin performansına etkileri

karmaşık bir yapıdadır. Özellikle akış yönündeki hız profili incelendiğinde (Şekil 4.16), x -eksenine yakın bölgedeki akış yönündeki hız bileşeninin değeri negatif y bölgesinde, pozitif y bölgesine göre daha büyüktür. Eş yönlü dönme durumunda, Senaryo-1'de, kanat $\theta=86^\circ$ azimut açısına yaklaşık $y/D=+0.1$ konumunda, ters yönlü dönüşte, Senaryo-2'de $y/D=-0.1$ konumunda ulaşır. Bu nedenle, ikinci türbinin kanatları Senaryo-2'de daha yüksek bir hız bileşenine maruz kalmaktadır, dolayısıyla kanadın ürettiği güce bağlı olarak türbin tarafından üretilen toplam güç katsayısı da artmaktadır. Senaryo-1'de eş yönlü dönüş için, akış yönünde iki türbin arasındaki mesafe $x/D = 11$ olduğunda deneysel ve HAD sonuçlarınca ikinci türbinin maksimum güç katsayısı $\lambda=1.1$ uç hızı oranında sırasıyla $C_p = 0.109$ ve $C_p = 0.113$ olarak elde edilmiştir. Ancak Senaryo-2 için maksimum güç katsayısı deneysel sonuçlarda $\lambda=1.1$ 'de $C_p = 0.118$, HAD analizlerinde $\lambda=1.0$ 'da $C_p = 0.124$ olarak elde edilmiştir. Hem deneysel hem de sayısal sonuçlar göz önüne alındığında, Senaryo-1 için, alt akış bölgesine yerleştirilen ikinci türbin, $x/D=11$ 'de üst akış türbini (birinci türbin) tarafından üretilen gücün yaklaşık % 72'sini üretmektedir. Bununla birlikte, Senaryo-2 için, bu değer biraz daha yüksektir ve alt akış bölgesine yerleştirilen ikinci türbin, $x/D=11$ 'de üst akış türbini (birinci türbin) tarafından üretilen gücün yaklaşık % 78'ini üretir. Bu sonuçlara göre, art izi bölgesindeki akış yapısı, alt akış bölgesine yerleştirilen türbinin performansı üzerinde

önemli bir etkiye sahiptir. Hidrokinetik türbin çiftliği uygulamalarında, akış yönünde iki türbin arasındaki mesafe arttıkça alt akış türbini tarafından üretilen güç artmaktadır. Bununla birlikte, uygulama bölgesi göz önüne alındığında, akış yönündeki iki türbin arasındaki mesafeyi, alt akış türbininden daha yüksek performans elde etmek için uzatmak, birim alan başına düşen türbin sayısını önemli ölçüde azaltacaktır. Bu nedenle uygulama için optimum türbin düzenlemesi planlanmalıdır.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Tez çalışmasının ana fikri, H-tipi bir Darrieus türbininin su kanal akışlarındaki çalışma şartlarını belirleyerek performansını iyileştirmek ve böylece minimum art izi bölgesi ve hızlı akış geri kazanımı ile art arda türbinler yerleştirilerek türbin çiftliği oluşturup birim alandan elde edilen enerji dönüşüm miktarını arttırmaktır. Bu kapsamda literatürde Patel ve ark. (2017), NACA 0018 kanat profilini kullanıldığı deneysel çalışmadaki türbinin geometrik özellikleri ve performans sonuçları kullanılarak, farklı kalınlıktaki NACA 0012, NACA 0018, NACA 0024 ve farklı kamburluktaki NACA 2418 ve NACA 4418 kanat profilleri kullanılarak $\lambda=0.9-1.4$ uç hız oranı aralığında 2-D ve 3-D analizlerle performans ve art izi bölgesindeki akış yapısı, SST k- ω türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Kanat yapısının türbin performansına ve art izi bölgesindeki akış yapısına etkisinin incelendiği ilk bölümde araştırmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Patel ve ark. (2017) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile 3-D HAD analizleri arasındaki HAD modelinin doğrulanması çalışmasında güç katsayısı farkı, türbinin maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.05$ uç hız oranında yaklaşık %4.3 civarında olduğu hesaplanmıştır.
- $\lambda=0.9-1.4$ uç hız oranı aralığında 2-D analiz sonuçlarından elde edilen ortalama güç katsayısı sonuçları, 3-D analizlerden ve referans alınan deney sonuçlarından yaklaşık bir buçuk kat daha büyük çıkmıştır. Bu katsayının, literatürde yapılan çalışmalarda da belirtildiği gibi, kanat uç girdaplarından, destek ve bağlantı kolları gibi etkenlerin 2-D analizlerde ihmal edildiğinden dolayı kaynaklandığı belirtilmektedir.
- Hem 2-D hem de 3-D analiz sonuçlarına göre, performans eğrisinin genel eğilimi ve 2-D analizlerde maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranı 3-D HAD ve deneysel sonuçlarla uyumludur. Bu nedenle, 3-D analizlerdeki eleman sayısına bağlı olarak yüksek kapasiteli bilgisayar ihtiyacı ve buna bağlı olarak çözüm süresinin uzaması nedeniyle türbin tasarımları için daha pratik ve hızlı bir yöntem olan ve literatürde kabul gören 2-D HAD yöntemi kanat profil etkisinin incelenmesinde kullanılmıştır.

