

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

**BİLYALI DÖVME PARAMETRELERİNİN 17-4 PH
(AISI 630) H1150 MALZEMESİNİN DÜŞÜK
ÇEVİRİMLİ YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**RAMAZAN MERAL
2181001**

TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. AHMET ÖZDEMİR

**ANKARA
AĞUSTOS 2024**

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

**BİLYALI DÖVME PARAMETRELERİNİN 17-4 PH
(AISI 630) H1150 MALZEMESİNİN DÜŞÜK
ÇEVİRİMLİ YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**RAMAZAN MERAL
2181001**

TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. AHMET ÖZDEMİR

**ANKARA
AĞUSTOS 2024**

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve ç) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 79 sayfalık kısmına ilişkin, 04/09/2024 tarihinde şahsım tarafından 'Turnitin' adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Ramazan MERAL
04.09.2024

ETİK BEYAN

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; 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 çalışmasında 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.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Türk Silahlı Kuvvetleri, Kara Kuvvetleri Komutanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Ramazan MERAL
04.09.2024



Aziz Türk Milletinin Kahraman Şehit ve Gazilerine...

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, bilyalı dövme parametrelerinin 17-4 PH (AISI 630) H1150 malzemenin düşük çevrimli yorulma ömrü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Tez hazırlık süresince ilgi ve bilgisini esirgemeyen, tecrübe ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Bilyalı dövme prosesinin icra edilmesiyle birlikte, teknik bilgi ve birikimleriyle destek verip yol gösteren TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. çalışanlarına teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Malzemeyi temin eden, numuneleri ürettiren, ısıl işlemlerini yaptıran ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen babam Nazir MERAL'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

KHO Makine Mühendisliği laboratuvarında yapılan testlerde desteklerinden ötürü Doç. Alb. Ayhan AYTAÇ ve teknik personele, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında yapılan testlerde desteklerini esirgemedikleri için Öğr. Gör. Ömer ŞAHİN ve Arş. Gör. Uğur ÖZDEMİR'e ayrıca teşekkür ederim.

Tez yazısının redaksiyonunda destek veren kardeşim Mukaddem MERAL'in yardımları için müteşekkirim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan, sabır ve anlayış gösteren, dualarını esirgemeyen kıymetli annem ve eşime sonsuz teşekkür ederim.

Ankara, Ağustos 2024

Ramazan MERAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZGÜNLÜK RAPORU	
ETİK BEYAN	
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
ÖZ	xiv
İNGİLİZCE ÖZ (<i>ABSTRACT</i>)	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Bilyalı Dövme	4
2.2 Yorulma	11
2.2.1 Çatlak Başlangıcı ve İlerlemesi	11
2.2.2 Gerilme Temelli Ömür Metodu (Stress Life)	15
2.2.2.1 Kuvvet Kontrollü Yorulma Testleri	20
2.2.3 Şekil Değişirme Temelli Ömür Metodu (Strain Life)	21
2.2.3.1 Gerinim Kontrollü Yorulma Testleri	24
2.3 Literatürdeki İlgili Çalışmalar	25
2.3.1 Bilyalı Dövmenin Oluşturduğu Kalıntı Gerilme ve İlgili Çalışmalar	25
2.3.2 Bilyalı Dövmenin Mikroyapıya Etkileri ve İlgili Çalışmalar	30
2.3.3 Bilyalı Dövmenin Yorulmaya Etkisi ile İlgili Çalışmalar	34
2.3.4 Bilyalı Dövmenin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisi ile İlgili Çalışmalar	37
3. MALZEME VE METOT	40
3.1 Malzeme Seçimi	40
3.2 Malzeme Temini ve Test Numunelerinin İmalatı	42
3.3 Bilyalı Dövme Parametrelerinin Belirlenmesi ve Bilyalı Dövmenin Uygulanması	46
3.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	49
3.5 Düşük Çevrimli Yorulma Testleri	50
3.6 Metalografik Numune Hazırlama	51

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	53
4.1 Yorulma Testi Sonuçları	53
4.2 Taguchi Metodu	62
4.3 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	63
4.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	64
4.5 Kopma Yüzeyleri	67
4.6 Mikroyapı	72
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	76
KAYNAKÇA	79
ÖZGEÇMİŞ	83



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 : Bilya Tipleri, Standartları ve Kullanım Alanları.	6
Tablo 2.2 : Farklı Oranlarda Bilyalı Dövmeye Uygulanan Düşük Alaşımli Çeliğın Yüzey Pürüzlülük Değerleri.	31
Tablo 3.1 : 17-4 PH Malzemenin Farklı Standartlardaki Gösterimi.	41
Tablo 3.2 : 17-4 PH Kimyasal Kompozisyonu.	41
Tablo 3.3 : 17-4 PH Malzemenin Isıl İşlemleri.	42
Tablo 3.4 : 17-4 PH Malzemenin Farklı Koşullardaki Tipik Mekanik Özellikleri.	42
Tablo 3.5 : Bilyalı Dövmeye Parametreleri ve Üretilen Numune Sayısı.	46
Tablo 3.6 : Düşük Çevrimli Yorulma Testi Parametreleri.	50
Tablo 4.1 : Numunelerin Düşük Çevrimli Yorulma Ömürleri.	57
Tablo 4.2 : Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri.	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 : Bilyalı Dövme Uygulanan Kanatçık Parçaları.	4
Şekil 2.2 : Bilyalı Dövme İşlemi ve Kalıntı Gerilmenin Şematik Gösterimi.	5
Şekil 2.3 : SAE J442 Standardına Göre Almen Şerit Çeşitleri ve Milimetre Cinsinden Ölçüleri.	7
Şekil 2.4 : SAE J442 Standardına Göre Almen Şerit Tutucu ve Ölçüleri.	8
Şekil 2.5 : Tutucuya Sabitlenmiş Almen Şeride Bilyalı Dövme Uygulanması Gösterimi.	8
Şekil 2.6 : Farklı Sürelerde Bilyalı Dövme Uygulanmış Almen Plaklarda Oluşan Yay Formu ve Yoğunluğu İfade Eden Ölçünün Gösterimi.	9
Şekil 2.7 : Almen Ölçüm Cihazı (Almen Gage).	10
Şekil 2.8 : Bilyalı Dövme Oranı ve Negatif Resimlerinin Gösterimi.	10
Şekil 2.9 : Yorulma Hasarının Üç Farklı Aşamasının Kırılan Bir Türbin Şaftı Üzerinden Gösterimi.	12
Şekil 2.10 : Farklı Yükleme ve Çeşitli Çentik Durumundaki Parçalarda Yorulma Hasarı Gösterimi.	13
Şekil 2.11 : Yorulma Limiti Gösteren(üst) ve Göstermeyen(alt) İki Farklı Malzeme İçin Çevrim Sayısı-Gerilme Genliği Grafiği (S-N Diyagramı).	14
Şekil 2.12 : LCF, HCF ve Sonsuz Ömür Bölgesinin S-N Grafiği Üzerinde Gösterimi.	15
Şekil 2.13 : Sürekli Değişken Genel (üst), Tekrarlı (orta) ve Tam Değişken (alt) Yükleme Grafikleri.	16
Şekil 2.14 : Rastgele Gerilmeyi Gösteren Örnek Bir Grafik.	17
Şekil 2.15 : Goodman-Haigh Diyagramı.	19
Şekil 2.16 : Gerilme Oranlarının da Çizildiği Goodman-Haigh Diyagramı.	19
Şekil 2.17 : Basma Gerilmesi Bölgesini de İçeren Goodman-Haigh Diyagramı.	20
Şekil 2.18 : Şekil Değişirme Ömür Yaklaşımı Konsepti.	21
Şekil 2.19 : Döngüsel Girdi Değişimine Göre Farklı Modlardaki Malzeme Tepkisi.	22
Şekil 2.20 : A-516 Gr. 70 Çeliğinin Gerinim Kontrollü Tam Değişken Yük Altındaki Gerilme-Gerinim Tepki Histerezis Döngüsü.	23
Şekil 2.21 : Polisaj Yapılmış, İmal Edildiği Gibi Bırakılmış ve Farklı Medya Tipleriyle Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Kalıntı Gerilme Sonuçları.	25

Şekil 2.22 : Farklı Medya Tipleriyle Bilyalı Dövme Uygulanmış Numuneler ve İşlem Yapılmamış Numuneden Alınan Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.	26
Şekil 2.23 : Farklı Bilyalı Dövme Oranlarında Bilyalı Dövme Yapılan Düşük Alaşımli Çeliğin Yüzeyinde Kalıntı Gerilme Gösterimi.	27
Şekil 2.24 : Farklı Bilyalı Dövme Oranlarında Bilyalı Dövme Uygulanan Düşük Alaşımli Çeliğin Yüzeyinden Alınan Mikrosertlik Ölçümleri.	27
Şekil 2.25 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzeyinden Alınan Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları.	28
Şekil 2.26 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzeyinden Alınan Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.	29
Şekil 2.27 : Farklı Yoğunluklarda Bilyalı Dövme Uygulanmış ve Tavlanmış Numunelerden Alınan Kalıntı Gerilme Ölçümü Sonuçları.	30
Şekil 2.28 : Farklı Oranlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzey Bölgesi Tane Yapısı.	31
Şekil 2.29 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzey Bölgesindeki Dislokasyon Yoğunluğu.	32
Şekil 2.30 : Tek Bilya (a), İki Bilya (b), Üç Bilya (c) Çarpan Bölge ile 20 Dakika Boyunca (d) İşlem Yapılan Bölgedeki Mikroyapı Gösterimi.	33
Şekil 2.31 : Tek Bilya (a), İki Bilya (b), Üç Bilya (c) Çarpan Bölgelerdeki İkizlenme Gösterimi.	33
Şekil 2.32 : Farklı Yoğunluklarda Bilyalı Dövme Uygulanmış ve Tavlanmış Numunelerin S-N Grafikleri.	34
Şekil 2.33 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin 700 MPa (Üst) ve 630 MPa (Alt) Gerilme Değerlerindeki Yorulma Ömürleri.	35
Şekil 2.34 : Farklı Oranlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin 700 MPa (Üst) ve 630 MPa (Alt) Gerilme Değerlerindeki Yorulma Ömürleri.	36
Şekil 2.35 : Farklı Yoğunluklarda Bilyalı Dövme Uygulanmış ve İşlem Yapılmamış Numunelerin S-N Grafikleri.	37
Şekil 2.36 : Bilyalı Dövmenin Akma ve Çekme Gerilmesiyle Yüzde Uzamaya Etkisinin Gösterimi.	38
Şekil 2.37 : Bilyalı Dövmenin Çekme Özelliklerindeki Etkilerini Gösteren Grafikler (30HGSA Solda, 1.4301 Sağda).	39
Şekil 3.1 : Isıl İşlem İçin Firmayla Paylaşılan Doküman.	43
Şekil 3.2 : Uygulama Yapılan Ipsen Marka Isıl İşlem Fırını.	44
Şekil 3.3 : Isıl İşlem Sonrası Parçalardan Birinin Görseli.	44
Şekil 3.4 : Talaşlı İmalat İçin Firma ile Paylaşılan Teknik Resim.	45
Şekil 3.5 : Üretimi Yapılmış Numunelerden Birkaç Adedinin Görseli.	46

Şekil 3.6 : Bilyalı Dövme Uygulanan Numune Gruplarının Görselleri.	49
Şekil 3.7 : Düşük Çevrimli Yorulma Testi Yapılan Bir Numune.	51
Şekil 3.8 : Zımparalama ve Parlatma İşlemlerinin Yapıldığı Cihaz (Solda) ile Dağlama İşlemleri Yapılmış Numuneler (Sağda).	52
Şekil 4.1 : 1 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	53
Şekil 4.2 : 2 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	54
Şekil 4.3 : 3 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	54
Şekil 4.4 : 4 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	54
Şekil 4.5 : 5 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	55
Şekil 4.6 : 6 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	55
Şekil 4.7 : 7 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	55
Şekil 4.8 : 8 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	56
Şekil 4.9 : 9 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.	56
Şekil 4.10 : Bütün Numunelerin Yorulma Ömürlerini Gösteren Karşılaştırmalı Grafik.	58
Şekil 4.11 : %100 Bilyalı Dövme Oranlarında 3A, 4,5A ve 6A Yoğunlukta Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.	58
Şekil 4.12 : %200 Bilyalı Dövme Oranlarında 3A, 4,5A ve 6A Yoğunlukta Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.	59
Şekil 4.13 : %300 Bilyalı Dövme Oranlarında 3A, 4,5A ve 6A Yoğunlukta Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.	59
Şekil 4.14 : 3A Bilyalı Dövme Yoğunluğunda %100, %200 ve %300 Bilyalı Dövme Oranında İşlem Yapılmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.	60
Şekil 4.15 : 4,5A Bilyalı Dövme Yoğunluğunda %100, %200 ve %300 Bilyalı Dövme Oranında İşlem Yapılmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.	60
Şekil 4.16 : 6A Bilyalı Dövme Yoğunluğunda %100, %200 ve %300 Bilyalı Dövme Oranında İşlem Yapılmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.	61
Şekil 4.17 : En Fazla Yorulma Ömrü İçin Parametrelerin Etkileri Grafiği.	62
Şekil 4.18 : Mikrosertlik Ölçümlerinin Yapıldığı Cihaz (Qness Q30M).	63
Şekil 4.19 : 5, 9 ve 10 Numaralı Numune Gruplarından Alınan Mikrosertlik Ölçümlerinin Kıyaslanması.	63
Şekil 4.20 : Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.	64
Şekil 4.21 : Ra Cinsinden Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Grafikte Gösterimi.	65
Şekil 4.22 : Numunelerin R_a Cinsinde Yüzey Pürüzlülüğüne Karşılık Yorulma Ömrü Grafiği.	66

Şekil 4.23 : Numunelerin R_z Cinsinde Yüzey Pürüzlülüğüne Karşılık Yorulma Ömrü Grafiği.	66
Şekil 4.24 : Numunelerin Kopma Bölgelerinin Fotoğrafları.	69
Şekil 4.25 : Fotoğrafların Çekildiği Mikroskop (Leica M205 C).	70
Şekil 4.26 : 10 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Kopan Yüzeyinin Fotoğrafı. Yorulma Başlangıcı (1) ve Çatlak İlerlemesi (2) Görülebilmektedir..	71
Şekil 4.27 : 5 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Kopan Yüzeyinin Fotoğrafı. Yorulma Başlangıcı (1) ve Çatlak İlerlemesi (2) Görülebilmektedir.	71
Şekil 4.28 : 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Kopan Yüzeyinin Fotoğrafı. Solda Yorulma Başlangıcı (1) ve Sağda Çatlak İlerlemesi (2) Görülebilmektedir.	72
Şekil 4.29 : Mikroyapı Görsellerinin Alındığı Ters Mikroskop (Leica DMI 5000M).	72
Şekil 4.30 : 10 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Merkez (Solda) ve Yüzeye Yakın Bölgeden (Sağda) Alınan Mikroyapı Görselleri.	73
Şekil 4.31 : 5 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Merkez (Solda), Yüzeye Yakın Bölge (Sağda) ve Ara Bölgeden (Altta) Alınan Mikroyapı Görselleri.	73
Şekil 4.32 : 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Merkez (Solda), Yüzeye Yakın Bölge (Sağda) ve Ara Bölgeden (Altta) Alınan Mikroyapı Görselleri.	74
Şekil 4.33 : Soldan Sağa 10, 5 ve 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunelerin Yüzeye Yakın Bölgedeki Mikroyapı Görselleri.	75
Şekil 4.34 : Soldan Sağa 10, 5 ve 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunelerin Yüzey Altı Ara Bölgedeki Mikroyapı Görselleri.	75

SEMBOL LİSTESİ

σ	: Gerilme
σ_a	: Gerilme Genliğini
σ_m	: Ortalama Gerilme (Mean Stress)
σ_r	: Gerilme Aralığı (Stress Range)
σ_e	: Yorulma Dayanımı
σ_u	: Çekme Dayanımı
σ_y	: Akma Dayanımı
ϵ	: Gerinim (Birim Şekil Değişirme)
A	: Bilyalı Dövme Yoğunluğu
E_{NT}	: Çekme Elastiklik Modülü
E_{NC}	: Basma Elastiklik Modülü
F	: Kuvvet
N	: Çevrim Sayısı
\emptyset	: Çap Simgesi
Q_N	: Çekme Elastiklik Modülünün Basma Elastiklik Modülüne Oranı
R	: Yük Oranı
R_a	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
R_z	: En Yüksek Pürüz Yüksekliğinin Ortalaması
R_q	: Kuadratik Ortalama Pürüzlülük
mm	: Milimetre
μm	: Mikrometre
$^{\circ}C$: Santigrat Derece
t	: Zaman
XRD	: X-Işını Difraktometresi
HV	: Vickers Sertliği
HRC	: Rockwell Sertliği
$OP-S$: Oksit Parlatma Solüsyonu

KISALTMALAR

- AMS** : Aerospace Material Specification (Havacılı Malzeme Spesifikasyonu)
- ASH** : Yüksek Sertlikte Dökme Demir Bilya
- ASM** : American Society for Metals (Amerika Metaller Derneği)
- ASTM** : American Society for Testing and Materials International (Amerikan Uluslararası Malzeme ve Deney Derneği)
- CW** : Cut Wire (Kesme Tel)
- HCF** : High Cycle Fatigue (Yüksek Çevrimli Yorulma)
- HRC** : Hardness Rockwell C (Rockwell C Sertliği)
- HV** : Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
- LCF** : Low Cycle Fatigue (Düşük Çevrimli Yorulma)
- PH** : Precipitation Hardening (Çökeltme Sertleşmesi)
- SAE** : Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Derneği)
- OP-S** : Oxide Polish Suspensions (Oksit Parlatma Solüsyonu)

ÖZ

Bilyalı Dövme Parametrelerinin 17-4 PH (AISI 630) H1150 Malzemesinin Düşük Çevrimli Yorulma Ömrüne Etkisinin Araştırılması

Ramazan MERAL

Millî Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü

Ankara, Ağustos 2024

Bu çalışmada, savunma sanayisinde yaygın olarak tercih edilen 17-4 PH H1150 paslanmaz çelik malzemeden üretilen numunelere bilyalı dövme işlemi uygulanarak bu parametrelerin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkileri deneysel olarak incelenmiştir. 17-4 PH “Contidion A” olarak temin edilen malzeme, H1150 kondisyonuna getirilecek şekilde ısıl işleme tabi tutulmuş, numuneler dokuz farklı gruba ayrılarak 3A, 4,5 A, 6A yoğunluklarda ve %100, %200, %300 oranlarında bilyalı dövme maruz bırakılmıştır. Numune gruplarına ASTM E606’ya göre gerinim kontrollü düşük çevrimli yorulma testleri yapılmış, yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, üç farklı gruptan alınan numunelerin mikroyapısı incelenmiş, mikrosertlik ölçümleri elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Bilyalı dövmenin düşük çevrimli yorulma ömrünü; dövme yapılmamış numuneye göre 3A yoğunlukta, %100, %200 ve %300 dövme oranları şartlarında sırasıyla %13,7, %44,6 ve %93,1; 4,5A yoğunlukta, %100, %200 ve %300 dövme oranı şartlarında sırasıyla %18,4, %75,2 ve %89,2; 6A yoğunlukta, %100, %200 ve %300 dövme oranı şartlarında sırasıyla %36,3, %62,3 ve %62,8 arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Taguchi deney tasarımına göre bilyalı dövme oranının bilyalı dövme yoğunluğuna nazaran yorulma ömrü üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görülmüş ve bilyalı dövme işleminin mikroyapıda iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bilyalı dövme, Düşük çevrimli yorulma, 17-4 PH, Taguchi

Bilim Kodu : 91443

Sayfa Sayısı : 81

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

ABSTRACT

Investigation of the Effect of Shot Peening Parameters on Low Cycle Fatigue Life of 17-4 PH (AISI 630) H1150 Material

Ramazan MERAL

Turkish National Defence University, Alparslan Defense Sciences and National Security Institute

Ankara, Aug 2024

In this study, the effects of shot peening parameters on low-cycle fatigue life were experimentally investigated using 17-4 PH H1150 stainless steel, widely used in the defense industry. The material, initially supplied in 'Condition A,' was heat treated to reach H1150. Samples were divided into nine groups and shot peened at intensities of 3A, 4.5A, and 6A with 100%, 200%, and 300% coverage. Strain-controlled low cycle fatigue tests were conducted on the sample groups according to ASTM E606, surface roughness measurements were taken, the microstructure of samples from three different groups was examined, and microhardness measurements were obtained and commented. According to the study, it was determined that shot peening increased the low-cycle fatigue life, compared to the unpeened sample, by 13.7%, 44.6%, and 93.1% under 100%, 200%, and 300% coverage, respectively at a 3A intensity; by 18.4%, 75.2%, and 89.2% under 100%, 200%, and 300% coverage, respectively at a 4.5A intensity; and by 36.3%, 62.3%, and 62.8% under 100%, 200%, and 300% coverage, respectively at a 6A intensity. Additionally, according to the Taguchi experimental design, it was observed that the shot peening coverage has a greater effect on fatigue life compared to the shot peening intensity, and it was determined that the shot peening process led to improvements in the microstructure.

Keywords: Shot peening, Low cycle fatigue, LCF, 17-4 PH, Taguchi

Science Code : 91443

Pages : 81

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

1. GİRİŞ

Malzeme yüzeyinin talaş kaldırılmadan işlenmesinde tercih edilen önemli bir yöntem olarak bilyalı dövme; çelik, dökme demir, cam, seramik gibi çeşitli malzemelerden yapılabilen bilyaların, yeterli kinetik enerji ile iş parçası yüzeyine çarptırılması işlemine denmektedir (Scholtes & Voehringer, 2001). Bu işlem, parça yüzeyinde girintiler oluşturan, parça yüzeyinin plastik deformasyona uğrayıp sertleşmesini sağlayan sayısız küçük çekiç darbelerine eş değerdir (Leghorn, 1957).

Bilindiği üzere basma gerilmesi olan yüzeyde, çatlak başlangıcı ve ilerlemesi gerçekleşmemektedir. Yorulma sonucu oluşan kırılmaların neredeyse tamamı parçanın yüzeyinden başladığından, bilyalı dövme ile oluşturulan basma gerilmesi tabakası, parça ömrünü önemli ölçüde arttırmaktadır (Champaigne J. , 2001) .

Bununla birlikte bilyalı dövme ile yüzey durumu da iyileştirilmektedir. Parça yüzeyinde mevcut bulunan mikro çatlaklar ve gözenekler gibi çatlak ilerlemesine sebep olacak form bozuklukları, bilyalı dövme uygulanarak kapatılabilir (Wang, ve diğerleri, 2018). Bu durum da parçanın yorulma ömrünü artırma yönünde olumlu bir etki oluşturmaktadır.

Bilyalı dövme, hemen hemen her geometriye sahip bileşenlerde kullanılabilir. Tipik olarak bilyalı dövme uygulanan bileşenler; yaylar, biyel kolları, dişliler, miller ve akslar, türbin kanadı ve kanat tabanları ile kaynaklı bağlantıların ısıdan etkilenen bölgeleridir. Bunun dışında yorulma ömrü arttırılmak istenen her türlü parça ile, gerilmeli korozyon çatlama ve korozyon yorulmasına karşı direnç üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı, korozyon yorulması ömrünün arttırılması istenen parçalarda da uygulanmaktadır (Sculze, 2006).

Yorulma; köprüler, uçaklar, makine parçaları gibi değişken ve dinamik yüklere maruz kalan yapılarda görülen bir hasar türüdür. Değişken ve dinamik yük koşulları altında, kopma veya akma mukavemetinden çok daha düşük gerilme seviyelerinde hasar oluşması olasıdır. Yorulma isminin verilmesinin sebebi, hasarın uzun ve tekrar eden gerilme veya birim şekil değiştirme çevrimlerinden sonra meydana geliyor olmasındandır (Callister & Retwisch, 2014).

Tasarım ve analizlerde; gerilme-ömür yaklaşımı, gerinim-ömür yaklaşımı ve doğrusal elastik kırılma mekaniği yaklaşımı olmak üzere üç temel yorulma-ömür yaklaşımı bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar, belirli bir yükleme durumundaki hasarın oluştuğu çevrim sayısının tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Budynas & Nisbett, 2021).

Gerilme-ömür yaklaşımı (S-N eğrisi), sonsuz ömür kriterini yansıtan klasik yorulma yaklaşımıdır. Genellikle yüksek çevrimli yorulma olarak tabir edilir ve yorulma limiti tipik olarak 10^6 çevrimden daha büyüktür. Parçaların yüksek seviyede yüklere maruz kalmasıyla, plastik bölgede gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki orantısızlık, birim şekil değiştirmenin kontrol mekanizması olarak kullanılmasını gerektirmiştir. Birim şekil değiştirme-ömür yaklaşımı da düşük çevrimli yorulma olarak tabir edilir ve genellikle 10^2 - 10^6 çevrim arasında kabul edilen sınırlı ömür bölgesini ele almaktadır (ASM Handbook Committee, Vol.19: Fatigue And Fracture, 1996).

Bilyalı dövme, parça yüzeyinde kalıntı basma gerilmeleri oluşturarak yorulma ömrünü arttırmaktadır. Basma gerilmesi çatlak başlamasını ve ilerlemesini engellemeye yardımcı olmaktadır (Trung, Khun, & Butler, 2017). Temel olarak bilyalı dövmenin yorulma dayanımını arttırmadaki etkisi kalıntı basma gerilmeleridir. Bununla birlikte yüzeyde bulunan mevcut çatlakları kapatma, yüzey kısmındaki taneleri inceltme, yüzeye yakın bölgede dislokasyon yoğunluğunu artırma, soğuk plastik deformasyonla yüzey bölgesinde ikizlenmeler meydana getirmesiyle bilyalı dövmenin, parçanın yorulma dayanımını arttırmada olumlu etkileri bulunmaktadır (Wang, ve diğerleri, 2018) (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018) (Zhang, Hansen, Gao, & Huang, 2012). Bu işlemin, kalıntı gerilme ve yüzey mikroyapısındaki değişiklikler ile yorulma dayanımına etkisi üzerinde literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada da kullanılan 17-4 PH paslanmaz çelik malzeme, yüksek mukavemet ve korozyon direnci özellikleri ile havacılıkta sıklıkla kullanılmaktadır. Yorulma yüklerine maruz kalan 17-4 PH malzeme ile imal edilmiş parçalarda bilyalı dövme de yapılmaktadır. Bu bilyalı dövme işlemleri farklı bilya tipleri, farklı yoğunluk ve oranlar içerebilmektedir.

Bilyalı dövme parametrelerinden olan yoğunluk; bilya cinsi ve çapı, bilyanın çarpma hızını değiştiren püskürtme basıncı, uygulama süresi ve bilyalı dövme oranına bağlı bir parametredir. Almen dövme şiddeti olarak da bilinmektedir. Bilyalı dövme yoğunluğu ölçümü için, metal bir plaka, bir tutucuya monte edilip ve test parçasıyla

birlikte bilyalı dövme işlemine tabi tutulmaktadır. Sonrasında plakada oluşan eğrilikle, bilyalı dövme yoğunluğu ölçülmektedir (Almen, Shot Blasting To Increase Fatigue Resistance, 1943) (Almen, Peened Surfaces Improve Endurance of Machine Parts, 1943).

Bilyalı dövme oranı %100'e kadar olmakla birlikte, bilyalı dövme sonucunda oluşan girintilerin, bilya çarpmayan yüzey alanına oranını ifade eder. %100 bilyalı dövme oranı, yüzeyin tamamını kaplayacak şekilde bir defa bilya çarpmış olmasını ifade eder. Bilyalı dövme oranı, her yüzeye birden fazla bilya çarpmış olmasıyla %200 gibi ya da daha yüksek oranlara da sahip olabilmektedir (Cammett, 2007).

Literatür araştırması bölümünde de aktarılacağı gibi; bilyalı dövme yoğunluğu arttıkça, parça yüzeyindeki kalıntı gerilme miktarının da arttığını gösteren çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Bu tez çalışmasında, bilyalı dövmenin yoğunluk ve bilyalı dövme oranı parametrelerinin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkileri araştırılmıştır. Dokuz farklı numune grubuna aynı bilya tipi ile, 3A, 4,5A ve 6A yoğunluklarda, %100, %200 ve %300 oranlarda bilyalı dövme uygulanmış olup, düşük çevrimli (LCF) yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Üç farklı gruptan alınan numuneler için mikroyapı incelemesi ile birlikte mikrosertlik ölçümleri de yapılmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek karşılaştırılmıştır. Bütün bu sonuçlarla birlikte, bilyalı dövmenin yoğunluk ve bilyalı dövme oranı parametrelerinin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkileri araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Bilyalı Dövme

İnsanoğlu ilk çağlardan beri günlük ihtiyaçları için kullandığı malzemeleri geliştirmeye çabalamıştır. Tarihin her döneminde, kendisini korumak ve ihtiyaçlarını daha etkin bir şekilde karşılayabilmek için zırhı, silahları, çeşitli alet edevatları sürekli olarak geliştirilmeye ihtiyaç duymuştur. İlk zırhçılar, metal ustaları ve demirciler tarafından metalin soğuk dövülmesi bir sanattı. Kalkanlar, göğüs plakaları, mızrak uçları, bıçaklar ve kılıçlar, soğuk çekişle birlikte daha sert ve daha sağlam olmaktadır. Bugün bu süreç artık bir sanat değil, başlangıçta Zimmerli tarafından "Shot Blasting" ve daha sonra Almen tarafından "Shot Peening" (Bilyalı Dövme) olarak adlandırılan kontrollü mekanik bir işlemdir (Şekil 2.1) (Progressive Surface, 2024).

