



**T.C.  
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Al-Si ESASLI FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ VE  
DERECELENDİRİLMEMİŞ SİLİNDİRİK PARÇALARIN SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih CİVELEK  
(201592221600)**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Cem ERTEK**

**SIVAS  
EYLÜL 2018**

**Fatih CİVELEK**'in hazırladığı ve “**Al-Si ESASLI FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ VE DERECELENDİRİLMEMİŞ SİLİNDİRİK PARÇALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**      **Dr. Öğr. Üyesi Cem ERTEK**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi



**Jüri Üyesi**              **Dr. Öğr. Üyesi Doğan Engin ALNAK**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi



**Jüri Üyesi**              **Doç. Dr. Sinan SEZEK**  
Atatürk Üniversitesi



Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. İsmail ÇELİK**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.





Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Fatih CİVELEK, 2018

## **ETİK**

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

27.07.2018

Fatih CİVELEK

## ÖZET

### Al-Si ESASLI FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ VE DERECELENDİRİLMEMİŞ SİLİNDİRİK PARÇALARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

**Fatih CİVELEK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cem ERTEK**

**2018, 66+xv sayfa**

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM)'ler dereceli yapıları nedeniyle spesifik özelliklere sahiptirler. Bu malzemeler pek çok alanda kullanılmaktadır, özellikle termal bariyer uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. FDM'lerin imalatı için pek çok farklı yöntem kullanılabilir. Silindirik parçaların fonksiyonel derecelendirilmiş bir yapıda imalatı için santrifüj döküm yöntemi oldukça uygun bir metottür. Bu çalışmada, malzeme olarak Al-Si alaşımı seçilmiştir. İç yüzeyinde %32 (hacimsel oran), dış yüzeyinde %8,5 Si içeren fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın ve %22 Si içeren derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılmıştır. Bu parçaların boyutları (iç çap 74 mm; et kalınlığı 6 mm ve boyu 165 mm), 2012-2016 yılları arasında Türkiye'de en çok satılan benzinli binek araçların silindir boyutları dikkate alınarak belirlenmiştir. Silindirik parçalar aynı ısıl yüke ve aynı aşınma koşullarına maruz bırakılmıştır. Isıl genişleme sonucu oluşan en yüksek Von Mises gerilmesi fonksiyonel derecelendirilmiş parça için 47,526 MPa, derecelendirilmemiş parça için ise 95,487 MPa olarak bulunmuştur. Aşınma analizi sonucu ise fonksiyonel derecelendirilmiş parçanın aşınma oranının derecelendirilmemiş parçanınkinden yaklaşık %14 daha az olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Al-Si alaşımları, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sonlu elemanlar yöntemi.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED AND UNGRADED CYLINDRICAL PARTS MADE OF Al-Si ALLOY BY FINITE ELEMENT METHOD**

**Fatih CİVELEK**

**Master of Science Thesis**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Cem ERTEK**

**2018, 66+xv pages**

Functionally graded materials (FGM) have specific properties due to their graded structures. These materials are used in many areas, especially in thermal barrier applications. Many different methods can be used for manufacturing of functionally graded materials. Centrifugal casting is a very convenient method for the production of cylindrical parts to gain them functionally graded structure. In this project, Al-Si alloy was chosen as material. Functionally graded cylindrical part having 32% (volume fraction) Si content on inner surface, 8,5% Si content on outer surface and ungraded (homogeneous) cylindrical part having 22% Si content was analyzed by the finite element method. The dimensions (inner diameter 74 mm; wall thickness 6 mm and length 165 mm) of these parts were determined by considering the cylinder dimensions of the gasoline passenger cars best-selling between 2012 and 2016 in Turkey. Cylindrical parts were exposed to the same thermal load and same wear conditions. The maximum Von Mises stress because of the thermal expansion was found to be 47,526 MPa for the functionally graded part and 95,487 MPa for the ungraded part. As a result of the wear analysis, it was found that the wear rate of the functionally graded part is about 14% less than that of the ungraded part.

**Key Words:** Al-Si alloys, functionally graded materials, finite element method.

## **KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR**

Çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Cem ERTEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.





# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER</b> .....	4
2.1 Giriş .....	4
2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin İmalat Yöntemleri .....	6
2.2.1 Toz metalürjisi yöntemi .....	6
2.2.2 Basınçlı filtreleme yöntemi.....	8
2.2.3 Şerit döküm yöntemi.....	9
2.2.4 Slip döküm yöntemi.....	9
2.2.5 İnfiltrasyon yöntemi.....	10
2.2.6 Kontrollü kalıp doldurma yöntemi .....	10
2.2.7 Santrifüj döküm yöntemi .....	11
2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Kullanım Alanları .....	12
2.3.1 Havacılık .....	13
2.3.2 Biyomedikal.....	13
2.3.3 Savunma.....	14
2.3.4 Enerji.....	14
2.3.5 Optoelektronik .....	15
2.3.6 Endüstriyel malzemeler .....	15
2.4 Literatür Araştırması .....	16
<b>3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ</b> .....	21
3.1 Giriş .....	21
3.2 Sonlu Elemanlar Yönteminde İzlenen İşlem Adımları .....	22
3.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları .....	24
<b>4. MALZEME VE YÖNTEM</b> .....	26
4.1 Malzeme Seçimi ve Model Tasarımı.....	26
4.2 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	30
4.2.1 Mekanik özelliklerin belirlenmesi .....	30
4.2.2 Termal özelliklerin belirlenmesi .....	38
<b>5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE YAPILAN ANALİZLER</b> .....	43
5.1 Isıl Gerilme Analizi .....	43
5.2 Aşınma Analizi.....	56
<b>6. TARTIŞMA VE SONUÇ</b> .....	58
<b>KAYNAKLAR</b> .....	60

## **EKLER**

EK-1 Aşınma Analizi Matlab Kodları ..... 64

## **ÖZGEÇMİŞ**



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1</b>	Homojen seramik kaplamanın şematik gösterimi (sol) ve kaplamada kırılmaların oluşumu (sağ).....	4
<b>Şekil 2.2</b>	Plazma sprey tekniği ile tabakalı derecelendirilmiş ZrO <sub>2</sub> /NiCoCrAlY ısı bariyer kaplaması ve tabaka bileşim yüzdeleri.....	5
<b>Şekil 2.3</b>	SiC/A356 FDM'in içinde kuvvetlendirici parçacıkların devamlı derecelendirmesi.....	5
<b>Şekil 2.4</b>	Toz karışımlarının hazırlanması.....	6
<b>Şekil 2.5</b>	İstiflenmiş toz karışımları.....	7
<b>Şekil 2.6</b>	Gaz basıncı kullanılan filtreleme düzeneği .....	8
<b>Şekil 2.7</b>	Su basıncı kullanılan filtreleme düzeneği.....	8
<b>Şekil 2.8</b>	Şerit döküm yöntemi için imalat düzeneği.....	9
<b>Şekil 2.9</b>	Kontrollü kalıp doldurma yöntemiyle FDM imalatı.....	10
<b>Şekil 2.10</b>	700 termal çevrim sonrası A356/Duralcan kompozit malzemeler: (a) Derecelendirilmiş arayüze sahip numune (b) Derecelendirilmemiş arayüze sahip numune.....	11
<b>Şekil 2.11</b>	Yatay santrifüj döküm işleminin şematik gösterimi.....	12
<b>Şekil 2.12</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli polipropilen implant.....	13
<b>Şekil 2.13</b>	Balistik teste maruz kalmış zırhlar: (sağ) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedan yapılmış zırh; (sol) çelik zırh.....	14
<b>Şekil 2.14</b>	Mitsubishi Materials Corp imalatı kesici uçlar.....	15
<b>Şekil 3.1</b>	Sonlu elemanlara bölünmüş türbin kanadı profili.....	22
<b>Şekil 3.2</b>	1 boyutlu problemler için eleman tipi.....	23
<b>Şekil 3.3</b>	2 boyutlu problemler için eleman tipleri .....	23
<b>Şekil 3.4</b>	3 boyutlu problemler için eleman tipleri.....	23
<b>Şekil 4.1</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça: (a) Parçanın tamamı; (b) 10°'lik kısmın 20 kat büyütülmüş gösterimi ve katmaların Si oranı.....	28
<b>Şekil 4.2</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parça.....	28
<b>Şekil 4.3</b>	Al-Si alaşımının elastisite modülünün Si oranı ve sıcaklık ile değişimi.....	36
<b>Şekil 4.4</b>	Oda sıcaklığındaki Al-Si alaşımlarının elastisite modüllerinin Si oranı ile değişimi: (1) Hızlı soğutma, (2) Geleneksel döküm.....	37
<b>Şekil 4.5</b>	Al-Si alaşımının kayma modülünün Si oranı ve sıcaklık ile değişimi.....	37
<b>Şekil 4.6</b>	20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerinde Al-Si alaşımının ısı genleşme katsayısının Si oranı ile değişimi.....	39
<b>Şekil 4.7</b>	Al-Si alaşımının ısı iletim katsayısının Si oranı ile değişimi.....	40
<b>Şekil 5.1</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça modeli.....	43
<b>Şekil 5.2</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş modelin katmanları ve Si oranları.....	44
<b>Şekil 5.3</b>	Sonlu eleman ağı oluşturulmuş fonksiyonel derecelendirilmiş parça...	45
<b>Şekil 5.4</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın düz yüzeylerindeki sonlu eleman ağı.....	45
<b>Şekil 5.5</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın iç yüzeyinin sıcaklık dağılımı.....	46

<b>Şekil 5.6</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın dış yüzeyinin sıcaklık dağılımı.....	47
<b>Şekil 5.7</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın üç boyutlu sıcaklık dağılımı.....	48
<b>Şekil 5.8</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçada ısı genleşmeler sonucu meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	49
<b>Şekil 5.9</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş parçada %32 oranında Si içeren katmanın iç yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	49
<b>Şekil 5.10</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın üst yüzeyinde ( $z=165$ mm) meydana gelen Von Mises gerilmeler.....	50
<b>Şekil 5.11</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın alt yüzeyinde ( $z=0$ mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	50
<b>Şekil 5.12</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın iç yüzeyinde $z$ eksen yönündeki normal gerilmeler.....	51
<b>Şekil 5.13</b>	Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın dış yüzeyinde $z$ eksen yönündeki normal gerilmeler.....	51
<b>Şekil 5.14</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın üç boyutlu sıcaklık dağılımı.....	52
<b>Şekil 5.15</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçada ısı genleşmeler sonucu meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	53
<b>Şekil 5.16</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın iç yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	53
<b>Şekil 5.17</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın üst yüzeyinde ( $z=165$ mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	54
<b>Şekil 5.18</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın alt yüzeyinde ( $z=0$ mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.....	54
<b>Şekil 5.19</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın iç yüzeyinde $z$ eksen yönündeki normal gerilmeler.....	55
<b>Şekil 5.20</b>	Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın dış yüzeyinde $z$ eksen yönündeki normal gerilmeler.....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1</b>	Al-Si alaşıımının kimyasal bileşimi (% ağırlık) .....	26
<b>Çizelge 4.2</b>	Türkiye'de 2012-2016 yılları arasında en çok satılan binek araç marka ve modelleri.....	26
<b>Çizelge 4.3</b>	Türkiye'de 2012-2016 yılları arasında en çok satılan binek araç modelleri için teknik veriler.....	27
<b>Çizelge 4.4</b>	Katmanların silisyum oranları ve boyutları.....	29
<b>Çizelge 4.5</b>	25 °C'de Al ve Si elementlerinin elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluğu.....	31
<b>Çizelge 4.6</b>	25 °C'de Al ve Si elementlerinin sıkışmazlık modülü ve kayma modülü.....	32
<b>Çizelge 4.7</b>	15 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerinde alüminyumun elastisite modülü ve kayma modülü.....	32
<b>Çizelge 4.8</b>	100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerinde alüminyumun sıkışmazlık modülü ve poisson oranı.....	33
<b>Çizelge 4.9</b>	Her bir alaşıımın 25 °C sıcaklıktaki mekanik özellikleri ve yoğunluğu.....	34
<b>Çizelge 4.10</b>	Her bir alaşıımın 100 °C sıcaklıktaki mekanik özellikleri.....	35
<b>Çizelge 4.11</b>	Her bir alaşıımın 200 °C sıcaklıktaki mekanik özellikleri.....	36
<b>Çizelge 4.12</b>	Alüminyum ve silisyumun 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerindeki lineer ısıl genleşme katsayıları.....	38
<b>Çizelge 4.13</b>	Her bir alaşıımın 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerindeki lineer ısıl genleşme katsayıları.....	39
<b>Çizelge 4.14</b>	Alüminyum ve silisyumun ısı iletim katsayıları.....	41
<b>Çizelge 4.15</b>	Belirlenen Si oranları için Al-Si alaşıımlarının ısı iletim katsayıları.....	41
<b>Çizelge 4.16</b>	Belirlenen Si oranları için hesaplanan $\alpha$ değerleri.....	41
<b>Çizelge 4.17</b>	Her bir Al-Si alaşıımının 25 °C, 127 °C ve 227 °C'deki ısı iletim katsayıları.....	42
<b>Çizelge 5.1</b>	Farklı eleman boyutu kullanıldığında fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçada meydana gelen maksimum Von Mises gerilmeleri.....	56

## SİMGELER DİZİNİ

<b>B</b>	Sıkışmazlık modülü, GPa
<b>B<sub>Al</sub></b>	Alüminyumun sıkışmazlık modülü, GPa
<b>B<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının sıkışmazlık modülü, GPa
<b>B<sub>Si</sub></b>	Silisyumun sıkışmazlık modülü, GPa
<b>CTE<sub>Al</sub></b>	Alüminyumun lineer ısı genleşme katsayısı, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
<b>CTE<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının lineer ısı genleşme katsayısı, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
<b>CTE<sub>Si</sub></b>	Silisyumun lineer ısı genleşme katsayısı, $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
<b>d<sub>Al</sub></b>	Alüminyumun yoğunluğu, $\text{kg}/\text{m}^3$
<b>d<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının yoğunluğu, $\text{kg}/\text{m}^3$
<b>d<sub>Si</sub></b>	Silisyumun yoğunluğu, $\text{kg}/\text{m}^3$
<b>E</b>	Elastisite modülü, GPa
<b>E<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının elastisite modülü, GPa
<b>E<sub>t</sub></b>	t sıcaklık değerindeki elastisite modülü, GPa
<b>F</b>	Sağ taraf vektörü
<b>J</b>	Aşınma yüzeyine dik doğrultuda etki eden kuvvet, N
<b>k</b>	Aşınma faktörü, $\text{m}^2/\text{N}$
<b>k<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının aşınma faktörü, $\text{m}^2/\text{N}$
<b>K<sub>Al</sub></b>	Alüminyumun ısı iletim katsayısı, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
<b>K<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının ısı iletim katsayısı, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
<b>K<sub>Si</sub></b>	Silisyumun ısı iletim katsayısı, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$
<b>L</b>	Kayma mesafesi, m
<b>m<sub>Si</sub></b>	Al-Si alaışımı içerisindeki silisyumun ağırlıkça oranı, $\text{kg}/\text{kg}$
<b>R</b>	Rijitlik matrisi
<b>S</b>	Kayma modülü, GPa
<b>S<sub>Al</sub></b>	Alüminyumun kayma modülü, GPa
<b>S<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının kayma modülü, GPa
<b>S<sub>Si</sub></b>	Silisyumun kayma modülü, GPa
<b>S<sub>t</sub></b>	t sıcaklık değerindeki kayma modülü, GPa
<b>t</b>	Sıcaklık değeri, $^{\circ}\text{C}$ (santigrat derece)
<b>u</b>	Bilinmeyenler vektörü
<b>v<sub>Al</sub></b>	Al-Si alaışımı içerisindeki alüminyumun hacimsel oranı, $\text{m}^3/\text{m}^3$
<b>v<sub>Si</sub></b>	Al-Si alaışımı içerisindeki silisyumun hacimsel oranı, $\text{m}^3/\text{m}^3$
<b>W<sub>v</sub></b>	Aşınan hacim, $\text{m}^3$
<b><math>\alpha</math></b>	Partikül takviyeli kompozit malzemelerdeki partikül yarıçapının Kapitza yarıçapına oranı
<b><math>\beta</math></b>	Elastisite modülü sıcaklık katsayısı
<b><math>\beta'</math></b>	Kayma modülü sıcaklık katsayısı
<b>v</b>	Poisson oranı
<b>v<sub>AlSi</sub></b>	Farklı oranda silisyum içeren her bir Al-Si alaışımının poisson oranı

## KISALTMALAR DİZİNİ

- CÜ** : Sivas Cumhuriyet Üniversitesi  
**FDM** : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme  
**İTÜ** : İstanbul Teknik Üniversitesi



## 1. GİRİŞ

Dökme demirin alternatifi olarak Al-Si alaşımları, motor parçaları imalatında günümüzde giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Ağırlığına oranla yüksek mukavemete sahip olmasının yanında, Al-Si alaşımları yanma sonucu açığa çıkan ısının hızla uzaklaştırılabilmesi için gereken ısı iletim özelliğine de sahiptir [1]. Al-Si alaşımlarının bir diğer önemli özelliği ise toplam motor ağırlığının azalmasını sağlayan, göreceli olarak düşük özgül ağırlığıdır. Bu alaşımların ısı iletim katsayısı, dökme demirin ısı iletim katsayısından yaklaşık olarak üç kat daha yüksektir. Al-Si alaşımlarından imal edilmiş silindir bloğu, ısıyı daha hızlı ve dengeli uzaklaştırır ve böylece soğutma sisteminde daha az soğutma sıvısına ihtiyaç duyulur. Al-Si alaşımlarının döküm sıcaklığının düşük olması, döküm kalıbındaki termal yükü göreceli olarak azalttığından daha iyi yüzey kalitesine ve daha yüksek boyutsal doğruluğa sahip döküm parçaların imalatına olanak sağlar [2]. Al-Si alaşımlarının otomotiv endüstrisindeki uygulamaları, özellikle silindir gömlekleri olmak üzere motor parçalarını ve motor bloklarını içermektedir. Bu alaşımların kullanımı; motor ağırlığının azaltılması, daha az egzoz gazı salınımı ve daha az yakıt tüketimi gibi avantajlar sağlamaktadır [3].

Hiperötektik Al-Si alaşımından imal edilmiş motor bloğu kullanımı pek çok firma tarafından düşünülmüştür. Al<sub>17</sub>Si<sub>4</sub>CuMg alaşımı kullanarak silindir bloğu dökümü oldukça zor ve pahalı bir işlemdir bu nedenle motor blokları daha ucuz olan hipoötektik Al-Si alaşımlarından imal edilmektedir. Bu alaşımların tribolojik özellikleri, yanma odası yüzeyinde kullanımları için uygun değildir. Bu sorunun çözümü için, yüzey kaplama işlemi ya da gömlek kullanımı gerekmektedir [3]. Silindir yüzeyinin elektro kaplama yöntemi kullanılarak Ni/SiC (Nikasil) kompozit malzemeyle kaplanmasıyla gerekli olan tribolojik özellikler kazandırılabilir. Ancak nikel içeren kaplamalar sülfüre karşı aşırı duyarlıdır ve sülfür içeren benzin kullanıldığında zamanla kaplamada bozulmalar meydana gelebilir [4]. Nikasil (Ni-SiC) dışında titanyum nitrür (TiN) ve titanyum alüminyum nitrit (TiAlN) de silindir yüzeyleri için kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fakat TiN ve TiAlN kaplamaların yapımında kullanılan fiziksel buhar biriktirme yöntemi pahalı bir yöntemdir [5].



Ekonomik olmasından dolayı hipoötektik Al-Si alaşımından imal edilmiş motor bloklarının pek çoğunda dökme demir silindir gömlekleri kullanılır. Fakat dökme demir gömlek kullanımını bazı sorunları beraberinde getirmektedir. Bunlardan bazıları şunlardır: Dökme demir gömlek ile silindir bloğu arasındaki bağ yalnızca mekaniktir, metalik bağ yoktur, bu durum ısı iletimini zorlaştırmaktadır. Al-Si alaşımı ile dökme demirin ısıl genleşme katsayılarının farklı olması silindir gömleğinin deformasyona uğramasına neden olabilir. Ayrıca dökme demir gömlekler motor ağırlığının artmasına neden olmaktadır [4].

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, iki ya da daha fazla fazdan oluşan gelişmiş bir kompozit türüdür. Malzeme içerisindeki fazların, yapı içerisindeki kompozisyonunun ve/veya mikro yapısının belirli bir yönde değişimi sonucu dereceli yapı oluşmaktadır. Dereceli yapı, geleneksel kompozitlerde sıklıkla karşılaşılan lokal gerilme yığılmalarının, termal ve artık gerilmelerin azalmasını sağlamaktadır. Santrifüj döküm yöntemi, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme imalatının ekonomik olarak yapılabileceği en basit yöntemlerden biridir. Santrifüj döküm yöntemiyle, takviye parçacıklarının radyal doğrultudaki konsantrasyonu ayarlanabilir. Böylece termal boyutsal kararlılığı ve aşınma direnci daha iyi olan parçaların imalatı yapılabilir [6].

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, santrifüj döküm yöntemi kullanılarak Al-Si alaşımından yapılmış fonksiyonel derecelendirilmiş silindir gömleğinin uygulamada pek çok fayda getireceği düşünülmüştür. Santrifüj döküm yöntemi ile imal edilecek olan silindir gömleği, fonksiyonel derecelendirilmiş yapıda olacaktır. Silisyumun yoğunluğunun, alüminyumun yoğunluğundan küçük olması nedeniyle santrifüj kuvvetin etkisiyle silisyum miktarı, silindir gömleğinin iç yüzeyinde en fazla ve radyal yönde giderek azalarak, dış yüzeyde en az olacaktır. Dökme demir silindir gömleği ile karşılaştırıldığında, Al-Si alaşımından imal edilen fonksiyonel derecelendirilmiş silindir gömleği;

1-Yoğunluğunun az olması nedeniyle motor ağırlığının düşürülmesini,

2-Dökme demir gömleklerle alüminyum silindir blokları arasındaki ısıl genleşme katsayısı farklılığından kaynaklanan sorunların giderilmesini,

3- Fonksiyonel derecelendirilmiş gömlekler, dış yüzeylerinin silindir bloğuyla aynı oranda Si içermesi sayesinde motor bloğuyla daha uyumlu çalışacak ve iç

yüzeylerinin yüksek oranda Si içermesinden dolayı aşınma direncinin artmasını sağlayacaktır.

Yukarıda sayılan nedenlerle bu çalışmada, Al-Si esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş ve derecelendirilmemiş içi boş silindirik parçaların, sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri ve karşılaştırılmaları yapılmıştır.

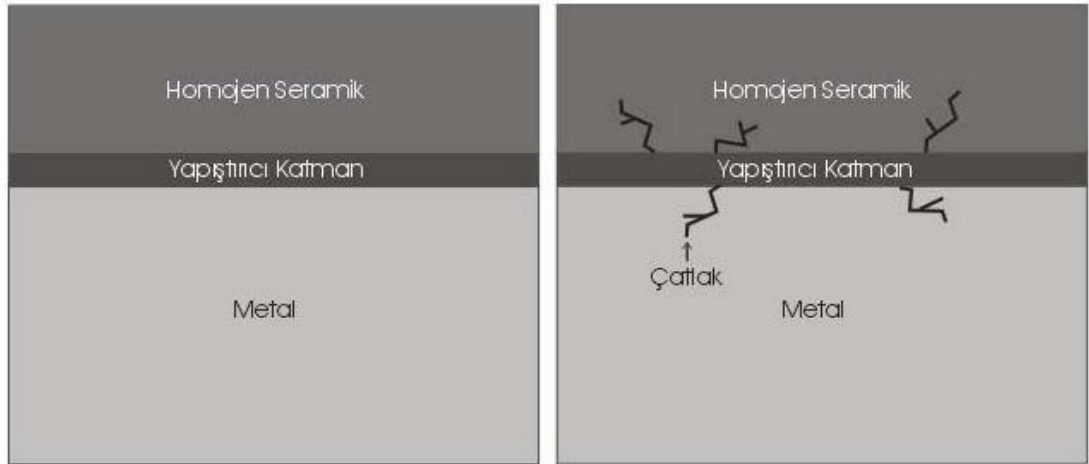


## 2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

### 2.1 Giriş

Uzay araçlarında 1500 °C'ye varan sıcaklıklara maruz kalan bölgelerde, metal yüzeyleri farklı yöntemlerle homojen seramik tabakalarla kaplanır. Böylece metal korozyona, oksidasyona ve aşınmaya karşı korunsa da sistem yüksek düzeylerde ısıl gerilme sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sorunun çözümü için Japonya'da bir üniversitede 1984-1985 yıllarında uzay araçları ve hava taşıtlarının AR-GE çalışmaları sırasında Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin (FDM) temelleri atılmıştır [7].

