

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PERVANE PERFORMANSININ ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE  
HESABI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre BAŞARAN**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ünver KAYNAK**

**ARALIK 2017**

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 141511004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emre BAŞARAN** 'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**PERVANE PERFORMANSININ ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE HESABI**" başlıklı tezi **04.01.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Ünver KAYNAK** .....  
Anadolu Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Yusuf ÖZYÖRÜK (Başkan)** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Emre BAŞARAN

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PERVANE PERFORMANSININ ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLERLE

HESABI

Emre BAŞARAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Tarih: Aralık 2017

1900'lü yılların başlarında ilk pervaneli uçakların uçmaya başlamasıyla beraber, insanlı ve insansız uçakların itki sistemlerinde pervaneler günümüzde de hala önemini korumaktadır. Uçak tasarımında, özellikle belli bir uçak seyir hızı ve dönme hızı için tasarlanmış pervanelerin performans eğrilerinin elde edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla yapılan deneyler daha maliyetli olacağı ve uzun vakit alacağı için test yerine analitik ve sayısal yöntemler gibi diğer seçenekler tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında deney verileri olan 640 no'lu NACA raporunda bulunan bir Clark-Y kesitli pervane için sayısal ve analitik yöntemler kullanılarak elde edilen performans verileri rapordaki deney verileriyle karşılaştırılmıştır. Sayısal yöntem olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), analitik yöntem olarak da Taşıma Çizgisi Kuramı kullanılmıştır. Bir HAD çözücüsü olan Autodesk Simulation CFD™ programı ve açık kaynak bir analitik çözücü sunan OpenProp programı analizler için kullanılmıştır. Çalışma sonunda bu iki yöntemin deney sonuçları ile karşılaştırılması yapılmış, avantajları ve dezavantajları sunulmuştur. Son olarak irtifanın performans değerlerine etkisi HAD yöntemi ile incelenmiş, irtifayla değişen hava yoğunluğuna bağlı olarak Reynolds ve Mach Sayısı etkileri sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** HAD, Pervane performansı, Taşıma çizgisi kuramı, Pervane performans testi , Yüksek irtifa, Düşük reynolds sayısı.



## ABSTRACT

Master of Science

### PROPELLER PERFORMANCE ANALYSIS WITH ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS

Emre BAŞARAN

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Date: December 2017

Beginning with the 1900's, ever since the first propeller aircraft started flying, propellers still have important place for manned and unmanned aircraft. During aircraft design, it is especially important to obtain the performance curves of the propellers designed for certain aircraft cruising and propeller rotation speed. Tests are done for this purpose, but alternative methods are also used, because tests are quite costly and time consuming. These alternatives are generally analytical and numerical methods.

In this thesis, numerical and analytical methods are used to obtain performance values of a Clark-Y section propeller configuration whose test data are given in NACA Report No. 640. Computational Fluid Dynamics (CFD) and Lifting Line Theories are used as the numerical and analytical tools. The Autodesk Simulation CFD™, a CFD solver, and the OpenProp, an open-source analytical solver, are used for analysis. Results of these two methods are compared with the NACA test data and the advantages and disadvantages are presented. In the last chapter, altitude effects on propeller performance are studied by using the CFD approach. The changing density due to altitude and its reflection on Reynolds and Mach numbers effects are presented.

**Keywords:** CFD, Propeller performance, The lifting line theory, Propeller performance experiment, High altitude, Low Reynolds number.

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Ünver Kaynak'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

TOBB ETÜ'ye yüksek lisans öğrenimimde burs sağladığı için ayrıca teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
1.3 Analitik Yöntemler .....	2
1.3.1 Momentum kuramı .....	2
1.3.2 Pala elemanı kuramı .....	3
1.3.3 Girdap kuramı .....	5
1.3.4 Taşıma çizgisi kuramı .....	5
1.4 Sayısal Yöntemler .....	7
1.4.1 Navier-Stokes denklemleri .....	7
1.4.2 Petrov-Galerkin ayrıklaştırma yöntemi .....	8
1.4.3 Türbülans modelleri .....	9
1.5 İrtifa Etkisi .....	10
<b>2. PERVANE GEOMETRİSİ</b> .....	<b>13</b>
<b>3. ANALİZ VE DENEY SONUÇLARI</b> .....	<b>17</b>
3.1 Test Koşulları ve Test Sonuçları .....	17
3.1.1 Test düzeneği ve koşulları .....	17
3.1.2 Deney sonuçları .....	18
3.2 OpenProp Analizleri .....	19
3.3 HAD Analizleri .....	23
3.3.1 Sayısal yöntem .....	23
3.3.2 Ağ yapısı .....	24
3.3.3 Ağ yapısından bağımsızlık analizleri .....	26
3.3.4 Analizler .....	27
3.3.5 Sonuçlar .....	27
3.4 Sonuçların Karşılaştırılması .....	28
<b>4. İRTİFA ETKİSİNİN İNCELENMESİ</b> .....	<b>31</b>
4.1 İrtifanın Pervane Performansına Etkisi .....	31
4.2 HAD Analizleri .....	32
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>39</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>41</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>43</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Pervane rüzgarı yapısı ve eyleyici disk modellemesi. ....	3
Şekil 1.2 : $r$ yarıçapı uzaklığındaki pala elemanı üzerine etki eden hız vektörleri. ....	4
Şekil 1.3 : Kesit üzerindeki hız ve kuvvetlerin gösterimi. ....	6
Şekil 2.1 : Pala geometri bilgileri. ....	13
Şekil 2.2 : $0.75r$ konumundaki kesit yapısı. ....	14
Şekil 2.3 : 3-Boyutlu pervane geometrisi. ....	15
Şekil 3.1 : Motor üzerine bütünleştirilmiş 3-palalı pervane [2]. ....	17
Şekil 3.2 : 2-Palalı Clark-Y kesitli 5868-9 pervanesi için verim eğrileri. ....	18
Şekil 3.3 : 2-Palalı Clark-Y kesitli 5868-9 pervanesi için itki katsayısı eğrileri. ....	18
Şekil 3.4 : 2-Palalı Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi güç katsayısı eğrileri. ....	18
Şekil 3.5 : OpenProp girdi ekranı. ....	20
Şekil 3.6 : Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için OpenProp girdi ekranı. ....	20
Şekil 3.7 : OpenProp pala boyunca hava dolaşımı dağılımı çıktısı. ....	21
Şekil 3.8 : Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için performans eğrileri. ....	22
Şekil 3.9 : Pervane çevresindeki dönen bölge. ....	23
Şekil 3.10 : Sınır şartları. ....	24
Şekil 3.11 : $0.75r$ konumundaki kesit etrafındaki ağ yapısı. ....	24
Şekil 3.12 : Pala üzerindeki yüzey ağ yapısı. ....	25
Şekil 3.13 : Çözüm alanı ağ yapısı. ....	25
Şekil 3.14 : Çözüm alanı boyutları. ....	26
Şekil 3.15 : Hücre sayısına karşılık itki ve tork hata yüzdeleri. ....	26
Şekil 3.16 : İtki katsayısı. ....	28
Şekil 3.17 : Tork katsayısı. ....	28
Şekil 3.18 : İtki katsayısı deney–HAD–Taşıma Çizgisi Kuramı karşılaştırması. ....	29
Şekil 3.19 : Tork katsayısı deney–HAD–Taşıma Çizgisi Kuramı karşılaştırması. ....	29
Şekil 4.1 : İtki katsayısının farklı yükseklikler için karşılaştırılması. ....	35
Şekil 4.2 : Tork katsayısının farklı yükseklikler için karşılaştırılması. ....	35
Şekil 4.3 : Kesit ve gelen akış hareket yönleri. ....	36
Şekil 4.4 : Farklı yüksekliklerde pervane ucu Mach sayısı dağılımı. ....	36
Şekil 4.5 : Farklı yüksekliklerde $0.75r$ konumunda basınç dağılımı. ....	37

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Analizler için seçilen pervane.....	14
Çizelge 2.2 : Farklı yarıçap konumları için geometrik özellikler.....	14
Çizelge 3.1 : J değerlerine karşılık gelen $C_T$ , $C_P$ ve $C_Q$ değerleri.....	19
Çizelge 3.2 : Clark-Y pervane kesidinin aerodinamik özellikleri.....	21
Çizelge 3.3 : Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için performans değerleri ...	22
Çizelge 3.4 : Analizlerde kullanılan seçenekler.....	24
Çizelge 3.5 : Ağ yapısı özellikleri.....	25
Çizelge 3.6 : Analiz matrisi.....	27
Çizelge 3.7 : Yapılan analizler ve sonuçları.....	27
Çizelge 3.8 : Deney-HAD-Taşıma Çizgisi Kuramı çözümlerinin karşılaştırılması...	29
Çizelge 4.1 : Farklı yüksekliklerde havanın fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 4.2 : $J=0.20$ , $W=144$ m/s.....	33
Çizelge 4.3 : $J=0.55$ , $W=147$ m/s.....	33
Çizelge 4.4 : $J=0.70$ , $W=150$ m/s.....	33
Çizelge 4.5 : 12500 ft pervane performans değerleri.....	34
Çizelge 4.6 : 25000 ft pervane performans değerleri.....	34
Çizelge 4.7 : 40000 ft pervane performans değerleri.....	34

## KISALTMALAR

<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>CFD</b>	: Computational Fluid Dynamics
<b>NACA</b>	: National Advisory Committee for Aeronautics



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
b	Kesit uzunluğu
B	Pala sayısı
c	Ses hızı
$C_D$	Sürüklenme kuvveti katsayısı
$C_L$	Taşıma kuvveti katsayısı
$C_T$	İtke katsayısı
$C_P$	Güç katsayısı
$C_Q$	Tork katsayısı
D	Pervane çapı
h	Pervane kesit kalınlığı
$D_r$	Sürüklenme kuvveti
J	İlerleme oranı
L	Taşıma kuvveti
M	Mach sayısı
n	Pervane devri
P	Pervane gücü
Q	Tork
p	Pervane hatvesi
r	Pervane yarıçapı
Re	Reynolds sayısı
$Re_{0.75}$	0.75 yarıçap konumundaki Reynolds sayısı
T	İtke
V	Hız
$\beta$	Hatve açısı
$\eta$	Pervane verimi
$\rho$	Yoğunluk

## 1. GİRİŞ

Uçak sistemleri açısından en önemli parçalardan olan pervaneler kanat kesiti olarak adlandırılan özel bir kesit alanı ve aerodinamik tasarımları sayesinde uçaklar için aynı kanatlar gibi taşıma sağlamakta ve bunun neticesinde gerekli itkiyi sağlamaktadırlar. Uçak için gerekli olan itkiyi en az tork ile sağlamak iyi bir pervane tasarımındaki en önemli hususlardan biridir [1]. Uçağın belirlenen seyir hızı ve belirlenen devir hızı için tasarlanan pervanelerin, tasarım koşulları dışındaki performans değerleri de yine bir diğer göz önünde bulundurulması gereken noktadır.

Tasarlanan pervanenin farklı koşullardaki performansının hesaplanması için farklı yöntemler mevcuttur. Bunlar; test düzenekleri, analitik yöntemler ve sayısal yöntemler olarak sıralanabilir. Test düzenekleri ile gerçek koşullar oluşturmak mümkünken, maliyet ve zaman açısından diğer iki yöntemle göre dezavantajlı durumdadır. Analitik yöntemlerde sonuçlar hızlı alınabilirken karmaşık durumların, koşulların çözümleri her zaman mümkün olmamaktadır. Sayısal yöntemler ise daha karmaşık durumların, gerçeğe daha yakın sonuçlarla benzeşimlerine olanak sağlarken çözüm zamanı ve donanım açısından daha fazla gereksinime ihtiyaç duymaktadır.

