T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MOTORLU İHA PERVANESİ PROFİLİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ VE DENEYSEL ANALİZİ

Onur SEZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Doç. Dr. Zafer GEMİCİ

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MOTORLU İHA PERVANESİ PROFİLİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ VE DENYSEL ANALİZİ

Onur SEZEN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Zafer GEMİCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Zafer GEMİCİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mete BUDAKLI, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Zafer GEMİCİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Elektrik Motorlu İHA Pervanesi Profilinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi ve Deneysel Analizi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur SEZEN

İmza

Aileme,

Danışmanıma

ve

Arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecimde bilgi, destek ve deneyimiyle her zaman yanımda olan ve çalışmamın her aşamasında değerli katkılarda bulunan danışmanım Doç. Dr. Zafer GEMİCİ'ye en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca ve özellikle yüksek lisans sürecimde bana her daim destek olan sevgili eşim Duygu SEZEN ve oğlum Kuzey Anıl SEZEN'e sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Bu çalışmada sayısal analizler konusunda değerli bilgileriyle destek sağlayan kıymetli okul arkadaşım Sayın Sami MALKİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, tez yazım sürecinde gösterdikleri anlayış ve verdikleri destek için VARLIK MAKİNA ve değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Onur SEZEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xiii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Taraması 2

1.2 Tezin Amacı 6

2 DENEY SİSTEMİ 7

2.1 Deney Düzeneği 8

2.2 Deney Düzeneği Elemanları 10

3 DENEYSEL ÇALIŞMA 14

3.1 Deneysel Metodoloji 17

4 BELİRSİZLİK ANALİZİ ve GÜVEN ARALIĞI 19

4.1 Güven Aralığı 19

4.2 Belirsizlik Analizi 20

4.3 Belirsizlik Analizi Sonucu 21

5 SAYISAL ÇALIŞMA 24

5.1 Pervanenin Modellenmesi 24

5.2 Türbülans Modelinin Seçilmesi 25

5.3 Hesaplama Ağı ve Sınır Koşulları 25
5.4 Hesaplama Ağı Bağımsızlık 27
5.5 İtki Katsayısı, Moment Katsayısı ve Verim Karşılaştırması 28
6 SONUÇ **35**
6.1 Sonuçlar 35
6.2 Öneriler 36
KAYNAKÇA **38**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **41**

SİMGE LİSTESİ

RH	Bağıl Nem
P	Basınç (Pascal, milibar)
U	Belirsizlik
e	Buhar Basıncı
D	Çap (metre)
n	Dönüş Sayısı (rps, rpm)
uxe	Ekipman Belirsizliği
Ta	Hava Sıcaklığı (Kelvin)
J	İlerleme Katsayısı
KT	İtme Katsayısı
N	İtme Kuvveti (Newton)
T	İtme Kuvveti (Newton)
w	Karışım Oranı
C	Katsayı (yoğunluk hesabı için)
M	Moment (Newton metre)
KM	Moment Katsayısı
uxr	Rastgele Bileşen Belirsizliği
Va	Serbest Akım Hızı
$t(\alpha/2n,n-1)$	t dağılımından elde edilen kritik değer
η	Verim
KV	Volt Başına Üretebilecek Devir Sayısını (rpm/V)
ρ	Yoğunluk (kg/m3)

KISALTMA LİSTESİ

AMI	Geçici Keyfi Ağ Arayüzü
BEMT	Kanat Elemanı Momentum Teorisi
FR	Donmuş Rotor
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
İHA	İnsansız Hava Aracı
LCD	Sıvı Kristal Ekran
MRF	Çoklu Referans Çerçevesi
PLA	Polilaktikasit
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
SST	Kayma Gerilmesi Aktarımı (Shear Stress Transport)
VDC	Volt Doğru Akım

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Rüzgâr tüneli ve test düzeneği.....**7**
Şekil 2.2 Test düzeneği 3 boyutlu tasarımı.....**8**
Şekil 2.3 Test düzeneği şeması.....**9**
Şekil 5.1 Taranmış pervane modeli **25**
Şekil 5.2 Oluşturulan hesaplama ağı **26**
Şekil 5.3 Hesaplama alanı ve sınır koşulları.....**27**
Şekil 5.4 Çözüm ağı eleman sayısına göre K_T, K_M değişim grafiği.....**28**
Şekil 5.5 10000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim **29**
Şekil 5.6 15000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim **30**
Şekil 5.7 18000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim **31**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Ölçüm ekipmanlarının detayları, fotoğrafları, kalibrasyon aralıkları ve hata değerleri **10**

Tablo 2.2 Kullanılan diğer ekipman detayları ve fotoğrafları **12**

Tablo 3.1 10000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları **15**

Tablo 3.2 15000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları **15**

Tablo 3.3 18000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları **16**

Tablo 4.1 15000 rpm, 20 m/s serbest akım hızında itki kuvveti güven aralığı **20**

Tablo 4.2 10000 rpm dönme hızında toplam belirsizlik oranı **22**

Tablo 4.3 15000 rpm dönme hızında toplam belirsizlik oranı **22**

Tablo 4.4 18000 rpm dönme hızında toplam belirsizlik oranı **23**

Tablo 5.1 10000 rpm dönme hızında deney ve HAD hesaplamaları arasındaki % fark **33**

Tablo 5.2 15000 rpm dönme hızında deney ve HAD hesaplamaları arasındaki % fark **33**

Tablo 5.3 18000 rpm dönme hızında deney ve HAD hesaplamaları arasındaki % fark **34**

ÖZET

Elektrik Motorlu İHA Pervanesi Profilinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi ve Deneysel Analizi

Onur SEZEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Zafer GEMİCİ

İnsansız Hava Araçları (İHA), hem ticari hem de askeri alanlarda hızla gelişen ve yaygınlaşan bir teknoloji haline gelmiştir. Ticari uygulamalarda, lojistik, tarım, haritalama ve afet yönetimi gibi birçok alanda etkin çözümler sunarken, askeri alanda keşif, gözetleme ve operasyonel görevlerde stratejik avantajlar sağlamaktadır. Gelişen batarya teknolojisi ve fırçasız elektrik motorlarının yüksek verimliliği, mini İHA'ların daha uzun süreli ve yüksek performanslı uçuşlar gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır. Bu sebeple kullanımları da giderek yaygınlaşmıştır. Birçok firma bu mini İHA'lar için elektrik motorlarıyla tahrik edilmek üzere mini pervaneler geliştirmektedirler. Sabit kanatlı bu araçlar için üretilmiş APC firmasının 5X5E pervanesi literatürde çokça incelenmeyen küçük boyutlarda ve yüksek devirlerde çalışan bir pervanedir. Bu tez çalışmasında, sabit kanatlı mini insansız hava araçlarında kullanılan küçük boyutlu ve yüksek devirde çalışan APC 5x5E pervanesinin performansı hem deneysel yöntemlerle hem de Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında, pervanenin farklı dönüş hızları ve serbest akış hızları altındaki itme (K_T) ve moment katsayıları (K_M) ve verim (η) deneysel olarak ölçülmüş, elde edilen sonuçlar HAD simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Deney düzeneği ve ölçüm

sistemleri detaylandırılmış, belirsizlik analizi yapılarak sonuçların güvenilirliği değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada deneysel verilerde serbest akım hızının 0 ila 20m/s arasında %10'dan daha düşük toplam belirsizlikte deney sonuçları elde edilmiştir. Daha yüksek serbest akım hızlarında çıkan %24,75'lik belirsizliğin nedenleri tartışılmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) verilerinde ise önceki literatürlere uygun olarak hesaplamalarda kabul edilebilen değerler içerisinde (%10'dan daha az) itme katsayısında (K_T) en fazla %5,57, moment katsayısında (K_M) en fazla %6,44 ve verimde (η) en fazla %9,03 farkla hesaplama değerleri elde edilmiştir.

Tez toplam altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde literatürde yer alan benzer çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmanın özgün katkısı vurgulanmıştır. İkinci bölümde deney düzeneği ve kullanılan ekipmanlar, üçüncü bölümde ise deneylerin uygulama süreci açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deneysel sonuçların belirsizlik analizi yapılmış, beşinci bölümde sayısal hesaplama yöntemleri detaylandırılmıştır, deney ve sayısal simülasyon sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılarak gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İnsansız hava aracı, İHA, mini pervane, deneysel analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi, HAD

ABSTRACT

Investigation of Electric Motor UAV Propeller Profile with Computational Fluid Dynamics and Experimental Analysis

Onur SEZEN

Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zafer GEMİCİ

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have rapidly become a developing and widely used technology in both commercial and military fields. In commercial applications, UAVs provide effective solutions in areas such as logistics, agriculture, mapping, and disaster management, while in the military field, they offer strategic advantages in reconnaissance, surveillance, and operational missions. Advances in battery technology and the high efficiency of brushless electric motors have enabled mini-UAVs to achieve longer flight durations and higher performance. For this reason, their usage has become increasingly widespread. Many companies have been developing mini propellers designed to be powered by electric motors for these mini-UAVs. The APC 5x5E propeller, manufactured for fixed-wing UAVs, is a small-sized and high-speed propeller that has not been extensively studied in literature. In this thesis, the performance of the APC 5x5E propeller, which is used in fixed-wing mini-UAVs and operates at small sizes and high rotational speeds, was analyzed using both experimental methods and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Within the scope of the study, the thrust (K_T), moment coefficients (K_M), and efficiency (η) of the propeller were experimentally measured under various rotational speeds and freestream

velocities, and the results were compared with CFD simulations. The experimental setup and measurement systems were detailed, and an uncertainty analysis was conducted to evaluate the reliability of the results. In this study, experimental results were obtained with a total uncertainty of less than 10% for free-stream velocities ranging from 0 to 20 m/s. The reasons for the 24.75% uncertainty observed at higher free-stream velocities have been discussed. In the Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis, the computed values remained within the acceptable range (<10%) as established in previous literature, with a maximum deviation of 5.57% for the thrust coefficient (K_T), 6.44% for the moment coefficient (K_M), and 9.03% for efficiency (η).

The thesis consists of six main chapters. In the Introduction chapter, similar studies from literature are reviewed and the original contribution of the present study is emphasized. The second chapter describes the experimental setup and the equipment used, while the third chapter explains the experimental procedure in detail. In the fourth chapter, the uncertainty analysis of the experimental results is presented. The fifth chapter focuses on numerical computation methods, and the results obtained from experiments and simulations are compared and evaluated. Finally, the sixth chapter discusses the conclusions drawn from the study and provides recommendations for future research.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, UAVs, mini propeller, experimental analysis, computational fluid dynamics analysis, CFD

1
GİRİŞ

İnsansız Hava Araçları (İHA), fiziksel olarak içinde insan olmayan. Uzaktan veya dahili bilgisayarı ile planlanan görevi yerine getiren araçlardır. İlk İHA'lar 1916 yılında geliştirilmiştir [1]. İHA'ların son yıllarda kullanımı giderek artmaktadır. İHA'ların savunma, tarım, arama-kurtarma, lojistik, gözlem gibi birçok alanda hem ekonomik hem de güvenli çözümler sunması bu araçların önemini günden güne artırmaktadır. Askeri alanda riskli bölgelerde keşif, gözlem, hedefleme ve imha gibi kritik görevleri insan hayatını tehlikeye atmadan yerine getirebilmektedirler. Sivil kullanımda ise tarım arazilerin ilaçlanması, veriminin gözlenmesi, büyük şehirlerde trafik yoğunluğunun gözlenmesi, doğal afetlerde hasar tespiti ve arama-kurtarma faaliyetlerinde kullanımı bu araçları günümüzde oldukça popüler ve önemli kılmaktadır. İHA'lar gelişen teknolojiler ve yenilikçi tasarımlar sayesinde giderek daha verimli ve kullanışlı hale gelmiştir. Çok rotorlu hava araçlarının insanlı hava araçlarının gerçekleştiremeyeceği yüksek manevra kabiliyeti gerektiren hareketleri başarıyla gerçekleştirebilmesi, İHA'ların stratejik önemini artıran faktörler arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, daha verimli içten yanmalı veya elektrikli motorların geliştirilmesiyle, 27 saat ve üzerinde havada kalabilen sabit kanatlı İHA'lar ortaya çıkmıştır. Bu tür İHA'lar, insanlı savaş uçaklarının insan faktöründen kaynaklanan operasyonel kısıtlamalarını ortadan kaldırarak önemli bir avantaj sunmaktadır.

