



**T.C.  
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DÖNEN ve SICAKLIK ETKİSİNDEKİ  
METAL MATRİSLİ KOMPOZİT BİR  
DİSKTEKİ ISIL GERİLMELERİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bahadır Hakan AKYÜZ**

**DANIŞMAN**

**Yrd. Doç. Dr. Faruk ŞEN**

**OCAK 2012**

**AKSARAY**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

DÖNEN ve SICAKLIK ETKİSİNDEKİ  
METAL MATRİSLİ KOMPOZİT BİR  
DİSKTEKİ ISIL GERİLMELERİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahadır Hakan AKYÜZ

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Faruk ŞEN

OCAK 2012

AKSARAY

Her hakkı saklıdır

T.C.  
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
KABUL ve ONAY BELGESİ

Bahadır Hakan AKYÜZ tarafından hazırlanan “Dönen ve Sıcaklık Etkisindeki Metal Matrisli Kompozit Bir Diskteki Isıl Gerilmelerin Analizi” başlıklı lisansüstü tez çalışması, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 11.01.2012 tarih ve 2012/02-1 sayılı kararı ile oluşturulan aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

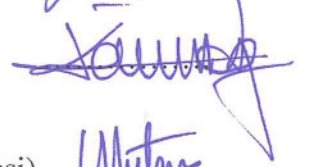
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Faruk ŞEN (Aksaray Üniversitesi)

1. Jüri : Doç. Dr. Kemal ALDAŞ (Aksaray Üniversitesi)

2. Jüri : : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Serdar GENÇ (Erciyes Üniversitesi) ...

İmza

...

...

...

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.01.2012

ONAY

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 25.01.2012 tarih ve 2012/04-04 sayılı kararı ile Bahadır Hakan AKYÜZ’ün Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** derecesi alması onaylanmıştır.



Doç. Dr. Selçuk REİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖNSÖZ

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler, üretimin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminin de buna paralel olarak gelişimini hızlandırmıştır. Ancak, dünyamızda ana malzemelerin kısıtlı olmasından ötürü, malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri teknolojide yaşanan bu gelişime ayak uyduramamıştır. Dolayısıyla bu durumda bilim adamları mevcut malzeme özelliklerinden, günümüz şartlarına göre hem ekonomik ve hem de teknik bakımdan daha uygun malzemeler imal etme yolunu seçmişlerdir.

Kompozit malzemelerin konvensiyonel malzemeler karşısında sergiledikleri üstün mekanik özellikleri, son yıllarda kompozit malzemeler üzerinde yoğunlaştırılmış çalışmaların yapılmasına yol açmıştır. Kullanımda konvensiyonel malzemelerden kompozit malzemelere geçişin başlıca sebeplerinden biri, kompozit malzemelerin standart hafif/yüksek mukavemet özelliğine sahip malzemelere göre daha hafif/daha yüksek mukavemet seçeneği sunmasıdır. Bunun yanında, kompozit malzemelerin üretimlerindeki esneklik, iyi korozyon dayanımı ve aşınma dirençleri, uzun yorulma ömürleri ve düşük ısı iletkenlikleri ile birçok uygulama alanında konvensiyonel malzemelere göre üstün özellikler göstermektedir.

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'na Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan “Dönen ve Sıcaklık Etkisindeki Metal Matrisli Kompozit Bir Diskteki Isıl Gerilmelerin Analizi” konulu çalışma ile kompozit malzemeler alanında yapılan çalışmalara bir katkı sağlanması hedeflenmektedir. Çalışma; Giriş, Kaynak Özetleri, Malzeme ve Yöntem, Bulgular ve Sonuçlar olmak üzere toplam beş bölümden oluşmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'na yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, başta danışmanım Yrd. Doç. Dr. Faruk ŞEN olmak üzere emeği geçen herkese sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, doğduğum günden bugüne kadar her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini biran bile esirgemeyen anneme ve babama teŐekkürü bir borç bilirim, bu tez sizin eserinizdir.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖNSÖZ.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Kompozit Malzemeler.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....</b>	<b>6</b>
<b>1.6.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....</b>	<b>6</b>
<b>1.6.2. Tabaka Yapıda Olan Kompozit Malzemeler.....</b>	<b>7</b>
<b>1.6.3. Tane Takviyeli Kompozit Malzemeler.....</b>	<b>9</b>
<b>1.6.4. Kompozit Malzemelerin Kombinasyonları.....</b>	<b>9</b>
<b>1.7. Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları.....</b>	<b>10</b>
<b>1.7.1. Sıvı Metal Emdirmesi (İnfiltrasyon).....</b>	<b>10</b>
<b>1.7.2. Sıkıştırılmalı veya Sıvı Dövme Döküm Tekniği.....</b>	<b>11</b>
<b>1.7.3. Basıncılı İnfiltrasyon.....</b>	<b>12</b>
<b>1.7.4. Sıvı Metal Karıştırması.....</b>	<b>13</b>
<b>1.7.5. Yarı Katı Karıştırma Yöntemi.....</b>	<b>14</b>
<b>1.7.6. Plazma Püskürtme.....</b>	<b>15</b>
<b>1.7.7. Toz Metalurjisi Tekniği.....</b>	<b>15</b>
<b>1.7.8. Difüzyon Bağlama ve Vakumda Presleme.....</b>	<b>16</b>
<b>1.7.9. Sıcak Presleme ve Sıcak İzostatik Presleme.....</b>	<b>16</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ.....</b>	<b>17</b>
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Problemin Tanımı.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2. Problemden Kullanılan Malzeme Özellikleri.....</b>	<b>23</b>

<b>3.3. Sonlu Elemanlar Modeli.....</b>	<b>25</b>
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. Giriş.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. Uygun Ağ Yapısının Seçimi.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3. Farklı Üniform Sıcaklıklar Altındaki Kompozit Diskin Isıl Gerilme Analizi</b>	<b>40</b>
<b>4.4. Sıcaklık Etkisindeki Dönen Diskteki Gerilmelerin Analizi.....</b>	<b>54</b>
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....</b>	<b>84</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>86</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>90</b>

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **DÖNEN VE SICAKLIK ETKİSİNDEKİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT BİR DİSKTEKİ ISIL GERİLMELERİN ANALİZİ**

Bahadır Hakan AKYÜZ

T.C.  
Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Faruk ŞEN

Bu çalışmada, ortasında dairesel delik bulunan bir kompozit disk modellenmiştir. Kompozit malzeme, alüminyum matrise sahiptir ve çelik fiberlerle takviye edilmiştir. Çözüm için sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır. Bu amaçla, modelleme ve analizler için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Kompozit disk önceki çalışmalardan farklı olarak, üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Üç boyutlu kompozit disk üzerine çeşitli sınır şartları, uniform sıcaklıklar ve açısal dönmeler uygulanmıştır. Meydana gelen ısı gerilmelerin ve elastik şekil değiştirmelerin miktarları hesaplanmış ve disk üzerindeki dağılımları elde edilmiştir. Farklı yükleme durumlarına göre elde edilen sonuçlar, birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, gerilmeler ve şekil değiştirmelerin değerleri ve dağılımlarının, uygulanan uniform sıcaklık ve açısal hız değişimine bağlı olarak değişim gösterdiği anlaşılmıştır.

2012, 90 Sayfa

**Anahtar kelimeler;** Kompozit disk, Metal-matris kompozit, Isıl gerilme, Dönen disk, FEM, ANSYS

**Bilim Kodu:** 914



## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### ANALYSIS OF THERMAL STRESSES IN COMPOSIT DISC WITH METAL MATRIX UNDER ROTATIONAL MOTION AND TEMPERATURE INFLUENCE

Bahadır Hakan AKYÜZ

T.R.

Aksaray University Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Faruk ŞEN

In this study, a composite disc having a centered circular hole was modeled. The composite material had aluminum metal matrix and it was reinforced with steel fibers. The finite element method (FEM) was used for solution. For this purpose, the ANSYS software was used for both modeling and analysis processes. Composite disc was created as three dimensional as a difference according to previous studies. The stresses and elastic strains which are the various boundary conditions, uniform temperatures and angular velocities were performed on three dimensional composite disc. The magnitudes of thermal stresses and elastic strains were calculated and their distributions on disc were obtained. The obtained results which are derived from various loading conditions were compared with together. According to results of study, it is understand that both magnitudes and distributions of stresses and strains were changed by changing applied uniform temperature and angular velocity.

2012, 90 Pages

**Key Words:** Composite disc, Metal-matrix composite, Thermal stress, Rotating disc, FEM, ANSYS.

**Science Code:** 914

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Tarih içinde malzemelerin gelişiminde birbirlerine göre önemi.....	3
Şekil 1.2.	Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimleri.....	7
Şekil 1.3.	İnce tabakanın başlıca iki tipi.....	8
Şekil 1.4.	Tabakalı kompozitlerin yapıştırılmamış görüntüsü.....	8
Şekil 1.5.	Tanecikli kompozitlerin şematik gösterimi.....	9
Şekil 1.6.	FP Alüminyum oksit/Al esaslı kompozitin vakumda sıvı emdirmesi teknığının akış şeması.....	11
Şekil 1.7.	Sıkıştırma döküm yöntemi.....	12
Şekil 1.8.	Basıncılı infiltrasyon metodu.....	13
Şekil 1.9.	Ergimiş metal karıştırılması yöntemiyle kompozit üretim ünitesi.....	14
Şekil 1.10.	Toz metalurji tekniği ile kompozit üretimi akış şeması.....	15
Şekil 3.1.	Kompozit diskin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.2.	Kompozit diskin ANSYS ile modellenen katı modeli.....	26
Şekil 3.3.	Kompozit disk modeline sınır şartlarının uygulanması .....	26
Şekil 3.4.	SOLID45 eleman tipi (ANSYS).....	28
Şekil 3.5.	Kompozit diskin sonlu elemanlara bölünmüş hali .....	29
Şekil 4.1.	0,5' lik ağ yapısına sahip birinci model .....	31
Şekil 4.2.	1' lik ağ yapısına sahip ikinci model.....	32
Şekil 4.3.	1,5' luk ağ yapısına sahip üçüncü model .....	32
Şekil 4.4.	2' lik ağ yapısına sahip dördüncü model.....	33
Şekil 4.5.	2,5' luk ağ yapısına sahip beşinci model .....	33
Şekil 4.6.	$\Delta t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\omega=20\text{ rad/sn}$ için beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.7.	$\Delta t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\omega=20\text{ rad/sn}$ için beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_{\theta}$ ) karşılaştırılması .....	35
Şekil 4.8.	$\Delta t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\omega=20\text{ rad/sn}$ için beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.9.	$\Delta t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\omega=20\text{ rad/sn}$ için beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) karşılaştırılması .....	37

Şekil 4.10.	$\Delta t=200$ °C ve $\omega=20$ rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_{\theta}$ ) karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.11.	$\Delta t=200$ °C ve $\omega=20$ rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) karşılaştırılması .....	39
Şekil 4.12.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak uygulanan normal gerilmeler.....	42
Şekil 4.13.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ ).....	44
Şekil 4.14.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan teğetsel gerilmeler ( $\sigma_{\theta}$ ).....	45
Şekil 4.15.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan z yönündeki gerilmeler ( $\sigma_z$ ).....	46
Şekil 4.16.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{r\theta}$ ).....	47
Şekil 4.17.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{rz}$ ).....	48
Şekil 4.18.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{\theta z}$ ).....	49
Şekil 4.19.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan elastik şekil değiştirme ( $\epsilon_r$ ).....	51
Şekil 4.20.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan elastik şekil değiştirme ( $\epsilon_{\theta}$ ).....	52
Şekil 4.21.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan elastik şekil değiştirme ( $\epsilon_z$ ).....	53
Şekil 4.22.	10, 20, 30 ve 40 rad/sn dönme hızında uniform sıcaklıklara bağlı olarak iç yüzeyde hesaplanan normal gerilmeler.....	59
Şekil 4.23.	10, 20, 30 ve 40 rad/sn dönme hızında uniform sıcaklıklara bağlı olarak dış yüzeyde hesaplanan normal gerilmeler.....	61
Şekil 4.24.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ ).....	63
Şekil 4.25.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan teğetsel gerilmeler ( $\sigma_{\theta}$ ).....	64
Şekil 4.26.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan z yönündeki gerilmeler ( $\sigma_z$ ).....	65
Şekil 4.27.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{r\theta}$ ).....	66
Şekil 4.28.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{rz}$ ).....	67
Şekil 4.29.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{\theta z}$ ).....	68

Şekil 4.30.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında radyal yönde oluşan elastik şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_r$ ).....	69
Şekil 4.31.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında teğetsel yönde oluşan elastik şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_\theta$ ).....	70
Şekil 4.32.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında z-yönünde oluşan elastik şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_z$ ).....	71
Şekil 4.33.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ ).....	74
Şekil 4.34.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan teğetsel gerilmeler ( $\sigma_\theta$ ).....	75
Şekil 4.35.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan z yönündeki gerilmeler ( $\sigma_z$ ).....	76
Şekil 4.36.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{r\theta}$ ).....	77
Şekil 4.37.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{rz}$ ).....	78
Şekil 4.38.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{\theta z}$ ).....	79
Şekil 4.39.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında radyal yönde oluşan elastik şekil değiştirmeler ( $\epsilon_r$ ).....	80
Şekil 4.40.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında teğetsel yönde oluşan elastik şekil değiştirmeler ( $\epsilon_\theta$ ).....	81
Şekil 4.41.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında z-yönünde oluşan elastik şekil değiştirmeler ( $\epsilon_z$ ).....	82

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Kompozit malzemenin özellikleri .....	24
Çizelge 4.1.	Beş farklı kompozit disk modelin eleman ve düğüm noktası sayıları.....	40
Çizelge 4.2.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ , $\sigma_\theta$ , $\sigma_z$ ).....	41
Çizelge 4.3.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 10 rad/sn dönme hızında hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ , $\sigma_\theta$ , $\sigma_z$ ).....	54
Çizelge 4.4.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 20 rad/sn dönme hızına bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ , $\sigma_\theta$ , $\sigma_z$ ).....	55
Çizelge 4.5.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 30 rad/sn dönme hızına bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ , $\sigma_\theta$ , $\sigma_z$ ).....	56
Çizelge 4.6.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 40 rad/sn dönme hızına bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ , $\sigma_\theta$ , $\sigma_z$ ).....	57

## SİMGELER DİZİNİ

$G_{r\theta}$	kayma modülü
$S$	maksimum kayma gerilmesi
$K$	mukavemet katsayısı
$\nu_{r\theta}$	poisson oranı
$E_r$	radyal doğrultudaki elastiklik modülü
$\varepsilon_r$	radyal doğrultudaki elastik şekil değiştirme
$\sigma_r$	radyal doğrultudaki normal gerilme
$X$	radyal doğrultudaki maksimum çekme gerilmesi
$\alpha_r$	radyal doğrultudaki ısı genleşme katsayısı
$E_\theta$	teğetsel doğrultudaki elastiklik modülü
$\varepsilon_\theta$	teğetsel doğrultudaki elastik şekil değiştirme
$Y$	teğetsel doğrultudaki maksimum çekme gerilmesi
$\sigma_\theta$	teğetsel doğrultudaki normal gerilme
$\alpha_\theta$	teğetsel doğrultudaki ısı genleşme katsayısı
$\tau_{r\theta}$	xy düzlemindeki kayma gerilmesi
$\tau_{rz}$	xz düzlemindeki kayma gerilmesi
$\rho$	yoğunluk
$\tau_{\theta z}$	yz düzlemindeki kayma gerilmesi
$\sigma_z$	z doğrultusundaki normal gerilme
$\varepsilon_z$	z doğrultusundaki elastik şekil değiştirme

# BÖLÜM I

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler oldukça yeni bir alan olup, II. Dünya savaşı esnasında mevcut malzemelerin tek başlarına gelişen teknoloji karşısında belirli gereksinimleri karşılayamaz hale gelmesi ile başlamış ve o zamandan beri de bu malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri konusunda araştırma ve geliştirme faaliyetleri artarak devam etmektedir. Yaşanan bu gelişmeler için teşvik edici güç malzemelerde *yüksek dayanım/yoğunluk* ve *yüksek elastiklik modülü/yoğunluk* oranı elde etmek olmuştur. Bu nedenle de belirli uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır. Bu malzemeler, spesifik uygulama alanlarında üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek amacıyla belirli tanımlanmış düzenleme biçimlerinde değişik fazdaki malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan malzemeler olduklarından, çok fazlı malzeme olarak da adlandırılırlar (Şahin, 2006).

İki ya da daha fazla malzemenin, en iyi özelliklerini bir araya getirmek ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak için mikro veya makro seviyede heterojen karışımıyla oluşan malzemeye *bileşik* ya da *kompozit malzeme* denir. Kompozit malzeme, doğrudan talep edilen maksatla kullanılmayan en az iki ayrı malzemedен spesifik bir özelliği elde edebilmek için bu malzemelerin belirli şartlar altında ve belirli bir oranda fiziksel olarak birleştirilmesi ile elde edilir (Deniz, 2005).

Kompozit terimini açıklamak için aşağıdaki kriterleri kullanmak gerekmektedir (Minorutaya, 1989);

- İnsanlar tarafından üretilmiş olmalı,
- Birbirleri ile uyumlu, fakat kimyasal olarak birbirlerinden farklı, birbirleri ile reaksiyona girmeyen bileşenlerden oluşturulmuş olmalı,
- Bileşenler tarafından üç boyutta karışmasıyla oluşmalı,
- Sonuçta elde edilen kompozitin özellikleri, ayrı ayrı bileşenlerden elde edilemeyecek nitelikte olmalıdır.

Kompozit malzeme üretme ile malzemelerin aşağıdaki özellikleri gelişme sağlanabilmektedir (Güleşen, 2005);

- Dayanım
- Rijitlik
- Korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Görünüm güzelliği
- Ağırlık
- Yorulma ömrü
- Isı izolasyonu
- Isıya dayanıklılık
- Ses Yalıtımı
- İmalat kolaylığı

Kullanımda alışlagelmiş malzemelerden kompozit malzemelere geçişin başlıca nedenlerinden biri, kompozitlerin standart *hafif /yüksek mukavemet* özellikli malzemelere göre *daha hafif / daha yüksek mukavemet* alternatifi getirmesidir. Buna ilave olarak üretimlerindeki esneklik, iyi korozyon ve aşınma dirençleri, uzun yorulma ömürleri ve düşük ısı iletkenlikleri ile birçok uygulama alanlarında konvensiyonel malzemelere göre üstünlük sağlamaktadırlar (Durman, 1991).

Bir malzemenin kompozit malzeme olarak ele alınabilmesi için öncelikle fazlardan bir tanesi diğer faz içerisinde miktar olarak en az % 5 olmalı ve ayrıca ilave fazın özellikleri diğer fazdan daha iyi olmalıdır (Chawla, 1995).

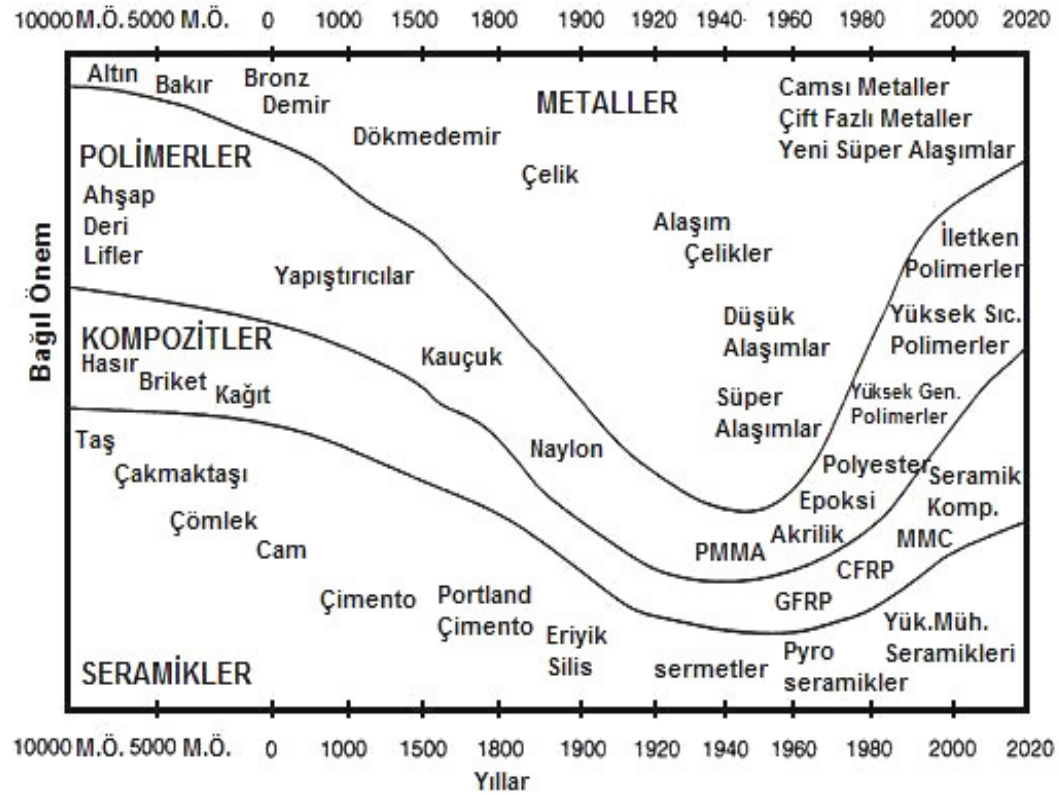
## **1.2. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi**

Kompozit malzemeler çok uzun zamandan beri var olan malzemeler olup, insanlar tarafından ilk kullanımlarının ne zaman olduğuna dair bir belge bulunmamaktadır. En yakın belgelerde Mısırlıların, kompozit malzemeleri kontrplak, kağıt hamuru, mukavemet kazandırmak için çamur içine hasır entegre ederek kullandıkları bilinmektedir. Buna benzer olarak, eski İnk ve Maya medeniyetlerinde tuğla ve çömlekleri sağlamlaştırmak için bitki liflerini kullanmışlardır. Kılıçlar ve zırhlar



ortaçağda mukavemeti artırmak için kaplanmışlardır. Bunun bir örneği olarak, çok katmanlı kompozite dönüştürmek için tekrarlanmış katlama ve yeniden şekil verme ile üretilmiş Samuray Kılıcı gösterilebilir. Eskimolar, igloları inşa ederken buza mukavemet vermek için yosun kullanmışlardır. Otomotiv endüstrisinde, Chevrolet Corvette modeli ile kompozitler büyük ölçekte kullanılmıştır. Tüm bu örnekler insan yapımı kompozit malzemelerdir. Bamboo, kemik, kereviz doğada var olan gözenekli kompozitlere birer örnektir. Öte yandan kas dokusu, çok yönlü elyafli katmandır. Hem doğal ve hem de insan yapımı kompozit malzemelerin çok sayıda örnekleri bulunmaktadır (Staab, 1999).

Tasarımda çoğunlukla kullanılan yapısal malzemeler dört ana grupta katagorize edilebilir: metaller, polimerler, kompozitler ve seramikler. Bu malzemeler çok eski dönemlerden itibaren kullanılmaktadır. M.Ö 10000 yıllarından başlayarak 2020 yılına kadar olan süreçte bu malzemelerin kullanımlarındaki dağılım ve izafi olarak tarih içindeki önem sıralamaları Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Staab, 1999).



Şekil 1.1. Tarih içinde malzemelerin gelişiminde birbirlerine göre önemi (Staab, 1999)

### 1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin sahip olduğu çeşitli avantajları aşağıdaki gibidir (URL-2);

- **Yüksek Mukavemet:** Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden ötürü kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.
- **Kolay Şekillendirilebilme:** Büyük ve kompleks parçalar tek işleme bir parça halinde kaplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.
- **Elektriksel Özellikler:** Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
- **Korozyon ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet:** Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.
- **Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı:** Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.
- **Kalıcı Renklendirme:** Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.
- **Titreşim Sönümlendirme:** Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

#### **1.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları**

Kompozit malzemelerin sahip olduğu ve yukarıda bahsedilen çeşitli avantajları yanında aşağıda belirtildiği gibi çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır ve bunlar (URL-2);

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- Hammaddenin pahalı olması; Uçaklarda kullanılabilecek kalitede karbon elyafının bir metrekarelik kumaşının maliyeti yaklaşık 50 \$'dır.
- Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesime dayanıklılık özelliği bulunmaktadır.
- Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
- Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilir.
- Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutulmuş olarak saklanmaları gerekmektedir.
- Sıcak kurutma gerekmektedir.
- Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Bazı durumlarda bu zor olabilir.
- Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmektedir.

#### **1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları**

Kompozit malzemelerin çok çeşitli kullanım alanları olmakla birlikte, başlıca kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz (Deniz, 2005);

- a) Otomobil, kamyon, otobüs kaporta parçaları, tampon, ön ve arka far yuvaları, çeşitli motor aksamı, rüzgarlık, gösterge panelleri, izole tanklar, treyler panelleri, dorse parçaları gibi otomotiv sektöründe,
- b) Balistik başlık ve yelek, araçlar için balistik koruyucu parçalar, roket gövdeleri, fırlatma tüpleri, roket motor korumaları, burun konileri, cihaz gövdeleri, taşıma sandıkları, cephane parçaları gibi savunma sektöründe,
- c) Kimyasal yakıt tankları, basınçlı tanklar, borular, depolama tankları, pompa ve valf parçaları, atık ve taşıma boruları, asit banyoları gibi kimya sektöründe,
- d) Panolar, dış kaplama giydirme elemanları, döşeme elemanları, beton kaplama elemanları, direkler, ses perdeleri, kapı pencere elemanları, zemin döşemeleri, mutfak ve banyo malzemeleri, çatı kaplama malzemeleri, prefabrik birimler, mobilyalar, mimari parçalar, bahçe birimleri, karayolu işaretlemeleri gibi inşaat sektöründe,
- e) Tekne gövdeleri, yakıt tankları, su elemanları, mobilyalar, motor kapakları, arıtma tankları, basınçlı tanklar, iskele elemanları gibi denizcilik sektöründe,
- f) Golf, hokey sopaları, kar ve su kayakları, baretler, el mobilyaları, oyun bahçesi ve park elemanları gibi diğer sektörlerde kullanılırlar

## **1.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Mühendislikte kullanılan kompozit malzemeler genel olarak takviye tiplerine göre sınıflandırılmakta olup, en yaygın şekildeki sınıflandırma, fiber ve partikül şeklinde olanıdır (Staab, 1999).

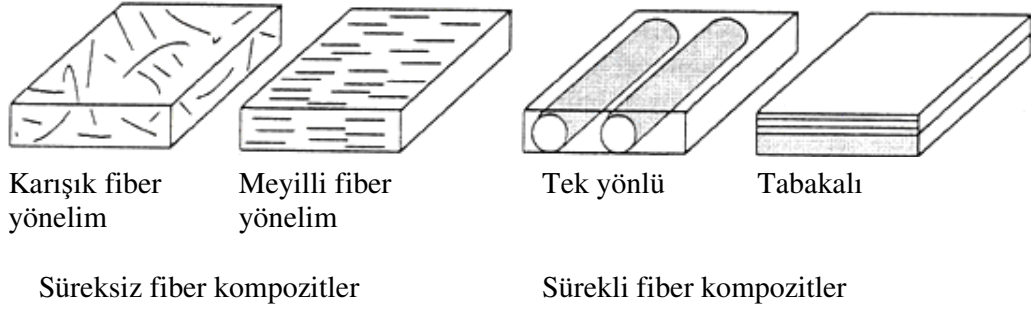
Kompozit malzemelerin kabul edilen en yaygın dört tipi şunlardır (Jones, 1999);

1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler
2. Tabaka yapıda olan kompozit malzemeler
3. Tane takviyeli kompozit malzemeler
4. İlk üç tipin tümü ya da bir kısmını içeren kombinasyonlar

### **1.6.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde, matriks içinde sürekli (uzun) veya dilimlenmiş (liflikçik) fiberler bulunmaktadır. Sürekli fiber geometrik olarak çok yüksek

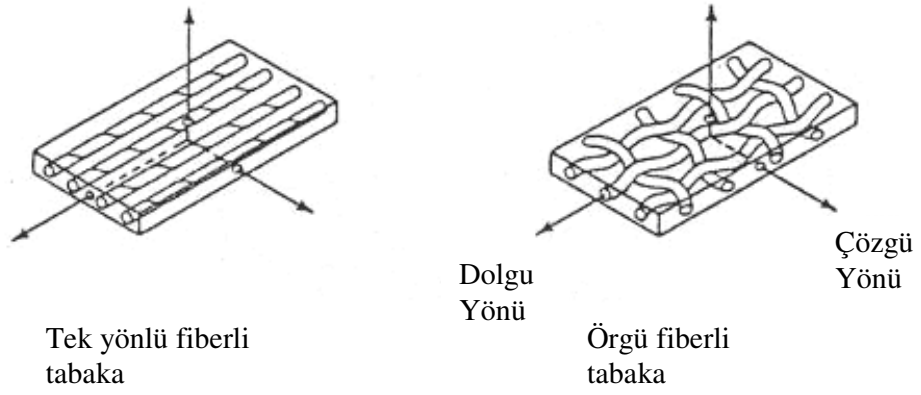
uzunluk/çap oranına sahip olarak karakterize edilir. Çeşitli şekillerdeki uzun fiberler doğası gereği, aynı kitle formundaki malzemeden daha güçlü ve epeyce katı durumdadır. Lifçikler genel olarak, kısa, kalın fiberler olarak göz önünde bulundurulur. Fiber takviyeli kompozitlerin her iki tiplerinin şematik olarak gösterimi Şekil 1.2’de mevcuttur. Doğal olarak, fiber ve lifçikler yük taşımak için yapısal bir eleman şeklini alacak şekilde birbirlerine yapışmadığı sürece az bir kullanımları bulunmaktadır. Bağlayıcı malzeme genel olarak *matriks* olarak adlandırılır (matematiksel bir kavram olan matriks ile karıştırılmamalıdır). Matriks malzemeleri; polimerler, metaller veya seramikler olabilir (Jones, 1999; Staab, 1999).



Şekil 1.2. Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimleri (Staab, 1999)

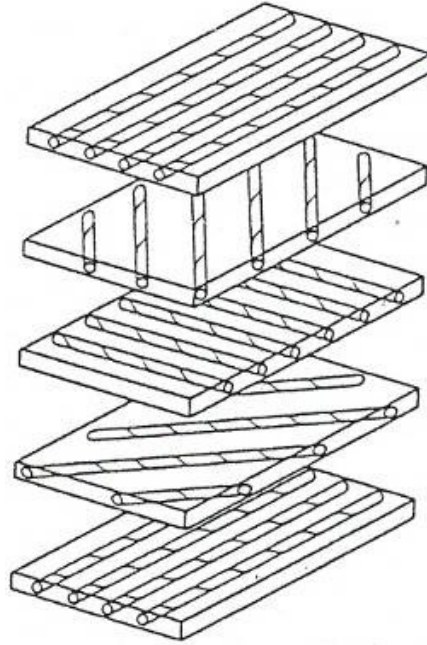
### 1.6.2. Tabaka Yapıda Olan Kompozit Malzemeler

Tabaka yapısında olan kompozit malzemeler, birbirine yapışmış en az iki farklı malzemenin katmanından oluşmaktadır. Katmanlaşma, bileşen katmanlarının en iyi yönü ve daha yararlı malzeme elde etmek için yapışmış malzeme kombine etmekte kullanılır. Katmanın temel yapı bloğu, tek yönlü fiberler veya matriks içinde örülmüş fiberlerin düzeninde olan ince tabakadır (kabukta bazen kavislidir). Malzeme eksenleri, fiber yönüne paralel ve dik olan esas malzeme eksenleri ile iki tipik düz ince tabakalar Şekil 1.3’te gösterilmiştir. Matriks organik, metalik, seramik ya da karbon olabilir (Jones, 1999).



Şekil 1.3. İnce tabakanın başlıca iki tipi (Jones, 1999)

Tabakalı kompozit, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi değişken olarak yönlendirilmiş malzeme yönleri ile ince katmanların bir dizisidir (Jones, 1999). Unutulmamalıdır ki, Şekil 1.4'teki katmanların fiber yönlendirmesi, katmanın orta yüzeyi çevresinde simetrik değildir. Levhanın katmanları genellikle her bir katmanda kullanılan aynı matris malzemesi ile yapıştırılır. Levhanın mekanik tepkimesi, bunu oluşturan her bir katmandan farklıdır. Tabakanın tepkimesi her bir katmanın özelliğine bağlı olduğu kadar katmanları diziliş sırasına da bağlıdır.



Şekil 1.4. Tabakalı kompozitlerin yapıştırılmamış görüntüsü (Jones, 1999)

### 1.6.3. Tane Takviyeli Kompozit Malzemeler

Tane takviyeli kompozit malzemeler, başka bir malzemenin matriks içine dağılmış bir ya da daha fazla malzeme parçacıklarından oluşmaktadır. Parçacıklar metal veya metal dışı olabilir. Bu bileşenlerin dört muhtemel kombinasyonları takip eden paragraflardan anlatılmıştır (Jones, 1999).

1. Metalik olmayan kompozit malzemelerdeki metalik olmayan tanecikler,
2. Metalik olmayan kompozit malzemelerdeki metalik tanecikler,
3. Metalik matriks kompozit malzemelerdeki metalik tanecikler,
4. Metalik matriks kompozit malzemelerdeki metalik olmayan tanecikler.

Tanecikler, gerçekte herhangi bir şekil, ebat ya da konfigürasyona sahip olabilir. En bilinen tanecik kompozitlerin örnekleri beton ve elyaf levhasıdır. Tanecikli kompozitin tepkisi eşyönsüz veya ortotropikten birisi olabilir. Bazı kompozitler, mukavemetin tasarımda önemli bir üyesi olmadığı birçok uygulamada kullanılmaktadır. Tanecikli kompozitlerin birkaç tipinin şematik gösterimi Şekil 1.5'te gösterilmiştir (Staab, 1999).



Şekil 1.5. Tanecikli kompozitlerin şematik gösterimi (Staab, 1999)

### 1.6.4. Kompozit Malzemelerin Kombinasyonları

Sayısız çok fazlı kompozit malzemeler, daha önce de tartışıldığı gibi çeşitli sınıflandırmalar, fiber, katmanlı veya tanecikli kompozit malzemelerin birden fazla karakteristiğini sergiler. Örneğin, güçlendirilmiş beton hem tanecikli (çünkü beton çimento karışımındaki bağlayıcı maddedeki çakıllardan oluşur) ve hem de fiber (çelik güçlendiricilerden ötürü) yapıdadır. Aynı zamanda, tabakalı güçlendirilmiş fiber kompozit malzemeler açık olarak hem tabakalı ve hem de fiber kompozit malzemelerdir. Bu durumdan ötürü, herhangi bir sınıflandırma sistemi rastlantısal ve

kusurludur. Tabakalı güçlendirilmiş fiber kompozit malzemeler, hem fiber kompozit malzeme ve hem de tabakalaştırma tekniklerini barındıran kompozit malzemelerin karma bir sınıfıdır. Burada, birlikte yapılandırılmış fiber güçlendirilmiş malzemenin katmanları çeşitli yönlerdeki tabakanın farklı rijitlik ve mukavemet vermek için, her bir tabaka tipik olarak farklı yönlerde yönlendirilmiştir (Şen, 2007).

