**T.C.**
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN PARABOLİK YAPRAK YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**UFUK TANER CEYHANLI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**
**KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN**
**DOÇ. DR. MEHMET BOZCA**

**İSTANBUL, 2016**

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN PARABOLİK YAPRAK YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ufuk Taner CEYHANLI tarafından hazırlanan tez çalışması 22.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Mehmet BOZCA

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Mehmet BOZCA

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Muharrem E. BOĞOÇLU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Erol AKATA

İstanbul Aydın Üniversitesi _____

# ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezimin hazırlanmasında bana yardımcı olan, makine mühendisliği alanında derin akademik tecrübeye sahip ve değerli desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen yüksek lisans tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet Bozca'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bana desteklerini ve iş hayatımda tavsiyelerini paylaşan değerli ekip liderim, meslektaşım Sezer YAHYAOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Eğitimim boyunca beni destekleyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

Kasım, 2016

Ufuk Taner CEYHANLI

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ ..... vii

KISALTMALAR ..... viii

ŞEKİL LİSTESİ ..... ix

ÇİZELGE LİSTESİ ..... xi

ÖZET ..... xii

ABSTRACT ..... xiii

BÖLÜM 1

GİRİŞ ..... 1

1.1 Literatür Özeti ..... 1

1.2 Tezin Amacı ..... 6

1.3 Hipotez ..... 6

BÖLÜM 2

YAPRAK YAYLAR ..... 7

2.1 Yaprak Yayların Yapısı ..... 7

2.2 Yaprak Yay Çeşitleri ..... 8

2.2.1 Parabolik Yaprak Yaylar ..... 8

2.2.2 Konvansiyonel Yaprak Yaylar ..... 9

2.2.3 Havalı Süspansiyon Yaprak Yayları ..... 10

2.3 Ağır Ticari Araçlarda Kullanılan Yaprak Yaylar ..... 11

2.4 Parabolik ve Konvansiyonel Yaprak Yayların Karşılaştırması ..... 11

2.5 Yaprak Yay Yapımında Kullanılan Malzemeler ..... 13

2.6 Yaprak Yay Üretimi ..... 13

BÖLÜM 3

SEÇİLEN PARÇA BİLGİLERİ ..... 14

3.1 Malzeme Bilgileri ..... 15

3.2 Parçanın İmalatı ..... 15

BÖLÜM 4

PARABOLİK YAPRAK YAYIN MUKAVEMET HESABI ..... 18

4.1 Tasarım Yüküne Göre Mukavemet Hesabı: ..... 18

4.2 Maksimum Yüke göre mukavemet hesabı: ..... 20

BÖLÜM 5

PARABOLİK YAPRAK YAYIN 3 BOYUTLU MODELLENMESİ ..... 21

5.1 Oluşturulan 3 Boyutlu Modelin Doğrulanması ..... 22

BÖLÜM 6

PARABOLİK YAPRAK YAYIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ..... 24

6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ..... 24

6.2 Parçanın Mesh Modelinin Oluşturulması ..... 25

6.3 Parçanın Dizayn Yüküne Göre Analizi ..... 26

6.4 Parçanın Maksimum Yüke Göre Analizi ..... 27

BÖLÜM 7

YORULMA ..... 29

7.1 Yorulma Testi ..... 30

7.1.1 Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi ..... 31

7.1.2 Gerilme-çevrim sayısı (S/N) eğrisi ..... 32

7.2 Yorulma Olayının Gelişimi ..... 32

BÖLÜM 8

PARABOLİK YAPRAK YAYIN FİZİKSEL TESTİ ..... 33

8.1 Prototip ve Fiziksel Test ..... 33

8.2 Test Sonuçları ..... 34

8.3 Yaprak Yayın Kırılmasının İncelenmesi ..... 35

BÖLÜM 9

PARABOLİK YAPRAK YAYIN GÜVENİRLİK ANALİZİ ..... 42

9.1 Güvenirlik Analizi ..... 42
9.2 Normal Dağılım Fonksiyonu ..... 43
9.3 Parabolik Yaprak Yayın Ömür Testi Sonuçlarına Göre Güvenirlik Hesabı 47
BÖLÜM 10
SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 50
KAYNAKLAR ..... 51
EK-A
PARÇANIN TEKNİK RESMİ ..... 55
ÖZGEÇMİŞ ..... 56

## SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $\sigma_{max}$ | Yayprak yayda oluşuan maksimum eğilme gerilmesi |
| s | Yaprak yayda oluşan maksimum sehim |
| F | Yaprak yaya gelen en büyük yük |
| n | Yaprak yay kat sayısı |
| w | Yaprak yay genişliği |
| $h_0$ | Yaprak yayın merkez kalınlığı |
| h1 | Yaprak yayın uç kalınlığı |
| L | Yaprak yayın uzunluğu |
| E | Elastilite modülü |
| $m_{tasarım}$ | Tasarım yükü |
| $m_{maksimum}$ | Maksimum yük |

## KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAD | Compter Aided Design |
| EN | Europian Standards |
| HB | Hardness Brinell |
| SEY | Sürekli Elemanlar Yöntem |

# ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Parabolik yaprak yay ..... 1
Şekil 1.2 Bir ağır ticari araçta yaylar ..... 2
Şekil 1.3 Farklı yükleme durumlarına göre gerilme ve sehim değerleri ..... 4
Şekil 1.4 Simülasyon ve analitik sonucun karşılaştırılması ..... 5
Şekil 2.1 Yay ve şasi bağlantısı ..... 7
Şekil 2.2 Üç katlı parabolik yaprak yay ..... 8
Şekil 2.3 Konvansiyonel yaprak yay ..... 10
Şekil 2.4 Havalı süspansiyon yaprak yay ..... 10
Şekil 2.5 Bir ağır ticari aractaki parabolik yaprak yayın konumu ..... 11
Şekil 2.6 Yay üretim proses şeması ..... 13
Şekil 3.1 Süspansiyon sistemi ve parçanın sanal araç içeresindeki konumu ..... 14
Şekil 3.2 Parabolik yaprak yay üretim proses şeması ..... 15
Şekil 5.1 Parabolik yayın üç boyutlu modeli ..... 21
Şekil 5.2 Yay ve işaretleyiciler ..... 22
Şekil 5.3 Tarama işlemi ..... 23
Şekil 5.4 Analiz sonucu ..... 23
Şekil 6.1 Parçanın mesh modeli ..... 26
Şekil 6.2 Yaprak yayda tasarım yükünde gerilme ..... 27
Şekil 6.3 Yaprak yayda tasarım yükünde deplasman ..... 27
Şekil 6.4 Yaprak yay maksimum yükte gerilme ..... 28
Şekil 6.5 Yaprak yay maksimum yükte deplasman ..... 28
Şekil 7.1 Yorulmada tipik gerilme-zaman eğrileri ..... 31
Şekil 8.1 Yaprak yay prototipi ..... 33
Şekil 8.2 Test düzeneği ..... 34
Şekil 8.3 Kırılma yüzeyleri ..... 36
Şekil 8.4 Kırılma kesitinden alınan parçalar ..... 36
Şekil 8.6 Metalik olmayan kalıntı tayini ..... 37
Şekil 8.8 Tane boyutu ..... 38
Şekil 8.9 Sertlik taraması sonuç grafiği ..... 39
Şekil 8.10 Plakalar üzerinde belirlenen noktalar ..... 39
Şekil 8.11 Takozlar üzerinde belirlenen noktalar ..... 40
Şekil 8.12 2.kat düzlemsellik ..... 41
Şekil 8.13 3.kat düzlemsellik ..... 41
Şekil 9.1 Dağılım fonksiyonu ..... 44
Şekil 9.2 Birikimli dağılım fonksiyonu ..... 44

Şekil 9.3 $z_\alpha$'nın sınırlandırılması ..... 45
Şekil 9.4 Logaritmik normal dağılım fonksiyonu ..... 46
Şekil 9.5 Logaritmik ömür değerlerinin grafiği ..... 48
Şekil A.1 Yayın teknik resmi ..... 55

# ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Farklı malzemeler için gerilme ve deformasyon değerleri ..... 4
Çizelge 3.1 51CrV4 kimyasal içeriği ..... 15
Çizelge 3.2 51CrV4 mekanik özellikleri ..... 15
Çizelge 4.1 Seçilen parabolik yaprak yayın bilgileri ..... 19
Çizelge 4.2 Yaprak yayın eğilme gerilmesi ve sehim değerleri ..... 20
Çizelge 5.1 Cad modelin özellikleri ..... 22
Çizelge 6.1 Sonlu elemanlar modelinin özellikleri ..... 25
Çizelge 8.1 Test bilgileri ..... 34
Çizelge 8.2 Rig testi sonucunda elde eldilen ömür değerleri ..... 35
Çizelge 8.3 Gerinim ölçer ölçüm sonuçları ..... 35
Çizelge 8.4 Plakaların kalınlık değerleri ..... 40
Çizelge 8.5 Takozların kalınlık değerleri ..... 40
Çizelge 9.1 Normal dağılım fonksiyonu ..... 46
Çizelge 9.2 Ömür değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması ..... 47
Çizelge 9.3 Güvenirlik değerleri ..... 49
Çizelge 10.1 Tasarım yükünde oluşan maksimum gerilme ve sehim değerleri ..... 50
Çizelge 10.2 Maksimum yükte oluşan maksimum gerilme ve sehim değerleri ..... 50

# ÖZET

## AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA KULLANILAN PARABOLİK YAPRAK YAYLARIN YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ufuk Taner CEYHANLI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet BOZCA

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında ağır ticari araçlarda sıkça kullanılan parabolik yaprak yayların yorulma davranışına etki eden faktörlerin belirlenmesi ve ihtiyaca cevap veren yeni parabolik yay tasarımlarının prototip ve imalat öncesinde kullanılan yöntemlerin doğrulunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Ağır ticari araclarda kullanınlan bir parabolik yaprak yayın analitik yöntemler ile mukavemet hesabı, Catia V5 programı ile oluşturulan üç boyutlu modelinin Ansys programı ile sonlu elemanlar analizi yapılarak gerçek test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar analizi sonuçları ile fiziksel deney sonuçları birbirini doğrulamıştır. Ağır ticari araçlarda kullanılan bu tip yaprak yayların üretimi öncesinde analitik yöntem ve sonlu elememanlar analizi yöntemlerinin parçanın yorulma davranışını belirleme konusunda güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yayın ömür testi sonuçlarına göre güvenirlik analizi yapılarak parçanın beklenilen ömrü ne kadar güvenirlikle gerçekleştirdiği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** parabolik yaprak yay, güvenirlik, yorulma davranışı,sonlu elemanlar

## ABSTRACT

# FATIQUE BEHAVIOR INVESTIGATION OF PARABOLIC LEAF SPRINGS USED IN HEAVY COMERCIAL VEHICLES

Ufuk Taner CEYHANLI

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Mehmet BOZCA

The objective of this master thesis is to define the factors affecting fatigue behavior of parabolic leaf springs and validate the methods used to design new leaf springs, commonly used in heavy commercial vehicles, which meets the demands before prototyping and manufacturing process. Stress and displacement analysis of a three layer parabolic leaf spring designed for a heavy truck have been performed using numerical and finite element method. The spring modelled and analysed using Catia Part Design and Ansys Workbench. The results of the finite element analysis are compared with the experimental results and verified with a maximum 0.91% difference. This study proved that analytical and finite element analysis are reliable methods to identify fatigue behavior of parabolic leaf springs. Additionally, it is determined by reliability analysis based on rig test results of nine springs that the spring achieve its lifecycle, 100000 cycle, with 100% rate without breaking and it can be used safely during the service period in heavy trucks.



**Keywords**: Parabolic leaf spring, reliability, fatique behavior, finite elements

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

## 1.1 Literatür Özeti

Yaprak yaylar, yol koşulları nedeniyle ani olarak şasi ve aktarma organlarına gelen darbelerin meydana getirdiği enerjiyi üzerinde depolayıp, daha sonra açığa çıkararak sürüş konforu ve güvenliği sağlayan süspansiyon elemanlarıdır. Makas olarakta adlandırılan yaprak yaylar, ağır ticari araçlarda, hafif ticari araçlarda, otobüslerde ve demir yolu araçlarında sıkça kullanılan süspansiyon sistemleridir ve ağır ticari araçlarda yaprak yay ve havalı yay olmak üzere iki çeşit yay çeşidi kullanılır. Genellikle arka süspansiyon donanımında kullanılırlar. Yaprak yaylar günümüzdeki en eski süspansyon sistemlerinden biri olmasına rağmen özellikle ticari ve agır araçlarda sıklıkla kullanılmaktadır ayrıca tek katlı olabildiği gibi birçok katmandan oluşan çok katlı yaprak yay çeşitleri de bulunmaktadır [1].



Şekil 1.1 Parabolik yaprak yay

Ağır ticari araçlarda kullanılan yaprak yayların karasteristik değerlerinin aracın çeşitli koşullarda nasıl davranacağının belirlenmesi ve gerekli kontrollerinin yapılması

bakımından son derece önemlidir. Günümüzde yaprak yayların verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar bilgisayar destekli tasarım ve analiz programları ile kolayca yapılabilmektedir.

Araç gövdesi ile tekerlekler arasına yerleştirilen süspansiyon sistemi, yolun yapısından kaynaklanan titreşimleri sönümlemek üzere tasarlanmıştır. Süspansiyon sistemi sürüş konforu ve güvenliği açısından ihtiyaç duyulan bir sistemdir ve konfor,güvenli dönüş gibi araç özelliklerini sağlar.

Araçların tiplerine göre kullanılan süspansiyon elemanları çeşitlilik göstermektedir.Binek araçlarda helisel yaylar tercih edilirken, ticari araçlarda ise parabolik, yığma veya havalı yaprak yaylar tercih edilir.

Yaprak yaylar yassı çelikten bant şeklinde kıvrılarak yapılırlar. Bu şekildeki yapıya "yaprak" denilmektedir. Uzundan kısaya doğru üst üste beraber demetlenmesiyle oluşur. Yaprakların bu demedi bir merkez cıvatası veya bir perçin ile beraber merkeze bağlanmışlardır. Yaprakların dışarı doğru kaymasını önlemek için de kelepçe ile tutturulmuşlardır. Bu bağlama şekliyle esnemesi durumunda kırılmaz, eğilmeye zorlanır.



Şekil 1.2 Bir ağır ticari araçta yaylar

Yaprağın her bir kıvrımı büküm olarak adlandırılır ve uzun yapraktan kısa yaprağa doğru gittikçe büküm artar. Bir yaprak yay içerisindeki fazla miktardaki yapraklar büyük yüklerde yayın dayanımlı olmasını sağlamaktadır. Fakat yaylar sert olacağından sürüş konforu düşmektedir.

Çoğunlukla daha uzun bir yaprak yay, daha kısa bir yaprak yaya kıyasla daha yumuşak olur.

Yaprak yaylar (makaslar) yay fonksiyonunu yerine getirmesinin yanında aksı destekleyen bir kol rolüne de sahiptir. Dayanıklılık açısından son derece mükemmeldir. Fakat ağır ve sert olması sebebiyle sürüş konforu açısından zayıftır.

Bir makas eğildiği zaman, büküm makas yapraklarının beraber ovalanmalarına neden olur. Bu ovalanmanın sebeb olduğu sürtünme yayın salınımının hızlıca sönümlemesini sağlar. Sürüş konforunun azalmasının bir sebebi de bu sürtünmedir ve buna neden olan faktör de makasların kolayca esneyebilmesidir. Onun için motorlu araçlarda yaprak yaylar çoğunlukla arka süspansiyon donanımında kullanılırlar. Binek otomobillerinde pek tercih edilmeyen yaprak yaylar, çoğunlukla kamyon, kamyonet gibi ağır hizmet tipi araçlarda kullanılmaktadır [2].

Patnaik ve arkadaşları [3]; 1 ton taşıma kapasiteli bir mini kamyona ait tek katlı bir parabolik yaprak yayın Catia V5 R20 programının Part Design ve Sturucture Analysis arayüzlerini kullanarak yorulma davranışını incelemiştir.

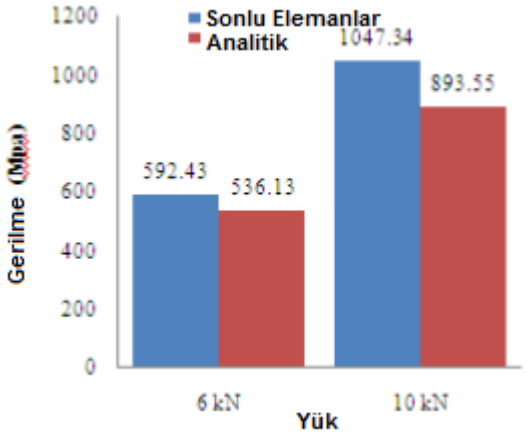
Dewangan ve arkadaşları [4]; Catia Structure Analysis programını kullanarak tek katlı bir parabolik yaprak yay üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile yayda oluşan gerilmeyi minimize etmeye çalışmışlardır.

Jeremiah ve Balu [5]; kompozit malzemeli konvansiyonel yaprak yaylar üzerinde analiz çalışmaları yaparak yayın malzeme ve geometrisini optimize etmeye çalışmışlardır. Elde edilen ananliz sonuçlar Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Çalışmalar sonucunda karbon epoksi yayın minumum deformasyon ve gerilmeye sahip olduğunu tespit emişlerdir.

