

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİNİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN MOTORLARIN
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

CAFER SOLUM

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF.DR. HASAN ALPAY HEPERKAN**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİNİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN MOTORLARIN
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

Cafer SOLUM tarafından hazırlanan tez çalışması 03.07.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof.Dr. Hasan Alpay HEPERKAN
Aydın Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Oktay ÖZCAN
Aydın Üniversitesi

Prof.Dr. Galip TEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Z. Düriye BİLGE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Hasan Rıza GÜVEN
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Son dönemde insansız hava aracı (İHA) teknolojisi, sağladığı avantajlardan dolayı ilgi odağı olmaya başlamıştır. Bu hava aracının tasarımı esnasında, önemli elmanlarından biri olan motor seçimi önem arz etmektedir. İHA'nın kullanım amacına göre pervaneli veya jet motoru tercihi yapılabilir. Eğer İHA'nın hızlı olması isteniyorsa jet motoru tercihi yapılır. Bu çalışmada da mikro jet motorlu bir İHA'nın tasarımı esnasında mevcut diğer İHA'larla performans kıyaslaması yapılmış, seçilen motorla diğer İHA'lara göre iyi performans sergilediği tespit edilmiştir.

Mikro jet motorların kullanım amacına ve ekonomikliğine göre uzun ya da kısa ömürlü olurlar. Bu çalışmada da radyal akışlı mikro jet motoru türbininin İHA çalışma şartlarına göre ısı taşınım katsayısı hesaplanmış ve türbin soğutma etkisi incelenmiştir. Mikro jet motor tasarımcılarına bir fikir vermesi açısından bu çalışma da tez içerisinde detaylı olarak anlatılmıştır.

Yıldız Teknik Üniversitesi'nde doktora çalışmasını tamamlamamda emeği geçen tez danışmanım sayın Prof.Dr. Hasan Alpay HEPERKAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Uzun süren bu çalışmayı tamamlama sürecinde sergilediği destekten ötürü sevgili eşim Sefa SOLUM ve gösterdikleri anlayıştan dolayı değerli evlatlarım Efe SOLUM ve Ali SOLUM'a teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyarım.

Temmuz, 2018

Cafer SOLUM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Orijinal Katkı.....	7
BÖLÜM 2.....	9
İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA)	9
2.1 İHA'ların Kullanım Amaçları	11
2.2 İHA'ların Sınıflandırılması.....	12
BÖLÜM 3.....	21
İHA MOTORLARI.....	21
3.1 Mikro Jet Motorları.....	24
3.2 Mikro Jet Motorlu İHA'nın Diğer İHA'larla Performans Kıyaslaması	26
3.2.1 Teorik İtki Hesaplamaları	27
3.2.2 Model İHA için Motor Seçim Hesaplamaları	29
3.2.3 Grafikler ve Değerlendirme	32
3.2.4 Öneriler.....	40
3.2.5 Sonuçlar	41

BÖLÜM 4.....	43
MİKRO JET MOTORU RADYAL AKIŞLI TÜRBİN KANADI ISI İNCELEMESİ.....	43
4.1 Radyal Akışlı Türbinler	43
4.1.1 Çalışma Prensipleri.....	44
4.1.2 Kademeli Aerodinamiği, Aerotermodinamiği ve Hız Profilleri	45
4.1.3 Mikro Jet Motorları.....	47
4.2 Problem Tanımı.....	47
4.3 Sayısal Analiz Yöntemi	47
4.4 Türbinin Geometrik Modeli	50
4.5 Ağ Oluşturma	52
4.5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Ağ Oluşturma	52
4.5.1.1 Parçanın Modelinin Çizilmesi	53
4.5.1.2 Eleman Tipi ve Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	54
4.5.1.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	54
4.5.1.4 Modelde Ağ Oluşturma (Mesh).....	54
4.5.1.5 Çözüm.....	54
4.5.1.6 Son İşlem	54
4.5.1.7 Yeniden Ağ Oluşturma	54
4.5.1.8 Sonuçların Değerlendirilmesi	55
4.5.1.9 Ağ Oluşturma İşlemi Sırasında Karşılaşılabilecek Bazı Terimler... ..	57
4.5.2 Uygun Ağ Oluşturma	57
4.5.2.1 Ekstra Kaba (Extra Coarse) Ağ.....	58
4.5.2.2 Daha Kaba (Coarser) Ağ	59
4.5.2.3 Kaba (Coarse) Ağ	61
4.5.2.4 Normal (Normal) Ağ	62
4.5.2.5 İnce (Fine) Ağ.....	63
4.6 Sınır Şartları ve Doğrulama Çalışması	64
4.7 Akış Modellemesi.....	65
4.8 Problemin Çözümü.....	71
4.9 Sonuçlar ve Değerlendirmeler	72
4.9.1 Türbin Dış Yüzeyi h Tanımlaması	72
4.9.2 Türbin Dış ve Yan Yüzeyi h Tanımlaması	85
4.9.3 Türbin Dış ve Yan Yüzeyi ile Merkez Kısmı h Tanımlaması.....	96
4.9.4 Türbin Dış ve Yan Yüzeyi ile Merkez Kısmı h Tanımlamasının Karşılaştırılması	107
BÖLÜM 5.....	126
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	126
KAYNAKLAR.....	129
ÖZGEÇMİŞ.....	133

SİMGE LİSTESİ

A	Alan (m^2)
C_a	Mikro jet motoruna giren hava hızı (m/s)
C_p	Sabit basınç özgül ısı kapasitesi [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]
d	Çap (m)
f	Gerçek Yakıt-Hava oranı
F	Kuvvet (N)
F_{st}	Özgül itme kuvveti (N.s/kg)
h	Isı taşınım katsayısı [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]
k	Isı iletim katsayısı [$W/(m \cdot K)$]
k	Türbülans kinetik enerjisi (kJ)
L	Uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
Nu_d	Çapa göre Nusselt sayısı
Nu_L	Uzunluğa göre Nusselt sayısı
P	Basınç (kPa)
P_0	Durma basıncı (kPa)
P_a	Atmosferik basınç (kPa)
P_c	Kritik basınç (kPa)
P_{rc}	Kompresör sıkıştırma oranı
P_{r_n}	Nozul basınç oranı
P_{r_T}	Türbin basınç oranı
Pr	Prandtl sayısı
Re_d	Çapa göre Reynolds sayısı
Re_L	Uzunluğa göre Reynolds sayısı
sfc	Özgül yakıt tüketimi (kg/N/saat)
S	Deformasyon hız tensörü
q	Isı akısı (W)
Q	Isı (kJ)
Q_{ted}	Termoelastik sönümlleme ısı kaynağı (kJ)
T	Sıcaklık (K)
T_0	Durma sıcaklığı (K)
T_a	Atmosferik sıcaklık (K)
u	Hız (m/s)
U_m	Çalışma şartına göre İHA hızı (m/s)
U_∞	İHA hızı (m/s)

β_n	Nozul basınç oranı
β_T	Türbin basınç oranı
ε	Türbülans sönümlleme oranı
η_B	Yanma verimi
η_i	İzentropik verim
η_m	Mekanik verim
η_n	Nozul verimi
μ	Dinamik vizkozite (N.s/m)
ν	Kinematik vizkozite (m ² /s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
τ	Viskoz gerilim tensörü
ΔP_B	Yanma odası basınç kaybı (kPa)



KISALTMA LİSTESİ

0D	Sıfır Boyut
3D	Üç Boyut
CBT	Basit Sabit Basınç Gaz Türbini
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
HALE	High Altitude Long Endurance- Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalma
İHA	İnsansız Hava Aracı
İHMA	İnsansız Hava Muharebe Aracı
MALE	Medium Altitude Long Endurance- Orta İrtifa Uzun Havada Kalma
MTOW	Maximum Take-Off Weight- Maksimum Kalkış Ağırlığı
NBC	Nükleer Biyolojik Kimyasal
RPV	Remote Piloted Vehicle- Uzaktan Komutalı Araç
SDS	Serbestlik Derecesi Sayısı
UAV	Unmanned Air Vehicle- İnsansız Hava Aracı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 İlk insansız hava aracının kullanım şekli	10
Şekil 2. 2 MQ-1 (Predator)	11
Şekil 2. 3 Türk özgün insansız hava aracı (TİHA)	12
Şekil 2. 4 Bayraktar mini İHA	12
Şekil 2. 5 Global Hawk	13
Şekil 2. 6 Mikro İHA ve kontrol paneli	14
Şekil 3. 1 Rolls-Roys AE3007H motoru	21
Şekil 3. 2 Havada kalma süresine göre harcanan yakıt oranı grafiği	23
Şekil 3. 3 Motor türlerinin itki-ağırlık karşılaştırması	23
Şekil 3. 4 Piston ve jet motorlarının max. havada kalma ve boş ağırlık karşılaştırması	24
Şekil 3. 5 EvoJet booster 160 VX	26
Şekil 3. 6 Viper jet model uçağı	26
Şekil 3. 7 Basit sabit basınç gaz türbininin (CBT) sistem şeması	27
Şekil 3. 8 Evojet booster motoru sıcaklık-devir grafiği	31
Şekil 3. 9 Evojet booster motoru devir-itki grafiği	32
Şekil 3. 10 İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık karşılaştırılması	33
Şekil 3. 11 İHA'ların model İHA ile itki-yüklü ağırlık karşılaştırılması-1	33
Şekil 3. 12 İHA'ların model İHA ile itki-yüklü ağırlık karşılaştırılması-2	34
Şekil 3. 13 İHA'ların model İHA ile yüklü ağırlık-kanat açıklığı karşılaştırılması-1	35
Şekil 3. 14 İHA'ların model İHA ile yüklü ağırlık-kanat açıklığı karşılaştırılması-2	35
Şekil 3. 15 İHA'ların model İHA ile itki-hız karşılaştırılması	36
Şekil 3. 16 Pervaneli İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması	37
Şekil 3. 17 Jet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması	38
Şekil 3. 18 Mikrojet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması	38
Şekil 3. 19 Pervaneli İHA'ların model İHA ile hız-itki karşılaştırması	39
Şekil 3. 20 Jet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-itki karşılaştırması	40
Şekil 3. 21 Mikrojet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-itki karşılaştırması	40
Şekil 4. 1 Radyal akışlı türbin impelleri ve radyal akışlı türbin kesiti	44
Şekil 4. 2 Radyal akışlı türbinde akış	44
Şekil 4. 3 Karışık içe akışlı radyal türbin donanımları ve hız profilleri	45
Şekil 4. 4 Dirsekli içe akışlı tip radyal türbin	46

Şekil 4. 5	Karışık içe akışlı radyal türbin	46
Şekil 4. 6	Radyal akışlı mikro gaz türbinin katı modelleme geometrisi	50
Şekil 4. 7	Radyal akışlı mikro gaz türbinin tek kanat için akış alanı geometrisi	51
Şekil 4. 8	Türbin rotor kanat teknik çizim geometrisi	51
Şekil 4. 9	Rotor tek kanat ve akış alanı için ekstra kaba ağ oluşturma.....	58
Şekil 4. 10	Rotor tek kanat ekstra kaba ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı	59
Şekil 4. 11	Rotor tek kanat ve akış alanı için daha kaba ağ oluşturma	60
Şekil 4. 12	Rotor tek kanat daha kaba ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı	60
Şekil 4. 13	Rotor tek kanat ve akış alanı için kaba ağ oluşturma	61
Şekil 4. 14	Rotor tek kanat kaba ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı	61
Şekil 4. 15	Rotor tek kanat ve akış alanı için normal ağ oluşturma	62
Şekil 4. 16	Rotor tek kanat normal ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı ..	63
Şekil 4. 17	Rotor tek kanat ve akış alanı için ince ağ oluşturma	63
Şekil 4. 18	Rotor tek kanat ince ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı	64
Şekil 4. 19	Comsol multifizik ara yüzü başlangıç seçimi.....	66
Şekil 4. 20	Comsol multifizik ara yüzü boyut seçimi	66
Şekil 4. 21	Comsol multifizik ara yüzü fizik komponentlerinin seçimi	67
Şekil 4. 22	Comsol multifizik ara yüzü bu çalışma için fizik komponentlerinin seçimi..	67
Şekil 4. 23	Comsol multifizik ara yüzü çalışma şartı seçimi.....	68
Şekil 4. 24	Comsol multifizik fizik ve çalışma şartı seçimi sonrası ara yüzü	68
Şekil 4. 25	Comsola dışarıdan geometri transferi	69
Şekil 4. 26	Geometriye kütüphaneden malzeme tanımlaması	69
Şekil 4. 27	Sisteme ve geometriye akışkan girişi tanımlaması	71
Şekil 4. 28	Programın çalışması esnasında hata-iterasyon penceresi.....	72
Şekil 4. 29	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	75
Şekil 4. 30	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre eş sıcaklık dağılımı	75
Şekil 4. 31	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre katman yöntemiyle eş hız dağılımı	76
Şekil 4. 32	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre akım çizgileri gösterimi	76
Şekil 4. 33	Akış bölgesinde ve kanat yüzeylerinde meydana gelen eş basınç dağılımı .	77
Şekil 4. 34	İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	78
Şekil 4. 35	İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı.....	78
Şekil 4. 36	İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	79
Şekil 4. 37	İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı..	80
Şekil 4. 38	İHA'nın 500 m havadaki duruma göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	80
Şekil 4. 39	İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	81
Şekil 4. 40	İHA'nın 1000 m havadaki duruma göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	81

Şekil 4. 41	İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	82
Şekil 4. 42	İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	82
Şekil 4. 43	İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	83
Şekil 4. 44	İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	83
Şekil 4. 45	İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	84
Şekil 4. 46	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	87
Şekil 4. 47	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre eş sıcaklık dağılımı	88
Şekil 4. 48	İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	88
Şekil 4. 49	İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	89
Şekil 4. 50	İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	89
Şekil 4. 51	İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı ..	90
Şekil 4. 52	İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	90
Şekil 4. 53	İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	91
Şekil 4. 54	İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	92
Şekil 4. 55	İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	92
Şekil 4. 56	İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	93
Şekil 4. 57	İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	94
Şekil 4. 58	İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	94
Şekil 4. 59	İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	95
Şekil 4. 60	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	98
Şekil 4. 61	İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	99
Şekil 4. 62	İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	100
Şekil 4. 63	İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	100
Şekil 4. 64	İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı	101
Şekil 4. 65	İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	102

Şekil 4. 66	İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	102
Şekil 4. 67	İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	103
Şekil 4. 68	İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	103
Şekil 4. 69	İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	104
Şekil 4. 70	İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	105
Şekil 4. 71	İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	105
Şekil 4. 72	İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı.....	106
Şekil 4. 73	İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı	106
Şekil 4. 74	Kanat akışkan giriş bölgesi sıcaklık elde edilen noktalar	108
Şekil 4. 75	Kanat orta bölgesi sıcaklık elde edilen noktalar	108
Şekil 4. 76	Kanat akışkan çıkış bölgesi sıcaklık elde edilen noktalar	109
Şekil 4. 77	Yerde sabit çalışma şartına göre üç durumun karşılaştırması	116
Şekil 4. 78	Yerde hızlanma şartına göre üç durumun karşılaştırması	117
Şekil 4. 79	Kalkış şartına göre üç durumun karşılaştırması	117
Şekil 4. 80	Havada 500 m şartına göre üç durumun karşılaştırması	118
Şekil 4. 81	Havada 1000 m şartına göre üç durumun karşılaştırması	118
Şekil 4. 82	Havada 3000 m şartına göre üç durumun karşılaştırması	119
Şekil 4. 83	Havada 5000 m şartına göre üç durumun karşılaştırması	119

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Boyut ve menzillerine göre İHA sınıflarının genel özellikleri	15
Çizelge 2. 2 Keşif-Gözetleme sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımı	15
Çizelge 2. 3 Çok amaçlı sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımı.....	16
Çizelge 2. 4 Taarruz sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımları.....	17
Çizelge 2. 5 Farklı ülkelere ait pervaneli İHA'lar.....	19
Çizelge 2. 6 Farklı ülkelere ait jet motorlu İHA'lar	19
Çizelge 2. 7 Farklı ülkelere ait mikrojet motorlu İHA'lar	20
Çizelge 3. 1 İHA tiplerine göre motor çeşitleri	22
Çizelge 4. 1 Türbin dış koruması için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler	74
Çizelge 4. 2 Türbin dış ve yan yüzeyi için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler	86
Çizelge 4. 3 Türbin merkez kısmı için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler	97
Çizelge 4. 4 İHA'nın yerde sabit çalışma durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri.....	109
Çizelge 4. 5 İHA'nın yerde hızlanma durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri.....	110
Çizelge 4. 6 İHA'nın kalkış durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri	110
Çizelge 4. 7 İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri	111
Çizelge 4. 8 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri	111
Çizelge 4. 9 İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri	112
Çizelge 4. 10 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri	112

MİNİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN MOTORLARIN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Cafer SOLUM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

İlk olarak 19. yüz yılda balon olarak kullanılmaya başlayan insansız hava aracı (İHA), günümüzde önemli bir yere sahip olan teknolojinin kullanım alanları incelendiğinde sağladığı avantajların göz ardı edilemeyecek derecede büyük olduğu görülmektedir. Özellikle 1990'lı yıllardan sonra teknoloji alanındaki yüksek ivmeli gelişmeler, ülkelerin, askeri stratejilerini tekrar gözden geçirmelerine neden olmuştur. Gün geçtikçe ağır sanayi ürünlerinin yerini daha hafif, hızlı ve daha etkili araçlar almaya başlamıştır. Bu gelişmelerden birisi de özellikle istihbarat amaçlı yürütülen uzay çalışmaları ve insansız hava araçlarıdır. İnsansız hava araçları insan bünyesinin dayanamayacağı görevleri yapabilecek kapasiteye ulaşmıştır. Bu görevlerin icrası tasarlanan aracın karakteristiğine ve performansına bağlıdır. Bir insansız hava aracının göreve yönelik performansı birçok değişkene bağlıdır. Tasarım aşamasında aracın yapacağı görev göz önünde bulundurulmalı ve aracın tüm parçaları buna göre optimize edilmelidir. Bu bağlamda aracın parçaları arasında en kritik parça motordur. Aracın motorunun seçimi veya tasarlanması aşamasında motorun kriterlerinin ve performansının çok iyi incelenmesi bir şarttır. Bu çalışmada model bir İHA ile mevcut İHA'lar ve motorlarının itki, ağırlık, hız, kanat açıklığı ve havada kalış süresi gibi değerler göz önüne alınarak performans incelemesinde bulunulmuştur. Özellikle son dönemlerde ilgi odağı olmaya başlayan mikro jet motorlarının diğer insansız hava araç motorlarıyla performans kıyaslaması yapılmıştır.

Bu çalışmada ayrıca model İHA'nın motor performansının incelemesinin devamında ise model İHA'da kullanımı amaçlanmış bir radyal akışlı mikro jet motor türbininin kanatlarının ısıya karşı gösterdikleri davranışları COMSOL bilgisayar analiz programıyla incelenmiştir. Sıcaklık değişiminin kanat üzerindeki etkilerini incelemek için, İHA'nın 7 farklı uçuş gerçek şartları göz önünde bulundurularak üç ayrı ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Türbin dış yüzeyi, türbin dış ve yan yüzeyi, türbin dış ve yan yüzey ile merkez kısmı için hesaplanan ısı transfer katsayısı sisteme tanımlanarak kanat üzerindeki sıcaklık analizi yapılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur. İHA hızı ve yüksekliği arttıkça h değeri artacağından soğuma etkisinin de arttığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İHA, jet motoru, radyal akışlı mikro jet motoru türbini, COMSOL, ısı taşınım katsayısı



**INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF ENGINES USED IN MINI
UNMANNED AERIAL VEHICLES AND OPTIMIZATION**

Cafer SOLUM

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN

Unmanned aerial vehicle (UAV), which first began to be used as a balloon in the 19th century, seems to be large enough to ignore the advantages that today's technology has when it examines areas of use. Especially after the 1990s, high-acceleration developments in technology have caused countries to repeat military strategies. The day has begun to take lighter, faster and more effective tools to replace heavy industrial products. One of these developments is space studies and unmanned aerial vehicles, especially for intelligence purposes. Unmanned aerial vehicles have reached the capacity to do missions that the human body can not tolerate. The performance of these tasks depends on the character and performance of the vehicle designed. The relative performance of an unmanned aerial vehicle depends on many variables. In the design phase, the task to be performed by the vehicle must be considered and all parts of the vehicle must be optimized accordingly. In this context, the most critical part among the parts of the vehicle is the motive. It is a condition that the criteria of the motor should be well defined and its performance should be examined very carefully in the course of the selection or design of the vehicle's engine. In this study, the performance of the model was evaluated by taking into consideration the values of the model of a UAV and the current UAVs and motors such as thrust, weight, speed, wing clearance and duration of the air. In particular, the performance comparison of micro jet engines with other unmanned aerial vehicle engines, which have recently become a focus of attention, has been made.

In this study, the behavior of the wings of a radial flow micro jet engine turbine intended for use in the UAV was investigated by the COMSOL computer analysis program, while the model UAV was continuing to examine the engine performance. In order to examine the effect of the change of temperature on the wing, three different heat transfer coefficients were calculated taking into consideration the 7 different flight real conditions of the UAV. The heat transfer coefficients for the turbine outer surface, turbine outer and side surfaces, turbine outer and side surfaces and the central portion were defined in the system and temperature analysis on the blade was made and evaluated. It has been observed that as the speed and height increase, the value of h increases and the effect of cooling increases.

Keywords: UAV, jet engine, radial inflow micro jet engine turbine, COMSOL, convection heat transfer coefficient



1.1 Literatür Özeti

Günümüzde önemli bir yere sahip olan insansız hava aracı (İHA) teknolojisinin kullanım alanları incelendiğinde sağladığı avantajların göz ardı edilemeyecek derecede büyük olduğu görülmektedir. İnsansız hava aracı sistemleri genel olarak; keşif, gözetleme, hedef tespit/izleme, harp sahası hasar tespit, elektronik harp, haberleşme, röle, fiziksel saldırı ve tahrip, mayın tespit ve imha, NBC kirlilik tespiti, yangın tespit ve izleme, atmosferik gözlem, arama/kurtarma ve sivil güvenlik, sınır güvenliği, tarımsal ilaçlama, bilimsel araştırmalar için gerekli bilgi toplama işlemlerinde kullanılmak üzere üretilmektedir.

Hava araçlarının en önemli bileşenlerinden biri olan itki sisteminin seçimi, hava aracının performansını hatırı sayılır şekilde etkileyecektir. İHA'larda kullanım amaçları ve boyutlarına göre kullanılabilecek motor tipleri değişmektedir. Mikro İHA'ların boyutları çok küçük olduğundan zaten elektrikli motor dışında motor tipinin kullanılması mümkün değildir. İHA menzili büyüdükçe daha fazla itkiye ihtiyaç duyulacağından bu itkiyi sağlayacak motor tercih edilmelidir. Pistonlu motorlar genellikle mini boyut ve orta menzil için, turboprop ve turbo jet gibi motorlar ise mini, orta ve uzun menzilli İHA'lar için kullanılmaktadır.

Pistonlu motorların icat edilmesine rağmen, hava debisinin azlığı, birim itki başına motor ağırlığının fazla oluşu ve yüksek hızlara imkân vermemesi, alternatif motor arayışına sebep olmuştur. Bu arayışların bir sonucu, 1913 yılında Rene Lorin tarafından ilk jet motoru patenti alınmıştır. Bazı araştırmacılara göre ilk jet motorlu uçak 1939

yılında uçurulan H 178 olmuş, bunu 1940 yılında CC-2 ve diğerleri izlemiştir. Modern gaz türbini motorlarının ilki F. Whittle tarafından imal edilmiştir. Bunu, Rolls Royce Welland, Devent, Nen ve Dart motorları izlemiştir. Sonraki yıllarda ortaya çıkan artyakıcılı, çift  aftlı, bypass turbo jetler, turbo fanlar ve turbo prop motorlar F. Whittle motorunun türevleridir. 1990'lı yılların jet motorları genellikle gaz türbini esaslı olmasına rağmen, ramjet, pulsjet, turboramjet gibi daha ileri seviyede itkili motorlara da rastlanılmaktadır [1].

1939 yılında ilk jet motorlu uçağın u urulmasından günümüze kadar geçen sürede, jet motorlarının performans gelişimiyle ilgili birçok çalışma yapılmış, bu araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. İlk ba larda sadece deneysel yapılan çalışmalar ki bu hem çok u ra  ve zaman alan hem de yeterli ve doğru materyal olmadığında istenilen sonuçların doğru elde edilmesini güçleştirmektedir, son yıllarda güçlü bilgisayarların ve kapsamlı bilgisayar programlarının ortaya çıkmasıyla artık sayısal olarak da yapılmaya ba lanmı tır. Yapılan bu araştırmalardan yüzden fazlası bu çalışma esnasında incelemeye tabi tutulmuş olup bunlardan bir ka ından burada yer verilmiştir. Dai vd. [2], bir radyal türbini kanadındaki i  akış alanını sayısal ve deneysel kar ıla tırmalarını yapmışlardır.  alı malarında, deneysel ve sayısal sonuçların büyük oranda birbiriyle uyumlu olduğunu görmüşlerdir ve kanat girişindeki akış dağılımını ve giriş açısının etkilerini, sayısal ve deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçları ortaya koymuşlardır.

Radyal t rbimli jet motorları genelde güç elde etme veya yardımcı güç elemanı olarak kullanılırlar. Bu nedenle radyal türbini tasarımı önem arz eder ve bu yönde de araştırmacıların birçok çalışması mevcuttur. Serrano vd. [3], içten yanmalı motorların modellenmesi için sıfır ve bir boyutlu gaz dinamik kodlarını kullanarak uygun turbo arjır radyal türbini modellemesini yapmışlardır. Modeli, çok geçerli olan ölçülmüş türbini karakteristiklerine dayandırarak olu turmu lardır. Bununla birlikte, genellikle motorlar bu bölgelerde çalıştığı için, türbini çalışma haritalarının içerinden farklı olarak tahmini çalışma şartlarında da modelin kabiliyetli olduğunu ortaya koymuşlardır. Yine turbo arjır uygulamasına örnek bir çalışmayı da Marelli ve Capobianco [4] yapmıştır.  alı malarında, otomotiv motorlarının turbo arjırlarında tipik olarak meydana gelen kararsız akış şartları altındaki radyal türbini verimine odaklanmışlardır.

Mikro jet motorları hava araçları üzerinde yer testlerine göre farklı performanslar sergileyebilirler. Bu nedenle tasarım ve test aşamalarında gerçek çalışma şartlarının da göz önüne alınması gerekir. Bu çalışmada dikkate alınan literatürlerden birisi de Samar ve Rehman'nın [5] yapmış olduğu çalışmadır. Çalışmalarında bir insansız hava aracının kontrol tasarım planı ve entegre yönlendirme ile uçuş testlerinin sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Kalkış/İniş ve yükseltelerin gerçek zaman hesaplaması için bir yer takip algoritması içeren dikey uçak referans yörüngesinin hesaplamasını tartışmışlardır. Bu algoritmanın özellikle çevrimiçi hesaplama uygun olduğunu bu yüzden de otonom uçuş için kullanışlı olduğunu bildirmişlerdir.

Eksenel türbinli jet motorları üzerine birçok araştırma yapılmış olsa da son dönemlerde radyal türbinli jet motorları üzerine de birçok araştırma mevcuttur. Bunlardan özellikle mikro jet motorlarının performans iyileştirmesine yönelik araştırmalar artmış durumdadır. QingHua vd. [6], radyal akışlı mikro türbinin rotor kanadı ile dış muhafaza arasındaki boşlukta akış sızıntı karakteristiğini incelemişlerdir. Çalışmalarında, rotor kanadı ile dış muhafaza arasındaki boşlukta bağlı hareketin sebep olduğu sürtünmeli akış ve rotor kanadı ucunun basınçlı tarafı ile vakum tarafı arasındaki basınç farkı, kanat ucu boşluğundaki akış sızıntısı üzerinde önemli rol oynadıklarını belirtmişlerdir. Rotor kanat ucu hızı arttıkça ve boşluk yüksekliği azaldıkça sürtünmeli akış etkisinin daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

Mikro jet motorlarında akışkanın türbine giriş açısı, türbin kademeleri ve kanat sayısı, gibi parametreler motor performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Cho vd. [7], küçük ölçekli radyal akışlı bir türbinin kısmi giriş karakteristikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Geometrik parametreler üzerine kurulu olan türbinin kısmi akış girişi ile performans karakteristiklerini araştırmak için türbin farklı kanat ucu boşluğu ve nozul giriş açısı ile testi yapılmıştır. İlave olarak kısmi giriş oranlarına çalışılmış ve kısmi giriş ile türbin kademesi boyunca ana akış yayılımının etkilerini araştırmak için her bir kademenin türbin çıkış gücü ölçülmüştür. Değişik çalışma şartlarına göre türbin performansını karşılaştırmak için türbin performansını geniş dönme hız aralıklarından elde etmişlerdir. Toplam performansın karşılaştırmak için net çıkış özgül torkunu da ölçmüşlerdir. Hesaplanan türbin performansı tahmini türbin performansı ile

karşılaştırılmıştır. Hesaplanan sonuçların test sonuçlarıyla uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Mikro jet motorlarının üretiminden önce bilgisayar ortamında gelişmiş programlar sayesinde analizlerinin yapılması hem zamandan tasarruf hem de sonradan meydana gelebilecek sorunlar büyük oranda önlenabilmektedir. Xie vd. [8], hesaplamalı katı mekaniği ve hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanarak bir radyal akışlı mikro gaz türbininin akış-sıcaklık-yapısal analizini yapmışlardır. İlk önce, hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanarak kanat ve nozul geçişlerinin akış ve sıcaklık alanlarının birleşik akış-sıcaklık analizini yapmışlardır. Farklı bölgelerin akış ve ısı transfer karakteristiklerini detaylı olarak analiz etmişlerdir. Termal ve aerodinamik yükleri, sıcaklık alanı ve basınç dağılımından elde etmişlerdir. Kanadın gerilme dağılımları, uç yük durumu göz önünde bulundurularak hesaplamalı katı mekaniğini kullanarak incelemişlerdir: Termal yük, merkezkaç yükü ile birleştirilmiş aerodinamik yük ve üç tip yük. Akış, sıcaklık ve stresin ayrıntılı parametrelerini elde edip ve analiz etmişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçların, radyal gaz türbini tasarımının daha fazla araştırılması için yararlı bir bilgi tabanı sağladığını ifade etmişlerdir.

Enerji maliyetinin yüksek olduğu günümüzde mikro jet motorların kullandığı yakıtlarda önem arz etmektedir. Bu nedenle son yıllardaki araştırmaların bir bölümü jet motorlarında kullanılan yakıtlar üzerine olmuştur. Calabria vd. [9], sıvı yakıtlarla beslenen bir mikro gaz türbininin sayısal çalışmasını yapmışlardır. Çalışmalarında sıvı yakıtlarla güçlendirilmek üzere uygun şekilde değiştirilmiş mikro-gaz türbinin potansiyellerini ve kritik sorunlarını değerlendirmişlerdir. Gazlı yakıtlar için tasarlanan versiyona göre sıvı yakıtlılarla arasındaki ana fark, yanma odası ve yanma odasındaki yakıt enjeksiyon sistemi ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Sayısal çalışmayı, hem OD (sıfır boyut) eşleştirme analizi hem de yakıcının bir 3D (üç boyut) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Dönen bileşenlerin çalışma haritaları ile birleşen termodinamik model, mikro-gaz türbininin gaz halindeki yakıtla çalışması sırasında toplanan deneysel verileri kullanarak kalibre etmişlerdir. OD modeli ile hesaplanan operatif parametreleri, sıvı yakıtlarla beslenen mikro-gaz türbininin davranışını simüle etmek ve böylece CFD analizinde kullanılacak başlangıç ve sınır koşullarını elde etmek için kullanmışlardır. Sıvı yakıtların yanma sürecini analiz

etmişlerdir ve değişen yüklerdeki ana farklılıkları, yanma odasındaki hava akışlarının sıcaklık ve hız profillerini, türbin giriş sıcaklığını ve egzoz gaz konsantrasyonunu ortalama değerleri açısından tartışmışlardır. Enjeksiyon sisteminin özelliklerine ilişkin bir ön çalışmayı da rapor etmişlerdir.

Marsan ve Moreau [10], bir radyal türbinde akış yapısının analizini çalışmışlardır. Akustik bir analitik modelin geliştirilmesine rehberlik eden ve potansiyel akustik kaynaklar olan aerodinamik yapıları tanımlamak için, kararlı statü ve kararsız sayısal simülasyonlar sayesinde, bir vanalı stator ve bir merkezci çarktan oluşan bir radyal akışlı türbinin akışını çalışmışlardır. Ana akış yapılarını ve ikincil akışlar ilk olarak tanımlamışlar ve daha sonra bıçak ve kanat yüzey basınç dalgalanmalarına bağlamışlardır. Rotor stator etkileşimini, ana potansiyel akustik kaynağı olarak tanımlamışlardır. Uç sızıntısı akışını ayrıntılı olarak incelemiş ve sadece bu çalışma noktasında ikincil öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. İki ana rotor-stator etkileşim mekanizmasının, statorun pervane kanatları üzerindeki etkisi ve çarkın kanatları üzerindeki stator firar kenarına bağlı şokun süprüntüsü olduğunu ifade etmişlerdir.

Khader ve Sayma [11], bir radyal akışlı türbinin rotor göbeği yüzeyindeki üretilmiş riblet adındaki küçük çıkıntılarının, rotor geçitlerindeki akış üzerindeki etkileri ve sürtünme azaltımına olan katkılarının ayrıntılı bir çalışmasını yapmışlardır. Bu özelliklerin tasarım noktası koşullarındaki etkilerini incelemek için sayısal analiz kullanmışlardır. Maksimum sürtünme azalmasının elde edildiği riblet geometrisini belirlemek için farklı yükseklik ve aralıklara sahip ribletleri incelemişlerdir. Rotor giriş kanat yüksekliğine göre ribletlerin nispi yüksekliğini sonuçların genelleştirilmesi için tanıtmışlardır. Bu çalışmalarının sonunda, sonuçları literatürdeki mevcut verilerle karşılaştırmışlardır. Ribletlerin yerleştirilmesinin, göbek yüzeyindeki duvar kesme gerilimini azaltabildiğini ve rotor geçişi içinde akış yönünde vortisitenin artmasına katkıda bulunabileceğini bulmuşlardır. Ribletler arasındaki mesafenin performansları üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğunu, bunun da ele alınacak olan göbek yüzeyinin üzerindeki akış yönünde vorteksin büyüklüğüne bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Jet motorlarının keşif ve endüstride kullanımıyla birlikte bu motorlarının performansı gelişimiyle ilgili birçok çalışmayı da beraberinde getirmiştir. Küçük ölçekli gaz türbininde biyoyakıt kullanılarak emisyon karakterleri ve performansının

değerlendirilmesi [12], gaz türbin motorlarında yakıt tüketiminin minimize edilmesi için performans optimizasyonu [13], gaz türbinlerinin tarihsel sağlıklı bilgiler ışığında büyük bakımdan önceki performanslarının incelenmesi [14], küçük gaz türbini teknolojisi tanıtımı [15], ultra, mikro ve nano gaz türbinlerinin muhtemel dizaynı ve ön görülmesi hesaplamalarının termodinamiksel fizibilite çalışması [16], bir jet motoru yakıt kontrolörlerinin değerlendirmesi için gerçek zamanlı multi-oran HIL simülasyon platformu [17], küçük ölçekli bir turbo jet motorunun deneysel ve nümerik analizi [18], araştırma amaçlı küçük bir turbo jet motorunun tasarımı, imalatı ve çalıştırılması [19], T56 Turboprop motorunun ekserji ekonomisi, sürdürülebilirlik ve çevresel tahribat yönünden maliyet analizi [20], insansız hava araçları uygulamaları için küçük turbojet motorunda bazı tasarım parametrelerinin ekserjetik etkileri [21], bu çalışmalardan bazılarıdır.

İkinci Dünya Savaşından beri jet motorlarının havacılıkta kullanımıyla birlikte gelişimine devam etmiş son yıllarda İHA'larda da kullanılmaya başlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte birçok bilimsel çalışma da yapılmıştır. MTE-D mikro türbin motorunun fırladıkları çalışma karakteristiği üzerinde araştırmalar [22], uçuş şartlarında bir jet motorunun yakıt kontrol ünitesinin takla atma testinde akşuatör donanımının kullanımı [23], jet motoru uygulamaları için açık hücre metal köpüklerinde ısı transferi ve basınç düşüşü üzerine çalışma [24], model bir jet motorunun yapımı ve test edilmesi [25], görev analizi sonucu bir savaş uçağının motor itki gereksiniminin belirlenmesi [26], konularında yapılan bu çalışmalar havacılık alanındaki birçok çalışmadan birkaç tanesidir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı İHA ve mikro jet motor alanında yapılan çalışmalara ilave katkı sağlamaktır. Tasarım aşamasındaki İHA'nın en önemli parçası olan motorun seçilmesi sonrası mevcut İHA'larla kıyaslaması yapılarak, İHA'nın başarılı olup olamayacağı öngörülmesi açısından bu çalışma büyük öneme sahiptir. Ayrıca İHA'larda kullanılan motor ömürleri ve performansları önem arz etmektedir. Bu çalışmada son dönemlerde ilgi duyulmaya başlanılan radyal türbinli mikro jet motorunun İHA'da kullanılması tasarlanarak, İHA çalışma şartlarına göre türbin kanadı ısı performans incelemesi yapılmıştır.

İHA'ların kullanım amaçları ve boyutlarına göre kullanılabilecek motor tipleri değişmektedir. Mikro İHA'ların boyutları çok küçük olduğundan zaten elektrikli motor dışında motor tipinin kullanılması mümkün değildir. İHA menzili büyüdükçe daha fazla itkiye ihtiyaç duyulacağından bu itkiyi sağlayacak motor tercih edilmelidir. Pistonlu motorlar genellikle mini boyut ve orta menzil için, turboprop ve turbojet gibi motorlar ise uzun menzilli İHA'lar için kullanılmaktadır.

Mini İHA'ların enerji gereksinimini bataryaların karşılaması artık uzak bir hayal gibi durmaktadır. Bu sebeple mikro jet motorları bu enerji gereksinimi karşılamak için güzel bir enerji ünitesi olabilir. Mikro jet motorunun İHA üzerinde kullanılması çok daha farklı bir yaklaşım gerektirmektedir. Bir hava aracında jet motor kullanılması durumunda hareket enerjisinin temeli motorun toplamda ürettiği enerjiden ziyade ortaya çıkan itkidir. Bu sebeple asıl önemli olan konu jet motorunun hafifliğinin yanında ortaya çıkan itki değeridir. Bu çalışmada, İHA motorlarının itki, ağırlık, hız, kanat açıklığı, havada kalış süresi gibi değerler göz önüne alınarak performans kıyaslaması yapılmıştır. Özellikle son dönemlerde ilgi odağı olmaya başlayan mikro jet motorlarının diğer insansız hava araç motorlarıyla performans kıyaslaması yapılmıştır.

Bu çalışmayla, ülkemizde üretimi yeni yapılmaya başlanmış olan gerek İHA gerekse İHA motor teknolojisi kazanımı için bir pencere, bir bakış açısı oluşturulması amaçlanmıştır. Özellikle jet motorlu İHA üretimi henüz yapılamadığından bu alanda yapılacak çalışmalara katkı olması hedeflenmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

İHA teknolojileri ülkemiz açısından çok önemli bir fırsat sunmaktadır. Tasarım ve beyin sermayesi odaklı, ağır sanayi yatırımı gerektirmeyen bu alanda milli bir vizyon kapsamında çalışmalar yürütülmesi ile ülkemiz, havacılık teknolojisini son noktada yakalayabilir. Bu gün itibarıyla ülkemizde yerli üretiminin yapılabildiği İHA teknolojisinin üzerinde önemle durularak dünyadaki benzer teknolojiyle rekabet eder hale getirilebilir. İHA üretimi yapılmadan önce rekabet açısından mevcut olanlarla kıyaslanması gerekir. Özellikle jet motorlu olanların kullanım amacı ve hız olarak düşünüldüğünde bunların tasarım aşamasında kullanılan itki ve yapı açısından özen gösterilmelidir.

Bu alışmada, İHA tasarımcılarına bir katkı sağlamaı amacıyla, mikro jet motorlu bir model İHA kavramsal tasarım verileriyle dünyada var olan diğeri İHA'larla performans kıyaslaması yapılmış ve model İHA'nın güvenli sınırlar içinde uçabileceği değerlendirilmiştir.

Radyal akışlı mikro jet motor türbini tasarımı yapılırken kullanım amacına göre ömür değerlendirmesi açısından kullanılan malzeme tercihi yapılır. Motorun uzun ömürlü olması istenirse dış hava akımından yararlanılarak kısmen de olsa kanat soğutması yapılabilir. Bu çalışmada, bu konuya katkı sağlayacak radyal akışlı mikro jet motoru kanat soğutması çalışması yapılarak, izelge ve şekillerle detaylı açıklamalar yapılmıştır. Böylece motor tasarımcılarına bir fikir vermesi veya katkı sağlamaı amaçlanmıştır.



İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA)

İnsansız Hava Aracı sistemleri, isminden de anlaşılacağı üzere; içerisinde insan bulunmadan uçabilen ve de üstlendikleri görevleri uzaktan yönetilerek ya da otonom olarak insan etkisi olmaksızın yerine getirebilen hava platformları/araçları olarak tanımlanabilirler.

İHA'lar ilk olarak Avusturyalılar tarafından 1849'da Venice'lilere karşı bomba taşıyan insansız balonların kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır (Şekil 2.1). Günümüzde bilinen İHA'lar A. M. Low tarafından 1916 yılında 1. Dünya Savaşı sırasında imal edilmiştir. Bu ilk yapılan uçaklar daha çok bir füzeye benzemektedir. Geriye dönüşleri mümkün değildi. Çünkü üzerine yerleştirilen patlayıcılarla birlikte fırlatıldıktan sonra düz bir rotada ilerliyor ve patlayıcılarla birlikte imha oluyordu. Bir kez fırlatıldıktan sonra hiçbir şekilde kumanda edilemiyordu. Bu durum kumanda edilebilme fikrini ortaya çıkardı. Takip eden yıllarda sınırlı sayıda üretilen Hewitt-Sperry otomatik uçak 1. Dünya Savaşı sırasında kullanılmış, 1. Dünya Savaşı sırasında ilk otomatik pilot denenmiştir. Bu Sperry'nin bir denemesiydi ve tüm dünya için referans olmuştur.

Elektronik teknolojisi geliştikçe radyo kontrolü fikri önem kazandı. 1928'de ilk kez tam bir uçak boyutlu Curtis Robin tam radyo kontrolle donatıldı. 1935 yılında ise film yıldızı ve model uçak tasarımcısı Reginald Denny ilk ölçekli RPV (Remote Piloted Vehicle- Uzaktan Komutalı Araç) modelini geliştirmiştir. Birkaç yıl sonra 2. Dünya Savaşı sırasında büyük uçaklar bombalar ile donatılarak, radyo kontrollü hale getirildi. 2. Dünya Savaşı süresince çok fazla miktarda uçak üretilmiş bunlar trenleri koruma amacıyla uçaksavar ve saldırı görevlerinde kullanılmıştır. 2. Dünya Savaşı'ndan sonra F-4'ler gibi bazı uçaklar tam ölçekli olarak yapıpı dron olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. 1 İlk insansız hava aracının kullanım şekli

Birkaç yıl içinde Almanya'dan sonra ABD'de ordu kullanmaya başlamıştır. Eğitim dronu olarak kullanılmak üzere binlerce küçük pervaneli uçak yapılmıştır. Uçak sanayi ilerledikçe bu sahada yapılacaklar artmıştır. Jet uçaklar geliştikçe onlar için kullanılacak dronlar üretmek gerekmiştir. Jet motoru bulunan ilk model 1951 yılında Teledyne Ryan firması tarafından geliştirilen Firebee-I'dir. 1955 yılında ise başka bir firma Beechcraft ABD Deniz Kuvvetleri için Model 1001 modelini üretmiştir. Bununla beraber bu araçlar Vietnam Savaşı süresince birer uzaktan kumandalı uçak olmaktan daha ileriye gidemediler.

1980'li ve 1990'lı yıllarda olgunlaşan ve küçültülen bu araçlar özellikle ABD'li askeri çevrelerin ilgisini çekmeye başlamıştır. Bunun en önemli nedeni İHA'ların uçaklara nazaran çok daha ucuz olması ayrıca riskli görevler sırasında yetişmiş mürettebat kaybını sıfıra indirmesidir. Genel olarak keşif ve gözetleme amacıyla kullanılan bu araçlar günümüzde silahlandırılmaktadır. Örneğin; MQ-1 Predator modeli araçlar üzerine AGM-114 Hellfire havadan-karaya füze takılmaktadır (Şekil 2.2). Zırhlı ve silahlı bu araçlara insansız hava muharebe aracı (İHMA) denilmektedir.



Şekil 2. 2 MQ-1 (Predator) [27]

2.1 İHA'ların Kullanım Amaçları

Günümüzde insanları insansız hava araçları geliştirmeye iten önemli sebepler vardır. Bu sebeplerden bazılarını şu şekilde sıralayabiliriz.

- a. Taarruz ya da hava savunma gibi tehlikeli görevlerde küçük ve görünmezlik özelliği bulunan İHA'ların kullanılması başarılı sonuçlar verebilir.
- b. İnsan için risk teşkil eden kimyasal ve nükleer maddelerle uğraşılması gereken durumlarda İHA'lar kolaylıkla görev yapabilir.
- c. Daha az enerji harcarlar, düşük emisyon ve gürültü seviyeleri ile çevre dostudurlar.
- ç. Uzun keşif/gözetleme gereken durumlarda insan dikkati zamanla azalır. İHA'lar, üzerinde taşıdıkları kamera ve radarlar yardımıyla hem daha etkin hem de ucuz çözümler sunabilir.

Bu durumda İHA teknolojileri ülkemiz açısından çok önemli bir fırsat sunmaktadır. Tasarım ve beyin sermayesi odaklı, ağır sanayi yatırımı gerektirmeyen bu alanda milli bir vizyon kapsamında çalışmalar yürütülmesi ile ülkemiz, havacılık teknolojisini son noktada yakalayabilir. Bu gün itibarıyla ülkemizde yerli üretiminin gerçekleştirebildiği İHA teknolojisinin üzerinde önemle durularak dünyadaki benzer teknolojiyle rekabet eder hale getirilebilir (Şekil 2.3 ve Şekil 2.4).



Şekil 2. 3 Türk özgün insansız hava aracı (TİHA) [28]



Şekil 2. 4 Bayraktar mini İHA [29]

2.2 İHA'ların Sınıflandırılması

İHA'ları altı farklı başlık altında sınıflandırabiliriz (bunun yanında bazı araçlar birkaç farklı özelliği bünyesinde barındırabilir):

Hedef ve yem: Düşman hava savunma veya savaş uçaklarına karşı yem olarak kullanılarak hedef belirlemede yardımcı olan araçlar.

Keşif ve gözetleme: Düşmana ait cephe bilgilerini toplayan araçlar.

Çatışma: Yüksek riskli görevlerde kullanılan saldırı kapasitesine sahip araçlar.

Lojistik: Kargo ve lojistik destek amaçlı araçlar.

Araştırma ve geliştirme: Gelecekte kullanılmak amacıyla farklı İHA teknolojilerinin denendiği araçlar.

Sivil ve ticari: Sivil ve ticari amaçlar için kullanılan araçlar.

Bunun yanında İHA'lar uçuş menzil ve irtifalarına göre de sınıflandırılırlar.

- Elle taşınabilen; (Handheld) 600 metre irtifa ve ortalama 2 km menzil,
- Close tipi; 1500 metre irtifa ve ortalama 10 km menzil,
- NATO tipi; 3000 metre irtifa ve ortalama 50 km menzil,
- Taktiksel; 5500 metre irtifa ve ortalama 160 km menzil,
- MALE; (Medium Altitude Long Endurance - orta irtifa, uzun menzil) 9000 metre irtifa ve ortalama 200 km menzil,
- HALE; (High Altitude Long Endurance - yüksek irtifa uzun menzil) 9000 metre irtifa ve belli olmayan menzil,
- HYPERSONIC; yüksek hızlı (süpersonik (Mach 1-5) veya hipersonik (Mach 5+) hızında) 15000 metre veya yörünge altında irtifa ve ortalama 200 km menzil,
- ORBITAL; alçak dünya yörüngesinde (Mach 25+),
- CIS Lunar; Dünya-Ay uçuşu şeklinde sınıflandırılmaktadır.

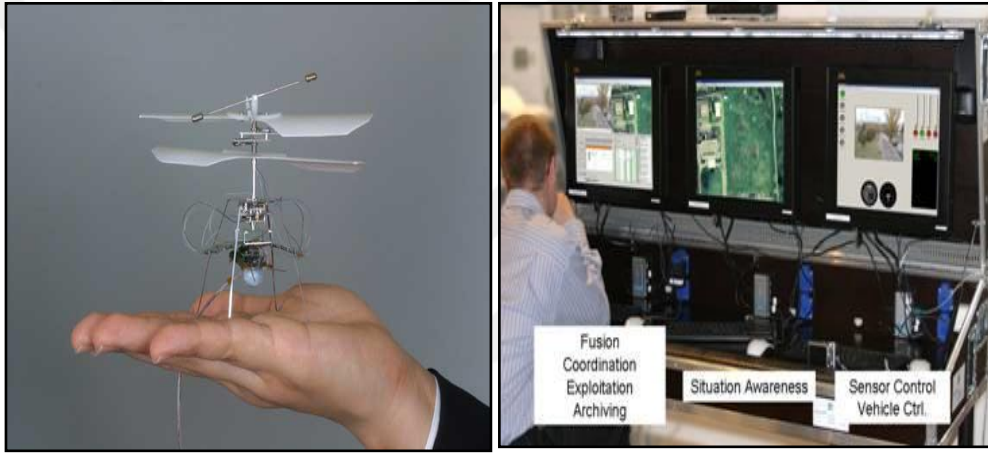


Şekil 2. 5 Global Hawk [30]

Ayrıca İHA'lar havada kalma sürelerine göre; mikro, mini (yakın), kısa, orta ve uzun menzilli olarak da gruplandırılır.

