

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

SAE 4140 (42CrMo4) ISLAH ÇELİĞİNİN BİLEŞİK
GERİLMELİ YORULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Mehmet Tuncay KAYA

Tez Danışmanı
Doç.Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ

Yozgat 2016

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün Kimya Anabilim Dalı 7011090009 numaralı öğrencisi Mehmet Tuncay KAYA'nın hazırladığı "SAE 4140 (42crmo4) İslah Çeliğinin Bileşik Gerilmeli Yorulma Davranışının İncelenmesi" başlıklı Yüksek Lisans tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 09/11 /2016 Çarşamba günü saat 10:00'da yapılmış, tezin onayına OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU



Üye : Doç.Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ (Danışman)



Üye : Yrd.Doç.Dr. Sertan OZAN



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 23.11.2016 tarih ve 36.....sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23.11.2016

Doç.Dr. Fuat KÖKSAL
Müdür



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
KISALTMALAR LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Yorulma.....	3
2.1.1. Yorulma Türleri.....	4
2.1.1.1. Kısa Ömürlü Yorulma.....	4
2.1.1.2. Uzun Ömürlü Yorulma	5
2.1.2. Yorulma Çeşitleri	5
2.1.2.1. Isıl Yorulma	5
2.1.2.2. Korozyonlu Yorulma	6
2.1.3. Yorulma Hasarı Oluşum Mekanizması	6
2.1.3.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu	7
2.1.3.2. Çatlağın Kayma Bantlarında İlerlemesi	9
2.1.3.3. Çatlağın Gerilmeye Dik Yönde İlerlemesi.....	10
2.1.3.4. Zorunlu Kırılma	11
2.1.4. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler.....	11
2.1.4.1. Ortalama ve Bileşik Gerilmenin Etkisi	11
2.1.4.2. Boyut Etkisi.....	12
2.1.4.3. Parça Biçiminin Etkisi.....	12
2.1.4.4. Yüzey İşlemlerinin Etkisi.....	12
2.1.4.5. Koroziyon Ortamının Etkisi.....	12
2.1.4.6. Sıcaklığın Yorulmaya Etkisi	13
2.1.4.7. Metal ve Alaşımın Soğuk İşlenmesi	13
2.1.4.8. Frekansın Etkisi.....	13
2.1.4.9. Mikro Yapının Etkisi	14

2.1.4.10. Artık Gerilmelerin Etkisi.....	15
2.1.4.11. Yüzey Sertliğinin Etkisi	15
2.1.4.12. Darbe Etkisi.....	16
2.1.5. Zorlanma Türleri	16
2.1.5.1. Rassal (rasgele) Zorlanma.....	16
2.1.5.2. Değişken Zorlanma	16
2.1.6. Yorulma Diyagramları.....	18
2.1.6.1. Wöhler Yorulma Diyagramı	18
2.1.6.2. Smith Yorulma Diyagramı	19
2.1.6.3. Gerber - Goodman – Soderberg – ASME Yorulma Diyagramı.....	20
2.1.6.4. Master Yorulma Diyagramı	21
2.1.7. Yorulma Makineleri	21
2.1.8. Yorulma Test Numuneleri.....	24
2.1.9. Yorulma Kırılması Hasar Analizi	26
2.1.10. Literatür Araştırması	27
2.1.11. Tezin Amacı	32
3. YÖNTEMLER	34
3.1. Malzeme	34
3.2. Isıl İşlem	34
3.3. Mekanik Ölçümler.....	36
3.4. Test Numunesi Üretimi	37
3.4.1. Kopya Torna Tezgâhında Numune Üretimi	42
4.2.1.1. Kopya Torna Tezgâhında Ayna-Punta Arası Numune Üretimi.....	46
4.2.1.2. Kopya Torna Tezgâhında Fırdöndü-Punta Arası Numune Üretimi .	47
3.4.2. CNC Torna Tezgâhında Numune Üretimi	47
3.4.2.1. CNC Torna Tezgâhında Ayna-Punta Arasında Numune Üretimi	49
3.4.2.2. CNC Torna Tezgâhında Ayna-Ayna Arasında Numune Üretimi.....	49
3.4.3. Talaşlı Üretim Verileri	50
3.5. Yorulma Makinesi Tasarımı ve Üretimi	56
3.6. Teorik Hesaplamalar	58
3.6.1. Eğme Gerilmesi Hesabı.....	59
3.6.2. Bileşik Gerilme Hesabı	61