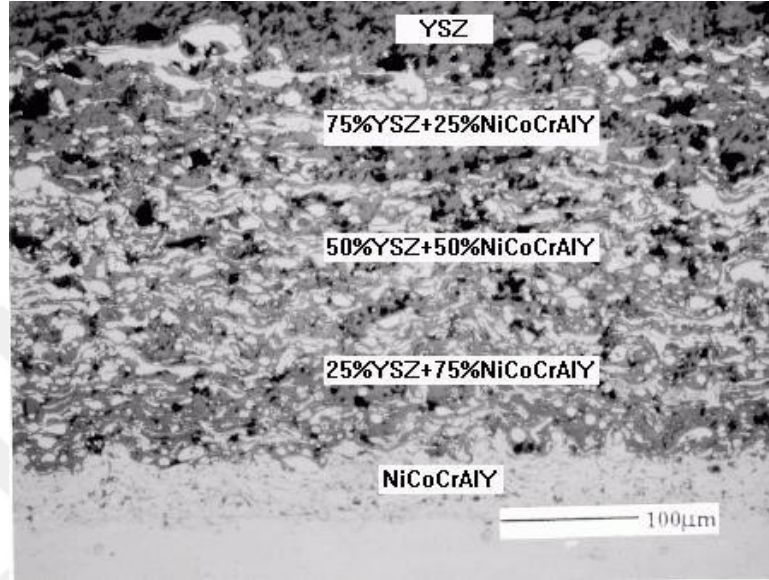
Sıcaklığın olumsuz etkilerinden korunması için yüksek sıcaklığa maruz kalan malzemeler, sıcaklığa karşı dirençli olan seramik malzemelerle kaplanmaktadır. Termal bariyer olarak adlandırılan bu sistemde bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Homojen seramik ve metalin termal genişleme katsayıları arasındaki uyumsuzluk nedeniyle sistem yüksek sıcaklığa maruz kaldığında bağlanma bölgesinde termal gerilmeler meydana gelir, bunun sonucunda da arayüz çatlakları ve kırılmalar oluşur (Şekil 2.1) [7].



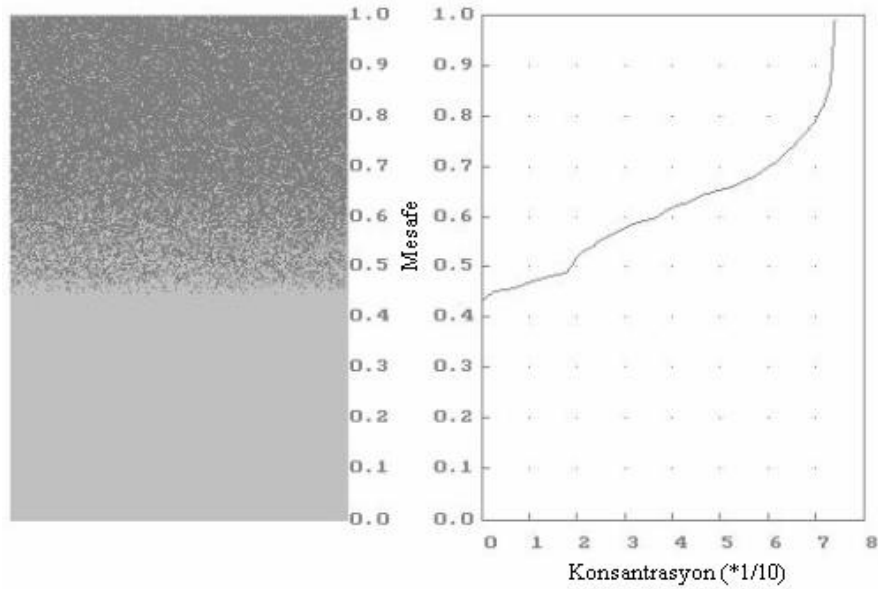
**Şekil 2.1** Homojen seramik kaplamanın şematik gösterimi (sol) ve kaplamada kırılmaların oluşumu (sağ) [7].

Söz konusu uyumsuzlukları gidermek ve ısıl gerilmeleri azaltmak amacıyla fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin sahip olduğu dereceli yapı sayesinde metal korozyona, oksidasyona ve aşınmaya karşı

korunur, ayrıca dereceli yapı seramik kaplamada oluşan kırılmaların, arayüz ve yüzey çatlaklarının en aza indirilmesini sağlar. FDM'lerde dereceli yapı, ihtiyaca ve kullanılan imalat yöntemine bağlı olarak tabakalı (Şekil 2.2) veya devamlı (Şekil 2.3) derecelendirilmiş şekilde olabilir [7].



**Şekil 2.2** Plazma sprej tekniği ile tabakalı derecelendirilmiş  $ZrO_2/NiCoCrAlY$  ısı bariyer kaplaması ve tabaka bileşim yüzdeleri [7].

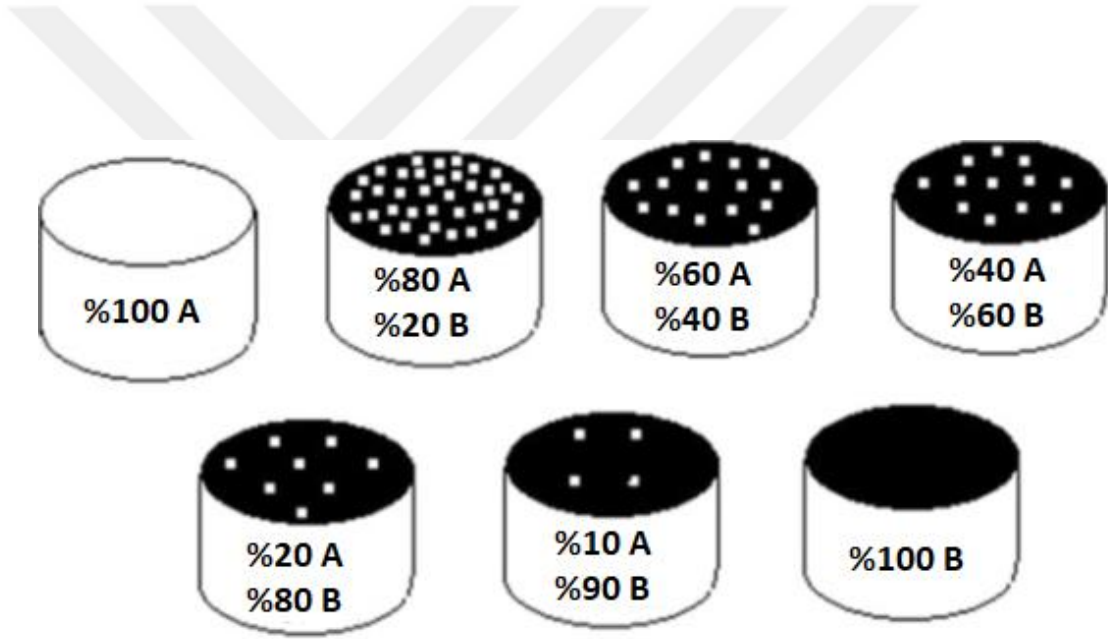


**Şekil 2.3** SiC/A356 FDM'in içinde kuvvetlendirici parçacıkların devamlı derecelendirmesi [7].

## 2.2 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin İmalat Yöntemleri

### 2.2.1 Toz metalürjisi yöntemi

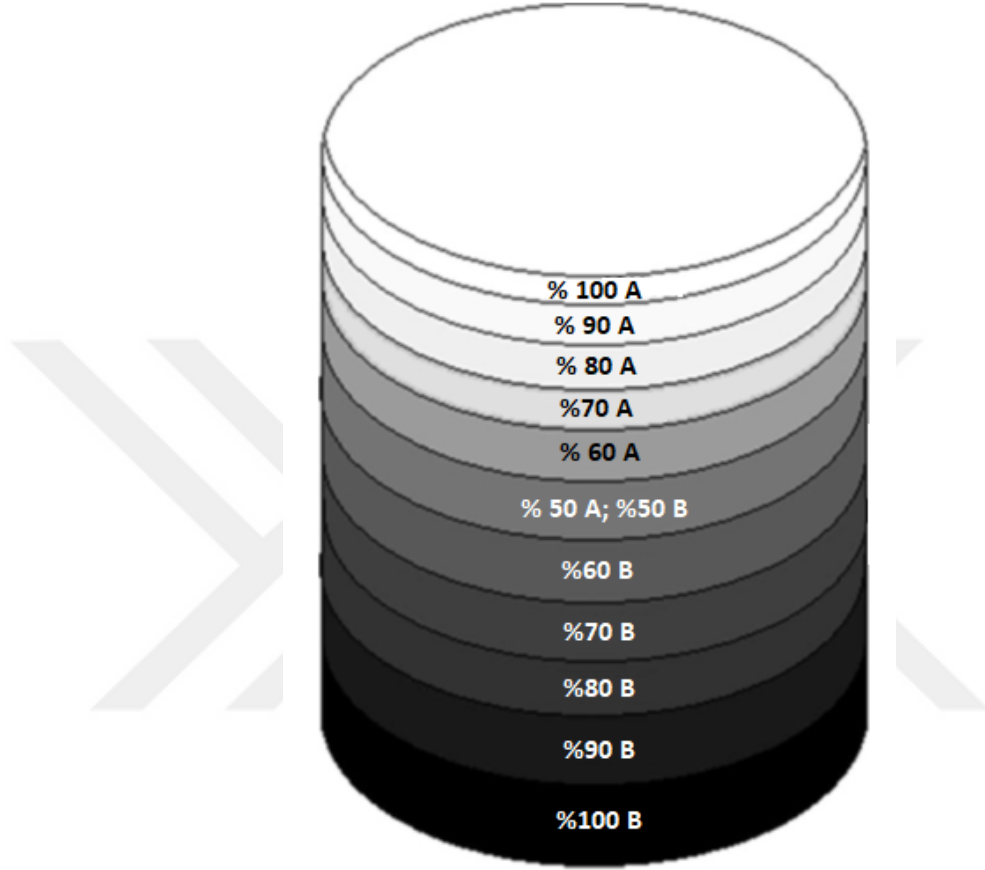
Toz metalürjisi yöntemi, imalatta geçmişten bu yana kullanılan eski bir yöntemdir ve günümüzde FDM elde edilmesi için de kullanılmaya başlanmıştır. Toz metalürjisi ile FDM imalatı, toz hazırlama, şekillendirme işlemi ve imalatı yapılacak olan FDM'nin kullanım alanına göre sinterleme ya da sıcak presleme aşamalarından meydana gelir. FDM'nin tasarımına bağlı olarak, ortalama parçacık büyüklüğünün veya kompozisyonunun değiştiği toz karışımları bu imalat yönteminde yapıtaşı olarak kullanılmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin tasarımına bağlı olarak hazırlanan toz karışımları örneği Şekil 2.4'de gösterilmiştir [8].



Şekil 2.4 Toz karışımlarının hazırlanması [8].

Derecelendirilmiş tozlar istiflenerek, imal edilecek ıslak parçanın kompozisyonunda basamaklı bir değişim elde edilir. Islak kelimesinin kullanılmasının nedeni, yapının sinterleme öncesinde kolay dağılabilir nitelikte olmasıdır.

Islak parçanın hazırlanmasından sonra tozların birleşmesi için sinterleme ya da sıcak presleme işlemi uygulanır. Şekil 2.5’de istiflenmiş toz karışımları örneği gösterilmektedir [8].

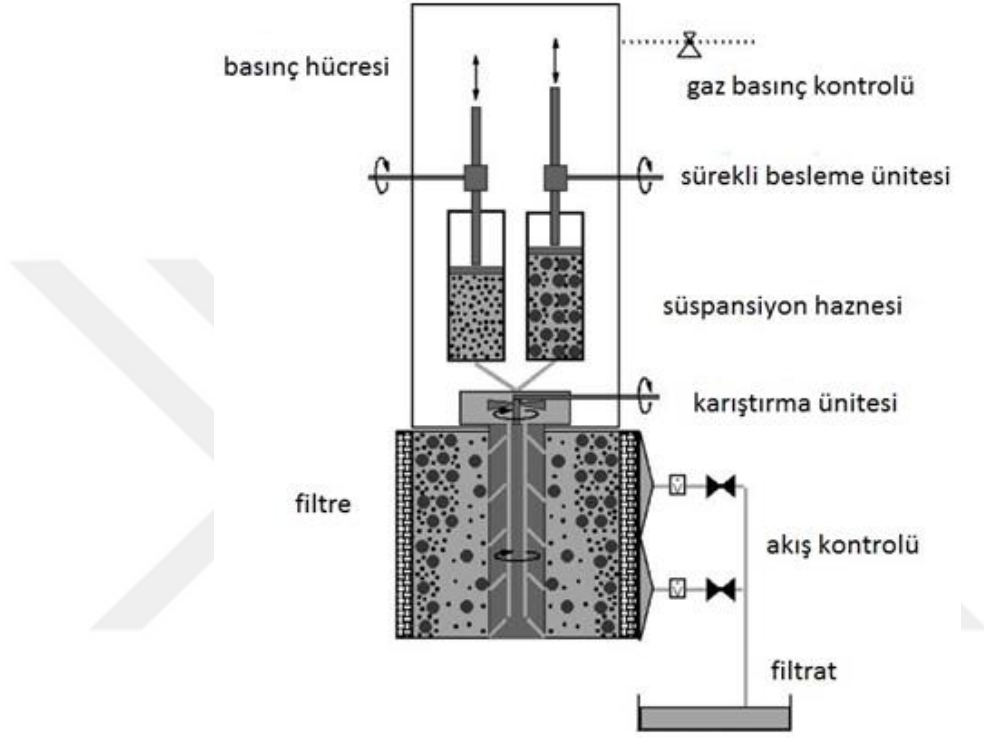


Şekil 2.5 İstiflenmiş toz karışımları [8].

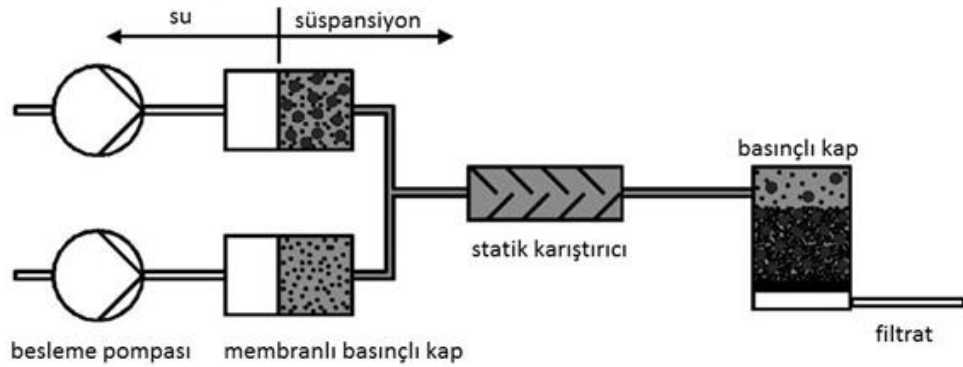
İstifleme işleminden sonra sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir ve böylece ıslak parça sinterleme işlemi için hazır hale getirilmiş olur. Ardından ıslak parça, toz karışımı içerisinde en düşük ergime sıcaklığına sahip bileşenin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıktaki fırına yerleştirilir. Fırın sıcaklığı, en düşük ergime sıcaklığına sahip olan tozun yüzeyinde ergimeye neden olacak kadar yüksektir. Yüzeyde oluşan ergime, tozların birbirine bağlanmasını sağlar ve malzemeye dayanım kazandırır. Sinterleme işlemi sırasında, basıncın uygulanmasıyla gerçekleştirilen işlem, sıcak presleme olarak adlandırılır. Bu işlem, yüksek yoğunluğa sahip malzeme imalatı yapılmak istenildiğinde tercih edilmektedir [8].

## 2.2.2 Basınçlı filtreleme yöntemi

Filtreleme sistemine beslenen süspansiyondaki toz kompozisyonunun sürekli olarak değiştirilmesiyle tek doğrultuda derecelendirilme yapılır. Şekil 2.6'da gaz ve Şekil 2.7'de su kullanılan filtreleme sistemleri gösterilmiştir [9].



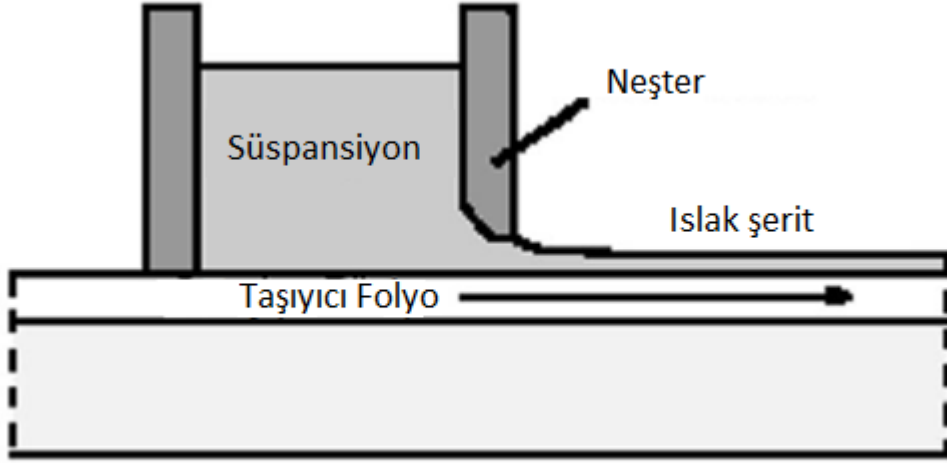
Şekil 2.6 Gaz basıncı kullanılan filtreleme düzeneği [9].



Şekil 2.7 Su basıncı kullanılan filtreleme düzeneği [9].

### 2.2.3 Şerit döküm yöntemi

Toz içeren süspansiyonun, taşıyıcı folyo üzerine ince ıslak şerit şeklinde dağıtılmasıyla gerçekleştirilen bu yöntemde ıslak şerit kalınlığı genellikle 25µm ile 1mm arasında değişmektedir (Şekil 2.8). Bu yöntem ile 1 µm kalınlığa kadar şerit imalatı yapılabilir. Şerit döküm yöntemi su, toz ve bağlayıcı içeren süspansiyon hazırlanması ve ıslak şeridin kurutulmasıyla katılaştırılması aşamalarından oluşur. Bu yöntemle fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme elde etmek için farklı kompozisyona sahip şeritler hazırlanır. Islak şeritler kesilerek üst üste yerleştirilir ve sinterlenir [10].



Şekil 2.8 Şerit döküm yöntemi için imalat düzeneği [10].

### 2.2.4 Slip döküm yöntemi

Slip döküm, seramik endüstrisinde geleneksel olarak uygulanan toz esaslı bir şekillendirme yöntemidir. Bu imalat yönteminde toz içeren süspansiyon gözenekli alçı kalıba dökülür ve kapiler kuvvetler sayesinde süspansiyondaki sıvı süzülür, tozlar alçı kalıbın duvarında birikir daha sonra kalıptan çıkarılan ıslak parça sinterlenir. Derecelendirme, süspansiyon içerisindeki tozların tane boyutunun veya süspansiyon kompozisyonunun değiştirilmesiyle sağlanır [10].

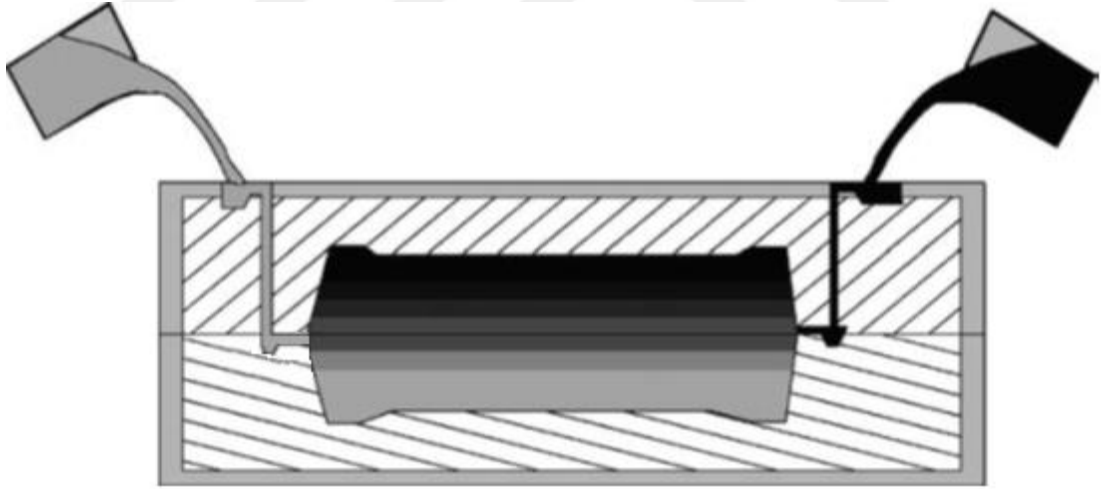


### 2.2.5 İnfiltasyon yöntemi

Ergime noktaları arasında yüksek fark bulunan fazları içeren fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler için uygundur. Bu yöntemde, önceden şekillendirilmiş ve derecelendirilmiş gözenekli yapı, ergime noktası düşük olan sıvı haldeki bileşen ile doldurulur. Gözenekli yapıdaki malzeme sadece açık gözenekler içermeli ve sıvı bileşen içerisinde çözünmemelidir. İnfiltasyon yöntemi özellikle metal/sermik ve cam/seramik FDM imalatı için tercih edilmektedir. Fakat genellikle metal/seramik yapılarda ıslanabilirlik yeterli seviyede değildir, bu nedenle daha geniş gözeneklere ihtiyaç duyulur ve imalat sırasında basınç uygulanır [9].

### 2.2.6 Kontrollü kalıp doldurma yöntemi

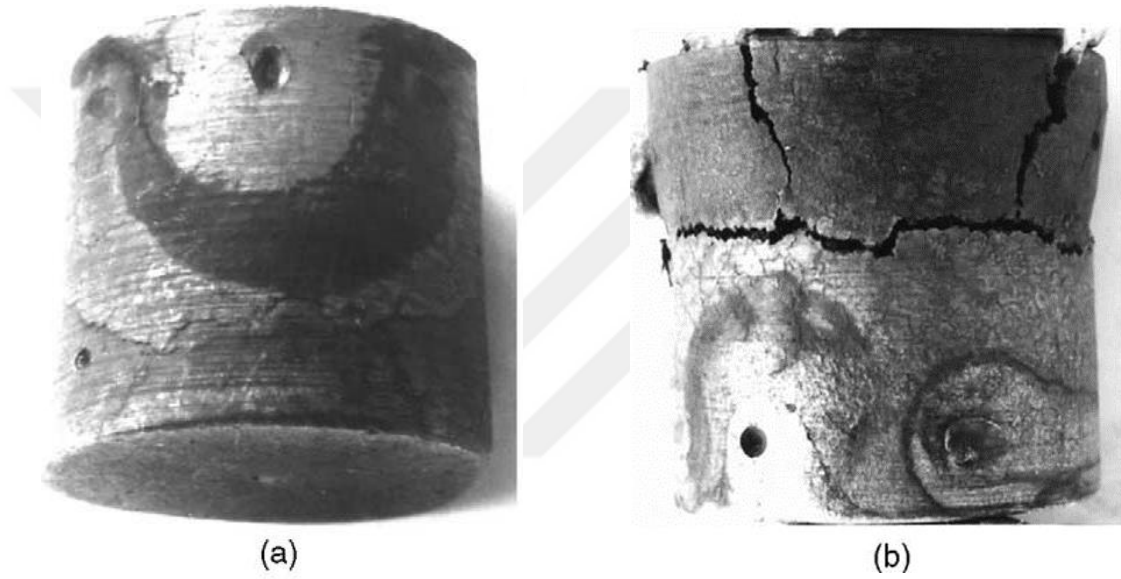
Bu yöntem yerçekimi dökümü veya santrifüj döküm yapılarak iki farklı şekilde uygulanabilir. Yerçekimi döküm yönteminde kalıp birinci ergimiş metal ile bir miktar doldurulur ve sonraki aşamada ikinci ergimiş metal kısmen katılmış malzeme üzerine dökülür (Şekil 2.9) [9].



Şekil 2.9 Kontrollü kalıp doldurma yöntemiyle FDM imalatı [9].

Bu yöntemde, derecelendirilmiş arayüzeyin genişliği ağırlıklı olarak ikinci metalin döküldüğü anda birinci metalin katılma derecesine bağlı olarak kontrol edilir. Dökümün dönen kalıp (santrifüj döküm) kullanılarak gerçekleştirilmesinde ise silindirik parçalar elde edilebilir. Şekil 2.10 kontrollü döküm yöntemi kullanılarak

imal edilen derecelendirilmiş A356/Duralcan kompozit malzemeye ve derecelendirilmemiş A356/Duralcan kompozit malzemeye uygulanan termal şok deneyinin sonucunu göstermektedir. Deneyde A356/Duralcan derecelendirilmiş kompozit malzeme 400 °C'ye kadar ısıtılmış ve su verilmiştir, bu işlem 700 kez tekrar edilmiştir. Deney sonunda derecelendirilmiş malzemede hiçbir hasar görülmemiştir. Aynı deneyde, derecelendirilmemiş A356/Duralcan kompozit malzeme üzerinde 300'cü işlem sonrası çatlaklar gözlenmiş ve deney sonunda ise bu çatlaklar numunenin tamamen tahribatına yol açmıştır [9].