- 2-D analiz sonuçlarına göre farklı kanat profilleri için maksimum güç katsayısı farklı uç hız oranlarında elde edilmiştir. NACA 0012 ve NACA 0024 için $\lambda=1.0$, NACA 0018 için $\lambda=1.05$ ve kambur kanat profilleri NACA 2418 ve NACA 4418 için $\lambda=1.2$ 'de türbinler maksimum güç katsayısına ulaşmıştır. İncelenen uç hız oranında ve kanat profilleri içerisinde maksimum güç katsayısı NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbin için elde edilmiştir.
- Aynı uç hız oranı $\lambda=1.05$ 'te, kambur kanat profilinin kullanıldığı analiz sonuçlarından elde edilen güç katsayısı, simetrik kanat profillerinden daha yüksek olmasına rağmen, kamburluk oranı arttıkça art izi bölgesindeki hız geri kazanımı alt akış yönünde uzamıştır.
- Her bir kanat profilinin maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranında ise kambur kanatların art izi bölgesindeki hız geri kazanımı simetrik kanat profillerinin art izi bölgesindeki akış geri kazanımından daha iyi olduğu belirlenmiştir.
- NACA 2418 ve NACA 4418 profillerinin art izi bölgesindeki hız geri kazanım uzaklıkları birbirine çok yakındır. Ancak, NACA 4418'in maksimum güç katsayısı, $\lambda=1.2$ 'de NACA 2418'den yaklaşık % 4.5 daha yüksektir.
- 2-D HAD analiz sonuçları değerlendirildiğinde, hem güç katsayısı hem de art izi bölgesindeki akış yapısından elde edilen sonuçlara göre, NACA 4418 profili, kanal akışında bir hidrokinetik türbin çiftliği uygulaması için daha uygun görülmektedir.

2-D HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak aynı katılık oranında NACA 4418 kanat profilinden oluşan türbin, mevcut deney düzeneğimizin çalışma şartları için uyarlanmıştır. Serbest akış hızının $U_{\infty}=0.3m/s$ açık su kanalımızda NACA 4418 kanat profilinin kullanıldığı türbinin performans deneyleri tork ölçümü ile $\lambda=0.5-1.4$ uç hız oranı aralığında yapılmıştır. Maksimum güç katsayısının elde edildiği uç hız oranında türbinin orta düzleminde, art izi bölgesindeki akış yapısı PIV yöntemi kullanılarak alt akış yönünde $12D$ 'ye kadar incelenmiştir. Performans ve PIV deneylerinden elde edilen sonuçlar LES türbülans modelinin kullanıldığı 3-D HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Bu araştırmaya ait sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

- $\lambda=0.5-1.4$ uç hız oranı aralığında çalıştırılan türbin, performans ölçümü ve LES sonuçlarında $\lambda=1.0$ uç hız oranında maksimum güç katsayısı değerine ulaşmıştır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarında maksimum güç katsayısı

sırasıyla $C_p=0.146$ ve $C_p=0.163$ elde edilmiştir ve aradaki fark yaklaşık % 10 civarındadır.

- Deneysel tork ölçümü ve 3-D HAD analiz sonuçlarından elde edilen güç katsayısı eğrileri iyi bir uyum sergilemektedir.
- Türbinin art izi bölgesindeki akış yapısı, türbinin en verimli çalışma noktası $\lambda=1.0$ 'da PIV ve LES yöntemiyle detaylıca incelenmiştir.
- PIV ve LES sonuçları incelendiğinde, türbinin yakınında art izi bölgesindeki akış yapısı iki bölüme ayrılmıştır. Pozitif y bölgesinde, negatif y bölgesine göre daha baskın bir akış yapısı oluşmuştur. Pozitif y bölgesindeki kanatların hareketi sırasında, kanatlar daha büyük girdap kopmalarına neden olmuştur. Bu nedenle, art izi bölgesinde alt akış boyunca orta düzlemdeki asimmetrik yapı açıkça görülmüştür.
- Art izi bölgesindeki maksimum hız düşüşü hem PIV hem de LES sonuçlarında yaklaşık olarak $x/D=1.2$; $y/D=0.3$ 'te meydana gelmiştir.
- Türbinin art izinde alt akış yönünde ilerledikçe asimmetrik akış yapısı yavaş yavaş simetriğe dönmeye başlamış, akış yönündeki hız değerleri artmış, girdaplar genişlemiş ve yayılmış, türbülans kinetik enerji değerleri azalmış ve hız geri kazanımı başlamıştır. Akış yönündeki minimum ortalama hız değerleri, PIV ve LES sonuçları için sırasıyla $x/D=11$ 'de serbest akış hızının % 84'ü ve % 94 seviyesine yükselmiştir.

Son olarak art izi bölgesindeki deneysel ve sayısal analiz sonuçları dikkate alınarak art izi bölgesinde alt akış yönünde $x/D=6$ 'dan $x/D=11$ 'e kadar yerleştirilen ikinci bir türbinin performansı deneysel tork ölçümü ve LES modeli ile incelenmiştir. Üst akış bölgesindeki birinci türbin maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.0$ uç hız oranında saat yönünün tersinde çalıştırılmıştır. Alt akış bölgesindeki ikinci türbin için iki senaryo oluşturulmuştur. Birinci senaryoda iki türbinde eş yönde; ikinci senaryoda ise iki türbin zıt yönde dönecek şekilde çalıştırılmıştır. Art izindeki her bir konumda ikinci türbin $\lambda=0.5-1.4$ aralığında çalıştırılarak performans eğrileri elde edilmiştir. İkili türbin konfigürasyonları için performans sonuçları şu şekilde özetlenmiştir:

- Her iki dönüş yönünde hem deneysel hem de sayısal çalışmalar sonucunda, alt akış yönündeki ikinci türbinin maksimum performansı bütün konumlarda $\lambda=1.0-1.1$ civarında elde edilmiştir.

- $x/D=6$ 'dan $x/D=11$ aralığındaki bütün konumlarda alt akış yönündeki ikinci türbinin performansı üst akış bölgesindeki birinci türbinin performansından daha düşük çıkmıştır.
- Üst akış bölgesindeki birinci türbinin art izi bölgesindeki asimetric akış yapısı nedeniyle, iki türbinin birbiri ile zıt dönmesi durumunda alt akıştaki ikinci türbinin performansı, iki türbinin birbiri ile eş yönde dönmesi durumuna göre daha yüksek çıkmıştır.
- Hem deneysel hem de sayısal analiz sonuçlarında, alt akıştaki ikinci türbin $x/D=11$ konumunda iken, eş yönlü dönüşte üst akıştaki birinci türbinin performansının yaklaşık % 72'sine ulaşırken, bu değer zıt yönlü dönüşte % 78 civarındadır.

