

Jet Motoru Güç Türbini Kanatçıklarının Akışkan Yapı Etkileşimi Analizleri ile
İncelenmesi

Görkem Madenoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2017

Investigation Jet Engine Power Turbine Blades with Fluid Structure Interaction Analyzes

Görkem Madenoğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

April 2017

Jet Motoru Güç Türbini Kanatçıklarının Akışkan Yapı Etkileşimi Analizleri ile
İncelenmesi

Görkem Madenoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji - Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Özge ALTUN

Nisan 2017

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Görkem Madenoğlu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Jet Motoru Güç Türbini Kanatçıklarının Akışkan Yapı Etkileşimi Analizleri ile İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Özge Altun

İkinci Danışman : ---

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özge Altun

Üye : Doç. Dr. Özer Aydın

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nihal Uđurlubilek

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna göre, Yrd. Doç. Özge ALTUN danışmanlığında hazırlamış olduğum ‘‘Jet Motoru Güç Türbini Kanatçıklarının FSI Analizleriyle İncelenmesi’’ başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 28/04/2017

Görkem Madenoğlu

İmza

ÖZET

Bu çalışmada, günümüz gaz türbinli motorlarında çalışabilecek özelliklerde bir güç türbini kanatçığı tasarlanmıştır. Tasarlanan kanatçık geometrisi üzerinde AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı yaklaşımlar ile gerçekleştirilen AYE analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Döner kanatçık üzerinde oluşan sıcaklık değerleri, tek yönlü AYE analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından döner kanatçık ve sabit kanatçıklar için zamandan bağımsız tek yönlü ve çift yönlü AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Tek ve çift yönlü AYE analizleri sonucunda döner kanatçık üzerinde meydana gelen şekil değişimi değerleri karşılaştırılmış ve değerler arasında sadece % 0.7 fark olduğu görülmüştür. Ardından döner kanatçığın sabit kanatçığa göre farklı açılarda olduğu 9 durum için tek yönlü AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Döner kanatçıkta meydana gelen sıcaklık dağılımları ve şekil değişim değerleri belirlenmiştir.

Tasarlanan kanatçıkta sıcaklık değerlerini düşürebilmek için, kanatçıklar üzerinde soğutma kanalı tasarımı çalışmaları yapılmıştır. Konjuge ısı transferi metodu ile soğutma kanalı olmayan kanatçıkta oluşan sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Ardından tasarlanan 2 farklı soğutma kanalı tasarımı için analizler tekrarlanmıştır. Ayrıca kanatçık malzemesinin, kanatçıkta oluşan sıcaklığa etkisini incelemek adına 3 farklı malzeme ile kanatçıklar modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda soğutma kanalı tasarımı ile birlikte yaklaşık 30°C sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akışkan Yapı Etkileşimi, Güç Türbini Kanatçıkları, Konjuge Isı Transferi, Soğutma Kanalı Tasarımı

SUMMARY

In this study, a power turbine blade has been designed with features that can work in today's gas turbine engines. Fluid-structure analyses were performed on the designed turbine blade. The results obtained by the different approaches of FSI analyses. The results are compared. The temperature values formed on the rotating blade were calculated using a one-way FSI analysis. Then steady-state one-way and two-way FSI analyses were performed for the rotary blades and the fixed vanes. As a result of the one and two-way FSI analysis, the values of the maximum deformations on the rotating blade were compared and found to be only 0.7% difference between the values. Then, one-way FSI analyses were performed for the 9 cases where the rotary blade was in different angular positions relative to the fixed vane. Temperature distributions and shape change values are observed in the rotating blade.

In order to decrease the temperature values in the designed blades, cooling channel design studies have been done on the geometry. Conjugated heat transfer method is used to determine the temperature values of the non-cooling channel. The analysis was then repeated for the design of the two different cooling channels designed. The blades were modeled with three different materials in order to examine the effect of the blade material on the temperature of the blade. As a result of the analyses made, a temperature drop of about 30 ° C was observed with the cooling channel design.

Keywords: Fluid Structure Interaction, Power Turbine Fins, Conjugate Heat Transfer, Cooling Channel Design

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında, derslerimde ve tez aşamasında bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Özge ALTUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca sağladıkları olanaklar ve sürekli yardımları için, TEI Yapısal Mühendislik Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm eğitim – öğretim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme, özellikle bu tez çalışması sırasında hayata gözlerini yuman annem Behiye MADENOĞLU'na teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Desteklerini her zaman hissettiğim sevgili eşim ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET | vi |
| SUMMARY | vii |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xv |
| | |
| 1. GİRİŞ VE AMAÇ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 5 |
| 3. JET MOTORLARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER | 25 |
| 3.1. Kompresör | 30 |
| 3.2. Yanma odası | 31 |
| 3.3. Güç türbini (yüksek basınç türbini)..... | 33 |
| 3.3.1. Güç türbini tasarımı | 33 |
| 3.3.2. Güç türbinlerinde kullanılan malzemeler..... | 36 |
| 4. YÖNTEM | 38 |
| 4.1. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Analizleri | 38 |
| 4.1.1. HAD yönetici denklemleri | 39 |
| 4.2. SEM (Sonlu Elemanlar Metodu) Analizleri..... | 41 |
| 4.2.1. SEM yönetici denklemleri..... | 42 |
| 4.3. AYE Analizleri..... | 43 |
| 4.4. Sistemleri Bağlama (System Coupling)..... | 47 |
| 4.4.1. Sistemleri bağlama yönetici denklemleri | 48 |
| 5. GÜÇ TÜRBİNİ KANATÇIKLARI ÜZERİNDE AYE ANALİZLERİ | 50 |
| 5.1. Sınır Koşulları | 51 |
| 5.2. Ağ Yapısından Bağımsızlık..... | 58 |
| 5.3. Sıcaklık Dağılımı AYE Analizi | 59 |
| 5.4. Tek Yönlü AYE Analizi | 61 |
| 5.5. Çift Yönlü AYE Analizi | 65 |
| 5.6. Hareketli Döner Kanatçık Yaklaşımıyla Tek Yönlü AYE Analizi | 68 |

İÇİNDEKİLER (devam)

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 6. SOĞUTMA KANALI TASARIMI | 73 |
| 6.1. Model 1 Sonuçları..... | 76 |
| 6.2. Model 2 Sonuçları..... | 77 |
| 6.3. Model 3 Sonuçları..... | 79 |
| 7. BULGULAR VE TARTIŞMA | 82 |
| 8. SONUÇ VE ÖNERİLER | 85 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ | 88 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 2.1. NACA 66 Kanatçığı | 6 |
| 2.2. Analiz ve Test Sonuçlarının Karşılaştırması | 6 |
| 2.3. Test Sonuçlarının Gösterilmesi | 7 |
| 2.4. Rüzgar Türbini Simülasyon Hacmi Görünümü..... | 8 |
| 2.5. Rüzgar Tünelinde Türbinin Yerleşimi | 9 |
| 2.6. Deney ve Analiz Sonuçları Karşılaştırması..... | 10 |
| 2.7. Basınç Görselleri..... | 11 |
| 2.8. Roket AYE Analizinde Kullanılan Akış Hacmi..... | 11 |
| 2.9. AYE Analizi Sonucunda Şekil Değiştirebilen ve Değiştiremeyen Roket Geometrileri Karşılaştırması..... | 12 |
| 2.10. Analizlerin Yapıldığı Model | 13 |
| 2.11. Basitleştirilerek Analizlerde Kullanılan Model Ağ Yapısı | 13 |
| 2.12. Bir Tane Döner Kanatçık İçin Yapılan AYE Analizi Sonucu Bulunan Mach Sayıları..... | 14 |
| 2.13. İki Döner ve Bir Sabit Kanatçık İçin Yapılan AYE Analizi Sonucu Bulunan Mach Sayıları | 14 |
| 2.14. On İki Birlik Sektör Modeli Alınan Geometrinin Tam Görüntüsü | 15 |
| 2.15. Farklı Açıl Hızlar İçin Tekrarlanan Analizler Sonucunda Oluşan Şekil Değişimi Değerleri | 16 |
| 2.16. Mach Sayısı 0.96 İçin AGARD 445.6 Kanadı Üzerinde Oluşan Basınç Dağılımı | 17 |
| 2.17. Konjuge Isı Transferi Analiz Şeması | 18 |
| 2.18. Kanatçık Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı | 19 |
| 2.19. Analizlerde Kullanılan Kanatçık Geometrisi | 20 |
| 2.20. Analizler Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri | 20 |
| 2.21. Kullanılan Analiz Modeli..... | 21 |
| 2.22. İlk Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Analiz Sonucunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı Görseli | 22 |
| 2.23. Döner Kanat Sıcaklık Dağılımları..... | 23 |
| 2.24. Döner Kanat Üzerindeki Isı Akışı % Farkları | 23 |
| 3.1. Gaz Türbinli Motor Bölümleri | 26 |
| 3.2. Gaz Türbinli Motorların Zaman İçindeki Değişimi | 26 |
| 3.3. İdeal Brayton Çevrimi Şeması. | 28 |
| 3.4. İdeal Brayton Çevrimi sıcaklık-entropi Diagramı..... | 28 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 3.5. F 100 Motorunun Teknik Çizimi ve Basitleştirilmiş Görüntüsü..... | 29 |
| 3.6. Bir Gaz Türbini Motorunun Basitleştirilmiş ve Patlatılmış Görüntüsü..... | 29 |
| 3.7. Tek Kademeli Kompresörler..... | 30 |
| 3.8. Eksenel ve Radyal Kompresörlerin Çok Kademeli Montaj Çizimleri..... | 31 |
| 3.9. Yanma Odası İçinde Havanın Hareketi..... | 32 |
| 3.10. Bir Güç Türbini Görseli..... | 34 |
| 3.11: Bir Güç Türbininde Kanatçık Disk Montajı..... | 35 |
| 3.12. Bir Güç Türbin Kanatçığındaki Soğutma Kanalları..... | 36 |
| 4.1. Figes Tarafından Gerçekleştirilen Bir Flanş Bağlantısındaki Gerilmeleri Gösteren Yapısal Analiz Sonucu..... | 41 |
| 4.2. AYE analizlerinin sınıflandırılması..... | 44 |
| 4.3 Tek Yönlü AYE Analizi Şeması..... | 45 |
| 4.4. Güçlü Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi Şeması..... | 46 |
| 4.5. Gevşek Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi Şeması..... | 47 |
| 4.6. Sistemleri Bağlama Ekranındaki Yakınsama Görseli..... | 48 |
| 5.1. Sayısal Analizlerde Kullanılacak Üç Boyutlu Model..... | 51 |
| 5.2. HAD Analizlerinde Kullanılan Sınır Koşulları..... | 52 |
| 5.3. HAD Analizlerinde Kullanılan Sıcaklık Sınır Koşulu Değerleri..... | 53 |
| 5.4. Sabit Ve Döner Kanatçıkları Arasındaki Ara Yüz Bölgesi Görseli..... | 54 |
| 5.5. Sabit Ve Döner Kanatçıklardaki Periyodik Ara Yüz Gösterimi..... | 55 |
| 5.6. Döner Kanatçık Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı..... | 55 |
| 5.7. Döner Kanatçık Sınır Koşulları..... | 56 |
| 5.8. Tek Yönlü AYE Analizlerindeki Basınç Aktarım Sınır Koşulu..... | 57 |
| 5.9. Çift Yönlü Aye Analizleri için Akışkan Yapı Ara Yüzü Gösterimi..... | 57 |
| 5.10. Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları..... | 58 |
| 5.11. Döner Ve Sabit Kanatçıkların Akış Hacimlerindeki Sıcaklık Dağılımı..... | 59 |
| 5.12. Döner Kanatçık Dış Yüzey Sıcaklık Değerleri..... | 60 |
| 5.13. HAD Analizi Sonucu Yüzey Sıcaklıklarının Termal Yapısal Analize Aktarılması..... | 60 |
| 5.14. Termal Yapısal Analiz Sonucu Elde Edilen Döner Kanatçıktaki Sıcaklık Dağılımı..... | 61 |
| 5.15. Tek Yönlü AYE Analizi Akış Şeması..... | 62 |
| 5.16. Sabit ve Döner Kanatçık Akış Hacimlerindeki Hız Dağılımı..... | 63 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 5.17. Sabit Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı. | 63 |
| 5.18. Döner Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı..... | 64 |
| 5.19. Döner Kanatçığın Dönme Eksenindeki Şekil Değişimi Görseli. | 64 |
| 5.20. Çift Yönlü AYE Analizi Akış Şeması..... | 65 |
| 5.21. Sabit ve Döner Kanatçık Akış Hacimlerindeki Hız Dağılımı. | 66 |
| 5.22. Sabit Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı | 66 |
| 5.23. Döner Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı..... | 67 |
| 5.24. Döner Kanatçığın Dönme Eksenindeki Şekil Değişimi Görseli | 67 |
| 5.25. Döner Kanatçığın Açısal Konum Görselleri | 69 |
| 5.26. Döner Kanatçığın Açısal Konumuna Göre Sıcaklık Değişimi..... | 70 |
| 5.27. Döner Kanatçığın Açısal Konumuna Göre Sıcaklık Değerleri | 71 |
| 5.28. Döner Kanatçığın Açısal Konumuna Göre Şekil Değişimi..... | 71 |
| 6.1. Soğutma Kanalı Eklenmiş Döner Kanatçık Geometrileri | 73 |
| 6.2. Model 1 İçin Akış Hacmi İçerisinde Soğutma Kanalı Görselleri..... | 75 |
| 6.3. Model 2 İçin Akış Hacmi İçerisinde Soğutma Kanalı Görselleri..... | 75 |
| 6.4. Model 1 İçin Döner Kanatçık Sıcaklık Dağılımları | 76 |
| 6.5. Model 1'deki Hava Sıcaklık Değerleri..... | 77 |
| 6.6. Model 2 İçin Döner Kanatçık Sıcaklık Dağılımları | 78 |
| 6.7. Model 2'deki Hava Sıcaklık Değerleri..... | 79 |
| 6.8. Model 3 İçin Döner Kanatçık Sıcaklık Dağılımları | 80 |
| 6.9. Model 3'deki Hava Sıcaklık Değerleri..... | 81 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 6.1. HAD Modellerindeki Model ve Malzeme Bilgileri | 74 |
| 6.2. HAD Analizlerinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri | 74 |
| 7.1. Çelik Kanatçık Malzemesi için En Yüksek ve En Düşük Sıcaklık Değerleri İle Sıcaklık Farkları..... | 83 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler**

| <u>Simgeler</u> | <u>Acıklama</u> |
|------------------------|---|
| v_r | Akışkanın radyal yöndeki hız bileşeni (m/s) |
| v_θ | Akışkanın teğetsel yöndeki hız bileşeni (m/s) |
| v_z | Akışkanın aksenal yöndeki hız bileşeni (m/s) |
| r | Yarıçap (m) |
| ρ | Yoğunluk (kg/m^3) |
| μ | Dinamik viskozite (Pa.s) |
| T | Sıcaklık ($^\circ\text{C}$) |
| c_p | Isı kapasitesi |

Kısaltmalar**Acıklama**

| | |
|-----|---------------------------------|
| AYE | Akışkan Yapı Etkileşimi |
| HAD | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| SEM | Sonlu Elemanlar Metodu |

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde gelişen teknoloji sayesinde birçok insanın günlük hayatı oldukça kolaylaştı. Cep telefonları sayesinde Dünya'nın herhangi bir yerindeki bir kişiyle anında iletişim kurmamız mümkün hale geldi. İnternet bağlantısı sayesinde gerekli bilgi paylaşımlarını yapmak ya da bir bilgiye ulaşmak 20 yıl öncesine göre çok kolay bir hal aldı. Peki, gelişen teknoloji bize bilgiye ulaşmak ya da haberleşmek dışında ne gibi kazançlar sağlıyor?

Bu sorunun cevabını bulabilmek için etrafımızda gördüğümüz ürünlerin tasarlanma ve üretilme süreçlerini incelememiz gerekebilir. Aynı insanın günlük hayatında yaşanan değişiklikler gibi üretim yapılan her sektörde de gelişen teknolojinin sunduğu nimetlerden yararlanmak mümkün olmuştur.

Birçok sektör üretim ve tasarım aşamalarında, günümüzde hızla gelişmekte olan teknolojiden faydalanmaktadır. Örneğin otomotiv firmalarında kaynak yapmak için kullanılan robotlar, kaynak işleminin maliyetini azaltırken kaynak kalitesini artırır ve aynı zamanda işlemi oldukça hızlandırır. Bisküvi fabrikalarında kullanılan paketleme makineleri; üretim bandında dağınık olarak bulunan ürünleri toplar, kötü şekilde olanlarını ayırır ve kalanlarını ambalajlanmaları için düzenler. Böylece birden çok insanın uzun sürede yapabileceği bir işlemi makineler yardımıyla çok daha hızlı yapmak mümkün olur. Tasarım yapılan fabrikalarda ürünlerin teknik resimlerinin elle yapılması yerine geliştirilen bilgisayar yazılımlarıyla yapılması sürecin hızlanmasında etkili bir rol oynamaktadır. Bu tarz örnekleri arttırmak ve çeşitlendirmek mümkündür.

Yaşanan teknolojik gelişmelere her sektör farklı zamanlarda adapte olmaktadır. Sektörün ihtiyaçları, teknolojik ürünlere harcanabilecek mali kaynak gibi parametreler teknolojiye uyum sürecinin belirleyici etkenlerindedir. Örneğin havacılık sektöründe teknolojik gelişmeler çok yakından takip edilir, belirli bir bütçe mali kaynak olarak ayrılır. Havacılık sektöründe teknolojik gelişmelerin bu denli kullanılmasının sebebi ise uzun ve zahmetli tasarım süreçleri, pahalı malzeme ve üretim yöntemleri, sıkı toleranslar, yüksek

kalitede ürün üretme zorunluluğu ve en önemlisi olarak uçuş emniyetine uygun üretim yapma zorunluluğu olarak gösterilebilir.

Uçuş emniyeti bu derece dikkate alınırken, kullanılan malzeme ve üretim türleri oldukça pahalıyken havacılık sektöründe çalışan mühendislerin en ufak ayrıntıları dikkate alarak tasarımlar yapmaları, kullanılacak malzeme, üretim ve bakım yöntemleri gibi kritik konuları en ince ayrıntısına kadar araştırmaları gerekmektedir. Durum bu iken de havacılık sektöründe yer alan kişi ve kurumların Dünya’da olan teknolojik gelişmeleri en ince ayrıntısına kadar takip etmeleri ve yeni teknolojileri diğer sektörlerden önce uygulamaları kaçınılmazdır.

Yukarıda sayılan sebeplerden ötürü havacılık sektöründe en son teknolojiye sahip üretim cihazları, en gelişmiş üretim yöntemleri ve en kaliteli bilgisayar yazılımları bulundurulmalıdır.

Son yıllarda artan bilgisayar kapasiteleri farklı uygulamalar için geliştirilen bilgisayar yazılımlarından elbette havacılık sektörü de yararlanır. Bilgisayar destekli teknik resim çizimi yazılımları, işlerin daha kolay dağıtılablmesini ve kontrolünü sağlayan yazılımlar ve belki de diğer maddelerden daha önemli olan simülasyon yazılımları en çok yararlanan kaynaklardır.

Geliştirilen simülasyon yazılımları pahalı testleri bilgisayar ortamında yapabilmek, test yapılırken kullanılacak malzeme ve enerji ihtiyacını ortadan kaldırmak ve çok hızlı şekilde yeni tasarımları değerlendirebilmek için kullanılabilir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gibi birçok alanda mühendislere tasarımlar konusunda yardımcı olan simülasyon sistemleri dışında son zamanlarda bu iki disiplinin beraber kullanılması ile ortaya çıkan AYE (Akışkan Yapı Etkileşimi) analizleri de kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada günümüzde kullanılan gaz türbinli motorlarda, yer alabilecek bir güç türbini kanatçığının ilk tasarım aşaması ile ilgili analizler yapılmıştır. Öncelikle kanatçıkların etrafından geçen yüksek sıcaklıktaki hava ve yüksek dönme hızlarının etkisi

altındaki davranışını incelemek adına kanatçıklar üzerinde farklı yaklaşımlarla Akışkan Yapı Etkileşimi analizleri ANSYS Workbench V. 17.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerin HAD analizleri ANSYS CFX yazılımı kullanılarak gerçekleştirilirken, SEM analizleri içinse ANSYS Mechanical yazılımı kullanılmıştır. Bu iki farklı disiplini birbirine bağlamak için ANSYS Workbench yazılımında bulunan sistemleri bağlama (System Coupling) özelliği kullanılmıştır.

AYE analizlerinden sonra, tasarlanan kanatçıklarda oluşan yüksek sıcaklık değerlerini düşürebilmek adına ANSYS CFX V. 17.0 yazılımı kullanılarak konjuge ısı transferi analizleriyle, kanatçıklarda kullanılacak soğutma kanalı tasarımları karşılaştırılmıştır. Soğutma kanalı tasarımları karşılaştırılırken, kanatçık malzemesi olarak kullanılacak malzemeler de karşılaştırılarak, kanatçık üzerinde oluşan sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, literatür araştırmasına yer verilmiştir. Simülasyon ya da deneysel alanda AYE analizleri ve güç türbini kanatçıkları üzerinde yapılan termal çalışmalar derlenmiştir. Üçüncü bölümde, gaz türbinli motorlar hakkında ana hatlarıyla bilgi verilerek, analizlerin gerçekleştirildiği güç türbini kanatçığı ile ilgili detaylı bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise havacılık alanında kullanılan analiz yöntemlerinden bahsedilerek, bu yöntemlerin kullandığı yönetici denklemler gösterilmiştir. Beşinci bölüm AYE analizlerinin gerçekleştirilmesi için gereken ağ yapısı, sınır koşulları gibi olguların anlatıldığı ayrıca farklı AYE analizlerinin sonuçlarının gösterildiği bölümdür. Altıncı bölümde ise tasarlanan güç türbini kanatçığı için farklı soğutma kanalı tasarımları kullanılarak termal analizler gerçekleştirilmiş ve bu sayısal analiz sonuçları paylaşılmıştır. Yedinci bölümde ise çalışmanın sonuçları detaylı olarak açıklanmıştır

Çalışmada, akışın sürekli ve sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiştir. Akışkan olarak hava, kanatçık malzemesi olarak ise AYE analizlerinde çelik (AMS 3060) seçilmiştir. Yapılan konjuge ısı transferi analizlerinde ise çelik malzemesine ek olarak Inconel 792 ve CMSX_4 malzemeler de kullanılmıştır. Malzemelerin fiziksel özellik değerleri için yaklaşık 1000 °C'deki değerler dikkate alınmıştır. Analizlerde havanın giriş hızı ve sıcaklığı sabit tutulmuştur. Yapılan tüm analizlerde sabit ve döner kanatçıklar

kullanılmıştır. Kanatçık ve akış hacimleri dahil edilerek 3 boyutlu 11 tane AYE analizi ve 9 adet konjuge ısı transferi analizi yapılmıştır.

Sayısal analizler sonucunda kanatçıklarda gözlenen en yüksek şekil değiştirme değerine göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Dönme yönünde kanatçıklarda meydana gelen şekil değişimleri, döner kanatçığa etki eden hava akışına bağlıdır. Ayrıca karşılaştırılan tek ve çift yönlü AYE analizlerini mukayese edebilmek için dönme yönünde oluşan şekil değişimlerinden yararlanılmıştır. Yapılan termal analizler ile tasarlanacak soğutma kanallarının kanatçıkta oluşan sıcaklık değerlerine etkisi incelenmiştir. Kullanılan farklı malzemelere göre kanatçık sıcaklığındaki değişim gözlenmiştir.

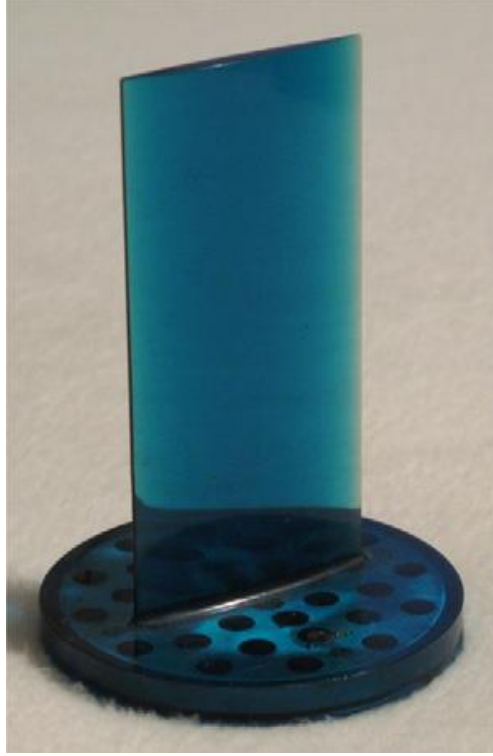
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde AYE analizleriyle ilgili: literatürde yer alan sayısal ve deneysel çalışmalar incelenmiştir.

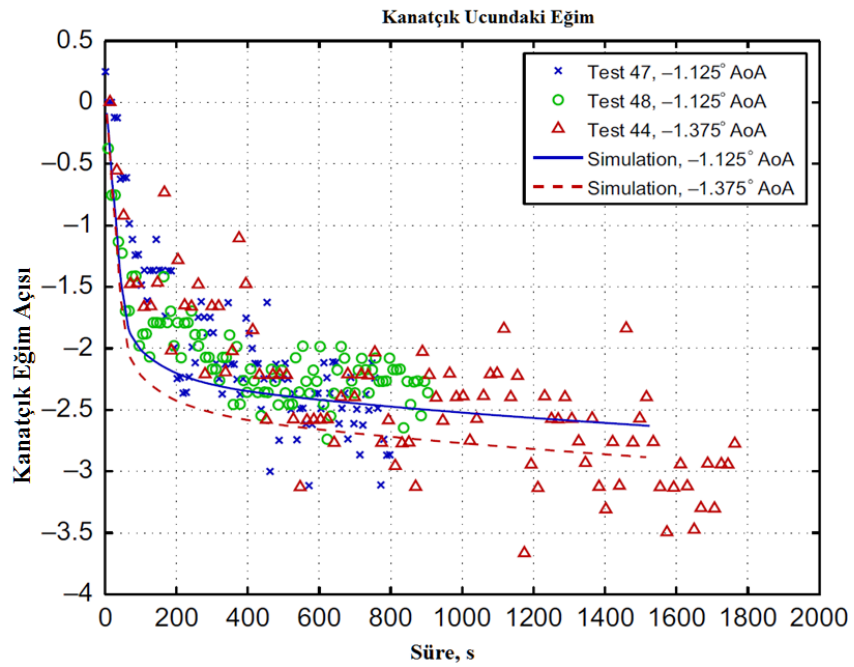
Campbell ve Paterson, (2011), insan vücudunda kan pompalamak için kullanılabilir özelliklere sahip bir pompanın, AYE analizlerini gerçekleştirebilmek için, bir AYE kodu geliştirmişlerdir. Yazarlar, OpenFOAM yazılımıyla akışkan analizlerini yaparken, kendilerinin oluşturduğu bir kodla da yapısal analizleri ile akışkan ve yapı analizleri arasındaki bağlantıyı gerçekleştirmişlerdir.

Yazılan kod kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler, su tüneli testi ile karşılaştırılmıştır. Su tüneli testi ve AYE analizlerinde NACA 66 kanatçığı kullanılmıştır (Şekil 2.1). Zamana bağlı analizler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar ve test verilerinin karşılaştırılması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Zamana bağlı olarak test sonuçları ise Şekil 2.3’de görülmektedir.

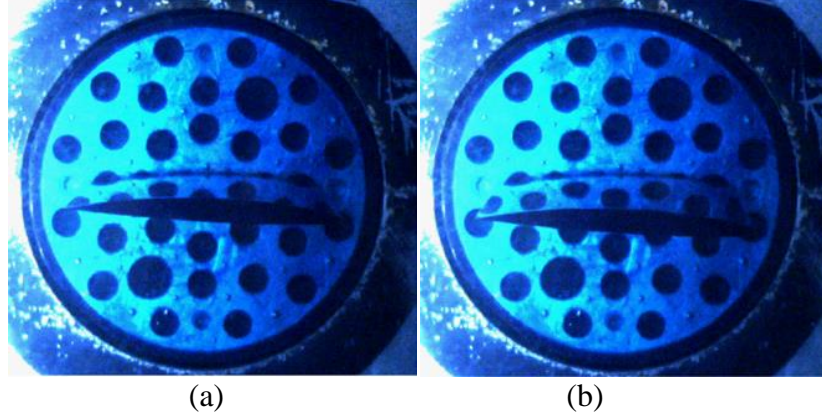
Şekil 2.2’de görülebileceği gibi yazarların oluşturdukları yazılım, kanadın davranışını genel olarak yansıtabilmektedir. Süre ilerledikçe sonuçlarda oluşan farklar görülmektedir. Yazarların da bahsettiği üzere ilk 100 saniyelik zaman aralığı sırasında yakınsama problemleri yaşansa da, devam eden zaman aralıklarında yakınsamış çözüm almak mümkündür.



Şekil 2.1. NACA 66 kanatçığı (Campbell ve Paterson, 2011).



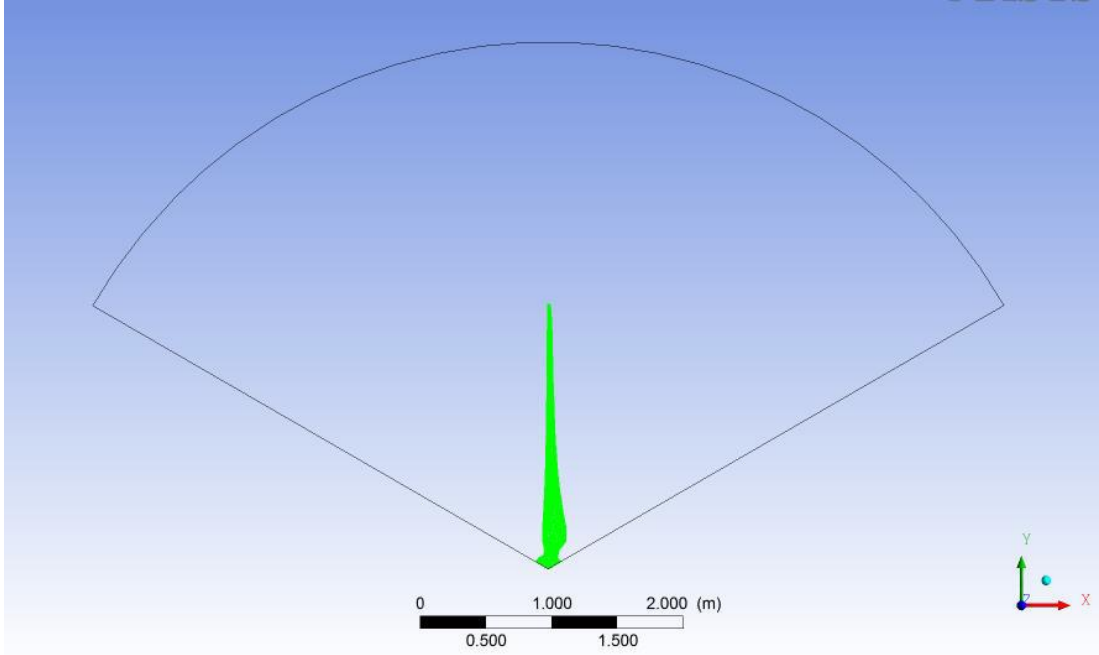
Şekil 2.2. Analiz ve Test Sonuçlarının Karşılaştırması (Campbell ve Paterson, 2011).



Şekil 2.3. Test Sonuçlarının Gösterilmesi: a) 150 s Sonucu, b) 600 s Sonucu (Campbell ve Paterson, 2011).

Doğan (2014), rüzgar türbini kanatları için yaptığı çalışmalarda, iki ve üç boyutlu modeller kullanarak, farklı hücum açlarına sahip NACA0012 kanat profilinin HAD ve AYE analizlerini gerçekleştirmiştir. NACA0012 profili testleri yapılmış ve sonuçları paylaşılmış bir geometri olduğundan analiz sonuçları bu test sonuçlarıyla karşılaştırılabilmektedir. Analizlerde HAD kısmı için ANSYS CFX ve SEM kısmı içinse ANSYS Mechanical yazılımları kullanılmıştır. İki boyutlu HAD analizleri, sıkıştırılamaz akış kabulüyle yapıldığından, artan hücum açısıyla birlikte yükselen Mach değerleri, belirli bir hücum açısı değerinden sonra analizlerin sonuçlarında test sonuçlarına göre farklı değerler göstermeye başlamaktadır. Doğan'a (2014) göre bu hücum açısı değeri 14° 'dir. Çünkü 14° 'lik hücum açısına kadar analiz sonuçları ve test sonuçları birbirleriyle oldukça uyumlu gözükmektedir. Bu bilgilere ek olarak kanat profilinde akış ayrılması 16° hücum açısı değerine ulaşıldıktan sonra gözlemlendiği için Doğan (2014) analizlerin 14° 'lik hücum açısına kadar kullanılmasının uygun olduğunu belirtmiştir.

İki boyutlu HAD analizlerinden sonra, Doğan (2014), 120° 'lik 1/3 sektör model kullanarak üç boyutlu HAD analizlerini gerçekleştirmiştir. Yapılan simülasyonlarda 8 metre çapa ve 20 metre uzunluğa sahip bir silindirin üçte birlik kısmı akış hacmi olarak belirlenmiş ve kanat profili bu akış hacminin içine yerleştirilmiştir (Şekil 2.4). HAD analizi 7.25 m/s rüzgar hızı kabulüyle yapılmıştır.



Şekil 2.4. Rüzgar Türbini Simülasyon Hacmi Görünümü (Doğan, 2014).

