

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**B SEGMENTİ BİR BİNEK ARAÇTA AMORTİSÖR YAYININ
KIRILMA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren ARSLAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

HAZİRAN 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**B SEGMENTİ BİR BİNEK ARAÇTA AMORTİSÖR YAYININ
KIRILMA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren ARSLAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan GENEL

HAZİRAN 2023

Eren ARSLAN tarafından hazırlanan “B Segmenti Bir Binek Araçta Amortisör Yayının Kırılma Analizi” adlı tez çalışması 23.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **Makina Tasarım ve İmalat** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Kenan GENEL** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Mediha İPEK**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “B SEGMENTİ BİR BİNEK ARAÇTA AMORTİSÖR YAYININ KIRILMA ANALİZİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(23/06/2023).

Eren Arslan

Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Malzeme ve Metalürji Bölümü'nden Prof. Dr. Cuma BİNDAL'a ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ALTINSOY'a ayrıca TÜRASAŞ'tan Timuçin ÖĞRENİR Bey'e teşekkür ederim.

Eren Arslan

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. YAYLAR	5
2.1. Yayların Karakteristiği ve Yaylanma Rijitliği	5
2.2. Yay Malzemelerinin Özellikleri	6
2.3. Yay İşİ	6
2.4. Yaylarda İç Sönümlenme	7
2.5. Helisel Yaylarda Mukavemet Hesabı	8
2.6. Helisel Yayların Isıl İşlemi	10
2.7. Helisel Yaylarda Bilyalı Dövme İşlemi	10
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	13
3.1. Malzeme Bileşimi	14
3.2. Sertlik Ölçümleri	14
3.3. Mikroskop Çalışmaları	15
4. NÜMERİK ÇALIŞMALAR	17
4.1. Malzeme Modeli	17
4.2. Yay Geometrisi	17
4.3. Mesh (Ağ) Yapısı	18
4.4. Sınır Şartları	20
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	21
5.1. Deneysel Sonuçlar	21
5.1.1. Sertlik sonuçları	21
5.1.2. Optik mikroskop çalışmaları	22
5.2. Hasar Analizi	23
5.3. Sonlu Eleman Analiz Sonuçları	28
5.4. Genel Sonuçlar	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	41

KISALTMALAR

FEA	: Sonlu eleman analizi (Finite element analysis)
HRC	: Rockwell-C sertlik değeri (RSD)
HV	: Vickers sertlik değeri
OM	: Optik mikroskopi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)

SİMGELER

F	: Baskı kuvveti
k	: Yaylanma rijitliği
k_θ	: Burulma etkisinde yaylanma rijitliği
K_w	: Wahl çarpanı
M	: Moment
M_b	: Burulma momenti
W	: Yay işi
W_b	: Burulma mukavemet momenti
α	: Helis açısı
δ	: Yer değiştirme
θ	: Burulma açısı
τ	: Kayma gerilmesi
τ_b	: Burulmadan kaynaklı kayma gerilmesi
τ_k	: Kesmeden kaynaklı kayma gerilmesi
Ψ	: Sönümleme faktörü

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Sertlik ölçümü sonuçları	21
Tablo 5.2. Yay malzemesi bileşimi (Ağ. %)	23
Tablo 5.3. Yay telinde farklı deplasman değerleri için gelişen gerilme değerleri ...	37

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yayların karakteristiği [6].....	5
Şekil 2.2. Sert ve yumuşak yay karakteristiği [6]	6
Şekil 2.3. Yay işi [6]	7
Şekil 2.4. Yaylarda iç sönümlenme [6].....	8
Şekil 2.5. Helisel yayların zorlanması [6].....	9
Şekil 3.1. Değiştirilen amortisör yayları	13
Şekil 3.2. Zımparalama ve parlatmada kullanılan makine.....	14
Şekil 3.3. Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihaz	15
Şekil 3.4. Kırık yüzeyi incelemelerinde kullanılan SEM cihazı.....	16
Şekil 4.1. Yayın katı modeli ve ölçüleri	18
Şekil 4.2. Oyuğun katı modeldeki yerleşimi.....	18
Şekil 4.3. Mesh (Ağ) yapısı	19
Şekil 4.4. Oyuklı bölgenin mesh yapısı	19
Şekil 4.5. Yer değiştirme sınır şartı	20
Şekil 4.6. Sabit mesnet sınır şartı.....	20
Şekil 5.1. Sertlik ölçümü yapılan bölgeler.....	21
Şekil 5.2. Sertliğin yüzeyden parçanın merkezine doğru değişimi.....	22
Şekil 5.3. Temperlenmiş martenzitik iç yapıya dair optik mikroskop görüntüsü.....	22
Şekil 5.4. (a) Kırılan amortisör yayı (b) kırılan karşı parçanın görünümü	23
Şekil 5.5. Kırık yüzeyinin (a) hasar sonrası (b) çözeltide temizlenmiş karşı yüzey görüntüleri.....	24
Şekil 5.6. Kırılan parçada karşılıklı yüzeylerin çatlak orijinine yakın bölgelerin görüntüleri.....	26
Şekil 5.7. Çatlak orijininin içeriye doğru çatlak ilerlemesini işaret eden yorulma izleri.....	27
Şekil 5.8. Yayda 50 mm deplasman (sıkışma) için oluşan eş değer (Von Mises) gerilme dağılımı	28
Şekil 5.9. Yay kesitindeki (a) eş değer gerilme (Von Mises), (b) kayma gerilmesi dağılımları (50 mm deplasman için).....	30
Şekil 5.10. 25 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki eş değer gerilme dağılımı	31
Şekil 5.11. 25 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki kayma gerilmesinin dağılımı	32
Şekil 5.12. 50 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki eş değer gerilme dağılımları.....	33
Şekil 5.13. 50 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki kayma gerilmesi dağılımları.....	34
Şekil 5.14. 100 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki eş değer gerilme dağılımları.....	35
Şekil 5.15. 100 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki kayma gerilmesi dağılımları.....	36

Şekil 5.16. Kritik bölgedeki gerilme değerlerinin deplasmanla değişimi..... 37

B SEGMENTİ BİR BİNEK ARAÇTA AMORTİSÖR YAYININ KIRILMA ANALİZİ

ÖZET

Bilindiği üzere süspansiyon helezon yayı, yol topografyasına bağlı olarak darbeleri yumuşatıp süspansiyon sisteminin sarsılmadan stabil kalmasını sağlayarak araç parçalarını korumanın yanı sıra aracın sürüş konforuna da katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, B segmenti bir araçta helezon yay kırılmasının nedeni sistematik olarak araştırılmıştır. Hasarlanan yay araçta ön süspansiyonda kullanılmakta olup, tel çapı 12 mm, uzunluğu 350 mm olan yayın sarımlar arası mesafesi ise 75 mm'dir. Süspansiyon yayının kullanıldığı aracın hasar öncesi 220 000 km'yi aşmış olduğu tespit edilmiştir. Araç genellikle asfalt yolda kısmen de düzgün olmayan toprak zeminde kullanılmıştır. Coğrafya ve mevsimsel şartlar göz önüne alındığında araç zaman zaman yağmur ve kar suyuna/tuzlu su maruz kalmaktadır. İnceleme kapsamında mikroskopi çalışmaları (optik ve taramalı elektron), sertlik ve metalografik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve yaydaki gerilme dağılımını belirlemek için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır.

Yay malzemesinin iç yapısının temperlenmiş martenzit olduğu yapılan SEM ve optik mikroskop incelemeleriyle birlikte ortaya koyulmuştur. Merkez ve yüzeye yakın bölgelerden alınan sertlik ölçümlerinin ortalama olarak 594 HV değerlerine ulaşması malzemenin iç yapısının temperlenmiş martenzit yapıda olduğunu desteklemektedir. Hasar analizi sonuçları, kırılmanın yorulma kaynaklı olduğunu ve çatlak başlangıcının ilginç bir şekilde gerilmenin maksimum olduğu yayın iç yüzeyinde değil, yayın üst yüzeyi ile dışa bakan kısımlar arasında yer alan korozyon oyuklarında olduğunu göstermiştir. Yayda kullanılan çeliğin (AISI 9254) mikroyapı, sertlik gibi özellikleri ve sonlu elemanlar analizinden (FEA) elde edilen gerilme değerleri dikkate alındığında tasarım, malzeme seçimi, ısıl işlem ve imalat süreçleri açısından herhangi bir sorun olmadığı anlaşılmıştır.

FEA sonuçları, korozyon kaynaklı oyuklaşmanın nominal gerilmeyi 1,70-1,85 oranında artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte maksimum asal gerilme dikkate alındığında, oyuk içinde çentik katsayısının 2,6 değerini aşmış olması, yayların mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde maksimum asal gerilmenin daha belirleyici olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Parça yüzeyine uygulanan son boyama işleminin yayı yol yüzeyinden gelen yağmur suyu/tuzlu kar suyu gibi bozucu etkilere karşı korumakta yetersiz kaldığı anlaşılmış ve boya kalitesinin iyileştirilmesi ve/veya yayı yol yüzeyinden gelen etkilere karşı koruyacak polimerik bir parça takılmasının sorunun çözümünde faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

FAILURE ANALYSIS OF THE DAMPER SPRING IN A B-SEGMENT PASSENGER CAR

SUMMARY

As it is known, the suspension helical or coil spring contributes to the vehicle's driving comfort and protects the vehicle parts by softening the impacts depending on the road topography and keeping the suspension system stable without shaking. As an important machine element, the performance of springs depends on many factors, such as the spring wire material and its manufacturing history. In general, springs made of high carbon and usually alloyed steels (Cr-Si, Si-Mn or Cr-V) are used to meet the high resilience expectation. Sometimes, cold-drawn wires can also meet expectations in spring construction.

The microstructure and cleanliness of steel directly affect the mechanical properties. In addition to the heat treatment history of the spring (such as tempering process temperature, decarburization effect, and grain coarsening), the surface treatments applied after manufacturing, grinding, shot blasting and coating processes (type and method of coating) also have a significant effect on the performance of the spring. The fact that spring wire is usually made of high-strength steel also means it has a high-notch sensitivity. For this reason, in some cases, manufacturing defects on the surface can accelerate the crack formation phase and worsen the part life.

In this study, the cause of coil spring fracture in a B-segment vehicle was investigated systematically. Within the scope of the investigation, microscopy studies (optical and scanning electron), hardness, and metallographic studies were carried out, and finite element analysis was used to determine the stress distribution in the spring.

The part under investigation is a front suspension coil spring. It is made of wire with a diameter of 12 mm, the height of the spring is 350 mm, and the pitch is 75 mm. The damaged spring belongs to a B-segment vehicle with over 220,000 km. It was found that the fracture started towards the end of the first winding, in a region of about 20 degrees between the top surface of the wire and the outer surface facing the centre. The car was mainly used on asphalt roads and partially on village roads. It was understood from the personnel interviews that the vehicle was used in geography where rain and snow are seen in the winter season (spreading salt on the road in the winter snow).

Spectral analysis was performed to determine the composition of the spring material. The results show that the chemical composition of fractured spring is within the specified range in the standard for AISI 9254 steel. SEM samples for microstructure were prepared by grinding, diamond paste polishing, and chemical etching with Nital 4%. It is understood that the microstructure of the fracture spring, the structure has tempered martensite.

The hardness measurements near the surface and core region vary from 590-600 HV10 (average hardness is 594 HV10). In addition, the microhardness (HV0.5) measurement results from the surface to the inside did not indicate the presence of

decarburization in the hardness profile. Low-magnification fractography studies were performed for macro examinations. A scanning electron microscope was used for detailed fracture surface examinations. The helical shape of the fracture surface indicates that the damage is typical fatigue fracture of high-strength materials under variable torsional stress. The presence of traces on the fracture surface and the corrosion-affected area strengthens the suspicion that the crack initiation is most likely caused by corrosion. An electron microscopy study will be useful for detailed examination in determining the origin of the crack.

From these micrographs, it is clear that fatigue crack nucleation is directly related to corrosion pitting. The presence of a large number of pits on the side surface of the specimen, some of which are clustered together, is an important indication that fatigue cracking starts from corrosion pits that cause stress concentration. The fact that the spring is made of high-strength steel has possibly increased the notch sensitivity, as expected.

The literature has reported that the stress concentration coefficient (SCF) of a hemispherical cavity under shear stress is directly proportional to the aspect ratio of the pit. Accordingly, it is expected that the pits at the crack origin will produce a much more severe notching effect, leading to crack formation. It is useful to investigate the effect of corrosion pitting on the stress distribution of the spring wire by finite element analysis.

In the finite element analysis performed in Ansys Workbench, a linear elastic and isotropic material model was used as the material model. Poisson's ratio of 0.3 and modulus of elasticity of 200 GPa were chosen for the spring steel. The location of the cavity in the model was determined by considering the crack initiation point of the fractured spring, and a 0.5 mm diameter hemispherical cavity (0.25 mm depth) was created to represent the corrosion pit. A total of 186760 tetrahedron elements were used in the finite element model. The element density was increased to improve the mesh quality in the region where the cavity is located.

Firstly, the equivalent and shear stress distribution across the spring for the 50 mm displacement model without a cavity was investigated. The stresses in the inner part of the spring are higher than in the other parts. Both stresses increase outward from the centre of the wire and also reach their maximum values on the surface of the wire facing the centre of the spring. It also confirms the results of the studies that carried out finite element-based stress analysis on helical springs.

In the model with pit, the maximum value of the equivalent stress in the pit (361.3 MPa) is 1.34 times higher than the stress on the inner surface of the wire. Also the maximum stress occurs in the pit, which is 1.82 times higher than the stresses in and around it. Although the Von Mises stress distribution reveals the stress concentration effect caused by the pit, in some cases, the maximum principal tensile stress can be decisive for fatigue damage. In contrast to the distribution of the shear stress, the maximum principal stress takes the largest value (242.4 MPa) not at the bottom of the pit but at the sidewall and is greater in magnitude than the shear stress. Considering that the stress at a point close to the pit is 91.3 MPa, the stress concentration factor of the pit reaches a value of 2.65. Furthermore the maximum principal stress is the most indicative stress component and can be useful in fatigue evaluations of springs. It should be noted that it is of great benefit to consider the maximum principal stress in the evaluation of the mechanical behaviour of springs with a high spring diameter/wire diameter ratio.

The failure analysis showed that the fracture was fatigue induced and the crack initiation was interestingly not on the inner surface of the spring where the stress was maximum but in the corrosion pits between the top of the spring and the outward-facing sides. Considering the properties of the steel (AISI 9254) used in the spring, such as microstructure, hardness, and the stress values obtained from the finite element analysis (FEA), it is concluded that there was no problem in terms of design, materials, heat treatment, and processing history of the spring. However, FEA results simulating corrosion-induced pitting show that the pitting has a significant stress concentration, confirming the crack initiation assessment. In this context, it was understood that the final painting process applied to the part surface was insufficient to protect the spring against deteriorating effects such as rainwater / salty snow water from the road surface. It was concluded that improving the paint quality and/or installing a polymeric part to protect the spring against the effects of the road would be beneficial in solving the problem.