6.2. Öneriler

Tez kapsamında yapılan araştırmalar neticesinde gelecekte çalışmalarda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar aşağıdaki gibi önerilmektedir.

- Türbin tasarımında kullanılan kanat konfigürasyonu ve türbinin çalışma şartları hem türbinin performansını hem de türbinin art izi bölgesindeki akış yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle türbin çiftliklerinde birim alandan elde edilen enerji transferini arttırmak için türbin tasarımı ve çalışma şartlarının optimize edilmesi gerekmektedir.
- Tez kapsamında da kullandığımız H-tipi Darrieus hidrokinetik türbinlerden oluşan bir türbin çiftliği için türbin çapının $11D$ kadar uzağında ikinci bir türbin yerleştirildiğinde dönüş yönüne bağlı olarak birinci türbinin % 70-80'i civarında maksimum güç elde edilmektedir. İkinci türbinin güç katsayısının arttırılabilmesi için daha ilerideki konumlarda da performans araştırması yapılabilir.
- Dikey eksenli türbinlerin çalışma şartlarına bağlı olarak art izindeki akış yapısı değişiklik göstermektedir. Bu kapsamda alt akış yönünde art izi bölgesine yerleştirilecek türbinlerin konumu ve dönüş yönü türbin performansını etkilemektedir. Türbin kurulumunun yapıldığı bölgelerde uygulama alanının müsait olduğu durumlarda türbinler eş eksen yerine bir miktar saptırılarak performansları arttırılabilir. Böylece birim alandan transfer edilen enerji miktarı arttırılmış olabilir.

- Performans sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanan SST $k-\omega$ türbülans modelinin kullanıldığı 2-D HAD analizleri ağ yapısındaki eleman sayısına bağlı olarak hızlı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle türbin geometrisi ve türbin dizilimi optimizasyonu çalışmalarında pratik çözüm üretmesi nedeniyle tercih edilebilir.
- LES türbülans modelinin kullanıldığı analizler, hem performans hem de art izi bölgesindeki akış yapısına bağlı olarak deneysel sonuçlar ile çok iyi uyum içerisindedir ve gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Ancak LES türbülans modelinin kullanılacağı çalışmalarda 3-D analiz gerekliliği nedeniyle analiz süreleri uzamaktadır. Bu nedenle pratik değildir. Optimize edilmiş sonuçlar için uygulamadan önce gerçekliği yansıtmak adına kullanılabilir bir türbülans modelidir.

KAYNAKLAR

- Alaimo A, Esposito A, Messineo A, Orlando C, Tumino D, 2015.3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine, *Energies*, 8, 4, 3013-33.
- Almohammadi K, Ingham D, Ma L, Pourkashan M, 2013.Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine, *Energy*, 58, 483-93.
- Ansys AF, 2013.15.0 User's Guide, ANSYS, Inc., United States.
- Araya DB, Dabiri JO, 2015.A comparison of wake measurements in motor-driven and flow-driven turbine experiments, *Experiments in fluids*, 56, 7, 1-15.
- Asr MT, Nezhad EZ, Mustapha F, Wiriadidjaja S, 2016.Study on start-up characteristics of H-Darrieus vertical axis wind turbines comprising NACA 4-digit series blade airfoils, *Energy*, 112, 528-37.
- Bachant P, Wosnik M, 2015.Performance measurements of cylindrical-and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency, *Renewable energy*, 74, 318-25.
- Bachant P, Wosnik M, 2016.Modeling the near-wake of a vertical-axis cross-flow turbine with 2-D and 3-D RANS, *Journal of renewable and sustainable energy*, 8, 5, 053311.
- Balduzzi F, Bianchini A, Maleci R, Ferrara G, Ferrari L, 2015.Blade design criteria to compensate the flow curvature effects in H-Darrieus wind turbines, *Journal of Turbomachinery*, 137, 1.
- Balduzzi F, Bianchini A, Maleci R, Ferrara G, Ferrari L, 2016.Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines, *Renewable energy*, 85, 419-35.
- Bangga G, Dessoky A, Wu Z, Rogowski K, Hansen MO, 2020.Accuracy and consistency of CFD and engineering models for simulating vertical axis wind turbine loads, *Energy*, 206, 118087.
- Battisti L, Zanne L, Dell'Anna S, Dossena V, Persico G, Paradiso B, 2011.Aerodynamic measurements on a vertical axis wind turbine in a large scale wind tunnel, *Journal of energy resources technology*, 133, 3.
- Bausas MD, Danao LAM, 2015.The aerodynamics of a camber-bladed vertical axis wind turbine in unsteady wind, *Energy*, 93, 1155-64.
- Ben-Nasr O, Hadjadj A, Chaudhuri A, Shadloo M, 2017.Assessment of subgrid-scale modeling for large-eddy simulation of a spatially-evolving compressible turbulent boundary layer, *Computers & Fluids*, 151, 144-58.
- Bianchini A, Balduzzi F, Bachant P, Ferrara G, Ferrari L, 2017.Effectiveness of two-dimensional CFD simulations for Darrieus VAWTs: a combined numerical and experimental assessment, *Energy Conversion and Management*, 136, 318-28.
- Boudreau M, Dumas G, 2017.Comparison of the wake recovery of the axial-flow and cross-flow turbine concepts, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 165, 137-52.
- Brochier G, Fraunie P, Beguier C, Paraschivoiu I, 1986.Water channel experiments of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades, *Journal of Propulsion and Power*, 2, 5, 445-9.
- Brownstein ID, Wei NJ, Dabiri JO, 2019.Aerodynamically interacting vertical-axis wind turbines: Performance enhancement and three-dimensional flow, *Energies*, 12, 14, 2724.
- Castelli MR, Englaro A, Benini E, 2011.The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD, *Energy*, 36, 8, 4919-34.
- Cavagnaro RJ, Polagye B, 2016.Field performance assessment of a hydrokinetic turbine, *International journal of marine energy*, 14, 125-42.