Bu özelliklerin yanı sıra, İHA'ların yüksek performansı ve farklı operasyonel senaryolara adaptasyon yeteneği, askeri ve sivil kullanım alanlarında artan bir ilgi görmelerini sağlamıştır. Bu bağlamda, İHA teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, modern havacılık endüstrisi için kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Havacılıkta pervane motorun ürettiği mekanik enerjiyi, önündeki hava kütlesini hava aracının hareket yönüne zıt yönde hızlandırmak suretiyle ileri doğru çekme kuvvetine dönüştürür [2]. İlk pervane 16.yy'da Leonardo da Vinci tarafından bir helikopter tasarımı için helisel olarak tasarlandı. Sonrasında 1723'teki ilk başarılı balon uçuşundan bir yıl sonra bir hava balonuna elle çevrilen bir pervane takıldı fakat elle tahrik pek de başarılı olamadı. İlk başarılı deneme 1852'de bir hava balonuna takıldı ve hava aracını 5 mil/h'lik bir hıza ulaştırdı. Fakat bu pervane tasarımında aerodinamik bir tasarım yerine kürek benzeri kanatlar kullanılmıştır. 1902-1903 kışı boyunca Wright kardeşler doğru hesaplamalar sağlayabilmek için pervane kavramıyla boğuştular ve 1903 baharında pervanenin esasen kanat profilleri kesitine sahip ve pervane düzlemine dik doğrultuda aerodinamik kuvvet üreten dönen bir kanat olduğunu fark eden kişilerdi [3].

1.1 Literatür Taraması

Bağçe, insansız hava aracı pervanesinin tasarım ve performans değerlendirmesi yapılmıştır. Turbotek firmasına prototip olarak üretilen dört adet pervanenin (10x6, 12x7, 10x7) performansları statik ve dinamik testlerle belirlenmiştir. Dört farklı Turbotek pervanesi için itki, tork, güç ve verimlilik değerleri, pervanelerin dönme hızlarının bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Testler, 5, 10, 15 ve 20 m/s sabit hava hızlarında ve 2.000-10.000 rpm arasında dönme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, analitik hesaplamalar, HAD analizleri ve Turbotek tarafından yapılan statik test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Turbotek ve deneysel sonuçların tatmin edici bir uyum gösterdiği bulunmuştur. Ancak, itki katsayılarının uyumlu olmasına rağmen, güç katsayılarında belirgin bir fark gözlenmiştir. 20 m/s'ye yakın hava hızlarında titreşimlerin artması, elektronik cihazların hassasiyetini etkileyerek belirsizliklere neden olmuştur [4].

Brandt, toplam 79 pervane için gerçekleştirilen rüzgâr tüneli testlerinin sonuçlarını sunmaktadır. Bu pervaneler hem benzinli hem de elektrikli motor uygulamalarını kapsayan çeşitli pervaneler olup hem elektrikli motorlarda hem de benzinli motorlarda test edilmiştir. Yapılan çalışmanın motivasyonu küçük ölçekli pervanelerin performansının derinlemesine incelenmemiş olmasıdır. Düşük Reynolds sayılarında aerodinamik performansın bozulduğu bilinmekle birlikte, bunun küçük ölçekli pervaneler üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır. Bu

durum, küçük ölçekli pervaneler için kullanılan tasarım metodolojilerinin eksik kalmasına yol açmaktadır. Bu açığı kapatmak amacıyla, UIUC Düşük Hızlı Rüzgâr Tüneli'nde bir test gerçekleştirilmiş ve pervane performans verileri toplanmıştır. Bu çalışmada, yüksek kaliteli bir pervane performansı veri seti oluşturulmuş ve bu veriler, aerodinamik eğilimleri analiz etmek için kullanılmıştır. Toplanan veriler, ileriye dönük araştırmalar için önemli bir temel sağlamaktadır. Yapılan testlerin güvenilirliği ve hızlı uygulanabilirliği doğrulanmış olup, gelecekteki çalışmalar için farklı uygulama ve geliştirme alanları sunmaktadır. Özellikle, aerodinamik davranışlar üzerine yapılan incelemeler, daha detaylı araştırmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır [5].

Lui ve arkadaşları, APC 1045 çok rotorlu bir pervanenin aerodinamik performansını analiz etmek amacıyla rüzgâr tüneli testleri, kanat elemanı momentum teorisi (BEMT) ve 3B hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak sistematik bir araştırma gerçekleştirmiştir. BEMT modeli, ilerleme oranı ≤ 0.567 olduğunda doğru ve güvenilir tahminler sağlarken, yöntem ilerleme oranı ≥ 0.661 olduğunda doğruluğunu kaybetmeye başlamaktadır. Buna karşılık, HAD simülasyonlarından elde edilen sonuçlar, tüm ilerleme oranlarında deneylerle iyi bir uyum göstermekte ve itki ve güç katsayılarındaki farklar sırasıyla yaklaşık %5 ve %4 düzeyinde kalmaktadır. Bu çalışma, serbest akış hızını değiştirerek söz konusu üç farklı yöntemin kullanımının avantaj ve sınırlamalarını araştırmak için aerodinamik parametreleri karşılaştırmaktadır. BEMT yönteminin sınırlamaları göz önünde bulundurulduğunda, küçük ölçekli sabit açılı pervanelerin aerodinamik parametrelerini tahmin etmek için yeterince güvenilir olduğu görülmüştür [6].

Serrano ve arkadaşları, dört adet 12 inç çapındaki pervanenin aerodinamik performansını pervane disk hücum açıları 0° ile 90° arasında ve ilerleme oranları 0 ile 0.55 arasında değişen koşullarda incelemiştir. Altı eksenli yük hücresi kullanılarak yapılan aerodinamik yük ölçümleri, tüm incelenen ilerleme oranlarında, tüm pervanelerin itiş gücünün disk hücum açısının artmasıyla birlikte arttığını göstermiştir. İleri giden ve geri çekilen kanatlar arasındaki yük farkı, pervane hücum açısının artmasıyla birlikte artan yalpa ve sapma momentlerine neden olmuştur. İlerleme oranının bir fonksiyonu olarak çizilen itiş gücü, güç ve itme verimliliği grafikleri, disk hücum açılarının aralığında birbirleriyle örtüşmüştür. Pervane performansının analitik tahmini, kanat elemanı teorisi

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler ile farklı akış modelleri kullanılarak yapılan tahminler karşılaştırılmıştır. Akış modellerinin, maksimum %15'lik bir sapma ile sıfır olmayan geniş bir disk hücum açısı aralığında pervane performansını tahmin edebildiğini göstermiştir [7].

Bryant, 7x4.5 pervanesinin itiş performansını Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) tabanlı HAD çalışmaları ve deneysel ölçümler kullanarak incelemiştir. Amacı, belirli bir çalışma koşulları seti altında, dönme hızı ile itiş gücü arasındaki ilişkiyi doğru bir ampirik model formülasyonu ile elde etmektir. HAD çalışmaları, pervane itiş gücünü ilerleme oranı, yan rüzgâr hızı ve yer yakınlığına bağlı olarak, farklı pervane dönme hızları için değerlendirmiştir. Deneysel çalışmalar ise pervane itiş gücünü statik durumda ve farklı yer yakınlıklarında, yine bir dizi dönme hızı aralığında değerlendirmiştir. Bu deneysel ölçümler, HAD simülasyonları tarafından yakalanan eğilimler için bir dayanak oluşturarak bir İHA'nın kontrol algoritmasında kullanılacak doğru bir ampirik itiş modeli geliştirilmesini sağlamıştır [8].

Xiang ve arkadaşları, elektrikli uçaklar için geliştirilmiş bir pervane tasarım yöntemi sunulmuştur. Belirli bir çalışma koşulu ve kanat profili dağılımı için, bu yöntem, maksimum verimli pervanenin kanat genişliği ve hatve açısı dağılımını, verimliliğini, tork ve itiş katsayılarını belirleyebilmektedir. Seyir koşulundaki uçuş hızı, itiş gücü ve dönme hızına göre, elektrikli bir uçağın pervanesi bu yöntem kullanılarak tasarlanmıştır. Pervanenin ölçeklendirilmiş modeli (çap 0,96 m) için rüzgâr tüneli testi gerçekleştirilmiştir [9].

Yang ve arkadaşları, doğrudan HAD tabanlı yüksek doğruluklu çok seviyeli bir pervane optimizasyon çerçevesi geliştirmiştir. Bu yaklaşım, hesaplama maliyeti ile model doğruluğu arasındaki çelişkiyi çözmeyi amaçlamaktadır. Önerilen optimizasyon kriteri ve analiz yöntemi sayesinde, üç boyutlu akışın optimum pervane şekli üzerindeki etkisi sayısal olarak ifade edilmektedir. Önerilen yöntem, güneş enerjisiyle çalışan bir uçak için geliştirilen iki kanatlı bir pervane üzerinde doğrulanmıştır. Ayrıca, çalışma pervane optimizasyonu hakkında birkaç genel kural sunmaktadır [10].

Rostami ve Farajollahi, kanal ile tasarlanmış bir çift pervane (ön ve arka) için yeni bir tasarım ve analiz üzerinde kaydedilen ilerlemeleri açıklamaktadır. Altı farklı kanal konfigürasyonuna sahip bir İHA modeli analiz edilerek en uygun kanal

tasarımı belirlenmiştir. Hareketli Referans Çerçevesi (MRF) yöntemi, hareketli rijit bir cisim etrafındaki akışlar için HAD simülasyonlarında uygulanmış ve incelenmiştir. Analizlerde, pervanenin dönme hızı ve hücum açısındaki değişiklikler, bu tasarımın genel aerodinamik özelliklerini daha iyi anlamak için ele alınmıştır. Kanal ile tasarlanmış ön ve arka pervane tasarımının, kanal içermeyen iki pervaneli tasarımlara göre verimliliği %6 oranında artırdığını ve daha iyi performans sunduğunu ortaya koymaktadır [11].

Loureiro ve arkadaşları, APC 14×7E pervanesinin analizinde düşük doğruluklu yöntemler arasında Kanat Elemanı Momentum Teorisi (BEMT), yüksek doğruluklu yöntemler arasında ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kω-SST türbülans modeli kullanılmıştır. Geometrik modellemeyi ise bir 3D tarayıcı ile yapmışlardır. HAD modellerinde, dönen ve sabit bölgelerin uyumunu sağlamak için iki yaklaşım değerlendirilmiştir: Donmuş Rotor (FR) ve Geçici Keyfi Ağ Arayüzü (AMI). Deneysel testlerle sonuçların karşılaştırılması, uygun analiz yönteminin seçiminin Reynolds sayısı ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğunu göstermiştir. Öte yandan, HAD-AMI modeli yüksek ilerleme oranı hızlarında daha iyi sonuçlar vermiş, ancak hesaplama maliyeti daha yüksek olmuştur. HAD-FR modeli, hatalarda sabit bir desen sergilemiş ve verimlilik analizinde sonuçları olumsuz etkilememiştir [12].

Carreño Ruiz ve arkadaşları, küçük ölçekli çok rotorlu itki sistemlerine dair deneysel veriler sunulmuş ve bu veriler düşük Reynolds sayısı koşullarındaki bu araçların aerodinamiğini tanımlamak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli ile birleştirilmiştir. STAR-CCM+ yazılımı kullanılarak, dinamik ağ temelli zaman duyarlı analiz ve statik ağ temelli kararlı durum teknikleri uygulanmış, Navier-Stokes denklemleri uygun bir çerçevede çözülmüştür. Uçuş zarfını karakterize eden Reynolds sayıları aralığında itiş ve tork katsayılarını doğru bir şekilde tanımlayabildiğini göstermektedir. Düşük Reynolds sayısı rejiminde çalışan küçük ölçekli çok rotorlu sistemlerin aerodinamiği için deneysel ve sayısal analizlerin entegrasyonunu başarıyla sunmaktadır [13].

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde hızla yaygınlaşan insansız hava araçlarında (İHA) kullanılan pervanelerin performansını değerlendirmek ve geliştirmek önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışma, daha önceki araştırmalardan farklı olarak, daha küçük çaplı bir pervane, daha ince bir kanat profili ve daha yüksek dönme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, APC firmasına ait ve 5x5E elektrik motorları için özel olarak tasarlanmış bir pervanenin aerodinamik performansı, deneysel yöntemler ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için, Arduino mikrodenetleyici tabanlı bir deney düzeneği oluşturulmuş ve bu düzenekte mikrodenetleyiciye uyumlu sensörler kullanılmıştır. Pervanenin geometrik modeli, 3 boyutlu bir tarayıcı ile dijital olarak taranmış ve HAD analizleri için uygun bir model haline getirilmiştir. HAD simülasyonları, Ansys Fluent yazılımında k-ω SST türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, pervanenin küçük ölçekli ve ince yapısı dikkate alınmış ve aerodinamik davranışlarının detaylı bir şekilde anlaşılması hedeflenmiştir.

Bu çalışma ile literatürde küçük çaplı pervaneler üzerine sınırlı sayıda bulunan çalışmalara katkı sağlanması ve bu alandaki bilgi birikiminin artırılması amaçlanmıştır.

