

**TEK MOTORLU BİR İHA İÇİN  
PERVANE SEÇİMİ VE ANALİZİ**

**Yüksek lisans tezi**

**Coşkun TUNCA**

**ESKİŞEHİR, 2018**

**TEK MOTORLU BİR İHA İÇİN PERVANE SEÇİMİ VE ANALİZİ**

COŞKUN TUNCA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Gövde Motor Bakım Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

05, 2018

## JURİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Coşkun Tunca'nın "Tek Motorlu Bir İnsansız Hava Aracı İçin Pervane Seçimi Ve Analizi" başlıklı tezi .... /.... /20.... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim dalında Yüksek Lisans Yeterlik tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Ünvanı – Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	:.....	.....
Üye	:.....	.....
Üye	:.....	.....
Üye	:.....	.....
Üye	:.....	.....

.....  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

### TEK MOTORLU BİR İHA İÇİN PERVANE SEÇİMİ VE ANALİZİ

COŞKUN TUNCA

Uçak Gövde Motor Bakım Ana Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü,05,2018

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU

Bu çalışmanın amacı pervane performansına etki eden önemli faktörlerin belirlenmesi ve bir insansız hava aracı için seçilen 1.8 m ve 2.0 m çaplarında, değişken hatveli, iki farklı pervanenin performans analizlerinin yapılarak hangisinin tanımlanan görev için daha uygun olduğunu belirlemektir. Yapılan incelemede bilinen pervane teorilerinden, pervane performansına yönelik mevcut Hamilton Standart pervane grafiklerinden ve üreticiye ait pervane performans ve verim grafiklerinden yararlanılmıştır. Bu çalışmanın ilk kısmında pervane pal açısı, pervane pal geometrisi, pervane pal yükü, pervane kök geometrisi (shank form), sıkışabilirlik etkisi ve blokaj etkisi gibi parametrelerin pervane performansı üzerindeki etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. İkinci aşamada pervanelerin dinamik koşullardaki verim, itki, hatve açısı gibi önemli parametreleri uçağın kalkış, tırmanış ve seyahat durumlarında 3 ayrı başlıkta incelenmiş sonuçlar kıyaslamalı bir şekilde grafiksel olarak sunulmuştur. Son durumda pervanelere ait gürültü incelemesi yapılarak çalışma sonlandırılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Pervane, Verim, Statik İtki, Gürültü

## **ABSTRACT**

### **PROPELLER SELECTION AND ANALYSIS FOR SINGLE ENGINE UNMANNED AIR VEHICLE**

**COŞKUN TUNCA**

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Anadolu University, Graduate School of Sciences, 05,2018

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU

The purpose of this study is to determine important factors affecting the propeller performance and studying performance analysis of the two different variable-pitch propeller which has 1.8 m and 2.0 m diameters. The aim of this analysis is to find out which propeller is more appropriate for the same task. In this review known propeller theories, the current Hamilton Standard propeller performance graphics and propeller performance and efficiency graphs which belongs to manufacturer were used. In the first part of this study, the effects on the propeller performance of the parameters such as the propeller pitch, the propeller pitch geometry, the propeller blade load, the propeller root geometry (shank form), the compressibility effect and the blockage effect were investigated after that the obtained results are presented in graphical form. In the second stage, dynamic conditions of the propellers are studied and some crucial parameters such as efficiency, thrust and pitch angle were analyzed for three different condition of aircraft which are take off, climb and cruise . Then the results are graphically presented in a comparative manner. In the last case the noise of the propellers was examined and the study was terminated.

**Keywords:** Propeller, Efficiency, Static Thrust, Noise

## ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup bana yardımcı olan tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet Ş. KAVSAOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Tez aşamasında yaptığım testlerde ve incelemelerde beni yalnız bırakmayan Eskişehir'de faaliyet gösteren TEI-TUSAŞ çalışanlarına ve yönetimine de sonsuz teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Coşkun TUNCA

2018

.../.../20....

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalardan bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığımı ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....

(İmza)

.....

(Adı-Soyadı)

## İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI .....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖNSÖZ .....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLolar DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ.....	xiv
1.1 Pervaneye Genel Bakış.....	1
1.1.1 Güç iletme şekline göre pervaneler .....	1
1.1.2 Hatve (Pitch) özelliğine göre pervaneler.....	3
1.1.3 Sabit hızlı pervanelerin çalışma prensibi.....	5
1.1.4 Düzenleyicinin (Govarnörün) çalışma prensibi .....	8
1.1.5 Bayraklama (Feathering) ve ters hatve .....	9
2. PERVANE PERFORMANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER .....	10
2.1 Pervane Geometrisi Etkinlik Değeri (Activity Factor) Hesabı.....	11
2.2 Pervane Hatve Açısı Etkisi .....	12
2.3 Pervane Pala Yüğü Etkisi .....	14
2.4 Pervane Kök Geometrisi .....	15
2.5 Sıkışabilirlik Etkisi .....	17
2.6 Blokaj Etkisi.....	18



<b>3. STATİK İTKİ HESABI .....</b>	<b>21</b>
<b>4. DİNAMİK DURUMDAKİ PERVANE PERFORMANSI HESABI.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Turboşarj ve Kritik İrtifa .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Uçağın Kalkış Esnasındaki Performansı.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 Uçağın Tırmanış Esnasındaki Performansı .....</b>	<b>36</b>
<b>4.4 Uçağın Seyahat Durumundaki Performansı.....</b>	<b>41</b>
<b>5. PERVANE GÜRÜLTÜ ANALİZİ .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Pervane Gürültüsü Tahmin Yöntemleri .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.1 Uzak alan (Far field) gürültüsü .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2 Kalkış Durumu Gürültü Seviyesi.....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 Tırmanış Durumu Gürültü Seviyesi .....</b>	<b>51</b>
<b>5.4 Seyahat Durumu Gürültü Seviyesi .....</b>	<b>51</b>
<b>6. SONUÇ .....</b>	<b>53</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>55</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>57</b>

## TABLolar/ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> Etkinlik değeri kıyaslaması .....	12
<b>Tablo 2.2.</b> Ortalama geometrik pal açısı kıyaslaması .....	13
<b>Tablo 2.3.</b> Pervane pala yükü kıyaslaması.....	15
<b>Tablo 2.4.</b> Uçak tiplerine göre pervane pala yükleri.....	15
<b>Tablo 2.5.</b> Pervane pala yükü kıyaslaması.....	16
<b>Tablo 2.6.</b> Pervane uç hızı kıyaslaması.....	18
<b>Tablo 3.1.</b> İki pervane için statik itki hesaplamalarında kullanılan değerler.....	25
<b>Tablo 3.2.</b> Statik itki kaybı yüzdeleri.....	28

## ŞEKİLLER DİZİNİ

## Sayfa

Şekil 1.1. Pervane elemanları ve kesit konum açısı.....	1
Şekil 1.2. Cessna 172 uçağındaki çekici pervane.....	2
Şekil 1.3. Predator MQ-1 uçağındaki itici pervane.....	2
Şekil 1.4. Sabit hatveli pervane.....	4
Şekil 1.5. Hatvesi yerde ayarlanabilen pervane.....	4
Şekil 1.6. Değişken açılı pervane.....	5
Şekil 1.7. Değişken açılı pervanede hız vektörleri.....	6
Şekil 1.8. Pervane verimi ve ilerleme oranı.....	7
Şekil 1.9. Pervane pal (pitch) açıları.....	7
Şekil 1.10. On speed ve over speed durumları.....	8
Şekil.1.11. Underspeed durumu.....	9
Şekil 1.12. Pervane pitch açısı uçuş modları .....	10
Şekil 2.1. Pervane pali üzerindeki kesitler .....	12
Şekil 2.2. Pervane pala açısı .....	13
Şekil 2.3. Pervane hatve açısı kıyaslaması.....	14
Şekil 2.4. Pervane kök (shank) formu .....	16
Şekil 2.5. 2 metre çapındaki pervane pali ve kök (shank) formu.....	17
Şekil 2.6. 1.8 metre çapındaki pervane pali ve kök (shank) formu.....	17
Şekil 2.7. Sıkışabilirlik etkisi.....	18
Şekil 2.8. $S_{body}$ ile tarif edilen alan.....	19

Şekil 2.9. Hamilton standart pervane verim grafiği .....	20
Şekil 2.10. Yerleşik verim grafiği .....	21
Şekil 3.1. Pervane itki ve güç katsayıları $B=3$ $AF=80$ .....	24
Şekil 3.2. Pervane itki ve güç katsayıları $B=3$ $AF=120$ .....	25
Şekil 3.3. Teorik olarak hesaplanan statik itki.....	26
Şekil 3.4. İtki sensörü .....	26
Şekil 3.5. İtki sensörü çalışma prensibi.....	27
Şekil 3.6. Teorik ve ölçüm yapılarak elde edilen statik itki.....	28
Şekil 4.1. 2.0 m pervaneye ait $\eta$ (verim) & ilerleme oranı grafiği.....	29
Şekil 4.2. 2.0 m pervaneye ait $C_p$ (güç katsayısı) & ilerleme oranı grafiği.....	30
Şekil 4.3. 1.8 m pervaneye ait $\eta$ (verim) & ilerleme oranı ve $C_p$ (güç katsayısı) & ilerleme oranı grafiği.....	30
Şekil 4.4. Kritik irtifa grafiği.....	31
Şekil 4.5. Kalkış durumu için hatve açısı & irtifa grafiği.....	33
Şekil 4.6. Kalkış durumu için verim & irtifa grafiği.....	34
Şekil 4.7. Kalkış durumu için itki & irtifa grafiği.....	35
Şekil 4.8. Kalkış durumu için $M_{tip}$ & irtifa grafiği.....	36
Şekil 4.9. Tırmanış durumu için hatve açısı & irtifa grafiği.....	38
Şekil 4.10. Tırmanış durumu için verim & irtifa grafiği.....	39
Şekil 4.11. Tırmanış durumu için itki & irtifa grafiği.....	40
Şekil 4.12. Tırmanış durumu için $M_{tip}$ & irtifa grafiği.....	41

<b>Şekil 4.13.</b> Seyahat durumu için hatve açısı & irtifa grafiği.....	43
<b>Şekil 4.14.</b> Seyahat durumu için verim & irtifa grafiği.....	44
<b>Şekil 4.15.</b> Seyahat durumu için itki & irtifa grafiği.....	45
<b>Şekil 4.16.</b> Seyahat durumu için Mtip& irtifa grafiği.....	46
<b>Şekil 5.1.</b> FAR36 gürültü seviyesi çizelgesi.....	47
<b>Şekil 5.2.</b> Kalkış durumundaki gürültü & irtifa grafiği.....	50
<b>Şekil 5.3.</b> Tırmanış durumundaki gürültü & irtifa grafiği.....	51
<b>Şekil 5.4.</b> Seyahat durumundaki gürültü & irtifa grafiği.....	52

## SİMGELER DİZİNİ

J	: İlerleme oranı
V	: Uçak hızı (m/s)
n	: Pervane devri (rps)
D	: Pervane çapı (m)
$\alpha$	: Hücüm açısı ( $^{\circ}$ )
$\beta$	: Hatve açısı ( $^{\circ}$ )
AF	: Etkinlik Değeri
TAF	: Toplam Etkinlik Değeri
r:	: Pervane yarıçapı (m)
$\Omega$	: Açısal hız
( $\Omega r$ )	: Liner hız
$P_{bl}$	: Pervane pale yükü (shp/ft <sup>2</sup> )
P	: Pervane gücü (watt)
B:	: Pale sayısı
$M_{tip}$	: Pervane uç hızı
$\pi$	: Pi sayısı
a	: Ses hızı (m/s)
$J_{eff}$	: Efektif ilerleme oranı
h	: Hava akışı yavaşlama katsayısı
$S_{body}$	: Pervane arkasında kalan blokaj alanının kesiti
$C_{Li}$	: Ortalama kaldırma katsayısı
$C_p$	: Güç katsayısı
$C_t$	: İtke katsayısı
$\eta$	: Pervane verimi
$\rho$	: Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )

- $T_{\text{statik}}$  : Statik itki
- $M_{\text{rotation}}$  : Rotasyonel tip hızı
- FL1 : Parçalı gürültü seviyesi
- FL2 : Parçalı gürültü seviyesi
- FL3 : Parçalı gürültü seviyesi
- FL4 : Parçalı gürültü seviyesi
- NC : Pal sayısı düzeltme faktörü
- DI : Yönlenme etkisi
- OSPL : Toplam gürültü seviyesi (dB)
- PNL : Algılanan gürültü değeri (dB)
- dB(A) : Ağırlıklı gürültü seviyesi (dB)
- FAR 36 : Federal Aviation Regulation Part 36 (Amerikan Havacılık Kuralları-  
Gürültü Standardı

# 1. GİRİŞ

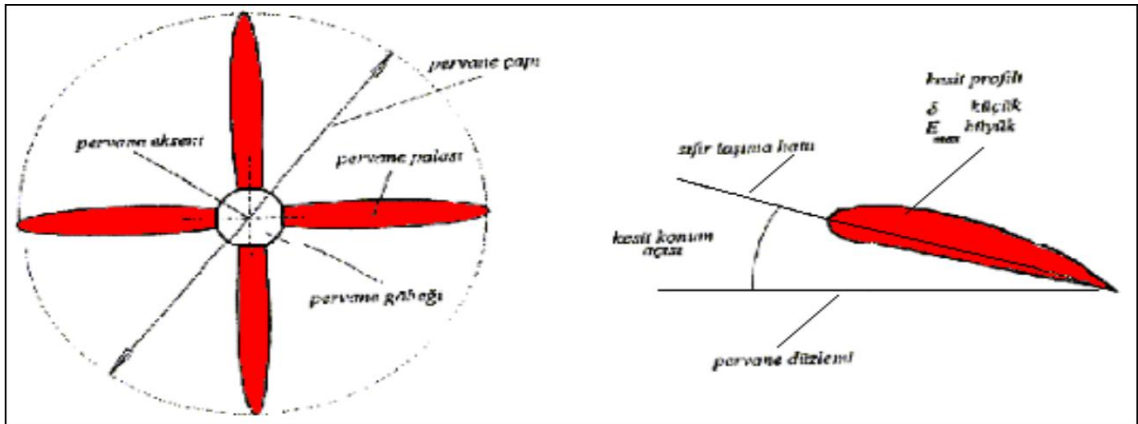
## 1.1 Pervaneye Genel Bakış

Bir uçağı ileri doğru çeken kuvvet akışkan kütesinin geriye doğru, momentumun artırılarak sevk edilmesi suretiyle elde edilir. Sözü edilen momentumun artımı genellikle:

- Bir turbojet motorunda havanın önce sıkıştırılıp sonra ısıtılarak genişletilmesiyle,
- Bir pervane ile havanın geriye doğru hızlandırılmasıyla,
- Modern, yüksek by-pass'lı turbojet motorlarında kısmen türbinde genişlemeyle ve kısmen de pervane ile hızlandırmak suretiyle elde edilir.

Pervane, içten yanmalı bir motorun veya türbinli bir motorun (turboprop) ürettiği mekanik enerjiyi, önündeki hava kitlesini uçağın hareket yönüne zıt yönde hızlandırmak suretiyle ileri doğru bir çekme kuvvetine dönüştürür. Bir diğer deyişle motordan elde edilen mekanik enerjiyi önündeki havayı uçağın gidiş yönüne doğru ivmelendirerek itme veya çekme gücüne çevirir.

Bir pervane göbeği etrafında eşit açısal aralıklarla konumlandırılmış ve blade (pal) adı verilen kanatçıklardan meydana gelir. Pervane iki veya daha fazla palin bir Hub'a monte edilmesinden oluşur. Hub'da palleri motor şaftına bağlar.[14]



Şekil 1.1. Pervane elemanları ve kesit konum açısı

**Kaynak:** [http://www.megap.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller.../Pervane%20Yapısı.pdf](http://www.megap.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller.../Pervane%20Yapısı.pdf)

### 1.1.1 Güç iletme şekline göre pervaneler

**Çekici pervane:** Uçakta thrust elde etmek için kullanılır. Bu tip pervaneler motorun önündedir. Motor sayısı ve motorun uçaktaki yerleşimine göre yerleri değişir.





**Şekil 1.2.** Cessna 172 uçağındaki çekici pervane

**Kaynak:** Wikipedia

Şekil 1.1’de gösterilen Cessna 172 uçağı dünya çapında yüksek popülariteye sahip pervaneli bir uçaktır. 4 silindirli, benzinli, 160 hp gücünde Lycoming IO-360-L2A motoruna bağlı 2 palli pervane ile itki ihtiyacını karşılamaktadır.[19]

**İtici pervane:** Uçağı itme gücü aktarır. Bunlar motorun arkasındadır ve uçağın arka tarafına bakar. Bu tip pervane kullanılan uçaklarda motor gövde gerisinde ya da kanat firar kenarındadır.



**Şekil 1.3.** Predator MQ-1 uçağındaki itici pervane

**Kaynak:** Wikipedia

Şekil 1.2’ de gösterilen Predator insansız hava aracı 4 silindirli, benzinli turboya sahip 115 hp gücündeki 1 adet Rotax 914F motoruna ait 2 palli pervanesiyle itki ihtiyacını karşılamaktadır.[20]

### 1.1.2 Hatve (Pitch) özelliğine göre pervaneler

Pervane palinin açıklığına dik bir düzlemlle kesilmesi suretiyle elde edilen kesit profilin veterinin pervanesinin içinde döndüğü düzlemlle yaptığı açıya kesit konum açısı denir. Şekil 1.1’de bu açı gösterilmiştir. Herhangi bir kesitindeki konum açısı sabit olan pervaneye **sabit hatveli pervane**, konum açısı değişen pervaneye ise **değişken hatveli pervane** adı verilir

Sabit açılı Pervaneler tek parça hâindedir. Bu pervaneler genelde iki paladan oluşur. Malzemeleri çoğunlukla metaldir. Bu pervanelerde hatve açısı, dolayısıyla pala açıları değişmemektedir. Hatve açısı uçağın seyahat hızında en verimli olacak şekilde sabitlenmiştir. Bu pervaneler direkt olarak motorun krank miline veya devir düşürücü bir dişli kutusuna bağlıdır. Pervane devri motor devrine bağlı olup gaz verilince artar, azaltılınca azalır.[2]

Değişken açılı pervaneler üçe ayrılır;

- Hatvesi kontrol edilebilen,
- Yerde hatvesi ayarlanabilen
- Sabit hızlı pervane olarak.

Hatvesi kontrol edilebilen pervane hatve açısı uçuş sırasında pilotun kumandalarıyla değiştirilebilen pervanedir. Yerde hatvesi ayarlanabilen pervaneler hatve açısı motor çalıştırılmadan önce sadece aletlerle yerde değiştirilebilir. Bu tip pervanelerde genellikle bir “yarık göbek” bulunur. Pala açıları uçağa göre belirlenir. Sabit hızlı pervane ise değişen motor güçlerinde pervane dönüş hızı sabit kalacak şekilde pala açıları otomatik olarak değiştirilebilen pervanelerdir[2].

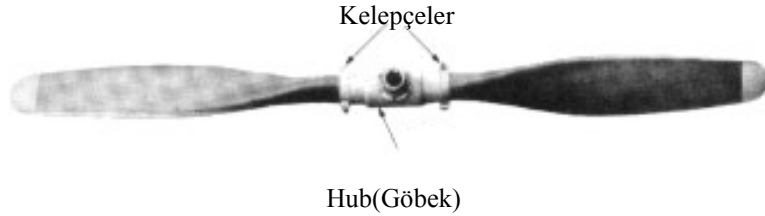
Şekil 1.4, 1.5 ve 1.6’da yukarıda bahsedilen pervanelere ait görseller sunulmuştur. Sabit açılı pervaneler tasarım olarak basittir, üretimi kolaydır ve ucuzdur ancak sabit hızlı pervanelerde bu durum tam tersidir. Bunun yanında kendini değişen motor güçlerine göre ayarlayabildiğinden performans olarak oldukça üstündür. Sabit hızlı

pervanelerin çalışma mekanizmasıyla ilgili ayrıntılı bilgi ilerideki bölümde paylaşılacaktır.



**Şekil 1.4.** Sabit hatveli pervane

**Kaynak:** FAA, 2012, Volume-2, Chapter 7



Kelepçeler

Hub(Göbek)

**Şekil 1.5.** Hatvesi yerde ayarlanabilen pervane

**Kaynak:**MEB, 2011, s 17



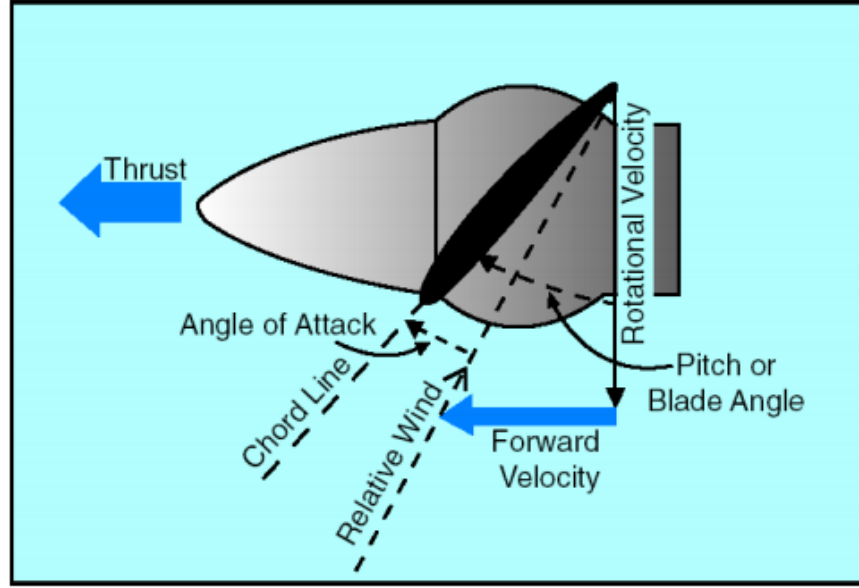
**Şekil 1.6.** Değişken açılı pervane

**Kaynak:** [http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/props.htm](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/props.htm)

### **1.1.3 Sabit hızlı pervanelerin çalışma prensibi**

Bu pervaneler yukarıda bahsedildiği gibi motor farklı güç durumlarına göre pervane açısının otomatik şekilde değiştirilebildiği pervanelerdir. Bu işlem governör adı verilen ekipmanla yapılmaktadır. Düzenleyici (governör) pervane hatvesini düşürerek yada yükselterek pervane devrini sabit tutabilmektedir [15]. Örneğin uçak tırmanışa geçti motor devrinin düşmesini engellemek için pervane açısı düşer ve motor güç durumunu korumuş olur.

