

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

BİLYALI DÖVME PROSESİ UYGULANAN TANK
PALET PİMLERİNİN YORULMA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET YALÇINKAYA
1581117

PROF.DR. ABBAS TAMER ÖZDEMİR

ANKARA
2019

T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

BİLYALI DÖVME PROSESİ UYGULANAN TANK
PALET PİMLERİNİN YORULMA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET YALÇINKAYA
1581117

PROF.DR. ABBAS TAMER ÖZDEMİR

ANKARA
2019



MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ

ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Ahmet YALÇINKAYA'nın hazırladığı, "Bilyalı Dövme Prosesi Uygulanan Tank Palet Pimlerinin Yorulma Analizi" konulu tez çalışması, jürimiz tarafından Teknoloji Yönetimi Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

İMZA

Başkan: Prof.Dr.Ulvi ŞEKER

Danışman: Prof.Dr.Abbas Tamer ÖZDEMİR

Üye: Dr.Öğ.Üyesi Alb.Ayhan AYTAÇ

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

22/02/2019

Hüsnü ÖZLÜ
Doç.Dr.Öğ.Alb.
Alparslan Svn.Bil.Ens.Md.

Alparslan SAVBEN Md.



T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ



TEZ İNTİHAL RAPORU

Ahmet YALÇINKAYA tarafından hazırlanan "Bilyalı Dövme Prosesi Uygulanan Tank Palet Pimlerinin Yorulma Analizi" adlı tez çalışmasının a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana Bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan kısımlarına ilişkin, **25/01/2019** tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından

- Kabul ve Onay sayfaları hariç,
- Kaynakça hariç
- Alıntılar hariç
- 5 kelimeden daha az eşleşmeler hariç tutularak yapılan filtreleme sonucuna göre alınmış olan benzerlik oranı % 4' tür. Tez çalışmasının herhangi bir intihal içermediğini; beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü hukuki sorumluluğu kabul ve beyan ederim.

Adı Soyadı : Ahmet YALÇINKAYA
Öğrenci No : 1581117
Anabilim Dalı : Harp Silah ve Araçları
Program Türü : ☒ Yüksek Lisans ☐ Doktora

Tarih / İmza

25/01/2019

DANIŞMAN ONAYI

Unvanı, Adı Soyadı : Prof.Dr. Abbas Tamer ÖZDEMİR

22/02/2019

Tarih / İmza

ETİK BEYANI

Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Ahmet YALÇINKAYA
22 / 02 / 2019



T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI

ANKARA 2019

BİLYALI DÖVME PROSESİ UYGULANAN TANK PALET PİMLERİNİN
YORULMA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET YALÇINKAYA

ÖZET

Metalik malzemeler sınırlı yorulma ömrüne sahiptir ve yorulma hasarlarına karşı oldukça hassastır. Bu yüzden metallerin yorulma mukavemetini artırmak oldukça önemlidir. Bir metalin yorulma mukavemetini artırmak için birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden biri olan bilyalı dövme, mekanik bir yüzey geliştirme süreci olarak dünya çapında oldukça yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Bilyalı dövme ile yüzeyde oluşturulan kalıntı basma gerilmeli tabaka sayesinde yorulma karakteristiğini iyileştirmek mümkündür.

Bu çalışmanın amacı; tank palet pimi olarak kullanılan AISI 4140 çeliği üzerindeki bilyalı dövme etkisini araştırmaktır. Tank palet pimlerinden üç-nokta eğme yorulma testi için numuneler hazırlanmış ve bu numunelere SAE standardı çerçevesinde dört farklı dövme şiddetinde ve %200 yüzey sarma oranında bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında bütün numuneler yorulma testine tabi tutulmuştur. Üç-nokta eğme yorulma testi ile bütün numune grupları için S-N eğrileri elde edilmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Yorulma sonrası bazı kırılma yüzeyleri de incelenmiştir. Sonuç olarak en iyi yorulma performansı sağlayan bilyalı dövme şiddeti SAE standartlarına göre 6-10A olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı dövme, AISI 4140 çeliği, yorulma, kırılma, kalıntı basma gerilmesi.

T.C.
NATIONAL DEFENCE UNIVERSITY
ALPARSLAN DEFENCE SCIENCES INSTITUTE
DEPARTMENT OF TECHNOLOGY MANAGEMENT

ANKARA 2019

FATIGUE ANALYSIS OF SHOT PEENED TANK TRACK PINS

MASTER THESIS

AHMET YALÇINKAYA

ABSTRACT

Metallic materials have limited fatigue life and resistance to fatigue damages. It is therefore essential to improve this short-come as far as possible. Practically, there are several ways to achieve this. Among them, shot peening is a common world-wide used mechanical surface enhancement process. With this technique, compressive residual stresses are mostly introduced on the surface of the metallic work-piece to enhance the fatigue performance.

This work aims to study the effect of shot peening on AISI 4140 steel generally used for tank track pins. Three-point bending fatigue testing specimens were manufactured from the original tank track pin. All specimens were first successively shot peened at four different Almen intensities with the coverage of %200. The specimens were then subjected to subsequent fatigue tests. After three-point bending fatigue tests, for each specimen groups, S-N curves were obtained and then compared with each other. After fatigue, some fracture surfaces were also examined. All through these results, the best intensity of shot peening indicating the best fatigue performance was determined as 6-10A according to SAE standart.

Keywords: Shot peening, AISI 4140 steel, fatigue, fracture, compressive residual stress.



ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

“Bilyalı Dövme Prosesi Uygulanan Tank Palet Pimlerinin Yorulma Analizi” başlıklı bu yüksek lisans tezinin araştırma alanını, çevrimsel yüklemelere maruz kalan malzemelerin dinamik yükler altındaki yorulma davranışı ve bu yorulma davranışını iyileştirmeye yönelik yüzey işlemleriyle elde edilebilecek performans artışını araştırmak oluşturmıştır. Bu tezde, paletli askeri araç sistemlerinin palet baklalarını birbirine bağlamada kullanılan AISI 4140 çeliğinden üretilen pimlerin yorulma dayanımının bilyalı dövme işlemi ile geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu kapsamda literatürde AISI 4140 çeliğine yönelik en sık uygulanan dört farklı bilyalı dövme metodu pimlerden elde edilen numunelere uygulanmış ve yorulma testleri yapılmıştır. Test sonuçları karşılaştırılarak palet pimlerine en iyi yorulma performansı sağlayan optimum bilyalı dövme süreci belirlenmiştir.

Bu süreçte başta tez danışmanım Prof.Dr. Abbas Tamer ÖZDEMİR’e, eşim Kerime YALÇINKAYA ve kızım Ece YALÇINKAYA’ya çalışmalarım ve zorlu deney süreci boyunca, duydukları güven ve verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Bu tezin test safhasının tamamı Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TUSAŞ)’de yapılmıştır. En zorlu kısım olan test sürecinde büyük bir özveri ile her türlü kolaylığı sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen TUSAŞ Yapısal Operasyonlar Direktörü sayın İsmail KILINÇ’a; ayrıca TUSAŞ imkanlarından faydalanmamı sağlayan TUSAŞ Üretim Mühendisliği Direktörü sayın Arif KÖKSAL’a ve Alp Aykut KİBAR, Mustafa YAVUZ ve Zeki YURDAKUL’a teşekkür ederim.

Ahmet YALÇINKAYA
Ankara, Şubat 2019



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
TEZ ONAY SAYFASI.....	iii
TEZ İNTİHAL RAPORU	v
ETİK BEYANI	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	xi
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR.....	xiii
İÇİNDEKİLER	xv
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xix
KISALTMA VE SEMBOLLER.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Yorulma ve Bilyalı Dövme Etkisi	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Beklenen Katkısı.....	3
2. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	5
2.1. Bilyalı Dövme	5
2.1.1. Bilyalı Dövme Parametreleri	10
2.1.1.1. Dövme Şiddeti ve Yoğunluğu.....	10
2.1.1.2. Yüzey Sarma Oranı	15
2.1.1.3. Bilyalar	17
2.1.2. Bilyalı Dövme Süreci Değişkenleri	19
2.2. Kalıntı Gerilmeler.....	22
2.3. Kalıntı Basma Gerilme Etkisi.....	25
2.4. Yorulma Analizi	28
2.4.1. Yorulmaya Etki Eden Faktörler	32
2.4.2. Yorulma Testi	33
2.4.2.1. Yorulma Testi Prensipleri	35
2.4.2.2. Yorulma Kırılmaları.....	38
2.4.3. Metallerde Yorulma	40
2.4.4. Çelikte Yorulma Dayanımı.....	42

2.5. Bilyalı Dövmenin Yorulma Mukavemetine Etkisi.....	43
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	49
4. DENEYSEL HAZIRLIK VE YÖNTEM	57
4.1. Malzeme Seçimi	57
4.2. Numune	59
4.3. Bilyalı Dövme İşlemi	60
4.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	62
4.5. Yorulma Testi.....	62
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	65
5.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri.....	65
5.2. Yorulma Testi Sonuçları ve Tartışma.....	66
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKÇA	79
ÖZGEÇMİŞ.....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 2.1: Almen Test Plakaları Özellikleri	13
Tablo 2.2: Farklı Hava Basınç Değerlerinde Almen Dövme Şiddeti Değerleri	14
Tablo 2.3: Farklı Çelik Bilya Tiplerine ait Teknik Bilgiler	18
Tablo 3.1: AISI 4140 Isıl İşlem Parametreleri	51
Tablo 3.2: AISI 4140 Yorulma Dayanımı Değerleri	52
Tablo 4.1: AISI 4140 Çeliği Kimyasal Kompozisyonu (ağırlıkça %)	57
Tablo 4.2: AISI 4140 Çeliği Mukavemet Değerleri.....	58
Tablo 4.3: S230 Çelik Bilya Kimyasal Kompozisyonu	60
Tablo 4.4: Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri	61
Tablo 5.1: Yüzey Pürüzlülüğü Parametre Değerleri	65
Tablo 5.2: Numune Yüzeyinden Alınan Sertlik Değerleri.....	71



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No.

Şekil 1.1: Paletli Askeri Araç Sistemleri, (a): Leopard 2 Tank, (b): Zırhlı Personel Taşıyıcı, (c): Fırtına Obüsü, (d): Zırhlı Muharebe Aracı	4
Şekil 2.1: Bilyalı Dövmede Tek Bilya Çarpma Etkisi	6
Şekil 2.2: Bilyalı Dövme Süreci.....	6
Şekil 2.3: Bilyalı Dövme Uygulaması	7
Şekil 2.4: Boşluklu Yapılarda Bilyalı Dövme Uygulaması	10
Şekil 2.5: Almen Plaka Ölçümü ve Doyurma Eğrisi	12
Şekil 2.6: Bilyalı Dövme Uygulanmamış ve Uygulanmış Yüzeyler	16
Şekil 2.7: Bilyalı Dövme ile Elde Edilen Farklı Yüzey Sarma Oranları (T sürede elde edilen yüzey sarma oranı)	17
Şekil 2.8: Bilya Çarpma Açısı.....	21
Şekil 2.9: Bilyalı Dövme ile Elde Edilen Kalıntı Gerilme Profili.....	24
Şekil 2.10: Akma Mukavemeti ve Çekme Mukavemeti ile Kalıntı Basma Gerilmesi İlişkisi.....	26
Şekil 2.11: Çeliklerde Kalıntı Basma Gerilme Profili	27
Şekil 2.12: Yorulma Analizi Kontrol Çizelgesi	31
Şekil 2.13: Gerilme-Zaman Grafiği ve Parametreler	36
Şekil 2.14: Yorulma Eğrisi (S-N diyagramı)	38
Şekil 2.15: Çatlak Kesit SEM Görüntüsü (AISI 4140).....	40
Şekil 2.16: Dökme Çelikte Bilyalı Dövme Deformasyon Etkisi Görüntüsü	46
Şekil 2.17: Dinamik Yükleme Altındaki Malzemede Kalıntı Gerilme Profili	48
Şekil 3.1: AISI 4140 İçin Derinlik ve Kalıntı Gerilme Profili.....	50
Şekil 3.2: Yüzey Pürüzlülüğünün Yorulma Ömrüne Etkisi.....	52
Şekil 3.3: Bilyalı Dövmüş Yüzey ve Eğiklik Görünümü	54
Şekil 3.4: Bilya Boyutu ve Hava Basıncının Almen Dövme Yoğunluğuna Etkisi....	54
Şekil 4.1: Yorulma Test Numunesi Geometrisi	59
Şekil 4.2: Yorulma Test Numunesi.....	59
Şekil 4.3: 3 Nokta Eğme Düzeneği.....	63
Şekil 4.4: Test Numunesi Geometrik Bölümleri.....	63
Şekil 5.1: Yüzey Pürüzlülük Dağılımı	66
Şekil 5.2: Gerilme - Ömür Grafiği (BD0).....	67
Şekil 5.3: Gerilme - Ömür Grafiği (BD1).....	67
Şekil 5.4: Gerilme - Ömür Grafiği (BD2).....	68
Şekil 5.5: Gerilme - Ömür Grafiği (BD3).....	68
Şekil 5.6: Gerilme - Ömür Grafiği (BD4).....	69
Şekil 5.7: Gerilme - Ömür Grafikleri Karşılaştırması.....	69
Şekil 5.8: Dövme Şiddetinin Yorulma Ömrüne Etkisi ($\sigma > 1000$ MPa).....	70
Şekil 5.9: Ömür Değişim Mukayesesi (BD0-BD2)	71
Şekil 5.10: Kırılma Yüzey Görüntüsü (a: 1025 MPa-90.136 çevrim, b: 981 MPa-359.392 çevrim).....	72



KISALTMA VE SEMBOLLER

σ_y	:	Akma dayanımı [MPa]
$\sigma_{\text{ç}}$	:	Çekme dayanımı [MPa]
σ_{COMP}	:	Maks. basma gerilmesi [MPa]
σ_{TENS}	:	Maks. çekme gerilmesi [MPa]
σ_{max}	:	Maksimum gerilme [MPa]
$\sigma_{\text{maks}}^{\text{rc}}$	:	Maksimum kalıntı basma gerilmesi [MPa]
σ_s^{rc}	:	Yüzey kalıntı basma gerilmesi [MPa]
σ_{min}	:	Minimum gerilme [MPa]
σ_a	:	Gerilme genliği [MPa]
σ_m	:	Ortalama gerilme [MPa]
σ_s	:	Sürekli mukavemet değeri [MPa]
t	:	Dövme süresi [s]
s	:	Bilya boyutu [mm]
f	:	Frekans [Hz]
σ	:	Gerilme [MPa]
S	:	Gerilme değeri [MPa]
N	:	Çevrim sayısı
R	:	Gerilme oranı
p	:	Hava basıncı [psi]
V	:	Hız [m/s]
m	:	Kütle [g]
I	:	Moment [Nm]
P	:	Toplam yük [W]
Ra	:	Yüzey pürüzlülüğü aritmetik ortalama değeri [μm]
Rz	:	Yüzey pürüzlülüğü yüzey çukuru dikey derinliği [μm]
BD	:	Bilyalı Dövme
KE	:	Kinetik Enerji
SAE	:	Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Birliği)
SEM	:	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TSK	:	Türk Silahlı Kuvvetleri
$TUSAŞ$	:	Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.



1. GİRİŞ

Bilyalı dövme işlemi, özellikle çevrimsel yüklemelere maruz kalan makine elemanlarının yorulma, aşınma, korozyon ve gerilmeli korozyon gibi hasarlara karşı mukavemetinin artırılması için uygulanan etkin bir mekanik yüzey işlemidir. Özellikle otomotiv, uzay ve havacılık sanayi olmak üzere birçok alanda oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmakta ve etkilerinden faydalanılmaktadır. Bu faydalı etki yüksek basınç yardımıyla bilya tanelerinin bir yüzeye püskürtülmesi ile sağlanmaktadır. Bilyalar kazandıkları yüksek hızın etkisiyle malzeme yüzeyinde küçük çukurlar oluştururlar. Bu çukurların oluşması da malzeme yüzeyinin plastik deformasyona uğramasına sebep olur. Malzeme yüzeyindeki bu plastik deformasyon kalıntı basma gerilmeli bir tabaka meydana gelmesini sağlamaktadır¹.

Kinetik enerji kazanmış yüksek hızlı bilyaların yüzeye çarpması ile malzemenin yapısal karakteristiğinde ciddi oranda bir iyileşme ve gelişme görülür. Kısaca, tane boyutunda küçülme ve bölgesel düzensizliklerde ciddi azalma meydana gelir². Yüzeyde plastik deformasyona maruz bırakılmış tabakada bir nevi sıkılaşma meydana gelir, yüzeydeki tabakanın pekleşme değerinin arttığı görülür.

Bilyalı dövme işleminin performansı, yüzeyde ve yüzeyin hemen alt tabakasında sağladığı kalıntı basma gerilme profili nispetinde değerlendirilmelidir. Bilyalı dövmenin etkilerinden en iyi şekilde faydalanabilmek için olabildiğince derin bir kesit boyunca kalıntı basma gerilmeli bir tabaka oluşturmak gereklidir. Böylelikle dinamik yüklere maruz kalan makine elemanlarının ömründe iyileşme sağlanabilir. Bu etkinin

¹ Andreza S. Franchim , Valdemir S. de Campos, Dilermando N. Travessa, Carlos de Moura Neto, “Analytical Modelling for Residual Stresses Produced by Shot Peening”, **Materials and Design**, s. 30, (2009): ss. 1556–1560.

² G. Liu, J. Lu, K. Lu, “Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening”, **Materials Science and Engineering: A**, s. 286, (2000): ss. 91-95.

oluşabilmesi için süreç birtakım parametrelere bağlıdır. Parametre seçimi kritik bir süreç olarak değerlendirilmeli ve yüzeyde istenen etkiyi sağlayabilecek en iyi metot uygulamaya geçilmeden önce belirlenmelidir.

Bilyalı dövme ile yüzey pürüzlülük değerinde dövme şiddetine bağlı olarak değişim olur, malzeme sertlik değeri artar. Yüzey çatlaklarının giderilmesine olumlu katkı sağladığından malzemede meydana gelebilecek korozyona bağlı hasarların da önlenmesine katkı sağlar³.

1.1. Yorulma ve Bilyalı Dövme Etkisi

Başta havacılık endüstrisi olmak üzere otomotiv endüstrisi ve birçok alanda kullanılan metalik malzemelerde, özellikle bağlantı elemanlarında malzemenin kullanım limitlerini belirlemede yorulma davranışının önceden analizi çok kritik bir öneme sahiptir. Metal yorulması sonucu oluşan malzeme kusurları ve kırılma, çalışma esnasında aniden meydana gelen ve telafisi oldukça güç olan sonuçlar meydana getirebilir. Sünek malzemelerde de meydana gelebilecek yorulma kırıkları plastik deformasyon sonucu çatlak oluşumundan başlayarak ilerler. Bir makine elemanı olarak kullanılan herhangi bir malzemenin kullanım alanında çalışma esnasında maruz kaldığı yüklemeler ile ortaya çıkan çekme gerilmesi neticesinde yüzeyde var olan çatlaklar ilerleyerek büyümeye devam eder ve yük altındaki malzemenin en zayıf noktasında görülen kırılma ile sonuçlanır⁴.

Yorulma kırılmaları, yüzeydeki eğme ve çekme gerilmelerinin yüzeyin sahip olduğu basma gerilmelerine oranla daha büyük olduğunda yüzeyden itibaren başlar. Bu başlangıç mevcut bir çatlakla daha hızlı olabilir. Yüzeyin altında kalan kısmın yorulma dayanımı yüzeyin sahip olduğu mukavemet değerinden daha fazladır. Bunun sebebi ise hammaddeden son haline kadar geçen sürede yüzeyin sürekli olarak birtakım işlemlere tabi tutulmasıdır. Bu işlemler yüzeyde yorulma dayanımına olumsuz etki eden çekme gerilmeleri meydana getirmekte ve ayrıca daha sonraki olası işleme yöntemleri için de malzeme ömründe beklenmeyen olumsuz etkiler

³ N. A. Alang, N. A. Razak, ve A. K. Miskam, "Effect of Surface Roughness on Fatigue Life of Notched Carbon Steel", *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, c. 11 s. 1, (2011): ss. 160–163.

⁴ Emrah Dülek, Çetin Karataş, Süleyman Sarıtaş, "Bilyalı Dövmüş Ç1020 Malzemede Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi ile İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, c. 18, s. 3, (2003): ss. 107-116.

oluşturabilmektedir. Sonuç olarak bu durum bir tasarım ve üretim problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Malzeme ömrü üzerindeki olumsuz etkileri ortadan kaldıracak için çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bilyalı dövme kontrollü bir yüzey geliştirme işlemi olarak etkin ve yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bilyalı dövme ile sağlanan kalıntı basma gerilmeler sayesinde yorulma ömrü üzerinde kayda değer artışlar elde etmek mümkün olmaktadır. Bilyalı dövme gibi bazı yüzey işlemleri ile, malzemeye kazandırılan kalıntı basma gerilmeler ile üretim ve şekil verme aşamalarında ortaya çıkan yüzeydeki çekme gerilmelerinin etkisini azaltmak amaçlanmaktadır⁵.

Günümüzde kullanılan birçok metal parçanın yorulma ömrü bilyalı dövme ile geliştirilebilir. İniş takımları, şanzıman üniteleri, krank milleri, türbin donanımlarına uygulanan uygulamaların başarı ile sonuçlandığı bilimsel çalışmalarda görülmektedir. Bilyalı dövme, malzeme özelliklerine göre farklılık gösterebilen işlem parametrelerinin uygulanmasıyla yüzeyde meydana oluşturulan kalıntı basma gerilmeleri ile malzeme ömrünü uzatır, daha uzun bir yorulma dayanımı sağlar.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Beklenen Katkısı

AISI 4140 çeliği, yüksek mukavemet ve tokluk değerine sahip, korozyona direnci yüksek, aşınmaya karşı dirençli ve Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK)'nin; silah, araç, gereç ve donanımlarında kullanım oranı oldukça yüksek bir çeliktir.

TSK envanterinde kullanılan paletli araçların birçoğunun palet baklalarının birbirine bağlanmasında kullanılan pimler AISI 4140 çeliğinden üretilmektedir. Paletli araçlar zor arazi koşullarında görev yapmak üzere tasarlanmıştır. Hareket organının temeli olan palet sistemleri, kullanım esnasında hava koşullarının yanında araç hareketinden ve yol durumundan kaynaklı değişken gerilmelere maruz kalmaktadır.

Paletli askeri araçların muharebe ağırlığı 15 ton ile 60 ton arasında değişmektedir (Şekil 1.1). Özellikle engebeli arazi koşullarında bu araçların yürüme organı olan palet sisteminin bu ağırlığı kusursuz taşıması hayati öneme haizdir. En donanımlı tankın bile hedefe ilerleyememesi demek düşman üzerindeki etkisinin olumsuz olması

⁵ A. Wick, V. Schulze, O. Vöhringer, "Effects of Warm Peening on Fatigue Life and Relaxation Behaviour of Residual Stresses in AISI 4140 Steel", *Materials Science and Engineering: A*, s. 293, (2000): ss. 191–197.

demektir. Harp silah, araç ve gereçlerinde malzeme yorulmasının neden olduğu arızalar en büyük sorunlardan birini teşkil eder. Paletli araçlar için ise en büyük sorunlardan biri de yürüyüş aksamında meydana gelen hata ve arızalardır.

Paletli araçların 1/10 ağırlığını teşkil eden palet sisteminin dayanıklılığı ve devamlılığı harp içerisinde önemli bir unsurdur. Bu çalışma ile palet baklalarının bağlantısında kullanılan pimlerin ömür değerlerini artırmak için yeni süreçler belirlemek, dayanıklılığını artırmak, pim değişim periyodunu artırmak amaçlanmaktadır.



Şekil 1.1: Paletli Askeri Araç Sistemleri, (a): Leopard 2 Tank, (b): Zırhlı Personel Taşıyıcı, (c): Fırtına Obüsü, (d): Zırhlı Muharebe Aracı

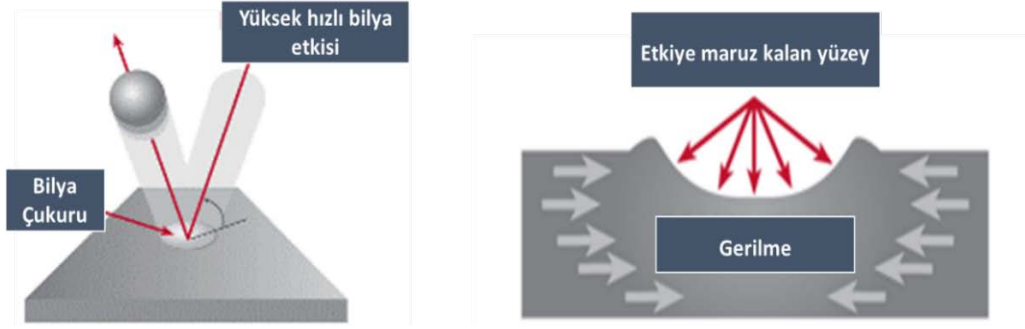
Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinden üretilen kundağı motorlu palet sistemine sahip zırhlı veya zırhsız araçlarda kullanılan palet pimi 3 nokta eğme yorulma testine tabi tutulmak üzere numune boyutuna getirilmiştir. Elde edilen düz geometriye sahip numunelere S230 bilya ile değişik dövme şiddetlerinde ve %200 yüzey sarma oranında bilyalı dövme süreçleri uygulanmıştır. Bilyalı dövme uygulanan numuneler ile uygulanmayan numunelerin yorulma testi sonuçlarında S-N eğrileri çıkarılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Yorulma ömrüne etki eden en iyi işlem süreci belirlenmeye çalışılmıştır.

2. KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Bilyalı Dövme

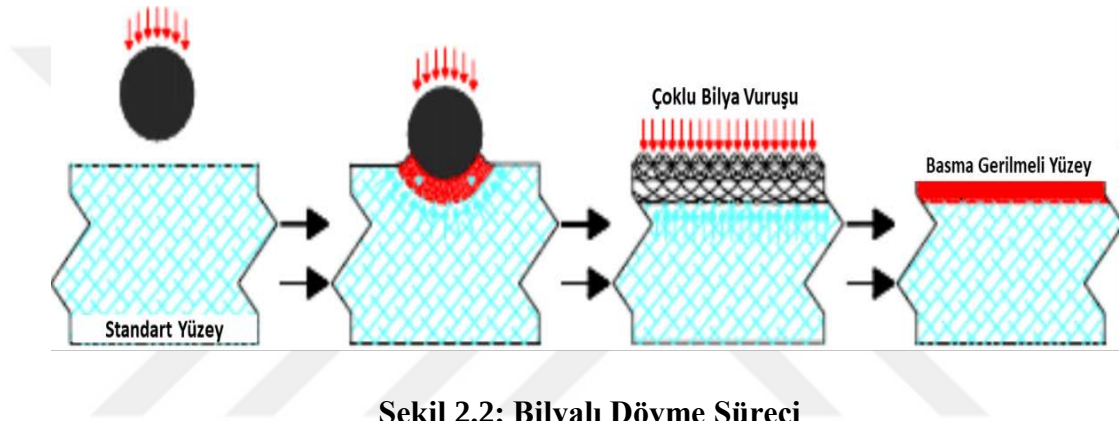
Bilyalı dövme; üretim ve şekil verme sonrası uygulanan yüzey işleme metotlarından bir tanesidir. Bir metal parça yüzeyinin kapalı bir ortamda, bir nozul vasıtasıyla yüksek basınçlarda ve yüksek bağl hızı sahip bilyalarla dövülmesi sonucu, metal yüzeyinde iki eksenli kalıntı basma gerilmeleri oluşturulması ve böylece yorulma dayanımının arttırılabilmesinin en düşük maliyetli bir yoludur. Bilyalı dövme bir yüzey iyileştirme ve yüzey özelliklerini geliştirme işlemidir. Bilyalı dövme ile yorulma, korozyona bağlı yorulma ve gerilmeli korozyon gibi hasarlara karşı metallerin mukavemet değerini arttırmak amaçlanmaktadır. Yorulma dayanımında artış, malzemenin sürekli mukavemet değerinde artış, yük altında çatlak oluşumunda azalma, korozyon oluşumunda ve hasarlarında azalma, malzeme ömründe en az %30 ve üzeri artış, işletme maliyetlerinde azalma bilyalı dövme işleminin en önemli faydalarındandır.

Bilyalı dövme metalik malzemelerde, hem sertlik artışına, hem de yüzeyde ve yüzeyin hemen alt tabakasında basma nitelikli kalıntı gerilmelerin oluşmasını sağlar. Farklı sıcaklığa sahip ortamlarda etkin olarak uygulanabilen, yüzey özelliklerini ve yüke karşı mukavemet performansını iyileştirmeyi hedefleyen bir işlemdir. Bilyalı dövme uygulanacak yüzeye küçük çaplı değişik yapı ve özelliklere sahip bilyalar fırlatılır. Bu bilyaların yüksek hızlı çarpma etkisi ile uygulama yapılacak yüzeye bir enerji aktarımı gerçekleşir (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2). Bu bilyaların dövülecek malzemedan daha sert ve mukavemet değerinin yüksek olması gereklidir.



Şekil 2.1: Bilyalı Dövmede Tek Bilya Çarpma Etkisi

Mattias Lundberg, “Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron”, *Licentiate Thesis*, Linköping University (2013), s. 25.



Şekil 2.2: Bilyalı Dövme Süreci

Jason Jhonson, Albert Whetstone, Justin Johnson, Shot Peening, *Shot Peening Poster*, (2001).