3.6.4. Sürekli Mukavemet Değeri Hesabı	63
3.6.5. Teorik Yorulma Ömrü Hesabı.....	68
3.6.6. Gerber Eğrisi Teorik Hesaplama.....	70
3.6.7. Goodman Eğrisi.....	71
3.6.8. Kontrol Edilemeyen Faktör Etkili Gerilme Hesaplaması	73
3.6.9. Gerber Güvenlik Katsayısı Hesaplaması.....	74
3.6.10. Goodman Güvenlik Katsayısı Hesaplaması	75
4. BULGULAR.....	76
4.1. Wöhler Yorulma Eğrileri.....	76
4.2 Goodman Master Diyagramları.....	82
4.3. Gerber Master Diyagramları	87
5. TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER.....	92
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ.....	100

SAE 4140 (42CrMo4) ISLAH ÇELİĞİNİN BİLEŞİK GERİLMELİ YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mehmet Tuncay KAYA
Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

2016; Sayfa: 100

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ

ÖZET

Bu çalışmada, SAE 4140 çeliğinin bileşik gerilme etkisi altında yorulma davranışı incelenmiştir. Makine elemanları, çalışma ortamında genellikle bileşik gerilme etkisi altında çalışırlar. Malzemelerin bileşik gerilme etkisi altında davranışlarının belirlenmesi tasarımcılar açısından oldukça önemlidir. Bu davranışın incelenmesi maksadıyla öncelikli olarak, bileşik gerilme etkisi altında yorulma testi yapabilecek bileşik gerilmeli yorulma test cihazı tasarlanarak üretilmiştir. Dört farklı talaşlı üretim yöntemi ile numuneler üretilerek, üretim yönteminin yorulma deneyi üzerine etkileri araştırılmıştır. En iyi numune üretim yönteminin CNC tornada iki ayna arasında numunenin işlenmesi olduğu anlaşılmıştır. Makine kalibrasyonu için, teorik hesaplamalar yapılmış ve üretilen deney numuneleri ile bileşik gerilmeli yorulma test cihazında kalibrasyon testleri yapılmıştır. Test ve hesaplama sonuçları uyuşana kadar test ve ayarlamalar devam etmiştir. Kalibrasyonu tamamlanan dönel eğmeli yorulma makinesinde bileşik gerilmesi etkisi altında (eğme+çekme, eğme +basma) malzemenin yorulma davranışı incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda elde edilen verilerle malzemeye ait Wöhler yorulma diyagramları, Goodman Master ve Gerber Master diyagramları oluşturulmuştur. Elde edilen veriler incelendiğinde çekme gerilmesinin yorulma dayanımını düşürdüğü, basma gerilmesinin ise yorulma dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bileşik gerilmeli Yorulma, SAE 4140 çelik, dönel eğme, yorulma deneyi

THE FATIGUE BEHAVIOR OF THE SAE 4140 STEEL UNDER COMBINED STRESS LOAD

Mehmet Tuncay KAYA
Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

2016; Page: 100

Thesis Supervisor: Associate Professor Hamza Kemal AKYILDIZ

ABSTRACT

This study examines the fatigue behavior of the SAE 4140 steel under combined stress loads. Machine elements work in their operational environments generally under combined stress loads. Identification of fatigue behavior of elements under combined stress loads is extremely important for the designers. In order to examine fatigue behavior under combined stress, initially a fatigue test device producing combined stress loads on test specimen was designed and manufactured. The specimens were produced employing four different production methods to examine effects of the production methods on the test specimen. It was observed that the best method in specimen production was to produce the specimen in CNC turning machine between double chuck. For the calibration of the fatigue test machine, theoretical calculations have been made and combined stress load calibrations were made using the test specimens. It was seen that the data obtained from theoretical calculations and the data obtained from experimental tests largely overlap and so fatigue test machine calibration was completed. The behavior of the fatigue test specimen under combined stresses (bending+tensile, bending+compression) were examined with the calibrated rotary bending fatigue machine. Based on the data obtained from the tests, Wohler fatigue diagrams, Goodman Master and Gerber Master diagrams were generated. With the examination of the obtained data, it was observed that during rotary bending fatigue tests the tensile stress reduces and compressive stress increases the fatigue strength of the specimen.

