

**TÜRBİN SABİT KANATÇIĞININ VERİLEN ISI
TRANSFERİ KATSAYISI VE BASINÇ DAĞILIMINI
KULLANARAK ANSYS İLE 2-BOYUTLU TERMAL
VE YAPISAL ANALİZİ**

MURAT İLKER ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
ENERJİ TERMODİNAMİK ANABİLİMDALI**

EYLÜL 2005

**THERMAL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A
2-D TURBINE NOZZLE GUIDE VANE WITH ANSYS
FOR A GIVEN HEAT TRANSFER COEFFICIENT
AND PRESSURE DISTRIBUTION**

Murat Ilker CELIK

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of MECHANICAL ENGINEERING

SEPTEMBER 2005

TÜRBİN SABİT KANATÇIĞININ VERİLEN ISI TRANSFERİ KATSAYISI VE BASINÇ
DAĞILIMINI KULLANARAK ANSYS İLE 2-BOYUTLU TERMAL VE YAPISAL
ANALİZİ

MURAT İLKER ÇELİK

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı
ENERJİ VE TERMODİNAMİK Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: PROF.DR.KEMAL TANER

EYLUL 2005

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TESEKKÜR.....	vii
SEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2 -TAHRİK İLKELERİ.....	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. Etki İle Tahrik.....	5
2.3. Tepki İle Tahrik.....	6
2.4. Tahrik Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	7
2.4.1. Giriş.....	7
2.4.1.1 Direkt tepkili tahrik sistemleri.....	7
2.4.1.2. İndirekt tepkili tahrik sistemleri.....	8
2.4.1.3. Enerjinin elde edilmesi.....	8
2.4.1.4. Gaz türbini komponentleri.....	9
2.4.2. Tanımlar.....	10
2.4.2.1. Gaz Türbini.....	10

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.2.2 Gaz Jeneratörü.....	10
2.4.2.3. Turbo Güç Santrali.....	10
3. GAZ TÜRBİNLERİNİN ÇALIŞMA TEORİSİ.....	13
3.1. Genel Prensipler.....	13
3.2. Gaz Akis Diyagramları.....	15
3.2.1 Turbo-jet/Turbo-Saft motorların gaz akis diyagramı.....	15
3.2.2. Gaz türbinlerinde termodinamik çevrim.....	16
3.2.2.1. Basınç-hacim (P-V) diyagramı.....	16
3.2.2.2. Basınç-sıcaklık (P-T) diyagramı.....	18
3.3. Enerjinin Dağılımı.....	18
3.4. Güç ve Verim.....	19
4. TÜRBİN KISMI.....	21
4.1. Sabit Kanatçıklar.....	21
4.2. Türbin Rotor Asamblesi.....	22
4.3. Türbinin Çalışma Teorisi.....	23
4.3.1. Çalışma teorisi ve türbin çeşitleri.....	23
4.3.1.1. Impulse türbinler.....	23
4.3.1.2. Tepkili türbinler.....	24
4.4. Türbin hız üçgenleri.....	24
4.5. Çalışma Karakteristikleri.....	25
5. SONLU ELEMANLAR METODU VE ANSYS.....	28
5.1. Tarihçe.....	28
5.2. Sonlu Elemanlarla İlgili Temel Bilgi.....	30

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Temel Adımları.....	30
5.2.1.1 Problemin ve çalışma alanının tanımı.....	30
5.2.1.2 Çalışma alanının bölünmesi.....	31
5.2.1.3 Durum değişkenlerinin belirlenmesi.....	31
5.2.1.4 Koordinat sistemlerinin kurulması.....	32
5.2.1.5 Elemanlar için yaklaşık fonksiyonların oluşturulması.....	32
5.2.1.6. Koordinat dönüşümleri.....	34
5.2.1.7 Sonuçların Yorumlanması.....	35
5.2.2 Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulamaları.....	36
5.2.3 ANSYS Hakkında.....	39
5.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kati Modelleme.....	41
5.3.1. Temel Adımlar.....	41
5.3.2. Hedefin Belirlenmesi.....	41
5.3.3. Modelin Boyutlarının Belirlenmesi.....	42
5.3.4. Elemanların Sıralarının Belirlenmesi.....	42
5.4. Kati Modellemeye Sonlu Elemanlar Metodu Açısından Genel Bir Bakış.....	43
5.4.1. Kati model elemanları.....	43
5.4.2. Oluşturulan bir modelin düzeltilmesi.....	45
5.4.3. Kati Modelin Sonlu Elemanlara Ayrılması.....	45
5.4.4. Yüklerin Uygulanması.....	46
5.4.5. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması.....	47
5.4.5.1. Model Davranışı.....	48
5.4.5.2. Yapısal Davranış.....	48
6. ISI TRANSFERİ PROBLEMLERİNİN ANALIZI.....	50
6.1. Giriş.....	50
6.2. Isı İletiminin (Kondüksiyon) Diferansiyel Denklemi.....	50
6.2.1 Fourier kanunu.....	50
6.2.2. Fourier diferansiyel denklemi.....	52
6.2.3. Isı iletim katsayısı.....	58

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.3.1 Gazların ısı iletim katsayısı.....	58
6.2.3.2 Sıvıların ısı iletim katsayısı.....	59
6.2.3.3 Katı maddelerin ısı iletim katsayısı.....	60
6.2.3.4 Sınır Şartları.....	61
6.3. Toplam Isı Transferi Katsayısı.....	64
6.3.1. Aralarında düzlem bir duvar bulunan iki ortam arasındaki toplam ısı transferi katsayısı.....	64
6.3.2. Aralarında farklı yüzey alanlı bir duvar bulunan iki ortam arasındaki toplam ısı transferi katsayısı.....	66
7. KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNDE DİFERANSİYEL DENKLEM VE BOYUTSUZ SAYILAR.....	67
7.1. Diferansiyel Denklemler.....	67
8. DENEYSEL MODELİN TANIMI.....	68
8.1. Deneysel Ölçüm Teknikleri.....	69
8.2. Kanatçık Hız Dağılımları.....	69
8.3. Kanatçık Isı Transferi Dağılımları.....	70
9. ANSYS MODELİNİN OLUSTURULMASI.....	71
9.1. Modelin Analizi.....	71
10. SONUÇ ve YORUMLAR.....	74
EK AÇIKLAMALAR	86

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

A. Ansys Modelini Olusturma Asamalarında Kullanılan Grafikler, Sekiller Ve Grafik Kullanıcı Arayüz Menüleri.....	86
B1. Ansys İle Programlama Algoritması.....	121
B2. Kanatçık Geometrisinin İmalat Koordinatlarına Göre Ansys Modelinin Olusturulması.....	122
C1. Deneysel Modelin Ansys Programlama Algoritması İle Yazılmış Programı..	134
C2. Türbin Modelinin Ansys Programlama Algoritması İle Yazılmış Programı...	141
11. KAYNAKLARIN DİZİNİ.....	148

ÖZET

Oluşan çok eksenli gerilmeler ve termal yüklerden dolayı, gaz türbinlerinde, sıcak kısım parçaları dizaynın ilk aşamasında en kritik parçalar olarak kabul edilirler. Özellikle türbinde akışkan sıcaklıkları 1000°C 'lere ulaştığı için, sıcaklık ve gerilme dağılımlarını deneysel olarak ölçmek imkansızdır. Bundan dolayı, bu parçaların analizi için numerik çözüm metodları kullanılır. Bu metodlar arasında son 10 yıldır en çok kullanılan metod sonlu elemanlar metodudur ve ANSYS ise en yaygın kullanılan sonlu elemanlar programıdır.

Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu ile ANSYS programı kullanılarak bir türbin sabit kanatçığının hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile önceden hesaplanan ısı taşınım katsayısı ve basınç dağılımları etkisi altında ortaya çıkan sıcaklık dağılımları ile deformasyon ve gerilme dağılımlarını hesaplamak amacı ile termal ve yapısal analizlerin yapılması hedeflenmiştir. Çalışmada iki model oluşturulmuştur. Birinci modelde girdi bilgileri, gerçekçi olması açısından Von Karman Enstitüsünde 1990 yılında yapılan deneysel bir çalışmadan alınmıştır. İkinci modelde ise, bir uçak motoru türbin kısmının çalışmasını simule edebilmek için daha yüksek sıcaklık ve basınç değerleri kullanılmıştır. Bu bilgiler ise, bir motor üretici firmanın ARGE bölümünden alınmıştır. Her iki modelde de aynı airfoil geometrisi kullanılmış, çıkan sonuçlar değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler; Sonlu Elemanlar Metodu, Türbin Sabit Kanatçığı, ANSYS

SUMMARY

At the very first design process, the hot section parts of a turbine are the most challenging parts due to complex loads such as multi axial stress state and thermal loads. These parts are the most fracture critical parts as well. As the flow temperatures in turbines rise up to 1000⁰Cs, it is impossible to experimentally measure the temperature and stress distribution in the turbines. Hence, simulations methods play the main role to calculate the temperature and stress distributions on hot section parts. The most popular method among these numerical simulations, in recent years, is the finite element method (F.E.M.) and the most common F.E.M. software is ANSYS.

The main subject of this thesis is to accomplish the thermal and structural analysis of a nozzle guide vane (NGV) by calculating the deformation and stress values for a given heat transfer coefficient (HTC) and pressure distribution, using ANSYS. For this purpose, two models have been generated. To get realistic calculation results, experimentally measured HTC and pressure distributions have been used as an input for the thermal and structural analysis. The subject experiment was done at Von Karman Instutue in 1990. In the second model, higher temperature and the pressure distributions have been used to simulate an aero-engine turbine operating conditions. The calculated temperature and pressure distributions have been received from a R&D department of an engine production facility. In both models, temperature and stress distributions have been calculated and compared on the same airfoil profile.

Keywords; F.E.M., Nozzle Guide Vane, Structural Analysis, ANSYS

TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım sayın Prof. Dr. Kemal TANER ve Yrd. Doç Dr. Haydar ARAS'a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Aynı zamanda ANSYS ile ilgili her türlü sorunumda bana sabırla yardım eden ve bana her zaman istediğimden fazlasını öğreten TEI ARGE Departmanı Mekanik Analiz Departmanı Lideri Mak. Y. Müh. Bülent ACAR'a da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bir gövdeye etki eden kuvvetler.....	4
2.2 Kütle ve ivme formülü.....	5
2.3 Aerodinamik profil : Düşük hız (V)farkı ve Yüksek basınç farkı (P).....	5
2.4 Pervanenin hava kütesini arkaya doğru itmesi.....	5
2.5 Etki ile tepki.....	6
2.6 Jet motorunun çalışma prensibi.....	7
2.7 Hava ve yakıtın yanması ile üretilen gaz enerjisi (E).....	7
2.8 Gaz kinetik enerjisi.....	8
2.9 Gaz kinetik enerjisinin bir kısmının mekanik enerjiye dönüşmesi.....	8
2.10 Enerji elde etme fazları.....	9
2.11 Gaz türbini komponentleri.....	9
2.12 Tek şaftlı basit bir gaz türbini gösterimi.....	10
2.13 Turbo-Jet.....	11
2.14 Turbo-prop.....	11
2.15 Turbo-şaft.....	11
2.16 Hava Jeneratörü.....	12
3.1 Bir gaz türbinini oluşturan komponentler ve çalışma fazları.....	13
3.2.a Turbo-jet motorunun gaz akış diyagramı.....	15
3.2.b Turbo-şaft motorun gaz akış diyagramı.....	15
3.2.c Serbest Türbin turbo-şaft motorun gaz akış diyagramı.....	16
3.3 Gaz türbinlerinde P-V diyagramı.....	17
3.4 Gaz türbinlerinde P-T diyagramı.....	18
3.5 Gaz türbinli motorlarda enerji dağılımı (SANKEY Diyagramı).....	18
4.1 Türbin Asamblesi.....	21
4.2 Türbin asamblesi alt parçaları.....	22

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3 İmpulse türbinler.....	23
4.4 Tepkili türbinler.....	24
4.5 Türbinde hız üçgenleri.....	25
4.6 Türbinin çalışma karakteristikleri.....	26
4.7 Türbinde gaz akışı.....	26
4.8 Türbin pale profili.....	27
5.1 Fren asamblesinin ANSYS ile analizi.....	29
5.2 V6 motorun ANSYS ile ısı transferi analizi.....	29
5.3 Bir kaydırağın ANSYS kullanılarak yapılan non-lineer analizi.....	30
5.4 ANSYS'in elektromanyetik modülü ile analiz.....	30
5.5 Altparametrik eleman konfigürasyonu.....	33
5.6 İzoparametrik eleman konfigürasyonu.....	33
5.7 Süperparametrik eleman konfigürasyonu.....	34
5.8. Bir sonlu elemanlar programının temel parçaları.....	37
5.9 Çatlak başlangıcı etrafındaki gerilim dağılımı.....	38
5.10 Bir çatlakın deforme olmuş ve deforme olmamış şekli.....	38
5.11 Çatlak etrafındaki düğüm noktaları vektörel yerdeğiştirmesi.....	39
5.12 Temel alan ve hacim elemanları	43
5.13 Bottom up yapısı.....	44
6.1 İzoterm eğrileri.....	51
6-2 Enerjinin korunumu kanunu.....	54
6.3 Hacim elemanında ısı akım şiddeti.....	55
6-4 Bazı gazların ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi.....	59
6-5 Bazı sıvıların ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi.....	60
6.6 Adyabatik veya mükemmel şekilde izole edilmiş yüzey.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6-7	Yüzeğe uygulanmış olan sabit ısı akımı.....63
6.8	Yüzeyde soğuma ve ısınmaya neden olan ısı iletimi prosesi.....63
6-9	Düzlem duvarda ısı geçişi.....64
8.1	Test edilen sabit kanatçığın geometrik profili.....68
8.2	Platin filmlerin airfoil üzerindeki pozisyonları.....70
10.1	Deneysel modelin Von Mises stress dağılımı.....74
10.2	Deneysel modelin X yönündeki deformasyonu.....75
10.3	Deneysel modelin Y yönündeki deformasyonu.....76
10.4	Deneysel modelin maksimum asal gerilme dağılımı.....77
10.5	Deneysel modelin minimum asal gerilme dağılımı.....78
10.6	Türbin modelinin Von Mises stress dağılımı.....79
10.7	Türbin modelinin X yönündeki deformasyonu.....80
10.8	Türbin modelinin Y yönündeki deformasyonu.....81
10.9	Türbin modelinin maksimum asal gerilme dağılımı.....82
10.10	Türbin modelinin minimum asal gerilme dağılımı.....83
10.11	Analizin yapıldığı sabit kanatçık orta kesiti.....84
A 1	Profilinin imalat koordinatlarına göre oluşturulan ANSYS modeli.....86
A. 2a	AL 6061 T6 için sıcaklığa bağlı termal konduktivite değerleri.....87
A. 2b	INCONEL için sıcaklığa bağlı termal konduktivite değerleri.....87
A. 3a	Deneysel Modelin kanatçık duvarı boyunca sıcaklık dağılımı.....88
A. 3b	Türbin Modelinin kanatçık duvarı boyunca sıcaklık dağılımı.....88
A. 4a	Deneysel modelin kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı.....89
A. 4b	Türbin modelinin kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı.....89
A.5a	Deneysel Modelin ısı akımlarının dağılımı.....90
A. 5b	Türbin modelinin ısı akımlarının dağılımı.....90

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
A. 6a Deneysel modelin termal gradient gösterimi.....	91
A. 6b Türbin modelin termal gradient gösterimi.....	91
A. 7a Deneysel Modelin ısı akımlarının vektörel dağılımı.....	92
A. 7b Türbin modelinin ısı akımlarının vektörel dağılımı.....	92
A. 8a Deneysel modelin vektörel termal gradient gösterimi.....	93
A. 8b. Türbin modelin vektörel termal gradient gösterimi.....	93
A. 9a AL 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı Young's Modulus değerleri.....	94
A. 9b INCONEL malzemesinin sıcaklığa bağlı Young's Modulus değerleri.....	94
A. 10a AL 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı Poisson oranı değerleri.....	95
A. 10b INCONEL malzemesinin sıcaklığa bağlı Poisson oranı değerleri.....	95
A. 11a AL 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı k değerleri.....	96
A. 11b INCONEL malzemesinin sıcaklığa bağlı k değerleri.....	96
A. 12a Deneysel Modelin kanatçık yüzeyi boyunca basınç dağılımı.....	97
A. 12b Türbin Modelinin kanatçık yüzeyi boyunca basınç dağılımı.....	97
A. 13 ANSYS programının başlatılması.....	98
A. 14 Termal Analiz Disiplininin Seçilmesi.....	99
A. 15 Kanatçık geometrisinin oluşturulması için vortekslerin oluşturulması.....	100
A. 16 Vortekslerin numaralandırılması ve koordinatlarının belirlenmesi.....	100
A. 17 Vorteksler ile kanatçık profilinin çizilmesi.....	101
A. 18 Vortekslerin çizgiler ile birleştirilmesi.....	102
A. 19 Çizgilerin iki ucundaki vortekslerin seçilmesi.....	102
A. 20 Çizgilerle kanatçık profilinin oluşturulması.....	103
A. 21 Çizgilerden bir alan oluşturulması.....	104
A. 22 Alanı oluşturacak çizgilerin tek tek seçilmesi.....	104
A. 23 Alanın oluşturulması.....	105

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
A. 24 Ağ örgüsü için eleman tipinin belirlenmesi.....	106
A. 25 Eleman tipinin eklenmesi.....	106
A. 26 Termal Elemanın Seçilmesi.....	107
A. 27 Eleman tipinin tabloda belirtilmesi.....	107
A. 28 Serbest Ağ örgüsünün seçilmesi.....	108
A. 29 Ağ örgüsünün uygulanacağı alanın seçilmesi.....	108
A. 30 Ağ örgüsü uygulanmış alan.....	109
A. 31 Malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	110
A. 32 Termal konduktivite değerinin seçilmesi.....	110
A. 33 Sıcaklığa bağlı termal konduktivite değerlerinin girilmesi.....	110
A. 34 Sıcaklık değerlerinin kanatçığı oluşturan çizgilere tanıtılması.....	111
A. 35 Çizgilerin tek tek seçilerek sıcaklık değerlerinin uygulanması.....	111
A. 36 Sıcaklık değerleri uygulanmış kanatçık modeli.....	112
A. 37 Termal Modelin çözümü.....	113
A. 38 Çözüm çıktı tablosu.....	113
A. 39 Yapısal modele geçiş.....	114
A. 40 Eleman tipinin termalden yapısalara değiştirilmesi.....	114
A. 41 Eleman davranışı olarak YÜZEY GERİLMESİ özelliğinin seçilmesi.....	115
A. 42 Malzeme özelliklerinin girilmesi.....	115
A. 43 Malzemenin termal genleşme değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak girilmesi.....	116
A. 44 Malzemenin Young's Modulus ve Poisson Oranı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak girilmesi.....	116
A. 45 Basınç değerlerinin kanatçık yüzeyine uygulanması.....	117
A. 46 Basınç değerlerinin her çizgi için girilmesi.....	117
A. 47 Basınç değerleri yüzeye uygulanmış kanatçık modeli.....	118

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
A. 48 Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	119
A. 49 Sınır şartlarının uygulanacağı düğüm noktalarının seçilmesi.....	119
A. 50 Sınır şartları ve diğer yükler uygulanmış modelin çözüme hazır görünümü.....	120

ÇİZELGELER DİZİNİ**Çizelge****Sayfa**

6.1	Isı iletim katsayıları.....	61
------------	-----------------------------	-----------

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
F	Kuvvet (N.m)
m	Kütle (N)
γ	İvme (m/s^2)
V	Hız (m/s)
G	Hava kütlesi (N)
V_0	Giriş hızı (m/sn)
V_1	Çıkış hızı (m/sn)
U	Devir (rpm)
W	Akışın bağıl hızı (m/sn)
E_c	Gaz kinetik enerjisi (Watt.saat)
E_m	Mekanik enerji (Watt.saat)
W_c	Yakıtın yanması ile elde edilen güç (Watt)
η_t	Çevrimin termodinamik verimi
W_T	Termodinamik güç (Watt)
W_{th}	Termal güç (BTU/sn.)
W_p	İtki gücü (Watt)
W_j	Jet gücü (lb.)
η_{th}	Termal verim
η_i	İçsel verim
η_p	İtki verimi
η_g	Toplam verim
α	Isıl yayılım katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
α_1	Pale ucu açısı
α_2	Pale kökü açısı
\dot{Q}, \dot{q}	Isı akımı (W/mm ²)
h	Isı transfer katsayısı (W/mm ² K)
R _T	Isıl direnç (microhm cm)
k	Termal kondüksiyon (ısı iletimi) katsayısı (W/mK)
T ₁ , T ₂	Ortam sıcaklıkları (K)
T _{d1} , T _{d2}	Duvarın dış ve iç yüzeyindeki sıcaklıklar (K)
α	Isıl genleşme katsayısı (ANSYS) (m/m ⁰ C x 10 ⁻⁶)
ν	Poisson's oranı
E	Young's Modulus (GPa)

Kısaltmalar **Açıklama**

C	Kompresör
CC	Yanma odası
T	Türbin
A.P.D.L	ANSYS Parametric Design Language
G.U.I.	Graphical User Interface
HTC	Heat Transfer Coefficient
F.E.M.	Finite Element Method

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen gaz türbini teknolojisi ile türbinlerin çalışma sıcaklıkları da artmış ve özellikle sıcak kısımlardaki parçaların maruz kaldığı aerotermal ve yapısal yükler motorun çalışma verimi, çalışma ömrü ve emniyeti açısından büyük önem kazanmıştır. Özellikle türbin giriş sıcaklık ve basınç değerlerinin devamlı olarak artması sonucu pale ve sabit kanatçıklara gelen termal yüklerin ana akış ve aerodinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için çok daha güvenli ve kesin numerik hesaplamalara ve yazılımlara ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır.

Gaz türbinli motorlarda hem en yüksek sıcaklığa hem de yüksek mekanik (merkezkaç kuvveti) kuvvetlere maruz kalan dönel ve sabit alt komponentlerden oluşan türbin kısmı bu yükler sonucu ortaya çıkan yüksek ve alçak çevrimli yorulma ve sürünmeden dolayı motorun en kritik komponentleri arasında yer almaktadır.

Termal açıdan bakıldığında iyi bir türbin dizaynı yüksek giriş sıcaklıklarına mücadele edebilen ve daha az soğutma gerektiren, hafif pale ve sabit kanatçıklardan oluşan bir tasarımdır. Bundan dolayı, tasarım safhasında ısıl yükleri hesaplayabilmek çok kritiktir.

Türbinlerde akışkan sıcaklıkları 1000⁰C'lere çıkabildiği için deneysel olarak türbin rotorundaki sıcaklık ve gerilim dağılımlarını ölçmek imkansızdır (Wigand, et al., 2002). Bu yüksek sıcaklıklarda yapılacak herhangi bir deney düzeneği milyon dolarlar tutarında bütçeler gerektirmektedir. Bu nedenle yıllar boyunca iki ve üç boyutlu kaskat konfigürasyonları ile testler yapılmak zorunda kalınmış ve aerodinamik performansları deneysel olarak doğru şekilde ölçülmeye çalışılmıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre de türbin çalışma şartlarındaki sıcaklık ve gerilme dağılımları ampirik yöntemlerle yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkacak gerilme ve sıcaklık değerlerinin bulunmasında kullanılmıştır.

Söz konusu nümerik hesaplama yöntemlerinden son yıllarda en çok kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS ise havacılık, otomotiv, medikal, vs. sektörlerinde en yaygın olarak kullanılan programlardan

birisidir. Özellikle son on yıl içinde, en yalın haliyle kompresör, yanma odası ve türbinden oluşan gaz türbinleri yüksek teknolojilerin kullanıldığı ve birçok mühendislik hesaplarının yapıldığı en kritik komponent olarak kabul edilmektedir.

Bir gaz türbini tasarımının ilk aşamasında fiziksel olarak deneysel bir şekilde ölçülebilecek herhangi bir modul (kompresör, yanma odası, türbin, vs.) henüz üretilmemiş olduğu için, ilk olarak bu moduller alt komponentler bazında bilgisayarda modellenerek kritik yükler altında ortaya çıkan deformasyon, gerilme, sıcaklık gibi fiziksel büyüklükler kolayca hiçbir test ekipmanına gerek kalmadan hesaplanabilmektedir (Örnek olarak, tasarımın ilk aşamalarında 10000 devir ile dönen ve ortalama 1000⁰C'ye maruz kalan türbin palesi üzerindeki gerilmeler ve sıcaklık dağılımları bu yöntemler sayesinde hesaplanabilmektedir.). Bu safhada sonlu elemanlar metodu ile farklı alternatifler yaratılarak içlerinden tasarım açısından şartları sağlayacak en iyi model seçilebilmektedir. Unutulmamalıdır ki, sonlu elemanlar gibi numerik yöntemler, testlerin gerekliliğini ortadan kaldırmaktan ziyade test yapılacak alternatif parçaların sayısını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır.

Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu ile, ANSYS programı kullanılarak bir türbin sabit kanatçığının hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile önceden hesaplanan ısı taşınım katsayısı (h) ve basınç dağılımları etkisi altında, ortaya çıkan sıcaklık dağılımları ile deformasyon ve gerilme değerlerini hesaplamak amacı ile termal ve yapısal analizlerin yapılması hedeflenmiştir.

Girdi bilgileri gerçekçi olması açısından Von Karman Enstitüsünde 1990 yılında yapılan “Aero-Thermal Investigation of A Highly Loaded Transonic Linear Turbine Guide Vane Cascade” (Arts, 1990) deneysel çalışmasından alınmıştır.

Model üzerinde düşük sıcaklıklar için yapılan analizden sonra, aynı kanatçık geometrisi üzerinde daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bir türbin kanatçığı üzerinde meydana gelen sıcaklık ve basınç dağılım değerleri kullanılarak ikinci bir termal ve yapısal analiz yapılmış ve bu iki modeldeki sıcaklık ve gerilme dağılımının kanatçık üzerindeki

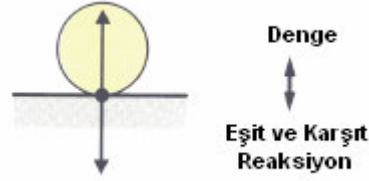
etkileri yorumlanmıştır. İkinci modelde de sonuçların gerçekçi olabilmesi için de bir mikrojet dizaynı için daha önceden hesaplanmış olan sıcaklık ve basınç dağılımı, motor üreticisi firmadan temin edilmiştir. İkinci modelde kanatçık malzemesi INCONEL dir. Nikel esaslı bir süperalaşım olan INCONEL malzemesi yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve termal direnci yüksek olan ve modern gaz türbinlerinde yüksek sıcak bölgelerinde ve özellikle türbin bölgesinde kullanılan bir malzemedir.

2 -TAHRİK İLKELERİ

2.1. Giriş

Bir uçakta tahrik belli değerde bir ivmenin bir kütleye uygulanması ile meydana gelir. Bu aslında Newton Kurallarının bir uygulamasıdır.

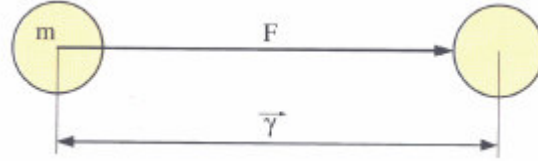
Bir gövdeye etki eden bir kuvvet için ona eşit ve karşıt bir kuvvet vardır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Bir gövdeye etki eden kuvvetler (Turbomeca, 1997)

Kuvvet (F) ve m kütlesine uygulanan γ ivmesi için şu eşitlik yazılabilir (Şekil 2.2):

$$F = m \cdot \gamma$$



Şekil 2.2. Kütle ve ivme formülü (Turbomeca, 1997)

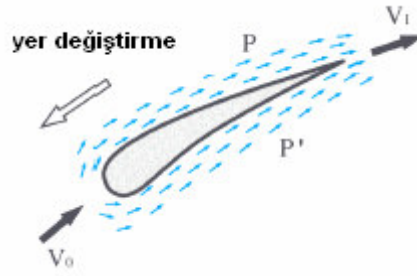
$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.1)$$

İlkeler aynı olmasına rağmen genel olarak iki tür tahrikten sözedilir : Tepki ile tahrik ve etki ile tahrik.

2.2. Etki İle Tahrik

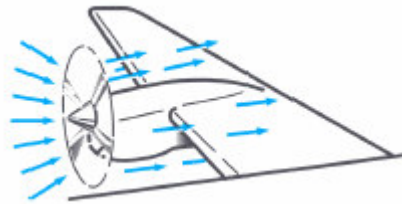
Etki ile tahrikte havanın içinde dönen pervane aerodinamik güçler yaratarak hava kütlesini ivmelendirir.

Aerodinamik profil, düşük hız (V) farkı ve Yüksek basınç farkı (P)`dan oluşur.(Şekil 2.3)



Şekil 2.3. Aerodinamik profil : Düşük hız (V)farkı ve Yüksek basınç farkı (P)

Etki ile tahrikte büyük bir hava kütlesi arkaya doğru düşük bir hız artışı ile arkaya doğru itilir (Şekil 2.4)

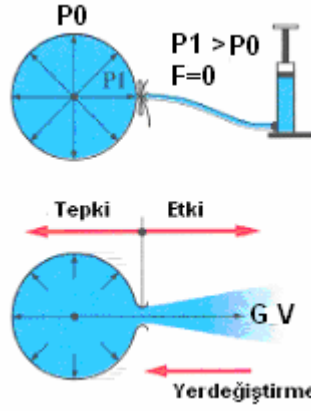


Şekil 2.4. Pervanenin hava kütlesini arkaya doğru itmesi. (Turbomeca, 1997)

2.3. Tepki ile Tahrik

Patlayan bir balon tepki ile tahrik ilkesine çok güzel bir örnektir. Balon patladığı zaman, basınç kuvvetlerinin bileşkesi sıfırdır ve balon denge halindedir.

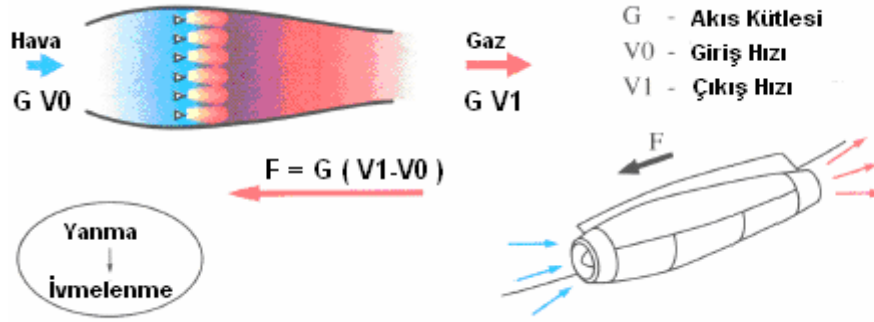
Balon delindiğinde hava belli bir hızla geriye doğru hareket eder (etki) ve balonda tam ters doğrultuda hareket eder (tepki). Öne doğru harekette kuvvet, dışarıya çıkan havanın kütesine (G) ve hızına bağlıdır (V) (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Etki ile tepki. (Turbomeca, 1997)

Tepki ile tahrik de küçük bir kütle miktarı büyük bir ivme ile geriye doğru itilmektedir.

Jet motorunu çalışma prensibi de tepki tahrik prensibidir (Şekil 2.6).

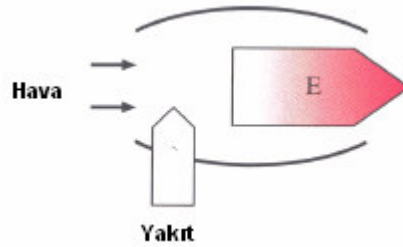


Şekil 2.6. Jet motorunun çalışma prensibi (Turbomeca, 1997)

2.4. Tahrik Sistemlerinin Sınıflandırılması

2.4.1. Giriş

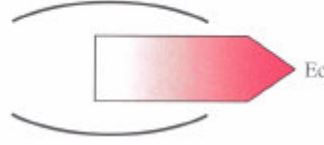
Havacılık motorları yakıt ve hava içindeki potansiyel enerjiyi kinetik veya mekanik enerjiye çeviren makinalardır.



Şekil 2.7. Hava ve yakıtın yanması ile üretilen gaz enerjisi (E) (Turbomeca, 1997)

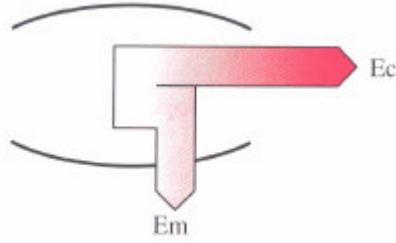
2.4.1.1. Direkt tepkili tahrik sistemleri

Bu tür sistemlerde bütün gaz kinetik enerjisi (E_c) tahrik için kullanılmaktadır. Roketler ve ram jetler bu tahrik türüne örnek olarak verilebilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Gaz kinetik enerjisi (Turbomeca, 1997).

Gaz kinetik enerjisi (E_c)'nin sadece bir kısmının tahrik için kullanıldığı sistemler de vardır. Geri kalan gaz kinetik enerjisi ise mekanik enerjiye (E_m) dönüştürülmektedir (Şekil 2.9). Turbo jet motorlar bu tahrik türüne örnek verilebilir



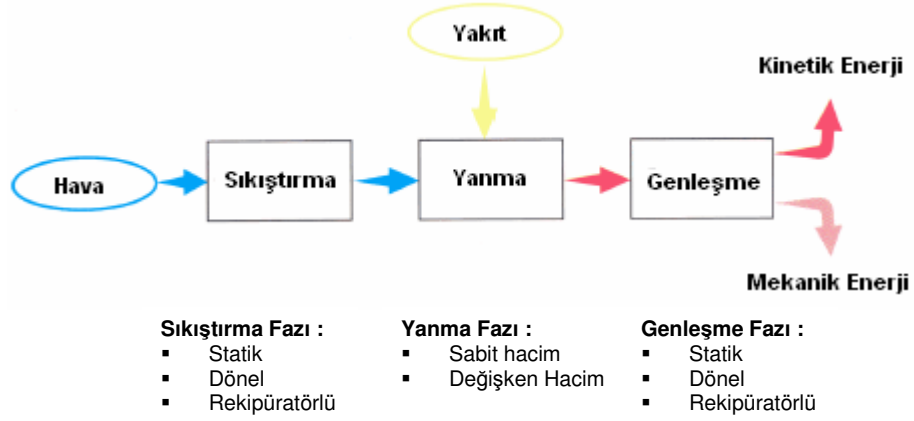
Şekil 2.9. Gaz kinetik enerjisinin bir kısmının mekanik enerjiye dönüşmesi (Turbomeca, 1997).

2.4.1.2. İndirekt tepkili tahrik sistemleri

Gaz kinetik enerjisi (E_c)'nin hemen hepsinin mekanik enerji (E_m)'ye dönüştürüldüğü sistemlerdir. Turboşaft ve turboprop motorlar bu tahrik tipine örnek verilebilirler (Turbomeca, 1997).

2.4.1.3. Enerjinin elde edilmesi

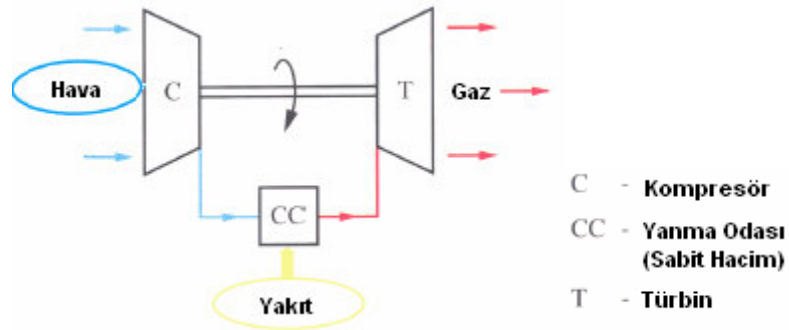
Birçok tahrik sistemleri havayı alıp, onu çeşitli fazlardan geçirirler. Bu fazlar üçe ayrılır : sıkıştırma, yanma ve genleşme (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Enerji elde etme fazları (Saravanamutto, et.al., 2001)

2.4.1.4. Gaz türbini komponentleri

Gaz türbinli motorlarda aşağıdaki komponentler kullanılır (Şekil 2.11).:

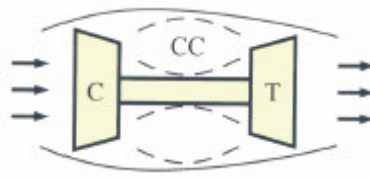


Şekil 2.11. Gaz türbini komponentleri

2.4.2. Tanımlar

2.4.2.1. Gaz türbini

Gaz türbini terimi enerji çevrimini kompresör (C), yanma odası (CC) ve türbin (T) vasıtasıyla yapan motor tiplerine verilen isimdir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Tek şaftlı basit bir gaz türbini gösterimi

Bir gaz türbini, çeşitli uygulamalar (turbo-jet, turbo-şaft, turbo-prop) için kullanılabilir.

2.4.2.2 Gaz Jeneratörü

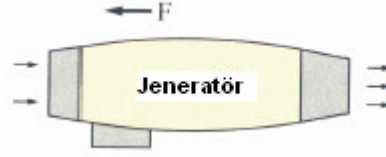
Motorda, enerji üretmek için gerekli olan termodinamik çevrimlerin gerçekleştiği bölümdür.

Gaz jeneratörü asamblesinin esas olarak bir şaftta mekanik enerji sağladığı durumlarda jeneratör “güç bölümü” olarak da adlandırılır.

2.4.2.3. Turbo Güç Santrali

Gaz Türbinleri aşağıdaki spesifik uygulamalarda kullanılır :

Turbo-jet güç santrali : Reaksiyon yolu ile itki elde edilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Turbo-Jet

Turbo-prop güç santrali : Elde edilen güç bir pervaneyi çevirmek için kullanılır (şaft gücü). (Şekil 2.14)



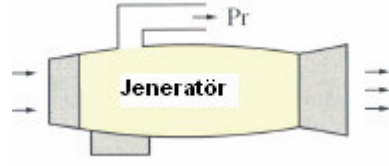
Şekil 2.14. Turbo-prop

Turbo-şaft güç santrali : Elde edilen güç, herhangi bir adaptörü çevirmek için kullanılır (şaft gücü). (Şekil 2.15)



Şekil 2.15. Turbo-şaft

Turbo hava jeneratörü: Daha fazla güç elde edebilmek için dış bir kaynaktan basınçlandırılmış (sıkıştırılmış) hava sisteme verilir. Kullanıldığı birçok uygulama vardır (Şekil 2.16)



Şekil 2.16. Hava Jeneratörü

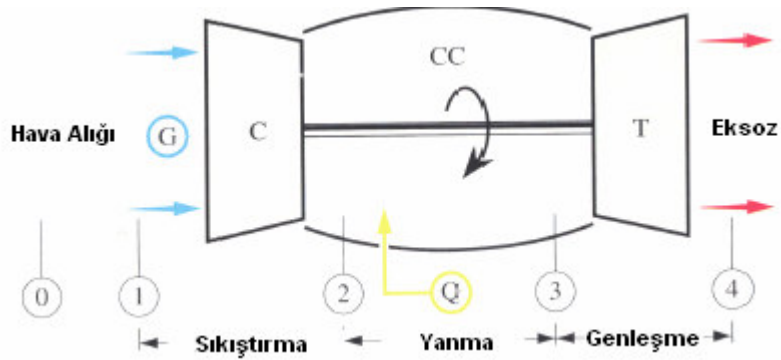
3. GAZ TÜRİNLERİNİN ÇALIŞMA TEORİSİ

3.1. Genel Prensipler

Uygulama ne olursa olsun, gaz türbinli motorlardaki çalışma fazları hep aynıdır : sıkıştırma, yanma ve genişleme.

Gaz türbinli motorların çalışma fazları aşağıdaki komponentler ile gerçekleştirilir (Şekil 3.1) :

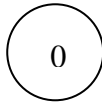
- Hava Alığı
- Kompresör
- Yanma Odası
- Türbin
- Eksoz



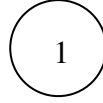
Şekil 3.1. Bir gaz türbinini oluşturan komponentler ve çalışma fazları (Turbomeca, 1997).

- Sıkıştırma –** Giren havanın (G) basıncının arttıran kompresörün (C) yaptığı iş.
- Yanma -** Hava (G) ve yakıtın (Q) karıştırıldığı ve sürekli yanmanın meydana geldiği safha
- Genleşme -** Sıkıştırılmış ve yanmış gazların türbinde (T) genleşmesi ile elde edilen gaz enerjisinin bir bölümü kompresörü (C) çevirmek için kullanılır ve kalan gazlar da dışarı atılırken eksozda genleşerek itkiyi meydana getirir.

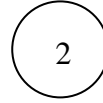
İstasyonlar



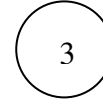
Ortam
Havası



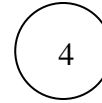
Hava Alığı



Kompresör
Çıkışı



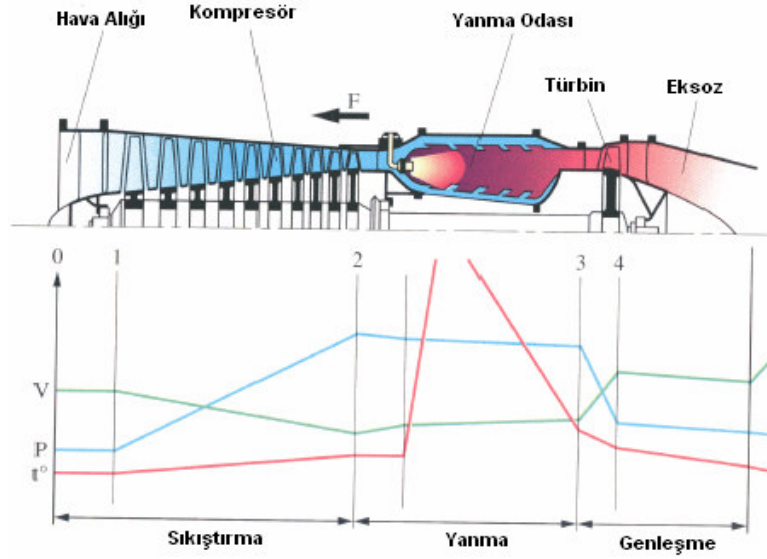
Türbin Girişi



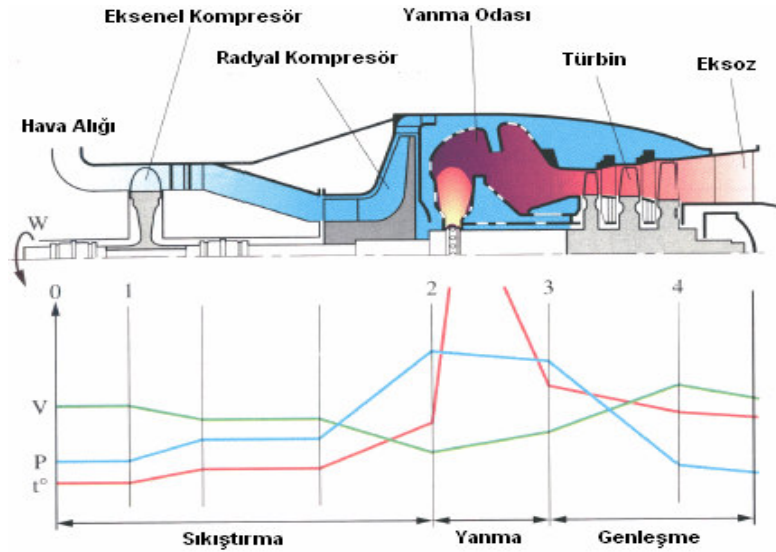
Türbin Çıkışı

3-2. Gaz Akış Diyagramları

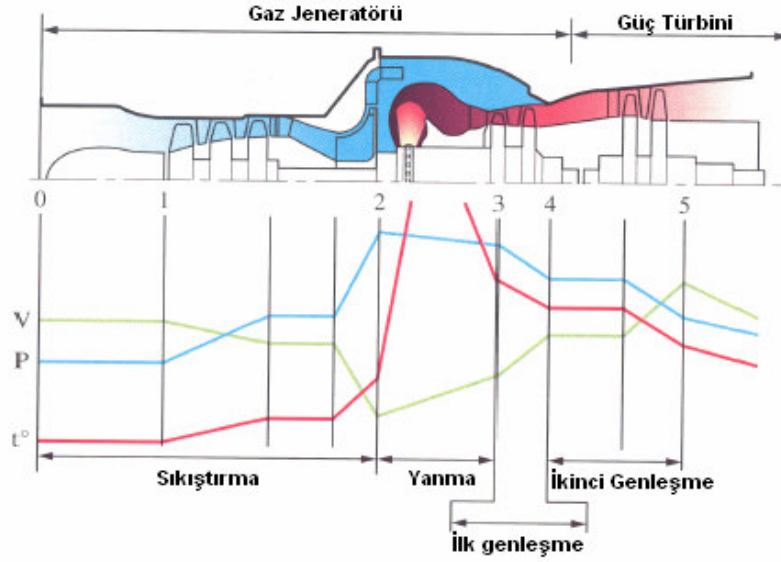
3.2.1 Turbo-jet/Turbo-Şaft motorların gaz akış diyagramı



Şekil 3.2.a Turbo-jet motorunun gaz akış diyagramı (Saravanamutto, et.al., 2001)



Şekil 3.2.b. Turbo-şaft motorun gaz akış diyagramı (Saravanamutto, et.al., 2001)



Şekil 3.2.c. Serbest Türbin turbo-şaft motorun gaz akış diyagramı (Saravanamutto, et.al., 2001)

3.2.2. Gaz türbinlerinde termodinamik çevrim

Gaz türbinlerindeki termdinamik çevrim Brayton çevrimidir ve bu çevrim, Basınç-Hacim ve Basınç-Sıcaklık eğrileri ile ifade edilebilir.