Bilyalı dövme, burulma, bükme gibi sürekli olarak basma ve çekme yüklemelerine maruz kalan parçaların yorulma ömrünü uzatır. Birçok makine elemanının yorulma dirençlerinin artırılması maksadıyla bu yöntem uzun yıllardır yaygın olarak uygulanmaktadır. En sık bilyalı dövme işlemi uygulanan parçaların başında; türbin bıçakları, türbin diskleri, havalandırma bıçak ve pervaneleri, birleştirme yüzey, dingiller, iniş dişlileri, konik dişliler, yataklar, krank şaftlar, transmisyon şaftları, vanalar, hava aracı kanat yüzeyleri ve yay kirişleri, bağlantı elemanları, sarmal ve eğme dişlileri, conta ve vida dişleri, şaft mafsalları, yaylar, silindir blokları ve pistonlar gelmektedir.

Bilyalı dövme işlem zincirinin en temel elemanı sistemin adını aldığı bilyalardır. Uygulamada kullanılan bilyalar dökme demir, çelik, kesme tel, seramik, cam gibi farklı malzemelerden olabilmektedir. Dövülecek yüzey özelliklerine ve yüzeyde

istenen etkiye göre bilya tip ve boyut seçimi önceden yapılır. Metallere uygulanacak bilyalı dövme işleminde sertlik-malzeme ilişkisi de dikkate alındığında çelik küresel bilyaların kullanımının daha uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Bilyalı dövme uygulamasına başlamadan önce kullanılacak bilya tipi ve boyutunu belirlemek son derece önemlidir. Yüzeye fırlatılan bilyalar, malzeme üzerinde çarptığı noktada malzeme özelliğine bağlı olarak bir tepki verilmesi oluşturur. Bu da bilyanın hızı ve boyutu ile değişiklik gösterir. Bu etkiler de önceden belirlenebilir. Bu etkileri önceden bilmek uygulama açısından zaman tasarrufu sağlar⁶.



Şekil 2.3: Bilyalı Dövme Uygulaması

“What is Shot Peening”, Progressive Surface, <https://www.progressivesurface.com/shotpeening/process.htm> [Erişim Tarihi: 11.11.2018].

Bilyalı dövme sisteminin temel elemanı bilya olsa da bu sistem bir işlemler zincirinden oluşur. Bilyalı dövme tezgahı bir bütün olarak; bilya tanklarında bulunan milyonlarca bilyanın, yüksek basınç ile bir nozul yardımıyla yüzey işlemi uygulanacak malzemenin özelliklerine ve işlem sonucunda olması beklenen özelliklere göre belirlenen süre, bilya tipi ve boyutu, hız, yoğunluk, yüzey sarma oranı ve vuruş açısı gibi parametrelere göre kapalı bir tezgahta püskürtülmesi prensibine göre çalışır (Şekil 2.3). Yüzeye püskürtülecek bilyaların hızı, malzemede kalıcı plastik deformasyon oluşturacak hızda ve yoğunlukta olacak şekilde metalin bütün yüzeyine püskürtülür.

⁶ Mattias Lundberg, “Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron”, *Licentiate Thesis*, Linköping University, (2013), s. 29.

Farklı geometrik yapılarda yüzeyin tamamına dağılım sağlamak bazı tezgahlar için otomatik robot yardımıyla olsa da bazı tezgahlar için ise el yardımıyla olabilmektedir.

Bilyalı dövmenin bir metalin mekanik karakteristiği ve yorulma ömrü üzerinde çok fazla etkisi vardır. Deneysel çalışmalar; bilyalı dövmenin yapı çeliklerinin, yay çeliklerinin, titanyum alaşımlarının, yorulma dayanımına iyi seviyede olumlu etki yarattığını göstermiştir. Bilyalı dövmenin sonuçları; bilya tipi, hız, şekil, malzeme, yüzey sarma oranı ve uygulanacak yüzeyin sertlik değerlerine dayanmaktadır⁷.

Bilyalı dövme işleminde önemli olan kriter malzemeye ve malzeme yüzeyine kazandırılmak istenen özelliklerin, malzeme özellikleri de göz önüne alınarak, önceden belirlenmesidir. Dövme süresini uzatmak ve yüksek çaplı bilyalar kullanmak her zaman malzeme ömrünü uzatmaz. Aşırı plastik deformasyon malzemede gevrekliğe yol açar ve malzeme ömrüne olumsuz etki yapar. Değişik bilya çapı ve bilya hızı ile farklı sertlik ve dayanım değerleri elde etmek mümkün olabilmektedir. Yüksek hızlarla püskürtülen bilyaların boyutu kadar çarpma açısı ve hızı da yüzeyde meydana gelecek plastik deformasyon miktarınının doğrudan belirleyicisidir. Malzeme yüzeyi bu değişkenlerin etkisi nispetinde kazandığı kalıntı gerilmeler ile beklenen derecede mukavemet ve sertlik değeri kazanır.

Bilyaların yüzeye şiddetle çarpması ile birlikte plastik deformasyona uğrayan bölgelerin çarpma etkisiyle genişlemeye çalışması yüzeyin hemen alt kısımlarında sadece elastik deformasyona maruz kalan bölgelerce engellenmeye çalışılır. Dolayısıyla yüzeyde ve yüzeyin hemen altında bilyalı dövmenin etki ettiği bölgelere kadar kalıntı basma gerilmesi, iç kesimlerde genişlemeyi önlemeye çalışan elastik deformasyona maruz kalmış bölgelerde ise çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Yüzeyde çukurlar oluşmasına neden olan çekme gerilmesi, yüzeyin hemen altında metali eski haline getirmeye çalışan basma gerilmesi sayesinde engellenmeye çalışılır. Bu yüzden yüzeyin hemen altında metal yüksek basma gerilmesi ile yüklenir. Birbiri üzerine çakışan çukurcukların altında basma nitelikli kalıntı gerilme profili oluşur⁸. Yüzeyde azami düzeyde olan kalıntı basma gerilme değeri ise malzeme yüzeyinden

⁷ M. Śledź, L. Bąk, F. Stachowicz, W. Zielecki, "Analysis of the Effect of Shot Peening on Mechanical Properties of Steel Sheets Used as Screener Sieve Materials", *Journal of Physics: Conference Series* - **451**, (2013).

⁸ Okan Ünal, "Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Bartın Üniversitesi, (2011), s. 6.

merkeze doğru ilerledikçe azalır. Azalan bir kalıntı gerilme profili dağılımı görülür. Bunun sebebi ise bilyalı dövme etkisinin sınırlı olmasıdır.

Dövme işlemi; farklı üretim yöntemleri neticesinde, malzemelerde oluşan ve istenmeyen gerilmelerin malzeme yüzeyinde eşit dağılımını düzenler. Özellikle tornalanmış veya taşlanmış yüzeylerde çok etkilidir. Çünkü bu işlemler ile malzeme yüzeyinde meydana gelen istenmeyen çekme gerilmeleri, faydalı kalıntı basma gerilmelere dönüştürülmüş olur. Bilyalı dövme, özellikle istenmeyen gerilme birikimlerine neden olan çap değişimlerine, keskin kenarlarda, yüzey hatalarında düşük mukavemetli malzemelerin karbon kayıpları etkilerine ve kaynaklı parçaların ısı etkisi altındaki bölgelerinde de oldukça etkilidir⁹.

Bilyalı dövme işlemi uygulamış yüzeyler aynı zamanda aşınmaya ve korozyona karşı daha dayanıklıdır ve daha uzun süre mukavemet değeri gösterdiği gözlemlenebilir. Yorulma ve korozyon sonucu meydana gelen hasarlar yüzeyden başlayarak malzeme merkezine doğru ilerler ve nihayetinde yorulma hasarlarına neden olur. Malzeme üzerinde etkili olan yükler ve potansiyel yükler cebirsel olarak toplanabilir. Bilyalı dövmede nihai amaç ise çekme ile yüklenmiş malzeme yüzeyinde kalıntı basma gerilmeler oluşturmaktır. Malzemeye kazandırılan bu kalıntı basma gerilmeler ile çalışma ve yükleme şartlarına göre değişken yüklere maruz bırakılan yüzeydeki gerilmelerin toplanabilirliğinden yola çıkarak yüzeyde ne kadar yüksek kalıntı basma gerilmesi oluşturulursa malzeme ömrünün de aynı şekilde artmasını beklemek mümkün olur¹⁰.

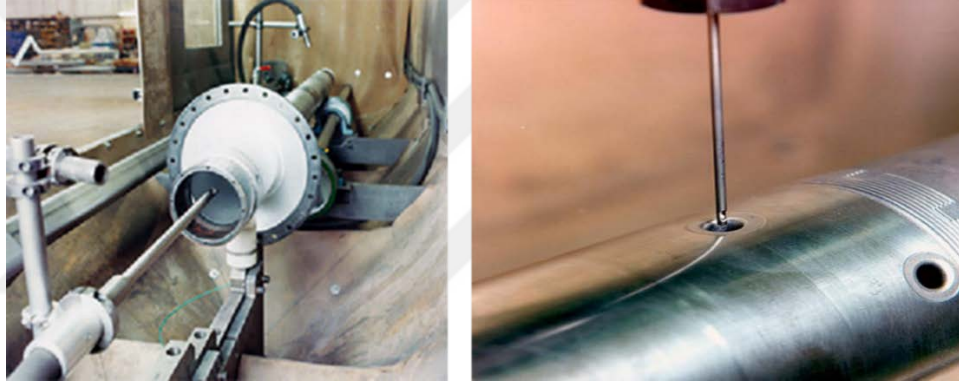
Yük altında çalışan metaller, özellikle bağlantı pimleri, yorulmanın temel sebebi olan çekme gerilmelerine doğrudan maruz kalmaktadır. Bilyalı dövme uygulanan bir yüzey ne kadar büyük kalıntı basma gerilme potansiyeline sahip olursa maruz kalınan yükün gerilmesinin etkisini en aza hatta sıfıra yakın seviyeye indirebilmek o derecede mümkün olur. Kalıntı basma gerilmeleri, çevrimsel yükler ve ani eğme ve burkulmalar neticesinde yüzeyde çatlakların başlamasına ve yük altında çatlağın ilerlemesine de

⁹ Selim Sarper Yılmaz, Bekir Sadık Ünlü, Remzi Varol, “Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Mekanik Özelliklere Etkisi”, *C.B.Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, c. 2, s. 8, (2007).

¹⁰ Shengping Wang, Yongjun Li, Mei Yao, Renzhi Wang, “Compressive Residual Stress Introduced by Shot Peening”, *Journal of Materials Processing Technology*, s. 73, (1998): ss. 64–73.

engel olur. Böylece malzemeden beklenen performans artar ve çalışma ömrünün uzadığı görülür.

Sürekli ilerleyen teknoloji, bilyalı dövmenin olumlu etkilerinden faydanlanma yöntemlerini de değiştirmeye ve geliştirmeye başlamıştır. Bilyalı dövmenin olumlu etkisi, birçok makine elamanının yüzeyine uygulandığında görüldüğü gibi, iç kısmı boşluğa sahip parçaların da boşluklu kısımlarında yorulma mukavemetinin artırılmasına katkı sağlamak amacıyla etkin olarak uygulanabilmektedir. Böylece iç kısımların da mukavemeti artırılmış olmaktadır. Bu artış da metalin daha mukavim özellik göstermesini sağlamaktadır. Yüzeye uygulanan dövme prensipleri (dövme süresi, şiddet, sarma oranı) aynı şekilde boşluk kısımlara da uygulandığında daha iyi ve uygulanabilir sonuçlar almak mümkün olmaktadır (Şekil 2.4)¹¹.



Şekil 2.4: Boşluklu Yapılarda Bilyalı Dövme Uygulaması

Bilyalı dövmenin işleminin kalitesi ve kontrolü uygulanan süreç kadar önemlidir. Sürecin başarısının ölçüm kriterleri olarak dövmenin şiddeti, oluşturulan kalıntı gerilmenin derinliği ve işlem sonrası elde edilen yüzey sarma oranı olarak belirlenebilir.

2.1.1. Bilyalı Dövme Parametreleri

2.1.1.1. Dövme Şiddeti ve Yoğunluğu

Bilyalı dövme işleminden istenen sonucu almak için bir takım işlem parametreleri süreç içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Metal yüzeye basınç

¹¹ Bill Barker, "Shot Peening Small Holes", *Progressive Technologies*.

yardımıyla bir nozul tarafından çok yüksek hızlarda fırlatılan bilyaların tipi ve metal yüzeye çarpma hızı; yüzeyde istenen etkinin türüne ve bilyalı dövme tabi tutulacak malzemenin özelliklerine göre kolayca değiştirilebilir. Bilyaların çarpma hızı ve çarpma açısı bilyanın boyutu ve materyali kadar önemlidir. Bu parametreleri değiştirmek ve farklı değerlerde kullanmak dövme şiddetini belirlemek anlamına gelmektedir. Mevcut deneyler ve işlemlerle elde edilen parametreleri değiştirmek suretiyle malzemeye aktarılan enerji miktarı değiştirilebilir yani istenen neticeyi sağlayabilecek parametre işlemden önce belirlenip uygulamaya geçilebilir. Bu işlemi aynı zamanda zaman tasarrufu sağlamak biçiminde değerlendirmek gerekir.

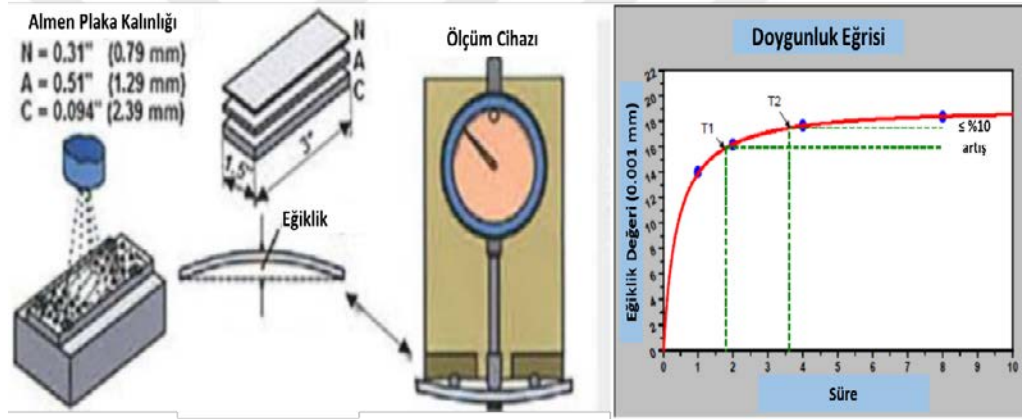
Bilyalı dövme ile malzemeye aktarılan enerji; bilya hızı, vuruş açısı ve bilya tipi ve boyutuna göre değişiklik göstermektedir. Bilyalı dövme sürecini hedef malzemeye uygulamadan önce süreç ile malzeme yüzeyinde oluşacak etkinin önceden tespit edilmesi veya belirlenmesi oldukça önemlidir. Dövme şiddeti, püskürtülen bilyaların sahip olduğu kinetik enerji ile doğru orantılıdır¹².

Bilyanın malzemenin yüzeyine çarpması ile sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı çok yüksek hızlı çarpma neticesinde malzemeye aktarılır ve aktarılan bu enerji ile yüzeye şiddetli bir baskı uygulanmış olur. Baskı da proaktif malzeme yapısı ile malzeme tarafından karşılanır. İyapının bu tepkisi ile dış etkenin baskısı neticesinde de yüzeye kalıntı nitelikli gerilmeler hapsedilmiş olur. Dövme şiddetini belirlemek aktarılan kinetik enerjinin miktarını belirlemektir. Dövme şiddetini, bilya hızı ve bilya tipini değiştirmek sureti ile sürecin kontrol altına alınması ve süreç değişkenlerinin belirlenmesi olarak tanımlamak mümkündür. Dövme şiddetinin önceden belirlenebilmesi ve tanımlanması uygulama için büyük zaman tasarrufu sağlar ve müteakip kullanımlar için sabit işlem parametreleri oluşturulabilmesinin önünü açar. Yassı yapıda bir metalin bir yüzeyine sürekli olarak dövme uygulanması ile metalin diğer yüzeyinde tümsek bir yapı oluşur. Standart bir yassı plaka kullanarak farklı yoğunluklarda daha kolay ölçme ve karşılaştırma yapmanın mümkün olduğu düşüncesinden yola çıkarak 1949 yılında John Almen tarafından yay çeliklerinden üretilen ve standart yapıda olan almen test plakaları geliştirilmiş ve günümüzde etkin olarak kullanılmaktadır.

¹² Bill Barker, "Shotmeter: A New Tool for Evaluating Shot Peening Intensity", *Progressive Technologies*.

Almen testi, dinamik yüzey işlemlerinde genellikle dövme süresini belirlemede ve dövme sonrasında yüzeyin alacağı durumun tespiti için kullanılır. Bilya tipi ve boyutuna göre dövme yoğunluğunun önceden tespitine yönelik bilgi verir. Bu oldukça basit ve maliyet-etkin bir yöntemdir¹³.

Almen test plakaları soğuk yuvarlanmış SAE 1070 yay çeliklerinden sertleştirilerek üretilmiştir. 44-50 HRC sertlik değerine sahiptir. Şekil 2.5'te çeşitleri ve özellikleri gösterilen özel tasarlanmış bu almen test plakaları ile yüzeye aktarılabilecek enerjini önceden ölçülebilir ve etkileri belirlenebilir. Bu değer uygulamada standart olarak kabul edilen almen dövme şiddetini vermektedir. Almen dövme şiddeti, bilyalı dövme işlemi süresince malzemeye aktarılan kinetik enerji miktarına göre değer alır. Bu, dövme yoğunluğunu geliştirmek için yaygın şekilde kullanılan bir metoddur¹⁴.



Şekil 2.5: Almen Plaka Ölçümü ve Doyurma Eğrisi

Bill Barker, "Shotmeter: A New Tool for Evaluating Shot Peening Intensity", *Progressive Technologies*.

Tek yönlü bilyalı dövme uygulanan almen test plakalarında oluşan eğiklik değeri bir ölçüm cihazı ile ölçülür ve alınan eğiklik değeri malzeme tarafından alınacak enerjiyi önceden gösteren bir ölçüt olarak değerlendirilir. Ölçüm cihazı ise plakaların standart durumlarına göre sıfırlanır daha sonra dövme uygulanmış plaka sıfırlanmış ölçüm cihazında ölçülerek plakanın standart durumuna (eğiklik yüksekliği,

¹³ A. Fedoryszyn, T. Piosik, P. Zyzak, "Methodology of Peening Intensity Evaluation Basing on the Almen Tests", *Archives of Foundry Engineering*, c. 9, s. 4/2009, (2009): ss. 246 – 248.

¹⁴ H. Y. Miao, S. Larose, C. Perron, Martin Lévesque, "Surface & Coatings Technology an Analytical Approach to Relate Shot Peening Parameters to Almen Intensity", *Surface & Coatings Technology*, s. 205, (2010): ss. 2055-2066.

$\pm 0,038\text{mm}$) göre aldığı eğiklik değeri okunur. Okunan bu değer dövme şiddetini ifade etmektedir. Almen ölçüm cihazı, plakaların aldığı eğiklik değerini binde bir oranında milimetre veya inç cinsinden göstermektedir. Belirlenen eğiklik aralıklarının her biri dövme şiddeti seviyesini temsil etmekle birlikte müteakip çalışmalarda referans değer olarak kullanılabilir.

Bilyalı dövme şiddetinin belirlenmesinde A, C ve N olmak üzere üç farklı almen test plakası kullanılmaktadır. Tablo 2.1’de özellikleri gösterilen plakalardan en kalın olanı C, en ince olanı N ve orta kalınlığa sahip olan ise A test plakası olarak adlandırılmaktadır. Üç farklı kalınlık düzeyine sahip bu test plakaları farklı yoğunluk seviyelerini belirlemek üzere kullanılmaktadır. En yaygın olarak A plakası kullanılmakla birlikte literatürde çelikler için genellikle A ve C test plakalarının kullanıldığı görülmektedir. Dövme şiddeti ifade edilirken eğiklik değerinin yanına almen plaka kodu yazılarak gösterilir. Almen dövme şiddetini mm veya inç cinsinden ifade etmek mümkündür. Örneğin, A tipi almen test plakası ile 0.020 inç değerinde eğiklik değeri ölçülen şiddet seviyesi genel olarak 0.020 A şeklinde ifade edilir. Genellikle düşük seviyeli istenen yoğunluk şiddeti için (≤ 0.006 in A) N test plakası kullanılır. C test plakası ise daha büyük dövme yoğunluk seviyeleri (≥ 0.23 in A) için kullanılır. N plakası ile okunan eğiklik değeri A plakasının üç katı seviyesinde, C plakası ile okunan eğiklik değeri ise A plakasının 0.3 katı seviyesindedir. Günümüzde bilyalı dövme uygulamalarının %80’i 0.012 in A ile 0.020 in A almen şiddeti değerindedir.

Tablo 2.1: Almen Test Plakaları Özellikleri

Plaka Kodu	A	C	N
Sertlik (HRC) (± 2)	48	48	44
Kalınlık (mm)	1.27-1.32	2.36-2.41	0.76-0.81
Uzunluk (mm) (± 0.4)		76.2	
Genişlik (mm) (± 0.1)		19	

MIL-S-13165C Shot Peening of Metal Parts (1966) ve MIL-P-81985 Peening of Metals (1974).

Farklı bilyalı dövme parametreleri almen dövme şiddetiyle doğrudan ilişkilidir. Almen dövme şiddeti plastik deformasyon seviyesi ile de bağlantılıdır. Dövme şiddeti doğrudan malzemenin kristal yapısına, mekanik özelliklerine etki eder. Ancak bilyalı dövmenin en etkin parametresi olmasına rağmen, plastik deformasyon, mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki almen şiddetinin etkileri hakkında yapılmış çalışma sayısı da sınırlıdır¹⁵. Dövme şiddeti; basınç, bilya tipi, bilya çapı, vuruş hızı gibi faktörlere bağlı olmasına rağmen bilyalı dövmeye maruz kalma süresi de dövme şiddetini belirlemede son derece önemli bir etkidir. Bu değişkenlerden bir ya da birkaçını değiştirerek farklı dövme şiddet değerlerini elde etmek mümkündür. Tablo 2.2’de farklı hava basınç değerlerinde elde edilen farklı almen dövme şiddeti değerleri görülmektedir¹⁶.

Tablo 2.2: Farklı Hava Basınç Değerlerinde Almen Dövme Şiddeti Değerleri

Bilya Tipi	Bilya Çapı	Hava Basıncı	Dövme Şiddeti	Dövme Süresi
S110	0,29 mm	20 psi	0,11 mm A	25 s
S110	0,29 mm	35 psi	0,14 mm A	25 s
S110	0,29 mm	50 psi	0,18 mm A	25 s

Almen test plakalarıyla istenen dövme şiddetini belirleme sürecinde; parametrelerin en iyi sonuç veren değerlerini tespit etmek için dövme süresine göre değişik zaman periyotlarındaki eğiklik değerleri alınarak logaritmik ölçekte bir doyurma eğrisi çizilir. Bu zaman alıcı bir işlem olmasına rağmen doğru uygulanacak dövme şiddetini tespit etmek için gerekli ve kritik bir işlemdir. En az beş adet test plakası kullanmak sağlıklı sonuç almak için gereklidir. Uygulamada dövme yoğunluğu belirli bir süreye kadar sürekli artış göstermektedir. Doyma noktasından sonra eğiklik

¹⁵ Okan Ünal, Remzi Varol, “Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected to Severe Shot Peening”, *Applied Surface Science*, s. 290, (2014): ss. 40-47.

¹⁶ Emrah Dülek, “Ç1020 Malzemede Bilyalı Dövme ile Oluşturulan Yüzeydeki Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma (Elektro Kimyasal) Yöntemiyle İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi (2002).

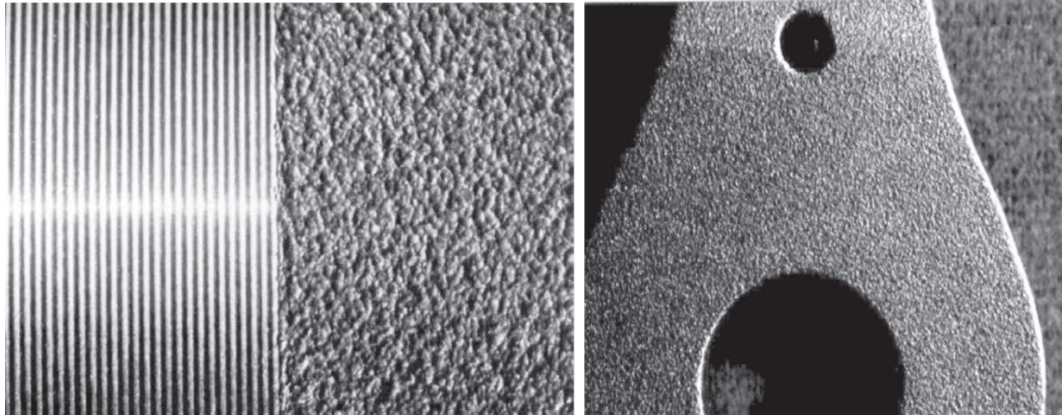
değerinin bir önceki duruma göre daha fazla artmadığı görülür. Bu değere ulaşıncaya kadar bilyalı dövme parametreleri değiştirilerek yoğunluk seviyesi istenen şiddete getirilmeye çalışılır. Doyma noktası, almen test plakasının eğiklik yüksekliğindeki artışın %10'u geçmediği nokta olarak belirlenir. Bu değer işlemde kullanılacak dövme şiddetini ifade etmektedir.

2.1.1.2. Yüzey Sarma Oranı

Bilyalı dövmenin faydalarından en iyi şekilde yararlanabilmek için malzeme yüzeyinin homojen şekilde dağılmış küçük çukurlarla kaplanması gerekmektedir. Püskürtülen bilyalar yüzeyin tamamına temas edecek şekilde dövme süreci işletilmelidir. Yüzey sarma oranı, dövme süresine ve yüzeye püskürtülen bilyaların miktarına bağlı olarak değişmektedir, ancak sarma oranı için yine en önemli değişken bilya tipi ve boyutudur.

Yüzey sarma oranı üst üste gelmiş çukurların derecesi ile belirtilen bilyalı dövme yapılmış yüzey alan ölçüsünü ifade eder. Bu değer % (yüzde) olarak ifade edilir. Tam ifadesi yani %100 yüzey sarma oranı, orijinal yüzey alanının %98'inin çukurlaşması olarak ifade edilir.

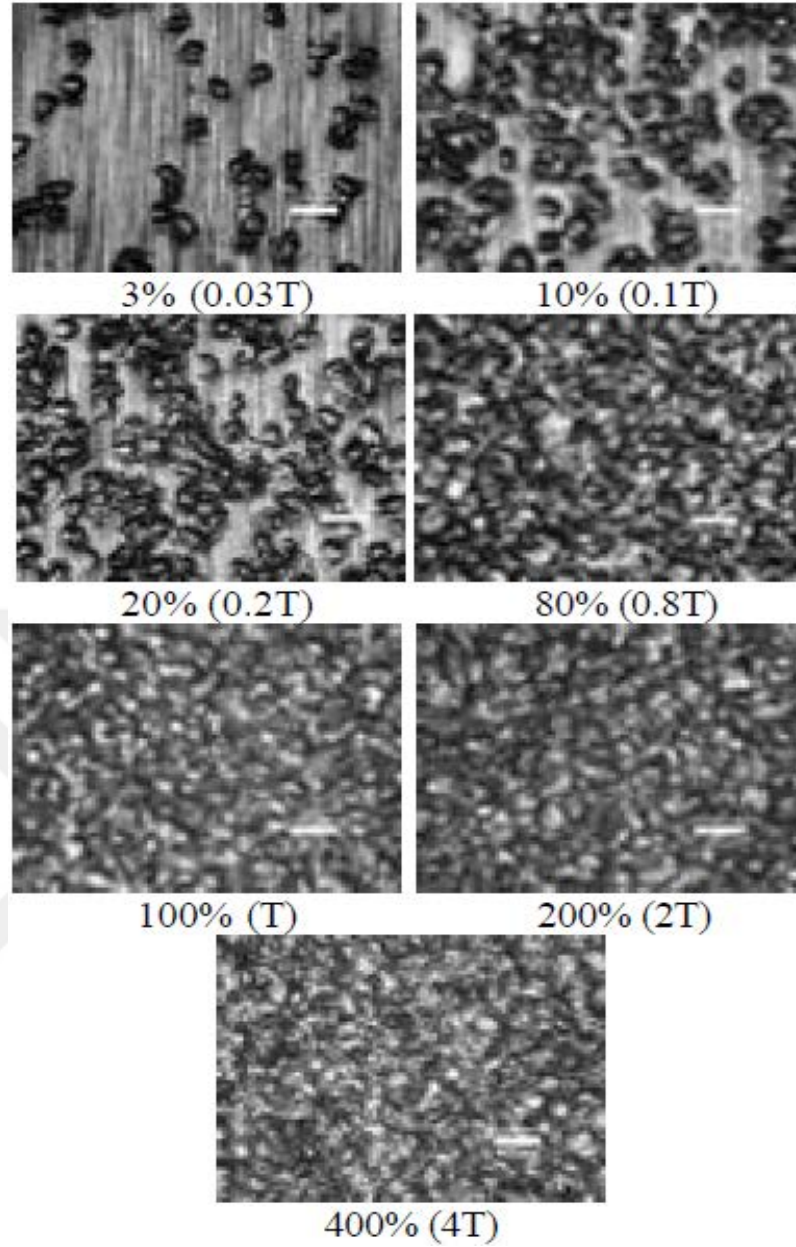
Yüzey sarma oranının değeri malzeme cinsine ve uygulama sonucunda elde edilmesi istenen etkiye göre değişebilir. Almen test plakaları kullanılarak yüzey sarma oranı değerini saptamak mümkün değildir. Yüzey sarma etkisini görebilmek için manyetik gözlükler veya mikroskop yardımıyla gözlem yapılarak sonuçlar gözle değerlendirilmektedir. Güvenliğin hayati öneme haiz olduğu alanlarda, özellikle havacılık endüstrisinde, en az %100 yüzey sarma oranına göre bilyalı dövme işlemi uygulanır. Bilyalı dövmenin etkilerini görebilmek için en düşük %20 yüzey sarma oranına ulaşılması gerekmektedir. Bu değerden itibaren yüzeyin özelliklerinin geliştiği yapılan çalışmalarda görülmüştür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Bilyalı Dövme Uygulanmamış ve Uygulanmış Yüzeyler

Yüzey sarma oranı, bilyalı dövme literatüründe etkiye maruz kalan yani istenen etkinin iletildiği yüzey bölgesi olarak tanımlanabilir. Aynı zamanda almen test plakalarının doyurma süresine kadarki geçen sürenin temel belirleyicilerindendir. Uygulama süresi ile orantılı olarak değişik sarma oranları elde etmek mümkündür. Bu süre değişiminde zamanla doğru orantı her zaman beklenmemelidir (Şekil 2.7)¹⁷. Yüzey sarma oranının artmasının olumlu etkisi her zaman beklenmemelidir. Almen test plakalarıyla belirlenen dövme şiddeti süresi yani doyurma oranının elde edildiği süre ile uygulamada elde edilen yüzey sarma oranı %100 olmayıp daha düşük bir değerde olabilir. Bu değer dövülecek yüzeyin alanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Düşük çaplı bilyalarla daha yüksek sarma oranı elde etmek için geçen süre ile büyük çaplı bilyalarla elde edilecek aynı sarma oranı daha kısa bir işlem süresinde elde edilebilmektedir. Büyük bilyaların meydana getireceği plastik deformasyon miktarı da beklenenden fazla olabilir. Elde edilebilecek plastik deformasyon miktarı dövme yapılacak metalin özelliklerine göre değişeceğinden, uygulama öncesi malzeme kalitesi veya bilya uyumu mutlaka dikkate alınmalıdır.

