

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**BİNEK ARAÇ SÜSPANSİYON ROTİLİNİN MAFSAL  
ÇIKMA YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU  
ELEMENLAR VE MEKANİK TESTLER İLE  
İNCELENMESİ**

**Halil AKYEL**

**Mayıs, 2023**

**İZMİR**

# **BİNEK ARAÇ SÜSPANSİYON ROTİLİNİN MAFSAL ÇIKMA YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU ELEMENLAR VE MEKANİK TESTLER İLE İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek lisans Tezi**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı**

**Halil AKYEL**

**Mayıs, 2023**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**HALİL AKYEL**, tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ BAHADIR UYULGAN** yönetiminde hazırlanan “**BİNEK ARAÇ SÜSPANSİYON ROTİLİNİN MAFSAL ÇIKMA YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR VE MEKANİK TESTLER İLE İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir

.....  
Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN

\_\_\_\_\_  
Yönetici

.....  
Doç. Dr. Metin Yurddaşkal

\_\_\_\_\_  
Jüri Üyesi

.....  
Doç. Dr. Onur Ertuğrul

\_\_\_\_\_  
Jüri Üyesi

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin çalışmasının araştırılması, yürütülmesi ve hazırlanması süresince bilgi birimini benimle paylaşan, beni araştırmaya yönelten danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Bahadır Uygan’a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Teorik ve pratik çalışmalarım süresince desteklerinden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği akademik personeline ve numune hazırlama aşamasında yardımlarını esirgemeyen teknik bölüm personellerine teşekkür ederim. ZF LEMFÖRDER A.Ş firmasından AR-GE bölümünden iş arkadaşlarım olan tez konumun belirlenmesine katkıda bulunan yüksek müh. Kerem Taş’a ayrıca yüksek müh. Emre Hasanoğlu ve yüksek müh. Çağdaş Baday’a sonlu elemanlar analizi konusunda bilgi ve tecrübe paylaşımlarından dolayı teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamda deneysel çalışmalarım süresince numune desteğini her zaman sağlayarak çalışmama büyük katkıda bulunan ZF LEMFÖRDER AKS MOD. A.Ş. firmasına ve AR-GE bölümü müdürü sayın Ender Erdoğan’a teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımın her döneminden bende desteklerini esirgemeyen ve bu çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen sevgili anneme, babama ve kız kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Halil AKYEL

# **BİNEK ARAÇ SÜSPANSİYON ROTİLİNİN MAFSAL ÇIKMA YÜKÜ PERFORMANSININ SONLU ELEMANLAR VE MEKANİK TESTLER İLE İNCELENMESİ**

## **ÖZ**

Binek araçlarda rotlar yönlendirme sisteminde görevlerini yaparken statik, dinamik ve yatak yüklerine maruz kalmaktadır. Rota etki eden statik yükler, yatay ve dikey yönde etki ederler. Dolayısı ile binek araçlarda kullanılan rotillerdeki mafsalın, yuvasından çıkma kuvvetinin yüksek olması gerekir. Mafsalın düşük kuvvetlerde yerinden çıkması o rotilin görevini yerine getirememesine veya istenmeyen ses oluşturarak sürüş konforunda düşüşe neden olmaktadır. Tedarikçi firmalar, otomotiv üreticisi firmaların belirlediği mafsal milinin rot yatağından çıkarken ulaşabileceği maksimum deformasyon kuvvetini sağlamak için, farklı ölçülerde tasarlanmış prototiplerin test sonuçlarına göre hareket etmektedir. Çıkma yükü testi bir müşteri isteğidir, aracın OEM (orijinal ürün üreticisi) tarafından tasarımı esnasında belirlenir ve rotil üreticisinden minimum çıkma yükünü karşılayacak şekilde malzeme ve tasarım belirlemesi beklenir. Binek araçların park halinde ya da düşük hızlarda kolayca dönebilmesini sağlayabilmek için rot başının çalışma açısının da bağlantılı olarak yüksek derecede olması gerekmektedir. Bu proje kapsamında geliştirilecek yeni tip rot başı, yüksek çıkma yükleri yanında daha yüksek çalışma açılarını da sağlayabilecek nitelikte tasarlanmıştır. Bu çalışmada öncelikle mevcut tasarımdan elde edilmiş ürüne mafsal çıkma testi uygulanmış daha sonra çıkma kuvveti hedef kuvvetten düşük çıkmıştır. Bu sebeple mevcut ürünlerden numuneler çıkartılmış ve bu numunelere eğme ve sertlik ölçme testi gerçekleştirilmiş daha sonra elde edilen sonuçlardan yeni parametreler belirlenmiştir. Buradan elde edilen gerilme değerleri kullanılarak çıkma kuvvetini artırmak amacı ile Catia V5 programı ile farklı varyantlarda tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar programı (FEA) ile optimize edilen tasarıma analiz uygulanarak en uygun geometriyi ve malzeme belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Şasi, rot başı, dövme, çekme testi

# **INVESTIGATION OF THE PULL-OUT PERFORMANCE OF PASSENGER VEHICLE SUSPENSION BALL JOINT BY FINITE ELEMENT AND MECHANICAL TESTS**

## **ABSTRACT**

In passenger cars, the rods are exposed to static, dynamic and bearing loads while performing their duties in the steering system. Static loads acting on the rod are loads acting in the horizontal and vertical directions. The dislocation of the joint at low forces causes that ball joint to fail to fulfill its task or to reduce driving comfort by creating unwanted noise. Tie rod manufacturers act according to the test results of prototypes designed in different parameters and use trial and error method in order to provide the maximum deformation force that the joint shaft can reach until it comes out of the housing in order to meet the request of the OEM companies. The pull-out load test is a customer request, it is determined during the design of the vehicle by the OEM (original product manufacturer) and the ball joint manufacturer is responsible to determine the material and design which meet the minimum pull-out load. The working angle of the tie rod end must be at a correspondingly high degree in order to ensure that passenger cars can easily turn when parked or at low speeds. The new type of tie rod head to be improved within the aim of this project will be designed to provide higher working angles as well as high pull-out loads. In this study, initially it was applied a joint pull-out test to the product obtained from the existing design, then to performed bending and hardness test by removing samples from the existing products, due to the pull-out force is lower than the target force, then to determined new parameters according to the results obtained and to increase the pull-out force using the obtained stress values. It is to determine the appropriate geometry and material by applying analysis to the design optimized with the finite element program (FEA) by making design optimization in different variants by Catia V5 program.

**Keywords:** Chassis, Tie rod, Forging, Pull out test

## İÇİNDEKİLER

|                                                  |           |
|--------------------------------------------------|-----------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....       | ii        |
| TEŞEKKÜR.....                                    | iii       |
| ÖZ .....                                         | iv        |
| ABSTRACT.....                                    | v         |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                           | x         |
| TABLolar LİSTESİ.....                            | xiv       |
| KISALTMALAR .....                                | xv        |
| <b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>                    | <b>1</b>  |
| 1.1 Teorik Ön İnceleme.....                      | 1         |
| 1.1.1 Amaç.....                                  | 3         |
| 1.1.2 Araştırmanın Önemi .....                   | 3         |
| 1.1.3 Literatür Araştırması .....                | 4         |
| <b>BÖLÜM İKİ – TEORİK İNCELEME.....</b>          | <b>10</b> |
| 2.1 Malzemelerin Mekanik Özellikleri .....       | 10        |
| 2.2 Çekme Özellikleri .....                      | 10        |
| 2.2.1 Mühendislik Gerilme-Şekil Değiştirme ..... | 12        |
| 2.2.2 Gerçek Gerilme-Şekil Değiştirme .....      | 15        |
| 2.2.3 Gerilim-Gerinim İlişki Türleri.....        | 19        |
| 2.2.3.1 Tam Elastik.....                         | 19        |
| 2.2.3.2 Elastik ve Tam Plastik.....              | 20        |
| 2.2.3.3 Elastik ve Gerinim Sertleşmesi .....     | 20        |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 2.2.4 Eğme Testi.....                        | 20 |
| 2.2.5 Sertlik .....                          | 21 |
| 2.2.5.1 Brinell Sertlik Yöntemi .....        | 22 |
| 2.2.5.2 Rockwell Sertlik Testi .....         | 23 |
| 2.2.5.3 Vickers Sertlik Testi .....          | 24 |
| 2.3 Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi..... | 25 |
| 2.3.1 Karbon (C).....                        | 25 |
| 2.3.2 Manganez (Mn) .....                    | 26 |
| 2.3.3 Silisyum (Si).....                     | 26 |
| 2.3.4 Kükürt (S).....                        | 27 |
| 2.3.5 Fosfor(P).....                         | 27 |
| 2.3.6 Krom (Cr) .....                        | 27 |
| 2.3.7 Nikel (Ni).....                        | 28 |
| 2.3.8 Molibden (Mo) .....                    | 28 |
| 2.3.9 Vanadyum (V) .....                     | 29 |
| 2.3.10 Niobyum (Nb) .....                    | 29 |
| 2.4 Plastik şekil verme yöntemleri .....     | 29 |
| 2.4.1 Açık Kalıpta Dövme.....                | 30 |
| 2.4.2 Kapalı Kalıpla Hassas Dövme.....       | 32 |
| 2.4.3 Çapaksız Dövme.....                    | 34 |
| 2.4.4 Yığma ve Kafa Şişirme .....            | 35 |
| 2.5 Dövme Kalıpları.....                     | 36 |
| 2.5.1 Kalıp Ayırma Çizgisi.....              | 36 |
| 2.5.2 Eğim .....                             | 37 |
| 2.5.3 Kemer ve Kaburgalar .....              | 37 |
| 2.5.4 İç Köse ve Yarı Çapı .....             | 37 |
| 2.5.5 Çapak.....                             | 37 |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6 MnV Çeliği.....                                       | 38        |
| 2.7 Sonlu Elemanlar Analiz Metodu (FEA).....              | 40        |
| <b>BÖLÜM ÜÇ – BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÇALIŞMALAR.....</b>     | <b>42</b> |
| 3.1 Mevcut Rot Başı Yuvasının Üç Boyutlu Tasarımı .....   | 42        |
| 3.2 Mekanik Montaj .....                                  | 45        |
| 3.3 Kapama Geometrisini Etkileyen Parametreler .....      | 45        |
| 3.4 Uygulanan Kapanma Geometrisi ve Çekme Yüğü. ....      | 45        |
| 3.5 Tasarım Optimizasyonu .....                           | 48        |
| 3.6 Alternatif Rot Başı Tasarımlarının Modellenmesi ..... | 48        |
| 3.7 Eğme Testi Simülasyonu.....                           | 51        |
| 3.8 Gerilme Şekil Değiştirme Diagramı Çizimi.....         | 56        |
| 3.9 Sonlu Elemanlar Çıkma Testi Analizi.....              | 57        |
| <b>BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>             | <b>63</b> |
| 4.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar .....     | 63        |
| 4.2 Rot başı mafsallık çıkma yükü testi.....              | 64        |
| 4.3 Metalografi Çalışmaları.....                          | 65        |
| 4.3.1 Numune Hazırlama.....                               | 65        |
| 4.3.2 Mikro Yapı İnceleme.....                            | 68        |
| 4.4 Sertlik Testi .....                                   | 69        |
| 4.4.1 Test 'in Uygulanışı .....                           | 69        |
| 4.4.2 Sertlik Dönüşüm Hesapları.....                      | 70        |
| 4.5 Eğme Testi.....                                       | 71        |
| 4.5.1 Test 'in Uygulanışı .....                           | 71        |

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR .....</b>                    | <b>74</b> |
| 5.1 Rot Başlı Mafsal Çekme Testi.....                | 74        |
| 5.2 Mikro Yapı İnceleme Sonuçları .....              | 74        |
| 5.3 Sertlik Testi Sonuçları.....                     | 77        |
| 5.4 Çıkma Yüğü Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları..... | 79        |
| 5.4.1 Mevcut Model Analiz Sonuçları .....            | 79        |
| 5.4.2 Model 1 Analiz Sonuçları.....                  | 81        |
| 5.4.3 Model 2 Analiz Sonuçları.....                  | 82        |
| 5.4.4 Model 3 Analiz Sonuçları.....                  | 83        |
| 5.4.5 Model 4 Analiz Sonuçları.....                  | 85        |
| <b>BÖLÜM ALTI – DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....</b>   | <b>87</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                               | <b>89</b> |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Binek araç yönlendirme mekanizması .....                                                                                                                                                                       | 1  |
| Şekil 1.2 Rot başının, çalışma koşullarında etkilendiği kuvvetler .....                                                                                                                                                  | 2  |
| Şekil 1.3 Süspansiyon bağlantı mafsalı oluşturan alt parçalar .....                                                                                                                                                      | 5  |
| Şekil 1.4 Analiz sırasında parçanın sabitleme ve kuvvet uygulama noktası.....                                                                                                                                            | 5  |
| Şekil 1.5 Süspansiyon mafsalı test fikstürü .....                                                                                                                                                                        | 6  |
| Şekil 2.1 Çekme testi (a) Çekme kuvveti uygulanması (1) ve sonuç olarak meydana gelen uzama (2), (b) tipik test numunesi, (c) Çekme testi kurulumu.....                                                                  | 11 |
| Şekil 2.2 Çekme testi şeması (1) Test başlangıcı (2) Kesitte homojen uzama ve daralma (3) Uzamanın sürmesi ve maksimum yüke ulaşma(4)Boyun vermenin başlangıcı ve yükün azalmaya başlaması(5)Kopma(6)Ölçülen son boy ... | 11 |
| Şekil 2.3 Tipik mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafiği .....                                                                                                                                                       | 13 |
| Şekil 2.4 Gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisi .....                                                                                                                                                                   | 16 |
| Şekil 2.5 Log-log ölçeğinde çizilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....                                                                                                                                          | 17 |
| Şekil 2.6 Gerilim-gerinim arasındaki ilişkinin üç farklı sınıflandırılması (a) Süper elastik (b) Elastik ve süper plastik (c) Elastik ve gerinim sertleşmesi.....                                                        | 19 |
| Şekil 2.7 Eğilme halinde çubuk üzerinde gerilme dağılımı .....                                                                                                                                                           | 21 |
| Şekil 2.8 Brinell sertlik test uygulama şeması .....                                                                                                                                                                     | 22 |
| Şekil 2.9 Rockwell sertlik test uygulama şeması .....                                                                                                                                                                    | 23 |
| Şekil 2.10 Vickers sertlik test uygulama şeması .....                                                                                                                                                                    | 24 |
| Şekil 2.11 Açık kalıpta dövme .....                                                                                                                                                                                      | 30 |
| Şekil 2.12 Açık kalıpta dövme işleminde ideal koşullarda iş parçasının homojen deformasyonu (1) Orijinal boy ve çaptaki başlangıç durumu, (2) kısmi sıkıştırma, (3) Son şekil.....                                       | 31 |
| Şekil 2.13 Açık kalıpta dövme işleminde fiçilaşma olarak adlandırılan durumu gösteren silindirik bir parçanın gerçek deformasyonu (1) Başlangıç, (2) Kısmi şekil değiştirme, (3) Son şekil .....                         | 31 |
| Şekil 2.14 Kapalı kalıp dövme işlem sırası (1) Ham parça ile temasın hemen öncesi, (2) Kısmi sıkıştırma, (3) Kalıp plakaları arasındaki boşlukta çapak oluşmasına neden olan son kalıp kapanışı.....                     | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.15 Tane akışı karşılaştırılması: (a) yüzey işlemi yapılmış sıcak dövme parça<br>(b) Dolu bloktan talaş kaldırma ile üretilmiş parça.....                                                                                                                                                   | 33 |
| Şekil 2.16 Kesit görünümleri (a) Geleneksel izli dövme (b) Hassas dövme .....                                                                                                                                                                                                                      | 34 |
| Şekil 2.17 Çapaksız dövme (1) ham parça yüklemesi (2) Sıkıştırma (3) Alt kalıbın<br>itmesi ile bitmiş parçayı kalıptan ayırma .....                                                                                                                                                                | 35 |
| Şekil 2.18 Cıvata veya benzeri parçaların baş kısmına şekil veren yığma<br>operasyonu. Üretim çevrimi yukarıdaki gibidir. (1) Tel dayama aparatına<br>sürülür; (2) Çeneli kalıp parça üzerine kapatılır ve dayama çekilir; (3)<br>Zimba ileri hareket eder ve (4) kafaya nihai şekli verilir. .... | 35 |
| Şekil 2.19 Dövmede geleneksel bir kapalı kalıp için terminoloji .....                                                                                                                                                                                                                              | 36 |
| Şekil 2.20 Radyal gövdenin dövme işlem aşamaları .....                                                                                                                                                                                                                                             | 39 |
| Şekil 2.21 Farklı tasarıma sahip olan rot başları .....                                                                                                                                                                                                                                            | 40 |
| Şekil 2.22 Üç boyutlu ağ elemanlar (a) Üçgen prizma (b) Dörtgen prizma .....                                                                                                                                                                                                                       | 41 |
| Şekil 3.1 Rot başı bileşenleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 42 |
| Şekil 3.2 Radyal yatağın tasarım aşamaları .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 43 |
| Şekil 3.3 Radyal gövde işleme yüzeyler .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 44 |
| Şekil 3.4 İşlenmiş mafsal mil .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 44 |
| Şekil 3.5 Plastik yatak 3B modeli .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 44 |
| Şekil 3.6 Dört farklı versiyonun farklı duvar kalınlıkları ve yükseklikleri.....                                                                                                                                                                                                                   | 46 |
| Şekil 3.7 Mevcut model üzerinde mafsal mili yatma açısı kontrolü.....                                                                                                                                                                                                                              | 47 |
| Şekil 3.8 Yuva duvarının pres ile kapatılma görseli .....                                                                                                                                                                                                                                          | 47 |
| Şekil 3.9 Uygulanan deplasmanı gösteren analiz modeli .....                                                                                                                                                                                                                                        | 48 |
| Şekil 3.10 Mafsal çıkma yükünü etkileyen ölçüler.....                                                                                                                                                                                                                                              | 49 |
| Şekil 3.11 Mevcut tasarım ölçüleri .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 49 |
| Şekil 3.12 Oluşturulan tasarım varyasyonları .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 51 |
| Şekil 3.13 Eğme testi sonucu elde edilen kuvvet şekil değiştirme eğrisi.....                                                                                                                                                                                                                       | 52 |
| Şekil 3.14 Eğme testi simülasyon datası .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 53 |
| Şekil 3.15 1000 N kuvvette numunede meydana gelen 1.6 mm şekil değişimi .....                                                                                                                                                                                                                      | 54 |
| Şekil 3.16 K ve n değerlerinin tespit edildiği gerçek eğriye yakın elde edilen kuvvet<br>şekil değiştirme eğrileri .....                                                                                                                                                                           | 54 |
| Şekil 3.17 K ve n değerinin tespit edildiği gerçek eğriye en yakın elde edilen gerilme<br>şekil değiştirme eğrisi.....                                                                                                                                                                             | 55 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.18 Gerilme-şekil değiştirme diyagramı .....                                                                          | 56 |
| Şekil 3.19 Analiz uygulanan dört farklı varyantın üst üste getirilmiş verisi.....                                            | 58 |
| Şekil 3.20 Analiz edilen rot başı yuvası 3B verisi .....                                                                     | 58 |
| Şekil 3.21 Analiz için oluşturulan işlem basamak ağacı.....                                                                  | 59 |
| Şekil 3.22 Sonlu elemanlar analizi temas tipi tanımlama .....                                                                | 60 |
| Şekil 3.23 Rot başı mesh görünümü .....                                                                                      | 60 |
| Şekil 3.24 Rot başı yuvası için mesh boyutunu girdiğimiz arayüz.....                                                         | 61 |
| Şekil 3.25 Parçanın sabitlendiği flanş yüzeyi .....                                                                          | 61 |
| Şekil 3.26 Mafsal mili küresine yer değiştirme kuvveti uygulanan yüzey .....                                                 | 62 |
| Şekil 4.1 Rot başı mafsal çıkma yükü testi .....                                                                             | 64 |
| Şekil 4.2 Rotun kesim öncesi görseli .....                                                                                   | 65 |
| Şekil 4.3 Metal kesme makinesinde rot 'un kesilmesi.....                                                                     | 65 |
| Şekil 4.4 Rottan kesilen parçalar.....                                                                                       | 66 |
| Şekil 4.5 Mikroyapı ve sertlik testi için kalıba alınacak numuneler a) Deforme olmamış numune, b) Deforme olmuş numune ..... | 66 |
| Şekil 4.6 Bakalit kalıp .....                                                                                                | 67 |
| Şekil 4.7 Kalıptan çıkan numuneler .....                                                                                     | 67 |
| Şekil 4.8 Kalıba alınan numunenin zımparalama işlemi.....                                                                    | 68 |
| Şekil 4.9 Mikro vickers sertlik ölçme cihazı.....                                                                            | 69 |
| Şekil 4.10 Batıcı uç açısı ve bıraktığı izin boyutu .....                                                                    | 70 |
| Şekil 4.11 Üç noktalı eğme deneyi numune 3B datası.....                                                                      | 72 |
| Şekil 4.12 Eğme numunesi çıkarılan kısım.....                                                                                | 73 |
| Şekil 4.13 Test öncesi eğme numunesi .....                                                                                   | 73 |
| Şekil 4.14 Test sonrası eğme numunesi .....                                                                                  | 73 |
| Şekil 5.1 Test sonucunda elde edilen çıkma yükü grafiği.....                                                                 | 74 |
| Şekil 5.2 Deforme olmamış 20X objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü .....                | 75 |
| Şekil 5.3 Deforme olmuş 20x objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü.....                   | 75 |
| Şekil 5.4 Deforme olmamış 50X objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü .....                | 76 |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.5 Deforme olmuş 50x objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü..... | 76 |
| Şekil 5.6 Numune inceleme yüzeyi.....                                                                      | 77 |
| Şekil 5.7 Sertlik ölçme işlemi uygulanan numuneler ve sertlik ölçülen bölgeler.....                        | 78 |
| Şekil 5.8 Deforme olmamış numuneden belli aralıklar ile ölçülen sertlik değerleri .                        | 78 |
| Şekil 5.9 Deforme olmuş numuneden belli aralıklar ile ölçülen sertlik değerleri .....                      | 79 |
| Şekil 5.10 Mevcut model ölçüleri .....                                                                     | 80 |
| Şekil 5.11 Mevcut tasarım analizinde ölçülen gerilme değerleri.....                                        | 80 |
| Şekil 5.12 Model 1 ölçüleri.....                                                                           | 81 |
| Şekil 5.13 Model 1 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri .....                                    | 82 |
| Şekil 5.14 Model 2 ölçüleri.....                                                                           | 82 |
| Şekil 5.15 Model 2 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri .....                                    | 83 |
| Şekil 5.16 Model 3 ölçüleri.....                                                                           | 84 |
| Şekil 5.17 Model 3 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri .....                                    | 84 |
| Şekil 5.18 Model 4 ölçüleri.....                                                                           | 85 |
| Şekil 5.19 Model 4 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri .....                                    | 86 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.1 Sonuçların karşılaştırılması.....                                        | 6  |
| Tablo 1.2 Dövme kuvvetleri .....                                                   | 7  |
| Tablo 2.1 Bazı malzemelerin elastisite modülleri, (E).....                         | 14 |
| Tablo 2.2 Bazı metallerin K ve n değerleri .....                                   | 18 |
| Tablo 2.3 Yaygın olan Rockwell sertlik ölçęi .....                                 | 23 |
| Tablo 2.4 MnV malzemenin hadde sonrası elde edilen mekanik özellikleri .....       | 38 |
| Tablo 2.5 DIN MnV malzemenin kimyasal kompozisyonu %ağırlık.....                   | 38 |
| Tablo 3.1 Rot Başı Gövdesi Parametrik Ölçüleri .....                               | 50 |
| Tablo 3.2 Farklı K ve n değerleri için gerçek ve Analiz çökme miktarları .....     | 56 |
| Tablo 4.1 MnV malzemesi mekanik özellikleri.....                                   | 69 |
| Tablo 4. 2 Östenitik olmayan çelikler için yaklaşık sertlik dönüşüm çizelgesi..... | 71 |
| Tablo 5.1 Yapılan analizler sonucunda elde edilen değerler .....                   | 86 |

## KISALTMALAR

|       |                                             |
|-------|---------------------------------------------|
| AR-GE | : Araştırma Geliştirme                      |
| ° C   | : Santigrad Derece                          |
| CAD   | : Computer Aided Design                     |
| CAE   | : Computer Aided Engineering                |
| OEM   | : Original Product Manufacturer             |
| M.Ö   | : Milattan Önce                             |
| Dk    | : Dakika                                    |
| kN    | : Kilonewton                                |
| mm    | : Milimetre                                 |
| mm/sn | : Milimetre/Saniye                          |
| mm/dk | : Milimetre/Dakika                          |
| MPa   | : Megapascal                                |
| POM   | : Polioksimetilen                           |
| r     | : Radüs                                     |
| sn    | : Saniye                                    |
| µm    | : Mikron                                    |
| %     | : Yüzde                                     |
| ASTM  | : American Society for esting and Materials |
| BSD   | : Brinell sertlik değeri                    |
| RSD   | : Rockwell sertlik değeri                   |
| VSD   | : Vickers sertlik değeri                    |
| KSD   | : Knoop sertlik değeri                      |
| +P    | : Çökelme sertleşmesi                       |
| CNC   | : Computer Numerical Control                |
| FEA   | : Finite Element Analysis                   |
| FE    | : Finite Element                            |

## BÖLÜM BİR

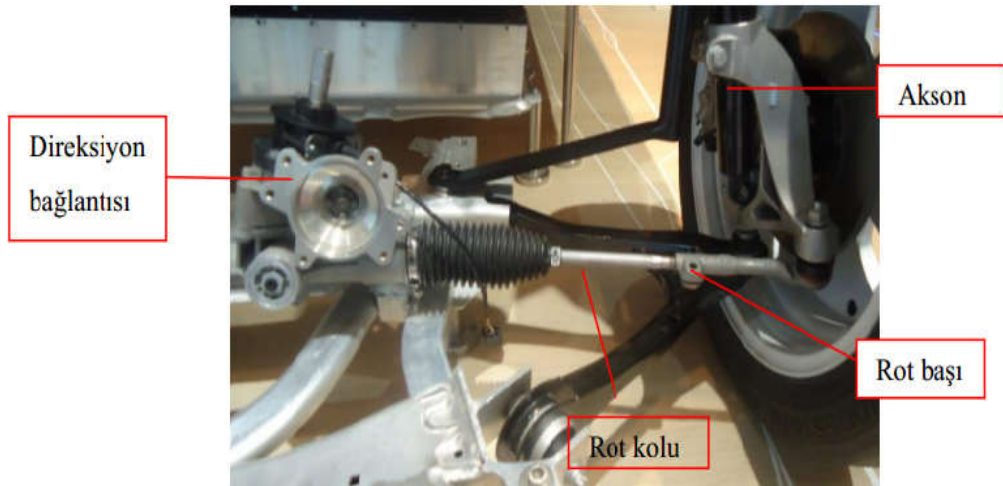
### GİRİŞ

#### 1.1 Teorik Ön İnceleme

Binek araçlarda kullanılan rotlar, aracın direksiyon sisteminin bir parçasıdır. Rotun en önemli görevi, direksiyonu çevirdiğimizde oluşan ve direksiyon mili ile yönlendirme sistemine iletilen doğrusal hareketi tekerleğin bağlı olduğu aksona iletmesidir (Gawande ve Vithalkar, 2015).

Rot, rot başı ve rot kolu olarak iki ana parçadan oluşmaktadır. Aracı yönlendirmek için, direksiyon dişlisinden gelen eksenel kuvvet rot kolunu etkiler ve oda bu kuvveti rot başına iletir. Rot başı ise direksiyon sisteminden gelen kuvveti aksona ileterek, aracın tekerleğinin sağa ve sola dönmesini sağlayarak aracın yönlenmesini gerçekleştirmektedir (Park, 2014).

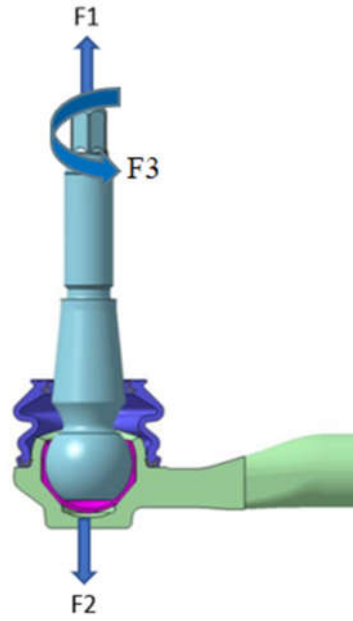
Şekil 1.1’de görülen rot kolu ve rot başı dişli yardımıyla birbirine monte edilir ve rotun toplam boyu ayarlanabilir özelliktedir (Patil, Chavan ve Kavade, 2013).



Şekil 1.1 Binek araç yönlendirme mekanizması (Pehlivan ve Özsoy, 2015)

Binek araçlarda rotlar yönlendirme sisteminde görevlerini yaparken statik, dinamik ve yatak yüklerine maruz kalmaktadır. Rota etki eden statik yükler, yatay ve dikey yönde etki ederler (Taş ve ark., 2016).

Rot başlarının maruz kaldığı dikey statik yük, en önemli statik yüklerden biridir ve otomotiv endüstrisindeki büyük otomobil üreticileri tarafından önemli bir özellik olarak belirlenmiştir. Araçlar çukur ve tümseklerden geçerken rot başı şekil 1.2’de gösterildiği gibi  $F_1$  ve  $F_2$  yüklerine, virajlarda ise  $\pm F_3$  dönme momentine ve ivmelenme yüklerine maruz kalmaktadır. Ancak  $F_3$  dönme momenti küresel mafsalin çalışma torkunu belirleyen ve ayrıca analiz edilen başka bir müşteri kriteridir (Kutlak, 2015).



Şekil 1.2 Rot başının, çalışma koşullarında etkilendiği kuvvetler (Kişisel arşiv, 2022)

Spesifik olarak,  $F_1$  çekme kuvveti, rot başının bir parçası olan küresel mafsali milini yatağın dışına çıkmaya zorlayarak rot başını çalışmaz hale getirmektedir. Mafsal milinin rot yuvasından çıkabileceği maksimum kuvvet ana sanayi (OEM) şirketleri tarafından belirlenir ve bu yükü sağlamak için günümüzün rot başı üreticileri değişen parametrelerle tasarlanmış prototiplerin test sonuçlarını baz alarak deneme yanılma yöntemi kullanmaktadır (Gürsel, 2011).

Bilyeli mafsallar direksiyon sisteminde de kritik işleve sahiptir ve bir güvenlik parçası olarak tanımlanır. Bu bileşenler, sürüş sırasında farklı türde yüklere maruz kalmaktadır ve bileşenin yeterince güvenli olduğundan emin olunmalıdır. Yüksek dayanımlı bir mafsal elde etmek için yapılması gereken bazı testler vardır. Testlerden biri mafsal milinin çıkma testidir (Eren ve Rutci, 2018).

### **1.1.1 Amaç**

Otomotiv şasi bileşenlerinin, araç sürüşü esnasında maruz kalacağı kuvvetlere karşı dayanıklı olması beklenmektedir. Dolayısı ile geliştirilecek rot başında statik ve dinamik zorlamalara ve ani darbelere karşı maksimum sürüş güvenliği sağlanması amaçlanmaktadır. Günümüzde elektrikli araç üretiminin yaygınlaşması beraberinde araç toplam ağırlığı artışına neden olmuş ve bu da şasi komponentlerine gelen yüklerin artmasına sebep olmuştur. Bunun yanı sıra geliştirilecek rot başında, sıvama kapağına ihtiyaç duyulmayan, mafsal mili ve plastik yatağın presleme yöntemi ile yatağa montajlanacağı bir rot başı gövdesi tasarlanacaktır. Bu sayede tasarlanan rot başı ana sanayi firmaları tarafından istenilen kritik çekme kuvvetini yekpare gövde ve optimize edilen tasarım sayesinde kolaylıkla sağlaması hedeflenmektedir. Montaj için gerekli parça sayısının düşüşü ile maliyet düşüşü hedeflenmektedir. Bu tezin amaçlarından biri, rot başı gövdesinin sıvama operasyonunun simülasyon modelinin sonlu elemanlar programı ile oluşturulmasıdır. Ayrıca yapılan modelleme sonlu elemanlar programı ile çözümlenerek, tasarımın ulaşacağı maksimum çekme kuvvetinin hesaplanmasıdır. Sonlu elemanlar metodu ile elde edilen sonuçların yapılacak testler ile karşılaştırılması sonucunda analiz metodunun yetkinliğinin kanıtlanmasıdır. Hedeflenen çıkma kuvveti 125% kN olarak belirlenmiştir. Diğer bir tasarım kriteri olan çalışma açısı minimum  $90^{\circ}$  dir.