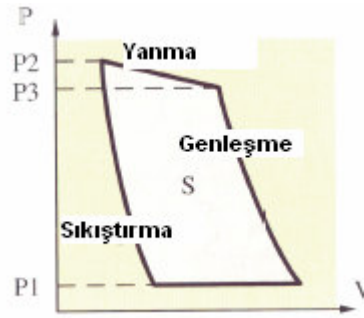
3.2.2.1. Basınç-hacim (P-V) diyagramı

Sıkıştırma teorik olarak adyabatiktir. Sıkıştırma sonucu basınç ve sıcaklık artar.

Kompresörü çevirmek için ihtiyaç duyulan güç, içeriye alınan hava kütlesi ve sıcaklıktaki artış oranına bağlıdır.

Havanın sıkıştırılarak basınç ve sıcaklığının artmasından sonra, hava yanma odasına iletilir ve burada sürekli yanma meydana gelirken, havanın basıncı biraz düşerken sıcaklık artar (Turbomeca, 1997).

Yanmadan sonra türbin kısmında gerçekleşen genişleme teorik olarak adyabatik olup, hız artarken basınç ve sıcaklık düşer (Şekil 3.3).

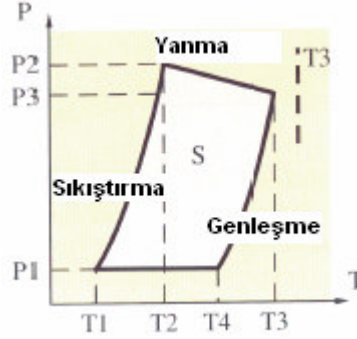


Şekil 3.3 Gaz türbinlerinde P-V diyagramı

Yanma, yanma odasındaki basınç kaybından dolayı tam olarak izobarik olmamasına rağmen, basınç sıcaklık ilişkisi aşağıdaki şekilde gösterilebilir :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.1)$$

3.2.2.2. Basınç-sıcaklık (P-T) diyagramı

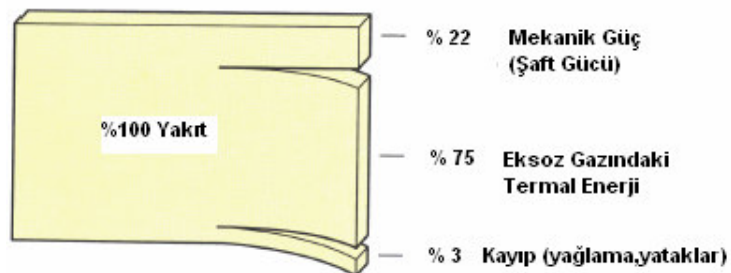


Şekil 3.4 Gaz türbinlerinde P-T diyagramı

Yukarıdaki diyagramda çalışan S yüzeyi ve T3 limiti gösterilmektedir. Yüzeyi arttırabilmek için P2/P1 oranı arttırılmalıdır ya da T3 limit daha yüksek bir değere ayarlanmalıdır. T3 limitinin çok yüksek değerlere ayarlanamamasının nedeni ise malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımlarının sınırlı olmasıdır (Şekil 3.4).

3.3. Enerjinin Dağılımı

Şekil 3.4'te (SANKEY DİYAGRAMI), gaz türbinli motorlardaki enerji dağılımı gösterilmektedir (Turbomeca, 1997):



Şekil 3.5. Gaz türbinli motorlarda enerji dağılımı (SANKEY Diyagramı)

3.4.Güç ve Verim

Termodinamik Güç (W_T) : İdeal şartlarda yakıtın yüzde yüz yanmasından elde edilecek olan güç;

$$W_T = W_c \cdot \eta_t \quad (3.2)$$

W_c : Yakıtın yanması ile elde edilen güç

η_t : Çevrimin termodinamik verimi

Termal Güç (W_{th}) : Motorun içinde hareket eden hava kütesine aktarılan güç :

$$W_{th} = \frac{1}{2} m(V_i^2 - V_0^2) \quad (3.3)$$

İtke Gücü (W_p) : Uçuş için ihtiyaç duyulan güçtür.

$$W_p = F \cdot V_0 = m(V_i - V_0)V_0 \quad (3.4)$$

Jet Gücü (W_j) : Motor çıkışındaki gaz enerjisi.

$$W_j = \frac{1}{2} mV^2 \quad (3.5)$$

$$\text{Yer çalıştırmasında : } W_{th} = W_j \quad (3.6)$$

Termodinamik Verim (η_t): Termodinamik gücün yakıt tarafından sağlanan enerjiye oranı.

$$(\eta_t) = \frac{W_T}{W_c} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (\cong \%40) \quad (3.7)$$

Termal Verim (η_{th}): Termal gücün yakıtın kalorifik (W_c) gücüne oranı.

$$(\eta_{th}) = \frac{W_{th}}{W_c} \quad (\cong \%25-30) \quad (3.8)$$

İçsel Verim (η_i): Termal gücün termodinamik güce oranı.

$$\eta_i = \frac{W_{th}}{W_T} \quad (\cong \%80) \quad (3.9)$$

İtki Verimi (η_p): İtki gücünün termal güce oranı (giriş hızının (V_i) yaklaşık %60'ı)

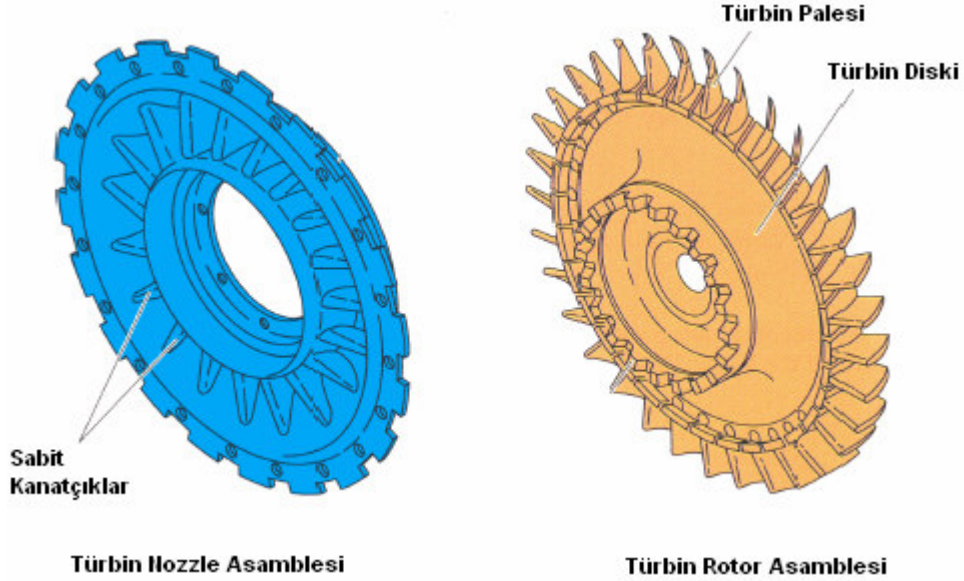
$$\eta_p = \frac{W_p}{W_{th}} = \frac{m(V_0 - V_i)V_0}{\frac{1}{2}m(V_i^2 - V_0^2)} = \frac{2V_0}{V_i + V_0} \quad (3.10)$$

Toplam Verim (η_g): Motor tarafından üretilen enerjinin yakıt tarafından verilen enerjiye oranı.

$$\eta_g = \eta_{th} \cdot \eta_p \quad (\cong \%20-25) \quad (3.11)$$

4. TÜRBİN KISMI

Türbin asamblesi, sabit kanatçıklar (NGV-Nozzle Guide Vane) ve onları izleyen dönen palelerden oluşurlar (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Türbin Asamblesi

4.1. Sabit Kanatçıklar

Sabit kanatçıklar genelde iki silindirik muhafaza arasında yer alırlar.

Dış muhafazalar genelde türbinin dış çerçevesinde yer alırlar. İç muhafaza ise genelde türbini kompresöre bağlayan shaftın etrafındadır.

Sabit kanatçıklar gaz akışını türbin palelerine uygun bir açı ile yönlendirirler. Soğutma amaçlı olarak, soğutma kanallı sabit kanatçık konfigürasyonları da mevcuttur (Turbomeca , 1997).

4.2. Türbin Rotor Asamblesi

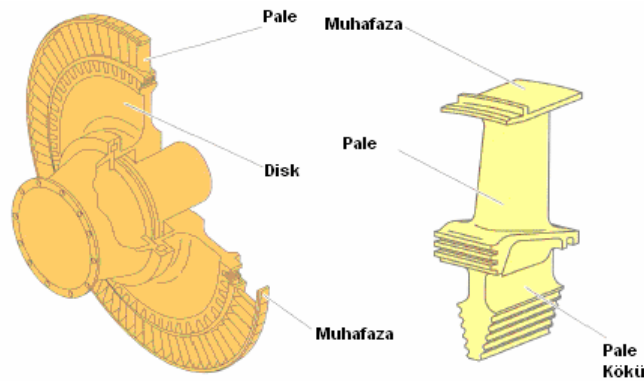
Rotor asamblesinde türbin paleleri, türbin diski ve şaftlar (ön ve arka) vardır (Şekil 4.2.).

Şaftlar türbin diski ile bitişik veya ayrı ayrı asamble edilebilir konfigürasyonlarda olabilirler. Türbin diskinin ön ve arka yüzü, kompresörün çeşitli kademelerinden alınan hava ile soğutulur. Ayrıca, türbin asamblesinde, palelerin aksenel yönde hareketini engelleyecek dairesel tutucular da mevcuttur.

Türbin paleleri disk ile bütünleşik yapıda olabilirler (blisk konfigürasyonu). Blisk konfigürasyonu diğer disk ve pale konfigürasyonuna göre statik/dinamik balans yönünden ve mekanik dayanım yönünden daha avantajlı olmasına rağmen, tamir edilebilirlik bakımından dezavantaj sergilemektedir.

Türbin paleleri ile dış çerçeve arasındaki mesafe çok kritiktir. Mesafe ne kadar az olursa pale uçlarında meydana gelen hava kaçakları minimum olacak ve verim artacaktır. Fakat mesafe hesaplarında yüksek sıcaklık ve yüksek devirlerde palelerin uzayarak çerçeveye sürtebileceği de dikkate alınmalıdır (Karaman ve Yurt, 1992)

Bazı türbin palelerinin uçları, uçlardaki kaçakları önlemek amacı ile, muhafazalı olarak imal edilmişlerdir.



Şekil 4.2. Türbin asamblesi alt parçaları

4.3. Türbinin Çalışma Teorisi

Türbinin görevini yeniden belirtecek olursak , yanan gazlar dışarıya atılırken türbin palelerine çarparak mekanik enerjiye dönüşür. Bu enerji motorun kompresör ve motordan dişliler vasıtası ile hareket alan tüm donanımlarını çalıştırır.

4.3.1. Çalışma teorisi ve türbin çeşitleri

Daha önce de belirtildiği gibi bir kademe türbin, sabit kanatçıklar (NGV) ve dönel türbin paleleri ve diskinden meydana gelir.

Yanma odasından gelen sıkıştırılmış ve yanan gaz ilk olarak sabit kanatçıklara çarpar. Daralan pasajdan dolayı, sabit kanatçıklarda basınç azalır ve hız artar ve gaz akışı uygun bir şekilde palelere yönlendirilir.

4.3.1.1. İmpulse türbinler

Bu tür türbinlerde dönme etkisi genelde etki sonucu meydana gelir (Şekil 4.3).

Bu tür türbinlerde gazın genişmesi sabit kanatçıklarda meydana gelir ve rotor çıkışındaki basınç, rotor girişindeki basınca eşittir.

Gaz türbinli motorlarda impulse türbinlerden daha ziyade tepkili türbin tipleri kullanılır.



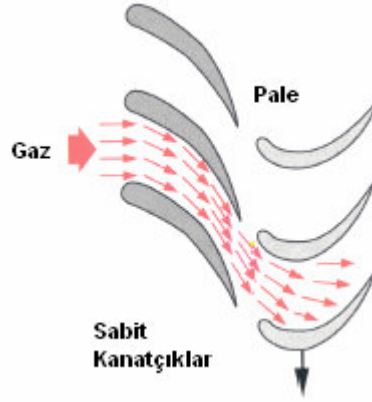
Şekil 4.3. İmpulse türbinler

4.3.1.2. Tepkili türbinler

Bu tür türbinlerde dönme etkisi profil üzerindeki aerodinamik güçler etkisi ile meydana gelir (Şekil 4.4).

Yanmış ve sıkıştırılmış gazların genişmesi kısmi olarak sabit kanatçıklarda kısmi olarak da palelerde meydana gelir.

Rotor kısmında kaybedilen enerjinin stator kısmında kaybedilen enerjiye oranı türbin tipi ile değişir (≈ 0.5).



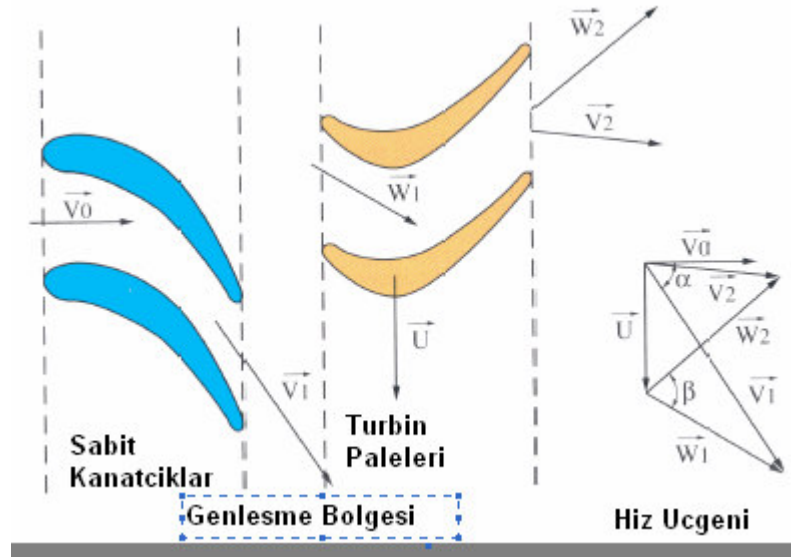
Şekil 4.4. Tepkili türbinler

4.4. Türbin hız üçgenleri

U – Devir

W – Akışın bağıl hızı

V – Akışın mutlak hızı



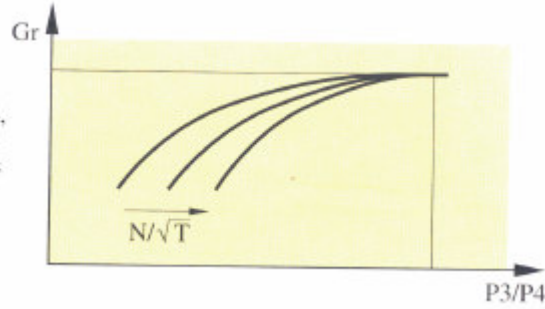
Şekil 4.5. Türbinde hız üçgenleri

Şekil 4.5. sadece tek türbin kademesini göstermektedir, fakat her motor için türbin kademe sayısı farklıdır. Ayrıca, yine her motorda türbin pale ve sabit kanatçıklarının uzunlukları, açısı ve şekli değişir.

4.5. Çalışma Karakteristikleri

Türbin kısmında meydana gelen genleşme aşağıdaki şekilde karakterize edilebilir (Şekil 4.6) :

- Genleşme oranı (giriş basıncı/çıkış basıncı \cong kademe başına 3.2)
- Sıcaklık düşmesi
- Akış hızı ve devir
- Tork kuvveti (Gaz akışına ve enerji dalgalanmasına bağlıdır)
- Verim (yaklaşık %92) (Vogt and Fransson, 2004)



Türbin genişleme oranı :

$$\frac{P3}{P4}$$

Dönme hızları :

$$\frac{N}{\sqrt{T}}$$

Düzeltilmiş hava miktarı :

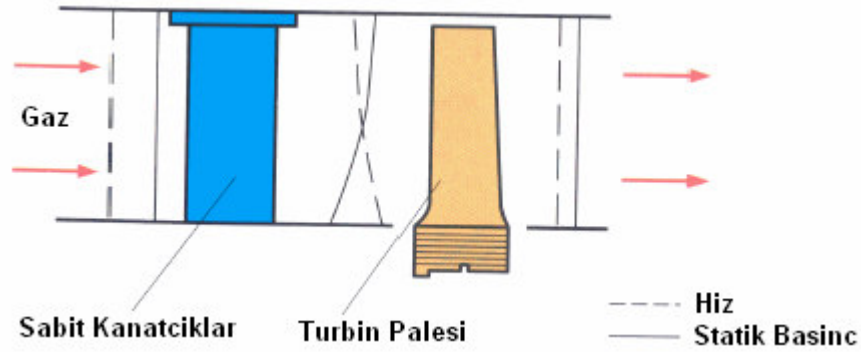
$$Gr$$

Şekil 4.6. Türbinin çalışma karakteristikleri

Türbin tarafından üretilen tork, gaz akışı ve enerji değişimine bağlıdır.

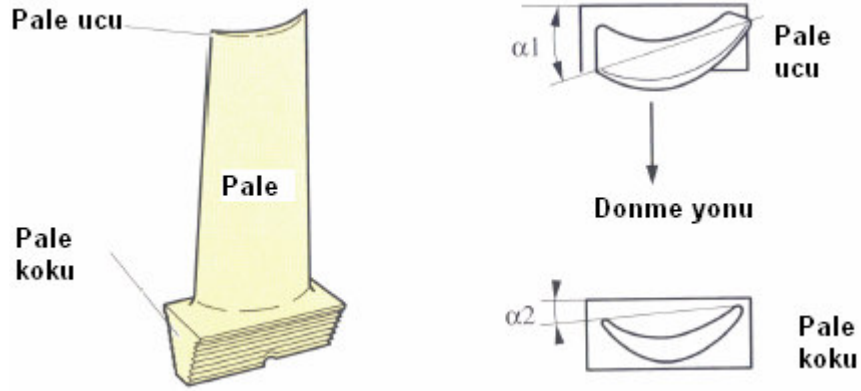
Sabit kanatçıklar ile yönlendirilen ve çevresel hareket kazanan gaz akışı türbin çıkışında düzeltilerek eksoz sistemine düzgün aksenal bir gaz akışı sağlar.(Şekil 4.7)

Sabit kanatçıklarda, kanatçık kökünden ucuna doğru hız artar ve basınç düşer.



Şekil 4.7. Türbinde gaz akışı

Üretilen işin pale boyunca düzgün dağılması ve akışın eksoz sistemine düz, aksenal bir hızda girebilmesi için, türbin paleleri, pale profili boyunca açılı bir yapıya sahiptir (en büyük açı palenin uç tarafındadır) (Şekil 4.8)(Jin, et. al, 2003).



Şekil 4.8. Türbin pale profili

5. SONLU ELEMANLAR METODU VE ANSYS

5.1. Tarihçe

Sonlu elemanlar metodu, değişik sonuçlar elde edebilmek için çeşitli mühendislik alanlarında uygulanabilecek numerik bir metottur.

Gerilme analizi, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetizma problemlerinde sabit veya geçiş anında, lineer veya lineer olmayan çözümlerin analizi sonlu elemanlar metodu ile yapılabilir. Modern sonlu elemanlar metodunun orijini, bazı araştırmacıların 1900'li yıllarda elastik ve eşit boyutta çubuklar kullanarak elastik sürekliliği modellemesine dayanmaktadır. Ama buna rağmen ilk sonlu elemanlar metodunu 1943 yılında Courant'ın geliştirdiği kabul edilmektedir. 1940 yıllarının başlarında parçalı polinomal enterpolasyonu üçgensel alt bölgelere uygulayarak burulma problemlerini araştırmıştır (Redy, J.N., 1993)

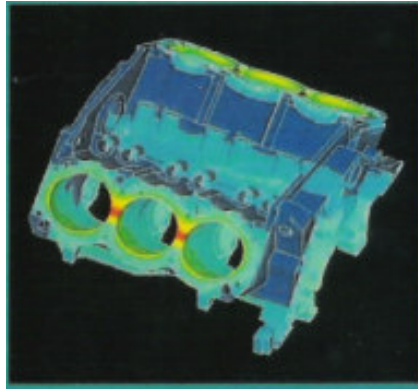
Bu araştırmadan sonra sonlu elemanlar metodundan yararlanılması ile ilgili en önemli adım 1950'li yıllarda Boeing'in, üçgensel gerilme elemanlarını uçak kanatlarını modellemede kullanılması ile oldu. 1960'lı yıllarda, araştırmacılar sonlu elemanlar metodunu, ısı transferi ve akış problemleri gibi mühendisliğin başka alanlarında da kullanmaya başladılar. Zienkiewicz ve Cheung, 1967 yılında sonlu elemanlar metodu ile ilgili bir kitap yazmışlardır. ANSYS programı ise ilk defa 1971 yılında kullanılmaya başlanmıştır. ANSYS programı, 100.000'den fazla kod içeren geniş kapsamlı ve genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. ANSYS, statik, dinamik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromagnetizma analizleri yapabilmektedir. ANSYS, 20 yılı aşkın bir süre en çok kullanılan sonlu elemanlar analiz (FEA) programı olmuştur. ANSYS'in son versiyonları, grafik kullanıcı ara yüzü (GUI), menüleri, çoklu pencereleri, diyalog kutuları ve araçlar menüsü ile yeni bir görünüm kazanmıştır. Günümüzde, ANSYS, havacılık, otomotiv, elektronik ve nükleer alanlarda kullanılmaktadır. ANSYS'i veya ANSYS benzeri başka bir sonlu elemanlar analiz programını tam anlamı ile ve bilerek kullanabilmek için

sonlu elemanlar metodunun altında yatan temel konseptleri ve limitlemeleri çok iyi bilmek gerekmektedir (Moaveni, 2003).

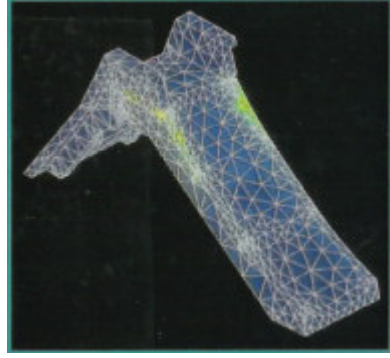
ANSYS, birçok problemi çözmeye yarayan çok güçlü ve önemli bir araçtır ve bir çok alanda uygulaması vardır.. Şekil 5.1’de Yapısal Analiz Mühendislik Topluluğunun rotorun doğal frekansını hesaplamada kullandıkları bir fren diskinin ANSYS modeli görülmektedir. Şekil 5.2’de ise önden çekişli motorlarda kullanılan V6 motor silindir kapağının ANSYS’in ısı transferi modülü ile analizi gösterilmektedir. Silindir kapağı üzerindeki ısı stres kontürleri açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.3’te de bir kaydırığın ANSYS kullanılarak yapılan non-lineer analizi gösterilmiştir. Şekil 5.4’te de gösterildiği gibi ANSYS’in elektromanyetik modülü ile de analizler yapılabilmektedir.



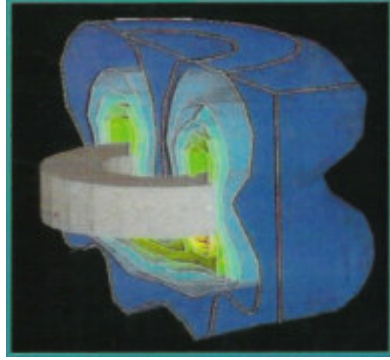
Şekil 5.1. Fren asamblesinin ANSYS ile analizi



Şekil 5.2. V6 motorun ANSYS ile ısı transferi analizi



Şekil 5.3. Bir kaydırağın ANSYS kullanılarak yapılan non-lineer analizi



Şekil 5.4. ANSYS'in elektromanyetik modülü ile analiz

5.2. Sonlu Elemanlarla İlgili Temel Bilgi

5.2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Temel Adımları

Bir problemin fiziksel doğasından bağımsız olarak, standart bir sonlu eleman metodu, başlıca genel olarak aşağıdaki adımları içerir.

5.2.1.1 Problemin ve çalışma alanının tanımı

Sonlu elemanlar metodunda, temel olarak üç yaklaşım kaynağı vardır. Birincisi fiziksel ve geometrik olarak çalışma alanının tanımı, diğer ikisi sonlu sayıda elemana bölünme ve algoritmanın çözümüdür. Çalışma alanının geometrik olarak tanımlanması için,

tanımlanmış çizgi ve alan elemanlarının eşitliklerini açıklayan, belirlenmiş düğüm noktalarının koordinatlarını referans alan global koordinat eksenlerine ihtiyaç duyulur.

5.2.1.2 Çalışma alanının bölünmesi

Gerçek sürekli bir alanın nasıl olupta kesikli bir çalışma alanı ile iyi bir şekilde idealize edilebileceği merak edilebilir. Belli bir noktaya kadar, daha küçük elemanların (daha ince ağ örgüsü) daha iyi sonuçlar vereceği doğrudur. Çalışma alanının sonlu elemanlar ile idealize edilmesinde, referans olarak iki tip eleman alınır. Bunlardan birincisi sonlu elemanlar diğeri ise master elemanlardır. Sonlu elemanlar, bir araya getirildikleri zaman sonuçta, gerçek sürekli çalışma alanının bölünmüş versiyonunu oluşturur. Sonlu elemanlar özellikle de çalışma alanının iç kısımlarında genelde, düz-kenarlıdır (veya-yüzeyli). Bu elemanlar sınırlarda (daha yüksek dereceli elemanlarda olduğu gibi) veya eğik yüzey içeren (levhalarda olduğu gibi) bölümlerde eğrilebilirler. Böylece eğilmiş elemanlar, fiziksel yaklaşıklıklara ilave olarak geometrik olarak da yaklaşıklık içerirler. Geometrik yaklaşıklıklar, elemanın dış kısmında şeklini tanımlamak için kullanılan düğüm noktalarının sayısı ile kontrol edilebilir. Fiziksel yaklaşıklıklar ise, durum değişkenleri için şekil fonksiyonlarını kullanan düğüm noktalarının toplam sayısı ile (dış kısımda olduğu kadar iç kısımda da kullanılan) kontrol edilebilir.

Master elemanların sonlu elemanlardaki kullanım yeri, eleman çalışma alanında hesaplamaları kolay hale getirmektir. Normalize edilmiş koordinat eksenlerinde tanımlanırlar (e, n, l). Gerçek elemanlar, herhangi bir boyut ve şekilde olabilir.

5.2.1.3 Durum değişkenlerinin belirlenmesi

Bu adıma kadar, problemin fiziksel doğasıyla ilgili herhangi bir referans yoktur. Problemin bir ısı transferi, akışkan ya da katı mekanik vs. bir problem olup olmadığı resmin içine bu aşamada eklenir.

Kararlı haldeki fiziksel bir problemin matematiksel ifadesi birçok değişken içerebilir. Bu değişkenlerin her biri arasındaki ilişki, belirgin bir fizik kanununun bileşenleri yansıtan matematiksel bir ifadedir. Örneğin, kırılma mekaniği analizleri için, sınıflandırma aşağıdaki şekilde yapılabilir :

Fiziksel Problem:	Elastik bir cismin deformasyonu
Korunum prensibi:	Kuvvetler dengesi
Durum değişkenleri:	kuvvetlerin yer değiştirmesi
Değişken:	gerilim veya gerinim
Malzeme sabitleri:	elastiklik modülü, poisson oranı
Bünye denklemi:	Hooke kanunu (Chanrupatla and Belengundu, 1991)

5.2.1.4 Koordinat sistemlerinin kurulması

Tüm sistem için bulunan global koordinat sistemine ilave olarak, elemanlar için özel bir koordinat sistemi kullanılmasının iki temel nedeni vardır. Birincisi, elemanlar için şekil fonksiyonları oluşturmada kolaylık ve ikincisi de elemanlar içinde integrasyonun kolay olmasıdır. Benzer eşitliklerin çözülmesinden sonra, eleman çalışma alanındaki gerinim, gerilim gibi fiziksel girdilerin hesaplanması için ters transformasyonlar rol alır.

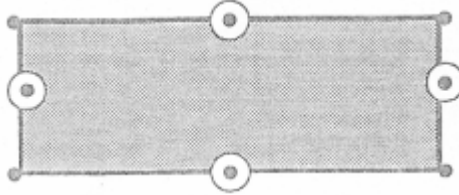
5.2.1.5 Elemanlar için yaklaşık fonksiyonların oluşturulması

Durum değişkenleri ve lokal koordinat sistemleri bir kere seçilince, fonksiyon çeşitli yollarla yaklaşırlabilir. Yaklaşırabilmek için iki girdiye ihtiyaç duyulur. Bunlardan

birincisi fiziksel (durum değişkeni) ve ikincisi de geometriktir (elemanın şekli). Eğer eleman gerçekte düz çizgiler veya düzlemlerden oluşuyorsa, birincil düğüm noktalarının (elemanın sınırlarındakiler) koordinatları elemanın şeklini doğru bir şekilde tanımlayacaktır. Bu durumda geometrik yaklaşıklık resmin içinde yer almayacaktır. Kullanıcı geometrik (eleman şekli) veya fiziksel (durum değişkenleri) yaklaşımları çalışma alanının çeşitli bölgeleri boyunca eşit bir şekilde veya birine öncelik verecek şekilde kullanıp kullanmayacağına karar vermelidir. Bu karar, eleman şekli "m" ve durum değişkeni "n" ile ifade edilen 3 farklı eleman kategorisine yol açar. 3 grupta sınıflandırılabilcek bu elemanlar :

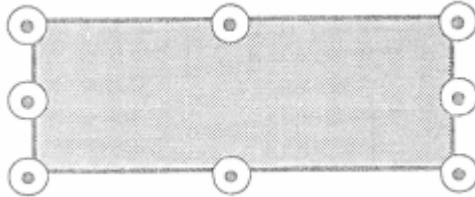
a. Altparametrik Elemanlar ($n > m$) : örnek bir eleman şekil 5.5'de görölmektedir.

- Durum değişkenini tanımlayan düğüm noktaları = n
- Geometriyi tanımlayan düğüm noktaları = m



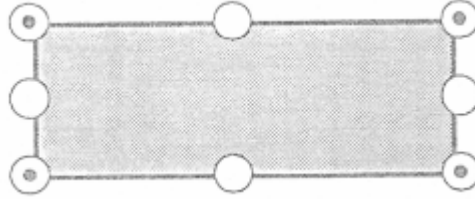
Şekil 5.5. Altparametrik eleman konfigürasyonu

b. İzoparametrik Elemanlar ($n = m$). Örnek bir eleman şekil 5.6'de görölmektedir.



Şekil 5.6. İzoparametrik eleman konfigürasyonu

c. Süperparametrik ($m>n$). Örnek bir eleman şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.7. Süperparametrik eleman konfigürasyonu

5.2.1.6. Koordinat dönüşümleri

Koordinat dönüşümleri genellikle Jakobyen matrisi formunda yapılır. Örneğin, eleman çalışma alanının x, y, z 'de yerleşmiş, master elemanda e, h, l 'da yerleştirilmiş iki farklı koordinat sistemi olduğunu varsayalım. Bu koordinat sistemleri arasında sürekli ve diferansiyeli alınabilir bir ilişki kuralım.

$$x = x(e, h, l)$$

$$y = y(e, h, l) \quad (5.1)$$

$$z = z(e, h, l)$$

Bir koordinat sistemindeki sonsuz küçüklükteki bir çizgi segmenti, diğerine aşağıdaki diferansiyel kuralını kullanarak dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \\ d\zeta \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Bu eşitliğin sağ tarafındaki ilk matris (5.2), Jakobyen olarak bilinir.

$$\begin{bmatrix} d\xi \\ d\eta \\ d\zeta \end{bmatrix} = j^{-1} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

(Acar, 1997)

5.2.1.7 Sonuçların Yorumlanması

Bu adım karar alınan ve belki de tüm işlem boyunca en önemli olan adımdır. Bu noktada iki önemli sorunun cevabı aranmalıdır : Sonuçlar ne kadar iyi ve bu sonuçlarla ne yapmalıyım? Birincisi hata tahmini yapılmasına ihtiyaç duyar ve ikincisi de problemin fiziksel doğasını kapsar. Bu soruların cevapları analizin tamamını veya belli adımlarını tekrar ettirmeyi gerektirebilir. Bununla birlikte uygulamada, problemlerin büyük kısmında, sadece aynı problemin çeşitli analiz sonuçlarını karşılaştırarak güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

5.2.2 Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulamaları

Olağan bir sonlu elemanlar programı, ön işlemci, işlemci ve son işlemci olmak üzere 3 ana adımdan oluşur. İlk kısım kullanıcı tarafından doldurulurken, diğer iki kısım kullanılan program tarafından tamamlanır. Bu kısımlar aşağıdaki adımları içerir.

i) Kullanıcı tarafından yerine getirilen görevleri bulunduran ön işlemci:

- 1) Analiz türü (statik, dinamik, termal, ...)
- 2) Boyutun tanımlanması (2 boyut veya 3 boyut)
- 3) Elemanların tanımlanması (2 boyutlu analiz için düzlemsel elemanlar, 3 boyut için tuğla veya kübik elemanlar, vs.)
- 4) Malzeme özelliklerinin tanımlanması (E, μ, \dots)
- 5) Model sınırlarındaki kısıtların tanımlanması ($u_x, u_y, u_z, rot_x, rot_y, rot_z$)
- 6) Yükleme tiplerinin tanımlanması (F_x, M_x, \dots)

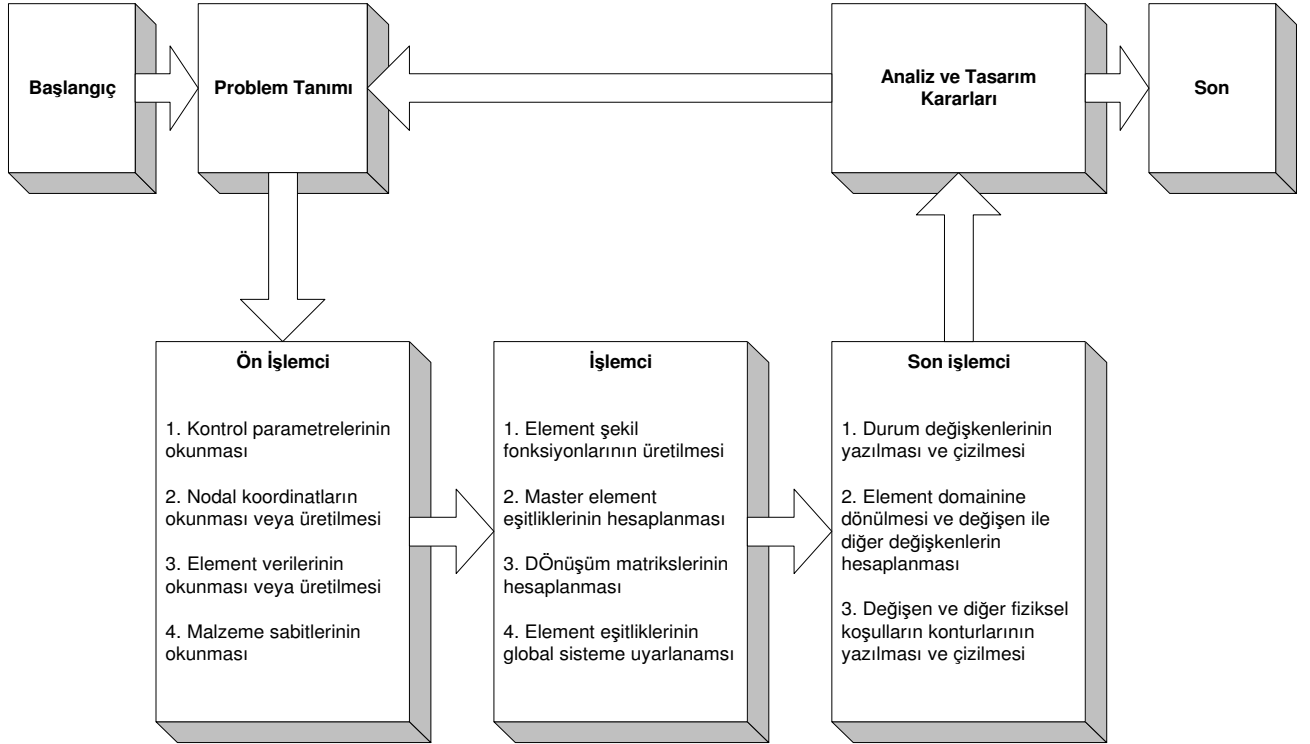
ii) Program tarafından yerine getirilen görevleri bulunduran işlemci:

- 1) Eleman şekil fonksiyonlarının oluşturulması
- 2) Master eleman eşitliklerinin hesaplanması
- 3) Dönüşüm matrislerinin hesaplanması
- 4) Eleman eşitliklerinin kurulması
- 5) Sınır koşullarının girilmesi
- 6) Çözüm işlemlerinin yerine getirilmesi

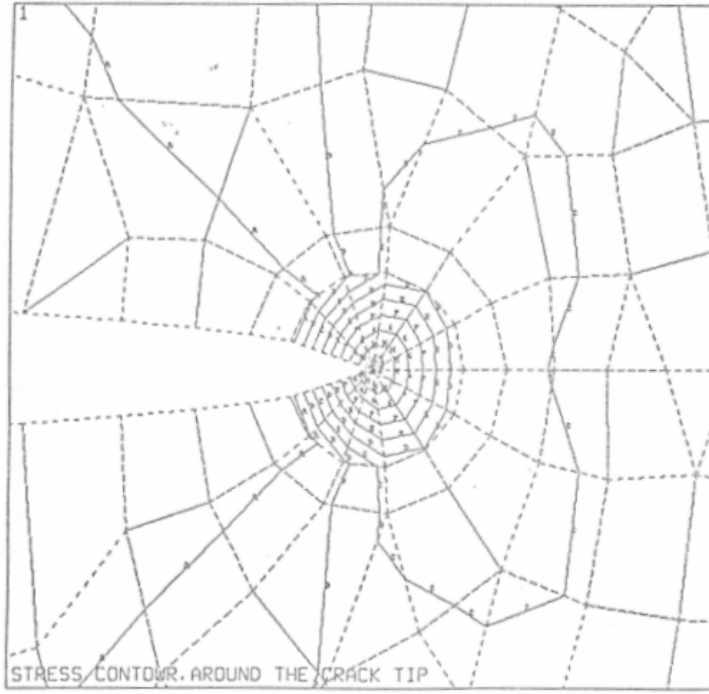
iii) Son işlemciden kullanıcı tarafından elde edilebilecek şeyler:

- 1) Durum değişkenlerinin konturlarının yazılması ve çizilmesi (Şekil 5.9)
- 2) Deforme olmuş şeklin yazılması ve çizilmesi (Şekil 5.10)
- 3) Yer değişiklikleri, dönmeler. vs için vektörel gösterim (Şekil 5.11)

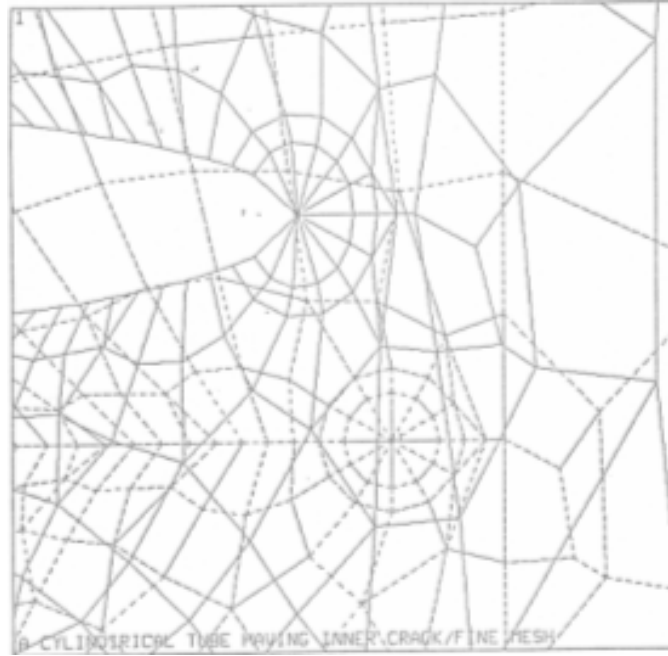
Tüm bu maddelerin şematik açıklaması şekil 5.8'de gösterilmiştir. Bir analizinin nodal ve vektörel gösterimleri ise şekil 5.9, 5.10 ve 5.11'de gösterilmiştir.



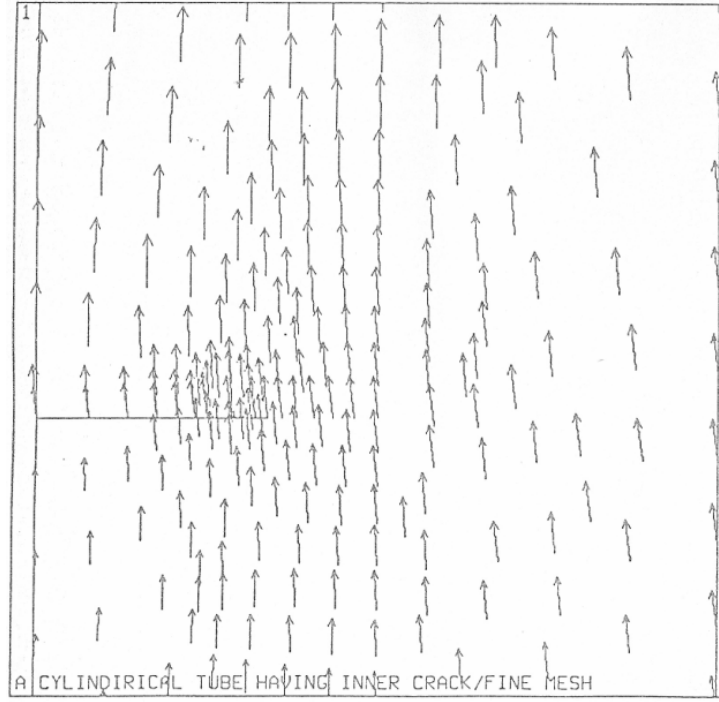
Şekil 5.8. Bir sonlu elemanlar programının temel parçaları



Şekil 5.9. Çatlak başlangıcı etrafındaki gerilim dağılımı.



Şekil 5.10. Bir çatlağın deforme olmuş ve deforme olmamış şekli.