1. GİRİŞ

Yaylar malzeme özellikleri ve geometrik şekilleri nedeniyle dış yükleme/zorlanma etkisinde büyük oranda şekil değiştirebilen, iş (potansiyel enerji) depolayarak dış etkenlerin ortadan kalkması halinde kısmen veya tamamen eski şekil ve konumlarını alabilen elastik elemanlardır. Yük altında enerji biriktiren yaylar, bu enerjiyi yük boşalması halinde az veya çok bir sürtünme kaybıyla geri verirler. Genel olarak çoğu makine elemanından fonksiyonlarını yerine getirirken şekillerini koruyup dış zorlanmalar karşısında belirlenen bir sınırın üzerinde deformasyona uğramamaları istenirken, yaylarda büyük elastik deformasyonlar arzu edilmektedir. Bu nedenle yaylar elastik makine elemanları olarak da tanımlanırlar.

Yaylar enerji depolayıcı olarak saat ve oyuncak mekanizmalarında, darbe ve titreşim sönümlemek için amortisörlerde, kuvvet uygulamak veya bir hareketi kontrol etmek amacıyla kavramalarda ve frenlerde, kuvvet ölçmek için dinamometre ve kantar mekanizmalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Yay şekli ve malzemesi, taşınacak kuvvet veya moment, deformasyon veya yaylanma miktarı, kullanım yerindeki hacim veya yer sınırlamaları dikkate alınarak seçilir. Yaylar şekline göre helis, çubuk, yaprak, spiral; zorlanma tipine göre çekme, basma; üretim şekline göre sıcak veya soğuk şekillendirilmiş; tel kesitine göre daire, kare kesitli olarak sınıflandırılabilir. Helisel yay, daire veya dikdörtgen kesitli bir telin bir eksen etrafında silindirik ya da konik şekilde sarılmasıyla imal edilen ve burulmaya zorlanan bir yay çeşididir. Helisel silindirik yaylar, helisel konik yaylar ve kangal yaylar olmak üzere üç türü vardır. Helisel silindirik yaylar gerek bası yayları gerekse çeki yayları olarak kullanılabilirken, helisel konik yaylar sadece bası yayları olarak kullanılırlar. Bunlar burulmaya zorlanırken kangal yaylar eğilmeye zorlanan yaylardır.

Helisel yaylar doğrusal orantılı veya değişken orantılı olabilir. Doğrusal orantılı helezon yaylarda yayın kuvveti sıkıştırma derecesiyle birlikte artar. Sıkıştırma oranı olarak tanımlanan yay sabiti yayın ne kadar sert olduğunu göstermektedir. Bu oran genellikle birim mesafe başına düşen ağırlık olarak ifade edilmektedir. Değişken

orantılı helezon yaylar yumuşak bir sıkıştırma oranı ile başlar ve yük arttıkça sıkıştırma oranı artar. Bunun nedeni orta kısımlardaki yay çaplarının daha geniş olması ve uçlara doğru küçülmesidir. Aracın yükü arttıkça ve yol yüzeyinin kalitesi düştükçe, yaylar iç içe geçer ve yayın daha güçlü kısmı devreye girer. Yay oranındaki bu kademeli artış araca dengeli yol tutuş özelliği sağlar. Yayların iç içe geçmesi sebebiyle birbirine çarpması ve ses yapması engellenir. Ayrıca yüzey kaplaması hasar görmeyeceği için yayların ve süspansiyon bileşenlerinin ömrü uzayacaktır.

1.1. Literatür Araştırması

Literatürde helisel yayların hasar analizi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Vukelic ve ark. [1] tarafından yapılan bir çalışmada kırık bir motorlu taşıt yayının deneysel ve sayısal analiz sonuçları sunulmaktadır. Kırığın yeri yayın ilk aktif sarımı üzerindedir. Kenar kısımlardaki korozyon oyuklarının çatlak başlama noktaları olarak davrandığı tespit edilmiştir. Helisel yayın sonlu eleman analizi yapılmıştır. Hasarsız olan helisel yayın gerilme dağılımı belirlenmiş ve yorulma ömrü tahmin edilmiştir. Yetersiz korozyon koruması ve sarımlar arası aşırı temasın ilk çatlaktan nihai kırılmaya kadar gelişen hasara neden olduğu belirtilmiştir.

Bergh ve ark. [2] servis sırasında zamanından önce bozulan bir helezon yayın hasar analizini optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanarak gerçekleştirmiştir. Yay teli boyunca sarmal bir deseni tanımlayan kalıp izleri mevcuttur. Üretim süreci analiz edildiğinde radyal dövme aşamasını gösteren bu izlerin dövme çekicindeki bir çatlaktan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu işaretlerden biri yorulma çatlağının yayılmasına sebep olmaktadır. Çalışmanın sonucunda radyal dövmenin tavsiye edilen prosedürlere göre yapılması önerilmekte ve dövme çekiçlerinin durumunun her büyük çalıştırmadan önce kontrol edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Xing ve ark.'nın [3] yapmış olduğu bir çalışmada dört adet yüksek mukavemetli valf yayının hasar mekanizması araştırılmıştır. Yayıdaki erken yorulma hasarı çevre şartlarının sebep olduğu taneler arası bir yüzey çatlağının varlığına bağlanmaktadır. Yüzey çatlakları yorulma dayanımını tasarım gerilmesi olan 720 MPa seviyelerinin oldukça aşağısında olan 320-350 MPa seviyelerine düşürmektedir. Detaylı analizler göstermektedir ki yumuşak ve kırılğan PbO yapışmasının neden olduğu azaltılmış

bilyalı dövme etkisi çevresel destekli kırılma oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Dahası çevresel destekli çatlakların çekirdeklenmesi ve yayılmasının hasar sürecini kontrol ettiği ileri sürülmektedir.

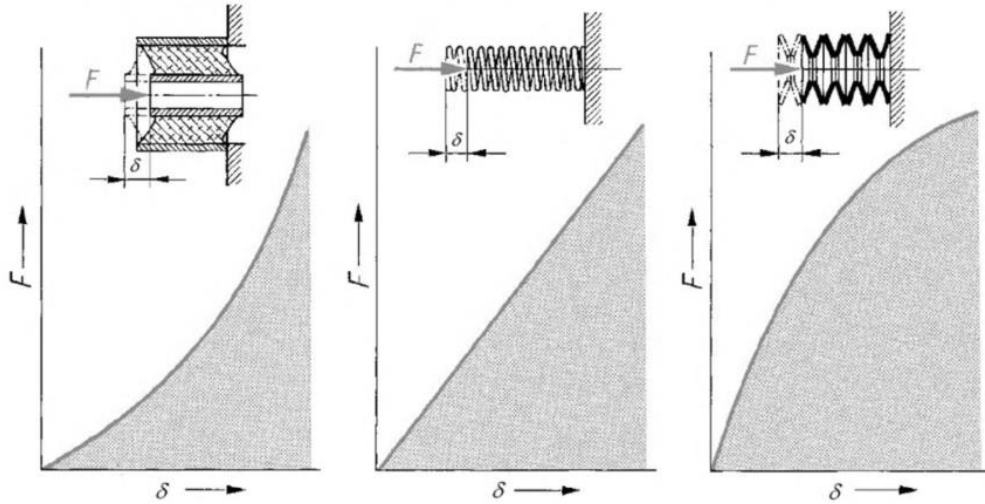
Rocha ve ark. [4] bir çalışmada içinde maden eritme ocağından çelik fabrikasına sıvı halde dökme demir taşıyan bir aracın vagon torpidosundaki baskı yayının arızalanmasına neden olan sebepleri araştırmıştır. Bu amaçla çalışmada optik mikroskopi (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), yanma ve X ışını ile nicel kimyasal analiz, Vickers mikro sertlik testi (HV), N ölçekli Rockwell yüzeysel sertlik ve X ışını kırınımı ile kalıntı gerilme analizi yapılmıştır. Orijinal yay üzerinde yapıldığı varsayılan işlemleri simüle etmek için su verme, temperleme ve bilyalı dövme işlemi analiz edilen yay için yeniden yapılmıştır. Yay kırılmasına yol açan sürecin yay yüzeyindeki bir kusurdan kaynaklanan yorulma hasarı mekanizması olduğu sonucuna varılmıştır. Malzeme yüzeyindeki sertlik dekarbürizasyondan dolayı belirtilenden daha düşük olmaktadır. Bundan sebeple bu bölgedeki artık gerilmeler yüzey kusurlarından kaynaklanan yorulma hasarını engelleyememiştir.

Luo ve ark. [5] tarafından yapılan bir çalışmada yol testi sırasında dört süspansiyon yayının erken yorulma kırılmasına sebep olan mekanizmalar araştırılmıştır. Çalışmada sonlu eleman yöntemi ve korozyonlu yorulma ile birleştirilmiş hasar analizi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar korozyon ve aşınma hasarının çakıl taşları ve asit yağmuru nedeniyle bozulan yay yüzeyinden kaynaklandığını göstermektedir. Süspansiyon yaylarının arızası korozyonlu yorulma çatlaması ile oluşan yüzey çatlaklarının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu yüzey çatlaklarının varlığı nedeniyle yayın yorulma dayanımı servis şartlarından daha düşük olan 420 MPa seviyelerine kadar düşmektedir. Sonuç olarak yorulma çatlakları korozyon yardımı olmadan hızlı bir şekilde ilerlemiş ve nihai kopmaya yol açmıştır.

2. YAYLAR

2.1. Yayların Karakteristiği ve Yaylanma Rijitliği

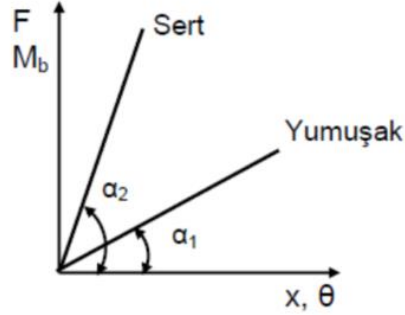
Genellikle bir F kuvvetine maruz kalan yayların uzama veya kısalma şeklindeki şekil değiştirmeleri δ , M_b burulma momentine maruz kalan yayların şekil değiştirmeleri burulma açısı cinsinden θ olarak gösterilir. Yük ile yayın şekil değiştirmesi arasındaki bağıntıya yayın karakteristiği denir. Bu karakteristik doğrusal, yükselen ya da alçalan olabilir. şekil 2.1'de sırasıyla yükselen, doğrusal ve alçalan karakteristikli yaylar gösterilmektedir [6].



şekil 2.1. Yayların karakteristiği [6]

Yaylanma rijitliği esas olarak yay karakteristiğinin eğimidir ve k ile gösterilmektedir. Kuvvet etkisinde uzama halinde $k = \frac{dF}{d\delta}$ ve moment etkisinde dönme halinde $k_\theta = \frac{dM}{d\theta}$ bağıntısıyla hesaplanır. Yay katsayısı olarak da bilinen bu ifadelerin birimleri sırasıyla [N/mm] ve [Nmm/rad] olup yayı bir birim uzatmak veya burulma yaylarında bir birim aı döndürmek için gerekli kuvvet veya moment olarak tanımlanabilir. Doğrusal olmayan yaylarda rijitlik, karakteristik eğrisinin teğetinin yatayla yaptığı açı olup sert yayların karakteristik eğimleri büyük, yumuşak yayların eğimleri kuuk olmaktadır. Ayrıca yukarıdaki bağıntılardan gorlduğu gibi doğrusal karakteristiğe sahip yayların rijitliği sabit, yükselen veya artan karakteristikli (yay rijitliği değişken) yaylarda rijitlik

kuvvetin büyümesi ile artarken, alçalan yaylarda kuvvetin büyümesi ile azalmaktadır[6]. Sert ve yumuşak yay karakteristiği Şekil 2.2’de temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sert ve yumuşak yay karakteristiği [6]

2.2. Yay Malzemelerinin Özellikleri

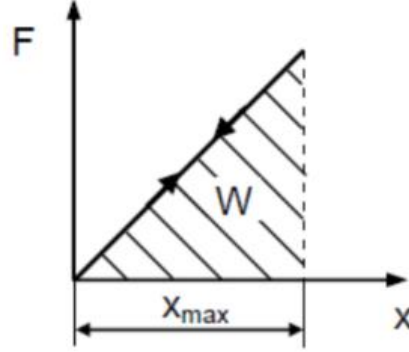
Yay malzemelerinden istenen özelliklerin karşılanabilmesi büyük ölçüde çelik malzemeler ile sağlanabileceğinden, yayların çok büyük bir kısmı bu malzemelerden imal edilir. Alaşım dizaynı, uygun ısıl işlem ve şekillendirme yöntemleriyle, yaylardan arzu edilen özellikleri karşılayacak şekilde çeliğin özelliklerini geniş sınırlar içerisinde değiştirmek mümkündür. Yay malzemelerinden beklenen özellikler; yeterli yükleme, yüksek elastiklik, kırılma ve yorulmaya karşı yüksek dayanım olarak sayılabilir [7].

Yay çelikleri yüksek yaylanma ve akma dayanımına sahip olmalıdır. Fakat şekillendirilebilecek kadar plastik şekil değiştirme yeteneğine de sahip olmaları istenir. Çeliklere yay özelliği kazandıran başlıca faktörler, bileşimindeki yüksekçe karbon oranı Si-Cr-Mn-Mo gibi alaşım elementleri ile gördükleri ısıl işlem prosedürleridir. Yaylar yeterli yüksek dayanım ve sünekliği sağlamak amacıyla çoğu zaman ıslah işlemine tabi tutulur. Bazı durumlar için soğuk levhalar ve çekilmiş teller de soğuk sertleşmiş olarak ya da ıslah edilmiş halde yay yapımında kullanılabilirler.

2.3. Yay İşi

Herhangi bir yay kuvvet veya moment etkisinde yüklendiği zaman yükleme karakteristik eğrisinin altında kalan alan yaya verilen işi (depolanan enerjiyi), boşaltma karakteristik eğrisinin altında kalan alan da yaydan geri alınan işi göstermekte olup genel olarak karakteristik eğrinin altında kalan alan yayın iş alma veya iş kabiliyeti şeklinde tanımlanır. Yayın şekil değiştirmesi esnasında yayda biriken enerji veya iş

(şekil değiştirme enerjisi, Şekil 2.3) sürtünme kayıpları yoksa, yükleme ve boşaltma karakteristikleri üst üste çakışır ve $W = \int_0^{x_{max}} F dx$ veya $W = \int_0^{\theta_{max}} M_b d\theta$ şeklinde hesaplanır [6].