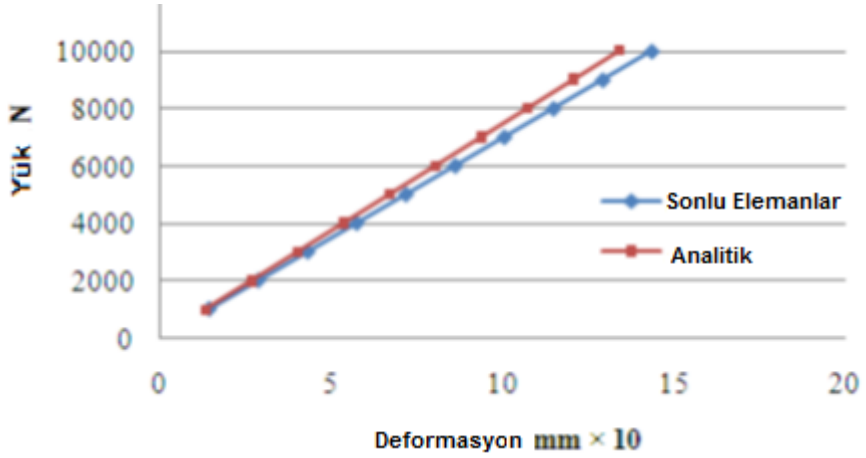
Çizelge 1.1 Farklı malzemeler için gerilme ve deformasyon değerleri

| Malzeme | Yaprak sayısı | Uzunluk [m] | Genişlik [m] | Gerilme [$N/m^2$] | Sehim [m] |
|---|---|---|---|---|---|
| Çelik | 12 | 600 | 90 | 2.02e5 | 2.04e-7 |
| E-glass epoksi | 12 | 600 | 90 | 1.83e5 | 1.83e-7 |
| Karbon epoksi | 12 | 600 | 90 | 1.52e5 | 1.52e-7 |

Aher ve Sonawane [6]; hafif ticari araçlarda kullanılmak üzere tasarlanmış bir konvansiyonel yaprak yayın analitik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile parçada oluşan gerilme ve sehim değerlerini bularak birbirileri ile kıyaslaşmıştır. Çalışma sonucuna göre yayın taşıdığı 6 kN ve 10 kN yük durumlarına göre oluşan gerilme ve sehim değerleri her iki yöntem için Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te gösterilmiştir.




Şekil 1.3 Farklı yükleme durumlarına göre gerilme ve sehim değerleri




Şekil 1.4 Simülasyon ve analitik sonucun karşılaştırılması

Şekillerden anlaşaılacağı gibi iki yöntemde birbirlerine yakın sonuçlar vererek birbirlerini doğrulamıştır.

Venkatesan ve Deveraj [7]; hafif ticari araçta kullanılan çelik, tek katlı, konvansiyonel bir yaprak yayı alıp bu yayı 3 boyutlu olarak moddelemişlerdir. Model üzerinde SEY ile Ansys programını kullanarak gerilme ve sehim değerlerini tespit etmişlerdir. Aynı çalışmayı çelik yerine kompozit malzeme kullanarak yapıp sonuçları ağırlık, maliyet ve dayanıklılık açısından kıyaslamışlardır. Kompozit yaprak yayın çelik yaya kıyasla daha hafif olmasına karşın çelik yaydan daha dayanıklı ve ekonomik olduğunu öne sürmüşlerdir.

Güven [1]; hafif ticari araçalar için konvansiyonel ve parabolik yaprak yay tasarlamış ve tasarımlarını sonlu elemanlar yöntemleri ile analiz edip, analiz sonuçlarından yola çıkarak aynı yükleme durumlarında daha az gerilme ve deformasyon değerlerine sahip yeni tasarımlar üretmiştir.

Görüldüğü gibi literatürdeki çalışmaların çoğu genelde yaprak yay malzemelerinin değişimi üzerine, fiziksel test içermeyen çalışmalardır. Ayrıca, çalışmaların çoğu hafif ticari araçlarda kullanılan, kovansiyonel ve tek katlı yaylar üzerinedir. Ağır ticari araçlar gibi zor çalışma koşullarına sahip 3 katlı parabolik yaprak yaylar üzerinde fiziksel test verilerini de içeren bir çalışma henüz yapılmamıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, ağır ticari araçlarda kullanılan yaprak yayların yapısal özelliklerinin ve tasarım çeşitlerinin incelenmesiyle, örnek bir ticari araçta kullanılan bir parabolik yayın seçilerek, mukavet mesabı, üç boyutlu modellemesi ve Ansys programında sonlu elemanlar gerilme analizinin yapılması ve bu değerlerin gerçek test değerleriyle karşılaştırılarak parabolik yayın yorulma davranışının incelenmesidir. Daha dayanımlı ve uzun ömürlü bir yaprak yayın tasarlarması için imalat öncesi kullanılan yöntemlerin doğrulanması hedeflenmiştir. Ek olarak seçilen parabolik yaprak yayın gerçekleştirmesi beklenen ömrü ne kadarlık bir güvenirlikle gerçekleştireceğini güvenirlik analizi ile tespit etmektir.

## 1.3 Hipotez

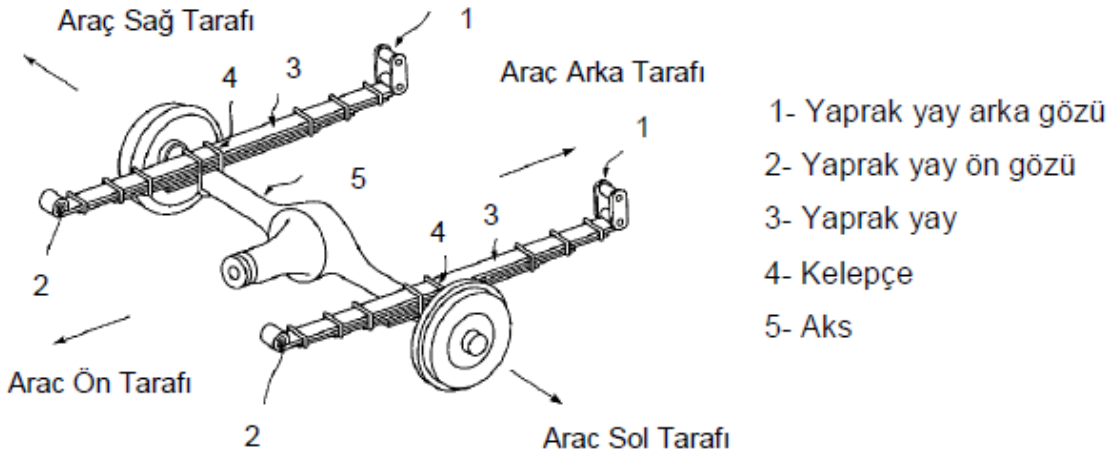
Bu çalışmada ortaya atılan hipotez, sonlu elemanlar yöntemi programları ve araçları kullanılarak maksimum gerilme ve sehim açısından yapılan yorulma davranışı incelemelerinin sonuç açısından değerlendirildiğinde, diğer yöntemlerden daha doğru ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Sonlu elemenlar analizinin fiziksel teste yakın sonuçlar vereceği düşünüldüğünden parçanın tasarım aşamasında kullanılabilecek etkili bir yöntem olduğu iddia edilmektedir.

# BÖLÜM 2

# YAPRAK YAYLAR

## 2.1 Yaprak Yayların Yapısı

Yaprak yaylarda bir adet merkez civatası bulunur ve bu civata parçaların tümünü birbirine bağlar. Yayların birbirinden ayrılmasını önlemek amacıyla sac kelepçeler veya kılıflar kullanılır. En üstte bulunan ana yaprağın sağ ve sol uçları kıvrılarak yay gözleri oluşturulur. Bu yay gözleri yaprak yay sisteminin şasiye bağlanmasını sağlar. Ayrıca, yaprak yaylar ön ve askı sisteminde ön dingile, arka baskı sisminde ise arka köprüye U cıvatalarıyla bağlamaktadır [8].




Şekil 2.1 Yay ve şasi bağlantısı

## 2.2 Yaprak Yay Çeşitleri

Yaprak yaylar parabolik, konvansiyonel (yığma) ve havalı yaprak yaylar olmak üzere üç grup içersinde incelenebilir.

### 2.2.1 Parabolik Yaprak Yaylar

Parabolik yay adını katların şeklinden alır. Merkezden uçlara doğru parabolik bir eğriyi takip ederek kesit kalınlığı azalan bir veya daha fazla kattan oluşur.

Yaylanma bölgelerinde yay katları arasında boşluklar içerir bu sayede yay, sabit iyi yay karakteristiğine ve zamandan bağımsız sönümleme karakteristiğine sahiptir.Aynı zamanda yay aşınmaya maruz kalmaz ve bakım gerektirmez.

Yayın katarı arasında yer alan bu boşluk, dayanıklı ve etkili yüzey işlemlerini mümkün kılar. Kumlama, ön yükleme ve boyama yüzey işlemleri ile birlikte yayın dayanımı arttırılabilir, ağırlığı azaltılabilir ve bu sayede ömrü uzar [10].

Yaprak yay imalatında 50CrV4, 51CrMoV4, 55Cr3, 60SiMn5 vb. gibi yay çelikleri kullanılır. Kalınlığına göre 800-1000 °C arasında tavlanan malzeme yağda soğutulmaya bırakılır. Yarı mamuller soğutulduktan sonra tavlama işlemi sonundaki sertlik değerine göre 450-550 °C arasında bir sıcaklıkta menevişlenerek su takviyesi ile dış ortam sıcaklığında soğutulur. (Sertlik 388-444 HB ) Bu şekilde malzemeye yüksek esneme özelliği kazandırılmış olur [11].



Şekil 2.2 Üç katlı parabolik yaprak yay

Parabolik yayların avantajları;

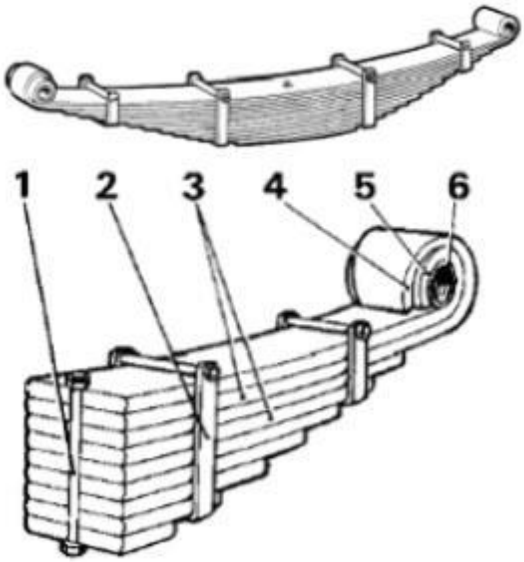
- Parabolik yaprak yaylar zamanla araçlarda konvensiyonel yayların yerini almaktadır. Yeni dizayn ile birlikte yayın ağırlığı anlamlı bir ölçüde azalırken imalat giderlerinde de büyük düşüşler göstermektedir. Bütün bu avantajlara ek olarak, final ürünün de

oluşan yayın karakteristiği klasik yaylara göre daha iyidir ve bu parabolik yaprak yayı daha üstün kılmaktadır.

- Yüzde 30'lara ulaşan ağırlık düşüşü ile, toplam yük taşıma kapasitesinde çok ciddi miktarlarda artış sağlanmaktadır.
- Parça ömrü 2 ile 5 kata kadar fazladır.
- Titresim emme özellikleri iyileştirilmesi ile birlikte sanzıman, süspansiyon ve eklem parçalarının ömrünü artırmak ve sürücü konforunu iyilestirmek mümkündür.
- Yakıt tüketiminde düşüş sağlarken, lastik ömürlerini uzatır.
- Elastisite oranı yayın ömrü süresice sabit kalır.
- Araçta ağırlık merkezi yüksekliğinin azaltılmasıyla aracın genel dinamiklerinin ve istikrarının geliştirilmesi sağlanır.
- Etkin bir korozyon kaplaması uygulaması imkânından dolayı daha iyi korozyon koruması sağlanmış olur.
- Yay gözlerinin kalınlığı yay kalınlığından bağımsız olarak gereksinime göre çok iyi bir şekilde ayarlanabilir [12].

### 2.2.2 Konvansiyonel Yaprak Yaylar

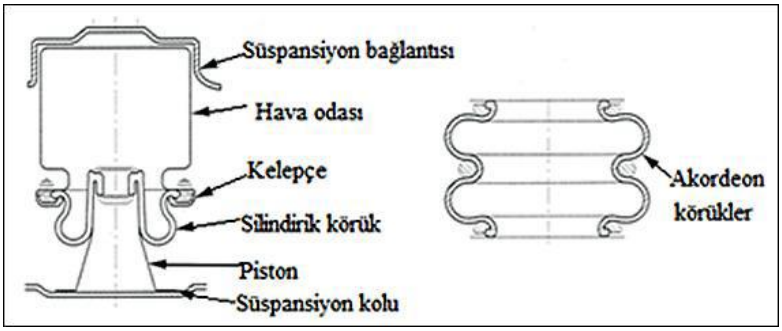
Kalınlığı tüm bölgesinde aynı iken boyları kademeli olarak değişen en az üç adet katın birleştirilmesiyle oluşturulan yaprak yaylardır. Bu yaylar, yaylanma katsayısının tek ya da birden çok değerlerde olması durumuna göre, kademesiz, yardımcılı ve muavinli olmak üzere üç tipte üretilmektedir. Aşırı yükleme ve bozuk yol şartlarına uyum gösterirler [9].




Şekil 2.3 Konvansiyonel yaprak yay

### 2.2.3 Havalı Süspansiyon Yaprak Yayları

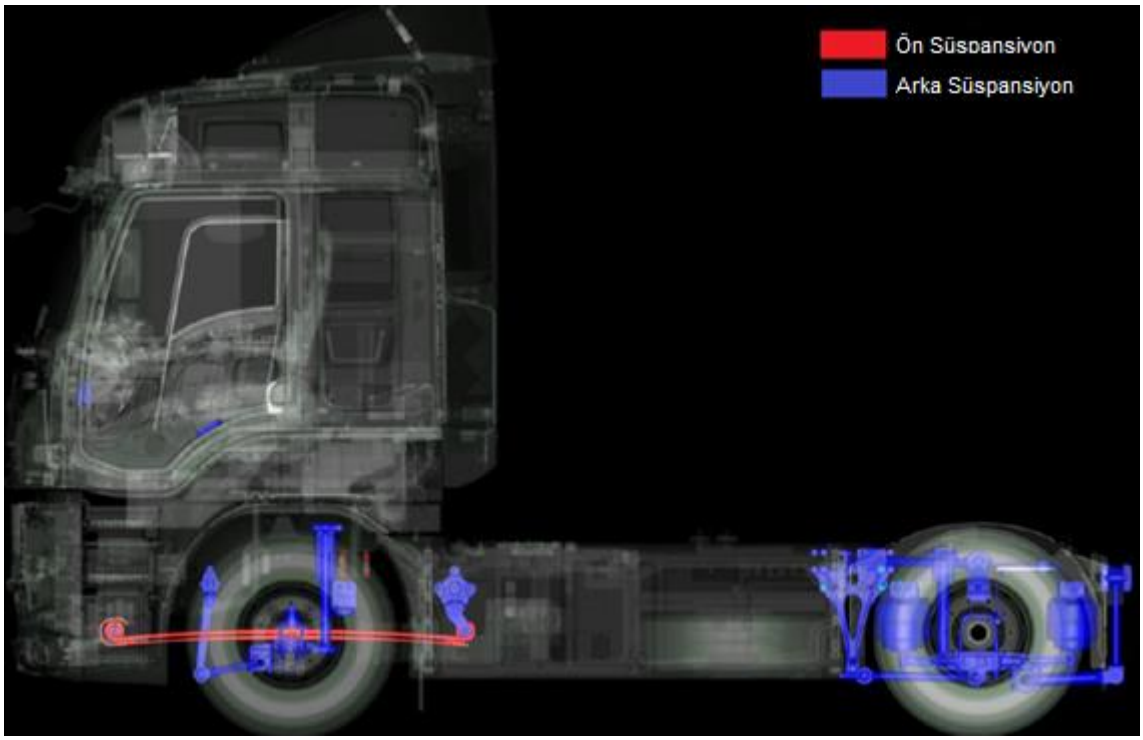
Havalı süspansiyon sistemleri ticari araçlarda, otobüs, kamyon ve lüks binek araçlarda kullanılan ve yüksek konfor sağlayan süspansiyon sistemlerdir. Havalı süspansiyon sistemi sıkıştırılan havanın körüklere iletilmesi ve havanın körükten geri emilmesi esasına dayanır. Bunun yanında makaslı sistemlerde yayın yüke göre formunun değişmesine karşılık havalı süspansiyon elemanları mekanik veya elektronik olarak kontrollü olan seviye kontrol valfleri ile birlikte çalışarak yüke bağlı olarak körüklere havayı gönderir ya da boşaltır, böylece aracın duruşunu aracın yükünden etkilenmeyecek şekilde sabit tutabilmektedir. Araç yüklü ve yüksüz ağırlıkta ideal sürüş konforu sağlar. Yay karakteristikleri progresif olarak daha kolay ayarlanmakta ve manevralara daha düzgün tepkiler verilebilmektedir [13].




Şekil 2.4 Havalı süspansiyon yaprak yay

## 2.3 Ağır Ticari Araçlarda Kullanılan Yaprak Yaylar

Ağır ticari araçların süspansiyon sistemlerinde parabolik, konvansiyonel (yığma) ve havalı süspansiyon yaprak yayları kullanılır. Araçtan beklenen performansa göre kullanılacak yaprak yay çeşidi belirlenebilir. Eğer araç ağır yükler altında kullanılacak şekilde tasarlanmış ise yığma yaprak yaylar tercih edilirken, kabin konforu beklenen durumlarda yaprak yay kullanılır. Aynı araçta arka ve ön süspansiyon sistemleri birbirinden farklı olabilir. Taşıdığı yük ağırlıkları büyük farklılıklar gösteren kamyonlarda aracın verimliliği ve konforu açısından yükleme durumda farklı, yüksüz durumda farklı yay rijitliğini sağlamak amacıyla yardımcı (muavin) yaprak yaylardan yararlanılır.