Şekil 5.11. Çatlak başlangıcı etrafındaki düğüm noktalarının vektörel yerdeğişirmeleri

5.2.3 ANSYS Hakkında

ANSYS dünyada kullanılan ticari sonlu elemanlar programları arasında en güçlü olanlardan biridir. Bunun nedeni ANSYS'in çok çeşitli uygulama alanları olmasıdır. ANSYS ürün ailesi, 7 temel parçadan oluşmaktadır. Bunlar; MP (multifizik), ME (mekanik), ST (yapısal), LP (lineer plus), TH (termal), E2-3 (elektromagnetik), FL (flotran-akışkan). Bu alt ürünleriyle ANSYS, lineer ve lineer olmayan analizler, kırılma, ısı transferi, akışkanlar, akustik problemler gibi çok sayıda problemi hem modelleyebilmekte ve hem de çözebilmektedir.

ANSYS programı, oldukça ayrıntılı bir grafik kullanıcı arayüzüne (GUI - Graphical User Interface) sahiptir ve böylece kullanıcılara program fonksiyonlarına, komutlara,

dökümanlara ve referans malzemelere kolay ve interaktif bir ulaşım sağlar. Kullanıcı verileri fare, klavye veya her ikisinin kombinasyonu ile girebilir.(Acar,1997)

ANSYS hem Windows hem de Unix sistemi için uygundur. 3 tip ANSYS programı mevcuttur: Birincisi öğrenci versiyonu, ikincisi üniversiteler için ve sonuncusu da ticari kullanımlar için tam versiyondur. Aralarındaki temel fark program tarafından kullanılan düğüm noktalarının sayısındadır.

ANSYS programı iki temel seviye halinde yapılmıştır:

- Başlangıç seviyesi,
- İşlemci (veya rutin) seviye

Başlangıç seviyesi ANSYS programının içine ve dışına bir geçiş yolu gibi işlem yapar. Aynı zamanda belli işin adını değiştirme, veritabanını silme ve dosyaları kopyalama gibi genel program kontrolleri için de kullanılır. Kullanıcı programa ilk girdiğinde, başlangıç seviyesindedir.

Kullanıcılar için ANSYS ile çalışırken iki olanak vardır. Bunlardan birincisi direkt olarak G.U.I ile (menüler yoluyla) çalışmaktır. İkincisi ise A.P.D.L. (ANSYS Parametric Design Language) ile çalışmaktır. Basit modeller için direkt olarak çalışma son derece verimlidir ancak kompleks parça ve modeller için A.P.D.L. tavsiye edilir çünkü bu yolla parametrik program yazılabilir. A.P.D.L. kullanıcılara diyalog kutuları yoluyla program parametrelerini girmelerine izin verir. A.P.D.L.'in programlama mantığı C ve Pascal gibi diğer yüksek seviye programlama dillerine benzer.

A.P.D.L. ile başlamak için iki opsiyon vardır, birincisi bir metin dosyası açılır ve program bu dosyaya yazılır, ikinci opsiyon olarak ise program, ANSYS'in kendi log dosyasına yazılabilir.

Kırılma mekaniği için, ANSYS son derece uygun bir programdır. Gerilim şiddet faktörleri program tarafından modelin doğru, kullanılan malzemenin izotropik, gerilim

durumunun düzlem gerilim, düzlem gerinim veya eksenel simetrik olması koşullarıyla direk olarak hesaplanabilir (Zienkiewicz, O.C., 1997).

5.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Katı Modelleme

Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapmaya başlamadan önce aşağıda belirtilecek olan hususların açıklığa kavuşturulması gerekmektedir.

5.3.1. Temel Adımlar

Kullanıcı modelini oluşturmaya başlamadan önce, fiziksek sistemi matematiksel olarak nasıl simule edeceğini çok iyi tasarlaması gerekmektedir: İlk olarak, yapılacak olan analizin amacı iyi belirlenmelidir. Modelin hepsini mi yoksa bir kısmının mı simule edileceğine karar verilmelidir. Modelin ne kadar detaylandırılacağı, analizde kullanılacak eleman tipi ve model de kullanılacak olan ağ örgüsü yoğunluğu belirlenmelidir. Bunlara ek olarak, elde edilecek sonuç karşılığında harcanacak olan hesaplama maliyetlerini (bilgisayar işlemcisinin kapasitesi, problemi çözmek için harcadığı zaman, v.s.) göz önüne almalıdır. Yukarıda sayılan bütün bu belirlemeler, yapılacak analizin başarılı olabilmesi için şarttır.

5.3.2. Hedefin Belirlenmesi

Analizin ilk adımı kullanılan programın kapasitesine değil, kullanıcının eğitimine ve tecrübesine bağlıdır. Yapacağı analizin hedeflerinin neler olabileceğine sadece kullanıcı karar verebilir. Kullanıcı başta belirleyeceği hedefler doğrultusunda modelini oluşturur ve analizini gerçekleştirir.

5.3.3. Modelin Boyutlarının Belirlenmesi

Bir sonlu elemanlar modeli, iki boyutlu (2-D) veya üç boyutlu (3-D) olmasıyla ve, nokta elemanlardan, çizgi elemanlardan, alan elemanlarda veya katı modellerden meydana gelmesi ile kategorize edilebilir. Modelin boyutu ve eleman tipinin seçimi genellikle problemi çözebilmek için kullanılacak olan model oluşturma yöntemine bağlıdır.

Çizgi modelleri iki boyutlu veya üç boyutlu kiriş yapıları ve bunun yanında üç boyutlu simterik olmayan kabuk yapıların iki boyutlu modellerini temsil ederler. Katı modelleme genel olarak çizgi modelleri oluşturmak için çok kullanışlı bir metod değildir.

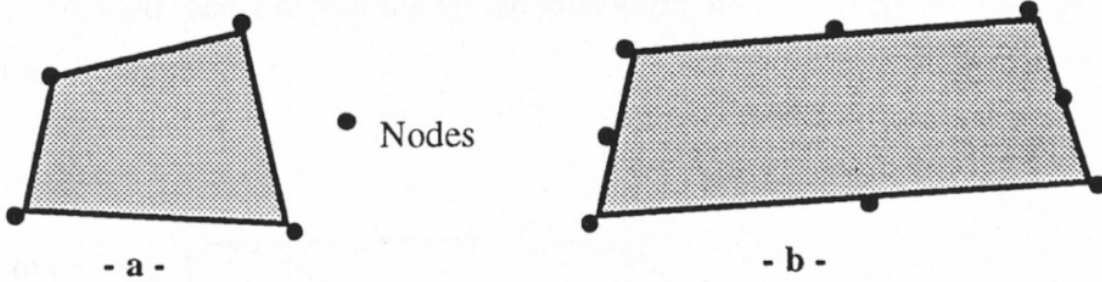
İki boyutlu katı analiz modelleri ince düzlemsel yapılar (plane stress), sabit bir kesite sahip “sonlu uzunluk”taki yapılar (plane strain) veya eksenel simetrik katı yapılar için kullanılmaktadır. Birçok iki boyutlu analiz modelleri, direk modelleme yöntemleri ile daha kolay oluşturulsalar da, katı modelleme ile de zorlanmadan oluşturulabilmektedirler.

Üç boyutlu kabuk modeller üç boyutlu bir düzlemde ince yapıların modellenmesi amacı ile kullanılmaktadırlar. Birçok üç boyutlu kabuk modeller, direk modelleme yöntemleri ile daha kolay oluşturulsalar da, katı modelleme ile de zorlanmadan oluşturulabilmektedirler.

Üç boyutlu katı model analizi, simetri ekseni olmayan ya da sabit bir kesit alanına sahip olmayan kalın yapılar için üç boyutlu düzlemde kullanılırlar. Direk modelleme metodları ile üç boyutlu model oluşturabilmek çok kolay değildir (Acar, 1997).

5.3.4. Elemanların Sıralarının Belirlenmesi

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi temel olarak iki çeşit eleman vardır ; lineer ve quadratik.



Şekil 5.12. Temel alan ve hacim elemanları (a) Lineer (b) Parabolik

Lineer elemanlar : Yapısal analiz için, sadece köşe noktalarında düğüm noktaları bulunan bu elemanlar kullanılır ise uygun bir zamanda çözüme ulaşılabilir. Tabii bu elemanı kullanırken kullanıcı, kritik noktalardaki bozulmaları engelleyecek şekilde modelini oluşturmalıdır.

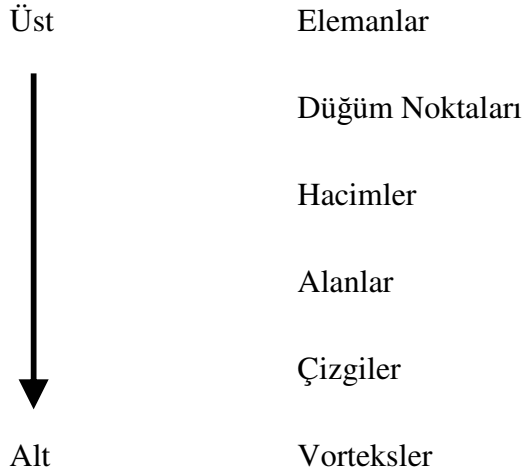
Parabolik elemanlar : Quadratik elemanların köşe noktalarındaki düğüm noktalarına ek olarak köşelerin orta noktalarında da düğüm noktaları mevcuttur ve bu yüzden lineer yapısal analizlerde lineer elemanlara oranla daha kesin çözümler verirler. Kritik noktalardaki bozulmaları simule etme özellikler daha iyidir. Fakat, çözüm süreleri lineer elemanlara nazaran daha uzundur.

5.4. Katı Modellemeye Sonlu Elemanlar Metodu Açısından Genel Bir Bakış

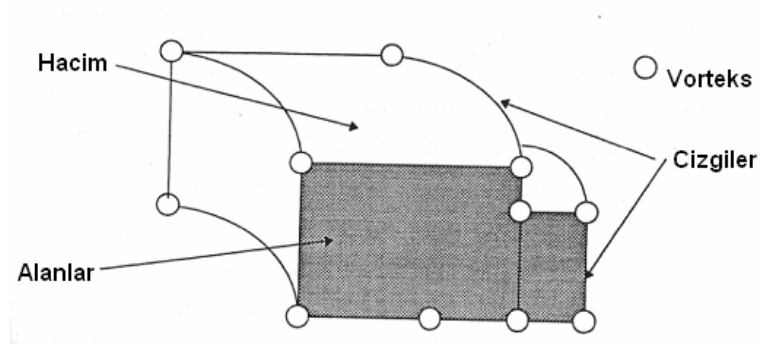
5.4.1. Katı model elemanları

Katı model kullanmanın amacı, direk modelleme ile kaybedilecek vaktin önlenmesidir. Direk modelleme de her düğüm noktası tek tek oluşturulmalıdır ve bu düğüm noktalarından da elemanlar oluşturulmalıdır. Bundan dolayı direk modelleme genel olarak iki boyutlu modeller için uygundur.

Modelleme elemanlarındaki sıralama aşağıdaki gibidir :



Boyutu belirlenmiş katı bir model yukarıdaki elemanların bir kısmını veya hepsini içerir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Bottom up yapısı.

Vorteksler, katı modellemede en alt seviyede kullanılan elemanlardır. Genelde katı bir model oluştururken, kullanıcı ilk olarak vorteksleri oluşturur ve daha sonra o vorteksleri daha üst seviyedeki elemanları (alanlar, hacimler, v.s.) tanımlamada kullanır. Bu yöntemle “aşağıdan yukarıya modelleme” adı verilir.

ANSYS programı kullanıcıya tanımlanmış çizgiler, alanlar, ve hacimler gibi geometrik şekiller kullanarak modelini oluşturabilme fırsatı da vermektedir. Geometrik

şekli oluştururken program otomatik olarak o şekilden daha düşük seviyedeki elemanları da oluşturur ki bu modelleme yöntemine “yukarıdan aşağıya modelleme” adı verilir.

Aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya modelleme teknikleri uygun olduğu takdirde aynı model üzerinde dahi beraberce kullanılabilir.

5.4.2. Oluşturulan bir modelin düzeltilmesi

Oluşturulan bir modeli düzeltirken, kullanıcının katı modelin ve sonlu elemanlar modellerinin sıralamasını iyi bilmesi gerekmektedir. Eğer bir model ağ örgülü haldeyse, elemandan daha düşük seviyedeki katı eleman modelleri silinemez.

Eğer bir model ağ örgüsü atıldıktan sonra tekrar düzeltilecekse, kullanıcı modelin düzeltilecek bölümünde bütün elemanları ve düğüm noktalarını silmelidir. Ancak bu silme işleminden sonra katı model elemanları silinip tekrar tanımlanabilirler. Model düzeltilip tekrar oluşturulduktan sonra bir kez daha ağ örgüsü atılmalıdır.

5.4.3. Katı Modelin Sonlu Elemanlara Ayrılması

Düğüm noktaları ve elemanlardan meydana gelen bir ağ örgüsünü oluşturabilmek için üç ana adım gerekmektedir. Bunlar; eleman özelliklerini tanımlamak, ağ örgüsü kontrollerini tanımlamak ve ağ örgüsünü oluşturmak.

Birinci adımda, kullanıcı eleman tipini (örnek: PLANE2, PLANE82) , sınır şartları (örnek: kalınlık, kesit alanı v.s.), malzeme özellikleri (Young’s Modulus, Poisson Oranı, v.s.) ve son olarak da eleman koordinat sistemini tanımlamalıdır.

İkinci adımda, kullanıcı eleman şeklini, orta nokta düğüm noktasını ve katı modeli ağ örgüsü kullanarak kaplarken kullanılacak olan eleman boyutunu tanımlamalıdır. Bu

adımda tanımlamalar analiz sonucunun ekonomisini ve kesinliğini birinci derecede etkileyeceği için bu adım en önemli adımdır. Modele bağlı olarak ağ örgüsü yoğunluğuna doğru karar verilmelidir. Örnek olarak, bir çatlak ucundaki ağ örgüsü yoğunluğu modelin diğer bölgelerine göre çok daha yoğun olmalıdır. Bir katı modele ağ örgüsü atmanın iki yolu vardır. Birincisi, alana ağ örgüsü atılması ve uzatma yöntemi ile o alanın hacime dönüştürülmesi ya da ilk olarak hacmin modellenmesi ve direkt olarak o hacime ağ örgüsü atılmasıdır. İkinci yöntemde daha çok eleman kullanılmaktadır.

5.4.4. Yüklerin Uygulanması

Yükler kelimesi, sınır şartları ve içeriden ve dışarıdan uygulanan kuvvet fonksiyonlarını içerir. Değişik disiplinlerdeki yük örnekleri :

Yapısal ; yerdeğiştirmeler, kuvvetler, basınçlar, sıcaklıklar, yerçekimi kuvvet, v.s.

Termal ; Sıcaklıklar, ısı, konveksiyon, ısı akımı, v.s.

Akışkan ; hızlar, basınçlar, v.s.

Yükler altı kategoriye ayrılırlar : Serbestlik derecesi, kuvvetler (konsantre yükler), yüzey yükleri, gövde yükleri, eylemsizlik yükleri ve kuple yükler

Serbestlik derecesi sınır şartı, modelin serbestlik derecesini bilinen bir sınır şartına getirmek için kullanılır. Sınır şartlarına örnek olarak; sabitlenmiş yerdeğiştirmeleri, yapısal analizde simetri sınır şartlarını ve termal analizde modele uygulanan sıcaklıkları örnek verebiliriz.

Kuvvet, model üzerinde bir noktaya uygulanmış olan konsantre yük olarak tanımlanabilir. Örnek olarak yapısal analizdeki kuvvet ve momentler ve termal analizde de ısı akış oranları gösterilebilir.

Yüzey yükü ise, bir yüzey üzerine dağılmış yükler olarak tanımlanabilir. Yapısal analizde bir yüzeydeki basınç ve termal analizde konveksiyon ve ısı akımı yüzey yüklerine örnek olarak verilebilir.

Gövde yükü ise volümetrik bir yüküdür. Yapısal analiz için sıcaklık ve akış örnek verilebilir. Termal analizde ısı üretim oranı gövde yüküne örnektir.

Eylemsizlik yükleri kütlelerin eylemsizliğine verilir. Örnek olarak; yerçekimi ivmesi, açısal hız ve açısal ivme verilebilir.

Kuple yükleri yukarıda anlatılan yüklerin özel bir halidir. Burada bir analiz sonucu diğer bir analiz için yük olarak kullanılabilir.

Yüklerin birçoğu hem katı modele (vorteksler, çizgiler ve alanlar) hem de sonlu eleman modeline (düğüm noktaları ve elemanlar) uygulanabilir. Örnek olarak, kuvvet hem vortekslere hem de düğüm noktalarına uygulanabilir.

Yükleri katı modele uygulamanın avantajı daha fazladır. Yükler katı modele uygulandığında kullanıcı yükleri silmeden veya değiştirmeden ağ örgüsünün boyutu ve yoğunluğu değişebilir. Katı model genel olarak sonlu elemanlar modeline nazaran daha az eleman içerir. Bundan dolayı, grafiksel olarak katı model elemanlarını seçip yükleri uygulamak daha kolaydır.

5.4.5. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Yapılan analizin amacına göre; modelin nasıl davranacağı anlaşılabilir, modelin davranışı yapısal davranışa çevrilebilir, gerçek yapının nasıl davranacağı tahmin edilebilir ve yapının amaca uygun olup olmadığına karar verilebilir.

5.4.5.1. Model Davranışı

Modelin ve yapının değerlendirilmesi genellikle yapı içerisindeki yük yollarının iyi şekilde anlaşılması ile gerçekleştirilebilir. Bu amaç için en uygun olanlar grafiksel sonuçlardır. Yerdeğiştirme grafikleri, gerilme grafikleri ve reaksiyonları gösteren grafikler bu konuda çok yardımcıdır. Bu aşamada, dağılım ve gerilmelerin yönü büyüklüklerinden daha önemlidir.

Eğer yüklemeler de basit komponent yüklemeleri seviyelerine indirgenebilirse, elde edilen sonuçların anlaşılması ve yorumlanması diğer birleşik kompleks yüklemelere nazaran çok daha kolay olacaktır.

5.4.5.2. Yapısal Davranış

Model sonuçlarını yapısal sonuçlara çevirmenin amacı, model ile gerçek yapı arasındaki farkları tanımlayabilmek ve bu farklara göre de gerekli düzenlemeleri yapabilmektir. Çoğu durumda model, gerçek yapıya göre çok daha kötümser, negatif sonuçlara maruz kalacak şekilde tasarlanır ve modelin sonuçları kabul edilebilir seviyede çıkarsa herhangi bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmaz. Ama genelde benzer yapılar için bir çok moelleme yapılır ve analiz sonuçlarına göre de birçok iyileştirmelerde bulunulur.

Farklılıklar geometriden, malzeme özelliklerinden, desteklerden ve yüklemelerden kaynaklanır. Bu sayılanların etkisini anlayabilmenin en iyi yolu, modele uygun bir fiziksel yapının bulunması ve bunun gerçek yapı ile karşılaştırılmasıdır. Farklar üç kategoride incelenebilirler :

1. Herhangi bir etkisi olmayan farklar
2. Hesaplanan ya da tahmin edilen düzeltmeler ile etkisi azaltılan farklar
3. Daha çok araştırma ve düzenleme gerektiren farklar

Eğer çözüm büyük yerdeğiştirme etkileri içermiyor ise, yön değiştirmelerin büyüklükleri kontrol edilmeli ve elde edilen küçük yerdeğiştirme teorisinin doğru olduğu kontrol edilmelidir.

Eğer girdi parametreleri ile ilgili terddütler varsa, sonlu elemanlar programı deneysel çalışmalar yapılarak kalibre edilmelidir.

6. ISI TRANSFERİ PROBLEMLERİNİN ANALİZİ

6.1. Giriş

Isı iletimi (kondüksiyon), bir maddenin parçacıklarının komşu parçacıklarla enerji alışverişidir. Bu alışveriş gazlarda molekül hareketleri, sıvılarda ve iletken olmayan katılarda molekül titreşimleri, iletken katılarda ise elektron hareketleri ile olur. Bundan dolayı elektriksel ve ısıl iletkenlikler arasında belirgin bir bağıntı vardır. Elektriği en iyi ileten maddeler genellikle ısıyı da iyi iletirler.

Taşınım ile ısı transferi, hareket halindeki bir ortam ile bir duvar arasındaki ısı alışverişidir. Konveksiyon akımı ya da bir makina aracılığı ile (vanitlatör, kompresör, pompa,vb.) meydana gelir. Kendiliğinden olana serbest, tabii veya doğal konveksiyon da denir. Makina aracılığı ile oluşan harekete de zorlanmış konveksiyon denmektedir.

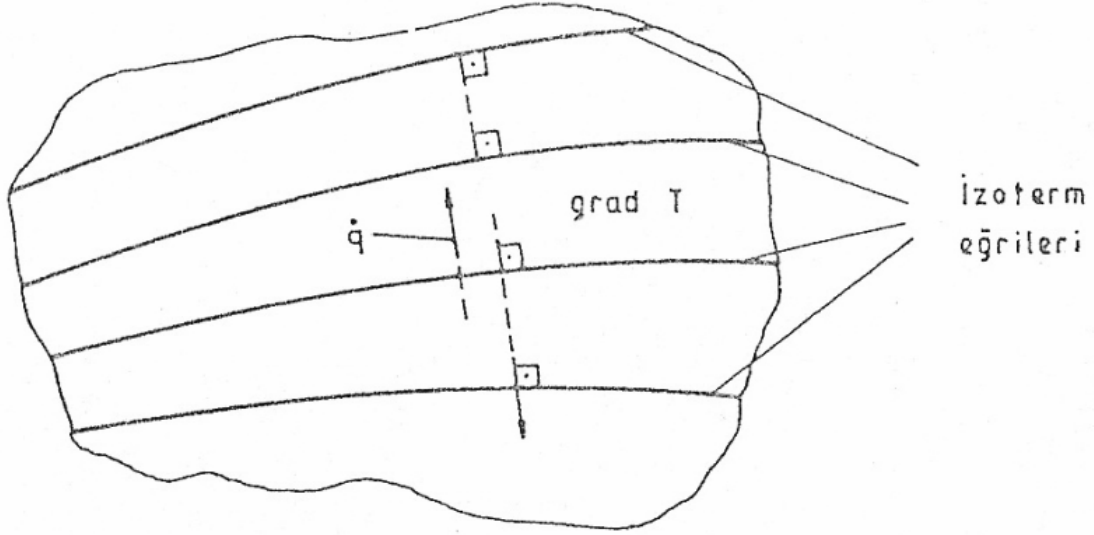
Cisimler birbirine dokunmadan ısı ışınımı (radyasyon) ile ısı transfer edebilirler. Bu durumda cisim ısı dalgası enerjisine çevrilerek diğer bir cisme nakledilir. Diğer cisimlerde dalgası enerjisinin tekrar ısı enerjisine dönüşmesiyle ısı transferi tamamlanmış olur.

6.2. Isı Yayılım Denklemi

Isı iletimi tek başına sadece katı maddelerde görülür. Sıvı ve gazlarda ısı iletimine paralel olarak ısı taşınımı (konveksiyon) veya ısı ışınımı (radyasyon) meydana gelir.

6.2.1 Fourier kanunu

Bir cisimde sıcaklıkları aynı olan noktalar birleştirildiğinde, belirli bir sıcaklıkta bulunan bir düzlem elde edilir. Bu düzlem izoterm düzlem (eşsıcaklık düzlemi) denir. Cisim iki boyutlu olarak düşünüldüğünde bu düzlem bir çizgi halini alır ki, bu çizgi de izoterm eğrisi (eşsıcaklık eğrisi) olarak adlandırılır. Şekil 6.1'de izoterm eğrileri gösterilmiştir.(Lienhard, 2004)



Şekil 6.1. İzoterm eğrileri

Bir noktada iki sıcaklık birden olamayacağından, izoterm eğrileri birbirini kesmezler. Sıcaklık, en çok izoterm eğrilerine dik yönde değişir. Bu yön, sıcaklığın gradyanıdır. Sıcaklığın arttığı yönde bu gradyan (vektör) pozitiftir.

Sıcaklık gradyanı bir ısı akımına sebep olur. Birim yüzeyden geçen ısı akımı, ısı akım şiddeti olarak adlandırılır ve \dot{q} ile gösterilir. \dot{q} ısı akımının birimi W , ısı akım şiddetinin ise W/m^2 'dir. Isı akım şiddetinin sıcaklık gradyanına doğru orantılı olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Isı akımı yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru olduğundan, ısı akım şiddeti vektörü ile sıcaklık gradyanı vektörü ters işaretlendirilir. Bu durumda,

$$\dot{q} = k \cdot (-gradT) = -k \cdot gradT \quad (6.1)$$

yazmak mümkündür. Orantı faktörü cismin bir fiziksel özelliği olup, ısı iletim katsayısı olarak adlandırılır. Bu katsayının birimi W/m^0C dir.

(6.1) eşitliği **Fourier Kanunu** olarak adlandırılır.

x,y,z koordinatlarına göre Fourier kuralı ;

$$\dot{q}_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\dot{q}_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6.2)$$

$$\dot{q}_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

şeklini alır.

Tek boyutlu kabul edilebilen bir cisimde sıcaklık y ve z koordinatlarına bağlı değildir. O zaman (6.2) eşitliği basit şekli alır (Moaveni, 2003)

$$\dot{q}_y = \dot{q}_z = 0 \quad \dot{q}_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6.3)$$

6.2.2. Fourier diferansiyel denklemi

Daha önce de belirtildiği gibi, mühendislik problemleri fiziksel durumların matematik modelleridir. Bir cisimdeki sıcaklık dağılımlarını belirleyebilmek için Fourier diferansiyel denkleminde yararlanılır. Sıcaklık dağılımları belirlendiğinde de, ısı akımlarını (6.1) ve (6.2) bağıntılarıyla hesaplamak mümkündür. Isı transferi problemlerinde bu denklemler, herhangi bir ortamda kütle, momentumun ve enerjinin dengesini temsil eder. Diferansiyel denklemlerin kesin çözümlerini bulmak için çok çaba harcamak gerekir. Çünkü ancak kesin çözümler, sistemin detaylı davranış biçimini ortaya çıkarır. Fakat

pratikte, birçok mühendislik problemlerinde, ya geometri çok karmaşık olduğundan veyahut sınır şartları çok kompleks olduğu için kesin çözümlere ulaşılmamaktadır (Sparrow and Boetcher, 2005).

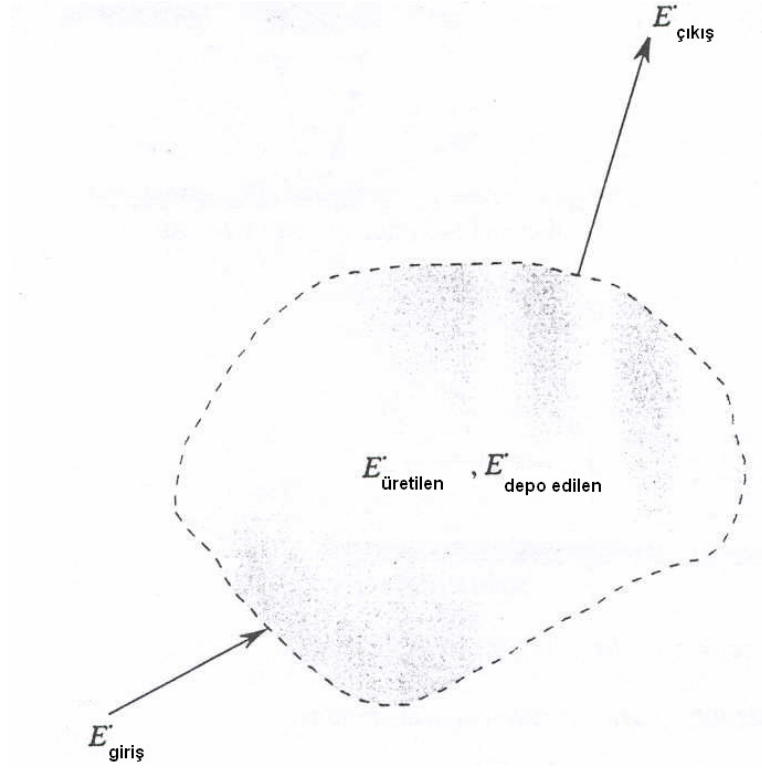
Enerjinin korunumu ısı transferi problemlerinin çözümünde çok önemli bir rol oynar. Bundan dolayı, fiziksel bir problemi doğru olarak modelleyebilmek için enerjinin korunumu kanununun çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Enerjinin korunumu kanunu şunu söyler , bir sisteme giren mekanik/ısı enerjisi oranı eksi, o sistem terkeden enerji oranı artı sistem hacminde üretilen enerji oranı, sistem hacminde depolanan enerjiye eşit olmalıdır.

$$E_{giriş} - E_{çıkış} + E_{üretilen} = E_{depolanan}$$

$E_{giriş}$ ve $E_{çıkış}$; sistem yüzeylerinden giren ve çıkan enerji miktarı.

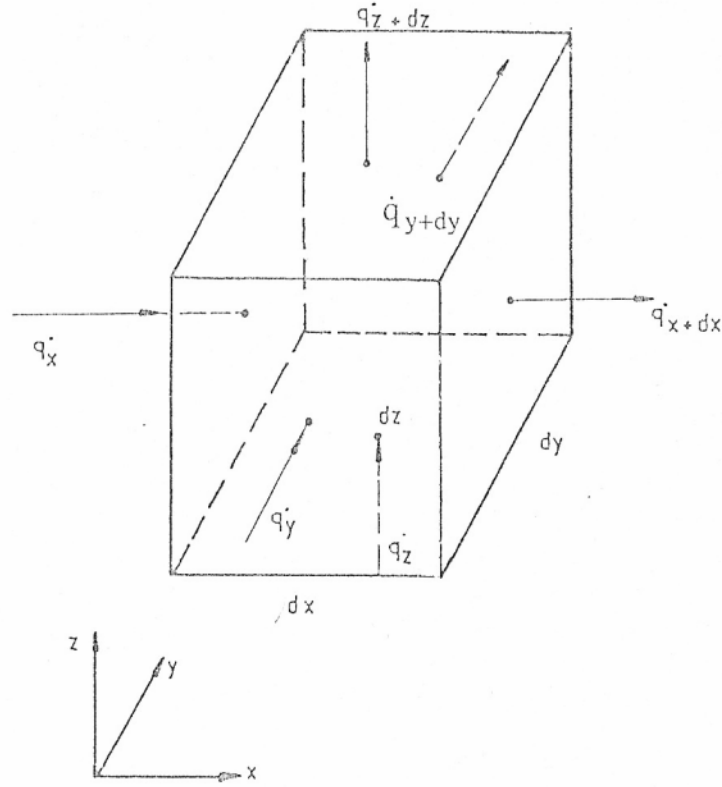
$E_{üretilen}$; sistem hacmi içinde elektrik, kimyasal, nükleer veya elektromanyetik formlardan ısı enerjisiye dönen enerji miktarı.

Böyle bir dönüşüme, katı bir iletkenin geçen elektrik akımını örnek olarak verebiliriz. Diğer taraftan, enerji depolama terimi, geçiş proseslerinden dolayı, iç ısı enerjisinin artması veya azalması demektir.



Şekil 6-2. Enerjinin korunumu kanunu

Fourier diferansiyel denklemini (sıcaklık dağılımının diferansiyel denklemini) bulmak için, bir cismin, boyutları, dx , dy ve dz olan sonsuz küçük bir parçasını alalım. Ancak, bu parça hala sürekli bir ortam olarak kabul edilmekte olup boyutları moleküller arası uzaklığa göre çok büyüktür.



Şekil 6.3. Hacim elemanında ısı akım şiddeti

Bu hacime her yönden giren ısılar q_x, q_y, q_z ve çıkan ısılarda q_{x+dx}, q_{y+dy} ve q_{z+dz} dir. Hacim içerisinde birim hacimde üretilen (artı işaretli) veya tüketilen (eksi işaretli) ısı da q_v olsun. Bu hacim elemanına giren ve çıkan ısılar arasındaki farka üretilen ısı eklendiğinde (veya tüketilen ısı çıkarıldığında) elde edilen ısı, hacim elemanı tarafından depo edilecektir. Şekil 6-3'de dikkate alınarak şu eşitlik yazılabilir :

$$\rho.c. \frac{\partial T}{\partial t} dx.dy.dz = (q_x - q_{x+dx}).dy.dz + (q_y - q_{y+dy}).dx.dz + (q_z - q_{z+dz}).dx.dy + q_v .dx.dy.dz$$

\dot{q}_x , \dot{q}_y ve \dot{q}_z eşitlik (6-2)'de verilmişlerdir. Bu büyüklüklerin $x+dx$, $y+dy$ ve $z+dz$ yerlerindeki değerleri Taylor serisine göre belirlenir. Mesela, \dot{q}_{x+dx} , \dot{q}_x ve türevleri cinsinden,

$$\dot{q}_{x+dx} = \dot{q}_x + \frac{dx}{1} \dot{q}_x' + \frac{dx^2}{2!} \dot{q}_x'' + \dots$$

olarak yazılabilir. dx çok küçük olduğundan bu seri yaklaşık olarak,

$$\dot{q}_{x+dx} = \dot{q}_x + dx \cdot \dot{q}_x'$$

$$\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx} = -\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} dx$$

şeklinde yazılabilir. \dot{q}_x değeri (2.2)'den hesaplanarak ve diğer yönler için de benzer şekilde hareket ederek aşağıdaki bağlantılar elde edilir.

$$\dot{q}_x - \dot{q}_{x+dx} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx$$

$$\dot{q}_y - \dot{q}_{y+dy} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (6.4)$$

$$\dot{q}_z - \dot{q}_{z+dz} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz$$

Bu bağlantılar eşitlik (6.3)'te yerine konarak,

$$\rho.c. \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \dot{q}_v \quad (6.5)$$

eşitliği bulunur. Bu eşitliğin vektörel yazılışı aşağıdaki gibidir :

$$\rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k.\text{grad}T) + \dot{q}_v \quad (6.6)$$

Bu eşitliğe Fourier ısı iletim diferansiyel denklemi denir (Lienhard,2004).

Fourier diferansiyel denklemi bazı özel durumlarda basitleşir. İzotrop cisimlerde k yöne bağlı olmayıp $k_x=k_y=k_z \neq f(x,y,z)$ dir. Ayrıca $k \neq F(T)$ ile, yani ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişmediği kabul edilerek, eşitlik (6.5) aşağıdaki hale indirgenir.

$$\rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} = k.\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{q}_v \quad (6.7)$$

$$\rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} = k.\nabla^2 T + \dot{q}_v$$

Isıl yayılım katsayısı α ,

$$\alpha = \frac{k}{\rho.c} \quad (6.8)$$

şeklinde tarif edilir ve,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha.\nabla^2 T + \frac{\dot{q}_v}{\rho.c} \quad (6.9)$$

olarak Poisson Diferansiyel Denklemi bulunur.

Cisim içinde ısı üretimi veya tüketimi yok ise ($\dot{q}_v=0$), o zaman (6.9) daha da basitleşerek

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha.\nabla^2 T \quad (6.10)$$

durumuna gelir. Eğer cisimdeki sıcaklık dağılımı zamana bağlı değilse eşitlik (6.10)'dan

$$\nabla^2 T = 0 \quad (6.11)$$

Laplace diferansiyel denklemi bulunur.

6.2.3. Isı iletim katsayısı

Isı iletim katsayısı k , ısı transferi hesaplarında sürekli olarak kullanılan bir fiziksel özellik olduğundan ayrıca incelenmesi gereklidir. Isı iletim katsayısı genel olarak, katı maddelerde en büyük ve gazlarda en küçük değerlere sahiptir. Sıvılardaki değerleri ise orta büyüklüktedir.

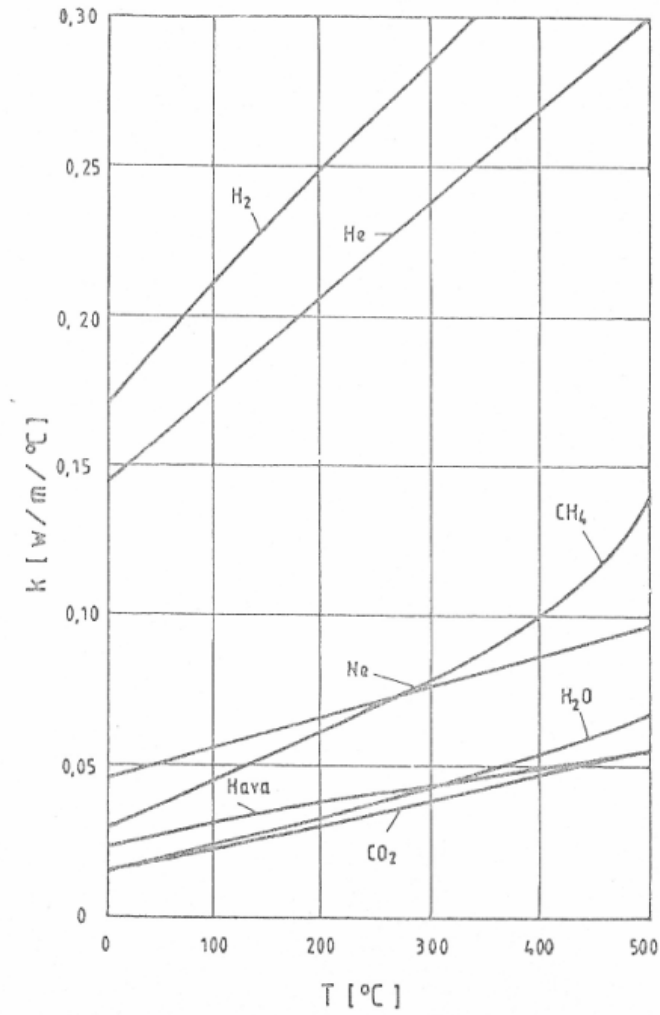
6.2.3.1 Gazların ısı iletim katsayısı

İdeal gazlarda ısı iletim katsayısını kinetik gaz teorisine göre hesaplamak mümkündür. Bu durumda ısı iletim katsayısı ,

$$k = \frac{R \cdot \sqrt{RT/\mu}}{(1-\chi) \cdot 8,65 \cdot N_L \cdot d^2} = c_v \cdot \eta \quad (6.12)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada c_v sabit hacimde özgül ısı, μ molekül kütlesi, T mutlak sıcaklık, D molekül çapı, η dinamik viskozite, R genel gaz sabiti ve $N_L = 6.023 \cdot 10^6$ 1/kmol olarak da Losschmidt sayısı ve χ adyabatik üstür.

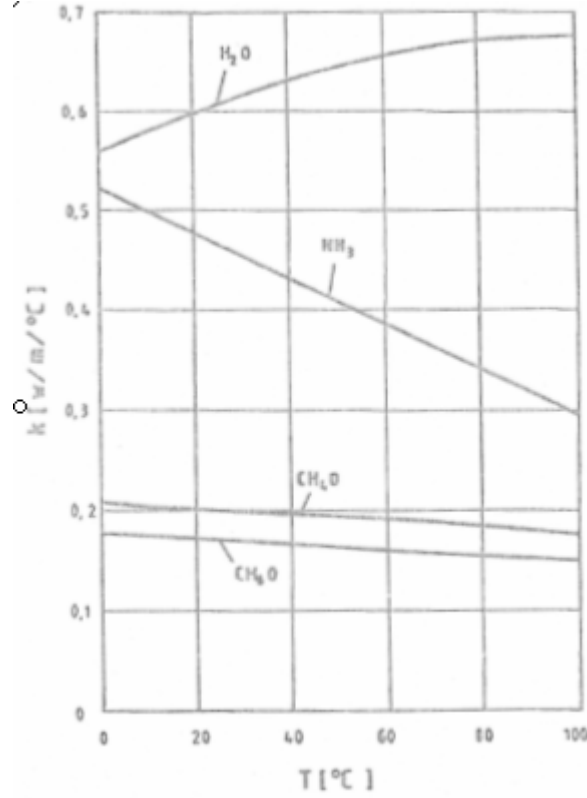
Yukarıdaki eşitlikten k 'nın basınçla değişmediğini ve mutlak sıcaklığın kareköküyle doğru orantılı olduğu görülür. k 'nın sıcaklıkla değişimi Şekil 6-4'te bazı gazlar için verilmiştir.



Şekil 6-4. Bazı gazların ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi (Yılmaz, 1999)

6.2.3.2 Sıvıların ısı iletim katsayısı

Sıvıların ısı iletim katsayıları genel olarak gazlarınkinden daha büyüktür; ancak, sıcaklıkla daha az değişirler ve genellikle sıcaklıkla azalır. Su, gliserin gibi bazı sıvılarda k sıcaklıkla artar. Şekil 6-5'te sıvılarda k 'nın sıcaklıkla değişimine bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 6-5. Bazı sıvıların ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi (Yılmaz, 1999)

6.2.3.3 Katı maddelerin ısı iletim katsayısı

Katı maddelerde k genellikle yoğunlukla artar. k 'nın değeri, aynı zamanda maddedeki nem oranına bağlıdır. Nemli bir maddenin k 'sı hem bu maddenin hem de suyun k değerinden büyük olabilir. Isı iletim katsayıları küçük olan katı maddeler yalıtkan olarak kullanılabilir. Bunun için $k < 0.2 \text{ W/m}^0\text{C}$ olması istenir. 20^0C 'de normal cam yününün k 'sı 0.005 civarında, yani havanınkinin yaklaşık iki katıdır. Elektrik iletkenlikleri büyük olan metallerin k 'ları daha büyüktür.

Isı iletim katsayılarının mertebeleri Tablo 6.1'de bazı maddeler için verilmiştir:

Tablo 6.1. Isı iletim katsayıları (Yılmaz, 1999)

<u>Madde</u>	<u>W/m⁰C</u>
Gazlar	0.002-0.200
Hava, 20 ⁰ C, 1 bar	0.026
Su, 20 ⁰ C, 1 bar	0.595
Su	0.50-0.70
Yağlar	0.1-1.0
Metal Olmayan Katılar	0.03-3.0
Sıvı Metaller	10-100
Katı Alaşımlar	20-200
Saf Metaller	40-400

6.2.3.4 Sınır Şartları

Bir diferansiyel denklemin çözümü, sınır şartı olmadan belirgin değildir. Zamana göre sınır şartı genellikle “başlangıç sınır şartı” olarak adlandırılır. Sınır şartları, hesapta dikkate alınan bölgenin x,y ve z koordinatlarına göre sınırlarındaki durumdur. Başlangıç şartı da, belirgin bir zamanda, hesaplanacak büyüklüğün, ısı transferinde genellikle sıcaklığın, bütün bölgedeki değerleridir. Mesela ısıtılan bir cisim, ısıtılmaya başladığı anda sahip olduğu sıcaklıktır (Yılmaz, 1999).

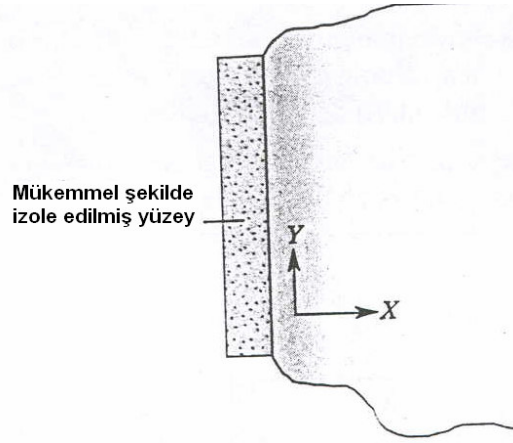
Başlangıç ve sınır şartları, her koordinat için diferansiyel denklemde fonksiyonun (sıcaklığın) her koordinata göre türevi kaçınıcı derecede ise o kadar gereklidir.

Başlangıç şartında, herhangi bir t_0 zamanında x, y ve z'ye bağlı olarak T_0 sıcaklığı verilir :

$$t=t_0 : T_0=f(x,y,z)$$

Hesaplanacak bölgenin sınırlarındaki durumları gösteren sınır şartları, çok çeşitli şekiller alabilir. Sınır şartları olarak pratikte en çok görülenler izah edilecektir.