Şekil 2.4'te gösterilen akış hacmi ve kanat için gerçekleştirilen HAD analizlerinde SST türbülans modeli kullanmış olan Doğan, (2014), HAD analizi sonucunda kanat yüzeyinde oluşan basınç dağılımını elde ederek, bu dağılımı yapısal kanat modeline sınır şartı olarak uygulamıştır. Yapısal model üzerindeki, dönme sınır şartı ve yer çekimi ivmesi gibi diğer sınır şartları da uygulanarak, model lineer ve lineer olmayan şekilde çözdürülmüştür.

Doğan'ın, (2014) tek yönlü AYE analizleri kullanılarak yaptığı bu çalışmada kanatta oluşan şekil değişimi değerleri kanat geometrisine göre oldukça küçük olduğu için çift yönlü AYE analizlerinin kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Literatürde test sonuçları bulunan NACA0012 kanat profili ile yapılan HAD analizlerinin, test sonuçlarıyla oldukça yakın sonuçlar verdiği Doğan, (2014) tarafından belirtilmiştir.

AYE analizleri, rüzgar türbinleri üzerinde sıkça gerçekleştirilen analizlerdir. Doğan'ın, (2014) yaptığı çalışmalara ek olarak MacPhee ve Beyene, (2015) rüzgar türbinleri üzerinde hem deneysel hem de sayısal çalışmalar yaparak, türbin kanatları üzerine gelen rüzgar yükü altında değişen, kanat hücum açılarını ve bu açılarının rüzgar türbininin performansına etkisini araştırmışlardır.

Tek ve çift yönlü AYE analizleri gerçekleştirerek, rüzgar türbini kanatlarının rüzgar etkisi altında şekil değiştirmesine izin verilen ve verilmeyen sayısal analizleri yapan MacPhee ve Beyene, (2015), ayrıca yapılan analiz çalışmalarını testlerle karşılaştırarak sonuçların uyumluluğunu kıyaslamışlardır. Şekil 2.5'te yazarların yaptıkları rüzgar tüneli testine ait görüntü bulunmaktadır.

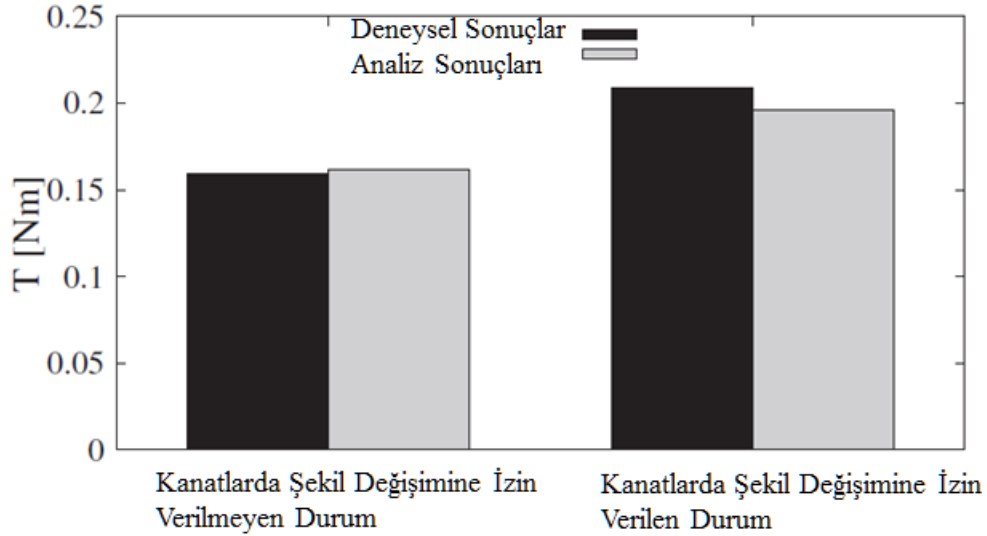


Şekil 2.5. Rüzgar Tünelinde Türbinin Yerleşimi (MacPhee ve Beyene, 2015).

Rüzgar tüneli testleri sonucunda, şekil değiştirmesine izin verilmeyen kanatların kullanıldığı rüzgar türbini sonuçlarını elde eden yazarlar, AYE analizleriyle benzer şartlar altında sayısal analizler yapmışlardır. Bu analizler sonucunda test ve sayısal analiz sonuçlarının birbirine uygun olması nedeniyle, çalışmalarına kanatlarda şekil değişimine izin verilen AYE analizleriyle devam etmişlerdir.

Söz konusu analizlerde, hesaplanan verim ve tork değerleri önceki analizlere göre %25 civarında fazla çıkmıştır. Şekil 2.6'da kanatların şekil değişimine izin verilen ve verilmeyen analizler ve test sonuçlarıyla ilgili karşılaştırmayı bulmak mümkündür. Tork ve

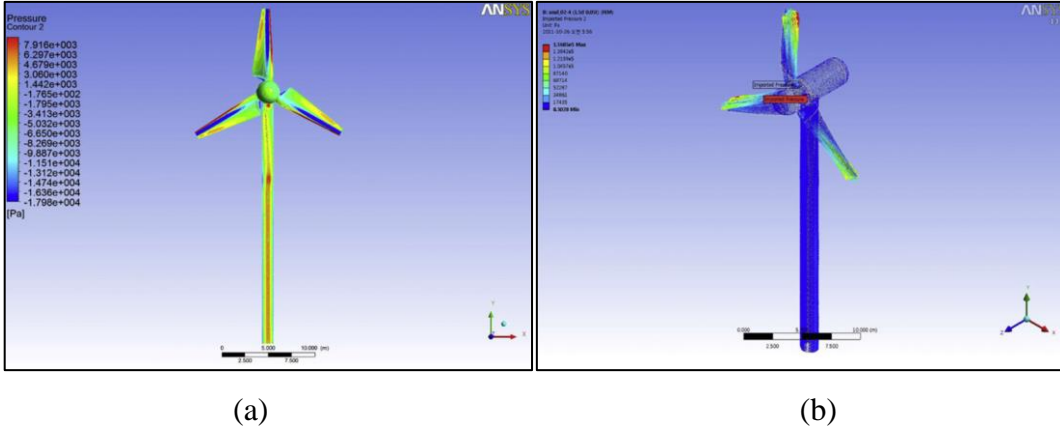
türbinin üreteceği enerji değerlerinin, kanatlarda şekil değişimine izin verilen durumda arttığına dikkat edilmelidir.



Şekil 2.6. Deney ve Analiz Sonuçları Karşılaştırması (MacPhee ve Beyene, 2015).

Bu çalışma sonucunda, rüzgar türbini kanatları gibi uzun ve esnek yapılarda hesaplamalar yapılırken, akıştan etkilenen ve şekil değiştiren yapıların hesaplamalara dahil edilmesinin önemini göstermişlerdir.

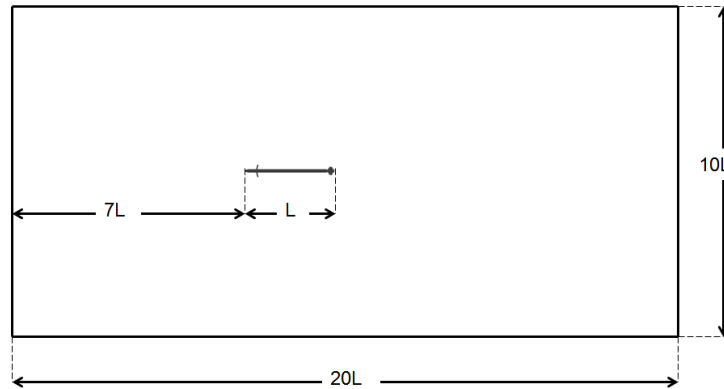
Doğan, (2014) ile MacPhee ve Beyene'in, (2015), rüzgar türbinlerinin performansına yönelik yaptığı çalışmalar dışında literatürde, rüzgar türbinlerini ayakta tutan yapıların dayanımını ölçmek ve geliştirmek için de AYE analizleri kullanılmıştır. Jo vd., (2012) yaptıkları çalışmalarda, tek yönlü AYE analizlerini kullanarak bir rüzgar türbini üzerine gelen rüzgar yükünü ANSYS CFX yazılımını ve SST türbülans modelini kullanarak hesaplamışlardır. Ardından hesaplanan basınç yüklerini yapısal modele aktaran (Şekil 2.7) yazarlar, rüzgar türbininin taşıyıcı kulesi üzerinde yapısal analizleri tamamlayarak, kulede meydana gelen şekil değişimini ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.7. Basınç Görselleri: a) HAD Analizi Sonucu Görseli, b) SEM yazılımına aktarılmış basınç görseli (Jo vd., 2012).

Akgül, (2012), literatürde referans test sonuçları bulunan AGARD 445.6 kanadı için zamana bağlı olmayan AYE analizleri gerçekleştirmiştir. AYE analizlerini yapabilmek için HAD yazılımı olarak CFX v.13, lineer yapısal analizlerin çözümünde ise ANSYS Mechanical'ı kullanan yazar, bu iki yazılım arasında bilgi geçişin sağlarken Kriging yönteminden yararlanmıştır.

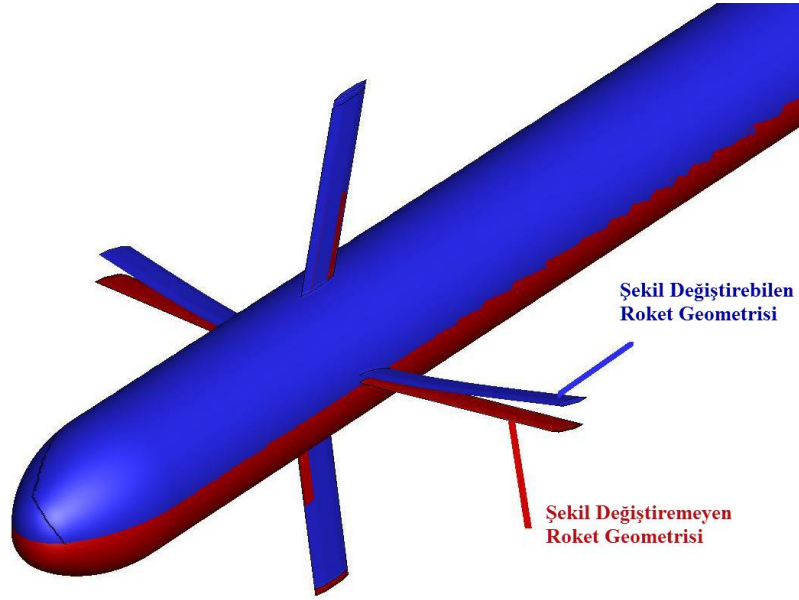
AGARD 445.6 kanadı için yaptığı çift yönlü AYE analizi sonuçlarını, literatürdeki test sonuçlarıyla karşılaştırıp doğrulamış ve daha sonra bir roket geometrisi üzerinde, doğruladığı yöntemi kullanarak analizler yapmıştır. Şekil 2.8'de roket geometrisi üzerinde yaptığı AYE analizleri için kullandığı akışkan hacmi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Roket AYE Analizinde kullanılan Akış Hacmi (Akgül, 2012).

Şekil 2.8'de gösterilen akış hacmi ve roket geometrisi için, roketin şekil değişimine izin verilen ve verilmeyen farklı analizler yapan Akgül, (2012), rokette şekil değişimine

izin verilen analizlerde verilmeyenlere göre, kaldırma kuvvetinin % 3.8, sürüklenme kuvvetinin ise % 6.6 oranında düştüğünü tespit etmiştir. Her iki durum için roket geometrisinde oluşan fark Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2.9. AYE Analizi sonucunda şekil değiştirebilen ve değiştiremeyen roket geometrileri karşılaştırması (Akgül, 2012).

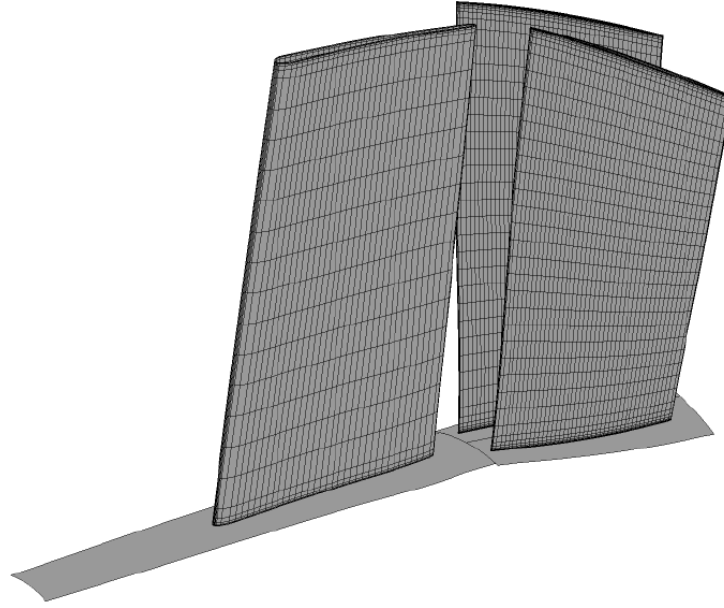
Yaptığı birçok AYE analizi sonrasında, Akgül, (2012), yapısal modelin şekil değişimine izin verilmesinin önemine vurgu yapmıştır. Basınç yüklemelerinin konumlarındaki değişim sebebiyle, şekil değişimine izin verilen modellerde, roketin kontrol edilebilirliğinin yaklaşık %12 oranında düşeceğini vurgulamaktadır.

Dhopade vd., (2010) çalışmalarını AYE analizleri kullanarak gaz türbinlerine yönelik yapmışlardır. Gaz türbinlerinin hava girişinde bulunan fan kanatları ile ilgili çalışan ekip, AYE analizlerini kullanarak, fan kanatlarında meydana gelebilecek düşük ve yüksek çevrimli yorulma olasılığı ile ilgilenmiştir. Sonraki adımda ise bahsedilen parçalar için ömür hesabı yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda çift yönlü AYE analizleri kullanan Dhopade vd., (2010), 32 döner kanatçık ve bu döner kanatçıkların önünde yer alan 18 sabit kanatçık bulunan model ile çalışmışlardır (Şekil 2.10). Yapılan analizlerin karmaşıklığı ve aldığı zaman göz önünde bulundurularak modelde basitleştirme yapılmış bir sabit ve iki

döner kanatçıktan oluşan model analiz modeli olarak seçilerek ve ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 2.11).



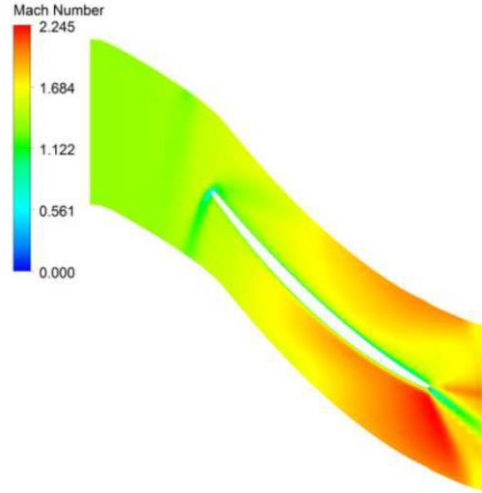
Şekil 2.10. Analizlerin Yapıldığı Model (Dhopade vd., 2010).



Şekil 2.11. Basitleştirilerek Analizlerde Kullanılan Model Ağ Yapısı (Dhopade vd., 2010).

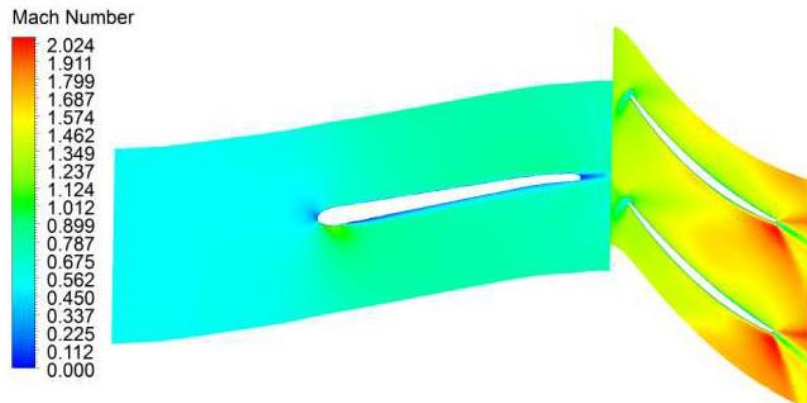
Oluşturulan modelde, öncelikle sabit kanatçıkların dahil edilmediği analizler yapılmıştır. Hava giriş hızı olarak 132m/s kabul edilmiştir ve döner kanatçıkların açılma hızı 11000 devir/dakika olarak belirlenmiştir. Dhopade vd., (2010) analizler sonucunda kanatçık çevresinde oluşan hava akımının süper-sonik olduğunu görmüşlerdir. Döner kanat

için yapılan AYE analizi sonucunda elde edilen Mach sayısı değerleri Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Bir Tane Döner Kanatçık İçin Yapılan AYE Analizi Sonucu Bulunan Mach Sayıları (Dhopade vd., 2010).

Tek döner kanatçık için yapılan analizlerden sonra, bir sabit kanatçık ve iki döner kanatçık kullanarak AYE analizleri gerçekleştiren Dhopade vd., (2010), sonuçlardan Mach sayıları, kanatçıklar üzerindeki basınç dağılımları ve kanatçıkların zaman şekil değiştirmesini inceleyip, tek döner kanatçıkla yapılan analizlerle karşılaştırmışlardır (Şekil 2.13).

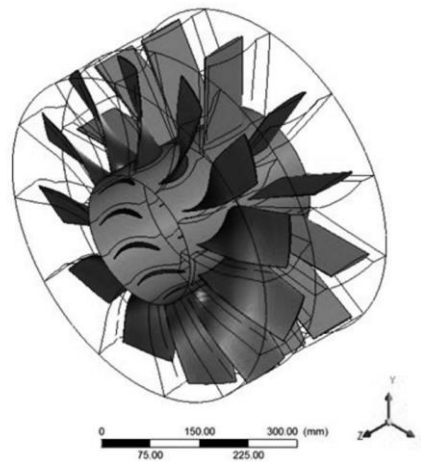


Şekil 2.13. İki Döner ve Bir Sabit Kanatçık İçin Yapılan AYE Analizi Sonucu Bulunan Mach Sayıları (Dhopade vd., 2010).

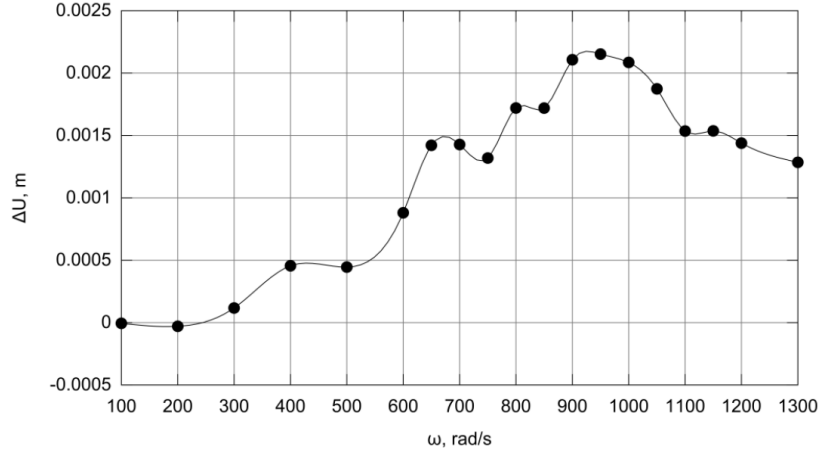
Dhopade vd., (2010) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, tek bir dönen kanatçık için yapılan analizler ile bir sabit ve iki döner kanatçığa sahip modelde yapılan analizler, kanatçık yer değişimi ve Mach sayıları açısından benzer sonuçlar verse bile, statik basınç değerlerindeki farklar göze çarpmaktadır. Yorulma analizi yapılırken, yüklemelerde meydana gelen zamana bağlı değişimlerin önemi oldukça büyüktür. Sabit ve döner kanatçıkların kullanıldığı modellerde yüklemelerin zamana bağlı olarak değişimi analizlere yansıtılabildiği için, ekip sabit ve döner kanatçık kullanılarak oluşturulan modellerin kullanılmasını önermişleridir.

Mekhonoshina vd., (2015) ise AYE analizlerini, bir kompresör sisteminde duran ve dönen kanatçıklar için uygulayarak, zamana bağlı olarak değişen gerilmeleri araştırmışlardır. On iki sabit ve on iki döner kanatçıktan oluşan modellerinde basitleştirme yapabilmek adına modelin on ikide birlik kısmını analizlerinde kullanan ekip, zamana bağlı çift yönlü AYE analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Yaptıkları analizlerde ANSYS CFX ve ANSYS Mechanical yazılımlarını kullanan Mekhonoshina vd., (2015) akışkan_yapı etkileşim bölgesi olarak, dönen kanatçığı seçmişler ve sabit kanatçığın hava akışı sırasında şekil değiştirmedeği kabulünü yapmışlardır. Döner kanatlar için farklı dönme hızlarındaki en büyük şekil değişimi değerlerini, belirledikleri bir referans noktasına göre elde eden yazarlar Şekil 2.15'teki sonuçlara ulaşmışlardır.



Şekil 2.14. On İkide Birlik Sektör Modeli Alınan Geometrinin Tam Görüntüsü (Mekhonoshina vd., 2015).



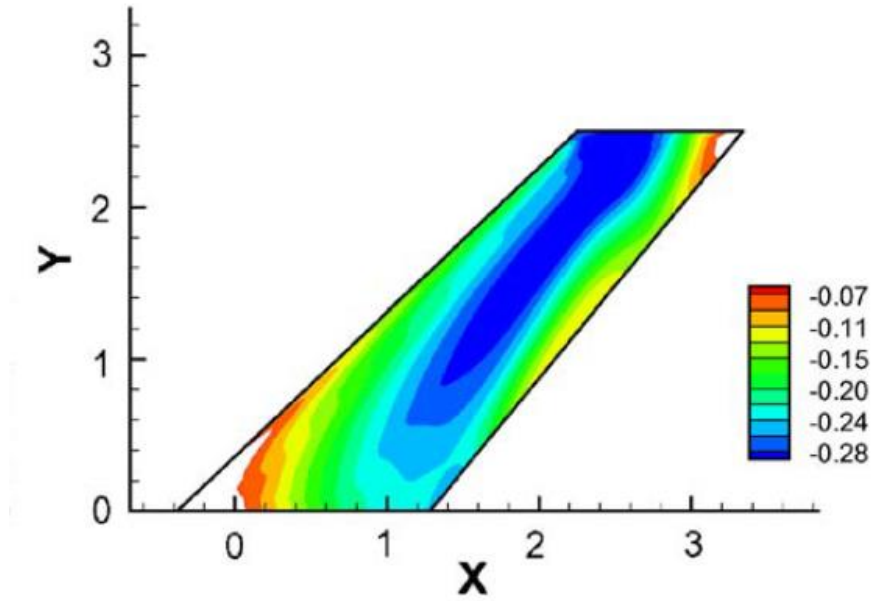
Şekil 2.15. Farklı Açısal Hızlar İçin Tekrarlanan Analizler Sonucunda Oluşan Şekil Değişimi Değerleri (Mekhonoshina vd., 2015).

Kamakoti ve Shyy, (2005), ise yaptıkları çalışmalarda AYE analizlerinin bir başka kullanım alanı olan, kanatlardaki titreşimle kırılma (flutter) konusunu incelemişlerdir. Literatürde birçok testi bulunan AGARD 445.6 kanadını kullanan yazarlar, aeroelastik analizler yapmışlardır. Kamakoti ve Shyy, (2005), çalışmalarında akışkan ve yapısal analizleri arasında farklı bağlantı yöntemlerini kullanarak en doğrusunun tespit edilmesini amaçlamışlardır.

Literatürde AYE analizleriyle ilgili en eski kaynaklardan birine sahip olan yazarlar, akışkan ve yapısal çözücüler arasındaki bağlantıyı sağlayan yazılımı kendileri kurmuşlar ve bu konuda farklı bağlantı türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını anlatan bir bölüm yayınlamışlardır.

Çift yönlü AYE analizleri kullanan Kamakoti ve Shyy, (2005), yapının doğal frekanslarını yapısal analizlerle hesaplayarak, etrafından geçen akış tarafından titreştirilen kanadın titreşim frekansıyla doğal frekansını karşılaştırmışlardır.

Yapılan analizler sonucunda, AGARD 445.6 kanadındaki titreşimle kırılma karakteristiğini başarıyla tespit etmişlerdir. Şekil 2.16'da analizlerde kullanılan kanat geometrisi üzerindeki basınç dağılımı, Mach sayısı 0.96 için verilmiştir.

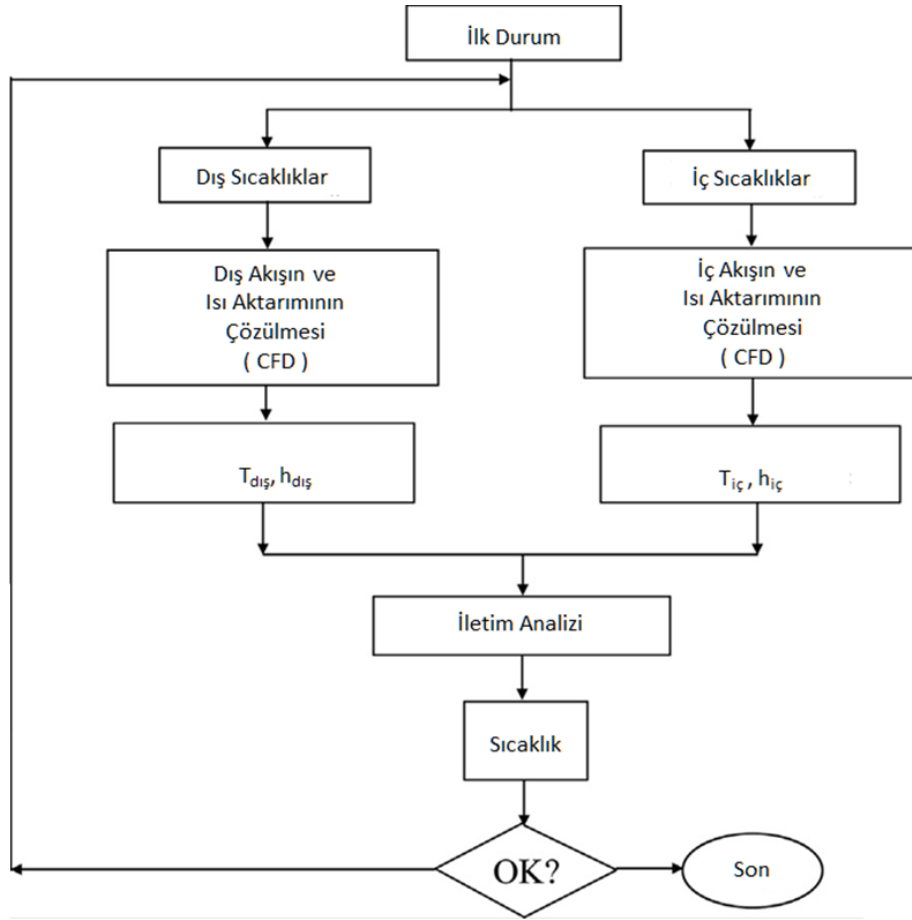


Şekil 2.16. Mach Sayısı 0.96 İçin AGARD 445.6 Kanadı Üzerinde Oluşan Basınç Dağılımı (Kamakoti ve Shyy, 2005).

Reyhani vd., (2013) gaz türbinli motorlarda en çok zorlanmaya maruz kalan parçalar olan, güç türbini kanatçıklarının, ömür değerlerini hesaplamak için kanatçıklar üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını incelemiştir.

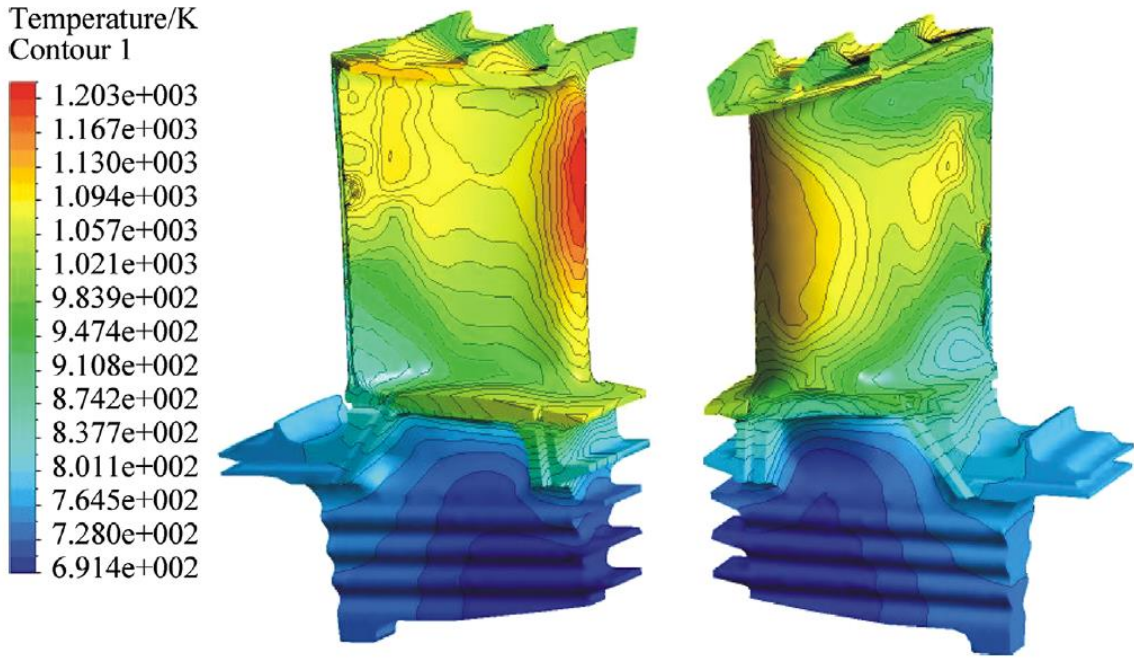
Türbin kanatçıklarına gelen havanın sıcaklığı arttıkça, gaz türbinli motorların verimliliğinin arttığından bahseden araştırmacılar malzemelerin dayanımı ve parçaların kullanımının mümkün olabilmesi için sıcaklık değerinin bir yerde sabitlenmesi gerektiğini anlatmıştır. Yapılan ömür hesabı için kanatçıkların sıcaklıklarının oldukça önemli olduğunu vurgulayan ekip, sıcaklık ile değişen malzemenin fiziksel özelliklerini hesaba katabilmek için ayrıntılı bir sıcaklık analizi gerçekleştirmiştir.

Reyhani vd., (2013) soğutma kanalları olan bir kanatçığın sıcaklığını bulabilmek için konjuge ısı transferi metodunu uygulamışlardır. Bu metotta, kanatçık duvar sıcaklıkları ısı transferi ve akış analizleri için sınır koşulu olarak kullanılırken, bu analizler sonucu bulunan iç ve dış akış sıcaklıkları ise kanatçığın iletim analizi için sınır şartını oluşturmaktadır. Ayrıca akış ve ısı transferi analizi, soğutucu akışkanın fiziksel özelliklerini de belirlemektedir. İteratif olarak ilerleyen çözümler sonucunda kanatçığa temas eden akışkanın ve kanatçığın sıcaklıkları bulunmuştur. Şekil 2.17'de konjuge ısı transferi analizi şeması görülmektedir.



Şekil 2.17. Konjuge Isı Transferi Analiz Şeması (Reyhani vd., 2013).

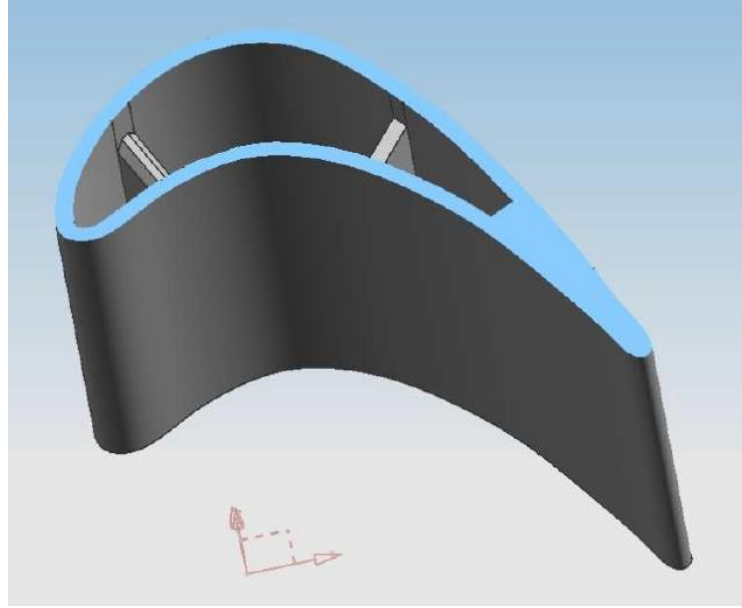
İteratif olarak ilerleyen analizler sonucunda Reyhani vd., (2013) kanatçık üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını belirlemişlerdir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Kanatçık Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı (Reyhani vd., 2013).