Tasarım noktası belirli olan bir pervane aynı zamanda kalkış, yükseliş ve seyir hareketlerinde de verimli olmalıdır. Bu hareketler farklı irtifalarda gerçekleşmektedir ve farklı irtifalarda pervanenin performansını etkileyecek şekilde havanın özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Yüksek irtifada yoğunluk ve sıcaklık düşüşü Reynolds sayısında ve ses hızında azalmaya sebep olmaktadır. Reynolds sayısındaki düşüş pervane üzerindeki akış rejimini değiştirmektedir. Ses hızındaki düşüş ise pervane ucundaki Mach sayısının artışına sebep olarak şok oluşma riskini arttırmaktadır. Bu iki durumun da pervane tasarımı sırasında göz önünde bulundurulması büyük önem arz etmektedir.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, pervane performans eğrilerinin elde edilmesi için farklı yöntemler karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Taşıma Çizgisi Kuramı yaklaşımları kullanılarak hesaplanan değerler test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Test sonuçları için Clark-Y tipi kesit ile tasarlanmış 2 palli pervane performans verileri NACA raporundan alınmıştır [2]. Çalışmalar sonunda farklı methodların avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir.

Son bölümde ise pervanenin farklı irtifalardaki performans verileri elde edilmiştir. Yüksek irtifalardaki düşük hava yoğunluğu sebebiyle oluşan düşük Reynolds sayısının ve yüksek pervane ucu Mach sayısının pervane performansına etkisi incelenmiştir.

## 1.2 Literatür Araştırması

Bu literatür araştırması, farklı pervane teorileri ve bunların kullanımı ve sınırlamaları hakkında bilgi içermektedir. Literatür taramasının son bölümü, Taşıma Çizgisi Kuramı için kullanılan yaklaşımı anlatılmaktadır.

Pervane verimliliğini optimize etmek için birçok yaklaşım kullanılmıştır. Pervanelerin performans değerlerinin incelenmesine yönelik bazı yaklaşımlar Momentum Teorisi, Pala Elemanı Teorisi, Girdap Teorisi, Taşıma Çizgisi Kuramı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'dir [3]. Bu teorik kavramlar aşağıdaki bölümlerde ele alınacaktır.

Son gelişmelerle birlikte elde edilen yüksek irtifalarda uçuş kabiliyeti, düşük hava yoğunluklarında ve dolayısıyla düşük Reynolds Sayısı ve transonik Mach sayısı rejimlerinde pervane performanslarının incelenmesini de önemli hale getirmiştir [4].

## 1.3 Analitik Yöntemler

### 1.3.1 Momentum kuramı

Momentum kuramı akışkanlar dinamiğinde pervanelerin matematiksel olarak modellenmesi için kullanılan bir yöntemdir. Momentum teorisinin amacı, verilmiş bir itki değeri için indüklenen hızı ve güç değerini, momentumun, kütle ve enerjinin korunumu yasaları ile bulmaktır [5].

Bu hesaplama için bir diğer önemli kavram ise pervane rüzgarıdır. Pervane, itki oluşturabilmek için havayı uçağın arkasına doğru akmaya zorlar. Bu rüzgar pervanenin

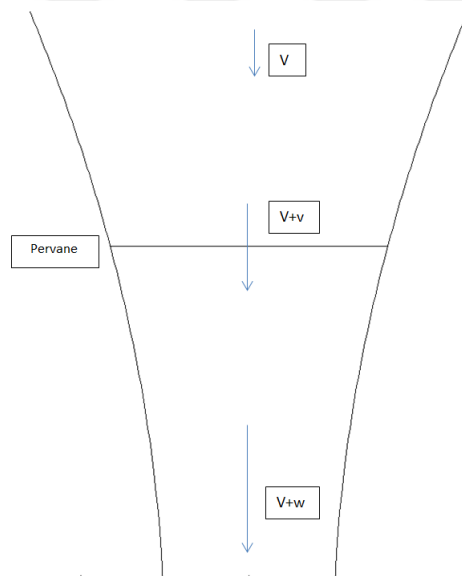
aktardığı enerjiden dolayı, pervane etkisinden uzak bölgedeki havadan daha hızlı akmaktadır. Pervane rüzgarı havanın içinde spiral bir şekilde aktığı bir tüp olarak kabul edilebilir [6].

Momentum teorisinde pervane sonsuz ince bir eyleyici disk olarak kabul edilir. Disk boyunca basınç değişirken hızın değişmediği varsayılır. Pervane rüzgarı ve eyleyici disk yapısı Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Momentum teorisinin kullandığı denklemler aşağıda verilmiştir [3]. Denklemlerde, indüklenmiş hız  $v$ , güç  $P$ , yoğunluk  $\rho$ , disk alanı  $A$  olarak tanımlanmıştır.

$$V = \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 + \left(\frac{T}{2\rho A}\right)^2} - \frac{v}{2} \quad (1.1)$$

$$P = T(V+v) \quad (1.2)$$

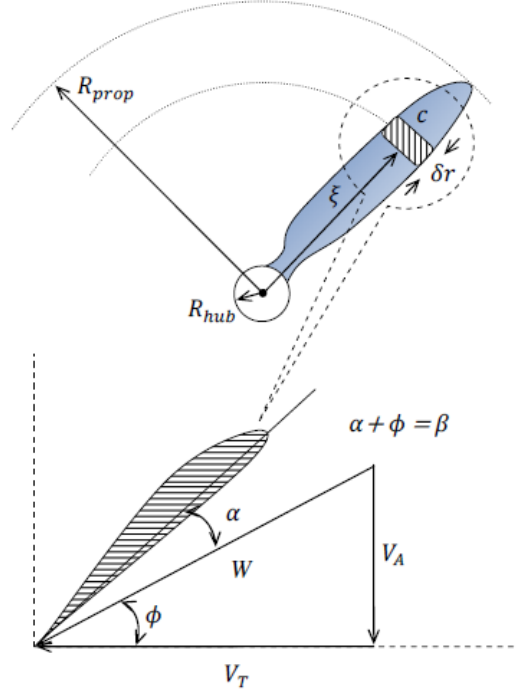


Şekil 1.1 : Pervane rüzgarı yapısı ve eyleyici disk modellemesi.

### 1.3.2 Pala elemanı kuramı

Pervane analiz ve tasarım yöntemlerinden bir diğeri de Pala Elemanı Kuramıdır. Bu kurama göre her bir pala elemanı iki boyutlu kabul edilir ve pala elemanları üzerindeki akışın bir diğereleman üzerinde etkisi olmadığı varsayılır [7]. Bu kuramın avantajı, bir profilin iki boyutlu karakteristiği bilinerek 3 boyutlu kuvvetlere karar verilmesidir.

Aynı zamanda palalar arasında etkileşim olmadığı varsayılmaktadır. Bu iki yaklaşımdan dolayı pala elemanı kuramıyla yapılan tasarım ve analizlerde hata oranı yüksektir [8]. Kuramın detayları Şekil 1.2 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : r yarıçapı uzaklığındaki pala elemanı üzerine etki eden hız vektörleri.

Pala elemanı teorisi ile hesaplanacak itki ve tork değerlerini belirleyen sürüklenme ve taşıma kuvvetlerinin hesaplamaları Eşitlik (1.3)-(1.4) ile gösterilmiştir.

$$dL = \frac{1}{2} \rho W^2 c dr C_l \quad (1.3)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 c dr C_d \quad (1.4)$$

Hesaplanan taşıma ve sürüklenme kuvvetleri kullanılarak B sayısında palaya sahip bir pervane için hesaplanacak itki ve tork değerleri Eşitlik (1.5)-(1.6) ile gösterildiği şekildedir:

$$dT = B(dL \cos \phi - dD \sin \phi) dr \quad (1.5)$$

$$dQ = B(dL \sin \phi + dD \cos \phi) dr \quad (1.6)$$



Pala elemanı teorisinin zayıf yönlerinden biri de, sonsuz sayıda pala sayısı için sonsuz itki ve tork hesaplanacak olmasıdır.

### 1.3.3 Girdap kuramı

Pervane analizinde kullanılabilecek bir diğer teori de girdap teorisidir. Bu teori kuvvetleri hesaplarırken eleman üzerindeki basınçları kullanmak yerine, eleman etrafındaki akışkan dolaşımını kullanmaktadır. Bu teori Kutta-Joukowski Kuramı'nı temel almaktadır [3]. Taşıma kuvveti hesabı için kullanılacak yöntem Eşitlik (1.7) ile verilmiştir.

$$L_s = \rho V \Gamma \quad (1.7)$$

### 1.3.4 Taşıma çizgisi kuramı

Pervane analiz ve tasarımlarında kullanılan yöntemlerden biri olan Taşıma Çizgisi Kuramı, Kutta-Joukowski Teoremi'ni, pervaneyi, vortisitinin yerel hız vektörlerine hizalandığı, palanın bir taşıma çizgisi olarak modellendiği bir yöntemle kullanır ve pala üzerindeki yükleri hesaplar [9]. Pala, yarıçap boyunca ayrı kesitler olarak modellenir ve bu kesitler kendi iki boyutlu özelliklerine sahiptir. Yükler bu 2 boyutlu kesitler üzerindeki kuvvetlerin toplanmasıyla hesaplanır.

Pala üzerinde bir kesit üzerindeki hız vektörleri ve yükler Şekil 1.3 ile gösterilmiştir. Şekilde gösterilen  $e_a$  aksenal,  $e_t$  teğetsel yönü belirtmektedir. Pervane  $\omega e_a$  açısal hızıyla dönmektedir.  $V_a$  aksenal,  $V_t$  teğetsel gelen akış hızıdır; indüklenmiş aksenal ve teğetsel hızlar ise  $u_a^*$  ve  $u_t^*$  ile gösterilmiştir. Toplam hız olan  $V^*$  ve hatve açısı Eşitlik (1.8)-(1.9) ile gösterilmiştir [10].

$$V^* = \sqrt{(V_a + u_a^*)^2 + (\omega r + V_t + u_t^*)^2} \quad (1.8)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{V_a + u_a^*}{\omega r + V_t + u_t^*} \right) \quad (1.9)$$

Hatve açısı hesaplanmasıyla her bir kesit üzerindeki viskoz olmayan Kutta-Joukowski taşıma kuvveti ve viskoz olan sürüklenme kuvveti toplanarak pervane üzerindeki itki ve tork hesaplanır. Eşitlik (1.10-1.11) ile Kutta-Joukowski taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti hesabı verilmiştir. Taşıma kuvveti  $F_i$ , sürüklenme kuvveti  $F_v$ , kesit üzerindeki dolaşım  $\Gamma$ , kesidin sürüklenme kuvveti katsayısı  $C_D$ , kesit uzunluğu ise  $c$ , akışkan yoğunluğu  $\rho$  ile gösterilmiştir. Eşitlik (1.12-1.13) ile ise itki ve tork hesaplama

$$F_i = \rho V^* \Gamma \quad (1.10)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \rho V^{*2} c C_D \quad (1.11)$$

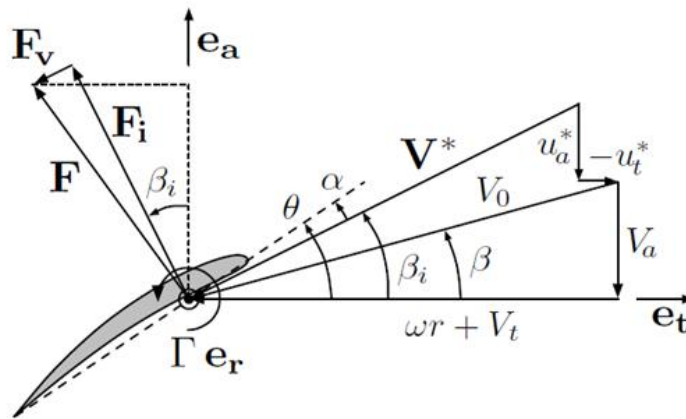
$$T = Z \int_{r_h}^R [F_i \cos \beta_i - F_v \sin \beta_i] dr \quad (1.12)$$

$$Q = Z \int_{r_h}^R [F_i \sin \beta_i + F_v \cos \beta_i] dr \quad (1.13)$$

yöntemi gösterilmiştir. İtki  $T$ , tork  $Q$ , pervane pala sayısı  $Z$ , pervane yarıçapı  $R$ , hub yarıçapı  $r_h$  ile gösterilmiştir.

Kullanılabilir güç, ilerleme hızı  $V_s$  olan bir araç için  $TV_s$  olarak tanımlanır. Bu durumda  $\eta$  olarak gösterilen verim Eşitlik (1.14) ile gösterildiği gibi olacaktır.

$$\eta = \frac{TV_s}{Q\omega} \quad (1.14)$$



Şekil 1.3 : Kesit üzerindeki hız ve kuvvetlerin gösterimi.

