

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİBRİT KOMPOZİT BİR DİŞLİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE  
ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RECEP İZCİ**

**DENİZLİ, HAZİRAN - 2015**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**HİBRİT KOMPOZİT BİR DİŞLİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE  
ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RECEP İZCİ**

**DENİZLİ, HAZİRAN - 2015**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

RECEP İZCİ tarafından hazırlanan “HİBRİT KOMPOZİT BİR DİŞLİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE ANALİZİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 16.06.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU

Üye  
Doç. Dr. Emin ERGUN  
Pamukkale Üniversitesi

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Engin TAN  
Pamukkale Üniversitesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/07/2015 tarih ve ..26/10.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından BAP FBE 025 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

  
**RECEP İZCİ**

## ÖZET

### HİBRİT KOMPOZİT BİR DIŞLININ TASARIMI, ÜRETİMİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RECEP İZCİ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MUZAFFER TOPÇU)

DENİZLİ, HAZİRAN - 2015

Bu tez kapsamında hibrit kompozit bir dişlinin tasarımı, üretimi ve analizi yapılmıştır. Hibrit kompozit dişliler ve analiz metotları konusunda literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması hibrit kompozitlerin ve hibrit kompozit dişlilerin geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermiştir. Kompozit malzemelerin yapısı ve üretim metotları üzerinde durulmuştur. Sonlu elemanlar metodunun ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımının temel prensipleri anlatılmıştır. Dişlinin tasarımı, üretimi ve genel analitik çözüm metodu incelenmiştir. Dişlinin farklı parametrelere göre beş farklı tasarımı oluşturulmuştur. ANSYS programında dişlinin yapısal analizleri yapılmıştır. 300, 400, 500, 600, 800 ve 1000 dev/dak dönüş hızlarında, beş farklı tasarım için yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerilme ve şekil değiştirme sonuçları elde edilerek bu sonuçlar tablolar ve grafikler şeklinde gösterilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Hibrit kompozit dişli, karbon fiber pre-preg, ANSYS, sonlu elemanlar analizi.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN, MANUFACTURING AND ANALYSIS OF A COMPOSITE GEAR**

**MSC THESIS  
RECEP IZCI**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. MUZAFFER TOPÇU)**

**DENİZLİ, JUNE 2015**

Designing, manufacturing and analyzing of a hybrid composite gear was done within the scope of this thesis. Literature survey was made about hybrid composite gears and their analysis methods. The literature survey showed that hybrid composites and hybrid composites gears have a wide range of application area. Structure and manufacturing techniques of composite materials were mentioned. Fundamental principles of finite element method and ANSYS finite element software were explained. Design, manufacturing and general analytical solution of the gear were investigated. Five different designs were constituted by means of different gear parameters. Structural analyses of the gear were done in ANSYS software. The structural analyses were performed for five different designs at 300, 400, 500, 600, 800 and 1000 rpm rotational speeds. Stress and strain results were obtained and they were demonstrated by means of graphics and tables.

**KEYWORDS:** Hybrid composites gear, carbon fiber pre-preg, ANSYS, finite element analysis.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|   |           |
|---|-----------|
| ÖZET.....   | vi        |
| ABSTRACT .....  | vii       |
| İÇİNDEKİLER.....  | viii      |
| ŞEKİL LİSTESİ.....  | x         |
| TABLO LİSTESİ.....  | xii       |
| SEMBOL LİSTESİ.....   | xiii      |
| ÖNSÖZ.....  | xiv       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Kompozit Malzemelerin Önemi .....   | 2         |
| 1.2 Literatür Taraması .....  | 3         |
| <b>2. KOMPOZİT MALZEMELER, KOMPOZİT MALZEMELERİN<br/>KULLANIM ALANLARI VE PRE-PREGLER .....</b> | <b>9</b>  |
| 2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı.....   | 9         |
| 2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları .....                                   | 10        |
| 2.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....   | 12        |
| 2.4 Pre-Preg Üretimi.....   | 14        |
| 2.5 Pre-Preg Malzemenin Avantajları .....   | 14        |
| <b>3. HİBRİT DIŞLININ TASARIMI, MALZEME ÖZELLİKLERİ VE<br/>ÜRETİMİ .....</b>                    | <b>16</b> |
| 3.1 Dişlinin Tasarımı .....   | 16        |
| 3.2 Dişlinin Malzeme Özellikleri .....  | 19        |
| 3.2.1 Karbon Prepreg .....  | 19        |
| 3.2.2 Köpük Dolgu Malzemesi.....  | 20        |
| 3.2.3 Epoksi Reçine .....   | 21        |
| 3.2.4 Dişli .....   | 21        |
| 3.2.5 Alüminyum Merkezleme Parçası.....   | 22        |
| 3.2.6 Dişli sabitleme parçası.....  | 23        |
| 3.2.7 Alt kalıp .....   | 23        |
| 3.2.8 Üst kalıp.....  | 24        |
| 3.3 Dişlinin Üretimi.....   | 25        |
| 3.3.1 Karbon pre-preglerin kesilmesi.....   | 25        |
| 3.3.2 Köpük malzemenin kesilmesi .....  | 26        |
| 3.3.3 Epoksi reçinenin hazırlanması .....   | 26        |
| 3.3.4 Dişlinin dişli sabitleme kalıbına yerleştirilmesi.....                                    | 27        |
| 3.3.5 Alt kalıbın (erkek kalıp) hidrolik prese yerleştirilmesi .....                            | 27        |
| 3.3.6 Kalıp yüzeyinin temizlenmesi.....   | 28        |
| 3.3.7 Pre-preglerin alt kalıba yerleştirilmesi .....  | 29        |
| 3.3.8 Alüminyum merkezleme parçasının yerleştirilmesi.....                                      | 29        |
| 3.3.9 Epoksi malzemenin uygulanması.....  | 30        |
| 3.3.10 Üst kalıbın yerleştirilmesi.....   | 30        |
| 3.3.11 Sıcaklık kontrolü .....  | 31        |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. DİŞLİNİN GENEL ANALİTİK ÇÖZÜMÜ VE ANSYS SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ.....</b> | <b>32</b> |
| 4.1 Genel Analitik Çözüm .....  | 32        |
| 4.2 SONLU ELEMANLAR METODU (SEM).....   | 39        |
| 4.2.1 SEM' de Çözüm Yöntemi.....  | 39        |
| 4.2.2 SEM' de kullanılan eleman modelleri.....                                    | 42        |
| 4.3 ANSYS Sonlu Elemanlar Analizleri.....   | 45        |
| 4.3.1 Analiz aşamaları.....   | 45        |
| 4.3.2 Analiz Sonuçları.....   | 54        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>   | <b>64</b> |
| <b>6. KAYNAKLAR .....</b>   | <b>66</b> |
| <b>7. ÖZGEÇMİŞ.....</b>   | <b>68</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1: Fiber ve matrisin kompozit malzemeyi oluşturması .....               | 9  |
| Şekil 2.2: Bir savaş uçağında kullanılan kompozit malzemeler .....              | 12 |
| Şekil 2.3: Bir haberleşme uydusunda kullanılan kompozit malzemeler .....        | 13 |
| Şekil 2.4: Bir jet motorunda kullanılan kompozit malzemeler .....               | 13 |
| Şekil 2.5: Prepreglerin farklı dokuma şekillerine örnekler .....                | 15 |
| Şekil 3.1 : Hibrit dişliyi ve kalıbını oluşturan parçalar .....                 | 17 |
| Şekil 3.2: Beş farklı tasarımın katı modelleri .....                            | 18 |
| Şekil 3.3: Dişli sabitleme parçası.....   | 23 |
| Şekil 3.4: Alt kalıp .....  | 24 |
| Şekil 3.5: Üst kalıp.....   | 24 |
| Şekil 3.6: Pre-preglerin istenen çapta kesilmesi ve ayrılması .....             | 25 |
| Şekil 3.7: Köpük dolgu malzemesi .....  | 26 |
| Şekil 3.8: Epoksi reçinenin hazırlanması .....                                  | 26 |
| Şekil 3.9: Dişlinin dişli sabitleme kalıbına yerleştirilmesi.....               | 27 |
| Şekil 3.10: Alt kalıbın hidrolik prese yerleştirilmesi.....                     | 27 |
| Şekil 3.11: Kalıp yüzeyinin temizlenmesi .....                                  | 28 |
| Şekil 3.12: Kullanılan kalıp ayırıcılar .....                                   | 28 |
| Şekil 3.13: Pre-preglerin alt kalıba yerleştirilmesi .....                      | 29 |
| Şekil 3.14: Alüminyum merkezleme parçasının yerleştirilmesi.....                | 29 |
| Şekil 3.15: Epoksi malzemenin eklenmesi.....                                    | 30 |
| Şekil 3.16: Montajın tamamlanması ve hidrolik basıncın uygulanması .....        | 30 |
| Şekil 3.17: Kalıp sıcaklığının kontrolü .....                                   | 31 |
| Şekil 4.1: Dönen bir diskte değişken parametrelerin gösterilmesi .....          | 38 |
| Şekil 4.2: SEM’ de kullanılan bir, iki ve üç boyutlu elemanlar .....            | 43 |
| Şekil 4.3: İzoparametrik elemanlara örnekler .....                              | 44 |
| Şekil 4.4: ANSYS Workbench ortamına katı modellerin çağırılması .....           | 46 |
| Şekil 4.5: ANSYS’ de malzeme tanımlamalarının yapılması .....                   | 47 |
| Şekil 4.6: Dişliyi oluşturan parçaların malzeme atamalarının yapılması.....     | 48 |
| Şekil 4.7: Hibrit dişlinin sonlu eleman ağının oluşturulması .....              | 49 |
| Şekil 4.8: Karbon fiber pre-preğin sonlu eleman modeli.....                     | 50 |
| Şekil 4.9: Dişli parçasının sonlu eleman modeli .....                           | 50 |
| Şekil 4.10: Epoksi reçinenin sonlu eleman ağı.....                              | 51 |
| Şekil 4.11: Köpük parçasının sonlu eleman ağı .....                             | 51 |
| Şekil 4.12: Alüminyum parçasının sonlu eleman ağı .....                         | 51 |
| Şekil 4.13: Dişlinin hareket ekseninin tanımlanması.....                        | 52 |
| Şekil 4.14: Dişlinin açılma hızının tanımlanması .....                          | 52 |
| Şekil 4.15: Çözüm sonuçlarının parametrik olarak elde edilmesi .....            | 53 |
| Şekil 4.16: Analiz sonuçlarının gösterilmesi.....                               | 53 |
| Şekil 4.17: Tasarım-1’de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri.....           | 54 |
| Şekil 4.18: Tasarım-1’de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri ..... | 55 |
| Şekil 4.19: Tasarım-2’de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri.....           | 56 |
| Şekil 4.20: Tasarım-2’de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri ..... | 57 |
| Şekil 4.21: Tasarım-3’de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri.....           | 58 |
| Şekil 4.22: Tasarım-3’de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri ..... | 59 |
| Şekil 4.23: Tasarım-4’de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri.....           | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4.24: Tasarım-4’de elde Von-Mises şekil değıştirme değeri .....61       | 61 |
| Şekil 4.25: Tasarım-5’de elde edilen Von-Mises gerilme değeri.....62          | 62 |
| Şekil 4.26: Tasarım-5’de elde edilen Von-Mises şekil değıştirme değeri ....63 | 63 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Tablo 3.1: Hibrit dişliyi oluşturan parçaların temel boyutları.....   | 16 |
| Tablo 3.2: Dişlinin farklı tasarımlarının ölçüleri.....               | 18 |
| Tablo 3.3: Dokunmuş karbon kumaş malzemenin mekanik özellikleri ..... | 19 |
| Tablo 3.4: Köpük dolgu malzemenin mekanik özellikleri.....            | 20 |
| Tablo 3.5: Epoksi malzemenin mekanik özellikleri .....                | 21 |
| Tablo 3.6: Dişli malzemesinin mekanik özellikleri.....                | 22 |
| Tablo 3.7: Alüminyum malzemenin mekanik özellikleri .....             | 22 |

## SEMBOL LİSTESİ

- $\sigma_x$ : x eksenine doğrultusundaki normal gerilme ( $N/mm^2$ )
- $\sigma_y$ : y eksenine doğrultusundaki normal gerilme ( $N/mm^2$ )
- $\tau_{xy}$ : xy düzlemindeki kayma gerilmesi ( $N/mm^2$ )
- $\sigma_r$ : r, yarıçap eksenine doğrultusundaki normal gerilme ( $N/mm^2$ )
- $\sigma_\theta$ :  $\theta$  açısı doğrultusundaki normal gerilme ( $N/mm^2$ )
- $\tau_{r\theta}$ : r- $\theta$  düzlemindeki kayma gerilmesi ( $N/mm^2$ )
- $\epsilon_x$ : x eksenindeki şekil değiştirme (mm/mm)
- $\epsilon_y$ : y eksenindeki şekil değiştirme (mm/mm)
- $\gamma_{xy}$ : xy düzlemindeki kayma şekil değiştirmesi (mm/mm)
- $\nu$ : Poisson oranı
- $E_1$ : 1 doğrultusundaki elastisite modülü ( $N/mm^2$ )
- $E_2$ : 2 doğrultusundaki elastisite modülü ( $N/mm^2$ )
- $G_{12}$ : 1-2 Düzlemindeki kayma modülü ( $N/mm^2$ )
- $S_{ijk}$ : i, j, k koordinat sistemindeki 3 boyutlu elastiklik matrisleri
- $r_i$ : Hibrit dişlinin iç çapı (mm)
- $r_o$ : Hibrit dişlinin dış çapı (mm)
- $\rho$ : Hibrit dişlinin yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
- $\omega$ : Hibrit dişlinin açısal hızı (rad/s)
- $U$ : Kütle kuvvetinin fonksiyonu ( $N/mm^2$ )
- $\ln$ : Tabanı “e” olan doğal logaritma fonksiyonu
- $[k]$ : Sonlu eleman ağ yapısındaki her bir elemana ait elastisite matrisi ( $N/mm^2$ )
- $[K]$ : Tüm yapının elastisite matrisi ( $N/mm^2$ )
- $\delta$ : Her bir düğüm noktasındaki yer değiştirme (mm)
- $[N]$ : Şekil vektörlerinin matrisi
- $[B]$ : Şekil değiştirmelerin matrisi (mm/mm)
- $[E]$ : Elastisite matrisi ( $N/mm^2$ )

## ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlama sürecinde değerli fikirleri ve derin bilgisiyle yolumu aydınlatan sayın hocam Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU' ya, üretim sürecinde desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Emin ERGUN ve Dr. Mühendis Tolga DOĞAN' a, malzeme alım desteklerinden dolayı TÜBA'ya ve maddi desteklerinden dolayı Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi'ne çok teşekkür ediyorum. Ayrıca analiz sürecinde destek veren Araş. Gör. Uğur GEZGİNCİ' ye ve tezi şekillendirmemde yardımcı olan Araş. Gör. Osman YELER' e teşekkür ediyorum.

Ayriyeten her zaman maddi ve manevi olarak beni destekleyen, her an yanımda olan sevgili eşim Tuğba'ya, anneme ve babama gönülden teşekkür etmek istiyorum. Bu tezi canım oğlum Ali Emir'e armağan ediyorum.

# 1. GİRİŞ

Günümüzde teknoloji geliştikçe, mühendislik malzemelerinden istenen özellikler de sürekli artmaktadır. Malzemelerin akma, kopma, yorulma, aşınma ve darbe dayanımları ve korozyon ve sıcaklık direnci gibi mekanik özelliklerinin yüksek olması istenmektedir. Yeni uygulama alanları ve koşullarıyla birlikte, bunun bir üst aşamasında mekanik özelliklerin malzemenin ağırlığına oranı olan özgül akma dayanımı (akma dayanımı / özgül ağırlık), özgül darbe dayanımı (darbe dayanımı / özgül ağırlık) vb. mekanik özelliklerinin de çok iyi olması beklenmektedir. İki ya da daha fazla malzemenin iyi özelliklerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemeler, seçilen birleşim ve boyutlarda istenen özelliklere sahip olabilmelidir. İyi bir hibrit kompozit tasarımının yapılabilmesi için optimizasyon araçlarının kullanılması gerekmektedir. Üretimi hedeflenen hibrit kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, ayrıca geliştirilecek yeni üretim metotlarıyla üretimde güvenilirliğinin artırılması ve maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmelidir (Gururaja ve Rao, 2012).

Bu tez kapsamında tekstil dokuma sektöründe kullanılan hibrit kompozit bir dişlinin tasarımı, üretimi ve analizi yapılmıştır. İlk olarak bu parça için farklı malzemelerle çeşitli tasarımlar üzerinde çalışılmış, daha sonra bu malzemenin üretimi için yöntem araştırması yapılmış ve son olarak oluşturulan bu tasarımlar sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS 15.0.7 sonlu elemanlar yazılımında analiz edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda istenen mekanik özellikleri sağlayan optimum tasarım gerçekleştirilmiş, dişlinin üretim maliyetleri düşürülmüş ve üretim güvenilirliği artırılmıştır. Üretilen hibrit kompozit dişliler bazı tekstil dokuma makinalarında test edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda elde edilen yeni tasarımlarla, kullanılan tasarım teknikleriyle, yapılan sonlu elemanlar analizleriyle araştırmacılara ve sektöre yeni bilgiler kazandırılmıştır. Hibrit kompozit dişlinin geliştirilmesi ve üretimi konusunda iyi sonuçlar elde edilmiştir. Böylece ürün tasarım süreci kısalmış, ürün kalitesi artmış ve üretim maliyeti düşürülmüştür.

## 1.1 Kompozit Malzemelerin Önemi

İki ya da daha fazla farklı malzemenin iyi özelliklerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş ve bu malzemelerden daha iyi mekanik özelliklere sahip yeni malzemelere hibrit kompozit malzeme denir. Hibrit kompozitler kompozitlerle metallerin, çeşitli plastiklerin veya doğal malzemelerin kombinasyonundan oluşabilmektedir. Hibrit kompozit uygulamalarında dayanım / özgül ağırlık oranının iyi, maliyetin düşük ve seri üretimin kolay olması gerekmektedir. Hibrit kompozitlerin çekme, akma, basma, yorulma ve darbe dayanımının kombinasyonu, kompozit malzemelerle elde edilemeyecek kadar iyidir. Son zamanlarda hibrit kompozitler, yüksek performanslı yapısal malzemelerde kullanılmakta, kullanım alanı günden güne artmaktadır. Hibrit kompozitlerin uzay, havacılık ve haberleşme gibi sektörlerdeki kullanımları araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Tek bileşen istenen özellikleri karşılayamadığı zaman hibrit malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı malzemelerin iyi özellikleri birbirine eklenerek, istenen amacı karşılayan özellikte hibrit malzemeler elde edilir. Hibrit malzemeler süper malzemeler demek değildir, fakat hibrit malzemelerde bazı mekanik özelliklerin mükemmel değerlere ulaşması sağlanabilir (Ashby ve Brechet, 2003).

Metal alaşımları, kompozit malzemeler, seramikler ve doğal malzemeler mühendislik uygulamalarında birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu farklı malzemeler sadece kendi başına değil, hibrit-karma malzemeler şeklinde de kullanılmaktadır. Hibrit malzemelere sandviç malzemeler, metal matris kompozitler ve metal fiber laminatları örnek verebiliriz. Örneğin sandviç malzemelerin eğilme direnci çok iyidir, ağırlığı azdır. İlaveten akustik sönümlendirme ve temel yalıtım özellikleri çok iyidir. Sandviç malzemeler başka malzemelerin ve malzeme kombinasyonlarının sahip olduğu özelliklere sahip olup, yüksek mukavemetli fiberlerle birlikte çok özgün uygulamalarda kullanılır. Örnek olarak 1986 yılında imal edilen “Voyager” ve 2004'te imal edilen ödüllü hava aracı “Space Ship One” (hiç durmadan dünyanın etrafını etrafını turlamıştır) verilebilir. Bunlar dışında sandviç malzemelerle imal edilmiş “StarShip” ve “Extra400” örnek olarak verilebilir (Ashby ve Brechet, 2003).



Metal matrisli kompozitler (MMK) ise seramik fiberlerin ve ipliklerin bir metal matris içinde birleştirilmesiyle elde edilmiş hibrit kompozitlerdir. Bu hibrit kompozit malzemeler; alümina ( $Al_2O_3$ ) ve silisyum karbür (SiC) gibi seramikler fiber bileşeni olarak, düşük ergime noktasına sahip olan magnezyum ya da alüminyum alaşımının matris malzeme olmak üzere kullanılmasıyla oluşturulmuştur. MMK malzemeler motor parçaları ve aşınmaya dayanıklı olması gereken fren balatası gibi otomotiv parçalarında kullanılmaktadır.

Hibrit malzemelere son örnek olarak metal fiberli kompozitleri verebiliriz. Bu kompozitler mükemmel hasar, yorulma ve darbe dayanımına sahiptir. Bu kompozitler, birbirini izleyen ince metal levhalarının ve kompozit levhaların birleşiminden oluşur. Uçak gövdeleri, uçak kanatlarının ön bölgeleri ve patlamaya dayanıklı konteynerler kullanım alanlarından birkaçıdır. Metal fiberli kompozitlerin en önemli özelliği, yorulma dayanımının metal alaşımlarından daha iyi olması; darbe ve şekil verilebilme özelliklerinin kompozitlerden daha iyi olmasıdır. Fakat günümüzde henüz sınırlı sayıda metal fiberli kompozit geliştirilebilmiştir, bu alan çok farklı oranlardaki metal karışım oranlarıyla geliştirilmeye açıktır.

## 1.2 Literatür Taraması

Bu çalışma kapsamında hibrit kompozitler ve hibrit kompozit dişlilerin tasarımı, üretimi, analizi ve test metotlarıyla alakalı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir.

Handsuh ve diğ. (2012), NASA Glenn Araştırma Merkezi'nde hibrit kompozit bir dişli tasarlamışlar ve bunu çeşitli dinamik testlerden geçirmişlerdir. Bu dişli, iç bölgesi T700 karbon fiberden, dış bölgesi (dişli bölgesi) AISI 9310 dişli çeliğinden oluşmaktadır. İmal edilen dişli aksel ve radyal kuvvetler altında çeşitli dinamik testlerden geçirilmiş ve elde edilen titreşim ve ses bilgileri toplanmıştır. Sonuç olarak hibrit kompozit dişlinin daha uzun bir periyotta daha yüksek bir tork ve hıza dayanıklı olduğu, % 20 daha hafif olduğu ve imalat koşullarının daha iyi hale getirilmesiyle ses ve titreşim değerlerinin de daha iyi olacağı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Altan ve diğ. (2008), alüminyum kompozit bir diskin parabolik termal yük dağılımı altında elastik-plastik termal gerilme analizini yapmıştır. Ortotropik ve ortasında delik bulunan alüminyum metal matrisli kompozit bir diskin elastik-plastik termal gerilme analizi analitik olarak yapılmıştır. Termal yük iç yüzeyden dış yüzeye doğru parabolik olarak uygulanmıştır. Eğrisel olarak çelik fiberle güçlendirilmiş alüminyum kompozit disk hidrolik preste üretilmiştir. Mekanik özellikleri gerinim ölçerler yardımıyla tespit edilmiştir. Termal gerilmeleri hesaplayan yazılım kodları geliştirilmiştir. Materyalde lineer olmayan sertleşme olduğu kabul edilmiştir.

Suryawanshi ve Damle (2013), hibrit kompozit bir tahrik milinin tasarımını incelemişlerdir. Klasik iki parçadan mamul çelik tahrik mili yerine, tek parçadan mamul hibrit alüminyum kompozit tahrik milinin yeni bir metotla üretilmesi üzerinde çalışmışlardır. Karbon fiber epoksi kompozit tabaka alüminyum borunun iç yüzeyine yerleştirilmiştir. Metalik malzeme yerine kompozit malzeme yerleştirilerek daha yüksek özgül katılık ve akma dayanımı elde edilmiştir. Alüminyumla kompozit tabaka arasındaki kalıntı ısıl gerilmeleri minimuma indirmek için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Üretimde sıkı geçme metodu kullanılarak alüminyum, kompozit boru ve çatal bağlantı montajı daha güvenilir ve daha az maliyetli olarak yapılmıştır. Sonuç olarak, yeni üretilen hibrit alüminyum kompozit tahrik milinin ağırlığı çeliğe göre azaltılmıştır. Statik tork kapasitesi 4320 Nm, açısal hızı 9390 dev/dak değerlerine çıkarılarak dizayn kriterlerinin üzerine çıkmıştır. Üretiminde sıkı geçme metodu kullanılarak montaj güvenilirliği artırılmış, üretim maliyeti düşürülmüştür. İlaveten hibrit kompozit şaftlarda ağırlık, ses ve titreşim azaltılmıştır. Fakat karbon fiber epoksi kompozit malzemelerin maliyeti yüksek olduğundan dolayı, bu malzemeler alüminyum gibi metallerle birleştirilerek, hibrit Al / Kompozit tahrik milleri tasarlanmıştır. Karbon fiber epoksi pre-preg olarak USN150, alüminyum boru olarak Al 6061-T6 kullanılmıştır.

Ashby ve Brechet (2003), hibrit malzeme dizayn metotları, bileşenlerin seçimi, şekli ve boyutları üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında aşağıdaki dizayn aşamalarını ortaya koymuşlardır:

1. Dizayn gereksinimlerinin, mükemmellik kriterlerinin ve önceliklerin formüle edilmesi gerekir.
2. Çakışan gereksinimlerin tanımlanması gerekir.
3. Malzeme ve şekil açısından elde edilen çözümlerin ayrıştırılması gerekir.
4. Uyumluluğun keşfedilmesi ve potansiyel çözümlerin tekrar yapılması gerekir.
5. Mükemmellik kriterlerine göre çözümlerin sınıflandırılması gerekir.