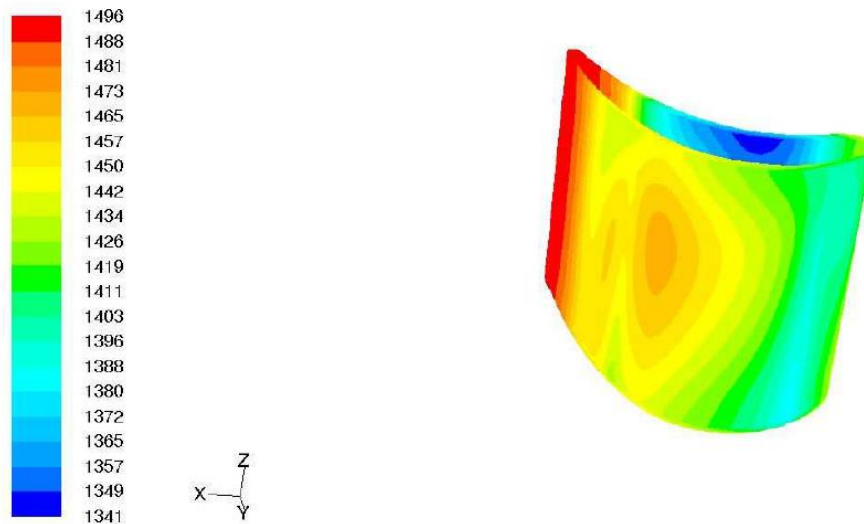
Kwiatkowski ve Domanski (2012), türbin kanatçıklarının daha uzun süre kullanılabilmesi ve bakım masraflarının azaltılmasını hedefleyerek, tasarladıkları türbin kanatçığı soğutma kanallarını farklı koşullar için analiz etmişlerdir.

Sıcak gazların giriş hızı 80 m/s olarak analizlere uygulanırken, soğutucu akışın giriş hızı 10 m/s olarak kabul edilmiştir. Giriş koşullarında, sıcak gazların giriş sıcaklığı 1230 °C ve soğuk gazların giriş sıcaklığı ise 90 °C olarak analizlere uygulanmıştır. Türbülans modeli olarak k-e kullanan yazarlar, patenti alınmış olan bir kanatçığı kullanmışlar ve üzerine kendi tasarladıkları soğutma kanallarını eklemişlerdir. Analizlerde kullanılan geometri şekil 2.19'da verilmiştir.



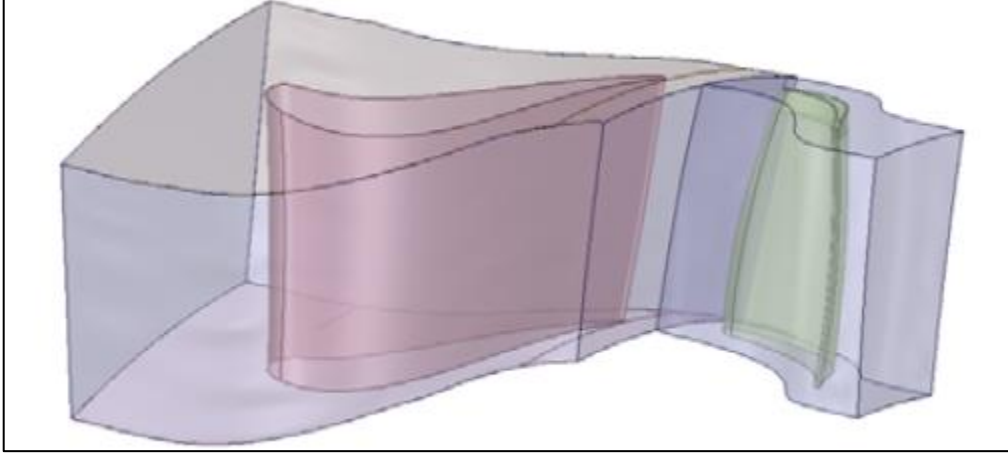
Şekil 2.19. Analizlerde Kullanılan Kanatçık Geometrisi (Kwiatkowski ve Domanski, 2012).

Şekil 2.19’da gösterilen model ve bahsedilen sınır koşullarıyla kanatçığın sıcaklık değerlerini hesaplayan Kwiatkowski ve Domanski (2012), Şekil 2.20’de gösterilen sıcaklık dağılımını elde etmişlerdir. Model üzerindeki sıcaklıklar yaklaşık 1225 ve 1000 °C aralığında değişmektedir. Şekil 2.20’de sıcaklık değerleri °K olarak gösterilmiştir.



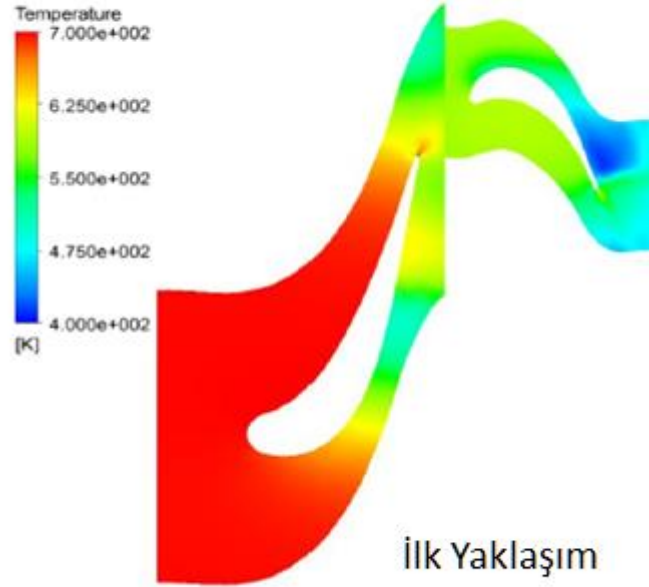
Şekil 2.20. Analizler Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Değerleri (Kwiatkowski ve Domanski, 2012).

Konjuge ısı transferi metodunu kullanarak, güç türbini kanatçıklarındaki sıcaklık dağılımını bulmak için çalışmalar yapan bir diğer ekip ise Silva vd.dir (2015). Yazarlar, yaptıkları çalışmada ANSYS CFX yazılımını kullanmışlardır. Analizler, bir sabit bir de döner kanatçık ve bu kanatçıklara ait akış hacimleri için gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Kullanılan Analiz Modeli (Silva vd., 2015).

Analizlerde 3 farklı yaklaşım denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Birinci yaklaşımda; sıfır duvar kalınlığı kabulü yapılmıştır. Akışkanların sıcaklıkları doğrudan metale uygulanarak, metal ve akışkan arasında ısı geçişi olmadığı kabul edilmiştir. İkinci yaklaşımda; kanatçığın içinde ısı iletiminin olduğu kabul edilerek analiz tamamlanmıştır. Üçüncü ve son yaklaşımda ise konjuge ısı transferi yaklaşımı kullanılarak, kanatçığın içinden ve etrafından geçen akışın sahip olduğu ısı taşınım katsayılarına ve kanatçığın içerisindeki iletim koşuluna göre sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Bu 3 farklı yaklaşıma göre yapılan analizler sonucunda, sabit ve döner kanatçıklarda meydana gelen sıcaklık dağılımlarının birbirinden çok farklı olmadığı görülmüştür. Şekil 2.22’de ilk yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucunda oluşan sıcaklık dağılımı görülmektedir.



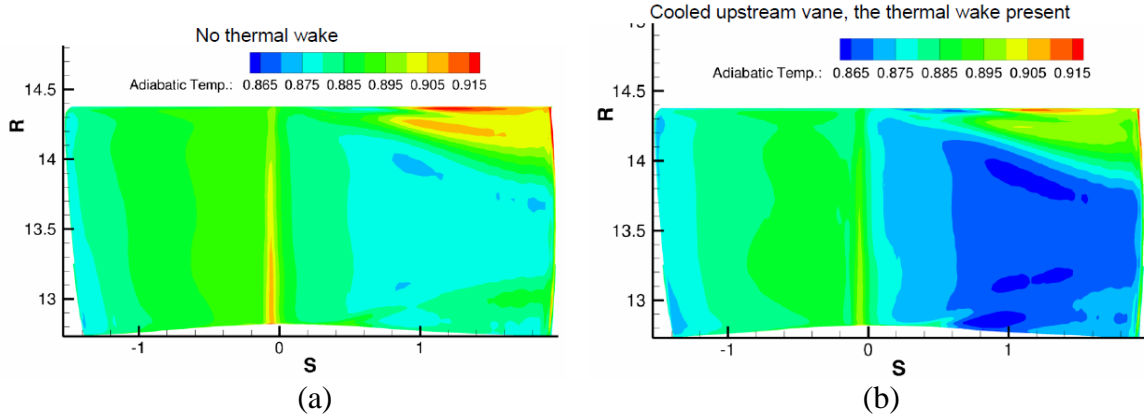
Şekil 2.22. İlk Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Analiz Sonucunda Oluşan Sıcaklık Dağılımı Görseli (Silva vd., 2015).

Ameri vd., (2008) GE E³ motoru ilk kademe güç türbin kanatçığı üzerinde sıcaklık dağılımını bulmak için analizler yapmışlardır. Zamana bağlı olarak birçok yüklemeye maruz kalan türbin kanatçıklarında, akışa bağlı olarak kanatçık yüzeylerinde gözlemlenen ısı taşınım katsayısı değerlerini araştırmışlardır. Sabit kanatçıklardan kaynaklanan akış ayrılmaları sıcaklık dağılımında meydana gelen değişimin başlıca sebebi olarak gösterilmiştir.

URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) modeli ile analizler yapan ekip, tek kanatçığın akış hacmini sayısal analizlerinde kullanmışlardır. Sabit ve döner kanatçıklar arasında 1:1 ve 2:3 oranı için farklı sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir.

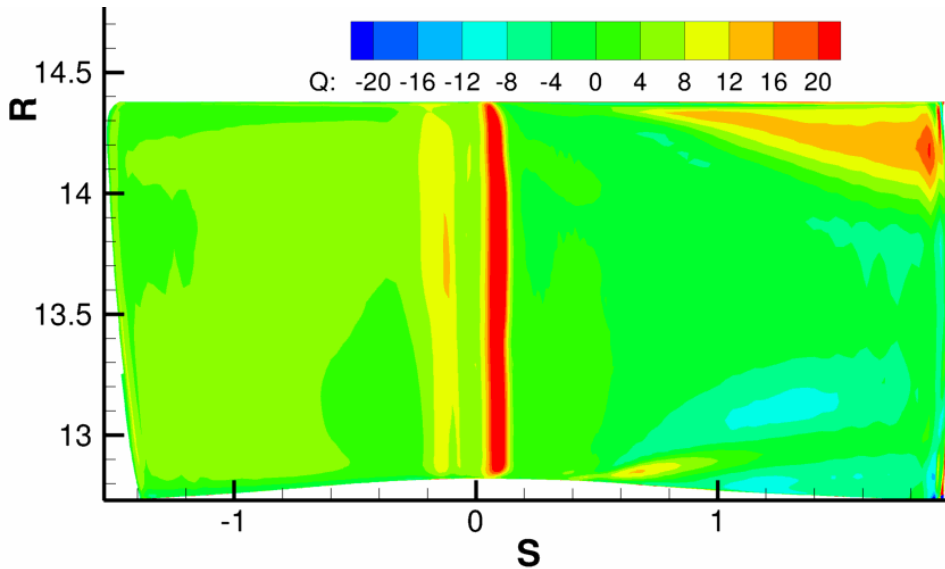
Yazarlar, sabit kanatçıklar için zamandan bağımsız analizler yaparak, akışın ayrıldığı durumları belirlemişlerdir. Bu analiz sonuçlarını döner kanat analizlerinde giriş koşulu olarak kullanan ekip, sabit ve döner kanatçık sayıları arasındaki 1:1 ve 2:3 oranlarına göre, döner kanatçıkların ayrılan akışla karşılaşma sıklıklarını sayısal analizlere dahil etmişlerdir.

Şekil 2.23'te zamandan bağımsız ve zamana bağlı olarak, döner kanatçık üzerindeki ortalama sıcaklık dağılımları görülmektedir.



Şekil 2.23. Döner Kanat Sıcaklık Dağılımları, (a) Zamandan Bağımsız Model, (b) Zamana Bağlı Model (Ameri vd., 2008).

Ameri vd., (2008) ayrıca zamana bağlı ve zamandan bağımsız analizler arasındaki ısı akısı farkını da kontrol etmişlerdir. Şekil 2.24'te iki yaklaşım arasındaki ısı akısı farkı döner kanatçık üzerinde gösterilmiştir.



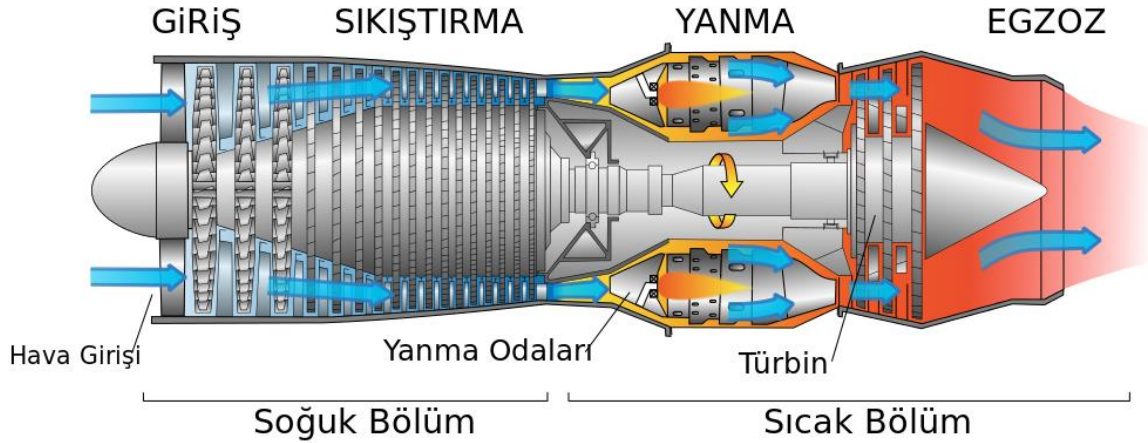
Şekil 2.24. Döner Kanat Üzerindeki Isı Akısı % Farkları (Ameri vd., 2008).

Şekil 2.24'te gösterilen, zamana bağlı ve zamandan bağımsız analizler sonucu elde edilmiş ısı akısı farklarında, zamana bağlı modelin ortalama değerleri özellikle kanatçık ön

bölgesinde zamandan bağımsız modelin sonuçlarından yaklaşık %20 daha fazladır. Ekip çalışmanın sonucunda bu farka dikkat çekerek, sabit kanat üzerinde oluşan akış ayrılmalarının ısı analizlere olan etkisinin önemini vurgulamışlardır.

3. JET MOTORLARI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Gaz türbini, yanma ile açığa çıkan ısı enerjisini mekanik enerjiye çevirmeye yarayan bir makinedir. Bir tür içten yanmalı motor olan gaz türbinlerinde, girişte bulunan kompresör ve çıkışta bulunan türbin arasında yanmanın gerçekleştiği yanma odası bulunur (Şekil 3.1). Atmosferde bulunan taze hava kompresörden geçerken basıncı artırılır. Bu aşamadan sonra yanma odasına giden yüksek basınçlı havanın üzerine yakıt püskürtülür. Üzerine yakıt püskürtülen sıkıştırılmış hava tutuşturularak yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıkta bir akış elde edilmiş olur. Hızla yanma odasından çıkan basınçlı ve sıcak hava türbine gelerek türbini ve dolayısıyla türbinin bağlı olduğu şaftı döndürür. Bu aşamada elde edilen iş, kompresör ve diğer komponentlerin (elektrik jeneratörü) çalışması için gereken gücü sağlar.



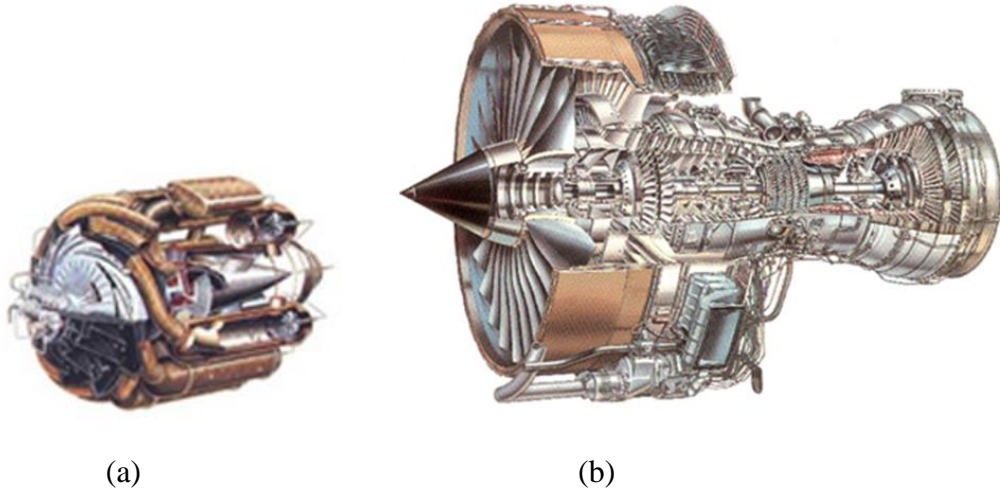
Şekil 3.1. Gaz Türbinli Motor Bölümleri (Anonim, 2017).

Gaz türbinlerinden elde edilen güç uçaklarda, trenlerde, gemilerde, elektrik jeneratörlerinde ve tanklarda kullanılır. M.Ö. 130 yıllarında Heron'un tasarladığı basit buhar türbiniyle ortaya çıkan gaz türbinleri aşağıda yer alan tarihlere yaşanan gelişmelerle günümüzdeki jet motorlarına dönüşmeye başlamıştır

Jhon Barber'ın 1791'de bir gaz türbini için aldığı ilk patent ile başlayan modern gaz türbinlerinin tarihçesi, Franz Stolze'nin Berlin'de başarısız gaz türbini projesi ve ilk aksenal kompresör denemesiyle devam etmiştir. Zaman içinde yaşanan gelişim ve teknolojiye

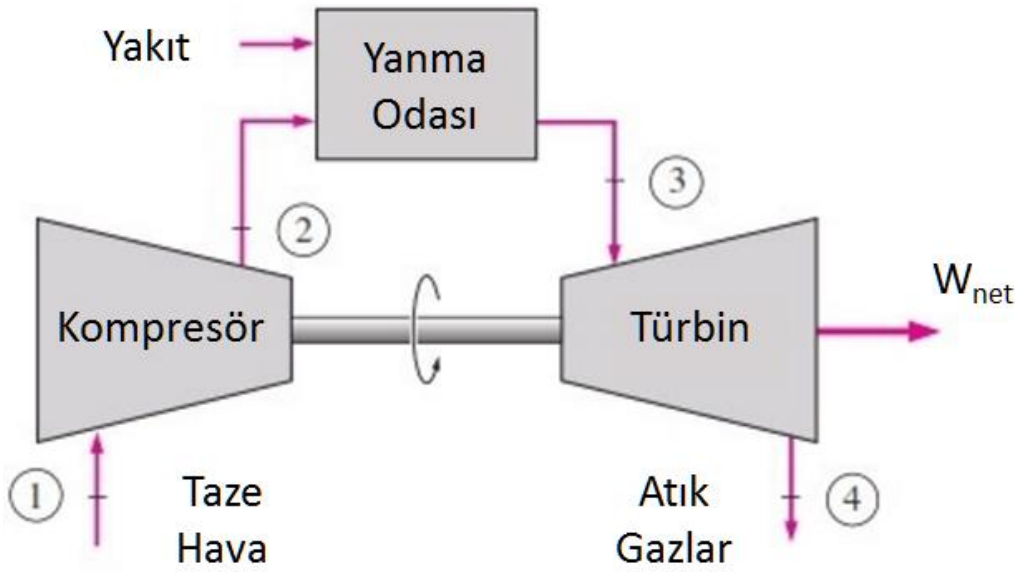
hızlı ilerleme sayesinde, 1939 yılında sadece bir Turbojet gaz türbinli motorundan güç alan ilk uçak olan Heinkel He 178 uçmuştur. Ayrıca aynı yılda İsviçre’de ilk defa enerji elde etmek için gaz türbinleri kullanılmıştır (MIT, 2016).

Yıllar içinde yapılan çalışmalar sonucunda ilk üretilen gaz türbinlerine göre çok daha güçlü, çok daha verimli gaz türbinleri üretmek mümkün olmuştur. Şekil 3.2’de görülen 1941 ve 1990 yıllarında üretilen iki jet motoru arasında görülen boyut farkları çalışmalarda ne kadar ilerlendiğini göstermektedir. Şu anda hava araçlarında kullanılan gaz türbinlerine, turboprop motorlar, turbofan motorlar, turbojet motorlar, turboşaft motorlar örnek gösterilebilir.



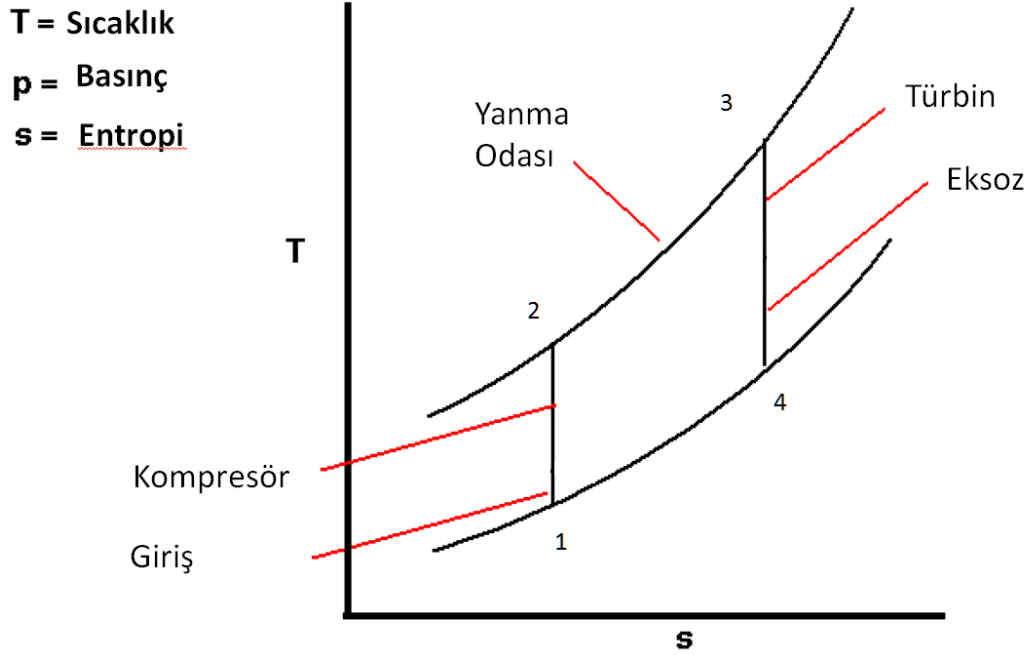
Şekil 3.2. Gaz Türbinli Motorların Zaman İçindeki Değişimi: a)Whittle W-1 (1941), b) Rolls-Royce Trent (1990) (MIT, 2016).

Gaz türbinleri ve diğer gaz akışkanlı güç çevrimleri Brayton Çevrimi prensibine göre çalışmaktadır. Kapalı bir sistem gibi kabul edilebilmesi için egzozdan çıkan gazların ikinci bir ısı değiştiricisinden geçerek tekrar çevrimde kullanıldığı düşünülür. Brayton çevrimi aynı zamanda Joule çevrimi olarak da adlandırılır. 19 yüzyılda George Brayton tarafından patenti alınan çevrimine göre çalışan makinede gaz kompresörü, karışım odacığı, genişletici bulunur.



Şekil 3.3. İdeal Brayton Çevrimi Şeması (Anonim, 2016).

Atmosferdeki hava kompresöre gelir burada izentropik olarak basınçlandırılır. Sıkıştırılmış hava karışım odacığı boyunca ilerler ve yakıtla karıştırılır. Sabit basınçta olan karıştırma işleminden sonra hava yakıt karışımı tutuşturularak genleştiriciye (türbin) enerjisini verir. Genleşme işlemi izentropik bir işlemdir. Yanma sonucu oluşan gazlar dışarı atılır. Genellikle izentropik kabul edilen sıkıştırma ve genişleme işlemleri kayıplardan dolayı izentropik olmaz. Ancak hesaplamalar bu işlemler izentropik kabul edilerek yapılır.

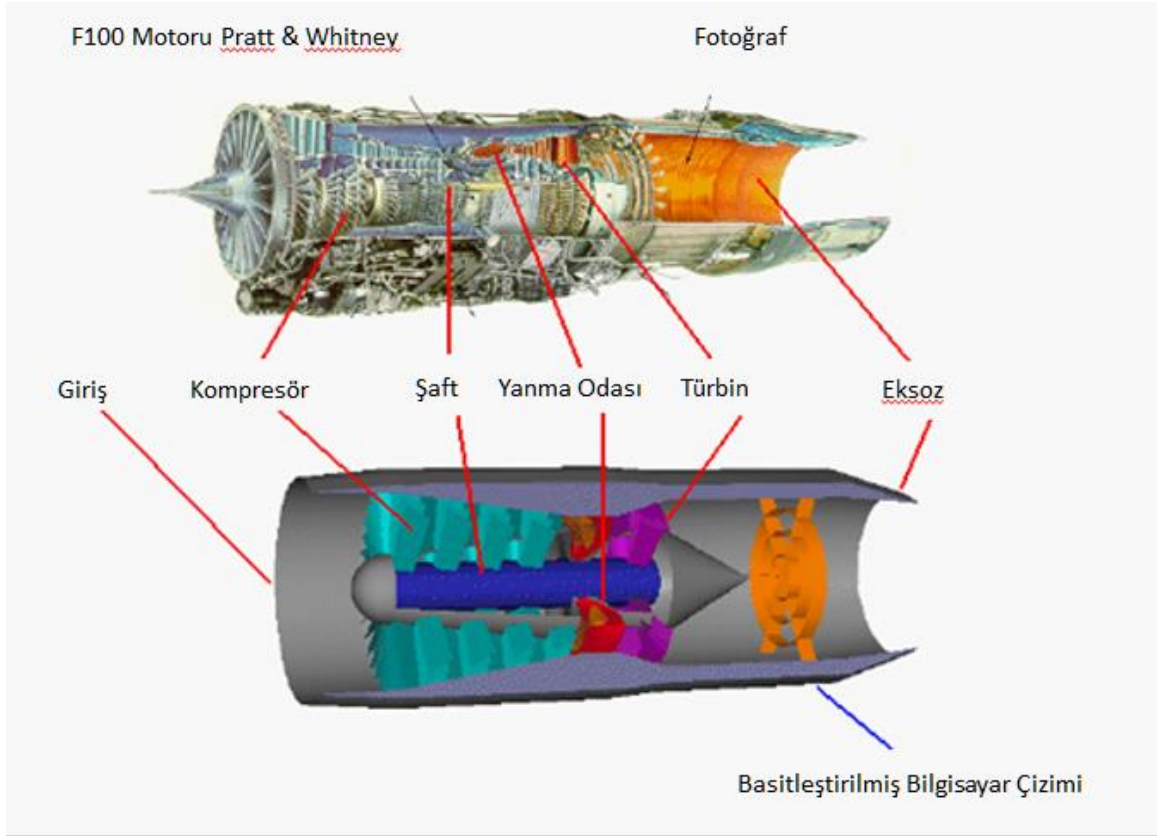


Şekil 3.4. İdeal Brayton Çevrimi sıcaklık-entropi Diagramı. (NASA, 2015)

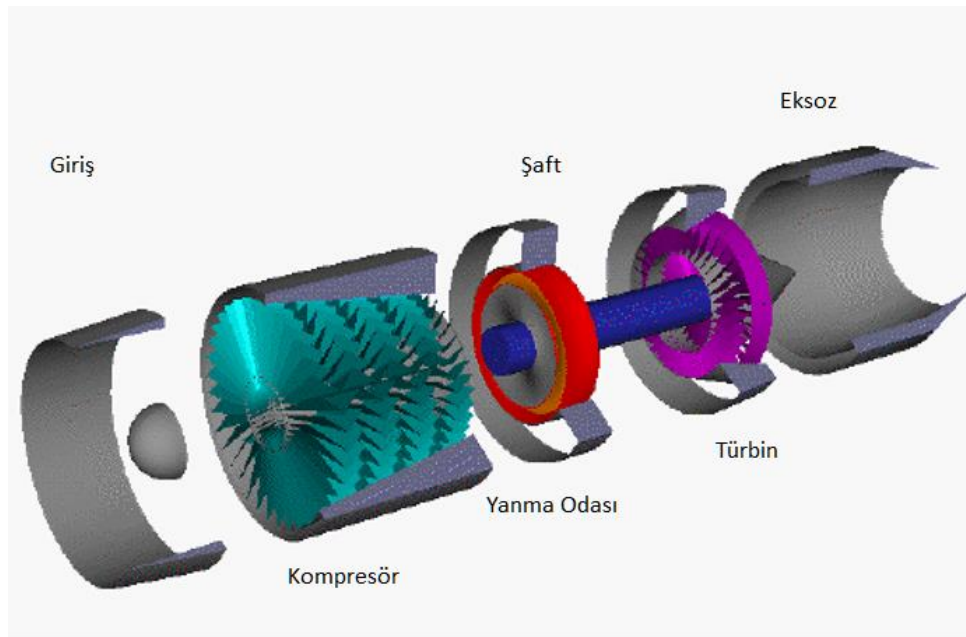
Şekil 3.4'te görülen ideal Brayton çevrimi için çizilmiş sıcaklık-entropi diyagramında; 1 ve 2 arasında, sisteme giren hava kompresörde sıkıştırılır. Bu işlem izentropik sıkıştırma olarak adlandırılır. 2 ve 3 arasında, sıkıştırılmış havaya yakıt karıştırılarak yakılır ve sisteme enerji yüklemesi yapılmış olur. 3 ve 4 arasında ise yüksek basınçlı gazlar türbinde geçirilerek izentropik olarak genişirler.

Çalışma prensibinden bahsedilen gaz türbinli motorlarda ortak olarak 3 temel yapı bulunmaktadır. Bunlar; kompresör, yanma odası ve türbindir.

Şekil 3.5'de bir F100 motorunun basitleştirilmiş görseli verilmiştir. Bu çizimde motorda enerji üretimini sağlayan bölümler olarak kompresör, yanma odası ve türbinden bahsedilebilir. Şekil 3.6'da görülen patlatılmış motor resminde de görülebileceği gibi motora alınan havanın bu bölümleri takip etmesi ve enerji üretiminin sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 3.5. F 100 Motorunun Teknik Çizimi ve Basitleştirilmiş Görüntüsü. (NASA, 2015)

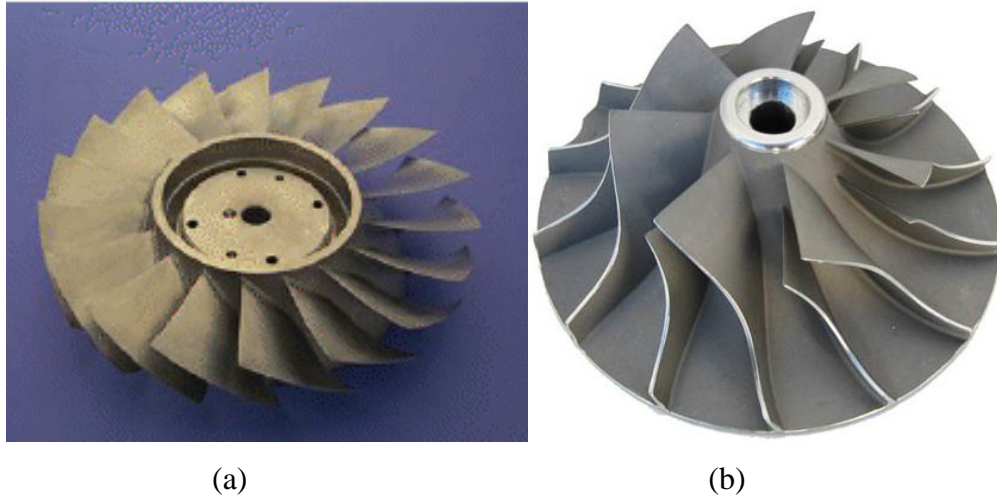


Şekil 3.6. Bir Gaz Türbini Motorunun Basitleştirilmiş ve Patlatılmış Görüntüsü. (NASA, 2015)

3.1. Kompresör

Askeri ya da sivil amaçlarla farklı alanlarda kullanılan çok çeşitli gaz türbinleri olmasına rağmen, bu farklı tasarımların hepsinde bulunan ortak bölümler vardır. Örneğin bütün gaz türbinli motorlarda havayı yanma odasına göndermeden önce sıkıştırarak motorun performansını büyük ölçüde etkileyen kompresör bulunur.

Günümüzde kullanılan kompresörler aksenel ve radyal kompresörler olarak iki şekilde sınıflandırılabilir. Şekil 3.7’de aksenel ve radyal kompresörler görülmektedir.



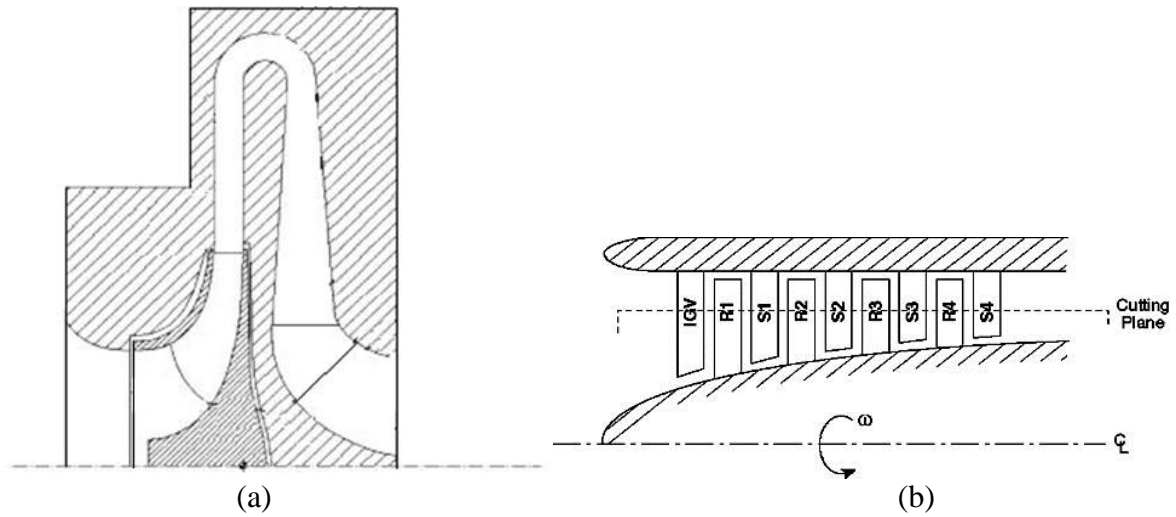
Şekil 3.7. Tek Kademeli Kompresörler: a) Aksenel Kompresör, b) Radyal Kompresör (NASA, 2015).