¹⁷ K. Dalaei ve B. Karlsson, “Influence of Overloading on Fatigue Durability and Stability of Residual Stresses in Shot Peened Normalized Steel”, *Materials Science and Engineering A*, s. 528, (2011): ss. 7323–7330.



Şekil 2.7: Bilyalı Dövme ile Elde Edilen Farklı Yüzey Sarma Oranları (T sürede elde edilen yüzey sarma oranı)

K. Dalaei ve B. Karlsson, “Influence of Overloading on Fatigue Durability and Stability of Residual Stresses in Shot Peened Normalized Steel”, *Materials Science and Engineering: A*, s. 528, (2011): ss. 7323–7330.

2.1.1.3. Bilyalar

Bilyalı dövme işlemini etkin bir şekilde tamamlamak ve işlem sonucunda olumlu neticeye ulaşmak için bilya tipi ve bilya materyali seçimi oldukça kritiktir. Bilya seçiminde en temel kritik husus; doğru materyalden imal edilen, en iyi sonucu verecek, malzeme kusuru olmayan bilya tipini seçmek ve kullanmaktır. Bilya tipleri, malzeme

üzerinde beklediğimiz etkiyi sağlamak üzere yüksek basınçlarla püskürtülen, sürecin en temel elemanıdır.

Bilyalı dövmede kullanılacak bilya çeşidinin belirlenmesinde; işlem uygulanacak malzemenin cinsi, istenen dövme şiddeti ve bilyalı dövme tezgâhının özellikleri temel kıstaslardır. Malzeme yüzeyinin deformasyonu ve kalıntı basma gerilmesi oluşumu kullanılan bilyanın sahip olduğu kinetik enerji ile sağlanır. Bilyanın kinetik enerjisini etkili bir şekilde malzemeye ne kadar transfer ettiği bilyanın sertliği, fiziksel kusurları, boyutu, ağırlığı ve dayanıklılığı gibi çeşitli özelliklerine bağlıdır. Genelde bilyanın sertliği ne kadar yüksekse dayanıklılığı da o kadar düşüktür. Dövme şiddetini doğrudan etkileyen bilya tipi ve çapının etkisinin malzeme üzerinde tamamen oluşabilmesi için yüzeyde en az bilya çapının 1/3'ü kadar çukur oluşturacak hızda fırlatılması gerekmektedir. İşlem süresince tekrar tekrar kullanımdan dolayı kırılan bilyalarla bu etki elde edilemeyeceğinden kırılan ve deformasyona uğrayan bilyaların tekrar kullanılmaması oldukça önem verilmesi gereken bir etkendir ve bu yüzden önemli bir parametre olarak dikkate alınmalıdır. Bilyalı dövme tezgâhındaki elek vasıtasıyla standartlardan farklılaşan bilyalar sistemden dışarı atılarak deforme olmuş bilyaların tekrar kullanılması engellenmektedir.

Bilyalar, demir ve demir dışı bilyalar olmak iki temel gruba ayrılmaktadır. Dövme yoğunluğu ve şiddeti doğrudan bilya boyutuna bağlı olduğundan bilyalı dövme uygulanacak malzemenin cinsine ve yüzeyde beklenen sonuca göre bilya seçimi dikkatle yapılmalıdır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3: Farklı Çelik Bilya Tiplerine ait Teknik Bilgiler

Bilya Tipi	Bilya Çapı (m)	Yoğunluk(kg/m^3)	Kütle
S110	$0,3 \times 10^{-3}$	7850	$1,11 \times 10^{-7}$
S170	$0,5 \times 10^{-3}$	7850	$2,01 \times 10^{-7}$
S230	$0,6 \times 10^{-3}$	7850	$8,87 \times 10^{-6}$
S550	$1,4 \times 10^{-3}$	7850	$1,13 \times 10^{-5}$

MIL-S-13165C Shot Peening of Metal Parts (1966) ve MIL-P-81985 Peening of Metals (1974).

2.1.2. Bilyalı Dövme Süreci Değişkenleri

Bilyalı dövme işleminden en iyi sonucu elde edebilmek için süreç mutlaka kontrollü bir şekilde ve uygun işlem parametreleri ile uygulanmalıdır. Bilyalı dövme işlemi bir bütün olarak bir takım işlem değişkenlerine bağlıdır. Bu değişkenlerle farklı işlem süreçleri oluşturularak beklenen sonuçlar elde edilebilmektedir. Sistem içerisindeki değişkenlerin dövme sürecinde hangi yönde ve nasıl etki ettiği çok iyi anlaşılırsa daha sonra yapılacak dövme işlemlerinde neticeye o kadar kolay ulaşılır veya sorun yaratan problemlerde etkili bir çözüm yolu rahatlıkla üretilebilir. Birçok temel parametre bu sistemin içerisinde etkileşim içerisinde. Bu parametrelerin etkilerini bilmek sürecin tamamını ve etkilerini anlamak için önemlidir. Bunlardan yaygın olarak bilinen parametreler ise şunlardır:

- Dövme yoğunluğu,
- Bilya boyutu ve sertliği,
- Nozul karakteristiği (uygulama açısı, uzunluğu)
- Hava basıncı,
- İş parçası ile nozul arası uzaklık,
- Uygulama süresi,
- Nozul ve iş parçası hareket hızı ve yönü.

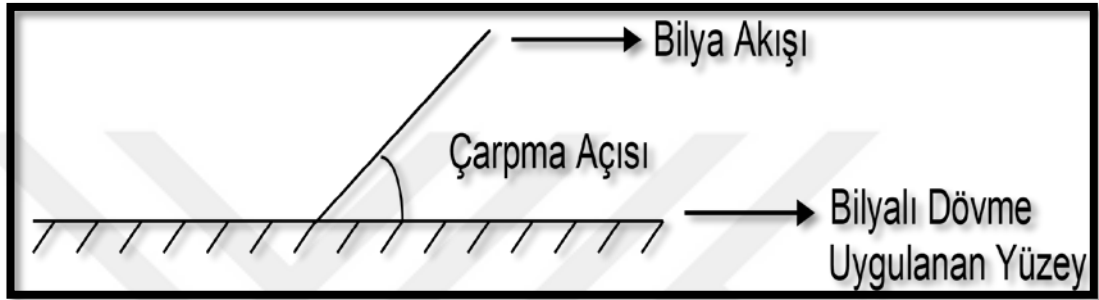
Bilyalı dövme işlemi, temel olarak bilya ile dövmenin uygulanacağı malzeme arasındaki yüksek hızlı ve belirlenen süre içerisindeki sürekli çarpışmalar sürecidir. Bu işlem bir çeşit yüzey işleme süreci olduğundan çarpışmada oluşan ve malzemeye doğrudan aktarılan enerji bilyanın sahip olduğu yani sistemde bilyaya kazandırılan kinetik enerjinin sadece bir kısmıdır. Bilya kinetik enerjisini, bilya tanelerinin sistem içerisinde hava akımına girip hava molekülleri ile ivmelendirilmesiyle kazanmaktadır. Bilinen bir denklem olan kinetik enerji denklemine göre kinetik enerjinin kütle ile doğrudan orantılı olduğu görülmektedir.

$$KE = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.1)$$

Kinetik enerji denlemi (2.1) bize bilya kütlesinin ve hızının bilyalı dövme süreci için ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. İki kat daha ağır bilya ile iki kat daha fazla enerji, iki kat daha hızlı bilya püskürtülmesi ile de dört kat daha fazla kinetik enerji elde edilebilmektedir. Kinetik enerji denkleminde yola çıkıldığında bilyalı dövme işleminde kütle ve hıza etki eden faktörlerin dövme şiddetini ne kadar büyük ölçüde etkilediği veya belirlediği açık şekilde görülmektedir. Dövme şiddetinin değerinin belirlenmesinde; bilya boyutu, bilya sertliği ve bilya püskürtülme hızı temel değişkenler olarak belirlenir ve bu parametrelerdeki küçük veya büyük değişikliklerle istenen değer şiddet değerleri elde edilebilir.

Bilyalı dövme sürecinde kullanılan bilyaların boyutunun dövme şiddetine genellikle yüksek derecede etkisi vardır. Sabit boyutta olduğu bilinen bilya havuzunda dahi bilyaların yeni olması ve boyut dağılımı için elekten geçirilmiş olması sağlıklı bir uygulama süreci için mutlaka önceden kontrol edilmelidir. Boyut dağılımı ne kadar fazla olursa dövme sürecinde çok daha fazla çeşitlilik meydana gelir. Bilya havuzunda küçük boyutlu bilyaların çoğunlukta olması durumunda, kütlelerinin düşük olmasından dolayı, düşük dövme şiddet değerleri elde edilir. Üretim sürecine bağlı olarak bilyaların her birinin yoğunluğunun değiştiğine de dikkat edilmelidir. Yapı içerisindeki boşluk veya gözenekler toplam kütlenin düşmesine neden olur. Bu yüzden bilya ne kadar doğru şekil ve boyutta olursa olsun, çarpışma değerine bağlı olarak düşük şiddet değeri elde edilebilir. Dövme işleminde kullanılan bilyanın sertliği, malzeme yüzeyinin çukurlaşma yüzdesinin ortaya çıkmasında en etken parametrelerdendir. Şayet bilyalı dövmeye tabi tutulan malzeme bilyadan daha sert ise işlem sırasında bilyaların yüzeye etkisinin sınırlı kaldığı gözlemlenir. Malzemede beklenen plastik deformasyon yüzey yerine bilyada meydana gelebilir. Bu istenmeyen ve sürece zarar veren bir durumdur. Ayrıca aynı tür bilyaları kendi aralarında karşılaştıracak olursak daha yüksek sertlik değerine sahip olan bilya ile daha yüksek şiddet değerleri elde etmek mümkündür. Kullanılacak bilya türü ve boyut değerlendirmesinden sonra dövme şiddet değerine etki eden en önemli parametre çarpma sırasında bilyanın sahip olduğu hızdır. Bilya hızı vektörel bir büyüklük olup yönü ve skaler büyüklüğü vardır. Bilya hızına; hava basıncı, akış hızı, hava kalitesi, hortum çapı, nozul çapı, akış sınırlamaları doğrudan etki eden faktörlerdendir. Bu değişkenlerdeki küçük değişiklikler, uygulama sonucunda kaydadeğer sapmalara neden olabilmektedir. Çarpmaya bağlı olarak hareket eden bilyanın yönü çarpma açısı

olarak ifade edilir (Şekil 2.8). Dövme şiddeti, çarpma açısının sinüs değerine göre değişiklik gösterir. Yüzeye çarpan bilya akımının yönünü etkileyen bütün parametreler dövme şiddetini etkiler. Nozul pozisyonu, parça geometrisinin değişmesi, bir başka yüzeyden sekmeler meydana gelmesi gibi etkiler çarpma açısını değiştirebilir. En uygun çarpma açısı olarak en az 45° kullanılır ancak bazı özel durumlarda bu değer 30° 'ye kadar düşürülebilir. 30° 'lik çarpma açısı ile elde edilen dövme şiddet değeri, çarpma açısı 90° iken elde edilen şiddet değerinin %50'si kadardır.



Şekil 2.8: Bilya Çarpma Açısı

Bilyalı dövme işleminde bilya fırlatma hızını en yüksek derecede etkileyen ve belirleyen parametre ise hava basıncıdır. Hava basıncı arttırıldığında bilyanın hızı da artacağından yüksek basınç değerinde yüksek şiddet değerleri elde edilebilmektedir. Sistem boyunca akan bilya miktarı da parçaların nozulu terketme hızını etkiler. Düşük bilya akış hızı ile hava basıncı ayarlandığında bilyalar hava akımı ile daha yüksek hızda hareket edeceğinden yüksek şiddet değerleri elde edilebilir. Eğer hava basıncı sabit tutulurken bilya besleme miktarını arttırılırsa, hava/bilya karışımı içerik olarak zenginleşir ve dövme hızı düşer, bu da dövme şiddetinin değerini düşürür. Buna karşılık birim zamanda akan bilya miktarı artacağından tam yüzey sarma oranı daha hızlı elde edilebilir. Bilya akış hızı arttırılırken de hava akımının sistemdeki bilyaları taşıyamayacağı maksimum noktaya kadar gelinmemesine dikkat edilmelidir. Bunun yanında hava kompresörü ile sağlanan hava kalitesi de dövme şiddetini etkiler. Eğer sistemdeki hava çok kuru ise, hava içindeki su molekülü oranı düşüktür, bilyalar sistem içerisinde daha geniş bir alanda hareket ederler. Havanın nemli olması durumunda ise, içerdiği su moleküllerinin oranını fazladır ve bu durum sistem içerisindeki bilyalar için beklenenden daha az yer kaldığını gösterir. Sonuç olarak havanın nem değeri arttıkça

bilya hızı azalır ve bu da dövme şiddetinin değerini düşürür. Bu parametre etkilerinden yola çıkarak bilyalı dövme süreci değişkenlerinin uygulama yapılacak malzemede istenen etkiyi meydana getirecek şekilde belirlenmesi uygun işlem parametresinin belirlenmesi ve uygulanması süreci olarak tanımlanabilir.

2.2. Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler, malzemenin herhangi bir dış yük etkisi altında olmaksızın malzeme içerisindeki makro ve mikro seviyelerde tane hareketlerinden dolayı malzemenin sonradan kazanmış veya sahip olduğu potansiyel gerilmelerdir. Kalıntı gerilmeler malzemelerin elastik davranışları sonucunda ve homojen olmayan dağılımla malzeme yüzeyinde ortaya çıkan bir kısım elastik gerilmelerdir. Gerilme bir malzemenin karakteristiğidir. Mekanik, kimyasal, termal etkiler kalıntı gerilmeyi etkileyen ve belirleyen unsurlardır. Bir metalde kalıntı gerilmeler, plastik deformasyon, faz uyuşmazlıkları, ısıl genleşmeler sonucunda meydana gelir, ayrıca bütün metaller de kendi içerisinde kalıntı gerilmeleri barındırır. Bu yüzden kalıntı gerilmelerin malzeme ömründe ve performansında yeri oldukça önemlidir.

Kalıntı gerilmelerin genel olarak malzemeye uygulanan termomekanik işlemlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığı, bazı durumlarda ise metallere daha spesifik özellikler kazandırdığı görülür¹⁸. Hehangi bir malzemede elde edilebilecek maksimum kalıntı gerilme değeri ve kalıntı gerilme dağılımı sadece malzemenin yapısı ve üretim yöntemine bağlı değildir, aynı zamanda metale verilen plastik deformasyon derinliğine de bağlıdır¹⁹. Metallerin sahip olduğu kalıntı gerilmeleri, elastik gerilmeler olarak değerlendirmek mümkündür. Bilyalı dövme gibi yüzey geliştirme işlemleri sonrası oluşan kalıntı gerilmeler ise elastik limit ve altında oluşan gerilmelerdir. Bir başka ifade ile kalıntı gerilmeler akma dayanım değerinin üzerine çıkması beklenmez, aksi takdirde bir başka plastik deformasyonun meydana gelmesi söz konusu olur²⁰. Malzeme özelliklerini geliştirmeye yönelik yüzey işlemleri ile oluşturulan kalıntı gerilme değerinin malzemenin akma dayanımı ile akma dayanımının yarısı arasında bir seviyede değer alması beklenir.

¹⁸ Franchim vd., *age*.

¹⁹ A. Niku-Lari, "An Overview of Shot Peening", *Intl. Conf. on Shot Peening and Blast Cleaning*, (1996): ss. 1-25.

²⁰ Ünal, 2011, s. 6.

Kalıntı gerilmeler basma veya çekme yönünde olacak şekilde karşımıza çıkar ve malzemenin kullanımı sırasında yorulma ömrünü azaltabilir veya artırabilir, çatlak oluşumuna sebep olabilir veya çatlak oluşumunu geciktirebilir. Malzeme imalat yöntemleri (torna vb.) yüzeyde kalıntı çekme gerilmeleri meydana getiren işlemlerdir²¹. Kalıntı basma gerilmeleri ise sonradan kazandırılan gerilmelerdir. Kalıntı çekme gerilmeleri malzeme ömrüne olumsuz etki eden faktörlerin başında gelmektedir. Üretim sonrası uygulanan yüzey geliştirme işlemleri bu yüzden önem kazanmaktadır. Kalıntı basma gerilmeleri ise yorulma ömrünün uzamasına doğrudan katkı sağlar. Çekme ve basma gerilmeleri cebirsel olarak toplanabildiğinden malzemeye sonradan ne kadar fazla kalıntı basma gerilmesi kazandırılırsa yorulma ömrünün de aynı şekilde artması beklenir.

Bir yüzeye kalıntı basma gerilmesi kazandırmanın birçok değişik yöntemi vardır ancak günümüzde en yaygın kullanım alanı bulan yöntem ise bilyalı dövmedir. Yüzey sertleştirme işlemleri ile, özellikle bilyalı dövme işlemi neticesinde, malzemenin yüzey bölgesinde hacim değişiklikleri yaratılır²². Hacim değişikliği gibi yüzeye ısı işlem uygulanması da kalıntı gerilme oluşumunun temel nedenidir. Kalıntı gerilmeye sebep olan kaynakların tam olarak önceden tahmin edilebilmesi ve malzemeye kazandırılacak kalıntı gerilmenin kontrol altına alınabilmesi, malzeme ömrüne olumlu katkı sağlamaya olanak sağlar.

Bilyalı dövme ile elde edilen kalıntı gerilmeler bir takım değişkenlere dayanır²³:

- Malzeme özellikleri (sertlik vb.),
- Isıl işlemle elde edilen mikro yapı (östenit, ferrit vb.),
- Bilyalı dövmede kullanılan bilya tipi,
- Dövme şiddeti, bilya akış hızı, dövme süresi vb.

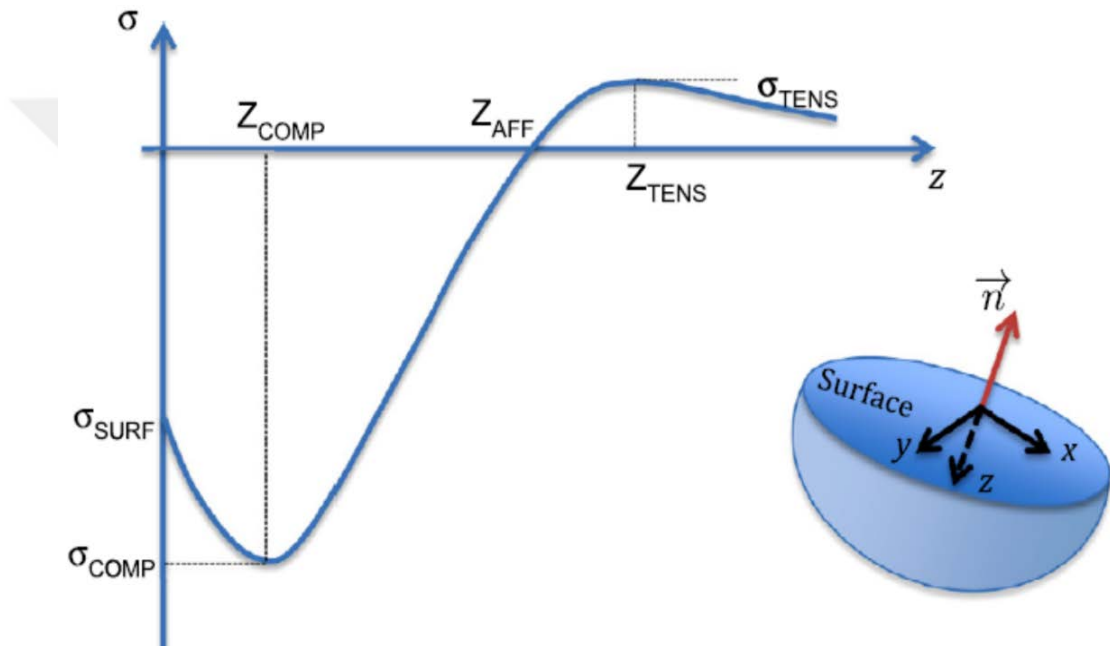
Bilyalı dövme işleminde, malzemede oluşturulan kalıntı basma gerilmenin büyüklüğü gibi derinliği de önceden tahmin edilebilir. Maksimum basma gerilmesi genellikle dövülmüş yüzeyin hemen altında meydana gelir. Bu en yüksek basma

²¹ Mehmet Subaşı, Fırat Kafkas, Çetin Karataş, “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik ve Kalıntı Gerilme İlişkisi”, **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, (2010): ss. 211-220.

²² Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, “AISI 4140 Çeliğinde Elde Edilen Farklı Sertliklerin Kalıntı Gerilmeler Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, **Politeknik Dergisi - Journal of Polytechnic**, c. 14, s. 4, (2011): ss. 289-295.

²³ “SAE Manual on Shot Peening 2001 Edition”, **Surface Enhancement Division of the SAE Fatigue Desing and Evaluation Committee**, SAE HS-84, (2001).

gerilme değeri yaklaşık malzemenin maksimum çekme mukavemetinin %50-60'ı dolaylarındadır. Dövülmüş yüzeyin üzerine, bir daha dövme işlemi uygulanması durumunda ise bu değerin aşağıya düştüğü görülür²⁴. Bilyalı dövme ile elde edilecek maksimum basma gerilmesi (σ_{COMP}) akma gerilmesinden (σ_y) düşük bir değerde olur, bilyalı dövmenin şiddeti çok fazla yoğunlaştıkça daha yüksek değerlere ulaştığı görülebilir ($0.8\sigma_y < \sigma_{COMP} < 1.2\sigma_y$). Şekil 2.9'da yüzeyde elde edilen kalıntı gerilmenin bilyalı dövme etkisinin malzeme derinliğinde bittiği noktadan (Z_{AFF}) itibaren kalıntı gerilmenin yön değiştirdiği görülmektedir²⁵.



Şekil 2.9: Bilyalı Dövme ile Elde Edilen Kalıntı Gerilme Profili

Donato Gallitelli, vd., “Simulation of Shot Peening: From Process Parameters to Residual Stress Fields in a Structure”, *Comptes Rendus - Mecanique*, s. 344, (2016): ss. 355–374.

²⁴ Ali Başaran, “Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi (2007), s. 41.

²⁵ Donato Gallitelli, Vincent Boyer, Maxime Gelineau, Yann Colaitis, Emmanuelle Rouhaud, Delphine Retraint, Régis Kubler, Marc Desvignes, Laurent Barrallier, “Simulation of Shot Peening: From Process Parameters to Residual Stress Fields in a Structure”, *Comptes Rendus - Mecanique*, s. 344, (2016): ss. 355–374.

2.3. Kalıntı Basma Gerilme Etkisi

Dinamik yüklemelere maruz kalan bütün makine elemanları sahip olduğu veya sonradan kazandıkları kalıntı gerilmelerin birçok avantaj veya dezavantajlarından etkilenir. Bütün malzemelerin maruz kaldığı belirli yükler altında sabit bir ömür değeri vardır. Yorulma ömrüne olumlu etki eden türde kalıntı gerilmeler elde etmek veya elde etme yöntemleri geliştirmek tasarım problemlerinin çözümüne olumlu katkı sağlar.

Kalıntı gerilmeler, dış kuvvete bağlı olmayan ve malzeme içerisinde hapsolmuş gerilmeler olarak değerlendirilmektedir. Üretim aşamasında kalıntı gerilme oluşturulabildiği gibi farklı yüzey işlemleri ile de kalıntı gerilme oluşturulabilmektedir. Kalıntı gerilmeler malzemelerinin yorulma ömrünü belirlemede en önemli etkidir. Yüzey geliştirme işlemlerinde ise nihai amaç; malzeme yüzeyinde plastik deformasyon meydana getirmek ve bu plastik deformasyon sayesinde kalıntı basma gerilmeli bir tabaka oluşturmaktır. Böylelikle yorulma ömründe artış elde edebilmek mümkün olabilmektedir.

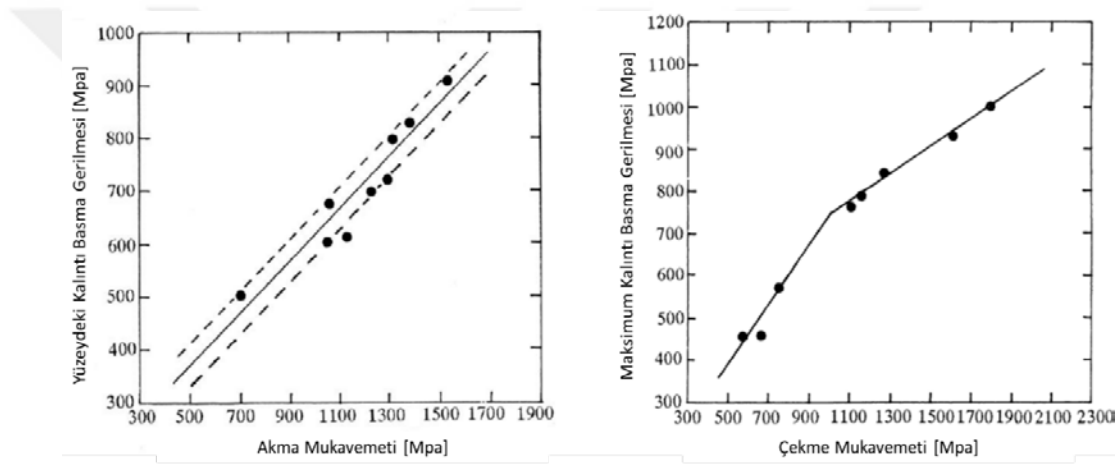
Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve malzeme merkezine doğru devam eder. Yüzeyde bulunan veya yüzeye kazandırılan basma gerilmeleri malzeme ömrüne genellikle olumlu etki eder. Çünkü basma gerilmeleri çatlak oluşumuna ve gelişimine engel olur. Çekme gerilmeleri ise malzeme için olumsuz etkidir. Çünkü çekme gerilmeleri; yüzeyde çatlak oluşumuna ve gelişimine yardımcı olur ve gerilmeli korozyon çatlamlarına öncülük eder²⁶. Yüzey plastik deformasyonu ile oluşturulan kalıntı basma gerilmesi yorulma mukavemetini artıran en temel ve yorulma ömründe belirleyici en önemli etken olarak karşımıza çıkar.

Bilyalı dövme süreci yüzeyde kalıntı basma gerilmeli tabakanın oluşmasını sağlayan bir işlemdir. Bu kalıntı basma gerilmeler yorulma kırıklarının başlamasını ve ilerlemesini engeller, aynı zamanda gerilmeli korozyona bağlı hasar oluşumunun da önüne geçer. Bilyalı dövme ile yoğun bir plastik deformasyon malzemeye aktarılır, belirli bir deformasyon derinliğinden sonra yani elastik gerininin başladığı noktada

²⁶ Emrah Dülek, Çetin Karataş, Süleyman Sarıtaş, “Bilyalı Dövmüş Ç1020 Malzemede Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi ile İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, c. 18, s. 3, (2003): ss. 107-116.

malzeme düzensizliklerinde bir iyileşme görülmez, bu plastik ve elastik gerinim bölgelerinin devam ettiği bölge kalıntı basma gerilmenin görüldüğü son noktadır²⁷.

Bir metalde yüzeye kazandırılabilir kalıntı basma gerilme miktarı önceden tahmin etmek mümkün olabilir. Akma dayanımı (σ_y) ve çekme dayanımı (σ_c) değeri yüzeye kazandırılabilir kalıntı gerilmenin tahmin edilmesinde veya belirlenmesinde önemli parametrelerdir. Şekil 2.10'da akma ve çekme mukavemet değerlerinin yüzeyde elde edilebilecek kalıntı basma gerilme değerine etkisi görülmektedir. Malzeme mukavemet değerleri arttıkça yüzeyde elde edilebilecek kalıntı basma gerilmesi artmaktadır²⁸. Elde edilen bu kalıntı basma gerilmesinin kullanım alanında yüke maruz kalma süresi ilerledikçe azaldığı görülür²⁹.