1nci tür sınır şartı : Isı kaybı veya kazanımının ihmal edilebileceği durumlar. Böyle sistemlere “adyabatik yüzey” veya mükemmel şekilde izole edilmiş yüzey denir (Şekil 6.6).



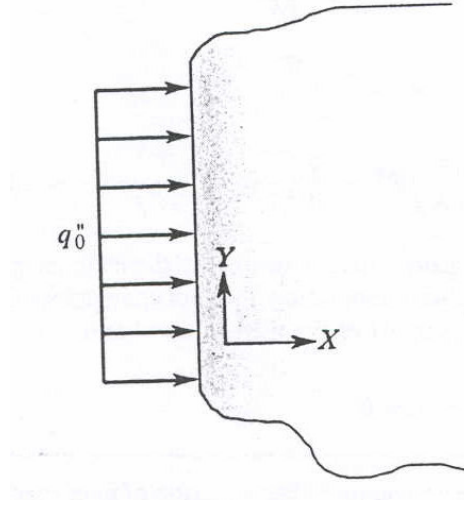
Şekil 6.6. Adyabatik veya mükemmel şekilde izole edilmiş yüzey

Isı iletimi (kondüksiyon) problemlerinde simetrik çizgiler, adyabatik çizgileri temsil eder. Bu tür bir sınır şartı aşağıdaki şekilde ifade edilir :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0,y} = 0 \quad (6.13)$$

2nci tür sınır şartı : Sabit bir ısı akımının yüzeye uygulandığı durumdur. Bu sınır şartı şekil 6.7’de gösterilmiştir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

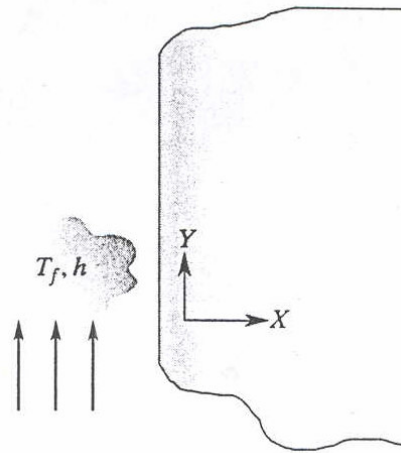
$$-k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q_0 \quad (6.14)$$



Şekil 6-7. Yüzeğe uygulanmış olan sabit ısı akımı

3ncü tür sınır şartı : Konveksiyon proseslerinden dolayı yüzeyde soğutma ve ısınmanın yer aldığı durumlardır. Bu durum, Şekil 6.8’de gösterilmiştir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir :

$$-k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{(x=0,y)} = h[T(0,y) - T_f] \quad (6.15)$$



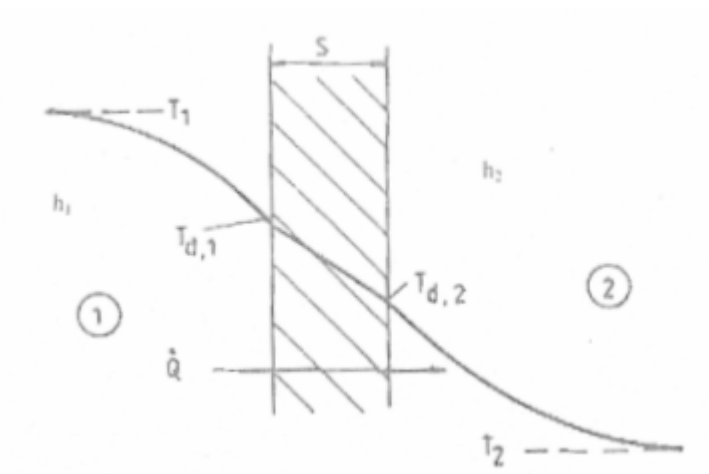
Şekil 6.8 Yüzeyde soğuma ve ısınmaya neden olan ısı iletimi prosesi.

6.3. Toplam Isı Transferi Katsayısı

Isı transferi genellikle aralarında bir duvar bulunan iki ortam arasında olur. Isı bir ortamdan diğerine geçerken, ısıya karşı her iki ortamla duvar arasında ve duvarın kendinden bir direnç vardır. Bu dirençler ısı transferi katsayıları ile duvarın özelliklerine bağlıdır. Isı transferi katsayıları konveksiyonla ısı transferi bölümlerinde verilen bilgilerle hesap edilecektir. Dirençler belirlendiğinde ve uygun bir ortalama sıcaklık tarif edildiğinde transfer edilen ısıyı hesaplamak mümkündür.

6.3.1. Aralarında düzlem bir duvar bulunan iki ortam arasındaki toplam ısı transferi katsayısı

Düzlem bir duvarın iç ve dış tarafında ısı transferi katsayıları Şekil 6-9'da gösterildiği gibi h_1 ve h_2 olsun. Yani, iç ve dış ortamla duvar arasında konveksiyonla ısı transfer edilmektedir. Duvarda ısı transferi iletimle vuku bulmaktadır. Duvardan uzakta 1 ve 2 ortamlarında T_1 ve T_2 sıcaklıkları hüküm sürsün. Duvarın iç ve dış yüzeyindeki sıcaklıkların $T_{d,1}$ ve $T_{d,2}$ olduğu düşünülüyor.



Şekil 6-9. Düzlem duvarda ısı geçişi (Yılmaz, 1999)

Transfer edilen ısı akımı \dot{Q} olduğu için aşağıdaki eşitlikleri yazmak mümkündür :

$$\dot{Q} = h_1.(T_1 - T_{d,1}).F$$

$$\dot{Q} = \frac{k}{s}(T_{d,1} - T_{d,2}).F \quad (6.16)$$

$$\dot{Q} = h_2.(T_{d,2} - T_2).F$$

İki ortam arasında transfer edilen ısı (\dot{Q})yı bulmak için,

$$\dot{Q} = U.(T_1 - T_2).F \quad (6.17)$$

bağlantısı kullanılır. Burada U toplam ısı transferi katsayısıdır. Yukarıdaki eşitliklerden U

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (6.18)$$

olarak çıkarılır. Bu eşitlik duvarın n tane, özellikleri ayrı duvardan teşekkül ettiği durumda, daha genel olarak

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (6.19)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlik ısı dirençleri olarak,

$$R_T = R_1 + \sum_{i=1}^n R_{s,i} + R_2 \quad (6.20)$$

şeklinde yazılabilir. Isı direnç, daha önce de tarif edildiği gibi, ısı transferi katsayıları ile yüzey alanının çarpımının bir bölünmesidir. Toplam ısı direnç her kısımdaki ısı dirençlerin toplamına eşittir.

U, eşitlik (6.18) veya (6.19)'a göre hesaplanır. Bu değerle de eşitlik (6.17)'ye göre \dot{Q} tespit edilir. Duvar yüzeyindeki sıcaklıklar \dot{Q} , T_1 , T_2 , k ve s bilindiğinden (6.16) ile verilen eşitliklerden belirlenir.

6.3.2. Aralarında farklı yüzey alanlı bir duvar bulunan iki ortam arasında toplam ısı transferi katsayısı

İki ortam arasında farklı yüzey alanlı bir duvar olması halinde transfer edilen ısı,

$$\dot{Q} = U_1 \cdot \Delta T \cdot F_1 = U_2 \cdot \Delta T \cdot F_2 = (U \cdot F) \cdot \Delta T \quad (6.21)$$

eşitliğinden hesaplanır. U_1 ve U_2 , \dot{Q} 'nın hesaplanmasında F_1 veya F_2 yüzeylerinin kullanılması durumları için tarif edilen, toplam ısı transferi katsayılarıdır. Eğri yüzeyli duvar halinde, en iyi yöntem (U.F)'nin toplam olarak hesaplanmasıdır. Eşitlik (6.16)'da izah edildiği yoldan toplam ısı transferi katsayısı ,

$$\frac{1}{(U \cdot F)} = \frac{1}{U_1 F_1} = \frac{1}{U_2 F_2} = \frac{1}{h_1 F_1} + \frac{s}{k F_s} + \frac{1}{h_2 F_2} \quad (6.22)$$

bağıntısından U_1 , U_2 veya (U.F) olarak bulunabilir. Bu eşitliğin genel hali

$$\frac{1}{(U \cdot F)} = \frac{1}{U_1 F_1} = \frac{1}{U_2 F_2} = \frac{1}{h_1 F_1} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{k} \cdot \frac{1}{F_{si}} + \frac{1}{h_2 F_2} \quad (6.23)$$

şeklindedir. Eşitlik (6.20) eğri yüzeyli duvarlar için de aynen geçerlidir. Silindirik ve küresel duvarlar için ortalama yüzey alanlar için daha önce verilen (6.20) ve (6.21) eşitlikleri geçerlidir.

7. KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNDE DİFERANSİYEL DENKLEM VE BOYUTSUZ SAYILAR

7.1. Diferansiyel Denklemler

Konveksiyon (ısı taşınımı) ile ısı transferi problemlerini incelemek için süreklilik, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin beraberce çözülmesi gerekir. Enerji denklemi hareket olmayan ortamda ($\dot{q}_v = 0$)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$$

şeklinde verilir. Eğer ortam hareketli ise, o zaman yerel diferansiyel $\frac{\partial T}{\partial t}$ toplam diferansiyel $\frac{DT}{Dt}$ şeklinde yazılmalıdır. Böylece enerji denklemi

$$\frac{DT}{Dt} = \alpha \nabla^2 T \quad (7.1)$$

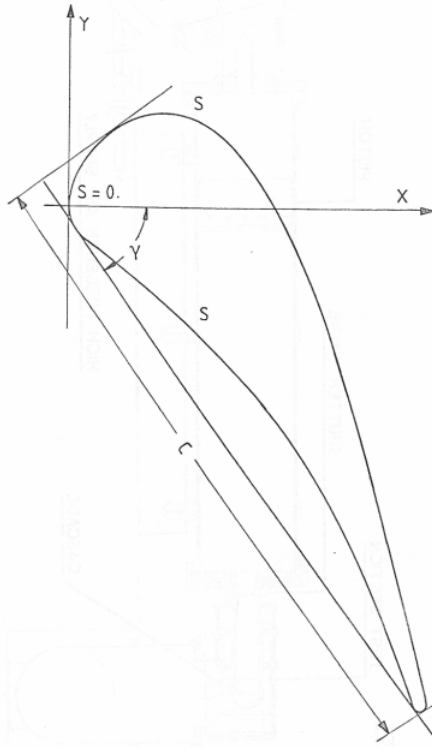
olarak elde edilir. Toplam diferansiyel kartezyen koordinatlarda

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7.2)$$

şeklinde dir. u, v, w ; x, y, z yönlerindeki hızlardır. Yüksek basınç farkları ve yüksek hızlarda yukarıdaki eşitliğe basınç ve dissipasyon (sürtünme) enerjilerini ihtiva eden terimler ek olarak gelir ki, normal akışlar ve akışkanlarda bu terimler ihmal edilebilir.

8. DENEYSEL MODELİN TANIMI

DeneySEL ölçümlerde ve ANSYS’de kullanılan kaskat modeli, Von Karman Enstitü’sünde özellikle bu deneySEL çalışma için tasarlanmış bir yüksek basınç türbin sabit kanatçık profilidir. Kanatçığın şekli, 0.9 Mach’lık bir hız için tasarlanmıştır. Tasarlanan kanatçık, 5 profil ve 4 pasajdan oluşan bir lineer kaskat halinde test edilmiştir. Merkez kanatçık, statik basınç ölçümleri (kanatçık hız dağılımları için) veya ısı akımı ölçümleri (kanatçık konvektif ısı transferi dağılımları) için sensörlerle donatılmıştır. Kaskat akışkanın giriş açısı 0 (sıfır) derece olacak şekilde pozisyonlanmıştır (Arts, 1990)



Şekil 8.1. Test edilen sabit kanatçığın geometrik profili.

8.1. Deneysel Ölçüm Teknikleri

Toplam basınç ve sıcaklık, statik basınç ve türbülans şiddet (*turbulence intensity*) değerleri hücum kenarı düzleminin 35 mm üzerinde ($x/c_{AX} = -1.487$), basınç transducer'ine bağlı bir pitot probu, K tipi termocouple probu ve duvar statik basınç ölçerler ve sabit sıcaklık probu vasıtası ile ölçülmüştür. Duvar statik basınç ölçerler aynı zamanda kaskatın alt tarafına, firar kenarına paralel olarak ve son kanatçığın 16 mm altına ($x/c_{AX} = 1.433$) yerleştirilmiştir. Kanatçıklar üzerindeki hız dağılımları kaskatın merkez kanatçığına yerleştirilmiş 27 statik basınç ölçer vasıtası ile elde edilmiştir.

Kanatçık duvarlarındaki konvektif ısı akımları, cam seramikten yapılmış olan ve merkez kanatçık üzerinde bulunan ince platin film ile ölçülmüştür. Ölçülen zamana bağlı yüzey sıcaklık değişimleri sayesinde konvektif ısı akımları hesaplanmıştır. Duvar sıcaklığı / Duvar ısı akımı çevrimi, tek boyutlu yarı sonlu gövde konfigürasyonunu simüle eden bir elektrik analizi vasıtası ile hesaplanmıştır.

Konvektif ısı iletimi katsayısı “h”, bu deneyde ölçülen ısı akımının toplam serbest akım (*freestream*) sıcaklık ile duvar sıcaklıklarının farkına oranı olarak tanımlanır (Arts,1990).

$$h = \frac{\dot{q}_w}{T_{01} - T_w}$$

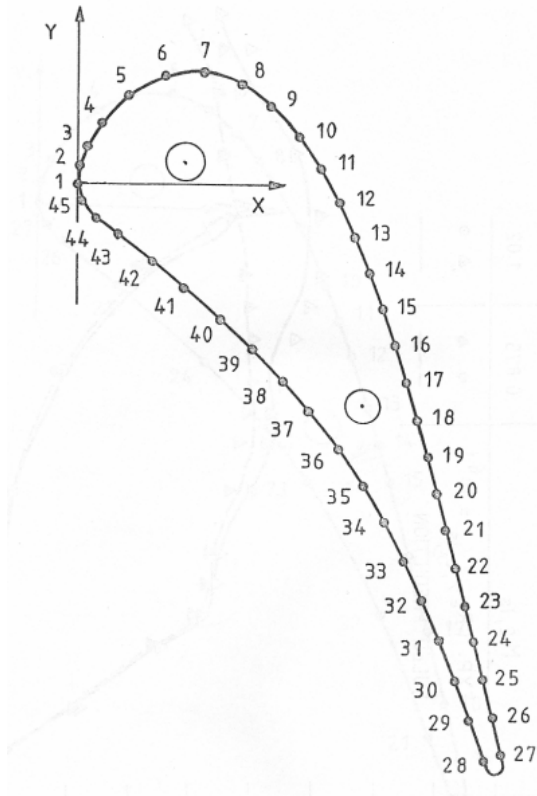
8.2. Kanatçık Hız Dağılımları

Kanatçığın izentropik Mach sayısı dağılımları, lokal statik basınç ölçümleri ile, değişik yüklemeler için, toplam basınç referans olarak ölçülmüştür. Merkez pale profili, üzerinde 27 adet statik basınç ölçer olan aynı profilli bir kanatçık ile değiştirilmiştir ve bu

basınç ölçerler transducer'lara bağlanmışlardır. Düşük basınç portları da kalibrasyon karakteristiklerinin verifikasyonu için vakum pompasına bağlanmıştır.

8.3. Kanatçık Isı Transferi Dağılımları

Kanatçık konvektif ısı transferi dağılımları, kanatçık üzerindeki 45 ince platin film vasıtası ile değişik Reynolds, Mach sayıları ve serbest akım türbulans şiddeti (*freestream turbulence intensity*) için ölçülmüştür. Merkez kanatçık, cam seramikten yapılmış olan 45 adet ince platin film ile kaplanmıştır. Platin filmlerin profil üzerindeki pozisyonları Şekil 8.2'de gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Platin filmlerin airfoil üzerindeki pozisyonları

9. ANSYS MODELİNİN OLUŞTURULMASI

9.1. Modelin Analizi

Kaskat modelin imalat koordinatlarına göre ANSYS modeli Ek Açıklama-A Şekil A.1’de ve A.P.D.L. yazılımı da Ek Açıklama-B’de verilmiştir.

Modelin analizi için yine aynı koordinatları kullanarak 46 spline’den meydana gelen yeni bir model oluşturulmuştur. Daha sonra bu çizgilerden bir alan oluşturulmuştur. Bu alan üzerinde eleman büyüklüğü 2 (iki) birim olan sonlu elemanlarla serbest ağ örgüsü oluşturulmuştur. Eleman tipi olarak da 2-boyutlu 8 düğüm noktalı katı termal eleman PLANE 77 elemanı seçilmiştir (ANSYS Users Manual,2004). Daha sonra deneysel model için Alüminyum 6061 T6, türbin modeli için ise INCONEL malzemenin termal konduktivite (k) katsayısı sıcaklığa bağlı olarak programa girilmiştir (Lienhard, 2004, Special Metals, 2001). Alüminyum 6061 T6 ve INCONEL malzemelerinin sıcaklığa bağlı λ değerlerinin grafiği Ek Açıklamalar-A Şekil A.2’de verilmiştir. Daha sonra deneysel ölçümlerden alınan 46 adet noktaya ait ısı akımı (Q) ve ısı taşınım (h) katsayıları ve deneysel modelin toplam sabit duvar sıcaklık değeri kullanılarak formül 9.1’in yardımı ile 46 adet noktaya ait sıcaklık değerleri (T_{01}) tek tek hesaplanmıştır. Airfoil koordinatlarına göre sıcaklık değerlerine ait grafik her iki model için de Ek Açıklamalar-A Şekil A.3’de gösterilmektedir.

$$h = \frac{\dot{q}_w}{T_{01} - T_w} \quad (9.1)$$

Daha sonra hesaplanan sıcaklık değerlerini modeli oluşturan çizgilere uygulayabilmek için, her çizgi için, o çizginin geçtiği iki sıcaklık değerinin toplamının ortalaması alınarak ortalama sıcaklık değerleri bulunmuştur.

Sıcaklık değerleri çizgilere tanımlandıktan sonra modelin çözümü yapılmış ve airfoil üzerindeki sıcaklık gradyanı görülmüştür. Çözüm sonuçlarına ait şekiller Ek Açıklamalar-A Şekil A.4-A.8 arasında verilmiştir.

Model üzerinde termal analiz çözümünü yaptıktan sonra, modelin yapısal analizini yapmak için ilk olarak modeldeki 2 boyutlu katı termal eleman PLANE 77, yine 2-boyutlu ve 8 düğüm noktalı katı yapısal eleman PLANE 82'ye dönüştürülmüştür (ANSYS Users Manual,2004). 2-boyutlu airfoil üzerindeki gerilmelerin analizi yapılacağı için eleman davranışı olarak z-ekseni yönündeki yerdeğiştirmelerin sıfır kabul edildiği ve x ve y yönündeki yerdeğiştirmelerin sadece x ve y'nin fonsiyonu olduğu ve hiçbir şekilde z'nin fonsiyonu olmadığı kabul edilen "DÜZLEM GERİNİMİ" davranışı seçilmiştir. Daha sonra her iki model için de malzemelerin sıcaklığa bağlı Poission oranı (ν) ve Young's Modulus (E) değerleri programa tanıtılmıştır (Khanna et.al., 2005, Special Metals, 2001). Aluminyum 6061 T6 ve INCONEL malzemelerinin sıcaklığa bağlı ν ve E değerlerinin grafiği Ek Açıklamalar-A Şekil A.9 ve Şekil A.10'da verilmiştir.Daha sonra Aluminyum 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı ısı genleşme katsayısı (α) programa tanıtılmıştır. . Aluminyum 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı α değerleri Ek Açıklamalar-A Şekil A.11'de verilmiştir. Bu değerler tanıtıldıktan sonra airfoil üzerine etki eden mekanik yükler yani basınç dağılımı airfoil'i oluşturan 46 adet spline üzerine tek tek tanıtılmıştır. Airfoil koordinatlarına göre basınç değerlerine ait grafik Ek Açıklamalar-A Şekil A.12'de gösterilmektedir. Basınç değerlerinin tanıtılmasından sonra, daha önce çözümü yapılan termal model üzerindeki yükler de programa tanıtılmıştır.Eleman tipi, sıcaklık ve basınç dağılımı, mekanik özellikler ve ısı genleşme katsayısı ile eleman davranışı (DÜZLEM GERİNİMİ) programa tanıtıldıktan sonra modelin çözümü yapılmış ve airfoil üzerindeki gerilme dağılımları bulunmuş, sonuçlar yorumlanmıştır. Böylece model üzerindeki hem yapısal sıcaklıklar hem de basınç dağılımları yardımı ile üzerinden belirli hızda ve belirli sıcaklıkta akışkan geçen bir airfoilin üzerindeki ısı iletimi dağılımı hesaplanmış hem de o şartlarda genleşen kanatçık üzerindeki gerilmeler ve yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır.

Termal ve yapısal modelin GUI ile oluşturulmasına ait şekiller Ek Açıklamalar-A Şekil A.13-A.48 arasında verilmiştir.

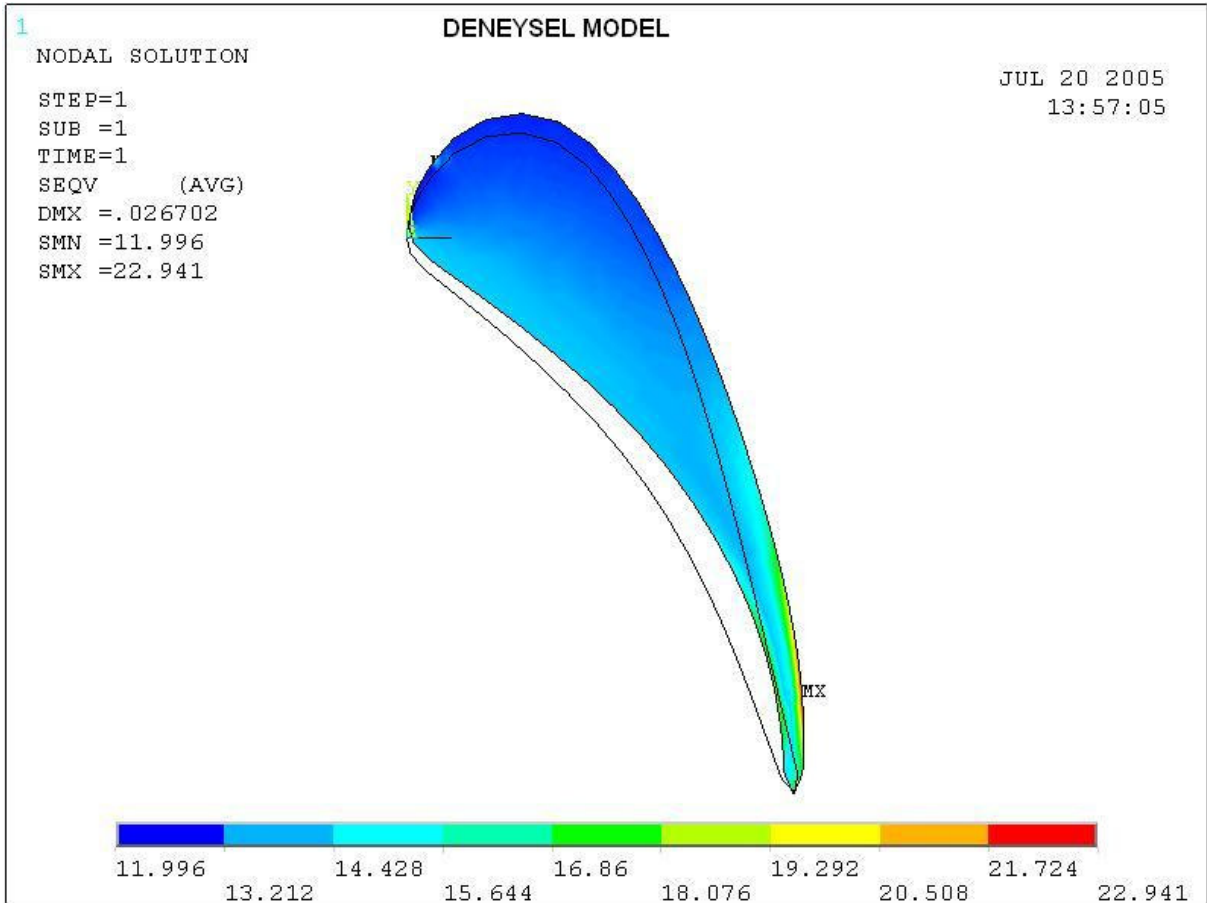
Her iki modelin A.P.D.L. yazılımları da Ek Açıklamalar-C'de verilmiştir.

Aynı şekilde modelde sadece basınç dağılımının etkisi görmek istenirse, başka bir deyişle sadece yapısal bir analiz çözümü istenirse, airfoilin üzerindeki termal etkiyi kaldırmak için baştan yeni bir model yaratmak yerine sadece airfoil malzemesinin termal genleşme katsayısı (α) programa tanıtmamak yeterli olmuştur.

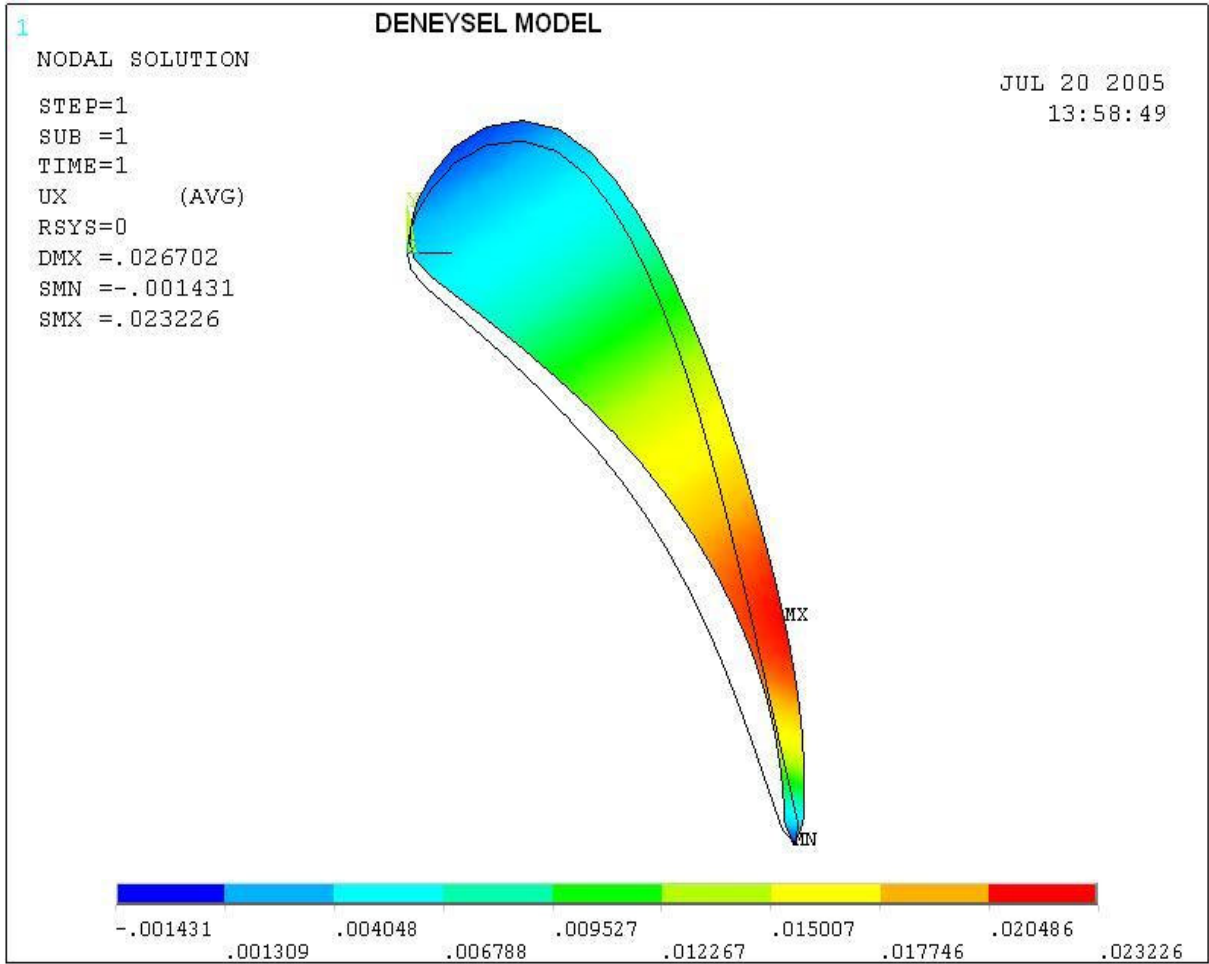
10. SONUÇ ve YORUMLAR

Türbin sabit kanatçığı, yanma odasından çıkan yanmış gazların türbin palelerine uygun bir açı ile çarpmasını sağlamak için gazları yönlendirmeye yarayan hareketsiz parçalardır.

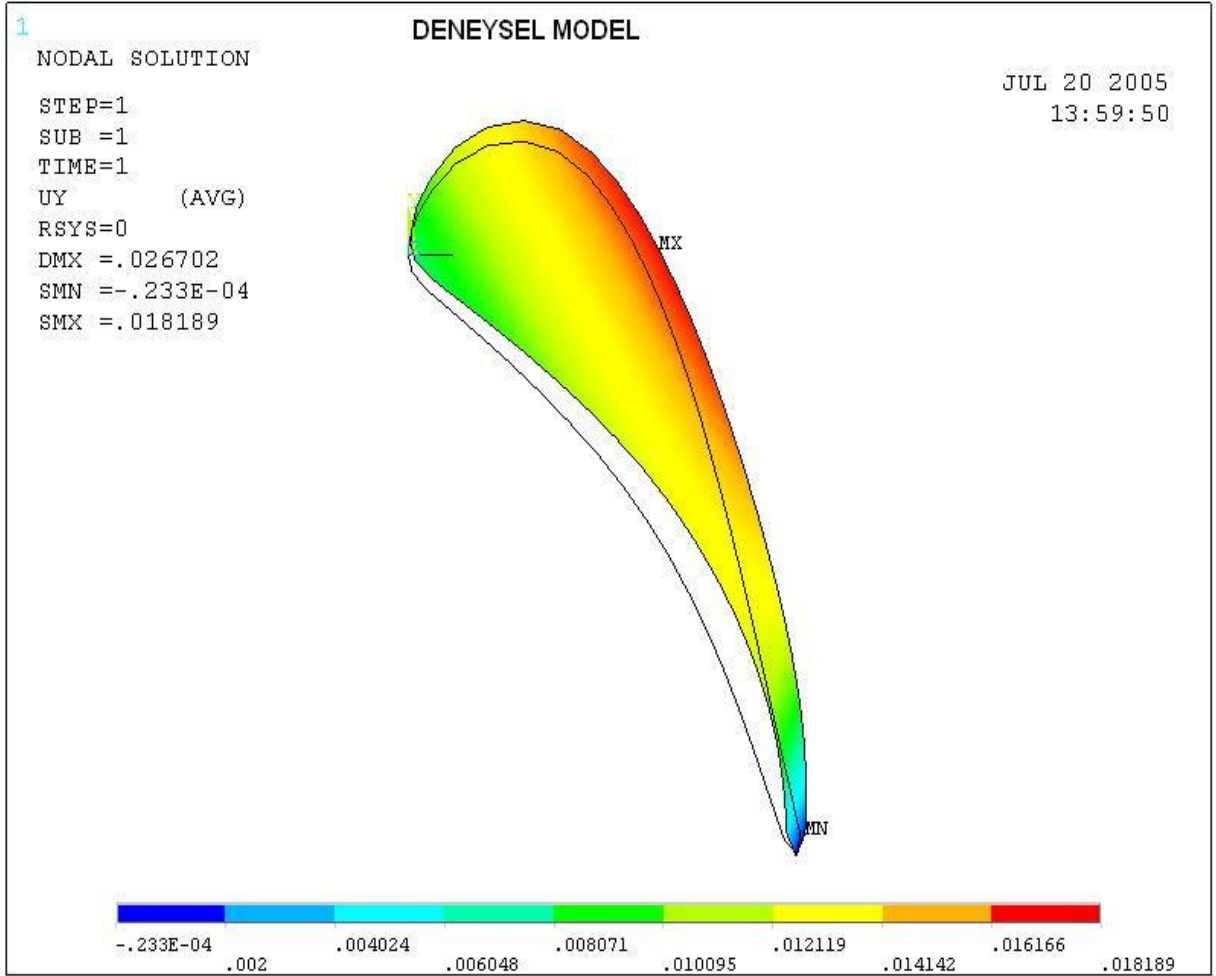
Türbin kanatçıkları hem kaskat testinde hem de çalışma şartları altında aerodinamik (termal ve mekanik) yükler altında incelenmiş ve incelemede pale kesitinin düzlemde oluşturduğu deformasyonlar X ve Y yönlerinde verilerek yine aynı türbin kesitinde ortaya çıkan gerilme değerleri maksimum-minimum, asal ve eşdeğer gerilme dağılımları Şekil 10-1-10.10 arasında verilmiştir.



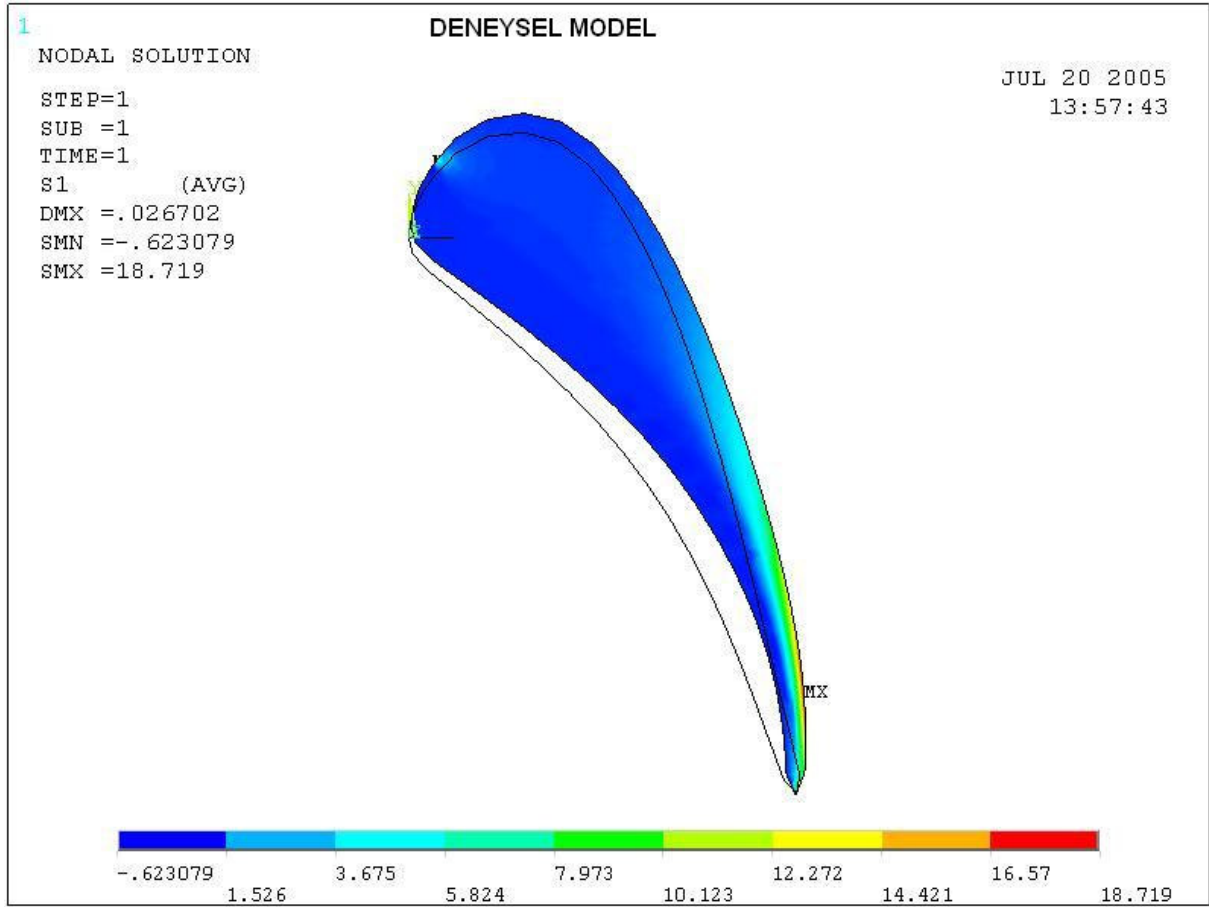
Şekil 10.1. Deneysel modelin Von Mises stress dağılımı



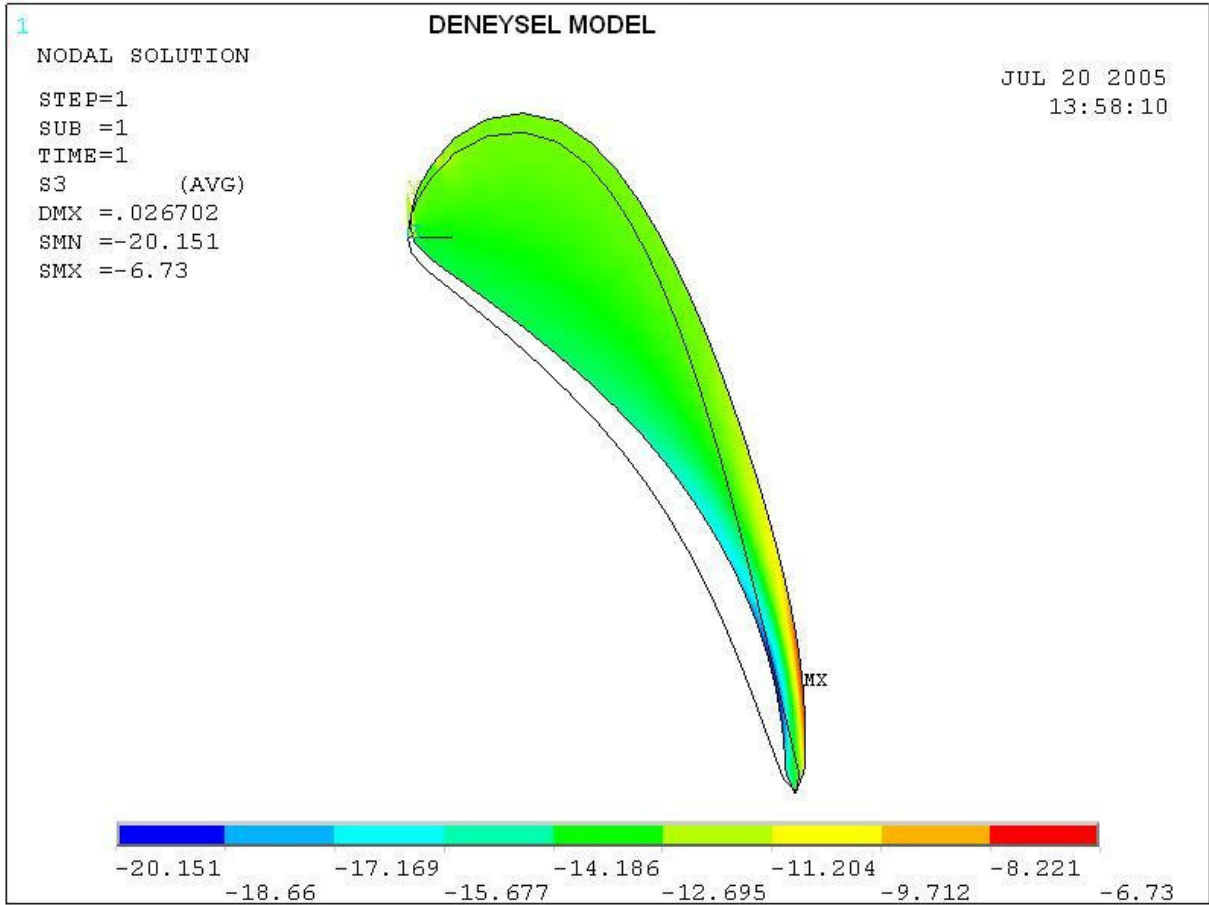
Şekil 10.2. Deneysel modelin X yönündeki deformasyonu



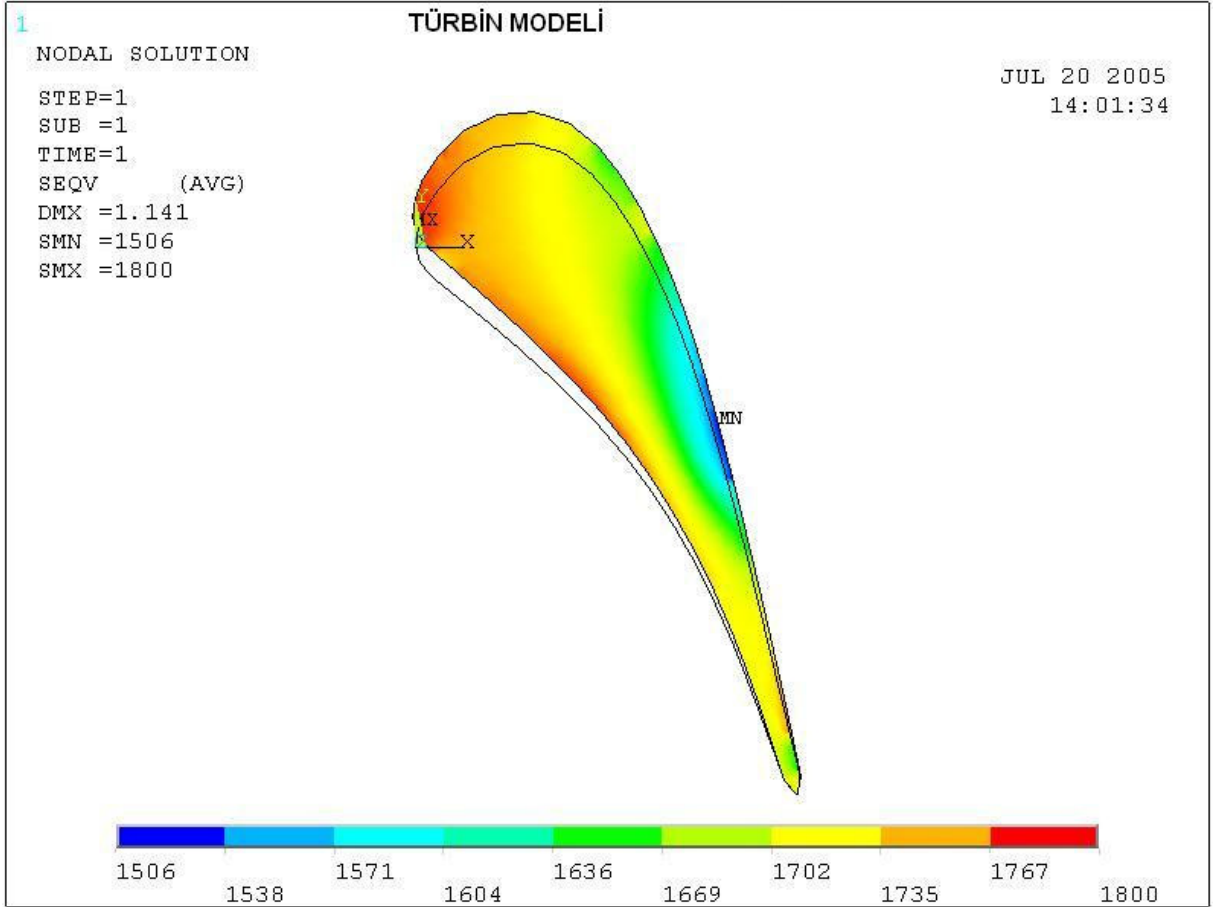
Şekil 10.3. Deneysel modelin Y yönündeki deformasyonu