- **Mikro İHA'lar:** Etkili yarıçapları 10 km; havada kalma süreleri 1 saat; kullanım amaçları, hedef tespiti, hedef belirleme, arama ve kurtarma, mayın tarlası algılama, nükleer biyolojik kimyasal silah algılama, sinyalleri karıştırarak iletişim bozma, radar karıştırma, iletişim sağlama.

- **Yakın (Mini) menzilli İHA'lar:** Etkili yan çapları 30 km; havada kalma süreleri 3 saatten az; kullanım amaçları, keşif, gözetleme, elektronik savaş, nükleer biyolojik ve kimyasal keşif.
- **Kısa menzilli İHA'lar:** Etkili yan çapları 60 km; havada kalma süreleri 2-4 saat; kullanım amaçları, yakın menzillinin amaçlarına ek olarak komuta ve kontrol maksadıyla kullanılır.
- **Orta menzilli İHA'lar:** Sıkı korunan hedeflerin keşfini yapar. Vuruş öncesi ve sonrası keşif yapılmaktadır. Gerçek zamana yakın görüntüleme elde edilir. Böylece daha etkin bilgi akışı sağlanır. Yüksek ses altı hızlarda (0.9 mach) uçmak için tasarlanmıştır. Etkili yan çapı 150 km, havada kalma süresi 3-6 saattir.



Şekil 2. 6 Mikro İHA ve kontrol paneli

- **Uzun menzilli İHA'lar:** Dizaynlarında önemli olan faktör yüksek havada kalma zamanı (6 saatten uzun), büyük menzil (150 km üzeri) ve yüksek irtifadır.

Şekil 2.5'de uzun menzilli, Şekil 2.6'de ise mikro bir İHA ve kontrol paneli örneği görülmektedir. Boyut ve menzillerine göre İHA'ların genel özellikleri Çizelge 2.1'de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 2.2'de ülkelere ait bazı keşif-gözetleme sınıfı İHA'lara ait motor tipileri ve performans değerleri hakkında bilgi verilmektedir. Görüldüğü gibi Amerika Birleşik Devletleri Dünya üzerinde sayı olarak önde gelmektedir. Keşif-gözetleme görevi için de farklı tiplerde motorlar kullanılmıştır. Keşif-gözetleme sınıfı oldukları için havada kalma süreleri oldukça yüksektir ve aynı şekilde maksimum irtifaları da yüksek değerlerdedir.

Çizelge 2. 1 Boyut ve menzillerine göre İHA sınıflarının genel özellikleri

Kategori	Kütle [kg]	Menzil [km]	Uçuş İrtifası [m]	Havada Kalma Süresi [saat]
Mikro	< 5	< 10	<350	1
Mini	<25	< 10	<3000	< 2
Kısa Menzil	25 –150	10 – 30	<30000	2 – 4
Orta Menzil	50 –250	30 – 70	30000	3 – 6
Uzun Menzil	> 250	> 70	> 30000	> 6

Çizelge 2. 2 Keşif-Gözetleme sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımı [27]

Genel Bilgi	Boyut ve Ağırlık			Motor	Performans		
Model	Ort. Uzunluk (ft.)	Max. Ort. Açıklık (ft.)	Gövde Çapı (ft.)	Adet, Firma ve Model	Hız (mph)	Max. Uçuş Süresi veya Menzil	Max. İrtifa (ft)
Amerika Birleşik Devletleri							
GLOV	3	4,7	0,4	1xdiesel rotary	91	4 saat /365 dk.	20000
Dragon Eye	3	4	0,3	2x200W d.c. Electric	40-50	0,8 saat/3 dk.	1000
Raven	3	4,4	0,3	1x200W d.c. Electric	25-60	1 saat/0,5 dk.	10000
GNAT 750	18	35	2,5	1xRotax 582	100	40 saat	20000
IGNAT	20,8	42,2	3,7	1xRotax 914 turbo, gasoline	140	40 saat +	25000
Seascan	10	4	0,7	1x3W d.c. electric.	78	15 saat /1100 dk.	16000
Buster	3,3	4	–	1x1.6 hp. recip.	35-80	4 saat	10000
İngiltere							
Raven	10,5	12	–	1xAerrow Quadra 200 cc.	75	3 saat/60 dk.	15000
Çin							
ASN-206	12,5	19,6	–	1xHS 700, recip.	113	4-8 saat /80 dk.	–
İsrail							
Mini-V	9	12	0,7x0,7	2x5.5 hp., 2-stroke	60-85	5 saat /30 dk.	12000
Seagull	–	7	–	Electric	20-40	–	–
Skylark	–	7	–	Electric	20-40	–	–

Çizelge 2. 3 Çok amaçlı sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımı [27]

Genel Bilgi	Boyut ve Ağırlık			Motor	Performans		
Model	Ort. Uzunluk (ft.)	Max. Ort. Açıklık (ft.)	Gövde Çapı (ft.)	Adet, Firma ve Model	Hız(mph)	Max. Uçuş Süresi veya Menzil	Max. İrtifa (ft)
Amerika Birleşik Devletleri							
Golden Eye 50	2,25	5	1,5	1x3W d.c. Electric	115	45 dk.	5000
Golden Eye 100	5,5	10	3	1xUAV Engines Ltd. 741 Rotary	184	4 saat	10000
Theseus	29	117	3,5	1xASE TPE 331	60-290	24 saat /6000 dk.	65000
Skyeye R4E	13,4	24	—	1xUAV Engines Ltd. 52 hp. Rotary	125	8-12 saat /230 dk.	15000+
HV-911 Eagle Eye	17,3	15,3	2,8	1xPVC PW 200	253	6 saat /127 dk.	20000
Scorpion 60	6,8	9,8	1	1x12 hp. Recip.	125	2 saat	5000
Scorpion 100	11,8	16,1	1,7	1xRotax 52 hp.	173	3-5 saat	15000
Taiwan							
Kestrel 2	13,1	16,4	—	—	80-115	8 saat	12000
İsrail							
Hermes 450	20	34,5	1,7	1xUEL AR 80-1010 52 hp. Rotary	70-95	20 saat /125 dk.	18000
E-Hunter	24,7	50,5	—	2x64 hp. Dual	122	25 saat /175 dk.	20000
Heron	28,2	54,5	2,8	1x100 hp.	138	50 saat /620 dk.	30000
Heron TP	39,4	74,5	—	1x1200 hp. turboprop	242	24 saat /620 dk.	45000
İtalya							
Falco	18	23,7	1,9	1x75 hp.	130	14 saat	21000
Japonya							
RPH-2	31,1	15,7	4,2	1xEC-68	62	1 saat	—
Rusya							
Ka-137	17,4	—	3,9	1xHirth 2706 P05,65 hp.	95	4 saat	16400

Çizelge 2. 4 Taarruz sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımları [27], [31]

Genel Bilgi	Boyut ve Ağırlık			Motor	Performans		
Model	Ort. Uzunluk (ft.)	Max. Ort. Açıklık (ft.)	Gövde Çapı (ft.)	Adet, Firma ve Model	Hız (mph)	Max. Uçuş Süresi veya Menzil	Max. İrtifa (ft)
Amerika Birleşik Devletleri							
Kalkara	18,1	9,9	1,25	1xMicroturbo TRIGO-5	M0,85	1,25 saat	40000
MQM-107E	18,1	9,9	1,25	1xMicroturbo TRIGO-5	M0,85	1,25 saat	40000
BQM-167 Seeter	20	10	—	1xtj.	600	2 saat	40000
QAH-1S	48	48	—	1xASE T-53-L-703	150	2 saat /315 dk.	12200
BQM-34A	22,9	12,9	3,1	1xJ85-GE-100 tj.	M0,92	1,9 saat	60000
BQM-34S	22,9	12,9	3,1	1xJ85-GE-100 tj.	M0,92	1,9 saat	60000
BQM-74E	12,9	5,6	1,1	1xWI 24-8,240 lb. t.	M0,82	1,3 saat	40000
BQM-74F	15	7	1,2	1xWI 24-8G,300 lb. t.	M0,92	1,9 saat	40000
AQM-37A	12,6	3,3	1,1	1xSabreliner-Premier RM-6599 Rocket	M0,7-2	138 dk.	70000
AQM-37 Ballistic	12,6	3,3	1,1	1xSabreliner-Premier RM-6599 Rocket	M3-5	168 dk.	330000
AQM-37C/D	12,6	3,3	1,1	1xSabreliner-Premier RM-6599 Rocket	M1-3,2	198 dk.	80000
AQM-37EP	12,6	3,3	1,1	1xSabreliner-Premier RM-6599 Rocket	M1-4	172 dk.	100000
MQM-107D	18,1	9,8	1,3	1xMicroturbo TRI 60-5-220	M0,8	90 dk./125 dk.	44000
MQM-107E	18,1	9,8	1,3	1xMicroturbo TRI 60-5-220	M0,85	90 dk./125 dk.	44000
Super MQM	19,2	9,8	1,3	1xMicroturbo TRI 60-5-220	M0,93	174 dk.	44000

Çizelge 2. 4 Taarruz sınıfı İHA'ların ülkelere göre dağılımları [27], [31] (devamı)

Genel Bilgi	Boyut ve Ağırlık			Motor	Performans		
Model	Ort. Uzunluk (ft.)	Max. Ort. Açıklık (ft.)	Gövde Çapı (ft.)	Adet, Firma ve Model	Hız (mph)	Max. Uçuş Süresi veya Menzil	Max. İrtifa (ft)
Fransa							
ECLIPSE T1	12	2,9	0,8	1xSNPE rocket engine	M2,5	Balistik	42000
ECLIPSE T2	13	3,3	0,8	1xSNPE rocket engine	M4,3	Balistik	250000
FOX TS1	9,1	12	1,5	1xLimbach 22 hp. recip.	60/200	1 saat /40 dk.	10000
FOX TS3	9,1	12	1,5	1xLimbach 50 hp. recip.	80/280	1 saat /40 dk.	12000
Rusya							
E85	10,5	6,6	—	1xK346S pulse jet.	373	43,5 dk.	9843
E95	6,9	7,9	0,8	1xM150 pulse jet.	255	0,4 saat /94 dk.	10000
M-21	40	23,5	3,35	1xTum P-13 or P-25	<M1,0	—	—
La-17MM	27,4	24,6	1,8	1xR11K tj.	596	1 saat	59000
M-932 Dan	15,1	8,8	1,7	1xMD-120 tj.	440	40 dk.	29500
İtalya							
Mirach 100/5	13	6,9	1,4	1xMicroturbo TRS 18-1 tj.	M0,86	1,2 saat	40000
İngiltere							
Falconet	12	10	—	1xMicroturbo TJA24	M0,72	1 saat	—
Japonya							
BQM-34AJ/AJ KAI	22,9	12,9	3,1	1xCAE J69-T-29	M0,95	805 dk.	55000
J/AMQ-1	11,1	6,9	1,1	1xHMI TJIM3 tj.	M0,9	15,6 dk.	—
Çin							
B-2	8,4	8,1	—	1xHUOSAI 16 recip.	149	1 saat	—
Changkong 1C	27,8	24,7	1,9	1xWP6 tj.	565	45 dk.	—

Çizelge 2. 5 Farklı ülkelere ait pervaneli İHA'lar

İsim	Ülke	Hız (km/h)	Yüklü Ağırlık MTOW (kg)	İtki (N)
Asn-206	Çin	210	222	640
Aerolight	İsrail	185	40	160
Alo	İspanya	200	20	148
Creaserelle	Fransa	250	150	277
Falco	İtalya	260	420	775
Hunter (MQ-5B)	ABD.	200	886	738
Huma-1	Pakistan	180	130	328
Kingfisher	Avustralya	150	66	295
Kzo	Almanya	220	161	393
Phoenix	İngiltere	360	210	420

Çizelge 2. 6 Farklı ülkelere ait jet motorlu İHA'lar

İsim	Ülke	Hız (km/h)	Yüklü Ağırlık MTOW (kg)	İtki (N)
Global Hawk (RQ-4)	ABD.	575	14628	31400
CI-289	Almanya	740	240	1100
Zond	Rusya	550	12000	110000
Excalibur	ABD.	741	1550	3100
Neuron	Fransa	980	2500	40000
Comorant	ABD.	926	4500	13350
Filur	İsveç	300	55	230
Futura Ucav	Fransa	360	70	222
Locaas	ABD.	370	45	130

Çizelge 2.3'te çok amaçlı İHA'ların ülkelere göre ayrılarak kullanılan motor tipi ve performans değerleri verilmiştir. Amerika ve İsrail sayı olarak diğer ülkelere göre daha üstündür. Farklı tipte motor kullanıldığı görülmektedir. Bazı modellerin havada kalış süreleri oldukça yüksektir.

Çizelge 2.4'te ise yine aynı şekilde ülkelere göre bu kez taarruz sınıfı İHA'lar ve onlara ait motor bilgisi ve performansları hakkında bilgi verilmiştir. Burada da Amerika'nın sayıca dünya genelinde bir üstünlük kurduğu görülmektedir. Rusya'nın da en az Amerika kadar İHA sayılarının fazla olması beklenirken daha az sayıda olduğu görülmektedir. Yalnız, bu durumun bilinen verilere göre olduğu göz önüne alınmalıdır.

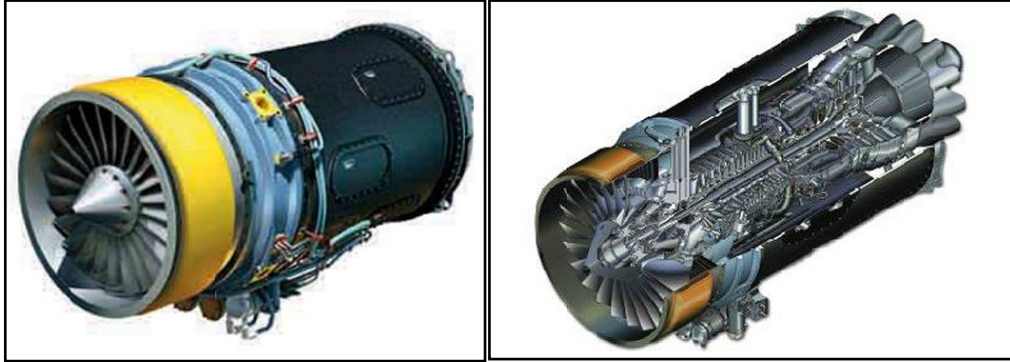
Çizelge 2. 7 Farklı ülkelere ait mikrojet motorlu İHA'lar

İsim	Ülke	Hız (km/h)	Yüklü Ağırlık MTOW (kg)	İtki (N)
Surveyor 600	Fransa	800	350	1300
Sky-X	İtalya	648	1000	4430
Nibbio	İtalya	1046	360	978
Kalkara (MQM-107E)	ABD.	1015	662	4230
Nishan Tj-1000	Pakistan	300	35	270
Cyber Scout	ABD.	463	23	120
Mirach 100/5	İtalya	315	300	1500

Uçak tasarımına benzer şekilde, İHA tasarımında da kullanım amacına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Motor tipi, yüklü ağırlık, hız, itki gibi parametreler bu amaç doğrultusunda hesaplanarak İHA tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda farklı ülkelerde üretilen değişik tipteki İHA'lardan bir kısmı Çizelge 2.5, Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'de verilmiştir.

İHA MOTORLARI

İHA'ların kullanım amaçları ve boyutlarına göre kullanılabilecek motor tipleri değişmektedir. Mikro İHA'ların boyutları çok küçük olduğundan elektrikli motor dışında motor tipinin kullanılması mümkün değildir. İHA menzili büyüdükçe daha fazla itkiye ihtiyaç duyulacağından bu itkiyi sağlayacak motor tercih edilmelidir. Çizelge 3.1'de havada kalma sürelerine göre İHA sınıflandırması ve kullanılan motor tipleri ve itkileri verilmiştir. Pistonlu motorlar genellikle mini boyut ve orta menzil için, turboprop ve turbojet gibi motorlar ise uzun menzilli İHA'lar için kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de uzun menzil İHA jet motoru görülmektedir.



Şekil 3. 1 Rolls-Royce AE3007H motoru [32]

Savaşan ve uzun menzilli insansız hava araçları, orta menzilli insansız hava araçlarına göre daha ağır ve itkisi daha fazladır. Eğer itki/ağırlık oranına göre kıyaslanacak olursa orta menzilli insansız hava araçlarının oranları daha büyüktür. Savaşan ve uzun menzilli insansız hava araçlarının ağır olmalarının ve itkilerinin fazla olmasının sebepleri kısaca şunlardır: Mühimmat taşınacağından ağırlık artacak ve bu ağırlığı karşılayabilecek itki değerinin olması, uzun mesafeler için daha fazla yakıt ve bunun getirisi olarak da fazla

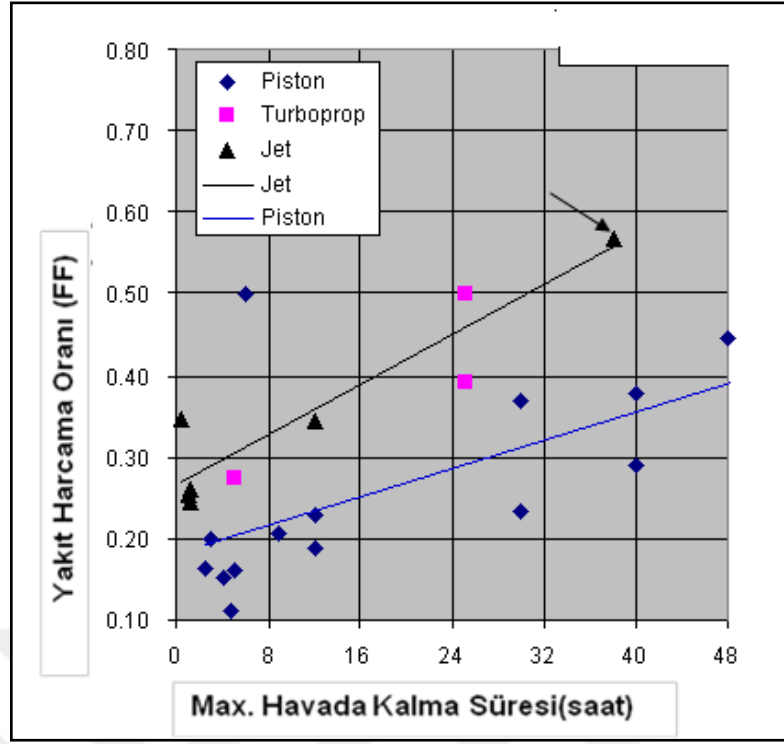
ağırlık gerekmesidir. Bu ağırlığı karşılayabilecek sistemler (motor vs) de buna göre şekilleneceğinden onların boyutları da karşılaması gerekenler açısından daha fazla güç üretmeleri gerekliliğinden dolayı daha büyük olmak zorundadır.

Çizelge 3. 1 İHA tiplerine göre motor çeşitleri

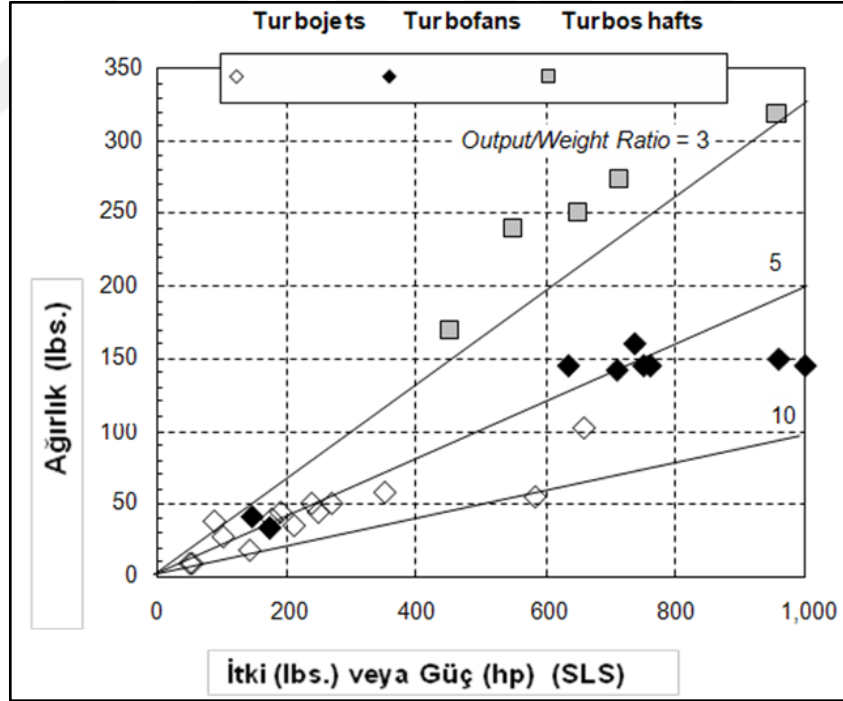
İHA Sınıfı	Motor Tipi	İtke (HP)
Mikro	Elektrik	1
Mini	Piston (2X2), mikro jet	1-20,
Kısa Menzil	Piston (4X4), mikro jet	90-250
Orta Menzil	Turboprop, Piston, Jet	250-500
Uzun Menzil	Turbojet-Turbofan, Piston.	>500

Şekil 3.2’de pistonlu motor, turboprop motor ve jet motor olmak üzere üç başlık altında incelemeye tabi tutulmuş olan insansız hava araçlarının bilgilerini karşılaştıran grafikte en uzun havada kalma süresine göre harcanan yakıt oranını göstermektedir. Oluşturulmuş olan siyah çizgi jet motorlu insansız hava araçlarının ortalama değerleri alınarak çizilmiştir. Mavi çizgi ise piston motorlu insansız hava araçlarının ortalama değerleri alınarak çizilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi jet motorlu insansız hava araçları piston motorlu insansız hava araçlarına göre havada kalınan birim zamanda daha fazla yakıt harcamaktadır. Görev tipi nedeniyle jet motorlu İHA’lar hızlı ve yüksek manevra kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Böyle bir İHA motoru yakıtı daha fazla kullanmak zorundadır.

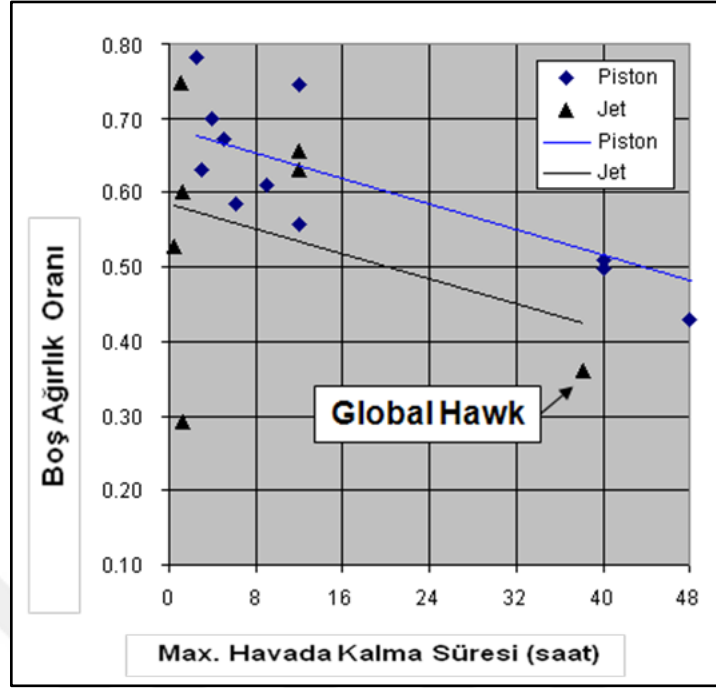
Şekil 3.3’te 3 farklı motor tipinin itke ve ağırlık durumlarına göre karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için aynı motor tiplerinin itke ve ağırlık değerleri grafikte gösterilmiş ve bu değerlerin kendi içlerinde yani aynı tipteki motorların itke/ağırlık oranlarının ortalaması alınarak en uygun çizgi çizilmiştir. Görüldüğü gibi turbojet motorunun itke/ağırlık oranı 10, turbofan motorun 5 ve turboshaft motorunun 3’tür. Yani üç farklı motorun aynı itke değerine sahip olduğu durumlarda kaldırabileceği yüklerin büyüklük sırası “turbojet>turboprop>turboshaft” şeklindedir.



Şekil 3. 2 Havada kalma süresine göre harcanan yakıt oranı grafiği [31]



Şekil 3. 3 Motor türlerinin itki-ağırlık karşılaştırması [33]



Şekil 3. 4 Piston ve jet motorlarının maksimum havada kalma ve boş ağırlık karşılaştırması [31]

Şekil 3.4'deki grafikte piston ve jet motorlu insansız hava araçlarının maksimum havada kalma süresi ile boş ağırlık oranlarının karşılaştırılması verilmiştir. Görüldüğü gibi jet ve piston motorlarının her ikisinde de boş ağırlık değeri düştükçe havada kalma süreleri artmaktadır. Yaklaşık olarak grafik eğimleri birbiriyle aynı olduğundan değişim her ikisi için de aynıdır diyebiliriz.

3.1 Mikro Jet Motorları

Mikro jet motorları, genellikle İHA'larda kısa mesafeli uçuşlar için kullanılır ve genelde tek seferlik olarak kullanılırlar. Bu kriterlerde bu motorlar, kısa ömürlüdür ve asıl amaç ucuz, hafif ve kolay üretilebilir olmalarıdır.

Mikro jet motorları, basitçe gerçek boyutlu motorların küçültülmüş boyutu değildir. Temel çalışma metodu aynıdır; fakat farklı bir talep ve genellikle basit tasarım için özel düşünülmesi gereken noktaları vardır. Gerçek uçak motoru ve mikro jet motorunu karşılaştırsak aralarında birkaç benzerlikler bulunmaktadır. Çoğu modern gaz türbinleri çok kademeli kompresörler ve türbinler, pal soğutulması, karmaşık düzenleyici ve kontrol mekanizması ve diğer birçok özellikleri içermektedir; fakat bu

özellikler mikro versiyonlarda görülmemektedir. Mikro jet motorlarında amaç basitlik ve işlevselliktir [34].

Günümüzde mikro jet motorlarda kullanılan genel yapı değişmemiştir. Gücünü ve kendini kanıtlayan amatörlerin yaptığı motorlar ufak değişiklikler yaşamıştır. Bütün model jet motorlarında ya arabaların ya da kamyonların turbo şarjlarının kompresörleri kullanılmıştır. Türbinler ise tek aşamalı eksenel olarak seçilmiştir. Günümüzde yanma odaları ise ev yapımı motorlardan alınmıştır. Borunun içinde kerosenin buharlaştırması ise tam bir sanat eseridir. Keroseni, model bir yanma odasında yakmak tam bir problemdir. Günümüzde birçok yanma odası kerosenle çok iyi çalışmaktadır. Sonuç olarak likit propan gaz tanklarına artık ihtiyaç duyulmamaktadır. Şekil 3.5’de bir mikro jet motor tipi görülmektedir.

Mikro jet motoru tasarımında amaç gaz türbininin temel prensiplerini kullanmaktır. Art yakıcılar, multi-şaft rotor sistemleri ve by-pass motorları mikro jet motorlarında kullanılmamaktadır. Mikro jet motorlarında radyal kompresörler kullanılır. Tek kademeli bir çark, istenilen basınç oranını sağlamamaktadır. Eksenel kompresörler genellikle gerçek tam boyutlu jet motorlarında kullanılır. Fakat bu çeşit kompresörler mikro jet motorlarında birçok probleme sebep olmaktadır. Hesaplamalar şunu gösteriyor; gaz türbini tek kademeli eksenel bir kompresörde çalışabilir, fakat pratikte bu tipte bir motor sadece kaliteli bir silah kadar itki üretebilir. Düşük basınç oranı çok küçük bir akış hızına ve yüksek yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Tek kademeli radyal kompresörle aynı basıncı elde etmek için eksenel bir kompresör en az 3 kademeye daha gereksinim duyar. Çok kademeli bir kompresörün yapımı aşırı derecede karışıktır.

Buna rağmen teorik olarak bu çeşit kompresörler mikro jet motorlarında birçok uygulama alanları vardır. İlk önce kompresör seçilir daha sonra türbin kademesi aynı uzantıya sabitlenir. Tek kademeli bir türbin yeterlidir ve eksenel ve radyal türbinler uygulanabilir. Tek kademeli kompresörler ve türbinler küçük bir boşluk tutarlar fakat aynısı yanma odası için uygulanmaz. Bu yüzden dışarıdan bakıldığında mikro jet motorları ve gerçek motorlar birbirine benzemez. Gerçek boyutlu bir jet motorunda yanma odası kompresör ve türbin arasında kısa bir kısım oluşturur; fakat genellikle mikro jet motorlarında yanma odası en büyük parçadır. Mikro boyuttaki kompresörler ve türbinler endüstriyel uçak motorlarında daha verimsizdir. Eğer bir motor tam olarak

çalışacaksa trbın gerekli enerjiyi egzoz akışından sağlamalıdır. Sonuç olarak enerjinin küçük bir kalan kısmı itki üretmek için ayrılır. Bu gerçek mikro jet motorlarında gerçekleştirilebilen düşük basınç oranlarında meydana gelir. Yakıttan sağlanan enerjinin sadece % 3'ten % 8'e kadar oranda itkiye dönüşür. Kütle olarak düşük olmalarına rağmen itki/ağırlık oranı gerçek jet motorlarıyla karşılaştırılabilir. Bu motorlar modellerde kullanıldığında büyük yakıt tanklarına ihtiyaç duyulur.



şekil 3. 5 EvoJet booster 160 VX [35]

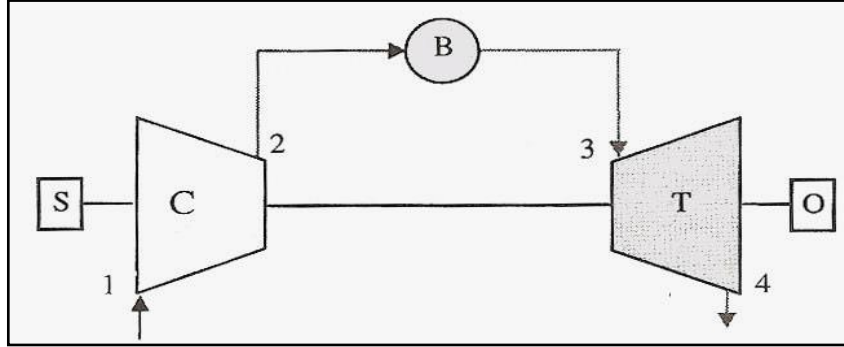
3.2 Mikro Jet Motorlu İHA'nın Diğer İHA'larla Performans Kıyaslaması



şekil 3. 6 Viper jet model uçağı [31]

Bu bölümde, seçilen model bir İHA ile buna adapte edilmiş bir mikro jet motorunun diğer İHA'larla teorik olarak performans kıyaslaması yapılarak elde edilen sonuçlar grafiklerle anlatılmıştır. Çalışmada kullanılan model uçağı şekil 3.6'da görülmekte olup uzunluk 2.4 m, kanat açıklığı 2.6 m, hesaplanan itki 12-17 kg (26,5-37,5 lb) ve kuru ağırlığı 16-16,5 kg'dır. Model uçağın kullanım amacı, keşif ve taarruz olacak şekilde belirlenmiştir.

3.2.1 Teorik İtke Hesaplamaları



Şekil 3. 7 Basit sabit basınç gaz türbininin (CBT) sistem şeması [36]

Sabit basınç Brayton çevrimine göre çalışan basit bir gaz türbinini (Şekil 3.7), ortak bir milde monte edilmiş olan C kompresörü, T türbini, B yanma odası ve S ilk hareket düzeni ve O çıkış gücü bağlantısından oluşmaktadır.

Model jet motorunun özgül itme kuvveti ve özgül yakıt tüketimi hesapları için gerçek turbo jet çevrimi temel alınmış ve hesaplamalarda aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır [36], [37], [38].

Motorun girişten sonraki durma basınç ve sıcaklığı;

$$P_{01} = P_a \left(1 + \eta_i \frac{C_a^2}{2 \cdot C_p T_a} \right)^{k/(k-1)} \quad (3.1)$$

$$T_{01} = T_a + \left(\frac{C_a^2}{2 \cdot C_p} \right) \quad (3.2)$$

Kompresör çıkışındaki basınç ve sıcaklık değerleri:

$$P_{02} = P_{01} \cdot Pr_c \quad (3.3)$$

$$T_{02} = T_{01} + \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\beta_c^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (3.4)$$

Yanma odası çıkış basınç ve sıcaklığı:

$$P_{03} = P_{02} (1 - \Delta P_B) \quad (3.5)$$

$$C_{pg} (T_{03} - T_{04}) = w_{TC} \quad (3.6)$$

Türbin çıkış sıcaklık ve basıncı:

$$T_{04} = T_{03} - \frac{w_{TC}}{C_{pg}} \quad (3.7)$$

$$T'_{04} = T_{03} \frac{1}{\eta_T} (T_{03} - T_{04}) \quad (3.8)$$

$$P_{04} = P_{03} \left(\frac{T'_{04}}{T_{03}} \right)^{k/(k-1)} \quad (3.9)$$

Türbin basınç oranı:

$$\beta_T = P_{03}/P_{04} \quad (3.10)$$

Türbin çıkışından atmosfere çıkışa kadar olan kısım tahrik nozulu değerlendirmesi, kesiti daralan (yakınsak) nozul üzerinde yapılmıştır. Nozul verimi ifadesinde çoğunlukla izentropik verim dikkate alınmaktadır.

Nozulun izentropik verimi:

$$\eta_n = \frac{T_{04} - T_5}{T_{04} - T'_5} \quad (3.11)$$

Nozul çıkış sıcaklığı:

$$T_5 = T_{04} - \eta_n T_{04} \left[1 - \left(\frac{1}{P_{04}/P_5} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (3.12)$$

Nozul basınç oranı:

$$\beta_n = P_{04}/P_a \quad (3.13)$$

Kritik basınç oranı:

$$\frac{P_{04}}{P_c} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\eta_n} \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{k/(k-1)}} \quad (3.14)$$

$P_{04}/P_a > P_{04}/P_c$ olduğunda nozul yakınsak tiptir. Bu durumda şu eşitlikler kullanılır:

$$T_{05} = T_c = \frac{2}{k+1} T_{04} \quad (3.15)$$

$$P_{05} = P_c = P_{04} \left(\frac{1}{P_{04}/P_c} \right) \quad (3.16)$$

$$\rho_5 = \frac{P_c}{RT_c} \quad (3.17)$$

$$C_5 = \sqrt{kRT_c} \quad (3.18)$$

Özgül itme kuvveti:

$$F_{st} = (C_5 - C_a) + \frac{A_5}{\dot{m}} (P_c - P_a) \quad (3.19)$$

Gerçek yakıt/hava oranı:

$$f = \frac{f'}{\eta_B} \quad (3.20)$$

Özgül yakıt tüketimi:

$$sfc = \frac{3600f}{F_{st}} \quad (3.21)$$

3.2.2 Model İHA için Motor Seçim Hesaplamaları

Çevrim hesapları yapılırken bazı değerler bilinmemektedir. Bu değerler mikro jet motoru yapımcılarının elde ettiği sonuçlar ve bazı gerçek turbojet çevrim problemleri çerçevesinde ortalama bir kabul ile hesaplamalar esnasında kullanılmıştır.

Yapılan kabuller:

Mikro jet motoruna giren havanın hızı (C_a) = 120 m/s,

Nozul verimi (η_n)= % 90,

Girişin izentropik verimi (η_i)= % 90,

Yanma verimi (η_B)= % 98,

Mekanik verim (η_m)= % 99,

Yanma odasının basınç kaybı (ΔP_B)= Kompresör çıkış basıncının % 3'ü,

Atmosferik basınç (P_a)= 101,3 kPa,

Atmosferik sıcaklık (T_a)= 288,15 K,

Kompresör sıkıştırma oranı (P_{rc})= 3,

Türbin giriş sıcaklığı (T_{03})= 1200 K.

Hesaplamalar:

Hesaplamalarda, yapılan kabuller ışığında yukarıda verilen (3.1)-(3.21) aralığındaki eşitlikler kullanılmış ve aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

Girişten sonraki durma basınç ve sıcaklığı;

$$P_{01} = (101,3) \left(1 + 0,90 \times \frac{120^2}{2 \times 1005 \times 288,15} \right)^{1,4/0,4} = 109,46 \text{ kPa}$$

$$T_{01} = 288,15 + \frac{120^2}{2 \times 1005} = 295,31 \text{ K}$$

Kompresör çıkış değerleri:

$$P_{02} = (109,46) \times 3 = 328,4 \text{ kPa}$$

$$T_{02} = 295,31 + \frac{295,31}{0,75} \left(3^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right) = 440,5 \text{ K}$$

$$P_{03} = 328,4 \times (1 - 0,03) = 318,55 \text{ kPa}$$

$$T_{04} = 1200 - \left[\frac{1,005(440,5 - 295,31)}{1,147 \times 0,99} \right] = 1071,5 \text{ K}$$

$$T'_{04} = 1200 - \frac{1}{0,75} (1200 - 1071,5) = 1028,67 \text{ K}$$

$$P_{04} = 318,55 \left(\frac{1028,67}{1200} \right)^{1,4/0,4} = 185,78 \text{ kPa}$$

Nozul basınç oranı:

$$Pr_n = \frac{185,78}{101,3} = 1,83$$

Türbin basınç oranı:

$$Pr_T = \frac{318,55}{185,78} = 1,7$$

$$T_{05} = T_c = \frac{2}{1,333 + 1} (1071,5) = 918,56 \text{ K}$$

$P_5 = P_a$ Bunun sonucunda basınç itme kuvveti sıfır olacaktır.

Nozul çıkışındaki gazın hızı:

$$C_5 = \sqrt{1,333 \times 287 \times 918,56} = 593 \text{ m/s}$$

Özgül itme kuvveti:

$$F_{st} = 593 - 120 = 473 \text{ Ns/kg}$$

Kütle debisini 0,30 olarak kabul edersek;

İtke değeri:

$$F = 473 \times 0,30 = 142 \text{ N} = 32 \text{ lb'dir.}$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen değere emniyet payı ve kayıplar da eklenirse Evojet Booster 160 VX (Şekil 3.5) motorunun itke değerine yakın bir değer bulunmuştur. Böylelikle seçilen motorun aşağıda verilen özelliklerinin model İHA'nın ihtiyaçlarını karşılayacak niteliklere sahip olduğu görülmektedir.

Evojet Booster 160 VX motorunun özellikleri [35]:

İtke: 173 N,

Ağırlık: 1,620 kg,

Çap: 112 mm,

Devir Hızı: 33000-123000 rpm,

Egzoz Gaz Sıcaklığı: 650 °C-750 °C,

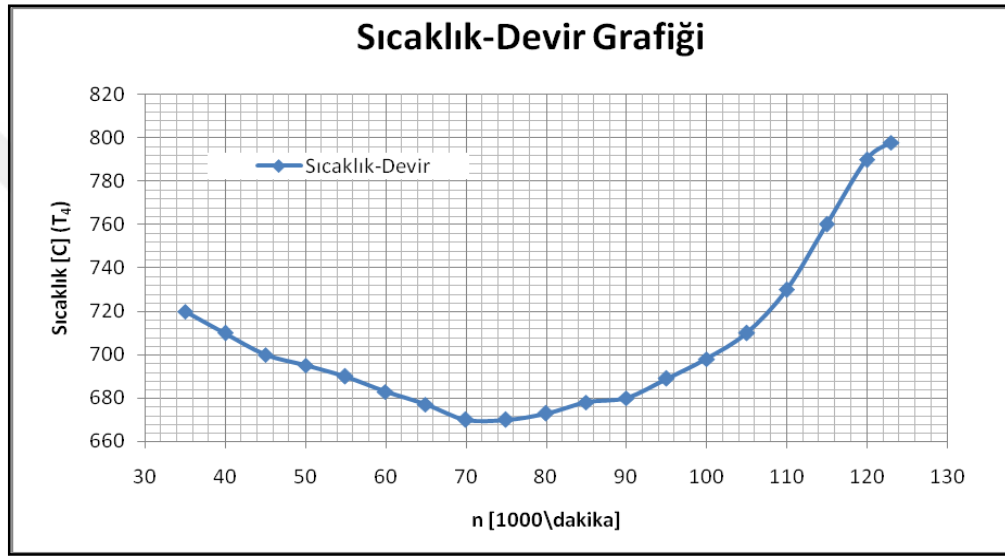
Kullanılan Yakıt: Jet A1,

Yakıt: 520 g/dk,

Bakım Süresi: 50 saat,

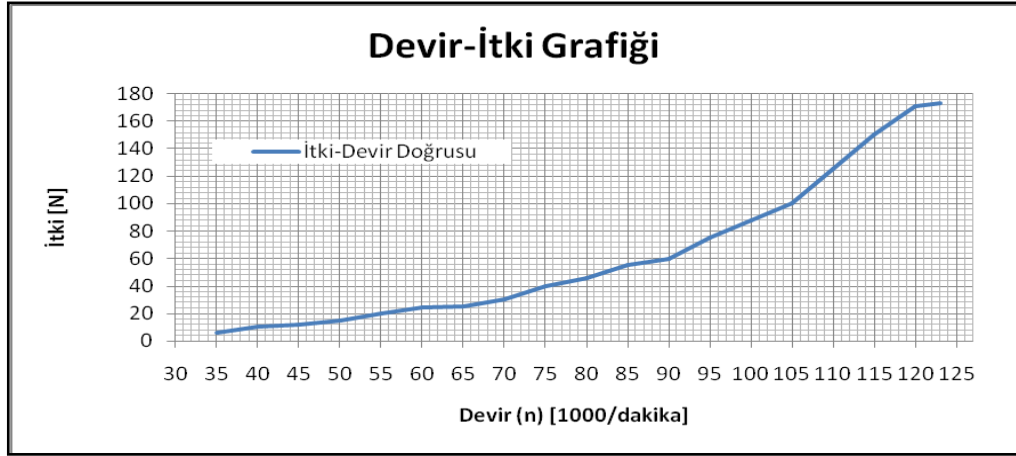
Yağlama: Yakıtın içinde % 5 oranında türbin yağı gerekir.

Motor performans grafikleri:



Şekil 3. 8 Evojet booster motoru sıcaklık-devir grafiği [35]

Jet motorlarının soğutulması genellikle hava ile yapılmaktadır. Konu mikro jet motorları olduğu zaman bu durum bir zorunluluktur. Motor rölanti durumundayken içinden fazla miktarda hava geçmeyeceği için motor içi sıcaklığı yüksek derecelerde bulunacaktır. Motor ortalama devirlere arttırıldığında ise motorun içine girecek olan hava göreceli olarak artacağından dolayı motor sıcaklığı düşük olacaktır. Fakat motor tam gaz açıldığında yakıtın yanmasından ortaya çıkan sıcaklığa yüksek mekanik sürtünmeden oluşan sıcaklık eklenecek ve motor sıcaklığı en üst seviyelere ulaşacaktır. Bu durum, Şekil 3.8'deki grafikte açık bir biçimde gözlemlenmektedir.

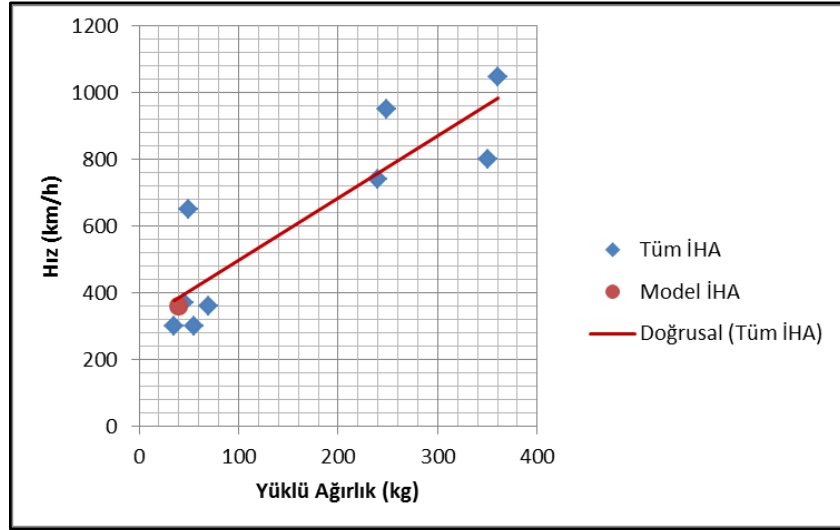


Şekil 3. 9 Evojet booster motoru devir-itki grafiği [35]

Motorun itkisini oluşturan temel etken nozulundan çıkan hızlandırılmış havadır. Bu havanın ağırlığı da çok önemlidir. Motor anlık olarak ne kadar çok miktar sıcak gaz atıyorsa dışarıya, orantılı olarak o kadar çok itki üretiyor demektir. Jet motorlarında bu miktar değiştirilerek istenilen itki değerine ulaşılır. Buna göre, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi motorun itkisi devir ile orantılı bir biçimde artmaktadır.

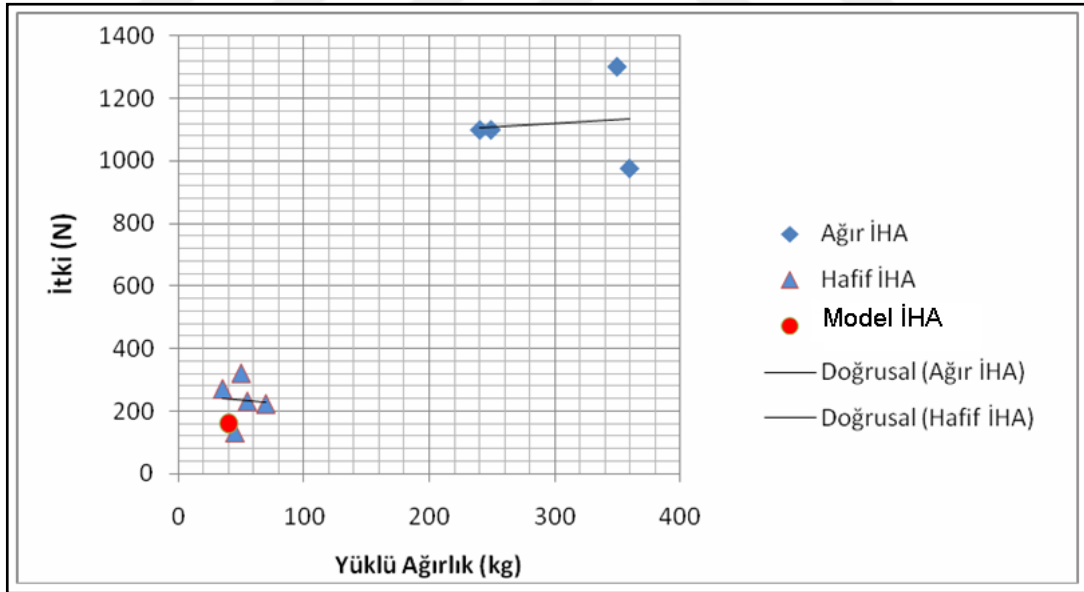
3.2.3 Grafikler ve Değerlendirme

Motorlar bir sehpaye sabitlendiklerinde farklı itki değerleri verirken uçan bir platform üzerinde çok daha farklı değerler sunmaktadır. Bu durumu inceleyebilmek için dünya üzerinde tasarlanmış olan farklı çeşitte insansız hava araçlarının bir kısmı (Çizelge 2.3, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5) farklı kategorilerde incelenmiş ve seçtiğimiz model İHA ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. 10 İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık karşılaştırılması

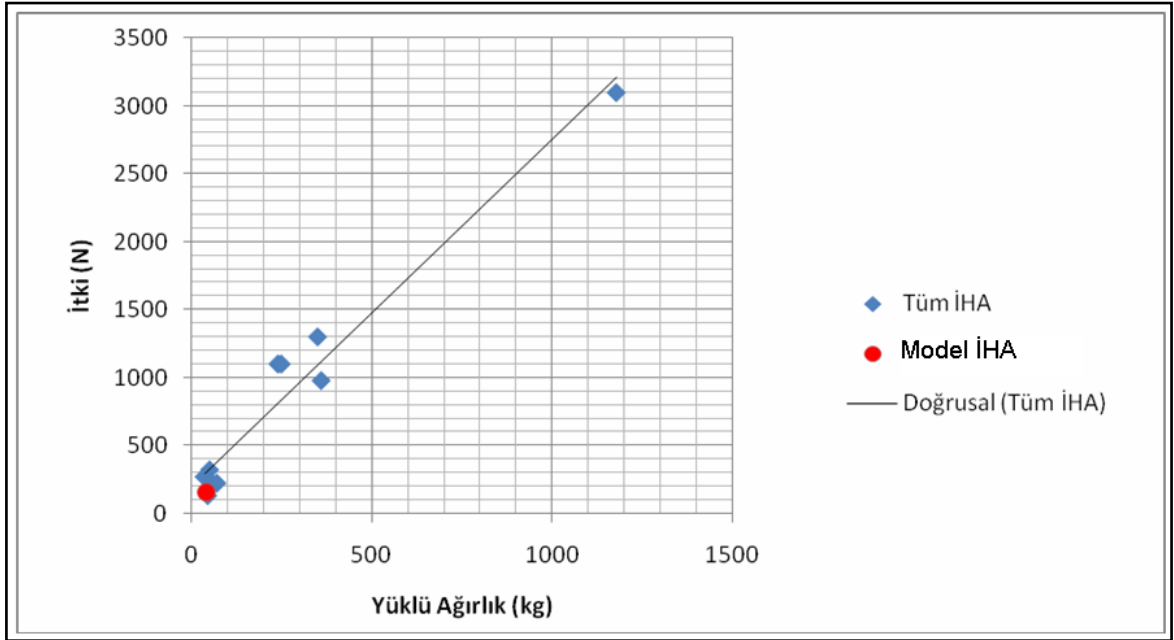
Model İHA için kullanılan değerler ilk tasarım için belirlenmiş kavramsal verilerdir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi araştırılan İHA'lar ve Model İHA değerleri grafiğe işlenmiştir. Ortalama değerler için bir doğru çizilmiştir. Ortalama 360 km/h hızı ve 40 kg yüklü ağırlığı bulunan Model İHA'nın bu doğruya yakınlığı bize ağırlığının uçuş hızı ile orantılı bir değere sahip olduğunu göstermektedir.