Şekil 2.10: Akma Mukavemeti ve Çekme Mukavemeti ile Kalıntı Basma Gerilmesi İlişkisi

Shengping Wang vd., “Compressive residual stress introduced by shot peening”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 73, (1998): ss. 64–73.

Kalıntı basma gerilme miktarı yüzeyden itibaren malzeme derinliğine inildikçe aynı değerde görülmez. Çeliklerde yüzeyden derinliğe inildikçe belirli bir noktaya kadar kalıntı basma gerilme değerinin artış gösterdiği, daha derin seviyelere inildikçe ise bu değer düşüğü, bir noktadan itibaren ise bu gerilme değerinin tamamen sıfır

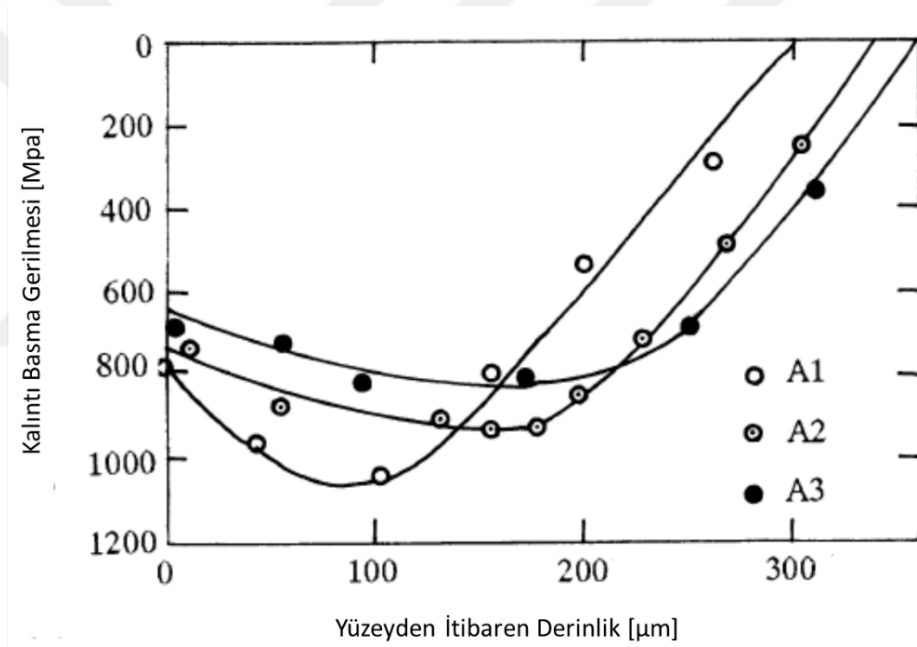
²⁷ Franchim vd., *age*.

²⁸ Shengping Wang, Yongjun Li, Mei Yao, Renzhi Wang, “Compressive Residual Stress Introduced by Shot Peening”, *Journal of Materials Processing Technology*, s. 73, (1998): ss. 64–73.

²⁹ Özdemir, A.T., “Experimental assessment of the redistribution of 3D residual stresses during early fatigue at split-sleeve cold expanded reamed A/C fastener holes, *Scientia Iranica B*, s. 25, (2018): ss. 1153-1168.

olduğu görülür. Bu nedenle daha derin bölgelerde elde edilecek kalıntı gerilme profili yani daha yoğun şiddetli dövmenin yorulma mukavemet değerini olumlu etkilemesi beklenebilir (Şekil 2.11). Ancak dövme şiddet değerinin artmasının olumsuz etkilerini her zaman göz önünde bulundurmak gereklidir.

Metallerin ve alaşımların yapıları birbirinden farklıdır. Bu yüzden işlenecek yüzeye göre, yorulma mukavemetini geliştirmede çok önemli bir rol oynayan kalıntı gerilme profili farklılık gösterebilir. Kalıntı basma gerilmelerini iyileştirmek yüzey işleme yöntemi, mikro seviyedeki kırıklar, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı değişimleri gibi birçok parametre ile doğrudan ilişkilidir. Düşük şiddetli bir uygulama ile düşük kalıntı gerilme profili elde edilebilirken, yüksek şiddetli uygulamalar da yüzey bütünlüğünü bozabilir ve yorulma ömrüne olumsuz etki edebilir³⁰.



Şekil 2.11: Çeliklerde Kalıntı Basma Gerilme Profili

Shengping Wang vd., "Compressive residual stress introduced by shot peening", *Journal of Materials Processing Technology*, s. 73, (1998): ss. 64–73.

³⁰ Baskaran Bhuvaraghan, Sivakumar M Srinivasan, Bob Maffeo, "Optimization of the Fatigue Strength of Materials Due to Shot Peening :A Survey, *International Journal of Structural Changes in Solids – Mechanics and Applications*, c. 2, s. 2, (2010): ss. 33-63.

2.4. Yorulma Analizi

Yorulma, malzeme üzerindeki periyodik gerilmelerden veya yüklerden ve bu yüklerin dalgalı bir şekilde süreklilik göstererek devam etmesinden dolayı malzemede oluşan kalıcı yapısal değişimler olarak tanımlanabilir. Birçok makine elemanı ve yapı elemanları kullanım yerine göre tekrarlanan yüklerin neden olduğu gerilmeler ve titreşimlere maruz kalır. Bu tekrarlanan yükler altında çalışan metallerde bu gerilmeler, metalin mukavetinden çok daha küçük değerde olsa bile sürekli yükleme altında belirli bir tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeyde çatlak başlangıcı ve devamında kopma olayına yani hasara neden olurlar. Bu durum yorulma hasarı olarak tanımlanabilir. Yorulma hasarı, her zaman sadece dış kaynaklı yüklerden kaynaklanmayıp aynı zamanda ısı genleşme ve büzülme gibi çalışma ortamına bağlı olarak ısı gerilmelerden de kaynaklanabilmektedir.

Mühendislik malzemelerinin büyük çoğunluğunda meydana gelen hasarların en başında yorulma hasarları gelmektedir. Aşınma ve korozyonda malzeme hasarlarının sebeplerindendir. Hasar analizlerinde malzeme yapısı da dikkate alınmalıdır. Böylelikle malzeme yüzeyinin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmede doğru bir yaklaşım sergilemek mümkün olabilir³¹.

Yorulma hasarlarının en temel nedeni yüzeyde meydana gelen veya bulunan yorulma çatlaklarıdır. Yorulma çatlakları, eş zamanlı olarak oluşan çevrimsel hareketlerden, çekme gerilmelerinden dolayı başlar ve mevcut çatlaklar kırılmaya kadar ilerler. Malzemenin herhangi bir yüke maruz kalmaması durumunda yorulmadan dolayı oluşan kırılma hasarı başlamaz ve ilerlemez. Sürekli olarak malzemeye etki eden çevrimsel gerilmeler çatlakların başlamasına neden olur, malzemenin kullanımdan dolayı maruz kaldığı çekme gerilmeleri ise çatlakların ilerlemesi için kolaylaştırıcı etken olarak karşımıza çıkar. Basma gerilmeleri ise çekme gerilmelerinin aksine yorulmaya neden olmayıp mukavemetin artmasına yardımcı olur. Genellikle gerilmenin yoğun hissedildiği yerlerde (çentik, anahtar deliği, taşlanan yerler, korozyonlu bölgeler vs.) çatlakların daha hızlı oluşmaya başladığı görülür.

Yorulma çatlağının başlangıç sebebi yüzeydeki bir çentik veya bir kılcal çatlak olabildiği gibi ani kesit değişimlerinin olduğu bölgeler de olabilir. Yorulma

³¹ Ünal, Varol, 2014.

kırılmasına; malzemenin şekli, yüzey durumu, maruz kaldığı yükler gibi dış etkenler ve malzemenin kimyasal bileşimi ve içyapısı gibi iç etkenler neden olur. Bu etkenlerin bir veya birkaçının aynı zamandaki varlığı ise yorulma hasarının oluşmasına sebeptir. Yapılan çalışmalarda; yorulma hasarlarının büyük çoğunluğunun esas kaynağının, malzeme kusurları olmadığı, çentik etkisi, yüzey durumu, malzeme mukavemet kapasitesinden fazla yükleme, yanlış yerde kullanım ve montaj hataları gibi sebeplerden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Yorulma çatlağının meydana gelebilmesi için malzemenin mukavemetine göre yeterince yüksek mertebede bir çekme gerilmesine maruz kalması ve bu gerilmenin tekrar sayısının oldukça fazla olması yeterlidir. Yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, tane boyutu ve yapısı vb. nedenler de temel yorulma etkeni olarak nitelendirilebilir.

Yorulma olayı üç temel aşama ile ifade edilebilir: ilk olarak çatlak ve çatlak ilerlemesine neden olan başlangıç hasarının oluşması, daha sonra sürekli olarak devam eden çevrimsel yüklemeler sonucu oluşan çatlaklar sebebiyle yüke maruz kalan kesitin yüklemeye direnemeyecek kadar zayıf düşmesi sonucu çatlağın büyümesi ve nihayetinde geri dönüşü olmayan yüke karşı zayıf düşen kesit alanda kırık yapının meydana gelmesidir.

Yorulma hasarları çevrimsel gerilme yüklemesi, çekme gerilmesi ve plastik gerinimlerin aynı anda etki etmesi ile başlamaktadır. Bu üç etkenin bir tanesinin olmaması durumunda yorulma kırılmasının başlaması ve ilerlemesi beklenmez. Çevrimsel yükleme neticesinde meydana gelen plastik gerinim ile kırılma başlangıcı meydana gelir, yükleme ile oluşan çekme gerilmesi ise çatlak ilerlemesini daha da hızlandırır. Bilindiği gibi basma gerilmeleri ise yorulmaya neden olmaz³².

Sürekli yükleme altındaki malzeme, elastik-plastik gerilmeler neticesinde özellikle malzeme kusurlarının olduğu bölgelerde zayıf düşmeye başlar ve bu bölgeler artık malzeme için çatlağın merkezi olan deformasyon bölgeleri olarak tanımlanabilir. Deformasyon bölgesinde çatlağın oluşumu ve ilerlemesi malzemenin ilk haline göre daha hızlı gelişir, kırılma olana kadar devam eder. Mikro çatlak oluşumu genellikle

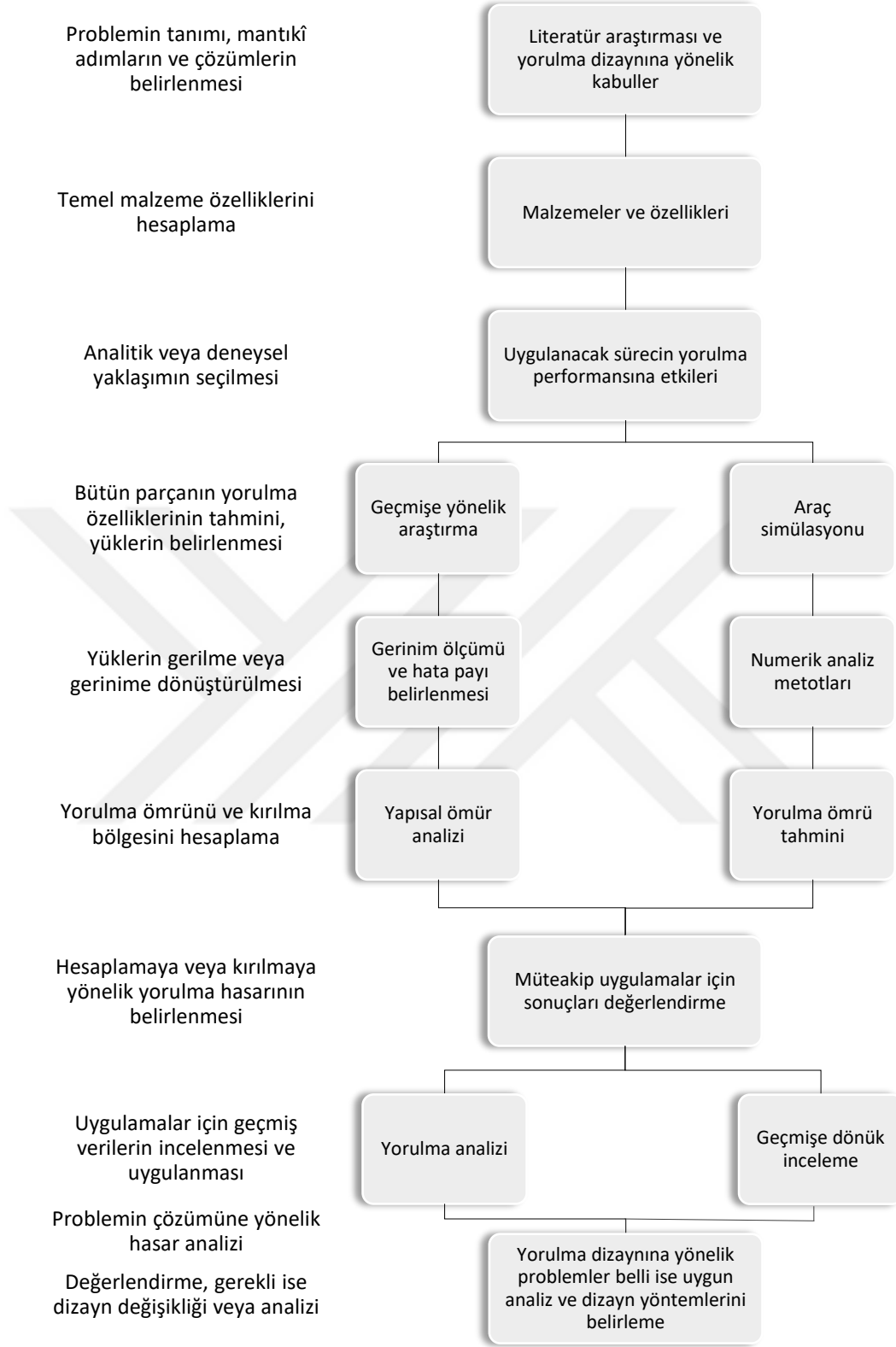
³² Bruce Boardman, "Fatigue Resistance of Steels", *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys - ASM Handbook Committee*, (1990): ss. 673-688.

tane sınırlarında başlar veya malzeme içyapısında kayma oluşumu gözlenir. Bu da sürekli yükleme altında kırılmaya kadar devam eder.

Normalde yorulma kırılmasına neden olan gerilmeler malzemenin akma gerilmesinden daha düşük bir değerdir. Ancak malzemenin pekleşme değerinin yüksek olduğu daha düşük çevrimli yorulma hasarları akma dayanımından daha yüksek bir değerde gerçekleşebilir. Yorulma hasarları malzemenin hassas olduğu veya daha ağır yüke maruz kaldığı bölgelerde başlar. Öyle ki birçok yorulma hasarı da malzemenin yapısal kusurlarının daha fazla olduğu yani malzemenin en zayıf ve yüklemeye hassas olduğu noktalardan başlar ve yükleme devam ettikçe ilerler.

Malzeme ömrünün büyük kısmı ilk çatlağın oluşmasına kadar geçen sürede harcanır. Aşırı yükleme durumunda ilk gerilmenin malzemeye uygulandığı anda yorulma ömründe %25-60 arasında bir azalma olur. Bu ilk yüklemenin çekme yönünde olması ise basma yönünde olması durumuna göre yorulma ömründe daha fazla azalmaya sebep olduğu görülebilir³³.

³³ Dalaei, Karlsson, *age*.



Şekil 2.12: Yorulma Analizi Kontrol Çizelgesi

Bruce Boardman, "Fatigue Resistance of Steels", *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys* - ASM Handbook Committee, (1990): ss. 673-688.

2.4.1. Yorulmaya Etki Eden Faktörler

Yorulma hasarlarının kaynağı dış etkenler olduğu gibi içyapı ve dış yapı gibi etkenlerde yorulma kırılmalarının başlamasına neden olabilir. Mekanik özellikler, mikroyapı, makroyapı değişimleri ve bunların doğrudan etkilerinin birleşimi ile yorulma ömrü etkilenir. Çelikler için yorulma mukavemetinin sertlik ve çekme gerilmesine orantılı olarak arttığı bilinmektedir. Ancak böyle bir genelleme yapmak her zaman doğru olmamaktadır. Çok yüksek miktarda çekme gerilmesi yüklemesinde tokluk, akma ve maksimum yük taşıma dayanımının da önemli kriterler olduğu dikkate alınmalıdır. Yük taşıma dayanımı davranışı üzerinde çeşitli üretim işlemleri³⁴, yüzey geliştirme yöntemleri ve çalışma ortamının özellikleri kritik önem taşımaktadır. Bütün bunların yanında şekil özelliklerinin yorulma mukavemetinde önemli etkisi bulunmaktadır. Örneğin parça çapının artması yüzey alanı ve hacmi artırır, yüzeyin artması da malzeme kusurlarının olma olasılığını artırır böylece yüzeyde uygulanan yüklemeye karşı zayıf noktaların artmış olduğu görülebilir.

Malzeme boyutu gibi yüzey durumu, kimyasal bileşim, uygulanan yüzey işlemi, içyapı özellikleri, metalürjik faktörler, çalışma sıcaklığı, gerilme yoğunluğu ve değişimi, kalıntı gerilmeler, parçanın üretim ve işleme şekli ve ortamının özellikleri, gerilmelerin tekrar sayısı ve frekansı, korozyon gibi kontrol edilebilen ve kontrol edilmeyen etkenler dikkate alınarak yorulma mukavemeti hakkında temel bilgiler elde edilebilir. Yorulma mukavemetine etki eden faktörler çok iyi bilinmeli ve mümkün olduğu kadar kontrol altında tutulmalı veya iyileştirme yöntemleri ile kalitesi iyileştirilmelidir. Böylece daha mukavim makine elemanları üretmek ve kullanmak mümkün olabilir. Yorulma ömrüne etki eden faktörler ne kadar iyi belirlenirse yorulma hasarlarının önceden çözümüne yönelik uygun geliştirmeler yapılabilmesi mümkün olabilir.

Yorulmaya etki eden faktörleri üç ana grupta ele almak mümkündür³⁵:

- Malzemeye bağlı faktörler,
 - Kimyasal bileşim,
 - Hatalar (Atom hataları, çizgisel hatalar),

³⁴ R. E. Smallman, R. J. Bishop, "Modern Physical Metallurgy ve Materials Engineering", 6. bs. (Oxford: Butterworth-Heinemann,1999), ss. 253-255.

³⁵ Cemal Çarboğa, "Ç1010 Yapı Çeliğinde Soğuk Çekme ile Sağlanan Deformasyonun Malzemenin Yorulma Davranışına Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, (2002), s. 45.

- Yapı hataları (Düzensizlikler, kayma düzlemleri),
- Geometri (Boyut, çentik),
- Yüzey durumu (Pürüzlülük, yüzey kaplaması),
- İşlemler (Isıl işlem, soğuk çekme, kalıntı gerilme yüklemesi),
- Yükleme durumu,
- Çalışma ortamı,
 - Sıcaklık,
 - Korozyon,
 - Radyasyon,
 - Vakum.

Yorulma dayanımını önceden tam olarak belirlemek mümkün değildir. Deneylerle yorulma ömrü hakkında bilgi sahibi olunabilse de kullanım alanına göre kaynak, birleştirme, yüzey koşulları gibi üretim ve montaj aşamalarının yorulma mukavemetine olumsuz etkileri olduğu dikkate alınmalıdır. Tasarım analizleri yapılırken maksimum yükleme dayanımı, yüke maruz kalma tipi (eğme, çekme, burulma) ve şekli (periyodik yükleme, değişken veya sabit yükleme), çalışma ortamı gibi etkenler dikkate alınarak belirlenmeye çalışılmalıdır.

2.4.2. Yorulma Testi

Yorulma; değişken gerilmeler altında malzemenin içyapısında meydana gelen değişimler, ömür; makine elemanının kırılıncaya kadar direnç gösterebildiği süre veya çevrim sayısı olarak tanımlanabilir. Sürekli veya değişken yüklere maruz bir makine elemanının tasarımı malzeme ömrü esas alınarak yapılmalıdır. Malzemenin yorulma ömrünü, laboratuvar ortamında veya malzemenin esas kullanım alanında test etmek mümkündür, ancak her zaman ömür testini kullanım alanında yapmak maliyet-etkin bir yöntem olmaz. Test cihazları ile esas malzemeden elde edilen test cihazlarına uygun numuneler üzerinde yapılan ömür testleri genellikle malzeme kullanım ömrü hakkında çok önemli ve temel bilgiler verir. Bu bilgiler tasarım analizlerinde değerlendirilerek kullanılır.

Ömür belirlemede uygun olan yaklaşım yorulma testlerinin yapılmasıdır. Tecrübi yöntemler ve analitik yaklaşımların yorulma ömür tayininde her zaman gerçek veya gerçeğe çok yakın değerler vermesi hiçbir zaman beklenmemelidir. Yorulma

ömrü belirlemede elde edilecek kıymetli bilgi bir parçayı kullanım yerine en uygun ortamda teste tabi tutmakla mümkün olabilir.

Hehangi bir yüke maruz kalan bir malzeme çalışma esnasında değişik tür ve şiddette gerilmelere maruz kalabilir. Ancak test ortamında bütün gerilme türlerini simüle etmek mümkün olmayabilir. Başlıca temel gerilme türleri baz alınarak test ortamının oluşturulması gerçek değerlere yakın değerler elde etmemizi sağlayabilir. Bu gerilmelerin belirlenmiş periyotlarla ve frekanslarla uygulanması ile temel sonuçlar elde edilir.

Laboratuvar ortamında yapılan yorulma testlerini, çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin tespitine yönelik olarak yapılan testler olarak sınıflandırmak mümkündür. Numuneler belirli periyotlarda belirli yüklere maruz bırakılır. Sabit yük altındaki malzeme mukavemet durumuna göre belirli bir çevrimden sonra ömür eşik değerine gelir ve bu değer çatlağın başladığı değerdir ve sonrasında yüklemenin devam etmesiyle çatlak ilerler ve kırılma meydana gelir. Bu değer malzemenin veya numunenin o yükleme/gerilme altındaki ömür değeridir. Çoğunlukla yorulmaya neden olan gerilme seviyesi malzemenin akma seviyesinden daha düşük bir değerdir.

Yorulma testlerini eksenel yükleme ve eğme testleri olmak üzere genel bir sınıflandırmada değerlendirmek mümkündür. Yorulma testi ile malzeme üzerinde genel olarak çekme ve basma gerilmeleri oluşturulur. Farklı yöndeki bu gerilmeler birlikte uygulanabildiği gibi bu gerilmelerin bir tanesi de uygulanabilir. Test ortamında malzemeye yüklenen gerilmeler, genellikle maksimum ve minimum çekme gerilmesi arasında yapılan yükleme veya maksimum çekme ve minimum basma gerilmesi arasında yapılan yükleme olarak değer alır ve uygulanır. Başlıca yorulma deneyi türleri ise şunlardır³⁶:

- Eksenel gerilmeli yorulma deneyi,
- Eğme gerilmeli yorulma deneyi,
- Burma gerilmeli yorulma deneyi,
- Bileşik gerilmeli yorulma deneyidir.

³⁶ H.E.Boyer, "Fague Testing", *ASM International*, (1986).

2.4.2.1. Yorulma Testi Prensipleri

Statik yükleme durumunda elde edilen mukavemet değerlerini dinamik yükleme koşullarında kullanmak mümkün değildir. Değişken gerilmelere maruz makine elemanlarında kopma statik sınırların çok altında gerçekleşir. Statik koşullarda oluşan kırılma ayrılma kırılması, dinamik koşullarda oluşan kırılma da yorulma kırılması şeklindedir. İki kırılma mekanizması birbirinden farklılık gösterir. Dinamik yüklemelerde yükün tekrar etmesi sonucu malzemede yorulma olayı gerçekleşmektedir. Değişken gerilmeler etkisinde malzemenin içyapısındaki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar direnç gösterebildiği süreye de ömür denmektedir. Genellikle bir parçanın ömrü gerilme değişim sayısı veya yük tekrar sayısı olarak tarif edilmektedir. Bir makine elemanında ömür tayini yapabilmek için bir takım deney düzenekleri ile malzeme dinamik davranışına yakın değerler elde etmek mümkün olmaktadır³⁷.

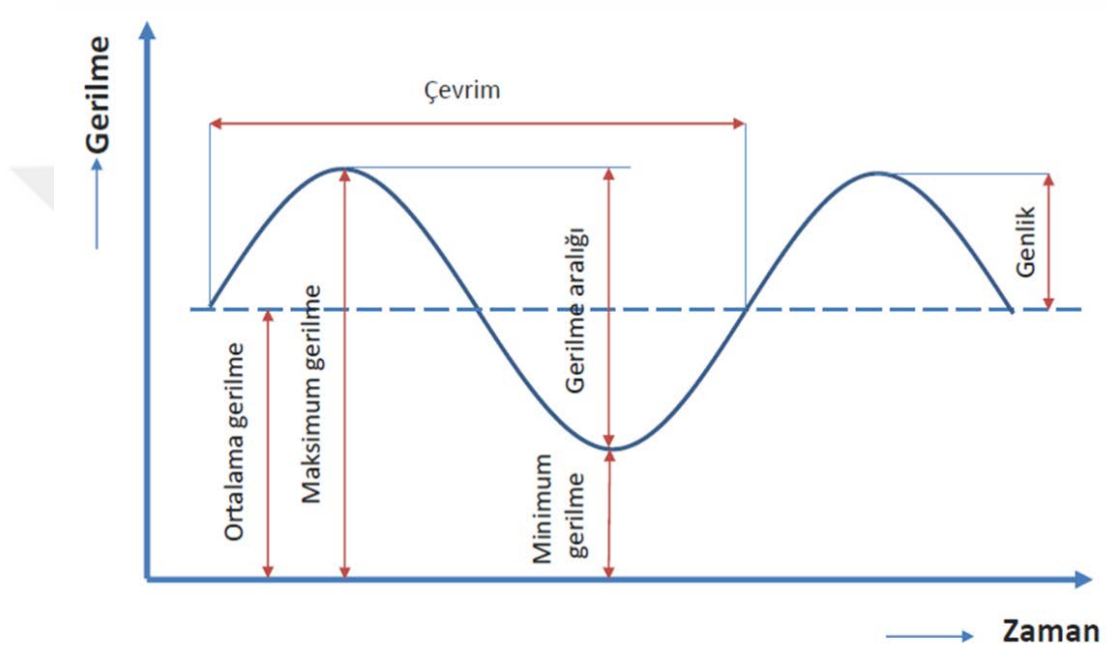
Yorulma testleri bazı temel prensiplere dayanır. Cebirsel olarak çekme gerilmesi negatif (-), basma gerilmesi ise pozitif (+) olarak değerlendirilir. Yorulma testine başlamadan önce uygulanacak gerilme oranını (R) tespit etmek gerekmektedir. Gerilme oranı, yorulma testinde uygulanan zıt yönlü veya aynı yönlü gerilme değerlerinin cebirsel oranı olarak ifade edilebilir. R oranı, yüklenen minimum gerilme değerinin maksimum gerilme değerinin oranıdır (2.2).

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.2)$$

Gerilme oranı, -1 ile +1 arasında bir değişken bir değer alır. Yorulma testi esnasında malzemenin maruz bırakıldığı gerilmeler tam değişken yani eşit derecede ve zıt yönlü ise gerilme oranı değeri R=-1 olur. Yani tam değişken gerilme yüklemesi anlamına gelir. Ancak gerilme kısmî derecede değişken durumda ise yani gerilmeler zıt yönlü ve eşit değerde değilse R oranı değeri 1 den küçük negatif değerlerde -1 ile 0 arasında bir değer alır, yükleme şekli maksimum gerilme ile sıfır yük arasında

³⁷ Erdem Koç, *Makine Elemanları-I*, 2. bs. (Adana: Nobel Kitabevi, 2004), ss. 38-42.

olduğunda gerilme oranı değeri $R=0$, yükleme farklı değerdeki çekme gerilmeleri arasında uygulanırsa gerilme oranı değeri 1 den küçük pozitif bir değer olur. Bu durum çekme-çekme gerilme yüklemesi olarak ifade edilebilir. Bu durumda uygulanacak maksimum ve minimum bir çekme gerilmesi değeri belirlenerek yorulma testi uygulanır. Gerilme oranı değerinin $R=1$ olması durumunda, yüklenen gerilme değerlerinin eşit derecede olduğu ve yorulma testinden ziyade sürekli yükleme yapıldığı anlaşılır.



Şekil 2.13: Gerilme-Zaman Grafiği ve Parametreler

Yorulma testinde uygulanan gerilmeler 3 farklı parametre ile tanımlanabilir (Şekil 2.13). Gerilme değişim sayısı, çevrim sayısı (N) olarak tanımlanmaktadır. Ortalama gerilme (σ_m) ise uygulanan maksimum ve minimum gerilmenin aritmetik ortalamasıdır (2.3). Maksimum ve minimum gerilmelerin eşit olduğu tam değişken yükleme durumlarında ortalama gerilme değeri 0 olur.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

Gerilme genliği (σ_a), gerilme aralığının yarısına eşit olan değerdir (2.4). Gerilme genliği altında malzemenin hasara uğraması beklenmez, ayrıca çevrim sayısının genişliği de genliği etkilemez. Çevrim sayısının artması ile gerilme genliğinin azaldığı görülebilir.