## **1.7. Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları**

Kompozit malzemeleri üretim tekniği; elyafa, matrikse, parça şekline ve istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere göre belirlenmekte olup, bunlar (Şahin, 2006);

- a) Sıvı hal üretim teknikleri,
- b) Katı hal üretim teknikleri, olarak çok genel biçimde sınıflandırılabilir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, elyaf ve matriksin uygun özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla makro seviyede birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kompozit malzemelerin üretilmesi için aşağıdaki şartların yerine getirilmiş olması gerekmektedir (Şahin, 2006);

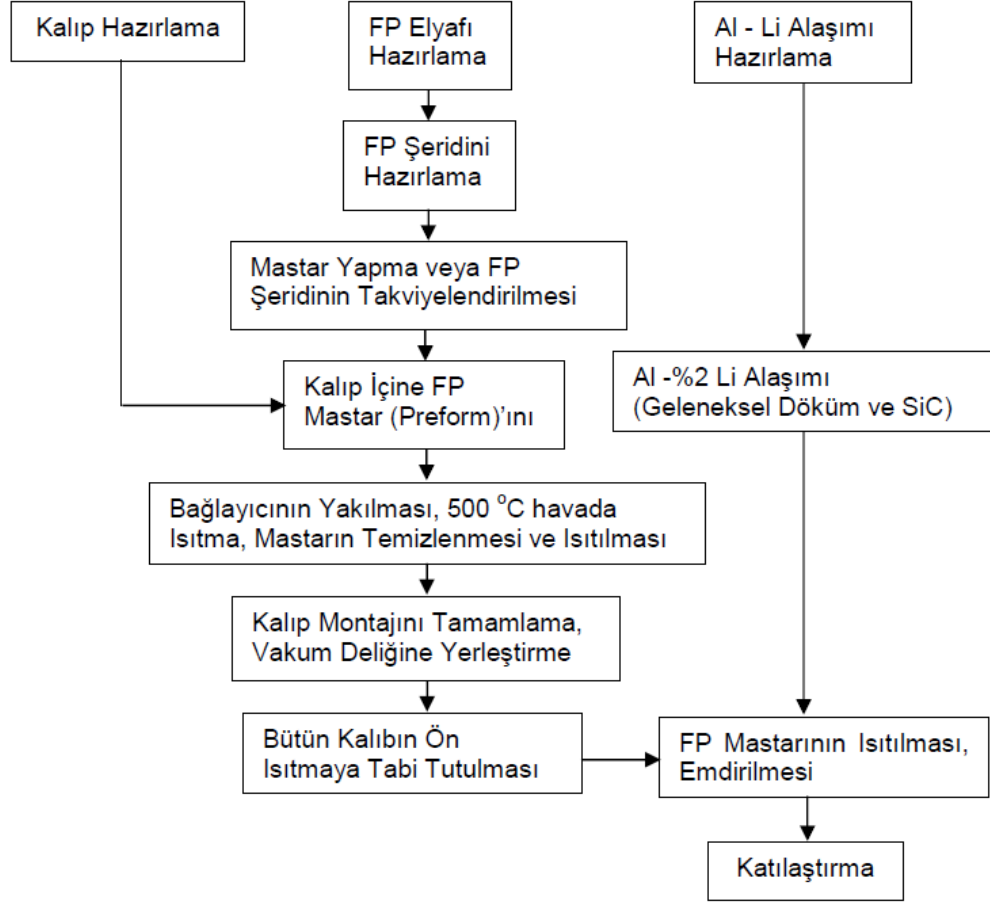
1. Elyafların eşit aralıklı dağılım göstermesi,
2. Elyafların homojen bir dağılım göstermesi,
3. Yüksek dayanımlı elyaflar mekanik temaslara karşı hassas olduğundan elyafların kırılmasının önlenmesi,
4. Elyaf ve matriks arasında kuvvetli bir ara yüzey bağının oluşturulması.

### **1.7.1. Sıvı Metal Emdirmesi (İnfiltrasyon)**

Bu teknik, hem kısa elyaf, kılçak kristalli ve hem de sürekli elyaf takviyelendirilmiş metal matriksli kompozit malzemelerin (MMK) üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknikte ilk olarak, uygun bağlayıcı kullanarak master (preform=önşekil) hazırlanır. Kompozitte tasarlanan elyaf hacim içeriği ve doğrultuları bu aşamada tespit edilir. Hazırlanan bu model kalıp içine yerleştirilir ve eritilmiş metal enjekte edilir. Bu esnada organik bağlar yanar ve katılaşmaya bırakılır. Emdirme işlemi basınçla yapılmaktadır. Böylelikle, elyafların arasına matriksin girmesi ile açığa çıkan atıl gazların dışarı atılması sağlanır (Deniz, 2005).



Sıvı metal emdirme tekniğinin şematik akış diyagramı Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



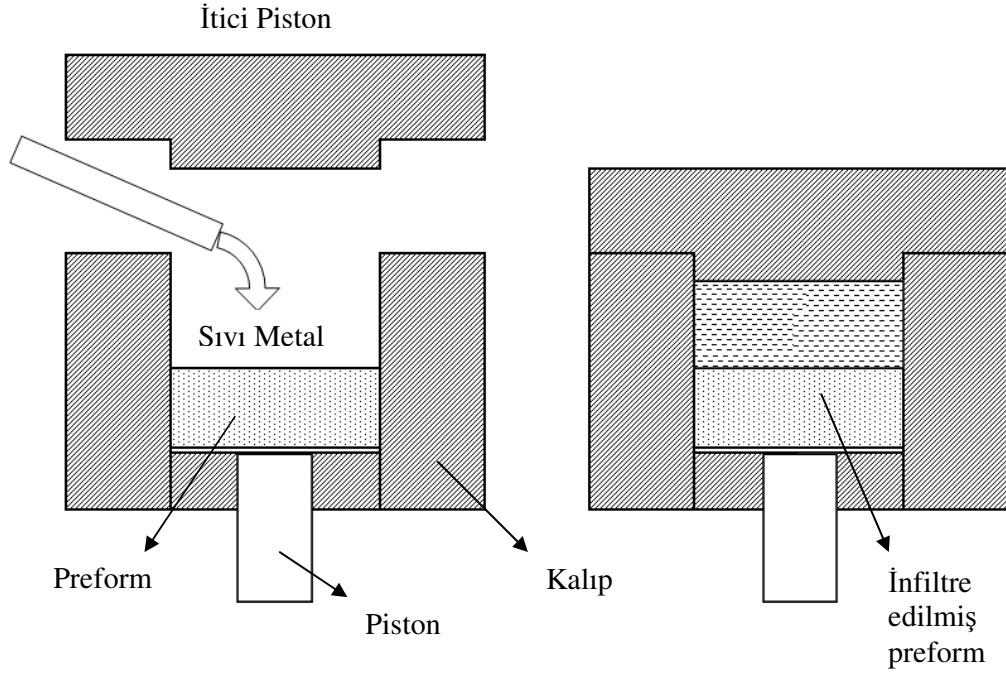
Şekil 1.6. FP Alüminyum oksit/Al esaslı kompozitin vakumda sıvı metal emdirme tekniğinin akış şeması (Deniz, 2005)

### 1.7.2. Sıkıştırılmalı veya Sıvı Dövme Döküm Tekniği

En önemli üretim yöntemlerinden birisi olan sıkıştırma döküm, otomotiv, havacılık alanlarında ve diğer uygulamalarda kullanıldığı için üzerinde birçok çalışma yapılmıştır.

Şekil 1.7'de görülen sıkıştırma döküm yöntemi, basınç altında katılaştırma ilkesine dayanmaktadır. İstenilen şekilde ve fiber hacmine sahip önşekil ısıtılarak alıp boşluğuna bırakılır ve sonra ısıtılmış kalıba sıvı metal dökülür. Bu işlemin ardından hidrolik pres uygulanır ve sıvı metal katılaşıncaya kadar bu işlem devam ettirilir. Konvansiyonel dökümlere nazaran daha fazla basınç gerektirmektedir. Sisteme uygulanan basınç değeri

yaklaşık 100 MPa kadardır. Yüksek basınç ihtiyacından ötürü istenilen parçanın ebatları sınırlayıcı etkindir (Kurnaz, 1993).

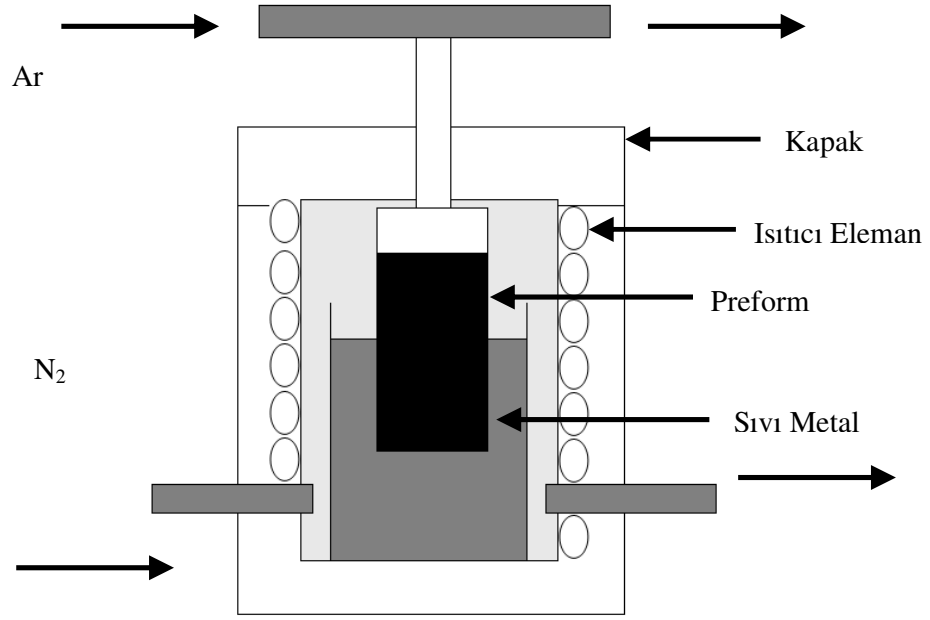


Şekil 1.7. Sıkıştırma döküm yöntemi (Kurnaz, 1993)

### 1.7.3. Basınçlı İnfiltrasyon

Basınçlı infiltrasyon tekniğinin sıkıştırma dökümden farkı, sıvının önşekil veya yatak içerisine bir zımba ile değil de basınçlı soygaz ile iletilmesidir. Bu şekildeki bir sistem Şekil 1.8'de görüleceği üzere, bir ucu basınç ünitesi içerisine yerleştirilmiş pota içerisindeki sıvı metale daldırılmıştır. Diğer ucu normal atmosfer veya vakuma bağlanmış ve içerisinde takviye malzeme bulunan bir silindirden meydana gelmektedir. Takviye geçişi engelleyecek şekilde silindir içerisine yerleştirilir. Silindir içerisindeki bu parçacıklar sıvı metale daldırılır veya başka bir yerde ön ısıtmaya tabii tutulur. Bu işlemden proses değişkenleri (Şahin,2006);

- Kalıp ön ısıtma sıcaklığı,
- İnfiltrasyon basıncı,
- Sıkıştırılmış takviye yoğunluğu,
- Takviye parçacık boyu,
- İnfiltrasyon hızı,
- Sıvı metal sıcaklığı, olarak sıralanabilir.



Şekil 1.8. Basınçlı infiltrasyon metodu (Şahin, 2006)

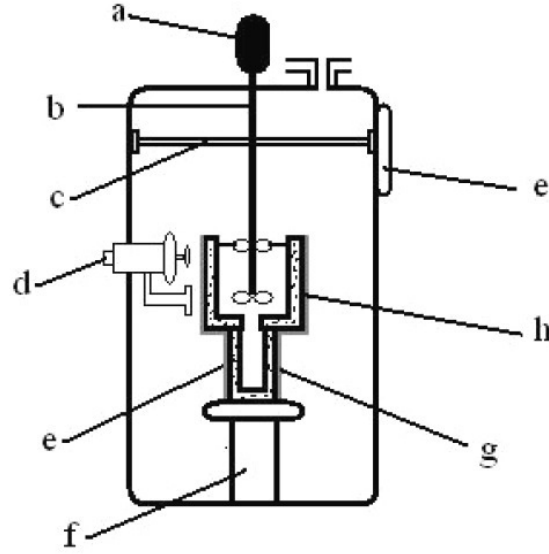
#### 1.7.4. Sıvı Metal Karıştırması

Bu üretim yönteminin oldukça değişik versiyonu var olmakla beraber takviye malzemenin tamamıyla sıvı haldeki matriks içerisine girmesini sağlamak için bazı yaklaşımlar şu şekilde özetlenebilir:

- Bir enjeksiyon tabancası kullanarak sıvı içerisine taşıyıcı soygaz ile tozların enjeksiyonu,
- Kalıp dolarken sıvı içerisine seramik parçacıkların ilave edilmesi,
- Mekanik hareket ile oluşturulan vorteks içerisinden parçacıkların sıvı metale ilave edilmesi,
- Sıvı içerisine, matriks alaşımı ve takviye toz karışımından meydana gelen, küçük briketlerin ilave edilmesi ve ardından karıştırılması,
- Karşılıklı hareket eden çubuklar kullanılarak parçacıkların sıvı içerisine itilmesi,
- Merkezkaç etkisi ile ince parçacıkların sıvı içerisine dağıtılması veya ultrasonik ile sıvı sürekli hareket halinde iken parçacıkların sıvı içerisine enjeksiyonu,
- Sıfır yerçekimi prosesin uygulanması. Bu proses uzun bir zaman dilimi için çok yüksek vakum ve sıcaklıkların birlikte etkisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Yukarıdaki işlemlerin hepsinde metal matriks ile takviye arasındaki güçlü bağ; yüksek işlem sıcaklığı kullanımı ve yeni faz oluşturulması gereklidir. Bu nedenle, takviye fazı ile matriks arasında ıslatmayı geliştirmek için takviye ile etkileşim gösteren bir element ile matriksin alaşımlanması halinde başarılı olmaktadır. Doğal olarak ıslanmayan parçacıkları için ıslatmayı iyileştirici alaşım elementi eklenmesi halinde veya parçacıkların ıslatılabilir bir örtü ile kaplanması gerekmektedir. Fakat bu reaksiyon kompozit üretimi veya kullanımı sırasında takviye elemanın zarar görmesine neden olmaksızın bağ oluşumunu teşvik edecek ıslatmayı sağlayacak kadar olmalıdır (Swhartz, 1992).

Şekil 1.9’da sıvı metal karıştırmasında kullanılan düzenek gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Ergimiş metal karıştırılması yöntemiyle kompozit üretim ünitesi a)Dia Motor, b) Pervane mili, c)Yatak, d) Güç Kaynağı, e)Suyla soğutulan grafit kalıp, f) Destek, g)Yalıtıcı, h) Suyla soğutulan paslanmaz kalıp (Swhartz, 1992)

### 1.7.5. Yarı Katı Karıştırma Yöntemi

Bu yöntem bazen “Compocasting” veya “Rheocasting” olarak da anılmaktadır. Bu yöntemde katı ile sıvı arasındaki sıcaklığa sahip yarı katı karıştırmak suretiyle yapılan

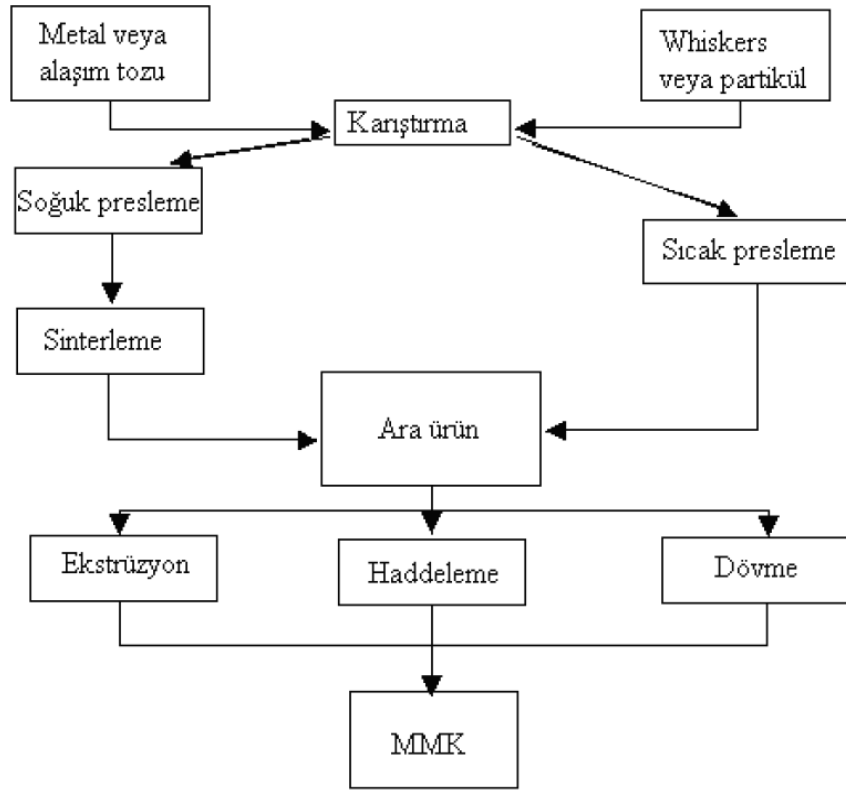
takviye ilave tekniğidir. Alaşımın sıcaklığı, sıvı sıcaklığının 30–50 °C üzerine çıkarılıp şiddetli şekilde karıştırılarak, yarı–katı aralığa kadar soğumasına müsaade edilir.

### 1.7.6. Plazma Püskürtme

Bu yöntem, atomik yapıdaki ergimiş metal parçacıkların, takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. Püskürtülen ergiyik metal parçacıkları takviye elemanlarına yapışır ve kısa sürede katılaşmaya başlar. Bu üretim metoduyla takviye elemanı üzerine istenilen kalınlığı verecek şekilde ergimiş metal püskürtülerek kompleks şekilli parçalar üretilebilir. Ayrıca, fiberler arası mesafenin kontrolü ve fiberlerin daha rahat yönlendirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir (Akorall, 2003).

### 1.7.7. Toz Metalurjisi Tekniği

Takviye malzemesinin sıvı alaşım tarafından ıslatılabilirliğinin düşük olması sebebiyle, ilk olarak geliştirilen üretim tekniği olup, Şekil 1.10’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Toz metalurjisi tekniği ile kompozit üretimi akış şeması (Bahçeci, 2006)

Toz metalurjisi tekniği ile üretilen parçaların genellikle sıvı hal üretim yöntemiyle üretilmiş parçalardan daha üstün mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda çalışılması, homojen katkı elemanı dağılımının elde edilebilmesi, kompozit yapının kontrolüne imkan vermesi, katkı elemanlarının daha ekonomik olması gibi nedenlerden ötürü parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde tercih edilmektedir (Bahçeci, 2006).

#### **1.7.8. Difüzyon Bağlama ve Vakumda Presleme**

Bu metotla birleştirme, yüksek basınç ve sıcaklıkta altında yapılır. Bu teknikte ilk önce, levha şeklindeki metal veya metal alaşımları ile elyaf şeklindeki takviye elemanları etkili yayılma sağlamak için kimyasal yüzey işlemine tabi tutulmaktadır. Daha sonra elyaflar önceden belirlenen yönlerde, açılarda ve istenilen aralıklarda metal tabakalar üzerine yerleştirilir. Daha sonra belirli sıcaklıkta genellikle erime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta ısıtılarak difüzyon ile birleşmesinin gerçekleşmesi için preslenir veya haddelenir. Ancak bu işlemde metal levhalar ile elyaf yüzeylerinin çok temiz ve oksitsiz olması gerekir. Aksi durumda ara yüzeyde istenilen bir difüzyon bağı oluşturulamaz. Çünkü kompozitin dayanımı bu oluşacak difüzyon bağına bağlıdır (Şahin, 2006).

#### **1.7.9. Sıcak Presleme ve Sıcak İzostatik Presleme**

Bu yöntem, Al, Mg ve Ti gibi metal matrisli kompozit malzemeleri üretmek için başarılı bir şekilde kullanılır. Numuneler, metal matristen oluşan ince folyo tabakalar arasına yerleştirilir ve kompoziti yerinde tutmak için bir bağlayıcı ile spreyleneir ve daha sonra bağlayıcı yakılarak yok edilir. Bu işlemin ardından şekillenmiş kompozit tamburdan çıkarılır, istenilen ölçüde kesilir ve sıcak pres kalıp içine istiflenir. İstiflenmiş kütle üzerine hafif basınç uygulanır ve bağlama sıcaklığına ulaşıldığında gerekli zaman için tam bağ basıncı uygulanır. Daha sonra basınç kaldırılır ve ısıl uzamalaradaki uyumsuzluklardan ileri gelen kalıcı gerilmeleri en aza indirmek için, parça komple yavaş bir biçimde soğumaya bırakılır. Sıcak izostatik preslemenin iki işleminden meydana geldiği, fakat MMK'nın mikroyapı ve özellikleri üzerine daha az bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Sıcak presleme ile ilgili üretilen kompozitlerin; yüksek dayanım göstermesi, dayanım/yoğunluk oranının geleneksel malzemelerden 2-4 kat daha yüksek olması, yorulma dayanımının iyi olması ve karışımlar kuralına tam uyum göstermesi gibi üstün özellikleri bulunmaktadır (Ejiofor, 1997).

## BÖLÜM II

### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Fomey (1986), kompozit malzemelerin tasarımcı ve mühendislere sağladığı olanağın sadece farklı özelliklerdeki malzemelerin bir araya getirilmesi değil, aynı zamanda malzeme özelliklerinin belirli bir yapı içerisinde, hatta bu yapının belirli noktaları ve doğrultuları üzerinde değişebilirliğinin sağlanması olduğunu tespit etmiştir. Taşetiren (1999) dört temel unsurun kompozit malzemelerin özelliklerini belirlediğini saptamıştır. Bunlar; matris, fiber, ara yüzey ve mikro yapı özellikleridir. Kompozit malzeme genel olarak sürekli bir fiber ve bir matris malzemedan meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerin isimlendirilmesi, kullanılan matris ve fiber malzemelerin çeşitli kombinasyonları ile oluşturulan fiber/matris malzemelerine göre yapılır.

Apalak ve arkadaşları tarafından (2001) yapılan çalışmada, epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış çok ince metal plakaların, laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum, titanyum ve çelik plakalarda sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir.

Şen (2001) yapılan çalışmada, epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış çok ince metal plakaların, laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. Bu amaçla, silindirik koordinatlarda iki boyutlu ısı transferi modeli oluşturulmuş ve sonlu farklar metodu kullanılarak, Fortran'da program yazılmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum, titanyum ve çelik plakalarda sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Daha sonra, laser nokta kaynağı yapılmış olan bu bindirme bağlantısının gerilme ve şekil değiştirme analizleri yapılmıştır. Bu aşamada, bu tür problemlerin çözümünde etkili bir metod olan sonlu eleman metodu kullanılmıştır. Bütün analizler genel amaçlı sonlu eleman yazılımı olan ANSYS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, alüminyum, titanyum ve çeliğin, deneysel gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) neticelerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Laser tarafından neden olunan delik etrafında ortaya çıkan elastik, plastik, ısıl gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) dağılımları incelenmiştir.

Metal-matriksli kompozitlerin (MMK) yüksek sıcaklıklardaki özellikleri, cam lifi ile takviye edilmiş plastiklerle karşılaştırıldığında daha üstündür. Birçok sıcaklık değerinde, metal matrislerin mukavemet ve elastiklik modülü, reçine esaslı matrislerden daha yüksektir. Ayrıca metal matriksli kompozitlerin gevrek kırılma ihtimali daha düşüktür (Ataberk ve Ark., 2004).

Çallıoğlu ve arkadaşları (2005) kompozit dönen bir diskteki mekanik ve ısı gerilmeleri hesaplamışlardır. Dönen disk içten ve dıştan basınç etkisi ve değişen parabolik bir sıcaklık etkisi altındadır. Teğetsel gerilmelerin, radyal gerilmelerden daha yüksek değerlerde olduğu anlaşılmıştır.

Sayman (2005) tarafından yapılan çalışmada, ankastre mesnetli ve çelik tellerle takviye edilmiş alüminyum metal-matriksli tabakalı kompozitlerde meydana gelen ısı gerilmeleri hesaplanmıştır. Çalışmada ısı gerilmeleri elastik-plastik analiz ile bulunmuştur. Sıcaklığın plakanın kalınlığı boyunca lineer olarak değiştiği kabul edilen bu çalışmada çözüm analitik olarak yapılmıştır. Sayman ve Özer (2001) yaptıkları çalışmada, bir önceki çalışmada kullanılan malzeme özelliklerine sahip alüminyum metal-matrikse sahip kompozit kullanarak bir başka çözüm gerçekleştirmişlerdir. Bu yeni çalışmada öncekinden farklı olarak sıcaklığın lineer değil parabolik olarak değiştiği kabulü ile ısı gerilmeleri bulunmuştur. Bununla birlikte benzer çözüm yöntemi ile çözüm yapılmıştır.

Kaynak ve Şen (2005) yaptıkları çalışmada, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiş polimer matrisli bir kompozit diskteki ısı gerilmeleri hesaplamışlardır. Isıl gerilmeleri uniform sıcaklık etkisiyle meydana getirilmiştir. Çözüm için iki boyutlu sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır. Bu amaç için ANSYS yazılımından yararlanılmıştır. Analiz edilen kompozit malzemenin üretimi Kaynak (2005) tarafından gerçekleştirilmiş ve üretilen bu kompozit malzemenin özellikleri yine aynı araştırmacı tarafından deneysel olarak elde edilmiştir.

Şen ve Palancıoğlu (2005) yaptıkları çalışmada,  $[45^\circ/-45^\circ]_2$  açılı oryantasyona sahip, basit mesnetli, çelik fiberlerle takviye edilmiş, tabakalı ve dairesel delikli termoplastik kompozitlerde, üniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen ısı gerilmeleri hesaplamışlardır. Oryantasyon açısı olarak, simetrik ve antisimetrik düzenleme seçilmiştir. Analizde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu amaçla, çözüm ANSYS



programı kullanılarak yapılmıştır. Üniform sıcaklık yükü olarak 40 ve 80 °C arasındaki çeşitli değerler seçilmiştir.

Çallıoğlu ve arkadaşları (2006) kompozit dönen bir disk için elastik-plastik gerilme analizini analitik olarak gerçekleştirmişlerdir. Plastik bölgenin dağılımını görmek için bir kaç farklı açısal hız dikkate alınmıştır. Çalışmada artık gerilmeler de hesaplanmıştır. Hem elastik gerilmeler hem de plastik gerilme analizi sonuçlarına göre diskin iç yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin, diskin dış yüzeyinde meydana gelen gerilmelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diskin iç yüzeyinde meydana gelen artık gerilmelerin değerlerinin, diskin dış yüzeyinde meydana gelen artık gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Sayman (2006) çelik fiberlerle takviye edilmiş termoplastik kompozit bir diskteki gerilmeleri elastik-plastik olarak hesaplamıştır. Radyal ve teğetsel gerilmeler uniform sıcaklık dağılımı altında hesaplanmıştır. Kompozit diskin radyal ve teğetsel doğrultulardaki farklı ısı genleşme katsayılarından dolayı, uniform sıcaklık dağılımı uygulandığında, ısı gerilmeler meydana gelmiştir. Teğetsel gerilmeler, radyal gerilmelerden daha büyük değerlerde hesaplanmıştır. Teğetsel gerilmelerin diskin iç yüzeyinde bası, diskin dış yüzeyinde ise çekme formunda olduğu görülmüştür. Çalışma hem analitik olarak hem de nümerik olarak yapılmış ve her iki çözümdeki değerler benzer olarak elde edilmiştir. Nümerik çözüm için ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

Şen (2006-a) tarafından yapılan çalışmada, simetrik olarak çapraz takviye edilmiş, [0/90]<sub>s</sub> ve açılı olarak takviye edilmiş tabakalı kompozit levhalardaki ısı gerilmeler elastik-plastik gerilme analizi ile bulunmuştur. Kompozit plakalara uniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Kompozit malzeme olarak termoplastik matrisin çelik tellerle takviye edildiği malzeme özellikleri kullanılmıştır. Isıl gerilme analizi ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uygulanan uniform sıcaklık artışına ve tabaka dizilişine bağlı olarak, kompozit malzemelerdeki ısı gerilmelerin değerlerinde artışlar meydana gelmiştir.

Şen (2006-b) tarafından yapılan çalışmada, tek yönlü olarak takviye edilmiş ve çelik tellerle takviye edilmiş termoplastik kompozit bir diskte meydana gelen ısı gerilmeler elde edilmiştir. Modelleme ve çözüm ANSYS programı yardımıyla yapılmıştır. Sıcaklık

uniform olarak etki ettirilmiştir ve 80 ile 120 °C arasında farklı sıcaklıkların ısı gerilmeler üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; radyal yöndeki ısı gerilmelerin, teğetsel yöndeki ısı gerilmelerden daha düşük değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte ısı gerilmelerin uniform sıcaklık yükünün değişimine bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Şen ve Palancıoğlu (2006) yaptıkları bir diğer çalışmada, çapraz takviye edilmiş kare delikli termoplastik levhalarda ısı gerilme analizini gerçekleştirmişlerdir. Oryantasyon açısı olarak simetrik ve antisimetrik düzenleme yapılmıştır. Analizde, sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu amaçla, çözüm ANSYS programı kullanılarak yapılmıştır. Üniform sıcaklık yükü olarak 40 ve 80 °C arasındaki çeşitli sıcaklık değerleri seçilmiştir.

Çalhoğlu (2007) uniform ve lineer gibi azalan veya artan sıcaklıklar etkisindeki dönen kompozit bir diskteki ısı gerilmeleri hesaplamıştır. Dönen disk içerisindeki teğetsel ve radyal gerilmeler üç farklı sıcaklık profili için hesaplanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre düşük sıcaklıklarda tüm disk için, teğetsel gerilmelerin, radyal gerilmelerden daha büyük değerlerde olduğu fakat sıcaklık arttırıldığında diskin iç yüzeyinde azalma gösterdiği anlaşılmıştır. Yapılan çalışmada, ayrıca radyal şekil değiştirmeler analitik olarak hesaplanmıştır ve tüm sıcaklık yükleri altında diskin dış yüzeyinde daha büyük, iç yüzeyinde daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.

Karakaya'ya göre (2007), mühendislik malzemelerini metal ve alaşımları, polimerler, seramikler, kompozitler olarak dört ana gruba ayırabiliriz. Kompozit malzemeleri de iki ya da daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde birleşmesiyle meydana gelen malzeme türü olarak veya birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzemeler olarak tanımlayabiliriz. Metal veya seramik alaşımlarını kompozit malzeme olarak değerlendirmeyiz çünkü birleşme mikroskobik boyutta gerçekleşir. Ama son yıllarda metal matrisli kompozitler adı altında yüksek mukavemetli malzemeler elde edilmiş ve özellikle yüksek dayanım gereken yerlerde kullanım alanı gittikçe artmaktadır.

Şen (2007) tarafından sonlu elemanlar metodu ve ANSYS programı kullanılarak yapılan çalışmada, üzerinde çok sayıda delik bulunan bir kompozit diskin ısı gerilme

analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, elastik-plastik ve artık gerilmeler hesaplanmıştır. Isıl gerilmeler, uygulanan uniform sıcaklık yükü tesiriyle oluşturulmuştur. Kompozit malzemenin radyal ve teğetsel doğrultulardaki farklı ısıl genleşme katsayıları nedeniyle ısıl gerilmelerin meydana geldiği görülmüştür. Isıl gerilmelerin ve artık gerilmelerin değerlerinin uygulanan uniform sıcaklık yüklemelerine bağlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir.

Şen (2007) tarafından yapılan çalışmada, çelik tellerle farklı oryantasyonlarda takviye edilmiş alüminyum metal-matriksli kompozit plakalarda meydana gelen ısıl gerilmeler üzerine, bir kare deliğin etkisi incelenmiştir. Isıl yük olarak, farklı değerlerde üniform sıcaklık dağılımları seçilmiştir. Tabakalı kompozit plakalar, dört farklı tabakacığın birleştirilmesi ile meydana getirilmiştir. Tabakaların dizilişi,  $[15^{\circ}/-15^{\circ}]_s$ ,  $[30^{\circ}/-30^{\circ}]_s$ , ve  $[60^{\circ}/-60^{\circ}]_s$  simetrik oryantasyon şeklinde düzenlenmiştir. Modelleme ve çözümde, sonlu elemanlar ile analizde etkin bir program olan ANSYS yazılımından yararlanılmıştır. Tabakalı kompozit plağın genişliğinin, kare deliğin boyutlarına oranı olan  $a/b$ , 5 olarak seçilmiştir.

Özellikle döküm yöntemi ile üretilen partikül takviyeli MMK malzemeler, sürtünme ve aşınma dayanımının istendiği alanlarda küçümsenmeyecek oranda endüstriyel uygulama alanına sahiplerdir. Örneğin, Al-Grafit ve Al-SiC MMK pistonlar, yüksek aşınma dayanımı sağlamaları ve yakıt tüketimini azaltmalarından dolayı ön plana çıkmaktadırlar. Bu tür kompozitlerin diğer kullanım şekilleri yatak malzemesi, elektrik kontak malzemesi ve silindir gömleği olabilmektedir (Eker, 2008).

Şen (2008) tarafından kompozit disklerle ilgili yapılan bir başka çalışmada, ısıl gerilmeler üzerine parabolik sıcaklık değişiminin etkisi incelenmiştir. Çözüm, sonlu elemanlar metodu ve sonlu elemanlar metodu ile ANSYS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl gerilmelerin parabolik sıcaklık değişimine bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Altan ve Topçu (2010) yaptıkları çalışmada, alüminyum matrise sahip çelik tellerle takviye edilmiş metal-matris bir kompozit diskin gerilme analizini gerçekleştirmişlerdir. Oluşturmuş oldukları modele lineer sıcaklık dağılımı uygulamışlardır. Çözümde numerik ve analitik olmak üzere iki metod uygulamışlardır. Analitik çalışma için bir program geliştirmişler, bununla birlikte numerik çalışma için Abaqus 6.8 paket

programını kullanmışlardır. Çalışmanın sonucuna göre iki metot uyumlu sonuçlar vermiştir.

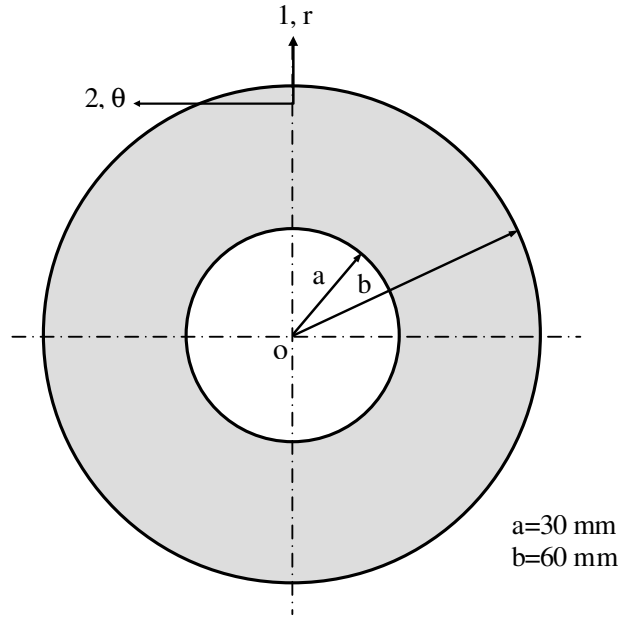
Bu çalışmada, metal-matriksli bir kompozit diskte oluşan gerilmeler analiz edilmiştir. Çalışmada ilk olarak, sadece uniform sıcaklık altında meydana gelen ısı gerilmeler elde edilmiştir. Daha sonra uniform sıcaklık yükü altındaki kompozit diske, bir açısız hız ile dönme verilmiş ve oluşan gerilmeler hesaplanmıştır. Analizlerde, sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır. Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak modelleme ve çözümler üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM III

### 3. MALZEME ve YÖNTEM

#### 3.1. Problemin Tanımı

Bu çalışma için, ortasında dairesel bir delik olan ve Şekil 3.1’de gösterilen iç yarı çapı  $a=30$  mm ve dış yarı çapı  $b=60$  mm olan bir kompozit disk modellenmiştir. Daha önce yapılan benzer çalışmalarda modelleme ve çözümler iki boyutlu olarak yapılmış olmasına rağmen, bu yeni çalışmada kompozit disk üç boyutlu olarak modellenmiştir. Dolayısıyla, kompozit diskin  $t=4$  mm kalınlığında olduğu varsayılmıştır. Böylece, modelleme ve çözümlenme üç boyutlu olarak yapılmıştır.