## 1.4 Sayısal Yöntemler

### 1.4.1 Navier-Stokes denklemleri

Bir akışın çözümü için akışı yöneten kısmi diferansiyel denklemler süreklilik denklemleri, Navier-Stokes denklemleri ve enerji denklemini içerir [11]. Bu denklemler birbirine bağlı ve doğrusal olmayan eşitlikler içerdiği için analitik yöntemlerle çözümleri imkansız kılar. Pratik birçok problem analitik çözüm yöntemlerine olanak sağlamadığı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği bu çözümler için kullanılmaktadır.

Akışı tanımlamak için kullanılan denklemler süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1.15)$$

X-Momentum Denklemi:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_\omega \quad (1.16)$$

Y-Momentum Denklemi:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega \quad (1.17)$$

Z-Momentum Denklemi:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega \quad (1.18)$$

Eşitliklerde geçen  $S_\omega$  dönen akışı tanımlamak için kullanılan terim olup matematiksel tanımı Eşitlik (1.19) ile gösterilmiştir.

$$S_\omega = -2\rho\omega_i \times V_i - \rho\omega_i \times \omega_i \times r_i \quad (1.19)$$

Eşitlikte  $i$  genel koordinat yönünü,  $\omega$  dönme hızını,  $r$  ise dönme eksenine olan uzaklığı

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_V \quad (1.20)$$

göstermektedir. Sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir sesaltı akış için enerji denklemi statik sıcaklık cinsinden Eşitlik (1.20) ile gösterilmiştir.

$C_p$ : Özgül ısı,  $g$ : Yerçekimsel ivme,  $k$ : termal iletkenlik,  $p$ : basınç,  $q_V$ : volumetrik ısı kaynağı,  $T$ : sıcaklık,  $t$ : zaman,  $u$ :  $x$  yönünde hız bileşeni,  $v$ :  $y$  yönünde hız bileşeni,  $w$ :  $z$  yönünde hız bileşeni olarak tanımlanmıştır.

#### 1.4.2 Petrov-Galerkin ayrıklaştırma yöntemi

Süreklilik denklemi haricindeki yönetici denklemler bazı akış özelliklerinin ( $U$ ,  $V$ ,  $T$  gibi.) çözüm alanı boyunca taşınmasını sağlarlar. Eşitlik (1.21) ile açıklanan sonlu eleman yöntemi doğrudan difüzyon ve kaynak terimleri için kullanılır.

$$\rho U \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \phi}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (1.21)$$

Fakat sayısal kararlılık için taşınım terimlerine karşı-rüzgar ayrıklaştırma yöntemi ağırlıklı integral ile birlikte uygulanır. Taşınım terimleri akış-yönü koordinatlara ( $s$ ) taşınır.

$$\rho U \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \phi}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \phi}{\partial z} = \rho U_s \frac{\partial \phi}{\partial s} \quad (1.22)$$

Taşınım terimlerinin ağırlıklı integral ile gösterimi Eşitlik (1.23) ile verilmiştir.

$$\int N \left( \rho U \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \phi}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dV = \rho U_s \frac{\partial \phi}{\partial s} \int N dV \quad (1.23)$$

### 1.4.3 Türbülans modelleri

#### 1.4.3.1 SST k-omega türbülans modeli

SST k-omega birçok aerodinamik uygulamada kullanılan iki-denklemlilik matematiksel bir türbülans modelidir [12]. Bir melez model olan SST k-omega, Wilcox k-omega ve k-epsilon modellerini birleştirir. Harmanlama işlevi gören  $F_1$  fonksiyonu duvar kenarına yakın bölgelerde Wilcox, serbest akış bölgelerinde ise k-epsilon modelini hareketlendirir. SST k-omega modelindeki türbülans kinetik enerjisi denklemi Eşitlik (1.24) ile gösterilmiştir [13,14].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1.24)$$

Yitim Hızı:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (1.25)$$

Eşitliklerde tanımlanan yardımcı ilişkiler ise aşağıda tanımlanmıştır.

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (1.26)$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \quad (1.27)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (1.28)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (1.29)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (1.30)$$

Kullanılan sabitlerin değerleri ise aşağıda verilmiştir;

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \quad \alpha_2 = 0.44$$
$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = \frac{9}{100}$$
$$\sigma_{k1} = 0.85, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.5, \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

### 1.5 İrtifa Etkisi

Pervanelerin itki üretmek için kullanılması, uzun süredir kullanılmalarından ve geliştirilmelerinden dolayı iyi bilinmekteyken, yüksek irtifa uçuş pervaneleri hakkında bilgi birikimi çok azdır. Bu rejimde uçuşlarına uygun pervaneler için çalışmalar günümüze kadar çok fazla yapılmamıştır. Bu rejimin özelliği pervanenin düşük Reynolds sayılı ve yüksek sesaltı Mach sayısına sahip olmasıdır. Ayrıca aynı pervane hem kalkış esnasında hem de tırmanma hareketi sırasında kullanılacaktır. Bu yüzden pervanenin çok yüksek hava yoğunluğu farklarında çalışması gerekmektedir.

Reynolds Sayısı bir akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere olan oranını temsil eder [15]. Bu iki tip kuvvetin oranı akışın rejimini belirler. Bu oran, türbülanslı akış ve düzgün akış olarak nitelendirilen farklı akış rejimlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Reynolds ve Mach sayılarının matematiksel tanımı Eşitlik (1.31-1.32) ile gösterilmiştir.

Eşitlikte gösterilen  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $V$  akışkan hızını,  $L$  akışkanın cisim üzerinde aldığı yolu,  $\mu$  ise akışkanın dinamik viskozitesini,  $c$  ise ses hızını

$$\text{Reynolds Sayısı: } Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1.31)$$

$$\text{Mach Sayısı: } M = \frac{V}{c} \quad (1.32)$$

göstermektedir. Pervanelerde akışkanın aldığı yol için kesit uzunluğu kullanılmaktadır.

İrtifanın artmasıyla birlikte hava yoğunlu düşmekte, dolayısıyla  $Re$  sayısı azalmakta buna karşılık  $Ma$  sayısı artmaktadır. Bu durum paller üzerinde oluşan akış rejimini ve kuvvetleri değiştirmektedir. İrtifa arttıkça buna paralel olarak yaşanan hava yoğunluğundaki düşüşe bağlı olarak  $Re$  sayısındaki azalma ve Mach sayısındaki

artışın 2-boyutlu kanat profillerinin türbülansa geçiş ve türbülanslı akım özellikleri Ref. [16]'de etraflıca incelenmiştir.

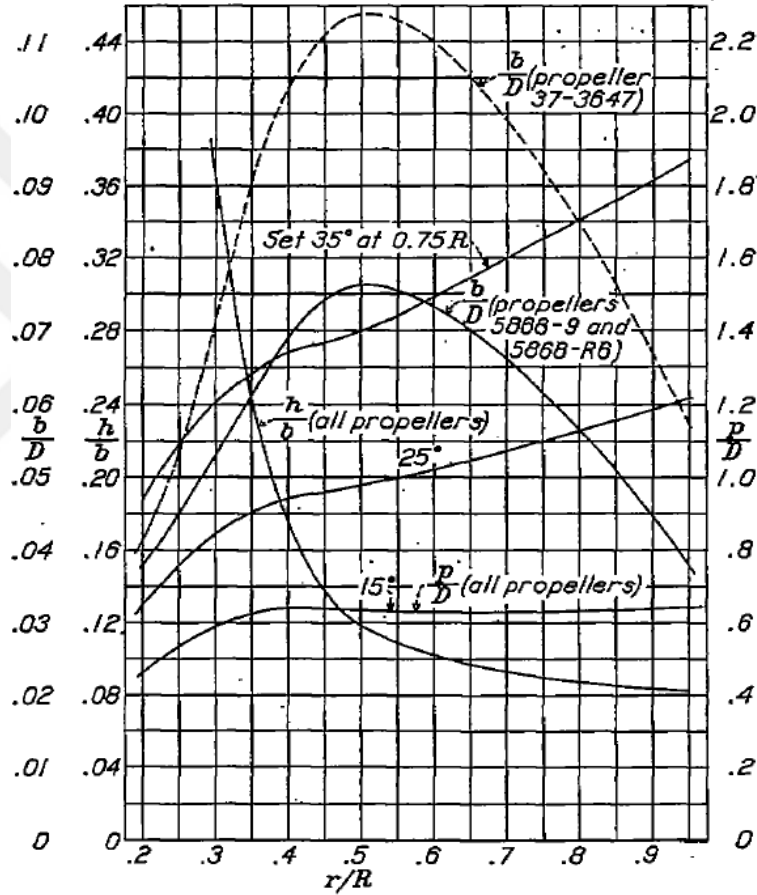






## 2. PERVANE GEOMETRİSİ

Literatürde deneyi yapılmış pervaneler incelenmiştir. 640 numaralı NACA raporunda [2], 2, 3 ve 4-palalı Clark-Y ve R.A.F.6 kesit yapıları pervanelerin testleri yapılmıştır. Testler için 5868-9 kodlu Clark-Y kesitli 2-palalı pervane kullanılmıştır. Testler için seçilen pervane geometri bilgileri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Pala geometri bilgileri.

Şekil 2.1’de verilen grafikte D pervane çapı, R pervane yarıçapı, r kesidin bulunduğu yarıçap, b kesit uzunluğu, h kesit kalınlığı, p geometrik hatve olarak gösterilmiştir.

Üç farklı hatve açısı profili içinden 0.75r konumunda bulunan kesit için 15 derece hatve açısına sahip geometri seçilmiştir. Çizelge 2.1 ile seçilen pervane bilgileri verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Analizler için seçilen pervane.

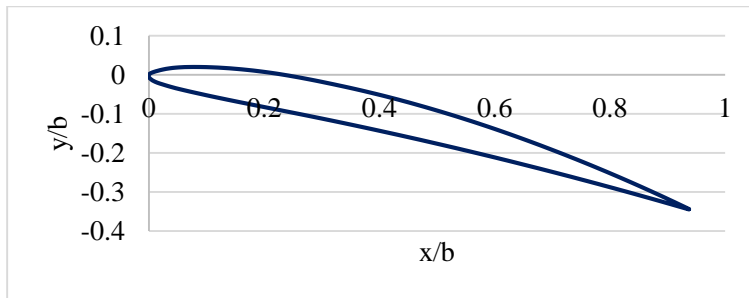
<b>Kesit Tipi</b>	Clark Y.
<b>Çap (m)</b>	3.048
<b>0.75r Konumundaki Hatve Açısı ( Derece)</b>	15
<b>Pala Sayısı</b>	2

Seçilen pervanenin geometrisinin oluşturulması için 9 farklı yarıçap konumunda geometrik özellikler alınmıştır. Seçilen 9 yarıçap konumu ve bu konumdaki kesitlerin geometrik özellikleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Farklı yarıçap konumları için geometrik özellikler.

<b>r/R</b>	<b>b/D</b>	<b>h/b</b>	<b>h/D</b>	<b>p/D</b>
0.2	0.038	0.360	0.0137	0.46
0.3	0.053	0.360	0.0191	0.60
0.4	0.069	0.180	0.0124	0.65
0.5	0.076	0.120	0.0091	0.65
0.6	0.073	0.100	0.0073	0.65
0.7	0.066	0.092	0.0061	0.65
0.8	0.057	0.088	0.0050	0.65
0.9	0.045	0.082	0.0037	0.65
0.95	0.037	0.081	0.0030	0.65

Alınan farklı kesitlerin geometrik özellikleri kullanılarak, [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com) adresli kesit veritabanı internet sitesi yardımıyla her bir pervane kesidi oluşturulmuştur [17]. 0.75r konumundaki kesite denk gelen pervane kesit görüntüsü Şekil 2.2 ile gösterilmiştir. Her bir kesit alanı denk gelen yarıçap konumuna yerleştirilerek 3-Boyutlu pervane geometrisi oluşturulmuştur. Pervane geometrisini oluşturmak için öğrenci lisansı ücretsiz olan Autodesk Inventor Professional 2017™ üç boyutlu katı tasarım programı kullanılmıştır. Oluşturulan 3-Boyutlu geometri Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : 0.75r konumundaki kesit yapısı.



Şekil 2.3 : 3-Boyutlu pervane geometrisi.