Düşük değerli genliklerde yüke maruz kalan malzemede daha uzun bir ömür değeri görölür³⁸. Genlik değerinin artması ile gerilmenin şiddeti ve enerjisi de armaktadır. Gerilme şiddeti ve enerjisinin artması ise ömür üzerinde olumsuz etki yapar.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.4)$$

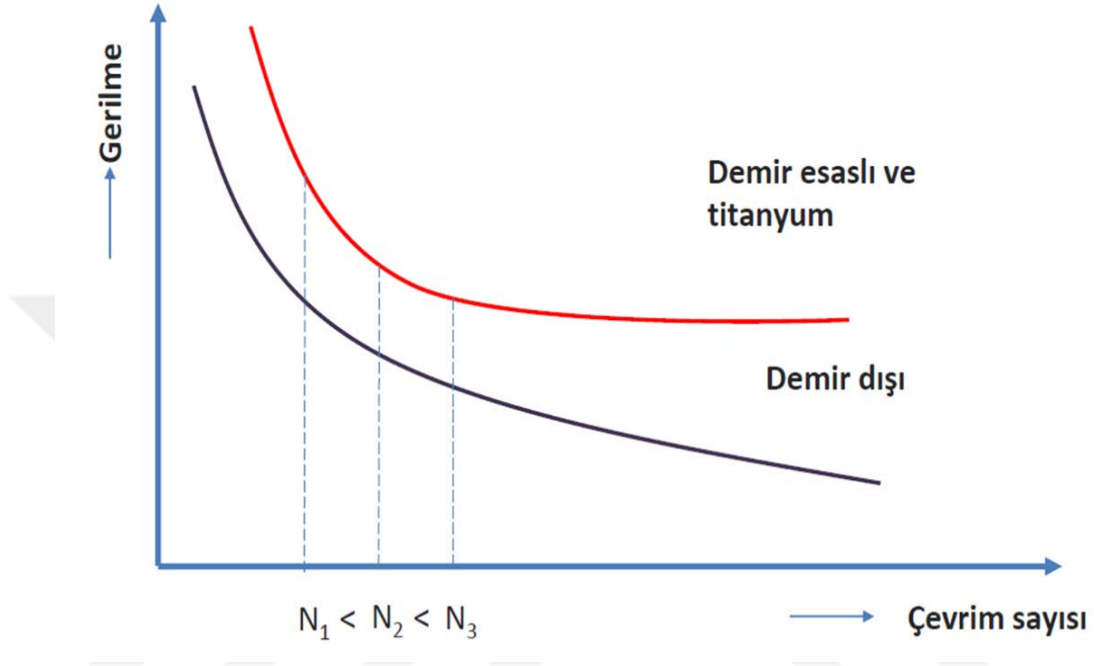
Yorulma mukavemeti ve ömür değerı üzerinde bir değerlendirme yapabilmek maksadıyla değişken yükler altındaki malzeme davranışları, logaritmik ölçekle ölçeklendirilerek yorulma eğrisi çizilir. Değişik gerilme genliğinde sabit bir ortalama gerilme değerı için numunenin kopuncaya kadar yüklenmesi yani her gerilme için gerilme-çevrim değerleri ile yorulma grafiği elde edilir (Şekil 2.14).

Belirli gerilme (S) değerlerinde malzemenin kopmasına kadar geçen süredeki çevrim sayısı (N), sabit gerilme altındaki malzemenin ömür değeridir. Elde edilen bu değerler ile Gerilme-Ömür grafiği (S-N diyagramı) oluşturulur. Bu diyagram ile sabit gerilme altında malzemenin hangi çevrimde çatlayacağı veya kırılacağını gösteren bağlantı gösterilir. S-N diyagramı çizilirken 8 ila 12 arasında numune kullanmak sağlıklı netice almak için önemlidir. Bütün deneylerde ortalama gerilme sabit tutularak numunelere farklı periyodik gerilmeler uygulanır ve kırılmaya kadar geçen süredeki çevrim sayısı tespit edilmiş olur. Büyük gerilmeler için düşük çevrim sayısı, küçük gerilmeler için büyük çevrim sayıları elde edilir. Gerilme genliği de deneylerde sabit tutularak daha net sonuçlar elde edilebilir.

Sürekli azalan yükleme durumunda belli bir gerilme değerinden daha düşük değerlerde malzemenin hasara uğramadığı görölür ve malzemenin bu sürekli

³⁸ K. Dalaei, B. Karlsson, “Influence of Shot Peening on Fatigue Durability of Normalized Steel Subjected to Variable Amplitude Loading”, *International Journal of Fatigue*, s. 38, (2012): ss. 75–83.

mukavemet değeri altındaki ömür değerinin de sonsuz olduğu kabul edilir. Bu değer çelikler için $N=10^7$ olarak kabul edilir³⁹. Bu değer, herhangi bir malzeme için sürekli mukavemet değeri (σ_s) olarak adlandırılır. Her farklı ortalama gerilme (σ_m) değeri için farklı bir sürekli mukavemet değeri elde etmek mümkündür.



Şekil 2.14: Yorulma Eğrisi (S-N diyagramı)

Yorulma testinde malzemeler veya numuneler sürekli olarak çevrimsel yüklemeye maruz bırakılırlar. Toplam çevrim sayısının büyük kısmı çatlak başlayana kadarki geçen sürede harcanır. Küçük numunelerle yapılan testler malzemenin bütünü için tam anlamıyla geçerli bir sonuç vermese dahi ana malzemenin kırılma ve mukavemet karakteristiğini kısmen tanımlayabilir ve bu konuda temel bilgiler elde etmemizi sağlayabilir. Mühendislik çalışmalarında, bu veriler temel alınarak amaca uygun tasarımlar dizayn edilebilmektedir.

2.4.2.2. Yorulma Kırılmaları

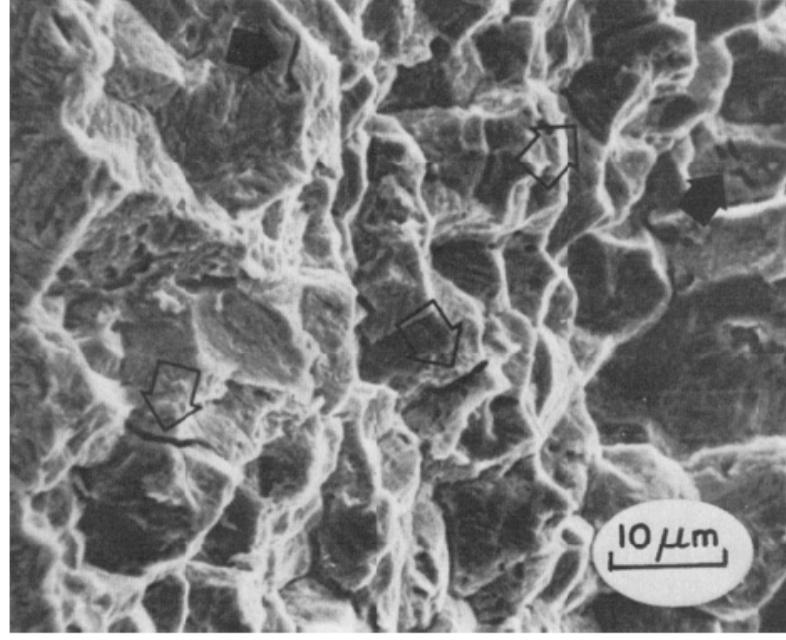
Yorulma kırıkları genellikle malzemenin akma gerilme değerinden daha düşük seviyede malzemenin maruz bırakıldığı devamlı yükler altında meydana gelir. Düşük

³⁹ Koç, *age*, s. 40.

çevrimli yük altında özellikle pekleşme oranı yüksek malzemelerde bu değer akma dayanım değerinin de üstünde olabilmektedir. Yorulma çatlağı, malzemenin en fazla yüke maruz kalan bölgesinden başlar ve sürekli yükleme neticesinde çatlağın başladığı kesit alanı boyunca ilerler. Çatlağın başladığı yer en düşük mukavemet değerinin olduğu ve en yüksek gerilmenin taşındığı bölgedir. Malzemenin artık taşıyamayacağı yüklemenin devam etmesi ile de kırılma meydana gelir. Tane sınırlarının zayıf olduğu ve boşlukların olduğu bölgeler yorulma hasarlarına karşı en hassas bölgelerdir. Geometrik yapı, metalürjik yapı ve yüzey kusurlarının da bölgesel mukavemet değerleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. İçyapı kusurları ve yüzey işlemleri gibi bazı istisnai durumlar haricinde çatlaklar yüzeyden itibaren başlar. Korozyon da çatlak başlangıcı için önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Korozyona uğramış bir bölge, gerilme yüklemesi altında malzemenin mukavemetinin en düşük olduğu yani gerilmenin en fazla hissedildiği bölgelerden bir tanesidir. Bu yorulmaya hassas durumlara karşı akma dayanımını artırmak uzun süreli yorulma mukavemeti elde edebilmeyi sağlamaktadır.

Yorulma sonucunda kırılan bir parçanın kırılma yüzeyinde iki farkı durum söz konusudur. Çatlağın ilerleme safhasında çatlak yüzeyler birbirine sürtünerek kısmen parlatılmış hale gelir, düzgün bir yüzey görüntüsü olduğu gözlenir. Kopma mukavemetinin aniden aşılması ile kırılan yüzeylere ait görüntüde ise, pürüzlü bir görünüm gözlenir. Kırılma sonucu yapılacak analizde kırılma başlangıç bölgesini tespit ve teşhis etmek böylece mümkün olabilmektedir. Yorulma kırılmalarının çoğunlukla çentik sınırlarından başladığı bilinmektedir. Bu yüzden kırılma mekanizmalarını detaylı ve iyi incelemek gerekir. Eğer kırılmaya neden olan faktörler açık ve net olarak ortaya konulabilirse, yüzey iyileştirmeye yönelik işlemlerden o kadar yüksek verim alınabilir. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi çatlak yapının en derin bölgesinden alınan SEM görüntüsünde, birçok metalde olduğu gibi AISI 4140 çeliğinde de çatlaklar kayma gerilmesine bağlı olarak östenit tane sınırlarından başlamaktadır. Aynı zamanda bu dölge yorulma kırılmasının da başladığı noktadır. İkinci derece çatlaklar aynı şekilde tane sınırları boyunca ilerlemektedir⁴⁰.

⁴⁰ C. Y. Kung, M. E. Fine, “Fatigue Crack Initiation and Microcrack Growth in AISI 4140”, *Metallurgical Transactions A*, c. 9A, (1978): ss. 1679-1683.



Şekil 2.15: Çatlak Kesit SEM Görüntüsü (AISI 4140)

C. Y. Kung, M. E. Fine, “Fatigue Crack Initiation and Microcrack Growth in AISI 4140”, *Metallurgical Transactions A*, c. 9A, (1978): ss. 1679-1683.

Bir çok metal iyi bir yüzey işleme kalitesine sahip olsa da yorulma çatlaklarının başlangıcı kaçınılmazdır. Ancak çatlak başlangıcını mümkün olduğu kadar engellemek veya geciktirmek metalin mukavemet değerini, kullanım ömrünü ve süresini artırmak anlamına gelmektedir.

2.4.3. Metallerde Yorulma

Kırılmaya kadar geçen sürede malzemedan en iyi şekilde verim alınabilir. Kırılmaya kadar geçen süredeki çevrim sayısı yani ömür değeri; uygulanan gerilme değeri, malzemeye uygulana yükün şekli, yükün uygulanma durumu, malzemenin kullanıldığı bölge, malzeme yapısı gibi birçok değişkene bağlıdır. Malzeme yorulma ömrünü belirlemek için malzemenin kullanıldığı alanda kırılmasını beklemek uygun bir yaklaşım değildir. Analitik hesaplama yöntemleri ile gerçek çalışma ortamındakine yakın değerler edilemeyebilir. Laboratuvar ortamında ana malzemedan üretilen uygun numunelerle bu değeri önceden belirleyebilmek günümüz teknolojik imkânları sayesinde mümkün olmaktadır.

Yorulma hasarının tek nedeninin her zaman metalin maruz bırakıldığı yük neticesinde oluşan çatlak ve ilerlemesi neticesinde kırılma oluşması olarak değerlendirmemek gerekir. Korozyon da metal malzeme ömrüne etki eden önemli unsurlardandır. Korozyon genellikle malzeme yapısından dolayı yüzeyde bulunan yüzey çatlakları içerisinde başlar ve korozyonun başladığı bölge artık malzeme için hassas bölge olarak değerlendirilir.

Periyodik gerilmelere maruz kalan bir metalin mukavemeti sürekli azalır ve böylece çekme mukavemetinin çok çok altındaki gerilme değerlerinde kırılma oluşabilir. Bu durum yorulma olarak nitelendirilir. Yorulma kırılmaları gevrek kırılmalardır ve kırılma yer ve zamanını önceden bilmek oldukça zordur. Yorulma kırığı çatlakla başlar, çatlağın başladığı kesitin yükü taşıyamaz hale gelmesiyle de ani kırılma meydana gelir. Yorulma genellikle malzeme iç yapısındaki kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanır. İçyapıda bulunan çatlak, boşluk, sert parçacık ve ani kesit değişimleri civarındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyük hissedilir. Bu gerilmeye hassas noktalar da metalin yorulmaya karşı zayıf bölgeleridir. Yüzey kalitesi, çalışma sıcaklığı, çalışma ortamı, frekans, yükleme koşulları metallerde yorulma mukavemetine etkiyen başlıca etkenlerdir. Yorulma çatlağı genellikle yüzeyde başlayıp içeriye doğru yayıldığından yüzey işleme kalitesi metaller için yorulma ömrünü belirlemede en önemli unsurdur. Yüzeydeki hatalar çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi arttıkça metalin yorulma mukavemetinin artması beklenir⁴¹.

Metal malzemelerde deformasyon ve kırılma davranışları kalıntı gerilmeler yardımıyla değiştirilebilir. Üretim ve kullanım esnasında yaratılan kalıntı gerilmeler olumsuz etkiye sahipken, yüzey iyileştirme yöntemleri ile yaratılan kalıntı gerilmeler faydalı olarak değerlendirilir⁴². Yorulma ve kırılma metallerin doğasında olduğu gibi bunu engellemek veya geciktirmek mümkündür. Metallere yönelik olarak yorulma performansını geliştirmede ekonomik ve uygulanabilir olma açısından bazı tasarım ve üretim yöntemleri geliştirilerek kolaylıkla uygulanabilir. Bu yöntemler⁴³:

⁴¹ Selim Sarper Yılmaz, Bekir Sadık Ünlü, Remzi Varol, “Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Asınma ve Mikro Yapı Özelliklerine Etkisi”, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, c. 4, s. 1, (2008): ss. 1-8.

⁴² H. Holzapfel, V. Schulze, O. Vöhringer, E. Macherauch, “Residual Stress Relaxation in an AISI 4140 Steel Due to Quasistatic and Cyclic Loading at Higher Temperatures”, **Materials Science and Engineering: A**, s. 248, (1998): ss. 9–18.

⁴³ Boardman, **age**, s. 1.

- Aerodinamik şekil verme ile gerilme yüklemelerini azaltma,
- Keskin kenarlı üretimden kaçınma,
- Isıl işlem neticesinde yüzey düzensizliklerini ve karbonsuzlaşmaya neden olabilecek işlemlerden kaçınma,
- Kaynak, ısıl işlem gibi nedenlerden dolayı oluşabilecek kalıntı çekme gerilmelerini azaltma,
- Fabrikasyon işlemleri iyileştirme,
- Korozyona karşı korumadır.

2.4.4. Çelikte Yorulma Dayanımı

Çelikler yapısında bulunan karbondan dolayı diğer metallere göre mukavemet değeri oldukça yüksek olan alaşımlardır. Çeliklerin yorulma dayanımını etkileyen faktörler ise; içyapılarındaki süreksizlikler ve çatlaklar, mikro boşluk, kalıntı, ayrışmalar vb. sebeplerden kaynaklanan homojen olamama durumları, mukavemet değeri, sünekliği, çelik yüzeyinin sahip olduğu kalıntı gerilmeler, yüzey durumu ve çalışma ortamıdır.

Çeliklerde yorulma analizi ile ilgili deneysel çalışmalar incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşıldığı gözlemlenmiştir;

- Kalıntıların, mikro çatlakların büyüklüğü, türü, sayısı ve dağılımı yorulma davranışı üzerinde diğer faktörlere göre daha etkili olduğu ve malzeme ömrünü olumsuz etkilediği,
- Yüzeydeki çentikler ve farklı geometrideki yapıların gerilme yoğunluğuna neden olduğu ve uygulanan yüklemelerin bu bölgelerde oluşan gerilme değerlerini daha da arttığı ve yorulma çatlaklarının başlamasına neden olduğu,
- Parlatılmış yüzeylerin ise pürüzlü yüzeylere göre daha yüksek yorulma dayanımı gösterdiği,
- Tane boyutunun küçülmesinin yorulma dayanımını arttığı,
- Bükme/burma gibi çevrimsel yüklere maruz kalan çentikli parçalarda, parçanın çapının artırılmasının yorulma mukavemetini olumsuz etkilediği,

- Yüzeydeki basma nitelikli kalıntı gerilmelerin, yorulma ömrünü uzattığı, bu tür gerilmelerin ısıtma işlem veya mekanik yüzey sertleştirme (bilyalı dövme, indüksiyon sertleştirme, kriyojenik işlem) yöntemleriyle elde edilebildiği,
- Yüzey sertleştirme derinliğinin artmasıyla birlikte yorulma ömrünün genellikle uzadığı,
- Isıtma işlem sırasında, yüzey bölgelerinin karbonsuzlaşmasının yorulma ömrüne olumsuz etki ettiği, yüzeye yakın bölgelerdeki karbonsuzlaşmanın, çekme nitelikli kalıntı gerilme yaratmasından dolayı yorulma dayanımından önemli ölçüde düşme görüldüğü,
- Belirli bir sertlik düzeyine kadar sertlik arttıkça yorulma dayanımı sınırının arttığı görülmüştür.

2.5. Bilyalı Dövmenin Yorulma Mukavemetine Etkisi

Hiçbir malzemenin sınırsız ömrü yoktur. Kullanım alanlarından dolayı maruz kaldığı dış etkiyle veya malzeme içerisinde oluşan çekme gerilmelerinden veya korozyondan dolayı yorulma çatlakları, çatlakların ilerleyen aşamalarında yorulma hasarları oluşabilmektedir. Tokluğu yüksek olan alaşımlar, düşük dayanımlı alaşımlara göre daha hassastırlar. Alüminyum, magnezyum, bakır, nikel, çelik ve paslanmaz çelik gibi birçok metal, uygun korozyon ortamlarında ve malzemenin eşik gerilme değerinde veya bu değerin üzerinde bir değerde çekme gerilmesine karşı son derece hassasiyet gösterir.

Bazı yüzey işlemleri ile oluşturulan kalıntı basma gerilmeli tabaka çatlak oluşumunu önemli ölçüde geciktirmektedir. Malzeme kompozisyonu ve özellikleri üzerinde bazı değişiklik yapılarak yorulma dayanımı artırılabilir gibi, bazen de var olan malzeme üzerinde birtakım işlemler yapılarak bölgesel veya malzeme bütününde birtakım özellikler kazandırılarak yorulma dayanımı iyileştirilebilir.

Yorulma mukavemetine etkiyen başlıca parametrelerin başında malzemenin yüzey işleme kalitesi gelmektedir. Yorulma çatlaklarının yüzeyde mikro çatlaklar şeklinde başlayıp merkeze doğru ilerlediğinden yüzey işleminin önemi oldukça büyüktür. Yüzeydeki pürüzlülükler ve mevcut yüzey çatlakları yorulma başlangıcını hızlandırır. Yüksek yorulma çevrimlerinde ($N > 10^5$) düşük yüzey pürüzlülüğü ise

yorulma mukavemetini ciddi oranda artırır⁴⁴. Malzeme yüzeyine yapılan işlemin veya işlemlerin kalitesi arttıkça yorulma mukavemetinin arttığı gözlemlenir. Yorulma çatlakları yüzeyden itibaren başladığından yola çıkarak yüzeyde yapılan iyileştirmelerle yorulma dayanımının çok daha üst mertebelere çıkarmak mümkündür. Bu yöntemler indüksiyonla sertleştirme gibi klasik ısıl işlemle yüzey iyileştirme ve sertleştirme yöntemleri olduğu gibi bilyalı dövme ve lazer peening gibi modern uygulamalar veya nitrüleme gibi yüzey kaplama işlemleri de olabilir. Günümüzde bilyalı dövme işlemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak yerini almıştır.

Bilyalı dövme ile metal yüzeyine yüksek basınçla fırlatılan sert ve küçük bilya taneleri ile yüzeyde homojen olmayan plastik deformasyon dağılımı meydana getirilir ve yüzeyde istenen makro seviyede kalıntı basma gerilemeleri oluşturur. Bu da yüzeyin kalitesini artırır. Artan yüzey kalitesi de yorulma dayanımını artırır. Artan yorulma dayanımı ile de malzeme daha uzun ömür değerine sahip olur. Bilyalı dövme ile elde edilen yüzey modifikasyonları, yüzey pürüzlülük değerinin kısmen artması, yüzeye yakın bölgelerde düzensizlik yoğunluğunda azalma ve kalıntı gerilme karakteristik profilindeki iyileşmelerdir.

Yorulma hasarlarını önlemek veya yorulma ömrünü arttırmak için uygulanmakta olan bilyalı dövmenin bir avantajı da parçanın üretim yöntemine ve metalin cinsine bakılmadan her türlü makine parçasına uygulanabilir olmasıdır. Yine bilyalı dövme ince metal plakaların istenilen formlarda sekillendirilmesi, yüzey sertleştirme, yüzey kalitesinin arttırılması ve yüzeydeki gözeneklerin giderilmesi gibi çeşitli amaçlar için yaygın biçimde kullanılır⁴⁵. Bilyalı dövme, çalışma ortamının özelliklerine göre özellikle çevrimsel yüklemelere maruz kalan elemanların yorulma ömrünü geliştirmek için de uygulanır. Yorulma mukavemetine olan bu etki bilyalı dövme ile yüzeye kazandırılan kalıntı basma gerilmeleri ile sağlanır. Bilyalı dövmenin aynı zamanda malzemenin pekleşmesi üzerinde de etkisi vardır⁴⁶.

⁴⁴ N. A. Alang, N. A. Razak, ve A. K. Miskam, "Effect of Surface Roughness on Fatigue Life of Notched Carbon Steel", *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, c. 11 s. 1, (2011): ss. 160–163.

⁴⁵ Selim Sarper Yılmaz vd., *age*.

⁴⁶ A. Wick, V. Schulze, O. Vöhringer, "Effects of Warm Peening on Fatigue Life and Relaxation Behaviour of Residual Stresses in AISI 4140 Steel", *Materials Science and Engineering: A*, s. 293, (2000): ss. 191–197.

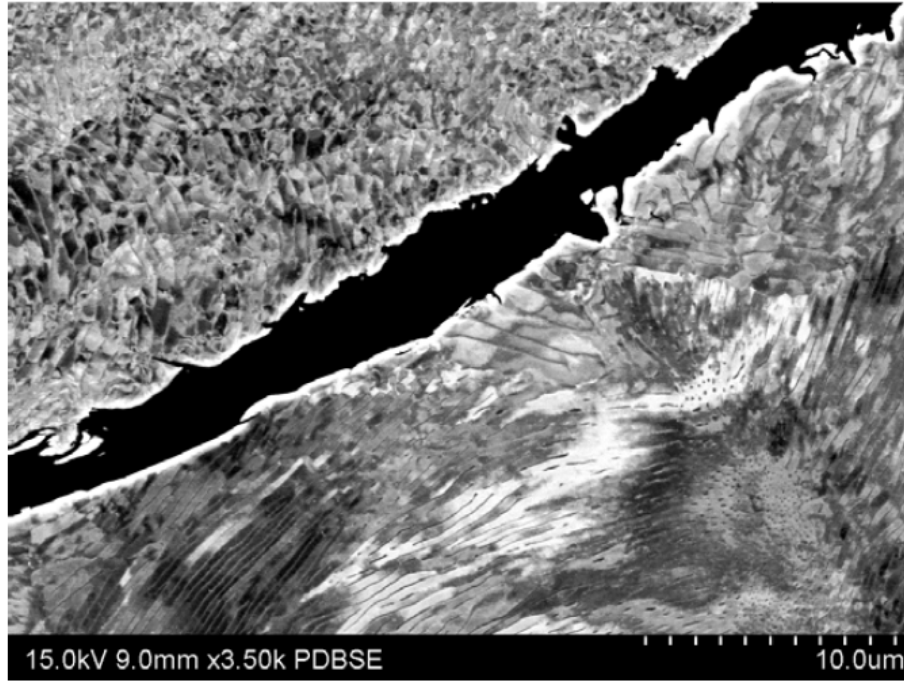
Bilyalı dövme ile yüzeyde yaratılan plastik defromasyon malzeme düzensizliklerini en düşük seviyeye indirir. Düşük yoğunluktaki malzeme düzensizlikleri bilyalı dövme ile kazanılan plastik deformasyon sayesinde azalabilir. Bu da yüzeyin deformasyon sertleşmesi değerini ciddi oranda artırabilir ve nihayetinde akma gerilmesi değerinde de artış görülür⁴⁷. Malzeme düzensizliklerini gidermekle birlikte yüzeyde ve yüzeyin hemen altındaki tabakada çok iyi bir tane yapısı meydana getirmek, yorulma çatlaklarının başlangıcını yavaşlatabilir. Nano yapıda bir yüzey yapısına sahip olan ve yüzey ve hemen altında iyi yapıda oluşturulmuş tane yapısına sahip bir makine elemanının çok iyi derecede yorulma performansı göstermesi beklenir⁴⁸. Malzeme özelliklerine ve mikroyapısına bağlı olarak, bilyalı dövmenin meydana getirdiği plastik deformasyon malzeme yüzeyinin yapısını ciddi oranda değiştirebilir⁴⁹. Bu nedenle bilyalı dövme, malzemenin yalnızca mekanik özelliklerini ve davranışlarını etkilemez, aynı zamanda malzemenin mikroyapısında da değişiklikler meydana getirir. Malzemenin tane yapısı küçülür, taneler arasındaki boşluklar kapanarak daha sıkı bir yapı meydana gelir. Deformasyon sertleşmesi yaratılmış bir yüzey meydana getirilir. Böylelikle mukavemet değerinde ciddi oranda bir artış sağlanır. Bu yüzden yüzey işlemi malzeme özelliklerine göre en iyi sonuca ulaşacak şekilde seçilmelidir. Bilyalı dövmenin tane yapısı ve düzensizlikler üzerindeki olumlu etkisi ve bu işlemin uygulanabilirliği ile birlikte değerlendirildiğinde etkin olarak kullanılması yorulma performansında önemli avantajlar meydana getirmektedir.

Metal yüzeyinde oluşturulan plastik deformasyonun değeri ile bilyalı dövmenin şiddeti arasında doğrudan bir ilişki kurulabilir. Çünkü plastik deformasyon miktarı malzemenin akma dayanımına bağlı bir değerdir. Bilyalı dövülmüş bir metalde ise plastik deformasyon, hem özellikleri bilyalı dövme ile iyileştirilmiş yüzey hem de akma dayanımına bağlı olarak değişir. Şekil 2.16'da gösterilen elektron mikroskobu görüntüsünde alt kısımda bilyalı dövme uygulanmayan bölümün içyapı görüntüsü, üst kısımda ise bilyalı dövmenin neden olduğu plastik deformasyonlu yüzey açıkça görülmektedir.

⁴⁷ Dalaei, Karlsson, *age*.

⁴⁸ Liu vd., *age*.

⁴⁹ Dalaei, Karlsson, *age*.



Şekil 2.16: Dökme Çelikte Bilyalı Dövme Deformasyon Etkisi Görüntüsü

Mattias Lundberg, “Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron”, *Licentiate Thesis*, Linköping University, (2013).

Bilyalı dövme ile yüzeyde oluşturulan basma yönündeki kalıntı gerilmeler ve yükselen pekleşme değeri yorulma dayanımına pozitif yönde etki yapar. Her ne kadar kalitesi ve özellikleri geliştirilmiş olsa da her malzemenin sınırlı bir kullanım ömrü olacağından bilyalı dövme ile yorulma çatlaklarının başlangıcı daha uzun bir süreye yayılabilir, çatlak ilerleme hızını da yavaşlatır ve bu sayede daha uzun bir kullanım ömrü elde etmek mümkün olur. Ancak bütün malzemeler ve bütün kullanım alanları için bunu söylemek her zaman doğru olmayabilir.

Sertleştirme işlemi, malzeme özelliklerini iyileştirmek ve parçanın ağırlığını arttırmadan yüksek dayanım elde edebilmek için kullanılan yaygın yöntemlerden biridir⁵⁰. Aynı zamanda bilyalı dövme ile yüzey sertliği arasında da doğrudan ilişki vardır.

Yüzey işlemi uygulanmış bir yüzeyin sertlik değerinin hissedilir bir şekilde artması beklenir. Yüzeye uygulanan plastik deformasyon yöntemleri, yüzey sertliğini genelde çok yüksek değerlere ulaştırır, ancak yüksek seviyelerde yüzeyde kırılganlığın

⁵⁰ Subaşı, Kafkas, Karataş, *age*.

arttığı da görülebilir. Büyük bilya tipleri seçmek yüksek deformasyon oranlarına ve artan karakteristikte yüzey pürüzlülüğüne neden olur⁵¹. Yüzey pürüzlülüğü ise, %100 yüzey sarma oranı elde edilene kadar geçen sürede artar ve daha sonra daha yüksek düzeyde yüzey sarma oranlarında daha fazla değişmez ve neredeyse aynı seviyede kalır. Parlatılmış yüzeylerde ise bilyaların yüzeye çarpması neticesinde yüzey pürüzlülüğünde kayda değer bir artış gözlemlenir, ancak tam yüzey sarma oranına ulaşıldığında, yüzey sertlik değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı değerde pürüzlülük değeri de kısmen doyma noktasına ulaşmış olur⁵². Bilyalı dövme ile malzemenin yüzeyinin maruz bırakıldığı plastik deformasyon nedeniyle yüzey sertliğinde kayda değer bir artışa neden olur. Ancak bu sertlik değeri yüzeyden malzeme merkezine inildikçe azaldığı yapılan deneysel çalışmalar neticesinde görülmüştür. Bir metalde en iyi sertlik değeri malzeme yüzeyinde ve yüzeyden yaklaşık 0.2-0.3 mm kadar merkeze gidildikçe görülebilir.