- Celik Y, Ma L, Ingham D, Pourkashanian M, 2020. Aerodynamic investigation of the start-up process of H-type vertical axis wind turbines using CFD, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 204, 104252.
- Chen B, Su S, Viola IM, Greated CA, 2018. Numerical investigation of vertical-axis tidal turbines with sinusoidal pitching blades, *Ocean Engineering*, 155, 75-87.
- Chen W-H, Chen C-Y, Huang C-Y, Hwang C-J, 2017. Power output analysis and optimization of two straight-bladed vertical-axis wind turbines, *Applied energy*, 185, 223-32.
- Dabiri JO, 2011. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays, *Journal of renewable and sustainable energy*, 3, 4, 043104.
- Dai Y, Lam W, 2009. Numerical study of straight-bladed Darrieus-type tidal turbine, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 162, 2, 67-76.
- Danao LA, Edwards J, Eboibi O, Howell R, 2014. A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine, *Applied energy*, 116, 111-24.
- Deshpande P, Li X, 2013. Numerical study of giromill-type wind turbines with symmetrical and non-symmetrical airfoils, *European International Journal of Science and Technology*, 2, 8, 195-208.
- Durhasan T, Pinar E, Ozkan G, Aksoy M, Akilli H, Sahin B, 2018. PIV measurement downstream of perforated cylinder in deep water, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 72, 225-34.
- Dynamics D, 2021.
- Elkhoury M, Kiwata T, Aoun E, 2015. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 139, 111-23.
- Ferreira CS, Van Kuik G, Van Bussel G, Scarano F, 2009. Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine, *Experiments in fluids*, 46, 1, 97-108.
- Firat E, Ozkan GM, Akilli H, 2017. PIV measurements in the near wakes of hollow cylinders with holes, *Experiments in fluids*, 58, 5, 39.
- Fleisinger M, Vesenjsek M, Hribersek M, 2014. Flow driven analysis of a Darrieus water turbine, *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 60, 12, 769-76.
- Gaywala K, Shah H, Patel P, 2017. Performance Prediction of a Straight-Bladed Darrieus Water Turbine using Multiple Stream Tube Model, *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 4, 6, 41-5.
- Genç M, 2009. Kanat profilleri etrafındaki düşük Reynolds sayılı akışın kontrolü ve aerodinamik performansın incelenmesi, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye*.
- Gorle J, Bardwell S, Chatellier L, Pons F, Ba M, Pineau G. PIV investigation of the flow across a Darrieus water turbine. 17th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics—Lisbon.
- Guang Z, Yang R-s, Yan L, Zhao P-f, 2013. Hydrodynamic performance of a vertical-axis tidal-current turbine with different preset angles of attack, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 25, 2, 280-7.
- Guerri O, Sakout A, Bouhadek K, 2007. Simulations of the fluid flow around a rotating vertical axis wind turbine, *Wind Engineering*, 31, 3, 149-63.
- Guillaud N, Balarac G, Goncalves E, Zanette J, 2020. Large Eddy simulations on vertical axis hydrokinetic turbines-power coefficient analysis for various solidities, *Renewable energy*, 147, 473-86.

- Hasan MR, Islam MR, Shahariar GH, Mashud M. Numerical analysis of vertical axis wind turbine. 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 318-21.
- Hilewit D, Matida EA, Fereidooni A, Abo el Ella H, Nitzsche F, 2019. Power coefficient measurements of a novel vertical axis wind turbine, *Energy Science & Engineering*, 7, 6, 2373-82.
- Hohman T, Martinelli L, Smits A, 2018. The effects of inflow conditions on vertical axis wind turbine wake structure and performance, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 183, 1-18.
- Howell R, Qin N, Edwards J, Durrani N, 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, *Renewable energy*, 35, 2, 412-22.
- Höök M, Tang X, 2013. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review, *Energy policy*, 52, 797-809.
- Hwang IS, Lee YH, Kim SJ, 2009. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control, *Applied energy*, 86, 9, 1532-40.
- Ikhennicheu M, Germain G, Druault P, Gaurier B, 2019. Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder, *Ocean Engineering*, 182, 137-46.
- Jain S, Saha UK, 2020. On the influence of blade thickness-to-chord ratio on dynamic stall phenomenon in H-type Darrieus wind rotors, *Energy Conversion and Management*, 218, 113024.
- Jin G, Zong Z, Jiang Y, Zou L, 2020. Aerodynamic analysis of side-by-side placed twin vertical-axis wind turbines, *Ocean Engineering*, 209, 107296.
- Khan M, Bhuyan G, Iqbal M, Quaicoe J, 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, *Applied energy*, 86, 10, 1823-35.
- Khan MJ, Iqbal MT, Quaicoe JE. A technology review and simulation based performance analysis of river current turbine systems. 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2288-93.
- Kinzel M, Mulligan Q, Dabiri JO, 2012. Energy exchange in an array of vertical-axis wind turbines, *Journal of Turbulence*, 13, 1, N38.
- Kline SJ, 1953. Describing uncertainty in single sample experiments, *Mech. Engineering*, 75, 3-8.
- Kroo I, 2007. *Applied Aerodynamics: A Digital Textbook*. Desktop Aeronautics, Inc., Stanford, CA, 94309.
- Kumar A, Saini R, 2017. Performance analysis of a Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades, *Renewable energy*, 108, 502-22.
- Kumar PM, Surya MMR, Kethala R, Srikanth N. Experimental investigation of the performance of darrieus wind turbine with trapped vortex airfoil. 2017 3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET), 130-5.
- Lain S, Osorio C, 2010. Simulation and evaluation of a straight-bladed Darrieus-type cross flow marine turbine.
- Lam H, Peng H, 2016. Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two-and three-dimensional computational fluid dynamics simulations, *Renewable energy*, 90, 386-98.
- Lam H, Peng H, 2017. Measurements of the wake characteristics of co-and counter-rotating twin H-rotor vertical axis wind turbines, *Energy*, 131, 13-26.