### 3. ANALİZ VE DENEY SONUÇLARI

#### 3.1 Test Koşulları ve Test Sonuçları

##### 3.1.1 Test düzeneği ve koşulları

Testler Amerika Ulusal Havacılık Danışma Kurulu N.A.C.A'nın ( National Advisory Committee for Aeronautics) bünyesinde bulunan yaklaşık 6.1 metrelik rüzgar tüneline 1938 yılında yapılmıştır [18]. Pervaneler sıvı soğutmalı 600 beygir güce sahip bir motora takılarak test edilmiştir. İlgili düzenek resmi Şekil 3.1 ile gösterilmiştir. İtki ve tork değerleri düzeneğin yerleştirildiği platform üzerine binen yükler üzerinden ölçülmüştür.

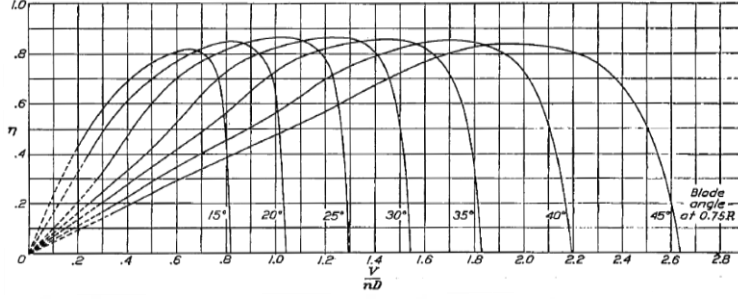
Test yöntemi olarak sabit devirde dönen pervaneye farklı hızlarda hava akışı uygulanmıştır. Testlerin sonuçları tekrarlandığında ilk testlerle aralarında %99 oranında yakınlık olduğu gözlemlenmiş, bu da testlerin tutarlı olduğunu göstermiştir.



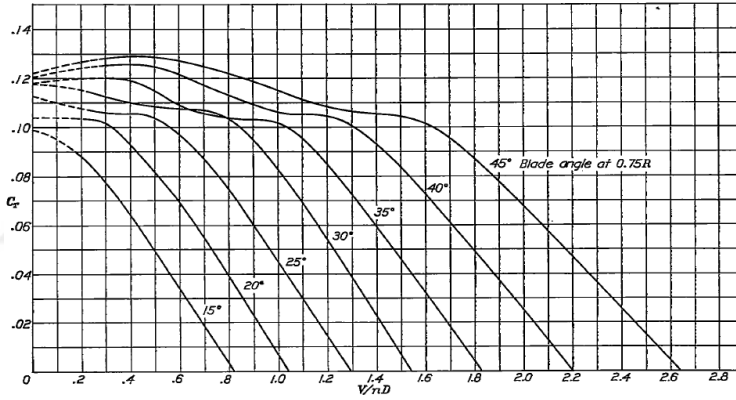
Şekil 3.1 : Motor üzerine bütünleştirilmiş 3-palalı pervane [2].

### 3.1.2 Deney sonuçları

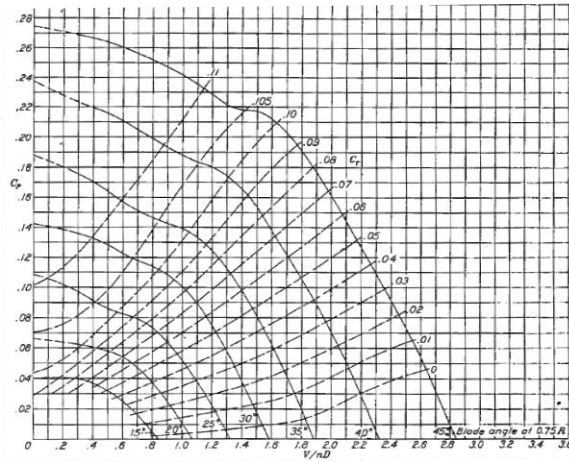
Test sonuçları grafikler ile verilmiştir. Grafikler birimsiz katsayılar olan ilerleme oranı  $J$  ( $V/nd$ ) karşılığında itki katsayısı  $C_T$ , Güç Katsayısı  $C_P$ , Verim  $\eta$  olarak ile gösterilmiştir. İlgili şekiller Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : 2-Palalı Clark-Y kesitli 5868-9 pervanesi için verim eğrileri.



Şekil 3.3 : 2-Palalı Clark-Y kesitli 5868-9 pervanesi için itki katsayısı eğrileri.



Şekil 3.4 : 2-Palalı Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi güç katsayısı eğrileri.

İlgili katsayıların matematiksel tanımları aşağıdaki eşitlikler ile gösterilmiştir.

$$\text{İtki Katsayısı} \quad : \quad C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (3.1)$$

$$\text{Güç Katsayısı} \quad : \quad C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (3.2)$$

$$\text{Tork Katsayısı} \quad : \quad C_Q = \frac{C_P}{2\pi} \quad (3.4)$$

$$\text{Pervane Verimi} \quad : \quad \eta = \frac{C_T V}{C_P n D} \quad (3.5)$$

$$\text{İlerleme Oranı} \quad : \quad J = \frac{V}{nD} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde geçen terimler,

T: İtki [N];  $\rho$  : Hava yoğunluğu [kg/m<sup>3</sup>]; n: Pervane dönme hızı [tur/s]

D: Pervane çapı [m]; P: Pervanenin gereksinim duyduğu güç [W], şeklindedir.

Farklı rüzgar hızlarına karşılık gelen  $J=V/nD$  değerleri için  $C_T$ ,  $C_P$  değerleri Çizelge 3.1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : J değerlerine karşılık gelen  $C_T$ ,  $C_P$  ve  $C_Q$  değerleri.

J	$C_T$	$C_P$	$C_Q$
0.20	0.087	0.040	0.0064
0.40	0.063	0.037	0.0059
0.55	0.041	0.029	0.0046
0.60	0.033	0.025	0.0040
0.70	0.018	0.016	0.0026

### 3.2 OpenProp Analizleri

Taşıma Çizgisi Kuramı'nın uygulanması için MIT'de (Massachusetts Institute of Technology) geliştirilen, açık kaynak bir pervane ve türbin tasarım-analiz kodu olan OpenProp kullanılmıştır [19]. Programın girdi arayüzünde pervane devri, itki, pervane

çapı ve kullanılan kesitlerin geometrik ve aerodinamik özellikleri girilmektedir. Şekil 3.5 ile OpenProp girdi ekranı gösterilmiştir.

Specifications		Blade Design Values						Inflow Profile Values			Options	
Number of blades:	NaN	r/R	c/D	Cd	t0/D	Skew	Xs/D	r	Va/Vs	Vt/Vs	<input checked="" type="radio"/> Propeller	
Rotation speed (rpm):		0.2									<input type="radio"/> Turbine	
Rotor diameter (m):		0.3									<input checked="" type="checkbox"/> Hub	
Required thrust (N):		0.4									<input type="checkbox"/> Chord optimiza...	
Ship speed (m/s):		0.5									<input checked="" type="checkbox"/> Viscous forces	
Hub diameter (m):		0.6									<input type="checkbox"/> Optimization pl...	
Fluid density (kg/m³):		0.7									<input checked="" type="checkbox"/> Geometry plots	
# radial panels:		0.8									<input type="checkbox"/> Performance c...	
# chordwise panels:		0.9									<b>Airfoil type</b>	
		0.95									Meanline type:	
		1									NACA a=0.8	
											Thickness type:	
											NACA 65A010	

Şekil 3.5 : OpenProp girdi ekranı.

OpenProp pervane tasarımı için Taşıma Çizgisi Kuramı kullanarak istenilen girdi değerlerinde en verimli pervaneyi tasarlamaktadır ve tasarlanan pervanenin performans eğrilerini vermektedir. Test için kullanılan Clark-Y kesitli 5868-9 pervanesi uygun inputlar haline getirilerek OpenProp ile tasarlanmış ve ayrıca performans analizi yapılmıştır. Clark-Y kesitli 5868-9 pervanesi tasarım ve performans analizi için girdi ekranının görüntüsü Şekil 3.6 ile gösterilmiştir.

Specifications		Blade Design Values						Inflow Profile Values			Options	
Number of blades:	2	r/R	c/D	Cd	t0/D	Skew	Xs/D	r	Va/Vs	Vt/Vs	<input checked="" type="radio"/> Propeller	
Rotation speed (rpm):	1200	0.2	0.038	0.0078	0.0137	0	0				<input type="radio"/> Turbine	
Rotor diameter (m):	3.048	0.3	0.053	0.0079	0.0191	0	0				<input checked="" type="checkbox"/> Hub	
Required thrust (N):	1687.3	0.4	0.069	0.0069	0.0124	0	0				<input type="checkbox"/> Chord optimiza...	
Ship speed (m/s):	33.528	0.5	0.076	0.0060	0.0091	0	0				<input checked="" type="checkbox"/> Viscous forces	
Hub diameter (m):	0.5	0.6	0.073	0.0058	0.0073	0	0				<input type="checkbox"/> Optimization pl...	
Fluid density (kg/m³):	1.2	0.7	0.066	0.0056	0.0061	0	0				<input checked="" type="checkbox"/> Geometry plots	
# radial panels:	50	0.8	0.057	0.0055	0.005	0	0				<input type="checkbox"/> Performance c...	
# chordwise panels:	50	0.9	0.045	0.0055	0.0037	0	0				<b>Airfoil type</b>	
		0.95	0.037	0.0054	0.003	0	0				Meanline type:	
		1	0.001	0.0010	0	0	0				NACA a=0.8	
											Thickness type:	
											NACA 65A010	

Şekil 3.6 : Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için OpenProp girdi ekranı.

Clark-Y kesitli profilin geometrik özellikleri ve aerodinamik özellikleri programda tanımlanmıştır. Farklı yarıçap konumlarında bulunan kesitlerin geometrik değerleri

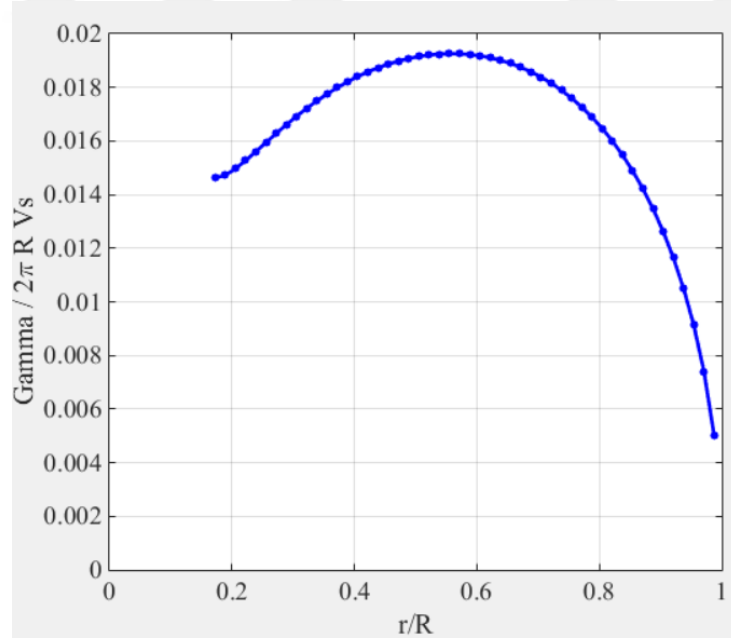


Şekil 3.6, aerodinamik özellikler ise Çizelge 3.2 ile gösterilmiştir [17]. Çizelgede belirtilen  $C_D$ , kesidin sürüklenme katsayısıdır.

Çizelge 3.2 : Clark-Y pervane kesidinin aerodinamik özellikleri.