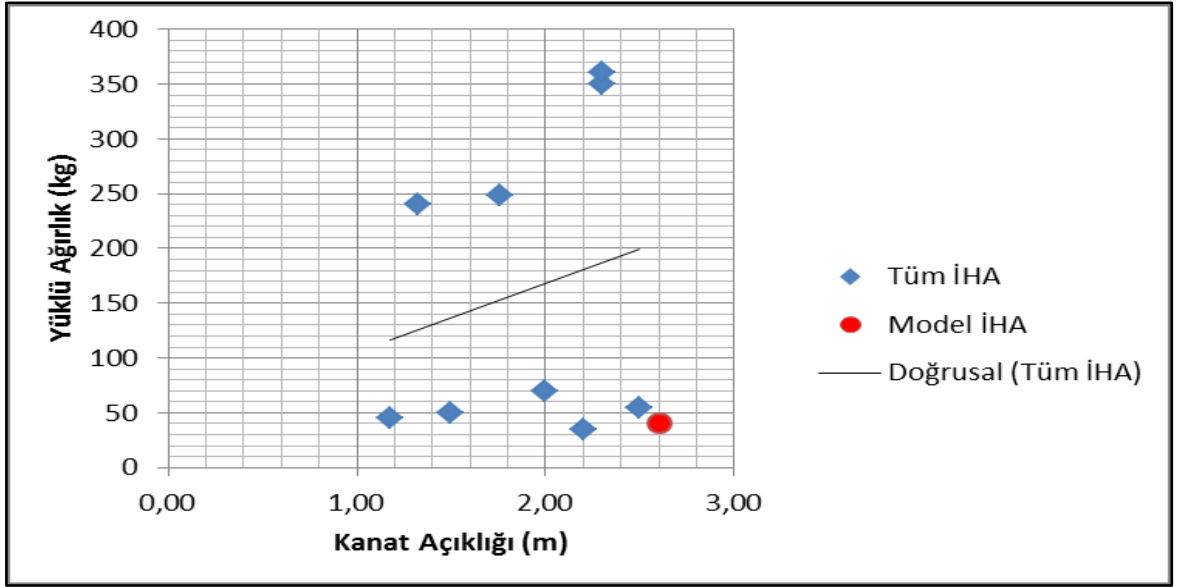
Şekil 3. 11 İHA'ların model İHA ile itki-yüklü ağırlık karşılaştırılması-1

Şekil 3.11 ve 3.12'de araştırılan İHA'lar ve Model İHA değerleri grafiğe işlenmiş ve ağır ve hafif İHA olacak şekilde ortalama değerler için birer doğru çizilmiştir. Bu grafiğe göre; 160 N itkisi ve 40 kg yüklü ağırlığı olan Model İHA'nın Hafif İHA doğrusuna yakınlığı ve itki değeri, sahip olduğu yüklü ağırlığına uygundur.

İnsansız hava aracı tasarlanırken aracın ağırlığı ve ihtiyaç duyulan itki orantılı olmalıdır. Eğer itkiniz çok fazla olursa uçağın kontrolü zor olacaktır, büyük bir ihtimalle uçak kontrolden çıkar veya motorunuzu tam güçte kullanamazsınız. Aynı zamanda eğer motorunuz uçağınıza göre çok fazla itki ürettiyorsa büyük bir ihtimalle uçağa oranla daha ağırdır dolayısıyla fazladan yakıt tüketmenize sebep olacaktır. Motorun itkisinin uçağın ağırlığına göreceli olarak daha düşük olduğu durumlar olabilir. Bu gibi durumlarla kanat açıklığı daha büyük uçaklarda karşılaşılır. Bizim örneğimizde de uçağımızın kanat açıklığı diğer uçaklara nazaran daha büyüktür (Şekil 3.13). Bu gibi durumlarda Şekil 3.14'de de görüldüğü gibi itki çok az bir miktar dahi olsa düşük seçilebilir.

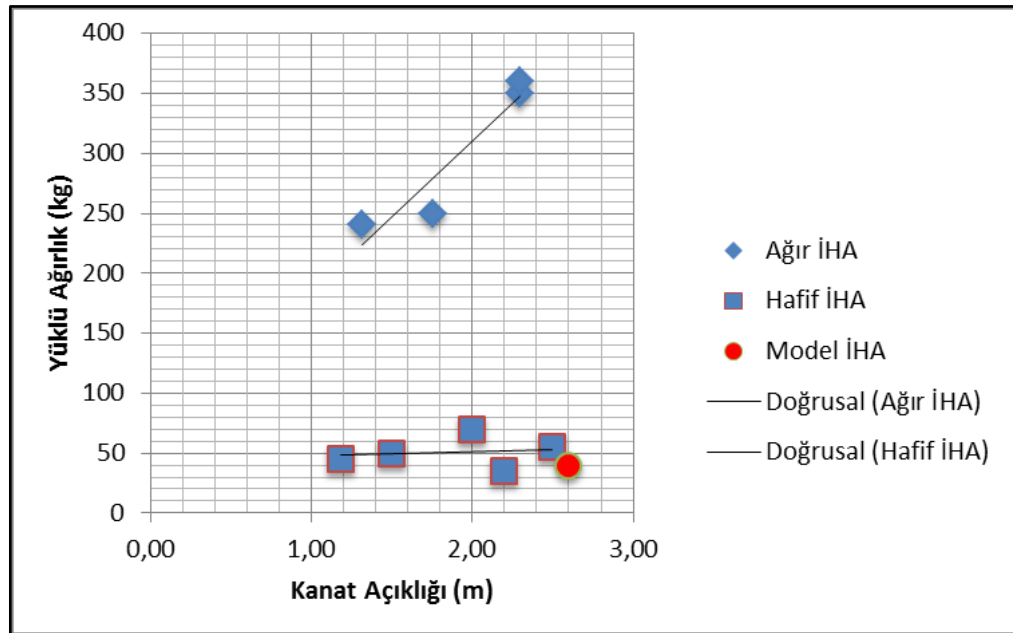


Şekil 3. 12 İHA'ların model İHA ile itki-yüklü ağırlık karşılaştırılması-2

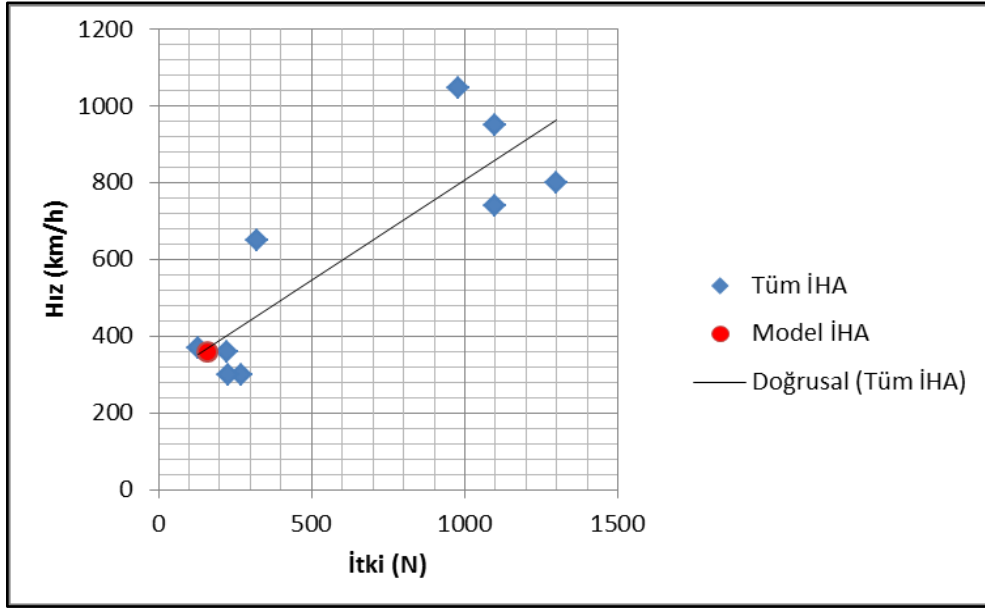


Şekil 3. 13 İHA'ların model İHA ile yüklü ağırlık-kanat açıklığı karşılaştırılması-1

Hafif ve küçük İHA'lar göz önünde bulundurulduğu zaman incelenen örneğin kanat açıklığı hafife alınmayacak miktarda fazladır (Şekil 3.14). Daha önce değindiğimiz gibi itkinin düşük olması bu konuda bir etmendir. Bunun temel sebebi indüklenmiş sürüklemenin kanat açıklığı ile ters orantılı olmasıdır. Sürüklemenin düşük olması daha az itki ile uçağınızı uçurabileceğiniz anlamına gelmektedir. Bunun yanında kanat açıklığının getirdiği birçok avantaj bulunmaktadır fakat bu konular aerodinamik konusu altında incelenmelidir.



Şekil 3. 14 İHA'ların model İHA ile yüklü ağırlık-kanat açıklığı karşılaştırılması-2

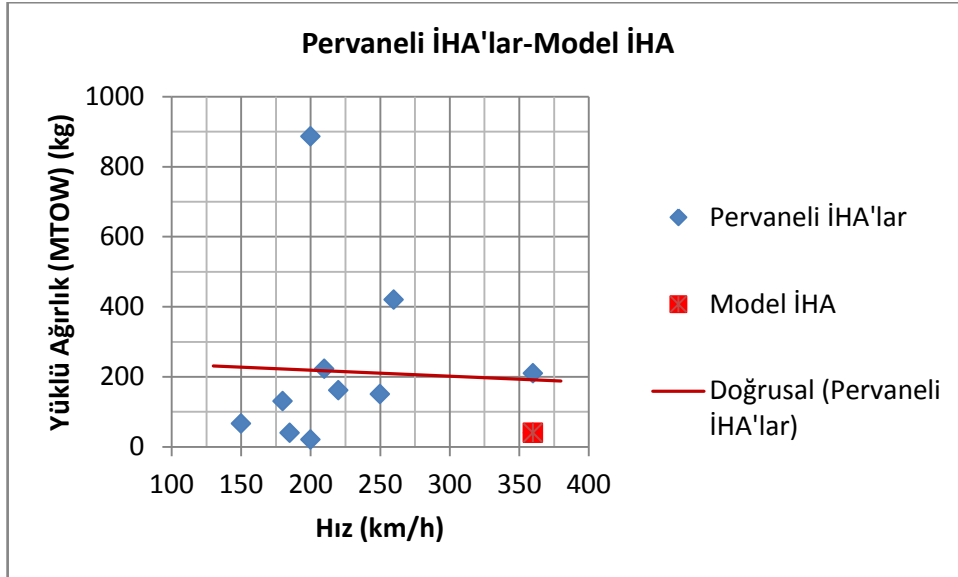


Şekil 3. 15 İHA'ların model İHA ile itki-hız karşılaştırılması

İtke, ağırlık ve kanat açıklığı ile karşılaştırıldığında uçağımızın güvenli sınırlar içerisinde uçağı öngörülmektedir. Bunun yanında incelenen Model İHA İtke-Hız karşılaştırmasına göre dünyadaki diğer uçaklarla aynı paralelliktedir (Şekil 3.15).

Seçilen model İHA'nın üretimden önce performans değerlerinin incelenebilmesi için, halihazırda mevcut İHA'larla kıyaslanması gerekir. Bu kıyaslanma hem kendi kategorisinde hem de diğer tiplerle kıyaslanarak geniş bir yelpazede fikir sahibi olunması sağlanmıştır. Özellikle İHA'larda kullanılan motorlar göz önüne alınmış, bu İHA'larla model İHA'nın itke, hız ve yüklü ağırlık (MTOW) kıyaslaması yapılmıştır.

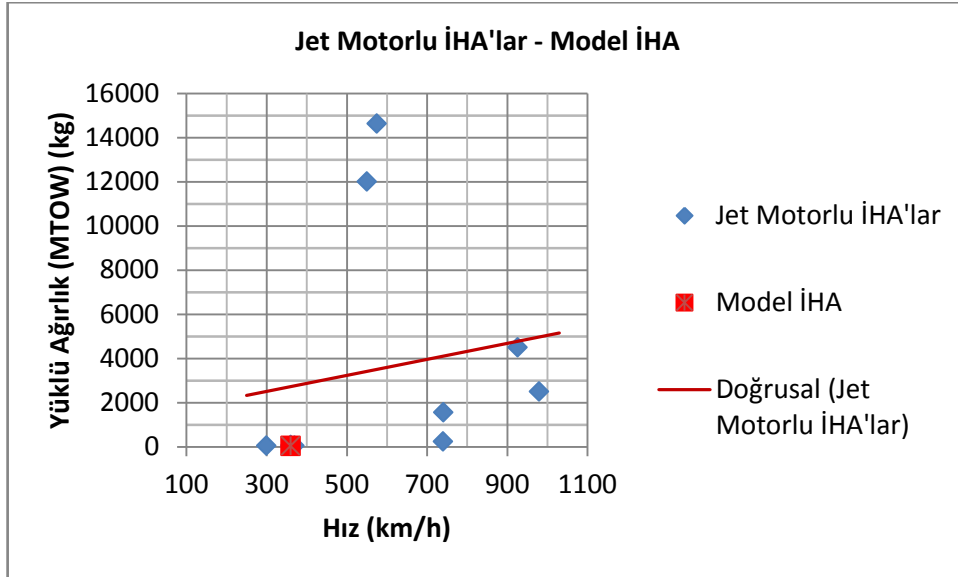
Bu durumun incelenebilmesi için dünya üzerinde değişik ülkelerde tasarlanmış olan farklı tipteki insansız hava araçlarının bir kısmı (Çizelge 2.6, Çizelge 2.7 ve Çizelge 3.1) farklı kategorilerde ele alınmış ve seçilen model İHA ile karşılaştırılmıştır. Model İHA için kullanılan değerler ilk tasarım için belirlenmiş kavramsal verilerdir.



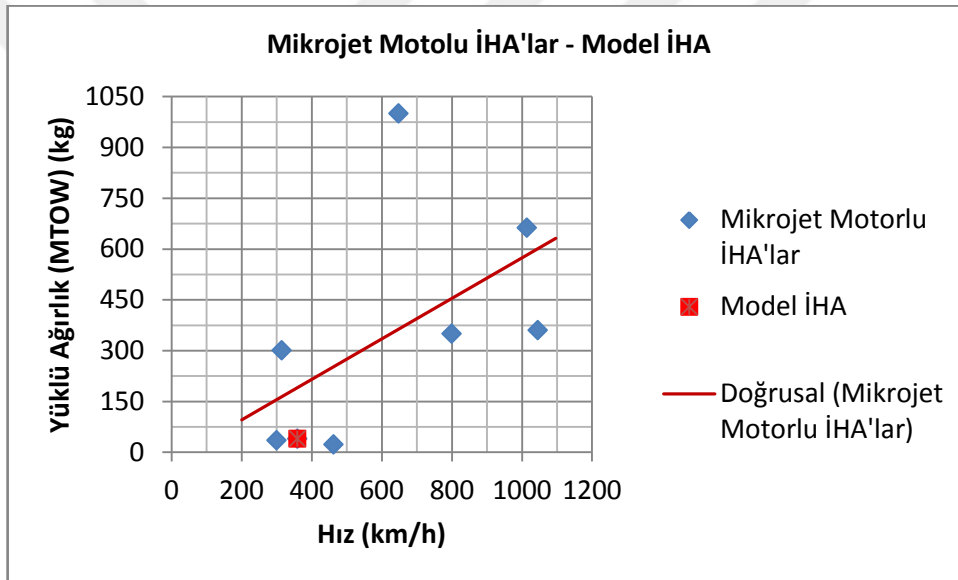
Şekil 3. 16 Pervaneli İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması

Şekil 3.16'da pervaneli İHA'lar ve Model İHA'nın hız ve yüklü ağırlık değerleri grafiğe işlenmiştir. Ortalama değerler için bir doğru çizilmiştir. Model İHA'nın bu doğruya yakınlığı bize ağırlığının uçuş hızı ile orantılı bir değere sahip olduğunu göstermektedir.

Jet motorlu İHA'ların Model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, model İHA'nın diğer İHA'lara kıyasla hız ve ağırlığının düşük kaldığı görülmektedir. Bunun sebebi incelendiğinde diğer İHA'lardaki motor tipinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Büyük boyutlu jet motorlarının mikro jet motorlara kıyasla daha fazla itki ürteceği aşikardır. Bunun neticesinde bu motora sahip İHA'lar daha fazla hıza ulaşacak ve daha fazla ağırlık taşıyacaklardır. Yine de Model İHA doğruya yakın bir konumdadır.



Şekil 3. 17 Jet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması

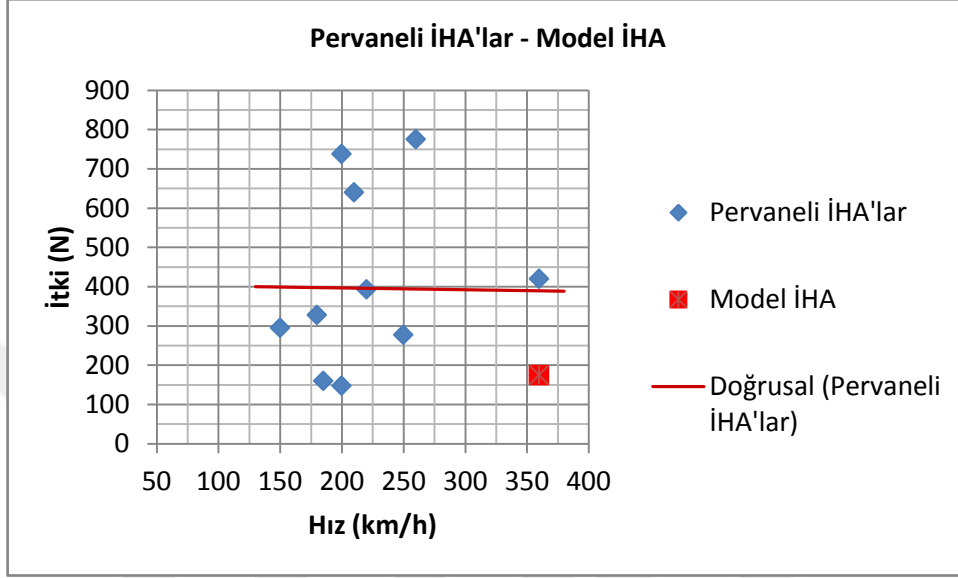


Şekil 3. 18 Mikrojet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması

Mikrojet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-yüklü ağırlık (MTOW) karşılaştırması Şekil 3.18'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde model İHA'nın çizgisel doğruya yakın olduğu görülmekte bu da hız-yüklü ağırlık değerlerinin uygun olduğunu göstermektedir. Bu grafikte bazı İHA'ların daha fazla hız veya yüklü ağırlığa sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri incelendiğinde, ilave motor ya da farklı tip başka bir motorla İHA'nın desteklendiği görülmüştür. İlave itki ise hızı ve taşınan yükü artıracaktır.

Pervaneli İHA'lar ve Model İHA'nın hız-itki kıyaslaması yapıldığında (Şekil 3.19), Model İHA'nın hızının yüksek fakat itki değeri olarak düşük olduğu görülmektedir. Hızının

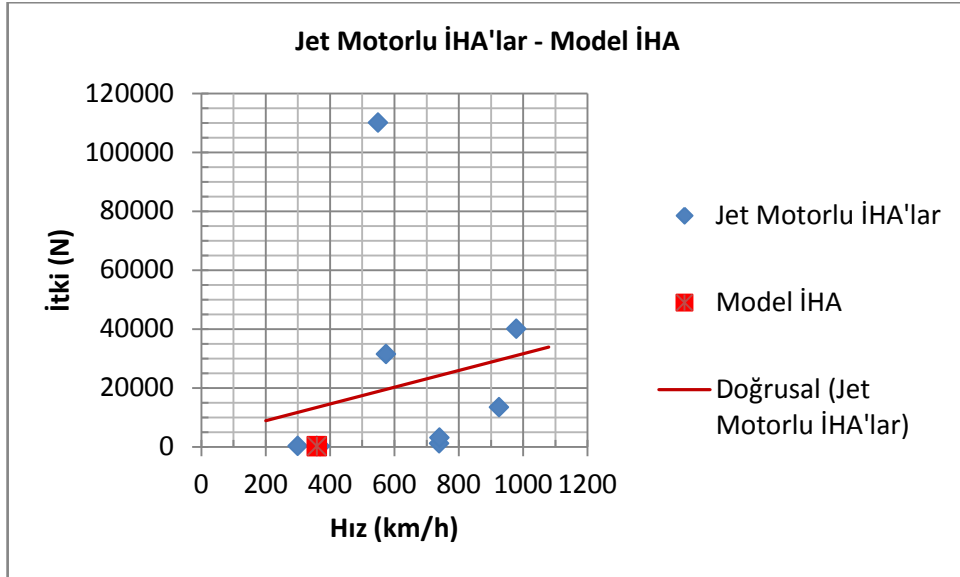
yüksek olması motor tipinden ve itkinin düşük olması ise küçük tip motor olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca pervaneli motorlar itki yönünden daha avantajlıdır fakat hız yönünden aynı durum söz konusu değildir. Model İHA'nın doğrusal çizgiye yakın olması hız – itki dengesinin normal değerlerde olduğunu göstermektedir.



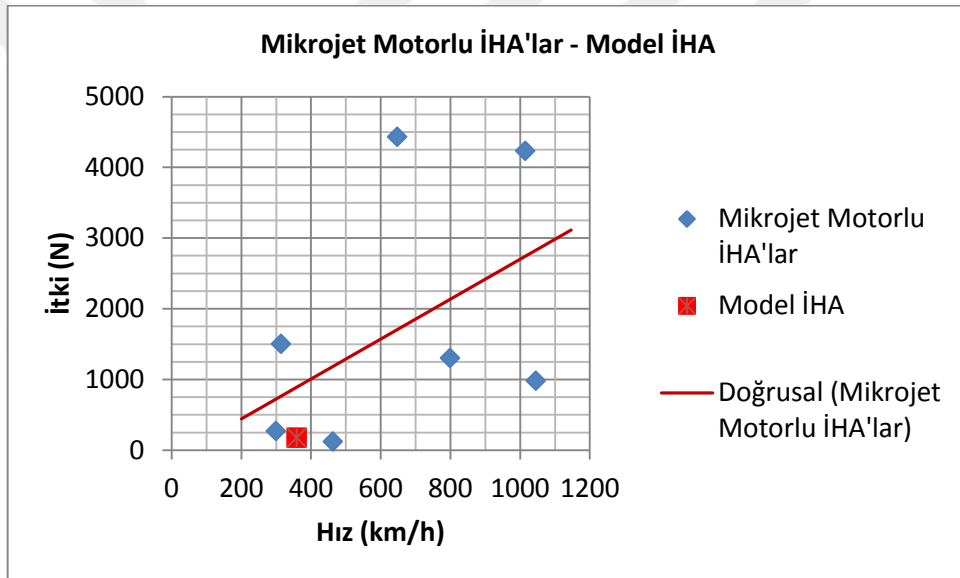
Şekil 3. 19 Pervaneli İHA'ların model İHA ile hız-itki karşılaştırması

Jet motorlu İHA'ların Model İHA ile hız-itki kıyaslaması Şekil 3.20'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi Model İHA gerek hız gerek itki olarak diğer İHA'lara göre oldukça düşük değerlerde ve nerdeyse yatay eksene yapışık durumdadır. Takdir edilir ki mikro jet motora göre daha büyük ebatlara sahip olan jet morları daha fazla itki üretecek ve bunun sonucunda üzerinde bulunduğu hava aracının hızını artıracaktır. Model İHA'nın doğrusal çizgiye yakın olması hız – itki dengesinin normal sınırlarda olduğunu göstermektedir.

Mikrojet motorlu İHA'ların model İHA ile hız – itki karşılaştırması yapıldığında (Şekil 3.21), model İHA düşük hız ve itki değerlerinde olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri araştırıldığında, diğer İHA'larda ikinci bir mikrojet motoru ya da mikrojet motorunun yanında başka tip motorun kullanılmış olduğu görülmüştür. Sonuçta Model İHA'nın doğrusal çizgiye yakın olması hız – itki dengesinin normal değerlerde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 20 Jet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-itki karşılaştırması



Şekil 3. 21 Mikrojet motorlu İHA'ların model İHA ile hız-itki karşılaştırması

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere mikrojet motorlu Model İHA'nın, farklı ülkelerde kullanılan mevcut değişik motor tipine sahip İHA'larla hız, itki, yüklü ağırlık kıyaslaması yapıldığında sahip olduğu değerlere göre güvenli uçağı öngörülmektedir.

3.2.4 Öneriler

Bazı olağan dışı şartlarda ortaya çıkan ihtiyaçları mevcut hava araçları karşılamayabilir. Bu durumda yeni bir hava aracı tasarımı, üretimi ve testleri uzun zaman alacağından başka alternatifler bulmak zorunluluğu olacaktır. Bu alternatif çözümleri üreten ülkeler, savaş zamanında önemli üstünlükler elde ederek savaş seyrinin lehlerine dönmesini

sağlamışlardır. Bunun örneklerini İkinci Dünya Savaşında daha net olarak görmekteyiz. Aşağıda model İHA'nın görev tipine göre alternatif çözümlerden bazı örnekler verilmiştir.

- Model İHA'nın görev tipine göre daha uzun süre havada kalması isteniyorsa; ilave yakıt tankı montajı veya mevcut depo hacminin artırılması sağlanabilir.
- Model İHA'nın diğerlerine göre daha hızlı olması isteniyorsa; ilave motor (çift motor) takviyesi ya da daha büyük boyutta motor (itkisi daha fazla motor) seçimi yapılabilir.
- Model İHA'nın daha fazla faydalı yük taşınması isteniyorsa; ilave motor (çift motor), başka tipte ilave motor, daha büyük boyutta motor (itkisi daha fazla motor) seçimi veya kanat yüzey alanının artırılması sağlanabilir.

3.2.5 Sonuçlar

Şehirlerde veya zorlu arazi şartlarında bir İHA'dan hem keşif hem de taarruz yapması bekleniyorsa bu aracın hızlı ve yüksek manevra kabiliyetine sahip olması aranan özellikler olacaktır. Bu tarz istekleri ancak jet motoru özelliklerine sahip küçük bir İHA karşılayabilir. Bu istekleri karşılayabilecek en uygun motor mikro jet motorudur.

Bir mikro jet motorunun performans parametreleri öncelikle motorun itkisine ve yakıt sarfiyatına bağlıdır. Bunların yanında, motorun ağırlığı, kesit alanı, uzunluğu, kullandığı yakıt, aksesuarları ve kullanım ömrü de motoru öne çıkaran bileşenlerdir. Bir İHA için mikro jet motoru seçilirken, tasarlanırken bu başlıklar tek tek incelenmeli ve gerekli hesaplamaları tüm ayrıntılarıyla yapılmalıdır. Tüm bunlara ek olarak mikro jet motorunun tüm parçaları gerek kullanılan malzeme gerekse çalışma mantığı bakımında incelenmeli ve en iyi verimi verecek şekilde seçilmeli, tasarlanmalıdır. Üretilen ilk mikro jet motoru ile günümüzde kullanılan mikro jet motorları arasında oluşan performans farkının temeli mikro jet motorlarında kullanılan parçaların hem malzemelerinde hem de yapılarında yapılan ufak değişikliklerdir. Her iki alanda da gelişme olması durumunda mikro jet motorları da gelişmeye devam edecektir.

Bu çalışmada, İHA ve İHA motorları incelenmiş, devamında keşif ve taarruz amaçlı model bir İHA seçimi yapılarak uygun bir mikro jet motoru hesabı yapılmış çıkan sonuca göre uygun bir endüstriyel tip mikro jet motoru seçimi yapılmıştır. Mikro jet motorlu

Model İHA'nın diğ er İHA'lar ile performans kıyaslaması grafiklerle yapılmış ve Model İHA performansının istenen değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Günümüzde kullanılan İHA ve bunlara ait motorların performanslarının malzeme teknolojisine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Bu alanlarda yapılacak yenilikler, paralelinde İHA teknolojisine de yansıyacaktır.



MİKRO JET MOTORU RADYAL AKIŞLI TÜRBİN KANADI ISI İNCELEMESİ

Yanma odalarında genişleyen gazların ortaya çıkan kinetik enerjilerinin, şaft çıkış gücüne çevrildiği, bu gücün de kompresörü, yardımcı sistemleri ve bir çıkış şaftını çevirdiği, kısım türbin kısmıdır. Kinetik enerji kompresörü ve aksesuarları tahrik etmek için gerekli mil gücüne çevrilir. Yanmadan elde edilen enerjinin yaklaşık dörtte üçü kompresörü çalıştırmak için kullanılır. Eksenel akış türbininde bir türbin çark rotoru ve bir set sabit kanatlı stator bulunur. Stator kanatçıkları belli bir açıda yerleştirilmişlerdir ve gazları türbin çarkının kanatçıklarına boşaltan küçük lüle görevi yaparlar. Eksenel kompresör gibi eksenel türbin de kademelidir. Rotora çıkış yapan gazlar kinetik enerjinin mekanik mil enerjisine dönüşmesini sağlar. Genelde türbinde kompresör kademesinden daha az kademe vardır. Türbinlerin radyal akışlı ve eksenel (aksiyal) akışlı olmak üzere iki tipi vardır. Mikro jet motorlarında genelde radyal akışlı türbinler kullanıldığından bu bölümde sadece radyal akışlı mikro jet türbin incelemesi yapılacaktır.

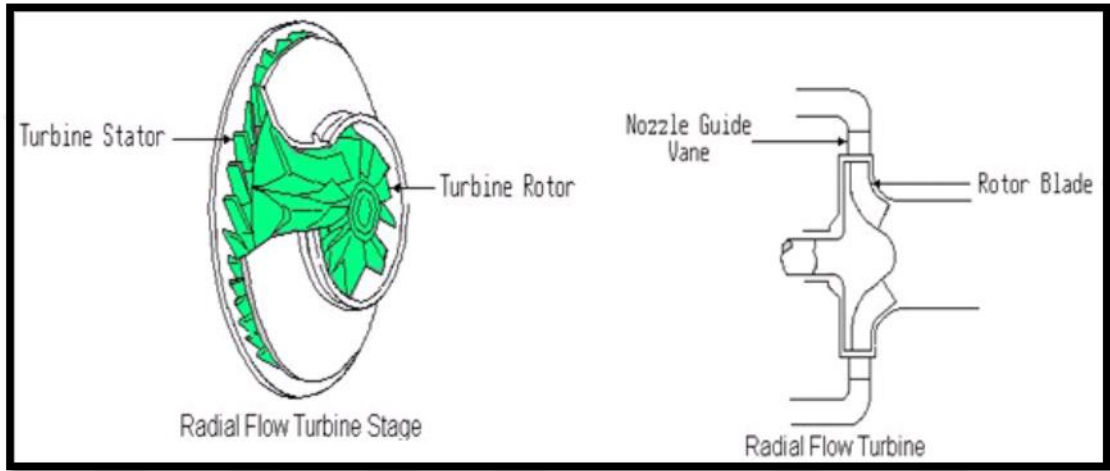
4.1 Radyal Akışlı Türbinler

Radyal akışlı türbinler fiziki görünüm olarak radyal kompresörlere benzemekte fakat türbinde, kompresörde olan dışa akışın yerini içe doğru akış, difüzör kanatçıklarının yerini de nozul kanatçıkları almaktadır. Radyal akışlı türbinler gaz türbinlerinin yüksek sıcaklıktaki çalışma ortamları için uygun değildirler ve çok küçük güçler dışında eksenel türbinler gaz türbinlerinde daha verimlidir. Radyal akışlı türbinler yüksek performans beklentisi olmayan küçük gaz türbinlerinde daha çok tercih edilmektedirler. Günümüzde bu tip türbinler genelde taşımacılık sektöründe dizel araçların turboşarjeri

olarak ve kimya endüstrisinde, İHA'larda, nadiren de olsa küçük helikopterlerde kullanılmaktadır.

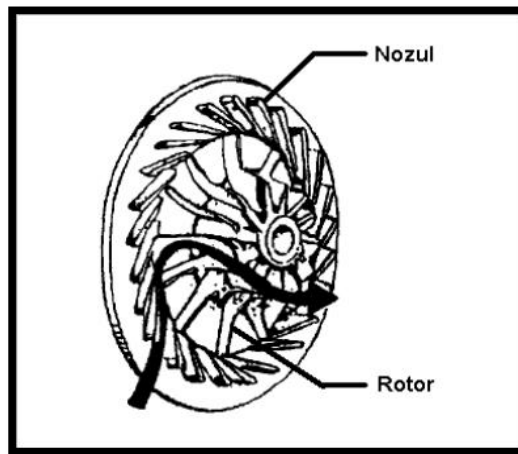
Her iki tip türbinde ortak olan ana bileşenler, sabit stator (vane) ve hareketli rotordur (blade). Türbin bir veya daha fazla kademeli olabilir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, her bir kademe, stator (vane) ve rotordur (blade).

Eksenel türbinle kıyaslandığında birçok dezavantajı ortaya çıkar. Az hava akışı sağlaması ve aerodinamik kayıplar (akışın santrifüj kayıplara uğrayarak türbinden geçmek zorunda olması) nedeniyle daha düşük verimle çalışır.



Şekil 4. 1 Radyal akışlı türbin impelleri ve radyal akışlı türbin kesiti

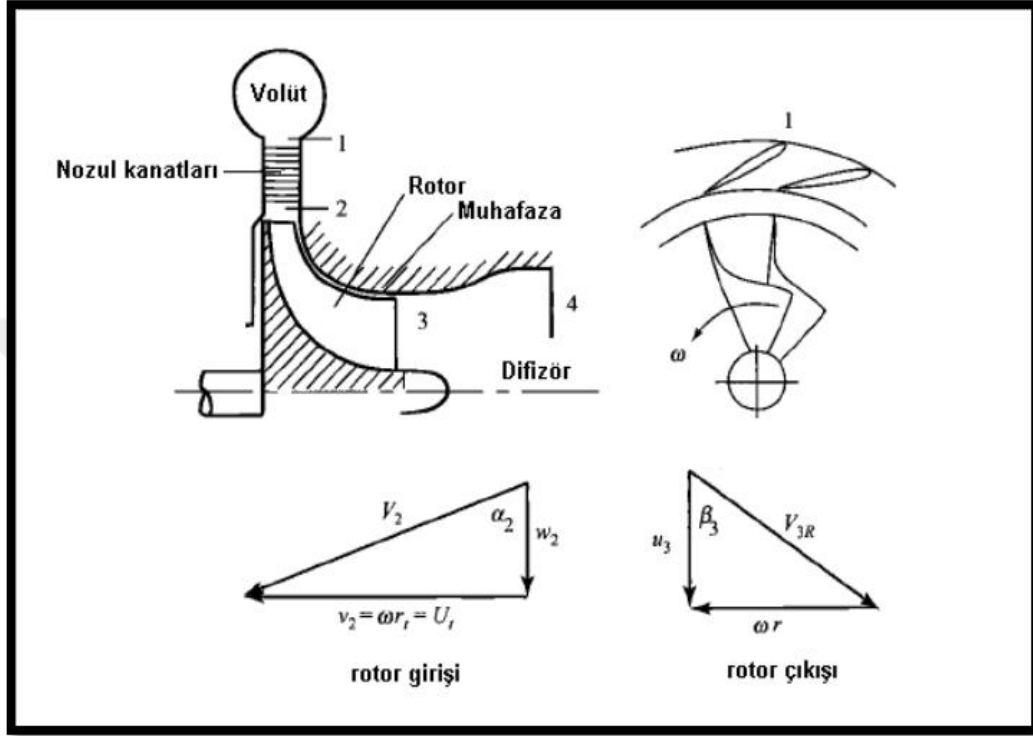
4.1.1 Çalışma Prensibi



Şekil 4. 2 Radyal akışlı türbinde akış [39]

Radyal akışlı türbinde nozul ve rotordaki akış Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Nozullar akışı ivmelendirmekte ve tanjant hızı arttırmaktadır. Rotor ise akışın tanjant hızını

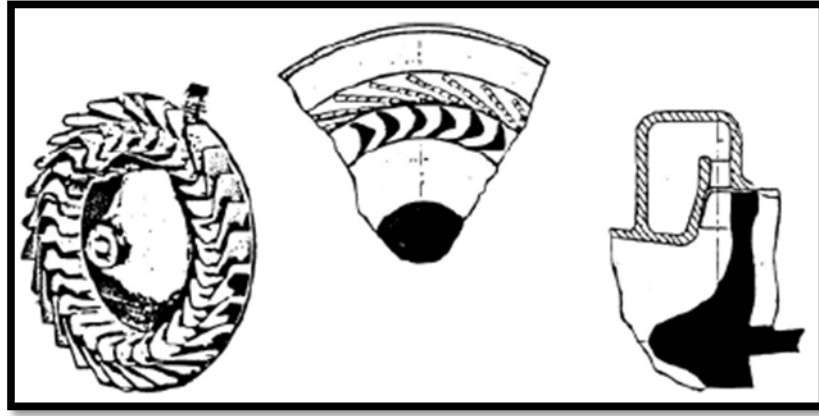
düşürerek akışın enerjisini çıkarmaktadır. Rotor çıkışında hız eksenel yöndedir. Şekil 4.3'de numaralı istasyonlar şeklinde radyal akışlı türbinin analizi yapılmaktadır. Akış nozullara 1 no'lu istasyondan girerek 2 no'lu istasyondan çıkar. Sonraki aşamada akış rotora girer ve rotor boyunca hareket ederek 3 no'lu istasyondan çıkar. Akış rotoru eksenel yönde terk etmektedir.



Şekil 4. 3 Karışık içe akışlı radyal türbin donanımları ve hız profilleri [39]

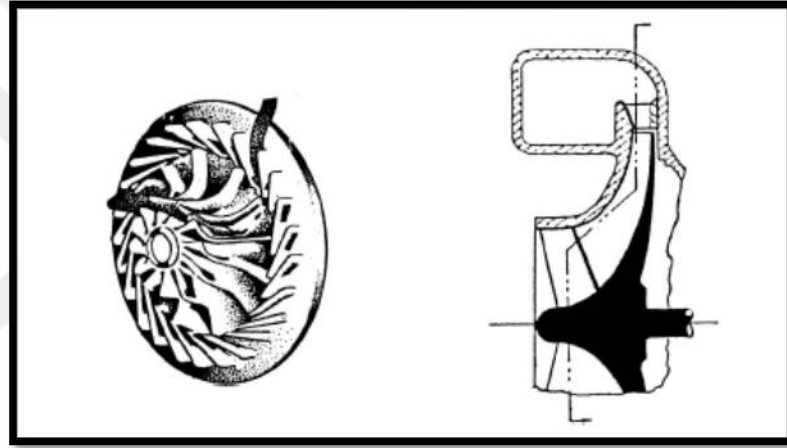
4.1.2 Kademe Aerodinamiği, Aerothermodinamiği ve Hız Profilleri

Radyal akışlı türbinlerin dirsekli içe akışlı radyal türbin ve karışık akışlı içe akış radyal türbini olmak üzere iki tipi mevcuttur (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Dirsekli kanatlar iki boyutludur ve radyal olmayan giriş açıları kullanmaktadırlar. Bu tipte impuls türbinindeki gibi rotorda akış ivmelendirilmez ve düşük verim, üretim zorluğu, rotor kanat sarsıntısı nedeniyle kullanım alanı çok kısıtlıdır.



Şekil 4. 4 Dirsekli içe akışlı tip radyal türbin [40]

Karışık içe akışlı radyal türbinler uygulamada en çok kullanılan radyal akışlı türbinlerdir ve donanımları Şekil 4.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 Karışık içe akışlı radyal türbin [40]

Donanımlardan volüt (salyangoz) girişteki çemberin yüzey alanını düşürmekte, bazı tasarımlarda kanatsız nozul göreviyle kullanılmaktadırlar. Nozul kanatları, hava akışındaki sıvı veya katı partiküllerin neden olduğu metal erozyonunu engelleyerek türbine ekonomiklik gibi bir kazanç sağladığından bazı radyal akışlı türbin dizaynlarına dahil edilmezler. Fakat akışın üniform olmayan davranışlarından ötürü, kanatsız dizaynlarda kanatlı dizaynlara göre daha fazla sürtünme kayıpları meydana gelmektedir. Kanatsız nozul konfigürasyonları genellikle verimin önemli olmadığı turboşarjlarda kullanılmaktadır. Kanatlı nozul uygulamalarında akış bu kanatlar boyunca ivmelendirilmektedir. Radyal akışlı türbinin impelleri göbek, kanatlar ve muhafazadan oluşmaktadır. Kanatlar göbeğe entegre edilerek akım çizgilerine normal kuvvetleri uygulamaktadırlar. Kanatlı kesimin hemen çıkışında radyal akışlı

kompresördekine benzer yapıda tam tersi görevi icra eden eksdüser kısmı yer almaktadır. Eksdüser kanat çıkışındaki tanjantsal hız kuvvetlerini ortadan kaldıracak şekilde kıvrımlı bir yapıda imal edilmektedir. Çıkıştaki difüzör ise eksdüseri terk eden yüksek değerlerdeki mutlak hızı statik basınca çevirmekle görevlidir.

4.1.3 Mikro Jet Motorları

Mikro jet motorları basitçe gerçek boyutlu motorların küçültülmüş boyutu değildir. Temel çalışma metodu aynıdır, fakat farklı bir talep ve genellikle basit tasarım için özel düşünülmesi gereken noktaları vardır. Bu husus Bölüm 3.1’de bahsedildiği için burada kısaca bahsedilmiştir. Bu motorların devir sayıları normal jet motorlarına göre oldukça yüksektir ve yanma proseslerine yeterli süre sağlayamamaktadır. Bir çözüm olarak radyal akışlı tasarım da yapılmaktadır.

4.2 Problem Tanımı

Bu kısımda, model İHA’da kullanımı amaçlanan mikro jet motoru radyal akışlı türbin kanatları arasındaki akışın analizi, radyal türbin kanadında meydana gelen sıcaklık dağılımı, İHA’nın 7 farklı çalışma şartlarında türbin dış yüzey, yan yüzey ve merkez kısmı için ısı taşınım katsayısı (h) tanımlaması yapılarak incelenecektir. Sorunu basitleştirmek için, hava türbin kanatçıkları arasından geçerken türbin rotorunun sabit olduğu varsayılır. Rotorun bıçakları türbin üzerinde homojen olarak dağıtılır.

Analizi sırasında kanatçık malzemeleri çelik malzeme ve akışkan sıkıştırılamaz hava olarak kabul edilecektir. Rotor çapı, gerçek uygulamalar göz önüne alınarak 200 mm olması tercih edilir.

4.3 Sayısal Analiz Yöntemi

Türbin kanadında sıcaklık dağılımını veya ısı transfer yayılımını incelemek için sayısal yöntemlerde genellikle ısı-akış yöntemi kullanılır. Daha önceleri ayrı ayrı çözülüp sonrasında bir ara yüz yazılımıyla bir araya getirilip yapılan analizler, son yıllarda geliştirilen bilgisayar programları yardımıyla hem ısı transferi hem de akış analizi birlikte yapılabilmektedir. Akış alanındaki taşınım ısı denklemleri ve katı alandaki ısı iletim denklemleri aynı anda hesaplanabildiğinden, yapılan sıcaklık alanı analizleri daha

gerçekçi olmaktadır. Bu yöntemde, akışkan akışı için Navier Stoks (Navier Stokes) çözücüsü ve katıdaki ısı iletimi için sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılmıştır.

Bu çalışmada sayısal analiz için COMSOL bilgisayar programı kullanılmıştır [41]. Program birbiriyle ilişkili fizik şartlarındaki çalışmalarını aynı anda çözebilmeye olanaklıdır. Bu kapsamda, katı ve sıvı içerisindeki ısı transferini birbiriyle ilişkili olarak çözecek şekilde ayarlama yapılmıştır. Burada program içerisinde seçilen fiziki çalışma, ısı transferi ve türbülanslı akıştır. Bu ikisi için uygun denklemler, sıkıştırılabilir izotermal olmayan akış ve birleşik ısı transferini karşılayan sırasıyla süreklilik (4.1) ve momentum korunumu (4.2) eşitlikleri aşağıda verilmiştir [41].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right] + F \quad (4.2)$$

Burada, ρ yoğunluk, u hız vektörü, p basınç, μ dinamik viskozite, F hacim kuvvet vektörüdür. Ayrıca çözüm sırasında, akışkan ısı denklemi de çözülür (4.3).

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T \right] = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_p \left[\frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla) p \right] + Q \quad (4.3)$$

Burada, C_p sabit basınçta özgül ısı kapasitesi, T mutlak sıcaklık, q ısı akışı, τ viskoz gerilme tensörü, Q viskoz ısınmadan farklı olan ısı kaynakları ve S deformasyon hızı tensörüdür ve eşitlik (4.4) ile ifade edilir.

$$S = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (4.4)$$

Basınca göre yapılan iş terimi;

$$\alpha T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) \text{ ile } \alpha_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial T} \bigg|_p \quad (4.5)$$

Ve viskoz ısıtma terimi; $\tau : S$ varsayılan olarak dahil edilmez, çünkü bunlar genellikle önemsizdir. Bununla birlikte, bu terimler, İzotermal Olmayan Akış özelliğindeki ilgili onay kutularına dahil edilerek eklenebilir. Fizik arayüzü ayrıca katılarda ısı transferini de destekler;

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -(\nabla \cdot q) + Q + Q_{ted} \quad (4.6)$$

Burada, Q_{ted} , termoelastik sönümlenme ısı kaynağıdır. Bu terim varsayılan olarak dahil değildir, ancak programda karşılık gelen onay kutusu seçilerek eklenir.

Newton'un ikinci hareket denklemi üzerinde yapılan işlemlerle elde edilen Navier-Stokes denklemleri hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde kullanılan temel denklemlerdendir (4.7).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

Denklemden anlaşılacağı üzere Newton'un ikinci kanunundan elde edilen momentum denklemi, x-ekseni için eşitlik (4.8) yazılabileceği gibi y ve z eksenlerinde de eşitlik (4.9) yazılabilmektedir.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \sum F_x \quad (4.8)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_y$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \sum F_z \quad (4.9)$$

Temel olarak termodinamiğin birinci yasasında yapılan işlemlerle elde edilen enerjinin korunumu denklemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde de kullanılmaktadır (4.10).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.10)$$

Mühendislik problemlerinde türbülanslı akışların karmaşıklığı dolayısıyla formüllerin uygulanabilmesi için benzer geçiş denklemleri geliştirilmiştir. Bunlardan endüstriyel uygulamalar için en çok kullanılan model, k-ε modelidir. Bu çalışmada, akışkan yüksek hızlarda olduğu için bu model kullanılmıştır. Model iki ilave iletim denklemi ve türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans sönümlenme oranı (ε) bağdaştırmak için kullanılan denklemlerdir (4.11). Türbülanslı akış içeren mühendislik problemlerinin çözülmesinde yaygın olarak kullanılan bu tipik iki denklemlilik türbülans modeli Launder ve Spalding tarafından standart k-ε modeli olarak 1974 yılında geliştirilmiş olup denklemler aşağıda gösterilmiştir [42].

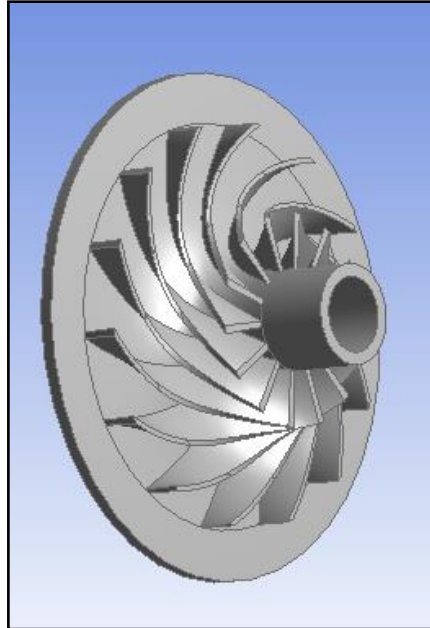
$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{vT}{\sigma k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{vT}{\sigma k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P - D$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{vT}{\sigma \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{vT}{\sigma \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} D) \quad (4.11)$$

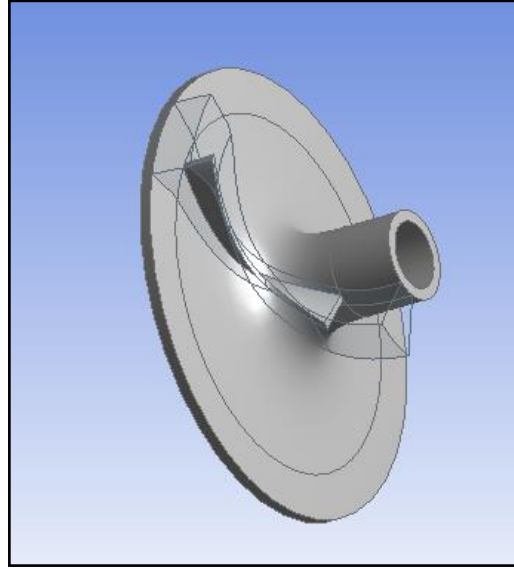
4.4 Türbinin Geometrik Modeli

İlk önce analizi yapılacak parçanın ya da kontrol hacminin geometrik şekli çizilmelidir. Bu ya doğrudan programın içinde bulunan ara yüzler ya da modüller yardımıyla çizilebilir ya da AutoCAD, Pro/Engineer, SolidWorks, CATIA gibi bir tasarım programıyla katı model çizilerek program içine aktarılabilir. Yapılan çalışmada pal geometrisinin çiziminde bu süreçler dikkate alınmıştır. Bu analizde geometri, “ANSYS Workbench” içinde “BladeGen” Modülü kullanılarak oluşturulmuş [43] ve daha sonra CATIA programında modifiye edilmiştir [44]. Varsayılan boyutları ile CATIA’da modelleme sonrası, 200 mm gerçek boyutuyla ölçekli hale getirilmiştir. Buna ek olarak, kanatçıklar on dört adet olacak şekilde tasarlanmıştır. Rotor çapı, kanat kalınlığı ve yüksekliği, sırasıyla 200 mm, 2 mm ve 15/22 mm olarak seçilmiştir.

Radyal akışlı mikro jet motor türbininin katı modelleme geometrisi Şekil 4.6’da ve tek kanat için akış alanı geometrisi Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.8’de türbin rotor akış geçiş alanının anlaşılacağı rotor kanat geometrisinin teknik çizimi gösterilmiştir.