Karakaya (2012), kompozit disk yayların, farklı kesit alanlarında ve hibrit tip olarak, yük kapasitesi, kütle, hibritleşme karakteristiği ve maliyet açısından incelemesini yapmıştır. Disk yaylar Abaqus sonlu elemanlar programıyla iki rijit kütle arasında sıkıştırılarak analiz edilmiş, yük altında flambaj karakteristikleri, analitik ve deneysel çalışmalar karşılaştırılarak elde edilmiştir. Farklı kesitlerdeki hibrit kompozit diskler modellenmiştir. Trapez A tipindeki yayın yük kapasitesi ve ağırlık bakımından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, dış tabakası karbon epoksi olan kompozitler daha avantajlıdır. Dış kabuk kuvvete maruz kalacağından bu tabakanın güçlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Babic ve diğ. (2013), yağlandırılmış kayma durumunda A356 / 10SiC / 1Gr hibrit kompozit diskin aşınma özelliklerini incelemiştir. Karma döküm yöntemiyle elde edilmiş olan A356 / 10SiC / 1Gr hibrit kompoziti, A356 Alüminyum alaşımı matris olarak, ağırlıkça %10 SiC ve %1 grafitle güçlendirilmiştir. Tribolojik testler, gelişmiş özelliklere sahip, bilgisayar destekli bir sürtünme ölçer yardımıyla yapılmıştır. Deney üç farklı kayma hızı ve üç farklı normal yük için, farklı kayma mesafelerinde ve farklı yağlayıcılarla yapılmıştır. Yapılan analizler kayma testleri esnasında çelikten kompozit plağa malzeme transferi olduğunu göstermiştir.

Prabhuram ve diğ. (2010), hibritleştirme prosesiyle, sentetik fiberlerin mukavemet, tokluk ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirmek için doğal ve metalik fiberlerle birleştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Talaş, fıstık kabuğu ve baladur ağacı cevzinin kabuğunu kullanmışlardır. Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler için gerekli olan reçine, katalizör ve diğer hızlandırıcılar buna göre üretilmiştir. Bu çalışmada yukarıda adı geçen çevre dostu ve doğada çözünebilen maddelerle oluşturulan bazı kompozitler incelenmiştir.

Lee ve diğ. (2013), ultrasantrifüj uygulamalarında kullanılan hibrit kompozit bir rotorun dizayn teorisini oluşturmaya çalışmış ve bazı optimizasyon metotları uygulamıştır. Santrifüj rotoru, bir santrifüjün gücünü, kabiliyetini belirleyen en önemli parçasıdır, rotor ciddi miktarda santrifüj yükünü taşımak zorundadır. Santrifüj kuvveti malzeme yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Fiber takviyeli kompozitlerin özgül mukavemetleri yüksektir, bu nedenle rotor dizaynı için uygun malzemelerdir. Diğer taraftan lifli kompozitlerin bütün doğrultulardaki özgül mukavemetleri yüksek değildir, enine mukavemet değerleri çok düşük olabilmektedir (saf matris malzemeyle aynı). Lifli kompozitlerin bu zayıflığının üstesinden gelebilmek için, hibrit kompozit rotoru oluşturan malzemeler arasındaki gerilme ilişkilerini boyutsal parametrelere ve malzeme özelliklerine göre anlamak çok önemlidir. Bu çalışmada dönen kompozit bir disk için sonlu elemanlar tekniğiyle ve analitik çözümle gerilme dağılımı hesaplanmaktadır. Hibrit kompozit rotorun performansını maksimize etmek için bir optimizasyon metodu geliştirilmiştir. Sonuç olarak bir hibrit kompozit disk için, düzlem gerilme durumuna göre, santrifüj kütle kuvveti uygulanmış, dönen ortotropik bir disk için ön dizayn aşamasında kullanılmak üzere analitik çözümler geliştirilmiştir.

Li ve diğ. (1999), beton kolon-kiriş bağlantılarının hibrit FRP (fiber reinforced plastics / fiberle güçlendirilmiş plastik) ile güçlendirilmesi üzerine çalışmıştır. Düzlemsel kafeslerdeki kiriş-kolon bağlantılarındaki FRP ile güçlendirilmiş betonun testleri yapılmıştır. Testlerde fiber takviyeli plastiklerle güçlendirilmiş betonun, statik yük altında, kiriş-kolon bağlantılarındaki davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada beton; hibrit FRP kompozitler, E-camiyla dokunmuş kumaşlar, düz dokunmuş karbon kumaşlar ve kıyılmış iplikten hasırla kombine edilmiş cam fiberli ve vinil ester reçineli hibrit kompozitlerle takviye edilmiştir.

Jeon ve Oh (1999), çelik ve hibrit bir esnek şaftın harmonik bir hareketteki gerilme ve titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Bir dalga üretici tarafından oluşturulan titreşim hareketi bir şaft yardımıyla diğer komponentlere aktarılmıştır. Bu yüzden şaftın titreşim karakteristiği iyi olmalıdır. Bu çalışmada şaftın gerilme, deformasyon ve titreşim analizleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır. Kompozit bir şaftın sönümleme oranı çelik malzemeye göre beş kat

daha iyidir. Kompozitin çeliğe göre doğal frekansı ve tokluğu daha iyidir. Karbon fiber epoksi modelde; oluşan gerilme % 5,73 daha düşük, ilk doğal frekansı 7,7 kat yüksek, şekil değiştirmesi 23 kat daha azdır. Karbon fiber epoksi modelin cam-fiberden daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Kim ve Lee (2007), Samsung firmasında LCD panellerin temizliği için kullanılmakta olan bir fırçanın paslanmaz çelik olan shaftını, shaftın iç bölümü karbon epoksi olacak şekilde hibrit olarak yeniden tasarlamışlardır. Elde edilen deney sonuçlarında yeni tasarım hibrit malzemenin hem aksenal ve radyal yükler hem de titreşim yüklerine karşı yaklaşık % 30 daha mukavemetli ve parça ağırlığının % 46 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Nguyen ve diğ. (1999), dokunmuş karbon pre-preğin kayma mukavemeti özelliklerini teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda; oluşturulan deney kurgusunun pre-preglerin özelliklerini belirlemede yeterli olduğu görülmüştür. Çok küçük kayma yüklerinde ve momentlerinde bile pre-preglerde kaymanın başladığı, kiriş eğilme teorisinin pre-preglerin elastisite modülünü bulmada yeterli olduğu görülmüştür. Sonuç olarak elde edilen formülasyonların düz dokunmuş pre-preg mimarisini çok yeterli şekilde tanımlayabildiği belirlenmiştir.

Lee ve diğ. (2004), Daewoo firmasının CNC (computer numerically controlled / bilgisayar nümerik kontrollü), yüksek hızlı bir freze tezgahına ait iki parçayı sandviç kompozit olarak yeniden tasarlamıştır. Bu parçalar kullanılarak oluşturulan yeni makinanın titreşim, radyal ve aksenal yüklerle karşı mukavemeti 1,5-5,7 kat arasında (farklı hızlarda) daha iyidir.

Inaba ve Shepherd (2009), filaman sargı yöntemiyle üretilmiş kompozit boruları, sıvı-cisim etkileşimiyle oluşturulan gerilme dalgalarıyla test etmişlerdir. Testler CFRP (carbon fiber reinforced plastics / karbon fiberle güçlendirilmiş plastik) ve GFRP (glass fiber reinforced plastics / cam fiberle güçlendirilmiş plastik) ile farklı açılarda filaman sargılarla oluşturulan (45°-60°), farklı kalınlıklardaki borularla ve farklı yükler altında yapılmıştır. Bu testlerde enine çatlamlar 45°'lik filaman sargılı borular için, tabaka boyunca çatlaklar 60°

filaman sargılı borular için tespit edilmiştir. Sonuç olarak, oluşan çatlak çeşitleri analiz edilerek farklı filaman sargı açılarının seçilebileceği tespit edilmiştir.

Venkateswarlu ve Rajasekhar (2013), hibrit kompozit bir bağlantı elemanını Pro-Engineer CAD (computer aided design / bilgisayar destekli tasarım) programında tasarlamış ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımında analizini yapmıştır. Sonuçlar Von-Mises kayma ve normal gerilme sonuçları olarak bulunmuştur. Cıvatalar yapıştırılmış, perçinlenmiş ve hem yapıştırılmış hem perçinlenmiş olarak, farklı yükler altında test edilmiştir. Sonuç olarak hibrit olarak montaj edilmiş cıvatanın mukavemetinin yapıştırılmış ve perçinlenmiş cıvatalara göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.

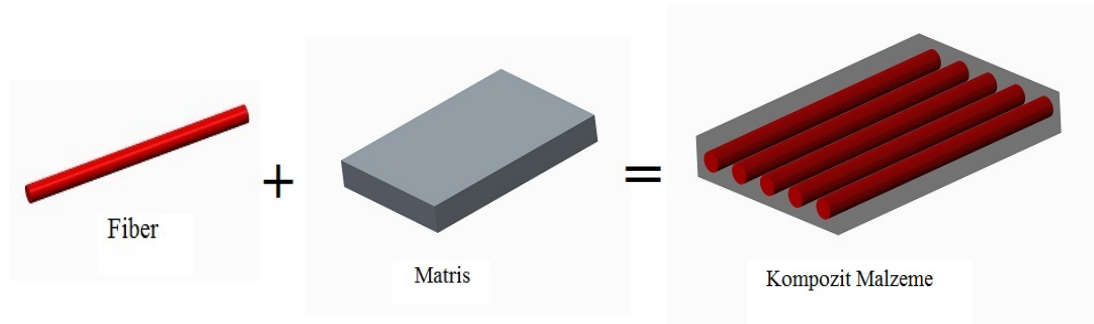
Kwon ve diğ. (2011), hibrit kompozit bir volan rotorunun tasarımını ve üretimini gerçekleştirmiştir. Kompozit volan rotorunun enerji kapasitesini arttırmak için içindeki hibrit çerçeveler filaman sargı yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen volanlar performans ve üretim maliyeti kriterlerine göre mukayese edilmiştir. Ayrıca oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir. Sonuç olarak filaman sargı yöntemiyle oluşturulan hibrit çerçevelerin volanın enerji kapasitesini ve performansını arttırdığı tespit edilmiştir.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER, KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI VE PRE-PREGLER

### 2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı özelliklerdeki iki ya da daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denir.

Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi, kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris bulunur (Mazumdar 2002) . Bu iki malzeme grubundan fiber, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da, fiberleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükün fiberler arasında homojen olarak dağılmasını sağlamaktır. Böylelikle fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesinin önüne geçilmiş olmaktadır.



Şekil 2.1: Fiber ve matrisin kompozit malzemeyi oluşturması

## 2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, metal malzemelere göre birtakım avantajlara sahiptirler. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hafiflik gerektiren konstrüksiyonlarda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Aşağıda bu malzemelerin avantajlı ve dezavantajlı yönleri ele alınmıştır.

### Avantajları

1. **Yüksek mukavemet:** Kompozitlerin çekme ve akma mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemeden tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.
2. **Kolay şekillendirilebilme:** Büyük ve karmaşık parçalar tek işlemlerle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.
3. **İyi elektriksel özellikler:** Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken malzemesi ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
4. **Korozyona ve kimyasal etkilere karşı yüksek mukavemet:** Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilere zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, borular, aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.
5. **Isıya ve ateşe dayanıklılığı:** Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.
6. **Kalıcı renklendirme:** Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem önemli bir ek masraf ve işçilik gerektirmez.



7. **Titreşim Sönümlendirme:** Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

### **Dezavantajları**

1. **Hava boşlukları:** Kompozit malzemelerde üretim esnasında oluşan ve giderilemeyen hava boşlukları malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir.
2. **İzotropik olmaması:** Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterebilmektedir. Aynı kompozit malzeme için bile mekanik özellikler bazı farklılıklar gösterebilmektedir.
3. **Talaşlı imalat zorluğu:** Kompozit malzemelerin delik delme ve kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalat yapılabilmesi daha zordur.

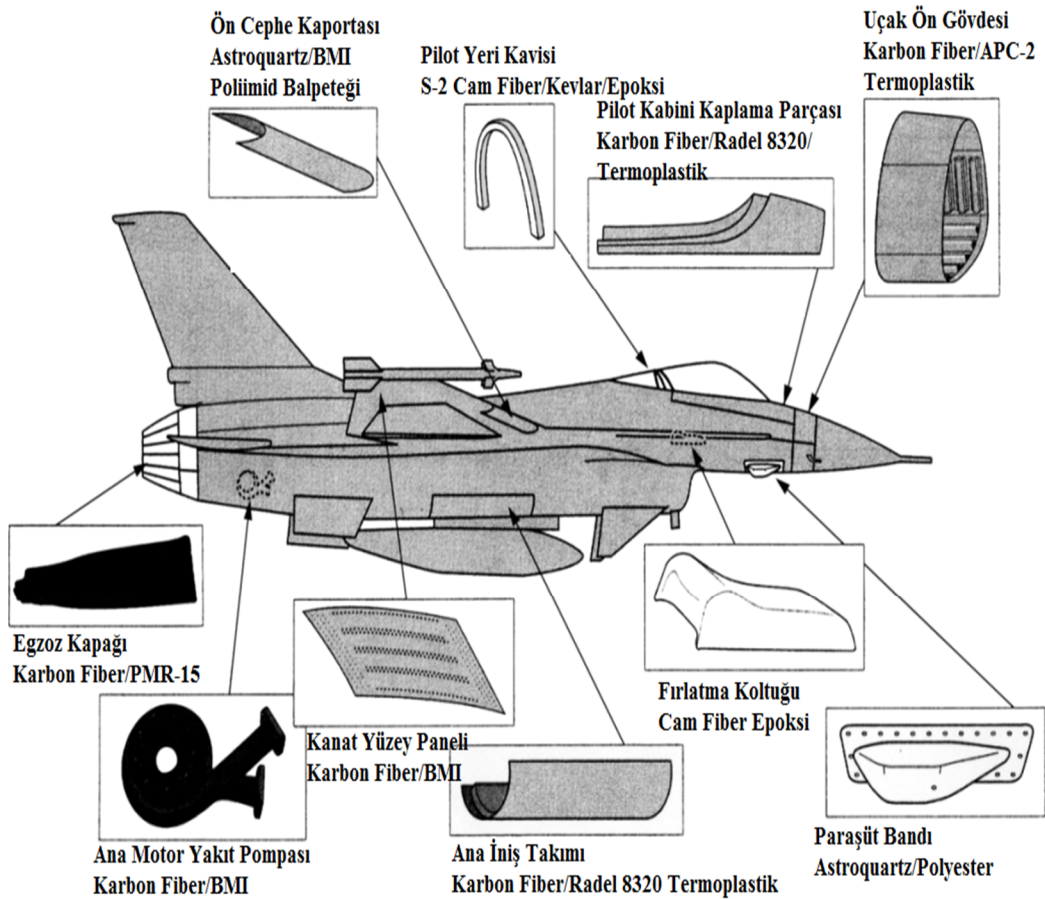
### **İyileştirilebilecek özellikleri**

1. Dayanım özellikleri
2. Rijitlik
3. Korozyon direnci
4. Aşınma direnci
5. Görünüm güzelliği
6. Ağırlık
7. Yorulma ömrü

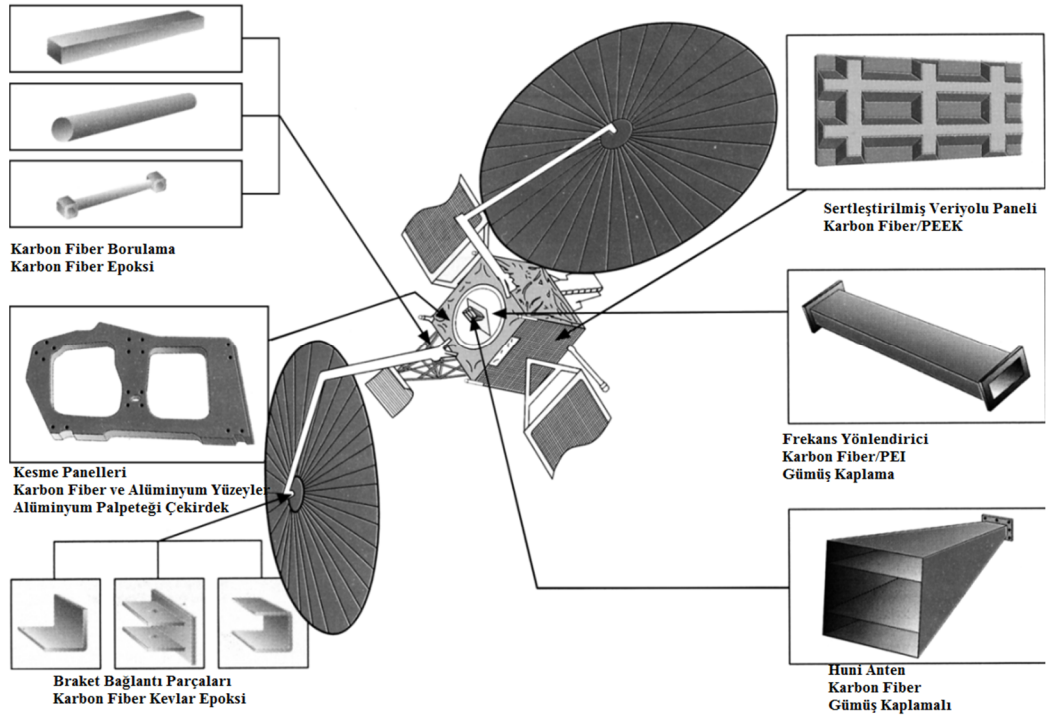
Yukarıda sayılan bu özelliklerin hepsi aynı anda sağlanamayabilir. Fakat kullanım yerine göre gereken özellikleri sağlayan uygun kompozit malzemenin tasarımı ve üretimi yapılabilir.

### 2.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

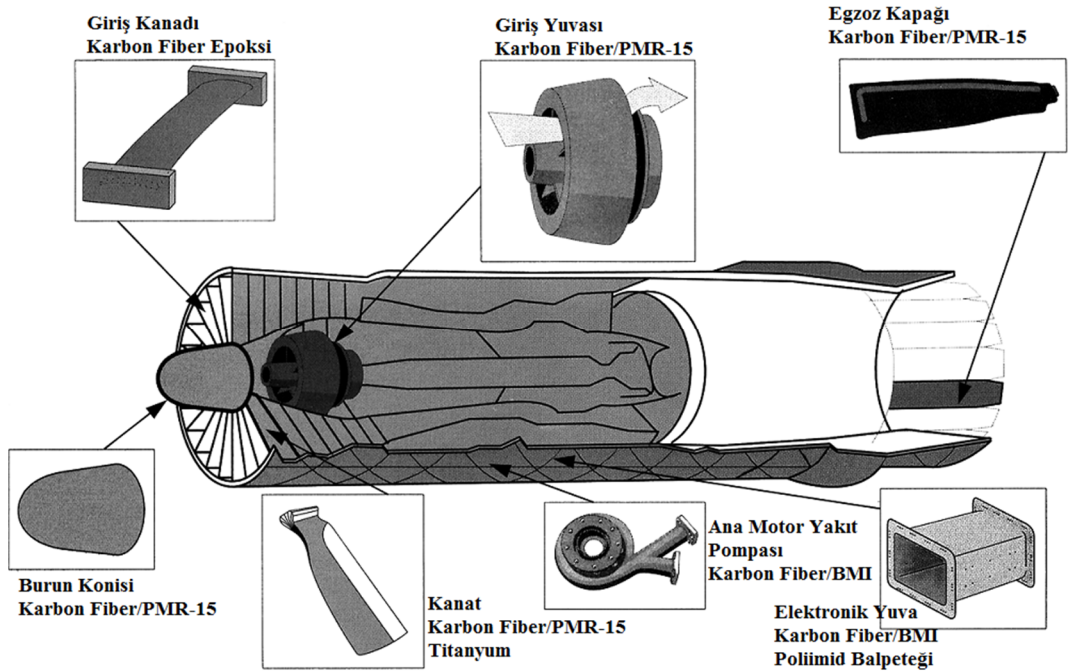
Kompozit malzemeler havacılık, uzay sanayi ve haberleşme teknolojilerine kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin bir savaş uçağını, bir yolcu uçağını, bir haberleşme uydusunu veya bir jet motorunu incelediğimizde birçok kompozit malzeme çeşidine rastlanabilir. Bu sistemlerde kullanılan kompozit malzeme adedi gün geçtikçe daha da artmaktadır. Şekil 2.2’ de bir savaş uçağındaki kompozit malzemelere, Şekil 2.3’ te bir haberleşme uydusunda kullanılan kompozit malzemelere, Şekil 2.4’ te ise jet motorunda kullanılan kompozit malzemelere örnekler verilmiştir (Mazumdar 2002).



Şekil 2.2: Bir savaş uçağındaki kullanılan kompozit malzemeler



Şekil 2.3: Bir haberleşme uydusunda kullanılan kompozit malzemeler



Şekil 2.4: Bir jet motorunda kullanılan kompozit malzemeler

## 2.4 Pre-Preg Üretimi

Pre-preg, “pre-impregnated” teriminin kısaltmasıdır ve reçine emdirilmiş kompozit kumaşları için kullanılan bir terimdir. Dokunmuş ya da tek yönlü cam, karbon ve aramid kumaşlar üzerine reçinenin emdirilmesi ve yarı kürleştirilmesi ile ürün oluşturulmaktadır. Pre-pregler kütleme için gerekli reçine ve sertleştirici karışımını içerdiğinden ilave reçine işçiliği gerektirmeden serime hazır haldedir. Dokunmuş kumaşlar, tek yönlü dikişli ve çok yönlü dikişli kumaşlar ile pre-pregler üretilmektedir.

Pre-pregler belirli bir basınç ve sıcaklık altında kürlenirler. Kütleme sonucunda emdirilen reçine sertleşerek ısı ve kimyasal dayanımı yüksek, hafif ve çok dayanıklı bir kompozit yapı oluşturur.

## 2.5 Pre-Preg Malzemenin Avantajları

Pre-preglerin önemli kullanım avantajları bulunmaktadır.

### 1. Reçine Elyaf Oranı Kontrolü

Kumaşa reçine emdirilmesi sırasında, reçine elyaf oranı ayarlanmaktadır. Genellikle pre-preglerde uygulama yeri ve müşteri talebine göre reçine oranı % 35 - % 50 arasında oranlarda ayarlanabilmektedir. Pre-preg dışındaki kompozit imalat yöntemlerinde reçine / elyaf oranı ayarının zor olması nedeniyle fazla reçine miktarı parçanın ağırlaşmasına ve fiziksel özelliklerinin kötüleşmesine neden olabilmektedir.

### 2. Üretim standardizasyonu

Pre-preglerle yapılan kompozit parça üretimlerinde kalınlık, ağırlık ve yüzey kalitesi gibi son ürün özellikleri diğer yöntemlere kıyasla standardize edilebilir ve tekrarlanabilir, yüksek ürün kalitesi sağlanarak düşük fire oranlarına ulaşılabilir. Ayarlanmış reçine oranı, reçine fazlalığı, kuru bölge ve hava boşlukları gibi problemleri ortadan kaldırdığı için proses verimliliğini artırır.

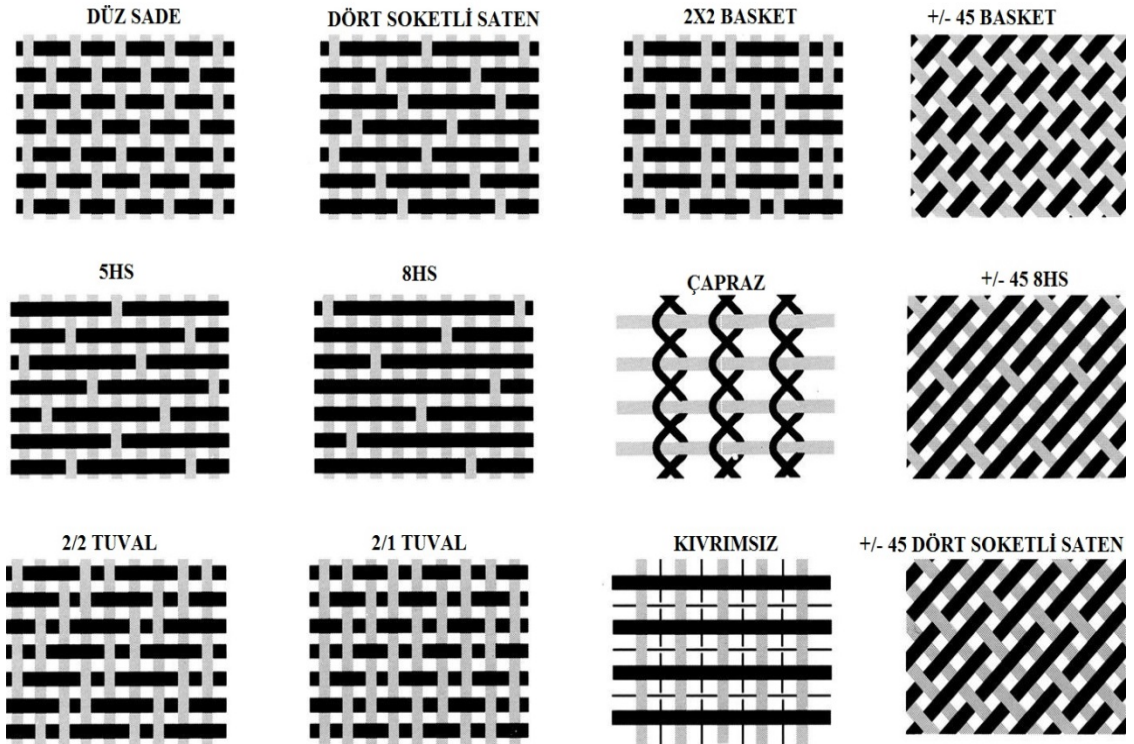
### 3. Kullanım Kolaylığı

Kuru kumaşların kalıba serilmesine kıyasla pre-preg serimi oldukça basittir. Önceden emdirilmiş reçine, kumaş liflerinin bir arada kalmalarını sağladığından ve hiçbir ilave işleme gerek olmadan kalıba ve kendi üzerine yapışabildiğinden kesimi ve serimi oldukça kolaydır. Diğer yöntemlerdeki reçine hazırlama sürecini ortadan kaldırdığından çalışma alanı temizliği ve işçi sağlığı açısından en ideal yöntemdir.