Ayrıca motor güç kolu artırıldığında veya azaltıldığında yine pervane açısı değiştirilerek sabit pervane devri sağlanır. Özet olarak sabit hızlı pervanelerde governör pervane açısını otomatik olarak değiştirerek devri sabit tutar [2].

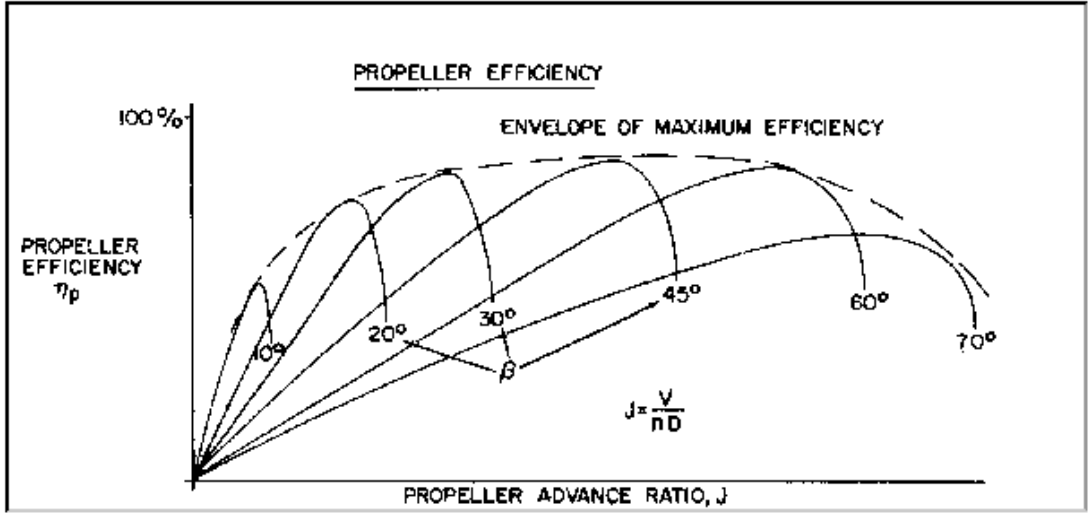


Şekil 1.7. Değişken açılı pervanedeki hız vektörleri

**Kaynak:** Cavcar, 2004, Propeller

Yukarıdaki şekle bakıldığında pervane üzerinde hem dönüşünden kaynaklı bir hız vektörü hemde ileri yönlü hızından dolayı bir hız vektörü görülebilmektedir. Bunların bileşkesi relative wind (bağıl hız) yazan okla gösterilmiştir. Eğer bu pervane sabit açılı bir pervane olsaydı ve forward velocity (ileri yönlü hız) kademeli olarak arttırılsaydı Şekil-1.7’de angle of attack (hücum açısı) olarak gösterilen hücum açısı azalacaktı bu durum belli bir seviyeye kadar istenen durum olduğundan verim önce artacak ancak hücum açısı sıfıra geldiğinde artık thrust (itki) üretemeyecek duruma gelmiş olacaktır. İşte bu nedenden dolayı sabit hızlı pervanelere ihtiyaç duyulmaktadır [12].

Bu durum Şekil-1.8’deki grafikte daha net bir şekilde görülebilmektedir. Bu grafik pervane verimi ile advance ratio (ilerleme oranı) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İlerleme oranı Şekil-1.8’de J harfiyle gösterilmektedir. Eğer pervanenin sabit devirde olduğu varsayılırsa pervane veriminin uçak hızıyla nasıl değiştiği rahatlıkla görülebilmektedir [16].



Şekil 1.8. Pervane verimi ve ilerleme oranı grafiği

**Kaynak:** [http://www.epi-eng.com/propeller\\_technology/selecting\\_a\\_propeller.htm](http://www.epi-eng.com/propeller_technology/selecting_a_propeller.htm)

Örneğin kalkış anında maksimum güç ve maksimum itki kuvvetine ihtiyaç vardır ve uçağın ileri yönlü hızı düşüktür bu durumda pervane Şekil-1.9’da solda gösterilen düşük pitch angle açısında kalarak hücum açısını düşük tutmuş olacak ve bu bölgede yüksek verimde çalışacaktır.



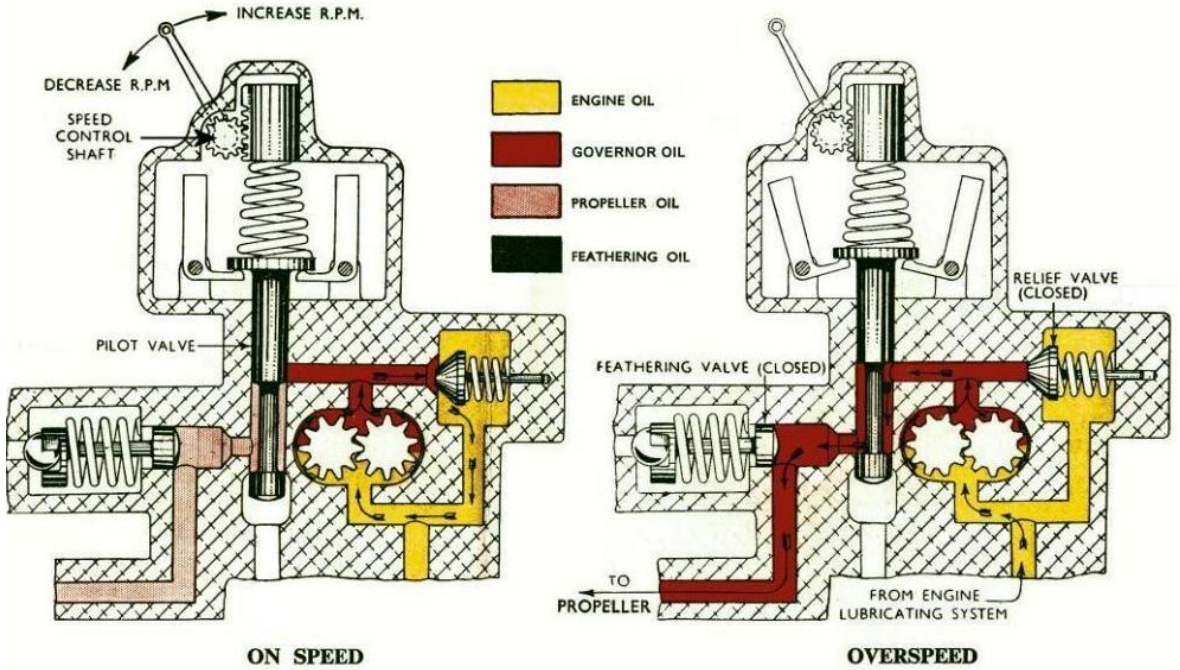
Şekil 1.9. Pervane pal (pitch) açıları

Uçak seyahat irtifasına çıktığında artık kalkış sırasındakinden daha düşük bir güce ihtiyacı vardır ve pervane daha yavaş dönmektedir ayrıca uçağın ileri yönlü hızı da yüksek olduğundan verimli bir çalışma için Şekil-1.9’da sağda pitch angle açısının da yüksek olması gerekmektedir [14]. İşte bu gibi farklı durumlarda sabit hızlı pervaneler Şekil-1.8’de gösterildiği gibi her zaman yüksek verimde çalışabilmek için farklı açılarda konumlandırılmalıdır. Bu işi uçakta daha önce de bahsedilmiş olan düzenleyici (govarnör) yapmaktadır. Düzenleyici basınçlı yağı yönlendirerek pervane açısını ayarlayan mekanizmadır. Elektrikli ve mekanik olmak üzere 2 tipte düzenleyici bulunmaktadır.

Bu kısımda mekanik tipte olan govarnörün farklı uçuş modlarında nasıl çalıştığı anlatılacaktır.

#### 1.1.4 Düzenleyicinin (Govarnörün) çalışma prensibi

Şekil-1.10'da On-speed ve Over-speed durumları gösterilmiştir. Aynı şekilde görüldüğü gibi düzenleyicinin bu işi yapabilmesi için dişli bir pompaya ihtiyacı vardır basınçlı yağ bu şekilde sağlanmaktadır.



Şekil 1.10. On-speed ve over-speed durumları

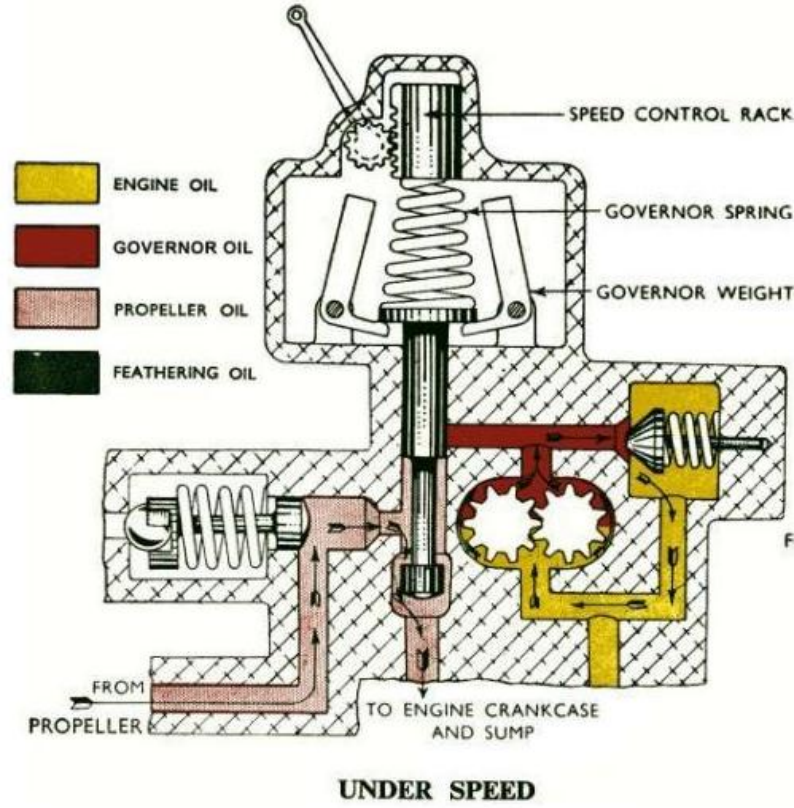
**Kaynak:** <http://www.enginehistory.org/Propellers/Governors/hydgov.shtml>

Uçak herhangi bir motor gücünde buna uygun sabit bir pervane açısıyla uçarken bu durum on-speed olarak belirlenir. On-speed durumu için olması gereken durum da denilebilir. Bu durumda flyweight (denge ağırlığı) üzerindeki merkezkaç kuvveti düzenleyici yayındaki kuvvetle eşit olmaktadır ve Şekil 1.10' da solda gösterildiği gibi pilot valf tüm portları kapatacak şekilde konumlanır pervaneye herhangi bir yağ geçişi yada pervaneden herhangi bir yağ geçişi söz konusu değildir.

Pervanenin herhangi bir nedenden dolayı devrinin arttığını düşünürsek Şekil 1.10'da sağda gösterildiği gibi OVERSPEED durumuna geçecektir. Bu durumda flyweight (denge ağırlığı) üzerindeki kuvvet yay kuvvetini yenecek pilot valfin yukarı



yönlü hareketini sağlayacaktır bu şekilde yüksek basınçlı yağ pervaneye doğru gidecektir. Böylece pervane pal açısı artacak ve pervane devri istenilen devre düşecektir. Sonuç olarak motor ve düzenleyici devirleri düşmüş olacak sistem yeniden ilk konumu olan ON-SPEED' e dönecektir.



Şekil 1.11. Under-speed durumu

**Kaynak:** <http://www.enginehistory.org/Propellers/Governors/hydgov.shtml>

Pervanenin herhangi bir nedenden dolayı devrinin azaldığını düşünürsek Şekil 1.11'de gösterildiği gibi UNDERSPEED durumuna geçecektir. Bu durumda yay kuvveti flyweight (denge ağırlığı) üzerindeki kuvveti yenecek pilot valfin aşağı yönlü hareketini sağlayacaktır. Bu hareketin ardından basınçlı yağ pervaneyi terk edecektir ve bunun sonucunda pervane pal açısı düşecek pervane istenilen devre gelmiş olacaktır. Sonuç olarak motor ve düzenleyicinin devirleri artıp sistem yeniden ilk konumu olan ON-SPEED' e dönecektir [15].

### 1.1.5 Bayraklama (Feathering) ve ters hatve

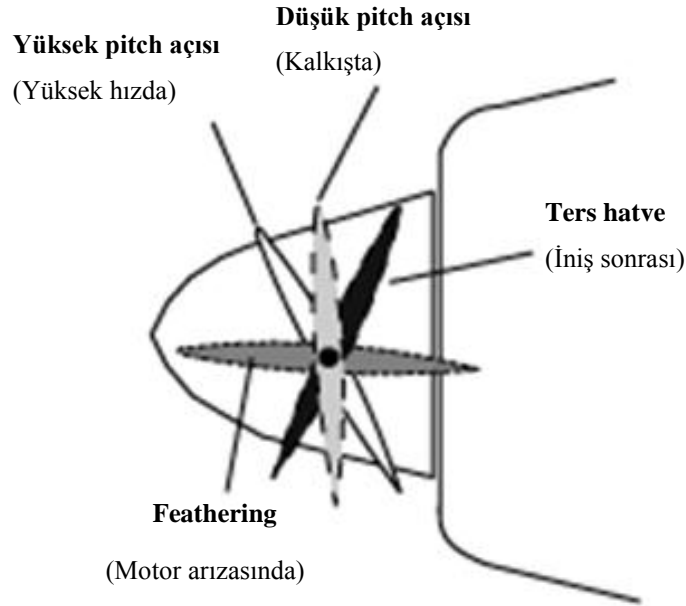
Çok motorlu pervaneli uçaklarda motorlardan birinin arızası durumunda, diğer motorlarla ya da mevcut hızı nedeniyle hareket hâlinde olan uçak için durmuş pervane



büyük bir sürüklenme (drag) kaynağı ve hava akımını karıştırıcı bir engel hâline gelir. Bunu önlemek için değişken hatveli pervaneli uçaklarda pilotun elle kumandasıyla ya da bazı uçaklarda motor durduğunda çalışan otomatik bir sistem ile pervaneler hava akımına dik, en az sürüklenme kuvveti yaratacak bir konuma gelirler, böylece pervanelerin uçağın uygun bir şekilde süzülmesine ya da diğer kalan motorlarla uçuşuna engel olması önlenir. Pervanelerin bu konumu bayraklama (feathering) olarak isimlendirilir. Bu özellik, yerde motorlar deneme için çalıştırılırken de kullanılır. Motorlar tam gaz çalışsa bile bayraklama ile hatve açısı ayarlanarak itme gücü sıfır olur, uçağı etkilemez [13].

Bazı uçaklarda bulunan ters hatve sistemiyle hatve açısı ters çevrilerek özellikle inişte ters çekme kuvveti meydana getirilerek frenlemeye yardımcı olunur. Bu da kısa iniş mesafesi sağlar. Ters hatve sistemi yerde manevra yaparken uçağın geri gitmesini bile sağlamaktadır.

Aşağıda Şekil 1.12’de değişken pervane pali açılarının ne anlama geldiği ve uçağı ait hangi performans durumlarında kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Pervane pitch açısı uçuş modları

## 2. PERVANE PERFORMANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Bu bölümde Pervane performansına etki eden ana faktörlerin tek tek üzerinden geçilip farklı 2 çaptaki pervane için etkileri yapılan hesaplamalarla kıyaslamalı olarak

gösterilecektir. Pervane performansına direkt olarak etki eden 6 adet faktör bulunmaktadır [9].

- 1) Pervane geometrisi
- 2) Pervane pal açısı
- 3) Pervane pal yükü
- 4) Pervane kök geometrisi (shank form)
- 5) Sıkışabilirlik etkisi
- 6) Blokaj etkisi

## 2.1 Pervane Geometrisi Etkinlik Değeri (Activity Factor) Hesabı

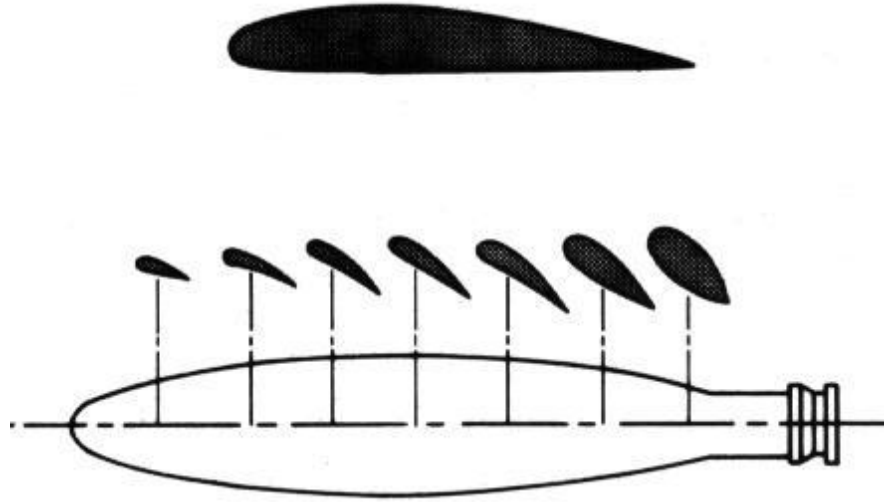
Etkinlik Değeri (Activity factor) ve pala sayısı parametreleri pervane tarafından çekilen güç ile yakından alakalıdır. Pervanenin güç çekme yeteneği olarakta bilinir. Tipik olarak bu değer 70-200 arasında değişmektedir [5]. Aşağıdaki 1 nolu formül kullanılarak hesaplanabilir. Veter (Chord) uzunluğu pervane çapı boyunca değişmekte olduğundan aşağıdaki integralin alınabilmesi için aralarındaki ilişkinin bilinmesi gerekmektedir. Bu ilişki bilinmiyorsa 7 nolu referansın 180 nolu sayfasında yer alan trapezoidal kuralı uygulanıp 2 nolu formülden AF'ye ulaşılabilir. Bu formülde yer alan  $f(x)$  fonksiyonu  $x^3 \cdot c(x)$  çarpımına eşittir. Yani ölçüm alınan noktadaki veter uzunluğunun o çaptaki  $x$  değerinin küpü ile çarpımıdır.

Şekil 2.1'de olduğu gibi pervane pali radyal olarak düşünüldüğünde farklı bölgelerde farklı chord değerlerine sahiptir, bunun için pervane üzerinde  $r/R$  oranının 0,2 ile 1 arasında olduğu yerlerde  $0,05r$  aralıklarla veter ölçümü yapılmalı ve bu değerler BAF formülüne yazılmalıdır. İncelenen 2 pervane için BAF hesabı yapılmış olup aşağıdaki değerlere ulaşılmıştır. Çap değişmesine rağmen AF için %3.6 lık bir fark ortaya çıkmıştır.

Bu konuda yapılan deneysel çalışmalarda aynı AF ye ve aynı  $J$ 'ye sahip pervanede maksimum verimin görüldüğü  $J$  değerinin altındaki noktalarda, uca doğru daralan (tapered) palanın sabit veter uzunluğuna sahip palaya göre daha yüksek verim sağladığı görülmüştür [9].

$$AF = \frac{10^5}{D^5} \int_{0.2R}^{1.0R} cr^3 dr = \frac{10^5}{16} \int_{0.2R}^{1.0R} \frac{c}{D} x^3 dx \quad (2.1)$$

$$AF = \frac{78125}{R} \{f(0.2) + 2[f(0.25) + f(0.3) + \dots + f(0.95)] + f(1.0)\} \quad (2.2)$$



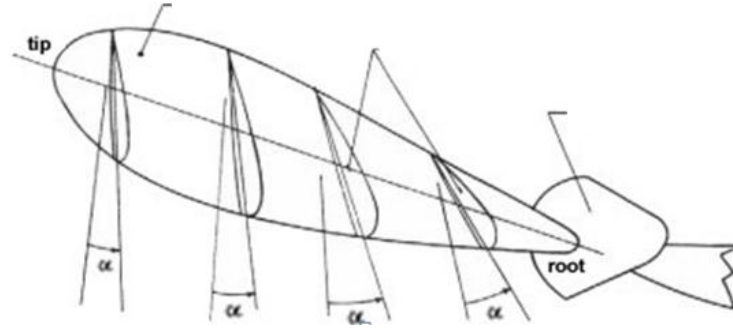
Şekil 2.1. Pervane pali üzerindeki kesitler

**Tablo 2.1.** Etkinlik değeri kıyaslaması

D	AF	TAF
1.8m	83.59	250.77
2.0m	80.65	241.95

## 2.2 Pervane Hatve Açısı Etkisi

Pervane pala açısı performansla direkt etki eden parametreler arasındadır. Uçuş sırasında artıp azalarak sürekli verimli bölgede kalınmasına yardımcı olmaktadır. Bir pervane verim grafiği incelendiğinde neden bu kadar kritik olduğu rahatça görülebilmektedir.