2
DENEY SİSTEMİ

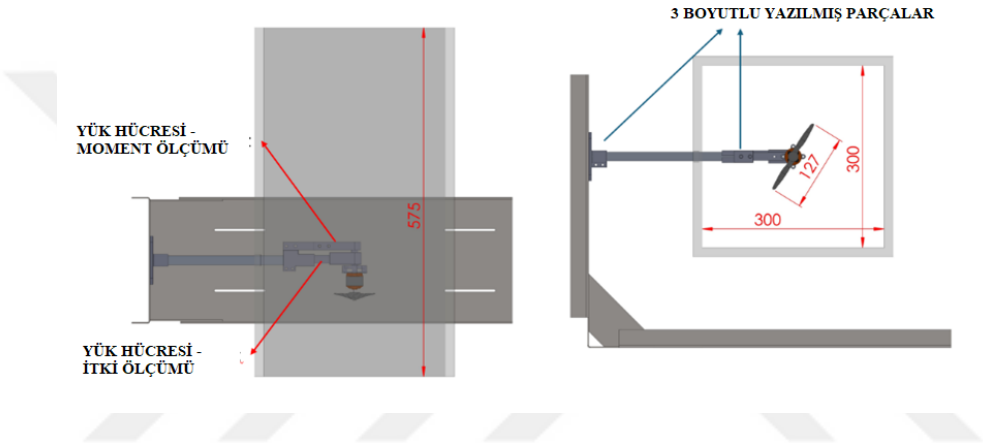
Bu çalışmada kullanılan pervane, APC firmasının mini insansız hava araçları için özel olarak ürettiği, 5x5” boyutlarında ve fırçasız elektrik motorlara uygun E serisi bir modeldir. Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Laboratuvarı'nda bulunan rüzgâr tünelinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan rüzgâr tüneli, 300x300x 500 mm boyutlarında tamamen şeffaf bir test bölmesine sahip, açık çevrim bir sistemdir. Tünel, maksimum 40 m/s'ye kadar serbest akış hızları sağlayabilmekte olup, hız kontrolü fan frekans invertörü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Serbest akış hızını doğru bir şekilde ölçmek ve deneylerin hassasiyetini artırmak amacıyla, test bölmesinin girişine ve çıkışına yükseklik ayarlı iki adet pitot tüpü yerleştirilmiştir. Bu tüpler, hız ölçümlerinin hassasiyetini artıracak şekilde konumlandırılmıştır. Test düzeneği ve rüzgâr tünelinin genel görünümü Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Rüzgâr tüneli ve test düzeneği

2.1 Deney Düzeneği

Test düzeneğinin tasarımı sırasında, piyasada bulunan hazır test düzenekleri incelenmiş ve tasarım sürecinde İsmail ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma dikkate alınmıştır [14]. Bu çalışmada pervanenin oluşturduğu kuvvetlerin, pervanenin arkasından ve akış düzlemi ile 90° açıyla doğrudan ölçülmesi en yüksek ölçme puanını almıştır. Bu yaklaşım temel alınarak, test düzeneği bu gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Test düzeneğinin üç boyutlu tasarımı, bir 3D tasarım yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Test düzeneği 3 boyutlu tasarımı

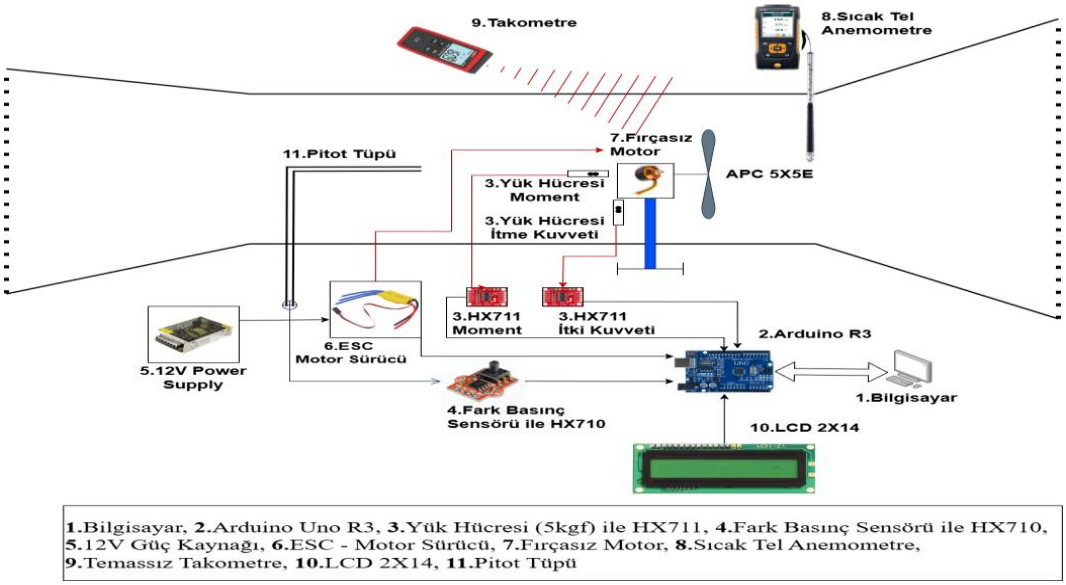
Deney düzeneği bileşenlerinin hızlı ve kolay bir şekilde üretilebilmesi amacıyla, tüm parçalar A8net model bir 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu işlem sırasında, deney sırasında oluşabilecek kuvvet ve momentlere karşı yeterli dayanımı sağlamak için mukavemet özellikleri yüksek olan PLA+ filament tercih edilmiştir.

Kuvvet ve moment ölçümleri gerektiren deneylerde yük hücreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, pervanenin oluşturduğu kuvvetlerin doğru bir şekilde ölçülmesi amacıyla, pervane montaj parçasının arkasına iki adet yük hücresi yerleştirilmiştir. İlk yük hücresi, pervane akış yönüne dik eksende ve ölçüm ucu pervane merkezinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. İkinci yük hücresi ise pervanenin oluşturduğu akıştan kaynaklanan momenti ölçmek amacıyla, pervane ekseninden 50 mm uzaklıkta bir moment kolu ile bağlanmıştır.

Tüm elektronik bileşenlerin çalıştırılmasında 12V, 200W bir güç kaynağı kullanılmıştır. Test kanalında serbest akış hızını ölçmek amacıyla TESTO 440i

sıcak tel anemometre tercih edilmiştir. Ayrıca pervane dönüş hızının belirlenmesi için UNI-T UT373 temassız takometre kullanılmıştır. Havanın yoğunluğunu belirlemek amacıyla MPS20N0040D-D çipine sahip bir barometrik basınç sensörü kullanılmıştır. Bu sensör aynı zamanda pitot tüpünden serbest akış hızını dijital olarak ölçme imkânı sağlamış, ancak ana ölçüm cihazı olarak sıcak tel anemometre tercih edilmiştir. Deney ortamının sıcaklığı ise HTC-1 dijital termometre ile ölçülmüştür. Pervanenin dönmesini sağlamak için Kyrio A2212-6 2000 KV model fırçasız motor ve 30 A kapasiteli bir elektronik hız kontrol cihazı kullanılmıştır. Fırçasız motor modelinin tanımında bulunan KV değeri uygulanan voltaj başına motorun dakikada dönebileceği hızı ifade etmektedir. Elektronik cihazların çalıştırılması ve sensörlerden gelen verilerin okunması amacıyla, Arduino R3 mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Mikrodenetleyiciler, kullanıcı tarafından programlanabilir olmaları sayesinde esnek bir kullanım sunmakta ve sensörlerden elde edilen verilerin hassasiyetle ölçülmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikleri, deney sırasında algılama, etkileme ve veri kaydetme işlemlerinin hassas zaman aralıklarında gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır [15], [16], [17]. Deney düzeneğinin şeması Şekil 2.3'te verilmiştir



1.Bilgisayar, **2**.Arduino Uno R3, **3**.Yük Hücresi (5kgf) ile HX711, **4**.Fark Basınç Sensörü ile HX710, **5**.12V Güç Kaynağı, **6**.ESC - Motor Sürücü, **7**.Fırçasız Motor, **8**.Sıcak Tel Anemometre, **9**.Temassız Takometre, **10**.LCD 2X14, **11**.Pitot Tüpü

Şekil 2.3 Test düzeneği şeması

2.2 Deney Düzeneği Elemanları

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazların teknik özellikleri, yapılan araştırmanın güvenilirliği ve geçerliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu özellikler, deneylerde elde edilen verilerin doğruluğunu doğrudan etkilediği gibi, cihazların seçimi ve kullanımı sırasında karşılaşılan sınırlamaların anlaşılmasına da katkı sağlar. Deneysel metodolojinin ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilmesi için, parametrelerin ölçümünde kullanılan cihazların teknik özelliklerinin açıkça belirtilmesi gereklidir. Cihazların hassasiyet değerleri, ölçüm aralıkları, çalışma prensipleri ve kalibrasyon durumları gibi bilgiler, tablo formatında sistematik bir şekilde verilecektir. Bu yaklaşım, kullanılan ekipmanların çalışma kapasitelerini ve deney sonuçlarına olan etkilerini net bir şekilde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Ayrıca, bu bilgilerin sunumu, çalışmanın tekrarlanabilirliği ve karşılaştırılabilirliği açısından da önemli bir referans sağlayacaktır. Ölçüm cihazların teknik özelliklerinin bu bölümde detaylandırılması, deneysel sonuçların yorumlanmasında temel bir kaynak oluşturacak ve araştırmanın bilimsel katkısını daha iyi anlamamıza olanak tanıyacaktır.

Tablo 2.1 Ölçüm ekipmanlarının detayları, fotoğrafları, kalibrasyon aralıkları ve hata değerleri

Ölçülen Parametre	**Ekipman**	**Hassasiyet**	**Görsel**
İtki Kuvveti	Yük Hücresi	5 kg / 49 N 0,02%	
Moment	Yük Hücresi	5 kg / 49 N 0,02%	

Tablo 2.1 Ölçüm ekipmanlarının detayları, fotoğrafları, kalibrasyon aralıkları ve hata değerleri (devamı)

Ölçülen Parametre	**Ekipman**	**Hassasiyet**	**Görsel**
Hava Basıncı	MPS20N0040D-D Barometre	0-40 kPa, 3,3- 5 VDC ± 0,3%	
Serbest Akım Hızı	TESTO 440i Sıcak Tel Anemometre	0,03 m/s + 4 %	
Dönüş Hızı	UNI-T UT373 Temassız Takometre	0,04%+2 rpm	
Ortam Sıcaklığı	HTC-1	-10℃～+50℃ ± 1,0 ℃ 10RH～99RH ± %5	
Doğrusal Ölçümü	Kumpas	0-150 mm ± 0,001 mm	

Ölçüm cihazları dışında deney düzeneğinde kullanılan diğer ekipmanlar Tablo 2.2'deki gibidir. Test düzeneği elemanlarının işlevleri ve deney sürecindeki rolleri

açıklanarak, deneyin gerçekleştirilme yöntemine dair bütünsel bir çerçeve çizilecektir. Bu bilgiler, deneyin metodolojisini detaylandırmak ve kullanılan ekipmanların deney prosedürüne olan katkısını açıklamak amacıyla sunulmuştur.

Tablo 2.2 Kullanılan diğer ekipman detayları ve fotoğrafları

Ekipman	**Detay**	**Görsel**
Fırçasız motor	Kyrio A2212-6 2000KV	
Fırçasız motor sürücü	30 A	
Analog-Dijital dönüştürücü – HX711	Çalışma gerilimi: 2,7-5 V Çalışma akımı: <1.5 mA 10- 80 arası seçilebilir SPS	
Güç kaynağı	12 V 16.7 A	
LCD Ekran	16×2 LCD Ekran	

Tablo 2.2 Kullanılan diğer ekipman detayları ve fotoğrafları (devamı)

Ekipman	Detay	Ekipman
Fan frekans invertörü	Siemens MicroMaster 420 (0.12-11 kW)	
Bilgisayar	MSI PE70 6QE	

3
DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneyler, sabit ortam sıcaklığında, farklı serbest akım hızlarında ve üç farklı motor dönüş hızında gerçekleştirilmiştir. Fırçasız motor, güç kaynağından sağlanan voltaj ve akım değerlerine göre 10.000 rpm, 15.000 rpm ve 18.000 rpm hızlarında çalıştırılmıştır. Deney süresince ortam sıcaklığı 24°C'de sabit tutulmuş, bağıl nem %40 ve ortam basıncı 101.325 Pa (1013,25 mbar) olarak barometrik basınç sensörü ile ölçülmüştür. Her bir motor dönüş hızı için deneyler, öncelikle statik koşullarda (serbest hava akımı hızı 0 m/s) başlatılmış ve ardından serbest akım hızı her bir adımda 5 m/s artırılarak devam ettirilmiştir. Deneyler, pervanenin itiş kuvveti üretemediği noktaya kadar veya rüzgâr tünelinin sağlayabileceği maksimum serbest akım hızı olan 40 m/s'ye kadar sürdürülmüştür.