Şekil 3.1. Kompozit diskin şematik gösterimi

#### 3.2. Problemden Kullanılan Malzeme Özellikleri

Üç boyutlu olarak modellenen metal matris kompozit diskin malzeme özellikleri için literatürden yararlanılmıştır. Bu nedenle, daha önce Çallıoğlu ve arkadaşları (2006) ile Altan ve Topçu (2010) tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Önceki yapılan bu çalışmalardan görüldüğü üzere, tercih edilen kompozit

malzeme, alüminyum matrikse sahiptir ve bu alüminyum matriks çelik tellerle takviye edilmiştir. Metal matris kompozit malzemenin yoğunluğu ise  $\rho=3.4725 \text{ gr/cm}^3$ 'tür (Çallıoğlu ve ark., 2006; Altan ve Topçu, 2010).

Bu çalışmada, metal matrisli çelik tellerle takviye edilmiş kompozit malzeme tercih edilmesinin önemli nedenlerinden birisi de, literatürde yer alan çok farklı çalışmalarda aynı veya benzer şekilde üretildiği ifade edilen ve ayrıca malzeme özellikleri aynı veya birbirine çok yakın değerlerde olan bu yapıdaki kompozit malzemenin çokça kullanılmış ve tercih edilmiş bir malzeme olmasıdır. Çizelge 3.1'de özellikleri verilen ve yukarıda bahsedilen kaynaklardan (Çallıoğlu ve ark., 2006; Altan ve Topçu, 2010) temin edilen alüminyum matrise sahip, çelik tellerle takviye edilmiş yapıdaki kompozit malzemelerin, bazı araştırmacılar tarafından yukarıdaki çalışmalardan çok daha önceden aynı veya benzer yöntemlerle üretilmiştir. Kompozit malzeme özellikleri de üretimi gerçekleştiren araştırmacılar tarafından, uzama telleri kullanılarak yapılan testler ile birbirlerine aynı veya çok yakın değerlerde tespit edilmiştir. Bahsedilen önceki çalışmalar, listelenen kaynaklardan detaylı olarak incelenebilir (Sayman ve Özer, 2001; Sayman, 2003; Sayman, 2004; Sayman, 2005; Ataberk ve ark., 2004; Sayman vd., 2000; Sayman ve Zor, 2000, Sayman ve Ataş 2000; Sayman ve Aykul, 2001; Sayman vd., 2001; Sayman 2001; Sayman ve Aksoy, 2001; Sayman ve Özer 2001; Sayman vd., 2002; Sayman, 2003; Sayman vd., 2003; Sayman vd., 2004).

Sonuç olarak, bu çalışmada, literatüre bakıldığında bu kadar önemli olan ve birçok analizde tercih edilen metal matrisli kompozit malzemenin tercih edilmesi uygun görülmüştür.

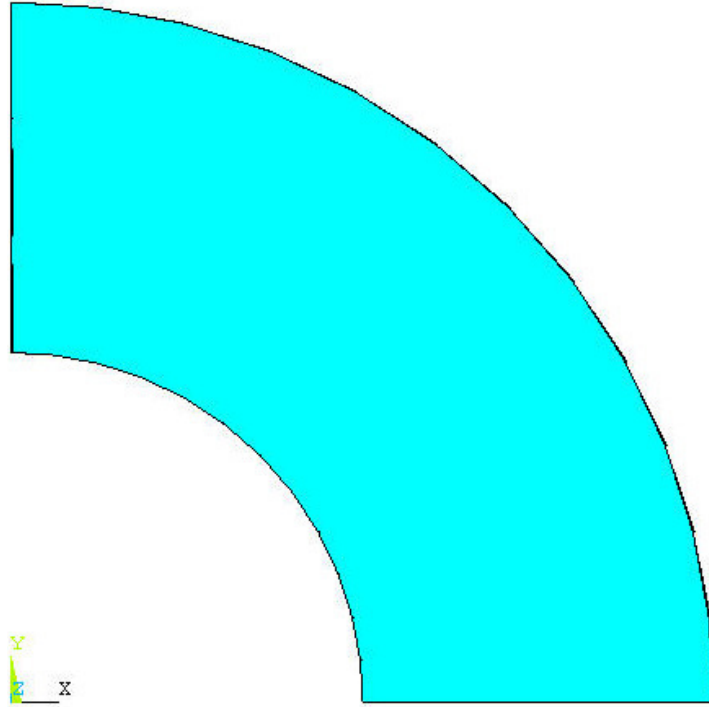
Çizelge 3.1. Kompozit malzemenin özellikleri (Çallıoğlu ve ark., 2006; Altan ve Topcu, 2010)

$E_r$ (MPa)	$E_\theta$ (MPa)	$G_{r\theta}$ (MPa)	$\nu_{r\theta}$	X (MPa)	Y (MPa)	S (MPa)	K (MPa)	$\alpha_r$ (1/°C)	$\alpha_\theta$ (1/°C)
89500	71500	32000	0.28	97	36	48	157	$18,6 \cdot 10^{-6}$	$21,6 \cdot 10^{-6}$

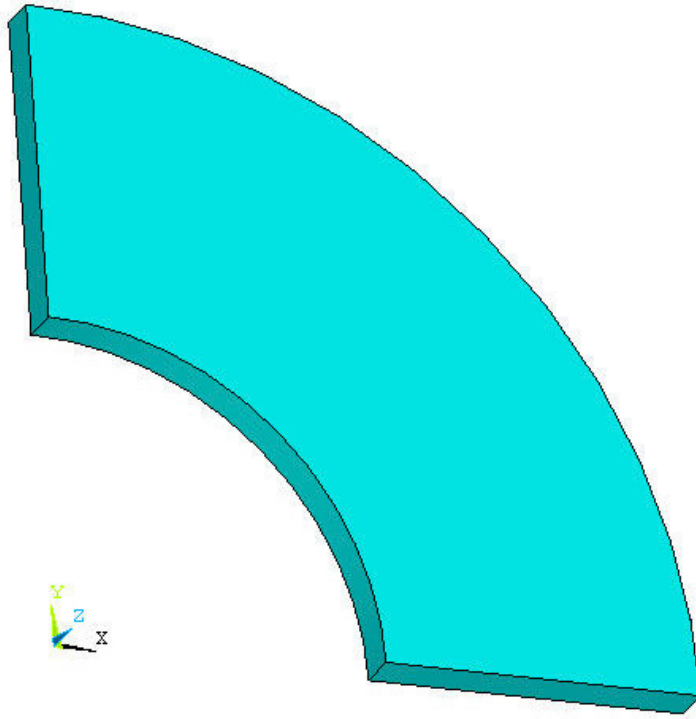
### 3.3. Sonlu Elemanlar Modeli

Çalışmada, son yıllarda birçok farklı alanda ve mühendislik problemlerinin çözümünde tercih edilen sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu nedenle bir sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS paket programından yararlanılmıştır. ANSYS programının tercih edilmesinin nedeni hem bilimsel çalışmalarda hem çeşitli sektörlerde oldukça yaygın olarak tercih ediliyor olmasıdır. Kısacası, bu çalışma için metal matrisli üç boyutlu kompozit diskin hem modellenmesi hemde çözümü ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Modellenen kompozit diskin katı modeli Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Simetri koşullarından dolayı kompozit diskin sadece  $\frac{1}{4}$  kısmı modellenmiştir. Böylece, eleman sayısı ve düğüm noktasının daha az, dolayısıyla da çözüm süresinin kısaltılması ve sonuç dosyalarının boyutlarının küçültülmesi amaçlanmıştır.

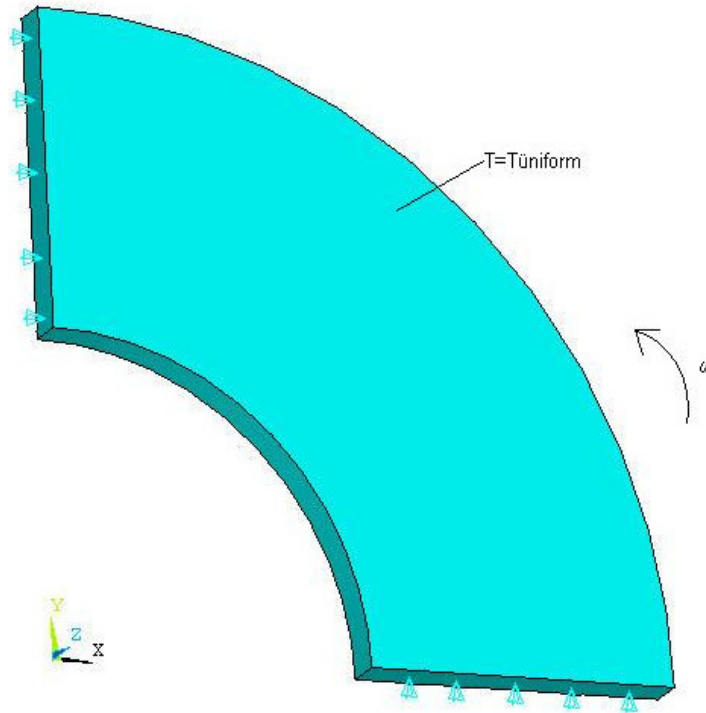


a) Modelin önden görünüşü



b) Modelin üç boyutlu görüntüsü

Şekil 3.2. Kompozit diskin ANSYS ile modellenen katı modeli



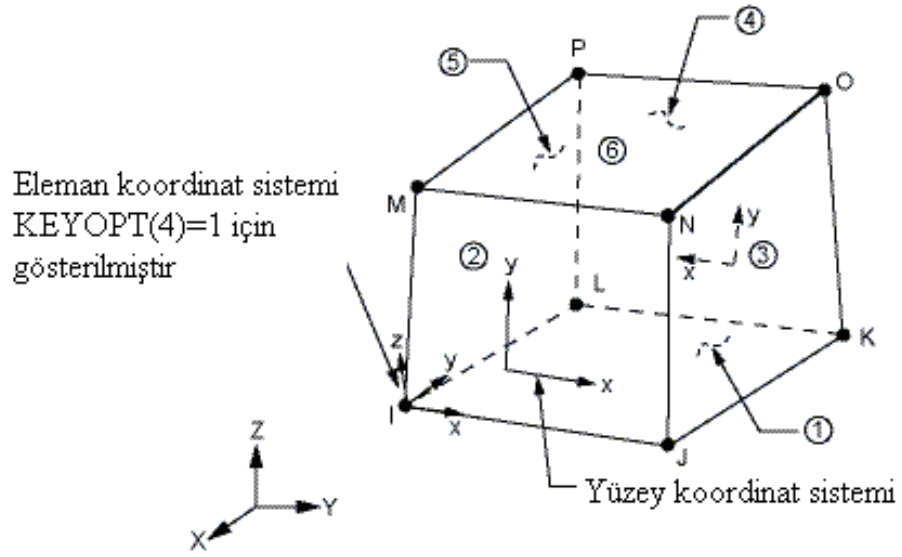
Şekil 3.3. Kompozit disk modeline sınır şartlarının uygulanması



Bu şekilde herhangi bir diskin tamamı yerine bir kısmının modellenerek çözüm yapılabilmesi, sonlu elemanlar metodunun ve dolayısıyla ANSYS programının sağladığı önemli bir avantajdır.

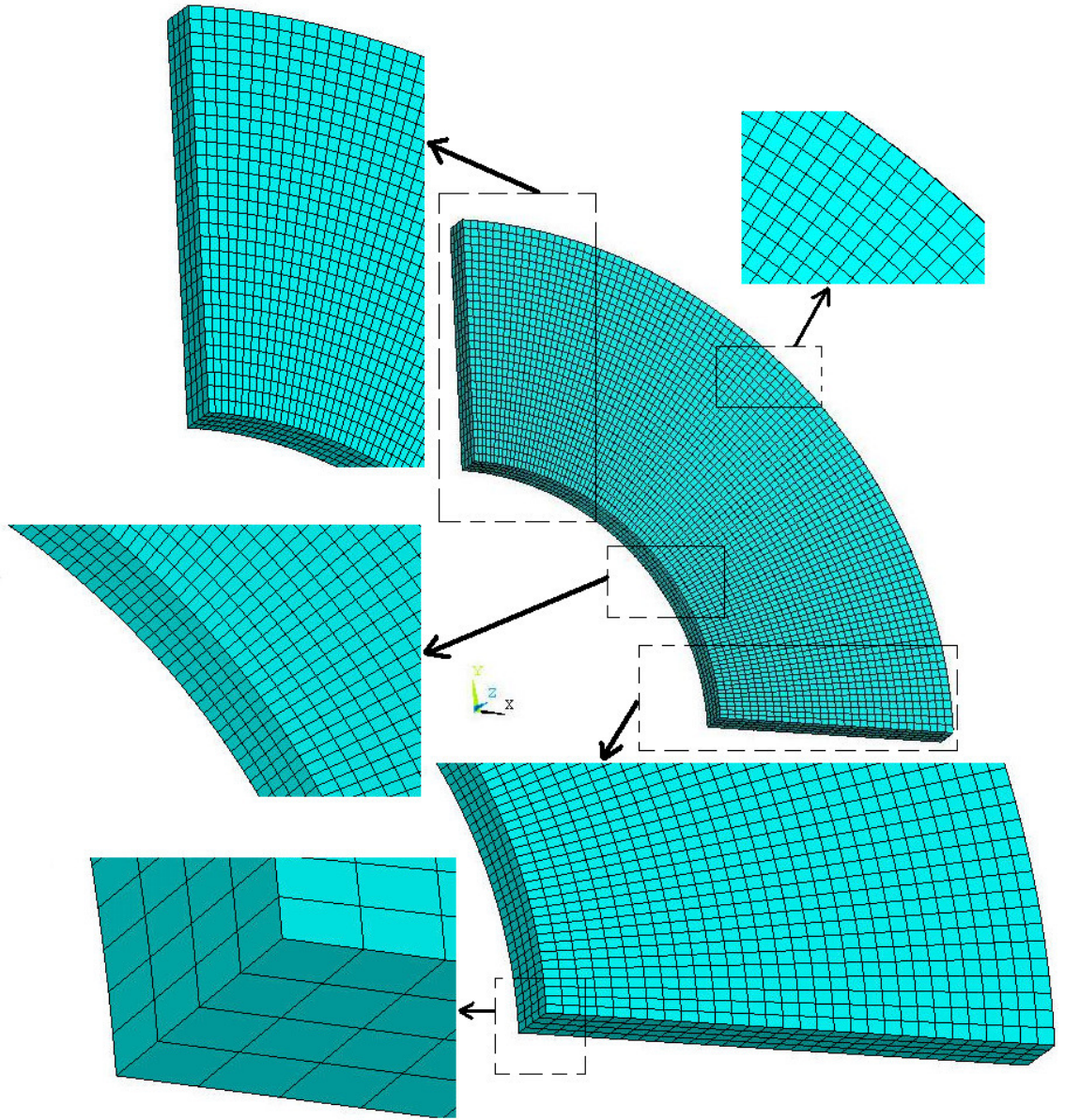
Modelleme işleminin tamamlanmasından sonra oluşturulan katı disk modele uygun sınır şartları model üzerine uygulanmıştır. ANSYS ortamında, kompozit disk modeline sınır şartlarının uygulanması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi diskin ¼'üne uygun olarak yapısal sınır şartları uygulanmıştır. Yapısal sınır şartlarının uygulanmasından sonra çözüm için ısı sınır şartları modele etki ettirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak, sıcaklık etkisinin ısıl gerilmeler üzerine etkisini gözlemlemek için çeşitli değerlerde uniform sıcaklıklar (60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 ve 270 °C) kompozit disk üzerine etki ettirilmiş ve her bir uniform sıcaklık yükü için ısıl gerilme hesaplamaları yapılmıştır. Uniform sıcaklık etkisinin ısıl gerilmelerin oluşumu ve değişimi üzerine etkisi incelendikten sonra, kompozit diskin bir dönme hareketi olduğu varsayılmıştır. Bu amaçla, belirli uniform sıcaklıklar etkisindeki kompozit diske, çeşitli değerlerde (10, 20, 30 ve 40 rad/sn) açısal hızlar ( $\omega$ ) etki ettirilmiştir.

Sonlu elemanlarla çözüm işleminde en önemli aşamalardan biri şüphesiz sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulmasıdır. Bir başka şekilde ifade edilmek istenirse, oluşturulan katı modelin (Şekil 3.3) uygun bir sonlu elemanlara bölünmesi, elde edilecek çözümü doğrudan etkilemektedir. ANSYS programında, sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması aşamasında kullanılmak üzere çeşitli özelliklere sahip elemanlar bulunmaktadır. Bu elemanlar; iki boyutlu çözümler, üç boyutlu çözümler, dönele simetrik çözümler vb. için farklı özelliklerdedir (ANSYS; Moaveni, 2003). Bu elemanların uygulamalarda seçilmesindeki temel farklılık, çözülmek istenen probleme uygulanması gereken sınır şartlarına ve elde edilmek istenen sonuçlara uygun olmasıdır. Bu çalışmada, modellemenin üç boyutlu olmasından dolayı, Şekil 3.4'te görülen SOLID45 eleman tipi kullanılmıştır. Örneğin, bu çalışmada iki boyutlu elemanların kullanılması ve oluşturulan katı model üzerinde (Şekil 3.3) sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması mümkün değildir.



Şekil 3.4. SOLID45 eleman tipi (ANSYS)

Uygun eleman tipinin seçilmesinden sonra, kompozit diskin sonlu elemanlara bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kompozit diskin sonlu elemanlara bölünmüş hali Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu şekilde model üzerindeki bazı kısımlar büyütülmüş olarak da gösterilmiştir. Şeklin bu şekilde detaylandırılması ile disk üzerinde oluşturulan sonlu elemanlar ağ yapısının daha iyi görülebilmesi ve anlaşılabilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.5. Kompozit diskin sonlu elemanlara bölünmüş hali

Şekil 3.5'ten açıkça görüldüğü üzere dörtgen elemanlardan oluşan düzgün bir ağ yapısı elde edilmiştir. Burada açıkça ifade etmek gerekirse, diskin dairesel yapısı ve iç kısmında oluşturulan deliğin dairesel yapısı nedeniyle düzgün dörtgen elemanlardan oluşan düzgün bir ağ yapısı elde etmek oldukça güçtür. Fakat bu çalışmada, ANSYS programının sağladığı bazı özel avantajlarla, bu şekilde düzgün bir ağ yapısının elde edilmesi mümkün olmuştur. Kompozit disk modelin sonlu elemanlara bölme işlemi sonucunda,  $\frac{1}{4}$  kompozit disk modeli üzerinde, 11400 eleman ve 14480 düğüm noktası elde edilmiştir. Bu eleman ve düğüm noktası sayıları Şekil 3.5'te oluşturulan ağ yapısı için elde edilmiştir.

## BÖLÜM IV

### 4. BULGULAR

#### 4.1. Giriş

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, bu çalışmada çözümler sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, modellemeler ve analizler bir sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışma, genel olarak değerlendirilecek olursa, üç aşamada tamamlanmıştır. İlk olarak farklı eleman ve düğüm sayılarına sahip üç boyutlu kompozit disk modeller oluşturulmuş ve farklı ağ yapısının gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir. Böylece, ilk aşamada değişen ağ yapısının uniform sıcaklık yükü altındaki dönen kompozit diskte meydana gelen gerilmeler üzerine etkisi araştırılmıştır. Oluşturulan modeller ve analizler ile çalışmanın diğer aşamaları için en uygun ağ yapısına sahip kompozit disk modelin belirlenmesi bu aşamada yapılan çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, ilk aşamadaki çalışmaların sonucu değerlendirilerek tercih edilen üç boyutlu kompozit disk modeli kullanılmak suretiyle, uygulanan farklı değerlerdeki uniform sıcaklıklar etkisiyle oluşan ısıl gerilmeler hesaplanmıştır. Bu aşamada, uygulanan uniform sıcaklık değişiminin, kompozit disk modeli üzerindeki ısıl gerilmelerin değerleri ve dağılımları üzerine etkisi incelenmiştir. Üçüncü aşamada ise uniform sıcaklıklar altındaki kompozit disk modeline, çeşitli değerlerde açısız hızlar verilmiştir. Böylece hem uniform sıcaklık ve hemde dönme şartlarının birlikte uygulanması ile analizler gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2. Uygun Ağ Yapısının Seçimi

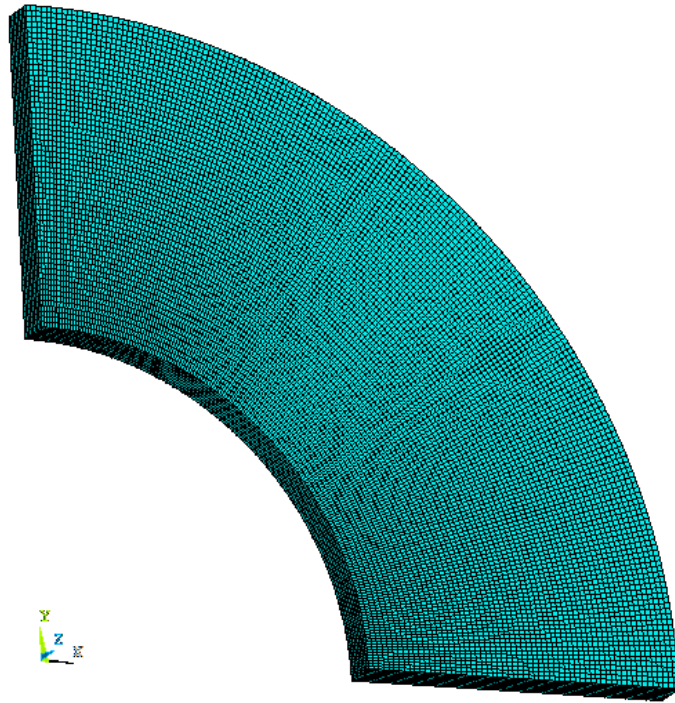
Çalışmanın ik aşamasında, yukarıda belirtildiği gibi, aşağıda Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterildiği üzere;

- Birinci Model (0.5’lik ağ yapısı),
- İkinci Model (1’lik ağ yapısı),
- Üçüncü Model (1.5’luk ağ yapısı),

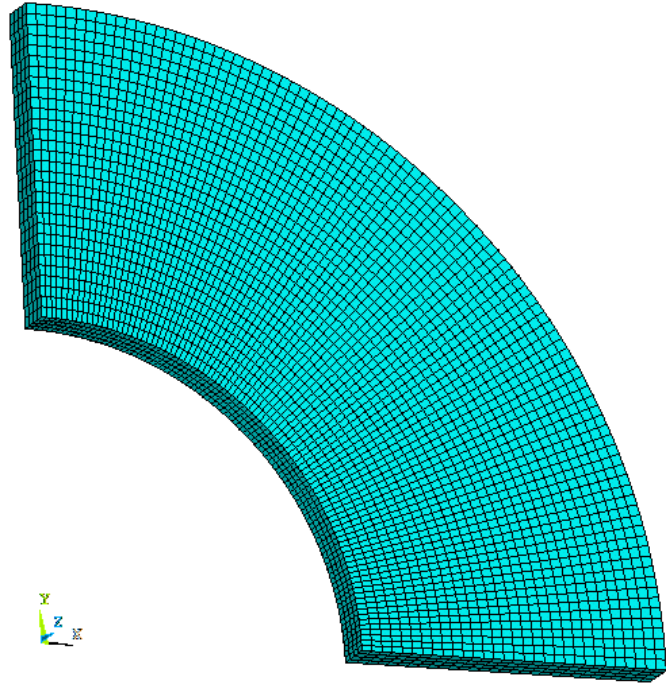
- Dördüncü Model (2'lik ağ yapısı),
- Beşinci Model (2.5'lik ağ yapısı), olmak üzere beş farklı ağ yapısına sahip üç boyutlu kompozit disk modelleri oluşturulmuştur.

Farklı eleman ve düğüm noktası sayısına sahip olarak oluşturulan her bir kompozit disk modeline, sırasıyla  $\Delta t=100$  °C ve  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükleri ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız uygulanmıştır. Uygulanan uniform sıcaklık yüklemeleri ve açısal hız altında her bir modelde meydana gelen,  $\sigma_r$  (radyal yöndeki gerilme),  $\sigma_\theta$  (teğetsel yöndeki gerilme) ve  $\tau_{r\theta}$  (kayma gerilmesi) minimum ve maksimum değerleri ve dağılımları hesaplanmıştır.

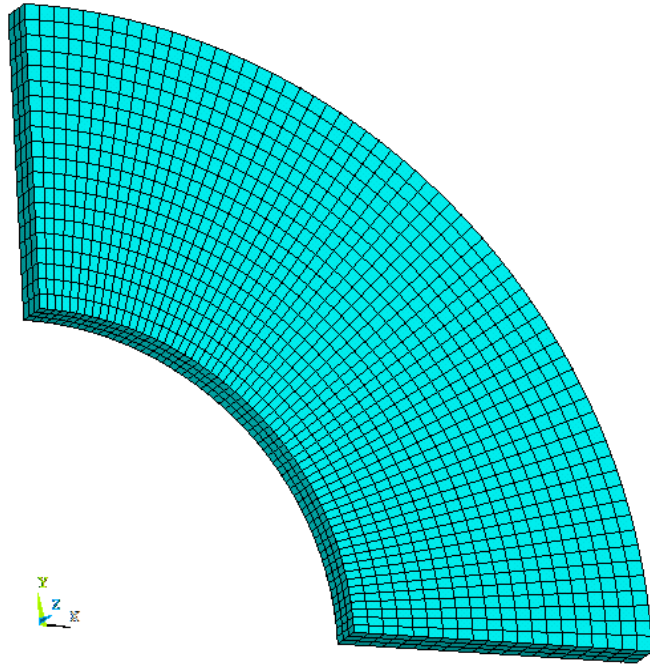
Aşağıda detayları verilen bu ön araştırma sonucunda, uniform sıcaklık yükü altındaki kompozit diskte meydana gelen gerilmelerin, farklı ağ yapıları kullanılması durumundaki farklılıklarının dikkate alınmayacak düzeyde düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, çalışmanın ikinci ve üçüncü çalışmalarında *Model 2*'nin (Şekil 4.2) kullanılmasına karar verilmiştir.



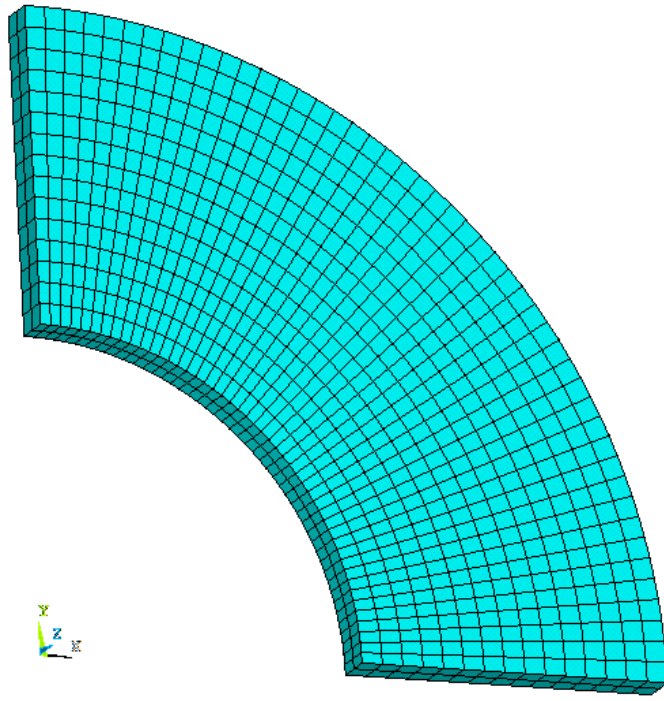
Şekil 4.1. 0.5'lik ağ yapısına sahip birinci model



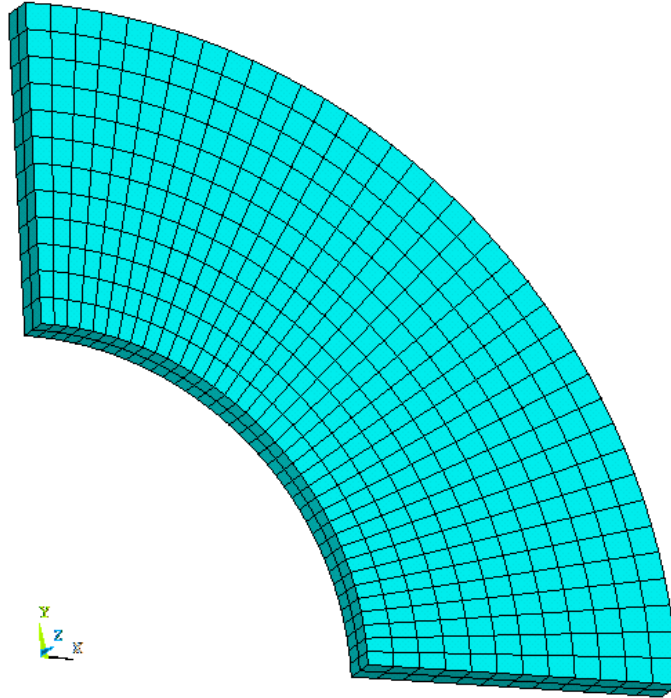
Şekil 4.2. 1'lik ağ yapısına sahip ikinci model



Şekil 4.3. 1.5'luk ağ yapısına sahip üçüncü model

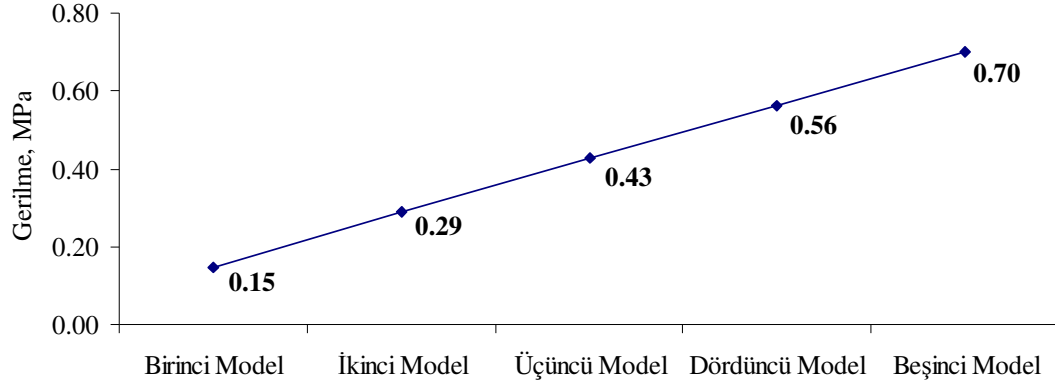


Şekil 4.4. 2'lik ağ yapısına sahip dördüncü model

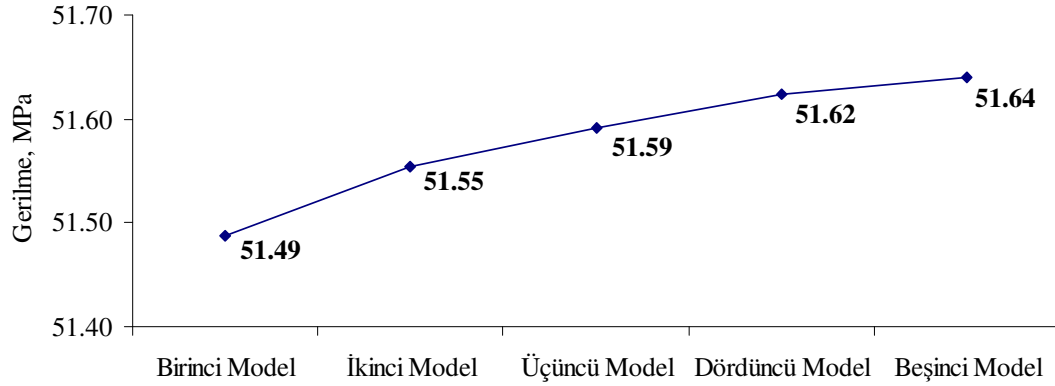


Şekil 4.5. 2.5'luk ağ yapısına sahip beşinci model

Şekil 4.6-a'dan,  $\Delta t=100$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında, beş farklı ağ yapısına sahip kompozit disk modelin radyal yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) minimum değerlerinde en fazla  $0.55$   $N/mm^2$ 'lik bir fark olduğu görülmektedir. Şekil 4.6-b'den görüldüğü üzere,  $\Delta t=100$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) maksimum değerlerinde en fazla  $0.15$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır.



a) Minimum değerler

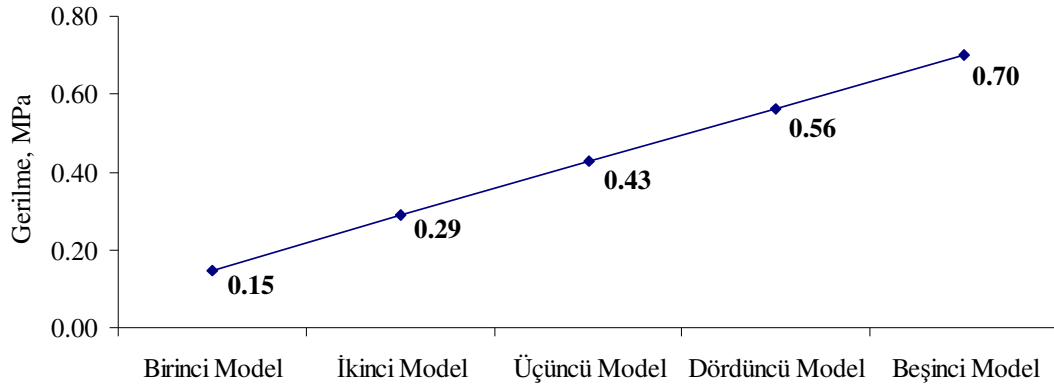


b) Maksimum değerler

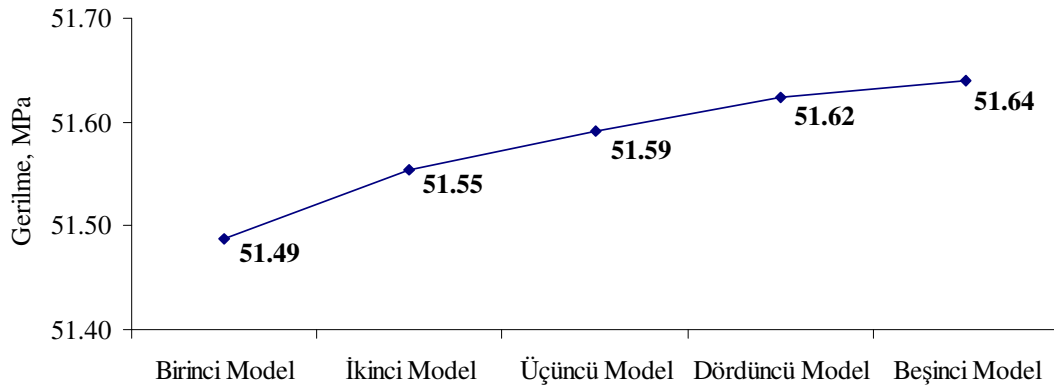
Şekil 4.6.  $\Delta t=100$  °C ve  $\omega=20$  rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) karşılaştırılması



Şekil 4.7-a'da  $\Delta t=100$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısız hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki gerilmelerinin ( $\sigma_\theta$ ) minimum değerlerinde en fazla  $0.55$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır. Şekil 4.7-b'de  $\Delta t=100$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısız hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki gerilmelerinin ( $\sigma_\theta$ ) maksimum değerleri arasında en fazla  $0.15$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır.