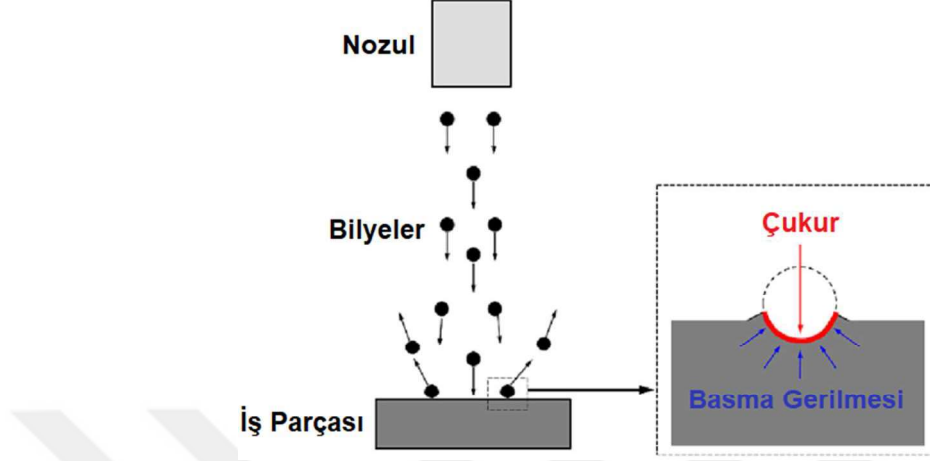


Şekil 2.1 : Bilyalı Dövme Uygulanan Kanatçık Parçaları.

(Progressive Surface, 2024)

Bilyalı dövme, kalıntı basma gerilmesi oluşturmak, metal ve kompozitlerin mekanik özelliklerini değiştirmek için kullanılan bir soğuk şekillendirme işlemidir (Wick & Veilleux, 1985). Parça yüzeyine belirli bir hızla çarpan bilyalar, yüzeyde plastik deformasyona sebep olarak çukurlar oluşturur. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi bilyaların

çarptığı bölgelerin yüzey altında ise kalıntı basma gerilmeleri meydana gelir (Sun & Dilger, 2023).



Şekil 2.2 : Bilyalı Dövme İşlemi ve Kalıntı Gerilmenin Şematik Gösterimi.

(Sun & Dilger, 2023)'ten uyarlanmıştır.

Bilyalı dövme işlemi için mevcut birçok uygulama standardı bulunmaktadır. Bunlar kullanıldığı endüstri ve yapılan işlemin amacına göre değişiklik göstermektedir. Havacılıkta farklı yöntemlerle yapılan bilyalı dövme işlemleri için SAE AMS altında farklı standartlar dikkate alınmaktadır. Bu standartlar da uygulama yöntemi ve kullanılan bilya tipi gibi konulara göre ayrılmaktadır (SAE International, 2018), (SAE International, 2023), (SAE International, 2022).

Bilyalı dövme prosesinde, medya adı da verilen bilyalar çeşitli malzemelerden yapılabilmektedir. Bilya malzemeleri genellikle çelik, cam ve seramiktir. Çelik bilyalar; çelik döküm, dövme ve kesme tel bilyaları da içermektedir.

Havacılıkta kullanılan bilya tipleri SAE AMS 2431 standardında belirlenmiştir (Tablo 2.1) (SAE International, 2023).

Tablo 2.1 : Bilya Tipleri, Standartları ve Kullanım Alanları.

Standart Numarası	Kapsadığı Bilya Tipi	Bilya Tipi İle Bilyalı Dövme Uygulanması Tavsiye Edilen Parçalar
AMS 2431/1	Normal Sertlikte Çelik Döküm Bilya	En yaygın kullanılan bilya tipi, 50 HRC'den daha düşük sertlikteki parçalar
AMS 2431/2	Yüksek Serlikte Çelik Döküm Bilya	50 HRC ve daha yüksek sertlikteki parçalar
AMS 2431/3	Kesme Tel Bilya	Sayıcı yüksek hacimli parçalar
AMS 2431/4	Paslanmaz Çelik Kesme Tel Bilya	Ferritik konteminasyona hassas olan parçalar
AMS 2431/5	Yüzey Sertleştirilmiş Çelik Bilya	Yüksek bilyalı dövme yoğunluğu ve derin kalıntı gerilme istenen parçalar
AMS 2431/6	Cam Bilya	Ferritik konteminasyona hassas olan, düşük bilyalı dövme yoğunluğu gerektiren parçalarda veya küçük radyüslerde ve dar alanlarda
AMS 2431/7	Seramik Bilya	Ferritik konteminasyona hassas olan 60 HRC ve daha yüksek sertlikteki parçalar

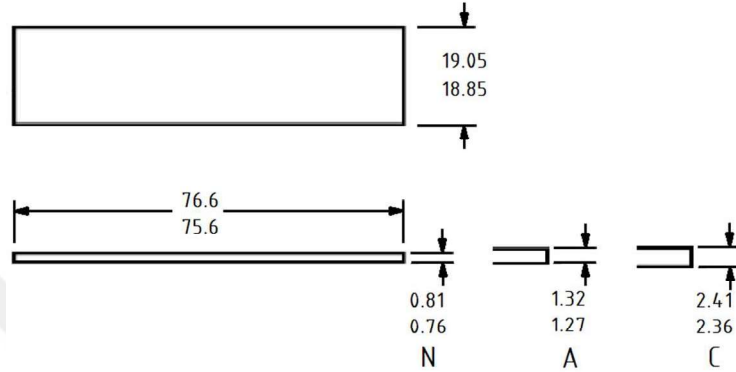
SAE International. (2023). Peening Media General Requirements. *AMS 2431*. SAE International'dan uyarlandı.

Bilyalı dövme işleminin en temel parametrelerinden birisi de yoğunluktur. Yoğunluk için literatürde farklı tanımlar olmakla birlikte, bilyaların iş parçası üzerinde kalıntı gerilme oluşturma kabiliyetidir diye tanımlanabilir. Bilyalı dövme yoğunluğu Almen yoğunluğu olarak da tanımlanmaktadır. Bilyalı dövme yoğunluğu; bilya özkütlesine, sertliğine, hızına, bilyanın yüzeye çarpma açısına, bilyanın şekline ve çarpan bilyaların sayısına bağlıdır (Determining the Shot Peening Intensity and the Coverage of Shot Peening, 2014).

J. O. Almen tarafından 1942'de ortaya atılmasıyla birlikte, Almen şeridi ve Almen ölçeği, bilyalı dövme ve kumlama endüstrileri tarafından tercih edilen ve bilyalı dövme yoğunluğunu ölçmek için basit, uygun maliyetli ve güvenilir bir araç olmuştur. Temelde, Almen şeridi, bir tarafı bilyalı dövmeye maruz bırakılan ve tepki olarak kavışlenen, yay takım çeliğinden yapılmış küçük (3 inç uzunluğunda ve 3/4 inç genişliğinde) bir parçadır (Champaign J. , Almen Strip Specifications, 1997).

Şekil 2.3'de ölçüleri verilen Almen şerit; düz, dikdörtgen biçimde olup, SAE 1070 soğuk haddelenmiş çelikten üretilmektedir (SAE International, 2022). Düşük, orta ve yüksek bilyalı dövme yoğunluğu uygulamaları için üç farklı standart kalınlıkta mevcuttur. Bu Almen şeritler inceden kalına N, A ve C olarak adlandırılmaktadır (SAE International, 2022).

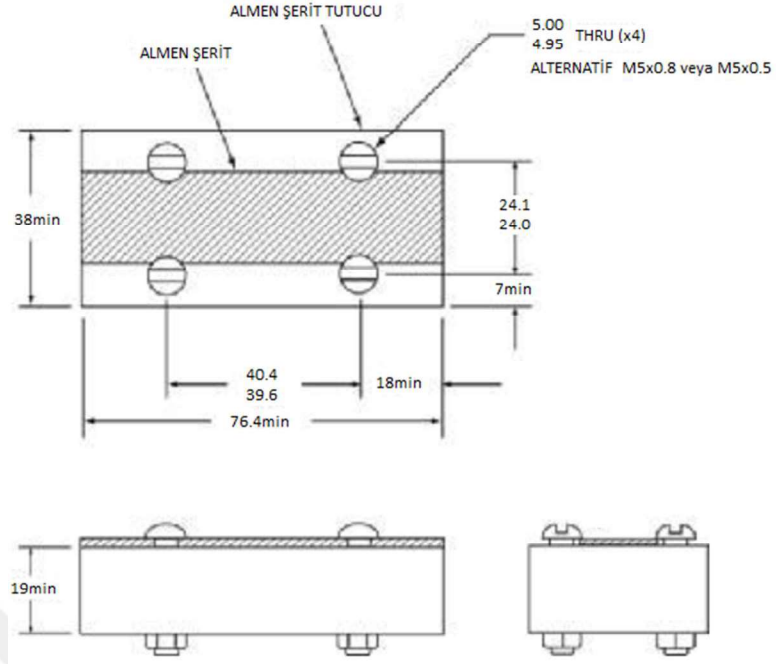
Almen şerit kullanılarak yoğunluğun doğrulandığı bu teste Almen test adı verilmektedir. Almen test ile birlikte parçaya bilyalı dövme uygulamadan önce bilyalı dövme yoğunluğu doğrulanıp kaydedilmektedir. Bilyalı dövme makinesinin ayarlarının doğru yapıldığı ve tasarım parametrelerine uygun biçimde çalıştığı doğrulanmaktadır. Böylece değerli parçaların hasara uğraması da engellenmiş olmaktadır.



Şekil 2.3 : SAE J442 Standardına Göre Almen Şerit Çeşitleri ve Milimetre Cinsinden Ölçüleri.

(SAE International, 2022)'den uyarlanmıştır.

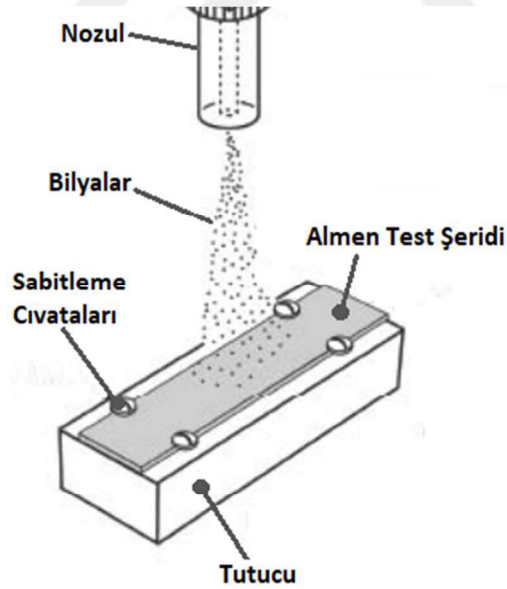
Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, işlem öncesi Almen şerit, Almen şerit tutucuya dört noktadan sabitlenmektedir (SAE International, 2022) (Champaigne J. , Shot Peening Intensity Measurement, 1992). Almen şerit tutucunun da standarda uygun ölçülerde en az 57 HRC sertlikte olması tavsiye edilmektedir (SAE International, 2022).



Şekil 2.4 : SAE J442 Standardına Göre Almen Şerit Tutucu ve Ölçüleri.

(SAE International, 2022)'den uyarlanmıştır.

Almen şerit tutucuya sabitlenen Almen şerit üzerine bilyalı dövme uygulanmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Tutucuya Sabitlenmiş Almen Şeride Bilyalı Dövme Uygulanması Gösterimi.

(Champaigne J. , Shot Peening Intensity Measurement, 1992)'den uyarlanmıştır.

Tutucu, hurda bir parçaya veya fiykir üzerine sabitlenerek test uygulanmaktadır. Şekil 2.6'da da gösterildiği gibi uygulama sonrası Almen şerit, tutucudan sökildiğinde,

oluşan kalıntı gerilmelerin sonucu olarak yay formu almaktadır (Şekil 2.6) (Appasamy & Permual, 2020).



Şekil 2.6 : Farklı Sürelerde Bilyalı Dövme Uygulanmış Almen Plaklarda Oluşan Yay Formu ve Yoğunluğu İfade Eden Ölçünün Gösterimi.

(Appasamy & Permual, 2020)'den uyarlanmıştır.

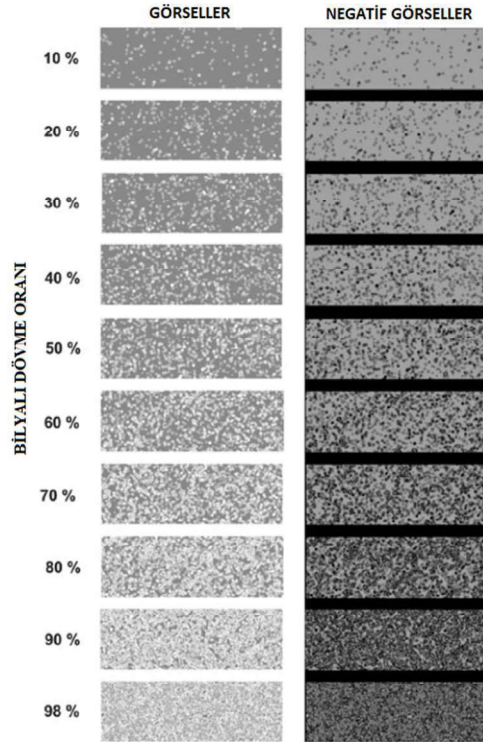
Almen şerit ölçüm bilyalı dövme yapılmayan tarafı aşağı gelecek şekilde Almen ölçü aracına yerleştirilir. Almen şeritte oluşan bu yay formu, Şekil 2.7'de örnek bir görseli verilen Almen ölçü aracı ile (Almen Gages, 2014) (Amerika Birleşik Devletleri Patent No. 5,297,418, 1994) hassas biçimde ölçülmektedir (Ölçü Şekil 2.6'te kırmızı okla gösterilmiştir). Elde edilen değer sonuna kullanılan Almen şeridin cinsi de eklenerek bilyalı dövme yoğunluğu elde edilmektedir. Örneğin yapılan ölçüm 0,006 inç ve kullanılan Almen şerit 'A' cinsi ise bilyalı dövme yoğunluğu 6A olmaktadır. Bilyalı dövmenin milimetre cinsinden de ifade edilebilmektedir. Bu durumda 6A bilyalı dövme yoğunluğu 0,15 mm A olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.7 : Almen Ölçüm Cihazı (Almen Gage).

(Almen Gages, 2014), (Amerika Birleşik Devletleri Patent No. 5,297,418, 1994)

Bilyalı dövme oranı, bilyalar tarafından bir defa çukur oluşturulmuş yüzeylerin oranı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.8) (Kirk, 2012). Yüzeyin yaklaşık olarak %98'i kaplandığında tamamen kaplanmış olarak kabul edilmektedir (SAE International, 2023). %100'ün üzerindeki bilyalı dövme oranları, yüzeyin belirli bir bölümü veya tamamının aynı noktada birden fazla kez bilya ile vurulduğunu ifade etmektedir.



Şekil 2.8 : Bilyalı Dövme Oranı ve Negatif Resimlerinin Gösterimi.

(Kirk, 2012)'den uyarlanmıştır.

2.2 Yorulma

Makine parçalarında dinamik ve değişken yükler altında meydana gelen hasar çeşidine yorulma adı verilmektedir. Bu dinamik ve değişken yük şartları altında parçanın çekme veya akma mukavemetinin altındaki gerilme seviyelerine maruz kalmasıyla hasara uğraması da yorulma ile mümkündür. Parçaların uzun çevrim sayıları boyunca dinamik yük altında çalışmasıyla hasar meydana gelmesinden dolayı bu olaya yorulma adı verilmiştir. Yorulma hasarı genellikle ani olarak gevrek kırılma gibi meydana gelmektedir (Callister & Retwisch, 2014).

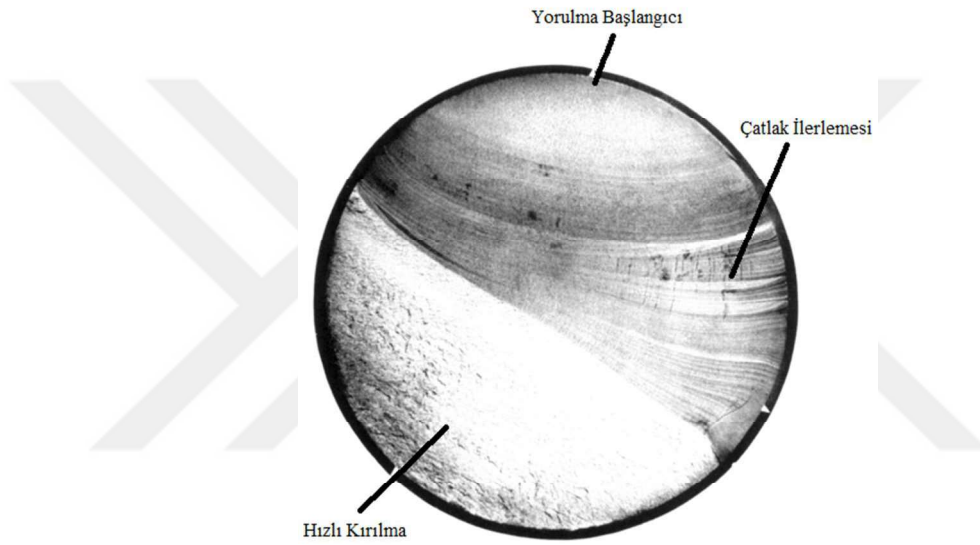
1830'lü yıllardan sonra tren yollarının ve atlar ile çekilen arabaların sayısı hızla artış göstermiştir. Bununla birlikte bu araçlarda kullanılan aks, krank mili, yaylar ve kaplin gibi parçalar yüksek çevrimli yüklere maruz kalmaya başlamıştır. Parçalardaki yorulma hasarları da ilk bu yıllarda görülmeye başlanmıştır. Yorulma konusuna deneysel ve teorik olarak en büyük katkı da bu yıllarda August Wöhler tarafından sağlanmıştır. Wöhler, o dönemde servisteki tren aksları üzerinde, kırılma problemi ile ilgili deneysel çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmalarda aks numuneleri dönmeye birlikte tam değişken eğilme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Test yapılan akslarda, hangi gerilme değerleri için yorulma ömrünün kaç çevrim olduğu, belirli stres değerinin altında hasar oluşmayan yorulma limitleri elde edilmiştir (Smith & Hillmansen, 2004). Wöhler'in çalışması gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri üzerindeki sistematik ilk çalışma olarak kabul edilmektedir. Çalışmaları; yüklerin ölçümü, çalışma sırasındaki ilgili gerilmelerin hesaplanması, çatlak ilerlemesi gözlemleri ve çentik etkisinin azaltılması için farklı önerileri de içeren sonlu ömür için tasarım konularını da kapsamaktadır. Wöhler yaptığı çalışmalardaki test sonuçlarını tablolar halinde sunmuştur. Spangenberg de bu tabloları eğriler halinde grafik üzerinde göstermiştir (Schütz, 1996). Wöhler'den sonra sonlu ömür için tasarım konularına yaklaşık 75 yıl sonra değinilmiştir (Almen & Boegehold, Rear Axle Gears: Factors Which Influence Their Life, 1935).

2.2.1 Çatlak Başlangıcı ve İlerlemesi

Yorulma hasarının oluşması çatlak veya çatlakların başlayıp ilerlemesinden dolayı olmaktadır. Yorulma çatlağı, tekrarlı dinamik yüklere maruz kalan bir noktada başlamaktadır. Bu nokta, genellikle malzemede süreksizliğin olduğu bir noktadır. Burada belirtilen süreksizlikler; parçanın o bölgesinde gerilme yığılmasına sebep olan

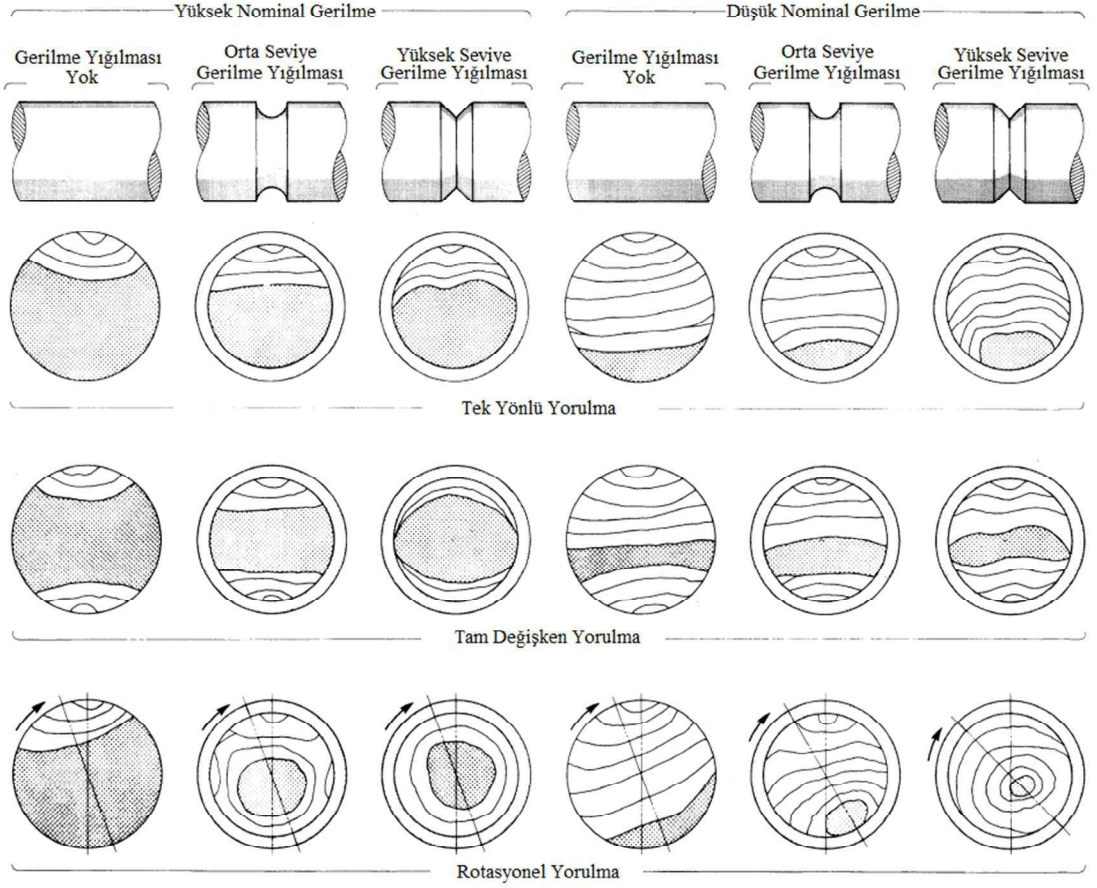
geometrik değişimler, üretim kaynaklı kusurlar ya da hammadde üretim prosesinden kaynaklanan malzeme kompozisyonu olarak örneklendirilebilir.

Şekil 2.9’da gösterildiği gibi yorulma hasarı üç farklı aşamada gerçekleşmektedir (Cottell, 2022). İlk aşama çatlak başlangıcı aşamasıdır. Bu aşamada plastik deformasyondan ötürü bir veya daha fazla mikro çatlak meydana gelmektedir. İkinci aşama ise çatlak ilerlemesi aşamasıdır. Şekil 2.10’da paylaşıldığı gibi bu aşamada mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşmektedir (ASM Handbook Comitee, Vol.11: Failure Analysis and Prevention, 1986). Üçüncü aşama ise hızlı kırılma aşamasıdır. Bu aşama çevrimli yüklemenin son çevrimidir (Budynas & Nisbett, 2021).



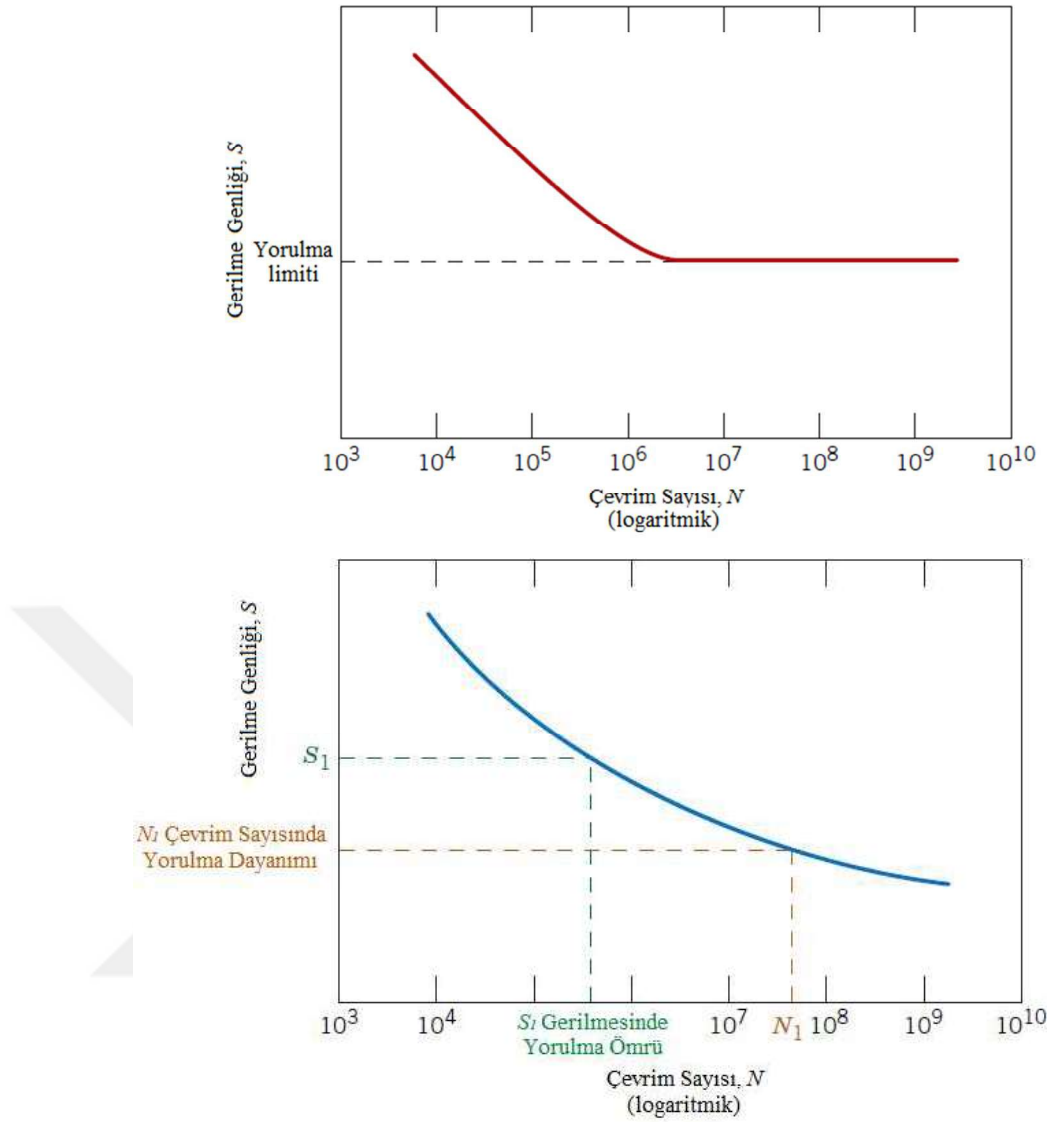
Şekil 2.9 : Yorulma Hasarının Üç Farklı Aşamasının Kırılan Bir Türbin Şaftı Üzerinden Gösterimi.

(Cottell, 2022)’den uyarlanmıştır.



Şekil 2.10 : Farklı Yükleme ve Çeşitli Çentik Durumundaki Parçalarda Yorulma Hasarı Gösterimi.

(ASM Handbook Committee, Vol.11: Failure Analysis and Prevention, 1986)'dan uyarlanmıştır.

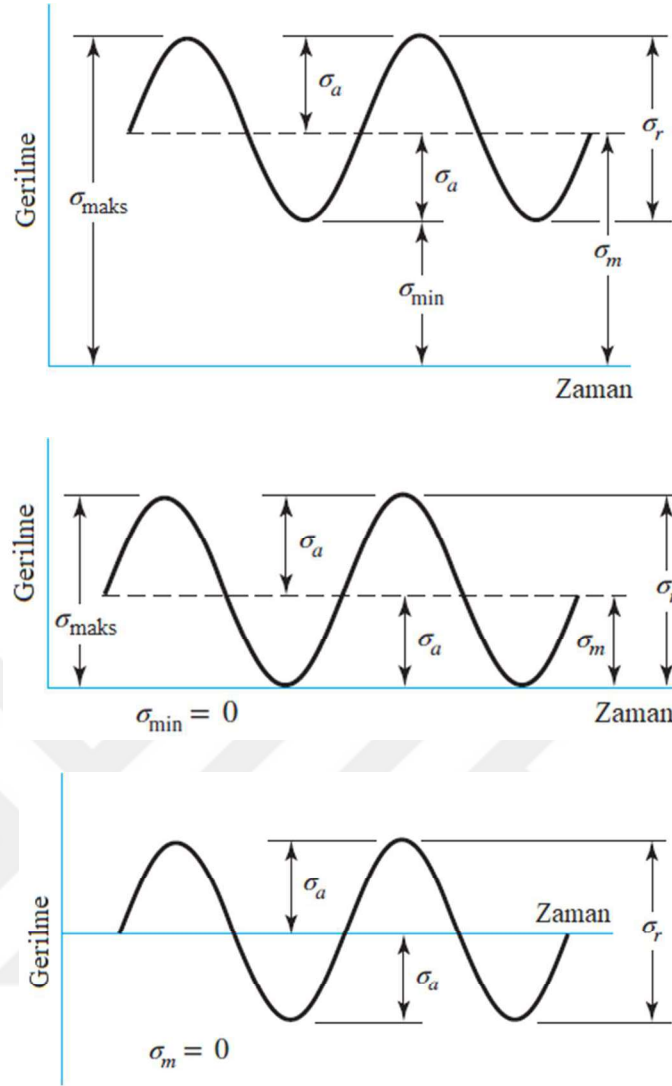


Şekil 2.11 : Yorulma Limiti Gösteren (üst) ve Göstermeyen (alt) İki Farklı Malzeme İçin Çevrim Sayısı-Gerilme Genliği Grafiği (S-N Diyagramı).

(Callister & Retwisch, 2014)'ten uyarlanmıştır.

S-N grafiklerinde S gerilme genliğini, N de çevrim sayısını ifade etmektedir. Gerilme genliği (alternating stress) değişken gerilme olarak da adlandırılmaktadır. Birçok çelik için yorulma limiti çekme gerilmesinin %35-%60'ı arasında değişmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2.11'de de gösterildiği gibi, ferritik olmayan alüminyum ve bakır metallerin birçoğu yorulma limiti göstermez (Callister & Retwisch, 2014).