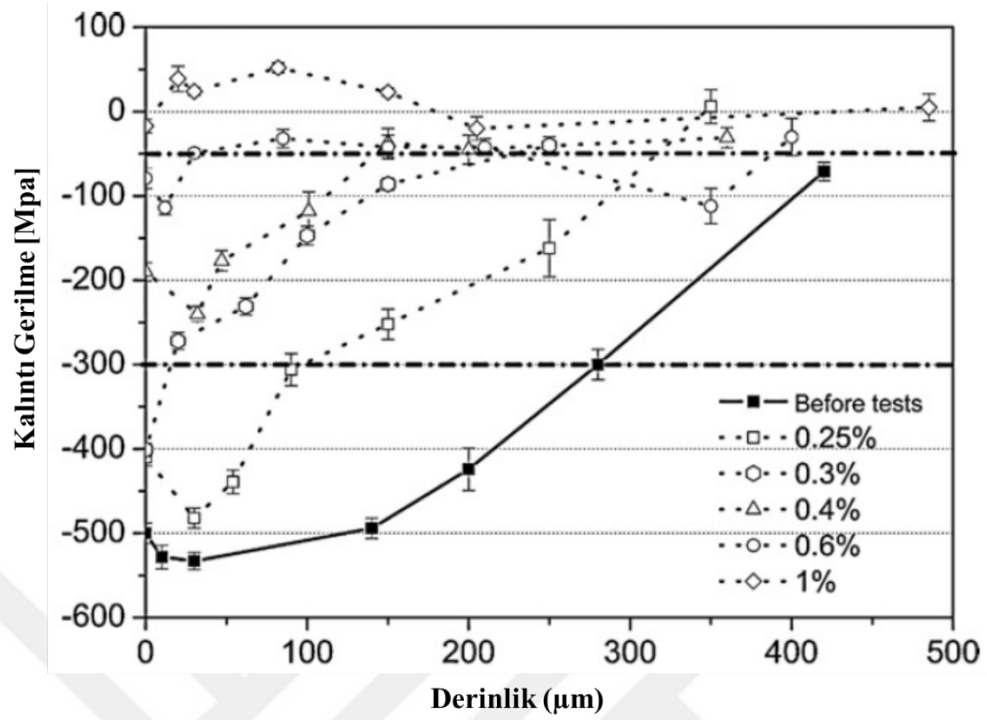
Yorulma dayanımını dolayısı ile malzeme ömrünü artırmaya yönelik belirlenen süreçlerle her kullanım alanında en iyi sonucu almak mümkün olmayabilir. Malzeme yüzey özelliklerini geliştirmeye yönelik işlemlere rağmen makine elemanın kullanım alanı, yükleme durumunda doğrudan veya dolaylı maruz kaldığı gerilmeler, sürekli değişken gerilmeler, ortam şartları yorulma dayanımına olan bu olumlu etkileri sınırlayabilir. Kullanım alanında yüklemenin şiddeti arttıkça bilyalı dövmenin etkilerinin azaldığı da görülebilir.

Malzemenin maruz bırakıldığı ilk yükleme esnasında malzemeye kazandırılan kalıntı gerilmelerin çok büyük bir kısmı harcanmaktadır. Yüklemenin devam etmesi ile yüzeydeki kalıntı basma gerilmelerinin miktarının azalmasına paralel olarak kalıntı gerilmeye sahip olan derinliğin de giderek azaldığı gözlemlenebilir (Şekil 2.17)⁵³. Bilyalı dövmeden beklenen fayda olarak yüzeye kazandırılan kalıntı basma gerilme büyüklüğü ne kadar artırılabilirse aynı oranda yorulma dayanımının arttığını görmek mümkün olur.

⁵¹ Okan Ünal, "Optimization of Shot Peening Parameters by Response Surface Methodology", *Surface & Coatings Technology*, (2016).

⁵² A. T. Vielma, V. Llaneza, F. J. Belzunce, "Shot Peening Intensity Optimization to Increase the Fatigue Life of a Quenched and Tempered Structural Steel", *Procedia Engineering*, s. 74, (2014): ss. 273-278.

⁵³ K. Dalaei, B. Karlsson, L.-E. Svensson, "Stability of Shot Peening Induced Residual Stresses and Their Influence on Fatigue Lifetime", *Materials Science and Engineering: A*, s. 528, (2011): ss. 1008-1015.



Şekil 2.17: Dinamik Yükleme Altındaki Malzemede Kalıntı Gerilme Profili

K. Dalaei, B. Karlsson, L.-E. Svensson, “Stability of Shot Peening Induced Residual Stresses and Their Influence on Fatigue Lifetime”, *Materials Science and Engineering: A*, s. 528, (2011): ss. 1008-1015.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

K. Dalei ve B. Karlsson bilyanın dövmenin değişken genlikli yükleme altında yorulma dayanımına etkisini incelemeye yönelik yaptıkları çalışmada; bilyalı dövmenin düşük genlikli yüklemelerde daha uzun malzeme ömrü sağladığını, çok yüksek genlikli çevrimlerde bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş malzemelerin birbirine çok yakın ömür değerleri gösterdiğini, 0,25 mm A almen dövme şiddeti %200 yüzey sarma oranı ile en iyi yorulma dayanımının sağlandığını, ilk yükleme esnasında malzeme ömrünün büyük kısmının harcandığını, devam eden yüklemelerde kalıntı gerilmenin doğrusal bir şekilde azaldığını deneylerle göstermiştir⁵⁴.

A. Vick vd. 6 farklı değerde ısıtıl işlem görmüş AISI 4140 çeliğinin yüzeyine uygulanan 0,3 mm A şiddetindeki bilyalı dövme etkisini araştırmaya yönelik yaptıkları çalışmada; yüksek sertlik değerine sahip numunelerde daha düşük kalıntı gerilme değeri, en düşük sertliğe sahip numunede ise en yüksek kalıntı gerilme değerini elde etmişlerdir. Dövme yöntemi değiştirildiğinde düşük sertlik değerine sahip numunede yüzey pürüzlülük değerinin arttığı, bilya boyutunun artmasıyla da yine yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür⁵⁵.

R. Herzog vd. farklı bilyalı dövme parametrelerinin Al7020 alüminyum alaşımı ve X35CrMo17 çeliğindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneylerde hava basıncı ve aktarım hızına bağlı olarak değişen dövme hızı, bilya boyutu, sertlik ve dövme süresinin elde edilen maksimum kalıntı basma gerilme değerini ve buna bağlı olarak yorulma mukavetini önemli oranda artırdığı görülmüştür. Bilya sertliğinin artmasıyla kalıntı basma gerilme değerinin daha da arttığı gözlemlenmiştir⁵⁶.

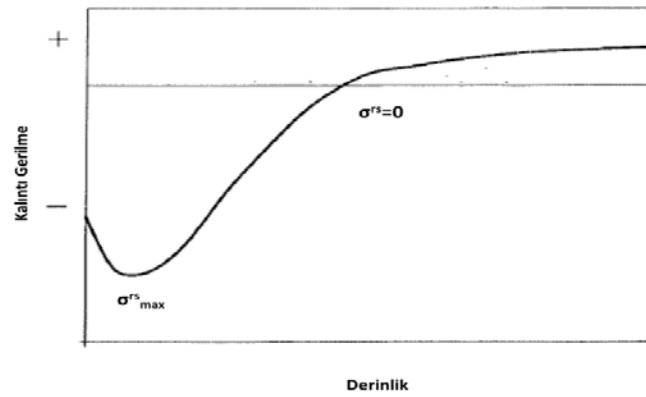
⁵⁴ Dalaei, Karlsson, 2012.

⁵⁵ A. Wick, H. Holzapfel, V. Schulze, O. Vohringer, "Effect of Shot Peening Parameters on the Surface Characteristics of Differently Heat Treated AISI 4140", *Icsp-7*, (2011): ss. 42-53.

⁵⁶ R. Herzog, W. Zin, H. Wohlfahrt, B. Scholtes, "The Significance of Almen Intensity for the Generation of Shot Peening Residual Stresses", *ICSP-6*, (1996): ss. 270-281.

A. T. Vielma vd. bilyalı dövme şiddetinin AISI 4340 çeliğine eşdeğer olan F1212 çeliğinin yorulma mukavemetine etkisini araştırmışlardır. 0,2 mm A ile 0,56 mm A dövme şiddetleri arasındaki farklı dövme şiddetleri ile uygulanan deneylerde; parlatılmış yüzeylerde pürüzlülük değerinin şiddet değeri ile birlikte arttığı aynı zamanda %100 yüzey sarma oranına kadar yüzey pürüzlülüğünün arttığı, daha yüksek sarma oranlarında pürüzlülük değerinin fazla değişim göstermediği, daha yüksek şiddetli uygulamada kalıntı basma gerilme değerinin beklenenden aksine azalış gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Yorulma testi sonuçlarına göre, dövme şiddeti ile birlikte yorulma mukavemetinin arttığı ancak yüksek şiddetli uygulamalarda yorulma dayanımının giderek düştüğünü, çekme dayanımının %50'si ile uygulanan yüklemde en iyi yorulma performansını 0,25 mm A şiddetinde elde etmişlerdir⁵⁷.

H. Hozapfel ve A. Wick dövme basıncı, bilya tipi ve boyutu, dövülen parça sertliği, bilya akış hızı gibi bilyalı dövme parametrelerinin AISI 4140 çeliğine etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda; bilyalı dövme sonrası yüzeyden derinliğe inildikçe sertliğin azaldığı, kalıntı basma gerilme değerinin ise bir noktaya kadar arttığı (Şekil 3.1), sistem basıncının artmasının sonucu olarak bilya akış hızının arttığı ve bunun kalıntı basma gerilme değerini de artırdığı görülmüştür⁵⁸.



Şekil 3.1: AISI 4140 İçin Derinlik ve Kalıntı Gerilme Profili

H. Hozapfel, A Wick, “Effect of Shot Peening Parameters on the Properties of Surface Layers in AISI 4140 in Different Heat Treatment Conditions”, *The Shot Peener*, c. 10, s. 1, (1996): ss. 6-13.

⁵⁷ Vielma, Llaneza, Belzunze, *age*.

⁵⁸ H. Hozapfel, A Wick, “Effect of Shot Peening Parameters on the Properties of Surface Layers in AISI 4140 in Different Heat Treatment Conditions”, *The Shot Peener*, c. 10, s. 1, (1996): ss. 6-13.

S. Torres ve C. Voorwald bilyalı dövmenin AISI 4340 çeliğinin yorulma ömrüne etkisini araştırmışlardır. Bilyalı dövme işleminden sonra burma gerilmeli yorulma testi uygulanmış ve elde edilen kalıntı basma gerilmesi değerini X-ray ışıınıımı yöntemi başlangıçta ve yorulma testi süresince ölçmüşlerdir. Dövme şiddeti ile kalıntı gerilme değerinin orantılı olarak arttığı ve yorulma süresince kalıntı basma gerilme değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca orta ve yüksek çevrimli yorulma testlerinde bilyalı dövmenin çatlak kaynağını yüzeyin daha da altına indirdiği gözlemlenmiştir⁵⁹.

M. Subaşı ve Ç. Karataş, AISI 4140 çeliğinde sertlik değerinin yorulma dayanımı üzerindeki etkisi ve farklı sertliklerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini tespit etmeye yönelik olarak yaptıkları çalışmalarda; farklı sertlik değerlerinin yorulma ömrüne etkisi ve kalıntı gerilme profili değişimini araştırmışlardır⁶⁰. AISI 4140 çeliğinde sertleştirilmemiş ve farklı ısı ileme 40, 45, 50 HRC sertlik değerine sahip (Tablo 3.1) numunelerin yorulma dayanımı karşılaştırıldığında; her malzemenin yorulma dayanımı açısından optimum bir sertlik değerinin olduğunu, sertleştirme işlemi görmüş bir malzemenin görmemişse göre daha yüksek yorulma dayanımı verdiğini ve AISI 4140 malzemesi için en yüksek yorulma dayanımı 45 HRC sertleştirilmiş numunede 792 MPa olarak görüldüğünü tespit etmişlerdir (Tablo 3.2) . 45 HRC sertlik değerine sahip numunede ise en yüksek kalıntı basma gerilme değeri ölçülmüştür⁶¹.

Tablo 3.1: AISI 4140 Isıl İşlem Parametreleri

Sertlik değeri (HRC)	Sertleştirme sıcaklığı (°C)	Sertleştirme ortamı	Temperleme sıcaklığı (°C)	Temperleme süresi (dak)
40	930 °C	Yağ	427 °C	40 dak
45	930 °C	Yağ	316 °C	40 dak.
50	930 °C	Yağ	204 °C	40 dak

Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi”, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 13, (2010): ss. 21-27.

⁵⁹ M. A. S. Torres, H. J. C. Voorwald, “An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel”, *International Journal of Fatigue*, s. 24, (2002): ss. 877–886.

⁶⁰ Emrah Dülek, Çetin Karataş ve Süleyman Sarıtaş, “Bilyalı Dövmüş Ç1020 Malzemede Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi ile İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, c. 18, s. 3, (2003): ss. 107-116.

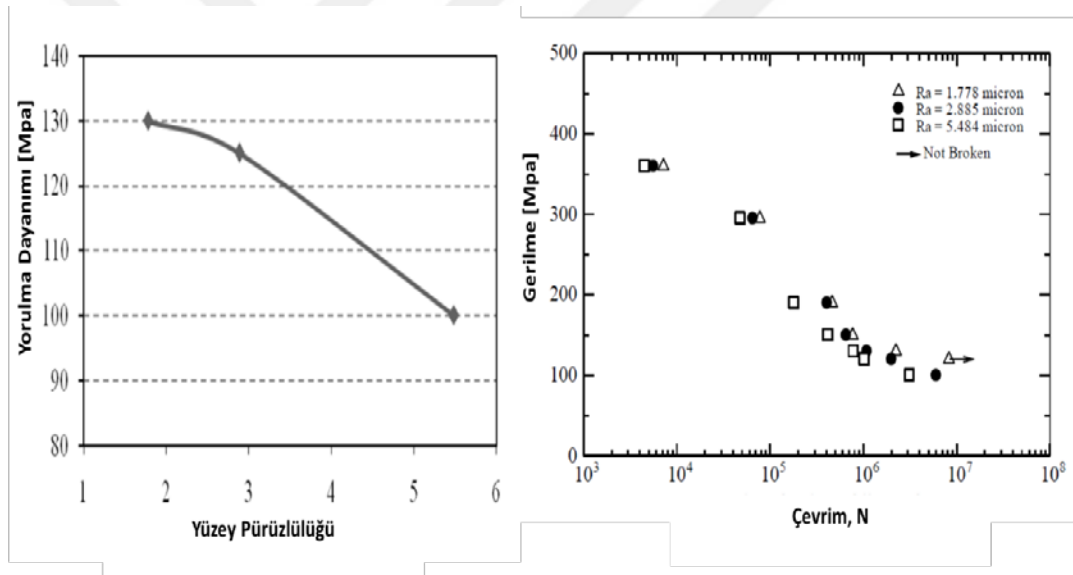
⁶¹ Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi”, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 13, (2010): ss. 21-27.

Tablo 3.2: AISI 4140 Yorulma Dayanımı Değerleri

Sertlik Değeri (HRC)	Yorulma Dayanımı (MPa)	Tornalanmış-sertleştirilmemiş numuneye göre artış (%)
Tornalanmış-sertleştirilmemiş	463	-
40	783	69
45	792	71
50	739	60

Mehmet Subaşı, Çetin Karataş, “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi”, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 13, (2010): ss. 21-27.

Alang, Razak ve Miskam, yüzey işlemleri görmüş çeliklerde yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 50 Hz frekansta ve $R = -1$ gerilme oranında yapılan yorulma testleri sonucunda; düşük yorulma çevrimlerinde ($N < 10^5$) yorulma ömründe herhangi bir farklılık görülmezken yüksek yorulma çevrimlerinde ($N > 10^5$) düşük yüzey pürüzlülüğünün yorulma mukavemetini artırdığı görülmüştür (Şekil 3.2)⁶².



Şekil 3.2: Yüzey Pürüzlülüğünün Yorulma Ömrüne Etkisi

N. A. Alang, N A Razak, ve A K Miskam, “Effect of Surface Roughness on Fatigue Life of Notched Carbon Steel”, *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, c. 11 s. 1, (2011): ss. 160–163.

S. Wang vd. elde ettikleri ampirik modellerle bilyalı dövme ile elde edilebilecek kalıntı gerilme değerinin malzeme akma dayanımı (σ_y) ve çekme dayanımı (σ_c) değerlerinin bilinmesi ile önceden hesaplamak üzere aşağıdaki eşitlikleri elde etmişlerdir (3.1, 3.2, 3.3). Burada σ_s^{rc} yüzeyde elde edilen kalıntı basma gerilme

⁶² Alang, Razak, Miskam, *age*.

değerini, $\sigma_{\max}^{rc}$ ise elde edilecek maksimum kalıntı basma gerilme değerini ifade etmektedir. Bu çalışmada metal özellikleri ile bilyalı dövme sürecinin kalıntı basma gerilme profili üzerinde önemli etkisi olduğu da görülmüştür⁶³.

$$\sigma_s^{rc} = 120 + 0.5\sigma_y (\pm 30) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\max}^{rc} = 70 + 0.667\sigma_c (\sigma_c < 1000 \text{ MPa}) \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\max}^{rc} = 430 + 0.323\sigma_c (\sigma_c \geq 1000 \text{ MPa}) \quad (3.3)$$

O. Ünal bilyalı dövme parametrelerinin optimizasyonuna yönelik yaptığı çalışmada; almen test plakalarının bilyalı dövme parametrelerine göre işlem sonrası aldığı eğiklik yüksekliğini önceden tahmin edebilmek maksadıyla bir analiz gerçekleştirmiş ve bu eşitliği doğrulamak için deneylerin sonuçları ile karşılaştırmıştır. Testlerde AISI 1070 yay çeliğinden imal edilen A tipi almen test plakası kullanılmıştır (Şekil 3.3). Almen dövme yoğunluğuna göre belirlenen eğiklik yüksekliğinin, bilya boyutu (s), hava basıncı (p), dövme süresi (s) ne bağlı bir fonksiyon olduğundan yola çıkarak aşağıdaki eşitliğe ulaşmıştır (3.4)⁶⁴;

$$\begin{aligned} \text{Eğiklik Yüksekliği(mm)} = & 2101 - [0,02895 * t(s)] - [3132 * s(mm)] - \\ & [0,04429 * p(kPa)] + [0,01601 * t(s) * s(mm)] + [0,059 * t(s) * p(kPa)] \\ & + [0,00721 * s(mm) * p(kPa)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte; dövme süresi t, bilya boyutu s, basınç p ile ifade edilmiştir. Burada hava basıncının, dövme süresi ve bilya boyutunun temel çarpanı olduğu $[t(s) * p(kPa), s(mm) * p(kPa)]$, eğiklik yüksekliğini belirleyicisi olan ve almen dövme şiddetini belirleyen en önemli parametre olduğu görülmektedir. Ancak hava basıncının çok düşük olduğu durumlarda bilya boyutu (s) ve dövme süresi (t) de önemli etken

⁶³ Wang, Li, Yao, Renzhi, *age*.

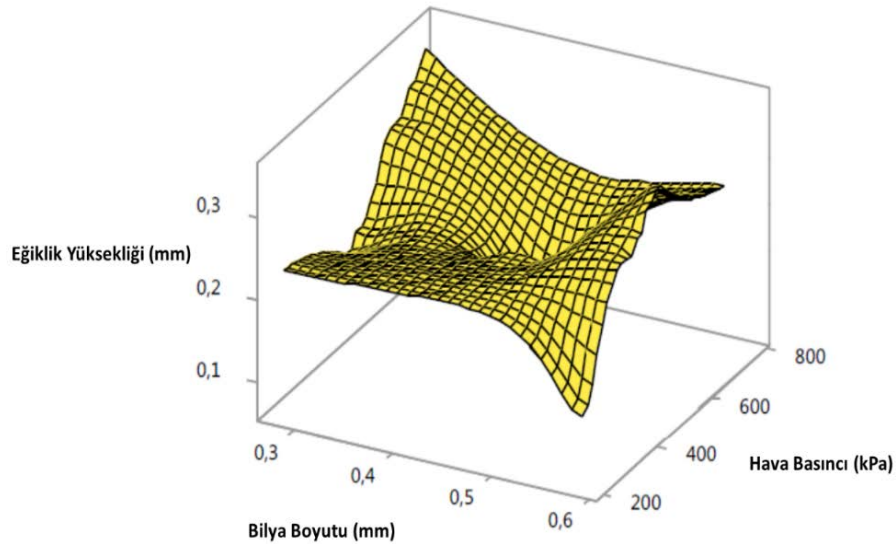
⁶⁴ Ünal, 2016.

parametre olmaktadır. Dövmе süresi ile bilya boyutunun aynı anda artması durumunda eğiklik yüksekliğinde ciddi bir artış olduğu görülebilir. Ancak bu parametrelerden bir tanesinin sabit kalması veya düşük miktarlarda artış göstermesi, almen dövme şiddetini beklenenden daha az bir değerde artırmaktadır. Bilya boyutundaki artışın hava basıncındaki artış ile desteklenmesi durumunda dövme şiddetinde de belirgin bir artış gözlemlenebilir (Şekil 3.4). Sonuç olarak hava basıncının, bu parametreler içerisinde almen dövme yoğunluğunun belirlenmesinde başlıca ve en etkin rol oynayan parametre olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.3: Bilyalı Dövmüş Yüzey ve Eğiklik Görünümü

Okan Ünal, "Optimization of Shot Peening Parameters by Response Surface Methodology", *Surface & Coatings Technology*, (2016).



Şekil 3.4: Bilya Boyutu ve Hava Basıncının Almen Dövme Yoğunluğuna Etkisi

Okan Ünal, "Optimization of Shot Peening Parameters by Response Surface Methodology", *Surface & Coatings Technology*, (2016).

Literatür araştırması bölümünde detaylı olarak anlatılan çalışmalar incelendiğinde; çalışmaların büyük çoğunluğunun en iyi bilyalı dövme prosesini belirlemeye yönelik araştırmalar olduğu görülmüştür. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmaların neredeyse tamamında bilyalı dövmenin metallerin yorulma ömrü üzerindeki olumlu etkisi ortaya çıkmıştır. Yorulma mukavetine en iyi faydayı sağlayan dövme şiddetini belirlemeye yönelik çalışmalarda proses belirleme süreci, SAE standartlarına göre ifade edildiğinde, 6A-18A aralığında dövme şiddeti değerleri belirlendiği görülmüştür. Çalışmalarda dövme şiddeti - yüzey sertliği ilişkisi de kurulmuş, bilyalı dövmenin yüzey sertliğine olan etkisi de incelenmiştir. Çalışmaların ortak yönlerinden bir tanesi de yüzeye uygulanan bilyalı dövmenin oluşturduğu plastik deformasyonlu yüzey ve bu deformasyonlu yüzeyin derinliğinin yorulma mukavemeti üzerindeki etki olmuştur. En iyi derinlik boyunca elde edilecek plastik deformasyonlu tabaka ile kazanılan kalıntı basma gerilmenin yorulma süresince harcanma süresinin artması da önemli bir çalışma konusu olarak ön plana çıkmıştır.



4. DENEYSEL HAZIRLIK VE YÖNTEM

4.1. Malzeme Seçimi

Bu çalışmada, AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinden üretilen tank palet pimi kullanılmıştır.

Bilyalı dövme bir plastik deformasyon işlemidir. Çeliklerde düşük karbon oranı plastik şekil verme kabiliyetini artıran ve kolaylaştıran bir unsurdur. Karbon miktarının artması aynı oranda şekil verme kabiliyetinin azalmasına neden olmakta ancak tokluğunu da artırmaktadır. Tablo 4.1 AISI 4140 çeliğinin spektrometre ile ölçülen kimyasal kompozisyonunu, Tablo 4.2 ise AISI 4140 çeliğinin mukavemet değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.1: AISI 4140 Çeliği Kimyasal Kompozisyonu (ağırlıkça %)

	Min.Değer	Maks.Değer	Ölç.Değer
C	0,380 %	0,450 %	0,382 %
Cr	0,900 %	1,200 %	1,088 %
Mn	0,600 %	0,900 %	0,834 %
Mo	0,150 %	0,300 %	0,223 %
P	0,000 %	0,035 %	0,004 %
S	0,000 %	0,035 %	0,002 %

Tablo 4.2: AISI 4140 Çeliği Mukavemet Değerleri

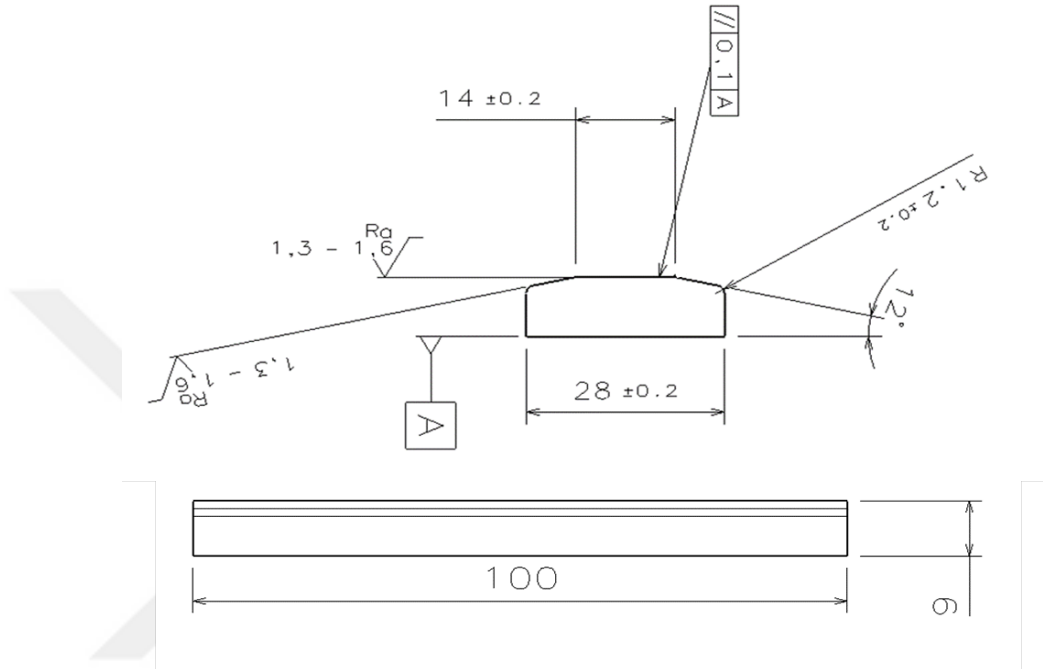
Östenitleme	850-860°C
Su Verme	820-860°C
Menevişleme	560°C
Elastisite Modülü	205 GPa
Poisson Oranı	0.29
Akma Mukavemeti	986 MPa
Kopma Mukavemeti	1075 MPa
Sertlik (HRC)	28-31
Yoğunluk ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	7.7-8.03

AISI 4140 çeliği aynı gruptan çeliklerle kıyaslandığı zaman orta derecede sertleşebilir ancak onlara nazaran dayanım ve tokluğu ise daha iyidir. Fakat çalışma ortamlarındaki performansı normal değerlerdedir. Yüksek karbon içeriğinden dolayı daha iyi sertleşir ve mukavemeti artar. Çekme dayanımları 1650 MPa kadar çıkabilir. Sertleştirme ve temperleme ısı işlemine uygundur. Çalışma ortamlarındaki dayanımı 480°C'den sonra hızlı bir şekilde azalır. Isıl işlem ve gerilme yoğunlaşması ile çeşitli sıcaklıklarda dönüşüme uğrayabilirler⁶⁵. Cr ve Mo alaşım elementlerini de içermesi sebebiyle, su verme ve ısı işlem sonrasında martenzitik yapı oluşturabilmesi ve bu sayede mukavemet, tokluk ve sünek yapı sağlanabilmesi AISI 4140 çeliğinin yaygın kullanım alanı bulmasında en büyük etkenlerdendir.

⁶⁵ Ethem Kesti, "Ç-4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi (2009), s. 17.

4.2. Numune

Yorulma testinde kullanılmak üzere AISI 4140 çeliğinden imal edilen tank palet pimlerinden düz geometride 3 nokta eğme yorulma testi numuneleri (9x28x100 mm) hazırlanmıştır (Şekil 4.1). Hazırlanan numunelerin yüzeyleri parlatma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.1: Yorulma Test Numunesi Geometrisi



Şekil 4.2: Yorulma Test Numunesi

4.3. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme işlemi uygulanması açısından kolay gibi görünmesine rağmen uygulamada yapılacak bazı hatalar bilyalı dövmenin olumlu etkilerini sınırlayabilir veya azaltabilir. Bu yüzden işlem parametreleri, işlem uygulanacak malzeme özelliklerine ve yüzeye kazandırılması istenen özelliklere göre en optimum sonucu alacak şekilde belirlenmelidir. Bu çalışmada Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TUSAŞ)'de bulunan bilyalı dövme tezgahı kullanılmıştır.