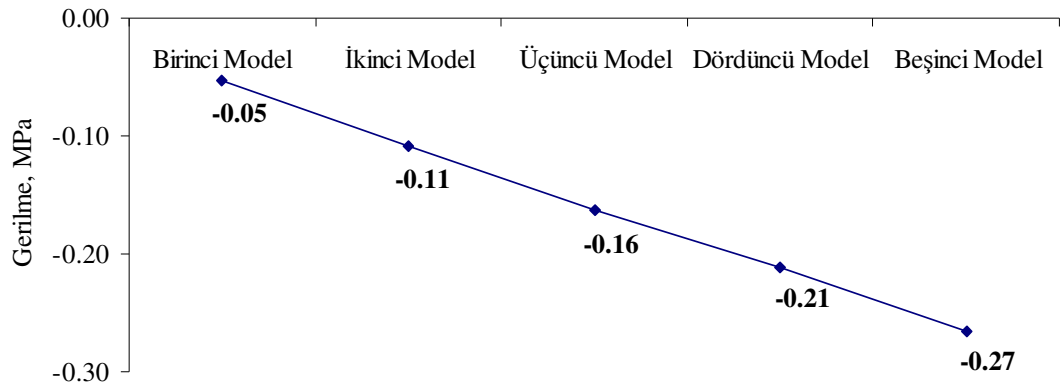
a) Minimum değerler



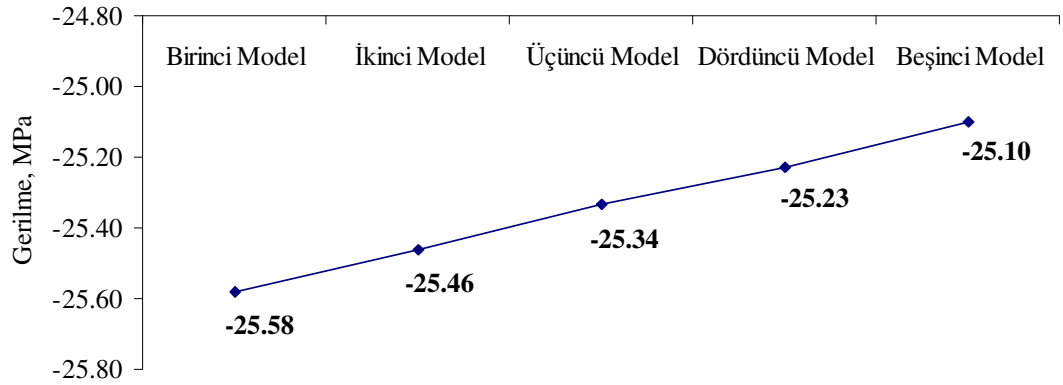
b) Maksimum değerler

Şekil 4.7.  $\Delta t=100$  °C ve  $\omega=20$  rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_\theta$ ) karşılaştırılması

Şekil 4.8-a'dan görüldüğü üzere,  $\Delta t=100$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) minimum değerlerinde en fazla  $0.22$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır. Şekil 4.8-b'den ise  $\Delta t=100$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) maksimum değerlerinde en fazla  $0.48$   $N/mm^2$ 'lik bir fark olduğu görülmektedir. Şekil 4.8'de dikkat edilmesi gereken husus, kayma gerilmelerinin önündeki eksi işaretinin, disk üzerinde hesaplanan kayma gerilmelerinin formlarının basma gerilmesi şeklinde olduğunu göstermesidir. Bir başka ifadeyle, a ve b şekillerinde gerilmelerin eksi değerlikleri değil, mutlak değerleri kadar basma gerilmeleri meydana geldiği anlaşılmalıdır.



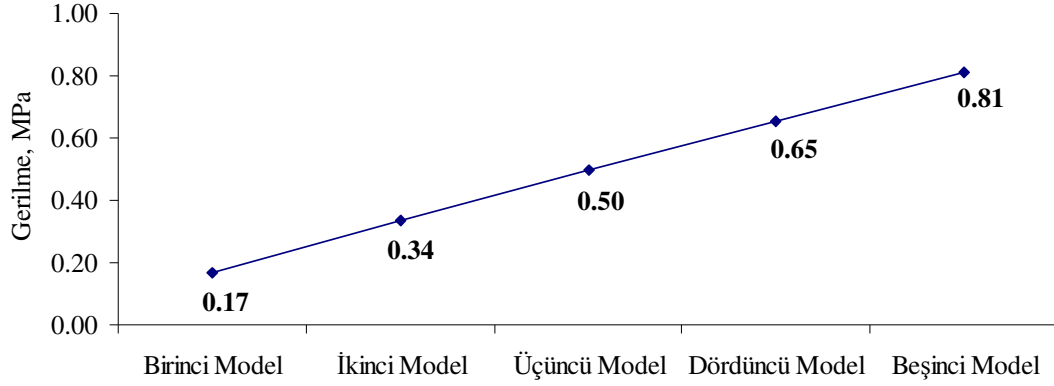
a) Minimum değerler



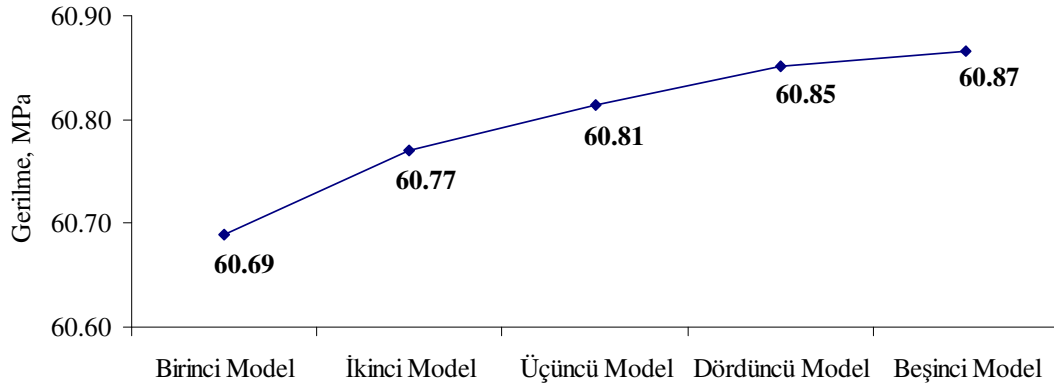
b) Maksimum değerler

Şekil 4.8.  $\Delta t=100$  °C ve  $\omega=20$  rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) karşılaştırılması

Şekil 4.9-a'dan görüldüğü üzere,  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) minimum değerleri arasında, en fazla  $0.64$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır. Şekil 4.9-b'den ise  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) maksimum değerlerinde en fazla  $0.18$   $N/mm^2$ 'lik bir fark olduğu değerlendirilmektedir.



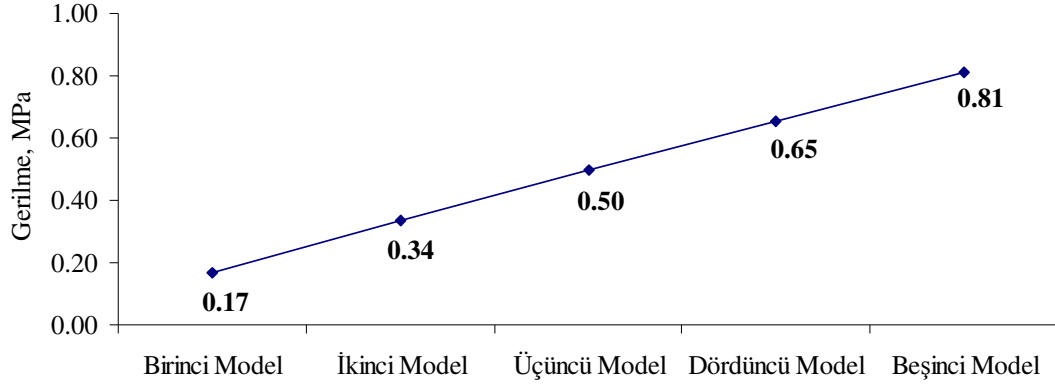
a) Minimum değerler



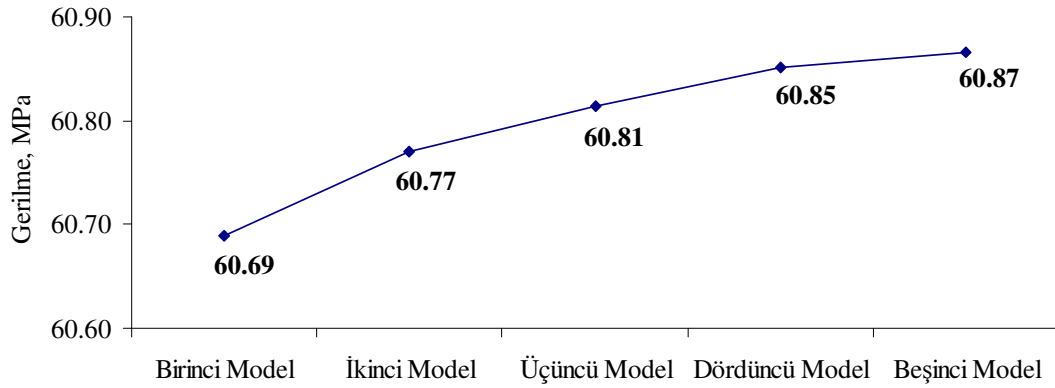
b) Maksimum değerler

Şekil 4.9.  $\Delta t=200$  °C ve  $\omega=20$  rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin radyal yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_r$ ) karşılaştırılması

Şekil 4.10-a'da  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki gerilmelerinin ( $\sigma_\theta$ ) minimum değerlerinde en fazla  $0.64$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır. Şekil 4.10-b'de ise  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki gerilmelerinin ( $\sigma_\theta$ ) maksimum değerlerinde en fazla  $0.18$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır.



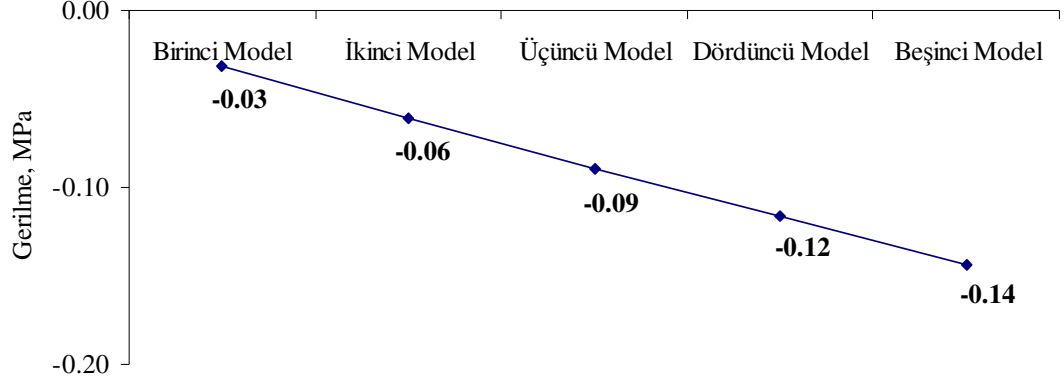
a) Minimum değerler



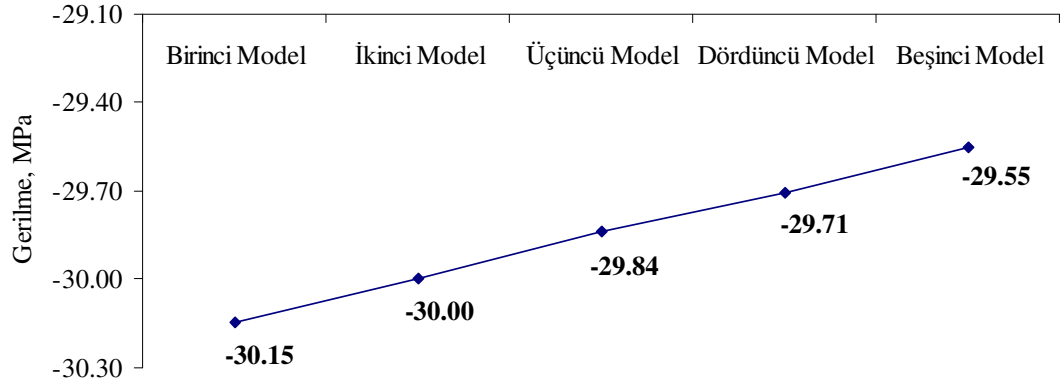
b) Maksimum değerler

Şekil 4.10.  $\Delta t=200$  °C ve  $\omega=20$  rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin teğetsel yöndeki normal gerilmelerinin ( $\sigma_\theta$ ) karşılaştırılması

Şekil 4.11-a'da  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) minimum değerlerinde en fazla  $0.11$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır. Şekil 4.11-b'de  $\Delta t=200$  °C uniform sıcaklık yükü ve  $\omega=20$  rad/sn açısal hız altında beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) maksimum değerlerinde en fazla  $0.6$   $N/mm^2$ 'lik bir fark bulunmaktadır.



a) Minimum değerler



b) Maksimum değerler

Şekil 4.11.  $\Delta t=200$  °C ve  $\omega=20$  rad/sn için beş farklı ağ yapısına sahip modelin kayma gerilmelerinin ( $\tau_{r\theta}$ ) karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen, beş farklı modelin sahip olduğu eleman sayısı ve düğüm noktası sayıları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü gibi, en fazla düğüm noktası ve eleman sayısı birinci modelde olur iken, en az düğüm noktası ve eleman sayısı beşinci model üzerinde meydana gelmiştir.

Çizelge 4.1. Beş farklı kompozit disk modelin eleman ve düğüm noktası sayıları

	<b>Düğüm Noktası Sayısı</b>	<b>Eleman Sayısı</b>
<b>Birinci Model</b>	104.310	90.720
<b>İkinci Model</b>	14.880	11.400
<b>Üçüncü Model</b>	5.376	3.780
<b>Dördüncü Model</b>	2.352	1.440
<b>Beşinci Model</b>	1.521	912

### **4.3. Farklı Üniform Sıcaklıklar Altındaki Kompozit Diskin Isıl Gerilme Analizi**

Çalışmanın ikinci aşamasında, Bölüm 4.2’de tercih edilen üç boyutlu “Model 2” kullanılmak suretiyle kompozit diskın ısıl gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık yükü olarak 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 ve 270 °C uniform sıcaklıklar, üç boyutlu disk modeli üzerine sırasıyla uygulanmıştır. Uygulanan uniform sıcaklıklar nedeniyle kompozit disk modeli üzerinde meydana gelen ısıl gerilmeler ve ısıl şekil değiştirmeler tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2’de, uygulanan uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler listelenmiştir. Kompozit diskın iç ve dış yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin basma ve çekme şeklinde değişiklikler gösterdiği gözlenmiştir. Bu nedenle bu çizelgede, analizlerden elde edilen değerler listelenirken, gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin, iç yüzey ve dış yüzey değerlerinin verilmesi uygun görülmüştür.

Bu çizelgeden görüldüğü gibi diskın iç yüzeyinde meydana gelen normal gerilmelerin çekme formunda, diskın dış yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin ise bası formunda

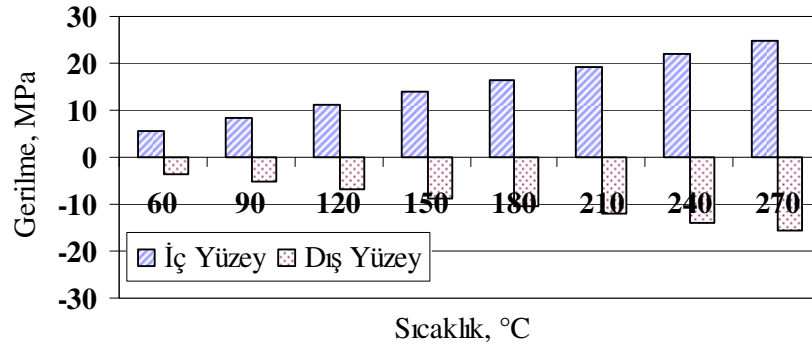
olduğu anlaşılmıştır. Bu durum hem teğetsel hemde radyal yönler için geçerlidir. Mutlak değer olarak, bası gerilmelerinin değerleri, çekme gerilmelerinden daha düşük olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.2'den çıkarılacak önemli sonuçlardan bir diğeri, gerilme değerlerinin uygulanan üniform sıcaklık artışına bağlı olarak artış gösterdiğiidir. Bu nedenle her üç doğrultu için en düşük ısıl gerilmeler 60 °C üniform sıcaklık yükü için hesaplanırken en yüksek ısıl gerilmeler 270 °C üniform sıcaklık yükü için hesaplanmıştır. Sonuç olarak, 270 °C üniform sıcaklık yükü için çekme ve basma şeklindeki en yüksek ısıl gerilme değerleri sırasıyla 24.89 MPa ve -15.66 MPa olarak hesaplanmıştır.

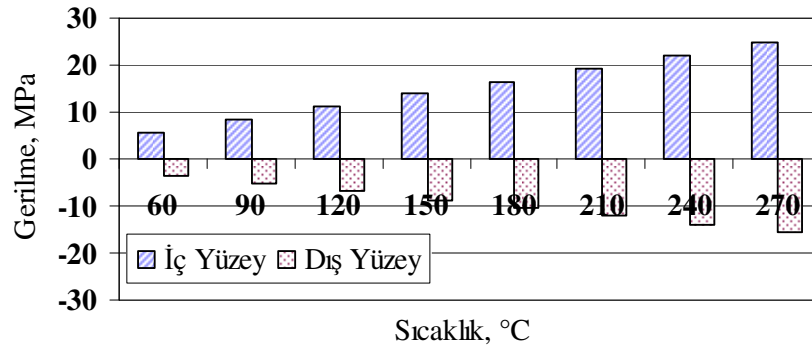
Çizelge 4.2. Üniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ )

Sıcaklık (°C)	Yüzey	Normal Gerilmeler (MPa)		
		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$
60	İç	5.53	5.53	0.02300
	Dış	-3.48	-3.48	0.00179
90	İç	8.295	8.30	0.03400
	Dış	-5.22	-5.22	0.00269
120	İç	11.06	11.06	0.04600
	Dış	-6.96	-6.96	0.00358
150	İç	13.83	13.83	0.05700
	Dış	-8.70	-8.70	0.00448
180	İç	16.59	16.59	0.06900
	Dış	-10.44	-10.44	0.00538
210	İç	19.36	19.36	0.08000
	Dış	-12.18	-12.18	0.00627
240	İç	22.12	22.12	0.09200
	Dış	-13.92	-13.92	0.00717
270	İç	24.89	24.89	0.10300
	Dış	-15.66	-15.66	0.00807

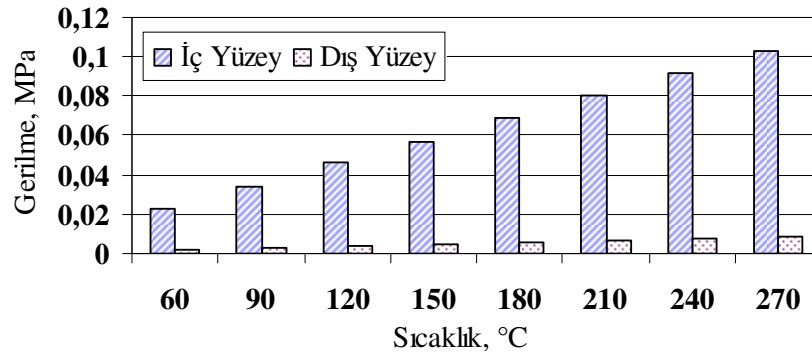
Uygulanan uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler; radyal yöndeki ( $\sigma_r$ ), teğetsel yöndeki ( $\sigma_\theta$ ) ve z yönünde ( $\sigma_z$ ) olmak üzere Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Çizelge 4.2’deki normal gerilme değerlerinin, grafiksel gösteriminde, uniform sıcaklık yükündeki artışa bağlı olarak, ısıl gerilmelerde meydana gelen artış açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, z-yönünde hesaplanan gerilmelerin değerlerinin radyal ve teğetsel gerilmelerden çok daha küçük hatta ihmal edilebilecek değerlerde olduğu görülmektedir.



a) Radyal yöndeki normal gerilme ( $\sigma_r$ )



b) Teğetsel yöndeki normal gerilme ( $\sigma_\theta$ )



b) z yönündeki normal gerilme ( $\sigma_z$ )

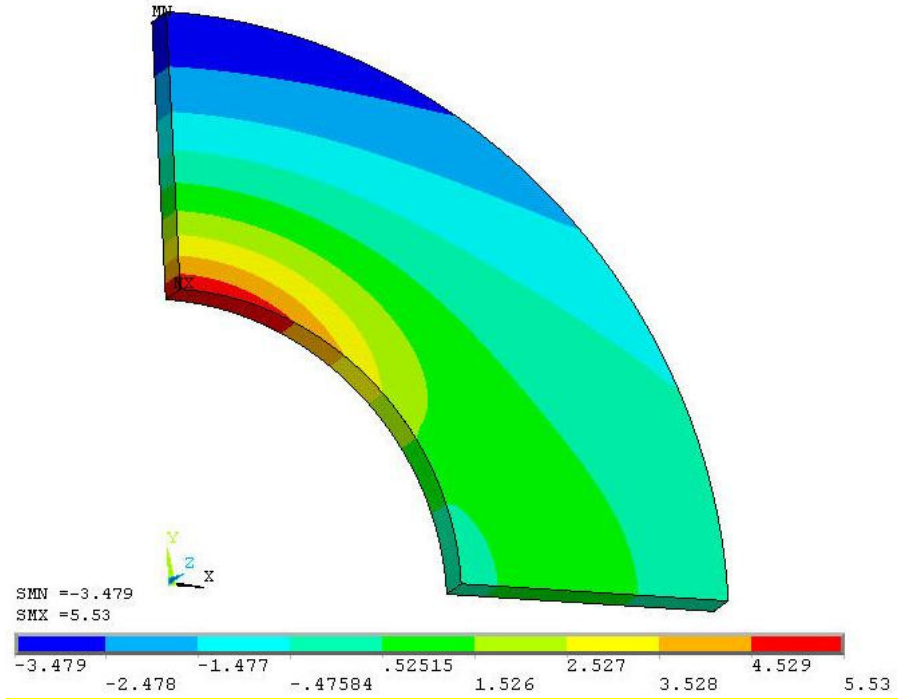
Şekil 4.12. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak uygulanan normal gerilmeler



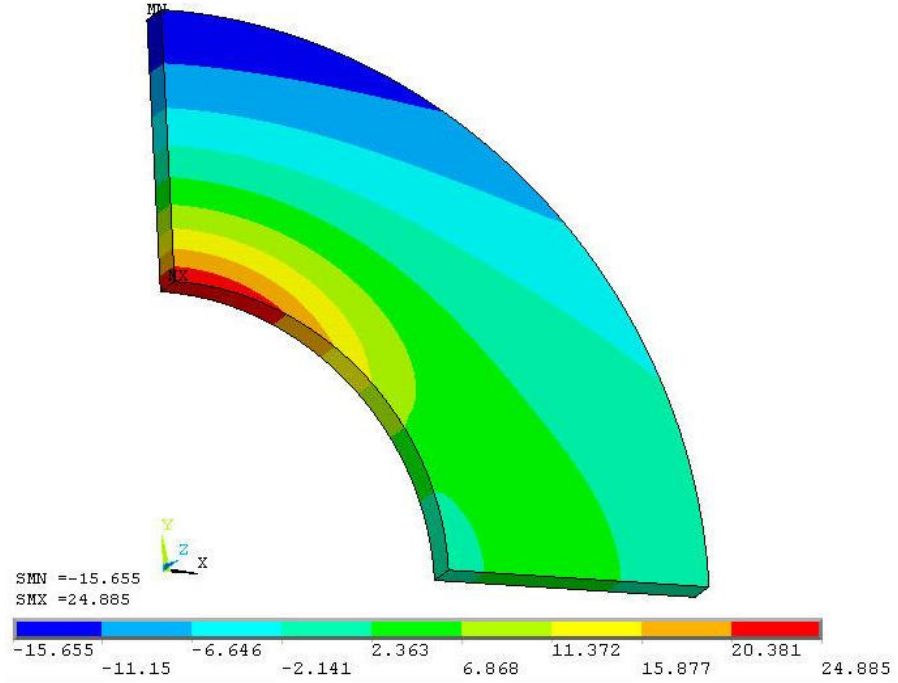
ANSYS sonlu elemanlar yazılımının önemli avantajlarından biri de analizler neticesinde elde edilen gerilmelerin model üzerinde eş gerilme eğrileri veya konturları ile gösterilebilmesidir. ANSYS yazılımının sağladığı bu imkan vasıtasıyla, ısı normal gerilmeler (Şekil 4.13-4.15), ısı kayma gerilmeleri (Şekil 4.16-4.18) ve ısı elastik şekil değiştirmelere (Şekil 4.19-4.21) örnek olarak bazı sonuçlar verilmiştir. Bu şekillerde tüm analiz sonuçlarının verilmesi yerine, uygulanan en düşük uniform sıcaklık yükü olan 60 °C ve uygulanan en yüksek uniform sıcaklık yükü 270 °C için elde edilen dağılımlar verilmiştir. Tüm bu şekillerden, 60 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilen normal gerilmelerin, kayma gerilmelerinin ve elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin 270 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilen değerlerden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 karşılaştırıldığında, uygulanan her bir üniform sıcaklık yükü için radyal ve teğetsel doğrultular için elde edilen ısı gerilmelerin maksimum değerlerinin aynı olduğu, fakat disk üzerindeki gerilme dağılımlarının tamamen farklı olduğu görülmektedir. Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 karşılaştırıldığında ise z-yönündeki ısı normal gerilmelerin, radyal ve teğetsel doğrultulardaki ısı gerilmelerden çok daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca, z-yönü için hesaplanan gerilmelerin dağılımlarının, diğer yönlerden oldukça farklı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ile kompozit disk üzerinde elde edilen kayma gerilmelerinin dağılımları gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi ve şekiller karşılaştırıldığında,  $\tau_{r\theta}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin (Şekil 4.16),  $\tau_{rz}$  (Şekil 4.17) ve  $\tau_{\theta z}$  (Şekil 4.16) kayma gerilmelerinin değerlerinden çok daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Hatta,  $\tau_{rz}$  ve  $\tau_{\theta z}$  kayma gerilmesi değerleri,  $\tau_{r\theta}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin yanında ihmal edilebilecek büyüklükte dirler. Tüm şekiller incelendiğinde en yüksek basma ve çekme formundaki kayma gerilmelerinin değerlerinin sırasıyla  $\tau_{r\theta}=-12.24$  MPa ve  $\tau_{r\theta}=7.89$  MPa olduğu ve 270 °C uniform sıcaklık yükü için hesaplandığı görülmektedir. Benzer şekilde, 60 °C uniform sıcaklık yükü için  $\tau_{r\theta}=-2.72$  MPa ve  $\tau_{r\theta}=1.75$  MPa olarak hesaplanmıştır. Bu durum, üniform sıcaklık yükü artışının, disk üzerindeki kayma gerilmelerinin değerlerinin, önemli oranda artışına neden olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

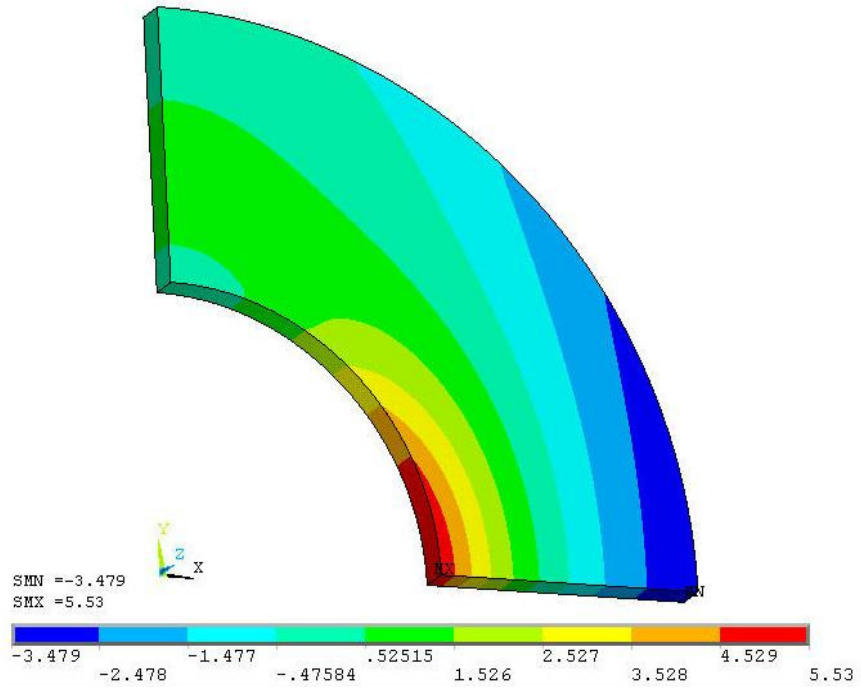


a) 60 °C

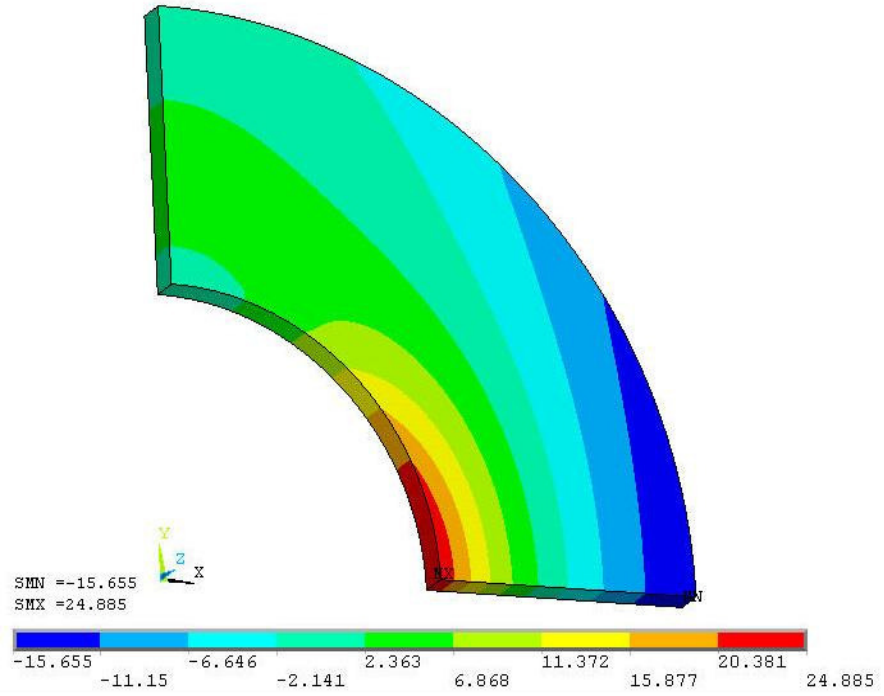


b) 270 °C

Şekil 4.13. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ )

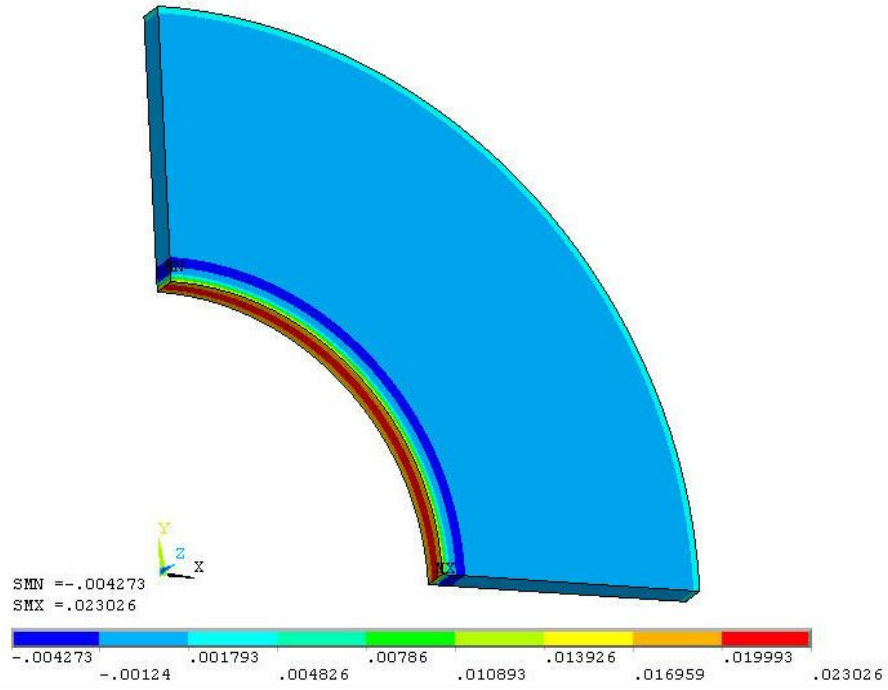


a) 60 °C

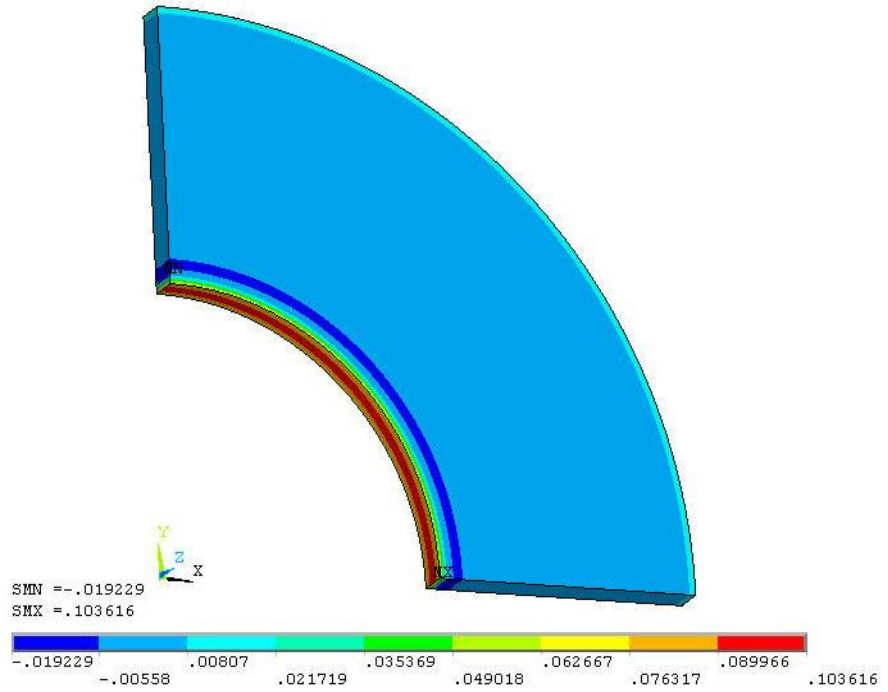


b) 270 °C

Şekil 4.14. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan teğetsel gerilmeler ( $\sigma_\theta$ )