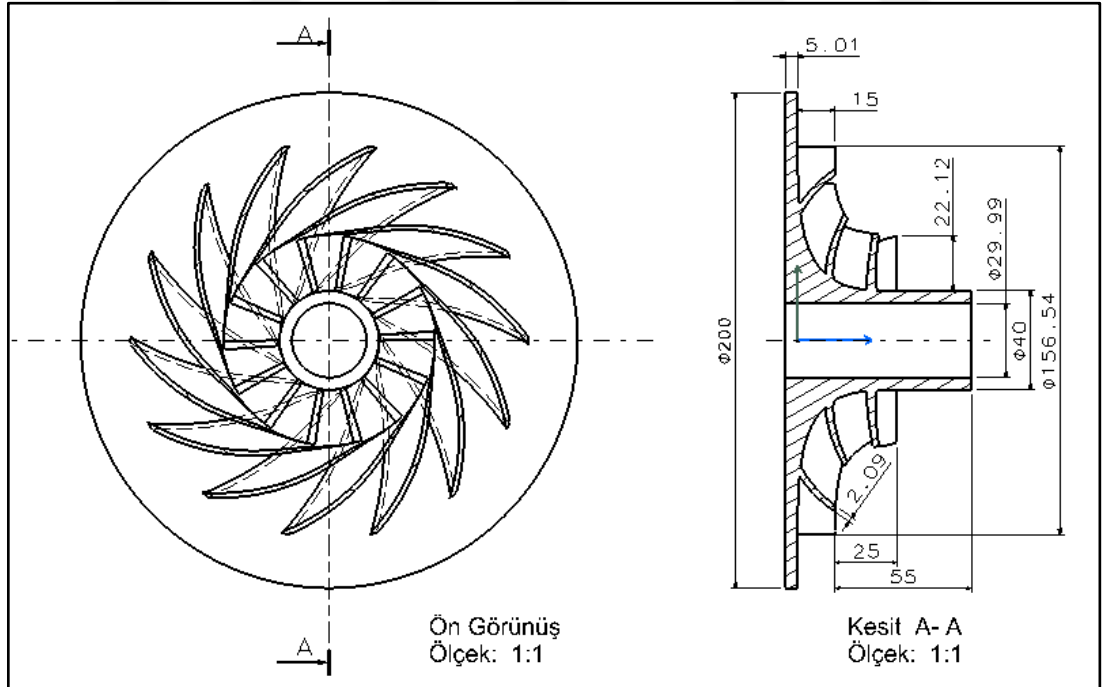


Şekil 4. 6 Radyal akışlı mikro gaz türbinin katı modelleme geometrisi



Şekil 4. 7 Radyal akışlı mikro gaz türbinin tek kanat için akış alanı geometrisi

Türbin rotorunun tek kanadı analize dahil edileceğinden sadece tek kanat ve buna ait akış alanı oluşturulmuştur. Geometrinin son hali “Comsol” programındaki geometri alt programından import ile Comsola aktarılmıştır.



Şekil 4. 8 Türbin rotor kanat teknik çizim geometrisi

4.5 Ağ Oluşturma

Tercih edilen ağ oluşturma programı, Comsol içinde yer alan ağ oluşturma alt programıdır. Tipik ağ oluşturma uygulamaları, elektromagnetik, mekanik, belirgin dinamik vs. gibi fiziksel tercihlere çok bağlı olabilir. Bu projede, CFD analizi yapılacağından program içindeki ağ oluşturma kullanılacaktır. İlk basamakta program içinde farklı katagoride çok kaba ağ oluşturmadan çok ince ağ oluşturmaya kadar tanımlanmış ağ oluşturma tercihi bulunmaktadır. Geometrinin farklı bölgelerine ihtiyaca göre farklı ağ oluşturma yapılabilmektedir. Bu çalışmada da uygun ağ oluşturma bulunana kadar iyileştirme çalışması yapılmıştır. Daha doğru sonuçlar elde etmek için program, bu ağ oluşturma üzerinde ileri düzeyde iyileştirmeler yapabilme imkanı vermektedir.

4.5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Ağ Oluşturma

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı çeşitlerdeki birçok mühendislik problemine çözüm bulmak için uygulanabilecek sayısal bir işlemdir. Isı transferi, elektromanyetizma, akışkanlar mekaniği, kararlı veya değişken rejimli, lineer veya lineer olmayan durumlar için gerilim analizi problemlerinin analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilmektedir. Modern sonlu elemanlar yönteminin gelişimi 1900'lu yılların başında başlamıştır. Bazı araştırmacılar bu yıllarda sürekli elastik durumları eş boyuttaki kesikli elastik parçalar şeklinde modellemeyi seçmişlerdir. Bununla birlikte, Courant sonlu elemanlar yöntemini geliştiren ilk kişi olarak anılmaktadır. Courant, 1940'lı yıllarda yayınlanan bir makalesinde, burulma problemlerini araştırabilmek için parçalı polinom interpolasyonu yöntemini üçgensel alt bölgeler (elemanlar) incelemesinde kullanmıştır.

Courant'tan sonra, sonlu elemanlar yöntemleri Boeing firmasının 1950'lerde uçak kanatlarını modellemesinde üçgen elemanlar kullanmasıyla mühendislik problemlerinde bir kez daha önemli bir şekilde kullanılmıştır. 1960'larda ise bilim insanları sonlu elemanlar yöntemini tüm mühendislik alanlarında yaymaya başlayıp çalışmalarını geliştirmişlerdir. 1967'de Zienkiewicz ve Cheung tümüyle sonlu elemanlar yöntemini anlatan bir kitap yazmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımı ilk yıllarda bütün işlemler elle yapılarak gerçekteşmekteydi. Bu nedenle işlemler 10-100 sayıları arasında eleman için

yapılmakta idi. Ancak eleman sayısının azlığı sonuçların doğruluğunu ve hassasiyetini kısıtlaması dolayısıyla problem teşkil etmekteydi. Devamında bu işlemler bilgisayara aktararak eleman sayıları arttırıldı. Günümüzde ise problemlerde milyonlarca eleman kullanılabilir. Örnek olarak sivil bir uçağın geometrisine uygulanacak ağ oluşturma işleminde yaklaşık 1,5 milyon düğüm noktası olmasına karşılık 10 milyon eleman kullanılması normal bir durum sayılabilir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde modeller sonlu sayıda elemanlara bölünmekte olup bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır. Bu noktalara düğüm (node) denmektedir. Mesela katı modellerde her elemandaki oluşan yer değiştirmeler direkt olarak düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkili olmaktadır. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerde oluşan yer değiştirmeleri çözmektedir. Bu nedenle düğüm noktaları mutlaka belirli noktalardan sabitlenmelidir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi'nde düğüm noktaları için tanımlanan şartlar, cebrik lineer denklemlere çevrilerek, önce bu denklemlerin çözülmesi sağlanır ve bütün elemanlardaki gerçek gerilmeleri bulunmaya çalışılır. Sonuç olarak model ne kadar çok elemana ayrılırsa o modele uygulanan yükün gerçek değerine göre daha doğru sonuçlar elde edilir

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar çalışırken aşağıdaki işlemleri uygularlar [45].

4.5.1.1 Parçanın Modelinin Çizilmesi

İlk önce analizi yapılacak parçanın ya da kontrol hacminin geometrik şekli çizilmelidir. Bu ya doğrudan programın içinde bulunan ara yüzler ya da modüller yardımıyla çizilebilir ya da AutoCAD, Pro/Engineer, SolidWorks, Catia gibi bir tasarım programıyla katı model çizilerek program içine aktarılabilir. Yapılan bu çalışmada türbin geometrisinin çiziminde bu süreçler dikkate alınmıştır.

4.5.1.2 Eleman Tipi ve Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Daha sonraki aşama programa parça malzemesinin özellikleri girilmesidir. Mesela elastik bir analiz için malzeme özelliklerinden Poisson oranı, elastiklik modülü ve yoğunluk gibi özellikler girilmelidir.

4.5.1.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Bir sonraki adımda programa modelin veya kontrol hacminin sınır bölgelerindeki koşullar girilmelidir. Doğru sonuçların elde edilebilmesi açısından doğru sınır değerlerinin girilmesi hayati bir öneme sahiptir. Aksi takdirde geometrinin tanımlanması doğru yapsa da doğru sonuca ulaşamayacaktır.

4.5.1.4 Modele Ağ Oluşturma (Mesh)

Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin uygulanabilmesi için model küçük elemanlara bölünmelidir. Yani modele ağ oluşturma işlemi uygulanır. Burada önemli olan husus modelin nasıl şekilde daha iyi küçük elemanlara bölünebileceğidir. Bazı programlar bunu otomatik olarak yapabildiği gibi kullanıcıya da ağ oluşturma imkanı tanımaktadır. Ayrıca program otomatik olarak ürettiği ağ oluşturma üzerinde kullanıcının değişiklik yapmasını desteklemektedir.

4.5.1.5 Çözüm

Bu aşamada öncesinden girilen parametrelere göre problem çözülür.

4.5.1.6 Son İşlem

Sınır şartlarına ve uygulanan diğer etkilere bağlı olacak şekilde problem çözümlendikten sonra sonuçlar değişik grafiklerle ve animasyonlarla gösterilerek yorumlanabilmesi sağlanır.

4.5.1.7 Yeniden Ağ Oluşturma

Sonlu elemanlar yöntemiyle yaklaşık çözümler üretilebilir. Eleman sayısı, eleman tipi, ağ oluşturma yöntemi ve ağ üzerinde manüel olarak yapılan değişiklikler vasıtasıyla

özüm tekrarlanabilir. Böylece elde edilecek sonuçlar da farklı olacaktır. Bu işlem optimizasyon olarak adlandırılmaktadır.

Diğer bir çeşit optimizasyon da model üzerinde değışiklik yapılarak çözümün tekrarlanmasıdır. Genellikle tasarım aşamasındaki modellerin analizi yapıldığından böyle bir yöntem de izlenebilir.

4.5.1.8 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu adım belki de yapılan analizin en kritik aşaması olarak değerlendirilebilir. Çünkü elde edilen verilerin problemin çözümünde kullanıcıların istifadesine ne ölçüde yaradığı, nasıl bir anlam ifade ettiği veya çözümün doğru yapıp yapılmadığının anlaşılması bu aşamada gerçekleştirilir. Elde edilen veriler değerlendirilir ve kontrol edilir. Değerlendirmede sonuçlar daha önce elde edilmiş verilerle kıyaslanarak, teorik bilgiyle karşılaştırılarak veya tecrübeler dayalı olarak yapılabilir.

Bu sekiz adımın tümü çözülecek problemin karmaşıklığı ve büyüklüğü ne derecede olursa olsun uygulanmak zorundadır. Ancak programların özelliklerine göre yalnızca komutlar değışebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde endüstriyel mühendislik tasarımları ve analizleri için bir dayanak haline gelmiştir. Gittikçe daha büyük ve kompleks tasarımlara ait problemler sonlu elemanlar yöntemiyle çözölmek istenmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin giderek artan yaygınlığı dolayısıyla da otomatik ağ oluşturma algoritmalarının geliştirilmesi teşvik edilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin uygulandığı ilk yıllarda, tasarımların son şekline ait yüzlerce eleman kullanılarak oluşturulan çok basit simölasyonların yapılması yeterli olmaktadır. Buna karşın tanımlı aralıklarını yeterli elemanlara bölmek için çok fazla el ile uğraşılması gerekmektedir. Fakat tasarımların analizinde giderek daha fazla sayıda elemana ihtiyaç duyulunca el yöntemiyle bu ağ oluşturma zorlaşacağı ve çok zaman alacağı anlaşılmıştır. Bu nedenle bilgisayar tabanlı sistemler geliştirilerek el ile yapılan bu ağ oluşturma işlemlerinin bilgisayar sistemlerinde yapılmasına başlanmıştır.

İşlemlerin tümünün bilgisayara aktarılmasıyla birlikte tüm görevler bilgisayara verilmemiştir. Bu durumda dahi tasarımcıların üzerine düşen görevler bulunmaktadır.

Tanımlanacak ağ yapısı için hangi çeşit ağ oluşturma işlemi uygulanacağı seçilmelidir. Çünkü ağ oluşturma işleminde kullanılabilen birçok eleman şekli vardır. Ve her şeklin daha uygun olduğu tasarım tarzları mevcuttur. Örneğin akışkanlar mekaniğinde yapılan analizlerde kullanılan elemanlar ile yapı tasarımı analizinde kullanılan elemanlar birbirinden farklı olabilmektedir. Bunlara karar verirken konu hakkındaki tecrübelerden, yayınlardan, sonuçların gerçeğe uygunluğundan vs. faydalanılır.

Ağ oluşturma, ayrıca üzerinde durulması gereken bir nokta da ağ oluşturma yapılacak alandaki hangi bölgelerde eleman yoğunluğunun daha fazla olacağına karar verilmesidir. Genellikle büyük gradyana sahip olduğu bilinen yerlerde birim alana daha fazla eleman yerleştirilmektedir. Ağ oluşturmada bahsi geçenlerden başka seçim yapılabilecek birçok alternatif vardır. Örneğin ağ oluşturmada elemanların belirli bir fonksiyona bağlı olarak büyüklükleri değişebilir. Fakat günümüzde, karmaşık tanım aralıklarında tek bir tuş kullanarak ve fazla uğraşmadan milyonlarca eleman oluşturulması istenmektedir. Sonlu elemanlar teknolojilerinin tüketicisi olan havacılık ve otomotiv endüstrisi gibi endüstriler, tasarıma ait deneme sayılarını ve pazarlama sürelerini azaltmaya gereksinim duymaktadırlar. Ayrıca bu endüstrilerin ürettikleri ürünlerin yüksek derecede güvenli olması gerekmektedir. Hızlı, güvenli, kendi karar verebilen ağ oluşturucular ve algoritmalarını geliştirmek bu endüstrilerin gelişmesine büyük katkı yapacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle ağ oluşturma konusunun geliştirilmesinin gerekliliği üzerinde birlik sağlanırken, bunun nasıl yapılacağı hakkında değişik fikirler öne sürülmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin ve teknolojilerinin kullanıcıları arasında hangi şekildeki ağ yapısına ait elemanların en hassas ve doğru sonuca ulaştıracığı konusunda uzun süreli bir bilgi alışverişi yaşanmıştır. Bunun sonucunda, aynı serbestlik derecesine sahip olduğunda quadrilateral ve hexahedral şeklindeki elemanların üçgen ve tetrahedral şekilli elemanlara göre daha iyi performansa sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Ayrıca hexahedral şekilli elemanların kullanılması sayesinde eleman sayısını önemli miktarda düşürebilmektedir. Bu düşüşle birlikte de analiz zamanı ve analiz sonrası işlem zamanı azalmaktadır. Bunlara ek olarak non-lineer sistemler için ve elemanların dizilişinin fiziksel olarak önem arz ettiği yerlerde

hexahedral ve quadrilateral geometrili elemanların kullanılması daha uygun olmaktadır [45].

4.5.1.9 Ağ Oluşturma İşlemi Sırasında Karşılaşılabilecek Bazı Terimler

Ağ oluşturma konusunda araştırma yapacakların sık sık karşılaşılabilecekleri bazı terimler aşağıda sıralanmıştır [46]:

- Düğüm: Ağ yapısı içinde bulunan elemanların birleştiği noktalar.
- Eleman: Ağ yapısı içindeki çok köşeli veya çok yüzlü parçalar olarak tanımlanabilir. Genellikle üçgen, dörtgen, dört veya altı yüzlü şeklinde bulunurlar.
- Üçgenleştirme: Verilen noktalar kümesini üçgen ağ oluşturma yapacak şekilde birleştirmek.
- Ağ Oluşturma: Verilen fiziksel bir tanım aralığında düğümler oluşturarak bu düğümleri ağ oluşturma işlemi uygulamak üzere birleştirmek.
- İzotropik-Olmayan: Özellikleri farklı doğrultular boyunca değişebilen demektir.
- İzotropik-Olmayan Ağ Oluşturma: Ağ oluşturmada doğrultuya bağlı bir fonksiyonun kullanıldığı durumdur. Bu, ağ oluşturmada uzatılmış elemanlara kullanılır.
- Değişken Ağ Oluşturma: Elemanların büyüklüğünün bulundukları pozisyonuna bağlı olarak değiştiği ağ oluşturmadır.
- Structured Mesh: Bütün elemanlar aynı topolojiye sahip olduğu ağ oluşturmadır. Örnek olarak bütün elemanların aynı sayıda komşuya sahip olduğu durumlar verilebilir.
- Unstructured Mesh: Yapısındaki elemanların farklı topolojiye sahip olabileceği ağ oluşturma türüdür. Mesela tanım aralığının rastgele üçgenlere bölünerek atılan ağ oluşturma unstructured mesh olarak tanımlanır.

4.5.2 Uygun Ağ Oluşturma

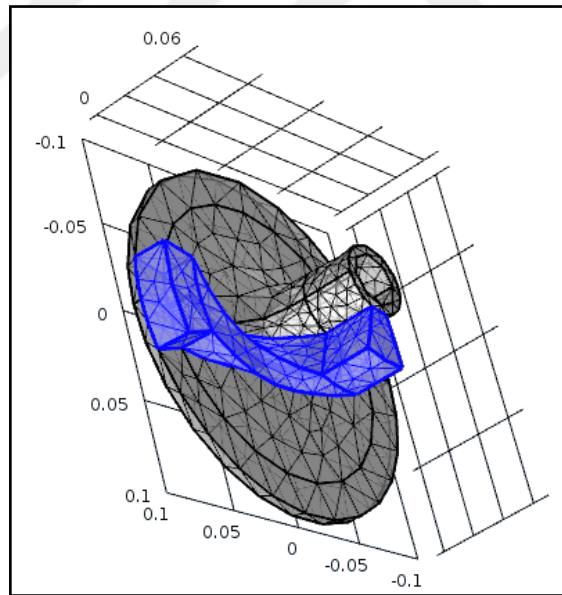
Bu kısımda istenen hassasiyette çözüm elde etmek için optimum ağ oluşturulması çalışması ele alınmıştır. Ayrıca gereksiz miktarda fazlaca eleman sayısı olan ağ oluşturulup uzun sürecek çözüm durumunun önüne geçmiş olunacaktır. Katı ve akışkan alanı için yapısal ağ oluşturmada ticari bir yazılım olan COMSOL-Mesh programı

kullanılmıştır. Comsol- Mesh bölümünden mevcut geometriye farklı hassasiyette ağ oluşturma yapılabilir. Bu kısımda istenen hassasiyette çözüm yapılabilmesi için farklı sıklıktaki ağ yapısıyla deneme yapılarak optimum ağ yapısına karar verilmiştir. Burada geometrinin her iki alanına da (katı ve akışkan alanı) aynı ağ oluşturma tanımlaması yapılacaktır.

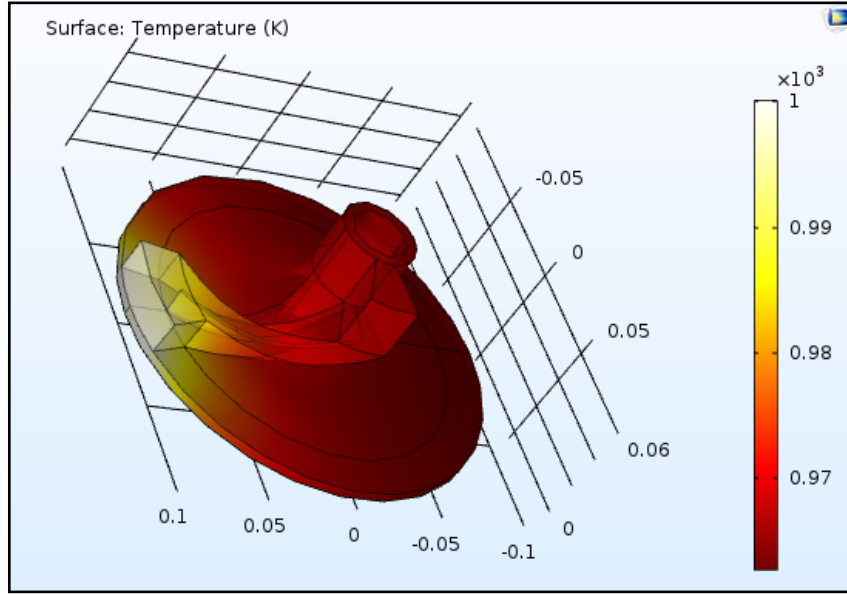
Deneme amaçlı çözüm aşamasına geçmeden önce programın doğru çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan parametrelerin sisteme girilmesi gerekir. Akışkan giriş sıcaklığı ve hızı sırasıyla 1000 K, 220 m/s olarak verilmiş, türbin radyal yüzey ve türbin merkez kısmına $0.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ h tanımlaması yapılmıştır. Akışkan türbülanslı olduğundan, akış kısmında k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir.

4.5.2.1 Ekstra Kaba (Extra Coarse) Ağ

Componenet-Mesh bölümünden ekstra kaba ağ (extra coarse) seçilerek mevcut geometriye ağ oluşturma yapılır. Komple ağ, 2183 hacim, 1141 yüzey, 297 kenar elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4. 9 Rotor tek kanat ve akış alanı için ekstra kaba ağ oluşturma

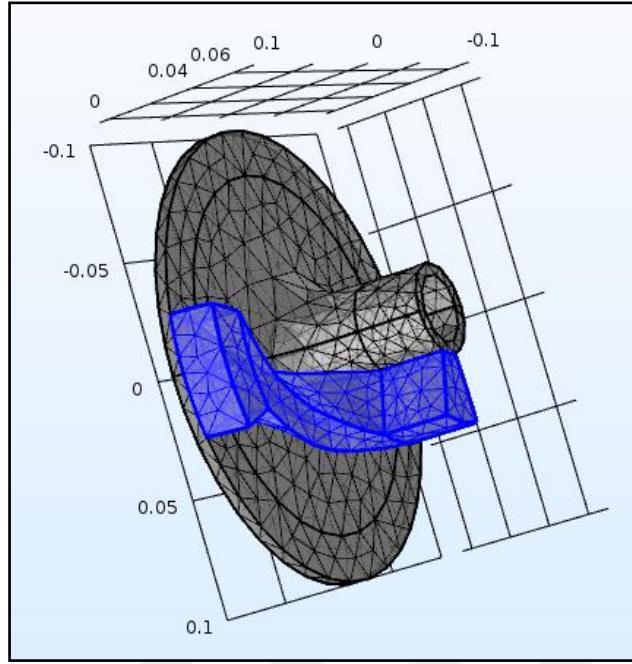


Şekil 4. 10 Rotor tek kanat ekstra kaba ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı

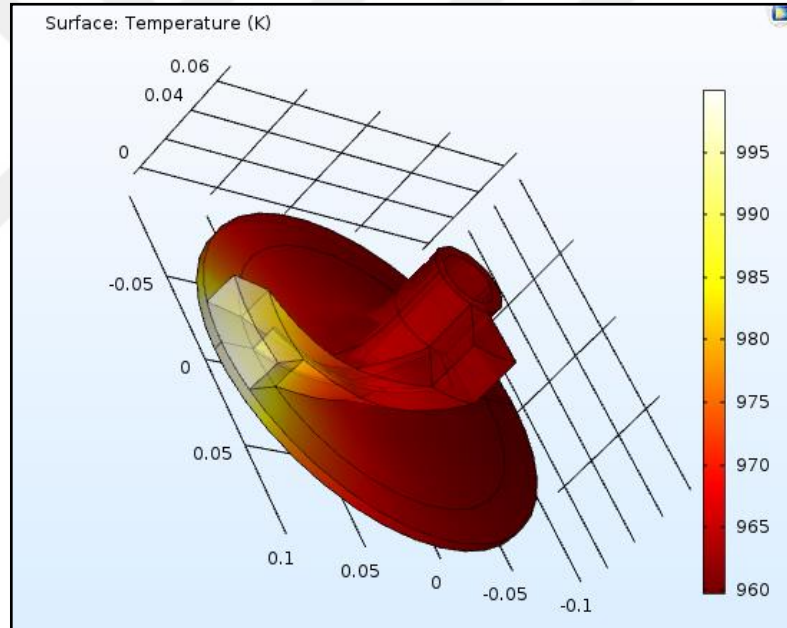
Çözüm esnasında 2225 çözülen serbestlik derecesi sayısına (SDS) ilave dahili 1117 SDS kullanılmış ve çözüm süresi 47 saniye sürmüştür. Çözüm esnasında program, 6 adet kenarın minimum ağ elemanından çok kısa olduğu uyarısı vermiştir. Bu da çözüm hassasiyetinin çok kaba olduğunu göstermektedir (Şekil 4.10).

4.5.2.2 Daha Kaba (Coarser) Ağ

Componenet-Mesh bölümünden daha kaba ağ (Coarser) seçilerek mevcut geometriye ağ oluşturma yapılır. Komple ağ, 3479 hacim, 1764 yüzey, 382 kenar elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4. 11 Rotor tek kanat ve akış alanı için daha kaba ağ oluşturma

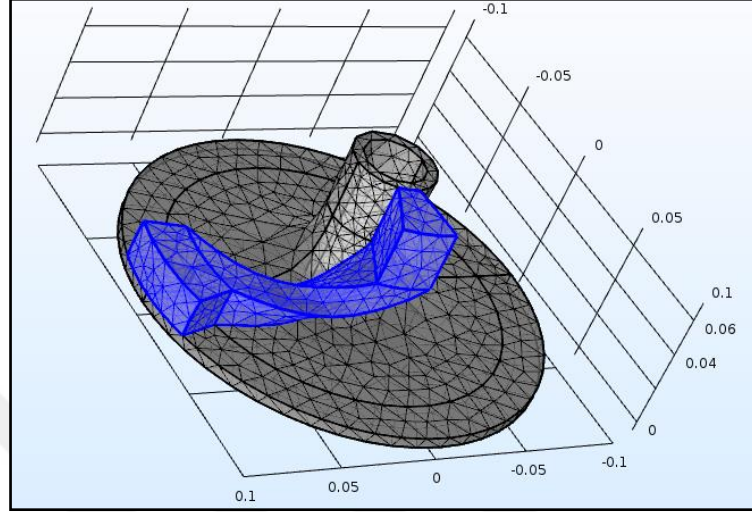


Şekil 4. 12 Rotor tek kanat daha kaba ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı

Çözüm esnasında 3401 çözülen serbestlik derecesi sayısına (SDS) ilave dahili 1673 SDS kullanılmış ve çözüm süresi 50 saniye sürmüştür. Çözüm esnasında program, 2 adet kenarın minimum ağ elemanından çok kısa olduğu uyarısı vermiştir. Bu da çözüm hassasiyetinin fazla kaba olduğunu göstermektedir fakat yine de bir öncekine göre daha iyi çözüm hassasiyeti üretmiştir. Bunu da sıcaklık skalasından anlayabiliriz (Şekil 4.12).

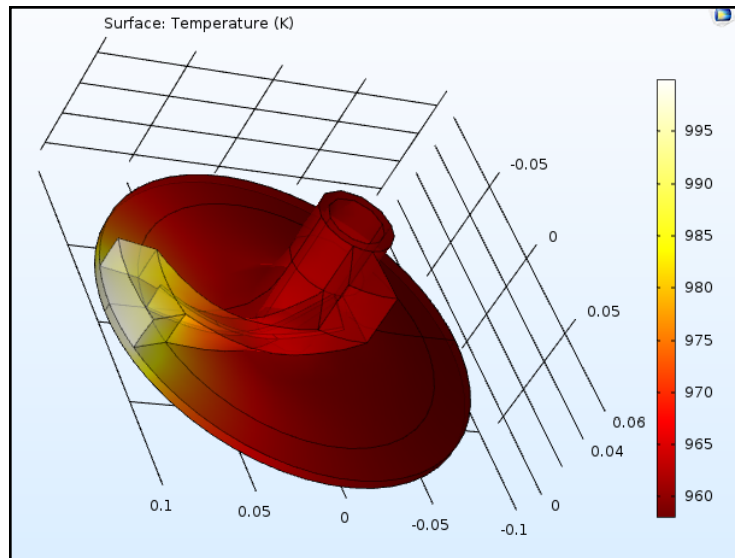
4.5.2.3 Kaba (Coarse) Ağ

Componenet-Mesh bölümünden kaba ağ (Coarse) seçilerek mevcut geometriye ağ oluşturma yapılır. Komple ağ, 5243 hacim, 2591 yüzey, 469 kenar elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.13).



Şekil 4. 13 Rotor tek kanat ve akış alanı için kaba ağ oluşturma

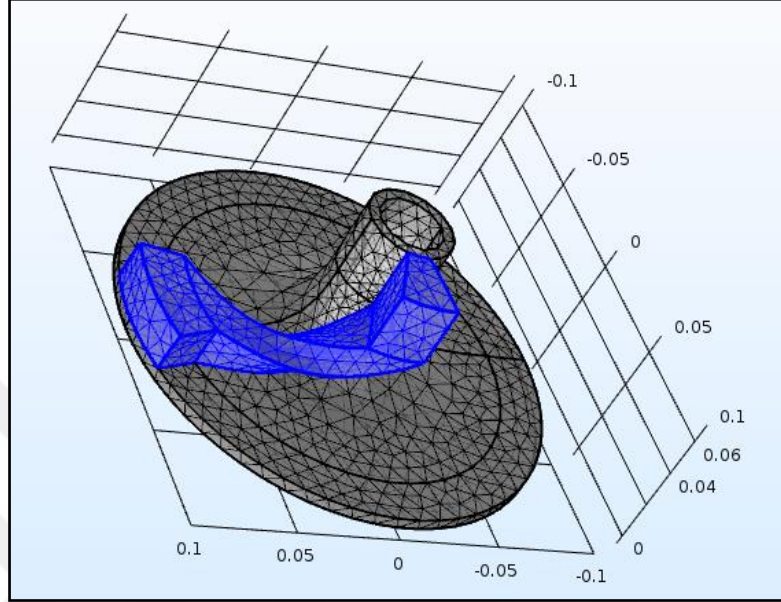
Çözüm esnasında 5056 çözülen serbestlik derecesi sayısına (SDS) ilave dahili 2313 SDS kullanılmış ve çözüm süresi 52 saniye sürmüştür. Çözüm esnasında program, 2 adet kenarın minimum ağ elemanından çok kısa ve bir yüzey bölgesinin ise minimum ağ elemanından daha dar olduğu uyarısı vermiştir. Bu da çözüm hassasiyetinin kaba olduğunu göstermektedir. Bu ağ yöntemi bir öncekine göre benzer çözüm hassasiyeti üretmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4. 14 Rotor tek kanat kaba ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı

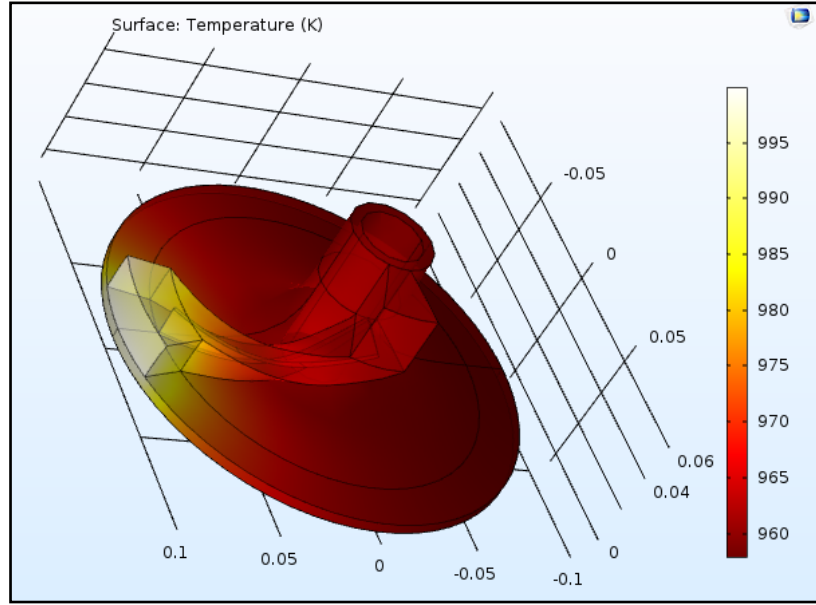
4.5.2.4 Normal (Normal) Ağ

Componenet-Mesh bölümünden normal ağ (Normal) seçilerek mevcut geometriye ağ oluşturma yapılır. Komple ağ, 9196 hacim, 3873 yüzey, 566 kenar elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4. 15 Rotor tek kanat ve akış alanı için normal ağ oluşturma

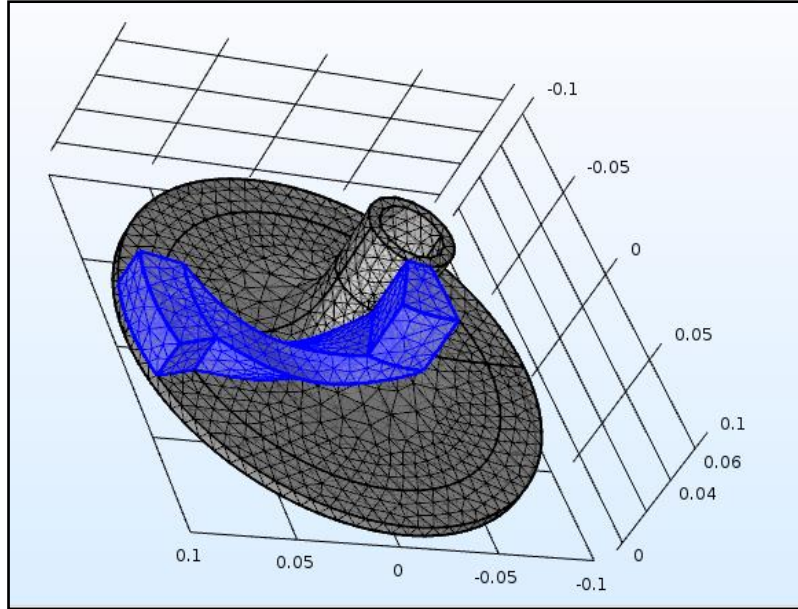
Çözüm esnasında 8903 çözülen serbestlik derecesi sayısına (SDS) ilave dahili 3336 SDS kullanılmış ve çözüm süresi 61 saniye sürmüştür. Çözüm esnasında program, ağ elemanları ile ilgili herhangi bir uyarı vermemiştir. Bu da çözüm hassasiyetinin istenen seviyede olabileceğini göstermektedir. Bu ağ yöntemi bir öncekine göre benzer çözüm hassasiyeti üretmiştir. Bunu sıcaklık skalasından anlayabiliriz (Şekil 4.16).



Şekil 4. 16 Rotor tek kanat normal ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı

4.5.2.5 İnce (Fine) Ağ

Componenet-Mesh bölümünden ince ağ (Fine) seçilerek mevcut geometriye ağ oluşturma yapılır. Komple ağ, 14525 hacim, 5245 yüzey, 656 kenar elemanından oluşmaktadır (Şekil 4.17).



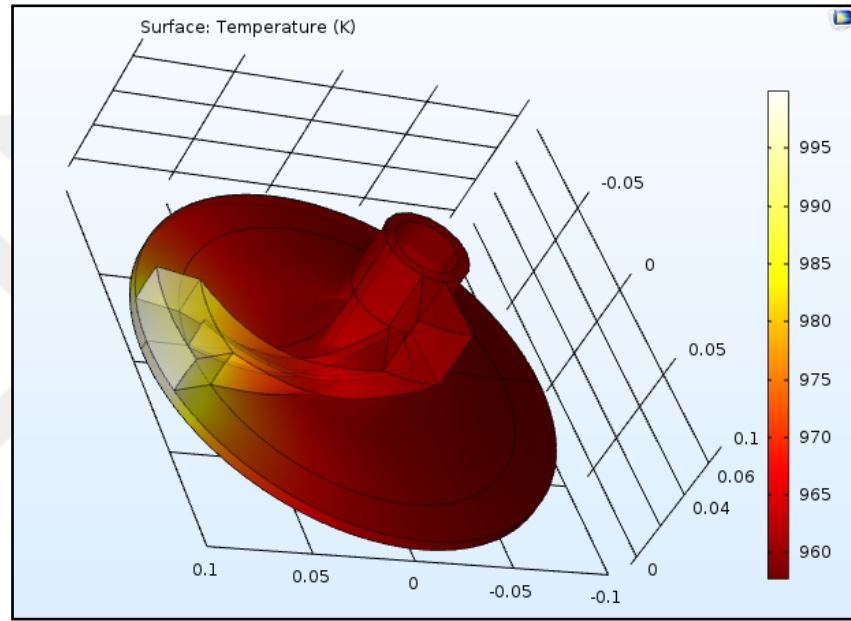
Şekil 4. 17 Rotor tek kanat ve akış alanı için ince ağ oluşturma

Çözüm esnasında 14016 çözülen serbestlik derecesi sayısına (SDS) ilave dahili 4379 SDS kullanılmış ve çözüm süresi 83 saniye sürmüştür. Çözüm esnasında program, ağ elemanları ile ilgili herhangi bir uyarı vermemiştir. Bu da çözüm hassasiyetinin istenen

seviyede olduğunu göstermektedir. Bu ağ yöntemi bir öncekine göre benzer çözüm hassasiyeti üretmiştir. Bunu sıcaklık skalasından anlayabiliriz (Şekil 4.18).

Ağ oluşturma ile ilgili yapılan hassasiyet çözüm çalışması sonucu, bu geometri ve sınır şartları için normal ve ince ağ oluşturma seçeneklerinden ikisi de uygun çözüm sonucunu elde edilmesini sağladığı tespit edilmiştir. Yine de emniyet payı açısından bundan sonraki çalışmalarda ince ağ oluşturma ile çözüm elde edilecektir

Burada ağ eleman sayısı arttıkça hesaplama hassasiyeti artar ancak bilgisayarın çözüm süresi uzamaktadır. Ayrıca iyi donanımlı bir bilgisayara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4. 18 Rotor tek kanat ince ağ oluşturma ile çözüm sonucu sıcaklık dağılımı

4.6 Sınır Şartları ve Doğrulama Çalışması

Mikro gaz türbinin ısı-akış analizinde iki hesaplama hacmi kullanılır: Rotor kanadı akış hacmi ve rotor kanadı katı hacmi. Mikro türbinler için türbin giriş sıcaklığı değeri hakkında 1600 K [26], 1545 K [24], 1323 K [25] ve 1173 K [27] gibi kabuller olsa da bu çalışmada 1000 K olarak alınmıştır. Yine literatüre göre sıcak gaz giriş hızı 370 m/s olarak alınmıştır [8]. Motor İHA üzerinde çalışacağından gerçek çalışma şartlarıdaki sıcaklığa bağlı olarak motor üzerindeki dış havaya göre bir h hesaplaması yapılarak sisteme tanımlanmıştır.

Katı sınırları adyabatik olarak kabul edilmiştir ve katı sınırları boyunca kayma olmayan sınır şartı olarak uygulanmıştır. Isı transferinde iletim ve taşınım hesaplanmış, yüzeyler

arasında sıcaklık farkları küçük olduğundan radyasyonla olan ısı transferi ihmal edilmiştir. Bütün hesaplamalarda k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan COMSOL programıyla elde edilen sonuçlar, Xie ve arkadaşları [8] tarafından ANYS 11 programı ile yapılan mikro radyal türbin akış-sıcaklık-yapısal analizi çalışmasıyla kıyaslanmış ve uyumlu olduğu belirlenmiştir

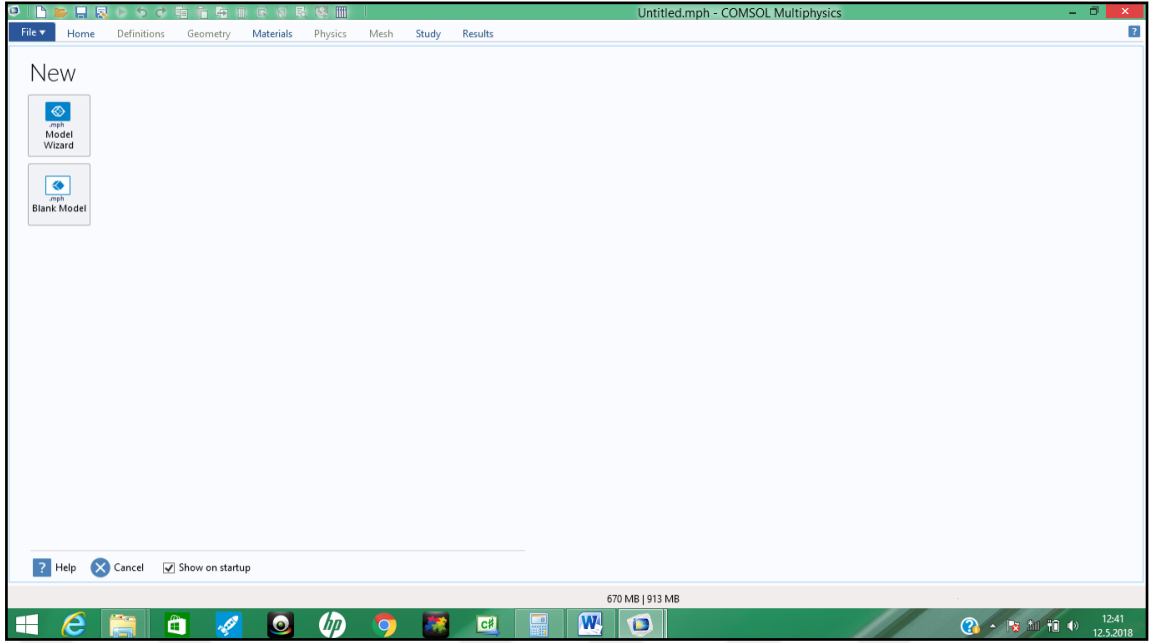
4.7 Akış Modellemesi

Bu bölümde adım adım şekillerle birlikte Comsolda başlangıçtan analize kadar olan süreç anlatılacaktır. Bazı detaylar önceki bölümlerde anlatıldığından burada kısaca bahsedilecektir.

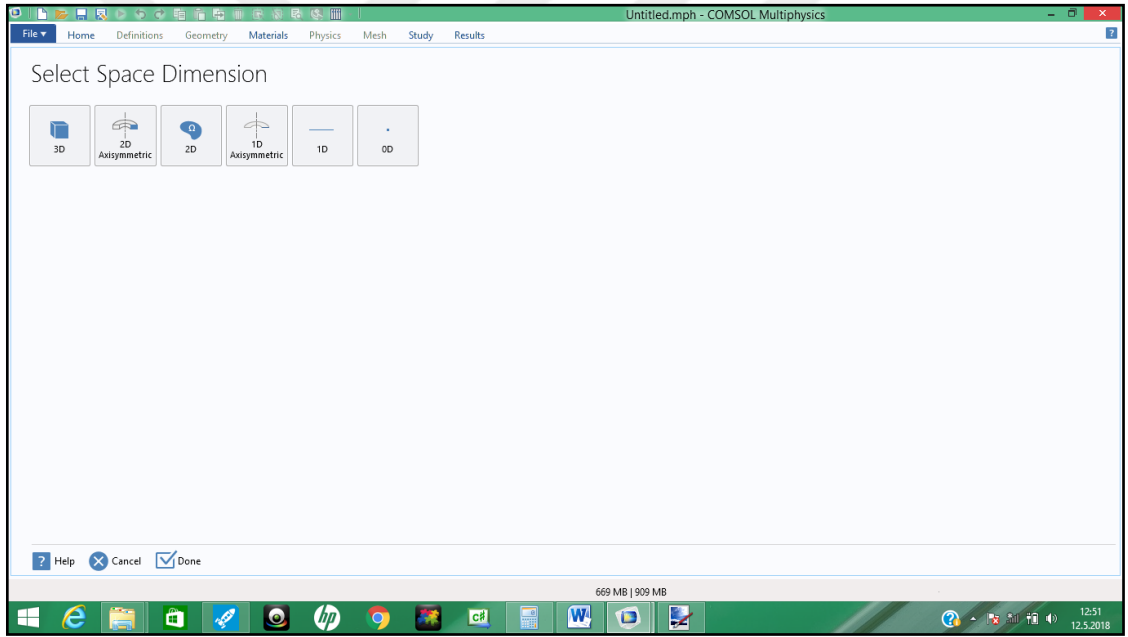
Comsolda bir problem tanımlaması yapıp uygun geometride analizi yapılacaksa öncelikle comsolda uygun kompenetler seçilmelidir: Akış, ısı taransferi, laminar, türbülanslı, sürekli, zamana bağlı vs. Diğer birçok seçenek de vardır fakat bu çalışmanın dışında olduğundan burada bahsedilmemiştir.

Bu çalışmada, Comsol multifizik, birleşik ısı taransferi, CFD- k-ε türbülans modeli, sabit (sürekli) çalışma kompenentleri seçilerek sistemin fiziki çalışma şartları oluşturulmuştur. İlk önce “New/Model Wizard” seçimi (Şekil 4.19), ardından hangi boyutta analiz yapılacaksa bu kısımda boyut seçimi yapılır. Bu çalışmada üç boyutla çalışma yapılacağından 3D/üç boyut seçimi yapılmıştır (Şekil 4.20).

Boyut seçiminden sonra en önemli bölüm olan, çalışmanın hangi şartlarda yapılacağını seçimi yapılacak olan fizik seçiminin olduğu bölümde fizik komponentleri seçilir (Şekil 4.21). Bu çalışma için, “Heat transfer/Conjugate heat taransfer/ Turbulent flow/ Turbulent Flow, k-ε” seçimi yapılmıştır (Şekil 4.22).

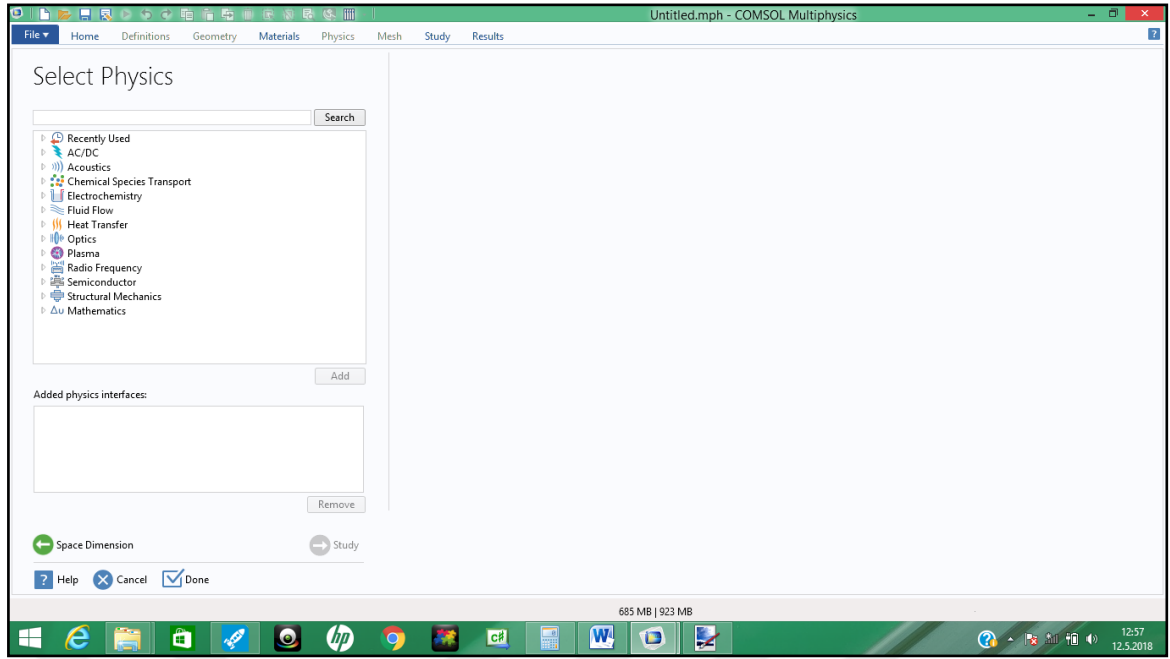


Şekil 4. 19 Comsol multifizik ara yüzü başlangıç seçimi

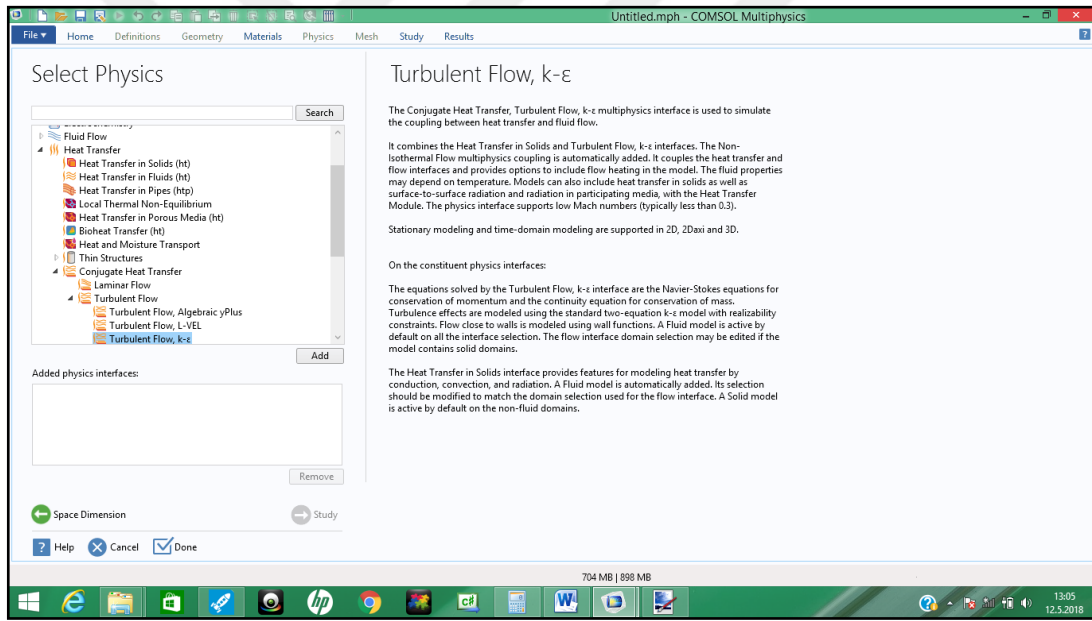


Şekil 4. 20 Comsol multifizik ara yüzü boyut seçimi

Fizik seçimi yapıldıktan sonra da “study” butonu ile sürekli ya da zamana bağlı çalışma şartları olan “Stationary/ Time Dependent” seçeneklerinden birinin tercihi yapılır. Bu çalışma için “Stationary” seçilmiştir (Şekil 4.23). Bu seçimden sonra “Done” butonu ile çalışma ara yüzüne geçilir (Şekil 4.24).