Şekil 2.5 Bir ağır ticari araçtaki parabolik yaprak yayın konumu

## 2.4 Parabolik ve Konvansiyonel Yaprak Yayların Karşılaştırması

Parabolik Yaprak Yay:

- Değişken yaprak kalınlıkları, bu sayede yüksek yük alan bölgeler kalın, düşük stres bölgeleri inceltilebilir.
- Yığma makasa göre yaklaşık %10 hafif tasarım yapılabilir.

- Parça maliyeti yığma ile yaklaşık aynıdır.(Malzeme az ancak yüksek kaliteli çelik ve pahalı malzeme kullanılır, değişken parabol kalınlığı ek proses gerektirir.)
- Katlar arasında sürtünme olmadığı için histerisis düşüktür.
- Yüksek gerilme değerlerinde çalışabilir.
- Yoldan gelen etkilere daha hassastır, düşük taşıma kapasitesine sahiptir. Histerisis'indüşük olması nedeni ile daha sert amortisör ve ARB kullanımı gerektirir.
- Parabolik makaslar off-road kullanımı için zayıf olarak düşünülmektedir.
- Tamire uygun değildir, her katın kendine has tasarımı vardır. Tüm makasın değiştirilmesi gerekir.
- Karmaşık tasarımı nedeni ile kapabilitesi yüksek tedarikçiler ile açalışılması gerekecektir.

Konvansiyonel Yaprak Yay:

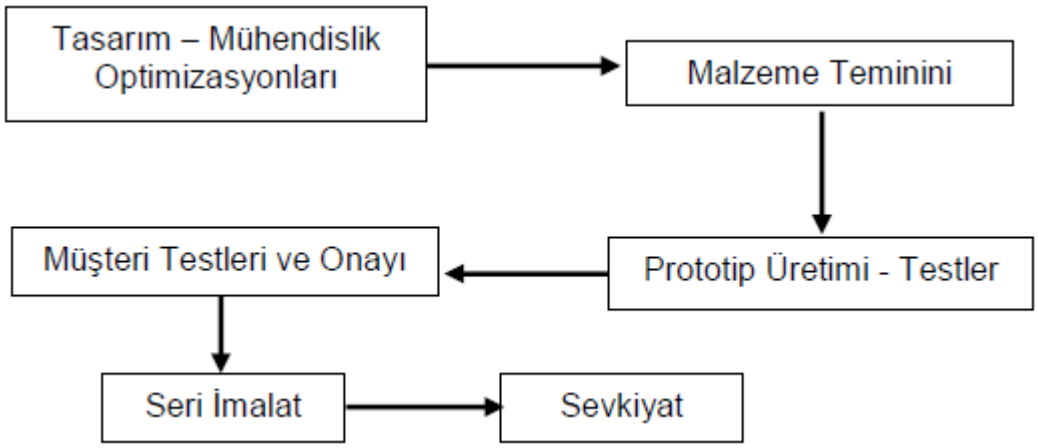
- Sabit kat kalınlığı.
- Düşük gerilme bölgelerinde fazla malzeme kullanımı nedeni ile daha ağırdır.
- Standart kullanılan malzeme ve standart proses ile üretilir. Parça ağırlığının fazla olması sebebi ile fiyat düşük değildir.
- Düşük yanal kuvvet dayanımı.
- Katlar arası sürekli temas olması nedeni ile sürtünme fazla ve histerisis yüksektir.
- Yanal yük dayanımı yüksektir.
- Düşük gerilme değerlerinde çalışabilir.
- Ömür ve kapasite dayanımı yüksektir.
- Müşteri gözünde daha dayanıklı ve kapasitelidir.
- Her kat ayrı ayrı sökülerek değiştirilebilir, tüm makasın değişmesine gerek kalmaz.
- Her kat boylarına kesilerek birleştirilir,üretimi daha kolaydır [15].

## 2.5 Yaprak Yay Yapımında Kullanılan Malzemeler

Yaprak yay üreticileri tarafından yaprak yay imalatında dayanımları 1300-1800 MPa arasında değişen yay çelikleri kullanılmaktadır [16]. Özellikle parabolik tek katlı yaprak yayların yüksek dayanıma, kaliteye ve emniyete sahip olması istenmektedir. Malzeme içerisinde segregasyonlar çatlakların oluşumuna neden olabilmektedir. Bu sebeple kullanılan yaprak yay malzemelerinde segregasyon oluşumunun engellenmesi gerekmektedir. Genellikle üreticiler sıcak haddelenmiş yay çeliklerini kullanmaktadırlar [17].

## 2.6 Yaprak Yay Üretimi

Yaprak yay üretim süreci bir dizi tasarım, analiz ve mühendislik işlemlerinden oluşmaktadır. Yay katmanlarında yer alan lamalar üzerinde yapılan şekillendirme işlemleri ile farklı formlarda yaprak yaylar elde edilmektedir. Farklı tip ve markalarda, hafif ve ağır ticari herbir araca yönelik ayrı ayrı tasarlanmış çok sayıda yaprak yay mevcuttur. Yüksek güvenlikli ve uzun ömürlü bir yaprak yay üretiminde her aşama ciddi derecede önem taşımaktadır. Bir yaprak yayın imalat süreci Şekil 2.6'da gösterilmiştir [9].

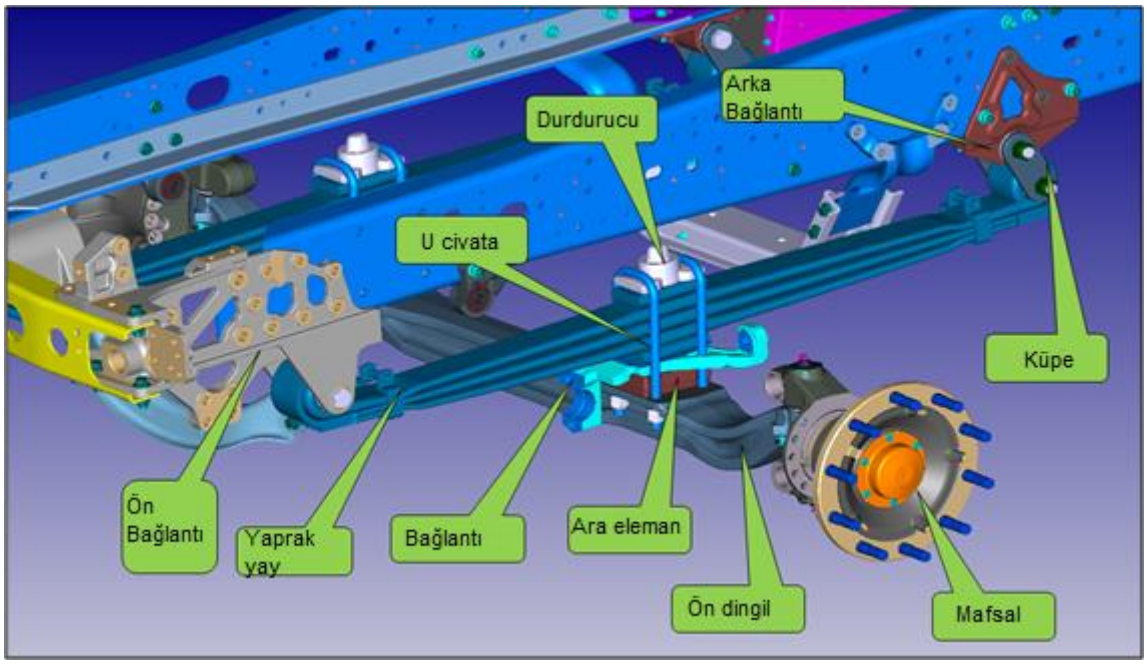



Şekil 2.6 Yay üretim proses şeması

# BÖLÜM 3

## SEÇİLEN PARÇA BİLGİLERİ

Yorulma davranışının incelecek parça 12.7 litre motor hacmine, 460PS motor gücüne, 3600 mm dingil mesafesine sahip otomatik vitesli bir 6x4 damperli kamyonların ön süspansiyon sistemlerinde kullanılan 1680 mm uzunluğunda 95 mm genişliğindeki üç katlı bir parabolik yaprak yaydır. Parçanın imalatında malzeme olarak 51Crv4 malzemesi kullanılmıştır ve 84 kg ağırlığındadır. Yayın imalatı Düzce'de yer alan bir yay firmansında gerçekleştirilmiştir.




Şekil 3.1 Süspansiyon sistemi ve parçanın sanal araç içeresindeki konumu

## 3.1 Malzeme Bilgileri

51CrV4 malzemesinin özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 51CrV4 kimyasal içeriği

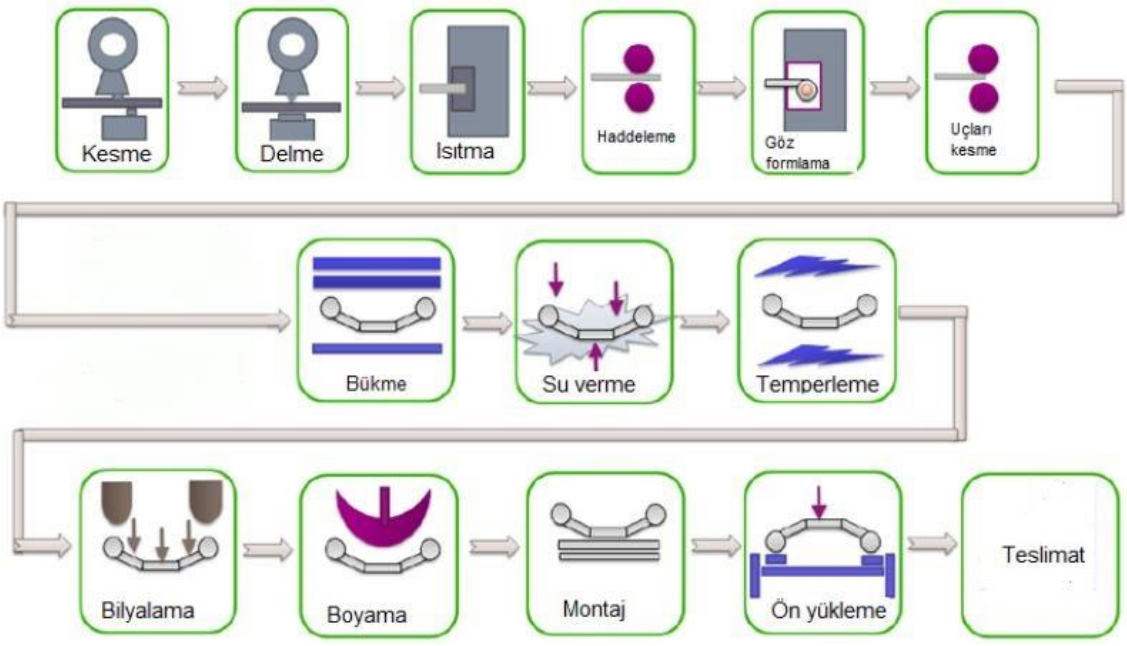
| Kimyasal Bileşenler | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | Sn | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | 0.51 | 0.28 | 0.92 | 0.01 | 0.004 | 1.08 | 0.02 | 0.08 | 0.02 | 0.18 | 0.011 | 0.163 |

Çizelge 3.2 51CrV4 mekanik özellikleri

| Sertlik [HB] | Akma Gerilmesi [N/mm$^2$] | Kopma Gerilmesi [N/mm$^2$] | Uzama [%] | Kesit Daralması [%] |
|---|---|---|---|---|
| 331 | 1532 | 1603 | 9 | 41 |

## 3.2 Parçanın İmalatı

Müşteri onayı alınan ve testlerle güvenilirliği doğrulanan yaprak yayların seri üretimlerine geçilir. Yorulma davranışı incelenecek olan parabolik yaprak yayın imalat aşamaları Şekil 3.2'de gösterilmiştir [9].




Şekil 3.2 Parabolik yaprak yay üretim proses şeması

- Kesme İşlemi

Kütükler halinde dökülen yay malzemelerinin belirlenmiş boylarda kesilmeleri gerekmektedir. Bu operasyon ince malzemeler için preslerde daha kalın malzemelerde ise testerelerde gerçekleştirilir.

- Delme İşlemi

Lamaların orta kısımları delinerek merkez civatası için yer açılır. Çok kalın levhalarda delme işlemi ısıl işlemden sonra yapılır.

- Isıl İşlem

Lamaların uç kısımları 936°C sıcaklıkta ısıtılarak haddeleme işlemine uygun hale getirilir.

- Haddeleme İşlemi

İstenilen ebatlara getirilen yaylık lamaların daha ince bir form almaları için hadde merdanelerinden geçirilmesi işlemidir.

- Göz Formlama

Yaprak yayların her iki uç kısımına göz adı verilen bağlantı noktaları oluşturulur.

- Bükme İşlemi

Fırınlar ile 955°C sıcaklığa getirilen levhalara çok güçlü preslerle parabolik şekli verilir.

- Su Verme

Bükme işleminden çıkan sıcak yaylar 79°C sıcaklıktaki yağa batırılarak 30 dakika boyunca soğutulur.

- Temperleme

Soğutulan yaylar 477°C sıcaklığındaki temperleme fırınlarında iki saat bekletilir. Bu işlem ile malzemenin mikro yapısı temperlenmiş martenzite dönüşür.

- Bilyalama İşlemi

Bilyalama işlemi çok sayıdaki bilyanın malzeme üzerine püskürtülmesiyle temelinde yay yüzeyinde bası gerilmeleri oluşturarak yayın yorulma ömrünü uzatıcı bir yüzeysel işleme operasyonudur. Yapılan bilimsel araştırmalarda kumlama operasyonun yaprak yay yorulma ömrünü %30'a kadar uzattığı bilgisine ulaşılmıştır [19]. Buna ek olarak ısıtma sonrası oluşan tufal tabakasının temizlenmesine de yardımcı olmaktadır. Kumlama işlemi serbest ve gerilme altında olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır.

- Boyama İşlemi

Korozyona karşı dayanımI arttırmak ve yaya daha iyi bir görünüm kazandırmak için yay boyama işlemine tabii tutulur. Elektrostatik ve yaş boya, kataforez kaplama, gibi farklı uygulamalar da yapılmaktadır [9].

- Montaj

Oluşturulan yaprak yay katları birbirilerine bağlanır.

- Ön Yükleme İşlemi
- Teslimat

Üretilen yaprak yaylar müşteriye ulaştırılır.

# BÖLÜM 4

# PARABOLİK YAPRAK YAYIN MUKAVEMET HESABI

Seçilen parabolik yaprak yayın yer aldığı çekicide ikisi önde ikisi arkada olacak şekilde 4 adet yaprak yay mevcuttur. Ön süspansiyon sisteminde parabolik yaprak yaylar kullanılmıştır ve bu yaylardan bir tanesi normal şartlarda 4200 kg yüke maruz kalırken maksimum yükleme durumunda 7100 kg yüke maruz kalmaktadır. Parabolik yaprak yaya rig testi sırasında 2200 – 7163 kg yük uygulanmıştır.

Yaprak yaylar eğilme gerilmesine maruz kalmaktadırlar. Yayın yük altında eğilme gerilme diyagramı çizildiğinde ankastre yayda en büyük gerilmenin kuvvetten en uzak noktada; bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetli yayda ise ortada meydana geldiği görülmektedir. Bu durumda yaprak yay için moment diyagramına uygun kesit seçildiğinde yay malzeme kesiti ekonomik kullanılmış olur. Bunu sağlamak için değişen kesitli yaylar kullanılmaktadır [9].