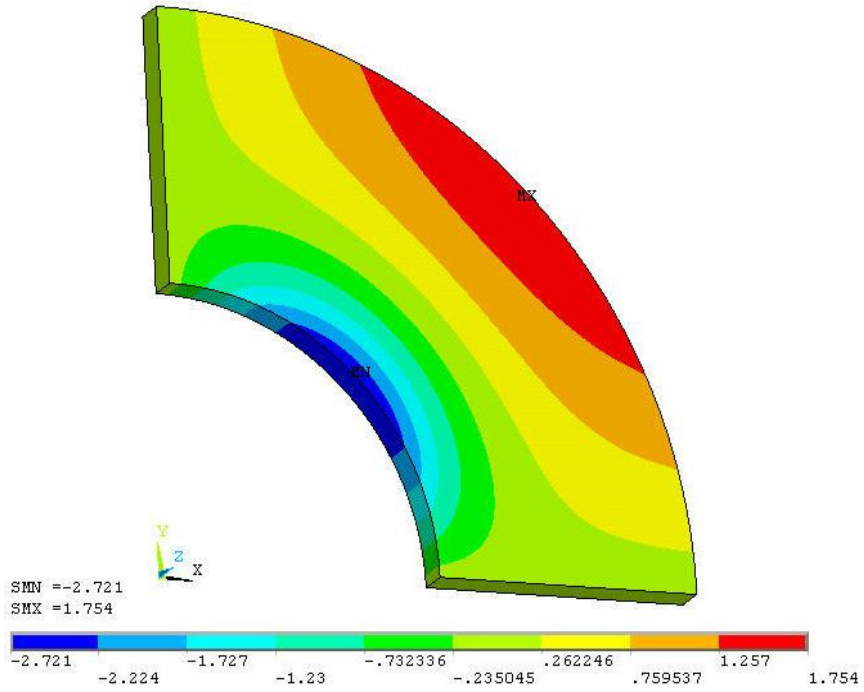


a) 60 °C

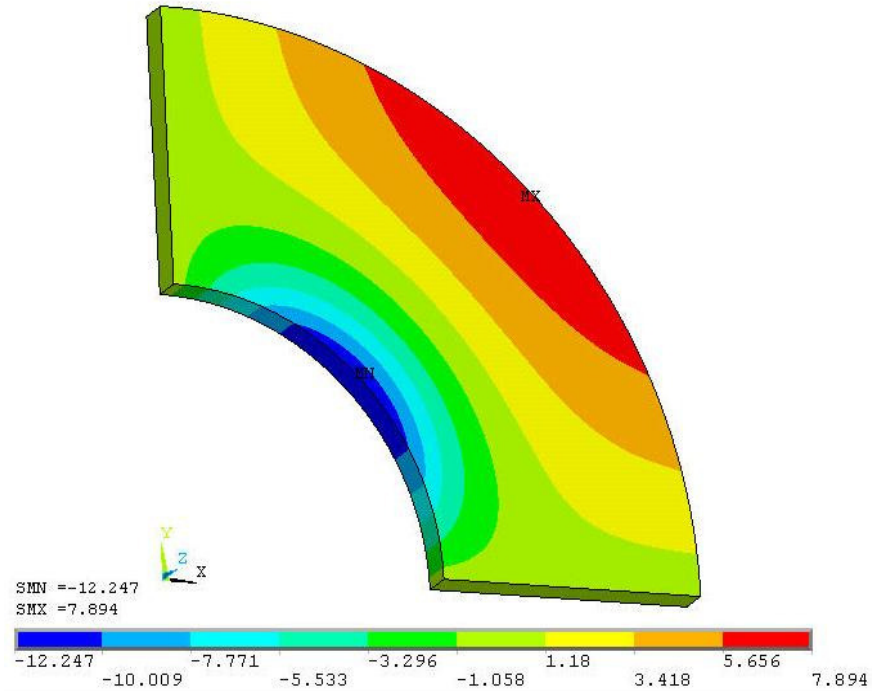


b) 270 °C

Şekil 4.15. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan z yönündeki gerilmeler ( $\sigma_z$ )

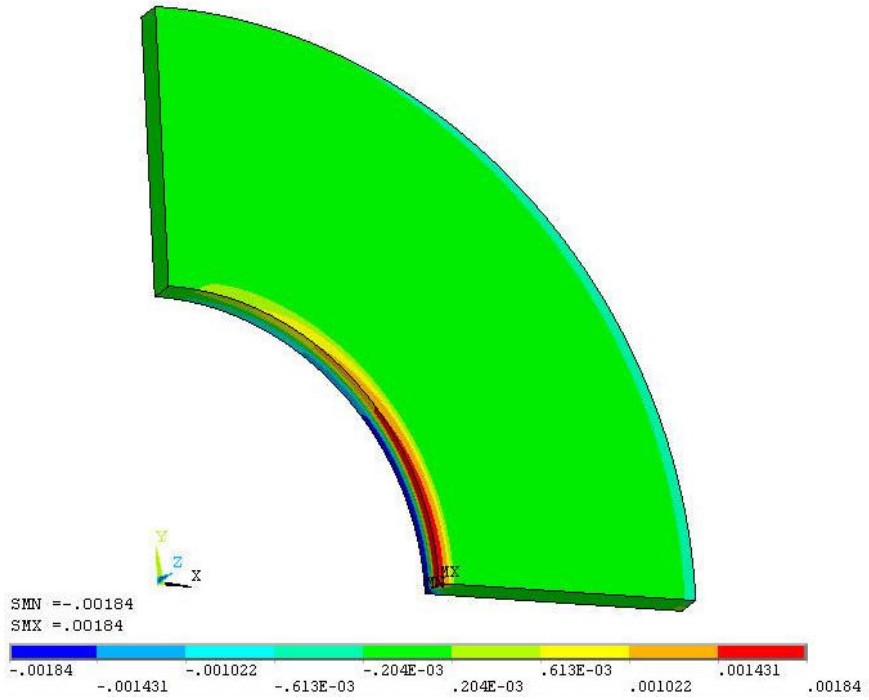


a) 60 °C

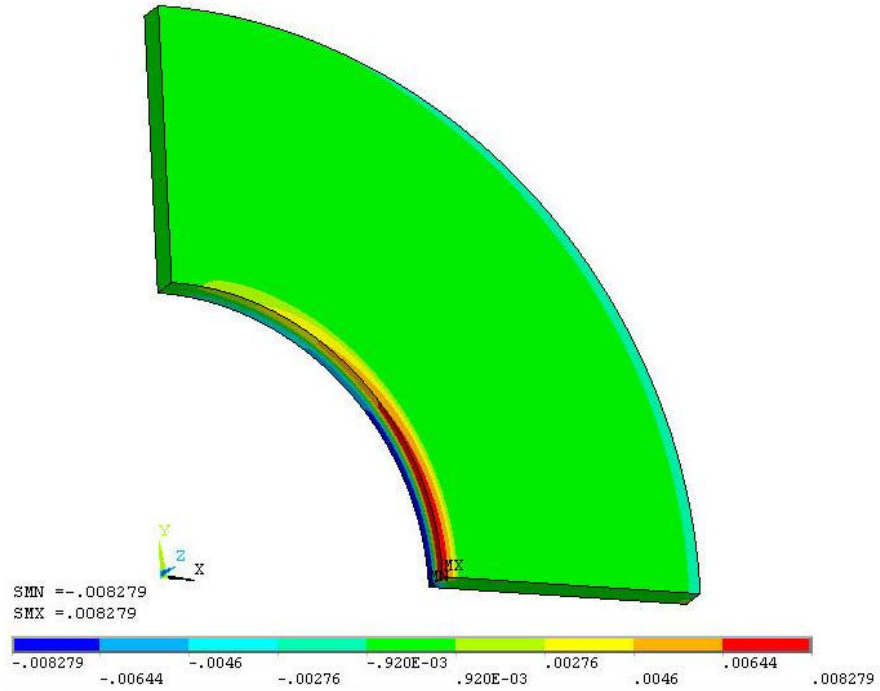


b) 270 °C

Şekil 4.16. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{r\theta}$ )

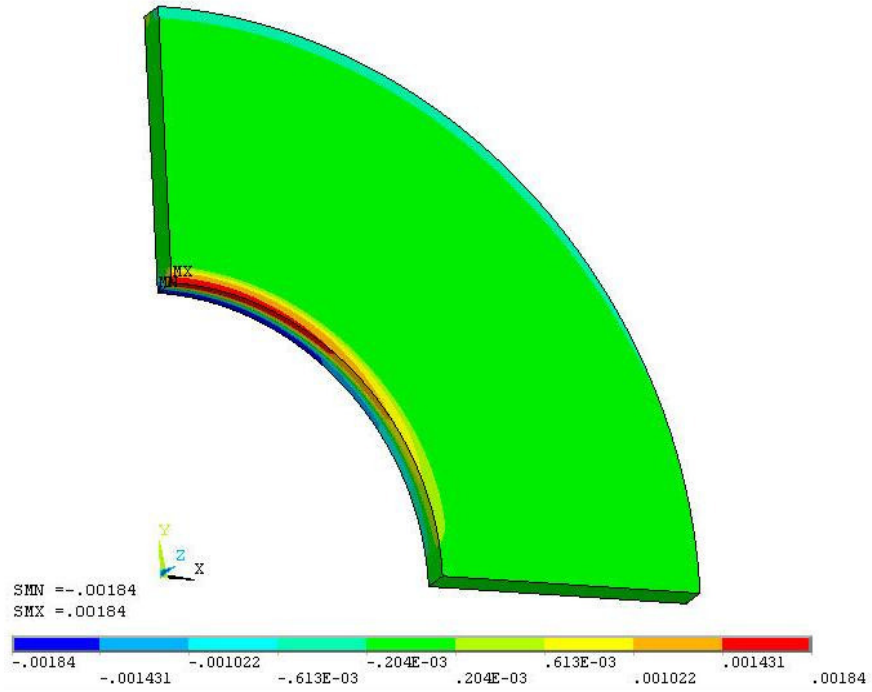


a) 60 °C

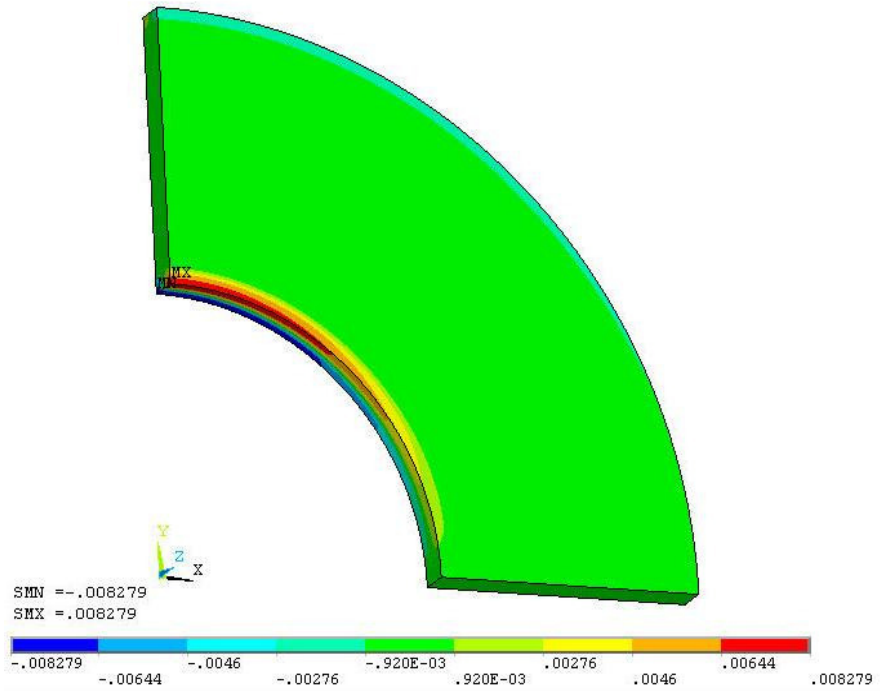


b) 270 °C

Şekil 4.17. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{rz}$ )



a) 60 °C

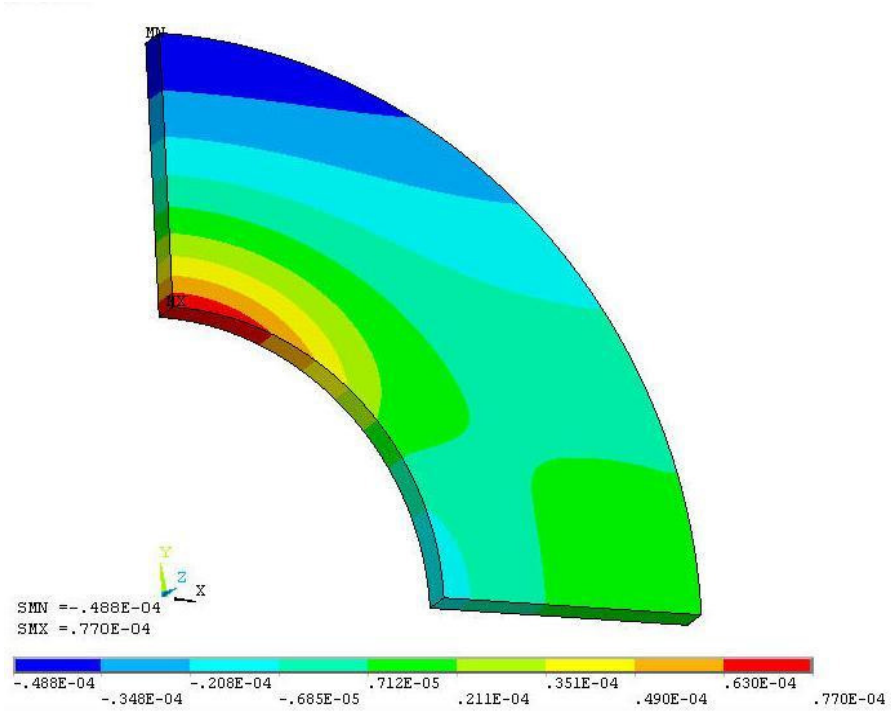


b) 270 °C

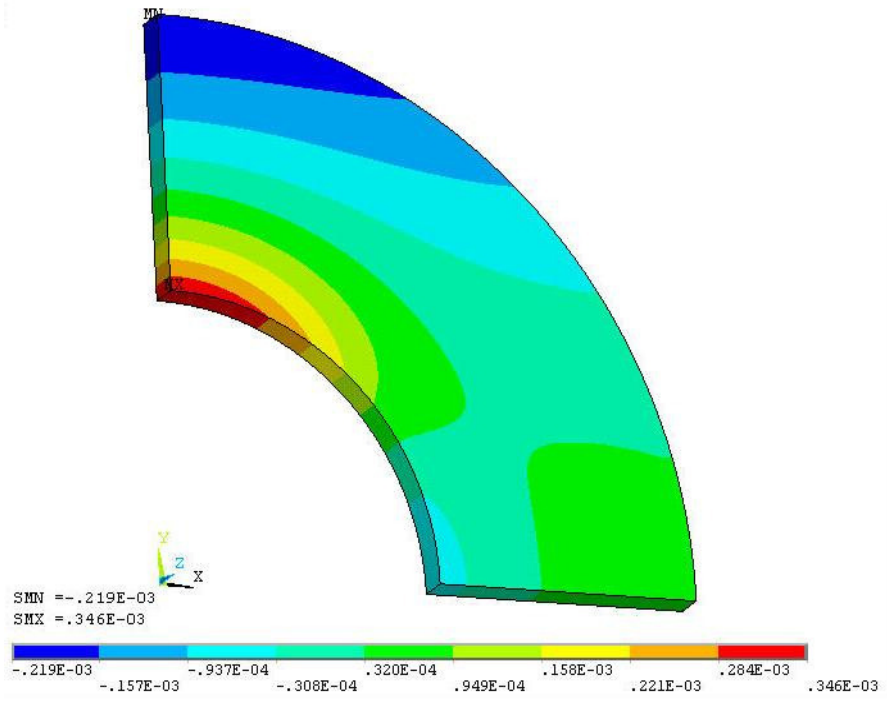
Şekil 4.18. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan kayma gerilmesi ( $\tau_{0z}$ )

Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de, 60 °C ve 270 °C uniform sıcaklıklar uygulandığında kompozit disk üzerinde meydana gelen elastik şekil değiştirmelerin dağılımları gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi z-yönünde meydana gelen elastik şekil değiştirmelerinin değerlerinin (Şekil 4.21), radyal ve teğetsel yönlerde elde edilen elastik şekil değiştirmelerin değerlerinden (Şekil 4.19) ve (Şekil 4.20) daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi üniform sıcaklık yükü artışıının, disk üzerindeki elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin, önemli oranda artışına neden olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü 60 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilen elastik şekil değiştirmelerin değerleri, 270 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilen elastik şekil değiştirmelerin değerlerinden daha küçük değerlidir.



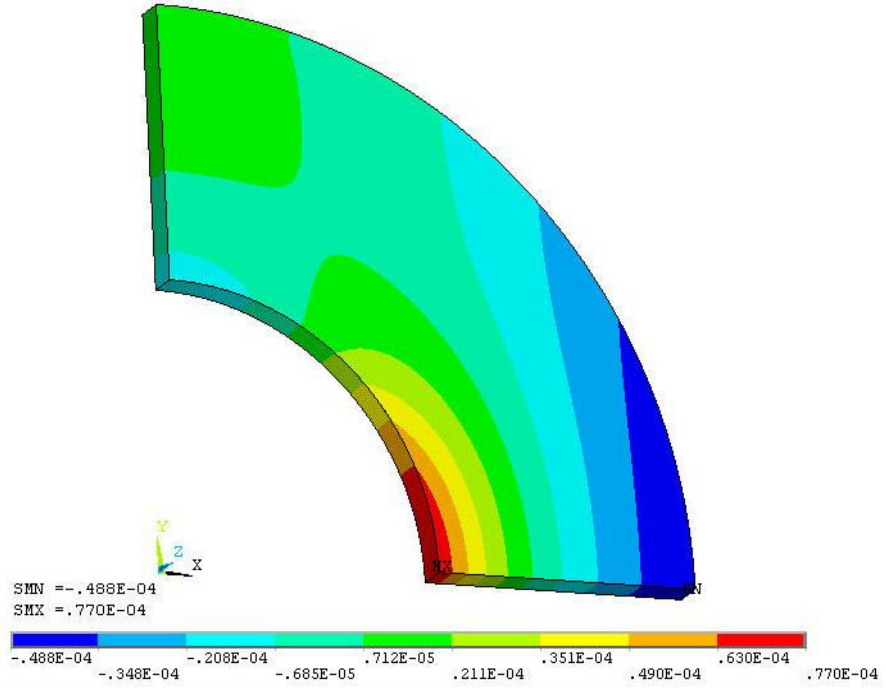


a) 60 °C

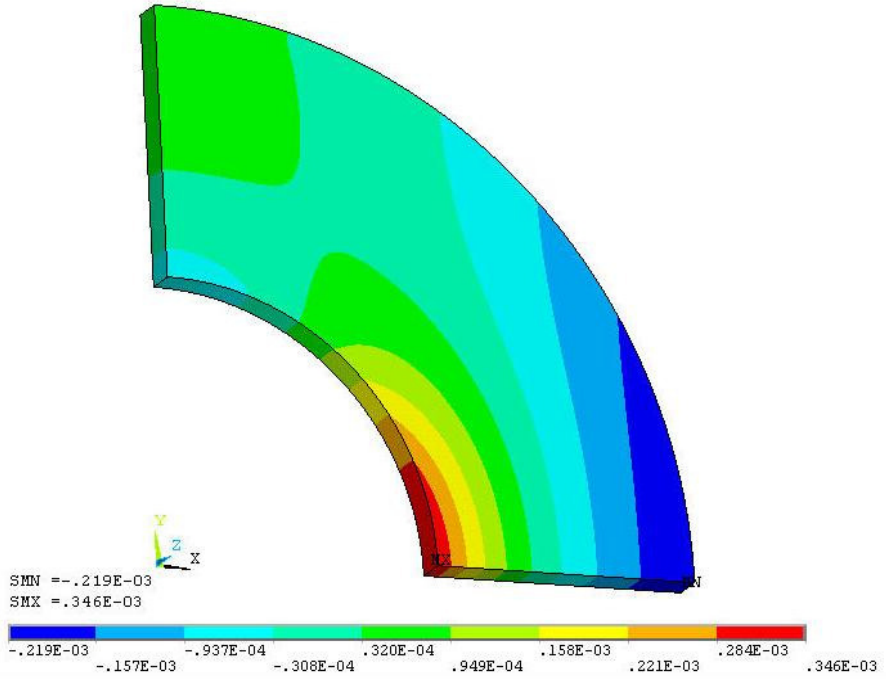


b) 270 °C

Şekil 4.19. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan elastik şekil değişirme ( $\epsilon_r$ )

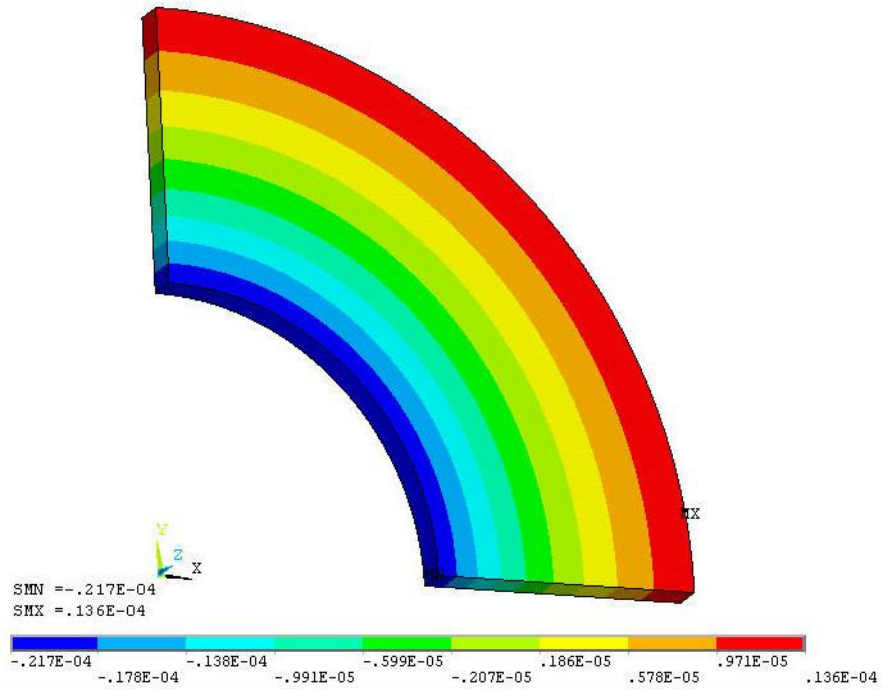


a) 60 °C

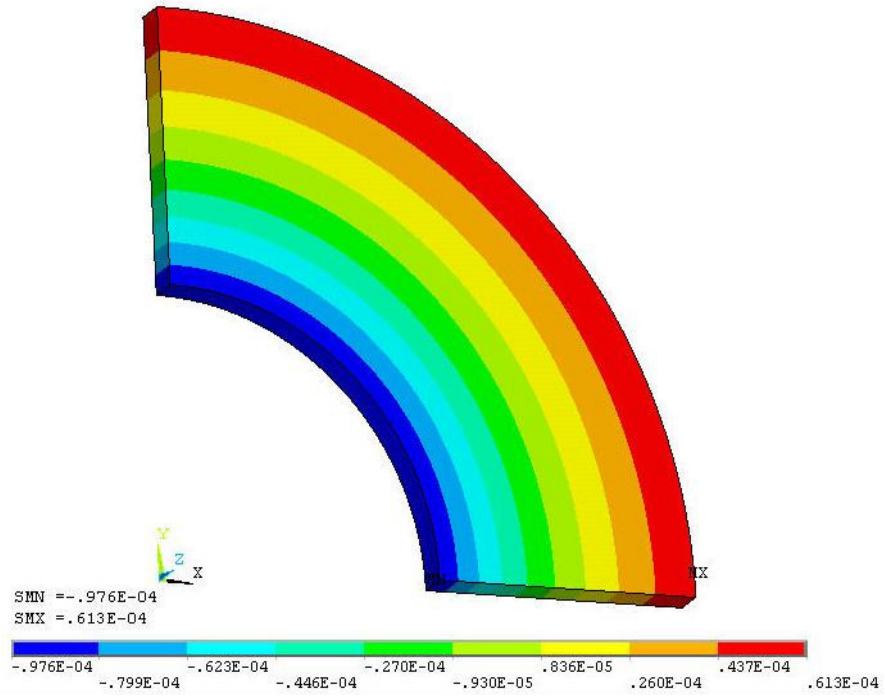


b) 270 °C

Şekil 4.20. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan elastik şekil değıştirme ( $\epsilon_0$ )



a) 60 °C



b) 270 °C

Şekil 4.21. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile oluşan elastik şekil değişirme ( $\epsilon_z$ )

#### 4.4. Sıcaklık Etkisindeki Dönen Diskteki Gerilmelerin Analizi

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında, Bölüm 4.2’de tercih edilen üç boyutlu “Model 2” kullanılarak uniform sıcaklık yükü altındaki kompozit diske farklı dönme hızlarında gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Dönme hızları olarak sırasıyla 10, 20, 30, 40 rad/sn açısal hızları, üç boyutlu kompozit disk modeli üzerine sırasıyla uygulanmıştır. Böylece dönen kompozit diske aynı anda uniform sıcaklık yükü etki ettirilmiştir.

Çizelge 4.3’te, uniform sıcaklıklara bağlı olarak 10 rad/sn olarak uygulanan dönme hızında hesaplanan normal gerilmeler listelenmiştir. Kompozit diskin iç ve dış yüzeyinde oluşan gerilmelerin basma ve çekme olarak değişiklikler gözlenmiştir. Bu nedenle, çizelgede analizlerden alınan değerler listelenirken, gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin, iç yüzey ve dış yüzey değerlerinin verilmesi uygun görülmüştür.

Çizelge 4.3. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 10 rad/sn dönme hızında hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ )

Sıcaklık (°C)	Açısal Hız (rad/sn)	Yüzey	Normal Gerilmeler (MPa)		
			$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$
60	10	İç	16.114	16.114	0.050
		Dış	0.089	0.089	0.004
90	10	İç	18.879	18.879	0.062
		Dış	-0.395	-0.395	0.005
120	10	İç	21.644	21.644	0.073
		Dış	-2.135	-2.135	0.006
150	10	İç	24.409	24.409	0.085
		Dış	-3.874	-3.874	0.007
180	10	İç	27.174	27.174	0.096
		Dış	-5.613	-5.613	0.008
210	10	İç	29.939	29.939	0.108
		Dış	-7.353	-7.353	0.009
240	10	İç	32.704	32.704	0.119
		Dış	-9.092	-9.092	0.009
270	10	İç	35.470	35.470	0.131
		Dış	-10.832	-10.832	0.010

Çizelge 4.4'te, uniform sıcaklıklara bağlı olarak 20 rad/sn olarak uygulanan dönme hızında hesaplanan normal gerilmeler listelenmiştir. Bu çizelgeden de uniform sıcaklık artışına bağlı olarak gerilmelerde meydana gelen artış açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.4, Çizelge 4.3 ile karşılaştırıldığında, Çizelge 4.3'te kompozit diskin dış yüzeyinde basma gerilmeleri meydana geldiği görülmüştü. Fakat, Çizelge 4.4'te ise kompozit diskin hem iç yüzeyinde hemde dış yüzeyinde gerilmelerin çekme formunda olduğu anlaşılmaktadır. Mutlak değer olarak dikkate alındığında, Çizelge 4.4'te dış yüzey için hesaplanan gerilmelerin değerlerinin, Çizelge 4.3'te dış yüzey için hesaplanan gerilmelerden genel olarak daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Fakat, Çizelge 4.4'te iç yüzey için hesaplanan gerilmelerin değerleri, Çizelge 4.3'te iç yüzey için hesaplanan gerilmelerin değerlerinden oldukça yüksek değerlerdedir.

Çizelge 4.4. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 20 rad/sn dönme hızına bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ )

Sıcaklık (°C)	Açısal Hız (rad/sn)	Yüzey	Normal Gerilmeler (MPa)		
			$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$
60	20	İç	47.867	47.867	0.131
		Dış	0.270	0.270	0.011
90	20	İç	50.632	50.632	0.142
		Dış	0.284	0.284	0.012
120	20	İç	53.397	53.397	0.154
		Dış	0.298	0.298	0.013
150	20	İç	56.162	56.162	0.165
		Dış	0.312	0.312	0.014
180	20	İç	58.927	58.927	0.177
		Dış	0.326	0.326	0.014
210	20	İç	61.692	61.692	0.189
		Dış	0.341	0.341	0.015
240	20	İç	64.457	64.457	0.200
		Dış	0.354	0.354	0.016
270	20	İç	67.222	67.222	0.212
		Dış	0.368	0.368	0.017

Çizelge 4.5'te, uniform sıcaklıklara bağlı olarak 30 rad/sn olarak uygulanan dönme hızında hesaplanan normal gerilmeler listelenmiştir. Daha önceki çizelgelerde görülen, uygulanan uniform sıcaklık artışına bağlı olarak gerilmelerde meydana gelen artış bu çizelgede de açıkça görülmektedir. Diğer çizelgelere benzer şekilde bu çizelgede de iç yüzeyde çok yüksek değerli gerilmeler meydana gelirken, dış yüzeyde oldukça düşük değerli gerilmeler meydana gelmiştir. Ayrıca, kompozit diskin hem iç yüzeyi için hem de dış yüzeyi için hesaplanan gerilmelerin çekme formunda olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.5. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 30 rad/sn dönme hızına bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ )

Sıcaklık (°C)	Açısal Hız (rad/sn)	Yüzey	Normal Gerilmeler (MPa)		
			$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$
60	30	İç	100.788	100.788	0.266
		Dış	0.573	0.573	0.022
90	30	İç	103.553	103.553	0.278
		Dış	0.587	0.587	0.023
120	30	İç	106.318	106.318	0.289
		Dış	0.601	0.601	0.024
150	30	İç	109.083	109.083	0.301
		Dış	0.615	0.615	0.025
180	30	İç	111.848	111.848	0.312
		Dış	0.629	0.629	0.026
210	30	İç	114.613	114.613	0.324
		Dış	0.643	0.643	0.027
240	30	İç	117.378	117.378	0.335
		Dış	0.657	0.657	0.028
270	30	İç	120.143	120.143	0.347
		Dış	0.671	0.671	0.029

Çizelge 4.6'da, uygulanan uniform sıcaklıklara bağlı olarak, 40 rad/sn olarak uygulanan dönme hızında hesaplanan normal gerilmeler listelenmiştir. Bu çizelgede de artan dönme hızına bağlı olarak gerilmelerdeki artışın devam ettiği görülmektedir. Ayrıca, kompozit diskin dış yüzeyinde bu artışın çok daha büyük miktarlarda olduğu

görülmektedir. Bunun yanında, iç yüzeydeki gerilmeler dış yüzeydeki gerilmeler ile kıyaslandığında oldukça düşük değerlerde kalmıştır.

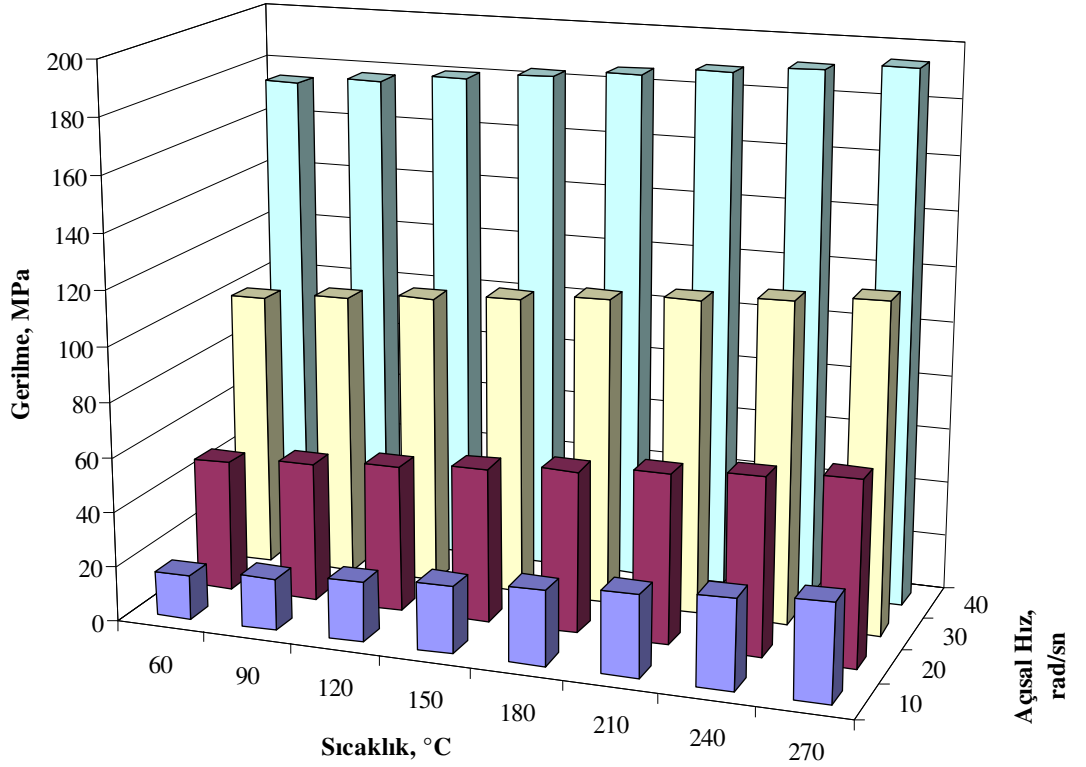
Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 birlikte değerlendirildiğinde, uniform sıcaklık artışına bağlı olarak gerilmelerdeki artış yanında, uygulanan açısal hız artışına bağlı olarak ta gerilmelerde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bir başka ifadeyle, daha hızlı dönme yapan üç boyutlu kompozit bir diskte meydana gelen gerilmelerin değeri, daha düşük hızla dönme yapan aynı diskteki gerilmelerden daha yüksektir. Dolayısıyla, dönme hızı dikkate alındığında, en yüksek değerli gerilmeler 40 rad/sn dönme hızı uygulandığında meydana gelirken, en düşük gerilmeler ise 10 rad/sn dönme hızı uygulandığında oluşmaktadır.