Aksenel kompresörlerde hava akışı kompresörün dönme eksenine paralel olduğu için bu isimle adlandırılırlar. Radyal kompresörlerde ise hava akışı kompresörden geçerken dönme eksenine göre radyal eksene çevrilir bu yüzden bu şekilde isimlendirilmişlerdir.

Radyal kompresörler ilk üretilen jet motorlarında kullanılmıştır. Günümüzde ise turboşaft motorlarda kullanılmakla beraber roket motorlarında pompa olarak ta kullanılmaktadır. Turbojet ve turbofan gibi daha büyük motorlarda ise aksenel kompresörler kullanılır.

Tek kademe radyal kompresör ortalama 4 oranında basınç artışı sağlayabilirken, tek kademe aksenel kompresörlerde ise bu rakam ortalama 1.2 değerindedir. Ancak aksenel

kompresörlerin çok kademeli olarak tasarımları ve montajları radyal kompresörlere göre çok daha kolay olduğu için aksenal kompresörler daha çok tercih edilir hale gelmiştir. Aksenal kompresörlerde akışın yönü değiştirilmediğinden ardarda konulan kompresör kademeleri beraber çalışabilir. Ancak radyal kompresörlerde akışın yönü dönme eksenine dik olarak değiştirildiği için ikinci kademe kompresöre giden havanın yönünün değiştirilmesi gerekmektedir. Çok kademeli iki radyal kompresör arasında bulunan ve difüzör olarak adlandırılan yapı sayesinde akışın yönü dönme eksenine paralel şekilde değiştirilebilir. Fazladan kullanılan parçalar motordaki ağırlık kriterlerini etkilediğinden radyal kompresörlerin kullanım alanları aksenal kompresörlere göre daha sınırlıdır. Aksenal ve radyal kompresörlerin seri şekilde montajı Şekil 3.8’de görülmektedir.



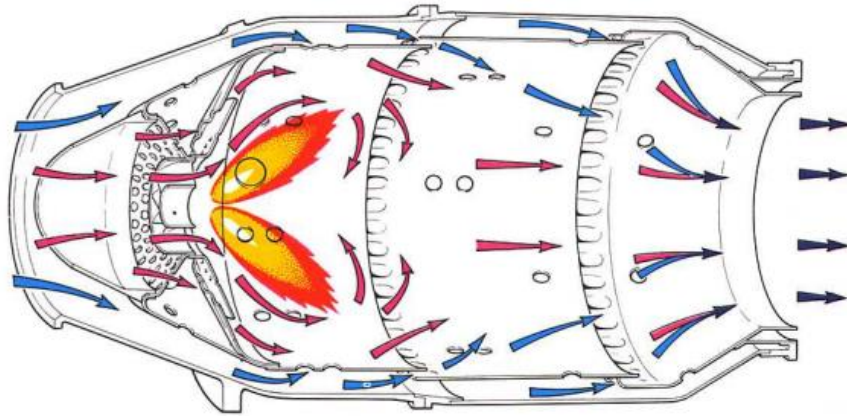
Şekil 3.8. Aksenal Ve Radyal Kompresörlerin Çok Kademeli Montaj Çizimleri a) Aksenal Kompresör (MIT, 2014), b) Radyal Kompresör (Veress ve Braembussche, 2004)

3.2. Yanma odası

Yanma odası, bir gaz türbininde yanmanın meydana geldiği bölümdür. Kompresör tarafından yüksek basınçtaki hava ile beslenen yanma odasında, havanın üzerinde pulvarize bir şekilde yakıt püskürtülür ve yakıt hava karışımının yanması sağlanır.

Yanma odasının esas amacı gaz türbin sistemine enerji girişini sağlamaktır. Sisteme giren enerji sayesinde türbine güç verilir veya egzostan çıkan yüksek basınçlı hava sayesinde itki elde edilir. Gaz türbininin verimini belirleyen parçalardan biri olan yanma odasında verimli çalışma şartları sağlamak için aşağıdaki kurallar göz önüne alınmalıdır:

- Yakıt tamamen yakılmalıdır. Yanmamış yakıt hem güç kaybına hem de çevre kirliliğine yol açar.
- Yanma odasında az basınç düşüşü olmalıdır. Türbinleri çevirebilmek için gereken basınç yanma odasında azalmamalıdır.
- Yanma olayı sadece yanma odası içinde olmalıdır. Türbin kısmına alevin ulaşması bu parçaların kolaylıkla zarar görmesine sebep olmaktadır.
- Çıkış bölgesinde eşit sıcaklık dağılımı oluşturulmalıdır. Eğer yanma odası çıkışında ortalama sıcaklıktan çok daha sıcak noktalar varsa türbinde hasara yol açabilir.
- Tasarlanan yanma odasında elde edilen sıcak gazların sıcaklığı türbinin yapısal olarak dayanabileceği sıcaklıkları aşmamalıdır.



Şekil 3.9. Yanma Odası İçinde Havanın Hareketi (Anonim, 2013)

Şekil 3.9’da görülebileceği gibi yanma odasına alınan havanın tamamı yanmaya katılmaz. Yanma odasındaki parçalarını oluşan alevin yaydığı yüksek ısıdan korumak için, kompresör tarafından yanma odasına gönderilen havanın bir kısmı (yaklaşık yarısı) yanmaya katılmadan soğutma delikleri üzerinden yanma odasına gönderilir. Böylece yanma odasını oluşturan parçaların zarar görmesi engellenir.

Ayrıca yanma odasını oluşturan malzemelerin iç yüzeyleri seramik esaslı malzemelerle kaplanarak içerideki sıcak havanın metal ile direkt teması engellenir. Bu işlem Thermal Barrier Coating (Isıl Engel Kaplamaları) olarak adlandırılır.

3.3. Güç türbini (yüksek basınç türbini)

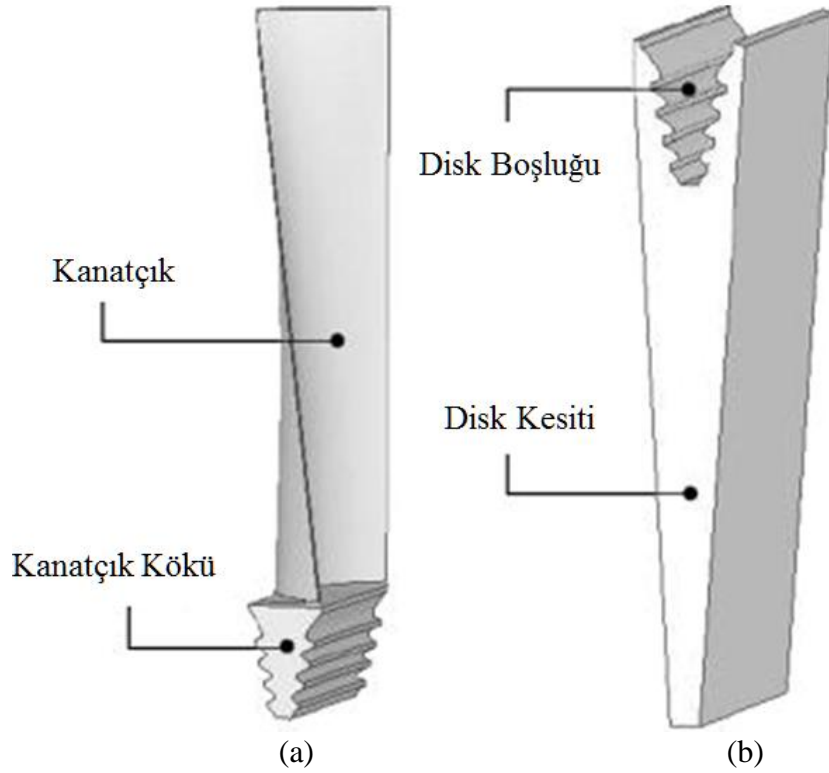
Yanma odasından gelen yüksek basınçlı ve enerjili akışkandan enerjisini alarak kompresörü döndürmek için gereken enerjiyi sağlayan yapıya güç türbini denir. Güç türbinleri birbirini takip eden sıralı kanatçıklardan ve bu kanatları birbirine bağlayan diskten oluşur. Görünüş olarak aksenal kompresörlere benzeyen güç türbinleri kompresörlerin tam tersi şekilde çalışır. Yanma odasından çıkan yüksek basınçlı hava güç türbini kanatçıklarına çarpınca, bu kanatçıklar üzerinde radyal yönde bir itki kuvveti oluşturur. Oluşan kuvvet altında dönmeye başlayan güç türbini shaft yardımıyla kompresörü de döndürerek gaz türbininin çalışmaya devam etmesini sağlar.

Motor çeşidine göre bir ya da birden daha çok güç türbini gaz türbinin içinde bulunabilir. Günümüzde kullanılan jet motorlarının çoğunda birden fazla güç türbini bulunmaktadır.

Güç türbinleri bir gaz türbininde en çok zorlanan kısımlardan biridir. Yüksek dönme hızları nedeniyle yapısal olarak zorlanan güç türbini ayrıca yanma odasından gelen yüksek sıcaklıktaki gazlarla da sürekli temas halinde olduğundan çok yüksek sıcaklıklarda çalışırlar. Bu sebeple güç türbinleri tasarlanırken, çok dikkatli tasarımlar yapılmalı ve malzeme seçiminde bu etkiler dikkate alınmalıdır.

3.3.1. Güç türbini tasarımı

Güç türbinleri yüksek sıcaklıklar altında çalışan ve çalışma sırasında yüksek dönme hızlarından dolayı büyük zorlanmalara maruz kalan parçalardır. Türbinin maruz kaldığı bu zorlu çalışma şartları nedeniyle parça ömürleri kısalmakta ve bu nedenle bir gaz türbininde ömrü en kısa olan parça genelde güç türbini kanatçıkları olmaktadır. Genellikle türbinin disk kısmı sağlam durumdayken kanatçıklar ısıl gerilmeler, yüklemeler, yorulma, sürtünme vb. nedeniyle güvenlik açısından kullanılmayacak kadar zarar görmüş olurlar. Bakım aşamasında sağlam olan disk kısmını değiştirmek fazladan maliyet getireceğinden türbinler disk ve kanatçık şeklinde ayrı ayrı üretilip sonrasında montajlanır (Şekil 3.10). Böylece bakım aşamasında gerekli görülen kanatçıklar değiştirilerek hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlanmış olur.



Şekil 3.10. Bir Güç Türbini Görseli a) Kanatçık ve Kanatçık Kökü, b) Disk Kesit Görseli (Qin vd., 2005).

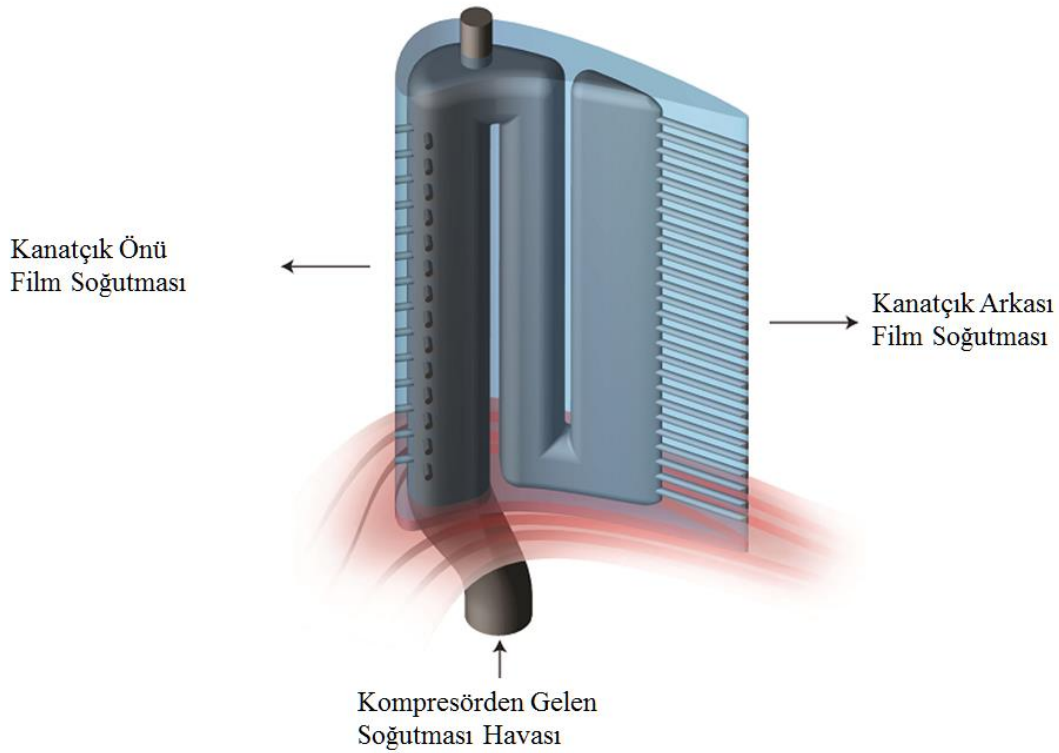
Şekil 3.10'da görüldüğü üzere kanatçığın kök bölgesinde diskin üzerindeki boşlukla uyumlu açılan bir profil vardır. Montaj sırasında kanatçıklar disk üzerine sırayla dizilir ve birbirini tarafından desteklenen bir sistem oluşturulur (Şekil 3.11).

Kanatçık kökündeki bölge kademeli görüntüsüyle ağaca benzetildiğinden, yabancı kaynaklarda bu bölge fırtree (köknar ağacı) adıyla anılır. Kanatçık kök bölgesinde kademeli bir yapının kullanılmasının sebebi, türbinin dönmesi sırasında oluşan merkezkaç kuvvetini kanatçıklardan diske daha eşit bir şekilde aktarabilmek ve böylece oluşabilecek yüksek gerilim bölgelerinden kaçınarak parçaların ömrünü uzatmaktır.



Şekil 3.11: Bir Güç Türbininde Kanatçık Disk Montajı (Kellner, 2015).

Güç türbini tasarımında dikkat edilen bir başka önemli nokta ise sıcak hava ile birebir temasta olan kanatçıkların sıcaktan korunmasıdır. Kanatçıklar dışından geçen çok sıcak hava kanatçıkların kısa zaman içinde aşırı ısınmasına sebep olur. Isınan kanatçıkların yapısal özellikleri azalarak türbinin hedeflenen zamandan çok daha kısa sürede hasar almasına sebep olabilir. Bu riskli durumu ortadan kaldırmak için kompresörde sıkıştırılan havanın bir kısmı motor içindeki soğutma görevini yerine getirmek için motor içerisinde dolaştırılır. Özellikle yanma odası ve türbin gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan bölümlere gönderilen soğutma havası sayesinde metal sıcaklıkları önemli ölçüde düşürülür ve daha uzun süre dayanan modüller tasarlanabilir. Şekil 3.12’de bir türbin kanatçığı içindeki soğutma kanalları görülebilmektedir.



Şekil 3.12. Bir Güç Türbin Kanatçığındaki Soğutma Kanalları. (Bruschewski vd., 2015)

Kanatçığın ön ve arka uçlarından dışarı atılan soğutma havası, kanatçığın geometrisinden dolayı kanatçık dış yüzeylerine yapışarak ilerler. Böylece tüm kanatçık yüzeylerinin soğutulması mümkün olur.

3.3.2. Güç türbinlerinde kullanılan malzemeler

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere güç türbini kısmı bir gaz türbininin en çok zorlanan parçalarındandır. Bu yüzden güç türbininde kullanılan malzemeler bu yüksek zorlanma değerlerine dayanabilmeli, uzun süre bakıma ihtiyaç duymadan çalışabilmelidir.

1940'lı yıllarda süper alaşımların geliştirilmesi ve ilerleyen yıllarda daha etkili malzeme üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasıyla güç türbin kanatlarının ısıya dayanım özellikleri büyük ölçüde geliştirilmiştir. Zaman içinde değişen alaşımlar ve kullanılan çeşitli malzemeler sonucunda, modern türbin kanatlarında, krom, kobalt, ve renyum içeren nikel bazlı alaşımlar kullanılmaktadır.

Son zamanlarda yaşanan gelişmelerden biri olan tek kristal malzemeler (Single Crystal Material) sayesinde sürünme ve yorulmaya karşı daha dayanıklı türbin kanatçıkları yapmak mümkün hale gelmiştir.

Türbin kanatçıklarını yüksek sıcaklıktan korumak için kullanılan bir diğer önlem ise termal bariyer kaplamaların kullanılmasıdır. Türbin kanatçıklarının üzerine kaplanan termal bariyer kaplamalar, hem sıcak hava ile metalin temasını keserek kanatçıkların sıcaklığının düşürülmesine sebep olur hem de kanatçıkların oksitlenme dayanımlarını artırır.

4. YÖNTEM

Zamanla gelişen teknoloji sayesinde, mühendisler hızlanan ve aynı anda daha çok hesaplama yapabilen bilgisayarlar yardımı ile çok daha ayrıntılı analizler yapmaya başladılar. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ve SEM (Sonlu Elemanlar Metodu) yöntemlerini sıkça kullanılmaya başlandı. Uzun bir süre HAD ve SEM ayrı ayrı kullanılsa da, özellikle havacılık alanında bu iki analiz türünün beraber kullanılmasıyla elde edilen AYE analizlerinin kullanımı hızla artmıştır. Takip eden bölümlerde HAD, SEM ve AYE analizlerinin tarihçelerinden ve şu anki kullanım alanlarından bahsedilecektir.

4.1. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Analizleri

Akış içeren problemlerin çözümünde, sayısal analizler ve çeşitli algoritmalar kullanan akışkanlar mekaniği dalına HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) denmektedir ve akışkanların kendi içlerindeki ve etraflarında bulunan yüzeyler ile girdikleri etkileşimlerini (momentum, ısı ve kütle transferi) araştırmakta kullanılır. HAD analizlerinde çözümü yapılmak istenen kontrol hacmi çok sayıda küçük hacme bölünerek (ağ yapısı _ mesh), hesaplamaların yapılabileceği bir matematiksel ağ meydana getirilir. Modele uygulanan sınır şartlarına göre matematiksel model çözülür ve sonuçlar kullanıcıya ulaştırılır.

Son zamanlarda oldukça sık kullanılan HAD ve SEM yazılımlarını geliştiren ve satan ANSYS'in HAD analizleri için geliştirdiği birçok yazılım vardır. Fluent, CFX, POLYFLOW, Forte FLO, AIM bu yazılımlardan birkaçıdır. Bu kadar farklı HAD çözücü kodu olmasının sebebi her bir CFD kodunun farklı alanlarda daha iyi ve doğru sonuçlar vermesi çözümleri farklı algoritmalarından kullanarak elde etmesi ve çözüm sürelerini azaltıp kullanıcıya daha çok özgürlük sunması olarak görülmektedir.

HAD analizlerinin kullanıldığı farklı durumların incelenmesi gerekirse, laminar ya da türbülanslı akışlar, (yaklaşık on adet türbülans modeli ANSYS içinde bulunmaktadır.) sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışlar, akustik analizler, ısı transferi analizleri (iletim, taşınım ve ışınım), çok fazlı akışlar, yanma ve kimyasal tepkime içeren akışlar ve

turbomakine tasarlanmasında kullanılan özel sınır şartları gerektiren akışlar olarak özetlenebilir. (ANSYS, 2016)

4.1.1. HAD yönetici denklemleri

Bu çalışmada bir gaz türbinli motorun güç türbini kanatçıkları için akış analizleri yapıldığından, bu bölümde silindirik koordinatlarda, Newton tipi akışkanın, daimi, sıkıştırılmaz ve türbülanslı akışı için gerekli denklemler aşağıda ifade edilmiştir (Genceli, 2002).

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$v_r = \bar{v}_r + v'_r; v_\theta = \bar{v}_\theta + v'_\theta; v_z = \bar{v}_z + v'_z; p = \bar{p} + p'; T = \bar{T} + T'$$

değerleri kullanıldığında türbülanslı akış için süreklilik denklemi Denklem (4.2)'deki hali almaktadır.

$$\frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} + \frac{\bar{v}_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'de \bar{v}_r , \bar{v}_θ ve \bar{v}_z bileşenleri akışkanın sırasıyla, radyal, açısız ve aksel hızları göstermektedir. Silindirik koordinatlarda sıkıştırılmaz akış için Navier Stokes denklemleri aşağıdaki şekilde bileşenlerine ayrılabilir,

r Bileşeni;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ & = F_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

θ Bileşeni;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ &= F_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_\theta)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (4.4)$$

z Bileşeni;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ &= F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_z)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Enerji denklemi;

$$\begin{aligned} & \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &= k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \\ &+ 2\mu \left\{ \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) \right]^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ &+ \mu \left\{ \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Bu çalışmada kullanılan SST türbülans modeli için türbülans kinetik enerji formülü, Denklem 4.7 ve 4.8'de gösterildiği gibidir (Menter, 1994).

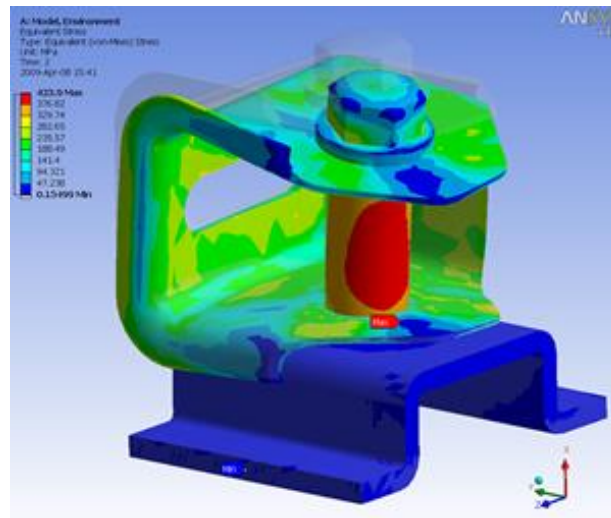
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \rho P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} \\ &= \frac{\lambda}{\nu t} P_k - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 \\ &- F_1) \frac{\rho \sigma \omega_2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.2. SEM (Sonlu Elemanlar Metodu) Analizleri

Sonlu elemanlar yöntemi ya da sonlu elemanlar metodu, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemleri çözmeye kullanılan sayısal bir yöntemdir. Günümüzde ayrıntılı ve karışık mühendislik problemlerinin yüksek doğrulukla çözümünde yaygın olarak kullanılır. Sonlu elemanlar yönteminde analizi yapılmak istenen yapı, birçok küçük parçaya ayrılır (ağ yapısı, mesh). Modelin ağ yapısı hazırlandıktan sonra, model üzerindeki yüklemeler ve sınır şartları (sıcaklık, dönüş etkisi, kuvvet, simetri, vb) programa aktarılır. Büyük bir problemin küçük parçalara ayrılmasıyla oluşturulan Sonlu Elemanlar Metodu, belirlenen yüklemeler ve sınır koşullarını dikkate alarak, oluşturulan ağ yapısında her bir eleman için küçük problemleri çözer. Bu yaklaşımla elde edilen sonuçlarla, çözümün doğruluğu bir miktar azalsa da gerekli ayarlamalar yapılarak doğru sonuçları elde etmek oldukça kolaydır.

Zaman içinde geliştirilen ticari SEM programları da HAD programları gibi çeşitlilik göstermektedir, örneğin günümüzde en çok kullanılan SEM yazılımlarına örnek vermek gerekirse; ABAQUS, HyperMesh, ANSYS, (içerisinde birçok farklı analiz tipi için geliştirilmiş modül bulunmaktadır.) LS_DYNA ve NASTRAN sayılabilir. Şekil 4.1'de Figs firması tarafından yapılmış bir SEM yöntemi analizi görülmektedir.



Şekil 4.1. Figs Tarafından Gerçekleştirilen Bir Flanş Bağlantısındaki Gerilmeleri Gösteren Yapısal Analiz Sonucu. (Figs, 2017)

4.2.1. SEM yönetici denklemleri

Sonlu elemanlar metodu kullanıldığında, sonlu sayıda serbestlik derecesine sahip bir model üzerinde süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (Campbell ve Paterson, 2011).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.9)$$

Denklem 4.9'de, ρ özgül ağırlığı göstermektedir. Ayrıca sonlu elemanlar metodunda momentum denklemi Denklem 4.10'da yazıldığı gibidir.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \bar{\nabla} \cdot \sigma + \rho b \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da u ile gösterilen terim, düğüm noktalarının yer değiştirme değerleridir. b ile gösterilen terim ise yapıya etki eden tüm kuvveti (body force) göstermektedir. $\bar{\nabla}$ ise fark tensörü olarak adlandırılır. Gerilme tensörü olarak adlandırılan σ ise Denklem 4.11'deki gibi açıklanmaktadır.

$$\rho = 2\mu \varepsilon + \lambda \bar{\nabla} \cdot u \quad (4.11)$$

$$\mu = E/2(1 + \nu) \quad (4.12)$$

$$\lambda = \nu E/(1 + \nu)(1 - 2\nu) \quad (4.13)$$

Katılarda ısı iletimi denklemi ise Fourier yasasında olduğu gibi Denklem 4.14'te gösterilmiştir.

$$q = k A dT/s \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'te gösterilen, q iletilen ısı enerjisi miktarını göstermektedir. Isı geçişi olan alan A ile gösterilirken, katının ısı iletim katsayısı k ile ifade edilmiştir. dT ısı iletimi

olan iki nokta arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir. Katının kalınlığı ise s ile gösterilmiştir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (4.15)$$

3 boyutlu ısı iletim denklemi, zamandan bağımsız, ısı üretiminin olmadığı ve katının ısı iletim katsayısının sabit olduğu varsayımı ile Denklem 4.15'te verilmiştir (Anonim, 2017).

4.3. AYE Analizleri

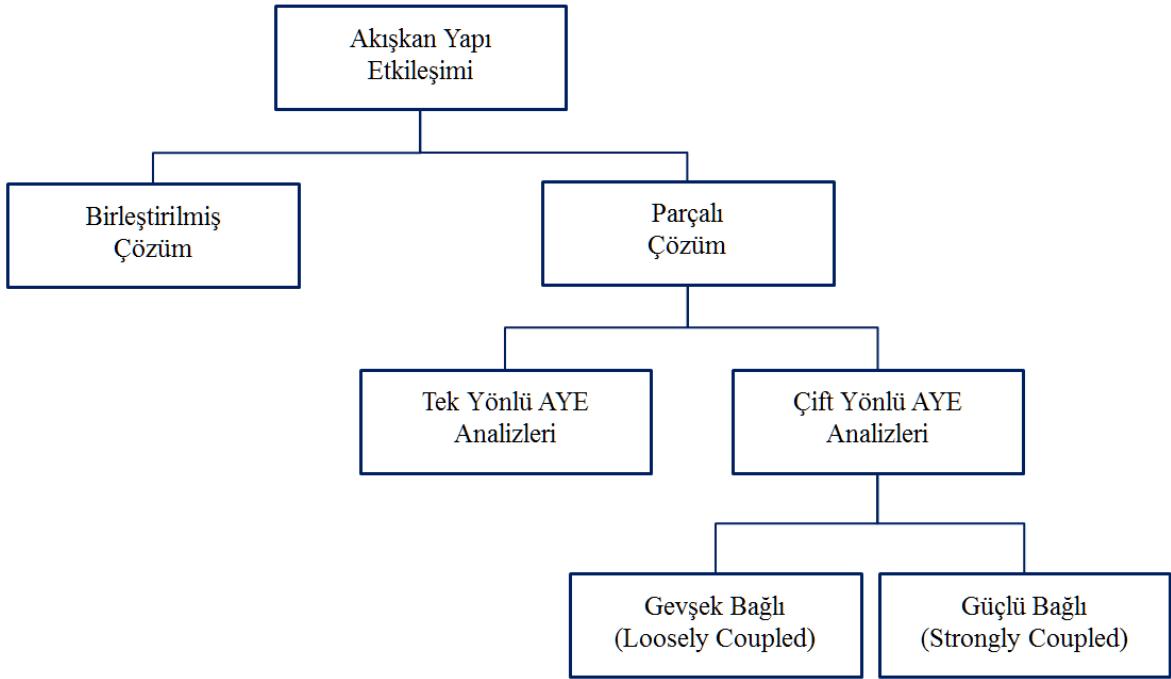
AYE akışkanlar dinamiği ve yapısal mekaniği tanımlayan kanunlar arasındaki bağlantıdır. Bu fenomen, deforme olabilen ya da hareket edebilen yapıların içinden veya etrafından geçen akışkanlarla etkileşiminin incelenmesini sağlamaktadır.

Bir akış yapıyla karşılaştığında, yapı üzerinde gerilme ve gerilimler meydana getirir. Bu gerilme ve gerilimler akışın ve yapının karakteristiğine göre çok büyük veya çok küçük olabilmektedir. (Anonim, 2017)

Akışkan Yapı Etkileşimleri, uçak kanatları, gaz türbinli motorlardaki güç türbini kanatçıkları gibi birçok mühendislik sisteminin tasarımında dikkate alınması gereken bir durumdur.

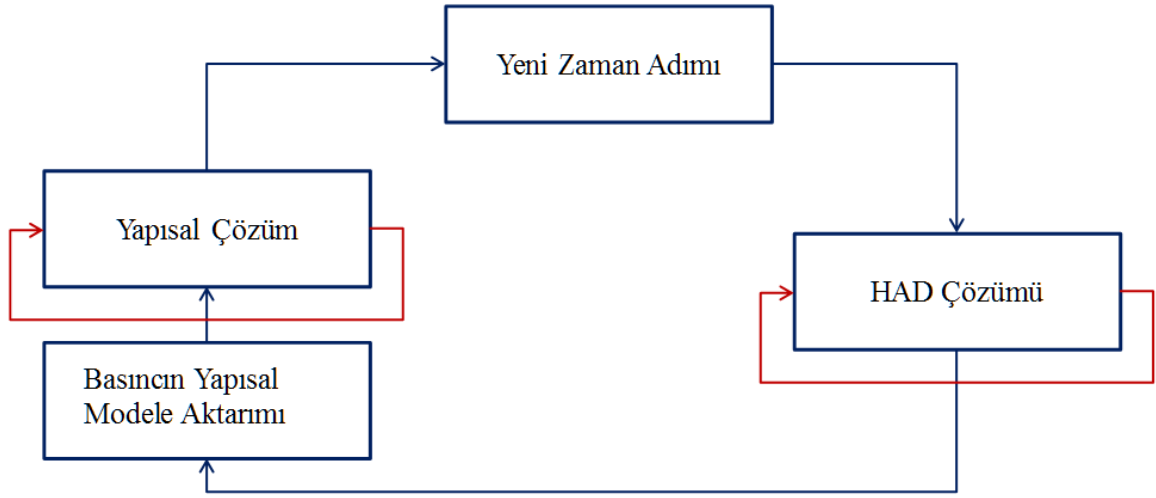
AYE analizlerinin çözümünde izlenilebilen iki ana yöntem vardır. Bu yöntemlerden birincisi birleştirilmiş çözüm (Monolithic Method) olarak adlandırılır. Birleştirilmiş çözüm metodunda yapısal ve akışkan çözücülerinin kullanacağı denklemler ve matrisler, bir araya getirilerek tek bir matris oluşturulur. Oluşturulan büyük matrisin çözülmesiyle HAD ve SEM çözümlerine ulaşılır. Fiziksel olarak gerçeğe en yakın sonuçlar birleştirilmiş çözüm kullanılarak yapılan AYE analizleri sonucunda bulunsa da, analizleri gerçekleştirmek için uzun zaman harcamak gerekmektedir.

Birleştirilmiş çözümlerin uzun sürmesi ve zahmetli olması sebebiyle, parçalı çözüm (partitioned method) daha sık kullanılan bir AYE analiz metodu haline gelmiştir. Parçalanmış çözümde, HAD ve SEM çözücülerini ayrı ayrı çalışarak belirlenen zaman adımlarında analizleri çözerler ve çözümler sonucu elde edilen bilgiyi kullanıcının belirlediği şekilde diğer çözücüye aktarırlar. Şekil 4.2’de AYE analizi çeşitleri gösterilmiştir. Birleştirilmiş ve parçalı çözümlere ek olarak, bu çalışmanın kapsamını oluşturan farklı parçalı çözüm yöntemleri de Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. AYE analizlerinin sınıflandırılması.

AYE analizlerinde parçalı çözüm yöntemi incelendiğinde, ilk olarak tek yönlü AYE analizleriyle karşılaşmaktadır. Tek yönlü AYE analizi, sadece akışkan çözücüsünde elde edilen basınç değerlerinin, yapısal çözücüye aktarıldığı AYE analizi türüdür. Bu tür analizlerde akışın etkisi altında kalan yapının şekil değişimi ihmal edilir. Akış geometrisinin değişmediği kabulüyle yapılan tek yönlü AYE analizleri, yapı üzerinde büyük şekil değişimleri gözlenen durumlarda kullanılmamalıdır. Şekil 4.3’te tek yönlü AYE analizleri için oluşturulan şema görülebilir. Bir analiz zaman adımı için sadece birer kere HAD ve yapısal çözüm yapılır.