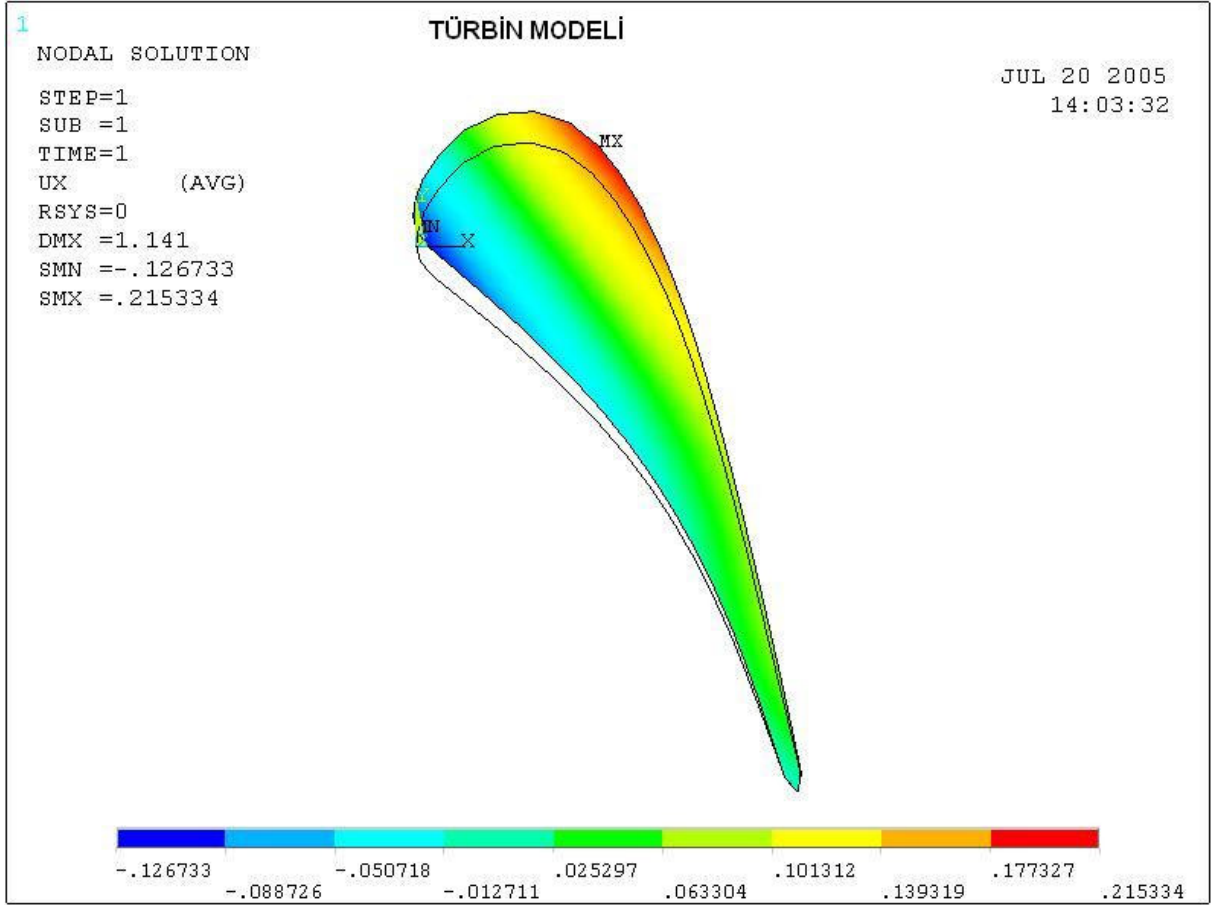
Şekil 10.4. Deneysel modelin maksimum asal gerilme dağılımı



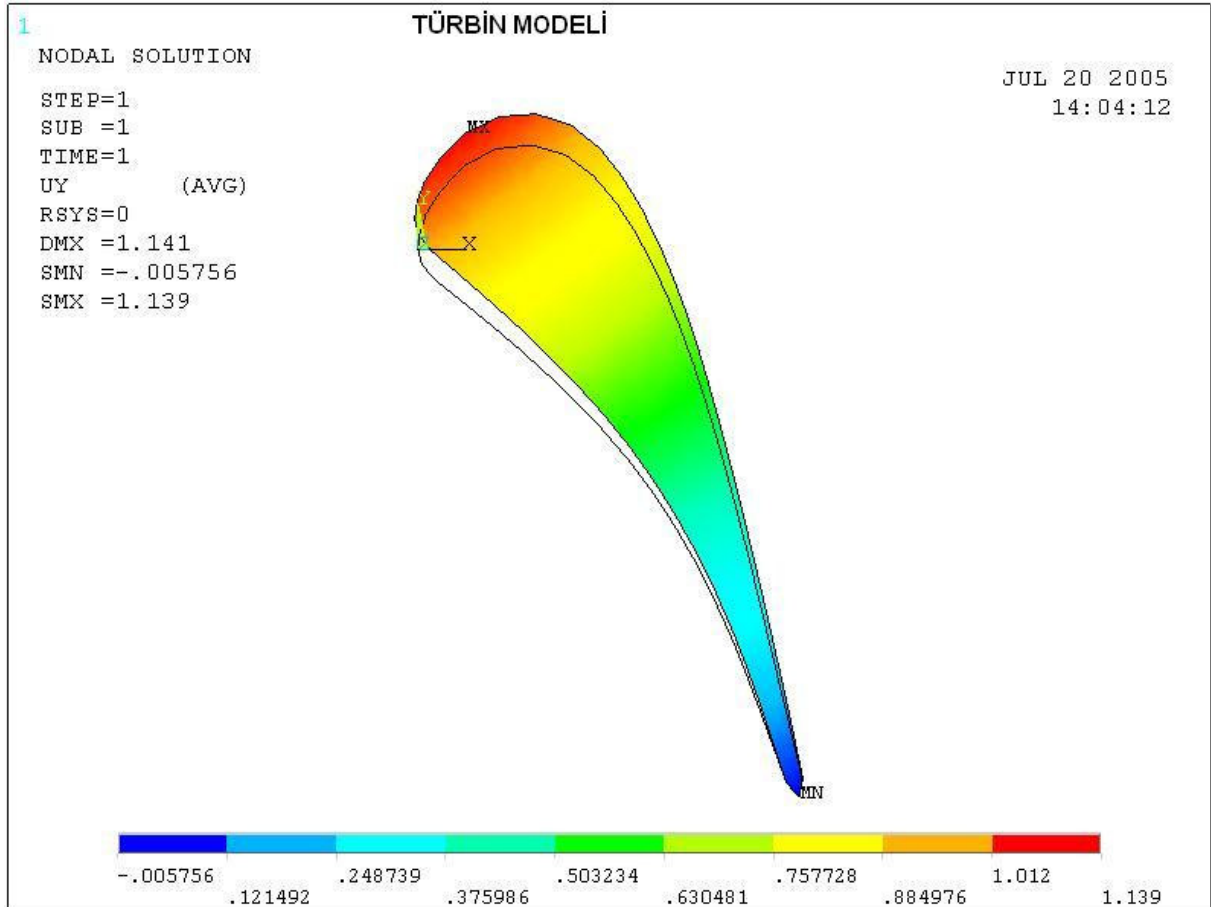
Şekil 10.5. Deneysel modelin minimum asal gerilme dağılımı



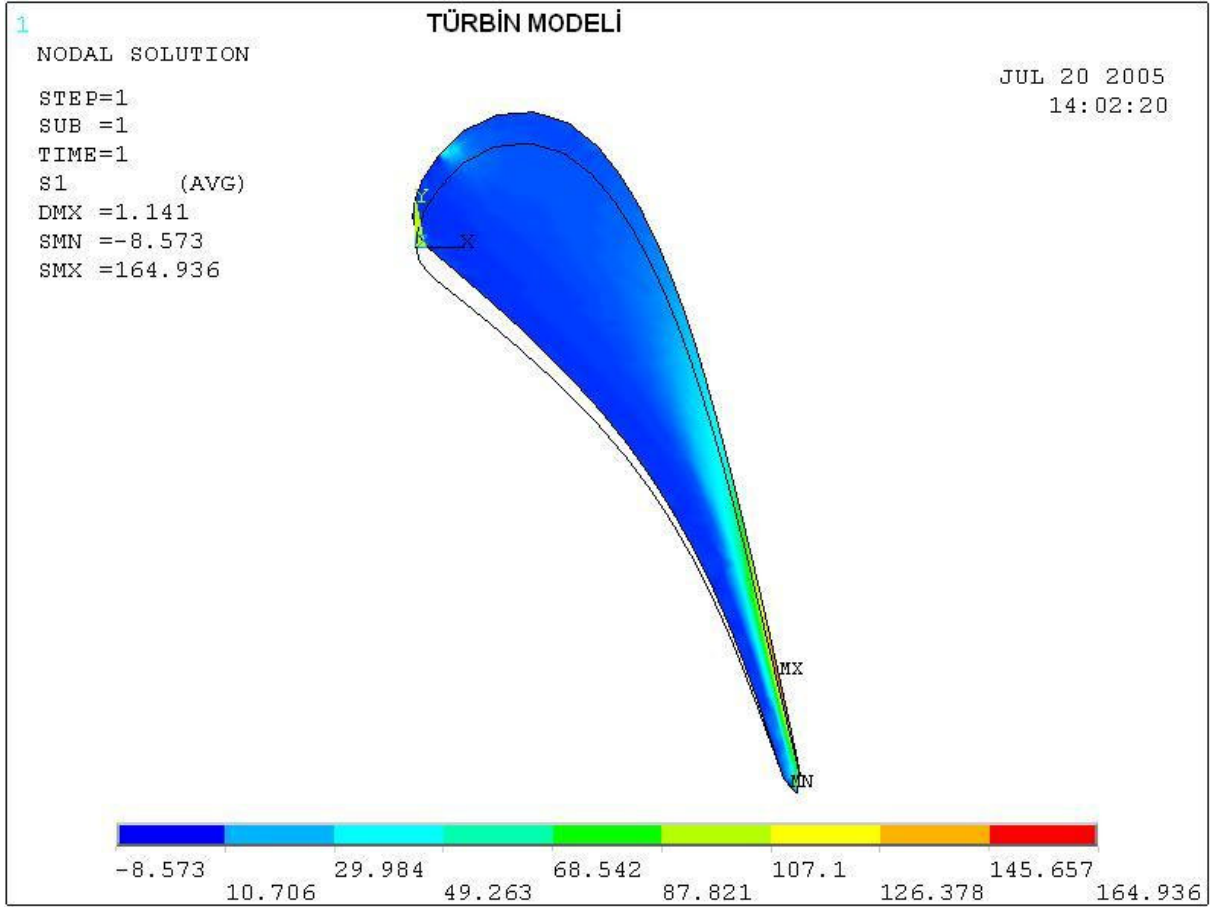
Şekil 10.6. Türbin modelinin Von Mises stress dağılımı



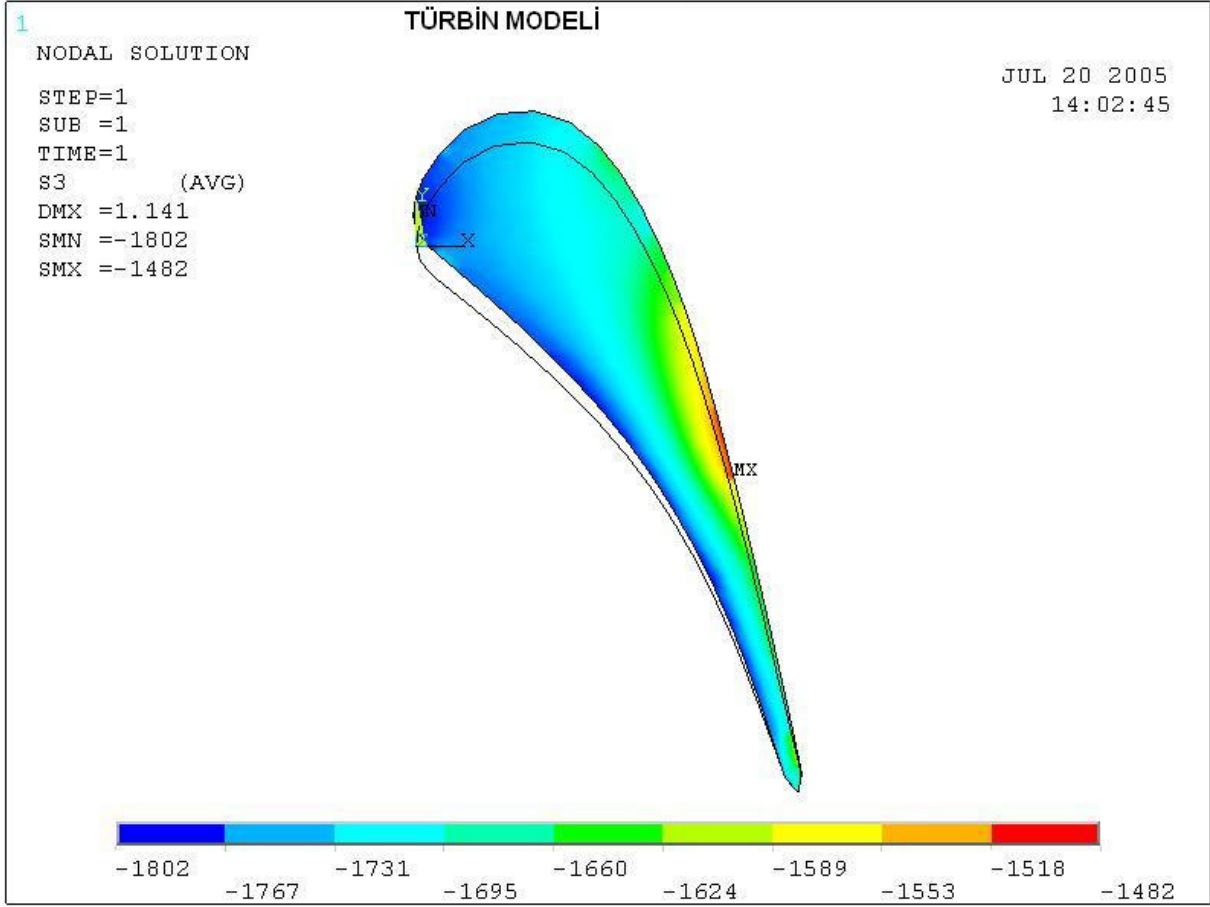
Şekil 10.7. Türbin modelinin X yönündeki deformasyonu



Şekil 10.8. Türbin modelinin Y yönündeki deformasyonu

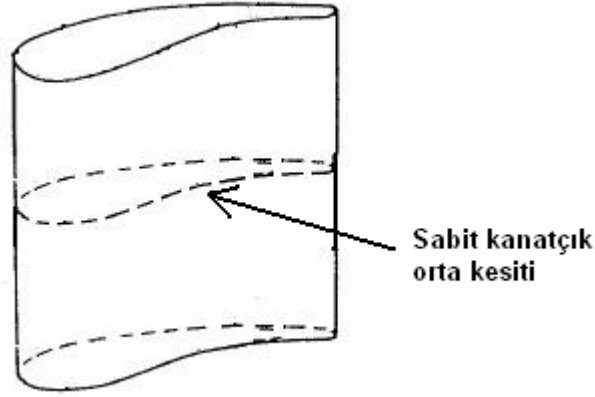


Şekil 10.9. Türbin modelinin maksimum asal gerilme dağılımı



Şekil 10.10. Türbin modelinin minimum asal gerilme dağılımı

Kanatçık kesitinin sabit kaldığı farz edilerek sonuçlar orta kesiti simüle edecek şekilde verilmiş ve bütün kesit boyunca bu değerlerin değişmediği kabul edilmiştir (Şekil 10.11). Kaskat testinde ortam sıcaklığı 140°C 'lerde olduğu için ve bu sıcaklıklarda da alüminyumun elastisite modulu ortalama %10'lar civarında düştüğü için ve kanatçık kesitine etkiyen basınç değerleri nispeten düşük olduğu için X ve Y yönlerindeki maksimum deformasyonlar sırası ile 23 ve 18 mikrondur ve kanatçığın emme tarafında oluşmuşlardır. Bu deformasyonlar altında akış karakteristiğinin değişmesi beklenmemelidir ki bu da test için istenen bir sonuçtur.



Şekil 10.11. Analizin yapıldığı sabit kanatçık orta kesiti

Deformasyon değerleri ve termal gradyanın az olmasından dolayı maksimum gerilme değerleri beklenildiği üzere düşük çıkmış ve maksimum deformasyonlar emme tarafında oluşmuştur. Bu değerler akma sınırı 250 MPa'lar civarında olan Alüminyum için son derece güvenilir değerlerdir ki bu da test ile ilgili herhangi bir sınırlayıcı etken oluşturmamaktadır.

Çalışma şartlarında altında INCONEL malzemedен yapılmış olan kanatçık modeli için ise analiz sonuçları kaskat testinde kullanılan alüminyum kanatçığa göre çok farklıdır. Bundaki en büyük sebep INCONEL malzemenin termal genleşme katsayısı ve bu kanatçığa ait ortaya çıkan basınç ve termal gradyan değerlerinin daha yüksek olmasıdır. INCONEL malzemedен üretilen kanatçık incelendiğinde kanatçık üzerinde ortaya çıkan maksimum maksimum deformasyonlar X ve Y eksenlerinde 0.22 ve 1.14 mm.dir. Bu miktardaki deformasyonlar akım ayrılmasına neden olabileceği için akış karakteristiğini olumsuz yönde etkileyebilir. Nihai karar, yapılacak olan detaylı bir hesaplamalı akışkanlar mekaniğine göre ve daha sonra gerçekleştirilecek testler sonucunda verilebilir. Bu analizlerde deforme olmuş kanatçık geometrisi kullanılmalıdır. Gerilme değerleri incelendiğinde ise maksimum gerilme değeri 1800 MPa'lar civarında olup bu değer, INCONEL malzemede kesin olarak kırılma veya kopmalara yol açabilecek bir değerdir. Kırılmanın arkasında yatan fiziksel gerçek ise hem yüksek hem de düşük çevrimli yorulma

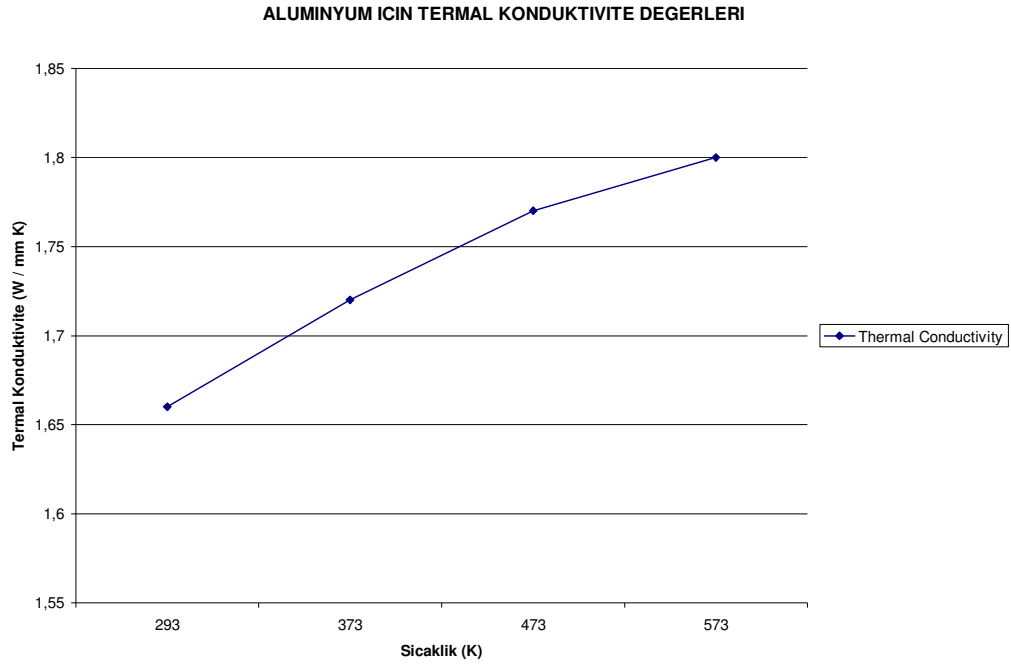
mekanizmalarıdır. Bu nedenle bu parçalar, bu yükler altında sonlu ömürlere sahip olup belli periyotlarda kontrol edilmelidir.

EK AÇIKLAMALAR – A

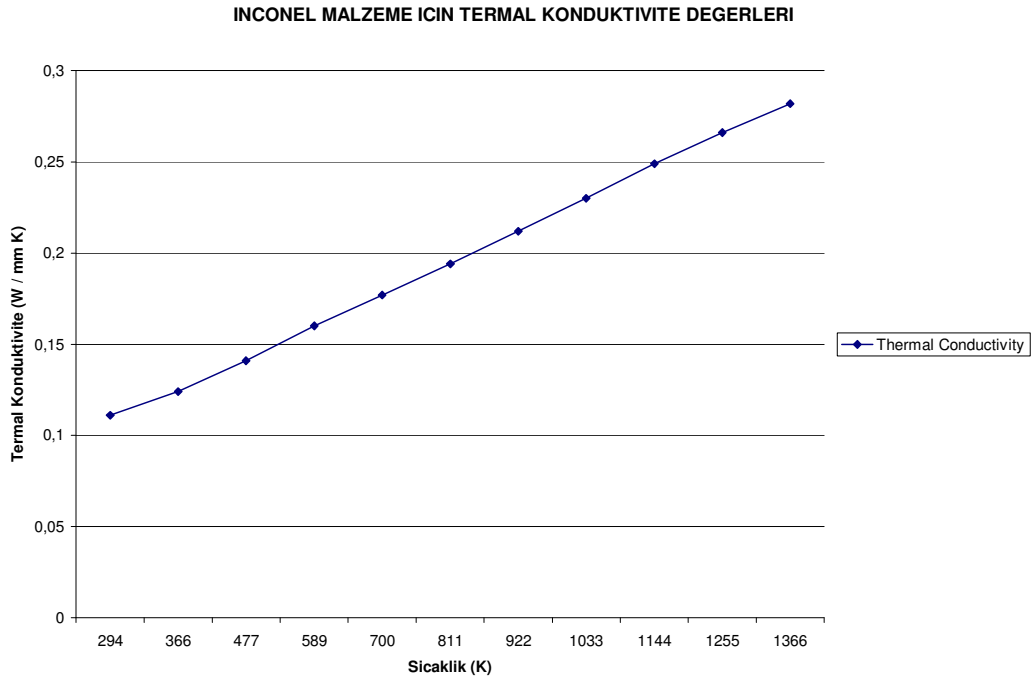
ANSYS MODELİNİ OLUŞTURMA AŞAMALARINDA KULLANILAN GRAFİKLER, ŞEKİLLER VE GRAFİK KULLANICI ARAYÜZ MENÜLERİ



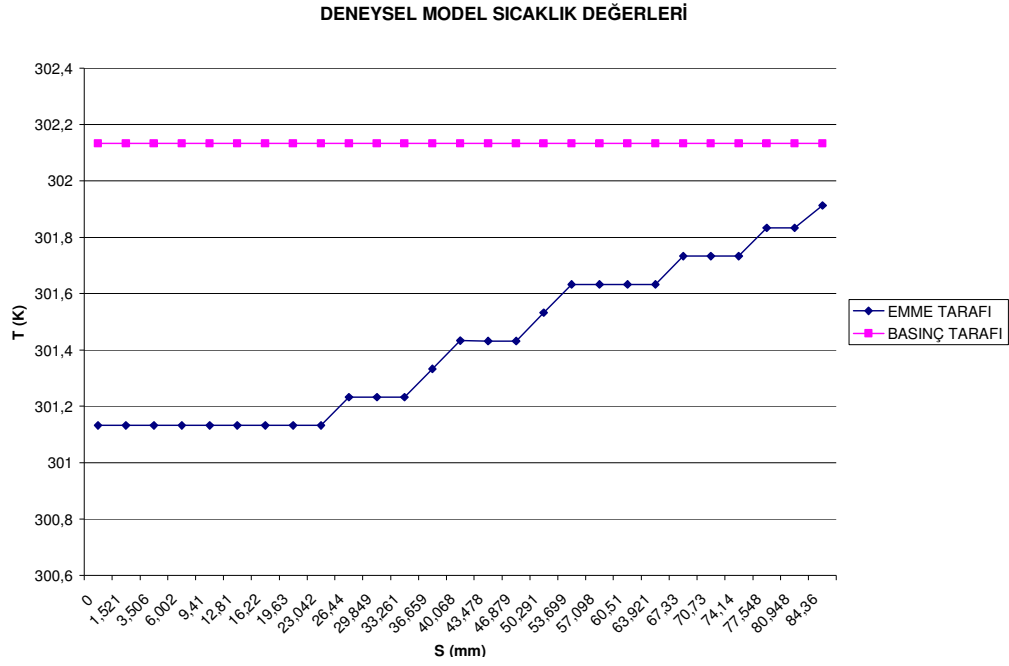
Şekil A 1. Kanatçık profilinin imalat koordinatlarına göre oluşturulan ANSYS modeli



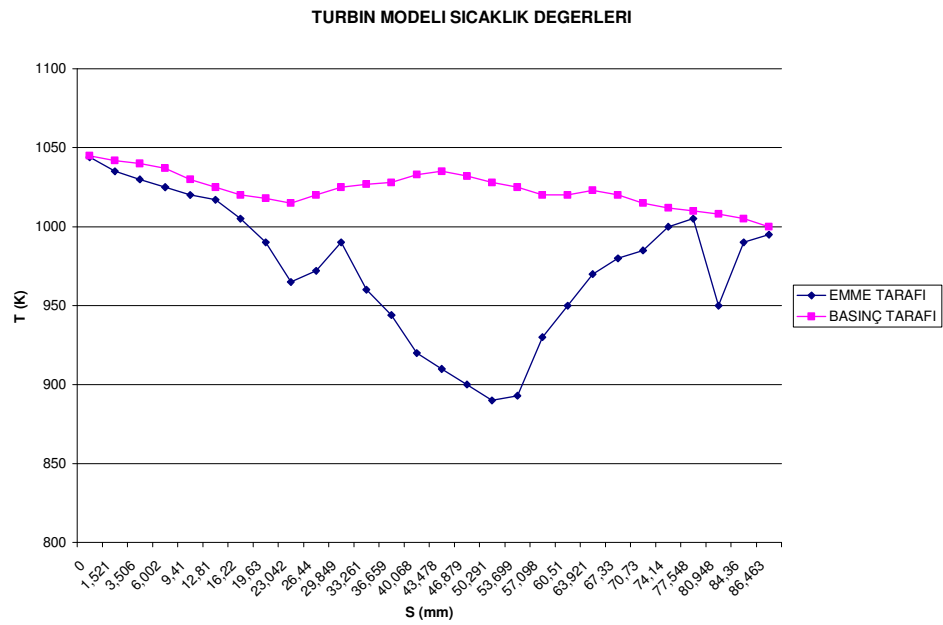
Şekil A. 2a. AL 6061 T6 için sıcaklığa bağlı termal konduktivite değerleri



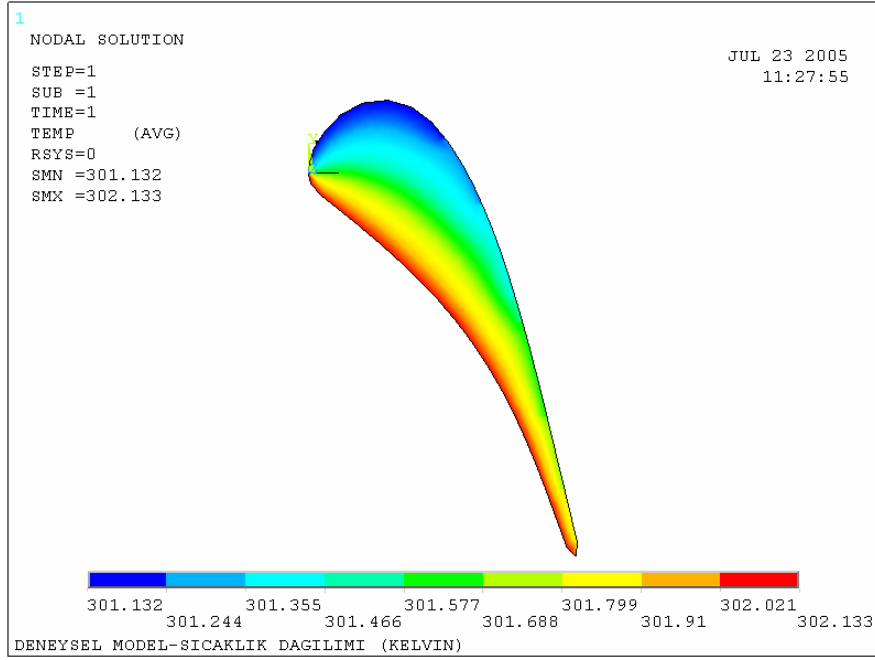
Şekil A. 2b. INCONEL için sıcaklığa bağlı termal konduktivite değerleri



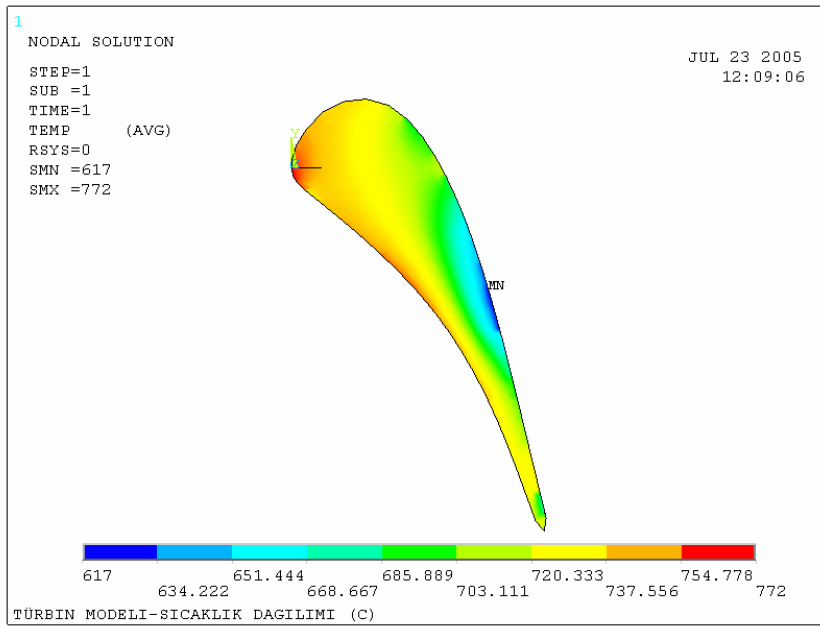
Şekil A. 3a. Deneysel Modelin kanatçık duvarı boyunca sıcaklık dağılımı



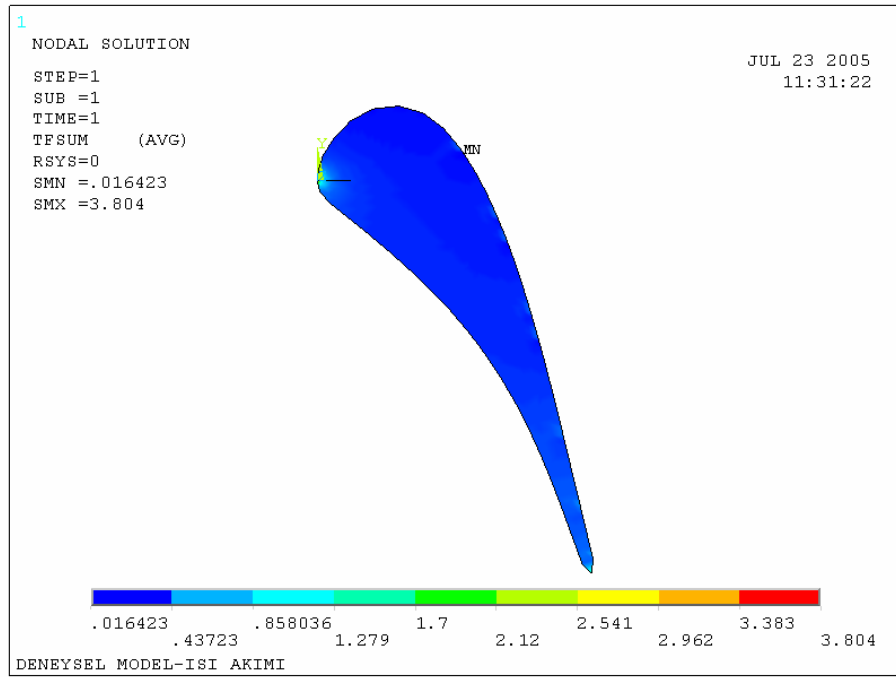
Şekil A. 3b. Türbin Modelinin kanatçık duvarı boyunca sıcaklık dağılımı



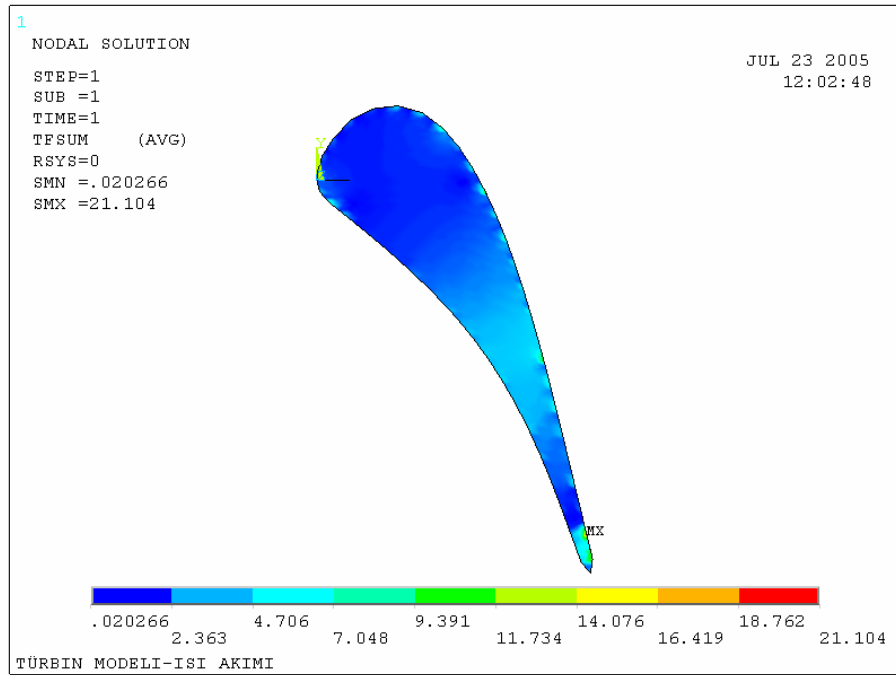
Şekil A. 4a. Deneysel modelin kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı



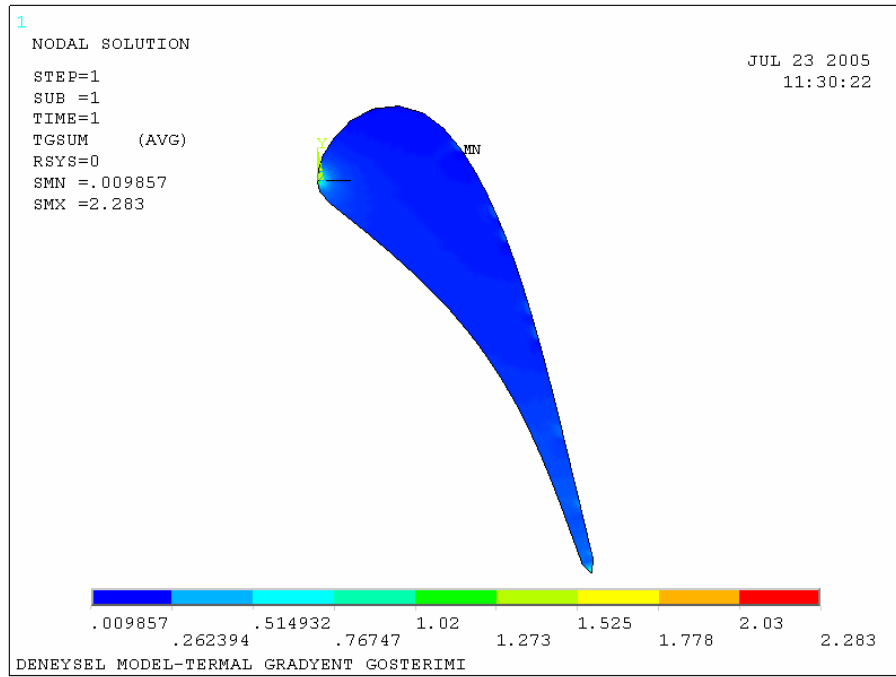
Şekil A. 4b. Türbin modelinin kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı



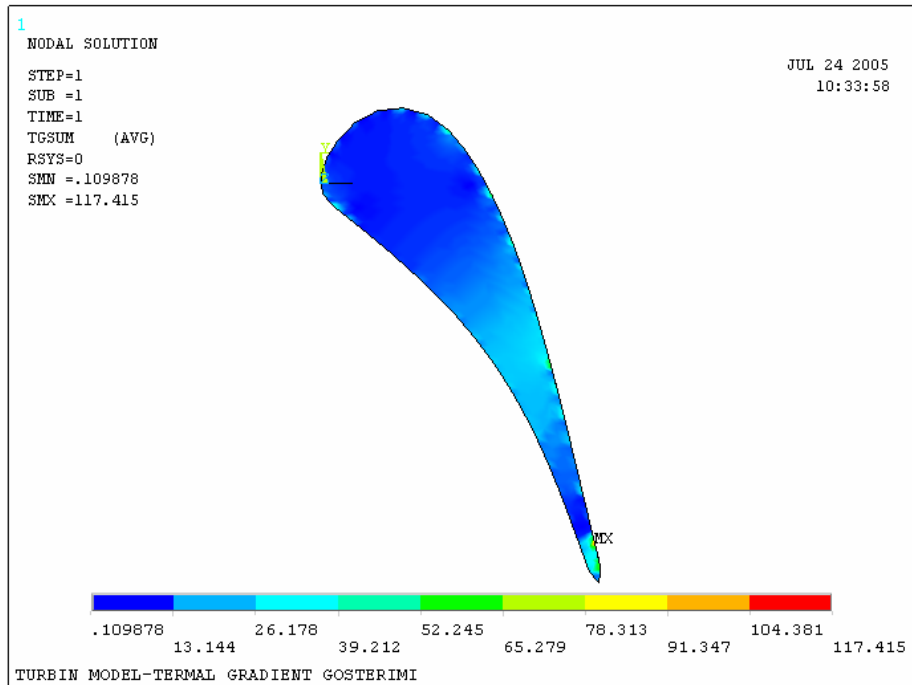
Şekil A.5a. Deneysel Modelin ısı akımlarının dağılımı



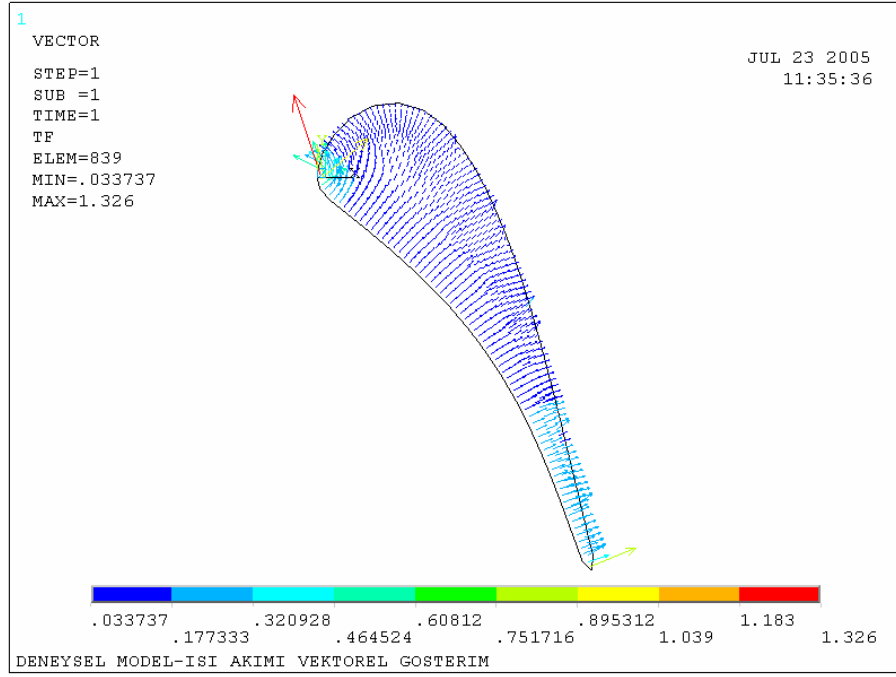
Şekil A. 5b. Türbin modelinin ısı akımlarının dağılımı



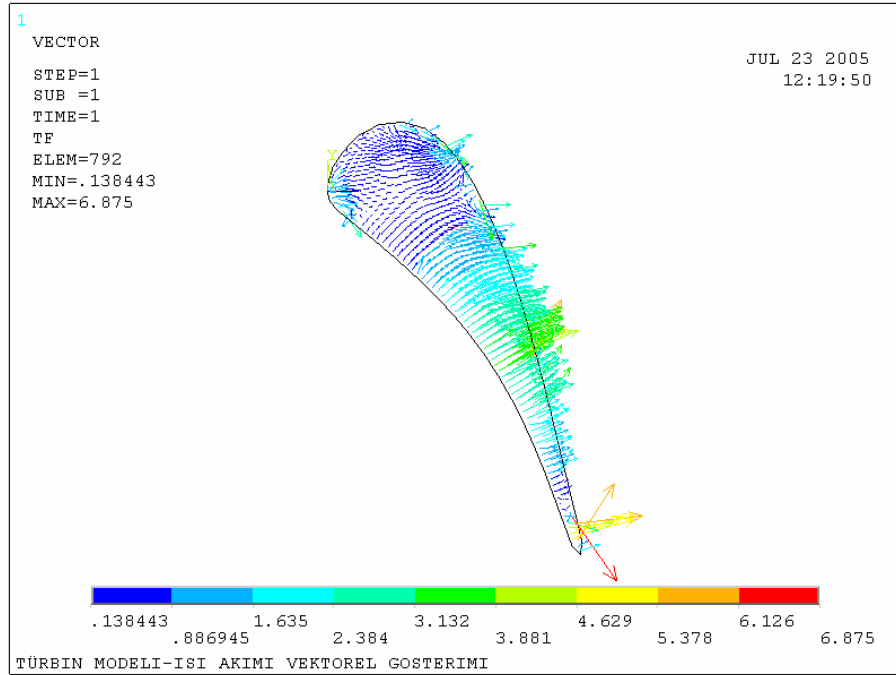
Şekil A. 6a. Deneysel modelin termal gradyent gösterimi



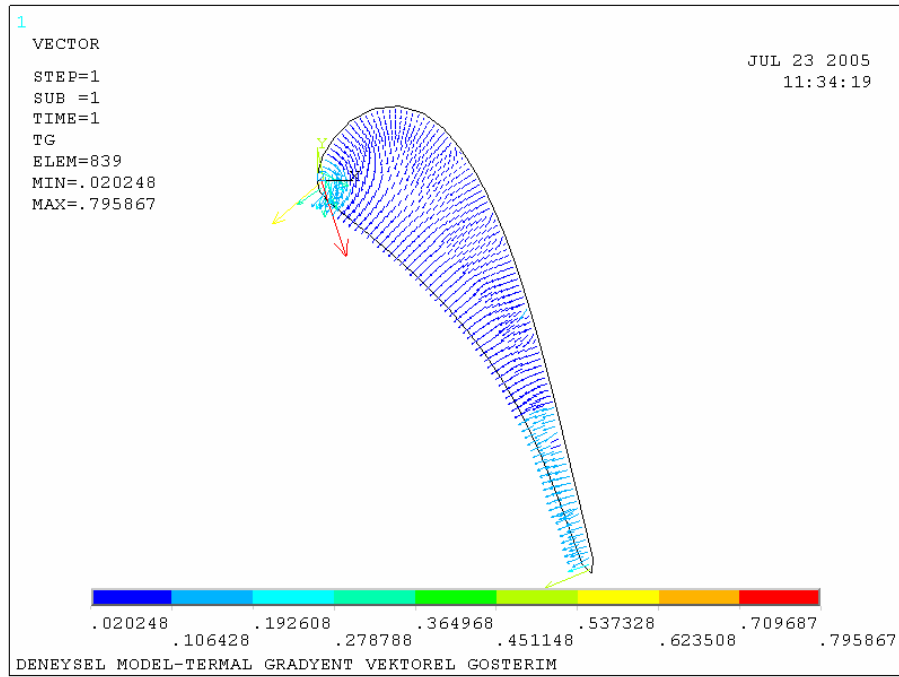
Şekil A. 6b. Türbin modelin termal gradyent gösterimi