Çizelge 4.6. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak 40 rad/sn dönme hızına bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ )

Sıcaklık (°C)	Açısal Hız (rad/sn)	Yüzey	Normal Gerilmeler (MPa)		
			$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_z$
60	40	İç	174.877	174.877	0.456
		Dış	0.998	0.998	0.038
90	40	İç	177.642	177.642	0.467
		Dış	1.012	1.012	0.039
120	40	İç	180.407	180.407	0.479
		Dış	1.026	1.026	0.040
150	40	İç	183.172	183.172	0.490
		Dış	1.040	1.040	0.041
180	40	İç	185.937	185.937	0.502
		Dış	1.054	1.054	0.042
210	40	İç	188.702	188.702	0.513
		Dış	1.068	1.068	0.043
240	40	İç	191.467	191.467	0.525
		Dış	1.082	1.082	0.044
270	40	İç	194.232	194.232	0.537
		Dış	1.096	1.096	0.044

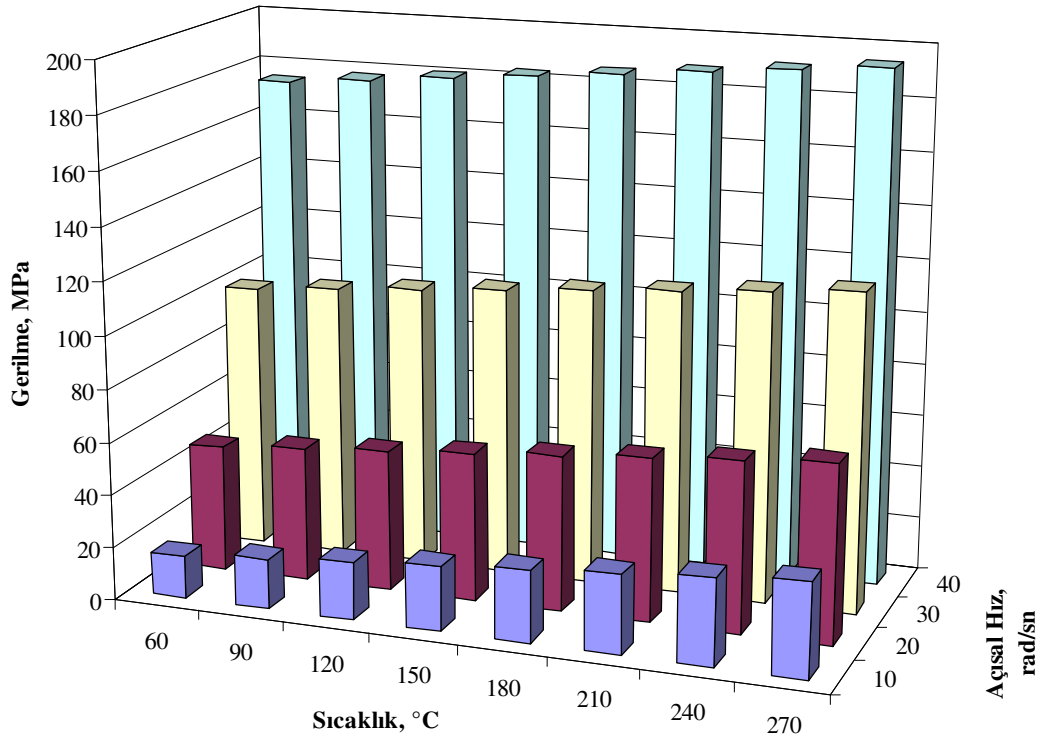
Üç boyutlu kompozit diske uygulanan, 10 rad/sn, 20 rad/sn, 30 rad/sn ve 40 rad/sn dönme hızları için ve ayrıca 60 °C, 90 °C, 120 °C, 150 °C, 180 °C, 210 °C, 240 °C ve 270 °C uniform sıcaklık yükleri için elde edilen iç yüzeydeki normal gerilme dağılımları Şekil 4.22’de ve dış yüzeydeki normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.23’de üç boyutlu grafikler ile verilmiştir.

Üç boyutlu grafikler ile uygulanan uniform sıcaklık yüküne ve uygulanan farklı açısız dönme hızlarındaki artışa bağlı olarak, normal gerilmelerde meydana gelen artışlar net bir şekilde görülmektedir. Bu şekiller ile kompozit diskin iç yüzeyinde her doğrultuda tamamen çekme formunda gerilmeler oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.22). Fakat, kompozit diskin dış yüzeyinde ise farklı durumlar ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.23). İlk olarak z-yönünde dış yüzey için hesaplanan tüm gerilmeler çekme formundadır (Şekil 4.23-c).

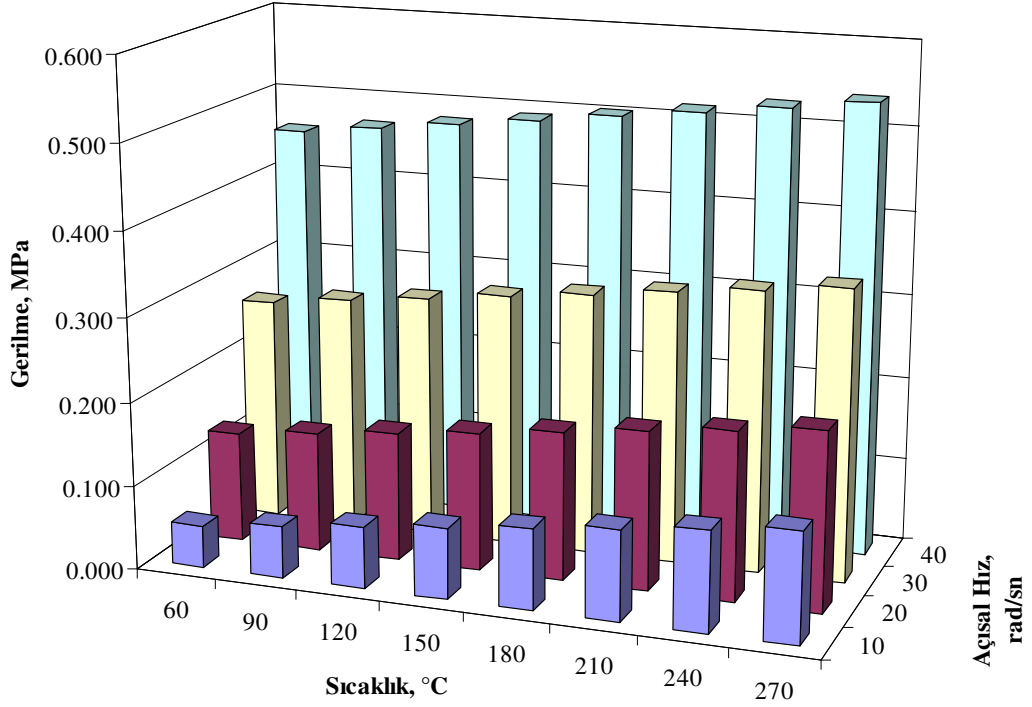


a) Radyal yöndeki normal gerilme ( $\sigma_r$ )





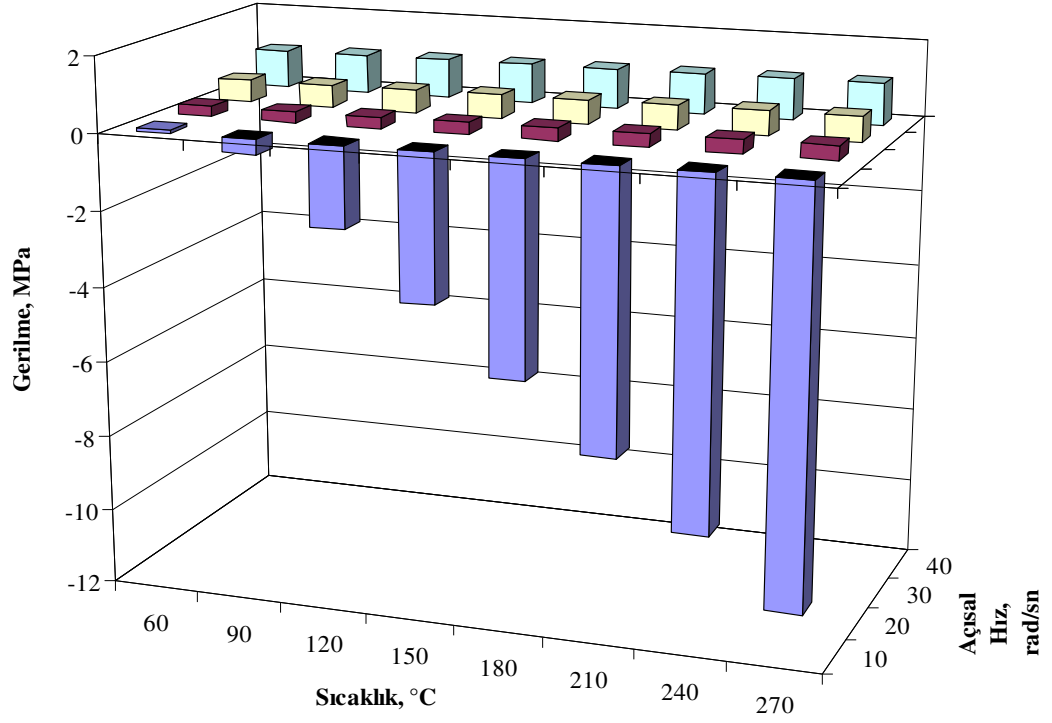
b) Teğetsel yöndeki normal gerilme ( $\sigma_\theta$ )



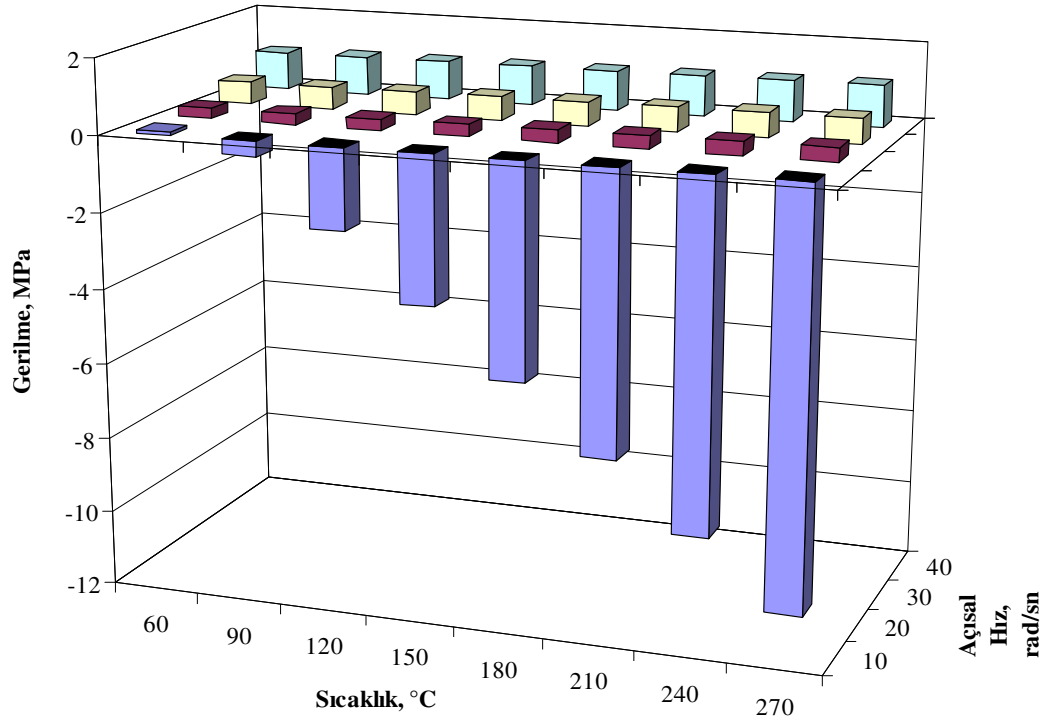
b) z yönündeki normal gerilme ( $\sigma_z$ )

Şekil 4.22. 10, 20, 30 ve 40 rad/sn dönme hızında uniform sıcaklıklara bağlı olarak iç yüzeyde hesaplanan normal gerilmeler

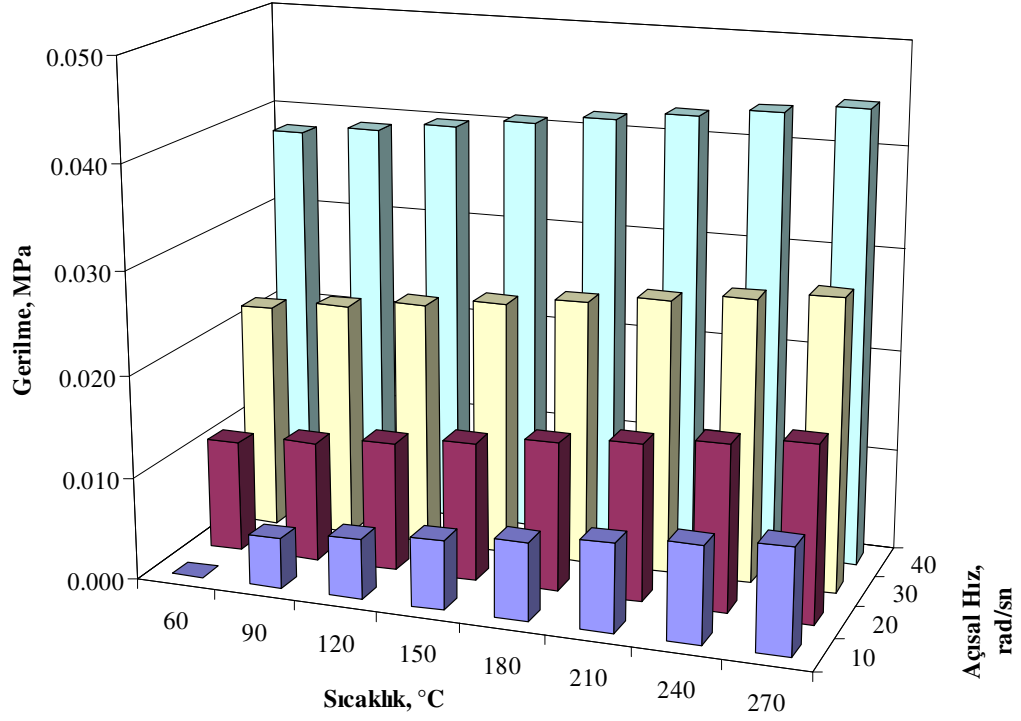
Bununla birlikte, dış yüzey için radyal ve teğetsel doğrultularda hesaplanan gerilmelere bakıldığında 10 rad/sn dönme hızı için basma formunda gerilmeler meydana gelmiştir (Şekil 4.23-a ve Şekil 4.23-b). Öte yandan radyal ve teğetsel doğrultularda 20, 30 ve 40 rad/sn dönme hızları için oluşan gerilmelerin çekme formunda olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, 10 rad/sn dönme hızı için radyal ve teğetsel doğrultularda hesaplanan basma gerilmelerinin mutlak değer olarak değerlerinin, diğer dönme hızları için hesaplanan çekme gerilmelerinden daha yüksek değerlerde olduğu anlaşılmıştır.



a) Radyal yöndeki normal gerilme ( $\sigma_r$ )



b) Teğetsel yöndeki normal gerilme ( $\sigma_{\theta}$ )



c) z yönündeki normal gerilme ( $\sigma_z$ )

Şekil 4.23.10, 20, 30 ve 40 rad/sn dönme hızında uniform sıcaklıklara bağlı olarak dış yüzeyde hesaplanan normal gerilmeler

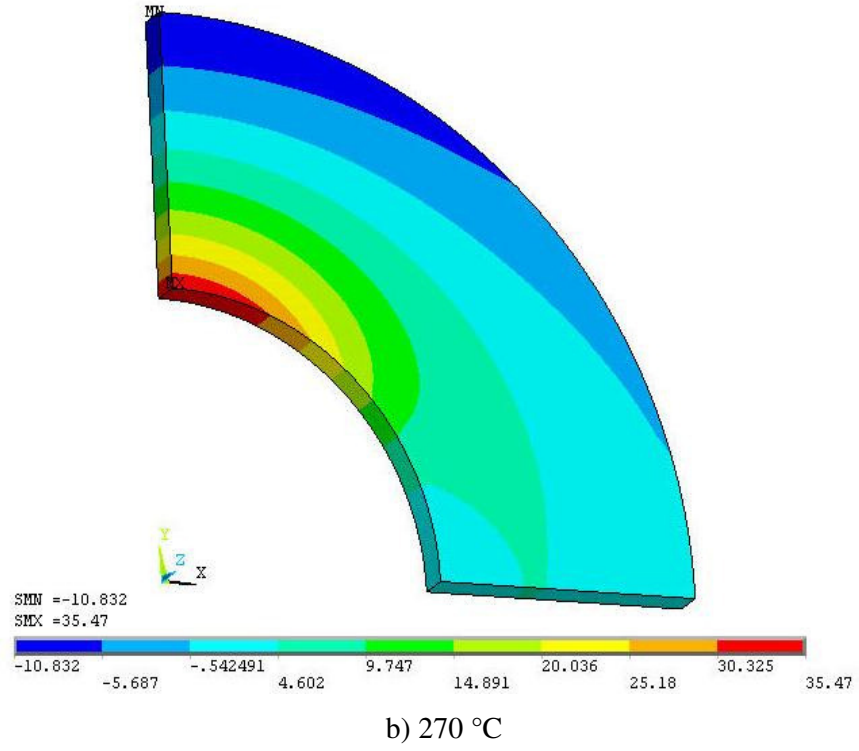
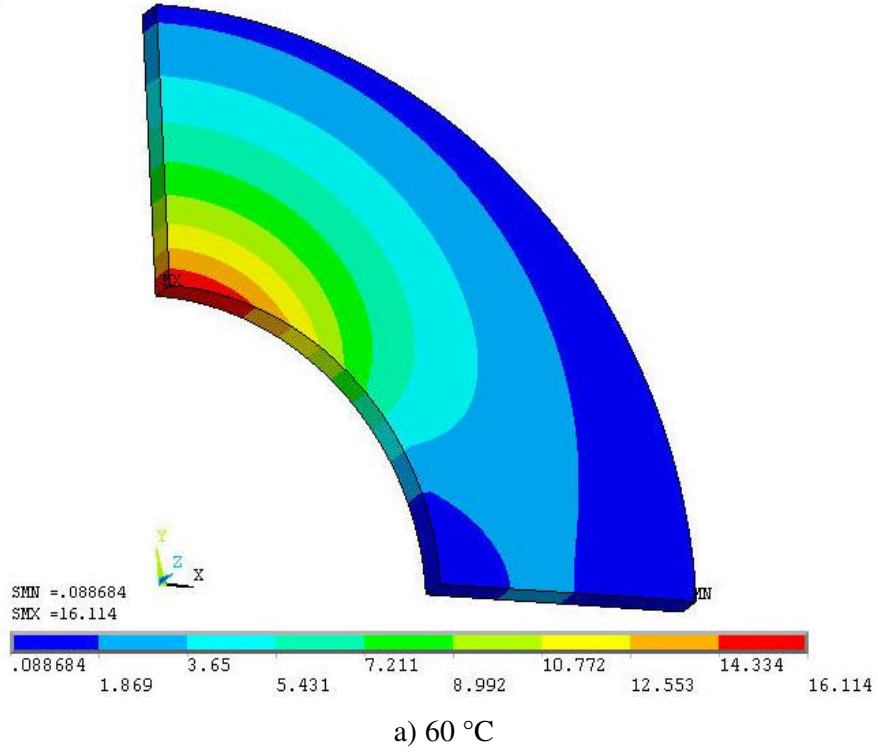
Yukarıda bahsedildiği üzere üç boyutlu kompozit diske, gerilmeler üzerine değişen dönme hızlarının etkisini görmek amacıyla farklı açısal hızlar uygulanmıştır. Dolayısıyla her analiz için çok fazla miktarda konturlu şekillerde elde edildi. Fakat, her analiz sonucunda elde edilen, her bir konturlu dağılımların buradaki şekillerde verilmesi yerine, ilk olarak sadece en düşük dönme hızı olan 10 rad/sn için ve ayrıca uygulanan 60 °C ve 270 °C uniform sıcaklık yükleri için elde edilen normal gerilme dağılımları (Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26), kayma gerilmeleri (Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29) ve elastik şekil değiştirmelere (Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32) örnek olarak verilmiştir.

Daha önce çizelgelerde listelenen ve şekillerde çizilen maksimum ve minimum değerlerden farklı olarak, bu şekillerde üç boyutlu kompozit disk üzerinde meydana gelen gerilme dağılımları ve elastik şekil değiştirme dağılımları net bir şekilde görülebilmektedir. Bu şekillerde, üç boyutlu disk üzerinde oluşan maksimum ve minimum değerler gösterilmiştir. Böylece disk üzerinde, basma ve çekme etkisindeki bölgeler rahatlıkla ayırt edilebilmektedir. Bunun sağladığı önemli avantajlardan birisi de disk üzerinde gerilme yığımlarının olduğu bölgelerin rahatlıkla tespit edilebilmesidir.

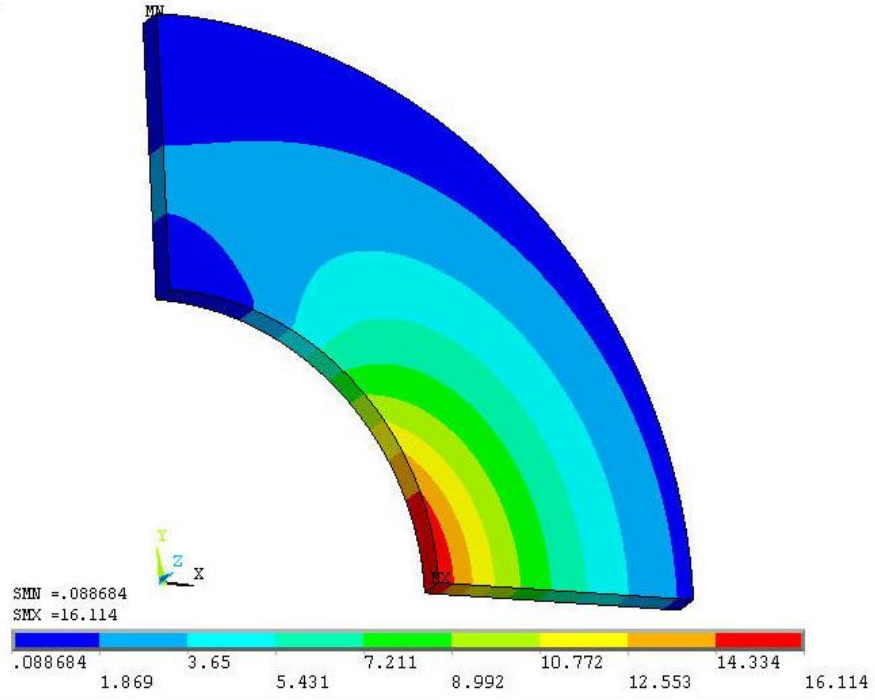
Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 karşılaştırıldığında; z-yönünde elde edilen gerilmelerin değerlerinin, teğetsel ve radyal yönlerde elde edilen gerilmelerden oldukça düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Radyal ve teğetsel doğrultulardaki gerilme dağılımları incelendiğinde, kompozit diskin iç yüzeyinde çekme gerilmeleri meydana gelirken, diskin dış yüzeyinde basma gerilmeleri meydana gelmiştir. Mutlak değer olarak basma gerilmelerinin daha düşük değerli olduğu görülmektedir.

Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 karşılaştırıldığında,  $\tau_{r\theta}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin,  $\tau_{rz}$  ve  $\tau_{\theta z}$  kayma gerilmelerinin değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca,  $\tau_{r\theta}$  kayma gerilmelerinin iç yüzeyde basma formunda ve dış yüzeyde çekme formunda olduğu ve mutlak değer olarak basma kayma gerilmelerinin çekme kayma gerilmelerinden daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

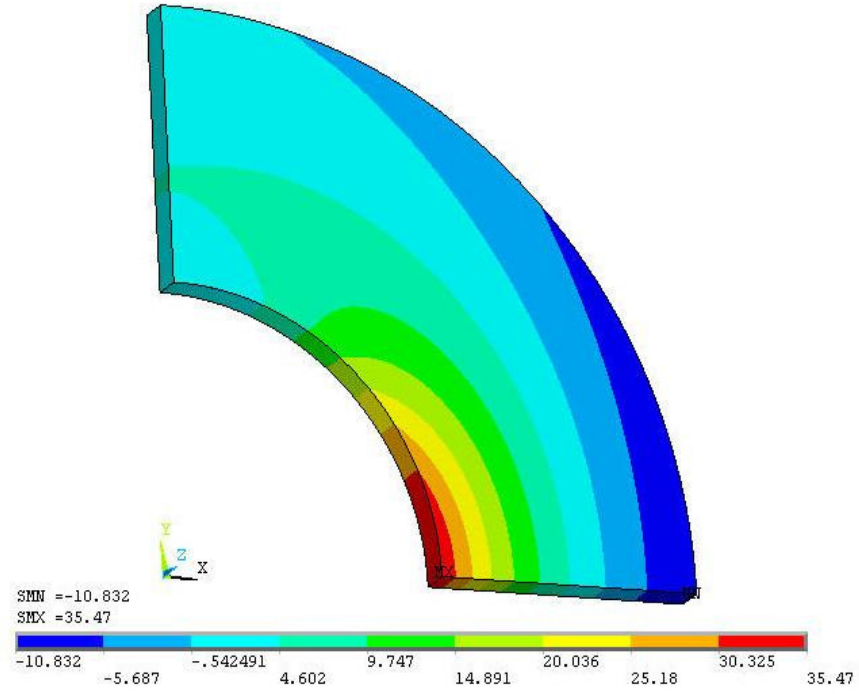
Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 karşılaştırıldığında, z-yönünde elde edilen elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin radyal ve teğetsel yönlerde elde edilen elastik şekil değiştirmelerin değerlerinden daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca z-yönündeki dağılımların diğer yönlerden oldukça farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.24. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ )

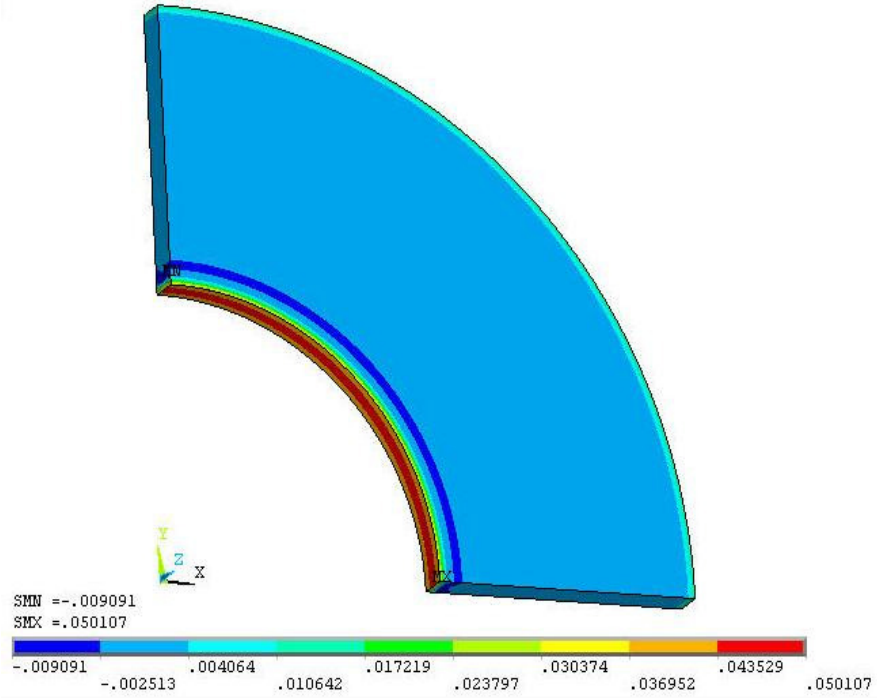


a) 60 °C

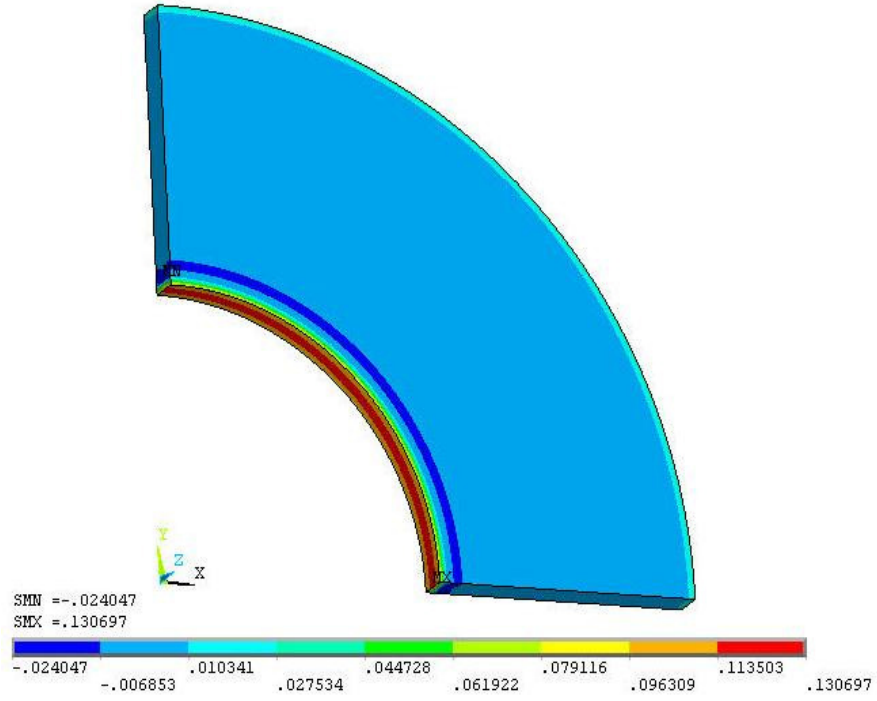


b) 270 °C

Şekil 4.25. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan teğetsel gerilmeler ( $\sigma_\theta$ )

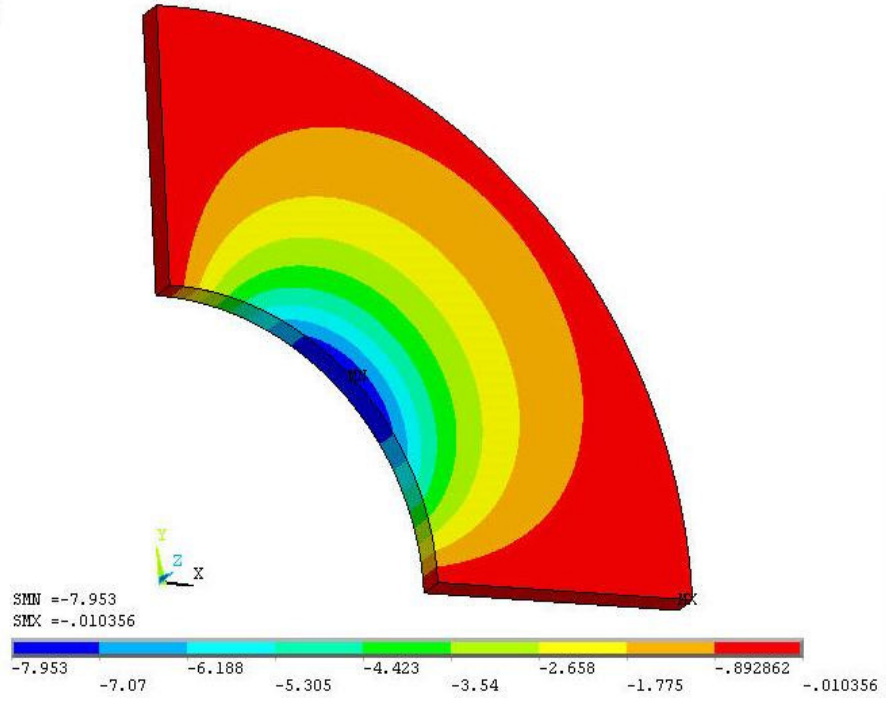


a) 60 °C

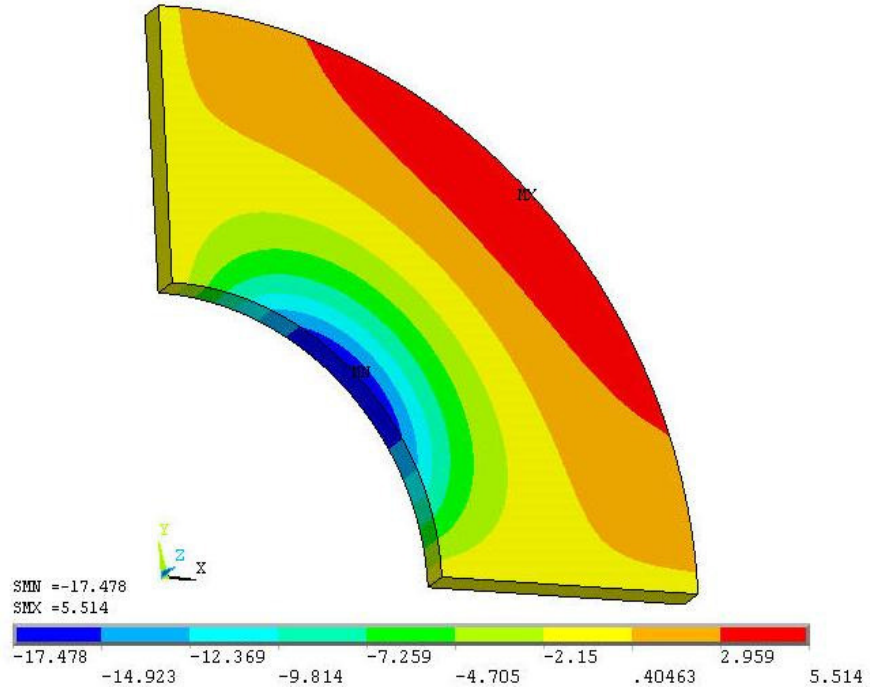


b) 270 °C

Şekil 4.26. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan z yönündeki gerilmeler ( $\sigma_z$ )



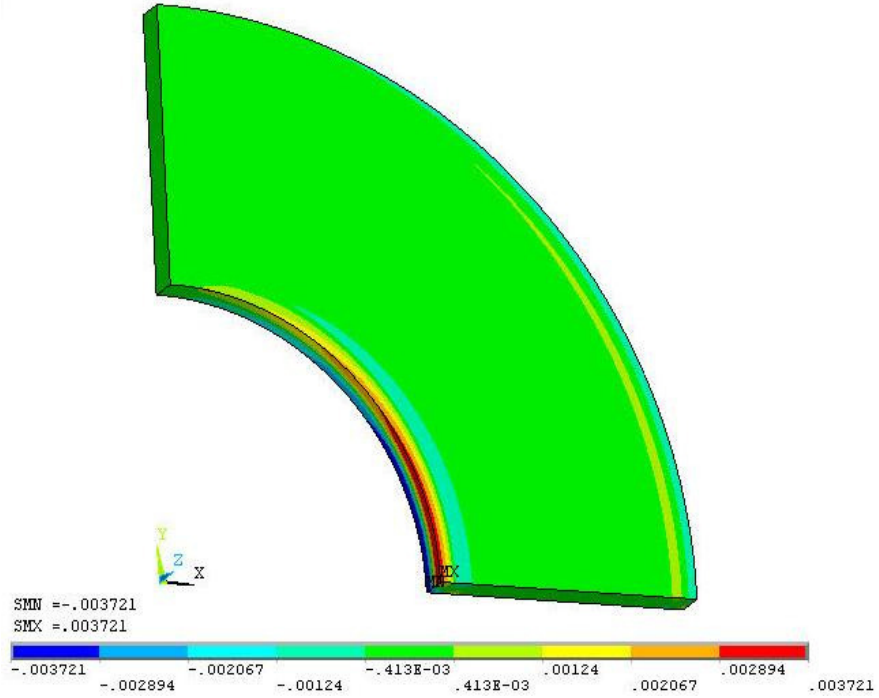
a) 60 °C



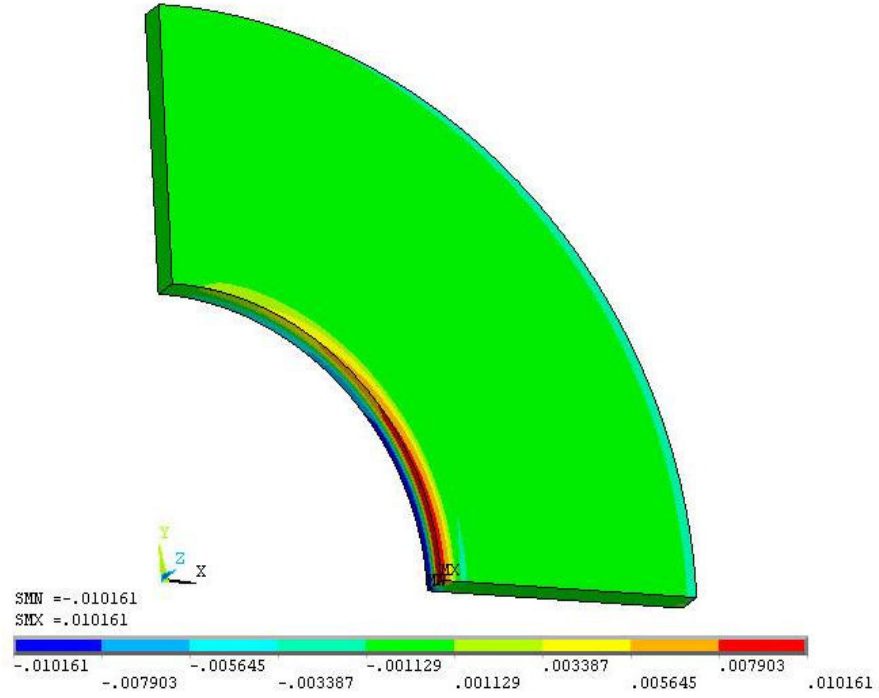
b) 270 °C

Şekil 4.27. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{r\theta}$ )