- Landreth C, Adrian R, Yao C, 2004. Double pulsed particle image velocimeter with directional resolution for complex flows, *Experiments in fluids*, 6, 2, 119-28.
- Lanzafame R, Mauro S, Messina M, Brusca S, 2020. Development and Validation of CFD 2D Models for the Simulation of Micro H-Darrieus Turbines Subjected to High Boundary Layer Instabilities, *Energies*, 13, 21, 5564.
- Le Maitre RW, 2013. Numerical petrology: statistical interpretation of geochemical data, Elsevier, p.
- Le TQ, Lee K-S, Park J-S, Ko JH, 2014. Flow-driven rotor simulation of vertical axis tidal turbines: A comparison of helical and straight blades, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6, 2, 257-68.
- Lee Y-T, Lim H-C, 2015. Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine, *Renewable energy*, 83, 407-15.
- Lei H, Zhou D, Bao Y, Li Y, Han Z, 2017. Three-dimensional Improved Delayed Detached Eddy Simulation of a two-bladed vertical axis wind turbine, *Energy Conversion and Management*, 133, 235-48.
- Li C, Xiao Y, Xu Y-l, Peng Y-x, Hu G, Zhu S, 2018. Optimization of blade pitch in H-rotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations, *Applied energy*, 212, 1107-25.
- Li C, Zhu S, Xu Y-l, Xiao Y, 2013. 2.5 D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack flow, *Renewable energy*, 51, 317-30.
- Li Y, Calisal SM, 2010. Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine, *Renewable energy*, 35, 10, 2325-34.
- Liao F, Wang S, Yang X, He G, 2020. A simulation-based actuator surface parameterization for large-eddy simulation of propeller wakes, *Ocean Engineering*, 199, 107023.
- Looney B, (2020). Statistical Review of World Energy, 2020, Bp.
- Lust EE, Flack KA, Luznik L, 2018. Survey of the near wake of an axial-flow hydrokinetic turbine in quiescent conditions, *Renewable energy*, 129, 92-101.
- Ma J, Wang F, Tang X, 2009. Comparison of several subgrid-scale models for large-eddy simulation of turbulent flows in water turbine. In: Fluid Machinery and Fluid Mechanics. Eds: Springer, p. 328-34.
- Maeda T, Kamada Y, Murata J, Furukawa K, Yamamoto M, 2015. Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine, *Energy*, 90, 784-95.
- Maeda T, Kamada Y, Murata J, Furukawa K, Yamamoto M, 2016. The influence of flow field and aerodynamic forces on a straight-bladed vertical axis wind turbine, *Energy*, 111, 260-71.
- Maître T, Amet E, Pellone C, 2013. Modeling of the flow in a Darrieus water turbine: Wall grid refinement analysis and comparison with experiments, *Renewable energy*, 51, 497-512.
- Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL, 2010. Wind energy explained: theory, design and application, John Wiley & Sons, p.
- Marsh P, Ranmuthugala D, Penesis I, Thomas G, 2015. Three-dimensional numerical simulations of straight-bladed vertical axis tidal turbines investigating power output, torque ripple and mounting forces, *Renewable energy*, 83, 67-77.
- Marsh P, Ranmuthugala D, Penesis I, Thomas G, 2017. The influence of turbulence model and two and three-dimensional domain selection on the simulated performance characteristics of vertical axis tidal turbines, *Renewable energy*, 105, 106-16.

- Mazarbhuiya HMSM, Biswas A, Sharma KK, 2020. Blade thickness effect on the aerodynamic performance of an asymmetric NACA six series blade vertical axis wind turbine in low wind speed, *International Journal of Green Energy*, 17, 2, 171-9.
- McLaren K, Tullis S, Ziada S, 2012. Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine, *Wind Energy*, 15, 3, 349-61.
- Mejia ODL, Quiñones JJ, Laín S, 2018. RANS and hybrid RANS-LES simulations of an H-type darrieus vertical axis water turbine, *Energies*, 11, 9, 2348.
- Mendoza V, Chaudhari A, Goude A, 2019. Performance and wake comparison of horizontal and vertical axis wind turbines under varying surface roughness conditions, *Wind Energy*, 22, 4, 458-72.
- Mendoza V, Goude A. Wake flow simulation of a vertical axis wind turbine under the influence of wind shear. *Journal of Physics: Conference Series*, 012031.
- Menter FR, 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32, 8, 1598-605.
- Mercier G, Pellone C, Maitre T. Experimental characterization of the near-wake of a cross flow water turbine with LDV measurements. *Proceedings of the 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanic*, Lisbon, Portugal, 7-10.
- Mertens S, van Kuik G, van Bussel G, 2003. Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof, *J. Sol. Energy Eng.*, 125, 4, 433-40.
- Meyers J, Meneveau C, 2012. Optimal turbine spacing in fully developed wind farm boundary layers, *Wind Energy*, 15, 2, 305-17.
- Mohamed M, 2012. Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes, *Energy*, 47, 1, 522-30.
- Mohamed M, Ali A, Hafiz A, 2015. CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18, 1, 1-13.
- Mosbahi M, Ayadi A, Chouaibi Y, Driss Z, Tucciarelli T, 2020. Experimental and numerical investigation of the leading edge sweep angle effect on the performance of a delta blades hydrokinetic turbine, *Renewable energy*, 162, 1087-103.
- Mukinović M, Brenner G, Rahimi A, 2010. Analysis of vertical axis wind turbines. In: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VII*. Eds: Springer, p. 587-94.
- Nabavi Y, 2008. Numerical study of the duct shape effect on the performance of a ducted vertical axis tidal turbine, University of British Columbia.
- Nazari S, Zamani M, Moshizi SA, 2018. Comparison between two-dimensional and three-dimensional computational fluid dynamics techniques for two straight-bladed vertical-axis wind turbines in inline arrangement, *Wind Engineering*, 42, 6, 647-64.
- Nguyen C-C, Tran P-T, 2015. A numerical study of thickness effect of the symmetric NACA 4-digit airfoils on self starting capability of a 1kW H-type vertical axis wind turbine, *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 3, 3, 7.
- Nicoud F, Ducros F, 1999. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor, *Flow, turbulence and Combustion*, 62, 3, 183-200.