### **1.1.2 Araştırmanın Önemi**

Otomotivde kullanılan rotlarının yüksek çalışma açlarına ulaşarak, yüksek manevra kabiliyetli direksiyon elemanlarının geliştirilmesinin yanı sıra üretim şeklini presleme metodu ile uygulayarak parça sayısının azaltılıp, montaj süresinin ve maliyetin azaltılmasıdır.

Bu yöntemde ana sanayi şartı olan çekme testine gerek kalmayıp test maliyetin azaltılması da önem arz etmektedir. Çekme yükünü karşılamak için tasarım parametrelerini en uygun hale getirecek sonlu elemanlar analiz metodu geliştirilmesi, test sonuçları ile doğrulanmasının sağlanması sonraki yapılacak olan tasarımlar içinde referans olacak ve tasarım maliyetlerinde azalma gerçekleşecektir.

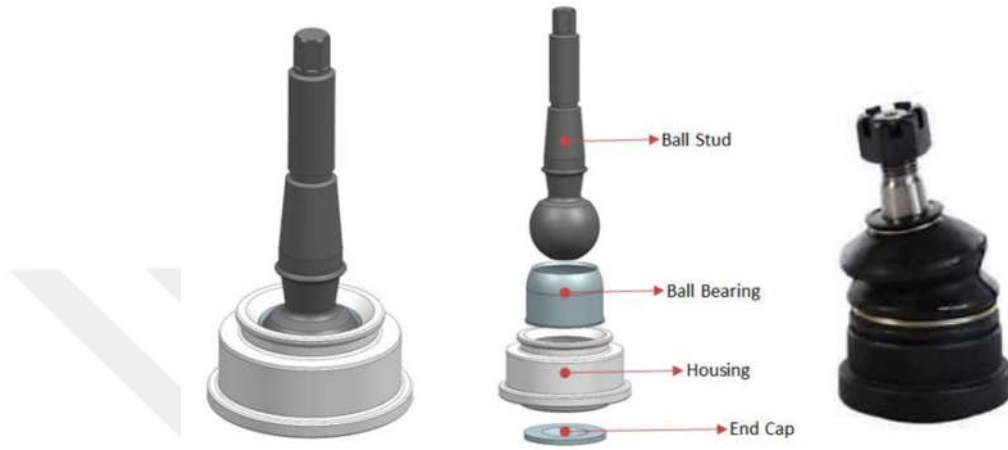
### ***1.1.3 Literatür Araştırması***

Rot başı, sürüş güvenliği açısından doğrudan ve hayati öneme sahip bir direksiyon mekanizmasının en temel parçalarından biridir. Bu parçanın ana işlevi, direksiyon bağlantısından gelen yönlendirmeyi rot kolu vasıtasıyla mafsala aktarmaktır. Bu çalışmada, minibüs tipi bir araç için bir rot başı parçasının yapısal analizi, gövde, mafsal ve yatağın sonlu eleman FE modellemesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, literatürdeki önceki çalışmalardan farklı olarak, bağlantı çubuğu ucunun her bir bileşeni FE modeline dahil edilmiş ve parçalar arasındaki temas etkileşimleri aracılığıyla tam bir montaj analiz edilmiştir. Eklem montajı için analizler, farklı olası bağlantı ucu yönelimleri için gerçekleştirilmiş ve bu modelleme yaklaşımıyla her bir bileşenin gerilim değişimleri ve deformasyon özellikleri, farklı operasyonel yükleme koşulları için araştırılmıştır (Pehlivan ve Özsoy, 2015).

Rot hasarını konu alan diğer bir çalışmada 2006'da A.H. Falah SUV araçların rot başlarını çalışmaz hale getiren hasar problemlerini araştırmış ve parça 30.000 km de 2 yıl dolmadan hasara uğramış bu da ülkemizde de otomobil parçaları için belirlenmiş 2 yıl veya 60000 km garanti şartı için yeterli olmamıştır (Falah, 2007).

Diğer bir çalışmada benzer yüklere maruz kalan parça olan süspansiyon bağlantı elemanının mafsal çıkma kuvveti FEA metodu ve deneysel çalışma ile incelenmiştir. Mafsal çıkma yükü ANSYS sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiş ve sonrasında sonuçlar gerçek çıkma testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 1.3'te süspansiyon parçasını oluşturan parçalar görülmektedir. Bu parçalardan housing (mafsal yuvası) mafsalı oluşturan ve diğer parçaları bir arada tutan ana gövde, ball stud (mafsal mili) sistemde yer alan karşıt parçaya geçen ve kuvvetin yoğun olarak geldiği parça, sealing

boot (toz lastiği) mafsalı dışarıdan gelen tozların ve diğer atıkların sisteme girmesi önleyen kauçuk parça ve ball bearing (plastik yatak) ise aşınmayı en aza indirmek, sürtünmeyi azaltmak ve daha iyi titreşim sönümlemesi sağlayan polimer malzemeden yapılmış parçadır (Eren ve Rutci, 2018).



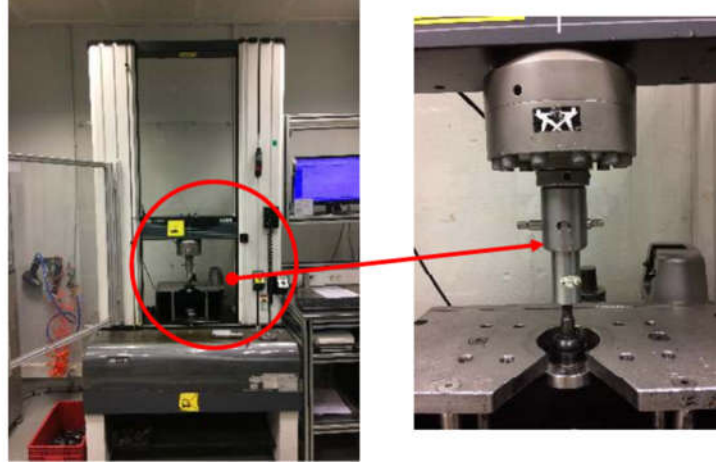
şekil 1.3 Süspansiyon bağlantı mafsalı oluşturan alt parçalar (Eren ve Rutci, 2018)

Çalışmada CAD model, NX Unigraphics programında tasarlanmış ve ANSYS Workbench programına aktarılmış. Daha sonra parçalara AISI1040, AISI5140 ve POM Delrin malzemeleri atanmıştır. Ağ ataması yapıldıktan sonra şekil 1.4'te görünen A noktasından sabitlenmiş ve mafsal üzerinde bulunan B noktasından ise çekme kuvveti uygulanmıştır.



şekil 1.4 Analiz sırasında parçanın sabitleme ve kuvvet uygulama noktası (Eren ve Rutci, 2018)

Daha sonra bu süspansiyon mafsalına aynı sınır koşullarında şekil 1.5’te görünen fikstürde mafsal çıkma testi uygulanmış ve reaksiyon kuvveti elde edilmiştir.



Şekil 1.5 Süspansiyon mafsalı test fikstürü (Eren ve Rutci, 2018)

Tablo 1.1’de görüldüğü gibi deneysel test sonucu çıkma kuvveti olarak 39347 N, sonlu elemanlar analiz sonucu ise 38757 N elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynıdır. Sapma yüzdesi 1,49’dur ve kabul edilebilir bir değerdir.

Tablo 1.1 Sonuçların karşılaştırılması

|                    | Deneysel Test Sonucu | FEA Analiz sonucu | %Hata |
|--------------------|----------------------|-------------------|-------|
| Pull Out Force (N) | 39347                | 38757             | 1,49  |

Bu çalışma sanal analiz yöntemlerinin sonuçlarının, fiziksel prototip aşamasından önce sağlam rotül tasarımının nasıl yapılacağı konusunda yol göstermiştir (Eren ve Rutci, 2018).

Diğer bir çalışmada vanadyum alaşımlı 30MnVS6 malzeme çeliğin soğuk şekillendirmede işleminde kullanımı isimli çalışmadır. Isıl işlem uygulanmadan ürün şekillendirme olasılığı üretim maliyetlerini düşürecek, üretim sürelerini kısaltacak ve pazarda daha fazla rekabet gücü yaratacak olduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada ısıtıl işlem uygulanmamış soğuk çekilmiş cıvatalar için, küreselleşme, su verme ve

temperleme süreçleri olmaksızın 700 MPa çekme dayanımı seviyeleri hedefleyen bir soğuk dövme bağlantı elemanı geliştirilmiştir. Çelik bileşimi, kontrollü haddeleme ve soğutma koşulları altında bir perlit-ferrit yapısı elde eden küçük Nb, V ve Ti ilaveleri ile Mn'ye bağlanmış düşük bir karbonlu bir çeliktir. ISO 898-1'e göre ısıtılma işlem ve performans 8.8 gereksinimlerini karşılayan mevcut cıvatalar SAE 10B30 çelikten üretilmiş ve SAE 10B30 malzemedan üretilen M16 cıvatalar ısıtılma işlem sürecinden geçerken, DIN 30MnVS6 çelikten yapılmış cıvatalara ısıtılma işlem uygulanmamıştır. Her ikisinde de aynı şekillendirme presini ve aynı kalıp kullanılmış ve süreçteki tek değişiklik SAE 10B30 çelik ürünleri için ısıtılma işlemin eklenmesi olmuştur. 30MnVS6 çeliğinin yapısı martenzitten değil ferrit artı perlit oluşmakta olduğunu gözlemleyip, yapı içerisinde karbür ve vanadyum nitrürün yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan ve östenit içinde neredeyse tamamen çözüldüğünden bahsetmiş ve bu nedenle tane boyutu kontrolü üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Yüksek konsantrasyonlarda Manganezin (Mn) varlığı, katı çözelti sertleşmesi elde etmek ve mekanik mukavemet, sertlik ve süneklik kombinasyonunu desteklemek için gerekli olduğunu söylemiştir. Dövme işlemi için DIN 30MnVS6 çeliğinin SAE10B30'a kıyasla daha yüksek dövme kuvvetine ihtiyaç duyduğu ortaya koymuştur. Tablo 1.2'de her iki malzemeyi dövme için gerekli kuvvetler verilmiştir.

Tablo 1.2 Dövme kuvvetleri

| Malzeme     | Dövme kuvveti(kN) |         |         |         |
|-------------|-------------------|---------|---------|---------|
|             | 1.aşama           | 2.aşama | 3.aşama | 4.aşama |
| DIN 30MnVS6 | 73                | 196     | 17      | 10      |
| SAE10B30    | 34                | 93      | 10      | 6       |

Cıvata üretimi için dövme test sonuçlarını karşılaştırarak, DIN 30MnVS6 mikro alaşımlı karbon çeliği kullanılıyorsa, kuvvetin yaklaşık iki katı gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Metalografik analizde, mikro alaşımlı çeliğin DIN 30MnVS6'nın martenzitlik bir mikro yapı göstermediğini, bunun yerine ferritik perlit olduğunu görülmüştür. Malzemeyi 30MnVS6 olarak değiştirme durumundaki avantajların, üretim zamanının kısalması daha temiz çevre dostu üretim, ısıtılma işlem prosesinin ortadan kaldırılması, dekarburizasyon riskinin ortadan kaldırılması, kaplama ve yüzey

işlemleri uygulandığında hidrojen giderme işlemine gerek duyulmamasından bahsetmiştir. Vanadyum alaşımlı çeliklerin ısıtılma işlemi ihtiyacını ortadan kaldıran tek soğuk şekillendirme işlemi ile mekanik özellikleri karşıladığını ortaya koymuştur. Isıl işlem sürecinin sona ermesinin kazanımları bahsedildiği gibi kuruluşlara, üretim sürecinde ürünleri ve teknolojik kazanımlar için rekabet gücü yarattığını kanıtlamıştır (Da Maia, Futami ve Oliveira, 2018).

Mangan-vanadyum çeliği konu alan diğer bir makalede dövme sıcaklığından kontrollü soğutmanın amacı mevcutta ısıtılma işlemi ile elde edilebilen istenilen mekanik özellikleri, ısıtılma işlemi prosesi olmadan 30MnVS6 malzemesi ile elde edilmesi konu alınmıştır. Geleneksel teknolojinin kontrollü soğutma ile değiştirilmesi, üretim maliyetlerinde önemli bir tasarruf sağlamıştır. Deneyin bir parçası olarak C45 çeliği, yüksek kükürt içeriğine sahip bir vanadyum mikro alaşımlı çelik olan 30MnVS6 çeliği ile değiştirilmiştir. Bu çeliğin seçilmesinin nedeni, aynı zamanda, gerekli mekanik özelliklerin elde edilmesine katkıda bulunan çöktürme sertleşmesi olasılığıydı. Dövme sıcaklığına kadar ısıtılma sırasında, vanadyum, ostenitin katı çözeltisi içinde çözünmüş ve soğutma sırasında ise ince V (C, N) çöktürleri şeklinde çökelmiştir. Bu çökelti hem pre-ötektoid ferrit hem de perlitik ferrit oluşmasını sağlamıştır. Malzemede bulunan yüksek kükürt konsantrasyonlarının varlığı, dövme parçaların işlenebilirliğini artırır (Jirkova, Masek, Pilecek, Vancura ve Vorel, 2015).

Çözültideki mikro alaşımların, mikroyapının ve özelliklerinin ortaya çıkarılmasında etkisi ve önemi büyüktür. Ferrit kafesinin dayanımını artırmasının yanında, dönüşüm sıcaklığını düşürürler ve ferrit veya beynit oluşumunun önüne geçerler. Bütün alaşımlar beynit oluşumunu engellerler ve sertleşebilirliği tüm yapı boyunca dağıtırlar (Sage, 1992).

Diğer bir çalışmada rot başının montajlandıktan sonra kapama farklı bir deyişle sıvama kuvvetinin montaj kalitesini etkilediğinden bahsedilmiştir. Rot başına plastik yatağının istenen torkları elde edecek şekilde pres kuvveti uygulanması gerektiğinden bahsetmiş, gereğinden fazla uygulanan pres baskı kuvveti duvar kenarlarında çatlak oluşturacağından bahsetmiştir. Bu istenmeyen durumu önlemek için tasarlanan şekil

ve malzemeye uygun sıvama mukavemeti seçimine başvurmuştur. Ayrıca çelik malzeme için gerekli olan kuvvetin 10-30 kN, alüminyum yataklar için ise 10-18 kN olacağından bahsetmiştir (Taş, 2017).



## **BÖLÜM İKİ**

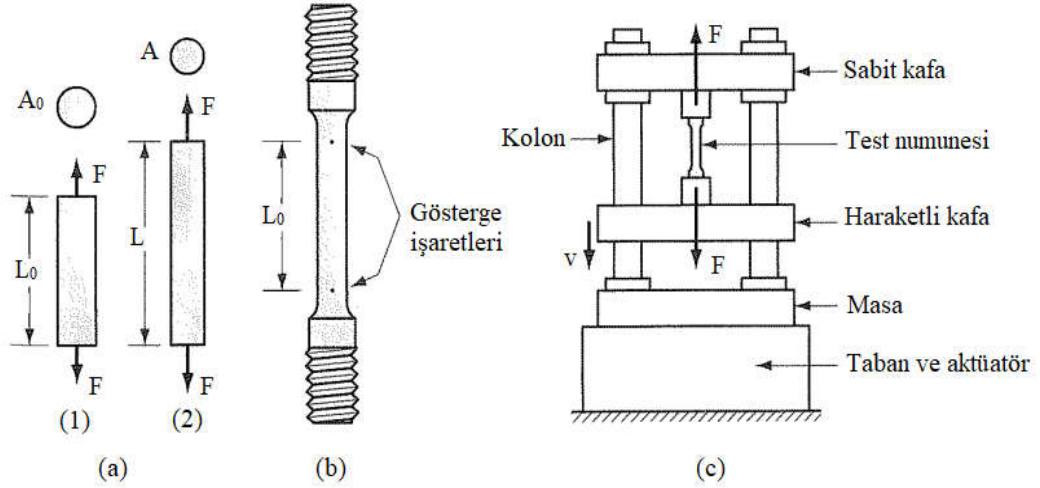
### **TEORİK İNCELEME**

#### **2.1 Malzemelerin Mekanik Özellikleri**

Çoğu malzeme, alüminyumdan üretilmiş uçak parçası veya çelik malzemeden üretilmiş otomobil şasi parçası örneğinde olduğu gibi kuvvet veya yük altında çalışırlar. Böyle durumlarda parçaların hasara uğramayacak şekilde veya büyük deformasyon oluşturmayacak şekilde malzeme özelliklerinin dikkate alınarak tasarlanması ve üretilmesi gerekir. Kullanılacak ürünlerin malzemesinin mekanik özellikleri, hassas bir şekilde tasarımının yapılması ve parçanın gerçek çalışma koşullarını sağlayan laboratuvar testleri ve deneyleri ile tayin edilir. Burada yük tipi, maruz kalma süresi ve çevre koşulları gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Uygulanan yükün büyüklüğü sabit veya zamana bağlı değişken, çeşidi ise çekme, basma veya kayma olabilir (Callister, 2009).

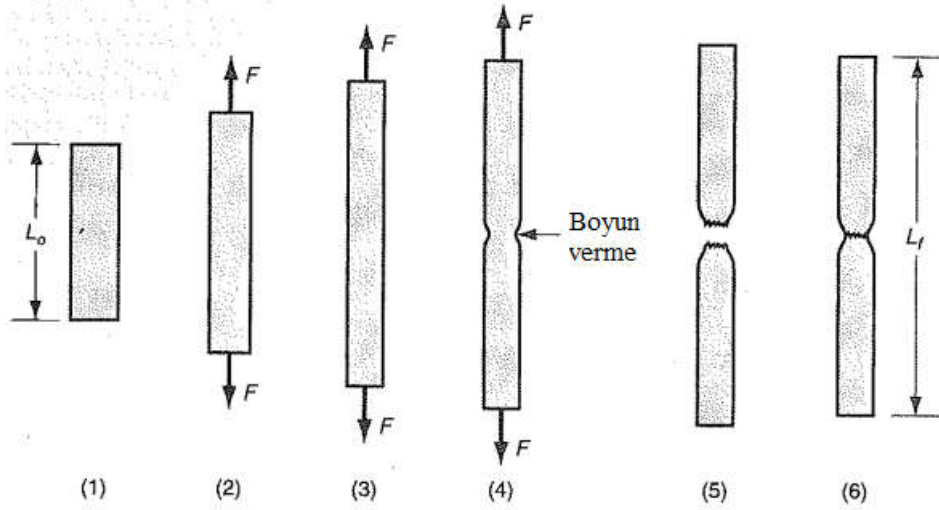
#### **2.2 Çekme Özellikleri**

Çekme testi gerilme-şekil değiştirme ilişkisini incelemek için metalik malzemelerde uygulanan en yaygın yöntemdir. Testte şekil 2.1 (a) 'da gösterildiği gibi numunenin çapını küçültürken boyunun uzamasına neden olur. Test numunesi ASTM standartlarına göre hazırlanır ve test uygulanır. Çekme tipik numunesi ve genel kurulumu sırası ile Şekil 2.1 (b) ve (c)'de gösterilmektedir (Groover, 2007).



Şekil 2.1 Çekme testi (a) Çekme kuvveti uygulanması (1) ve sonuç olarak meydana gelen uzama (2), (b) tipik test numunesi, (c) Çekme testi kurulumu (Groover, 2007)

Başlangıçta test numunesinin ilk uzunluğu  $L_0$  ve  $A_0$  ilk alanına sahiptir. Ölçüm boyu noktası arasındaki uzunluk ve numunenin test 'ten sonraki  $A$  alanı ölçülür. Test sırasında numune şekil 2.2'de gösterildiği gibi gerilir ardından şekil 2.2 (4) boyun verir ve daha sonrasında ise şekil 2.2 (5) kopma gerçekleşir.



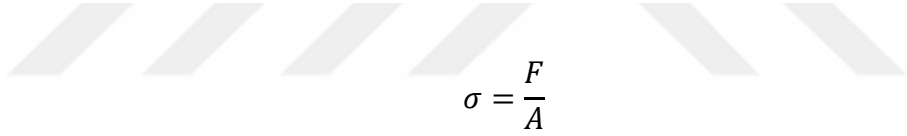
Şekil 2.2 Çekme testi şeması (1) Test başlangıcı (2) Kesitte homojen uzama ve daralma (3) Uzamanın sürmesi ve maksimum yüke ulaşma (4) Boyun vermenin başlangıcı ve yükün azalmaya başlaması (5) Kopma (6) Ölçülen son boy (Groover, 2007)

Daha sonra yük ve numunenin uzunluğundaki değişiklik gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemek için gereken verileri elde etmek için test ilerledikçe kaydedilir. İki farklı türde gerilim-şekil değiştirme eğrisi vardır. Bunlardan biri Mühendislik gerilim-şekil değiştirme diğeri ise gerçek gerilim şekil değiştirmedir. Birincisi tasarımda daha önemliyken ikincisi ise imalatda daha önemlidir (Groover, 2007).

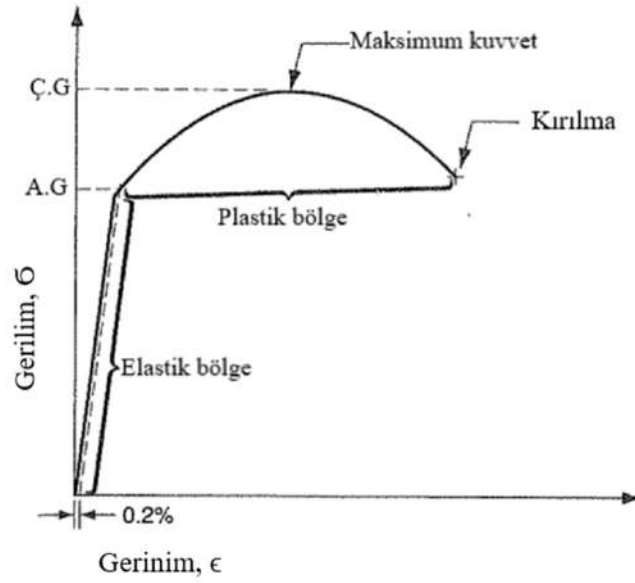
### 2.2.1 Mühendislik Gerilme-Şekil Değiştirme

Numuneye uygulanan yükü numunenin ilk kesit alanına bölerek mühendislik gerilmesi; yine aynı numune üzerinde belirlenen iki nokta arasındaki bağıl artış ölçülerek mühendislik şekil değişimi hesaplanır. Bu hesaplanan değerler genelde tasarım aşamasında kullanıldığı için tasarım mühendisleri tarafından önemlidir.

Metalik bir çekme numunesinin çekme testinden elde edilen mühendislik gerilme şekil değiştirme eğrisi şekil 2.3'te gösterilmektedir. Eğrinin herhangi bir noktasındaki mühendislik gerilimi, başlangıç kesit alanına bölünen kuvvet olarak tanımlanır.


$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Burada  $\sigma$  mühendislik gerilmesi, F Testte uygulanan kuvveti, A ise numunenin orijinal alanı mm<sup>2</sup> cinsinden ifade eder.



Şekil 2.3 Tipik mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafiği (Groover, 2007)

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Herhangi bir noktadaki mühendislik şekil değişimi “e” tanımlamakta olup birimi mm/mm olacak şekilde birimsizdir. Denklem 2.2’deki L son boy olup  $L_0$  ise ilk boy ölçüsüdür.

Şekil 2.3 ‘deki gerilim-şekil değiştirme ilişkisi iki bölgeye sahiptir ve iki ayrı davranış biçimi gösterir. Bunlar (1) Elastik, (2) Plastik bölgelerdir. Elastik bölgede gerilim ile şekil değiştirme arasındaki ilişki lineerdir ve malzeme yük serbest bırakıldığında ilk pozisyonuna dönerek elastik davranış sergiler. Bu ilişki denklem (2.3)’teki Hooke kanunu ile tanımlanır;

$$\sigma_e = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

Burada E elastisite modülüdür ve birimi MPa malzemenin doğal sertliğinin ölçüsüdür. Her malzeme için farklı bir değeri olan bir orantı sabitidir. Lineer ilişkide gerilme arttıkça bir süre sonra malzemenin akmaya başladığı bir noktaya ulaşır.

Malzemenin bu akma noktası lineer bölgenin sonundaki eğim değişikliği ile tanımlanır. Akma başlangıcını bir test verisi grafiğinde görmek genelde zor olduğu için lineer çizgiye 0,2%'lik paralel bir değişim çizgisinin eğriyi kestiği nokta olarak tanımlanır (Groover, 2007).

Tablo 2.1 Bazı malzemelerin elastisite modülleri, (E) (Groover, 2007)

| Malzeme                        | Elastisite modülü, MPa, E |
|--------------------------------|---------------------------|
| Alüminyum alaşımları           | $69 \times 10^3$          |
| Dökme demir                    | $138 \times 10^3$         |
| Bakır alaşımları               | $110 \times 10^3$         |
| Çelik                          | $209 \times 10^3$         |
| Magnezyum                      | $48 \times 10^3$          |
| Titanyum                       | $117 \times 10^3$         |
| Tungsten                       | $407 \times 10^3$         |
| Elmas                          | $1035 \times 10^3$        |
| Nylon                          | $3.0 \times 10^3$         |
| Polietilen (düşük yoğunluklu)  | $0,2 \times 10^3$         |
| Polietilen (yüksek yoğunluklu) | $0,7 \times 10^3$         |
| Polisitiren                    | $3,0 \times 10^3$         |

Akma noktası malzemenin bir mukavemet özelliğidir ve bu nedenle akma mukavemeti olarak adlandırılır. Diğer isimleri akma gerilmesi veya elastik limittir. Akma noktası plastik bölgeye geçişi ve malzemenin plastik deformasyonunun başlangıcını ifade eder. Gerilme ve şekil değişimi arasındaki ilişki artık hooke yasası ile tanımlanamaz. Yük akma noktasının ötesine arttıkça numunenin uzaması devam eder ancak öncekinden çok daha hızlı oranda şekil 2.3'te gösterildiği gibi eğri lineer olmaktan çıkar. Son olarak uygulanan yük maksimum bir değere ulaşır ve bu noktada hesaplanan mühendislik gerilmesine malzemenin çekme dayanımı veya nihai çekme dayanımı denir. Gerilim-şekil değiştirme eğrisinin sağ tarağında yük azalmaya başlar ve test numunesi sünek malzemelerde boyun verme olarak adlandırılan bölgesel yeni sadece boyun verdiği kısımda uzama gerçekleşir. Gerilme uzunluk boyunca eşit şekilde artmaya devam etmek yerine numunenin küçük bir bölümünde yoğunlaşır ve kopma meydana gelene kadar kesit sadece bu bölgede azalmaya devam eder. Kopmadan hemen önce hesaplanan gerilme kopma gerilmesi olarak adlandırılır ve uzama şu şekilde tanımlanır;

$$EL = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.4)$$

Burada EL yüzde uzama olarak,  $L_f$  ise kopma noktasındaki numune uzunluğu olarak tanımlanır ve birimi mm'dir.  $L_0$  başlangıçtaki numune uzunluğu olup birimi mm'dir.

Alandaki daralma aşağıdaki denklemde kesit daralması olarak tanımlanır;

$$AR = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (2.5)$$

Burada AR kesit daralması yüzde olarak ifade edilir.  $A_f$  Kopma noktasındaki kesit alanı olarak tanımlanır, birimi mm<sup>2</sup> dir. Yüzde uzama ve yüzde alan küçülmesi mühendislik uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan süneklik ölçümleridir (Groover, 2007).

### 2.2.2 Gerçek Gerilme-Şekil Değişirme

Gerçek gerilme F yükünün uygulandığı andaki gerçek kesit alanına bölünmesiyle hesaplanır. Mühendislik gerilmesinde ise test ilerledikçe küçülen alan yerine test numunesinin ilk alanı kullanılır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

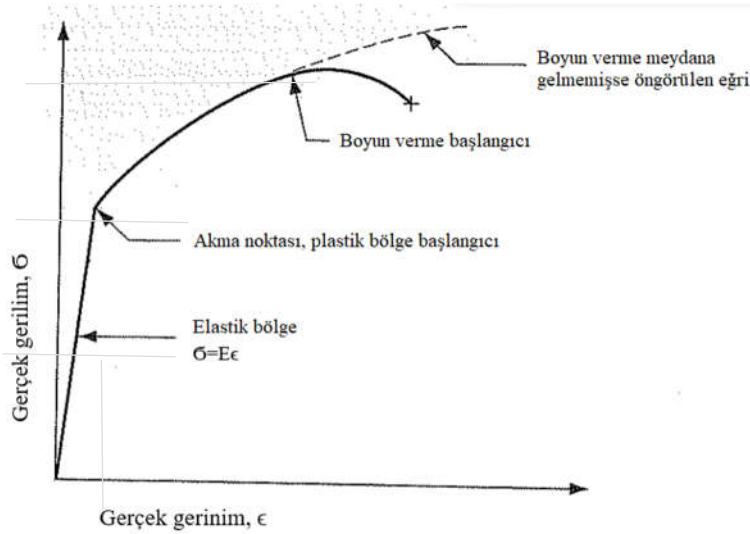
Burada  $\sigma$  gerçek gerilme olup birimi ise MPa'dır. F ise kuvvet olup birimi N'dur. A ise yükün etki ettiği gerçek anlık alan olup birimi mm<sup>2</sup>'dir.

Gerçek şekil değişirme, malzemenin birim uzaması başına anlık uzamanın daha gerçekçi değerlendirilmesini sağlar. Bir çekme testinde gerçek şekil değişimin değeri toplam uzamayı küçük artışlara bölerek, her bir artış için mühendislik şekil değişimini başlangıç uzunluğunu esas alarak hesaplar ve sonra şekil değişim değerlerini toplayarak sonuca ulaşır.

$$\epsilon_{true} = \sum e \quad (2.7)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.8)$$

Şekil 2.3 ‘deki mühendislik gerilim-şekil değiştirme verileri gerçek gerilim-şekil değiştirme değerleri kullanılarak çizildiğinde eğri şekil 2.4‘deki gibi görünecektir. Elastik bölgedeki çizim önceki ile hemen hemen aynıdır. Şekil değiştirme değerleri küçüktür ve gerçek gerilim çoğu metalde mühendislik gerilimine neredeyse eşittir ve gerilme değerleri birbirine yakındır. Bunun nedeni test numunesinin kesit alanının elastik bölgede önemli ölçüde değişmemesidir. Bu nedenle gerçek gerilim-şekil değiştirmede elastik bölgede Hooke yasası geçerlidir. Gerçek gerilim-şekil değiştirme eğrisi ile mühendislik arasındaki fark plastik bölgede oluşur. Numunenin uzaması sırasında sürekli küçülen anlık kesit alanı artık hesaplamada kullanıldığı için plastik bölgede gerilme değerleri daha yüksek olur.