## 4.1 Tasarım Yüküne Göre Mukavemet Hesabı:

Kalılınlığu uzuluğu boyunca değişen çok katlı parabolik yaprak yaylarda meydana gelen gerilme ve sehim aşağıdaki denklemlerden hesaplanır [18].

$$\sigma_{max} = \frac{3FL}{2nwh_0^2} \tag{4.1}$$

$$S = \frac{FL^3}{2Enwh_0^3}\left(2 - \frac{h_1^3}{h_0^3}\right) \tag{4.2}$$

Burada;

$\sigma_{max}$ : Yayprak yayda oluşuan maksimum eğilme gerilmesi [MPa]

s : Yaprak yayda oluşan maksimum sehim [mm]

F : Yaprak yaya gelen en büyük yük [N]

n : Yaprak yay kat sayısı

w : Yaprak yay genişliği [mm]

$h_0$ : Yaprak yayın merkez kalınlığı [mm]

$h_1$ : Yaprak yayın uç kalınlığı [mm]

L : Yaprak yayın uzunluğu [mm]

E : Elastilite modülü

Çizelge 4.1 Seçilen parabolik yaprak yayın bilgileri

| | |
|---|---|
| Tasarım yükü | $m_{tasarım}$ = 4200 [kg] |
| Maksimum yük | $m_{maksimum}$ = 7163 [kg] |
| Yaprak yay kat sayısı | n = 3 |
| Yaprak yay genişliği | w = 90 [mm] |
| Yaprak yayın merkez kalınlığı | $h_0$ = 29 {mm] |
| Yaprak yayın uç kalınlığı | $h_1$ = 23 {mm] |
| Yaprak yayın uzunluğu | L = 1680 [mm] |
| Elastilite modülü | E = 210000 [MPa] |

$F = m_{tasarım}.g$ = 4200.9,81= 41202 [N]

Tasarım eğilme gerilmesi:

$\sigma_{max} = \frac{3FL}{2nwh_0^2} = \frac{3.41202.1680}{2.3.90.29^2}$ = 457,25 [MPa]

Sehim:

$$s = \frac{FL^3}{2Enwh_0^3}\left(2 - \frac{h_1^3}{h_0^3}\right) = \frac{41202.1680^3}{2.210000.3.90.29^3}\left(2 - \frac{23^3}{29^3}\right) = 106{,}03\ [mm]$$

## 4.2 Maksimum Yüke göre mukavemet hesabı:

Maksimum yük = $m_{maksimum}$ = 7163 kg

$F = m_{maksimum}.g$ = 7163.9,81 = 70269,03 [N]

Maksimum eğilme gerilmesi:

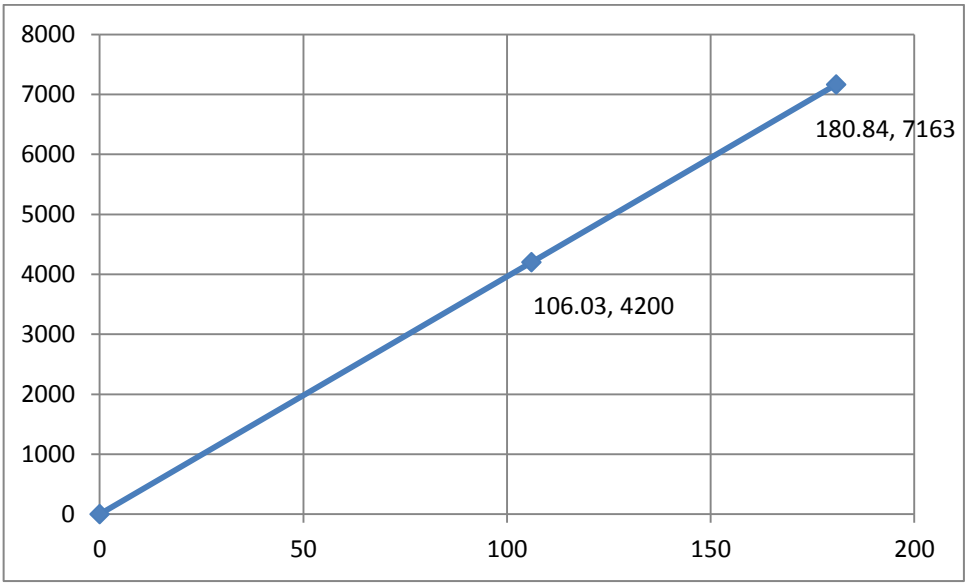
$$\sigma_{max} = \frac{3FL}{2nwh_0^2} = \frac{3.70269{,}03.1680}{2.3.90.29^2} = 779{,}83\ [MPa]$$

Sehim:

$$s = \frac{FL^3}{2Enwh_0^3}\left(2 - \frac{h_1^3}{h_0^3}\right) = \frac{70269{,}03.1680^3}{2.210000.3.90.29^3}\left(2 - \frac{23^3}{29^3}\right) = 180{,}84\ [mm]$$

Çizelge 4.2 Yaprak yayın eğilme gerilmesi ve sehim değerleri

| Yük [kg] | Maksimum eğilme gerilmesi [MPa] | Maksimum sehim [mm] |
|---|---|---|
| $m_{tasarım}$ = 4200 | 457,25 | 106,03 |
| $m_{maksimum}$ =7163 | 779,83 | 180,84 |

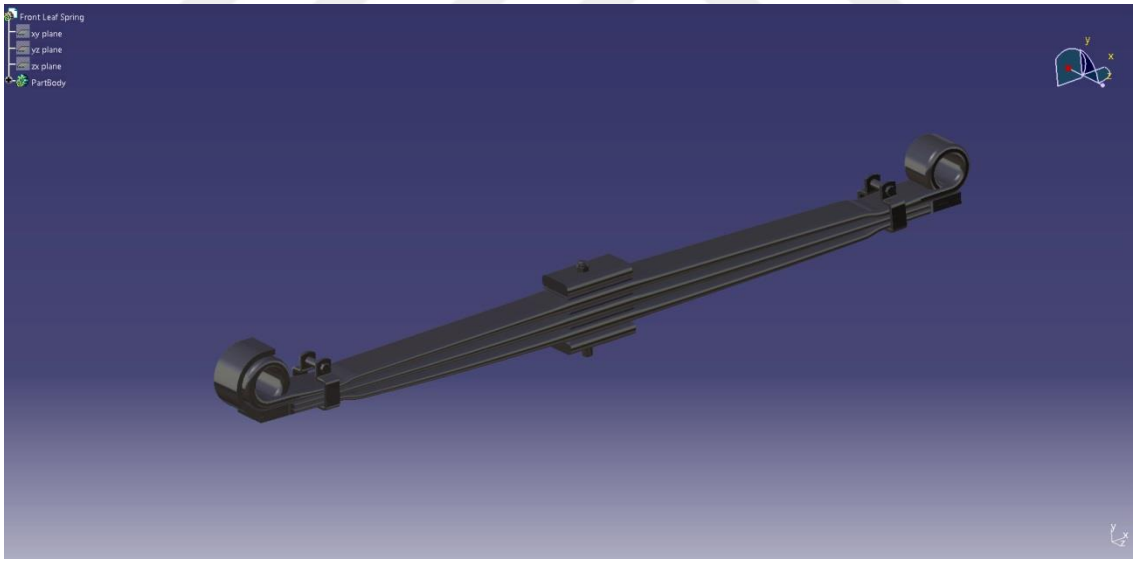



Şekil 4.1 Teorik yük-sehim grafiği

# BÖLÜM 5

## PARABOLİK YAPRAK YAYIN 3 BOYUTLU MODELLENMESİ

Parabolik yaprak yayın 3 boyutlu modellemesi CATIA V5 programında Part Design arayüzü ile yapılmıştır. Parça üzerinden ölçüler alınarak parçayla birebir ölçülerde 3 boyutlu model oluşturulmaya çalışılmıştır.




Şekil 5.1 Parabolik yayın üç boyutlu modeli

Materyal atanması ile birlikte oluşturulan 3 boyutlu parabolik yaprak yayın bilgileri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Cad modelin özellikleri

| | |
|---|---|
| Alan [$m^2$] | 1.198 |
| Hacim [$m^3$] | 0.011 |
| Yoğunluk [$kgm^3$] | 7860 |
| Kütle [kg] | 82.62 |

## 5.1 Oluşturulan 3 Boyutlu Modelin Doğrulanması

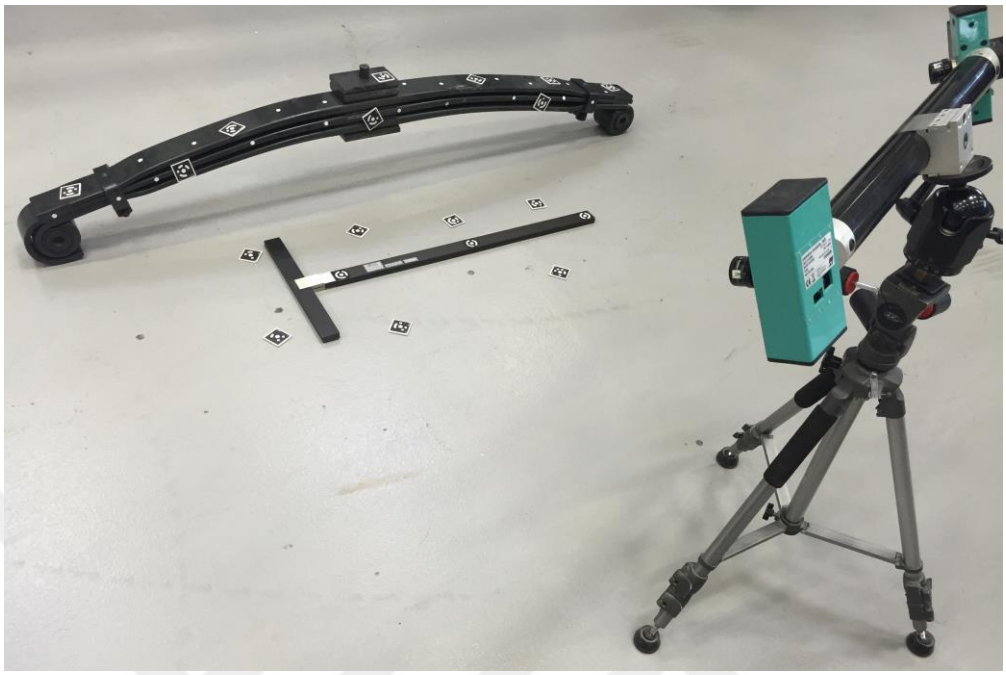
Sonlu elemanlar analizi için oluşturulan 3 boyutlu modelin parçanın kendisiyle aynı boyutlarda olması analizin doğruluğu için büyük önem taşır. Doğrulama işleminin yapılabilmesi için parçanın optik kameralar ile taranarak nokta bulutu datasının elde edilmesi ve bu datanın çeşitli yazılımlar kullanılarak 3 boyutlu model ile kıyaslanması gerekir.

Tarama işleminde ilk olarak parabolik yaprak yay üzerine işaretleyici noktalar ve çevresine (0,0) noktasına sahip T referans cetveli yerleştirilmiştir. Yay bu konumdayken çevresinde daire oluşturarak fotoğraflanmış ve bu fotoğraflar AICON Studio adlı yazılımda kullanılmıştır. Yazılım sayesinde yaprak yay üzerindeki bütün noktarın koordinatları çıkarılmıştır.



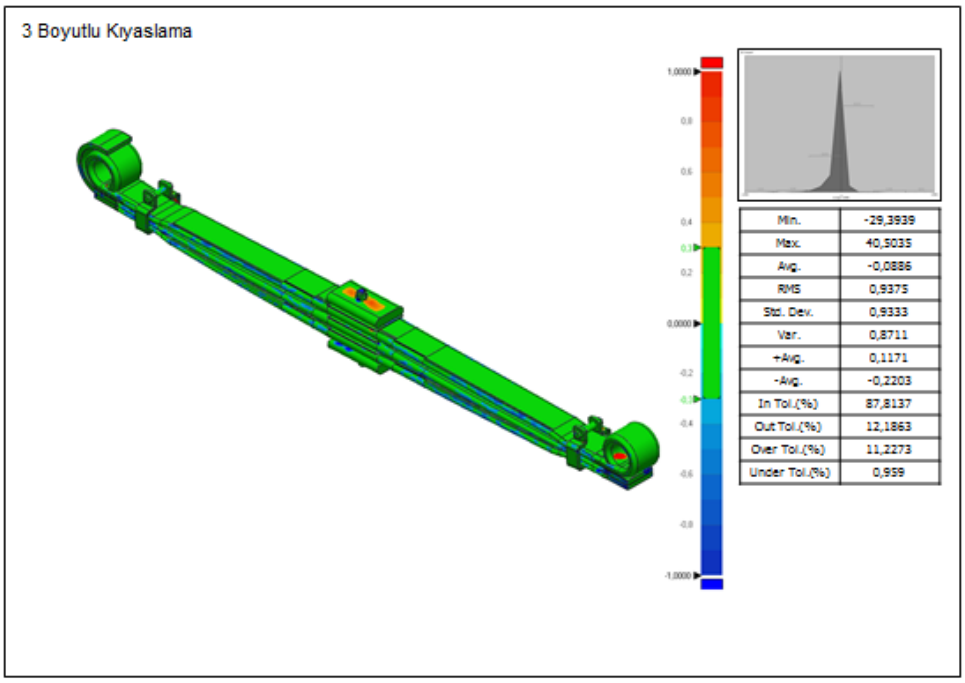
Şekil 5.2 Yay ve işaretleyiciler

İkinci aşama olarak, yaprak yayın çevresinden optik kamera ile taranarak OPTOCAT yazılımı ile yayın nokta bulutu datası elde edilmiştir.



Şekil 5.3 Tarama işlemi

Elde edilen nokta bulutu datası ile çizilmiş olan 3 boyutlu model Geomagic Control programı kullanılarak karşılaştırılmış ve %87,81 oranıyla doğrulanmıştır.




Şekil 5.4 Analiz sonucu

# BÖLÜM 6

# PARABOLİK YAPRAK YAYIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

## 6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar analizi öncelikle havacılık ve nükleer sistemlerde karmaşık problemlerin çözümü için 1960'lı yıllardan itibaren geliştirilmiş bir nümerik hesaplama yöntemidir [20]. Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir [21].

Özellikle gelişen bilgisayar teknolojisine bağlı olarak son zamanlarda çok zor ve karmaşık problemleri hızlı bir şekilde çözebilen yazılım ve donanımlar geliştirilmiştir. Buna bağlı olarak paket program olarak satılan ve çok karmaşık problemleri çözebilen yazılımlar günümüzde kolayca ulaşılabilir olmuştur. SEY bir bilgisayar modelini ona ait bir malzeme tanımlamasını, modelin yüklemesini sağlayan bir yük uygulaması ve hesap sonucu oluşan sonuç dosyalarını kapsar [20].

SEY sıvı mekaniği, akustik, katı mekaniği, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlarda karşılaşılan, karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere, düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere, kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine, lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanabilir.

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar “nod” adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır [21].

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile ifade etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir [21].

## 6.2 Parçanın Mesh Modelinin Oluşturulması

Catia V5 programı ile oluşturulan 3 boyutlu data Anys Workbench programında açılır. Sturucture Analysis arayüzünde model üzerindeki haraket kısıtları, temas yüzeyleri ve sürtünme değerleri, malzeme bilgileri ve kuvvetler tanımlanıp parça bir çok küçük eleman ve noktalara ayrılarak mesh işlemi yapılır. Sonlu elemanlar modelinin özellikleri Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Sonlu elemanlar modelinin özellikleri

| | |
|---|---|
| Eleman tipi | Dört yüzlü (Tetrahedron) |
| Eleman boyutu | 8 mm |
| Node sayısı | 93730 |
| Eleman Sayısı | 47018 |
| Kauçuk-çelik dinamik sürtünme katsayısı | 0.4 |
| Çelik-çelik dinamik sürtünme katsayısı | 0.1 |
| Elastisite modulü - Çelik | 210 [GPa] |
| Elastisite modulü - Kauçuk | 0.1 [GPa] |
| Poisson oranı | 0.3 |

Parabolik yaprak yay araç üzerindeki bağlantı şekillerinden dolayı ön göz kısımından sadece dönme hareketi yapabilirken arka göz kısmından dönme ve yatay eksende

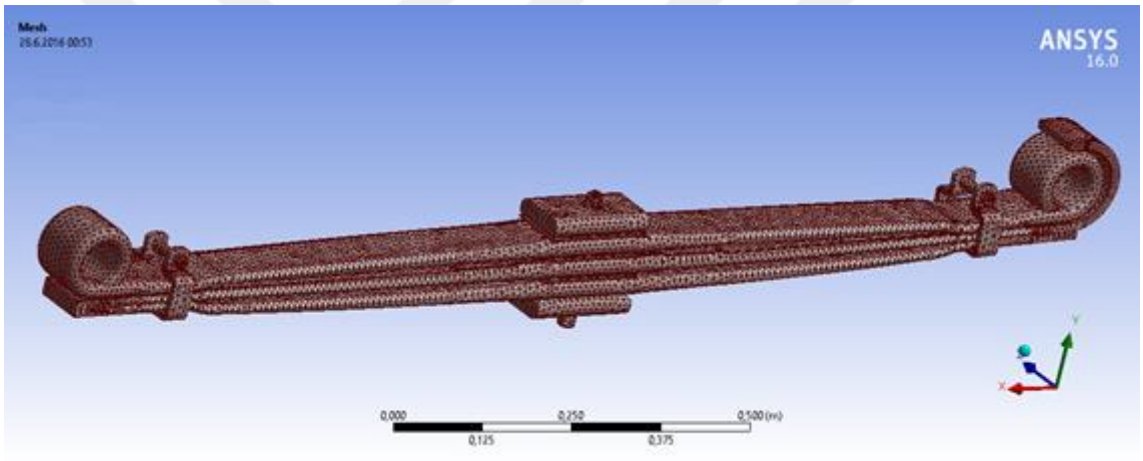
ilerleme hareketi yapmaktadır. Araç üzerindeki koşulların sonlu elemanlar analzinde de oluşturulması için aşağıda belirtilen sınır şartları kullanılmıştır:

Ön göze sadece z ekseni etrafında dönme serbestliği ( Rx:0, Ry:0, Rz:serbest, Ux:0, Uy:0, Uz:0),

- Arka göze ise z ekseni etrafında dönme serbestliği ve x ekseni boyunca hareket serbestliği verilmiştir. ( Rx: 0, Ry:0, Rz:serbest, Ux:serbest, Uy: 0, Uz:0)
- Ayrıca parçanın orta bölgesinden aşağıya doğru tasarım ve maksimum yük durumundaki kuvvetler uygulanmıştır.

R: Dönme hareketi

Ux: Öteleme hareketi

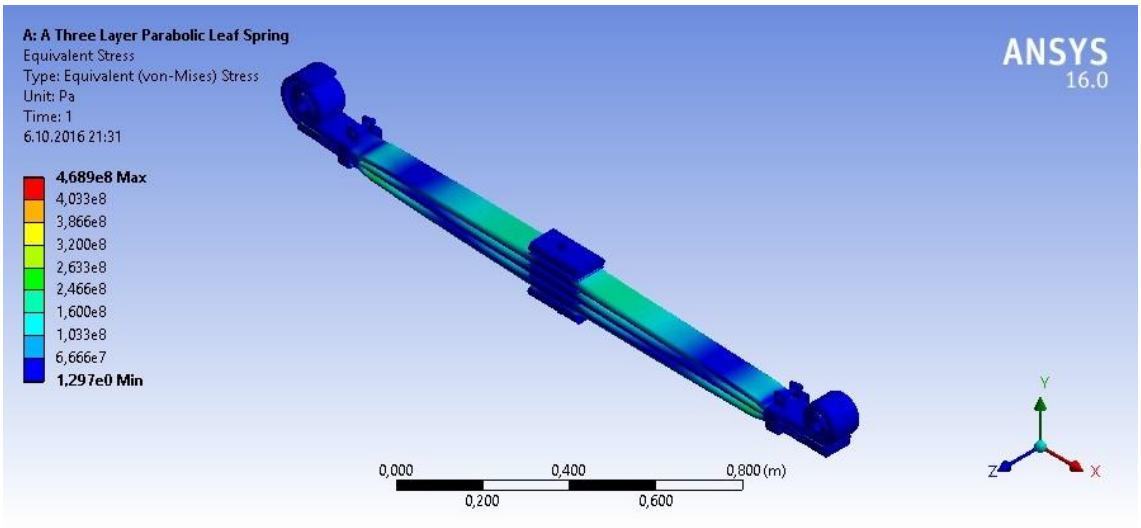



Şekil 6.1 Parçanın mesh modeli

Eleman boyutu 8 mm seçilerek yapılan meshleme sonucu 93730 adet nod ve 47018 adet eleman elde edilmiştir.