Bu deney düzeni, pervane performansının farklı hız ve akış koşullarında incelenmesini ve elde edilen verilerin karşılaştırmalı analizine olanak tanımıştır. Deneysel veriler, statik ve dinamik koşullarda pervanenin çekme kuvveti ile serbest akım hızları arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla bilgisayardan okunarak Excel tablosuna kaydedilmiştir. Elektronik kutu üzerindeki LCD ekran, deney düzeneğinin gözlemlenmesi sırasında koşulların sabitlenmesini kontrol etmek için yardımcı bir araç olarak kullanılmıştır. Her bir deney koşulunda LCD ekrandan stabil koşullar sağlandığında, rüzgâr tüneli test kanalındaki serbest akım hızı sıcak tel anemometre ile kontrol edilmiş ve gerekli durumlarda rüzgâr tünelinin fan frekans invertörü ile istenilen hız sağlanana kadar ayarlamalar yapılmıştır. Pervane devrinin sabit tutulması için temassız takometre ile ölçümler alınmış, gerektiğinde fırçasız motor sürücüsüne bilgisayar üzerinden mikro denetçi kontrolünde yüzdesel çalışma verileri gönderilmiştir. İstenilen devir sağlandığında veri tabloya kaydedilmiştir.

Statik deney tamamlandıktan sonra motor durdurulmuş ve rüzgâr tüneli test bölmesindeki serbest akım hızı istenilen değere ayarlandıktan sonra yük hücrelerinde sürüklenme direncinden kaynaklanan kuvvet ve momentler sıfırlanmıştır. Bu işlem, hava akımından oluşan kuvvetlerin etkisini ortadan kaldırarak sadece pervanenin dönmesinden kaynaklanan kuvvetlerin ölçülmesini sağlamıştır. Her serbest akım hızında bu süreç tekrar edilmiştir. Her serbest akım hızı ve motor devri için deneyler üçer kez tekrarlanarak ölçümlerin doğruluğu artırılmıştır. Deneysel çalışmalar, Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilen devir değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, her bir devir devirde ölçüm alınan serbest akım hızları tabloların sol sütunlarında ve ilerleme oranları tabloların sağ sütunda sunulmuştur. Deneylerde, yük hücreleri kullanılarak pervanenin oluşturduğu itki kuvveti (T) ve moment (M) değerleri ölçülmüştür. Ayrıca, her bir deney koşulunda, ilgili devir değerine karşılık gelen ilerleme oranları tabloların sağ sütunlarında verilmiştir.

Tablo 3.1 10000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları

10000 rpm / 166.667 rps	
V_a **(m/s)**	J
0	0
5	0,2362
10	0,4724
15	0,7087
20	0,9449

Tablo 3.2 15000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları

15000 rpm / 250 rps	
V_a **(m/s)**	J
0	0
5	0,1575
10	0,3150

Tablo 3.2 15000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları (devamı)

15000 rpm / 250 rps	
V_a **(m/s)**	J
15	0,4724
20	0,6299
25	0,7874
30	0,9449
35	1,1024

Tablo 3.3 18000rpm dönme hızında yapılan deneylerin serbest akım hızları ve ilerleme oranları

18000 rpm / 300 rps	
V_a **(m/s)**	J
0	0
5	0,1312
10	0,2625
15	0,3937
20	0,5249
25	0,6562
30	0,7874
35	0,9186
40	1,0499

3.1 Deneysel Metodoloji

Aerodinamik özellikler, bir pervanenin mekanik ve akışkan özelliklerine göre göreceli performansını tanımlayan bir dizi boyutsuz katsayıdır [18]. İster hava için kullanılan pervaneler olsun isterse su gibi daha yoğun bir akışkan olsun, bu boyutsuz parametreler her akışkan ortamında kullanabilir ve pervanenin aerodinamik performansları bu sayılarla karşılaştırılır [19].

Bunlar arasında pervanelerle ilgili dört önemli fiziksel büyüklük bulunmaktadır: İtme katsayısı (K_T), pervanenin ürettiği itiş kuvvetinin (T) yoğunluk (ρ), dönüş hızı (n,rps) ve pervane çapı (D) ile normalize edilmiş bir göstergesidir. Denklem 3.1 ile ifade edilir. Moment katsayısı (K_M), pervanenin ürettiği tork (M) ile yoğunluk (ρ), dönüş hızı (n) ve pervane çapı (D) ile normalize edilmiş bir göstergesidir. Denklem 3.2 ile ifade edilir. Bu parametre, pervanenin belirli bir yük altında ne kadar dönme momenti oluşturduğunu ifade eder ve enerji verimliliğinin değerlendirilmesinde önemlidir. İlerleme katsayısı (J) pervanenin ileri hızını (V_a), dönme hızı (n) ve çapı (D) ile normalize eden bir parametredir, Denklem 3.3 ile ifade edilir. Bu katsayı, pervanenin çalışma koşullarını ifade eden önemli bir boyutsuz parametredir ve genellikle performans grafikleri, bu parametreye bağlı olarak gösterilir. Verim (η), pervanenin mekanik gücün ne kadarını ileri itiş kuvvetine dönüştürdüğünü ifade eder ve pervanenin enerji verimliliğini değerlendirmek için kritik bir ölçüttür. Denklem 3.4 ile ifade edilir.

$$K_T = \frac{T}{\rho.n^2.D^4} \tag{3.1}$$

$$K_M = \frac{M}{\rho.n^2.D^5} \tag{3.2}$$

$$J = \frac{V_a}{n.D} \tag{3.3}$$

$$\eta = \frac{K_T}{K_M}.\frac{J}{2\pi} \tag{3.4}$$

Bu boyutsuz katsayılarda ortam özelliklerine göre hesaplanması geren diğer parametre havanın yoğunluğudur (ρ). Hava yoğunluğu, meteoroloji, ilgili bilimler ve mühendislikle ilgili birçok önemli sorunda yer alır. Örneğin, Deniz Mühimmat Test İstasyonu'nda, hava yoğunluğu bilgisi, bir füzenin sürükleme katsayısını belirlemek ve atmosferdeki ışık kırılmasına yönelik düzeltme eğrilerini hesaplamak

için gereklidir. Bu sebeplerle, çeşitli birimlerde yoğunluğu hesaplamak için dönüştürme faktörlerini içeren bir tablo hazırlamanın gerekli olduğu düşünülmüştür [20]. Havanın yoğunluğunu hesaplamak için, buhar basıncı (e) karışım oranından (w) Denklem 3.5 ile hesaplanır. Havanın yoğunluğu ise C katsayısı (0,34844) ile havanın toplam basıncı (P) ve havanın sıcaklığı ile (T_a) Denklem 3.6 ile hesaplayabiliriz.

$$e = \frac{w.P}{0{,}622+w} \tag{3.5}$$

$$\rho = C.\frac{(P-0{,}37.e)}{T_a} \tag{3.6}$$

Denklem 3.5, Denklem 3.6 içinde yerine konularak sadeleştirilir ise, Denklem 3.7 elde edilir.

$$\rho = C.P\,\frac{(1-0{,}00061.w)}{T_a} \tag{3.7}$$

Deney koşullarında hesaplamaları yaparsak (T_a = hava sıcaklığı 24°C, w=bağıl nem %40 RH) havanın yoğunluğunu 1,188 kg/m^3 olarak bulunmuştur.

4
BELİRSİZLİK ANALİZİ ve GÜVEN ARALIĞI

4.1 Güven Aralığı

Güven aralıkları, anlamlılık testlerine bir alternatif olarak kullanılabilir, çünkü bir p-değeri bulmadan testin anlamlılığını belirlemeye olanak tanır. Ayrıca, anlamlılık testlerine göre belirgin bir avantaja sahiptirler, çünkü p-değerinin sağlayamadığı etkilerin bir ölçüsünü ve çalışmalar arasında bir karşılaştırma noktası sunarlar [21]. Deneylerimiz için her bir parametrede üç adet deney yapıldığı için bu yöntemi uygulamak uygun olacaktır. Araştırmalarda %95 güven düzeyi kullanımı, istatistiksel analizlerde yaygın bir uygulamadır. Bu, sonuçların %95 olasılıkla gerçek popülasyon parametresini yansıttığı anlamına gelir.

Deney sonuçlarının ortalaması ($\bar{x}$), her bir ölçüm değerinin toplamının örnek sayısına (n) bölünmesiyle hesaplanır. Formül şu şekildedir:

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+x_3}{n} \tag{4.1}$$

Örneklem standart sapması (s), ölçüm değerlerinin ortalamadan sapmasının karelerinin ortalamasının karekökü alınarak hesaplanır.

$$s = \sqrt{\frac{1}{1-n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{4.2}$$

%95 güven aralığı, örneklem ortalamasına ($\bar{x}$) t-dağılımından elde edilen kritik değerin çarpımı ile hesaplanan bir belirsizlik değeri eklenip çıkarılarak elde edilir.

$$CI = \bar{x} \pm t_{\alpha/2,\mathrm{n}-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{4.3}$$

Serbestlik derecesi (*n-1*) iki olan bir dağılımda kritik *t* değeri $t_{0,025,2}$=4,303'tür. İstatistiksel güven aralıklarında kullanılan α (alfa) değeri, yapılan tahminin dışında kalma ihtimalini, yani yanılma payını ifade eder. Bir başka deyişle, %95 güven düzeyiyle yapılan bir çıkarımda yapılan tahminin %5 olasılıkla doğru olmayabileceğini gösterir. Güven aralıkları genellikle ortalamanın her iki tarafına eşit mesafede tanımlandığı için (±) bu toplam hata payı ikiye bölünerek $\alpha/2$ şeklinde kullanılır. Bu sayede, dağılımın hem sol hem de sağ uçlarında $\alpha/2$=0.025 kadar birer hata payı bırakılarak toplam %0,05 olarak, ortadaki %95'lik güven bölgesi tanımlanmış olur. Bu nedenle güven aralığı hesaplamalarında $t_{(\alpha/2,\ n-1)}$ gibi kritik değerler tercih edilir.

Deney verileri bu yöntemle sınandığında tüm verilerin %95 güven aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 4.1 'de HAD mesh bağımsızlığının yapıldı pervane dönme hızı ve serbest akım hızında deneyden elde edilen itki kuvvetin Denklem 4.1, 4.2, 4.3 ile nasıl hesaplandığı örnek olarak verilişitir.

Tablo 4.1 15000 rpm, 20 m/s serbest akım hızında itki kuvveti güven aralığı

1. Deney itki (N)	**2. Deney itki (N)**	**3. Deney itki (N)**	$\bar{x}$	***s***	**CI**
1,7332	1,767	1,7362	1,7455	0,018709	[1,699;1,7919]

4.2 Belirsizlik Analizi

Artık birçok çevrede, deneysel sonuçları, ilgili belirsizlikleri açıklamadan sunmak kabul edilemez bir durumdur. Belirsizlik analizi, yayınlama sürecindeki belirgin rolünün yanı sıra, deneylerin tekrarlandığında ortaya çıkan sapmaların önemini değerlendirmek için deneyciye mantıklı bir yöntem sunar. Student's-t testi, William Sealey Gosset tarafından, özellikle örneklem boyutunun 30'un altında hipotez testlerini daha güvenilir bir şekilde gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiştir [22]. Bu yöntem, düzgün çalışmayan bir deneyde sorunun kaynağını bulmak için güçlü bir araç olabilir [23], [24]. Student's-t testi, özellikle küçük örneklem boyutlarında ölçüm belirsizliklerinin doğrudan etkilediği durumlarda güvenilir çıkarımlar yapılabilmesi için kullanılır. Bu bağlamda, Student's-t testi yalnızca iki grup ortalamasının karşılaştırılmasına değil, aynı zamanda ölçümlerdeki rastgele belirsizliklerin değerlendirilmesine de olanak tanır. Belirsizlik analizi ise ölçüm

sisteminden ve yöntemden kaynaklanan sapmaları sayısal olarak ifade eder. Student's-t testi ile oluşturulan güven aralıkları, belirsizlik analizinden elde edilen değerlerin istatistiksel anlamlılık çerçevesinde değerlendirilmesini sağlar. Dolayısıyla Student's-t testi ve belirsizlik analizi birlikte kullanıldığında, elde edilen sonuçların sadece teknik olarak değil, aynı zamanda istatistiksel güvenilirlik açısından da güçlü bir temele dayandırılması mümkün olur. Örneğin, pervane kanadı üzerinde profil hücum açısını yeni kanatta arttırarak, önceki kanata kıyasla çekme katsayısını %5 artırdığı iddia ediliyorsa, ancak bu ölçümde ±%6 belirsizlik varsa, bu testin geçerli olduğunu söylemek mümkün değildir.

Hesaplamalardaki belirsizliği tanımlamak için, Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen aşağıdaki belirsizlik denklemi kullanılır [25].

$$u_R = \sqrt{(\frac{\partial R}{\partial x1})^2 u_{x_1}^2 + (\frac{\partial R}{\partial x2})^2 u_{x_2}^2 + \cdots + (\frac{\partial R}{\partial xn})^2 u_{x_n}^2} \tag{4.4}$$

Bu denklemde, u_R R nin belirsizliklerini ifade eder, x_1, $x_2 \ldots x_n$ değişkenliklerine bağlı bir fonksiyondur. u_{x1}, u_{x2},, u_{xn} değişkenlerinin belirsizliğidir.