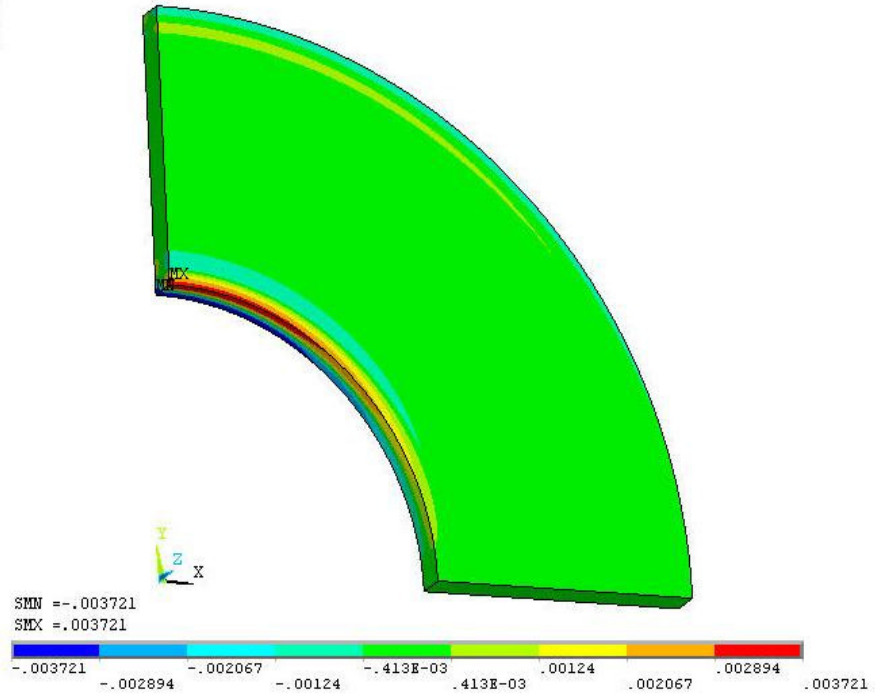


a) 60 °C

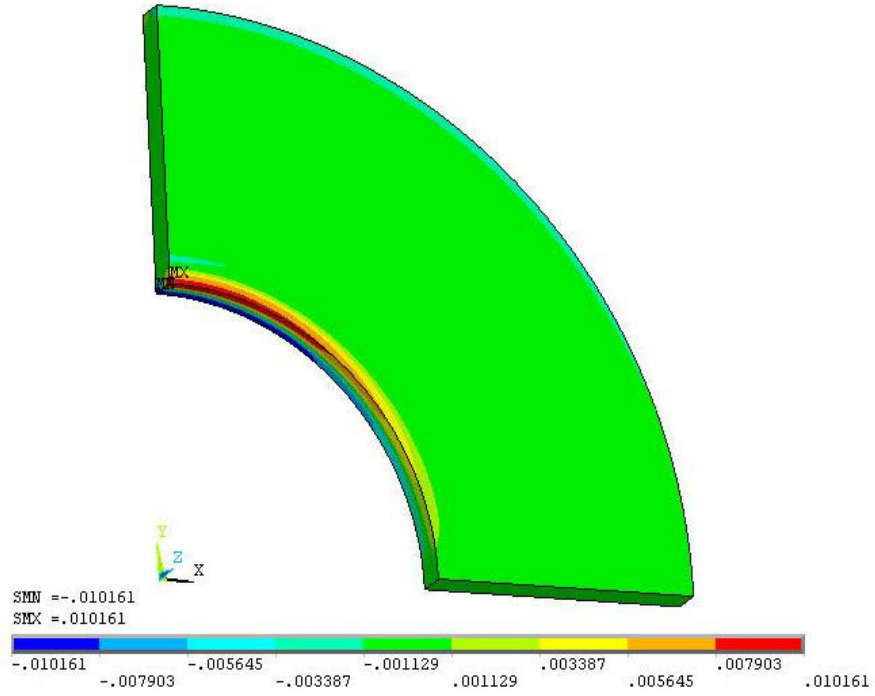


b) 270 °C

Şekil 4.28. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{rz}$ )

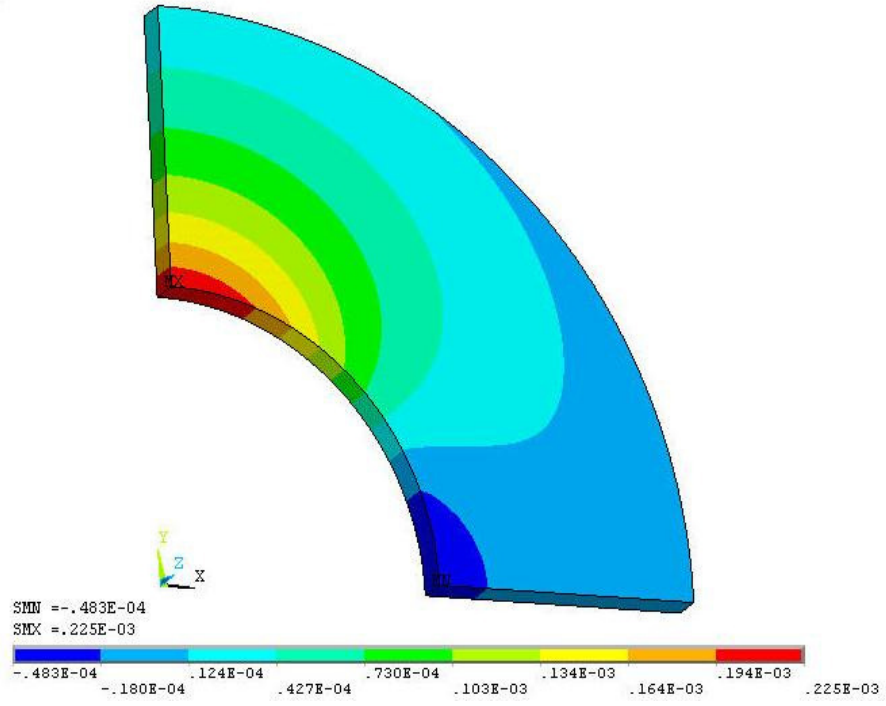


a) 60 °C

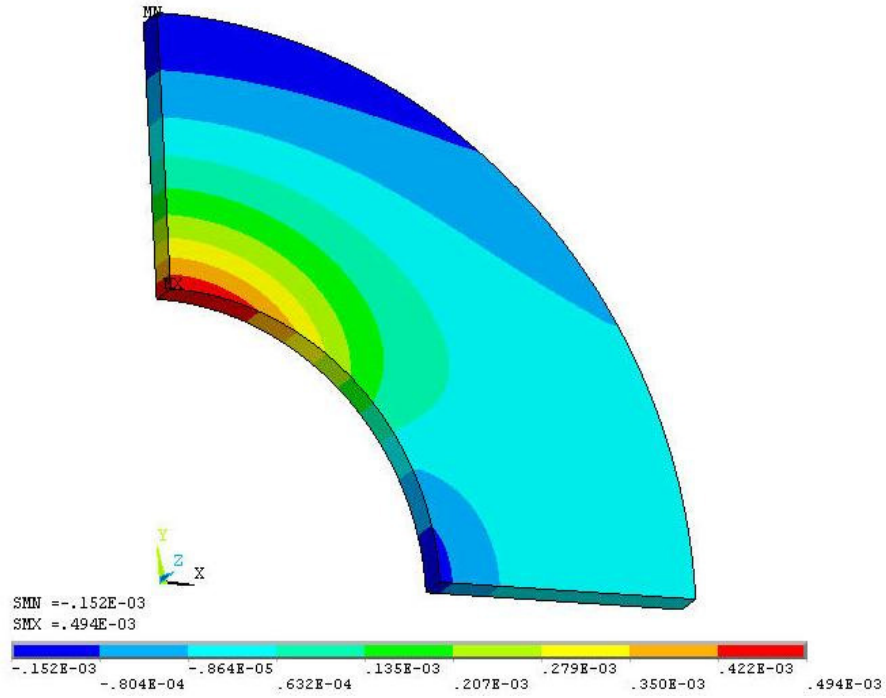


b) 270 °C

Şekil 4.29. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{\theta z}$ )

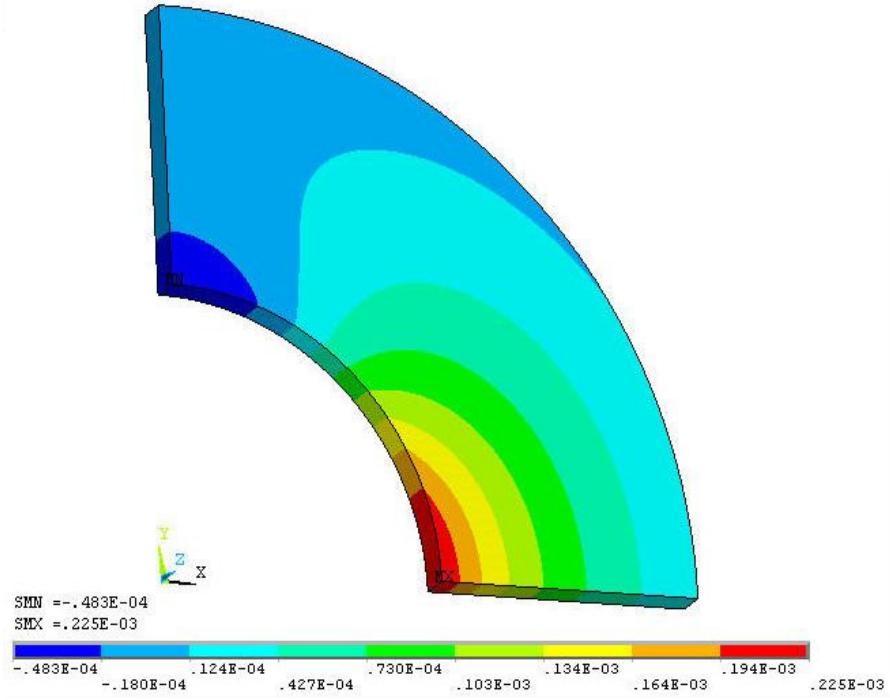


a) 60 °C

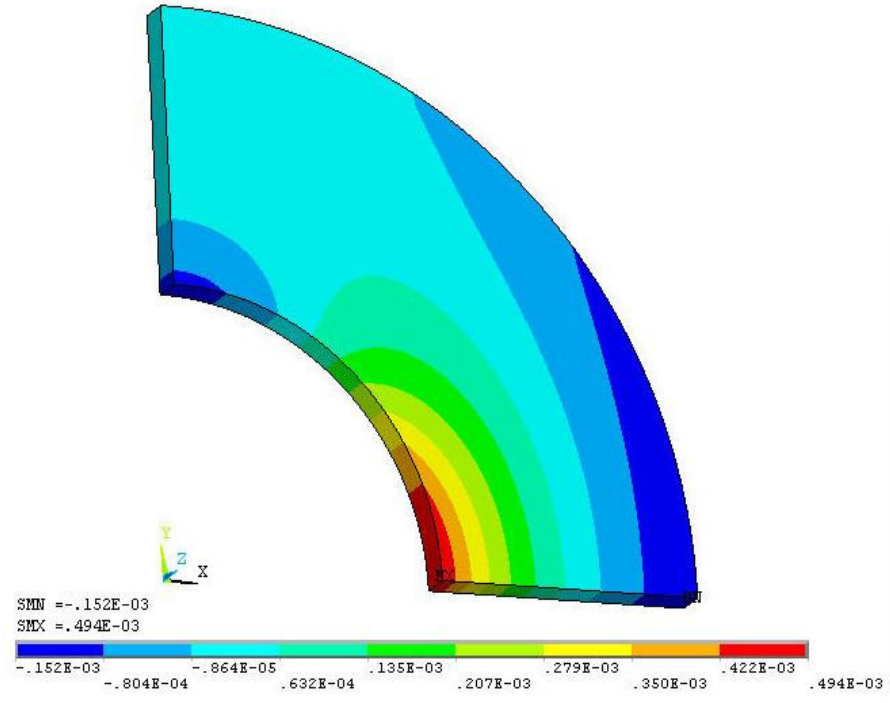


b) 270 °C

Şekil 4.30. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında radyal yönde oluşan elastik şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_r$ )

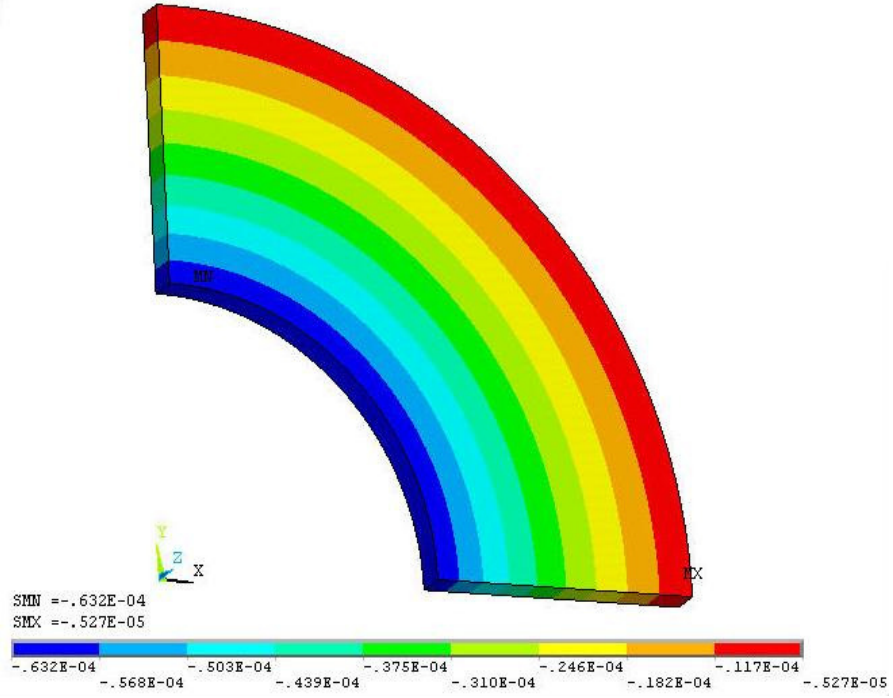


a) 60 °C

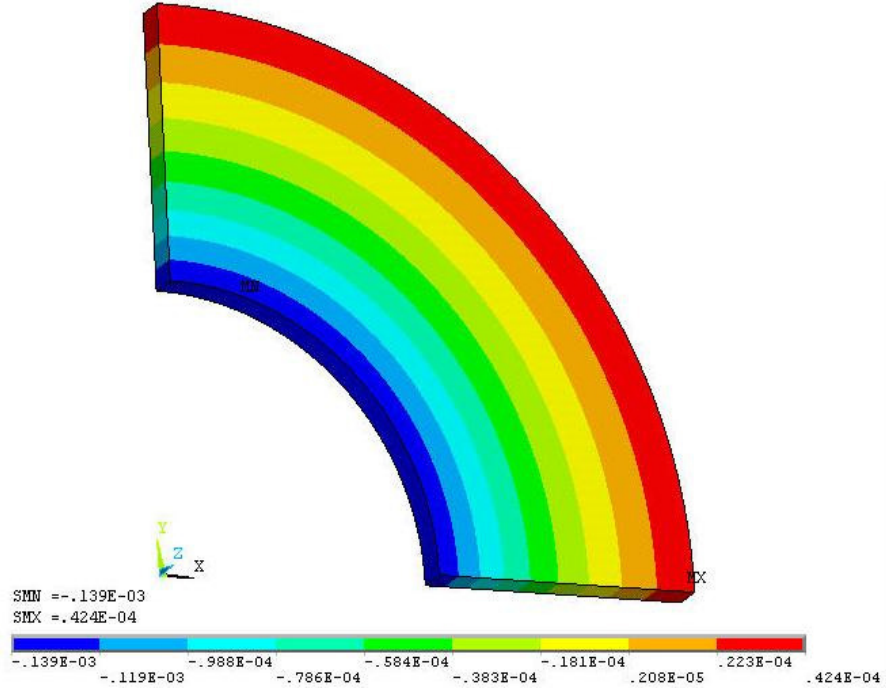


b) 270 °C

Şekil 4.31. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında teğetsel yönde oluşan elastik şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_\theta$ )



a) 60 °C



b) 270 °C

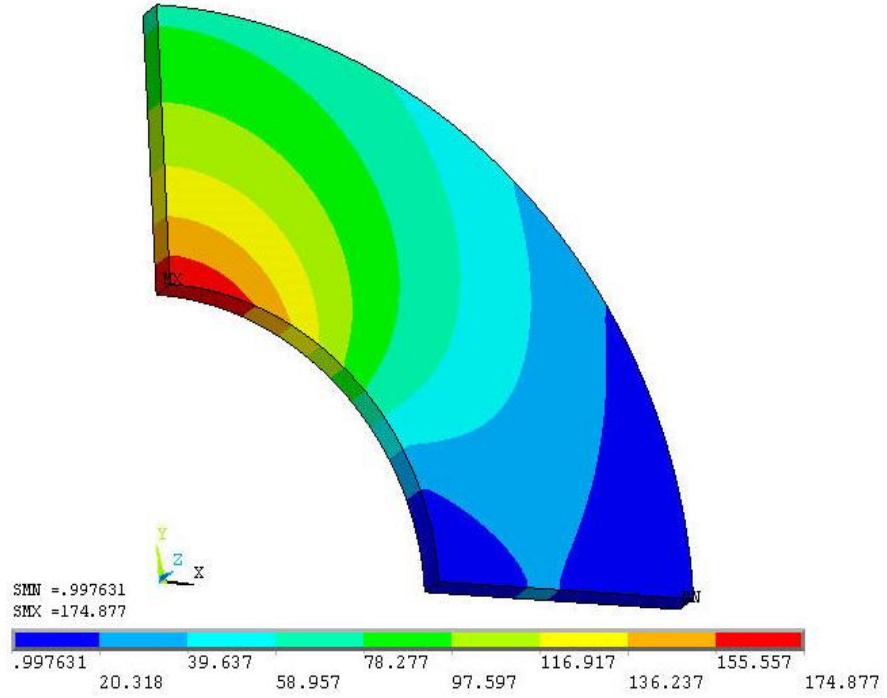
Şekil 4.32. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 10 rad/sn dönme hızında z-yönünde oluşan elastik şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_z$ )

Yukarıda bahsedildiği üzere üç boyutlu kompozit diske, gerilmeler üzerine değişen dönme hızlarının etkisini görmek amacıyla farklı açısız hızlar uygulanmıştır. Dolayısıyla her analiz için çok fazla miktarda konturlu şekiller elde edildiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, her analiz sonucunda elde edilen, her bir konturlu dağılımların yukarıdaki şekillerde verilmesi yerine, ilk olarak sadece en düşük dönme hızı olan 10 rad/sn için ve ayrıca 60 °C ve 270 °C uniform sıcaklık yükleri için elde edilen normal gerilme dağılımları (Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26), kayma gerilmeleri (Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29) ve elastik şekil değiştirmelere (Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32) örnek olarak verilmiştir. Fakat bu şekillerde, gerilmeler ile elastik şekil değiştirmeler üzerine iki farklı değerdeki sıcaklık etkisi görülebilmekle birlikte, dönme hızındaki değişimin gerilmelerin ve elastik şekil değiştirmelerin değerleri ve dağılımları üzerine etkisini göstermek mümkün olmamıştır. Bu nedenle ikinci olarak, en yüksek dönme hızı olan 40 rad/sn sadece 60 °C ve 270 °C uniform sıcaklık yüklerindeki ısı normal gerilmeler (Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35), kayma gerilmeleri (Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38) ve elastik şekil değiştirmeler (Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41) için konturlu dağılımlar verilmiştir. Böylece yukarıda en düşük dönme hızı olan 10 rad/sn için verilen şekiller ve aşağıdaki 40 rad/sn dönme hızı için verilen şekiller ile dönme hızına bağlı olarak gerilmelerin ve elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin ve dağılımlarının üç boyutlu disk üzerinde değişiminin daha iyi anlaşılabilmesi amaçlanmıştır.

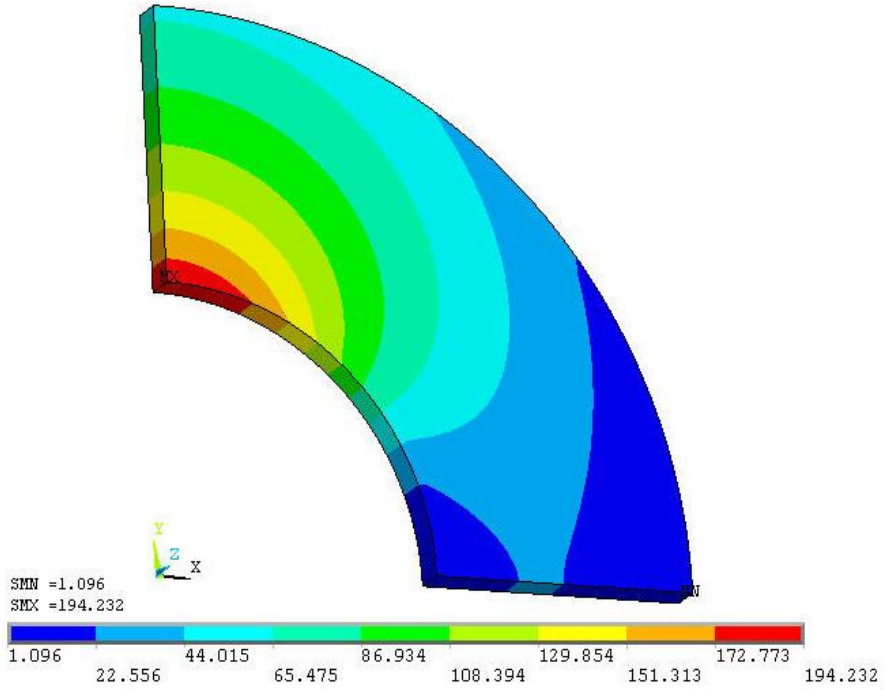
Aşağıda verilen şekillerden görüldüğü gibi, en yüksek dönme hızı 40 rad/sn dönme hızı uygulandığında elde edilen, normal gerilmeler, kayma gerilmeleri ve elastik şekil değiştirmeler için de en düşük dönme hızı olan 10 rad/sn için yapılan benzer durumlar olduğu ve benzer değerlendirmelerin geçerli olduğu söylenebilir. Bununla birlikte aşağıda açıklandığı gibi bazı dikkat çekici hususlarda meydana gelmiştir.

İlk olarak, Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 karşılaştırıldığında z-yönünde elde edilen gerilmelerin düşük değerlerde olduğu açıkça görülüyor. Bununla birlikte, radyal ve teğetsel yönlerde basma formundaki normal gerilmelerin değerlerinin düşüş gösterdiği ve çekme formundaki normal gerilmelerin ise çok aşırı miktarda artış gösterdiği anlaşılmıştır.

Bir diğer önemli nokta, Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 karşılaştırıldığında basma formundaki  $\tau_{r0}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin aşırı miktarda artış gösterdiği, bununla birlikte çekme formundaki  $\tau_{r0}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin ise düştüğü görülmüştür.



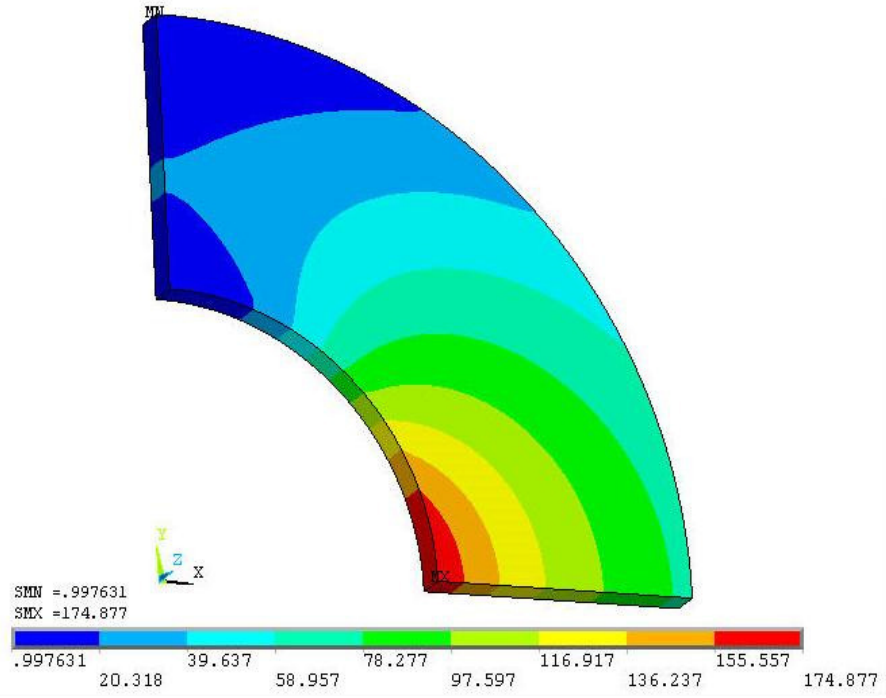
a) 60 °C



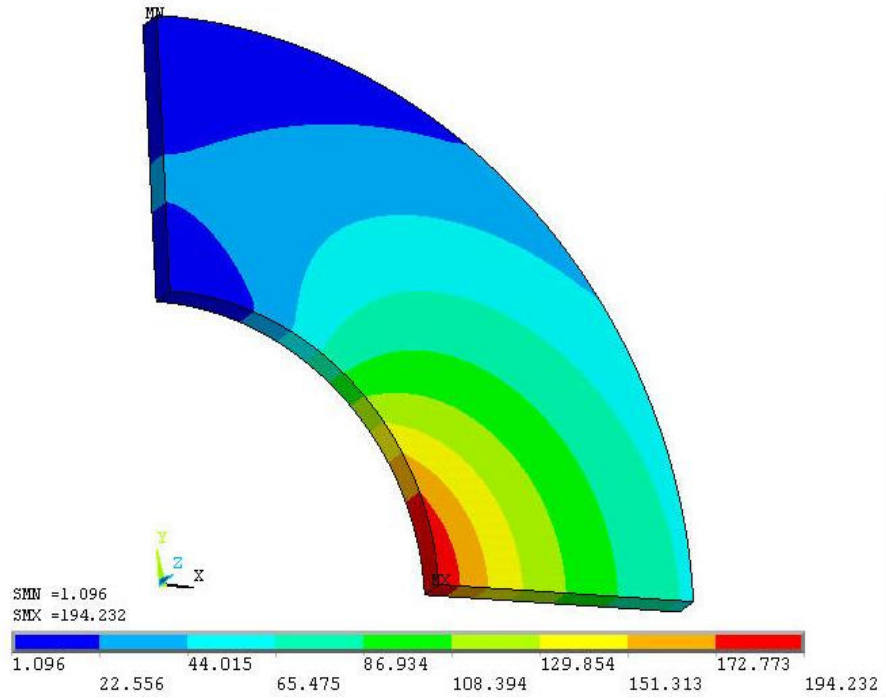
b) 270 °C

Şekil 4.33. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan radyal gerilmeler ( $\sigma_r$ )



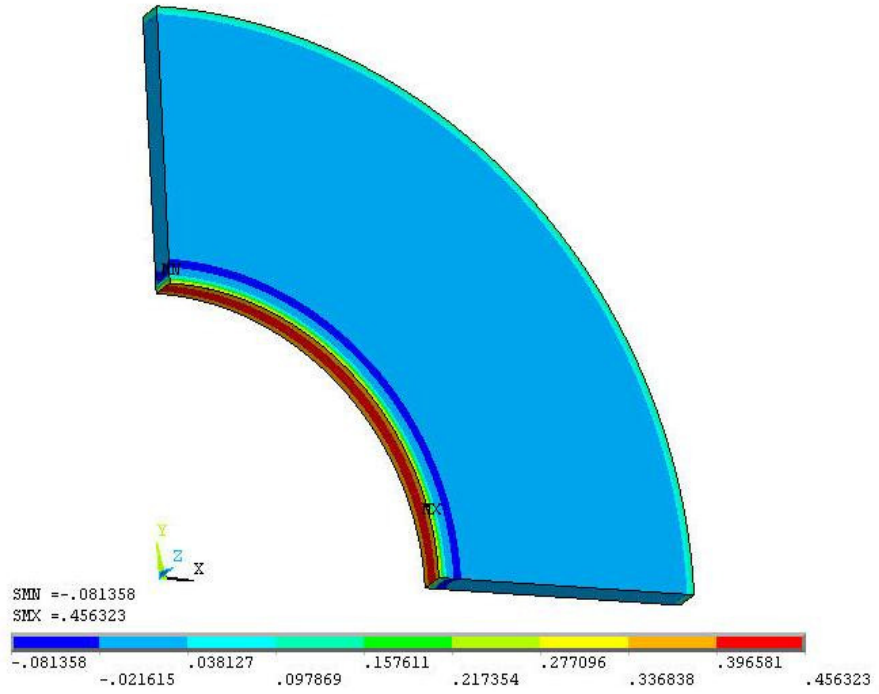


a) 60 °C

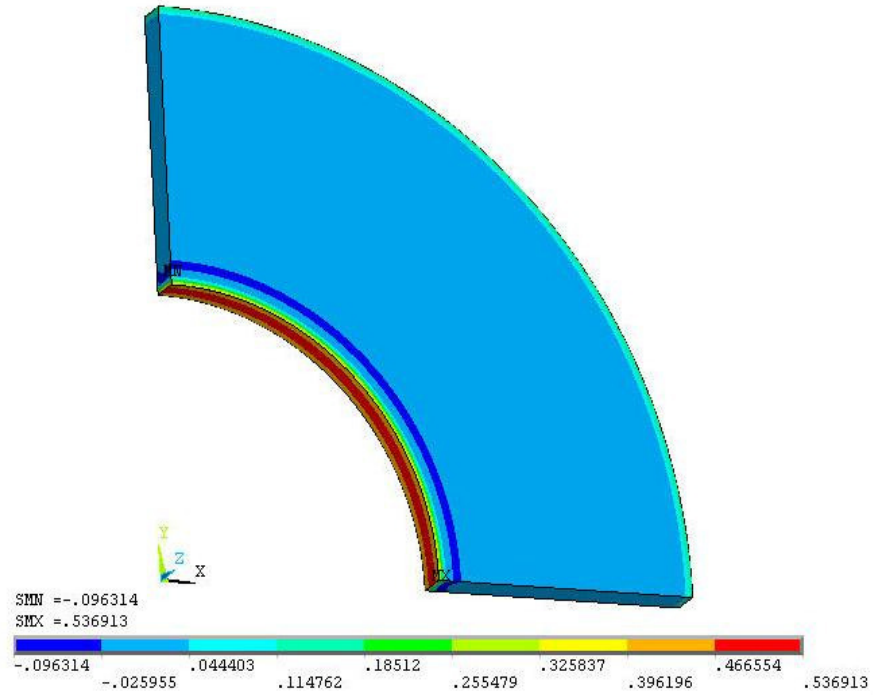


b) 270 °C

Şekil 4.34. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan teğetsel gerilmeler ( $\sigma_\theta$ )

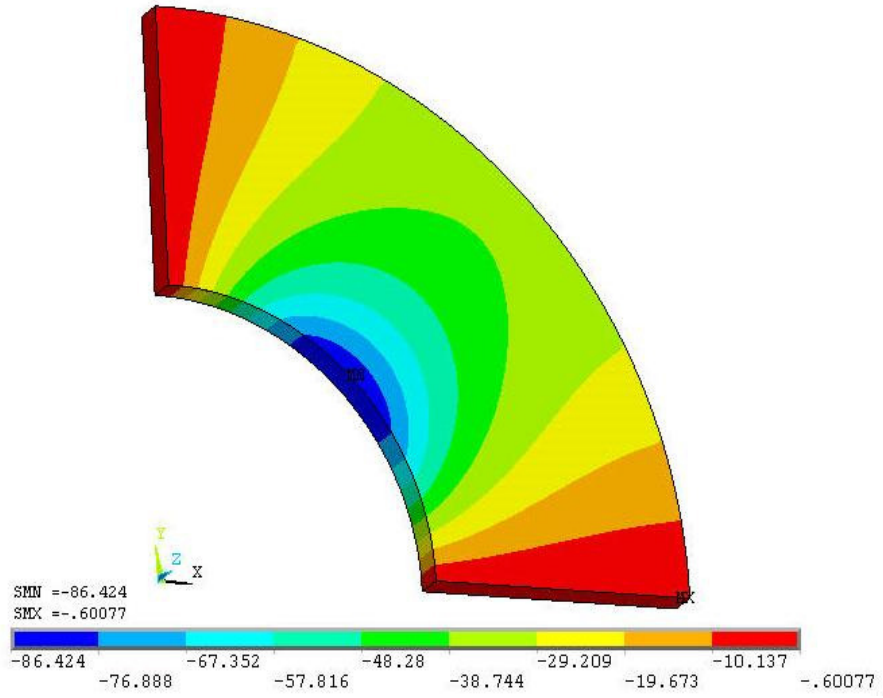


a) 60 °C

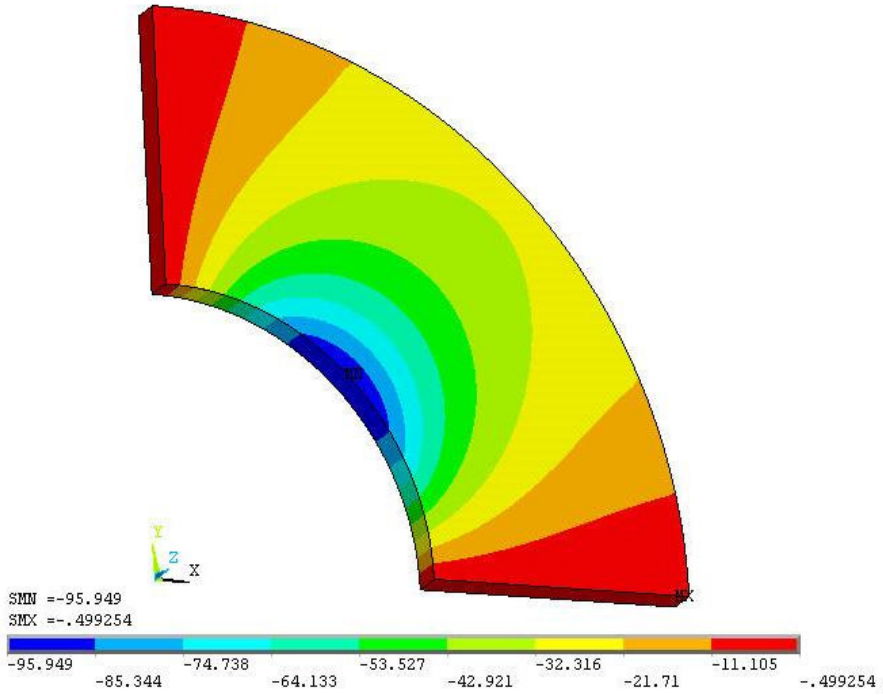


b) 270 °C

Şekil 4.35. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan z yönündeki gerilmeler ( $\sigma_z$ )