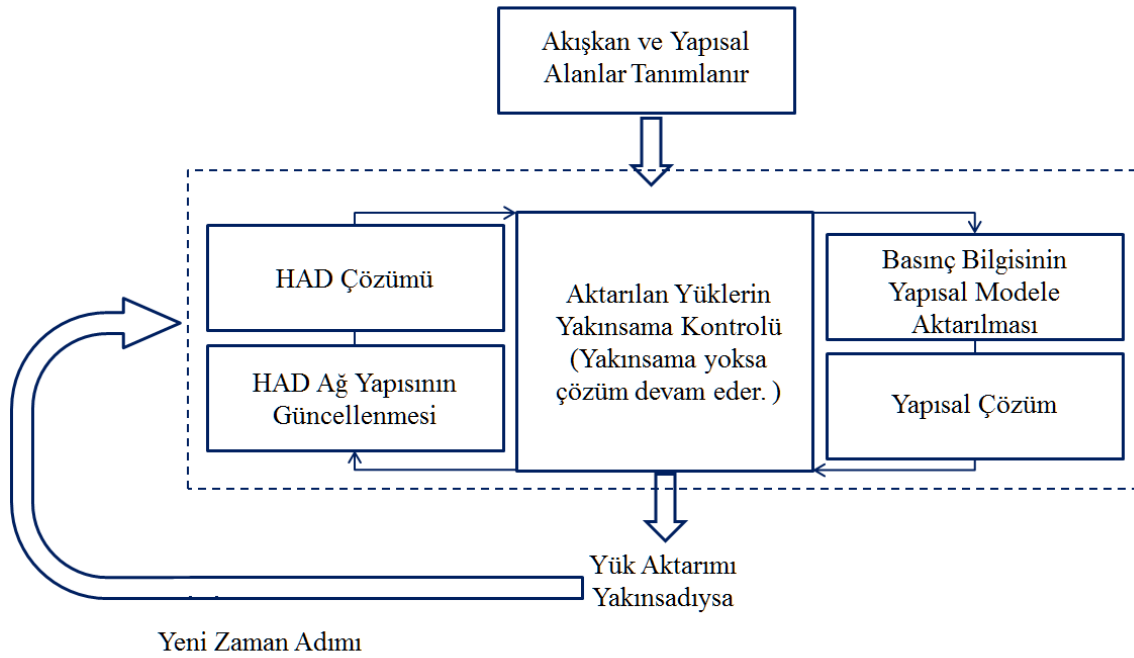
Şekil 4.3 Tek Yönlü AYE Analizi Şeması.

Tek yönlü AYE analizlerinin aksine, çift yönlü AYE analizlerinde akışın etkisi altında kalan yapının, şekil değişimi ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Analiz süresi boyunca, akışın geometrisi yapının geometrisindeki değişime bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple çift yönlü AYE analizlerinde HAD analizleri sonucu oluşan basınçların aktarılmasına ek olarak, yapısal çözüm sonucu ortaya çıkan yapısal modeldeki şekil değişimleri de HAD analizine, her analiz adımı sonrasında aktarılır. Güncellenen akış geometrisini analizlere yansıtılabilmek için her adımdaki HAD analizlerinden önce, yapısal modeldeki şekil değişimlerine bağlı kalınarak HAD ağ yapısı güncellenir. Ağ yapısının güncellenmesi ve her analiz zaman adımı için HAD ve yapısal çözümlerin iteratif olarak çalışması, çift yönlü AYE analiz çözümlerinin uzun sürmesine neden olmaktadır.

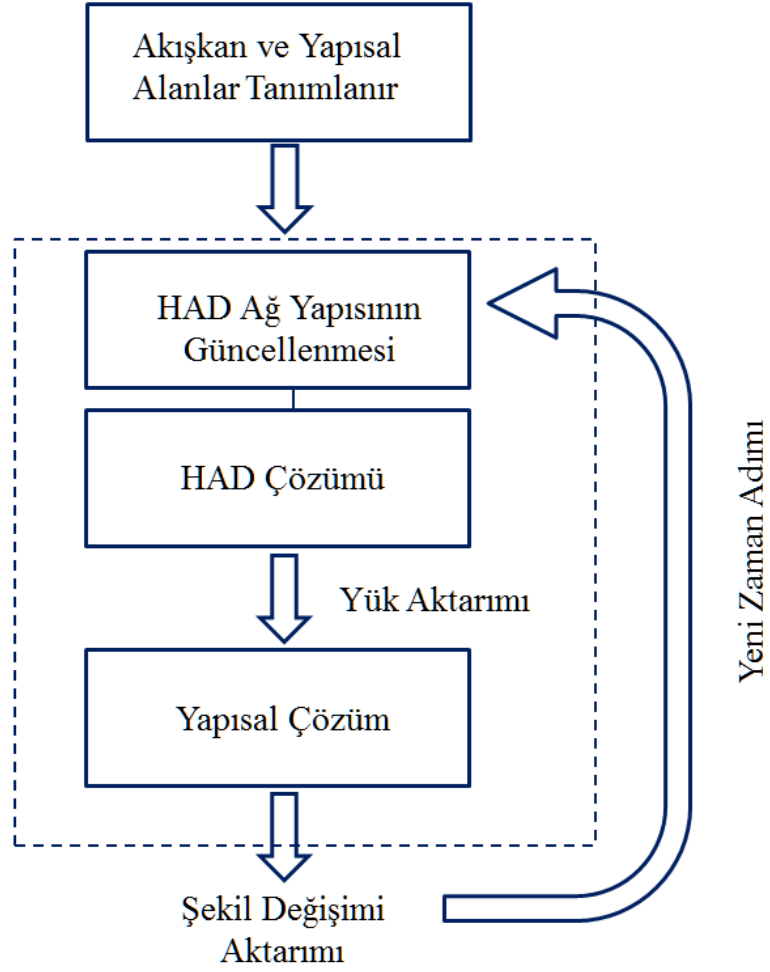
Çift yönlü AYE analizlerinde çözüm başlangıç koşullarındaki HAD analizleriyle başlar. HAD analizi sonucunda elde edilen basınç bilgileri yapısal modele aktarılır ve yapısal model, basınç bilgilerini sınır koşulu olarak kullanarak yapısal modelde meydana gelen şekil değişimini hesaplar. Hesaplanan şekil değişimi değerleri HAD analizlerinde kullanılacak ağ yapısına yansıtılır. Böylece ikinci adımdan itibaren şekil değiştiren yapısal modele uygun şekilde HAD analizleri yapılır.

Çift yönlü AYE analizlerinde akışkan ve yapısal çözümler arasındaki bilgi aktarımı her adımda kontrol edilebilir. İki disiplinde kullanılan ağ yapıları birbiri ile uyumlu olmadığından bu kontrolün yapılması tavsiye edilir. Her adımda çözümler arasında bilgi

aktarımının kontrolü ve yakınsamasının irdelendiği duruma güçlü bağlı çift yönlü AYE analizleri adı verilir. Güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinin çalışma şeması Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Güçlü bağlı çift yönlü AYE analizlerinden farklı olarak bilgi aktarımı kontrolü ve yakınsamasının önemsenmediği durumlarda, aktarılan basınç ve şekil değişimi bilgisi düğüm noktaları arasında interpolate edilir. Bu tarz analizlere gevşek bağlı çift yönlü AYE analizleri adı verilir. Gevşek bağlı çift yönlü AYE analizleri akışkan ve yapı tarafında birbiriyle uyumlu ağ yapıları kullanıldığı durumlarda kullanılmalıdır aksi halde bilgi aktarımı sırasında oluşacak farklar kaçınılmaz olur. Gevşek bağlı çift yönlü AYE analizlerinin çalışma şeması Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Güçlü Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi Şeması.



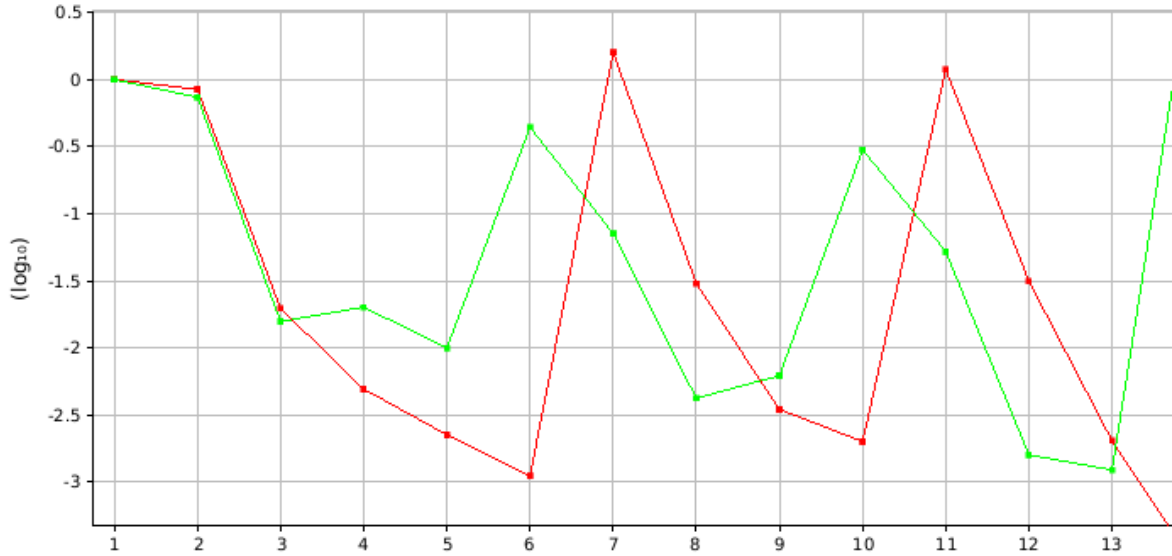
Şekil 4.5. Gevşek Bağlı Çift Yönlü AYE Analizi Şeması.

4.4. Sistemleri Bağlama (System Coupling)

Sistemleri bağlama Ansys Workbench yazılımının içinde bulunan, AYE analizleri gibi birden fazla disiplin kullanılarak yapılan analizlerde kolaylık sağlayan bir yazılımdır. AYE analizlerinden örnek vererek ilerlemek gerekirse, HAD ve SEM analiz kurulumları tamamlandıktan sonra, sistemleri bağlama kullanılarak, analiz süreleri, analiz adım zamanları, bilgi aktarımının yapılacağı bölgeler ve paylaşımı yapılacak bilgi çeşitleri belirlenebilir.

Sistemleri bağlama yazılımı içinden gerekli ayarlamaları yaptıktan sonra, analiz başlatılabilir ve analiz sonuçları takip edilebilir. Şekil 4.6'da sistemleri bağlama kullanılarak yapılmış bir AYE analizinin çözümü sırasında oluşan grafik görülmektedir.

Grafikte yeşil ile gösterilen çizgiler HAD analizi sonucunda oluşan basınç dağılımının yapısal tarafa aktarımındaki yakınsama değerlerini gösterirken, kırmızı çizgiler ise yapısal analiz sonucunda hesaplanan şekil değiştirme değerlerinin HAD analizine aktırıldığı sıradaki yakınsama durumunu gösterir. Yatay eksen de ise bağlanmış analizlerin kaçınıcı itersasyonda bulunduğu gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Sistemleri Bağlama Ekranındaki Yakınsama Görşeli.

4.4.1. Sistemleri bağlama yönetici denklemleri

Çift yönlü ve güçlü bağlı AYE analizlerinde önceden bahsedildiği gibi akışkanlar tarafı ve yapısal taraf arasında her analiz adımı sırasında bilgi aktarımı olmaktadır. Ancak iki disiplinde kullanılan ağ yapıları farklı olduğundan aktarılan bilginin ne kadar doğru aktarıldığı kontrol edilmelidir. Bu yüzden sistemleri bağlama yazılımı güçlü bağlı ve çift yönlü AYE analizleri çözdürülürken bilgi aktarımındaki değişiklikleri kontrol eder ve eğer bu değişiklikler belirlenen değerlerin altına düşmez ise analiz devam etmesine izin vermez. Yazılım bilgi aktarımı sırasındaki yakınsama kontrolünü aşağıda gösterilen 4.16, 4.17 ve 4.18 numaralı formüller ile yapar (ANSYS, 2017).

$$\Delta_l = \frac{1}{\omega} (\varphi_l^i - \varphi_l^{i-1}) \quad (4.16)$$

Denklemler 4.16'da, ω rahatlatma parametrelerini (under relaxation factor) göstermektedir. Bilgi aktarımı yapılan değişkenin değeri φ ile gösterilirken, l bilgi aktarımının yapılacağı konumu göstermektedir. i ise çözümler arasında bilgi aktarımının yapıldığı iterasyon numarasını göstermektedir. Δ_l değeri ise aktarılan verinin iki iterasyon arasındaki değişimini göstermektedir.

$$\hat{\Delta}_l = \frac{\Delta_l}{((\max|\varphi| - \min|\varphi|) + |\bar{\varphi}|) * 0.5} \quad (4.17)$$

Denklemler 4.17'de ise, $\hat{\Delta}_l$ değeri iki başarılı iterasyon arasındaki değerin normalize edilmiş halidir. Aktarımı yapılan değerlerin en yüksek ve en düşük durumları arasındaki fark ile aktarımı yapılan değerlerin ortalaması toplanır ve yarıya alınır. Denklemler 4.16'da bulunan iterasyonlar arası değişim değeri hesaplanan değere bölünerek, normalize edilmiş değişim değeri bulunmuş olur.

$$RMS = \sqrt{(\hat{\Delta}_l)^2} \quad (4.18)$$

Normalize edilmiş değişim değerinin, karesi ve ardından karekökü alınarak sistemler arası aktarılan değeri yakınsaması kontrol edilir.

5. GÜÇ TÜRBİNİ KANATÇIKLARI ÜZERİNDE AYE ANALİZLERİ

Bu bölümde, güç türbini kanatçıkları üzerinde AYE analizleri gerçekleştirerek, farklı türdeki AYE analizleri sonucunda, elde edilen sayısal değerler karşılaştırılmıştır. Sayısal analizleri gerçekleştirirken kullanılacak geometriler, sınır şartları ve analiz sonuçları yer almaktadır.

Bu çalışmada birbirini takip edecek şekilde dört farklı AYE analizi yapılmıştır. İlk analiz döner kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımını bulabilmek için yapılan tek yönlü AYE analizidir. HAD analizi sonucunda kanatçık geometrisi üzerindeki sıcaklıklar bulunarak, bundan sonra kurulacak olan sayısal modellere bulunan sıcaklıklar uygulanmıştır.

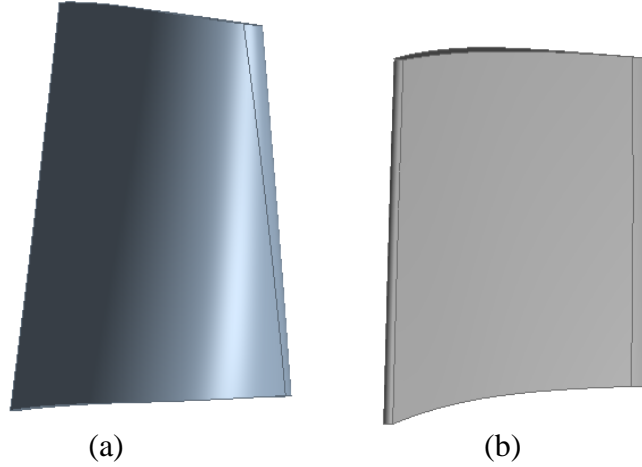
İkinci sayısal model çalışması olarak, sabit ve döner kanat üzerinde tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilmiştir. HAD analizi sonucunda bulunan basınç dağılımı, yapısal modelde döner kanatçık üzerine uygulanarak, kanatçığındaki şekil değişimleri hesaplanmıştır.

Üçüncü olarak, sabit ve döner kanattan oluşan model üzerinde, çift yönlü ve güçlü bağlı AYE analizi gerçekleştirilmiştir. HAD ve SEM çözücülerinin birbirine bağlı olarak, her adımda birbirine bilgi aktararak çalışmasıyla çözülen sayısal model sonucunda, döner kanatçık geometrisi üzerindeki şekil değişimi hesaplanmıştır. Hesaplanan değer ikinci analiz adımıda yapılan tek yönlü AYE analiz sonucuyla karşılaştırılmış ve aradaki fark hesaplanmıştır.

Döner kanatçığın sabit kanatçığa göre bulunduğu açısız konum döner kanatçık üzerine gelen basınç değerlerini değiştirmektedir. Bu sebeple döner kanatçığın farklı açısız konumlarda olduğu birden fazla HAD analizi gerçekleştirilmiş olup, bu analizler sonucu bulunan basınç dağılımları, yapısal modeller üzerine uygulanmıştır. Tek yönlü AYE analizleriyle döner kanatçığın farklı konumlardaki analizleri yapılmıştır. Bu yaklaşım çalışmadaki dördüncü analizi oluşturmaktadır.

Gerçekleştirilen dört sayısal analizde aynı kanat geometrileri kullanılmıştır. Şekil 5.1’de analizleri yapılan kanat geometrileri görülmektedir. Oluşturulan geometride 41 adet

sabit kanatçık ve 57 adet döner kanatçık bulunmaktadır. Aynı kanat geometrisinin kullanılması ve kanat diziliminin periyodik olması nedeniyle bir tane sabit ve bir tane döner kanatçık ile kanatçıkların etrafındaki akış hacimleri analiz edilmiştir.



Şekil 5.1. Sayısal Analizlerde Kullanılacak Üç Boyutlu Model, (a) Döner Kanatçık, (b) Sabit Kanatçık.

Sabit ve döner kanatçıkların dönme eksenine en yakın uzaklıkları 111 mm olarak kabul edilmiştir. Sabit kanatçıkların uzunluğu yaklaşık 26 mm iken döner kanatçıkların uzunluğu yaklaşık 30 mm olarak alınmıştır.

5.1. Sınır Koşulları

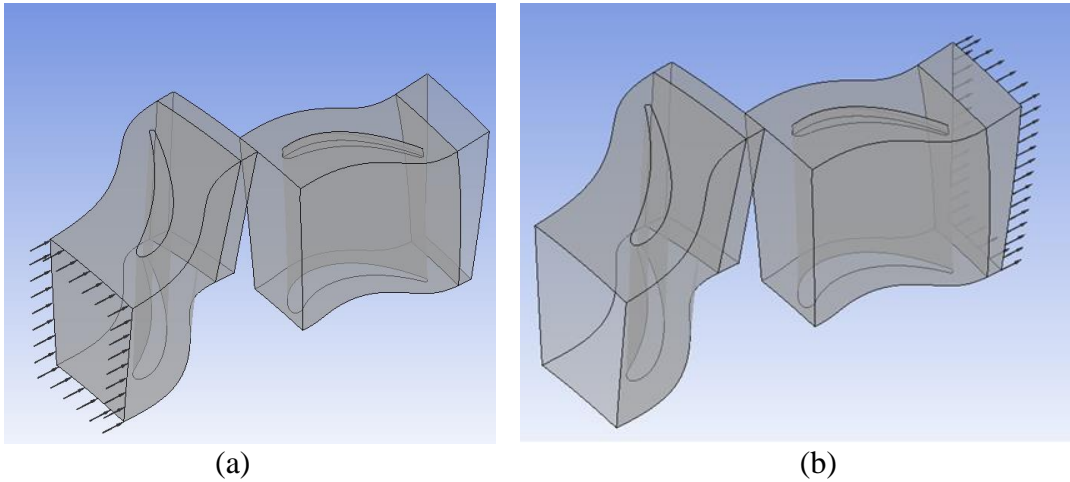
Analizlerde giriş sınır şartı olarak sabit toplam basınç ve sıcaklık sınır şartları kullanılmıştır.

Giriş sınır şartları Şekil 5.2 (a)'da gösterilmiş olan yüzeyde sabit toplam basınç ve sıcaklık dağılımı olarak verilmiştir. Sabit toplam basınç sınır şartı için $P_{in} = 259657$ Pa alınmıştır. Analizlerde çıkış sınır koşulu olarak $\dot{m} = 0,059280$ kg/s kütleli debi değeri uygulanmıştır. Bu değer tüm motor için hesaplanan yaklaşık $\dot{m} = 3,38$ kg/s debi değerinin 1/57'sine denk gelmektedir. Toplam elli yedi tane döner kanatçıktan, bir tanesi modellendiğinden toplam debi miktarının da aynı oranda azaltılması gerekmektedir. Şekil 5.2 (b)'de çıkış sınır koşulunun uygulandığı yüzey görülmektedir.

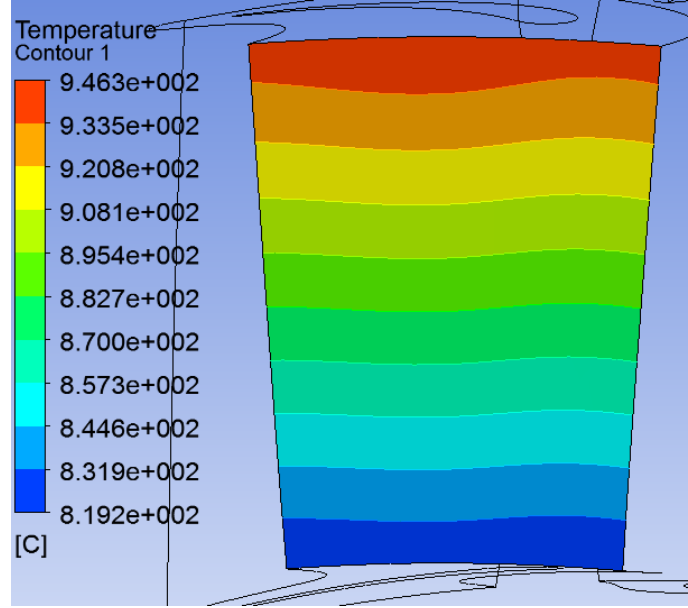
Girişteki sıcaklık dağılımı için ise Denklem 5.1 kullanılmıştır. Uygulanan sıcaklık sınır şartı sonucu giriş yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Giriş yüzeyi boyunca sıcaklık yaklaşık 827 ve 927°C aralığında değişmektedir.

$$(1100 + (Radius - 0.110 [m]) * 5000 / 1 [m]) [K] \quad (5.1)$$

Ayrıca döner kanat akış hacminin 23000 devir/dakikalık hızla döndürüleceği HAD yazılımına girdi olarak girilmiştir. Bu sınır şartının analizlerde kullanılmasının sebebi, dönme etkisiyle akışta meydana gelecek sapmanın da analizler sonucunda görülmek istenmesidir.

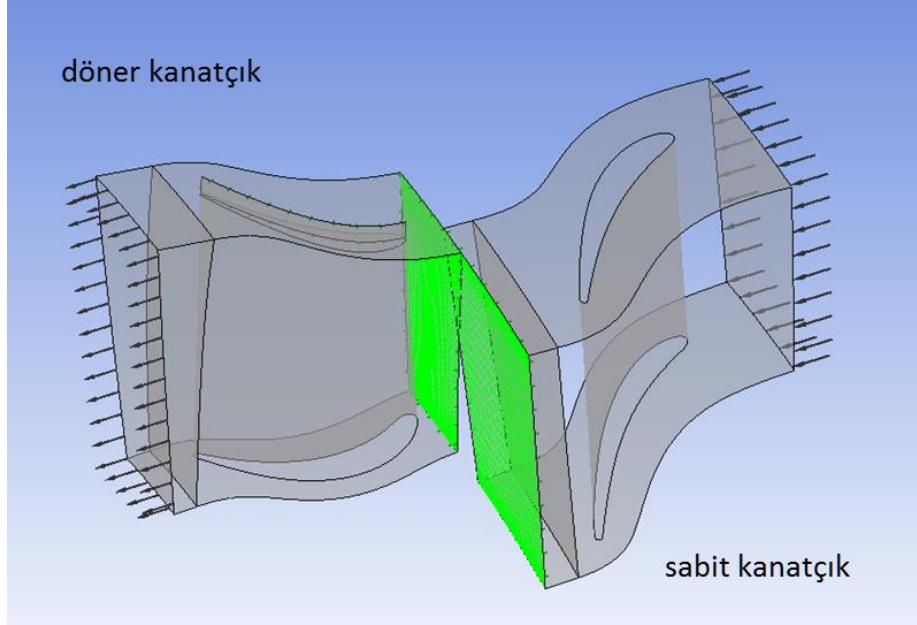


Şekil 5.2. Şekil 5.2.HAD Analizlerinde Kullanılan Sınır Koşulları (a) Giriş Sınır Koşulu, (b) Çıkış Sınır Koşulu.



Şekil 5.3. HAD Analizlerinde Kullanılan Sıcaklık Sınır Koşulu Değerleri.

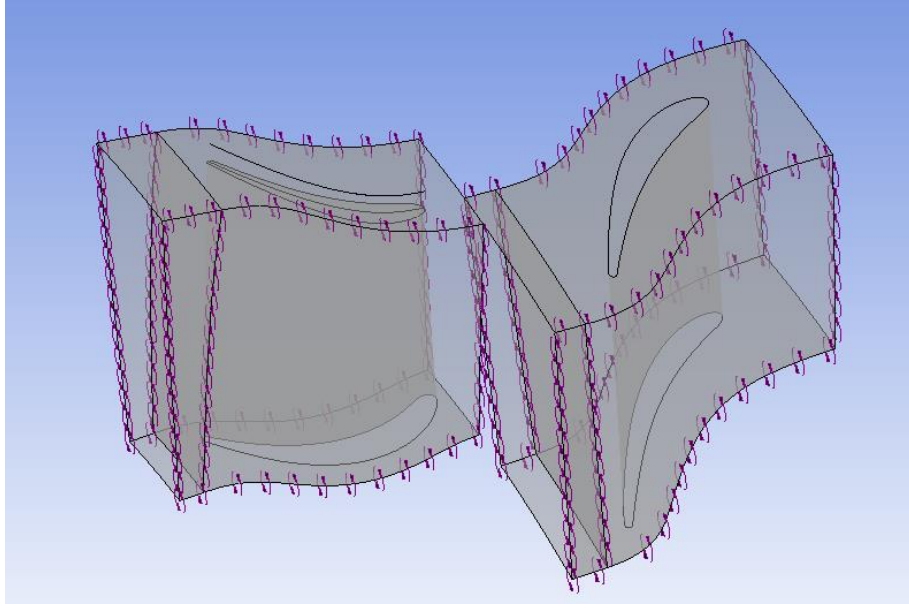
Sabit ve döner kanatçık sayıları eşit olmadığından, kanatçıkların etrafındaki akış hacimleri de birbirinden farklıdır. Sabit kanatçık akış hacminden döner kanatçık akış hacmine geçerken, bahsedilen hacim farklarını analize yansıtmak ve iki kanatçığın akış hacimlerini birbiriyle bağlantılı hale getirebilmek için, sabit kanatçığın akış hacminin bitişi ile döner kanatçık akış hacmi başlangıcı arasında ara yüz tanımlanmıştır. Böylece gerçek fiziksel durumda olduğu gibi sabit kanatçıktan gelen akış döner kanatçığa aktarılabilir. Bu ara yüzde ayrıntılarını yakalamakta daha iyi olan 'mixing plane' seçeneği kullanılmıştır. Şekil 5.4'te sabit ve döner kanatların akış hacimleri arasındaki ara yüz yeşil renkte gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Sabit Ve Döner Kanatçıkları Arasındaki Ara Yüz Bölgesi Görseli.

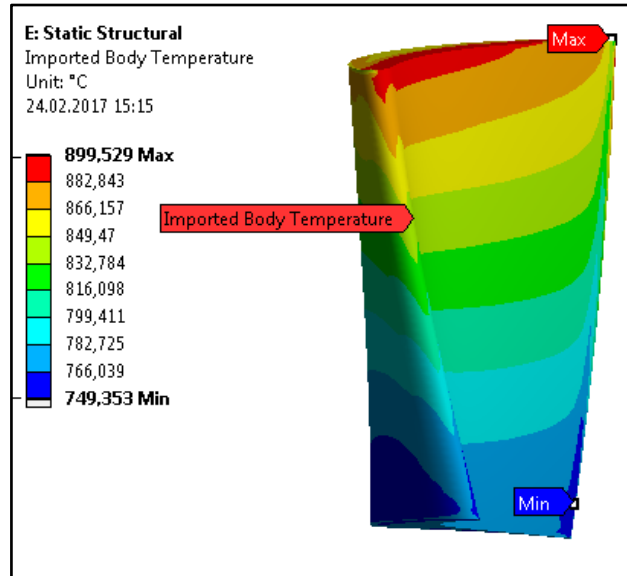
Giriş, çıkış ve ara yüz sınır koşullarına ek olarak, duran ve dönen kanatçıklar için tanımlanan periyodik ara yüz sınır şartı sayesinde, akış hacimlerinin periyodik olarak tekrar ettiği çözücüye tanımlanmıştır. Şekil 5.5’de sabit ve dönen kanatlar için oluşturulan periyodik ara yüz sınır koşulu gösterilmiştir.

HAD analizlerinde türbülans modeli olarak ‘Shear Stress Transport (SST)’ modeli kullanılmıştır. Literatürde benzer çalışmalarda (Doğan, (2014), MacPhee ve Beyene, (2015)) bu modelin kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca bu model akış ayrılmalarının çözümünde daha doğru sonuçlar verdiği için de tercih edilen bir modeldir. SST türbülans modeli $k-\omega$ ve $k-\epsilon$ türbülans modellerinin güçlü oldukları durumlarda yer değiştirerek kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır.



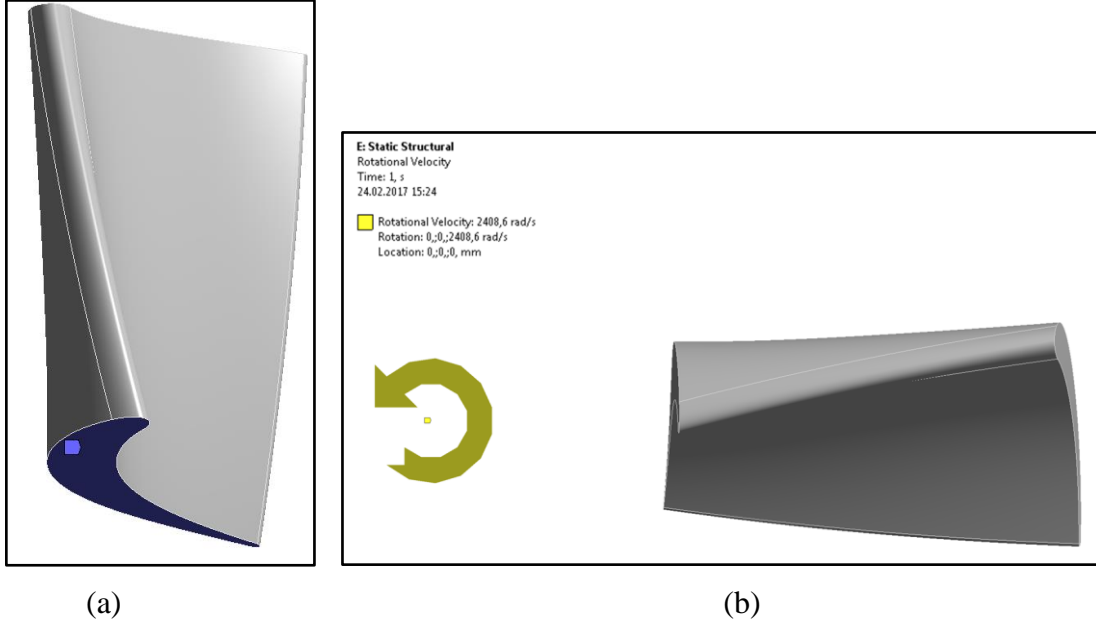
Şekil 5.5. Sabit Ve Döner Kanatçıklardaki Periyodik Ara Yüz Gösterimi.

Yukarıda açıklanan sınır koşulları için HAD analizleri yapılmıştır. Yapılan HAD analizlerinden elde sonuçlar SEM analizlerini yapabilmek için kullanılmıştır. HAD analizleri sonucunda döner kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 5.6' da görülmektedir. Şekil incelendiğinde döner kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı 750 °C ile 900 °C arasında değiştiği tespit edilmiştir.



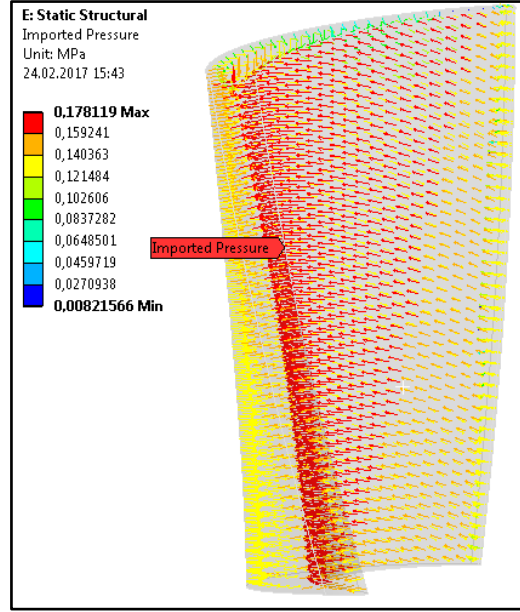
Şekil 5.6. Döner Kanatçık Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı.

SEM analizlerinde kanatçık, alt yüzeyinden sabitlenerek çözümler alınmıştır. Ancak kanatçığın dönme etkisini modele dahil edebilmek için, 23000 devir/dakika dönme hızı döner kanatçığa uygulanmıştır (Şekil 5.7).

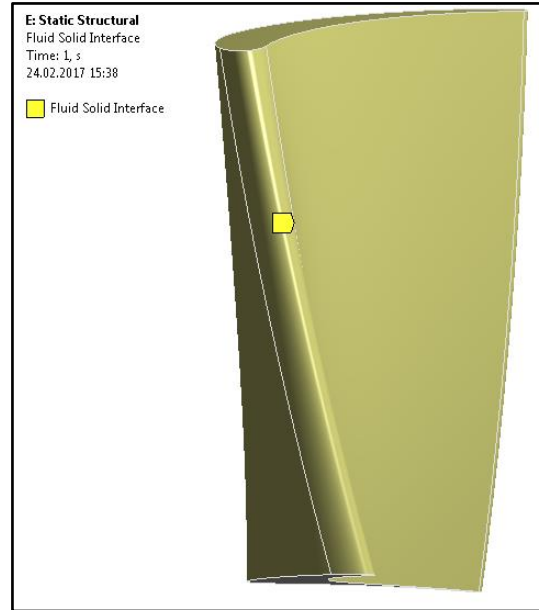


Şekil 5.7. Döner Kanatçık Sınır Koşulları (a) Döner Kanatçığın Sabitlendiği Yüzey, (b) Dönme Sınır Koşulu.