**Şekil 2.2.** Pervane pala açısı

**Kaynak:** [http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/props.htm](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/props.htm)

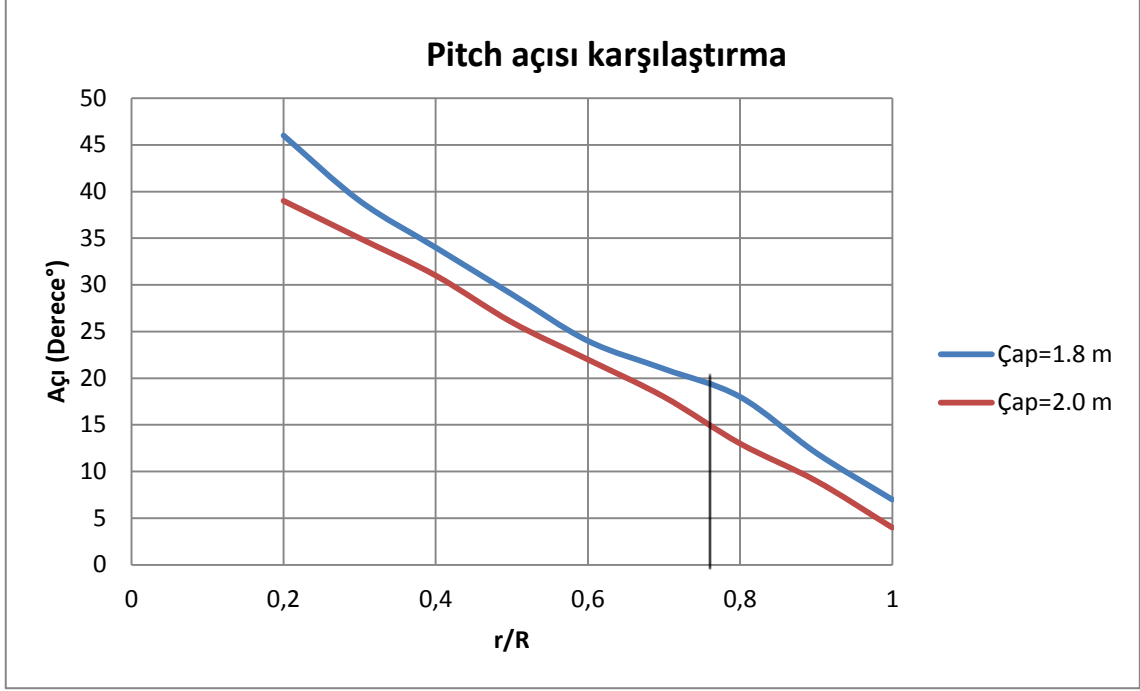
Pervane pala açısı kökten uca doğru azalır. herhangi bir yarıçaptaki pala kesitine (airfoil) gelen akım dönmeden kaynaklı çizgisel hız ile pervaneye doğru gelen rüzgâr hızının vektörel toplamıdır. Bunun yüzden yarıçap boyunca dönmeden kaynaklı çizgisel hız arttıkça, yerel hücum açısını sabit tutmak için pala açısının azalması, yani palanın burulması gerekir. Bir pervanenin geometrik hatve açısı (pitch angle,  $\beta$ ) pervane palasının  $\frac{r}{R} = \frac{3}{4}$  değerindeki pala açısı olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmaya konu olan iki pervanenin pala açıları pervaneler yere paralel olarak sabitlendikten sonra açı ölçer ve uzunluk ölçer kullanılarak 0.1r aralıklar ile ölçülmüş ve Şekil 2.3'te sunulmuştur. İki pervane arasında sürekli olarak 2 - 6 ° arasında bir fark görülmektedir.

Bu grafiğe bakılarak büyük çaptaki pervanenin pitch açılarının diğerine göre daha küçük olduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni çapın büyümesiyle çizgisel hızda meydana gelen artıştır ve yapısal olarak pervane dayanımının etkisidir.

Genellikle geometrik hatve pervane palası boyunca değişir. Bu nedenle pervane ekseninden yarıçapın %75 'i kadar uzaklıktaki kesitin geometrik hatvesi pervanenin "ortalama geometrik hatvesi" olarak isimlendirilir. Şekil 2.3'te siyah çizgiye karşılık gelen açılar geometrik hatve açılarıdır.[9]

**Tablo 2.2.** Ortalama geometrik pal açısı kıyaslaması

D	Ortalama geometrik pitch açısı (0.75r)
1.8 m	19°
2.0 m	15°



Şekil 2.3. Pervane hatve açısı kıyaslaması

Yukarıdaki ölçümlere göre kısa olan pervanenin daha büyük geometrik açiya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni Şekil 1.7'ye bakılarak anlaşılabilir. Pervaneye gelen bileşke hız, dönme kaynaklı çizgisel hız ( $\Omega r$ ) ve ileri yönlü uçak hızından oluşmaktadır. İleri yönlü hız iki durumda da aynı ancak pervaneler aynı devirde dönse de yarıçaptan dolayı dönme kaynaklı hız  $\Omega r$  büyük pervanede daha fazla oluşmaktadır. Bu nedenden dolayı ufak çaptaki pervaneye daha düşük hücum açıları ile hava gelecektir bu dejavantajı yok edebilmek amacıyla küçük çaptaki pervanenin geometrik pitch açısı daha büyük tasarlanmıştır.

### 2.3 Pervane Pala Yükü Etkisi

Pervane pala yükü aşağıda verilen basit formül ile bulunabilmektedir. Formülde yer alan güç (P) kalkış gücü olan maksimum güçtür. B ise pala sayısıdır.

$$P_{bl} = \frac{4P}{\pi B D^2} \quad (2.3)$$

Referans 6'ya göre kıyaslama yapılırsa bu değerlerin çok yüksek olmadığı verilen diğer uçaklar incelenerek anlaşılabilir. Pervane pal yükü hesabındaki parametreleri değiştirerek optimum değerler bulunabilir. Özellikle düşük ilerleme oranlarında yüksek pala yüküne sahip bir pervanenin, pervane verimine olumsuz etkisi olduğu görülmektedir. [8]

**Tablo 2.3.** Pervane pala yükü kıyaslaması

D	Pbl (shp/ft <sup>2</sup> )
1.8m	1.89
2.0m	1.48

**Tablo 2.4.** Uçak tiplerine göre pervane pala yükleri

Airplane Type	Propeller Type	Number of Blades	Power Loading per Blade in shp/ft <sup>2</sup>		
			High	Avarage	Low
Homebuilts	Fixed Pitch	2	3.2	2.4	1.0
FAR 23 Single Engine Types	Constant speed some fixed pitch	2 or 3	3.9	3.2	2.0
Agiricultural Types	Constant speed	2, 3 or 4	5.9	3.8	2.2
Military Trainers	Constant speed	2 or 3	6.2	4.4	2.8
FAR 23 Twin Engine Types	Constant speed	2 or 3	4.8	3.7	2.8
Regional Turboprops	Constant speed	3 or 4	5.2	4.6	3.4

**Kaynak:** Roskam,2003

## 2.4 Pervane Kök Geometrisi

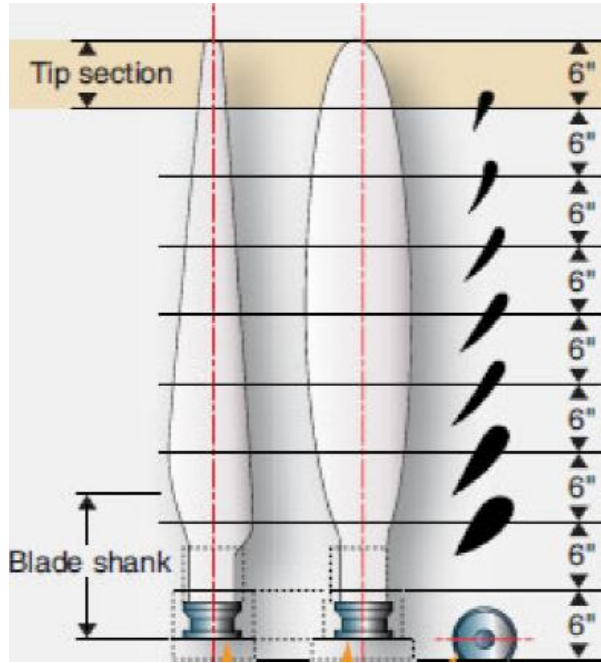
Pervane palinin şekli pervanenin kök kısmında göbeğe (hub'a) bağlanmasından dolayı oldukça farklı bir form almaktadır. Palin yuvarlaklaşmaya başladığı kısımdan göbeğe kadar olan mesafe kök mesafesidir. Aşağıda Şekil 2.3'te pervane palinin kök kısmı ölçekli bir şekilde gösterilmiştir. Deneysel çalışmalara dayanarak pervanenin bu kısmının performans üzerinde şu gibi etkileri olduğu söylenebilir [7] ;

- Kök kısmında geçiş ne kadar yumuşak olursa verimlilik artacaktır.
- Kök kısmındaki tasarım hatve açısı 90°'yi geçmemelidir.
- Kök profiller, mümkün olabildiğince yüksek kaldırma katsayısına sahip olmalıdır. İnce kök profilleri istenmeyen bir durumdur.

İki pervanenin kök geometrileri (shank form) karşılaştırıldığında;

- 2.0 metrelik pervanenin kök formunun diğer pervaneye göre göbeğe geçişinin çok daha yumuşak olduğu görülmüştür.

- 1.8 metrelik pervanede kök kısmının tam anlamıyla silindirik bir yapıya dönüştüğü rahat bir şekilde anlaşılmaktadır.
- İki pervane palasında da tasarım hatve açısı 90 dereceyi geçmemektedir.
- 2.0 metrelik pervanede geçişin yumuşak ve kanat profiline yakın kesitli oluşu kaldırma katsayısının bu pervanede kök kısmında daha büyük olduğunu göstermektedir.



**Şekil 2.4.** Pervane kök(shank) formu

**Kaynak:** <http://content.aviation-safety-bureau.com/allmembers/faa-h-8083-32-amtpowerplant/sections/chapter-7.php/>

Pervane kök formu yüzdeleri çapa göre aşağıdaki gibidir;

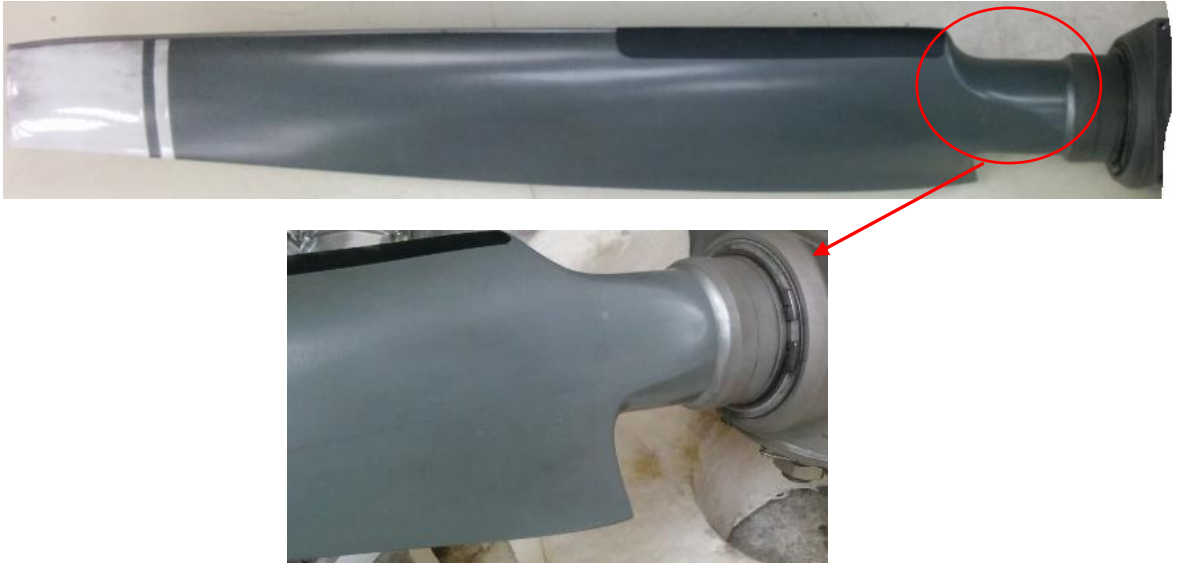
**Tablo 2.5.** Pervane pala yükü kıyaslaması

D	Kök (shank) formu yüzdesi
1.8m	13,4
2.0m	10,8

İki pervaneye ait kök formlarına ait görseller aşağıda Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Üst kısımda yer alan kıyaslamalar bu görsellere dayanarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.5. 2 metre çapındaki pervane pali ve kök (shank) formu



Şekil 2.6. 1.8 metre çapındaki pervane pali ve kök (shank) formu

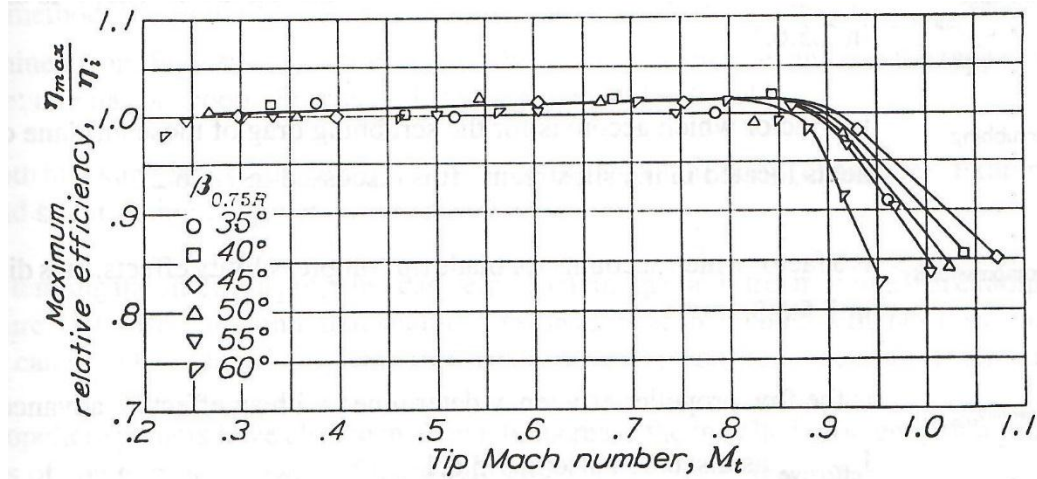
## 2.5 Sıkışabilirlik Etkisi

Pervane uç hızı ve uçağın ileri yönlü hızının bileşkesi pervane uç kısmını sıkışabilirlik etkisi altına sokabilmektedir. Bu durumun verim üzerindeki etkisiyle ilgili grafik aşağıda paylaşılmıştır. [9]

Şekil 2.7’de verilen grafik incelendiğinde Mach sayısı 0.85 değerini az bir miktar geçtiğinde çok büyük verim kaybı olmamaktadır çünkü itkinin büyük çoğunluğu iç taraftaki kesitlerden elde edilmektedir. Daha ileri gidildiğinde ise transonik hava hareketi yıkıcı şok dalgaları ve türbülans yarattığı için verim bir anda düşmektedir. İki



pervanede 0.85 Mach değerinin altındadır ancak bu noktada kabul edilemeyecek düzeyde gürültü oluşmaktadır. Bu gürültünün etkisini bertaraf edebilmek için pervane uç hızı deniz seviyesinde standart atmosfer koşullarında 245 m/s (M=0.72) altında tutulmalıdır [9].



Şekil 2.7. Sıkıştırılabilirlik etkisi

Kaynak: Roskam, 2003.s. 291

Aşağıdaki formülle pervane üzerindeki maksimum hız Mach cinsinden hesaplanabilmektedir.

$$M_{tip} = \sqrt{\left(\frac{\pi D n}{a}\right)^2 + M^2} \quad (2.4)$$

İki pervanenin deniz seviyesinde maruz kalabileceği maksimum hızlara göre uç hızları aşağıda hesaplanmıştır. Bu durumda biri gürültü açısından sınır şartlarda kalsa da ikisinin de çalışma aralığının verim konusunda bir olumsuzluk yaratmayacağı görülmektedir.

Tablo 2.6. Pervane uç hızı kıyaslaması

D (m)	Max rpm	Max hız (knot)	Mtip
1.8	2300	117	0.66
2.0	2300	117	0.73

## 2.6 Blokaj Etkisi

Bu durumun etkisi aşağıda verilen deneysel (ampirik) formüllerle tanımlanmıştır. Bu metodun uygulamasında efektif ilerleme oranı  $J_{eff}$  kullanılması gerekmektedir. h

hava akışının yavaşlamasına karşılık gelen katsayıdır ve aşağıdaki formülle belirlenebilir. [10]

**J** İlerleme oranı

$S_{body}$  pervane arkasında yer alan blokaj alanının kesiti olarak ifade edilmiştir. Şekil 2.7’de kırmızı ile gösterilen alandır. Bu alan uçağın tasarımına göre değişmektedir.

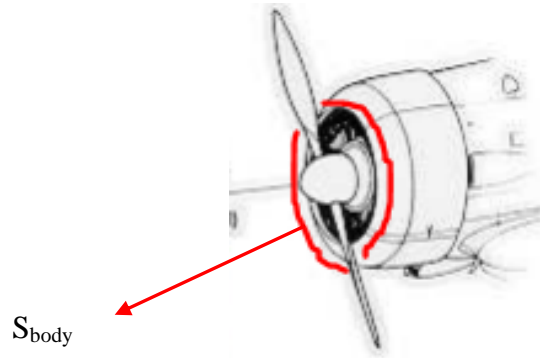
**D** pervane çapı olarak ifade edilmiştir.

**h** hava akışı yavaşlama katsayısı

$$j_{eff} = (1 - h) j \quad (2.5)$$

$$h = 0,329 \frac{S_{body}}{D^2} \quad (2.6)$$

$$j = \frac{v}{nD} \quad (2.7)$$



Şekil 2.8  $S_{body}$  ile tarif edilen alan

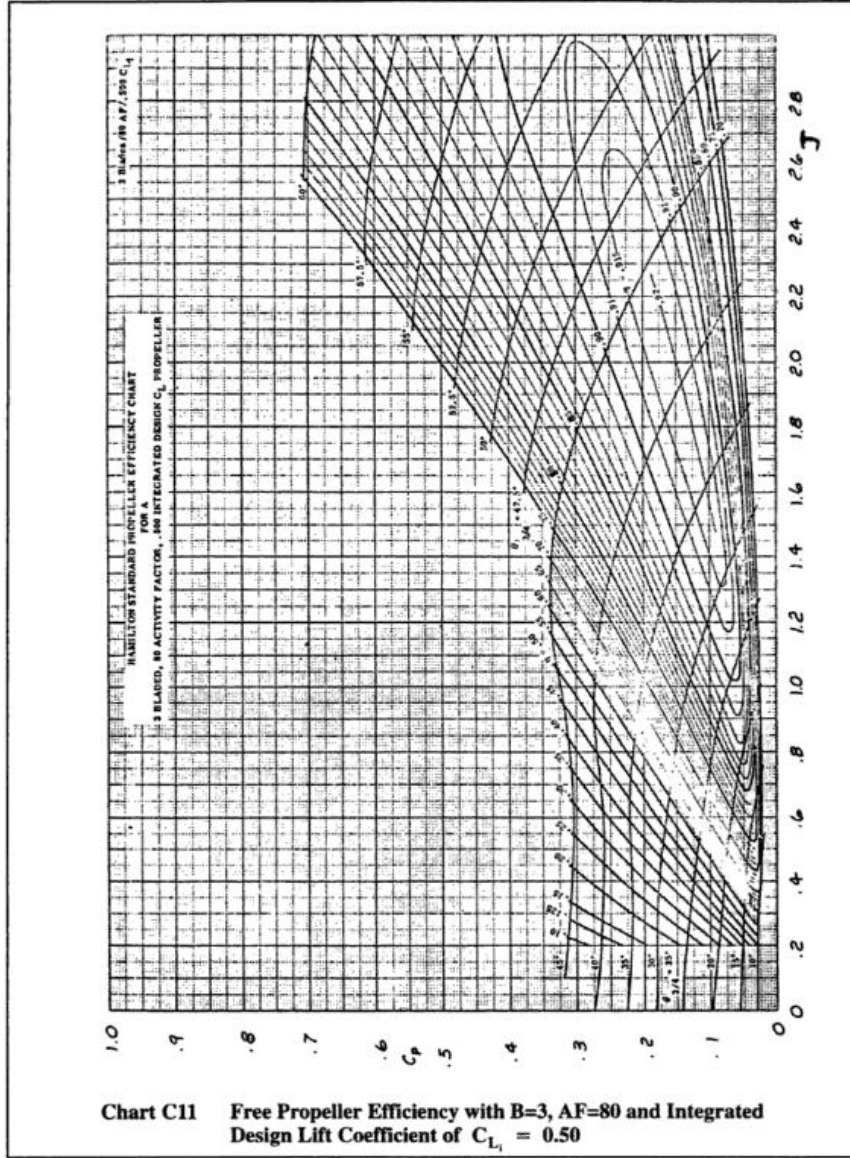
Bu formüllere dayanarak;

- İlk olarak 2 farklı pervane için önce 2.7 nolu formül sonra 2.5 nolu formül ile sabit devirde değişen hızlara karşılık gelen  $J_{eff}$  hesaplanır.
- Sonra Çizelge 2.8’deki Hamilton standart pervane verim grafiği kullanılarak bu grafikte  $C_p$  güç katsayısına karşılık gelen  $J_{eff}$  ilerleme oranı bulunup bu noktadaki verim değerleri grafiğe aktarılmıştır.

**AF:** 80

**B:** 3

$C_{Li}$ : 0.50 olan grafik C11'e göre yerleşik verim hesaplaması yapıldığında Şekil 2.10'daki gibi bir davranış görülmektedir.[4]

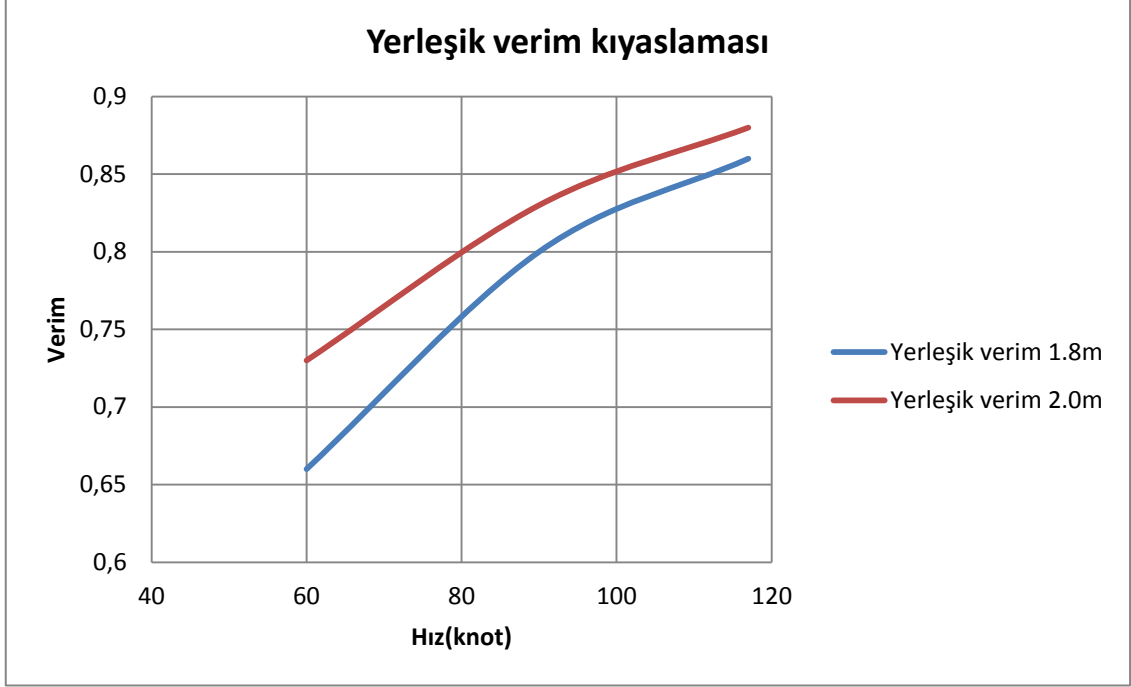


Şekil 2.9 Hamilton standart pervane verim grafiği

**Kaynak:**Roskam ,2003

Yerleşik verim pervanesinin uçağa takıldıktan sonraki durumunun takılmadan boş halde önünde veya arkasında bir kısıtlama olmadan çalışması halindeki verim katsayısıdır. Bu grafiğe göre değerlendirme yapılacak olursa pervane arkasında kalan blokaj alanı yerleşik verime düşük hızlarda daha fazla olmak üzere negatif etkisi

bulunmaktadır. Pervanenin çapları farklı olduğundan çapı küçük olan pervane bu negatif etkiden daha fazla etkilenmektedir. Buda pervanenin göbek kısmında yaşanan kaybın ne seviyede olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.10. Yerleşik verim grafiği

### 3. STATİK İTKİ HESABI

Teorik olarak statik itki hesabı yapılırken şu parametrelerin belirlenmesi gerekir [9];

- a) İrtifa
- b) Motor şaft gücü
- c) Pervane devri (Motor devri pervane devrinden farklı olabilir)
- d) Pal Activity factor sayısı
- e)  $C_{Li}$  integrated lift katsayısı
- f) Pal sayısı

Bu değerler bilindiği durumda Hamilton standart pervane statik itki grafiklerinden yukarıda mevcut katsayılara uygun olanlar seçilerek pervaneye ait o durumdaki statik itki hesaplanabilir. Burada ilk olarak 2 pervaneye ait teorik olarak statik itki hesabı yapılmış ve bu sonuçlar değerlendirilmiştir.