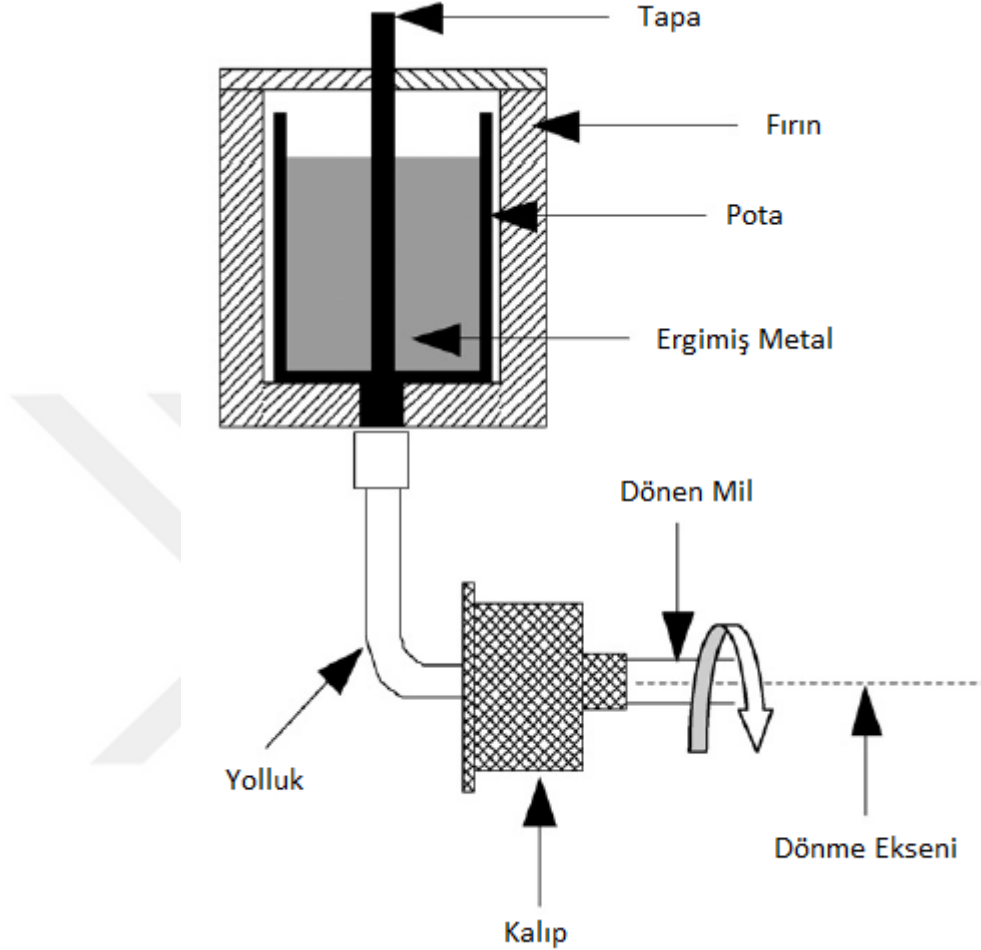
**Şekil 2.10** 700 termal çevrim sonrası A356/Duralcan kompozit malzemeler:  
(a) Derecelendirilmiş arayüze sahip numune (b) Derecelendirilmemiş arayüze sahip numune [9].

### 2.2.7 Santrifüj döküm yöntemi

Santrifüj döküm yönteminde ergimiş metal dönen kalıba dökülür ve metal tamamen katılaşıncaya kadar kalıp hareketine devam eder. Derecelendirilme, malzemeler arasındaki yoğunluk farkı ve kalıbın dönmesi sonucu oluşan merkezkaç kuvvetleri yardımıyla gerçekleştirilir [11].

Santrifüj döküm yöntemiyle sürekli derecelendirme yapılabilir fakat bu yöntem sadece silindirik parçaların imalatı için uygundur. Başka bir sorun ise hangi tür derecelendirme oluşturulacağı sınırlıdır çünkü derecelendirme yoğunluk farkına bağlı

olarak gerçekleşir [11]. Şekil 2.11’de yatay santrifüj döküm düzeneğinin şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Yatay santrifüj döküm işleminin şematik gösterimi [10].

### 2.3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Kullanım Alanları

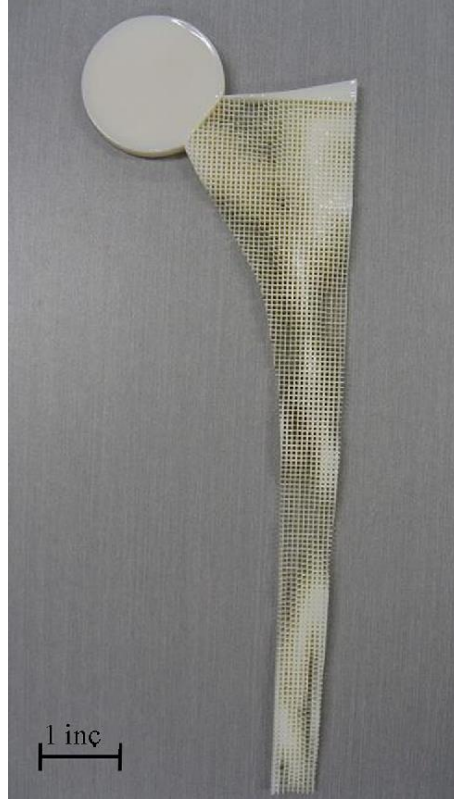
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sahip oldukları karakteristik özellikler sayesinde çoğu alanda tercih edilir duruma gelmiştir. Günümüzde FDM’ler havacılık, biyomedikal, savunma, enerji, denizcilik, optoelektronik vb. alanlarda kullanılmaktadır [8].

### 2.3.1 Havacılık

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ilk olarak uzay taşıtlarının gövde kısımlarında kullanılmaya başlanmıştır. Havacılık endüstrisinde, bu yeni malzemenin kullanımı yıllar geçtikçe artmıştır. Roket motoru parçaları, uzay mekiği kafes sistemleri, ısı değıştirici paneller, türbin kanadı kaplaması vb. havacılıkta kullanılan pek çok araç ve yapı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedendir [8].

### 2.3.2 Biyomedikal

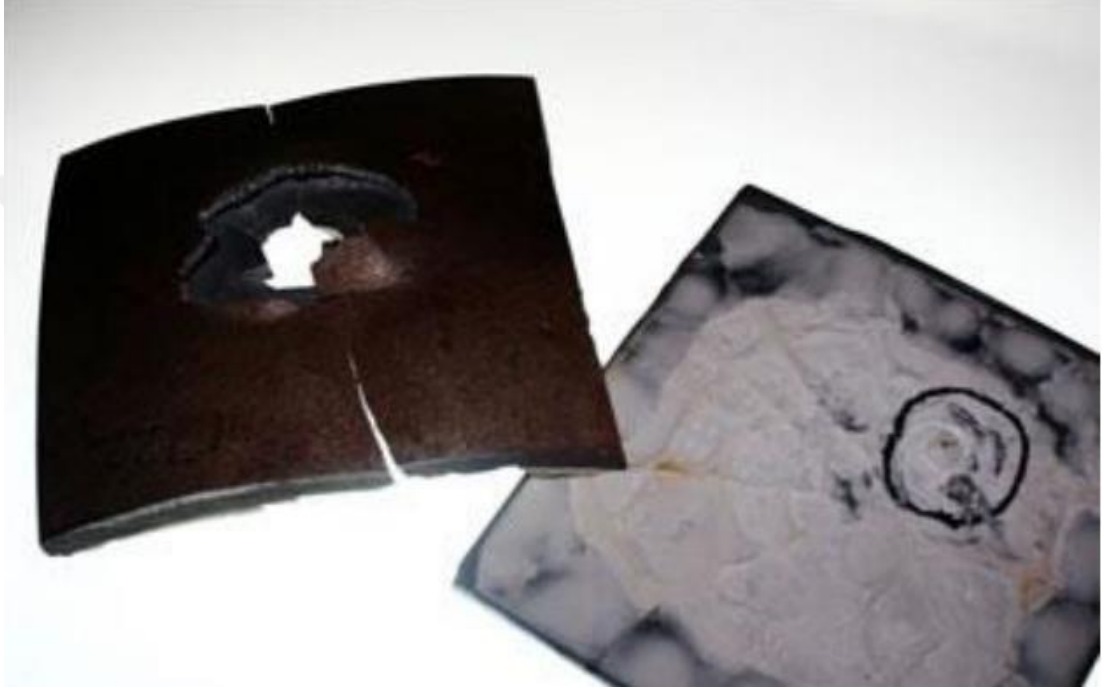
İnsan vücudu, diş ve kemik gibi pek çok fonksiyonel derecelendirilmiş yapı içerir. Dişler ve kemikler, doğal yaşlanma ya da hasar sonucu insan vücudunda en çok değıştirilen kısımlardır. Bu kısımların değıştirilmesinde biyouyumlu malzemeler kullanılır. Gözenekli derecelendirilmiş malzemeler, bu endüstride en yaygın kullanılan malzemelerdir çünkü yer değıştirildikleri vücut kısımlarıyla benzer özelliklere sahiptirler [8]. Şekil 2.12’de fonksiyonel derecelendirilmiş implant örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli polipropilen implant [12].

### 2.3.3 Savunma

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin çatlak ilerlemesini engelleyen özelliklere sahip olmaları, bu malzemeleri savunma sanayi için cazip hale getirmiştir. FDM'ler savunma sanayinde kurşungeçirmez yelek, geleneksel Japon kılıcı ve zırh plaka imalatı için kullanılmaktadır [8]. Şekil 2.13'de balistik test sonucu fonksiyonel derecelendirilmiş zırhta ve çelik zırhta oluşan hasarlar görülmektedir [13].



**Şekil 2.13** Balistik teste maruz kalmış zırhlar: (sağ) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış zırh; (sol) çelik zırh [13].

### 2.3.4 Enerji

Enerji endüstrileri, bir takım cihazların verimliliğini artırmak için farklı türde fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere sürekli ihtiyaç duymaktadır. Nükleer reaktörlerin iç duvarları, termoelektrik dönüştürücüler, güneş panelleri, güneş pilleri, basınçlı kaplar, katı oksit yakıt üretimi için derecelendirilmiş elektrot, ultrasonik güç çeviriciler için piezoelektrik fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, türbin kanadı kaplaması ve ısı bariyer kaplamalar, enerji endüstrisinde kullanılan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme uygulamalarının bazılarıdır [8].

### 2.3.5 Optoelektronik

Optoelektronik endüstrisinde fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, fiber optik malzemeler, lensler, yüksek verimli foto detektörler, güneş pilleri, manyetik depolama aygıtları, değişken kırılma indisine sahip yarı iletken malzemeler vb. mamullerin imalatında kullanılmaktadır [8].

### 2.3.6 Endüstriyel malzemeler

Kesici ve şekillendirici kalemlerin mukavemet ve ısıl dirençlerini artırmak amacıyla FDM uygulamaları yapılmaktadır. Bu çalışmalarda kendi kendini yağlama fonksiyonuna ve yüksek ısıl dirence sahip kesici uçlar elde edilmekte ve bunlarla kuru kesim yapılabilmektedir [14].



Şekil 2.14 Mitsubishi Materials Corp imalatı kesici uçlar [14].

## 2.4 Literatür Araştırması

Huang ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmada, Al alaşımı (AlSi18CuMgNi) matris, SiC tozları ise takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Kalıp tasarımında dört adet piston yatay ekseninde, başları dışa gelecek şekilde ve dönme eksenine dik konumda yerleştirilmiştir. Al alaşımı ve SiC tozlarından oluşan karışım, dikey ekseninde dönen kalıba dökülmüştür. SiC tozlarının ( $3170 \text{ kg/m}^3$ ) ve ergimiş metalin ( $2400\text{--}2700 \text{ kg/m}^3$ ) yoğunlukları arasındaki farktan dolayı santrifüj kuvvet, SiC parçalarının piston başı bölgesinde kümelenmesini sağlamış ve böylece fonksiyonel derecelendirilmiş piston imal edilmiştir. Döküm sıcaklığının, SiC parçalarının dağılımına olan etkisi incelenmiş, pistonun farklı bölgeleri için sertlik ve aşınma testleri yapılmıştır. Alüminyum alaşımı ile SiC tozu karışımının ve kalıbın sıcaklığının artırılması, pistonlardaki SiC derecelenmesini olumlu yönde etkilemiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş pistonun etek kısmından baş kısmına doğru sertliğin ve aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir [15].

Radhika ve Raghu'nun çalışmasında, takviye oranı %12 (ağırlıkça) olan fonksiyonel derecelendirilmiş Al/B<sub>4</sub>C, Al/SiC, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al/TiB<sub>2</sub> kompozit silindirik parçaların santrifüj döküm yöntemiyle imalatı yapılmıştır. Bütün FDM'lerin dış yüzeyinin içyapısı ve takviye malzemelerin matris içindeki dağılımları incelenmiştir. Farklı takviye malzemeleri (B<sub>4</sub>C, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiB<sub>2</sub>) ile derecelendirilen silindirik kompozitlerin, sertlik ve aşınma dirençleri karşılaştırılmıştır. Santrifüj kuvvetin etkisiyle takviye malzemeleri, silindirik kompozit içerisinde yoğunluklarına göre dağılmıştır. B<sub>4</sub>C ( $2,52 \text{ g/cm}^3$ ) en düşük yoğunluğa sahip olduğundan, Al/B<sub>4</sub>C dış yüzeyinde en az miktarda takviye malzemesi bulunan; TiB<sub>2</sub> ( $4,52 \text{ g/cm}^3$ ) ise en yüksek yoğunluğa sahip olduğundan, Al/TiB<sub>2</sub> dış yüzeyinde en fazla miktarda takviye malzemesi bulunan silindirik parça olmuştur. Dış yüzeyde takviye parçacık yoğunluğunun artması, sertlik ve aşınma direncini artırmış, bu nedenle Al/TiB<sub>2</sub>'nin en yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip FDM olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitin yapıldığı aşınma testinde, uygulanan kuvvetin artması aşınma oranını artırırken, aşındırıcı diskin dönüş hızının artması ise temas zamanını ve dolayısıyla aşınma oranını azaltmıştır [16].

Rajan ve Pai'nin çalışmasında, santrifüj döküm yöntemiyle çeşitli Al alaşımları ve farklı takviye malzemeleri kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş silindirik parçalar elde edilmiş ve içyapıları incelenmiştir. Takviye malzemesi olarak

SiC, B<sub>4</sub>C, SiC-grafit, primer Si fazı-grafit, Mg<sub>2</sub>Si, Al<sub>3</sub>Ni ve primer Si fazı kullanılmıştır. SiC ve Al<sub>3</sub>Ni takviye parçacıklarının yoğunluğu, Al alaşımınınkinden büyük olduğu için derecelendirme dış yüzeyden iç yüzeye doğru azalan şekilde olmuştur. Grafit, Mg<sub>2</sub>Si ve primer Si takviye parçalarının yoğunlukları, Al alaşımının yoğunluğundan küçük olduğundan, derecelendirme iç yüzeyden dış yüzeye doğru azalan şekilde olmuştur. B<sub>4</sub>C takviye malzemesinin yoğunluğunun, Al alaşımının yoğunluğuna yakın olmasından dolayı düzgün bir derecelendirme elde edilememiştir. Al-SiC fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede, farklı parçacık boyutlarına (14, 23 ve 42 µm) sahip SiC tozlarının eşit oranda karıştırılıp takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla derecelendirmenin daha yumuşak olduğu görülmüştür [17].

Jayakumar ve diğerlerinin çalışmasında, A319 alüminyum alaşımı ile ağırlıkça %10 ve %15 oranında SiC (23 µm) tozu kullanılarak, dikey santrifüj döküm yöntemiyle fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçalar imal edilmiştir. Elde edilen silindirik parçaların iç çapı 120, dış çapı ise 300 mm'dir. Parçalar üzerinde, yarıçapın yaklaşık 90, 115 ve 135 mm olduğu bölgelerden numuneler alınarak mekanik ve tribolojik özellikler incelenmiştir. En yüksek yoğunluk (2,87 g/cm<sup>3</sup>) ve en düşük ısıl genleşme katsayısı (20,1 µm/mK), ağırlıkça %15 SiC tozu içeren FDM'nin, SiC parçacıkları tarafından zenginleştirilen bölgesinde tespit edilmiştir. %15 SiC içeren FDM için en yüksek basma dayanımı 650 MPa olarak parçacıkça zengin bölgede elde edilmiştir. %15 SiC içeren FDM için en yüksek kopma dayanımı, yarıçapın 135 mm olduğu bölgede (SiC yoğunluğu %28) 279 MPa; en düşük kopma dayanımı, yarıçapın 90 mm olduğu bölgede 220 MPa değerinde bulunmuştur. A319 alaşımının kopma dayanımı ise 230 MPa'dır. %10 SiC içeren FDM için ise en yüksek kopma dayanımı yarıçapın 115 mm olduğu bölgede 265 MPa; en düşük kopma dayanımı ise yarıçapın 90 mm olduğu bölgede 218 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri %15 SiC içeren FDM için T6 ısıl işleme sonrasında 94,4 HRB, öncesinde ise 78 HRB değerlerinde elde edilmiştir. %10 SiC içeren FDM için en yüksek sertlik değeri T6 ısıl işleme sonrasında 87 HRB değerinde bulunmuştur [6].

Kılıç'ın çalışmasında, Kendi İlerleyen Yüksek Sıcaklık Sentezi yöntemi ile NiTi/NiAl/Ni<sub>3</sub>Al intermetalik fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, 150 MPa sıkıştırma basıncı ve 200 °C, 300 °C ve 400 °C ön ısıtma sıcaklıkları kullanılarak imal edilmiş ve mikro yapısı incelenmiştir. Artan ön ısıtma sıcaklığıyla FDM'de gözeneklerin daha homojen bir dağılım sergilediği ve numune bütünlüğünün korunduğu



gözlemlenmiştir. 150 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak 200 °C sıcaklıkta yapılan ön ısıtmadan sonra imal edilen ve 1000 °C'de 1 saat sinterlenen numunede sırasıyla NiTi, NiAl, Ni<sub>3</sub>Al ana fazlarıyla birlikte TiAl<sub>3</sub>, NiTiAl, TiAl gibi ara fazlar da gözlenmiştir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek sertlik değerine ortalama 550 HV ile NiTi-NiAl ara bölgesinin sahip olduğu tespit edilmiştir [18].

Kai ve diğerlerinin çalışmasında, santrifüj döküm yöntemiyle imal edilen ve takviye malzemesi olarak % 20 SiC kullanılan ZAlSi9Mg-SiC kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve ısıl genleşme katsayısı incelenmiştir. İmal edilen silindirin dış çapı 130, iç çapı ise 72 mm'dir. Silindirin dış yüzeyinde SiC oranının % 40'a ulaştığı ve kompozit malzemenin elastisite modülünün, alaşımın elastisite modülünden daha büyük olduğu görülmüştür. Kompozitin lineer ısıl genleşme katsayısı 20-100 °C sıcaklık aralığında ortalama 16.67 µm/m.K değerindedir. Silindir eksenine doğrultusunda 60 mm yarıçap bölgesinden alınan örnek ile yapılan deney sonucunda, ısıl genleşme katsayısının 300 °C sıcaklıkta en yüksek değerine ulaştığı ve bu noktadan sonra düşüşe geçtiği gözlenmiştir. Isıl genleşme katsayısının 300 °C'den sonra azalmasının nedeni, plastik şekil değiştirme ile içyapı içerisindeki boşlukların kapanmasıdır [19].

Topçu ve diğerlerinin çalışmasında, santrifüj döküm yöntemi kullanılarak alüminyum 2014 (AlCu4SiMg) alaşımı ile hacimce % 15 oranındaki SiC (9 µm) karışımı dökülmüştür. Alüminyum ile SiC arasındaki yoğunluk farkından dolayı SiC tanecikleri, parçanın dış kısmında toplanmış ve iç kısma doğru giderek yoğunluğu azalmıştır. Böylece SiC takviyeli alüminyum matrisli FDM imal edilmiştir. Kalınlık boyunca mikro yapıdan kaynaklanan sertlik değişimi incelenmiştir. İmal edilen silindir şeklindeki FDM'den, pim şeklinde numuneler çıkarılmış ve bu numunelere iki farklı yaşlandırma işlemi uygulanarak kuru ortamdaki aşınma davranışları incelenmiştir. Birinci işlem, 500 °C'de 3 saat çözeltiye alma ve sonrasında suda soğutma, 145 °C'de 10 saat yaşlandırma ve suda soğutma şeklinde; ikinci işlem ise 495 °C'de 8 saat çözeltiye alma ve sonrasında suda soğutma, 180 °C'de 3 saat yaşlandırma ve suda soğutma şeklinde uygulanmıştır. SiC partiküllerinin alüminyum alaşımdan daha yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle döküm sırasında silindirin dış kısmında daha fazla partikül toplanmış ve dış kısımda elastisite modülünün daha büyük olduğu görülmüştür. Yapılan Vickers sertlik ölçümleri sonucunda, yaşlandırma işlemi ile FDM'nin sertlik değerlerinin artmış olduğu tespit edilmiştir.

Hem dökülmüş hem de yaşlandırma yapılmış halde, silindirin SiC'ce zengin olmayan iç kısmının sertlik değerleri ile SiC'ce zengin olan dış kısmının sertlik değerleri arasında fark olduğu görülmüştür. İmal edilen FDM'nin iç kısımlarında daha az SiC bulunmasına rağmen, ölçülen en az sertlik değeri 80 HV değerinin üzerindedir. Yaşlandırma işlemleri sonrasında sertlik ortalama 140 HV değerindedir. Aşınma deneylerinde, uygulanan yükün ve alınan yolun artması sonucu aşınma miktarının arttığı görülmüştür. SiC'ce zengin olan kısımda meydana gelen aşınma miktarının, genel olarak SiC'ce zengin olmayan kısımda oluşana göre daha az olduğu tespit edilmiştir [20].

Fang ve diğerlerinin çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş WC-Co kompozitler (%10 Co ve %16 Co) yeni bir karbürleme yöntemiyle imal edilmiştir. Bu karbürleme işleminin yapıldığı durumda WC katı, Co ise hem katı hem de sıvı fazlarda bulunmaktadır. İmal edilen fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin, sertlik, aşınma dayanımı, çapraz kopma mukavemeti, basma dayanımı, kırılma tokluğu, darbe ve yorulma dayanımı testleri yapılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş WC-Co numuneler geleneksel kompozit WC-Co örneklerle içyapı ve mekanik özellikler açısından kıyaslanmış ve içyapıdaki farklılığın mekanik ve aşınma performansına olan etkisi ortaya konmuştur. Fonksiyonel derecelendirilmiş WC-Co'ta derecelendirilmiş bölge boyunca, iç kısımdan yüzeye doğru Co metalinin yoğunluğunda neredeyse doğrusal bir azalma; sertlik değerinde ise sürekli bir artış olduğu tespit edilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş WC-Co malzemenin sertliğinde meydana gelen belirgin artış, aşınma direncinin önemli derecede artmasını da sağlamıştır. Yapılan testlerde birbirine yakın kırılma tokluğuna sahip FDM ile geleneksel malzeme arasında aşınma direncinin FDM'de % 40 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. En yüksek yüzey sertliğine ve en fazla aşınma direncine %10 Co içeren fonksiyonel derecelendirilmiş WC-Co malzemenin sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca fonksiyonel derecelendirilmiş WC-Co malzemelerin, geleneksel WC-Co kompozit malzemelere göre daha yüksek darbe ve yorulma dayanımına sahip oldukları görülmüştür [21].

Bassiouny ve diğerlerinin çalışmasında, SiC takviyeli alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit, yatay santrifüj döküm yöntemiyle imal edilmiştir. SiC takviye malzemesi, farklı ağırlık oranlarında (%0, %2.5, %5, %7.5, %10, %15) ve üç farklı parçacık boyutunda (16  $\mu\text{m}$ , 23  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ ) kullanılmıştır.

Dakikada 800, 900 ve 1000 olmak üzere üç farklı devirde ve metalin besleme hızının boru eksenine doğrultusunda 16 ve 28 mm/s olduğu iki farklı hız değeri için imalat yapılmıştır. Mikro yapının incelenmesi sonucunda, imal edilen boruların dış bölgesindeki SiC oranının en yüksek değerde olduğu, iç kısma doğru dereceli bir şekilde azaldığı görülmüştür. Büyük boyutlu takviye parçalarının kullanılması durumunda ve daha yüksek dönüş hızlarında, imal edilen tüm boruların dış yüzeylerinde takviye parçacık yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlenmiştir. Metalin besleme hızının artması durumunda, imal edilen parçanın dış yüzeyindeki takviye yoğunluğunun arttığı, fakat düşük besleme hızında derecelendirmenin daha yumuşak olduğu görülmüştür. Yapılan tüm testler sonucunda en yüksek sertlik değerleri boruların dış kısmında gözlenmiştir. Kompozit içerisindeki SiC takviye malzemesinin oranı arttıkça dış yüzeyde sertlik değeri artmış ayrıca en yüksek sertlik değerine SiC takviye parçacık boyutunun en küçük olduğu örnekte rastlanmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme yapısındaki SiC takviye parçacık oranının artması, çekme dayanımını artırmıştır. Kopma dayanımının, SiC parçacık miktarı ile doğru, parçacık boyutuyla ise ters orantılı olduğu görülmüştür [22].

Chakrabarty ve diğerlerinin çalışmasında, Mg içeriğinin (%2,5 ve %7,5) fonksiyonel derecelendirilmiş A356-Mg<sub>2</sub>Si malzemesine etkileri araştırılmıştır. İmal edilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, çoğunlukla  $\alpha$ -Al, ötektik Al-Si, yalancı ötektik Al-Mg<sub>2</sub>Si ve primer Mg<sub>2</sub>Si fazlarını içermektedir. Malzeme ayrıca, mekanik özelliklere zarar veren Al-Fe-Si fazını da içermektedir. Alüminyuma göre daha az yoğunluğa sahip primer Mg<sub>2</sub>Si parçacıkların, santrifüj döküm yöntemiyle imal edilen boru şeklindeki parçaların iç katmanında daha yoğun olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik değerleri, boru şeklindeki parçaların iç kısımlarında ölçülmüştür. Sertlik değerinin Mg miktarının artırılmasıyla yükseldiği tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında en yüksek kopma dayanımı iç kısımda görülmüş ve kopma dayanımının Mg miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Test sıcaklığı 150 °C'ye yükseltildiğinde, %2,5 Mg içeren fonksiyonel derecelendirilmiş parçanın iç kısmında kopma dayanımı 178 MPa; %7,5 Mg içerende ise 148 MPa olarak ölçülmüştür. Sıcaklığın 300 °C'ye çıkarılmasıyla kopma dayanımının azaldığı görülmüştür [1].

### 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

#### 3.1 Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliği alanında uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemi ilk kullananlar Boeing, Bell Aerospace ve Rolls Royce firmalarıdır. Turner ve arkadaşları yöntemin ana fikrini oluşturan ilk makaleyi 1956 yılında yayınlamışlardır. Teknolojinin ilerlemesiyle 1970'lerde olgunlaşan yöntem, günümüzde makine, elektrik, uçak, inşaat, hidrodinamik ve atom gibi farklı mühendislik dallarında, tıpta ise ortopedi, kalp damar cerrahisi ve estetik cerrahi alanlarında uygulanmaktadır [23].