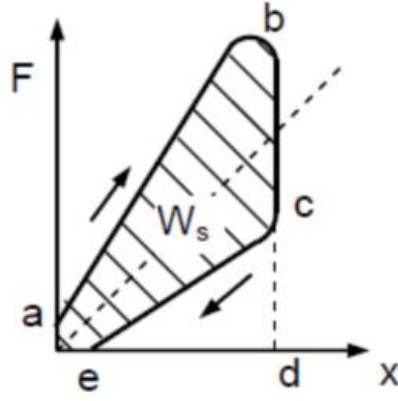


Şekil 2.3. Yay işi [6]

2.4. Yaylarda İç Sönümleme

Teorik olarak yaylarda yükleme ve boşaltma eğrileri üst üste çakışır. Ancak uygulamada gerek yay malzemesinin iç sürtünmesi gerekse yay elemanları arasındaki sürtünmeden dolayı yayların yükleme ve boşaltma eğrileri birbirinden farklıdır. Yayın depo ettiği enerji yaydan alınan işten daha büyükse aradaki fark iç sönümlenmelerle ısıya dönüşen sürtünme işini gösterir. Bu nedenle iç sönümleme etkisi fazla olan yaylarda yükleme ve boşaltma eğrilerinin altındaki alanlar arasındaki fark ısıya dönüşen sönümleme etkisine karşılık gelmektedir.

Şekil 2.4 iç sönümleme için genel modeli göstermekte olup yüklemede şekil değiştirme, başlangıçtaki sürtünme kuvveti yenildikten sonra a noktasından başlayıp a-b eğrisi boyunca devam etmektedir. Boşaltmada şekil değişimi b-c bölgesinde sürtünme kuvveti yenildikten sonra c-e eğrisi boyunca olmaktadır. Histerisiz olayı nedeniyle yay hiçbir zaman ilk konumuna dönemez, kuvvet sıfır olsa bile yayda az da olsa bir şekil değişiminin kaldığı görülür. Yüklemede yayda biriken şekil değiştirme enerjisi (iş) $W_1 = \text{Alan}(abcd)$ ve boşaltmada geri verilen iş $W_2 = \text{Alan}(ecd)$ şeklinde ifade edildiğine göre sürtünme nedeniyle kaybolan enerji $W_s = W_1 - W_2 = \text{Alan}(abce)$ olmaktadır. Bu enerji yayın sönümleme özelliğini gösterir ve sönümleme faktörü olarak adlandırılıp $\Psi = \frac{W_s}{W_1} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \cdot 100$ şeklinde ifade edilmektedir.

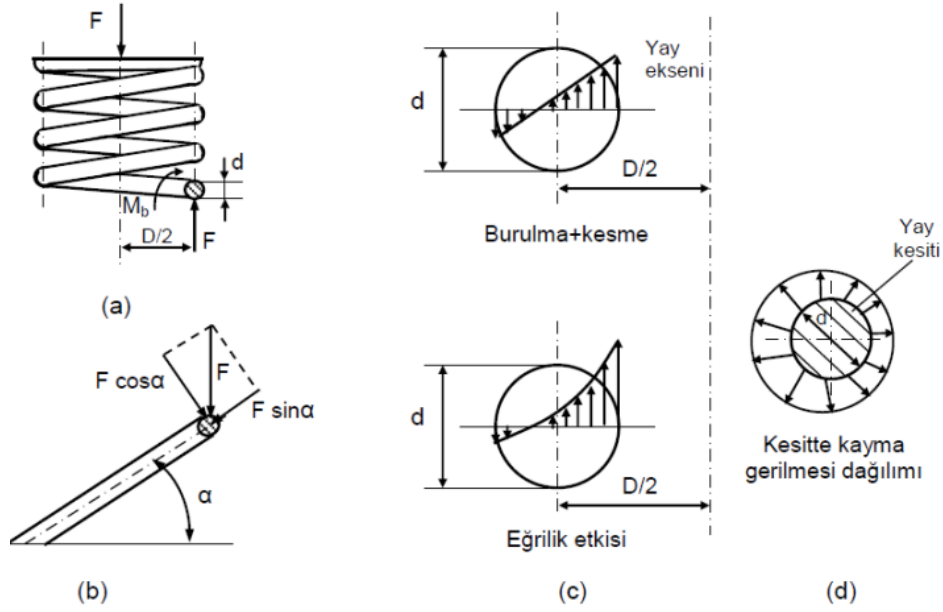


Şekil 2.4. Yaylarda iç sönümleme [6]

Çelik yaylarda iç sönümleme çok küçük ($0,06...0,3$) olduğundan genellikle ihmal edilir. Ancak kauçuk yaylarda bu değer $6...30$ arasındadır. Dış sürtünme dolayısıyla ortaya çıkan sönümleme birçok elemandan oluşan yaylarda ortaya çıkar. Bu tür yaylarda sönüm faktörü $40...50$ arasındadır. Sönümleme faktörü 40 olan bir yay, biriktirdiği şekil değiştirme enerjisinin en çok 60 'ını geri verirken, 40 'ı sürtünme dolayısıyla ısı şeklinde kaybolur. Başka bir ifadeyle bu tür yay darbe şeklinde gelen bir kuvvetin/momentin şiddetini 40 oranında sönümlemektedir. Bu nedenle titreşim ve çarpma sönümleyici yaylarda sönümleme faktörünün büyük olması arzu edilir [6].

2.5. Helisel Yaylarda Mukavemet Hesabı

Helisel yaya aksenal doğrultuda etki eden F basma kuvveti etkisinde yay telinin herhangi bir kesitinde oluşan kuvvet ve burulma momenti Şekil 2.5'te gösterilmiştir. F kuvveti etkisinde sarımlar birbirine yaklaşımaya ve α helis açısı küçülmeye çalışır. Böylece herhangi bir noktada tel kesiti burulmaya zorlanır. Ayrıca F aksenal kuvvetinin düşey ve yatay bileşenleri sırasıyla $F \cos \alpha$ ve $F \sin \alpha$ olup ek zorlanmalar doğururlar. Ancak helis açısı α küçük olduğundan $\sin \alpha = 0$ ve $\cos \alpha = 1$ alınarak sadece burulma ve kesme zorlanmaları dikkate alınmaktadır.



Şekil 2.5. Helisel yayların zorlanması [6]

F kuvvetinin doğurduğu burulma momenti $M_b = FD/2$ olup yay tel kesitinde doğurduğu kayma gerilmesi:

$$\tau_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{M_b}{J_p/y} = \frac{FD/2}{\frac{\pi d^4/32}{d/2}} = \frac{8FD}{\pi d^3}$$

şeklinde hesaplanır. Burada τ_b burulmadan kaynaklı kayma gerilmesini, M_b burulma momentini, W_b burulma mukavemet momentini, F yaya gelen baskı kuvvetini, D yay çapını, J_p polar atalet momentini, y tarafsız eksen den olan uzaklığı, d ise yay teli çapını göstermektedir.

Eğri kirişlerin iç yüzeylerinde gerilme yığılmaları meydana gelir. Helisel yayların iç kısımlarında oluşan gerilme yığılmaları, gerilmeler hesaplanırken dikkate alınması gerekmektedir. Wahl faktörü (K_w), helisel yaylarda hem kesme gerilmelerini hem de eğriliğinden oluşan gerilme yığılmalarını içermektedir. Yay indeksi $C = D/d$ olmak üzere Wahl faktörü (K_w),

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buradan $\tau_b = K_w \frac{8FD}{\pi d^3}$ olmaktadır.

Kesme etkisinde ortaya çıkan kesme veya kayma gerilmesi ise

$$\tau_k = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d^2}$$

şeklindedir. Burada τ_k kesmeden kaynaklı kayma gerilmesini, F baskı kuvvetini, A yay kesit alanını, d ise yay teli çapını göstermektedir. Şekil 2.5.c tel kesitindeki toplam kayma gerilmesini göstermektedir. Yayın helisel yapısı nedeniyle tel kesitinde gerilme dağılımı düzgün değildir. (Şekil 2.5.d). Başka bir ifadeyle yayın iç kısmındaki gerilmeler dış taraftakinden daha büyük olmaktadır [6].

Burulmaya zorlanan helisel bası yaylarında yay rijitliği $k = \frac{F}{\delta} = \frac{Gd^4}{8D^3i}$ şeklinde hesaplanmaktadır. Burada G kayma modülünü göstermektedir ve $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. i ise etkili sargı sayısını temsil etmektedir ve serbest uçlar (taşlanmamış veya düzeltilmemiş) için $i = i_{top} - 0,5$ şeklinde ifade edilmektedir.

2.6. Helisel Yayların Isıl İşlemi

Genellikle çelik malzemeden elde edilen yaylar sıcak veya soğuk sarım şeklinde üretildikten sonra mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ıslah işlemine tabi tutulurlar. Islah işlemi sırasıyla östenitleştirme, su verme ve temperleme şeklinde olmaktadır. Bu işlemler sonrası yapı temperlenmiş martenzit içermektedir.

Östenitleştirme işlemi yayın koruyucu gaz altında östenit faz sıcaklığına kadar (çoğunlukla 810-1000 °C) ısıtılması ve bu sıcaklıkta parça kalınlığına göre belirli bir süre tutulup yağda soğutularak sertleşmesi şeklinde gerçekleşir. Su verme ile difüzyonsuz bir dönüşüm sağlanarak martenzit oluşumu gerçekleşir. Bu dönüşüm yüzey merkezli kübik (ymk) kafes yapısının hacim merkezli tetragonal (hmt) yapıya dönüşümü şeklindedir. Su verme işlemi sonunda parçanın yüzeyinden çekirdeğine doğru sertliğin ne kadar ilerlediği yay çeliğinin sertleşebilirliğine, bu da kimyasal bileşime ve tane yapısına bağlıdır.

Sertleştirme sonrası elde edilen martenzitik yapı çok sert ve kırılgan olduğundan malzemeye tok bir yapı kazandırmak, ortaya çıkan gerilmeleri gidermek ve gerekli yüzey sertliğini elde etmek için temperleme uygulanır. Temperleme sıcaklığı istenilen sertliğe göre 300-550 °C arasında değişebilir [8,9].

2.7. Helisel Yaylarda Bilyalı Dövme İşlemi

Shot peening olarak da bilinen deformasyona dayalı yüzey sertleştirme işlemi olarak tanımlanan bilyalı dövme temelde bir soğuk işlem prosesidir. Endüstride sıkça kullanılan kumlamaya benzetmekle beraber burada amaç yay malzemesinin yüzeyini

sertleştirerek yorulmaya karşı dirençli hale getirmektir. Yorulma çatlakları genellikle yüzeyden başlamaktadır. Bilyalı dövme işleminde yüzeydeki gerilmeler giderilerek plastik deformasyon ile kalıcı bası gerilmeli tabaka oluşturulup malzeme ömründe dikkate değer artışlar sağlanmaktadır.

Kalıcı gerilmeler, dış kuvvete bağlı olmayan ve parçada hapsolmuş gerilmeler şeklinde tanımlanabilir ve bu gerilmeler malzemelerin yorulma davranışında önemli rol oynamaktadır. Çünkü yorulma çatlakları genellikle yüzeye etkiyen çekme gerilmeleri nedeniyle oluşmaktadır. Bu gerilmeler yüzeyde oluşturulan basma gerilmeleri ile dengelenmekte ve malzemenin yorulma ömrü artırılmaktadır [10].

Proses olarak yay malzemesine nispeten daha sert olan bilyalar istenilen hız ve açıda bir su jeti gibi nozullardan malzemenin yüzeyine püskürtülüp yüzeyde sert bir tabaka oluşması sağlanmaktadır. İşlemdeki temel parametreler bilya çapı, hızı, kütlesi, dövme açısı ve parça ile bilyanın yapıldığı malzemelerdir. Bilya malzemesi genelde döküm çelik ve döküm demir olmakla beraber cam bilya ve kesik tel parçacıklarının da kullanıldığı daha özel uygulamalar vardır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, B segmenti bir araçta helezon yay kırılmasının nedeni sistematik olarak araştırılmıştır(Şekil 3.1). Yay geometisi ilk ve son sarımları daha küçük çapta olacak şekilde tasarlanmıştır. Amortisör yayı kırılmadan önce yaklaşık olarak 16 yıl boyunca 220 bin km mesafede kullanılmıştır. Kırılma, yayın korozyon etkilerinin de mevcut olduğu alt tarafında ve birinci sarımda gerçekleşmiştir. Hasar sonrası aracın dengesinin bozulmaması için her iki amortisör yayının da değiştirilmesi gerekmektedir. Aşağıda Şekil 3.1’de değiştirilen yaylara ait resimler verilmektedir. Şekil 3.1’de sol tarafta kırılmamış olan sağ tarafta ise aynı aracın hasarlanan yayı görülmektedir. Her iki yayda da bulunan korozyon hasarının benzerlik göstermesi dikkati çekmektedir.



Şekil 3.1. Değiştirilen amortisör yayları

Bu tez çalışması kapsamında mikroskopi çalışmaları (optik ve taramalı elektron), sertlik ve metalografik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve yaydaki gerilme dağılımını belirlemek için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır.

3.1. Malzeme Bileşimi

Hasar analizi yapılacak olan yay kırılmanın gerçekleştiği yüzeyden yaklaşık 1 cm içerden kesildi ve boyuna kesit alınacak şekilde sırasıyla 60, 120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalar ile zımparalandı. Ardından yay parçası parlatma çuhası kullanılarak parlatma çözeltisinin de (alümina) yardımıyla parlatıldı. Zımparalama ve parlatma işlemi için kullanılan makine Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Zımparalama ve parlatmada kullanılan makine

Zımparalama ve parlatma işleminden sonra bu numune hem mikroskop altında iç yapı incelemelerinde kullanılmış hem de yay malzeme bileşiminin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bileşimin tespiti için TÜRASAŞ’ta bulunan metalürji laboratuvarında bulunan spektral analiz cihazından yararlanılmıştır.

3.2. Sertlik Ölçümleri

Malzemenin sertlik ölçümleri Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme laboratuvarında yapılmıştır. Ölçüm için yaydan alınan boyuna kesit kullanılmıştır. Ölçümler QNESS 750M marka cihaz ile yapılmıştır. Sertlik ölçümü için 10 kg’lık yük uygulanmıştır. Beş farklı noktadan ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca LEICA VMHT MOT marka cihaz ile 500 gr’lık yük uygulanarak sertliğin yüzeyden parçanın

içine doğru değişimi incelenmiştir. Sertlik ölçümünde kullanılan cihaz Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.3. Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihaz

3.3. Mikroskop Çalışmaları

Yay malzemesinin iç yapısını incelemek amacıyla optik mikroskop kullanılmıştır, kırık yüzeyi incelemelerinde ise JEOL JSM6060 LV markalı taramalı elektron mikroskobundan (Şekil 3.4) yararlanılmıştır. Yayın kırıldığı bölge inceleme için bir miktar içerden kesilmiş, ardından kırık yüzeyi temizliği için 4 saat süreyle %20'lik asetik asit- alkol çözeltisi içinde bekletilmiştir.