### 4. Üretim Verimliliği

Pre-pregler kompozit üretiminde verimliliği arttırmaktadır. Prepregler kompozit üreticilerine düşük ilk yatırım ve üretim maliyetleri ile yüksek kaliteli ve verimli üretim yapma imkanı sunmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 2.5' de farklı tip dokunmuş pre-preglere örnekler verilmiştir.



Şekil 2.5: Prepreglerin farklı dokuma şekillerine örnekler

### 3. HİBRİT DİŞLİNİN TASARIMI, MALZEME ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİMİ

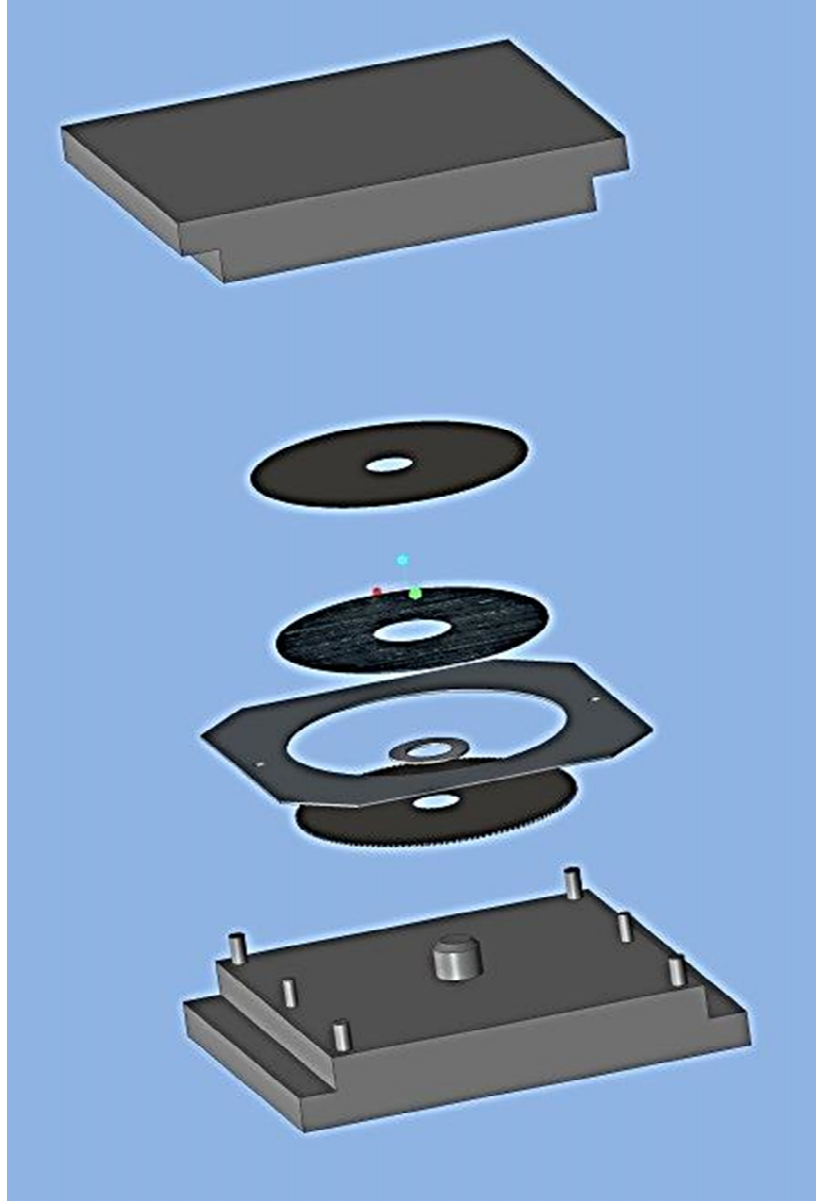
Bu bölümde dişli diskin tasarım süreci, malzeme seçimi, seçilen malzemelerin özellikleri ve üretim aşamaları anlatılmıştır. İlk bölümde dişlinin tasarımı anlatılmış, yapılan beş farklı tasarımın özellikleri verilmiştir. İkinci bölümde dişliyi oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde durulmuştur. Son bölümde ise dişli üretiminin safhaları detaylandırılmıştır.

#### 3.1 Dişlinin Tasarımı

İlk aşama olarak dişlinin katı model çizimleri Pro Engineer Creo 2.0 programında yapılmıştır. Dişli hibrit kompozit şeklinde tasarlanmıştır. Tablo 3.1’ de hibrit dişliyi oluşturan parçaların tasarım ölçüleri verilmiştir. Hibrit dişliyi oluşturan tüm parçaların katı modelleri ve dişlinin montajı oluşturulmuştur. Dişlinin üretimi için gerekli olan kalıpların tasarımları yapılmıştır. Şekil 3.1’ de kalıpların ve hibrit dişliyi oluşturan parçaların katı modelleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Hibrit dişliyi oluşturan parçaların temel boyutları

| Boyutlar      | Karbon pre-preg | Ara dolgu malzemesi | Epoksi reçine | Dişli | Alüminyum |
|---------------|-----------------|---------------------|---------------|-------|-----------|
| İç çap (mm)   | 60              | 102                 | 345           | 348,5 | 60        |
| Dış çap (mm)  | 355             | 345                 | 355           | 360   | 102       |
| Kalınlık (mm) | 0,40            | 3,80                | 3,80          | 0,60  | 3,80      |



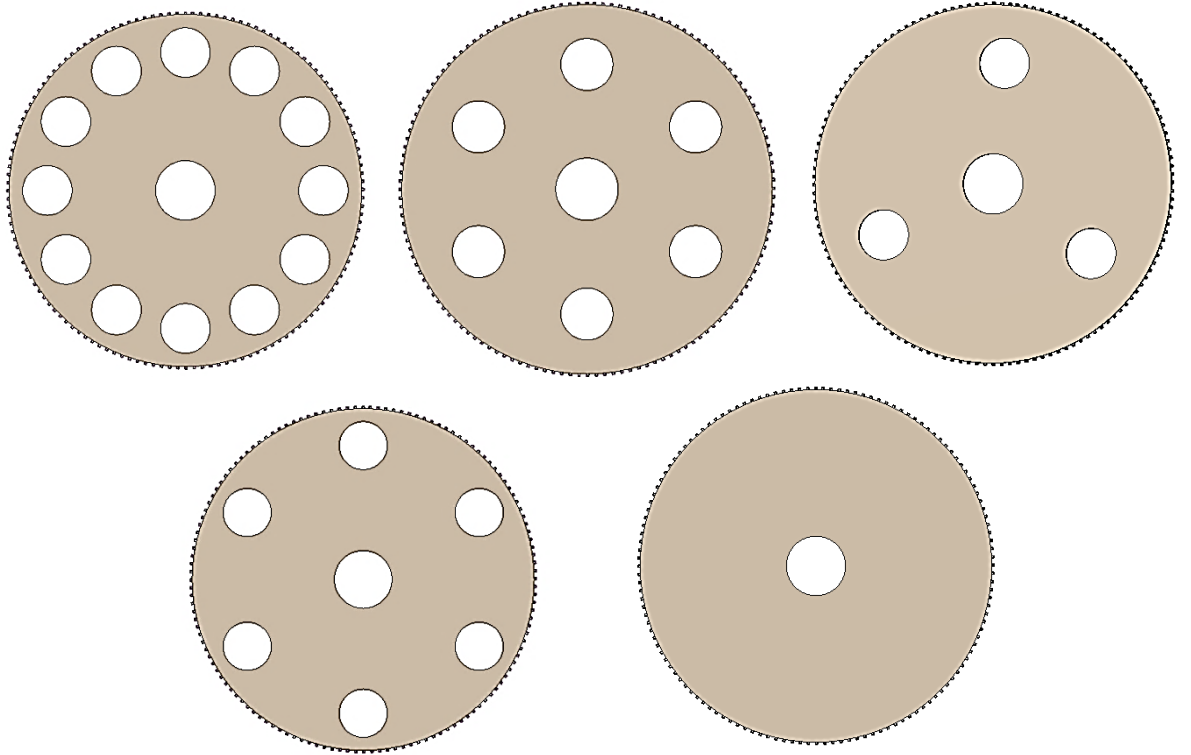
Şekil 3.1 : Hibrit dişliyi ve kalıbını oluşturan parçalar

Hibrit dişli için beş farklı tasarım oluşturulmuştur. Bir nolu tasarımda, dişlinin 278 mm bölüm dairesi üzerinde, her biri 50 mm çapında ve 12 adet delik açılmıştır. İki nolu tasarımda 240 mm bölüm dairesi üzerinde, 50 mm çapında ve 6 adet delik açılmıştır. Üç nolu tasarımda, iki nolu tasarımdan farklı olarak delik sayısı 3' e düşürülmüş, diğer ölçüler aynı bırakılmıştır. Dört nolu tasarımda 278 mm bölüm dairesi üzerinde, 50 mm çapında delikler açılmış, fakat delik sayısı 12' den 6' ya düşürülmüştür. Beş nolu tasarımda diğer bütün tasarımlardan farklı

olarak, dişli disk üzerinde hiç delik açılmamıştır. Tablo 3.2' de beş farklı tasarımın boyutlandırması, Şekil 3.2' de ise katı modelleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Dişlinin farklı tasarımlarının lleri

| Tasarım no | Bölüm dairesi çapı (mm)                                    | Delik sayısı (adet) | Delik apı (mm) |
|------------|--|---------------------|-----------------|
| 1          | Ø 278  | 12                  | Ø 50            |
| 2          | Ø 240  | 6                   | Ø 50            |
| 3          | Ø 240  | 3                   | Ø 50            |
| 4          | Ø 278  | 6                   | Ø 50            |
| 5          | Bu tasarımda dişli üzerinde delik oluşturulmamıştır (Ø 0). |                     |                 |



Şekil 3.2: Beş farklı tasarımın katı modelleri



## 3.2 Dişlinin Malzeme Özellikleri

### 3.2.1 Karbon Prepreg

Karbon pre-preg parçalar bir tanesi dişli diskin bir yüzeyinde, bir tanesi de diğer yüzeyinde olmak üzere iki adettir. Dişli diskin mekanik dayanımını veren parçalardır. Bu çalışmada kullandığımız karbon pre-preg parçalar Fibermak firması tarafından hazırlanmıştır. Dokunmuş karbon kumaşlar, Down-Aksa firması tarafından üretilen karbon fiberlerin Metyx firması tarafından dokunmasıyla üretilen 6K A-38 kodlu malzemelerdir. Bu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 3.3' te verilmiştir. Tablo 3.3' te görüldüğü gibi 6K-A-38 dokunmuş karbon kumaşların çekme dayanımı 3800 MPa, elastisite modülü 240 GPa' dır. Bu değerler en yüksek kalitede çeliklerin bile ulaşabileceği değerler değildir. Bu nedenle karbon pre-pregler hibrit dişliye mükemmel bir dayanım kazandırmaktadır. Fakat görüldüğü gibi bu malzemenin yüzde uzaması yüksek değildir (% 1,6). Hibrit dişlide kullanılan ara dolgu malzemesi olan köpük ise dişlinin istenen esnekliği kazanmasını sağlar. Burada görüldüğü gibi hibrit dişliyi oluşturan malzemelerin iyi mekanik özelliklerinden faydalanılmaktadır. Karbon pre-preg hibrit dişliye dayanım kazandırmakta, köpük malzeme ise hibrit dişliye esneklik katmaktadır.

Tablo 3.3: Dokunmuş karbon kumaş malzemenin mekanik özellikleri

| Özellikler                    | 6K A-38 (AKSACA) |
|-------------------------------|------------------|
| Çekme dayanımı (MPa)          | 3800             |
| Elastisite modülü (GPa)       | 240              |
| Uzama (%)                     | 1,6              |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,78             |

### 3.2.2 Köpük Dolgu Malzemesi

İki karbon pre-preg arasındaki dolguyu sağlayan malzeme köpüktür. Köpük dişli diske esneklik kazandırır ve hafiflik sağlar. Köpük malzemesi olarak Airex Baltek firmasının C70.200 kodlu malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 3.4' te gösterilmiştir. Köpük malzemenin yoğunluğu  $0,2 \text{ g/cm}^3$  olup, hafif bir malzemedir. Bu özellik hibrit dişliye hafiflik katmaktadır. Malzemenin düzleme dik doğrultudaki basma dayanımı ve basma modülü değerleri ve düzlemdeki akma dayanımı ve akma modülü değerleri iyidir. Malzemenin koptuğu andaki uzama değeri % 30 olup, malzeme sünektir. Köpük malzemenin bu özelliği hibrit dişliye esneklik kazandırmaktadır. Aynı zamanda termal kondaktivite değeri de iyi olup, hibrit dişlinin ısıya karşı direncini arttırmaktadır.

Tablo 3.4: Köpük dolgu malzemenin mekanik özellikleri

| Özellikler                                      | Airex Baltek C70.200 |
|---|----------------------|
| Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )                    | 0,2                  |
| Basma dayanımı (düzleme dik doğrultudaki) (MPa) | 5,2                  |
| Basma modülü (düzleme dik doğrultudaki) (MPa)   | 280                  |
| Akma dayanımı (düzlemdeki) (MPa)                | 6                    |
| Akma modülü (düzlemdeki) (MPa)                  | 175                  |
| Kayma direnci (MPa)                             | 3,5                  |
| Kayma modülü (MPa)                              | 75                   |
| Koptuğu andaki uzaması (%)                      | 30                   |
| Termal kondaktivite (oda sıcaklığında) (W/m.K)  | 0,048                |
| Renk  | Kahverengi           |

### 3.2.3 Epoksi Reçine

Epoksi reçine dişli, karbon pre-preg ve köpük malzemelerinin birbirine yapışmasını sağlayarak, dişlinin bütünlüğünün oluşmasını sağlar. Epoksi reçine olarak Delrin®100 BK602 malzemesi kullanılmıştır. Tablo 3.5’ te köpük malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir. Tablo 3.5’ te görüldüğü gibi epoksi malzemenin mekanik özellikleri iyidir. Malzemenin kopma uzaması % 23 ve kırılma anındaki nominal uzaması % 50’ nin üzerinde olup, bu değerler hibrit dişliye esneklik kazandırmaktadır. Aynı zamanda malzemenin ergime sıcaklığı 178 °C olup, malzeme yüksek çalışma sıcaklıklarına karşı dirençlidir.

Tablo 3.5: Epoksi malzemenin mekanik özellikleri

| Özellikler                             | Delrin®100 BK602 |
|--|------------------|
| Akma modülü (MPa)                      | 3150             |
| Kopma dayanımı (MPa)                   | 72               |
| Kopma uzaması (%)                      | 23               |
| Kırılma anındaki nominal uzama (%)     | >50              |
| Eğilme modülü (MPa)                    | 2900             |
| Ergime sıcaklığı, 10 C°/min. (°C)      | 178              |
| Lineer termal genleşme katsayısı (1/K) | 110E-6           |

### 3.2.4 Dişli

Dişli malzemesi dövme yöntemiyle elde edilmiş, ASTM A228 standardında bir çeliktir. Hibrit dişlinin dönerek çalışması esnasında hibrit dişli üzerine gelen dönme kuvvetini alan ve bu kuvveti ileten parçadır. Dişlide 138 adet diş bulunmaktadır. Bu da kuvvetin en az titreşimle diğer parçalara aktarılmasını sağlar. Dişli parça enerjinin ve hareketin tekstil dokuma makinesi üzerinde iletilmesini sağlar. Tablo 3.6’ da dişli malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.6: Dişli malzemesinin mekanik özellikleri

| Özellikler                     | ASTM A228 |
|--------------------------------|-----------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )  | 7,85      |
| Sertlik (HRC)                  | 41-60     |
| Akma mukavemeti (MPa)          | 2350      |
| Elastisite modülü (GPa)        | 210       |
| Poisson oranı                  | 0,313     |
| Kayma modülü (GPa)             | 80        |
| Maksimum servis sıcaklığı (°C) | 120       |

### 3.2.5 Alüminyum Merkezleme Parçası

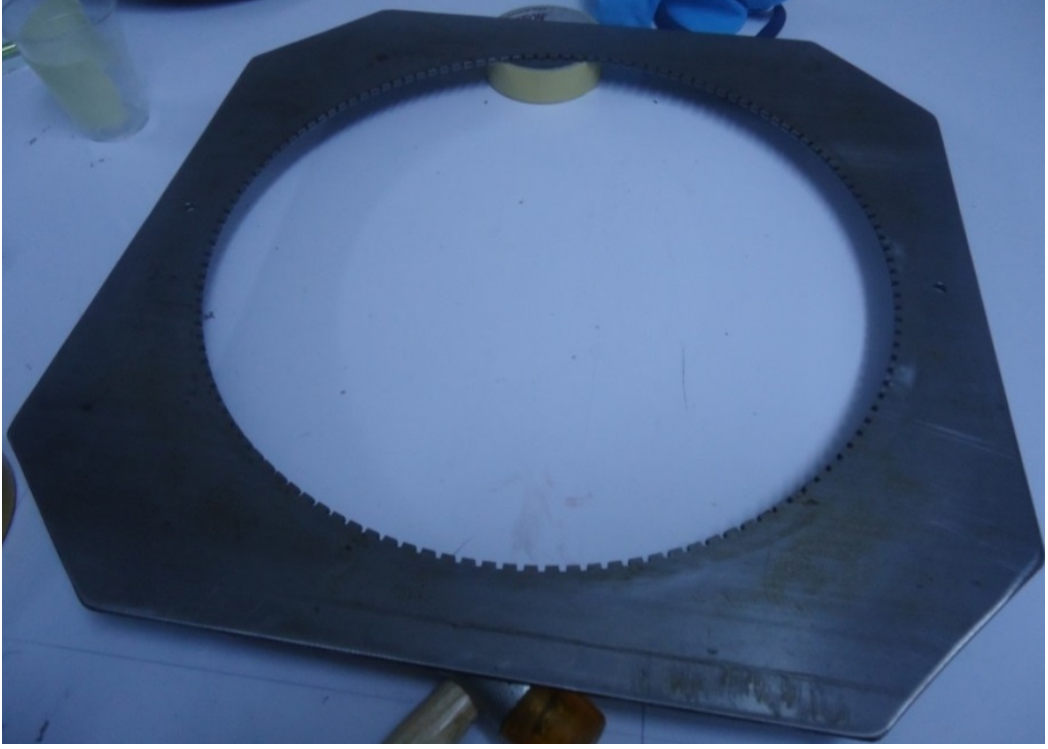
Alüminyum merkezleme parçası, dişlinin merkezinde yer almaktadır. Dişlinin merkez bölgesinin dayanımı sağlayarak, bu alanda deformasyon oluşmasına engel olur. Alüminyum malzemesi olarak yüksek mukavemetli Al 6005-T1 tercih edilmiştir. Tablo 3.7' de seçilen alüminyumun mekanik özellikleri verilmiştir. Tablo 3.7' de görüldüğü gibi alüminyumun yoğunluğu 2,7 g/cm<sup>3</sup> olup, hafif bir malzemedir. Aynı zamanda mekanik özellikleri iyidir. Bu nedenle malzeme olarak alüminyum seçilmesi hibrit dişlinin dayanımı artırırken, hafif kalmasını sağlamıştır.

Tablo 3.7: Alüminyum malzemenin mekanik özellikleri

| Özellikler                    | Al 6005-T1 |
|-------------------------------|------------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,70       |
| Sertlik HRB                   | 46         |
| Akma mukavemeti (MPa)         | 105        |
| Elastikiyet modülü (GPa)      | 69         |
| Poisson oranı                 | 0,33       |
| Kayma modülü (GPa)            | 26         |
| Termal kondaktivite (W/m.K)   | 180        |

### 3.2.6 Dişli sabitleme parçası

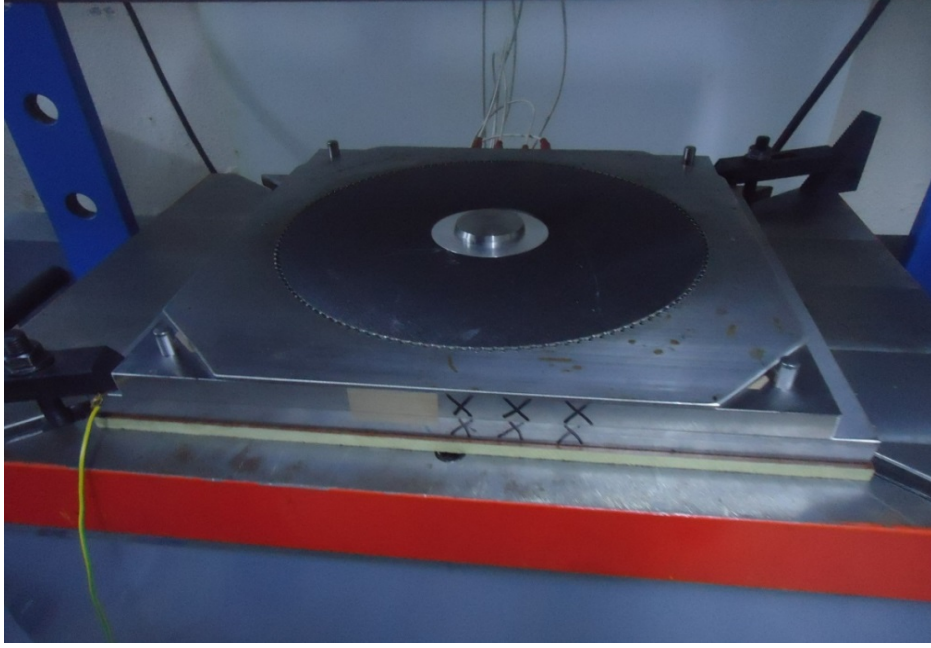
Sıcaklığa ve ısı değişimlerine dayanıklı kalıp çeliğinden imal edilmiştir. Kalıplama esnasında dişli ilk olarak bu parçanın içerisine yerleştirilir. Kalıplama esnasında diski oluşturan malzemelerin sabit kalmasını sağlar. Şekil 3.3' te dişli sabitleme parçası gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Dişli sabitleme parçası

### 3.2.7 Alt kalıp

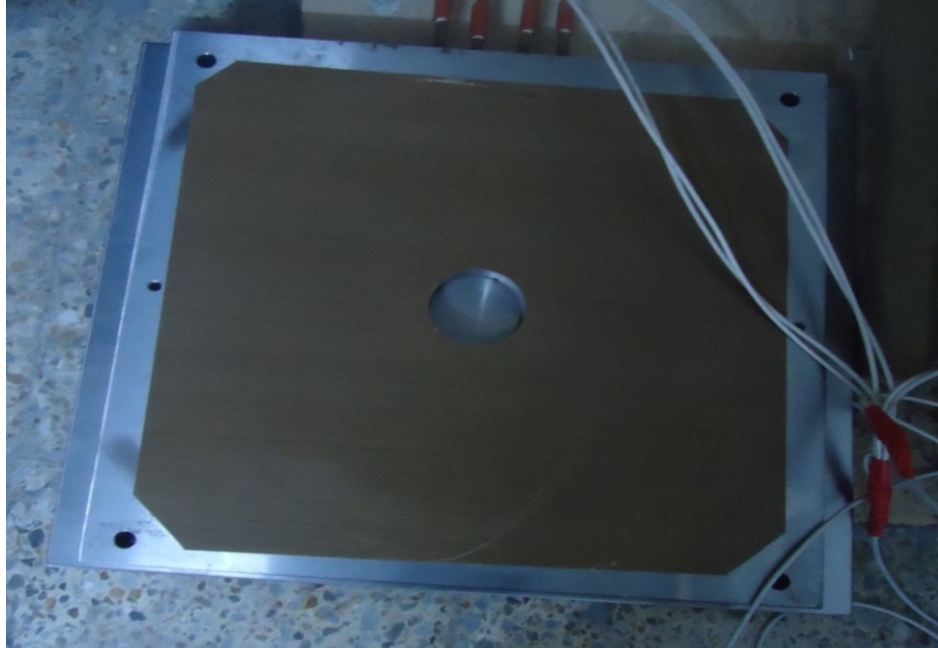
Kalıp parçaları ısı işlem görmüş kalıp çeliğinden imal edilmiştir. Alt kalıp malzemesi yüksek sıcaklığa, ani sıcaklık değişimlerine ve yüksek basma dayanımına sahip çelikten imal edilmelidir. Alt kalıp üzerinde kalıbın istenen sıcaklığa gelmesini sağlayan elektrikli ısıtıcı sistemi bulunmaktadır. Kalıplar birleştirildikten sonra ısıtıcı sistemi çalıştırılmakta ve kalıplar istenen sıcaklığa getirilmektedir. Şekil 3.4' te alt kalıbın hidrolik prese montajlı hali gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Alt kalıp

### 3.2.8 Üst kalıp

Üst kalıp üzerinde kalıbın istenen sıcaklığa gelmesini sağlayan elektrikli ısıtma sistemi bulunmaktadır. Üst kalıp ısıtma işlemi kalıp çeliğinden üretilmiştir. Alt kalıpla aynı mekanik özelliklere sahiptir. Şekil 3.5’ te üst kalıp resmi gösterilmiştir.