S-N diyagramı düşük çevrimli yorulma, yüksek çevrimli yorulma ve sonsuz ömür bölgesi olmak üzere yatay ekseninde 3 farklı bölgeden oluşmaktadır. Düşük çevrimli yorulma (LCF) bölgesi $\sim 10^5$ çevrim sayısına kadar olan bölge olarak kabul edilmektedir. Yüksek çevrimli yorulma (HCF) bölgesi de 10^6 - 10^7 çevrim sayısına



Şekil 2.13 : Sürekli Değişken Genel (üst), Tekrarlı (orta) ve Tam Değişken (alt) Yükleme Grafikleri.

(Budynas & Nisbett, 2021)'den uyarlanmıştır.

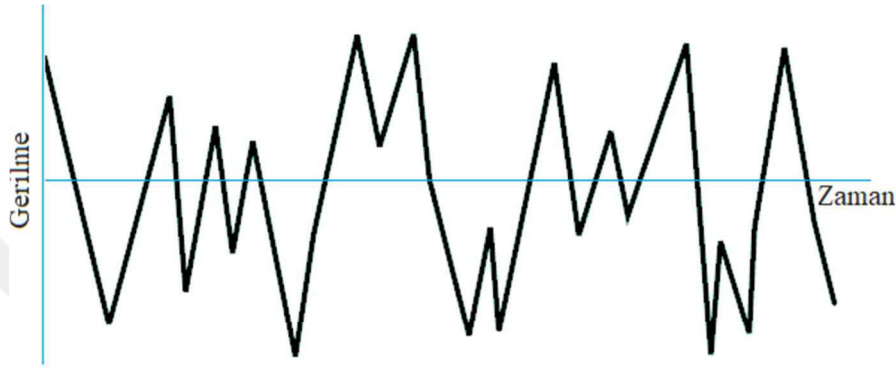
- σ_{min} en düşük gerilmeyi,
- σ_{maks} en büyük gerilmeyi
- σ_m ortalama gerilmeyi (mean stress)
- σ_a değişken gerilme ya da gerilme genliğini (alternating stress/stress amplitude)
- σ_r gerilme aralığını (stress range) ifade etmektedir.

Üst ve orta grafikteki yükleme tiplerinde parça yalnızca çekme yüküne maruz kalırken, alt grafikteki yükleme tipinde hem çekme hem de basma yüküne maruz kalmaktadır.

Bu grafiklerden yola çıkarak σ_m ortalama gerilme ve σ_a değişken gerilme değerleri Denklem 2.1 ve 2.2’de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$



Şekil 2.14 : Rastgele Gerilmeyi Gösteren Örnek Bir Grafik.

(Callister & Retwisch, 2014)’ten uyarlanmıştır.

Şekil 2.14’de görüldüğü gibi rastgele yüklemeler de değişken yüklemelere örnek olarak verilebilmektedir (Callister & Retwisch, 2014).

Bir parçanın yorulma hasarı, uygulanan gerilim genliği veya uygulanan gerilim aralığı ile güçlü bir şekilde ilişkilidir ve aynı zamanda ortalama gerilimden de etkilenir. Yüksek çevrimli yorulma bölgesinde, normal ortalama gerilimler bileşenlerin yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mikro çatlakların açılma ve kapanma durumu ortalama gerilme ile ilgilidir. Mikro çatlakların açılması çatlakların ilerleme hızını hızlandırdığı ve mikro çatlakların kapanması çatlakların büyümesini geciktirdiği için, yorulma mukavemeti açısından çekme ortalama gerilmeleri zararlı ve basma normal ortalama gerilmeleri faydalıdır. Ortalama kayma gerilimi mikro çatlakların açılma ve kapanma durumunu etkilemez ve şaşırtıcı olmayan bir şekilde çatlak ilerlemesi üzerinde çok az etkisi vardır. Büyük miktarlardaki plastik deformasyonun, ortalama gerilimin herhangi bir faydalı veya zararlı etkisini ortadan kaldırdığı düşük çevrimli yorulma bölgesinde, ortalama gerilimin yorulma mukavemeti üzerindeki etkisi daha azdır (Lee & Taylor, Stress-Based Fatigue Analysis and Design, 2005).

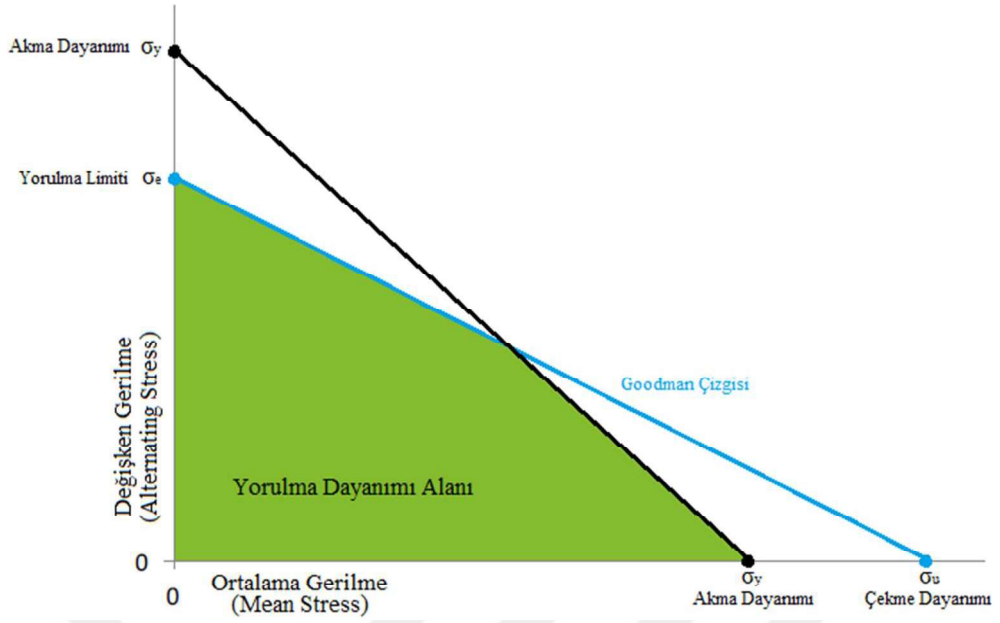
Parçaların yüzeyleri ne kadar düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olursa olsun dinamik yüklere karşı parçanın iç kısımlarına kıyasla daha hassastır. Bilyalı dövme ile parça yüzeyinde ince bir tabaka basma yönünde kalıntı gerilme oluşturularak, çekme yönünde dinamik yüklere maruz kalan bir parçanın çalışabileceği değişken gerilme değeri arttırılmaktadır. Basma gerilmesinin artmasıyla ortalama gerilme (mean stress) değeri düşmektedir.

Gerber (1847), Goodman (1899), Haigh (1917) ve Soderberg (1930) çekme ortalama gerilmesinin yüksek çevrimli yorulma mukavemeti üzerindeki etkisini göstermek için modeller sunmuşlardır. Goodman'ın ortaya koyduğu veriyi Haigh, gerilme genliğine karşı ortalama gerilme grafiğine aktarmıştır (Lee & Taylor, Stress-Based Fatigue Analysis and Design, 2005).

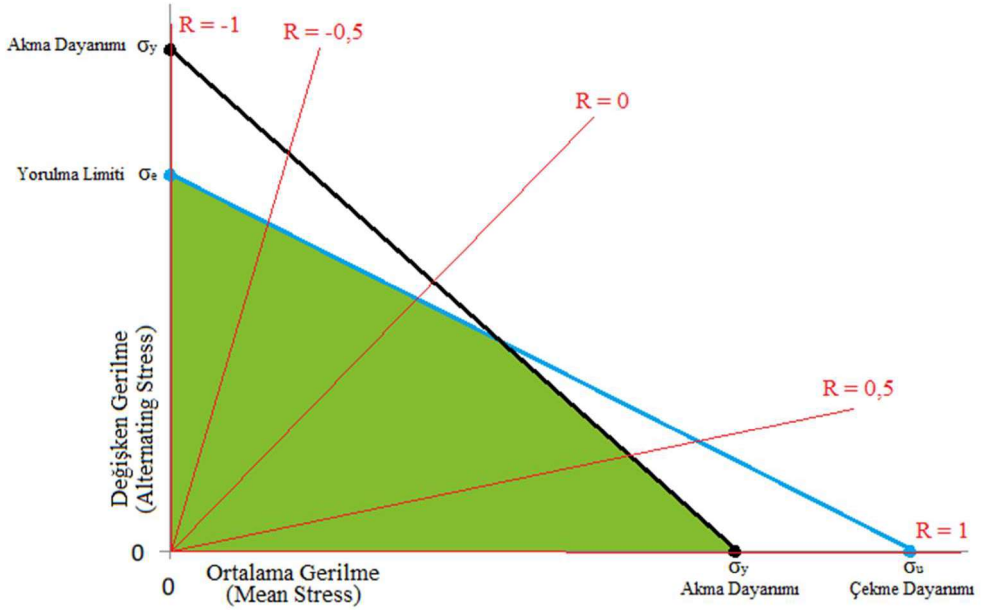
Haigh koordinatlarında Goodman çizgisi matematiksel olarak 2.3 numaralı denklemden gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}} \quad (2.3)$$

Bu denklemde σ_e yorulma limiti, σ_a gerilme genliği, σ_m ortalama gerilme ve σ_u çekme gerilmesini ifade etmektedir. Bu formül daha sonra σ_e yerine σ_{ar} (ortalama gerilmenin sıfır olduğu durumdaki gerilme genliği) konularak modifiye edilmiştir. Diğer çalışmaların aksine Goodman'ın formülü basit olmakla birlikte, çekme ortalama gerilmesi için yorulma limitinde makul derecede iyi çalışmaktadır. Haigh, Goodman'ın yorulma limitini Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'te gösterildiği gibi grafiğe aktarmıştır.

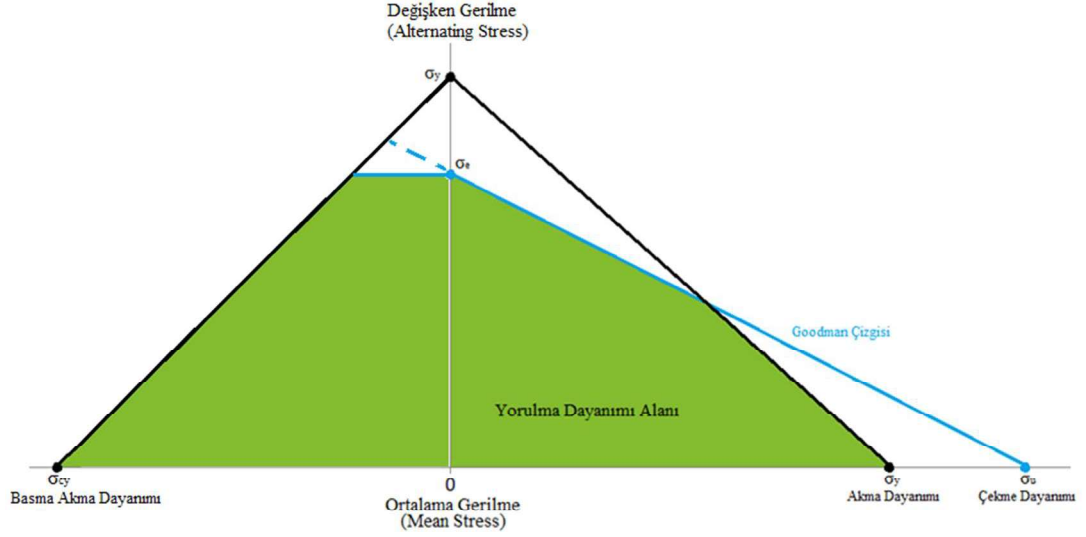


Şekil 2.15 : Goodman-Haigh Diyagramı.



Şekil 2.16 : Gerilme Oranlarının da Çizildiği Goodman-Haigh Diyagramı.

Goodman-Haigh diyagramı kullanılarak, belirli bir ortalama gerilme değeri için, izin verilen en yüksek değişken gerilme değeri elde edilebilmektedir. En büyük gerilmenin en düşük gerilmeye oranı olan R çizgilerinin de grafiğe eklenmesiyle, ortalama gerilme değerine karşılık gelen değişken gerilme değeri bulunabilmektedir.



Şekil 2.17 : Basma Gerilmesi Bölgesini de İçeren Goodman-Haigh Diyagramı.

2.2.2.1 Kuvvet Kontrollü Yorulma Testleri

Kuvvet kontrollü yorulma testleri için farklı birkaç standart mevcuttur. Sıklıkla kullanılan standart, ASTM E466 standardıdır. Bu standart eksenel yüklemeli ve kuvvet kontrollü yorulma testlerini kapsamaktadır. Standartın amacı, gerinimlerin çoğunlukla elastik bölgede olduğu yükleme koşullarındaki malzemelerin yorulma mukavemetlerini tayin etmektir. Standartın kapsadığı testler parça veya yapılardan ziyade, boyutları belirlenmiş test numuneleri içindir. Kuvvet kontrollü yük testleri, görece yüksek çevrim sayısı ile gerilmeye maruz bırakılan parçaların; malzeme, geometri, yüzey durumları, gerilim gibi çeşitli varyasyonlarının yorulma mukavemeti üzerindeki etkilerini görmek için yapılmaktadır

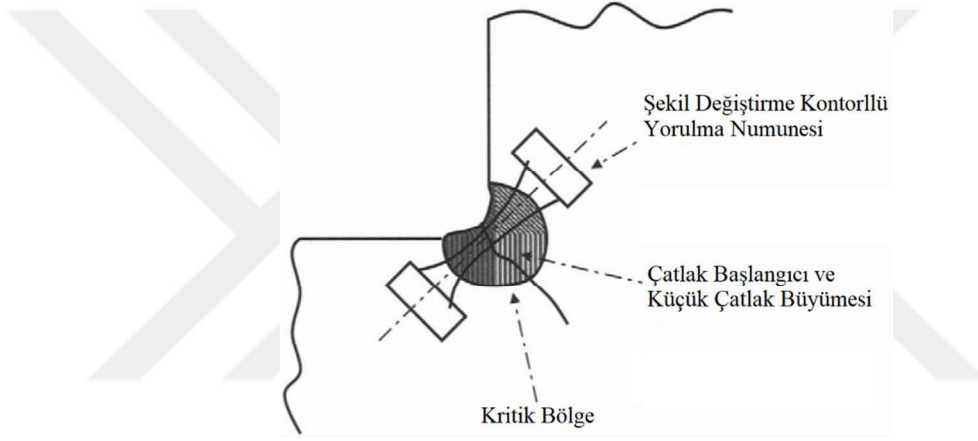
İlgili standartta belirtildiği üzere testler; mekanik, elektromekanik-manyetik ya da hidrolik-elektrohidrolik tipteki, kuvvet izleme sistemi olan bir yorulma test cihazında yapılabilmektedir. Kuvvet kontrollü yorulma testi için test frekansı 10^{-2} ila 10^{+2} arasında olabilmektedir

Testler, hasar kriterine ulaşılması veya daha önce belirlenmiş bir çevrim sayısına ulaşılmasıyla tamamlanır. Hasar kriteri genellikle, test numunesinin tamamen kırılması, belirlenmiş bir büyütme oranıyla görünen ya da belirlenmiş boyuttaki bir çatlak oluşması olmaktadır (ASTM International, 2021).

2.2.3 Şekil Değişirme Temelli Ömür Metodu (Strain Life)

Yorulmanın başladığı yerde gerilmeler elastik limiti geçtiğinde, plastik şekil değişirme meydana gelmektedir. Şekil değişirme temelli ömür metodu, çatlağın başladığı bölgelerdeki plastik ve elastik şekil değişirmenin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu metot, gerilmelerin ve şekil değişirmenin yüksek olduğu, parça ömrünün düşük olması beklenen durumlarda kullanışlıdır (Budynas & Nisbett, 2021).

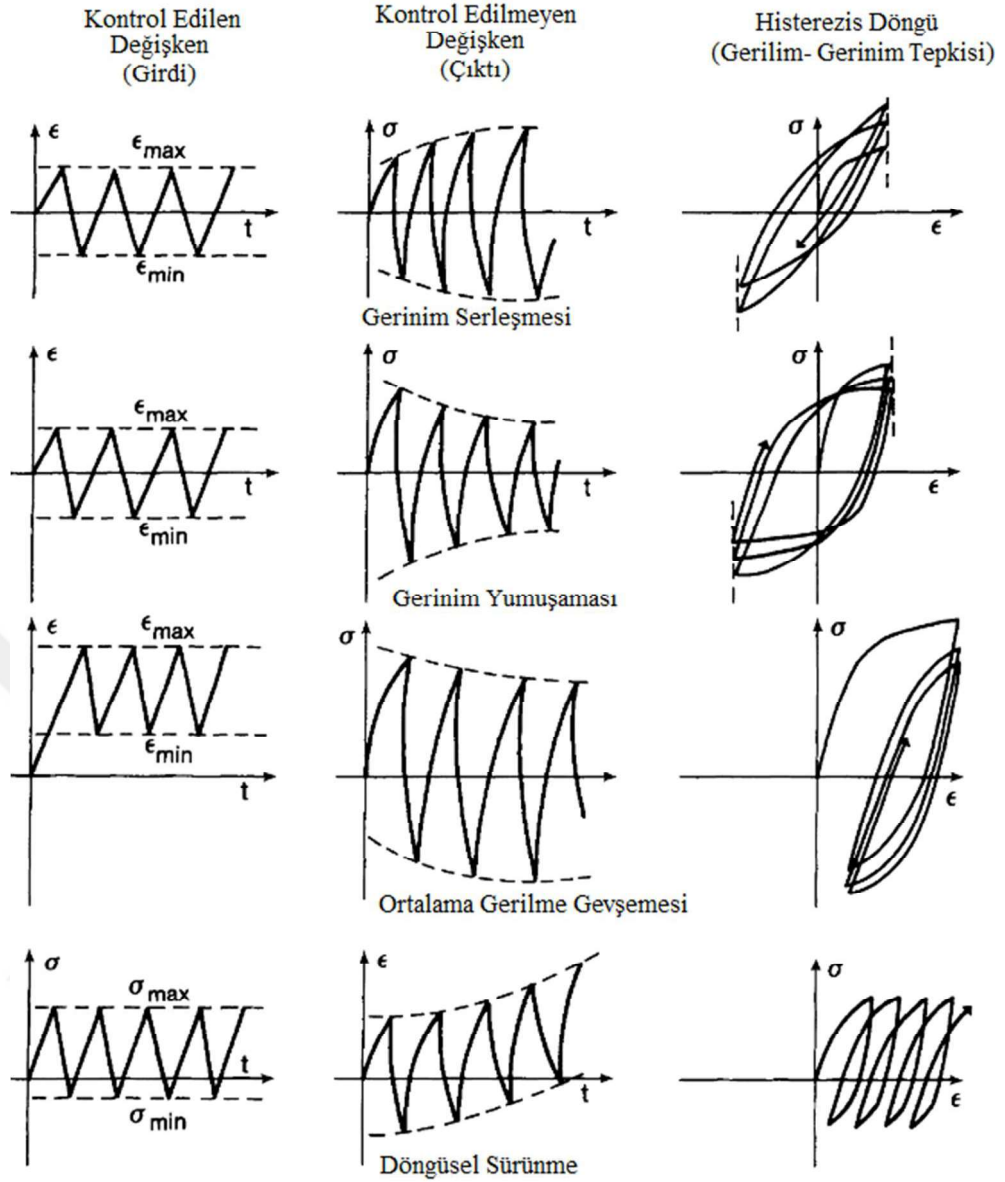
Şekil değişirme ömür metodu, Şekil 2.18’de de gösterildiği gibi, çentikli bir parçadaki çatlak başlangıcı ve küçük çatlak büyümesinin, aynı şekil değişirme çevrimine tabi tutulan laboratuvar numunesiyle benzer ömre sahip olacağı tahminine dayanmaktadır (Lee & Taylor, Strain-Based Fatigue Analysis and Design, 2005).



Şekil 2.18 : Şekil Değişirme Ömür Yaklaşımı Konsepti.

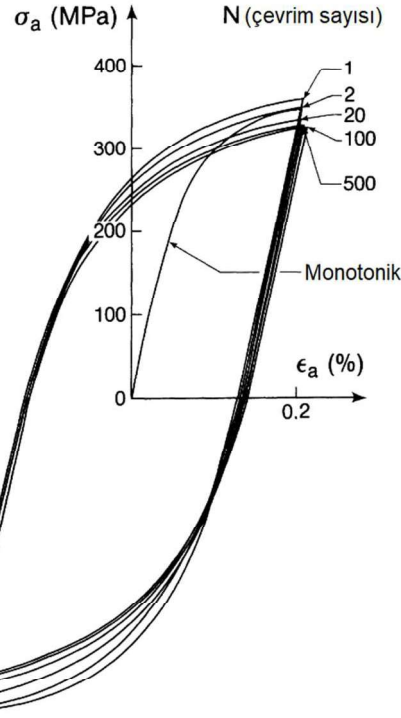
(Lee & Taylor, Strain-Based Fatigue Analysis and Design, 2005)'ten uyarlanmıştır.

Bir malzeme, şekil değişirme kontrollü tam değişken yük altında döngüye sokulduğunda, döngüsel yumuşama, döngüsel sertleşme, stabil kalma ya da bunların bir kombinasyonu ile tepki verebilmektedir (Şekil 2.19). Döngüsel olarak şekil değişirme kontrollü yüklemeye tabi tutulan parça, başlangıçta monotonik malzeme özelliklerinde değişim gösterse de malzeme tepkisi stabil bir histerezis döngüye oturmaktadır (Ellyin, 1997).



Şekil 2.19 : Döngüsel Girdi Değişimine Göre Farklı Modlardaki Malzeme Tepkisi.

(Ellyin, 1997)'den uyarlanmıştır.



Şekil 2.20 : A-516 Gr. 70 Çeliğinin Gerinim Kontrollü Tam Değişken Yük Altındaki Gerilme-Gerinim Tepki Histerezis Döngüsü.

(Ellyin, 1997)'den uyarlanmıştır.

Tam değişken yük altında gerinim kontrollü test edilen perlitik-ferritik çelik, önce gerinim yumuşaması gösterirken, kontrolsüz gerilme kararlı duruma ulaşınca kadar artan çevrim sayısı ile birlikte azalır (Şekil 2.20). Daha yüksek gerinim oranlarında ($\Delta\epsilon/2 > 0.4\%$) aynı çelik, stabil duruma gelene kadar artan çevrim sayısı ile birlikte gerinim sertleşmesi göstermektedir (Ellyin, 1997).

Gerinim kontrollü döngülerde, plastik deformasyon sonucunda büyük gerinimler için ortalama gerilme ortadan kalkar. Bu durumda gerilme değeri ortalama gerilme etrafında merkezlenmeye doğru değişiklik gösterir. Böylece ortalama gerinimin etkisi oldukça azdır. Ancak gerinim seviyesi yeterince yüksek değilse ortalama gerilme tamamen kaybolmaz. Bu da pozitif ortalama gerilme için yorulma ömrü üzerinde zararlı, negatif ortalama gerilme için ise faydalı bir etkiye sahiptir (Budynas & Nisbett, 2021).

Baskı yönündeki ortalama gerilmeye sahip parçalar, sıfır veya çekme yönündeki ortalama gerilmeye sahip parçalardan daha uzun yorulma ömrüne sahiptir. Yüksek gerinim genliğindeki ortalama gerilmenin kaybolması durumunda, yorulma ömründe bir değişiklik olmamaktadır. Ortalama gerinim değeri bir ortalama gerilme değeri

oluşturmuyorsa yorulma ömrüne faydalı bir etki sağlamamaktadır. Önemli ölçüde ortalama gerilmeyle bir ortalama gerinim yorulma ömrünü ciddi oranda etkilemektedir (Koh & Stephens, 1991).

2.2.3.1 Gerinim Kontrollü Yorulma Testleri

Gerinim kontrollü yorulma testleri için farklı birkaç standart mevcuttur. Sıklıkla kullanılan standart ASTM E606 standardıdır. Bu standart eksenel yüklemeli ve gerinim kontrollü yorulma testlerini kapsamaktadır. Bu yöntem, zamana bağlı elastik olmayan şekil değiştirmelerin büyüklüklerinin, zamandan bağımsız elastik olmayan şekil değiştirmelerin büyüklükleriyle aynı veya daha küçük olduğu sıcaklık ve gerinim oranlarına uygulanabilir. Standartın kapsadığı testler parça veya yapılardan ziyade, boyutları belirlenmiş test numuneleri içindir.

Gerinim kontrollü yorulma testleri, hasar meydana getiren görece düşük sayıdaki (genellikle $<10^5$) ısıl veya mekanik olarak çevrimsel plastik gerinime maruz kalan parçalar için önemlidir.

Testin yeterince düşük frekanslarda yapılması gerekmektedir. Test frekansının parça sıcaklığını 2°C 'den daha fazla ısıtması istenmemektedir. Yorulma gerinim eğrisi çıkarılması istenen durumlarda en az 10 numune kullanılması tavsiye edilmektedir.

Gerinim kontrollü yorulma testlerinde de hasar kriteri birden fazla olabilir.

Bunlardan ilki ayrılımdır. Test yapılan numunenin tamamen iki parçaya ayrılmış olduğu çevrim sayısında test tamamlanmış olur.

Modülüs hasar metodunda ise parçanın çekme sırasındaki modülüsüyle, basma sırasındaki modülüsünün oranının 0,5'e ulaşmasıyla test tamamlanmış olur.

$$Q_N = E_{NT}/E_{NC} \quad (2.4)$$

$$Q_{Nf} = 0,5Q_1 \quad (2.5)$$

Parçanın ikiye ayrılması, modülüs oranının yarıya düşmesinden önce gerçekleştiğinde hasarın gerçekleştiği çevrim sayısı olan N_f ayrılmanın gerçekleştiği çevrim sayısı olur.

Parça yüzeyinde limit boyutları daha önceden belirlenmiş mikro çatlakların oluşması da hasar kriteri olabilmektedir.

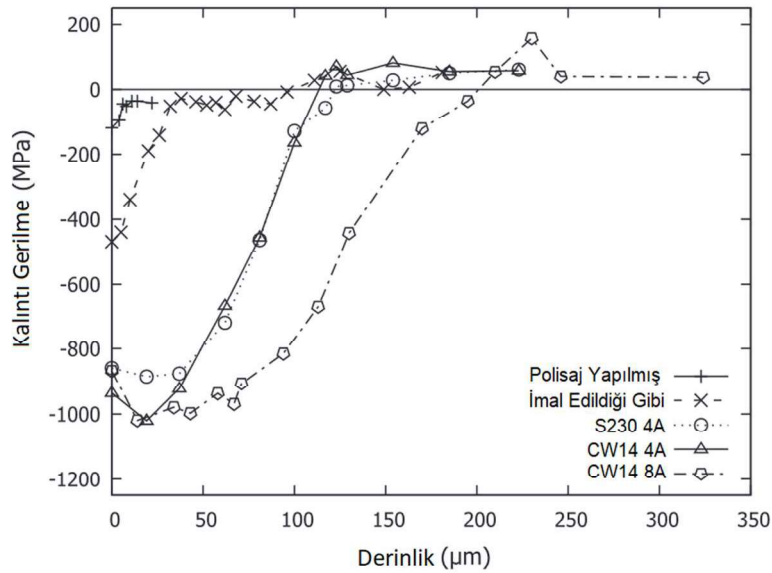
Test sırasında numuneye uygulanan kuvvetin yarı yarıya düşmesi de hasar kriteri olarak kabul edilebilmektedir. Bu durum parçada çatlak veya çatlakların oluştuğunu göstermektedir (ASTM International, 2021).

2.3 Literatürdeki İlgili Çalışmalar

2.3.1 Bilyalı Dövmenin Oluşturduğu Kalıntı Gerilme ve İlgili Çalışmalar

Bilyalı dövmenin temel amacı, daha önce de bahsedildiği gibi yüzeyde kalıcı bir basma gerilmesi oluşturarak, çekme yönünde çalışan parçalar için yorulma mukavemetini arttırmaktır. Bilyalı dövmenin oluşturduğu kalıntı gerilme ile ilgili daha önce yapılan çeşitli birçok çalışma bulunmaktadır.

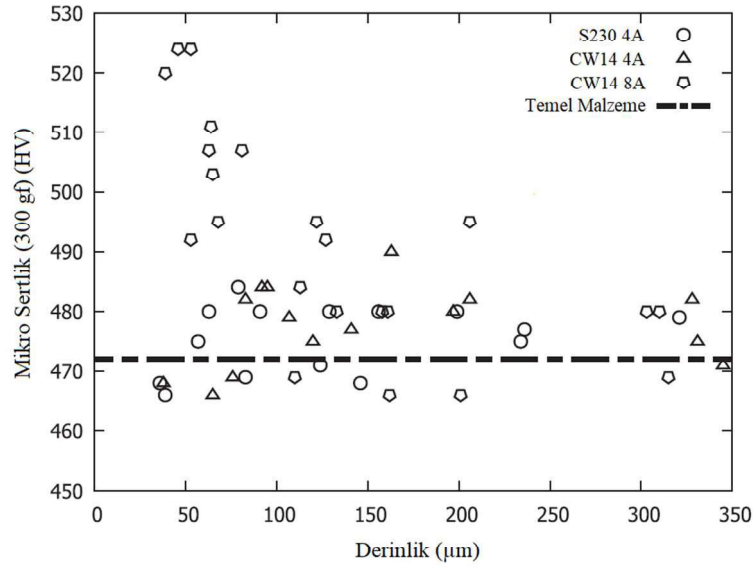
Bir çalışmada, farklı bilyalı dövme koşullarının oluşturduğu kalıntı gerilmeler, yüzey durumları ve yorulma ömürleri incelenmiştir (Şekil 2.21). Yüksek çevrimli yorulma bölgesinde kalıntı gerilmelerin, düşük çevrimli yorulma bölgesinde de yüzey durumlarının yorulma ömrü için belirleyici olduğu belirtilmiştir (Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018). Yüksek bilyalı dövme yoğunluğunun yüksek kalıntı gerilme oluşturduğu gözlemlenmiştir (Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018).