- Nobile R, Vahdati M, Barlow J, Mewburn-Crook A, 2011. Dynamic stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study, *World Renew. Energ. Congr*, 4225-32.
- Ouro P, Runge S, Luo Q, Stoesser T, 2019. Three-dimensionality of the wake recovery behind a vertical axis turbine, *Renewable energy*, 133, 1066-77.
- Ouro P, Stoesser T, 2017. Wake generated downstream of a vertical axis tidal turbine.
- Ozkan G, Elsinga G, Breugem W-P, Stübing D, Reynolds K, Westerweel J, 2021. Stereoscopic PIV measurements of flow over a riblet surface at high Reynolds number, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 120, 110246.
- Paraschivoiu I, 2002. Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept, Presses inter Polytechnique, p.
- Parker CM, Araya DB, Leftwich MC, 2017. Effect of chord-to-diameter ratio on vertical-axis wind turbine wake development, *Experiments in fluids*, 58, 12, 1-11.
- Parker CM, Leftwich MC, 2016. The effect of tip speed ratio on a vertical axis wind turbine at high Reynolds numbers, *Experiments in fluids*, 57, 5, 74.
- Patel V, Eldho T, Prabhu S, 2017. Experimental investigations on Darrieus straight blade turbine for tidal current application and parametric optimization for hydro farm arrangement, *International journal of marine energy*, 17, 110-35.
- Peng Y, Xu Y, Zhan S, 2016. Wind tunnel tests and numerical simulation of time-varying aerodynamic forces on straight blades of a vertical axis wind turbine.
- Posa A, 2019. Wake characterization of coupled configurations of vertical axis wind turbines using Large Eddy Simulation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 75, 27-43.
- Posa A, 2020. Dependence of the wake recovery downstream of a Vertical Axis Wind Turbine on its dynamic solidity, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 202, 104212.
- Posa A, 2020. Influence of tip speed ratio on wake features of a vertical axis wind turbine, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 197, 104076.
- Posa A, Balaras E, 2018. Large Eddy Simulation of an isolated vertical axis wind turbine, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 172, 139-51.
- Posa A, Parker CM, Leftwich MC, Balaras E, 2016. Wake structure of a single vertical axis wind turbine, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 61, 75-84.
- Priegue L, Stoesser T, 2017. The influence of blade roughness on the performance of a vertical axis tidal turbine, *International journal of marine energy*, 17, 136-46.
- Raciti Castelli M, Ardizzon G, Battisti L, Benini E, Pavesi G. Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 409-18.
- Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B, 2017. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: guidelines for minimum domain size and azimuthal increment, *Renewable energy*, 107, 373-85.
- Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B, 2019. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines, *Energy*, 180, 838-57.
- Riegler H, 2003. HAWT versus VAWT: Small VAWTs find a clear niche, *Refocus*, 4, 4, 44-6.
- Ross H, Polagye B, 2020. An experimental evaluation of blockage effects on the wake of a cross-flow current turbine, *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 6, 3, 263-75.

- Ryan KJ, Coletti F, Dabiri JO, Eaton JK. Three-dimensional velocity measurements around and downstream of a rotating vertical axis wind turbine. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, V03BT46A024.
- Sabaeifard P, Razzaghi H, Forouzandeh A. Determination of vertical axis wind turbines optimal configuration through CFD simulations. International Conference on Future Environment and Energy, 109-13.
- Sahim K, Ihtisan K, Santoso D, Sipahutar R, 2014. Experimental study of Darrieus-Savonius water turbine with deflector: effect of deflector on the performance, *International Journal of Rotating Machinery*, 2014.
- Saini G, Saini R, 2018. A numerical analysis to study the effect of radius ratio and attachment angle on hybrid hydrokinetic turbine performance, *Energy for Sustainable Development*, 47, 94-106.
- Seal C, Smith C, Rockwell D, 1997. Dynamics of the vorticity distribution in endwall junctions, *AIAA journal*, 35, 6, 1041-7.
- Selig M, (2018). UIUC Applied Aerodynamics Group. Department of Aerospace Engineering; 2013.
- Sengupta A, Biswas A, Gupta R, 2016. Studies of some high solidity symmetrical and unsymmetrical blade H-Darrieus rotors with respect to starting characteristics, dynamic performances and flow physics in low wind streams, *Renewable energy*, 93, 536-47.
- Shaheen M, Abdallah S, 2017. Efficient clusters and patterned farms for Darrieus wind turbines, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 125-35.
- Shamsoddin S, Porté-Agel F, 2014. Large eddy simulation of vertical axis wind turbine wakes, *Energies*, 7, 2, 890-912.
- Shamsoddin S, Porté-Agel F, 2016. A large-eddy simulation study of vertical axis wind turbine wakes in the atmospheric boundary layer, *Energies*, 9, 5, 366.
- Shamsoddin S, Porté-Agel F, 2020. Effect of aspect ratio on vertical-axis wind turbine wakes, *Journal of Fluid Mechanics*, 889.
- Shiono M, Suzuki K, Kiho S, 2000. An experimental study of the characteristics of a Darrieus turbine for tidal power generation, *Electrical Engineering in Japan*, 132, 3, 38-47.
- Simão Ferreira CJ, Van Bussel GJ, Van Kuik GA, 2006. Wind tunnel hotwire measurements, flow visualization and thrust measurement of a VAWT in skew.
- Somoano M, Huera-Huarte F, 2017. Flow dynamics inside the rotor of a three straight bladed cross-flow turbine, *Applied Ocean Research*, 69, 138-47.
- Stanislas M, Okamoto K, Kähler CJ, Westerweel J, 2005. Main results of the second international PIV challenge, *Experiments in fluids*, 39, 2, 170-91.
- Su J, Chen Y, Han Z, Zhou D, Bao Y, Zhao Y, 2020. Investigation of V-shaped blade for the performance improvement of vertical axis wind turbines, *Applied energy*, 260, 114326.
- Sun J, Huang D, 2020. Numerical investigation on aerodynamic performance improvement of vertical-axis tidal turbine with super-hydrophobic surface, *Ocean Engineering*, 217, 107995.
- Sun K, Ji R, Zhang J, Li Y, Wang B, 2021. Investigations on the hydrodynamic interference of the multi-rotor vertical axis tidal current turbine, *Renewable energy*, 169, 752-64.
- Tescione G, Ragni D, He C, Ferreira CS, Van Bussel G, 2014. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry, *Renewable energy*, 70, 47-61.