$r/R$	$C_D$
0.2	0.0078
0.3	0.0079
0.4	0.0069
0.5	0.006
0.6	0.0058
0.7	0.0056
0.8	0.0055
0.9	0.0055
0.95	0.0054

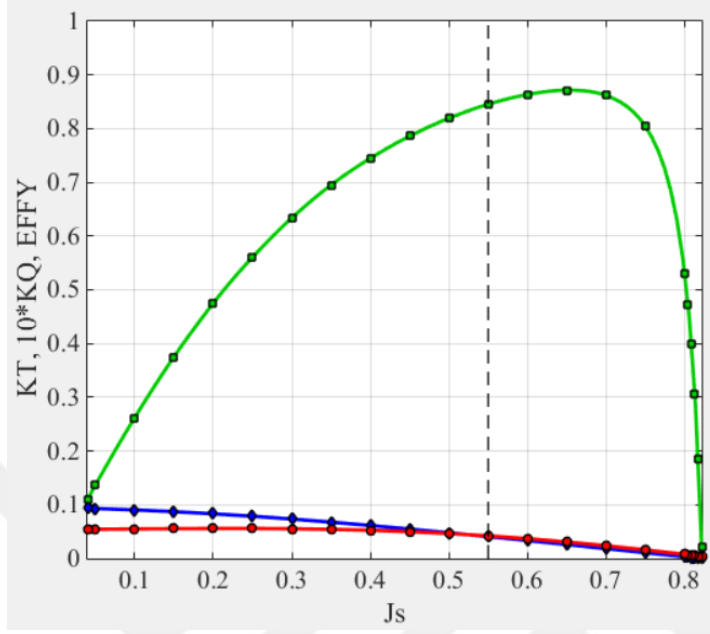
Belirtilen girdilerle pervanenin performans eğrileri elde edilmiştir. Taşıma Çizgisi Kuramının temeli olan pervane üzerindeki hava dolaşımı dağılımı OpenProp tarafından hesaplanmış ve program çıktısı olarak  $V/nD=0.55$  değeri için Şekil 3.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : OpenProp pala boyunca hava dolaşımı dağılımı çıktısı.

Pervanenin performans eğrileri Şekil 3.6 ile gösterilmiştir.  $K_T$  itki katsayısı,  $K_Q$  tork katsayısı  $\times 10$ ,  $EFFY$  verim,  $J_s$  ise daha önce tanımlanmış olan  $V/nD$  olarak verilmiştir.

Grafikte yeşil çizgi EFFY; mavi çizgi KT; kırmızı çizgi 10xKQ grafiklerini göstermektedir.



Şekil 3.8 : Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için performans eğrileri.

Grafikteki değerler çizelge halinde, test sonuçlarıyla karşılaştırılacak değerler için Çizelge 3.3 ile verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için performans değerleri

<b>J</b>	<b>C<sub>T</sub></b>	<b>C<sub>Q</sub></b>
0.20	0.083	0.0057
0.40	0.062	0.0053
0.55	0.041	0.0043
0.60	0.033	0.0038
0.70	0.018	0.0025

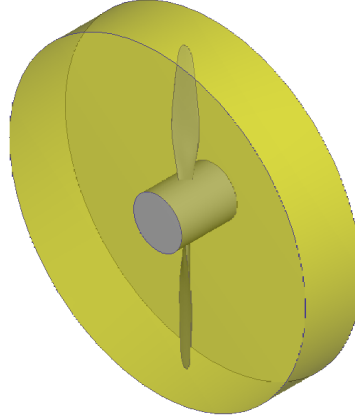
### 3.3 HAD Analizleri

Bu kısımda testi yapılan pervanenin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri için Autodesk Simulation CFD™ yazılımı kullanılmıştır. Çözüm yöntemi, uygulanan sınır şartları ve ağ yapısı devam eden bölümlerde verilmiştir.

#### 3.3.1 Sayısal yöntem

Pervane hareketinin analiz edilebilmesi için Dönen Bölge yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda akışkan hareketi göreceli bir çerçeveye göre hesaplanır ve ekstra ivme terimleri dikkate alınır [20]. Pervane çevresine tanımlanan Dönen Bölge Şekil 3.7 ile gösterilmiştir. Bu yöntemde dönüş hızı pervaneye değil, dönen bölgeye tanımlanmaktadır.

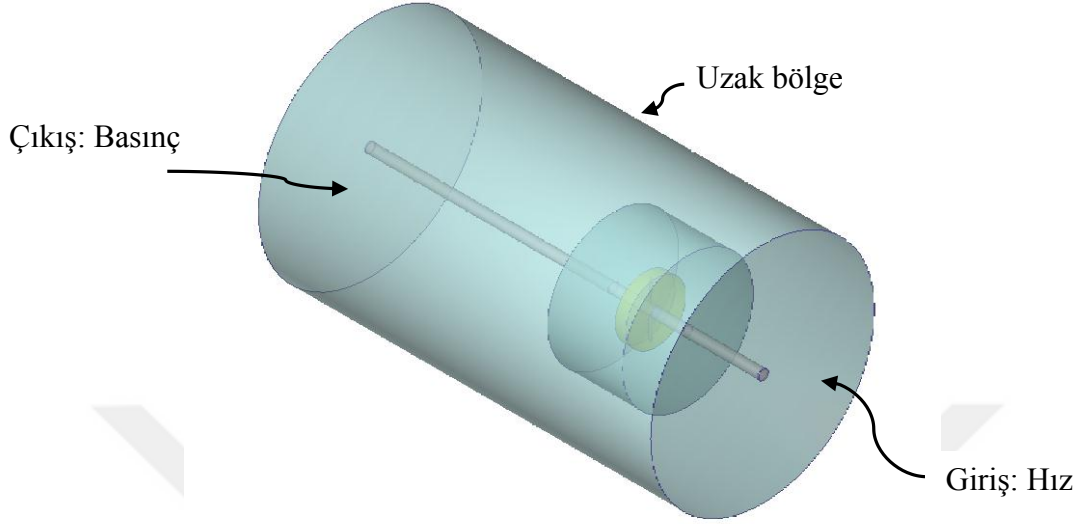
Dönen bölge ve durağan bölge arasındaki temas alanı sınır bölgesi olarak tanımlanmıştır. İki bölgenin ağ yapısı arasındaki ilişki kayan ağ yapısıdır. Kayan ağ yapısında iki bölgedeki ağ yapısı da kendini korur fakat göreceli olarak döner, hücreler arası bilgi bu temas bölgelerinden iletilir.



Şekil 3.9 : Pervane çevresindeki dönen bölge.

HAD analizlerinde SST k-omega türbülans modeli kullanılmıştır. SST k-omega Autodesk Simulation CFD™ yazılımının dış aerodinamik ve Dönen Bölge uygulamaları için önerdiği türbülans modelidir [21]. Ayrıca literatürde SST k-omega modeli aerodinamik pervane analizleri için önerilmiştir [22,23]. K-epsilon türbülans modeli ile yapılan karşılaştırmalarda da yine yakın sonuçlar alınmıştır.

Analizlerde deniz seviyesindeki hava özellikleri akışkan olarak tanımlanmıştır. Sınır şartları olarak giriş için normal hız, çıkış için basınç tanımlanmıştır. Analizlerde sınır şartları Şekil 3.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Sınır şartları.

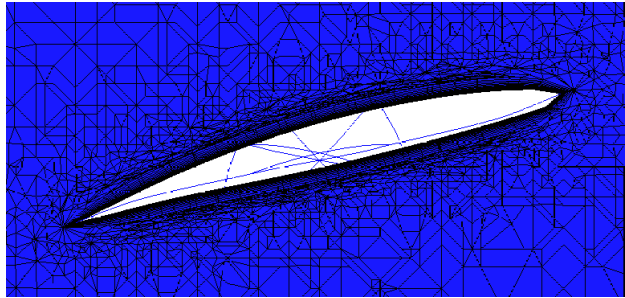
Analizlerde kullanılan program seçenekleri Çizelge 3.4 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : Analizlerde kullanılan seçenekler.

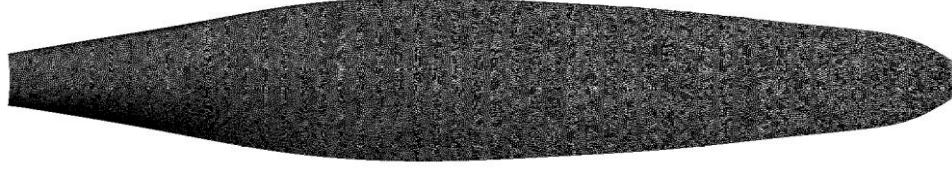
<b>Taşıma Modeli</b>	Petrov-Galerkin
<b>Sıkıştırılabilirlik</b>	Sesaltı Sıkıştırılabilir Akış
<b>Türbülans Modeli</b>	SST k-omega

### 3.3.2 Ağ yapısı

Yazılımın kendi ağ algoritmasıyla üretilen ağ yapısı Şekil 3.11-3.12-3.13 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : 0.75r konumundaki kesit etrafındaki ağ yapısı.



Şekil 3.12 : Pala üzerindeki yüzey ağ yapısı.



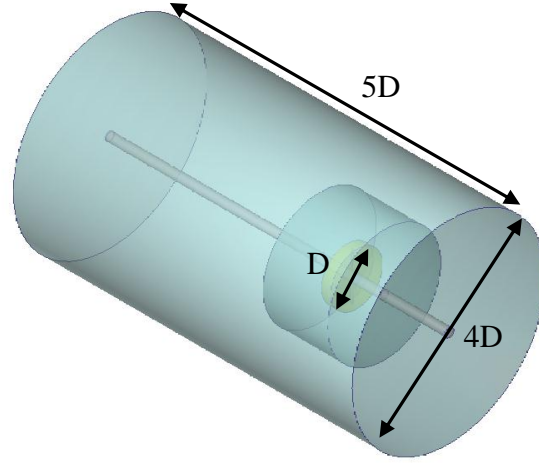
Şekil 3.13 : Çözüm alanı ağ yapısı.

Analizlerde kullanılan ağ yapısı ile ilgili sayısal bilgiler Çizelge 3.5 ile detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Ağ yapısı özellikleri.

<b>Sınır Tabaka Hücreleri Kat Sayısı</b>	20
<b>Toplam Bağlantı Noktası Sayısı</b>	2720080
<b>Toplam Hücre Sayısı</b>	12339541
<b>Pervane Yüzeyinde En Yüksek <math>y^+</math></b>	3

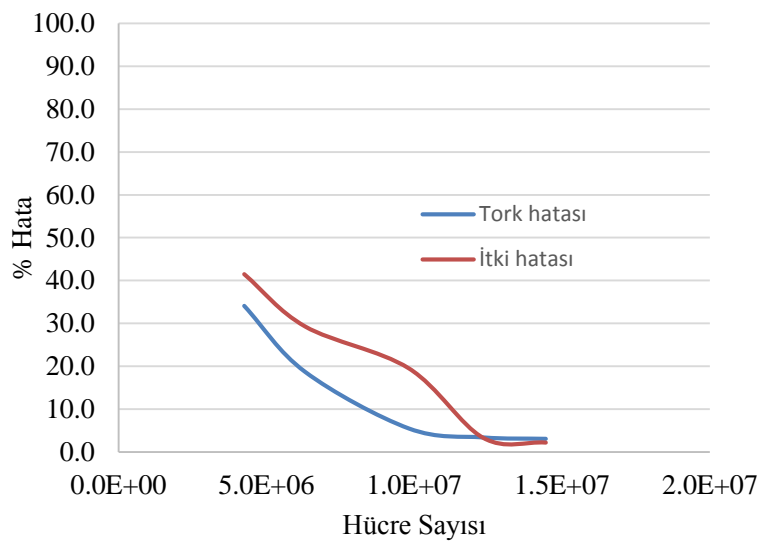
HAD analizleri için hazırlanan çözüm alanının çapı pervane çapının 4 katıdır. Bu çap akışın fazla pervane hizasında alan daralmasından dolayı serbest akış bölgesine göre hızlanmaması için büyük alınmıştır [24]. Pervane arkası bölge için 5 pervane çapı uzunluğunda bir çözüm alanı belirlenmiştir. Şekil 3.14 ile bu boyutlar gösterilmiştir. Şekilde D pervane çapını göstermektedir.



Şekil 3.14 : Çözüm alanı boyutları.

### 3.3.3 Ağ yapısından bağımsızlık analizleri

Yapılan analizlerin sayısal olarak ağ yapısından bağımsız olması HAD analizlerinde çok önemlidir. Bu sebeple analizlere başlamadan hedef bir test noktası seçilerek hücre sayısı düşük bir ağ yapısıyla analizlere başlanmış ve hücre sayısı artırılarak ağdan bağımsızlık noktasının bulunması hedeflenmiştir. Ağdan yapısından bağımsızlık analizleri  $V=33.6$  m/s hava hızı için gerçekleştirilmiştir ve bulunan tork ve itki değerleri test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır hata yüzdesi olarak Şekil 3.15 ile sunulmuştur. 12 milyon hücre sayısından sonra sonuçların değişmediği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.15 : Hücre sayısına karşılık itki ve tork hata yüzdeleri.