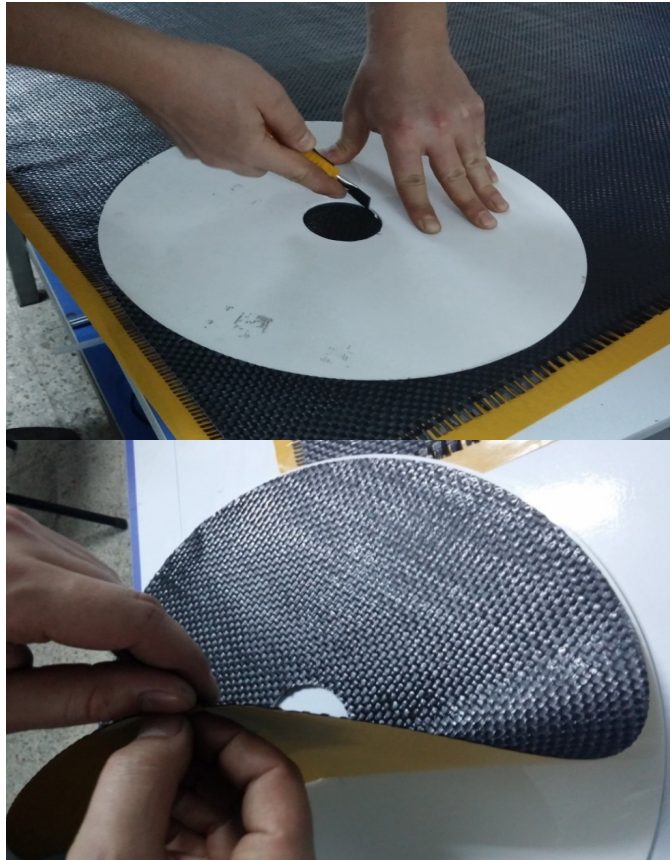
Şekil 3.5: Üst kalıp

### 3.3 Dişlinin Üretimi

Bu bölümde dişli diskin üretim safhaları incelenmiştir. Dişlinin üretiminde ilk olarak karbon pre-pregler ve köpük malzeme istenen çaplarda kesilmiştir. Epoksi reçine hazırlanmış, dişli malzemesi dişli sabitleme kalıbına yerleştirilmiş ve alt kalıp hidrolik prese yerleştirilmiştir. Kalıp yüzeyi temizlikleri yapılmış, pre-pregler ve diğer malzemeler alt kalıba yerleştirilmiş ve son olarak üst kalıp yerleştirilmiştir. Kalıba hidrolik basınç uygulanmış, ısı enerjisi verilmiş ve yeterli süre bu şekilde beklenmiştir.

#### 3.3.1 Karbon pre-preglerin kesilmesi

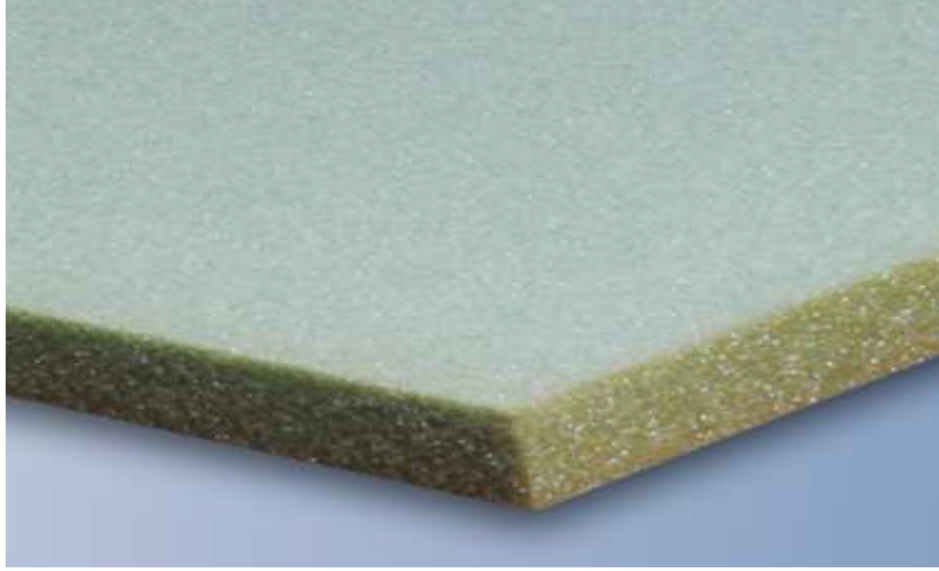
Daha önceden hazırlanarak buzdolabında bekletilmekte olan karbon pre-pregler istenen çaplarda kesilerek montaja hazır hale getirilir. Şekil 3.6’ da karbon pre-preglerin kesilmesi ve ayrılması gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Pre-preglerin istenen çapta kesilmesi ve ayrılması

### 3.3.2 Köpük malzemenin kesilmesi

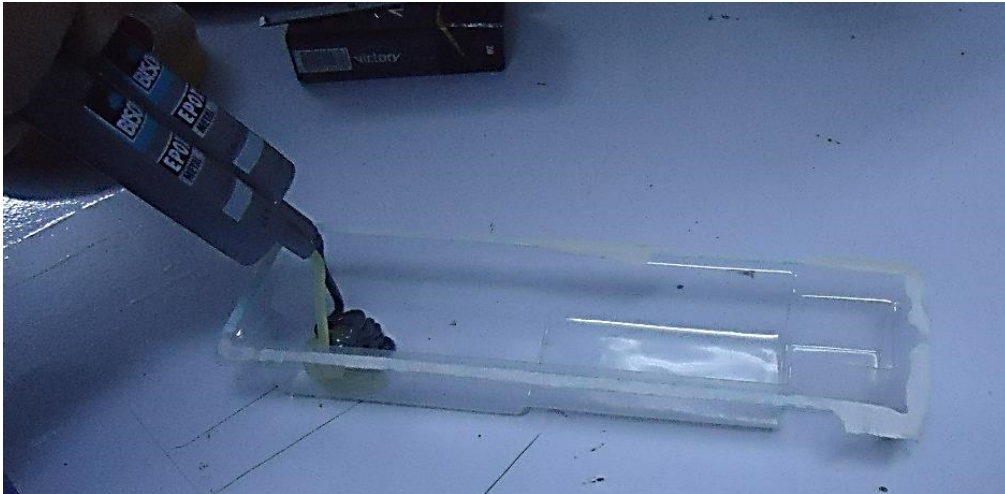
Köpük malzeme istenen çapta kesilerek montaja uygun hale getirilir. Şekil 3.7’ de köpük malzeme görülmektedir.



Şekil 3.7: Köpük dolgu malzemesi

### 3.3.3 Epoksi reçinenin hazırlanması

Epoksi reçineler uygun bir kaptaki hazırlanarak montaja hazır hale getirilir. Şekil 3.8’ de epoksi reçinenin karıştırılması gösterilmiştir.

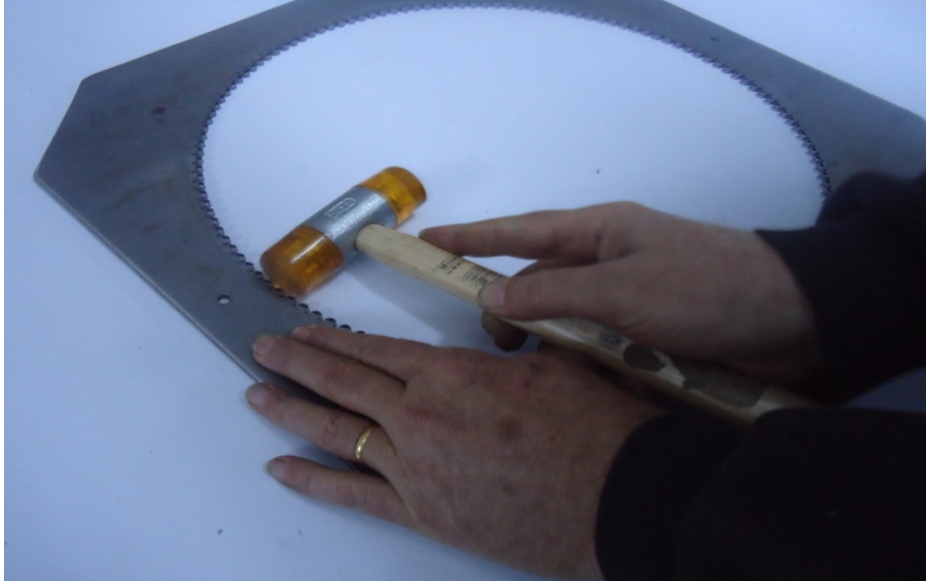


Şekil 3.8: Epoksi reçinenin hazırlanması



### 3.3.4 Dişlinin dişli sabitleme kalıbına yerleştirilmesi

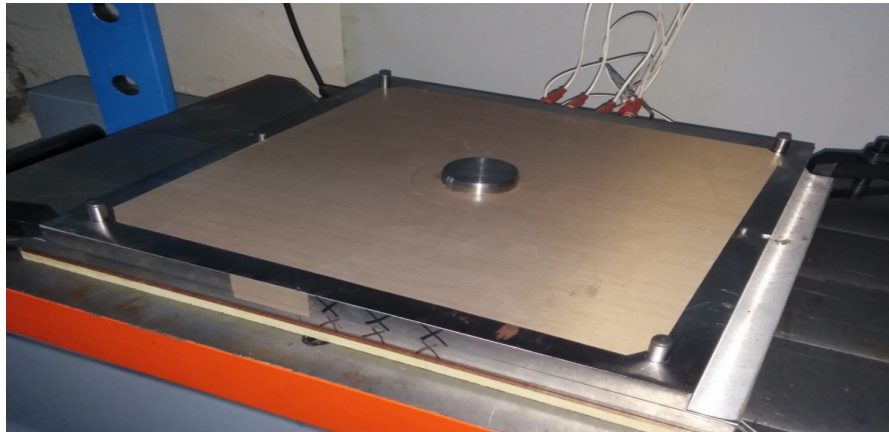
Dişli, ara sabitleme parçasına, aralarında hiç boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilir. Bu işlem elle ve dikkatli bir şekilde plastik ağızlı çekiç kullanılarak yapılır. Dişlinin kalıba montajı yapılarak sabitlenmesi sağlanır. Şekil 3.9’ da dişlinin kalıba montajı gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Dişlinin dişli sabitleme kalıbına yerleştirilmesi

### 3.3.5 Alt kalıbın (erkek kalıp) hidrolik prese yerleştirilmesi

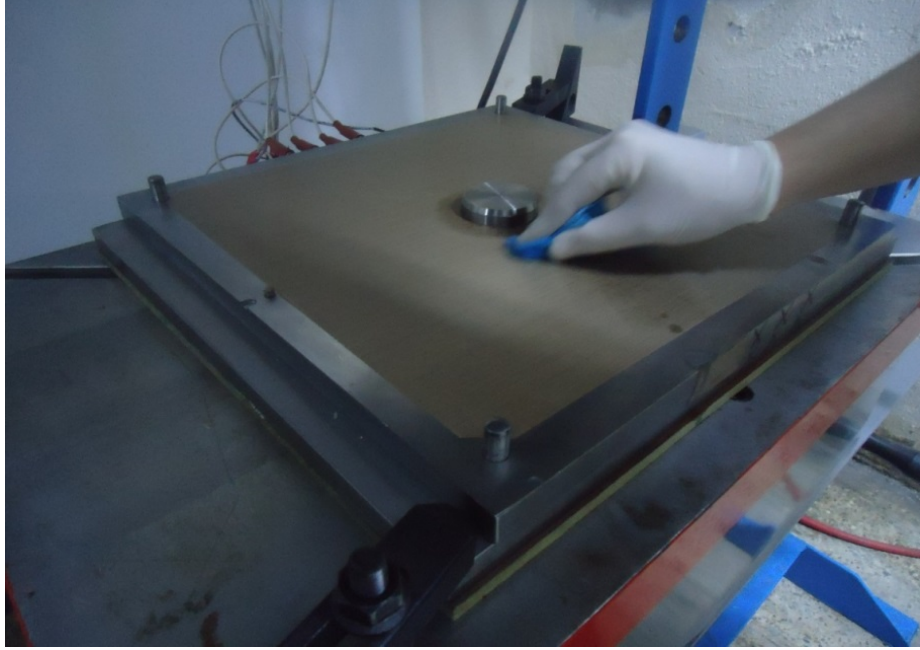
Alt kalıp küçük bir vinç yardımıyla hidrolik pres üzerine yerleştirilir. Şekil 3.10’ da alt kalıbın hidrolik prese yerleştirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.10: Alt kalıbın hidrolik prese yerleştirilmesi

### 3.3.6 Kalıp yüzeyinin temizlenmesi

Kalıp yüzeyine özel temizleyiciler tatbik edilerek kalıp yüzeyinin temizlenmesi sağlanır. Temizleyicilerden sonra kalıp yüzeyine kalıp ayırıcılar uygulanarak, üretilen dişlilerin kalıptan rahat çıkması sağlanır. Şekil 3.11’ de kalıp yüzeyinin temizlenmesi gösterilmektedir. Şekil 3.12’de ise kullanılan kayıp ayırıcılar gösterilmektedir.



Şekil 3.11: Kalıp yüzeyinin temizlenmesi



Şekil 3.12: Kullanılan kalıp ayırıcılar

### 3.3.7 Pre-preglerin alt kalıba yerleştirilmesi

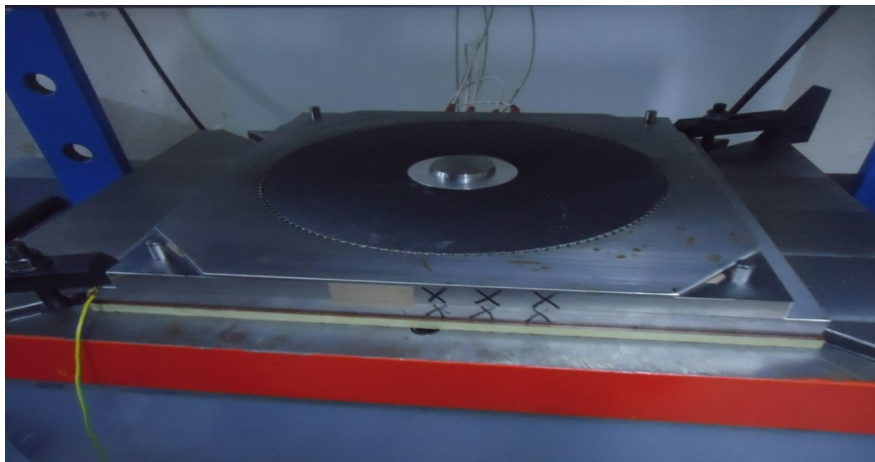
Daha önceden kesilerek hazırlanmış olan pre-pregler, Şekil 3.13' te görüldüğü gibi alt kalıba yerleştirilir.



Şekil 3.13: Pre-preglerin alt kalıba yerleştirilmesi

### 3.3.8 Alüminyum merkezleme parçasının yerleştirilmesi

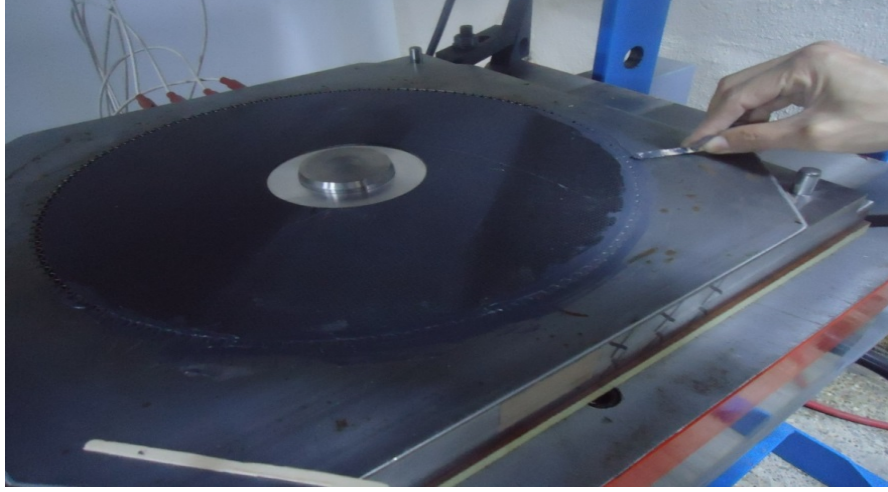
Daha öncesinde uygun ölçülerde tornalanmış olan alüminyum merkezleme parçası alt kalıbın üzerine Şekil 3.14' te görüldüğü gibi yerleştirilir.



Şekil 3.14: Alüminyum merkezleme parçasının yerleştirilmesi

### 3.3.9 Epoksi malzemenin uygulanması

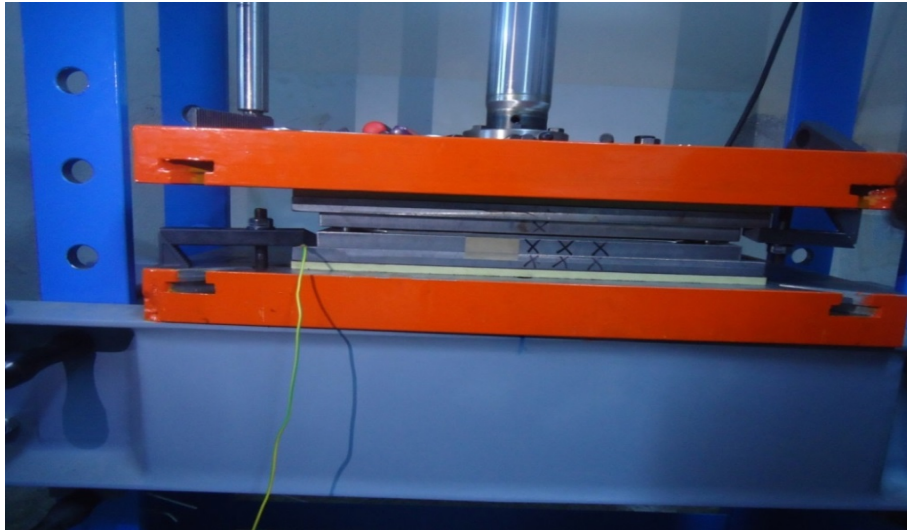
Epoksi reçine malzemesi dişli ile pre-preg arasına, aralarında hiç boşluk kalmayacak şekilde doldurulur. Şekil 3.15’ te epoksinin uygulanması gösterilmektedir. Bu işlem uzun zaman almaktadır.



Şekil 3.15: Epoksi malzemenin eklenmesi

### 3.3.10 Üst kalıbın yerleştirilmesi

Üst kalıp da yerleştirilir ve parçalar 6 bar basınç altında ve 120 °C sıcaklıkta 45 dakika kalır. 45 dakika sonra kalıba verilen ısı kesilir ve 6 bar basınç altında bir saat soğumaya bırakılır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16: Montajın tamamlanması ve hidrolik basıncın uygulanması

### 3.3.11 Sıcaklık kontrolü

İşlem esnasında kalıp sıcaklığı devamlı olarak kontrol edilmektedir. Kalıbın yeterli sıcaklığa ulaşip ulaşmadığına bakılmaktadır. Bu işlemde uygulama sıcaklığı ve zamanı doğru kontrol edilmelidir. Şekil 3.17’de üretim esnasında kalıbın sıcaklık kontrolü gösterilmektedir.



Şekil 3.17: Kalıp sıcaklığının kontrolü

## 4. DIŐLİNİN GENEL ANALİTİK ÇÖZÜMÜ VE ANSYS SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

### 4.1 Genel Analitik Çözüm

#### 1.1.1 Genel Elastik Çözüm

Kompozit diskin kalınlığı, diğer boyutlarının (yarıçap) yanında çok küçük olduğundan, düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu, yani düzleme dik gerilmelerin etkemediği kabul edilebilir. Öncelikle incelenen kompozitteki fiberler 0°-90° örgü yapısına sahip olduğu için Kartezyen koordinatlarda iki boyutlu düzlem gerilme durumu için denge denklemi;

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (5.1.a)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \quad (5.1.b)$$

şeklindedir. Burada kütle kuvvetinin fonksiyonu ise;

$$U = -\frac{1}{2} \rho \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (5.2)$$

şeklindedir. Buradaki  $\rho$  ve  $\omega$  sırasıyla ortotropik malzemenin yoğunluğu ve açısal hızıdır.

Ortotropik malzeme için şekil değıştirme bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = S_{12}\sigma_x + S_{22}\sigma_y \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = S_{66}\tau_{xy}\end{aligned}\tag{5.3}$$

Buradaki  $S_{11} = 1/E_1$  ,  $S_{22} = 1/E_2$  ,  $S_{12} = -\nu/E_1$  ,  $S_{66} = 1/G_{12}$  olarak tanımlanır. Bu bileşenler arasındaki ilişkiyi ifade eden uygunluk denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial y \partial x}\tag{5.4}$$

(5.1a) ve (5.1b) denklemleri sırasıyla x ve y' ye göre türevlenip düzenlenirse aşağıdaki kayma gerilmesi ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)\tag{5.5}$$

Şekil değiştirme bileşenleri denklem (5.5) ifadesindeki  $\tau_{xy,yx}$  kullanılarak uygunluk denkleminde yerine konularak ana diferansiyel denklem olan denklem (5.6) elde edilmiş olunur.

$$S_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + (2S_{12} + S_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + S_{11} S_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = -(S_{12} + S_{22}) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - (S_{11} + S_{12}) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (5.6)$$

Buradaki  $F$ , (5.1a) ve (5.1b) denklemlerini sağlayan gerilme fonksiyonudur.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + U$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + U$$
(5.7)

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$$

Denklem (5.6),  $F$  gerilme fonksiyonunun çözümlerine olanak sağlar. (5.6) nolu denklemin özel çözümleri aşağıdaki gibi elde edilebilir (Chang 1975).

$$F_1 = C_1 (x^2 + y^2)^2$$
(5.8)

$C_1$ , denklem (5.6)' dan aşağıdaki gibi hesaplanabilir.



$$C_1 = \frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} \quad (5.9)$$

Denklem (5.6)' yı homojen hale getirip genel bir çözüm elde etmek oldukça zordur (Genta ve Gola 1981). Düzlem gerilme durumu için bulunan çözüme göre (5.10) uygunluk denklemi sağlandığı için;

$$S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - S_{66} = 0 \quad (5.10)$$

homojen denklem çözümü aşağıdaki gibi bulunur.

$$F_2 = C_2(x^2 + y^2) + C_3 \ln(x^2 + y^2) \quad (5.11)$$

Genel gerilme fonksiyonu ise;

$$F = C_1(x^2 + y^2)^2 + C_2(x^2 + y^2) + C_3 \ln(x^2 + y^2) \quad (5.12)$$

şeklinde elde edilir. Kartezyen koordinatlarda gerilme bileşenleri denlem (5.13)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 4C_1(3y^2 + x^2) + 2C_2 + 2C_3 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{1}{2} \rho\omega^2(x^2 + y^2) \\ \sigma_y &= 4C_1(3y^2 + x^2) + 2C_2 - 2C_3 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{1}{2} \rho\omega^2(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\tau_{xy} = 4xy \left( -2C_1 + \frac{C_3}{(x^2 + y^2)^2} \right)$$

Bu gerilme bileşenleri kutupsal koordinat sistemine aşağıdaki gibi dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \sigma_x m^2 + \sigma_y n^2 + 2\tau_{xy} mn \\
 \sigma_\theta &= \sigma_x n^2 + \sigma_y m^2 - 2\tau_{xy} mn \\
 \tau_{r\theta} &= -(\sigma_x - \sigma_y) mn + \tau_{xy} (m^2 - n^2)
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

Buradaki  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  ve  $\tau_{r\theta}$  sırasıyla radyal, teğetsel ve kayma gerilmeleridir. Ayrıca  $m=x/r$ ,  $n=y/r$  ve  $r^2=x^2+y^2$  şeklinde tanımlanmıştır. Sonuç olarak gerilme bileşenleri denklem (5.15)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= 4C_1 r^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r^2} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \\
 \sigma_\theta &= 12C_1 r^2 + 2C_2 - \frac{2C_3}{r^2} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \\
 \tau_{r\theta} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

$C_1$ , denklem (9)'dan bulunabilir,  $C_2$  ve  $C_3$  ise sınır koşullarının belirlenmesiyle elde edilir. Kayma gerilmesi bileşeni  $\tau_{r\theta}$  dolaylı olarak sınır koşullarını sağlar, çünkü daima sıfırdır. Kutupsal koordinatlarda gerilme bileşenleri denklem (5.15)'de verildiği gibi sadece  $r$ 'nin bir fonksiyonudur. Bunun bir sonucu olarak, şekil değiştirme bileşenleri de  $r$ 'nin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} = S_{11}\sigma_r + S_{12}\sigma_\theta \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{d} = S_{12}\sigma_r + S_{22}\sigma_\theta$$

Radyal yer değiştirme  $u$  ise denklem (5.16)' dan;

$$u_r = 4C_1r^3(S_{12} + 3S_{22}) + 2C_2r(S_{12} + S_{22}) + \frac{2C_3}{r}(S_{12} - S_{22}) - \frac{1}{2}\rho\omega^2r^3(S_{12} + S_{22}) \quad (5.17)$$

şeklinde elde edilir.

