

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TASARIM PARAMETRELERİNİN TİCARİ**  
**ARAÇLARDA KULLANILAN YAPRAK**  
**YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞINA**  
**ETKİLERİ**

**Mert YANMAZ**

**Eylül, 2021**  
**İZMİR**

# **TASARIM PARAMETRELERİNİN TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN YAPRAK YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

**Mert YANMAZ**

**Eylül, 2021**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**MERT YANMAZ**, tarafından **PROF. DR. ÇINAR EMİNE YENİ** yönetiminde hazırlanan “**TASARIM PARAMETRELERİNİN TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN YAPRAK YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Çınar Emine YENİ

Yönetici

Prof. Dr. Murat PAKDİL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Çiçek ÖZES

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Çalışmamda yaprak yay üzerinde mekanik, fonksiyonel testler, malzeme testleri, sonlu elemanlar analizleri ve yorulma testlerine imkan sağladığı için Olgun Çelik A.Ş.'ne teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda bana yardımcı olan tez danışmanım Prof. Dr. Çınar Emine Yeni'ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım ve tüm hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşim Beren Seymen Yanmaz'a ve aileme, bana her zaman inandıkları ve güvendikleri için teşekkür ederim.

Tezimin sonlu elemanlar analizleri bölümünde verdiği destek için Sn. Seray Göksel Tokgönül'e, yorulma testlerinde verdikleri destek için Sn. Sercan Dağlı'ya, kalite analizlerindeki destekleri için Sn. Eren Nas'a, üretim proseslerinde verdiği destek için Sn. Çağdaş Özyiğit'e, teşekkür ediyorum.

Mert YANMAZ

# **TASARIM PARAMETRELERİNİN TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN YAPRAK YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

## **ÖZ**

Bu çalışmada ticari araçlarda süspansiyon sisteminin en önemli parçalarından biri olan yaprak yay, tasarım parametreleri açısından ele alınmıştır. Yaprak yaylar parabolik, konvansiyonel ve z tip yaprak yaylar olmak üzere çeşitli tiplerde bulunabilir. Yaylar geleneksel olarak çelik lama malzemeleri olan 55Cr3, 51CrV4, 52CrMoV4, 51B60H ve 5160H gibi farklı malzemelerden imal edilmektedir. Hangi malzemelerin kullanılacağı araçların taşıma kapasitelerine göre değişen farklı lama kalınlıklarına göre değişmektedir. Gelişen yeni teknolojiler ve ana sanayideki rekabet ortamı sonucu üretici firmalar tarafından maliyet, dayanıklılık, ağırlık gibi çeşitli parametrelerde ihtiyaçları karşılama noktasında pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada 51CrV4 ve 51B60H çelik malzemeden imal edilen parabolik yaprak yaylar yorulma dayanımı açısından incelenmiştir. Buna ek olarak yaprak yay teknik resimlerinde tasarımcılar tarafından belirlenen yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilme gibi parametrelerin yaprak yayın yorulma davranışlarına etkileri çalışma kapsamında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında farklı yöntemlerle belirlenen yüzey pürüzlülüğü değerleri, bu yüzeylere gerilim altında uygulanan kumlama işleminin yarattığı farklı artık gerilme değerleri, bu gerilmelerin yorulma ömrünü ne derece etkilediği yapılan düşey yorulma testleriyle ortaya koyulmuştur. Yaprak yay genişliği ve göz kalınlığı gibi tasarım parametrelerinin yaprak yay yorulma ömrüne ve gerilme değerlerine etkileri ile ilgili bilgisayar destekli analizler gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Parabolik yaprak yay, gerilimli kumlama, yüzey pürüzlülüğü, yorulma, artık gerilme, yaprak yay genişliği, göz kalınlığı.

# **EFFECTS OF DESIGN PARAMETERS ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF LEAF SPRINGS USED IN COMMERCIAL VEHICLES**

## **ABSTRACT**

In this study, leaf springs which are one of the most important components in commercial vehicles, are investigated in terms of design parameters. There are three types of leaf springs. These are parabolic, conventional and airliners. Steel materials such as 55Cr3, 51CrV4, 52CrMoV4, 51B60H and 5160H are being used for leaf springs. The material to be used is defined according to rolled layer thickness that varies with load carrying capacity of vehicles. As a result of improving the state of the art technologies and competition environment created by vehicle manufacturers, there are many studies on meeting customer requirements. In this study, parabolic leaf springs manufactured from 51CrV4 and 51B60H hot rolled steel materials have been investigated in terms of fatigue behavior. In addition, some properties which are given on technical drawings such as surface roughness and residual stress levels are also analysed. Surface roughness values derived from different descaling methods, generated residual stress values associated with stress shot peening process and their effect on fatigue life of leaf springs are demonstrated with fatigue tests. Computer aided analysis have been performed to demonstrate the effect of design parameters, such as leaf width and eye thickness, on fatigue life and static stress values.

**Keywords:** Parabolic leaf springs, stress shot peening, fatigue, residual stress, leaf spring width, eye thickness.

## İÇİNDEKİLER

|                                                     | Sayfa     |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....          | ii        |
| TEŞEKKÜR.....                                       | iii       |
| ÖZ .....                                            | iv        |
| ABSTRACT.....                                       | v         |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                              | x         |
| TABLolar LİSTESİ.....                               | xv        |
| <br>                                                |           |
| <b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>                       | <b>1</b>  |
| <br>                                                |           |
| 1.1 Giriş.....                                      | 1         |
| 1.2 Literatür Taraması.....                         | 2         |
| <br>                                                |           |
| <b>BÖLÜM İKİ - SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ.....</b>      | <b>12</b> |
| <br>                                                |           |
| 2.1 Süspansiyon Sistemleri ve Tarihi Gelişimi ..... | 12        |
| 2.2 Süspansiyon Sistemlerinin İşlevi.....           | 14        |
| 2.2.1 Sürüş konforu.....                            | 14        |
| 2.2.2 Yol tutuşu .....                              | 14        |
| 2.2.3 Kontrol ve İdare .....                        | 14        |
| 2.3 Süspansiyon Sisteminin Ana Unsurları.....       | 15        |
| 2.3.1 Mekanizma .....                               | 15        |
| 2.3.2 Yaylar .....                                  | 16        |
| 2.3.3 Amortisörler.....                             | 17        |
| 2.3.4 Burçlar .....                                 | 17        |
| 2.4 Süspansiyon Çeşitleri .....                     | 18        |
| 2.4.1 Sabit Süspansiyon Sistemleri.....             | 19        |
| 2.4.2 Bağımsız Süspansiyon Sistemleri.....          | 21        |

## **BÖLÜM ÜÇ - YAPRAK YAY ÇEŞİTLERİ VE ÖNEMLİ TASARIM PARAMETRELERİ ..... 23**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Yay Sistemleri .....                                   | 23 |
| 3.2 Çelik Yaprak Yay ve Çeşitleri.....                     | 23 |
| 3.2.1 Parabolik Yaprak Yaylar .....                        | 24 |
| 3.2.2 Konvansiyonel Yaprak Yaylar .....                    | 25 |
| 3.2.3 Havalı Süspansiyon Yayları .....                     | 27 |
| 3.3 Yaprak Yayların Önemli Tasarım Parametreleri.....      | 27 |
| 3.3.1 Yaprak Yay Kesiti .....                              | 27 |
| 3.3.2 Yaprak Yay Malzemesi .....                           | 30 |
| 3.3.3 Yay Katsayısı.....                                   | 31 |
| 3.3.4 Yaprak Yay Gözleri.....                              | 32 |
| 3.3.5 Yaprak Yay Genişlik .....                            | 33 |
| 3.3.6 Yaprak Yay Yüzey Pürüzlülüğü.....                    | 34 |
| 3.3.7 Yaprak Yay Kavisi ve Serbest Yay Yüksekliği.....     | 35 |
| 3.3.8 Yaprak Yay Eksen Mesafesi.....                       | 36 |
| 3.3.9 Bilya Püskürtme Tipi, Şiddeti ve Kaplama Oranı ..... | 36 |
| 3.4 Simetrik Yaprak Yayların Hesaplama Yöntemleri .....    | 38 |
| 3.4.1 Eğilme Gerilmesi Hesabı.....                         | 39 |
| 3.4.2 Merkezdeki Sehim Hesabı.....                         | 40 |
| 3.4.3 Göz Kısmında Gerilme Hesabı.....                     | 42 |

## **BÖLÜM 4 - YORULMA ..... 44**

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 4.1 Yorulmanın Tanımı .....                  | 44 |
| 4.2 Yorulma hasarının oluşum aşamaları ..... | 45 |
| 4.2.1 Çatlak Oluşumu .....                   | 45 |
| 4.2.2 Çatlak İlerlemesi.....                 | 46 |
| 4.2.3 Nihai Kırılma .....                    | 48 |
| 4.3 Gerilme – Ömür Yaklaşımı .....           | 49 |
| 4.3.1 Sabit Genlikli Yorulma.....            | 50 |

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2 Yorulma Notasyonları .....                                                           | 50        |
| 4.3.3 Gerilme Ömür Diyagramları (S/N Eğrileri, Wöhler Eğrisi).....                         | 52        |
| 4.3.4 Yüksek Çevrimli Yorulma.....                                                         | 54        |
| 4.3.5 Düşük Çevrimli Yorulma .....                                                         | 54        |
| 4.4 Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler.....                                            | 54        |
| 4.4.1 Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi.....                                                  | 55        |
| 4.4.2 Artık Gerilmelerin Yorulma Ömrüne Etkisi.....                                        | 56        |
| <b>BÖLÜM 5 - DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>                                                     | <b>59</b> |
| 5.1 Yüzey temizlik hassasiyetinin artık gerilmelere etkisi ve malzeme incelemeleri.....    | 59        |
| 5.2 Yüzey pürüzlülüğünün üretilen yaprak yayın yorulma ömrüne etkisinin araştırılması..... | 66        |
| 5.2.1 Yorulma Testine Alınacak Yaprak Yayların Belirlenmesi.....                           | 67        |
| 5.2.2 Farklı Yüzey Temizlikleri İçin Düşey Yorulma Testleri.....                           | 73        |
| 5.2.2.1 Boylamasına Yüzey Temizlenmiş Numuneler Hasar Analizi .....                        | 73        |
| 5.2.2.1.1 Hasar Kesit Görüntüleri ve Konumları .....                                       | 74        |
| 5.2.2.1.2 Overlap İncelemeleri .....                                                       | 74        |
| 5.2.2.1.3 Dekarbürizasyon ve Birleşik Ferrit İncelemeleri .....                            | 75        |
| 5.2.2.1.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri .....                            | 77        |
| 5.2.2.2 Dairesel Yüzey Temizlenmiş Numuneler Hasar Analizi.....                            | 80        |
| 5.2.2.2.1 Hasar Kesit Görüntüleri ve Konumları .....                                       | 81        |
| 5.2.2.2.2 Overlap İncelemeleri .....                                                       | 81        |
| 5.2.2.2.3 Dekarbürizasyon ve Birleşik Ferrit İncelemeleri .....                            | 82        |
| 5.2.2.2.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri .....                            | 84        |
| 5.3 Yaprak Yay Genişliğinin Yay Üzerindeki Gerilmelere Etkisi .....                        | 88        |
| 5.3.1 Farklı Genişliğe Sahip Numuneleri Gerilme Karşılaştırmaları .....                    | 90        |
| 5.3.2 Farklı Genişliğe Sahip Numuneleri Yorulma Ömür Karşılaştırmaları....                 | 92        |
| 5.4 Yaprak Yay Göz Kalınlığının Yaprak Yayın Yorulma Ömrüne Etkisini Araştırılması.....    | 95        |
| 5.4.1 Göz kalınlığı ince olan 2+1 yaprak yayın gerilme ve hasar analizi.....               | 97        |

5.4.2 Göz kalınlığı 2 mm artırılan 2+1 yaprak yayın gerilme ve hasar analizi 98

**BÖLÜM 6 - SONUÇ VE DEĞERLENDİRME..... 101**

**KAYNAKLAR ..... 104**



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1 At arabalarında kullanılan en ilkel süspansiyon sistemi .....       | 13    |
| Şekil 2.2 Süspansiyon sisteminin ana unsurları .....                          | 15    |
| Şekil 2.3 Süspansiyon sistemi elemanları .....                                | 16    |
| Şekil 2.4 Çok katlı yaprak yay .....                                          | 17    |
| Şekil 2.5 Mini tip amortisör .....                                            | 17    |
| Şekil 2.6 Burç kesit görüntüsü .....                                          | 18    |
| Şekil 2.7 Sabit ve bağımsız süspansiyon tipleri .....                         | 18    |
| Şekil 2.8 Hotchkiss süspansiyon .....                                         | 19    |
| Şekil 2.9 Sabit arka süspansiyon sistemi .....                                | 20    |
| Şekil 2.10 Bağımsız süspansiyon sistemi tipleri .....                         | 21    |
| Şekil 2.11 Bağımsız süspansiyon sistemi önden görünüşü .....                  | 22    |
| Şekil 3.1 Parabolik yaprak yay .....                                          | 25    |
| Şekil 3.2 Konvansiyonel tandem makas montajı .....                            | 25    |
| Şekil 3.3 Konvansiyonel yaprak yaylar ve komponentleri .....                  | 26    |
| Şekil 3.4 Yaprak yayların başlıca şekilleri .....                             | 26    |
| Şekil 3.5 Havalı süspansiyon yayı .....                                       | 27    |
| Şekil 3.6 Profil A sıcak haddelenmiş yay çeliği kesiti .....                  | 28    |
| Şekil 3.7 Profil B sıcak haddelenmiş yay çeliği kesiti .....                  | 29    |
| Şekil 3.8 Profil C sıcak haddelenmiş yay çeliği kesiti .....                  | 29    |
| Şekil 3.9 Yay Çeliği Malzemeleri Kimyasal Kompozisyonları .....               | 30    |
| Şekil 3.10 Çift katılık oranlı bir makasın LD diyagram örneği .....           | 31    |
| Şekil 3.11 Düz göz .....                                                      | 32    |
| Şekil 3.12 Berlin göz .....                                                   | 33    |
| Şekil 3.13 Ters göz .....                                                     | 33    |
| Şekil 3.14 Yaprak yay genişlik ölçüsü .....                                   | 34    |
| Şekil 3.15 I Boyunda bir profilde yüzey pürüzlülük ölçümü .....               | 35    |
| Şekil 3.16 Serbest yay yüksekliği ve kavis değerleri .....                    | 36    |
| Şekil 3.17 Yaprak yay eksen mesafeleri .....                                  | 36    |
| Şekil 3.18 Bir yapı çeliğinin kumlama öncesi ve sonrası yüzey görüntüsü ..... | 37    |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.19 Bilya püskürtmenin şematik gösterimi .....                                                                             | 38 |
| Şekil 3.20 Yaprak yay hesaplamaları için diagram.....                                                                             | 39 |
| Şekil 3.21 Simetrik trapez yaprak yay .....                                                                                       | 40 |
| Şekil 3.22 Simetrik parabolik yaprak yay .....                                                                                    | 40 |
| Şekil 3.23 Göz bölgesi kuvvetleri ve moment şeması .....                                                                          | 42 |
| Şekil 4.1 Yorulma hasarında çatlak ilerlemesinin üç aşamasını gösteren şematik<br>gösterim.....                                   | 45 |
| Şekil 4.2 Kayma sebepli yüzey çatlak oluşumu.....                                                                                 | 46 |
| Şekil 4.3 Al-4%Cu alaşımlı bir malzemenin kırılma yüzeyinde oluşan mikroskobik<br>ilerleme çizgileri.....                         | 48 |
| Şekil 4.4 Yorulma çatlak ilerlemesi modeli .....                                                                                  | 48 |
| Şekil 4.5 Şaft yorulma kırılması yüzeyi ve yorulma hasarının aşamaları.....                                                       | 49 |
| Şekil 4.6 Yorulma çatlak çekirdeklenmesi, ilerlemesi ve nihai kırılmanın şematik<br>gösterimi.....                                | 49 |
| Şekil 4.7 $R=0$ ve $R=-1$ Durumları için sabit genlikli tekrarlı yorulma yüklemeleri .                                            | 51 |
| Şekil 4.8 Sabit genlikli yorulma (Qiao ve Yang, 2006).....                                                                        | 52 |
| Şekil 4.9 Yorulma test numunesi (Pook, 2007) .....                                                                                | 52 |
| Şekil 4.10 Alüminyum alaşımlı bir numunenin S/N grafiği (Pook, 2007) .....                                                        | 53 |
| Şekil 4.11 Çelik yüzeylerin farklı yüzey kaliteleri etkisiyle gösterdikleri yorulma<br>dayanımları (Stephens ve diğer, 2001)..... | 56 |
| Şekil 4.12 Yüzeyden t kadar derinlikte artık gerilme dağılımı .....                                                               | 56 |
| Şekil 5.1 İncelenecek yaprak yaylar.....                                                                                          | 59 |
| Şekil 5.2 Farklı yüzey temizlik işlemleri uygulanan yaprak yaylar.....                                                            | 60 |
| Şekil 5.3 Boyuna ve enine yüzey pürüzlülük ölçümleri .....                                                                        | 60 |
| Şekil 5.4 Gerilim altında kumlama .....                                                                                           | 61 |
| Şekil 5.5 Kumlama sonrası yaprak yaylar .....                                                                                     | 62 |
| Şekil 5.6 60x büyütülmüş yüzey mikroskop görüntüleri .....                                                                        | 62 |
| Şekil 5.7 X ışınımı kırınımı yöntemi ile yüzeyde artık gerilme ölçümü.....                                                        | 63 |
| Şekil 5.8 Kumlama öncesi ve sonrası artık gerilme değişimleri.....                                                                | 64 |
| Şekil 5.9 Derinlikte artık gerilme ölçümü.....                                                                                    | 64 |
| Şekil 5.10 Farklı yüzey temizlikleri için derinlikte artık gerilme ölçüm sonuçları ...                                            | 65 |
| Şekil 5.11 Malzeme inceleme görselleri .....                                                                                      | 66 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.12 Boylamasına yüzey temizlikli yaprak yayları fonksiyonel testleri .....                                  | 67 |
| Şekil 5.13 Kavisli yaprak yay parabolik kalınlık ölçüm cihazı .....                                                | 68 |
| Şekil 5.14 Boylamasına yüzey temizlenmiş yaprak yayların parabolik kalınlık ölçüm sonuçları .....                  | 68 |
| Şekil 5.15 Analizler için katı modele dönüştürülmüş yaprak yay .....                                               | 68 |
| Şekil 5.16 Sınır koşulları.....                                                                                    | 69 |
| Şekil 5.17 Boylamasına makas numune 1 analiz görüntüsü .....                                                       | 69 |
| Şekil 5.18 Çekme testi .....                                                                                       | 70 |
| Şekil 5.19 Çekme testi .....                                                                                       | 70 |
| Şekil 5.20 Boylamasına yüzey temizlenmiş yaprak yayların sonlu elemanlar analiz sonuçları gerilme grafikleri ..... | 71 |
| Şekil 5.21 Dairesel yüzey temizlikli yaprak yayları fonksiyonel testleri.....                                      | 71 |
| Şekil 5.22 Dairesel yüzey temizlenmiş yaprak yayların parabolik kalınlık ölçüm sonuçları .....                     | 72 |
| Şekil 5.23 Dairesel yüzey temizlenmiş yaprak yayların sonlu elemanlar analiz sonuçları gerilme grafikleri .....    | 72 |
| Şekil 5.24 Yorulma test görüntüsü.....                                                                             | 73 |
| Şekil 5.25 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin hasar bölgesi görüntüsü .....                           | 74 |
| Şekil 5.26 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin <i>overlap</i> görüntüsü....                            | 75 |
| Şekil 5.27 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin kısmi dekarbürizasyon görüntüsü.....                    | 76 |
| Şekil 5.28 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin birleşik ferrit görüntüsü .....                         | 77 |
| Şekil 5.29 Boylamasına yüzey temizlikli numune1 SEM görüntüsü.....                                                 | 78 |
| Şekil 5.30 Boylamasına yüzey temizlikli numune 5 SEM görüntüsü.....                                                | 79 |
| Şekil 5.31 Boylamasına yüzey temizlikli numune 6 SEM görüntüsü.....                                                | 79 |
| Şekil 5.32 Boylamasına yüzey temizlikli numune 3 SEM görüntüsü.....                                                | 80 |
| Şekil 5.33 Yorulma hasar konumu ve kesit görüntüleri.....                                                          | 81 |
| Şekil 5.34 Dairesel olarak hassas temizlik yapılmış numunelerin overlap görüntüleri .....                          | 82 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.35 Dairesel olarak hassas yüzey temizliği yapılan numunelerin kısmi dekarbürizasyon görüntüleri..... | 83 |
| Şekil 5.36 Dairesel olarak hassas yüzey temizliği yapılan numunelerin birleşik ferrit görüntüleri .....      | 84 |
| Şekil 5.37 Dairesel yüzey temizlikli numune 2 SEM görüntüsü .....                                            | 85 |
| Şekil 5.38 Dairesel yüzey temizlikli numune 4 SEM görüntüsü .....                                            | 85 |
| Şekil 5.39 Dairesel yüzey temizlikli numune 5 SEM görüntüsü .....                                            | 86 |
| Şekil 5.40 Dairesel yüzey temizlikli numune 1 SEM görüntüsü .....                                            | 86 |
| Şekil 5.41 Boylamasına yüzey temizlikli numuneler weibull dağılımları ve B10 ömrü .....                      | 87 |
| Şekil 5.42 Dairesel yüzey temizlikli numuneler weibull dağılımları ve B10 ömrü...                            | 88 |
| Şekil 5.43 76,2 ve 70 mm genişlikli numunelerin 3D modelleri .....                                           | 89 |
| Şekil 5.44 76,2 ve 70 mm genişlikli kesit karşılaştırmaları .....                                            | 89 |
| Şekil 5.45 51CrV4 malzeme için analiz öncesi seçilen SN grafiği .....                                        | 90 |
| Şekil 5.46 Numunelerin gerilme karşılaştırma grafiği.....                                                    | 91 |
| Şekil 5.47 Numunelerin gerilme grafikleri .....                                                              | 91 |
| Şekil 5.48 70 mm genişlikli numune 1 için ömür sonuçları .....                                               | 92 |
| Şekil 5.49 76,2 mm genişlikli numune 1 için ömür sonuçları .....                                             | 92 |
| Şekil 5.50 70 mm genişlikli numune 3 için ömür sonuçları .....                                               | 93 |
| Şekil 5.51 76,2 mm genişlikli numune 3 için ömür sonuçları .....                                             | 93 |
| Şekil 5.52 70 mm genişlikli numune 5 için ömür sonuçları .....                                               | 94 |
| Şekil 5.53 76,2 mm genişlikli numune 5 için ömür sonuçları .....                                             | 94 |
| Şekil 5.54 70 mm genişlikli numune 7 için ömür sonuçları .....                                               | 94 |
| Şekil 5.55 76,2 mm genişlikli numune 7 için ömür sonuçları .....                                             | 95 |
| Şekil 5.56 Yaprak yay göz bölgesi kalınlık karşılaştırılması.....                                            | 96 |
| Şekil 5.57 İnceleme gerçekleştirilen 2+1 yaprak yay sınır koşulları .....                                    | 96 |
| Şekil 5.58 Fren yükü uygulanmış 2+1 yaprak yay.....                                                          | 96 |
| Şekil 5.59 51CrV4 malzeme için göz bölgesi S-N grafiği.....                                                  | 97 |
| Şekil 5.60 Mevcut makas tasarımı göz bölgesi maksimum asal gerilmeler .....                                  | 98 |
| Şekil 5.61 Mevcut tasarım için yaprak yay göz bölgesi hasar analizi .....                                    | 98 |
| Şekil 5.62 2 mm artırılmış göz kalınlıklı yaprak yay maksimum asal gerilmeler .....                          | 99 |
| Şekil 5.63 2 mm artırılmış göz kalınlıklı yaprak yay nCode hasar analizi .....                               | 99 |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.64 Mevcut ve yeni tasarımlarda farklı göz kalınlıkları için göz bölgesi gerilme karşılaştırması..... | 100 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 5.1 Yüzey temizliksiz numunelere göre kumlama öncesi $R_z$ karşılaştırması ..                       | 61 |
| Tablo 5.2 Boylamasına zımpara ile yüzey temizlikleri yapılmış numunelere göre $R_z$ karşılaştırması ..... | 63 |
| Tablo 5.3 Yüzey temizlik yapılmamış numuneye kıyasla derinlikte artık gerilme ölçümü .....                | 65 |
| Tablo 5.4 Boylamasına zımpara ile yüzey temizlik yapılan makasların yorulma test sonuçları .....          | 73 |
| Tablo 5.5 Dairesel disk ile hassas yüzey temizlik yapılan makasların yorulma test sonuçları .....         | 80 |

## **BÖLÜM BİR**

### **GİRİŞ**

#### **1.1 Giriş**

Rekabetin son yıllarda oldukça arttığı otomotiv sektöründe, gerek sürüş konforu, gerekse sürüş güvenliği açısından süspansiyon sistemleri oldukça büyük bir öneme sahiptir. Araçları, binek ve ticari olmak üzere kategorilere ayırdığımızda farklı süspansiyon sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan farklı süspansiyon elemanları karşımıza çıkmaktadır. Süspansiyon sisteminin en önemli komponentlerinden bir tanesi yaylardır. Binek araçlarda helisel yay kullanımı görülürken, ticari araçlarda yaprak yayların kullanımı çoğunluktadır. Yaprak yaylar hem aks ve şasi arasındaki bağlantının sağlanması hem de yoldan gelen darbelerle karşı sürüşü daha dayanılır hale getirmesi yönüyle en önemli ve kritik öneme sahip süspansiyon komponentlerinden bir tanesidir.

Kullanıldıkları araç tipi, tonajı ve aracın hangi aksı üzerinde kullanılacaklarına göre farklı tiplerde yaprak yaylar bulunmaktadır. Bu kapsamda karşımıza çok katlı konvansiyonel yaprak yaylar, hava körüğü yayları ve son yıllarda kullanımları tercih edilen parabolik yaprak yaylar çıkmaktadır. Parabolik yaprak yaylar en az sayıda katın kullanılmasına olanak sağlayarak yay karakteristiği ve dayanım özelliklerini sağlayabilmesi açısından süspansiyon sisteminin hafifletilmesine büyük katkısı olan önemli bir süspansiyon komponentidir. Parabolik yaprak yaylar gerekli dayanım ve fonksiyonel özellikleri sağlaması istendiğinden kapsamlı analiz edilmesi ve testlerle gerçek yol koşullarında testlerin doğrulanmasını gerektiren kritik elemanlardır.

Yorulma, tekrarlı yüklemelere maruz kalan makine elemanları hasarlanmalarında ortaya çıkmaktadır. Zamanla yüzeyde başlayan çatlak, başlangıç, ilerleme ve nihai kırılma aşamalarından geçerek hasar gerçekleşmektedir. Makine elemanları ve komponentlerinin yorulma dayanımlarının prototip aşamasındayken belirlenmesi oldukça kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla araç üreticilerinden alınan yükleme

değerleri ve frekansları ile tezgah testlerine maruz bırakılan numuneler en son olarak araç testlerinde de dayanıklılık açısından sınanmaktadır.

Çalışma kapsamında parabolik yaprak yayların çeşitli tasarım parametrelerindeki değişkenlikler sonrası yorulma ömürlerindeki farklılıklar tezgah testleri ve yorulma ömür hesaplama yazılımları ile incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

## 1.2 Literatür Taraması

Süspansiyon sistemleri ve yay komponentleri üzerinde gerçekleştirilen önceki çalışmalar incelendiğinde yaprak yaylar ile ilgili yapılmış birçok çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda yorulma dayanımı, malzeme özellikleri, proses parametrelerinin yorulma ömrüne etkileri, sonlu elemanlar analizleri ile testlerin korelasyonu ve yaprak yaylar üzerine gelen kuvvetler üzerinde yoğunlaşıldığı gözlemlenmiştir. Tez kapsamında sunulmak üzere bu çalışmalardan bazılarının yararlanılmıştır.

Bakir, Siktas ve Atamer (2014), “*Comprehensive Durability Assesment of Leaf Spring with CAE Method*” adlı çalışmada ağırlık ve maliyet azaltma çalışmalarının öneminden bahsedilmiş olup; ağır hizmet kamyonlarında bulunan dört yapraklı yayın, yapılan optimizasyon çalışmasıyla üç yapraklı hale getirilmesi aşamasında gerçekleştirilen hesaplamalardan bahsedilmiştir. İlk adım olarak kalınlık verilerini kullanan matematiksel hesaplamalara dayanan şirket içi bir yazılım olan BLAFES ile düşey yük altında dört yapraklı yaprak yay katılık değeri 2883,7 N/mm hesaplanmıştır. Bu değerin üretici firma tarafından belirtilen değere göre yaklaşık % 1 daha yüksek olduğu görülmüştür. Yay katsayısı üç yapraklı yaprak yay için BLAFES programı yardımıyla hesaplanmış ve orijinal yaprak yay ile üç yapraklı yeni yay katılık değerleri karşılaştırıldığında, katılık değerinin üç yapraklı yayda % 6 artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonraki adımlarda benzer katılık karşılaştırmaları elastokinematik olarak ve sonlu elemanlar hesaplamalarıyla gerçekleştirilmiştir. Abaqus sonlu elemanlar programında yüksüz haldeki yay modeline düşey yük uygulanmasıyla üç yapraklı yeni tasarım yaprak yay için elde edilen sonuçlara göre

yeni tasarım üç yapraklı yayın katılık değeriinde orijinal tasarıma göre elastokinematik model doğrulanmıştır. Doğrulan bu model daha sonra çoklu gövde simülasyonlarıyla (MBS) yaprak yayın yük kollektifinin bulunmasında kullanılmıştır. Test aracından, yayın sehim ve ivme değeri kaydedilmiş ve bu değeri hesaplanmış olan ivme ve sehim değeriyle kıyaslanmıştır. Test sonucunda elde edilen ve hesaplanan değeri çok yakın olduğu için testten elde edilen kuvvet değeri orijinal ve yeni tasarım yay ile hazırlanmış iki ayrı MBS modeline uygulanmıştır. Hesaplamalar sonucunda kesme kuvveti ve eğilme momenti olarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ek olarak yoldan toplanan ve zamanla değerişen yük datalarını işleme yöntemleri olan, parça ve araç onayları için yorulma çevrimlerinin belirlenmesine yardımcı olan *'Level Crossing'* ve *'Range Pair'* hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. *'Level Crossing'* sonuçları, yeni tasarım yaprak yay uygulanan kuvvetlerin orijinal tasarıma uygulananlardan daha yoğun *'Level Crossing'* dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. *'Range Pair'* hesaplamaları ise yeni tasarım yaprak yay uygulanan kuvvetlerin orijinal tasarıma kıyasla daha yoğun *'Range Pair'* dağılımları olduğunu göstermektedir. Bu da yeni tasarım üç yapraklı yaprak yayın daha büyük yüklere maruz kaldığını göstermektedir. Bu aşamada hesaplanan kuvvet ve momentler sonlu elemanlar hesaplamalarında kullanılmıştır. Geçmiş testlerin çıktılarına göre dört yapraklı orijinal yaprak yay tasarımı için hasar bölgesinin üçüncü kat üzerinde olduğu görülmektedir. Abaqus programında U civataların sıkılmasıyla elde edilen modele düşey kuvvet uygulanmış ve yay katsayısı değeri BLAFES ve elastokinematik hesaplamalar ile elde edilen değeriye oldukça yakın sonuç verdiği görülmüştür. Sonlu elemalar yönteminin bir diğeri çıktısı olan gerilme sonuçları incelendiğinde maksimum gerilmenin önceki testlerde tespit edilen hasar başlangıç bölgesi olan üçüncü katın alt tarafında çıktığı görülmektedir. Yeni ve eski tasarımlar karşılaştırıldığında kat sayısı azaltılıp kalınlık dağılımı artırılan yeni tasarımda katların üzerlerine daha ağır kuvvetler gelmesine karşılık maksimum gerilmenin %20'ye kadar daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Gerilme sonuçlarının yeni bir tasarımın uygun dayanım karakteristiğini belirlemede her zaman yeterli olmayabileceği düşüncesiyle son adım olarak yorulma ömür hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve hem orijinal hem de yeni tasarım yaprak yay için benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu çalışma, gerilme sonuçlarının yüksek değerişken yükler altında çalışan yaprak yay gibi komponentlerin

sağlamlık karakteristiklerini göstermede her zaman yeterli olmadığını, kapsamlı bir sağlamlık değerlendirmesi için çok kanallı yorulma ömür hesaplamalarının uygulanması gerektiğini göstermektedir.

Soner ve diğer. (2012), '*Design and Fatigue Life Comparison of Steel and Composite Leaf Spring*' adlı çalışmada araçlarda ağırlık azaltmanın ne denli önemli olduğunu, CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmanın çevre sağlığı açısından bir gereklilik olduğundan bahsetmektedirler. Yay üretiminde kullanılan çelik malzemeye en iyi alternatif hafif olmaları, yüksek performanslı olmaları, yorulma performansları, korozyon dayanımları, yüksek frekanslarda titreşim dayanımları ve kimyasal dayanımları göz önünde bulundurulduğunda kompozit malzemelerdir. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler bu bakımdan yaprak yay üretiminde önemli bir alternatiftir. Son yıllarda araştırmacılar polimer bazlı kompozit ve metal malzemelerin bir arada kullanılmasıyla üretilecek hibrit yaprak yaylar üzerinde çalışmaktadırlar. Bu çalışmada fiber takviyeli polimer matrisli kompozit yaprak yay ve çelik yaprak yay kötü yol koşullarında yaprak yay prototipinin dayanım limitini belirleyebilmek için düşey tezgah testleriyle karşılaştırılmıştır. Rig testi de denilen bu testler yaprak yayın merkez düzlüğünden bir piston yardımıyla düşey yönde tekrarlı uygulanan yükler ile gerçekleştirilmiştir. Yaprak yayın şasiye bağlandığı noktalar bu test için her iki yönde de tekerlekli kayar mafsallar ile simule edilmiştir. 100x13 mm kesitte tasarlanan iki katlı yayın yaprakları arasındaki boşluklara kauçuk susturucular koyulmuştur. İki katlı modelin ağırlığı 26 kg'dır. Gerilme analizi ve yay katsayısı kontrolü Abaqus sonlu elemanlar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Kauçuk ve çelik malzemeye 0,02 sürtünme sabiti tanımlanmıştır. Maksimum ve dizayn düşey kuvvetlerin uygulanması durumu için analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları gerinim ölçer sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar programı ile belirlenen en yüksek gerilim değeri, gerinim ölçer ile belirlenen en yüksek gerilime göre %2 civarında düşük ölçülmüştür. Maksimum kuvvet uygulanma durumunda sonlu elemanlar programıyla elde edilen sehim değeri, gerinim ölçer ile elde edilene göre yaklaşık %2 fazla ölçülmüştür. Prototip yaprak yaylar üretilmiştir. Prototip yaprak yaylar seri üretim öncesi kötü yol koşullarını simule eden rig testlerine bağlanarak dayanımları belirlenmiştir. En az 5 adet prototip maksimum düşey yükleme altında minimum 200000 çevrim gerekliliğine

göre 0,75 Hertz frekansta test edilmiştir. Sonuçlara göre çatlak başlangıcına kadar testler minimum 208137 maksimum 215914 çevrim koşturmuştur. İki katlı çelik yaprak yay tasarımına alternatif olarak tek katlı kompozit yaprak yay üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit yaprak yay çelik tasarım ile aynı sürüş konforunu sağlayan aynı yay katsayısı ve daha yüksek yorulma dayanımı düşüncesiyle imal edilmiştir. Tek katlı olması sebebiyle susturucu ihtiyacı bulunmamaktadır. 75x29 mm kesitte üretilen tek katlı kompozit yay 5,2 kg ağırlığındadır. Toplam uzunluk olarak ise çelik tasarımı ile aynıdır. Kompozit yapılar anizotropik olduğu için model altı parçaya bölünmüş ve çeşitli fiber oryantasyonlarında test edilmiştir. Sonlu elemanlar programı yardımıyla hesaplanan maksimum gerilme değeri 1240 MPa, maksimum sehim 139 mm ölçülmesine karşın gerinim ölçer sonuçlarına göre maksimum gerilme 1284 MPa ve maksimum sehim 140 mm olarak ölçülmüştür. Kompozit malzeme üretiminde yüksek modüllü tek eksenli katlanmaz karbon fiber ve termoset epoksi reçine kullanılmıştır. Kompozit paneller reçine transfer kalıplama (RTM) tekniğiyle üretilmiştir. Fiber hacim oranı yaklaşık % 58’dir. Karbon fiber yaprak yayın rig testleri de aynı yüklemeler altında 0,75 Hertz frekansta gerçekleştirilmiş ve kırılana kadar koşturulmuştur. Test sonucu 342125 çevrim sonrası hasar görülmüştür. Test cam fiber epoksi malzemeye sahip yay için tekrar gerçekleştirildiğinde sonuçların gereksinimleri bu alternatif için de karşıladığı görülmüştür.