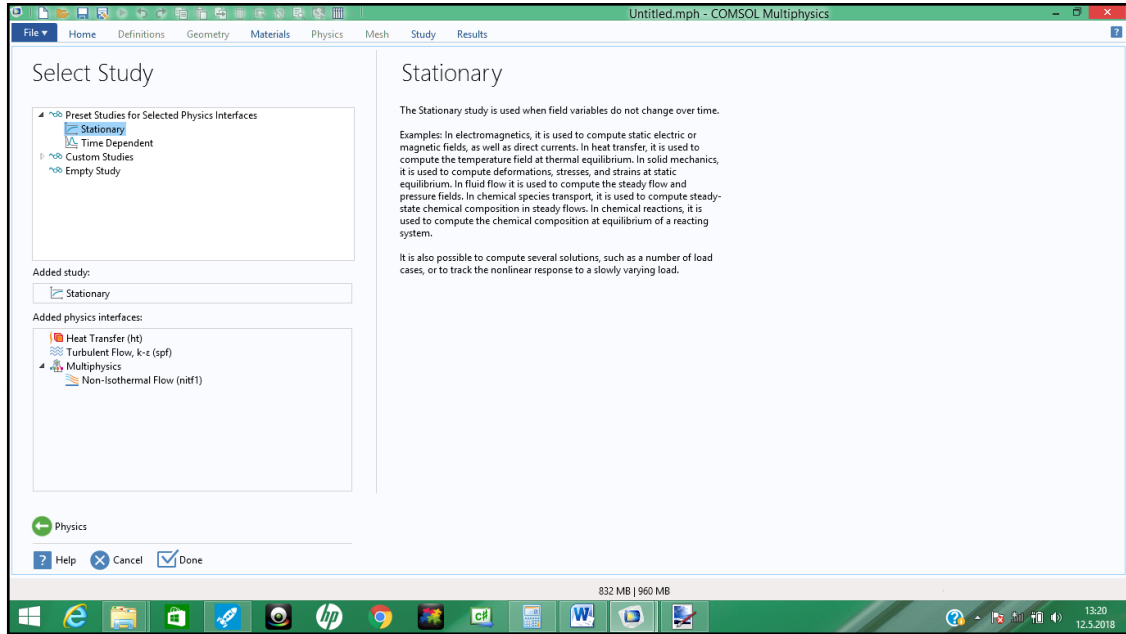
Şekil 4. 21 Comsol multifizik ara yüzü fizik komponentlerinin seçimi



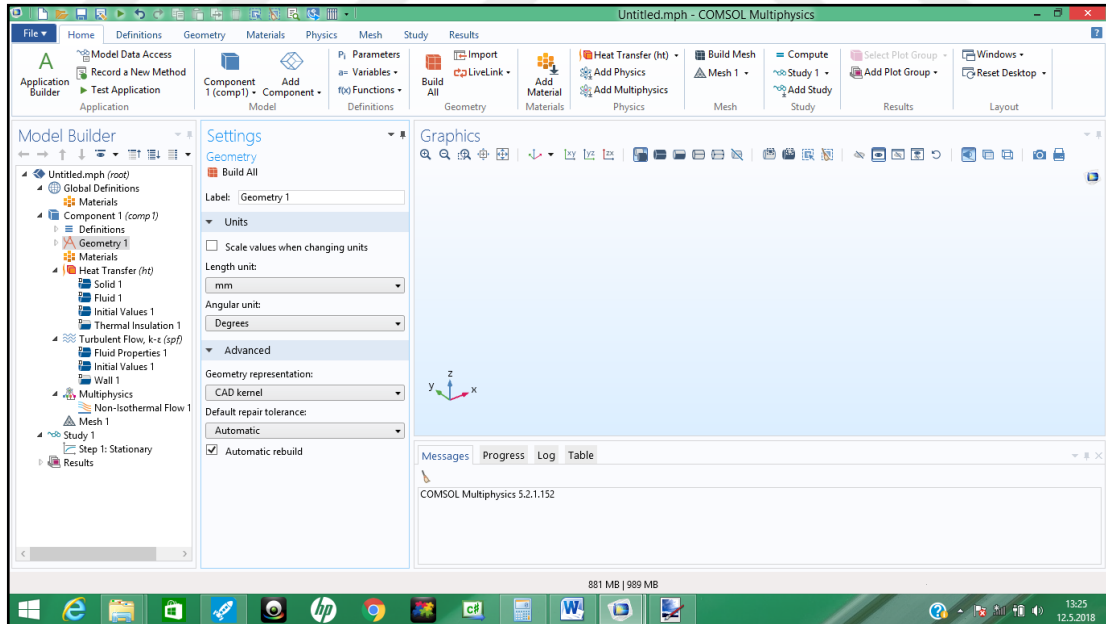
Şekil 4. 22 Comsol multifizik ara yüzü bu çalışma için fizik komponentlerinin seçimi

Fizik ve çalışma şartı tamamlandıktan sonra üzerinde analiz yapılacak uygun geometrinin oluşturulması gerekmektedir. Comsol programı kendi içinde geometri oluşturulmasına imkan tanımaktadır. Fakat bunun yerine uygun bir çizim ve tasarım programında özellikle karmaşık geometrilerin oluşturulup comsol içine transfer edilmesi daha mantıklıdır. Bu çalışma için geometri oluşturulması Bölüm 4.4 kısmında anlatıldığından burada detaylı anlatılmayacaktır. Başka bir programda oluşturulan geometri “Geometry/Import” ile comsola transfer edilir (Şekil 4.25). Kanat

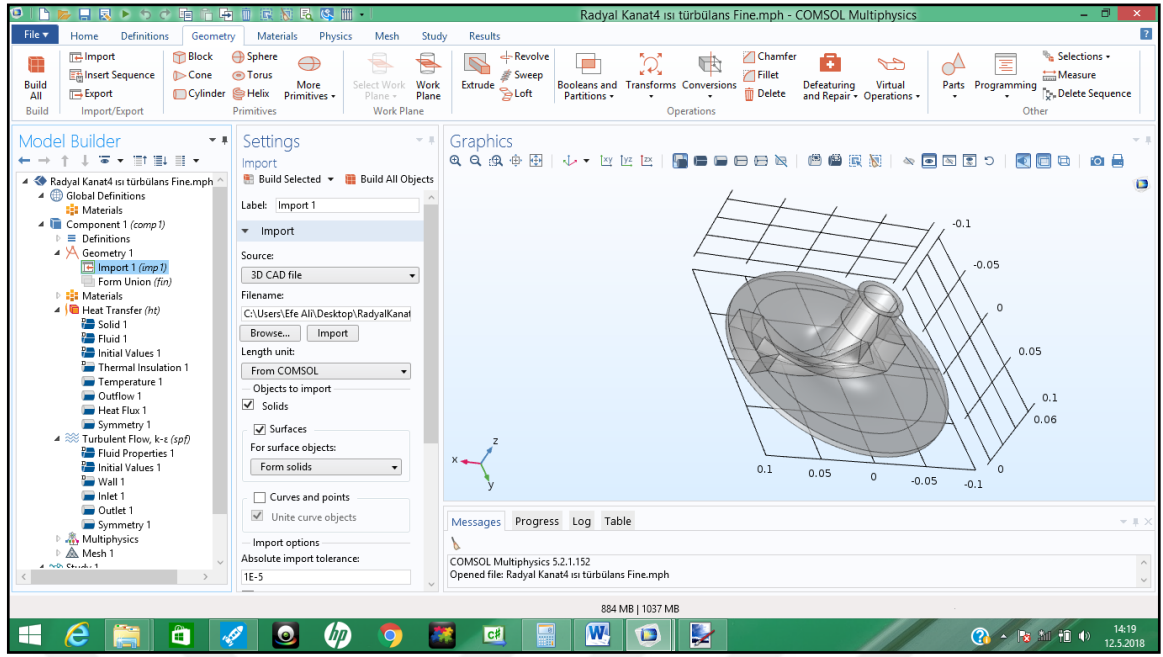
geometrisinin görülebilmesi ve geometri içerisinde yüzey, kenar veya nokta seçimi daha kolay yapılabilmesi için “graphics” bölümündeki “tranparency” tıklanır. Böylece geometri şeffaf olacağından ileriki aşamalarda geometri üzerinden elaman seçimi daha kolay olacaktır.



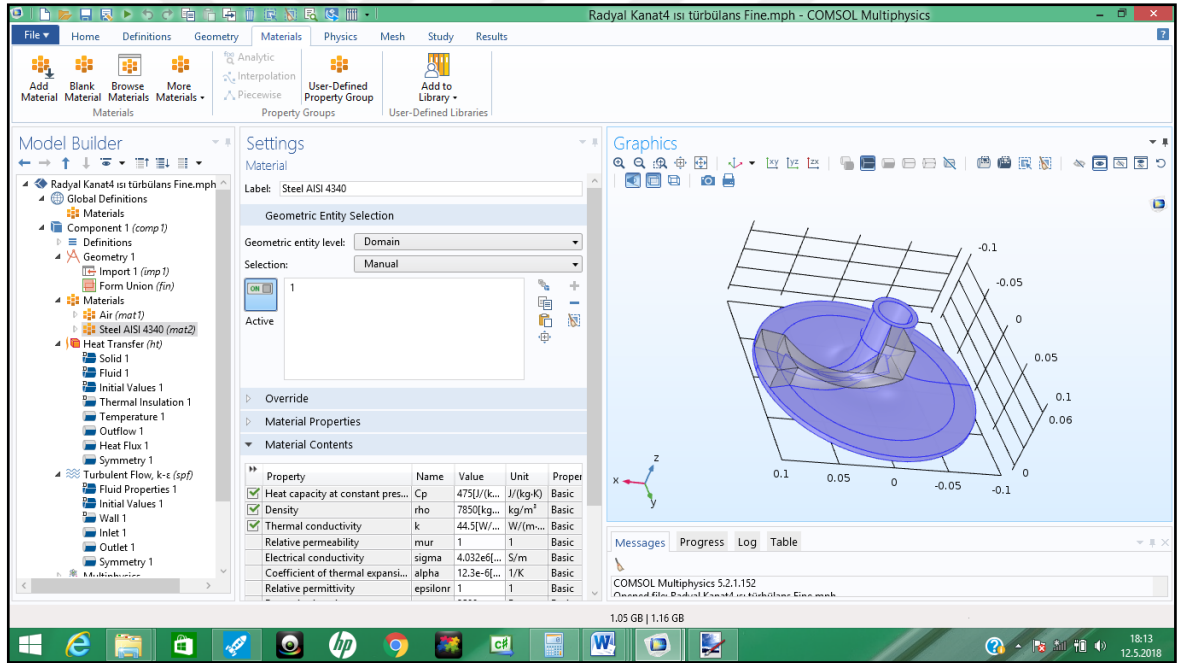
Şekil 4. 23 Colsol multifizik ara yüzü çalışma şartı seçimi



Şekil 4. 24 Colsol multifizik fizik ve çalışma şartı seçimi sonrası ara yüzü



Şekil 4. 25 Comsola dışarıdan geometri transferi



Şekil 4. 26 Geometriye kütüphaneden malzeme tanımlaması

Geometri transferinden sonra malzeme tanımlaması yapılır. Malzeme tanımlaması ya manuel olarak ya da comsol içerisinde yer alan malzeme komponentinden tanımlaması yapılabilir. Bu çalışmada yer alan geometri iki alandan oluşmaktadır: Akışkan alanı ve katı alan. Akışkan yüksek sıcaklıklarda çalıştığından katı bölgeye “Steel AISI 4340” adlı çelik, comsol programı içinde yer alan malzeme kütüphanesinden alınarak tanımlama

yapılmıştır (Şekil 4.26). Akışkan alanı ise yine kütüphaneden hava olarak tanımlanmıştır.

Her ne kadar bilgisayar programları problemleri otomatik çözseler de kullanıcılar başlangıçta ilgili yerlere başlangıç parametrelerini doğru girmesi gerekmektedir. Aksi takdirde istenen doğru sonuçlar elde edilemeyecektir. Bu kısımdan itibaren, bu parametrelerin sisteme nasıl tanımlandığı anlatılacaktır.

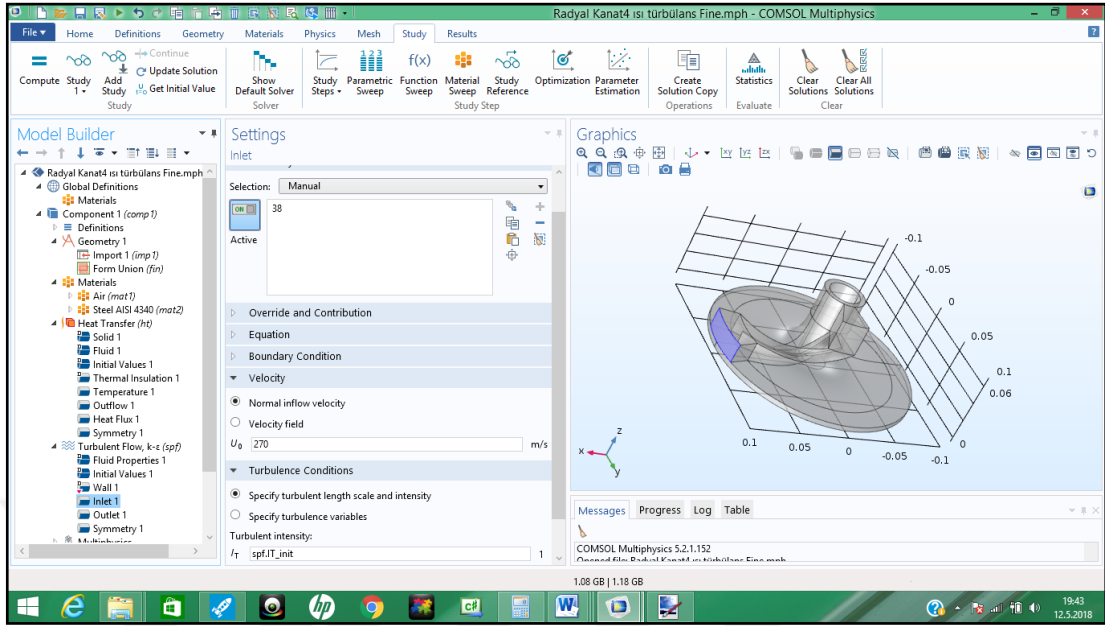
Malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra “Model Builder” bölümünde yer alan “Heat Transfer” komponentinde yer alan alt kısımlara tanımlamalar yapılır. “Fluid 1” için geometride ilgili alan seçilir ve “air” tanımlaması yapılır. “Temperature” kısmı için sıcak havanın giriş kısmı geometriden seçilir ve “Temperature” kısmına T_0 yazan yere “User defined” seçilerek manuel olarak buraya 1000 K yazılır. “Outflow” için geometriden akışkanın çıkış kısmı seçilir. “Heat Flux 1” için geometride akış alanının dış kısmı seçilir. “Settings” kısmında “Heat Flux” altında yer alan bölümde “Convective heat flux” kutucuğu işaretlenir. H kısmına uygun değer girilerek bu tanımlama tamamlanır. Geometriye başka ısı akısı tanımlanacaksa “Physics/Boundaries” kısmında ikinci veya daha fazla ısı akısı tanımlaması yapılabilir. “Symmetry 1” için aynı akış şartlarında olduğundan geometriden akış alanı iki yan yüzü tanımlanır.

“Tubulent Flow” bölümünde yer alan kısımda “Inlet 1” için geometriden akış alanının giriş kısmı tanımlanır ve “Settings” bölümünde yer alan “Boundary Condition/Velocity/Normal inflow velocity” işaretlenir ve U_0 için 370 değeri girilir (Şekil 4.27). “Outlet 1” için geometriden çıkış kısmı tanımlaması yapılır. “Symmetry 1” için yine aynı akış şartlarında olduğundan geometriden akış alanı iki yan yüzü tanımlanır.

Bu tanımlamalardan sonra program tarafından sonlu elemanlar yönteminin kullanılabilmesi için ağ oluşturma tanımlaması yapılır. “Mesh 1” kısmında geometri için uygun ağ oluşturma tanımlaması yapılır. Bu kısım, bölüm 4.5.2’de geniş anlatıldığından burada bahsedilmeyecektir.

Uygun ağ oluşturma tanımlamasından sonra “Study/Compute” tıklanır ve problem çözümü gerçekleştirilir. Geometri büyüklüğü, multifizik karmaşıklığı ve ağda yer alan eleman sayısına göre çözüm süresi kısa veya uzun olacaktır. En önemlisi de sistem tanımlamaları kullanıcı tarafından doğru girildiyse, program sistemi doğru olarak

çözecektir. Aksi takdirde program yanlış olan kısımlar için uyarı verecek ve bu kısımlar düzeltilmedikçe program doğru çalışmayacaktır.

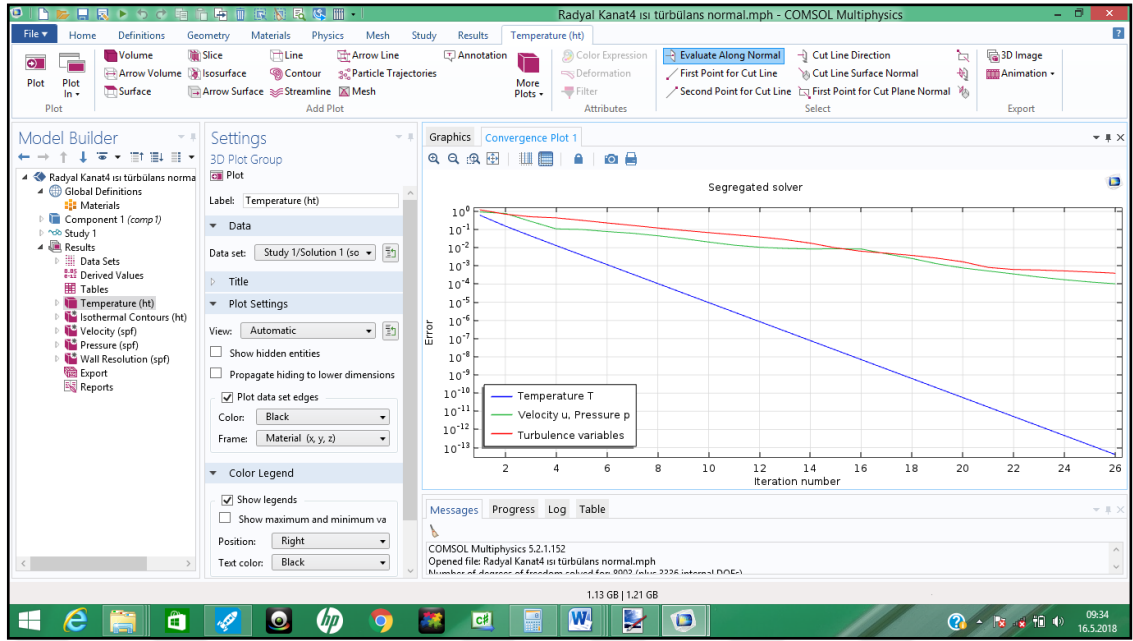


Şekil 4. 27 Sisteme ve geometriye akışkan girişi tanımlaması

Mikro türbinler için türbin giriş sıcaklığı değeri hakkında önceki bölümde bahsedilene ilave, 1600 K [47], 1545 K [48], 1323 K [49] ve 1173 K [50] gibi kabuller de yapılmıştır. Bu çalışmada, programa tanımlanan malzeme özelliğinden dolayı giriş sıcaklığı 1000 K olarak alınmıştır.

4.8 Problemin Çözümü

Önceki bölümde anlatılan bütün parametreler doğru bir şekilde girildikten sonra “Study/Compute” tıklanarak program koşturulur. Parametre değerlerinin programa doğru bir şekilde girilmesi durumunda belli bir iterasyonla problem çözümü sonuçlanacaktır. Bu arada çözüm sürecinin doğru işleyip işlemediği hata- iterasyon penceresinden izlenebilir. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi iterasyon ilerledikçe, tüm verilerin çizgileri (sıcaklık, hız, basınç, türbülans değişkenleri vs.) 10’nun alt değerlerine doğru ilerlemesi gerekir. Eğer iterasyon sayısı arttıkça çizgiler 10’nun üst değerlerine doğru ve fazlaca ilerlemişse program problemi çözmeyecektir. Ya da iterasyon sayısı çok fazla ilerlediği halde veri çizgileri 0-10 civarlarında zigzaglı bir şekilde ilerliyorsa program problemi yine çözmeyecektir. Bu durumlarda çalışma durdurulup veriler yeniden gözden geçirilir ya da ağ iyileştirilmesine gidilir.



Şekil 4. 28 Programın çalışması esnasında hata-iterasyon penceresi

Belli iterasyondan sonra hesaplamalar sonucu türbin kanadının sıcaklık, hız ve basınç değerleri “Results” kısmında gösterilir. Bu veriler değerlendirilerek ve istenen yorumlar eklenerek çalışma bitirilmiş olur.

4.9 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu bölümde, İHA’nın 7 farklı çalışma şartlarına göre motor türbin dış koruması, türbin radyal yüzeyi, türbin merkez kısmı için hesaplanan ısı taşınım katsayısına (h) göre akış alanında ve kanat üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenecektir. Öncelikle sadece türbin dış kısmındaki h değerine göre sıcaklık dağılımı incelemesi yapılacaktır. Isı taşınım katsayısı (h) hesapları kaynak dokümanda belirtilen formül ve tablolar yardımıyla yapılmıştır [51]. Çalışma şartları bahar aylarına göre ortalama çevre sıcaklığı göz önünde bulundurularak problem çözümü gerçekleştirilmiştir.

4.9.1 Türbin Dış Yüzeyi h Tanımlaması

Türbin dış koruması için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’deki gaz özellikleri havanın film sıcaklığına göre tablolardan elde edilen değerlerdir. Film sıcaklığı ise yüzey ve çevre sıcaklığının ortalaması olarak alınmıştır. Hesaplamalarda belirleyici rol alan Reynolds ve Nusselt sayıları kaynak dokümanda yer alan uygun denklemlere göre hesaplamalar yapılmıştır [51]. Reynolds

ve buna bağılı Nusselt sayıları düz levha kabulüyle hesaplanmıştır. Bunun nedeni, türbin dış yüzey ekseninin hareket yönüyle aynı doğrultuda olması, çapının büyük olması, diğer bir ifadeyle yayın kırışe oranı yani eğrilik oranının bire yakın olmasındandır.

Bu durumda Reynolds sayısı eşitlik (4.1)'e göre hesaplanır.

$$Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad (4.1)$$

Burada, U_∞ çalışma şartlarına göre İHA hızı ve L türbin dış yüzey uzunluğu olarak 112 mm'dir. Kinematik vizkozite olan ν değeri ise havanın film sıcaklığına göre kaynak dökümandaki tablolardan elde edilmiştir.

İHA'nın 7 farklı çalışma durumuna göre hesaplanan Reynolds sayıları 5×10^5 değerinden küçük olduğundan türbin dış yüzeyi üzerindeki akış laminar akış özelliğindedir. Bu nedenle Nuselt sayısı eşitlik (4.2)'ye göre hesaplanmıştır.

$$Nu_L = 0.664(Re_L)^{1/2}(Pr)^{1/3} \quad (4.2)$$

Bu denklemde yer alan Prandtl sayısı olan Pr değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümandaki tablolardan elde edilen değeridir.

Düz levhaya göre hesaplanan bu değerler kapsamında ısı taşınım katsayısı olan h , eşitlik (4.3)'e göre hesaplanır.

$$h = Nu_L \frac{k}{L} \quad (4.3)$$

Burada yer alan ısı iletim katsayısı k değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümandaki tablolardan elde edilen değeridir. Diğer ifadeler olan Nusselt sayısı ve L değerleri, önceden bahsedildiği gibidir.

Gerçek çalışma şartlarına yaklaşıması için Çizelge 4.1'deki h değerinin % 70'i alınarak Comsol programına tanımlanmıştır. Bunun nedeni türbin akışkanı ile dış hava arasında belli kalınlıkta malzemenin yer almasıdır. Daha hassas değerlerin hesaplanması üretim parametrelerin belirlenmesiyle yapılabilir. Bu çalışmada belirtilen yaklaşımdaki değerler kullanılacaktır. Daha gerçekçi değerler ancak deneysel verilerle elde edilebileceği unutulmamalıdır.

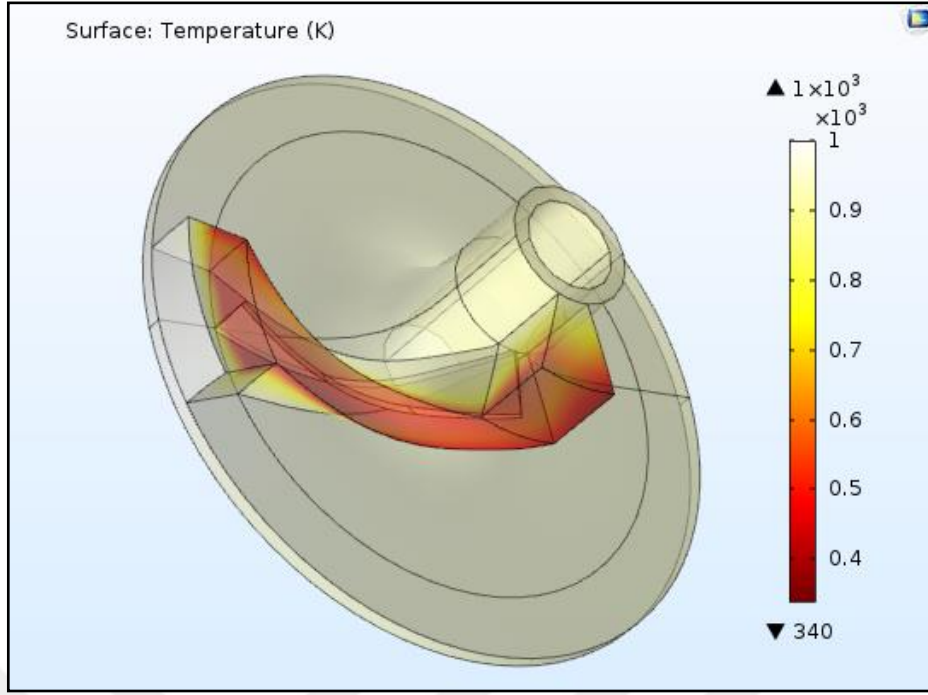
İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı Şekil 4.29'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde akışın 1000 K sıcaklığında girdiği halde

çıkış bölümünün bazı yerlerinde 500 K'ne kadar düşmektedir. Bunun nedeni olarak akışın bir miktar enerjisini türbin kanadına aktarması ve akış dış yüzeyine yapılan h tanımlamasıdır. Bu durum, çalışma şartlarına göre hem istenir hem de istenmez.

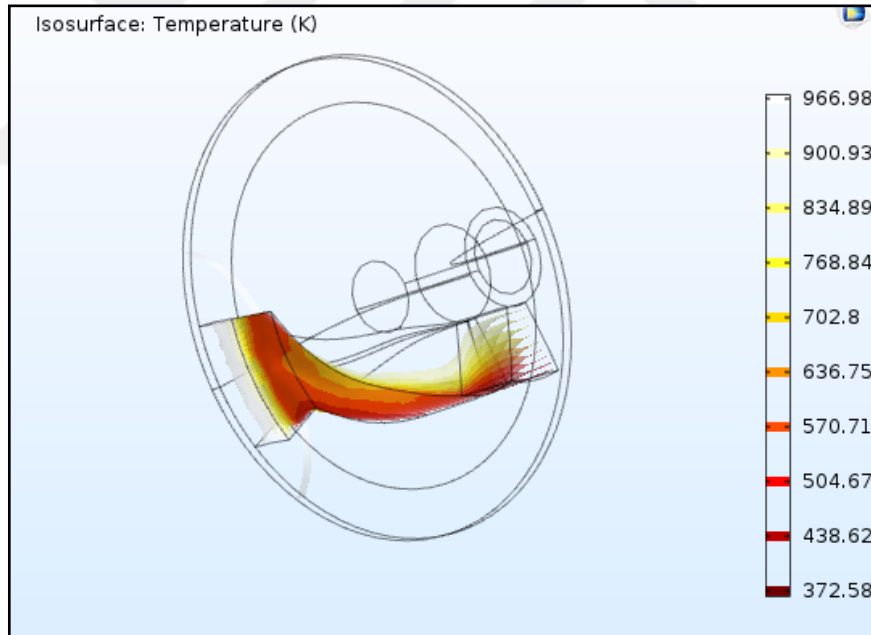
Türbin kanadının aşırı ısınması istenmiyorsa bu iyi bir durumdur. Eğer motordan fazlaca güç veya hız performansı isteniyorsa h değerinin çok fazla olması arzu edilmez. Bu nedenle motorun kullanım amacına göre bu parametreler değiştirilebilir.

Çizelge 4. 1 Türbin dış koruması için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler

	Yerde (Sabit)	Yerde (Hızlanma)	Kalkış	Havada 1	Havada 2	Havada 3	Havada 4
Yerden Yükseklik (m)	0	0	200	500	1000	3000	5000
Hız (m/s)	2	30	60	100	110	120	130
Çevre Sıcaklığı (°C)	15	15	14	12,5	10	0	-10
$\nu * 10^6$ (m ² /s)	58,51	58,51	58,51	56,4	56,4	55,42	55,21
k (W/(m.K))	0,06332	0,06332	0,06332	0,06284	0,06284	0,06253	0,06232
Pr	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682	0,681
Re	3828	57426	114852	198582	218440	242512	263720
Nu	36,1525	140,025	198,025	260,391	273,1	287,75	300
h (W/m ² .K)	20,44	79,16	111,95	146,1	153,23	160,65	166,93



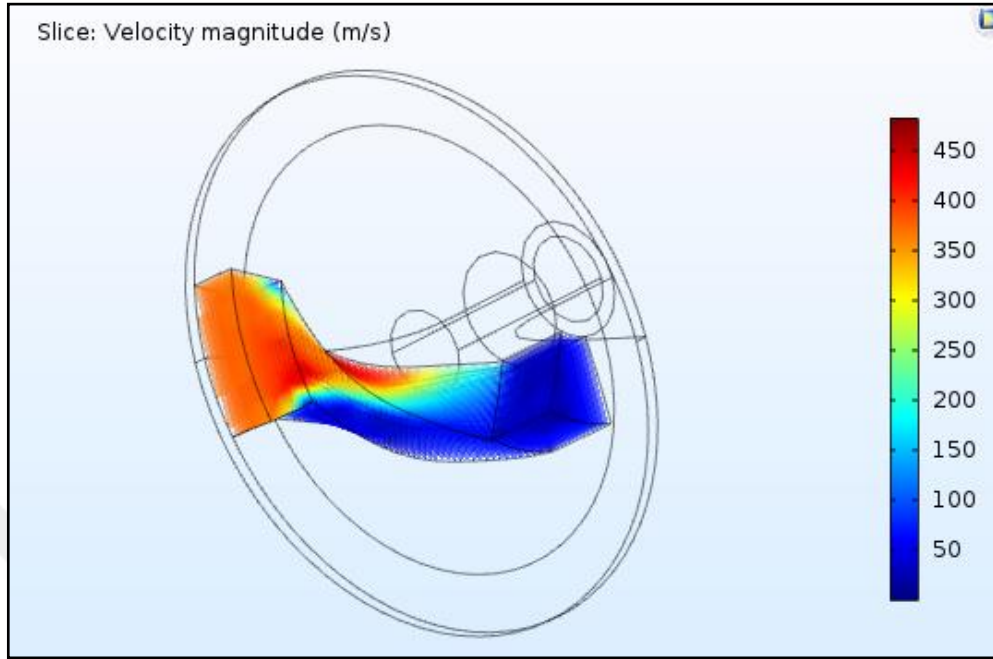
Şekil 4. 29 İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



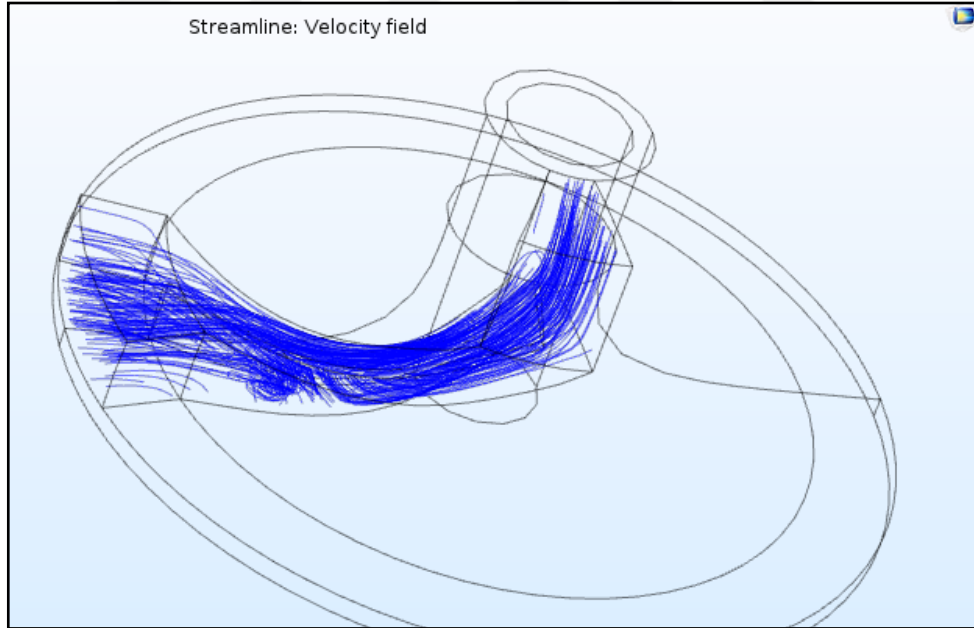
Şekil 4. 30 İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre eş sıcaklık dağılımı

Sıcaklık dağılımının daha iyi incelenebildiği durum eş sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 4.30'da görülmektedir. Bu durum incelendiğinde kanat dip sıcaklığının yüksek olduğu fakat kanat üst kısımlarında sıcaklığın azaldığı net olarak görülmektedir. Çıkışa doğru beklendiği gibi, sıcaklık azalımının kanat dibine doğru çok yaklaştığı görülmektedir. Böyle bir uygulamada, türbin malzemesi seçilirken bu kriter dikkate alınması gerekir. Diğer bir tercih özel imalat

tekniklerine başvurulabilir. Bütün bu tercihler yapılırken optimum ekonomiklik dikkate alınmalıdır.



Şekil 4. 31 İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre katman yöntemiyle eş hız dağılımı

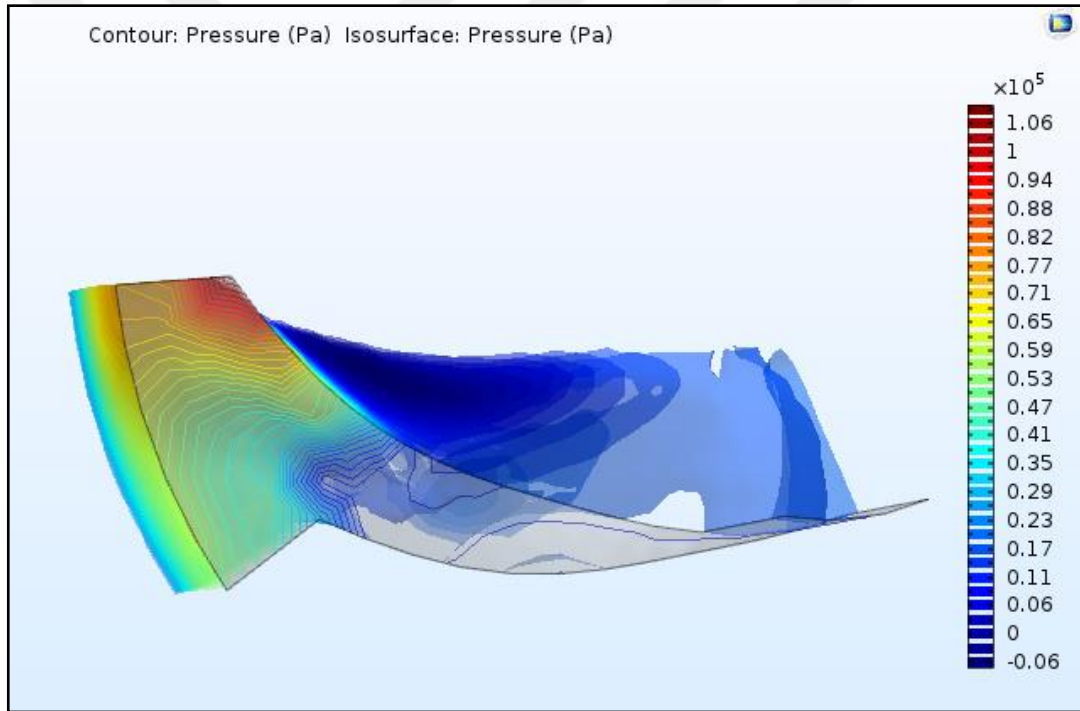


Şekil 4. 32 İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre akım çizgileri gösterimi

İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de sırasıyla katman yöntemiyle hız dağılımı ve akım çizgileri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde hızın başlangıçta yüksek olduğu kanat ön yüzünden başlayarak azaldığı akışın çıkış bölgelerinde en az değere ulaştığı görülmektedir. Akım çizgilerinin genelde

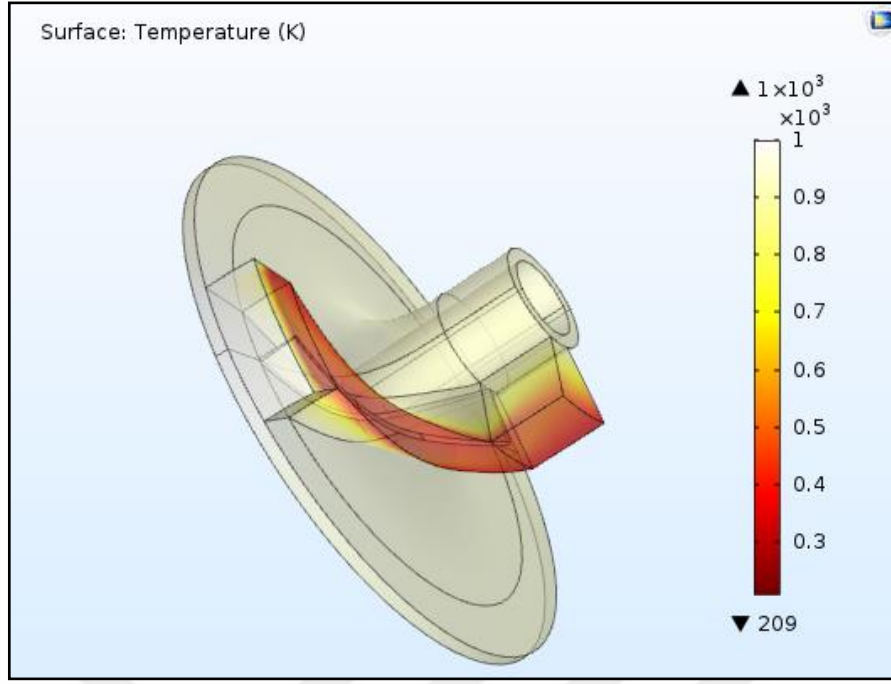
düzgün olduğu fakat kanat ön yüzünde eğimin olduğu bölgelerde girdapların olduğu açık olarak görülmektedir. Yine bir miktar girdabın kanat çıkış uçlarından sonra da olduğu tespit edilmektedir.

Akış bölgesinde ve kanat yüzeylerinde meydana gelen eş basınç dağılımı Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kanat giriş kısmının akım yönüne göre, sol bölgede yoğun basınç artışının olduğu, ilerleyen kısımlarda kanat arka orta eğimli bölgesinde en düşük basınç değerinin olduğu görülmektedir. Kanat arka bölgesinde vakum oluşumu ve kanat ön kısmında türbülanslı bölgelerdeki basınç dalgalanmaları açık olarak görülmektedir. Bu durum aerodinamik açıdan beklenen bir durumdur. Burada anlaşılacağı üzere kanat tasarımı esnasında en fazla aerodinamik kuvvetin olduğu bu bölgelerin göz önüne alınması gerekmektedir.

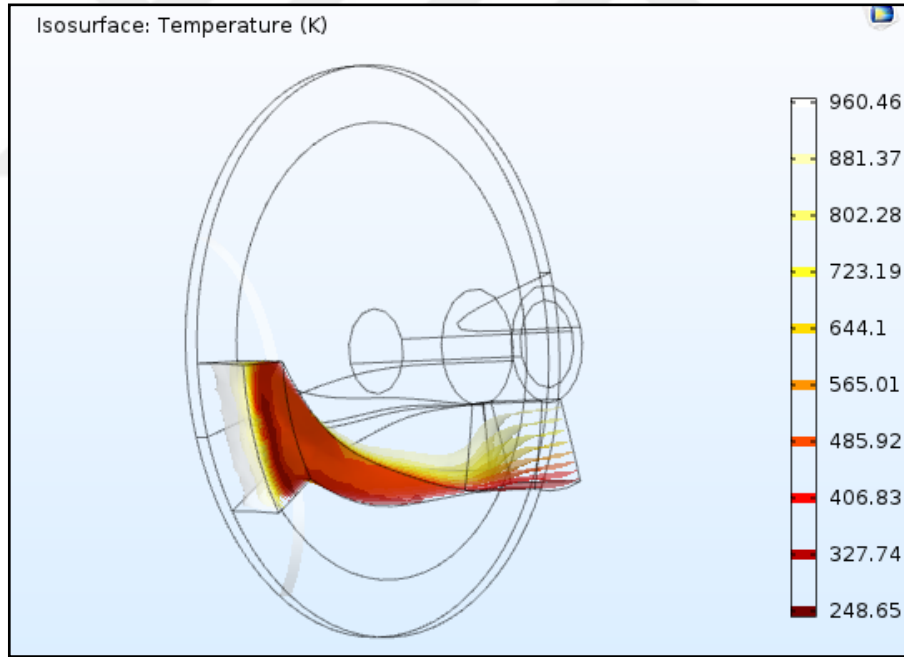


Şekil 4. 33 Akış bölgesinde ve kanat yüzeylerinde meydana gelen eş basınç dağılımı

Çalışmanın bu bölümünden itibaren İHA çalışma şartlarına göre tanımlanan diğer h değerleri için akış ve kanat üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelencektir. Hız ve basınç dağılımı bir önceki çalışmaya benzer olduğundan bundan sonraki kısımlarda bu değerlendirmeler yapılmayacaktır.



Şekil 4. 34 İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

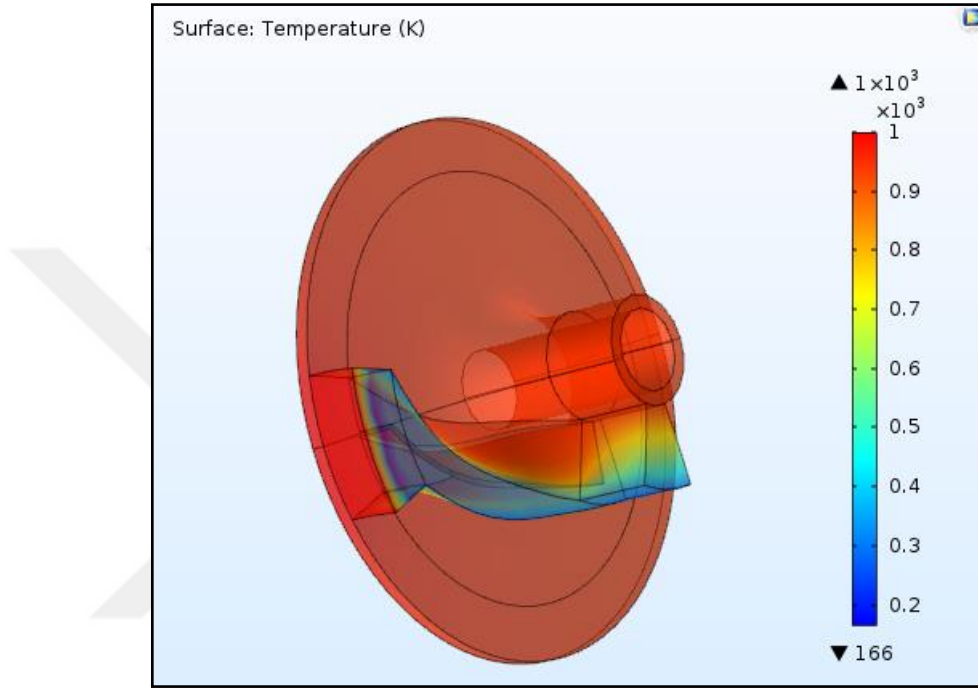


Şekil 4. 35 İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

Şekil 4.34'te İHA'nın yerde hızlanma şartına göre, türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil incelendiğinde h değerinin artmasıyla sıcaklık değerlerinin bir önceki duruma göre daha da azaldığı görülmektedir. Şekil 4.35'te eş sıcaklık dağılımından da görüldüğü gibi girişte ve kanat diplerinde yüksek sıcaklıklar olmasına

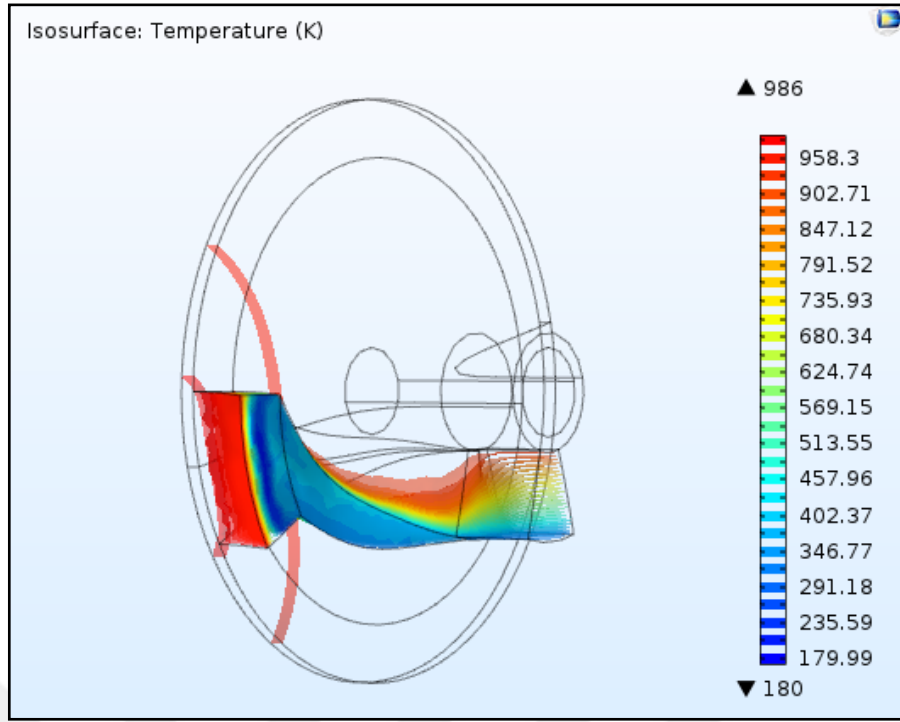
karşın kanat üstlerinde ve akışın çıkış kısmında sıcaklıklar büyük oranda düşmektedir. En yüksek ve düşük sıcaklıklar sırasıyla 1000 K ve 400 K civarındadır.

İHA'nın kalkış esnasında hesaplanan h değerine göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı Şekil 4.36'da ve eş sıcaklık olarak Şekil 4.37'de görülmektedir. Bir öncekine göre benzerlik gösterse de dış kısımlarda 300 K civarına kadar sıcaklık düşümü olduğu gözlemlenmektedir.

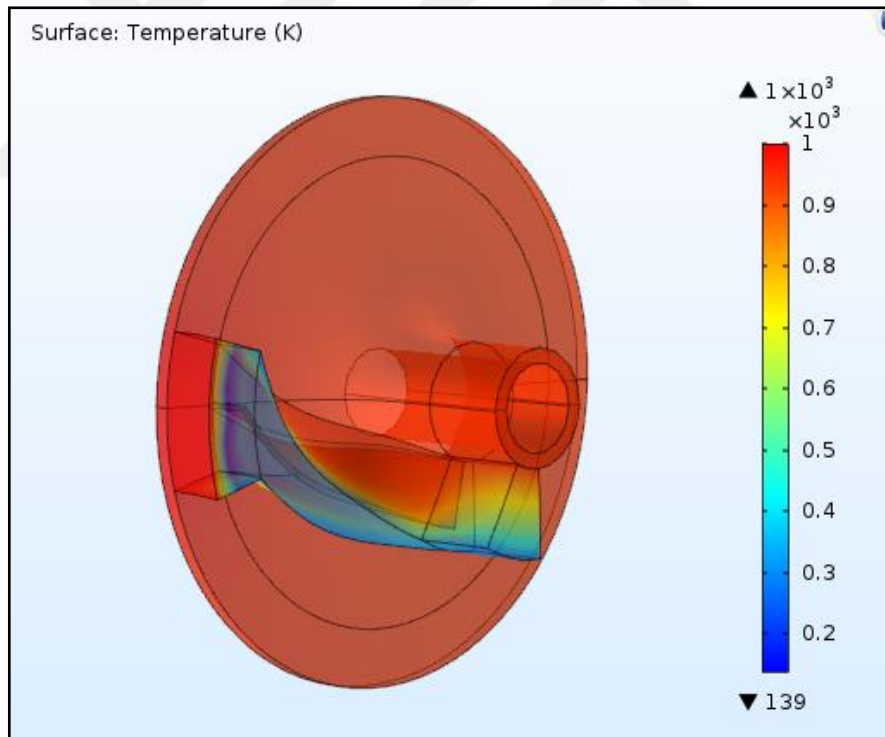


Şekil 4. 36 İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

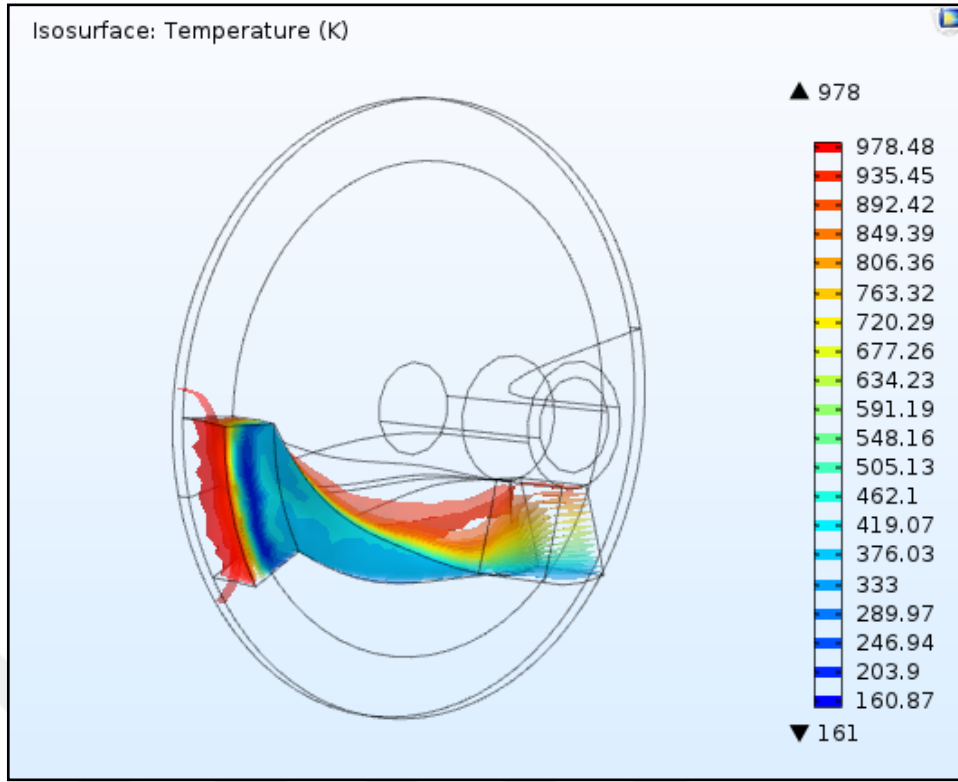
Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da İHA'nın 500 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kanat giriş ve çıkış kısımlarının bir bölümünde ısı taşınım katsayısı etkisiyle sıcaklık 760 K civarında, kanat üst boşluğu bölgelerinde 370 K civarında olduğu görülmektedir.