### 3.3.4 Analizler

Testler ile karşılaştırmak için toplamda 5 farklı analiz yapılmıştır. 1200 rpm devir hızı için beş farklı hava hızında yapılan analizlerde itki ve tork değerleri HAD ile hesaplanmıştır. Yapılan analizler Çizelge 3.6 ile gösterilmiştir. Çizelgede V rüzgar hızı, n devir hızı (devir/saniye), D ise pervane çapıdır.

Çizelge 3.6 : Analiz matrisi.

V (m/s)	J=V/nD
12.2	0.20
24.4	0.40
33.5	0.55
36.6	0.60
42.7	0.70

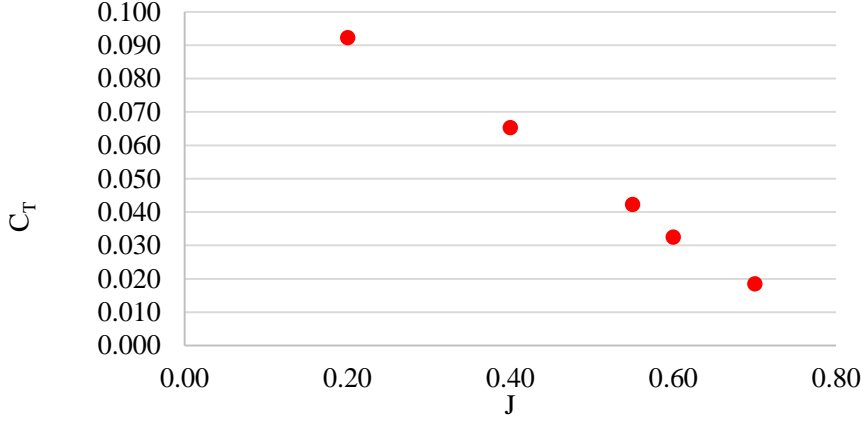
### 3.3.5 Sonuçlar

Yapılan analizlerin sonuçları, beş farklı rüzgar hızında, itki, tork, itki katsayısı, tork katsayısı değerleri için Çizelge 3.7 ile gösterilmiştir.

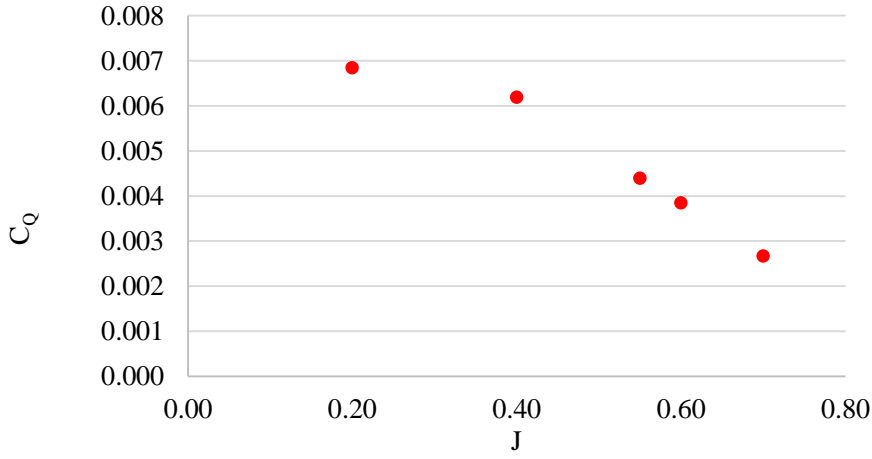
Çizelge 3.7 : Yapılan analizler ve sonuçları.

V (m/s)	J	İtki (N)	İtki Katsayısı $K_T$	Tork (N.m)	Tork Katsayısı $K_Q$
12.2	0.20	3824	0.092	864	0.0068
24.4	0.40	2707	0.065	782	0.0062
33.5	0.55	1755	0.042	555	0.0044
36.6	0.60	1349	0.033	486	0.0038
42.7	0.70	768	0.019	337	0.0027

İlerme oranı J için itki katsayısı ve tork katsayısı grafikleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 ile sunulmuştur.



Şekil 3.16 : İtki katsayısı.



Şekil 3.17 : Tork katsayısı.

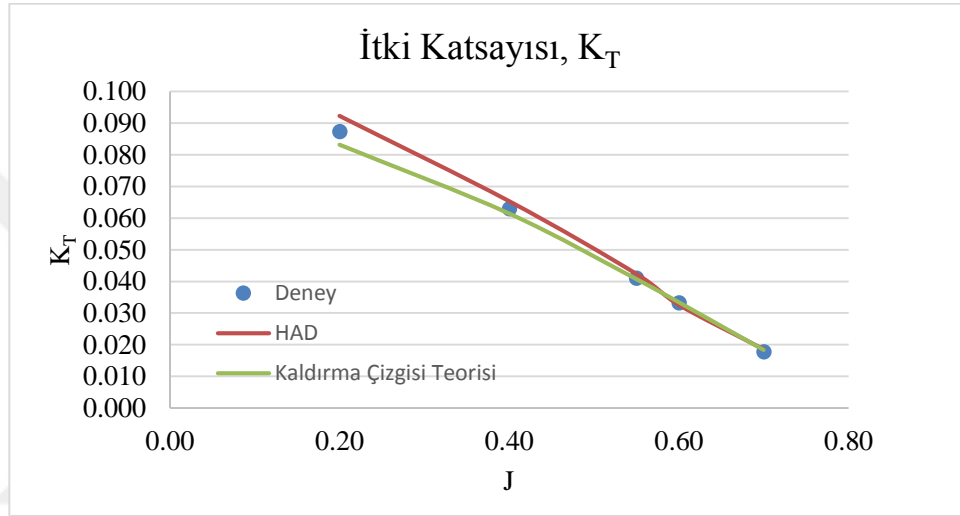
### 3.4 Sonuçların Karşılaştırılması

Test sonuçları, Taşıma Çizgisi Kuramı sonuçları ve HAD analiz sonuçları itki ve tork değerleri için aynı J değerleri için karşılaştırılmıştır. Analizler Autodesk Simulation CFD™ yazılımı ile, Taşıma Çizgisi Kuramı uygulaması OpenProp ile yapılmıştır. Test sonuçları ise N.A.C.A tarafından yapılmıştır. Sonuçlar itki katsayısı  $K_T$ , tork katsayısı  $K_Q$  için karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar tablo olarak Çizelge 3.8 ile, grafik olarak ise Şekil 3.18-3.19 ile gösterilmiştir.

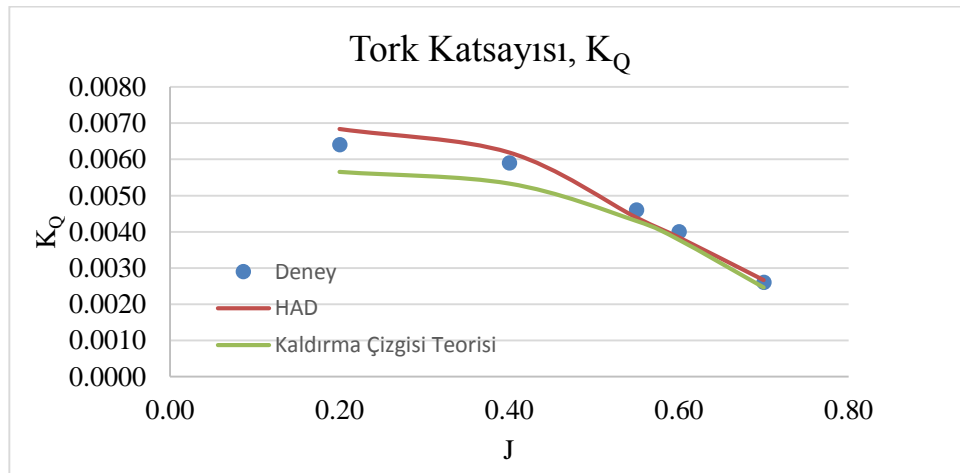


Çizelge 3.8 : Deney-HAD-Taşıma Çizgisi Kuramı çözümlerinin karşılaştırılması.

J	İtki Katsayısı, $K_T$			Tork Katsayısı, $K_Q$		
	Deney	HAD	Taşıma Çizgisi Kuramı	Deney	HAD	Taşıma Çizgisi Kuramı
0.20	0.087	0.092	0.083	0.0064	0.0068	0.0057
0.40	0.063	0.065	0.061	0.0059	0.0062	0.0053
0.55	0.041	0.042	0.041	0.0046	0.0044	0.0043
0.60	0.033	0.033	0.033	0.0040	0.0038	0.0038
0.70	0.018	0.019	0.018	0.0026	0.0027	0.0025



Şekil 3.18 : İtki katsayısı deney-HAD-Taşıma Çizgisi Kuramı karşılaştırması.



Şekil 3.19 : Tork katsayısı deney-HAD-Taşıma Çizgisi Kuramı karşılaştırması.

Yapılan alışmalar sonucunda Taşıma izgisi Kuramı ve HAD analiz yöntemi test sonuçları ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Taşıma izgisi Kuramı uygulamasının avantajları ve dezavantajları;

- Pervane performansını deney sonuçlarına yakın olarak hesaplamaktadır.
- Hesaplamalar düşük bir donanım gereksinimiyle hızlı bir şekilde yapılmaktadır.
- Teoriyi uygulayabilmek için kullanılan pervane kesitlerinin aerodinamik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir.
- Karmaşık akış yapıları için uygulamak zordur.
- Taşıma izgisi Kuramı ile hesaplanan değerler tasarım noktasından uzaktaki noktalarda test sonuçlarından uzaklaşmaktadır.

HAD uygulamasının avantajları ve dezavantajları;

- Pervane performansını deney sonuçlarına yakın olarak hesaplamaktadır.
- Karmaşık akış yapılarında, farklı durumların analizlerini yapmaya olanak sağlar.
- Hesaplamaların gerçeğe yakın yapılması için uygun bir ağ yapısı ve bu ağ yapısı için de yüksek bilgisayar donanımı gerekmektedir.
- Analizler uzun bir koşma zamanı gerektirmektedir.

## 4. İRTİFA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

### 4.1 İrtifanın Pervane Performansına Etkisi

Sesaltı hız rejimindeki uçuşlar için pervane tasarımı iyi bilinen bir kavramdır. Fakat yüksek irtifalardaki uçuşlarda dikkat edilmesi gereken hususlar artmaktadır. İrtifanın artmasıyla birlikte sıcaklık düşmekte, hava yoğunluğu azalmaktadır. Bu değişimler sonucunda uçuş rejimi düşük Reynolds sayılı ve yüksek Mach sayılı. Bu rejimlerde gerekli performansı sağlaması gereken pervane aynı zamanda da kalkış ve tırmanma hareketleri için de kullanılmaktadır. Bu sebeple bir pervane tasarlanırken atmosferdeki aşırı yoğunluk ve sıcaklık değişimlerini de gözönünde bulundurmak gerekmektedir [25].

İrtifa arttıkça hava sıcaklığının düşmesiyle birlikte ses hızı da düşmeye başlamaktadır. Eşitlik (4.1) ile c ses hızının hesabı gösterilmiştir.

k: özısıların oranı; R=286.9 [J/kgK]: gaz sabiti; T: Hava sıcaklığı [K] olmak üzere

$$c = \sqrt{kRT} \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'de görüldüğü üzere irtifa artışıyla birlikte gelen sıcaklık düşüşü ses hızında azalmaya sebep olmaktadır. Ses hızındaki azalma ise Eşitlik (1.32)'de de görüleceği üzere Mach sayısında artışa yol açmaktadır. Pervane ucundaki Mach sayısı 0.75 değeri ve sonrasında performansta ciddi düşüşe sebep olmaktadır [25].