Şekil 2.4 Gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Groover, 2007)

Şekil 2.4 ‘de boyun verme meydana gelmemiş ve gerçek gerilme-şekil değiştirme grafiğinin öngörülen devamı kesik çizgi ile gösterilmiştir. Plastik bölgede şekil değiştirme önemli hale geldikçe gerçek şekil değiştirme ve mühendislik şekil

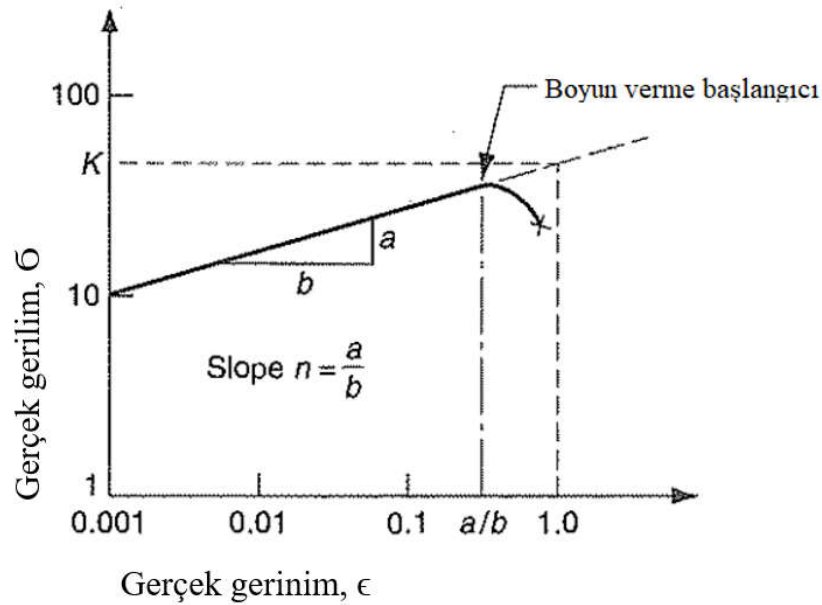
değiştirme değerleri birbirinden uzaklaşır. Mühendislik birim şekil değişiminden gerçek birim şekil değiştirmenin belirlenmesi şu ifade ile ilişkilendirilebilir;

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (2.9)$$

Benzer şekilde gerçek ve mühendislik gerilmesinden gerçek gerilmenin belirlenmesi şu ifade ile ilişkilendirilebilir:

$$\sigma = \sigma_e (1 + e) \quad (2.10)$$

Şekil 2.4'te boyun verme başlayana kadar homojen plastik deformasyon bölgesinde gerilmenin artmasıyla şekil değişimi hızla artar. Bunun anlamı plastik deformasyonun arttıkça metalin sertlik ve mukavemetinin artmasıdır. Bu metalik kristal yapılarda birçok metalin az veya çok gösterdiği önemli bir özelliktir ve deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılır.



Şekil 2.5 Log-log ölçeğinde çizilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Groover, 2007)

Deformasyon sertleşmesi metallerin plastik deformasyon sırasında özellikle de metal şekillendirme proseslerinde önemli bir faktördür. Plastik bölgeyi temsilen

gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisinin bir kısmı bir log-log ölçeğinde çizilirse sonuç şekil 2.5'te gösterildiği gibi doğrusal bir ilişki olacaktır. Verilen bu dönüşümde düz bir çizgi olduğu için plastik bölgede oluşan gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2.11)$$

Plastik akış eğrisi olarak da adlandırılan bu denklem plastik bölgedeki metallerin davranışlarının ve deformasyon sertleşmesi kapasitelerini açıklar. Burada K sabiti deformasyon sertleşmesi sabiti olarak adlandırılır birimi ise MPa 'dır ve bire eşit gerçek bir şekil değiştirme değerindeki gerçek gerilimin değerine eşittir. Bunun anlamı denklem (2.11)'de 'ε' yerine 1 yazdığımızda n kaç olursa olsun gerilme deformasyon sertleşmesi sabitine (σ=K) eşit olacaktır. Burada n parametresi ise pekleşme üsteli olarak adlandırılır, değeri birden küçüktür ve şekil 2.5'teki doğrunun eğimidir ve bu eğim sıfır ile bir arasında değişir. Değeri metallerin sertleşme kabiliyeti ile doğrudan ilişkilidir. 'n' değeri ne kadar büyükse şekil değişimi o kadar zordur (Groover, 2007).

Tablo 2.2 Bazı metallerin K ve n değerleri (Groover, 2007)

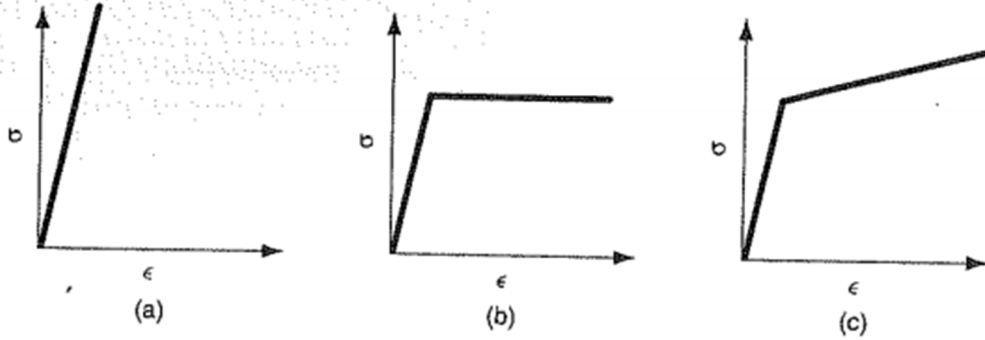
| Malzeme                        | Deformasyon<br>sertleşmesi sabiti, K | Deformasyon<br>sertleşme üsteli, n |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
|                                | MPa                                  | -                                  |
| Alüminyum, saf, tavllanmış     | 175                                  | 0,20                               |
| Alüminyum, alaşım, tavllanmış  | 240                                  | 0,15                               |
| Alüminyum, ısıtıl işlem görmüş | 400                                  | 0,10                               |
| Bakır, saf, tavllanmış         | 300                                  | 0,50                               |
| Bakır alaşımı, pirinç          | 700                                  | 0,35                               |
| Çelik, düşük C, tavllanmış     | 500                                  | 0,25                               |
| Çelik, yüksek C, tavllanmış    | 850                                  | 0,15                               |
| Çelik, alaşımlı, tavllanmış    | 700                                  | 0,15                               |
| Çelik, paslanmaz, östenitik    | 1200                                 | 0,40                               |

Bir çekme numunesinin toplam uzaması uniform uzama ve uniform uzama sonrası olmak üzere iki kısımdan oluşur. Plastik akış denklemini sağlayan bir malzeme için düzgün uzama sertleşme üsteli n'e eşittir.

Buna ek olarak ‘n’ logaritmik koordinatlarda çizildiğinde gerçek gerilim-gerçek gerinim eğrisinin eğimidir. Eğrinin önemli bir kısmı birçok düşük karbonlu çelik için neredeyse düz bir çizgidir ve denklem (2.11)’e uyduğu varsayılır. Karmaşık geometrili parçalar üretmek için kullanılan düşük karbonlu çelikler için n değeri normalde yaklaşık 0,22’dir. Daha yüksek değerler ise deformasyon sırasında daha yüksek esneme kapasiteleri olduğunu gösterir. Şekillendirilebilirlik için tam olarak işlenmemiş bazı düşük karbonlu çelikler özellikle sıcak haddelenmiş çelik sınıflarının n değerleri 0,10 civarındadır fakat şekillendirilebilir çelik sınıflarının çoğunun n değeri 0,14’ün üzerindedir (ASM, 1990).

### 2.2.3 Gerilim-Gerinim İlişki Türleri

Elastik-plastik hakkında birçok bilgi gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisi tarafından sağlanır. Belirttiğimiz gibi Hooke yasası metalin elastik bölgedeki davranışları için geçerlidir. Akış eğrisi yani Holloman denklemi ise metallerin plastik bölgedeki davranışları belirler. Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri şekil 2.6’da gösterilen hemen hemen tüm katı malzeme türleri için geçerlidir.



Şekil 2.6 Gerilim-gerinim arasındaki ilişkinin üç farklı sınıflandırılması (a) Süper elastik (b) Elastik ve süper plastik (c) Elastik ve gerinim sertleşmesi (Groover, 2007)

#### 2.2.3.1 Tam Elastik

Bir malzemenin davranışı elastiklik modül ‘E’ ile gösterilen sertliği ile tanımlanır. Plastik akışa boyun eğmek yerine kırılır. Seramikler, birçok dökme demirler ve ısıyla

sertleşen polimerler gibi kırılğan malzemeler, bu kategoriye giren gerilme-şekil değıştirme eğrilerine sahiptir. Bu malzemeler plastik şekillendirme işlemleri için uygun değillerdir.

#### *2.2.3.2 Elastik ve Tam Plastik*

Bu malzeme E ile tanımlanan bir sertliğe sahiptir. Üzerine etki eden kuvvet malzemenin akma dayanımına ulaşıldığında, malzeme aynı stres seviyesinde plastik olarak deforme olur. Metaller, deformasyon sırasında gerinimle sertleşmek yerine yeniden kristalleşecek kadar yüksek sıcaklıklara ısıtıldıklarında bu şekilde davranırlar. Kurşun bu davranışı oda sıcaklığında sergiler çünkü oda sıcaklığı kurşun için yeniden kristalleşme noktasının üzerindedir.

#### *2.2.3.3 Elastik ve Gerinim Sertleşmesi*

Bu malzeme elastik bölgede Hooke yasasına uygun davranır. Y akma dayanımında akmaya başlar. Devam eden deformasyon, K dayanım katsayısı Y'den büyük ve gerinim sertleşmesi üssü n sıfırdan büyük olan bir akış eğrisi ile tanımlanan, sürekli artan bir gerilim gerektirir. Akış eğrisi genellikle doğal bir logaritmik grafik üzerinde doğrusal bir fonksiyon olarak temsil edilir. Çoğu sünek metal, soğuk işlendiğinde bu şekilde davranır.

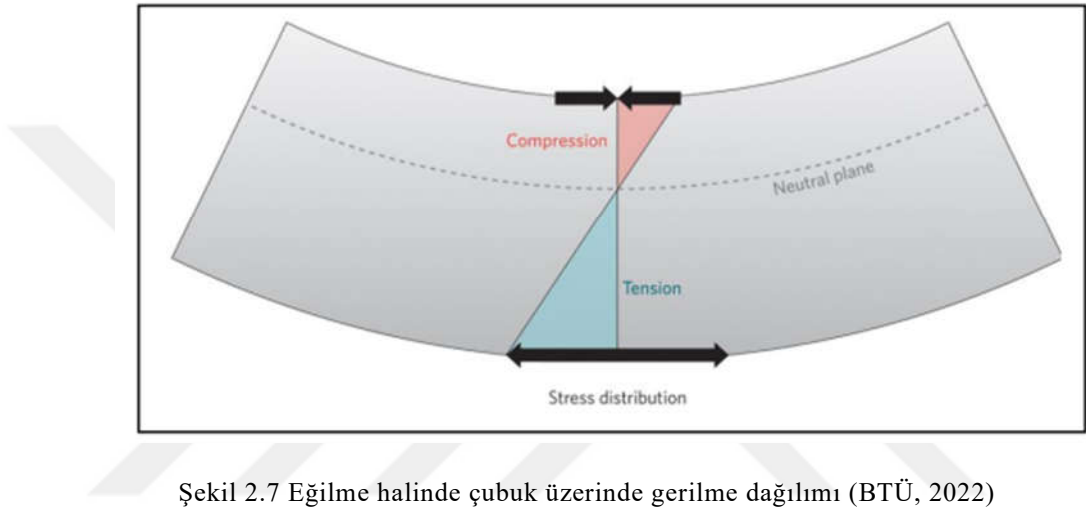
#### *2.2.4 Eğme Testi*

Eğme testi malzemelerin eğilme ve önemli mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan bir test yöntemidir. Yanal yüklerin etki ettiği kiriş benzeri ürünler eğilebilir. Eğilme momentleri kirişin tüm bölgelerinde meydana gelir. Bu, eğilme gerilimi ile ilgilidir. Eğilme denkleminin geçerli olabilmesi için malzemenin homojen olması ve Hooke kanununa uyması gerekir (Bursa Teknik Üniversitesi [BTÜ], 3 nokta eğme deneyi föyü, 2022).

TSE'nin TS 205 standardına göre eğme deneyi, iki destek noktası arasına sabit olarak bırakılan, kesiti genellikle dikdörtgen veya daire şeklinde olan test numunesinin

ortasına dikey yönde bir kuvvet uygulandığında oluşan şekil değiştirmesidir (TS EN ISO 7438, 2021).

Üst kısmında basma gerilimi, altta ise çekme gerilimi olan numuneye uygulanan bir kuvvet, numunenin eğilmiş durumda olduğunu göstermektedir. Bu numunelerin Şekil 2.7’de görüldüğü gibi iç yüzey bölgesinde basma gerilmeleri, dış yüzeyde ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır (BTÜ, 2022).



Şekil 2.7 Eğilme halinde çubuk üzerinde gerilme dağılımı (BTÜ, 2022)

### 2.2.5 Sertlik

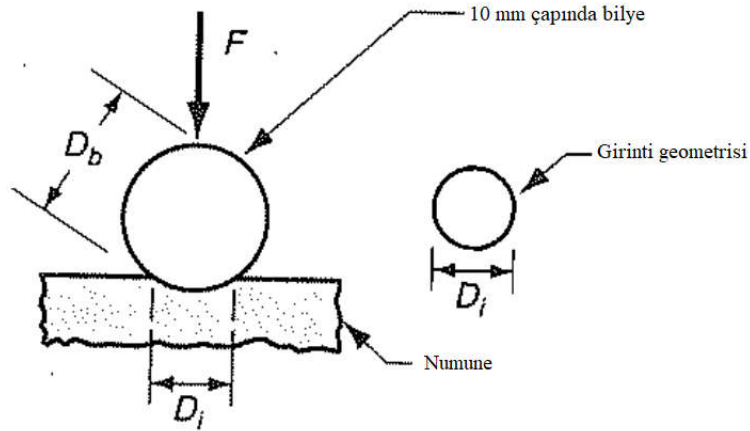
Malzemede sertlik kalıcı şekil değiştirmeye karşı direnç olarak tanımlanır. İyi sertlik genellikle malzemenin çizilmeye ve aşınmaya karşı dirençli olduğu anlamına gelir. İmalatta kullanılan takımların çoğu dahil olmak üzere birçok mühendislik uygulaması için çizilme ve aşınma direnci önemli özelliklerdendir. Bu bölümde göreceğimiz üzere sertlik ve mukavemet arasında güçlü bir ilişki vardır. Sertlik testleri hızlı ve kullanışlı oldukları için malzeme özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte farklı malzemeler arasındaki sertlik farklılıkları nedeniyle çeşitlik test yöntemleri mevcuttur. Brinell ve Rockwell en iyi bilinen sertlik yöntemlerindendir (Groover, 2007).

### 2.2.5.1 Brinell Sertlik Yöntemi

Brinell sertlik testi yaygın olarak düşük ve orta sertlikteki metalleri test etmek için kullanılan bir yöntemdir. İsmi 1900’lü yıllarda bu yöntemi geliştiren İsveçli mühendisten alır. Testte sertleştirilmiş çelikten (veya metal katkılı karbürden) yapılmış 10 mm çapında bir bilye numunenin üzerine 500, 1500 ve 3000 kg yük ile uygulanır. Daha sonra ise yük aşağıdaki formülde gösterildiği gibi girinti alanına bölünür (Groover, 2007).

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b (D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) ‘de HB Brinell sertlik numarası, F girinti yükü birimi kg,  $D_b$  bilye çapı birimi mm,  $D_i$  yüzeyde oluşan girintinin çapı olup birimi mm’dir.



Şekil 2.8 Brinell sertlik test uygulama şeması

Bu boyutlar şekil 2.8’de gösterilmiştir. Ortaya çıkan BHN birimi  $\text{kg/mm}^2$  olup genellikle birimsiz sadece sayı ile gösterilir. Daha sert malzemeler için çelik bilyenin ölçüm doğruluğunu tehlikeye atan elastik deformasyona maruz kalabileceği için (500 BHN) sement karbür bilye kullanılır.

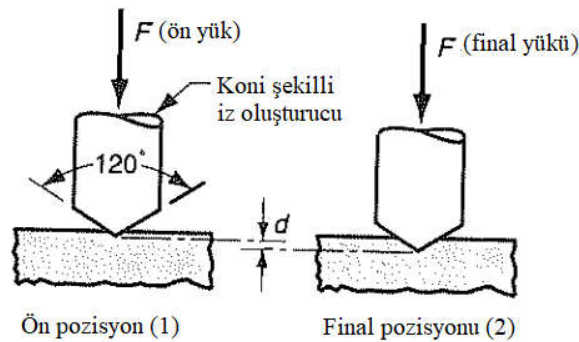
### 2.2.5.2 Rockwell Sertlik Testi

Bu test yöntemi, 1920'lerin başında onu geliştiren metalürji uzmanının adını taşıyan, yaygın olarak kullanılan başka bir testtir. Kullanımı yıllar içinde yapılan çeşitli geliştirmeler ile birçok farklı malzemelere uyarlanabilir hale getirmiştir. Rockwell Sertlik Testinde, koni şeklinde girintili veya küçük çaplı bir top 1,6 mm veya 3,2 mm 10 kg'lık küçük bir yük kullanılarak numuneye bastırılır, böylece girinti malzemeye oturur ve izin taban noktası başlangıç noktası olarak alınır. Bunun amacı numune ile elmas uç arasındaki temasın elde edilmesidir. Ardından, 150 kg'lık (veya başka bir değer) büyük bir yük uygulanır ve bu girinti ucunun numuneye başlangıç konumunun belirli bir mesafesi ötesinde nüfuz etmesine neden olur. Bu ilave penetrasyon mesafesi  $d$ , test makinesi tarafından bir Rockwell sertlik okumasına dönüştürülür. Şematik grafiği şekil 2.9'da gösterilmektedir (Groover, 2007).

Tablo 2.3 Yaygın olan Rockwell sertlik ölçeği (Groover, 2007)

| Rockwell ölçeği | Sertlik sembolü | Batıcı uç    | Yük(kg) | Malzeme                     |
|-----------------|-----------------|--------------|---------|-----------------------------|
| A               | RSD-A           | Piramit      | 60      | Karbit , Seramik            |
| B               | RSD-B           | 1.6 mm bilye | 100     | Demir dışı alaşım           |
| C               | RSD-C           | Piramit      | 150     | Demir alaşımı, takım çeliği |

Yük ve girinti geometrisindeki farklılıklar, farklı malzemeler için çeşitli Rockwell ölçekleri sağlar. En yaygın ölçekler Tablo 2.3'te belirtilmiştir.



Şekil 2.9 Rockwell sertlik test uygulama şeması

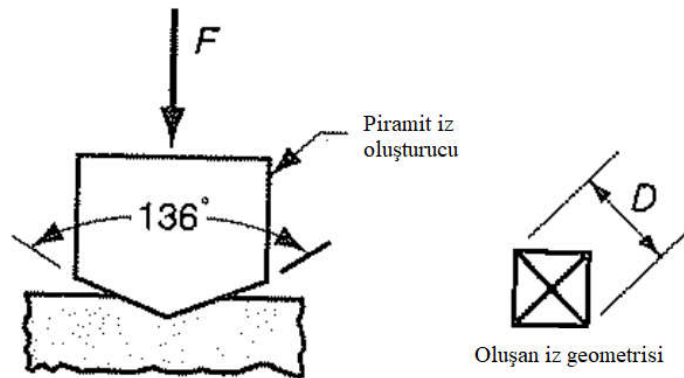
### 2.2.5.3 Vickers Sertlik Testi

Yine 1920'lerin başında geliştirilen bu test, elmaştan yapılmış tepe açısı  $136^\circ$  olan piramit şeklinde bir uç kullanır. Bu uç tarafından yapılan izlenimlerin yükten bağımsız olarak geometrik olarak benzer olması ilkesine dayanmaktadır. Buna göre sertliği ölçülecek malzemenin sertliğine bağlı olarak çeşitli büyüklükte yükler uygulanır. Vickers Sertliği (HV) daha sonra  $F$  yükü ile malzemeye bastırılan piramitlerin tepe noktalarının bıraktığı dikdörtgen izlerin köşegenlerinin ölçülmesiyle hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu, denkleme uygulanarak belirlenir:

$$VSD = \frac{1.854F}{D^2} \quad (2.13)$$

Yük 1-120 kgf arasında değişir. Normal yük olarak 30 kgf olarak girilebilir. Yükün numune üzerinde tutulma süresi 20 sn'dir. Bu süreden sonra piramit baskı ucu numune ile teması kesilir ve deney sonlandırılır.

Denklem (2.13)'te  $F$  uygulanan yük birimi kg,  $D$  Şekil 2.10'da gösterildiği gibi girinti tarafından yapılan baskının köşegenler arası mesafesi olup birimi mm'dir. Vickers testi tüm metaller için uygulanabilir ve sertlik testleri arasında en geniş skalalardan birine sahiptir (Groover, 2007).



Şekil 2.10 Vickers sertlik test uygulama şeması

### 2.3 Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi

Karbonlu çeliklerden elde edilemeyen kendine özgü mekanik ve kimyasal özellikleri elde etmek amacıyla, yapıya bir veya birden fazla alaşım elementi eklemek suretiyle üretilen çelikler alaşımlı çelik olarak adlandırılır.

Alaşım elementlerinin etkisi esas olarak diğer metallere göre daha etkili olan çelik yapı üzerindedir. Ayrıca alaşım elementlerinin etkileri toplamsal değildir, dolayısıyla birçok alaşım elementinin bir arada bulunması beklenen özellikleri değiştirmez. Alaşımlı çelikler, alaşım elemanları (karbon ve arıtılamayan elemanlar dışında kalan diğerleri) toplam miktarı %5'ten az olan (düşük alaşımlı) çelikler ve alaşım elemanlarının toplamı %5'ten fazla olan (yüksek alaşımlı) çelikler olmak üzere, iki ana gruba ayrılırlar.

Alaşımsız çeliklere benzer davranış sergileyen düşük alaşımlı çeliklerin en dikkat çekici özelliği yüksek sertleşebilmeleridir. Ayrıca sertlik, çekme mukavemeti, akma noktası, elastik modül gibi mukavemet özellikleri ile ısı direnci ve meneviş direnci gibi özellikler artarken, kopmada uzama, kesit daralması, çentiklenme gibi değerler de azalma olur. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde, istenilen özelliklerin bulunmaması veya yetersiz olması halinde yüksek alaşımlı çelikler kullanılır. Bu alaşım türü, normal sıcaklıklarda iyileştirilmiş mekanik mukavemete ek olarak, ısı direnci, pullanma direnci, korozyon direnci, sıcak sertlik ve mıknatıslanmama gibi arzu edilen özellikleri elde etmeyi amaçlar (ASM, 1990).

#### 2.3.1 Karbon (C)

Çelik için temel alaşım elementidir. Karbon miktarının artmasıyla sertlik ve mukavemet artarken süneklik ve kaynak kabiliyeti düşer. %0,8 karbona kadar akma ve çekme dayanımı artar fakat bu değerden sonra kırılmalık artar. Isıl işlem sonrasında ise sertlik kalıntı östenit sebebiyle sertlik daha fazla artmaz. Çeliğin ulaşabileceği en yüksek sertlik değeri 67 HRC olup bu değer %0,6 karbon oranı seviyesinde sağlanır. Çeliklerde karbon miktarının yüksek olması süneklik, dövüle bilirlilik, derin

çekilebilirlik ve kaynak kabiliyeti gibi özelliklere olumsuz yönde etki etmektedir. Yüksek karbon miktarının diğer bir olumsuz özelliği ise ısıtım sırasında çatlak oluşturmasıdır (ASM, 1990).

### **2.3.2 Manganez (Mn)**

Yapıya genellikle cevher halinde iken girer. Latince sert, kırılğan gümüş beyaz metal anlamına gelen magnes kelimesinden türemiştir. Demir çelik endüstrisinde genellikle oksijen ve sülfür giderici mukavemet artırıcı element olarak kullanılır. Alaşım elementi olarak ikinci sırada yer alır ve çelik üretimi için gerekli bir elementtir. Mangan çeliklerde, çekme mukavemetini, dövüle bilirliliği, tokluğu, sertliği ve aşınmaya dayanıklılığı artıran özelliklere sahiptir. Mn, çelikten kükürt'ü çıkararak, sıcak haddeleme işlemi sırasında çeliğin kırılğan hale gelmesini önler. Daha Yüksek Manganez, Sementasyon sırasında karbon penetrasyonunu destekler. Manganez, kükürt ile manganez sülfür (MnS) oluşturabilir ve talaşlı işlemeye yardımcı olur ve aynı anda kükürten kaynaklanan kırılğanlığı önleyerek çeliği yüzey kalitesi için faydalı hale getirir (Annamalai, 2018).

### **2.3.3 Silisyum (Si)**

Silisyum çelik üretimi esnasında yapıya oksijen giderici olarak eklenir dolayısı ile yapıdaki silisyum miktarı çelik türü ile doğrudan ilgilidir. Oksijeni tam giderilmiş çelikler maksimum %0,6'ya kadar silisyum içerebilir. Döküm yöntemiyle üretilen çeliklerde akışkanlık elde etmek için ilave edilebilir. Ferrit içerisinde çözüneme özelliğine sahip olduğu için malzemenin süneklik ve tokluğunu düşüşe sebebiyet vermeden, dayanımı ve sertliğinde artış sağlar. Sertliği ve mukavemeti arttırmada manganezden daha az etkilidir ve genellikle sertleşebilirliği, aşınma direncini ve elastikiyeti artırır, ancak yüzey kalitesine olumsuz etkisi vardır (ASM, 1990).

Diğer yandan yüksek silisyum oranı sıcak haddeleme ile üretim esnasında çatlak oluşumuna yol açar. Bundan dolayı %0,04'ten daha yüksek silisyum kullanımından kaçınılmalıdır. Galvanik kaplama amacıyla %0,04'ten daha fazla silisyum içeren alaşım, kaplama kalınlığı ve görünüşüne olumlu yönde etki eder (Annamalai, 2018).

#### **2.3.4 Kükürt (S)**

Alaşım içerisindeki artan kükürt oranına bağlı olarak, şekillendirmeye enine doğrultuda sünekliği ve darbe tokluğunu düşürürken, boyuna doğrultuda mekanik özelliklere etkisi azdır. Diğer yandan artan sülfür oranı malzemenin kaynak kabiliyetini azaltır. Bu element, özellikle düşük karbonlu ve düşük mangan oranlı çeliklerde yüzey kalitesi için çok zararlıdır. Yüksek bir kükürt içeriğine mangan içeren çelikte, genellikle boyutsal doğrulukta olumlu etki göstererek daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilir. Bu nedenle çeliklerde sülfür içeriği maksimum bir limitle belirlenmiştir. Bir istisna olarak işlenebilirliği iyileştirmek için kükürt içeriğinin yüksek tutulabileceği otomat çeliğidir. Genellikle çeliklerde inklüzyon şeklinde bulunur. Çeliklerde istenmeyen bir element olup azaltılmaya çalışılır (ASM, 1990).

#### **2.3.5 Fosfor(P)**

Haddelenmiş durumdaki çeliklerde alaşım içerisinde artan fosfor oranıyla birlikte mukavemet ve sertlik paralel olarak artarken, süneklik ve darbe dayanımı tokluğu düşer. Düşen süneklik ve tokluğun etkisi su verilmiş ve temperlenmiş yüksek karbonlu çeliklerde daha belirgindir. Bu istenmeyen etkileri nedeniyle, çeliklerde düşük miktarda tutulmak istenen elementler arasında kükürt ile fosforda yer alır. Fosfor demir içerisinde çözünür ve talaşlı işleme sırasında, talaşın malzemeden kırılarak kopmasını sağlar. Böylelikle uzun lifli talaşlar oluşmasını engelleyerek yüzeyin daha kaliteli ve pürüzsüz çıkmasına katkıda bulunur. Yüksek fosfor oranı genellikle düşük karbonlu otomat çeliklerinde işlenebilirliği artırdığı için tercih edilir. Yüksek kalitede bir çelik üretmek için, alaşımda bulunabilecek fosfor seviyesinin %0,030 – %0,050 seviyesini geçmemesi gerekir (ASM, 1990).

#### **2.3.6 Krom (Cr)**

Çeliklere genellikle korozyon direncini, oksidasyonu, sertleşebilirliği, yüksek sıcaklık mukavemetini ve aşınma direncini artırmak için eklenir. Karbür oluşturu elementtir. İlave edildiğinde sert krom-karbürler oluşturarak sertliği önemli derecede

artırır. Karmaşık yapıdaki krom-demir karbürleri östenit içerisinde yavaş çözünür bu yüzde su verme işlemi öncesinde temperleme süresinin yeterince uzun tutulması gereklidir. Krom sertlik artırıcı element olarak kullanıldığında üstün mekanik özellikler elde etmek için genellikle Nikel ile birlikte kullanılır. Yüksek sıcaklık mukavemeti olarak bilinen sürünme dayanımı sağlaması için ise genellikle molibden ile birlikte kullanılır. Yaklaşık %14 ve üzerinde krom içeren çelikler, malzemenin yüzeyinde oksit tabakası oluşturarak paslanmaz çelik olarak sınıflandırılır (ASM, 1990).

Paslanmaz çelikler %12'den fazla karbon içerebilir ve 18-8 olarak bilinen çelik %18 krom, %8 ise nikel içerir. Çelik içerisindeki krom oranı %1,1'i aştığında çelik yüzeyinde katman oluşturarak çeliği oksidasyona karşı korur (Annamalai, 2018).

### **2.3.7 Nikel (Ni)**

Nikel, yapısal çeliklerde alaşım elementi olarak kullanıldığında ferrit fazını sertleştirir bunun nedeni çelikte karbür olarak bulunmayıp ferrit içerisinde çözünmesidir. Tane küçültücü etkiye sahiptir. Böylelikle çeliğin dayanımını ve tokluğunu önemli ölçüde artırır. Nikel içeren çeliklerin ısıtılma işlemi kolaydır çünkü nikel kritik soğuma eğrisini düşüren özelliğe sahiptir. Alaşım elementi olarak tek başına kullanılmadığı için, çeliklerde krom ve molibden ile kullanıldığında sertleşebilirlik, yüksek darbe direnci ve yüksek yorulma direnci elde edilir. Ayrıca çeliklerde krom ile birlikte %5 e kadar kullanıldığında çeliğe paslanmaz çelik özelliği kazandırır (ASM, 1990).

### **2.3.8 Molibden (Mo)**

Molibden yapısal çeliklere %0,1 ile %1,0 oranlarında eklenir. Östenit katı çözeltisinde bu oranlarda kullanıldığında kritik su verme hızını karbon çeliklerine kıyasla yavaşlatır. Molibden, su verilmiş çeliklerin temperlenmesi sırasında ikincil sertleşmeye neden olarak yüksek sıcaklıklarda düşük alaşımlı çeliklerin sürünme mukavemetini artırır. %0,15 ile %0,30 molibden içeren alaşımlı çeliklerin temper

kırılganlığına karşı dayanımları yükselir. Aynı zamanda çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını artıran özelliğe sahiptir (ASM, 1990).

### **2.3.9 Vanadyum (V)**

Vanadyumun mikro alaşımlı çökelme sertleşmesine katkıda bulunan elementlerden bir tanesidir. Genellikle %0,03 ile %0,10 oranlarda eklendiğinde amacına ulaşır. Vanadyum ayrıca elektrikli fırınlarda eritilmiş çelikte %0,012'ye kadar çıkabilen oranlarda çözünmüş nitrojeni dengeleyerek dayanıklılığı artırır. Maksimum %0,15 vanadyum içeren çeliklerde akma ve çekme dayanım arasında doğrusal bir ilişki vardır ve bu orana kadar vanadyum miktarı arttıkça mukavemet artar. Ayrıca vanadyum çeliklerde sürünme dayanımını artırır. Vanadyum, sıcak haddeleme işlemi sonrasındaki soğuma sırasında ince taneler halinde ferrit fazı içerisine çökerek mukavemetin artmasına katkıda bulunur. Niyobyum çökeltileri kadar kararlı olmayan bu vanadyum çökeltileri, normal haddeleme sıcaklıklarında çözelti halindedir ve bu nedenle oluşumları soğuma hızına bağlıdır (ASM, 1990).

### **2.3.10 Niobyum (Nb)**

Karbon çeliklerine az miktarda niobyum eklenmesi çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır. Orta karbonlu çeliklere %0,02 Nb ilavesi çeliğin akma mukavemetini 70 ile 100 MPa civarında artırdığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sıcak haddeleme sırasında tane inceltme özelliği sayesinde olup, yükselen bu akma mukavemeti malzemenin darbe tokluğunda da önemli artış sağlamaktadır. Bununla birlikte, niyobyum çökeltileri daha yüksek sıcaklıklarda kararlıdır, bu da ince taneli ferrit elde etmek için önemli bir elementtir. Karbür yapıcı özelliği ile malzemenin sertliği artar (ASM, 1990).