- Träsch M, Déporte A, Delacroix S, Germain G, Gaurier B, Drevet J-B, 2020. Wake characterization of an undulating membrane tidal energy converter, *Applied Ocean Research*, 100, 102222.
- Vergaerde A, De Troyer T, Muggiasca S, Bayati I, Belloli M, Kluczevska-Bordier J, Parneix N, Silvert F, Runacres MC, 2020. Experimental characterisation of the wake behind paired vertical-axis wind turbines, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 206, 104353.
- Villeneuve T, Boudreau M, Dumas G, 2020. Improving the efficiency and the wake recovery rate of vertical-axis turbines using detached end-plates, *Renewable energy*, 150, 31-45.
- Wang K, Sun K, Sheng Q-h, Zhang L, Wang S-q, 2016. The effects of yawing motion with different frequencies on the hydrodynamic performance of floating vertical-axis tidal current turbines, *Applied Ocean Research*, 59, 224-35.
- Weickert M, Teike G, Schmidt O, Sommerfeld M, 2010. Investigation of the LES WALE turbulence model within the lattice Boltzmann framework, *Computers & Mathematics with Applications*, 59, 7, 2200-14.
- Wenlong T, Baowei S, Zhaoyong M, 2013. Conceptual design and numerical simulations of a vertical axis water turbine used for underwater mooring platforms, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5, 4, 625-34.
- Westerweel J, 1995. Digital particle image velocimetry: Theory and application.
- Westerweel J, Elsinga GE, Adrian RJ, 2013. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 45, 409-36.
- Yagmur S, Dogan S, Aksoy MH, Goktepel I, 2020. Turbulence modeling approaches on unsteady flow structures around a semi-circular cylinder, *Ocean Engineering*, 200, 107051.
- Yagmur S, Dogan S, Aksoy MH, Goktepel I, Ozgoren M, 2017. Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and Large Eddy Simulation methods, *Flow Measurement and Instrumentation*, 55, 23-36.
- Yang B, Shu X, 2012. Hydrofoil optimization and experimental validation in helical vertical axis turbine for power generation from marine current, *Ocean Engineering*, 42, 35-46.
- Yuen A, Yeoh G, Yuen R, Lo S, Chen T. Development of wall-adapting local eddy viscosity model for study of fire dynamics in a large compartment. *Applied Mechanics and Materials*, 1579-91.
- Zanforlin S, 2018. Advantages of vertical axis tidal turbines set in close proximity: A comparative CFD investigation in the English Channel, *Ocean Engineering*, 156, 358-72.
- Zou L, Wang K, Jiang Y, Wang A, Sun T, 2020. Wind tunnel test on the effect of solidity on near wake instability of vertical-axis wind turbine, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 5, 365.
- Zuo W, Wang X, Kang S, 2016. Numerical simulations on the wake effect of H-type vertical axis wind turbines, *Energy*, 106, 691-700.

EKLER

EK-1 Kistler Dual Range Torque Sensor 4503B üretici firma kataloğu

Torque sensor, optional dual range

Type 4503B...

Technical data			Type 4503B...
Rated torque	M_{rated}	N-m	0.2/0.5/1/2/5/10/20/50/100/200/500/1,000/2,000/5,000
Maximum torque			1.5 × rated torque
Alternating torque			0.7 × rated torque
Accuracy class			0,05 / 0,1
Linearity error including hysteresis		% FSO	<±0,05 oder <±0,1
Output signal (rated value)	M_{rated}	VDC kHz	±5 or 10 100 ±40
Speed & angle measurement		pulses/rev.	up to 8,192 + Z-pulse
Rated speed		1/min	50,000 (Depending on measuring range)
Case material			hard-anodized aluminum
Dimensions	L	mm	122 ... 169
	D	mm	58 ... 148
	H	mm	90.1 ... 170.5
Operating temperature range		°C	10 ... 60

General technical data

Deg. of protection to IEC/EN 60529	IP40
Connector	7 and 12 pin male plug
Data sheet: see www.kistler.com	Type 4503B (000-767)

Accessories

Coupling socket, 7 pin		Type KSM000517
Coupling socket, 12 pin		Type KSM000703
SensorTool		Type 4706A
Connecting cables		Type KSM124970-5, KSM186420-2,5, KSM186430-2,5, KSM219710-5
Couplings		Type 2301A... to 2303A...
Mounting base (GU)		GU for 0.2 ... 20 N-m Type 18030861 GU for 50 ... 100 N-m Type 18030862 GU for 200 ... 1,000 N-m Type 18030863 GU for 2,000 ... 5,000 N-m Type 18030864

12

www.kistler.com

EK-2 Vexta BLH5100KC-GFS üretici firma kataloğu

Product Number

BLH 2 30 K C - 5 FR

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦

① Series	BLH BLH Series
② Motor Frame Size	0: 42 mm (1.65 in.) 2: 60 mm (2.36 in.) 4: 80 mm (3.15 in.) 5: 90 mm (3.54 in.)
③ Output Power (W)	(Example) 30: 30 W (1/25 HP)
④ Power Supply Voltage	K: 24 VDC
⑤ Cable Type	
⑥ Gear Ratio/Shaft Type	Number: Gear ratio for combination types: 8 types from 5 to 200 Gear ratio for geared types: 7 types from 5 to 100 A: Round Shaft Type
⑦ Blank: Combination Type – Parallel Shaft Gearhead FR: Combination Type – Hollow Shaft Flat Gearhead	

Product Line

Combination Type The combination type comes with a motor and gearhead pre-assembled.

The combination of motors and gearheads can be changed, and they are also available separately. In addition, the gearhead can be removed and the assembly position can be changed in 90° increments.

Geared Type The geared type has an integrated motor and gearhead. The combination of motor and gearhead cannot be changed.