Pervane tasarımında önemli bir kavram olan pervane ucu Mach sayısı, pervanenin uç noktasının Mach sayısını tanımlamak üzere kullanılır. Pervane ucundaki Mach sayısı hesaplanırken Eşitlik (1.32)'de gösterilen hız V yerine, pervanenin dönme hareketinden kaynaklanan teğetsel hız bileşeni  $V_t$  ve uçağın ilerleme hareketinden

gelen aksenal hız bileşeni  $V_a$  kullanılarak eşlenik hız birleşimi  $W$  hesaplanır. Eşitlik (4.2-4.3-4.4) ile pervane ucu Mach sayısının hesaplanması gösterilmiştir.

$$V_t = \omega r \quad (4.2)$$

$$W = \sqrt{V_a^2 + V_t^2} \quad (4.3)$$

Pervane ucu Mach sayısı:  $Ma_t = \frac{W}{c}$  (4.4)

Yukarıdaki eşitliklerde geçen terimler aşağıda tanımlanmıştır:

$V_a$ : Kesite gelen aksenal gelen akış hızı [m/s]

$V_t$ : Kesite gelen teğet akış hızı [m/s]

$\omega$ : Kesidin açısal hızı [rad/s]

İrtifa artışıyla birlikte gelen hava yoğunluğu düşmesi  $Re$  sayısı azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum paller üzerinde oluşan akış rejimini ve kuvvetleri değiştirmektedir. Yoğunluğun  $Re$  sayısı üzerindeki etkisi Eşitlik (1.31) ile gösterilmiştir. Eşitlik (1.31) ile gösterilen hesaptaki hız yerine aksenal ve teğetsel hız bileşeni olan  $W$  kullanılmalıdır. Yine akışın katettiği mesafe olan  $L$  yerine pervane kesit uzunluğu olan  $c$  kullanılmaktadır. Bu durumda  $Re$  sayısı hesabı Eşitlik (4.5) ile gösterilen şekle dönüşmektedir.

$$Re = \frac{\rho W c}{\mu} \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5) ile de görüleceği üzere yoğunluğun düşmesiyle birlikte  $Re$  sayısı düşmekte, dolayısıyla palin maruz kalacağı akış rejimi de değişmektedir.

## 4.2 HAD Analizleri

Deniz seviyesindeki hava özellikleri için HAD ve Taşıma Çizgisi Kuramı yöntemiyle performans değerleri elde edilen pervanenin farklı irtifadaki performans eğrileri HAD yöntemiyle elde edilmiştir. Farklı irtifadaki havanın fiziksel özellikleri çözücüde tanımlanmıştır. Clark-Y kesitli 2-Palalı 5868-9 pervanesi için 12500-25000-40000 ft yüksekliğinde performans eğrileri elde edilmiştir. Bu yüksekliklere denk gelen havanın fiziksel özellikleri Çizelge 4.1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı yüksekliklerde havanın fiziksel özellikleri.

Yükseklik (ft)	Yükseklik (m)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Dinamik Viskozite (10 <sup>-5</sup> Pa.s)	Sıcaklık (Kelvin)
0	0	1.22	1.789	288
12500	3810	0.84	1.671	263
25000	7620	0.554	1.544	239
40000	12192	0.323	1.443	216

Çizelge 4.1 ile de görüleceği üzere yükseklik arttıkça yoğunlukta dramatik bir düşüş gözlemlenirken dinamik viskozite değeri görece daha yavaş düşüş göstermektedir. Bu veriler eşliğinde farklı yüksekliklerdeki  $Re_{0.75}$  0.75 yarıçapında bulunan kesit uzunluğu için 4 farklı yükseklikte hesaplanmıştır.

Hesaplanan Re sayısı değerleri farklı yüksekliklerde farklı farklı ilerleme oranları J, V/nD için Çizelge 4.2-4.3-4.4 ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : J=0.20, W=144 m/s.

Yükseklik (ft)	$Re_{0.75}$	Pervane ucu Mach sayısı
0	1.84 E6	0.56
12500	1.36 E6	0.59
25000	0.97 E6	0.62
40000	0.60 E6	0.65

Çizelge 4.3 : J=0.55, W=147 m/s.

Yükseklik (ft)	$Re_{0.75}$	Pervane ucu Mach Sayısı
0	1.89 E6	0.58
12500	1.39 E6	0.60
25000	0.99 E6	0.63
40000	0.62 E6	0.66

Çizelge 4.4 : J=0.70, W=150 m/s.

Yükseklik	$Re_{0.75}$	Pervane ucu Mach Sayısı
0	1.92 E6	0.59
12500	1.41 E6	0.62
25000	1.01 E6	0.65
40000	0.63 E6	0.69

Yapılan analizlerin sonuçları, üç farklı rüzgar hızında, itki, tork, itki katsayısı, tork katsayısı değerleri için farklı yüksekliklerde Çizelge 4.5-4.6-4.7 ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : 12500 ft pervane performans değerleri.

V (m/s)	J	İtki (N)	İtki Katsayısı $K_T$	Tork (N.m)	Tork Katsayısı $K_Q$
12.2	0.20	1850	0.0447	630	0.0050
33.5	0.55	757	0.0183	384	0.0030
42.7	0.70	154	0.0037	226	0.0018

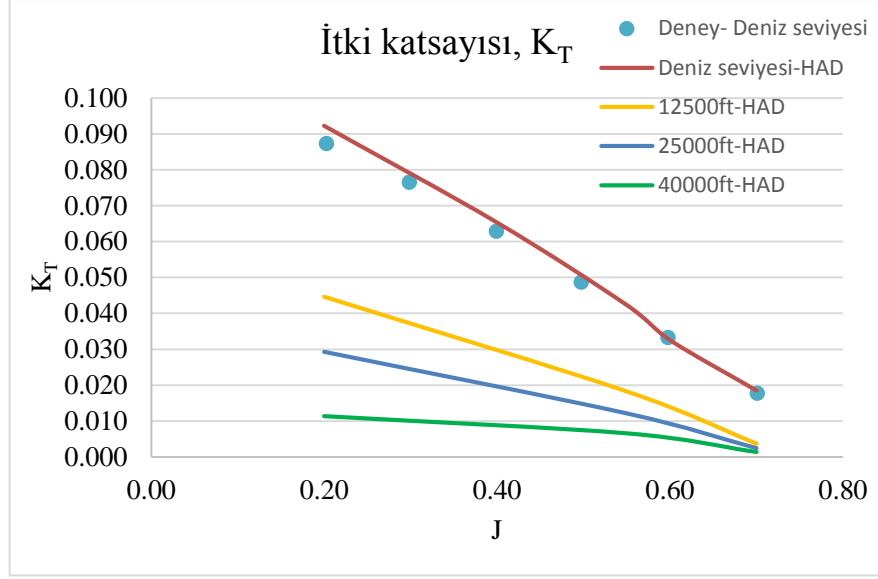
Çizelge 4.6 : 25000 ft pervane performans değerleri.

V (m/s)	J	İtki (N)	İtki Katsayısı $K_T$	Tork (N.m)	Tork Katsayısı $K_Q$
12.2	0.20	1215	0.0293	420	0.0033
33.5	0.55	503	0.0121	256	0.0020
42.7	0.70	101	0.0024	152	0.0012

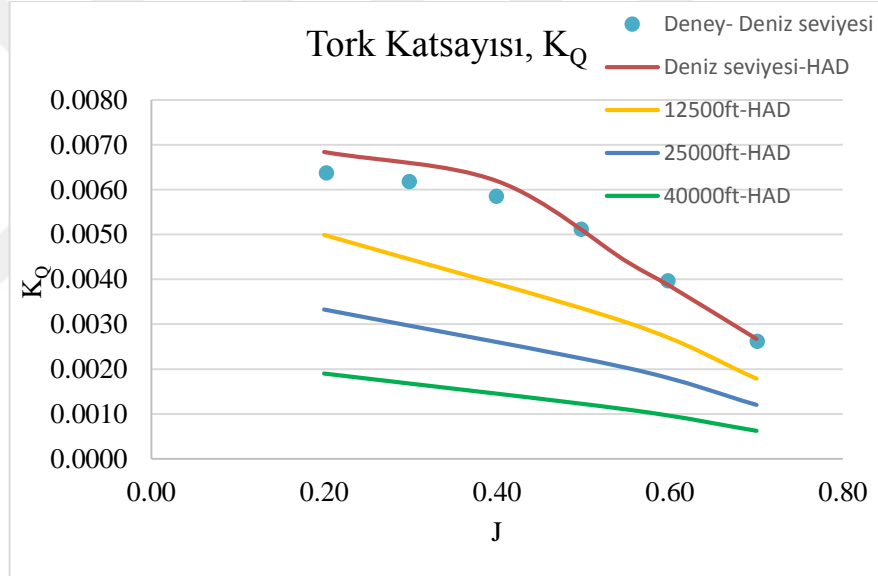
Çizelge 4.7 : 40000 ft pervane performans değerleri.

V (m/s)	J	İtki (N)	İtki Katsayısı $K_T$	Tork (N.m)	Tork Katsayısı $K_Q$
12.2	0.20	470	0.0113	240	0.0019
33.5	0.55	271	0.0065	139	0.0011
42.7	0.70	55	0.0013	79	0.0006

Farklı yüksekliklerde hesaplanan performans değerleri Şekil 4.1-4.2 ile itki ve tork katsayıları için karşılaştırılmıştır.

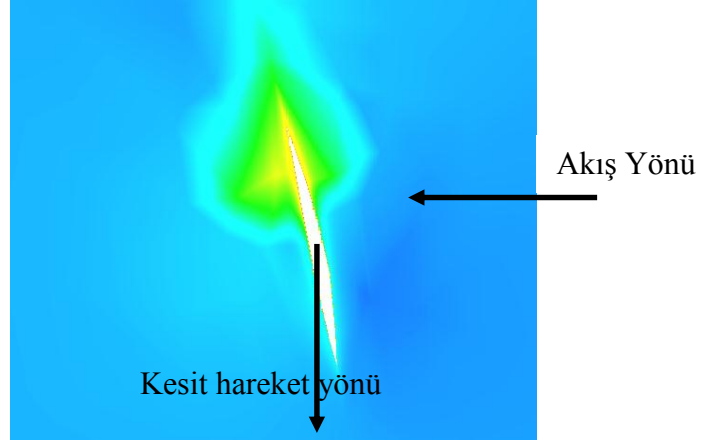


Şekil 4.1 : İtki katsayısının farklı yükseklikler için karşılaştırılması.

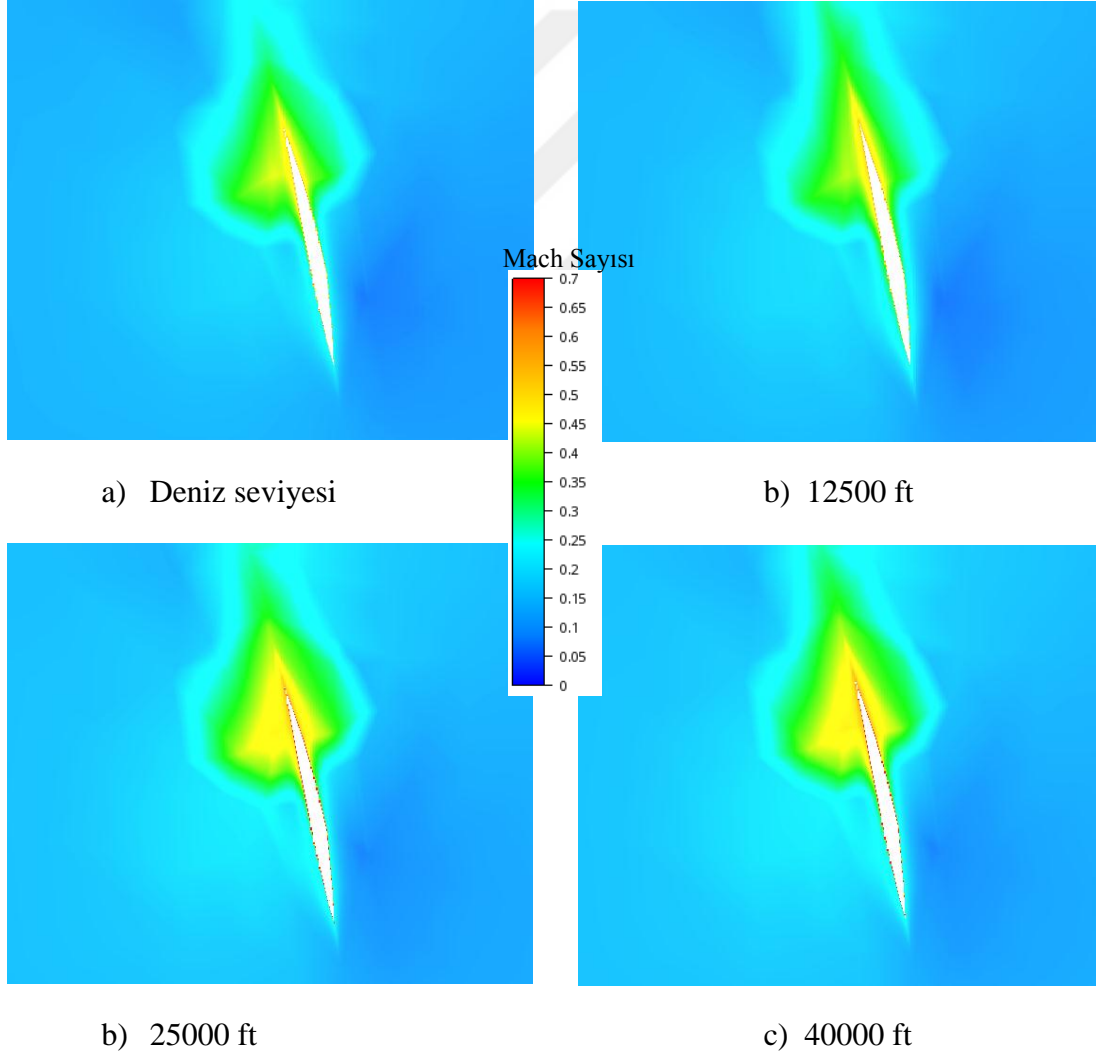


Şekil 4.2 : Tork katsayısının farklı yükseklikler için karşılaştırılması.