Keywords: Fatigue under combined stress, SAE 4140 steel, rotary bending, fatigue test

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. SAE 4140 Çeliği Kimyasal Bileşimi	34
Tablo 3.2. Çekme Deney Numunesi Ölçüleri.....	36
Tablo 3.3. Malzeme Mukavemet Değerleri	37
Tablo 3.4. İstatistik Tablosu	37
Tablo 3.5. Son Pasolarda Kaldırılmayan Talaş Miktarları.....	51
Tablo 3.6. Mikro Sertlik Ölçümleri	53
Tablo 3.7. Numune Üzerinde Yapılan Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları	54
Tablo 3.8. Yüzey Faktörü ve Üstel Katsayısı:	64
Tablo 3.9. Sıcaklık Faktörü Katsayı Değerleri	65
Tablo 3.10. Güvenilirlik Katsayı Tablosu (5).....	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Yorulma Kırılması Yüzeyi..... 4
Şekil 2.2.	Kısa Ömürlü Yorulma Çevrimi..... 4
Şekil 2.3.	Uzun Ömürlü Yorulma 5
Şekil 2.4.	Isıl Yorulma 5
Şekil 2.5.	Korozyonlu Yorulma Kırılması Yüzeyi..... 6
Şekil 2.6.	Yorulma Çatlağı Oluşum Mekanizması..... 7
Şekil 2.7.	Yorulma Çatlağı Kesit..... 7
Şekil 2.8.	Wood'un Mikrodeformasyon Teorisi 8
Şekil 2.9.	Çatlağın Kayma Banlarında İlerlemesi 9
Şekil 2.10.	Çatlağın Gerilmeye Dik Yönde İlerlemesi..... 10
Şekil 2.11.	Çatlak İlerleme Mekanizması 10
Şekil 2.12.	Zorunlu Yorulma Kırılması..... 11
Şekil 2.13.	Mikro Boşluk Oluşumu ve Boşlukların Birleşmesi 15
Şekil 2.14.	Rassal Gerilme Diyagramı 16
Şekil 2.15.	Sabit Genlikli Değişken Gerilme Diyagramı 16
Şekil 2.16.	Ön Gerilmeli Sabit Genlikli Değişken Gerilme Diyagramı..... 17
Şekil 2.17.	Ön Gerilmeli Sabit Genlikli Değişken Gerilme Diyagramı..... 17
Şekil 2.18.	Wöhler Eğrisi 18
Şekil 2.19.	Smith Diyagramı 19
Şekil 2.20.	Gerber – Goodman – Soderberg - ASME Yorulma Diyagramı..... 20
Şekil 2.21.	Master Yorulma Diyagramı 21
Şekil 2.22.	Dönen Eğmeli Ankastre Tip Yorulma Makinesi 22
Şekil 2.23.	R. R. Moore Dört Noktalı Dönen Eğmeli Yorulma Makinesi 22
Şekil 2.24.	Tekrarlı Eğme Yorulma Makinesi 23
Şekil 2.25.	Çok Eksenli Yorulma Makinesi 23
Şekil 2.26.	Servo Hidrolik Yorulma Makinesi..... 23
Şekil 2.27.	Burulma Yorulma Makinesi..... 24
Şekil 2.28.	Yorulma Deneyi Test Numunesi Bölümleri 24
Şekil 2.29.	Kontrollü Gerinim Termomekanik Yorulma Test Numunesi..... 25