SEM analizlerinde buraya kadar anlatılan sınır koşulları her analiz için aynı şekilde uygulanmıştır. Ancak SEM yazılımının HAD yazılımıyla olan bilgi aktarımı yapılacak AYE analizi çeşidine göre değişmektedir. Tek yönlü AYE analizlerinde HAD analizinde hesaplanan basınç dağılımı direk olarak SEM yazılımına aktarılırken, çift yönlü AYE analizlerinde ise bilgi aktarımı karşılıklı olduğundan SEM yazılımı içinde bilgi aktarımının sağlanacağı bölgeler belirtilmelidir. Şekil 5.8’de tek yönlü AYE analizlerinde kullanılacak olan bilgi aktarımı sınır şartı gösterilmiştir. Çift yönlü AYE analizleri için akışkan yapı ara yüzü (Fluid Solid Interface) sınır şartı kullanılmalıdır. Şekil 5.9’da ise çift yönlü AYE analizleri için gerekli akışkan yapı ara yüz şartı gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Tek Yönlü AYE Analizlerindeki Basınç Aktarım Sınır Koşulu.

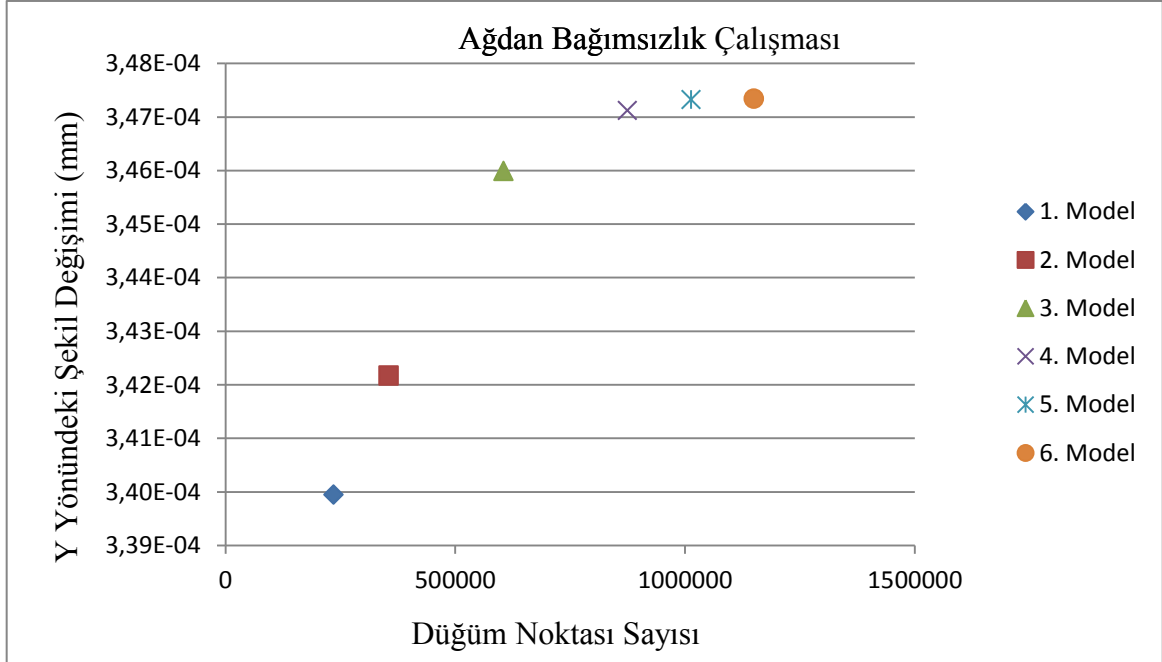


Şekil 5.9. Çift Yönlü AYE Analizleri İçin Akışkan Yapı Ara Yüzü Gösterimi.

5.2. Ağ Yapısından Bağımsızlık

Ağdan bağımsızlık, bir sayısal analiz sonucu elde edilen sayısal çözümün, ağ yapısı ayrıntılarına, hücre ve düğüm noktası sayısına göre değişiminin kontrolüdür. Sayısal analiz esnasında farklı sayıda hücre içeren ve farklı kalitede ağ yapısı ile çözümler tekrarlanarak farklı sonuçlar elde edilip edilmediği kontrol edilmelidir. Bu kontrolü yapabilmek için aynı geometrik modelde, farklı yoğunluklarda ağ yapılarının oluşturulması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada TurboGrid yazılımı kullanılarak dörtgen elemanlar ile oluşturulan farklı ağ yapıları için, sadece döner kanat üzerinde tek yönlü AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, en doğru sonucun elde edilebileceği en az sayıda hücre içeren model araştırılmıştır. Şekil 5.10'da oluşturulan farklı ağ yapılarının düğüm noktası sayıları ve şekil değiştirme sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.10. Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları.

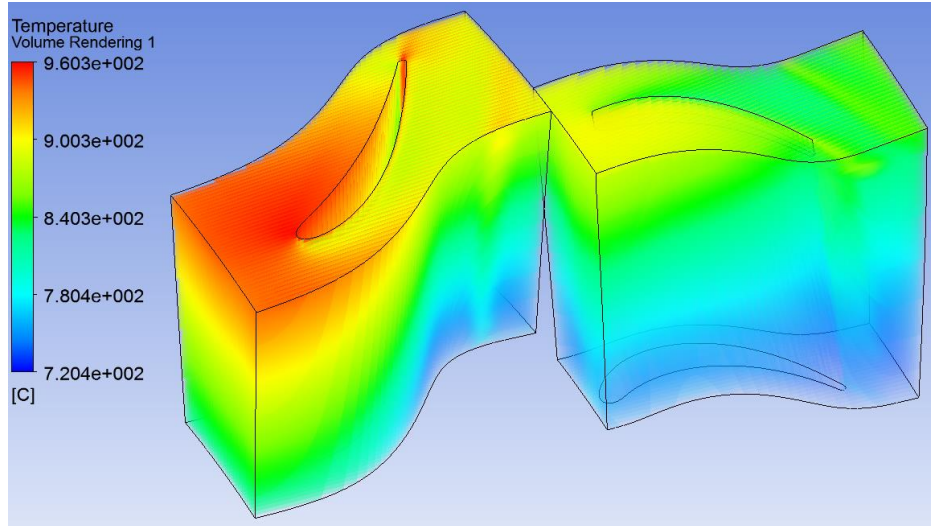
Şekil 5.10'da gösterilen grafik farklı ağ yapısındaki modellerin sonuçlarını göstermektedir. Modellerdeki düğüm noktası sayısı arttıkça, y yönündeki şekil değişimi

değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle ilk üç model için sonuçlar oldukça farklı çıkmaktadır. Ancak 4, 5 ve 6. Modellerin sonuçları birbirine oldukça yakındır. Bu sebeple, bu üç modelden en az hücre ve düğüm noktasına sahip olan model 4 uygun ağ yapısı olarak seçilmiştir. Model 4'te yaklaşık 880000 düğüm noktası ve 830000 hücre vardır. Sabit kanatçık akış hacmine de model 4'te kullanılan ağ yapısı özellikleri ile sayısal ağ oluşturulmuş ve takip eden analizler bu ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

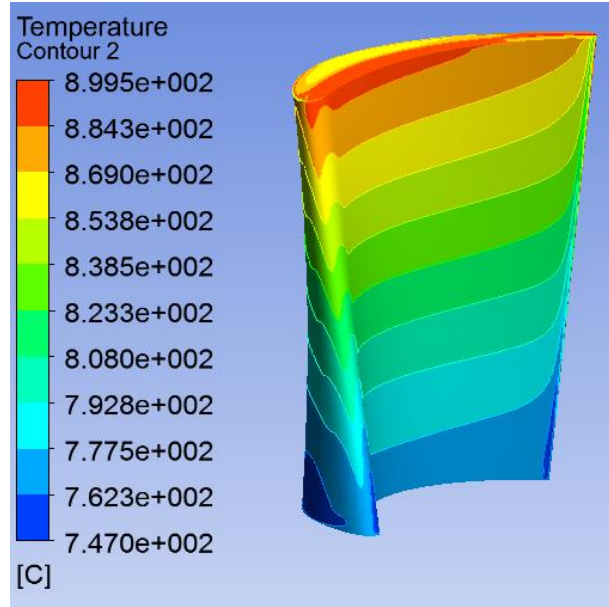
5.3. Sıcaklık Dağılımı AYE Analizi

AYE analizlerinde ilk adım, döner kanatçığın üzerindeki sıcaklık dağılımının bulunması adımıdır. Kanatçık üzerinde bulunan sıcaklık dağılımı, yapılan tek ve çift yönlü analizlerde sınır koşulu olarak yapısal analizlere aktarılmıştır. Bu kanatçığın sıcaklık etkisi altındaki genişmesi analiz edilmiştir.

HAD analizi sonucunda akış hacmi içerisindeki sıcaklık dağılımı değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.11). Analiz sonucunda elde edilen döner kanatçığın dış yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 5.12'de verilmiştir.



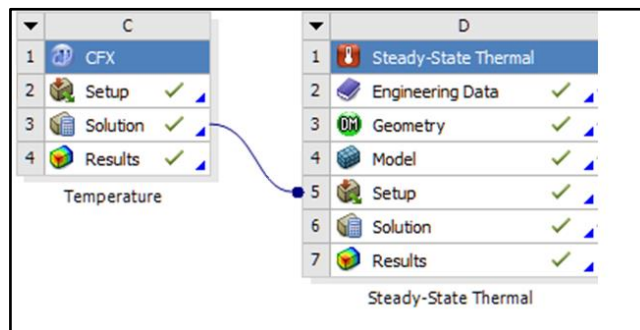
Şekil 5.11. Döner Ve Sabit Kanatçıkların Akış Hacimlerinde Sıcaklık Dağılımı.



Şekil 5.12. Döner Kanatçık Dış Yüzey Sıcaklık Değerleri.

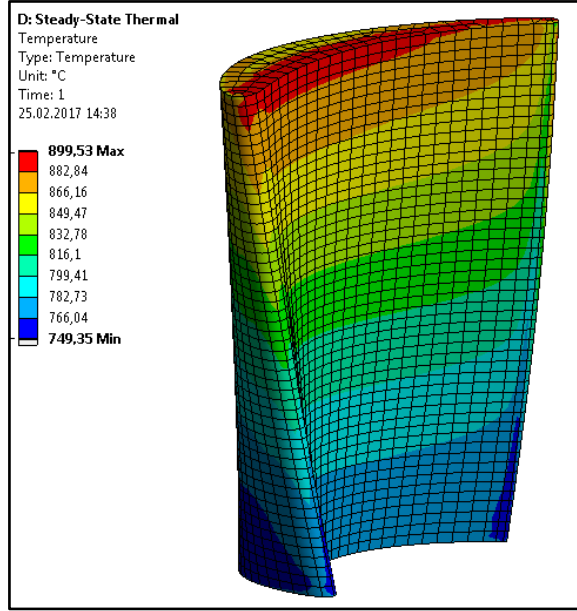
HAD analizi sonucu bulunan sıcaklık değerleri sadece döner kanatçığın dış yüzeyindeki sıcaklık değerleridir. Kanatçığın iç hacmindeki sıcaklık değerlerini bulmak için yapısal analizde ısı iletimi analizi çözümleri yapılmıştır.

İletim çözümleri için, öncelikle HAD analizi sonucu bulunan yüzey sıcaklık değerleri Workbench içinden zamana bağlı olmayan termal yapısal analiz sekmesine bağlanarak yapılsa analize aktarılmıştır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. HAD Analizi Sonucu Yüzey Sıcaklıklarının Termal Yapısal Analize Aktarılması.

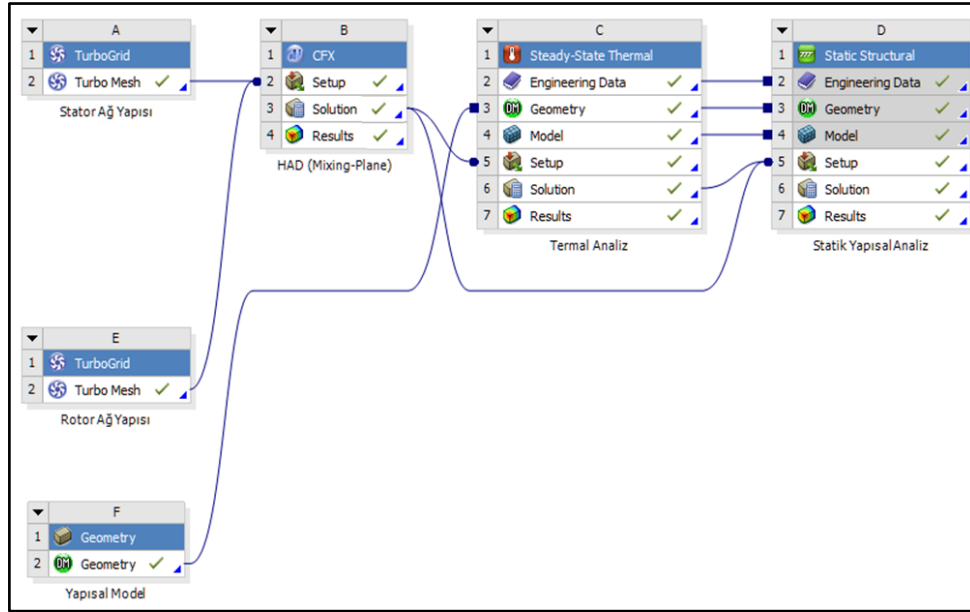
Aktarılan yüzey sıcaklık değerleri kullanılarak yapılan termal yapısal analiz sonucunda, döner kanatçık içindeki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Şekil 5.14'te döner kanatçık içindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.14. Termal Yapısal Analiz Sonucu Elde Edilen Döner Kanatçıktaki Sıcaklık Dağılımı.

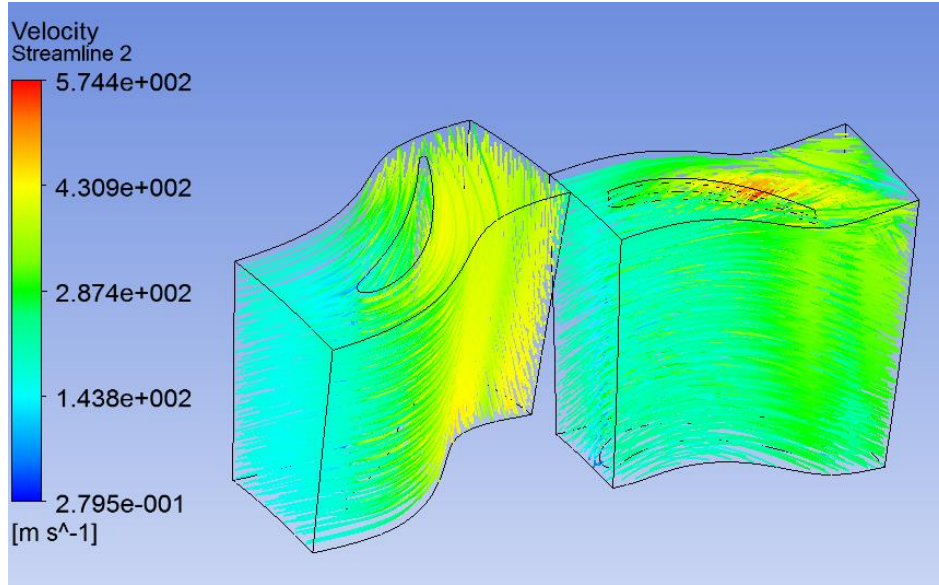
5.4. Tek Yönlü AYE Analizi

Döner kanatçıktaki sıcaklık dağılımı bulunduktan sonra, tek ve çift yönlü AYE analizleri için gereken bütün sınır şartları tamamlanmış olmaktadır. HAD analizi sonucu bulunan sıcaklık ve basınç değerlerinin yapısal çözücüye aktarılması ile tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15'te Ansys Workbench içerisinde tek yönlü AYE analizi için oluşturulan akış şeması gösterilmiştir. İletim çözümü sonucunda elde edilen döner kanatçıktaki sıcaklık dağılımı ile HAD analizinden elde edilen döner kanatçık üzerindeki basınç dağılımı statik yapısal modele aktarılmıştır. Bu sınır şartları altında statik yapısal model çözdürülerek tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilmiştir.



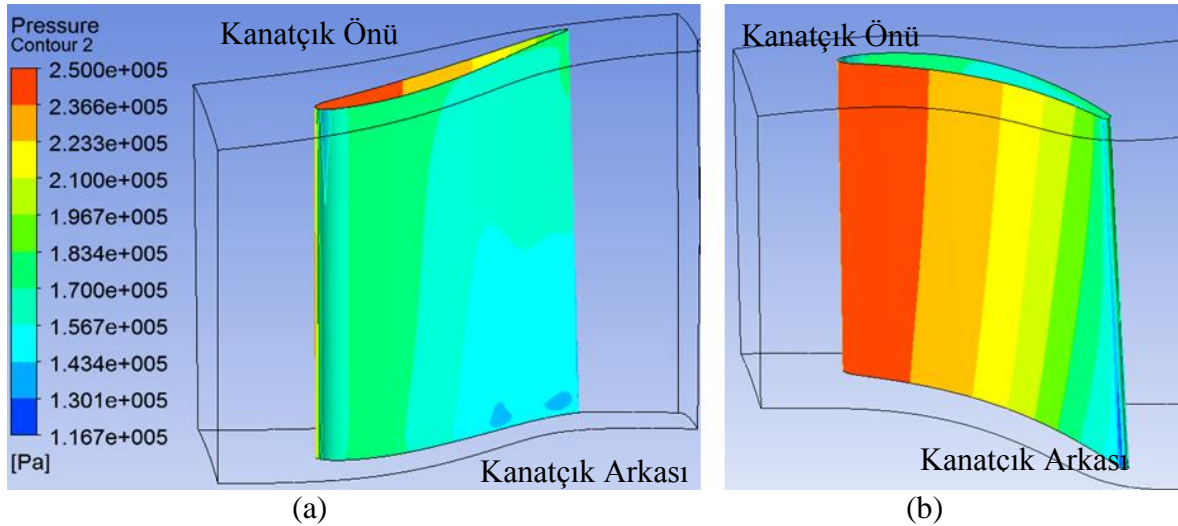
Şekil 5.15. Tek Yönlü AYE Analizi Akış Şeması.

Tamamlanan tek yönlü AYE analizi sonucunda, akış hacmindeki akışkan hızları, akışkan basınç değerleri ve döner kanatçıktaki şekil değişimi değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.16'da gösterilen akışkan hızı değerleri, havanın akış hacminde ulaşacağı hız değerlerini göstermektedir. Şekilde yer alan akış iplikleri incelendiğinde maksimum hız değerinin (yaklaşık $v = 574,4$ m/s) döner kanatçığın üst yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni döner kanatçığın üst kısmında bulunan (tip clearance) bölgede akışın oluşturduğu türbülanstır. Döner kanadın ön yüzüne çarpıp ayrılan akış üst bölgede girdaplar oluşturarak ilerler. Sabit kanatçık etrafındaysa akış, ilerledikçe hızlanarak bir ayrılma ya da girdap oluşumu görünmeden sabit kanatçık akış hacmini terk etmektedir.



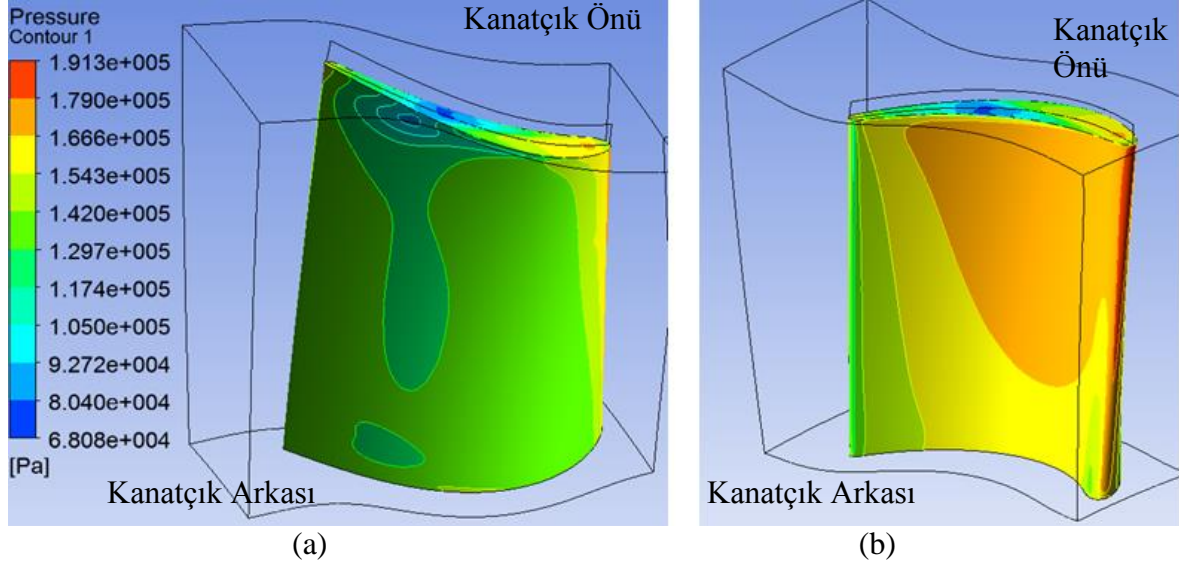
Şekil 5.16. Sabit ve Döner Kanatçık Akış Hacimlerindeki Hız Dağılımı.

Şekil 5.17'de ise sabit kanatçık üzerinde meydana gelen basınç değerleri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde sabit kanatçık basınç dağılımının dış yüzeyde çok az değiştiği görülmektedir. İç yüzeyde ise aksenal yönde ilerledikçe azalan basınç değerleri görülmektedir. Yönlendirilmek istenen akışkan ilk olarak sabit kanatçık iç yüzüne çarptığı için, kanat ucunda basınç değerlerinin yüksek olması ve aksenal yönde ilerledikçe düşmesi beklenen bir durumdur.



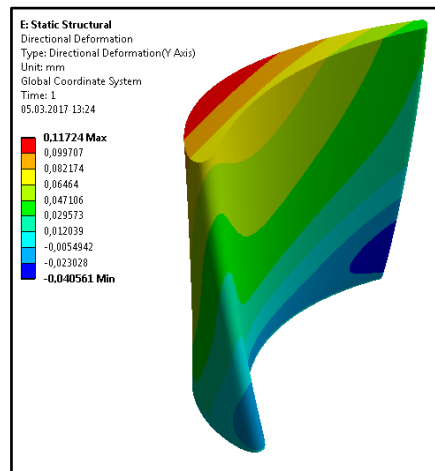
Şekil 5.17. Sabit Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı (a) Dış Yüzey, (b) İç Yüzey.

Şekil 5.18’de ise döner kanatçığa ait basınç dağılımı görülmektedir. Döner kanatçığın dış yüzündeki basınç dağılımı, sabit kanatçıktaki dağılıma benzer olarak neredeyse sabit bir değerdedir. İç yüzeyde ise döner kanatçığın ön tarafında maksimum değere ulaşan basınç değeri, akış ilerledikçe düşmektedir.



Şekil 5.18. Döner Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı (a) Dış Yüzey, (b) İç Yüzey.

Döner kanatçığın, dönme yönünde şekil değişimi ise Şekil 5.19’da verilmiştir. Şekil 5.19’de gösterilen değerler çift yönlü AYE analizi sonucuyla karşılaştırılacak olan değerlerdir.

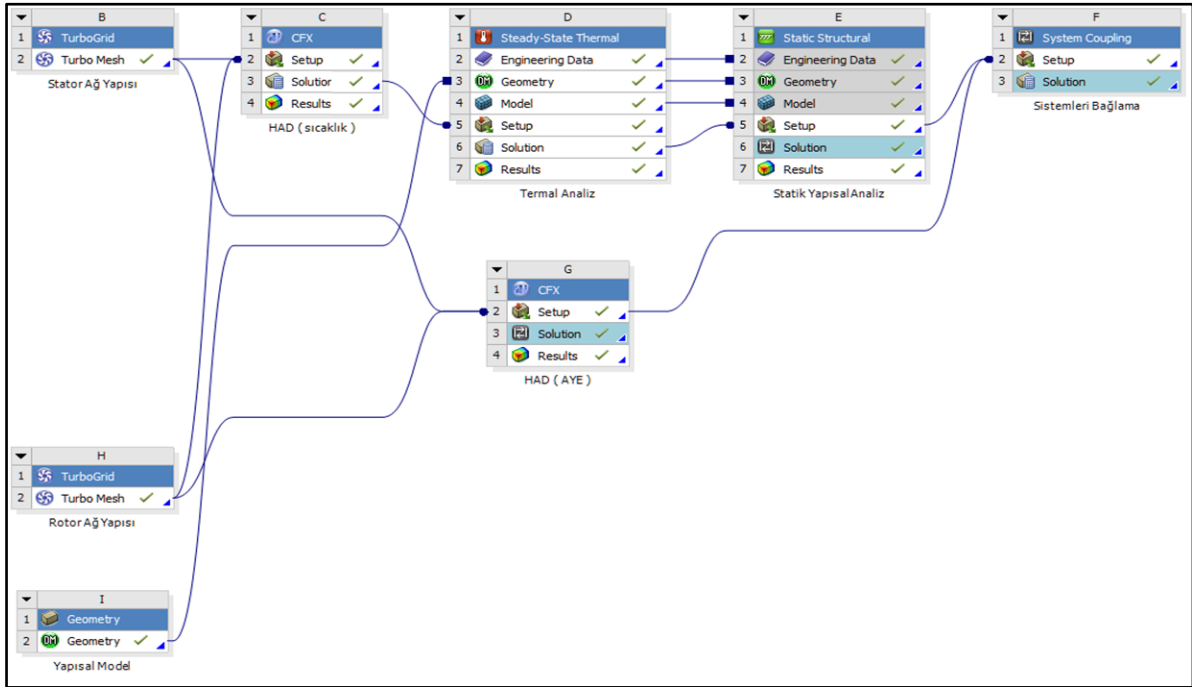


Şekil 5.19. Döner Kanatçığın Dönme Eksenindeki Şekil Değişimi Görseli.

Tek yönlü AYE analizi sonucunda, döner kanatçıkta dönme yönünde görülen en yüksek şekil değişimi değeri 0,11724 mm olmuştur. Şekil değişiminin oluşmasında sabit kanatçıklar tarafından yönlendirilen havanın, döner kanatçıklara enerjisini aktararak dönme etkisini oluşturmaları neden olmaktadır.

5.5. Çift Yönlü AYE Analizi

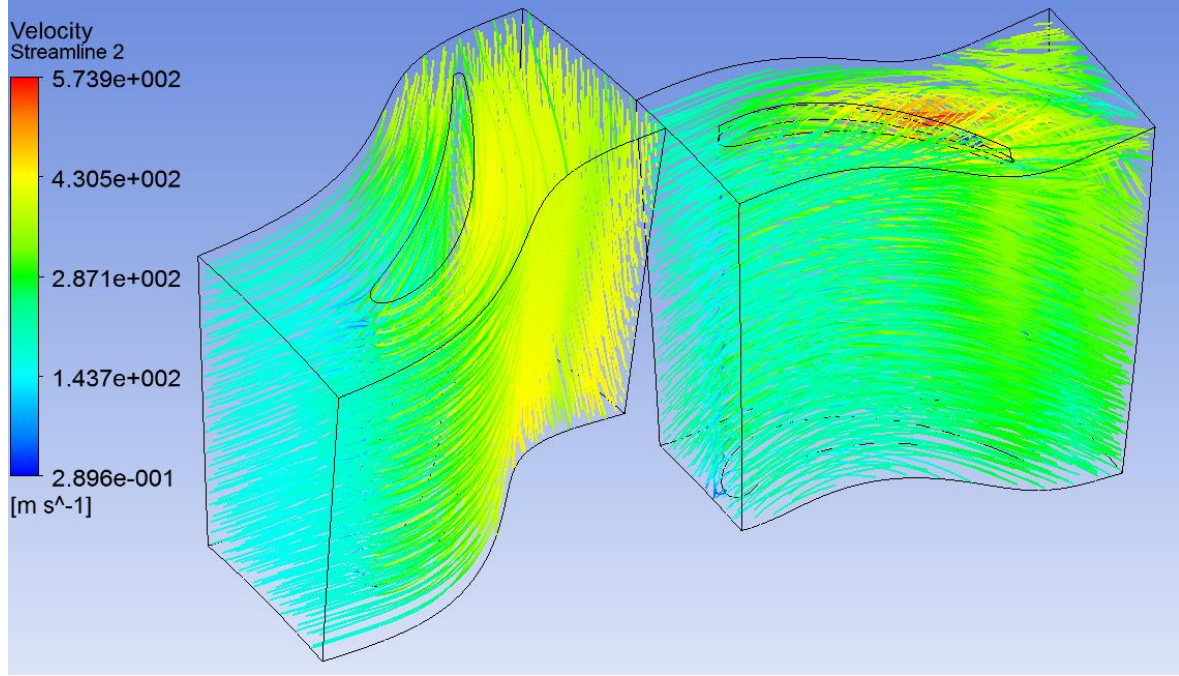
Tek yönlü AYE analizi ardından çift yönlü AYE analizi gerçekleştirilmiştir. Tek yönlü AYE analizlerinin aksine sıcaklık ve basınç değerleri çift yönlü AYE analizleri için aynı HAD çözümünden gelememektedir. Bu yüzden Şekil 5.20’de gösterilen çift yönlü AYE analizi şemasında bir HAD analizi sonucundan sıcaklık değerleri yapısal modele aktarılırken diğer HAD analizi ise yapısal model ile bağlanarak, çift yönlü AYE analizine katılmaktadır.



Şekil 5.20. Çift Yönlü AYE Analizi Akış Şeması.

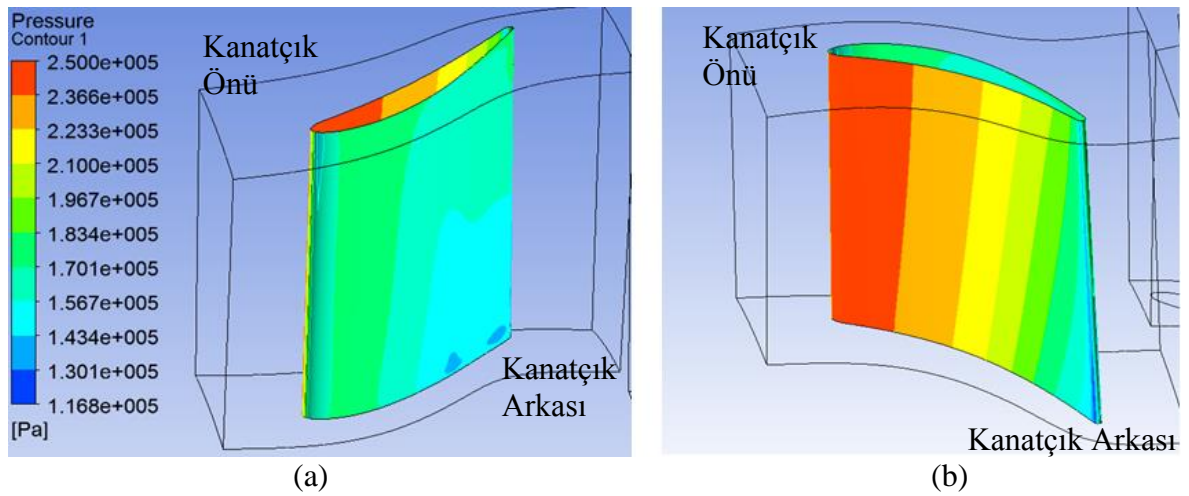
Tamamlanan çift yönlü AYE analizi sonucunda bulunan, akış hacmindeki akışkan hızları, akışkan basınç değerleri ve döner kanatçıktaki şekil değişimi değerleri belirlenmiştir. Şekil 5.21’de gösterilen akışkan hızı değerleri, havanın akış hacminde ulaştığı hız değerlerini göstermektedir. Hız iplikleri ile gösterilen hız görsellerinde, döner

kanatçığın üzerinde maksimum hız değerinin (yaklaşık $v = 573,9$ m/s) oluştuğu görülmektedir.



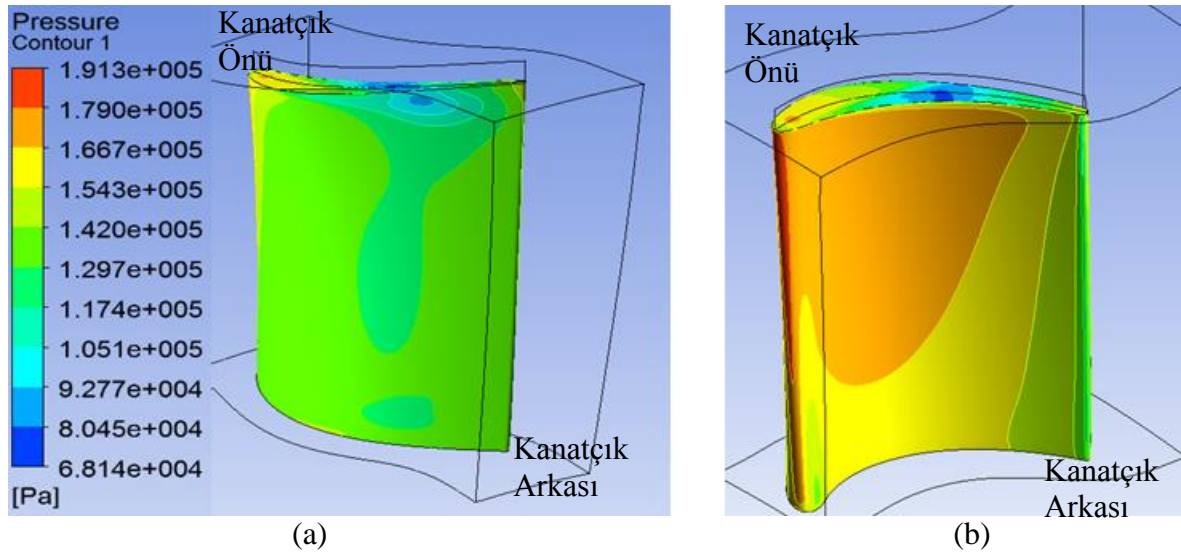
Şekil 5.21. Sabit ve Döner Kanatçık Akış Hacimlerindeki Hız Dağılımı.