Bilyalı dövme işlemi, yüksek basınçlı hava yardımıyla çalışan bilyalı dövme tezgâhında, Tablo 4.3'te kimyasal kompozisyonu verilen S230 dökme çelik bilya tipi kullanılarak uygulanmıştır (sertlik 45 HRC, yoğunluk 7.0 gr/cm³).

Tablo 4.3: S230 Çelik Bilya Kimyasal Kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S
1.0	0.84	0.97	0.19	0.018

Bilyalı dövmenin kalitesi, dövmenin şiddeti, elde edilen kalıntı gerilmenin derinliği ve bütün yüzeyi sarma oranı ile belirlenmektedir. Dövme işleminin kontrolünü sağlamak ve dövme şiddetleri belirlemek maksadıyla A tipi almen test plakası seçilmiş ve uygulamada SAE standartları takip edilmiştir⁶⁶.

Hazırlanan düz geometrili numunelere uygulamak üzere 4-7A, 6-10A, 12-16A ve 13-17A olmak üzere 4 farklı dövme şiddet aralığı belirlenmiştir. Bu dövme şiddetlerinin herbiri için %200 yüzey sarma oranı olacak şekilde parametreler belirlenmiştir. Farklı dövme şiddetlerini elde etmek için hava basıncı 800 mbar ile 3000 mbar arasında değişiklik göstermiştir.

Almen şiddet değerlerini SAE standartları ile ifade etmek için 40 sayısı çarpan olarak kullanılmıştır. Yani 10A değeri 0,25 mm A almen şiddeti değerine tekabül

⁶⁶ SAE Standard J442, Test strip, Holder and Gage for Shot Peening, SAE International, 2008 ve SAE Standard J443, Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip, SAE International, 2003.

etmektedir. Uygulamada kullanılacak almen şiddet değerleri belirlenirken literatür araştırması dikkate alınmış, AISI 4140 çeliği üzerindeki en optimal etkiyi verebilecek değerler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu değerler belirlenirken kesin bir şiddet değeri elde etmek mümkün olmadığından elde edilebilecek değerler bir aralık olarak ifade edilmiştir.

Bilyalı dövmenin yorulma mukavemeti üzerindeki etkisini karşılaştırmak için belirlenen dövme şiddet değerlerini elde etmek üzere farklı bilyalı dövme işlem parametreleri tespit edilmiş ve uygulanmıştır. Tablo 4.4 farklı dövme şiddetlerini elde etmek için uygulanan bilyalı dövme koşullarını göstermektedir. Bu çizelgede hava basıncının almen şiddeti üzerindeki etkisi de görülmektedir. Bütün bilyalı dövme koşulları nozul ile numune arasındaki mesafe 25 cm ve çarpma açısı 90° olacak şekilde uygulanmıştır. Uygulamanın tamamı kontrollü olarak oda sıcaklığında yapılmıştır.

Tablo 4.4: Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri

Numune Kodu	Dövme Şiddeti (Almen Intensity)	Yüzey Sarma Oranı (Coverage)	Bilya Tipi	Hava Basıncı (mbar)	Dövme Süresi (s)	Nozul Uzaklığı (cm)
BD0	-	-	-	-	-	-
BD1	4-7A	%200	S230	800	68	25
BD2	6-10A	%200	S230	1000	42	25
BD3	12-16A	%200	S230	2500	42	25
BD4	13-17A	%200	S230	3000	45	25

Bilyalı dövme şiddeti belirlenirken her bir şiddet değeri için 5'er adet almen test plakası kullanılmıştır. Yani bilyalı dövme parametreleri almen test plakası kullanılarak kontrol altında tutulmuştur. İstenen doyurma oranı elde edildiğinde uygulanan parametreler o almen şiddet değeri için işlem parametresi olarak belirlenmiştir. Bilyaların fırlatılması için gerekli olan basınç bilyalı dövme tezgahının özelliklerine bağlıdır. Bu basınç da bilya akış hızını ve yüzeye çarpma hızını belirlemektedir.

Kullanılan bilyalı dövme tezgahında işlem parametrelerine göre bilya akış hızı 8000 g/dk olmuştur.

4.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Bilyalı dövme uygulandıktan sonra bütün numune gruplarının kendi içerisinde aynı yüzey özelliklerini kazanıp kazanmadığını kontrol etmek için yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Bütün test numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Böylelikle yüzey pürüzlülük değerlerinin yorulma ömrü üzerindeki etkisi sınırlandırılarak sadece bilyalı dövmenin yorulma üzerindeki etkisi görülmeye çalışılmıştır.

4.5. Yorulma Testi

Bilyalı dövme uygulanmış ve bilya dövme uygulanmamış numuneler için yorulma testleri, TUSAŞ tesislerinde bulunan kapasitesi 100 kN olan Rumul resonant yorulma test cihazında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Yorulma test cihazına bağlanan 3 nokta eğme fikstürü ile yaklaşık 100 Hz frekansta yapılan yorulma testlerinde gerilme oranı $R=0.1$ (çekme-çekme yükleme) olarak belirlenmiştir.

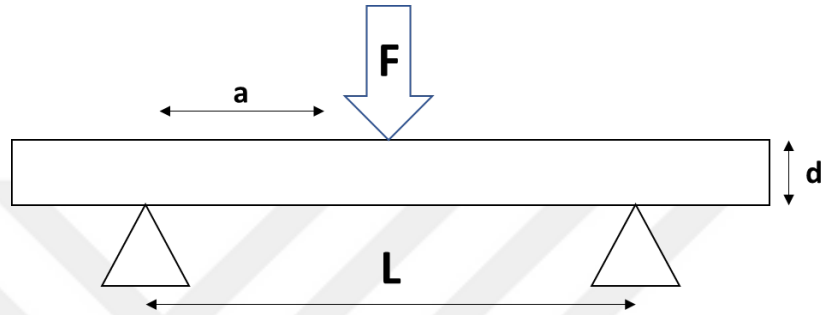
Testler icra edilirken yüklemeler kontrollü olarak uygulanmıştır. Gerilme genliği ve ortalama gerilmenin yorulma ömrü üzerindeki etkilerini sınırlamak için bu değerler test süresinde sabit tutulmuştur. Bütün numunelerin aynı şartlarda yorulma testsine tabi tutulmasına özen gösterilmiştir.

Yorulma testlerinde eksenel yüklemeli yorulma testi uygulanmamıştır. Palet piminin kullanım alanı nedeniyle eksenel gerilmeli yorulma testi yerine gerçek şartlara çok daha yakın sonuçlar verebileceği değerlendirildiğinden 3 nokta eğme yorulma testi uygulanmıştır. Eksenel yükleme ile metal yorulma davranışı hakkında genel bilgi elde edilebileceği gibi eğme testi ile malzemenin gerçek kullanım alanı kısmen simule edilebilmektedir. Kullanım alanına daha yakın bir test ortamının metal kullanım ömrü hakkında daha net bilgi sağlayacağı değerlendirilmiştir. Uygulanan 3 nokta eğme yorulma testi ile metal yüzeyinin dinamik yükleme durumunda eğme gerilmeleri karşısındaki davranışları tespit edilmeye çalışılmıştır. Böylelikle bilyalı dövmenin yüzeye doğrudan etkisi daha açık görülebileceği değerlendirilmiştir.

Yorulma testinde gerilme hesabı, denklem (4.1)'e göre yapılmıştır:

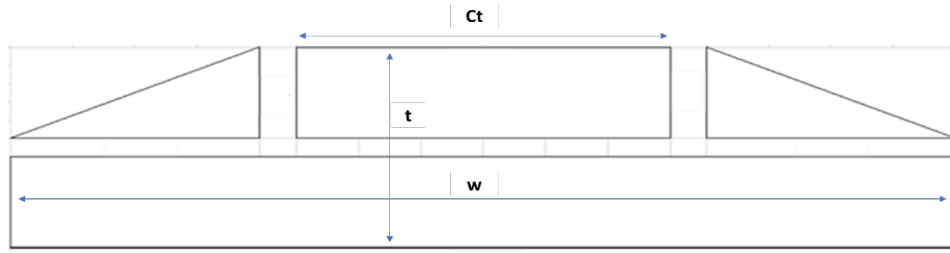
$$\sigma = \frac{P * a * z}{I} \quad (4.1)$$

(P = Basma mesnetine binen toplam yük (F), a = Alt ve üst mesnet arasındaki yatay mesafe, z = Nötral eksene olan mesafe, kesitin ağırlık merkezinin alt yüzeye olan mesafesi, I = Moment)



Şekil 4.3: 3 Nokta Eğme Düzeneği

Gerilme denkleminde bulunan I ve z değişkenleri Şekil 4.4'daki gibi numunenin geometrik şekillere bölünmesiyle hesaplanmıştır. Ölçümler her numune için ayrı ayrı yapılarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.4: Test Numunesi Geometrik Bölümleri (t = numune kalınlığı, w = numune genişliği, Ct = tavan genişliği)



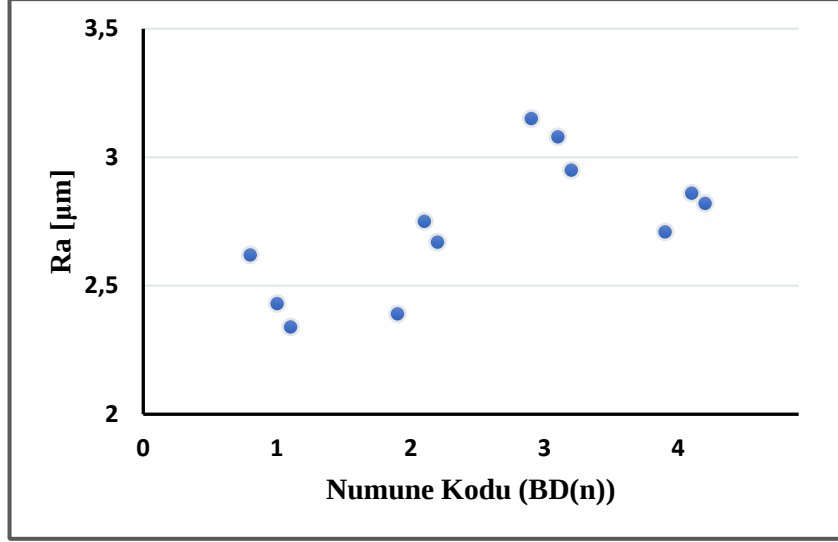
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Ölçümler sonucunda Tablo 5.1 görüldüğü gibi her numune grubu için numunelerin kendi aralarında yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür (*Ra*: aritmetik ortalama değer, *Rz*: yüzey çukuru dikey derinliği).

Tablo 5.1: Yüzey Pürüzlülüğü Parametre Değerleri

Numune Kodu	Dövme şiddeti (Almen Intensity)	Yüzey Sarma Oranı (Coverage)	Yükleme Yönüne Paralel		Yükleme Yönüne Dik	
			Ra [µm]	Rz [µm]	Ra [µm]	Rz [µm]
BD0	-	-	0,71	6,22	0,57	3,36
BD0	-	-	0,709	6,3	0,54	3,45
BD0	-	-	0,74	5,88	0,59	4,01
BD1	4-7A	%200	2,62	13,46	2,76	14,16
BD1	4-7A	%200	2,43	12,71	2,69	14,61
BD1	4-7A	%200	2,34	12,3	2,66	14,52
BD2	6-10A	%200	2,39	11,9	2,79	13,34
BD2	6-10A	%200	2,75	13,47	2,62	12,74
BD2	6-10A	%200	2,67	14,22	2,5	11,92
BD3	12-16A	%200	3,15	15,57	2,89	14,10
BD3	12-16A	%200	3,08	15,04	3,16	14,95
BD3	12-16A	%200	2,95	14,98	2,97	14,22
BD4	13-17A	%200	2,71	15,20	3,60	16,48
BD4	13-17A	%200	2,86	14,54	3,41	17,16
BD4	13-17A	%200	2,82	14,70	3,36	17,04



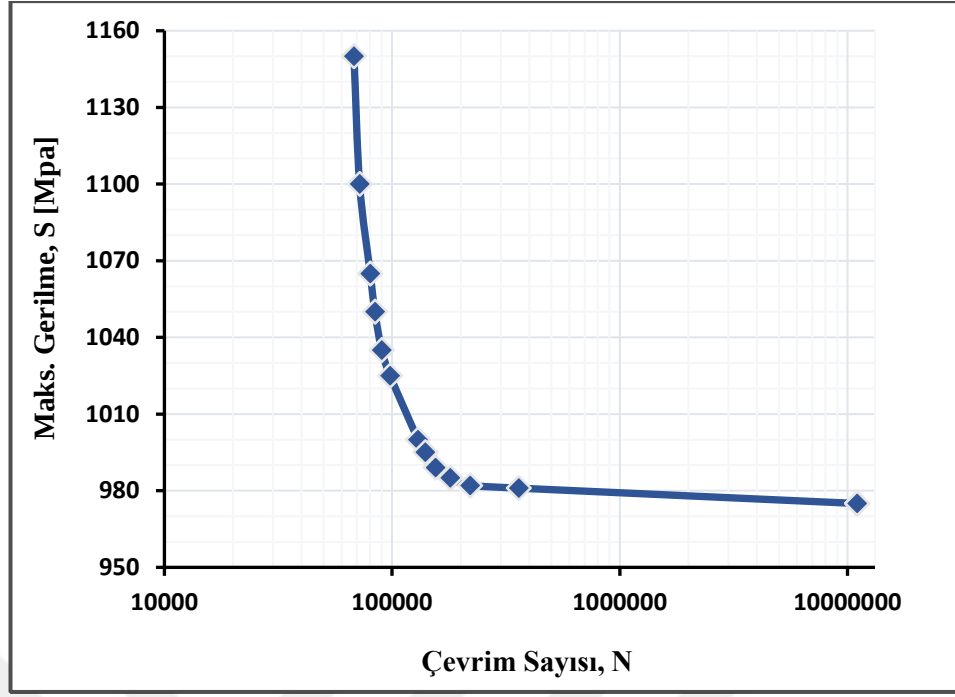
Şekil 5.1: Yüzey Pürüzlülük Dağılımı

5.2. Yorulma Testi Sonuçları ve Tartışma

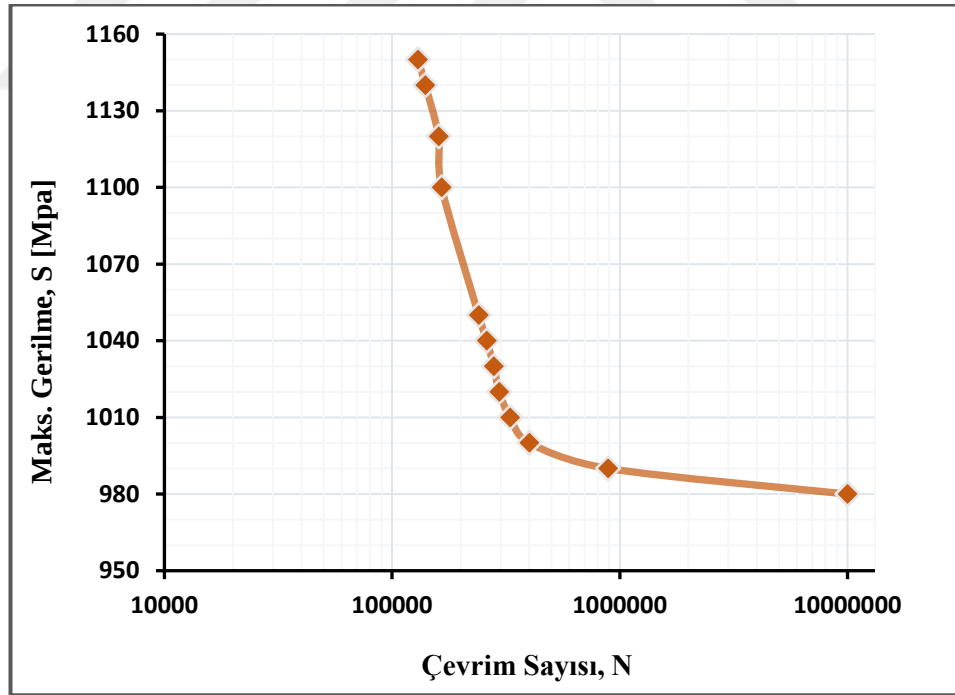
Bütün numuneler için yorulma testleri aynı ortam şartlarında uygulanmıştır. Test boyunca ortalama gerilme sabit tutulmuş ve malzemenin sabit yük altındaki yorulma davranışı görülmeye çalışılmıştır. Yorulma testleri icra edilirken kırılma başlangıcı ile birlikte testler sonlandırılmış ve kırılmanın başladığı çevrim sayısı o yüke ait ömür değeri olarak belirlenmiştir.

Bilyalı dövme uygulanmamış numunelere yönelik yorulma testlerine 900 MPa yük ile başlanmış ve bu testte numunenin sürekli mukavemet değeri olarak belirlediğimiz 10^7 çevrim sayısını geçtiği görülmüştür. Bunun üzerine yüklemeler 20'er MPa artış olacak şekilde yeniden uygulanmış ve 980 MPa yüklemeden itibaren kırılmaların başladığı gözlemlenmiştir. Ancak kırılma değerleri 1160 MPa ile 980 MPa arasında çok dar bir aralıkta gerçekleşmiştir. Aynı test şartları bilyalı dövülmüş numune grupları için de uygulanmıştır.

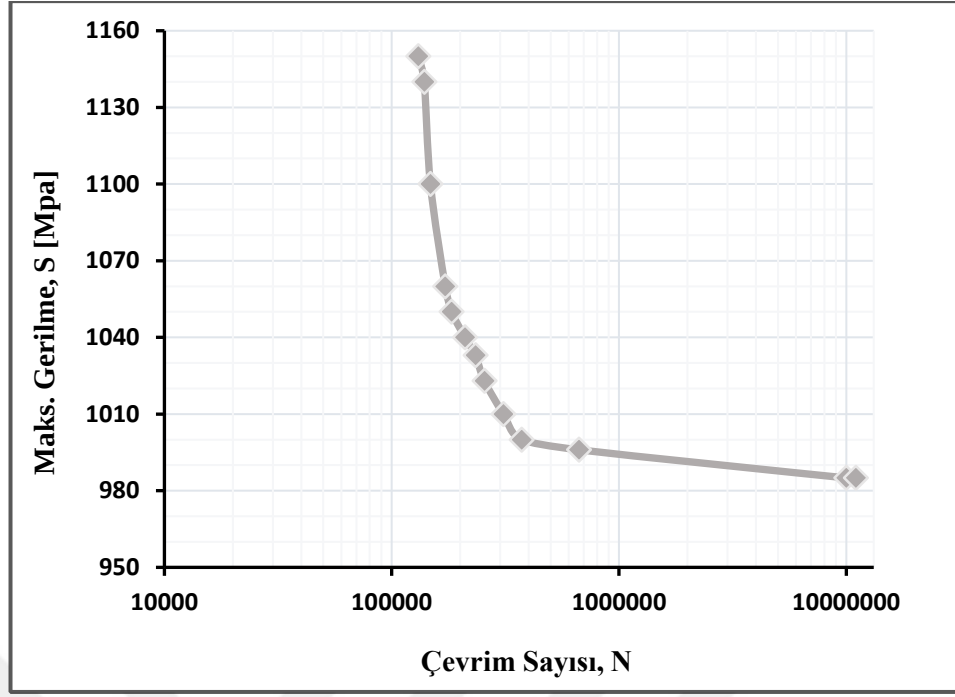
Bilyalı dövme işlemine tabi tutulan numunelerin tamamında bütün yükleme değerleri için standart duruma göre ömür değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Numune gruplarına göre elde edilen S-N grafikleri Şekil 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7'de sırasıyla gösterilmiştir. Yapılan testler sonucunda en iyi yorulma mukavemet değerlerinin 6-10A (BD2) dövme şiddetinde elde edildiği görülmüştür.



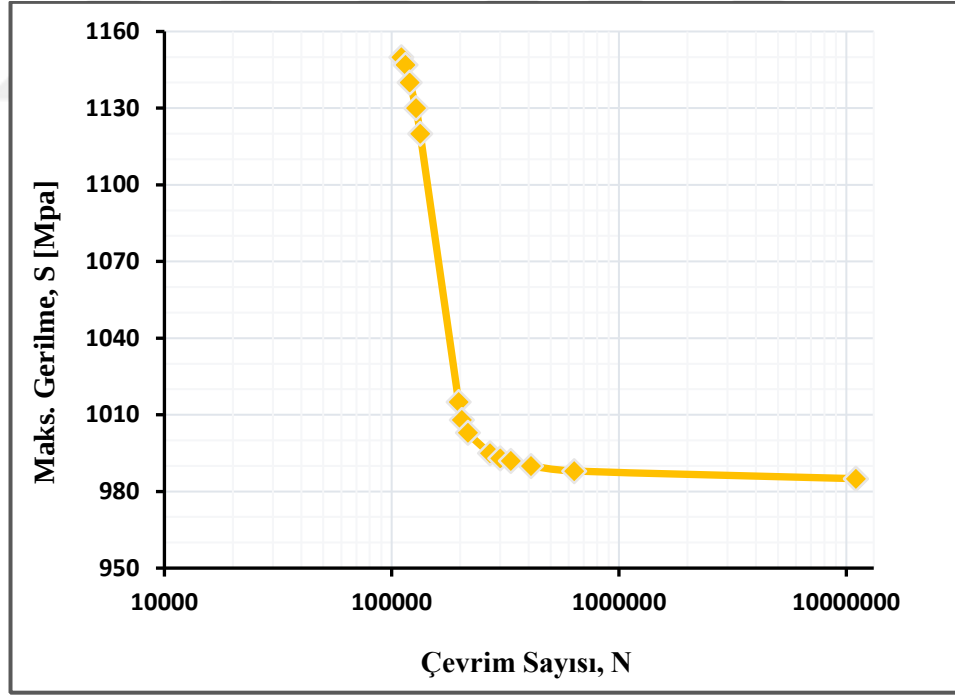
Şekil 5.2: Gerilme - Ömür Grafiği (BD0)



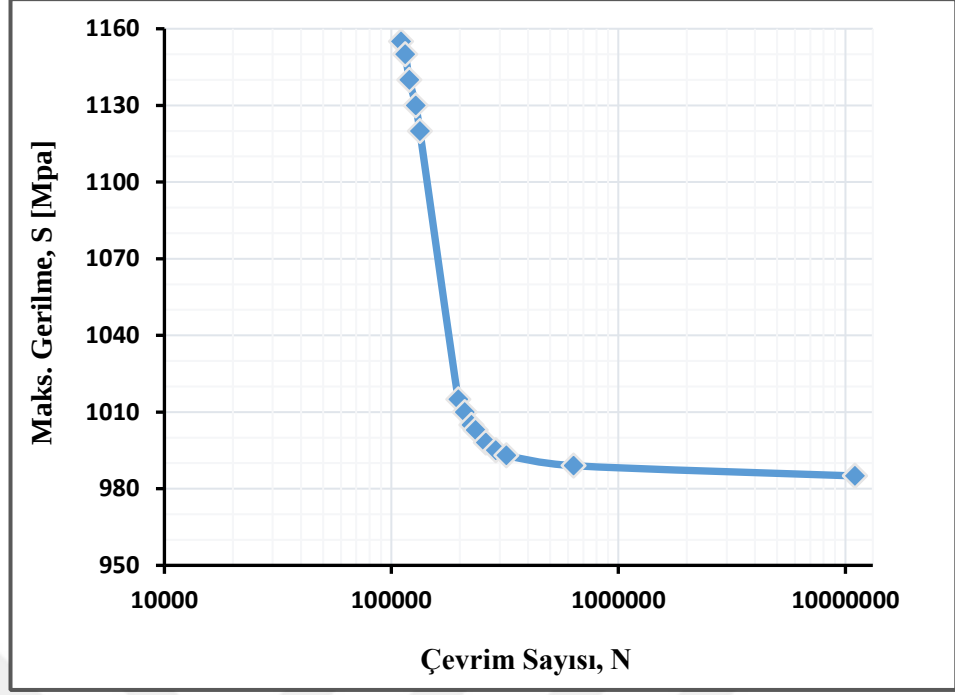
Şekil 5.3: Gerilme - Ömür Grafiği (BD1)



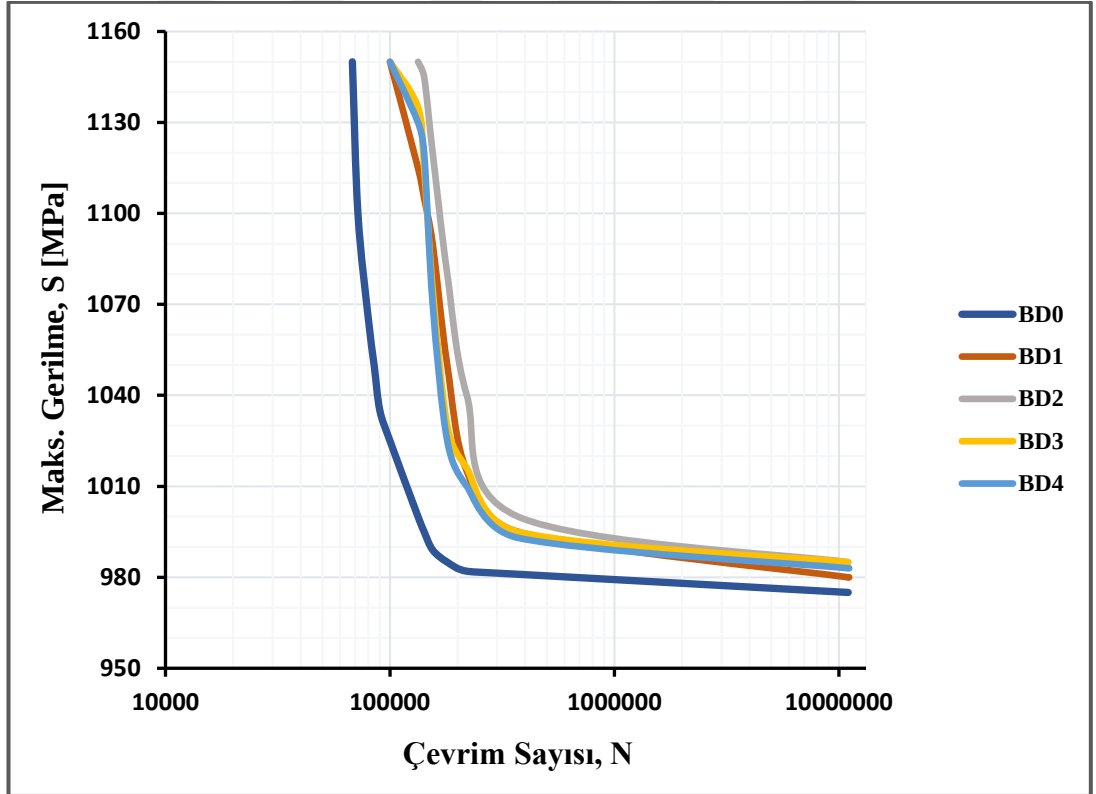
Şekil 5.4: Gerilme - Ömür Grafiği (BD2)



Şekil 5.5: Gerilme - Ömür Grafiği (BD3)

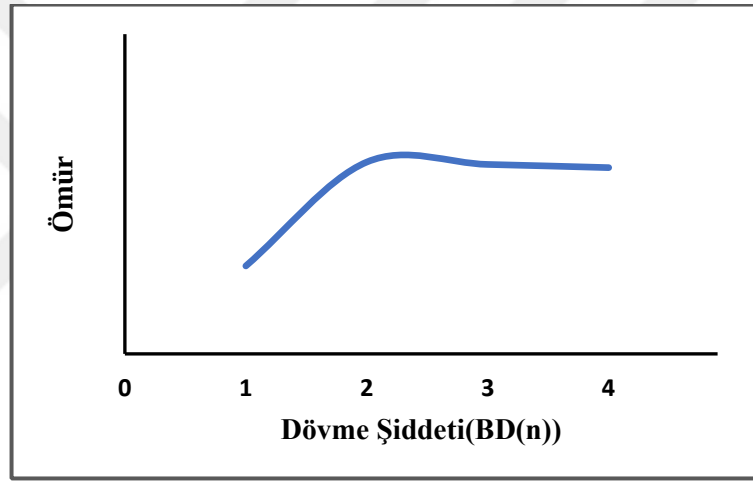


Şekil 5.6: Gerilme - Ömür Grafiği (BD4)



Şekil 5.7: Gerilme - Ömür Grafikleri Karşılaştırması

Bu çalışmada bilyalı dövme işlem parametreleri olarak belirlenen 4-7A, 6-10A, 12-16A ve 13-17A dövme şiddetlerinin genel olarak AISI 4140 çeliğinin yorulma mukavemeti üzerindeki etkisi analiz edildiğinde; 4-7A ve 6-10A dövme şiddetleri ile başlangıç durumuna göre ömür değerlerinde bir iyileşme görülmüş ancak 12-16A ve 13-17A dövme şiddeti ile başlangıç durumuna göre daha iyi mukavemet değerleri elde edilmesine rağmen daha düşük şiddetli dövme şiddetlerine göre daha az ömür artışı elde edildiği yorulma deneyler sonucunda görülmüştür. Dövme şiddetinin ömür üzerindeki etkisi sürekli artan bir profil göstermemiştir. Bir noktadan sonra sürekli iyileşme değerinde doyuma ulaşıldığından dövme şiddetinin artışının AISI 4140 çeliği üzerindeki olumsuz etkisi görülmüştür.