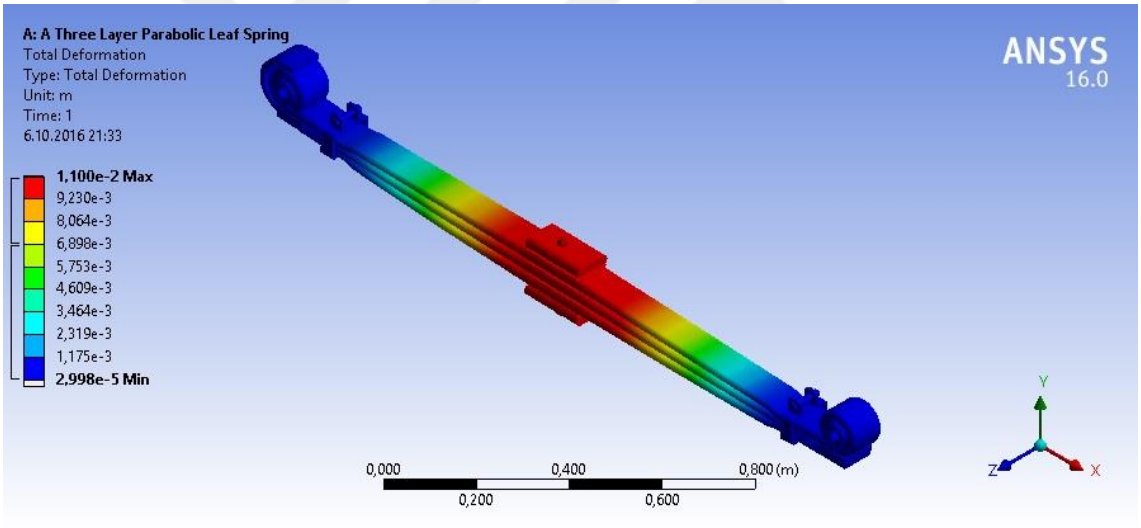
### 6.3 Parçanın Dizayn Yüküne Göre Analizi

Parçanın dizayn yükü olan 4200 kg'a göre üzerinde oluşan gerilmeler Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Parabolik yaprak yay üzerinde oluşan maksimum gerilme sonlu elemanlar yöntemine göre 468 MPa'dır.




Şekil 6.2 Yaprak yayda tasarım yükünde gerilme

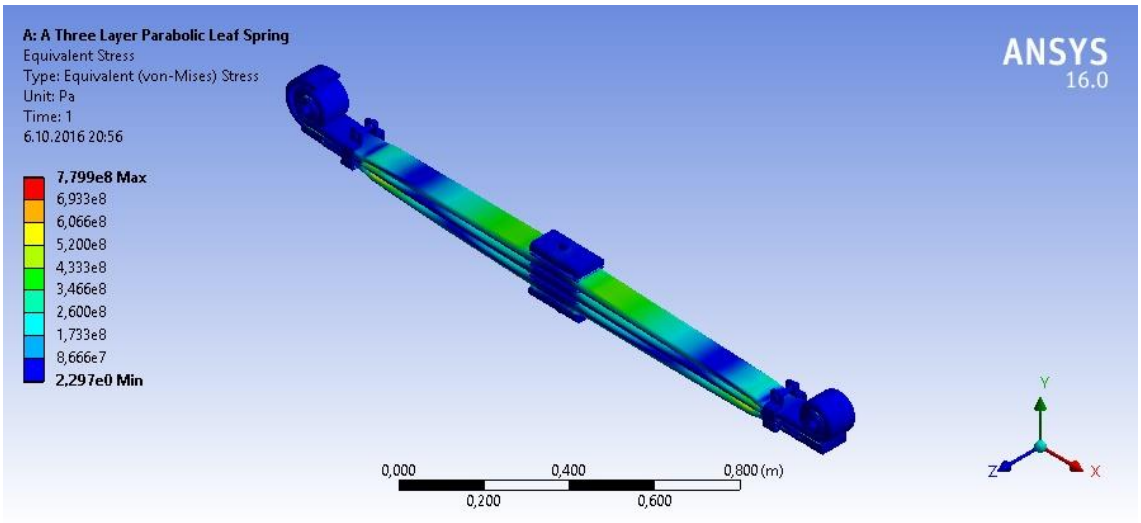
Dizayn yükünün neden olduğu sehim ise Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Parça üzerinde meydana gelen maksimum sehim değeri 110 mm'dir.




Şekil 6.3 Yaprak yayda tasarım yükünde deplasman

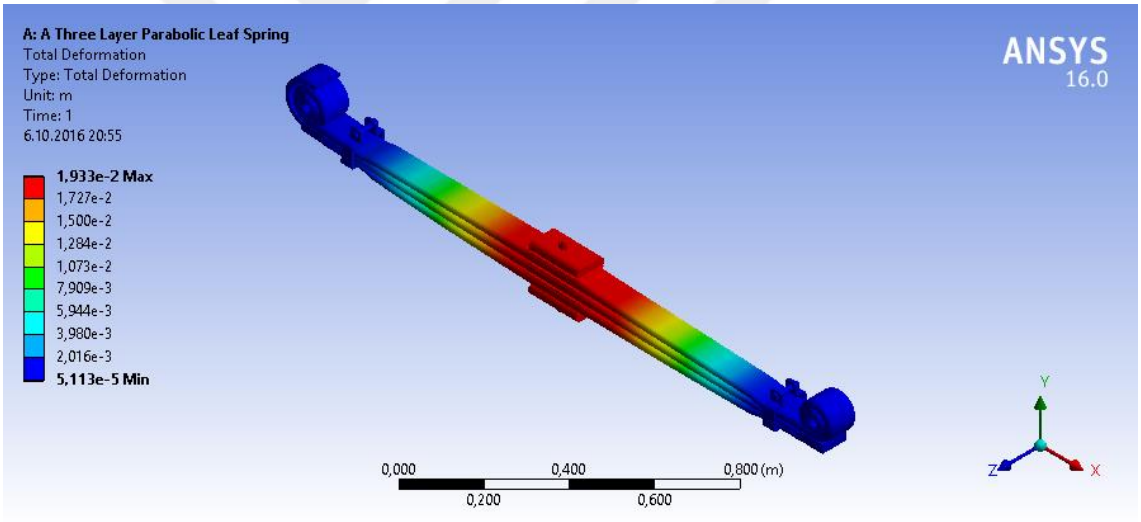
## 6.4 Parçanın Maksimum Yüke Göre Analizi

Parçanın maksimum yük olan 7163 kg'a göre üzerinde oluşan gerilmeler Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Parabolik yaprak yay üzerinde oluşan maksimum gerilme sonlu elemanlar yöntemine göre 779 MPa'dır.




Şekil 6.4 Yaprak yay maksimum yükte gerilme

Maksimum yükün neden olduğu sehim ise Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Parça üzerinde meydana gelen maksimum sehim değeri 193 mm'dir.




Şekil 6.5 Yaprak yay maksimum yükte deplasman

# BÖLÜM 7

## YORULMA

Mühendislik yapı parçalarının yorulmadan dolayı zarar görmesi ve sonucunda kopması günüzmüzde hala mühendislerin güncel problemi olarak önemini korumaktadır. Bu sorun bilhassa değişen tekrarlı yüklerin uygulandığı koşullarda ve konstrüksiyon malzemesinin mühim derecede yüzey düzgünsüzlüğü içerdiği hallerde çok önemli olmaktadır [22]. Genel kullanımı itibariyle yorulma sözcüğü malzemelerin statik gerilme ya da uzamalar altındaki davranışlarından başka, tekrarlı gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu koşullardaki davranışlarını belirlemek için kullanılmaktadır [23].

ASTM E 1823-10a 'ya göre yorulma şu şekilde tanımlanmıştır: Tekrarlı gerilme ve uzamalara maruz kalan parçalarda belirli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine ve bunun sonucunda da kırılmaya sebeb olan kalıcı yapı değişimidir, ikinci tanımlamada önemi vurgulanan dört özellik; olayın sürekli bir şekilde gelişmesi, berlirli bir bölgede lokalize olması, çatlakların büyümesi ve bunların sonucunda kırılmanın meydana gelmesidir. Uygulamada makina sistemlerine ve dolayısıyla makine sistemini oluşturan parçalara çoğunlukla yönü ve büyüklüğü düzenli veya düzensiz bir şekilde zamanla değişen gerilmeler, kuvvetler, burulma ve eğilme momentleri tesir eder [24]. Bu çeşit zorlanmaya maruz kalan makine parçası kendi akma sınırı altındaki bir gerilme değerinde umuldadık bir şekilde kırılabilir. Bu çeşit kırılmalar yorulma kırılması olarak adlandırılır [25]. Yorulma zorlanması durumunda yük arzu edildiği kadar tekrarlanabilir ve zorlanmanın zaman aralıklarına ulaşılabilir [26].

Metal mazlemerde yorulma hasarı herhangi bir belirti vermeden ve aniden kırılmanı meydana gemesi şekilinde oluştuğundan büyük önem taşır. Metal malzemelerde

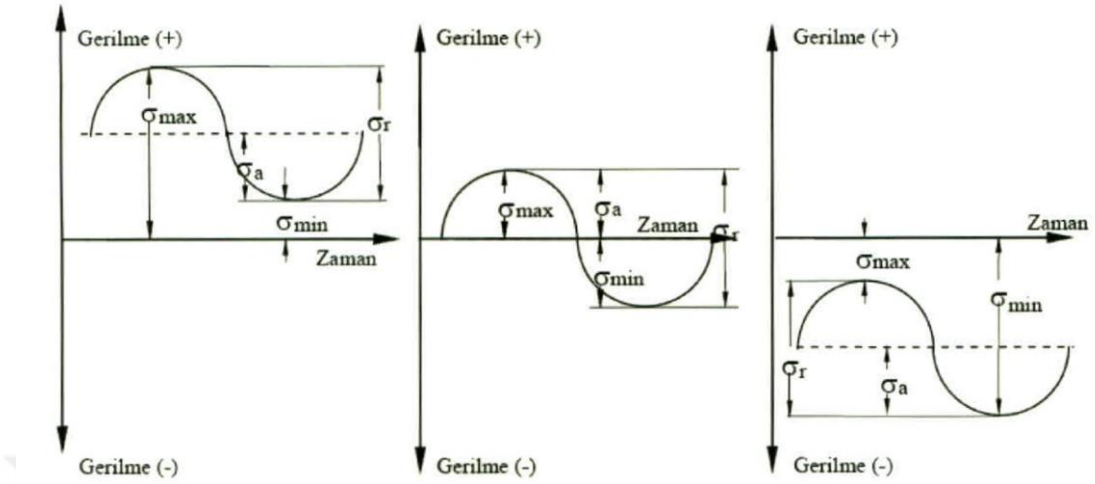
yorulma kırığı yüzeyi gevrek kırılma yüzeyinini andırır [25]. Bir yorulma kırığı çoğunlukla kırık yüzeyi dikkatlice incelenerek diğer hasar çeşitlerinde kolay bir şekilde ayrıştırılabilir. Yorulma kırığı ilerlemeye devam ettikçe, açılan kesitler birbiriyle sürtünerek yüzeyin o alanının parlak bir görünüm almasına neden olur. Bir süre sonra kalan kesit kendine uygunan yükü taşıyamayacak duruma geldiğinde ani kırılma sonucu kaba bir görünüme sahip olur. Yorulma kırığı yüzeyi üzerinde tekrar izlerini ve duraklama çizgileri görülebilir. Yorulma çatlağındaki yorulmanın durdurulduğu aralıklar veya yük değerlerinin değişimi sebebiyle, ağaç gövdelerinde görülen yaş halkalarına benzer duraklama çizgileri oluşabilir. Bu çizgiler yorulma çatlağı ucunun değişik zamanlardaki lokasyonunu gösterir ve bu çizgilerden gerilmenin her çevriminde bir adet oluşur. Duraklama çizgilerinin varlığı o kırık yüzeyinin yorulmuş olduğunun kesin kanıtıdır, fakat bunların mevcut olmaması kırık yüzeyinin yorulmadığı anlamına gelmez. Duraklama çizgilerinin meydana gelmesi için malzemenin yeterince sünek olması gerekir. Duraklama çizgilerinin tipleri incelenerek yorulma kırılmasının başlama ve büyümesiyle alakalı veriler elde edinilebilir [26].

## 7.1 Yorulma Testi

Malzemelerin yorulma testleri, yorulma cihazları olarak adlandırılan makinalarda gerçekleştirilir. Bu cihazlar ile malzemeye zamanla değişiklik gösteren sinüzoidal dalgalı gerilmeler uygulanır. Bu sinüsoidal dalgada gerilme artarak maksimumum değere ve azalarak minimum değere erişir. Dinamik gerilmelere maruz kalan makine elemanlarında gerilmelerin maksimum değerleri ve bu gerilmelerin periyodik değişimi yani tekrarı önem arz ader. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler elemanın iç bünyesinde ayrılmalara ve yıpranmalara neden olduğu için kopma olayı, statik sınırların oldukça altında meydana gelir. Dinamik gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç yapısındaki değişikliklere yorulma, malzemenin kopuncaya kadar dayanıklılığını koruduğu süre ise yorulma ömrü olarak adlandırılır [27].

Yorulma testi çoğunlukla sinüzoidal yük uygulanarak gerçekleştirilir. Bu sayede yorulma yükünün sahip olduğu durum Şekil 7.1‘de gösterilmiş olan birkaç parametre ile tanımlanabilir. Maksimum ve minimum gerilmeyi belirterek diğer gerilme

parametreleri; gerilme genliği $\sigma_m$ , gerilme aralığı $\sigma_a$, gerilme oranı R ve ortalama gerilme $\sigma_{ort}$ gibi parametreler basitçe bulunabilir.




Şekil 7.1 Yorulmada tipik gerilme-zaman eğrileri

Yorulma olayında gerilmenin basma veya çekme şeklinde etki etmesine göre üç tip çevrim bölgesi vardır. İlk bölgede kuvvetin en büyük gerilme değeri de en küçük gerilme değeri de negatif değer gösterir. Bu bölgeye negatif tekrar bölgesi denir. İkinci bölgede gerilme çekme ile basma arasında değişiklik gösterir. Burası alternatif bölge olarak adlandırılır. Üçüncü bölgede ise kuvvetin en büyük gerilme değeri de en küçük gerilme değeri de pozitif değer gösterir. Bu bölgeye ise pozitif tekrar bölgesi denir.

### 7.1.1 Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi

Herhangi bir yük genliğinde verilmiş olan bir ömür süresi için, yorulma dayanımı ortalama gerilme ($\sigma_m$) değerine bağlıdır. Verilen aynı yorulma ömrü için, gerilme genliği ($\sigma_a$) ortalama gerilme arttıkça azalmaktadır. Çelik gibi metaller yorulma ömrünün sonsuz olduğu bir gerilme değerlerine sahiptirler. Bu durum için yorulma dayanımı, sürekli mukavemet sınırı şeklinde ifade edilir. Alüminyum alaşımı ve benzeri diğer malzemelerin sürekli mukavemet sınırları yoktur. Bu yüzden herhangi bir yorulma ömrü belirlenmelidir.

### 7.1.2 Gerilme-çevrim sayısı (S/N) eğrisi

Verilen maksimum gerilme seviyesinde hasarın oluştuğu çevrim sayısına yorulma ömrü denir. Yorulma ömrü terimini tam anlamıyla ifade edebilmek için, ortalama gerilme veya yorulma gerilme oranı R'ye gereksinim vardır. Bu şekildeki testlerin çıktıları, logaritmik ölçekte hasarın oluştuğu çevrime karşılık, maksimum yorulma gerilmesi olarak grafik halinde verilir. S-N (Gerilme-Çevrim sayısı) eğrisi olarak adlandırılan bu grafik, malzemenin yorulmasını temsil eden genel metodlardan birisidir. Birbirini takip eden gerilme malzemeye uygulandığın takdirde bu eğride, hasar için çevrim sayısı (N), gerilme genişliği (S)'nin bir fonksiyonu olarak görülür. S-N eğrisinin eğimi, malzemeden malzemeye değişir ve malzemenin yorulma direncinin hakkında bir veren bir ölçüdür [28].

## 7.2 Yorulma Olayının Gelişimi

Yorulma olayının meydana gelebilmesi için makine parçasına veya malzemeye çekme gerilmesinin uygulanması, bu gerilmede değişimlerin yada dalgalanmaların meydana gelmesi ve bu sırada plastik şekil değişiminin oluşması gerekir. Üç faktörden herhangi birinin olmaması durumunda yorulma çatlağı oluşmaz ve ilerleyemez. Çekme gerilmesinde oluşan değişmeler ve dalgalanmalar çatlağı başlatırken, çatlağın ilerlemesi ise çekme gerilmesinin tesiriyle gerçekleşir.