Daha sonra motor test bremzesinde yapılacak 2 ayrı pervaneye ait test ile bu pervanelerin gerçek durumdaki statik itki grafikleri çıkarılmıştır.

$$C_p = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (2.8)$$

$$C_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2.9)$$

$$\eta = \frac{V}{nD} \cdot \frac{C_t}{C_p} \quad (2.10)$$

Hesaplamalar birbirleriyle kıyaslanabilmesi amacıyla Eskişehir irtifası 2500 feet şartlarına göre yapılmıştır. 2.8 nolu formülde;

- Motor şaft gücü watt cinsinden
- Pervane dönüş sayısı  $n$  rps cinsinden
- Pervane çapı  $D$  metre cinsinden
- Yoğunluk  $\rho$ ,  $\text{kg/m}^3$  cinsinden

yazılarak  $C_p$  (güç katsayısı) elde edilir.

2.9 nolu formül bu kısımda kullanılmayacaktır. Kullanıldığı durumda aşağıdaki birimlere sahip olması gerekmektedir;

- İtki  $N$  cinsinden
- Pervane dönüş sayısı  $n$  rps cinsinden
- Pervane çapı  $D$  metre cinsinden
- Yoğunluk  $\rho$ ,  $\text{kg/m}^3$  cinsinden

İtki pervane yüzeyinin ürettiği kaldırma kuvveti ile direk alakalı olduğundan  $C_{Li}$  bu noktada oldukça büyük bir öneme sahiptir.  $C_{Li}$  (ortalama lift katsayısı) pervane geometrisiyle direkt alakalı bir katsayı olup hesaplanması için ayrıntılı pervane kesit geometrisi gerekmektedir. Bu geometri bilindiği durumda 11 nolu referansın 7.8 nolu bölümünde yer alan 2.11 nolu formül kullanılarak bu değere ulaşılabilmektedir. Ancak incelenen 2 pervaneye ait bu bilgiler mevcut değildir bu yüzden 4 nolu referansta yer alan farklı uçaklara ait pervanelerinin  $C_{Li}$  katsayıları incelenmiş ve aşağıdaki bölümde hesaplamada kullanılan değerler bu tablodaki değerlere göre yaklaşım yapılarak elde edilmiştir. [9]

1.8 m çapındaki pervane görsel olarak incelendiğinde diğer pervaneye göre kesiti daha kalın olduğu ve kaldırma katsayısının daha büyük olması gerektiği ortaya

çıkıştır. Bu yüzden 1.8 metrelik pervane için ortalama kaldırma katsayısı 0.50 seçilirken 2.0 metrelik pervane için 0.45 seçilmiştir.

$$CL_i = 4 \int_{0.15}^1 (Cl_d) x^3 dx \quad (2.11)$$

Pal etkinlik değeri (activity factor) üst bölümlerde 2 pervane içinde hesaplanmıştır.

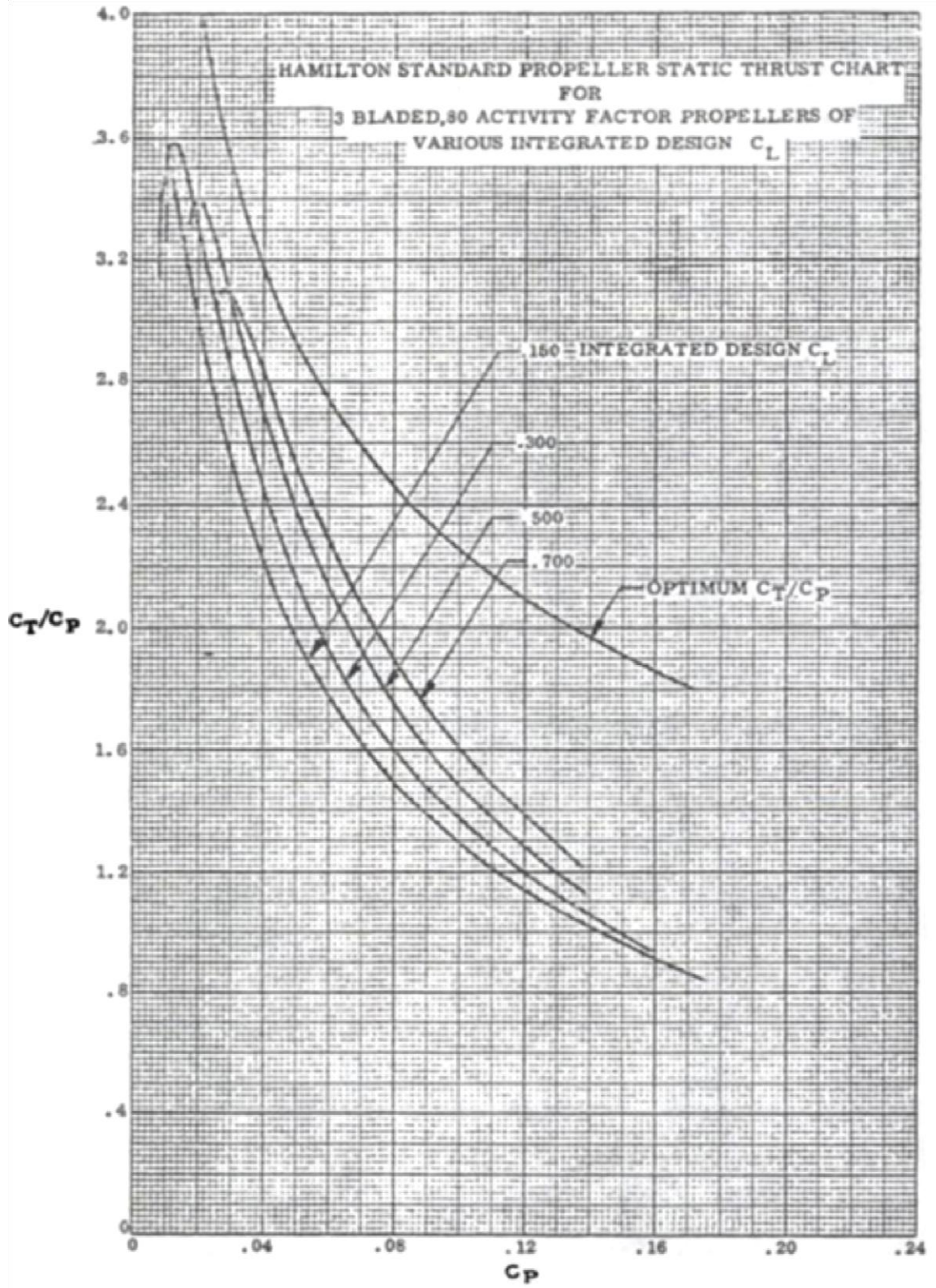
Pal sayısı 3 ve 4 olan pervaneler için Hamilton standart pervane grafikleri kullanılabilir. Bu çalışmada ele alınan pervane 3 pale sahiptir.

Grafik şu şekilde kullanılmaktadır;

- Elde edilmiş olan  $C_p$  (güç katsayısı) grafikte yatay eksene  $C_t/C_p$  oranı düşey eksene denk gelmektedir.
- Grafikte 0.15, 0.30, 0.50, 0.70 olmak üzere 4 farklı  $C_{Li}$  katsayısına ait veri bulunmaktadır. Bu aralıkta kalan tüm katsayılar interpolasyonla bulunabilmektedir. Tablo 3.1’de pervanelere ait  $C_{Li}$  değerleri bulunmaktadır.
- Bilinen  $C_p$  değeri bilinen  $C_{Li}$  değeri ile karşılaştırıldıktan sonra şekil 3.1 ve şekil 3.2’de verilen grafiklerde buna karşılık gelen  $C_t/C_p$  değerine ulaşılması gerekmektedir.
- Grafiklerden biri AF.80 değeri AF:120 için oluşturulmuştur. AF değeri bu iki değer arasında ise interpolasyonla istenilen AF değerindeki değere ulaşılması gerekmektedir. AF değerleri 2.1 nolu bölümde hesaplanan değerlerdir.

Böylelikle bütün bilinmeyenler bilinir hale gelmiş olur. 2.12 nolu statik itki formülüne  $C_t/C_p$  değerleri uygun grafiklerden alınıp yerleştirildiğinde istenen durumdaki statik itkiye ulaşılmış olur. [4]

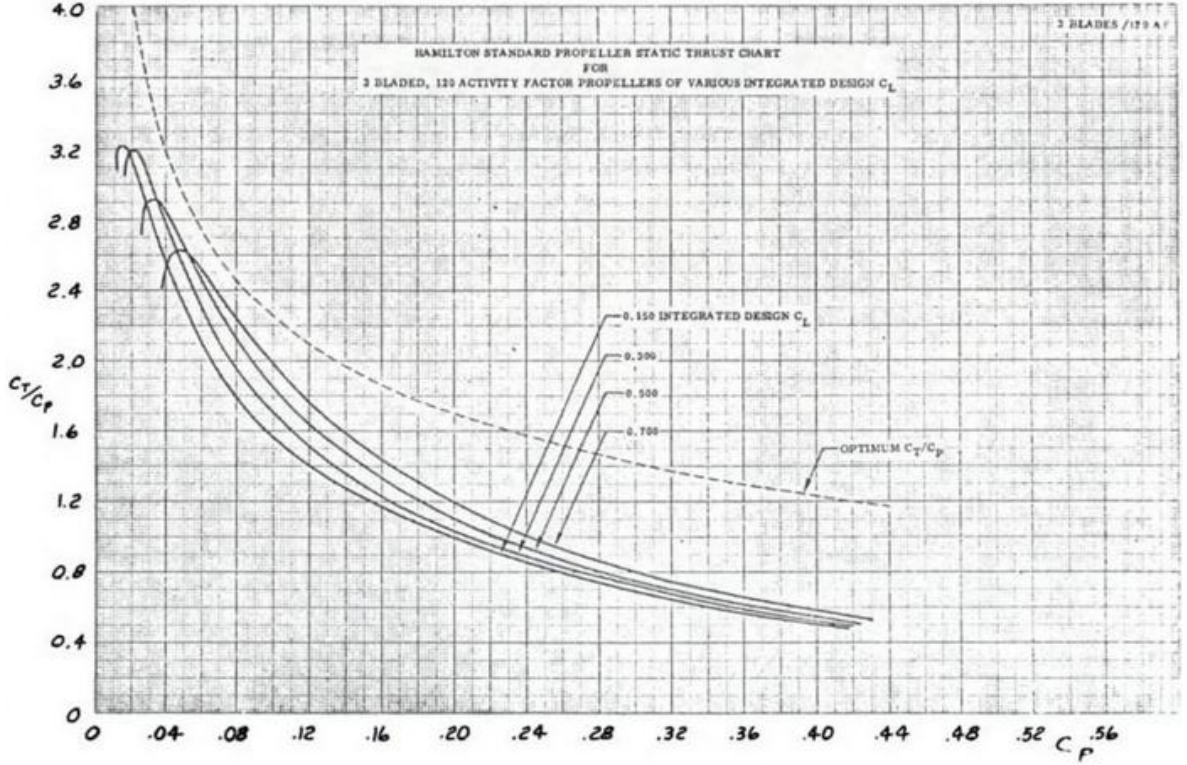
$$T_{\text{statik}} = 33000 \left( \frac{C_t}{C_p} \right) \left( \frac{SHP}{ND} \right) \quad (2.12)$$



Şekil 3.1. Pervane itki ve güç katsayıları  $B=3$   $AF=80$

Kaynak: Roskam, 2003





Şekil 3.2. Pervane itki ve güç katsayıları B=3 AF=120

Kaynak: Roskam, 2003

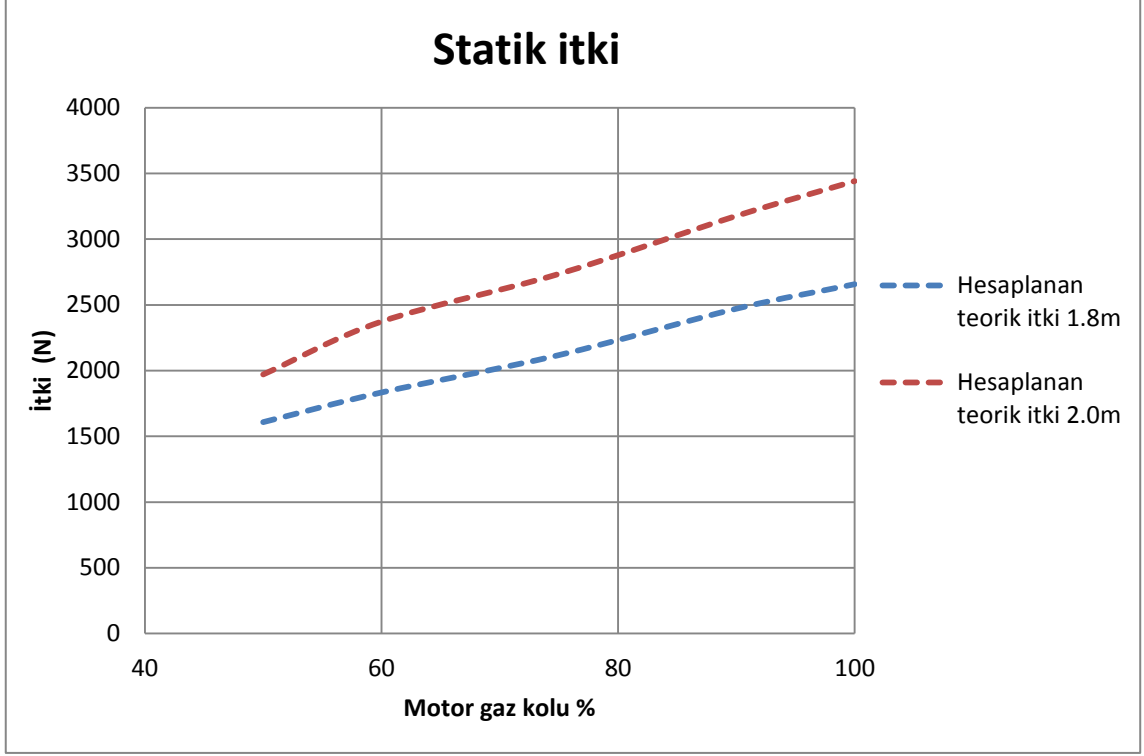
2 farklı pervane için farklı motor yüklerine (güç durumuna) göre hesaplamalar yapıldığında aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Pervanelere ait kritik katsayılar aşağıdaki gibi alınmıştır.

Tablo 3.1. İki pervane için statik itki hesaplamalarında kullanılan değerler

Çap	1,8 m
İrtifa	2500 ft
Motor gücü	Max 155 hp
Devir	Max 2300 rpm
AF	83,6
$C_{Li}$	0,5
Pal sayısı	3
Yoğunluk	1,134 kg/m <sup>3</sup>
Grafik	Hamilton C1&C2

Çap	2.0 m
İrtifa	2500 ft
Motor gücü	Max 155 hp
Devir	Max 2300 rpm
AF	80
$C_{Li}$	0,45
Pal sayısı	3
Yoğunluk	1,134 kg/m <sup>3</sup>
Grafik	Hamilton C1





Şekil 3.3. Teorik olarak hesaplanan statik itki

Grafiklere göre 2.0 lık pervanenin 1.8'lik pervaneye göre aynı motor yük durumlarında daha fazla itki oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca düşük motor güçlerinde birbirlerine daha yakın değerler mevcutken motor gaz kolu %100 olduğunda bu fark daha da belirginleşmektedir.

Daha sonra hali hazırda raylı bir sistemle ve bu sisteme uygun aşağıda verilen 500 kg kapasiteye sahip itki sensörü ile motor test bremzesine bağlı bulunan motor için 2 farklı pervane ile testler gerçekleştirilmiş ve ardından alınan itki verileri de aynı şekilde grafiğe döküldüğünde;



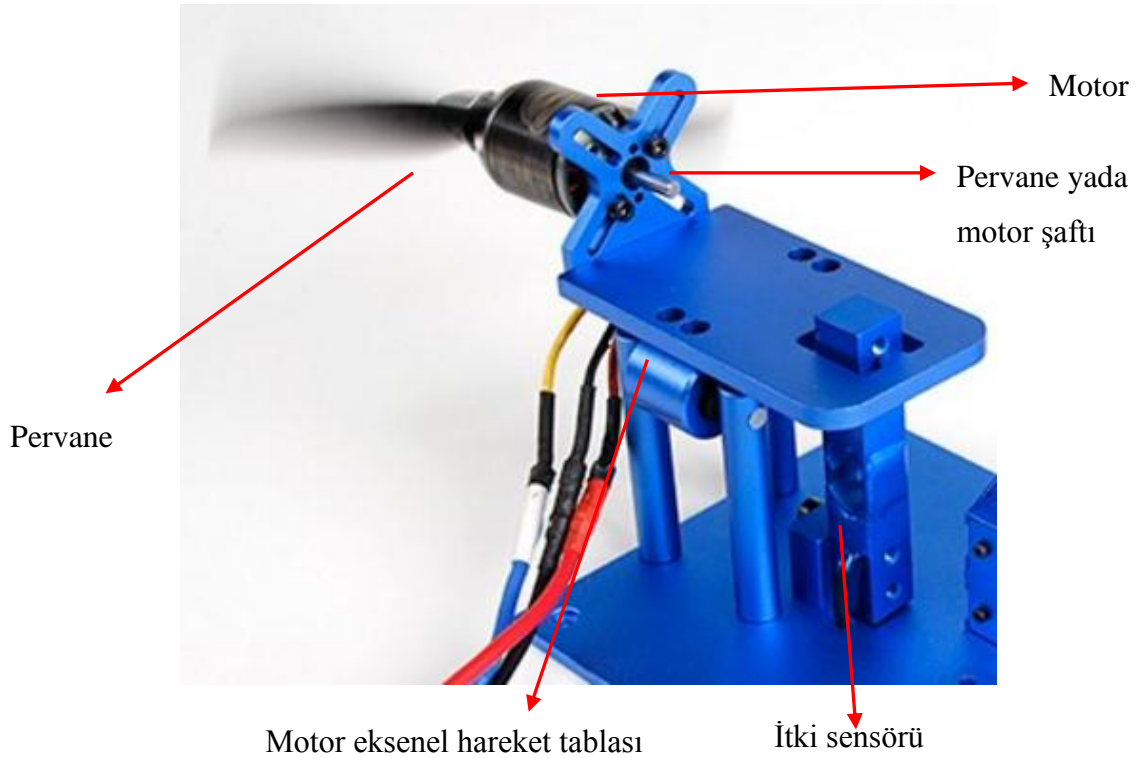
Şekil 3.4. İtki sensörü

**Kaynak:** [http://www.esit.com.tr/tr/products/100/yuk\\_hucmeleri\\_ve\\_montaj\\_kitleri/43/lama\\_tipi](http://www.esit.com.tr/tr/products/100/yuk_hucmeleri_ve_montaj_kitleri/43/lama_tipi)

İtki sensörünün şematik olarak çalışma prensibi aşağıda verilen basit düzenekte gösterilmiştir. Motorun çalışmasıyla beraber pervane itki üretmeye başlar. Motor devri

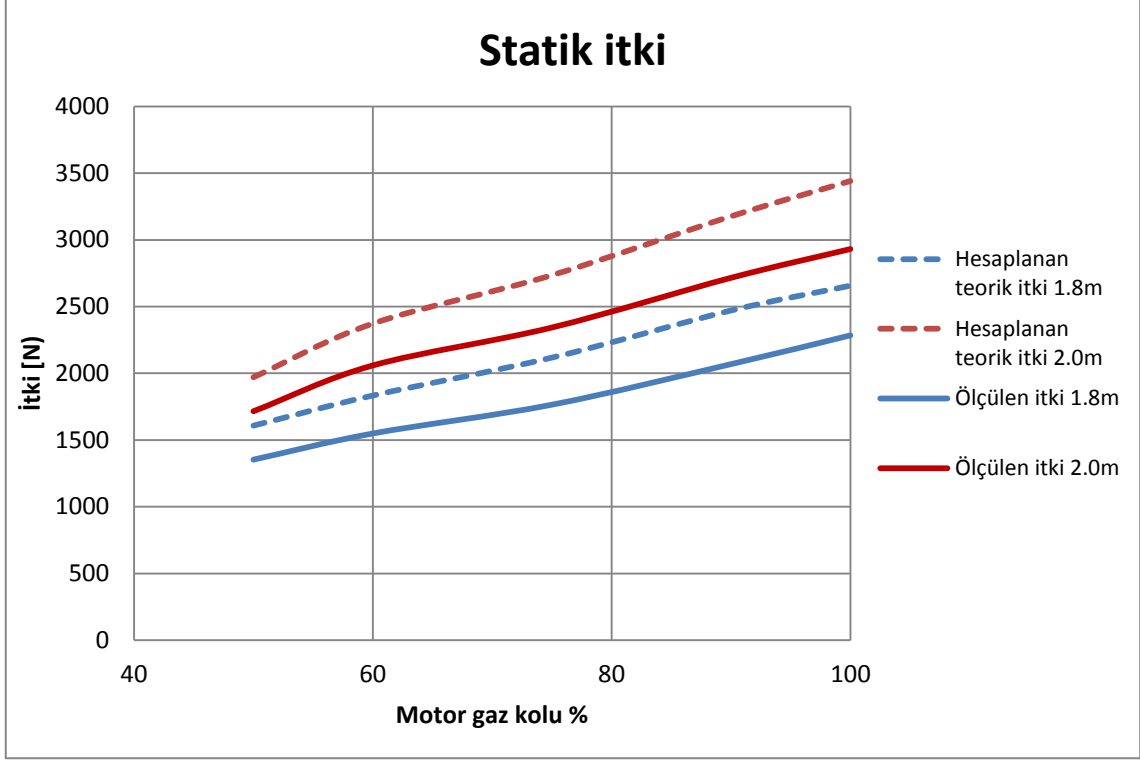
ve gaz kolu yükseldikçe bununla birlikte itki değeri de yükselecektir. Bu yükseliş motora giren yakıt oranıyla direkt alakalıdır. Aşağıda gösterilen sistemde pervane itkisi 2 yönde de olabilir. Bu pervanenin itici ya da çekici olmasıyla açıklanır. İlk durumda motor çalışmazken yada rölanti devrinde çalışırken itki sensörü üzerinde herhangi bir kuvvet yoktur. Motorun devri ve gücü arttığında çekici ya da itici pervane oluşuna göre aşağıda gösterilen motorun aksel hareketini sağlayan tabla ileri yada geri giderek itki sensörü ile temasa girer. İtki sensörü bir yük hücresidir. Yük hücresi, bir kuvveti elektrik sinyali hâline dönüştürmek için kullanılan dönüştürücüdür. Bu dönüşüm dolaylı ve iki aşamada olur. Mekanik bir düzenleme ile, algılanan kuvvet bir gerinim ölçerin şeklini değiştirir. Gerinim ölçer şekil değişikliğini (gerinim) bir elektrik sinyali olarak ölçer. Çünkü gerinim, telin etkin elektriksel direncini değiştirir.