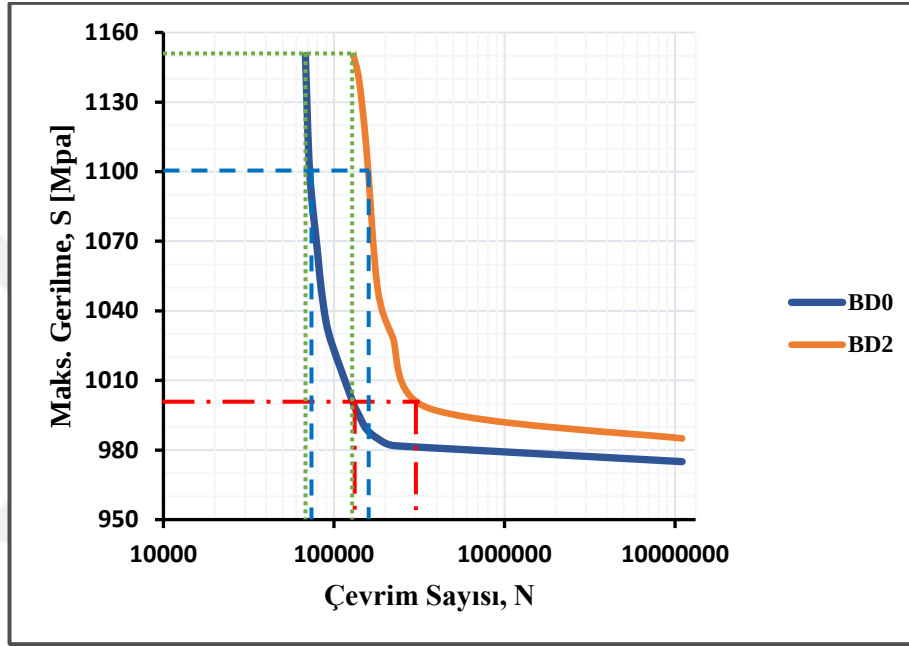


Şekil 5.8: Dövme Şiddetinin Yorulma Ömrüne Etkisi ($\sigma > 1000$ MPa)

Bu test çalışması ile dövme şiddetindeki değişimin yorulma üzerindeki etkinliğinin hissedildiği gerilme değerleri de açık olarak görülmüştür. 3 nokta eğme yorulma testleri neticesinde elde edilen S-N grafikleri incelendiğinde; dövme şiddetinin ömür değeri üzerindeki etkisi yüksek gerilme bölgelerinde (yaklaşık $\sigma > 1000$ MPa) daha açık şekilde görülmektedir. Düşük gerilme değerlerinde ise bu etki oldukça sınırlı kalmıştır.

1000 MPa gerilme değerinde bilyalı dövme uygulanmamış numuneler ile (BD0) en sonucu veren bilyalı dövme şiddeti (BD2) karşılaştırıldığında ömür değerlerinde % 180'lik bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 5.9). Ancak bu değer gerilme ile doğru orantılı bir değişim göstermemiştir. Aynı karşılaştırmayı 1100 MPa

gerilme değeri için yaptığımızda ömür değerinde %115’lik bir artış olduğu görülmüştür. 1150 MPa gerilme değerinde ise sadece %80 üzerinde ömür artışı görülmüştür. 975-985 MPa gerilme aralığında ise bütün numune grupları için birbirine çok yakın gerilme değerlerinde numunelerin sürekli mukavemet değerlerine ulaştığı görülmüştür. (çevrim sayısı 10^7). Yani, bütün dövme süreçleri için AISI 4140 çeliğinin sürekli mukavemet değerlerinde kaydadeğer bir mukavemet değeri farkı olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



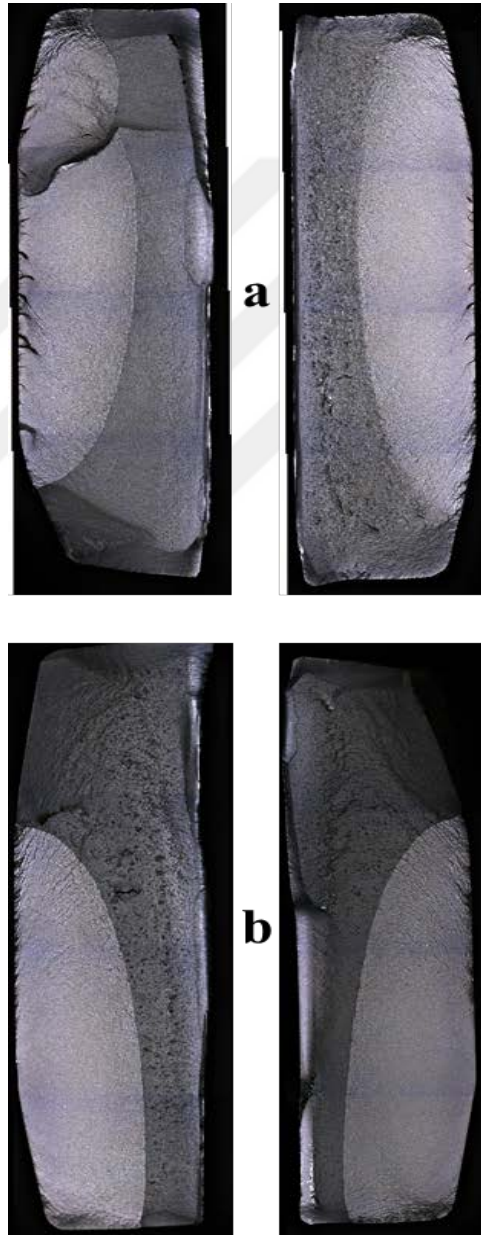
Şekil 5.9: Ömür Değişim Mukayesesi (BD0-BD2)

Testler sonucunda yüzeydeki sertlik artışı ile yine AISI 4140 çeliği için yorulma mukavemet değerinde artış olduğu görülmüştür. Numunelerin yüzeyinden alınan sertlik değerleri dikkate alındığında sertlik artışının yorulma ömrü üzerinde olumlu etki sağladığı görülmüştür (Tablo 5.2).

Tablo 5.2: Numune Yüzeyinden Alınan Sertlik Değerleri

Numune Kodu	BD0	BD1	BD2	BD3	BD4
Ortalama Yüzey Sertliği (HRC)	32,6	35,1	36,7	36,6	35,2

Şekil 5.10’da görülen, yorulma testi sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzey görüntüleri incelendiğinde; iç bölgede başlayan yorulma çatlağının ara yüzeylerinin birbirlerine sürtünmesinden dolayı kırılma yüzeyinin daha pürüzsüz, diğer kısmın ise daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Ayrıca yüksek yüke maruz kalma durumunda yorulma çatlağının başladığı bölgede kırılma yüzeyinin daha büyük (geniş), düşük yükleme durumunda ise kırılma yüzeyinin daha küçük (dar) olduğu da görülmektedir.



Şekil 5.10: Kırılma Yüzey Görüntüsü (a: 1025 MPa-90.136 çevrim, b: 981 MPa-359.392 çevrim)

Yorulma testlerinin sonuçları ile literatür araştırmasında incelenen çalışmalar karşılaştırıldığında;

- K. Dalei ve B. Karlsson tarafından yapılan çalışmada 0,25 mm A almen dövme şiddeti ve %200 yüzey sarma oranında en iyi yorulma dayanımının elde edildiği deneyler ile paralel olarak bu çalışmada en iyi gerilme – ömür grafiği 0,25 mm A ve %200 yüzey sarma oranında elde edilmiştir.
- A. Vick vd. yaptıkları çalışmada yüzeydeki sertlik değerinin yüzey pürüzlülüğündeki artışla azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada dövme şiddetinin artması ile birlikte artan yüzey pürüzlülüğü ile sertlik değerinde bir azalma olduğu ve M. Subaşı ve Ç. Karataş tarafından yapılan çalışmaya paralel olarak sertlik artışı ile yorulma dayanımının arttığı görülmüştür.
- R. Herzog tarafından yapılan çalışmada hava basıncı ve bilya akış hızının dövme şiddetinin belirlenmesinde en temel unsur olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmaya paralel olarak değişen hava basıncının bilyalı dövme parametreleri üzerindeki etkisi görülmüştür.
- A. T. Vielma vd. yaptıkları çalışmada çeliklerde dövme şiddeti ile birlikte yorulma mukavemetinin arttığı, ancak bir noktadan sonra yorulma dayanımında artış görülmediği sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada %200 yüzey sarma oranında 10A dövme şiddetinden daha yüksek dövme şiddetlerinde yorulma dayanımında artış olmadığı görülmüştür.

Metalik malzemelerin en büyük sorun alanlarından birini oluşturan ömür iyileştirme yöntemleri üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan yorulma testleri ve literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde; bu çalışmada elde edilen test verileri ile önceki çalışmalardan elde edilen verilerin benzerlikler gösterdiği görülmüştür. Yüzey iyileştirme yöntemleri gibi bilyalı dövme işleminde de nihai amaç, yüzeyde ve yüzeyden itibaren mümkün olan en fazla derinlikte kalıntı basma gerilmeli bir tabaka elde etmektir. Metallerde deformasyon ve kırılma davranışları sonradan elde edilen bu kalıntı gerilmeler yardımıyla değiştirilebilmektedir.

Yorulma testlerinde uygulanan yükün etkisi ile o yük altında malzeme tarafından hissedilen yük şiddetinin aynı olmadığı dikkate alınmalıdır. Malzemeye etkiyen

yüklerin cebirsel olarak toplanabilirliğinden yolan çıkarak üretim sonrasında yüzeye kazandırılan özellikler sayesinde uygulanan yükün tamamı malzemeye doğrudan etki etmediği görülür. Kalıntı basma gerilmelerin önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır. Yorulma testleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde; yükleme sürecinde yüzeyde kalan kalıntı gerilme miktarının sürekli azalması ve nihayetinde belli bir kritik seviyenin altına inmesi veya bazı özel durumlarda tamamen ortadan kalkması ile çatlakların ve nihai ana çatlağın oluşup, gelişmesi sonucu malzemede kırılmanın meydana geldiği söylenebilir.

Bilyalı dövme ile işleme tabi yüzeyde malzemenin tane yapısı şekilsel olarak değişerek, oldukça pekleşmekte ve mikro yapısal değişiklikler kaçınılmaz olarak gerçekleşmektedir. Sürekli yüklemeye maruz kalan malzeme yüzeyinde bilyalı dövme ile elde edilen plastik deformasyonlu sıkışmış yapının yorulma çatlağının yüzeyden oluşmasını geciktirdiği ve ilerlemesini engellediği değerlendirilmektedir. Orta ve yüksek çevrimli yorulma testlerinde bilyalı dövmenin çatlak oluşumunu yüzeyin daha da altındaki bölgelerde tetiklediği bilinmektedir. Bu yüzden yüzey pürüzlülüğünün çentik etkisi yaratmadığı ve yüzeyin hemen altında, daha zayıf olan tanelerde ve tane sınırlarında ayrışma olarak, genellikle inklüzyon veya kompleks alaşım karbürlerinin etkisiyle mikro-çatlak oluşumunun başladığı söylenebilir. Çatlağın başladığı yer en düşük mukavemet değerinin olduğu ve çatlaklar ilerledikçe bilhassa çatlak uç kısımları en yüksek gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerdir. Oluşan ve zamanla ilerleyen bu mikro çatlakların uçlarında giderek artan yük konsantrasyonu etkisinin devam etmesiyle çatlakların daha hızlı ilerlediği ve sonuçta görünen kırılmaya neden olduğu değerlendirilmektedir. Kırılma yüzeyi fotoraflarından da, işlem görmüş malzemelerde, çatlağın yüzeyin altında ve belli bir derinlikte başladığı, hem daha içeriye hem de dış yüzeye doğru yavaşça ilerlediği görülmektedir. Kırık yüzey dikkatle incelendiğinde, parçanın dış yüzeyinde görünen birbirlerine paralel dalgalı izlerin, son kopma öncesi dış yüzeyde oluşan yırtılmalar sonucu oluştuğu kanaatini kuvvetlendirmektedir (Şekil 5.9).

Dövme şiddeti; püskürtülen bilyaların sahip olduğu kinetik enerji ile doğru orantılıdır. Bilyalı dövme bir kinetik enerji aktarım sürecidir. Malzemeye aktarılan bu enerji malzeme özelliklerini iyileştirir. Yüzeyin sertlik değerinde artış görülür. Sertlik artışı ile yorulma mukavemetinin artması beklenir. Ancak bu sertlik değeri yüzeyden malzeme merkezine inildikçe azalır. Artan dövme şiddeti ile birlikte aktarılan kinetik

enerji miktarının da artması ile, AISI 4140 çeliği için özellikle 6-10A şiddetinden itibaren, sertlik değerinin bir doyum noktasından sonra artış göstermediği ve gevrek bir yapı olduğundan yorulma dayanımında sürekli artış olmadığı değerlendirilmiştir. Bu yüzden artan dövme şiddeti ile bir noktadan itibaren yüzey bütünlüğünün bozulmaya başladığı değerlendirilmektedir. Öte yandan, sertlik ile malzemenin akma dayanımı arasında bire bir orantıdan dolayı, dövme şiddetine paralel olarak akma dayanımı artmakta ve bu da doğrudan dış yüzeyde meydana gelen basma gerilme şiddetini ve derinliğini olumlu yönde etkilemektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, kalıntı gerilme değerinin artması doğrudan çatlak ilerleme hızını ve derinliğini etkilediği için yorulma ömrünü arttırmaktadır.

Dövme şiddetinin belli bir doyuma ulaşması-malzemenin aşırı pekleşmesi, akma dayanımını az da olsa düşürmekte ve bu da sonuçta yorulma ömrünü belli bir ölçüde olumsuz olarak etkileyebilmektedir.

Bilyalı dövme ile ömür artışının sağlandığı görülmüştür. Ancak bu ömür artışının malzeme sürekli mukavemet değerinde kaydadeğer bir farklılık oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Gerilme değerinin artmasıyla da ömür artışındaki fark azalmıştır. 1000 MPa gerilme değeri için en iyi ömür artışı ölçülmüştür (%180).

Sonuç olarak; bilyalı dövme işlemi birçok metalik malzeme yüzeyine uygulanabilen ve yorulma mukavemetinin geliştirilmesine çok önemli katkı sağlayan bir yüzey işlemidir. Bu çalışmada, 4 farklı dövme şiddeti uygulanmış ve 6-10A dövme şiddeti değerine sahip numunelerin en yüksek yorulma dayanımı sağladığı görülmüştür. Ayrıca artan dövme şiddetinin sürekli olarak malzeme ömrüne olumlu katkı sağlamadığı da görülmüştür. Sınırlı ömre sahip metalik malzemelerin ömrünü artırma metotları her zaman ciddi bir araştırma konusu olmuştur ve bu konuda birçok araştırma ve çalışma yapılmaya devam etmektedir. Bilyalı dövme bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur. Bilyalı dövme süreci karmaşık gibi görünmesine rağmen uygulanabilirliği yüksek olan ve yaygın kullanılan bir süreçtir. Bilyalı dövme ile ulaşmak istenen amaç en iyi şekilde önceden tespit edilebilir ve uygulamaya konulabilirse sürecin yararlarından azami derecede faydalanmak mümkün olabilir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, palet sistemine sahip askeri araçların palet baklalarını birbirine bağlamada kullanılan ve AISI 4140 çeliğinden üretilen palet pimlerinin yorulma mukavemetini artırma yöntemlerini araştırmak ve bilyalı dövmenin palet piminin yorulma mukavemetindeki etkisini incelemek ve bu pimplere uygulanabilecek en iyi bilyalı dövme sürecinin belirlenmesidir. Bu amaca ulaşmak için literatürde yaygın olarak kullanılan 4 farklı bilyalı dövme süreci belirlenmiştir. Daha sonra bu 4 farklı sürecin palet piminin yorulma ömrüne etkilerini karşılaştırmak üzere uygulanan 3 nokta eğme yorulma testleri sonucunda bütün dövme süreçlerine ait S-N grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler yardımıyla palet pimine uygulacak en iyi yorulma mukavemeti sağlayan bilyalı dövme parametresi belirlenmiştir. Testler pimlerden elde edilen numunler üzerinde yapılmıştır.

Bu testlerden elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Bilyalı dövme, AISI 4140 çeliğinin yorulma mukavemetini artırmaktadır. Palet pimi numunesi üzerinde en iyi yorulma mukavemeti sağlayan bilyalı dövme parametresi, %200 yüzey sarma oranında 6-10A dövme şiddetidir.
- Yüzey sertlik değerinin artması ile yorulma mukavemetinde artış görülmektedir.
- Artan bilyalı dövme şiddeti ile orantılı olarak yorulma ömründe sürekli artış görülmemektedir. AISI 4140 çeliği için yorulma mukavemeti 6-10A dövme şiddetinden itibaren düşmektedir.

Palet piminin yorulma performansına yönelik olarak yapılacak müteakip çalışmalarda referans olabileceği değerlendirilen öneriler aşağıdadır;

- Bilhassa takım çeliklerinde uygulanan ve hem malzeme dayanımını hem de yorulma ömrünü ciddi miktarda arttırdığı bilinen kriyojenik ısıtıl işlemin, bilyalı dövme işlemiyle uyumlu bir şekilde palet pimine uygulanması ile yorulma testleri yapılarak elde edilecek sonuçlarla kullanılan malzemenin ve pimlerin ömrüne olası olumlu katkıları, sadece bilyalı dövme uygulanmış pimlerin yorulma performansları karşılaştırılarak bir değerlendirme yapılabilir.
- Bilyalı dövme ve yorulma testlerinin bütün pim üzerinde uygulanması ile malzemenin yorulma davranışı gözlemlenebilir.
- Farklı sıcaklığa sahip ortamlarda bilyalı dövme ve yorulma testleri uygulanabilir.
- Halen indüksiyon sertleştirme tekniği kullanılan bu pimlerde, yukarıda bahsedilen, bilyalı dövme ve kriyojenik işlem katkılmasıyla son malzeme ve pim yorulma performansları da irdelenerek, en uygun kombinasyon üzerinden ileriye dönük tasarımlar yapılabilir.
- Kriyojenik ısıtıl işlem ve bilyalı dövme işlemlerinden sonra elde edilen kalıntı gerilme değerleri ölçülerek, kalıntı gerilme değerlerinin yorulma performansı üzerindeki etkisi değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- Alang, N. A., N A Razak, ve A K Miskam, “Effect of Surface Roughness on Fatigue Life of Notched Carbon Steel”, *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, c. 11 s. 1, (2011): ss. 160–163.
- Ayday, A., M. Durman, “Effect of Different Surface-Heat-Treatment Methods on the Surface Properties of AISI 4140 Steel”, *Materiali in Tehnologije*, s. 48, (2014): ss. 787–790.
- Bagherifard, S., I. Fernandez-Pariante, R. Ghelichi, M. Guagliano, “Effect of Severe Shot Peening on Microstructure and Fatigue Strength of Cast Iron”, *International Journal of Fatigue*, s. 65, (2014): ss. 64–70.
- Başaran, Ali, “Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, (2007).
- Barker, Bill, “Shot Peening Small Holes”, *Progressive Technologies*.
- , “Shotmeter: A New Tool for Evaluating Shot Peening Intensity”, *Progressive Technologies*.
- Benedetti, M., V. Fontanari, M. Bandini, D. Taylor, “Multiaxial Fatigue Resistance of Shot Peened High-Strength Aluminum Alloys”, *International Journal of Fatigue*, s. 61, (2014): ss. 271-282.
- Bhuvaraghan, Baskaran, Sivakumar M. Srinivasan, Bob Maffeo, “Optimization of the Fatigue Strength of Materials Due to Shot Peening: A Survey”, *International Journal of Structural Changes in Solids – Mechanics and Applications*, c. 2, s. 2, (2010): ss. 33-63.
- Boardman, Bruce, “Fatigue Resistance of Steels”, *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys - ASM Handbook Committee*, (1990): ss. 673-688.
- Boyer H.E., “Fague Testing”, *ASM International*, (1986).
- Çarboğa, Cemal, “Ç1010 Yapı Çeliğinde Soğuk Çekme ile Sağlanan Deformasyonun Malzemenin Yorulma Davranışına Etkisinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, (2002), s. 45.
- Dalaei, K., B. Karlsson, “Influence of Overloading on Fatigue Durability and Stability of Residual Stresses in Shot Peened Normalized Steel”, *Materials Science and*

Engineering: A, s. 528, (2011): ss. 7323–7330.

———, “Influence of Shot Peening on Fatigue Durability of Normalized Steel Subjected to Variable Amplitude Loading”, **International Journal of Fatigue**, s. 38, (2012): ss. 75–83.

Dalaei, K., B. Karlsson, L.-E. Svensson, “Stability of Shot Peening Induced Residual Stresses and Their Influence on Fatigue Lifetime”, **Materials Science and Engineering: A**, s. 528, (2011): ss. 1008-1015.

Dülek, Emrah, “Ç1020 Malzemede Bilyalı Dövme ile Oluşturulan Yüzeydeki Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma (Elektro Kimyasal) Yöntemiyle İncelenmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi (2002).

Dülek, Emrah, Çetin Karataş, Süleyman Sarıtaş, “Bilyalı Dövülmüş Ç1020 Malzemede Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi ile İncelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi**, c. 18, s. 3, (2003): ss. 107-116.

Fedoryszyn, A., T. Piosik, P. Zyzak, “Methodology of Peening Intensity Evaluation Basing on the Almen Tests”, **Archives Of Foundry Engineering**, s. 9, (2009): ss. 246–248.

Franchim, Andreza S., Valdemir S. de Campos, Dilermando N. Travessa, Carlos de Moura Neto, “Analytical Modelling for Residual Stresses Produced by Shot Peening”, **Materials and Design**, s. 30, (2009): ss. 1556–1560.

Gallitelli, Donato, Vincent Boyer, Maxime Gelineau, Yann Colaitis, Emmanuelle Rouhaud, Delphine Retraint, “Simulation of Shot Peening: From Process Parameters to Residual Stress Fields in a Structure”, **Comptes Rendus - Mecanique**, s. 344, (2016): ss. 355–374.

Guagliano, M., “Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: A Numerical Approach”, **Journal of Materials Processing Technology**, s. 110, (2001): ss. 277–286.

Hassani-Gangaraj, S. M., A. Moridi, M. Guagliano, A. Ghidini, M. Boniardi, “The Effect of Nitriding, Severe Shot Peening and Their Combination on the Fatigue Behavior and Micro-structure of a Low-alloy Steel”, **International Journal of Fatigue**, s. 62, (2014): ss. 67–76.

Herzog, R., W. Zin, H. Wohlfahrt, B. Scholtes, “The Significance of Almen Intensity for the Generation of Shot Peening Residual Stresses”, **ICSP-6**, (1996): ss. 270-281.

Holzapfel, H., V. Schulze, O. Vöhringer, E. Macherauch, “Residual Stress Relaxation in an AISI 4140 Steel Due to Quasistatic and Cyclic Loading at Higher Temperatures”, **Materials Science and Engineering: A**, s. 248, (1998): ss. 9–18.

Hozapfel, H., A. Wick, O. Voehringer, “Effect of Shot Peening Parameters on the Properties of Surface Layers in AISI 4140 in Different Heat Treatment Conditions”, **The Shot Peener**, c. 10, s. 1, (1996): ss. 6-13.

- Jhonson, Jason, Albert Whetstone, Justin Johnson, Shot Peening, **Shot Peening Poster**, (2001).
- Kesti, Ethem, “Ç-4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması”, **Yüksek Lisans Tezi**, Selçuk Üniversitesi (2009), s. 17.
- Koç, Erdem, **Makine Elemanları-I**, 2. bs. (Adana: Nobel Kitabevi, 2004).
- Kung, C. Y., M. E. Fine, “Fatigue Crack Initiation and Microcrack Growth in AISI 4140”, **Metallurgical Transactions A**, c. 9A, (1978): ss. 1679-1683.
- Liu, G., J. Lu, K. Lu, “Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening”, **Materials Science and Engineering: A**, S.286, (2000): ss. 91-95.
- Lundberg, Mattias, “Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron”, **Licentiate Thesis**, Linköping University, (2013).
- Miao, H. Y., S. Larose, C. Perron, Martin Lévesque, “An Analytical Approach to Relate Shot Peening Parameters to Almen Intensity”, **Surface & Coatings Technology**, s. 205, (2010): ss. 2055-2066.
- MIL-S-13165C Shot Peening of Metal Parts (1966) ve MIL-P-81985 Peening of Metals (1974).
- Mylonas, G. I., G. Labeas, “Numerical Modelling of Shot Peening Process and Corresponding Products: Residual Stress, Surface Roughness and Cold Work Prediction”, **Surface and Coatings Technology**, s. 205, (2011): ss. 4480-4494.
- Niku-Lari, A., “An overview of Shot Peening”, **Intl. Conf. on Shot Peening and Blast Cleaning**, (1996): ss. 1-25
- Özdemir, A.T., “Experimental assessment of the redistribution of 3D residual stresses during early fatigue at split-sleeve cold expanded reamed A/C fastener holes, Scientia Iranica B, s. 25, (2018): ss. 1153-1168.
- Prevéy, P. S., J. T. Cammett, “The Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress, Cold Work and Fatigue in a Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel”, **8th International Conference on Shot Peening**, (2002): ss. 1-7.
- SAE Manual on Shot Peening 2001 Edition, **Surface Enhancement Division of the SAE Fatigue Design and Evaluation Committee**, SAE HS-84, (2001).
- SAE Specification - Shot Peening of Metal Parts, Aerospace Material Specification, AMS-S-13165, **SAE International**, USA, 1997.
- SAE Standard J443, Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip, **SAE International**, 2003.

- SAE Standard J442, Test strip, Holder and Gage for Shot Peening, **SAE International**, 2008.
- Sherafatnia, K., G. H. Farrahi, A. H. Mahmoudi, A. Ghasemi, “Experimental Measurement and Analytical Determination of Shot Peening Residual Stresses Considering Friction and Real Unloading Behavior”, **Materials Science and Engineering: A**, s. 657, (2016): ss. 309–321.
- Śledź, M., Ł. Bąk, F. Stachowicz, W. Zielecki, “Analysis of the Effect of Shot Peening on Mechanical Properties of Steel Sheets Used as Screener Sieve Materials”, **Journal of Physics: Conference Series - 451**, (2013).
- Smallman, R. E., R. J. Bishop, "Modern Physical Metallurgy ve Materials Engineering", 6. bs. (Oxford: Butterworth-Heinemann,1999).
- Subaşı, Mehmet, Fırat Kafkas, Çetin Karataş, “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik ve Kalıntı Gerilme İlişkisi”, **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, (2010): ss. 211-220.
- , “AISI 4140 Çeliğinde Elde Edilen Farklı Sertliklerin Kalıntı Gerilmeler Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, **Politeknik Dergisi - Journal of Polytechnic**, c. 14, s. 4, (2011): ss. 289-295.
- , “AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi”, **K.S.Ü. Mühendislik Bilimleri Dergisi**, s. 13, (2010).
- Torres, M. A. S., H. J. C. Voorwald, “An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel”, **International Journal of Fatigue**, s. 24, (2002): ss. 877–886.
- Trško, Libor, Otakar Bokůvka, František Nový, Mario Guagliano, “Effect of Severe Shot Peening on Ultra-High-Cycle Fatigue of a Low-alloy Steel”, **Materials and Design**, s. 57, (2014): ss. 103–113.
- Ünal, Okan, “Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, (2011), s. 6.
- , "Optimization of Shot Peening Parameters by Response Surface Methodology", **Surface & Coatings Technology**, (2016).
- Ünal, Okan, Remzi Varol, “Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected to Severe Shot Peening”, **Applied Surface Science**, s. 290, (2014): ss. 40-47.
- Ünal Okan, "Optimization of Shot Peening Parameters by Response Surface Methodology", **Surface & Coatings Technology**, (2016).
- Vielma, A. T., V. Llaneza, F. J. Belzunce, “Shot Peening Intensity Optimization to Increase the Fatigue Life af a Quenched and Tempered Structural Steel”, **Procedia Engineering**, s. 74, (2014): ss. 273-278.

- Wallace, J. F., A. M. Said, “Improvement in the Fatigue Behavior of Tank Track Pins”, **U.S. Army Tank-Automotive Command Research and Development Center**, (1985).
- Wang, Shengping, Yongjun Li, Mei Yao, Renzhi Wang, “Compressive residual stress Introduced by Shot Peening”, **Journal of Materials Processing Technology**, s. 73, (1998): ss. 64–73.
- What is Shot Peening, Progressive Surface, <https://www.progressivesurface.com/shotpeening/process.htm> [Erişim Tarihi: 11.11.2018].
- Wick, A., V. Schulze, O. Vöhringer, “Effects of Warm peening on Fatigue Life and Relaxation Behaviour of Residual Stresses in AISI 4140 Steel”, **Materials Science and Engineering A**, s. 293, (2000): ss. 191–197.
- Wick, A., H. Holzapfel, V. Schulze, O. Vohringer, “Effect of Shot Peening Parameters on the Surface Characteristics of Differently Heat Treated AISI 4140”, **Icsp-7**, (2011): ss. 42-53.
- Yılmaz, Selim Sarper, Bekir Sadık Ünlü, Remzi Varol, “Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Mekanik Özelliklere Etkisi”, **C.B.Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi**, c. 2, s. 8, (2007).



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet YALÇINKAYA
Doğum Yeri ve Tarihi : KIRIKKALE / 1984
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu :

Lise : Işıklar Askeri Lisesi BURSA 1998 - 2002
Lisans : Kara Harp Okulu ANKARA 2002 – 2006

Çalıştığı Birlikler :

Topçu ve Füze Okulu	Polatlı / ANKARA	2006 – 2007
18'inci Mknz.P.Tugayı	Gelibolu / ÇANAKKALE	2007 – 2010
106'ncı Topçu Alayı	İslahiye / GAZİANTEP	2010 – 2013
39'uncu Topçu Alayı	KKTC	2013 – 2015
KHO SAVBEN	ANKARA	2015 – 2016
Gnkur.İstihbarat Başkanlığı	ANKARA	2016 – 2018
K.K.Tayin Daire Başkanlığı	ANKARA	2018 -