Yorulma üzerine yapılan ilk çalışmarda çevrim sayısını tespit etmek için sabit büyüklükte dinamik gerilmelerle malzemeler yükleniyordu. Daha sonra gerçekleştirilen araştırmalarda ise yorulma hasarlarının metalurjik hatalardan ve tasarımdan kaynaklandığı, çatlakların süreksizliklerden başlayıp ilerlediğinin tespit edilmesi üzerine yorulmanın bazı kademelerden geçerek oluştuğu ve ilerlediği düşüncesine ulaşıldı. Kırılma mekaniği bakımından bir yapı veya makine parçasının ömrü üç aşamada incelenir. Bu aşamalar, üretimden kaynaklanan bir problemin veya sürünme, yorulma tesiriyle bir mikro seviyedeki çatlağın oluşumu olan çatlak başlangıcı aşaması, kırılma tokluğu ya da gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilen kararlı çatlak ilerleme aşaması ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın gerçekleştiği kırılma aşamasıdır [29].

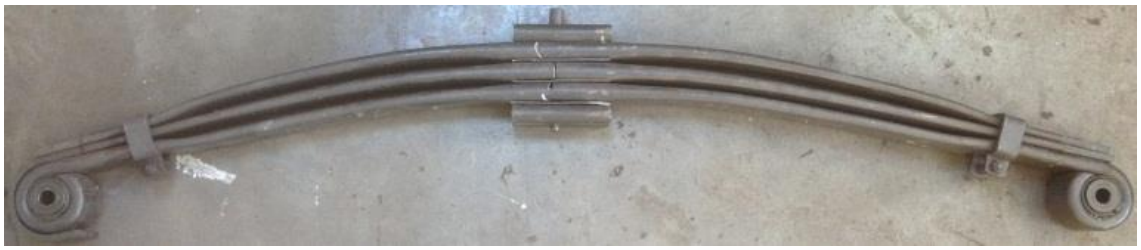
# BÖLÜM 8

# PARABOLİK YAPRAK YAYIN FİZİKSEL TESTİ

Süspansiyon sistemlerinde kullanılan çok katlı parabolik yaprak yayın SEY ile gerçekleştirilen statik gerilme ve yorulma analizlerinin sonuçlarının doğrulanması için deneysel testlere ihtiyaç vardır.

## 8.1 Prototip ve Fiziksel Test

Yorulma dayanımının deneysel testlerle incelenmesi amacıyla Catia V5 yazılımı ile oluşturulan yaprak yay modelinin birebir ölçülerinde Şekil 8.1'de görülen prototipi üretilmiştir.



Şekil 8.1 Yaprak yay prototipi

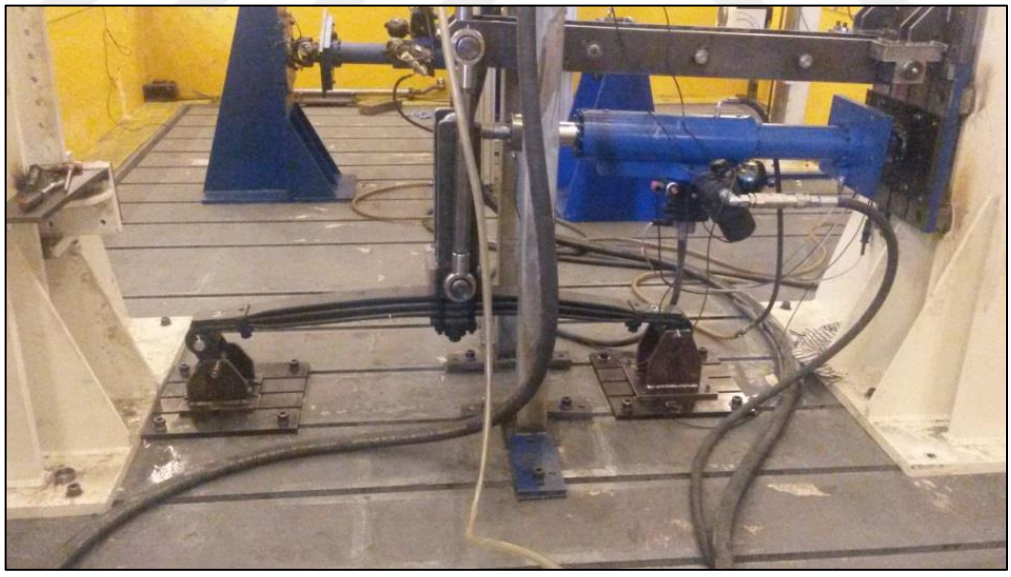
Üretilen prototip Çizelge 8.1'de gösterilen değerler kullanılarak kırılana kadar test edilmiştir. Şekil 8.2'de görüldüğü gibi yaprak yay sağ tarafta sadece dönme hareketi yapabilirken sol tarafta yatay ilerleme ve dönme hareketlerini gerçekleştirebilmektir. Parça araç içersinde de bu şekilde hareket etmektedir.

Çizelge 8.1 Test bilgileri

| | |
|---|---|
| Test Hızı | 0.78 Hz |
| Test Yük Max. | 7163 kg |
| Test Yükü Min. | 2020 kg |
| Min. Çevrim Sayısı | 100.000 cycle |

Test ekipmanlarI şunlardır:

- Hidrolik Silindir 1: ±160000 N, 1 Adet
- Yük Ölçer 1: MS Cell, SL400, ±200000 N, 1 Adet
- LVDT 1:Messotron, BTL7, Strok: 400 mm, 1 Adet
- Hidrolik Silindir 2: ±15000 N, 1 Adet
- Yük Ölçer 2: AEP Transducers, TC8, , ±25000 N, 1 Adet
- LVDT 2: Messotron, DPO 400, 320 mm, 1 Adet



Şekil 8.2 Test düzeneği

## 8.2 Test Sonuçları

Parabolik yaprak yayın kırılana kadar herbir yay için ayrı ayrı yapılan 9 adet deney sonundaki ömür değerleri Çizelge 8.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.2 Rig testi sonucunda elde eldilen ömür değerleri

| Numune Numarası | Test Ömrü [cycle] |
|---|---|
| 1 | 162620 |
| 2 | 171800 |
| 3 | 166404 |
| 4 | 168590 |
| 5 | 165842 |
| 6 | 163085 |
| 7 | 176213 |
| 8 | 162180 |
| 9 | 248399 |

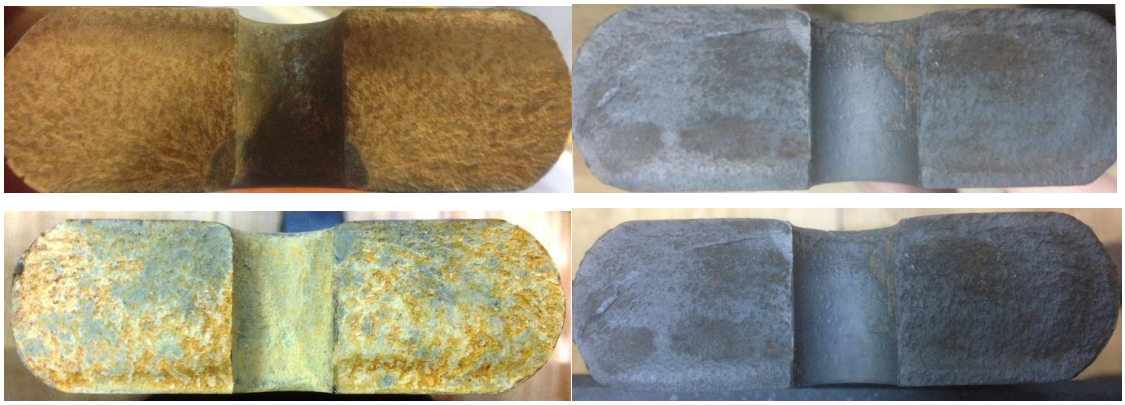
Ayrıca bu 9 prototip testlerinden bir tanesinde parçanın çeşitli bölgelerine gerinim ölçerler yerleştirilmiş ve kuvvet-gerilim verileri toplanmıştır. Dizayn ve maksimum yük için gerinim ölçülerden toplanan verilerden en yüksek değerler Çizelge 8.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 8.3 Gerinim ölçer ölçüm sonuçları

| Yük | Maksimum gerilme | Sehim |
|---|---|---|
| Tasarım yükü | 465 MPa | 109 mm |
| Maksimum yük | 775 MPa | 190 mm |

## 8.3 Yaprak Yayın Kırılmasının İncelenmesi

Söz konusu makas katının kırık kesiti incelendiğinde, malzemenin yorulmasına bağlı olarak oluşan yorulma halkaları Şekil 8.3'te görülmektedir. Bu halkaların oluşum nedeni malzemenin ani yük değişimlerine zorlanması veya dinamik yük altında tekrarlı zorlamalar ile çalışması sonucu malzemede çatlağın oluşması ve çatlağın merkezinden onu çevreleyen eş eksenli halkaların oluşması sonucudur.



Şekil 8.3 Kırılma yüzeyleri

Malzemenin kimyasal analizi:

Çizelge 3.1'den görüleceği gibi malzemeye ait kimyasal elementlerin % dağılımları, TS EN10089 - Su Verilmiş ve Temperlenmiş Yaylar için Sıcak Haddelenmiş Çelikler Teknik Standardı'na göre uygundur.

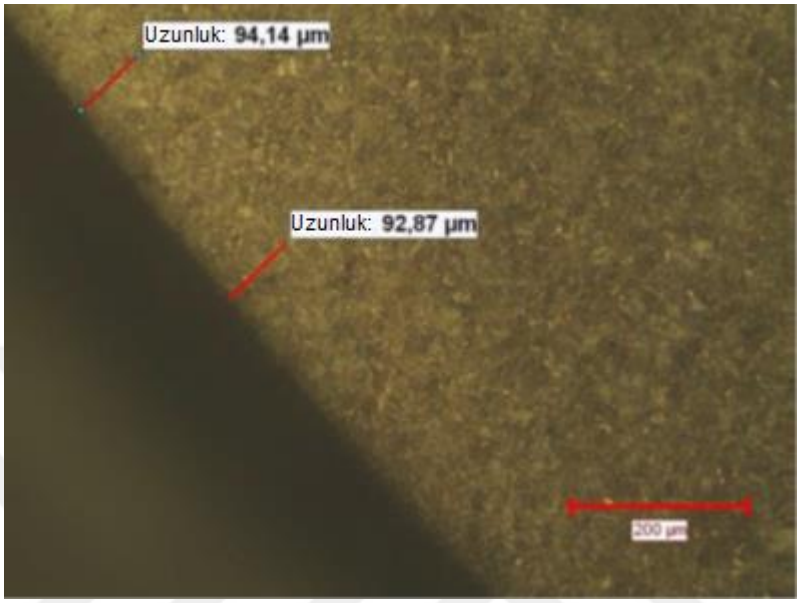



Şekil 8.4 Kırılma kesitinden alınan parçalar

Seçilen kırılma kesiti üzerinde A ile işaretlenmiş alanda dekarbürizasyon analizi, B olarak işaretlenmiş kısımda kalıntı, faz yapısı ve tane boyutu analizleri yapılmış iken C kısmında sertlik taraması yapılmıştır.

Malzeme dekarbürizasyon analizi:

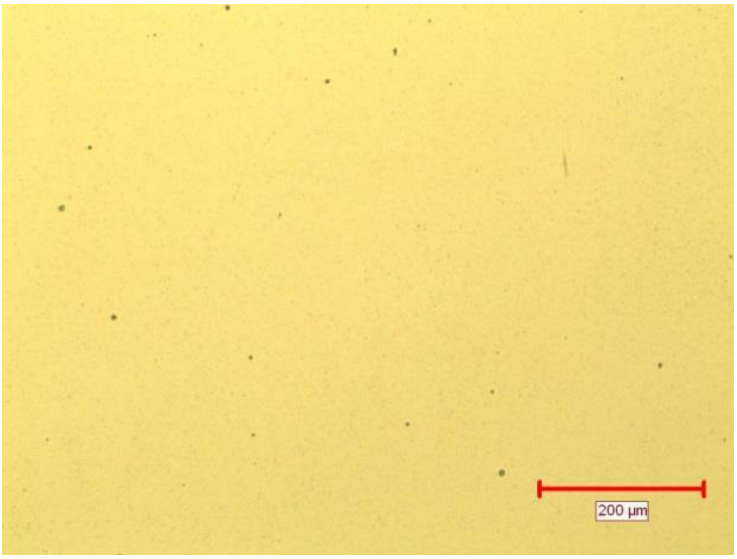
- Malzemede kabul edilebilir dekarbürizasyon derinliği maksimum 250 µm'dir. İnceleme sonucu dekarbürizasyon derinliği maksimum 94,14 µm olarak tespit edilmiştir.




Şekil 8.5 Dekarbürizasyon derinliği

Malzeme kalıntı analizi:

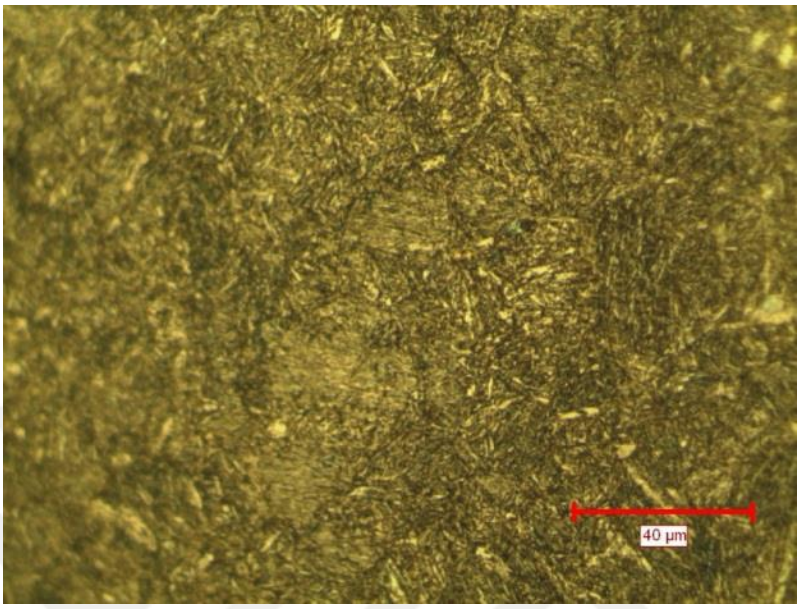
- Malzemede bulunan metalik olmayan kalıntı tipleri ASTM-E45'e göre incelenmiş olup C tipi ince silikat ve D tipi küresel oksit kalıntılarına rastlanmıştır. İndeks numaraları C tipi için 0,5 ve D tipi için ince 0,5'e ve kalın 1'e uymaktadır.




Şekil 8.6 Metalik olmayan kalıntı tayini

Malzeme mikroyapısı analizi:

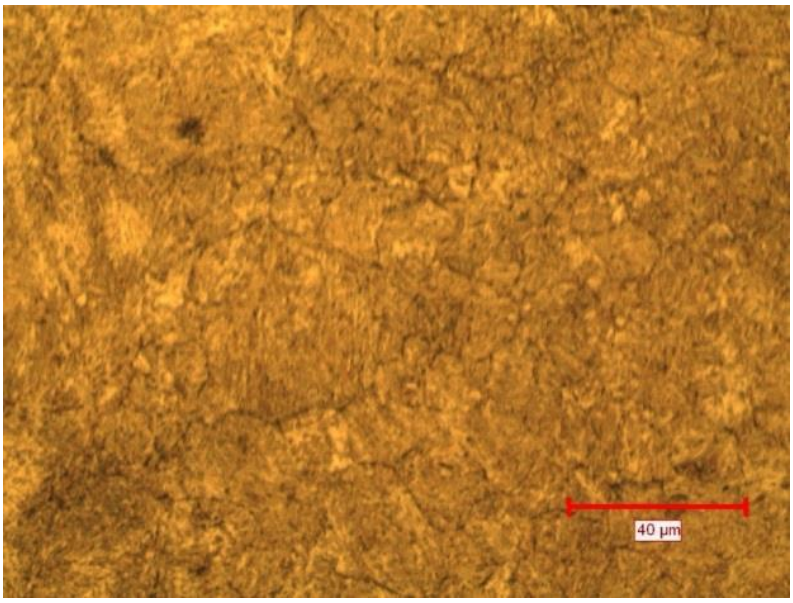
- Malzeme mikroyapısı, su verilmiş ve temperlenmiş yay çeliklerinde görülmesi beklenen Temperlenmiş Martenzit yapısına sahiptir.




Şekil 8.7 Mikro yapı / Temperlenmiş martenzit

Malzeme tane boyutu analizi:

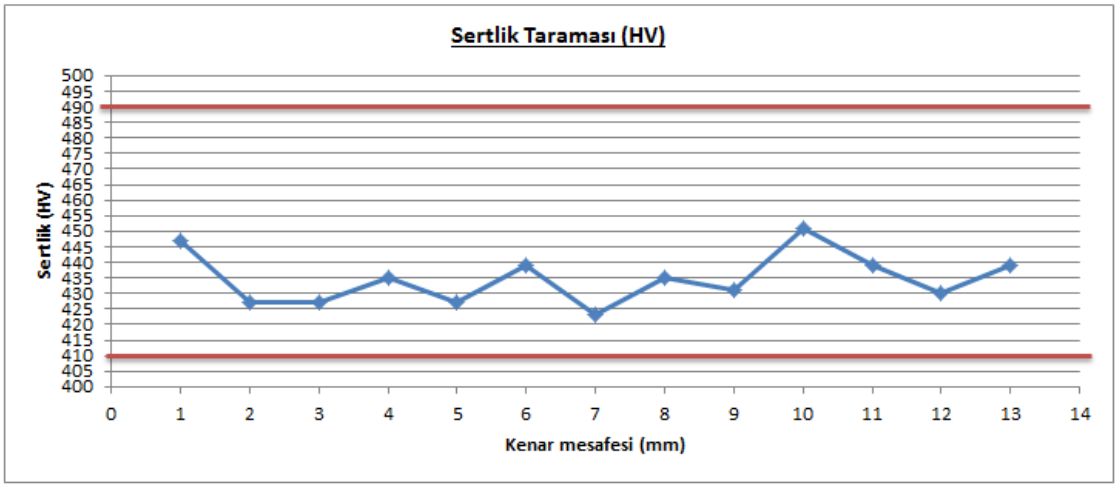
- Ortalama ASTM tane boyutu istenilen speğe göre minumun 5'tir. Yapılan inceleme sonucu ASTM tane boyutu ortalama 8'e uymaktadır.