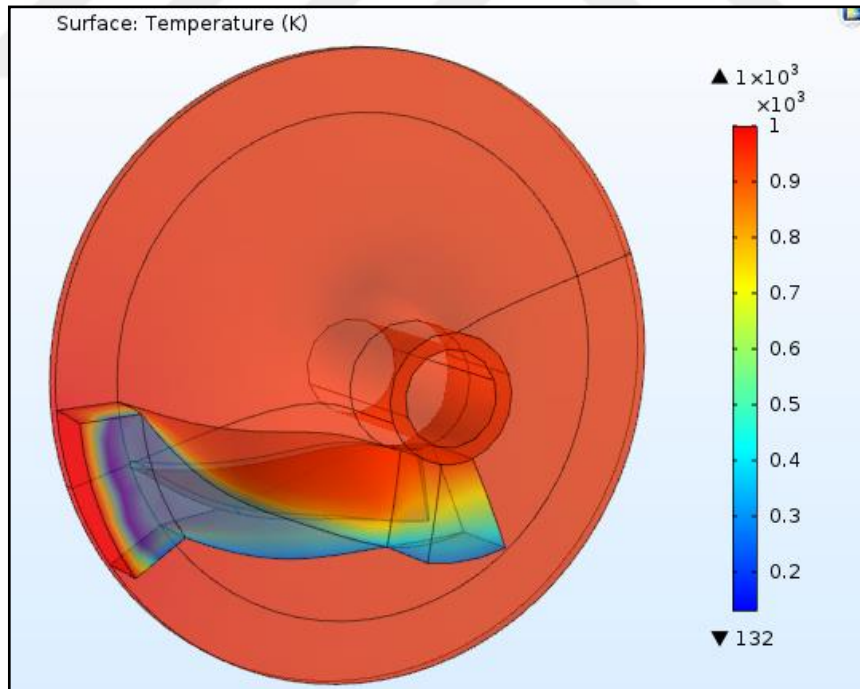
Şekil 4. 37 İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



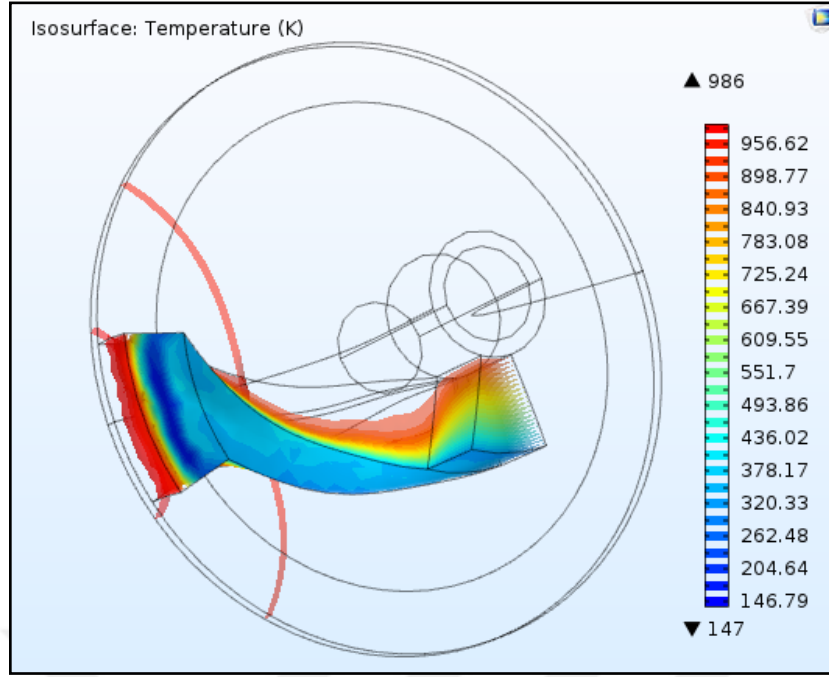
Şekil 4. 38 İHA'nın 500 m havadaki durmuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 39 İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

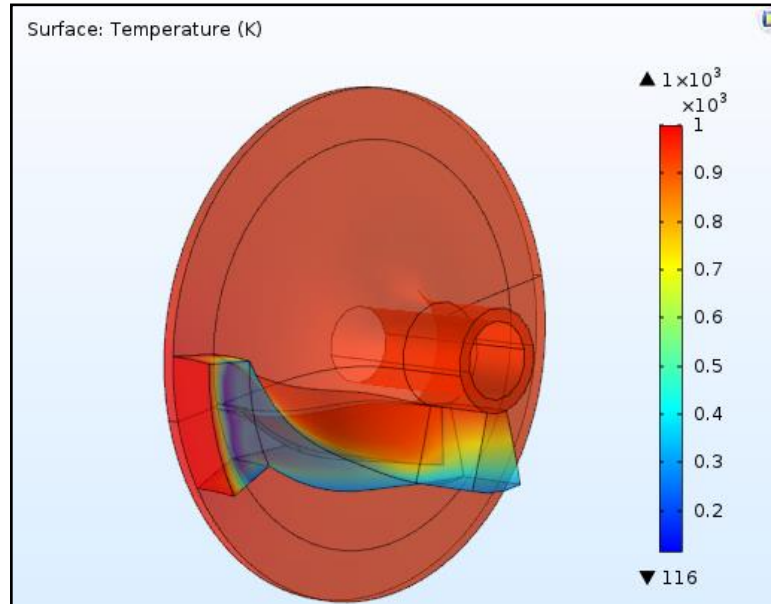


Şekil 4. 40 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



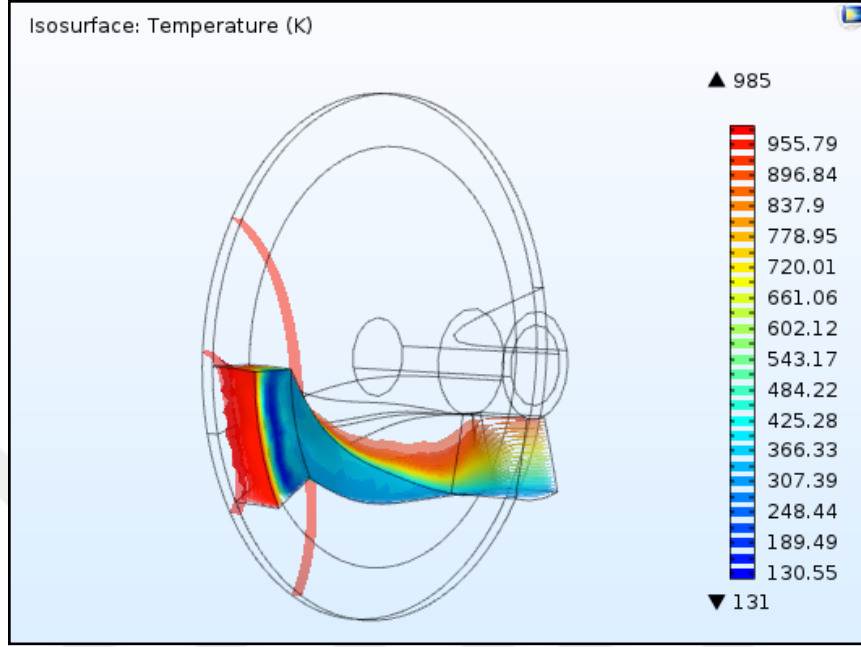
Şekil 4. 41 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de İHA'nın 1000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kanat giriş ve çıkış kısımlarının üst kısımlarında ısı taşınım katsayısı etkisiyle sıcaklık 750 K civarında, kanat üst boşluğu bölgelerinde 360 K civarında olduğu görülmektedir. Dış çevre sıcaklığı azaldıkça ve h değeri arttıkça kanat bölgesine doğru soğuma artacaktır.

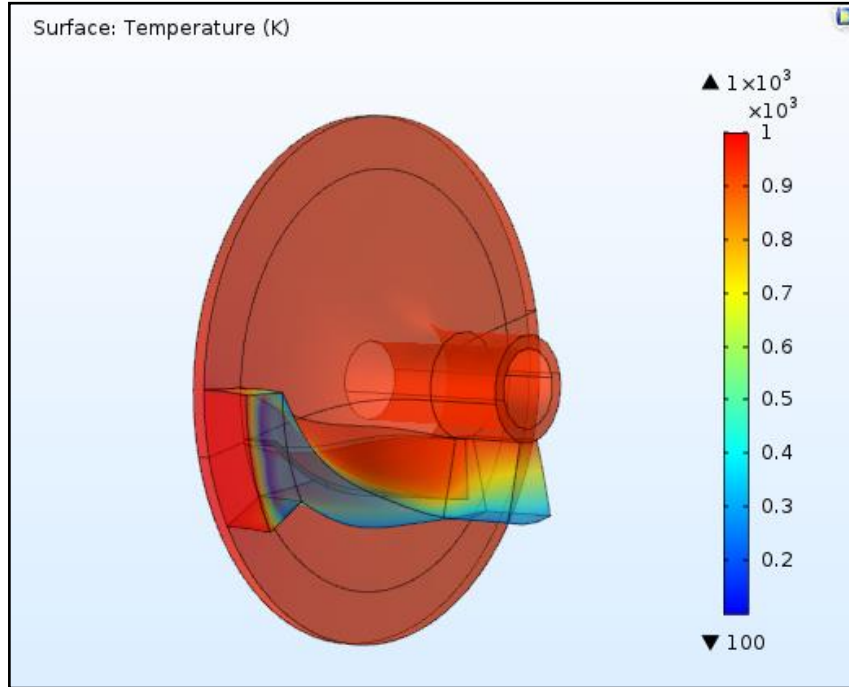


Şekil 4. 42 İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

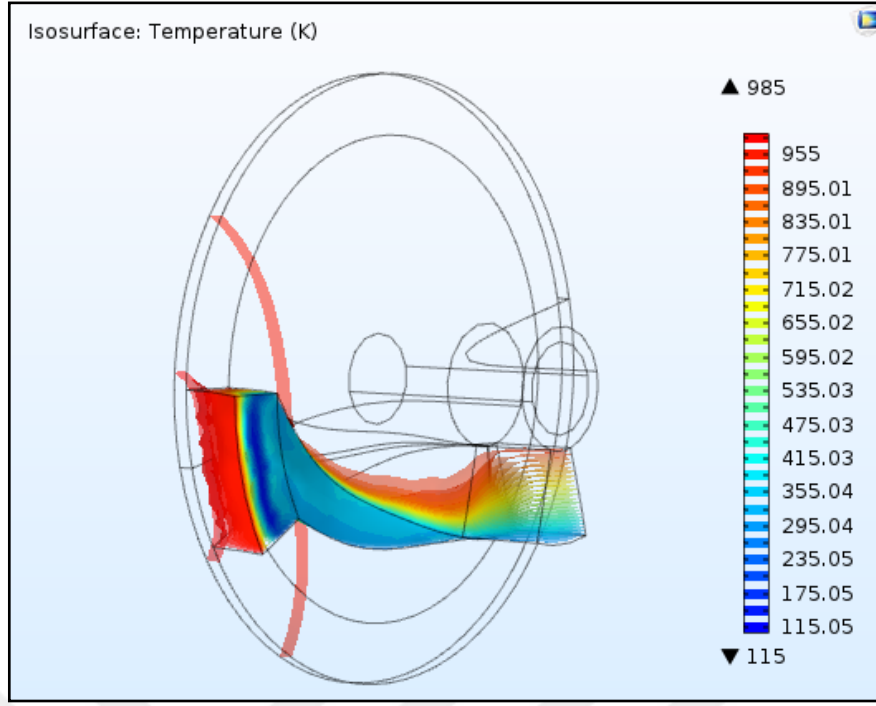
Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te İHA'nın 3000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kanat giriş ve çıkış kısımlarının üst kısımlarında ısı taşınım katsayısı etkisiyle sıcaklık 740 K civarında, kanat üst boşluğu bölgelerinde 350 K civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 43 İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 44 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 45 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te İHA'nın 5000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, kanat giriş ve çıkış kısımlarının üst kısımlarında ısı taşınım katsayısı etkisiyle sıcaklık 715 K civarında, kanat üst boşluğu bölgelerinde 325 K civarında olduğu görülmektedir.

Genel olarak, İHA'nın 7 farklı çalışma şartlarındaki türbin kanat ve akış alanı için incelenen sıcaklık, hız ve basınç dağılımı benzer özellikler göstermektedir. Sıcaklık dağılımı yüksekliğe ve İHA hızına bağlı olarak değiştiği, yükseklik ve hız arttıkça türbin kanadının üst bögesi ve üst boşluk kısmında soğuma etkisinin arttığı gözlenmektedir.

Daha önce bahsedildiği gibi mikro jet motorunun kullanım amacı ve ekonomiklik göz önüne alınarak tasarım aşamasında incelenen bu hususlar dikkate alınması gerekir. Motor ömrünün uzun olması istendiği takdirde incelen bu durum avantajlı olmaktadır. Diğer taraftan motor performansının ve veriminin yüksek olması arzu ediliyorsa incelenen bu ısı taşınım katsayısının yüksek olması istenen bir durum değildir. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzemelerin üretimi daha ekonomik olması durumunda ısı taşınım katsayısının daha fazla olmasına ihtiyaç olmayacaktır. Bu tür

tasarımların malzeme teknolojisine son derece bağımlı olduğu, tasarımcıların göz önünde bulundurması gereken bir husustur.

4.9.2 Türbin Dış ve Yan Yüzeyi h Tanımlaması

Çalışmanın bu bölümünden itibaren İHA'nın 7 farklı çalışma şartlarına göre türbin dış ve yan yüzeyi için tanımlanan h değerleri için akış ve kanat üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenecektir.

Türbin yan yüzeyi, 15*120 mm boyutlarında dış atmosfere açık 4 adet kanalla temas halinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Hesaplamalarda belirleyici rol alan Reynolds ve Nusselt sayıları, dış hava akışı türbin yan yüzeyindeki kanalların içinde gerçekleştiğinden hidrolik çapa göre ve kaynak dökümünde yer alan uygun denklemlere göre hesaplamalar yapılmıştır [51].

Bu durumda Reynolds sayısı eşitlik (4.4)'e göre hesaplanır.

$$Re_d = \frac{U_m d}{\nu} \quad (4.4)$$

Burada, U_m çalışma şartlarına göre İHA hızı ve d hidrolik çap (türbin yan yüzeyindeki 4 adet kanala göre) olarak 68 mm'dir. Kinematik vizkozite olan ν değeri ise hava için film sıcaklığına göre kaynak dökümündeki tablolardan elde edilmiştir.

İHA'nın 7 farklı çalışma durumuna göre hesaplanan Reynolds sayıları 2300 değerinden büyük olduğundan, türbin yan yüzeyindeki 4 adet kanal içindeki dış hava akımları türbülanslı akış özelliğindedir. Bu nedenle Nuselt sayısı eşitlik (4.5)'e göre hesaplanmıştır.

$$Nu_d = 0.0214(Re_d^{0.8} - 100)(Pr)^{0.4} \quad (4.5)$$

Bu denklemde yer alan Prandtl sayısı olan Pr değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümündeki tablolardan elde edilen değeridir.

Hidrolik çapa göre hesaplanan bu değerler kapsamında ısı taşınım katsayısı olan h , eşitlik (4.6)'ya göre hesaplanır.

$$h = Nu_d \frac{k}{d} \quad (4.6)$$

Burada yer alan ısı iletim katsayısı k değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümandaki tablolardan elde edilen değeridir. Diğer ifadeler olan Nusselt sayısı ve hidrolik çap d değerleri, önceden bahsedildiği gibidir.

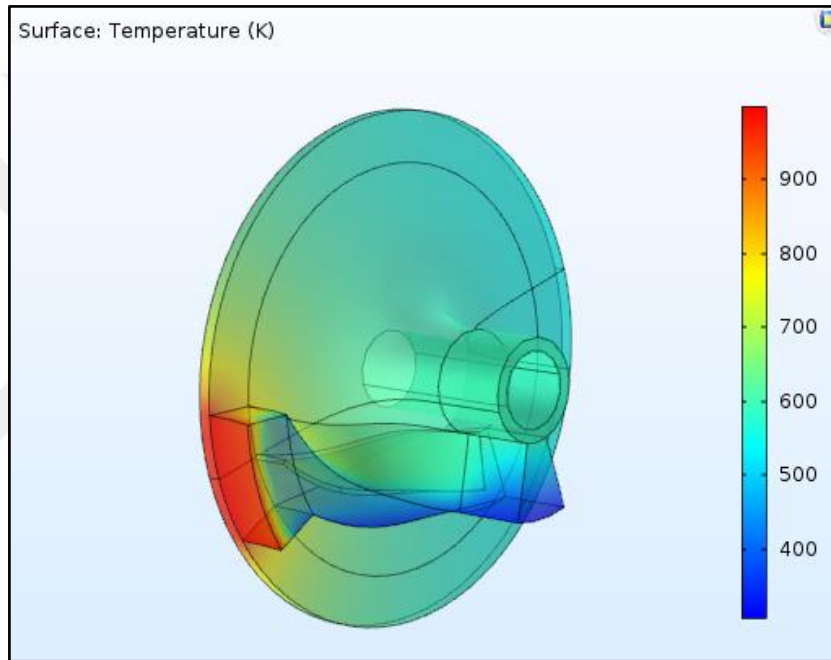
Gerçek çalışma şartlarına yaklaşılması için Çizelge 4.2’de verilmiş h değerinin % 70’i alınarak Comsol programına tanımlanmıştır. Bunun nedeni türbin yan yüzeyi ile dış hava arasında belli kalınlıkta malzemenin yer almasıdır. Daha önce belirtildiği gibi, daha hassas değerlerin hesaplanması üretim parametrelerin belirlenmesiyle yapılabilir. Bu çalışmada belirtilen yaklaşımdaki değerler kullanılacaktır.

Çizelge 4. 2 Türbin dış ve yan yüzeyi için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler

	Yerde (Sabit)	Yerde (Hızlanma)	Kalkış	Havada 1	Havada 2	Havada 3	Havada 4
Yerden Yükseklik (m)	0	0	200	500	1000	3000	5000
Hız (m/s)	2	30	60	100	110	120	130
Çevre Sıcaklığı (°C)	15	15	14	12,5	10	0	-10
$\nu * 10^6$ (m ² /s)	58,51	58,51	58,51	56,4	56,4	55,42	55,21
k (W/(m.K))	0,06332	0,06332	0,06332	0,06284	0,06284	0,06253	0,06232
Pr	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682	0,681
Re	2324	34866	69731	120567	132624	147239	160115
Nu	7,22	77,11	135,77	211,4	228,31	248,38	265,74
h (W/m ² .K)	5,26	56,16	98,89	150,8	162,84	177,16	188,4

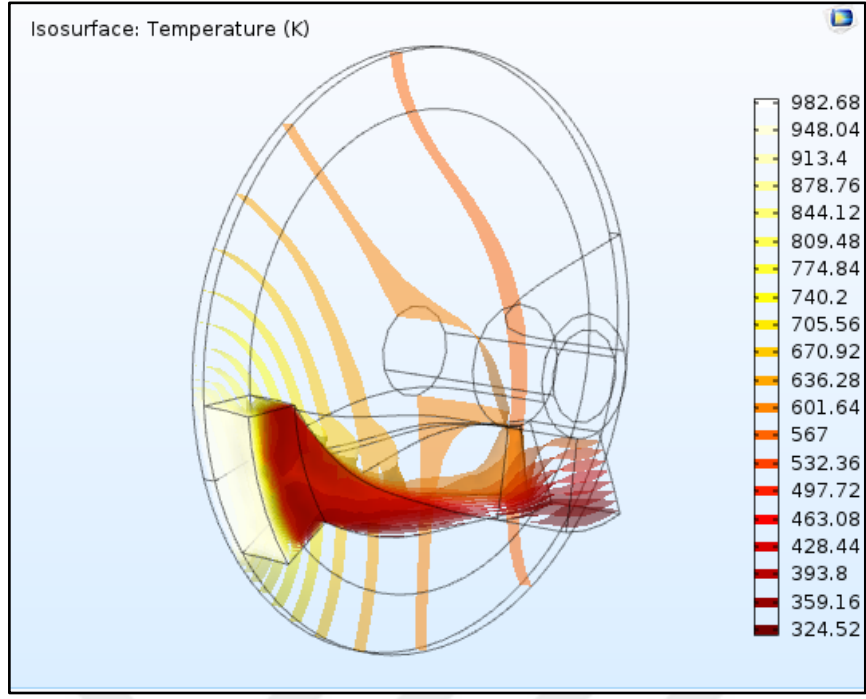
Hız ve basınç dağılımı bir önceki çalışmaya benzer olduğundan bundan sonraki kısımlarda bu değerlendirmeler yapılmayacaktır. Bir önceki çalışmaya ilave yani türbin dış ve yan yüzeyi için hesaplanan h değeri probleme dahil edilmiştir. Türbin yan yüzeyi için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

İHA’nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı Şekil 4.46’da görülmektedir. Şekil incelendiğinde akışın 1000 K sıcaklığında girdiği halde çıkış bölümünün orta kesiminde 410 K’ne kadar düşmektedir. Bunun nedeni olarak akışın bir miktar enerjisini türbin kanadına aktarması, ayrıca türbin akışkan dış yüzeyi ve türbin yan yüzeyine yapılan h tanımlamasıdır.

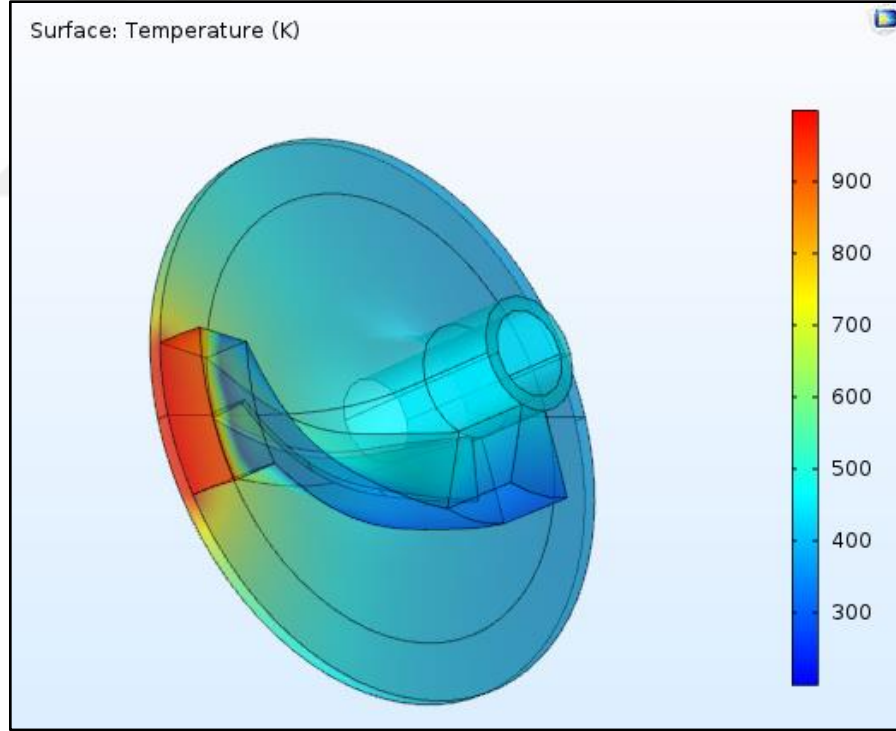


Şekil 4. 46 İHA’nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

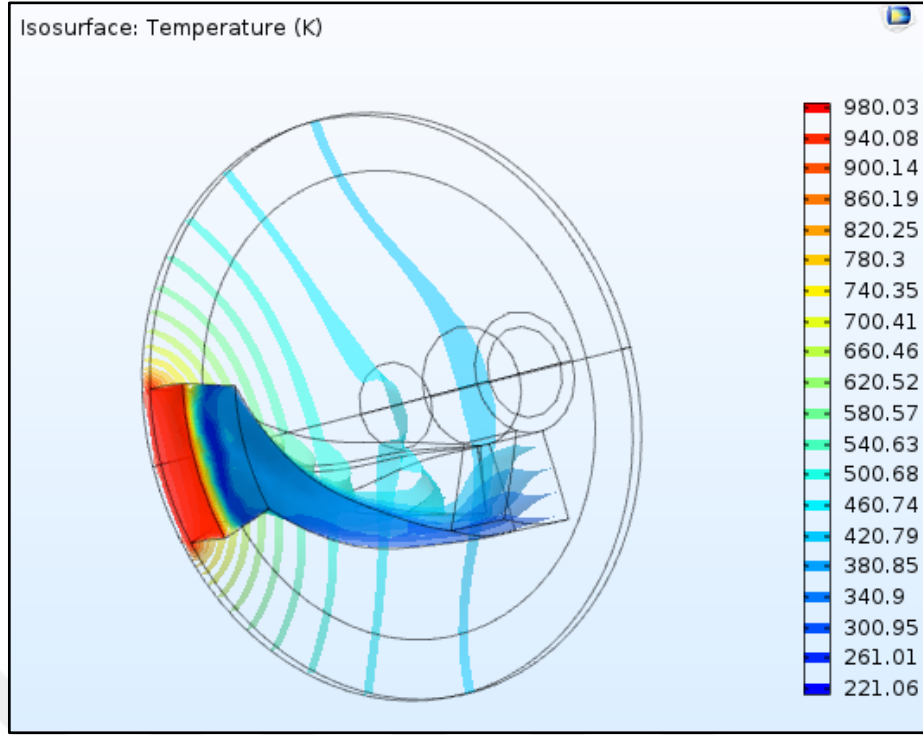
İHA’nın yerde sabit çalışma şartına göre sıcaklık dağılımının daha iyi incelenemediği durum eş sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 4.47’de görülmektedir. Bu durum incelendiğinde akışkan giriş sıcaklığının yüksek olduğu fakat kanat orta kısımlarında sıcaklığın azaldığı ve 600 K civarında olduğu net olarak görülmektedir. Çıkışa doğru beklendiği gibi, sıcaklık azalımının kanat dibine doğru çok yaklaştığı görülmektedir.



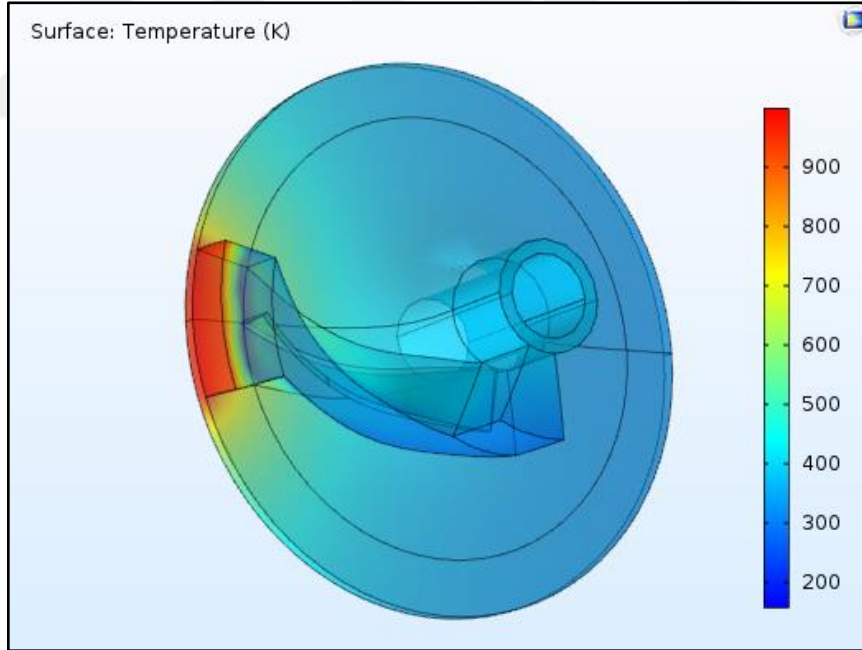
Şekil 4. 47 İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre eş sıcaklık dağılımı



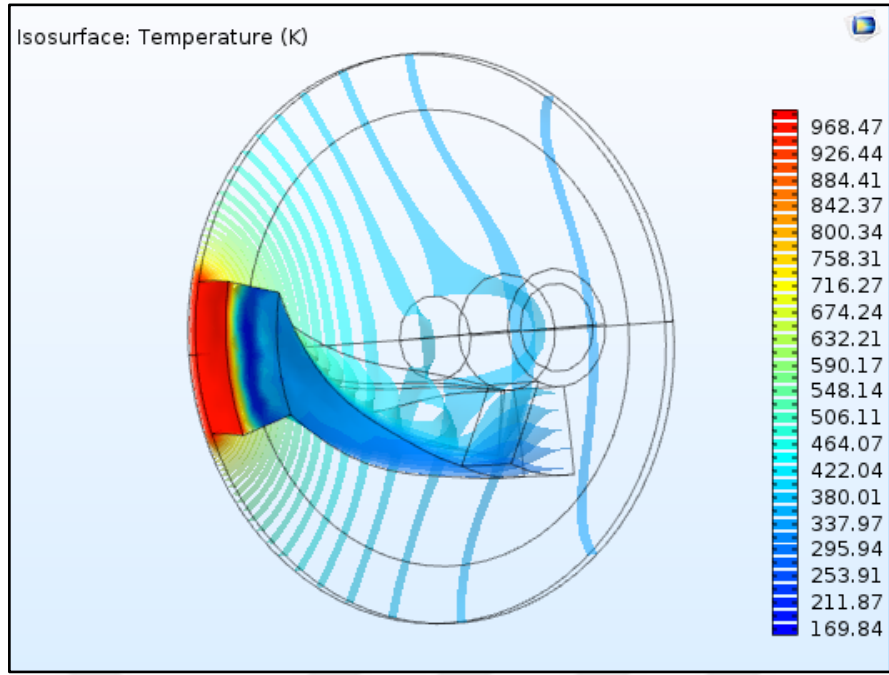
Şekil 4. 48 İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



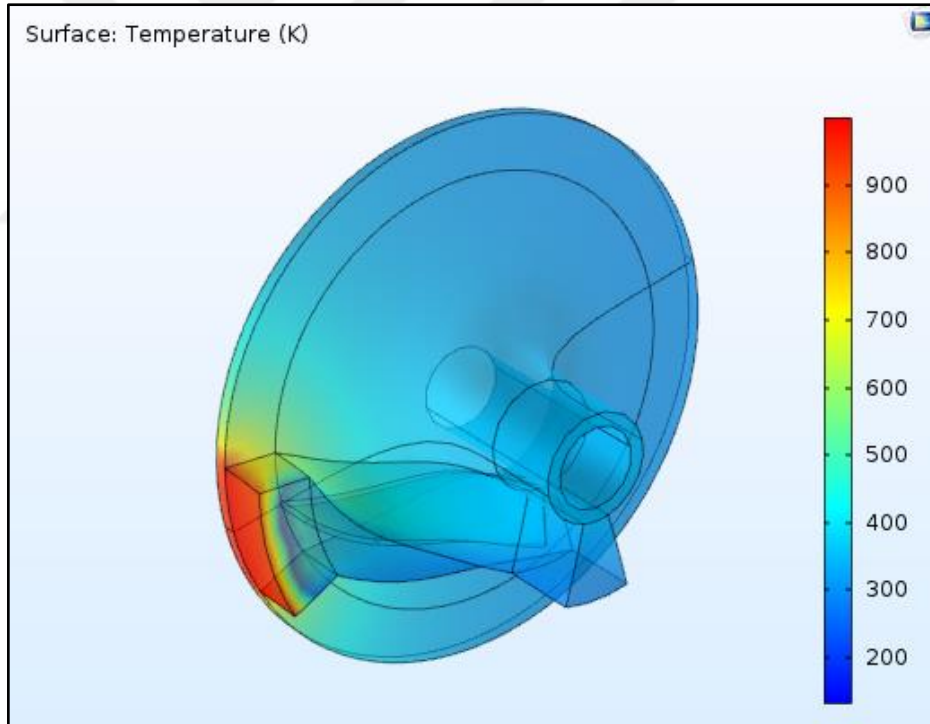
Şekil 4. 49 İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



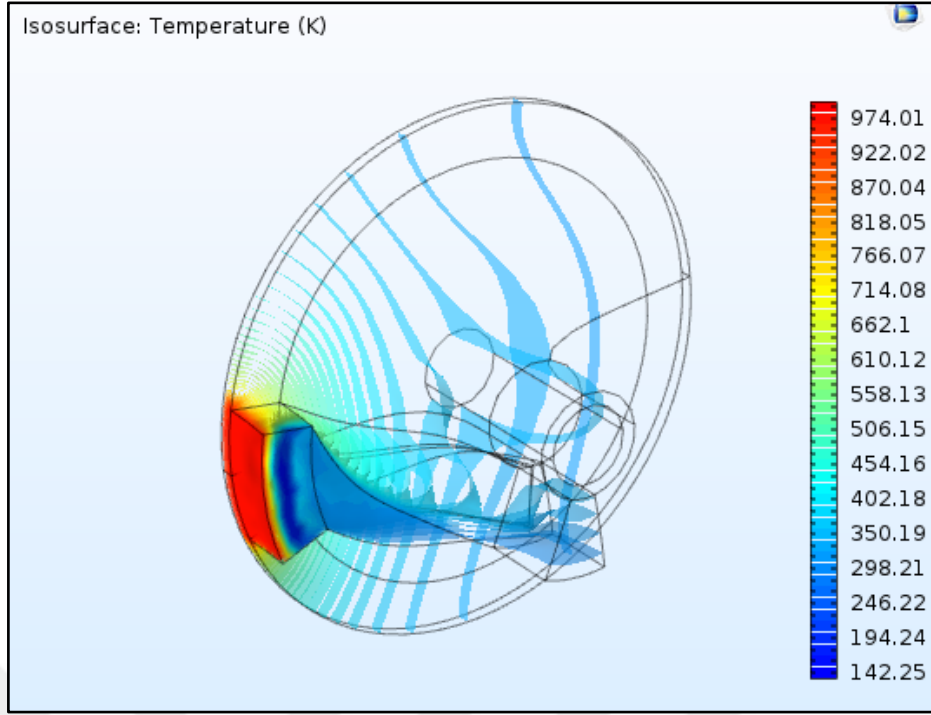
Şekil 4. 50 İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 51 İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 52 İHA'nın 500 m havadaki durmuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



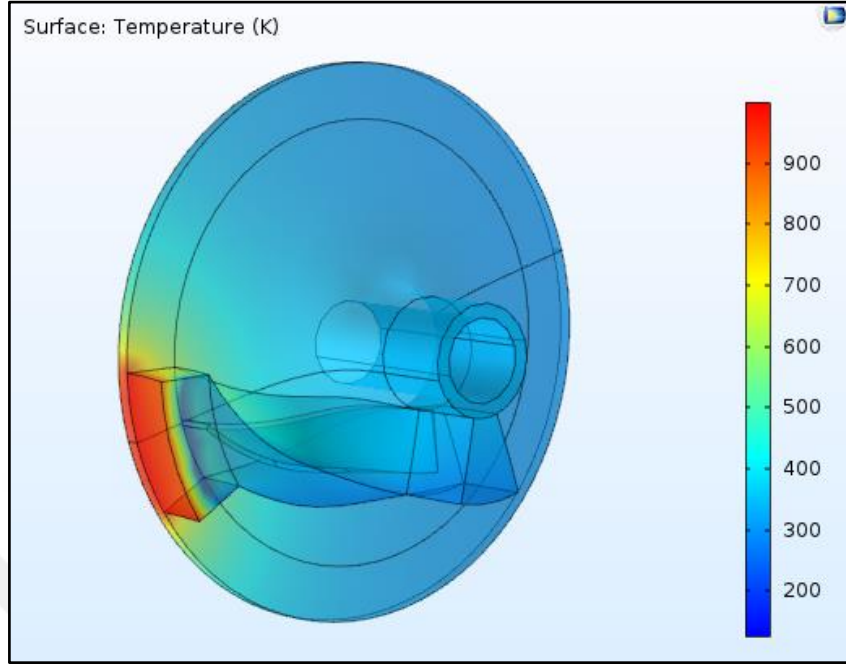
Şekil 4. 53 İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

Şekil 4.48'de İHA'nın yerde hızlanma şartına göre, türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil incelendiğinde h değerinin artmasıyla sıcaklık değerlerinin bir önceki duruma göre daha da azaldığı görülmektedir. Şekil 4.49'da İHA'nın yerde hızlanma şartına göre eş sıcaklık dağılımından da görüldüğü gibi girişte yüksek sıcaklıklar olmasına karşın kanat ortalarından itibaren büyük oranda düşüş olduğu ve bu civarda 500 K sıcaklık gözlenmektedir. En yüksek ve düşük sıcaklıklar sırasıyla 1000 K ve 320 K civarındadır.

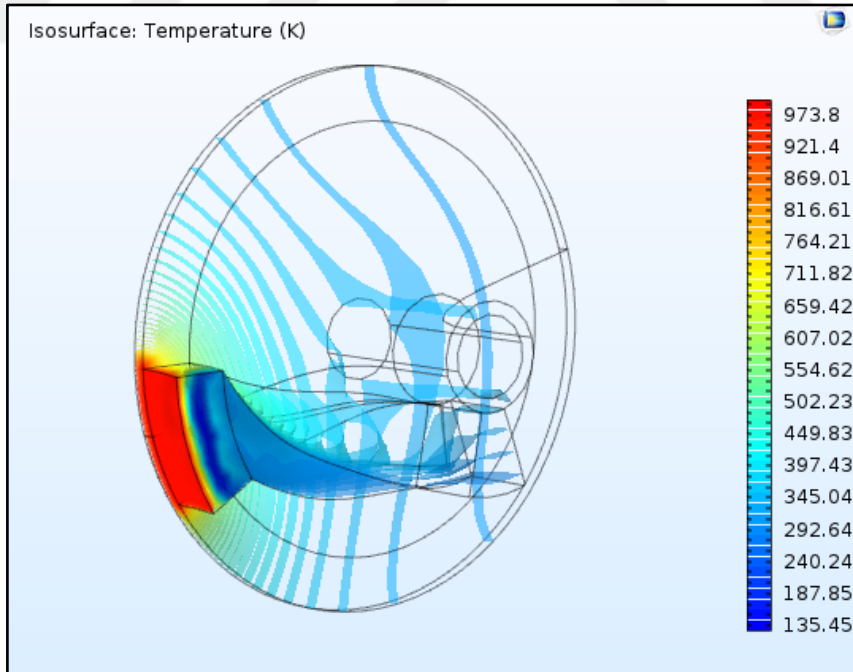
İHA'nın kalkış esnasında hesaplanan h değerine göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı Şekil 4.50'de ve eş sıcaklık olarak Şekil 4.51'de görülmektedir. Bir öncekine göre benzerlik gösterse de sıcaklığın biraz daha azaldığı görülmektedir. Sıcaklık azalımının dalga halinde kanat boyunca azaldığı yani girişten sonraki bölümlerde kanat köklerinde de düşmektedir. Kanat ortasından itibaren 430 K civarına kadar sıcaklık düşümü olduğu ve giderek azaldığı gözlemlenmektedir

Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'de İHA'nın 500 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, girişten sonra

sıcaklığının dalga halinde azaldığı ve kanat orta bölümünden itibaren 400 K civarında olduğu ve de giderek azaldığı görülmektedir.

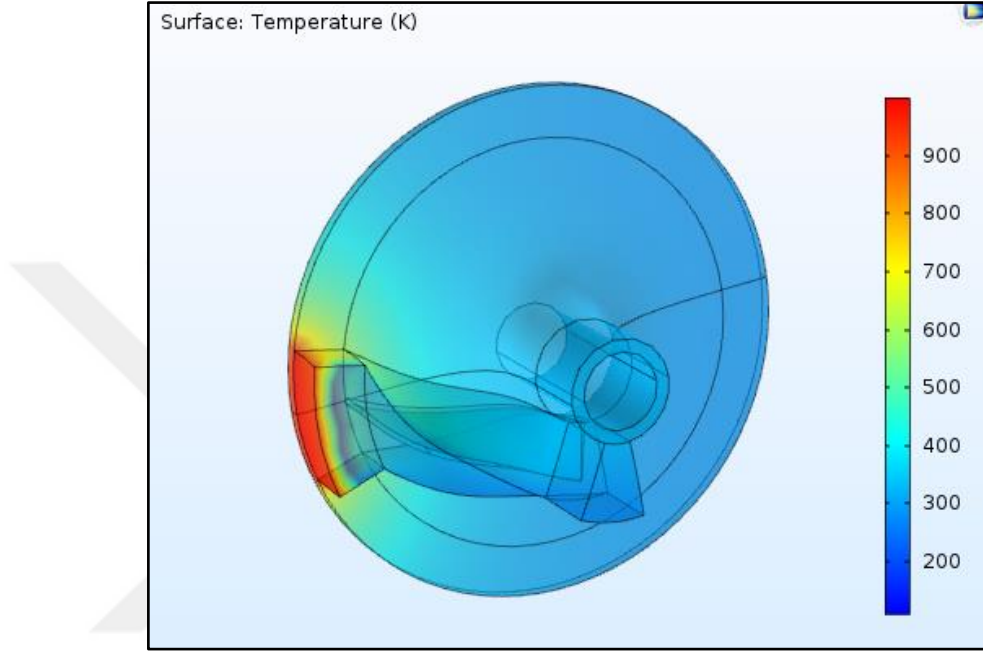


Şekil 4. 54 İHA'nın 1000 m havadaki durmuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

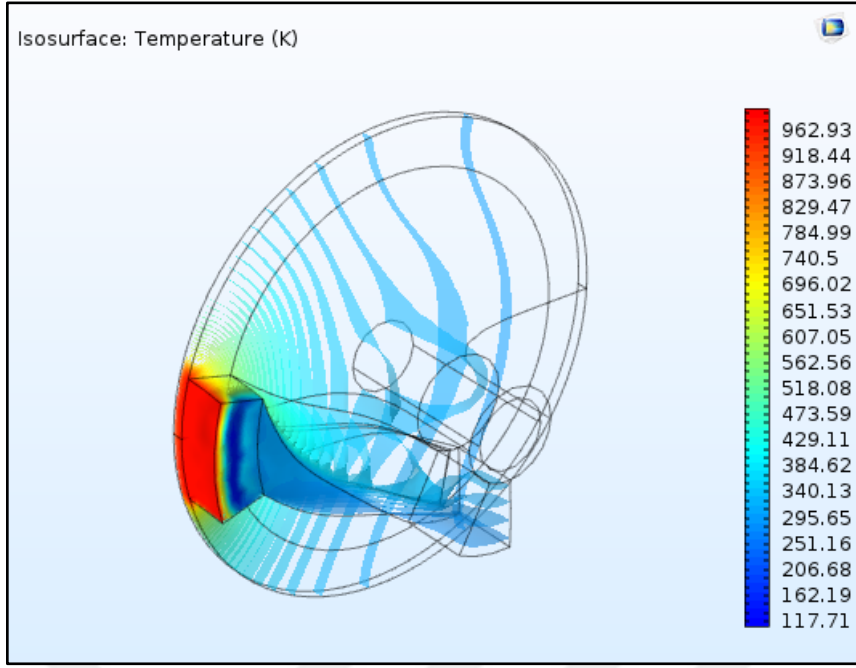


Şekil 4. 55 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

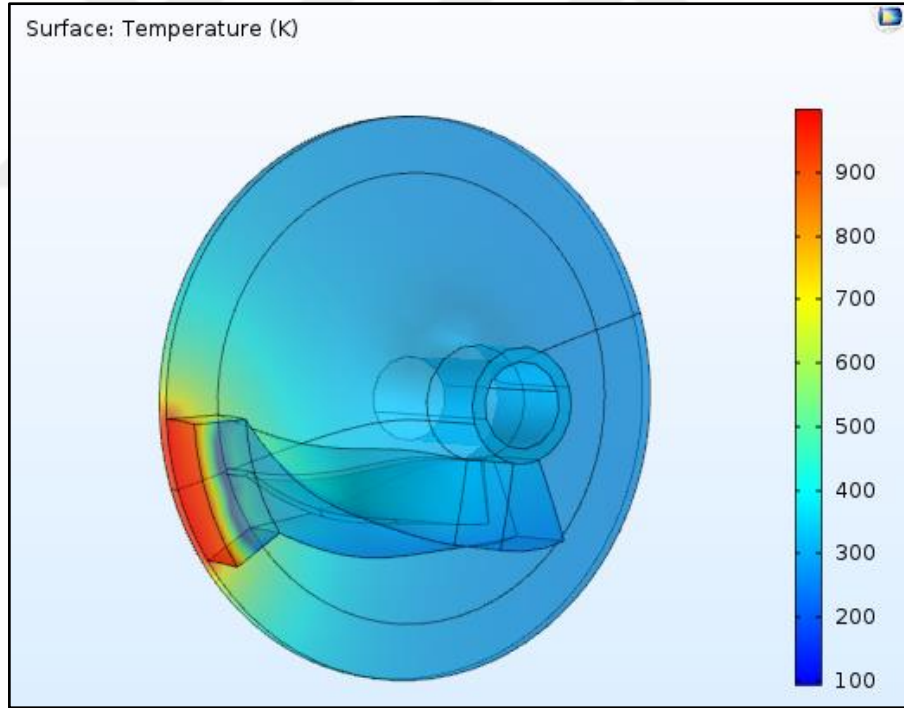
Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te İHA'nın 1000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, bir öncekine benzer şekilde sıcaklık dağılımının girişten sonra dalga halinde kanat ve akış alanı boyunca giderek azaldığı görülmektedir. Dış çevre sıcaklığı azaldıkça ve türbin yan ve dış yüzey h değeri arttıkça kanat bölgesine doğru soğuma artacaktır. Kanat giriş kısmından sonra orta bölgesinde sıcaklık 380 K civarı ve giderek sıcaklık azalmaktadır.



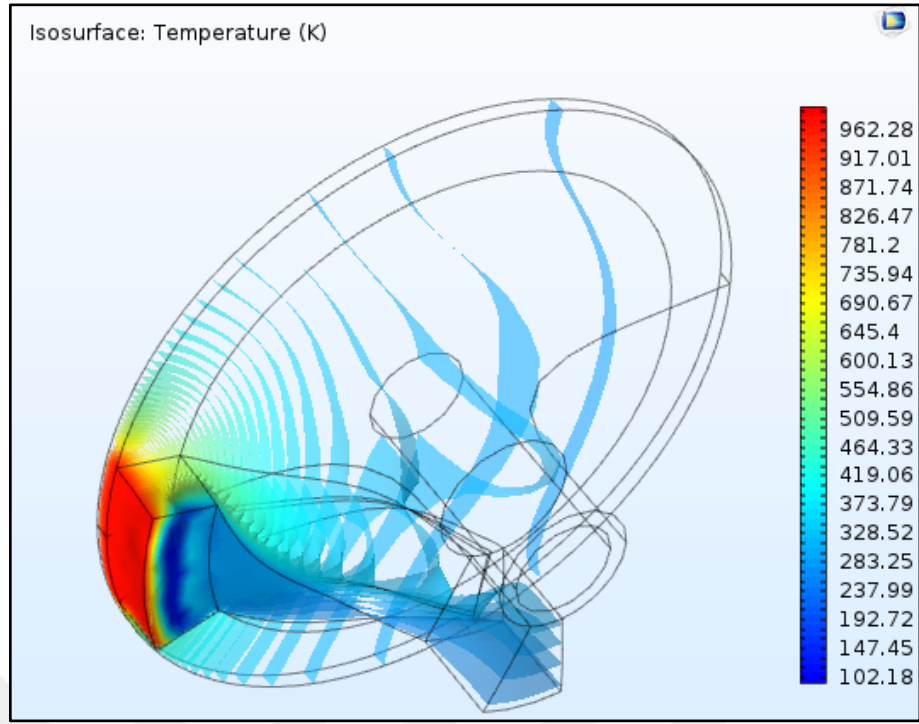
Şekil 4. 56 İHA'nın 3000 m havadaki duruma göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 57 İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 58 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 59 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de İHA'nın 3000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, akışkan girişinden itibaren dalga halinde sıcaklık azalımının başladığı görülmektedir. Kanat giriş kısmından sonra orta bölgesinde sıcaklık 370 K civarında ve giderek azalmaktadır.

Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da İHA'nın 5000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, akışkan girişinden itibaren dalga halinde sıcaklık azalımının başladığı görülmektedir. Kanat giriş kısmından sonra orta bölgesinde sıcaklık 360 K civarında ve giderek azalmaktadır.