Şekil 5.22'de sabit kanatçık üzerinde meydana gelen basınç değerleri gösterilmektedir. Sabit kanatçık için dış yüzeyde basınç değerleri çok değişmezken, iç yüzeyde maksimum değerden minimum değere kadar bir azalma gözlemlenmektedir.

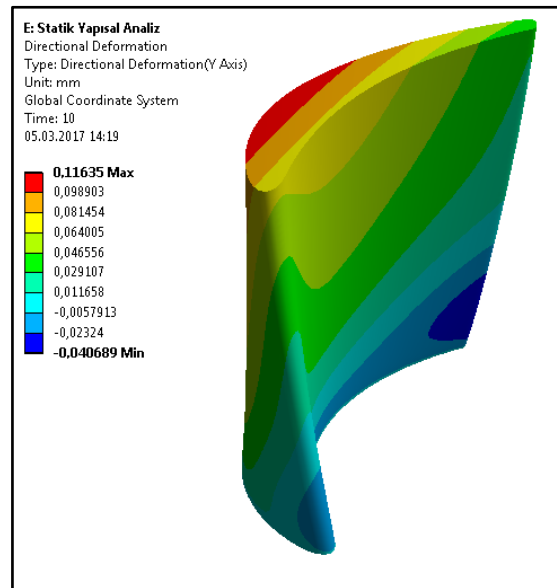


Şekil 5.22. Sabit Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı (a) Dış Yüzey, (b) İç Yüzey

Şekil 5.23'te ise döner kanatçık üzerinde meydana gelen basınç değerleri gösterilmektedir. Dış yüzeyde basınç dağılımı, iç yüzeye göre düşük değerlerde kalmaktadır. İç yüzeyde ise kanatçığın ön tarafında maksimum değere ulaşan basınç değeri, akış aksenal yönde ilerledikçe düşmektedir. Ayrıca kanatçık iç yüzüne gelen toplam basınç, dış yüzeye gelen toplam basınç değerine göre çok daha büyüktür. İç ve dış yüzeylerde oluşan toplam basınç farkı kanatçığı döndürmektedir.



Şekil 5.23. Döner Kanatçık Üzerindeki Basınç Dağılımı (a) Dış Yüzey, (b) İç Yüzey



Şekil 5.24. Döner Kanatçığın Dönme Eksenindeki Şekil Değişimi Görseli

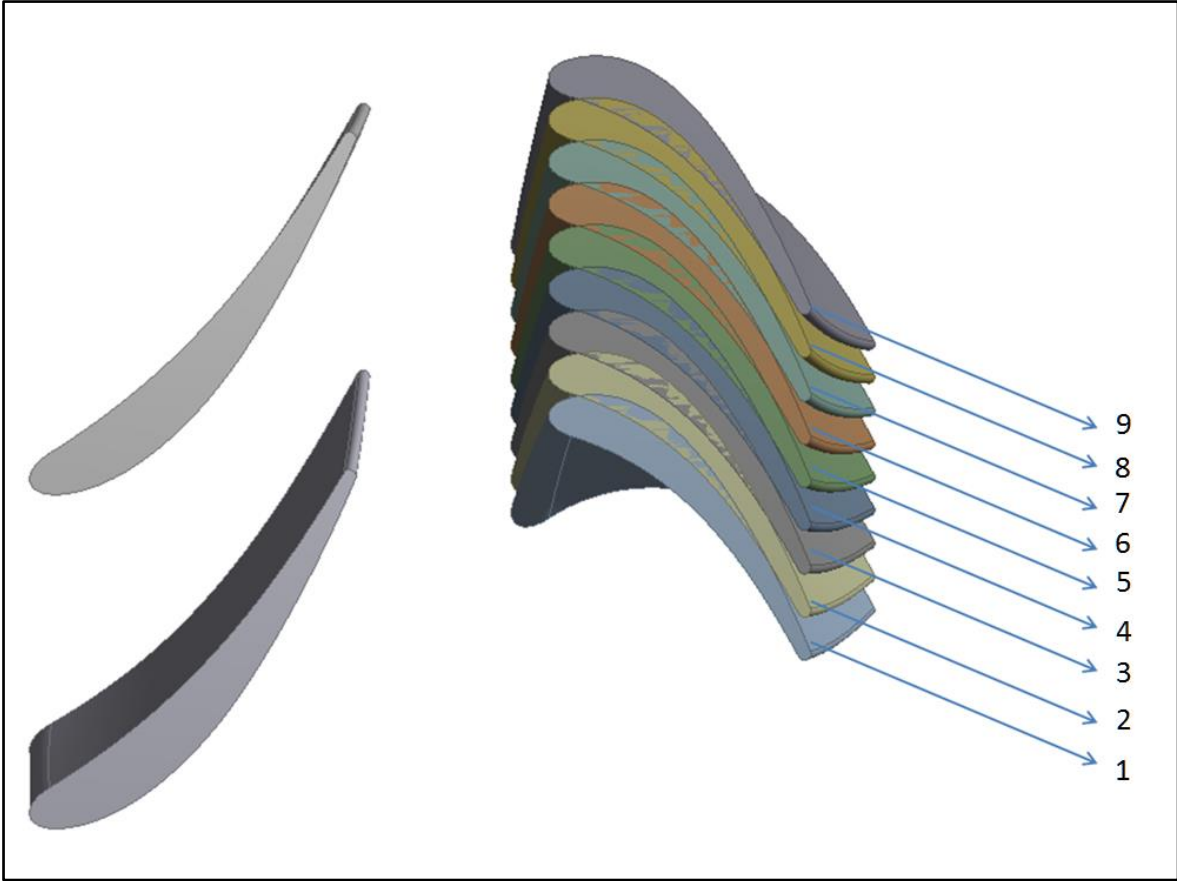
Çift yönlü AYE analizi sonucunda, döner kanatçıktaki dönme yönünde oluşan en yüksek şekil değişimi değeri, 0,11635 mm olarak Şekil5.24'te görülmektedir.

5.6. Hareketli Döner Kanatçık Yaklaşımıyla Tek Yönlü AYE Analizi

Çift yönlü AYE analizi sonucunda, döner kanatçıktaki dönme yönünde oluşan en yüksek şekil değişimi değeri, 0,11635 mm olarak bulunmuştur. Bu değer tek yönlü AYE analizi için 0,11724 mm idi. Tek ve çift yönlü AYE analiz sonuçlarında yaklaşık %0,7'lik bir fark meydana geldiği görülmüştür. Tek yönlü AYE analizlerinin çok daha hızlı bir şekilde yapılabiliyor olması tek yönlü AYE analizlerini daha fazla tercih edilir kılmaktadır. Ayrıca tek ve çift yönlü AYE analizleri arasındaki sonuç farklarının çok küçük seviyelerde kalmış olması da tek yönlü AYE analizlerinin tercih edilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu bölümde, sabit ve döner kanatçıklar arasındaki açısal konumun değiştirildiği, birbirine bağlı tek yönlü AYE analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucu, döner kanatların üzerine gelen değişken basınç yüklerinin döner kanat üzerinde oluşturduğu etkiyi gözlemlemek mümkün olmuştur.

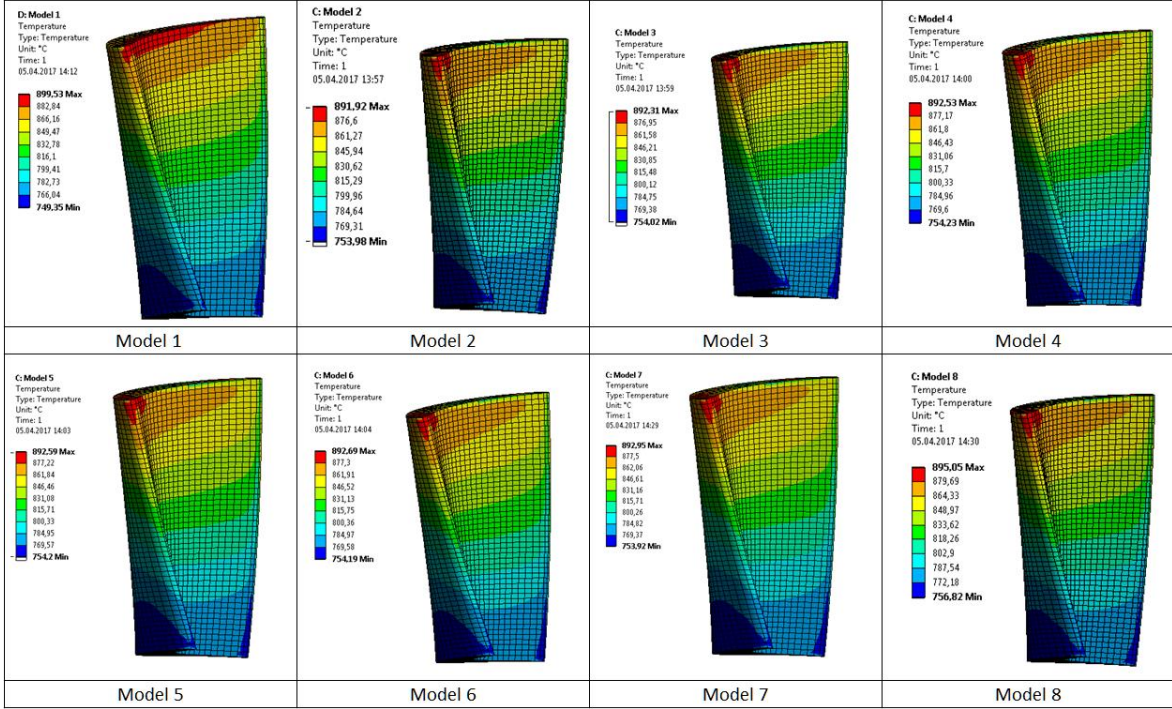
Hareketli döner kanatçık yaklaşımıyla yapılan tek yönlü AYE analizleri, aslında birbirini takip eden birden fazla tek yönlü AYE analizi yapılmasıyla elde edilir. Döner kanatçığın iki sabit kanatçık arasındaki farklı pozisyonlarını kullanarak yapılan tek yönlü AYE analizleri sonunda, dönme esnasında kanatçık üzerinde oluşan basınç dağılımı ve şekil değişimi gibi sonuçlar görülebilmektedir. Şekil 5.24'te gösterildiği gibi, döner kanatçık 9 farklı konumda modellenerek, 8 farklı AYE analizi yapılmıştır. 1 ve 9 numaralarıyla gösterilen konumlarda döner kanatçıklar sabit kanatçıklara göre aynı açısal konumda bulunmaktadır.



Şekil 5.25. Sabit Kanatçığın Açısal Konum Görselleri

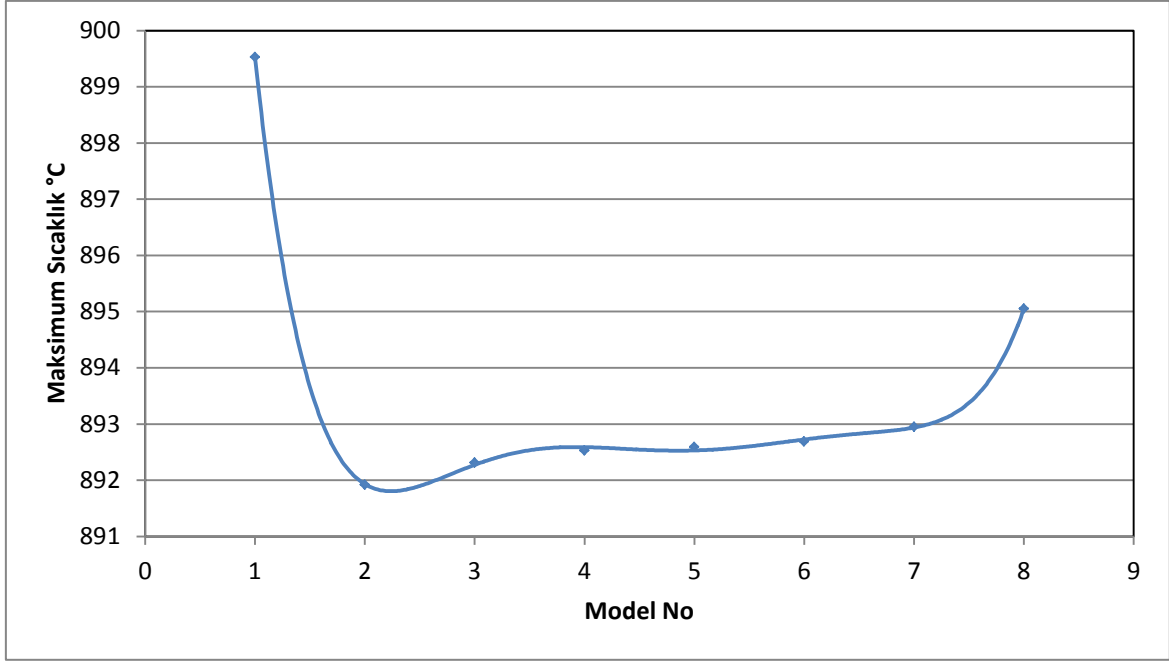
Şekil 5.25'te de görülebileceği gibi döner kanatçık, her analizde bir öncekine göre $1,1^\circ$ döndürülmüştür. Bu sayede ilk ve son analizlerin sabit kanatçıklara göre buldukları açısal konumlar aynı olmaktadır.

Şekil 5.25'te gösterilen 9 ayrı modelde, döner kanatçığın açısal konumu tüm akışı etkilemektedir. Bu sebeple döner kanatçığın üzerine gelen sıcaklık dağılımı da her açısal konuma göre değişecektir. Açısal konuma göre döner kanatta oluşacak sıcaklık dağılımı değişiklikleri hesaba katılmış ve yapılan 9 ayrı tek yönlü AYE analizinden önce, o açısal konumda döner kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Şekil 5.26'da döner kanatçığın farklı açısal konumlardaki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.



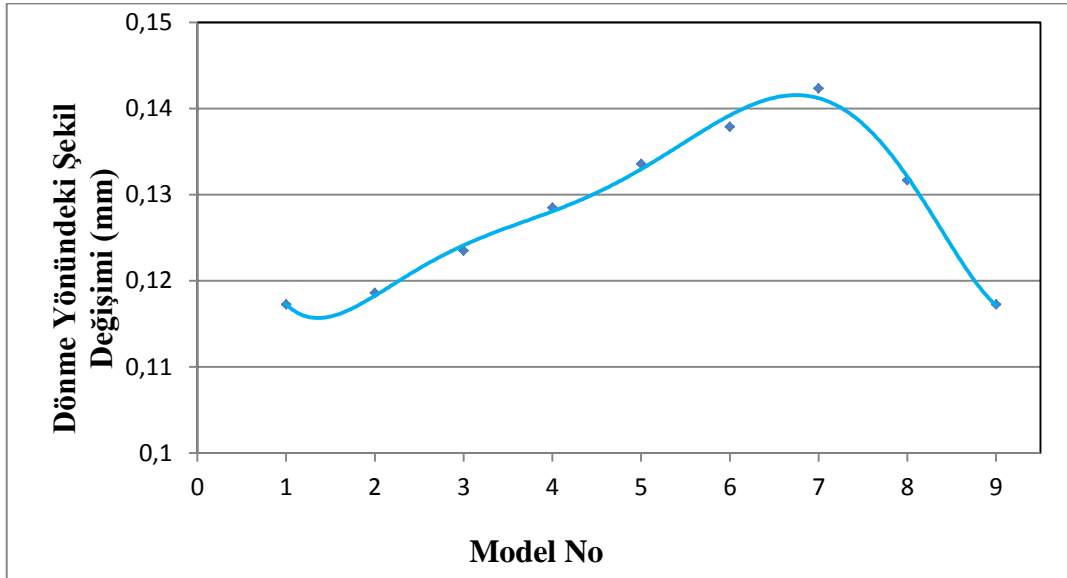
Şekil 5.26. Döner Kanatçığın Açısal Konumuna Göre Sıcaklık Değişimi

Döner kanatçığın farklı açısal konumlardaki sıcaklık değerleri Şekil 5.26’da gösterilmiştir. Döner kanatçığın farklı açısal konumlardaki sıcaklık değerleri incelendiğinde (Şekil 5.27), sabit kanatçık önüdeyken, döner kanatçık sıcaklık değerinin en yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir. İkinci konumda kanatçık sıcaklığı yaklaşık 8 °C düşmektedir. 3. ve 7. konumlar arasında sıcaklık değeri yaklaşık sabit kalırken, son konumda sıcaklık değeri 2 °C artmaktadır.



Şekil 5.27. Döner Kanatçığın Açısal Konumuna Göre Sıcaklık Değerleri

Döner kanatçığın, sabit kanatçıklara göre açısal konumunun değiştiği AYE analizleri sonucunda her adımda kanatçık üzerinde meydana gelen dönme yönündeki şekil değişimi, Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



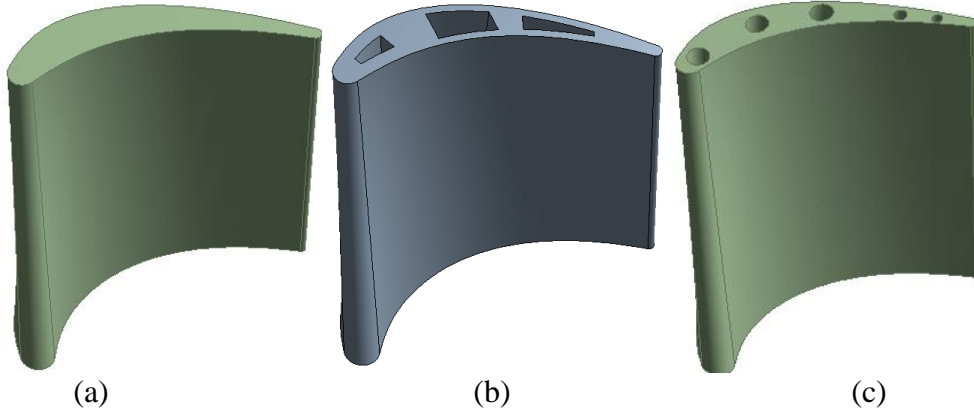
Şekil 5.28. Döner Kanatçığın Açısal Konumuna Göre Şekil Değişimi

Şekil 5.28’e göre döner kanatçıklar, sabit kanatçıkların önündeyken oluşan şekil değişimi, diğer açısal konumlara göre daha küçüktür. Bir döner kanatçık iki sabit kanatçık

arasında hareket ederken, öncelikle üzerine etkiyen basınç değerleri artmakta ve ikinci sabit kanatçığa yaklaşılrken azalmaktadır.

6. SOĞUTMA KANALI TASARIMI

Bu bölümde, önceki bölümlerde AYE analizleri ile incelenen güç türbini döner kanatçığı için, 2 farklı soğutma kanalı tasarımı üzerinde çalışılmış ve HAD analizleri ile bu soğutma kanallarının, döner kanatçıkların sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Günümüzde kullanılan güç türbini döner kanatçıklarında bulunan soğutma kanalları örnek alınarak tasarlanan geometride, film soğutma etkisi ihmal edilmiştir. Şekil 6.1’de aynı döner kanatçık için soğutma kanalı olmayan 1 model ve soğutma kanalı olan 2 model geometrileri gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Ele Alınan Döner Kanatçık Geometrileri (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3.

Yapılan HAD analizlerinde, konjuge ısı transferi yöntemi kullanılarak, kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Konjuge ısı transferi analizi için akış hacminin yanı sıra, katı kanatçık geometrisi de sayısal analiz modeline dahil edilmiştir. Bu sayede aynı anda, akışkandan katıya taşınım ile olan ısı transferi ile birlikte katı içinde iletim ile gerçekleşen ısı transferi de hesaplanmış olur. Konjuge ısı transferi yaklaşımı, metal sıcaklıklarına göre akışkanın ısı taşınım katsayısında meydana gelen değişiklikleri de sayısal analizlere dahil ettiğinden, daha doğru sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

Konjuge ısı transferi yöntemi kullanılarak 2 farklı soğutma kanalı tasarımı denenmiş ve karşılaştırma yapabilmek için soğutma kanalı olmayan bir döner kanatçık geometrisi (Model 1) analiz edilmiştir. Kanatçık malzemesi olarak; çelik(AMS 3060)

Inconel 792 ve CMSX_4 malzemeleri kullanılmıştır. Toplamda 9 sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.1’de gerçekleştirilen 9 sayısal analiz gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. HAD Analizlerindeki Model ve Malzeme Bilgileri

| Sayısal Analiz Numarası | Geometrik Model | Malzeme |
|-------------------------|-----------------|------------------|
| 1 | Model 1 | Çelik (AMS 3060) |
| 2 | Model 1 | INCO 792 |
| 3 | Model 1 | CMSX_4 |
| 4 | Model 2 | Çelik (AMS 3060) |
| 5 | Model 2 | INCO 792 |
| 6 | Model 2 | CMSX_4 |
| 7 | Model 3 | Çelik (AMS 3060) |
| 8 | Model 3 | INCO 792 |
| 9 | Model 3 | CMSX_4 |

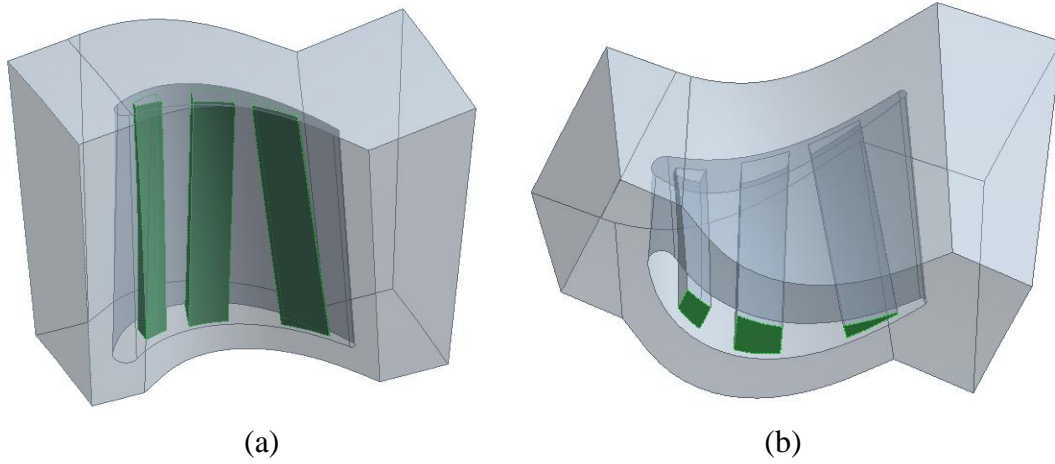
Sayısal analizlerde kullanılan kanatçık malzemeleri, sadece termal özellikleri kullanılarak modellenmiştir. INCO 792 malzeme bilgilerinde Reyhani vd.’nin (2013) çalışmasından yararlanılmıştır. CMSX_4 malzemesinin termal özellikleri ise Qusted vd.’nin yaptığı çalışmadaki, 927 °C sıcaklıktaki değerlerdir. Çelik (AMS 3060) malzemesi özellikleri için ise ANSYS CFX malzeme kütüphanesinde bulunan veriler kullanılmıştır. Çizelge 6.2’de konjuge ısı transferi analizlerinde kullanılan malzemelerin termal özellikleri özetlenmiştir.

Çizelge 6.2. HAD Analizlerinde Kullanılan Malzemelerin Termofiziksel Özellikleri

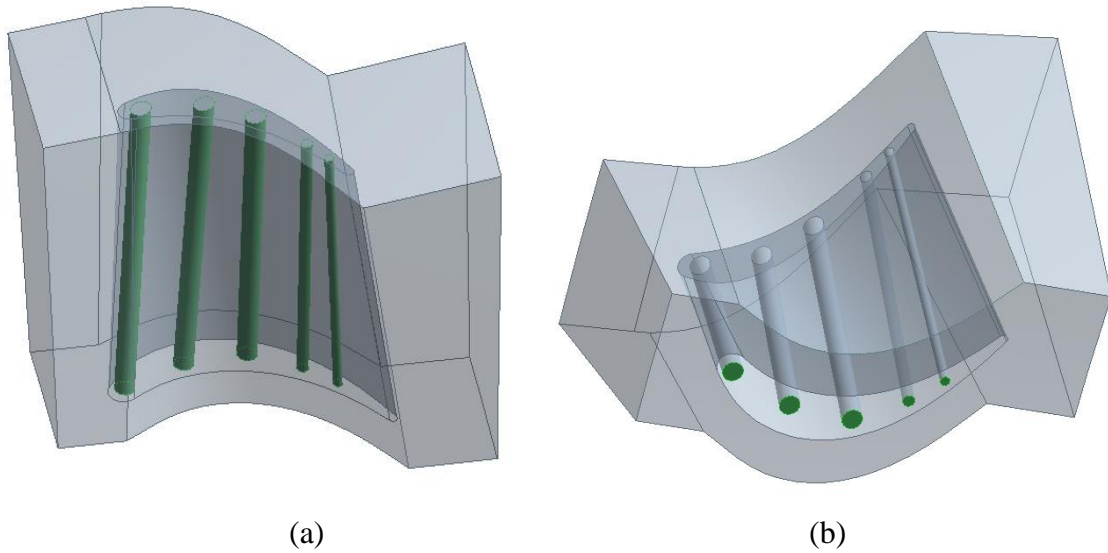
| Malzeme | Özgül Ağırlık (kg/m ³) | Isı kapasitesi (j/kg.K) | Isı İletim Katsayısı (W/m.K) |
|------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Çelik (AMS 3060) | 7854 | 434 | 60,5 |
| INCONEL 792 | 8250 | 710 | 17,7 |
| CMSX_4 | 8283 | 650 | 21,9 |

HAD analizlerinde, AYE analizlerindeki gibi sabit ve döner kanatçıkların akış hacimleri modellenmiştir. Ayrıca katı döner kanatçık modeli de modele dahil edilmiştir. AYE analizlerinde kullanılan akış hacmi ağ yapısı özellikleri sabit tutularak HAD analizlerinde kullanılacak ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısına eklenen soğutma kanalları hücre ve düğüm noktası sayısında artışa sebep olmuştur. Modellerde yaklaşık 1.2 milyon düğüm noktası ve 1 milyon hücre bulunmaktadır.

Modellerde sınır koşulu olarak AYE analizlerinde HAD analizleri için bahsedilen sınır koşullarında herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. Sınır koşullarına yapılan tek ekleme soğutma kanallarının girişine 10m/s'lik akışkan giriş hızıdır. Soğutucu akışkanın soğutma kanallarına 300 °C sıcaklığında girdiği kabul edilmiştir. Şekil 6.2 ve Şekil6.3'te soğutma kanalı dahil edilmiş modeller için soğutucu akışkan hacimleri ve soğutucu akışkan giriş sınır şartı bölgeleri yeşil renk ile işaretlenerek gösterilmiştir.



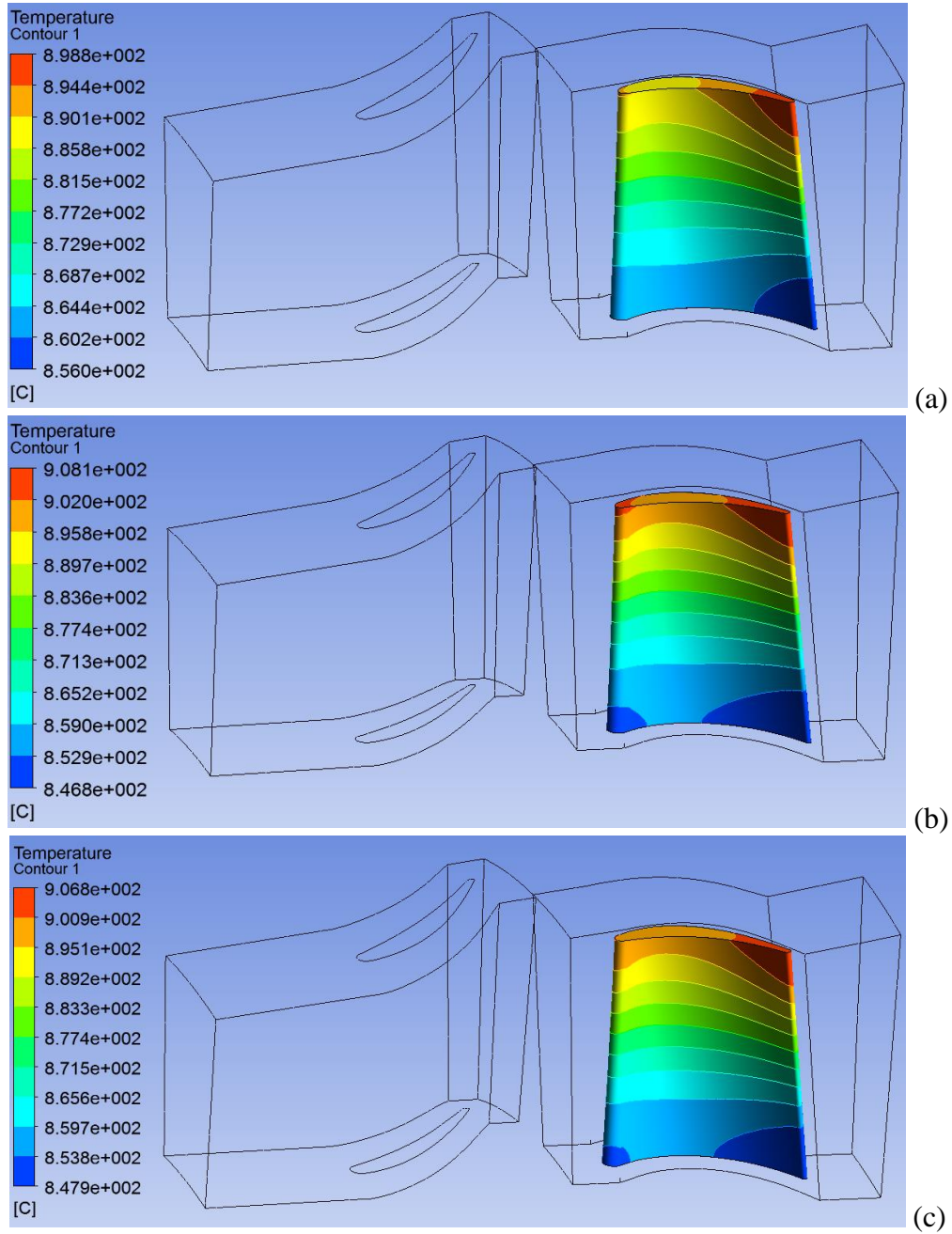
Şekil 6.2. Model 2 İçin Akış Hacmi İçerisinde Soğutma Kanalı Görselleri. (a) Soğutma Kanalı Hacimleri, (b) Giriş Sınır Şartı Uygulanan Bölgeler.



Şekil 6.3. Model 3 İçin Akış Hacmi İçerisinde Soğutma Kanalı Görselleri. (a) Soğutma Kanalı Hacimleri, (b) Giriş Sınır Şartı Uygulanan Bölgeler.

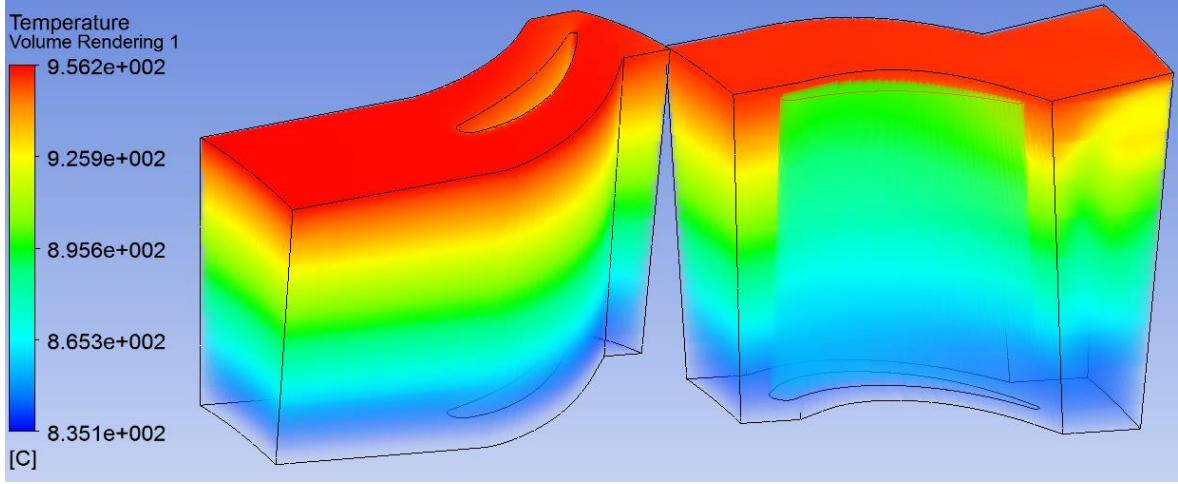
6.1. Model 1 Sonuçları

Soğutma kanallarının kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisinin görülebilmesi için, öncelikle soğutma kanalı dahil edilmemiş model (model 1) üzerinde konjuge ısı transferi analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3'te soğutma kanalı olmayan döner kanatçık modelleri üzerinde sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Model 1 için Döner Kanatçık Sıcaklık Dağılımları. (a) Çelik(AMS 3060) Kanatçık, (b) Inconel 792 Kanatçık, (c) CMSX_4 Kanatçık.