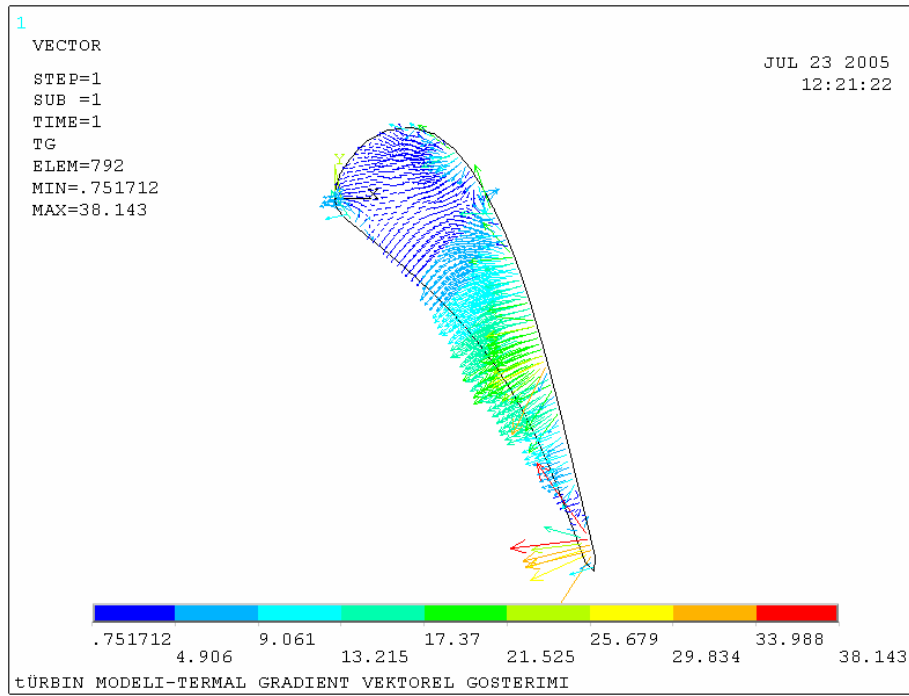
Şekil A. 7a. Deneysel Modelin ısı akımlarının vektörel dağılımı



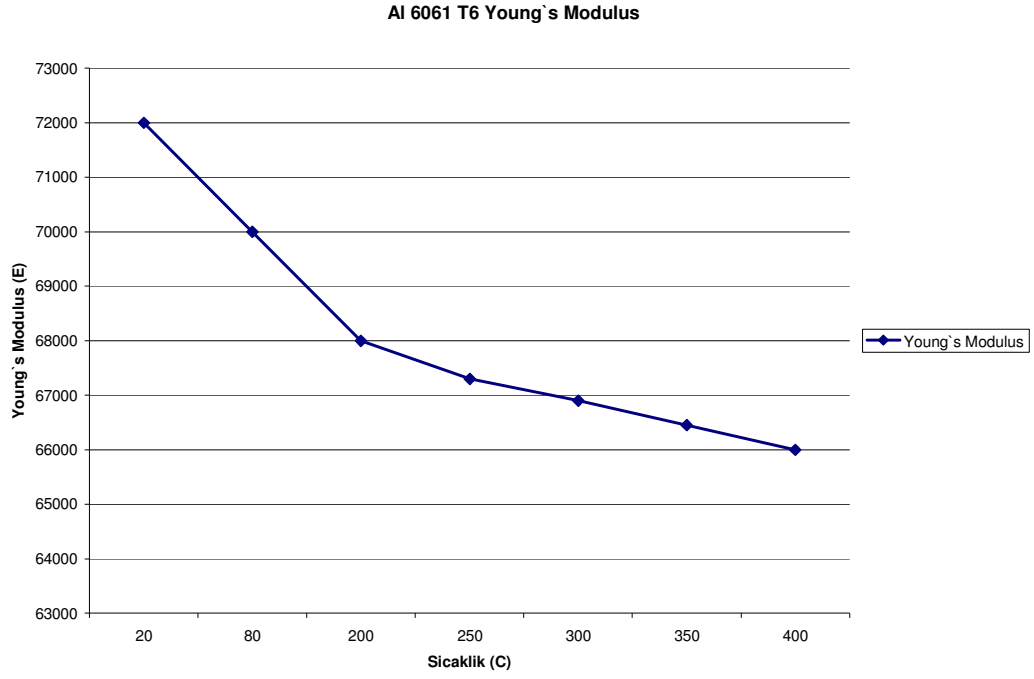
Şekil A. 7b. Türbin modelinin ısı akımlarının vektörel dağılımı



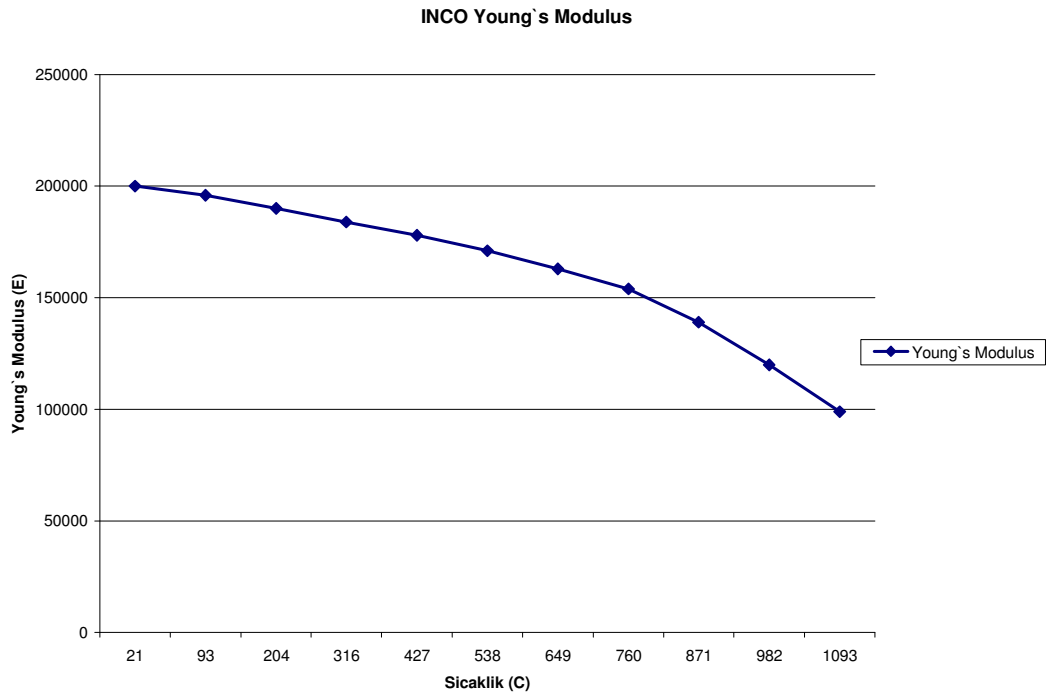
Şekil A. 8a. Deneysel modelin vektörel termal gradient gösterimi



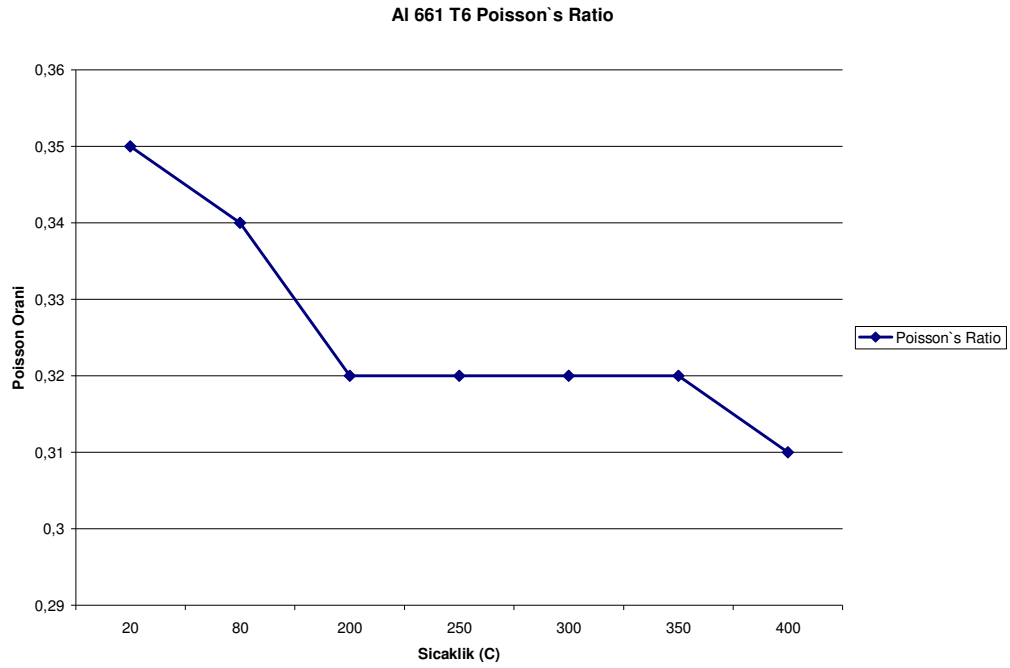
Şekil A. 8b. Türbin modelin vektörel termal gradient gösterimi



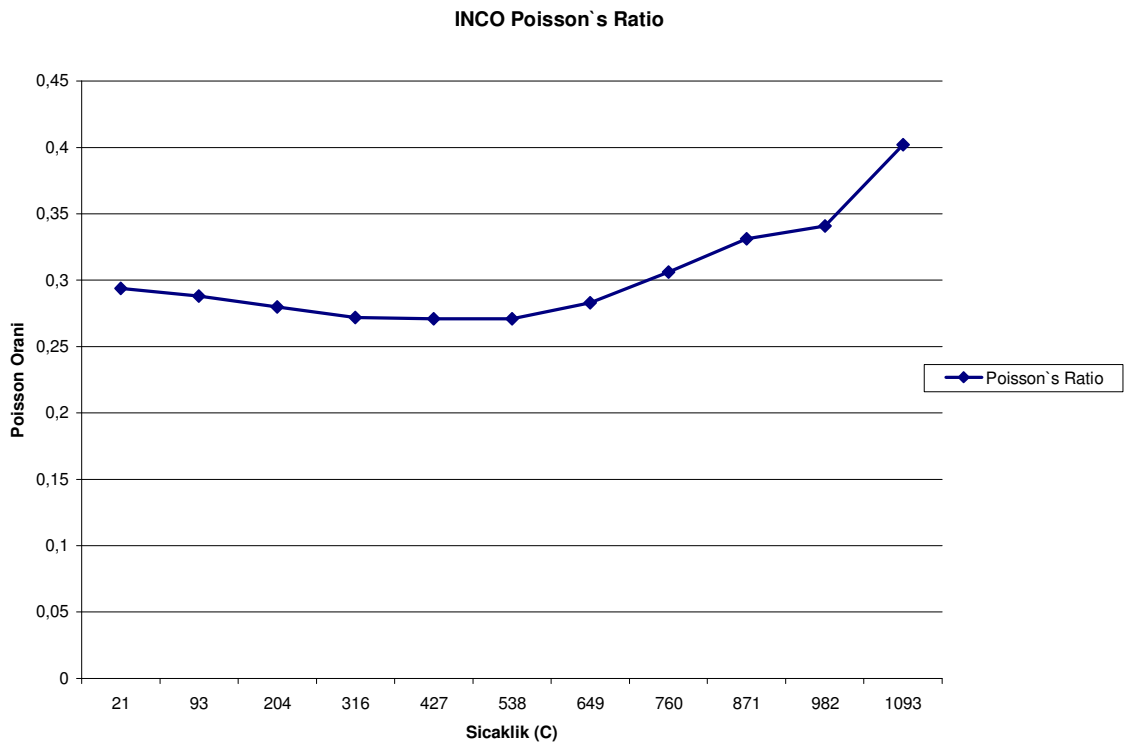
Şekil A. 9a. AL 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı Young's Modulus değerleri



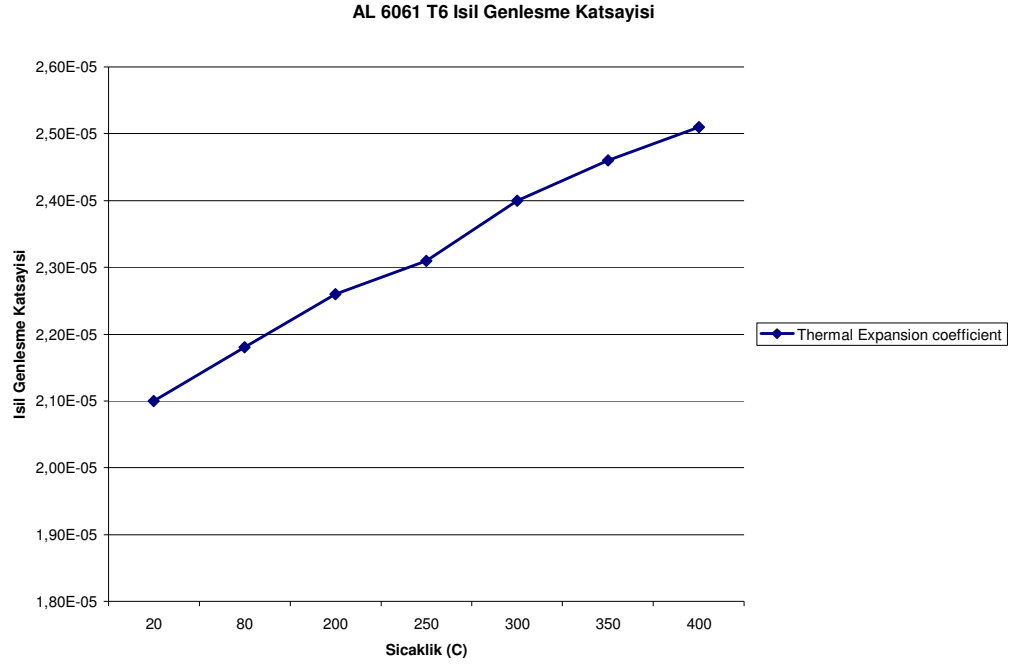
Şekil A. 9b. INCONEL malzemesinin sıcaklığa bağlı Young's Modulus değerleri



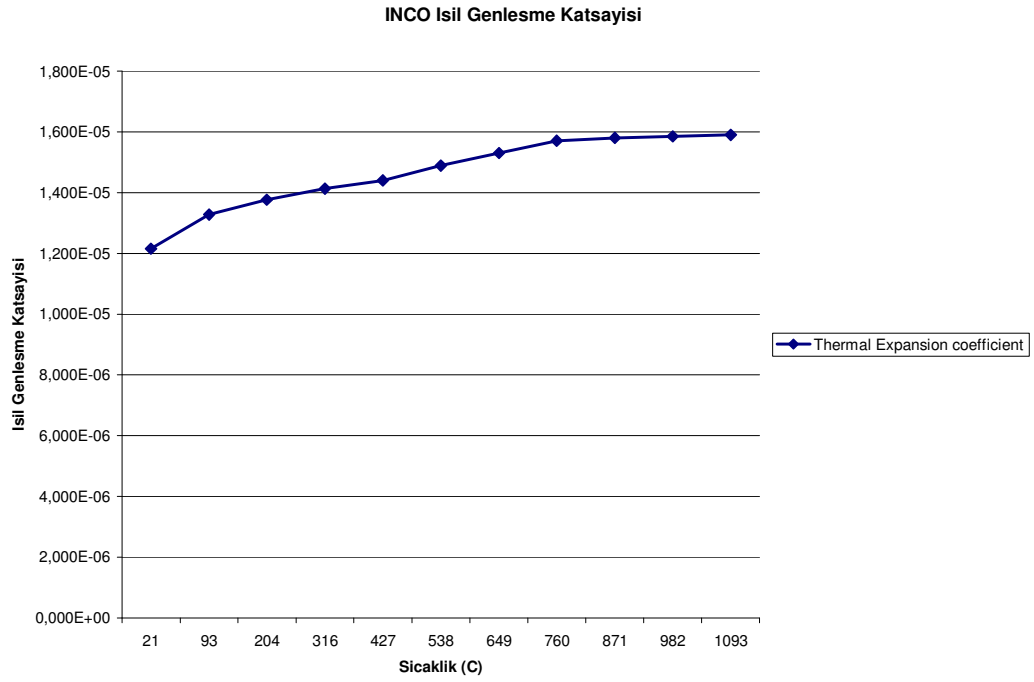
Şekil A. 10a. AL 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı Poisson oranı değerleri



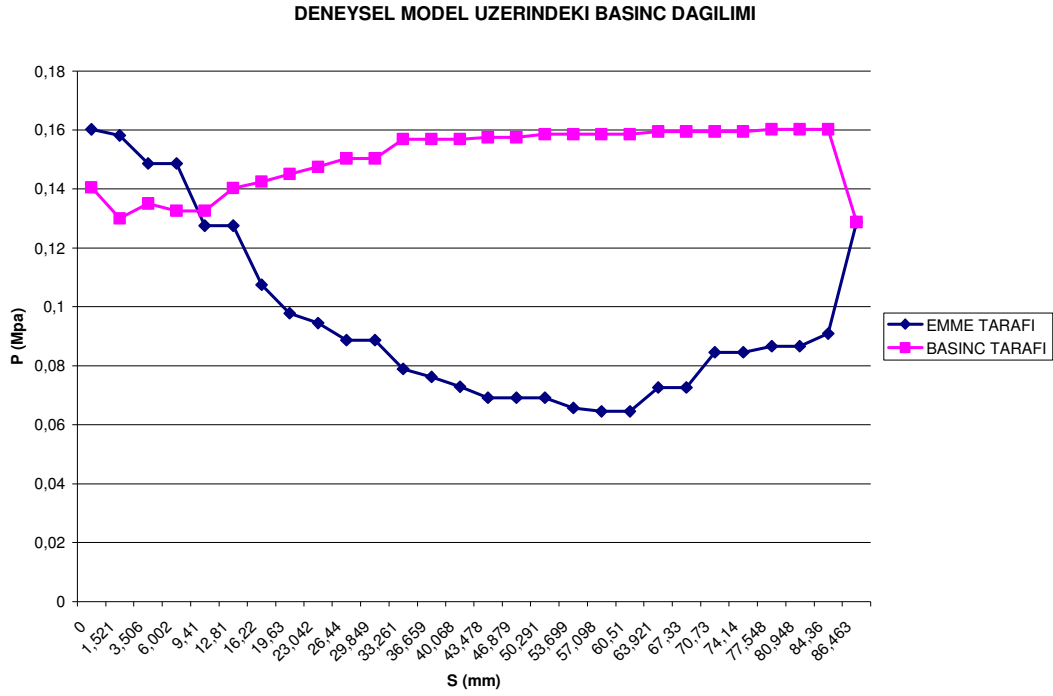
Şekil A. 10b. INCONEL malzemesinin sıcaklığa bağlı Poisson oranı değerleri



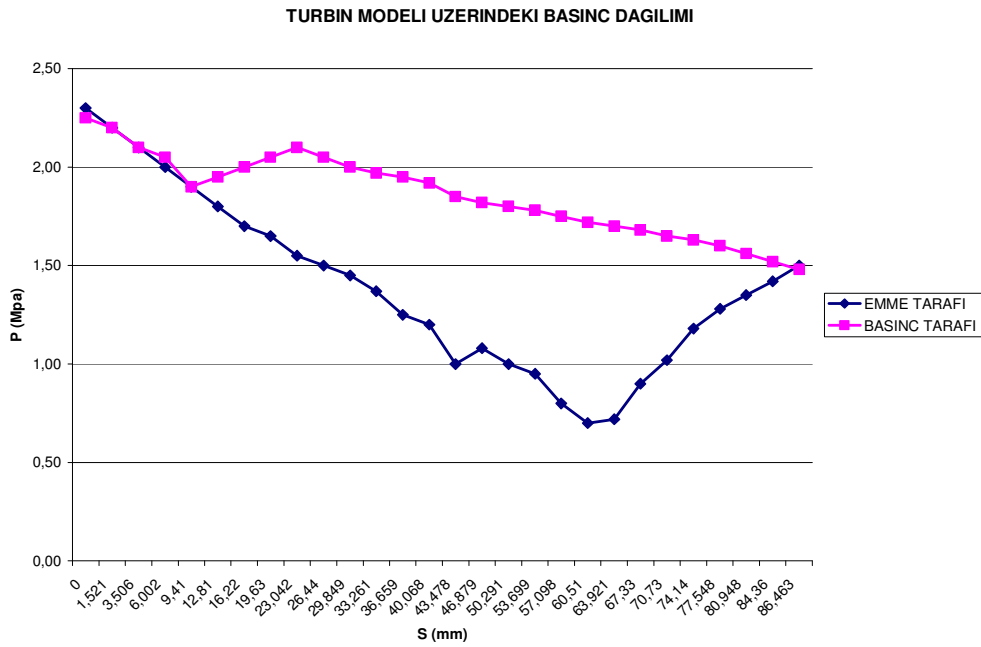
Şekil A. 11a. AL 6061 T6 malzemesinin sıcaklığa bağlı ısıl genleşme katsayısı değerleri



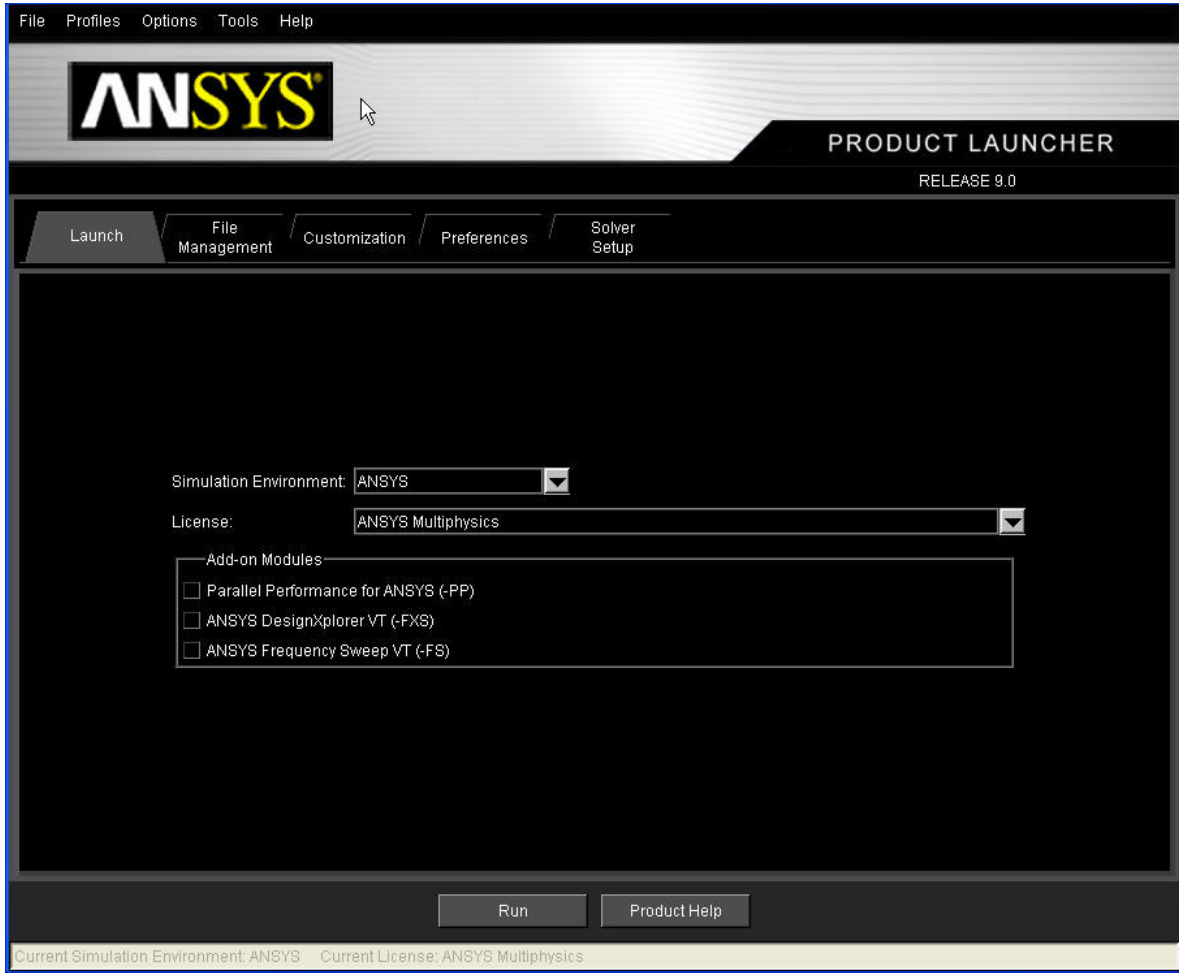
Şekil A. 11b. INCONEL malzemesinin sıcaklığa bağlı ısıl genleşme katsayısı değerleri



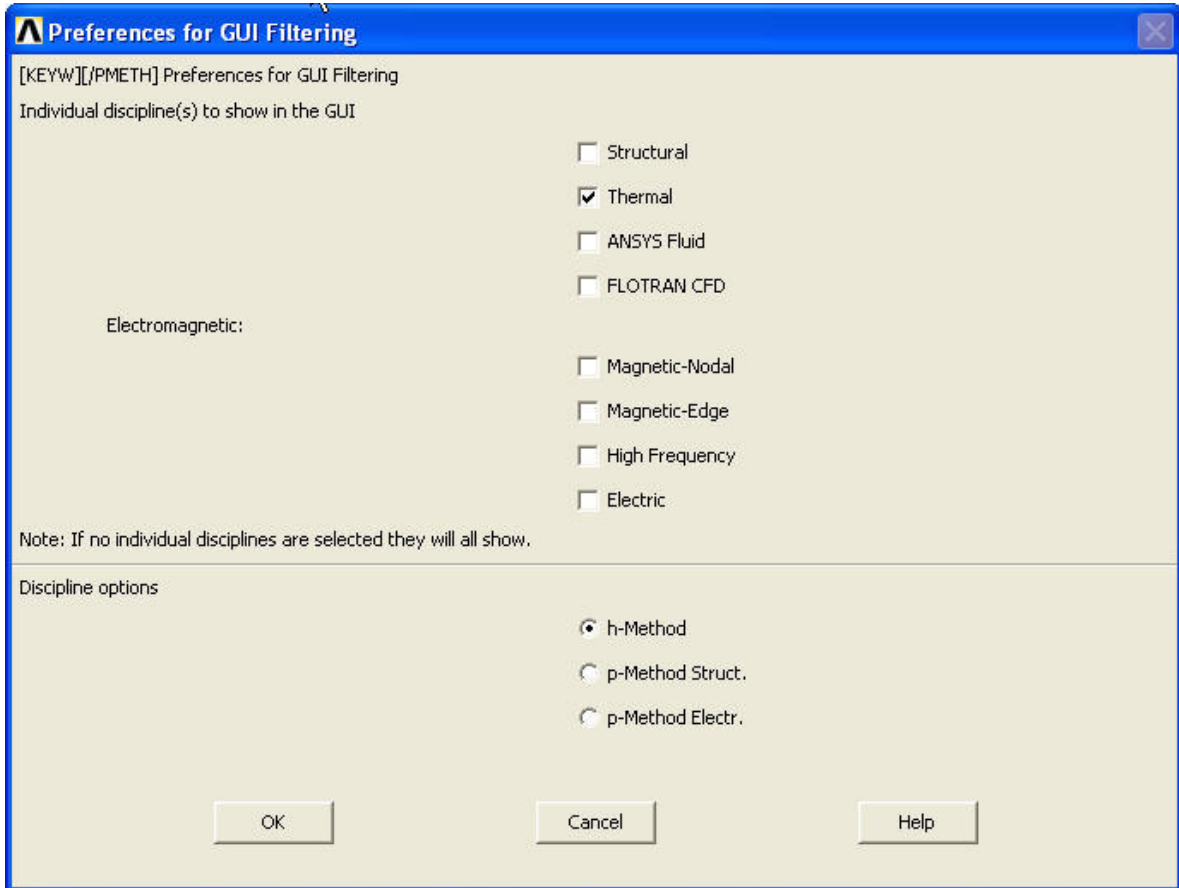
Şekil A. 12a. Deneysel modelin kanatçık yüzeyi boyunca basınç dağılımı



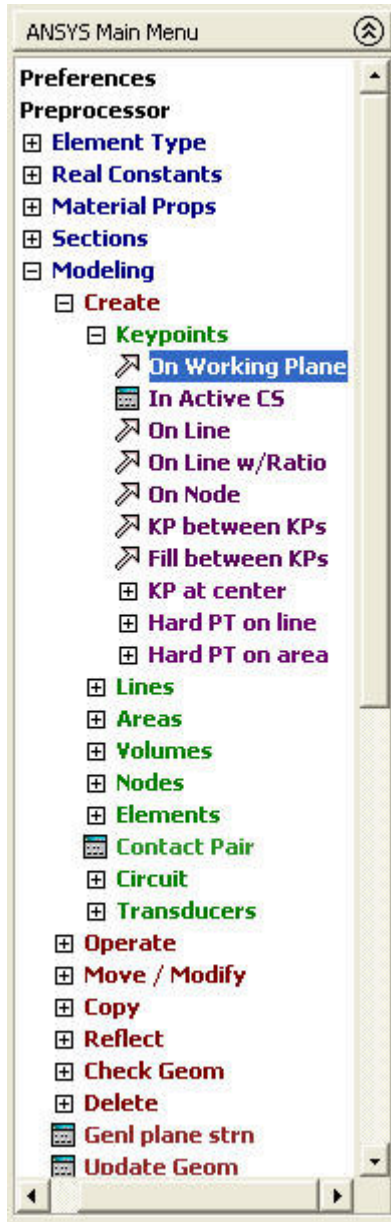
Şekil A. 12b. Türbin modelinin kanatçık yüzeyi boyunca basınç dağılımı



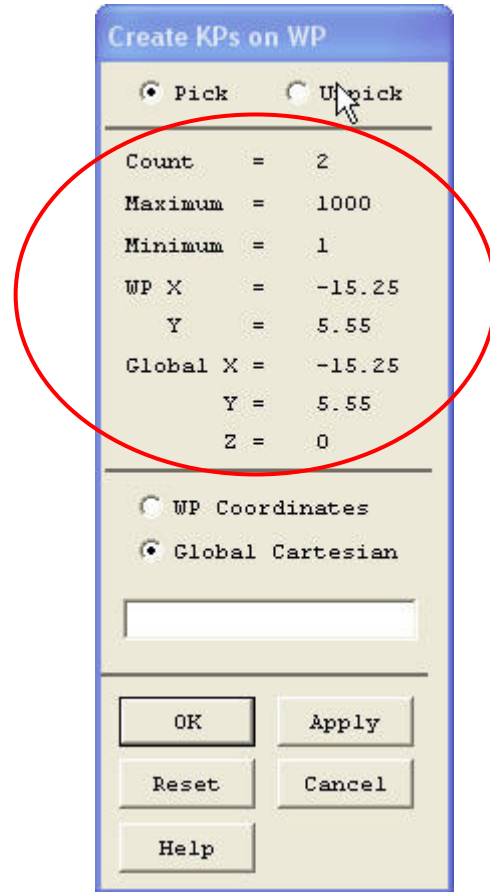
Şekil A. 13. ANSYS programının başlatılması



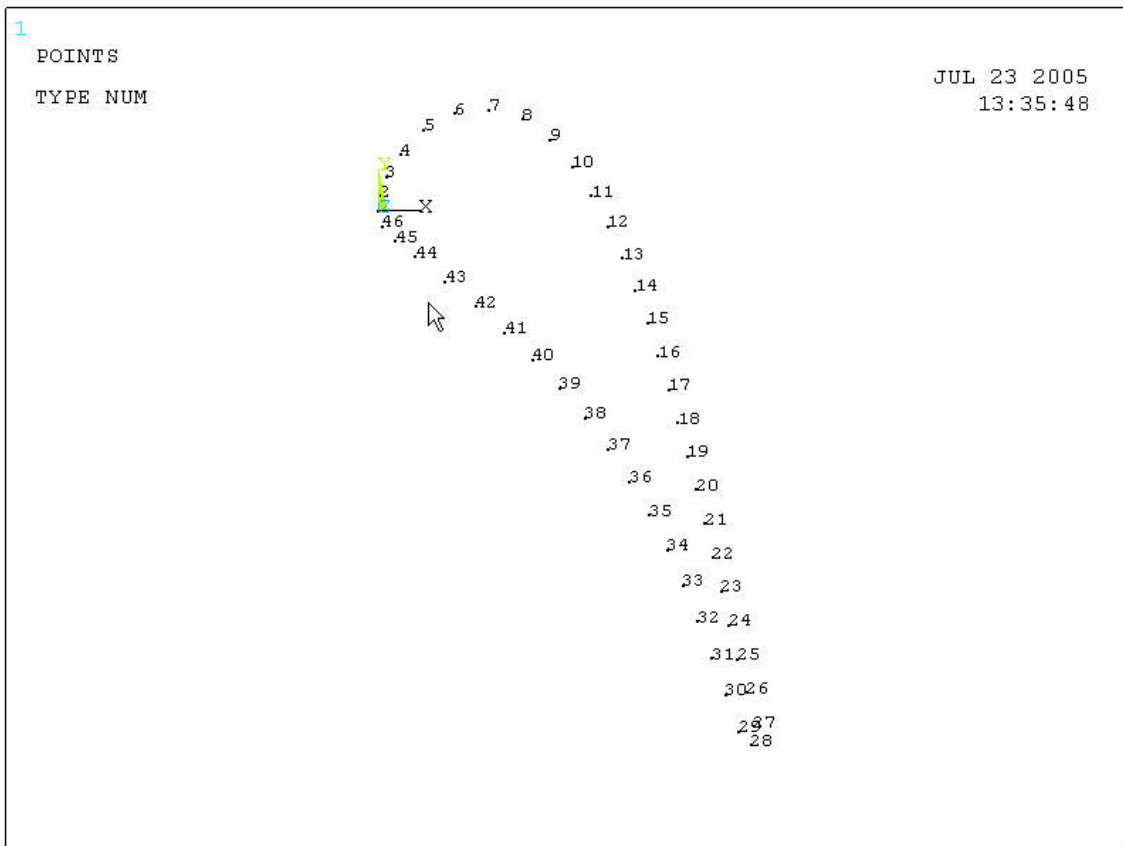
Şekil A. 14. Termal Analiz Disiplininin Seçilmesi



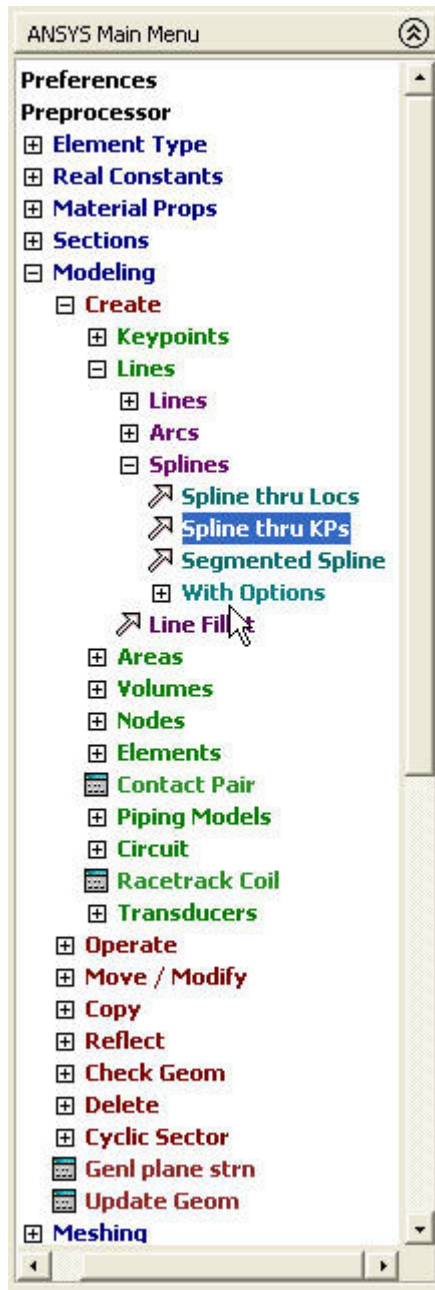
Şekil A. 15. Kanatçık geometrisinin oluşturulması için vortekslerin oluşturulması



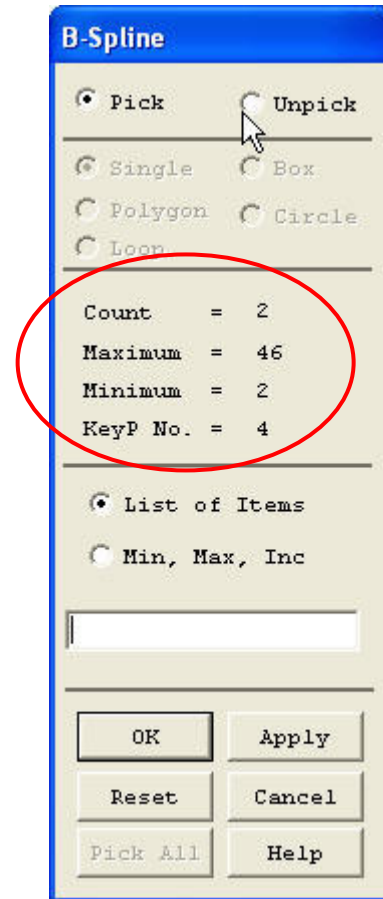
Şekil A. 16. Vortekslerin numaralandırılması ve koordinatlarının belirlenmesi



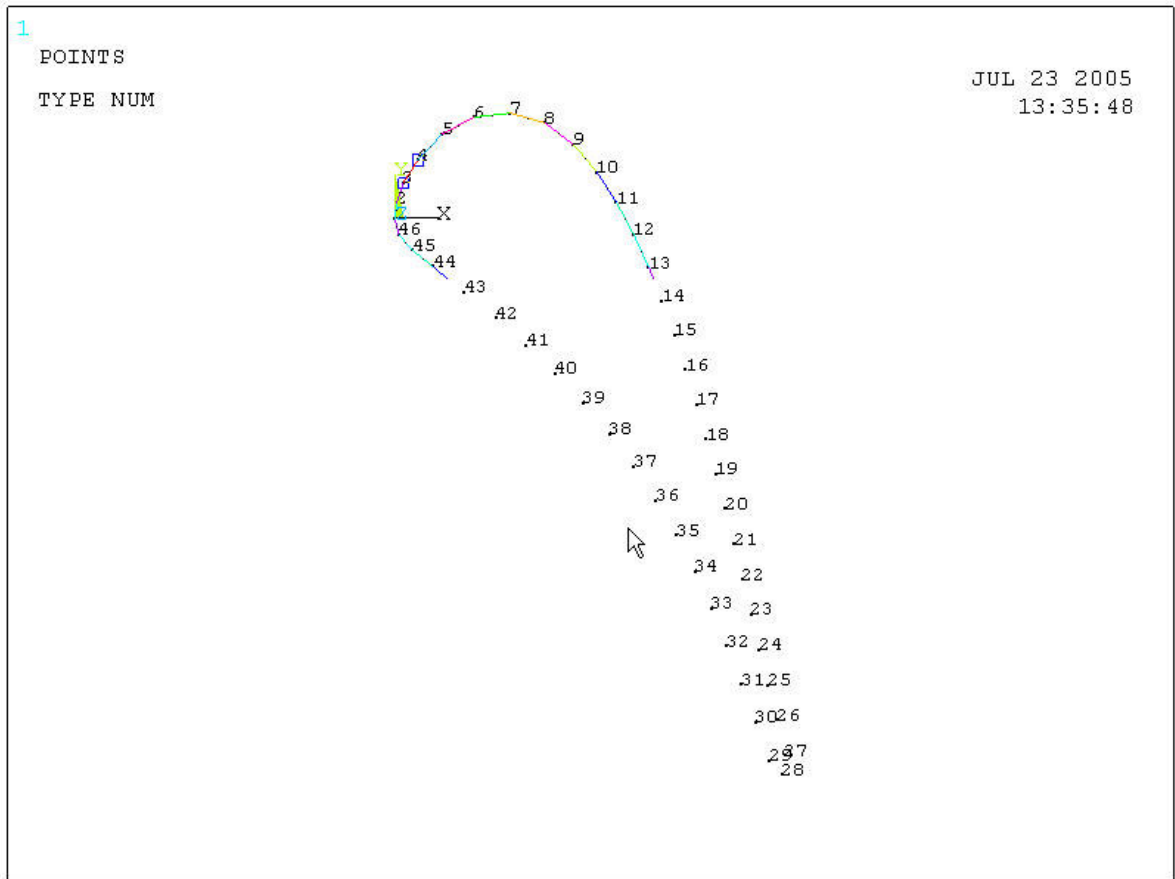
Şekil A. 17. Vorteksler ile kanatçık profilinin çizilmesi



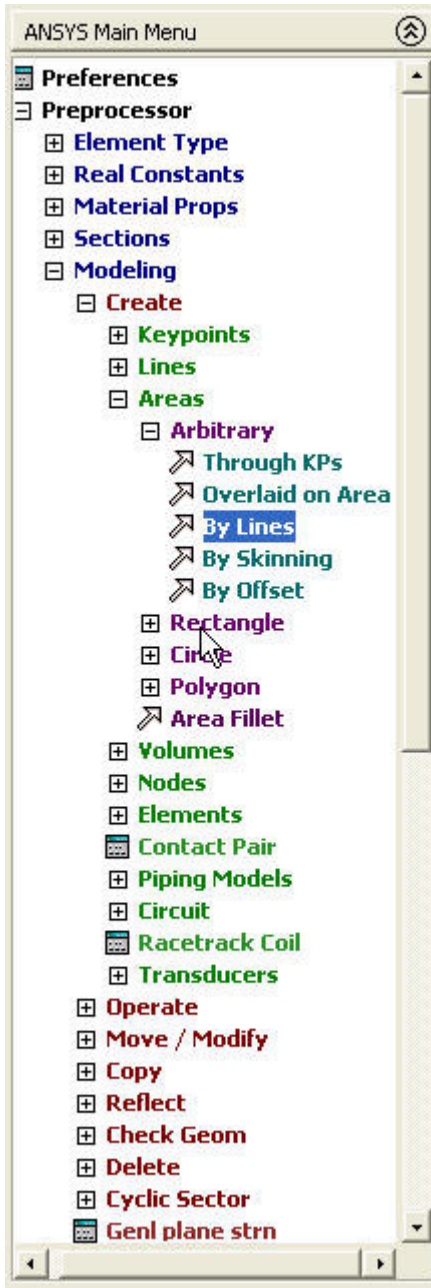
Şekil A. 18. Vortekslerin çizgiler ile birleştirilmesi



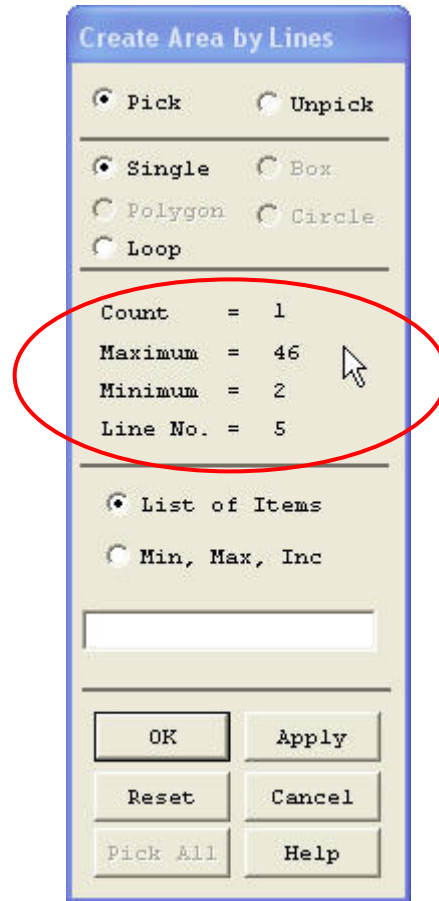
Şekil A. 19. Çizgilerin iki ucundaki vortekslerin seçilmesi