Eğer hesaplamalar %95 güven aralığı ile tahmin ediliyorsa, cihaz hatası başlangıçta 2'ye bölünmeli ve elde edilen nihai sonuç 2 ile çarpılmalıdır.

$$u_{x1} = 2\sqrt{(\frac{u_{xe1}}{2})^2 + u_{x1r}^2} \tag{4.5}$$

u_{xe1}, cihazın belirsizliğini ifade eder. u_{x1r}, rastgele bileşenlerin belirsizliğini ifade eder.

4.3 Belirsizlik Analizi Sonucu

Pervanenin aerodinamik performans analizinde kullanılan hesaplamaların toplam belirsizlik analizinin gerçekleştirilmesi için öncelikle bu hesaplamalarda kullanılan değişkenlerin belirsizliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, kullanılan hava yoğunluğu Denklem 3.7 ile hesaplandığından, bu denklemin belirsizlik analizi yapılmıştır. Havanın yoğunluğu hesaplanırken oluşabilecek toplam hata U_ρ = 0,00536 kg/m^3 ve relatif hata $U_{\rho\,\%}$= 0,45% olarak hesaplanmıştır. Pervanenin aerodinamik performansını değerlendirmek amacıyla itme katsayısı

(K_T), moment katsayısı (K_M), ilerleme oranı (J) ve verim (η) hesaplamalarına yönelik toplam belirsizlik değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Her bir katsayı için deney yapılan farklı devir değerlerine bağlı olarak elde edilen toplam belirsizlik değerleri Tablo 4.2, 4.3 ve 4.4 de verilmiştir.

Tablo 4.2 10000 rpm dönme hızında toplam belirsizlik oranı

V_a	U_{K_T}	U_{K_M}	U_J	U_η
0	2,84%	7,01%	0,06%	7,56%
5	2,57%	7,12%	4,60%	8,86%
10	3,98%	7,26%	4,30%	9,33%
15	3,68%	5,43%	4,20%	7,79%
20	4,55%	5,68%	4,15%	8,38%

Tablo 4.2'e baktığımızda pervanenin 10000 rpm devir hızında itki katsayısında (K_T) en fazla toplam belirsizlik %|4,55|'dir. Moment katsayısında (K_M) en fazla toplam belirsizlik %|7,26| ve verim katsayısı (η) için ise en fazla toplam belirsizlik %|9,33|'dür. Pervanenin itki üretebildiği son serbest akım hızı olan 20 m/s'ye hıza kadar tüm toplam belirsizlik değerleri %|10|'un altındadır.

Tablo 4.3 15000 rpm dönme hızında toplam belirsizlik oranı

V_a	U_{KT}	U_{KM}	U_J	U_η
0	4,53%	3,33%	0,05%	5,62%
5	4,26%	6,47%	4,60%	9,01%
10	5,23%	6,23%	4,30%	9,20%
15	3,54%	7,49%	4,20%	9,29%
20	5,35%	5,78%	4,15%	8,90%
25	7,14%	7,44%	4,12%	11,10%
30	9,61%	9,91%	4,10%	14,40%
35	19,56%	14,61%	4,09%	24,75%

Tablo 4.3'e bakacak olursak pervanenin 15000rpm devir hızında, 20m/s serbest akım hızına kadar Tablo 4.4'e benzer şekilde toplam belirsizlikler %10'un altında kalmaktadır fakat hız 20m/s'nin üzerine çıktıkça toplam belirsizlikte artmaktadır. Bu devirde itme katsayısı (K_T) için en fazla toplam belirsizlik 35m/s son hızda %19,56, moment katsayısı (K_M) için aynı hızda en fazla toplam belirsizlik %14,61, verim (η) için ise en fazla toplam belirsizlik %24,75'tir.

Tablo 4.4 18000 rpm dönme hızında toplam belirsizlik oranı

V_a	U_{KT}	U_{KM}	U_J	U_η
0	1,65%	2,29%	0,05%	2,82%
5	1,95%	2,32%	4,60%	3,03%
10	2,44%	2,38%	4,30%	5,49%
15	3,16%	2,74%	4,20%	5,93%
20	3,58%	3,37%	4,15%	6,43%
25	9,96%	3,70%	4,12%	11,39%
30	9,96%	7,69%	4,10%	13,23%
35	16,88%	13,26%	4,09%	21,85%
40	18,23%	15,62%	4,08%	24,35%

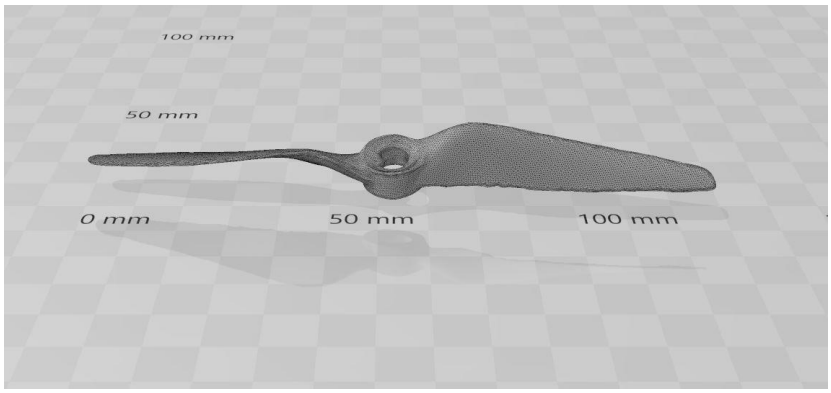
Tablo 4.4'ya bakacak olursak pervanenin 18000 rpm devir hızında, 20 m/s serbest akım hızına kadar diğer devir hızlarına bezer şekilde toplam belirsizlikler %|10|'un altında kalmaktadır fakat hız 20m/s'nin üzerine çıktıkça toplam belirsizlikte artmaktadır. Bu devirde itme katsayısı (K_T) için en fazla toplam belirsizlik 40 m/s son hızda %18,23, moment katsayısı (K_M) için aynı hızda en fazla toplam belirsizlik %15,62, verim (η) için ise en fazla toplam belirsizlik %24,35'tir. 20 m/s hızların üzerinde pervane üzerinde oluşan kuvvetler nedeni ile titreşim artmakta ve toplam belirsizlikler bu sebeple yükselmektedir.

5
SAYISAL ÇALIŞMA

Sayısal çözümler, fiziksel süreçlerin matematiksel modeller aracılığıyla simüle edilmesine dayalıdır ve deneysel çalışmalara kıyasla zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sunar. Özellikle karmaşık geometrilere ve sınır koşullarına sahip akış problemlerinde, sayısal analiz yöntemleri akış yapıları, basınç dağılımları ve türbülans etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanır. Bu kapsamda kullanılan sayısal çözüm teknikleri, akışkanların hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemleri gibi temel denklemleri çözerken, doğruluk ve hassasiyeti artırmak için uygun ağ yapıları ve türbülans modelleriyle desteklenmiştir. Pervane etrafındaki akış ticari bir program olan Ansys Fluent 24 ile çözülmüştür.

5.1 Pervanenin Modellenmesi

Simülasyon çalışmalarında deneylerde kullanılan pervanenin orijinal boyut ve hacminin model oluşturma aşamasında kullanılması doğrudan simülasyon sonuçlarını etkileyen önemli bir faktördür [26]. Deneylerde kullanılan pervanenin üretimde oluşan tüm yüzey özelliklerinin modele yansıtılabilmesi için pervane, 3Dörtgen firmasında Einscan marka bir Sp2 masaüstü tip tarama cihazında yapılmıştır. Cihaz maksimum 200x200x200mm ölçülerde tarama yapabilmektedir ve 0,05mm çözünürlüğe sahiptir, alınan yüzey modeli Şekil 5.1'de görülebilmektedir. Bu cihazlar sadece yüzey taraması yaptığından, buradan alınan .stp dosya formatında pervane yüzeyi Autodesk firmasının akademik çalışmalar için ücretsiz olarak kullanıma olanak sağladığı Fusion 360 programı ile üç boyutlu katı modele dönüştürülmüştür.



Şekil 5.1 Taranmış pervane modeli

5.2 Türbülans Modelinin Seçilmesi

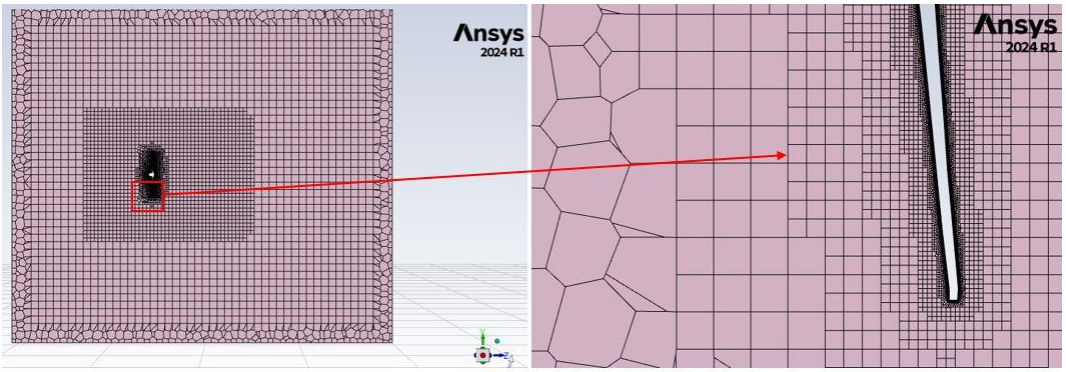
Herhangi bir türbülans modeli, tüm akış problemleri için evrensel bir üstünlük sağlamamaktadır. Türbülans modeli seçimi, akışın fiziksel karakteristikleri, belirli bir sınıfa özgü geliştirilmiş uygulamalar, hedeflenen doğruluk seviyesi, mevcut hesaplama kaynakları ve simülasyon süresi gibi bir dizi faktöre bağlı olarak yapılmaktadır. Uygulama için en uygun türbülans modelinin seçimi, bu modellerin sağladığı imkanlar ve getirdiği kısıtlamaların kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine dayanır [27]. k-ω SST türbülans modeli oldukça popüler hale gelen iki denklemli bir girdap-viskozite modelidir. Kayma Gerilmesi Aktarımı (SST) formülasyonu, iki farklı dünyanın en iyi özelliklerini bir araya getirmektedir. Sınır tabakasının iç kısımlarında k- ω formülasyonunun kullanılması, modeli viskoz alt tabaka boyunca doğrudan kullanılabilir hale getirir. SST formülasyonu ayrıca serbest akış bölgesinde $k-\epsilon$ davranışına geçiş yapar ve böylece modelin serbest akış türbülans özelliklerine karşı aşırı duyarlı olma sorununu ortadan kaldırır [28].

Bu nedenle, türbülans modelinin seçim süreci hem uygulama gerekliliklerini hem de simülasyon parametrelerini dikkate alacak şekilde ve eldeki kaynaklara bakılarak k-ω SST seçilmiştir.

5.3 Hesaplama Ağı ve Sınır Koşulları

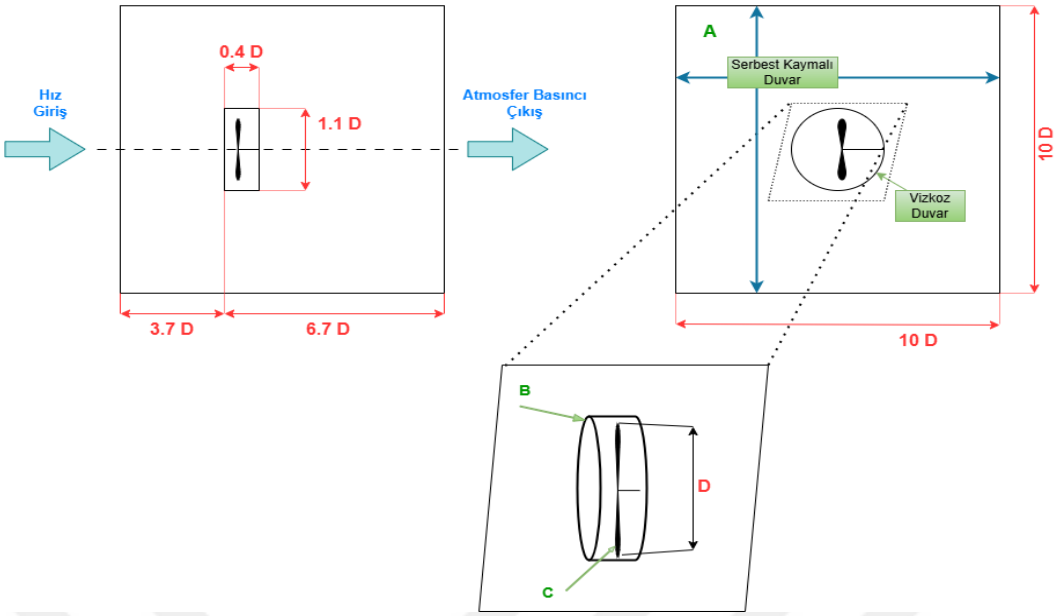
Hesaplama ağları, fiziksel bir alanın küçük hücrelere bölünmesiyle oluşturulan ve sayısal simülasyonlarda hız, basınç ve sıcaklık gibi fiziksel büyüklüklerin dağılımını belirlemek için kullanılan matematiksel yapılardır. Bu çalışmada, Ansys-Fluent yazılımının mesh oluşturma arayüzü kullanılarak hibrit bir yapı olan

poly-hexcore ağ yapısı seçilmiştir. Yüzey ağları, eğrilik ve yakınlık temelli algoritma ile oluşturulmuş, dönen hacmi çevreleyen 200x200x200 mm'lik bölge yerel olarak iyileştirilmiştir [29]. İlk katman kalınlığı 0,002 mm olarak belirlenmiş ve 1,2 büyütme katsayısı ile 18 katmanlı sınır tabakası ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan hesaplama ağı yapısı Şekil 5.2'te görülmektedir.