Karaağaç ve diğer. (2013), ‘*Decarburization Effects on Fatigue Behavior of Leaf Spring Material*’ adlı çalışmada sıcak haddelenmiş yay çeliklerinin ham malzeme üretim prosesinden gelen yüzeyde karbonsuzlaşma (*decarburization*) üzerinde durulmuştur. Karbonsuzlaşma karbon oksidasyonunun özel bir tipidir. Geçiş sıcaklığı altında yapısal sementitin okside olması ve geçiş sıcaklığı üzerinde östenit içerisindeki karbonun okside olması durumudur. Bu çalışmada yüzeyi karbonsuzlaşmış ferrit yapıların yorulma ömürlerinin yüzey sertliği ve kumlama ile oluşan kalıcı gerilme ile ilişkisi anlatılmıştır. Yaprak yaylarda karbonsuzlaşma ısıtma işlem sonucunda yüzeyde oluşur. Çalışma araç üreticileri tarafından belirlenen karbonsuzlaşma derinliğinin ömür performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Karbonsuzlaşma oluşumu öncelikle ısıtma işlem öncesinde yay çeliği döküm ve sıcak haddeleme proseslerinde başlar. Her test numunesi bakalit içerisinde alınır ve nital ile parlatılarak dağlanır. Daha sonra mikro

sertlik ölçümü gerçekleştirilir. Grafikten yararlanarak çekirdek sertliği başlangıç noktasını bulmak için iki farklı metot kullanılabilir. İlk metod çekirdek sertliğinin en düşük ve en yüksek değerinin ortalamasının %80'ine karşılık gelen değerdir. İkinci metod ise ISO EN 3887'ye göre toplam karbonsuzlaşma değerine bakılmasıdır. 410-461 HB sertlik değeri referans alınarak 70x17-55Cr3 DIN EN 10089 ve DIN EN 10092-1B ölçülerinde standart malzemeden prototip üretilmiştir. Üretilen bu prototipten termograf fırınında 2 farklı ayar için zamana bağlı sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Her ayar için üç farklı sıcaklık alanından geçen ürün ilk ayarda 11 dakika boyunca yüzeyde maksimum 1025-1045 °C sıcaklıkta bulunmuştur. İkinci ayarda parça maksimum sıcaklıkta 11 dakika kalmış olup yüzeyinde ölçülen maksimum sıcaklık değeri 945-950 °C'dir. Karbonsuzlaşma derinliği çekme yüzeyinden kumlama öncesi ve sonrası iki farklı sıcaklık ayarı için de ölçülmüştür. Kumlama sonrası x ışınları kırınım ölçeri ile ölçülen karbonsuzlaşma derinliğiyle yüzeyde oluşan bası artık gerilmeleri ölçülmüştür. İlk ayar için stresli kumlama yapılmış yayda karbonsuzlaşma 0,215 mm, kumlanmamış numunede ise 0,185 mm olarak ölçülmüştür. İkinci ayar için kumlanmış numunede 0,145 mm, kumlanmamış numunede ise 0,092 mm karbonsuzlaşma derinliği ölçülmüştür. Stresli kumlama çekme yüzeyine yay 1600 MPa'da gergin durumundayken uygulanmıştır. Karbonsuzlaşma ve bası artık gerilmeleri hesabı sonrası kumlanmamış numune yorulma rig testine maruz bırakılmıştır. İki farklı ayarda üretilen yaprak yay prototipi araç pozisyonundayken düşey yük ile test edilmiştir. Her ayar için 5 adet prototip test edilmiş olup karbonsuzlaşma derinliği 92 µm'den 185 µm'ye ulaştığında yay ömrünün %42'ye düştüğü gözükmemektedir.

Soner ve diğer. (2013), '*Effect of Leaf Spring on Suspension and Steering System*' adlı çalışmada tasarım parametrelerini değiştirmenin aracın toplam ağırlığına önemli derecede etkisi bulunan araç sürüş dinamiklerine olası etkileri araştırılmıştır. Süspansiyon konfor ve güvenliği sağlayan en önemli sistemlerden bir tanesidir. Doğal frekansın da sürüşün konfor seviyesine etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada ön aks için doğal frekans değerleri 1 Hz ve 1,5 Hz arasında değişmektedir. Eğer araç bu değerler dışında çalışıyorsa beklenmedik titreşim ve gürültüden dolayı sürücünde konforsuzluk gözlemlenecektir. Araç üreticileri tarafından 1,11 Hz, 1,33 Hz ve 1,5 Hz

olarak verilen doğal frekanslar için farklı yükler altında sonlu elemanlar hesaplamaları sonucunda elde edilen gerilmeler de göz önünde bulundurularak optimum tasarım belirlenmiştir. Tasarım yükü 14950 N olarak verilmiştir. Doğal frekanslardan yola çıkarak yay katsayısı değerleri ve buna bağlı olarak metalden metale temas mesafesi için maksimum yük durumu hesaplanır. Tüm tasarımlar 51CrV4 malzeme için gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımdan 1,1 Hz frekans için hesaplanan yay katsayısı 72,8 N/mm olup maksimum kuvvet 22230 N'dur. İkinci tasarımda 1,33 Hz için 106,4 N/mm yay katsayısı hesaplanmış ve maksimum kuvvet de 25590 N olarak belirlenmiştir. Son olarak frekans değeri 1,5 Hz olan üçüncü tasarım için yay katsayısı değeri 135,4 N/mm ve maksimum kuvvet değeri 28490 N olarak belirlenmiştir. Verilen yük durumu için yüksek yer değiştirme karakteristiğine sahip olan birinci tasarımda ağırlık optimizasyonunu sağlamak üzere tek katlı yay tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımdan elde edilen sonuçlara dayanarak öne frenleme durumunda oluşan gerilim seviyesini azaltmak için ikinci tasarım çift katlı olarak tasarlanmıştır. Üç numaralı tasarım ise maksimum yük altında minimum deplasmanı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. U civatalarla sıkılmamış (*unclamped*) yay için düşey yük altında yük-deplasman grafiğini doğrulamak için test gerçekleştirilmiştir. Her üç tasarım için deformasyon ve civataları sıkılmış durumda iken düşey, ileri frenleme ve geri yönde frenleme durumları için gerilme durumları incelenmiştir. Birinci tasarım için ileri yönde frenleme durumunda oluşan 1828 MPa *Von-Mises* gerilmesini ağırlık optimizasyonu ile azaltma şansı bulunmadığından şasiye kauçuk malzemeden bir wind-up stoperi konumlandırılması gerekli olmuştur. İkinci tasarım için en yüksek gerilme ileri yönde frenleme durumu için meydana gelmiştir ve değeri 1364 MPa'dır. Üçüncü tasarım için de en zorlayıcı durum ileri yönde frenleme olarak gözükmektedir ve oluşan gerilme değeri 1507 MPa'dır ve wind-up stoperi kullanım ihtiyacı bulunmaktadır. Her üç tasarım ağırlık olarak kıyasladığında 1,11 Hz doğal frekans için birinci tasarımın 25 kg, 1,33 Hz doğal frekans için ikinci tasarımın 34 kg, 1,5 Hz doğal frekans için üçüncü tasarımın 28 kg olduğu hesaplanmıştır. Birinci tasarımda U civatalar sıkılmamış durumda 291 mm deplasman değeri gözlemlenirken, civatalar sıkılıp araç şartlarında yay katsayısına etkiyen diğer faktörlerle beraber deplasman 268 mm değerine düşmektedir. Okunan gerilmeler ise 1396 MPa'dan 1313 MPa'a gerilemektedir. Düşey rig testlerinde maksimum yük için 275000 ortalama çevrim

değeri için beklenen gerilme değeri 1200 MPa olduğu için birinci tasarım uygun bulunmamıştır. Gerilme seviyeleri ve tasarım ağırlığı düşünüldüğünde optimum tasarım 1,33 Hz için yapılan ikinci tasarım olduğu gösterilmiştir. İki numaralı çift katlı parabolik yaprak yay tasarımı için prototip üretilmiş ve düşey test rigine bağlanmıştır. 200000 çevrim gerekliliği için 0,75 Hz frekansında gerçekleştirilen 5 adet düşey testte minimum 286332 çevrim ömür gözlemlenmiştir ve tasarım gerekliliklerinin karşılandığı görülmüştür. Makalenin son kısmında yaprak yay ve yönlendirme sistemi beraber incelenmiştir.

Soner ve diğer. (2011), '*Parabolic Leaf Spring Fatigue Considering Braking Wind up Evaluations*' adlı çalışmada yayların yoldan gelen enerjiyi absorbe ettiği, sürüş konforu ve güvenliği için her bir katın katılık değerinin ve gerilme dağılımının çok iyi bilinmesi gerektiği üzerinde durulmuştur. Buna ek olarak yayların *wind up* (fren kuvveti sonrası burulma) etkisinin önemli kontrol mekanizmaları olduğu ve hem *jounce* (tümsekte izin verilen yaylanma) kuvveti hem de frenleme etkisine eş zamanlı maruz kalan yayda çekme gerilme değerine çok yakın hatta çekme gerilme değerinin de üzerinde gerilmeler gözlemlenebileceği belirtilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde en kritik konulardan birinin ön aks *wind up* stoperinin konumu olduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda iki katlı bir parabolik yaprak yay modellenmiştir. Model, her bir yaprakta meydana gelen gerilme dağılımı ve deformasyonu gözlemleyebilmek amacıyla dizayn, *jounce* ve metal-metal düşey kuvvetleri altında doğrusal olmayan sonlu elemanlar analiziyle incelenmiştir. Bu doğrultuda üretilen numune fiziksel olarak test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra *jounce* kuvveti ve *wind up* fren momenti uygulanarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda maksimum gerilme her üç düşey yükleme için de ana kat üzerinde oluşmuştur. Dizayn yükü, *jounce* yükü ve metal-metal yükü altında ana kat üzerinde oluşan maksimum *Von Mises* gerilmesi değerleri sırasıyla 788 MPa, 1080 MPa ve 1224 MPa olarak hesaplanmıştır. Beş adet numune test edilmiş ve gerinim ölçer ile data toplanmıştır. Testler en az 150000 çevrim ömür gereksinimi için minimum 1599 N maksimum kuvvet 49000 N olacak şekilde 0,5 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler testi geçmiştir. Gerinim ölçerden elde edilen sonuçların sonlu elemanlar programından elde edilenlere yakın olduğu

gözlemlenmiştir. *Wind up* stoperi ani frenleme sırasında uzun eksenli ön yaylarda oluşan burulma momentini absorbe etmek amacıyla kullanılır. *Wind up* stoperinin araç şasisi üzerindeki doğru konumu yaya etkiyen yükler ve yer değiştirme ile ilgilidir. Makalenin son bölümünde akma mukavemeti 1300 MPa civarında olan 51CrV4 malzemeden üretilen bu yaprak yayın ana ekseninden 81 mm ve 45 mm yerleştirilen kauçuk *wind up* stoperleri için ani frenleme durumunda yay üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. 81 mm mesafede *wind up* teması olmamakta, 45 mm’de yerleştirilende ise *wind up* stoperi doğru olarak görevini yapmaktadır. Bu sebeple 1679 MPa gerilme değeri 1399 MPa değerine gerilemiştir.

Yoo ve diğer. (2007), ‘*Fatigue Strength Evaluation for the Leaf Spring of Commercial Vehicle Considering U Bolt Fixing Force*’ adlı çalışmada tasarım parametrelerinin yaprak yayların yorulma ömrüne çok önemli etkisi olduğuna değinilmiş, bu yaylar test edilmiş ve nümerik analiz ile doğrulanmıştır. Normalde ticari araçlarda kullanılan yaprak yay daha fazla parçadan meydana gelmesine karşı bu çalışmada gerilme analizine ve ömür tahminine etkisi olan belirli tasarım parametreleri üzerinde durulmuştur. Analiz modelinin merkez bölgesinde yapı 3 adet parabolik yaprak, sac plakalar, alt ve üst makas braketlerini temsil eden yapılar ve U civataya odaklanılmıştır. Yayın merkez bölgesi için üç farklı model kullanılmıştır. İlk model orijinal modeldir; ikinci modelde en üstte bulunan üst yapı ve birinci kat arasındaki sac plakanın kalınlığı 3 mm’den 10 mm’ye artırılmıştır. Üçüncü tasarımda ise orijinal modelden farklı olarak üst makas tablasını temsil eden merkez braketin kalınlığı 20 mm’den 30 mm’ye çıkarılmıştır. Yaprak yay malzemesi olarak 51CrMoV4 kullanılmıştır. U civataları sıkılan yaya sınır koşulları uygulandıktan sonra merkez parçaya düşey noktasal yük tekrarlı bir şekilde uygulanmış ve bu sinüzoidal yükleme sonuçta yapraklardaki gerilmeler incelenmiştir. 5, 10, 12.6 ve 15 ton U civata sıkma yüküyle analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden gerilme sonuçları elde edildikten sonra malzemenin S-N verilerini ve yükleme geçmişini girdi olarak kabul ederek ticari yorulma yazılımı olan FEMFAT kullanarak ömür hesabı yapılmıştır. Bir diğer önemli faktör olarak Haigh-diagram metodu kullanılarak elde edilen ortalama gerilme etkisinden bahsedilmiştir. Civata sıkma yükü ne kadar büyükse ortalama gerilmenin o kadar büyük olduğu ve üst yapı ne kadar katı (kalın

ise) ise aynı şekilde ortalama gerilmenin o kadar büyük olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme genliği yayın alt ve üst tarafında dengeli olarak dağılmıştır; fakat merkez deliği etrafında katılık gradyanti görülmüştür. Civata sıkma yükü ne kadar büyük ve üst yapı ne kadar katı ise ortalama gerilme o kadar düşük olduğu görülmüştür. Daha sonra *Miner Rule* kullanılarak hasar hesabı yapılmıştır. Bu çalışmada minimum çevrim gereksinimi 200000 çevrim olarak belirlenmiştir ve hasar hesabı FEMFAT yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Her 12 durum için de tahmini hasar değerleri merkez kısım haricinde benzer çıkmıştır. Maksimum hasar U civatadan yaklaşık 200 mm mesafede arka kol tarafında 0,74 olarak hesaplanmıştır. Bu da civata sıkma kuvvetinden bağımsız olarak yaklaşık olarak 270000 çevrim yorulma ömrüne denk gelmektedir. Makasın merkezindeki kısımda ise çeşitli tasarım modifikasyonları ve civata sıkma kuvvetine göre farklı hasar gözlemlenmektedir. 12,6 tonf sıkma kuvveti için orijinal modelde hasar değerinin üzerinde çıkmış ve tasarım gerekliliklerini karşılamadığı gözükümüştür. Buna karşılık ikinci tasarımda 12,6 tonf sıkma kuvveti için hasar değerinin 1'in altında kaldığı ve en zayıf noktanın U civata alanının dışında olduğu görülmüştür. Fakat orijinal ve birinci durum için civata torkunun kontrol edilemediği veya civatalarda gevşeme olursa o zaman tasarım ömür hedefinin tutturamadığı görülmüştür. Üst yapının daha kalın olduğu üçüncü tasarımda toplam hasarın diğer modellerden daha düşük olduğu ancak bu durumda da civataların gevşemesi durumunun yaprak yayda hasara neden olabileceği görülmüştür.

Chavhan ve Wankhade (2019), "*Experimental analysis of E-glass/epoxy composite-material leaf spring used in automotive*" adlı çalışmada kamyonet tipi araçta kullanılan konvansiyonel tip 65Si7 çelik yaprak yay yerine epoksi matris ve tek eksenli E cam takviye malzemeden üretilen yayın kullanımı incelenmiş; ağırlık, güvenlik, maliyet ve sağlamlık açılarından karşılaştırmalar yapılmıştır. Kompozit içerisindeki fiber ağırlık oranı % 60 olarak belirlenmiştir ve kalıptan çıkarılmadan önce malzeme 24 saat kürlenmiştir. Her iki malzemeye de eğilme, sertlik ve morfoloji analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç nokta eğme testine göre kompozit yaprak yaydaki deplasman bir değere kadar aynı kuvvet için daha düşük; fakat belli bir değerden sonra konvansiyonel çelik yaprak yaydaki deplasman değerleri daha yüksek gelmektedir. Kompozit yayın deplasman değerinin 4800 N sabit yük değerine,

elik yaydaki deplasman değerinin ise 6400 N sabit yük değerine kadar sürekli arttığı gözlemlenmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde ortalama sertlik değerleri kompozit yay için 45 BHN, elik yaprak yay için ise 182 BHN llmştr. Son olarak elektron tarama mikroskobu (SEM) kullanılarak kompozit malzemenin iç yapısı incelenmiştir. Fiber ve matris arasındaki arayüz yapışmasının, fiber ağırlık oranının az olmasından dolayı zayıf olduğu bu yöntemle gözlemlenmiştir. Kompozit malzeme yapısında boşluklar gözlemlenmiştir. Eğme yükünden dolayı meydana gelen itme ve delaminasyon olayı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda bütün bu çalışmalarla birlikte, elik yerine kompozit malzeme kullanımı sonrası yaklaşık %75 ağırlık azaltılmış olacağına değinilmiş ve kompozit malzeme iyi bir alternatif malzeme olarak gösterilmiştir.

## **BÖLÜM İKİ**

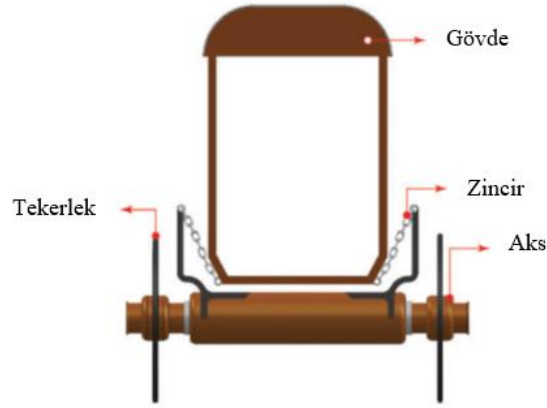
### **SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ**

#### **2.1 Süspansiyon Sistemleri ve Tarihi Gelişimi**

Süspansiyon sistemleri kinetik enerjiyi dağıtmak ve darbeleri kontrol altına almakla görevli aracın en önemli sistemlerinden bir tanesidir. Aynı zamanda yol tutuşunu sağlayarak araç güvenliğine de önemli katkıları bulunmaktadır (Sahlani ve diğer, 2018).

Eski zamanlarda araç sürücüleri sürüş kontrolünü sağlamak ve yolcuların konforunu sağlamak gibi iki önemli özellik arasında seçim yapmak durumunda kalmışlardır. Sürüş konforundan daha çok o zamanın koşullarında sıklıkla karşılaşılan bozuk yol koşulları karşısında güvenli sürüşün devamını sağlayıp aracı kontrol altında tutabilmek, o zamanlar sürücüler ve araç üreticileri tarafından ön planda tutulmakta idi. Bütün bunlar göz önünde bulundurularak tasarlanan bu süspansiyonlar aks on ve dingil pimi yardımıyla aksa monte edilmiş ön tekerleklerden meydana gelmekteydi. Bu tasarımda aks sabit kalırken, aracın yönlendirilebilmesi mümkün kılınmaktaydı. At arabaları ile taşıma yapan sistemlerden, modern otomobillere kadar süspansiyon sistemlerinin araçlara uygulanması için çok fazla sayıda uygulama gerçekleştirilmiştir. Sağlamlık araç güvenliği açısından çok önemli olduğu için, araç tasarımları performans ve güvenlik arasında bir değişim gösterdiler. Bu da komponent tasarımlarının çalışma koşullarına olabildiğince doğru uyum göstermesi anlamını taşımaktadır (Orj kaynak AA, 2004 aktaran Mohyaldeen, 2011).

Şekil 2.1’de de gösterildiği gibi süspansiyon sistemlerinin tarihi araştırıldığında, kullanılan en ilkel form olarak büyük baş hayvan ile yük taşınan araçlarda demir zincir kullanımı görülmektedir. Bu sistem, 19. yy başlarına kadar süspansiyon sistemlerinin temeli olarak görülmekteydi. 18. yy ortalarında yaprak yaylar Lando adı verilen taşıyıcı araçlarda kullanılmaya başladı. 19. yy ortalarından sonra ise eliptik yaylar taşıyıcı araçlarda yay göstermeye başladı (Wikipedia, bt).



Şekil 2.1 At arabalarında kullanılan en ilkel süspansiyon sistemi (Goodarzi ve Khajepour, 2017)

At arabaları düşük hızlarda yük taşımak amacıyla icat edilmiş oldukları için, içten yanmalı motorların sağladığı daha yüksek hızlar için uygun değillerdi. Otomobiller başlangıçta at arabalarının kendinden tahrikli tipleri olarak geliştirildiler. Obadiah Elliott adında İngiliz bir mucit tarafından ilk kullanılabilir süspansiyon yayı tasarlanmıştır. Bu süspansiyon yayı araç aksına her iki tekerlek yönünde bağlı olacak şekilde tasarlandı ve bu alanda patent alındı. Daha sonraları hafif yük taşıyan atlı arabalarda odun, daha ağır yük taşıyan araçlarda ise düşük karbonlu çelikten imal edilen ve genellikle çok katlı olan yaprak yaylar kullanılmaya başlamıştır (Wikipedia, bt).

Otomobillerin ortaya çıkmasıyla çelik yaprak yaylar zorlu yol koşulları için yetersiz kaldı ve yoldan araca iletilen aşağı yukarı sarsıntılar salınım hareketine dönüştürülmesi amacıyla deri kayışlı süspansiyon sistemleri kullanımı ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda amortisör ilk defa 1901 yılında Fransa'nın Mors firması tarafından bir araçta kullanıldı. Helisel yaylar ise 1906 yılında kullanılmaya başlandı ve günümüzde hala modern araçlarda kullanılmaktadırlar. 1920 yılında burulma çubukları Leyland Motors firması tarafından kullanılmaya başlandı (Wikipedia, bt).

Bağımsız süspansiyon sistemleri 1922 yılında ortaya çıktı ve 1932 yılında pazarda yerini aldı. Bugün birçok firma tarafından dört tekerlek için de kullanılmaktadır (Wikipedia, bt).

## **2.2 Süspansiyon Sistemlerinin İşlevi**

Süspansiyon sistemleri lastik, lastik havası, yaylar, amortisör ve bağlantı çubuklarını içeren, araç şasisi ve tekerlekleri arasında konumlanan sistemlerdir (Wikipedia, bt).

Süspansiyon sisteminin fonksiyonu üç temel prensibe dayanmaktadır. Bunlar:

### **2.2.1 Sürüş konforu**

Süspansiyon sistemleri, yolcuları ve taşınan kargoları, düzgün olmayan yol koşullarından kaynaklanan titreşim ve darbelerin rahatsız edici etkilerinden koruyarak bu sayede sürüş konforuna katkıda bulunmaktadır (Stone ve diğer, 2004).

### **2.2.2 Yol tutuşu**

Sürüş esnasında tekerlek ile yol temas noktasından araç gövdesine etkileyen, sürüş performansına ve araç sürüş davranışlarına etkisi olan kuvvetler süspansiyon sistemleri tarafından alınırlar. Süspansiyon sistemlerinin sahip olması gereken en önemli özelliklerinden biri olan yol tutuşunun sağlanması fonksiyonu tam da bu noktada ortaya çıkmaktadır. Lastik tarafından iletilen yanal ve düşey etkileyen kuvvetler viraj dönme, çekiş ve frenleme kabiliyetleri üzerinde etkilidir. Bu terimler süspansiyon sisteminin lastik yükündeki değişimi minimuma indirmesi ile geliştirilebilir. Bunların yanında araç süspansiyonunun araç statik ağırlığını desteklemek gibi önemli başka bir görevi daha bulunmaktadır. Süspansiyon sistemleri sayesinde salınım boşluğu gereklilikleri en aza indirilir (Goodarzi ve Khajepour, 2017).

### **2.2.3 Kontrol ve İdare**

İyi bir süspansiyon sistemi her bir manevrada aracın stabil kalabilmesini sağlayabilmelidir. Ancak iyi bir sürüş idaresi için stabiliteden çok daha fazlası gerekmektedir. Araç sürücünün ivmelenme, frenleme ve yönlendirme gibi girdilerine

en iyi ve akıcı bir biçimde cevap verebilmelidir. Araç davranışları öngörülebilir olmalıdır. Süspansiyon sistemleri, yalpalama ve salınım hareketlerini minimize etmek, tekerlek açısının kontrolünü sağlamak ve virajlarda yoldan etkiyen yanal kuvvetleri azaltmak gibi etkileriyle araç idaresinin sağlanmasına birçok yolla katkı sağlamaktadır (Goodarzi ve Khajepour, 2017).

### 2.3 Süspansiyon Sisteminin Ana Unsurları

Süspansiyon sistemleri fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için çeşitli komponentlerden oluşmaktadır. Bu kapsamda süspansiyon sistemlerinin mekanizma, yay, amortisör ve burçlar olmak üzere dört ana bileşenden meydana geldiği söylenebilir. Şekil 2.2’de süspansiyon sisteminin ana unsurları olan mekanizma, yay, amortisör ve burçlar gösterilmektedir.

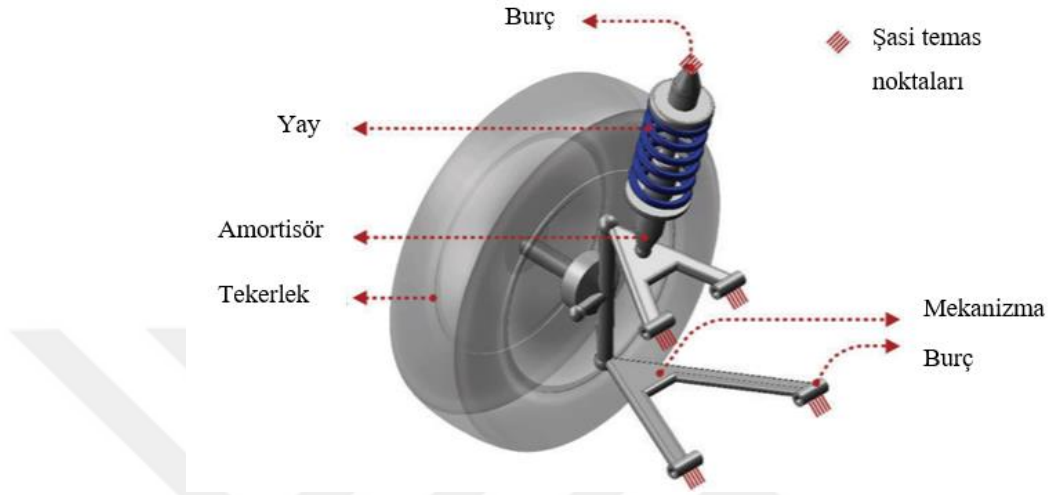


Şekil 2.2 Süspansiyon sisteminin ana unsurları (Goodarzi ve Khajepour, 2017)

#### 2.3.1 Mekanizma

Tekerlek ve şasi bağlantısını sağlayan, kuvvet ve moment iletimini sağlayan süspansiyon mekanizması, bir veya daha çok koldan meydana gelmektedir. Süspansiyon geometrisi, tekerlek açısı ve buna bağlı hareketlerin hepsi mekanizma tarafından belirlenmektedir. Süspansiyon hareketi sırasında gerçekleşen tekerlek açısı değişimi lastik kuvvetlerinde değişime yol açtığından dolayı mekanizma yol tutuşunu ve aracın idare edilebilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bütün bunların yanında süspansiyon sisteminin ağırlığının önemli bir kısmını mekanizma ağırlığı

etkilemektedir. Daha hafif malzemelerden imal edilen mekanizma elemanları daha iyi sürüş kalitesi sağlasa da daha maliyetlidirler (Goodarzi ve Khajepour, 2017). Şekil 2.3'te süspansiyon sistemi elemanlarından oluşan mekanizma gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Süspansiyon sistemi elemanları (Goodarzi ve Khajepour, 2017)

### 2.3.2 Yaylar

Üzerlerine kuvvet uygulandığında deforme olup, uygulanan yük kaldırıldıktan sonra başlangıçtaki şekline geri dönebilen elastik parçalar yay olarak tanımlanmaktadır. Yeni yolcu tipi araçlarda daha çok helisel yaylar kullanılmaktadır. Bunun yanında genellikle ticari araçların ön süspansiyonlarında helisel yay kullanımı görülse de arka süspansiyonlarında yaprak yaylar kullanılmaktadır (Sahlani ve diğer 2018). Yaprak yaylar araç ağırlığını desteklerler ve sürücü için sürüşü daha dayanılır hale getirirler. Yayların karakteristiğini belirleyen en önemli özellik yay sabitleri ya da katılık oranlarıdır. Yay sabiti yüksek bir yaya sahip bir araçta yol tutuşu ve aracın idare edilebilmesi artarken buna ters orantılı olarak sürüş konforu azalmaktadır (Goodarzi ve Khajepour, 2017). Şekil 2.4'te çok katlı yaprak yay örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Çok katlı yaprak yay (Olgun Çelik, bt)

### 2.3.3 Amortisörler

Amortisörler araç süspansiyonuna gelen darbeleri ve geri tepme hareketlerini kontrol etmekle sorumlu süspansiyon elemanlarıdır. Amortisörlerin en önemli görevlerinden bir tanesi tekerlek ve yol temasını sağlamasıdır. Güvenlik, stabilite ve konfor unsurları amortisörlerin en önemli avantajlarıdır. Temel ikiz tüp, gaz beslemeli ikiz tüp, pozisyon ve ivme hassasiyetli amortisör ve *coil over* olmak üzere çeşitli tipleri bulunmaktadır. Şekil 2.5’te mini tip bir amortisöre örnek gösterilmektedir (Dishanti ve diğer, 2017).

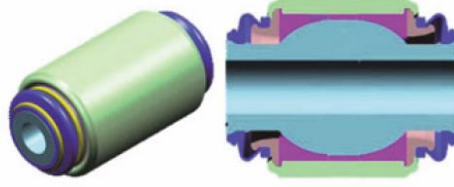


Şekil 2.5 Mini tip amortisör (Dishanti ve diğer, 2017)

### 2.3.4 Burçlar

Burçlar iki metal parçanın birbiriyle doğrudan temasını önlemek ve bu sayede oluşacak titreşim ve gürültüyü önlemek amacıyla kullanılırlar. Gürültü ve ses izolasyonunun sağlanabilmesi amacıyla burçların içinde kauçuk gibi yumuşak malzemeler kullanılır. Serbestlik derecelerine göre sınıflandırılan birçok burç çeşidi bulunmaktadır. Döner mafsallar en çok karşılaşılan tipleridir. Bilyalı bağlantılar tüm yönlerde dönme hareketine izin verirlerken, döner mafsallar silindirik döner hareketi

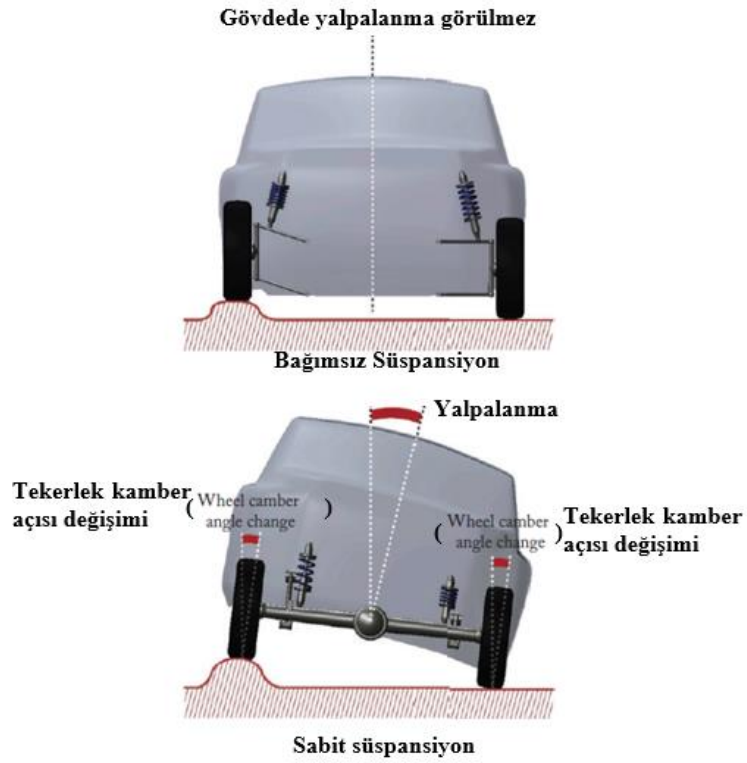
desteklerler (Goodarzi ve Khajepour, 2017). Şekil 2.6’da burç ve kesit görseli gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Burç kesit görüntüsü (Heißing ve Ersoy, 2011)

## 2.4 Süspansiyon Çeşitleri

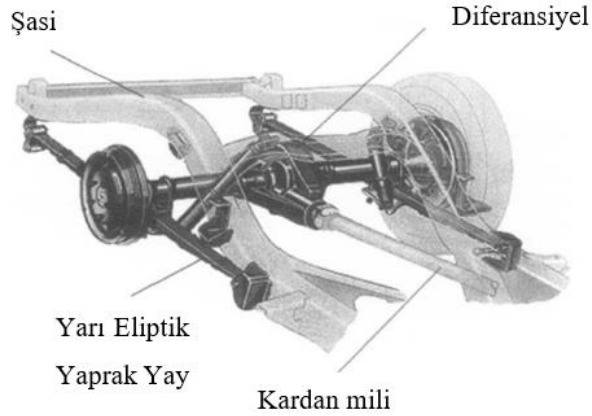
Süspansiyonlar bulundukları konuma veya tiplerine göre sınıflandırılabilir. Süspansiyon sistemleri bulunduğu konuma göre ön ve arka süspansiyon olarak sınıflandırılabilirken; tiplerine göre süspansiyonlar sabit ve bağımsız süspansiyon sistemleri olmak üzere iki çeşittir (Stone ve Ball, 2004). Şekil 2.7’de farklı tiplerde süspansiyon sistemlerine örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Sabit ve bağımsız süspansiyon tipleri (Goodarzi ve Khajepour, 2017)

### 2.4.1 Sabit Süspansiyon Sistemleri

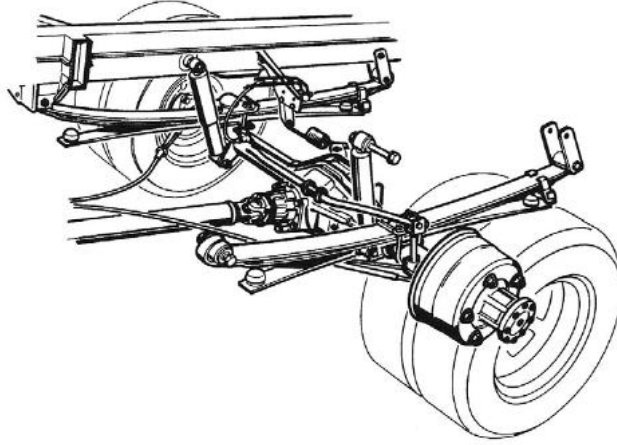
Oldukça sağlam sistemler oldukları için daha çok ağır yük taşıyan araçların süspansiyonlarında iki ucundan tekerlek bağlı sabit kiriş sistemleri olan sabit akslar kullanılmaktadır. Yaprak yaylarla araç şasisine bağlanırlar. “*Hotchkiss Süspansiyon*”, “*Dört Kollu (Four-Link) Süspansiyon*” ve “*de Dion Süspansiyon*” olmak üzere çeşitli tipleri bulunmaktadır. *Hotchkiss* süspansiyon tipinde kardan mili diferansiyele U bağlantı ile bağlıdır ve aks şasiye boylamasına yaprak yaylarla bağlanır. Dört kollu arka süspansiyon ise *Hotchkiss* tip süspansiyonun bazı sınırlamalarının üstesinden gelmek amacıyla tasarlanmıştır. Alt salıncak kolları aks üzerinde doğru konumlanmayı sağlarken üst salıncak kolları frenleme ve sürüş torkunu sönmölemektedir. Bu tip süspansiyon sistemleri helisel yay kullanımına izin vermektedir. *De Dion* aksları sabit akstan bağımsız süspansiyona geçişte ara bir basamak olarak görölmektedir. *De Dion* tip süspansiyonda diferansiyel şasiye bağlıdır, bu sayede yaylandırılmamış kütle azaltılmıştır. Her iki tekerlek içi boş ve kayar bir boru ile bağlıdır. Bu da yaylandırılmamış kütle azaltılmasında rol almaktadır. Şekil 2.8’de *Hotchkiss* tip sabit süspansiyon sistemi gösterilmektedir (Stone ve Ball, 2004).