Şekil 2.21 : Polisaj Yapılmış, İmal Edildiği Gibi Bırakılmış ve Farklı Medya Tipleriyle Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Kalıntı Gerilme Sonuçları.

(Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018)'den uyarlanmıştır.

Aynı çalışmada kalıntı gerilmelere paralel olarak Şekil 2.22’de gösterildiği gibi mikro sertlik ölçümleri de yapılmıştır.

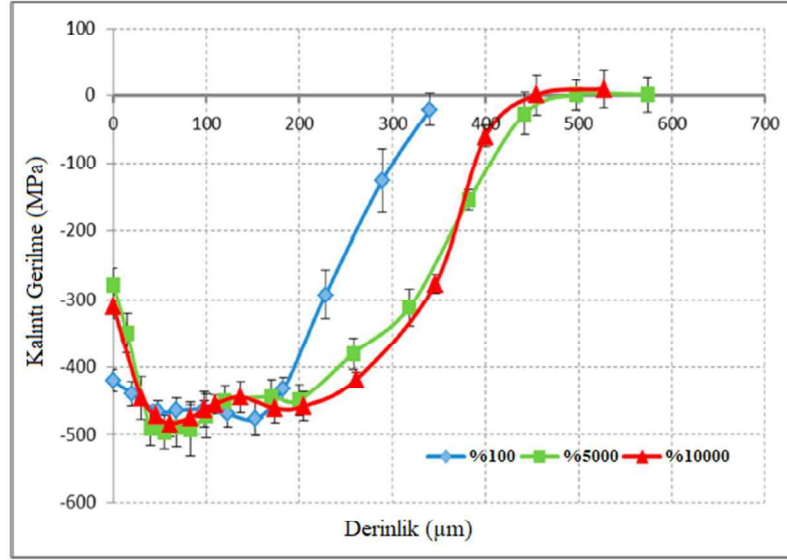


Şekil 2.22 : Farklı Medya Tipleriyle Bilyalı Dövme Uygulanmış Numuneler ve İşlem Yapılmamış Numuneden Alınan Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.

(Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018)’den uyarlanmıştır.

Alınan sertlik ölçümlerinde CW18 medya tipi ile ve 8A yoğunlukta yapılan bilyalı dövme işleminin en yüksek mikrosertlik sonuçlarını verdiği gözlemlenmiştir. Diğer numunelerden alınan sonuçlarda belirgin bir mikrosertlik değeri olmamasının, ölçümün bilyalı dövme yüzeyine yeterince yakın olmamasından kaynaklı olduğu belirtilmiştir (Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018).

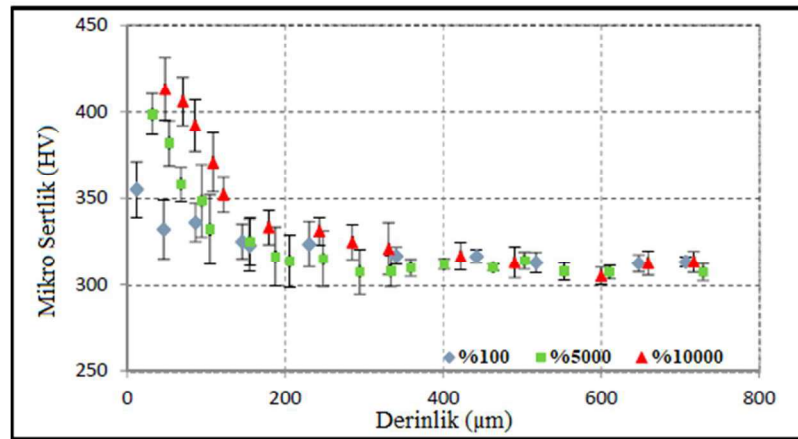
Bilyalı dövme işleminin 39NiCrMo3 çelik numuneler üzerindeki etkisinin araştırıldığı farklı bir çalışmada da kalıntı gerilme (Şekil 2.23) ve mikrosertlik (Şekil 2.24) ölçümleri yapılmıştır (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018). Araştırmada uygulanan bilyalı dövme işlemi, %100, %5000 ve %10000 olmak üzere üç farklı bilyalı dövme oranıyla yapılmıştır (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018).



Şekil 2.23 : Farklı Bilyalı Dövme Oranlarında Bilyalı Dövme Yapılan Düşük Alaşımli Çeliğin Yüzeyinde Kalıntı Gerilme Gösterimi.

(González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018)'den uyarlanmıştır.

Sonuçlara bakıldığında üç farklı bilyalı dövme oranında da kalıntı gerilme seviyesinin en fazla ~450 MPa olduğu görülmüştür (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018). Bununla birlikte %5000 ve %10000 kaplama oranlarında kalıntı gerilme derinliğinin daha fazla olduğu ancak bu iki farklı bilyalı dövme oranının oluşturduğu kalıntı gerilme derinliği arasında gözle görülür bir fark olmadığı belirtilmiştir (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018).

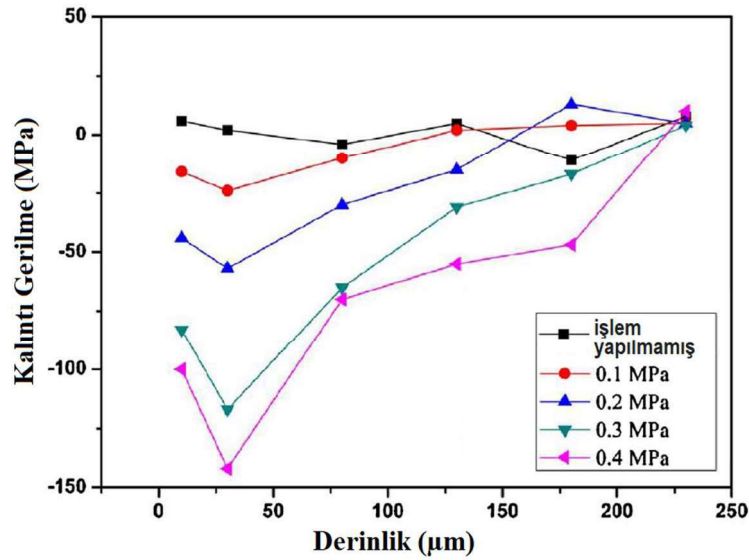


Şekil 2.24 : Farklı Bilyalı Dövme Oranlarında Bilyalı Dövme Uygulanan Düşük Alaşımli Çeliğin Yüzeyinden Alınan Mikrosertlik Ölçümleri.

(González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018)'den uyarlanmıştır.

Mikrosertlik ölçüm sonuçları, yüksek bilyalı dövme oranı uygulanan numunelerin yüzey katmanında daha yüksek sertlik değeri elde edildiğini göstermektedir. Yine %5000 ve %10000 oranlarla bilyalı dövme işlemine tabi tutulan numunelerden alınan mikro sertlik ölçümleri arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Mikrosertliğin bilyalı dövme oranıyla birlikte artmış olmasının, yüzeye yakın bölgedeki tane incelmesi ve dislokasyon yoğunluğunun artmasından dolayı olabileceği belirtilmiştir (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018).

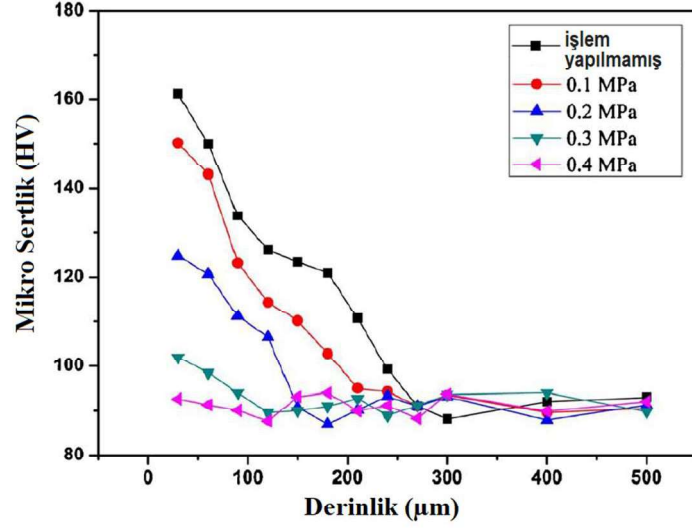
Al5052/Ti6Al4V parçalarının kaynaklandığı bölgeye yapılan bilyalı dövme işleminin etkilerinin incelendiği bir çalışmada kalıntı gerilme (Şekil 2.25) ve mikrosertlik (Şekil 2.26) ölçümleri yapılmıştır (Wang, ve diğerleri, 2018). Çalışmada bilyalı dövme işlemi farklı basınçlarda uygulanmıştır (Wang, ve diğerleri, 2018). Uygulamadaki basınç değeri bilyalı dövme yoğunluğunun farklı bir göstergesidir.



Şekil 2.25 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzeyinden Alınan Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçları.

(Wang, ve diğerleri, 2018)'den uyarlanmıştır.

Ölçüm sonuçları, bilyalı dövme uygulanmış numunedeki kalıntı basma gerilmesinin, bilyalı dövme uygulanmayan numuneden ~10 kat daha fazla olduğunu göstermiştir. En yüksek kalıntı basma gerilmesi değeri, en yüksek basınçta uygulanan bilyalı dövme ile alınmıştır (Wang, ve diğerleri, 2018).

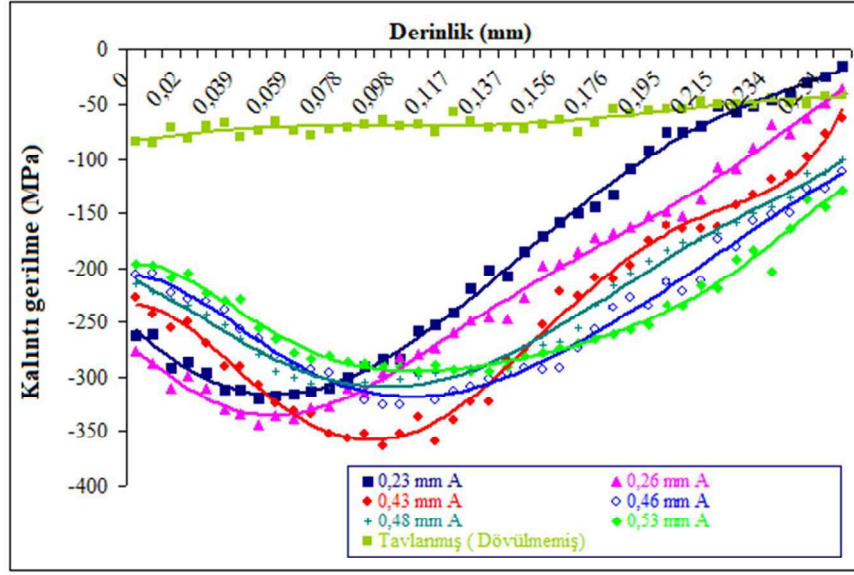


Şekil 2.26 : Farklı Basınlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzeyinden Alınan Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.

(Wang, ve diğerleri, 2018)'den uyarlanmıştır.

Derinliğe göre mikrosertlik ölçümlerinde alınan en yüksek mikrosertlik değeri 0,4 MPa basınç ile uygulanan bilyalı dövme işlemiyle elde edilmiş olup 162,1 HV olarak ölçülmüştür. Bilyalı dövme uygulanmayan numune için en yüksek mikrosertlik değeri de ~91 HV olarak ölçülmüştür. Derinlik arttıkça mikrosertlik değeri de düşmüştür (Wang, ve diğerleri, 2018).

1020 çelik için yapılan farklı bir çalışmada tavllanmış ve dövülmemiş, haddelenmiş ve bilyalı dövülmüş, tavllanmış ve bilyalı dövülmüş numunelerin yüzey kalıntı gerilmeleri ve yorulma ömürleri araştırılmıştır. 276 MPa ve 363 MPa arasında değişen kalıntı gerilmeler ölçülmüştür (Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013).



Şekil 2.27 : Farklı Yoğunluklarda Bilyalı Dövme Uygulanmış ve Tavlanmış Numunelerden Alınan Kalıntı Gerilme Ölçümü Sonuçları.

(Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013)'den uyarlanmıştır.

Bilyalı dövme şiddetinin belirli bir seviyeye ulaşmasıyla kalıntı gerilme artışı durmuştur. En yüksek kalıntı gerilme değeri 0,43 mm A (17 A) bilyalı dövme yoğunluğunda elde edilmiştir. Sadece tavllanmış ve dövülmemiş numunelerle farklı bilyalı dövme yoğunluğunda dövülmüş numunelerden alınan kalıntı gerilme ölçümleri Şekil 2.27'de grafik olarak verilmiştir (Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013). Tavlanıp bilyalı dövülen numunelerden alınan yüzey kalıntı gerilme değerleriyle en büyük kalıntı gerilme değerlerinin, haddelenip dövülmüş numunelerden alınan değerlerden daha fazla olduğu belirtilmiştir (Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013).

2.3.2 Bilyalı Dövmenin Mikroyapıya Etkileri ve İlgili Çalışmalar

Bilyalı dövmenin kalıntı gerilme etkisi dışında, parça yüzeyinde ve iç yapısında farklı etkileri de bulunmaktadır. Bu konularla ilgili de çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Önceki bölümde de paylaşılan, bilyalı dövmenin 39NiCrMo3 çelik numuneler üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada, farklı bilyalı dövme oranları sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018).

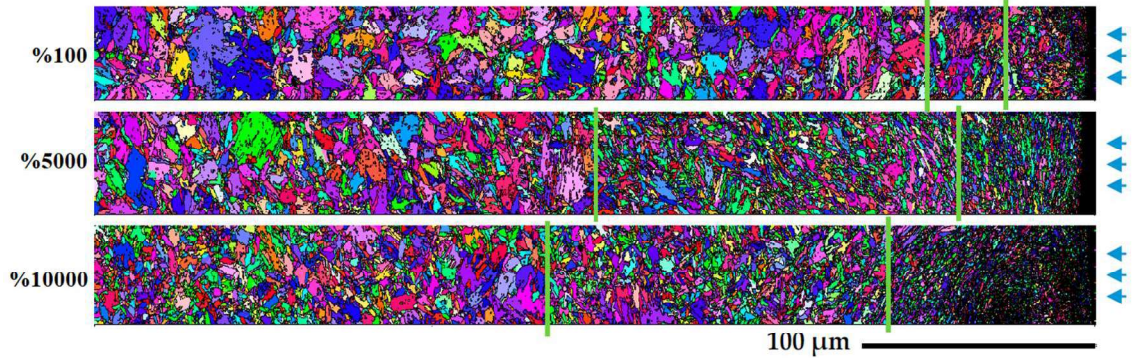
Tablo 2.2 : Farklı Oranlarda Bilyalı Dövme Uygulanan Düşük Alaşımli Çeliğin Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Bilyalı Dövme Oranı (%)	R _a (μm)	R _z (μm)	R _{maks} (μm)
100	5,84 ± 0,5	27,94 ± 2,62	34,30 ± 4,01
5000	7,05 ± 0,89	33,75 ± 3,31	44,37 ± 5,81
10000	6,58 ± 0,51	31,71 ± 2,47	44,83 ± 8,41

González, J., Peral, I. -B., Colombo, C., & Pariente, I. F. (2018). A Study on the Microstructural Evolution of a Low Alloy Steel by Different Shot Peening Treatments. *Metals*, 8(3), s. 187'den uyarlandı.

Yüzey pürüzlülük değerinin yüksek olması, yorulma ömrü açısından istenen bir durum değildir. Yüksek bilyalı dövme oranıyla yapılan bilyalı dövme işleminin yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşturduğu gözlemlenmiştir (Tablo 2.2). %5000 ve %10000 oranlarla bilyalı dövme uygulanan numunelerde yüzey pürüzlülük değerlerinin yakın olmasının, belirli bir bilyalı dövme oranı seviyesinden sonra yüzey pürüzlülük değerinin stabil olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018).

Aynı çalışmada, farklı oranlarda bilyalı dövme uygulanan numunelerden kesitler alınıp, yüzey bölgesindeki tane yapısı incelenmiştir.

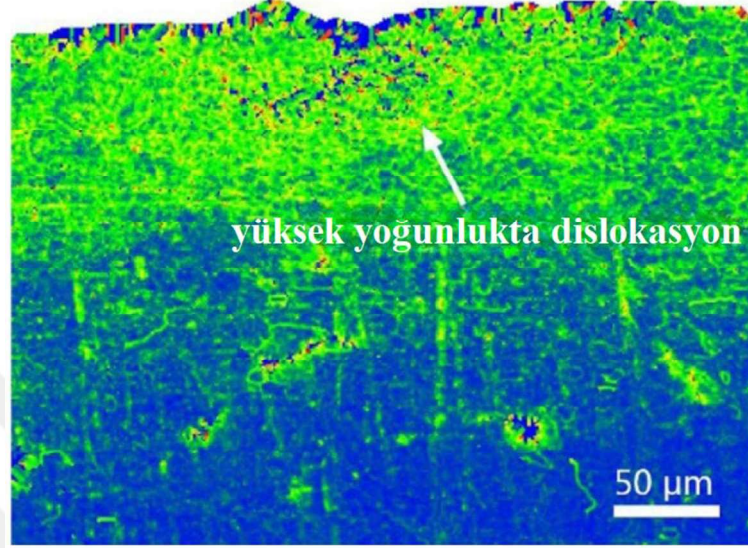


Şekil 2.28 : Farklı Oranlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzey Bölgesi Tane Yapısı.

(González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.28'de (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018) de görüldüğü gibi ok ile gösterilen bilyalı dövme uygulanmış yüzey bölgesinde tanelerde inceleme gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme oranının artmasıyla, tane incelmesinin olduğu bölgenin derinliği de artmıştır. Aynı çalışmada, yine yüzeye yakın bölgede, dislokasyon yoğunluğunun arttığından da bahsedilmiştir (González, Peral, Colombo, & Pariente, 2018).

Önceki bölümde de paylaşılan, Al5052/Ti6Al4V parçalarının kaynaklandığı bölgeye yapılan bilyalı dövme işleminin etkilerinin incelendiği çalışmada, bilyalı dövme sonrası yüzey bölgesinde tane incelmesi olduğundan bahsedilmiştir (Wang, ve diğerleri, 2018).

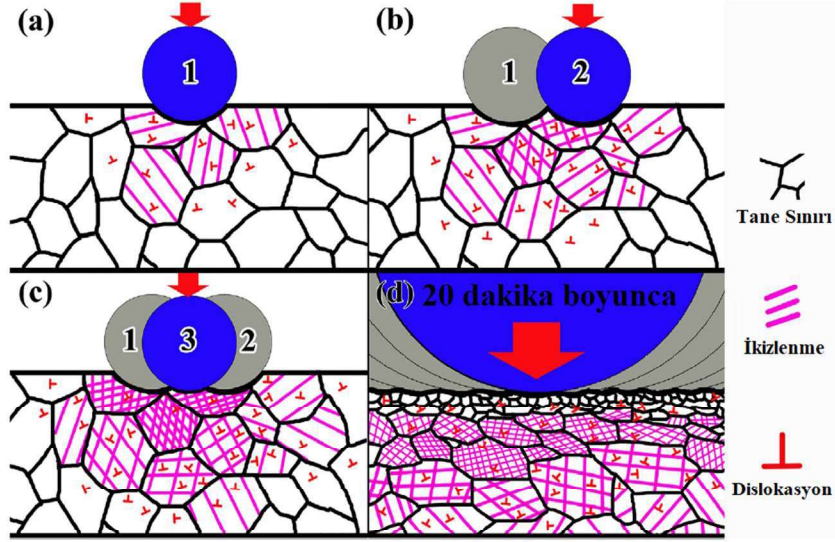


Şekil 2.29 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Yüzey Bölgesindeki Dislokasyon Yoğunluğu.

(Wang, ve diğerleri, 2018)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.29'da gösterildiği gibi, aynı çalışmada bilyalı dövme sonrası yüzey bölgesinde dislokasyon yoğunluğunun da arttığı bildirilmiştir (Wang, ve diğerleri, 2018).

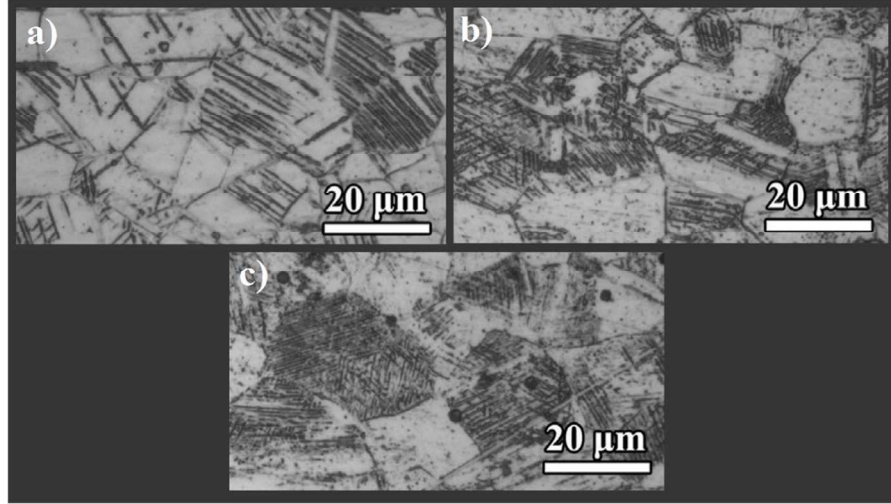
316L paslanmaz çelik üzerinde bilyalı dövmenin etkilerinin araştırıldığı farklı bir çalışmada ikizlenmeler üzerinde de durulmuştur. Tek bilya, iki bilya ve üç bilyanın çarptığı bölgelerle birlikte, uzun süre işlem yapılan aynı bölgedeki sonuçlar incelenmiştir (Li, ve diğerleri, 2022).



Şekil 2.30 : Tek Bilya (a), İki Bilya (b), Üç Bilya (c) Çarpma Bölgesi ile 20 Dakika Boyunca (d) İşlem Yapılan Bölgedeki Mikroyapı Gösterimi.

(Li, ve diğerleri, 2022)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.30'da (Li, ve diğerleri, 2022) da görüldüğü gibi tek bir bilyanın dahi çarptığı bölgede ikizlenmeler meydana gelmiştir. Aynı bölgeye çarpan bilya sayısı arttıkça, ikizlenme yoğunluğu da artmıştır. Bununla birlikte bu bölgedeki dislokasyon yoğunluğu ve tane incilmesi de çarpan bilya sayısı ve işlem süresine bağlı olarak artış göstermiştir (Li, ve diğerleri, 2022).



Şekil 2.31 : Tek Bilya (a), İki Bilya (b), Üç Bilya (c) Çarpma Bölgelerindeki İkizlenme Gösterimi.

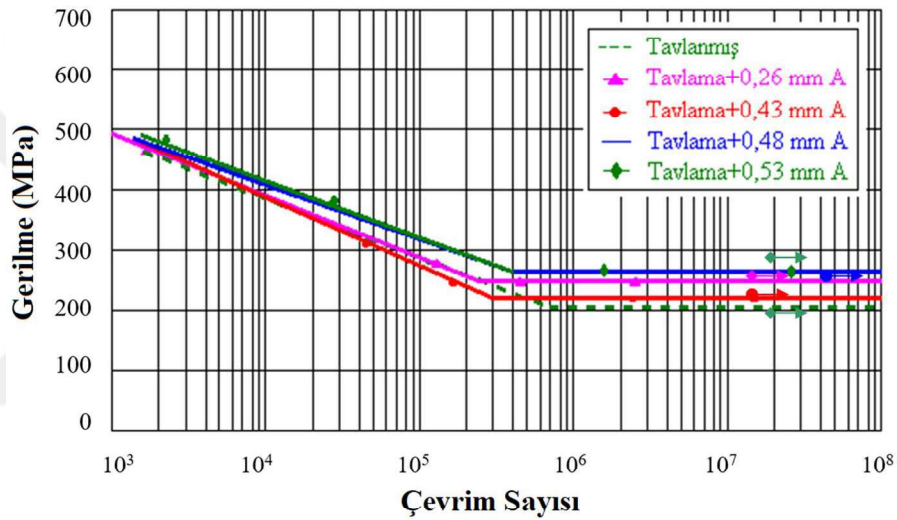
(Li, ve diğerleri, 2022)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.31’da (Li, ve diğerleri, 2022) verilen mikroyapı görselinde de görüldüğü gibi aynı bölgeye çarpan bilya sayısının artmasıyla ikizlenme yoğunluğu da artış göstermiştir.

2.3.3 Bilyalı Dövmenin Yorulmaya Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Bilyalı dövmenin kalıntı gerilmeyle ve diğer etmenlerle yorulma ömrüne etkileri, çeşitli çalışmalarda incelenmiştir.

Bölüm 2.3.1 de bahsedilen, 1020 çelik için yapılan tavllanmış ve dövülmemiş, haddelenmiş ve bilyalı dövülmüş, tavllanmış ve bilyalı dövülmüş numunelerinin kalıntı gerilme ölçümlerinin paylaşıldığı çalışmada yorulma ömürleri de kıyaslanmıştır.



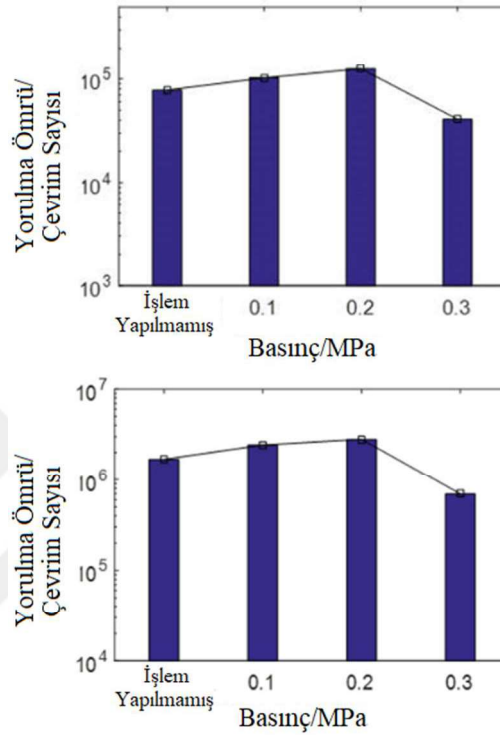
Şekil 2.32 : Farklı Yoğunluklarda Bilyalı Dövme Uygulanmış ve Tavllanmış Numunelerin S-N Grafikleri.

(Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.32’de (Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013) verilen grafikte de görüldüğü üzere tavllanmış ve bilyalı dövme uygulanmamış numunelerin yorulma dayanımı (yorulma limiti) 205 MPa’dır. 0,43 mm A yoğunlukta bilyalı dövme yapılmış numunelerin yorulma dayanımı 220 MPa seviyesindedir ve yorulma dayanımı %7 artış göstermiştir. 0,48 mm A ve 0,53 mm A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanan numunelerde ise yorulma dayanımı 265 MPa olarak bulunmuş olup sadece tavllanmış numunelere göre %29 artmıştır. Haddeleme ve bilyalı dövme yapılmış numunelerde ise 0,26 mm A ve 0,43 mm A yoğunlukta dövülen numunelerin sadece haddeleme yapılmış numunelere göre yorulma dayanımı değişmemiş olup 360 MPa seviyesinde olduğu belirtilmiştir. Haddelenmiş ve 0,53 mm A yoğunlukta bilyalı dövme

uygulanmış numunelerde ise yorulma dayanımı dövmenin yüzeye zarar vermesi sebebiyle %13 düşmüştür (Dülek, Orman, Karataş, & Sarıtaş, 2013).

Bilyalı dövmenin 20CrMnTi malzeme yorulma ömrüne etkisi ile ilgili yapılan bir çalışmada 0,1 MPa, 0,2 MPa ve 0,3 MPa yoğunluklarda ve %100, %200 oranlarda bilyalı dövme uygulanmıştır (Qian, ve diğerleri, 2023).

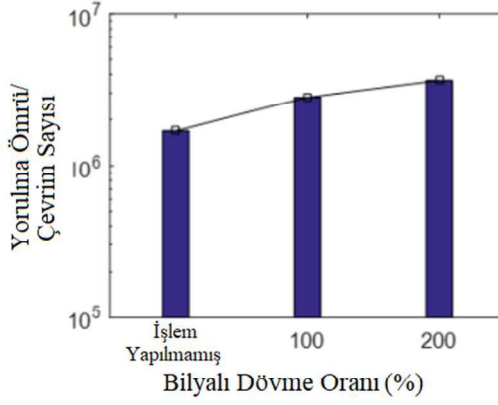
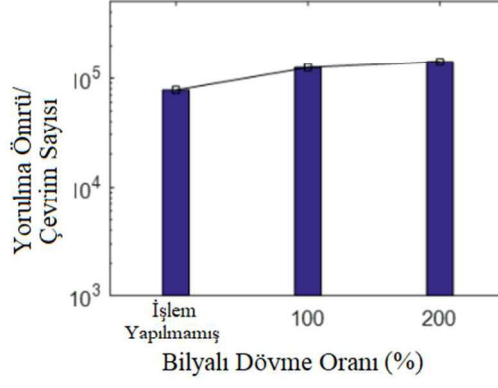


Şekil 2.33 : Farklı Basınçlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin 700 MPa (Üst) ve 630 MPa (Alt) Gerilme Değerlerindeki Yorulma Ömürleri.

(Qian, ve diğerleri, 2023)'den uyarlanmıştır.

0,1 MPa ve 0,2 MPa basınçlarda bilyalı dövme yapılmış numunelerin yorulma ömürleri, bilyalı dövme yapılmamış numunelere göre artış göstermiştir (Şekil 2.33). 0,3 MPa basınçta bilyalı dövme yapılmış numunede ise yorulma ömrü, işlem yapılmamış numunelere göre düşmüştür. Yüksek yoğunlukta bilyalı dövmenin, yüzey pürüzlülüğünü de arttırmasıyla, yorulma ömrü olumsuz olarak etkilenmiştir (Qian, ve diğerleri, 2023).

Aynı çalışmada bilyalı dövme oranının yorulma ömrüne etkileri de incelenmiştir.