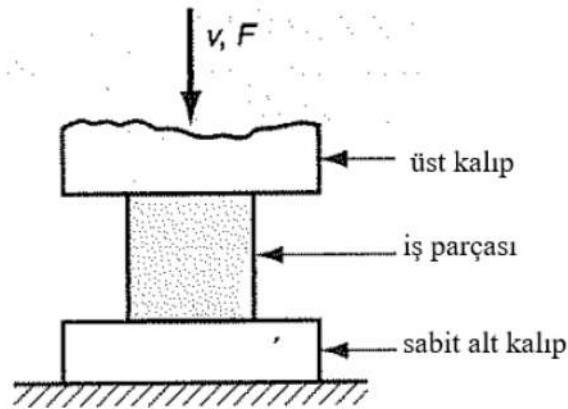
## **2.4 Plastik şekil verme yöntemleri**

Üretilmek istenilen parçanın darbe veya kademeli basınç uygulanarak iki kalıp arasında sıkıştırıldığı bir deformasyon işlemidir. Bilinen en eski metal şekillendirme yöntemi olan dövmenin geçmişi M.Ö. 5000'e dayanır. Günümüzde dövme otomotiv,

havacılık ve diğer alanlar için çeşitli yüksek mukavemetli bileşenler üretmek için kullanılan önemli bir üretim yöntemidir. Motor krank milleri, bağlantı çubukları, dişliler, uçak yapısal parçaları ve jet motoru türbin parçaları bu yöntemle üretilen parçaların bazılarıdır. Dövme işlemi birçok farklı şekilde gerçekleşir. Bunlardan birisi uygulama sıcaklığına göre sınıflandırmadır. Çoğu dövme işlemi önemli miktarda deformasyon gerektiren zamanlarda mukavemeti düşürüp sünekliği artırmak kaydı ile dövme için gerekli kuvveti düşürmek amacı ile sıcak veya ılık olarak uygulanmaktadır. Bunun yanında bazı hassas geometrili ürünleri üretmek için soğuk dövmede üretilmek istenilen parçanın darbe veya kademeli basınç uygulanarak iki kalıp arasında sıkıştırıldığı bir deformasyon işlemidir. Bir dövme makinesinde darbe için yükü uygulayan kısım çene olarak adlandırılırken kademeli basınç uygulayan kısım dövme tezgahıdır. Dövme prosesleri arasındaki diğer bir fark ise, şekillendirilen parçanın dövme sırasındaki akışıdır. İş parçası kalıplar tarafından boyut olarak sınırlandırılır. Bu sınıflandırmaya göre üç çeşit dövme işlemi tipi vardır. Bunlar; a) Açık kalıpta dövme, b) kapalı kalıpla hassas dövme, c) Çapaksız dövme (Groover, 2007).

#### 2.4.1 Açık Kalıpta Dövme

Bu yöntemde iş parçası şekil 2.11’de görüldüğü gibi iki düz kalıp yüzeyi arasında sıkıştırılır böylece iş parçası metal sınırlama olmadan akması sağlanır. Bu dövme yöntemi daha çok yığma veya açık kalıpta yığarak dövme olarak bilinir. Bu sayede parçanın yüksekliği azalırken çapı artacaktır.

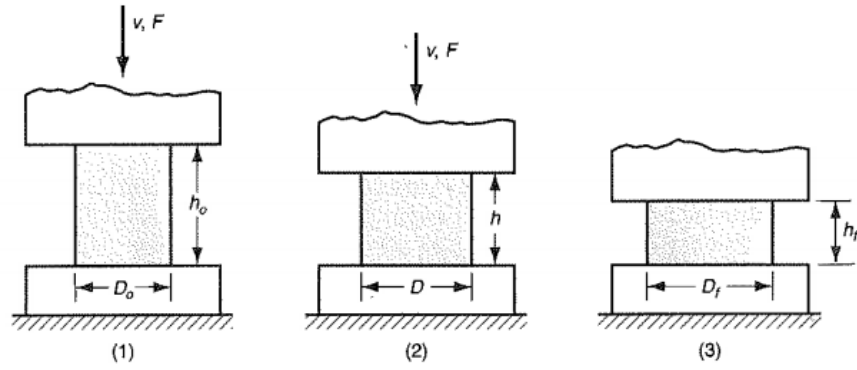


Şekil 2.11 Açık kalıpta dövme (Groover, 2007)

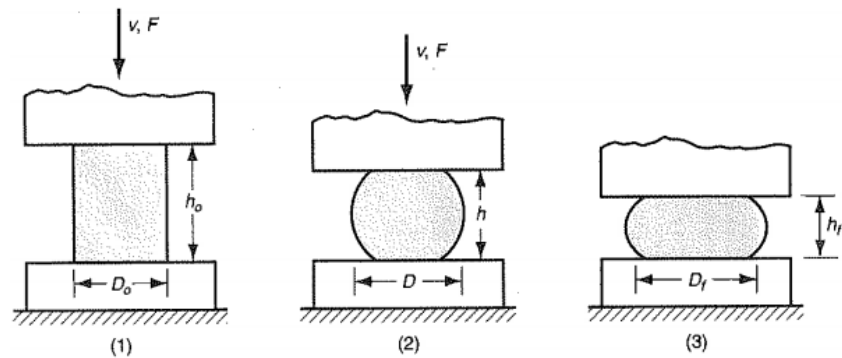
Açık kalıpta dövme ideal koşullar altında yapıldığında iş parçası ile kalıp yüzeyleri arasında sürtünme olmadığında homojen deformasyon meydana gelir. Deformasyon sırasında parçanın boyu kısalırken çapı büyür. Böyle bir durumda malzemenin radyal akışı şekil 2.12’de gösterildiği gibi üniformdur. Gerçek birim şekil değiştirme ifadesi;

$$\epsilon = \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)’te,  $h_0$  başlangıç boyu;  $h$  sıkıştırma sırasında herhangi bir notadaki boyu,  $h_f$  son final boyudur. Burada  $h$  son değer,  $h_f$  olduğunda gerçek birim şekil değiştirme maksimum değerinde olur.



Şekil 2.12 Açık kalıpta dövme işleminde ideal koşullarda iş parçasının homojen deformasyonu (1) Orijinal boy ve çaptaki başlangıç durumu, (2) kısmi sıkıştırma, (3) Son şekil (Groover, 2007)

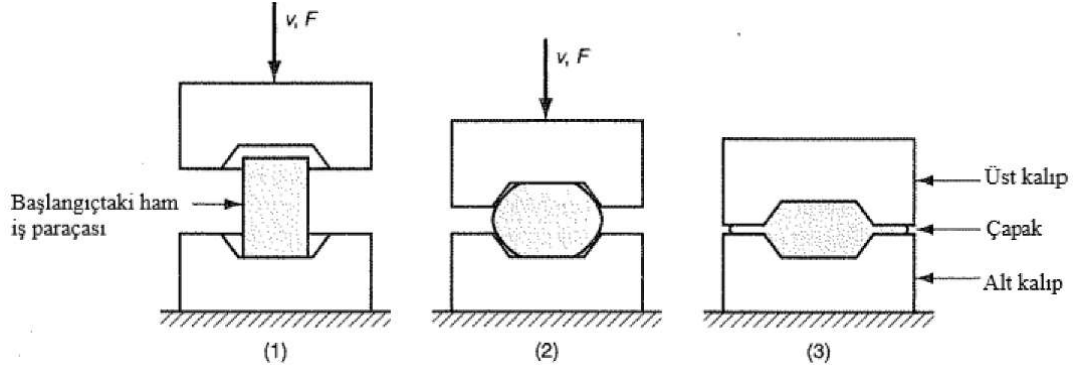


Şekil 2.13 Açık kalıpta dövme işleminde fiçilaşma olarak adlandırılan durumu gösteren silindirik bir parçanın gerçek deformasyonu (1) Başlangıç, (2) Kısmi şekil değiştirme, (3) Son şekil (Groover, 2007)

Şekil 2.13'te açık kalıpta dövme işleminde parça ile kalıp yüzeyi arasında meydana gelen sürtünmeden dolayı fiçilaşma olarak adlandırılan durum görülmektedir.

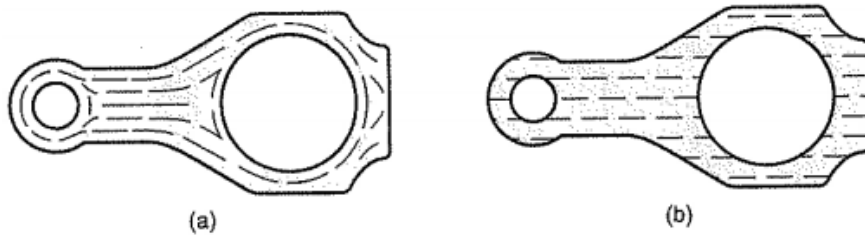
#### **2.4.2 Kapalı Kalıpla Hassas Dövme**

İzli kalıpta dövme diye de adlandırılan bu işlem, üretmek istenilen parça şeklinin tersinde forma sahip olan kalıplar ile yapılan dövme işlemidir. Bu işlem şekil 2.14'te gösterildiği gibi üç aşamada gerçekleştirilir. Ham iş parçası ilk aşamada şekilde gösterildiği gibi kalıp boşluğuna yerleştirilir. Son aşamaya doğru yaklaşırken, metalin kalıp alanı dışında kalan küçük boşluklara doğru akması ile çapak oluşur. Bu oluşan istenmeyen çapağın dövme sonrası ekstra işlem ile kesilmesine rağmen, aslında bu yöntem için önemli bir görev üstlenir. Kalıp içerisinde çapak oluşmaya başladıkça sürtünme kuvveti boşluğa sürekli metal akışına karşı direnç gösterir böylece ana parça metalinin boşluğa daha fazla ilerlemesini kısıtlar. Sıcak dövmede metal akışı daha da fazla kısıtlanır bunun nedeni kalıp plakaları arasındaki soğutmanın deformasyona karşı direnci artırmasıdır. Kapalı kalıpta dövme işleminde genellikle son istenilen geometriyi elde etmek için birçok aşama gereklidir. Kalıp boşluğunun ayrılması her aşamada gereklidir. Başlangıç adımları iş parçası için üniform deformasyon sağlamak ve sonraki adımlarda arzu edilen metalürjik yapıyı elde etmek için metali yeniden dağıtır. Ek olarak darbeli dövme kullanıldığında çekicinin istenilen şekli elde etmek için birkaç kez vurması gerekebilir. Her aşamada farklı geometrilere sahip kalıp boşlukları gereklidir. İlk aşamalar metali kalıp içerisine üniform olarak dağıtmak ve sonraki aşamalarda ise arzu edilen metalürjik yapıyı elde etmek için tasarlanmıştır. Son aşamanın görevi ise üretilmek istenilen parçayı istenilen geometriye getirmektir. Darbeli dövme işlemi manuel olarak yapıldığında olumsuz koşullar altında başarılı sonuç elde edecek operatör yetenekleri gereklidir. Kapalı kalıp dövme işleminde çapak oluşumu ve daha karmaşık parçaların dövülmesi nedeniyle açık kalıpta dövme işlemine kıyasla parçayı analiz etmesi daha zor ve dövme için uygulanan kuvvet önemli ölçüde daha büyüktür (Groover, 2007).



Şekil 2.14 Kapalı kalıp dövme işlem sırası (1) Ham parça ile temasın hemen öncesi, (2) Kısmi sıkıştırma, (3) Kalıp plakaları arasındaki boşlukta çapak oluşmasına neden olan son kalıp kapanışı. (Groover, 2007)

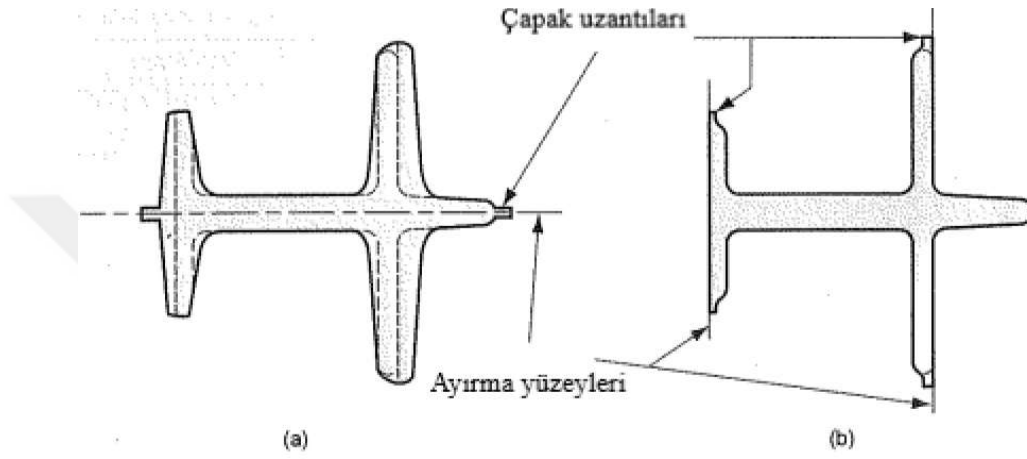
İzli kalıpta dövme işlemi hassas dar toleranslarda çalışma konusunda başarılı değildir ve genellikle dövme sonrasında yüzeyi istenilen toleranslara getirmek için talaşlı işlem gerektirir. Ana parça geometrisi dövme işlemiyle elde edilir daha sonra gerekli yüzey kalitesi, delikler vida dişleri vb. talaşlı üretim işlemi ile oluşturulur. Dövme işleminin tüm parçayı talaşlı üretim ile üretmeye kıyasla avantajları daha az atık metal, yüksek üretim hacimleri, yüksek mukavemet ve istenilen tane boyutu ve yönlenmesidir. Dövme ve dolu bloktan talaşlı işleme yönteminin tane akışı üzerine kıyaslanması şekil 2.15’ de verilmiştir (Groover, 2007).



Şekil 2.15 Tane akışı karşılaştırılması: (a) yüzey işlemi yapılmış sıcak dövme parça (b) Dolu bloktan talaş kaldırma ile üretilmiş parça (Groover, 2007)

İzli kalıpta dövme yöntemindeki teknolojik gelişmeler, daha ince kesitli parçalar üretimi, daha karmaşık geometrilerde üretim, kalıp tasarım gerekliliğindeki ciddi azalma, daha yakın toleranslar, işleme paylarının sanal ortamda minimuma indirilmesi yenilikler sağladı. Dolayısı tüm bu özellikler hassas dövme yönteminin oluşmasını

sağladı. Hassas dövme yaygın olarak alüminyum ve titanyum malzemelerin dövülmesinde kullanılır. Hassas dövme ile geleneksel izli dövme arasındaki karşılaştırma şekil 2.16’da verilmiştir. Hassas dövme işlemi çapak oluşumunu azaltmasına rağmen tamamen ortadan kaldırmaz. Fakat bazı hassas dövme işlemleri tasarım gereksinimlerine bağlı olarak tamamen çapaksız dövmeyi de mümkün kılmıştır. Bu işlem sona yakın şekli veren dövme olarak sınıflandırılmıştır.

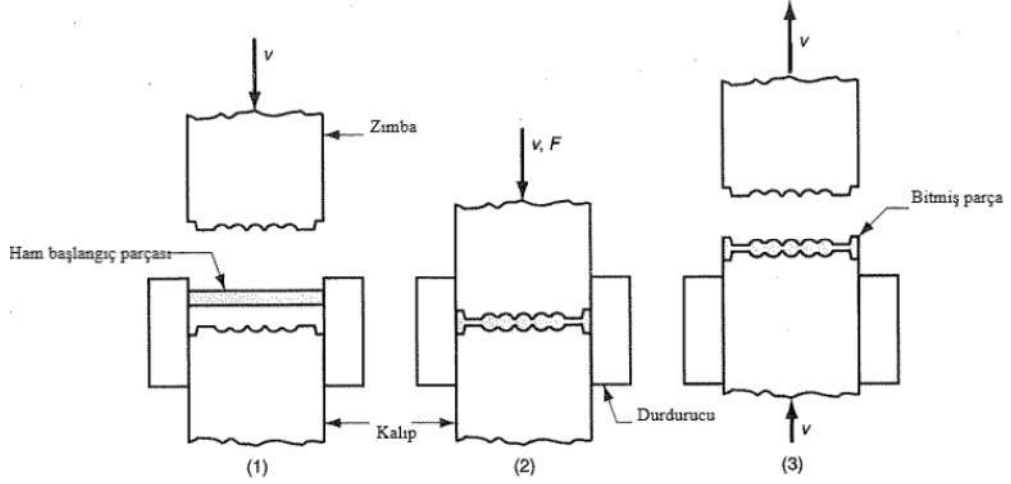


Şekil 2.16 Kesit görünümü (a) Geleneksel izli dövme (b) Hassas dövme (Groover, 2007)

Kesikli çizgi geleneksel dövme ile üretilen parçayı, hassas dövme ile üretilen geometriye getirmek için talaşlı işlem gerektiren kısımları gösteriyor. Her iki durumda da oluşan çapakları dövme sonrası kesilmektedir (Groover, 2007).

### 2.4.3 Çapaksız Dövme

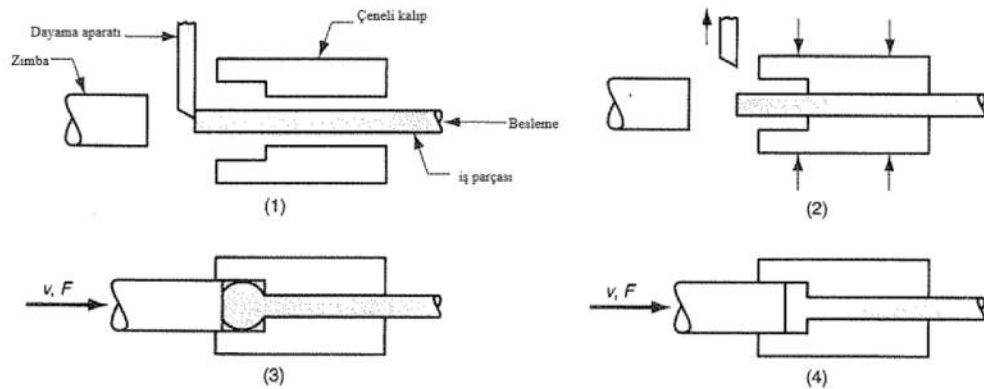
Çapaksız dövmede proses kontrolüne izli kalıpta dövmeye göre daha fazla ihtiyaç duyulur. Bu dövme işleminde en önemli kriter dövülecek iş parçası hacminin, kalıp boşluğu hacmi ile çok dar toleranslarla aynı olmasının gerektiğidir. Eğer ilk aşamada ham metal hacmi çok büyük ise aşırı basınç kalıpta veya preste hasar oluşturur. Eğer tam tersi ham metal hacmi kalıp boşluğundan küçük ise hacim yetersiz kalacak parça istenilen geometride oluşmayacaktır. Daha çok alüminyum ve magnezyum alaşımlarında basit ve simetrik geometrilerin üretimine uygun bir yöntemdir. Çapaksız dövme genellikle hassas dövme olarak sınıflandırılır. Şekil 2.17’de hassas dövmenin basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Çapaksız dövme (1) ham parça yüklemesi (2) Sıkıştırma (3) Alt kalıbın itmesi ile bitmiş parçayı kalıptan ayırma (Groover, 2007)

#### 2.4.4 Yığma ve Kafa Şişirme

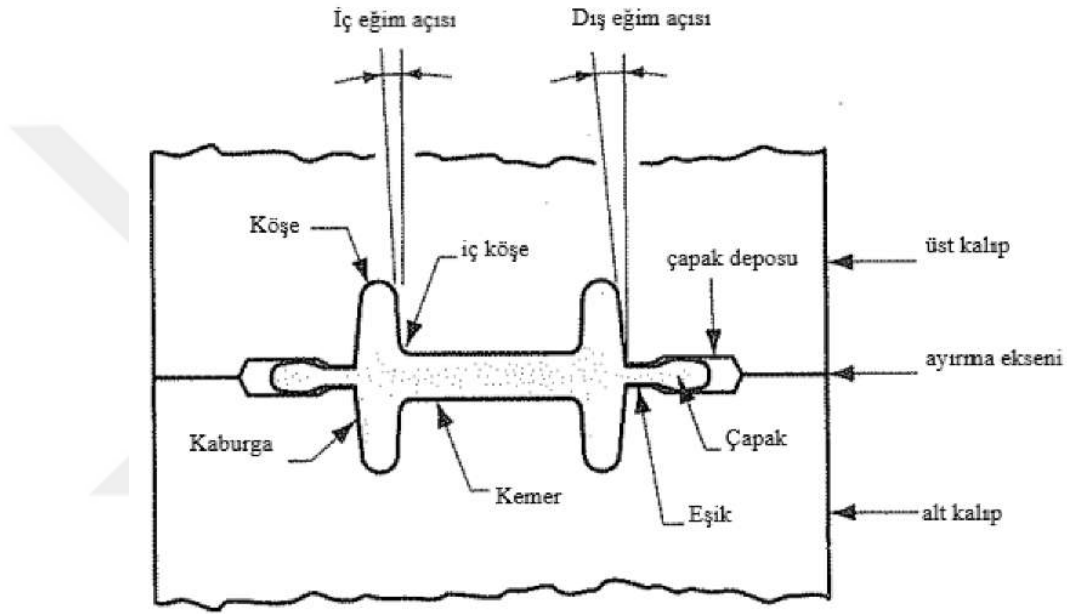
Yığma metodu silindirik iş parçasında çapın arttığı, boyun kısaldığı bir deformasyon işlemidir. Bu yöntem şekil 2.13 açık kalıp yönteminde analiz edilmiştir. Bununla birlikte şekil 2.18’de gösterildiği üzere kapalı kalıp yöntemiyle de uygulanabilir. Genellikle bağlantı elemanları endüstrisinde çivi, cıvata vb. gibi ürünlerin üretilmesinde kullanılan yöntemdir. Baş şişirici veya kafa şişirici diye adlandırılan özel preslerde sıcak veya soğuk olarak gerçekleştirilir. Seri üretime uygun bir üretim yöntemidir (Groover, 2007).



Şekil 2.18 Cıvata veya benzeri parçaların baş kısmına şekil veren yığma operasyonu. Üretim çevrimi yukarıdaki gibidir. (1) Tel dayama aparatına sürülür; (2) Çeneli kalıp parça üzerine kapatılır ve dayama çekilir; (3) Zimba ileri hareket eder ve (4) kafaya nihai şekli verilir. (Groover, 2007)

## 2.5 Dövm Kalıpları

Başarılı bir dövm işlemi için dövm kalıbının tasarımı oldukça önemlidir. Dövülecek parçalar dövm işleminin sınırlarını ve prensiplerini esas alacak şekilde tasarlanmalıdır. Buradaki amaç dövm kalıplarının ve dövülecek parçalara uygulanan tasarım terminolojisini tanımlamaktır. Açık kalıplar genellikle basit şekilli olduklarından bu bölümde kapalı kalıp tasarımı ve terminolojisi üzerinde duracağız.



Şekil 2.19 Dövmde geleneksel bir kapalı kalıp için terminoloji (Groover, 2007)

Aşağıda dövm işlemi ile parça üretmek için, kalıp ve üretilecek parça tasarımı yaparken dikkate alınacak prensip ve sınırlamaları detaylı olarak tanımlanmıştır.

### 2.5.1 Kalıp Ayırma Çizgisi

Üst kalıbı alt kalıptan ayıran düzlem çizgisidir. Kapalı kalıpta ise çapak hattı olarak adlandırılan iki kalıp yarımlarının oluşturduğu düzlemdir. Tasarımcı tarafından seçilen bu düzlem parçadaki tane akışını, uygulanması gereken pres gücünü ve çapak oluşumunu etkiler (Groover, 2007).

### **2.5.2 Eğim**

Parça yanlarında bulunan ve parçayı kalıptan kolayca ayırmak için verilmesi gereken koniklik miktarıdır. Terim kalıp boşluğu yanlarına verilen koniklik içinde uygulanır. Bu eğim açısı genellikle alüminyum ve magnezyum alaşımlı parçalarda  $3^\circ$ , çelik alaşımlı parçalarda ise  $5^\circ$  ile  $7^\circ$  arasında verilir. Hassas dövme işleminde ise eğim açısı sıfıra yakındır (Groover, 2007).

### **2.5.3 Kemer ve Kaburgalar**

Kemer ayırma çizgisine paralel ince dövme kısmına verilen isimdir. Kaburga ise ayırma çizgisine dik ince dövme kısmına verilen isimdir. Bu parça özellikleri ince oldukları için metal akışında zorluklara neden olur (Groover, 2007).

### **2.5.4 İç Köşe ve Yarı Çapı**

İç köşe ve dış köşe yarı çapları şekil 2.19’da gösterilmiştir. Küçük yarı çaplar metal akışını sınırlamaya yatkın olur ve dövme esnasında kalıp yüzeylerindeki gerilmeleri artırmaya eğilimlidir (Groover, 2007).

### **2.5.5 Çapak**

Çapak oluşumu, kalıp boşluğunu doldurmayı kolaylaştırmak için kalıbın içinde basınç artırmaya sebep olması nedeniyle kapalı kalıpta kritik rol oynar. Şekil 2.19’da gösterildiği gibi kalıp içerisine çapak eşiği ve oluğu tasarlanır ise basınç artışı kontrol edilebilir. Çapak eşiği metalin yanal akışının olduğu yüzey alanını belirler, bu sebep ile kalıp içinde basınç artışı kontrol edilir. Çapak oluğu dövme yükünün yüksek değerlere ulaşmasına sebep olmadan fazla metalin bu bölüme kaçmasına izin verir (Groover, 2007).

## 2.6 MnV Çeliği

Vanadyum alaşımlı çelikler halen soğuk şekillendirme yönteminde az kullanıma sahiptir. Araştırmacılar otomotiv endüstrisinde sıcak dövme MnV mikro alaşımlı çelik komponentlerin ısıtma süreçlerini ortadan kaldırarak zaman, enerji ve işçilik maliyetlerini azalttığını gözlemlemişlerdir. Cıvatalar için bir soğuk dövme makinesi geliştirilmiş daha sonra küreselleşme, su verme ve temperleme ısıtma işlemleri olmadan 700 MPa mukavemet seviyesine ulaşılmıştır. Çelik bileşimi, kontrollü haddeleme ve soğutma koşulları ile elde edilen ferrit yapısına sahip az miktarda Nb, V ve Ti alaşımları eklenerek oluşturulmuş düşük karbonlu beyritik bir çeliktir (Da Maia vd. 2018).

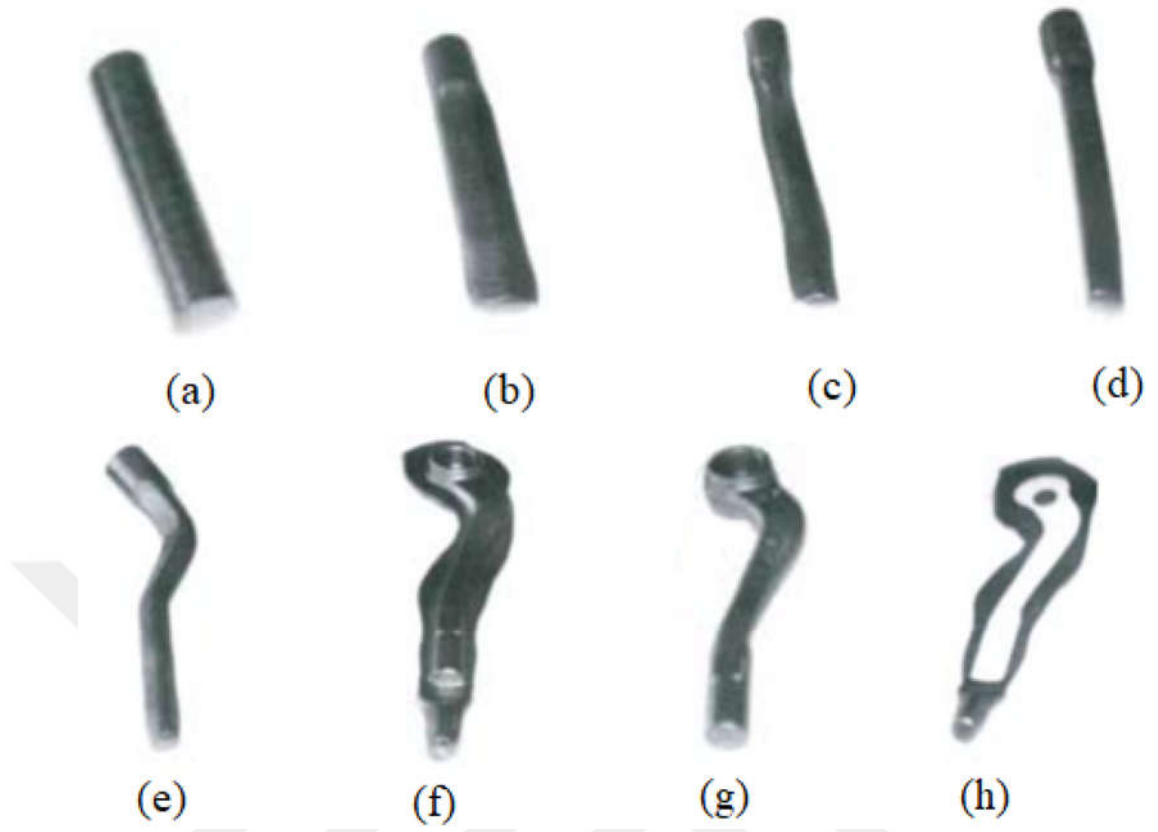
Yüksek konsantrasyonlarda Manganezin (Mn) varlığı, katı çözelti sertleşmesi elde etmek mekanik mukavemet, sertlik ve süneklik kombinasyonunu sağlamak için esastır. Beklendiği gibi, Manganez, mikro alaşımlı elementlerden daha yüksek konsantrasyonlarda ve EN 10267 ferritik-perlitik çeliklerin çökelme sertleşmesi için çalışma sıcaklıkları standartı tarafından belirtilen aralık dahilindedir (Da Maia vd. 2018).

Tablo 2.4 MnV malzemenin hadde sonrası elde edilen mekanik özellikleri (Saarstahl GmbH, 2022)

|                                                   |                        |
|---------------------------------------------------|------------------------|
| Çap d (mm)                                        | 5-30                   |
| Akma mukavemeti $R_{P\,0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 500                    |
| Çekme mukavemeti $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )       | 720-820                |
| Kopma uzaması $A_5$ (%)                           | ≥ 20                   |
| Kesit daralması $Z$ (%)                           | ≥ 50                   |
| Mikro yapı                                        | %50 ferrit, %50 Perlit |

Tablo 2.5 DIN MnV malzemenin kimyasal kompozisyonu %ağırlık (Saarstahl GmbH, 2022)

| Element     | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Ti   | V    | N     |
|-------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| (% ağırlık) | 0,30 | 0,65 | 1,50 | 0,019 | 0,024 | 0,15 | 0,02 | 0,12 | 0,012 |



Şekil 2. 20 Radyal gövdenin dövme işlem aşamaları (Kişisel arşiv, 2022)

Şekil 2.12’de Rot başı parçasının üretiminin aşamaları görülmektedir. (a) ile gösterilen şekil bobinden rot başı için belirlenmiş boyda kesilen dövmeğe hazır üründür. Sonraki (b) aşaması ise yığma metodu silindirik iş parçasında çapın arttığı, boyun kısaldığı bir deformasyon işlemi uygulanmaya başlanmıştır. (f) aşamasında ise gövdeye rot başının araç şasi sistemi için alması gerekli geometrik şekil verilmeye başlanmış ve (g) aşaması ile nihai geometri tamamlanmıştır. (h) aşamasında ise oluşan fazla çapak son vuruş ile nihai üründen ayrılmıştır. Basit bir rot tasarımı, rot başı eksen merkezi ile rot kolu eksen merkezi arasında kaçıklık olmayan tasarımlardır.

Bununla birlikte, bazı durumlarda rot başı tasarımı değişebilir çünkü rotun araç üzerinde hareket etmesi için yeterli çalışma aralığı yoktur ve basit bir düz rot yatak tasarımı üretmek her zaman mümkün değildir. Bazı durumlarda, mafsal eksen dışında merkezlenmemiş olsa bile, çalışma koşullarında tekerleğe çarpmaması için mafsal yatağı kavisli olabilir. Çeşitli rot tasarımları Şekil 2.13’te gösterilmektedir.