Şekil 2.8 Hotchkiss süspansiyon (Stone ve Ball, 2004)

Sabit süspansiyon sistemlerinde sol ve sağ tekerlekler ve aksın düşey yönde birlikte hareket etmesi sebebiyle tekerlekler birbirlerinin hareketlerinden etkilenirler. Sabit süspansiyon sistemleri yalın ve dayanıklı yapıları sebebiyle ağır hizmet tipi araçların arka süspansiyonlarında tercih edilirler. Ağır hizmet tipi araçlarda arka ve ön

süspansiyon sistemlerinde yaprak yaylar kullanılmasına karşın; binek araç, kamyonet ve minibüslerin ön süspansiyonlarında helisel yaylar kullanılmaktadır. Bunun dışında sabit süspansiyonlu araçlarda burulma çubuklu yay kullanımı da gözükmemektedir (Milli Eğitim Bakanlığı [MEB], 2013). Şekil 2.9’da sabit arka süspansiyona bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Sabit arka süspansiyon sistemi (Reimpell ve diğer, 2001)

Sabit süspansiyon sisteminin çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar binek araçlarda kabul edilemeyecek olsa da ticari araçlarda için kabul edilebilirdir (Reimpell ve diğer, 2001).

Sabit süspansiyon sisteminin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

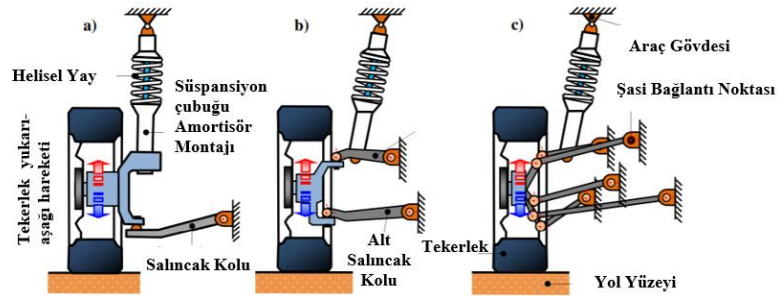
- Her iki tekerleğin de birbirinden etkilenmesi
- Yer gereksiniminin fazla olması
- İzolasyon olarak yetersiz olmaları
- Sürüş konforu açısından yetersiz kalmaları
- Ağır olmaları
- Çekiş sırasında tekerleklere gelen yük değişimleri
- Montaj noktalarında yoğunlaşan kuvvetlerin oluşması,
- Kamber açılarının oluşması
- Yalpalanma merkezleri yüksekte olduğu için yalpalanma açılarının oluşması

Sabit süspansiyon sisteminin avantajları genel olarak aşağıdaki gibidir:

- Basittirler ve üretilebilirlik olarak ekonomiktir,
- Ömürleri yüksektir

#### 2.4.2 Bağımsız Süspansiyon Sistemleri

Bağımsız süspansiyon sistemleri tümsek ve çukurdan geçerken bir tekerleğin diğer tekerleğe etkisinin en aza indirgendiği sistemlerdir. Birçok binek ve hafif ticari araç motor için daha fazla alana müsaade etmesi, önemli derecede düşey yönlü hareketi mümkün kılabilmesi ve yönlendirme sırasında titreşimlere daha iyi direnç göstererek sürüş konforuna katkıda bulunması sebebiyle ön süspansiyon olarak bu tip sistemler kullanılmaktadır. Bağımsız süspansiyon sisteminin kendi içinde birçok çeşidi olsa da zaman içerisinde barındırdıkları dezavantajlar sonrası bunlardan bazılarının kullanımları ortadan kalkmıştır. En çok kullanımı görülen bağımsız süspansiyon sistemi çeşitleri “MacPherson”, “Double Wishbone” ve “Multi-Link” süspansiyon sistemleridir. Bunlara Şekil 2.10’da örnekler gösterilmektedir (Lajqi, 2013).



Şekil 2.10 Bağımsız süspansiyon sistemi tipleri (Lajqi, 2013)

a) MacPherson, b) Double Wishbone, c) Multi-link

Artan ivmelenme, daha yüksek viraj hızları ve son hızlar, giderek artan güvenlik gereksinimleri gibi trendleri takip edebilmek için bağımsız süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Daha az alan gereksinimi, kinematik ve elastokinematik tekerlek içe dönüklük (*toe-in*) açısı değişimleri, daha kolay yönlendirilebilirlik, düşük ağırlık ve tekerleklerin birbirlerini etkilememesi gibi avantajları sebebiyle tercih edilirler



## **BÖLÜM ÜÇ**

### **YAPRAK YAY ÇEŞİTLERİ VE ÖNEMLİ TASARIM PARAMETRELERİ**

#### **3.1 Yay Sistemleri**

Süspansiyon sistemi süspansiyon yayları, denge çubukları ve amortisörlerin bir arada bulunduğu alt sistemlerdir. Bu alt sistemlerden biri olan yaylar konfor ve sürüş güvenliği ile ilgili şasi için çok önemli belli başlı görevleri yerine getirmekle sorumlu sistemlerdir. Yay sistemleri aracı ve yolcuları, düşey yönlü deplasman ve yalpalanma hareketinin istenmeyen etkilerine karşı koruma sağlamaktadır. Yay sistemleri titreşimli yol koşullarında araç konforuna büyük katkıda bulunmakta, aynı zamanda güç transferi ve yol tutuşu kuvvet iletimi için olmazsa olmaz olan tekerlek ve yol temasının sağlanmasına da katkıda bulunmaktadır. Yay sistemleri aynı zamanda araç idaresi için önemli olan dönüş kuvvetlerinin ön ve arka aksa dağılımı için de önemli bir görev üstlenmektedir (Heißing ve Ersoy, 2011).

Yaylar araçlarına ve malzemelerine göre beşe ayrılabilir. Bunlar:

- Çelik Yaylar
- Hava ve Gaz Yayları
- Kompozit Yaylar
- Kauçuk Yaylar
- Poliüretan Elastomer Yaylar'dır (Reimpell, 2001).

#### **3.2 Çelik Yaprak Yay ve Çeşitleri**

Çelik yaprak yaylar kendi içinde yaprak yaylar, helisel yaylar, torsiyon çubukları ve viraj denge çubukları olarak gruplara ayrılabilir. Yaprak yaylar ise boylamasına ve enine yaprak yaylar olmak üzere iki grupta incelenebilirler. Boylamasına yaprak yaylar genellikle ticari araçların ve treylerlerin sabit aksları üzerinde yaylanma ve sönümlemeye yardımcı olmak üzere kullanılırlar (Reimpell, 2001).

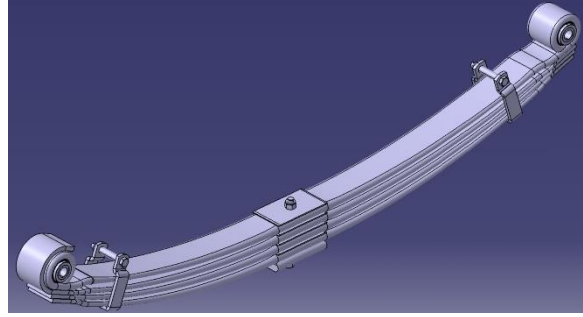
Yaprak yaylar at arabalı taşıma araçlarının kullanıldığı günlerden beri kullanılan geleneksel bir yay çeşididir. Çok katlı yaprak yaylar sağlam, güvenilir ve pahalı olmayan çözümler sunmaktadır. Bugünlerde yaprak yaylar ve sabit aksların kullanıldığı sistemlerin binek araçlar için kullanımı az ve sınırlı sayıda olsa da ticari araçların hem ön hem de arka akslarında kullanımı oldukça yaygındır. Yaprak yayların başlıca avantajı yalnızca bir yay elemanı olarak değil aynı zamanda şasi ve aksı birbirine bağlayan bir bağlantı elemanı olarak da kullanılabilmesidir. Her bir yayın birbirine sürtünmesiyle ortaya çıkan sürtünme dolayısıyla, çok katlı yaprak yaylar aynı zamanda sönümleme fonksiyonu da sağlamaktadırlar (Heißing ve Ersoy, 2011).

### **3.2.1 Parabolik Yaprak Yaylar**

Parabolik yaprak yaylar, çelik haddehanelerinden gelen belli uzunlukta ve kesitte yaylık lamaların kalınlıklarına göre uygun yöntemlerle belirlenen boylarda kesildikten sonra indüksiyon veya doğalgaz fırınlarında ısıtılması ve merdaneler yardımıyla sıcak olarak haddelenmesiyle üretilen, kalınlıkları formları boyunca değişkenlik gösteren, tek katlı veya çok katlı olarak bulunabilen süspansiyon elemanlarıdır. Şekil 3.1’de çok katlı parabolik yaprak yay bir örnek gösterilmektedir. Hafif ve ağır ticari araç süspansiyon sistemlerinin ön ve arka akslarında kullanılabilirler. Çok katlı yaprak yaylar göz kırılmalarından dolayı ön kol tarafında meydana gelebilecek kazaları önlemek amacıyla genellikle sarma kat ile birlikte kullanılırlar. Araç şasisine genellikle merkez bölgesinden montajı yapılan parabolik yaprak yaylar, gözlerine monte edilmiş kauçuk burçlar vasıtasıyla araç şasisine bağlanırlar. Bazı tip parabolik yaprak yaylarda amortisör montajı yapılabilmesi için ek bir gözlü kat bulunabilmektedir.

İkinci dereceden ters parabolik bir formüle göre değişen kalınlığa sahip ve sabit genişlikli yaprak yaylardır. Tamamen parabolik yayların serbest uç tarafları büyük yükler için elverişli olmadıkları için, parabolik yaprak yaylar uzunluklarının dörtte üçlük kısmı parabolik bir formülü takip eden ve kalan kısmı sabit kalınlıkla devam edecek şekilde dizayn edilirler. Tek katlı parabolik yaprak yaylar genel olarak hafif araçlarda kullanılırlar. Merkez bağlantı noktaları sabit kalınlığa sahip ve parabolik

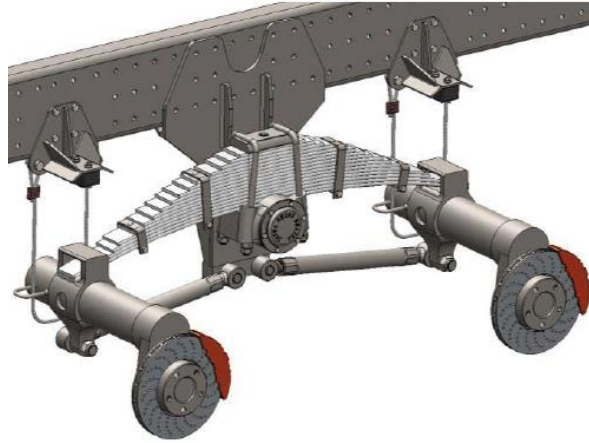
kısımlara göre daha kalındır. Eğer hesaplanan kat kalınlığı izin verilen kalınlıktan fazla ise çok katlı kullanımlara geçilmelidir (Heiβing ve Ersoy, 2011).



Şekil 3.1 Parabolik yaprak yay

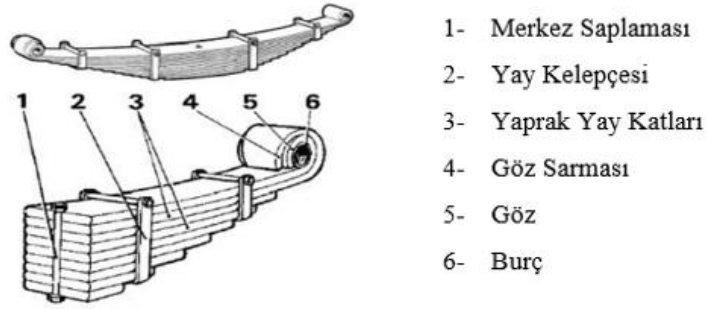
### 3.2.2 Konvansiyonel Yaprak Yaylar

Kalınlığı uzunluğu boyunca değişmeyen ve genellikle ağır ticari araçların arka süspansiyon sistemlerinde yer alan gözlü veya tandem tipindeki süspansiyon elemanlarıdır. Çok katlı yapılarında kat kaymalarını önlemek için kelepçe ve oluk gibi çözümlerden yararlanılmalıdır. Şekil 3.2’de konvansiyonel tandem bir yaprak yayın araç üzerindeki görüntüsü gösterilmektedir.



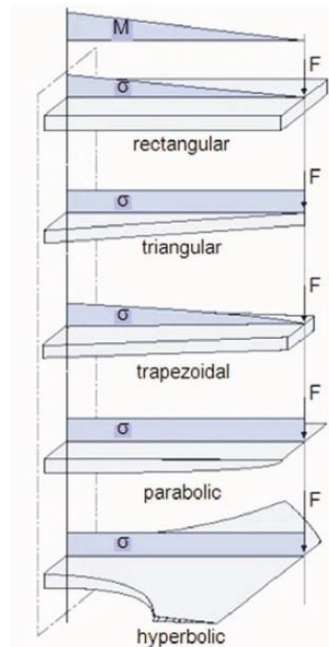
Şekil 3.2 Konvansiyonel tandem makas montajı (Cornak, 2019)

Şekil 3.3’te konvansiyonel bir yaprak yay kesiti gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Konvansiyonel yaprak yaylar ve componentleri (MEB, 2005)

Yaprak şekillerine göre düşünüldüğünde konvansiyonel yaprak yaylarda dikdörtgen şekilli ve trapez şekilli tip katlar kullanılabilmektedir. Ancak dikdörtgen şekilli katlar göz önünde bulundurulduğunda merkezde serbest uca doğru azalan moment ve gerilmelere karşın sabit genişlik ve kalınlıkta devam eden kat yapıları yaprak yayların ağırlıklarını gereksiz artırabilmektedir. Bu sebeple kat uçlarından yanlarda kesilmiş kat yapıları olan trapez şekilli katlar konvansiyonel yaylarda daha mantıklı çözümler olarak düşünülebilir. Şekil 3.4'te trapez ve dikdörtgen şekilli yaprakların gerilme ve moment ilişkisi gösterilmektedir.

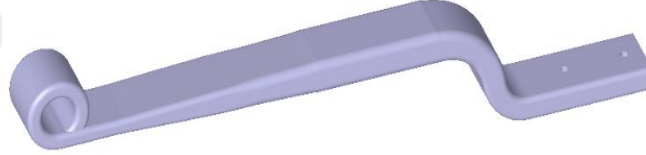


Şekil 3.4 Yaprak yayların başlıca şekilleri (Heißing ve Ersoy, 2011)

### 3.2.3 Havalı Süspansiyon Yayları

Araçların süspansiyon sistemleri havalı veya mekanik süspansiyon olacak şekilde tasarlanırlar. Havalı süspansiyon askı sistemlerinde yoldan gelen titreşimleri ve düzgünsüzlükleri absorbe edip sönümlemek ve dolayısıyla sürüş konforunu sağlamak için amortisörlerle beraber hava körükleri de kullanılmaktadırlar. Körüğün araca bağlantısı hava körüğü makasları (z makaslar) vasıtasıyla gerçekleşir. Z makaslar göbek kısmından aksa bağlanırken, göz kısmından da araç şasisine bağlantı sağlanmaktadır. Genellikle Z makasların kuyruk kısmı hava körüğüne yataklık etmektedir.

Bu tür yaylar tek katlı veya çok katlı olabilirler. Çok katlı z makaslar genellikle göz kırılmaları sonrası araç güvenliğini tehdit etmemesi için sarma kat ile tasarlanıp üretilirler. Parabolik ve parabolik olmayan kalınlığa sahip olabilirler. Şekil 3.5'te havalı süspansiyon yayına bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Havalı süspansiyon yayı (Olguncelik, bt)

## 3.3 Yaprak Yayların Önemli Tasarım Parametreleri

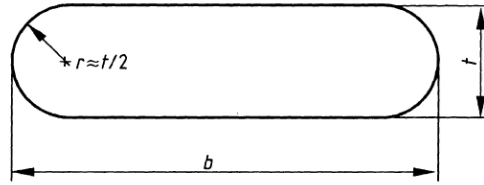
### 3.3.1 Yaprak Yay Kesiti

Otomotivde kullanılan yaylar için, yuvarlak kenarlı yassı çelik lamalar kullanılmaktadır. Bu çubuklar iki düz kenar ve iki konveks yuvarlatılmış kenara sahiptir. Kesit toleransı düz yüzeylerin bir miktar konkav olabilmesine izin vermektedir. Bu çubuğun yuvarlatılmış kenarlarının eğrilik yarıçapı, kalınlığının %65-%85'i arasında değer alabilir.

Form A (DIN 59145), Form B (DIN 4620) ve Form C (DIN 59146) olmak üzere otomotiv yaprak yaylarında kullanılan üç farklı formda yaylık lama kesiti bulunmaktadır.

- **Form A (DIN 59145)**

Kenarları kalınlıklarının yarısına eşdeğer olan bir yarıçap ile yuvarlatılmış lamalardır. Kalınlıkları 6 mm ile 35 mm, genişlikleri ise 50 mm ile 120 mm arasında değişmektedir. Genellikle parabolik tip tek veya çok katlı yaprak yaylar bu profilde dökülen lamalarla imal edilirler. Şekil 3.6’da A profil gösterilmiştir. Şekilde “r” ile gösterilen ölçü radyüs, t ile gösterilen ölçü kalınlık ve b ile gösterilen ölçü ise genişlik ölçüsüdür.



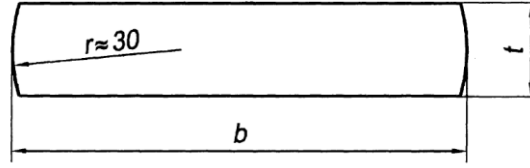
Şekil 3.6 Profil A sıcak haddelenmiş yay çeliği kesiti (DIN EN 10092-1, 2003)

Form A kesitli lama için atalet momenti hesabı Denklem 3.1’de gösterildiği gibidir:

$$I_A = \frac{bt^3}{12} - r^2x \left[ 1 - \frac{t}{b}x \left( 1 - \frac{3\pi}{16} \right) \right] \quad (3.1)$$

- **Form B (DIN 4620)**

Kalınlıkları 6 mm ile 26 mm, genişlikleri ise 50 mm ile 120 mm arasında değişmektedir. Genellikle konvansiyonel tip yaprak yaylarda bu profilde dökülen lamalarla imal edilirler. Şekil 3.7’de B profil yay kesitine bir örnek gösterilmektedir.



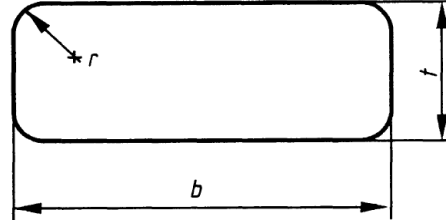
Şekil 3.7 Profil B sıcak haddelenmiş yay çeliği kesiti (DIN EN 10092-1, 2003)

Form B kesitli lama için atalet momenti hesabı Denklem 3.2’de gösterildiği gibidir:

$$I_B = \frac{bt^3}{12} - 0,2071072 \times \frac{t^4}{12} \quad (3.2)$$

#### - Form C (DIN 59146)

Kalınlıkları 25 mm ile 62 mm, genişlikleri ise 70 mm ile 120 mm arasında değişmektedir. Genellikle yüksek kalınlık istenen parabolik tip yaprak yaylar veya hava körüğü yayları bu profilde dökülen lamalar ile imal edilirler. Şekil 3.8’de C profil yay kesitine bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Profil C sıcak haddelenmiş yay çeliği kesiti (DIN EN 10092-1, 2003)

Form C kesitli lama için atalet momenti hesabı Denklem 3.3’te gösterildiği gibidir:

$$I_C = \frac{bt^3}{12} - r^2 \times \left( r^2 \times \frac{16-5\pi}{4} - rt \times \frac{10-3\pi}{3} + t^2 \times \frac{4-\pi}{4} \right) \quad (3.3)$$

### 3.3.2 Yaprak Yay Malzemesi

Çelik yay malzemesi olarak yüksek miktarda deformasyona uğrayabilen ve akma değeri olarak da yüksek performans gösteren orta veya yüksek karbonlu yay çeliği diye adlandırılan çelik çeşitleri kullanılmaktadır (Çemtaş, bt).

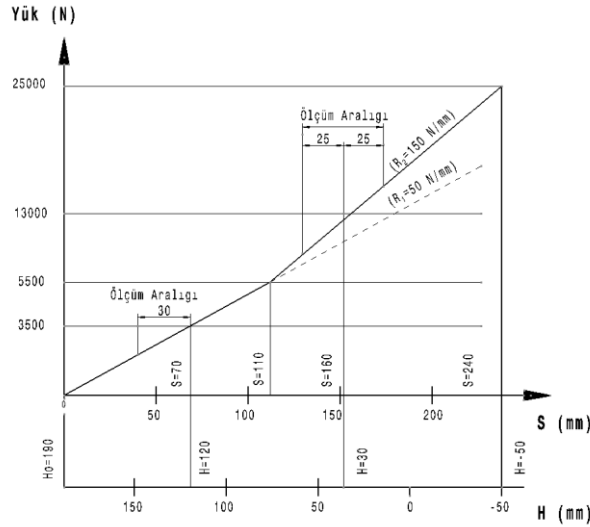
Çelik dökümhanelerinde farklı profillerde dökülen yassı lamalar halinde üretilirler. En yaygın kullanılan yay malzemelerin 51CrV4, 55Cr3, 52CrMo4 ve 60SiMn5 gibi yay çeliği malzemeleri örnek gösterilebilir. Bunların dışında 51B60H ve 5160H malzeme kullanımları da bulunmaktadır. Şekil 3.9’da yay yapımında kullanılan çelik malzemelerin kimyasal kompozisyonları gösterilmektedir.

| Kalite   | C            | Si           | Mn           | P              | S              | Cr           | Mo           | Ni   | Al             | V             | Cu   |
|----------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|------|----------------|---------------|------|
| 5160     | 0.56<br>0.64 | 0.15<br>0.35 | 0.75<br>1.00 |                |                | 0.70<br>0.90 |              | 0.25 |                |               |      |
| 51B60    | 0.56<br>0.64 | 0.15<br>0.35 | 0.75<br>1.00 | 0.035<br>0.03  | 0.035<br>0.04  | 0.70<br>0.90 | 0.06         | 0.25 | 0.020<br>0.040 |               | 0.35 |
| 6150     | 0.48<br>0.53 | 0.15<br>0.35 | 0.70<br>0.90 | 0.03           | 0.04           | 0.80<br>1.10 | 0.06         | 0.25 |                | En az<br>0.15 | 0.35 |
| 9260     | 0.56<br>0.64 | 1.80<br>2.10 | 0.75<br>1.00 |                |                |              |              |      | 0.025          |               | 0.35 |
| 9262     | 0.57<br>0.64 | 1.80<br>2.20 | 0.75<br>1.00 | 0.025<br>0.025 | 0.025<br>0.025 | 0.25<br>0.40 |              | 0.20 | 0.015<br>0.040 |               | 0.25 |
| 50CrV4   | 0.47<br>0.55 |              | 0.70<br>1.10 | 0.025          | 0.025          | 0.90<br>1.20 |              |      | 0.010<br>0.040 | 0.10<br>0.25  | 0.30 |
| 51CrV4   | 0.47<br>0.55 | 0.40         | 0.70<br>1.10 | 0.025          | 0.025          | 0.90<br>1.20 |              |      |                | 0.10<br>0.25  |      |
| 52CrMoV4 | 0.48<br>0.56 |              | 0.70<br>1.10 | 0.025          | 0.025          | 0.90<br>1.20 | 0.15<br>0.30 |      |                | 0.10<br>0.20  |      |
| 54SiCr6  | 0.51<br>0.59 | 1.20<br>1.60 | 0.50<br>0.80 | 0.025          | 0.025          | 0.50<br>0.80 |              |      |                |               |      |
| 54SiCrV6 | 0.51<br>0.59 | 1.20<br>1.60 | 0.50<br>0.80 | 0.025          | 0.025          | 0.50<br>0.80 |              | 0.20 | 0.015<br>0.040 | 0.10<br>0.20  | 0.25 |
| 55Cr3    | 0.52<br>0.59 | 0.40         | 0.70<br>1.00 | 0.025          | 0.025          | 0.70<br>1.00 |              |      |                |               |      |
| 56Si7    | 0.52<br>0.60 | 1.60<br>2.00 | 0.60<br>0.90 | 0.025          | 0.025          | 0.40<br>0.45 | 0.10         | 0.40 |                |               |      |
| 56SiCr7  | 0.53<br>0.59 | 1.60<br>2.00 | 0.60<br>0.90 | 0.03           | 0.03           | 0.20<br>0.45 |              |      |                |               |      |
| 58CrMoV4 | 0.58<br>0.62 | 0.20<br>0.30 | 0.80<br>0.95 | 0.02           | 0.01           | 0.90<br>1.05 | 0.15<br>0.20 | 0.25 | 0.020          | 0.10<br>0.15  | 0.30 |
| 58CrV4   | 0.55<br>0.62 | 0.15<br>0.40 | 0.70<br>1.10 | 0.035          | 0.035          | 0.90<br>1.20 |              |      |                | 0.10<br>0.20  |      |
| 60Si7    | 0.56<br>0.64 | 1.50<br>1.80 | 0.70<br>1.00 |                |                |              |              |      |                |               |      |
| 60SiCr7  | 0.57<br>0.64 | 1.70<br>2.20 | 0.70<br>1.00 | 0.03           | 0.03           | 0.25<br>0.40 |              |      |                |               |      |
| 60SiCr8  | 0.55<br>0.65 | 1.70<br>2.20 | 0.70<br>1.00 | 0.045          | 0.045          | 0.20<br>0.40 |              |      |                |               |      |
| 60SiMn5  | 0.55<br>0.65 | 1.00<br>1.30 | 0.90<br>1.10 | 0.03           | 0.03           |              |              |      |                |               |      |
| 61SiCr7  | 0.57<br>0.65 | 1.60<br>2.00 | 0.70<br>1.00 | 0.025          | 0.025          | 0.20<br>0.45 |              |      |                |               |      |
| 65Si7    | 0.60<br>0.70 | 1.50<br>1.80 | 0.70<br>1.00 |                |                |              |              |      | 0.025          |               | 0.35 |
| 67SiCr5  | 0.62<br>0.72 | 1.20<br>1.40 | 0.40<br>0.60 | 0.035          | 0.035          | 0.40<br>0.60 |              |      |                |               |      |
| SUP 9    | 0.52<br>0.60 | 0.15<br>0.35 | 0.65<br>0.95 | 0.035          | 0.035          | 0.65<br>0.95 |              |      |                |               | 0.30 |
| 251A58   | 0.55<br>0.60 | 1.80<br>2.10 | 0.80<br>1.00 | 0.035          | 0.035          | 0.15<br>0.30 | 0.10         |      |                |               |      |

Şekil 3.9 Yay Çeliği Malzemeleri Kimyasal Kompozisyonları (Çemtaş, bt)

### 3.3.3 Yay Katsayısı

Yayların fonksiyonelliğini belirleyen en önemli özelliklerinden bir tanesi de yayın katılık oranıdır. Bu değer kavisin 1 mm değişimi için uygulanması gereken kuvvet miktarı olarak da tanımlanabilir. Kat kalınlığı değişimi yay katsayısını doğrudan etkilemektedir. Yaylar değişken veya sabit katsayılı olabilmektedirler. Şekil 3.10'da çift katılık oranlı bir yaprak yaya ait yük-sehim grafiği gösterilmektedir. Bu grafik yaprak yayın karakteristiğini oluşturmaktadır ve fonksiyonel özelliklerini vermektedir.  $S = 110$  mm ile gösterilen yer yardımcı katın devreye girdiği dirsek bölgesi olarak adlandırılabilir. Bu noktadan sonra yaprak yay ana katına yardımcı katın da destek verdiği ve katılık oranını arttırdığı görülmektedir.  $H_0$  ile gösterilen ölçü yaprak yayın serbest haldeki kavisini vermektedir.  $S$  yayın toplam yer değiştirmesini verirken,  $H$  ise yay yüksekliğini vermektedir.  $H=0$  olduğu durumda yay düz konumdadır.  $S=0$  olduğu durum ise serbest yay yüksekliğini vermektedir.



Şekil 3.10 Çift katılık oranlı bir makasın LD diyagram örneği

Yük sehim grafiklerinde verilen uygulanan yük ile yaprak yayın ne kadar hareket edeceğini belirleyen yay katılığı doğal frekans ile ilişkilidir. Doğal frekans ise sürüş konforuna doğrudan etkisi olan çok önemli bir parametredir. Doğal frekans ile yay katılığı ilişkisi Denklem 3.4'teki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir (Soner ve diğer, 2013):

$$w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_{spring} \cdot g}{F_i}} \quad (3.4)$$

W: Doğal frekans

$c_{spring}$ : Yay Katılığı

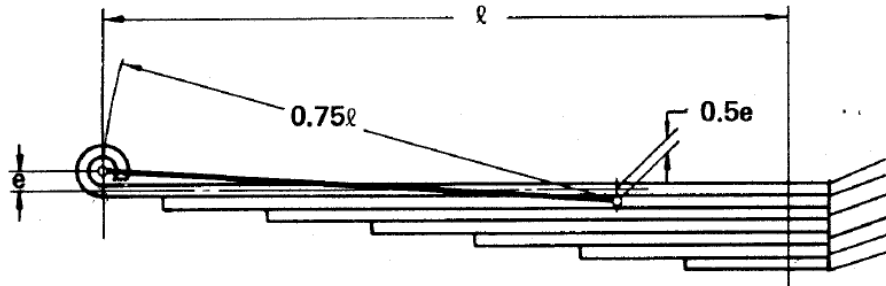
g: Yer çekimi ivmesi

$F_i$ : Kuvvet

### 3.3.4 Yaprak Yay Gözleri

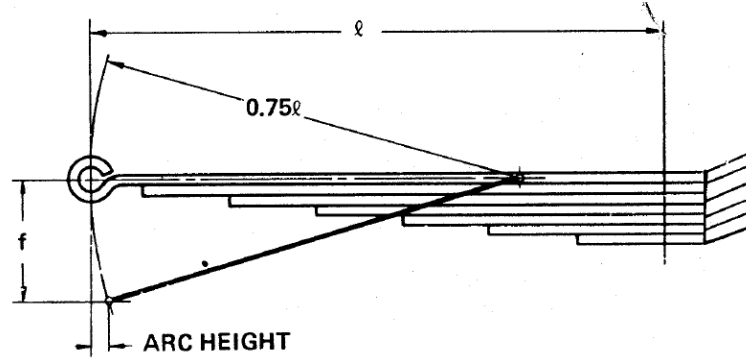
Yay gözleri yayların araç şasisine bağlanan uç bölgelerinde içerisinde burçlar barındıran tasarımlardır. Kullanıldıkları araç tiplerine, yüklemelerine veya monte edileceği bölgedeki pakete göre çeşitli göz tipleri bulunmaktadır.

**Düz Normal Göz:** En yaygın göz tipidir. Eğer gerekirse ikinci kat göze destek vermek amacıyla uzatılabilir. (Institute of Spring Technology, 2004) Şekil 3.11’de ankastre bir yay üzerinde düz göz gösterilmektedir.



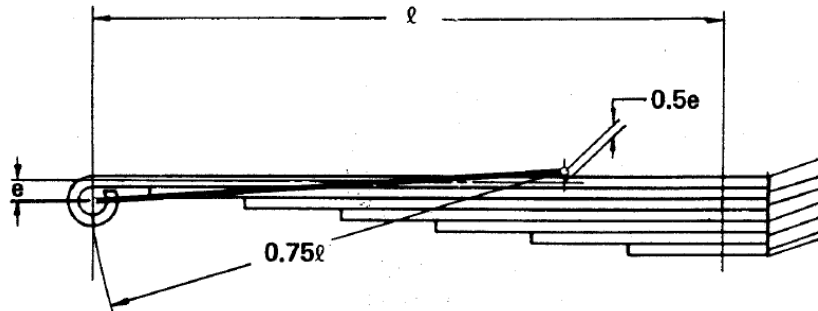
Şekil 3.11 Düz göz (SAE, 1990)

**Berlin Göz:** Boylamasına yükler ana kat merkezine uygulanır, böylece gözün yukarı kıvrılma eğilimi azaltılmış olur (Institute of Spring Technology, 2004). Şekil 3.12’de ankastre bir yay üzerinde berlin göz gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Berlin göz (SAE, 1990)

**Ters Göz:** Yönlendirme ve aks kontrolünün geliştirilmesi ve istenen süspansiyon hareketini sağlayabilmek için bazı zamanlarda tercih edilir. Gözü desteklemek için ikinci bir katın gerekli olduğu uygulamalarda bu göz tipinin kullanımı önerilmez (Institute of Spring Technology, 2004). Şekil 3.13'te ankastre bir yay üzerinde ters göz gösterilmektedir.