Şekil 2.30.	Kontrollü Eksenel Gerinim ve Burulma Testi Boru Numunesi	25
Şekil 2.31.	Tekrarlı Eğilme Yorulması Test Numunesi	25
Şekil 2.32.	Dönen Eğmeli Yorulma Test Numunesi	26
Şekil 2.33.	Kontrollü Eksenel Gerinim Düz Yorulma Test Numunesi	26
Şekil 2.34.	Kontrollü Eksenel Gerinim Silindirik Yorulma Test Numunesi	26
Şekil 2.35.	Çok Eksenli Yorulma Test Numunesi	26
Şekil 2.36.	Yorulma Kırığı Yüzeyi	27
Şekil 3.1.	Soğuk Haddelenmiş AISI 4140 Çeliği İç Yapı Görüntüsü	34
Şekil 3.2.	Isıl İşlem Fırınında Isıtılan Parçalar	35
Şekil 3.3.	Yağda Sertleştirme	35
Şekil 3.4.	Temper-Martenzit İç Yapı Görüntüsü.....	36
Şekil 3.5.	Çekme Deney Numunesi.....	36
Şekil 3.6.	Çekme Deneyi.....	37
Şekil 3.7.	Yorulma Deney Numunesi.....	40
Şekil 3.8.	Torna Kateri ve Kesici Uç.....	41
Şekil 3.9.	İki Punta Arasında Tornalama	41
Şekil 3.10.	Kopya Torna Tezgâhı.....	42
Şekil 3.11.	Kopya Torna Tezgâhı Şematik Görüntüsü.....	43
Şekil 3.12.	İlerleme Değişimi.....	43
Şekil 3.13.	Kopya Torna Tezgâhı Kopyalama Mastarı	44
Şekil 3.14.	Kopya Torna Tezgâhı Hidrolik Dayama Sistemi.....	45
Şekil 3.15.	Kopya Torna Tezgâhı Kesici İlerletme Sistemi	45
Şekil 3.16.	Kopya Torna Tezgâhı Ayna-Punta Arası Numune Üretimi.....	46
Şekil 3.17.	KTT Fırdöndü Aynası-Punta Arası Numune Üretimi.....	47
Şekil 3.18.	CNC Torna Tezgâhı	48
Şekil 3.19.	CNC Torna Tezgâhında Numune Üretimi	50
Şekil 3.20.	Kaldırılmayan Talaş Miktarı Değişimi.....	52
Şekil 3.21.	Mikro Sertlik Değişimi	54
Şekil 3.22.	Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi	55
Şekil 3.23.	Bileşik Gerilmeli Yorulma Makinesi Üretimi.....	57
Şekil 3.24.	Elektronik Kumanda Devresi.....	58
Şekil 3.25.	Bileşik Gerilme Yükleme Sistemi.....	58

Şekil 3.26.	Gerilme-Yüklemeye Mesafesi Eğrisi.....	59
Şekil 3.27.	Yorulma Makinesi Eğme Gerilmesi Şematik Resmi	60
Şekil 3.28.	Eğme Gerilmesi.....	60
Şekil 3.29.	Eğme ve Çekme Gerilmesi	61
Şekil 3.30.	Gerilme Dağılımı	62
Şekil 3.31.	Yorulma Makinesi Eğme-Çekme Gerilmesi Şematik Resmi.....	62
Şekil 3.32.	Yorulma Makinesi Eğme-Basma Gerilmesi Şematik Resmi.....	63
Şekil 3.33.	K_t Katsayısı	67
Şekil 3.34.	q Katsayısı.....	67
Şekil 3.35.	f Katsayısı.....	68
Şekil 3.36.	Teorik Yorulma Eğrisi	69
Şekil 3.37.	Gerber Teorik Yorulma Eğrisi	71
Şekil 3.38.	Goodman Teorik Yorulma Eğrisi.....	73
Şekil 3.39.	Goodman-Gerber Teorik Yorulma Eğrisi	73
Şekil 4.1.	Deneysel Yorulma Eğrisi	76
Şekil 4.2.	45 N/mm ² PÇekme Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi.....	77
Şekil 4.3.	90 N/mm ² PÇekme Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi.....	78
Şekil 4.4.	45 N/mm ² PBasma Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi	79
Şekil 4.5.	90 N/mm ² Basma Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi.....	80
Şekil 4.6.	Deneysel Yorulma Eğrileri	81
Şekil 4.7.	Deneysel Yorulma Eğrileri Doğrusal Grafik	81
Şekil 4.8.	Deneysel ve Teorik Yorulma Eğrisi.....	82
Şekil 4.9.	Goodman Teorik Master Diyagramı	83
Şekil 4.10.	Goodman Deneysel Master Diyagramı	83
Şekil 4.11.	Goodman Deneysel-Teorik Master Diyagramı.....	84
Şekil 4.12.	45 N/mm ² P Çekme Gerilmeli Goodman Master Diyagramı	84
Şekil 4.13.	90 N/mm ² P Çekme Gerilmeli Goodman Master Diyagramı	85
Şekil 4.14.	45 N/mm ² P Basma Gerilmeli Goodman Master Diyagramı.....	86
Şekil 4.15.	90 N/mm ² P Basma Gerilmeli Goodman Master Diyagramı.....	86
Şekil 4.16.	Goodman Deneysel Master Diyagramı	87
Şekil 4.17.	Gerber Teorik Master Diyagramı.....	87
Şekil 4.18.	Gerber Deneysel Master Diyagramı.....	88