Şekil 3.4. Kırık yüzeyi incelemelerinde kullanılan SEM cihazı

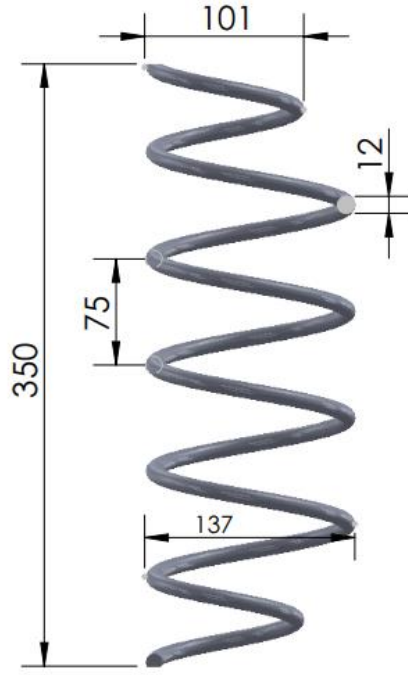
4. NÜMERİK ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme Modeli

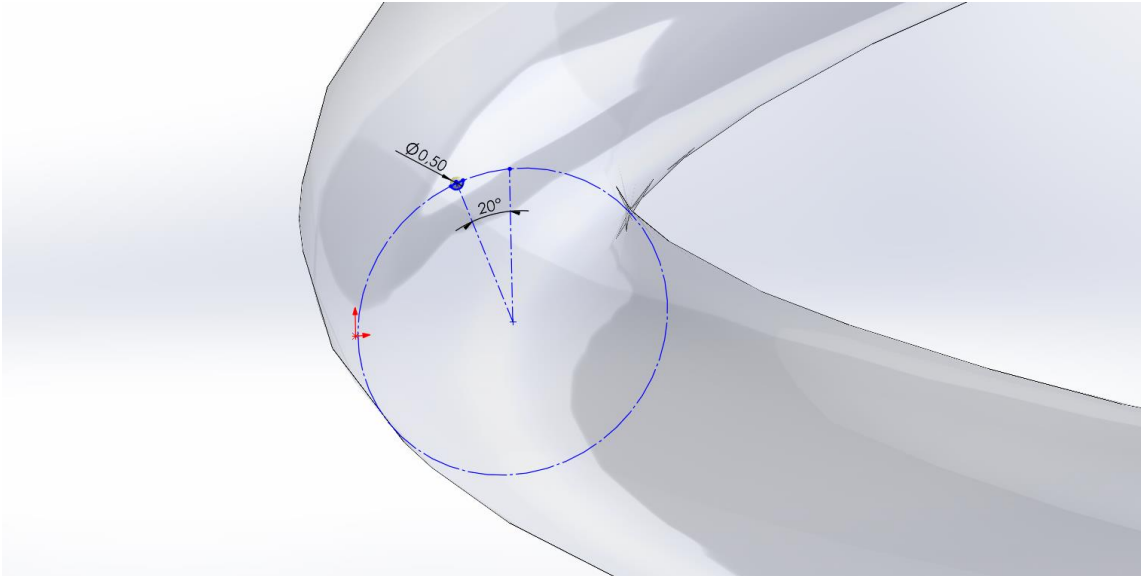
Ansys Workbench üzerinde birçok farklı malzeme modeli bulunmaktadır. Yaylar elastik sınırlar içerisinde çalışan makine elemanları olduğundan dolayı analizde malzeme modeli olarak lineer elastik ve malzeme özelliklerinin yöne bağımlı olmadığı izotropik malzeme modeli kullanılmıştır. Yay çeliği için Poisson oranı 0,3 ve elastiklik modülü ise 200 GPa seçilmiştir.

4.2. Yay Geometrisi

Yay geometrisi Solidworks'te ilk ve son sarımları daha küçük çapta olacak şekilde üç farklı helis çizilerek gerçek ölçülerine uygun olarak modellenmiştir. Yaya yük uygulayabilmek ve sabit mesnet olacak yeri seçebilmek için alt ve üst tarafından bir miktar kesilmiştir. Ayrıca yay üzerinde kırılma bölgesine yakın yerde üst yüzey ve yayın dış tarafı arasında üst yüzeyle 20 derece açı yapacak şekilde 0,5 mm çaplı yarı küresel şekilde korozyon oyuğunu temsil eden bir boşluk açılmıştır. Şekil 4.1 helisel yaya ait katı modeli ve Şekil 4.2 oyuğun yerleşimini göstermektedir.



Şekil 4.1. Yayın katı modeli ve ölçüleri



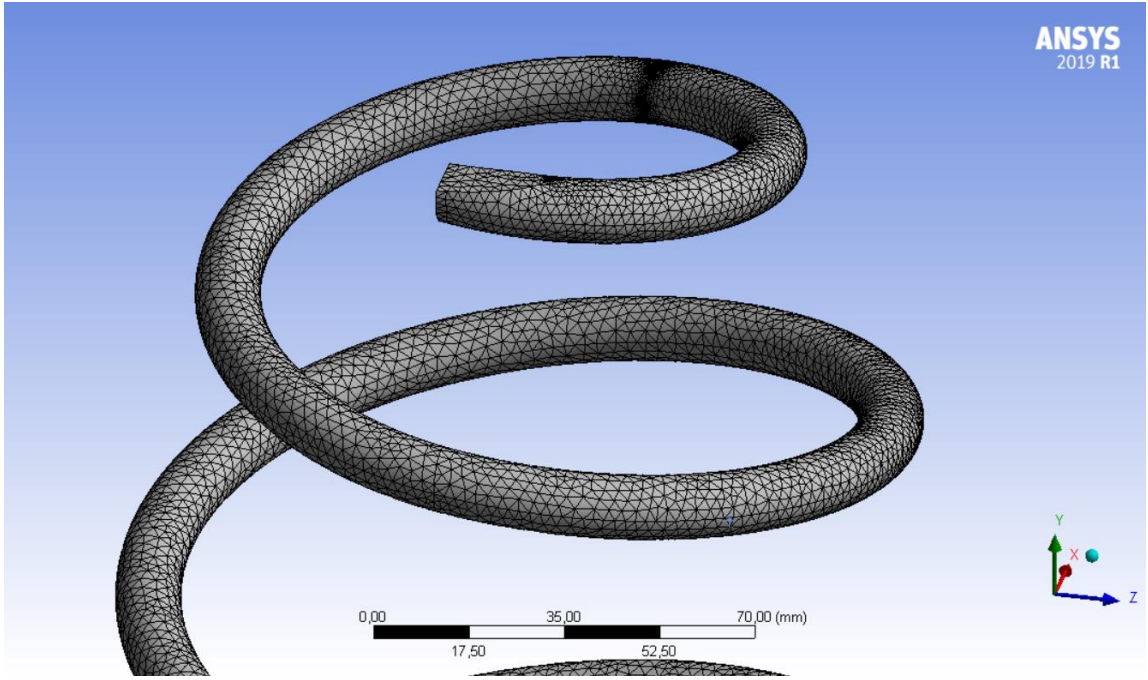
Şekil 4.2. Oyuğun katı modeldeki yerleşimi

4.3. Mesh (Ağ) Yapısı

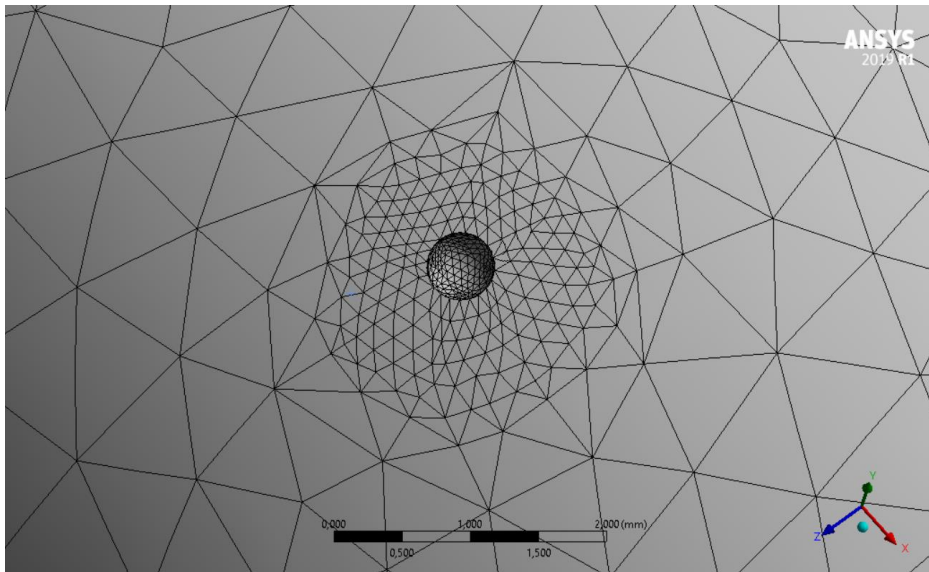
Karmaşık mühendislik problemlerinin basite indirgenerek kontrol edilebilir küçük parçalarla çözümünü sağlayan yöntem sonlu elemanlar yöntemi denir. Bu metotta çözüm bölgesi çok sayıda, basit, küçük birbirine bağlı sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan ağ yapısına mesh denir. Mesh yapısı

eleman ve düğüm noktalarından oluşmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde elde edilecek sonuçların yaklaşım doğruluğu ağ içerisinde kullanılan eleman tipine ve eleman sayısına bağlıdır.

Burada yay geometrisi dörtyüzlü (tetrahedron) elemanlara bölünmüştür. Analizde toplamda 186760 eleman kullanılmıştır. Oyukların bulunduğu bölgelerde mesh kalitesini artırabilmek için eleman sıklığı artırılmıştır. Şekil 4.3 ve 4.4 yay geometrisi için oluşturulan mesh yapısını göstermektedir.



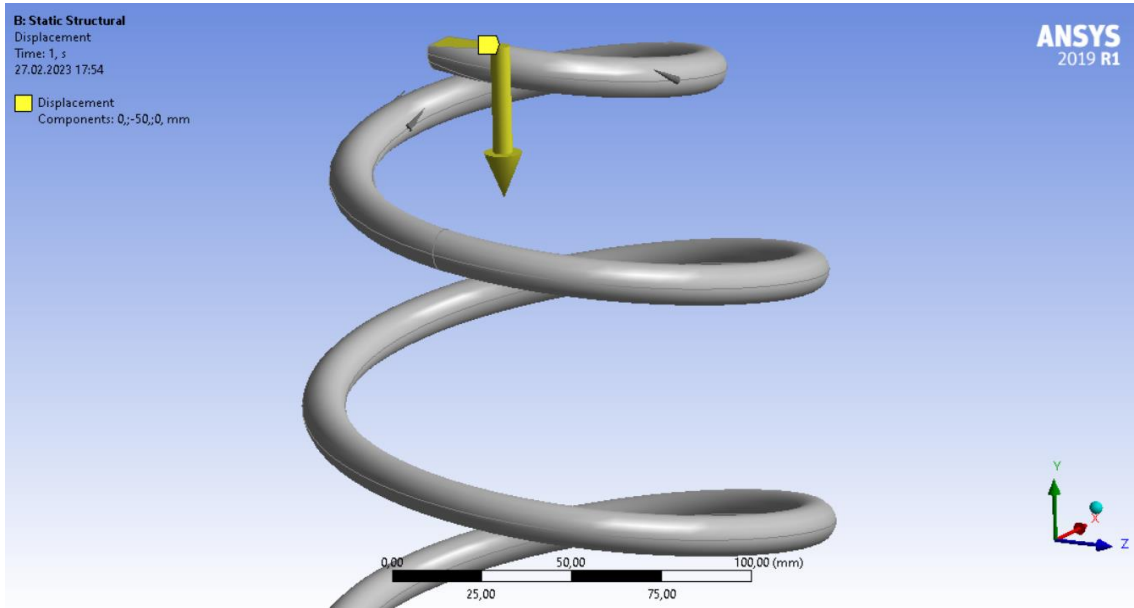
Şekil 4.3. Mesh (Ağ) yapısı



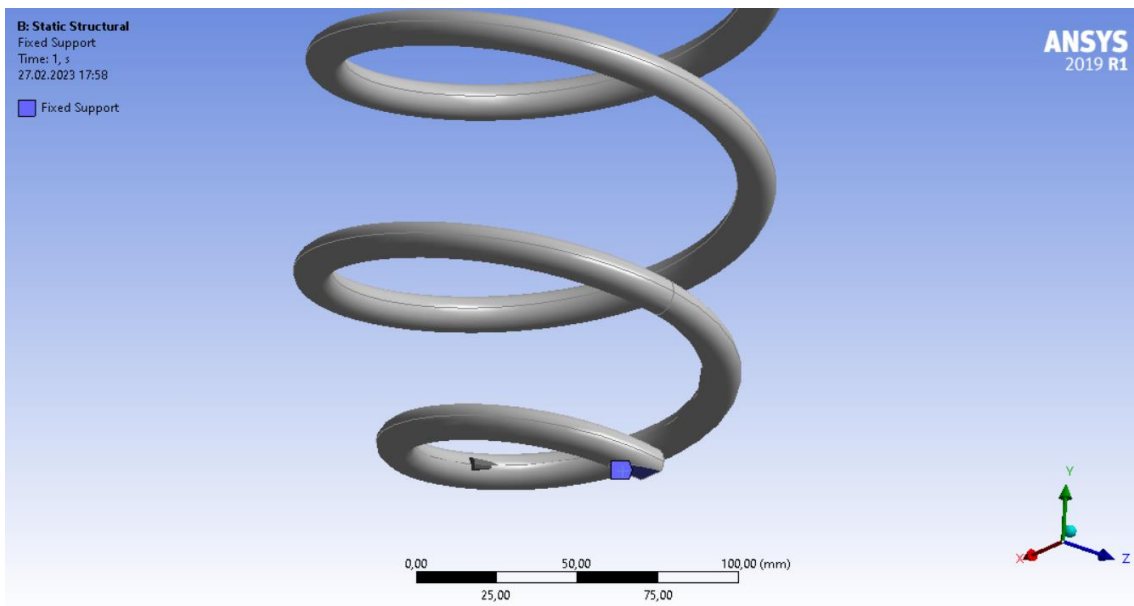
Şekil 4.4. Oyuklu bölgenin mesh yapısı

4.4. Sınır Şartları

Analize devam edebilmek için sisteme etkiyen kuvvet, momentler ve mesnet bölgeleri gibi girdiler programa tanıtılmalıdır. Bu çalışmada helisel yay için mukavemet analizi yapılacağından dolayı sınır şartı olarak mesnet ve yük bölgeleri tanımlanacaktır. Yay analizlerinde yükleme genellikle yer değiştirme şeklinde uygulanmaktadır. Burada helisel yaya 25, 50 ve 100 mm yer değiştirme uygulanacaktır. Yay üst taraftan yük uygulanabilmesi için yine bir miktar kesilmiştir. Şekil 4.5 ve 4.6 uygulanan sınır şartlarını göstermektedir.