Şekil 8.8 Tane boyutu

Kırılma kesitinin sertlik taraması:

Sertliğin kesitte homojen dağıldığı (yüzey – çekirdek farkı 23 HV içerisinde ölçülmüştür) gözlenmistir.




Şekil 8.9 Sertlik taraması sonuç grafiği

Kat arası şimlerin kalınlık analizi:

Söz konusu plakaların ölçümleri yapılmış olup 3,11 - 3,01 mm arası değerler ölçülmüştür. Teknik resimdeki ölçü 3 ± 0,15 mm spesifikasyonuna uygun olduğu görülmüştür.




Şekil 8.10 Plakalar üzerinde belirlenen noktalar

Çizelge 8.4 Plakaların kalınlık değerleri

| Numune | 1.(mm) | 2.(mm) | 3.(mm) | 4.(mm) | 5.(mm) | 6.(mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.Plaka | 3,04 | 3,08 | 3,01 | 3,01 | 3,07 | 3,05 |
| 2.Plaka | 3,11 | 3,1 | 3,03 | 3,01 | 3,04 | 3,05 |
| 3.Plaka | 3,07 | 3,08 | 3,09 | 3,09 | 3,1 | 3,09 |

Söz konusu takozların ölçümleri yapılmış olup 29,18 - 28,83 mm arası değerler ölçülmüştür. Teknik resimdeki ölçü 29 ±0,30 mm olduğu için toleransa uygun olduğu görülmüştür.




Şekil 8.11 Takozlar üzerinde belirlenen noktalar

Çizelge 8.5 Takozların kalınlık değerleri

| Numune | 1.(mm) | 2.(mm) | 3.(mm) | 4.(mm) | 5.(mm) | 6.(mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Takoz üst kat | 29,09 | 29,18 | 29,1 | 29,15 | 29,15 | 28,96 |
| Takoz alt kat | 28,89 | 28,87 | 28,83 | 29,01 | 28,96 | 28,86 |

2.kat düzlemsellik:

Makas 2.katına düzlemsellik mastarı ile bakıldığında 0,4 mm geçmediği 0,35 mm'nin altında kaldığı görüldü. Teknik resimde düzlemsellik 160 mm'de 2 mm olarak görülmektedir. Bu makas katında teknik resime uygun olduğu görülmüştür.




Şekil 8.12 2.kat düzlemsellik

3.kat düzlemsellik:

Makas 3.katına düzlemsellik mastarı ile bakıldığında 0,35 mm geçmediği 0,30 mm'nin altında kaldığı görüldü. Teknik resimde düzlemsellik 160 mm'de 2 mm olarak görülmektedir. Bu makas katında teknik resime uygun olduğu görülmüştür.




Şekil 8.13 3.kat düzlemsellik

# BÖLÜM 9

# PARABOLİK YAPRAK YAYIN GÜVENİRLİK ANALİZİ

## 9.1 Güvenirlik Analizi

Bir teknik sistemin, belirli şartlar altında ve öngörülen bir zaman diliminde, talep edilen fonksiyonu, yeterli bir şekilde yerine getirme olasılığına güvenirlik denir.

Güvenirlik, emniyet fikrinin farklı bir tanımı olarak zannedilse de aslında güvenirlik ve emniyet terimleri birbirinden farklıdır.

Klasik konstrüksiyon yöntemi, emniyet temeline dayanır. Bu metotta bir teknik sistemin işe yarar durumu, sistem elemanlarının yeterince uzun bir zaman dilimi boyunca dayanması ile elde edilir. Bu işlem, makine elemanları bilim dalının yasalarına göre ve uygun bir emniyet katsayısı belirlenerek gerçekleştirildiği takdirde, makine sistemin işe yarar olduğu düşüncesi kabul edilebilir. Fakat bu yönteme göre, sistemin işe yarama süresi hakkında net bilgi verilemez.

İstatistik kontstrüksiyon olarak adlandırılan yöntemin temel kuralı ise güvenirliktir. Temel olarak güvenirlik, ihtimaller teorisini ve istatistiksel analizi esas almaktadır.

Makine mühendisliği alanında, belirli bir zaman dili içinde, hasar oluşmaması için, ihtimaller hesabının yapılması büyük önem taşır [30].

Güvenirlik hesabında çoğunlukla kullanılan dağılım fonksiyonları aşağıda gösterilmiştir.

- Normal dağılım fonksiyonu
- Üstlü dağılım fonksiyonu

- Weibull dağılım fonksiyonu

## 9.2 Normal Dağılım Fonksiyonu

Normal dağılım fonksiyonu Gauss-Laplace fonksiyonu olarakta adlandırılır. Dağılımın yoğunluk fonskiyonu x genel bir değişken olmak üzere aşağıda gösterilmiştir

$$f(x) = \frac{1}{S_x\sqrt{2\pi}} . exp\left[-\frac{(x-\overline{x})^2}{2.{S_x}^2}\right] \quad (9.1)$$

Bu fonksiyon z standart değişkenine göre yazıldığında,

$z = \frac{(x-\overline{x})}{S_x}$ dönüşümü yapılırsa (9.2)

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} . exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \quad (9.3)$$

şeklinde bir fonksiyona ulaşılır.

Herhangi bir a değeri için $z_\alpha = \frac{(a-\overline{x})}{S_x}$ eşitliği kabul edilirse, x değişkeninin a'dan yüksek olma olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$P(x>a) = P(z>z_\alpha) = \alpha$ (9.4)

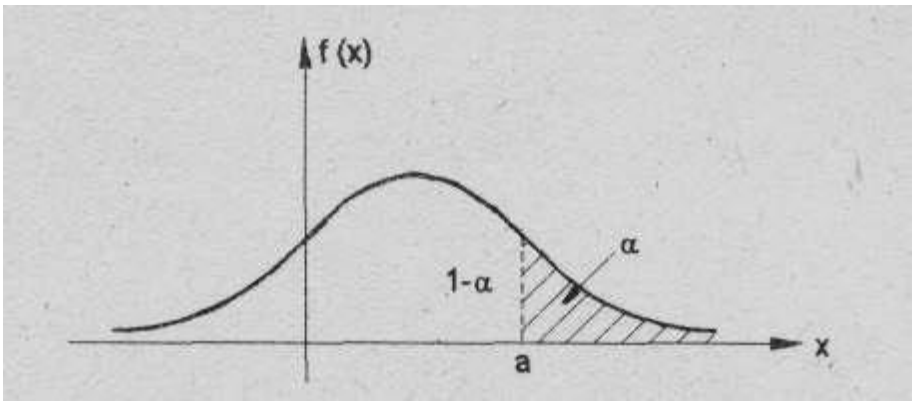
Burada α Şekil 9.1'de gösterilen taralı alandır. α 'nın $z_\alpha$' ya bağlı değeleri Çizelge 9.1'de verilmiştir.

Şekil'de eğrinin altında kalan alanın 1 olduğu düşünülürse, işe yaramama ve güvenirlik değerleri;

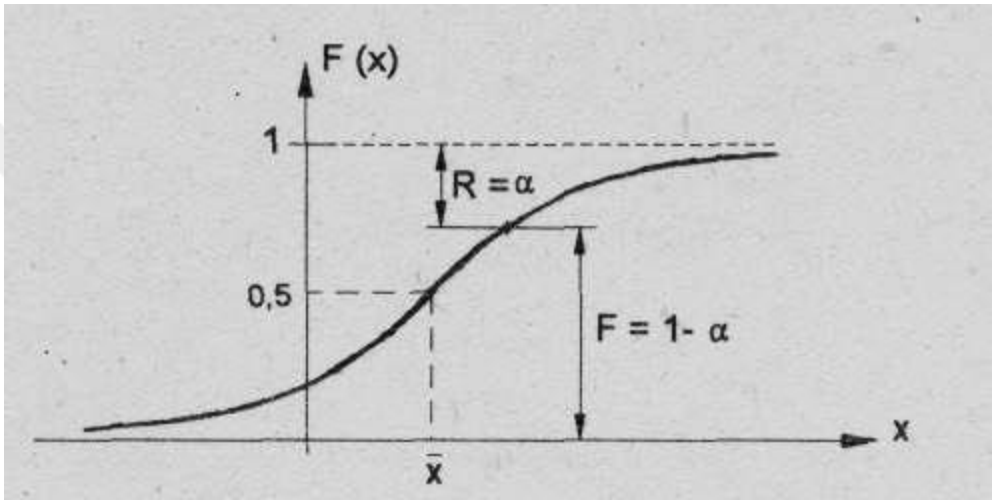
$$\int_{-\alpha}^{z_\alpha} f(z).dz = F = 1 - \alpha \quad (9.5)$$

$$\int_{z_\alpha}^{+\infty} f(z).dz = R = \alpha \quad (9.6)$$

şeklinde elde edilebilir [25].




Şekil 9.1 Dağılım fonksiyonu




Şekil 9.2 Birikimli dağılım fonksiyonu

$z_\alpha$ bağıntısı a'ya göre yazıldığında,

$$a = \bar{x} + z_\alpha . S_x \tag{9.7}$$

elde edilir.Buna göre $z_\alpha = \pm 1$ değerleri arasında kalan alan, bütün alanın % 68,26' sıdır. Bu değer

$z_\alpha$ = ±2 için % 95,44

$z_\alpha$ = ±3 için % 99,865' tir.

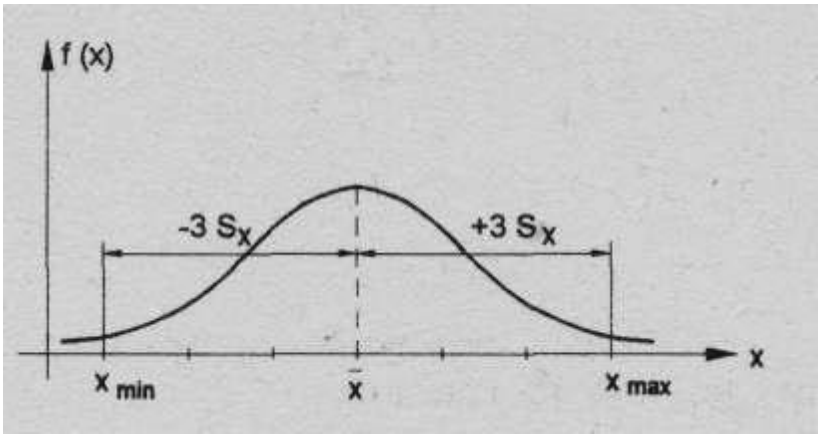
Bu durum pratikte $z_\alpha$'nın sınırları ±3 alınarak hesap kolaylığı sağlanır. Normal dağılım için x'in maksimum ve minumum değerleri,

$$x_{max} = \bar{x} + 3.S_x \ ; x_{min} = \bar{x} - 3.S_x \tag{9.8}$$

şeklindedir. Buna göre ortlama ve standart sapma değerleri,

$$\bar{x} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} ; S_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \quad (9.9)$$

olarak bulunuR [25].




Şekil 9.3 $z_\alpha$'nın sınırlandırılması

Makine mühendisliği alanında x değişkeni gerilme, ömür vs.değerlerine karşılık gelebilir.

Değişken gerilme olduğu takdirde:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sigma_i \quad (9.10)$$

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}} \quad (9.11)$$

$$f(\sigma) = \frac{1}{S_\sigma \sqrt{2\pi}} . exp\left[ - \frac{(\sigma - \bar{\sigma})^2}{2.{S_\sigma}^2} \right] \quad (9.12)$$

$$z_\alpha = \frac{\sigma - \bar{\sigma}}{S_\sigma} \quad (9.13)$$

Değişken ömür olduğu taktirde:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} N_i \quad (9.14)$$

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (N_i - \bar{N_i})^2}{n-1}} \quad (9.15)$$

$$f(N) = \frac{1}{S_N \sqrt{2\pi}} \cdot exp\left[ - \frac{(N - \bar{N})^2}{2 \cdot {S_N}^2} \right] \quad (9.16)$$

$$z_\alpha = \frac{N - \bar{N}}{S_N} \quad (9.17)$$

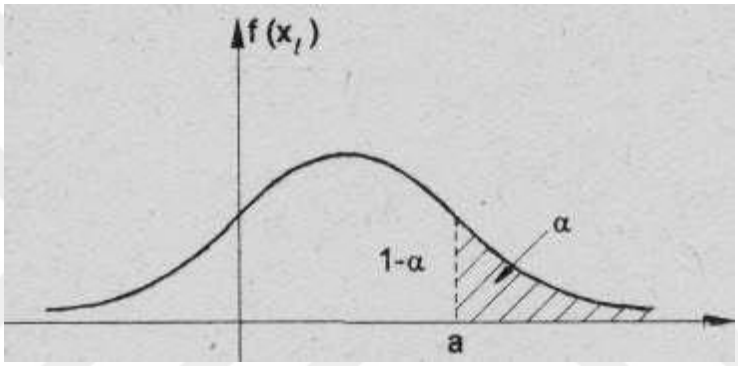
Çoğunlukla ömür değerlerinin logaritması, bir normal dağılım gösterir. Bu durumda hesaplar aşağıdaki tarzda yapılır.

Gelişigüzel değişken x' in logaritması $x_L$ normal bir dağılım gösterirse, x' in dağılımına "Logaritmik Normal Dağılım" denir. Bu dağılımın ortalaması ve standart sapması, genel bir değişken için aşağıdaki gibidir [30].

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \tag{9.18}$$

$$S_{X_L} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X_l})^2}{n-1}} \tag{9.19}$$

$x_L$ normal bir dağılım gösterdiğinden, işlemler normal dağılıma göre yapılır.




Şekil 9.4 Logaritmik normal dağılım fonksiyonu

Çizelge 9.1 Normal dağılım fonksiyonu

| $z_\alpha$ | .00 | .01 | .02 | .03 | .04 | .05 | .06 | .07 | .08 | .09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .0 | .0000 | .0040 | .0080 | .0120 | .0160 | .0199 | .0239 | .0279 | .0319 | .0359 |
| .1 | .0398 | .0438 | .0578 | .0517 | .0557 | .0596 | .0606 | .0606 | .0714 | .0753 |
| .2 | .0793 | .0832 | .0871 | .0910 | .0948 | .0987 | .1026 | .1064 | .1103 | .1141 |
| .3 | .1179 | .1217 | .1255 | .1293 | .1331 | .1368 | .1406 | .1443 | .1480 | .1517 |
| .4 | .1554 | .1591 | .1628 | .1664 | .1700 | .1736 | .1772 | .1808 | .1844 | .1879 |
| .5 | .1915 | .1950 | .1985 | .2019 | .2054 | .2088 | .2123 | .2157 | .2190 | .2224 |
| .6 | .2257 | .2291 | .2224 | .2357 | .2389 | .2422 | .2454 | .2486 | .2517 | .2549 |
| .7 | .2580 | .2611 | .2642 | .2673 | .2704 | .2734 | .2764 | .2794 | .2823 | .2852 |
| .8 | .2881 | .2910 | .2939 | .2967 | .2995 | .3023 | .3051 | .3078 | .3106 | .3133 |
| .9 | .3159 | .3186 | .3212 | .3238 | .3264 | .3289 | .3315 | .3340 | .3365 | .3389 |
| 1.0 | .3413 | .3438 | .3461 | .3485 | .3508 | .3531 | .3554 | .3577 | .3599 | .3621 |
| 1.1 | .3643 | .3665 | .3686 | .3708 | .3729 | .3749 | .3770 | .3790 | .3810 | .3830 |
| 1.2 | .3849 | .3869 | .3888 | .3907 | .3925 | .3944 | .3962 | .3980 | .3997 | .4015 |
| 1.3 | .4032 | .4049 | .4066 | .4082 | .4099 | .4115 | .4131 | .4147 | .4162 | .4177 |
| 1.4 | .4192 | .4207 | .4222 | .4236 | .4251 | .4265 | .4279 | .4292 | .4306 | .4319 |
| 1.5 | .4332 | .4345 | .4357 | .4370 | .4382 | .4394 | .4406 | .4418 | .4429 | .4441 |

Çizelge 9.1 Normal dağılım fonksiyonu (devamı)

| $z_\alpha$ | .00 | .01 | .02 | .03 | .04 | .05 | .06 | .07 | .08 | .09 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.6 | .4452 | .4463 | .4474 | .4484 | .4495 | .4505 | .4515 | .4525 | .4535 | .4545 |
| 1.7 | .4554 | .4564 | .4573 | .4582 | .4591 | .4599 | .4608 | .4616 | .4625 | .4633 |
| 1.8 | .4641 | .4649 | .4656 | .4664 | .4671 | .4678 | .4686 | .4693 | .4699 | .4706 |
| 1.9 | .4713 | .4719 | .4726 | .4732 | .4738 | .4744 | .4750 | .4756 | .4761 | .4767 |
| 2.0 | .4772 | .4778 | .4783 | .4788 | .4793 | .4798 | .4803 | .4808 | .4812 | .4817 |
| 2.1 | .4821 | .4826 | .4830 | .4834 | .4838 | .4842 | .4846 | .4850 | .4854 | .4857 |
| 2.2 | .4861 | .4864 | .4868 | .4871 | .4875 | .4878 | .4881 | .4884 | .4887 | .4890 |
| 2.3 | .4893 | .4896 | .4898 | .4901 | .4904 | .4906 | .4909 | .4911 | .4913 | .4916 |
| 2.4 | .4918 | .4920 | .4922 | .4925 | .4927 | .4929 | .4931 | .4932 | .4934 | .4936 |
| 2.5 | .4938 | .4940 | .4941 | .4943 | .4945 | .4946 | .4948 | .4949 | .4951 | .4952 |
| 2.6 | .4953 | .4955 | .4956 | .4957 | .4959 | .4960 | .4961 | .4962 | .4963 | .4964 |
| 2.7 | .4965 | .4966 | .4967 | .4968 | .4969 | .4970 | .4971 | .4972 | .4973 | .4974 |
| 2.8 | .4974 | .4975 | .4976 | .4977 | .4977 | .4978 | .4979 | .4979 | .4980 | .4981 |
| 2.9 | .4981 | .4982 | .4982 | .4983 | .4984 | .4984 | .4985 | .4985 | .4986 | .4986 |
| 3 | .4987 | .4987 | .4987 | .4988 | .4988 | .4989 | .4989 | .4989 | .4990 | .4990 |
| 3.1 | .4990 | .4991 | .4991 | .4991 | .4992 | .4992 | .4992 | .4992 | .4993 | .4993 |
| 3.2 | .4993 | .4993 | .4994 | .4994 | .4994 | .4994 | .4994 | .4995 | .4995 | .4995 |
| 3.3 | .4995 | .4995 | .4995 | .4996 | .4996 | .4996 | .4996 | .4996 | .4996 | .4997 |
| 3.4 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4997 | .4998 |

### 9.3 Parabolik Yaprak Yayın Ömür Testi Sonuçlarına Göre Güvenirlik Hesabı

Çizelge 8.2'de yer alan, rig testiyle elde edilmiş 9 adet parabolik yaprak yayın ömür değerleri kullanıralak güvenilirlik analizi gerçekleştirilebilir.