Şekil 5.2 Oluşturulan hesaplama ağı

Pervane ve çevresindeki akışı çözümlemek için MRF modeli uygulanmıştır. MRF yöntemi ile hesaplama alanı, dış sabit akışkan bölgesi (A) ve iç dönen akışkan bölgesi (B) olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Sabit akışkan bölgesi, çevredeki havayı simüle etmek için rüzgâr tüneline benzer bir dikdörtgen yapıdadır ve boyutları sırasıyla 11.4D, 10D ve 10D olarak belirlenmiştir. Dönen akışkan bölgesi ise pervane çevresindeki akış alanını kapsamakta olup, çapı 1.1D ve uzunluğu 0.4D olarak ayarlanmıştır. Döner alanın geometrik merkezi giriş yüzeyinden 3.7D, çıkış yüzeyinden ise 6.7D uzaklıktadır ve pervane modeli bu bölgeye yerleştirilmiştir. Dönen akışkan bölgesi, bir boşluk gövdesini (C olarak işaretlenmiştir) içermekte olup, pervane modelini temsil etmektedir. Hesaplama alanı ve sınır koşulları Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



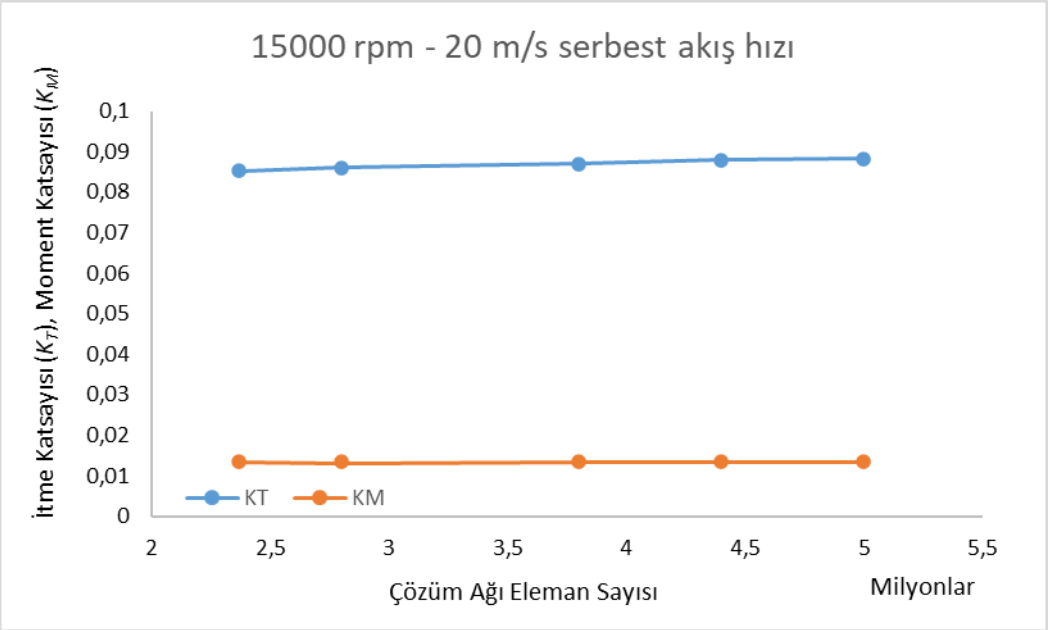
Şekil 5.3 Hesaplama alanı ve sınır koşulları

Dönen akışkan bölgesi, rotorla aynı dönme hızını koruyacak şekilde ayarlanmıştır. Sabit akışkan bölgesi için, giriş yüzeyi hız girişi olarak tanımlanmış ve sabit bir %5 türbülans şiddeti korunmuştur. Akışkan, malzeme kütüphanesinden seçilerek 24 °C hava olarak ayarlanmıştır. Çıkış yüzeyi, 0 Pa gösterge statik basınca sahip bir basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Geri kalan dört yüzey serbest kaymalı duvar (free-slip wall) olarak, dönen akışkan bölgesi tarafından çevrelenen rotor yüzeyi ise viskoz duvar (no-slip wall) olarak ayarlanmıştır. Bu ayarların amacı, geleneksel işletim koşulları altında bir ortamı simüle etmektir. Sabit ve dönen bölgeler için geometrik sınırlar, daha önce yapılan çeşitli HAD çalışmalarına uygun olarak tanımlanmıştır.

5.4 Hesaplama Ağı Bağımsızlık

Hesaplama ağlarının kalitesi, simülasyonların doğruluğunu ve çözüm süresini büyük ölçüde etkiler. Daha ince bir ağ yapısı, daha yüksek çözünürlük sağlar ancak hesaplama maliyetini artırır. Bu nedenle, doğru ağ yapısının seçimi, hem fiziksel büyüklüklerin hassas bir şekilde modellenmesi hem de hesaplama maliyetlerinin optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Mesh bağımsızlık çalışması, simülasyon sonuçlarının ağ yoğunluğundan bağımsız hale gelmesini sağlamak için kritik bir adımdır [30]. Çalışmada, deney verilerinde toplam belirsizliğin %10 dan küçük ve çalışmanın genelini ifade etmesi için 15000 rpm ve 20 m/s hızda farklı ağ yoğunluklarına sahip beş farklı mesh yapısı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme

sırasında, her bir ağ için pervanenin itme katsayısı (K_T) ve moment katsayısı (K_M) gibi temel performans parametreleri hesaplanmıştır. Mesh yoğunluğu arttıkça sonuçlar arasındaki farklar azalmış itme katsayısı (K_T) için değer %0,5'in altında, moment katsayısı (K_M) için %0,15'in altında sapma gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hesaplamalar 4 milyon mesh yapısına sahip çözüm ağında yapılmıştır. Çözüm ağı karşılaştırma grafiği Şekil 5.4'te görülmektedir.

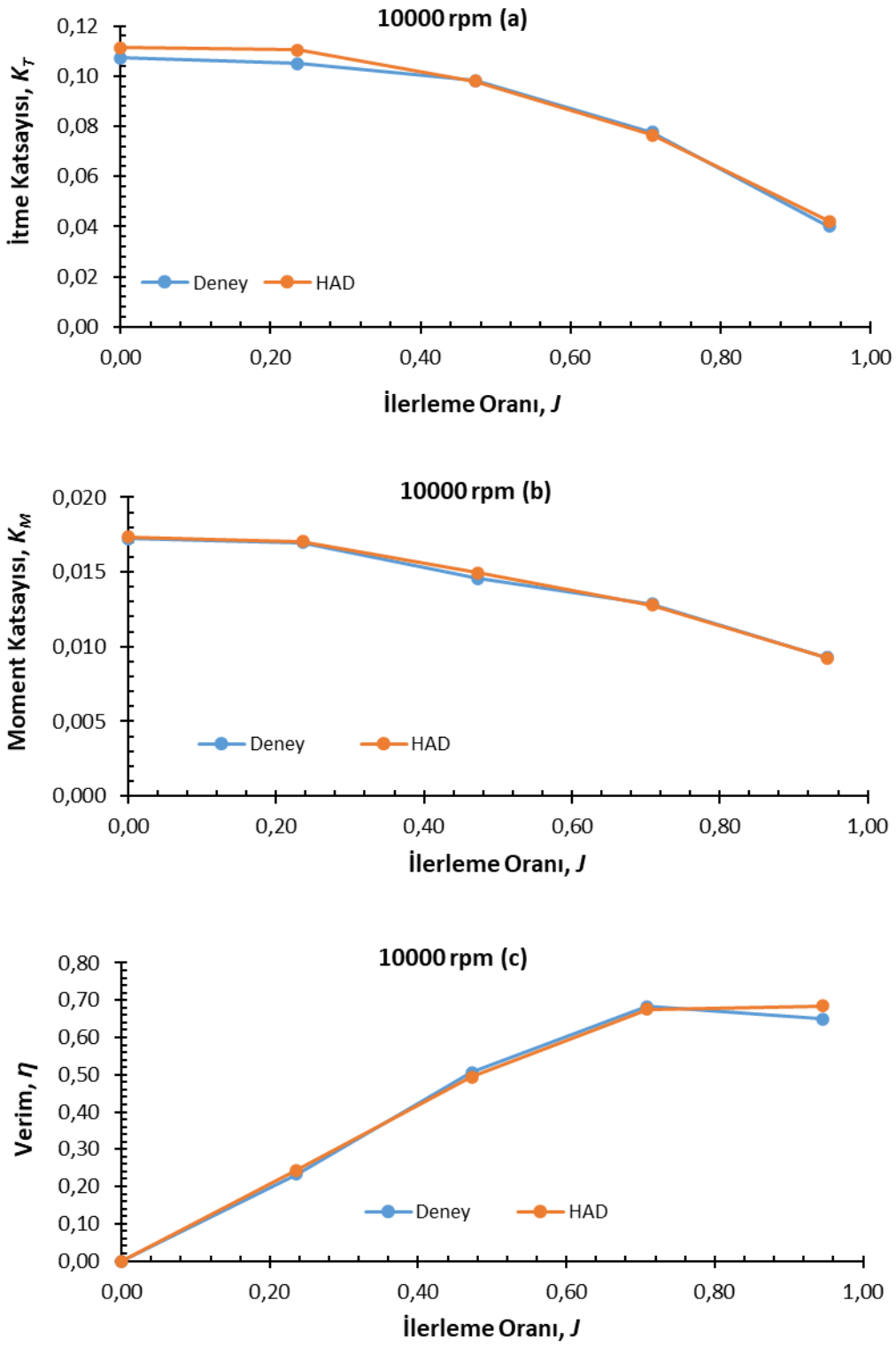


Şekil 5.4 Çözüm ağı eleman sayısına göre K_T, K_M değişim grafiği

5.5 İtki Katsayısı, Moment Katsayısı ve Verim Karşılaştırması

Pervane performansını değerlendirmek için sayısal (HAD) ve deneysel yöntemlerden elde edilen itme katsayısı (K_T), moment katsayısı (K_M) değerleri ve verim (η) karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı, sayısal simülasyonların deneysel verilerle uyumunu doğrulamak ve kullanılan HAD modelinin pervane performansını tahmin etme etkinliğini gözlemlemektir. Ayrıca, iki yöntem arasındaki farkların olası nedenleri de analiz edilecek ve bu farkların, ağ yapısı, türbülans modeli ve deneysel ölçüm sınırlamaları gibi faktörlerden hangisinden kaynaklanabileceği tartışılacaktır. Deney sonuçları ve HAD analizlerinden hesaplanan itme katsayısı ve moment katsayısının ilerleme oranına göre değişimi şekillerde verilmiştir.

10000 rpm dönme hızında itme, moment ve verim katsayılarının deneysel ve HAD analizlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir.