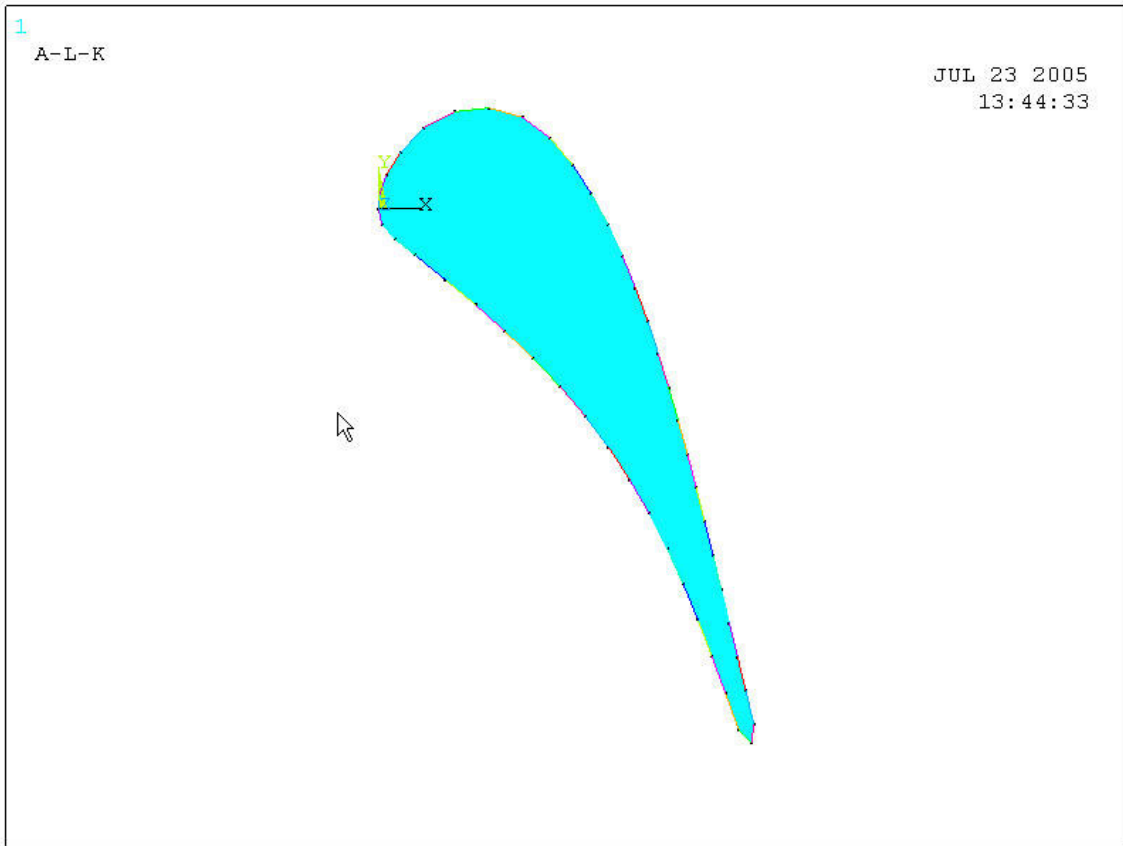
Şekil A. 20. Çizgilerle kanatçık profilinin oluşturulması



Şekil A. 21. Çizgilerden bir alan oluşturulması



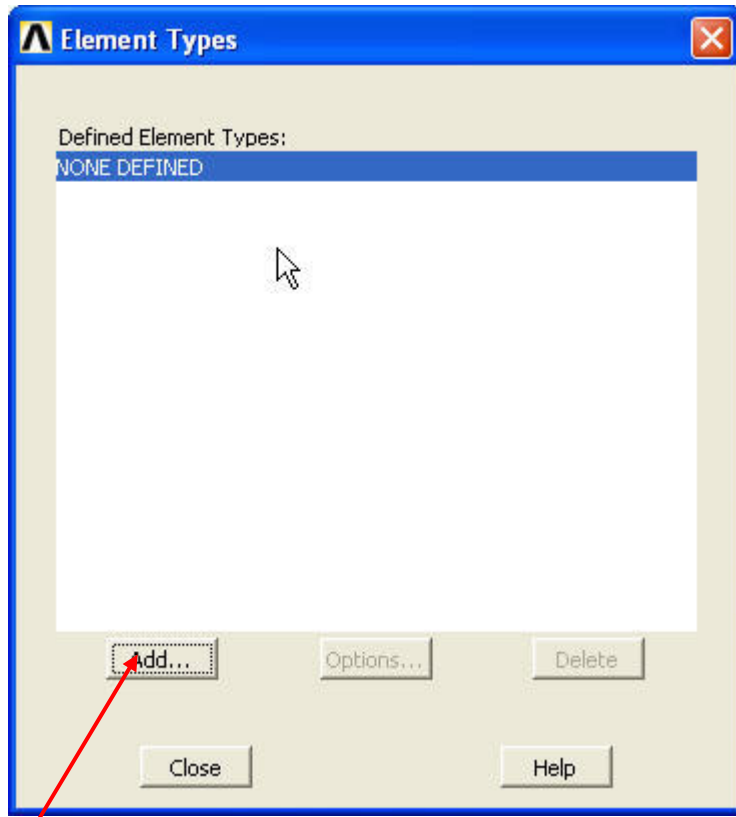
Şekil A. 22. Alanı oluşturacak çizgilerin tek tek seçilmesi



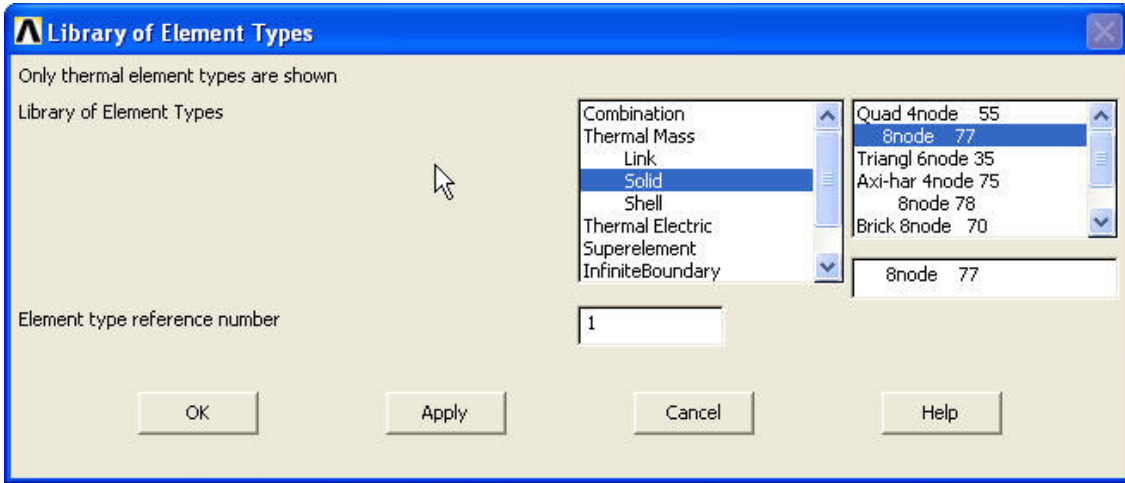
Şekil A. 23. Alanın oluşturulması



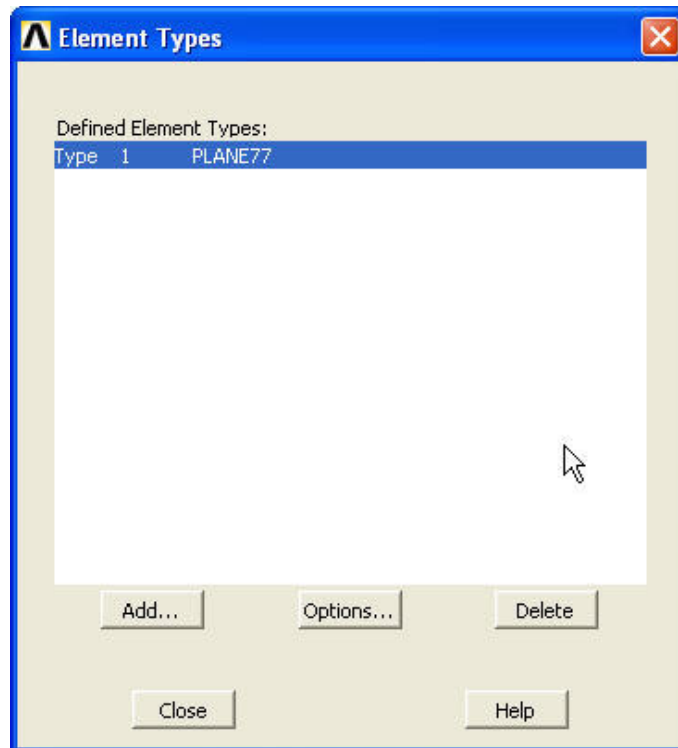
Şekil A. 24. Ağ örgüsü için eleman tipinin belirlenmesi



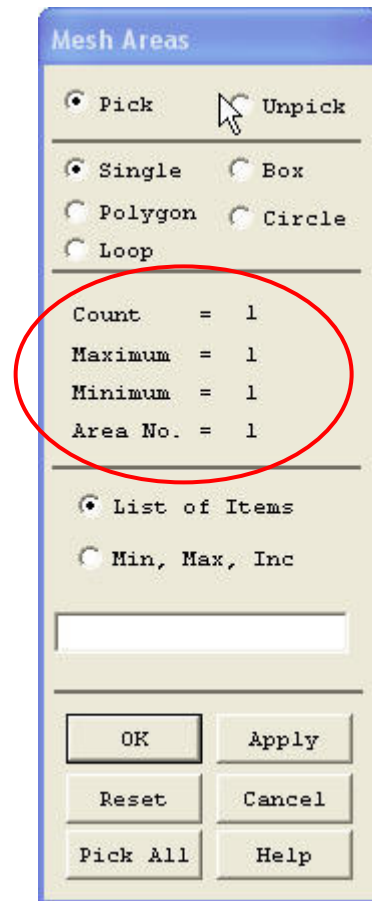
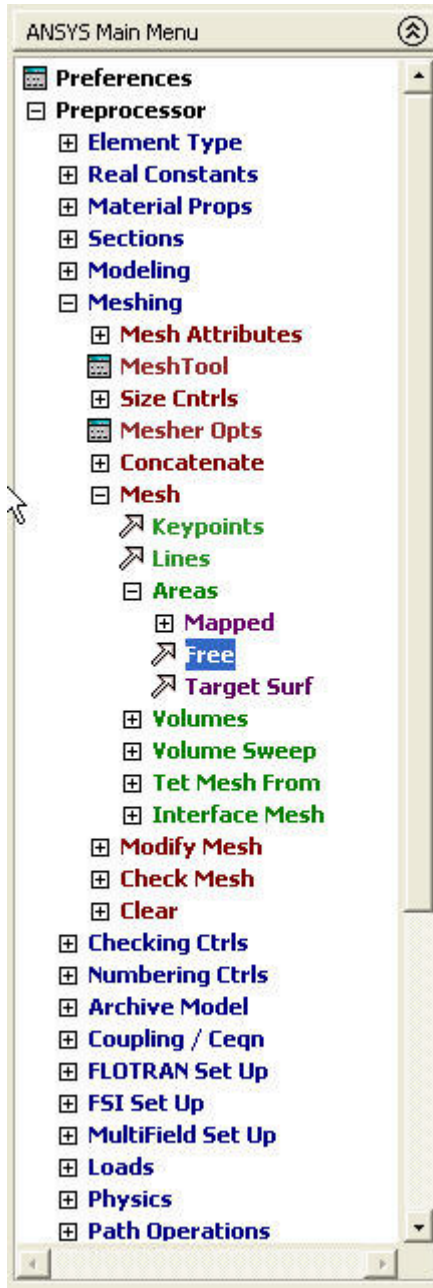
Şekil A. 25. Eleman tipinin eklenmesi



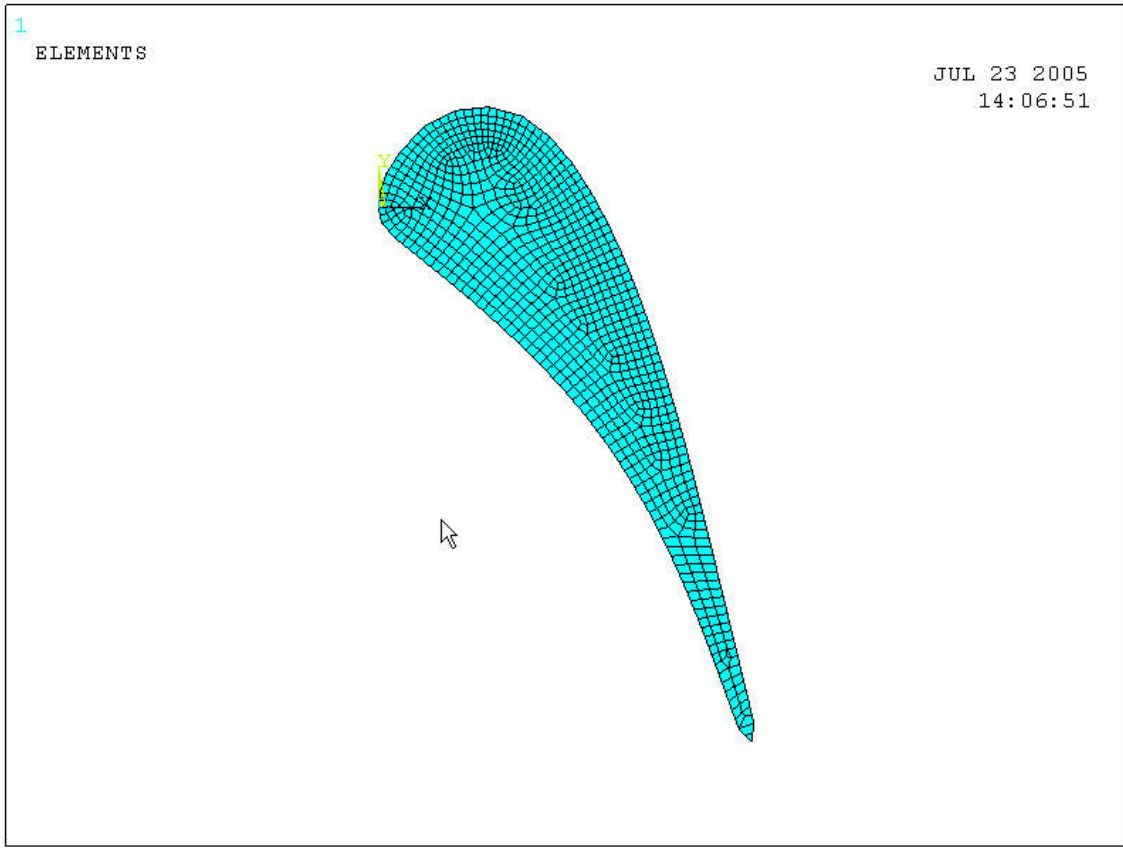
Şekil A. 26. Termal Elemanın Seçilmesi



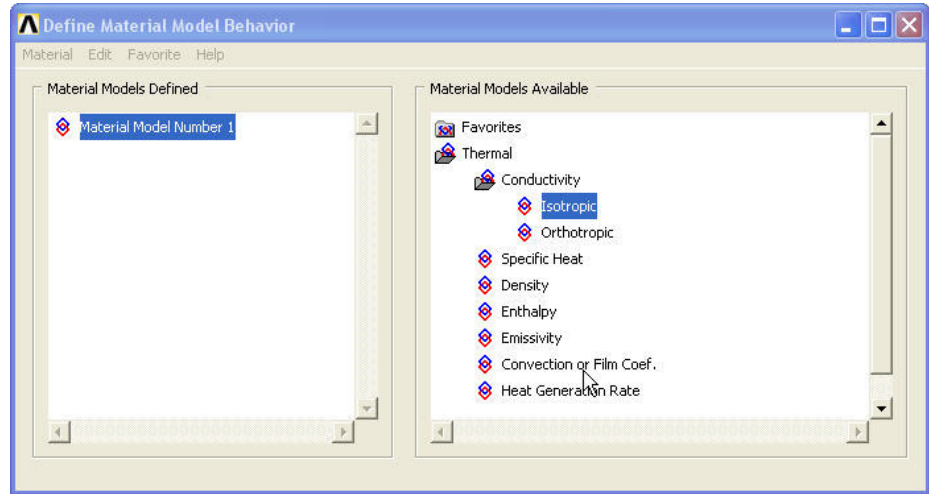
Şekil A. 27. Eleman tipinin tabloda belirtilmesi



Şekil A. 28. Serbest Ağ örgüsünün seçilmesi Şekil A. 29. Ağ örgüsünün uygulanacağı alanın seçilmesi

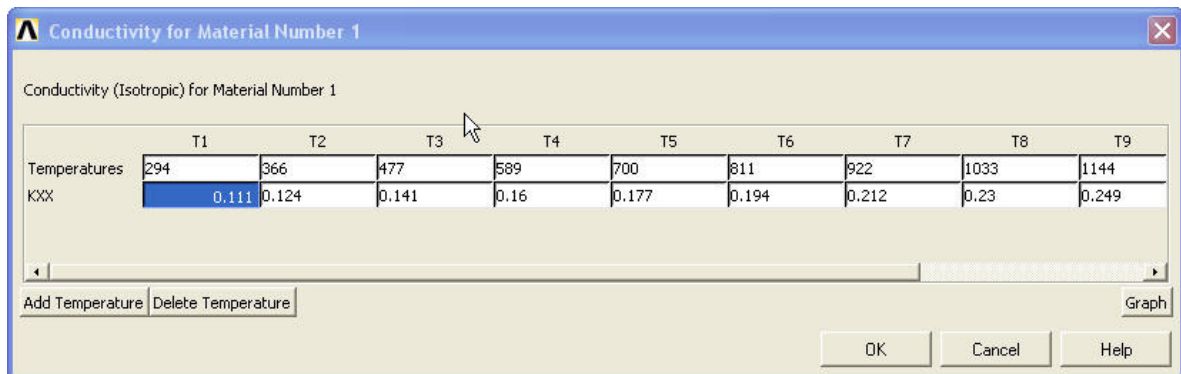


Şekil A. 30. Ağ örgüsü uygulanmış alan



Şekil A. 31. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

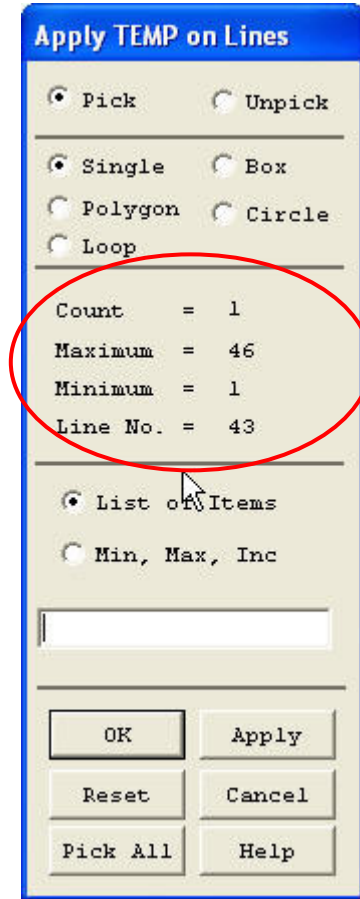
Şekil A. 32. Termal konduktivite değerinin seçilmesi



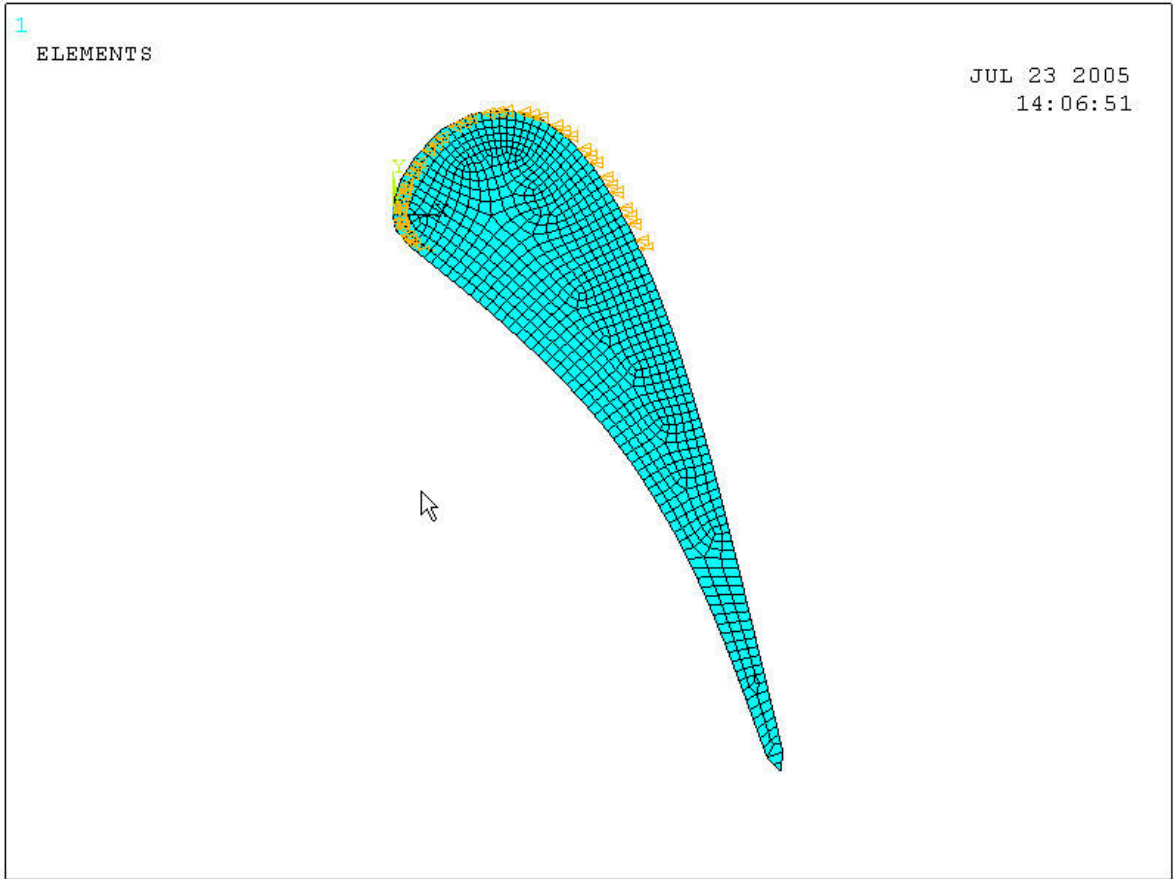
Şekil A. 33. Sıcaklığa bağlı termal konduktivite değerlerinin girilmesi.



Şekil A. 34. Sıcaklık değerlerinin kanatçığı oluşturulan çizgilere tanıtılması



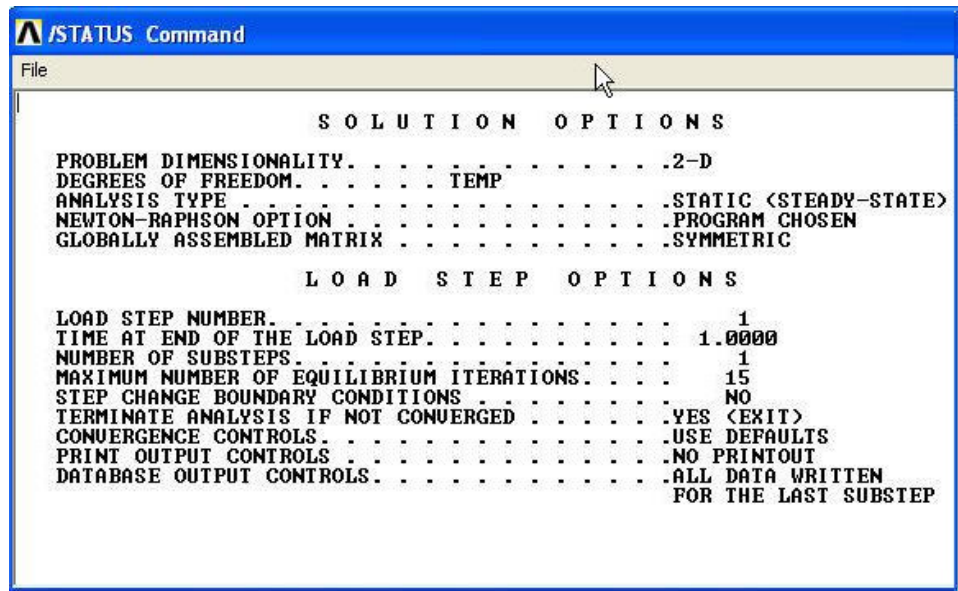
Şekil A. 35. Çizgilerin tek tek seçilerek sıcaklık değerlerinin uygulanması



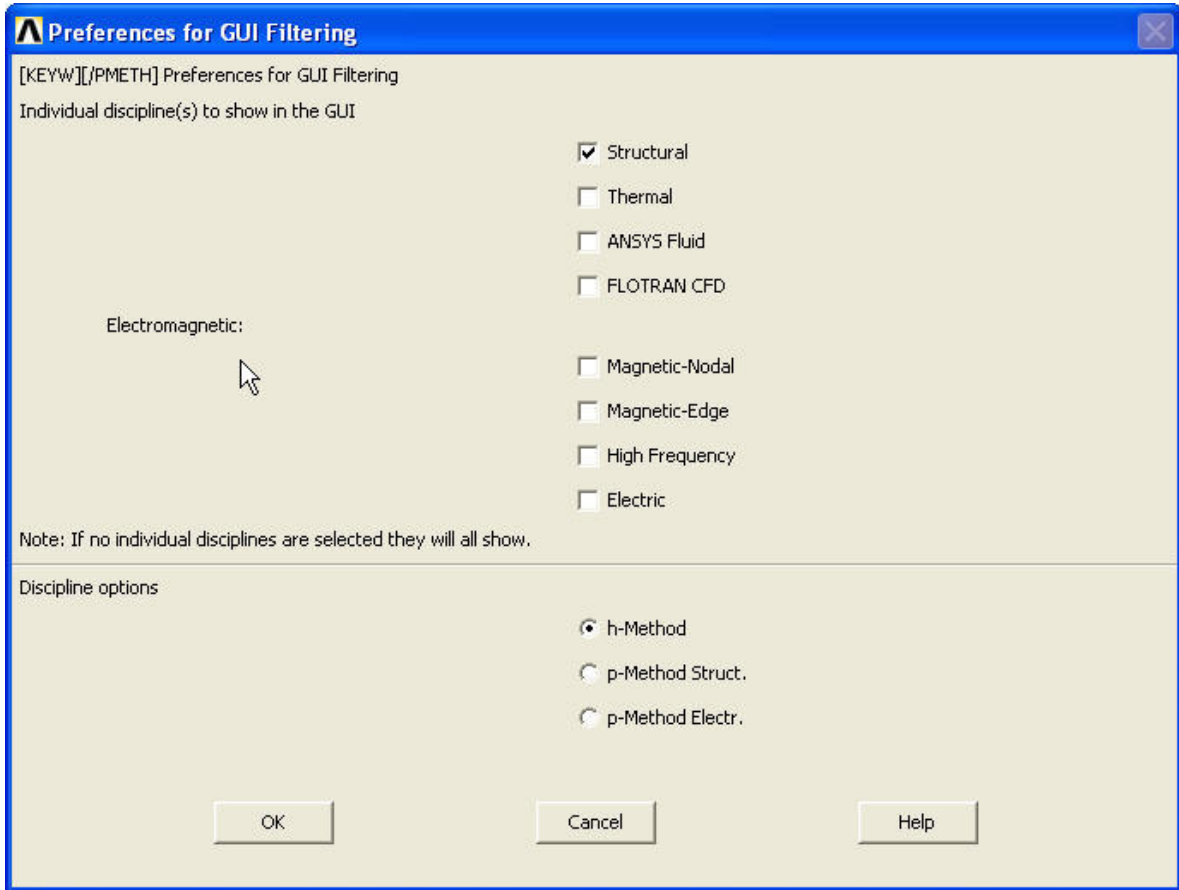
Şekil A. 36. Sıcaklık değerleri uygulanmış kanatçık modeli



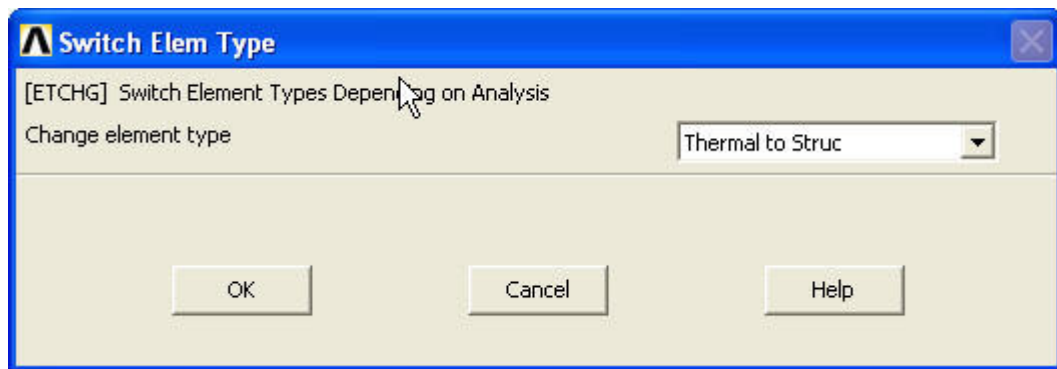
Şekil A. 37. Termal Modelin çözümü



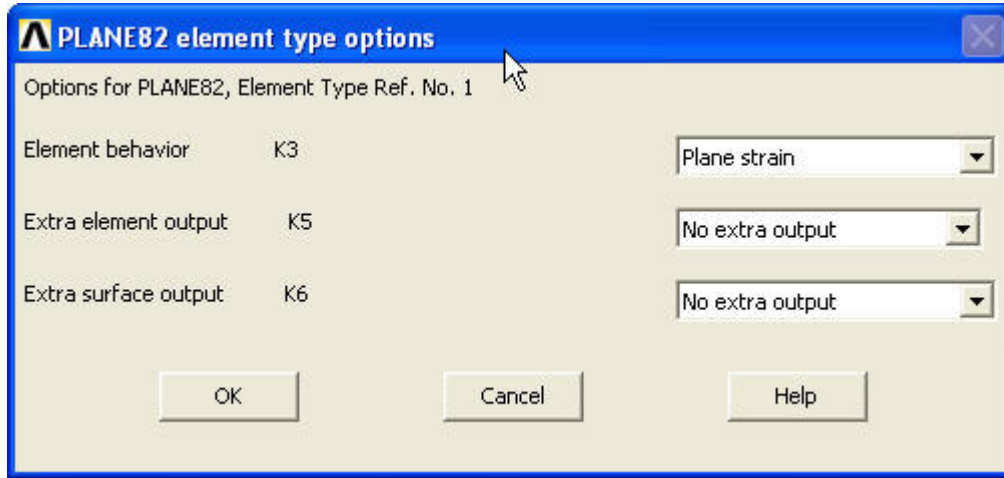
Şekil A. 38. Çözüm çıktı tablosu



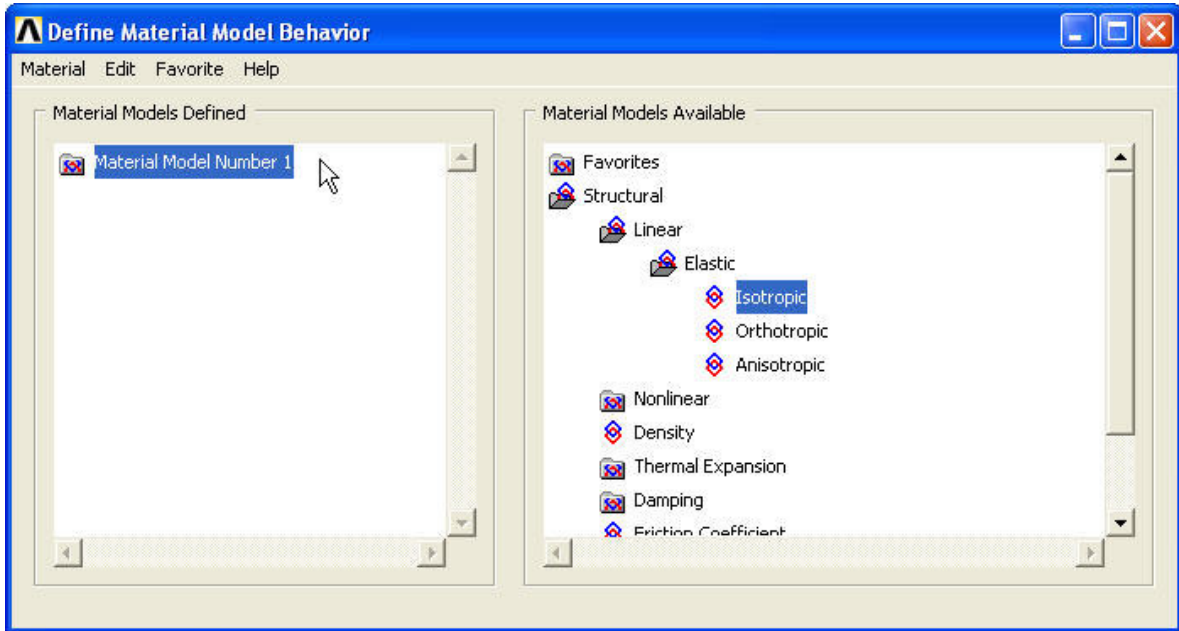
Şekil A. 39. Yapısal modele geçiş



Şekil A. 40. Eleman tipinin termalden yapısalaya değiştirilmesi



Şekil A. 41 Eleman davranışı olarak YÜZEY GERİLMESİ özelliğinin seçilmesi



Şekil A. 42. Malzeme özelliklerinin girilmesi

Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1

Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1

Reference temperature

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Temperatures	21	93	204	316	427	538	649
ALPX	2.1E-005	2.18E-005	2.26E-005	2.31E-005	2.4E-005	2.46E-005	2.51E-005

Add Temperature Delete Temperature Graph

OK Cancel Help

Şekil A. 43. Malzemenin termal genişleme değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak girilmesi

Linear Isotropic Properties for Material Number 1

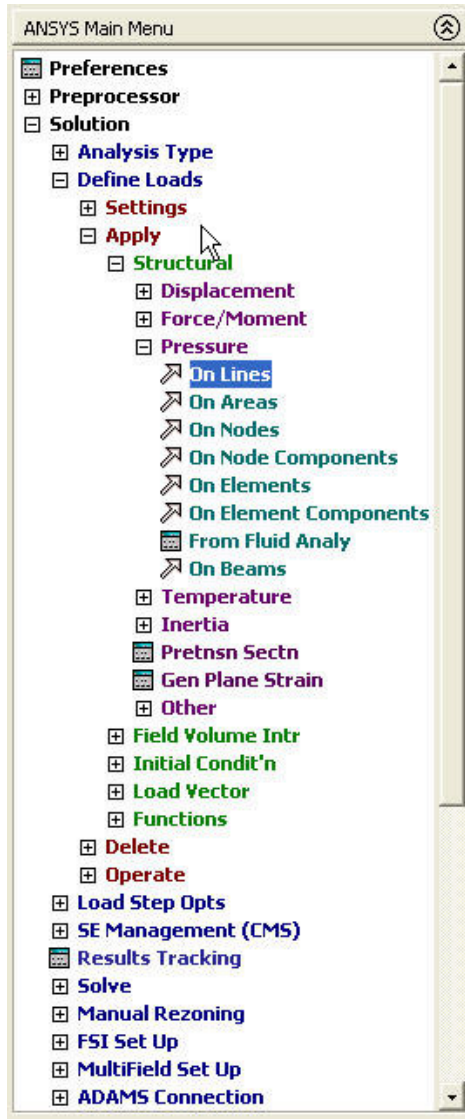
Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Temperatures	21	93	204	316	427	538	649	760	871
EX	2E+005	1.96E+005	1.9E+005	1.84E+005	1.78E+005	1.71E+005	1.63E+005	1.54E+005	1.39E+005
PRXY	0.294	0.288	0.28	0.272	0.271	0.271	0.283	0.306	0.331

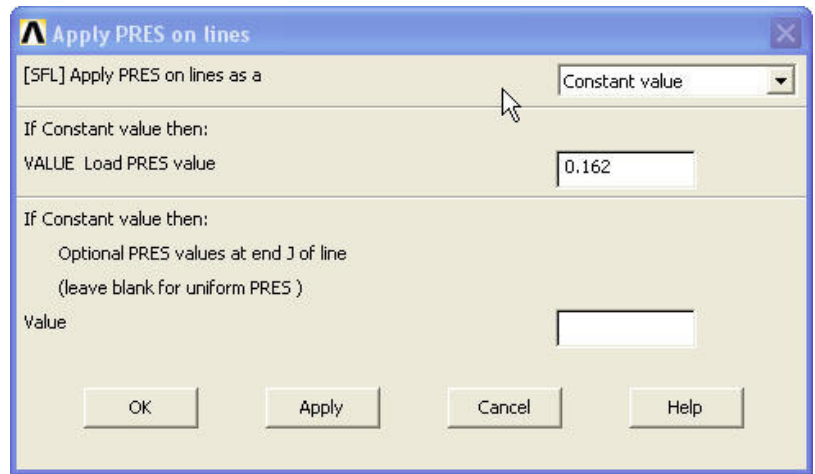
Add Temperature Delete Temperature Graph

OK Cancel Help

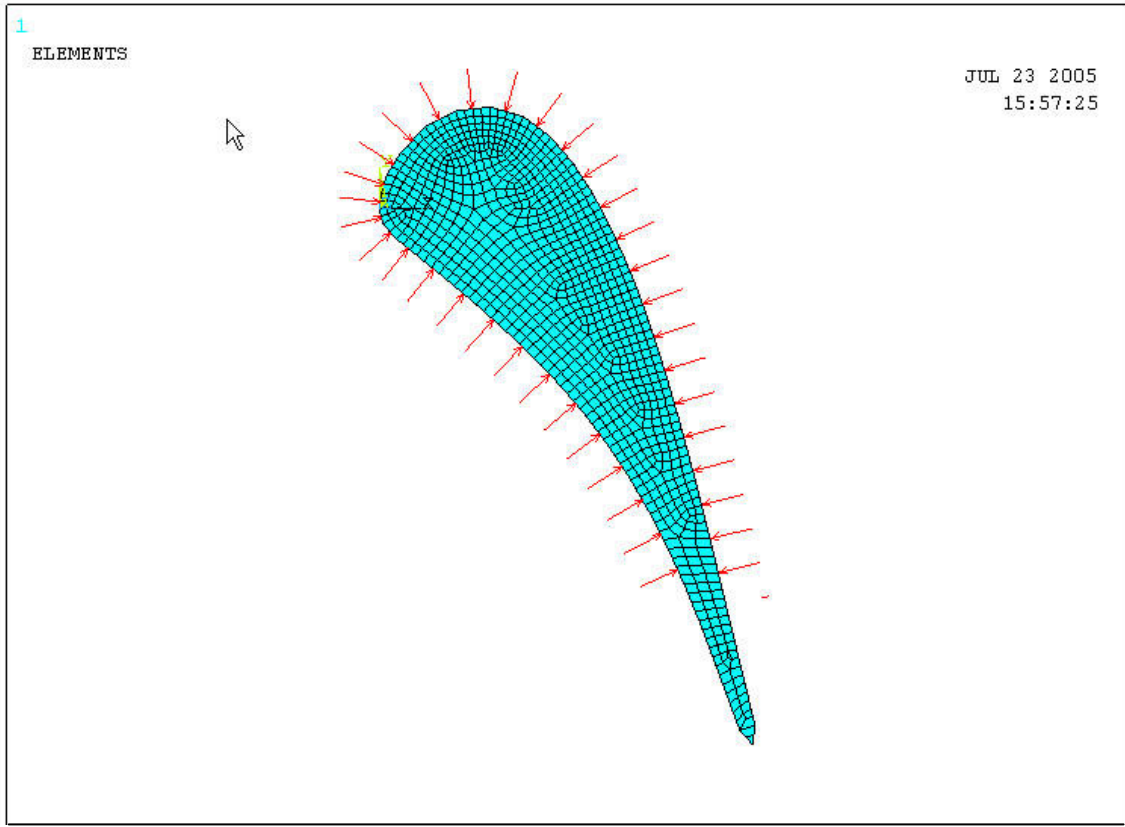
Şekil A. 44. Malzemenin Young's Modulus ve Poisson Oranı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak girilmesi



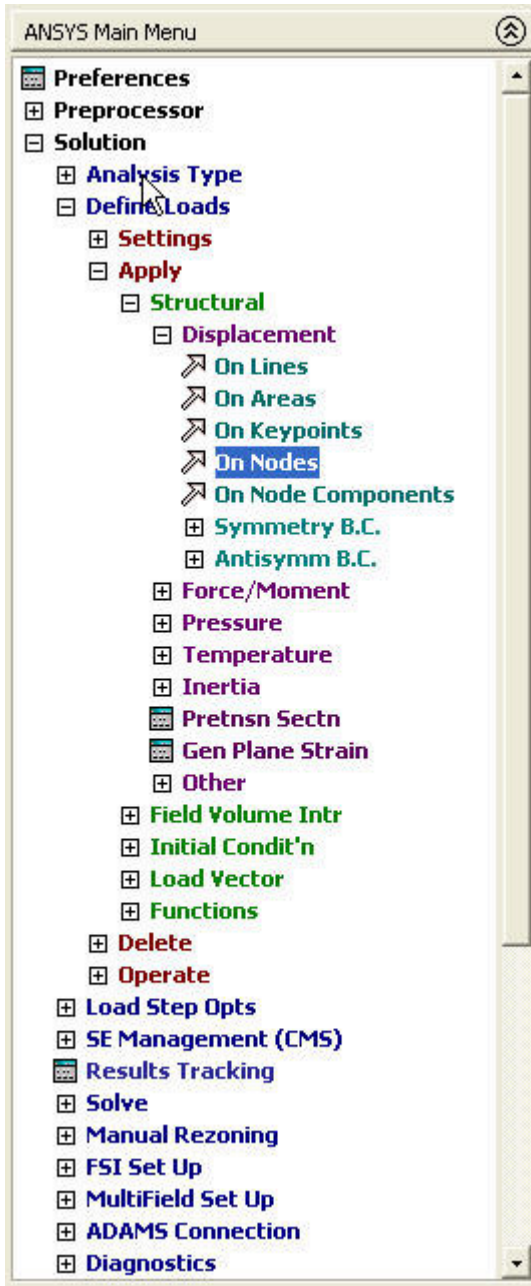
Şekil A. 45. Basınç değerlerinin kanatçık yüzeyine uygulanması



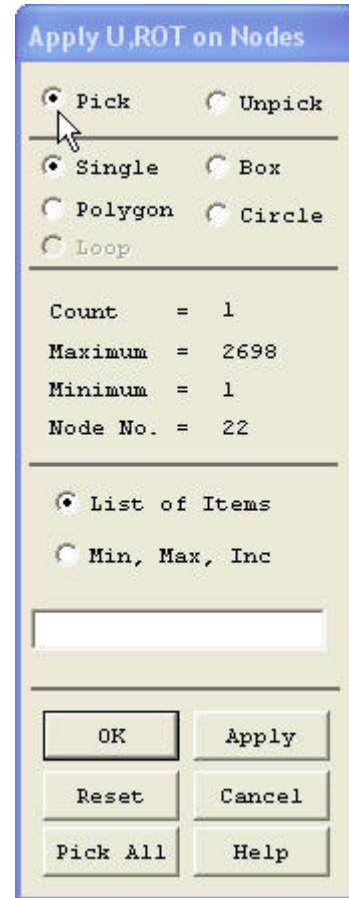
Şekil A. 46. Basınç değerlerinin her çizgi için girilmesi



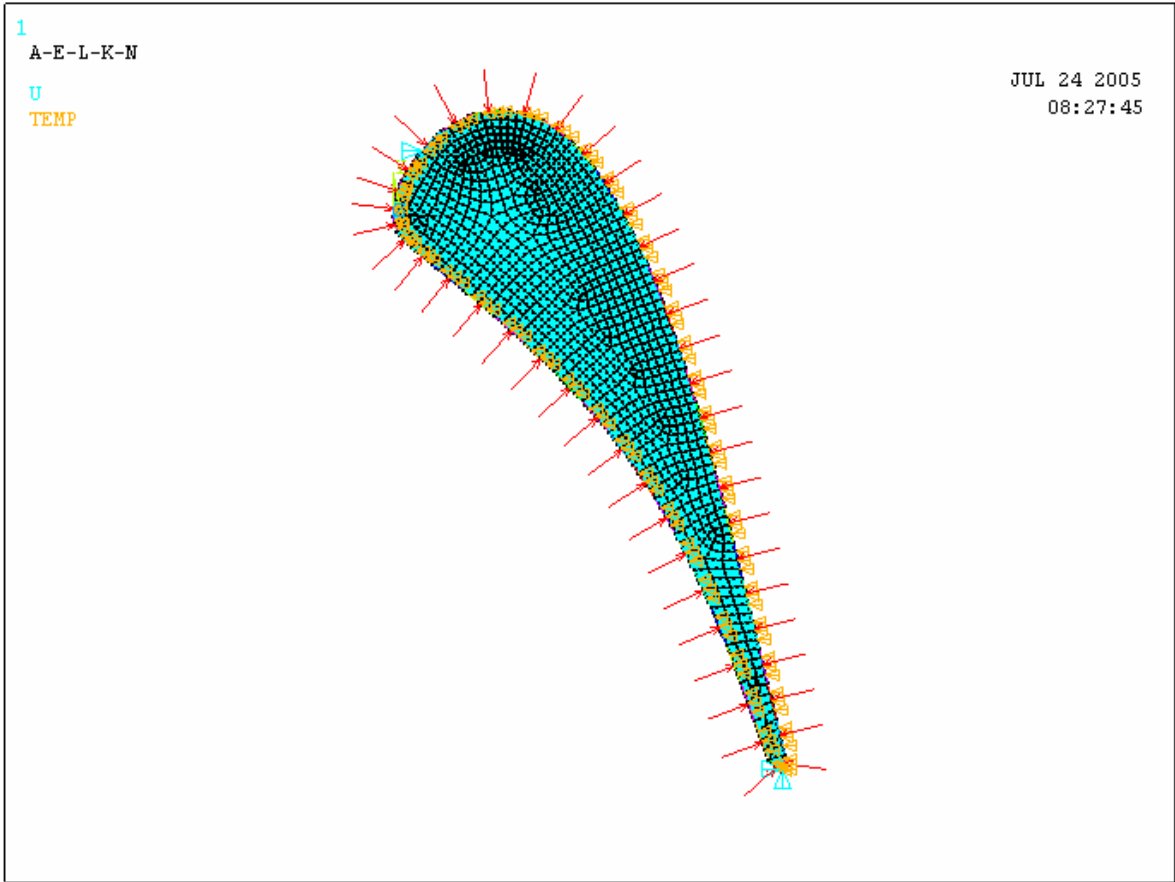
Şekil A. 47. Basınç değerleri yüzeye uygulanmış kanatçık modeli



Şekil A. 48. Sınır şartlarının belirlenmesi



Şekil A. 49. Sınır şartlarının uygulanacağı düğüm noktalarının seçilmesi



Şekil A. 50. Sınır şartları ve diğer yükler uygulanmış modelin çözüme hazır görünümü

EK AÇIKLAMALAR-B

ANSYS İLE PROGRAMLAMA ALGORİTMASI VE KANATÇIK GEOMETRİSİNİN İMALAT KOORDİNATLARINA GÖRE ANSYS MODELİNİN OLUŞTURULMASI

B1. ANSYS İLE PROGRAMLAMA ALGORİTMASI

Çatlak analizi için ANSYS Parametrik Tasarım Dili (ANSYS Parametric Design Language, A.P.D.L) ile yazılmış olan bir program ve örnek parametre giriş listesi aşağıda verilmiştir.