Şekil 4.19.	Gerber Deneysel-Teorik Master Diyagramı.....	88
Şekil 4.20.	45 N/mmP ² P Çekme Gerilmeli Gerber Master Diyagramı.....	89
Şekil 4.21.	90 N/mmP ² P Çekme Gerilmeli Gerber Master Diyagramı.....	90
Şekil 4.22.	45 N/mmP ² P Basma Gerilmeli Gerber Master Diyagramı	90
Şekil 4.23.	90 N/mmP ² P Basma Gerilmeli Gerber Master Diyagramı	91
Şekil 4.24.	Gerber Deneysel Master Diyagramı.....	91

KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	: American Iron and Steel Institute
ASME	: American Society For Mechanical Engineers
ASTM	: American Society For Testing and Materials
CNC	: Computer Numerical Control
DIN	: Deutsches Institut für Normung
KTT	: Kopya Torna Tezgahı
SAE	: Society of Automotive Engineers
SEM	: Scanning Electron Microscope

SEMBOL LİSTESİ

σ_{\max}	: Maksimum gerilme
σ_{ak}	: Akma gerilmesi
σ_{\min}	: Minimum gerilme
σ_m	: Ortalama gerilme
σ_a	: Gerilme genliği
N	: Devir sayısı
σ	: Gerilme
M	: Moment
d	: Çap
L	: Yük kolu uzunluğu
$\sigma_{\text{ç}}$: Çekme mukavemeti
σ_Y	: Sürekli mukavemet gerilmesi
k_a	: Yüzey faktörü
k_b	: Boyut faktörü
k_c	: Yükleme faktörü
k_d	: Sıcaklık faktörü
k_e	: Güvenilirlik faktörü
k_f	: Diğer etkiler
r	: Yarıçap
σ_Y^*	: Teorik yorulma gerilmesi
σ_{a0}	: Kontrol edilemeyen faktör etkili gerilme
n_f	: Güvenlik katsayısı

1. GİRİŞ

Makine parçaları çalışma ortamında, statik zorlanmalardan çok büyüklüğü ve yönü düzenli/düzensiz olarak değişen kuvvetlere maruz kalırlar. Makine elemanları, bu kuvvetlerin oluşturduğu eğme ve burulma momentleri etkisi altında çalışır. Dinamik yükler ve titreşimler altında çalışan makine parçaları, maruz kaldıkları gerilmelerin etkisiyle, çevrim sayılarına bağlı olarak akma dayanımının altındaki değerlerde bile hasara uğrayabilir. Genellikle yüzeyde oluşan mikroskobik ölçekteki fiziksel hasar çevrim sayısına bağlı olarak artar [1]. Parça kesiti, hasarın artmasıyla, üzerine etki eden gerilmeye dayanamayarak ani olarak kırılır. Bu tür kırılmalar yorulma, kırılıncaya kadar geçen süreye de yorulma ömrü denir.