En yüksek hava hızı olan 42.7 m/s için pervane ucu çevresi Mach sayısı eşyükselti eğrileri Şekil 4.4 ile gösterilmiştir. Şekil 4.3 ile ise pervane kesitinin ve gelen akışın yönü gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Kesit ve gelen akış hareket yönleri.

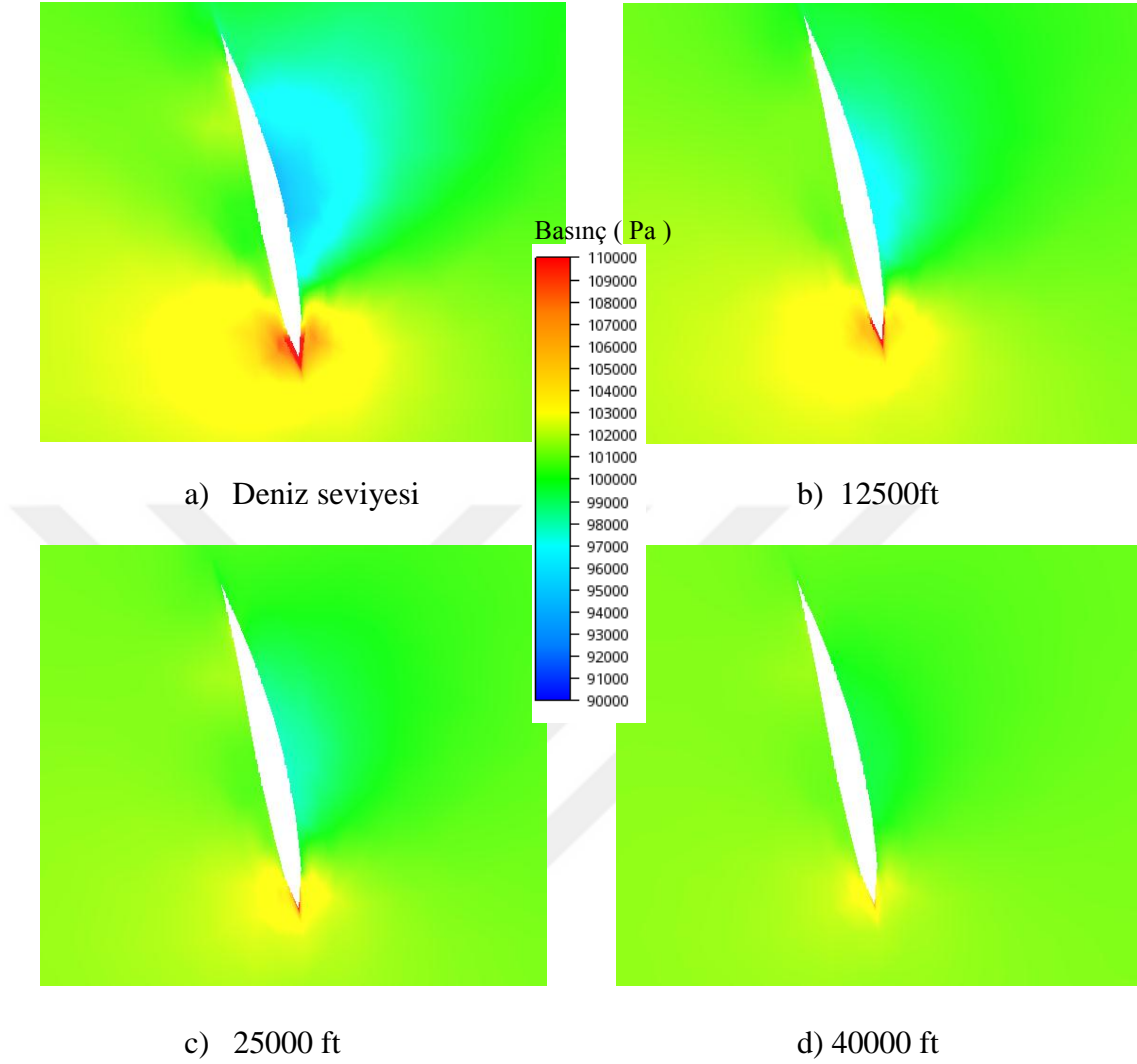


Şekil 4.4 : Farklı yüksekliklerde pervane ucu Mach sayısı dağılımı.

Şekil 4.4 ile gösterildiği gibi yükseklik arttıkça pervane ucu çevresindeki Mach sayısı artmaktadır.



0.75r kesitindeki basınç dağılımları Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Farklı yüksekliklerde 0.75r konumunda basınç dağılımı.

Yükseklik arttıkça yoğunluk ve dolayısıyla pal yüzeyleri arasındaki basınç farkında oluşan azalma görünmektedir. Pervane performansındaki düşüş basınç dağılımı gösterimiyle daha iyi anlaşılmaktadır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deney sonuçları bilinen bir pervanenin iki farklı uygulama, HAD ve Taşıma Çizgisi Kuramı, ile performans verileri incelenmiş, hesaplanan değerler deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda HAD ve Taşıma Çizgisi Kuramı uygulamaları ile elde edilen performans verilerinin deney sonuçlarıyla uyduğu gözlemlenmiştir. Taşıma Çizgisi Kuramı'nın hızlı çözümler almak için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu karşılaştırma ve doğrulama çalışması sonrasında farklı irtifalardaki performans verileri HAD uygulaması ile elde edilmiştir. Farklı irtifada değişen hava yoğunluğunun ve buna bağlı olarak azalan Re sayısı değerinin, düşen hava sıcaklığıyla birlikte artan Mach sayısının performans verileri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, irtifa artışıyla birlikte pervane performansında dramatik bir düşüş gözlemlenmiştir. Pervane tasarımlarında yüksek irtifadaki performans değerlerinin de gözönünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Pervane performansı için yapılan HAD uygulamasında tamamiyle türbülanslı çözüm kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda HAD uygulamasının türbülansa geçiş modeli kullanılarak yapılması, farklı yarıçap konumlarındaki ve farklı irtifalardaki akışın ve kuvvetlerin daha doğru hesaplanması için uygun olacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Bulten, N.W.H., Stoltenkamp, Van Hooijdonk, J.J.A.**, (2014). Efficient Propeller Designs Based on Full Scale CFD Simulations, *Wartsila Propulsion*
- [2] **Hartman, E.P., Biermann, D.**, (1939). Characteristics of Full-Scale Propellers Having 2, 3, and 4 Blades of Clark Y and R.A.F. Airfoil Sections, NACA Report No. 640, 1938.
- [3] **Johnson, W.**, (1994). *Helicopter Theory*, New York, NY: Dover Publications.
- [4] **Koch, L.D.**, (1998). Design and Performance Calculations of a Propeller for Very High Altitude Flight, Lewis Research Center, Ohio, USA.
- [5] **Keys, C.N.**, (1979). Rotary-Wing Aerodynamics, Volume 2.
- [6] **Rwigema, M.K.**, (2010) Propeller Blade Element Momentum Theory With Vortex Wake Deflection, 27<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice France.
- [7] **Öner, L.**, Pervane Analizi, *M.Sc. Tezi*, Uçak ve Uzay Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2010)
- [8] **Weick, F.E.**, (1930). *Aircraft Propeller Design*, New York and London, McGraw-Hill Book Company, INC.
- [9] **Kesler, S.R.**, Propeller Thrust Analysis Using Prandtl's Lifting Line Theory, a Comparison Between the Experimental Thrust and The Thrust Predicted By Prandtl's Lifting Line Theory, *M.Sc. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, The University of Utah, Utah, (2014)
- [10] **Epps B.**, (2010). OpenProp v2.4 Theory Document
- [11] <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-83A92AE5-0E9E-4E2D-B61F-64B3696E5F66-htm.html> 21.10.2017
- [12] <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learnexplore> 20.10.2017
- [13] **Menter, F.R.**, (1993). Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper, 93-2906
- [14] **Menter, F.R.**, (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, Vol. 32, 1598-1605
- [15] **Merchant, M.P., Miller, L.S.**, (2006), Propeller Performance Measurement for Low Reynolds UAV Applications, 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA.
- [16] **Kaynak, Ü., Çakmakoğlu, S.Ç. and Genç, M.S. (2012).**, "Transition at Low-Re Numbers for Some Airfoils at High Subsonic Mach Numbers", Low

Reynolds Number Aerodynamics and Transition, Dr. Mustafa Serdar Genc (Ed.), ISBN: 978-953-51-0492-6, InTech.

- [17] <http://airfoiltools.com/plotter/index> 15.09.2017
- [18] **Weick, F.E., Wood, D.H.**, The Twenty-foot Propeller Research Tunnel of the National Advisory Committee for Aeronautics. T.R. No.300 NACA, 1928
- [19] <http://engineering.dartmouth.edu/openprop> 08.06.2017
- [20] <http://help.autodesk.com/cloudhelp/2014/ITA/SimCFD/files/GUID-3708657C-7160-43B0-AFF9-AB7710719663.htm> 21.10.2017
- [21] <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/SimCFD-UsersGuide/files/GUID-E9E8ACA1-8D49-4A49-8A35-52DB1A2C3E5F-htm.html> 22.10.2017
- [22] **Stajuda, M., Karczewski, M., Obidowski, D., Jozwik, K.**, (2016). Development of a CFD Model for Propeller Simulation, *Mechanics and Mechanical Engineering*, Vol. 20, 579-593
- [23] **Kutty, H.A., Rajendran, P.**, (2017). 3D CFD Simulation and Experimental Validation of Small APC Slow Flyer Propeller Blade, Technical Note, School of Aerospace Engineering, University Sains Malaysia, Malaysia
- [24] **Subhas, S., Saji, V.F., Ramakrishna, S., Das, H.N.**, (2012). CFD Analysis of a Propeller Flow, *International Journal of Computer Applications*, Vol.55-No.16
- [25] **Colozza, A.**, (1998). High Altitude Propeller Design and Analysis Overview, Federal Data Systems, Ohio, USA

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** :Emre BAŞARAN  
**Uyruğu** :TC  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 08/04/1989 - ADANA  
**E-posta** :emre.basaran@tai.com.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans** :2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (AR-GE Burslu)

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
Ağustos 2013 – Eylül 2017	Punto Mühendislik	AR-GE Müh.
Eylül 2017 – Günümüz	TUSAŞ TAI	Tasarım Müh.

### YABANCI DİL:

İngilizce (İleri Düzeyde)

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Başaran ,E., Kaynak, Ü., (2017).** Propeller Performance Analysis Using Analytical and Numerical Methods, 232th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow (ICHTFF), December 14-15, Boston, USA