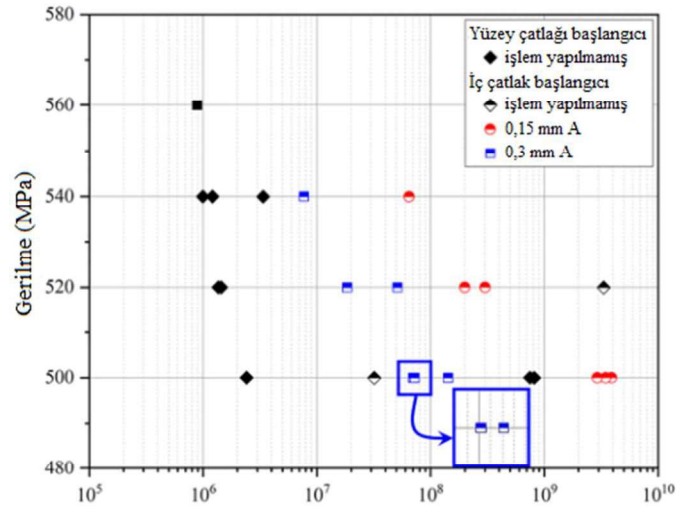


Şekil 2.34 : Farklı Oranlarda Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin 700 MPa (Üst) ve 630 MPA (Alt) Gerilme Değerlerindeki Yorulma Ömürleri.

(Qian, ve diğerleri, 2023)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.34'te (Qian, ve diğerleri, 2023) görüldüğü gibi bilyalı dövme oranının artmasıyla yorulma ömrü de artış göstermiştir (Qian, ve diğerleri, 2023).

GH4169 süper alaşım malzemeden imal edilen ve 0,15 mm A (6A) ve 0,3 mm A (12A) yoğunlukta bilyalı dövme uygulanan numunelerin yüksek çevrimli yorulma ömürleri kıyaslanmıştır (Qin, ve diğerleri, 2023).



Şekil 2.35 : Farklı Yoğunluklarda Bilyalı Dövme Uygulanmış ve İşlem Yapılmamış Numunelerin S-N Grafikleri.

(Qin, ve diğerleri, 2023)'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.35'te (Qin, ve diğerleri, 2023) de görüldüğü gibi, bilyalı dövme uygulanan numunelerin yorulma ömürleri genel olarak bilyalı dövme yapılmamış numunelerden daha uzundur. 0,15 mm A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanan numunelerin yorulma ömrü, 0,3 mm A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanan numunelerden daha uzundur. Bunun sebebi ise yüksek yoğunlukta yapılan bilyalı dövme sonucu, yüzey pürüzlülüğünün de artmasıdır (Qin, ve diğerleri, 2023).

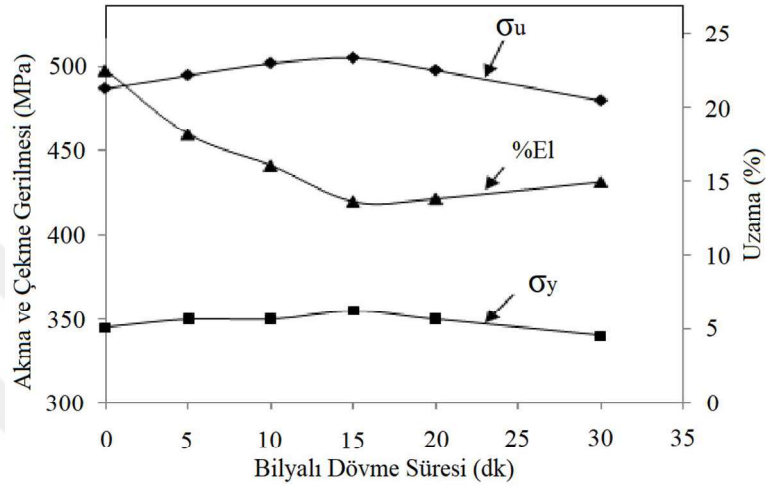
2.3.4 Bilyalı Dövmenin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Bilyalı dövmenin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve gerinim üzerindeki etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir.

Bir çalışmada bilyalı dövmenin, nikel bazlı süper alaşım olan 720Li malzemenin çekme mukavemeti ve sünekliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Numunelere %1000 oranda bilyalı dövme uygulanmış ve 200-650°C arasında, iki farklı yük durumunda çekme testine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda bilyalı dövme yapılmış numunelerin sünekliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca işlem yapılan numunelerin yüzeyinde mikro çatlaklara rastlanırken, işlem yapılmayan numunelerin yüzeyinde mikro çatlak görülmemiştir. Bununla birlikte %125, %200, %400 ve %600 oranlarda bilyalı dövme uygulanan numunelere de çekme testleri uygulanmış; sünekliğin ve çekme mukavemetinin en az düştüğü numune %125 oranda bilyalı dövme uygulanan numune olmuştur. Daha yüksek bilyalı dövme oranlarında işlem yapılan numunelerin çekme

mukavemeti ve süneklikleri de daha düşük olarak tespit edilmiştir (Jackson, Rolph, & Hardy, 2020).

Farklı sürelerde bilyalı dövme uygulanan AA 2024 T4 malzemeden üretilen numunelerin düşük çevrimli yorulma ömürlerinin test edildiği bir çalışmada, akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve gerinim özelliklerinin değişimi üzerinde de durulmuştur (Abood, Saleh, Salem, Kadhim, & Abdullah, 2013).

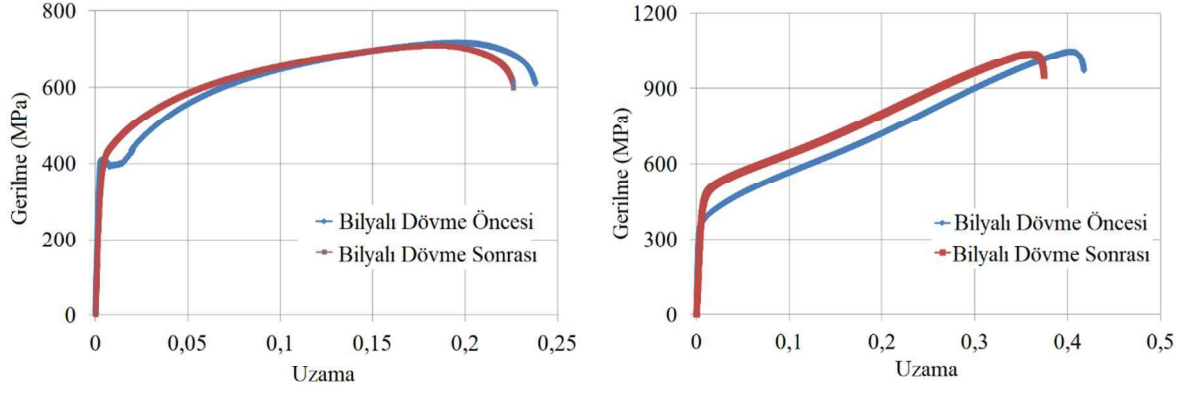


Şekil 2.36 : Bilyalı Dövmenin Akma ve Çekme Gerilmesiyle Yüzde Uzamaya Etkisinin Gösterimi.

(Abood, Saleh, Salem, Kadhim, & Abdullah, 2013)'den uyarlanmıştır.

15 dakika süreyle bilyalı dövme uygulanan numunelerde akma gerilmesi %2,8, çekme gerilmesi de %3,6 artmıştır. Bilyalı dövme süresinin artmasıyla bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 2.36). Yüzde uzama, bilyalı dövmeden en çok etkilenen malzeme özelliği olmuştur (Abood, Saleh, Salem, Kadhim, & Abdullah, 2013).

Elek olarak kullanılan sac metal malzemelere uygulanan bilyalı dövmenin, mekanik özelliklere olan etkileri üzerinde yapılan bir çalışmada, akma ve çekme gerilmesine net bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir (Şekil 2.37). Bununla birlikte işlem yapılan yüzeylerin toplam uzamasının azaldığı bildirilmiştir (Śledź, Bąk, Stachowicz, & Zielecki, 2013).



Şekil 2.37 : Bilyalı Dövmenin Çekme Özelliklerindeki Etkilerini Gösteren Grafikler (30HGSA Solda, 1.4301 Sağda).

(Śledź, Bąk, Stachowicz, & Zielecki, 2013)'den uyarlanmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarda, bilyalı dövme işlemi gören parçalardaki kalıntı gerilme ve mikrosertlik değerleri ölçülmüş; bununla birlikte bilyalı dövmenin yorulma ömrüne etkileri de incelenmiştir. Bilyalı dövme sonrası parça yüzeyine yakın bölgelerde basma yönünde kalıntı gerilme oluşmaktadır. Bu da ortalama gerilme (σ_m) değerinin daha düşük olmasını sağlayarak yorulma ömrünü arttırmaktadır. Bazı çalışmalarda bilyalı dövme sonrası parça yüzeyine yakın bölgelerde, mikroyapıdaki değişiklikler üzerinde durulmuştur. Bilyalı dövme sonrası yüzeye yakın tanelerde inceleme görülmüş, bilyalı dövme arttıkça tane incelmesinin derinliği de artmıştır. Ayrıca yine yüzeye yakın bölgelerde dislokasyon yoğunluğu ve ikizlenme miktarı da bilyalı dövme sonrası artış göstermiştir.

Bu çalışmada ise bilyalı dövmenin yoğunluk ve bilyalı dövme oranı parametrelerinin, 17-4 PH H1150 malzeme için düşük çevrimli yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı yoğunluk ve bilyalı dövme oranlarında bilyalı dövme uygulanan numunelere düşük çevrimli yorulma testleri yapılmıştır. Numune gruplarının yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve farklı birkaç gruptan alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri alınarak yüzeye yakın bölgenin mikrosertlik ölçümleri de elde edilmiştir. Taguchi metodu kullanılarak bilyalı dövme parametrelerinin etkileri matematiksel olarak da ifade edilmiştir.

3. MALZEME VE METOT

Çalışmanın bu bölümünde numuneler için kullanılacak malzeme seçimi, numunelerin üretimi ve ısıl işlemi, numunelerin gruplara ayrılması ve bilyalı dövme işleminin yapılması, düşük çevrimli yorulma testlerinin yapılması hakkında bilgi verilmiştir.

3.1 Malzeme Seçimi

Test numuneleri için 17-4 PH (H1150) malzeme seçilmiştir. 17-4 PH malzeme, geniş bir endüstri yelpazesinde yaygın olarak tercih edilen, çökme sertleşmesi uygulanan martenzitik bir paslanmaz çeliktir. Malzemenin öne çıkan özellikleri; yüksek mukavemet ve sertlik, çok iyi korozyon direnci ve kolay ısıl işlem uygulanabilmesidir. Bunlarla birlikte kaynaklanabilirliği, dövme, döküme ve talaşlı imalata uygun olması da tercih sebebi olan diğer özellikleridir (AK Steel International, 2018).

17-4 PH malzeme, aynı zamanda çatlak ilerlemesine karşı da oldukça dirençlidir. Bu yönüyle ömür özellikleri de ön plana çıkmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda sertlik, mukavemet ve korozyon direnci ihtiyacının olduğu; havacılık ve uzay sanayisi, petrol endüstrisi, silah sanayisi gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (AK Steel International, 2018).

Çalışma için bu malzemenin seçilmesinin sebebi ise özellikle havacılık ve uzay sanayi ile savunma sanayide yaygın olması, çeşitli uygulamalarda da bilyalı dövme işlemine tabi tutulmasıdır.

Bu malzeme, %17 Krom, %4 Nikel içerdiği ve “Precipitation Hardening” yani çökme sertleşmesi yapılmış olmasından dolayı adını 17-4 PH olarak almıştır. 17-4 PH adı, üretici markanın verdiği isimdir. Farklı standartlarda Tablo 3.1’deki şekilde isimlendirilmektedir.

Tablo 3.1 : 17-4 PH Malzemenin Farklı Standartlardaki Gösterimi.

Malzeme Adı	Standart
630	AISI
X5CrNiCuNb16-4	EN / BS
1.4542	DIN
ZYCNU17-04	AFNOR
S17400	UNS
SUS630	JIS

17-4 PH malzemenin kimyasal kompozisyonu için üreticisinin paylaştığı veriler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 : 17-4 PH Kimyasal Kompozisyonu (Elemenler Üstte, Kütlece Yüzdeler Altta).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Nb
<0,07	<1	<0,04	<0,03	<1	15-17,5	3-5	3-5	0,15-0,45

AK Steel International. (2018). Armco 17-4 PH Stainless Steel Product Data Bulletin’den uyarlandı.

17-4 PH malzemenin ısıtılmasına bağlı olarak farklı çeşitleri bulunmaktadır. İmal edildiği haliyle “Condition A” olarak tabir edilmektedir. Bu haliyle malzeme, 1038±14°C sıcaklıkta 0,5 saat çözeltiye alma ısıtılmasına tabi tutulup; yağ, hava ve polimer veya 32°C sıcaklıktan düşük havada soğutulmuştur. “Condition A” koşulunda olan 17-4 PH malzeme çeşitli ısıtılmalara tabi tutularak farklı özellikler elde edilebilmektedir (AK Steel International, 2018). Bu ısıtılma işlemlerinin nasıl yapılacağı bilgisi de üretici firma tarafından ve AMS2759/3 standardında verilmiştir (Tablo 3.3). Malzemenin farklı koşullardaki isimleri, Fahrenheit cinsinden ısıtılma sıcaklığını ifade etmektedir.

Tablo 3.3 : 17-4 PH Malzemenin Isıl İşlemleri.

Koşul	Isıl İşlem Sıcaklığı	Süre (Saat)	Soğutma
H900	482°C (900°F)	1	Hava
H925	496°C (925°F)	4	Hava
H1025	552°C (1025°F)	4	Hava
H1075	579°C (1075°F)	4	Hava
H1100	593°C (1100°F)	4	Hava
H1150	621°C (1150°F)	4	Hava
H1150-D	621°C (1150°F)	4	Hava
	621°C (1150°F)	Takip Eden 4	Hava
H1150M	760°C (1400°F)	2	Hava
	621°C (1150°F)	Takip Eden 4	Hava

SAE International. (2020). Heat Treatment Precipitation-Hardening Corrosion-Resistant, Maraging, and Secondary Hardening Steel Parts. AMS2759/3. SAE International'dan uyarlandı.

Farklı ısıl işlemler sonucu malzemelerin mekanik özellikleri de Tablo 3.4'te verilmiştir. Burada ısıl işlem sıcaklığı düşük olan malzemelerin daha gevrek olduğu görülebilmektedir.

Tablo 3.4 : 17-4 PH Malzemenin Farklı Koşullardaki Tipik Mekanik Özellikleri.

Mekanik Özellik	H900	H925	H1025	H1075	H1100	H1150	H1150-D	H1150M
Çekme (MPa)	1379	1310	1172	1138	1034	1000	965	862
%0,2 Akma (MPa)	1276	1207	1138	1034	931	862	758	586
% Uzama	14	14	15	16	17	19	20	22
Sertlik (HRC)	44	42	38	36	35	33	31	27
Charpy V Çentik Darbe Enerjisi (J)	20	34	47	54	61	68	108	135

AK Steel International. (2018). Armco 17-4 PH Stainless Steel Product Data Bulletin'den uyarlandı.

Değişken yüklere maruz kalan parçalar için daha tok bir malzemenin seçilmesi uygun olacağından 17-4 PH için H1150 ısıl işlemlili malzeme seçilmiştir.

3.2 Malzeme Temini ve Test Numunelerinin İmalatı

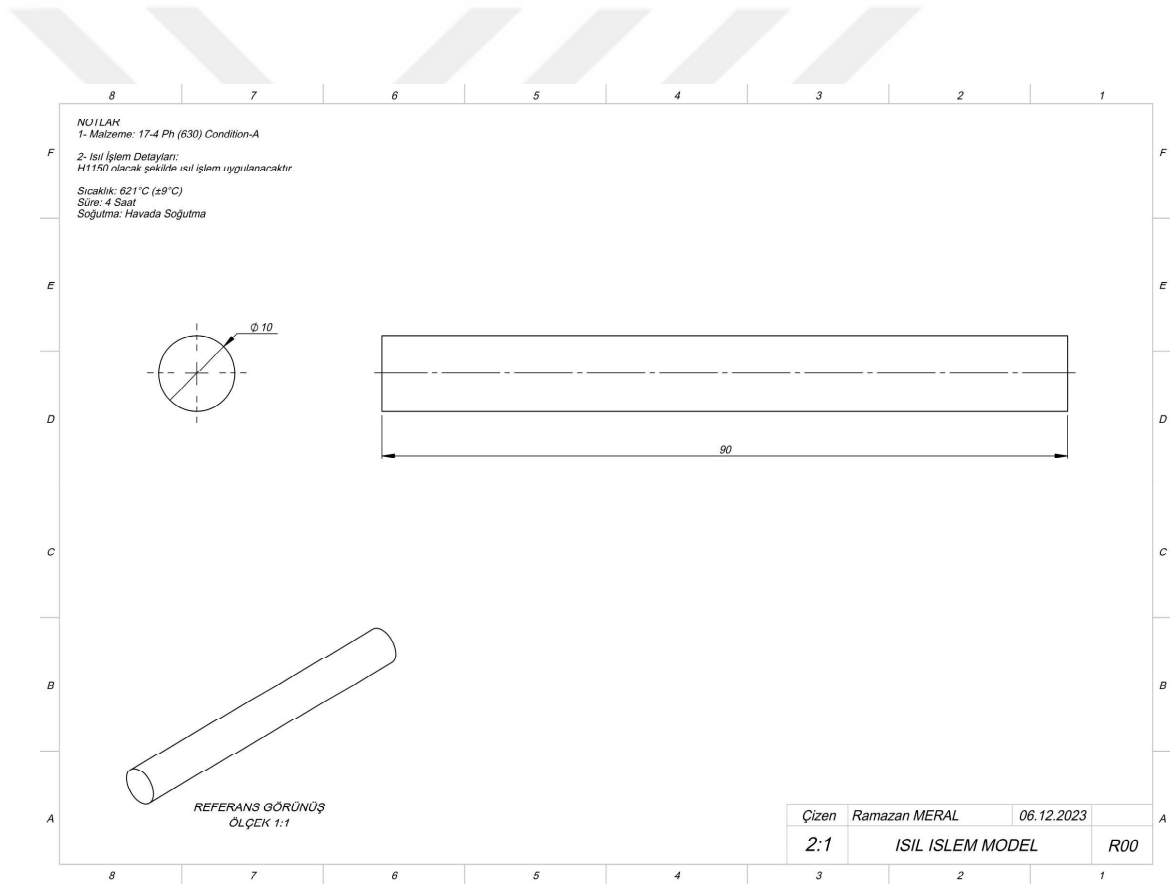
Testler için kullanılacak olan 17-4 PH (630) malzeme, 'Condition A' olarak, Swiss Steel Group – Ugitech marka, Ø10 mm olarak çubuk şeklinde temin edilmiştir. H1150 olarak temin edilmemesinin sebebi de üreticinin özellikler küçük çaplarda 'Condition A' dışında üretim yapmıyor olmasıdır. Ancak yüksek adetli alımlarda özel sipariş üzerine istenilen kondisyonda ısıl işlem ile temin edilebilmektedir.

Malzeme 'Condition A' haliyle de kullanılabilir. Ancak özellikle dinamik yükler altında ve soğuk dövme uygulamalarında piyasada kullanımının yaygın olmaması ve üreticinin de tavsiye etmemesiyle, malzeme bu durumda tercih edilmemiştir.

Çubuk şeklinde temin edilen malzeme 90 mm'lik parçalara ayrılmıştır.

17-4 PH Condition A malzemenin H1150 yapılabilmesi için Akalın Isıl İşlem Çelik San. Ve Tic. Ltd. firmasında ısıl işlem uygulaması yapılmıştır.

AMS2759/3 standardında ve üretici firma dokümanında da belirtildiği gibi H1150 kondisyon için 621°C ($\pm 9^\circ\text{C}$) sıcaklıkta 4 saat ısıl işleme tabi tutulan parça, sonrasında hava ile soğutulmuştur.



Şekil 3.1 : Isıl İşlem İçin Firmayla Paylaşılan Doküman.

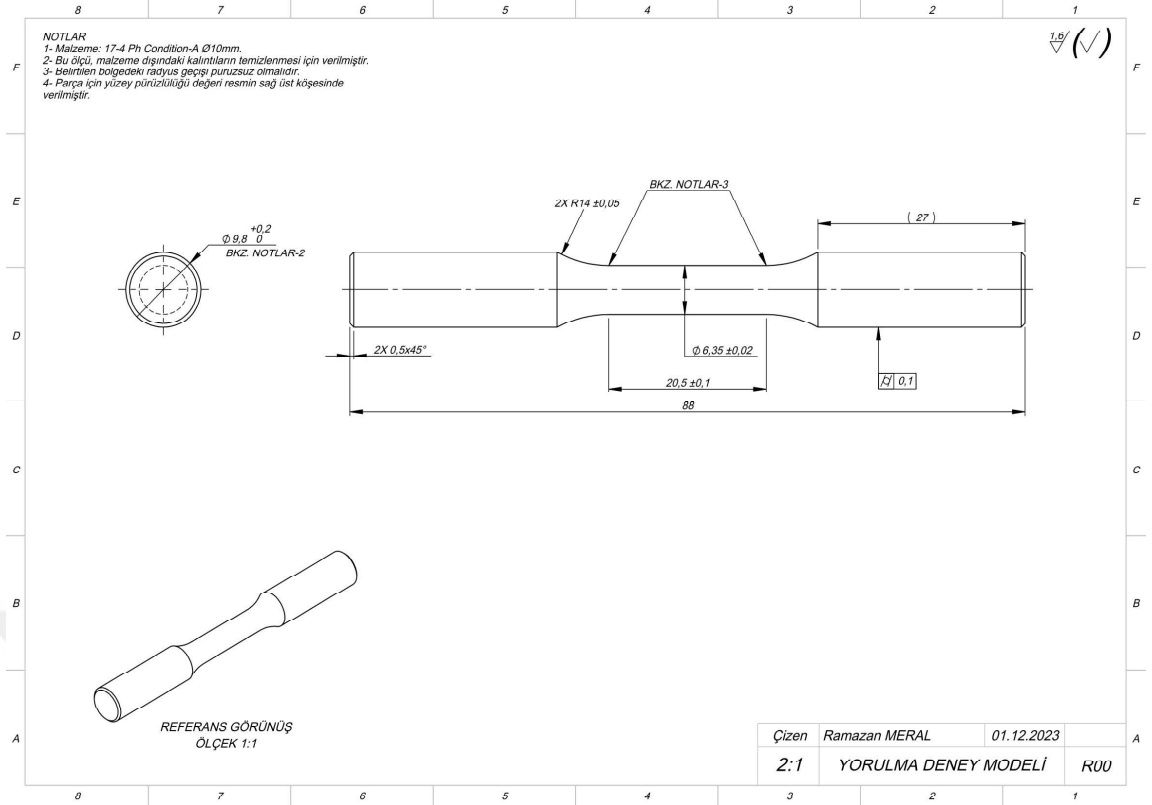


Şekil 3.2 : Uygulama Yapılan Ipsen Marka Isıl İşlem Fırını.



Şekil 3.3 : Isıl İşlem Sonrası Parçalardan Birinin Görsele.

Isıl işlemden sonra talaşlı imalat yapılarak, ASTM E606 standardında belirtilen numuneler uygun geometride işlenmiştir. Numune geometrilerinin yorulma testinin yapılacağı Instron 8803 cihazına uygunluğu da teyit edilmiştir.



Şekil 3.4 : Talaşlı İmalat İçin Firma ile Paylaşılan Teknik Resim.

Yorulma numunelerinde kırılacak bölge olarak belirlenen en küçük çaplı bölgenin radyuslarla birlikte en büyük çapa kadar olan kısımlarının yüzey pürüzlülükleri, ilgili standartlarda $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ olarak belirtilmiştir. Bilyalı dövme uygulanmayacak olan numuneler için yüzey pürüzlülük değeri $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ olacak şekilde imalat yapılabilir. Ancak bu durumda bilyalı dövme yapılan numuneler ile yüzey pürüzlülüğü $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ olan parçaların kıyaslaması yapılmış olacaktır. Bir parçanın yüzey pürüzlülüğünün $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ olarak elde edilmesi için yüksek kalite taşlama gibi ek bir yüzey işlemi gerekmektedir. Parça torna ile ince işleme yapılarak imal edildikten sonra yüzey pürüzlülük değeri $R_a = 1,6-3,2 \mu\text{m}$ olmaktadır. Herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış parça ile bilyalı dövme yapılmış parçalar kıyaslanmak istendiğinden, bilyalı dövme yapılmamış test numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri teknik resimde $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ olarak belirtilmiştir. Parça Ø10 mm olarak temin edildiğinden, en büyük çaplarda herhangi bir işleme yapılmamıştır.



Şekil 3.5 : Üretimi Yapılmış Numunelerden Birkaç Adedinin Görseli.

3.3 Bilyalı Dövme Parametrelerinin Belirlenmesi ve Bilyalı Dövmenin Uygulanması

Bilyalı dövme için medya olarak AMS2431/2 standardında ASH 110 bilya kullanılmıştır. Bu standart 55-62 HRC arasında sertliğe sahip döküm çelik bilyaları kapsamaktadır.

3A, 4,5A ve 6A bilyalı dövme yoğunluğu, %100, %200 ve %300 bilyalı dövme oranı, bilyalı dövme parametreleri olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.5 : Bilyalı Dövme Parametreleri ve Üretilen Numune Sayısı.

Numune Grup No	Yoğunluk	Bilyalı Dövme Oranı (%)	Adet
1	3A	100	4
2	3A	200	4
3	3A	300	4
4	4,5A	100	4
5	4,5A	200	4
6	4,5A	300	4
7	6A	100	4
8	6A	200	4
9	6A	300	4
10	İşlem Yapılmamış		4
TOPLAM			40

Belirlenen parametreler ile, aynı bilyalı dövme yoğunluğunda ve farklı bilyalı dövme oranlarında dövülen numunelerin düşük çevrimli yorulma ömrü ile, aynı bilyalı dövme oranlarında ve farklı yoğunluklarda dövülen numunelerin düşük çevrimli yorulma ömrü kıyaslanabilecektir. Toplam 40 adet numune üretilmiştir. Bütün numuneler ile test yapılmamıştır. Her bir grup için bir test yapılmıştır. Alınan sonuçlara göre iki ya da üç test yapılan grup da mevcuttur.

Bilyalı dövme işlemleri TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. firmasında yapılmıştır.







Şekil 3.6 : Bilyalı Dövme Uygulanan Numune Gruplarının Görselleri.

Bilyalı dövme uygulanan numunelerin uygulama sonrası çekilen fotoğrafları Şekil 3.6'da verilmiştir. Resimler, Tablo 3.5'de verilen numune grup numarası ile aynı sırada paylaşmış ve resimlerin sol üst köşesine numune grup numaraları yazılmıştır.

3.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü de kalıntı gerilmeyle birlikte yorulma ömrünü etkileyen önemli etkenlerden birisidir. Düşük çevrimli yorulma bölgesinde, yüzey pürüzlülüğünün kalıntı gerilmeden daha etkili olduğunu paylaşan çalışmalar mevcuttur (Klotz,

Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018) (Trung, Khun, & Butler, 2018). Bununla birlikte incelenen diğer çalışmalarla; malzeme, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme seviyelerine bağlı olarak değişebileceği anlaşılmıştır (Bag, ve diğerleri, 2020) (Sahoo, Satpathy, Prasad, Ahmed, & Kumar, 2013) (Chung, Chen, Lee, & Tsay, 2021). Yorulma testleri öncesinde, parçaların yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek kaydedilmiştir.

3.5 Düşük Çevrimli Yorulma Testleri

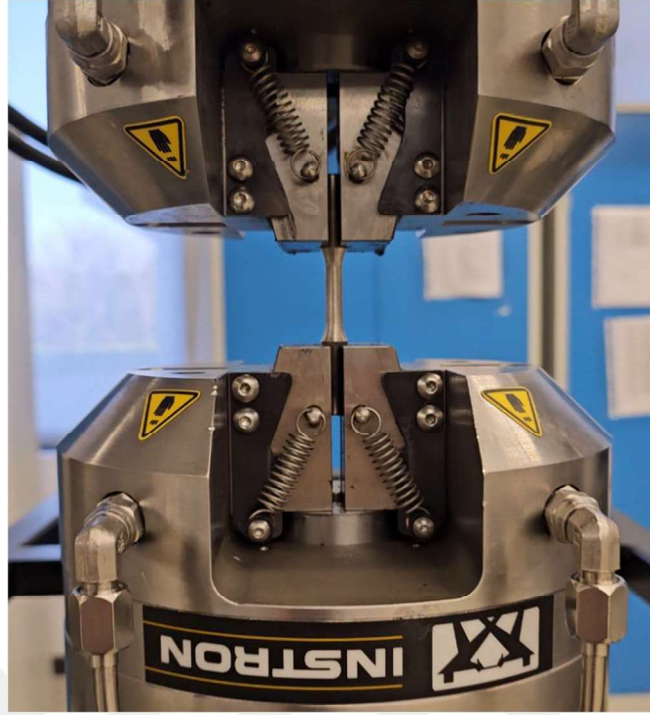
17-4 PH H1150 malzemenin düşük çevrimli yorulma bölgeleri ve bu bölgelerdeki gerilmeye karşılık gelen çevrim sayısı hakkında bilgi edinmek için daha önce yapılan çalışmalar üzerinden literatür araştırması yapılmıştır (Concli, Fraccaroli, Nalli, & Cortese, 2022) (Wu & Lin, 2002) (Sezgin & Yamabe, 2019).

Bu araştırmalar sonucu elde edilen verilerle düşük çevrimli yorulma testleri için test parametreleri belirlenmiştir. Parametrelerin netleştirilmesi için bilyalı dövme uygulanmamış olan fazla numuneler ile denemeler yapılmıştır.

Tablo 3.6 : Düşük Çevrimli Yorulma Testi Parametreleri.

Test	Yük Oranı	Gerinim Aralığı	Çevrim Frekansı
LCF	R=-1	%0,9 (0,009 mm/mm – 0 mm/mm)	4 Hz

Çevrim frekansı düşük çevrimli yorulma testlerinde, ısınmanın etkisini azaltmak için ~1 Hz olacak şekilde daha düşük seçilebilmektedir. Ancak bu çalışmada yorulma karakteristiği belirlemeden ziyade, yorulma ömrü kıyaslaması yapıldığından ve test koşulları bütün numuneler için aynı olduğundan çevrim frekansının etkisi olmayacaktır.