Sonlu elemanlar yönteminde "parçadan bütüne gitme" genel ilkesi kullanılmaktadır. Sonlu eleman, iki ya da üç boyutlu yapıların bir bölgesi veya bir parçası olabilir. Bu yöntem ilk olarak gerilme analizleri için kullanılmıştır. Daha sonra ise ısı analizi, akışkan analizi, elektrik analizi vb. alanlarda da uygulanmaya başlanmıştır [23].

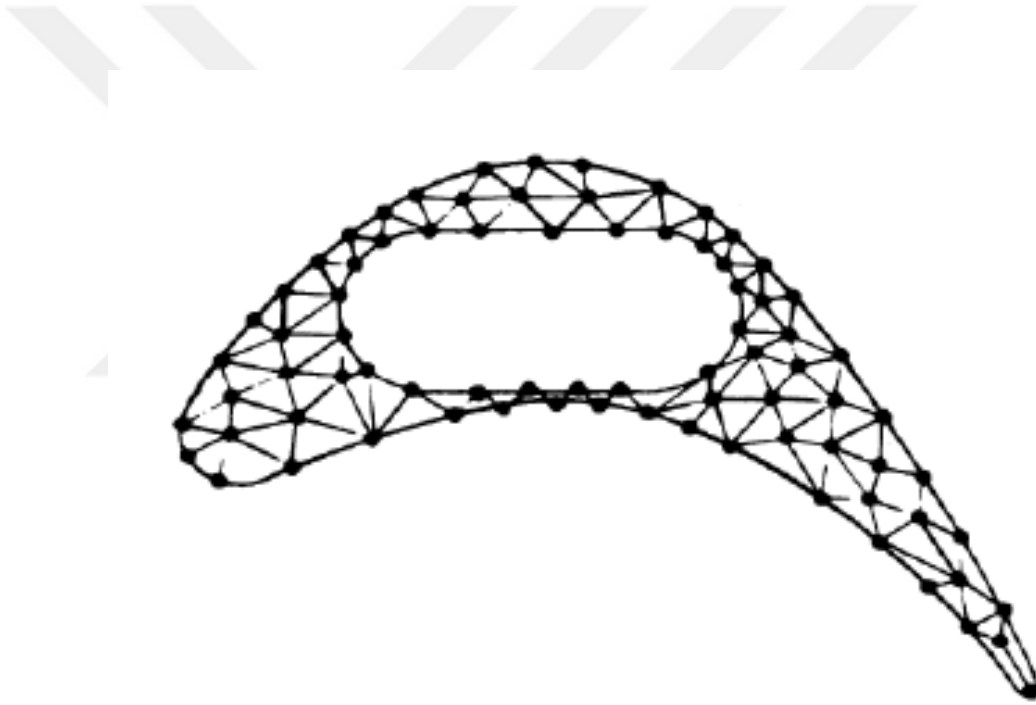
Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan gerilme analizlerinde, gerçek geometrik cismin, tam olarak formüle edilmesi oldukça zordur. Bu nedenle geometrik cisim, bilgisayarda hesaplanması daha kolay olan elemanlardan, oluşturulmaktadır. Sonrasında ise daha basit geometriye sahip bu küçük elemanların her birine bilinen tüm fizik kuralları uygulanmaktadır. Cismin tamamının elemanlara bölünebilmesi için bir ağ yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Cismin geometrisine ve boyutuna göre uygun elemanlara bölünmüş haline, sayısal model denilmektedir. Sayısal modeli oluşturan elemanların birbirlerine temas ettiği yerlerde düğüm noktaları oluşturulmaktadır. Kullanılan eleman sayısının artırılması, kuvvet dağılımının daha hassas ölçülebilmesi açısından önemlidir. Bir başlangıç noktası seçilir ve bu noktaya göre tüm düğüm noktalarının x, y, z eksenleri üstündeki koordinatları saptanarak bilgisayara girilir. Daha sonra, geometrik şekli oluşturan tüm elemanlar için poisson oranı ve elastisite modülü değerleri bilgisayar programına aktarılır. Oluşturulan modelde, düğüm noktalarına dış etkenlerin (kuvvet, moment vb.) ve sınır şartlarının uygulanması sonucunda meydana gelen değişiklikler için matrisler oluşturulur ve bu matrisler bilgisayar programıyla çözülür. Bu yöntemle her bir elemandaki ve elemanların oluşturduğu cismin tamamındaki gerilme, şekil değiştirme değerleri hesaplanır [23].

### 3.2 Sonlu Elemanlar Yönteminde İzlenen İşlem Adımları

Sonlu elemanlar yönteminde izlenen işlem adımları aşağıdaki gibidir;

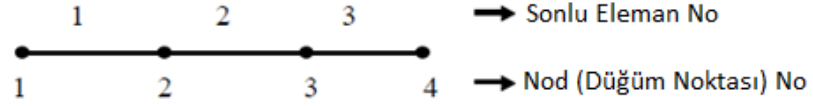
- İncelenecek fiziksel olay için matematiksel model hazırlanır ya da hazır olarak alınır [24].
- Hazırlanan matematiksel model için matematiksel varyasyonel, yani ‘Varyasyonel Formülasyon’ kurulur [24].
- Çözüm bölgesi ‘sonlu eleman’ olarak adlandırılan alt bölgelere ayrılır.

Bu işlem sonucunda oluşan yapı ‘sonlu eleman ağı’ veya ‘mesh’ olarak adlandırılır [24]. Şekil 3.1’de türbin kanadı üzerinde oluşturulmuş sonlu eleman ağı (mesh) gösterilmektedir [25].

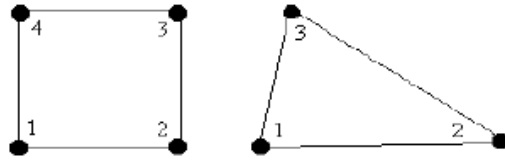


**Şekil 3.1** Sonlu elemanlara bölünmüş türbin kanadı profili [25].

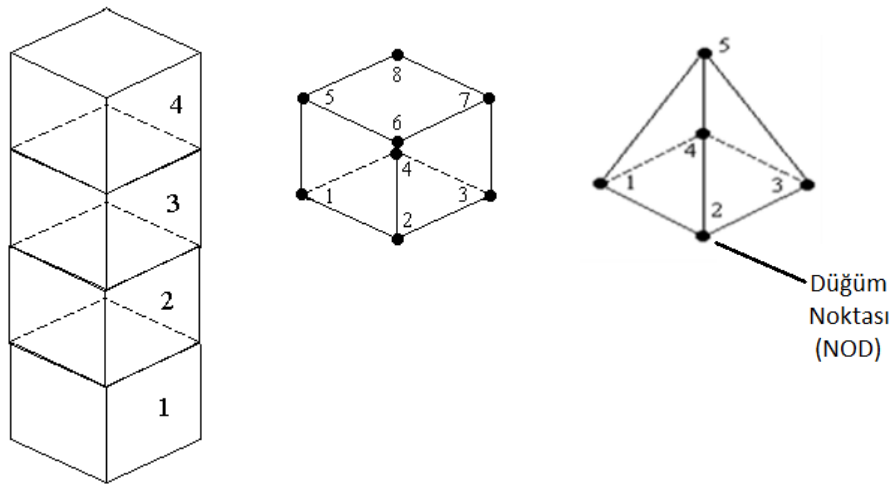
- Çözüm bölgesinin geometrisi için uygun olan eleman tipi seçilir. Bir boyutlu problemler için çizgi eleman (Şekil 3.2), iki boyutlu problemler için üçgen ve dikdörtgen şeklindeki elemanlar (Şekil 3.3), üç boyutlu problemler için ise küp, piramit vb. şekillerdeki elemanlar seçilir (Şekil 3.4) [24].



Şekil 3.2 1 boyutlu problemler için eleman tipi [23].



Şekil 3.3 2 boyutlu problemler için eleman tipleri [23].



Şekil 3.4 3 boyutlu problemler için eleman tipleri [23].

- Her bir sonlu eleman için aranan çözüm fonksiyonunun polinom olduğu kabulü yapılır [24].
- Her bir sonlu elemanda kabul edilen bu çözümler varyasyonel formülasyonda yerlerine konularak her bir sonlu eleman için cebirsel denklem takımları oluşturulur. Bu denklem takımlarının uygun bir biçimde birleştirilmesiyle bütün sisteme ait lineer denklem takımı oluşturulur.

$$R.u = F \quad [3.1]$$

Burada R katsayılar matrisidir ve rijitlik matrisi olarak adlandırılır, u bilinmeyenleri içeren vektör, F ise sağ taraf vektörüdür [24].

- Elde edilen denklem sistemine, uygun satır-sütun işlemleriyle sınır koşulları dahil edilir, oluşturulan son sistem 'indirgenmiş sistem' olarak adlandırılır. Bu sistemin çözülmesiyle her bir düğüm noktası için aranan büyükler bulunmuş olur [24].

### 3.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları;

- Sonlu elemanlar yöntemi farklı ve karmaşık malzeme özelliklerine sahip sistemlerde, kolaylıkla uygulanabilir [24].
- Sonlu elemanlar yöntemi ile geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesi mümkündür. Çözüm bölgesi farklı sonlu elemanlar kullanılarak alt bölgelere ayrılabilir. Gerekirse bazı alt bölgeler daha çok sayıda elemana bölünerek daha hassas çözümler elde edilebilir [24].
- Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel olarak genelleştirilebilir ve çok sayıda problemin çözümü için aynı model kullanılabilir [24].

Dezavantajları;

- Sonlu elemanlar yönteminin doğruluğu ancak esas teori kadardır. Malzemenin fiziksel verilerinin elde edilmesinde ve bilgisayara girilmesinde yapılan hatalar, sonucu olumsuz etkileyecektir [23].
- Bütün sayısal analiz yöntemlerinde olduğu gibi sonlu elemanlar yönteminde de bilgisayarlar kullanılmaktadır. Bilgisayarların temini ve kullanımı sonucu ortaya çıkan maliyet, sonlu elemanlar yönteminin ekonomik dezavantajıdır [23].

- Daha kesin sonuçlar için daha küçük eleman boyutları kullanılmalıdır. Eleman boyutlarının küçülmesi ise çözüm süresini artırır ve daha büyük bilgisayar hafızası gerektirir. Bilgisayar hafızasının sınırlı oluşu çözümün hassasiyetini azaltmaktadır [23].





## 4. MALZEME VE YÖNTEM

### 4.1 Malzeme Seçimi ve Model Tasarımı

Bu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş ve derecelendirilmemiş içi boş silindirik parçaların, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizleri yapılmıştır. Günümüzde Al-Si alaşımları motor ağırlığını azaltmak amacıyla silindir bloğu imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Silindirik parçaların uygulamada silindir gömleği olarak kullanılabilmesi düşünüldüğünden, malzeme olarak Al-Si alaşımı seçilmiştir. Çizelge 4.1’de alaşım içerisindeki elementlerin ağırlıkça yüzdeleri verilmiştir. Al-Si alaşımı içerisindeki ağırlıkça %19,49 Si oranı, hacimsel olarak yaklaşık %22 Si oranına denk gelmektedir. Bu alaşımın fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça olarak imalatının santrifüj döküm yöntemiyle yapılabileceği düşünülmüştür.

Silindirik parçaların boyutları belirlenirken, Türkiye’de 2012-2016 yılları arasında en çok satılan binek araç marka ve modelleri (Çizelge 4.2) bulunmuş, bu araçların benzinli modellerinin silindir çaplarının ortalaması Çizelge 4.3’teki veriler esas alınarak 74 mm olarak hesaplanmıştır. Bu ortalama değer, çalışmada modellenen içi boş silindirik parçaların iç çapı olarak kullanılmıştır.

**Çizelge 4.1** Al-Si alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık) [26]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Diğer	Al
19,49	0,76	0,78	0,28	0,35	0,32	0,15	<0,01	Kalan

**Çizelge 4.2** Türkiye’de 2012-2016 yılları arasında en çok satılan binek araç marka ve modelleri [27-31]

Marka	Model	2016 Yılı	2015 Yılı	2014 Yılı	2013 Yılı	2012 Yılı	Toplam	Yıllık Ortalama
FIAT	EGEA	34755	5674				40429	20215
	LINEA	7724	35041	32239	37537	33351	145892	29178
RENAULT	FLUENCE	21877	33764	32252	27536	26818	142247	28449
	SYMBOL	25273	23922	20424	27988	16477	114084	22817
	CLIO	26075	26468	22545	22206	10321	107615	21523
TOYOTA	COROLLA	33225	34961	23464	17389	12485	121524	24305
VOLKSWAGEN	PASSAT	28915	30167	18285	17232	11888	106487	21297
	POLO	27578	21651	19803	22449	17537	109018	21804

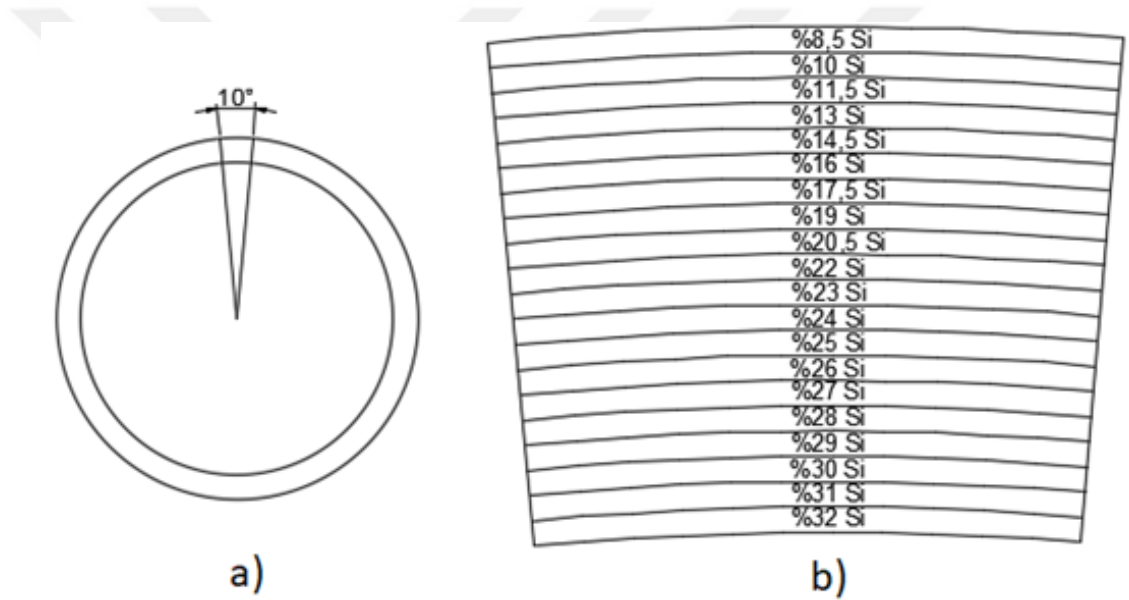
**Çizelge 4.3** Türkiye'de 2012-2016 yılları arasında en çok satılan binek araç modelleri için teknik veriler [32-39]

Marka	Model	Benzinli Motor Türleri ve Silindir Boyutları	
FIAT	EGEA	1.4 16V Fire Çap x strok (mm x mm) = 72x 84	1.6 16V E-Torq AT6 Çap x strok (mm x mm) = 77 x 85,8
	LINEA	1.4 FIRE 77 HP POP Çap x Strok (mm x mm) = 72 x 84	
RENAULT	FLUENCE	1.6 16V 110 bg Çap x strok (mm x mm) = 79,5 x 80,5	1.6 16V CVT 115 bg Çap x strok (mm x mm) = 78 x 83,6
	SYMBOL	1.2 16v 75 bg Çap x strok (mm x mm) = 69x76,8	
	CLIO	1.2 16v 75 bg Çap x strok (mm x mm) = 69x76,8	1.2 120 bg Çap x strok (mm x mm) = 72,2x73,1
			1.2 Turbo EDC 120 bg Çap x strok (mm x mm) = 72,2x73,1
TOYOTA	COROLLA	1.33 1NR-FE motor Çap x strok (mm x mm) = 72,5x80,5	1.6 1ZR-FAE motor Çap x strok (mm x mm) = 80,5x78,5
VOLKSWAGEN	PASSAT	1.4 TSI (122Hp) Silindir çapı = 76 mm	
	POLO	1.0 lt 75 PS Manuel 3 silindir 12 V benzinli motor Çap x strok (mm x mm) = 74,5x76,4	1.2 lt TSI 90 PS Manuel/DSG 4 silindir 16 V TSI benzinli motor Çap x strok (mm x mm) = 75,6x71

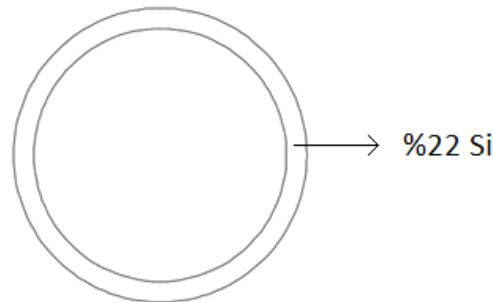
L.A.Sleeve kataloğundan, 74 mm çap değeri için silindir gömleğinin boyu 165 mm bulunmuş [40] ve parçaların boy değeri olarak alınmıştır.

A319 ve A356 alüminyum alaşımları motor bloğu imalatında en çok kullanılan alüminyum alaşımlarının başında gelmektedir [1]. A356 alüminyum alaşımı ağırlıkça yaklaşık olarak %7,5 silisyum içerir ve bu oran hacimsel orana çevrildiğinde yaklaşık %8,5'e denk gelmektedir. Çalışmada tasarlanan fonksiyonel

derecelendirilmiş içi boş silindirik parçanın uygulamada silindir gömleği olarak kullanılması düşünüldüğünden motor bloğuyla uyumlu çalışması için dış yüzeyindeki Si oranı %8,5 (hacimsel), iç yüzeyinde ise %32 (hacimsel) olarak belirlenmiştir. Silisyumun %32 ile %8,5 aralığında derecelendirileceği silindirik parçanın et kalınlığının 6 mm olması uygun görülmüştür. Karşılaştırma yapabilmek için derecelendirilmemiş silindirik parçanın et kalınlığı da 6 mm alınmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça (Şekil 4.1), her birinin kalınlığı 0,3 mm olacak şekilde 20 katmana bölünmüştür. Karşılaştırma yapmak için tasarlanan fonksiyonel derecelendirilmemiş içi boş silindirik parçada ise silisyum oranı, parçanın her bölgesinde aynı ve %22 (hacimsel) değerindedir (Şekil 4.2).



**Şekil 4.1** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça: (a) Parçanın tamamı; (b) 10°'lik kısmın 20 kat büyütülmüş gösterimi ve katmaların Si oranı.



**Şekil 4.2** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parça.

Çizelge 4.4’de her bir katmanın silisyum oranı ve çapları verilmiştir.

**Çizelge 4.4** Katmanların silisyum oranları ve boyutları

Katman No	Hacimsel Si Oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ağırlıkça Si Oranı (kg/kg)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)
1	0,085	0,07422	74	74,6
2	0,1	0,08750	74,6	75,2
3	0,115	0,10083	75,2	75,8
4	0,13	0,11422	75,8	76,4
5	0,145	0,12767	76,4	77
6	0,16	0,14117	77	77,6
7	0,175	0,15473	77,6	78,2
8	0,19	0,16835	78,2	78,8
9	0,205	0,18202	78,8	79,4
10	0,22	0,19575	79,4	80
11	0,23	0,20494	80	80,6
12	0,24	0,21415	80,6	81,2
13	0,25	0,22339	81,2	81,8
14	0,26	0,23266	81,8	82,4
15	0,27	0,24195	82,4	83
16	0,28	0,25127	83	83,6
17	0,29	0,26062	83,6	84,2
18	0,3	0,26999	84,2	84,8
19	0,31	0,27939	84,8	85,4
20	0,32	0,28881	85,4	86

## 4.2 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

### 4.2.1 Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça 20 katmandan oluşmaktadır. Her katmanın Si oranı farklıdır dolayısıyla her bir katman (alaşım) için malzeme özellikleri ayrı ayrı belirlenmelidir. Literatürde Al-Si alaşımları için malzeme özellikleri araştırılmış, fakat alaşımdaki Si oranının geniş bir aralıkta (%8,5-%32) yer almasından dolayı gerekli verilerin hepsine ulaşamamıştır. Bu nedenle Al-Si alaşımlarının malzeme özelliklerini (elastisite modülü, kayma modülü, ısıl genleşme katsayısı vb.) elde edebilmek için matematiksel modellerden faydalanılmıştır. Malzeme özellikleri belirlenirken yalnızca Al ve Si elementleri dikkate alınmış, çok az miktardaki diğer elementler hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Elastisite modülü, kayma modülü, sıkışmazlık modülü ve poisson oranının tespitinde Mori-Tanaka yöntemi kullanılmıştır [41].

Her bir alaşım (katman) için sıkışmazlık modülü;

$$B_{AL\text{Ş}} = B_{Al} + \frac{(B_{Si} - B_{Al}) \cdot v_{Si}}{1 + \frac{(1 - v_{Si}) \cdot (B_{Si} - B_{Al})}{B_{Al} + \left(\frac{4}{3}\right) \cdot S_{Al}}} \quad [4.1]$$

Her bir alaşım (katman) için kayma modülü;

$$S_{AL\text{Ş}} = S_{Al} + \frac{(S_{Si} - S_{Al}) \cdot v_{Si}}{1 + \frac{(1 - v_{Si}) \cdot (S_{Si} - S_{Al})}{S_{Al} + f_1}} \quad [4.2]$$

$$f_1 = \frac{S_{Al} \cdot (9 \cdot B_{Al} + 8 \cdot S_{Al})}{6 \cdot (B_{Al} + 2 \cdot S_{Al})} \quad [4.3]$$

Her bir alaşım (katman) için yoğunluk;

$$d_{AL\text{Ş}} = d_{Al} \cdot v_{Al} + d_{Si} \cdot v_{Si} \quad [4.4]$$

Her bir alaşım (katman) için poisson oranı;

$$v_{AL\text{ř}} = \frac{1}{2 \cdot (1 + \frac{S_{AL\text{ř}}}{\lambda})} \quad [4.5]$$

$$\lambda = B_{AL\text{ř}} - \frac{2}{3} S_{AL\text{ř}} \quad [4.6]$$

Her bir alaşım (katman) için elastisite modülü;

$$E_{AL\text{ř}} = 3 \cdot (1 - 2 \cdot v_{AL\text{ř}}) \cdot B_{AL\text{ř}} \quad [4.7]$$

denklemleri kullanılarak bulunmuştur.

25 °C sıcaklık değerinde, alüminyum ve silisyum elementlerinin elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluğu Çizelge 4.5’de verilmiştir.

**Çizelge 4.5** 25 °C’de Al ve Si elementlerinin elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluğu [42-44]

	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Alüminyum	70,2	0,345	2700
Silisyum	162	0,22	2330

$$B = \frac{E}{3(1 - 2v)} \quad [4.8]$$

$$S = \frac{E}{2(1 + v)} \quad [4.9]$$

Denklem 4.8 ve 4.9 kullanılarak [45], alüminyum ve silisyum için sıkışmazlık ve kayma modülleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.6).

**Çizelge 4.6** 25 °C’de Al ve Si elementlerinin sıkışmazlık modülü ve kayma modülü

	Sıkışmazlık modülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)
Alüminyum	75,48	26,1
Silisyum	96,4	66,4

Mekanik özelliklerin sıcaklıkla olan değişimini hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [46].

$$E_t = E_{15}(1 - \beta(t - 15)) \quad [4.10]$$

$$S_t = S_{15}(1 - \beta'(t - 15)) \quad [4.11]$$

Alüminyum için 15 °C sıcaklıkta  $\beta = 4,8 \times 10^{-4}$  ve  $\beta' = 5,2 \times 10^{-4}$  değerindedir [46].

Silisyumun mekanik özellikleri 20 °C ile 200 °C sıcaklıkları arasında çok az değiştiğinden ihmal edilmiştir [47].

Alüminyumun 25 °C sıcaklıktaki elastisite modülü 70,2 GPa, kayma modülü ise 26,1 GPa değerindedir. 15 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerleri için hesaplanan elastisite ve kayma modülleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7** 15 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerinde alüminyumun elastisite modülü ve kayma modülü

Sıcaklık	Elastisite modülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)
15 °C	70,538	26,236
100 °C	67,66	25,076
200 °C	64,274	23,71

100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerindeki alüminyumun, sıkışmazlık modülünü ve poisson oranını bulmak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [45].

$$B = \frac{S \cdot E}{3(3S - E)} \quad [4.12]$$

$$\nu = \frac{E}{2S} - 1 \quad [4.13]$$

100 °C ve 200 °C sıcaklıktaki alüminyum için hesaplanan sıkışmazlık modülü ve poisson oranı Çizelge 4.8’de verilmiştir.

**Çizelge 4.8** 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerinde alüminyumun sıkışmazlık modülü ve poisson oranı

Sıcaklık	Sıkışmazlık modülü (GPa)	Poisson oranı
100 °C	74,73	0,349
200 °C	74,1	0,355

Her bir Al-Si alaşımı (katman) için 25 °C’deki yoğunluk değeri [4.4] denkleminde; 25 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarındaki mekanik özellikler, [4.1], [4.2], [4.5] ve [4.7] denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.9 - 4.10 - 4.11’de sunulmuştur. Ayrıca 25 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerleri için hesaplanan elastisite ve kayma modüllerinin Si oranı ile değişimi Şekil 4.3’te ve Şekil 4.5’te görülmektedir.