Genel olarak, İHA'nın 7 farklı çalışma şartları için türbin dış ve yan yüzeyi için hesaplanan h tanımlamasıyla sistem incelenmiş, türbin kanat ve akış alanı için incelenen sıcaklık, hız ve basınç dağılımı benzer özellikler göstermektedir. Sıcaklık dağılımı yüksekliğe ve İHA hızına bağlı olarak değiştiği, yükseklik ve hız arttıkça türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı girişten itibaren dalga halinde azalmaya başladığı gözlenmektedir. Özellikle kanat soğutmasının başarılı bir şekilde gerçekleştiği hatta istenenden daha fazla soğuma gerçekleşmektedir. Bu istenmediği takdirde tasarım aşamasında yapılacak bazı önlemlerle bu giderilebilir.

4.9.3 Türbin Dış ve Yan Yüzeyi İle Merkez Kısmı h Tanımlaması

Çalışmanın bu bölümünden itibaren İHA'nın 7 farklı çalışma şartlarına göre türbin dış ve yan yüzeyi ile merkez kısmı için tanımlanan h değerleri için akış ve kanat üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelencektir.

Türbin merkez kısmı için, motor ön tarafından egzoz çıkışına kadar olan kısım dahil, 30 mm çapında boru şeklinde yuvarlak bir kanal tasarlanarak, dış havanın akışı sağlanacak şekildedir. Burada oluşan hava akış hızı İHA hızı ile aynı alınmıştır. Hesaplamalarda belirleyici rol alan Reynolds ve Nusselt sayıları kaynak dökümünde yer alan uygun denklemlere göre hesaplama yapılmıştır [51].

Bu durumda Reynolds sayısı eşitlik (4.7)'ye göre hesaplanır.

$$Re_d = \frac{U_m d}{\nu} \quad (4.7)$$

Burada, U_m çalışma şartlarına göre İHA hızı ve boru şeklinde yuvarlak kanal çapı olan d 30 mm'dir. Kinematik vizkozite olan ν değeri ise hava için film sıcaklığına göre kaynak dökümündeki tablolardan elde edilmiştir.

İHA'nın yerde sabit çalışma durumuna göre hesaplanan Reynolds sayısı 2300 değerinden küçük olduğundan, türbin merkez kısmında yer alan boru şeklinde kanal içindeki hava akımı laminar akış özelliğindedir. Bu nedenle Nuselt sayısı eşitlik (4.8)'e göre hesaplanmıştır.

$$Nu_d = 0.036(Re_d^{0.8})(Pr)^{1/3} \left(\frac{d}{L}\right)^{0.055} \quad (4.8)$$

Bu denklemde yer alan Prandtl sayısı olan Pr değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümündeki tablolardan elde edilen değeridir. Boru şeklinde yuvarlak kanal çapı olan d 30 mm'dir. L ise 75 mm ve türbin merkez kısmında yer alan boru şeklindeki kanal uzunluğudur.

İHA'nın yerde sabit çalışma durumu hariç diğer 6 farklı çalışma durumuna göre hesaplanan Reynolds sayıları 2300 değerinden büyük olduğundan, türbin merkez kısmında yer alan boru şeklinde kanal içindeki hava akımları türbülanslı akış özelliğindedir. Bu nedenle Nuselt sayısı eşitlik (4.9)'a göre hesaplanmıştır.

$$Nu_d = 0.0214(Re_d^{0.8} - 100)(Pr)^{0.4} \quad (4.9)$$

Bu denklemde yer alan Prandtl sayısı olan Pr değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümandaki tablolardan elde edilen değeridir.

Boru şeklinde kanala göre hesaplanan bu değerler kapsamında ısı taşınım katsayısı olan h , eşitlik (4.10)'a göre hesaplanır.

$$h = Nu_d \frac{k}{d} \quad (4.10)$$

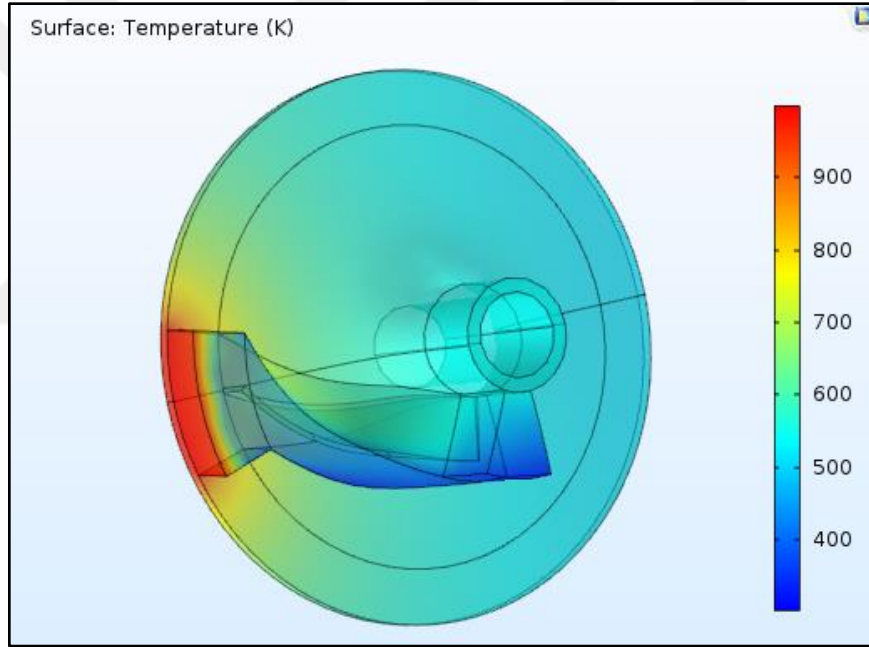
Burada yer alan ısı iletim katsayısı k değeri, film sıcaklığına göre havanın, kaynak dökümandaki tablolardan elde edilen değeridir. Diğer ifadeler olan Nusselt sayısı ve kanal çapı olan d değerleri, önceden bahsedildiği gibidir.

Çizelge 4. 3 Türbin merkez kısmı için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler

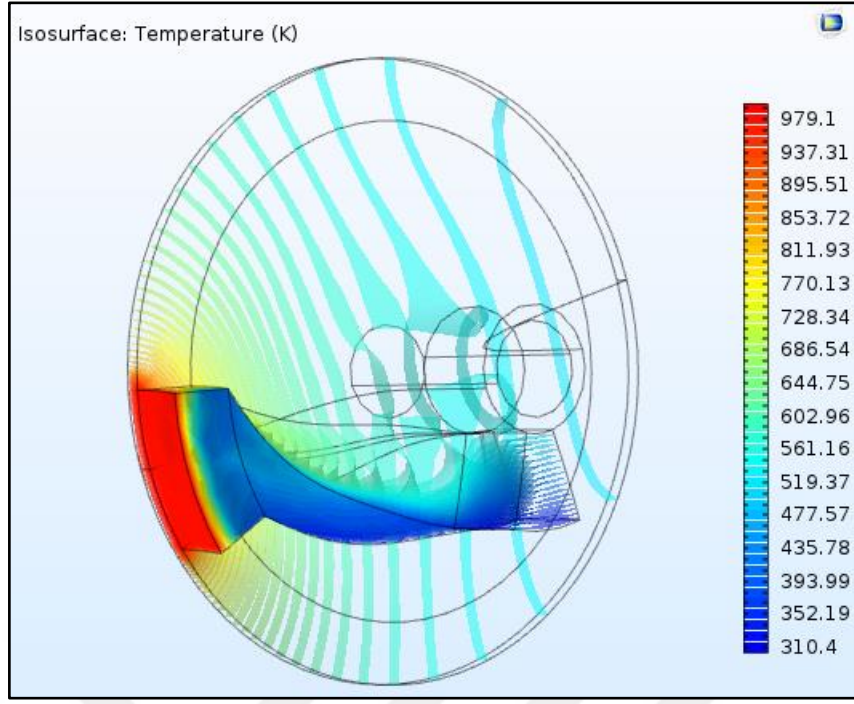
	Yerde (Sabit)	Yerde (Hızlanma)	Kalkış	Havada 1	Havada 2	Havada 3	Havada 4
Yerden Yükseklik (m)	0	0	200	500	1000	3000	5000
Hız (m/s)	2	30	60	100	110	120	130
Çevre Sıcaklığı (°C)	15	15	14	12,5	10	0	-10
$\nu * 10^6$ (m ² /s)	58,51	58,51	58,51	56,4	56,4	55,42	55,21
k (W/(m.K))	0,06332	0,06332	0,06332	0,06284	0,06284	0,06253	0,06232
Pr	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682	0,682	0,681
Re	1025	15382	30760	53191	58510	64958	70639
Nu	7,72	39,23	69,67	108,97	117,75	128,18	137,2
h (W/m ² .K)	12,74	64,77	115	176,2	190,4	207,23	220,49

Hız ve basınç dağılımı bir önceki çalışmaya benzer olduğundan bundan sonraki kısımlarda bu değerlendirmeler yapılmayacaktır. Bir önceki çalışmaya ilave yani türbin dış ve yan yüzeyine ilave olarak merkez kısmı için hesaplanan h değeri de probleme dahil edilmiştir. Türbin merkez kısmı için hesaplanan h değeri ve diğer parametreler Çizelge 4.3’de verilmiştir.

İHA’nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı Şekil 4.60’ta görülmektedir. Şekil incelendiğinde akışın 1000 K sıcaklığında girdiği halde çıkış bölümünün orta kesiminde 405 K’ne kadar düşmektedir. Bunun nedeni olarak önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, akışın bir miktar enerjisini türbin kanadına aktarması, ayrıca türbin akışkan dış yüzey, türbin yan yüzeyi ve türbin merkez kısmına yapılan h tanımlamasıdır.

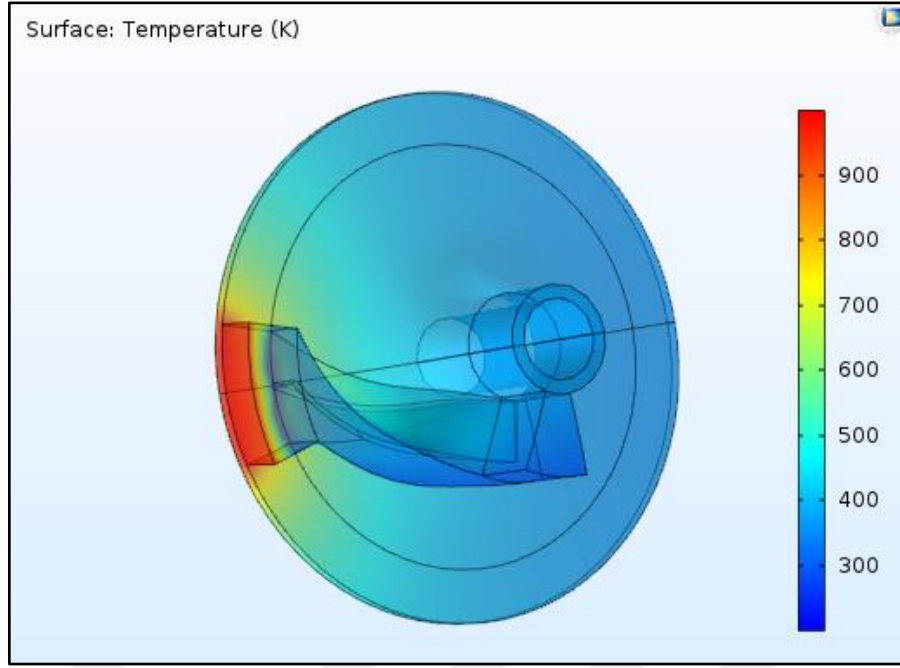


Şekil 4. 60 İHA’nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

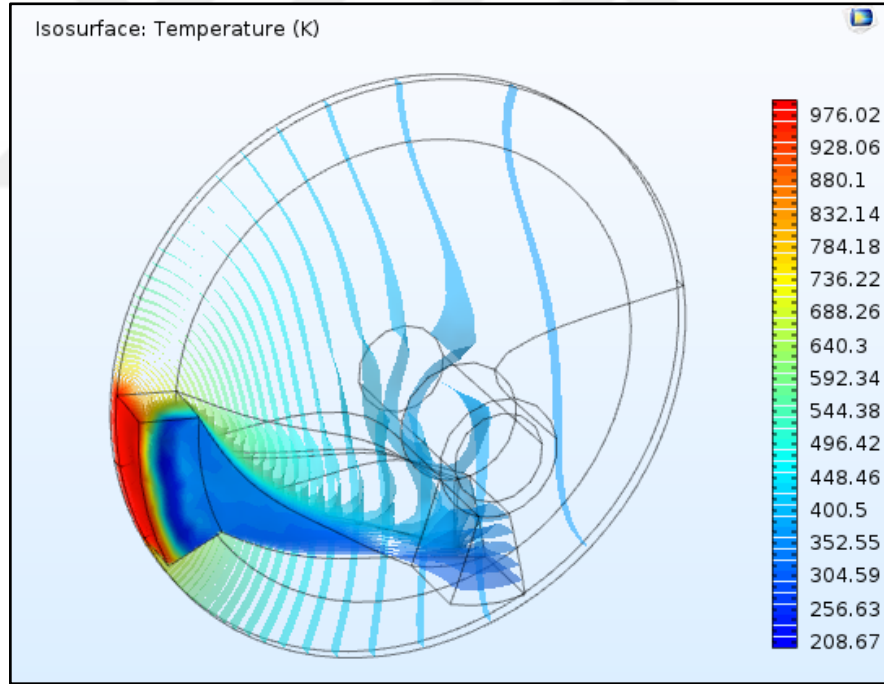


Şekil 4. 61 İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

İHA'nın yerde sabit çalışma şartına göre sıcaklık dağılımının daha iyi incelenemediği durum eş sıcaklık dağılımının verildiği Şekil 4.61'de görülmektedir. Bu durum incelendiğinde, sıcaklık dağılımının dalga şeklinde azaldığı, akışkan giriş sıcaklığının yüksek olduğu fakat kanat orta kısımlarında sıcaklığın azaldığı ve 590 K civarında olduğu net olarak görülmektedir. Çıkışa doğru beklendiği gibi, sıcaklık azalımının kanat çıkış orta kesiminde daha da azaldığı ve 520 K civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 62 İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

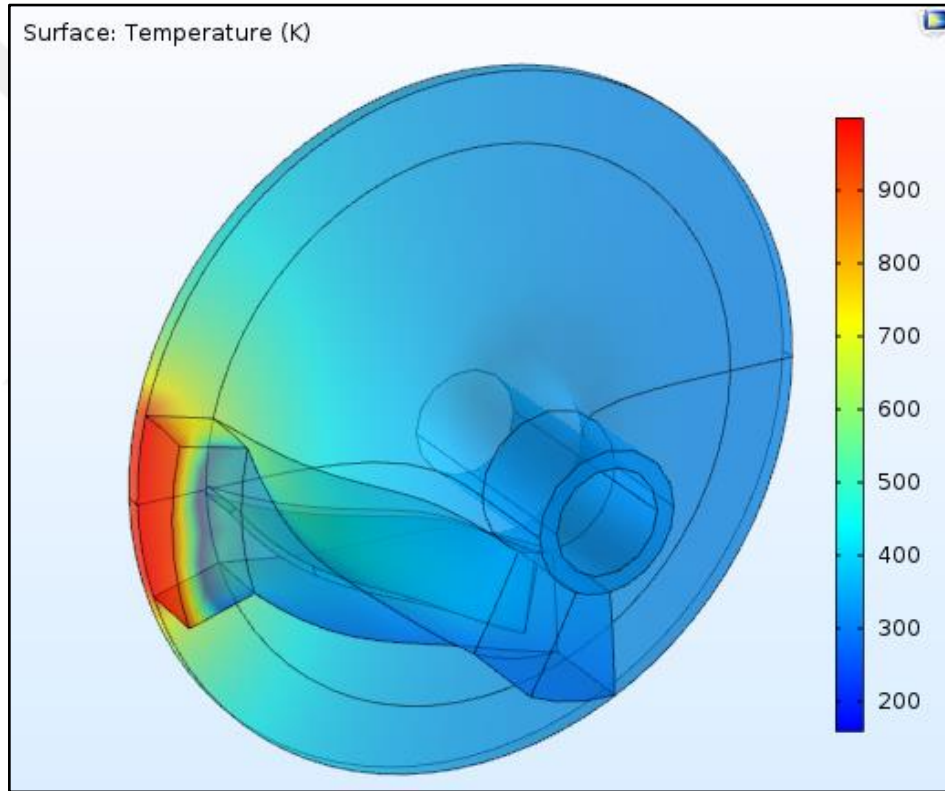


Şekil 4. 63 İHA'nın yerde hızlanma şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

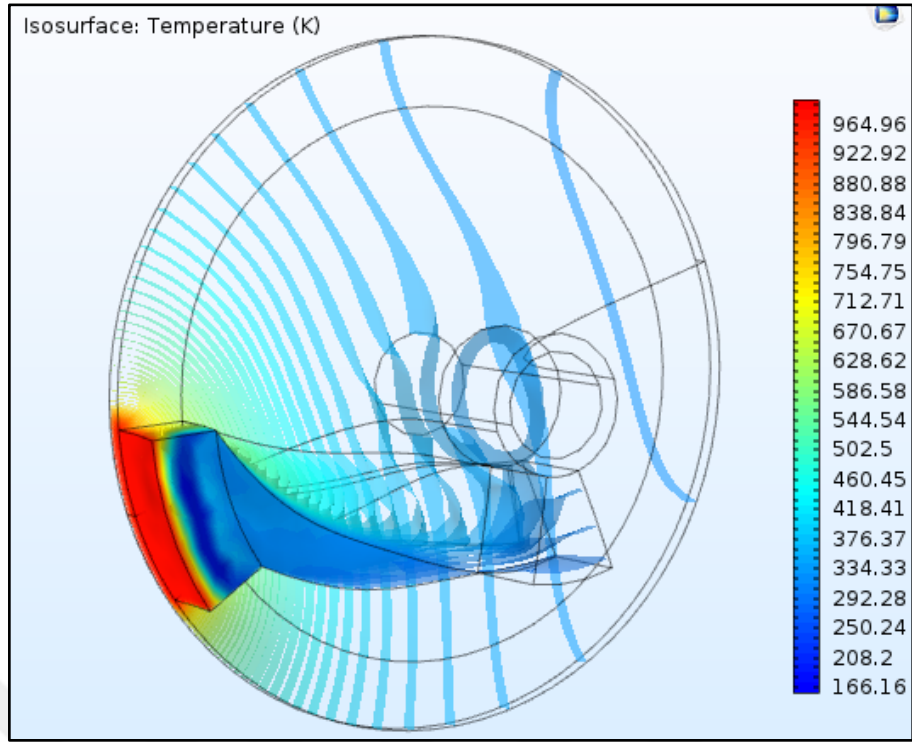
Şekil 4.62'de İHA'nın yerde hızlanma şartına göre, türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil incelendiğinde h değerinin artmasıyla sıcaklık değerlerinin bir önceki duruma göre daha da azaldığı görülmektedir. Şekil 4.63'te İHA'nın yerde

hızlanma şartına göre eş sıcaklık dağılımından da görüldüğü gibi girişte yüksek sıcaklıklar olmasına karşın, dalga halinde azalmaya başladığı, kanat ortalarından itibaren büyük oranda düşüş olduğu ve bu civarda yaklaşık 500 K sıcaklık olduğu gözlenmektedir.

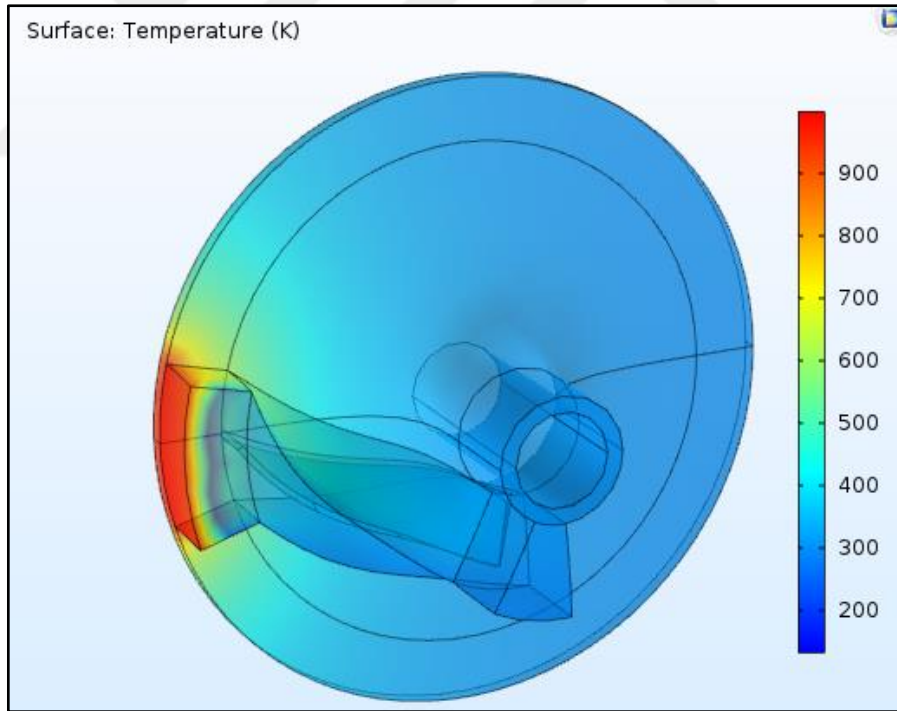
Kalkış esnasında hesaplanan h değerine göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı Şekil 4.64'te ve eş sıcaklık dağılımı olarak da Şekil 4.65'de görülmektedir. Bir öncekine göre benzerlik gösterse de sıcaklığın biraz daha azaldığı görülmektedir. Sıcaklık azalımının dalga halinde kanat boyunca azaldığı yani girişten sonraki bölümlerde kanat köklerinde de düşmektedir. Kanat ortasından itibaren 420 K civarına kadar sıcaklık düşümü olduğu ve giderek azaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 64 İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



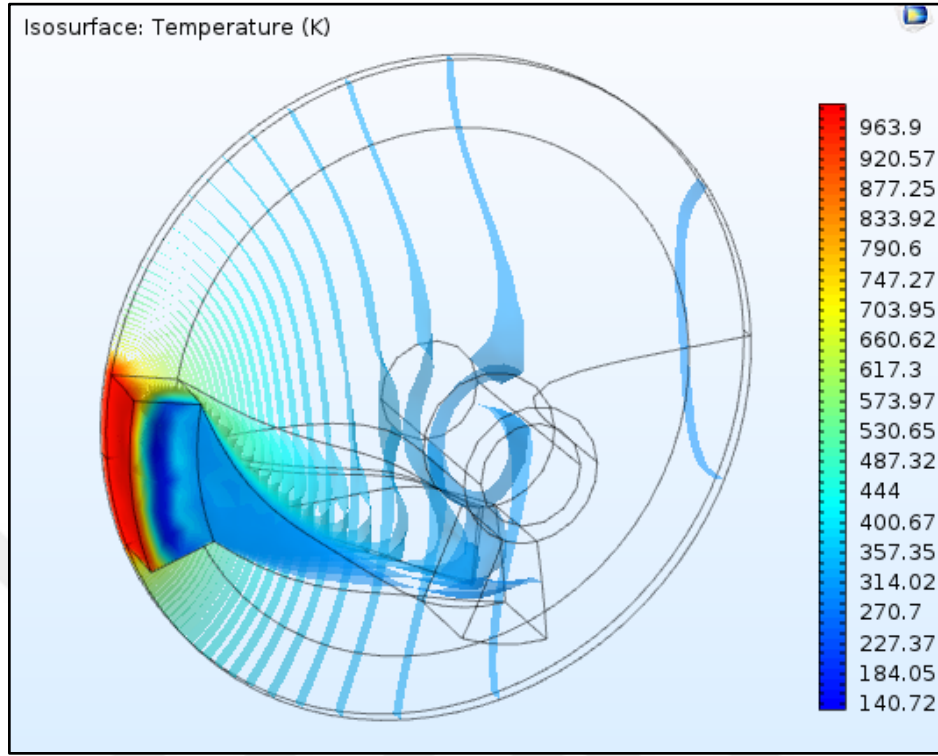
Şekil 4. 65 İHA'nın kalkış şartına göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



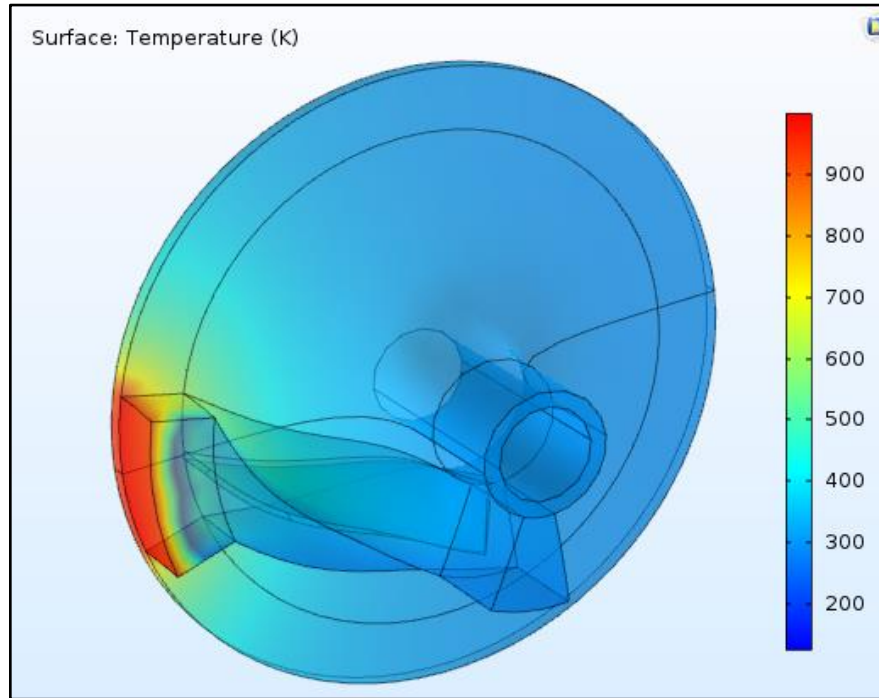
Şekil 4. 66 İHA'nın 500 m havadaki durmuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

Şekil 4.66 ve Şekil 4.67'de İHA'nın 500 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, girişten sonra

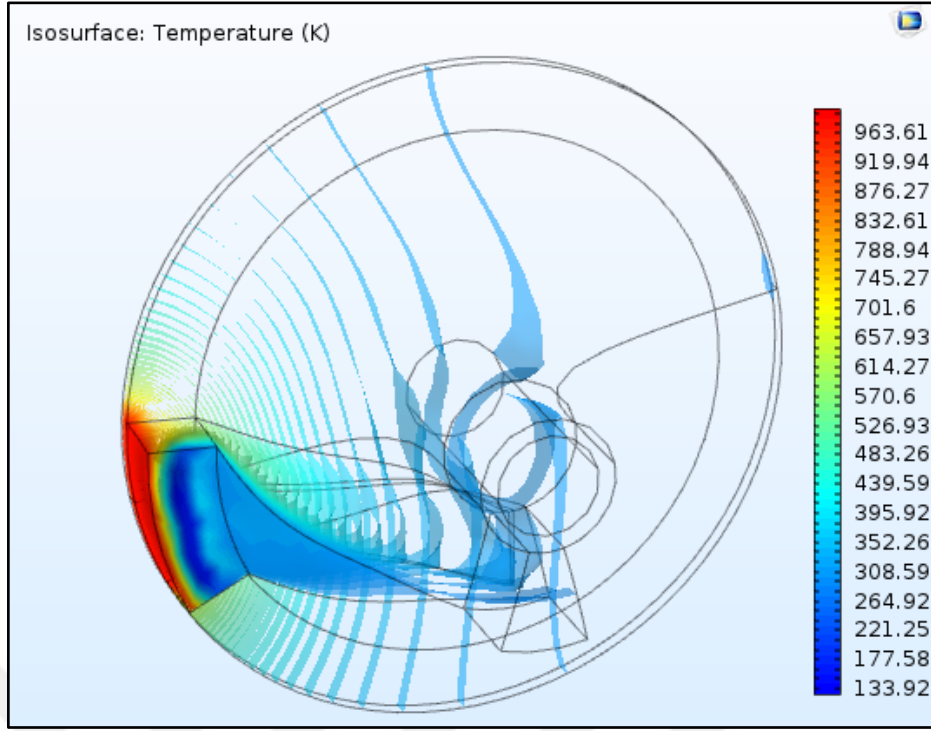
sıcaklığının dalga halinde azaldığı ve kanat orta bölümünden itibaren 390 K civarında olduğu ve de giderek azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. 67 İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 68 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı

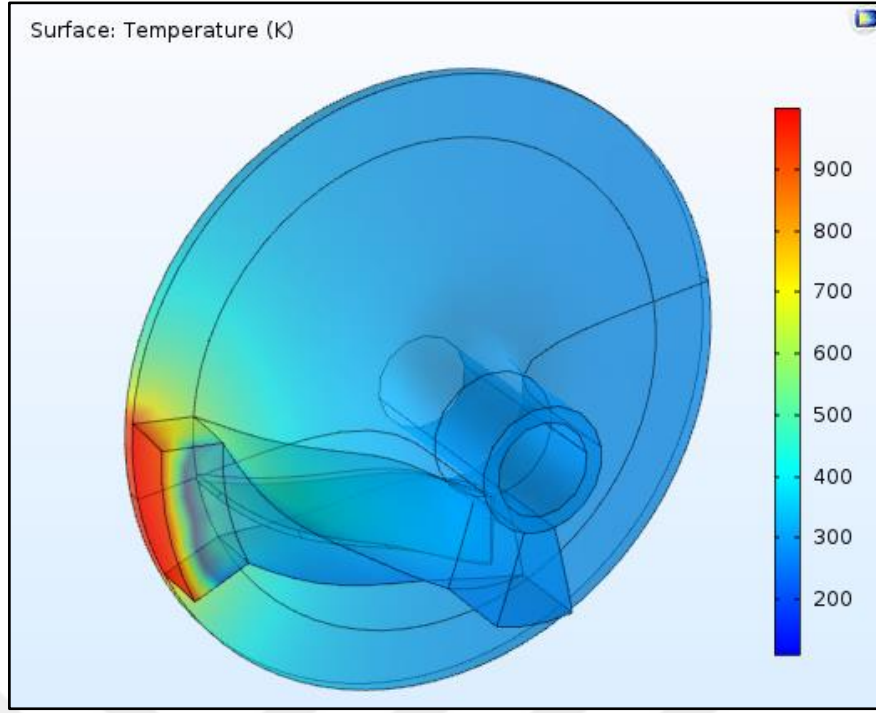


Şekil 4. 69 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

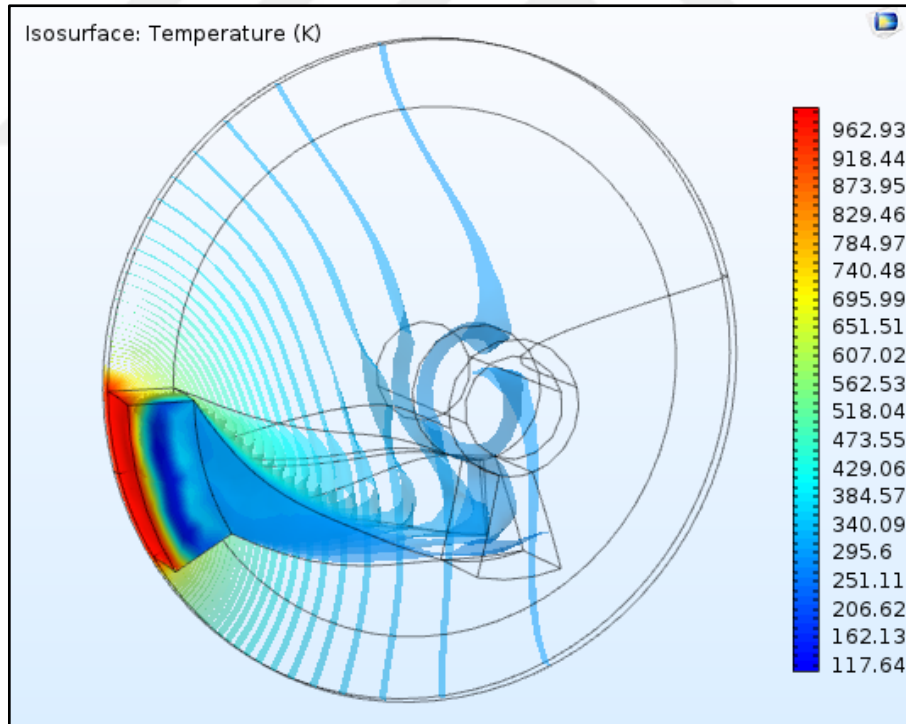
Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da İHA'nın 1000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, bir öncekine benzer şekilde sıcaklık dağılımının girişten sonra dalga halinde kanat ve akış alanı boyunca giderek azaldığı görülmektedir. Dış çevre sıcaklığı azaldıkça ve türbin yan, dış yüzey ve merkez kısmı h değeri arttıkça kanat bölgesine doğru soğuma artacaktır. Kanat giriş kısmından sonra orta bölgesinde sıcaklık 370 K civarındadır ve giderek sıcaklık azalmaktadır.

Şekil 4.70 ve Şekil 4.71'de İHA'nın 3000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, akışkan girişinden itibaren dalga halinde sıcaklık azalımının başladığı görülmektedir. Kanat giriş kısmından sonra orta bölgesinde sıcaklık 360 K civarında ve giderek sıcaklık azalmaktadır.

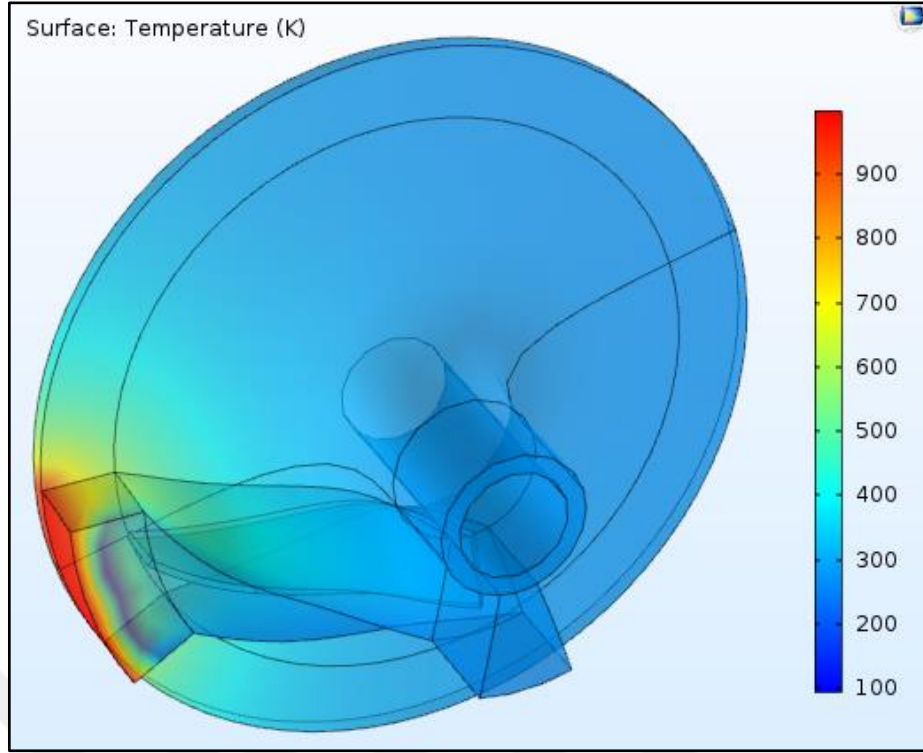
Şekil 4.72 ve Şekil 4.73'de İHA'nın 5000 m havada çalışma şartlarına göre türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, akışkan girişinden itibaren dalga halinde sıcaklık azalımının başladığı görülmektedir. Kanat giriş kısmından sonra orta bölgesinde sıcaklık 350 K civarında ve giderek sıcaklık azalmaktadır.



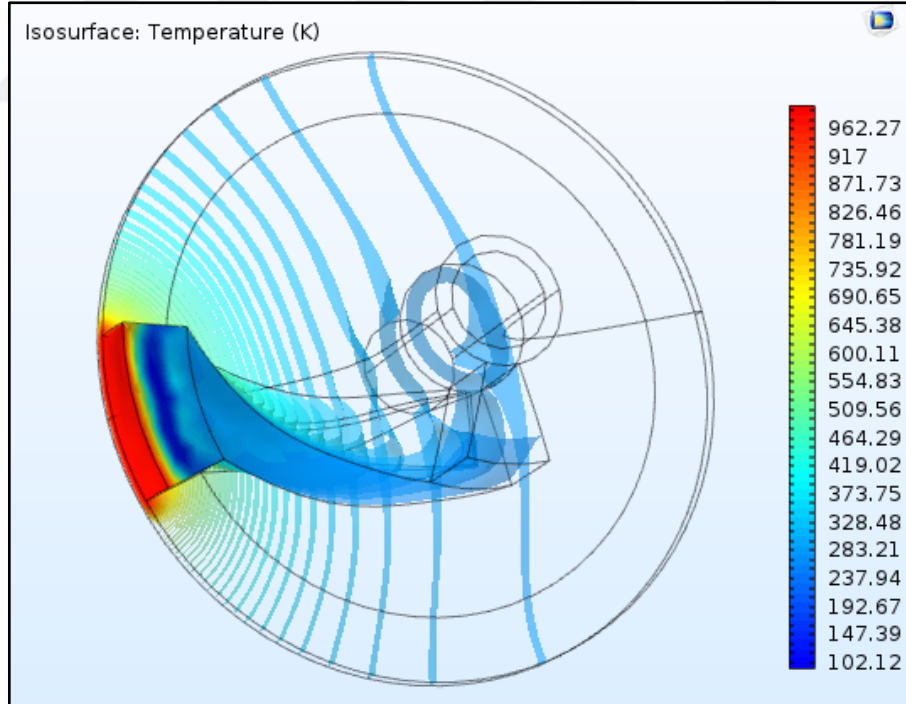
Şekil 4. 70 İHA'nın 3000 m havadaki durmuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 71 İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 72 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı sıcaklık dağılımı



Şekil 4. 73 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı ve akış alanı eş sıcaklık dağılımı

Genel olarak, İHA'nın 7 farklı çalışma şartları için türbin dış ve yan yüzeyi ile merkez kısmı için hesaplanan h tanımlamasıyla sistem incelenmiş türbin kanat ve akış alanı için

incelenen sıcaklık dağılımı benzer özellikler göstermektedir. Sıcaklık dağılımı yüksekliğe ve İHA hızına bağlı olarak değiştiği, yükseklik ve hız arttıkça türbin kanadı ve akış alanındaki sıcaklık dağılımı girişten itibaren dalga halinde azalmaya başladığı gözlenmektedir. Özellikle kanat soğutmasının başarılı bir şekilde gerçekleştiği hatta istenenden daha fazla soğuma da gerçekleşmektedir. Bu istenmediği takdirde tasarım aşamasında yapılacak bazı önlemlerle bu giderilebilir.

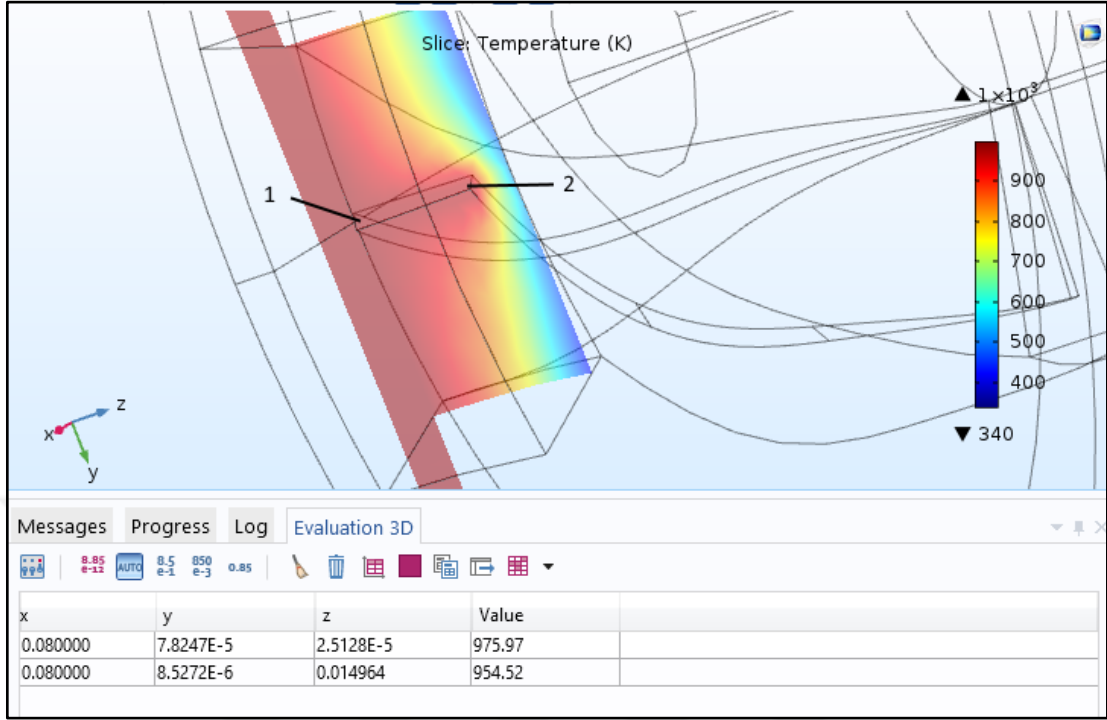
Daha önce bahsedildiği gibi mikro jet motorunun kullanım amacı ve ekonomiklik göz önüne alınarak tasarım aşamasında incelenen bu hususlar dikkate alınması gerekir. Motor ömrünün uzun olması istendiği takdirde incelen bu durum avantajlı olmaktadır. Diğer taraftan motor performansının ve veriminin yüksek olması arzu ediliyorsa incelenen bu ısı taşınım katsayısının yüksek olması istenen bir durum değildir. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzemelerin üretimi daha ekonomik olması durumunda ısı taşınım katsayısının daha fazla olmasına ihtiyaç olmayacaktır. Bu tür tasarımların malzeme teknolojisine son derece bağımlı olduğunu, tasarımcıların göz önünde bulundurması gereken bir husustur.

4.9.4 Türbin Dış ve Yan Yüzeyi ile Merkez Kısmı h Tanımlamasının Karşılaştırılması

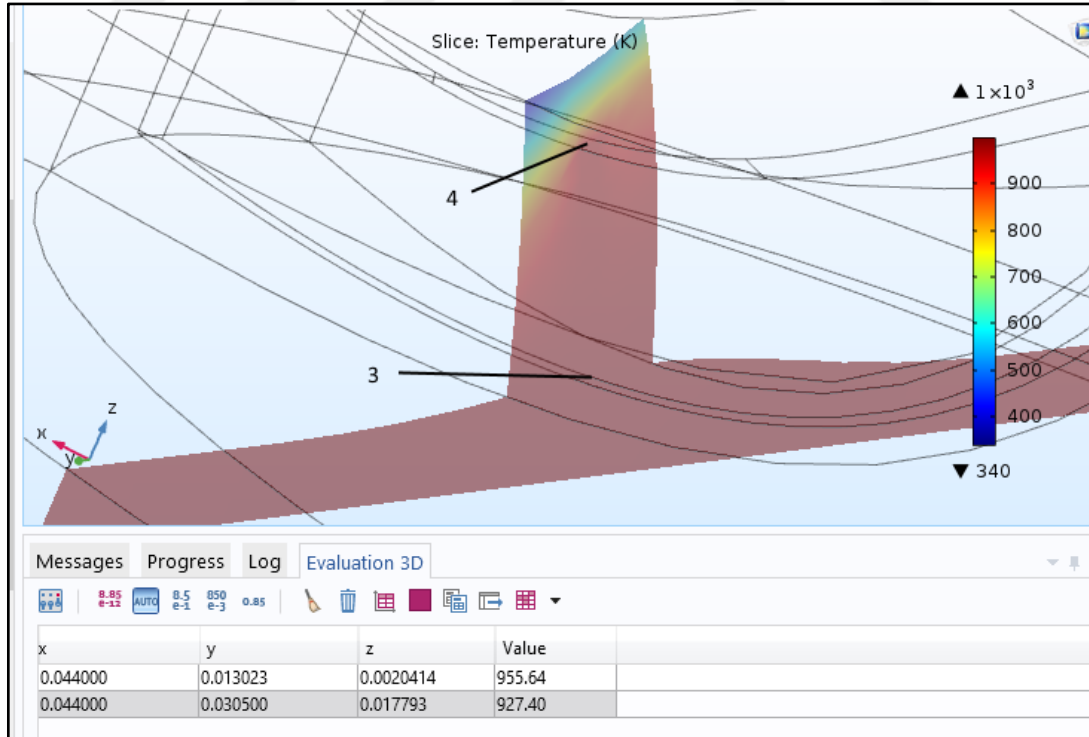
Bu bölümde, bundan önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılan türbin dış yüzey, türbin dış ve yan yüzey, türbin dış, yan yüzey ile merkez kısmı için hesaplanan h tanımlamalarının türbin kanadı sıcaklık karşılaştırılması yapılacaktır. İHA'nın 7 farklı çalışma koşullarında hesaplanan h değerleri için Şekil 4.74'te gösterildiği gibi kanat akışkan giriş kısmı 1 ve 2 ile gösterilen noktalarında, Şekil 4.75'de gösterildiği gibi kanat orta bölgesi 3 ve 4 ile gösterilen noktalarında ve Şekil 4.76'da gösterildiği gibi kanat akışkan çıkış bölgesinde 5 ve 6 ile gösterilen noktalarında, kanat üst ve kök kısımlarında, Comsol programında sayısal çözümleme ile sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Şekillerin altında sıcaklık değerlerinin elde edildiği noktaların geometrik koordinatları da gösterilmektedir.

Sıcaklık değerlerinin elde edildiği bu bölgeler kanat için kritik sayılabilecek bölgelerdir. İHA'nın 7 farklı çalışma şartı için elde edilen bu sıcaklık değerleri ileriki bölümlerde anlatıldığı gibi öncelikle çizelgeler halinde, ardından karşılaştırma şekilleri halinde

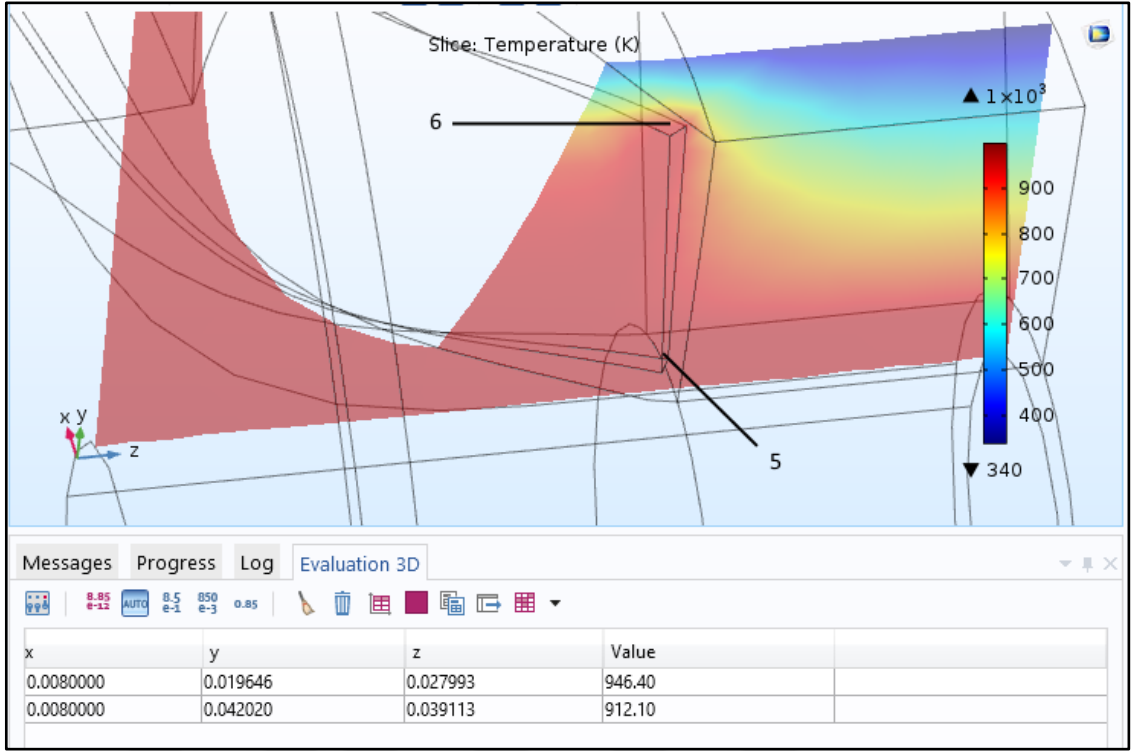
gösterilmiştir. İlerleyen bölümlerde çizelgeler ve şekillerde gösterilen hususlar detaylı anlatılmıştır.