Şekil 4.5. Yer değiştirme sınır şartı



Şekil 4.6. Sabit mesnet sınır şartı

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

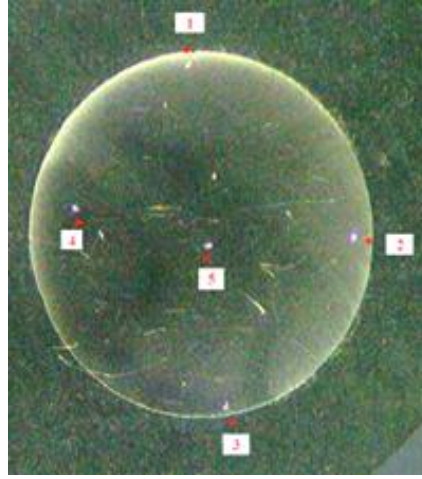
5.1. Deneysel Sonuçlar

5.1.1. Sertlik sonuçları

Yay malzemesinin yüzey ve iç kısımlarından yapılan sertlik ölçümlerinden 590-600 HV aralığında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 5.1 yay kesitinde sertlik ölçümü yapılan bölgeleri ve Tablo 5.1 sertlik ölçümü sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 5.1. Sertlik ölçümü sonuçları

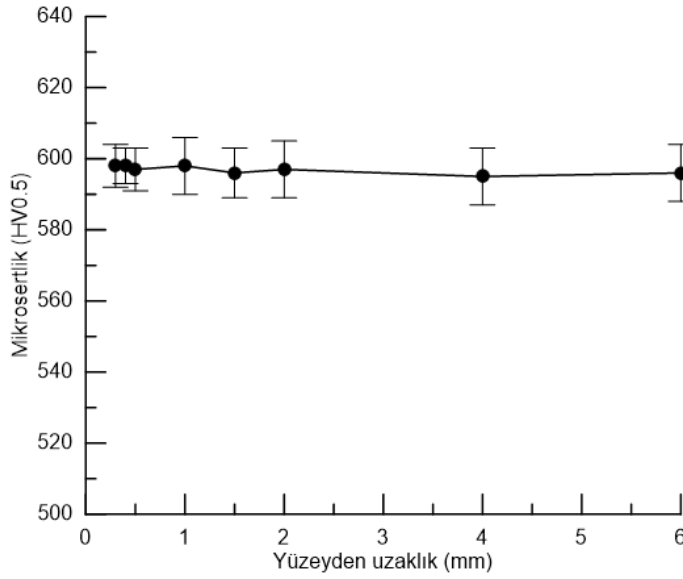
1	2	3	4	5	Ortalama
590	591	593	600	597	594



Şekil 5.1. Sertlik ölçümü yapılan bölgeler

Ayrıca yüzeye yakın kısımlarda yapılan mikro sertlik ölçümlerinden parçanın içine doğru sertlik değişimi incelendiğinde (Şekil 5.2), yüzey bölgesinde herhangi bir sertlik düşüşüne rastlanmamış olması muhtemel bir dekarbürizasyon etkisinin parçada meydana gelmediğinin bir göstergesidir. Makine laboratuvarında yapılan Rockwell sertlik ölçümlerinden 54-55 HRC olduğu belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerin genel

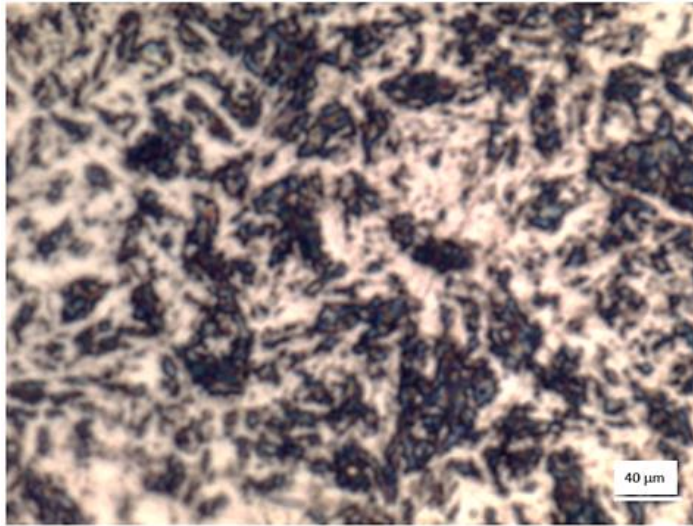
olarak tutarlı olduğu malzemede ısıl işlem pratiği bakımından uygunsuzluğa rastlanmamıştır.



Şekil 5.2. Sertliğin yüzeyden parçanın merkezine doğru değişimi

5.1.2. Optik mikroskop çalışmaları

Yay malzemesinin iç yapısına ait 500 büyütme ile çekilmiş mikroskop görüntüsü Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Yay malzemesinin iç yapısında temperlenmiş martenzitik yapı dikkati çekmektedir.



Şekil 5.3. Temperlenmiş martenzitik iç yapıya dair optik mikroskop görüntüsü

Spektral analiz sonuçları Tablo 5.2'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak malzemenin 9254 kalite yay çeliği (AISI 9254 commercially high silicon spring steel) olduğu saptanmıştır.

Tablo 5.2. Yay malzemesi bileşimi (Ağ. %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Yayın bileş.	0,52	1,32	0,74	0,01	0,01	0,63
AISI 9254	0,51-0,59	1,30-1,60	0,60-0,80	0,03 (maks)	0,03 (maks)	0,60-0,80

5.2. Hasar Analizi

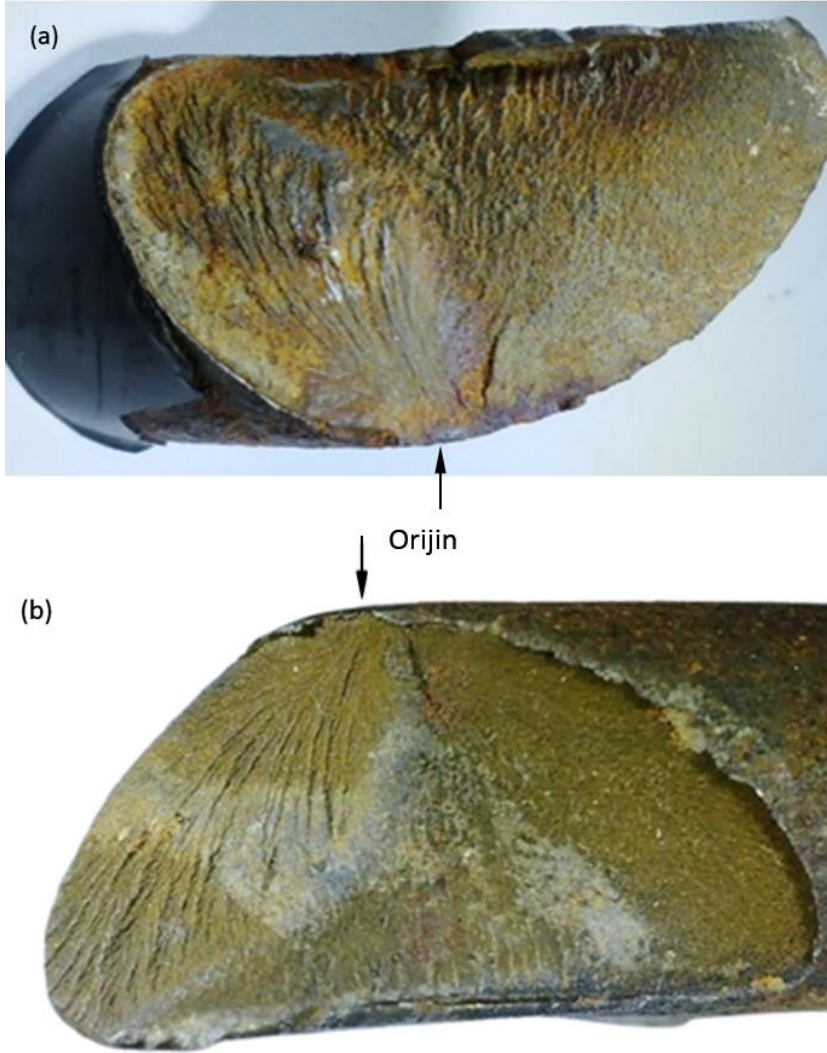
Şekil 5.4 yaydaki kırılmanın hangi bölgede gerçekleştiğini daha net olarak göstermek amacıyla aslında (çalışma şartlarında) ters duran parça, iyi bir görüntü elde edebilmek için şekildeki gibi çevrilerek görüntü alınmıştır.



Şekil 5.4. (a) Kırılan amortisör yayı (b) kırılan karşı parçanın görünümü

Polimer bazlı boya tabakasının kırılma yüzeyine yakın yerlerde zarar gördüğü ve bu bölgede korozyondan kaynaklandığı dikkat çekmektedir. Çatlak başlangıç noktası birinci sarımın sonuna doğru telin üste bakan yüzeyi ile dış yüzeyi arasında yaklaşık 20 derece yapan bölgede başladığı anlaşılmıştır. Kırılan yayın karşılığı olan parçaya ve kırık yüzeyine dair görüntüler Şekil 5.5'te gösterilmektedir. İlk değerlendirmede kırılmanın korozyon oyuklarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Kırık yüzeyi

üzerinde çatlak orijini ve yorulma hasarına ilişkin durak çizgileri açıkça görülmektedir. Çatlak orijininin detaylı incelemesi için elektron mikroskobu çalışmasından yararlanılacaktır.



Şekil 5.5. Kırık yüzeyinin (a) hasar sonrası (b) çözültide temizlenmiş karşı yüzey görüntüleri.

Bilindiği gibi, bu tür parçalarda, kar suyu (tuzlu su kalıntıları) yağmur, çamur gibi çevre şartlarının etkisiyle küçük oyukların oluşması muhtemeldir ve oyuk oluşumu sonrası oyukların birleşmesi şeklinde, zamanla şiddetlenen bir tablo sergilenmektedir. Korozyon oyuğunun geometri ve büyüklüğüne bağlı olarak ciddi gerilme yığılmalarına yol açtığı bilinmektedir [11].

Şekil 5.5'ten, kırık yüzeyinde oluşan izlerin ve korozyondan etkilenen bölgenin varlığı parçada çatlağın kademeli olarak ilerlediği ilk etapta muhtemel orijin noktasından

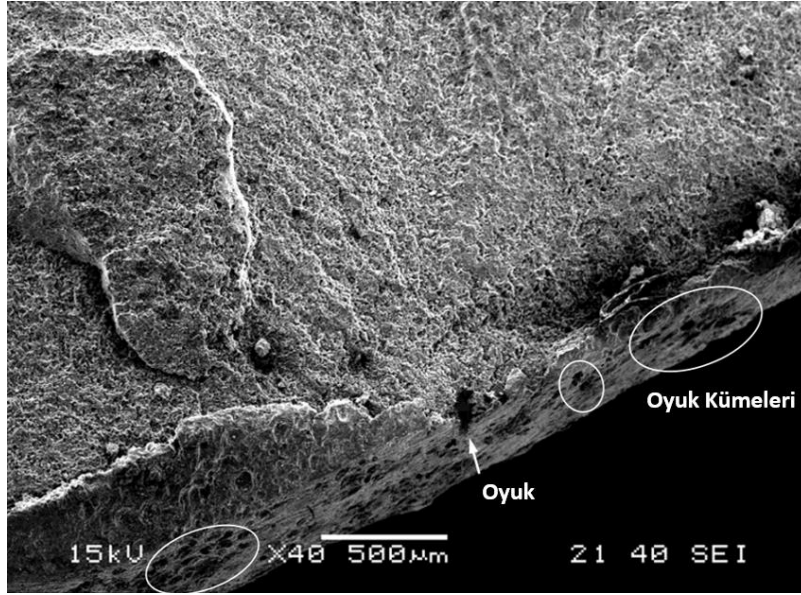
oyukçuklardan başlayan çatlağın kararlı bir şekilde ilerlediği ve aynı zamanda oluşan bu yeni kırık yüzeylerinde korozyonun oluştuğu görülmektedir. Daha sonra çatlağın önemli ölçüde ilerlemesi sonucu ani ve zorunlu kırılma meydana gelmiştir. Makro incelemeler, kırık yüzeyinin helisel bir şekle sahip olması, yüksek mukavemetli malzemelerde değişken burulma zorlanması altında göstermiş olduğu tipik yorulma kırılması oluştuğunu işaret etmektedir [12, 13].

Yayda kullanılan çelik malzemesi kaliteli ve temperlenmiş halde iyi bir sertlik değerine sahiptir. Her ne kadar yayın kırılma süreci aracın kullanım pratiği ile ilgili olsa da, korozyon gibi çevre şartlarının hasar oluşumunda etkili olduğu bilinmektedir. Parçada korozyon etkisinin yoğun bir şekilde gözlenmiş olması, hasarın korozyonlu yorulma neticesinde meydana geldiği şüphesini uyandırmaktadır.

Şekil 5.5'te verilen kırık yüzeyi ve bu bölgeye yakın kısımdan alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, yorulma kırılmasının yüzeyde korozyondan kaynaklanan çok sayıda oyukçuk oluşumuyla ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Numunenin yan yüzeyinde de çok sayıda kümelenmiş bitişik ve ayrı oyukların varlığı, yorulma çatlağının gerilme yığılmasına yol açan korozyon oyuklarından başladığı bulgusunu kuvvetlendirmektedir. Ayrıca orijinden iç kısma doğru, spiral düzlem boyunca çatlak ilerlemesi SEM görüntülerinde de detayı olarak görülmektedir (Şekil 5.6, 5.7).