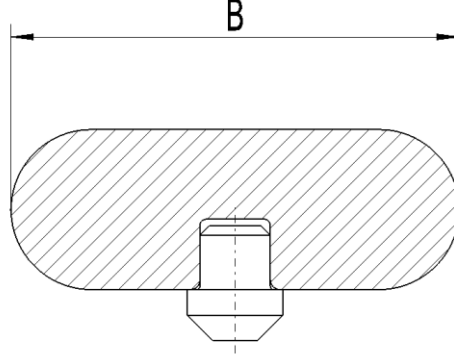


Şekil 3.13 Ters göz (SAE, 1990)

### 3.3.5 Yaprak Yay Genişlik

Yaprak yayın tasarım özelliklerinden en önemlilerinden bir tanesi hammadde genişliğidir. Farklı profiller için farklı genişliklerde yaprak yaylar kullanılabilir. Yaprak yayın genişliği atalet momenti üzerinde doğrudan etkilidir. Ana sanayi araç üreticileri yaprak yay genişliğini belirlerken şasiye montajı ve temas mesafelerini göz önünde bulundurarak belirler. DIN EN 10092-1 standardına göre 50 mm'den 150 mm'ye kadar farklı genişliklerde yaprak yay ham malzemesi

bulunabilmektedir. Şekil 3.14'te B ile gösterilen ölçü yaprak yayın genişliğini ifade etmektedir.

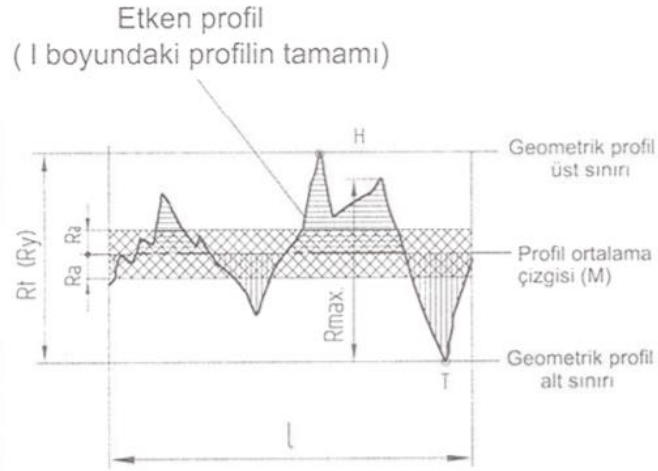


Şekil 3.14 Yaprak yay genişlik ölçüsü

### 3.3.6 Yaprak Yay Yüzey Pürüzlülüğü

Parçaların yüzeyleri incelendiğinde işleme kalitelerine göre hassas işlenmiş ya da kaba işlenmiş olabilirler. Parçaların yüzey pürüzlülükleri işleme kalitelerini belirler. Yüzey pürüzlülüklerinin ölçümlerinde değerlendirme kriterleri farklılık göstermektedir. Çalışma kapsamında yüzey pürüzlülük değerleri  $R_z$  olarak değerlendirilecektir. Şekil 3.15'te etken bir I boyunda ölçülen yüzey pürüzlülükleri gösterilmektedir.

- $R_a$ , yüzey pürüzlülüklerinin belirlenen bir I boyunda aritmetik ortalama alınarak hesaplanan yüzey pürüzlülük ölçüm parametresidir.
- $R_z$ , belli bir I boyu içerisinde 5 tepe noktanın ortalaması alınarak hesaplanan yüzey pürüzlülük ölçüm parametresidir.
- $R_{max}$ , ise en derin pürüzlülük mesafesini veren ölçüm parametresidir.



Şekil 3.15 I Boyunda bir profilde yüzey pürüzlülük ölçümü (Demir, bt)

Yüzey pürüzlülüğü yüzey kalitesini etkilediğinden ve yüzeyde çentik etkisine, dolayısıyla çatlak başlangıcına sebep olabileceğinden dolayı yorulma ömrü açısından oldukça kritik ve önemlidir.

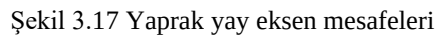
### 3.3.7 Yaprak Yay Kavisi ve Serbest Yay Yüksekliği

Yaprak yay yüksüz durumda iken, en alttaki katın merkez düzlüğünün altından ön ve arka göz merkezlerinden geçen eksene olan mesafe serbest yay yüksekliği olarak adlandırılmaktadır. Serbest yay yüksekliği Şekil 3.16'da  $SYH$  ile gösterilmektedir. Serbest yay yüksekliği paket yüksekliği ve yaprak yayın formu ile birlikte değişebildiği gibi, aracın sürüş yüksekliğine de katılık oranıyla birlikte doğrudan etki yapmaktadır. Katılık oranı bilinen ve sabit olan bir yaprak yayı farklı serbest yay yüksekliği değerlerinde üretildiğinde aracın sürüş yüksekliği de buna bağlı olarak değişecektir. Yaprak yayın çalışma karakteristiği yük sehim grafikleriyle teknik resimlerde belirtilmektedir. Titreşimleri sönümleme özelliğinin yanında araç şasisi ve aks bağlantısı sağlamakta da görevli yaprak yaylar için şasi üzerinde merkez durdurucuları veya “wind up stoper” da denilen frenleme durumunda belli bir deformasyon sonrası devreye girip yaprak yay üzerindeki gerilmeleri azaltmak ve yayın ömrünü artıran yapılar bulunmaktadır. Serbest yay yüksekliği aynı zamanda bu durdurucu yapıların devreye girme zamanını doğru ayarlanmasını da sağlayan çok önemli bir tasarım parametresidir (Kelebek, 2017).

### 3.3.8 Yaprak Yay Eksen Mesafesi



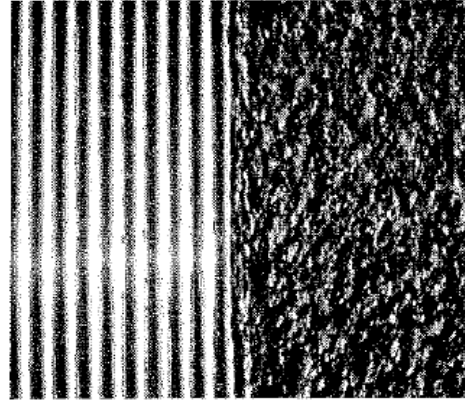
Technical drawing of a beam with a central support and two wheels at the ends. The beam is labeled "Lớn" (Large) and has a central support point. The drawing shows the beam's profile and the wheels at the ends.



Aşındırıcı kumun belli bir basınçla metal yüzey üzerine püskürtülmesi işlemi bilya püskürtme veya kumlama olarak adlandırılmaktadır. Metal üzerinde zamanla oluşan kirlilik, korozyon ve pas gibi oluşumları ortadan kaldırıp temiz bir yüzey oluşturarak

metali boyaya hazırlamak ve metalin ömrünü artırmak amacıyla kumlama işlemi uygulanır (Sigma, bt).

Kumlamanın malzeme metalurjisi, yüzey geometrisi ve artık gerilmeler üzerinde çeşitli etkileri bulunmaktadır. Kumlama işlemi sonunda yüzeyde yorulma dayanımı açısından faydalı bası artık gerilmesi oluşumu sağlanabilmektedir. Bir diğer yandan malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayan pekleşmenin gerçekleştirilmesi yine kumlamanın olumlu bir etkisi olarak gösterilmektedir. Tribolojik modifikasyonlar gerçekleşmekte ve mikro düzeyde çatlak ilerlemesinin önüne geçilebilmektedir. Çeşitli üretim prosesleri sonrası düzgünsüzleşen yüzeyde kumlama sonrası isotropik bir yapı oluşturulabilir. Bu duruma bir örnek Şekil 3.18’de gösterilmektedir (Higounenc, bt).



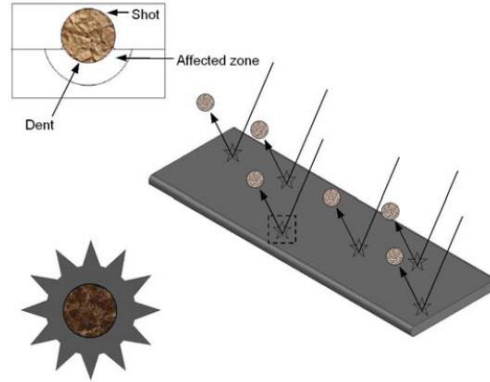
Şekil 3.18 Bir yapı çeliğinin kumlama öncesi ve sonrası yüzey görüntüsü (Higounenc, bt)

Bilya püskürtme için farklı malzemelerde çeşitli aşındırıcı tipleri kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları dairesel çelik döküm bilyalar ve *cut wire* denilen silindirik çelik tellerin kesitlerine uygun boyda kesilmesiyle elde edilen aşındırıcılar ve paslanmaz çelik *cut wire* olmak üzere sıralanabilmektedir. Yorulma dayanımı açısından karşılaştırıldığında dairesel döküm bilyalara kıyasla *cut wire* tipinde aşındırıcılar daha iyi performans sergilerken, bu aşındırıcıların paslanmaz çelik tiplerinin daha pahalı ve daha etkili olduğu söylenebilir. Yüzey kaliteleri olarak incelendiğinde ise dairesel çelik döküm bilyaların daha iyi performans gösterdiği söylenebilir (MetFin, bt).

Kumlama aşağıdaki gibi birçok faktörden etkilenmektedir:

- Aşındırıcının büyüklüğü
- Sertlik
- Şekil
- Aşındırıcı elek dağılımı
- Fırlatma hızı
- Püskürtme açısı
- Kumlama süresi
- Akış hızı

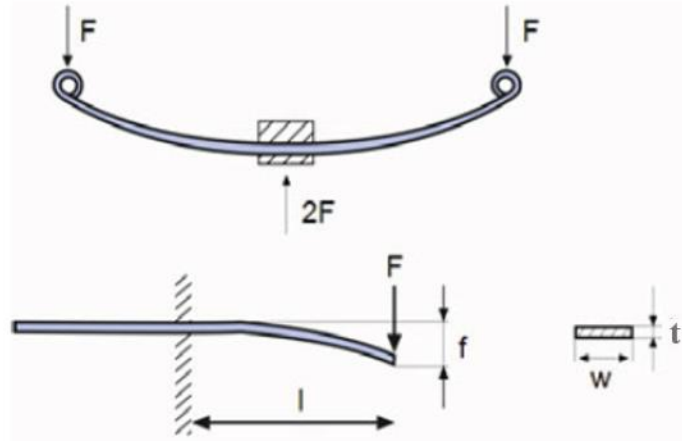
Bu maddelerden aşındırıcı büyüklüğü, elek dağılımı, sertlik ve şekil doğrudan bilya seçimi ile ayarlanabilmektedir. Geri kalan maddeler ise tezgah parametreleri yardımıyla ayarlanabilmektedir (Çelik Granül Sanayi A.Ş., 2002). Şekil 3.19’da bilya püskürtme işlemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.19 Bilya püskürtmenin şematik gösterimi (Bhuvaraghan ve diğeri, 2010)

### 3.4 Simetrik Yaprak Yayların Hesaplama Yöntemleri

Yaprak yaylarda gerilme ve yer değıştirme ilişkisi *Hooke* yasası yardımıyla hesaplanabilmektedir. Yaprak yayları sehim ve maksimum eğilme momenti hesapları için Şekil 3.20’de verilen diyagrama göre hesaplama formülleri verilecektir.



Şekil 3.20 Yaprak yay hesaplamaları için diagram (Heißing ve Ersoy, 2011)

### 3.4.1 Eğilme Gerilmesi Hesabı

Yaprak yaylar araç üzerinde yoldan gelen yükler sonrası eğilme momentine maruz kalmaktadırlar. Denklem 3.5'te genel moment (M) hesabı gösterilmektedir. Bu denklemden türetilen Denklem 3.6 ve 3.7'de ise merkezden y mesafesinden uygulanan kuvvetten (F) doğan momentin kirişin atalet momentine (I) göre oluşturduğu eğilme gerilmesi ( $\sigma_b$ ) hesabı verilmektedir.

$$M = F \cdot l \quad (3.5)$$

$$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{b \max} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{w \cdot t^2} \quad (3.7)$$

Şekil 3.21'de gösterilen trapez şekilli gözlü konvansiyonel simetrik bir yay için maksimum eğilme gerilmesi ( $\sigma_{b \max}$ ) hesabı Denklem 3.8'de gösterilen formül yardımıyla yapılmaktadır. Denklem 3.8 ve 3.9'da verilen formüller ile ilgili notasyonlar aşağıda gösterildiği gibidir :

$\sigma_{b \max}$  : Maksimum Eğilme Gerilmesi

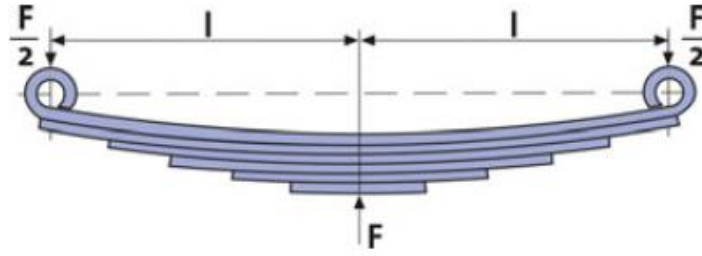
F : Aksa Gelen Kuvvet

I : Atalet Momenti

n : Yaprak Yay Kat Sayısı

w : Yaprak Yay Genişliği

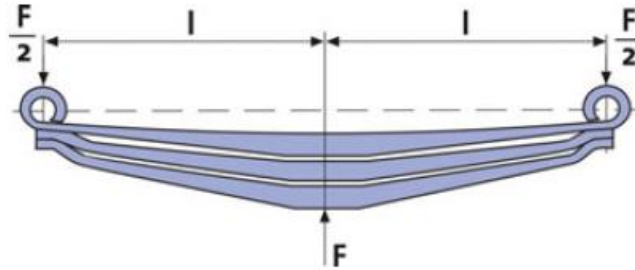
t<sub>0</sub> : Merkez Kalınlık



Şekil 3.21 Simetrik trapez yaprak yay (Heiβing ve Ersoy, 2011)

$$\sigma_{b \max} = \frac{3 \cdot F \cdot l \cdot n \cdot w \cdot t_0}{2} \quad \#3.8$$

Şekil 3.22’de gösterilen bir parabolik yaprak yay için maksimum eğilme gerilmesi hesabı Denklem 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.22 Simetrik parabolik yaprak yay (Heiβing ve Ersoy, 2011)

$$\sigma_{b \max} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{n \cdot w \cdot t_0^2} \quad (3.9)$$

#### 3.4.2 Merkezdeki Sehim Hesabı

Şekil 3.20’de f ile gösterilen sehim Denklem 3.10’da verilen formül yardımıyla hesaplanabilmektedir. Denklem 3.11’de I ile gösterilen yaprak yay dikdörtgen kesiti

için atalet momenti hesabını verirken bu iki formül yardımıyla yaprak yay yarısı için katılık ( $c_f$ ) hesabı Denklem 3.12’de gösterildiği gibi yapılabilmektedir.

$$f = \frac{F.l^3}{3.E.I} \quad (3.10)$$

$$I = \frac{w.t^3}{12} \quad (3.11)$$

$$c_f = \frac{F}{f} = \frac{1}{4} \times \frac{w \times t^3}{I^3} \times E \approx \text{Sabit} \quad (3.12)$$

Şekil 3.21’de gösterilen trapez şekilli gözlü konvansiyonel simetrik bir yay için sehim ve katılık Denklem 3.13 ve 3.14’teki formüllerde gösterilmektedir:

$$f = \frac{2.K.F.l^3}{E.n.w.t^3} \quad (3.13)$$

$$c_f = \frac{E.n.w.t^3}{2.K.L^3} \quad (3.14)$$

Sehim faktörü Denklem 3.15’te K ile gösterilmektedir. Toplam kat sayısı n olarak gösterilirken, destek uçlardaki kat sayısı formülde n’ olarak gösterilmektedir.

$$K = \frac{3.n}{2.n+n'} \quad (3.15)$$

Şekil 3.22’de gösterilen bir parabolik yaprak yay için sehim ve katılık hesabı Denklem 3.16 de 3.17’de verilmektedir. Formüllerde  $t_0$  merkez kalınlığı,  $t_1$  ise sabit uçtaki kat kalınlığı olarak verilmektedir.

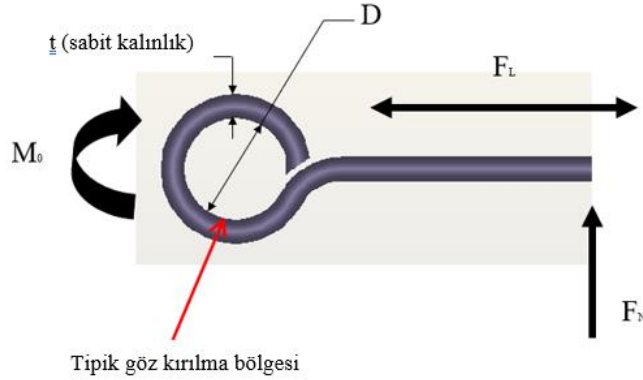
$$f = \frac{2.F.l^3}{E.n.w.t_0^3} \left( 2 - \frac{t_1^3}{t_0^3} \right) \quad (3.16)$$

$$c_f = \frac{E. n. w. t_0^3}{2. l^3. \left(2 - \frac{t_1^3}{t_0^3}\right)} \quad (3.17)$$

### 3.4.3 Göz Kısımında Gerilme Hesabı

Özellikle fren yükleri uygulandıktan sonra yaprak yay göz kısmında eğilme gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan eğilme gerilmesi düz göz, ters göz ve berlin göz olarak da isimlendirilen basık gözler oluşan eğilme gerilmesi Denklem 3.18’de gösterilen formül yardımıyla hesaplanabilmektedir. Yalnızca berlin göz için diğer iki tipe göre boylamasına bası yüklemelerinde eğilme gerilmesi oluşmadığı için bir avantaj söz konusudur. Şekil 3.23’te göz bölgesi kuvvetleri ve momentler şematik olarak gösterilmektedir.

$$S = \frac{3. F. (D + t)}{t^2 w} \quad (3.18)$$



Şekil 3. 23 Göz bölgesi kuvvetleri ve moment şeması (Olgun Çelik, bt)

Burç çakma sırasında sıkı geçme sebebiyle yaprak yay göz tarafında oluşan eğilme gerilmesi Denklem 3.19’da verilen formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$S = \frac{4}{\pi} \frac{\Delta. E. t}{(D + t)^2} \quad (3.19)$$

F : Boylamasına yükleme

E : Elastisite Modülü

W : Yaprak Genişliği

T : Göz Kalınlığı

D : Yaprak Yay Göz İç Çapı

S : Gerilme

$\Delta$ : Burç Dış Çapı ve Göz İç Çapı Arasındaki Fark (SAE, Spring Design Manuel)



## **BÖLÜM 4**

### **YORULMA**

#### **4.1 Yorulmanın Tanımı**

Yorulma çevrimsel gerilme altında malzemede meydana gelen hasarları tanımlayan bir kavramdır (Suresh, 1998 aktaran Maurer, 2017). Bu çevrimsel gerilmeler malzemenin dayanım sınırından çok daha düşük gerilme seviyelerinde hasara sebebiyet verebilirler. Mekanik yorulma, sürünme yorulması, termomekanik yorulma, korozyon yorulması, kayma yüzeyi yorulması, yuvarlanma yorulması ve titreşimli aşınma yorulması olmak üzere çok çeşitli formları bulunmaktadır (Maurer, 2017).

Yorulma, değişken gerilme ve gerinimlerin meydana geldiği koşullara maruz kalan malzemelerde, belli bir dalgalanma sayısı sonunda bazı nokta veya noktalarda çatlak veya tamamen hasara uğrama ile sonuçlanan ilerleyerek gelişen bölgeselleşmiş ve kalıcı olan yapısal hasarların meydana geldiği bir süreçtir. Çevrimsel gerilemenin sonucu olarak ortaya çıkan plastik gerinim çatlağı başlatır, çekme gerilmeleri çatlak büyüme ilerlemesini artırır. Mikroskobik plastik gerinimler düşük gerilme seviyelerinde görülürler (Bathias, 2013).

Yorulma limiti, dayanım limiti ve yorulma dayanımı çevrimsel yükleme altında malzemelerin özelliklerini tanımlamak için kullanılan terimlerdir.

Yorulma hasarları metalik yapılarda oldukça sık karşılaşılan sorunlardır. 19. Yüzyıl içerisinde birçok ciddi yorulma hasarı bildirilmiş ve konuyla ilgili ilk laboratuvar araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Yorulma üzerine yapılmış kayda değer araştırmalar August Wöhler tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapıların statik dayanımının altında yapılan tekil yükleme uygulamalarında malzemelerin herhangi bir hasara uğramadığını gözlemleyen August, aynı yükleri tekrarlı bir şekilde uyguladıktan sonra hasara neden olduklarını görmüştür (Schijve, 2013).

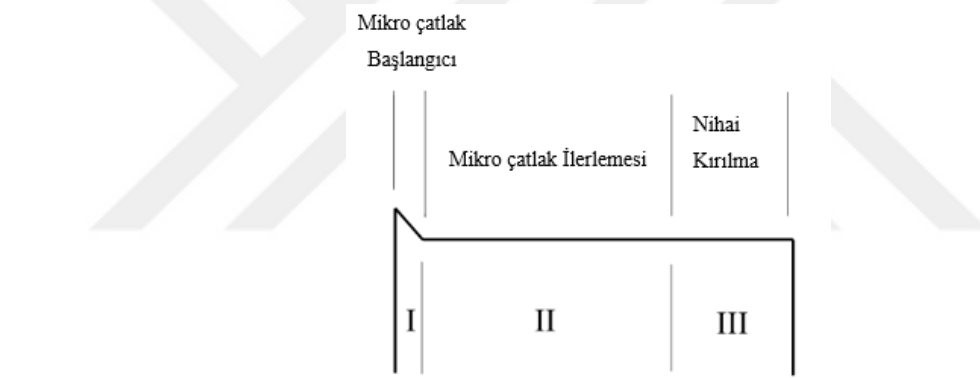
19. yüzyılda yorulma hasarları herhangi bir uyarı vermeden ani olarak gerçekleştiği ve görülemediği için, yorulma gizemli bir olaydı. 20. Yüzyıl içerisinde tekrarlı

yükleme uygulamalarının küçük çatlak çekirdeklenmelerini tetiklenmeleri, çatlak büyümeleri ve sonucunda da hasar ile sonuçlanan yorulma mekanizmasını başlatabileceği öğrenilmiştir (Schijve, 2013).

Metallerde yorulmanın sebep olduğu hasarlar genellikle nihai kırılmaya yol açan çevrimsel sertleşme veya yumuşamanın, çatlak başlangıcının ve çatlak ilerlemesinin sonucu olarak görülürler (Tu ve Zhang, 2016).

#### 4.2 Yorulma hasarının oluşum aşamaları

Yorulma hasarlarının karakterizasyonu aşağıdaki üç aşamaya bağlıdır. Bu aşamalar Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Yorulma hasarında çatlak ilerlemesinin üç aşamasını gösteren şematik gösterim

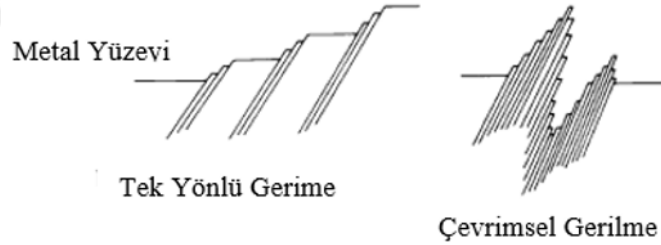
##### 4.2.1 Çatlak Oluşumu

Yorulma, mikroyapısal özellikler, yüklem durumları ve bölgeselleşmiş çevrimsel deformasyon dağılımına bağlı olan çatlak oluşumu ve çatlak büyümesinin proseslerinin bir basamağıdır (Tu ve Zhang, 2016).

Sünek metallerde tanecik boyutunda gerçekleşen tersine plastisitenin bir sonucu olarak yorulma çatlağı başlar. Yüzey tanecikleri zayıftır ve düşük gerilme değerlerinde plastik deformasyona uğrarlar. Bu bir tanecikte mikroçatlak oluşumuna yol açar. Bu gibi mikroplastisite, taneciklerde meydana gelen kayma sebebiyle, akma gerilmesi

değerinden çok daha düşük gerilme seviyelerinde meydana gelebilir (Cottrell, 1964 aktaran Pook, 2007). Kayma tanecik içindeki kesin bir kristalografik düzlemde meydana gelebilir. Çatlak başlangıcına direnç, yüzey pürüzlülüğüne, artık gerilmelere ve kontrol edilmesi çok güç olan çevresel etkilere bağlıdır (Pook, 2007).

Tek yönlü çekme gerilmesi altındaki maksimum kayma gerilmesi düzlemi yüzeye 45 derecededir, bu sebeple kayma bu uygun derecede yerleşmiş düzlemde bu açı değerinde gerçekleşir. Tek yönlü gerilme altında Şekil 4.1’de gösterilen yüzeyde basamak oluşumu gerçekleşir. Buradaki en önemli nokta kaymanın birden fazla paralel düzlemde meydana gelmiş olmasıdır. Yük uygulandığında ortaya çıkan kayma, yük kaldırıldığında tamamen tersinir değildir. Yorulma yüklemesi altında ileri ve geri kayma gelişimini oluşturan düzlemlerin yakınında tersine kayma meydana gelir. Sonuç olarak; yüzey çatlakları, bu küçük miktartlı tersine plastik gerinimler altında meydana gelir (Forsyth 1969 aktaran Pook, 2007). Kayma çizgileri bir taneciğin içinden geçiyorsa, çatlak intergranüler değil, transgranülerdir (Pook, 2007).



Şekil 4.2 Kayma sebepli yüzey çatlak oluşumu (Pook 2007)

#### 4.2.2 Çatlak İlerlemesi

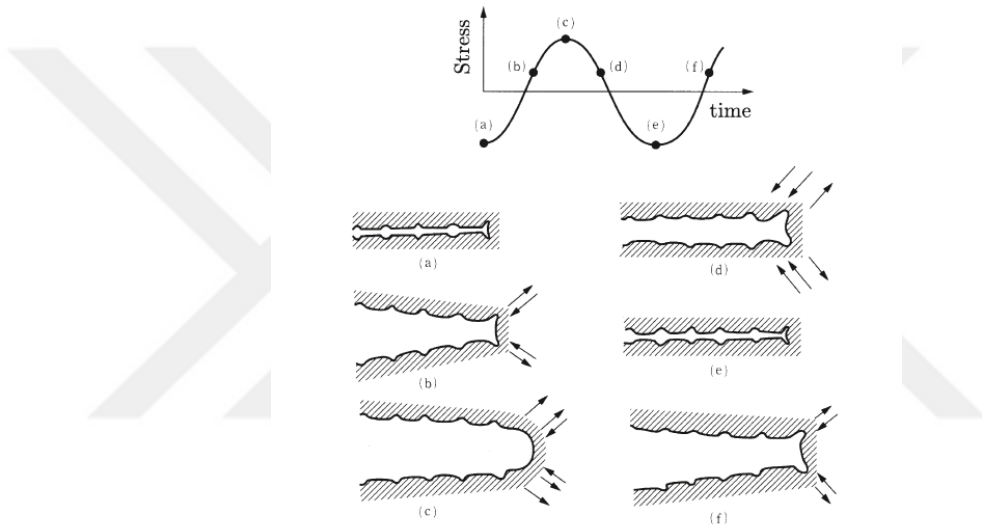
Metal yorulması literatüründe yorulma çatlak ilerlemesi ve çatlak büyümesi terimleri yorulma çatlağı boyutunun artışı için kullanılırlar. 1950’lerde metallerde yorulma çatlak ilerlemesi aşağıdaki şemada gösterilen iki aşamalı süreçte netlik kazanmıştır. Forsyth’un notasyonunda, yorulma çatlak ilerlemesindeki ilk aşama mikroçatlak başlangıcının yön olarak bir değişme olmaksızın genişlemesidir. Dolayısıyla Aşama 1 çatlak, yüksek kayma gerilmesi düzleminde bulunan kayma bandında gerçekleşen bir çatlak ilerlemesidir. Kırılma mekanizması bu durumu karışık

modlu çatlak olarak tanımlar. Aşama 1 çatlak ilerlemesi gücünü plastisiteden almaktadır. Aşama 1 çatlak kritik bir uzunluğa ulaştığında, yönünü değiştirdiğinde ve maksimum asal çekme gerilmesine 90 derece yönünde ilerlediğinde Aşama 2 çatlağa dönüşür. Kırılma mekaniğinde bu duruma Mode 1 denir. Kritik uzunluk mikroyapı özelliklerine ve gerilme durumlarına doğrudan bağlıdır. Bu uzunluk genellikle 1/4 mm'den daha az ve 0,02 mm civarında bir değerdir. Aşama 2 çatlak durumuna geçişten sonra, oluşan çatlak kesitin büyük bir bölümünde ilerler. Aşama 1 ve Aşama 2 terimleri çoğu zaman mikroçatlak ve makroçatlak olarak da kullanılabilirler. Mikroçatlak başlangıcı ve makro çatlak ilerlemesi sonucunda bir durumda kesit alanı o kadar azalır ki tek bir yük çevrimi bile hasara uğratmaya yeter. Bu duruma Aşama 3 denir ve gevrek hasar veya sünek çökme kaynaklı olabilir (Pook, 2007).

Bir çok kırılma yüzeyi mikroskobik olarak incelendiğinde metalik malzemelerde Aşama 2 yorulma çatlağının en göze çarpıcı özelliği belirgin çizgi izlerinin birbirine paralel olarak ve çatlak ilerlemesine dik yönelimde bulunuyor olmasıdır. Bu çizgilere mikroskobik ilerleme çizgileri (*striations*) denilmektedir (Pook 1983a, Broek 1988). Her bir mikroskobik ilerleme çizgisi bir gerilme çevrimine karşılık gelmektedir, bunun sonucu olarak da çizgiler arasındaki mesafe tek bir çevrimde çatlağın ilerlemesinin bir miktarıdır. Mikroskobik ilerleme çizgileri ancak mikroskop incelemesi altında gözlemlenebilir. Bu çizgiler yorulma hasarı sonrası malzeme kırılma yüzeyinde oluşan ve gözle görülebilen deniz kabuğu çizgileri ile karıştırılmamalıdır. Uygulanan gerilme çevrimi ve ilerleme çizgileri arasındaki bire bir örtüşme deneysel olarak bir çok defa gösterilmiştir. Metalik malzemelerin mikroskobik ölçekteki yorulma çatlağı ilerlemesi oldukça düzensiz bir prosestir. Mikroskopik ilerleme çizgilerinin varlığı çatlağın yorulma çatlağı ilerlemesi ile oluştuğuna bir kanıt olarak gösterilebilir. Ancak her durumda ilerleme çizgisi oluşumu gözlemlenmeyebilir. Mikroskopik ilerleme çizgilerinin oluşumunun gözlemlenmemesi yorulma çatlağı ilerlemesinin meydana gelmediği anlamını taşımamaktadır. Şekil 4.3'te Al-4%Cu alaşımında meydana gelen bir yorulma çatlağı ve mikroskobik ilerleme çizgisi oluşumu ve Şekil 4.4'te yorulma çatlak ilerlemesi şematik gösterimi gösterilmektedir.



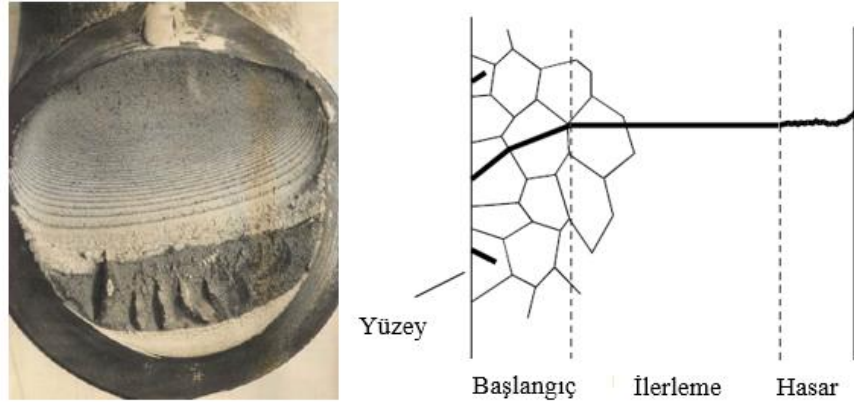
Şekil 4.3 Al-4%Cu alaşımlı bir malzemenin kırılma yüzeyinde oluşan mikroskopik ilerleme çizgileri (Pook, 2007)



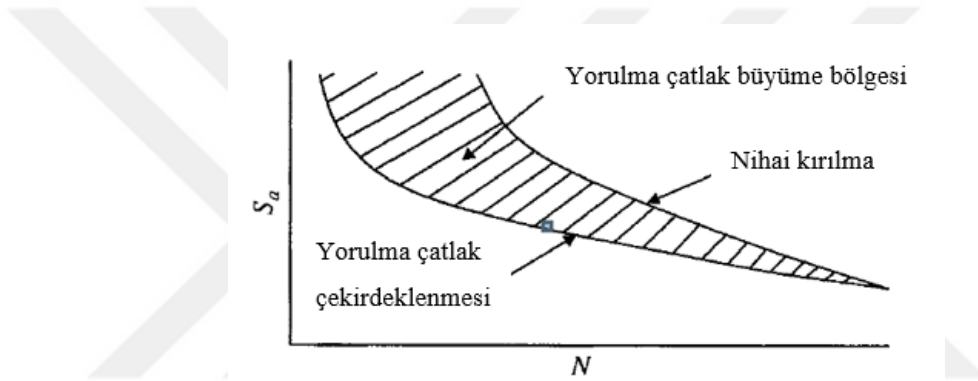
Şekil 4.4 Yorulma çatlak ilerlemesi modeli (Yamada, 2007)

#### 4.2.3 Nihai Kırılma

Çatlak başlangıcı sonrası ilerlemeye başlayan çatlak öyle bir düzeye gelir ki artık hasar oluşmayan kesit yüke karşı koyamaz ve kırılma gözlemlenir. Yorulma hasarı aşamaları ve bir shaftın yorulma kırılma yüzeyinin görseli Şekil 4.5 ve 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Şaft yorulma kırılması yüzeyi ve yorulma hasarının aşamaları (Fatigue Theory Reference Manuel, bt)



Şekil 4.6 Yorulma çatlak çekirdeklenmesi, ilerlemesi ve nihai kırılmanın şematik gösterimi (Stephens ve diğer, 2001)

Son çatlak boyutu malzemenin kırılma tokluğu ile ilişkilidir. Yüksek gerilme seviyelerinde daha küçük çatlak boyutları görülürken, daha düşük gerilme seviyelerinde çatlak boyutu daha büyüktür. Kritik çatlak boyutu numune çapının %10'u ile %50'si arasında değişen değerlikler alabilir.

#### 4.3 Gerilme – Ömür Yaklaşımı

Eğer bir makine parçasına yeterli şiddette gerilmeler uygulanırsa hasar ile sonuçlanan yorulma çatlakları oluşabilir. Bu yaklaşımda moment veya uygulanan yük belli değişmeyen değerler arasında değişmektedir.