**Çizelge 4.9** Her bir alaşımın 25 °C sıcaklıktaki mekanik özellikleri ve yoğunluğu

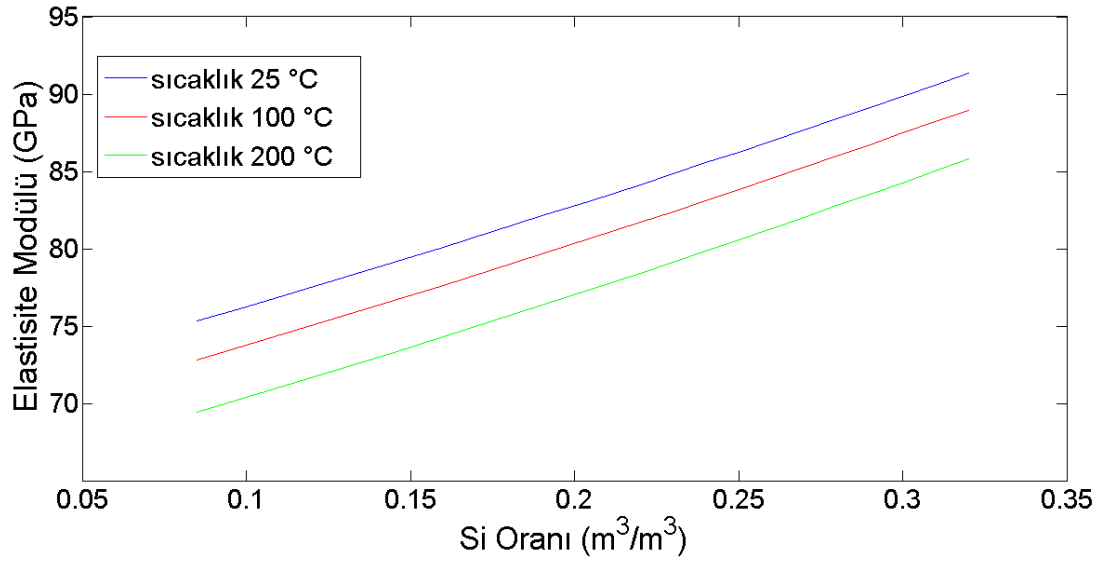
Alaşım (Katman) No	$v_{Si}$ ( $m^3/m^3$ )	$m_{Si}$ (kg/kg)	$d_{ALŞ}$ ( $kg/m^3$ )	$B_{ALŞ}$ (GPa)	$S_{ALŞ}$ (GPa)	$V_{ALŞ}$	$E_{ALŞ}$ (GPa)
1	0,085	0,07422	2668,55	76,9952	28,1707	0,33695	75,3254
2	0,1	0,08750	2663	77,2669	28,5520	0,33550	76,2624
3	0,115	0,10083	2657,45	77,5400	28,9383	0,33404	77,2099
4	0,13	0,11422	2651,9	77,8143	29,3297	0,33258	78,1682
5	0,145	0,12767	2646,35	78,0901	29,7264	0,33110	79,1374
6	0,16	0,14117	2640,8	78,3671	30,1283	0,32961	80,1179
7	0,175	0,15473	2635,25	78,6456	30,5357	0,32811	81,1097
8	0,19	0,16835	2629,7	78,9254	30,9486	0,32660	82,1130
9	0,205	0,18202	2624,15	79,2066	31,3672	0,32508	83,1282
10	0,22	0,19575	2618,6	79,4892	31,7915	0,32355	84,1553
11	0,23	0,20494	2614,9	79,6784	32,0777	0,32252	84,8468
12	0,24	0,21415	2611,2	79,8682	32,3665	0,32149	85,5439
13	0,25	0,22339	2607,5	80,0586	32,6579	0,32045	86,2464
14	0,26	0,23266	2603,8	80,2496	32,9522	0,31941	86,9547
15	0,27	0,24195	2600,1	80,4414	33,2491	0,31836	87,6686
16	0,28	0,25127	2596,4	80,6337	33,5489	0,31730	88,3883
17	0,29	0,26062	2592,7	80,8267	33,8515	0,31625	89,1138
18	0,3	0,26999	2589	81,0203	34,1570	0,31518	89,8453
19	0,31	0,27939	2585,3	81,2146	34,4655	0,31411	90,5827
20	0,32	0,28881	2581,6	81,4095	34,7769	0,31303	91,3262

**Çizelge 4.10** Her bir alaşımın 100 °C sıcaklıktaki mekanik özellikleri

Alaşım (Katman) No	$v_{Si}$ ( $m^3/m^3$ )	$m_{Si}$ (kg/kg)	$B_{ALŞ}$ (GPa)	$S_{ALŞ}$ (GPa)	$v_{ALŞ}$	$E_{ALŞ}$ (GPa)
1	0,085	0,07422	76,2866	27,1466	0,340942	72,8041
2	0,1	0,08750	76,5660	27,5285	0,339469	73,7472
3	0,115	0,10083	76,8467	27,9156	0,337986	74,7015
4	0,13	0,11422	77,1290	28,3081	0,336492	75,6671
5	0,145	0,12767	77,4126	28,7060	0,334988	76,6442
6	0,16	0,14117	77,6978	29,1094	0,333472	77,6330
7	0,175	0,15473	77,9844	29,5184	0,331945	78,6338
8	0,19	0,16835	78,2724	29,9333	0,330407	79,6468
9	0,205	0,18202	78,5620	30,3540	0,328857	80,6722
10	0,22	0,19575	78,8531	30,7808	0,327294	81,7103
11	0,23	0,20494	79,0480	31,0687	0,326246	82,4095
12	0,24	0,21415	79,2436	31,3594	0,325192	83,1145
13	0,25	0,22339	79,4398	31,6529	0,324132	83,8253
14	0,26	0,23266	79,6368	31,9493	0,323067	84,5422
15	0,27	0,24195	79,8344	32,2486	0,321996	85,2650
16	0,28	0,25127	80,0327	32,5508	0,320919	85,9940
17	0,29	0,26062	80,2317	32,8560	0,319836	86,7291
18	0,3	0,26999	80,4314	33,1643	0,318747	87,4705
19	0,31	0,27939	80,6318	33,4756	0,317652	88,2183
20	0,32	0,28881	80,8330	33,7900	0,316551	88,9725

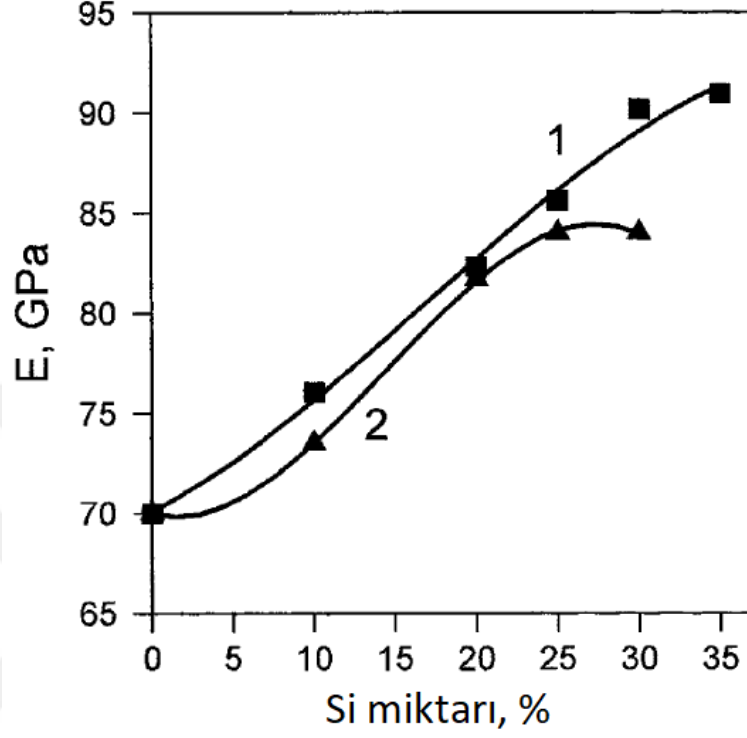
**Çizelge 4.11** Her bir alaşımanın 200 °C sıcaklıktaki mekanik özellikleri

Alaşım (Katman) No	$v_{Si}$ ( $m^3/m^3$ )	$m_{Si}$ (kg/kg)	$B_{ALŞ}$ (GPa)	$S_{ALŞ}$ (GPa)	$V_{ALŞ}$	$E_{ALŞ}$ (GPa)
1	0,085	0,07422	75,70485	25,77466	0,347119	69,44307
2	0,1	0,08750	75,99003	26,15630	0,345610	70,39238
3	0,115	0,10083	76,27672	26,54341	0,344091	71,35349
4	0,13	0,11422	76,56495	26,93610	0,342559	72,32663
5	0,145	0,12767	76,85472	27,33451	0,341016	73,31203
6	0,16	0,14117	77,14604	27,73875	0,339460	74,30993
7	0,175	0,15473	77,43894	28,14896	0,337893	75,32057
8	0,19	0,16835	77,73341	28,56527	0,336312	76,34422
9	0,205	0,18202	78,02948	28,98781	0,334718	77,38112
10	0,22	0,19575	78,32716	29,41673	0,333111	78,43155
11	0,23	0,20494	78,52651	29,70629	0,332032	79,13948
12	0,24	0,21415	78,72659	29,99880	0,330947	79,85363
13	0,25	0,22339	78,92740	30,29429	0,329856	80,57409
14	0,26	0,23266	79,12893	30,59281	0,328759	81,30092
15	0,27	0,24195	79,33121	30,89442	0,327655	82,03423
16	0,28	0,25127	79,53422	31,19915	0,326544	82,77410
17	0,29	0,26062	79,73798	31,50707	0,325427	83,52063
18	0,3	0,26999	79,94248	31,81821	0,324303	84,27390
19	0,31	0,27939	80,14774	32,13263	0,323172	85,03401
20	0,32	0,28881	80,35376	32,45038	0,322035	85,80105

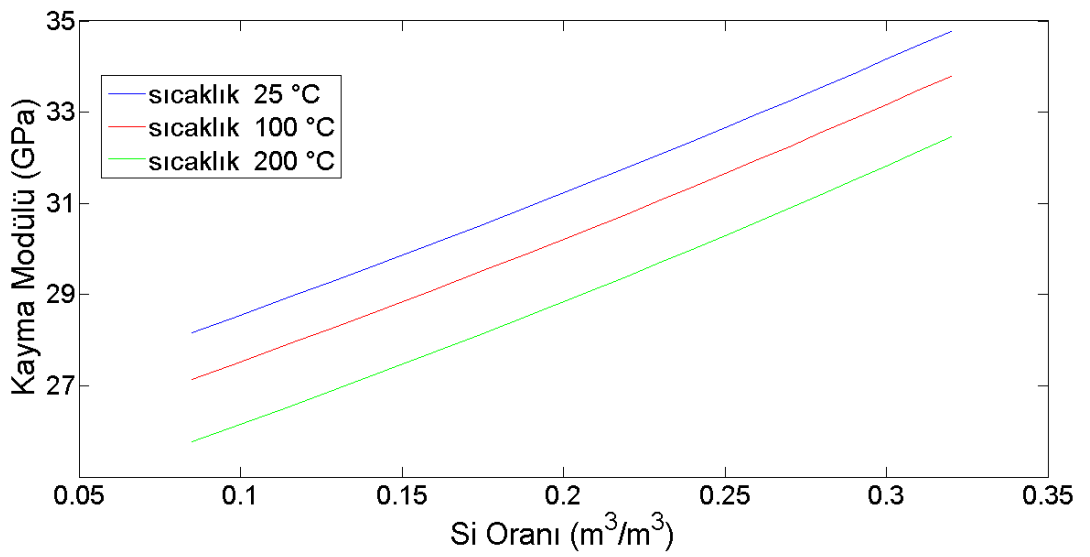


**Şekil 4.3** Al-Si alaşımasının elastisite modülünün Si oranı ve sıcaklık ile değişimi.

Şekil 4.3 ile Şekil 4.4 karşılaştırıldığında matematiksel model kullanılarak hesaplanan elastisite modüllerinin, deneysel sonuçlara yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 Oda sıcaklığındaki Al-Si alaşımlarının elastisite modüllerinin Si oranı ile değişimi: (1) Hızlı soğutma, (2) Geleneksel döküm [48].



Şekil 4.5 Al-Si alaşımının kayma modülünün Si oranı ve sıcaklık ile değişimi.

#### 4.2.2 Termal özelliklerin belirlenmesi

Huang ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmada, Al-Si alaşımları için Turner modeli kullanılarak hesaplanan ısı genleşme katsayılarının, deneysel verilere en yakın olduğu görülmüştür [49]. Hesaplamalarda kullanılacak Turner modelinin denklemi aşağıda verilmiştir [50].

$$CTE_{ALSi} = (CTE_{Al}v_{Al}B_{Al} + CTE_{Si}v_{Si}B_{Si}) / (v_{Al}B_{Al} + v_{Si}B_{Si}) \quad [4.14]$$

20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerleri için alüminyum ve silisyumun ısı genleşme katsayıları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

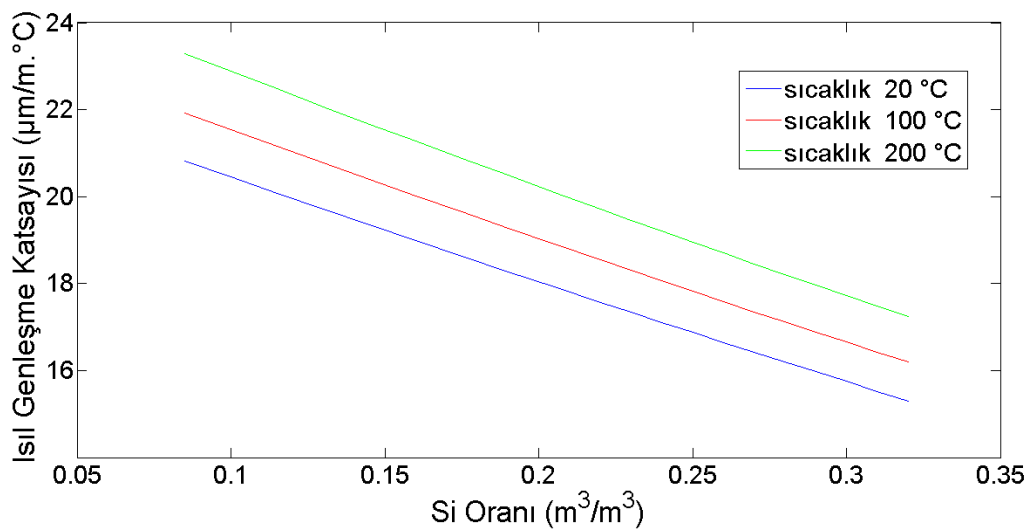
**Çizelge 4.12** Alüminyum ve silisyumun 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerindeki lineer ısı genleşme katsayıları [51-53]

	Lineer Isıl Genleşme Katsayısı ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )		
	20 °C	100 °C	200 °C
Alüminyum	23	24,2	25,7
Silisyum	2,5	3	3,4

Denklem 4.14 kullanılarak her bir Al-Si alaşımı için 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklıklarındaki ısı genleşme katsayıları hesaplanmış ve Çizelge 4.13’te sunulmuştur. Ayrıca 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerleri için hesaplanan ısı genleşme katsayısının Si oranı ile değişim grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.

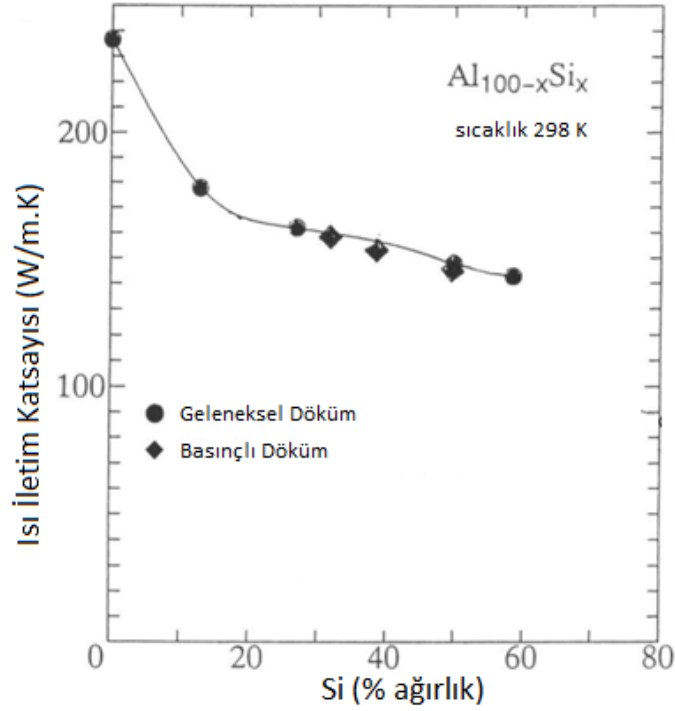
**Çizelge 4.13** Her bir alaşımın 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerindeki lineer ısı genleşme katsayıları

Alaşım (Katman) No	$v_{Si}$ ( $m^3/m^3$ )	$m_{Si}$ (kg/kg)	Lineer Isıl Genleşme Katsayısı ( $\mu m/m \cdot ^\circ C$ )		
			20 °C	100 °C	200 °C
1	0,085	0,07422	20,8258	21,9314	23,2961
2	0,1	0,08750	20,4524	21,5423	22,8842
3	0,115	0,10083	20,0821	21,1565	22,4760
4	0,13	0,11422	19,7147	20,7740	22,0713
5	0,145	0,12767	19,3503	20,3946	21,6700
6	0,16	0,14117	18,9888	20,0184	21,2723
7	0,175	0,15473	18,6301	19,6453	20,8779
8	0,19	0,16835	18,2743	19,2753	20,4869
9	0,205	0,18202	17,9213	18,9083	20,0993
10	0,22	0,19575	17,5710	18,5443	19,7149
11	0,23	0,20494	17,3391	18,3033	19,4604
12	0,24	0,21415	17,1083	18,0637	19,2074
13	0,25	0,22339	16,8787	17,8253	18,9558
14	0,26	0,23266	16,6503	17,5881	18,7056
15	0,27	0,24195	16,4231	17,3523	18,4568
16	0,28	0,25127	16,1970	17,1177	18,2093
17	0,29	0,26062	15,9722	16,8844	17,9633
18	0,3	0,26999	15,7484	16,6523	17,7186
19	0,31	0,27939	15,5258	16,4215	17,4752
20	0,32	0,28881	15,3044	16,1919	17,2332



**Şekil 4.6** 20 °C, 100 °C ve 200 °C sıcaklık değerlerinde Al-Si alaşımının ısı genleşme katsayısının Si oranı ile değişimi.

25 °C sıcaklıktaki Al-Si alaşımlarının ısı iletim katsayıları Şekil 4.7'den alınmıştır. Si oranının hacimce %8,5, %15, %20,5, %30 ve %45,5 olduğu noktalar için grafikten ısı iletim katsayıları belirlenmiş ve bu noktalar arasında ısı iletim katsayısının doğrusal olarak değiştiği kabul edilmiştir. Seçilen bu noktalar eğimin en fazla değiştiği noktalardır.



Şekil 4.7 Al-Si alaşımının ısı iletim katsayısının Si oranı ile değişimi [54].

Al-Si alaşımlarının farklı sıcaklıklardaki ısı iletim katsayılarını hesaplarken, düşük Si oranları (%8,5, %15, %20,5) içeren alaşımlar için denklem 4.15 [55] ve yüksek Si oranları (%30, %45,5) içeren alaşımlar için ise denklem 4.16 [55] kullanılmıştır.

$$\frac{K_{AL\text{Ş}}}{K_{Al}} = \frac{[K_{Si}(1 + 2\alpha) + 2K_{Al}] + 2v_{Si}[K_{Si}(1 - \alpha) - K_{Al}]}{[K_{Si}(1 + 2\alpha) + 2K_{Al}] - v_{Si}[K_{Si}(1 - \alpha) - K_{Al}]} \quad [4.15]$$

$$(1 - v_{Si})^3 = \left\{ \frac{K_{Al}}{K_{AL\text{Ş}}} \right\}^{(1+2\alpha)/(1-\alpha)} \times \left\{ \frac{K_{AL\text{Ş}} - K_{Si}(1 - \alpha)}{K_{Al} - K_{Si}(1 - \alpha)} \right\}^{3/(1-\alpha)} \quad [4.16]$$

Alüminyumun 25 °C'deki; silisyumun 25 °C, 127 °C ve 227 °C'deki ısı iletim katsayıları Çizelge 4.14'de verilmiştir. Alüminyumun ısı iletim katsayısının 25 °C ile 227 °C sıcaklık aralığındaki değişimi çok az olduğundan bu değişim hesaplara dahil edilmemiştir [57].

**Çizelge 4.14** Alüminyum ve silisyumun ısı iletim katsayıları [56,58]

	Isı İletim Katsayısı (W/m. °C)		
	25 °C	127 °C	227 °C
Alüminyum	235,2		
Silisyum	149	105	80

Şekil 4.7'den silisyum oranlarının hacimce 0,085, 0,15, 0,205, 0,3 ve 0,455 olduğu Al-Si alaşımları için belirlenen ısı iletim katsayıları Çizelge 4.15'de verilmiştir.

**Çizelge 4.15** Belirlenen Si oranları için Al-Si alaşımlarının ısı iletim katsayıları

Si oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Isı İletim Katsayısı (W/m. °C)
0,085	202,94
0,15	180
0,205	166,9
0,3	161,18
0,455	154,4

Denklem 4.15 ve 4.16 kullanılarak hesaplanan  $\alpha$  değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

**Çizelge 4.16** Belirlenen Si oranları için hesaplanan  $\alpha$  değerleri

Si oranı (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,085	0,15	0,205	0,3	0,455
$\alpha$	-13,8613	-13,4757	-35	3,2995	1,0197

Hesaplanan  $\alpha$  değerleri, 127 °C ve 227 °C sıcaklıktaki  $K_{Si}$  değerleri denklem 4.15 ve denklem 4.16'da yerlerine konularak 127 °C ve 227 °C sıcaklıktaki Al-Si alaşımların (Si oranı 0,085, 0,15, 0,205, 0,3 ve 0,455) ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Bu noktalar arasında ısı iletim katsayısının doğrusal değiştiği kabul edilmiştir. Çizelge 4.17'de her bir alaşım (katman) için hesaplanan değerler sunulmuştur.