Motor gücü arttıkça itki sensörü üzerindeki gerinim artacak ve bu şekilde motorun güç durumuna göre itki değerleri elde edilmiş olacaktır.



Şekil 3.5. İtki sensörü çalışma prensibi

**Kaynak:** [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-thrust-stand.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-thrust-stand.html?__store=en_us)



Şekil 3.6. Teorik ve ölçüm yapılarak elde edilen statik itki

Ölçümlerden elde edilen itki verileri teorik olarak hesaplanan verilerden her durum için daha alt seviyede çıkmıştır. Bu sonuç beklenen bir durumdur çünkü teorik hesaplamalar serbest pervaneye ait sonuçlar vermektedir. Yerleşik pervanede yukarıda bahsedilen kayıplardan dolayı düşüş olabilmektedir. Yüzde olarak hesaplandığında 1.8 lik pervanede daha fazla kayıp olduğu görülmüştür.

Tablo 3.2. Statik itki kaybı yüzdeleri

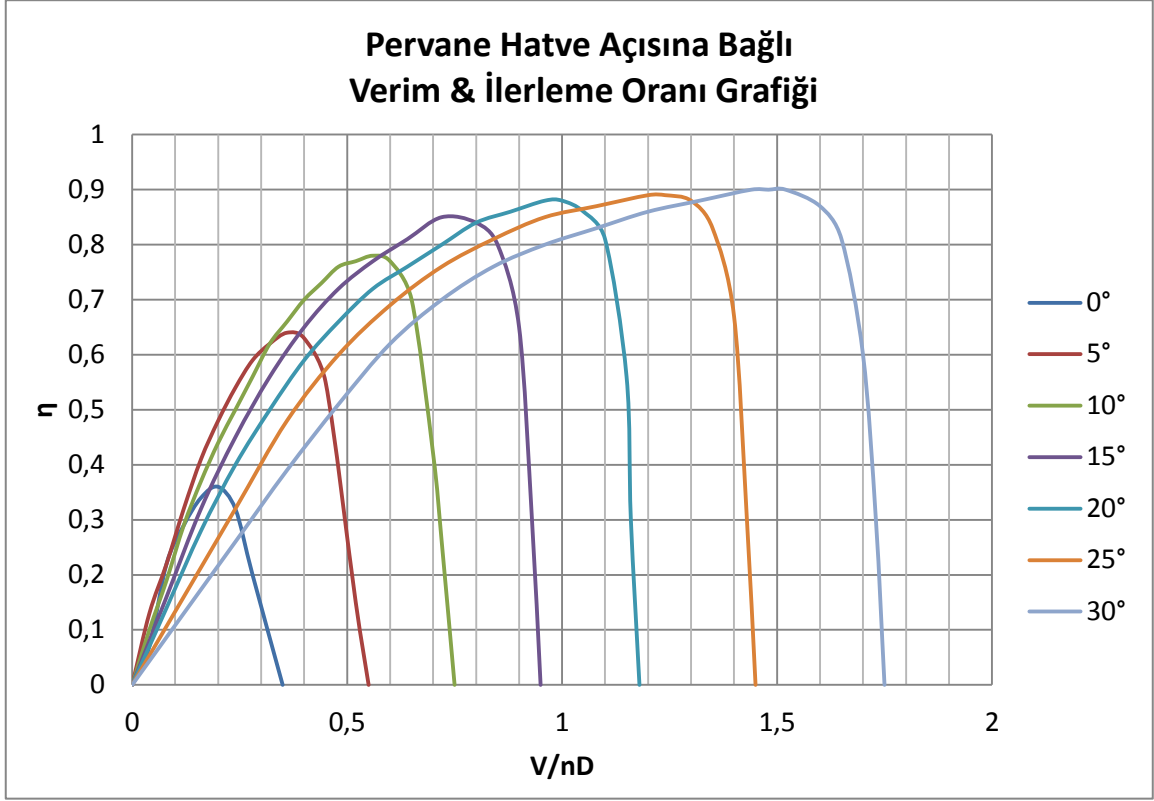
D	Ortalama kayıp %	Maksimum kayıp %
1.8	15.6	17.5
2.0	13.3	14.0

#### 4. DİNAMİK DURUMDAKİ PERVANE PERFORMANSI HESABI

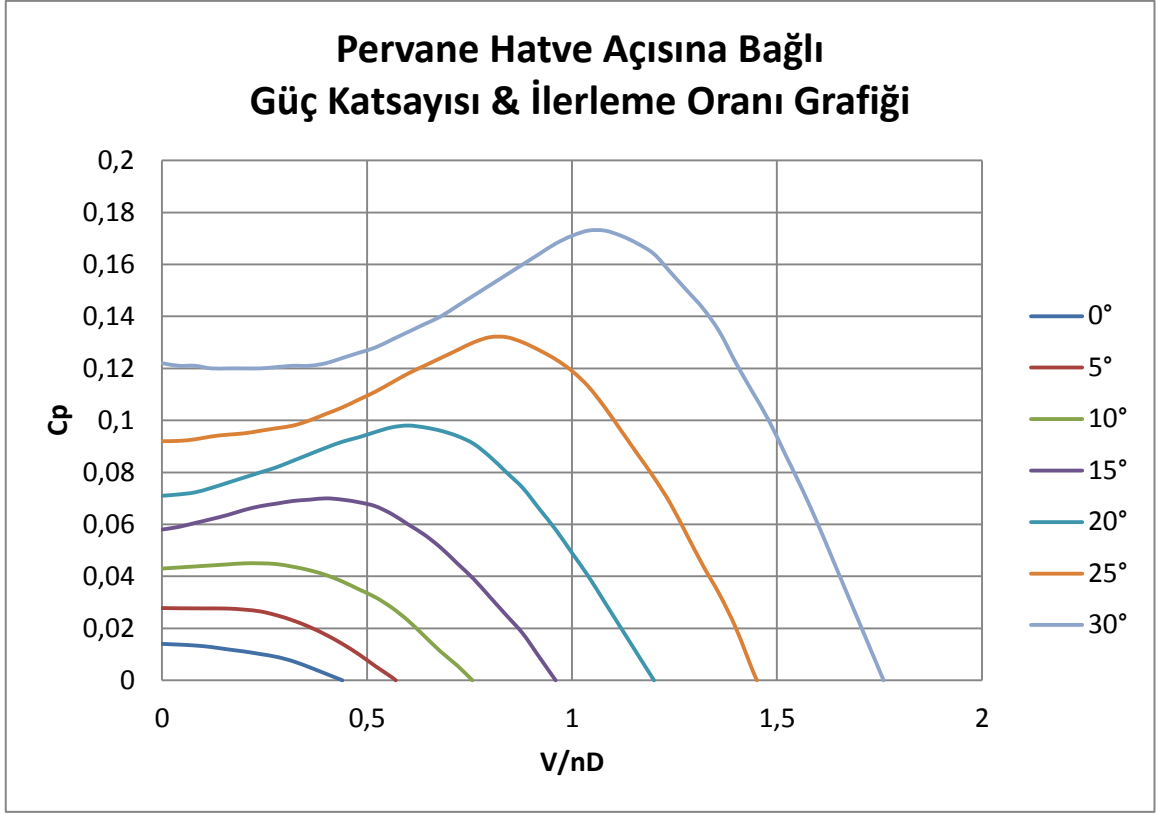
Bu bölümde dinamik durumdaki pervane performansının 2 pervane için aynı koşullarda ne gibi değişkenliklere yol açtığı incelenmiştir. Dinamik durum 3 alt başlığa ayrılmıştır. Bunlar;

1. Uçağın kalkış esnasındaki performansı
2. Uçağın tırmanış esnasındaki performansı
3. Uçağın seyahat hızındaki performansı

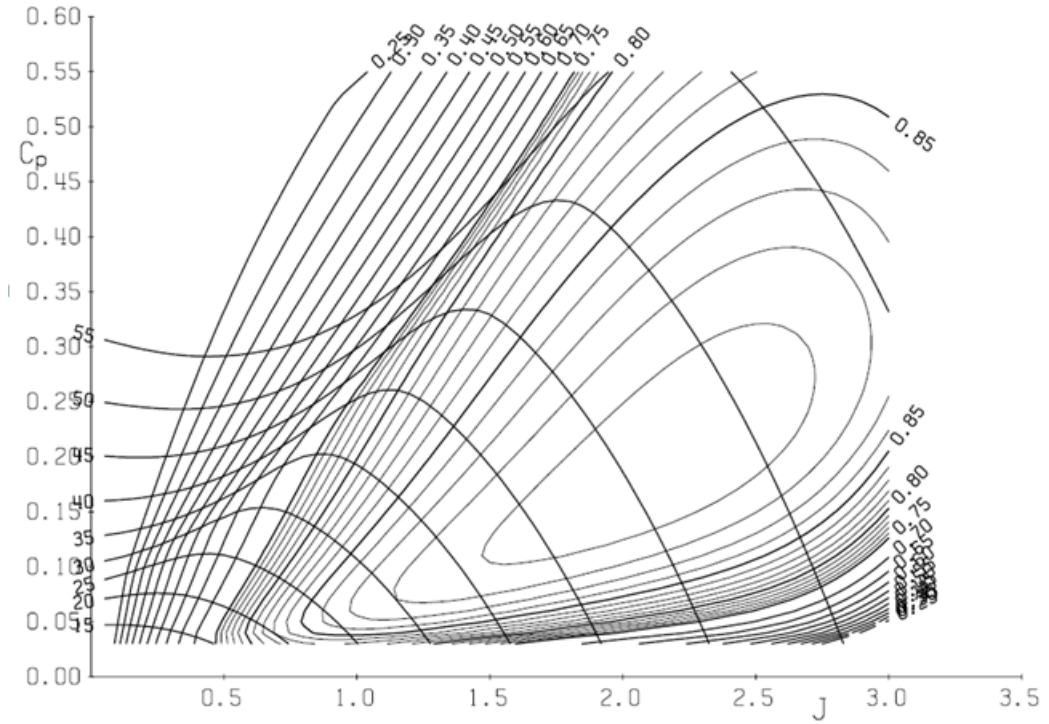
Bu 3 durum için hesaplamalar yapılırken pervanelere ait aşağıda gösterilen  $C_p$  & İlerleme oranı ve  $\eta$  & İlerleme oranı grafikleri başta olmak üzere ayrıca her bölümde değişen durumlara göre aşağıda verilen diğer girdiler kullanılmıştır.



Şekil 4.1. 2.0 m pervaneye ait  $\eta$  (verim) & İlerleme oranı grafiği



Şekil 4.2. 2.0 m pervaneye ait  $C_p$  (güç katsayısı) & İlerleme oranı grafiği

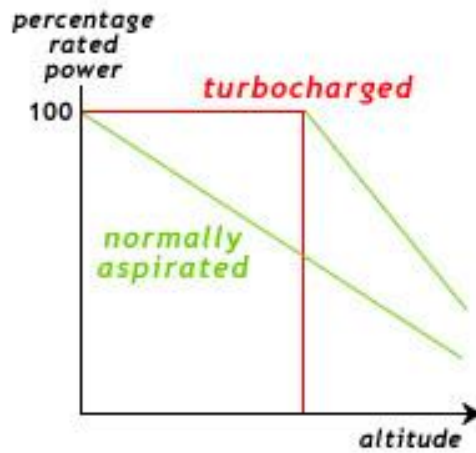


Şekil 4.3. 1.8 m pervaneye ait  $\eta$  (verim) & İlerleme oranı ve  $C_p$  (güç katsayısı) & İlerleme oranı grafiği

#### 4.1 Turboşarj ve Kritik İrtifa

Turboşarj sistemleri temel olarak motordan alınan gücün artırılmasını sağlar. Silindir içerisine daha fazla hava göndererek meydana gelen yanmanın daha güçlü olması sağlanır. Yöntem gerekli olan gücü yanmış egzoz gazlarının dışarı atılması sırasında alır. Bu yönden süperşarj sistemleri gibi gücünü krank milinden alarak ekstradan yakıt tüketilmesine neden olmazlar. Turboşarj sistemlerinde türbin ve kompresör bölümlerinde iki adet dönen yapı bulunur. Türbin egzoz manifoldunda yer alır. Yanma sonucu oluşan egzoz gazları atmosfere atılırken sahip olduğu yüksek enerji ile türbini döndürür. Türbin de aradaki bağlantı mili aracılığı ile kompresörü döndürür. Bu kompresör ile sıkıştırılan hava pistondan içeriye gönderilir. Böylece silindir içerisine püskürtülen yakıttan daha yüksek verim elde edilir.

Bu çalışmada kullanılan motor turboşarja sahip bir motor olduğundan deniz seviyesindeki motor gücünü belirli irtifaya kadar muhafaza edebilmektedir. Bu sayede yüksek irtifalarda yüksek güç alınabilmektedir. Aşağıdaki şekilde turboşarja sahip bir motorla doğal emişli bir motorun güç kıyaslaması gösterilmiştir. Şekile göre doğal emişli bir motorun deniz seviyesindeki gücü irtifaya bağlı olarak liner bir şekilde azalmaktadır ancak turboşarja sahip olan motorda belirli bir irtifaya kadar motor gücünde herhangi bir azalma görülmemektedir.



Şekil 4.4 Kritik irtifa grafiği

**Kaynak:** [http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/props.htm](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/props.htm)

Kritik irtifa tanımı buradan gelmektedir. Şekilde turboşarja sahip olan motorun güç kesmeye başladığı ilk nokta kritik irtifa olarak bilinmektedir. Bu irtifa genellikle

15000-20000 ft seviyelerinde olmaktadır. Ancak uçaktaki turboşarj sayısına ve kapasitesine bağlı olarak bu değerin altına ve üstüne çıkabilen durumlar da mevcuttur. Aşağıda yapılacak olan performans hesaplamalarında da bu durum dikkate alınmıştır.

#### 4.2 Uçağın Kalkış Esnasındaki Performansı

Bu tip uçaklar kalkış performansını genellikle gaz pedalını tam güç ayarındayken gerçekleştirirler. Kalkış irtifası deniz seviyesinde başlayarak belli bir yüksekliğe kadar olabilmektedir. Uçağın görev profilini düşündüğümüzde kalkış hesaplamaları yapılırken maksimum 10000 ft değerine göre hesaplamalar yapılmıştır.

Bu hesaplamalar yapılırken aşağıda verilen girdilere kullanılmıştır;

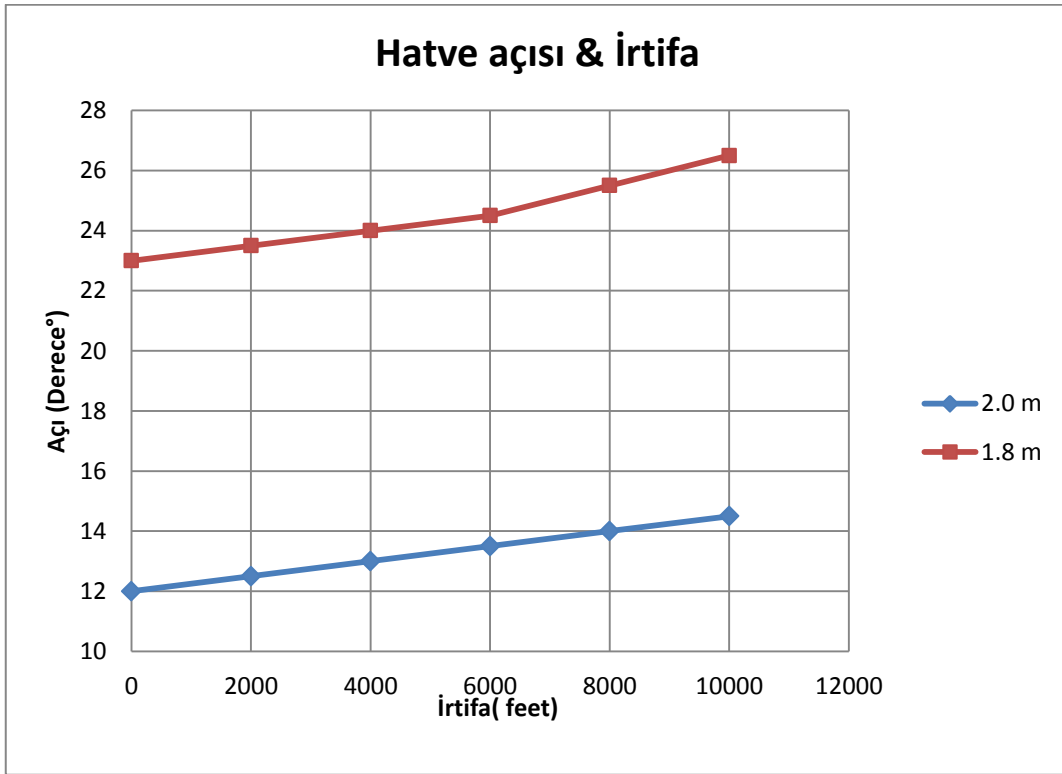
- Uçak hızı: 70 knot (35.98 m/s)
- Motor gaz kolu: %100
- Pervane devri: 2300 rpm (38.3 rps)
- Pervane gücü:155 hp (115568 watt)-Motorun maksimum gücü
- Kalkış irtifası:0-2000-4000-6000-8000-10000 ft olmak üzere 5 farklı irtifada hesaplamalar yapılmıştır.
- 10000 ft seviyesine kadar motorda herhangi bir güç düşümü olmadığından motor gücü sabit olarak alınmıştır.
- Pervane çapı: 1.8 ve 2.0 m olmak üzere 2 farklı çapta hesaplamalar yapılmıştır.
- 2 farklı pervaneye ait  $C_p$  & İlerleme oranı ve  $\eta$  & İlerleme oranı grafikleri kullanılmıştır.

Hesaplamalar şu şekilde yapılmıştır;

- 1) İlk olarak  $V$  (hız),  $n$  (devir),  $D$  (çap) kullanılarak **2.7** nolu formüldeki  $J$  (ilerleme oranı) bulunmuştur.
- 2)  $P$  (güç),  $\rho$  (yoğunluk),  $n$  (devir), $D$  (pervane çapı ) kullanılarak **2.8** nolu formüldeki  $C_p$  (güç katsayısı) elde edilmiştir.
- 3) 1 nolu adımdaki  $J$  (ilerleme oranı ) ile 2 nolu adımdaki  $C_p$  (güç katsayısı) ait olduğu  $C_p$  &  $J$  pervane grafiğinde kesiştirilerek bu durumda olması gereken pervane hatve açısı bulunmuştur.
- 4) Bulunan pervane hatve açısı  $\eta$  &  $J$  grafiğinde bir önceki adımdaki  $J$  değerine oturtularak bu garfikte karşılık gelen pervane verimi elde edilmiştir.

- 5) Daha sonra farklı irtifalar yerleştirilerek pervane hatve açısının ve verim katsayısının değişimi gözlemlenmiştir.
- 6) Pervane verimi ve güç katsayısı değerleri hesaplanmış olduğundan bu bilgileri 2.10 nolu formüle yerleştirerek pervanenin mevcut koşullardaki itki katsayısı hesaplanmış
- 7) Bulunan itki katsayısı 2.9 nolu formüle yerleştirilerek pervaneden elde edilen itkiye geçilmiş ve itki & irtifa grafikleri davranışı kıyaslamalı olarak gözlemlenmiştir.