Şekil 2.21 Farklı tasarıma sahip olan rot başları (Ersoy ve Heiβing, 2011)

## 2.7 Sonlu Elemanlar Analiz Metodu (FEA)

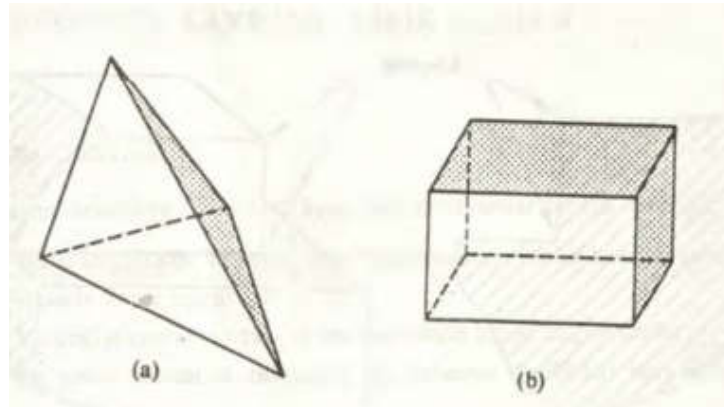
Sonlu elemanlar analizi (FEA), doğrusal olmayan problemler için en etkili ve popüler olarak kullanılan mühendislik analiz araçlarından biri olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada dikey eksenel yüke maruz bırakılan ve üzerinde basma kuvveti etki eden eleman kolon olarak tanımlanmıştır. Malzemeye etki eden sıkıştırma yükü kritik yük olarak bilinen maksimum noktaya ulaştığında, yanal sapmanın olacağı kolon bükülme etkisine maruz kalacağı söylenmiştir. Bu olgu "burkulma" olarak bilinir ve kolondaki maksimum gerilim malzemenin akma geriliminden az olduğunda bile gerçekleşebilecek olduğu belirtilmiştir. Bu durumda araç rot kolunun ince yapısı nedeniyle düz bir kolon olduğu varsayılmıştır. Kolonun burkulacağı yükleme koşulları, kolonun uzunluğu, malzeme özellikleri ve enine kesit geometrisine bağlıdır (Essienubong, Ikechukwu, Ebunilo ve Ikpe, 2016).

Sonlu elemanlar ağ oluşturma, bir FE'yi oluşturan geometrik girdi gereksinimlerinden biridir ve bir, iki veya üç boyutta var olan bir alanın ayrıklaştırılmasını içerir. Başka bir deyişle ağ oluşturma (meshing), sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecek modelin daha küçük ayırık öğelere bölündüğü bir süreçtir. Kullanılan ağ boyutları, sonlu elemanlar analizinde elde edilen çözümleri büyük ölçüde etkiler. Genel olarak, ağ inceltildikçe ayrıklaştırma hatası azalır ve dolayısıyla daha doğru bir sonuç elde edilir. Bununla birlikte, ağ boyutları ne kadar ince olursa,

hesaplama süresi o kadar fazla gerekir. Ağ boyutunu belli bir boyuttan daha fazla küçülmenin analiz sonuçları üzerinde çok az etkisi olduğunu veya hiç etkisi olmadığını ve ağın yakınsandığından bahsedilmiştir (Kalny, 2014).

FEA'de ağ oluşturma, üç boyutlu (3B) bir CAD analiz modelinde ayrıntılı parça tasarımı için doğrudan katı modelden elde edilebilir. Hesaplama tekniklerine bağlı olarak karmaşık geometrili katı model, hesaplama süresini etkileyebilir veya düzgün bir şekilde analiz etmek için çok karmaşık hale gelebilir dolayısı ile bu durumlarda uzun hesaplama süresini azaltmak için FE modelinde ağ boyutunun küçültülmesi gibi uygun bir idealleştirme süreciyle bazı basitleştirmeler gereklidir (Essienubong vd., 2016).

Sonlu elemanlar yönteminde ağ eleman geometrisinin tayin edilmesinde analizi yapılacak ürünün karmaşıklığı, özellikle iç ve dış tasarım limitlerinin şekli önemli ölçüde rehber olacaktır. İki boyutlu cisimlerde ağ elemanının biçimi, ürünün şekline bağlı olarak tespit edilir. Eğri ve düzgün olmayan geometrilerde, üçgen ve dörtgen öğeler, dikdörtgen öğelerden daha uygundur. Üç boyutlu cisimlerde ise dört yüzeyle (üçgen prizma), dikdörtgen prizmadan daha uygundur. Analizi yapılacak ürünün geometrisine bağlı olarak, uygulamalarda karışık bölme yapmak belli bir eleman kullanmaktan daha elverişli olabilmektedir (Nath ve Günay, 1993).



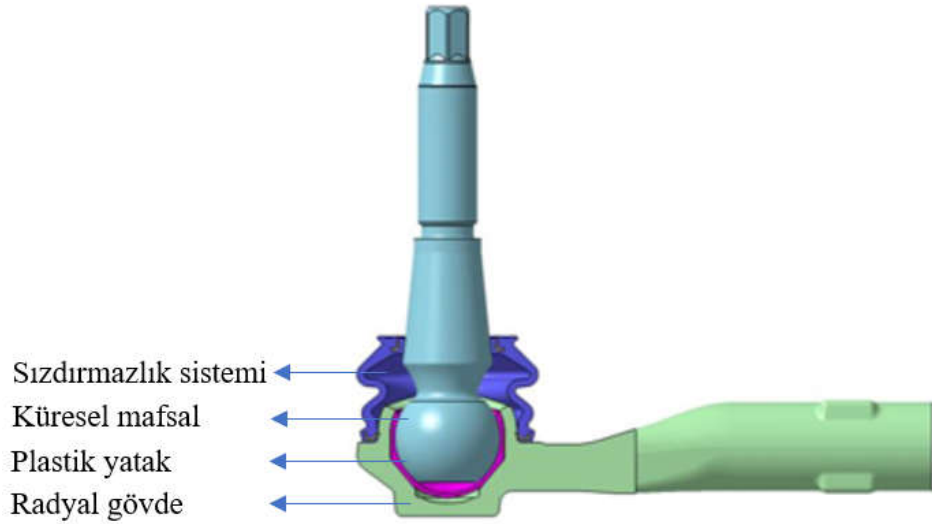
Şekil 2.22 Üç boyutlu ağ elemanlar (a) Üçgen prizma (b) Dörtgen prizma (Nath ve Günay, 1993)

## BÖLÜM ÜÇ

### BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Mevcut Rot Başı Yuvasının Üç Boyutlu Tasarımı

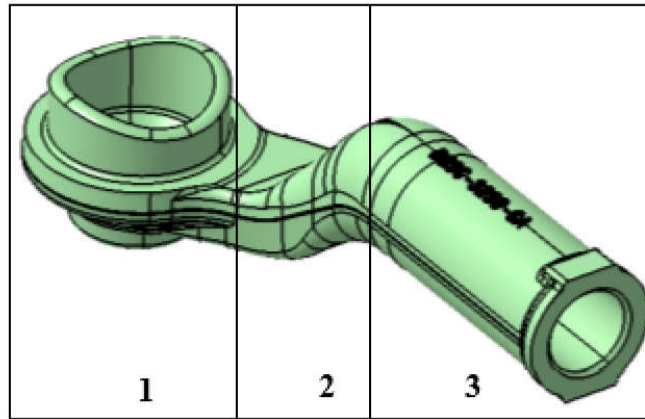
Rot başını oluşturan alt montaj parçalar şekil 3.1’de görüldüğü üzere genellikle çelik malzemeden dövme yöntemiyle üretilen küresel mafsallı mil, çelik veya alüminyumdan üretilen radyal gövde, aşınma ve torkları sağlayan plastik yatak ve sızdırmazlık görevi gören toz lastiğidir. Montaj parçaları, rotun şasi sistemi üzerinde sağlaması gereken test ve kinematik özelliklere göre farklı tasarımlardan oluşabilmektedir. En yalın haliyle rot başı, düz olarak tasarlanan ve rot başı küre merkezi ile rot kolu küre merkezi arasından kaçıklık olmayan tasarımlardır (Ersoy & Heiβing, 2011). Ancak rotun yönlendirme sisteminde hareket edeceği hacmin bazı durumlarda sistemde bulunan diğer parçalar tarafından kısıtlı olması sebebiyle, rot başı tasarımları farklılık gösterebilmektedir. Genellikle basitçe dövülebilen düz radyal gövde tasarlanmak mümkün olmamaktadır.



Şekil 3.1 Rot başı bileşenleri (Kişisel arşiv, 2022)

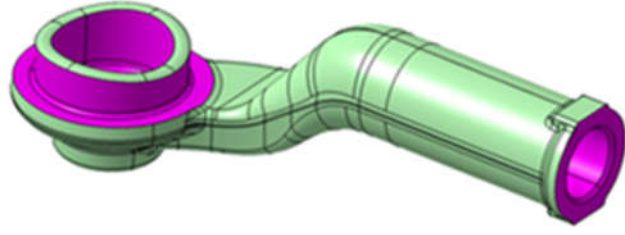
Radyal yatak oluşturulmaya başlamadan önce müşteriden tasarım gerekliliklerini içeren rot ile ilgili tüm teknik detaylar alınır. Daha sonra tasarımcı mühendis bu gerekliliklere göre tasarlanacak olan rot ’un mafsallı mil çapını, uzunluğunu, mafsallı mil

açısını ve metrik bağlantı çapı seçimini yapar. Şekil 3.2 ‘de görülen tasarımın 1 ve 3 numaralı kısımları ZF’nin bilgi birikimine dayalı olarak tasarım sisteminde taslak olarak mevcut olup, tasarımcı burada parametrik modele, belirlenen metrik bağlantı çapını ve yine hesaplarla belirlenen mafsal çapını girerek tasarımı günceller. 2 numaralı kısım ise rotun çalışabileceği boş alana, araç tekerleri tam döndüğünde herhangi bir temas olmayacak şekilde tasarlanır. Bu geometri yine müşteri tarafından gönderilen rot ‘un çalışma hacmini gösteren paket esas alınarak tasarlanır. Tasarım tamamlandıktan sonra, sonlu elemanlar yöntemi ile (FEA) araç üzerinde rota gelen kuvvet uygulanarak tasarımın istenilen burkulma kuvvetine uygun olup olmadığı analiz sonucu ortaya çıkan gerilme değerine göre yorumlanır. Parçanın istenilen kuvvete dayanmadığı öngörülür ise tasarımcı tarafından özellikle 2 numaralı boyun bölgesi kesiti iyileştirilerek yenilenir ve döngü tekrarlanır.



Şekil 3.2 Radyal yatağın tasarım aşamaları (Kişisel arşiv, 2022)

Yapılan ön çalışmalarla belirlenen optimum radyal yatak geometrisi sıcak dövme prosesi ile ham gövde olarak üretilmiştir. Elde edilen radyal yatak daha sonra montaj işleminin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan yüzey ölçülerine talaşlı imalat yöntemiyle getirilmiştir. Şekil 3.3’te belirtilen bağlantı ve montaj işlemi için gerekli olan yüzeyler teknik resimde belirtilen nihai ölçülerine CNC işleme merkezi kullanılarak imal edilmiştir. Prosesin son aşamasında rot başının rot kolu ile bağlantısını sağlayan metrik diş radyal yatağa açılmıştır.



Şekil 3.3 Radyal gövde işleme yüzeyleri (Kişisel arşiv, 2022)

Benzer talaşlı imalat işlemi mafsallı mil içinde yapılmıştır. Soğuk dövme sonucunda ham olarak elde edilen mafsallı mil son ölçülerine fabrika içerisinde işlenerek montaja hazır hale getirilmiştir. Rot kolunu oluşturan sızdırmazlık elemanı ve radyal yatak ile mafsallı mil arasında bulunan ve asıl amacı metal-metal kontaklı önlemek olan plastik yatak tedarikçilerden hazır olarak temin edilmektedir. İşlenmiş mafsallı mil Şekil 3.4’te, plastik yatağın model resmi ise Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 İşlenmiş mafsallı mil (Ersoy & Heiβing, 2011)



Şekil 3.5 Plastik yatak 3B modeli (Ersoy & Heiβing, 2011)

### 3.2 Mekanik Montaj

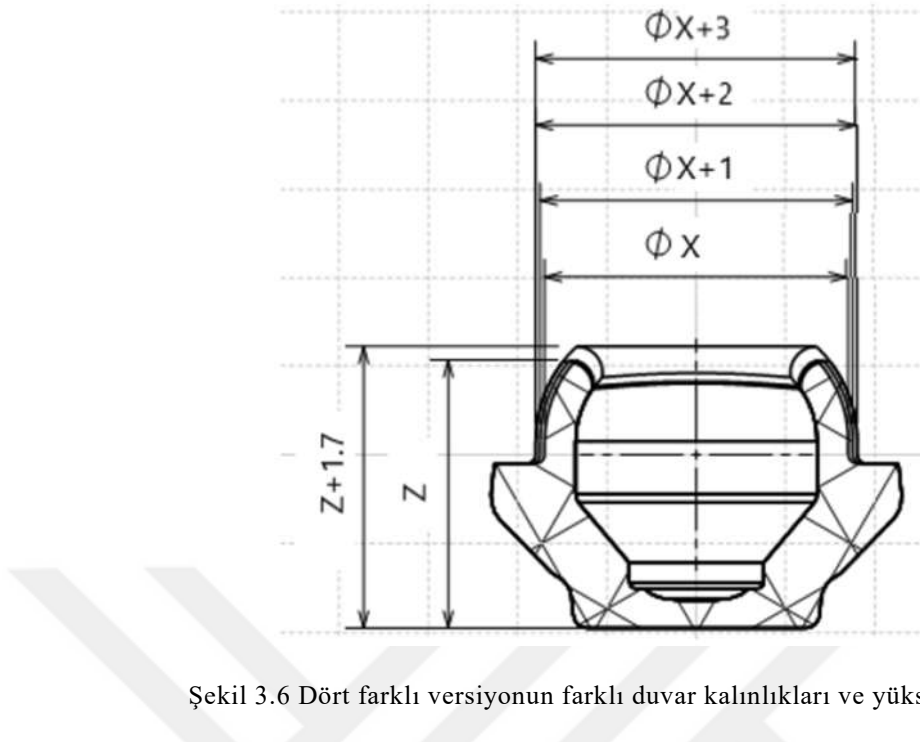
Dövme prosesinden ham olarak tedarik edilen radyal gövde ve mafsallı milin imalat sonucunda nihai ölçülerine yani montaj işlemi için hazır hale getirilmiştir. Otomasyon sistemine dayalı döner montaj hattında parçaların montajı gerçekleştirilmiştir. Son işlem sırasında uygulanan kapanma kuvveti hem çatlak oluşturmaması için hem de gerekli güvenli kapanmayı sağlayabilmek için sayısal olarak kontrol edilmektedir. Rot başı sisteminde plastik yatağı, mafsallı mil ve gövdenin fazla sıkıştırılması yüksek moment değerleri meydana getirirken, sürüş konforunu büyük ölçüde düşürmektedir. Öte yandan montaj aşamasında oluşan baskının az olması halinde oluşan düşük moment değerleri ise sürüş güvenliğini düşürmektedir. Bu nedenle rot başının montaj işlemi sırasında gerek duyulan kapanma kuvvetinin önceden tespit edilmesi son derece önemlidir.

### 3.3 Kapanma Geometrisini Etkileyen Parametreler

Duvar yüksekliği, yatak ağız kesit kalınlığı ve presin ilk temastan sonraki Y ekseninde aldığı yol (deplasman) kapanma geometrisini etkileyen parametrelerdir. Duvar yüksekliğinin çok fazla olması durumunda mafsallı hareket alanı azalacak bu da çalışma açısından düşüğe neden olacaktır. Kesit kalınlığının fazla olması ise presleme esnasında daha çok kuvvet gerektireceğinden duvarda çatlak oluşturma riskini artıracığından tercih edilmez. Bu nedenle maksimum çekme kuvvetini sağlayacak optimum tasarım belirlenecektir.

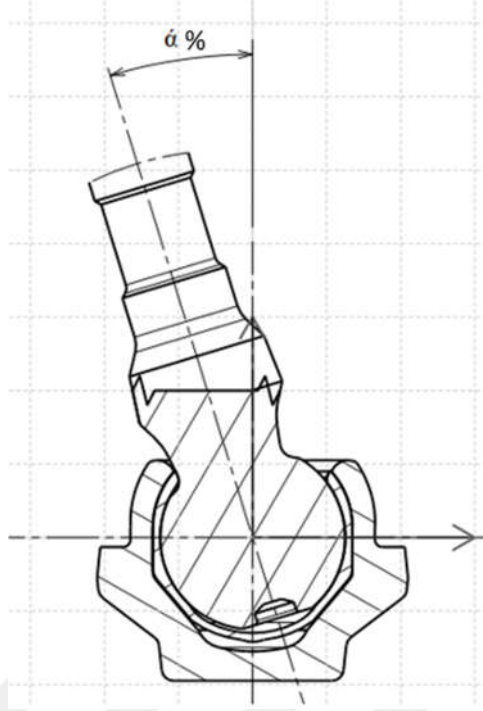
### 3.4 Uygulanan Kapanma Geometrisi ve Çekme Yüğü.

Proje kapsamında kullanılacak olan mafsallı gövdesi için çatlak oluşmayacak kapanma geometrisi için farklı duvar kalınlıkları ve duvar yüksekliklerinde bazı tasarım varyasyonları oluşturuldu.



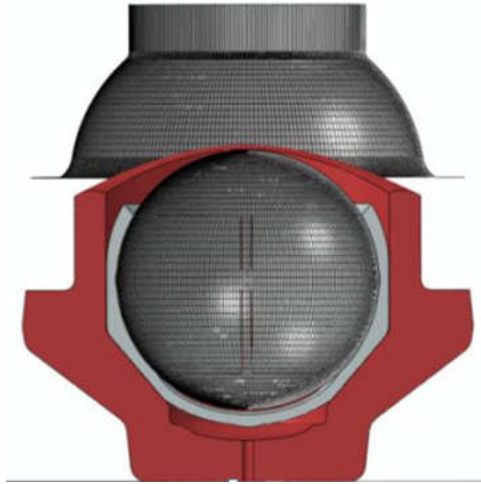
Şekil 3.6 Dört farklı versiyonun farklı duvar kalınlıkları ve yükseklikleri

Alternatif tasarımlar yapılırken tasarım gereksinimi olan  $\alpha^\circ$  yatma açısı göz önünde bulundurulmuştur. Binek araçların park halinde ya da düşük hızlarda tekerleğin kolayca dönmesini sağlayabilmek için rot başı çalışma açısının da yüksek açılarda olması gerekmektedir. Bu proje kapsamında geliştirilen yeni tip rot başı, daha yüksek çalışma açılarını sağlayabilecek nitelikte tasarlanmıştır ve en az  $\alpha^\circ$  'lik yatma açısına ulaşmak proje hedeflerinden biridir. Şekil 3.7'de  $\alpha^\circ$  yatma açısında montajlanmış mafsal mili ve rot başı gövdesi modelleri görülmektedir.



Şekil 3.7 Mevcut model üzerinde mafsalsal mili yatma açısı kontrolü

Bu tasarım gereksinimi olan yatma açısı bu duvar yüksekliğini etkileyen bir kısıtlayıcı faktör olarak göz önünde bulundurulmuştur.

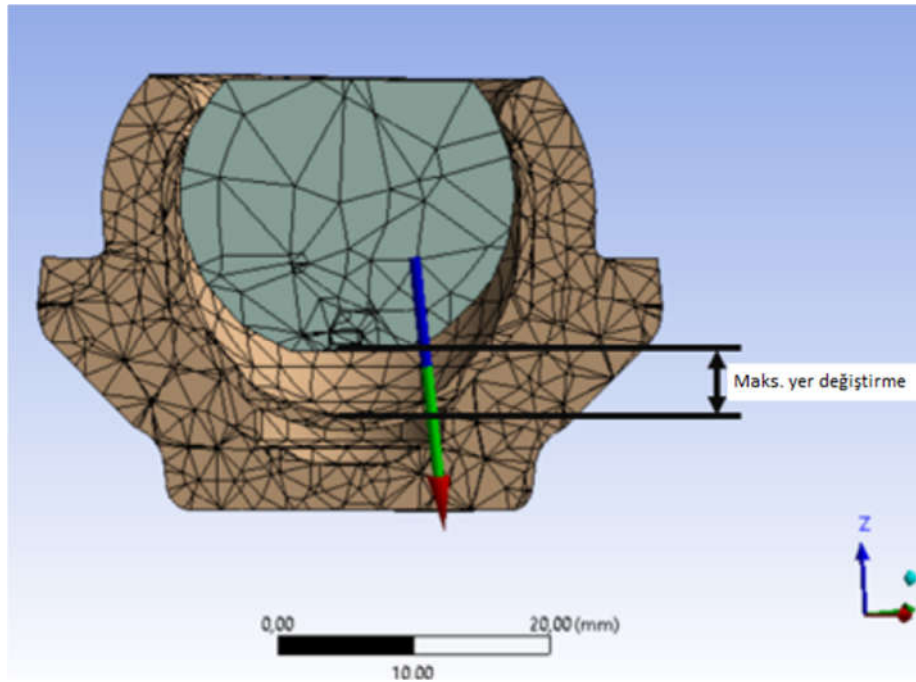


Şekil 3.8 Yuva duvarının pres ile kapatılma görseli

Şekil 3.8’de mafsalsal yuvasının duvarının pres yardımıyla kapatılma görseli verilmiştir.

### 3.5 Tasarım Optimizasyonu

Daha sonra rot başı gövdesinin istenilen açıda çalışacak şekilde geometrisi belirlenmiştir. Gövde yüksekliği, duvar kesit kalınlığı ve gövdenin iç konturunu göz önüne alarak rot başı gövdesini modelledikten sonra mafsalsalın gövdeden çıkma kuvvetini kontrol etmek için analiz programını kullanarak sonlu elemanlar analizi yapıldı. Mafsala, Z eksenini yönünde yuvadan çıkmasını sağlayan mafsalsal çekme testi sırasında gerçekleşen maksimum deplasmanı uygulanmıştır.

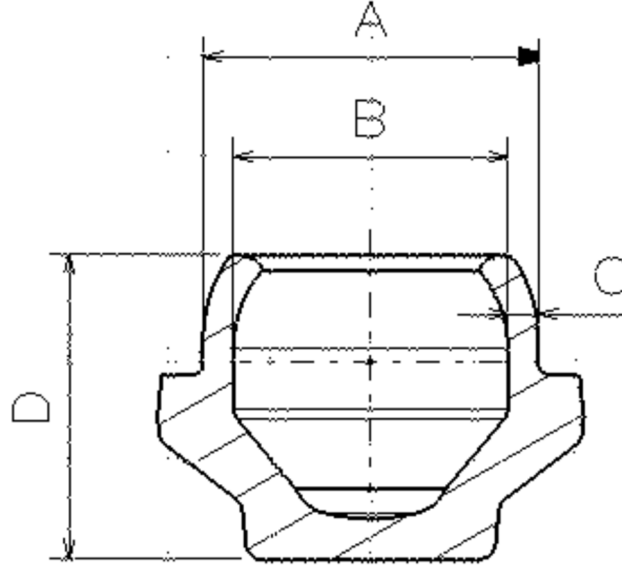


Şekil 3.9 Uygulanan deplasmanı gösteren analiz modeli

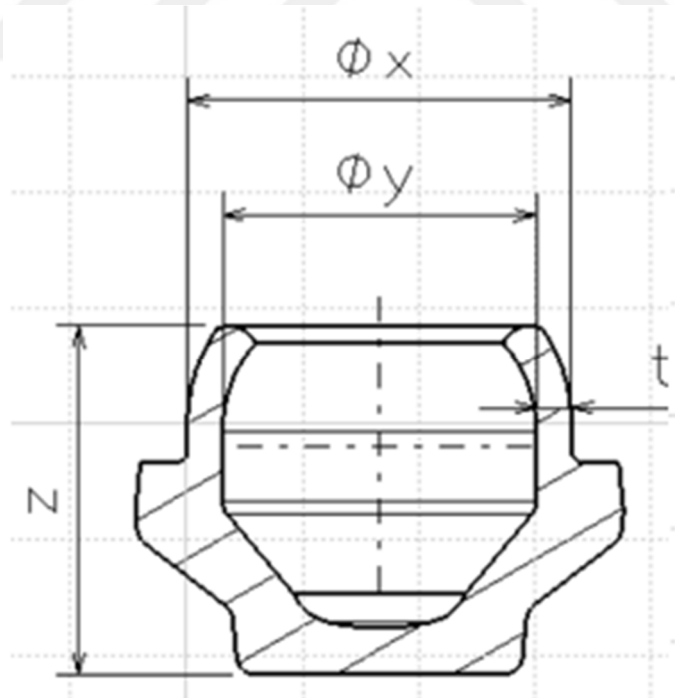
### 3.6 Alternatif Rot Başı Tasarımlarının Modellenmesi

Sonlu elemanlar modeli oluşturulup, testler ile mevcut rot başı gövdesi baz alınarak model doğrulandıktan sonra mevcut tasarımda 100% kN yükte yerinden çıkan mafsalsalın gövdesini Şekil 3.11’de belirtilen kritik ölçülerde iyileştirme yaparak 125% kN hedef olarak amaçlanmıştır. Rot başının tasarım iyileştirme çalışmasında ilk olarak, kapama prosesi sırasında çatlak oluşumuna etki ettiği düşünülen temel ölçüler model üzerinde tespit edilmiştir. Bu ölçüler rot başının dış çapı (A), radyal yatağın, rot

milinin hareket yönüne dik doğrultuda bulunan duvar yüksekliği (D) ve duvar kesit kalınlığı (C) dir. Şekil 3.10’da belirlenen ölçüler model üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Mafsal çıkma yükünü etkileyen ölçüler



Şekil 3.11 Mevcut tasarım ölçüleri

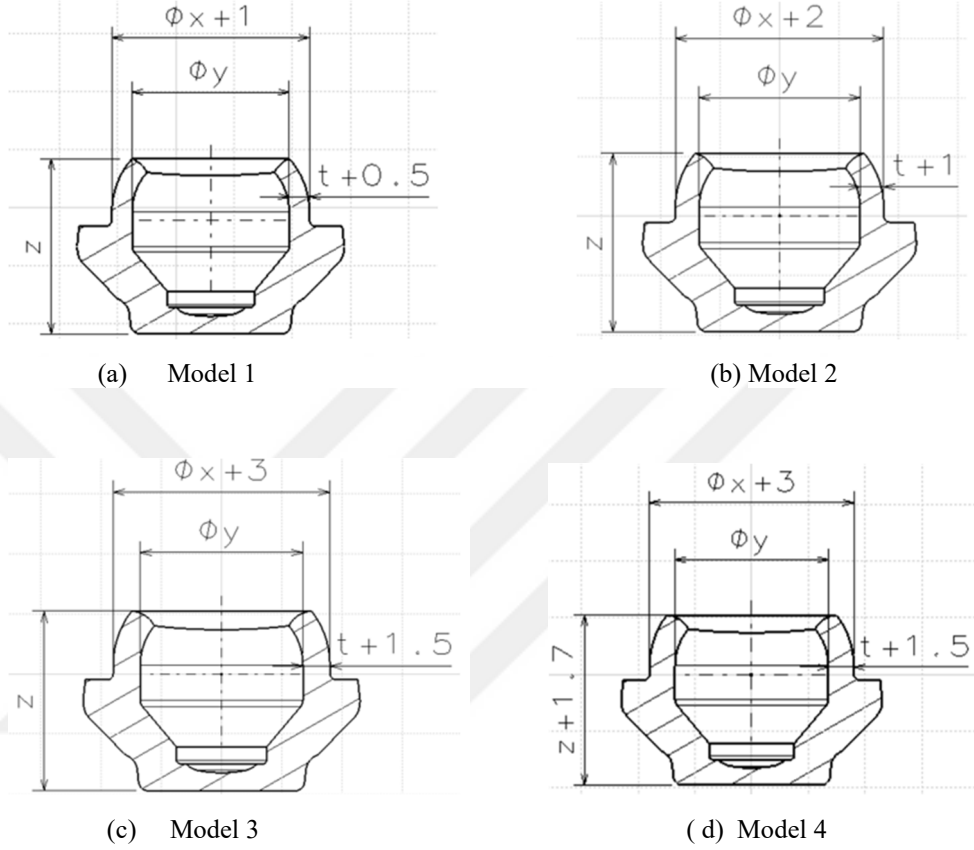
Çatlak oluşumunu engellemek için yüzde şekil değiştirme değerinin mümkün olduğunca düşük olması gerekmekte ve bu koşulu sağlayacak en iyi tasarımı elde etmek için farklı tasarım varyasyonları Tablo 3.1’de verilmiştir. Mafsal çıkma testi esnasındaki plastik şekil değişimine, duvar kesit kalınlığı (C) ve duvar yüksekliğinin (D) etkisini inceleyebilmek için sonlu elemanlar çekme analizleri model 4 hariç sadece kesit kalınlığı değiştirilerek gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1 Rot Başlı Gövdesi Parametrik Ölçüleri

|              | A<br>Dış çap         | B<br>İç çap        | C<br>Kesit<br>kalınlığı | D<br>Duvar<br>yüksekliği |
|--------------|----------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| Mevcut model | $\varnothing x$ mm   | $\varnothing y$ mm | t mm                    | z mm                     |
| Model 1      | $\varnothing x+1$ mm | $\varnothing y$ mm | t+0.5 mm                | z mm                     |
| Model 2      | $\varnothing x+2$ mm | $\varnothing y$ mm | t+1 mm                  | z mm                     |
| Model 3      | $\varnothing x+3$ mm | $\varnothing y$ mm | t+1.5 mm                | z mm                     |
| Model 4      | $\varnothing x+3$ mm | $\varnothing y$ mm | t+1.5 mm                | z+1.7 mm                 |

Proje kapsamında mafsal mili çıkma yükünün 100% kN’ dan büyük olması hedeflenmiştir. Belirlenen hedef çıkma yüküne dayanarak dört farklı tasarım varyasyonu modellenmiş olup modellerin teknik resimleri şekil 3.12’te verilmektedir. Şekil 3.12 (a)’da D ile tanımlanan XY düzlemindeki duvar yüksekliği mafsal milinin çalışma açısını olumsuz etkilememesi için model 1, 2, 3 için z mm olarak sabit tutulmuş sadece model 4 için duvar yüksekliği etkisini görebilmek için z+1.7 mm olarak belirlenmiştir. B ile tanımlanan yuva iç çap ölçüsü model 1, 2, 3 ve 4 için plastik yatak tasarımında değişikliğe neden olmasın diye  $\varnothing y$  mm olarak sabit tutulmuştur. Birbiri ile ilişkili olan A dış çap ve C duvar kesit kalınlığı ise model 1 için A:  $\varnothing x+1$  mm C: t+0.5 mm, model 2 için, A:  $\varnothing x+2$  mm C: t+1 mm, model 3 için A:  $\varnothing x+3$  mm C: t+1.5 mm, model 4 için, A:  $\varnothing x+3$  mm, C: t+1.5mm, D: z+1.7mm olarak belirlenmiştir. Burada C duvar kalınlığını artırmadaki amaç mafsal milinin çıkma yüküne maruz kaldığında temas noktası olan alandaki malzeme hacmini artırarak daha yüksek gerilmelere dayanması hedeflenmektedir. Sonuçlar ve öneriler kısmı olan

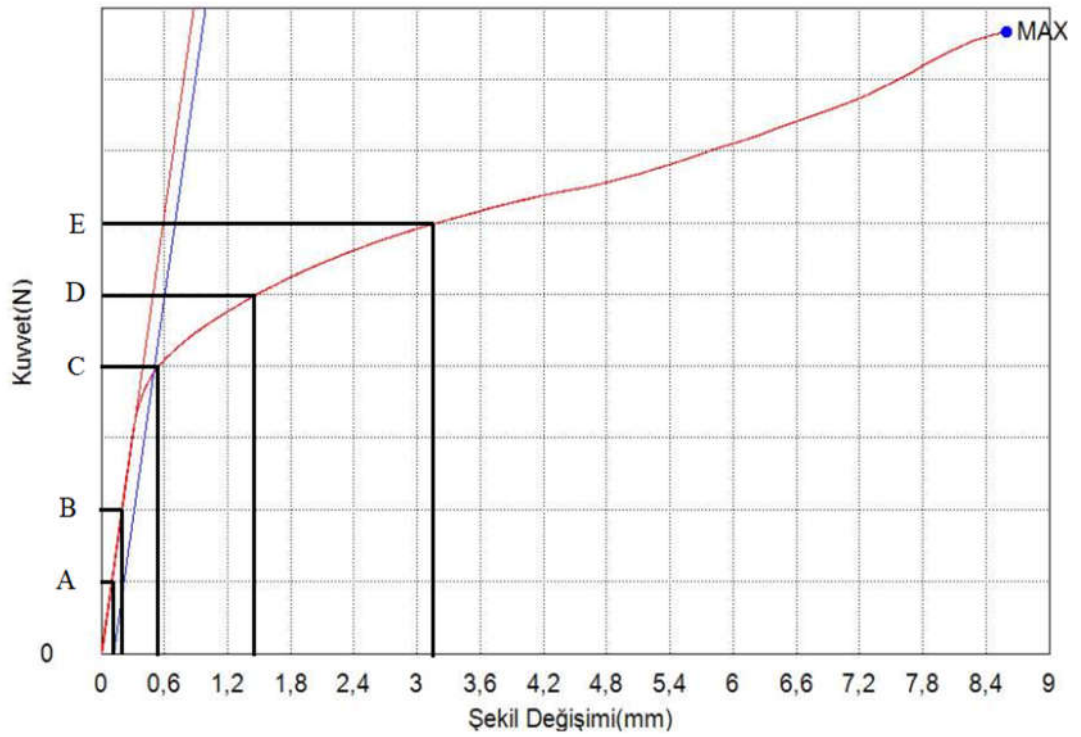
bölüm beş'te bu tasarlanan dört farklı varyasyon modele sonlu elemanlar metodu ile mafsallık çekme analizi uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.12 Oluşturulan tasarım varyasyonları

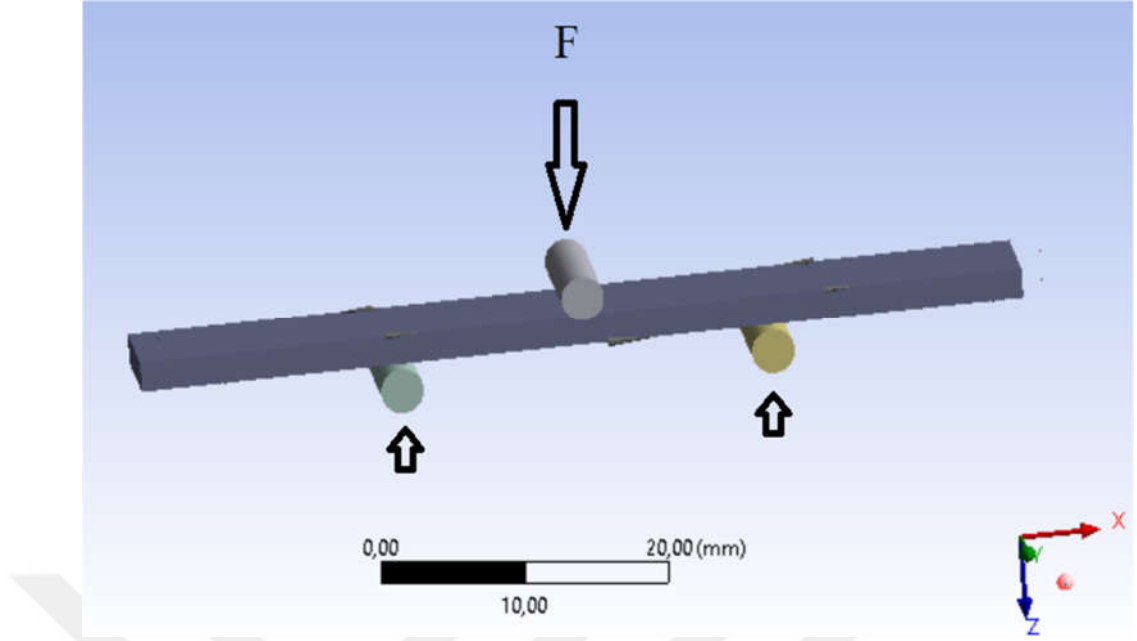
### 3.7 Eğme Testi Simülasyonu

Mafsallık mili çıkma yükü simülasyonu öncesinde analiz sırasında gireceğimiz malzeme özelliklerini belirleme amacı ile eğme testi gerçekleştirildi. Bölüm dörtte şekil 4.13' de bulunan numuneye eğme testi uygulandı. Test sonucunda 5000 tane veri ile şekil 3.13 kuvvet-çökme eğrisi elde edildi ve bu verilerden A, B, C, D ve E kuvvetlerine denk gelen noktalar K ve n sabitlerini belirlemek için referans noktası olarak sonlu elemanlar eğme analizinde kullanıldı.