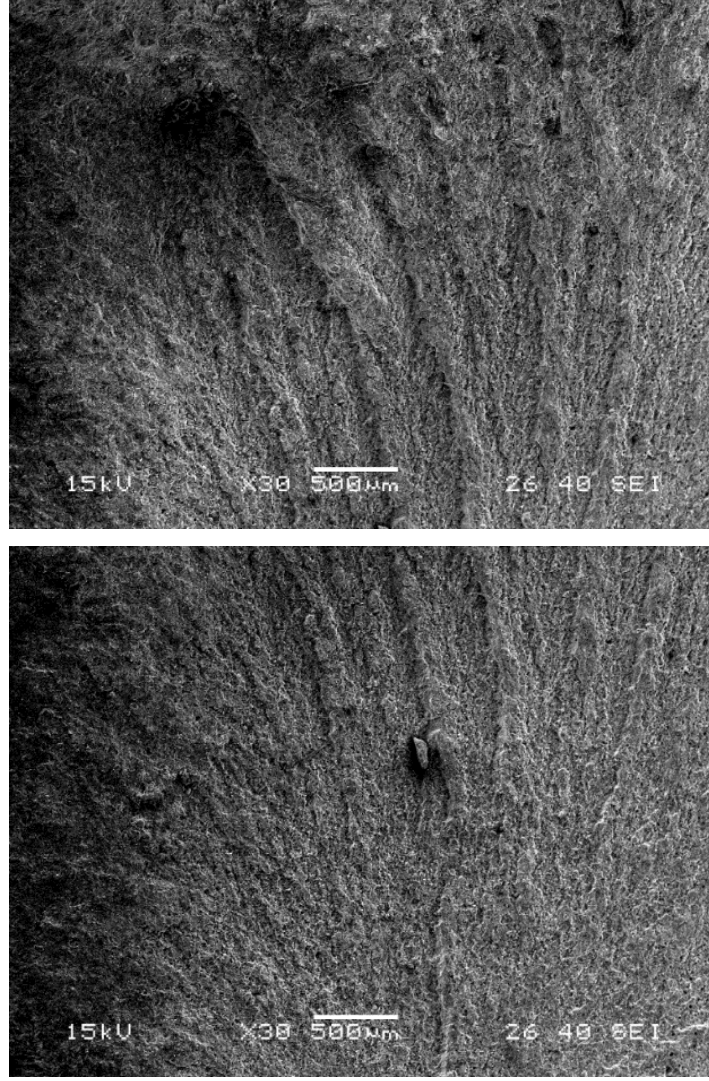


a



b

Şekil 5.6. Kırılan parçada karşılıklı yüzeylerin çatlak orijinine yakın bölgelerin görüntüleri



Şekil 5.7. Çatlak orijininin içeriye doğru çatlak ilerlemesini işaret eden yorulma izleri

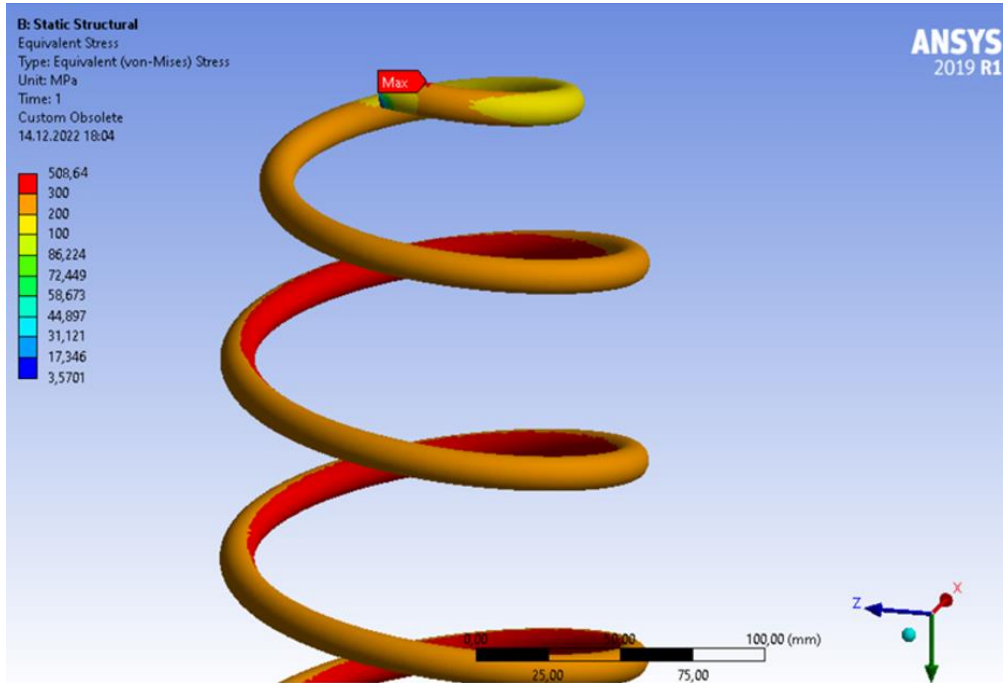
Çatlak başlangıç noktası birinci sarımda telin üst yüzeyi ile dışa bakan yüzeyi arasında yaklaşık 20 derece yapan bölgede başladığı anlaşılmıştır. Bu noktada yaylarda gerilmenin, bileşik ve kayma gerilmesinin telin iç yüzeyinde maksimum olduğu hatırlanacak olursa çatlağın iç yüzeyde başlamaması oldukça ilginçtir [14].

Bu durumun gerilme dağılımıyla doğrudan ilişkili olduğu SEM fotoğraflarında oyukların yer yer birleştiği yarı küresel şekle sahip olmakla birlikte, yüzeyden içeriye düzensiz bir şekilde ilerlemiş olması en önemli bulguyu oluşturmaktadır. Yarı küresel oyuk varlığının neden olduğu gerilme dağılımının detaylandırılması sonlu eleman analiz sonuçlarının incelenmesinde fayda vardır.

5.3. Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

Helisel yaylarda genel olarak burulma ve kesmeden kaynaklı kayma gerilmelerinin etkili olduğundan daha önce bahsedilmişti. Burada analizler sonucunda yayın tümündeki ve yay kesitindeki gerilmeler 50 mm deplasman için incelendikten sonra oyuğun bulunduğu bölgedeki eşdeğer gerilme (Von Mises) ve kayma gerilmelerinin dağılımı 25, 50 ve 100 mm yer değiştirme için incelenecek, daha sonra tüm yer değiştirmeler için sonuçlar tablo ve grafik halinde verilecektir.

Yayın genelinde eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımı incelendiğinde (Şekil 5.8), yayın iç tarafında gerilmelerin, dış tarafa göre daha yüksek olduğu görülmektedir ki bu durum mukavemet hesaplarında da dikkat çekilen bir detaydır.



Şekil 5.8. Yayda 50 mm deplasman (sıkışma) için oluşan eş değer (Von Mises) gerilme dağılımı

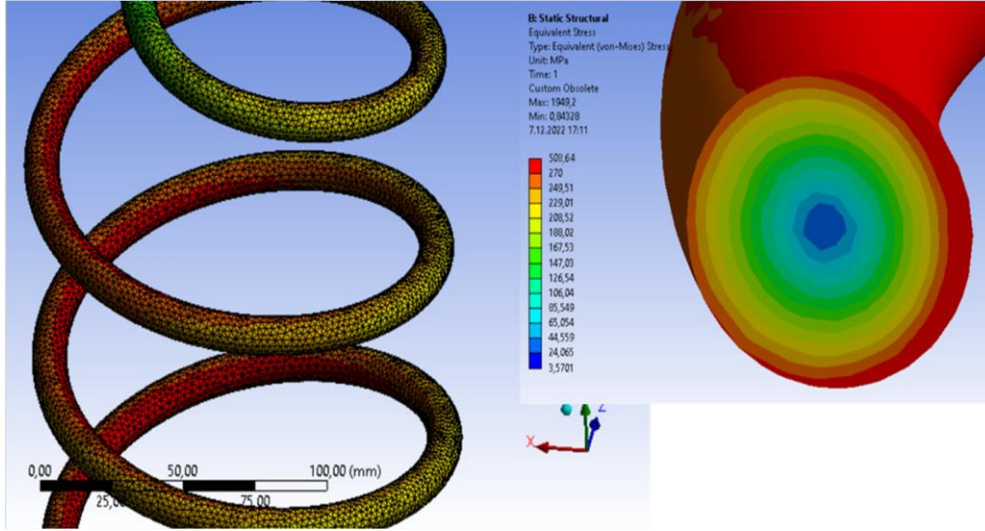
Yaya yük uygulamak için kesilen bölgenin uç kısmında kısmen keskin kenar içermesi maksimum gerilmenin (508,64 MPa) burada oluşmasına yol açmıştır. Bu durum değerlendirmelerde göz ardı edilmiştir.

Şekil 5.9’da yay kesitindeki eş değer ve kayma gerilmeleri 50 mm deplasman değeri için verilmiştir. Buna göre, her iki gerilmenin telin merkezinden dışa doğru arttığı ve yayın içe bakan tarafında daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç gerek sonlu eleman analiz çalışmalarıyla gerekse de mekanik yaklaşımla gerilme dağılımının incelendiği çalışma sonuçlarıyla uyumludur [14-16].

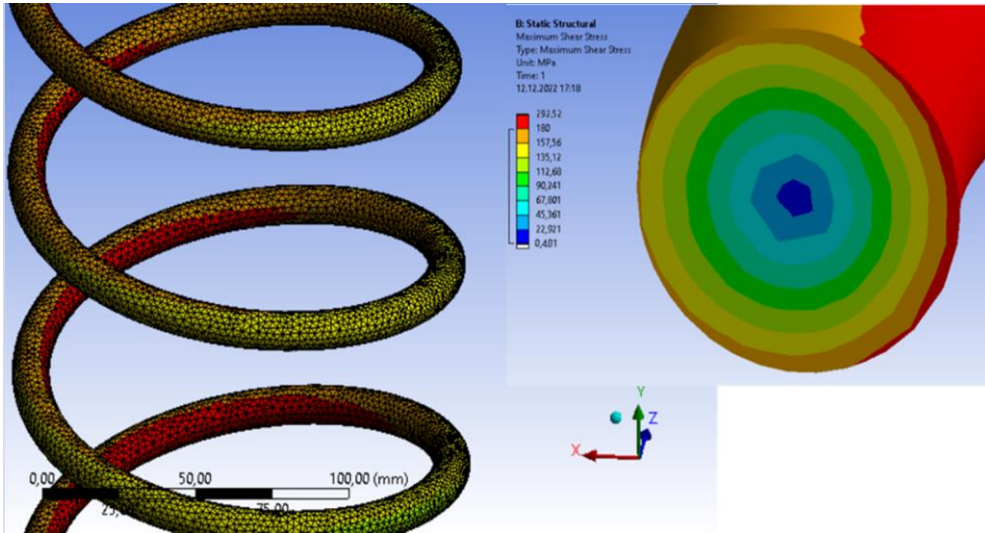
Daha önce verilen temel mukavemet bilgileri kullanılarak, $G = E/[2(1+\nu)]$ denklemi dikkate alınarak (sonlu elemanlar yönteminde $E=200\text{GPa}$ ve $\nu=0,3$ olarak girilmiştir) $G=76,92\text{ GPa}$ ve Wahl faktörü $K_w=1,13$ olarak hesaplanmakta ve buna göre gerilme hesabı yapıldığında (yayın iç yüzeyinde) 50 mm deplasmanda kayma gerilmesinin 204 MPa olduğu görülmüştür. Şekil 5.9-b'de iç yüzeyde gerilmenin 182-190 MPa aralığında değiştiği (en büyük 190 MPa) gözlenmiştir.

Şekil 5.10'da $a/2c = 0,5$ olan (yarı küresel), derinliği 0,25 mm (a) olan oyuklu model için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Burada sırasıyla yayın 25, 50 ve 100 mm'lik yer değiştirmeleri esas alınmıştır. Oyuğun modeldeki yerleşimi kırılan parçanın çatlak başlangıç noktasının yeri gözetilerek kararlaştırılmıştır. Bu da, yayın üst yüzeyi ile dış yüzeye bakan kısmın arasında, konumu üst yüzeye yaklaşık 20 derece açı yapan noktaya karşılık gelmektedir. Şekil 5.10'dan görüleceği üzere, telin üst yüzeyindeki gerilme ortalama 100 MPa mertebelerindedir, oyuktan uzak bölgedeki gerilme genel olarak yayın eksenine yani iç kısma bakan yüzeydeki gerilmeden (124,3 MPa) daha düşük olmasına rağmen, oyuğun varlığı gerilme seviyesini yaklaşık olarak 1,46 kat arttırarak 182,3 MPa'a çıkartmıştır. Şekil 5.11'deki kayma gerilmesine ait görüntülerden, benzer şekilde yayın üst yüzeyinde ortalama 56,8 MPa iken, oyuk nedeniyle, gerilmenin 104,3 MPa'a kadar çıktığı görülmektedir.

Yaydaki deplasman değerinin 50 ve 100 mm değerleri için oyuğun varlığı gittikçe artan bir gerilme seviyesinin söz konusu olduğunu göstermektedir. (Şekil 5.12-5.15).