/ FILNAM, ...	! Programın görev ismi
/ TITLE, ...	! Programın başlığı
ANTYPE, STAT	! Analiz tipinin statik olarak tanımlanması
*ASK, ...	! Değişkenlerin tanımlanması
/ PREP7	! Önışlemin girilmesi
K, ...	! Anahtar noktaların tanımlanması
L, ...	! Doğruların tanımlanması
LESIZE, ...	! Doğruların bazı artışlar ile bölünmesi
AL, ...	! Alanların oluşturulması
MP, ...	! İç bölge için malzeme özelliklerinin tanımlanması
ET, 1, PLANE82	! Bölgenin ağ modelinin yapılması için PLANE-82 elemanlarının seçimi
AMESH, ...	! İç bölgenin PLANE-82 ile ağ modelinin yapımı
MP, ...	! Dış bölge için malzeme özelliklerinin tanımlanması
AMESH, ...	! Dış bölgenin PLANE-82 ile ağ modelinin yapımı

K, ...	! Dönüş eksenini tanımlaması için iki anahtar noktanın oluşturulması
ET, 2, SOLID95	! SOLID-95 elemanlarının tanımlanması
TYPE, 2	! SOLID-95 elemanlarının aktif hale getirilmesi
CSYS, ..	! LOCAL C.S.'nin aktif hale getirilmesi
NSEL, ...	! Düğüm noktalarının seçilmesi
ESLN, ...	! Elemanların seçilmesi
MAT, ...	! Güncelleştirilmiş malzeme özelliklerinin saptanması
EMODIF, ...	! Malzeme özelliklerinin değiştirilmesi
D, ...	! Sınır koşullarının belirlenmesi
SFA, ...	! Seçilmiş alan üzerindeki basıncın belirlenmesi
/ SOLU	
SOLVE	! Çözüm

B2. KANATÇIK GEOMETRİSİNİN İMALAT KOORDİNATLARINA GÖRE ANSYS MODELİNİN OLUŞTURULMASI

```

!!!!!!!!!!!!AIRFOILPROFILE!!!!!!!!!!!!
/PREP7
!!!!!!!!!!!!SUCTIONSIDE!!!!!!!!!!!!
K,1,0,0,0,
K,2,0.185,1.554,0,
K,3,0.371,2.349,0
K,4,0.556,2.850,0
K,5,0.742,3.298,0
K,6,0.927,3.662,0
K,7,1.113,3.982,0
K,8,1.298,4.267,0
K,9,1.484,4.548,0
K,10,1.669,4.825,0
K,11,1.855,5.099,0
K,12,2.040,5.366,0
K,13,2.226,5.618,0

```

K,14,2.411,5.859,0
K,15,2.597,6.095,0
K,16,2.782,6.326,0
K,17,2.968,6.549,0
K,18,3.153,6.765,0
K,19,3.339,6.971,0
K,20,3.524,7.166,0
K,21,3.710,7.351,0
K,22,3.895,7.524,0
K,23,4.081,7.688,0
K,24,4.266,7.843,0
K,25,4.452,7.987,0
K,26,4.637,8.122,0
K,27,4.822,8.251,0
K,28,5.008,8.372,0
K,29,5.193,8.486,0
K,30,5.379,8.594,0
K,31,5.564,8.698,0
K,32,5.750,8.798,0
K,33,5.935,8.895,0
K,34,6.121,8.987,0
K,35,6.306,9.077,0
K,36,6.492,9.164,0
K,37,6.677,9.248,0
K,38,6.863,9.326,0
K,39,7.048,9.400,0
K,40,7.234,9.469,0
K,41,7.419,9.533,0
K,42,7.605,9.591,0
K,43,7.790,9.644,0
K,44,7.976,9.691,0
K,45,8.161,9.732,0
K,46,8.347,9.770,0
K,47,8.532,9.804,0
K,49,8.718,9.833,0
K,51,8.903,9.859,0
K,52,9.089,9.880,0
K,53,9.274,9.898,0
K,54,9.460,9.912,0
K,55,9.645,9.923,0
K,56,9.830,9.931,0
K,57,10.016,9.936,0
K,58,10.201,9.938,0
K,59,10.387,9.936,0

K,60,10.572,9.932,0
K,61,10.758,9.923,0
K,62,10.943,9.910,0
K,63,11.129,9.893,0
K,64,11.314,9.871,0
K,65,11.500,9.846,0
K,66,11.685,9.816,0
K,67,11.871,9.783,0
K,68,12.056,9.744,0
K,69,12.242,9.701,0
K,70,12.427,9.652,0
K,71,12.613,9.598,0
K,72,12.799,9.538,0
K,73,12.984,9.473,0
K,74,13.169,9.403,0
K,75,13.355,9.331,0
K,76,13.540,9.253,0
K,77,13.726,9.170,0
K,78,13.911,9.082,0
K,79,14.097,8.987,0
K,80,14.282,8.884,0
K,81,14.467,8.774,0
K,82,14.653,8.660,0
K,83,14.838,8.541,0
K,84,15.024,8.417,0
K,85,15.209,8.289,0
K,86,15.395,8.154,0
K,87,15.580,8.013,0
K,88,15.766,7.866,0
K,89,15.951,7.713,0
K,90,16.137,7.554,0
K,91,16.322,7.392,0
K,92,16.508,7.226,0
K,93,16.693,7.053,0
K,94,16.879,6.874,0
K,95,17.064,6.686,0
K,96,17.250,6.490,0
K,97,17.436,6.287,0
K,98,17.621,6.078,0
K,99,17.806,5.864,0
K,100,17.992,5.645,0
K,101,18.177,5.422,0
K,102,18.363,5.190,0
K,103,18.548,4.951,0

K,104,18.734,4.705,0
K,105,18.919,4.452,0
K,106,19.105,4.195,0
K,107,19.290,3.933,0
K,108,19.475,3.665,0
K,109,19.661,3.392,0
K,110,19.846,3.112,0
K,111,20.032,2.824,0
K,112,20.217,2.528,0
K,113,20.403,2.226,0
K,114,20.588,1.917,0
K,115,20.774,1.602,0
K,116,20.959,1.282,0
K,117,21.145,0.956,0
K,118,21.330,0.623,0
K,119,21.516,0.284,0
K,120,21.701,-0.062,0
K,121,21.887,-0.415,0
K,122,22.073,-0.772,0
K,123,22.258,-1.135,0
K,124,22.444,-1.503,0
K,125,22.629,-1.880,0
K,126,22.814,-2.266,0
K,127,23.000,-2.663,0
K,128,23.185,-3.068,0
K,129,23.371,-3.480,0
K,130,23.556,-3.896,0
K,131,23.742,-4.314,0
K,132,23.927,-4.735,0
K,133,24.112,-5.163,0
K,134,24.298,-5.598,0
K,135,24.483,-6.043,0
K,136,24.669,-6.501,0
K,137,24.854,-6.971,0
K,138,25.040,-7.448,0
K,139,25.225,-7.929,0
K,140,25.411,-8.417,0
K,141,25.596,-8.911,0
K,142,25.782,-9.415,0
K,143,25.967,-9.929,0
K,144,26.153,-10.453,0
K,145,26.338,-10.988,0
K,146,26.524,-11.532,0
K,147,26.710,-12.085,0

K,148,26.895,-12.647,0
K,149,27.081,-13.217,0
K,150,27.266,-13.798,0
K,151,27.451,-14.389,0
K,152,27.637,-14.986,0
K,153,27.822,-15.591,0
K,154,28.008,-16.202,0
K,155,28.193,-16.821,0
K,156,28.379,-17.445,0
K,157,28.564,-18.076,0
K,158,28.750,-18.713,0
K,159,28.935,-19.358,0
K,160,29.120,-20.009,0
K,161,29.306,-20.665,0
K,162,29.491,-21.327,0
K,163,29.677,-21.992,0
K,164,29.862,-22.664,0
K,165,30.048,-23.344,0
K,166,30.233,-24.034,0
K,167,30.419,-24.735,0
K,168,30.604,-25.445,0
K,169,30.790,-26.162,0
K,170,30.975,-26.886,0
K,171,31.161,-27.615,0
K,172,31.347,-28.347,0
K,173,31.532,-29.083,0
K,174,31.718,-29.823,0
K,175,31.903,-30.566,0
K,176,32.089,-31.312,0
K,177,32.274,-32.064,0
K,178,32.459,-32.820,0
K,179,32.645,-33.585,0
K,180,32.830,-34.362,0
K,181,33.016,-35.130,0
K,182,33.201,-35.897,0
K,183,33.387,-36.665,0
K,184,33.572,-37.432,0
K,185,33.757,-38.198,0
K,186,33.943,-38.966,0
K,187,34.128,-39.732,0
K,188,34.314,-40.501,0
K,189,34.499,-41.267,0
K,190,34.685,-42.036,0
K,191,34.870,-42.802,0

K,234,4.822,-5.493,0
K,235,5.008,-5.643,0
K,236,5.193,-5.793,0
K,237,5.379,-5.944,0
K,238,5.564,-6.094,0
K,238,5.750,-6.245,0
K,239,5.935,-6.396,0
K,240,6.121,-6.547,0
K,241,6.306,-6.699,0
K,242,6.492,-6.851,0
K,243,6.677,-7.003,0
K,244,6.863,-7.156,0
K,245,7.048,-7.309,0
K,246,7.234,-7.463,0
K,247,7.419,-7.616,0
K,248,7.605,-7.771,0
K,249,7.790,-7.926,0
K,250,7.976,-8.081,0
K,251,8.161,-8.237,0
K,252,8.347,-8.393,0
K,253,8.532,-8.550,0
K,254,8.718,-8.707,0
K,255,8.903,-8.865,0
K,256,9.089,-9.023,0
K,257,9.274,-9.182,0
K,258,9.460,-9.342,0
K,259,9.645,-9.502,0
K,260,9.830,-9.663,0
K,261,10.016,-9.824,0
K,262,10.201,-9.987,0
K,263,10.387,-10.149,0
K,264,10.572,-10.313,0
K,265,10.758,-10.476,0
K,266,10.943,-10.642,0
K,267,11.129,-10.809,0
K,269,11.314,-10.978,0
K,270,11.500,-11.148,0
K,271,11.685,-11.320,0
K,272,11.871,-11.491,0
K,273,12.056,-11.664,0
K,274,12.242,-11.837,0
K,275,12.427,-12.010,0
K,276,12.613,-12.184,0
K,277,12.799,-12.358,0

K,278,12.984,-12.534,0
K,279,13.169,-12.709,0
K,280,13.355,-12.885,0
K,281,13.540,-13.062,0
K,282,13.726,-13.240,0
K,283,13.911,-13.418,0
K,284,14.097,-13.597,0
K,285,14.282,-13.776,0
K,286,14.467,-13.956,0
K,287,14.653,-14.137,0
K,288,14.838,-14.318,0
K,289,15.024,-14.501,0
K,290,15.209,-14.686,0
K,291,15.395,-14.872,0
K,292,15.580,-15.058,0
K,293,15.766,-15.247,0
K,294,15.951,-15.436,0
K,295,16.137,-15.627,0
K,296,16.322,-15.819,0
K,297,16.508,-16.012,0
K,298,16.693,-16.208,0
K,299,16.879,-16.405,0
K,300,17.064,-16.603,0
K,301,17.250,-16.803,0
K,302,17.436,-17.005,0
K,303,17.621,-17.208,0
K,304,17.806,-17.412,0
K,305,17.992,-17.619,0
K,306,18.177,-17.828,0
K,307,18.363,-18.038,0
K,308,18.548,-18.250,0
K,309,18.734,-18.465,0
K,310,18.919,-18.681,0
K,311,19.105,-18.899,0
K,312,19.290,-19.120,0
K,313,19.475,-19.342,0
K,314,19.661,-19.567,0
K,315,19.846,-19.794,0
K,316,20.032,-20.022,0
K,317,20.217,-20.254,0
K,318,20.403,-20.488,0
K,319,20.588,-20.724,0
K,320,20.774,-20.963,0
K,321,20.959,-21.204,0

K,322,21.145,-21.447,0
K,323,21.330,-21.694,0
K,324,21.516,-21.943,0
K,325,21.701,-22.195,0
K,326,21.887,-22.449,0
K,327,22.073,-22.707,0
K,328,22.258,-22.966,0
K,329,22.444,-23.229,0
K,330,22.629,-23.496,0
K,331,22.814,-23.764,0
K,332,23.000,-24.036,0
K,333,23.185,-24.312,0
K,334,23.371,-24.591,0
K,335,23.556,-24.872,0
K,336,23.742,-25.157,0
K,337,23.927,-25.445,0
K,338,24.112,-25.737,0
K,339,24.298,-26.032,0
K,340,24.483,-26.331,0
K,341,24.669,-26.634,0
K,342,24.854,-26.941,0
K,343,25.040,-27.250,0
K,344,25.225,-27.562,0
K,345,25.411,-27.877,0
K,346,25.596,-28.197,0
K,347,25.782,-28.521,0
K,348,25.967,-28.850,0
K,349,26.153,-29.185,0
K,350,26.338,-29.525,0
K,351,26.524,-29.869,0
K,352,26.710,-30.215,0
K,353,26.895,-30.567,0
K,354,27.081,-30.921,0
K,355,27.266,-31.280,0
K,356,27.451,-31.643,0
K,357,27.637,-32.012,0
K,358,27.822,-32.385,0
K,359,28.008,-32.763,0
K,360,28.193,-33.145,0
K,361,28.379,-33.532,0
K,362,28.564,-33.924,0
K,363,28.750,-34.322,0
K,364,28.935,-34.724,0
K,365,29.120,-35.133,0

K,366,29.306,-35.546,0
K,367,29.491,-35.964,0
K,368,29.677,-36.387,0
K,369,29.862,-36.816,0
K,370,30.048,-37.250,0
K,371,30.233,-37.690,0
K,372,30.419,-38.136,0
K,373,30.604,-38.586,0
K,374,30.790,-39.042,0
K,375,30.975,-39.506,0
K,376,31.161,-39.978,0
K,377,31.347,-40.456,0
K,378,31.532,-40.938,0
K,379,31.718,-41.422,0
K,380,31.903,-41.909,0
K,381,32.089,-42.398,0
K,382,32.274,-42.890,0
K,383,32.459,-43.387,0
K,384,32.645,-43.891,0
K,385,32.830,-44.395,0
K,386,33.016,-44.901,0
K,387,33.201,-45.405,0
K,388,33.387,-45.911,0
K,389,33.572,-46.416,0
K,390,33.757,-46.920,0
K,391,33.943,-47.426,0
K,392,34.128,-47.930,0
K,393,34.314,-48.436,0
K,394,34.499,-48.940,0
K,395,34.685,-49.446,0
K,396,34.870,-49.950,0
K,397,35.056,-50.457,0
K,398,35.241,-50.961,0
K,399,35.427,-51.465,0
K,400,35.560,-51.829,0
K,401,35.612,-51.958,0
K,402,35.715,-52.087,0
K,403,35.882,-52.235,0
K,404,36.075,-52.312,0
K,405,36.268,-52.344,0

!!!!!!!!!!!!!!!!SPLINES!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

K, ,P51X

BSPLIN,1,2,3,4,5,6

BSPLIN,6,7,8,9,10,11
BSPLIN,11,12,13,14,15,16
BSPLIN,16,17,18,19,20,21
BSPLIN,21,22,23,24,25,26
BSPLIN,26,27,28,29,30,31
BSPLIN,31,32,33,34,35,36
BSPLIN,36,37,38,39,40,41
BSPLIN,41,42,43,44,45,46
BSPLIN,46,47,49,51
BSPLIN,51,52,53,54,55,56
BSPLIN,56,57,58,59,60,61
BSPLIN,61,62,63,64,65,66
BSPLIN,66,67,68,69,70,71
BSPLIN,71,72,73,74,75,76
BSPLIN,76,77,78,79,80,81
BSPLIN,81,82,83,84,85,86
BSPLIN,86,87,88,89,90,91
BSPLIN,91,92,93,94,95,96
BSPLIN,96,97,98,99,100,101
BSPLIN,101,102,103,104,105,106
BSPLIN,106,107,108,109,110,111
BSPLIN,111,112,113,114,115,116
BSPLIN,116,117,118,119,120,121
BSPLIN,121,122,123,124,125,126
BSPLIN,126,127,128,129,130,131
BSPLIN,131,132,133,134,135,136
BSPLIN,136,137,138,139,140,141
BSPLIN,141,142,143,144,145,146
BSPLIN,146,147,148,149,150,151
BSPLIN,151,152,153,154,155,156
BSPLIN,156,157,158,159,160,161
BSPLIN,161,162,163,164,165,166
BSPLIN,166,167,168,169,170,171
BSPLIN,171,172,173,174,175,176
BSPLIN,176,177,178,179,180,181
BSPLIN,181,182,183,184,185,186
BSPLIN,186,187,188,189,190,191
BSPLIN,191,192,193,194,195,196
BSPLIN,196,197,198,199,200,201
BSPLIN,201,202,203,204,205,206
BSPLIN,206,207,208
BSPLIN,1,209,210,211,212,213
BSPLIN,213,214,215,216,217,218
BSPLIN,218,219,220,221,222,223

BSPLIN,223,224,225,226,227,228
BSPLIN,228,229,230,231,232,233
BSPLIN,233,234,235,236,237,238
BSPLIN,238,239,240,241,242,243
BSPLIN,243,244,245,246,247,248
BSPLIN,248,249,250,251,252,253
BSPLIN,253,254,255,256,257,258
BSPLIN,258,259,260,261,262,263
BSPLIN,263,264,265,266,267,269
BSPLIN,269,270,271,272,273,274
BSPLIN,274,275,276,277,278,279
BSPLIN,279,280,281,282,283,284
BSPLIN,284,285,286,287,288,289
BSPLIN,289,290,291,292,293,294
BSPLIN,294,295,296,297,298,299
BSPLIN,299,300,301,302,303,304
BSPLIN,304,305,306,307,308,309
BSPLIN,309,310
BSPLIN,310,311,312,313,314,315
BSPLIN,315,316,317,318,319,320
BSPLIN,320,321,322,323,324,325
BSPLIN,325,326,327,328,329,330
BSPLIN,330,331,332,333,334,335
BSPLIN,335,336,337,338,339,340
BSPLIN,340,341,342,343,344,345
BSPLIN,345,346,347,348,349,350
BSPLIN,350,351,352,353,354,355
BSPLIN,355,356,357,358,359,360
BSPLIN,360,361,362,363,364,365
BSPLIN,365,366,367,368,369,370
BSPLIN,370,371,372,373,374,375
BSPLIN,375,376,377,378,379,380
BSPLIN,380,381,382,383,384,385
BSPLIN,385,386,387,388,389,390
BSPLIN,390,391,392,393,394,395
BSPLIN,395,396,397,398,399,400
BSPLIN,400,401,402,403,404,405
BSPLIN,405,208

EK AÇIKLAMALAR-C**DENEYSEL VE TÜRBİN MODELİN ANSYS PROGAMLAMA ALGORİTMASI
İLE YAZILMIŞ PROGRAMLARI****C1. DENEYSEL MODELİN ANSYS PROGRAMLAMA ALGORİTMASI İLE
YAZILMIŞ PROGRAMI**

```
/FILENAME,alper,0
SAVE
!!!!!!!!!!!!AIRFOILPROFILE!!!!!!!!!!!!!!
/PREP7
/COM, Thermal
!!!!!!!!!!!!SUCTIONSIDE!!!!!!!!!!!!!!
K,1,0,0,0,
K,2,0.177, 1.511
K,3,0.787,3.393
K,4,2.132,5.493
K,5,4.444,7.981
K,6,7.450,9.542
K,7,10.820,9.919
K,8,14.078,8.997
K,9,16.796,6.954
K,10,18.986,4.360
K,11,20.835,1.498
K,12,22.446,-1.509
K,13,23.866,-4.596
K,14,25.157,-7.751
K,15,26.326,-10.954
K,16,27.387,-14.185
K,17,28.380,-17.448
K,18,29.323,-20.724
K,19,30.224,-24.001
K,20,31.082,-27.303
K,21,31.914,-30.612
K,22,32.725,-33.923
```

K,23,33.523,-37.228
K,24,34.324,-40.542
K,25,35.125,-43.855
K,26,35.924,-47.160
K,27,36.726,-50.476

K,28,36.461,-52.305

!!!!!!!!!!!!PRESSURESIDE!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

K,29,35.242,-50.963
K,30,33.926,-47.378
K,31,32.609,-43.793
K,32,31.256,-40.221
K,33,29.806,-36.685
K,34,28.224,-33.209
K,35,26.490,-29.806
K,36,24.584,-26.495
K,37,22.494,-23.301
K,38,20.206,-20.240
K,39,17.733,-17.332
K,40,15.093,-14.569
K,41,12.337,-11.926
K,42,9.496,-9.373
K,43,6.571,-6.916
K,44,3.603,-4.511
K,45,1.651,-2.948
K,46,0.353,-1.471

BSPLIN,1,2
BSPLIN,2,3
BSPLIN,3,4
BSPLIN,4,5
BSPLIN,5,6
BSPLIN,6,7
BSPLIN,7,8
BSPLIN,8,9
BSPLIN,9,10
BSPLIN,10,11
BSPLIN,11,12
BSPLIN,12,13
BSPLIN,13,14
BSPLIN,14,15
BSPLIN,15,16
BSPLIN,16,17

BSPLIN,17,18
BSPLIN,18,19
BSPLIN,19,20
BSPLIN,20,21
BSPLIN,21,22
BSPLIN,22,23
BSPLIN,23,24
BSPLIN,24,25
BSPLIN,25,26
BSPLIN,26,27
BSPLIN,27,28
BSPLIN,28,29
BSPLIN,29,30
BSPLIN,30,31
BSPLIN,31,32
BSPLIN,32,33
BSPLIN,33,34
BSPLIN,34,35
BSPLIN,35,36
BSPLIN,36,37
BSPLIN,37,38
BSPLIN,38,39
BSPLIN,39,40
BSPLIN,40,41
BSPLIN,41,42
BSPLIN,42,43
BSPLIN,43,44
BSPLIN,44,45
BSPLIN,45,46
BSPLIN,46,1
Al,all
Et,1,77
Esize,1
Amesh,all

MPTEMP,1,293
MPTEMP,2,373
MPTEMP,3,473
MPTEMP,4,573
MPDATA,KXX,1,,1.66
MPDATA,KXX,1,,1.72
MPDATA,KXX,1,,1.77
MPDATA,KXX,1,,1.8

DL,1, ,ALL, 301.1326368
DL,2, ,ALL, 301.1324804
DL,3, ,ALL, 301.1324573
DL,4, ,ALL, 301.1325052
DL,5, ,ALL, 301.1324984
DL,6, ,ALL, 301.1324796
DL,7, ,ALL, 301.1325248
DL,8, ,ALL, 301.1325125
DL,9, ,ALL, 301.1324495
DL,10, ,ALL, 301.2324921
DL,11, ,ALL, 301.2325748
DL,12, ,ALL, 301.2324816
DL,13, ,ALL, 301.3325145
DL,14, ,ALL, 301.4325977
DL,15, ,ALL, 301.4324244
DL,16, ,ALL, 301.4323572
DL,17, ,ALL, 301.5324566
DL,18, ,ALL, 301.6324605
DL,19, ,ALL, 301.6324636
DL,20, ,ALL, 301.6325451
DL,21, ,ALL, 301.6325448
DL,22, ,ALL, 301.732523
DL,23, ,ALL, 301.7325009
DL,24, ,ALL, 301.7325027
DL,25, ,ALL, 301.8325238
DL,26, ,ALL, 301.8325368
DL,27, ,ALL, 301.9125209
DL,28, ,ALL, 302.1324888
DL,29, ,ALL, 302.1325087
DL,30, ,ALL, 302.132517
DL,31, ,ALL, 302.1324518
DL,32, ,ALL, 302.1324672
DL,33, ,ALL, 302.1324889
DL,34, ,ALL, 302.1324965
DL,35, ,ALL, 302.1325088
DL,36, ,ALL, 302.1324603
DL,37, ,ALL, 302.1325375
DL,38, ,ALL, 302.1325694
DL,39, ,ALL, 302.132523
DL,40, ,ALL, 302.1324975
DL,41, ,ALL, 302.1324573
DL,42, ,ALL, 302.1324335
DL,43, ,ALL, 302.1324886
DL,44, ,ALL, 302.1324782

```
DL,45, ,ALL, 302.1324605
DL,46, ,ALL, 302.1325743
FINISH
/SOL
solve
FINISH
SAVE
RESUME
/FILNAME,alpermekanik,0
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULT1,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/PREP7
ETCHG,TTS
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
UIMP,1,REFT,,293
MPTEMP,1,20+273
MPTEMP,2,80+273
MPTEMP,3,200+273
MPTEMP,4,250+273
MPTEMP,5,300+273
MPTEMP,6,350+273
MPTEMP,7,400+273
MPDATA,EX,1,,72000
MPDATA,EX,1,,70000
MPDATA,EX,1,,68000
MPDATA,EX,1,,67300
MPDATA,EX,1,,66900
MPDATA,EX,1,,66450
MPDATA,EX,1,,66000
MPDATA,PRXY,1,,0.35
```

MPDATA,PRXY,1,,0.34
MPDATA,PRXY,1,,0.32
MPDATA,PRXY,1,,0.32
MPDATA,PRXY,1,,0.32
MPDATA,PRXY,1,,0.32
MPDATA,PRXY,1,,0.31
MPDATA,ALPX,1,,21E-6
MPDATA,ALPX,1,,21.8E-6
MPDATA,ALPX,1,,22.6E-6
MPDATA,ALPX,1,,23.1E-6
MPDATA,ALPX,1,,24E-6
MPDATA,ALPX,1,,24.6E-6
MPDATA,ALPX,1,,25.1E-6
SFL,1,PRES,0.1602
SFL,2,PRES,0.1581
SFL,3,PRES,0.14865
SFL,4,PRES,0.14865
SFL,5,PRES,0.1275
SFL,6,PRES,0.1275
SFL,7,PRES,0.10755
SFL,8,PRES,0.0979
SFL,9,PRES,0.09455
SFL,10,PRES,0.0887
SFL,11,PRES,0.0887
SFL,12,PRES,0.07895
SFL,13,PRES,0.07625
SFL,14,PRES,0.07285
SFL,15,PRES,0.06915
SFL,16,PRES,0.06915
SFL,17,PRES,0.06915
SFL,18,PRES,0.06565
SFL,19,PRES,0.0645
SFL,20,PRES,0.0727
SFL,21,PRES,0.0727
SFL,22,PRES,0.0846
SFL,23,PRES,0.0846
SFL,24,PRES,0.08665
SFL,25,PRES,0.08665
SFL,26,PRES,0.09085
SFL,27,PRES,0.12865
SFL,28,PRES,0.12865
SFL,29,PRES,0.12865
SFL,30,PRES,0.16015
SFL,31,PRES,0.16015

SFL,32,PRES,0.16015
SFL,33,PRES,0.15945
SFL,34,PRES,0.15945
SFL,35,PRES,0.15945
SFL,36,PRES,0.15945
SFL,37,PRES,0.1585
SFL,38,PRES,0.1585
SFL,39,PRES,0.1585
SFL,40,PRES,0.15685
SFL,41,PRES,0.15685
SFL,42,PRES,0.15685
SFL,43,PRES,0.15035
SFL,44,PRES,0.15035
SFL,45,PRES,0.1325
SFL,46,PRES,0.14055

FINISH

/SOL

LDREAD,TEMP,, , , 'alper', 'rth', ''

D,18,UX,

D,203,UX

D,203,UY

C2. TÜRBİN MODELİNİN ANSYS PROGRAMLAMA ALGORİTMASI İLE YAZILMIŞ PROGRAMI

```
/FILENAME,normal,0
SAVE
!!!!!!!!!!!!AIRFOILPROFILE!!!!!!!!!!!!!!!
/PREP7
/COM, Thermal
!!!!!!!!!!!!SUCTIONSIDE!!!!!!!!!!!!!!!
K,1,0,0,0,
K,2,0.177, 1.511
K,3,0.787,3.393
K,4,2.132,5.493
K,5,4.444,7.981
K,6,7.450,9.542
K,7,10.820,9.919
K,8,14.078,8.997
K,9,16.796,6.954
K,10,18.986,4.360
K,11,20.835,1.498
K,12,22.446,-1.509
K,13,23.866,-4.596
K,14,25.157,-7.751
K,15,26.326,-10.954
K,16,27.387,-14.185
K,17,28.380,-17.448
K,18,29.323,-20.724
K,19,30.224,-24.001
K,20,31.082,-27.303
K,21,31.914,-30.612
K,22,32.725,-33.923
K,23,33.523,-37.228
K,24,34.324,-40.542
K,25,35.125,-43.855
K,26,35.924,-47.160
K,27,36.726,-50.476

K,28,36.461,-52.305

!!!!!!!!!!!!PRESSURESIDE!!!!!!!!!!!!!!!
K,29,35.242,-50.963
```

K,30,33.926,-47.378
K,31,32.609,-43.793
K,32,31.256,-40.221
K,33,29.806,-36.685
K,34,28.224,-33.209
K,35,26.490,-29.806
K,36,24.584,-26.495
K,37,22.494,-23.301
K,38,20.206,-20.240
K,39,17.733,-17.332
K,40,15.093,-14.569
K,41,12.337,-11.926
K,42,9.496,-9.373
K,43,6.571,-6.916
K,44,3.603,-4.511
K,45,1.651,-2.948
K,46,0.353,-1.471

BSPLIN,1,2
BSPLIN,2,3
BSPLIN,3,4
BSPLIN,4,5
BSPLIN,5,6
BSPLIN,6,7
BSPLIN,7,8
BSPLIN,8,9
BSPLIN,9,10
BSPLIN,10,11
BSPLIN,11,12
BSPLIN,12,13
BSPLIN,13,14
BSPLIN,14,15
BSPLIN,15,16
BSPLIN,16,17
BSPLIN,17,18
BSPLIN,18,19
BSPLIN,19,20
BSPLIN,20,21
BSPLIN,21,22
BSPLIN,22,23
BSPLIN,23,24
BSPLIN,24,25
BSPLIN,25,26
BSPLIN,26,27

BSPLIN,27,28
BSPLIN,28,29
BSPLIN,29,30
BSPLIN,30,31
BSPLIN,31,32
BSPLIN,32,33
BSPLIN,33,34
BSPLIN,34,35
BSPLIN,35,36
BSPLIN,36,37
BSPLIN,37,38
BSPLIN,38,39
BSPLIN,39,40
BSPLIN,40,41
BSPLIN,41,42
BSPLIN,42,43
BSPLIN,43,44
BSPLIN,44,45
BSPLIN,45,46
BSPLIN,46,1
Al,all
Et,1,77
Esize,1
Amesh,all

MPTEMP,1,294,
MPTEMP,2,366,
MPTEMP,3,477,
MPTEMP,4,589,
MPTEMP,5,700,
MPTEMP,6,811
MPTEMP,7,922
MPTEMP,8,1033
MPTEMP,9,1144
MPTEMP,10,1255
MPTEMP,11,1366
MPDATA,KXX,1,,0.111
MPDATA,KXX,1,,0.124
MPDATA,KXX,1,,0.141
MPDATA,KXX,1,,0.16
MPDATA,KXX,1,,0.177
MPDATA,KXX,1,,0.194
MPDATA,KXX,1,,0.212
MPDATA,KXX,1,,0.23

MPDATA,KXX,1,,0.249
MPDATA,KXX,1,,0.266
MPDATA,KXX,1,,0.282
DL,1, ,ALL, 1044-273
DL,2, ,ALL, 1035-273
DL,3, ,ALL, 1030-273
DL,4, ,ALL, 1025-273
DL,5, ,ALL, 1020-273
DL,6, ,ALL, 1017-273
DL,7, ,ALL, 1005-273
DL,8, ,ALL, 990-273
DL,9, ,ALL, 965-273
DL,10, ,ALL, 972-273
DL,11, ,ALL, 990-273
DL,12, ,ALL, 960-273
DL,13, ,ALL, 944-273
DL,14, ,ALL, 920-273
DL,15, ,ALL, 910-273
DL,16, ,ALL, 900-273
DL,17, ,ALL, 890-273
DL,18, ,ALL, 893-273
DL,19, ,ALL, 930-273
DL,20, ,ALL, 950-273
DL,21, ,ALL, 970-273
DL,22, ,ALL, 980-273
DL,23, ,ALL, 985-273
DL,24, ,ALL, 1000-273
DL,25, ,ALL, 1005-273
DL,26, ,ALL, 950-273
DL,27, ,ALL, 990-273
DL,28, ,ALL, 995-273
DL,29, ,ALL, 1000-273
DL,30, ,ALL, 1005-273
DL,31, ,ALL, 1008-273
DL,32, ,ALL, 1010-273
DL,33, ,ALL, 1015-273
DL,34, ,ALL, 1023-273
DL,35, ,ALL, 1020-273
DL,36, ,ALL, 1025-273
DL,37, ,ALL, 1028-273
DL,38, ,ALL, 1032-273
DL,39, ,ALL, 1035-273
DL,40, ,ALL, 1033-273
DL,41, ,ALL, 1028-273

```
DL,42, ,ALL, 1027-273
DL,43, ,ALL, 1025-273
DL,44, ,ALL, 1015-273
DL,45, ,ALL, 1037-273
DL,46, ,ALL, 1045-273
FINISH
/SOL
solve
FINISH
SAVE
RESUME
/FILNAME,normalmekanik,0
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULT1,1
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/PREP7
ETCHG,TTS
KEYOPT,1,3,2
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
UIMP,1,REFT,,,20
MPTEMP,1,21
MPTEMP,2,93
MPTEMP,3,204
MPTEMP,4,316
MPTEMP,5,427
MPTEMP,6,538
MPTEMP,7,649
MPTEMP,8,760
MPTEMP,9,871
MPTEMP,10,982
MPTEMP,11,1093
MPDATA,EX,1,,200000
```

MPDATA,EX,1,,196000
MPDATA,EX,1,,190000
MPDATA,EX,1,,184000
MPDATA,EX,1,,178000
MPDATA,EX,1,,171000
MPDATA,EX,1,,163000
MPDATA,EX,1,,154000
MPDATA,EX,1,,139000
MPDATA,EX,1,,120000
MPDATA,EX,1,,99000
MPDATA,PRXY,1,,0.294
MPDATA,PRXY,1,,0.288
MPDATA,PRXY,1,,0.280
MPDATA,PRXY,1,,0.272
MPDATA,PRXY,1,,0.271
MPDATA,PRXY,1,,0.271
MPDATA,PRXY,1,,0.283
MPDATA,PRXY,1,,0.306
MPDATA,PRXY,1,,0.331
MPDATA,PRXY,1,,0.341
MPDATA,PRXY,1,,0.402
MPDATA,ALPX,1,,12.15E-6
MPDATA,ALPX,1,,13.28E-6
MPDATA,ALPX,1,,13.77 E-6
MPDATA,ALPX,1,,14.13 E-6
MPDATA,ALPX,1,,14.40 E-6
MPDATA,ALPX,1,,14.89 E-6
MPDATA,ALPX,1,,15.30 E-6
MPDATA,ALPX,1,,15.70 E-6
MPDATA,ALPX,1,,15.80 E-6
MPDATA,ALPX,1,,15.85 E-6
MPDATA,ALPX,1,,15.90 E-6
SFL,1,PRES,2.25
SFL,2,PRES,2.15
SFL,3,PRES,2.05
SFL,4,PRES,1.95
SFL,5,PRES,1.85
SFL,6,PRES,1.75
SFL,7,PRES,1.675
SFL,8,PRES,1.6
SFL,9,PRES,1.525
SFL,10,PRES,1.475
SFL,11,PRES,1.41
SFL,12,PRES,1.31

SFL,13,PRES,1.225
SFL,14,PRES,1.1
SFL,15,PRES,1.04
SFL,16,PRES,1.04
SFL,17,PRES,0.975
SFL,18,PRES,0.875
SFL,19,PRES,0.75
SFL,20,PRES,0.71
SFL,21,PRES,0.81
SFL,22,PRES,0.96
SFL,23,PRES,1.1
SFL,24,PRES,1.23
SFL,25,PRES,1.315
SFL,26,PRES,1.385
SFL,27,PRES,1.46
SFL,28,PRES,1.49
SFL,29,PRES,1.465
SFL,30,PRES,1.485
SFL,31,PRES,1.56
SFL,32,PRES,1.625
SFL,33,PRES,1.675
SFL,34,PRES,1.725
SFL,35,PRES,1.775
SFL,36,PRES,1.85
SFL,37,PRES,1.925
SFL,38,PRES,1.975
SFL,39,PRES,2.05
SFL,40,PRES,2.075
SFL,41,PRES,1.975
SFL,42,PRES,1.975
SFL,43,PRES,2.075
SFL,44,PRES,2.15
SFL,45,PRES,2.225
SFL,46,PRES,2.275

FINISH

/SOL

LDREAD,TEMP,, , , 'normal', 'rth', ''

D,18,UX,

D,203,UX

D,203,UY

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, B., 1997, Finite Element Analysis of Fracture Mechanics Problems, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, 121 s.
- ANSYS Users Manual (Elements/Commands/Procedures/Theory) of Rev. 9.0, 2004, Swanson Analysis System Inc., Pennsylvania
- Arts, T. Lambert De Rouvroit M. And Rutherford, A.W., Aero-thermal Investigation of A Highly Loaded Transonic Linear Turbine Vane Cascade, 1990, 57 p.
- Chandrupatla, T.R. and Belengundu, A.D., 1991, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice-Hall, International Inc., 414 p.
- Gas Turbine Engines Training Notes, 1997, TURBOMECA, 142 p.
- Gehrer, A. And Jericha, H., 1998, External Heat Transfer Predictions In a Highly-Loaded Transonic Linear Turbine Guide Vane Cascade Using an Upwind Biased Navier-Stokes Solver, ERCOFTAC Seminar and Workshop on Turbomachinery Flow Prediction VI, Graz, Austria, 8-21
- Jin, P. And Goldstein, R.J., 2003, Local Mass and Heat Transfer on a Turbine Blade Tip, International Journal of Rotating Machinery, 9, 81-95
- Karaman, İ. Ve Yurt, Ö., 1992, İçten Yanmalı Motorlar ve Gaz Türbinleri, Milli Eğitim Basımevi, 311 s.
- Khanna, K.S., Long, W., Porter, D., Wang, H., Liu, K.C., Radovic, M. and Lara-Curtzio, E., 2005, Residual Stresses in Spot Welded New Generation Aluminium Alloys, Science and Technology of Welding and Joining, 10, 79-92
- Lienhard, J.H., 2004, A Heat Transfer Text Book, 2004, Phlogiston Press, Cambridge, M.A., 738 p.

- Moaveni, S., 2003, Finite Element Analysis, Pearson Education, 822 p.
- Redy, J.N.,1993, An Introduction to The Finite Element Method, Mc-Graw Hill International Editions, 684 p.
- Saravanamutto, H.,I.,H., Roger, C.A. and Cohen, H., 2001, Gas Turbine Theory, Pearson Education, 474 p.
- Sparrow, E and Boetcher, S.,2005, Introduction to ANSYS Heat conduction and ANSYS CFD, ME 5341 Spring Semester, University of Minnesota, 9 p.
- Special Metals, Inconel 718SPF™, 2002, 16 p.
- Vogt, D.M. amd Fransson, T.H., 2004, Effects of Blade Modes Shape on the Aeroelastic Stability of a LPT Cascade, Turbine Engine HCF Conference, 97-115
- Weigand, B. Semmler, K. And Wolfersdorf, J., 2002, Heat Transfer Technology for Internal Passages of Air-Cooled Blade for Heavy Duty Gas Turbines, ABB Alstom Power, Baden, Switzerland, 16-19.
- Yılmaz, T., 1999, Teorik ve Uygulamalı Isı Transferi, Papatya Yayıncılık, 392s.
- Zienkiewicz, O.C., 1997, The Finite Element Method, McGraw Hill Company, 209 p.