Şekil 4. 74 Kanat akışkan giriş bölgesi sıcaklık elde edilen noktalar



Şekil 4. 75 Kanat orta bölgesi sıcaklık elde edilen noktalar



Şekil 4. 76 Kanat akışkan çıkış bölgesi sıcaklık elde edilen noktalar

Çizelge 4. 4 İHA'nın yerde sabit çalışma durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	975.97	822.74	809.81
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	954.52	762.23	745.49
3	0.044	0.013023	0.0020414	955.64	660.46	632.29
4	0.044	0.0305	0.017793	936.85	629.62	599.82
5	0.008	0.019646	0.027993	946.4	603.27	560.73
6	0.008	0.4202	0.039113	912.1	597.62	548.51

Çizelge 4. 5 İHA'nın yerde hızlanma durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	974.21	741.2	728.2
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	949.2	660.78	644.74
3	0.044	0.013023	0.0020414	953.03	522.24	490.6
4	0.044	0.0305	0.017793	937.95	507.32	466.87
5	0.008	0.019646	0.027993	944.26	450.44	396.14
6	0.008	0.4202	0.039113	906.81	456.16	398.87

Çizelge 4. 6 İHA'nın kalkış durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	974.05	697.04	689.04
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	948.56	612.33	600.91
3	0.044	0.013023	0.0020414	952.55	460.24	438.77
4	0.044	0.0305	0.017793	936.85	446.81	421.23
5	0.008	0.019646	0.027993	942.81	391.64	347.81
6	0.008	0.4202	0.039113	903.2	393.77	356.05

Çizelge 4. 7 İHA'nın 500 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	973.94	663.06	657.82
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	948.19	575.57	568.06
3	0.044	0.013023	0.0020414	952.4	420.56	405.72
4	0.044	0.0305	0.017793	936.37	406.5	390.47
5	0.008	0.019646	0.027993	942.8	357.37	323.66
6	0.008	0.4202	0.039113	902.26	360.21	328.67

Çizelge 4. 8 İHA'nın 1000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	973.75	655.58	650.35
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	947.91	567.58	560.65
3	0.044	0.013023	0.0020414	952.14	412.15	398.3
4	0.044	0.0305	0.017793	937.69	401.05	383.05
5	0.008	0.019646	0.027993	942.6	349.68	317.83
6	0.008	0.4202	0.039113	897.83	351.69	322.94

Çizelge 4. 9 İHA'nın 3000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	973.43	643.79	639.68
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	947.37	554.36	548
3	0.044	0.013023	0.0020414	951.67	397.04	384.08
4	0.044	0.0305	0.017793	936.31	386.67	369.71
5	0.008	0.019646	0.027993	941.62	335.26	304.44
6	0.008	0.4202	0.039113	896.59	337.36	310.5

Çizelge 4. 10 İHA'nın 5000 m havadaki durumuna göre türbin kanadı sıcaklık değerleri

Değerleme Noktası	Geometrik Koordinatlar (m)			Üç Farklı h Değerine Göre Sıcaklıklar (K)		
	x	y	z	T1	T2	T3
1	0.08	7.824E-5	2.5125E-5	973.18	633.45	629.89
2	0,08	8.5272E-6	0.014964	946.8	542.9	536.87
3	0.044	0.013023	0.0020414	951.01	383.72	371.4
4	0.044	0.0305	0.017793	936.34	373.49	357.58
5	0.008	0.019646	0.027993	941.27	322.57	292.83
6	0.008	0.4202	0.039113	895.96	323.29	297.73

İHA'nın 7 farklı çalışma koşulunda ve 3 farklı durum için hesaplanan h değerlerine göre çalışan radyal türbin kanadının 6 farklı noktasında önceki bölümlerde anlatıldığı gibi

sayısal yöntemle elde edilen sıcaklık değerleri, Çizelge 4.4 ile Çizelge 4.10 arasındaki çizelgelerde verilmiştir. Çizelgelerde 1 ile 6 arası sıcaklık değerlerinin elde edildiği noktalara karşılık gelen koordinatlar ve bu koordinatlardaki Kelvin cinsinden sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Çizelgelerde yeralan T1 sıcaklıkları, türbin dış yüzeyi için hesaplanan h değerine karşılık İHA çalışma şartlarında elde edilen türbin kanat sıcaklıklarıdır.

T2 sıcaklıkları, türbin dış ve yan yüzeyi için hesaplanan h değerine karşılık İHA çalışma şartlarında elde edilen türbin kanat sıcaklıklarıdır. T3 sıcaklıkları ise türbin dış ve yan yüzeyi ile merkez kısmı için hesaplanan h değerine karşılık İHA çalışma şartlarında elde edilen türbin kanat sıcaklıklarıdır.

İHA'nın yerde sabit çalışma şartlarına göre düzenlenen Çizelge 4.4 incelendiğinde; T1 yani ilk durum için elde edilen türbin kanadı dibi sıcaklıkları girişte 975.97 K olarak yüksek değerlerde çıkışa doğru 54 K'den fazla sıcaklık kaybı oluşmaktadır. Kanat üst kısımları ise kanat dibine göre 19-34 K aralığında daha fazla sıcaklık kaybı yaşanmaktadır. Burada giriş 954.52 K ile başlayıp çıkışta 912.1 K'e kadar düşmektedir. İkinci durumdaki T2 sıcaklıkları girişten itibaren sıcaklık azalımı meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 822.74 K çıkışta 603.27 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 762.23 K çıkışta ise 597.67 K sıcaklık değeri vardır. Çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat üstlerinde neredeyse yarı yarıya sıcaklık azalması meydana gelmektedir. Üçüncü durumdaki T3 sıcaklıkları bir önceki duruma göre girişten itibaren sıcaklık azalımı biraz daha fazla meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 809.81 K çıkışta 560.73 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 745.49 K çıkışta ise 548.51 K sıcaklık değeri vardır. Benzer şekilde burada da çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat üstlerinde neredeyse yarı yarıya sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

İHA'nın yerde hızlanma çalışma şartlarına göre düzenlenen Çizelge 4.5 incelendiğinde; T1 yani birinci durum için elde edilen türbin kanadı dibi sıcaklıkları girişte 974.21 K olarak yüksek değerlerde çıkışa doğru 56 K'den fazla sıcaklık kaybı oluşmaktadır. Kanat üst kısımları ise kanat dibine göre 15-38 K aralığında daha fazla sıcaklık kaybı yaşanmaktadır. Burada giriş 949.2 K ile başlayıp çıkışta 906.81 K'e kadar düşmektedir. İkinci durumdaki T2 sıcaklıkları girişten itibaren sıcaklık azalımı meydana gelmektedir.

Burada kanat dibinde girişte 741.2 K, çıkışta 450.44 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 660.78 K çıkışta ise 456.16 K sıcaklık değeri vardır. Çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibinde kanat üstüne biraz daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir. Üçüncü durumdaki T3 sıcaklıkları bir önceki duruma göre girişten itibaren sıcaklık azalımı biraz daha fazla meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 728.2 K çıkışta 396.14 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 644.74 K çıkışta ise 395.87 K sıcaklık değeri vardır. Burada çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibi ve üstünde neredeyse yarıdan daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

İHA'nın kalkış çalışma şartlarına göre düzenlenen Çizelge 4.6 incelendiğinde; T1 birinci durum için elde edilen türbin kanadı dibi sıcaklıkları girişte 974.05 K olarak yüksek değerlerde çıkışa doğru 58 K'den fazla sıcaklık kaybı oluşmaktadır. Kanat üst kısımları ise kanat dibine göre 16-39 K aralığında sıcaklık kaybı yaşanmaktadır. Burada giriş 948.56 K ile başlayıp çıkışta 903.2 K'e kadar düşmektedir. İkinci durumdaki T2 sıcaklıkları girişten itibaren sıcaklık azalımı meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 697.04 K, çıkışta 391.64 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 612.33 K çıkışta ise 393.77 K sıcaklık değeri vardır. Çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibinde kanat üstüne oranla biraz daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir. Üçüncü durumdaki T3 sıcaklıkları bir önceki duruma göre girişten itibaren sıcaklık azalımı biraz daha fazla meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 689.04 K çıkışta 347.81 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 600.91 K çıkışta ise 356.05 K sıcaklık değeri vardır. Anlaşılabileceği üzere çıkışta kanat dibinde kanat üstüne göre sıcaklık azalımı daha fazladır. Burada çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibi ve üstünde neredeyse üçte iki oranında sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

İHA'nın 500 m havada çalışma şartlarına göre düzenlenen Çizelge 4.7 incelendiğinde; T1 birinci durum için elde edilen türbin kanadı dibi sıcaklıkları girişte 973.94 K olarak yüksek değerlerde, çıkışta 942.8 K olmaktadır. Kanat üst kısımları ise kanat dibine göre 16-40 K aralığında sıcaklık kaybı yaşanmaktadır. Burada giriş 948.19 K ile başlayıp çıkışta 902.26 K'e kadar düşmektedir. İkinci durumdaki T2 sıcaklıkları girişten itibaren sıcaklık azalımı meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 663.06 K, çıkışta

357.37 K'e kadar fazlaca sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 575.57 K çıkışta ise 360.21 K sıcaklık değeri vardır. Çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibinde kanat üstüne oranla biraz daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir. Üçüncü durumdaki T3 sıcaklıkları bir önceki duruma göre girişten itibaren sıcaklık azalımı biraz daha fazla meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 657.82 K çıkışta 323.66 K'e kadar sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 568.06 K çıkışta ise 328.67 K sıcaklık değeri vardır. Anlaşılağı üzere çıkışta kanat dibinde kanat üstüne göre sıcaklık azalımı daha fazladır. Burada çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibi ve üstünde neredeyse üçte iki oranından daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

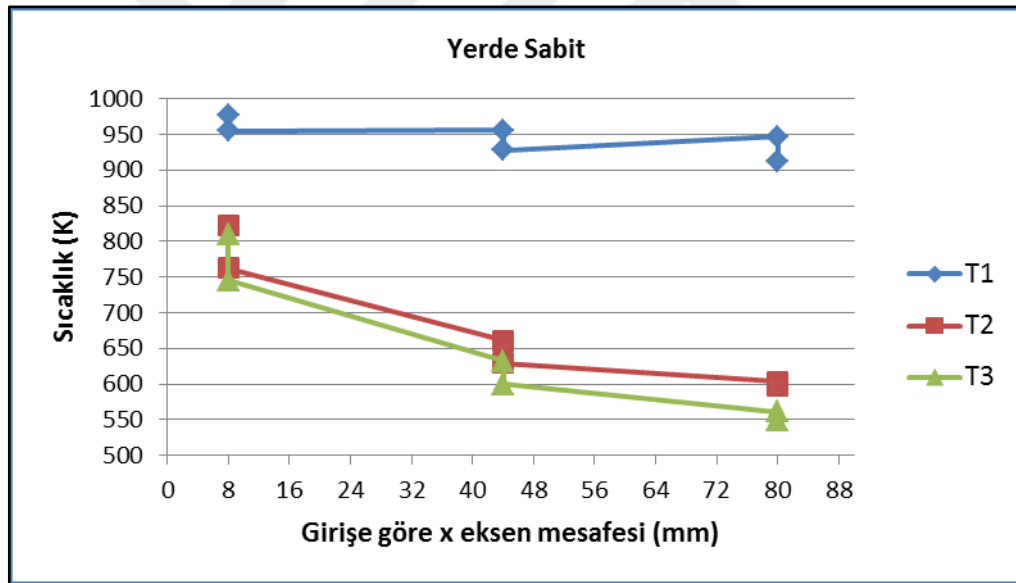
İHA'nın 1000 m havada çalışma şartlarına göre düzenlenen Çizelge 4.8 incelendiğinde; T1 birinci durum için elde edilen türbin kanadı dibi sıcaklıkları girişte 973.75 K olarak yüksek değerlerde, çıkışta 942.6 K olmaktadır. Kanat üst kısımları ise kanat dibine göre 15-40 K aralığında sıcaklık kaybı yaşanmaktadır. Burada giriş 947.91 K ile başlayıp çıkışta 897.83 K'e kadar düşmektedir. İkinci durumdaki T2 sıcaklıkları girişten itibaren sıcaklık azalımı meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 655.65 K, çıkışta 349.68 K'e kadar sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 567.58 K çıkışta ise 351.69 K sıcaklık değeri vardır. Çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibinde kanat üstüne oranla biraz daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir. Üçüncü durumdaki T3 sıcaklıkları bir önceki duruma göre girişten itibaren sıcaklık azalımı biraz daha fazla meydana gelmektedir. Burada kanat dibinde girişte 650.35 K çıkışta 322.94 K'e kadar sıcaklık azalımı oluşmaktadır. Kanat üstlerinde ise girişte 560.65 K çıkışta ise 322.94 K sıcaklık değeri vardır. Anlaşılağı üzere çıkışta kanat dibinde kanat üstüne göre sıcaklık azalımı daha fazladır. Burada çıkışta ilk giriş sıcaklığına göre kanat dibi ve üstünde neredeyse üçte iki oranından daha fazla sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

İHA'nın 3000 m ve 5000 m havada çalışma şartlarına göre düzenlenen Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 incelendiğinde; bir öncekinde anlatılan durumlara benzer özellikler gösterdiğinden detaylı olarak anlatılmamıştır. T1 sıcaklıkları birbirine çok yakın fakat T2 ve T3 sıcaklıkları gittikçe azalmaktadır. Burada bahsedilen yedi çizelgede belirtilen

durumlar için kanat orta bölgesinde, kanat kökü ile kanat üstü sıcaklıkları arasındaki fark, giriş ve çıkış kısımlarındaki sıcaklık farklarına göre daha azdır.

Bu bölümden itibaren ise hesaplanan 3 farklı h değerinin sisteme tanımlanmasıyla İHA'nın 7 farklı çalışma koşulunda oluşan sıcaklık değerlerinin kıyaslaması yapılacaktır.

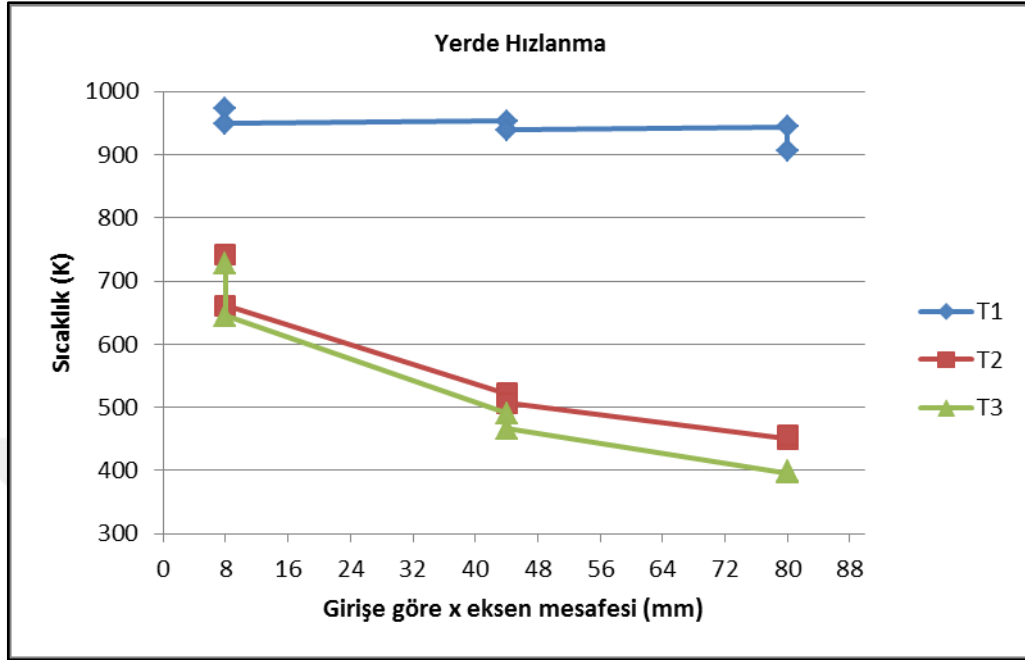
İHA'nın yerde sabit çalışma şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.77 incelendiğinde; T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsa da bu değer 900 K'nin altına düşmemektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 810 K üzerinde sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 600 K civarı, T3 sıcaklıkları ise 555 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı girişte fazla olsa da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklık farkları çok fazla değildir.



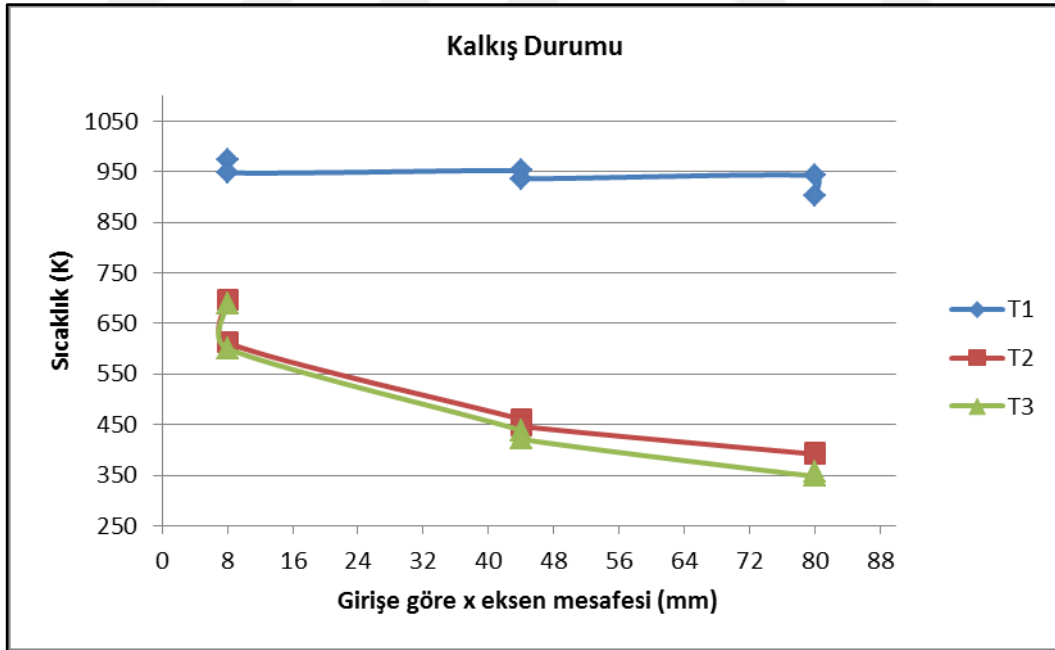
Şekil 4. 77 Yerde sabit çalışma şartına göre üç durumun karşılaştırması

İHA'nın yerde hızlanma çalışma şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.78 incelendiğinde; T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsada bu değer 900 K'nin altına düşmemektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 740 K üzerinde sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 455 K civarı, T3 sıcaklıkları 395 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı

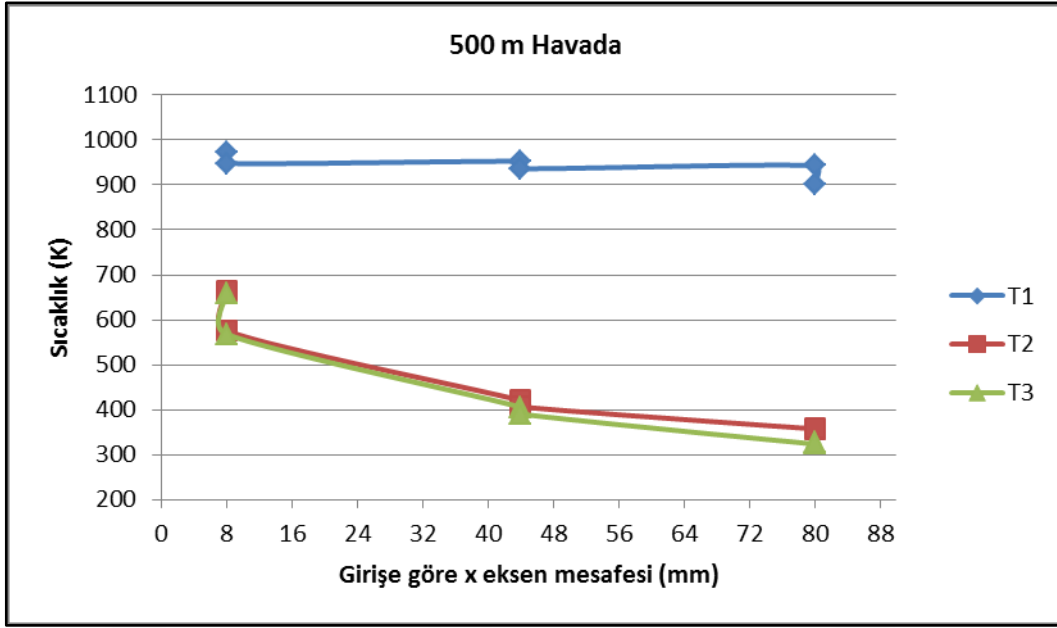
girişte fazla olsa da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklık farkları çok fazla değildir.



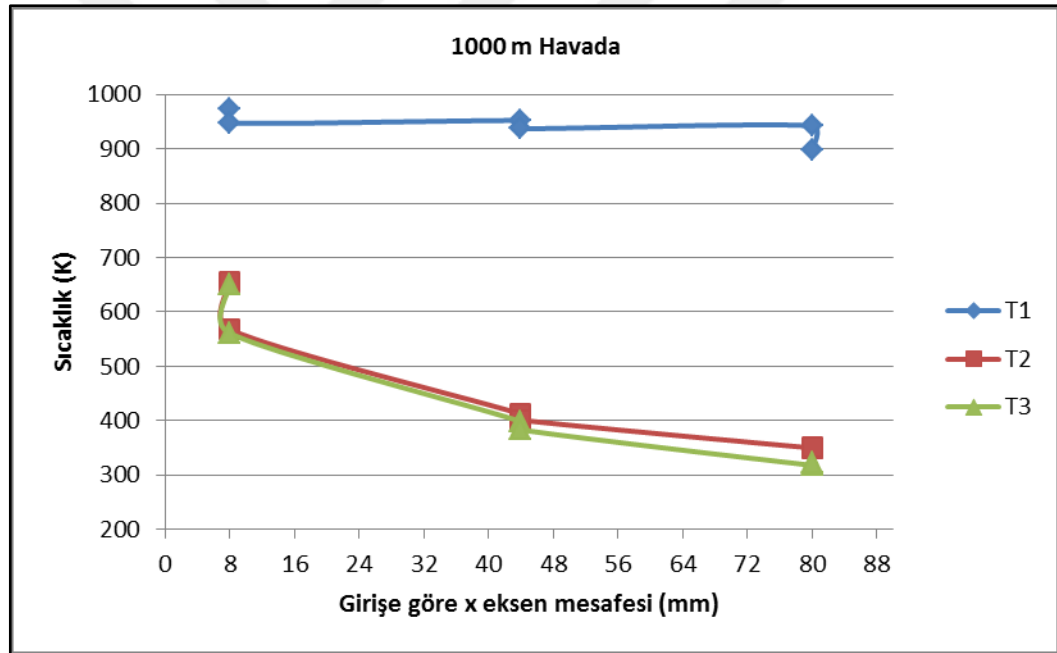
Şekil 4. 78 Yerde hızlanma şartına göre üç durumun karşılaştırması



Şekil 4. 79 Kalkış şartına göre üç durumun karşılaştırması



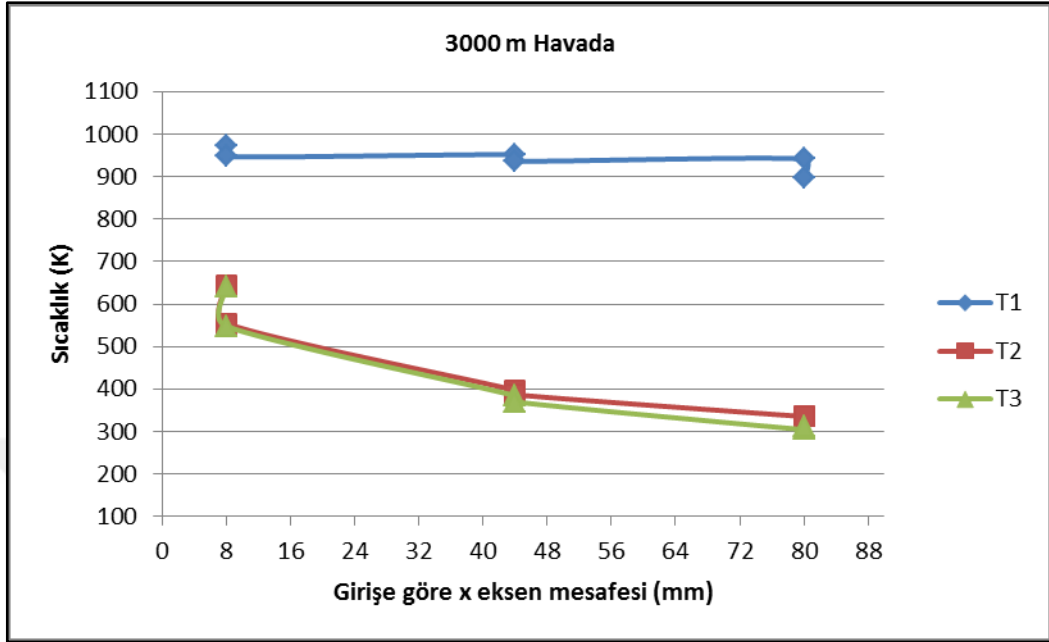
Şekil 4. 80 Havada 500 m şartına göre üç durumun karşılaştırması



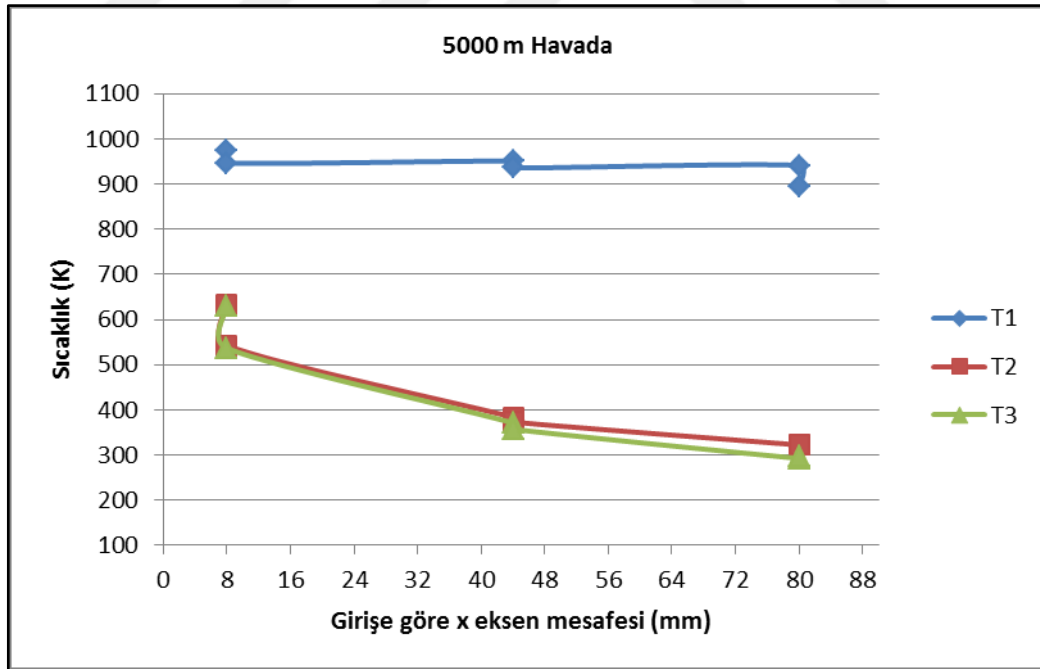
Şekil 4. 81 Havada 1000 m şartına göre üç durumun karşılaştırması

İHA'nın kalkış şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.79 incelendiğinde; T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsada bu değer 900 K'nin altına düşmemektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 700 K civarında sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 395 K civarı, T3 sıcaklıkları 355 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı girişte fazla olsa

da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklıkları birbirlerine yakın değerlerdedir.



Şekil 4. 82 Havada 3000 m şartına göre üç durumun karşılaştırması



Şekil 4. 83 Havada 5000 m şartına göre üç durumun karşılaştırması

İHA'nın 500 m havada çalışma şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.80 incelendiğinde; T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsada bu

değer 900 K'nin altına düşmemektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 660 K civarında sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 360 K civarı, T3 sıcaklıkları 330 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı girişte fazla olsa da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklıkları birbirlerine yakın değerlerdedir.

İHA'nın 1000 m havada çalışma şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.81 incelendiğinde, bir öncekiyle çok benzerlik göstermektedir. T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsada bu değer kanat üstünde 900 K'nin çok az altına düşmektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 655 K civarında sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 350 K civarı, T3 sıcaklıkları 320 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı girişte fazla olsa da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklıkları birbirlerine yakın değerlerdedir.

İHA'nın 3000 m havada çalışma şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.82 incelendiğinde; bundan bir ve iki öncekiyle benzer özellikler göstermektedir. T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsada bu değer çıkışta kanat üstünde 900 K'nin altına çok az düşmektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 640 K civarında sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 340 K civarı, T3 sıcaklıkları 300 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı girişte fazla olsa da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklıkları birbirlerine yakın değerlerdedir.

İHA'nın 5000 m havada çalışma şartındaki durumunu gösteren Şekil 4.83 incelendiğinde, bundan önceki üçüyle benzer özellikler göstermektedir. T1 sıcaklıklarında, kanat kökü ve kanat üstlerinde belli bir sıcaklık azalması olsada bu

değer 900 K'nin biraz altına düşmektedir. T2 ve T3 sıcaklıkları birbirine benzer şekilde sıcaklık azalması göstermektedir. Girişte her ikisi de 630 K civarında sıcaklıkla başlayıp çıkışta T2 sıcaklıkları 320 K civarı, T3 sıcaklıkları 295 K civarındadır. T2 ve T3 sıcaklıkları başlangıçta kanat kökü ve kanat üst sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı girişte fazla olsa da çıkışta bu sıcaklıklar birbirine çok yakındır. T1 için bu durum çok fazla değişmemektedir. Orta bölgelerde sıcaklık farkları her üç durum için benzer özellik göstermekte ve kanat kökü ve kanat üstü sıcaklıkları birbirlerine yakın değerlerdedir.

Bu bölümde detaylı anlatılan çizelgeler ve şekiller değerlendirildiğinde; İHA'nın 7 farklı çalışma şartlarında sadece türbin dış yüzeyi h tanımlamasına göre ölçülen T1 sıcaklıkları göstermiştir ki girişte kanat kökü ve üstü için fazlaca sıcaklık azalması oluşmamaktadır. Fakat çıkışta kanat üstünde 100 K, kanat kökünde ise ortalama 50 K civarında sıcaklık azalması meydana getirmektedir. Kanat orta bölgesinde ise 50-65 K civarında sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

Türbin dış ve yan yüzeyi ile merkez kısmına göre tanımlanan h değerlerinin dikkate alındığı T2 ve T3 sıcaklıklarında, girişten itibaren çıkışa doğru ciddi miktarda sıcaklık azalması meydana geldiği görülmektedir. Son iki durum için kanat soğuması fazlaca oluşmaktadır. Burada görüldüğü gibi İHA hızı ve yükseltisi arttıkça buna paralel h değeri arttıkça kanat soğutmasının arttığı görülmektedir.

Buraya kadar anlatılanlar ışığında; radyal akışlı mikro türbin tasarımında ne kadar kanat soğutması isteniyorsa o oranda dış havayla temas etmesi sağlanmalıdır. Burada mikro jet motorun İHA'da kullanılması amaçlandığında 7 farklı çalışma şartında ve 3 farklı h tanımlamasına göre kanat soğutması gösterilmiştir. Burada amaç motor tasarımcılarına bir fikir verebilmektir. Daha önce de belirtildiği gibi, gerçek sıcaklık ölçüm değerleri deneysel ölçümlerle elde edilebilir ve bu değerler bu çalışmada olduğu gibi bilgisayar ortamında sayısal çalışmayla elde edilen değerlerle kıyaslanması gerekir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Şehirlerde veya zorlu arazi şartlarında bir İHA'dan hem keşif hem de taarruz yapması bekleniyorsa bu aracın hızlı ve yüksek manevra kabiliyetine sahip olması aranan özellikler olacaktır. Bu tarz istekleri ancak jet motoru özelliklerine sahip küçük bir İHA karşılayabilir. Bu istekleri karşılayabilecek en uygun motor mikro jet motorudur.

Bir mikro jet motorunun performans parametreleri öncelikle motorun itkisine ve yakıt sarfiyatına bağlıdır. Bunlara ek olarak motorun ağırlığı, kesit alanı, uzunluğu, kullandığı yakıt, aksesuarları ve kullanım ömrü de motoru öne çıkaran bileşenlerdir. Bir İHA için mikro jet motoru seçilirken, tasarlanırken bu başlıklar tek tek incelenmeli ve gerekli hesaplamaları tüm ayrıntılarıyla yapılmalıdır. Tüm bunlara ek olarak mikro jet motorunun tüm parçaları gerek kullanılan malzeme gerekse çalışma mantığı bakımında incelenmeli ve en iyi verimi verecek şekilde seçilmeli, tasarlanmalıdır. Üretilen ilk mikro jet motoru ile günümüzde kullanılan mikro jet motorları arasında oluşan performans farkının temeli mikro jet motorlarında kullanılan parçaların hem malzemelerinde hem de yapılarında yapılan ufak değişikliklerdir. Her iki alanda da gelişme olması durumunda mikro jet motorları da gelişmeye devam edecektir.

Bu çalışmada, İHA ve İHA motorları incelenmiş, devamında keşif ve taarruz amaçlı model bir İHA seçimi yapılarak uygun bir mikro jet motoru hesabı yapılmış çıkan sonuca göre uygun bir endüstriyel tip mikro jet motoru tercihi yapılmıştır. Mikro jet motorlu Model İHA'nın diğer İHA'lar ile performans kıyaslaması grafiklerle yapılmış ve Model İHA performansının istenen değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Bazı olağan dışı şartlarda ortaya çıkan ihtiyaçları mevcut hava araçları karşılamayabilir. Bu durumda yeni bir hava aracı tasarımı, üretimi ve testleri uzun zaman alacağından başka alternatifler bulmak zorunluluğu olacaktır. Bu alternatif çözümleri üreten ülkeler, savaş zamanında önemli üstünlükler elde ederek savaş seyrinin lehlerine dönmesini sağlamışlardır. Bunun örnekleri İkinci Dünya Savaşında daha net olarak görmekteyiz. Aşağıda model İHA'nın görev tipine göre alternatif çözümlerden bazı örnekler verilmiştir.

- Model İHA'nın görev tipine göre daha uzun süre havada kalması isteniyorsa; ilave yakıt tankı montajı veya mevcut depo hacminin artırılması sağlanabilir.
- Model İHA'nın diğerlerine göre daha hızlı olması isteniyorsa; ilave motor (çift motor) takviyesi ya da daha büyük boyutta motor (itkisi daha fazla motor) seçimi yapılabilir.
- Model İHA'nın daha fazla faydalı yük taşınması isteniyorsa; ilave motor (çift motor), başka tipte ilave motor, daha büyük boyutta motor (itkisi daha fazla motor) seçimi veya kanat yüzey alanının artırılması sağlanabilir.

Bu çalışmada ayrıca, model İHA'da kullanılması amaçlanmış radyal akışlı mikro jet motorunun, türbin kanadının ve akış alanının sıcaklık dağılımı incelemesi yapılmıştır. Sıcaklık değişiminin kanat üzerindeki etkilerini incelemek için, İHA'nın 7 farklı gerçek uçuş şartları göz önünde bulundurularak üç ayrı ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Türbin dış yüzeyi, türbin dış ve yan yüzeyi, türbin dış ve yan yüzey ile merkez kısmı için hesaplanan ısı transfer katsayısı sayısal modellemesi yapılan sisteme tanımlanarak kanat üzerindeki sıcaklık analizi yapılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur. İHA hızı ve yüksekliği arttıkça h değeri artacağından soğuma etkisinin de arttığı gözlenmiştir.

Önceki bölümde detaylı anlatılan çizelgeler ve şekiller ışığında İHA'nın 7 farklı çalışma şartlarında sadece türbin dış yüzeyi h tanımlamasına göre girişte kanat kökü ve üstü için fazlaca sıcaklık azalması oluşmamaktadır. Fakat çıkışta kanat üstünde 100 K, kanat kökünde ise ortalama 50 K civarında sıcaklık azalması meydana getirmektedir. Kanat orta bölgesinde ise 50-65 K civarında sıcaklık azalması meydana gelmektedir.

Türbin dış ve yan yüzeyi ile merkez kısmına göre tanımlanan h değerlerinin dikkate alındığında, türbin girişinden itibaren çıkışa doğru ciddi miktarda sıcaklık azalması

meydana geldiği görülmektedir. Son iki durum için kanat soğuması fazlaca oluşmaktadır. Burada görüldüğü gibi İHA hızı ve yükseltisi arttıkça, buna paralel h değeri arttığından kanat soğutmasının arttığı görülmektedir.

Buraya kadar anlatılanlar ışığında; radyal akışlı mikro türbin tasarımında ne kadar kanat soğutması isteniyorsa o oranda dış havayla temas etmesi sağlanmalıdır. Bu çalışmada mikro jet motorun İHA'da kullanılması amaçlandığından, 7 farklı çalışma şartında ve 3 farklı h tanımlamasına göre kanat soğutması gösterilmiştir. Burada amaç motor tasarımcılarına bir fikir verebilmektir. Daha önce de belirtildiği gibi, gerçek sıcaklık ölçüm değerleri deneysel ölçümlerle elde edilebilir ve bu değerler bu çalışmada olduğu gibi bilgisayar ortamında sayısal çalışmayla elde edilen değerlerle kıyaslanması gerekir.

Mikro jet motorları genellikle kısa ömürlü olarak kullanımı tercih edilirler. Bu durumda, üretimi basit ve ucuz olması yoluna gidilir. Eğer daha uzun ömürlü olması istenirse, bu durumda ya ısıya dayanıklı kanat malzemesi tercih edilir ki bu da daha pahalı bir üretim anlamına gelmektedir. Ya da bu çalışmada olduğu gibi, jet motorunun en hassas bölümü olan kanatların soğutulması yoluna gidilebilir. Diğer bir alternatif ise her ikisi birlikte uygulanabilir. Bu son durumda motor ömrünün oldukça uzun olacağı aşıkardır. Sonuçta mikro jet motorunun kullanım amacına göre ucuz veya pahalı üretim ve uzun ya da kısa ömürlü olması tamamen tercihe bağlıdır.

Bu çalışmada değinilmese de mikro jet motorlarında türbin kanatlarının maruz kalacağı maksimum sıcaklığı belli bir değerde tutmak için, kompresörden çıkan havanın belli bir oranı yanma odasından çıkan oldukça sıcak olan gazlarla karıştırılıp sıcaklığı belli bir değere düşürülerek türbine gönderilmesi diğer bir seçenektir. Bu durum hem malzeme maliyetlerini azaltabilir hem de motor ömrünü uzatabilir. Bunun tek dezavantajı hava oranının kontrolüdür.

Günümüzde kullanılan İHA ve bunlara ait motorların performanslarının malzeme teknolojisine bağlı olduğu unutulmamalıdır. Bu alanlarda yapılacak yenilikler, paralelinde İHA teknolojisine yansıyacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, E., (1997). Türbin Motorlarının Aerodinamiği ve Mekaniği, İkinci Baskı, HHO Yayınları, İstanbul.
- [2] Dai, J., Ijichi, N., Tange, H., Shibata, H., Tamaki, H. ve Yamaguchi, S., (2004). "Comparison of Internal Flow Field between Experiment and Computation in a Radial Turbine Impeller", JSME International Journal, 47: 48-56.
- [3] Serrano, J.R., Arnau, F.J., Dolz, V., Tiseira, A. ve Cervello, C., (2008). "A Model of Turbocharger Radial Turbines Appropriate to Be Used in Zero and One Dimensional Gas Dynamics Codes for Internal Combustion Engines Modelling", Energy Conversion and Management, 49: 3729-3745.
- [4] Marelli, S. ve Capobianco, M., (2010). "Steady and Pulsating Flow Efficiency of a Waste-Gated Turbocharger Radial Flow Turbine for Automotive Application", Energy, 36: 459-465.
- [5] Samar, R. ve Rehman, A., (2011). "Autonomous Terrain-Following for Unmanned Air Vehicles", Mechatronics, 21: 844-860.
- [6] QingHua, D., JuiFang, N. ve ZhenPing, F., (2008). "Study on Leakage Flow Characteristics of Radial Inflow Turbines at Rotor Tip Clearance", Science in China Series E: Technological Sciences, 51 (8): 1125-1136.
- [7] Cho, C-H., Cho, S-Y. ve Ahn, K-Y., (2010). "A Study of Partial Admission Characteristics on a Small-Scale Radial Inflow Turbine", Power and Energy, 224: 837-748.
- [8] Xie, Y., Lu, K., Liu, L. ve Xie G., (2014). "Fluid-Thermal-Structural Coupled Analysis of a Radial Inflow Micro Gas Turbine Using Computational Fluid Dynamics and Computational Solid Mechanics", Hindawi Publishing Corporation: Mathematical Problems in Engineering, 2014: 1-10.
- [9] Calabria, R., Chiariello, F., Massoli, P. ve Reale, F., (2015). "Numerical Study of a Micro Gas Turbine Fed by Liquid Fuels: Potentialities and Critical Issues", Energy Procedia, 81: 1131-1142.
- [10] Marsan, A. ve Moreau, S., (2015). "Analysis of the Flow Structure in a Radial Turbine", 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics ETC11, 23-27 March 2015, Madrid.
- [11] Khader, M.A. ve Sayma, A.I., (2017). "Effect of End-Wall Riblets on Radial Turbine Performance", 10th International Conference on Compressors and Their Systems, 11-13 September 2017, London.

- [12] Habib, Z., Parthasarathy, R. ve Golahalli, S., (2009). "Performance and Emission Characteristics of Biofuel in a Small-Scale Gas Turbine Engine", *Applied Energy*, 87: 1701-1709.
- [13] Silva, V.V.R., Khatib, W. ve Fleming, P.J., (2005). "Performance Optimization of Gas Turbine Engine", *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 18: 575-583.
- [14] Li, Y.G. ve Nilkitsaranont, P., (2009). "Gas Turbine Performance Prognostic for Condition-Based Maintenance", *Applied Energy*, 86: 2152-2161.
- [15] Romier, A., (2004). "Small Gas Turbine Technology", *Applied Thermal Engineering*, 24: 1709-1723.
- [16] Capata, R. ve Sciubba, E., (2006). "Preliminary Considerations on the Thermodynamic Feasibility and Possible Design of Ultra, Micro and Nano Gas Turbines", *Inter Int. of Thermodynamics*, 9 (2): 81-91.
- [17] Montazari-Gh, M., Nasiri, M. ve Jafari, S., (2011). "Real-Time Multi-Rate HIL Simulation Platform for Evaluation of a Jet Controller", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19: 996-1006.
- [18] Badami, M., Nuccio, P. ve Signoretto, A.A., (2013). "Experimental and Numerical Analysis of a Small-Scale Turbojet Engine", *Energy Conversion and Management*, 76: 225-233.
- [19] Benini, E. ve Giacometti, S., (2007). "Design, Manufacturing and Operation of a Small Turbojet – Engine for Research Purposes", *Applied Energy*, 84: 1102-116.
- [20] Ballı, O. ve Hepbaşlı, A., (2013). "Exergoeconomic, Sustainability and Environmental Damage Cost Analyses of T56 Turboprop Engine", *Energy*, 64: 582-600.
- [21] Turan, O., (2012). "Exergetic Effects of Some Design Parameters on the Small Turbojet Engine for Unmanned Air Vehicle Applications", *Energy*, 46: 51-61.
- [22] Chan, X., Xin, F. ve Zhaoyun, W., (2013). "Research on Windmill Starting Characteristics of MTE-D Micro Turbine Engine", *Chinese Journal of Aeronautics*, 26 (4): 858-867.
- [23] Montazeri, M., Nasiri, M. ve Rajabi, M., (2011). "Actuator-Based Hardware in the Loop Testing of a Jet Engine Fuel Control Unit in Flight Conditions", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19: 996-1006.
- [24] Azzi, W., Roberts, W.L. ve Rabiei, A., (2007). "A Study on Pressure Drop and Heat Transfer in Open Cell Metal Foams for Jet Engine Application", *Materials and Design*, 28: 569-574.
- [25] Güzelgök, R. ve Çetinkaya, S., (2009). "Model Bir Jet Motoru Yapımı ve Test Edilmesi", *Politeknik Dergisi*, 12 (1): 29-33.
- [26] Duman, S. ve Tuncer, O., (2011). "Görev Analizi Sonucu Bir Savaş Uçağının Motor İtki Gereksiniminin Belirlenmesi", *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 5 (1): 27-39.
- [27] SHEPHARD, (2008). *Unmanned Vehicles Handbook*, the Shephard Press Ltd., Berkshire, UK.

- [28] TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Orta İrtifa Uzun Havada Kalışlı (MALE-Medium Altitude Long Endurance) İHA, <https://www.tai.com.tr/urun/anka>, 30 Aralık 2011.
- [29] Baykar Makina, Bayraktar Mini İnsansız Hava Aracı Sistemi, <http://www.baykarmakina.com/sistemler-2/bayraktar-mini-ihha>, 20 Mayıs 2011.
- [30] Northrop Grumman, Capabilities - Autonomous Systems, <http://www.northropgrumman.com/globalhawk>, 21 Şubat 2011.
- [31] Skymaster, Products, <http://www.skymaster.com>, 10 Mart 2011.
- [32] Rolls-Royce, Power Systems, <http://www.rolls-royce.com>, 12 Mart 2011.
- [33] Nelson, J.R. ve Dix, D.M., (2003). Development of Engines for Unmanned Air Vehicles: Some Factors to Be Considered, IDA, Virginia.
- [34] Kamps, T., (2005). Model Jet Engines, Third Edition, Traplet Publications Ltd., Worcester, UK.
- [35] EvoJet, Model Jet Engines, <http://www.evojet.de>, 15 Mart 2011.
- [36] Güzelgök, R., (2008). Model Bir Jet Motoru Yapımı ve Test Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [37] Mattingly, J.D., (1996). Elements of Gas Turbine Propulsion, AIAA Education Series, Virginia.
- [38] Raymer, D.P., (1992). Aircraft Design: A Conceptual Approach, AIAA Education Series, Second Printing, Washington D.C..
- [39] Mattingly, J.D., Heiser, W.H. ve Pratt, D.T., (2002). Aircraft Engine Design, AIAA Education Series, Virginia.
- [40] Meherwan, P.B., (2006). Gas Turbine Engineering Handbook, Third Edition, Oxford.
- [41] The COMSOL Group Company, Products, <https://www.comsol.com>, 21 Nisan 2017.
- [42] Wilcox, D.C., (1998). Turbulence Modeling for CFD, Second Edition, DCW Industries Inc., La Canada, California.
- [43] The ANSYS Inc., Products, <https://www.ansys.com>, 22 Mart 2016.
- [44] The 3DExperience Company, Products, <https://www.3ds.com>, 10 Mayıs 2016.
- [45] Tu, J., Yeoh, G.H. ve Liu, C., (2013). Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach, Second Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [46] Meşeli, İ., (2010), Mühendislik, Sonlu Elemanlar Analizi, <http://www.ilkeymeseli.com/2010/12/mesh-cozum-agi>, 21 Mayıs 2015.
- [47] Epstein, A.H., (2003). "Millimeter-Scale MEMS, Gas Turbine Engines", Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, 16-19 June 2003, Atlanta, Georgia, USA.
- [48] Onishi, T., Burguburu, A., Dessorens, O., and Ribaud, Y., (2005). "Numerical Design and Study of a MEMS-Based Micro Turbine", ASME Turbo Expo: 2005, 6–9 June 2005, Reno, Nevada.
- [49] Isomura, K. ve Murayama, M., (2002). "Development of Micro-Turbocharger and Micro-Combustor for a Three-Dimensional Gas Turbine at Micro-Scale," ASME Turbo Expo: 2002, 3–6 June 2002, Amsterdam.

- [50] Fu, L., Shi, Y., Deng, Q. ve Feng, Z., (2009). "Aerodynamic Design and Numerical Investigation on Overall Performance of a Microradial Turbine with Milimeter-Scale", ASME Turbo Expo: 2009, 8–12 June 2009, Orlando, Florida.
- [51] Holman, J.P., (2010). Heat Transfer, Tenth Edition, Mc Grow – Hill, USA; Çeviren: Horuz, İ., (2014). Isı Transferi, Onuncu Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cafer SOLUM
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.08.1971 - Refahiye
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : csolum@hho.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Ün.	2005
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Ün.	1996
Lise	Meslek Lisesi	Fatih Endüstri Meslek L.	1989

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017	Hava Lojistik Komutanlığı	Hava Besımevi ve Neşriyat Komutanı
2008	Hava Harp Okulu Komutanlığı	Öğretim Elemanı
2002	2. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı	Mühendislik Şube Müdürü
1997	GENE Mühendislik	Proje Mühendisi
1996	MEKA Limited Şirketi	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Ocak 2011 Solum, C., Koç, İ. Ve Altuntaş, Y., (2011). "Çift Etkili LiBr-H₂O Akışkanlı Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminde Termodinamiksel Büyüklüklerin Sistem Performansına Etkileri", Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 5 (1): 19-26.

Bildiri

1. Eylül 2012 Solum C. ve Heperkan, H.A., (2012). "İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Motorların İncelenmesi ve Jet Motorları ile Diğerlerinin Performans Kıyaslaması", IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 12-14 Eylül 2012, İstanbul.
2. Eylül 2012 Demirtaş, H.E., Solum, C. ve Ergun, C., (2012). "Havacılık Sektöründe Kullanılan Kompozit Zırhların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi", IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 12-14 Eylül 2012, İstanbul.
3. Eylül 2012 Koç, İ., Altuntaş, Y. ve Solum, C., (2012). "Gaz Türbin Kanadı Üzerinde İki Boyutlu Sıcaklık Dağılımının Çıkarılması", IV. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 12-14 Eylül 2012, İstanbul.
4. Aralık 2013 Solum, C. ve Heperkan, H.A., (2013). "Mikro Jet Motorlu Taktik Amaçlı Bir İnsansız Hava Aracının Motor Performansının İncelenmesi", HUMBOLDT-KOLLEG 2013, 12-15 Aralık 2013, İstanbul.
5. Haziran 2014 Solum, C., Bilgin, A., Demirtaş, M., Ağırbaş, Ö.F. ve Atasever, A., (2014). "Keşif ve Gözlem Amaçlı Yarı Otonom Zeplin Tasarımı ve Güneş Enerjili Sistemin Entegrasyonu", Havacılıkta İleri Teknolojiler Konferansı-HİTEK 2014, 18-19 Haziran 2014, İstanbul.
6. Haziran 2014 Açıkel, C.O., Şimşir, Y. ve Solum, C., (2014). "Taktik Amaçlı Bir Mini İHA'nın Mikro Jet Motoruyla Performans İncelemesi", Havacılıkta İleri Teknolojiler Konferansı-HİTEK 2014, 18-19 Haziran 2014, İstanbul.
7. Nisan 2015 Solum, C. ve Heperkan, H.A., (2015). "Jeotermal Enerjili Çift Etkili Lityum Bromür – Su Akışkanlı Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Ekserji Analizi", 12. Ulusal Tesilat Mühendisliği Kongresi ve Teskon+Sodex Fuarı, 8-11 Nisan 2015, İzmir.

8. Haziran 2015 Solum, C., Kaplan, Ç., Aytar, H.M., Sert, E. ve Taraklı, S., (2015). "Reconnaissance and Observation Purpose Solar Autonomous Airship Design", 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences", 29 June-03 July 2015, Krakow.