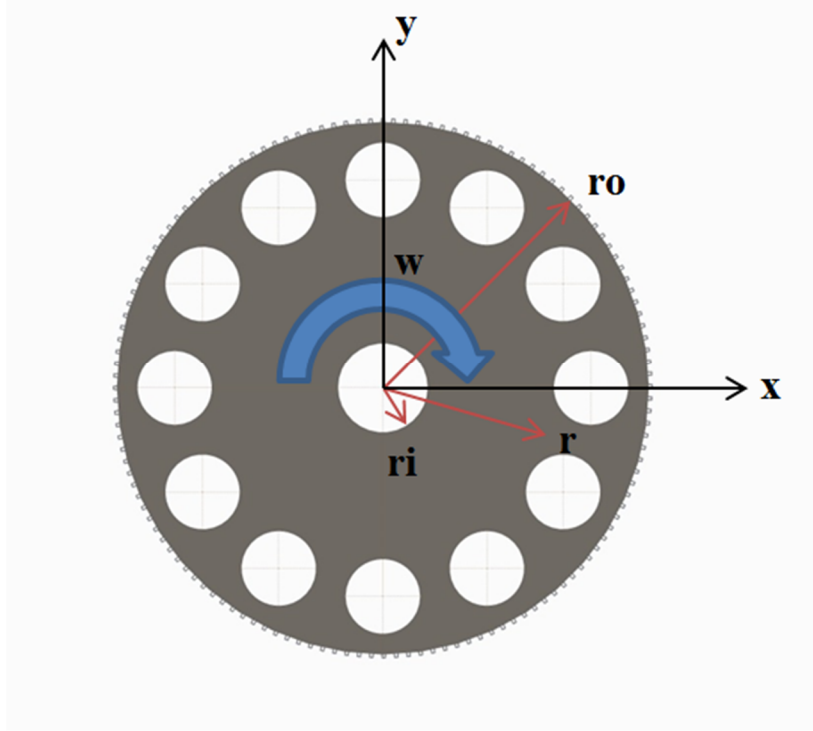
### 1.1.2 Dönen Disk

şekil 4.1 ' de görölen dönen bir dişlinin en iç ve en diş kısmında radyal gerilme olmadığı için sınır koşulları buna göre alınarak  $C_2$  ve  $C_3$  bulunabilir.

$$\sigma_r(r_i) = 0, \quad \sigma_r(r_o) = 0 \quad (5.18)$$

$$4C_1r_i^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r_i^2} - \frac{1}{2}\rho\omega^2r_i^2 = 0 \quad (5.19)$$

$$4C_1r_o^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r_o^2} - \frac{1}{2}\rho\omega^2r_o^2 = 0 \quad (5.20)$$



Şekil 4.1: Dönen bir diskte değişken parametrelerin gösterilmesi

$r_i$  ve  $r_o$  sırasıyla iç ve dış yarıçap olmak üzere (Şekil 4.1) ve (5.19) , (5.20) nolu denklemlerden  $C_2$  ve  $C_3$  çekilirse;

$$C_2 = \left( -2C_1 + \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) \quad (5.21)$$

$$C_3 = \left( 2C_1 - \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) r_i^2 r_o^2$$

sonuçları elde edilir.

Denklem (5.9)'dan  $C_1$  ifadesi denklem (5.21)'de yerine konularak;

$$C_2 = \left( -\frac{2\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} + \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) \quad (5.22)$$

$$C_3 = \left( \frac{2\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} - \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) r_i^2 r_o^2$$

sabitleri elde edilmiş olunur.

## 4.2 SONLU ELEMANLAR METODU (SEM)

Karmaşık mühendislik problemlerinin doğrudan çözülemediği ya da doğrusal yaklaşımla çözümünün zor olduğu durumlarda, problem daha kolay anlaşılabilen alt problemlere ayrılır. Daha sonra bu alt problemlerin çözümünden orijinal problemin çözümüne ulaşılır. Problemin çözümünde iyi tanımlanmış sonlu sayıda eleman (yani sonlu sayıda alt problem) kullanılarak yeterli bir model elde edilebilir. Böyle problemler “sonlu” olarak adlandırılır. Oysa gerçekte elastik sürekli ortamda bu sonlu sayıdaki elemanlar arası bağlantı noktası sayısı sonsuzdur. Sonlu Elemanlar Metodu’yla bu sonsuz sayıdaki bağlantı noktalarının sayısı sonlu bir sayıya indirgenir. Cisim sadece bu noktalardan birbirine bağlıymış gibi düşünülür. Sonlu sayıdaki bu bağlantı noktaları ne kadar çoğaltılırsa, bu metotla yapılan çözümlerdeki hata oranı da o kadar küçülür.

Sonlu elemanlar metodunun önemli bir özelliği, tüm problemi temsil etmek üzere elemanları bir araya getirmeden önce, her bir elemanın ayrı ayrı formüle edilebilmesidir. Örneğin; bir gerilme analizi probleminde her bir elemana etki eden dış kuvvetler ile elemanın düğüm noktalarının, yer değiştirme bağlantıları bulunarak tüm sistem çözülebilir.

### 4.2.1 SEM’ de Çözüm Yöntemi

Herhangi bir problemdeki değişken parametre sonsuz sayıda değerlere sahip olabilir. Sonlu elemanlar metodunda çözümlenecek sistem, elemanlara bölüldüğünden ve bilinmeyen ortam değişkeni her eleman içindeki enterpolasyon fonksiyonlarıyla ifade edildiğinden bilinmeyenler sonlu bir sayıya indirgenmektedir. Enterpolasyon fonksiyonları düğüm noktalarının koordinatları cinsinden ifade edilir. Elde edilen sonucun gerçek sonuca yakınlığı, yalnız elemanların boyutları ve sayısına bağlı değil, aynı zamanda seçilen enterpolasyon fonksiyonlarına da bağlıdır. Çözüm için kullanılacak fonksiyonlar probleme uygun fonksiyonlar olmak zorundadır. Ayrıca bu fonksiyon ve fonksiyonun türevleri komşu elemanla olan sınır üzerinde sürekli ve tanımlı olmalıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (şekil değiştirme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir.

Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makina elemanının (motor blokları, pistonlar, şaftlar ve dişliler vb.) kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir. Bu metod ile her elemanın çözümü yapılmakta, her eleman için rijitlik matrisi ayrı ayrı bulunduktan sonra elemanlar birleştirilmek suretiyle bütün sistemin rijitlik matrisi elde edilmektedir. Sonlu elemanlar metodunun diğer bir avantajı da her elemanın özelliklerinin değişik yaklaşımlarla hesaplanabilmesidir (Bathe 1996).

Eleman özelliklerini elde etmeye yarayan ilk yaklaşım direkt yaklaşımdır. Direkt yaklaşımla elde edilebilen eleman özellikleri, daha iyi bir yaklaşım olan varyasyon yaklaşımıyla da elde edilebilir. Bu yaklaşımın ana mantığı, varyasyon hesap prensiplerine dayanıp kullanılan fonksiyonun sınır değerinin bulunmasıdır. Direkt yaklaşım basit eleman şekillerine uygulanabilirken, varyasyon yaklaşımı karmaşık eleman şekillerine de uygulanabilir. Eleman özelliklerini bulmaya yarayan üçüncü bir yaklaşım ise, daha gelişmiş bir yaklaşım olan ve tamamen matematiğe dayanan ölçülmüş kalıcı yaklaşım olup, problemin temel denklemleri ile başlar ve bir fonksiyon veya varyasyon deyimine dayanmaz. Bu yaklaşımla sonlu elemanlar metodu, fonksiyonu olmayan problemlere de uygulanabilir. Bazı problemler için bileşik bir fonksiyonun olmayışı ya da bulunamayışı bu yaklaşımı avantajlı kılmaktadır. Dördüncü yaklaşım ise enerji dengesi yaklaşımı olup, sistemin mevcut enerjisinin dengesine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda varyasyon

istenmemekte dolayısıyla sonlu elemanlar metodunun kullanım sahası genişlemektedir. (Bathe 1996)

Kullanılan yaklaşım yöntemi ne olursa olsun, sonlu elemanlar metoduyla bir problemin çözümü için aşağıdaki sıra takip edilir (Kollar ve Springer 2003) ve (Nakasone ve diğ. 2008):

1. Fiziksel problemin matematiksel modeli kurulur veya hazır alınır.
2. Ele alınan probleme ait varyasyonel ifade (formülasyon) kurulur.
3. Çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılır. Bu işleme ayırma ya da sonlu eleman ağı oluşturma adı verilir.
4. Her bir elemana ait elastiklik matrisi  $[k]$  oluşturulur.
5. Tüm yapının elastiklik matrisi olan  $[K]$  matrisi, her bir elemanın elastiklik matrisleri kullanılarak oluşturulur.
6. Bütün yapıya etki eden toplam yüklere eşdeğer bir kuvvet, sonlu eleman ağı yapılarının düğüm noktalarına olacak şekilde uygulanır.
7. Düğüm noktalarındaki toplam yer değiştirme “ $d$ ” ile ifade edilir. Her bir düğüm noktasındaki yer değiştirme ise “ $\delta$ ” ile ifade edilir.
8. Her bir elemandaki yer değiştirme  $u = [N]\delta$  denklemiyle hesaplanır. Burada  $[N]$  şekil vektörlerinin matrisidir.
9. Her bir noktadaki şekil değiştirmeler  $\epsilon = [B]\delta$  denklemiyle hesaplanabilir.  $[B]$  şekil değiştirme matrisidir.
10. Bir elemandaki gerilmeler  $\sigma = [E]\epsilon$  denklemiyle hesaplanır.  $[E]$  malzemenin elastiklik matrisini karakterize eder.
11. Eleman elastiklik matrisi  $[k]\delta = f_e$  olarak ifade edilir,  $f_e$  düğüm noktalarında uygulanan kuvveti temsil eder.
12. Son olarak eleman elastiklik matrisi  $k = \int_{(V)} [B]^T [E] [B] dV$  olarak ifade edilir. Burada  $V$  elemanın hacmini ifade etmektedir.

Bu aşamaları takip ederek izotropik ya da kompozit bir malzemenin sonlu elemanlar çözümü yapılabilir. İzotropik ile kompozit malzeme arasındaki tek fark malzeme elastislik matrisidir.

#### 4.2.2 SEM' de kullanılan eleman modelleri

Sonlu eleman problemlerinin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etmesi oranında, elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşabilir. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılabilir:

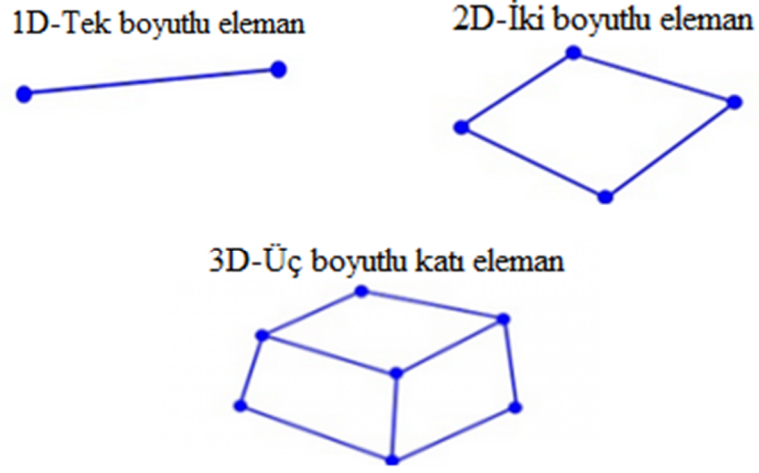
**Tek boyutlu elemanlar:** Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır. Şekil 4.2' de tek boyutlu bir eleman görülmektedir (Bathe 1996).

**İki boyutlu elemanlar:** İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı, seçilecek enterpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır. Şekil 4.2' de iki boyutlu bir eleman görülmektedir (Bathe 1996).

**Dönel elemanlar:** Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözmeye olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.

**Üç boyutlu elemanlar:** Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyli elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir. Şekil 4.2 de üç boyutlu bir eleman görülmektedir (Bathe 1996).





Şekil 4.2: SEM’ de kullanılan bir, iki ve üç boyutlu elemanlar

**İzoparametrik elemanlar:** Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa, kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyette tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla eleman sayısını arttırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır, dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesinin ve gerekli zamanın artmasına neden olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta, hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir.

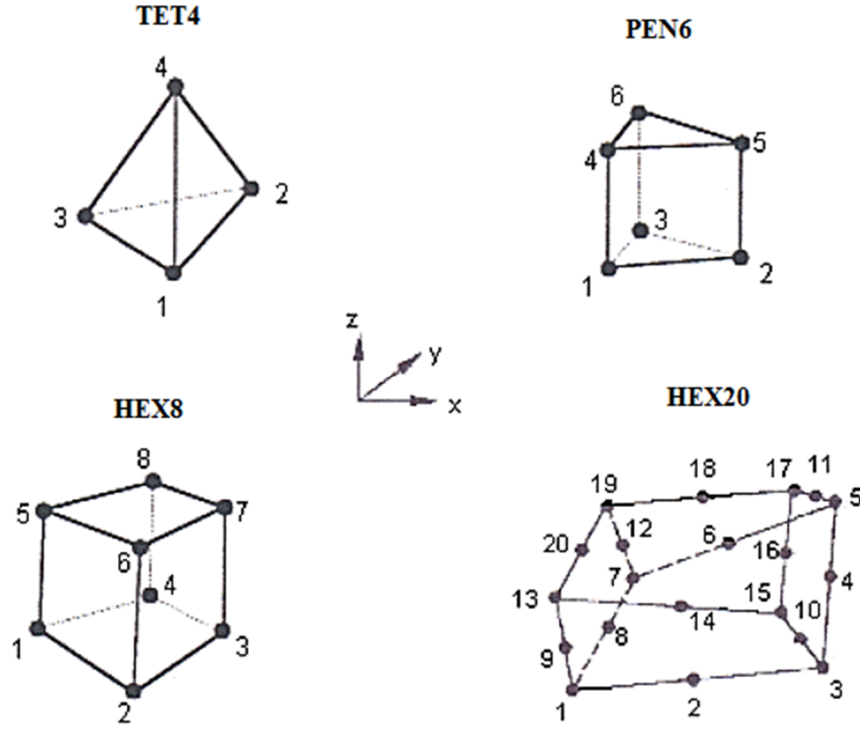
Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin, aynı mertebeden aynı şekil fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eş parametrelili elemanlar da denir.

İzoparametrik elemanların şu özellikleri vardır:

- Lokal koordinatlarda iki komşu eleman arasında süreklilik sağlanıyorsa, izoparametrik elemanlarda da sağlanıyor demektir.
- Eğer enterpolasyon fonksiyonu lokal koordinat takımındaki elemanda sürekli ise, izoparametrik elemanda da sürekli.

c) Çözümün tamlığı lokal koordinatlarda sağlanıyor ise izoparametrik, elemanlarda da sağlanır.

İzoparametrik elemanların bu özellikleri dolayısıyla, enterpolasyon fonksiyonları lokal koordinatlarda seçilir. Şekil 4.3’ te TET4, PEN6, HEX8 ve HEX20 gibi izoparametrik elemanlara ait geometriler gösterilmektedir (Cook 1995).



Şekil 4.3: İzoparametrik elemanlara örnekler

## 1.2 ANSYS Sonlu Elemanlar Ağ Kalitesi

ANSYS sonlu eleman ağı oluşturma teknolojisi pure hex ya da hex-dominant sonlu eleman ağ yapısı üretmek için birçok metot sunabilecek şekilde tasarlanmıştır. Modelin kompleksliğine, istenen sonlu eleman ağ yapısı kalitesi, ağ yapısı tipi ve çözüm zamanına göre ANSYS sonlu eleman ağ yapısı istenen skalada yapabilir. Sonlu eleman ağ yapısı üretmek için “sweep”, “automatic mesh” ve “body sizing” gibi yöntemleri kullanma imkanı verir. Böylece optimum sonuca ulaşılacak etkinlik ve verimlilik elde edilir (ANSYS 2015).

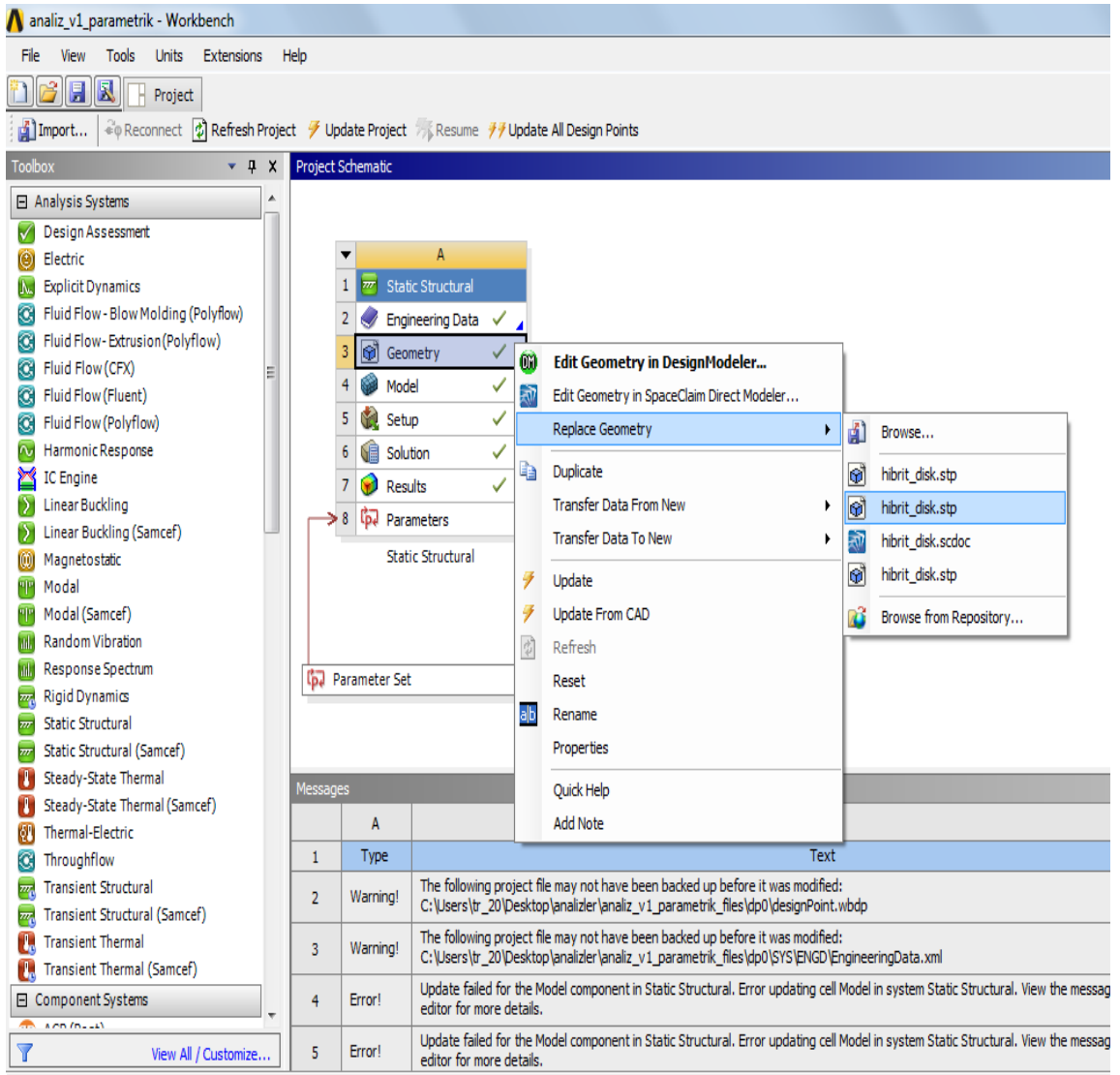
### 4.3 ANSYS Sonlu Elemanlar Analizleri

Hazırlanan beş farklı tasarım için ANSYS 15.0.7 sonlu elemanlar yazılımında yapısal analizler yapılmıştır. Yapısal analizlerin yapılabilmesi için ANSYS Workbench ortamına “Static Structural” analiz tanımlanmıştır. Bu analizin “Engineering Data”, “Geometry”, “Model”, “Setup”, “Solution” ve “Results” sekmelerinin tanımlanması gerekir. Yazılımın arayüzünde sırasıyla bu tanımlamaların hepsi yapılmıştır. Bu çalışmada bunlara ek olarak parametre tanımlaması da yapılmıştır. Dişlinin “z” eksenindeki açısal hızı giriş parametresi, Von-Mises gerilme ve Von-Mises şekil değiştirmeleri sonuç parametresi olarak tanımlanmıştır. Böylelikle dişlinin farklı açısal hızları (300, 400, 500, 600, 800 ve 1000 dev/dak) için şekil değiştirme sonuçları her bir tasarım için tek analizde elde edilmiştir.

“Engineering Data” sekmesinde ANSYS malzeme kütüphanesinden analizde kullanılacak malzemeler seçilir. “Geometry” sekmesinde dişlinin katı modellerinin analiz ortamına getirilmesi sağlanır. “Model ve Setup” sekmelerinde dişlinin sonlu eleman ağı oluşturulur, dişlinin sınır koşulları tanımlanır ve dişliye maruz kaldığı yükler uygulanır. “Solution ve Results” sekmelerinde hangi sonuçları görmek istediğimiz tanımlanır. “Parameters” sekmesinde ise analiz girdilerinde ve çıktılarında hangi değişkene göre analiz yapmak istediğimiz tanımlanır.

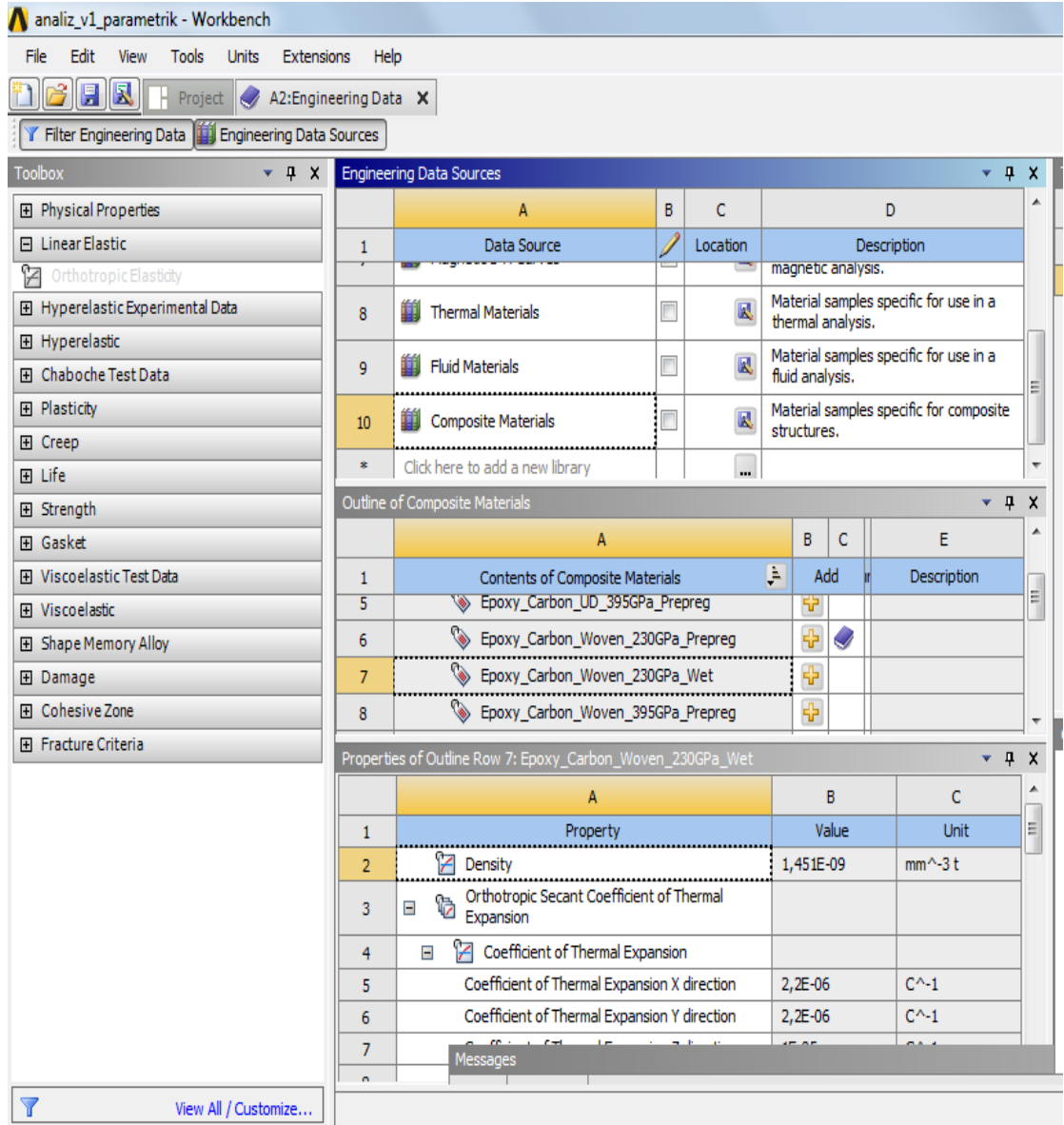
#### 4.3.1 Analiz aşamaları

**Modellerin ANSYS Workbench ortamına aktarılması:** Creo Parametric 2.0 tasarım programında hazırlanan katı modeller step uzantılı olarak kaydedilmiş ve ANSYS Workbench ortamına step uzantılı olarak çağrılmıştır. Hibrit dişli tasarım programında montaj olarak step uzantılı olarak kaydedilmişti, bu nedenle sonlu elemanlar yazılımı ortamına montaj şeklinde gelmektedir. Burada sadece montajın çağrılması yeterli olmaktadır (Şekil 4.4).