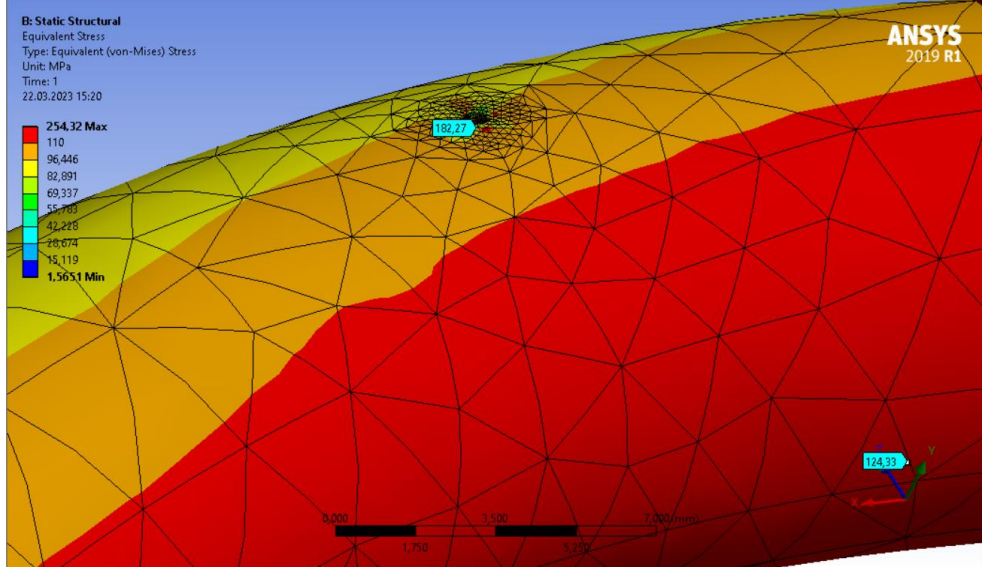


(a)

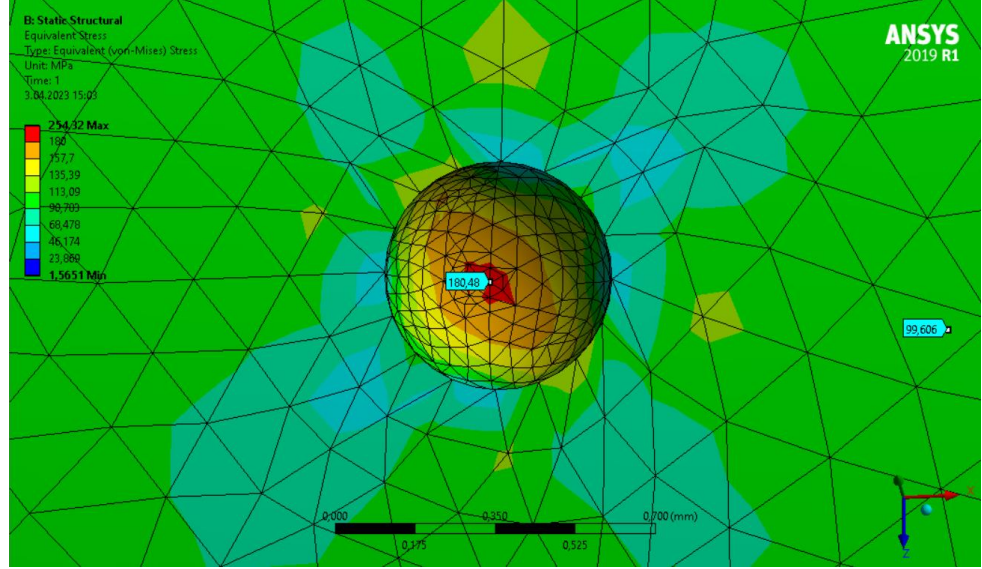


(b)

Şekil 5.9. Yay kesitindeki (a) eş değer gerilme (Von Mises), (b) kayma gerilmesi dağılımları (50 mm deplasman için).

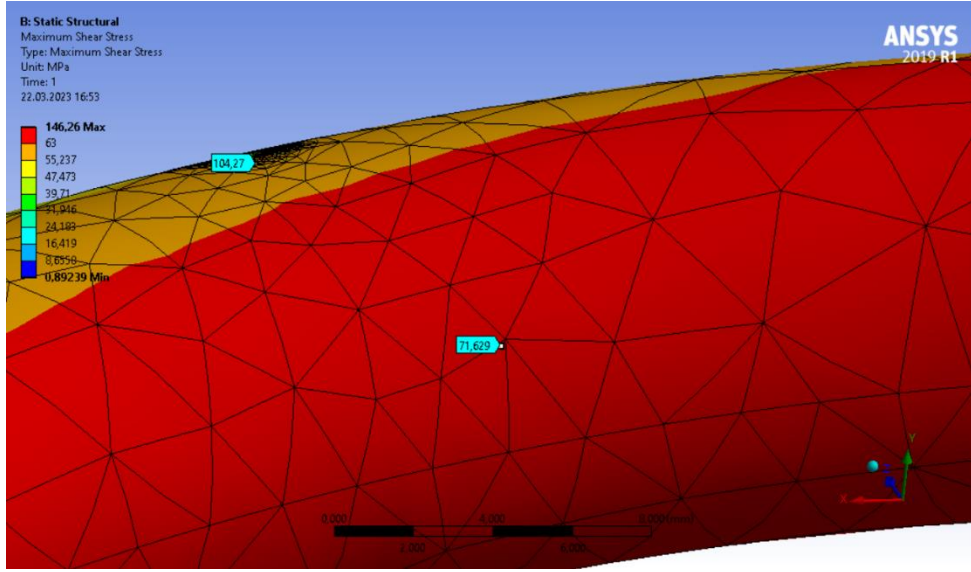


(a)

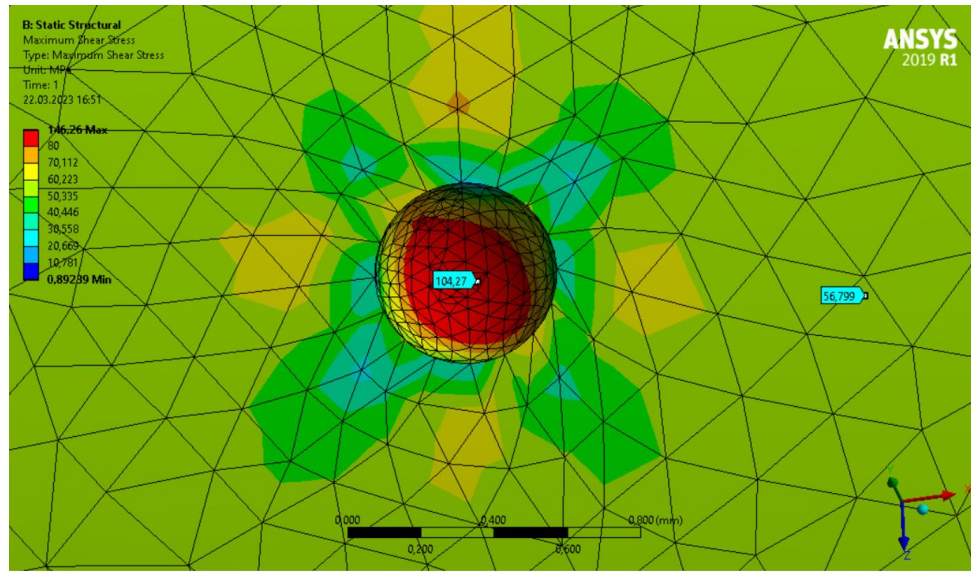


(b)

Şekil 5.10. 25 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki eş değer gerilme dağılımı

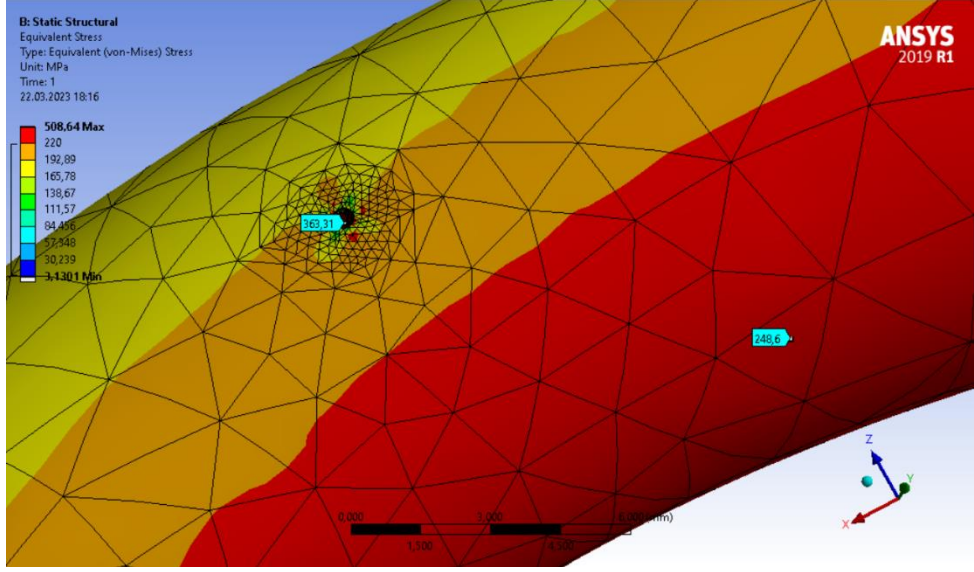


(a)

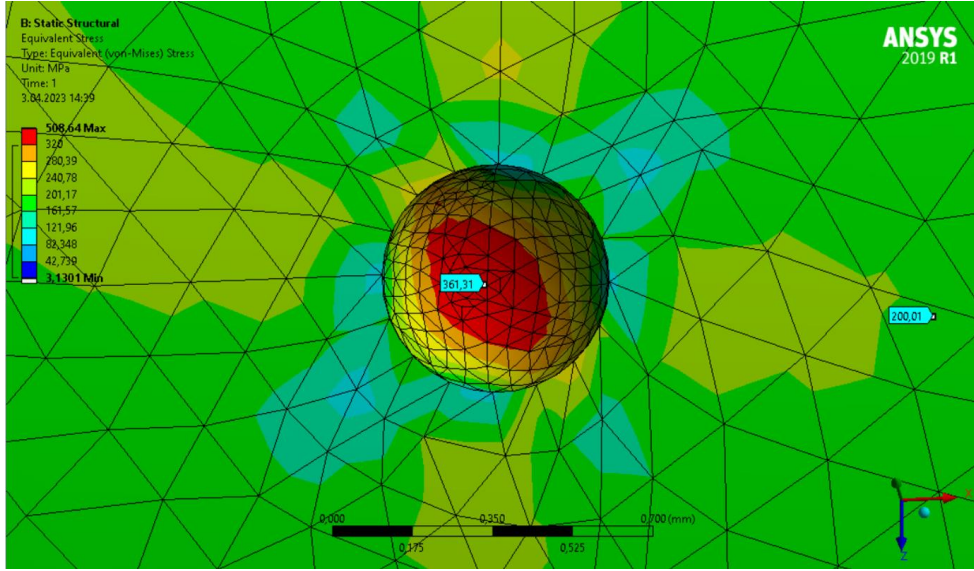


(b)

Şekil 5.11. 25 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki kayma gerilmesinin dağılımı

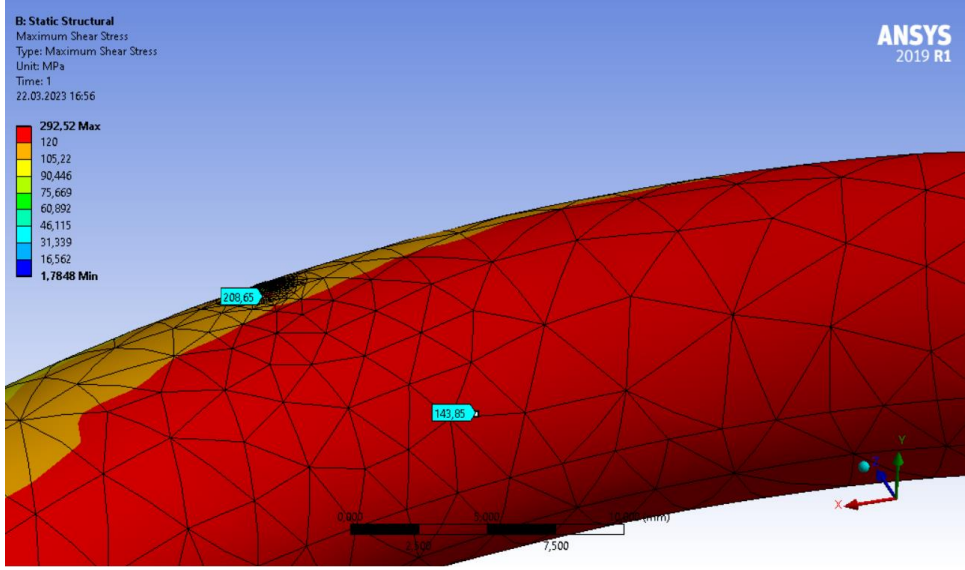


(a)

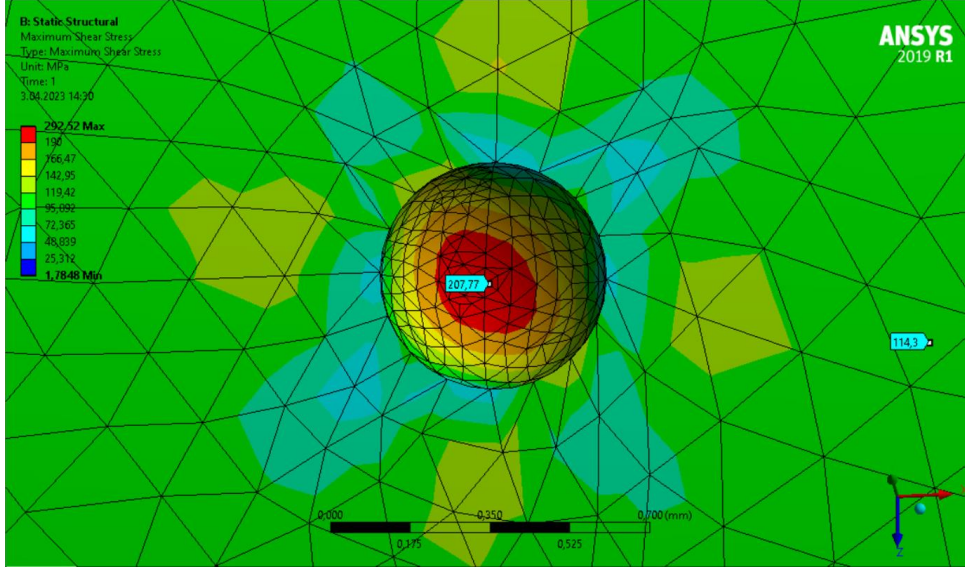


(b)

Şekil 5.12. 50 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki eş değer gerilme dağılımları.