Şekil 3.7 : Düşük Çevrimli Yorulma Testi Yapılan Bir Numune.

Düşük çevrimli yorulma testi sırasında çekilen bir fotoğraf Şekil 3.7’de verilmiştir.

3.6 Metalografik Numune Hazırlama

Testler sonrasında, üç farklı numune grubundan (5, 9 ve 10 numaralı numune grupları) kesilerek numune alınmıştır. Sonrasında kalıplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kalıplama işlemi sonrası sırasıyla 120, 320 ve 800 numara alümina zımpara kağıtlarıyla koloidal zımparalama işlemi yapılmıştır. Her bir zımparalama işlemi 30 N, 300 RPM ve ikişer dakika şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Final parlatma işlemi, OP-S solüsyonda, aşındırıcı boyutu 0,06 μm olarak 2 dakika uygulanmıştır. Son 30 saniyesi de sulu şekilde icra edilmiştir ve kral suyu olarak adlandırılan sıvıyla (Aqua regia) dağlanmıştır. Kullanılan kral suyunun kimyasal bileşimi 3 kısım hidroklorik asit (HCl), 1 kısım nitrik asittir (HNO₃).



Şekil 3.8 : Zımparalama ve Parlatma İşlemlerinin Yapıldığı Cihaz (Solda) ile Dağlama İşlemleri Yapılmış Numuneler (Sağda).

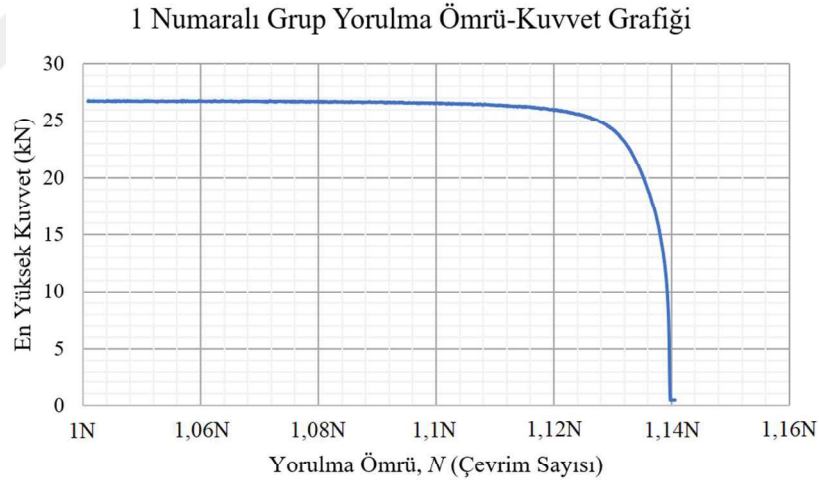
Zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı cihaz ile bu işlemler ve dağlama sonrası numunelerin fotoğrafları Şekil 3.8’de verilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde düşük çevrimli yorulma testleri sonuçları paylaşılmıştır. Bu sonuçlar grafikler üzerinde de gösterilmiştir. Taguchi L9 dizinine oturtulan testler için parametrelerin etkileri ortaya konulmuştur. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Farklı üç gruptan alınan örnekler ile mikroyapı ve mikrosertlik ölçümleri yapılarak sonuçları paylaşılmıştır.

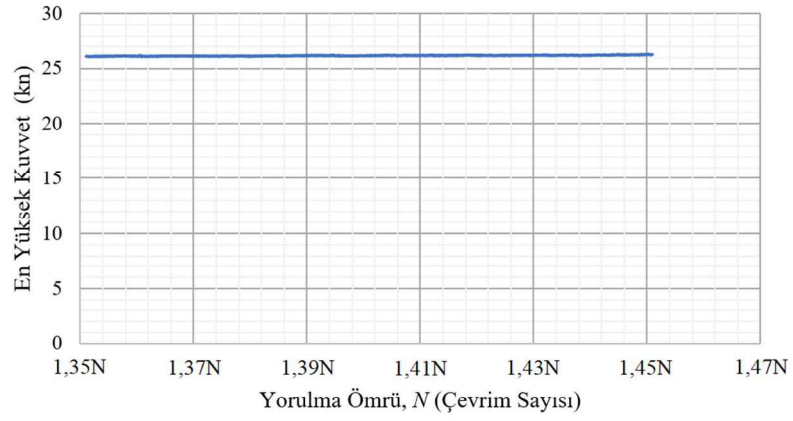
4.1 Yorulma Testi Sonuçları

Bilyalı dövme işlemi yapılmamış 10 numaralı numune grubunun testleri öncelikle yapılmıştır. Diğer numune gruplarının testleri de 10 numaralı numune grubuyla aynı olacak şekilde Tablo 3.6’de verilen test parametreleri ile tamamlanmıştır.



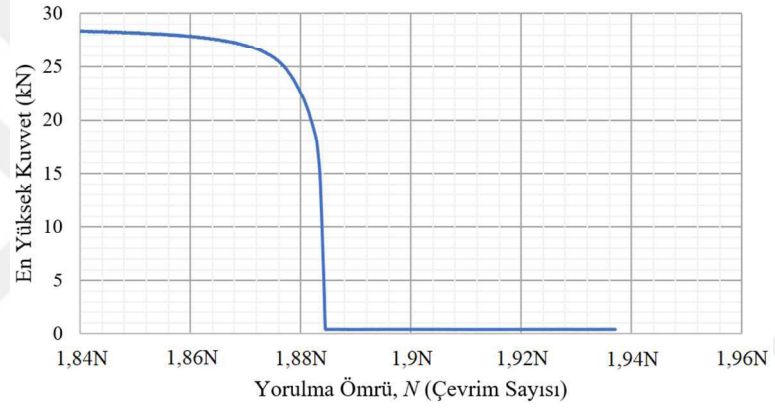
Şekil 4.1 : 1 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

2 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



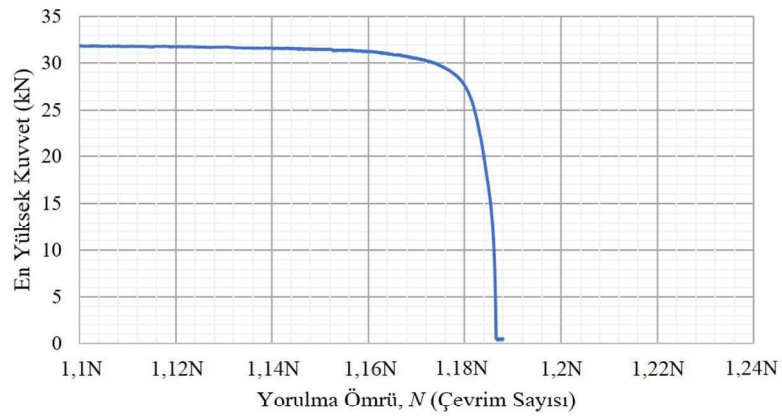
Şekil 4.2 : 2 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

3 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



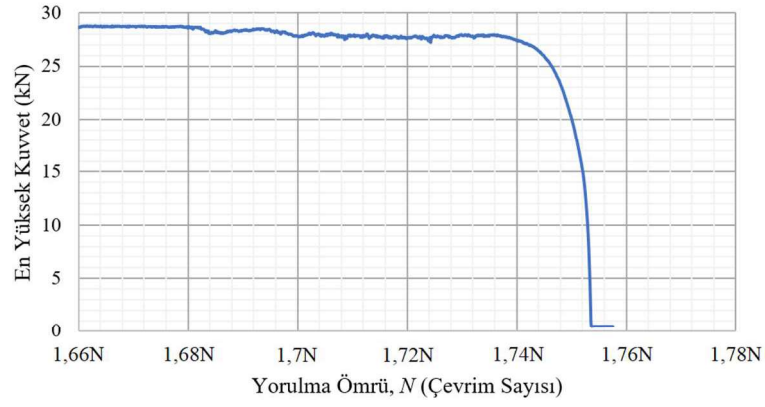
Şekil 4.3 : 3 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

4 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



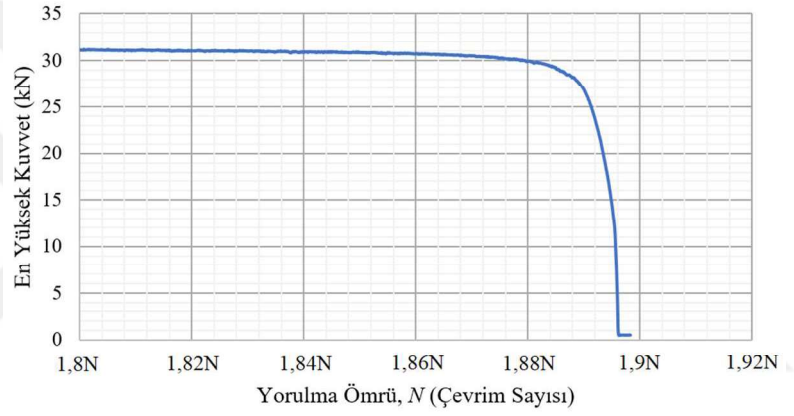
Şekil 4.4 : 4 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

5 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



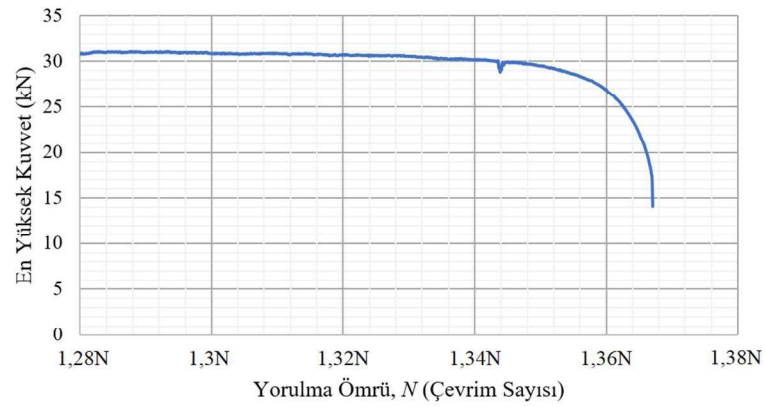
Şekil 4.5 : 5 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

6 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



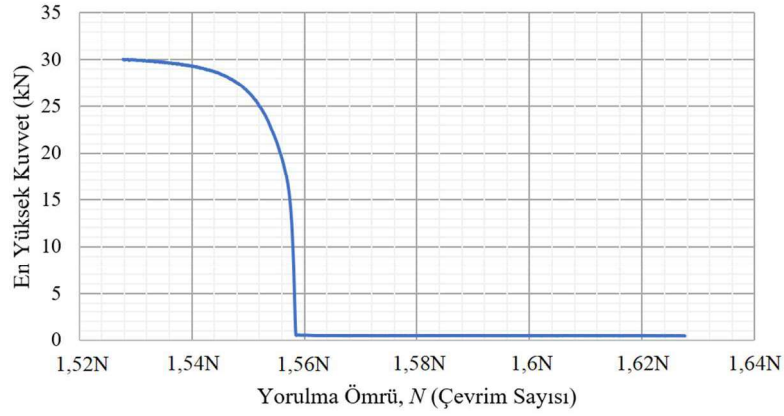
Şekil 4.6 : 6 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

7 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



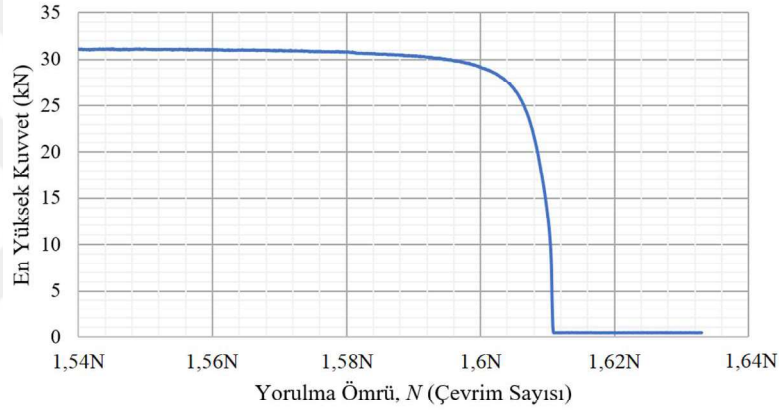
Şekil 4.7 : 7 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

8 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



Şekil 4.8 : 8 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

9 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği



Şekil 4.9 : 9 Numaralı Grup Yorulma Ömrü-Kuvvet Grafiği.

Şekil 4.1'den Şekil 4.9'a kadar kopmadan önce numunelere uygulanan en yüksek kuvvetin grafikleri paylaşılmıştır. Tablo 4.1'de de belirtildiği gibi 1 numaralı gruptan alınan numunenin yorulma ömrü 1,14N çevrim olarak kaydedilmiştir. Bu çevrim sayısı Bölüm 2.2.3.1'de belirtildiği gibi numunelerin ikiye ayrıldığı durum hasar kriteri olarak kabul edildiğinde elde edilmiştir. 1 numaralı numune için, Şekil 4.1'de numunenin kopmadan önce en yüksek kuvvet değerlerini gösteren grafik verilmiştir. Yine Bölüm 2.2.3.1'de de belirtildiği gibi hasar kriteri olarak yükün yarı yarıya düştüğü çevrim sayısı kabul edildiğindeki durumda da yorulma çevrim sayısı 1,138N olmaktadır. Numunenin ikiye ayrıldığı durumdaki çevrim sayısı ile uygulanan en yüksek kuvvetin yarıya düştüğü çevrim sayısı arasındaki farkın en yüksek olduğu durum, 8 numaralı numunenin üçüncü testinde %4 fark ile gerçekleşmiştir. Bu fark da yapılan kıyaslama için herhangi bir değişiklik teşkil etmeyeceğinden numunelerin koparak ikiye ayrıldığı çevrim sayısı, hasar kriteri olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.1 : Numunelerin Düşük Çevrimli Yorulma Ömürleri.

Numune Grup No	Yoğunluk	Bilyalı Dövme Oranı (%)	Düşük Çevrimli Yorulma Ömrü (Çevrim Sayısı)		
			Test-1	Test-2	Test-3
1	3A	100	1,14N	-	-
2	3A	200	1,45N	0,56N	-
3	3A	300	1,93N	-	-
4	4,5A	100	0,8N	1,18N	-
5	4,5A	200	1,75N	-	-
6	4,5A	300	1,89N	-	-
7	6A	100	1,36N	-	-
8	6A	200	2,71N	0,96N	1,62N
9	6A	300	1,63N	-	-
10	İşlem Yapılmamış		1N	0,74N	-

Tablo 3.6’da verildiği gibi, yorulma ömrü 10 numaralı numune grubu için 1N çevrim olacak şekilde testler icra edilmiştir. Yapılan ilk testte 10 numaralı gruptan alınan numunenin yorulma ömrü 1N çevrim olarak elde edilmiştir. İkinci testte ise ömür 0,74N çevrim sayısı olarak kaydedilmiştir. Buradaki farklılığın üretimden kaynaklanan yüzey farklılıkları olduğu düşünülmektedir. Yine aynı şekilde diğer numune gruplarına yapılan farklı testlerde birbirine yakın olmayan ömür sayılarının elde edilmesinin üretim veya proses kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

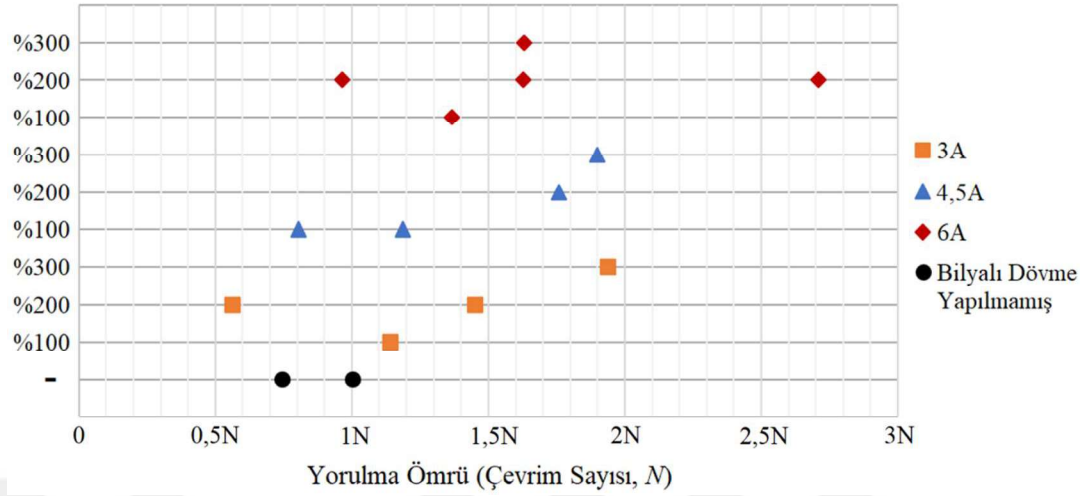
Yapılan bilyalı dövme işlemiyle birlikte yorulma ömrünün artması beklenmektedir. 1 numaralı gruptaki numunenin yorulma ömrü 1,14N olarak kaydedilmiştir. 2 numaralı gruptan alınan numunelerden ilkinin yorulma ömrü beklendiği gibi artış göstererek 1,45N çevrimken, ikinci numunenin yorulma ömrü 0,56N çevrim olmuştur. Burada ikinci numunenin kusurlu olduğu söylenebilir.

4 numaralı numune grubuna yapılan iki farklı testte yorulma ömürleri 0,8N ve 1,18N çevrim olarak tespit edilmiştir. 1, 2, 3 ve 10 numaralı numune gruplarının test sonuçları ile kıyaslandığında ikinci test sonucu olan 1,18N çevrim sayısının daha makul bir sonuç olduğu söylenebilir.

8 numaralı numune grubunun test sonuçlarına bakıldığında ise 5, 6, 7 ve 9 numaralı numune gruplarının test sonuçları ile kıyaslandığında üçüncü testin sonuçlarının daha gerçekçi olduğu görülebilmektedir.

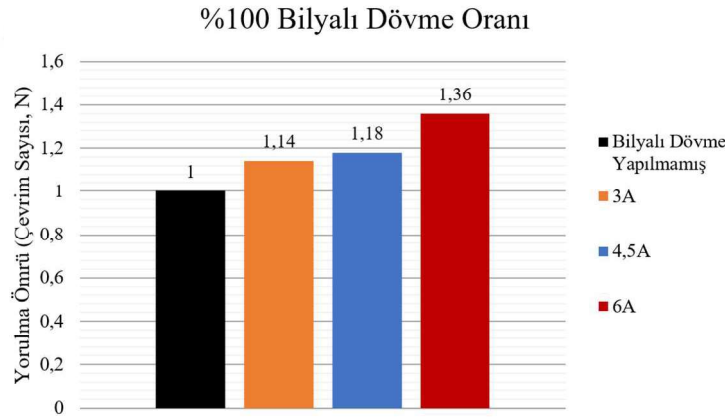
Anlamlı bulunan sonuçlar için kıyaslama yapılmıştır.

Numune sayısının az olmasıyla daha fazla test icra edilememiştir. Test sayısı arttırılırsa daha anlamlı sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir.



Şekil 4.10 : Bütün Numunelerin Yorulma Ömürlerini Gösteren Karşılaştırmalı Grafik.

Şekil 4.10'a bakıldığında bilyalı dövme işleminin düşük çevrimli yorulma ömrüne olumlu etkisi net bir şekilde görülebilmektedir.

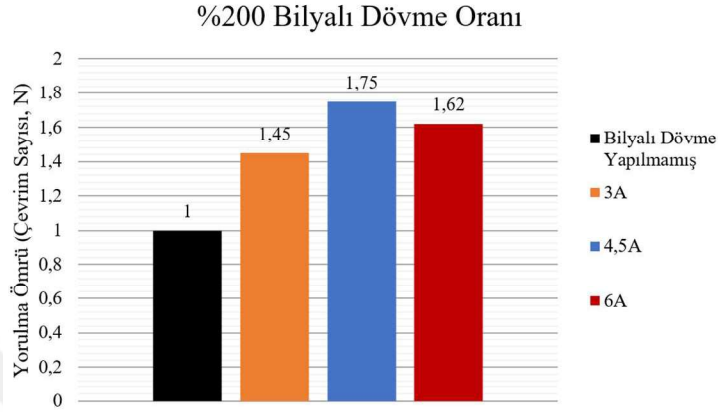


Şekil 4.11 : %100 Bilyalı Dövme Oranlarında 3A, 4,5A ve 6A Yoğunlukta Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.

3A bilyalı dövme yoğunluğu ve %100 bilyalı dövme oranıyla işlem yapılmış numunenin yorulma ömrü 1,14N olarak test edilmiştir. Bilyalı dövme uygulanmamış numunenin ömrü olan 1N çevrim sayısına kıyasla %13,7'lik bir artış kaydedilmiştir. Bilyalı dövme oranı sabit kalıp, bilyalı dövme yoğunluğu 4,5A olarak arttırıldığında yorulma ömrü, bilyalı dövme uygulanmamış numuneye kıyasla %18,4 artış

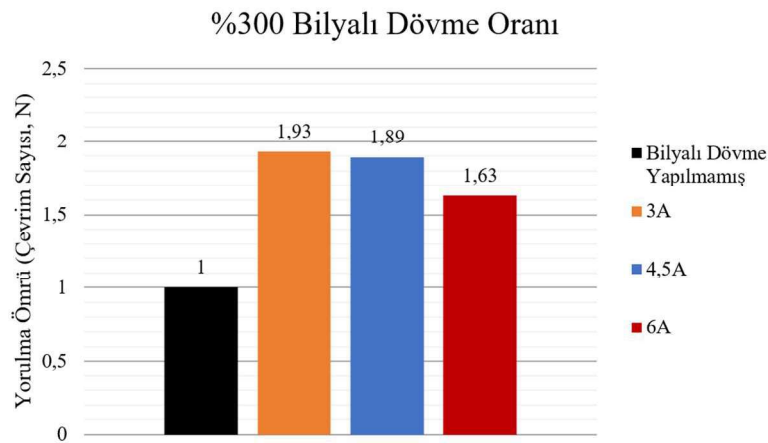
göstermiştir. 6A yoğunlukta işlem yapılan numunenin ömrü de işlem yapılmayan numuneye kıyasla %36,3 artmıştır (Şekil 4.11).

%100 bilyalı dövme oranında 3A'dan 6A'ya kadar yapılan yorulma testlerinde yorulma ömrünün yoğunluk arttıkça arttığı görülebilmektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.12 : %200 Bilyalı Dövme Oranlarında 3A, 4,5A ve 6A Yoğunlukta Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.

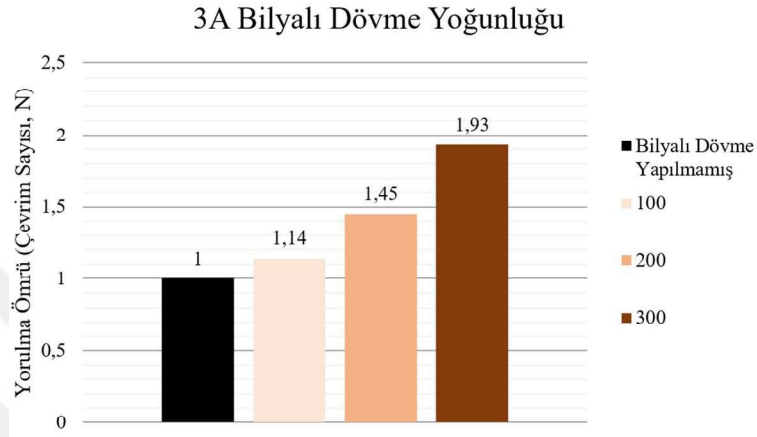
Bilyalı dövme oranı %200 olarak tutulup bilyalı dövme yoğunluğunun yorulma ömrüne etkisi kıyaslandığında 3A yoğunlukta işlem yapılan numunenin yorulma ömrü, baz numuneye kıyasla %44,6 artmıştır. 4,5A ve 6A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numunelerin ömürlerinde de sırasıyla %75,2 ve %62,3 artış olmuştur. 6A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numunenin ömrü 4,5A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numuneye göre %7,4 azalmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.13 : %300 Bilyalı Dövme Oranlarında 3A, 4,5A ve 6A Yoğunlukta Bilyalı Dövme Uygulanmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.

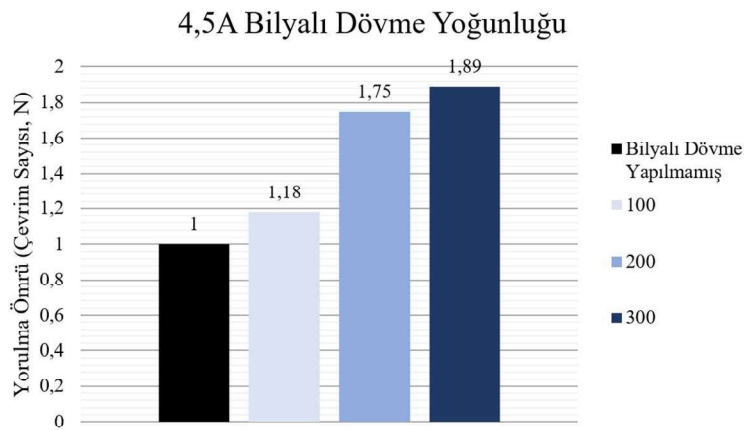
%300 bilyalı dövme oranında yoğunluklar arası ömür karşılaştırması yapıldığında, 3A, 4,5A ve 6A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numunelerin ömrü baz numuneye göre

sırasıyla %93,1, %89,2 ve %62,8 artmıştır. %300 bilyalı dövme oranında en yüksek ömür 3A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanan numune ile elde edilmiştir. Bilyalı dövme yoğunluğu arttırıldıkça yorulma ömründe azalma görülmüştür. 4,5A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numunenin ömrü 3A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numuneye göre %2, 6A yoğunlukta işlem yapılan numunenin ömrü ise %18,6 azalmıştır (Şekil 4.13).



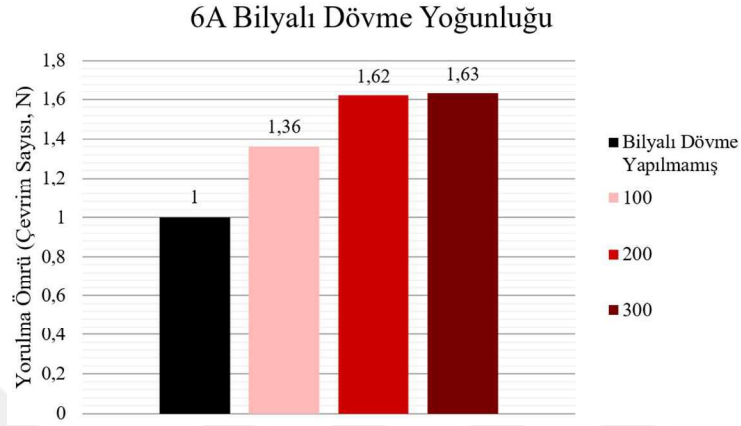
Şekil 4.14 : 3A Bilyalı Dövme Yoğunluğunda %100, %200 ve %300 Bilyalı Dövme Oranında İşlem Yapılmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.

3A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanmış numunelerin bilyalı dövme oranı arttırıldığında yorulma ömürlerinin de arttığı görülmektedir (Şekil 4.14). Bilyalı dövme uygulanmamış numuneye kıyasla %100, %200 ve %300 bilyalı dövme oranı uygulanmış numunelerin ömürleri sırasıyla %13,7, %44,6 ve %93,1 artmıştır.



Şekil 4.15 : 4,5A Bilyalı Dövme Yoğunluğunda %100, %200 ve %300 Bilyalı Dövme Oranında İşlem Yapılmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.

4,5A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanmış numunelerin bilyalı dövme oranı arttırıldığında ise, %100, %200 ve %300 bilyalı dövme oranları için yorulma ömürlerinde baz numuneye kıyasla sırasıyla %18,4, %75,2 ve %89,2 artış olmuştur (Şekil 4.15).



Şekil 4.16 : 6A Bilyalı Dövme Yoğunluğunda %100, %200 ve %300 Bilyalı Dövme Oranında İşlem Yapılmış Numunelerin Ömür Kıyaslaması.

6A yoğunlukta bilyalı dövme uygulanmış numunelerin bilyalı dövme oranı arttırıldığında ise, %100, %200 ve %300 bilyalı dövme oranları için yorulma ömürlerinde baz numuneye kıyasla sırasıyla %36,3, %62,3 ve %62,8 artış olmuştur (Şekil 4.16).

Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de bilyalı dövme oranları sabit tutulup bilyalı dövme yoğunluğunun yorulma ömürlerine etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’de ise aynı sonuçlar kullanılarak bilyalı dövme yoğunluğu sabit tutulup bilyalı dövme oranlarının yorulma ömürlerine etkileri de verilmiştir.

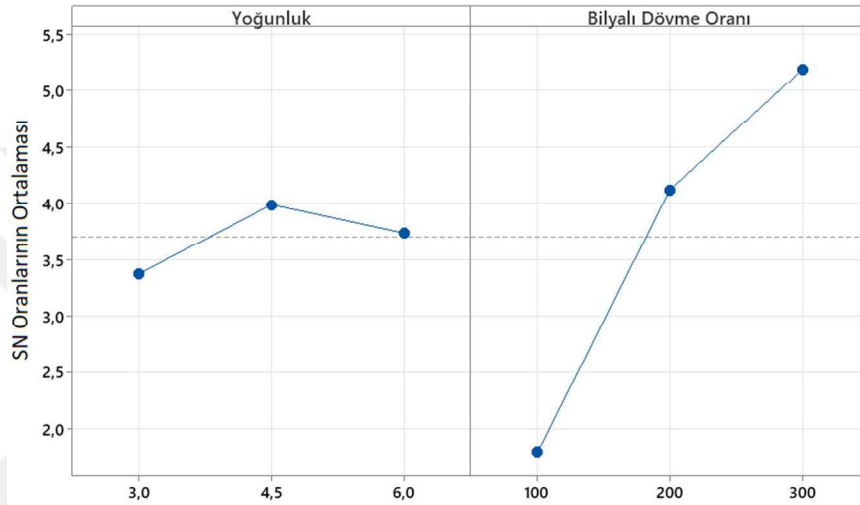
Bilyalı dövme oranı sabit tutulup bilyalı dövme yoğunluğu arttırıldığında %100 bilyalı dövme oranı ile işlem yapılan numunelerde yorulma ömrü artış göstermiştir (Şekil 4.11). %200 bilyalı dövme oranı ile işlem yapılan numunelerde ise en yüksek ömür 4,5A yoğunlukta elde edilmiş olup, yoğunluk 6A’ya çıkarıldığında yorulma ömrü düşmüştür (Şekil 4.12). %300 bilyalı dövme oranları ile uygulama yapılan numunelerde ise en yüksek yorulma ömrü 3A yoğunlukta elde edilmiş, yoğunluk arttıkça ömür düşmüştür (Şekil 4.13).