Günümüz serbest piyasa ekonomisinde rekabet edebilmenin temel kuralı, hafif, fonksiyonel ve uzun servis sürelerine sahip makine veya makine elemanları üretmektir. Tasarım aşamasında seçilen malzemeye ait mekanik verilerin doğruluğu, makine elemanının düşük emniyet katsayıları ile tasarlanarak, uzun süre fonksiyonunu yerine getirmesi için önemlidir [2]. Bu nedenle; yorulma gerilmeleri ve yorulma çevrim sayılarının net olarak belirlenmesi günümüzde daha da önem kazanmıştır. Mekanik verilerin belirlenmesi için yapılan yorulma deneyleri, maliyetlerinin fazla olması ve araştırma sürelerinin uzunluğu sebebiyle, oldukça zor deneylerdir. Ayrıca; tasarlanan makine elemanının çalışma şartlarının, deney ortamına aktarılacak olması da diğer bir önemli zorluktur. Çalışma şartlarının oluşturulduğu deneylerde elde edilen veriler, sadece deney şartlarını içeren makine parçaları için ideal sonuçlar vermektedir. Malzemeye ait oluşturulan her grafik, her makine elemanının tasarımı için kullanılamamaktadır.

Makine parçaları çalışması ortamında üzerlerine etki eden kuvvetlerle bağlı olarak farklı gerilme türlerine maruz kalmaktadır. Oluşan bu gerilme türleri bazen tek iken bazı durumlarda bileşik olabilir. Makine elemanlarında gerilmelere bağlı olarak oluşan hasarların %90'ında yorulmanın etkisi gözlemlenmektedir [2]. Yorulma etkisinin incelendiği literatür çalışmalarının çoğunda, malzemelerin çekme-basma gerilmeleri sonucu yorulma durumları incelenirken, sınırlı sayıda yapılan deneysel çalışmada ise malzemelerin bileşik gerilme etkisi altında yorulma davranışlarının

incelendiği grlmŖtr. Yapılan yorulma deneyleri incelendiğinde bileŖik gerilmeli yorulma deneylerinin endüstriyel uygulamalarda makine elemanlarında karŖılaŖılan durumları daha ok tanımladığı sonucuna varılmıŖtır.

Yapılan bu deneysel alıŖmada SAE 4140 (42CrMo4) ıslah eliğinin bileŖik gerilmeli yorulma etkisi altında yorulma davranıŖı incelenmiŖtir. alıŖma için bileŖik gerilme oluŖturulabilecek bir dönen aksenal eğmeli yorulma makinesi tasarlanarak retilmiŖtir. Üretilen yorulma makinesinde numuneler eğme gerilmesi etkisi altında, n yüklemeli eğme gerilmesi etkisi altında ekme gerilmesine ve n yüklemeli eğme gerilmesi etkisi altında basma gerilmesine maruz bırakılarak yorulmaya tabii tutulmuŖtur.

Yapılan alıŖmanın amacı; tek ekseninde yükleme etkisi altında eğme gerilmesiyle elde edilen verilerle, iki ekseninde oluŖturulan yükleme sonucu bileŖik gerilmeye maruz kalan malzemenin yorulma ömründe oluŖan deđiŖimlerin karŖılaŖtırılarak tespit edilmesidir. Genellikle makine elemanlarının alıŖma ortamlarında bileŖik gerilmelere maruz kaldığı dŖnldđnde, elde edilen verilerin tasarımcıya bileŖik gerilme etkisi altında tasarımında kullandığı malzemenin yorulma ömründe oluŖan deđiŖimleri değerlendirmesi açısından oldukça önemlidir.

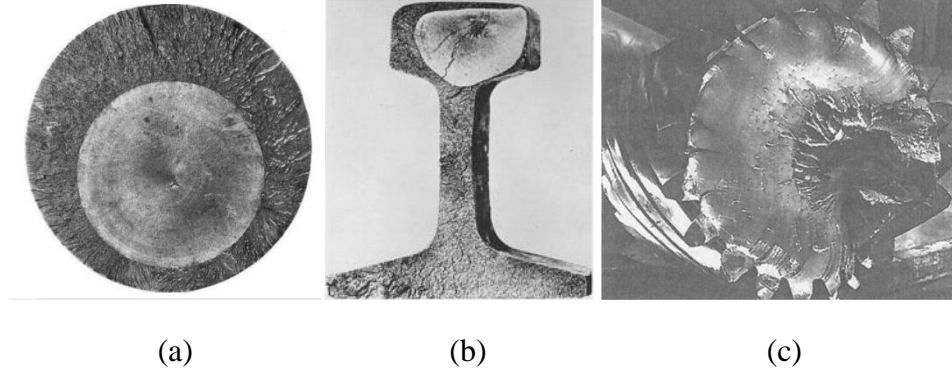
2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yorulma