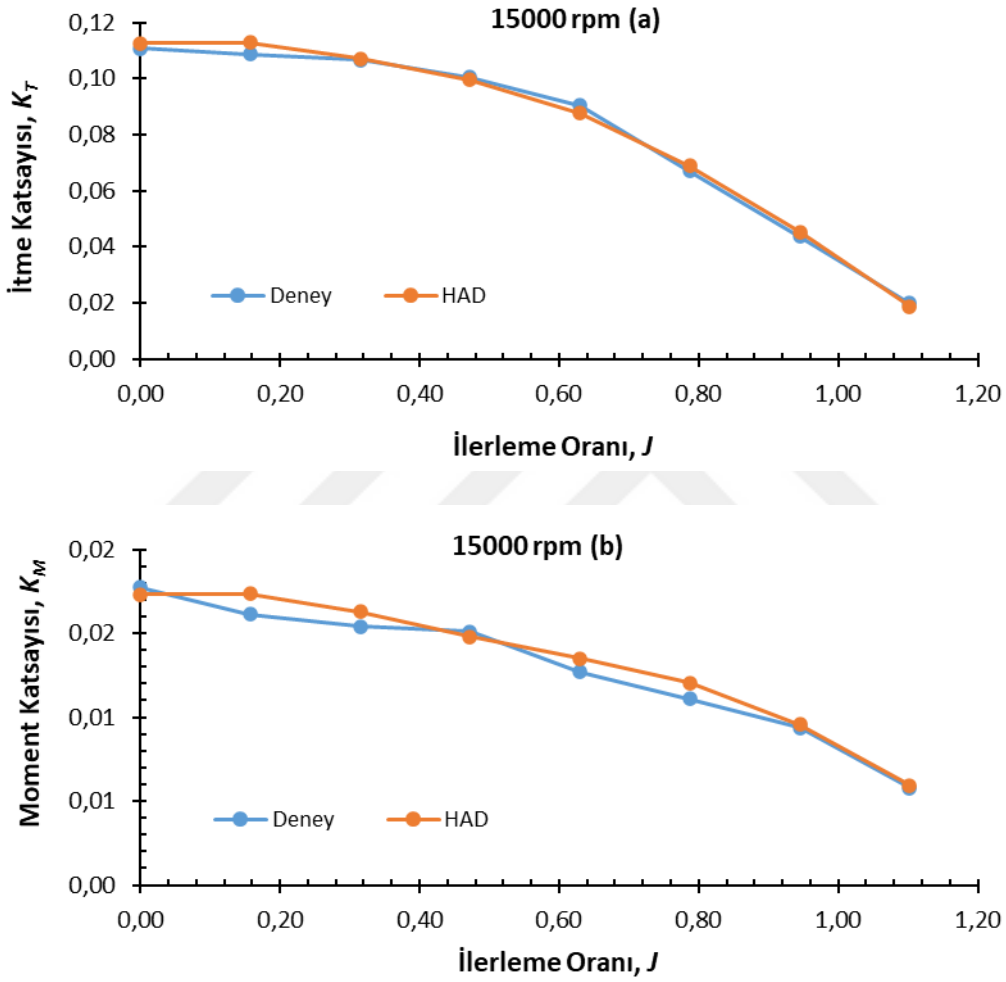


Şekil 5.5 10000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim

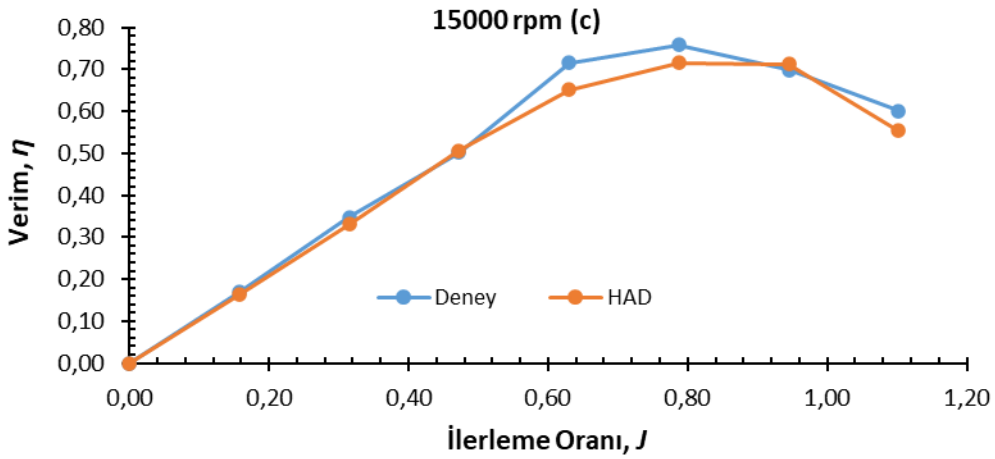
10000 rpm dönme hızında yapılan analizlerde, serbest akım hızının artmasıyla itme katsayısının beklenen şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, serbest akım hızının artması, pervanenin dönmesi için gereken momentin düşmesine neden olmakta ve dolayısıyla moment katsayısı da azalmaktadır. Denklem 3.4'e göre

verim (η), itme katsayısının (K_T) moment katsayısına (K_M) oranı ile tanımlanmaktadır. Bu oran incelendiğinde, moment katsayısındaki daha belirgin düşüş nedeniyle, ilerleme oranı artışıyla verimin de arttığı ve itki üretebilen son serbest akım hızı olan $J \approx 0{,}94$ noktasında maksimum değere ulaştığı saptanmıştır.

15000 rpm dönme hızında itme, moment ve verim katsayılarının deneysel ve HAD analizlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 5.6'de verilmiştir.



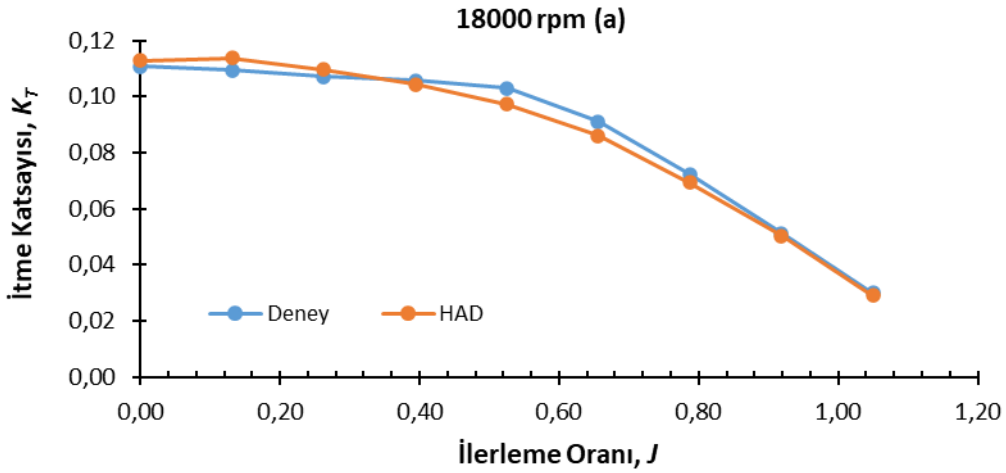
Şekil 5.6 15000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim



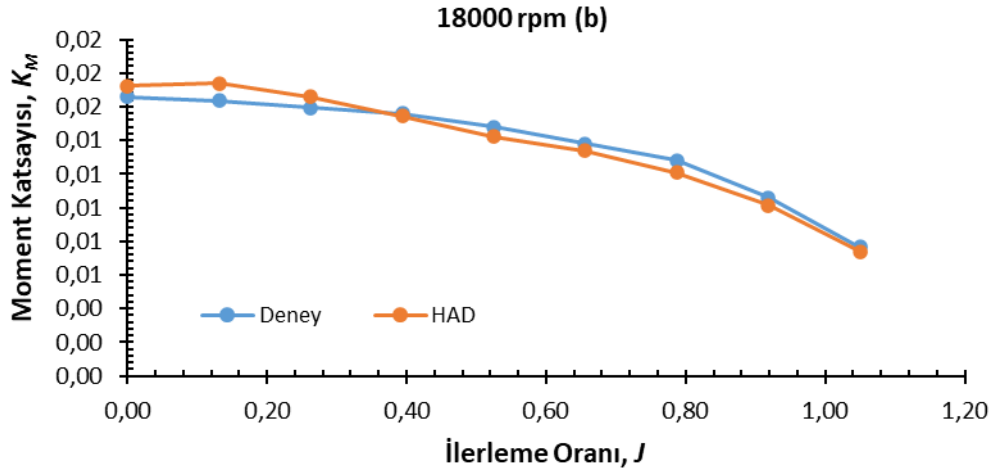
Şekil 5.6 15000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim (devamı)

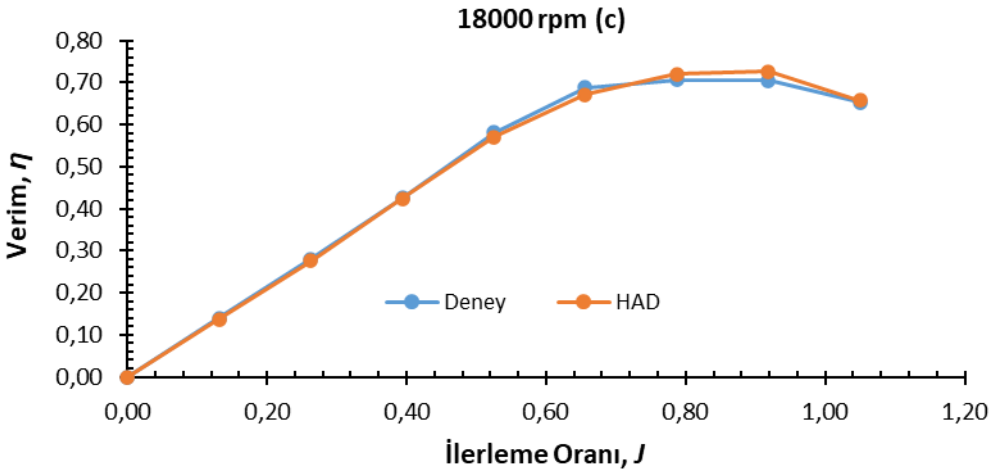
15000 rpm dönme hızında, serbest akım hızının artmasıyla itme katsayısı ve moment katsayısının beklenen şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.6 (a)'da görüldüğü üzere, $J \approx 0{,}8$ ilerleme oranından sonra itme katsayısındaki düşüş daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, ilerleme oranı arttıkça başlangıçta yükselen verim değerinin, bu ilerleme oranının ötesinde düşmeye başlamasına yol açmaktadır.

18000 rpm dönme hızında itme, moment ve verim katsayılarının deneysel ve HAD analizlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7 18000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim





Şekil 5.7 18000 rpm dönme hızı, a) itme katsayısı b) moment katsayısı c) verim (devamı)

18000 rpm devir hızında, önceki verilerle uyumlu olarak serbest akım hızının artmasıyla itme katsayısı ve moment katsayısı azalmaktadır. Benzer şekilde, pervane verimi $J \approx 0{,}8$'e kadar artış göstermiş; ancak Şekil 5.7 (a)'da görüldüğü üzere, itme katsayısındaki belirgin düşüş nedeniyle verimdeki artış yavaşlayıp sonrasında düşmeye başlamıştır. 15000 rpm durumundan farklı olarak, bu artış azalması ve verimdeki düşüş eğilimi, ilerleme oranının yaklaşık $J \approx 0{,}9$ değerine kadar uzanan daha geniş bir aralıkta gerçekleşmektedir.

Grafiklere bakarak deney verileri ile HAD analizlerinin uyumu görülmektedir. Değerler arasındaki farkı daha net belirlemek için deney verileri ile HAD hesaplamaları arasındaki yüzdesel fark hesaplanmıştır. Deneysel veriler ile HAD analizleri arasında dalgalanma görünse de aradaki fark %9'u geçmemektedir.

Deney verileri ile HAD verileri ile aradaki yüzdesel fark Tablo 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.1 10000 rpm dönme hızında deney ve HAD hesaplamaları arasındaki % fark

10000 rpm			
J	$\%\lvert K_T \rvert$	$\%\lvert K_M \rvert$	$\%\lvert \eta \rvert$
0,0000	3,80%	0,53%	0,00%
0,2362	5,04%	0,54%	4,52%
0,4724	0,19%	2,37%	2,46%
0,7087	1,46%	0,39%	1,19%
0,9449	4,88%	0,34%	5,29%

Tablo 5.2 15000 rpm dönme hızında deney ve HAD hesaplamaları arasındaki % fark

15000 rpm			
J	$\%\lvert K_T \rvert$	$\%\lvert K_M \rvert$	$\%\lvert \eta \rvert$
0	1,75%	2,45%	0,00%
0,1575	3,90%	7,41%	3,25%
0,3150	0,52%	5,56%	4,80%
0,4724	0,96%	1,98%	1,00%
0,6299	3,17%	6,41%	9,03%
0,7874	2,71%	8,79%	5,54%
0,9449	3,60%	1,92%	1,96%
1,1024	5,42%	2,54%	7,94%

Tablo 5.3 18000 rpm dönme hızında deney ve HAD hesaplamaları arasındaki % fark

18000 rpm			
J	$\%\lvert K_T \rvert$	$\%\lvert K_M \rvert$	$\%\lvert \eta \rvert$
0	1,79%	4,02%	0,00%
0,1312	3,96%	6,44%	2,28%
0,2625	2,25%	3,87%	1,49%
0,3937	1,37%	0,97%	0,34%
0,5249	5,63%	3,81%	1,82%
0,6562	5,57%	3,21%	2,37%
0,7874	3,99%	5,67%	1,85%
0,9186	1,63%	4,50%	3,06%
1,0499	3,20%	3,83%	0,72%

Tablolardan görüleceği üzere tüm devirlerde itme katsayısı (K_T) için en fazla yüzdesel fark %5,63, moment katsayısı (K_M) için en fazla yüzdesel fark %8,79, verim (η) için en fazla yüzdesel fark %9.03'tür.