#### 4.3.1 Sabit Genlikli Yorulma

Tüm yük çevrimlerinin birbirinin aynısı olduğu yükleme çeşididir.

#### 4.3.2 Yorulma Notasyonları

- **Çevrim** : Sürekli tekrarlayan yorulma tarihçesinin en küçük birimidir. Çevrim genellikle sinüzoidal olsa da her zaman bu şekilde gerçekleşmeyebilir.
- **Gerilme Genliği** : Maksimum ve minimum gerilme değerlerinin farklarının yarısına eşittir. Gerilme genliği Denklem 4.1’de  $\sigma_a$  ile gösterilmektedir.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4.1)$$

- **Maksimum Gerilme** :  $\sigma_{\max}$  ile gösterilmektedir. Sinüzoidal yüklemenin üst tepe noktasında okunan gerilme değeridir. Maksimum gerilme Denklem 4.2 ile matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (4.2)$$

- **Minimum Gerilme** : Sinüzoidal yüklemenin alt tepe noktasında okunan değerdir.  $\sigma_{\min}$  ile gösterilen minimum gerilme Denklem 4.3 ile matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (4.3)$$

- **Yük çevrimi** : Matematiksel olarak  $\sigma_m \pm \sigma_a$  olarak ifade edilebilir. Çeki gerilmeleri pozitif, bası gerilmeleri negatif değerlidir.
- **Ortalama Gerilme** :  $\sigma_m$  ile gösterilmektedir. Aşağıda verilen Denklem 4.4 ile matematiksel olarak hesaplanabilir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.4)$$

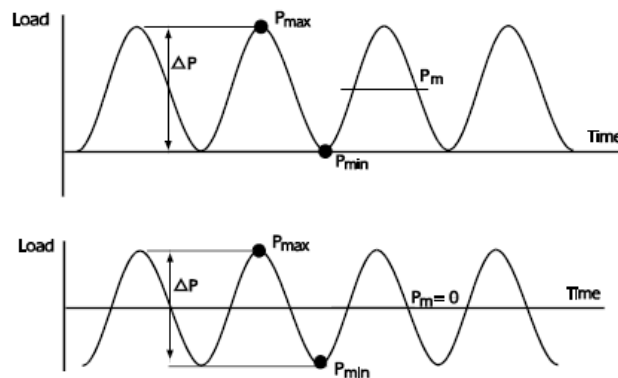
- **Gerilme aralığı :**  $\Delta\sigma$  ile gösterilmektedir. Aşağıda verilen Denklem 4.5 ile matematiksel olarak hesaplanabilir.

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4.5)$$

- **Gerilme Oranı :** R ile gösterilmektedir. Ortalama gerilmeyi ölçmek için kullanılır. Minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranıdır. Aşağıda verilen Denklem 4.6 ile matematiksel olarak hesaplanabilir.

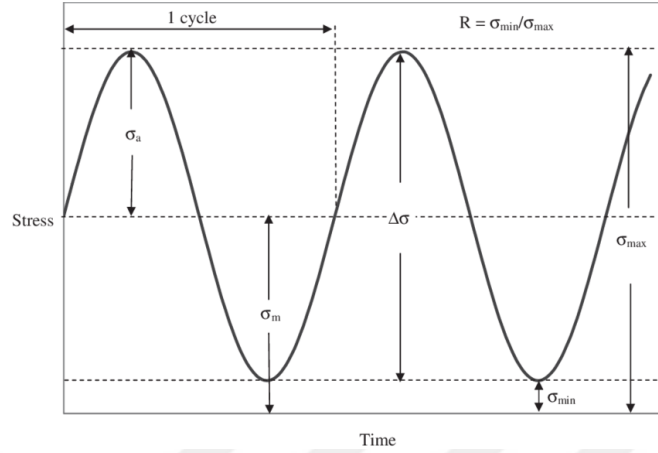
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4.6)$$

R= -1 ve R=0 yorulma özelliklerini test etmek için kullanılan iki durumdur. R'nin 0'a eşit olduğu durum minimum gerilmenin 0 olduğu durumdur. Parça veya malzeme maksimum gerilme ile 0 arasında test edilir. Bu duruma titreşimli yüklüme durumu da denilmektedir. R'nin -1'e eşit olduğu durumda ortamala gerilme 0'dır. Bu yükleme tipine tam değişken yükleme de denilmektedir. Şekil 4.7'de R=-1 ve R=0 durumlarında yüklemelere örnek gösterilmektedir (Stephens ve diğer, 2001).



Şekil 4.7 R=0 ve R=-1 Durumları için sabit genlikli tekrarlı yorulma yüklemeleri (Fatigue Theory Reference Manuel, 2002)

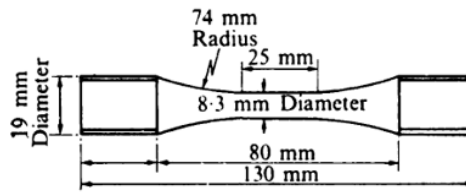
Yorulma notasyonları Şekil 4.8’de gösterilen yükleme durumu için gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Sabit genlikli yorulma (Qiao ve Yang, 2006)

#### 4.3.3 Gerilme Ömür Diyagramları (S/N Eğrileri, Wöhler Eğrisi)

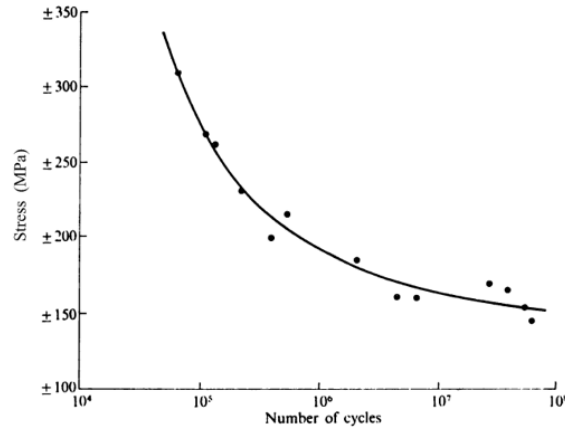
Düzgün bir S-N eğrisi oluşturabilmek için metalik ve çentiksiz bir numune ile çok fazla sayıda sabit genlikli yorulma testi gerçekleştirilmelidir. Sonuçlar yüzey işleme kalitesine karşı oldukça hassastır. Modern test cihazlarında yalnızca bir numune test edilir. Farklı gerilme oranları için direkt gerilmelerde dairesel kesitli veya düzlemsel eğilmelerde dikdörtgen kesitli numuneler kullanılabilir. Testlerde genellikle sinüzoidal yükleme kullanılır. Şekil 4.9’da direkt gerilme altında test edilen uçlarına diş açılmış yorulma test çubuğuna bir örnek gösterilmektedir (Connolley et al. 2005 aktaran Pook, 2007).



Şekil 4.9 Yorulma test numunesi (Pook, 2007)

Geleneksel olarak sonuçlar S/N eğrileri ile gösterilmektedirler. Bunlar çok sayıda test sonucunda değişken gerilme ve hasar çevrim sayısı eksenlerine göre oluşan

noktalara yerleştirilen bir eğri ile çizilir. Hasar, yorulma test numunesinin iki parçaya ayrılması olarak tanımlanabilir. S/N eğrilerine Wöhler Eğrileri de denilmektedir. Hasar meydana gelene kadar gerçekleşen çevrim sayısı ömür ya da dayanım olarak adlandırılır. S/N eğrileri genellikle logaritmik bir skalada çizilirler, ama değişken gerilme lineer ya da logaritmik olarak çizilebilir. Şekil 4.10'da S/N eğrisine bir örnek gösterilmektedir (Pook, 2007).



Şekil 4.10 Alüminyum alaşımlı bir numunenin S/N grafiği (Pook, 2007)

Yukarıdaki S/N eğrisinde  $10^3$ - $10^4$  çevrim altında hasarın meydana geldiği alana düşük çevrimli yorulma, daha uzun ömür gösteren alan ise yüksek çevrimli yorulma olarak adlandırılmaktadır. Ömür olarak zamandan ziyade çevrim ile ifade edilmesi, hasarın frekanstan bağımsız olarak oluşmasıyla açıklanmaktadır (Frost et al. 1974 aktaran Pook, 2007).

Çekme dayanımı 700 MPa'ın üzerinde olan çeliklerde, bir çekme numunesi  $10^7$  çevrime kadar hasara uğramadıysa daha uzun çevrimlerde de hasara uğraması pek mümkün değildir. Bu gibi durumlarda test  $2 \times 10^7$  çevrimde durdurulur ve eğri buradan sonra yatay olarak çizilir. Bu yatay çizgiye karşılık gelen gerilmeler o malzemenin yorulma limiti olarak adlandırılırlar. Eğer gerilme seviyeleri logaritmik olarak çizildiyse, S/N eğrisinin sonlu ömür kısmı *Basquin* eşitliğinden gelen düz bir çizgi ile gösterilir. *Basquin* eşitliğinden gelen bu düz çizgi ve yatay çizginin kesiştiği yere dirsek denilmektedir. Basquin eşitliği Denklem 4.7 ile gösterilmektedir (Pook, 2007).

$$\sigma_a = CN_f^b \quad (4.7)$$

$\sigma_a$  : Gerilme Genliği

$N_f$  : Hasar çevrim sayısı

$C$  : Malzeme sabiti

$b$  : Basquin üsteli

$C$  ve  $b$  değerleri deneysel olarak belirlenmektedir.

#### 4.3.4 Yüksek Çevrimli Yorulma

Yüksek çevrimli yorulma servis koşullarında mekanik anlamda gerçekleşen hasarların ana nedenini oluşturan belki de başa çıkması en zorlu olaydır. Bu zorluk çok erken aşamalarda akma sınırının altında mikro veya nano düzeyde başlayabilen çatlakların oluşturduğu hasarlardan kaynaklanmaktadır. Tehlikeli hasarı önceden tahmin etmeye yarayacak basit bir yol yoktur (Lemaitre ve Desmorat, 2005).

#### 4.3.5 Düşük Çevrimli Yorulma

Yorulma hasarlarının  $10^3$ - $10^4$  çevrim altında meydana geldiği durum düşük çevrimli yorulma olarak adlandırılır. Bu tip hasarlar malzeme akma sınırının üzerinde zorlandığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Düşük çevrimli yorulma karakteristikleri tam tersinir yükleme durumlarında ortaya çıkmaktadır. Deplasman kontrollü testler ile kontrol edilmektedir (Yamada, 2007).

### 4.4 Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler

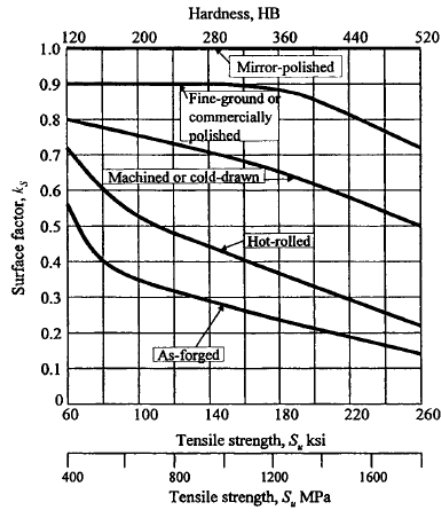
Çok fazla sayıdaki değişken parçaların yorulma mukavemetlerini etkilemektedir. Bunlardan gerilme değişimleri, tekrar sayısı ve çeki gerilmeleri yorulma dayanımına etki eden temel faktörler olarak gösterilebilirler. Bunlardan başka yorulma dayanımına etkisi bulunan yan faktörler de bulunmaktadır. Bunlar özetle aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sıcaklık
- Korozyon
- Metalurjik Faktörler
- Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi
- Isıl İşlemler
- Çentik
- Akma ve Çekme Dayanımları
- Frekans
- Kaynak Dikişi
- Soğuk Deformasyon
- Yüzey Kaplamaları
- Plastik Deformasyon
- Geometrik Parametreler
- Gerilme Koşulları

Bu tez çalışması kapsamında tasarım parametresi olarak belirlenen yüzey pürüzlülüğünün gerilim altında kumlama değerlerine etkisi ve oluşan artık gerilme seviyelerinin yaprak yayın yorulma ömrünü ne derecede etkilediği üzerinde durulacaktır. Çalışmanın son bölümünde geometrik parametrelerin yorulma ömrü üzerindeki etkileri bilgisayar destekli analizlerle incelenecektir.

#### ***4.4.1 Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi***

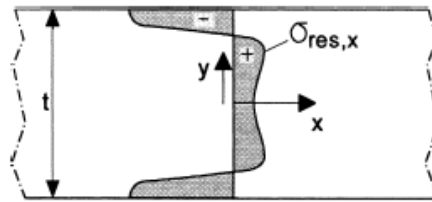
Birçok yorulma hasarım yüzeyden başladığından dolayı, yüzey yorulma davranışı açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bu yüzey etkileri; yüzey kalitesi, kimyasal kompozisyon, artık gerilmeler ve mikroyapı farklılıklarından ortaya çıkarlar. S/N eğrileri elde edilirken hazırlanan numuneler yüzey olarak oldukça hassas işlenmiş ve yüzey kusurları minimize edilmiştir. Fakat gerçek hayatta makine parçalarının yüzeyleri bu derece kusursuz olmayabilir. Bu sebeple yorulma dayanımı hesaplanırken yüzey faktörlerinin etkisi mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 4.11’de çelik yüzeylerin farklı yüzey kaliteleri için yorulma dayanımına etki eden yüzey faktörleri gösterilmektedir (Stephens ve diğer, 2001).



Şekil 4.11 Çelik yüzeylerin farklı yüzey kaliteleri etkisiyle gösterdikleri yorulma dayanımları (Stephens ve diğer, 2001)

#### 4.4.2 Artık Gerilmelerin Yorulma Ömrüne Etkisi

Herhangi bir dış yük olmaksızın oluşan gerilme dağılımına artık gerilme denir. Bası ve çeki artık gerilmeleri daima bir arada ve denge halinde bulunurlar. Şekil 4.12’de yüzeyden  $t$  kadar derinlikte artık gerilmelerin dağılımı gösterilmektedir. İstenmeyen çeki artık gerilmeleri yorulma ömrünü olumsuz etkilerken, bası artık gerilmeleri yorulma dayanımını önemli derecede artırmaktadır. Dış bir yük olmadığı durumda artık gerilme dağılımı Denklem 4.8’de gösterildiği gibi formüle edilir:



Şekil 4.12 Yüzeyden  $t$  kadar derinlikte artık gerilme dağılımı

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x dy = 0 \quad (4.8)$$

Dış bir moment olmadığı durumda artık gerilme dağılımı Denklem 4.9'da gösterildiği gibi formüle edilir:

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} y \sigma_x dy = 0 \quad (4.9)$$

Malzeme üzerine uygulana dış yük gerilme dağılımına sebebiyet vermektedir. Bu gerilme dağılımı, hem malzeme geometrisi hem de yük miktarı tarafından belirlenmektedir. Elastik davranış gösteren malzemelerde gerilme dağılımı bu dış yük ve oluşan artık gerilmelerin toplamından oluşmaktadır. Denklem 4.10'da verilen eşitlik yardımıyla bu durum formüle edilebilir:

$$\sigma = \sigma_{\text{dış yük}} + \sigma_{\text{artık}} \quad (4.10)$$

Bir malzemeye çevrimsel bir yük uygulandığında gerilme genliği ve ortalama gerilmeler dış yükün oluşturduğu gerilmelerdir. Artık gerilmeler gerilme genliğini etkilemezken, ortalama gerilme değerini değiştirmektedirler. Artık gerilmeler etkisinde meydana gelen gerilme genliği ve ortalama gerilme Denklem 4.11 ve 4.12 yardımıyla gösterilebilir:

$$\sigma_a = \sigma_{a,\text{dış yük}} \quad (4.11)$$

$$\sigma_m = \sigma_{m,\text{dış yük}} + \sigma_{\text{artık}} \quad (4.12)$$

Artık gerilmelerin ortaya çıktığı bazı durumlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Homojen olmayan plastik deformasyon
- Üretim prosesleri
- Kumlama
- Plastik delik deformasyonu
- Isıl işlem
- Montaj operasyonu

Artık gerilmeler tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki ayrı şekilde hesaplanabilirler.

Tahribatlı Artık Gerilme Hesaplama Yöntemleri:

- Delik delme metodu
- Yuvarlak Çekirdek Tekniği
- Eğilme deformasyonu metodu
- Kesit alma metodu

Tahribatsız Artık Gerilme Hesaplama Yöntemleri:

- X ışını ve nötron yayılımı metodu
- Ultrasonik teknikler
- Manyetik metodlar

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 5.1 Yüzey temizlik hassasiyetinin artık gerilmelere etkisi ve malzeme incelemeleri

Hammadde imalat süreçleri ve yaprak yay ısıtım işlem süreçlerinden geçen yaprak yay yüzeyinde karbonun oksijen ile tepkimeye girerek uzaklaşması sonucu meydana gelen kısmi veya birleşik ferrit bölgeleri, pas oluşumu, mikro çatlaklar ve tufal bulunabilmektedir. Bu tip istenmeyen düzensizlikleri ortadan kaldırmak açısından ısıtım işlem ve kumlama işlemleri arasında yüzey temizlik işlemleri gerçekleştirilmektedir. Çalışmanın ilk bölümünde 76,2x19 mm DIN EN 10092-1 A profil 51CrV4 lamadan üretilen tek katlı parabolik yaprak yay için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Isıtım işlem prosesinden geçen toplam 15 adet yaprak yay, yüzey temizliksiz, boylamasına olarak zirkonyum zımpara ve dairesel zirkonyum disk ile yüzeyleri temizlenmiş olarak gruplara ayrılmıştır. Şekil 5.1’de incelenecek 15 adet yaprak yay gösterilmektedir.



Şekil 5.1 İncelenecek yaprak yaylar (Kişisel arşiv, 2021)

Şekil 5.2’de boylamasına yüzey temizlikleri yapılmış, dairesel olarak hassas temizlik yapılmış ve hiç temizlik yapılmamış makaslar birlikte gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Farklı yüzey temizlik işlemleri uygulanan yaprak yaylar (Kişisel arşiv, 2021)

Beşerli gruplara ayrılan yaprak yaylar  $R_z$  yüzey pürüzlülük parametreleri açısından boylamasına ve enine ölçümler alındıktan sonra karşılaştırılmıştır. Şekil 5.3'te boylamasına ve enine yüzey pürüzlülük ölçümleri gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Boyuna ve enine yüzey pürüzlülük ölçümleri (Kişisel arşiv, 2021)

Farklı yüzey temizliği işlemleri uygulanmış makaslara kumlama öncesinde yapılan boylamasına ve enine yüzey pürüzlülük ölçümleri sonrasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de yüzey temizliksiz numunelere göre %  $R_z$  olarak karşılaştırılmıştır. Boylamasına ve enine pürüzlülük değerleri  $R_z$  parametresi olarak incelendiğinde, özellikle dairesel disk zımpara ile yüzeyleri temizlenmiş yüzeylerin daha hassas işlendiği görülmektedir. Boylamasına olarak zımpara ile yapılan temizlik işlemi sonrası ise hiç yüzey temizlik yapılmamış numunelere göre yapılan karşılaştırmalarda kesin bir sonuca ulaşılammış, değişken sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte

enine yüzey pürüzlülük değerleri özelinde incelendiğinde, zımpara işleminin boylamasına gerçekleştirilmesinin bir neticesi olarak pürüzlük değerlerinin oldukça yüksek olduğu gözükmemektedir.

Tablo 5.1 Yüzey temizliksiz numunelere göre kumlama öncesi  $R_z$  karşılaştırması

| Dairesel Zımpara Yüzey Temizliği      |                                 | Boylamasına Zımpara Yüzey Temizliği   |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Boylamasına Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi | Enine Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi | Boylamasına Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi | Enine Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi |
| -40                                   | -20                             | 15                                    | 89                              |
| -42                                   | -38                             | -11                                   | 57                              |
| -18                                   | -34                             | 9                                     | 59                              |
| -44                                   | -79                             | -38                                   | -32                             |
| -32                                   | -40                             | 17                                    | 30                              |

Yaprak yaylar üzerine etkiyen eğilme momenti ile beraber iç yüzeylerinde oluşan ve yorulma dayanımı açısından istenmeyen çeki gerilmeleri sebebiyle hasarın genellikle yayların iç yüzeylerinde başladığı bilinmektedir. Bu çeki gerilmelerinin zararlı etkisini en aza indirmek amacıyla bu bölgelerde bası artık gerilmeleri oluşturulmak istenmektedir. Bu amaçla önceden farklı yüzey temizlik proseslerinden geçirilen yaprak yaylar Şekil 5.4'te gösterildiği gibi gerilim altında bilya püskürtme işlemine maruz bırakılmıştır.

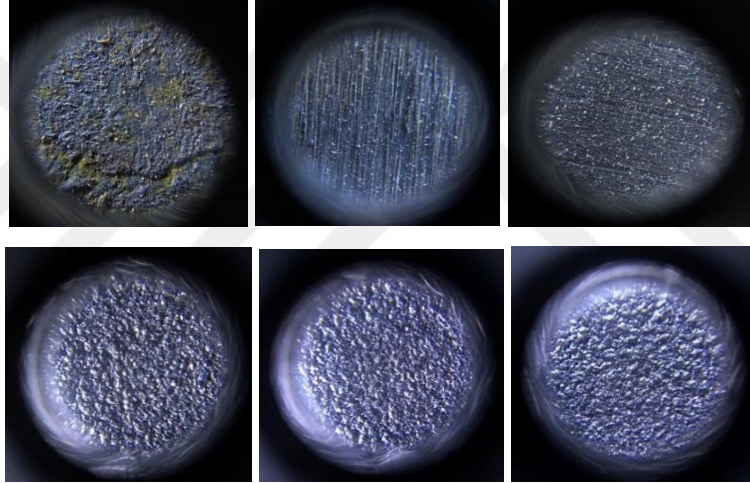


Şekil 5.4 Gerilim altında kumlama (Kişisel arşiv, 2021)

Gerilim altında kumlama prosesinden geçirilen yaprak yaylar Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Şekil 5.6'da ise farklı yüzey temizlikleri için kumlama öncesi ve sonrası 60x büyütülmüş yüzey görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Kumlama sonrası yaprak yaylar (Kişisel arşiv, 2021)



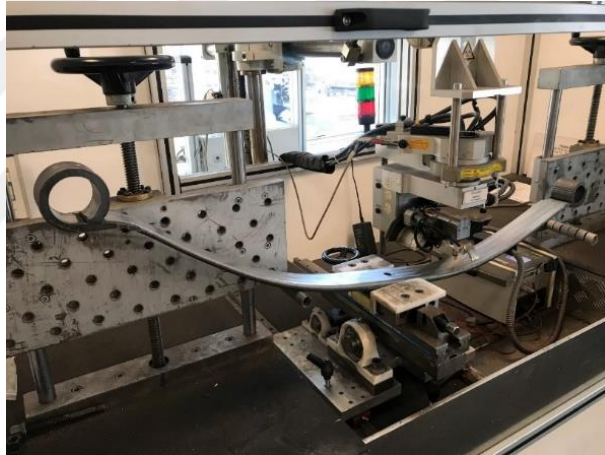
Şekil 5.6 60x büyütülmüş yüzey mikroskop görüntüleri (Kişisel arşiv, 2021)

Gerilim altında kumlama prosesinden geçirilen farklı temizlik prosesleri uygulanan yaprak yaylar boyuna ve enine yüzey pürüzlülük değerleri olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda Tablo 5.2’de gösterildiği üzere kumlama sonrası yüzey hassasiyetleri arasındaki fark azalsa da dairesel zımpara ile yapılan temizlik sonrası daha hassas pürüzlülük değerleri elde edildiği görülmektedir.

Tablo 5.2 Boylamasına zımpara ile yüzey temizlikleri yapılmış numunelere göre  $R_z$  karşılaştırması

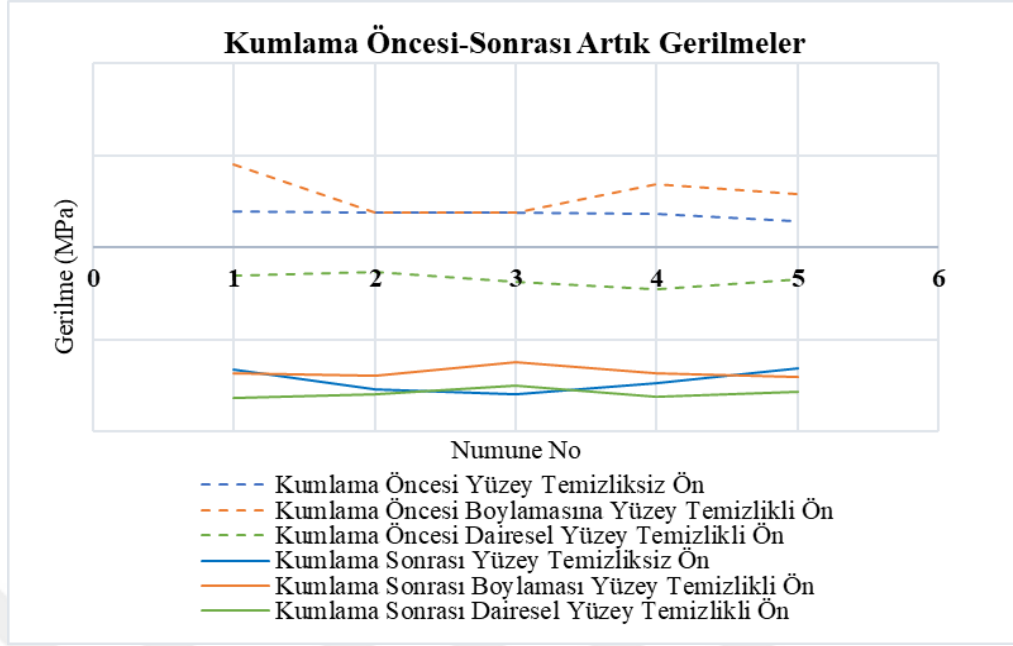
| Kumlama Öncesi                                    |                                 | Kumlama Sonrası                                   |                                 |
|---------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|
| Dairesel Zımpara ile Yüzeyi Temizlenmiş Numuneler |                                 | Dairesel Zımpara ile Yüzeyi Temizlenmiş Numuneler |                                 |
| Boylamasına Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi             | Enine Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi | Boylamasına Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi             | Enine Ölçüm<br>% $R_z$ Değişimi |
| -48                                               | -58                             | -5                                                | -13                             |
| -34                                               | -60                             | -5                                                | -9                              |
| -25                                               | -58                             | -20                                               | -22                             |
| -10                                               | -69                             | -19                                               | -26                             |
| -42                                               | -54                             | -6                                                | -25                             |

Gerilim altında kumlama öncesi ve sonrası seçilen makasların yüzeylerinde artık gerilme ölçümü gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız olarak uygulanan bu yöntem X ışınımı kırınımı ölçüm cihazı yardımıyla Şekil 5.7’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



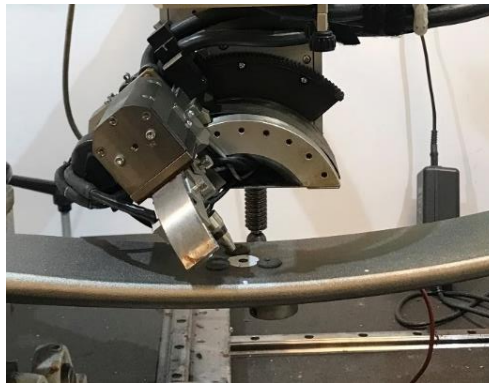
Şekil 5.7 X ışınımı kırınımı yöntemi ile yüzeyde artık gerilme ölçümü (Kişisel arşiv, 2021)

Şekil 5.8’de kumlama öncesi ve sonrası yüzey temizliksiz ve farklı yüzey temizlikli numuneler için artık gerilmelerdeki değişim grafik yardımıyla gösterilmektedir.



Şekil 5.8 Kumlama öncesi ve sonrası artık gerilme değişimleri

Gerilim altında kumlanan yaprak yay numunelerinden seçilen her bir yüzey temizlik tipine göre birer adet yaprak yay için her üç durumda da merkezden belirlenen belli bir mesafeden ve ön koldan olmak üzere 0-500  $\mu\text{m}$  derinlikte artık gerilme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Derinlikte artık gerilme ölçümü için yaprak yay yüzeyi tuz bazlı bir dağlayıcı yardımıyla kademeli olarak aşındırılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9’da artık gerilme ölçümü ile ilgili bir görsel gösterilmektedir.



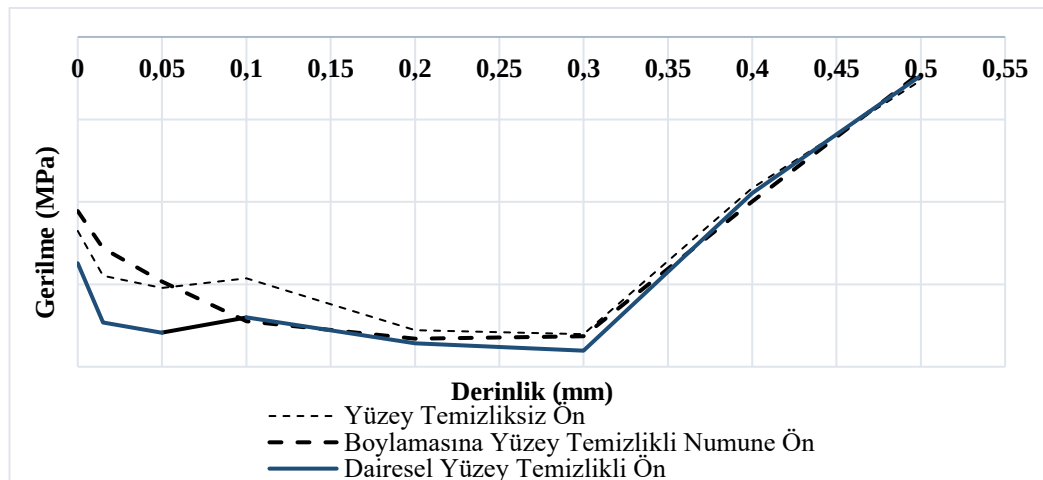
Şekil 5.9 Derinlikte artık gerilme ölçümü (Kişisel arşiv, 2021)

Yüzeyden 50  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar artık gerilmeler incelendiğinde hassas olarak işlenip yüzeyi temizlenmiş numunede, boylamasına zımpara ile yüzeyi daha az hassas temizlenmiş ve hiç yüzey temizlik yapılmamış numunelere göre daha yüksek bası artık gerilmeleri olduğu görülmektedir. Yüzeyden 100  $\mu\text{m}$  derinlikte dairesel olarak hassas yüzey temizlenmiş numune ve boylamasına zımpara ile daha az hassas yüzey temizlik yapılmış numunelerde benzer artık gerilme değerleri elde edilmektedir. 200 – 500  $\mu\text{m}$  derinlikte yüzey temizlik işleminin bası artık gerilmelerine belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Bu durum Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3 Yüzey temizlik yapılmamış numuneye kıyasla derinlikte artık gerilme ölçümü

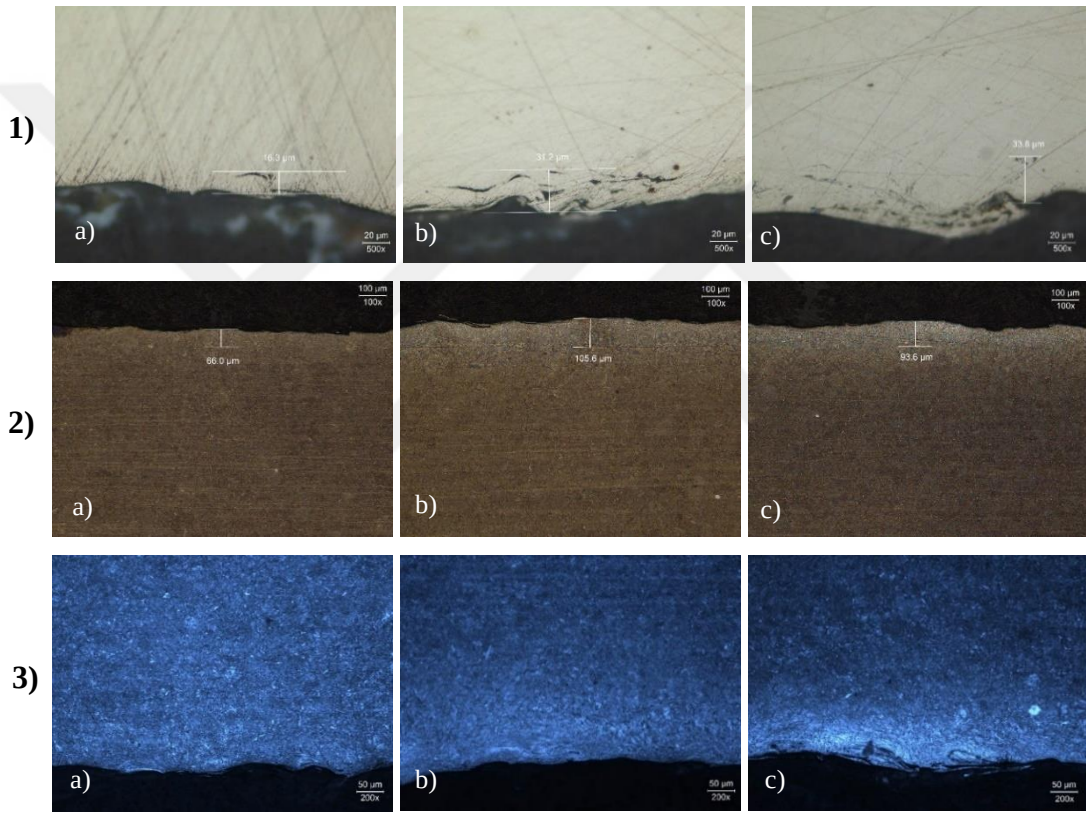
| Derinlik (mm) | Artık Gerilme Farkı (MPa)               |                                            |
|---------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
|               | Dairesel Zımpara ile Yüzeyi Temizlenmiş | Boylamasına Zımpara ile Yüzeyi Temizlenmiş |
| 0             | 79                                      | -48                                        |
| 0,015         | 114                                     | -66                                        |
| 0,05          | 108                                     | -15                                        |
| 0,1           | 95                                      | 104                                        |
| 0,2           | 32                                      | 21                                         |
| 0,3           | 40                                      | 5                                          |
| 0,4           | 13                                      | 33                                         |
| 0,5           | -12                                     | -19                                        |

Derinlikte ölçülen artık gerilmelerin farklı yüzey temizlik işlemleri yapıp kumlanan numunelerde değişim oranları Şekil 5.10'daki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 5.10 Farklı yüzey temizlikleri için derinlikte artık gerilme ölçüm sonuçları

Gerilim altında kumlama operasyonundan geçirilen inceleme numuneleri malzeme analizleri için laboratuvar incelemeleri gerçekleştirilmiştir. 100x ve 500x büyütme altında ışık mikroskobuyla incelenen numunelerde yüzeyde kısmi karbonsuzlaşma, birleşik ferrit ve üst üste binme (*overlap*) olaylarının gerçekleşip gerçekleşmediği incelenmiştir. Şekil 5.11’de malzeme inceleme görüntüleri gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde kısmi karbonsuzlaşma ve overlap derinlikleri, yüzeyi dairesel disk ile hassas olarak temizlenip kumlanmış numunelerde diğer numunelere kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.11 Malzeme inceleme görselleri

- a) Dairesel Temizlikli Numune, b) Boylamasına Temizlikli Numune, c) Temizliksiz Numune  
1) Overlap Görüntüsü, 2) Kısmi Dekarbürizasyon Görüntüsü, 3) Birleşik Ferrit Görüntüsü

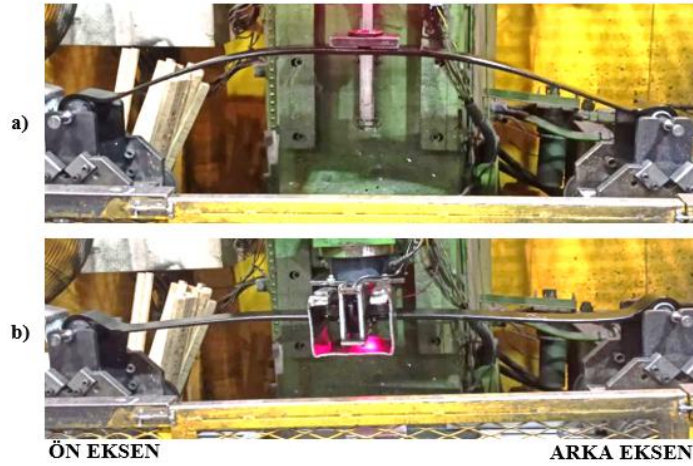
## 5.2 Yüzey pürüzlülüğünün üretilen yaprak yayın yorulma ömrüne etkisinin araştırılması

Tüm üretim proseslerinden geçirilip boyanan ve bitmiş ürün haline getirilen 51B60H malzeme ile üretilen 76,2 x 19 mm DIN EN 10092-1A kesitli tek katlı yaprak

yaylar için iki farklı yüzey temizliğinin numunelerin yorulma davranışlarına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda parabolik kalınlıkları ve gerilme seviyeleri göz önünde bulundurularak 4 adet yüzeyi dairesel disk ile hassas temizlenmiş, 4 adet de yüzeyi boylamasına zımpara yapılarak daha az hassas temizlenmiş toplam 8 adet bitmiş ürün düşey yorulma testine maruz bırakılmıştır.