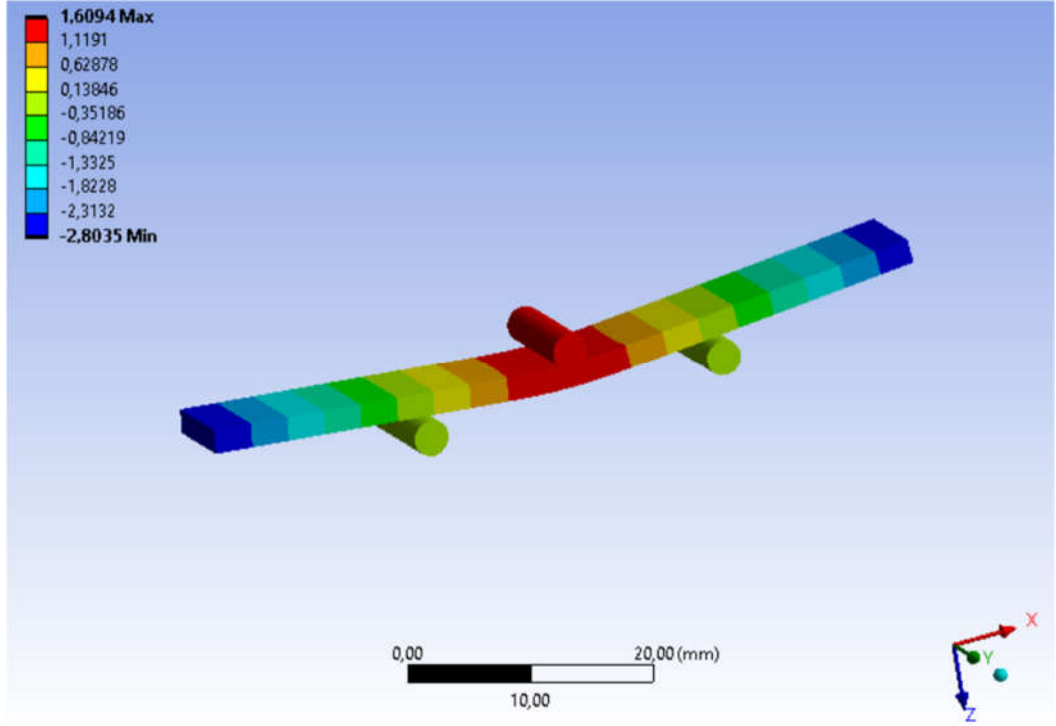
Şekil 3.13 Eğme testi sonucu elde edilen kuvvet şekil değiştirme eğrisi

Eğme test numunesinin Catia V5 programında oluşturulan verisi şekil 3.13'te görüldüğü gibi step dosya formatında kaydedilerek sonlu elemanlar analiz programına geometrik data kısmından aktarıldı. Daha sonra eğme testindeki mesnet noktaları ve yük uygulama noktası tanımlandı. Ağ (mesh) işlemi ile sonlu elemanlar analizi için uygun hale getirildi. Malzeme olarak yapısal çelik malzemesi atandı ve elastik limit değeri olarak eğme testinden alınan X MPa, çekme değeri olarak ise Y MPa olarak girildi. İzotropik üstel davranış (Power law) tanımlandı ve plastik bölge için tablo 3.2'de bulunan analiz 1,2,3,4 K ve n değerleri sırası ile seçilerek şekil 3.15'te 1000N yükte uygulanan analizde görüldüğü gibi beş farklı yükte dört ayrı analiz gerçekleştirildi.

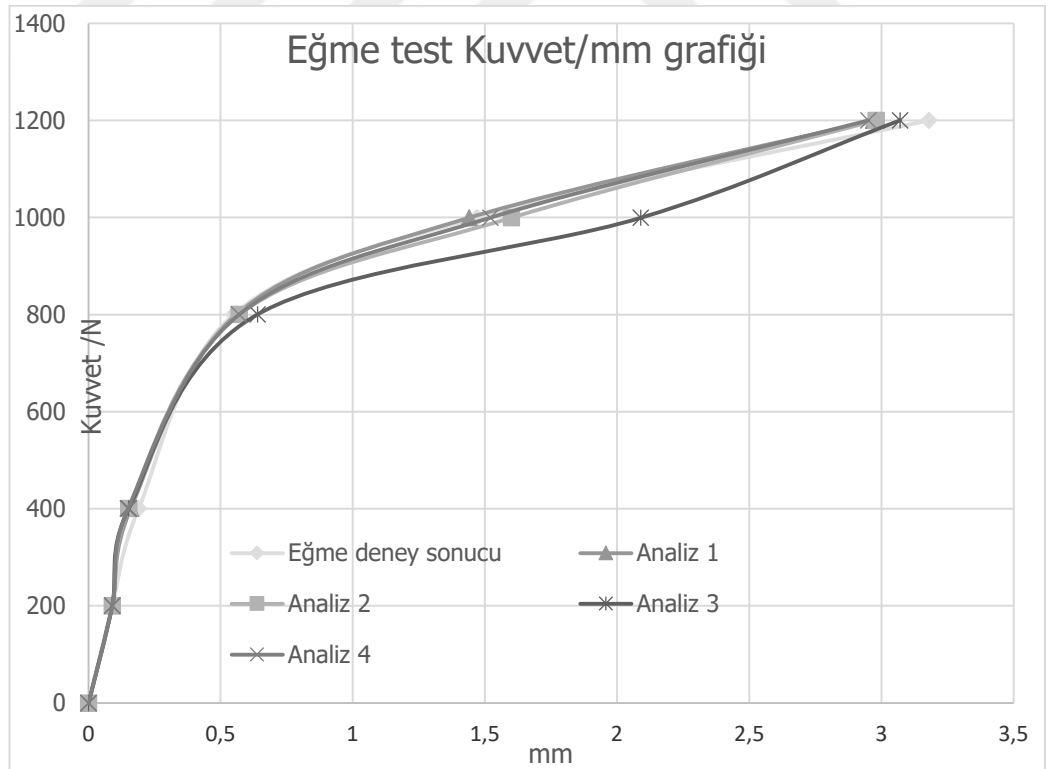


Şekil 3.14 Eğme testi simülasyon datası

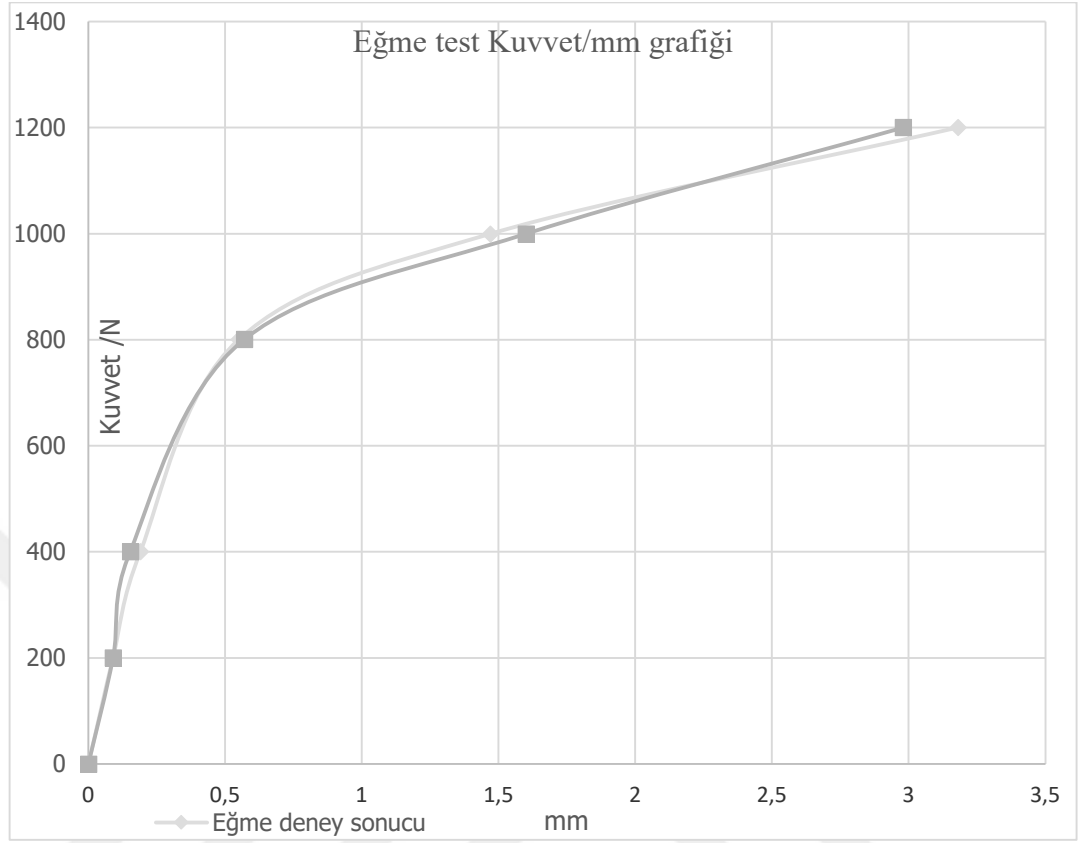
Daha sonra her bir analiz için A, B, C, D ve E kuvvet değerlerine karşılık gelen çökme miktarları Excel programına taşınarak her bir analiz için kuvvet-şekil değiştirme grafiği çizdirildi. Oluşan grafikler karşılaştırılarak gerçek eğme testinden alınan kuvvet-şekil değiştirme eğrisine en yakın eğri olan analiz 2 için belirlenen simülasyon K ve n değerleri verdiği için bu değerleri malzemenin homojen plastik deformasyon bölgesi için non-lineer parametreler olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.15 1000 N kuvvette numunede meydana gelen 1.6 mm şekil değişimi



Şekil 3.16 K ve n değerlerinin tespit edildiği gerçek eğriye yakın elde edilen kuvvet şekil değiştirme eğrileri



Şekil 3.17 K ve n değerinin tespit edildiği gerçek eğriye en yakın elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisi

Şekil 3.16'da ki grafikte, gerçek eğme testi sonucunda oluşan grafik ve Ansys workbench student programında gerçekleşen dört farklı analiz sonucu oluşturulan gerilme- şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Şekil 3.17'de ise gerçek eğme testi sonucu oluşan eğri ve bu eğriye en yakın oluşmuş analiz 2 eğrisi görülmektedir.

Tablo 3.2 Farklı K ve n değerleri için gerçek ve Analiz çökme miktarları

| Kuvvet(N) | Gerçek Çökme (mm) | FEA Analiz 1 çökme (mm) | FEA Analiz 2 çökme (mm) | FEA Analiz 3 çökme (mm) | FEA Analiz 4 çökme (mm) |
|-----------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0         | 0                 | 0                       | 0                       | 0                       | 0                       |
| A         | 0,09              | 0,09                    | 0,09                    | 0,09                    | 0,09                    |
| B         | 0,19              | 0,16                    | 0,15                    | 0,152                   | 0,153                   |
| C         | 0,55              | 0,56                    | 0,57                    | 0,64                    | 0,57                    |
| D         | 1,47              | 1,44                    | 1,52                    | 2,09                    | 1,6                     |
| E         | 3,18              | 2,97                    | 2,95                    | 3,07                    | 2,98                    |

### 3.8 Gerilme Şekil Değiştirme Diagramı Çizimi

Şekil 3.18’de görünen gerilme-şekil değiştirme eğrisi denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.18 Gerilme-şekil değiştirme diyagramı

**Maksimum eğilme gerilmesi hesabı:** Numune homojen ve elastik bir kirişse, üç noktadan eğilme testi süresince en yüksek gerilme numunenin dış yüzeyinde orta noktada meydana gelir. Oluşan bu gerilme, yük deplasman eğrisinin herhangi bir noktası için aşağıdaki formül (3.1) ile hesaplanır. (BTÜ, 2022)

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1)$$

Burada denklem (3.1)'de;

$\sigma$ : Orta noktada kiriş yüzeyinde gerilme (N/mm<sup>2</sup>)

P: Yük sehimi eğrisinin herhangi bir noktasındaki kuvvet(N)

L: İki destek arası mesafe(mm)

b: Kiriş genişliği(mm)

d: Kirişin yüksekliği(mm)

**Maksimum Şekil Değiştirme hesabı:** Maksimum şekil değiştirme kirişin alt yüzeyinde, desteklerin orta noktasında meydana gelir. Buradaki şekil değiştirme aşağıdaki formül (3.2) den hesaplanır. (B, 2022)

Burada;

$\varepsilon$ : Numunenin dış yüzeyindeki şekil değiştirme (mm/mm)

D: Numunenin maksimum deplasmanı(mm)

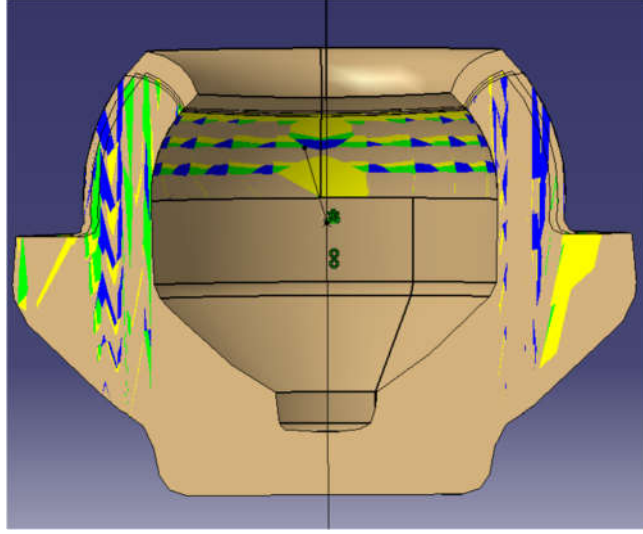
d: Numunenin kesit yüksekliği(mm)

L: destekler arası mesafe(mm)

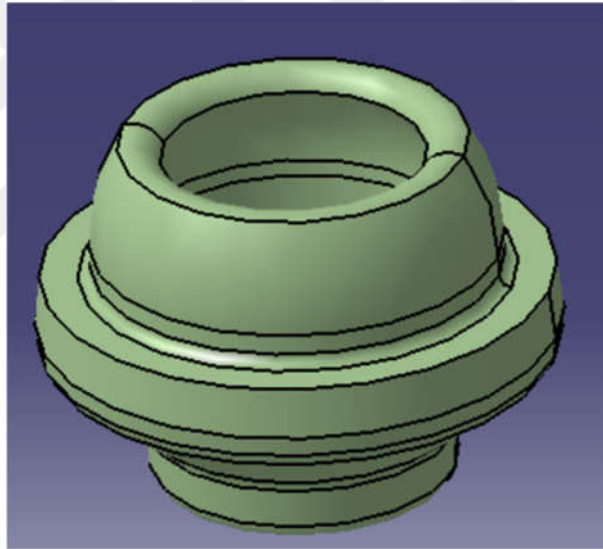
$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.2)$$

### 3.9 Sonlu Elemanlar Çıkma Testi Analizi

Oluşturulan mevcut model ve dört farklı varyasyon sonlu elemanlar programına yüklenerek detayları bölüm beşte belirtilen işlem basamakları uygulanarak analiz yapılmıştır. Analizde kullanılacak komponentler; Rot başı yuvası, plastik yatak ve mafsal mili küresinden oluşmaktadır.



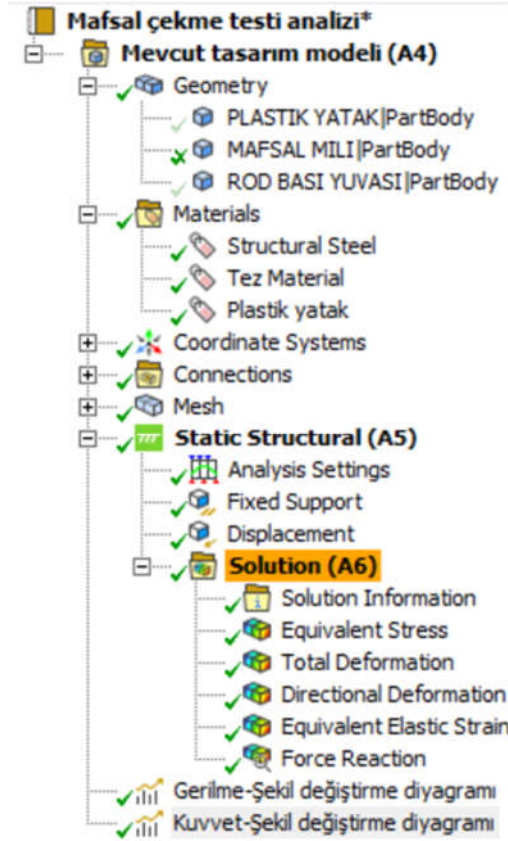
Şekil 3.19 Analiz uygulanan dört farklı varyantın üst üste getirilmiş verisi



Şekil 3.20 Analiz edilen rot başı yuvası 3B verisi

Dört farklı varyasyonda hazırlanan modelleri step olarak kaydedildi. Sonraki aşama olarak modeli sonlu elemanlar analiz programına yükleyip çıkma yükü analizi için gerekli işlem basamaklarını uygulandı. Bu basamaklar sırası ile, malzeme verilerini ilgili modele atama, parçalar arası temas tipini belirleme, mesh (ağ) seçimi, parçayı sabitleme ve yükün uygulanacağı parçanın ve yerin belirlenmesi, çözümlemenin başlatılması sonrasında ise görülmek istenen gerilme, deformasyonun tipinin

eklenmesi ve kuvvet-şekil değiştirme, gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin elde edilmesi basamaklarından oluşmaktadır. Bu basamaklar şekil 3.21’de görülmektedir.



Şekil 3.21 Analiz için oluşturulan işlem basamak ağacı

**Sonlu elemanlar malzeme atama:** Numuneyi oluşturan parçalar olan rot başı yuvası, plastik yatak ve mafsal mili 'ne ayrı ayrı malzeme ataması yapıldı. Bu malzemeler mafsal mili için sonlu elemanlar analiz programı kütüphanesinde bulunan yapısal çelik, plastik yatak için polietilen atanmıştır. Üzerinde çalıştığımız rot başı yuvası için ise yapısal çelik atanıp buna ek olarak analizin plastik bölgede sergilediği davranışı gözlemlemek için “nonlinaer isotropic hardening power law” malzeme özelliği eklenip daha önce eğme simülasyonu ile doğrulanarak belirlenen K ve n değerleri girilmiştir.

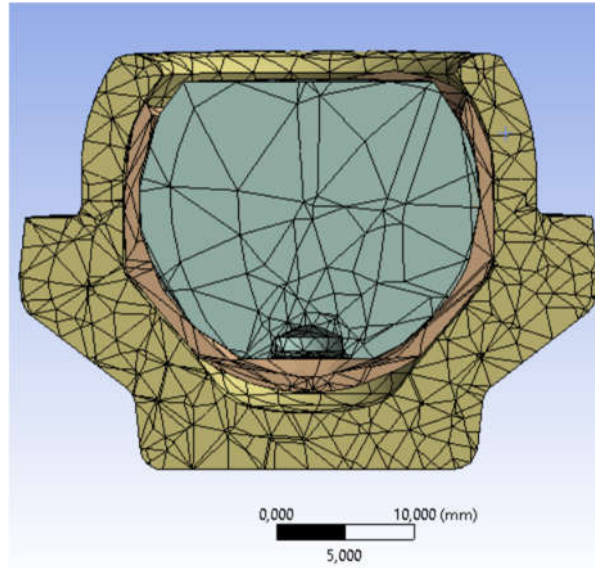
**Parçalar arası temas tipi belirleme:** Şekil 3.22’de görüldüğü gibi mafsal mili küresi ile plastik yatak için sürtünmeli temas belirlenerek, sürtünme katsayısı  $\theta$  olarak

girilmiştir. Plastik yatak ile rot başı yuvası için ise, yatağın hareket etmesini istemediğimiz için birbirine bağlı seçilmiştir.

|                                               |                        |                   |                          |
|-----------------------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|
| <b>Scope</b>                                  |                        | <b>Scope</b>      |                          |
| Scoping Method                                | Geometry Selection     | Scoping Method    | Geometry Selection       |
| Contact                                       | 16 Faces               | Contact           | 10 Faces                 |
| Target                                        | 4 Faces                | Target            | 10 Faces                 |
| Contact Bodies                                | PLASTİK YATAK/PartBody | Contact Bodies    | PLASTİK YATAK/PartBody   |
| Target Bodies                                 | MAFSAL MILİ/PartBody   | Target Bodies     | ROD BAŞI YUVASI/PartBody |
| Protected                                     | No                     | Protected         | No                       |
| <b>Definition</b>                             |                        | <b>Definition</b> |                          |
| Type                                          | Frictional             | Type              | Bonded                   |
| <input type="checkbox"/> Friction Coefficient | 0                      | Scope Mode        | Automatic                |
| Scope Mode                                    | Automatic              | Behavior          | Program Controlled       |
| Behavior                                      | Program Controlled     | Trim Contact      | Program Controlled       |
| Trim Contact                                  | Program Controlled     | Trim Tolerance    | 0,17048 mm               |
| Trim Tolerance                                | 0,17048 mm             | Suppressed        | No                       |
| Suppressed                                    | No                     |                   |                          |

Şekil 3.22 Sonlu elemanlar analizi temas tipi tanımlama

**Mesh seçimi:** Mesh seçimi bizim için önemli parça olan rot başı yuvası için, üç boyutlu eleman olan tetrahedron seçilmiştir. Element boyutu rot başı yuvası için 3 mm, mafsallı mil küresi için 9 mm, plastik yatak için ise 3 mm olarak seçilmiştir. Şekil 3.23'te ağ(mesh) uygulanmış model, şekil 3.24'te ise ağ boyut bilgilerini gösteren arayüz görülmektedir.

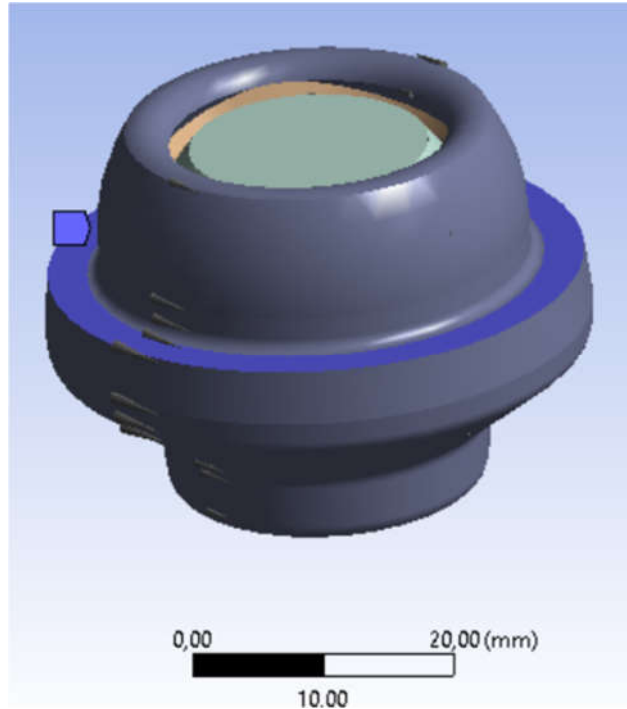


Şekil 3.23 Rot başı mesh görünümü

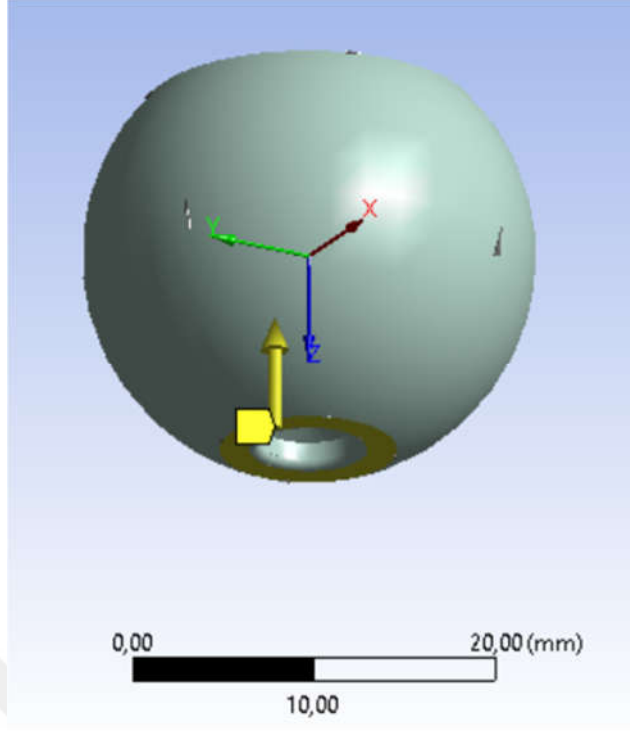
|                                         |                    |
|-----------------------------------------|--------------------|
| Scope                                   |                    |
| Scoping Method                          | Geometry Selection |
| Geometry                                | 1 Body             |
| Definition                              |                    |
| Suppressed                              | No                 |
| Type                                    | Element Size       |
| <input type="checkbox"/> Element Size   | 3, mm              |
| Advanced                                |                    |
| <input type="checkbox"/> Defeature Size | Default            |
| Behavior                                | Soft               |

Şekil 3.24 Rot başı yuvası için mesh boyutunu girdiğimiz arayüz

**Parçayı sabitleme ve yer değiştirme yüzeyleri:** Analiz uygulayacağımız modelimizi, gerçek çekme testinde şekil 4.1’de rot başı mafsallı çıkma yükü testi görselinde görüldüğü gibi şekil 3.25’te görüldüğü gibi flanş bölgesinden sabitleyip, mafsallı küresinin alt kısmındaki şekil 3.26’te işaretlenmiş bölgeden 6 mm yer değiştirme kuvveti uygulandı.



Şekil 3.25 Parçanın sabitlendiği flanş yüzeyi



Şekil 3.26 Mafsal mili küresine yer değiştirme kuvveti uygulanan yüzey

Bu işlem basamaklarını uyguladıktan sonra sonlu elemanlar programında bulunan “solve” komutu ile çözümleme işlemi başlatıldı. Daha sonra şekil 3.21’deki işlem basamaklarını gösteren ağaçta görülen “solution” kısmına sonuç olarak görmek istediğimiz “Equivalent stress” von-mises gerilmesini, “total deformation” olarak görülen toplam deformasyon sekmesini, “directional deformation” olarak görülen Z eksenini yönünde meydana gelen deformasyon sekmesini, “Equivalent elastic strain” olarak görülen şekil değiştirme miktarını gösterecek sekmeyi, mafsalın ne kadar kuvvette yataktan çıktığını gösteren “force reaction” sekmesini ve elde etmek istediğimiz gerilme-şekil değiştirme, kuvvet şekil değiştirme grafiklerini programın “home” sekmesindeki grafik seçeneğinden ekledik.

Analiz sonucunda toplam beş adet gerilme-şekil değiştirme ve kuvvet-şekil değiştirme sonuç grafiği elde ederek bunların arasında optimum sonucu veren tasarımı beşinci bölümde yer alan sonuçlar ve öneriler kısmında belirlenmiştir.

## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar

- **Rot başı yuvası malzemesi:** MnV çelik, ZF Lemförder aks modülleri firmasından tedarik edilmiştir.
- **Metal kesme cihazı:** Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan metal kesme cihazı kullanılmıştır.
- **Bakalit kalıp:** Zf lemförder aks modülleri a.ş firmasında bulunan kalıplar numunelerin korozyon deneylerinde kalıba alınma aşamalarında kullanılmıştır.
- **SiC zımpara:** Metalografik numune hazırlama işlemlerinde yüzey zımpara aşamasında kullanılmıştır.
- **Alümina pasta:** 3 µm elmas pasta parlatma işlemlerinde kullanılmıştır.
- **Dağlayıcı:** Karışımında %2 nitrik asit ve etil alkol bulunan nital ile dağlandı.
- **Metalografik numune hazırlama cihazları:** Presi MECAPOL P230 cihazı metalografik kesit hazırlama işlemlerinden zımparalama ve parlatma basamaklarının gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılmıştır.
- **Optik ve metal mikroskop:** Mikroyapı incelemeleri için Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan Nikon-ECLIPSE marka ME600D model optik mikroskop ve ZEISS marka Stero mikroskop kullanılmıştır.
- **Micro Vickers sertlik ölçme cihazı:** SHIMADZU HVM micro sertlik ölçme deneylerinde kullanılmıştır.
- **Eğme testi cihazı:** Mikroyapı incelemeleri için Dokuz Eylül Üniversitesi Makine mühendisliği mekanik laboratuvarında bulunan Instron Universal eğme cihazı kullanılmıştır.
- **Rot başı çekme cihazı:** ZF Lemförder aks modülleri a.ş firması laboratuvarında bulunan mafsallık çekme cihazı kullanılmıştır.

#### 4.2 Rot başı mafsalsal çıkma yükü testi

Test edilecek olan rot başı mafsalsal milinin küre merkezine denk gelecek şekilde şekil 4.1’de görüldüğü üzere gövdenin altından mafsalsal yüzeyine kadar delindi. Deliğin çapı sürtünme kuvvetini engellemek için yükü uygulayacak olan aparatın çapından biraz geniş açıldı. Daha sonra rot başı mafsalsal bölgesinden küre merkezi yukarıda kalacak şekilde tezgâhın alt tablasına sabitlendi. Tezgâhın üst tablasındaki yükü uygulayacak olan aparat açılan delik ile aynı eksene getirilerek ve mafsalsal milinin küresine yanaştırılarak tezgâh sıfırlandı.



Şekil 4.1 Rot başı mafsalsal çıkma yükü testi (Kişisel arşiv, 2022)

Tezgâhın alt tablası sabit bir hız ile yukarıya doğru hareket etmeye başladı ve mafsalsal milinin gövdeden çıkması ile durduruldu. Test tamamlandıktan sonra tezgâh yük-mesafe grafiğini oluşturuldu.

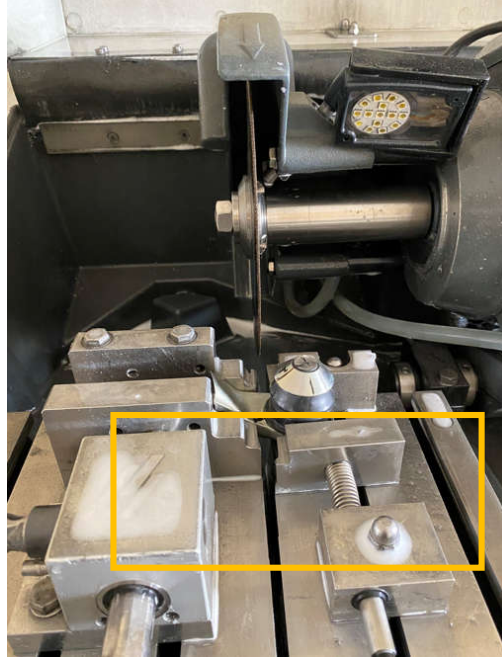
### 4.3 Metalografi Çalışmaları

#### 4.3.1 Numune Hazırlama

İlk olarak rot şekil 4.3 'te görülen metal kesme makinesinde şekil 4.4'te görülen parçalara ayrıldı. Daha sonra yatağın yuva kısmı şekil 4.5'te görüldüğü gibi tekrar çeyrek parça çıkacak şekilde mikroyapı incelemeleri için dört parçaya ayrıldı.



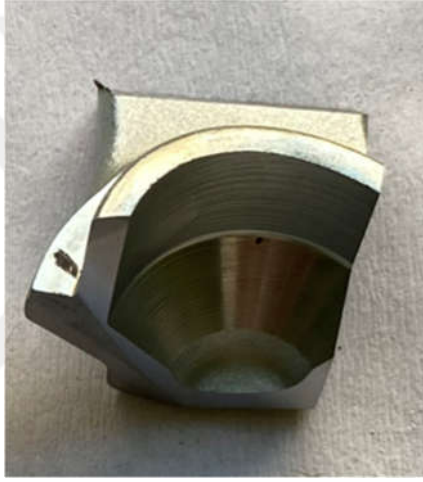
Şekil 4.2 Rot'un kesim öncesi görseli (Kişisel arşiv, 2022)



Şekil 4.3 Metal kesme makinesinde rotun kesilmesi (Kişisel arşiv, 2022)



Şekil 4. 4. Rottan kesilen parçalar (Kişisel arşiv, 2022)



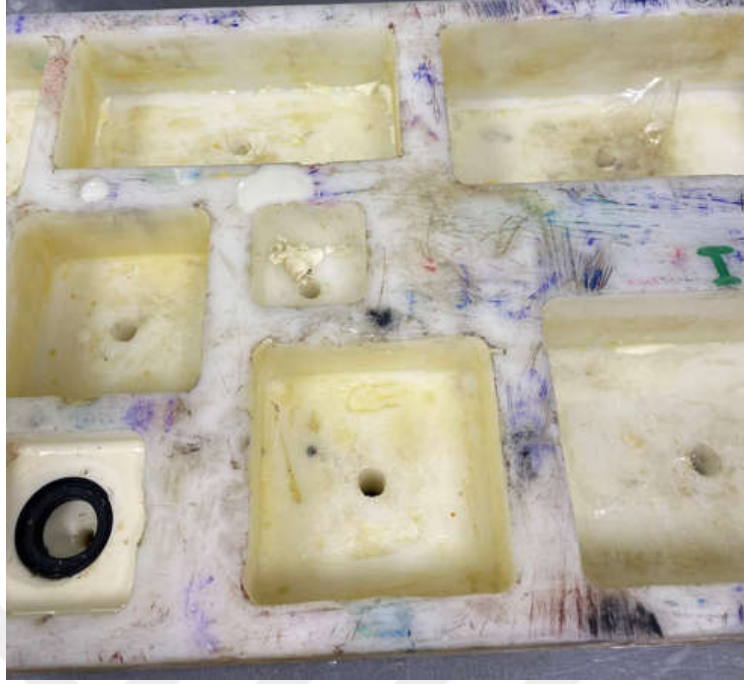
(a)



(b)

Şekil 4.5 Mikroyapı ve sertlik testi için kalıba alınacak numuneler a) Deforme olmamış numune, b) Deforme olmuş numune (Kişisel arşiv, 2022)

Mikro yapı incelemesi için istenilen boyuta ayrılan radyal yatak kafa parçaları bakalit kalıba alınarak yüzey parlatma işlemine hazır hale getirildi



Şekil 4.6 Bakalit kalıp (Kişisel arşiv, 2022)



Şekil 4.7 Kalıptan çıkan numuneler (Kişisel arşiv, 2022)

ZF Lemförder A.Ş firmasının numune hazırlama laboratuvarında şekil 4.6’da görülen bakalit kalıba alınan deforme olmuş ve deforme olmamış radyal yatak numunelerine, Dokuz eylül üniversitesi Metalurji ve Malzeme mühendisliği numune

hazırlama laboratuvarında mikro yapı incelemesi için ön hazırlık olan zımparalama ve parlatma işlemi uygulandı. Zımparalama işleminde Şekil 4.7’de görünen bakalit kalıba alınmış numunelere sırası ile 80, 240, 400, 800 ve 1200 grid SiC zımparalarda şekil 4.8’ de görülen numune hazırlama cihazında bu işlemler uygulandı. Zımparalanan numunelere alümina pasta kullanılarak aynı cihazda parlatma keçesi kullanılarak parlatma işlemi uygulandı.



Şekil 4.8 Kalıba alınan numunenin zımparalama işlemi (Kişisel arşiv, 2022)

Parlatma işlemi sonrasında numune çözeltisinde % 2 nitrik asit ve etil alkol bulunan nital ile dağlandı. Numune nital dağlayıcı içerisinde 5 sn süresince bekletildi ve sonrasında yüzey kontrol edildi. İstenilen yüzey elde edildikten sonra ışık mikroskobun ’da farklı büyütme ölçeklerinde incelendi.

#### **4.3.2 Mikro Yapı İnceleme**

Deneylerde kullanılan parçaların malzemesi MnVS çeliğidir. Bu malzemenin kimyasal kompozisyon bilgisi tablo 2.5’de, mekanik özellikleri ise tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 MnV malzemesi mekanik özellikleri (Saarstahl GmbH, 2022)

|                  |         |
|------------------|---------|
| Çekme mukavemeti | 700-900 |
| Akma mukavemeti  | 400-500 |
| % uzama          | 10-15   |
| Sertlik, HB      | 200-250 |

#### 4.4 Sertlik Testi

##### 4.4.1 Test 'in Uygulanışı

Deneysel çalışmada mafsal kapama işlemi öncesi ve sonrasında meydana gelen sertlik değişimlerini gözlemlemek amacı ile Vickers mikro sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sertlik deneyleri “ASTM E92-72 metalik malzemelerin vickers sertliği için standart test yöntemi” standardına göre uygulanmıştır. Bu ölçümler için şekil 4.9’da görseli verilmiş olan Shimadzu marka cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz baskı elemanı olarak şekil 4.10’de gösterilen tepe açısı  $136^\circ$  olan elmas kare piramit kullanılmıştır. F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde yerine konarak sertlik değeri bulunmuştur. Bu cihazın uygulayabildiği yük aralığı 0,1 ile 2 kgf arasında olup deney süresince uygulanan yük 1kgf ’dur. Ölçüm sırasında uygulanan kuvvet numune üzerinde 15 saniye tutulmuş sonrasında baskı ucu numuneden kaldırılarak ölçüm tamamlanmıştır.



Şekil 4.9 Mikro vickers sertlik ölçme cihazı (Teskon teknik ekipmanlar, 2023)



Şekil 4.10 Batıcı uç açısı ve bıraktığı izin boyutu

Vickers sertlik değerinin tespiti için denklem (4.1)'den faydalanıldı,

$$VSD = \frac{1.854F}{D^2} \quad (4.1)$$

Burada F uygulanan yükü(kg) , D ise iz köşegenlerinin ortalaması (mm) olup

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.2)$$

formülü ile hesaplanır.  $d_1$  ve  $d_2$  sırası ile ölçülen köşegen uzunluklarıdır.

#### 4.4.2 Sertlik Dönüşüm Hesapları

Deneyisel çalışma kapsamında Brinell sertlik dönüşümü için tablo 4.2'te verilen dönüşüm tablosunda vickers, brinell ve rockwell sertlik değerleri deneyisel çalışmada elde edilmiş olan vickers sertlik değerlerinin en yüksek ve en düşük değer aralığındaki verileri baz alınarak ASTM'nin E140-12b metallerin sertlik dönüşümü isimli standardından alınarak tabloya eklenmiştir.

Tablo 4. 2 Östenitik olmayan çelikler için yaklaşık sertlik dönüşüm çizelgesi (E140-12b, 2017)

| Brinell sertliği | Vickers sertliği | Rockwell |
|------------------|------------------|----------|
| HB               | HV               | HRc      |
| 253              | 266              | 25       |
| 258              | 272              | 26       |
| 264              | 279              | 27       |
| 271              | 286              | 28       |
| 279              | 294              | 29       |
| 286              | 302              | 30       |
| 294              | 310              | 31       |
| 301              | 318              | 32       |
| 311              | 327              | 33       |

#### 4.5 Eğme Testi

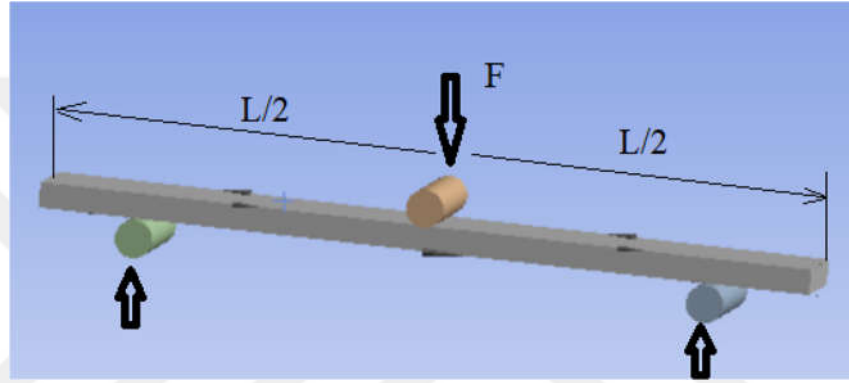
Bir malzemenin eğilmedeki mekanik özelliklerini belirlemek için eğilme testleri yapılır. Yanal yüklere maruz kalan kirişler gibi parçalarda sapma meydana gelir. Eğilme momentleri kirişin tüm bölgelerinde meydana gelir. Eğilme gerilimi ile ilgili klasik eğilme denkleminin geçerli olması için malzemenin homojen olması ve Hooke yasasını takip etmesi gerekir. Eğme deneyi sonucunda eğme momenti ( $M_c$ ), eğilme gerilmesi ( $\sigma_e$ ), elastisite modülü ( $E_e$ ) ve sehim miktarı ( $\delta$ ) gibi değerler hesaplanır. (Groover, 2007)

Eğme testi, TSE'nin TS 205 standardına göre, genellikle dairesel veya dikdörtgen kesitli düz bir numunenin merkez noktasına kuvvet uygulandığında meydana gelen deformasyon ile şekil değiştirmesi olarak tanımlanır (TS EN ISO 7438, 2021).

##### 4.5.1 Test 'in Uygulanışı

ASTM E290-14 eğme testi standardına göre sünekliği belirlemek için kullanılan üç noktalı eğme testi, en yaygın kullanılan eğme testi yöntemidir. Bu deneyin mantığı,

deneyde kullanılan malzemeler için 'basit kiriş' modeli varsaymaya dayanmaktadır. Kiriş denklemleri ideal moment koşullarından türetildiği için, kiriş kayma gerilmelerinin normal gerilmelere kıyasla ihmal edilebilir düzeyde kalması arzu edilir. Bu nedenle malzemenin kesit alanı sabit olmalı ve uzunluk değeri en geniş değerin en az 16 katı olmalıdır. Deneysel sınır koşulları, "basit kiriş" modellemesi ile aynıdır. Numuneyi uzunlamasına yatay bir konumda destek üzerine yerleştirilir ve basma kuvveti merkezden uygulanır. Şekil 4.11’de mesnetler ve kuvvetin uygulandığı nokta gösterilmektedir.



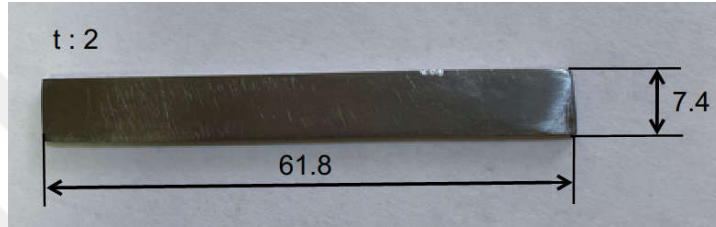
Şekil 4.11 Üç noktalı eğme deneyi numune 3B datası (Kişisel arşiv, 2022)

Deney düzeneği, Shimadzu üniversal test makinesi kullanılarak 1 mm/dk hızda gerçekleştirilen üç noktalı bir eğme testidir. Cihazın alt kısmında 3 noktalı bükme mekanizması mevcuttur. Malzeme ile bükme ucu arasında hafif temas sağlandıktan sonra cihaz çalıştırılmıştır. Çökmeye tepki olarak oluşan kuvvet bir yük hücresi ile ölçülmüş daha sonra elde edilen veriler bilgisayar ortamında saklanmıştır. Deneysel olarak elde edilen ölçümler sayesinde mekanik özellikler hesaplanmıştır.

Numune şekil 4.2’de gösterilen metal kesme cihazı ile ürünün vida kısmından şekil 4.12’de görüldüğü gibi iki parçaya bölünerek çıkarılmıştır. Daha sonra bölünen ana numuneden taşlama ve zımpara yardımıyla şekil 4.13’te görülen eğme numunesi çıkarılmıştır.



Şekil 4.12 Eğme numunesi çıkarılan kısım (Kişisel arşiv, 2022)



Şekil 4.13 Test öncesi eğme numunesi (Kişisel arşiv, 2022)



Şekil 4.14 Test sonrası eğme numunesi (Kişisel arşiv, 2022)

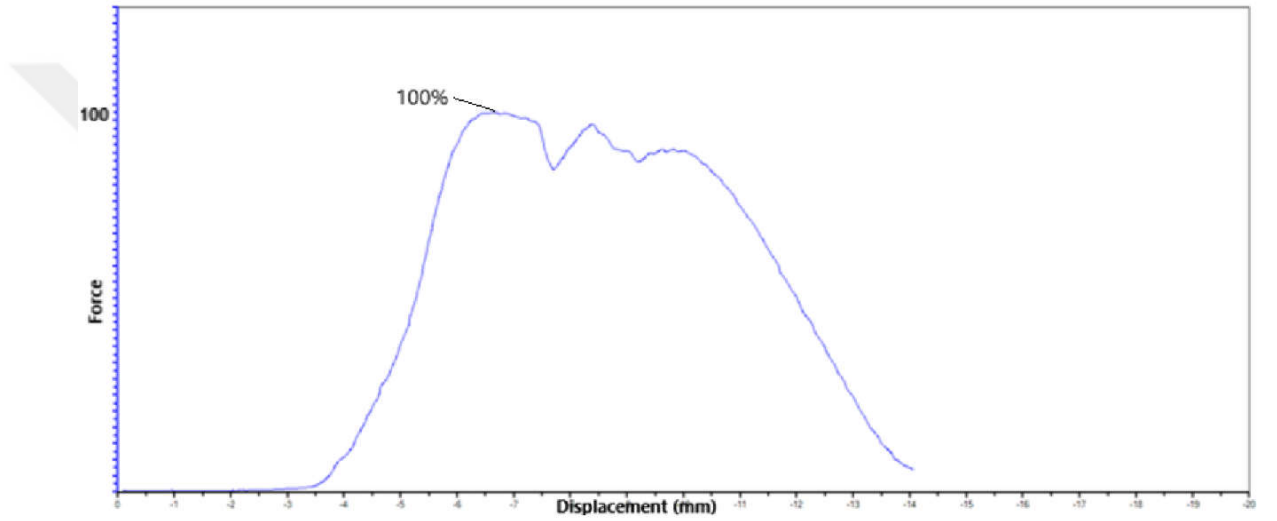
Daha sonra bu numeneye üç nokta eğme cihazı kullanılarak eğme testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te eğme testi sonrası elde edilen numune görülmektedir.

## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇLAR

#### 5.1 Rot Başı Mafsal Çekme Testi

Mevcut durumda kullanılan ürüne ZF Lemförder A.Ş. firmasının mekanik test laboratuvarında mafsal çekme testi uygulanmış ve Şekil 5.1’de grafikte gösterildiği gibi maksimum mafsal çıkma yükü elde edilmiştir.

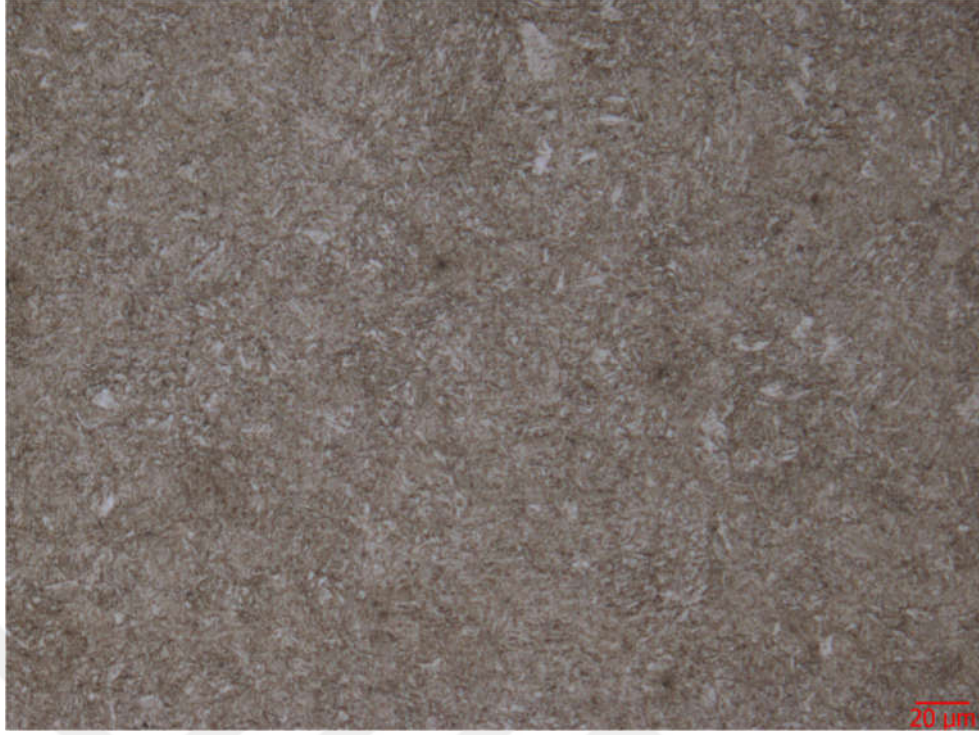


Şekil 5.1 Test sonucunda elde edilen çıkma yükü grafiği (Kişisel arşiv, 2022)

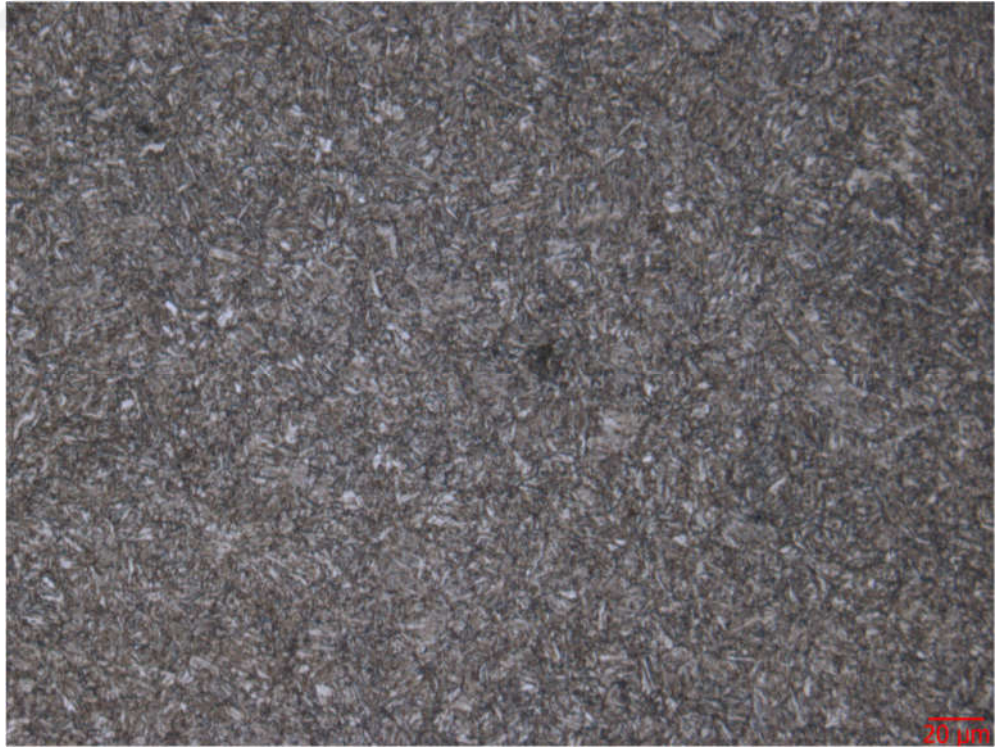
Rot başı mafsal çekme testi sonucunda elde edilen çıkma kuvveti 100% kN'dur. Fakat günümüzde elektrikli araçlara geçiş ile araç toplam ağırlığında artışlar meydana gelmiş bu yüzden şasi komponentlerine gelen yük artmıştır. Dolayısı ile bu değeri %25 artırmak için tasarım optimize edilmiş sonrasında alternatif tasarımlara sonuçları bölüm beşte yer alan sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır.

#### 5.2 Mikro Yapı İnceleme Sonuçları

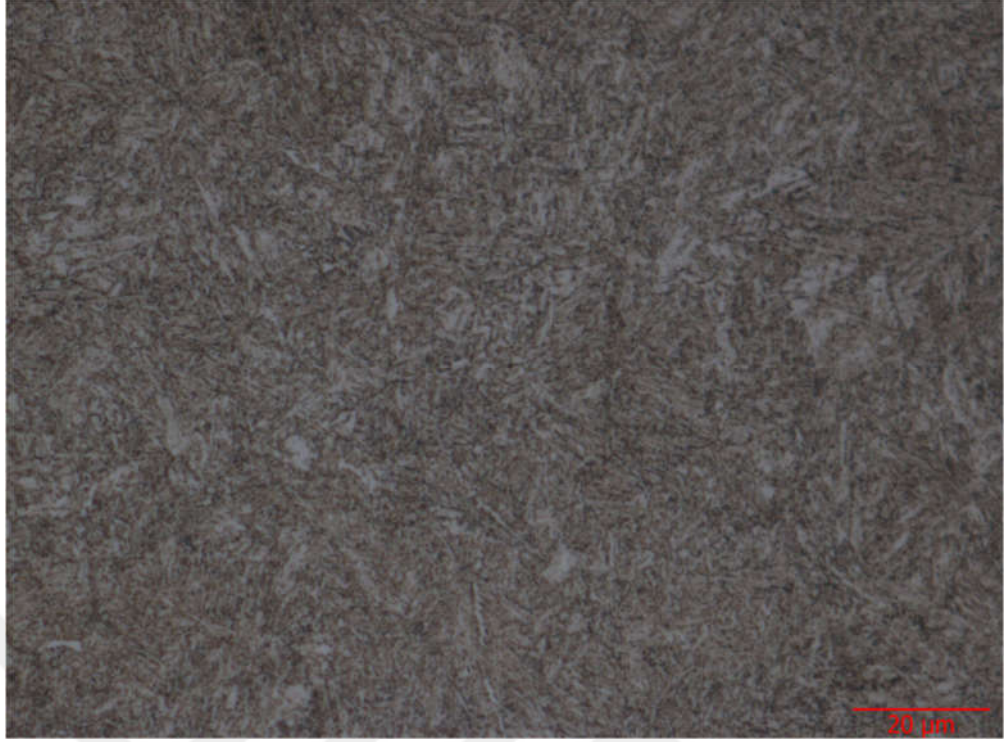
Dağlama işleminden sonra elde edilen deforme olmuş ve deforme olmamış numuneler ışık mikroskobu altında 10x ve 50x objektif ile elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir.



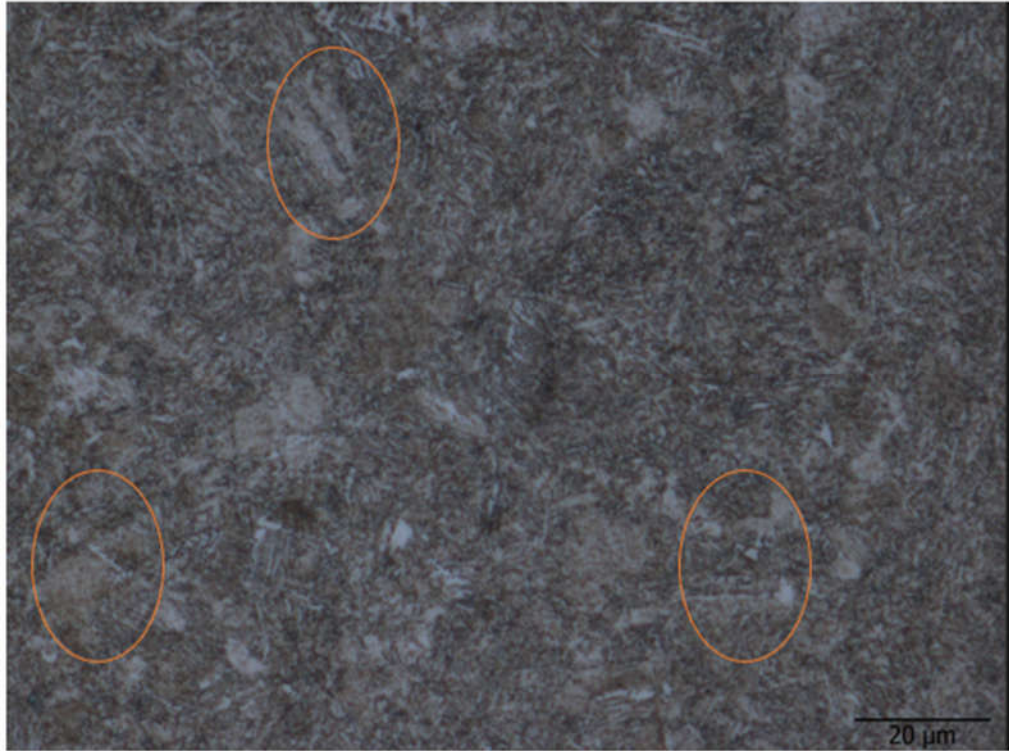
Şekil 5.2 Deforme olmamış 20X objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü



Şekil 5.3 Deforme olmuş 20x objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü



Şekil 5.4 Deforme olmamış 50X objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü



Şekil 5.5 Deforme olmuş 50x objektif ile alınan 10 saniye %2 nital ile dağlanmış mikro yapı görüntüsü

Bu mikroyapı incelemesi soğuk deformasyon ile gerçekleşen mafsallık kapama işlemi öncesi ve sonrasında oluşan tane yapısı farklılıklarını gözlemlemek için yapılmıştır. Şekil 5.2 ve şekil 5.3'te 20x görüntülemelerde ferrit artı perlitik yapı görülmektedir fakat yönlenme gözlemlenememiştir. Daha sonra 50x görüntüleme sonrasında Şekil 5.4'te görüleceği gibi mikroyapı ferrit artı perlit beynitik yapıdan oluşmakta olduğu ve tanelerin eş eksenli bir şekilde yapı içerisine dağıldığı, kapama işleminde meydana gelen soğuk deformasyon etkisi çok belirgin olmadığı fakat taneler şekil 5.5 'deki gibi deformasyon doğrultusunda çok az bir yönlenme ve tane geometrisinde daralma olduğu göze çarpmaktadır. Yönlenmenin çok fazla olmamasının nedeni yüzde deformasyon oranının az olmasından dolayıdır.

### 5.3 Sertlik Testi Sonuçları

İnceleme yüzeyi şekil 5.6'da görülen her bir numuneye kesiti boyunca 1.5 mm aralık ile üç sıra beş satır toplam on beş ölçüm yapılmış, sonrasında üç sıraların ortalaması alınarak deforme olmamış numunenin değerleri şekil 5.8'de, deforme olmuş numunenin değerleri ise şekil 5.9'da verilmiştir.