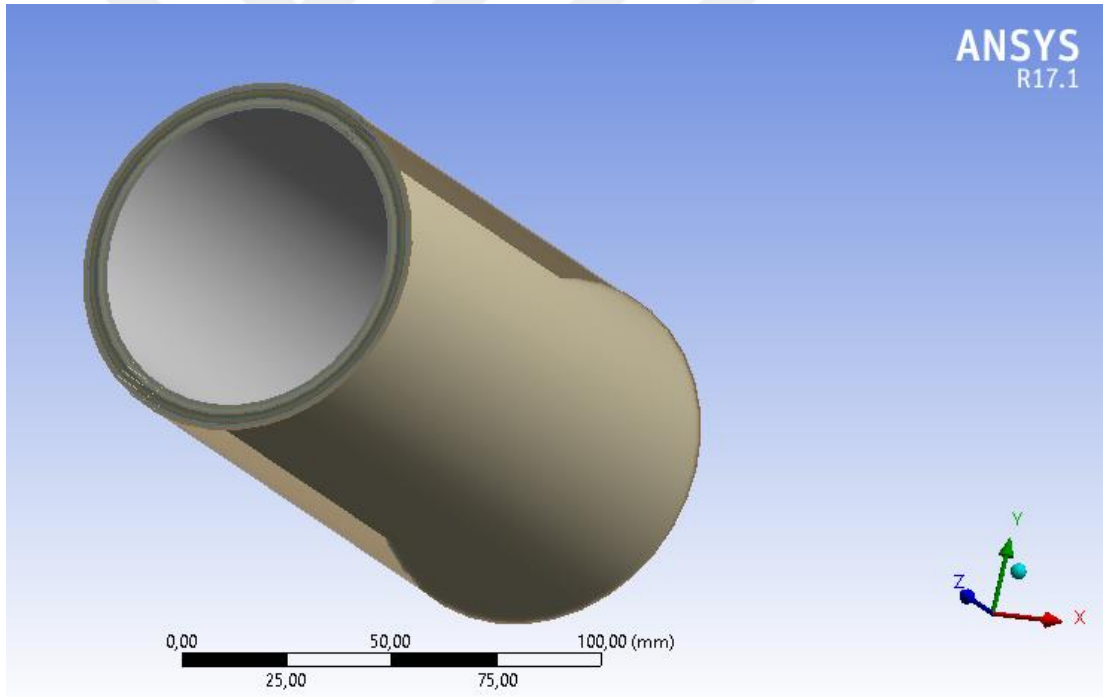
**Çizelge 4.17** Her bir Al-Si alaşımlarının 25 °C, 127 °C ve 227 °C'deki ısı iletim katsayıları

Alaşım (Katman) No	v <sub>Si</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	m <sub>Si</sub> (kg/kg)	Isı İletim Katsayısı (W/m. °C)		
			25 °C	127 °C	227 °C
1	0,085	0,07422	202,940	202,730	202,480
2	0,1	0,08750	197,646	197,399	197,108
3	0,115	0,10083	192,352	192,068	191,735
4	0,13	0,11422	187,058	186,738	186,363
5	0,145	0,12767	181,765	181,407	180,991
6	0,16	0,14117	177,618	177,305	176,942
7	0,175	0,15473	174,045	173,816	173,555
8	0,19	0,16835	170,473	170,328	170,167
9	0,205	0,18202	166,900	166,840	166,780
10	0,22	0,19575	165,997	165,571	165,201
11	0,23	0,20494	165,395	164,724	164,148
12	0,24	0,21415	164,793	163,878	163,096
13	0,25	0,22339	164,191	163,032	162,043
14	0,26	0,23266	163,588	162,185	160,991
15	0,27	0,24195	162,986	161,339	159,938
16	0,28	0,25127	162,384	160,493	158,885
17	0,29	0,26062	161,782	159,646	157,833
18	0,3	0,26999	161,180	158,800	156,780
19	0,31	0,27939	160,743	157,839	155,465
20	0,32	0,28881	160,305	156,879	154,150

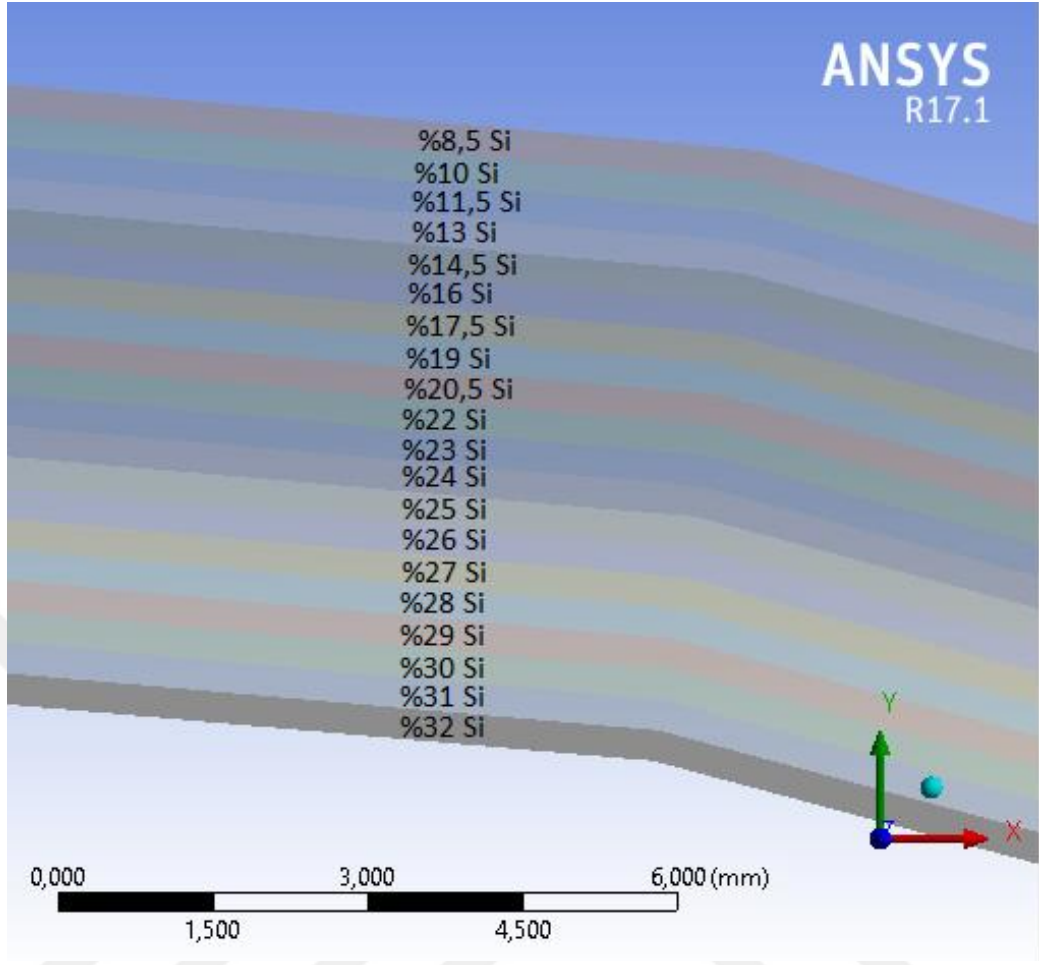
## 5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE YAPILAN ANALİZLER

### 5.1 Isıl Gerilme Analizi

Isıl gerilme analizini yapmak için ANSYS 17.1 Workbench programı kullanılmıştır. Öncelikle ısıl gerilmelerin hesaplanabilmesi için termal analiz yapılmış ve üç boyutlu sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça geometrisi ANSYS Workbench programı kullanılarak 20 katmanlı bir yapıda oluşturulmuştur (Şekil 5.1). Her bir katmanın kalınlığı 0,3 mm ve boyu 165 mm'dir. Katmanlar arası ilişki yapışık olarak seçilmiş ve yekpare bir model oluşturulmuştur. Daha sonra Bölüm 4.2'de belirlenen tüm malzeme özellikleri programa girilmiş ve her bir katman için malzeme ataması yapılmıştır. Her bir katmanın silisyum oranı Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

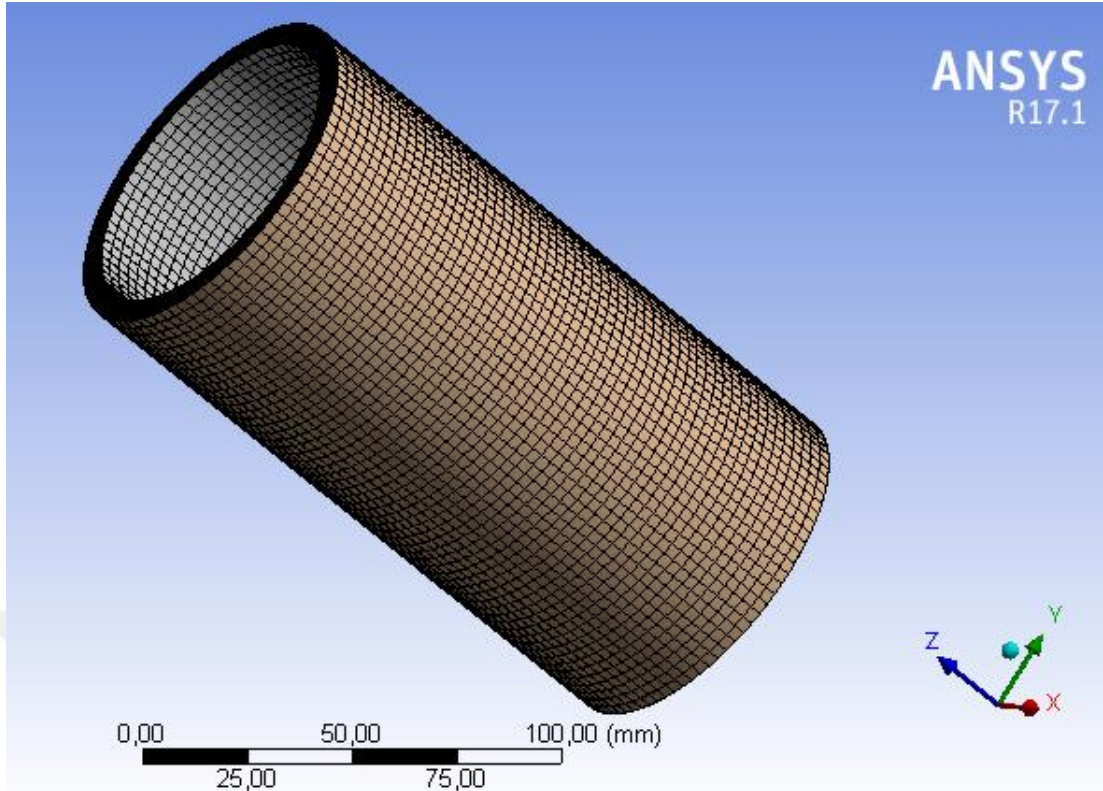


Şekil 5.1 Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça modeli.

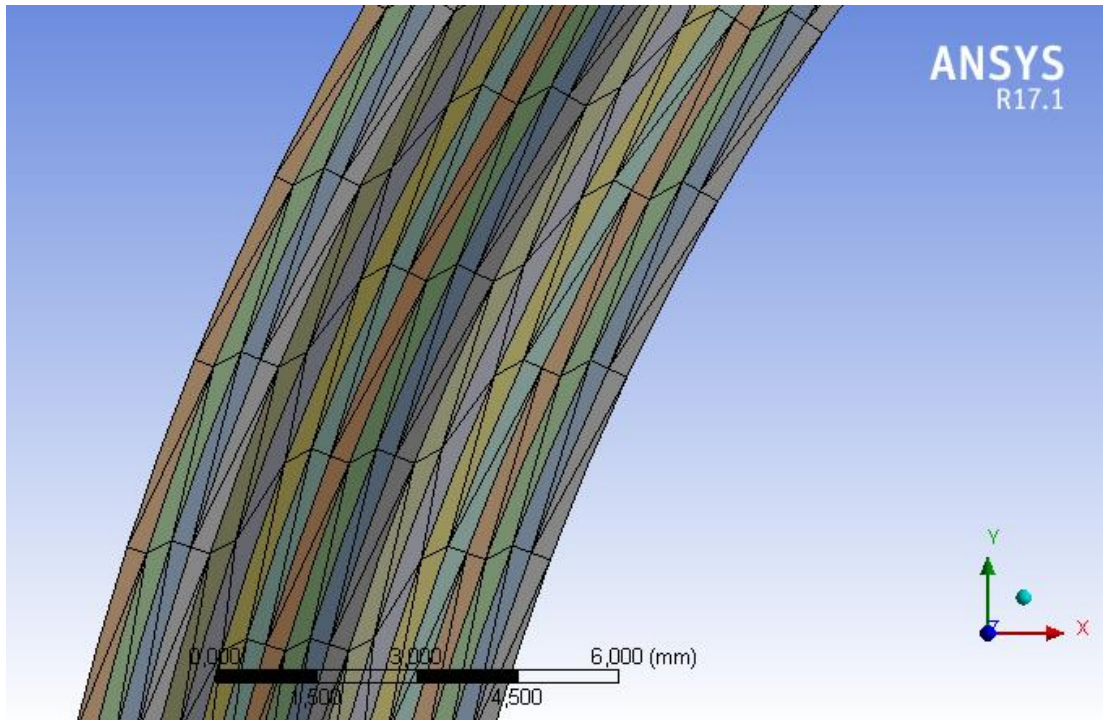


**Şekil 5.2** Fonksiyonel derecelendirilmiş modelin katmanları ve Si oranları.

Sonrasında ise üç boyutlu model sonlu elemanlara bölünmüştür. Sonlu eleman boyutu 3 mm olarak seçilmiştir. Silindirik yüzeylerde kare eleman, düz yüzeylerde ise üçgen eleman kullanılarak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman ağı (mesh) Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görülmektedir.

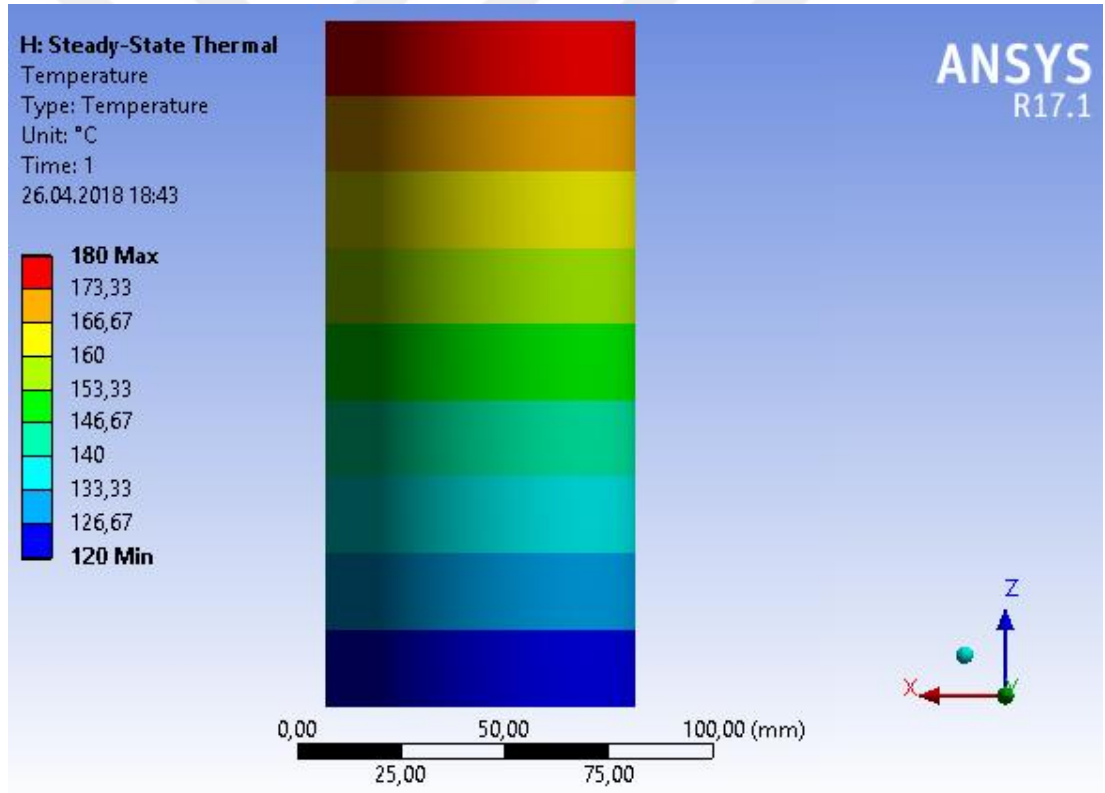


Şekil 5.3 Sonlu eleman ağı oluşturulmuş fonksiyonel derecelendirilmiş parça.



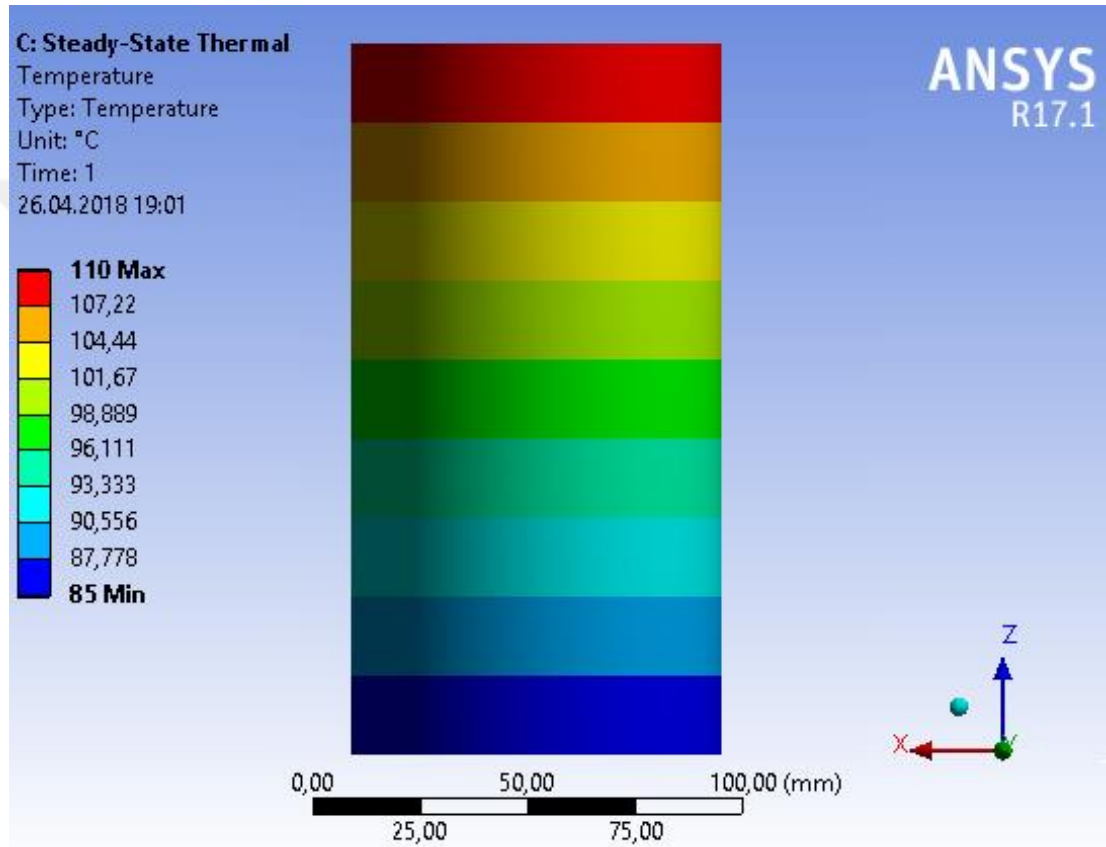
Şekil 5.4 Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın düz yüzeylerindeki sonlu eleman ağı.

Silindirik parçaların uygulamada silindir gömleği olarak kullanılacağı düşünüldüğünden, su soğutmalı benzinli bir motorun silindir sıcaklık dağılımından alınan veriler, silindirik parçaların ulaşacağı son sıcaklık değerleri olarak programa girilmiştir. Silindirik parçanın iç yüzeyinin üst kenarının ( $z=165$  mm) sıcaklık değeri  $180$  °C [59], alt kenarının ( $z=0$  mm) sıcaklık değeri ise  $120$  °C [59] olarak; dış yüzeyinin üst kenarının sıcaklık değeri  $110$  °C [59] ve alt kenarının sıcaklık değeri  $85$  °C [59] olarak literatürden alınmıştır. İç yüzeydeki sıcaklık dağılımını bulmak için iç çapı  $74$  mm, kalınlığı  $0,3$  mm ve boyu  $165$  mm olan bir model tasarlanmıştır. Bu modele %32 oranında Si içeren Al-Si alaşımı malzeme olarak atanmış ve modelin üst yüzeyi ( $z=165$  mm) için  $180$  °C; alt yüzeyi ( $z=0$  mm) için ise  $120$  °C sıcaklık değeri girilmiştir. Oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 5.5’de gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın iç yüzeyinin sıcaklık dağılımı.

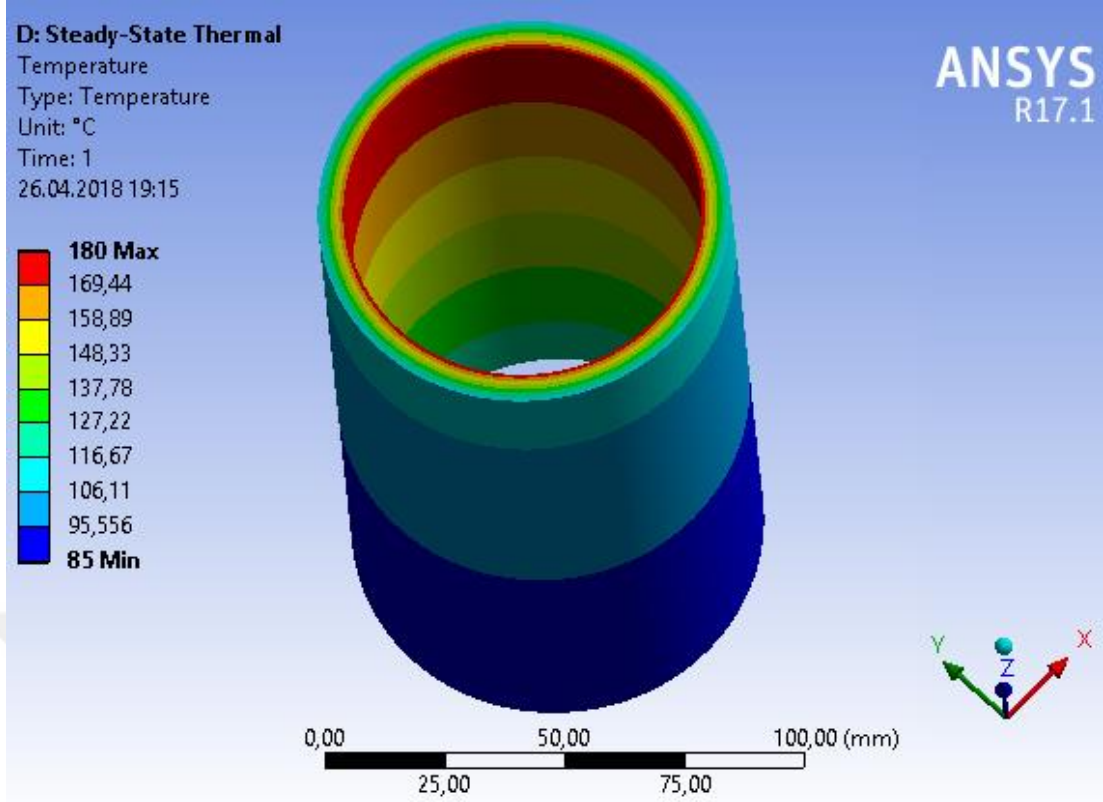
Dış yüzeydeki sıcaklık dağılımını bulmak için dış çapı 86 mm, kalınlığı 0,3 mm ve boyu 165 mm olan bir model tasarlanmıştır. Bu modele %8,5 oranında Si içeren Al-Si alaşımı malzeme olarak atanmış ve modelin üst yüzeyi ( $z=165$  mm) için  $110$  °C, alt yüzeyi ( $z=0$  mm) için ise  $85$  °C sıcaklık değeri girilmiştir. Oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



**Şekil 5.6** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın dış yüzeyinin sıcaklık dağılımı.

Bulunan iç yüzey ve dış yüzey sıcaklıkları üç boyutlu fonksiyonel derecelendirilmiş modele aktarılmış ve üç boyutlu sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Şekil 5.7'de, bulunan üç boyutlu sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.

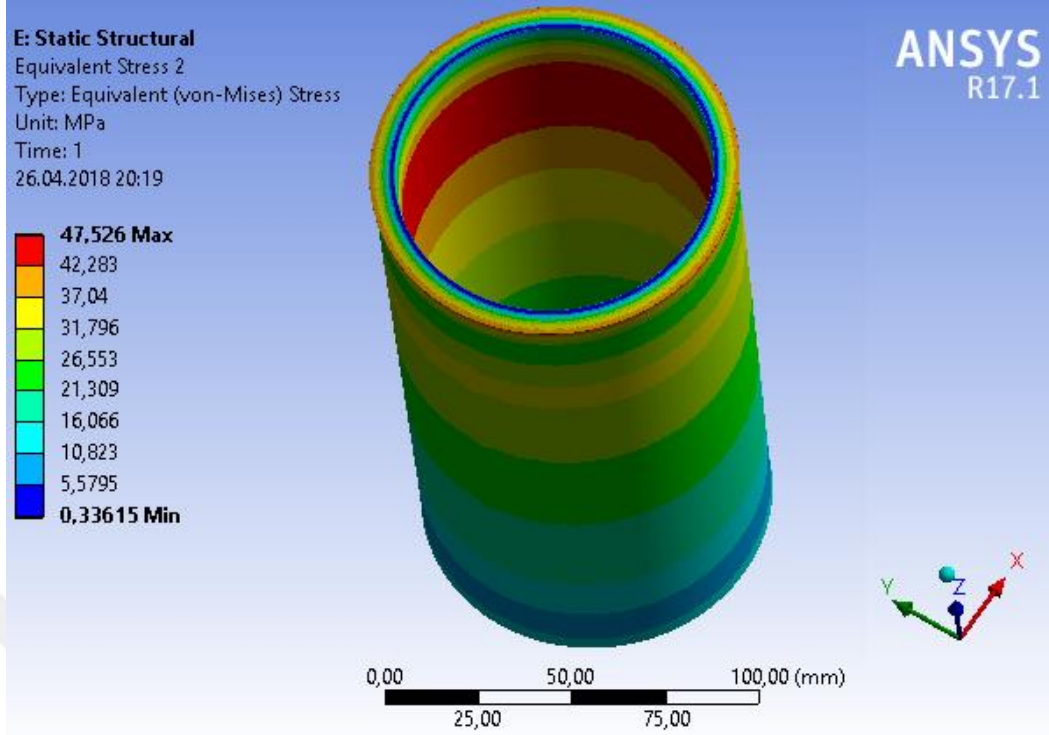




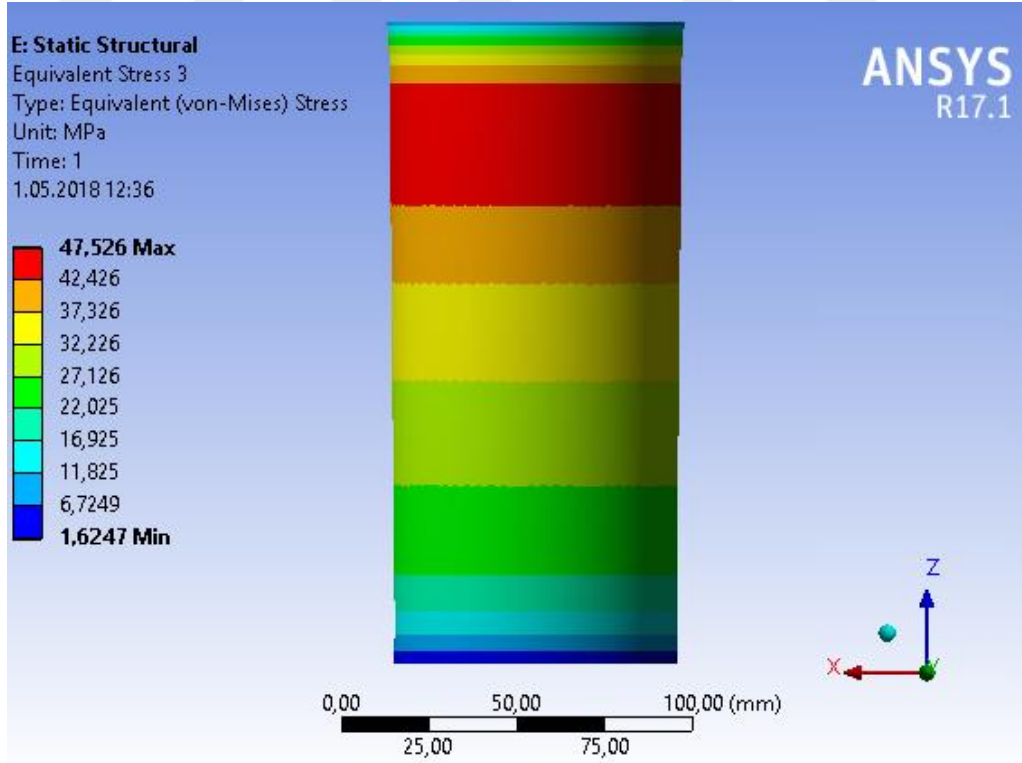
**Şekil 5.7** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın üç boyutlu sıcaklık dağılımı.