### 5.2.1 Yorulma Testine Alınacak Yaprak Yayların Belirlenmesi

Şekil 5.12’de gösterildiği gibi ön yüklemeleri gerçekleştirilerek yüklü yükseklikleri ayarlanan ve yay katsayıları ölçülerek markalandıktan sonra üretim süreçleri tamamlanan yaprak yaylar, kavisli parabolik yaprak yay kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülmüş, ölçüm sonuçlarına göre yaprak yayın gerçek durumdaki katı modeli oluşturulmuş ve parabolik kalınlık dağılımı belirlenmiştir. Katı modeli oluşturulan yaprak yaylar araç konumunda test yükü için statik analizi Abaqus programında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12 Boylamasına yüzey temizlikli yaprak yayları fonksiyonel testleri (Olgun Çelik, bt)

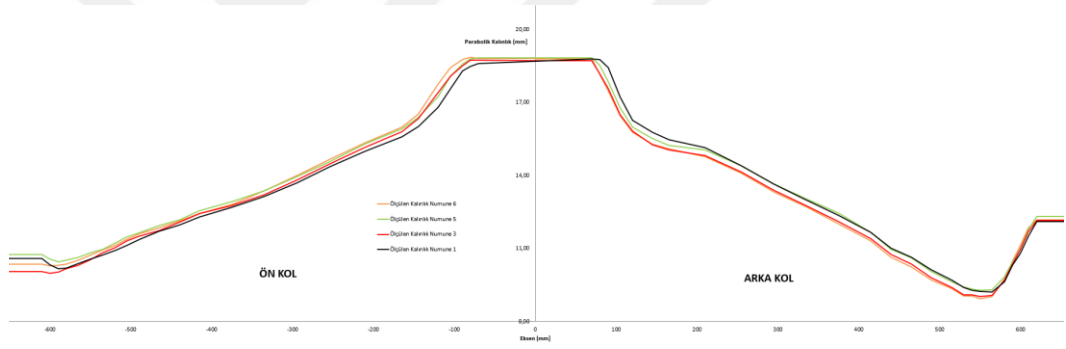
a)Yüksüz konumda b)Dizayn yükü konumunda

Şekil 5.13’te kavisli yaprak yay parabolik kalınlık ölçüm cihazı ile ölçüm başlangıcı gösterilmektedir.



Şekil 5.13 Kavisli yaprak yay parabolik kalınlık ölçüm cihazı (Kişisel arşiv, 2021)

Boylamasına yüzey temizliği yapılan dört adet yaprak yay numunesi için parabolik kalınlık ölçüm sonucu elde edilen kalınlık dağılımı Şekil 5.14'te grafik ile gösterilmektedir.



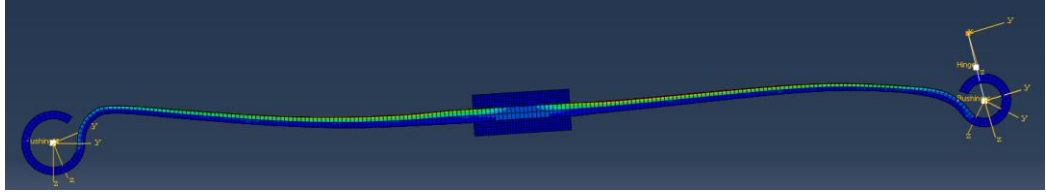
Şekil 5.14 Boylamasına yüzey temizlenmiş yaprak yayların parabolik kalınlık ölçüm sonuçları

Parabolik kalınlık ölçüm cihazından elde edilen veriler neticesinde formu oluşturulup Catia V5 yardımıyla katı modele dönüştürülen yaprak yay numunelerine ait bir görsel Şekil 5.15'te gösterilmektedir.

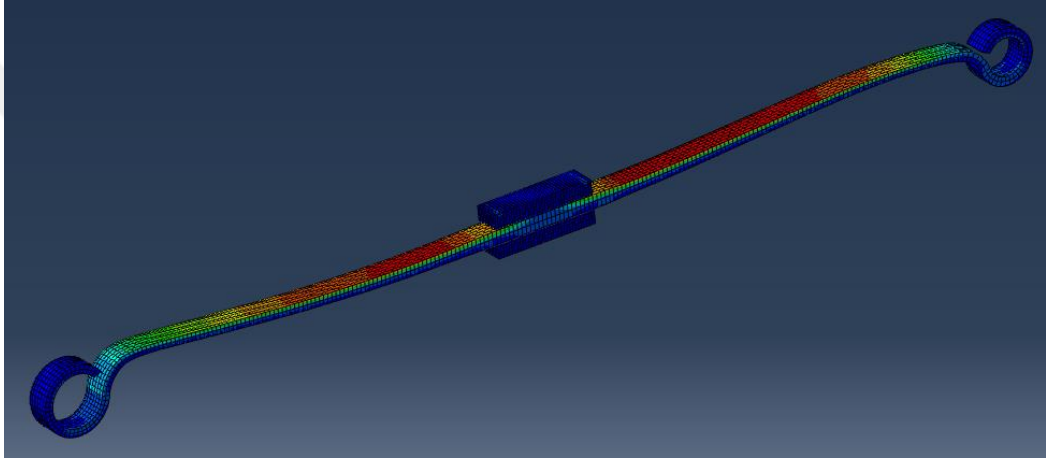


Şekil 5.15 Analizler için katı modele dönüştürülmüş yaprak yay

Analiz modeli oluşturulan yaprak yay Şekil 5.16’da gösterilen sınır koşulları uygulanarak göbek kısmından z yönünde belirlenen yük ile yüklenmiştir. Statik analiz sonuçları Şekil 5.17’de boylamasına yüzey temizlikli numune 1 için gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Sınır koşulları



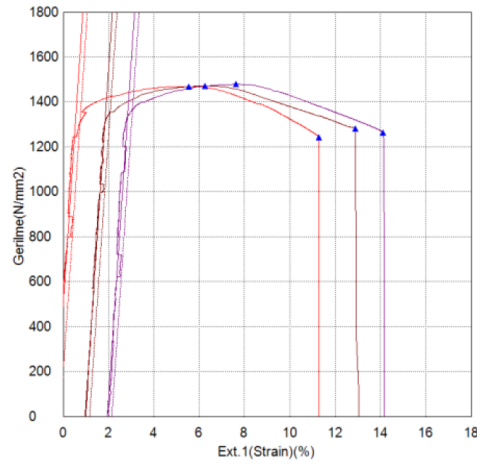
Şekil 5.17 Boylamasına makas numune 1 analiz görüntüsü

Gerilme analizi değerlendirebilmek amacıyla 3 adet numune için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testi uygulamasının gösterildiği görsel Şekil 5.18’de gösterilmektedir.



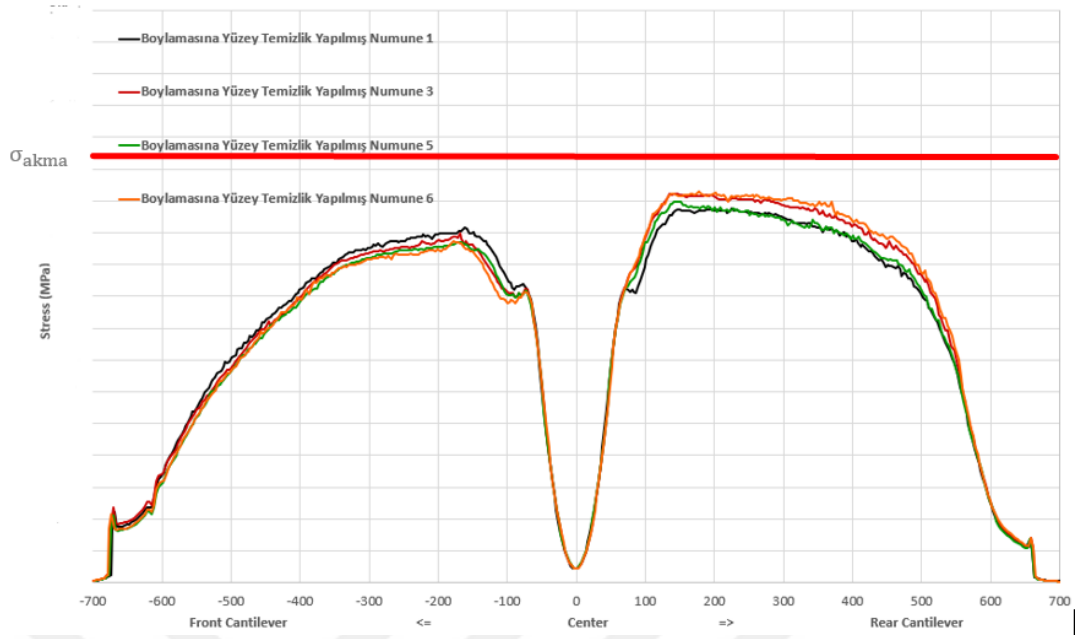
Şekil 5.18 Çekme testi (Kişisel arşiv, 2021)

Gerçekleştirilen 3 adet çekme testi sonrasında ortalamalar alınarak akma mukavemeti değeri belirlenmiştir. Şekil 5.19’da 51B60H malzeme ile üretilen yaprak yay için çekme grafiği gösterilmektedir. Çekme testi sonuçlarına göre akma mukavemeti yaklaşık olarak hesaplanmıştır.



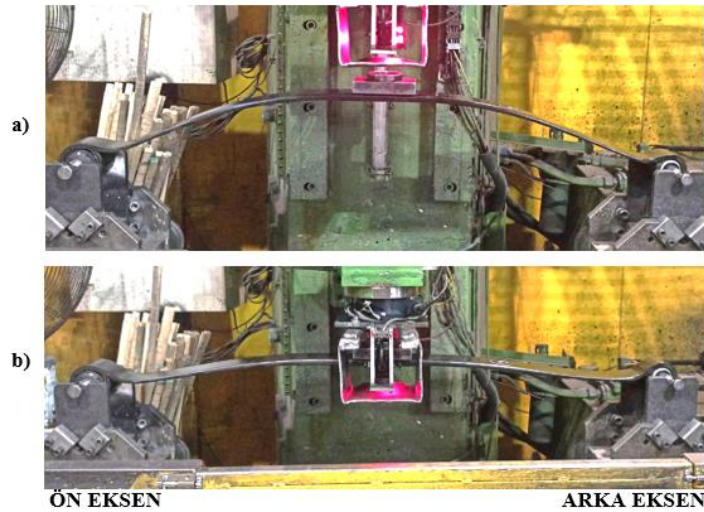
Şekil 5.19 Çekme testi

Boylamasına yüzey temizlik yapılmış 1 numaralı numunenin statik analiz sonuçları incelendiğinde arka kol tarafında gerilmeleri ön kola kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Çekme sonucunda elde edilen akma mukavemetine göre Şekil 5.20’deki grafik değerlendirildiğinde, hem ön hem de arka kol tarafında okunan değerlerin akma gerilmesi altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.20 Boylamasına yüzey temizlenmiş yaprak yayların sonlu elemanlar analiz sonuçları gerilme grafikleri

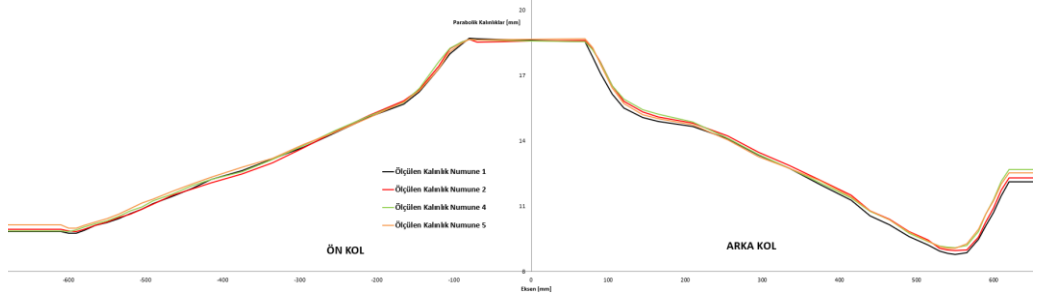
Dairesel olarak yüzeyleri hassas temizlenmiş yaprak yaylar ön yükleme prosesine getirilen yaprak yayların Şekil 5.21’de gösterildiği gibi yüklemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.21 Dairesel yüzey temizlikli yaprak yayları fonksiyonel testleri (Olgun Çelik, bt)

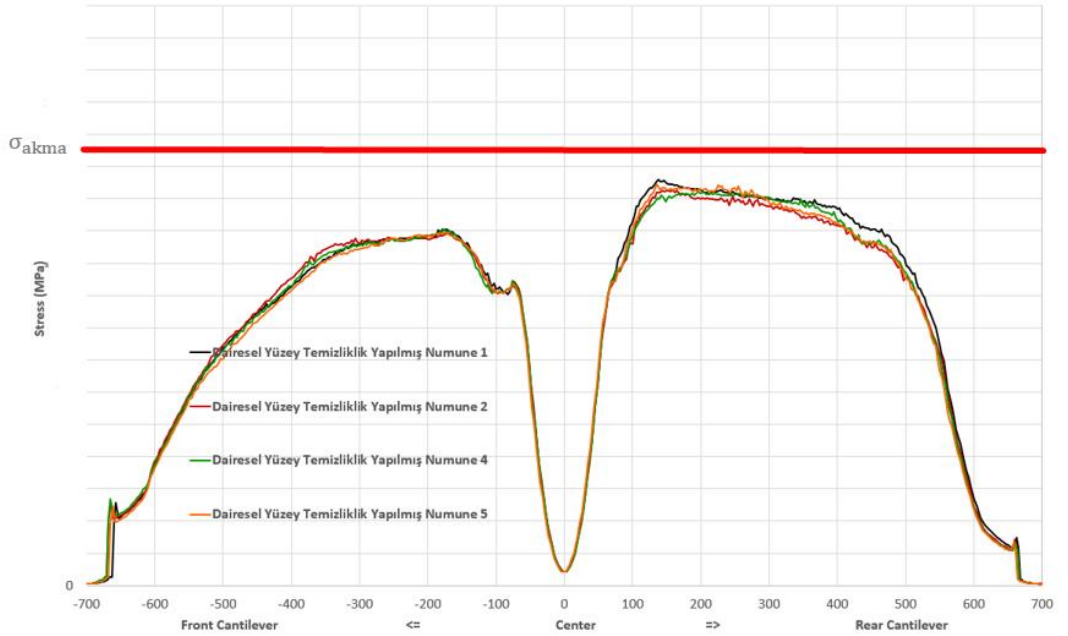
a)Serbest konumda b)Dizayn yükünde

Dairesel olarak hassas yüzey temizliği yapılan dört adet yaprak yay numunesi için parabolik kalınlık ölçüm sonucu elde edilen kalınlık dağılımı Şekil 5.22’de grafik ile gösterilmektedir.



Şekil 5.22 Dairesel yüzey temizlenmiş yaprak yayların parabolik kalınlık ölçüm sonuçları

Analiz modeli oluşturulan yaprak yay Şekil 5.16’da gösterilen sınır koşulları uygulanarak göbek kısmından z yönünde belirlenen yük ile yüklenmiştir. Statik analiz sonuçları Şekil 5.23’te dairesele olarak hassas yüzey temizlenmiş numuneler için karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.23 Dairesel yüzey temizlenmiş yaprak yayların sonlu elemanlar analiz sonuçları gerilme grafikleri

### 5.2.2 Farklı Yüzey Temizlikleri İçin Düşey Yorulma Testleri

Ana sanayi tarafından çeki-çeki çalışacak şekilde belirlenen düşey yüklerle, ön göz tarafından fikstüre sabitlenip, arka göz tarafından küpe ile fikstüre bağlanan ve 0,5 Hz frekansta ikili fikstürde koşturulan tek katlı parabolik yaprak yaylar yorulma ömrü olarak incelenmiştir. Şekil 5.24’de ikili fikstüre bağlanarak düşey yorulma testleri gerçekleştirilen makasların test görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.24 Yorulma test görüntüsü (Kişisel arşiv, 2021)

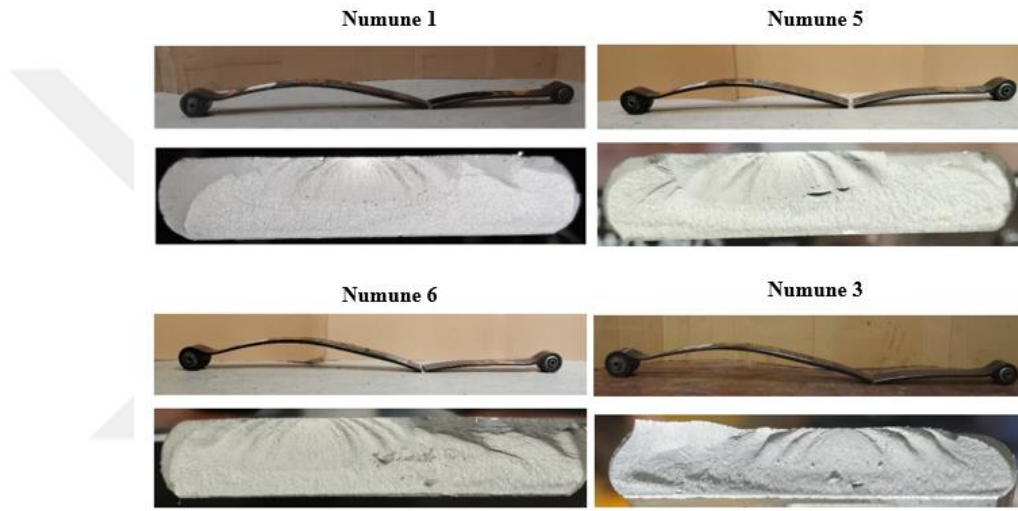
#### 5.2.2.1 Boylamasına Yüzey Temizlenmiş Numuneler Hasar Analizi

Kabul çevrimi %100 olarak kabul edildiğinde boylamasına yüzey temizlikli yaprak yayların yorulma testi sonrası gerçekleşen test çevrim sonuçları ve hasar bölgeleri Tablo 5.4’te gösterilmektedir.

Tablo 5.4 Boylamasına zımpara ile yüzey temizlik yapılan makasların yorulma test sonuçları

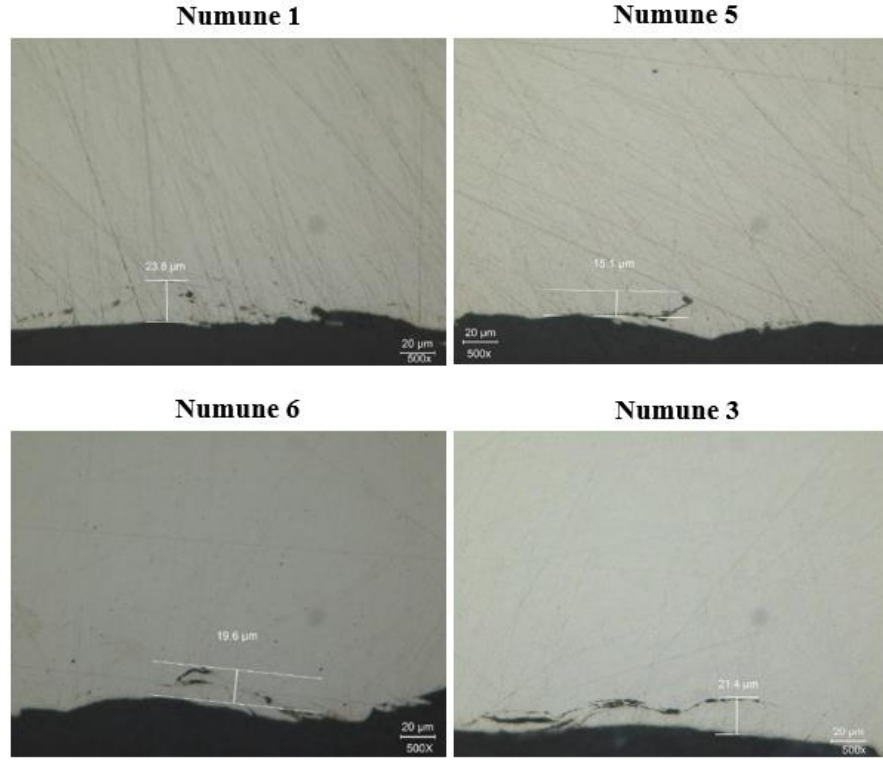
| Boylamasına Zımpara ile Yüzey Temizliği Yapılan Yaprak Yaylar |                   |                   |              |                        |               |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|------------------------|---------------|
| Makas No                                                      | Yorulma Test Tipi | Kabul Çevrimi (%) | Frekans (Hz) | Gerçekleşen Çevrim (%) | Hasar Bölgesi |
| #1                                                            | Düşey Test        | 100               | 0,5          | 213,4                  | Arka Kol      |
| #5                                                            |                   |                   |              | 281,9                  | Arka Kol      |
| #6                                                            |                   |                   |              | 285,3                  | Arka Kol      |
| #3                                                            |                   |                   |              | 644,3                  | Arka Kol      |

5.2.2.1.1 *Hasar Kesit Görüntüleri ve Konumları.* Boylamasına olarak daha az hassas yüzey temizliği yapılan numunelerin yorulma testi sonrası kırılma bölgeleri ve kırılma kesitleri Şekil 5.25'te gösterilmektedir. Tüm çatlak başlangıçları yaprak yayların çeki yüzeyleri de denilen iç yüzeylerinden başlayıp ilerlemiştir. Kırılma lokasyonları incelendiğinde tüm kırılmalar yaprak yayların arka kol taraflarında oluşmuştur. Göbek düzlüğüne veya yaprak yay gözüne yakın bölgelerde kırılma gözlemlenmemiştir. Radyüs bölgelerinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.25 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin hasar bölgesi görüntüsü (Kişisel arşiv, 2021)

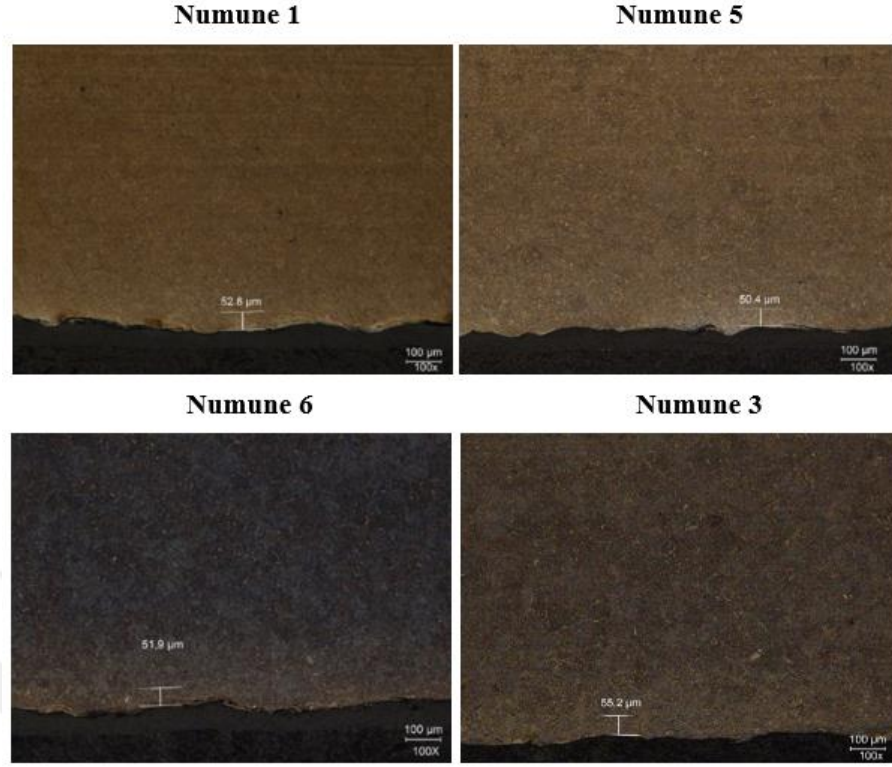
5.2.2.1.2 *Overlap İncelemeleri.* Parabolik haddeme ve kumlama prosesleri sonrası yüzeyde tufal oluşumu veya overlap denilen üst üste binme olayı gerçekleşebilir. Bu durum yüzeyde yorulma çatlakları oluşumuna sebep olan çentik etkisini oluşturmaktadır. Şekil 5.26'da boylamasına yüzey temizliği yapılmış numunelerin yorulma testi sonrası malzeme hasar analizi için gerçekleştirilen overlap inceleme görüntüleri gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre 15.1  $\mu\text{m}$  ile 23.8  $\mu\text{m}$  arasında değişen overlap derinlikleri gözlemlenmiştir. En düşük overlap derinliği 15.1  $\mu\text{m}$  ile Numune 5'te, en yüksek overlap derinliği ise 23.8  $\mu\text{m}$  ile Numune 1'de görülmüştür.



Şekil 5.26 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin overlap görüntüsü

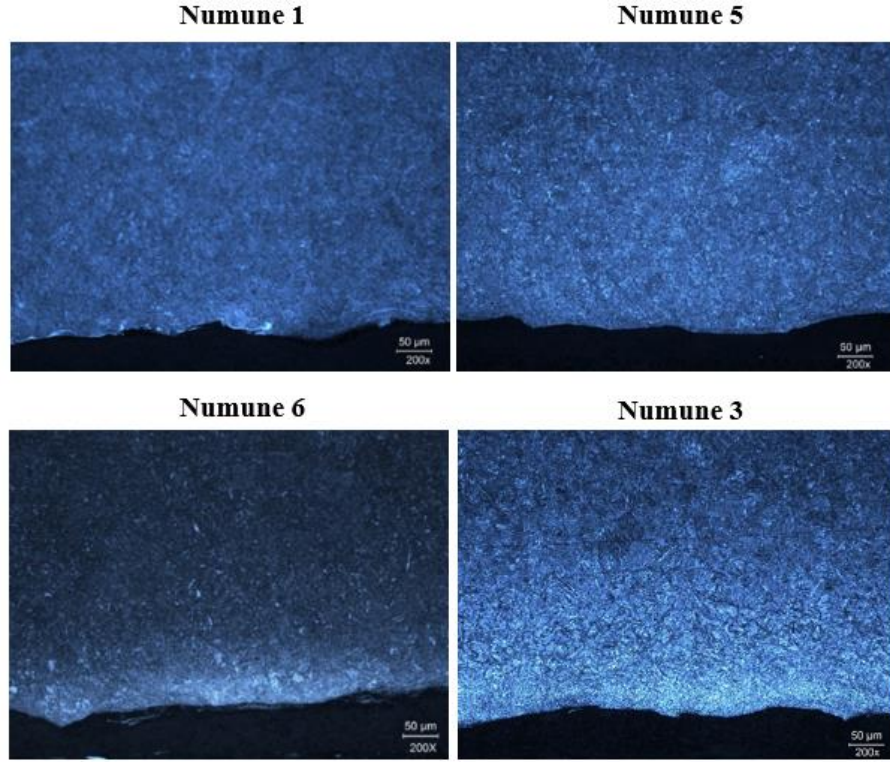
**5.2.2.1.3 Dekarbürizasyon ve Birleşik Ferrit İncelemeleri.** Dekarbürizasyon, karbon oksidasyonunun bir çeşididir. Yorulma ömrüne negatif etkisi bulunmaktadır. Yay çeliği ham malzeme haddeleme prosesinde başlayarak yaprak yay üretim süreçlerinde karbonsuzlaşmış bölge oluşumu devam eder (Karaağaç ve diğer, 2013).

Boylamasına yüzey temizliği gerçekleştirilerek yorulma testine alınan numunelerin hasarlanmaları sonrasında gerçekleştirilen 100 kat büyütülmüş mikroskop incelemelerinde, Şekil 5.27’de gösterildiği gibi çeki gerilmelerine maruz kalan iç yüzeylerde kısmi dekarbürizasyon görüntüleri verilmektedir. 50.4 µm ile 55.2 µm arasında değişen kısmi karbonsuzlaşma bölgesi derinlikleri görülmektedir. En düşük kısmi dekarbürizasyon derinliği 50.4 µm ile Numune 5’te, en yüksek dekarbürizasyon derinliği 55.2 µm ile Numune 3’te hesaplanmıştır.



Şekil 5.27 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin kısmi dekarburizasyon görüntüsü

Şekil 5.28’de gösterildiği gibi mikroskop altında 200 kat büyütülmüş olarak, malzeme iç yüzeylerinde birleşik ferrit oluşumu incelemesi gerçekleştirilmiştir. Boylamasına yüzey temizliği gerçekleştirilen numunelerin iç yüzeylerinde birleşik ferrit oluşumu gözlemlenmemektedir.



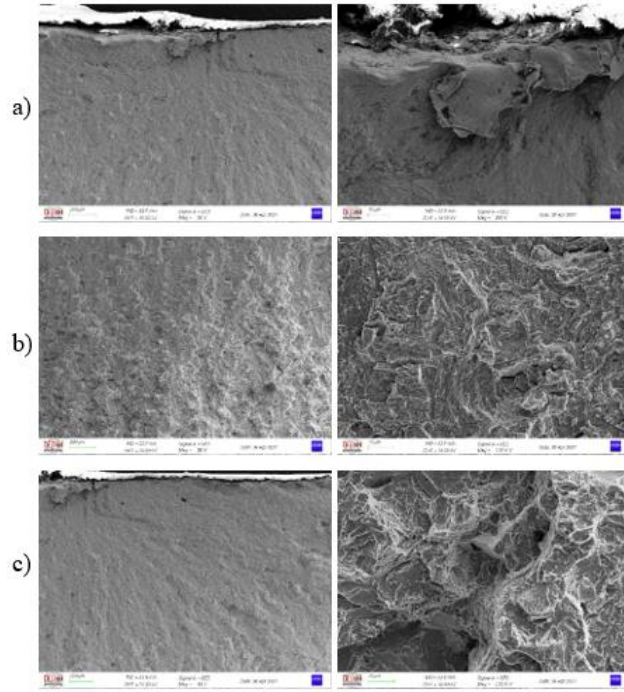
Şekil 5.28 Boylamasına yüzey temizliği yapılan numunelerin birleşik ferrit görüntüsü

**5.2.2.1.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri.** Kırılma yüzeyi SEM incelemeleri için numune yüksekliği kırık yüzeyden itibaren yaklaşık 5 mm olacak şekilde uygun yükseklikte kesildikten sonra hasar yüzeyindeki yağ, kir ve pastan arındırılmak üzere numune üzeri alkol ile temizlenip kurutulmuştur. Temizlenen numuneler yaklaşık 1 saat 130 °C sıcaklıkta etüvde tutulduktan sonra numune hazırlık işlemleri biten boylamasına yüzey temizlenmiş yaprak yay numunesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi gerçekleştirilmiştir.

Boylamasına yüzey temizliği gerçekleştirilmiş numunelerin yorulma testi sonrası hasarlanan bölgeleri için hazırlanan numune kesitleri için SEM inceleme görüntüleri numune 1 için Şekil 5.29’da, numune 5 için Şekil 5.30’da, numune 6 için Şekil 5.31’de ve numune 3 için Şekil 5.32’de gösterilmektedir.

Çatlak ilerleme çizgileri hasar merkezinden ilerleme bölgesine doğru yayılmaktadır. Her ne kadar yorulma çatlak büyüme oranını gösteren mikroskopik ilerleme çizgileri oluşmasa da hasarın yorulma hasarı olduğu görülmektedir. Malzeme

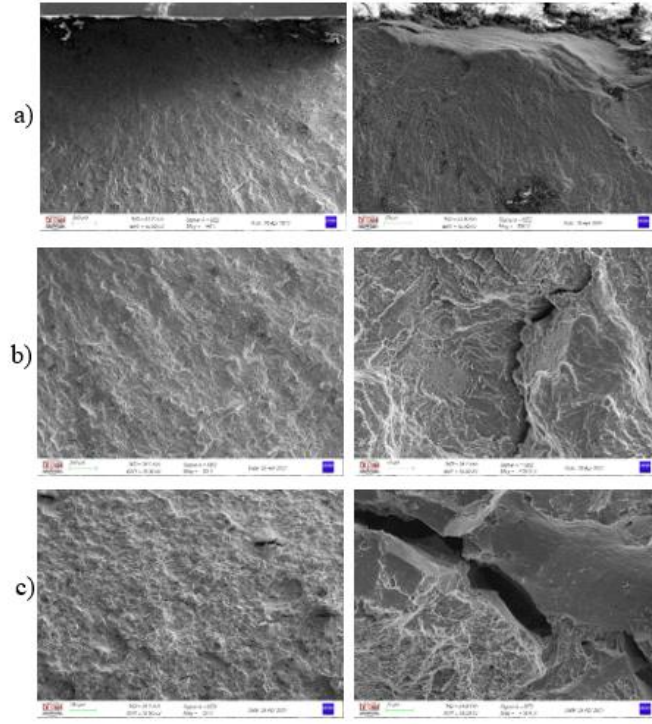
iç yapılarında inklüzyon görülmemekle birlikte ilerleme bölgesinde transgranüler çatlak ilerlemesi olduğu gözlemlenmektedir. Final kırılma bölgesinde ise transgranüler çatlak ilerlemesinin intergranüler çatlak ilerlemesine dönüştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum nihai kırılma bölgelerinde gevrek bir yapının oluştuğunu bize göstermektedir.