6
SONUÇ

Bu tezde, mini insansız hava araçlarında kullanılan bir pervanenin itme katsayısını, moment katsayısını ve verimini ölçebilmek için deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneğinden elde edilen veriler, HAD analizleri ile karşılaştırılmıştır. Deneyler literatürde bulunan pervanelerden daha küçük ve daha yüksek devirlerde gerçekleştirilmiştir.

Deneyler üç farklı dönme hızında ve farklı serbest akım hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bölümde deneyler ve HAD hesapları arasındaki fark ve karşılaştırmalar verilmiştir.

6.1 Sonuçlar

Deneysel verilerin belirsizlik analizleri sonucunda, itme katsayısı, moment katsayısı ve verim değerleri için toplam belirsizliklerin, serbest hava akış hızının 20 m/s'ye kadar olduğu tüm devirlerde %10'un altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, deneysel ölçümlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Özellikle 20 m/s'ye kadar olan hızlarda ($J \leq$ ~0.6) elde edilen deneysel veriler ile HAD analizleri arasındaki karşılaştırmaların yüksek bir uyum gösterdiği ve güvenilir sonuçlar sunduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu hem deneysel hem de sayısal analizlerin doğruluğunu destekleyerek çalışmanın genel güvenilirliğine katkı sağlamaktadır.

Daha yüksek hızlarda deneysel veriler ile HAD sonuçları arasında uyum gözlemlense de toplam belirsizliğin artması nedeniyle bu verilere güvenmek mümkün değildir. Bu durumun temel sebebi, yüksek hız ve devirlerde meydana gelen titreşimlerin ölçülen değerlerde sapmaya yol açarak toplam belirsizliği artırmasıdır. Özellikle, serbest akım hızlarının 20 m/s'nin üzerine çıktığı durumlarda, toplam belirsizlik verim (η) için %24,75'e kadar yükselmektedir.

Deneysel verilere bakıldığında, serbest akım hızı 20 m/s'yi aştıkça belirsizliğin düzenli bir şekilde arttığı açıkça görülmektedir. Bu nedenle, yüksek hızlarda elde edilen deneysel verilerin doğruluğu ve güvenilirliği sınırlıdır.

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile deneysel veriler arasındaki yüzdesel fark incelendiğinde, tüm verilerin %10'un altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, deneysel veriler ile HAD analizlerinin uyumlu olduğunu ve HAD analizinde kullanılan yöntemin değerlendirme amacıyla uygun bir yaklaşım sağladığını ortaya koymaktadır. HAD analizlerinde en yüksek fark, verim (η) için 15000 rpm'de ve 20 m/s'de %9,03 olarak belirlenmiştir, bu değerde belirsizlik analizinde uygun bulunan bir değerdir. Bu sonuç, sayısal çalışmanın literatürdeki bulgularla uyumlu olup, kullanılan sayısal yöntemin doğruluğunu ve deneysel verilerle çakışmasının güvenilir olduğunu göstermektedir.

6.2 Öneriler

Çalışmada çıkan sonuçlar doğrultusunda, yüksek hızlarda toplam belirsizliğin artması, gelecekte üzerinde çalışılması gereken önemli bir konu olarak değerlendirilmektedir. Bu artışın temel sebebinin, deneyler sırasında gözlemlenen ve verilere de yansıyan şekilde, rüzgâr tünelindeki hız ve pervane devri arttıkça meydana gelen titreşimlerin toplam belirsizliği artırması olduğu görülebilir.

Titreşimi azaltmaya yönelik öneriler:

- Pervanenin Dönme Eksenine Daha İyi Merkezlenmesi:

Pervanenin dönme eksenine daha iyi merkezlenmesi, oluşan titreşimleri azaltabilecektir. Bu doğrultuda, pervaneyi ekseninde daha iyi merkezlemek için sistem tasarımında iyileştirmeler yapılmalıdır.

- Titreşim Sönümleyici Sistemlerin Kullanımı:

Yüksek devirlerde kanat uçlarında oluşan türbülansın neden olduğu titreşimlerin, yük hücrelerine etkisini azaltmak amacıyla, yük hücresi ile fırçasız motor arasındaki bağlantıya titreşim sönümleyici bir sistem entegre edilmelidir.

- Aerodinamik Sistem Tasarımı:

Deney sisteminin tasarımında, yüksek hızlarda oluşacak türbülansı azaltmak için daha küçük ve aerodinamik bir yapı kullanılmalıdır. Bu sayede, türbülansın ölçüm üzerindeki etkisi en aza indirgenebilir.

Küçük çaplı bir pervanenin ürettiği küçük kuvvetlerin ölçümünün hassasiyetinin artırılması toplam belirsizliği düşüreceğinden,

- Küçük Kuvvetlerin Ölçüm Hassasiyetinin Artırılması:

Küçük çaplı bir pervanenin ürettiği küçük kuvvetlerin daha hassas şekilde ölçülmesi için, kuvvet ve moment ölçümünde kullanılan yük hücrelerinin hassasiyeti artırılabilir. Böylece, deneylerde daha hassas ölçümler elde edilerek toplam belirsizlikler azaltılabilir.

- Sayısal Analizlere Yönelik Öneriler:

Mevcut çalışmada kullanılan MRF, kendi yerel koordinat sisteminde çözülür ve bu sayede dönen hareketin etkileri sabit bir akış alanı üzerinde yaklaşık olarak yakalanır. Bunun yerine dinamik mesh yöntem ile zamana bağımı analiz yapılarak hareketin ve deformasyonun her anki etkisi zaman adımlarıyla takip edilerek gerçekçi ve zaman açısından doğru sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKÇA

[1] J. W. R. Taylor, *Jane's Pocket Book of Remotely Piloted Vehicles: Robot Aircraft Today*, Birleşik Krallık: Collier Books, 1977.

[2] M. A. Yükselen, Aerodinamik Ders Notları, *Bölüm 11: Pervane Teorisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006. [Çevrimiçi]. Erişilebilir: https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/11-%20Pervane%20teorisi.pdf

[3] J. D. Anderson Jr., *Uçuşa Başlangıç: Uçak ve Uzay Mühendisleri İçin*, M. A. Yükselen, çev., 7. bas., Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 2020.

[4] M. Bağçe, *Design and performance evaluations of the propeller of a UAV*, M.S. thesis, Dept. of Mechanical Eng., Middle East Technical University, Ankara, Turkey, Feb. 2015.

[5] J. B. Brandt, *Small-scale propeller performance at low speed*, M.S. thesis, Dept. of Aerospace Eng., University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA, 2005. [Çevrim içi]. Erişilebilir: https://m-selig.ae.illinois.edu/props/volume-1/Brandt_2005_UIUC-MS-Thesis_Appendix.pdf

[6] X. Liu, D. Zhao ve N. L. Oo, "Comparison studies on aerodynamic performances of a rotating propeller for small-size UAVs," *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 133, Şub. 2023, Mak. No. 108148, doi: 10.1016/j.ast.2023.108148.

[7] D. Serrano, M. Ren, A. J. Qureshi ve S. Ghaemi, "Effect of disk angle-of-attack on aerodynamic performance of small propellers," *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 92, ss. 901–914, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.ast.2019.07.022.

[8] A. Bryant, *Development of an empirical propeller thrust model using experimental measurements and computational fluid dynamics*, M.S. thesis, Dept. of Aerospace Eng., Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA, 2020.

[9] S. Xiang, Y. Q. Liu, G. Tong, W. P. Zhao, S. X. Tong ve Y. D. Li, "An improved propeller design method for the electric aircraft," *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 78, ss. 488–493, Tem. 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.05.008.

[10] X. Yang, D. Ma, L. Zhang, Y. Yu, Y. Yao ve M. Yang, "High-fidelity multi-level efficiency optimization of propeller for high altitude long endurance UAV," *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 133, Şub. 2023, Mak. No. 108142, doi: 10.1016/j.ast.2023.108142.

[11] M. Rostami ve A. H. Farajollahi, "Aerodynamic performance of mutual interaction tandem propellers with ducted UAV," *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 108, Oca. 2021, Mak. No. 106399, doi: 10.1016/j.ast.2020.106399.

[12] E. V. Loureiro vd., “Evaluation of low fidelity and CFD methods for the aerodynamic performance of a small propeller,” *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 108, Oca. 2021, Mak. No. 106402, doi: 10.1016/j.ast.2020.106402.

[13] M. Carreño Ruiz, M. Scanavino, D. D’Ambrosio, G. Guglieri ve A. Vilardi, “Experimental and numerical analysis of hovering multicopter performance in low-Reynolds number conditions,” *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 128, Eyl. 2022, Mak. No. 107777, doi: 10.1016/j.ast.2022.107777.

[14] N. I. Ismail vd., “Design selection of experimental test rig for static thrust on micro size propeller using Pugh method,” *ESTEEM Acad. J.*, c. 20, sy. 3, ss. 53–64, Eyl. 2024, doi: 10.24191/esteem.v20i3.1754.g1707.

[15] Z. Jiang vd., “Aerodynamic performance of propellers for multirotor unmanned aerial vehicles: Measurement, analysis, and experiment,” *Int. J. Rotating Mach.*, c. 2021, Mak. No. 9538647, 2021, doi: 10.1155/2021/9538647.

[16] C. A. Varnon ve C. I. Abramson, “Chapter 1: Introduction,” *J. Mind Behav.*, c. 39, sayı 1/2, ss. 1–6, Kış/Bahar 2018. [Çevrim içi]. Ulaşılabilir: https://www.jstor.org/stable/26529172

[17] C. A. Varnon ve M. K. Moore, “Chapter 4: Getting Started with the Propeller Experiment Controller,” *J. Mind Behav.*, c. 39, sayı 1/2, ss. 35–44, Kış/Bahar 2018. [Çevrim içi]. Ulaşılabilir: https://www.jstor.org/stable/26529172

[18] J. Wu, Q. Wang, H. Deasy ve J. Hang, “A study on the effect of toroidal propeller parameters on efficiency and thrust,” *Energies*, c. 17, sy. 23, Ara. 2024, doi: 10.3390/en17235938.

[19] J. Liu, Z. Yu, F. Yu, T. Yan ve B. He, “Computational fluid dynamics driven surrogate model to predict hydrodynamic and acoustic properties of propeller boss cap fins,” *Appl. Ocean Res.*, c. 153, Ara. 2024, doi: 10.1016/j.apor.2024.104293.

[20] N. R. Williams, “The calculation of air density in various units,” *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, c. 30, sy. 9, ss. 319–320, Kas. 1949.

[21] C. Almonte, *Small sample confidence intervals for the mean of a positively skewed distribution*, Yüksek lisans tezi, Florida Int. Univ., Miami, FL, ABD, 2008, doi: 10.25148/etd.FI13101599.

[22] Student, “The probable error of a mean,” *Biometrika*, c. 6, sy. 1, ss. 1–25, Mar. 1908.[Çevrim içi]. Ulaşılabilir: https://www.york.ac.uk/depts/maths/histstat/student.pdf

[23] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, c. 1, sy. 1, ss. 3–17, Oca. 1988, doi: 10.1016/0894-1777(88)90043-X.

[24] A. Gönül, *Tel Kanatlı Yoğuşturucuların Hava Tarafı Isıl ve Akış Performansının İncelenmesi*, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.

[25] S. J. Kline ve F. A. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *Mechanical Engineering*, c. 75, ss. 3–8, 1953. [Çevrim içi]. Erişim:https://archive.org/details/sim_mechanicalengineering_195301_75_1

[26] F. Erdoğdu, “3 boyutlu tarama sistemlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarıyla birlikte gıda prosesleri simülasyonunda kullanımı,” TÜBİTAK, Proje No: 107M217, Mersin Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye, Eyl. 2008.

[27] M. A. Özdemir ve S. Onbaşıoğlu, “F-4 Phantom II uçağının etrafındaki akışın HAD analizi – Kısım 1: Kanat kök profili NACA 0006,” *JAST*, c. 1, sa. 4, ss. 1–6, Tem. 2004.

[28] F. R. Menter, “Zonal two-equation k–ω turbulence models for aerodynamic flows,” *AIAA Paper 93-2906*, 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, FL, USA, 6–9 Temmuz 1993.

[29] T. Stokkermans, L. Veldhuis, B. Soemarwoto, R. Fukari ve P. Eglin, “Breakdown of aerodynamic interactions for the lateral rotors on a compound helicopter,” *Aerosp. Sci. Technol.*, c. 101, Mak. No. 105845, 2020, doi: 10.1016/j.ast.2020.105845.

[30] D. Kim, Y. Lee, S. Oh, Y. Park, J. Choi ve D. Park, “Aerodynamic analysis and static stability analysis of manned/unmanned distributed propulsion aircrafts using actuator methods,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, c. 214, Tem. 2021, Mak. No. 104648, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104648.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. O. Sezen ve Z. Gemici, “Experimental study of propellers used in mini unmanned aerial vehicles (UAVs),” *Proc. 7th Int. Conf. Advances Mech. Eng. (ICAME 2024)*, Istanbul, Turkey, Ara. 2024, ss. 876–881.