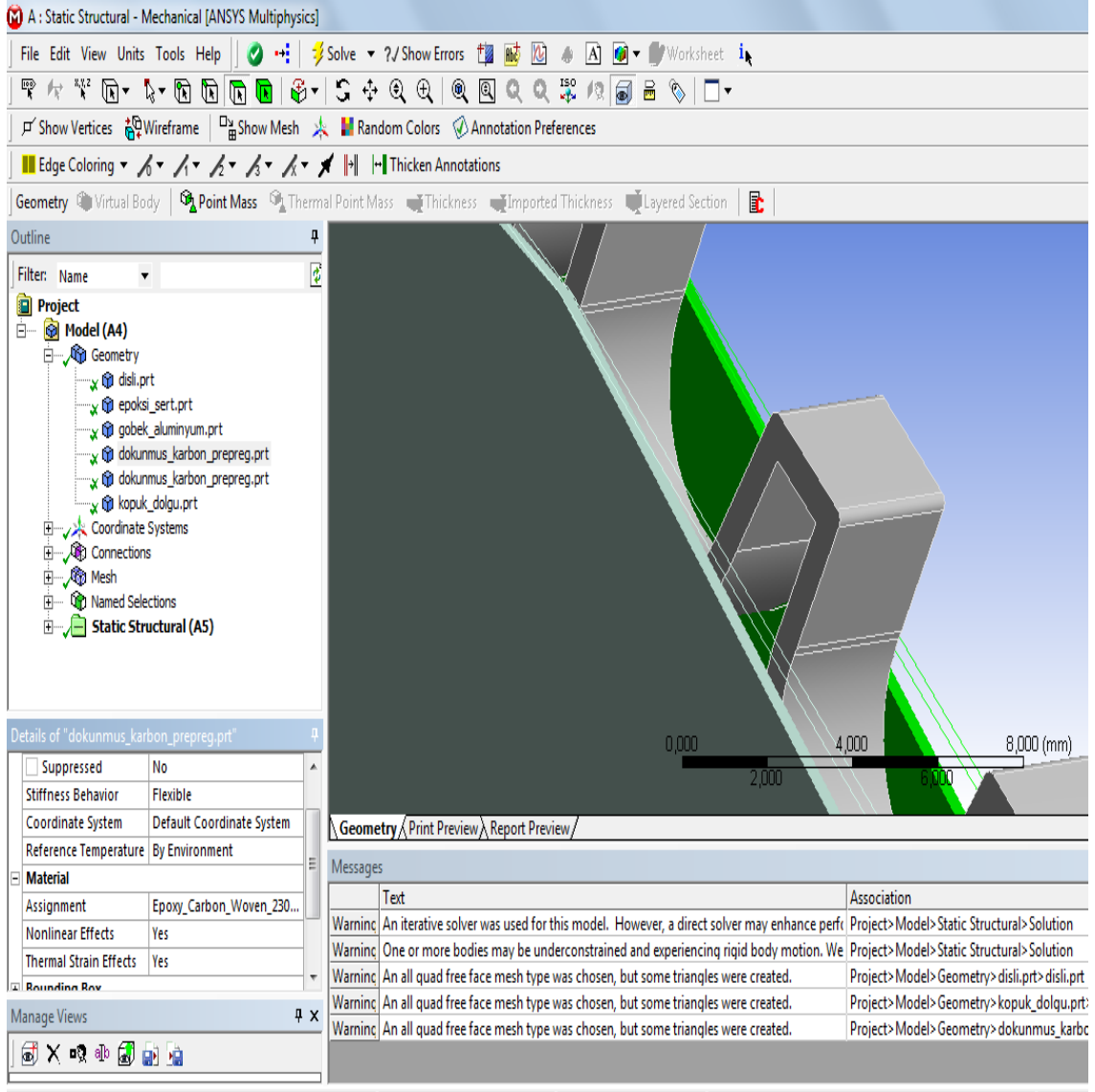
Şekil 4.4: ANSYS Workbench ortamına katı modellerin çağırılması

**Malzeme tanımlamaları:** ANSYS Malzeme kütüphanesinden malzeme tanımlamaları yapılır. Malzeme kütüphanesi içerisinde “Composite Materials” sekmesinden Karbon pre-preg, epoksi reçine ve köpük malzemeleri, “General Materials” sekmesi altında ise dişli ve alüminyum parçanın malzemeleri seçilmiştir (Şekil 4.5). Bu seçimler malzemelerin analiz ortamına gelmesini ve kullanıcının analiz ortamında istediği malzemeyi, istediği parçaya tanımlamasını sağlar. Şayet analizde kullanılacağı malzeme malzeme kütüphanesinde tanımlı değilse, kullanıcı özelliklerini bildiği malzemeyi malzeme kütüphanesi ara yüzünde tanımlayabilme kolaylığına sahiptir.



Şekil 4.5: ANSYS' de malzeme tanımlamalarının yapılması

**Malzeme atamaları:** Montajı oluşturan her bir parçanın malzemesi seçilir (Şekil 4.6). Karbon pre-pregler için Epoxy\_Carbon\_Woven\_Pregreg\_230GPa, dişli için Structural\_Steel, epoksi reçine için Resin\_Epoxy, alüminyum merkezleme parçası için Alluminum\_Alloy ve köpük malzemesi için SAN\_Foam\_81kgm3 seçilmiştir. Seçilen malzemelerin mekanik özellikleriyle, üretimde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

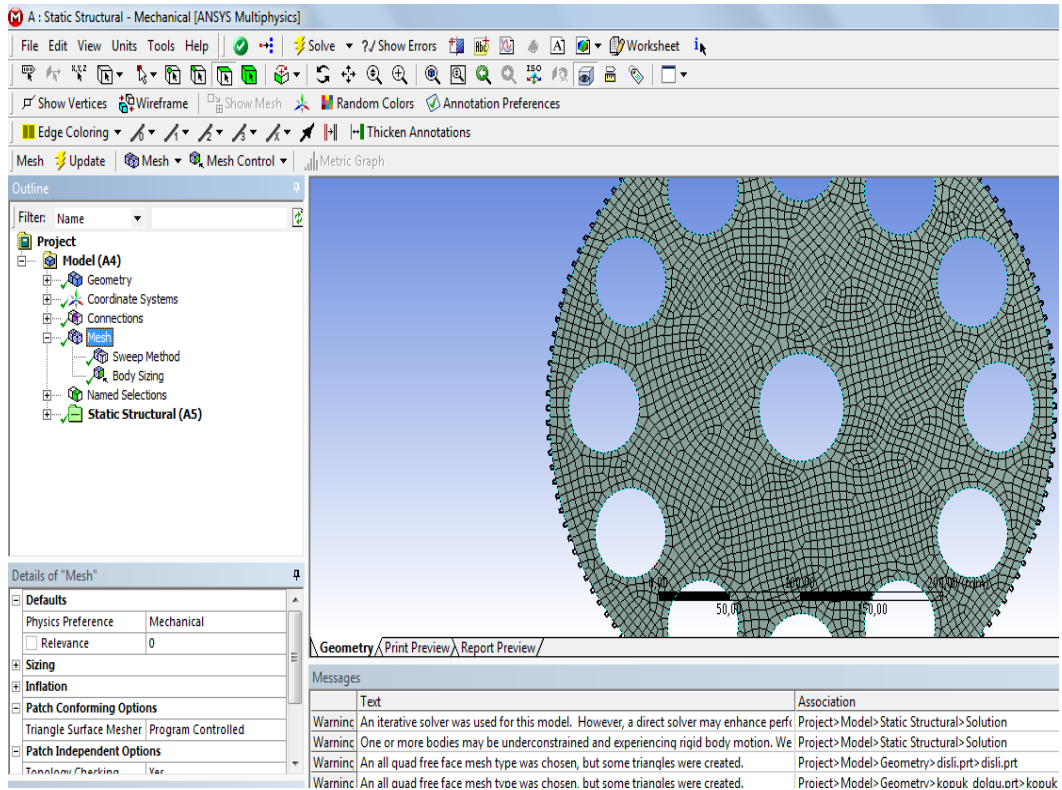


Şekil 4.6: Dişliyi oluşturan parçaların malzeme atamalarının yapılması

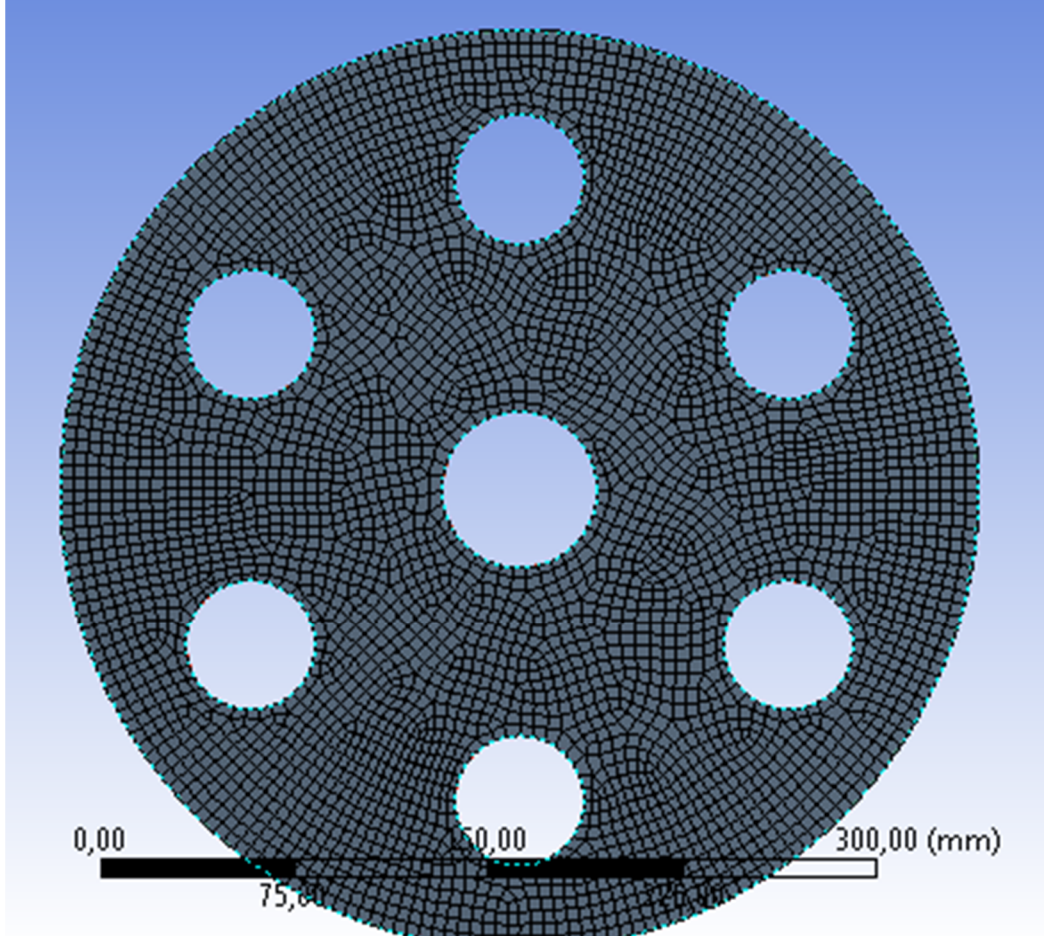
**Sonlu elemanlara ayırma işlemi (sonlu eleman ağ yapısı) :** Bu kısımda iki metod kullanılmıştır. İlk olarak “sweep” metodu kullanılmış ve “automatic thin, all quad ve number of divisions (= 3)” olarak seçilmiştir. Böylece çapına göre kalınlığı düşük olan bu dişlide sonlu eleman ağ yapısının düzgün oluşturulması sağlanmıştır (Şekil 4.7). İkinci olarak sonlu eleman ağının eleman büyüklüğü tespit edilmiştir. Eleman büyüklüğü 10 mm, 7,5 mm, 5 mm ve 2,5 mm olarak sırayla analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde 5 mm eleman büyüklüğünün yeteri kadar hassasiyet sağlayabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.8’ de karbon fiber pre-preglerin, Şekil 4.9’ da dişli parçasının, Şekil 4.10’ da

epoksi reçinenin, Şekil 4.11’ de köpük parçasının ve Şekil 4.12’ de alüminyum merkezleme parçasının sonlu elemanlara ayrılmış modelleri gösterilmiştir.

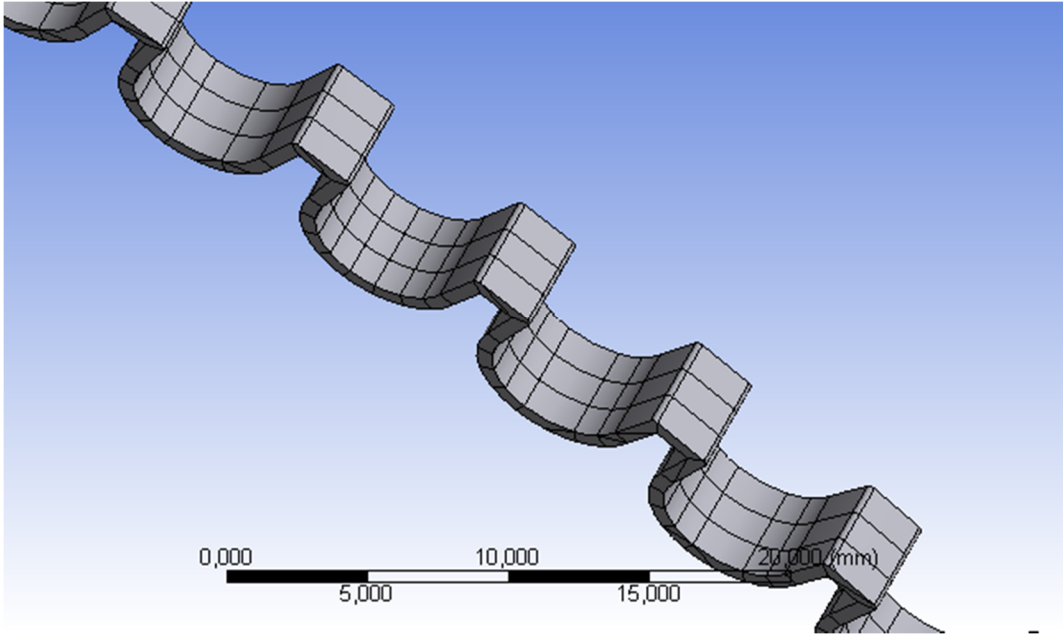
Hibrit dişlinin sonlu eleman ağı oluşturulduğunda, toplam olarak 41124 adet sonlu eleman ve 228990 adet düğüm noktası oluşmaktadır. Bu sonlu elemanlardan 5547 tanesi dişli malzemesine, 11658 adet eleman bir karbon pre-preg parçasına, 10698 adet eleman köpük malzemesine, 903 adet eleman alüminyuma ve 660 adet eleman epoksi reçineye aittir. Düğüm noktalarında ise; 40704 adet düğüm noktası dişli malzemesine, 60723 adet düğüm noktası bir karbon pre-preg parçasına, 56033 adet düğüm noktası köpük malzemesine, 5087 adet düğüm noktası alüminyuma ve 5720 adet düğüm noktası epoksi reçineye aittir. Bu rakamlardan çıkan sonuca göre, her elemandaki düğüm noktası sayısı, eleman sayısı ile birebir aynı oranda artmamaktadır. Bunun nedeni her parçanın kendine has bir geometriye sahip olması ve sonlu eleman ağının bu geometriye bağlı olarak oluşmasıdır. Ayrıca hibrit dişliyi oluşturan her bir parçanın sonlu eleman ağ yapısı incelendiğinde sonlu eleman ağ yapısının her birinde çok düzgün olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.7: Hibrit dişlinin sonlu eleman ağının oluşturulması

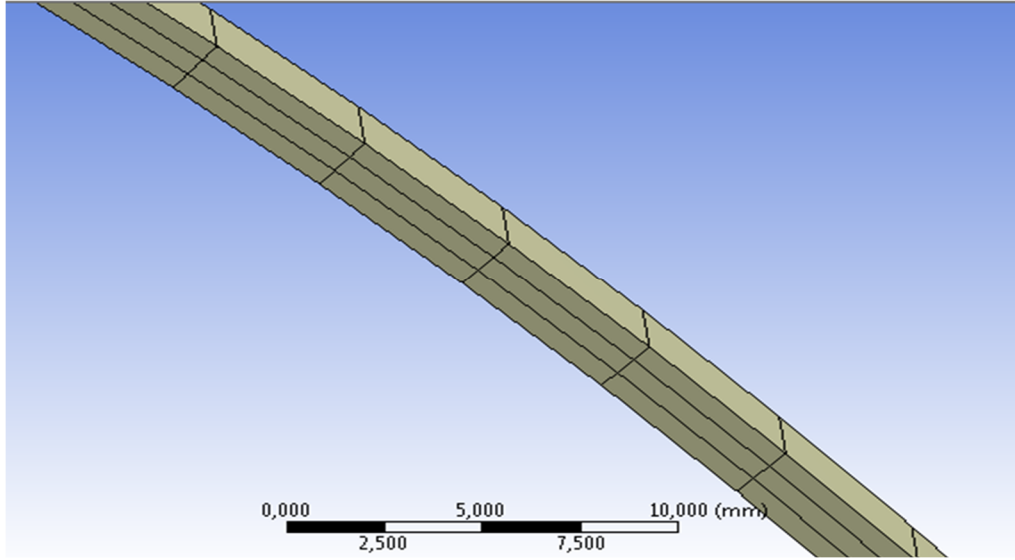


Şekil 4.8: Karbon fiber pre-preğın sonlu eleman modeli

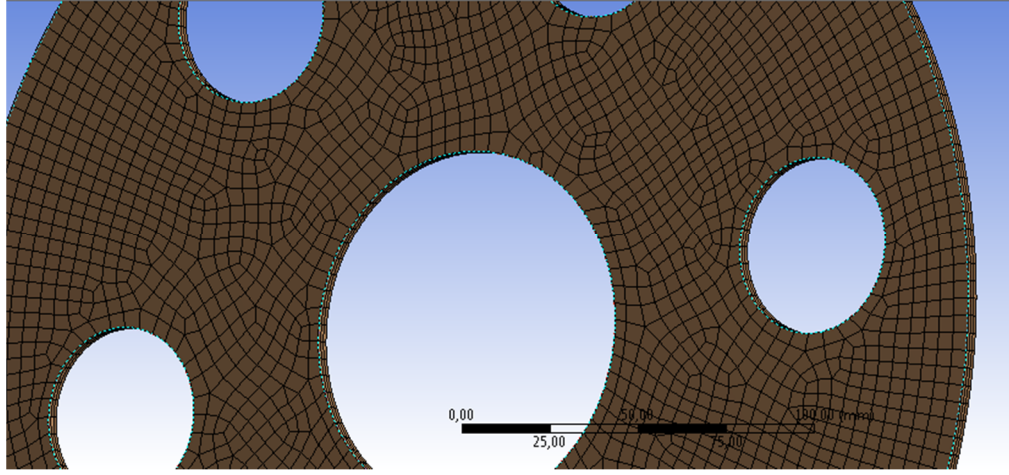


Şekil 4.9: Dişli parçasının sonlu eleman modeli

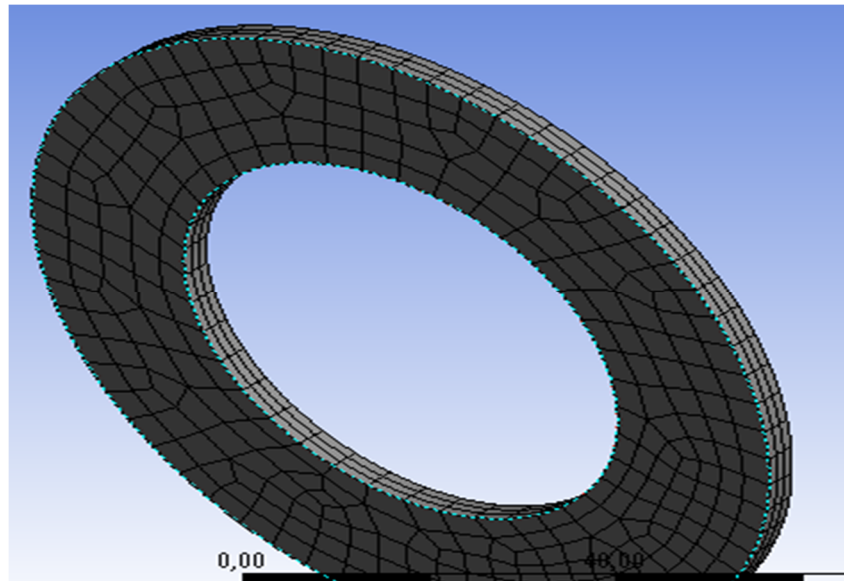




Şekil 4.10: Epoksi reçinenin sonlu eleman ağı

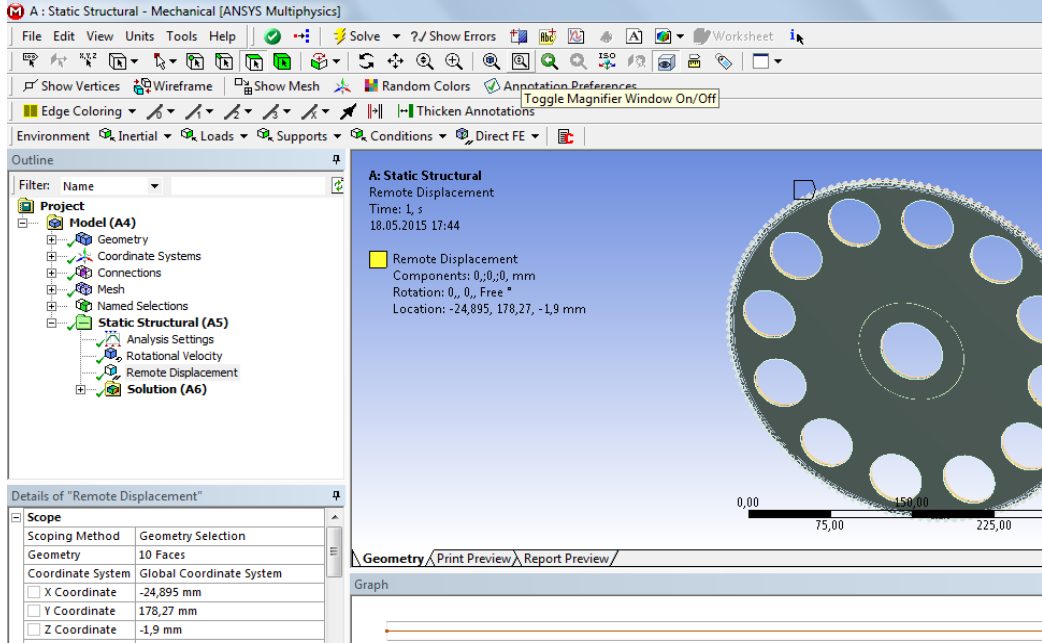


Şekil 4.11: Köpük parçasının sonlu eleman ağı

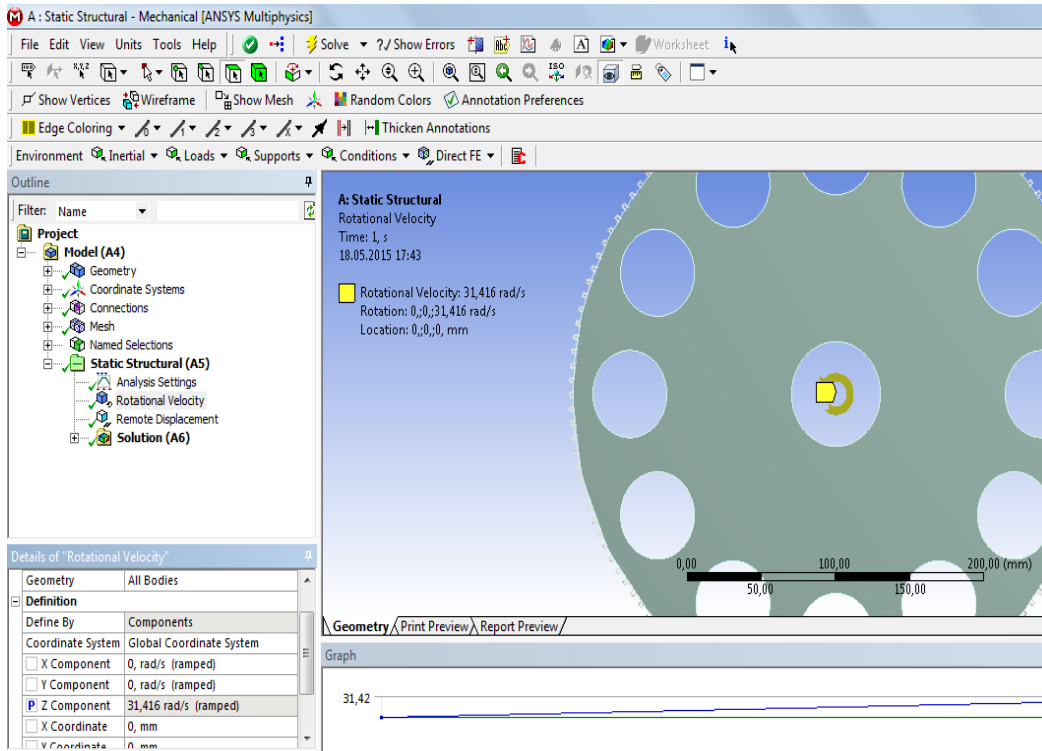


Şekil 4.12: Alüminyum parçasının sonlu eleman ağı

**Sınır koşullarının verilmesi:** Sınır koşullarında ilk olarak “remote displacement” sınır şartı verilmiştir, bu kısıtta sadece z eksenini etrafında dönmeye izin verilmiştir. Dişli diğer tüm eksenlerde dönme ve öteleme hareketine kısıtlanmıştır (Şekil 4.13). Dişliye z eksenini etrafında açısal hız tanımlanmıştır (Şekil 4.14).