Geared Type/Combination Type – Parallel Shaft Gearhead

Type	Output Power	Product Name	Gear Ratio	List Price
Geared Type	15 W (1/50 HP)	BLH015K-□	5 10 15 20	\$359.00
			30 50 100	\$366.00
			5 10 15 20	\$413.00
Combination Type	30 W (1/25 HP)	BLH230KC-□	30 50 100	\$422.00
			200	\$431.00
			5 10 15 20	\$452.00
	50 W (1/15 HP)	BLH450KC-□	30 50 100	\$460.00
			200	\$470.00
			5 10 15 20	\$550.00
	100 W (1/8 HP)	BLH5100KC-□	30 50 100	\$561.00
			200	\$572.00

The following items are included with each product.

Motor, Driver, Gearhead, I/O Signal Cable, Power Supply Cable, Installation Screws*1, Parallel Key*2, Operating Manual

*1 Only for combination type

*2 Only for the products with a key slot on the output shaft

Round Shaft Type

Output Power	Product Name	List Price
15 W (1/50 HP)	BLH015K-A	\$264.00
30 W (1/25 HP)	BLH230KC-A	\$287.00
50 W (1/15 HP)	BLH450KC-A	\$311.00
100 W (1/8 HP)	BLH5100KC-A	\$371.00

The following items are included with each product.

Motor, Driver, I/O Signal Cable, Power Supply Cable, Operating Manual

Combination Type – Hollow Shaft Flat Gearhead

Output Power	Product Name	Gear Ratio	List Price
30 W (1/25 HP)	BLH230KC-□FR	5 10 15 20	\$471.00
		30 50 100	\$483.00
		200	\$495.00
50 W (1/15 HP)	BLH450KC-□FR	5 10 15 20	\$544.00
		30 50 100	\$556.00
		200	\$568.00
100 W (1/8 HP)	BLH5100KC-□FR	5 10 15 20	\$653.00
		30 50 100	\$665.00
		200	\$677.00

The following items are included with each product.

Motor, Driver, Gearhead, I/O Signal Cable, Power Supply Cable, Installation Screws, Parallel Key, Safety Cover (with screws), Operating Manual

Specifications

15 W (1/50 HP), 30 W (1/25 HP), 50 W (1/15 HP), 100 W (1/8 HP)



Product Name	Geared Type/Combination Type – Parallel Shaft Gearhead	BLH015K-□	BLH230KC-□	BLH450KC-□	BLH5100KC-□
	Combination Type – Hollow Shaft Flat Gearhead	–	BLH230KC-□FR	BLH450KC-□FR	BLH5100KC-□FR
	Round Shaft Type	BLH015K-A	BLH230KC-A	BLH450KC-A	BLH5100KC-A
Rated Output Power (Continuous)	W (HP)	15 (1/50)	30 (1/25)	50 (1/15)	100 (1/8)
Power Source	Rated Voltage	24 VDC			
	Permissible Voltage Range	±10%			
	Rated Input Current	A	1.0	2.1	3.1
Maximum Input Current		A	2.4	3.7	5.4
					9.8
Rated Torque	N·m (oz·in)	0.05 (7.1)	0.12 (17)	0.2 (28)	0.4 (56)
Instantaneous Maximum Torque*	N·m (oz·in)	0.075 (10.6)	0.15 (21)	0.24 (34)	0.5 (71)
Rated Speed	r/min	3000		2500	
Speed Control Range	r/min	100~3000			
Round Shaft Type					
Permissible Inertia J	×10 ⁻⁴ kg·m ² (oz·in ²)	0.5 (2.7)	1.8 (9.8)	3.3 (18.1)	5.6 (31)
Rotor Inertia J	×10 ⁻⁴ kg·m ² (oz·in ²)	0.032 (0.175)	0.067 (0.48)	0.23 (1.26)	0.61 (3.3)
Speed Regulation	Load	±0.5% max. (0~Rated torque, at rated speed, at rated voltage, at normal ambient temperature)			
	Voltage	±0.5% max. (Rated voltage ±10%, at rated speed, with no load, at normal ambient temperature)			
	Temperature	±0.5% max. (0~+50°C (+32~+122°F), at rated speed, with no load, at rated voltage)			

* The time during which the instantaneous maximum torque is effective is no more than 5 seconds and at 2000 r/min or below.

† The values for each specification apply to the motor only.

‡ A number indicating the gear ratio is entered where the box □ is located within the product name.

EK-3: Maksimum güç katsayısının elde edildiği $\lambda=1.0$ uç hız oranı için güç katsayısının belirsizliğinin örnek hesaplaması.

$$w_{C_P} = \pm \left[\left(\frac{\Omega}{0.5\rho AU_\infty^3} w_T \right)^2 + \left(\frac{T}{0.5\rho AU_\infty^3} w_\Omega \right)^2 + \left(-3 \frac{T\Omega}{0.5\rho AU_\infty^4} w_{U_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{EK-3.1})$$

$$C_P = \frac{0.062 \times 2.4}{0.5 \times 998.2 \times 0.25 \times 0.3 \times 0.3^3} = 0.146 \quad (\text{EK-3.2})$$

$$w_{C_P} = \pm \left[\left(\frac{2.4}{0.5 \times 998.2 \times 0.25 \times 0.3 \times 0.3^3} \times 0.001 \right)^2 + \left(\frac{0.062}{0.5 \times 998.2 \times 0.25 \times 0.3 \times 0.3^3} \times 0.005 \right)^2 + \left(-3 \frac{0.062 \times 2.4}{0.5 \times 998.2 \times 0.25 \times 0.3 \times 0.3^4} \times 0.015 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{EK-3.3})$$

$$w_{C_P} = \pm [(2.3746 \times 10^{-3})^2 + (3.0672 \times 10^{-4})^2 + (-2.20842 \times 10^{-2})^2]^{1/2} \quad (\text{EK-3.4})$$

$$w_{C_P} = 0.02245$$

$$\frac{w_{C_P}}{C_P} \times 100, \quad \frac{0.02245}{0.146} \times 100 = \%15.38 \quad (\text{EK-3.5})$$