Yoğunluk sabit tutulup bilyalı dövme oranı arttırıldığında, bütün bilyalı dövme yoğunluklarında, yorulma ömrü bilyalı dövme oranıyla birlikte artmıştır (Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16).

Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de bilyalı dövme oranları sabit tutulup bilyalı dövme yoğunluğunun yorulma ömürlerine etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da ise aynı sonuçlar kullanılarak bilyalı dövme yoğunluğu sabit tutulup bilyalı dövme oranlarının yorulma ömürlerine etkileri de verilmiştir.

4.2 Taguchi Metodu

Deney tasarımı Taguchi L9 (3²) dizilime yerleştirilerek parametrelerin etkileri matematiksel olarak da elde edilmiştir.



Şekil 4.17 : En Fazla Yorulma Ömrü İçin Parametrelerin Etkileri Grafiği.

Daha önce yapılan bilyalı dövme oranının yoğunluğa kıyasla daha etkili olması değerlendirmesi, Taguchi analiziyle de görülmektedir (Şekil 4.17).

Taguchi analizi sonrası yapılan regresyon analizi ile de bu parametreler kullanılarak N cinsinden yorulma ömrü denklemi elde edilmiştir.

$$\text{Ömür} = 0,915 + 0,011.(\text{Yoğunluk}) + 0,002954.(\text{Bilyalı Dövme Oranı}) \quad (4.1)$$

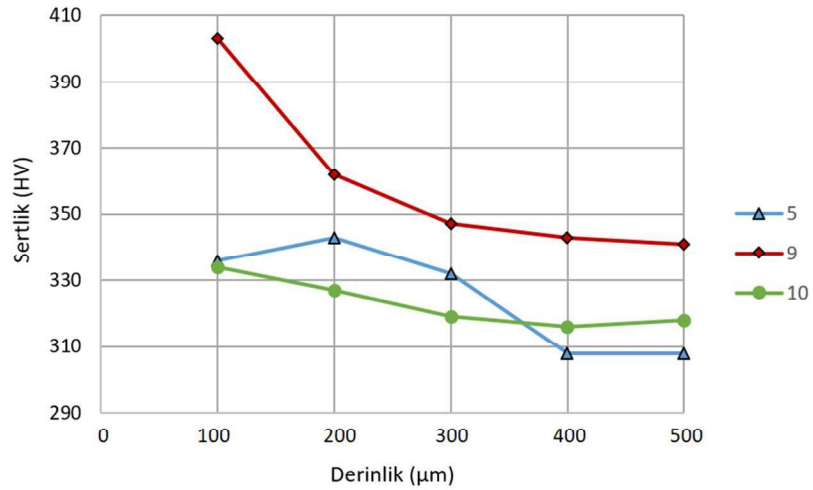
Bu denklem, bu çalışmada uygulanan parametreler ile 17-4 PH H1150 malzemesine, 3A, 4,5A ve 6A yoğunlukta; %100, %200 ve %300 oranlarda bilyalı dövme yapılmış numuneler için uygulanan test sonuçlarıyla elde edilen istatistiksel bir ifadedir. Test sayıları arttırıldığında daha güvenilir bir ifade elde edilebilir.

4.3 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Mikrosertlik ölçümleri, 5, 9 ve 10 numaralı gruplardan alınan numuneler için, numunede kesitin en dar olduğu yerden, yüzeyden parça içine doğru 100 μm aralıklarla beş noktadan alınan ölçümlerle yapılmıştır. Ölçümler ASTM E384 standardına göre ve HV 0.2 yük ile yapılmış olup, Qness Q30M marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 : Mikrosertlik Ölçümlerinin Yapıldığı Cihaz (Qness Q30M).



Şekil 4.19 : 5, 9 ve 10 Numaralı Numune Gruplarından Alınan Mikrosertlik Ölçümlerinin Kıyaslanması.

Bilyalı dövme uygulanan numunelerde mikrosertliğin yüzeyde yüksek olduğu, derinlik arttıkça sertliğin azaldığı görülmüştür (Şekil 4.19). En yüksek bilyalı dövme yoğunluğu ve bilyalı dövme oranı parametrelerinin uygulandığı 9 numaralı gruptan alınan numunenin sertlik değerleri de en yüksektir.

9 numaralı gruptan alınan numunenin yüzeyinden 100 µm derinde 403 HV sertlik değeri ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değeri 200 µm derinlikte 362 µm, 300 µm derinlikte 347 HV, 400 µm derinlikte 343 HV ve 500 µm derinlikte 343 HV olarak derinlik arttıkça azalmıştır.

5 numaralı gruptan alınan numunede en yüksek sertlik değeri 343 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 4.19'te de görüldüğü gibi 5 numaralı gruptan alınan numuneden ölçülen mikrosertlik değeri derinlik arttıkça azalmıştır.

10 numaralı numune grubunda da ölçülen sertlik derinlik arttıkça azalmıştır. Bununla birlikte bu değerler yüzeye yakın bölgelerde diğer iki numuneye göre daha düşüktür. Yüzeyin 100 µm altında 10 numaralı numuneden alınan sertlik değeri, 9 numaralı numuneden alınan sertlik değerine göre %17; 5 numaralı numuneden alınan sertlik değerine göre de %0,5 daha düşüktür. Yüzeyin 200 µm altında ise 10 numaralı numuneden alınan sertlik değeri, 9 numaralı numuneden alınan sertlik değerine göre %9,6; 5 numaralı numuneden alınan sertlik değerine göre de %4,7 daha düşüktür.

Mikrosertlik değerleriyle kalıntı gerilme değerlerinin orantılı olduğu literatürdeki diğer çalışmalarda görülebilmektedir (Wang, ve diğerleri, 2018) (Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018). Bu çalışmada da kalıntı gerilme değerleri ölçülmediğinden mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

4.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Yüzey pürüzlülük ölçümleri için, numunelerin en dar kesitinin olduğu bölgede Mitutoyo SJ-410 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4.20).

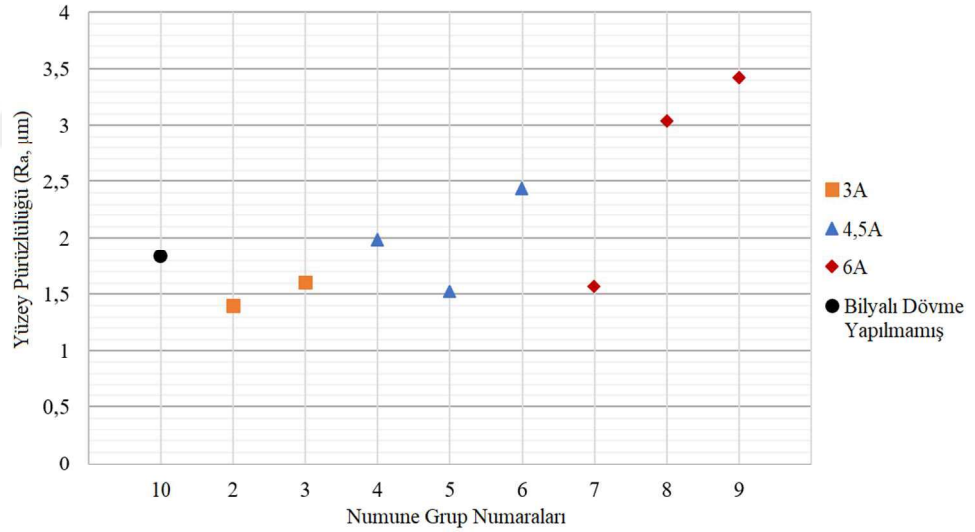


Şekil 4.20 : Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.

Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri yorulma testleri sonrasında yapılabilmektedir. 1 numaralı grupta yeterli sayıda numune kalmadığı için ölçüm yapılamamıştır.

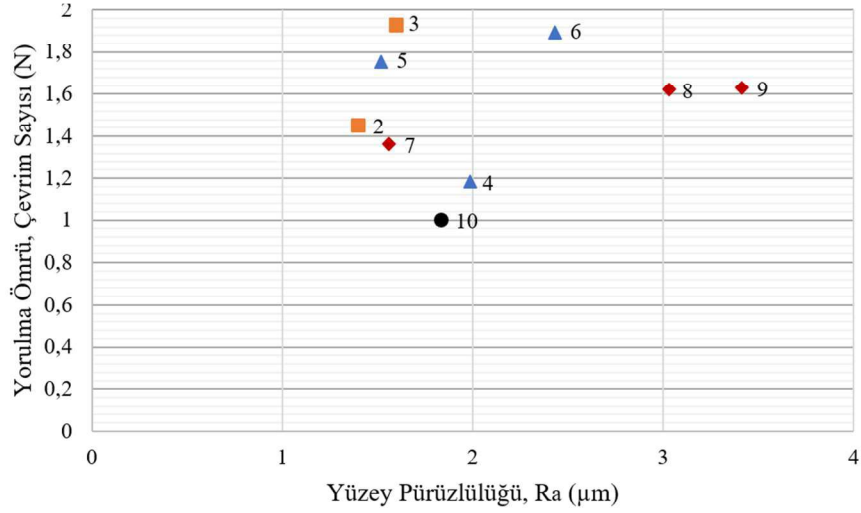
Tablo 4.2 : Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri.

Numune Grup No	Yüzey Pürüzlülük Değerleri (μm)		
	R_a	R_z	R_q
1	-	-	-
2	1,400	1,746	8,440
3	1,600	9,663	2,006
4	1,987	11,665	2,460
5	1,523	8,577	1,913
6	2,435	14,519	3,054
7	1,564	13,395	2,554
8	3,035	17,457	3,804
9	3,416	19,871	2,019
10	1,836	6,908	2,019

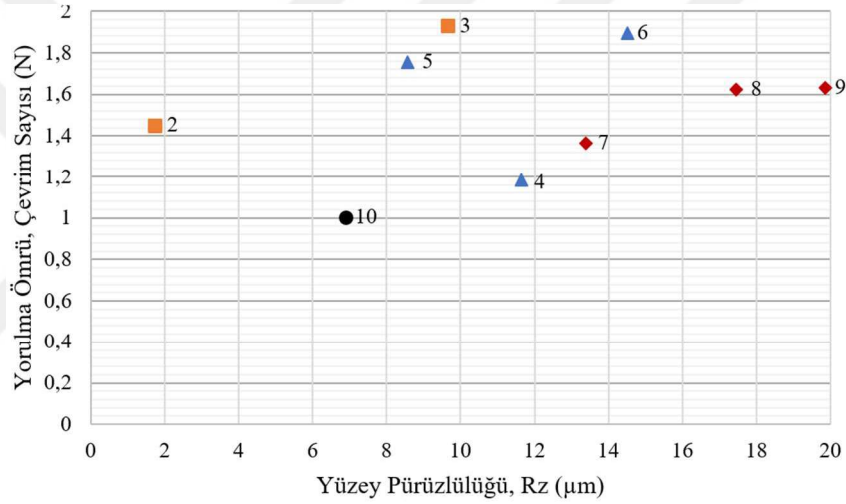


Şekil 4.21 : R_a Cinsinden Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Grafikte Gösterimi.

Bilyalı dövme yoğunluğu ve bilyalı dövme oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmıştır (Şekil 4.21). 3A yoğunlukta bilyalı dövme yapılmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü baz numuneye göre daha düşüktür. 4,5A ve 6A yoğunlukta bilyalı dövme yapılan numunelerin yüzey pürüzlülükleri bilyalı dövme yoğunluğu ile birlikte artmıştır. 5 ve 7 numaralı numune gruplarından alınan ölçümlerin numune sayısı artırıldığında daha tutarlı olabileceği düşünülmektedir. Bu numunelerin sonuçları çıkartıldığında doğrusala yakın bir yüzey pürüzlülüğü artışı görülebilmektedir.



Şekil 4.22 : Numunelerin R_a Cinsinde Yüzey Pürüzlülüğüne Karşılık Yorulma Ömrü Grafiği.



Şekil 4.23 : Numunelerin R_z Cinsinde Yüzey Pürüzlülüğüne Karşılık Yorulma Ömrü Grafiği.

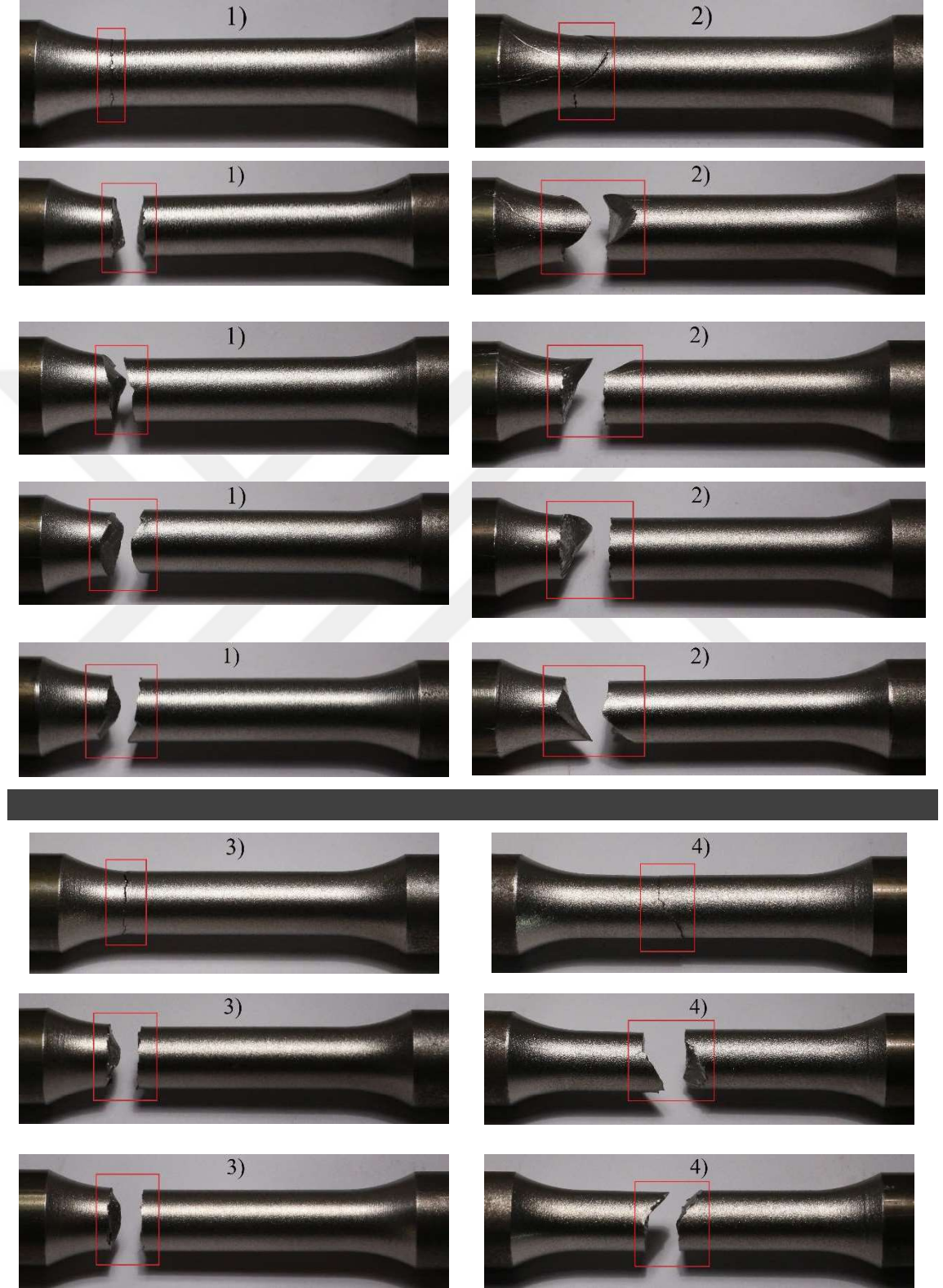
Literatürdeki çalışmalarda düşük çevrimli yorulma ömür bölgesinde, gerilme seviyelerinin yüksek olmasıyla, ortalama gerilmeden çok, yüzey pürüzlülüğünün etkisi olabileceği belirtilmiştir (Klotz, Delbergue, Bocher, Lèveque, & Brochu, 2018) (Qian, ve diğerleri, 2023).

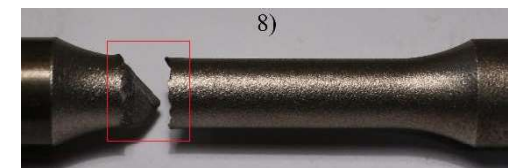
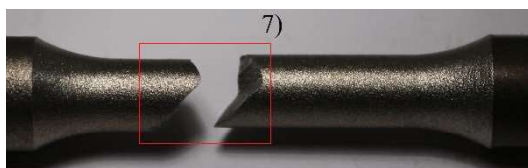
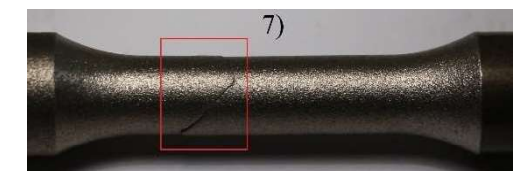
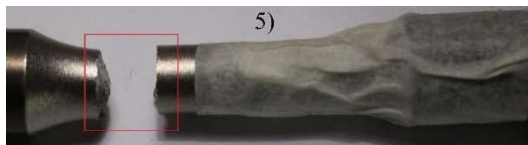
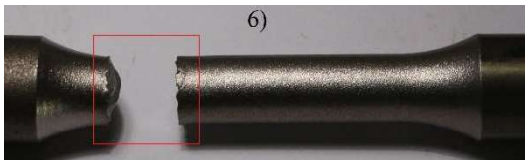
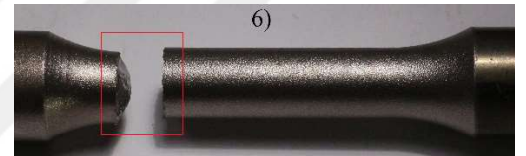
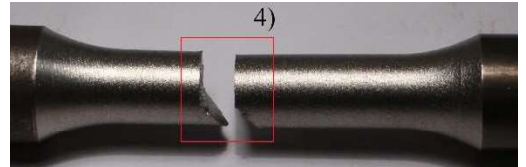
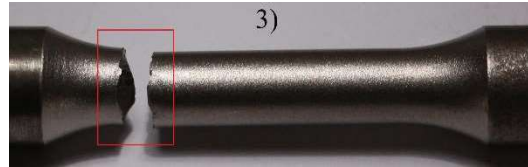
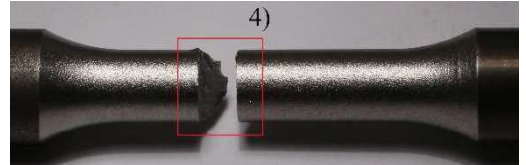
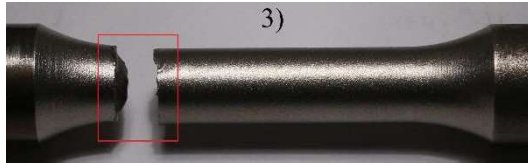
Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te paylaşılan R_a ve R_z cinsinden yüzey pürüzlülük değerlerine karşılık N cinsinden yorulma ömürleri incelendiğinde; 2, 4 ve 7 numaralı numunelerin yüzey pürüzlülükleri ve yorulma ömürleri 8 ve 9 numaralı numunelere kıyasla daha düşüktür.

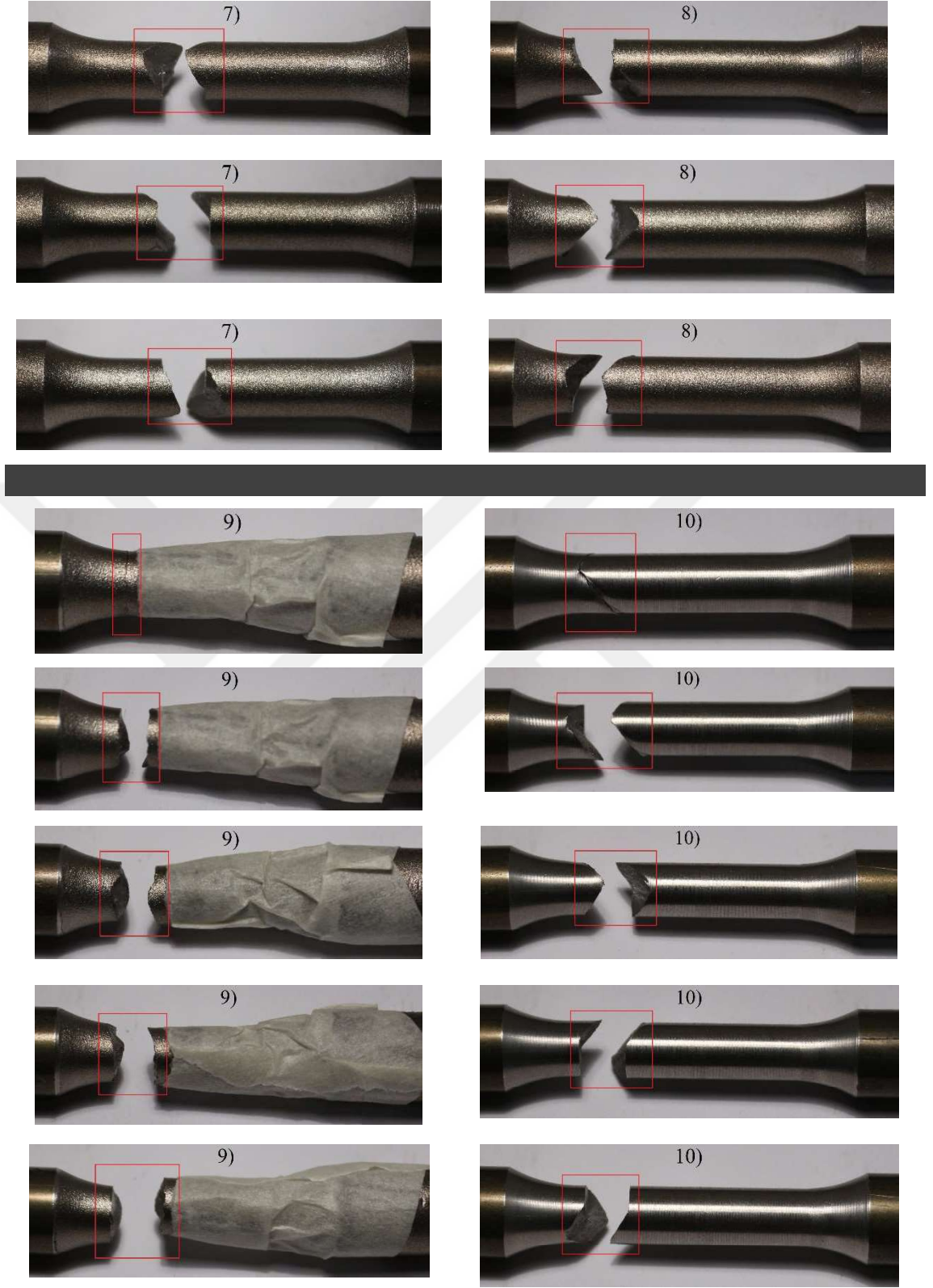
Bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, çevrim sayısının 1N olduğu düşük çevrimli yorulma bölgesinde yüzey pürüzlülüğü etkisi net bir şekilde görülememiştir.

4.5 Kopma Yüzeyleri

Kopan numunelerin Canon Eos 650D fotoğraf makinesiyle fotoğrafları çekilmiştir.







Şekil 4.24 : Numunelerin Kopma Bölgelerinin Fotoğrafları.

Şekil 4.24’da numunelerin kopma bölgelerinin fotoğrafları verilmiştir. Numunelerin grup numaraları fotoğraf üzerine yazılmıştır. Numuneler kopma bölgesinden

birleştirilerek her grup için en üstte birer fotoğraf eklenmiştir. Numuneler ayrılıp, yukarıdan aşağı, doksan derece çevrilerek, her bir grup için dörder farklı fotoğraf paylaşılmıştır. 5 ve 9 numaralı numunelerden, mikroyapı ve mikrosertlik için parça kesildiğinden fotoğraf için bantla birleştirilmiştir.

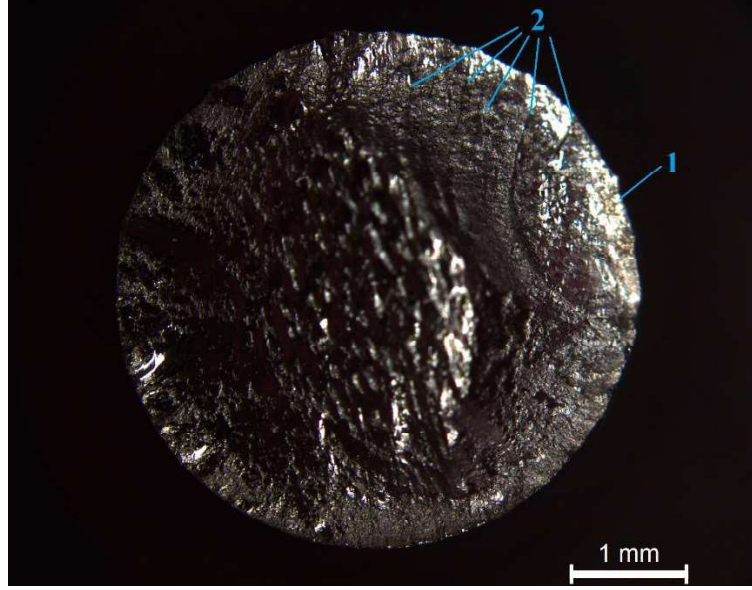
Kopma bölgeleri incelendiğinde bütün numuneler için gevrek kırılma olduğu görülebilmektedir. Yorulma testi yapılmamış numunelerle kırılan numuneler kıyaslandığında, boylarında değişme olmadığı görülmüştür.

Uygulanan kuvvet, yorulma ömrü grafikleri incelendiğinde, 2 numaralı numune hariç diğer numunelerde beklenmeyen bir kırılma davranışı olmadığı görülmüştür. 2 numaralı numune hariç tüm numunelerde kırılma öncesi kuvvet düşüşü yaşanmıştır. Kırılma anındaki çevrim sayısı ile kuvvetin yarıya düştüğü çevrim sayısı arasında da kayda değer bir fark görülmemiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9).

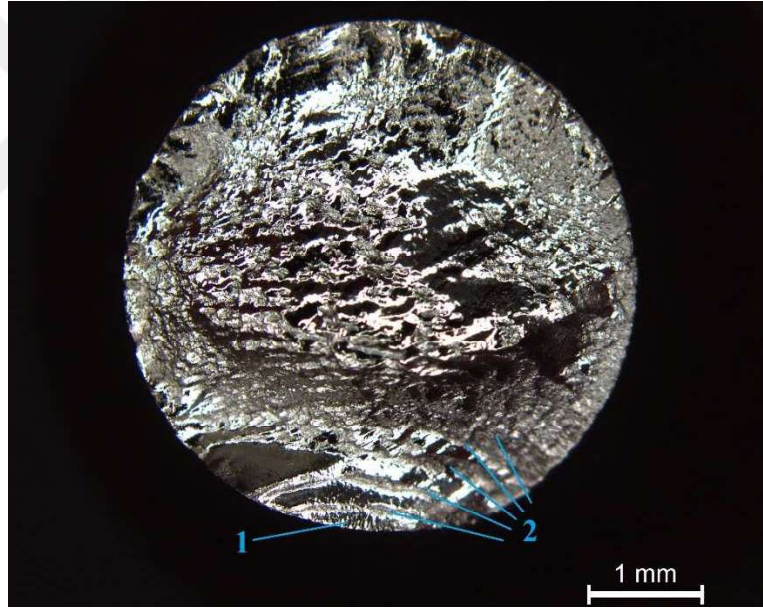
5, 9 ve 10 numaralı gruplardan alınan numunelerin kopan yüzeylerinin fotoğrafları Leica M205 C marka mikroskop ile çekilmiştir (Şekil 4.25).



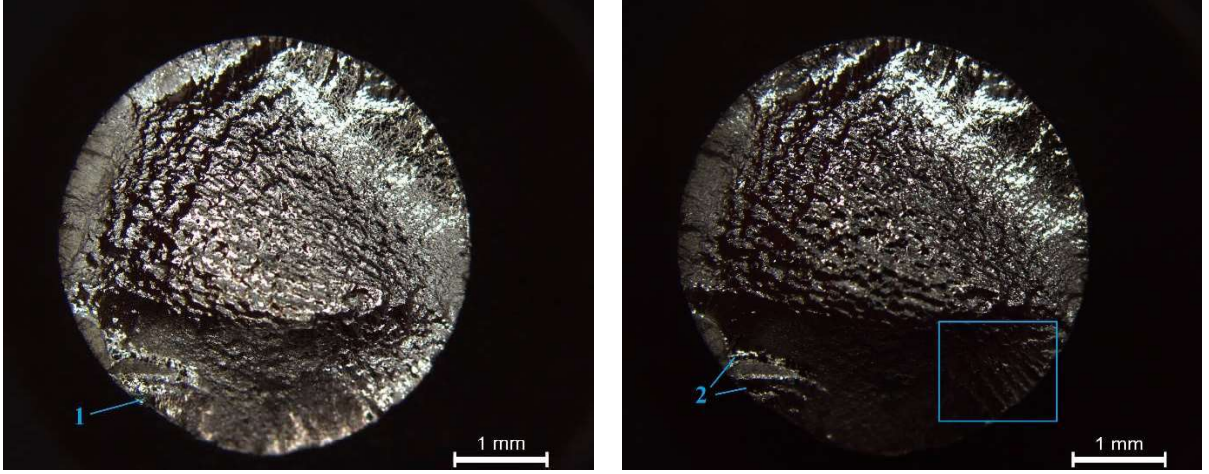
Şekil 4.25: Fotoğrafların Çekildiği Mikroskop (Leica M205 C).