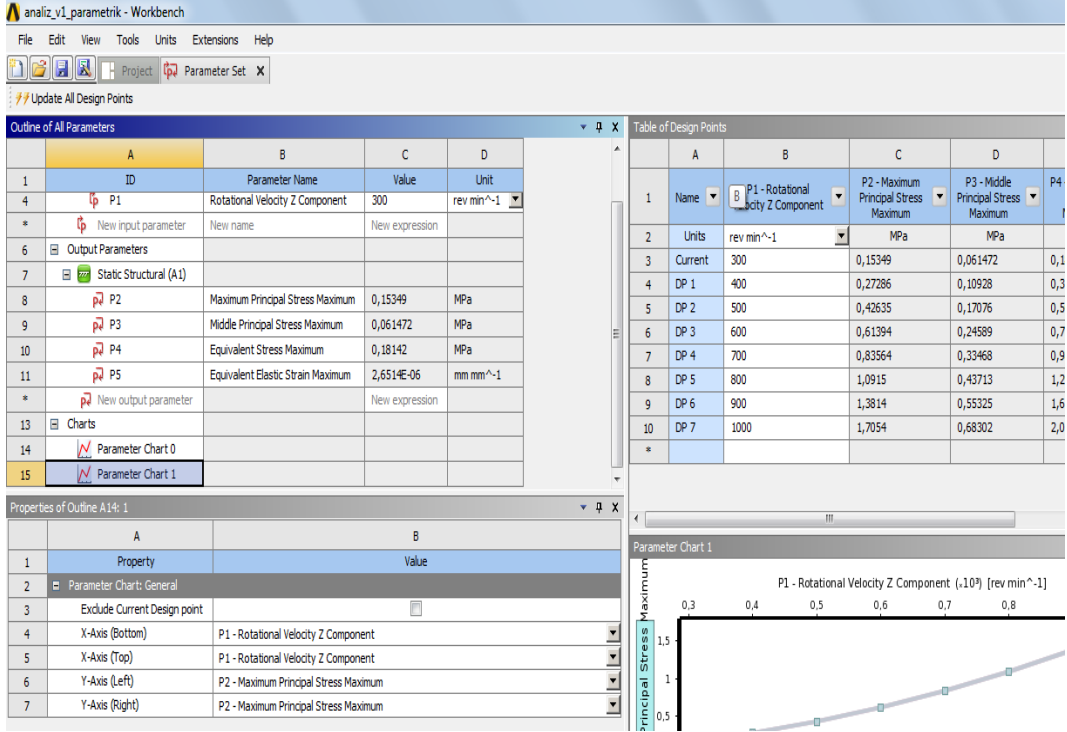


Şekil 4.13: Dişlinin hareket ekseninin tanımlanması

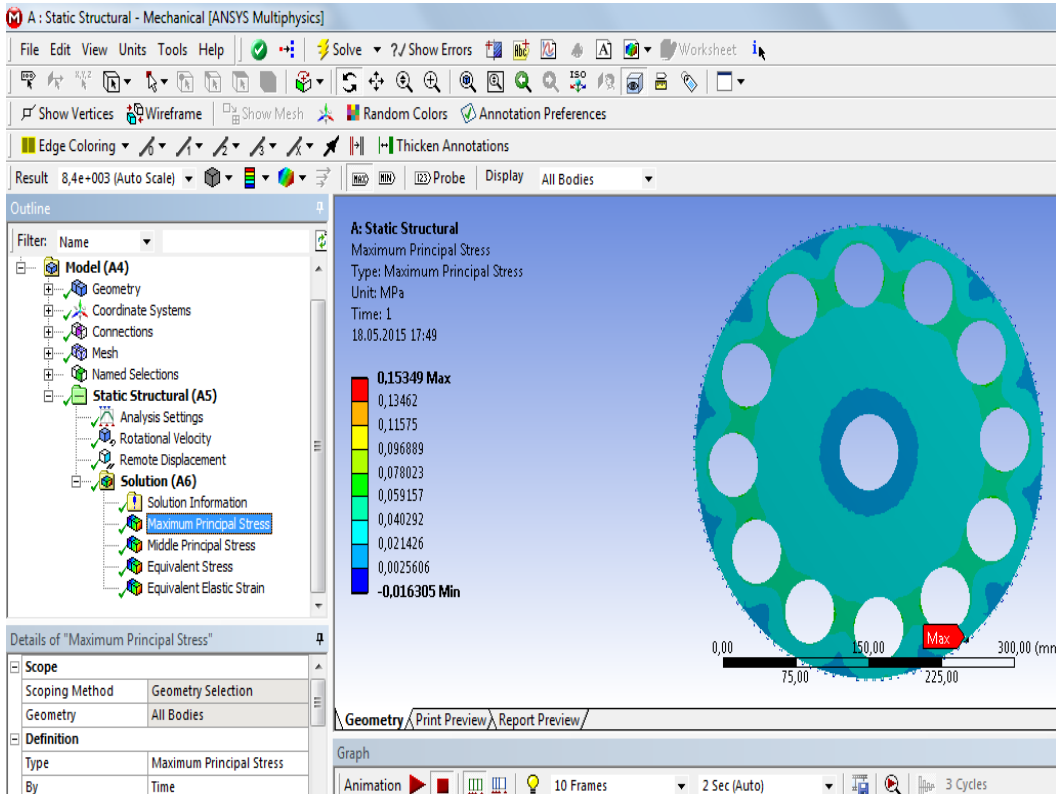


Şekil 4.14: Dişlinin açısal hızının tanımlanması

**Çözüm çıktılarının tanımlanması:** Von-Mises gerilme ve Von-Mises elastik şekil değiştirme değerleri sonuç parametreleri olarak gösterilecektir (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).



Şekil 4.15: Çözüm sonuçlarının parametrik olarak elde edilmesi

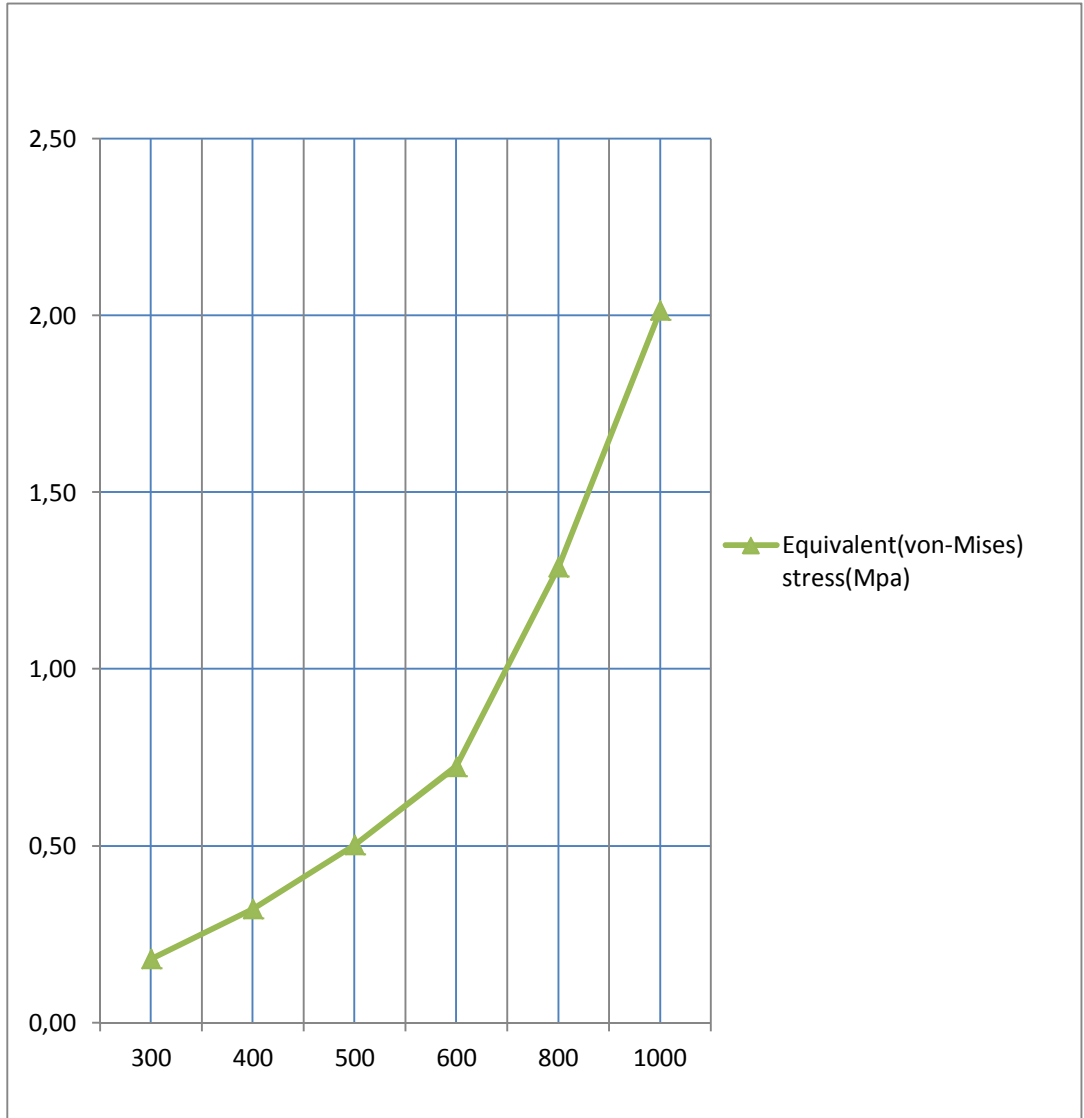


Şekil 4.16: Analiz sonuçlarının gösterilmesi

### 4.3.2 Analiz Sonuçları

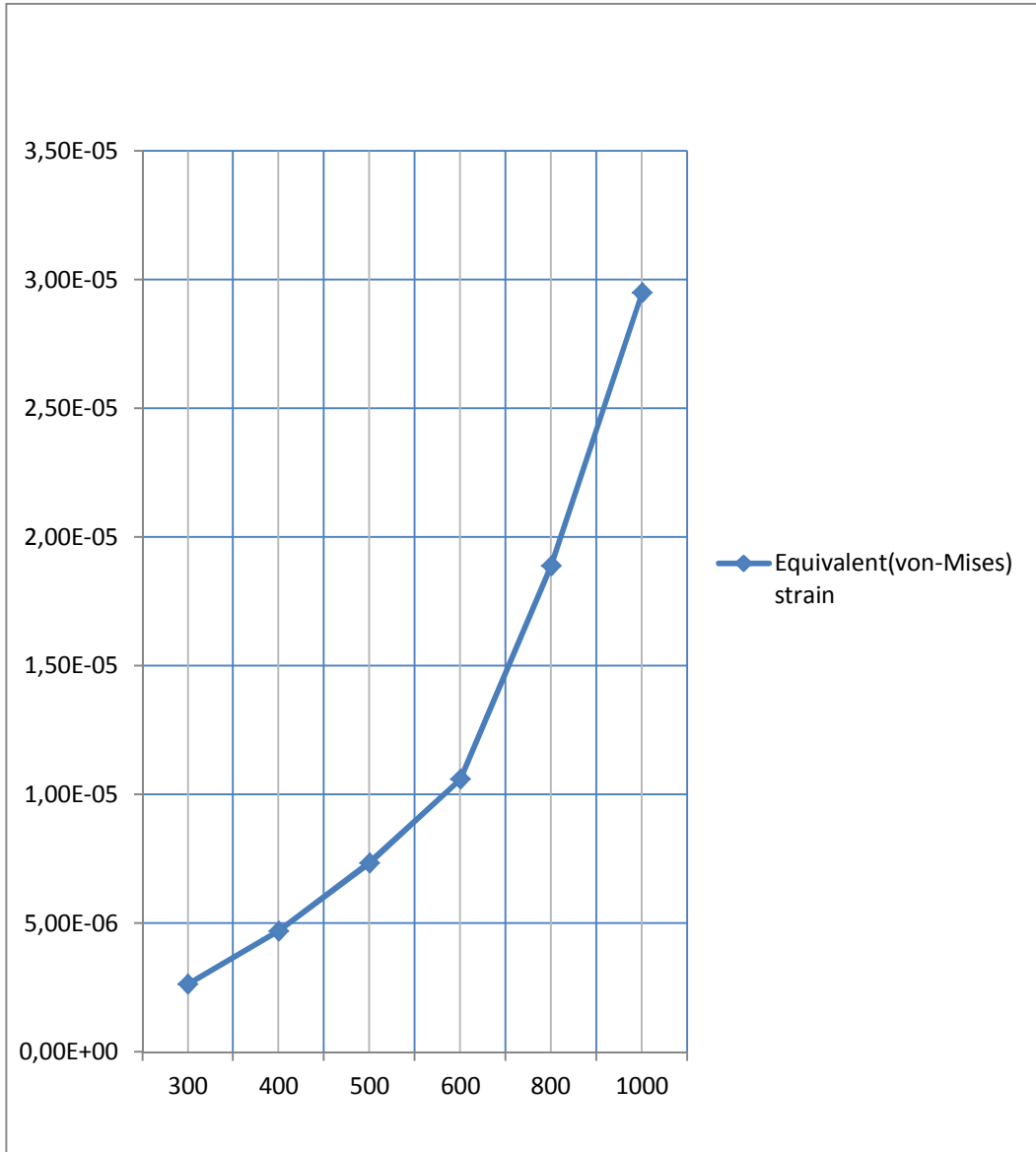
#### Tasarım-1:

Şekil 4.17' de görüldüğü gibi Tasarım-1 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,18142 MPa, 400 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,32252 MPa, 500 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,50394 MPa, 600 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,72567 MPa, 800 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,2901 MPa ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 2,0158 MPa olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises gerilme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.17: Tasarım-1'de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri

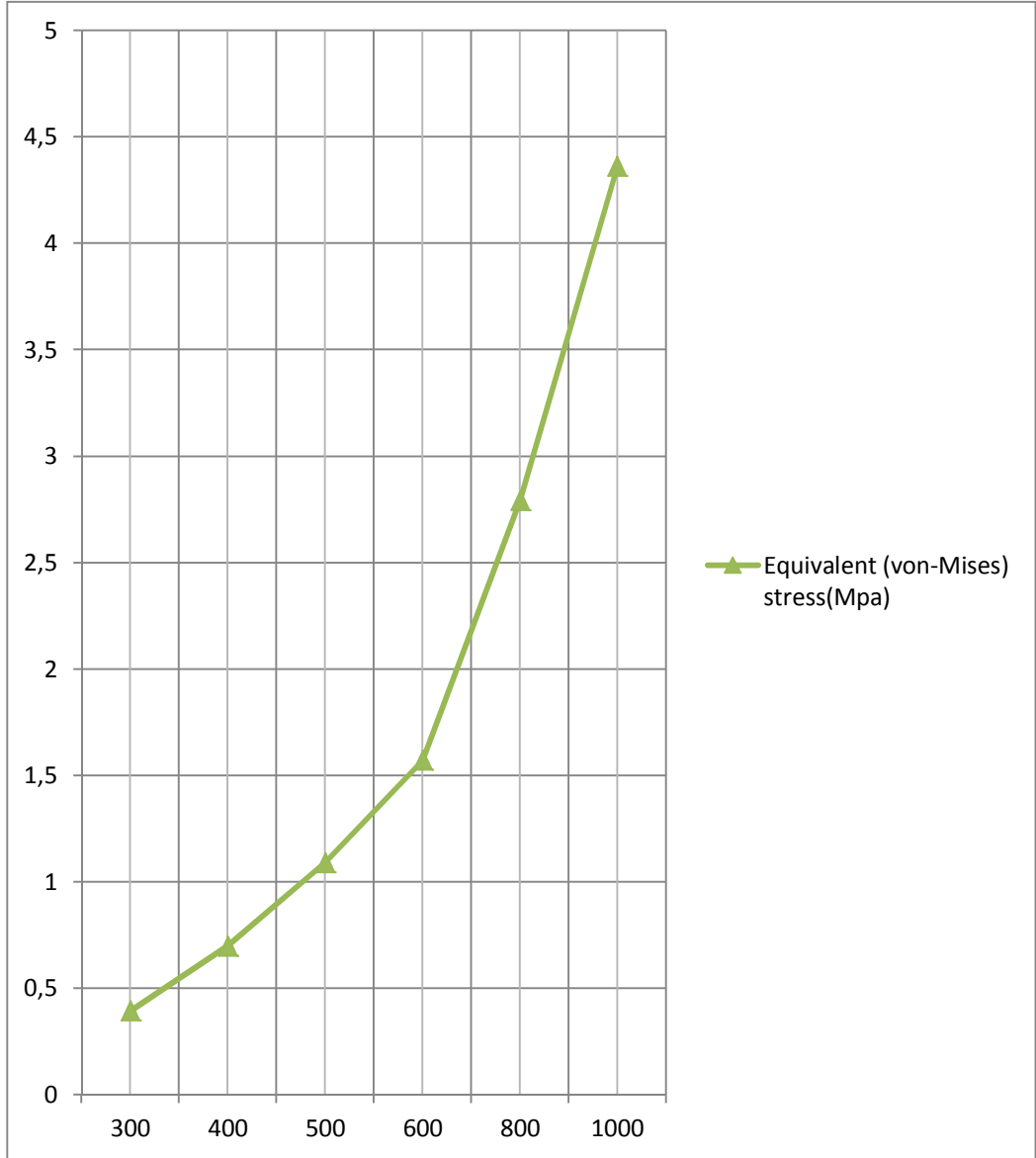
Şekil 4.18’ de görüldüğü gibi, Tasarım-1 için ANSYS 15.0.7’ de yapılan analizlerde 300 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $2,65e-06$  mm/mm, 400 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $4,71e-06$  mm/mm, 500 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $7,36e-06$ , 600 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $1,06e-05$  mm/mm, 800 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $1,89e-05$  mm/mm ve 1000 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $2,95e-05$  mm/mm olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises şekil değiştirme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.18: Tasarım-1’de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri

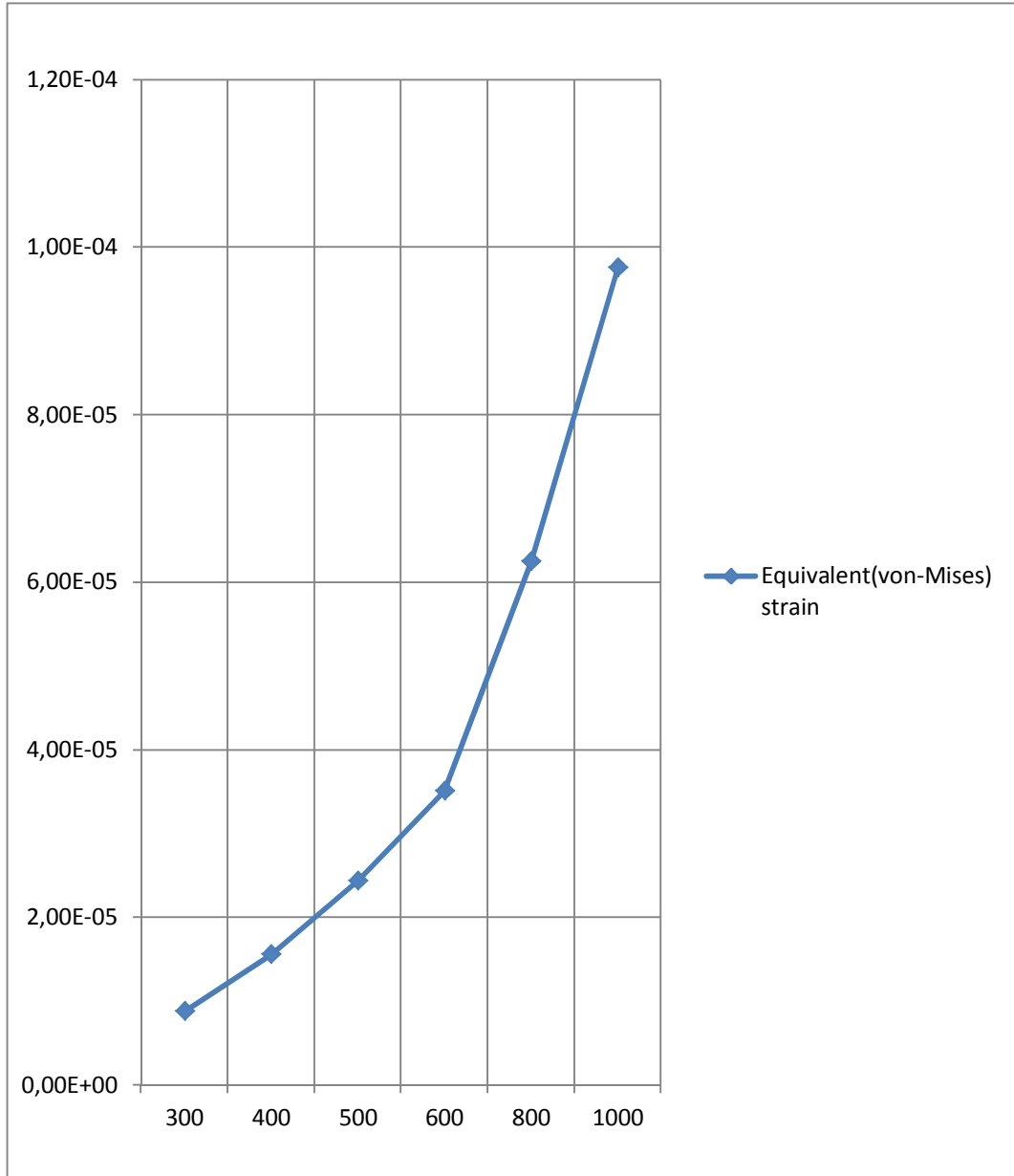
## Tasarım-2:

Şekil 4.19' da görüldüğü gibi Tasarım-2 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,39275 MPa, 400 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,69821 MPa, 500 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,091 MPa, 600 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,571 MPa, 800 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 2,7928 MPa ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 4,3638 MPa olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises gerilme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.19: Tasarım-2'de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri

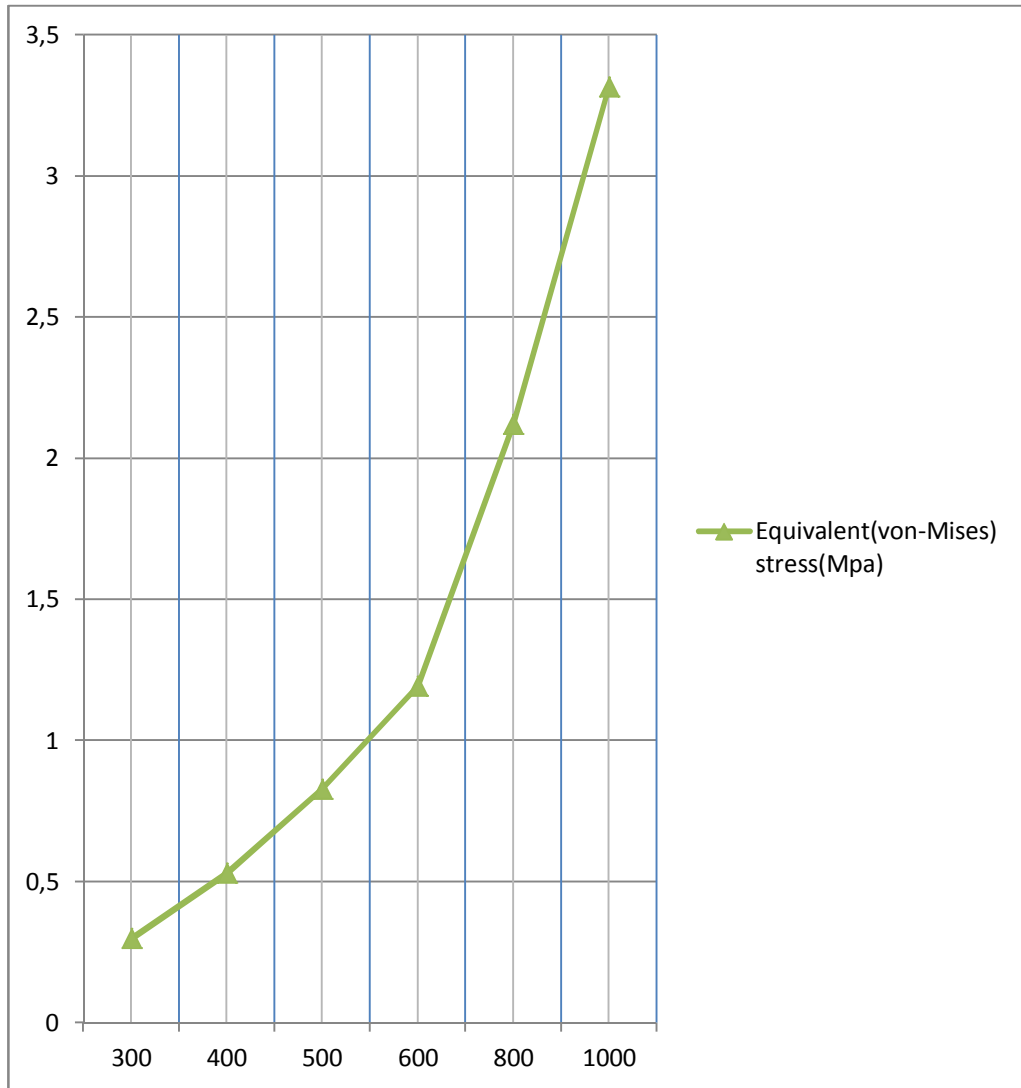
Şekil 4.20' de görüldüğü gibi, Tasarım-2 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $8,78e-06$  mm/mm, 400 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $1,56e-05$  mm/mm, 500 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $2,44e-05$  mm/mm, 600 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $3,51e-05$  mm/mm, 800 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $6,25e-05$  mm/mm ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $9,76e-05$  mm/mm olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises şekil değiştirme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.20: Tasarım-2'de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri

### Tasarım-3:

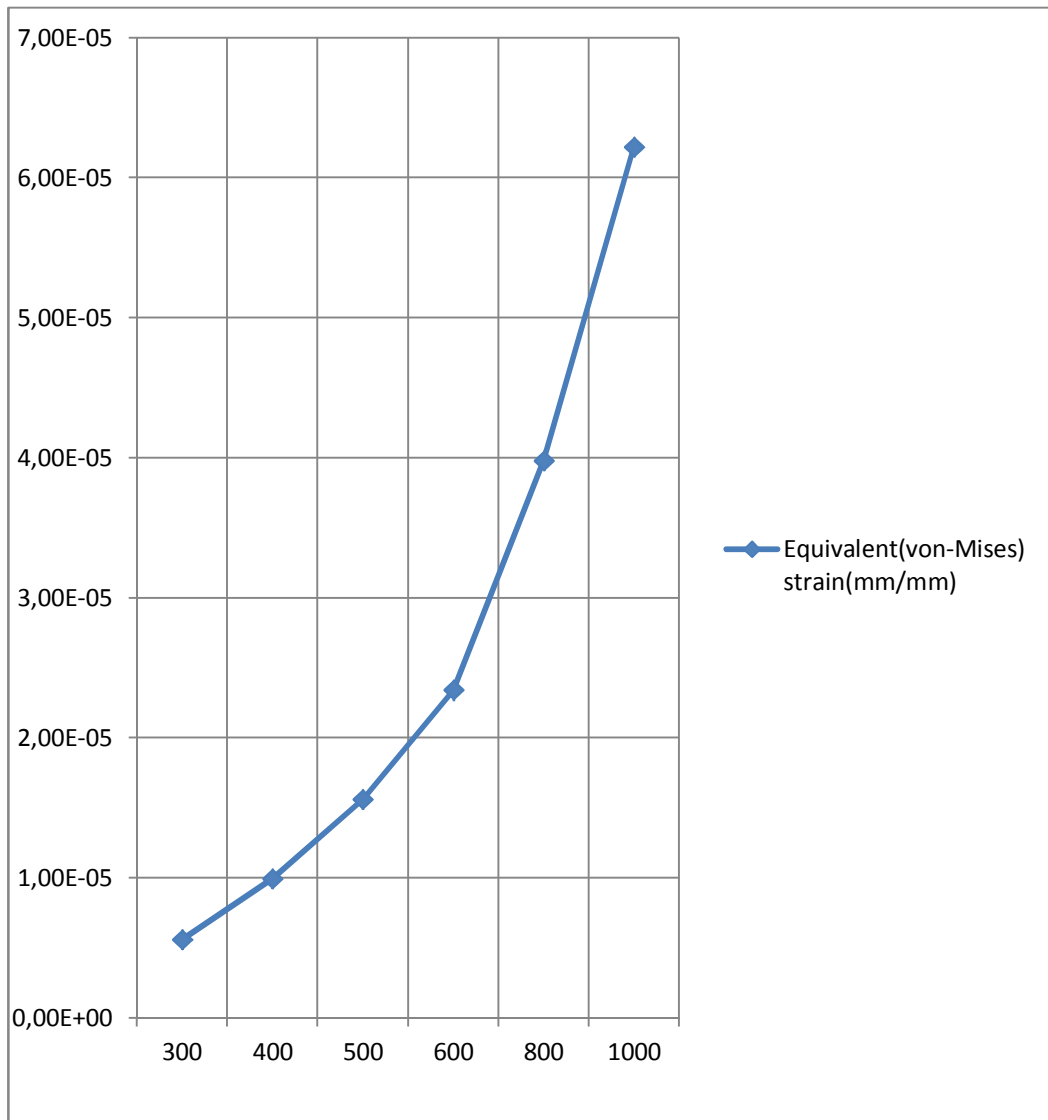
Şekil 4.21' de görüldüğü gibi Tasarım-3 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,29834 MPa, 400 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,53037 MPa, 500 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,82871 MPa, 600 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,1933 MPa, 800 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 2,1215 MPa ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 3,3148 MPa olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises gerilme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.21: Tasarım-3'de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri



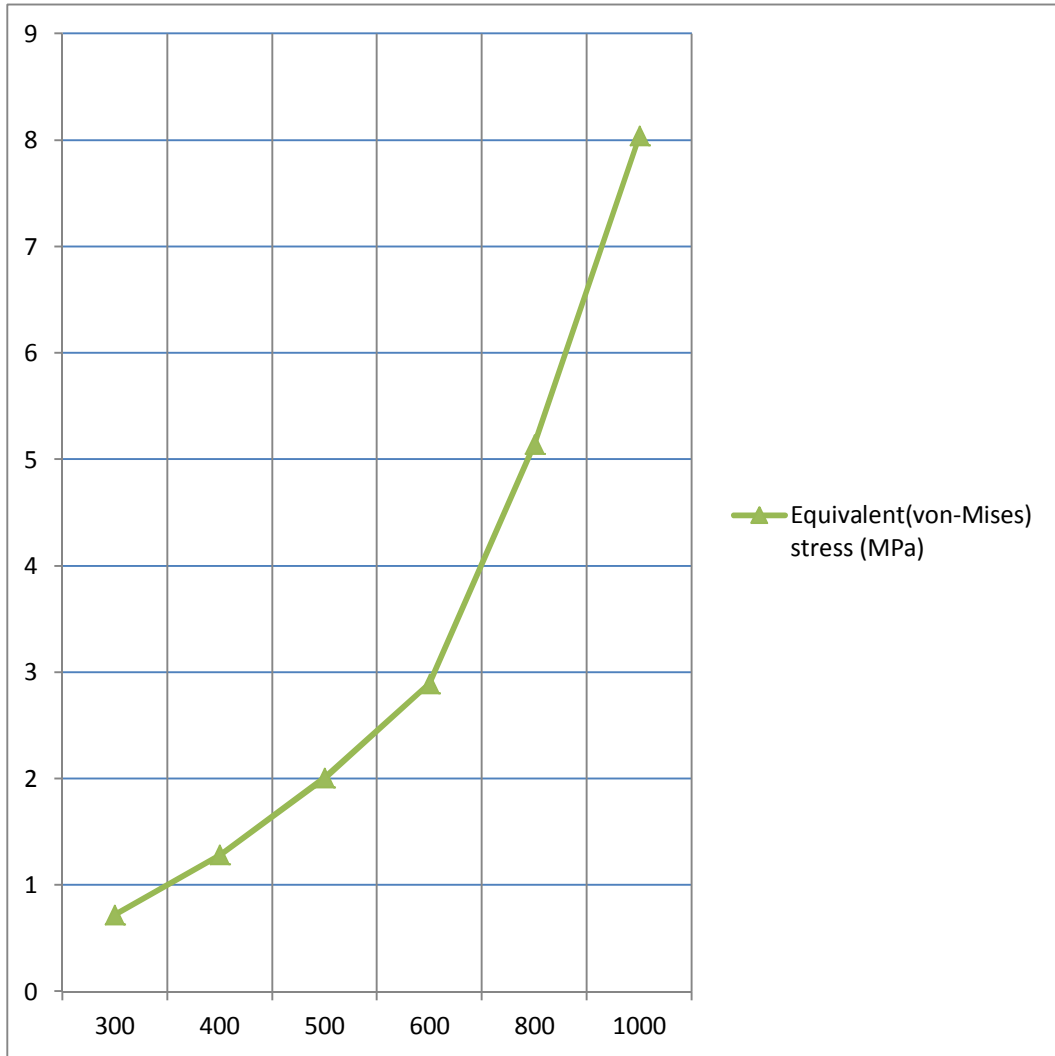
Şekil 4.22’ de görüldüğü gibi, Tasarım-3 için ANSYS 15.0.7’ de yapılan analizlerde 300 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $5,59e-06$  mm/mm, 400 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $9,95e-06$  mm/mm, 500 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $1,56e-05$  mm/mm, 600 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $2,34e-05$  mm/mm, 800 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $3,98e-05$  mm/mm ve 1000 dev/dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $6,22e-05$  mm/mm olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises şekil değiştirme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.22: Tasarım-3’de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri

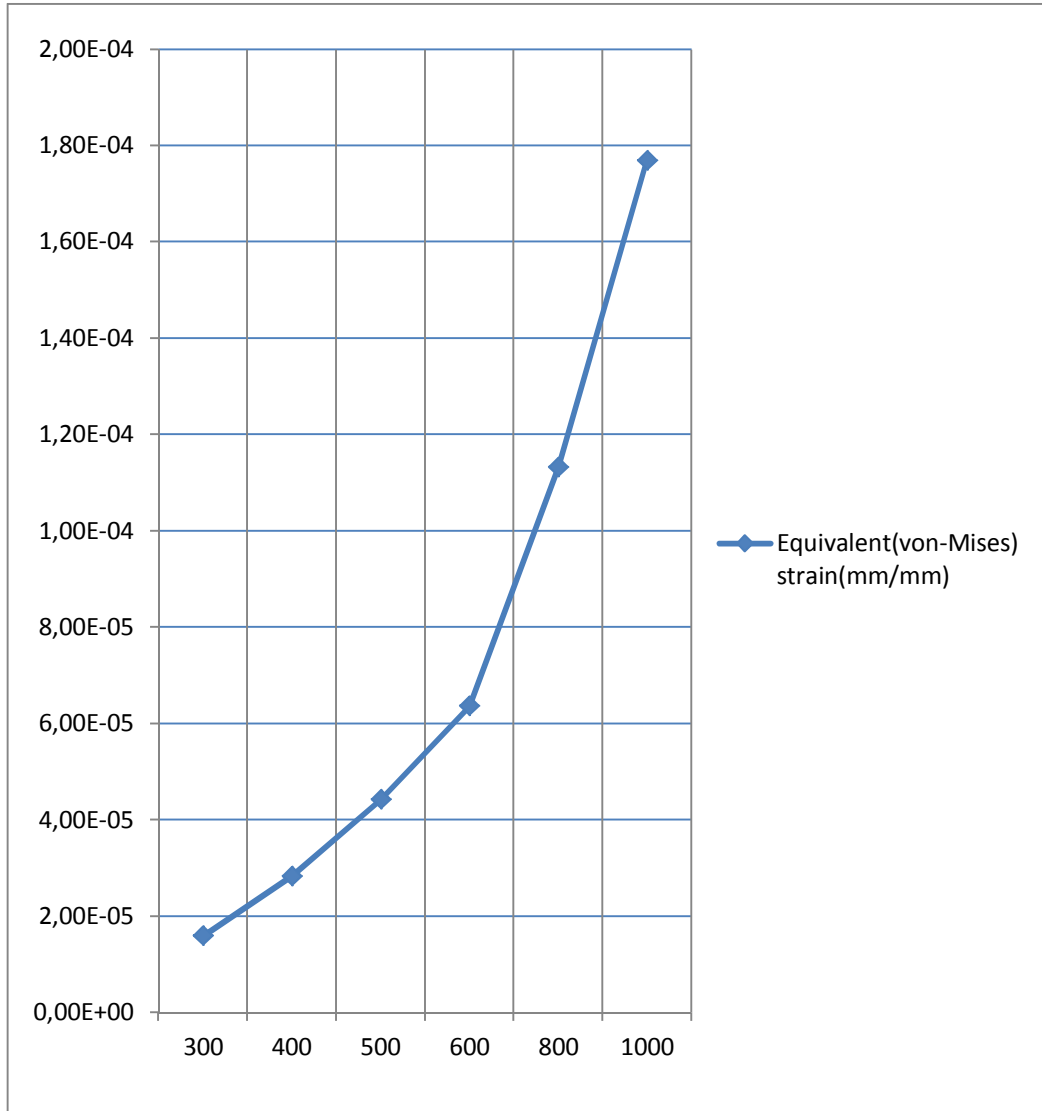
#### Tasarım-4:

Şekil 4.23' te görüldüğü gibi Tasarım-4 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,72354 MPa, 400 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,2863 MPa, 500 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 2,0098 MPa, 600 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 2,8942 MPa, 800 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 5,1452 MPa ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 8,0393 MPa olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises gerilme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.23: Tasarım-4' de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri

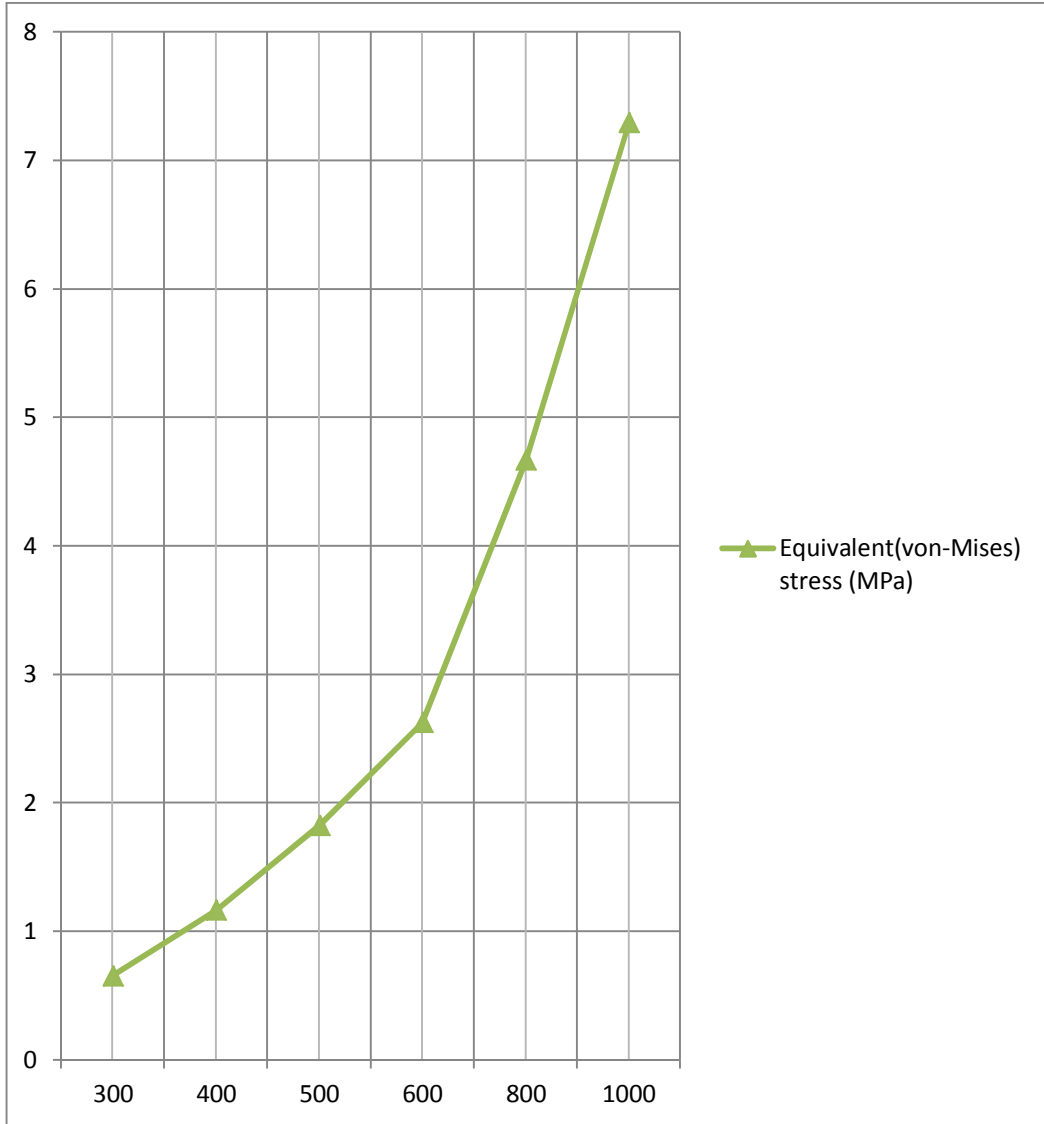
Şekil 4.24' te görüldüğü gibi, Tasarım-4 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $1,59e-05$  mm/mm, 400 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $2,83e-05$  mm/mm, 500 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $4,42e-05$  mm/mm, 600 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $6,36e-05$  mm/mm, 800 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $0,00011322$  mm/mm ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $0,0001769$  mm/mm olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises şekil değiştirme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.24: Tasarım-4' de elde Von-Mises şekil değiştirme değerleri

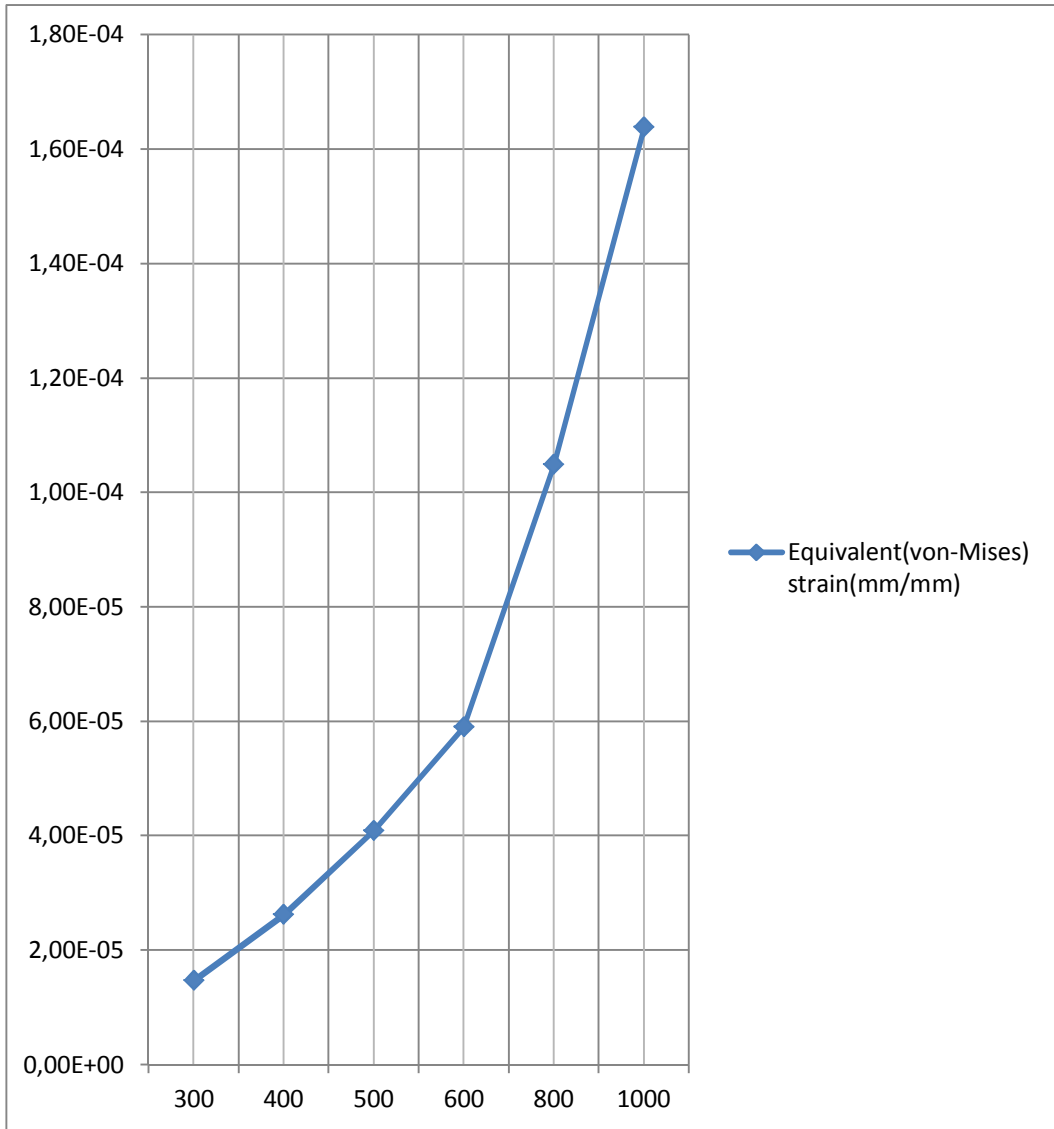
### Tasarım-5:

Şekil 4.25' te görüldüğü gibi Tasarım-4 için ANSYS 15.0.7' de yapılan analizlerde 300 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 0,65653 MPa, 400 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,1672 MPa, 500 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 1,8237 MPa, 600 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 2,6261 MPa, 800 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 4,6686 MPa ve 1000 dev/dak' daki Von-Mises gerilme değeri 7,2947 MPa olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises gerilme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.25: Tasarım-5'de elde edilen Von-Mises gerilme değerleri

Şekil 4.26’ da görüldüğü gibi, Tasarım-5 için ANSYS 15.0.7’ de yapılan analizlerde 300 dev/dak’ deki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $1,47e-05$  mm/mm, 400 dev/dak’ deki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $2,62e-05$  mm/mm, 500 dev/dak’ deki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $4,09e-05$  mm/mm, 600 dev/dak’ deki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $5,90e-05$  mm/mm, 800 dev ‘dak’ daki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $0,000140485$  mm/mm ve 1000 dev/dak’ deki Von-Mises şekil değiştirme değeri  $0,00016382$  mm/mm olarak bulunmuştur. Hız arttıkça Von-Mises şekil değiştirme değerleri parabolik olarak artmaktadır.



Şekil 4.26: Tasarım-5’de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında hibrit kompozit dişlinin tasarım, üretim ve analiz aşamaları detaylı olarak aktarılmıştır. Dişliye ait beş farklı tasarımın, beş farklı açısız hızda yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarım-2' de elde edilen Von-Mises normal gerilme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises normal gerilme değerlerinin yaklaşık iki katından fazladır. Tasarım-2' de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerlerinin yaklaşık üç katından fazladır.

Tasarım-3' te elde edilen Von-Mises normal gerilme değerleri, Tasarım-2' de elde edilen Von-Mises normal gerilme değerlerinden daha küçük, fakat Tasarım-1' deki değerlerden % 60 daha büyüktür. Tasarım-3' te elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerlerinin yaklaşık iki katından fazladır.

Tasarım-4' te elde edilen Von-Mises normal gerilme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises normal gerilme değerlerinin yaklaşık dört katıdır. Tasarım-4' te elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerlerinin yaklaşık altı katıdır.

Tasarım-5' te elde edilen Von-Mises normal gerilme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises normal gerilme değerlerinin yaklaşık üç buçuk katından fazladır. Tasarım-5' de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerleri, Tasarım-1' de elde edilen Von-Mises şekil değiştirme değerlerinin yaklaşık altı katıdır.

Sonuç olarak Tasarım-1' in optimum tasarım olduğu görülmektedir. Her ne kadar Tasarım-1'in imalatı, deliklerin yapılmasından dolayı Tasarım-5' e göre daha maliyetli olsa da, mukavemet değerleri çok daha iyi olduğu için Tasarım-1 tercih edilir.

Bu tezdeki çalışmalara ilave olarak, sonlu elemanlar yöntemiyle dişlinin titreşim ve yorulma analizleri de yapılabilir. Ayrıca, bir test düzeneği hazırlanarak

dişlinin farklı yükler altındaki davranışları deneysel olarak ölçülebilir ve hibrit dişlinin ömür testleri yapılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

Altan, G., Topçu, M., Bektaş, N.B. ve Altan, B.D., “Elastic-plastic thermal stress analysis of an aluminum disc under parabolic thermal load distribution”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 2318-2327, (2008).

ANSYS Inc., “ANSYS Finite Element Mesh [online]”, (10 May 2015), <http://www.ansys.com/Products/Workflow+Technology/ANSYS+Workbench+Platform/ANSYS>

Ashby, M. F. and Brechet, Y. J. M., “Designing hybrid materials”, *Acta Materialia*, 51, 5801-5821, (2003).

Babic, M., Stojanovic, B., Mitrovic, S., Bobic, I., Miloradovic, N., Pantic, M. and Dzunic, D., “Wear properties of A356/10SiC/1Gr hybrid composites in lubricated sliding conditions”, *Tribology in Industry*, 2(35), 148-154, (2013).

Bathe, K.J., *Finite Element Procedures*, New Jersey: Prentice Hall, 1-150, (1996).

Chang, C.I., “The anisotropic rotating disks”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 17(6), 397-402, (1975).

Cook, R.D., *Finite Element Modeling For Stress Analysis*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 75-103, (1995)

Genta, G., Gola, M. And Gugliotta, A., “Axisymmetrical computation of the stress distribution in orthotropic rotating discs”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 24(1), 21-26, (1982)

Gururaja, M.N. and Rao, A. N.H., “A Review on recent applications and future prospectus of hybrid composites”, *Int. J. Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 6(1), (2012).

Handschuh R.F., Roberts G.D., Sinnaman R.R., Stringer D.B., Dykas B.D. and Kohlmen L.W., “Hybrid gear preliminary results-application of composites to dynamic mechanical components”, *NASA Center for Aerospace Information*, NASA/TM-217630, (2012).

Inaba, K. and Shephard, J.E., “Failure of liquid-filled filament-wound composite tubes subjected to axial impact”, ICCM-17 17th International Conference On Composite Materials, Edinburg International Convention Centre (EICC)-U.K., (2009).

Jeon, H. S. and Oh, S. H. , “A Study on gerilme and vibration analysis of a steel and hybrid flexspline for harmonic drive”, *Composite Structures*, 47, 827-833, (1999).



- Karakaya, Ş., “Investigation of hybrid and different cross-section composite disc springs using finite element method”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 4(36), (2012).
- Kim, H.S. and Lee, D.G., “Design and manufacture of stainless steel/carbon epoxy hybrid shaft for cleaning large LCD glass panels”, *Composite Structures*, 80, 279-289, (2007).
- Kollar, L.P. and Springer, G.S., *Mechanics of Composite Structures*, New York: Cambridge University Press, 395-410, (2003).
- Kwon, J.D., Kim S.J., Nasir, S.U., Ha, S.K., “Design and fabrication of hybrid composite flywheel rotor”, *World Academy of Science-Engineering and Technology*, 60, 1309-1313, (2011).
- Lee, D.G., Suh, J.D., Kim H.S. and Kim J.M., “Design and manufacture of composite high speed machine tool structures”, *Composites Science and Technology*, 64, 1-8, (2004).
- Lee, H. G., Park, J. and Kim, J. H. , “Design theory and optimization metot of a hybrid composite rotor for an ultracentrifuge”, *Mechanism and Machine Theory*, 59, 78-95, (2013).
- Li, J., Bakoss, S. L., Samali, B. and Ye, L. , “Reinforcement of concrete beam-column connections with hybrid FRP sheet”, *Composite Structures*, 47, 805-812, (1999).
- Mazumdar, S.K., *Composites Manufacturing, Materials, Product and Process Engineering*, Boca Raton, 8-21, (2002).
- Nakasone, Y., Yoshimoto, S. and Stolarski, T.A., *Engineering Analysis with ANSYS Software*, Oxford: Elsevier, 1-34, (2008)
- Nguyen, M., Herszberg, I. and Paton, R., “The shear properties of woven carbon fabric”, *Composite Structures*, 47, 767-779, (1999).
- Prabhuram, T., Somurajan, V. and Prabhakaran, S., ”Hybrid composite materials”, *Int. J. IEEE*, 978-1-4244-9082-0/10, (2010).
- Suryawanshi, B. K. and Damle, P.G., “Review of design of hybrid aluminum/composite drive shaft for automobile”, *Int. J. Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2(4), (2013).
- Venkateswarlu, S.A. and Rajasekhar K., “Modelling and analysis of hybrid composite joint using fem in ANSYS”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 6, 1-6, (2013).

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Recep İZCİ

Doğum Yeri ve Tarihi : Tavas, 1981

Lisans Üniversite : Makine Mühendisliği, ODTÜ

Y. Lisans Üniversite (varsa) : Endüstri Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi

Elektronik posta : recepizci@gmail.com

İletişim Adresi : İncilipınar Mah. 3395/1 Sk. No:2/9  
Pamukkale / DENİZLİ