Görüldüğü gibi, kanatçık malzemesi çelik olarak seçilen modelde, sıcaklık değerleri 898 °C ile 856 °C aralığında değişmiştir. Kanatçık malzemesi Inconel 792 olarak seçilen modelde 908°C ve 846°C aralığında sıcaklık dağılımı bulunmaktadır. CMSX_4 malzemenin kullanıldığı kanatçıkta ise sıcaklık dağılımı 906°C ile 848°C aralığında olmuştur.



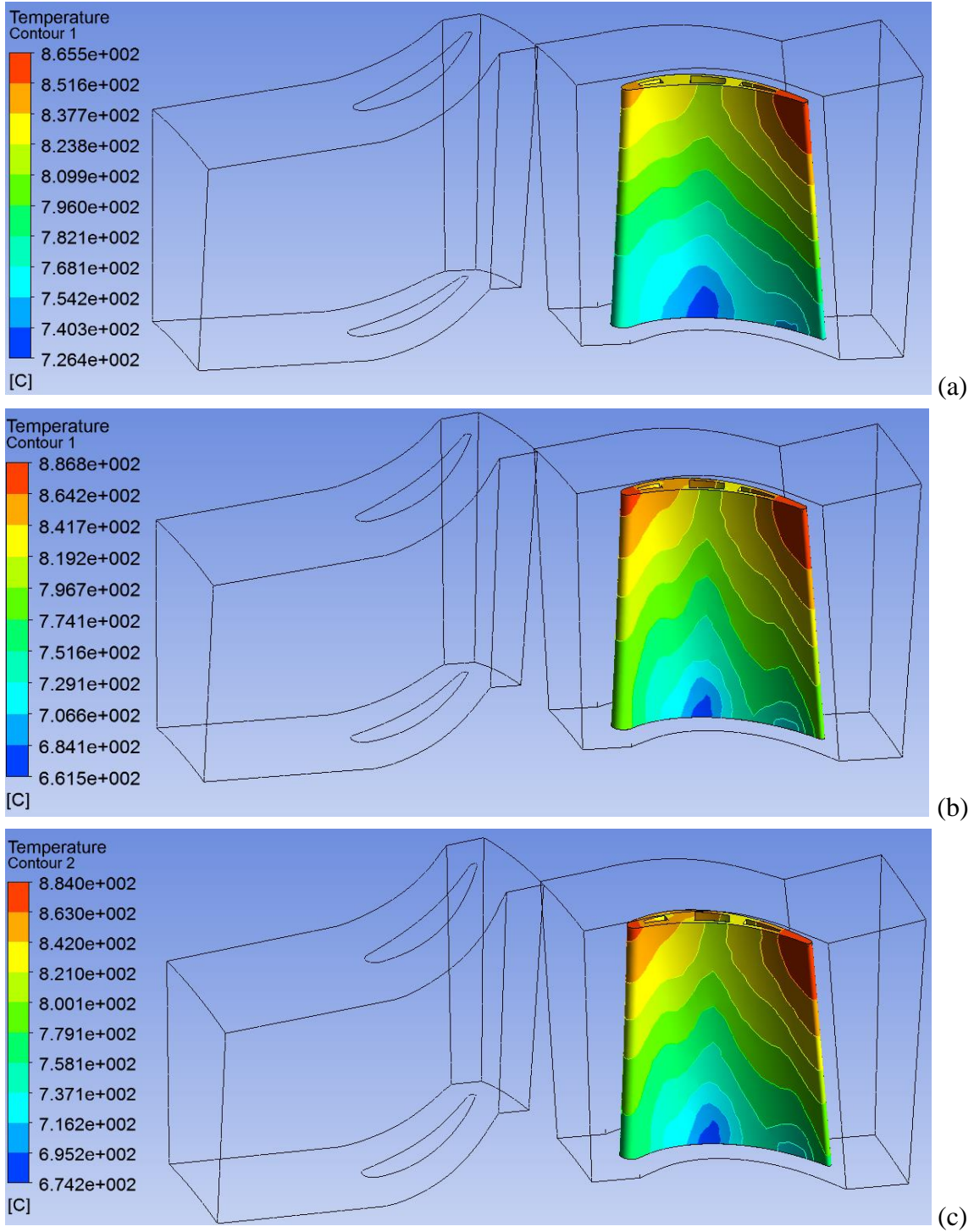
Şekil 6.5. Model 1'deki Hava Sıcaklık Değerleri.

Şekil 6.5'te Model 1'de oluşan hava sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hava sıcaklıkları 956 °C ile 835°C arasında değişmektedir. Hava ısı enerjisinin bir kısmını kanatçık ile paylaştığından çıkışa doğru havanın ortalama sıcaklık değerinin düştüğü görülmektedir.

6.2. Model 2 Sonuçları

Soğutma kanalı eklenerek sayısal analizleri yapılan ilk model, Model 2'dir. Soğutma kanalı oluşturulurken, kanatçığın içi et kalınlığı 1 mm olacak şekilde boşaltılmıştır. Sonrasında kanatçığın mukavemetini arttırmak için soğutma kanalları dikey şekilde bölünmüştür. Böylece Şekil 6.1 (b)'de gösterilen kanatçık geometrisi elde edilmiştir.

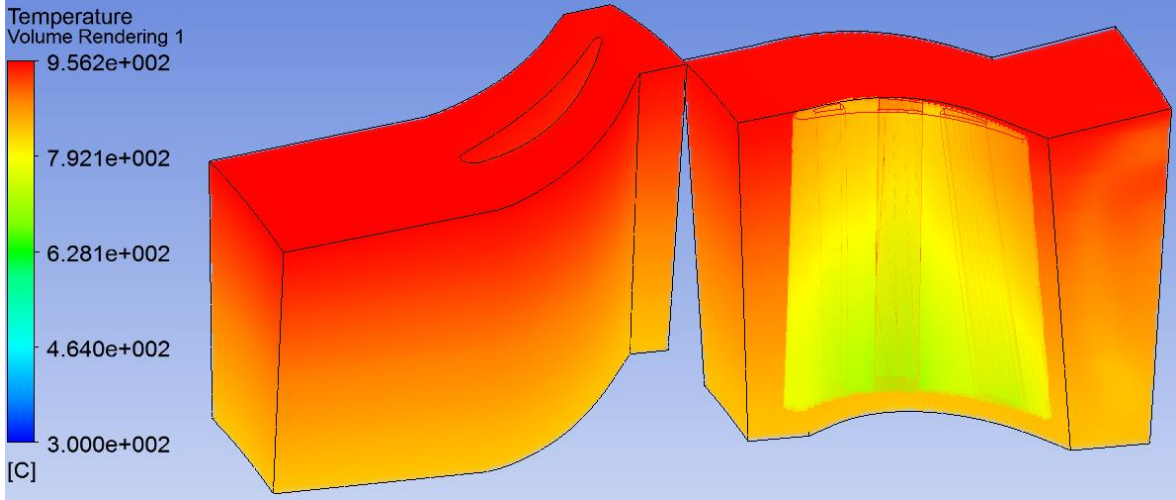
Model 2 için yapılan sayısal analizler sonucunda bulunan sıcaklık dağılımı Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Model 2 için Döner Kanatçık Sıcaklık Dağılımları. (a) Çelik Kanatçık, (b) Inconel 792 Kanatçık, (c) CMSX_4 Kanatçık.

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi, kanatçık malzemesi çelik olarak seçilen modelde, sıcaklık değerleri 865 °C ile 726 °C aralığında değişmiştir. Kanatçık malzemesi Inconel 792 olarak seçilen modelde 886°C ve 661°C aralığında sıcaklık dağılımı bulunmaktadır. CMSX_4 malzemenin kullanıldığı kanatçıkta ise sıcaklık dağılımı 884°C ile 674°C

aralığında olmuştur. Model 2'nin çelik kanatçık için sıcaklık dağılımı maksimum değeri soğutma kanalı olmayan modelden yaklaşık 33°C daha düşüktür. Sıcaklık dağılımındaki alt sınır ise yaklaşık 130°C azalmış ve sıcaklık dağılımındaki maksimum ve minimum değerlerin aralığını genişletmiştir.



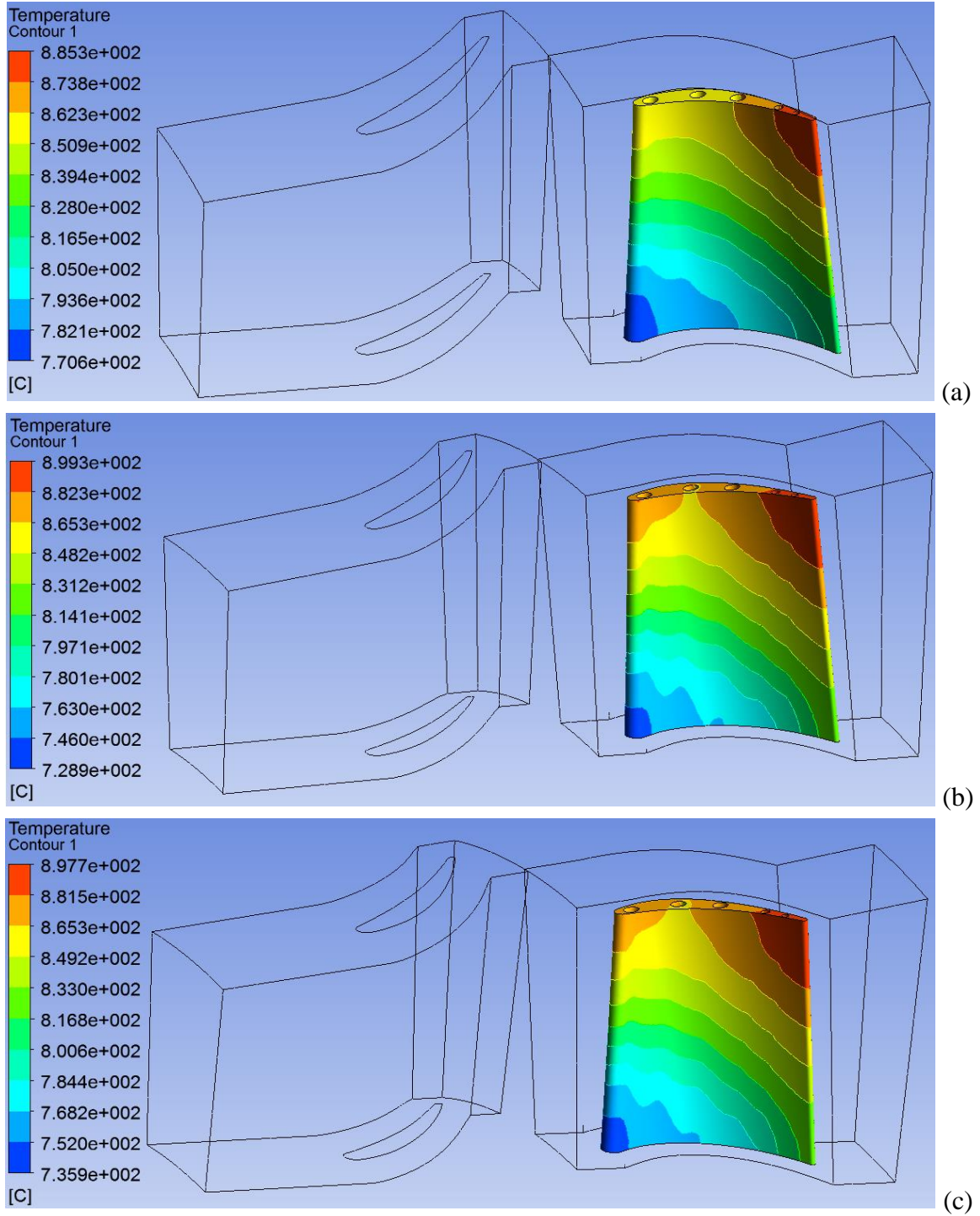
Şekil 6.7. Model 2'deki Hava Sıcaklık Değerleri.

Şekil 6.7'de Model 2'de oluşan hava sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sıcaklık değerleri 956°C ile 300 °C arasında değişmektedir. 300 °C'lik hava sıcaklık değeri soğutma kanallarında kullanılan soğutma havasının sıcaklığıdır. Kanatçığa verilen ısı sebebiyle havanın ortalama sıcaklığı çıkış bölgesinde azalmıştır.

6.3. Model 3 Sonuçları

Model 3 soğutma kanalı ile sayısal analizi yapılan ikinci modeldir. Modele çapları yaklaşık 2 mm ile 1 mm arasında değişen 5 adet soğutma kanalı dikey olarak yerleştirilmiştir. Böylece Şekil 6.1 (c)'de gösterilen kanatçık geometrisi elde edilmiş olur.

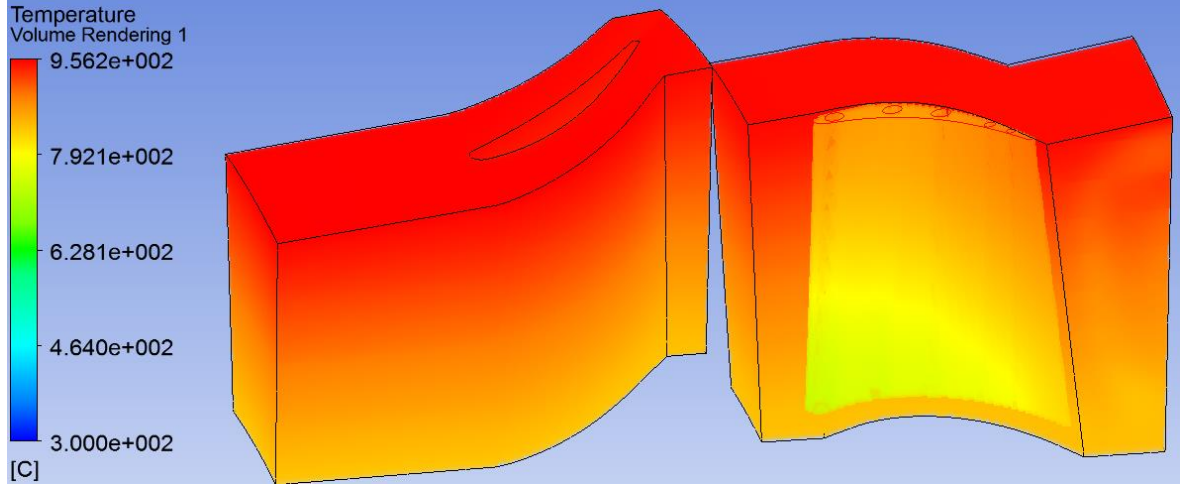
Şekil 6.6'da Model 3 için yapılan sayısal analizler sonucu oluşan sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Model 3 için Döner Kanatçık Sıcaklık Dağılımları. (a) Çelik Kanatçık, (b) Inconel 792 Kanatçık, (c) CMSX_4 Kanatçık.

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi, kanatçık malzemesi olarak çeliğin seçildiği modelde, sıcaklık değerleri 885 °C ile 770 °C aralığında değişmiştir. Kanatçık malzemesi Inconel 792 seçilmiş modelde 899°C ve 728°C aralığında sıcaklık dağılımı bulunmaktadır. CMSX_4 malzemenin kullanıldığı kanatçıkta ise sıcaklık dağılımı 897°C ile 736°C

aralığında olmuştur. Çelik kanatçık için Model 3'ün sonuçları Model 1 ile karşılaştırıldığında, maksimum sıcaklık değerlerinde yaklaşık 14 °C'lik düşüş olduğu görülmektedir. Minimum sıcaklık değerinin görüldüğü bölgelerde ise yaklaşık 85 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür.



Şekil 6.9. Model 3'deki Hava Sıcaklık Değerleri.

Şekil 6.9'de Model 3'te oluşan hava sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sıcaklık değerleri 956°C ile 300 °C arasında değişmektedir. 300 °C'lik hava sıcaklık değeri soğutma kanallarında kullanılan soğutma havasının sıcaklığıdır. Kanatçığa verilen ısı sebebiyle havanın ortalama sıcaklığı çıkış bölgesinde azalmıştır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen tek yönlü AYE analizlerinde kanatçık ucunda meydana gelen maksimum şekil değiştirme değeri 0,11274 mm olarak bulunmuştur. Çift yönlü AYE analizleri için bu değer 0,11635 mm olarak elde edilmiştir. Tek ve çift yönlü AYE analizleri karşılaştırıldığında şekil değişim sonuçları arasında %0,7'lik bir fark ortaya çıkmaktadır.

Tek yönlü AYE analizlerinin çift yönlü analizlere göre çok daha hızlı sonuçlanması ve yakınsama durumunda sağladığı kolaylıklar sebebi ile, türbin kanatçıklarında yapılacak AYE analizlerinde tek yönlü analiz türünün kullanılabilmesi görülmüştür.

Döner kanatçığın, sabit kanatçığa göre açılma konumunun değiştiği 9 farklı tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, döner kanatçığın sabit kanatçıklar arasında dönerken maruz kaldığı yükler, şekil değişim değerleri ve sıcaklık değerleri araştırılmıştır.

Sabit kanatçıkların arasında iken üzerindeki sıcaklık dağılımı değerleri düşen döner kanatçığın, şekil değişim değerleri sabit kanatçıklar arasında geldiğinde artmıştır.

Bir gaz türbinli motorda kullanılmak üzere tasarlanan, güç türbini kanatçığında, gözlenen sıcaklık dağılımı oldukça önemlidir. Güç türbinin düzgün çalışmasını ve bakım sürelerini belirlemede önemli bir yer sahibi olan kanatçık sıcaklık dağılımını mümkün olduğunca düşürmek, gaz türbinli motor için hayati öneme sahiptir. Bu bilgiler ışığında gerçekleştirilen sayısal analizlerin sonuçları aşağıdaki şekilde yorumlanabilir.

Öncelikle soğutma kanalı tasarımının, kanatçık sıcaklıklarına etkisini incelemek gerekirse, tasarlanan soğutma kanallarıyla kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımının en yüksek değerinin en az 15°C düştüğü görülmektedir. Bu değişim değeri Model 2 için 33 °C'yi bulmaktadır. Kanatçık üzerinde oluşan en düşük sıcaklık değerleri incelendiğinde ise, değerlerin model 2 için 129 °C Model 3 için ise 85 °C düştüğü görülmektedir.

Kanatçık üzerinde en düşük sıcaklık değerlerine Model 2’de ulaşılmıştır. Ancak, döner kanatçıkta bulunan en yüksek sıcaklık değeri kadar, kanatçıkta oluşan sıcaklık farkı değerleri de tasarım için önemlidir. En yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri arasındaki farkın az olması istendiğinde ise Model 3 daha avantajlıdır. Çizelge 7.1’de çelik malzemesi için 3 farklı modelin en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri ile birlikte sıcaklık farkı değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Çelik Kanatçık Malzemesi için En Yüksek ve En Düşük Sıcaklık Değerleri İle Sıcaklık Farkları.

| Model | En Yüksek Sıcaklık °C | En Düşük Sıcaklık °C | Sıcaklık Farkı |
|---------|-----------------------|----------------------|----------------|
| Model 1 | 898 | 856 | 42 |
| Model 2 | 865 | 726 | 139 |
| Model 3 | 885 | 770 | 115 |

Eğer tasarlanan döner kanatçığın termal gradyanının düşük olması gerekiyorsa Model 3’te tasarlanan geometri, soğutma kanalları için daha uygun gözükmektedir.

Kullanılan kanatçık malzemesi de, kanatçığın sıcaklık dağılımına etki etmektedir. Örneğin ısı iletim katsayısı daha yüksek olan çelik malzemesi, kanatçığa gelen ısıyı kanatçık bütününe daha iyi ilettiği için, çelik malzeme ile modellenen kanatçıklarda sıcaklık farkı daha az olmaktadır. CMSX_4 malzemesinin ısı iletim katsayısı çelikten düşük ancak Inconel’den yüksektir. Bu yüzden CMSX_4 malzemesiyle modellenen kanatçıkların sıcaklık farkları, çelik ile modellenen kanatçıklardan fazla iken, Inconel 792 ile modellenen kanatçıklardan daha azdır.

Kanatçıklarda kullanılan malzemelere bakıldığında, her 3 model içinde en düşük maksimum sıcaklık değeri çelik malzemesi için görülmektedir. Çeliğin ısı iletim değeri de diğer 2 malzemeye göre daha yüksek olduğundan, sıcaklık farklarını minimize etmeye yardımcı olur. Ancak, belirtilen sıcaklıklarda çelik malzemesinin çalışabilmesi mümkün değildir. Bu sebeple kanatçıklarda malzeme olarak çelik kullanılamaz.

Her 3 model ve 3 malzeme incelendiğinde, bir gaz türbinli motorun güç türbini döner kanatçığı için, Model 2 ve CMSX_4 malzemenin seçilmesi en mantıklı sonuç olarak görülmektedir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen CMSX_4 malzemesi Inconel’e göre

sıcaklığı kanatçığa daha eşit şekilde dağıtabilmektedir. Model 2 ile gösterilen soğutma kanalı tasarımında da, diğer tasarımlara göre daha eşit bir sıcaklık dağılımı vardır. Bu sebeple Model 2 ve CMSX_4 malzemesinin kullanılması en doğru karardır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, bir gaz türbinli motorda kullanılmak üzere tasarlanan güç türbini kanatçığı üzerinde yapılan sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Öncelikle gerçekleştirilen AYE analizi sonuçları, kullanılan farklı yaklaşımlarla değerlendirilmiş ve hangi yaklaşımın ne tür ihtiyaçlara cevap verebileceği araştırılmıştır. Ardından tasarlanan güç türbini döner kanatçığında oluşan yüksek sıcaklıkları düşürmek için tasarlanan farklı soğutma kanalı tasarımları sonuçları karşılaştırılmıştır.

Öncelikle sıcaklık dağılımının bulunduğu termal AYE analizinden bahsetmek gerekirse, içinden ya da etrafından geçen akış etkisiyle geometrisi büyük değişikliklere uğramayan modellerde, katı sıcaklıklarını bulabilmek adına gerçekleştirilebilecek analizlerdir. Isı değiştiricileri gibi sistemlerde sadece sıcaklık yükünden etkilenen katı malzemeler için, yüzey sıcaklıkları termal AYE analizi yöntemiyle bulunabilir. Ardından termal AYE analizini takip eden iletim analiziyle katıdaki sıcaklık dağılımını kolayca bulmak mümkündür.

Tek yönlü AYE analizleri ise, akışın, akış etkisi altında şekil değiştiren yapıdan etkilenmediği kabulüyle yapılmaktadır. Akışkan ve yapısal çözümler ayrı olarak çözülür. Önce HAD analizi çözüldükten sonra, basınç dağılımı SEM çözücüsüne gönderilerek akışın oluşturduğu etkinin bir sınır koşulu olarak işleme alınmasıyla tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen tek yönlü AYE analizi sonucunda, döner kanatçıkta dönme yönünde meydana gelen en yüksek şekil değişimi 0,11724 mm olarak bulunmuştur.

Yapının şekil değişiminden akışın az etkilendiği durumlarda kullanılması gereken tek yönlü AYE analizleri, çift yönlü analizlere göre oldukça hızlı sonuçlanmaktadır. Ancak unutulmamalıdır ki, yapıda meydana gelen değişikliklerin akış hacmine etkisinin ihmal edilmemesi gereken durumlarda, çift yönlü AYE analizleri uzun sürmesine rağmen tercih edilmelidir.

Tek yönlü AYE analizlerinin aksine, çift yönlü yaklaşımda, şekil değiştiren yapının akışa etkisi ihmal edilmez. İteratif çözüm uygulanarak, yapıda meydana gelen şekil değişimi akışkan hacminin geometrisine uygulanarak HAD analizi tekrarlanır. HAD ve SEM çözümleri sırayla çözüme dahil olurlar ve aralarında ağ yapısı şekil değişimi ve basınç değerlerini birbirlerine aktarırlar.

Bu çalışmada yapılan çift yönlü AYE analizi sonucunda, döner kanatçığın dönme yönündeki şekil değişimi 0,11635 mm olarak bulunmuştur. Tek yönlü sonuç ile karşılaştırıldığında sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ancak çift yönlü analiz, tek yönlü analizin yaklaşık on dört katı kadar uzun sürmektedir.

Bu sebeple şekil değişim değeri çok yüksek olmayan yapılarda ve şekil değişiminden akış hacminin çok etkilenmediği durumlarda tek yönlü AYE analizlerini tercih etmek daha mantıklıdır. Çift yönlü analizlerde karşılaşılan uzun zaman gereksinimi ve yakınsama zorluğu gibi etmenler tek yönlü analizleri daha öne çıkarmaktadır.

Tek ve çift yönlü analizlerin sonuçları birbirine oldukça yakın çıktığından, hareketli döner kanatçık yaklaşımıyla yapılan AYE analizlerinde tek yönlü metot kullanılmıştır. Döner kanatçığın sabit kanatçıklara göre açısız konumuna bağlı olarak değişen basınç değerleri, AYE analizinin farklı açısız konumlar için tekrarlanması gerektirmektedir.

Döner kanatçığın açısız konumu, takip eden her analizde 1,1 derece arttırılarak 9 adet tek yönlü AYE analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sabit kanatçıkların ortasına doğru döner kanatçığa etki eden basınç değerlerinde ve kanatçığın şekil değişim değerlerinde artış görülmüştür. Diğer sabit kanatçığa yaklaşırken bu değerlerde hızlı bir azalma meydana gelmektedir.

Gaz türbinli motorlarda, türbin kanatçıklarının yorulma ve ömür davranışlarını incelemek gerekirse yukarıda anlatılan, basınç ve şekil değişimi değerlerinin değişimlerine bağlı olarak kanatçıklar üzerinde oluşan gerilme değerlerinin değişimi incelenmelidir.

Tasarlanan güç türbini kanatçığı üzerinde gerçekleştirilen AYE analizlerine ek olarak, kanatçık üzerindeki sıcaklık değerlerini azaltabilmek için kullanılacak soğutma

kanalları ile ilgili analizler de gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde konjuge ısı transferi yöntemi kullanılarak tasarlanan soğutma kanalları sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarlanan soğutma kanallarına ek olarak kanatçık malzemesi de değiştirilerek farklı malzemelerin sıcaklık dağılımına etkisi gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, kanatçık üzerinde en düşük maksimum sıcaklık değerini elde etmek birinci amaç olarak gözükmektedir. Bu açıdan bakıldığında Model 2 olarak tanımlanmış soğutma kanalına sahip model istenilen sonuçlara en uygun olan model olarak gözükmektedir.

Ancak kanatçık üzerindeki sıcaklık değerlerinde, en yüksek ve en düşük değerler arasındaki farkın fazla olması da kanatçığın çalışma ömrünü azaltacak bir etken olduğundan, sıcaklık farkı Model 2'ye göre daha az olan Model 3 tercih edilebilir olmaktadır.

Kullanılan kanatçık malzemeleri incelendiğinde, en düşük sıcaklıklar çeliğin kanatçık malzemesi olarak kullanıldığı modellerde görülmektedir. Ama kanatçığa etki eden sıcaklık çok yüksek olduğundan bu sıcaklıklarda çelik malzemesinin çalışması mümkün değildir. Bu yüzden CMSX_4 malzemesinin seçimi daha mantıklı görünmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akgül, M., 2012, Static aeroelastic analysis of a generic slender missile using a loosely coupled fluid structure interaction method, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 58s.
- Anonim, 2015, Animated Gas Turbine Parts, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/enex.html>, erişim tarihi: 02.03.2017.
- Anonim, 2015, Brayton Cycle, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/braytonram.html>, erişim tarihi: 02.03.2017.
- Anonim, 2015, Compressors, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/compress.html>, erişim tarihi: 06.03.2017.
- Anonim, 2017, Ansys Yapısal Mekanik Ürünleri, <http://www.figes.com.tr/ansys/structural-mechanics-products.php>, erişim tarihi: 06.01.2017.
- Anonim, 2017, Early Gas Turbine History, http://web.mit.edu/aeroastro/labs/gtl/early_GT_history.html, erişim tarihi: 05.02.2017.
- Anonim, 2014, Energy Exchange with Moving Blades, <https://ocw.mit.edu/ans7870/16/16.unified/propulsionS04/UnifiedPropulsion9/UnifiedPropulsion9.htm>, erişim tarihi: 09.02.2017.
- Anonim, 2015, Gas Turbine Parts, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/turbparts.html>, erişim tarihi: 09.02.2017.
- Anonim, 2017, Inverse Heat Conduction Problem, <http://www.heatlab.cz/research/inverse-heat-conduction-problem>, erişim tarihi: 25.02.2017.
- Anonim, 2017, Jet Motoru Bölümleri, https://tr.wikipedia.org/wiki/Gaz_t%C3%BCrbinli_motorlar, erişim tarihi: 01.02.2017.
- Anonim, 2013, Model Jet Engines, <http://modeljetengines1.blogspot.com.tr/2013/04/Motores-reaccion.html>, erişim tarihi: 21.02.2017.
- ANSYS V. 17, (2017) System Coupling User's Guide.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bruschewski, M., Scherhag, C., Schiffer, H.P., Grundmann, S., 2015, Influence of Channel Geometry and Flow Variables on Cyclone Cooling of Turbine Blades , Trans. ASME, J. Turbomach., Vol. 138(6), pp. 412 – 421, <http://turbomachinery.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2480256>, erişim tarihi: 06.03.2017.
- Campbell, R.L., Paterson, E.G., 2011, Fluid-structure interaction analysis of flexible turbomachinery, Journal of Fluids and Structures, 27, 1376-1391, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974611001319>, erişim tarihi: 12.01.2017.
- Dhopade, P., Neely, A.J., Young, J., 2010, Fluid-structure interaction of gas turbine blades, 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, New Zeland, 4s, https://www.researchgate.net/publication/258536887_Fluid-structure_interaction_of_gas_turbine_blades, erişim tarihi: 26.01.2017.
- Doğan, K., 2014, Yatay eksenli rüzgar türbin kanatlarının akışkan-yapı etkileşimi yönünden incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, 110s. (yayınlanmamış).
- Genceli, O. F., 2002, Çözümlü Isı Taşınımı Problemleri, Birsen Yayınevi, s. 274;622;623;626.
- Jo, C.H., Kim, D.Y., Rho, Y.H., Lee, K.H., Johnstone, C., 2013, FSI analysis of deformation along offshore pile structure for tidal current power, Renewable Energy, 54, 248-252, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112004442>, erişim tarihi: 27.01.2017.
- Kamakoti, R., Shyy, W., 2004, Fluid-structure interaction for aeroelastic applications, Progress in Aerospace Sciences, 40, 535-558, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042105000084>, erişim tarihi: 11.01.2017.
- Kellner, T., 2015, Where Turbines Are Born: An Inside Look At GE's Big Iron Maternity Ward, <http://www.gereports.com/turbines-born-inside-look-ges-big-iron-maternity-ward/>, erişim tarihi: 06.03.2017.
- Kwiatkowski, R., Domanski, R., 2012, Numerical analyses of heat transfer in high-temperature loaded turbine blades, Journal of Power Technologies, 92(4), 208-213, <http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/viewFile/273/505>, erişim tarihi: 06.02.2017.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kudumula, S. R., 2016, What Is The Difference Between Brayton Cycle And Joule Cycle? <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-brayton-cycle-and-joule-cycle>, erişim tarihi: 12.02.2017.
- MacPhee, D.W., Beyene, A., 2015, Experimental and fluid structure interaction analysis of a morphing wind turbine rotor, *Energy*, 90, 1055-1065, https://www.researchgate.net/publication/281334207_Experimental_and_Fluid_Structure_Interaction_analysis_of_a_morphing_wind_turbine_rotor, erişim tarihi: 25.02.2017.
- Mekhonoshina, E.V., Modorskii, V.Y., Petrov, V.Y., 2015, Numeric simulation of the interaction between subsonic flow and a deformable profile blade on the compressor experiment phase, *International Conference Information Technology and Nanotechnology*, Samara, Russia, 8s. https://www.researchgate.net/publication/301445438_Numeric_simulation_of_the_interaction_between_subsonic_flow_and_a_deformable_profile_blade_on_the_compressor_experiment_phase, erişim tarihi: 19.03.2017.
- Menter, F. R., 1994, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, vol. 32, no 8. p. 1598-1605.
- Reyhani, M.R., Alizadeh, M., Fathi, A., Khaledi, H., 2013, Turbine blade temperature calculation and life estimation – a sensitivity analysis, *Propulsion and Power Research*, 2(2), 148-161, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212540X13000199>, erişim tarihi: 16.02.2017.
- Silva, L.M., Tomita, J.T., Bringhenti, C., 2015, Analysis of temperature distribution using conjugate heat transfer in a HPT stage via CFD, 22nd International Symposium on Air Breathing Engines, Phoneix, U.S.A., 9s, https://drc.libraries.uc.edu/bitstream/handle/2374.UC/745764/ISABE2015_CS%26A_Jesuino%20Takachi%20Tomita_30_MANUSCRIPT_20186.pdf?sequence=5, erişim tarihi: 17.03.2017.
- Quested, P.N., Brooks, R.F., Chapman, L., Morrell, R., Youssef, Y., vd., 2009, Measurement and estimation of thermophysical properties of nickel based superalloys, *Materials Sciences and Technology*, 25(2), 154-162, http://www.academia.edu/21013560/Measurement_and_estimation_of_thermophysical_properties_of_nickel_based_superalloys, erişim tarihi: 10.03.2017.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Qin, F., Chen, L., Li, Y., Zhang, X., 2006, Fundamental Frequencies of Turbine Blades With Geometry Mismatch in Fir-Tree Attachments, Trans. ASME, J. Turbomach., Vol. 128(3), pp. 512– 516, <http://turbomachinery.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1467261>, erişim tarihi: 12.03.2017.
- Veress, A., Braembussche, R.V., 2004, Inverse Design and Optimization of a Return Channel for a Multistage Centrifugal Compressor, Trans. ASME, J. Fluids eng., Vol. 126(5), pp. 799 – 806, <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1430056>, erişim tarihi: 21.03.2017.