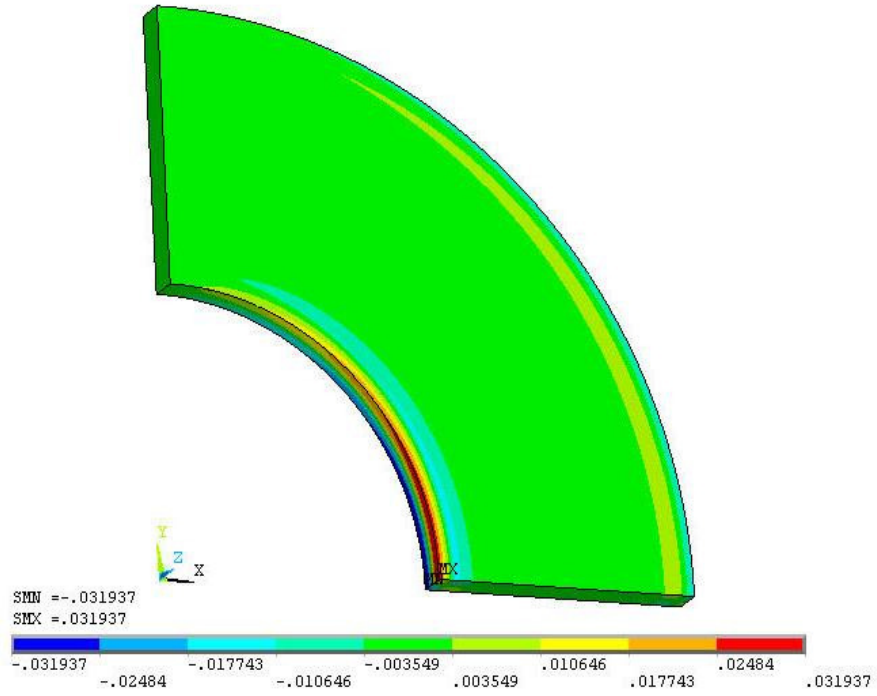


a) 60 °C

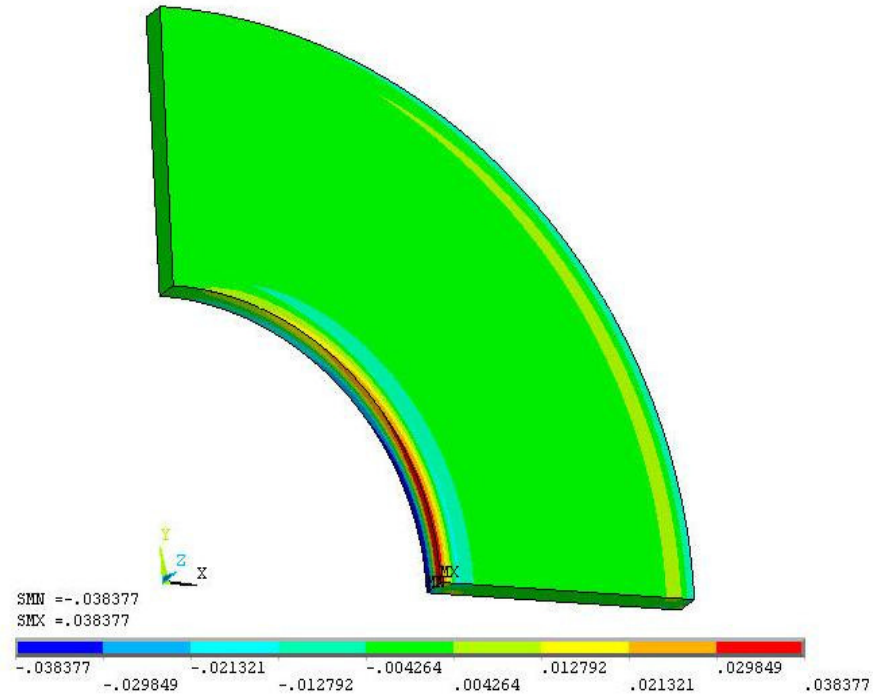


b) 270 °C

Şekil 4.36. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{r\theta}$ )

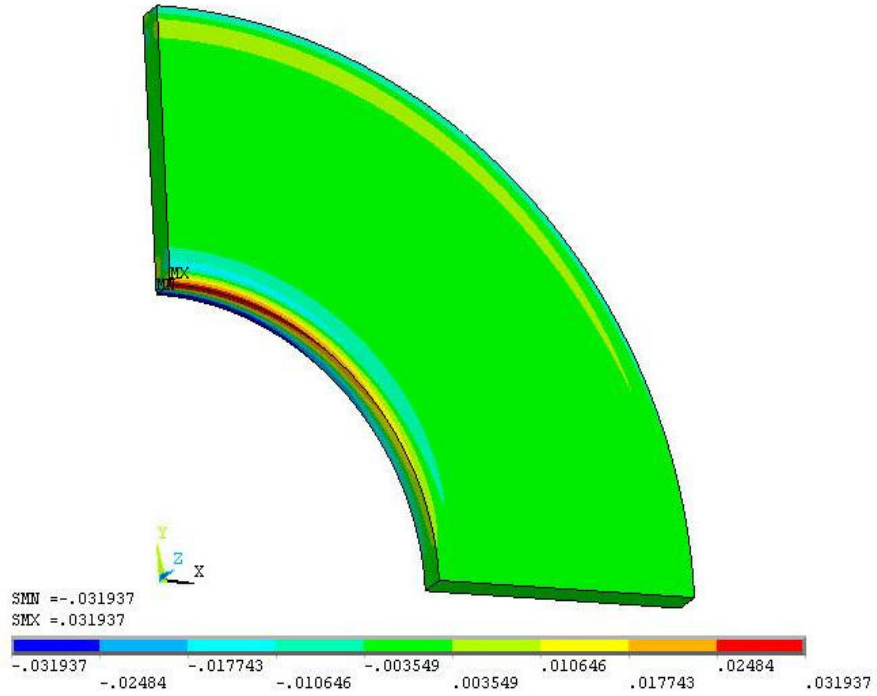


a) 60 °C

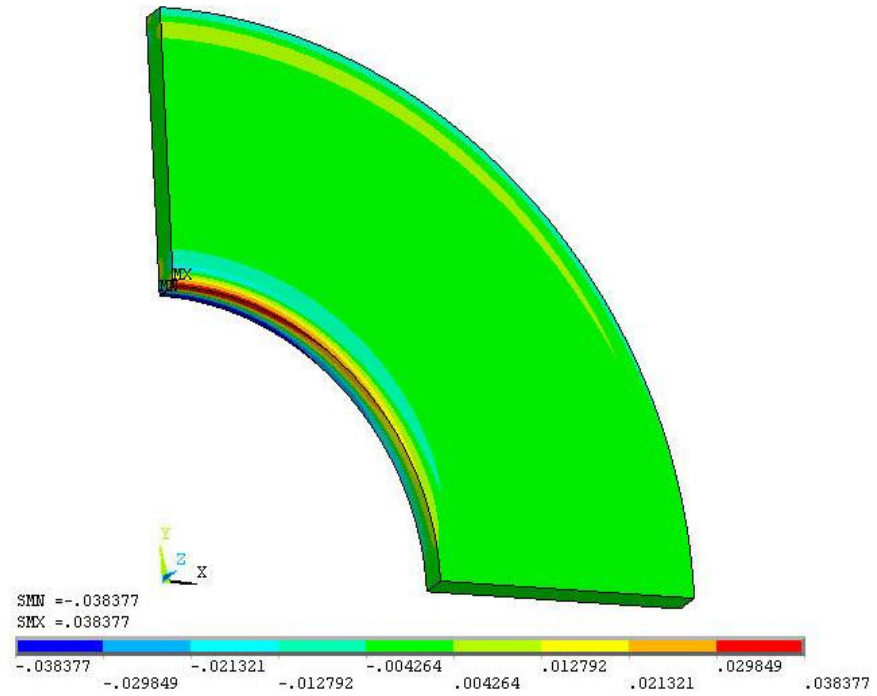


b) 270 °C

Şekil 4.37. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{rz}$ )

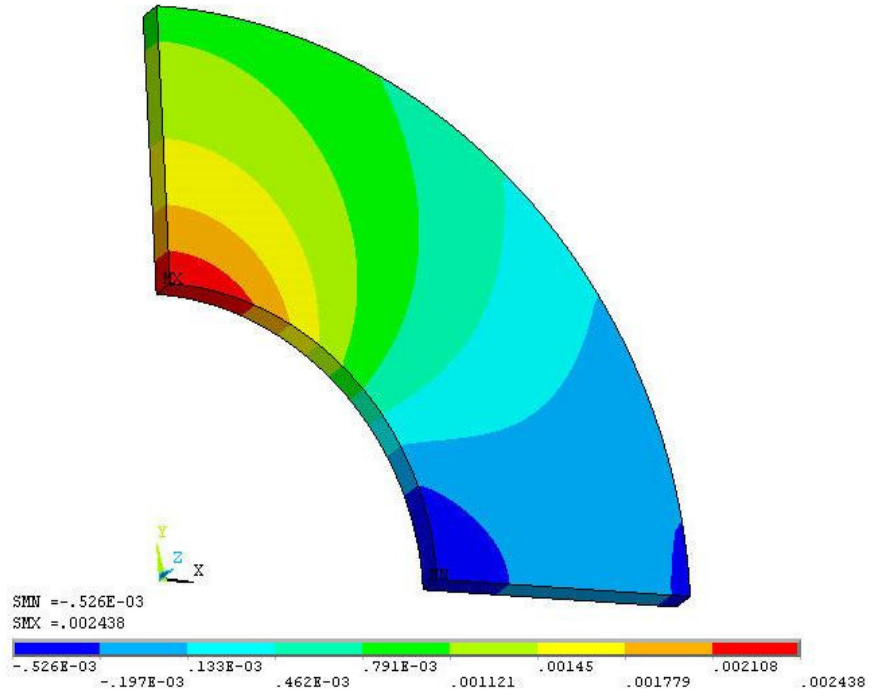


a) 60 °C

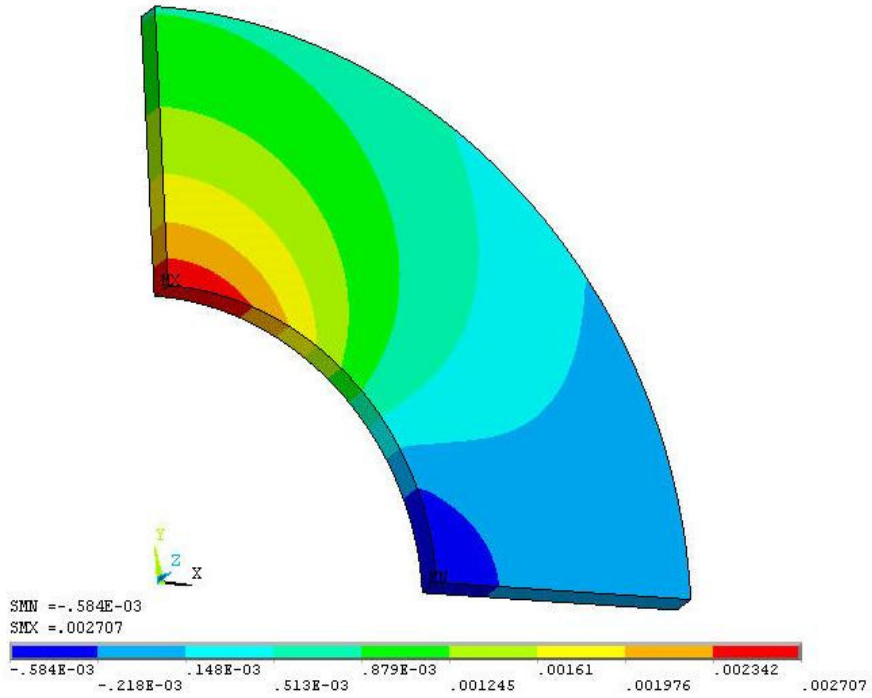


b) 270 °C

Şekil 4.38. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında oluşan kayma gerilmeleri ( $\tau_{\theta z}$ )

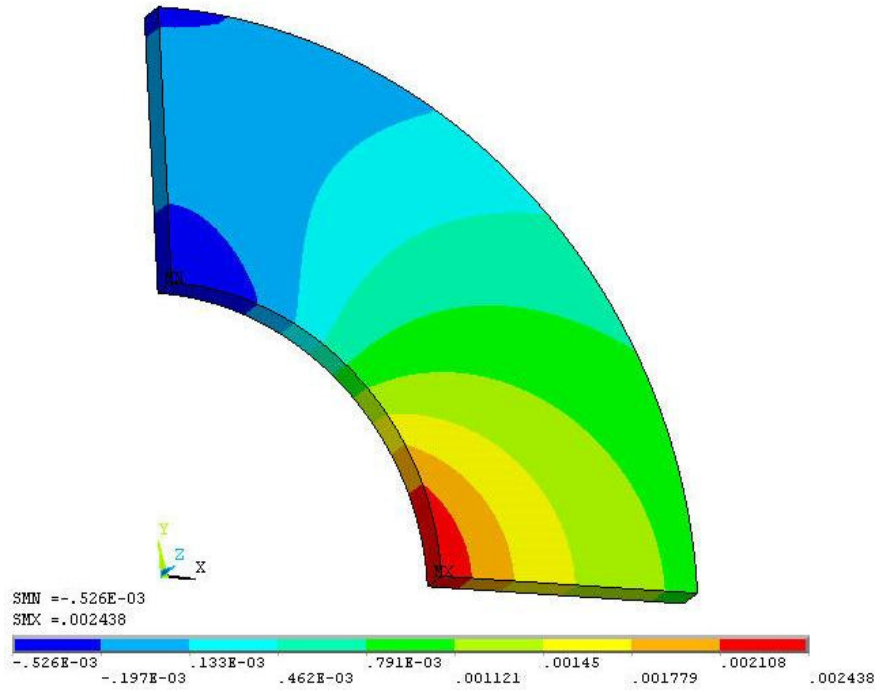


a) 60 °C

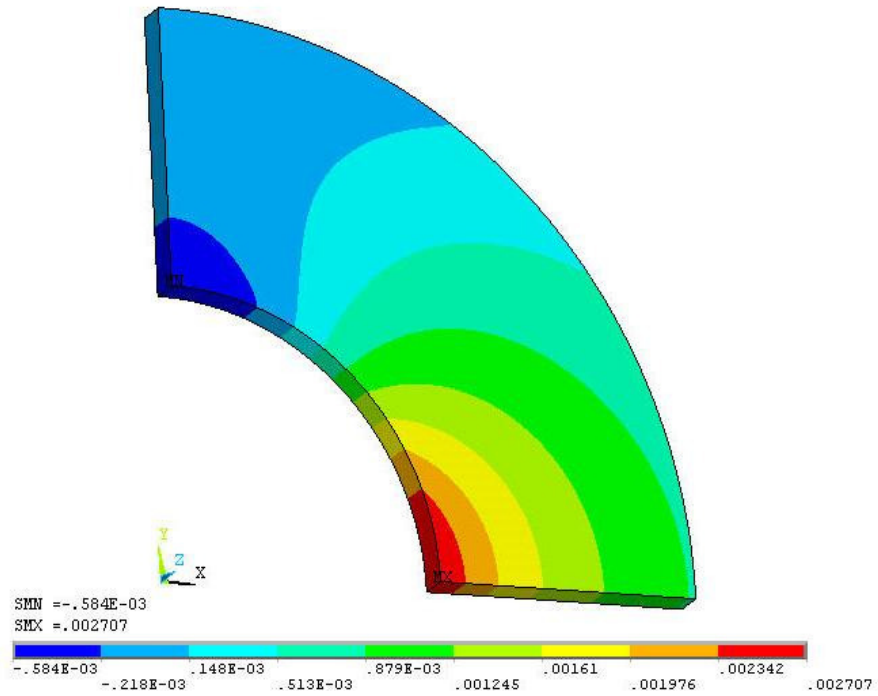


b) 270 °C

Şekil 4.39. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında radyal yönde oluşan elastik şekil değiştirmeler ( $\epsilon_r$ )

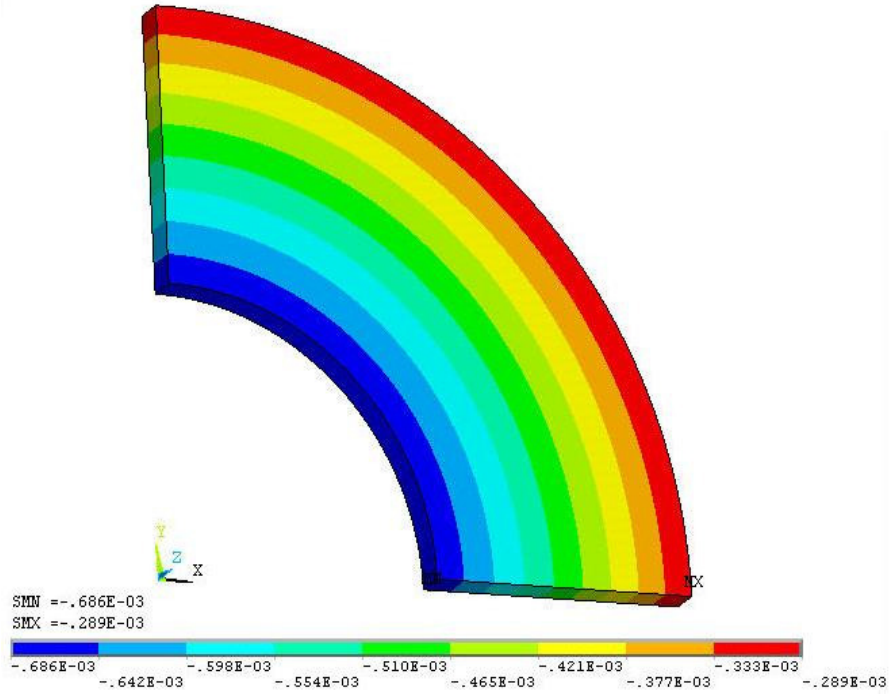


a) 60 °C

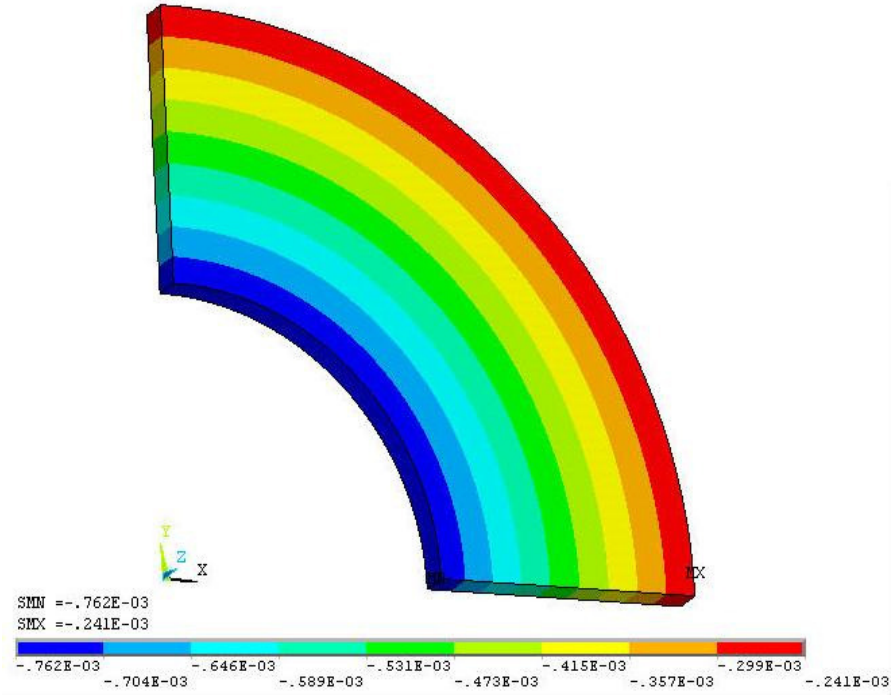


b) 270 °C

Şekil 4.40. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında teğetsel yönde oluşan elastik şekil değiştirmeler ( $\epsilon_\theta$ )



a) 60 °C



b) 270 °C

Şekil 4.41. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile 40 rad/sn dönme hızında z-yönünde oluşan elastik şekil değiştirmeler ( $\epsilon_z$ )



Tüm bu konturlu şekillerden, 10 rad/sn dönme hızı için 60 ve 270 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilen normal gerilmelerin, kayma gerilmelerinin ve elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin, 40 rad/sn dönme hızında 60 ve 270 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilen değerlerden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir.

Uniform sıcaklık yükündeki artış, gerilmelerin ve elastik şekil değiştirmelerin miktarını arttırmakla birlikte, dönme hızındaki artış üç boyutlu kompozit disk üzerindeki gerilmelerin değer ve dağılımlarının yanında, formunun da değişmesine neden olmaktadır. Bu sonuçlar; uygulanan uniform sıcaklık yükü artışının ve dönme hızındaki artışın üç boyutlu kompozit disk üzerinde oluşan gerilmelerin ve elastik şekil değiştirmelerin miktarlarındaki artış üzerinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

## BÖLÜM V

### 5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, alüminyum matrise sahip çelik fiberlerle takviye edilmiş, ortasında dairesel delik bulunan bir kompozit disk modellenmiştir. Kompozit disk önceki çalışmalardan çok farklı olarak, üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Üç boyutlu diske çeşitli sınır şartları, uniform sıcaklıklar ve açılal dönmeler uygulamak suretiyle oluşan gerilmeler, elastik şekil değişimleri ve disk üzerindeki dağılımları incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma, üç aşamada tamamlanmıştır.

İlk aşamada, sonlu elemanlarla çözümde önemli bir soru işareti olan, eleman ve düğüm noktası sayısının değişiminin, gerilmeler üzerine nasıl bir etkisi olduğu ve dolayısıyla analizlerde hangi ağ yapısının daha uygun olacağı konusu araştırılmıştır. Sonlu elemanlarla ilgili önceki çalışmalardan bilinen ve tavsiye edilen ağ yapısı, model üzerinde düzgün ağ yapısı olarak adlandırılan ve düzgün dörtgen elemanlardan oluşan ağ yapısının oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, hem diskin dairesel yapısı hem de ortasında konumlandırılan deliğın dairesel yapısından dolayı düzgün ağ yapısının oluşturulması zor olmasına rağmen, disk üzerinde düzgün ağ yapısı elde edilebilmiştir. Daha sonra, hepside düzgün ağ yapısına sahip fakat farklı eleman ve düğüm noktalarına sahip beş farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller için uygulanan bazı üniform sıcaklıklar ile ısı analizler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen ısı gerilmelerin değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmüştür. Fakat, genel olarak Model 2, 3 ve 4 karşılaştırıldığında ısı gerilmelerin değerleri lineer değişim gösterirken, Model 1 ile 2 arasında ve Model 4 ile 5 arasında, lineerliğin bozulduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak, Model 3 ve 4 ile oldukça yakın sonuçlara ve lineer ilişkiye sahip olan Model 2'nin, çalışmanın ikinci ve üçüncü aşamasında kullanılmasına karar verilmiştir. Model 2 olarak adlandırılan ve düzgün ağ yapısına sahip kompozit disk modeli üzerinde 11400 eleman ve 14880 düğüm noktası oluşturulmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ilk aşama sonuçlarına göre tercih edilen üç boyutlu “Model 2” kullanılmak suretiyle kompozit diskin ısı gerilme analizi

gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık yükü olarak 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 ve 270 °C uniform sıcaklıklar, üç boyutlu disk modeli üzerine sırasıyla uygulanmıştır. Uygulanan uniform sıcaklıklar nedeniyle kompozit disk modeli üzerinde meydana gelen ısı gerilmeler ve ısıl şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre ısı gerilmelerin değerleri uygulanan uniform sıcaklık yüküne bağlı olarak artış göstermiştir. Dolayısıyla en düşük ısı gerilmeler 60 °C uniform sıcaklık yükü için hesaplanırken, en yüksek değerli ısı gerilmeler 270 °C uniform sıcaklıklar uygulandığında elde edilmiştir. Bu durum elastik şekil değiştirmeler içinde geçerlidir. Genel olarak diskin iç yüzeyinde gerilmeler basma formunda meydana gelirken, diskin dış yüzeyinde çekme formunda gerilmeler meydana gelmiştir. Her bir sıcaklık yükü için radyal ve teğetsel yöndeki gerilmelerin maksimum değerleri eşit olmasına rağmen, kompozit disk üzerinde tamamen farklı dağılımlar elde edilmiştir. Modelleme ve analizler üç boyutlu olarak yapıldığında z-yönünde de gerilmeler ve elastik şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Fakat z-yönünde elde edilen bileşenlerin değerleri diğer yönlerde elde edilenlerden oldukça düşük değerlerdedir. Analizler neticesinde elde edilen kayma değerleri karşılaştırıldığında,  $\tau_{r\theta}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin,  $\tau_{rz}$  ve  $\tau_{\theta z}$  kayma gerilmelerinin değerlerinden çok daha büyük değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca,  $\tau_{rz}$  ve  $\tau_{\theta z}$  kayma gerilmesi değerleri,  $\tau_{r\theta}$  kayma gerilmelerinin değerlerinin yanında ihmal edilebilecek büyüklüktedirler.

Çalışmanın son ve üçüncü aşamasında, yine üç boyutlu “Model 2” kullanılmak suretiyle uniform sıcaklık yükü altındaki kompozit diske, ilave olarak farklı dönme hızları verilmek suretiyle gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Dönme hızları olarak sırasıyla 10, 20, 30, 40 rad/sn açısız hızları, üç boyutlu disk modeli üzerine sırasıyla uygulanmıştır. Uygulanan farklı dönme hızları nedeniyle, kompozit disk modeli üzerinde meydana gelen ısı gerilmeler ve ısıl şekil değiştirmeler tespit edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde uygulanan açısız hızdaki artışa bağlı olarak, gerilmelerin değerlerinin arttığı görülmüştür. Dolayısıyla, kompozit disk üzerindeki en düşük ısı gerilmeler 10 rad/san açısız hız ve 60 °C uniform sıcaklık etkisinde iken hesaplanırken, en yüksek ısı gerilmeler 40 rad/san açısız hız ve 270 °C uniform sıcaklık etkisinde iken elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Akoral, E., 2003. Toz metalurjisi yöntemi ile Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Altan, G. Topçu, M., 2010. Thermo-elastic stress of a metal-matrix composite disc under linearly-increasing temperature loading by analytical and FEM analysis, *Advances in Engineering Software*, 41, 604-610.
- ANSYS, Release 10.0 Documentation, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.
- ANSYS. The general-purpose finite element software. Documentation.
- Apalak, M.K. Aldaş, K. Şen, F., 2001. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bindirme bağlantılarının laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen ısı transferinin incelenmesi, 13.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Konya, Bildiri Kitabı 267-273.
- Ataberk, N., Uyaner, M., Avcı, A., Koçak, S., 2004. Elasto-plastic stress analysis of aluminum metal-matrix composite plate under in-plane loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23, 563-570.
- Bahçeci, E., 2006. Al matrisli  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Chawla, K.K., 1995. *Ceramic Matrix Composites*, Chapman & Hall, London.
- Çallıoğlu, H. Topçu M. Altan, G., 2005. Stress analysis of curvilinearly orthotropic rotating discs under mechanical and thermal loading, *Journal of reinforced plastics and composites*, 24, 8, 831-838.
- Çallıoğlu, H. Topçu, M. Tarakçılar A.R., 2006. Elastic-plastic stress analysis of an orthotropic rotating disc, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48, 9, 985-990.
- Çallıoğlu H., 2007. Thermal stress analysis of curvilinearly orthotropic rotating discs, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20, 357-369.
- Deniz, M.E., 2005. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarımı ve imalatı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Durman, M., 1991. Kompozit malzemeler ders notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sakarya Mühendislik Fakültesi, Metalurji Bölümü, Sakarya.
- Ejiofor, J.U., Okorie, B.A. and Reddy, 1997. *R.G.J.Mater. Eng. Perf.* , 6, 324-326.
- Fomey, R. C., 1986. Kompozit malzemeler çağı, *Teknik ve Uygulama Dergisi*, 11, 3-4.
- Güleşen, N., 2005. Fiber takviyeli termoplastik kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri

Enstitüsü, Kütahya.

- Kaynak, İ., Şen F. 2005. Thermal stress analysis of composite disc under uniform temperature effect using FEM, 15.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Trabzon, Bildiriler Kitabı Cilt 2, 912-916.
- Jones, R. M., 1999. Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis Inc., PA.
- Karakaya, Ş., 2007. Tabakalı kompozit plakaların gelişmiş global optimizasyon teknikleriyle yapısal optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kaynak, İ., 2005. Fiber orientation prediction for 3D injection and compression molded parts, Ph. D. Thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kurnaz, S. C., 1993. Alümina (Saffil) takviyeli ZA 12 esaslı kompozit malzemelerin infiltrasyon yöntemi ile üretim ve özelliklerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Minorutaya, R., 1989. Thermomechanical Behaviour of MMCs. Pergamon Press. Michigan. USA.
- Moaveni, S., 2003. Finite element analysis: Theory and application with ANSYS, 2<sup>nd</sup> edition. Pearson Education. Inc. New Jersey. USA.
- Sayman O., Atas, C., 2000. Elastic-plastic stress analysis and expansion of plastic zone in clamped and simply supported aluminium metal matrix laminated plates, Composite Structures, 49, 9-19.
- Sayman O., Zor, M., 2000. An elastic-plastic stress analysis and residual stresses in a woven steel fiber reinforced thermoplastic composite cantilever beam loaded uniformly, J. of Reinforced Plastics and Composites, 19, 13, 1078-1092.
- Sayman O., Akbulut H., Meriç C., 2000. Elasto-plastic stress analysis of aluminum metal-matrix composite laminated plates under in-plane loading, Computers & Structures, 75, 55-63.
- Sayman O., 2001. An elastic-plastic thermal stress analysis of aluminum metal-matrix composite beams, J. of Composite Structures, 53, 419-425.
- Sayman O., 2003. Thermal elastic-plastic stress analysis of symmetric aluminium metal-matrix composite laminated plates under linearly distributed temperature, J. of Thermal Stresses. 26, 1, 1-12.
- Sayman O., Aksoy S., 2001. Elastic-plastic stress analysis of simply supported and clamped aluminum metal matrix laminated plates with a hole, Composite Structures, 53, 355-364.
- Sayman O., Aykul H., 2001. Elasto-plastic stress analysis of aluminum metal-matrix laminated plates with a circular hole under transverse loading, J. of Reinforced Plastics and Composites, 20, 1205-1221.

- Sayman, O., Özer, M.R., 2001. Elastic-plastic thermal stress analysis of aluminum-matrix composite beams under a parabolically temperature distribution, *Composites Science and Technology*, 61, 2129-2137.
- Sayman, O., Özbay M., Akbulut H., 2001. Elastic-plastic stress analysis of metal-matrix laminated plates under in-plane and transverse loading, *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 20, 417-430.
- Sayman O., Çallıoğlu, H., Ataş, C., Köksal N.S., 2002. Nonlinear stress analysis of unidirectionally reinforced symmetric aluminum metal-matrix laminated beams under a bending moment, *J. of Science and Engineering of Composite Materials*. 10, 5, 365-375.
- Sayman, O., Yeni E. Ç., Toygar E., Şenel M., 2003. Thermal residual stresses in aluminum metal-matrix antisymmetric laminated plates under uniform temperature distribution”, *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 22, 10, 913-926.
- Sayman, O., Yıldız H., Aktaş M., 2004. Effects of hardening parameter and strain hardening exponent on residual stress and plastic zone growth in aluminium metal-matrix composites under out of plane loading, *J. of Reinforced plastics and Composites*, 23, 2065-2080.
- Sayman, O., 2003. Elastic-plastic and residual stresses in symmetric aluminum metal-matrix laminated plates under a linear thermal loading, *Journal of Thermal Stresses*, 26, 391-406.
- Sayman, O., 2004. Thermal stress analysis in an aluminum metal-matrix orthotropic disc, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23, 1473-1479.
- Sayman, O., 2005. Elastic-plastic stress analysis of symmetric aluminum metal-matrix composite laminated plates under thermal loads varying linearly, *Composites Part B: Engineering*, 36, 61-72.
- Sayman, O., 2006. Stress analysis of a thermoplastic composite disc under uniform temperature distribution, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19, 1, 61-77.
- Staab, G. H., 1999. *Laminar Composites*, US: Butterworth-Heinemann.
- Swhartz, M.M., 1992. *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- Şahin, Y., 2006. *Kompozit malzemelere giriş*, Seçkin yayıncılık san. ve tic. A.Ş, Ankara.
- Şen, F., 2001. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantısının laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve ısıl gerilmelerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Şen, F. Palancıoğlu, H., 2005.  $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_2$  tarzında simetrik ve antisimetrik oryantasyona sahip tabakalı ve delikli termoplastik kompozitlerde üniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen ısıl gerilmelerin analizi, *Mühendis ve Makine*, 546, 27-35.

- Şen, F., 2006. An investigation of thermal elasto-plastic stress analysis of laminated thermoplastic composites with a circular hole under uniform temperature loading, *Science and Engineering of Composite Materials*, 13, 213-224.
- Şen, F., 2006. The estimation of elasto-plastic thermal and residual stresses in a thermoplastic composite disc under uniform temperature effect, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 25, 1485-1498.
- Şen, F. Palancıoğlu, H. 2006. apraz takviye edilmiş kare delikli termoplastik kompozit levhalarda ısıl gerilme analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 173-181.
- Şen, F., 2007. Elastic-plastic thermal stresses in a composite disc with multiple holes, *Advanced Composite Letters*, 16/3, 95-103.
- Şen, F., 2007. Farklı aılarda takviye edilmiş kare delikli alüminyum metal-matrisli kompozit plaklarda ısıl gerilmelerin hesaplanması, *Teknoloji Dergisi*, 10, 1, 21-30.
- Şen, F., 2008. The effect on thermal and residual stresses of parabolic temperature loading in a thermoplastic composite disc, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 51-67.
- Taşgetiren, S., 1999. Kompozit malzemelere giriş ders notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- URL-1, <http://www.scribd.com/doc/65056285/MMK-son>. 12 Kasım 2011.
- URL-2, <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-57.pdf>. 12 Kasım 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Bahadır Hakan AKYÜZ

**Doğum Yılı** : 1979

**Doğum Yeri** : Konya

### **Eğitim Durumu:**

**Lisans** : 1998-2003 Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine  
Mühendisliği Bölümü

### **Haberleşme Adresi:**

**Adres** :Mercedes-Benz TÜRK A.Ş. Kamyon Fabrikası  
Yan Sanayi Yönetimi 68100 Aksaray

**Tlf** : 0 532 3041398

**e-posta** : bahadir.hakan.akyuz@gmail.com