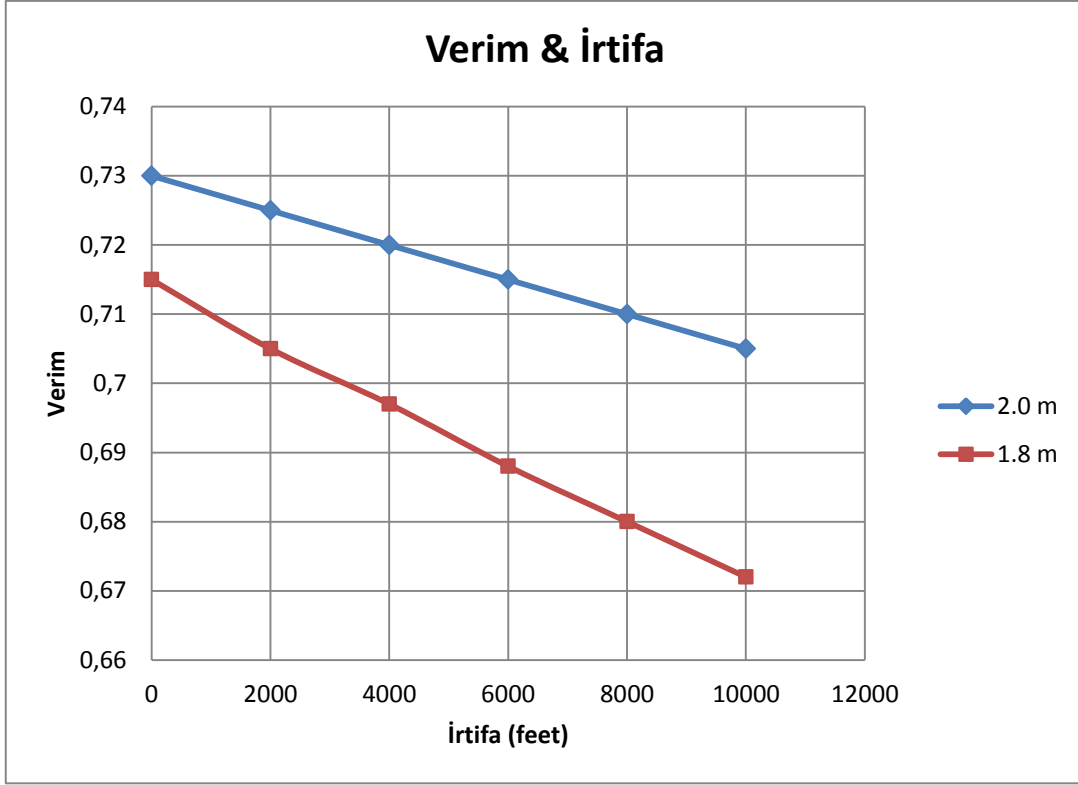
2 farklı pervane için elde edilen sonuçlar aşağıda grafiklerle gösterilmiştir;



Şekil 4.5. Kalkış durumu için hatve açısı & irtifa grafiği

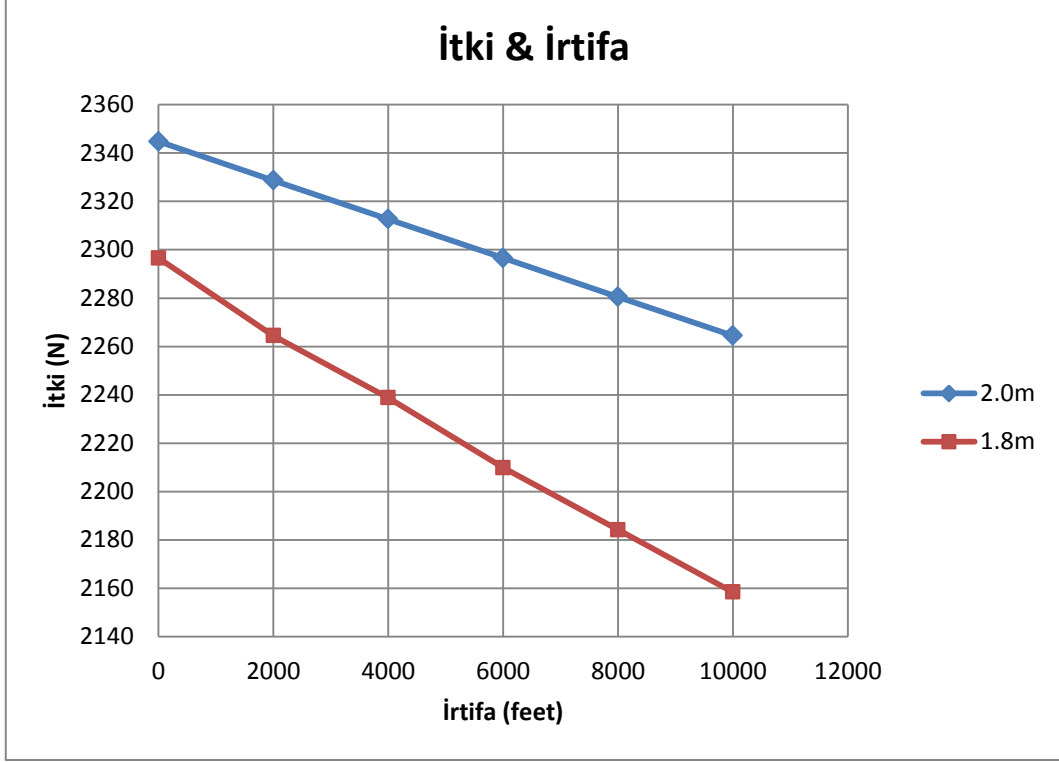
İrtifaya karşı gelen hatve açıları grafiğe aktarıldığında Şekil 4.5'teki gibi davranış göstermektedir. Büyük çaptaki pervanenin aynı koşullar gözetildiğinde daha küçük hatve açısında çalıştığı, irtifanın artışına paralel hatve açısında da artış olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Bunun nedeni hava yoğunluğunun irtifaya bağlı düşüşüdür.





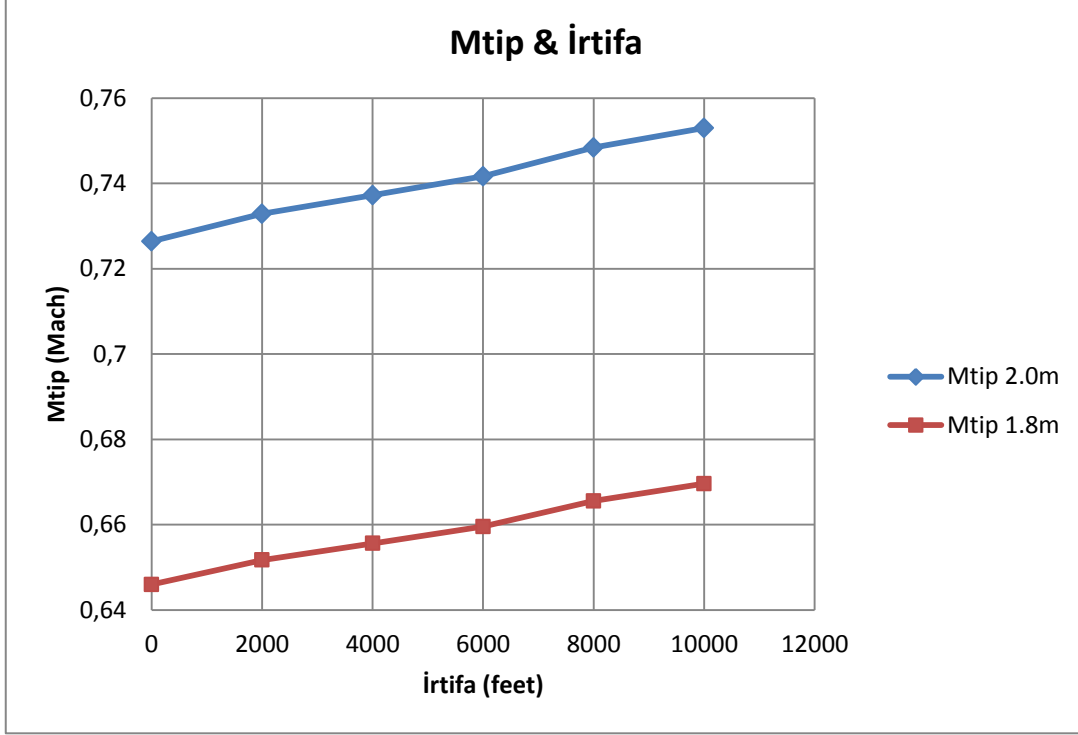
**Şekil 4.6.** Kalkış durumu için verim & irtifa grafiği

Verim irtifa grafiği incelendiğinde büyük çaptaki pervanenin veriminin kalkış performansı esnasında ortalama % 3.5 civarında daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Ayrıca deniz seviyesinden irtifaya çıkıldıkça verimler arasındaki farkta liner bir şekilde artmaktadır. Bu artışa bakılarak büyük çaptaki pervanenin daha avantajlı konumda olduğu söylenebilir.



Şekil 4.7. Kalkış durumu için itki & irtifa grafiği

İtki & irtifa grafiđi incelendiđinde İrtifaya bađlı olarak itkinin dűštűđű ve verim irtifa grafiđinde verilen % 3.5'lik verim farkı aynı oranda itki farkı olarak gözlemlenmiřtir.



Şekil 4.8. Kalkış durumu için  $M_{tip}$  & irtifa grafiği

Pervane tip hızının irtifaya bağlı değişimi yukarıdaki gibidir. Tip hızı incelendiğinde diğer performanslara göre Kalkış performansında daha yüksek seviyede değerler ortaya çıkmıştır. Bu durum Şekil 2.7'deki sıkışabilirlik grafiği altında incelendiğinde 2 pervane açısından da performans kaybı söz konusu değildir.

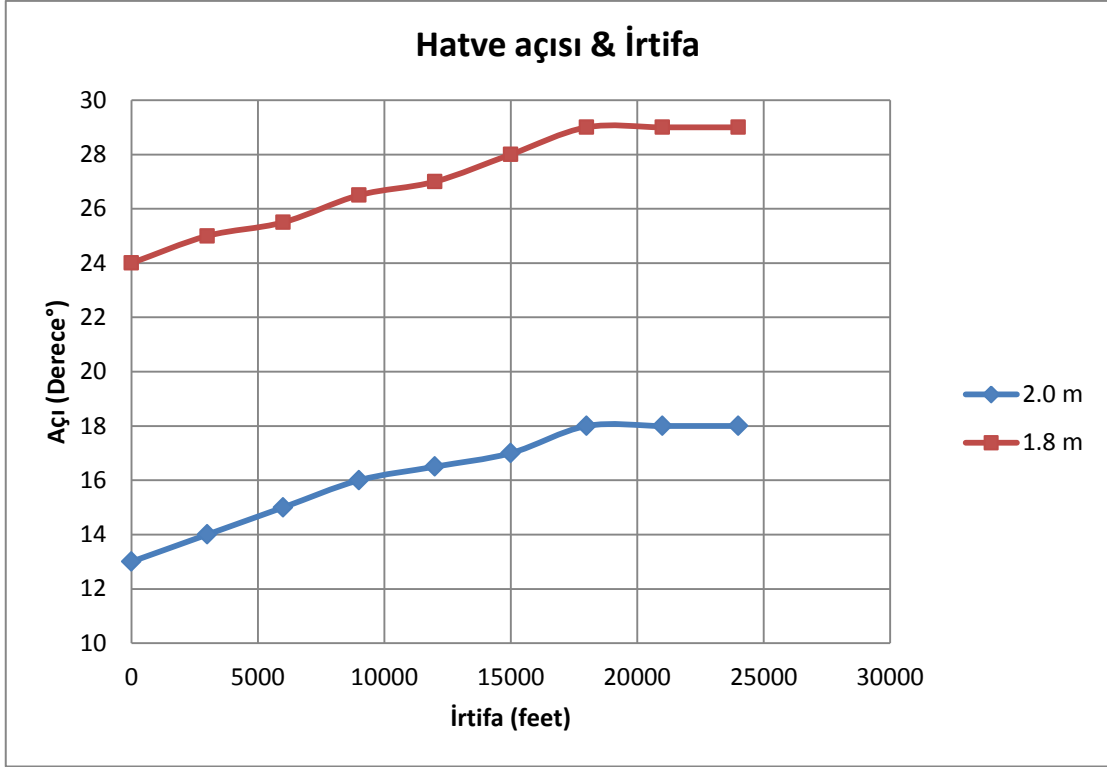
### 4.3 Uçağın Tırmanış Esnasındaki Performansı

Uçağın tırmanış esnasındaki performansı incelenirken diğer bu tip uçakların tırmanış hızlarına göre ortalama bir hız seçilmiş olup sabit hızda tırmandığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Genelde bu tip uçakların tırmanış durumundaki motor gücü seyahat hızındaki motor gücünden yüksek, kalkış performansındaki motor gücünden düşük bir güçte olmaktadır. Tırmanış durumundaki hız buna göre motor seçilmiştir. Ayrıca uçağın elektriksel komponentlerinin ihtiyacı olan elektrik gücü motordan temin edildiğinden bu güç motorun gücünden çıkarılarak net olan pervane shaft gücü kullanılmıştır. Uçağın görev profilini düşündüğümüzde tırmanış hesaplamaları yapılırken maksimum 24000 ft değerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Bundan dolayı irtifa artışından gelen motor güç düşümü hesaplamalar sırasında dikkate alınmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken aşağıda verilen girdilere ihtiyaç bulunmaktadır;

- Uçak hızı: 80 knot (41.12 m/s)
- Motor gaz kolu: %85
- Pervane devri: 2084 rpm (34.7 rps)
- Pervane gücü deniz seviyesi: 124-8=116 hp (86489 watt)-Net pervane şaft gücü  
Pervane gücü 24000 ft : 98-8 = 90 hp (67104 watt)-Net pervane şaft gücü
- Tırmanış irtifası:0-3000-6000-9000-12000-15000-18000-21000-24000 ft olmak üzere 9 farklı irtifada hesaplamalar yapılmıştır.
- Pervane çapı: 1.8 ve 2.0 m olmak üzere 2 farklı çapta hesaplamalar yapılmıştır.
- 2 farklı pervaneye ait  $C_p$  & ilerleme oranı ve  $\eta$  & ilerleme oranı grafikleri kullanılmıştır.

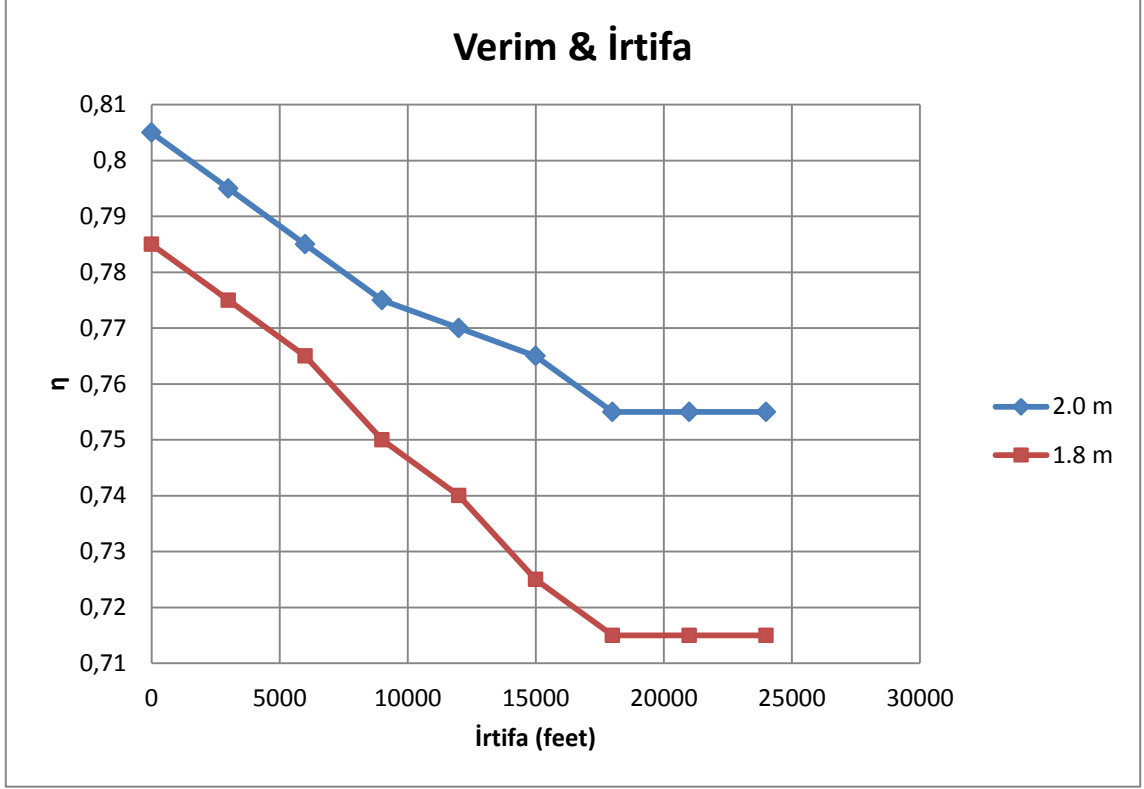
Hesaplamalar şu şekilde yapılmıştır;

- 1) İlk olarak  $V$  (hız),  $n$  (devir),  $D$  (çap) kullanılarak **2.7** nolu formüldeki  $J$  (ilerleme oranı) bulunmuştur.
- 2)  $P$  (güç),  $\rho$  (yoğunluk),  $n$  (devir),  $D$  (pervane çapı ) kullanılarak **2.8** nolu formüldeki  $C_p$ (güç katsayısı) elde edilmiştir.
- 3) 1 nolu adımdaki  $J$  (ilerleme oranı ) ile 2 nolu adımdaki  $C_p$  (güç katsayısı) ait olduğu  $C_p$ & $J$  pervane grafiğinde kesiştirilerek bu durumda olması gereken pervane hatve açısı bulunmuştur.
- 4) Bulunan pervane hatve açısı  $\eta$  &  $J$  grafiğinde bir önceki adımdaki  $J$  değerine oturtularak bu grafikte karşılık gelen pervane verimi elde edilmiştir.
- 5) Daha sonra farklı irtifalar ve motorun gücünde yaşanan düşüştten dolayı farklı güç değerleri yerleştirilerek pervane hatve açısının ve verim katsayısının değişimi gözlemlenmiştir.
- 6) Pervane verimi ve güç katsayısı değerleri hesaplanmış olduğundan bu bilgileri **2.10** nolu formüle yerleştirerek pervanenin mevcut koşullardaki itki katsayısı hesaplanmıştır.
- 7) Bulunan itki katsayısı **2.9** nolu formüle yerleştirilerek pervaneden elde edilen itkiye geçilmiş ve itki & İrtifa grafikleri davranışı kıyaslamalı olarak gözlemlenmiştir.



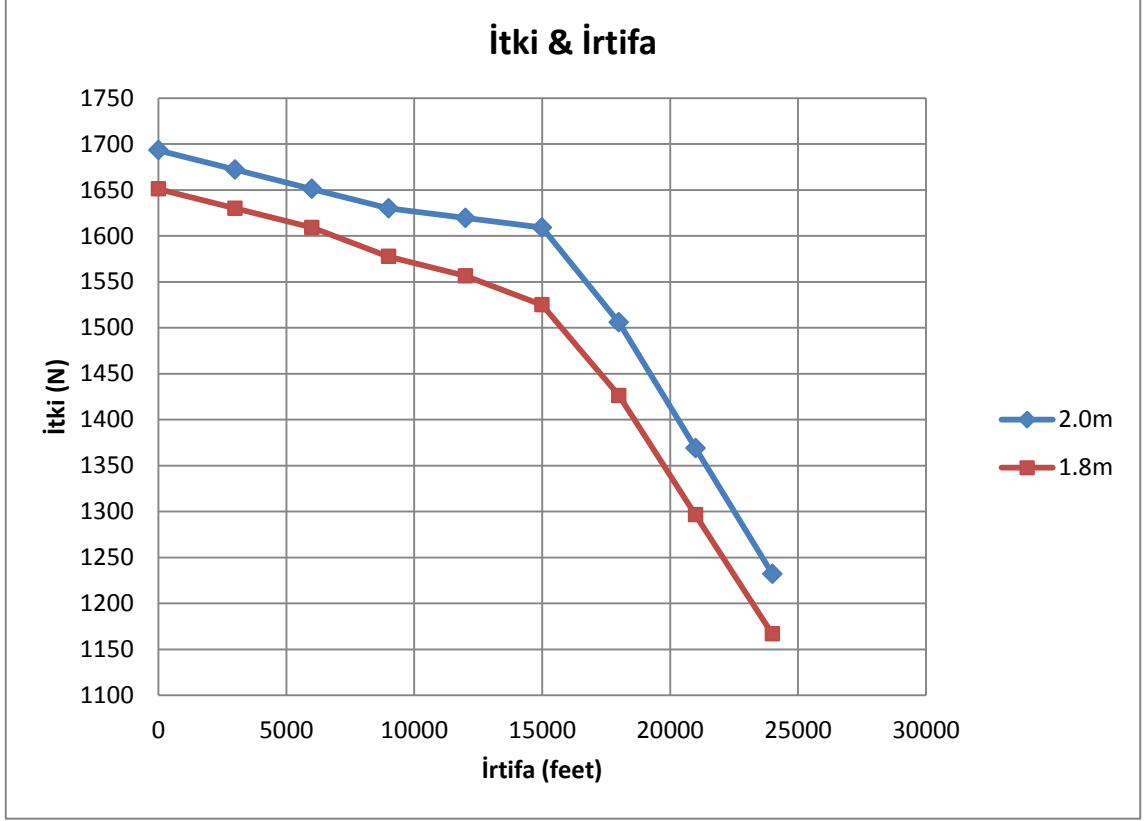
Şekil 4.9. Tırmanış durumu için hatve açısı & irtifa grafiği

Hatve açısı & irtifa grafiği incelendiğinde irtifaya bağlı olarak hatve açısındaki artış çok net görülebilmektedir. Bunun temel nedeni irtifa ile birlikte hava yoğunluğunun azalmasıdır. Grafikte dikkat çeken bir ayrıntı da 18000 ft irtifasından sonra pervanenin hatve açısında herhangi bir değişim gözlemlenmemesidir. 2.8 nolu formülde belirtilen  $C_p$  güç katsayısının motor gücüne, yoğunluğa, pervane çapına, pervane devrine bağlı olduğu görülebilmektedir. Pervane çapı ve devri sabit olarak düşünüldüğünde yoğunluk azalmakta ancak yüksek irtifadan dolayı motor gücü de düşmektedir. Bu iki düşüş hesaplamalar yapıldığında birbirlerini tolere edebilecek seviyede oldukları belirlenmiştir. Yani 18000 ft irtifadan sonra  $C_p$  değişmemektedir. Ayrıca bu hesaplamalar yapılırken 2.7 nolu formülde verilen ilerleme oranı  $J$ 'de uçak hızının sabit olmasından dolayı değişmemektedir. Hatve açısını belirleyen  $C_p$  &  $J$  grafiği olduğundan bu noktadan sonra bir değişim gözlemlenmemiştir.