Statik analiz için aynı geometrik model (20 katmanlı) kullanılmıştır. Termal analizde kullanılan sonlu eleman ağı statik analizde de aynı şekilde oluşturulmuştur, sadece eleman boyutu 3,5 mm olarak değiştirilmiştir.

Termal analiz sonucu bulunan üç boyutlu sıcaklık dağılımı, statik analize aktarılmış ve ısı yükü olarak uygulanmıştır. Statik analizde çevre sıcaklığı 22 °C olarak girilmiştir. Analizde hiçbir sınır şartı uygulanmamıştır. Isıl genleşmeler sonucu oluşan Von Mises gerilmeleri Şekil 5.8'de görülmektedir.

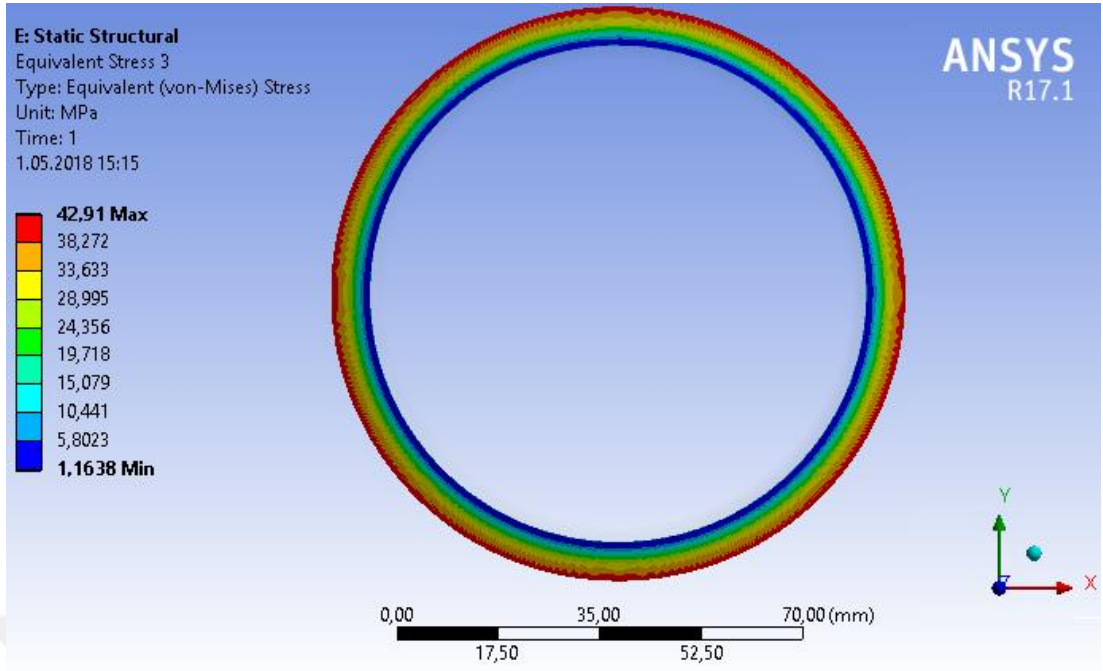


**Şekil 5.8** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçada ısıl genişmeler sonucu meydana gelen Von Mises gerilmeleri.

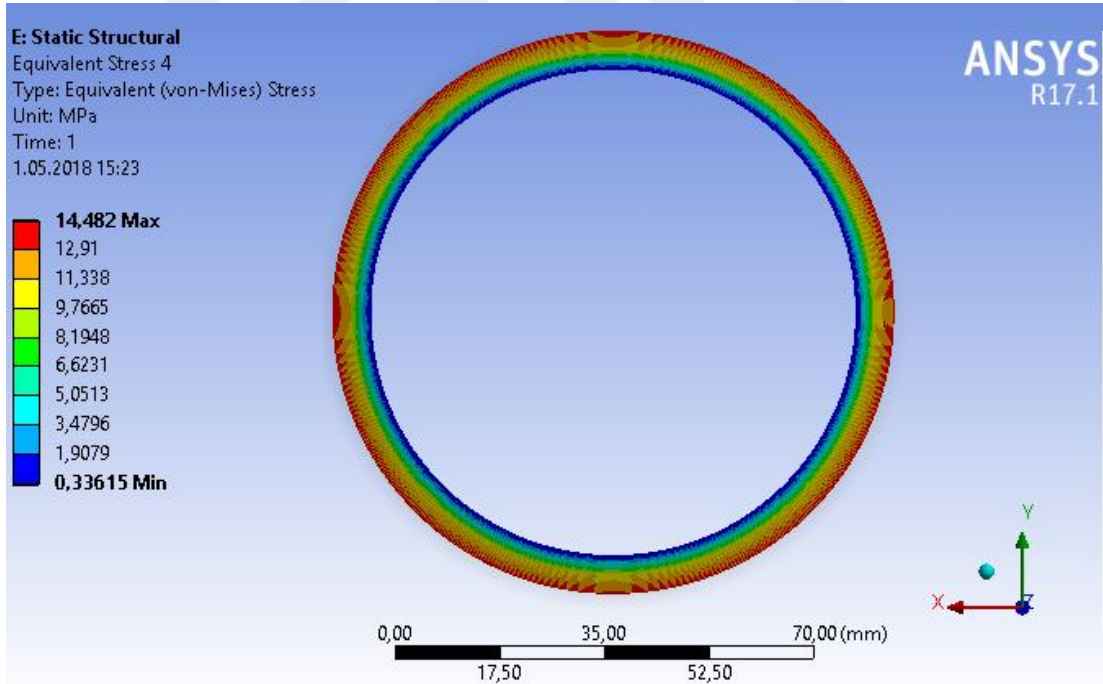


**Şekil 5.9** Fonksiyonel derecelendirilmiş parçada %32 oranında Si içeren katmanın iç yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilmeleri.

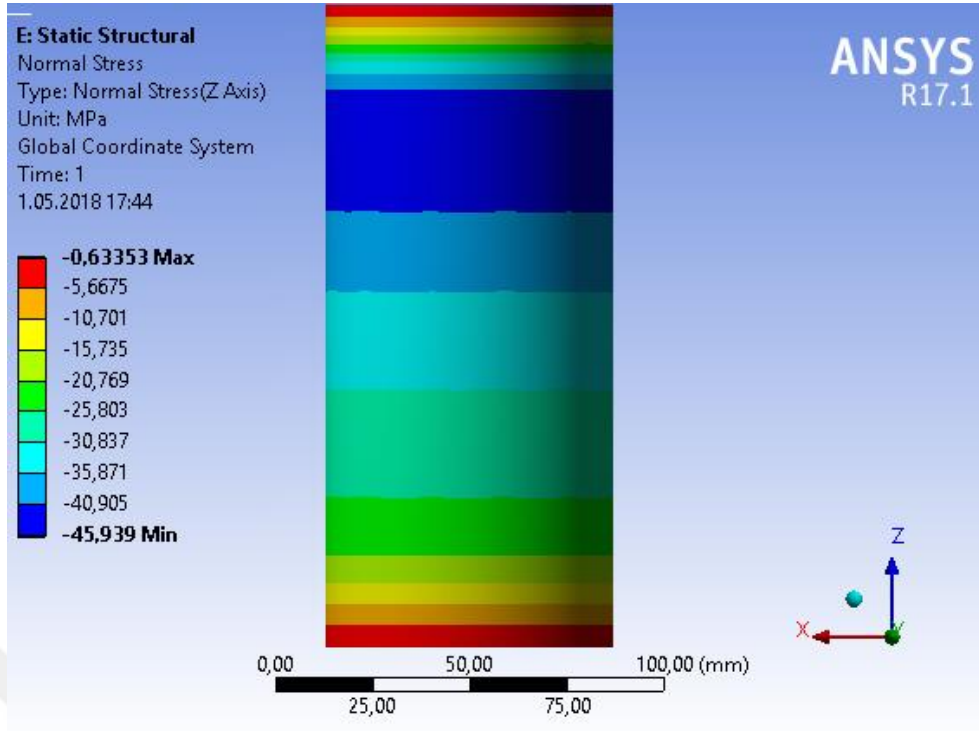




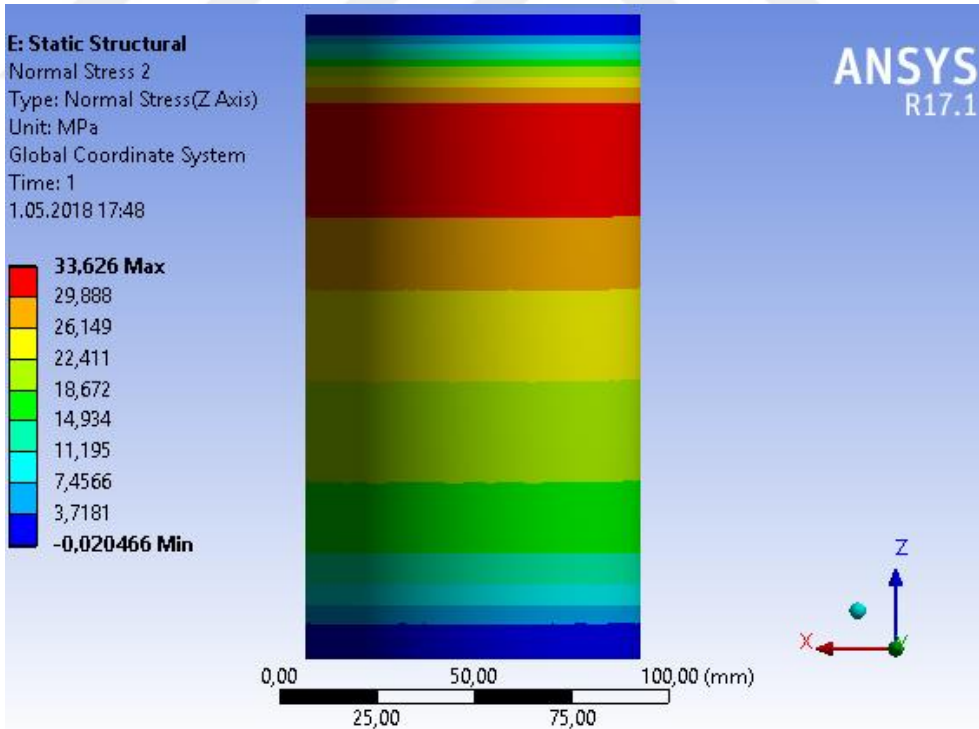
**Şekil 5.10** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın üst yüzeyinde ( $z=165$  mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.



**Şekil 5.11** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın alt yüzeyinde ( $z=0$  mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.

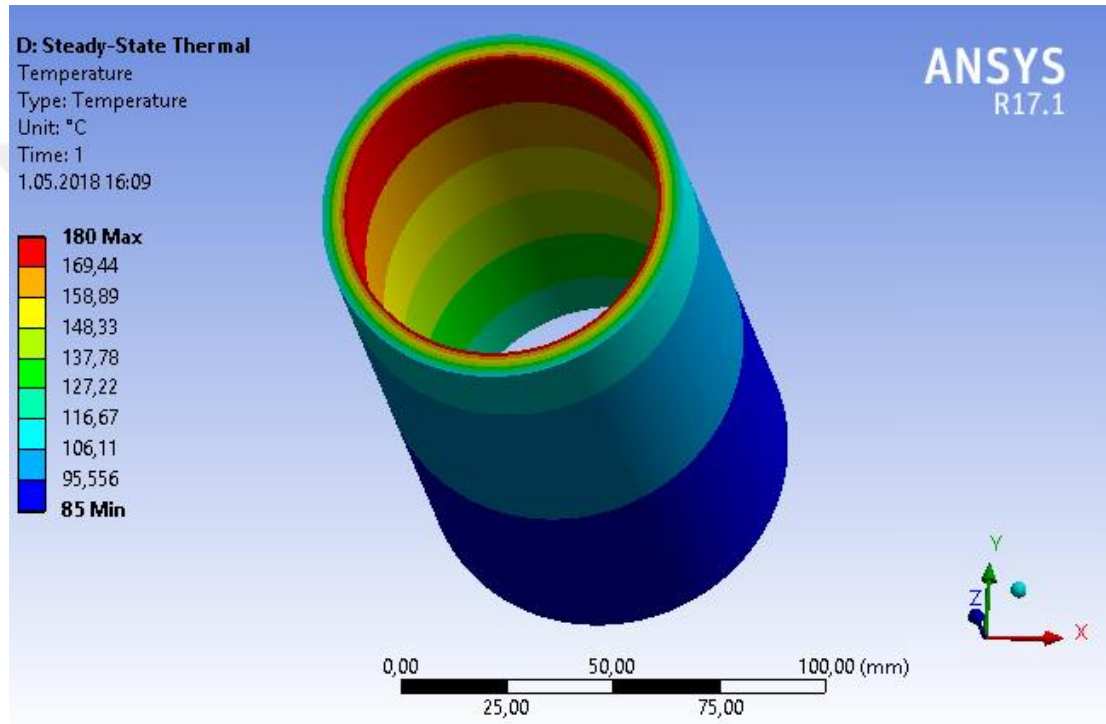


**Şekil 5.12** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın iç yüzeyinde z eksen yönündeki normal gerilmeler.



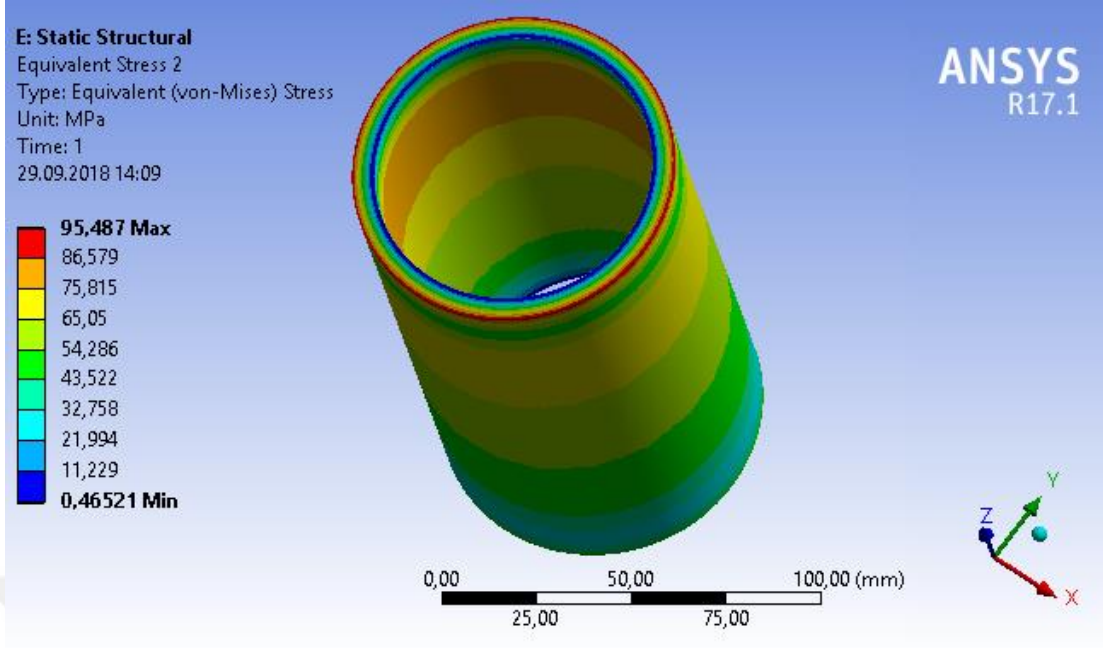
**Şekil 5.13** Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın dış yüzeyinde z eksen yönündeki normal gerilmeler.

Karşılaştırma için oluşturulan derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın iç çapı 74, dış çapı 86 ve boyu 165 mm'dir. Termal analiz için, ANSYS Workbench programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu model, kenar uzunluğu 3 mm olan kare elemanlara bölünerek sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Malzeme olarak %22 Si (hacimsel oran) içeren Al-Si alaşımı atanmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçaya uygulanan sınır şartlarının aynısı uygulanmış ve üç boyutlu sıcaklık dağılımı (Şekil 5.14) bulunmuştur.

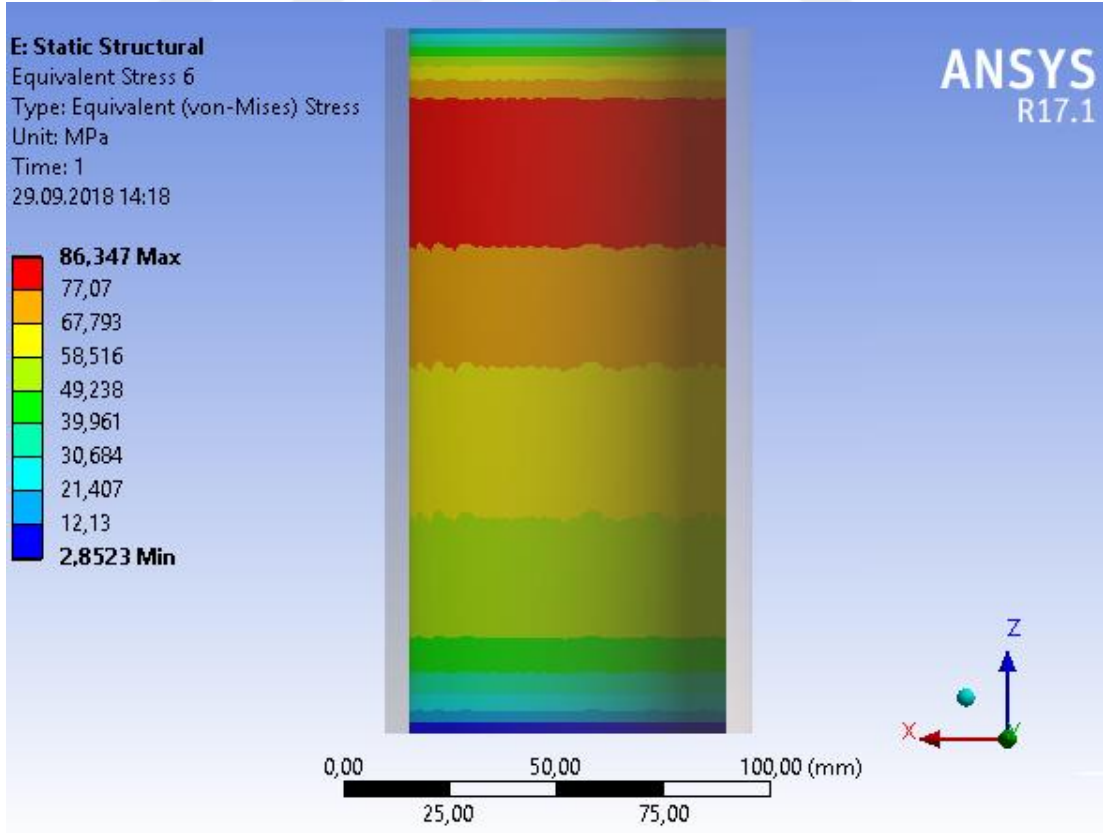


**Şekil 5.14** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın üç boyutlu sıcaklık dağılımı.

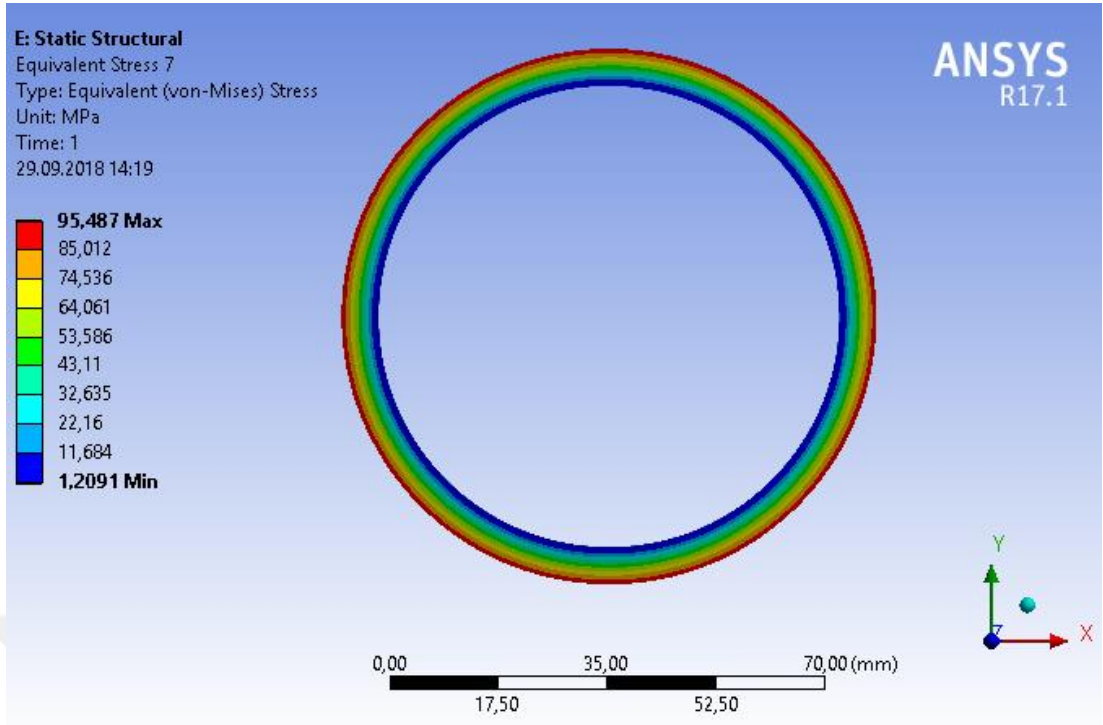
Statik analiz için aynı geometrik model kullanılmıştır. Sonlu eleman boyutu 3,5 mm olarak seçilmiştir. Silindirik yüzeylerde kare eleman, düz yüzeylerde ise üçgen eleman kullanılarak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Termal analiz sonucu bulunan üç boyutlu sıcaklık dağılımı statik analize aktarılmış ve ısı yükü olarak uygulanmıştır. Statik analizde çevre sıcaklığı 22 °C olarak girilmiştir. Analizde hiçbir sınır şartı uygulanmamıştır. Isıl genleşmeler sonucu oluşan Von Mises gerilmeleri Şekil 5.15'de görülmektedir.



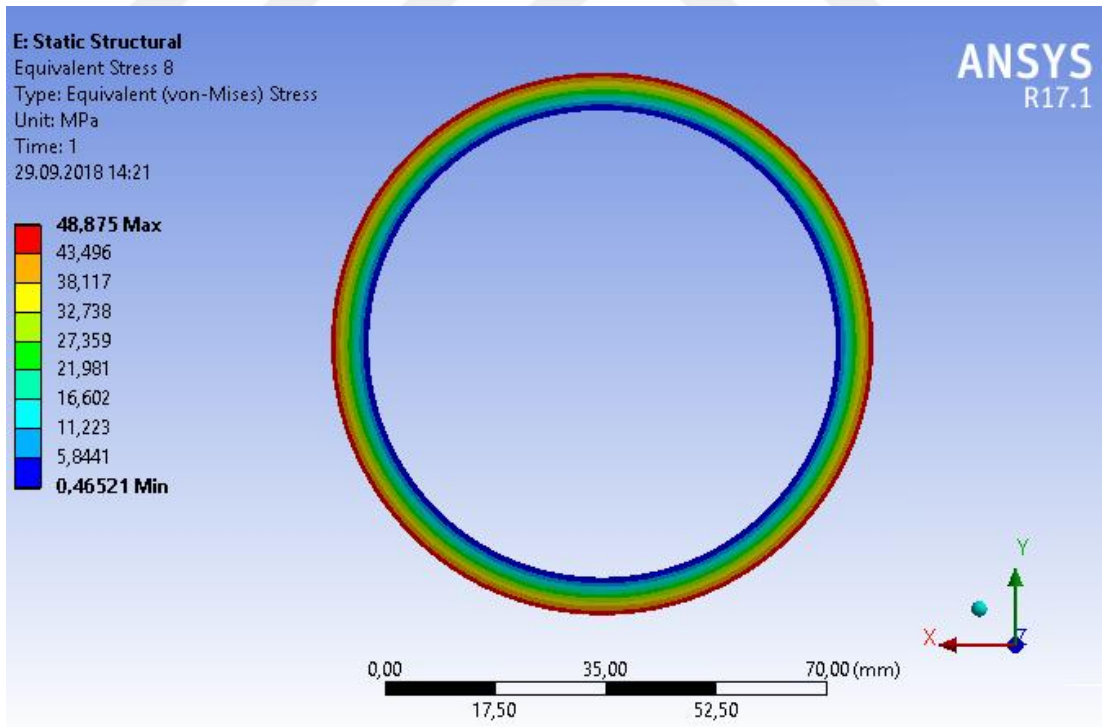
**Şekil 5.15** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçada ısıl genleşmeler sonucu meydana gelen Von Mises gerilmeleri.



**Şekil 5.16** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın iç yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilmeleri.