Şekil 4.26 : 10 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Kopan Yüzeyinin Fotoğrafi. Yorulma Başlangıcı (1) ve Çatlak İlerlemesi (2) Görülebilmektedir.



Şekil 4.27 : 5 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Kopan Yüzeyinin Fotoğrafi. Yorulma Başlangıcı (1) ve Çatlak İlerlemesi (2) Görülebilmektedir.



Şekil 4.28 : 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Kopan Yüzeyinin Fotoğrafları. Solda Yorulma Başlangıcı (1) ve Sağda Çatlak İlerlemesi (2) Görülebilmektedir.

Verilen görsellerde (Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28) 1 numara ile gösterilen bölgeler çatlak başlangıcını, 2 numara ile gösterilen bölgeler de çatlak ilerleme çizgilerini göstermektedir.

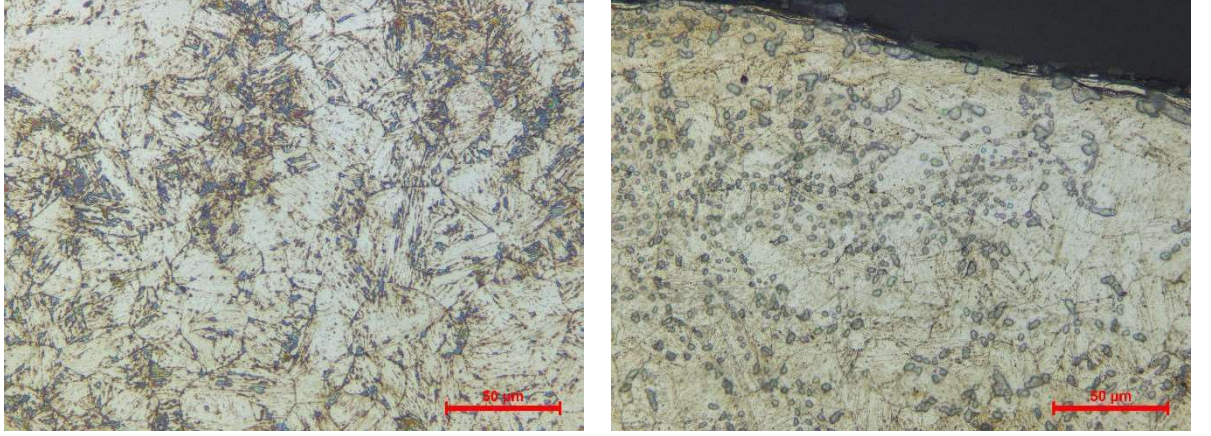
Şekil 4.28'de çatlak ilerleme çizgilerinin daha net görülebilmesi için farklı ışık seviyeleri kullanılarak çekilen iki fotoğraf verilmiştir.

4.6 Mikroyapı

Leica DMI 5000M marka ters mikroskop ile 5, 9 ve 10 numaralı gruplardan alınan numunelerin mikroyapı görselleri alınmıştır (Şekil 4.29). Bütün görseller 10X büyütme ile çekilmiştir.

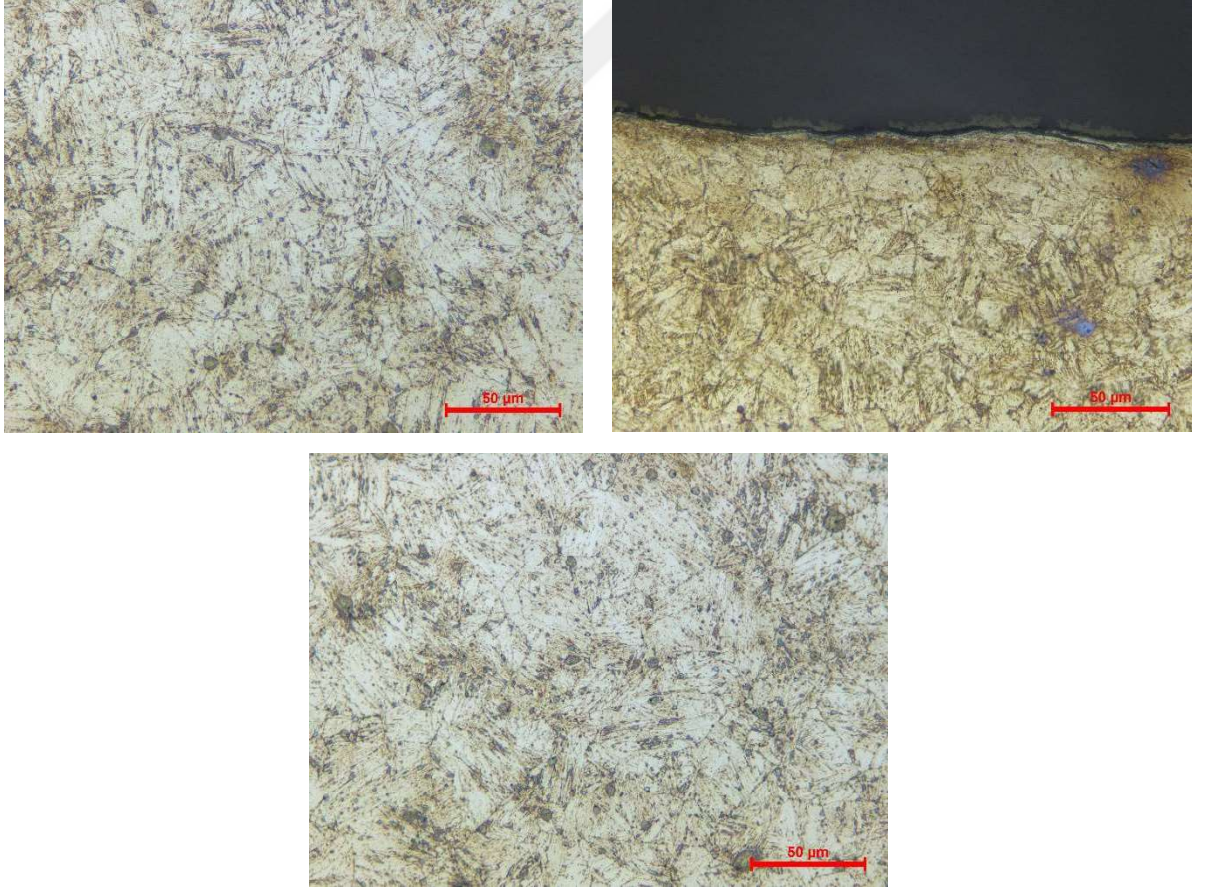


Şekil 4.29 : Mikroyapı Görsellerinin Alındığı Ters Mikroskop (Leica DMI 5000M).



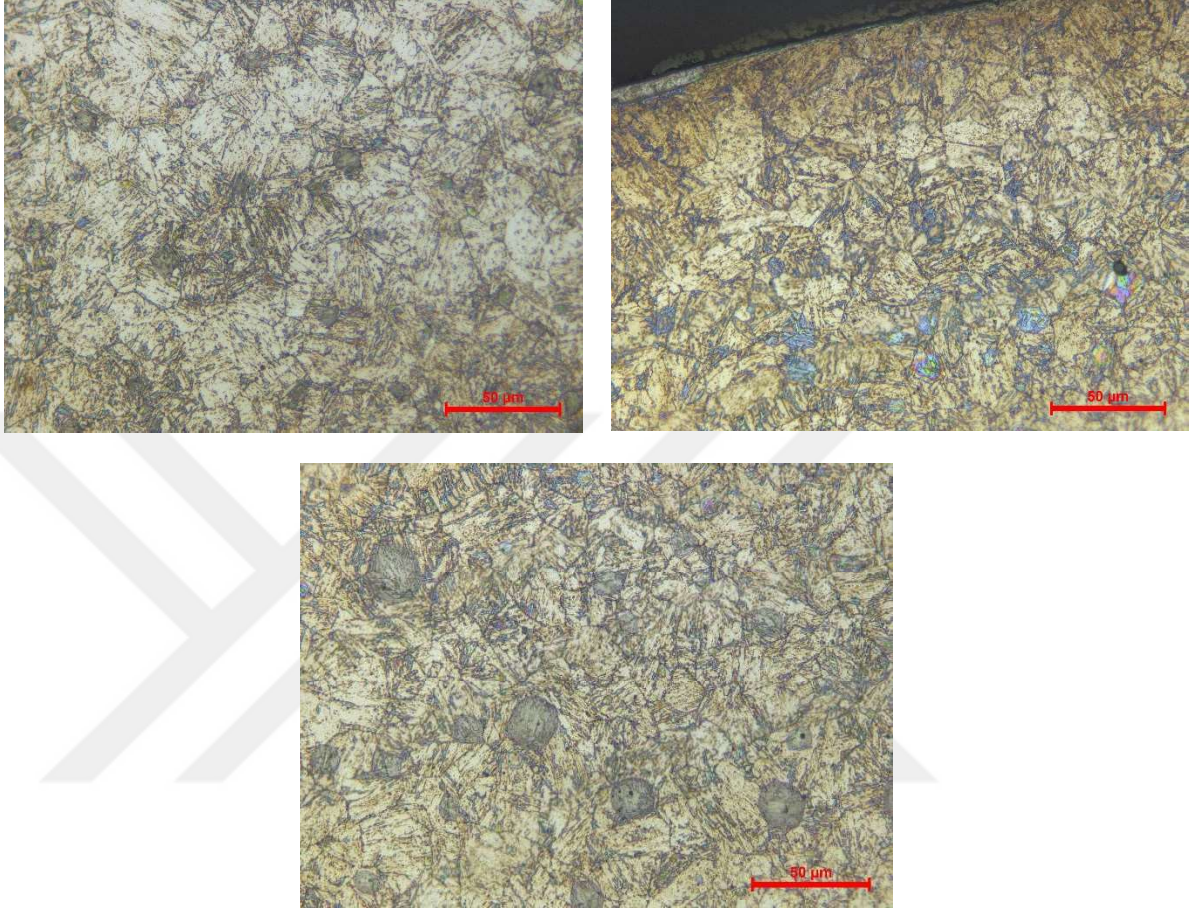
Şekil 4.30 : 10 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Merkez (Solda) ve Yüzeze Yakın Bölgeden (Sağda) Alınan Mikroyapı Görselleri.

Bilyalı dövme uygulanmamış 10 numaralı numunelerin mikroyapısı incelendiğinde, yüzeze yakın bölgelerle, merkezdeki bölgelerin tane boyutları arasında gözle görülür bir farklılık bulunmadığı görülebilmektedir (Şekil 4.30).



Şekil 4.31 : 5 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Merkez (Solda), Yüzeze Yakın Bölge (Sağda) ve Ara Bölgeden (Altta) Alınan Mikroyapı Görselleri.

5 numaralı gruptan alınan numunenin mikroyapı incelemesinde, bilyalı dövmenin etkisiyle yüzeye yakın bölgelerde tanelerde incelme olduğu görülebilmektedir (Şekil 4.31).



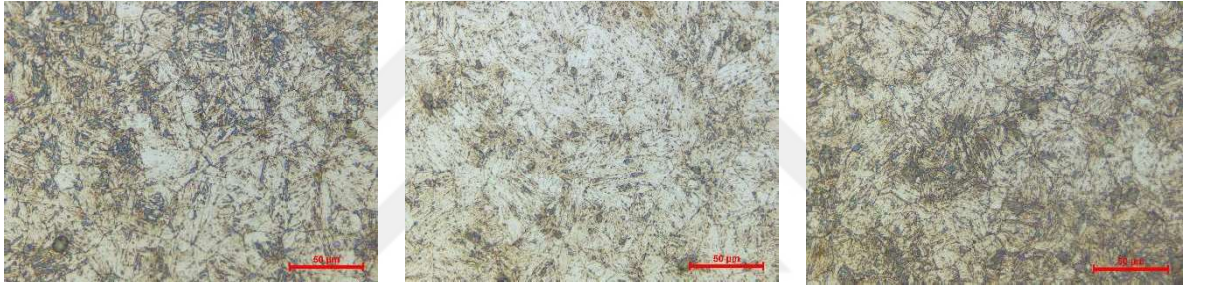
Şekil 4.32 : 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunenin Merkez (Solda), Yüzeğe Yakın Bölge (Sağda) ve Ara Bölgeden (Altta) Alınan Mikroyapı Görselleri.

9 numaralı gruptan alınan numunenin mikroyapı incelemesinde, bilyalı dövmenin etkisiyle yüzeye yakın bölgelerde tanelerde incelme olduğu, tane incelmesinin 5 numaralı numuneyle karşılaştırıldığında daha derinlere kadar etkili olduğu görülebilmektedir (Şekil 4.32).



Şekil 4.33 : Soldan Sağa 10, 5 ve 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunelerin Yüzeğe Yakın Bölgedeki Mikroyapı Görşelleri.

Şekil 4.33’de gösterildiği gibi, 5 ve 9 numaralı numune gruplarında, yüzeğe yakın bölgelerdeki tane boyutlarının 10 numaralı grupta görülen tane boyutlarına göre küçüldüğü gözlemlenmiştir. 9 numaralı gruptan alınan numunedeki tane boyutlarının da 5 numaralı gruptan alınan tane boyutlarına göre daha ince olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.34 : Soldan Sağa 10, 5 ve 9 Numaralı Gruptan Alınan Numunelerin Yüzeğe Altı Ara Bölgedeki Mikroyapı Görşelleri.

Yüzeğe altı ara bölgeden alınan mikroyapı görşelleri incelendiğinde 5 ve 10 numaralı numune gruplarında mikroyapının, numune merkezindeki mikroyapı ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. 9 numaralı gruptan alınan numunede ise, diğer gruplardaki numunelere kıyasla daha ince taneler görülmektedir (Şekil 4.34). Bu da yüksek yoğunluk ve bilyalı dövme oranında yapılan bilyalı dövme işleminin mikroyapıya olan etki derinliğinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Tane yapısı incelmesinin yorulma ömrüne olumlu yönde etkisi olduđu literatürdeki çalışmalarda da belirtilmiştir (Mlikota, Dogahe, Schmauder, & Božić, 2022) (Turnbull & De Los Rios, 1995).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bilyalı dövme parametrelerinin 17-4 PH malzeme için düşük çevrimli yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Farklı parametrelerle bilyalı dövme işlemi uygulanan numuneler için bilyalı dövmenin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkilerinin açık bir şekilde görülebilmesi amaçlanmıştır. Yüksek gerilme seviyelerinde, bilyalı dövmeden kaynaklanan ortalama gerilme seviyesi, mikroyapı değişimleri ve yüzeysel etkilerin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Ayrıca çalışmada farklı parametrelerde uygulanan bilyalı dövmenin parametre etkilerinin matematiksel ifadesi de ortaya konulmuştur.

Bilyalı dövme işlemi 3A, 4,5A ve 6A olmak üzere üç farklı yoğunluk ve %100, %200 ve %300 olmak üzere üç farklı oranda yapılmıştır. Bu parametrelerdeki bilyalı dövmenin etkileri incelenmiştir. Bilyalı dövme uygulanmayan numunelerin düşük çevrimli yorulma ömürleri 1N çevrim olacak şekilde testler yapılmıştır. Düşük çevrimli yorulma testleri gerinim kontrollü olacak şekilde icra edilmiştir. Aynı zamanda uygulanan farklı parametrelerin yorulma ömrüne etkileri Taguchi metoduyla gösterilmiştir. Farklı gruplardan alınan numunelerin mikroyapısı incelenmiş, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Bu sonuçlar, bilyalı dövme işlemi yapılmamış numunelerin sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

Bilyalı dövme işleminin düşük çevrimli yorulma ömrünü arttırdığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bilyalı dövme oranı parametresinin, bilyalı dövme yoğunluğu parametresine kıyasla yorulma ömrüne etkisinin daha fazla olduğu paylaşılmıştır. Bilyalı dövme yoğunluğu ve oranının artmasıyla yüzeye yakın bölgelerde tanelerin incelendiği ve bununla birlikte yüzey pürüzlülüğünün de arttığı gösterilmiştir. 1N çevrim yorulma ömrü seviyelerinde yüzey pürüzlülüğünün fazla olmasına rağmen yorulma ömrünün bilyalı dövme yapılmamış numuneye kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme yoğunluğu ve oranı fazla olan numunelerin yüzeye yakın bölgelerinin mikrosertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu

durum yüzeye yakın bölgelerdeki kalıntı gerilme miktarıyla orantılı olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Çalışma yalnızca 17-4 PH H1150 malzemeden üretilen numuneler için yapılmıştır. Belirtilen bilyalı dövme yoğunlukları ve oranları dışında farklı bir bilyalı dövme işlemi uygulanmamıştır. Gerinim genliği küçük tutulmuştur. Testlerin amacı yorulma grafiği çıkarmak değil, ömür kıyaslaması yapmak olduğundan frekanslar testlerde sabit tutulmuş, frekans etkileri incelenmemiştir. Testlerin tamamı oda sıcaklığında yapılmıştır. Bilyalı dövmenin düşük ya da yüksek sıcaklılardaki etkilerine bakılmamıştır.

Bu çalışmayla birlikte benzer mekanik özelliklere sahip, düşük çevrimli yorulma bölgesinde çalışacak bir parça tasarlarken, bilyalı dövme işleminin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkileri öngörülerek parametrelerin belirlenmesi daha doğru bir biçimde yapılabilecektir. Bununla birlikte benzer çevrim sayısında çalışması düşünülen bilyalı dövme uygulanacak bir parça için emniyet katsayısı da daha sağlıklı bir şekilde tahmin edilebilir olacaktır.

Her ne kadar yorulma ömrünü arttırsa da bilyalı dövme işlemi, kontrol edilebilirliği düşük ve kısmen kaotik olmasından kaynaklı, birçok etkenin sonuçları etkilediği söylenebilir. Bu durumda da farklı parametreler ile yapılan bilyalı dövme işleminin sonuçları tahmin edilebilir olmayabilir.

Bilyalı dövme işlemi farklı birçok sektörde uygulanmaktadır. Ancak havacılıkta kullanılan standartlara uygun, daha kontrollü uygulanan bilyalı dövme işlemi yurtiçinde yalnızca bu işlemi kullanan firmalar bünyesinde bulunmaktadır. Firmalarda da iş yoğunluğu sebebiyle, farklı bilya tipleri, daha geniş bilyalı dövme yoğunluğu aralıkları gibi farklı parametrelerde testler yapmak oldukça zordur. Bu sebeplerden ötürü çalışmada farklı bilya tipleri ve daha yüksek yoğunluklarda bilyalı dövme uygulanamamıştır. Yorulma testleri, mikroyapı görselleri ve mikrosertlik ölçümlerinde de test maliyetlerinin yüksek olması dolayısıyla, testler kısıtlı şekilde icra edilebilmiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrası XRD ile kalıntı gerilme ölçümü de yapılmak istenmiş ancak yine maliyet kaynaklı icra edilememiştir. Bununla birlikte tez başlangıcında yapılmak istenen yüksek çevrimli yorulma ömrüne etkilerin incelenmesi de test donanımlarında oluşan beklenmedik arızanın tez süresince giderilememesi sebebiyle gerçekleştirilememiştir.

Bu çalışmanın devamında özellikle sürünme sıcaklıklarında çalışan parçalar için bilyalı dövmenin etkileri üzerine çalışma yapılması tavsiye edilebilir. Bilyalı dövme sonrası tane incilmesi olacağından sürünme sıcaklıklarında tane sınırı kayması mekanizmasını tetikleyebilir. Ayrıca ortalama gerilme değerinin de yüksek sıcaklıkla birlikte azalabilecek olması, bilyalı dövme işleminin sürünme sıcaklıklarında çalışan bir parça için uygulanmasını anlamsız kılabilir. Ayrıca bu çalışmaya benzer şekilde farklı boyut ve şekildeki bilyaların da etkilerini incelemek için bir çalışma yapılabilir. Bilyalı dövme parametrelerinin düşük çevrimli yorulma ömrüne etkileriyle birlikte, yüksek çevrimli yorulma ömrüne etkileri de incelenebilir.



KAYNAKÇA

- Abood, A. N., Saleh, A. H., Salem, R. K., Kadhim, G. A., & Abdullah, Z. W. (2013). Strain Life of Shot Peening AA 2024-T4. *Journal of Materials Science Research*, 2(1), s. 113-123.
- AK Steel International. (2018). Armco 17-4 PH Stainless Steel Product Data Bulletin.
- Almen Gages. (2014). Electronics Inc.: https://www.electronics-inc.com/products/rotary-flap-products/rotary-flap-accessories/2-almen-gage/adresinden_alindi
- Almen, J. O. (1943). Peened Surfaces Improve Endurance of Machine Parts. *Metal Progress*, 43(1), s. 209-215.
- Almen, J. O. (1943). Shot Blasting To Increase Fatigue Resistance. *SAE Transactions*, 51(7).
- Almen, J. O., & Boegehold, A. C. (1935). Rear Axle Gears: Factors Which Influence Their Life. *Proceedings-American Society for Testing and Materials*, 35, s. 99-146.
- Appasamy, R., & Permual, A. (2020). Investigation of fatigue strength of aluminium 2024-T3 subjected to shot peening process by Ni shots. *Materials Research Express*, 7(1), s. 016593.
- ASM Handbook Committee. (1986). *Vol.11: Failure Analysis and Prevention*. ASM International.
- ASM Handbook Committee. (1996). *Vol.19: Fatigue And Fracture*. ASM International.
- ASTM International. (2021). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. *E466*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. *E606*. ASTM International.
- Bag, A., Delbergue, D., Ajaja, J., Bocher, P., Lévesque, M., & Brochu, M. (2020). Effect of Different Shot Peening Conditions on the Fatigue Life of 300 M Steel Submitted to High Stress Amplitudes. *Fatigue*, 130, s. 105274.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2021). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill Education.
- Callister, W. D., & Retwisch, D. G. (2014). *Material Science and Engineering An Introduction*. John Wiley & Sons.
- Cammett, J. (2007). Shot Peening Coverage-the Read Deal. *The Shot Peener*, 21(3), s. 8-14.

- Champaigne, J. (1992). Shot Peening Intensity Measurement. *The Shot Peener*, 6(4), s. 1-6.
- Champaigne, J. (1997). Almen Strip Specifications. *The Shot Peener*, 11(3), s. 6-13.
- Champaigne, J. (2001). *Shot Peening Overview*. Street Mishawaka: Electronics Inc.
- Champaigne, J. M. (1994). *Amerika Birleşik Devletleri Patent No. 5,297,418*.
- Chung, Y. H., Chen, T. C., Lee, H. B., & Tsay, L. W. (2021). Effect of Micro-Shot Peening on the Fatigue Performance of AISI 304 Stainless Steel. *Metals*, 11(9), s. 1408.
- Concli, F., Fraccaroli, I., Nalli, F., & Cortese, L. (2022). High and Low-Cycle-Fatigue Properties of 17-4 PH Manufactured Via Selective Laser Melting in As-Built, Machined and Hipped Conditions. *Progress in Additive Manufacturing*, 7, s. 99-109.
- Cottell, G. A. (2022). Fatigue Failures, With Special Reference to Fracture Characteristics. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22, s. 2352-2378.
- Determining the Shot Peening Intensity and the Coverage of Shot Peening*. (2014). OSK-Kiefer GmbH: <https://osk-kiefer.de/en/quality-assurance/shot-peening-intensity-and-coverage/> adresinden alındı
- Dülek, E., Orman, Ş., Karataş, Ç., & Sarıtaş, S. (2013). Bilyalı Dövme Parametrelerinin Ç1020 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisi ve Oluşan Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi İle Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(3).
- Ellyin, F. (1997). Cyclic Stress-Strain Response. F. Ellyin içinde, *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction* (s. 33-76). Springer Dordrecht.
- González, J., Peral, I. -B., Colombo, C., & Pariente, I. F. (2018). A Study on the Microstructural Evolution of a Low Alloy Steel by Different Shot Peening Treatments. *Metals*, 8(3), s. 187.
- Jackson, T. J., Rolph, J., & Hardy, M. C. (2020). The Effect of Shot Peening on the Ductility and Tensile Strength of Nickel-Based Superalloy Alloy 720Li. *Superalloys 2020. The Minerals, Metals & Materials Series* (s. 535-545). Springer.
- Kirk, D. (2012). Shot Peening Coverage Requirements. *The Shot Peener*, 26(3), s. 24-34.
- Klotz, T., Delbergue, D., Bocher, P., Lèveque, M., & Brochu, M. (2018). Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened Inconel 718. *Fatigue*, 110, s. 10-21.
- Koh, S. K., & Stephens, R. I. (1991). Mean Stress Effects on Low Cycle Fatigue For a High Strength Steel. *Fatigue And Fracture of Engineering Materials And Structures*, 14(4), s. 413-428.
- Lee, Y. L., & Taylor, D. (2005). Strain-Based Fatigue Analysis and Design. Y. L. Lee, J. Pan, R. B. Hathaway, & M. E. Barkey içinde, *Fatigue Testing and Analysis* (s. 181-236).

- Lee, Y. L., & Taylor, D. (2005). Stress-Based Fatigue Analysis and Design. Y. L. Lee, J. Pan, R. B. Hathaway, & M. E. Barkey içinde, *Fatigue Testing and Analysis* (s. 103-180).
- Leghorn, G. (1957). The Story Of Shot Peening. *A.S.N.E. Journal*.
- Li, J., Zhao, Y., Chen, M., Gao, W., Mao, Q., Xianke, L., . . . Li, Y. (2022). Formation of Nano-Grains Dominated By Twin-Twin Intersections for a RASP-Processed 316L Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, s. 3150-3157.
- Mlikota, M., Dogahe, K., Schmauder, S., & Božić, Ž. (2022). Influence of The Grain Size On The Fatigue Initiation Life Curve. *Fatigue*, 158, s. 106562.
- Progressive Surface. (2024). *What is shot peening?* Progressive Surface: <https://www.progressivesurface.com/shotpeening/process.htm> adresinden alındı
- Qian, W., Wang, Y., Liu, K., Yin, X., He, X., & Xie, L. (2023). Experimental Study on the Effect of Shot Peening and Re-Shot Peening on the Residual Stress Distribution and Fatigue Life of 20CrMnTi. *Coatings*, 13(7), s. 1210.
- Qin, Z., Li, B., Chen, R., Zhang, H., Xue, H., Yao, C., & Tan, L. (2023). Effect of Shot Peening on High Cycle and Very High Cycle Fatigue Properties of Ni-based Superalloys. *Fatigue*, 168.
- SAE International. (2018). Shot Peening, Automatic. *AMS 2430*. SAE International.
- SAE International. (2020). Heat Treatment Precipitation-Hardening Corrosion-Resistant, Maraging, and Secondary Hardening Steel Parts. *AMS2759/3*. SAE International.
- SAE International. (2022). Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening. *SAE J442*. SAE International.
- SAE International. (2023). Peening Media General Requirements. *AMS 2431*. SAE International.
- SAE International. (2023). Shot Peening Coverage Determination. *SAE J2277*. SAE International.
- SAE International. (tarih yok). Shot Peening, Computer Monitored. *AMS 2432*. SAE International.
- Sahoo, B., Satpathy, R. K., Prasad, K., Ahmed, S., & Kumar, V. (2013). Effect of Shot Peening on Low Cycle Fatigue Life of Compressor Disc of a Typical Fighter Class Aero-Engine. *Procedia Engineering*, 55, s. 144-148.
- Schaldenbrand, P. (2019). *What is a SN-Curve?* Siemens Digital Industries Software: <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve> adresinden alındı
- Scholtes, B., & Voehringer, O. (2001). Mechanical Surface Treatment. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (s. 5253-5261). içinde

- Schütz, W. (1996). A History of Fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2), s. 263-300.
- Sculze, V. (2006). *Modern Mechanical Surface Treatment*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Sezgin, J. -G., & Yamabe, J. (2019). Tensile and Fatigue Properties of 17-4PH Martensitic Stainless Steels In Presence of Hydrogen. *Procedia Structural Integrity*, 19, s. 249-258.
- Śledź, M., Bąk, Ł., Stachowicz, F., & Zielecki, W. (2013). Analysis of The Effect of Shot Peening On Mechanical Properties of Steel Sheets Used As Screener Sieve Materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 451.
- Smith, R. A., & Hillmansen, S. (2004). A Brief Historical Overview of The Fatigue of Railway Axles. *The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 218(4), s. 267-277.
- Sun, J., & Dilger, K. (2023). Influence of Initial Residual Stresses on Welding Residual Stresses in Ultra-High Strength Steel S960. *Journal of Manufacturing Processes*, 101, s. 259-268.
- Trung, P. Q., Khun, N. W., & Butler, D. L. (2017). Effect of Shot Peening Process on the Fatigue Life of Shot Peened Low Alloy Steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 140(1), s. 011013.
- Trung, P. Q., Khun, N. W., & Butler, D. L. (2018). Effect of Shot Peening Process on the Fatigue Life of Shot Peened Low Alloy Steel. *J. Eng. Mater. Technol.*, 140(1).
- Turnbull, A., & De Los Rios, E. R. (1995). The Effect Of Grain Size On The Fatigue Of Commercially Pure Aluminium. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 18(12), s. 1455-1467.
- Wang, H., Yuan, X., Wu, K., Xu, C., Jiao, Y., Wang, G., & Luo, J. (2018). Effect of High Energy Shot-Peening On The Microstructure And mechanical Properties of Al5052/TiAl4V Lap Joints. *Journal of Materials Processing Tech.*, s. 76-85.
- Wick, C., & Veilleux, R. F. (1985). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol. 3 : Materials, Finishing and Coating*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Wu, J. -H., & Lin, C. -K. (2002). Tensile and Fatigue Properties of 17-4 PH Stainless Steel at High Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33, s. 1715-1724.
- Zhang, X., Hansen, N., Gao, Y., & Huang, X. (2012). Hall-Petch and Dislocation Strengthening in Graded Nanostructured Steel. *Acta Materialia*, 60(16), s. 5933-5943.