**Şekil 4.10.** Tırmanış durumu için verim & irtifa grafiği

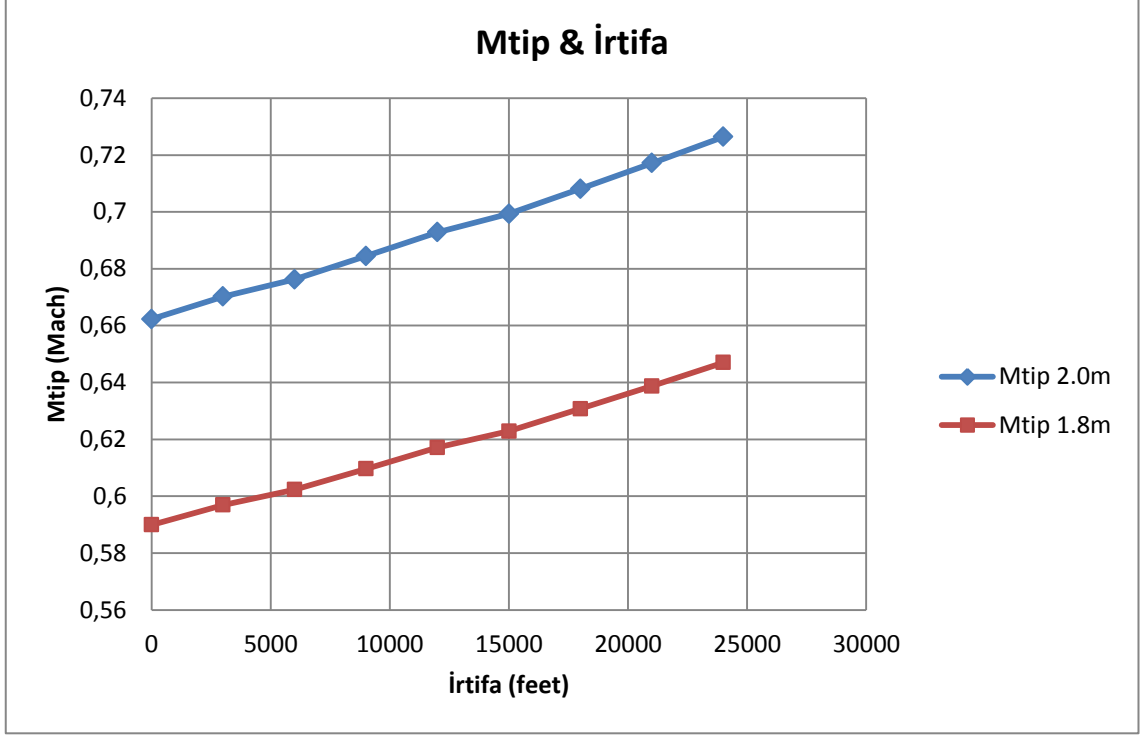
Verim & irtifa grafiğine bakıldığında irtifaya göre verimdeki düşüş net bir şekilde görülebilmektedir ve bu düşüş davranış olarak 2 pervanede de birbirine oldukça yakındır. 0-24000 ft arası tek tek değerlendirilirse 2 m pervanenin ortalama verimi 1.8 m çapındaki pervaneye göre %4 oranında daha fazla olduğu görülebilmektedir. Ayrıca düşük irtifalardaki verim kaybına bakıldığında 1.8 m çapındaki pervanede kayıp daha düşük seviyelerdedir. Bir önceki grafikte 18000 ft irtifasından sonra hatve açısının sabit olduğu sonucuna varılmıştır bunun etkisi bu grafikte de sabit verim katsayısı olarak kendini göstermektedir. Bu durumun neden bu şekilde olduğu Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 incelendiğinde çok rahat anlaşılacaktır.



**Şekil 4.11.** Tırmanış durumu için itki & irtifa grafiği

Tırmanış koşullarında elde edilen itki değerleri kıyaslandığında 24000 ft irtifaya kadar itki değeri iki pervanede de oldukça yakın davranışla düşmektedir. 15000 ft irtifasından sonra bu düşüş oldukça sert ve dramatik hale gelmiş bulunmaktadır. Bunun 2 nedeni bulunmaktadır;

- Uçağın kritik irtifa denilen irtifayı geçmeye başladığı ve bu yüzden motor gücünde azalmanın olması
- İrtifaya bağlı olarak yoğunluğun düşmesi



Şekil 4.12. Tırmanış durumu için  $M_{tip}$  & irtifa grafiği

Tırmanış durumu için pervaneye ait tip hızının irtifaya bağlı değişim yukarıdaki grafikte gösterilmiştir. Şekil 2.7'deki grafiğe bakılarak İrtifaya bağlı artan tip hızının performans açısından herhangi bir kayıp oluşturmayacağı yorumu yapılabilir.

#### 4.4 Uçağın Seyahat Durumundaki Performansı

Uçağın seyahat esnasındaki performansı incelenirken diğer bu tip uçakların seyahat hızlarına göre ortalama bir hız seçilmiş olup sabit hızda seyahat ettiği varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Genelde bu tip uçakların seyahat durumundaki motor gücü motorun en ekonomik durumu olarak belirlenmektedir ve bu güç hem kalkış performansındaki motor gücünden hem de tırmanış esnasındaki motor gücünden düşük bir güçte olmaktadır. Ayrıca uçağın elektriksel komponentlerinin ihtiyacı olan elektrik gücü motordan temin edildiğinden bu güç motorun gücünden çıkarılarak net olan pervane shaft gücü kullanılmıştır. Uçağın görev profilini düşündüğümüzde seyahat hızına göre hesaplamalar yapılırken maksimum 24000 ft değerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Bundan dolayı irtifa artışından gelen motor güç düşümü hesaplamalar sırasında dikkate alınmıştır.

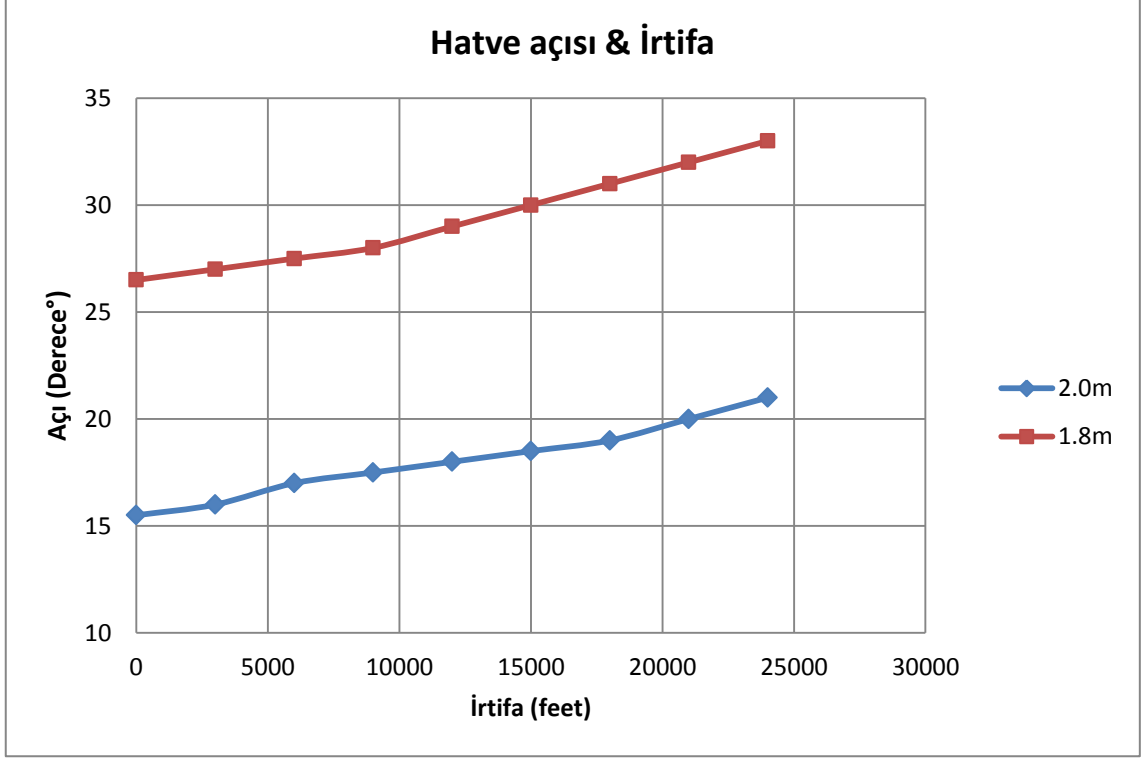
Bu hesaplamalar yapılırken aşağıda verilen girdilere ihtiyaç bulunmaktadır;



- Uçak hızı: 95 knot (48.83 m/s)
- Motor gaz kolu: %70
- Pervane devri: 1964 rpm (32.7 rps)
- Pervane gücü deniz seviyesi: 104-8=96 hp (71577 watt)-Net pervane şaft gücü
- Pervane gücü 24000 ft : 97-8 = 89 hp (66358 watt)-Net pervane şaft gücü
- Seyahat irtifası:0-3000-6000-9000-12000-15000-18000-21000-24000 ft olmak üzere 9 farklı irtifada hesaplamalar yapılmıştır.
- Pervane çapı: 1.8 ve 2.0 m olmak üzere 2 farklı çapta hesaplamalar yapılmıştır.
- 2 farklı pervaneye ait  $C_p$  & İlerleme oranı ve  $\eta$  & İlerleme oranı grafikleri kullanılmıştır.

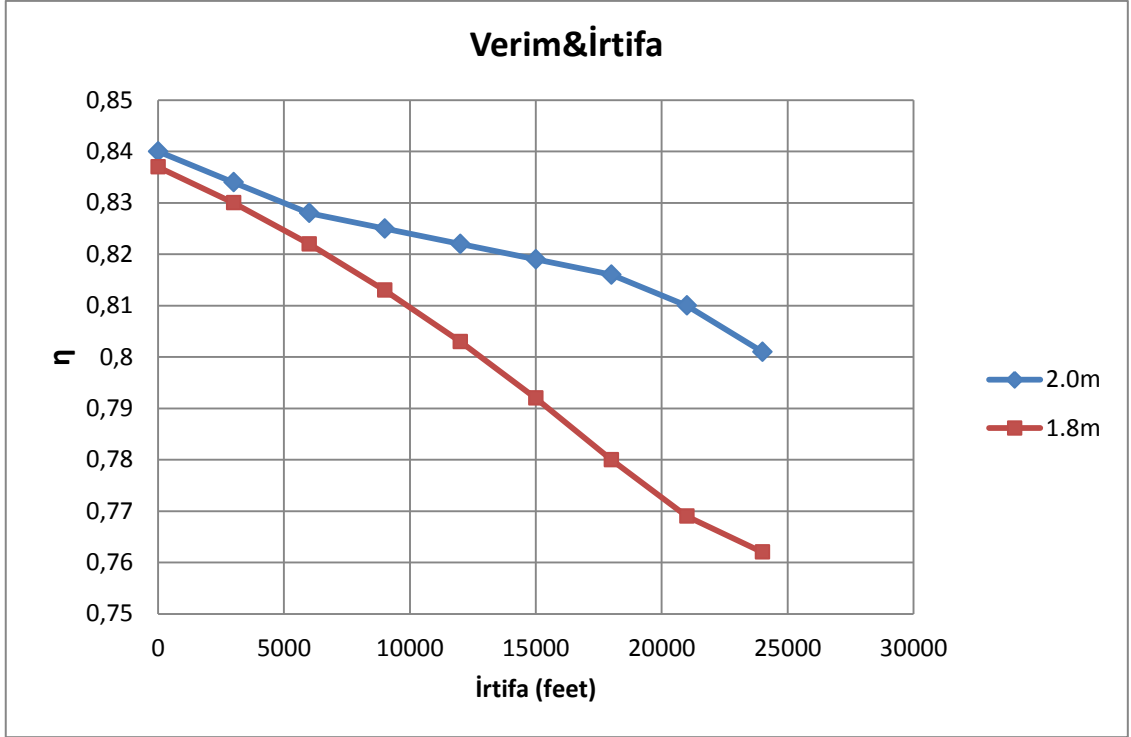
Hesaplamaların sırası aşağıda belirtilmiştir.;

- 1) İlk olarak V (hız), n (devir), D (çap) kullanılarak **2.7** nolu formüldeki J (ilerleme oranı) bulunmuştur.
- 2) P (güç),  $\rho$  (yoğunluk), n (devir),D (pervane çapı ) kullanılarak **2.8** nolu formüldeki  $C_p$ (güç katsayısı) elde edilmiştir.
- 3) 1 nolu adımdaki J (ilerleme oranı ) ile 2 nolu adımdaki  $C_p$  (güç katsayısı) ait olduğu  $C_p$ &J pervane grafiğinde kesiştirilerek bu durumda olması gereken pervane hatve açısı bulunmuştur.
- 4) Bulunan pervane hatve açısı  $\eta$  & J grafiğinde bir önceki adımdaki J değerine oturtularak bu grafikte karşılık gelen pervane verimi elde edilmiştir.
- 5) Daha sonra farklı irtifalar ve motorun gücünde yaşanan düşüşten dolayı farklı güç değerleri yerleştirilerek pervane hatve açısının ve verim katsayısının değişimi gözlemlenmiştir.
- 6) Pervane verimi ve güç katsayısı değerleri hesaplanmış olduğundan bu bilgileri 2.10 nolu formüle yerleştirilerek pervanenin mevcut koşullardaki itki katsayısı hesaplanmış
- 7) Bulunan itki katsayısı 2.9 nolu formüle yerleştirilerek pervaneden elde edilen itkiye geçilmiş ve itki & irtifa grafikleri davranışı kıyaslamalı olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Seyahat durumu için hatve açısı & irtifa grafiği

Hatve açısı & irtifa grafiği incelendiğinde önceki grafikler gibi irtifaya bağlı hatve açısındaki artış net bir şekilde görülebilmektedir. Kalkış ve tırmanış durumları düşünülürse buradaki açı değişiminin tüm performans hesaplamaları arasında en fazla genişliğe sahip olduğu çıkarılabilir. Bunun temel nedeni seyahat irtifasındaki hızın diğer durumlara göre yüksek oluşundandır.



Şekil 4.14. Seyahat durumu için verim & irtifa grafiği

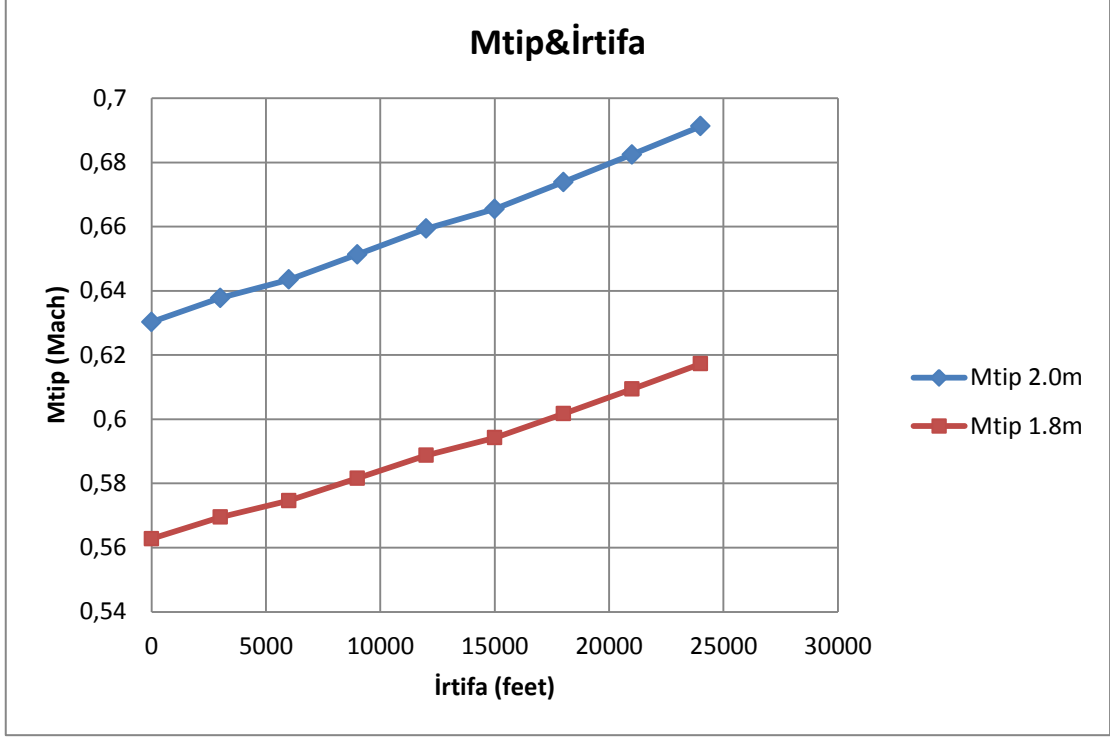
Verim & irtifa grafiği incelendiğinde bir önceki grafiklere göre farklılık olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Genel davranış olan verimin irtifaya bağlı olarak düşmesi olsa gibi görünse de pervaneler arasındaki verim bandı her irtifa da bir miktar daha genişlemektedir. Bu genişleme büyük çaptaki pervanenin avantajlı konuma geldiğini göstermektedir. Grafik ortalama verim olarak değerlendirildiğinde ise 2.0 m çapındaki pervanenin %2.6 seviyesinde daha yüksek ortalamaya sahip olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.15. Seyahat durumu için itki & irtifa grafiği

Uçağın seyahat koşullarında itki & irtifa grafiği incelendiğinde verim grafiğinin yansıması oldukça net bir şekilde görülebilmektedir. İlk etapta aralarında çok fazla bir itki farkı olduğu görülmesine de bu fark her irtifa artışında bir miktar daha artarak 22000 ft irtifasında maksimum seviyeye ulaşmış bulunmaktadır. Grafiğe dikkatli bakıldığında 22000 ft sonrasındaki düşüşün sert bir şekilde gerçekleştiği görülebilmektedir. Bunun nedeni ;

- İlk etaptaki hafif düşüşte uçağın seyahat durumundaki motor gücünün henüz kritik irtifayı geçmediğini bu düşüşün yalnızca verim ve yoğunlukla alakalı olduğu
- İkinci etaptaki sert düşüşün yoğunluk düşüşünün etkisinin yanında uçağın artık kritik irtifayı aştığı ve motor gücünde azalmanın olduğu kanaatine varılabilmektedir.

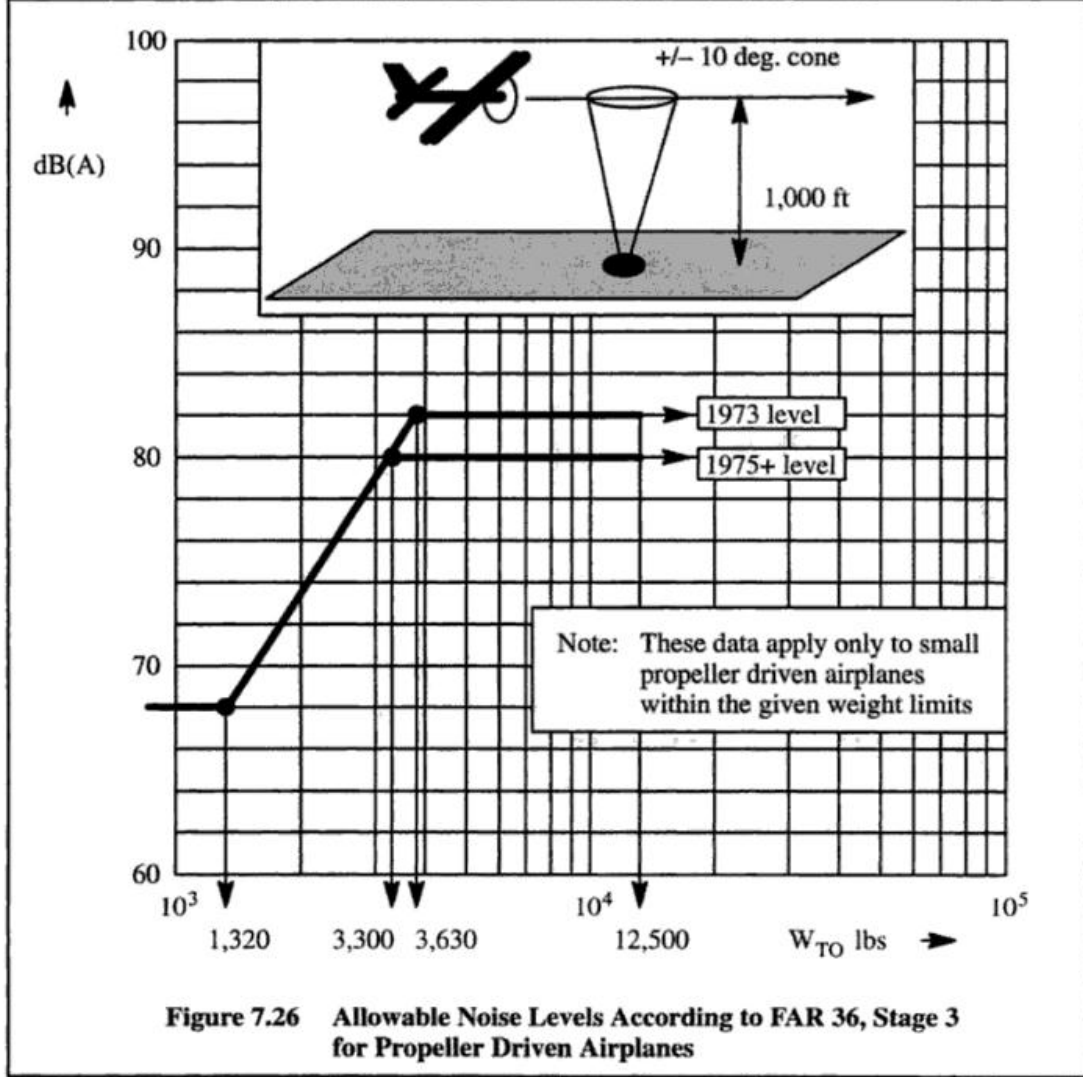


Şekil 4.16. Seyahat durumu için  $M_{tip}$  & irtifa grafiği

Yukarıdaki grafik pervanenin seyahat durumunda tip hızı değişimini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında 2 pervane içinde herhangi bir irtifada performans kaybına sebep olacak bir durum görülmemektedir.

## 5. PERVANE GÜRÜLTÜ ANALİZİ

Aşağıda FAR 36 ya göre izin verilen gürültü limitlerinin gösterildiği çizelge bulunmaktadır.[9] 1975 yılından beri uçaklar gürültü konusunda FAR 36 kriterlerine göre tasarlanmaktadır.