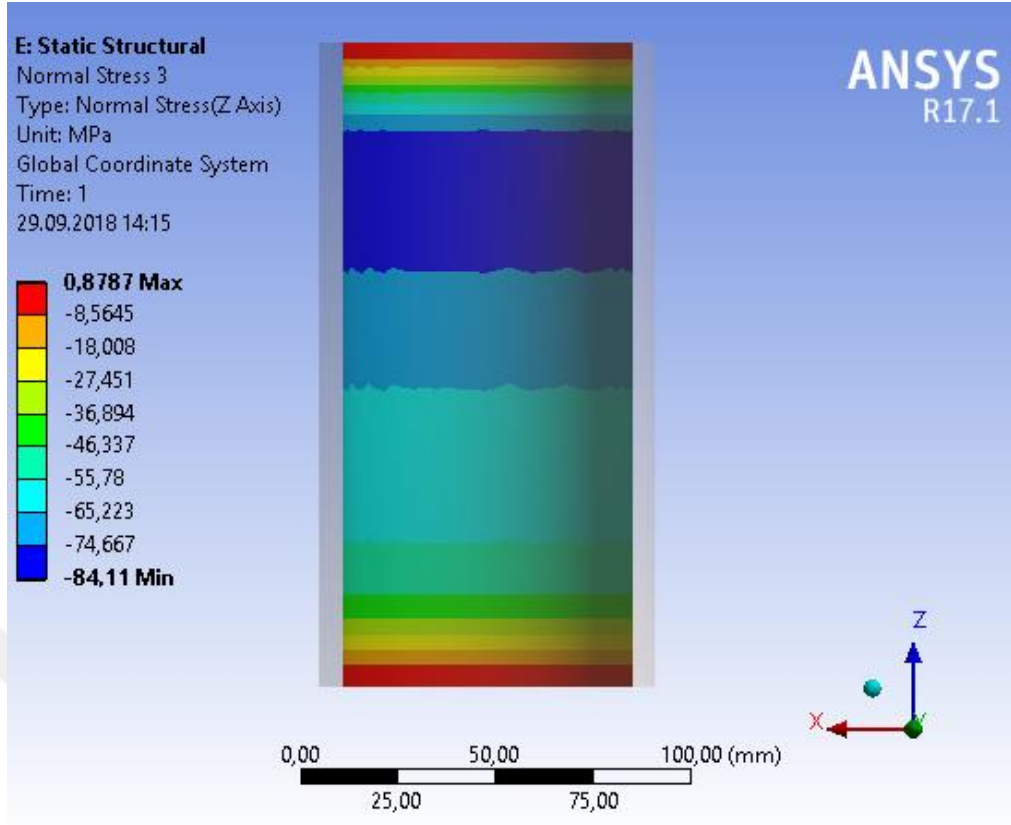


**Şekil 5.17** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın üst yüzeyinde ( $z=165$  mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.

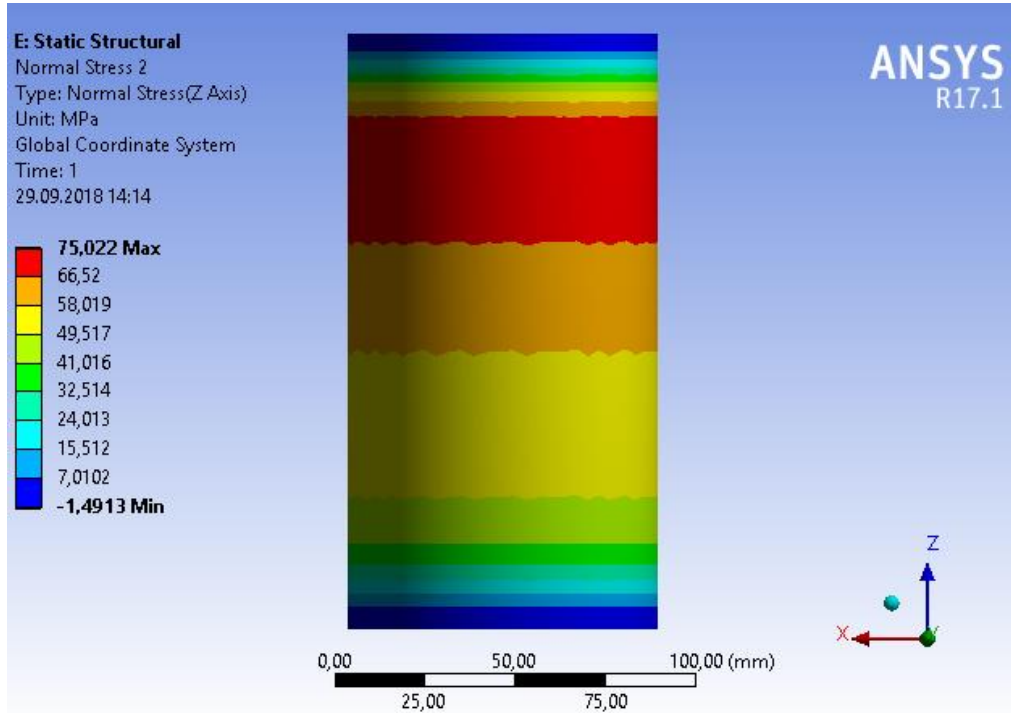


**Şekil 5.18** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın alt yüzeyinde ( $z=0$  mm) meydana gelen Von Mises gerilmeleri.





**Şekil 5.19** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın iç yüzeyinde z eksenî yönündeki normal gerilmeler.



**Şekil 5.20** Fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçanın dış yüzeyinde z eksenî yönündeki normal gerilmeler.

Ayrıca sonlu elman ağı oluşturulurken kullanılan eleman boyutunun analiz sonuçlarına etkisini görmek için fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın statik analizi üç farklı eleman boyutu için yapılmıştır. Çizelge 5.1’de analizler sonucunda elde edilen maksimum Von Mises gerilmeleri sunulmuştur.

**Çizelge 5.1** Farklı eleman boyutu kullanıldığında fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçada meydana gelen maksimum Von Mises gerilmeleri

Eleman Tipi	Eleman Boyutu (mm)	Sonlu Eleman Sayısı	Maksimum Von Mises Gerilmesi (MPa)
Üçgen Prizma	3,5	147024	47,526
	5	76160	47,849
	6	53760	48,199

Çizelge 5.1 dikkate alındığında, 5 mm boyutunda sonlu eleman kullanılırsa 3,5 mm boyutunda eleman kullanılması durumunda elde edilen sonuca göre %0,68 oranında hatayla maksimum Von Mises gerilmesi daha kısa sürede hesaplanabilir.

## 5.2 Aşınma Analizi

Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın aşınma oranını hesaplamak için Archard denklemi [60] kullanılmıştır.

$$W_v = k \cdot J \cdot L \quad [5.1]$$

Aşınma faktörü (k) birbirine temas eden malzeme çiftine ve yüzey özelliklerine göre değişen bir katsayıdır. Archard aşınma kanunu, aşınan malzeme miktarının uygulanan kuvvet ve mesafe ile doğrusal değiştiğini kabul eder [60].

Silindir çapının 50-100 mm aralığında olduğu durumda aşınma, silindir çapının %0,5’ini geçmemelidir [61]. Bu nedenle iç çapı 74, dış çapı 86 mm olacak şekilde tasarlanan fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın iç yüzeyinden çap doğrultusunda 0,37 mm aşındığı ve aşınma sonrası iç çapın 74,74 mm olduğu kabul edilmiştir.

Sonlu eleman modeli için fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parça 74 mm ile 74,74 mm çap aralığında 1000 katmana bölünmüştür. Silindirik parçanın iç yüzeyinde Si oranı %32, dış yüzeyinde %8,5 değerindedir. Si oranının iç ve dış yüzey arasında doğrusal değiştiği kabul edilmiş ve çap 74,74 mm olduğunda Si oranı % 30,55 değerinde hesaplanmıştır.

Jiang ve diğerlerinin çalışmasındaki aşınma deneyinde, 6 mm çapında, 12 mm boyunda pin ve 1000 numara zımpara kâğıdı kullanılmıştır. 7 N değerinde uygulanan yük sonucunda %32 Si (hacimsel oran) içeren Al-Si alaşımının aşınma oranı  $3,9 \times 10^{-10}$  (m<sup>3</sup>/m) ve %22 Si (hacimsel oran) içeren Al-Si alaşımının aşınma oranı ise  $4,6 \times 10^{-10}$  (m<sup>3</sup>/m) olarak hesaplanmıştır [26].

Denklem 5.1’de kullanılan k değerinin Si oranı ile doğrusal olarak değiştiği kabul edilmiş ve her bir alaşım (katman) için k değerini veren aşağıdaki denklem kurulmuştur.

$$k_{ALSi} = \left( \left( \frac{3,9}{7} \right) + 0,01 * (32 - 100 \cdot v_{Si}) \right) \cdot 10^{-10} \quad [5.2]$$

MATLAB R2009b programı kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçanın aşınma oranı  $3,9505 \times 10^{-10}$  (m<sup>3</sup>/m) değerinde bulunmuştur. Ek-1’de kullanılan program kodları verilmiştir.



## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

%22 oranında (hacimsel oran) Si içeren Al-Si alaşımı kullanılarak santrifüj dökümle imalatının gerçekleştirilmesi düşünülen fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş silindirik parça iç yüzeyinde %32, dış yüzeyinde ise %8,5 Si içeriğine sahip bir yapıda tasarlanmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmemiş içi boş silindirik parça ise homojen bir yapıdadır ve %22 oranında Si içermektedir. Bu parçaların sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yapılan literatür araştırması ve kullanılan matematiksel modeller sonucunda, Al-Si alaşımlarında Si oranının artmasının, alaşımın elastisite modülünü artırdığı, ısı genleşme ve ısı iletim katsayılarını ise azalttığı görülmüştür. Al-Si alaşımlarında sıcaklığın artması, alaşımın ısı genleşme katsayısını artırmış, elastisite modülü ve ısı iletim katsayısını ise azaltmıştır.
- Uygulanan ısı yük sonucunda fonksiyonel derecelendirilmiş ve derecelendirilmemiş silindirik parçalarda gerilmelerin meydana geldiği görülmüştür. Fonksiyonel derecelendirilmemiş parçada gerilmelerin oluşmasının nedeni, homojen olmayan sıcaklık dağılımıdır. Fonksiyonel derecelendirilmiş parçada gerilmelerin meydana gelme sebebi ise hem homojen olmayan sıcaklık dağılımı hem de Si oranının değişmesi nedeniyle ısı genleşme katsayısının değişmesidir.
- Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik parçada meydana gelen en büyük Von Mises gerilmesi 47,526 MPa, fonksiyonel derecelendirilmemiş (homojen) silindirik parçada ise 95,487 MPa'dır. Fonksiyonel derecelendirme sayesinde en büyük Von Mises gerilmesinin yaklaşık %50 oranında azaldığı görülmüştür. Fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş silindirik parçanın iç yüzeyinde sıcaklık daha fazladır ve dış yüzeyden iç yüzeye doğru alaşımdaki Si oranı artmaktadır. Artan Si oranı malzemenin ısı genleşme katsayısını azaltmaktadır. Genleşme, sıcaklık farkı ve ısı genleşme katsayısının çarpımı ile doğru orantılı olduğundan, fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş silindirik parçanın radyal doğrultudaki bölgesel genleşme farklılıkları fonksiyonel derecelendirilmemiş parçaya göre daha azdır. Bu nedenle ısı gerilme değerleri fonksiyonel derecelendirilmiş parçada daha düşüktür.

- Aşınma analizi sonucunda fonksiyonel derecelendirilmiş parçanın aşınma oranı  $3,9505 \times 10^{-10}$  ( $m^3/m$ ) değerinde hesaplanmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmemiş malzemenin aşınma oranı ise  $4,6 \times 10^{-10}$  ( $m^3/m$ ) değerindedir. Fonksiyonel derecelendirme ile aşınma oranının yaklaşık %14 azaldığı tespit edilmiştir.
- Yapılan analizler sonucunda, ısıl gerilmelerin ve aşınma oranının fonksiyonel derecelendirilmiş parçada daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla fonksiyonel derecelendirilmiş silindir gömleklerinin ömrünün, derecelendirilmemiş (homojen) gömleklerden daha uzun olacağı öngörülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] **Ram, S.C., Chattopadhyay, K. and Chakrabarty, I.** (2017). High temperature tensile properties of centrifugally cast in-situ Al-Mg<sub>2</sub>Si functionally graded composites for automotive cylinder block liners. *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 84-97.
- [2] **Orłowicz, A.W., Tupaj, M., Mróz, M. and Trytek, A.** (2015). Combustion Engine Cylinder Liners Made of Al-Si Alloys. *Archives of Foundry Engineering*, 15 (2), 71-74.
- [3] **Santos, H.O., Costa, I. and Rossi, J. L.** (2003). Mechanical and Microstructural Characterisation of Cylinder Liners. *Materials Science Forum*, 416-418, 407-412.
- [4] **Javidani, M. and Larouche, D.** (2014). Application of Cast Al-Si Alloys in Internal Combustion Engine Components. *International Materials Reviews*, 59 (3), 132-158.
- [5] **Shen, X., Nie, X. and Hu, H.** (2012). Numerical Analysis of Thermal Distributions in Aluminum Engine Cylinders Influenced by Alumina Ceramic Coatings. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 62 (6), 463-478.
- [6] **Jayakumar, E., Jacob, J.C., Rajan, T.P.D., Joseph, M.A. and Pai, B.C.** (2016). Processing and Characterization of Functionally Graded Aluminum (A319)-SiC<sub>p</sub> Metallic Composites by Centrifugal Casting Technique. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47 (8), 4306-4315.
- [7] **Alagöz, H., Gülgeç, M. ve Konez, A.** (2004). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler ve Kullanım Alanları. *Mühendis ve Makine*, 45 (532).
- [8] **Mahamood, R.M. and Akinlabi E.T.** (2017). Functionally Graded Materials. *Springer International Publishing AG*, 103p.
- [9] **Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H.** (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A*, 362 (1-2), 81-106.
- [10] **Saiyathibrahim, A., Mohamed Nazirudeen, S.S. and Dhanapal, P.** (2015). Processing Techniques of Functionally Graded Materials - A Review. *International Conference on Systems, Science, Control, Communication, Engineering and Technology (2015)*, August 10-11, 98-105, Coimbatore.
- [11] **Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Shukla, M. and Pityana, S.** (2012). Functionally Graded Material: An Overview. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012*, July 4-6, 1593-1597, London.
- [12] **Khanoki, S.A. and Pasini D.** (2012). Multiscale Design and Multiobjective Optimization of Orthopedic Hip Implants with Functionally Graded Cellular Material. *Journal of Biomechanical Engineering*, 134 (3).
- [13] **Url-1** <[http://temasek-labs.ntu.edu.sg/Research/ResearchAreas/Documents/Functionally%20Graded%20Materials%20\(FGM\).pdf](http://temasek-labs.ntu.edu.sg/Research/ResearchAreas/Documents/Functionally%20Graded%20Materials%20(FGM).pdf)>, alındığı tarih: 15.04.2018.
- [14] **Konez, A., Alagöz, H., Topal, S. ve Güleç, M.** (2005). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Teknikleri ve Kullanım Alanları. *Mühendis ve Makine*, 46 (547).
- [15] **Huang, X., Liu, C., Lv, X., Liu, G. and Li, F.** (2011). Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (9), 1540-1546.

- [16] **Radhika, N. and Raghu, R.** (2016). Development of functionally graded aluminium composites using centrifugal casting and influence of reinforcements on mechanical and wear properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26 (4), 905-916.
- [17] **Rajan, T.P.D. and Pai, B.C.** (2009). Formation of solidification microstructures in centrifugal cast functionally graded aluminium composites. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 62 (4-5), 383-389.
- [18] **Kılıç, M.** (2015). Kendi İlerleyen Yüksek Sıcaklık Sentezi İle Fonksiyonel Derecelendirilmiş İntermetalik Malzemelerin Üretimi ve Mikroyapılarının İncelenmesi. *Yaşam Bilimleri Dergisi*, 5 (2).
- [19] **Wang, K., Jiang, T., Huang, Z., Xue, H., Yang, D. and Zhu, Z.** (2016). Mechanical and thermal expansion properties of SiC<sub>p</sub>/ZAlSi9Mg composites produced by centrifugal casting. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*, 31 (1), 197-203.
- [20] **Topçu, M., Taşgetiren S. ve Uluköy A.** (2010). Alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin aşınma davranışına yaşlandırma işleminin etkisi. *13th International Materials Symposium*, October 13-15, 141-147, Denizli.
- [21] **Wang, X., Hwang, K.S., Koopman, M., Fang, Z.Z. and Zhang, L.** (2013). Mechanical properties and wear resistance of functionally graded WC-Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 36, 46-51.
- [22] **El-Galy, I.M., Ahmed, M.H. and Bassiouny, B.I.** (2017). Characterization of functionally graded Al-SiC<sub>p</sub> metal matrix composites manufactured by centrifugal casting. *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4), 371-381.
- [23] **Güler, M.S. ve Şen, S.** (2015). Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim Teknik Dergisi*, 5 (1), 56-66.
- [24] **Bircan, G.** (2005). Kanca traverslerinin parametrik tasarlanmaları gerilme analizleri ve prototip üretim yöntemlerinin incelenmesi. *İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi). 74s, İstanbul.
- [25] **Jagota, V., Sethi, A.P.S. and Kumar, K.** (2012). Finite Element Method: An Overview. *Walailak Journal of Science and Technology*, 10 (1), 1-8.
- [26] **Jiang, Q.C., Xu, C.L., Lu, M. and Wang, H.Y.** (2005). Effect of new Al-P-Ti-TiC-Y modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys. *Materials Letters*, 59 (6), 624-628.
- [27] **Url-2** <<http://www.odd.org.tr/folders/2837/categorialdocs/1731/Model%20Dokumu%20Aralik'2016.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [28] **Url-3** <<http://www.odd.org.tr/folders/2837/categorialdocs/1417/MODEL DOKUMARALIK2015.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [29] **Url-4** <<http://www.odd.org.tr/folders/2837/categorialdocs/1365/MODEL DOKUMUARALIK2014.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [30] **Url-5** <<http://www.odd.org.tr/folders/2837/categorialdocs/1368/MODEL DOKUMUARALIK2013.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [31] **Url-6** <<http://www.odd.org.tr/folders/2837/categorialdocs/1363/MODEL DOKUMUARALIK2012.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [32] **Url-7** <<https://otomobil.fiat.com.tr/content/dam/fiat/TR/models/brochures/Egea Sedan.pdf>>, alındığı tarih: 18.04.2018.
- [33] **Url-8** <<https://otomobil.fiat.com.tr/content/dam/fiat/TR/models/brochures/Linea Katalog.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.

- [34] **Url-9** <<https://www.cdn.renault.com/content/dam/Renault/TR/global-brochures/Fluence.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [35] **Url-10** <<https://www.auto-data.net/tr/renault-symbol-ii-1.2-16v-75hp-16718>>, alındığı tarih: 18.04.2018.
- [36] **Url-11** <[http://kocaslanlarmotorlu.com.tr/images/satis/32\\_10.pdf](http://kocaslanlarmotorlu.com.tr/images/satis/32_10.pdf)>, alındığı tarih: 18.04.2018
- [37] **Url-12** <<http://turkiye.toyota.com.tr/Files/KILAVUZ/COROLLA/COROLLA-OM12J90T.pdf>>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [38] **Url-13** <[http://automobilio.info/en/Volkswagen/Passat/Passat-B7/1.4-TSI-\(122Hp\)/14460](http://automobilio.info/en/Volkswagen/Passat/Passat-B7/1.4-TSI-(122Hp)/14460)>, alındığı tarih: 04.10.2017.
- [39] **Url-14** <<https://www.epey.com/dosya/71168/2017-volkswagen-polo-1-2-tsi-bmt-90-ps-comfortline-urun-katalogu.pdf>>, alındığı tarih: 18.04.2018.
- [40] **Url-15** <<https://www.lasleeve.com/downloads/LASleeve-Auto-Performance-2014-catalog.pdf>>, alındığı tarih: 18.04.2018.
- [41] **Saunders, W. L., Pendley, K. and Gutierrez-Miravete, E.** (2014). Modal analysis of functionally graded metal-ceramic composite plates. *Proceedings of the 2014 COMSOL Conference*, October 8-10, Boston (in USA).
- [42] **Cardarelli, F.** (2008). Background Data for the Chemical Elements. *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference* (2nd edition). Springer, 1181-1194, London.
- [43] **Lasagni, F. and Degischer, H.P.** (2010). Enhanced Young's Modulus of Al-Si Alloys and Reinforced Matrices by Co-continuous Structures. *Journal of Composite Materials*, 44 (6), 739-755.
- [44] **Url-16** <<http://www.pscyclops.com/tools/technotes/materials/density.html>>, alındığı tarih: 20.10.2018.
- [45] **Url-17** <<http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/PoissonIntro.html>>, alındığı tarih: 20.10.2018.
- [46] **Url-18** <[http://www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_2/2\\_2\\_2.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_2/2_2_2.html)>, alındığı tarih: 10.10.2017.
- [47] **Kahn, H., Huff, M.A. and Heuer, A.H.** (1998). Heating Effects on the Young's Modulus of Films Sputtered onto Micromachined Resonators. *Microelectromechanical Structures for Materials Research, Materials Research Society Symposium 518*, April 15-16, 33-38, San Francisco.
- [48] **Nikanorov, S.P., Volkov, M.P., Gurin, V.N., Burenkov, Y.A., Derkachenko, L.I., Kardashev, B.K., Regel, L.L. and Wilcox, W.R.** (2005). Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt. *Materials Science and Engineering: A*, 390 (1-2), 63-69.
- [49] **Ma, P., Jia, Y., Prashanth, K.G., Yu, Z., Li, C., Zhao, J., Yang, S. and Huang, L.** (2017). Effect of Si content on the microstructure and properties of Al-Si alloys fabricated using hot extrusion. *Journal of Materials Research*, 32 (11), 2210-2217.
- [50] **Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. and Lavernia, E.J.** (1991). Particulate reinforced metal matrix composites - a review. *Journal of Materials Science*, 26 (5), 1137-1156.
- [51] **Frank, W.B., Koch, G.P. and Mills, J.J.** (1984). Properties of Pure Aluminum. *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, Hatch, J.E. (Ed.), American Society for Metals, 1-24, Ohio.

- [52] **Jia, Y.D., Ma, P., Prashanth, K.G., Wang, G., Yi, J., Scudino, S., Cao, F.Y., Sun, J.F. and Eckert, J.** (2017). Microstructure and thermal expansion behavior of Al-50Si synthesized by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 699, 548-553.
- [53] **Kempe, V.** (2011). Inertial MEMS: Principles and Practice. *Cambridge University Press*, 475p, New York.
- [54] **Sadatomi, N., Hamamoto, N., Saigo, T. and Yamashita, O.** (2002). Thermal Characterization of Al-Si Materials Prepared by Die Casting Method. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 49 (9), 793-798.
- [55] **Every, A.G., Tzou, Y., Hasselman, D.P.H. and Raj, R.** (1992). The effect of particle size on the thermal conductivity of ZnS/diamond composites. *Acta Metallurgica et Materialia*, 40 (1), 123-129.
- [56] **Xiu, Z., Chen, G., Yang, W., Song, M. and Wu, G.** (2009). Microstructure and thermal properties of recyclable Si<sub>p</sub>/1199Al composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (6), 1440-1443.
- [57] **Jia, Y., Cao, F., Ma, P., Scudino, S., Eckert, J., Sun, J. and Wang, G.** (2016). Microstructure and thermal conductivity of hypereutectic Al-high Si produced by casting and spray deposition. *Journal of Materials Research*, 31 (19), 2948-2955.
- [58] **Masolin, A., Bouchard, P., Martini, R. and Bernacki, M.** (2013). Thermo-mechanical and fracture properties in single-crystal silicon. *Journal of Materials Science*, 48 (3), 979-988.
- [59] **Wang, G., Chen, H., Yuan, Z. and Lu, W.** (2012). Numerical Study on Three-Dimensional Steady-State Temperature Field of a Gasoline Engine. *Advanced Materials Research*, 569, 610-614.
- [60] **Sutton, D.C., Limbert, G., Stewart, D. and Wood, R.J.K.** (2014). A Functional Form for Wear Depth of a Ball and a Flat Surface. *Tribology Letters*, 53 (1), 173-179.
- [61] **Zhang, X.J., Gui, C.L.** (2004). General consideration of tribological design of an engine. **Briscoe, B.J.** (Dizi Ed.), *Tribology and Interface Engineering Dizisi: Vol. 46. An Intelligent System for Tribological Design in Engines, Elsevier*, 37-94, Amsterdam.



**EK-1**

**AŞINMA ANALİZİ MATLAB KODLARI**

```

N=7; % kuvvet (Newton)
A=pi*0.003^2; % Pin kesit alanı (m2)
x(1)=0;
for i=1:1000
x(i+1)=x(i)+0.00145; % Her bir adımda (katmanda) Si oranındaki azalma
VSi(i)=32-x(i); % Her bir katmanın Si oranı (% hacim)
k=((3.9/7)+0.01*(32-VSi(i)))*10^-10; % Her bir katman için aşınma faktörü
D(i)=(N/A)*k; % Her bir katman için 1 metre kayma mesafesi için meydana gelen
aşınma derinliği (m/m)
Y=0.00000037; % Her bir katmanın kalınlığı (metre)
L(i)=Y/D(i); % Her bir katmanın aşınması için alınması gereken kayma
mesafesi (metre)
Ltop=sum(L); % Toplam kayma mesafesi (metre)
W(i)=A*D(i)*L(i); % Her bir katman için aşınan hacim (m3)
Wtop=sum(W); % Toplam aşınan hacim
end
Wr=Wtop/Ltop % Fonksiyonel derecelendirilmiş parçanın aşınma oranı (m3/m)

```



## ÖZGEÇMİŞ



### **Kişisel bilgiler**

Adı Soyadı	Fatih Civelek
Doğum Yeri ve Tarihi	Sakarya, 15.01.1989
Medeni Hali	Bekâr
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	C.Ü. Teknoloji Fakültesi – İmalat Mühendisliği Bölümü
E-posta Adresi	fatihcivelek89@gmail.com

### **Eğitim ve Akademik Durumu**

Lise	Karasu Anadolu Lisesi, 2003-2006
Lisans	İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, 2007-2012
Yüksek Lisans	C.Ü. İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016-

### **İş Tecrübesi**

C.Ü. İmalat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi, 2016-