Şekil 5.29 Boylamasına yüzey temizlikli numune1 SEM görüntüsü

a)Başlangıç bölgesi, b)İlerleme bölgesi, c)Kırılma bölgesi





Şekil 5.32 Boylamasına yüzey temizlikli numune 3 SEM görüntüsü

a)Başlangıç bölgesi, b)İlerleme bölgesi, c)Kırılma bölgesi

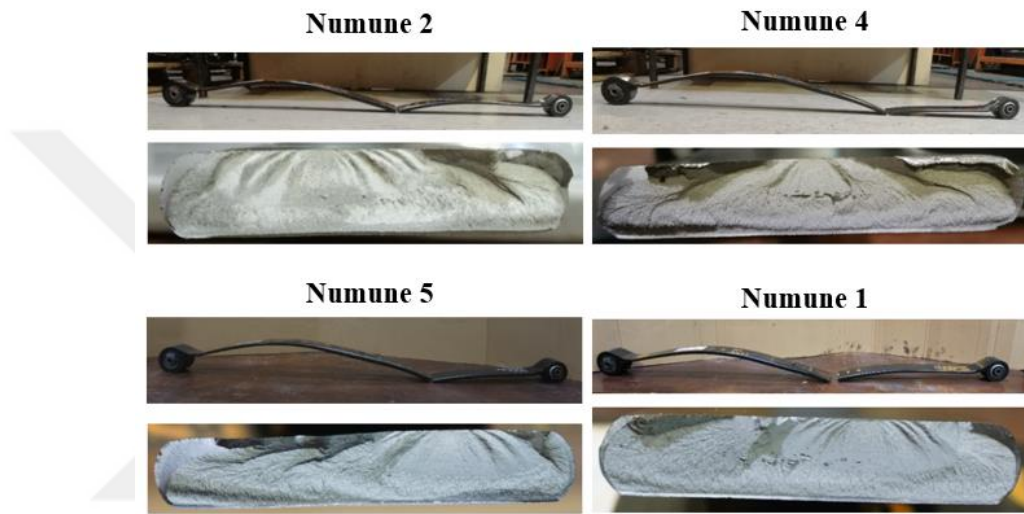
#### 5.2.2.2 Dairesel Yüzey Temizlenmiş Numuneler Hasar Analizi

Kabul çevrimi %100 olarak kabul edildiğinde dairesel yüzey temizlikli yaprak yayların yorulma testi sonrası gerçekleşen test çevrim sonuçları ve hasar bölgeleri Tablo 5.5'te gösterilmektedir.

Tablo 5.5 Dairesel disk ile hassas yüzey temizlik yapılan makasların yorulma test sonuçları

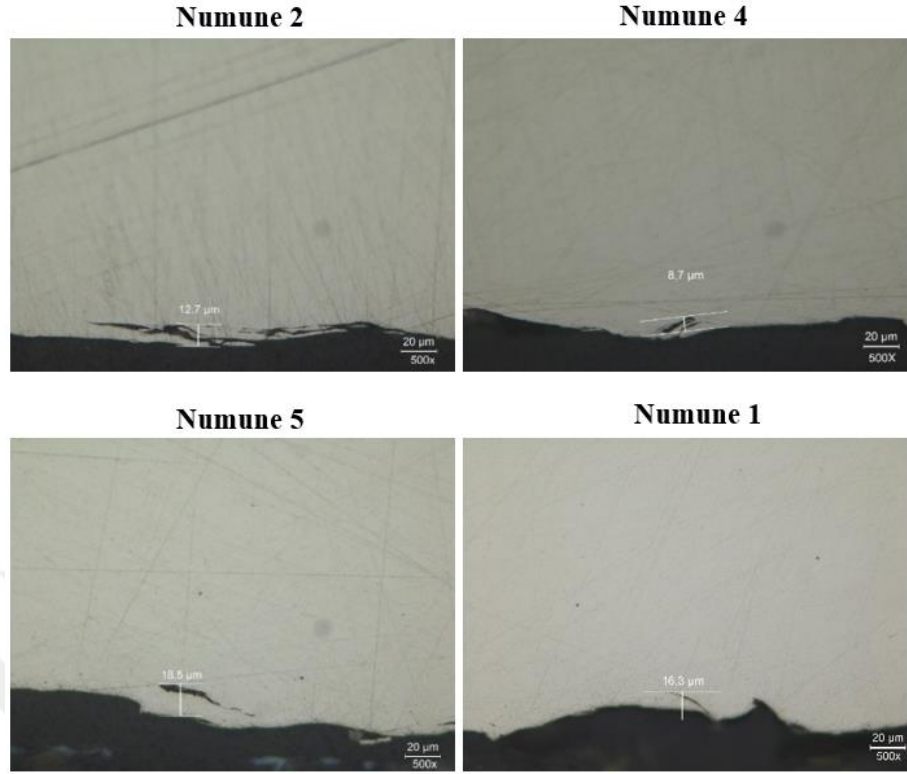
| Dairesel Zımpara ile Yüzey Temizliği Yapılan Yaprak Yaylar |                   |                   |              |                        |               |
|------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|------------------------|---------------|
| Makas No                                                   | Yorulma Test Tipi | Kabul Çevrimi (%) | Frekans (Hz) | Gerçekleşen Çevrim (%) | Hasar Bölgesi |
| #2                                                         | Düşey Test        | 100               | 0,5          | 630,1                  | Arka Kol      |
| #4                                                         |                   |                   |              | 630,1                  | Arka Kol      |
| #5                                                         |                   |                   |              | 428,4                  | Arka Kol      |
| #1                                                         |                   |                   |              | 396,2                  | Arka Kol      |

5.2.2.2.1 *Hasar Kesit Görüntüleri ve Konumları.* Dairesel yüzey temizliği yapılan numunelerin yorulma testi sonrası kırılma bölgeleri ve kırılma kesitleri Şekil 5.33'te gösterilmektedir. Tüm çatlak başlangıçları yaprak yayların çeki yüzeyleri de denilen iç yüzeylerinden başlayıp ilerlemiştir. Kırılma lokasyonları incelendiğinde tüm kırılmalar yaprak yayların arka kol taraflarında oluşmuştur. Göbek düzlüğüne veya yaprak yay gözüne yakın bölgelerde kırılma gözlemlenmemiştir. Radyüs bölgelerinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir.



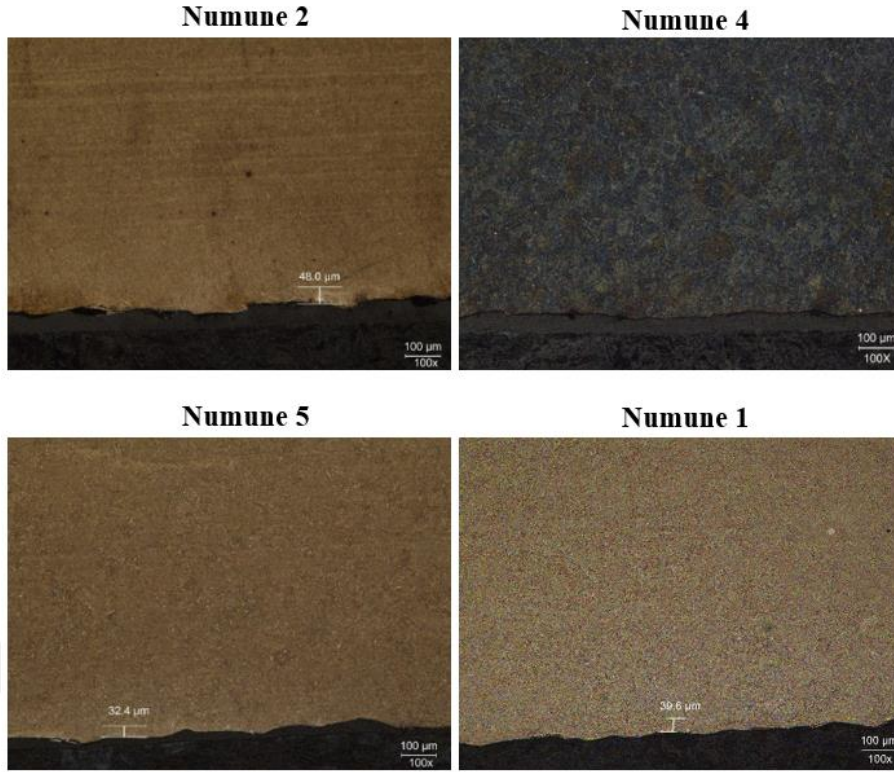
Şekil 5.33 Yorulma hasar konumu ve kesit görüntüleri (Kişisel arşiv, 2021)

5.2.2.2.2 *Overlap İncelemeleri.* Şekil 5.34'te daireSEL yüzey temizliği yapılmış numunelerin yorulma testi sonrası malzeme hasar analizi için gerçekleştirilen overlap inceleme görüntüleri gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre 8.7  $\mu\text{m}$  ile 18.5  $\mu\text{m}$  arasında değişen overlap derinlikleri gözlemlenmiştir. En düşük overlap derinliği 8.7  $\mu\text{m}$  ile numune 4'te, en yüksek overlap derinliği ise 18.5  $\mu\text{m}$  ile numune 5'te görülmüştür.



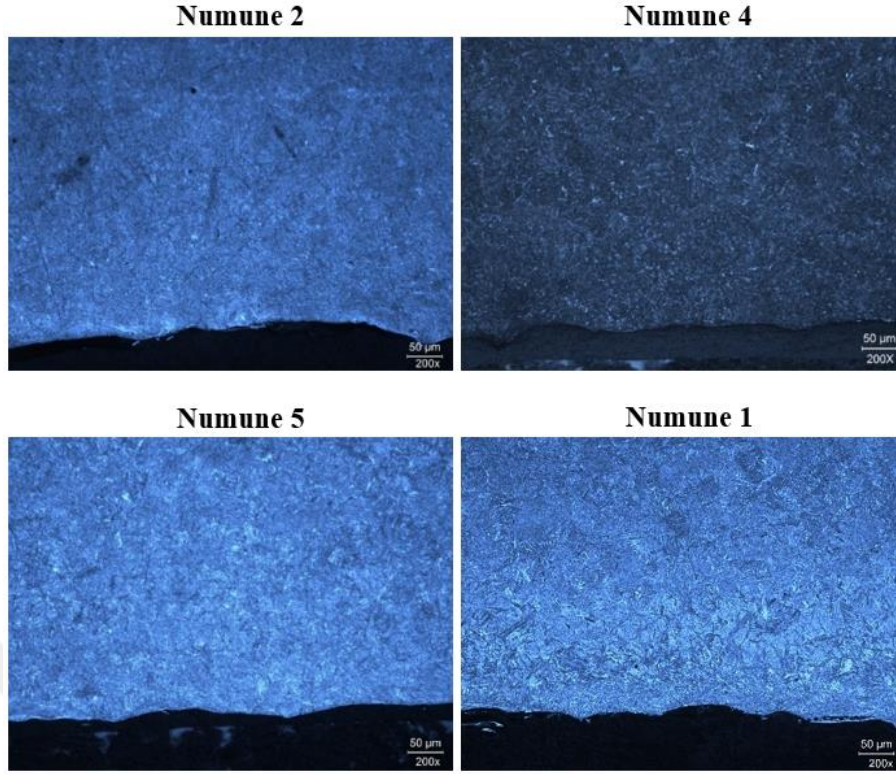
Şekil 5.34 Dairesel olarak hassas temizlik yapılmış numunelerin overlap görüntüleri

**5.2.2.2.3 Dekarbürizasyon ve Birleşik Ferrit İncelemeleri.** Dairesel olarak hassas yüzey temizliği gerçekleştirilerek yorulma testine alınan numunelerin hasarlanmaları sonrasında gerçekleştirilen 100 kat büyütülmüş mikroskop incelemelerinde, Şekil 5.35'te gösterildiği gibi çeki gerilmelerine maruz kalan iç yüzeylerde kısmi dekarbürizasyon görüntüleri verilmektedir. Maksimum 48 µm'ye kadar değişen kısmi karbonsuzlaşma bölgesi derinlikleri görülmektedir. Numune 4'ün iç yüzeyinde karbonsuzlaşmış bölge gözlemlenmezken, en yüksek kısmi dekarbürizasyon derinliği 48 µm ile numune 2'de hesaplanmıştır.



Şekil 5.35 Dairesel olarak hassas yüzey temizliği yapılan numunelerin kısmi dekarbürizasyon görüntüleri

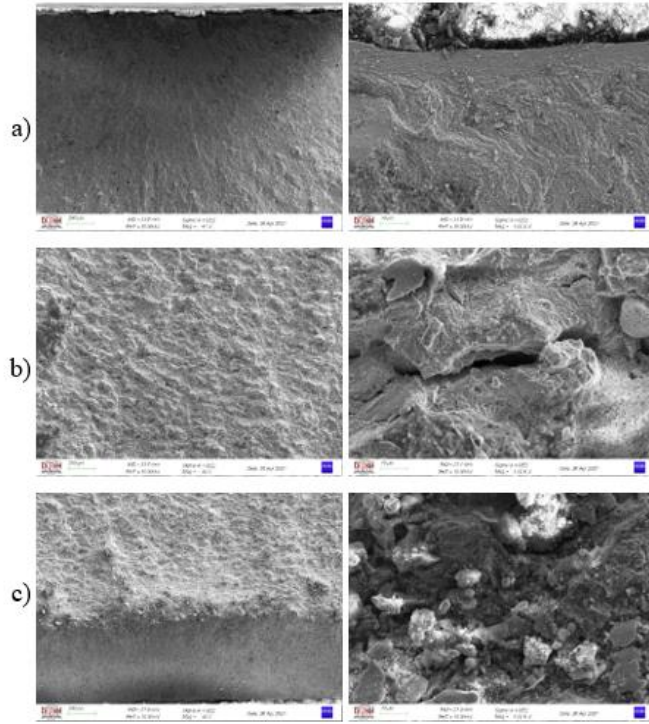
Şekil 5.36’da gösterildiği gibi mikroskop altında 200 kat büyütülmüş olarak, malzeme iç yüzeylerinde birleşik ferrit oluşumu incelemesi gerçekleştirilmiştir. Dairesel yüzey temizliği gerçekleştirilen numunelerin iç yüzeylerinde birleşik ferrit oluşumu gözlemlenmemektedir.



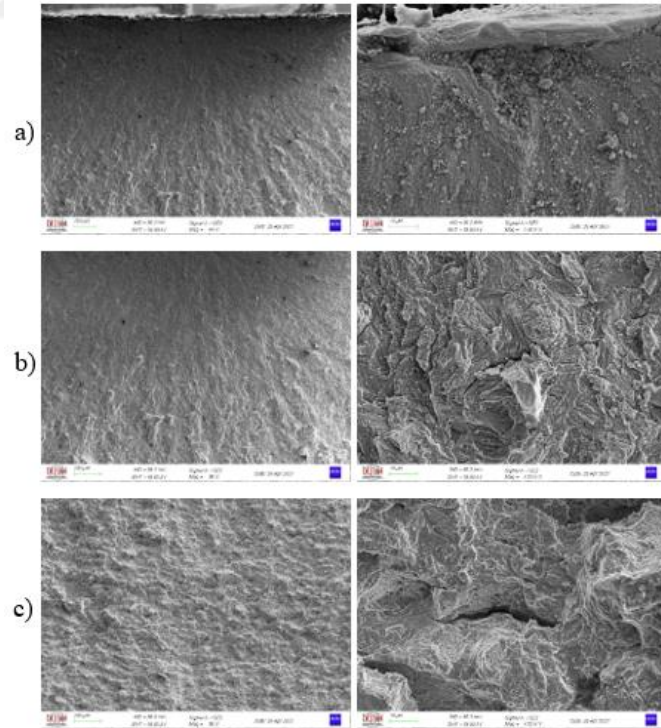
Şekil 5.36 Dairesel olarak hassas yüzey temizliği yapılan numunelerin birleşik ferrit görüntüleri

5.2.2.2.4 *Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri.* Dairesel olarak yüzey temizliği gerçekleştirilmiş numunelerin yorulma testi sonrası hasarlanan bölgeleri için hazırlanan numune kesitleri için SEM inceleme görüntüleri numune 2 için Şekil 5.37’de, numune 4 için Şekil 5.38’de, numune 5 için Şekil 5.39’da ve numune 1 için Şekil 5.40’ta gösterilmektedir.

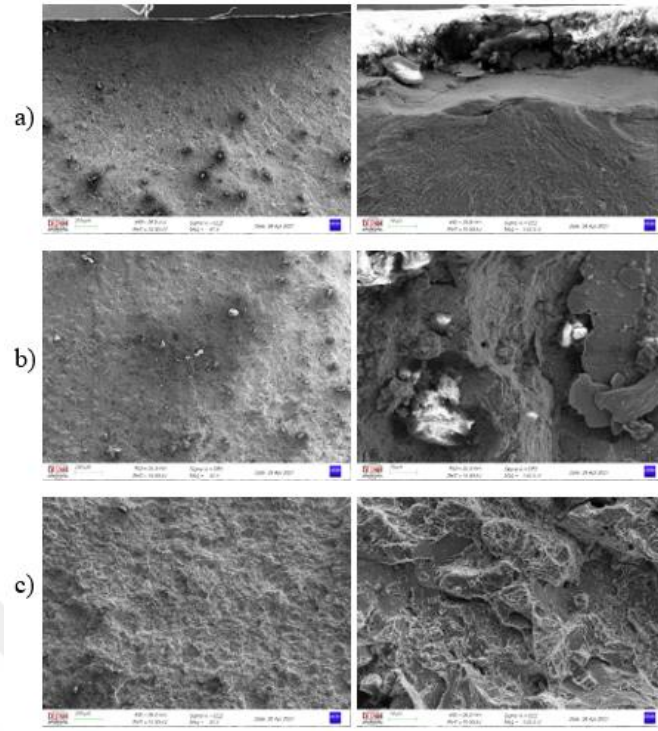
Çatlak ilerleme çizgileri hasar merkezinden ilerleme bölgesine doğru yayılmaktadır. Her ne kadar yorulma çatlak büyüme oranını gösteren mikroskopik ilerleme çizgileri oluşmasa da hasarın yorulma hasarı olduğu görülmektedir. Malzemelerin kırılma yüzeylerinde dış etken sebepli yabancı maddelere rastlanmıştır; ancak malzeme iç yapılarında inklüzyon görülmemiştir. Çatlak ilerleme bölgesinde transgranüler çatlak ilerlemesi olduğu gözlemlenmektedir. Final kırılma bölgesinde ise tıpkı boylamasına zımpara ile yüzeyi temizlenip teste alınmış yaprak yayların kırılma kesiti incelemesinde görüldüğü gibi transgranüler çatlak ilerlemesinin intergranüler çatlak ilerlemesine dönüştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum nihai kırılma bölgelerinde gevrek bir yapının oluştuğunu bize göstermektedir.



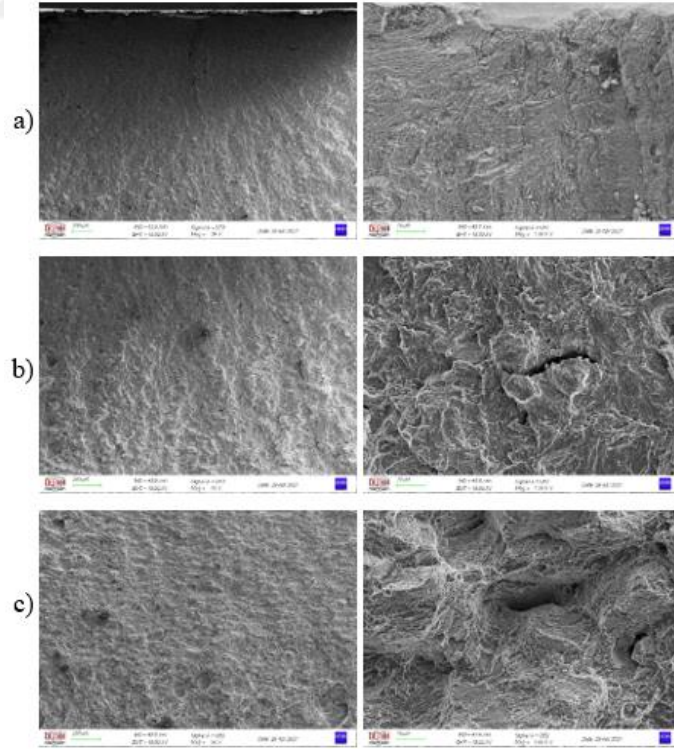
Şekil 5.37 Dairesel yüzey temizlikli numune 2 SEM görüntüsü  
a)Başlangıç bölgesi, b)İlerleme bölgesi, c)Kırılma bölgesi



Şekil 5.38 Dairesel yüzey temizlikli numune 4 SEM görüntüsü  
a)Başlangıç bölgesi, b)İlerleme bölgesi, c)Kırılma bölgesi



Şekil 5.39 Dairesel yüzey temizlikli numune 5 SEM görüntüsü  
a)Başlangıç bölgesi, b)İlerleme bölgesi, c)Kırılma bölgesi

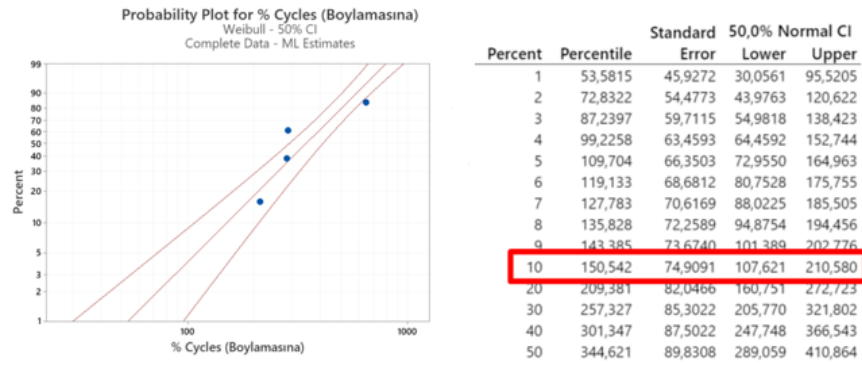


Şekil 5.40 Dairesel yüzey temizlikli numune 1 SEM görüntüsü  
a)Başlangıç bölgesi, b)İlerleme bölgesi, c)Kırılma bölgesi

Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te farklı yüzey temizlikli yaprak yayların yorulma test sonuçları bir tablo ile gösterilmektedir. Yorulma test sonuçlarına göre dairesel olarak hassas yüzey temizliği yapılmış yaprak yayların , daha az hassas olarak yüzey temizliği yapıp test edilen makaslara göre belirgin bir şekilde daha iyi ömür gösterdiği görülmektedir.

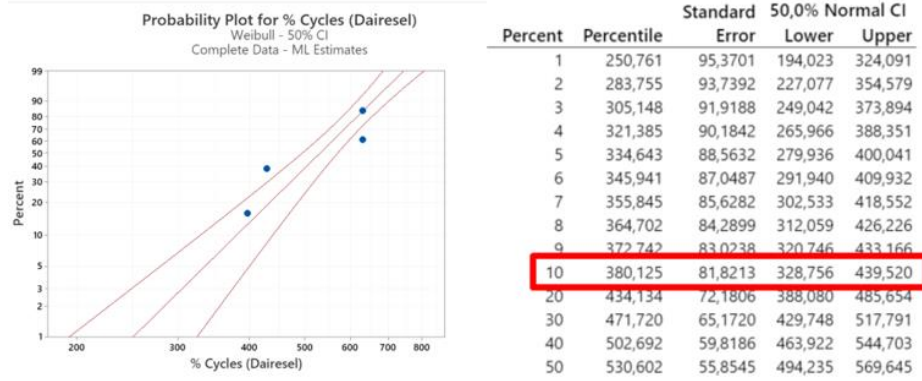
Yorulma testinden elde edilen sonuçlar istatistik yazılımı olan Minitab 20 programında “Weibull dağılımı” ile “Maximum Likelihood” metodu kullanılarak gösterilmiştir. B10 ömürleri %50 güvenilirlik seviyesinde hesaplanmış ve birbiriyle kıyaslanmıştır.

Boylamasına yüzey temizlikli numuneler için yorulma test sonuçlarının %50 güvenilirlikte Weibull dağılımları incelendiğinde B10 ömrü %107,6 hesaplanmıştır. Bu güvenilirlik seviyesinde tüm yorulma test sonuçlarının aralık içerisinde kalmadığı görülmektedir. Şekil 5.41’de boylamasına yüzey temizlikli numunelerin yorulma testi ömür sonuçlarına göre Weibull dağılımları ve %B10 ömürleri gösterilmektedir.



Şekil 5.41 Boylamasına yüzey temizlikli numuneler weibull dağılımları ve B10 ömrü

Dairesel yüzey temizlikli numuneler için yorulma test sonuçlarının %50 güvenilirlikte Weibull dağılımları incelendiğinde B10 ömrü %328,7 hesaplanmıştır. Bu güvenilirlik seviyesinde tüm yorulma test sonuçlarının aralık içerisinde kalmadığı görülmektedir. Şekil 5.42’de dairesel yüzey temizlikli numunelerin yorulma testi ömür sonuçlarına göre Weibull dağılımları ve %B10 ömürleri gösterilmektedir.

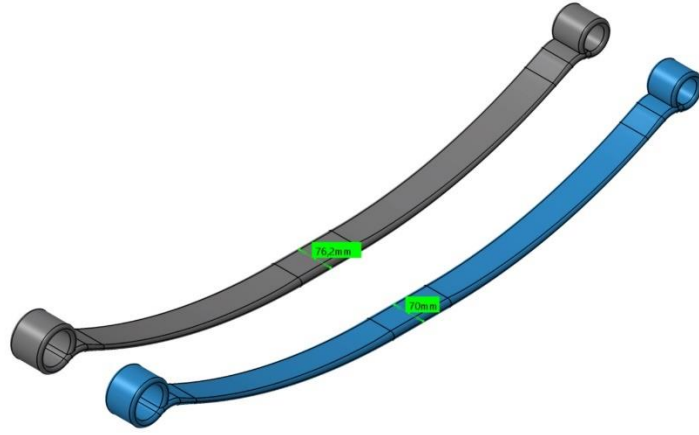


Şekil 5.42 Dairesel yüzey temizlikli numuneler weibull dağılımları ve B10 ömrü

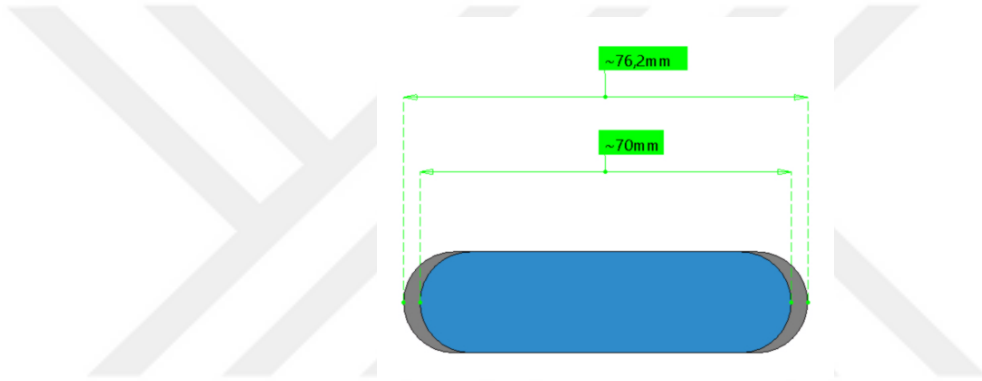
### 5.3 Yaprak Yay Genişliğinin Yay Üzerindeki Gerilmelere Etkisi

Yaprak yayların önemli tasarım parametrelerinden bir tanesi de ham malzeme genişliğidir. Yaprak yay genişliğinin etkisi, çalışma kapsamında incelenen ve test öncesi ölçümleri yapılan dairesele yüzey temizlikli numunelerden seçilen dört adet numune için Catia V5'te hazırlanan analiz modellerinin Abaqus programında statik olarak analiz edilmesi ve nCode programında gerçekleştirilen ömür incelemesi ile ortaya koyulmaktadır. Çalışma kapsamında 51CrV4 malzeme ve bu malzemeye ait SN verileri kullanılarak ömür analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında 76,2x19 mm kesit ölçülerine sahip tek katlı parabolik yaprak yaylar diğer tüm parametreleri sabit tutularak genişliği 70 mm'ye indirilmiş ve seçilen dört adet yaprak yay için analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.43 ve 5.44'te farklı genişlikteki numunelerin katı model ve kesit karşılaştırmaları gösterilmektedir.

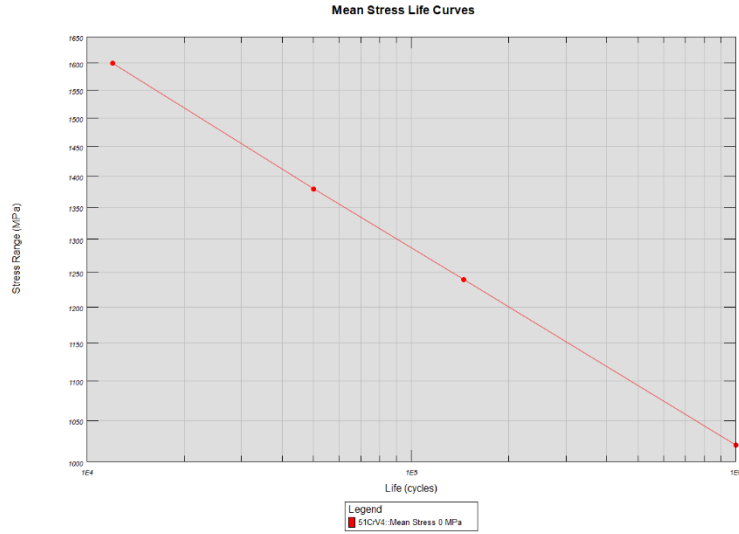


Şekil 5.43 76,2 ve 70 mm genişlikli numunelerin 3D modelleri



Şekil 5.44 76,2 ve 70 mm genişlikli kesit karşılaştırmaları

Olgun çelik bünyesinde daha önceki çalışmalar sonrasında 51CrV4 malzeme için çıkarılan Şekil 5.45'te gösterilen S-N için gerilme ve çevrim bilgileri girildikten sonra nCode programı yardımıyla 51CrV4 malzeme ile üretilen tek katlı 70 ve 76 mm genişlikli yaprak yaylara yorulma analizi gerçekleştirilmiş ve ömür bilgileri elde edilmiştir.



Şekil 5.45 51CrV4 malzeme için analiz öncesi seçilen SN grafiği

### 5.3.1 Farklı Genişliğe Sahip Numuneleri Gerilme Karşılaştırmaları

Numune 1 için gerilme sonuçları incelendiğinde ön kolda 105 MPa, arka kolda 124 MPa gerilme farkları olduğu görülmektedir. 70x19 kesitli yaprak yayda arka kolda ön kola kıyasla %14,1 oranında daha yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. 76,2x19 kesitli yaprak yayda bu oran %13,8 olarak hesaplanmıştır.

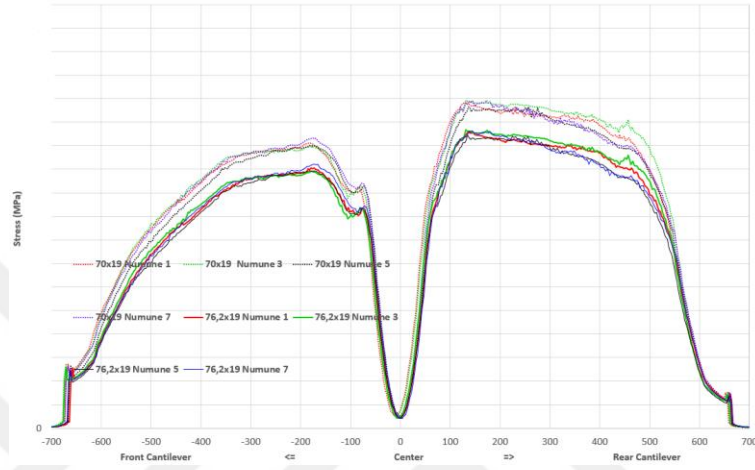
Numune 3 için gerilme sonuçları incelendiğinde ön kolda 114 MPa, arka kolda 127 MPa gerilme farkları olduğu görülmektedir. 70x19 kesitli yaprak yayda arka kolda ön kola kıyasla %15,9 oranında daha yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. 76,2x19 kesitli yaprak yayda bu oran %16,3 olarak hesaplanmıştır.

Numune 5 için gerilme sonuçları incelendiğinde ön kolda 106 MPa, arka kolda 120 MPa gerilme farkları olduğu görülmektedir. 70x19 kesitli yaprak yayda arka kolda ön kola kıyasla %13,8 oranında daha yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. 76,2x19 kesitli yaprak yayda bu oran %13,9 olarak hesaplanmıştır.

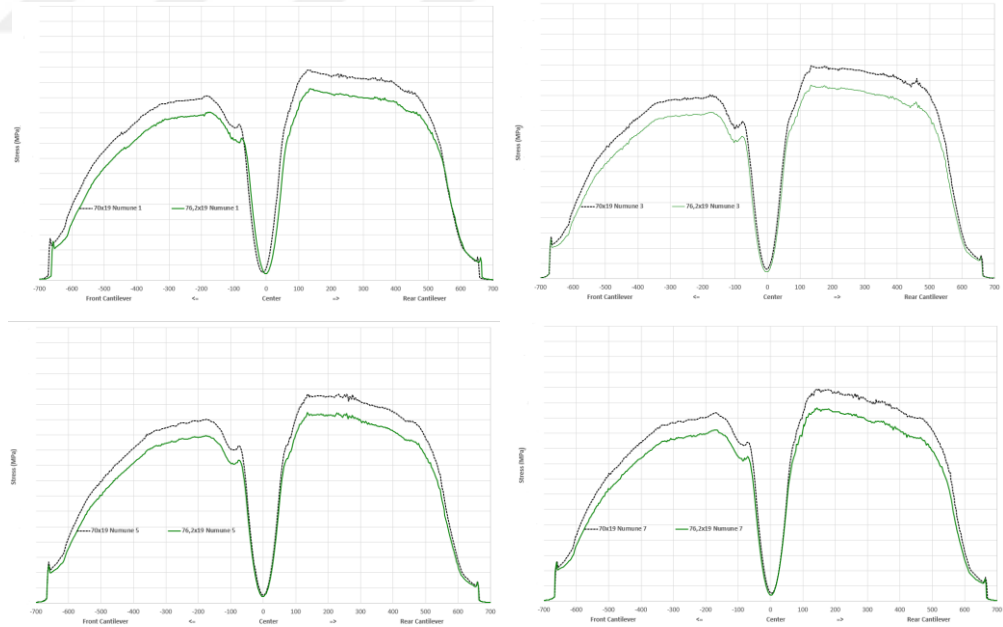
Numune 7 için gerilme sonuçları incelendiğinde ön kolda 112 MPa, arka kolda 127 MPa gerilme farkları olduğu görülmektedir. 70x19 kesitli yaprak yayda arka kolda

ön kola kıyasla %12,8 oranında daha yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. 76,2x19 kesitli yaprak yayda bu oran %12,7 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.46'da karşılaştırmalı olarak tüm numunelerin gerilme dağılımları, Şekil 5.47'de ise katların ayrı ayrı gerilme dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 5.46 Numunelerin gerilme karşılaştırma grafiği

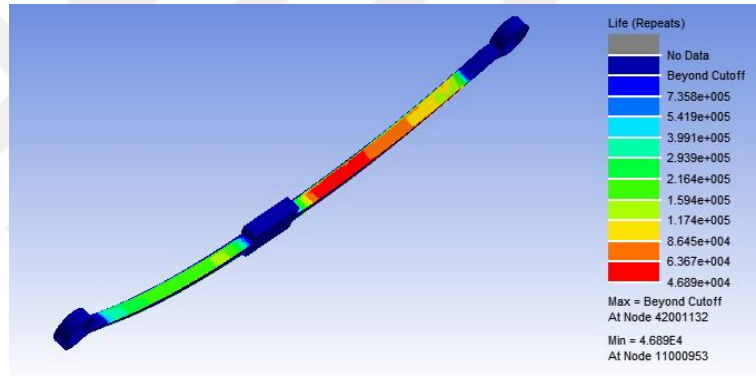


Şekil 5.47 Numunelerin gerilme grafikleri

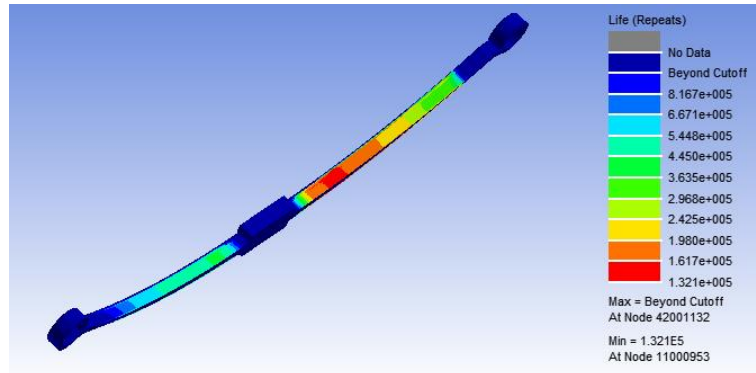
### 5.3.2 Farklı Genişliğe Sahip Numuneleri Yorulma Ömür Karşılaştırmaları

İncelenecek numuneler için y eksenı yönünde yay simetrik olduğu için analizleri hızlandırmak adına makas modelinin y ekseninde boylamasına yarısı alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Numune 1 için gerçekleştirilen analizler sonrasında 70 mm genişlikli numunenin arka kol tarafında minimum ömür değeri olarak 46890 çevrim okunmuştur. 76,2 mm genişlikli numune için ömür değeri incelendiğinde minimum ömür değeri 132100 çevrimde arka kol tarafında olduğu görülmektedir. Şekil 5.48 ve 5.49’da iki farklı genişlik değeri için ömür değeri gösterildiği nCode görüntüleri gösterilmektedir.