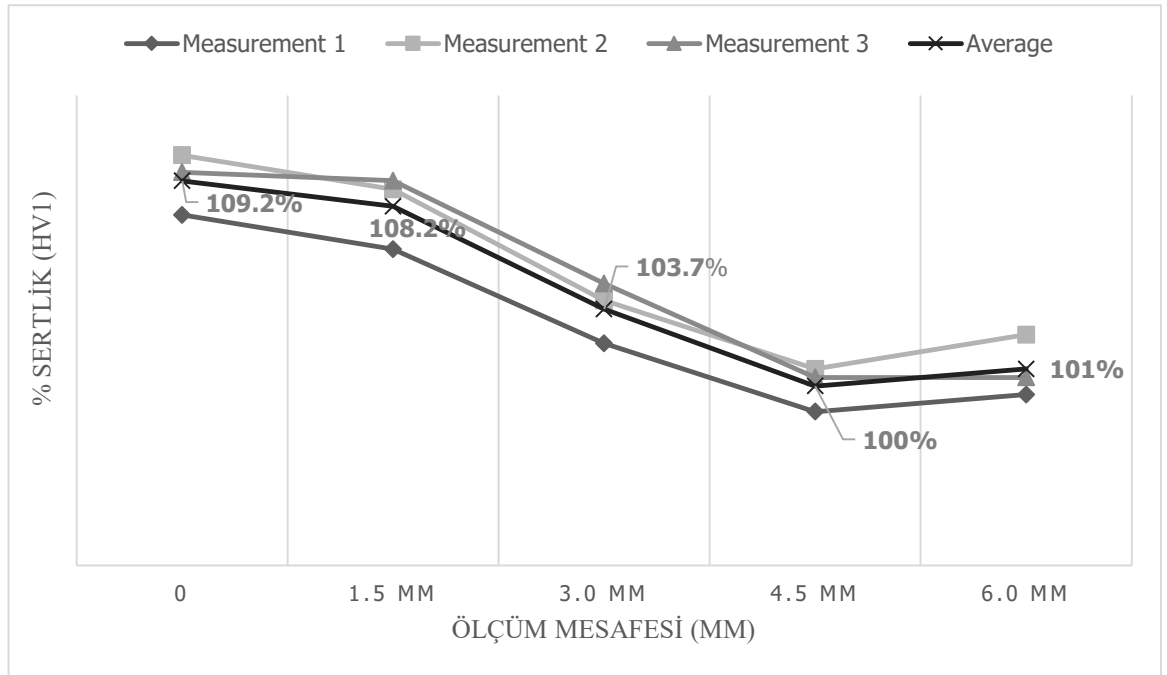


Şekil 5.6 Numune inceleme yüzeyi

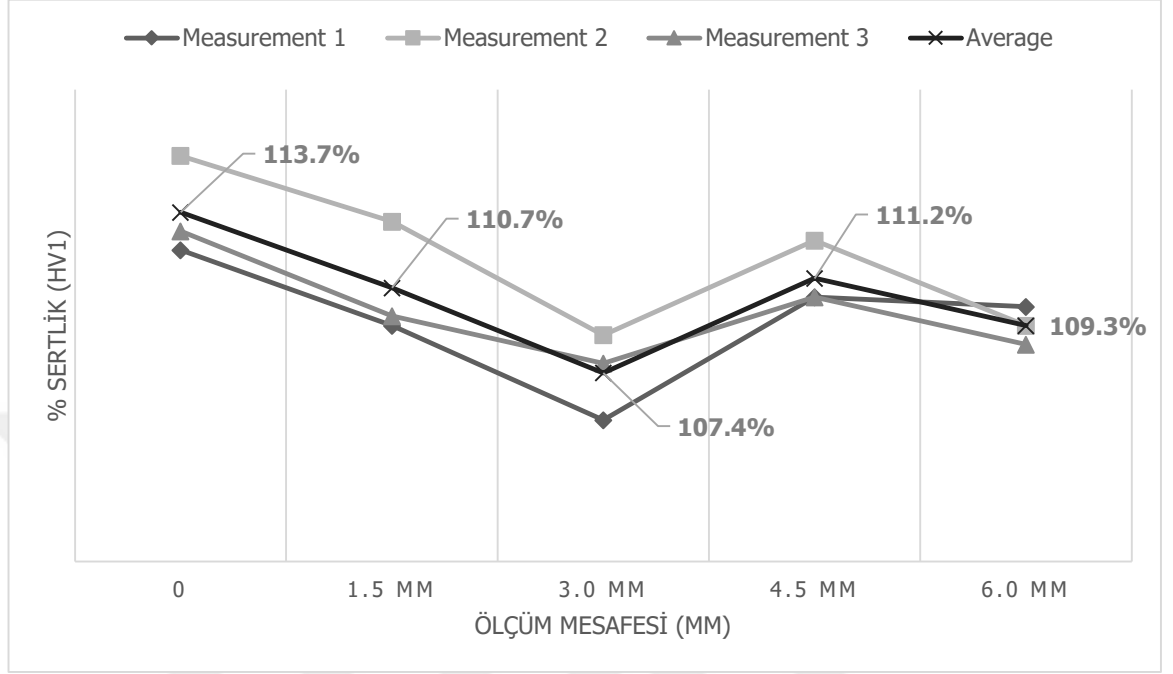


Şekil 5.7 Sertlik ölçme işlemi uygulanan numuneler ve sertlik ölçülen bölgeler

Şekil 5.7 'de gösterildiği gibi 1.5 mm aralıklar ile deforme olmuş ve deforme olmamış numune üzerinde 10N yük uygulanarak üç sıra beş satırdan toplam on beş ölçüm yapılmıştır. Şekil 5.9'da grafikte görüleceği üzere deforme olmuş numunede sertlik değerleri, deforme olmamış numuneye göre yüksektir. Bunun nedeni soğuk deformasyonla ortaya çıkan pekleşme mekanizmasının sonucudur.



Şekil 5.8 Deforme olmamış numuneden belli aralıklar ile ölçülen sertlik değerleri



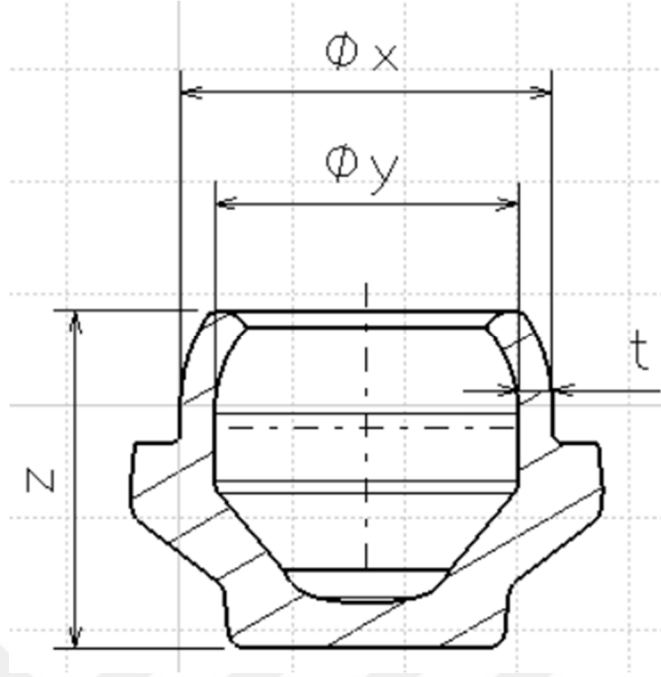
Şekil 5.9 Deforme olmuş numuneden belli aralıklar ile ölçülen sertlik değerleri

#### 5.4 Çıkma Yüğü Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Bu kısımda CAD ortamında oluşturduğumuz mevcut ve dört farklı varyasyon modeline sonlu elemanlar programında uygulanan çıkma yükü simülasyon sonuçlarını inceleyeceğiz.

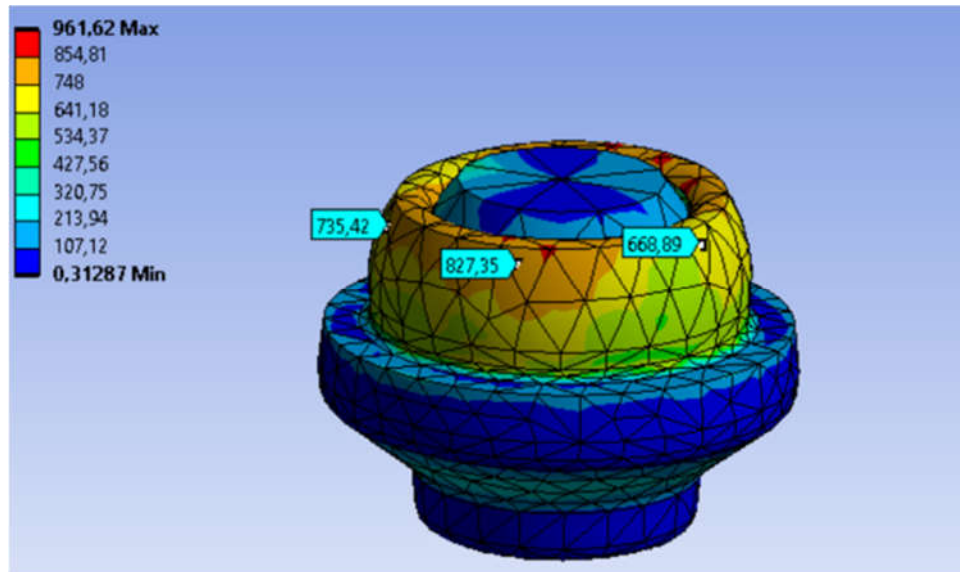
##### 5.4.1 Mevcut Model Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar programına mevcut tasarımın şekil 5.10'da ölçüleri görülen verisi yüklenerek çözme işlemi başlatılmış ve kürenin yuvadan çıktığı durumdaki maksimum gerilme ve maksimum çıkma kuvveti değeri edilmiştir.



Şekil 5.10 Mevcut model ölçüleri

Çözülme işleminden sonra elde edilen maksimum gerilme değeri şekil 5.11’de görüldüğü gibi 800 MPa civarındadır. Yaptığımız yuva duvar kesit kalınlığı optimizasyonlarında kesit kalınlığı artışı için malzeme hacminde artma meydana gelmiş ve bu değerin düştüğü görülmüştür.

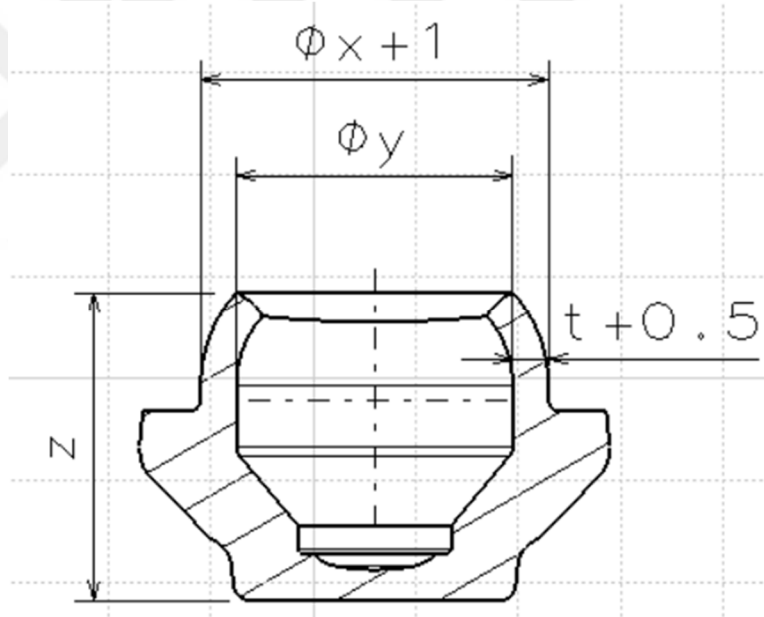


Şekil 5.11 Mevcut tasarım analizinde ölçülen gerilme değerleri

Tez çalışmamızda mafsalsın mevcut model gerçek çekme testinde yuvadan çıkma kuvvetini şirket gizlilik politikası nedeniyle 100% kN olarak tanımladık ve sonlu elemanlar analizinde malzeme farklılıkları da göz önünde bulundurulduğunda test süresi içerisindeki Z ekseninde ölçülen en yüksek değer 100% kN olarak varsaydık. Oluşturduğumuz alternatif tasarımlarda elde edilen değerler bu değeri esas alarak % iyileştirme olarak bu oranda hesaplanmıştır.

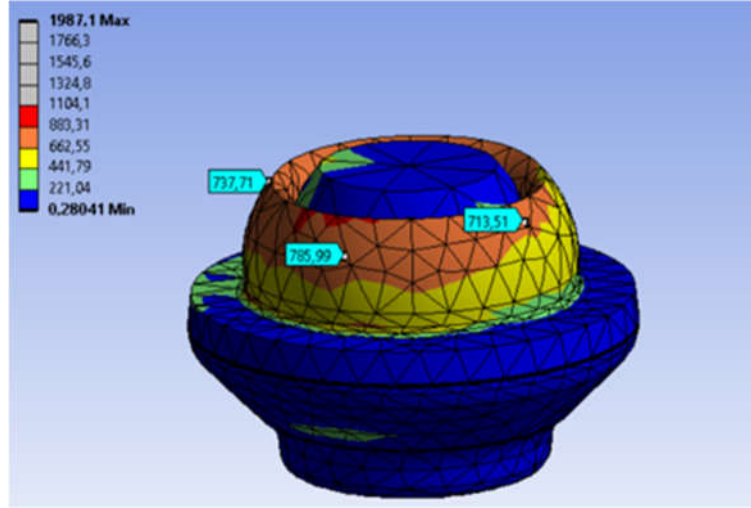
#### 5.4.2 Model 1 Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar programına model 1 varyantının şekil 5.12’te ölçüleri görülen verisi programa yüklenerek çözme işlemi başlatılmış ve kürenin yuvadan çıktığı durumdaki maksimum gerilme ve maksimum kuvvet ölçülmüştür elde edilmiştir.



Şekil 5.12 Model 1 ölçüleri

Çözülme işleminden sonra elde edilen maksimum gerilme değeri şekil 5.13’te görüldüğü gibi 750 MPa civarındadır. Bu bölgede model 1’de duvar kesit kalınlığı 0.5 mm arttığı için gerilme değerinde 50 MPa bir düşüş gözlemlenmiştir.

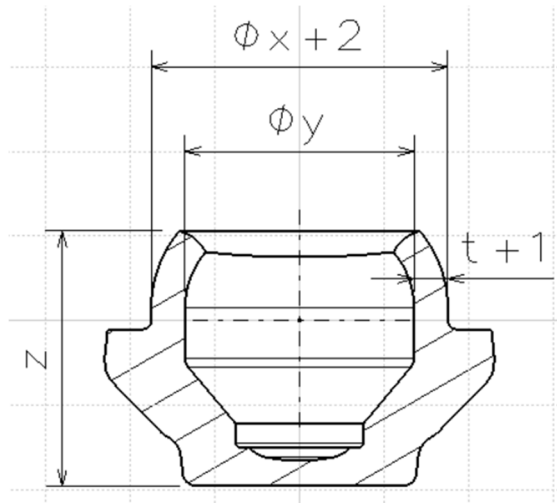


Şekil 5.13 Model 1 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri

Mevcut tasarımda 100% kN olarak elde edilen çıkma yükü, model 1 varyantının analizinde duvar kesit kalınlığının artması ile 101,4% kN olarak elde edilmiş ve %1,4 iyileştirme sağlanmıştır.

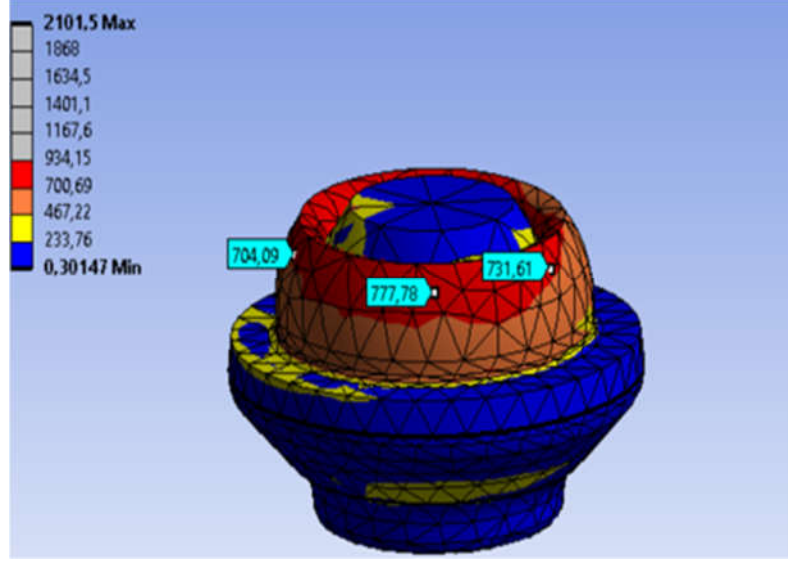
#### 5.4.3 Model 2 Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar analiz programına model 2 varyantının şekil 5.14'te ölçüleri görülen verisi programa yüklenerek çözme işlemi başlatılmış ve kürenin yuvadan çıktığı durumdaki maksimum gerilme ve maksimum kuvvet değeri elde edilmiştir.



Şekil 5.14 Model 2 ölçüleri

Çözölme işleminden sonra elde edilen maksimum gerilme değeri şekil 5.15'te görüldüğü gibi ortalama 730 MPa civarındadır. Bu bölgede model 1'de duvar kesit kalınlığı 1 mm arttığı için gerilme değerinde mevcut tasarıma kıyasla 70 MPa bir düşüş gözlemlenmiştir.

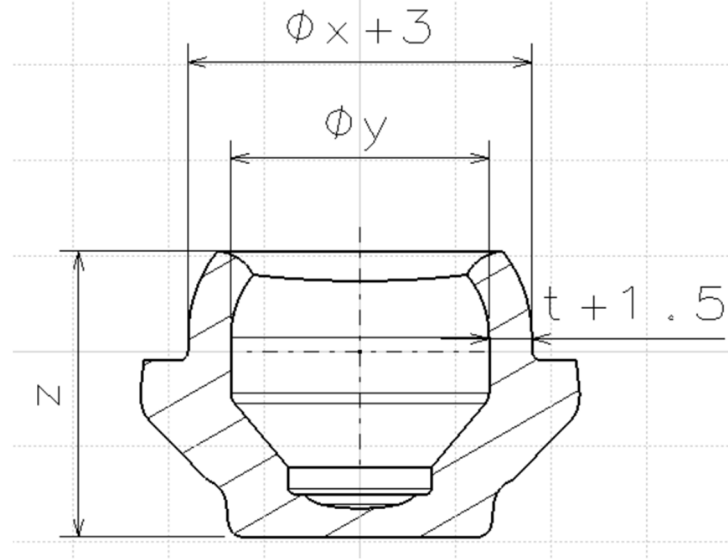


Şekil 5.15 Model 2 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri

Mevcut tasarımda 100% kN olarak elde edilen çıkma yükü, model 2 varyantının analizinde duvar kesit kalınlığının artması ile 110,2% kN olarak elde edilmiş ve 10,2% iyileştirme sağlanmıştır.

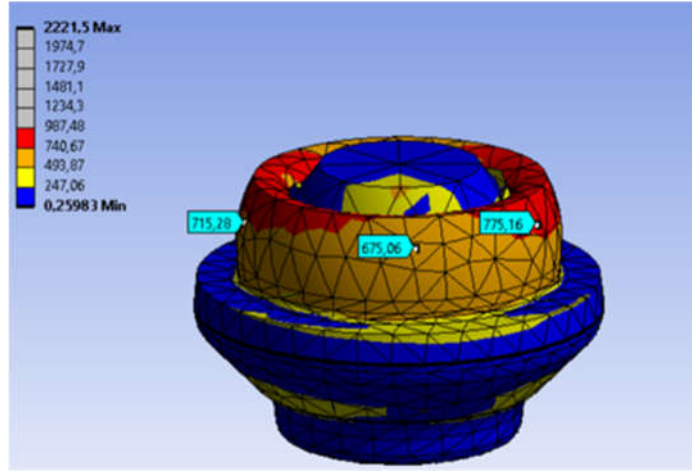
#### 5.4.4 Model 3 Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar analiz programına model 3 varyantının şekil 5.16'da ölçüleri görülen verisi programa yüklenerek çözme işlemi başlatılmış ve kürenin yuvadan çıktığı durumdaki maksimum gerilme ve maksimum kuvvet değeri elde edilmiştir.



Şekil 5.16 Model 3 ölçüleri

Çözülme işleminden sonra elde edilen maksimum gerilme değeri şekil 5.17’de görüldüğü gibi 700 MPa civarındadır. Bu bölgede model 3’te duvar kesit kalınlığı 1.5 mm arttığı için gerilme değerinde mevcut tasarıma kıyasla 100 MPa bir düşüş gözlemlenmiştir.

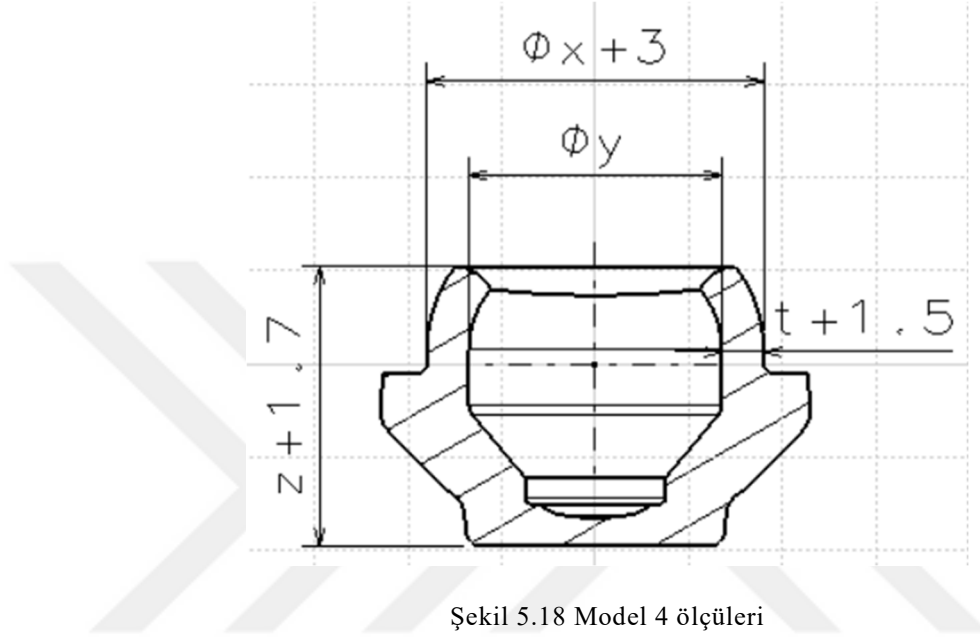


Şekil 5.17 Model 3 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri

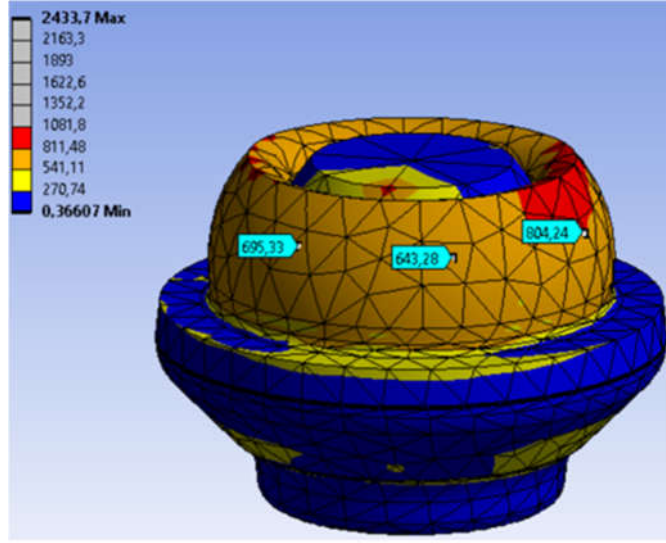
Mevcut tasarımda 100% kN olarak elde edilen çıkma yükü, model 3 varyantının analizinde duvar kesit kalınlığının artması ile şekil 5.21’de görüldüğü gibi 120% kN olarak elde edilmiş ve %20 iyileştirme sağlanmıştır.

#### 5.4.5 Model 4 Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar analiz programına model 4 varyantının şekil 5.18’de ölçüleri görülen verisi programa yüklenerek çözme işlemi başlatılmış ve kürenin yuvadan çıktığı durumdaki maksimum gerilme ve maksimum kuvvet değeri elde edilmiştir.



Çözülme işleminden sonra elde edilen maksimum gerilme değeri şekil 5.19’da görüldüğü gibi 680 MPa civarındadır. Bu bölgede model 4’te duvar kesit kalınlığı 1.5 mm duvar yüksekliği ise 1.7 mm arttırılmıştır. Dolayısı ile bu bölgede mafsallın yuvadan çıkmaya çalışacağı bölgedeki malzeme hacmi arttığı için buna paralel olarak gerilme değerinde 120 MPa bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 5.19 Model 4 yuva ağzında oluşan maksimum gerilme değerleri

Mevcut tasarımda 100% kN olarak elde edilen çıkma yükü, model 3 varyantının analizinde duvar et kalınlığının artması ile 149% kN olarak elde edilmiş ve %49 iyileştirme sağlanmıştır.

Tablo 5.1 Yapılan analizler sonucunda elde edilen değerler

| Model   | Gerilme (MPa) | Çıkma kuvveti (%kN) | % İyileşme |
|---------|---------------|---------------------|------------|
| Mevcut  | 800           | 100                 | 0          |
| Model 1 | 750           | 101,4               | 1,4        |
| Model 2 | 730           | 110,2               | 10,2       |
| Model 3 | 700           | 120                 | 20         |
| Model 4 | 680           | 149                 | 49         |

## BÖLÜM ALTI

### DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Sunulan bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe kullanılmakta olan ve ZF Lemförder aks modülleri A.Ş firması tarafından tarafıma temin edilen rot başı parçasına mafsalsal çekme kuvvetini artırmak amacıyla bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile alternatif tasarım çalışmaları öncesinde mikro yapı, sertlik ve eğme testleri uygulanmış ve sonrasında Catia V5 tasarım programında modellenen dört farklı kesit kalınlığına sahip olan modellere Ansys workbench öğrenci sonlu elemanlar analiz programı ile mafsalsal çekme testi uygulanmış ve sonrasında en optimum tasarım seçilmiştir.

Rot başı parçasının gövde kısmı üç üretim aşamasından meydana gelmektedir. Bunlar ham gövde, talaşlı üretim görmüş gövde ve mafsalsal montajından sonra pres ile mafsalsalın yuva içerisine pres yardımı ile sabitlendiği aşamadır. Presleme işlemi öncesi olan model “deforme olmamış model” presleme sonrası olan model ise “deforme olmuş model” olarak adlandırılmış ve tez çalışması boyunca bu iki modele uygulanan testlerin sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- **Mikro yapı incelemesi;** Deforme olmuş ve deforme olmamış modellerin mikroyapı analizinde her ikisinin de ferrit artı perlit ve çökelme sertleşmesi ile meydana gelen beynitik yapıdan oluşmuş olduğu ve tanelerin yapı içine eş eksenli olarak dağıldığı gözlemlenmiş, soğuk deformasyon ile deforme edilen modelin tanelerinde yönlenme beklenilmiş fakat deformasyon oranı çok düşük olduğu için belirgin bir yönlenme olmamıştır ve bu normal karşılanmıştır.
- **Sertlik testi;** Yine her iki deforme olmuş ve olmamış modele vickers mikro sertlik testi uygulanmış bunun sonucunda ise soğuk deformasyon ile pekleşen modelin sertlik sonuçlarının, deforme olmamış modele kıyasla yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin soğuk deformasyon ile toplam dislokasyon sayısındaki artış olarak yorumlanmıştır.

- **Eğme testi;** Rot başının vida kısmından çıkarılan eğme test numunesi Dokuz Eylül üniversitesi Makine mühendisliği mekanik laboratuvarında bulunan Shimadzu universal test cihazı kullanılarak 1mm/dk hızında gerçekleştirilmiş ve X MPa akma mukavemeti, Y MPa çekme mukavemeti elde edilmiştir. Sonrasında ise malzemenin plastik deformasyon bölgesinde geçerli olan Halloman denklemindeki deformasyon sertleşmesi katsayısı(K) ve deformasyon sertleşmesi üsteli (n)'i tespit etmek için bu test sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonlar yapılarak gerçek kuvvet-çökme eğrisini sağlayan değerler tespit edilmiş ve rot başı çıkma yükü analizinde malzeme verisi olarak kullanılmıştır.

- **Sonlu elemanlar analizi;** Tasarım iyileştirmesi yaparak mafsal çıkma kuvvetini artırmak amacıyla dört farklı kesit kalınlığı olan modeller tasarlanmış, bu modellere eğme testinden elde edilen malzeme mekanik özellikleri kullanılarak rot başı çekme sonlu elemanlar analizi uygulanmış, rod başı yuvasında meydana gelen gerilme dağılımı ve buna bağlı çıkma kuvvetleri ölçülmüştür. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen çıkma kuvveti sonuçlarında en yüksek iyileşmeyi %49 ile model 4 sağlasa da artırılan duvar yüksekliği çalışma açısını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle mevcut tasarım yerine kullanılması mümkün olmadığı için seçenekler arasından çıkartılmıştır. Bu yüzden mafsal hareket açısını engellemeyen, artırabileceğimiz maksimum kalınlığa sahip model 3 uygulanabilir alternatif tasarım olarak uygun bulunmuştur.

## KAYNAKLAR

TS EN ISO 7438 (2021). *Metalik Malzemenin Eğme Deneyleri*. Ankara.

Rutci, A., ve Eren, F. S. (2018). Investigation of Suspension Ball Joint Pull Out Force Based on FEA Method and Experimental Study. *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*. Antalya.

ASM. (1990). *ASM HANDBOOK Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM INTERNATIONAL.

Nath, B., ve D. D. (1993). *Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri*. Sakarya, Adapazarı.

Da MAIA, B. I., Futami, A., ve Oliveira, M. (2018). Vanadium Alloy Steel DIN 30MnVS6 Applied in Cold Forming. *ISIJ International, Advance Publication by J-STAGE*, 342.

*Bursa Teknik Üniversitesi , 3 nokta eğme deneyi föyü*. (2022, Kasım 10). [https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/3%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu\(1\).pdf](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/3%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu(1).pdf)

E140-12b, A. (2017). Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness.

Engineers, S. o. (SAE J411, 1989 SAE Handbook, Vol 1, Materials, p 2.01-2.03). *"Carbon and Alloy Steels,"*.

Ersoy, M., ve HeiBing, B. (2011). *Chassis Handbook Fundamentals, Driving Dynamics, Components,*. Osnabrück , Germany.

Falah, A. (2007). Failure investigation of a tie rod end of an automobile steering. *Engineering Failure Analysis*, 895-902.

Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing*.

Gürsel, K., ve Çakır, S. (2011). Sıvama ile monte edilen mekanizmalarda oluşan sıkıştırma kuvvetlerinin saptanması. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 17(3): 143-156.

Ikpe Aniekan Essienubong ve O. I. (2016). Static Analysis on a Vehicle Tie Rod to Determine the buckling Displacement. *International Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering*, s. 16-24.

International, A. (2014). *ASTM E290-14 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*.

Vorel, I., Vancura, F., Pilecek, V., Jirkova H. ve Basek, B. (2015). Material-Technological Modelling of C45 Steel Die Forgings. *Procedia Engineering* , 714-721.

Kalny, O. A. (2014, 3 10). Meshing Computers and Structures.

Kutlak, H. ve Uygur, İ. (2015). Üç Makaralı Sıvama Aparatı ile Rot Başının Sıvama Prosesi Analizi. *4:1: 57-64*.

Park, Y. C. (2014). Lightweight Design of an Outer Tie Rod for an Electrical Vehicle. *2014: 1-6*.

Patil, M., Chavan, D. ve Kavade, M. (2013). FEA of Tie Rod of Steering System of Car.

Pehlivan, M., ve Özsoy, M. (2015). Computer Aided Structural Analysis of a Tie Rod End. *Special issue of the International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2014)*, 128.

Prashant R., ve Vithalkar, R. R. (2015). Study of analysis of bus passenger tie rod. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 04(11) ; 239-241.

Annamalai, R. (2018). *Alloy-Effect of Alloying Elements in Iron and Steel*.

Saarstahl GmbH. (2022, Ekim 16). Saarlühl: <https://www.saarstahl.com/sag/downloads/download/11698>

Taş, K. (2017). Binek Araç Rotunun Push-Out Ve Yorulma Performansının Deneyisel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi,. *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Master Tezi*, 104s.

Teskon teknik ekipmanlar. (2023, Şubat 15). Teskon: <http://www.teskon.com/sertlik-micro-vickers-urun940.html>

TS 205-3 EN ISO 7799. (2000). *Kalınlığı 3 mm veya daha az olan levha ve şerit metalik malzemeler için eğme deneyi*.

Callister, William. D. ve Rethwisch, D. G. (2009). *Materials Science And Engineering*. USA/Versailles.

Yükselen Çelik. (2022, Aralık 14). 10 16, 2022 tarihinde [www.yukselen.com](http://www.yukselen.com): <https://www.yukselen.com/teknik/detay/sertlik-donusum-cizelgesi>