Şekil 5.1. FAR36 gürültü seviyesi çizelgesi

Kaynak: Roskam, 2003

Grafikte de görüldüğü gibi gürültü desibel cinsinden dB(A) ölçülmektedir. Pervaneli uçaklarda gürültü kaynağı olarak farklı birçok etken bulunmaktadır;

- Motor gürültüsü: Egzoz gürültüsü, turbocharger gürültüsü, krankşaft gürültüsü, dişli kutusu gürültüsü vb.
- Aerodinamik gürültü

c) Pervane gürültüsü

Bir çok pervaneli uçakta pervane kaynaklı gürültü diğer yukarıda bahsedilen gürültü türlerini domine etmektedir. Dolayısıyla bu bölümde yalnızca pervane kaynaklı gürültü incelenecektir.

Pervane kaynaklı gürültü 2 ana başlığa ayrılmaktadır;

**1) Dönme Kaynaklı Gürültü**

Bu gürültü pervane palesi geçiş frekansının harmoniklerinde oluşan ve ayrı frekansları olan tüm sesleri açıklar. Pervane pale sayısı B ve rotasyonel frekans rad/sec ile tanımlanır. Bu gürültü pervanenin diski üzerindeki sabit bir nokta üzerindeki salınımlı basınç alanı nedeniyle oluşur. Genel anlamda itki ve torkun üretilmesiyle yakından ilişkilidir.

**2) Girdap (Vortex) gürültüsü**

Bu gürültünün oluşmasındaki ana etken firar kenarlarında ve Pervane palesi uç kısmında kararsız basınç alanı nedeniyle oluşan vortekslerdir. Bu vorteksler hızın bir fonksiyonudur. Dönen bir pervane palesi için palenin kök kısmından uç kısmına kadar her bölümde hız değişkenlik göstermektedir. Gürültü seviyesi bölüm hızının 6. kuvvetiyle orantılı olduğundan titreşim genliği artarak uç kısımda maksimuma dayanır. Dolayısıyla vorteks gürültüsünü düşürebilmek için pervane uç hızının düşmesi gerekmektedir.

**5.1 Pervane Gürültüsü Tahmin Yöntemleri**

Hamiltonun gerçekleştirmiş olduğu testler sonucunda ortaya çıkan verilere dayanarak pervane gürültü seviyesi hesabını sağlayan ampirik formüller bu bölümde kullanılacaktır [1].

Gürültü hesabı yapılırken 2 hesaplama yöntemi bulunmaktadır;

- Uzak alan (Far field)
- Yakın alan (Near field)

Hesaplama yöntemleri birbirlerine çok benzerdir. Ancak yakın alan (near field) gürültü hesabı daha çok yorulma ve parçaların yapısal durumları açısından kritik olduğundan yalnızca uzak alan (far field) methodu ile hesaplama yapılmıştır [11].

### 5.1.1 Uzak alan (Far field) gürültüsü

Uzak alan gürültüsü tanım olarak pervane ucunun bir pervane çapı kadar uzağındaki oluşan gürültüdür. Bu gürültü, 4 nolu referansın ek kısmında bulunan D1'den D8'e kadar pervane gürültü çizelgeleri kullanılarak, bir tahmin yapılabilmektedir. Bu hesapların yapılma sırası ve kullanılan formüller aşağıda anlatılmıştır.

1) Pervane tip hızı 5.1 nolu formül kullanılarak Mach cinsinden hesaplanmıştır.

- n pervane dönüş hızı (rps)
- Va ses hızı ft/sec

$$M_{rotation} = \frac{\pi n D}{V_a} \quad (5.1)$$

2) Pervanenin o koşullardaki güç değeri ve rotasyonel tip hızı kullanılarak Parçalı gürültü seviyesi FL1 D1 grafiğinden okunmuştur.

3) Pervane çapının ve pal sayısının girdi olarak kullanarak parçalı gürültü seviyesi FL2 D2 grafiğinden okunmuştur

4) Atmosferik soğurmanın etkisini katabilmek amacıyla parçalı gürültü seviyesi FL3 D3 grafiğinden okunmuştur.

5) DI directivity index (Yönlenme etkisi)hesaba katabilmek için D4 grafiğinden DI değeri okunmuştur.

6) Bir başka düzeltme katsayısı NC değeri aşağıdaki değerlerin referansında interpolasyonla 3 palli pervane için hesaplanmıştır.

**1 palli pervane için :** NC=0 dB

**2 palli pervane için :** NC=3 dB

**4 palli pervane için :** NC=6 dB

7) OSPL Toplam gürültü seviyesi aşağıdaki toplam formülüyle bulunmuştur.

$$OSPL=FL1+FL2+FL3+DI+NC \quad (dB) \quad (5.2)$$

8) Sonrasında aşağıda verilen 5.3 ve 5.4 nolu formüllerle PNL algılanan gürültü değeri bulunmuştur.

$$PNL=OSPL+\Delta PNL \quad (dB) \quad (5.3)$$



$\Delta$ PNL, D5 ve D8 arasındaki çizelgelerden uygun olanı bulunarak okunacak olan değerdir. Bu hesap yapılırken garfikte istenen Helisel tip speed Mach number cinsinden 5.4 nolu formülden hesaplanacaktır.

$$M_{rotation} = M \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{J}\right)^2} \quad (5.4)$$

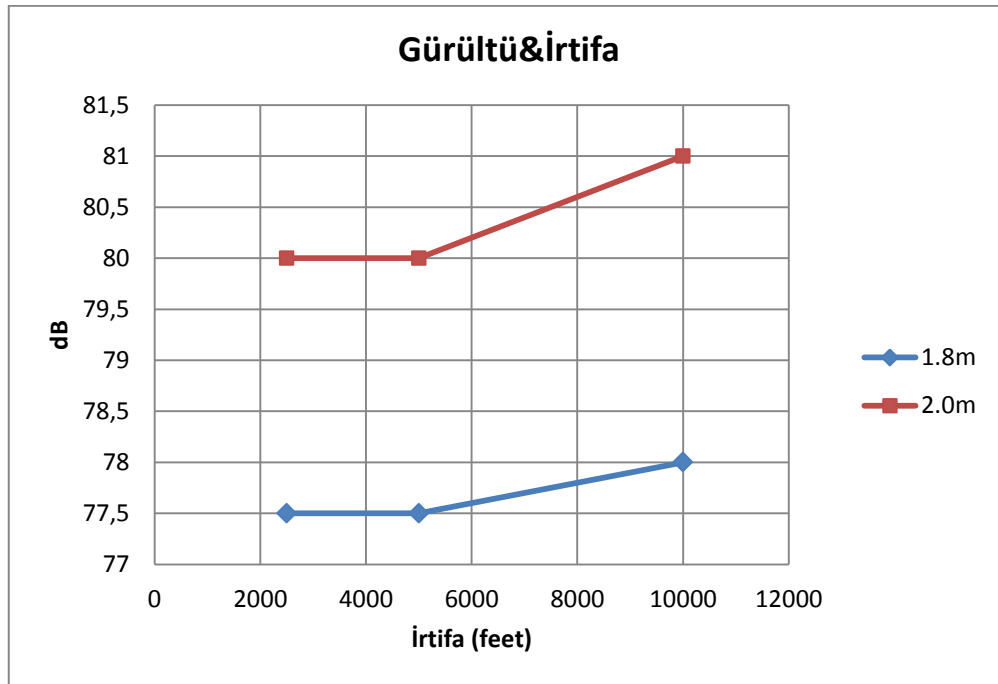
9) Ağırlıklı gürültü seviyesi desibel cinsinden 5.5 nolu förmüle göre hesaplanmıştır.

$$dB(A) = PNL - 14dB \quad (dB) \quad (5.5)$$

10) Yukarıda verilen formüllerle farklı irtifalarda kalkış-tırmanış ve seyahat durumlarındaki değişen değerlerin de hesaba katılmasıyla 2 farklı çaptaki pervanenin gürültü seviyeleri hesaplanmış kıyaslama yapabilmek amacıyla grafiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

## 5.2 Kalkış Durumu Gürültü Seviyesi

Kalkış irtifası olarak 2500-5000-10000 ft irtifalarına göre hesaplamalar yapıldığında sonuçlar aşağıdaki gibi çıkmıştır.

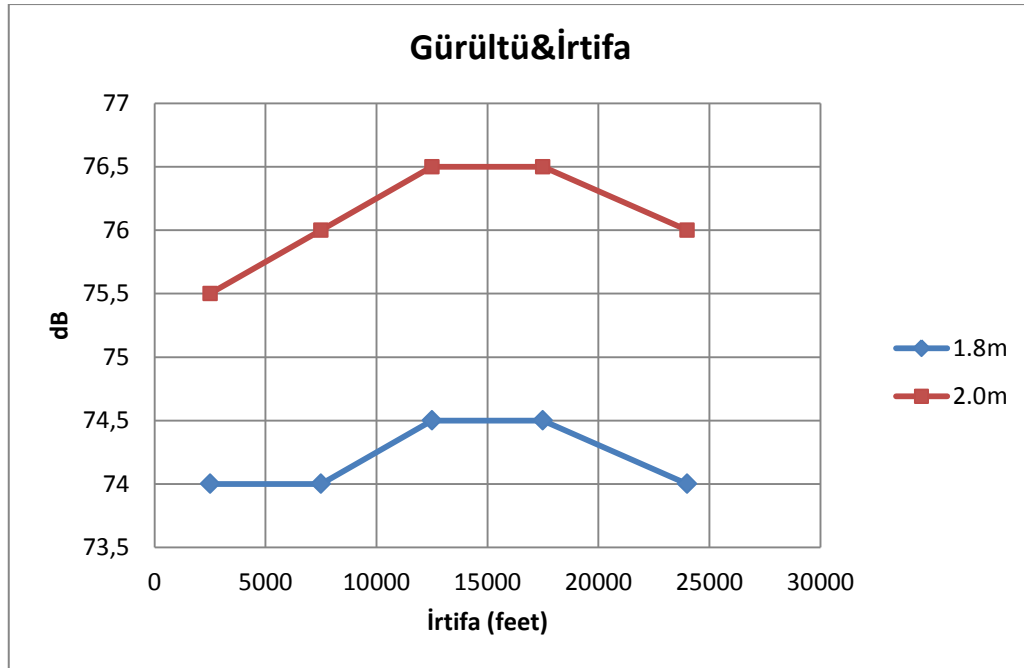


Şekil 5.2. Kalkış durumundaki gürültü & irtifa grafiği

Gürültü seviyesi olarak büyük çaptaki pervanenin diğerine göre ortalama 2-2.5 dB fazla olduğu ve 81 dB seviyesine ulaştığı görülebilmektedir. Şekil 5.1’de FAR36’da izin verilen gürültü seviyesi grafiği incelendiğinde bu değer tam limitteki değer olduğu görülebilmektedir.

### 5.3 Tırmanış Durumu Gürültü Seviyesi

Tırmanış durumunda 2500-24000 ft arasındaki irtifalarda hesaplamalar yapılmış olup gürültü seviyesi aşağıdaki gibi oluşmuştur. Tırmanış durumuna motorun gücü kalkış durumuna göre daha az olduğundan gürültü seviyesindeki düşme net bir şekilde görülebilmektedir. Büyük çaptaki pervanenin bu şartlarda da diğerine göre 1,5-2 dB civarında fazla gürültüye sebep olduğu görülebilmekte İrtifanın belli bir seviyeden sonra artışının gürültü seviyesinin düşmesine sebep olduğu da aşağıdaki grafikten okunabilmektedir. Bunun temel nedeni kritik irtifa sonrası motor gücünde yaşanan düşüştür.

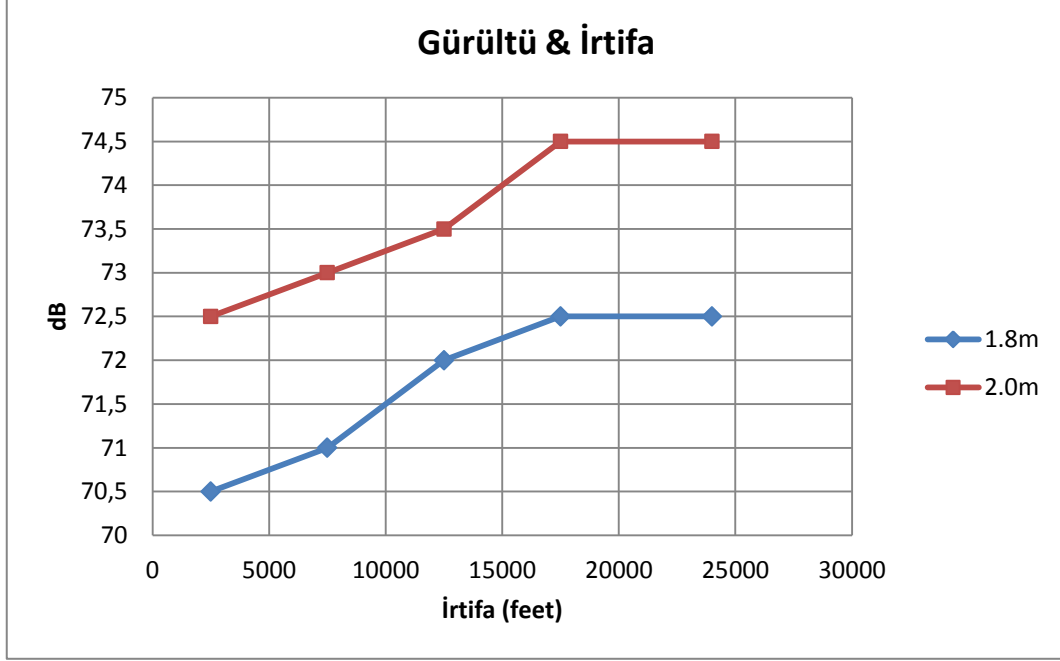


Şekil 5.3. Tırmanış durumundaki gürültü & irtifa grafiği

### 5.4 Seyahat Durumu Gürültü Seviyesi

Seyahat durumunda 2500-24000 ft arasındaki irtifalarda hesaplamalar yapılmış olup gürültü seviyesi aşağıdaki gibi bir davranış göstermektedir. Seyahat durumunun motorun güç durumu olarak diğer durumlara göre en düşük olduğu, gürültü seviyesinin 70 dB seviyesine yaklaşmasından bu grafikte çok net anlaşılmaktadır. Diğer grafiklerde

olduğu gibi büyük çaptaki pervanenin 2 dB civarında fazla gürültü çıkardığı görülebilmektedir. Motor gücünün düşmesiyle birlikte gürültü seviyeleri artış trendinden sabit bir değere geçmektedir.



Şekil 5.4. Seyahat durumundaki gürültü & irtifa grafiği

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada 2 farklı çaptaki pervanenin statik ve dinamik durumdaki performans parametrelerine ait hesaplamalar yapılmış olup bunun sonucunda oluşturulan grafiklerle pervanelerin kıyaslamaları yapılmıştır. Bu çalışmalar iki pervanenin de aynı motor üzerinde aynı koşullarda çalıştıkları düşünülerek gerçekleştirilmiştir.

Statik hesaplamalar yapılırken 2. Bölümde belirtilen 6 adet kritik parametre incelenmiş olup bunlar arasında etkinlik değeri, pervane pal açısı, pervane pal yükü ve sıkışabilirlik etkisi gibi 4 adet parametrenin birbirlerine karşı belirleyici bir üstünlüğü bulunamamıştır. Ancak pervane kök geometrisi ve blokaj etkisinin pervaneler üzerinde önemli bir performans etkisine sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Sonrasında bu parametrelerden elde edilen sonuçlarla yapılan statik durumdaki teorik itki hesapları bu iki pervanene arasındaki performans farkını ortaya çıkarmıştır. Gerçek durumla kıyaslayabilmek amacıyla bu pervanelerden alınan test verileri ve teorik hesaplamalar grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuç olarak 2.0 metre çapındaki pervanenin statik durumda aynı çalışma koşullarında 1.8 metrelik pervaneye göre daha yüksek performansta ve verimde çalışabildiği görülmüştür.

Ardından bu pervanelerin dinamik durumdaki performansları incelenmiş olup bu kısımda kalkış, tırmanış ve seyahat olmak üzere 3 farklı uçuş modu incelenmiştir. Farklı uçuş modları motor açısından farklı girdilere sahiptir. Kalkış modu incelendiğinde 10000 ft mertebesine kadar yapılan kalkışlarda verim açısından 2.0 m çapındaki pervanenin daha üst seviyede olduğu belirlenmiştir. Bu sayede bu pervane ile kalkış performansının daha hızlı ve yakıt açısından daha verimli olacağı öngörülmüştür. Bu performans avantajının yanında pervane çapının 20 cm uzun olmasından dolayı kalkış anında 1.8m çapındaki pervaneye göre yere değme riskinin daha yüksek olacağı belirlenmiştir. Tırmanış modu incelendiğinde kalkış moduna yakın sonuçların tekrar ettiği görülebilmektedir. Verim olarak 2.0 m çapındaki pervanenin %4.1 oranında daha verimli çalışabildiği görülebilmektedir. Son olarak seyahat modu incelenmiş ve bu modda 2 pervanenin de bu performansı gerçekleştirebilmek için diğer modlara göre daha büyük pale açılarında oldukları net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu sonuç ayrıca sabit hızlı pervanelerin çalışma prensibini de doğrulamıştır. Ayrıca bu modda ilk başlarda 2 pervane arasında çok fazla bir verim farkı olmasa da irtifanın artışına bağlı

olarak 2.0 m çapındaki pervanenin daha verimli rejimde kaldığı belirlenmiştir. Özellikle 15000 ft irtifasından sonra 1.8 m çapındaki pervanedeki düşüş dikkat çekmiştir. Önceki modlara kıyasla yüksek oranda olmasa da % 2.6 lık bir ortalama verim farkına sahiptir. Özellikle kalkış ve seyehat modundaki verim ve itki grafikleri incelendiğinde kritik irtifa denilen durumun etkisi de net bir şekilde görülebilmektedir. Grafiklere bakıldığında motorun kritik irtifa sonrasında büyük çaptaki pervaneye ihtiyaç duyduğu açık bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca pervaneler arasındaki çap farkından dolayı yüksek irtifalarda sıkışabilirlik faktörünün verim üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla pervane uç hızları her mod için ayrı ayrı hesaplanmış olup Şekil 2.7 de verilen grafiğe göre değerlendirme yapıldığında bu 2 pervanenin de mevcut irtifa ve motor koşullarında herhangi bir verim kaybı yaşamayacağı sonucuna varılmıştır.

Bu verim hesaplamalarının sonrasında 5. bölümde pervaneler gürültü açısından incelenmiş olup aynı şartlarda ne kadar gürültü farkı oluşturdukları hesaplanmıştır. Gerek kalkış modu gerek tırmanış ve seyehat modu olsun büyük çaptaki pervane her zaman için gürültü açısından deavantaj yaratmaktadır. Her modda da 1.5-2.5 dB arasında fazla gürültü oluşturmaktadır. Ortaya çıkan bu değerler FAR 36 da pervaneli uçaklar için izin verilen gürültü açısından incelenirse limit değerinin 80 dB olduğu görülmüştür. Tırmanış ve seyehat modunda her iki pervanenin de bu limit değerinin altında olduğu ancak kalkış modunda 2.0 m çapındaki pervanenin 81 dB değerine ulaşarak tam limitte olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak gürültü açısından bakıldığında bir miktar deavantaj yaşasa da büyük çaptaki pervanenin performans ve verim açısından daha önde olduğu ortaya çıkmıştır. Uçuş profili düşünüldüğünde bu pervanenin kullanılmasının birçok faktöre olumlu katkı yapacağı öngörülmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] Anon, (1963) Generalized method of propeller performance estimation, Hamilton standart report PDB 6101A, United Aircraft Corporation, June 1963
- [2] FAA, 2012, Aviation Maintenance Technician Handbook, Powerplant Volume-2 Chapter 7
- [3] FAA, 2003, Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, FAA-H-8083-25, U.S., Department of Transportation, Federal Aviation Administration Washington D.C7
- [4] Gray, W.H ve Mastrocola, N. (1943) Representative Operating Charts of Propellers Tested in the NACA 20-Foot Propeller Research Tunnel: NACA Wartime Report L-286
- [5] Hitchens, F. (2015). Propeller Aerodynamics: The History, Aerodynamics & Operation of Aircraft Propellers, Andrews UK Limited
- [6] Lowry, T. J. (1999), Performance of Light Aircraft, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1801 Alexander Bell Drive Reston, VA 20191
- [7] Reid, E. G. (1945), Studies of Blade Shank Form and Pitch Distribution for Constant Speed Propellers, NACA TN 947
- [8] Roskam, J (1989), Airplane design Part II: Preliminary Configuration Design and Integration of the Propulsion System, DAR Corporation 120 East Ninth Street, Suite 2, Lawrence, KS 66044
- [9] Roskam, J. ve Chuan-Tau E. L. (2003), Airplane Aerodynamics and Performance, Chapter 7, DAR Corporation, 1440 Wakarusa drive, Suite 500, Lawrence, Kansas 66049
- [10] Torenbeek, E. (1982), Synthesis of subsonic airplane design, Kluwer Boston Inc, Hingham, Maine
- [11] Woan, C. J. (1977), Propeller Study, Part II: The design of propellers for minimum noise; NASA CR-155005

- [12] Cavcar, M. (2004). Propeller.  
<https://www.scribd.com/document/230664341/Propeller>
- [13] MEB, (2011). Temel Pervane, Bireysel Öğrenme notu, Ankara  
[http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/TemelPervane.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/TemelPervane.pdf)
- [14] Yükselen, pervane ders notları, Pervane teorisi, Bölüm11  
<http://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/11-%20Pervane%20teorisi.pdf>
- [15] <http://www.enginehistory.org/Propellers/Governors/hydgov.shtml/>  
(Erişim tarihi 01.03.2017)
- [16] [http://www.epi-eng.com/propeller\\_technology/selecting\\_a\\_propeller.htm](http://www.epi-eng.com/propeller_technology/selecting_a_propeller.htm)  
(Erişim tarihi 01.03.2017)
- [17] [http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/props.htm](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/props.htm)  
(Erişim tarihi 01.03.2017)
- [18] [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-thrust-stand.html?\\_\\_store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-thrust-stand.html?__store=en_us)  
(Erişim tarihi 01.03.2017)
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cessna\\_172](https://en.wikipedia.org/wiki/Cessna_172)  
(Erişim tarihi 01.03.2017)
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Atomics\\_MQ-1\\_Predator](https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator)  
(Erişim tarihi 01.03.2017)