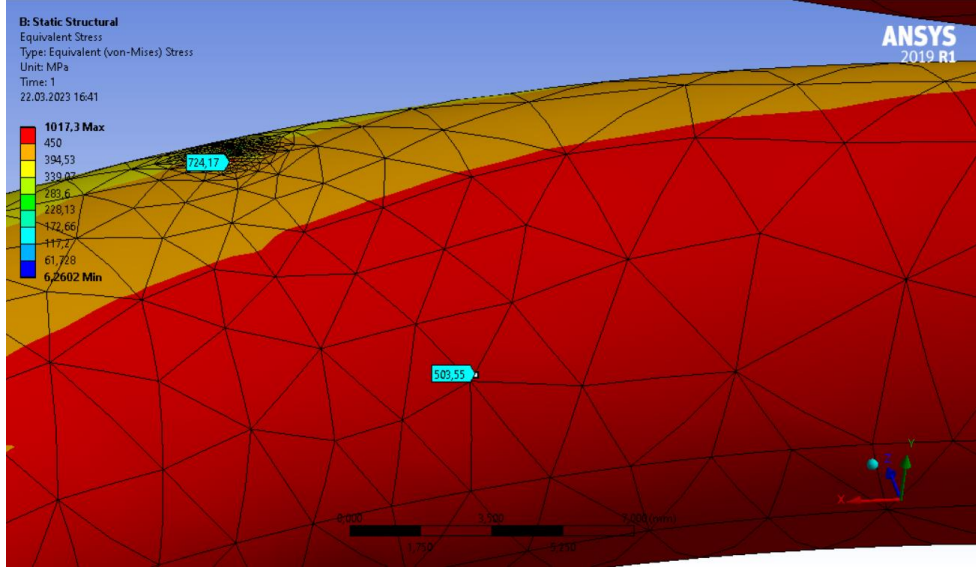


(a)

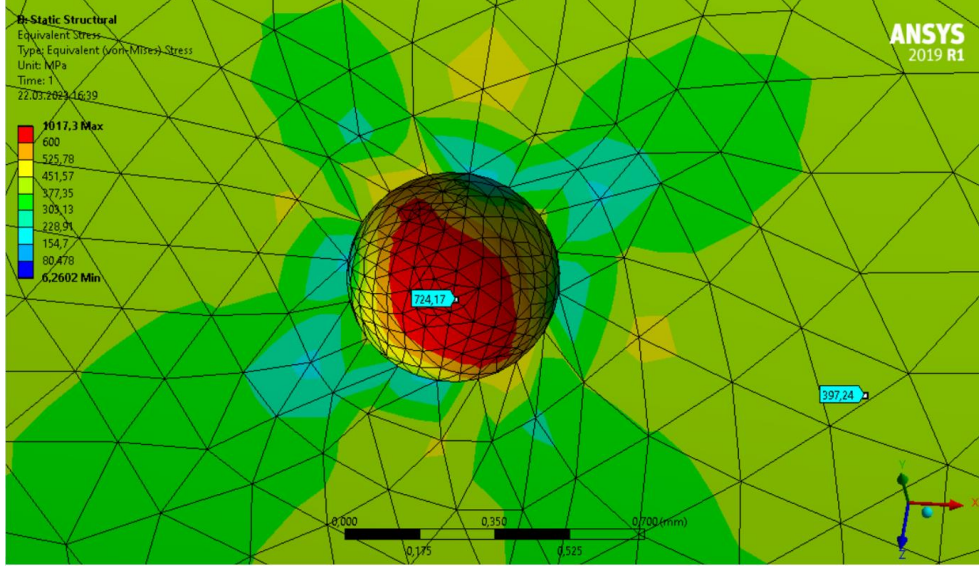


(b)

Şekil 5.13. 50 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki kayma gerilmesi dağılımları.

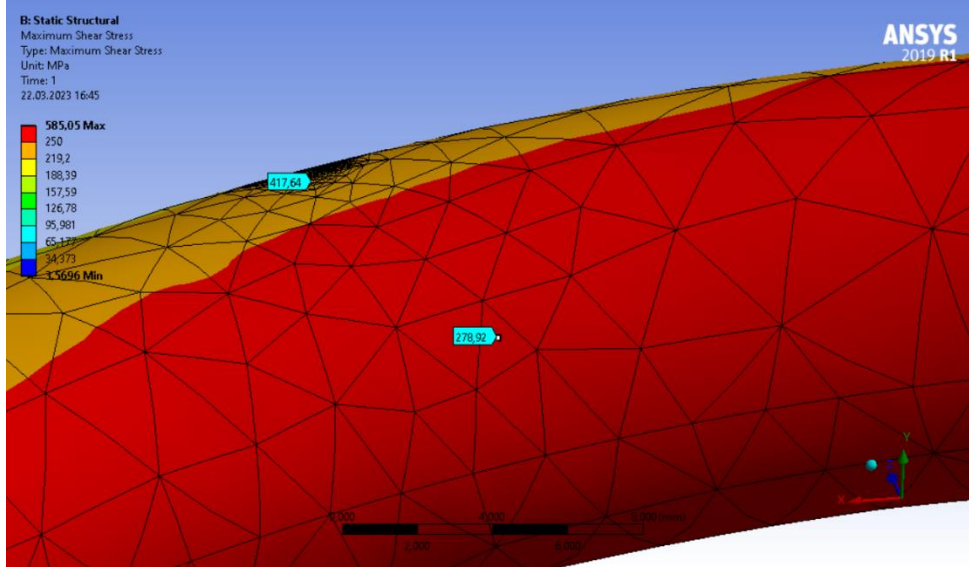


(a)

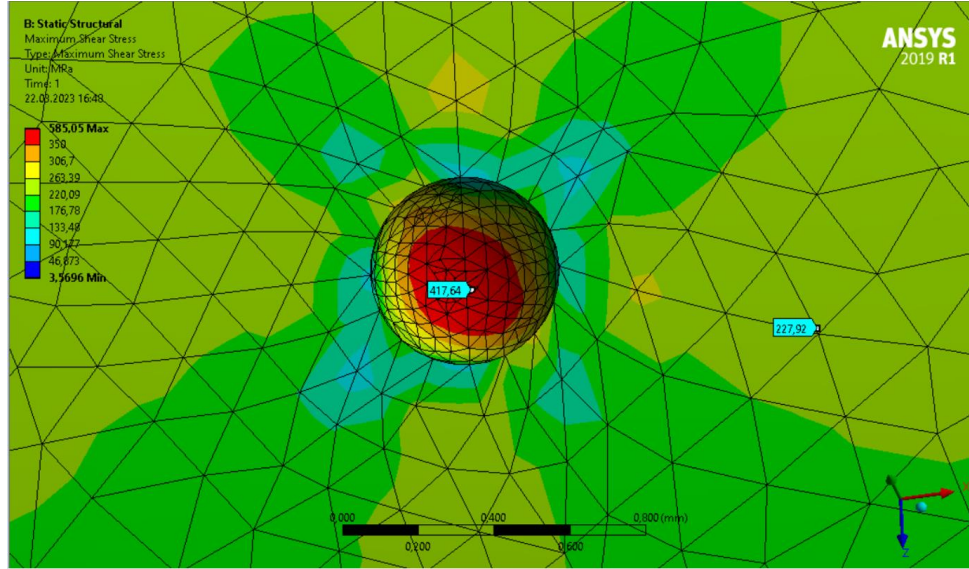


(b)

Şekil 5.14. 100 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki eş değer gerilme dağılımları.



(a)



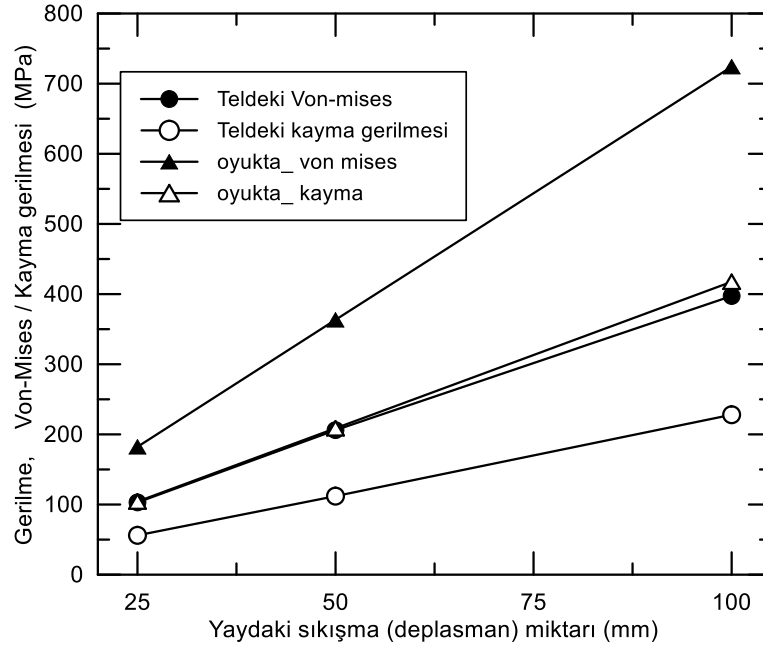
(b)

Şekil 5.15. 100 mm deplasman için (a) oyuk civarındaki ve (b) oyuk içindeki kayma gerilmesi dağılımları.

Tüm analizler sonuçlarında ortak nokta, yayda deplasman miktarı ne olursa olsun teldeki en büyük gerilme yayın merkezine bakan yüzeyde oluşmaktadır. Gerilme dağılımları (Şekil 5.16) ve Tablo 5.3 dikkate alındığında, 0,5 mm çaplı yarı küresel bir oyuğun varlığı yay telindeki bileşke gerilmeyi ortalama 1,8 kat (1,77-1,82) arttırdığı, kayma gerilmesinde de benzer mertebelerde ortalama 1,85 kat (1,83-1,86) arttırdığı anlaşılmıştır.

Tablo 5.3. Yay telinde farklı deplasman değerleri için gelişen gerilme değerleri

Yer Değiştirme(mm)	Yüzeyde (MPa)		Oyuk içinde (MPa)	
	Von mises	Kayma	Von mises	Kayma
25	103	56	182,2	104,3
50	206	112	363,3	208,7
100	397,2	227,9	724,2	417,6



Şekil 5.16. Kritik bölgedeki gerilme değerlerinin deplasmanla değişimi

5.4. Genel Sonuçlar

1. Hasarlanan yayın AISI 9254 çeliğinin bileşimine sahip olduğu, temperlenmiş şartlarda sertliği 54-55 RSD-C olup kullanım yerine göre nitelikli bir çelik olduğu anlaşılmıştır. Yay parçasının üretimden kaynaklanan herhangi bir kusur (kalıp izi..vs) bulunmadığı tespit edilmiştir. İmalat sonrasında ısıl işlem koşullarından kaynaklanabilecek yüzeyde dekarbürizasyon benzeri oluşumlara rastlanmamıştır.
2. Kırık yüzeyi profili ıslah edilmiş çelik parçaların burulma zorlanması altında göstermiş olduğu tipik yorulma kırılma şeklindedir.
3. Yay parçasının boyanmış olmasına rağmen, hasarın ilk aktif sarımın sonuna doğru boyanın tahrip olduğu bölgeden, korozyon ve mekanik zorlanmanın müşterek etkisinde, yani korozyonlu yorulma neticesinde meydana geldiği, çatlakların yayın üst yüzeyi ile dış yüzeye bakan kısmın arasında, üst yüzeyle

yaklaşık 20 derece açı yapan noktadaki korozyon oyuklarından başladığı ve parça içine doğru spiral bir düzlem boyunca ilerlediği anlaşılmıştır.

4. Sonlu eleman analizleri, spiral yaylar için temel mukavemet kitaplarında belirtilen sonuçlara paralel bir gerilme dağılımı sunmuştur. Buna göre bileşke ve kayma gerilmesi yay telinin içe bakan yüzeyinde en büyük, dışa bakan yüzeyde ise en düşüktür. Yayın sıkışma miktarıyla gerilme değerlerinin orantılı olarak arttığı belirlenmiştir.
5. Gerçek parçada kritik bölge için yapılan oyuk modellemesi 0,5 mm çaplı tekil oyuk için gerilmenin kabaca 1,8 kata kadar arttırdığını göstermiştir ki, bu değer kırılma orijinin neden telin iç yüzeyinden meydana gelmediğinin bir göstergesidir. Kırılmanın meydana geldiği bölgede tespit edilebilen oyuk büyüklüğü 0,5 mm altındadır, ancak geometrik olarak yarı küresel bir oyuktan daha şiddetli çentik etkisi oluşturabilecek düzensiz korozyon oluşumları incelenen bölgede yer almaktadır. Yukarıda çatlak başlangıç yerinin doğrulanması amacıyla yapılan değerlendirmenin makul kabul edilebileceğini göstermektedir.
6. Uygulama pratiği açısından araçta yayın montajlandığı kısmın, zeminden gelecek su serpintilerine karşı siperlik görevi gören bir parçayla korunmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.
7. İleriki çalışmalarda düzensiz korozyon oluşumlarının yol açabileceği çentik etkisi ve sonuçları kullanılan malzemenin sertliği ile ilişkilendirilerek yorulma ömür hesabı yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Vukelic, G., Brcic, M., Pastorcic, D., Experimental and numerical analysis of a helical spring failure, XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications, 2017.
- [2] Bergh, F., Silva, G.C., Silva, C., Paiva, P., Analysis of an automotive coil spring fracture, Engineering Failure Analysis 129, 2021.
- [3] Xing, X.Q., Lu, J.N., Jian, J.W., Li, L.J., Luo, Z.C., Effect of environment-assisted cracking on the premature fatigue failure of high-strength valve springs, Engineering Failure Analysis 126, 2021.
- [4] Rocha, J.M.A.M., Pimenta, A.R., Correa, S.R., Fonseca, M.C., Diniz, M.G., Fracture failure analysis in compression spring of a wagon torpedo, Engineering Failure Analysis 122, 2021.
- [5] He, J.Z., Lu, J.N., Deng, X.Y., Xing, X.Q., Luo, Z.C., Premature fracture of high-strength suspension springs caused by corrosion fatigue cracking, Results in Engineering 16, 2022.
- [6] Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi .(15.01.2023).Yaylar. <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/erdemkoc/71071/1-Yaylar-1.pdf>.
- [7] Bulut, Ş., AISI 301 Kalite yay çeliğinin ısıtılma şartlarının mekanik özelliklerine etkisi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [8] Durmuş, H., Çakır, F.G., Gül, C., Investigation into effect of different tempering temperatures on mechanical properties of 51CrV4 steel, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, GU J Sci, Part C, 8(3), 662-670, 2020
- [9] Kömeç, A.A., Dikçi, K., Atapek, Ş.H., Polat, Ş., Aktaş, G., Kurt, Z., Çakır, B., 51CrV4 yay çeliğinin yüzey özelliklerinin incelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Malzeme, Metalürji, Otomasyon ve Üretim Teknolojisi, Metal Dünyası Dergisi, 277, Temmuz 2016
- [10] Dülek, E., Orman, Ş., Karataş, Ç., Sarıtaş, S., Bilyalı dövme parametrelerinin Ç1020 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi ve oluşan kalıcı gerilmenin katman kaldırma yöntemi ile araştırılması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 20, No 3, 289-295, 2005
- [11] Cerit, M., Genel, K., Ekşi, S., Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit, Engineering Failure Analysis 16 (2009) 2467-2472
- [12] Davis, J.R., Metals Handbook Desk Edition, 2nd Edition, 1998
- [13] Fatemi, A., Stephens, R.I., Stephens, R.R., Fuchs, H.O., Metal Fatigue in Engineering, 2nd Edition, October 2000

- [14] Budynas, R.G., Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, Ninth Edition
- [15] Prawoto, Y., Ikeda, M., Manville, S.K., Nishikawa, A., Design and failure modes of automotive suspension springs, Engineering Failure Analysis 15 (2008) 1155–1174
- [16] Institute of Spring Technology.(19.04.2023).Prestressing of compression spring.<https://www.ist.org.uk/prestressing-of-compression-springs>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Eren ARSLAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makine Tasarım ve İmalat

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022 Ara- 2023 Şub arasında ATP Mühendislik'te makine mühendisi olarak çalıştı.