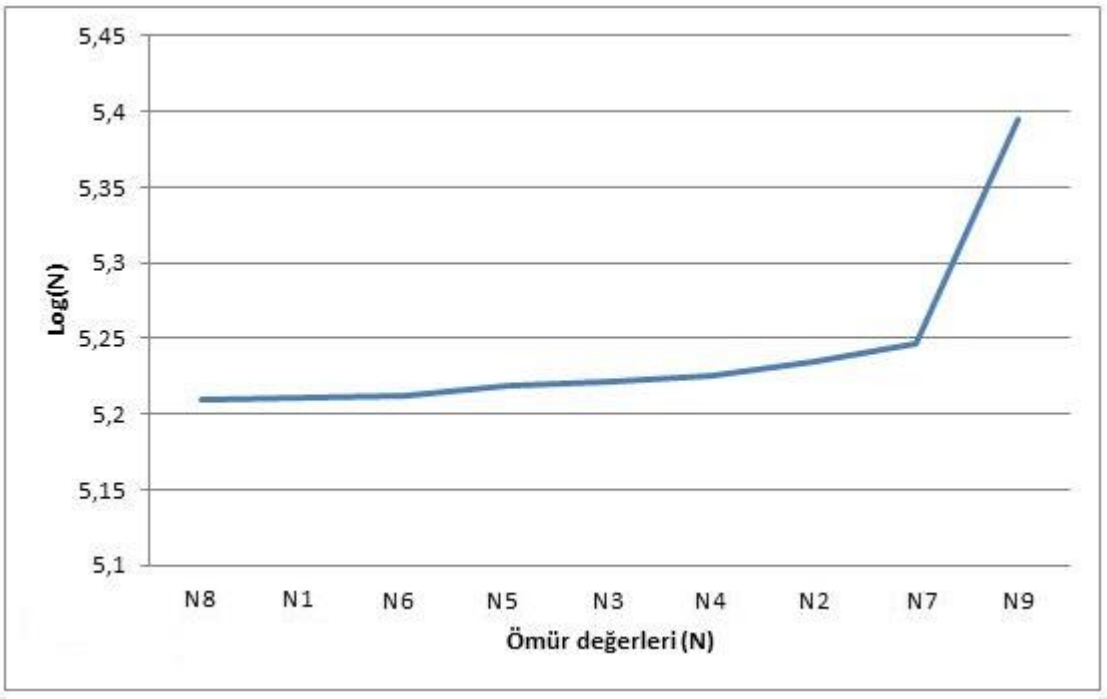
Çizelge 8.2'deki ömür değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır ve logaritmaları hesaplanır. Ömür değerlerinin sıralaması ve logaritmaları Çizelge 9.2'de verilmiştir.

Çizelge 9.2 Ömür değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması

| Ömür değerlerinin küçükten büyüğe sıralanması | Ömür değerlerinin logaritmaları |
|---|---|
| $N_8 = 162180$ | $N_{L8} = \log(N_8) = 5.209$ |
| $N_1 = 162620$ | $N_{L1} = \log(N_1) = 5.211$ |
| $N_6 = 163085$ | $N_{L6} = \log(N_6) = 5.212$ |
| $N_5 = 165842$ | $N_{L5} = \log(N_5) = 5.219$ |
| $N_3 = 166404$ | $N_{L3} = \log(N_3) = 5.221$ |
| $N_4 = 168590$ | $N_{L4} = \log(N_4) = 5.226$ |
| $N_2 = 171800$ | $N_{L2} = \log(N_2) = 5.235$ |

Çizelge 9.2 Ömür değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması (devamı)

| Ömür değerlerinin küçükten büyüğe sıralanması | Ömür değerlerinin logaritmaları |
|---|---|
| $N_7$ = 176213 | $N_{L7}$ = log($N_7$)= 5.246 |
| $N_9$ = 248399 | $N_{L9}$ = log($N_9$) = 5.395 |




Şekil 9.5 Logaritmik ömür değerlerinin grafiği

Şekil 9.5'teki dağılım, logaritmik normal dağılıma uymaktadır.

Ortalama değer ve standart sapma:

$$\overline{N}_L = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{N_{Li}}{n}\right) = \frac{N_{L1}+N_{L2}+N_{L3}+N_{L4}+N_{L5}+N_{L6}+N_{L7}+N_{L8}+N_{L9}}{n} = \frac{5{,}209+5{,}235+5{,}221+5{,}226+5{,}219+5{,}212+5{,}246+5{,}209+5{,}395}{9} =$$

$$\mathbf{5{,}241}$$

$$S_{N_L} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(N_{Li}-\overline{N}_L)^2}{n-1}} =$$

$$\frac{(N_{L1}-\overline{N}_L)+(N_{L2}-\overline{N}_L)+(N_{L3}-\overline{N}_L)+(N_{L4}-\overline{N}_L)+(N_{L5}-\overline{N}_L)+(N_{L6}-\overline{N}_L)+(N_{L7}-\overline{N}_L)+(N_{L8}-\overline{N}_L)+(N_{L9}-\overline{N}_L)}{9-1} =$$

$$\mathbf{0{,}00344}$$

Her bir ömür değeri için güvenirlik analizi yapıldığında aşağıdaki çizelge elde edilir.

Çizelge 9.3 Güvenirlik değerleri

| Ömür Değerleri | Log [N] | Z | Güvenirlik |
|---|---|---|---|
| 162180 | 5,209997296 | -9,283244569 | >%99,99 |
| 162620 | 5,211173957 | -8,941328009 | >%99,99 |
| 163085 | 5,212414018 | -8,580988374 | >%99,99 |
| 165842 | 5,219694527 | -6,465402659 | >%99,99 |
| 166404 | 5,221163762 | -6,03846921 | >%99,99 |
| 168595 | 5,226844691 | -4,38769273 | >%99,99 |
| 171800 | 5,235023159 | -2,01117582 | %52,28 |
| 176213 | 5,246037945 | 1,189524052 | %38,10 |
| 248399 | 5,395149843 | 44,51877732 | <%0,01 |

Seçilen parabolik yaprak yay hedeflenilen 100000 cycle'lık ömrünü yapılan güvenirlik analizine göre %100'e yakın bir güvenirlikle gerçekleştirir.

# BÖLÜM 10

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Tasarım ve maksimum yükünde fiziksel test ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen maksimum gerilme ve sehim değerleri Çizelge 10.1 ve Çizelge 10.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 10.1 Tasarım yükünde oluşan maksimum gerilme ve sehim değerleri

| | Maksimum gerilme | Sehim |
|---|---|---|
| Sonlu elemanlar yöntemi | 468 MPa | 110 mm |
| Fiziksel test | 465 Mpa | 109 mm |
| Sapma | 0.64 % | 0.91 % |

Çizelge 10.2 Maksimum yükte oluşan maksimum gerilme ve sehim değerleri

| | Maksimum gerilme | Sehim |
|---|---|---|
| Sonlu elemanlar yöntemi | 779 MPa | 193 mm |
| Fiziksel test | 775 Mpa | 192 mm |
| Sapma | 0.51 % | 0.52 % |

Sonlu elemanlar yöntemi sonuçlar fiziksel test sonuçlarından maksimum %91' lik sapma ile doğrulanmıştır. Ayrıca yaprak yayların kendilerinden beklenen 100000 cycle'lık ömürlerini %100'e yakın bir güvenirlik oranıyla gerçekleştireceği saptanmıştır.

Bu çalışmada bir ağır ticari araçta kullanılan üç katlı parabolik yayın teorik yorulma analizi yapılmış, yayın üç boyutlu modellinin oluşturularak sonlu elemanlar metodu ile yorulma analizi sonuçları elde edilmiştir. Bu değerler birbirlerini yüksek oranda

doğrulamıştır. Böylece sonlu elemanlar yönteminin üç katlı parabolik yaprak yayların yorulma davranışını belirlemede kullanılabilecek doğru bir metot olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR


[1] Güven, N., (2015). Bir Aracın Süspansiyon Sistemi İçin Yaprak Yay Tasarımları Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Süspansiyon Sistemleri, Motorlu Araçlar Teknolojisi, http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/S%C3%BCspansiyon%20Sistemleri.pdf, 5 Haziran 2016.

[3] Patnaik M., Yadav N., Dewangan R., (2012). "Study of a Parabolic Leaf Spring by Finite Element Method and Design of Experiments", International Journal of Modern Engineering Research.

[4] Dewangan R., Patnaik M., Yadav N., (2012). "Minimization of Stress of a Parabolic Leaf Spring by Simulated Annealing Algorithm", International Journal of Engineering.

[5] Jeremiah R., Balu S., "Stress Analysis & Optimization of Leaf Spring by Using Taguchi Method", National Journal on Advances in Building Sciences and Mechanics.

[6] Aher V.K., Sonawane P.M., (2012). "Static And Fatigue Analysis Of Multi Leaf Spring Used In The Suspension System Of LCV", International Journal of Engineering Research and Applications.

[7] Venkatesan M., Devaraj D.H., (2012). Design and Analysis of Composite Leaf Spring in Ligt Vehicle, International Journal of Modern Engineering Research.

[8] SAE International, (1980). Manual On Design And Application Of Leaf Springs, Yayın No: 978-0-89883-383-6.

[9] Sunar, Ö., (2015). "Yaprak Yaylarda Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yorulma Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

[10] Langen-Sondermann, http://ww.langensondermann.de/en/products/parabolics, 25 Ekim 2016.

[11] Polat, O., (2012). Yaprak Yayların Bilgisayar Destekli Yorulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

[12] Biber S., Parabolik Yay Üretiminde Hidrolik Oransal Servo Makinalar, Rota Teknik A.Ş., İstanbul

[13] Sayılgan, N., (2015). Ağır Ticari Araçların Havalı Süspansiyon Sisteminde Kullanılan Boru Denge Çubuğu Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] Özden, E., Yaprak Yaylarda Kompozit Malzeme Uygulama ve Yorulma Analizi, 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.

[15] Ford Otosan, (2016). Temel Süspansiyon Eğitimi, İstanbul.

[16] Sustarsic, B., Sensic, B. , Arzensek, B., Jodin, P., (2007). "The Notch Effect On The Fatıgue Strength Of 51CrV4Mo Sprıng Steel", Materials And Technology, 29–34.

[17] Peng, W., Zhang, J., Yang, X., (2010). "Failure Analysis On The Collapsa Of Leaf Spring Steels During Cold-Punching", Engineering Failure Analysis , 17: 971–978.

[18] Ersoy, M., Heissing, B., (2011). Chassis Handbook, First Edition, MercedesDruck, Berlin.

[19] Tekeli, S., (2002). "Enchement Of Fatigue Strength Of SAE 9245 Steel By Shot Peening", Materials Letters 57, 604–608.

[20] Akkuş, N., (2005). “Mekatronik Tasarımda Sonlu Eleman Uygulamaları”, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Bölümü Ders Notu, 4 - 5.

[21] Ergin, A., Bayraktarkatal, E., Ünsan Y., (2000). “Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları”, Seminer Kitabı, İstanbul, Türkiye,

[22] Eldeniz, İ., (1992). Yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde yorulma çatlak büyümesi ve tabaka ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[23] Fuchs, H.O., Stephens, K.I., (1980). Metal Fatigue in Engineering, J. Wiley Sons Inc, N. York, 1-35.

[24] Parton, V.Z., Morozov, E.M., (1978). Elastic-Plastic Fracture Mechanics, Mir Publishers, Moskow, 30-37.

[25] Dieter, G.E., (1976). Mechanical Metallurgy, 2nd Ed; Mc Graw Hill Co. Tokyo, 403-447.

[26] Sarıtaş, S., (1987). Yorulmuş kırık yüzeylerin mikroskopla incelenmesi, İkinci Ulusal Kırılma Konferansı, Trabzon, 189-196.

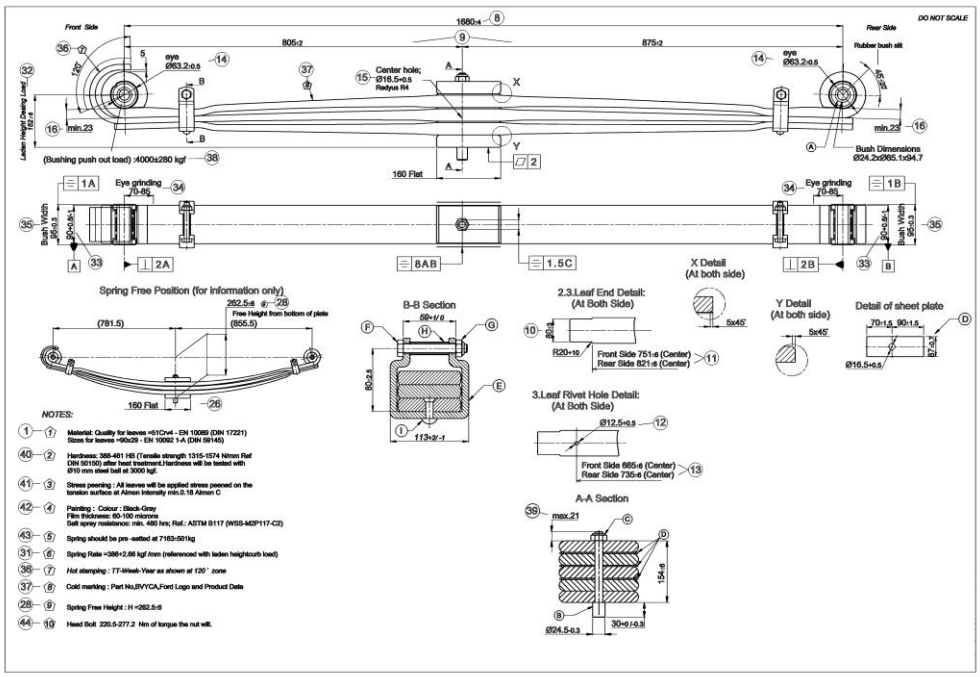
[27] Gemi, L., (2004). Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 88.

[28] Hull, D., Legg, M.J., Spencer, B., (1978). Failure of glass polyester filament wound pipe, Composites, 9: 17-24.

[29] Güldü, İ., (1995). Cam takviyeli plastik malzemelerde takviye açısının kırılma davranışına etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[30] Tahralı, N., Dikmen, F., (2004). Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik ve Ömür Hesapları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

## PARÇANIN TEKNİK RESMİ




Şekil A.1 Yayın teknik resmi

# ÖZGEÇMİŞ

**KİŞİSEL BİLGİLER**


**Adı Soyadı** : Ufuk Taner CEYHANLI

**Doğum Tarihi ve Yeri** : 24.08.1990 Batman

**Yabancı Dili** : İngilizce ve Almanca

**E-posta** : tanerceyhanli@gmail.com


**ÖĞRENİM DURUMU**

| **Derece** | **Alan** | **Okul/Üniversite** | **Mezuniyet Yılı** |
|---|---|---|---|
| Y. Lisans | Konstrüksiyon | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2017 |
| Lisans | Makine Mühendisliği | Uludağ Üniversitesi | 2013 |
| Lise | Fen Bilimleri | Yeşilköy Anadolu Lisesi | 2008 |

**İŞ TECRÜBESİ**

| **Yıl** | **Firma/Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2015 | Ford Otosan A.Ş. | Prototip Mühendisi |
| 2013 | Kurdoğlu Lazer Kesim | Stajyer Mühendis |
| 2010 | Sistem Teknik Ltd. Şti. | Stajyer Mühendis |

**YAYINLARI**

**Bildiri**

1. Ceyhanlı, T., Bozca M., Investigation of Fatigue Behaviour of Parabolic Leaf Springs Used in Heavy Comercial Vehicles, Internatiol Conference on Advances in Automative Technologies, 2016, YTU, Istanbul