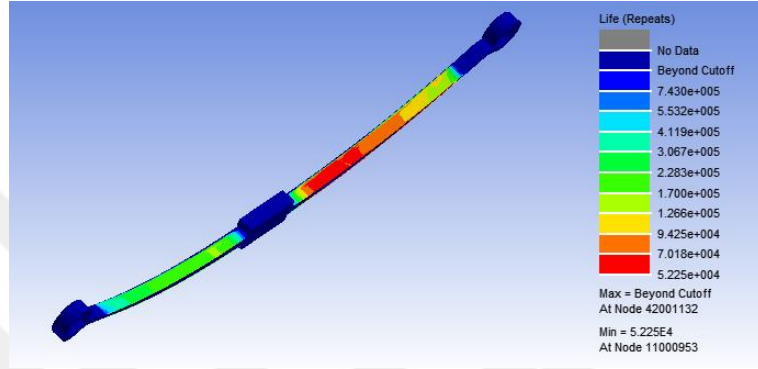


Şekil 5.48 70 mm genişlikli numune 1 için ömür sonuçları

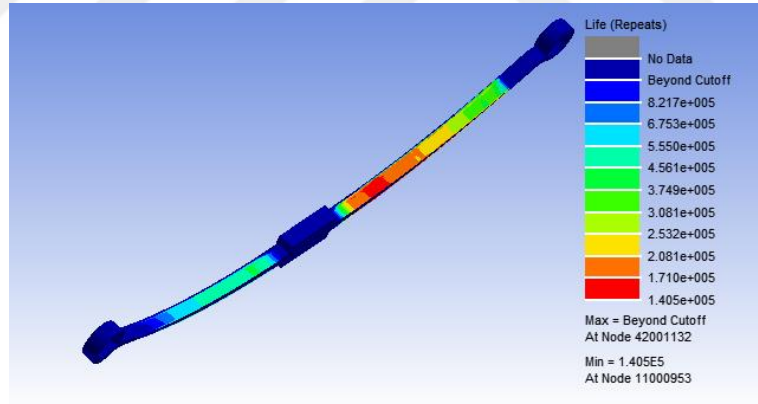


Şekil 5.49 76,2 mm genişlikli numune 1 için ömür sonuçları

Numune 3 için gerçekleştirilen analizler sonrasında 70 mm genişlikli numunenin arka kol tarafında minimum ömür değeri olarak 52250 çevrim okunmuştur. 76,2 mm genişlikli numune için ömür değerleri incelendiğinde minimum ömür değerinin 140500 çevrimde arka kol tarafında olduğu görülmektedir. Şekil 5.50 ve 5.51’de iki farklı genişlik değeri için ömür değerlerinin gösterildiği nCode görüntüleri gösterilmektedir.

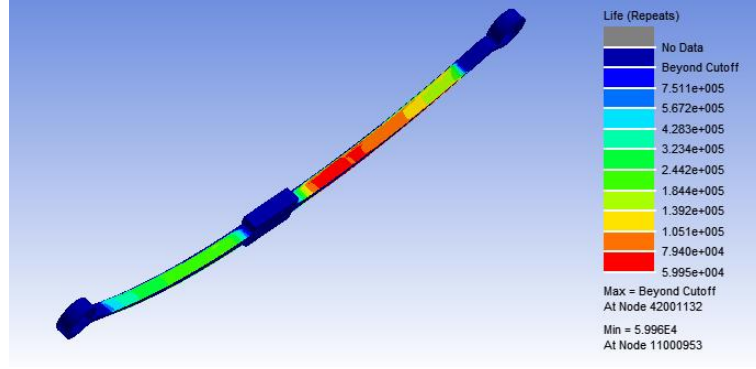


Şekil 5.50 70 mm genişlikli numune 3 için ömür sonuçları

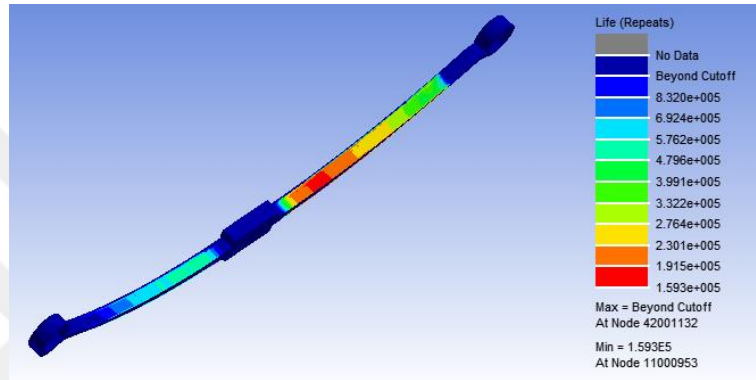


Şekil 5.51 76,2 mm genişlikli numune 3 için ömür sonuçları

Numune 5 için gerçekleştirilen analizler sonrasında 70 mm genişlikli numunenin arka kol tarafında minimum ömür değeri olarak 59950 çevrim okunmuştur. 76,2 mm genişlikli numune için ömür değerleri incelendiğinde minimum ömür değerinin 159300 çevrimde arka kol tarafında olduğu görülmektedir. Şekil 5.52 ve 5.53’te iki farklı genişlik değeri için ömür değerlerinin gösterildiği nCode görüntüleri gösterilmektedir.

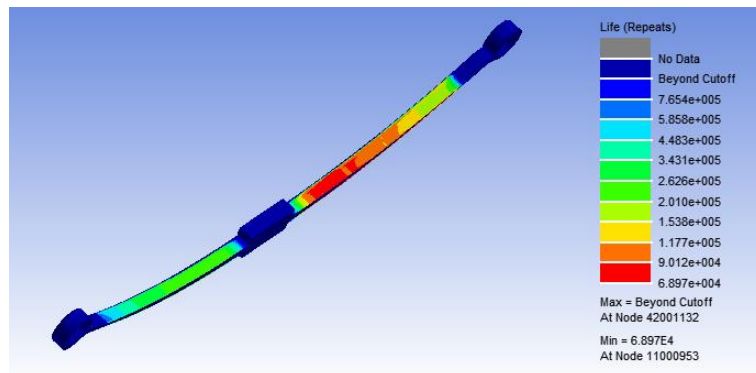


Şekil 5.52 70 mm genişlikli numune 5 için ömür sonuçları

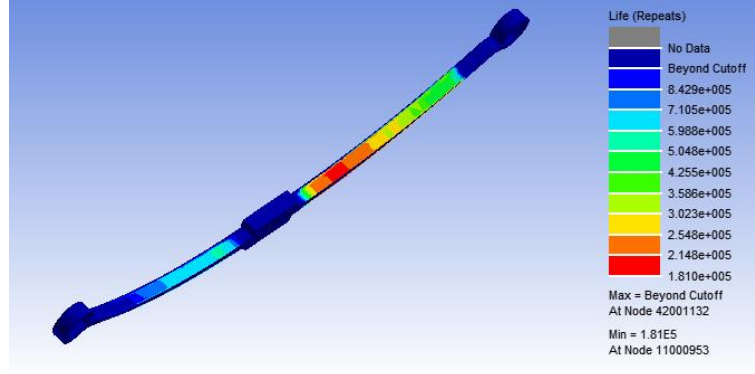


Şekil 5.53 76,2 mm genişlikli numune 5 için ömür sonuçları

Numune 7 için gerçekleştirilen analizler sonrasında 70 mm genişlikli numunenin arka kol tarafında minimum ömür değeri olarak 68970 çevrim okunmuştur. 76,2 mm genişlikli numune için ömür değerleri incelendiğinde minimum ömür değerinin 181000 çevrimde arka kol tarafında olduğu görülmektedir. Şekil 5.54 ve 5.55'te iki farklı genişlik değeri için ömür değerlerinin gösterildiği nCode görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.54 70 mm genişlikli numune 7 için ömür sonuçları



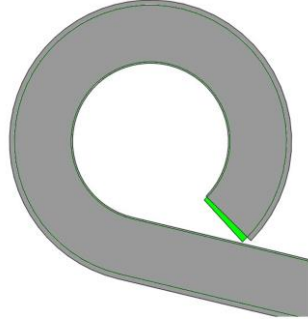
Şekil 5.55 76,2 mm genişlikli numune 7 için ömür sonuçları

Tüm numuneler için farklı genişlik değerleri için hasar bölgeleri gerilme grafiğine göre değerlendirildiğinde, nCode programına göre gerilmelerin en yüksek olduğu bölgede hasarlanmanın gerçekleşeceği öngörülmektedir.

#### 5.4 Yaprak Yay Göz Kalınlığının Yaprak Yayın Yorulma Ömrüne Etkisini Araştırılması

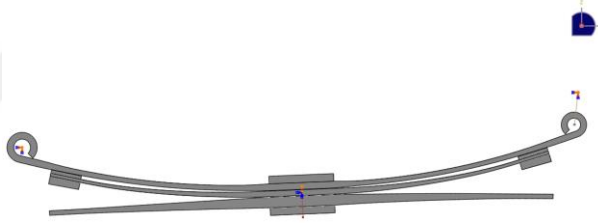
Yaprak yayların önemli tasarım parametrelerinden bir tanesi de parabolik hadde kalınlık dağılımıdır. Yaprak yayların karakteristik özelliklerinin belirlenmesi süreci parabolik kalınlık dağılımlarına göre şekillenmektedir. Uygun katılık oranı ve yaprak yaylar üzerinde oluşan gerilme yığılması bölgelerine göre uygun kalınlık dağılımına göre tasarım yapmak oldukça önem arz etmektedir. Bu doğrultuda yaprak yaylarda özellikle frenleme sırasında fren yükü kaynaklı göz bölgesinde hasarlanmalar meydana gelebilmektedir. Göz bölgesinde gerçekleşecek bir hasar araç ve yolcu güvenliği bakımından oldukça kritiktir. Bu sebeple göz et kalınlığının kritik gerilme değerlerinin üzerine çıkmaması ve kalınlık değerinin belli bir minimum değer üzerinde tutulması makas üreticileri tarafından üstünde durulması gereken konulardan bir tanesidir.

Çalışma kapsamında parabolik 2+1 katlı yaprak yaylar üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Göz et kalınlığı mevcut tasarımda 2 mm artırılarak karşılaştırma yapılmıştır. Makasların göz et kalınlık farkının gösterildiği üst üste koyulmuş yaprak yay göz bölgesi görüntüsü Şekil 5.56'da gösterilmektedir.



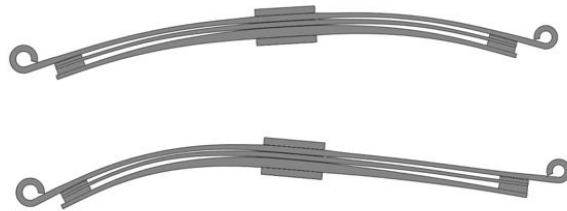
Şekil 5.56 Yaprak yay göz bölgesi kalınlık karşılaştırılması

Yaprak yay analizleri sonlu elemanlar analiz programı olan Abaqus'te gerçekleştirilmiştir. Analiz modeli hazırlandıktan sonra Şekil 5.57'de gösterildiği gibi sınır koşulları belirlenmiştir. Ön göz tarafında y eksenin dönmeye izin verilirken diğer yönlerde hareket kısıtlanmıştır. Arka göz tarafında makas küpesi belirlenmiş, yaprak yayın y yönünde dönme hareketi ve x yönündeki hareketi serbest bırakılmıştır. Diğer yönlerde ise sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.57 İnceleme gerçekleştirilen 2+1 yaprak yay sınır koşulları

Şekil 5.58'de yaprak yayın ani öne frenleme durumunu simüle edecek şekilde + x yönünde 12000 Newton ve + z yönünde 16000 N kuvvet uygulanmış görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.58 Fren yükü uygulanmış 2+1 yaprak yay

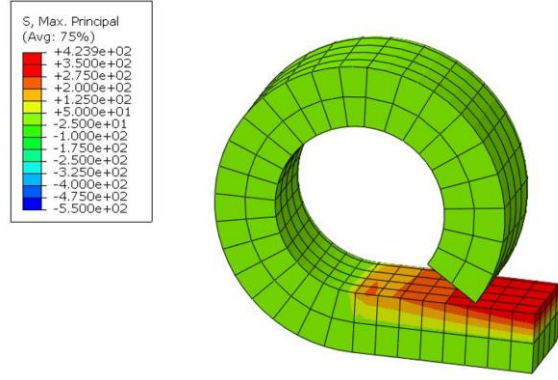
51CrV4 malzeme ile üretilen yaprak yay göz bölgesine uygulanan farklı gerilme genlikli yüklemeler için geçmişte elde edilen veriler ile oluşturulup nCode analizlerinde kullanılan SN Şekil 5.59’da gösterilmektedir.



Şekil 5.59 51CrV4 malzeme için göz bölgesi S-N grafiği

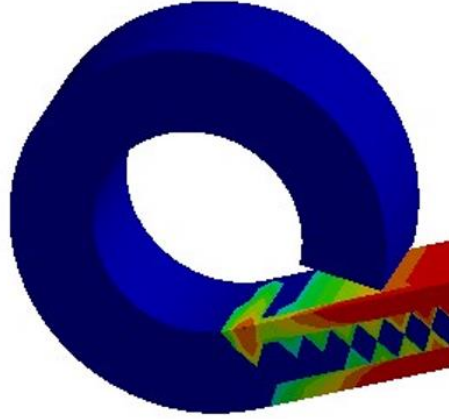
#### 5.4.1 Göz kalınlığı ince olan 2+1 yaprak yayın gerilme ve hasar analizi

51CrV4 malzemedan üretilen 90x23 DIN EN 10092 1-A kesitli parabolik yaprak yay öncelikle statik kuvvet uygulanarak analiz edilmiştir. Mevcut tasarım göz bölgesinde yaklaşık 424 MPa’a yaklaşan gerilmeler okunduğu Şekil 5.60’ta gösterilmektedir.



Şekil 5.60 Mevcut makas tasarımı göz bölgesi maksimum asal gerilmeler

Statik olarak gerilmeler incelendikten sonra 51CrV4 malzeme ile üretilen yaprak yay göz bölgesi için daha önceden oluşturulmuş S-N verileri nCode programına girildikten sonra hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Fren yükü durumunda yorulma açısından kritik bölgeler Şekil 5.61’de kırmızı renklendirme ile gösterilmektedir. Bu kalınlık için yaprak yayın 44540 çevrimde göz bölgesinden hasarlandığı görülmektedir.

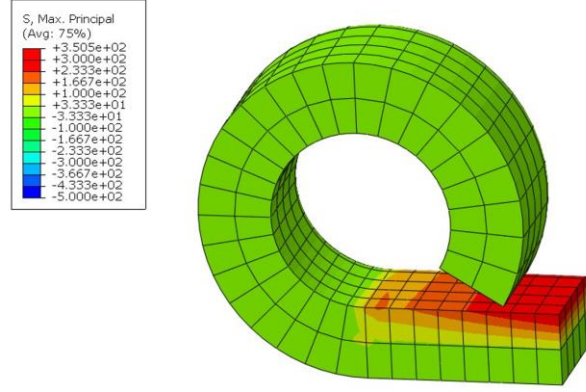


Şekil 5.61 Mevcut tasarım için yaprak yay göz bölgesi hasar analizi

#### 5.4.2 Göz kalınlığı 2 mm artırılan 2+1 yaprak yayın gerilme ve hasar analizi

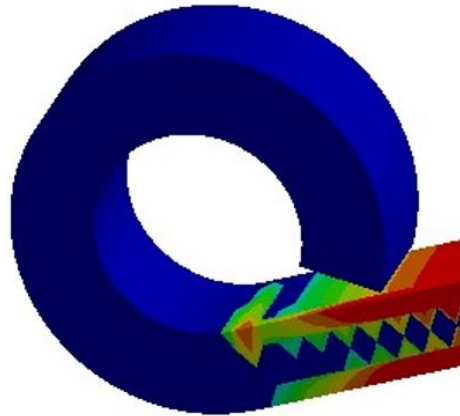
Analizleri gerçekleştirilen parabolik yaprak yay gerilmeleri 350 MPa üzerinde çıkmıştır. Kritik değerin üzerinde hesaplanan gerilmeler sonrası göz kalınlığı 2 mm artırılmış ve yeni tasarım statik kuvvet uygulanarak tekrar analiz edilmiştir. Göz

bölgesinde gerilmeler yaklaşık 350 MPa'a kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 5.62'de analiz sonucu kritik gerilme bölgeleri gösterilmektedir.



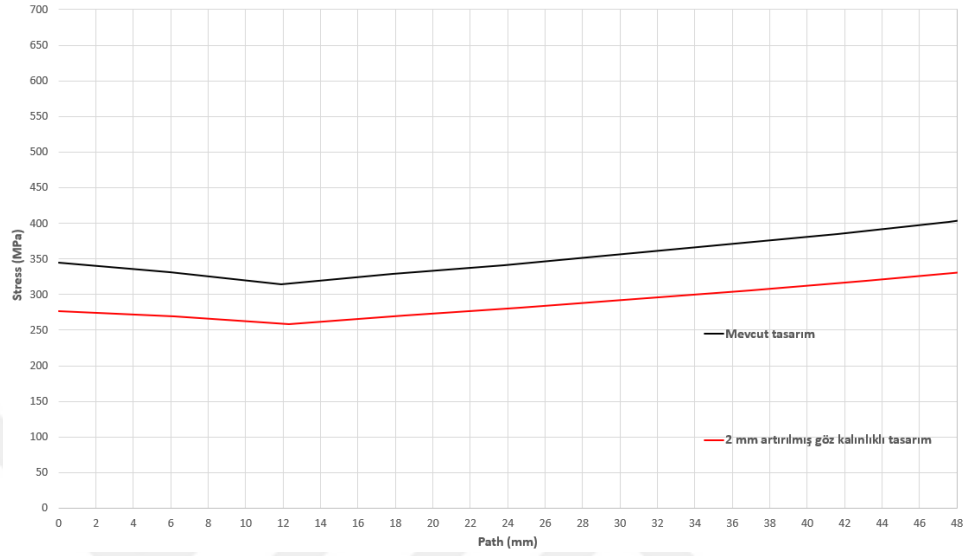
Şekil 5.62 2 mm artırılmış göz kalınlıklı yaprak yay maksimum asal gerilmeler

Statik olarak gerilmeler incelendikten sonra 51CrV4 malzeme ile üretilen yaprak yay göz bölgesi için daha önceden oluşturulmuş S-N verileri nCode programına girildikten sonra hasar analizi 2 mm artırılmış göz kalınlıklı tasarım için tekrarlanmıştır. Fren yükü durumunda yorulma açısından kritik bölgeler Şekil 5.63'te kırmızı renklendirme ile gösterilmektedir. Bu kalınlık için yaprak yayın 58540 çevrimde göz bölgesinden hasarlandığı görülmektedir.



Şekil 5.63 2 mm artırılmış göz kalınlıklı yaprak yay nCode hasar analizi

Şekil 5.64'te göz merkezinden başlayarak yaprak yayın merkez düzlüğü doğrultusunda olacak şekilde 2 mm aralıklarla okunan gerilme değerleri mevcut tasarım ve 2 mm kalınlaştırılmış tasarım için gösterilmektedir.



Şekil 5.64 Mevcut ve yeni tasarımlarda farklı göz kalınlıkları için göz bölgesi gerilme karşılaştırması

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Deneysel çalışmaların ilk bölümünde önemli bir tasarım parametresi olan  $R_z$  yüzey pürüzlülüğünün artık gerilmeler üzerindeki etkisi 76,2x19 DIN EN 10092-1 A profil ve 51CrV4 malzemeli lamadan üretilen tek katlı parabolik yaprak yay üzerinde incelenmiştir. İnceleme kapsamında enine ve boyuna yüzey pürüzlülükleri kumlama öncesi ve kumlama sonrası olmak yüzey temizliksiz ve farklı yüzey temizliği uygulanmış yaprak yay yüzeylerinde ölçülmüştür. Kumlama öncesinde boyuna gerçekleştirilen pürüzlülük ölçümlerinde dairesel flap disk ile yüzey temizliği gerçekleştirilen yüzeylerde  $R_z$  olarak %19 ile %42 arasında değişen oranlarla daha hassas yüzeyler elde edilirken, enine  $R_z$  pürüzlülük ölçüm sonuçları incelendiğinde bu oranın %20 ile %79 arasında değiştiği görülmektedir. Boylamasına temizlik gerçekleştirilen numunelerde yüzey temizliksiz numunelere göre boylamasına ve enine  $R_z$  pürüzlülük ölçümlerinde kesin bir yargıya varılamadığı, değişkenliklerin çok fazla olduğu görülmüştür. Gerilim altında gerçekleştirilen kumlama sonrasında farklı yöntemlerle gerçekleştirilen zımpara işlemleri için  $R_z$  pürüzlülük değerleri arasındaki fark kapansa da, dairesel flap disk ile yüzey temizlenen makaslarda boylamasına yüzey temizlikli makaslara kıyasla boylamasına  $R_z$  pürüzlülük ölçümlerinde %5 ile %20, enine pürüzlülük ölçümlerinde %9 ile %26 arasında daha hassas yüzeyler elde edildiği görülmüştür. Dairesel flap disk kullanılarak yüzey temizliği gerçekleştirilen yüzeylerde kumlama öncesi ve sonrası boylamasına zımpara ile yüzey temizliği gerçekleştirilen yüzeylere kıyasla daha hassas yüzeyler elde edildiği görülmüştür. Dairesel olarak yüzey temizliği gerçekleştirilen numunelerde özellikle enine pürüzlülük ölçümlerinde daha da hassas yüzeyler elde edilmektedir. Bu durum boylamasına temizlik sonrası 60 kat büyütülmüş incelemelerde gözlemlenen boylamasına yüzey izleri sebepli olduğu söylenebilir.

Gerilim altında kumlama sonrası derinlikte artık gerilmeler x ışınımı kırılımı yöntemi ile hesaplanmıştır. Hiç yüzey temizlenmemiş numuneye göre gerçekleştirilen karşılaştırmalarda, dairesel olarak hassas yüzey temizliği gerçekleştirilen yaprak yay yüzeylerinde 50  $\mu\text{m}$ 'ye kadar hem yüzey temizliksiz hem de boylamasına temizlikli

numunelere göre daha fazla bası artık gerilmesi oluşturulabildiği gözlemlenmiştir. 100 µm derinlikte her iki yüzey temizlik işlemi için benzer bası artık gerilmeleri gözlemlenirken 500 µm derinliğe kadar artık gerilmelerdeki düşüşün benzer bir trend ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Dairesel olarak hassas temizlik gerçekleştirilen yüzeylerde oluşan ve sertliğin görece daha düşük olduğu karbonsuzlaşmış bölge derinliğinin daha az hassas boylamasına zımpara hareketi ile gerçekleştirilen temizlikli yüzeylere kıyasla daha düşük olduğu gerçekleştirilen malzeme incelemeleri sonrası ortaya konulmuştur. Bu da dairesel olarak hassas temizlik işlemi sonrası özellikle yüzeye yakın bölgelerde daha fazla bası artık gerilmesini açıklamaktadır.

Çalışmanın ilk bölümünde yüzey hassasiyetinin artık gerilmelere etkisi ortaya konulduktan sonra ikinci bölümünde yüzey pürüzlülüğü etkisiyle malzeme yorulma ömründeki değişim tezgah testleri ile ortaya konulmuştur. 51B60H ham malzemeli DIN EN 10092-1 A kesitli lamadan üretilmiş tek katlı parabolik yaprak yay için farklı yüzey temizlik işlemleri ile üretim gerçekleştirilmiş ve üretilen yaprak yaylar düşey yorulma testine alınmıştır. Yorulma testleri sonrası elde edilen ömür değerleri için %50 güvenilirlikte B10 ömürleri karşılaştırılmıştır. Dairesel yüzey temizlikli numuneler için yorulma test sonuçlarının %50 güvenilirlikte *Weibull* dağılımları incelendiğinde B10 ömrü %328,7 hesaplanmıştır. Boylamasına yüzey temizlikli numuneler için bu değer %107,6 hesaplanmıştır. Daha hassas yüzey temizliği yapıp teste alınan yaprak yaylarda yaklaşık olarak 3 kat daha yüksek ömür gösterdiği görülmüştür. Malzeme kırılma kesitleri SEM incelemeleri sonrası tüm hasarların yaprak yayların çeki gerilmelerine maruz iç yüzeylerinde başladığı görülmektedir. SEM incelemelerinde ayrıca yorulma çatlağının üç aşaması olan başlangıç, ilerleme ve nihai kırılma aşamaları gözlemlenmiştir. Çatlak ilerlemesinin nihai kırılma bölgesinde transgranülerden intergranüler yapıya dönüştüğü ve kırılmanın gevrek olarak gerçekleştiği yorumlanabilmektedir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde yaprak yayların önemli tasarım parametrelerinden olan ham malzeme genişliği değerinin yaprak yay üzerinde oluşan gerilmelere ve yorulma ömrüne etkisi bilgisayar destekli programlar yardımıyla incelenmiştir. İncelemeler sonrasında yaprak yay genişliği 76,2 mm'den 70 mm'ye düştüğünde

bununla birlikte yaprak yay üzerinde oluşan gerilmelerde artış olduğu, ancak yaprak yay üzerindeki gerilme dağılımlarının değişmediği gözlemlenmiştir. Yorulma ömürleri incelendiğinde 76,2 mm geniş kesitli yaprak yaylarda görece daha yüksek ömür değerleri gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmaların son bölümünde yaprak yayların önemli tasarım parametrelerinden bir tanesi olan göz bölgesi kalınlığının özellikle frenleme sırasında göz kırılmalarına yol açabileceği bilinmekle birlikte göz bölgesindeki 2 mm'lik kalınlık değişiminin gerilmelerde ve yaprak yay yorulma ömründe yaratacağı etkiler incelenmiştir. Göz bölgesi kalınlık değeri 2 mm kalınlaştırılan yaprak yay için gerilme seviyelerinin yaklaşık 424 MPa'dan, 350 MPa seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu değer Hotchkiss tip süspansiyonlar berlin göz bölgesi gerilme sınır değeri olan 350 MPa'ı sağlayan bir değerdir. 51CrV4 malzeme için göz SN'ine göre nCode'da hesaplanan ömür değerleri incelendiğinde, 2 mm daha kalın göz kalınlığına sahip yaprak yayda 44540 çevrimden 58540 çevrime çıkan değerler gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

Bakir M., Siktas M. ve Atamer S. (2014). Comprehensive durability assesment of leaf spring with CAE method, The Society of Automotive Engineering (SAE) *Technical Paper*. No 2014-01-2297.

Bathias C. (2013). *Fatigue limit in metals*, (1. Baskı), İngiltere: Wiley Iste.

Bhuvaraghan B., Srinivasan S.M. ve Maffeo B. (2010). Optimization of the fatigue strength of materials due tos hot peening, *The International Journal of Structural Changes in Solids - Mechanics and Applications*, 2(2), 33-63.

Chavhan R. G. ve Wankhade L. N. (2019). Experimental analysis of E-glass/epoxy composite-material leaf spring used in automotive, *Materials Today: Proceedings*, 26, 373-377.

Çelik Granül Sanayi A.Ş. (2002). Etkin temizlik için aşındırıcı seçimi, *Teknik Bülten*, (2), 1-4.

Çemtaş Teknik Yayınlar-I Arge Kitabı, (bt). 02 Eylül 2021, [http://www.cemtas.com.tr/images/uploads/598f77bccbb74bf6980afb2e52b9b42c\\_cemtas\\_arge\\_kitap\\_8.pdf](http://www.cemtas.com.tr/images/uploads/598f77bccbb74bf6980afb2e52b9b42c_cemtas_arge_kitap_8.pdf).

Demir T. (bt). *Yüzey işaretleri*. Ders Notları, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.

Deutsches Institut für Normung (DIN). (2003). *Hot rolled spring steel flat bars*. (No: 10092-1)

Dishant, Singh R. ve Sharma M. (2017). Suspension Systems: A Review, 2017, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4, 1377-1382.

Heiing, B., ve Ersoy, M. (2011). *Chassis handbook*, (2. Baskı), Almanya: Vieweg & Teubner Verlag.

*Fatigue Theory Reference Manuel*, (2002). 03 Eylül 2021, <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/FesafePdf/FesafeFatigueTheory.pdf>

Goodarzi A., ve Khajepour A. (2017). *Vehicle suspension system technology and design*, (1. Baskı), Kanada: Morgan & Claypool.

Güven N. (2011). *Bir ticari aracın süspansiyon sistemi için yaprak yay tasarımı gelitirmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Higounenc O. (2005). Correlation of shot peening parameters to surface characteristic, *International Congress on Shot Peening-9 : Paris*, Fransa, 28-35.

Institute of Spring Technology, (2004). *Spring design training course manual*, 20-30 November.

Karaagac, M., Soner, M., Togay, A., Keskin, A., Yildiz, S., Tekin, E., ve Diğer. (2013). Decarburization effects on fatigue behavior of leaf spring material, *The Society of Automotive Engineering (SAE) Technical Paper*. No. 2013-01-0392.

Kelebek O. (2017). *Ağır ticari araçlarda kullanılan çok katlı konvansiyonel yaprak yay yerine tek katlı parabolik yaprak yayın bilgisayar destekli tasarımı ve analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Lajqi S. (2013). *Suspension and steering system development of a four wheel drive and four wheel steered terrain vehicle*, Doktora Tezi, University of Maribor, Slovenya.

Lemaitre J. ve Desmorat R. (2005). *Engineering damage mechanics*, (1. Baskı), Hollanda: Springer Science & Business Media.

Maloch M. ve Cornak S. (2019). Study of prestressed multi-leaf apring behavior in terms of tandem bogie layout with utilization of FEM, *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, IEEE , Çek Cumhuriyeti, 1-5.

Maurer M.T. (2017). *Statistical analysis of fatigue data in mechanical engineering*, Yüksek Lisans Tezi, Graz University of Technology, Graz.

*MetFin Shotblast Systems*, (bt). 02 Eylül 2021, <https://metfin.com/abrasive-media-options/>.

Milli Eğitim Bakanlığı (2005). *Süspansiyon sistemleri*, MEGEP (Meslekî Eğitim ve Öğretim Sistemini Güçlendirme Projesi), Ankara.

Milli Eğitim Bakanlığı (2013). *Motorlu araçlar teknolojisi, süspansiyon sistemleri*, Ankara.

Mohyaldeen H. M. (2011). *Analysis of an automobile suspension arm using the robust design method*, Doktora Tezi, University Malaysia Pahang, Malezya

*Olgun Çelik A.Ş. Suspension Basics*, (bt). 05 Eylül 2021, İç döküman

Pook L. (2007). *Metal Fatigue: What it is, why it matters*, (1. Baskı), Hollanda: Springer.

Qiao P. ve Yang M. (2006). Fatigue Life Prediction of Pultruded E-Glass/Polyurethane Composites, *Journal of Composite Materials*, 40(9), 815-837.

Reimpell J., Stoll H. ve Betzler J. W. (2001). *The Automotive Chassis: Engineering principles*, (2. Baskı), Oxford: Butterworth-Heinemann.

SAE Spring Commitee (1990). *Spring design manuel*, (1. Baskı), Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc.

Sahlani A. A., Khaleel H. H., ve Khashan M. K. (2018). Design and analysis of coil spring in vehicles using finite elements method, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 8(4), 615-624.

Schijve J. (2003). Fatigue of Structures and Materials, *International Journal of Fatigue*, 25(8), 679–702.

*Sigma*, (2021). <http://www.sspst.com/icerik/goTo/8/kumlama-nedir-nasil-yapilir.html>, 2021

Soner M., Güven M., Güven N., Erdoğan T. Karaağaç M. ve Kanbalaat A. (2011). Parabolic leaf spring fatigue considering braking wind up evaluations, *The Society of Automotive Engineering (SAE) Technical Paper*. No. 2011-01-2168.

Soner M., Güven M., Özçelik G. Tokgönül S.G., Erdoğan T., Karaağaç M. ve diğer. (2013). Effect of leaf spring on suspension and steering system, *The Society of Automotive Engineering (SAE) Technical Paper*. No. 2013-01-1203.

Soner M., Tanoğlu M., Güven N., Karaağaç M., Akyalı R., Aksoy O. ve diğer. (2012). Design and fatigue life comparison of steel and composite leaf spring, *The Society of Automotive Engineering (SAE) Technical Paper*. No. 2012-01-0944.

Stephens R.I., Fatemi A., Stephens R.R. ve Fuchs H.O. (2001). *Metal fatigue in engineering*, (2. Baskı), Kanada: John Wiley & Sons.

Stone R. ve Ball J. K. (2004). *Automotive Engineering Fundamentals*, (pp. i-xv) Warrendale: Society of Automotive Engineers.

Tu S.T. ve Zhang X.C. (2016). Fatigue crack initiation mechanism, *Reference Module in Materials Science and Material Engineering*, 1-23.

Yamada Y. (2007). *Materials for springs*, Japonya: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Wikipedia, (bt). 02 Eylül 2021, [https://en.wikipedia.org/wiki/Car\\_suspension](https://en.wikipedia.org/wiki/Car_suspension)

Yoo S., Park J. ve Lim J. (2007). Fatigue strength evaluation for the leaf spring of commercial vehicle considering U bolt fixing force, *The Society of Automotive Engineering (SAE) Technical Paper*. No. 2007-01-0853.