Makine elemanları, çalışma ortamlarında değişken yükler ve buna bağlı oluşan gerilmelerin etkisi altında çalışır. Çalışma sırasında makine elemanına etki eden yükler statik olsa da elemanın kesitinde meydana gelen gerilmeler tam değişken olabilir. Örneğin dönen bir milin üzerine etki eden kuvvet statik iken, mil kesitinde oluşan gerilmeler tam değişkendir. Bu gerilmeler malzemenin içyapı kusurları veya elemanın yüzeysel faktörlerine bağlı olarak kesitte hasarların oluşmasına sebep olur. Makine elemanı, akma gerilmesinin altında yüklemelere maruz kalmasına rağmen, kesitinde oluşan hasarlar elemanın kopmasına yol açar. Değişken gerilmelerin etkisi altında malzemenin içyapısındaki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye de ömür adı verilir. Yorulma adı verilen bu olay, W.A.S. Alber tarafından ilk olarak gemi demir zincirlerinde oluşan kopmaların incelenmesi sonucu gözlemlenmiştir. W.A.S. Alber tarafından gemi zincirlerine tekrarlı yükler uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. 19. Yüzyılın ortalarında demiryolu araçlarının gelişmesiyle, lokomotif akslarında tekrarlı değişken yüklemeler sonucu oluşan kırılmalar, bu konunun daha detaylı incelenmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır. 1852 ve 1870 yılları arasında Alman demir yolu mühendisi olan August WÖHLER bu sorunu araştırmak için laboratuvar ortamında sistematik bir dizi deneyler yapmış ve elde ettiği verileri kendi adıyla anılan bir diyagramla yorumlamıştır [3], [4].

Yorulma olayında elemanın ömrü, genellikle çevrim sayısı ile tarif edilir. Değişken zorlanmada kopma, içyapıda veya dış yüzeyde bir süreksizlik noktasından başlar. Bu nokta civarında malzeme yorulur ve bir çatlak meydana gelir. Zamanla çatlak çevrim sayısına bağlı olarak derinleşir ve çatlak dışında kalan bölgede oluşan gerilme, mukavemet sınırını aşarak elemanın birden bire kırılmasına neden olur. Bu şekilde oluşan kırılma yüzeylerinde iki bölge görülür. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi kırılma yüzeyinin bir kısmı mat ve düz, diğer kısmı ise parlak ve tanelidir. Parlak bölge önceden meydana gelen ve zamanla büyüyen çatlağı gösterir. Mat bölge ise birden bire kopan bölgedir. Birçok makine parçası başlangıçta çok iyi çalışabilir fakat

yükleme sonucu belli bir süre sonra çevrim sayısına bağlı olarak, yorulma hasarına uğrayarak işlevselliğini yitirir [5], [6].

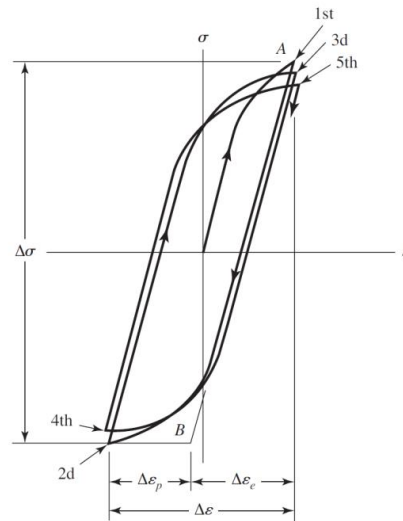


Şekil 2.1. Yorulma Kırılması Yüzeyi

2.1.1. Yorulma Türleri

2.1.1.1. Kısa Ömürlü Yorulma

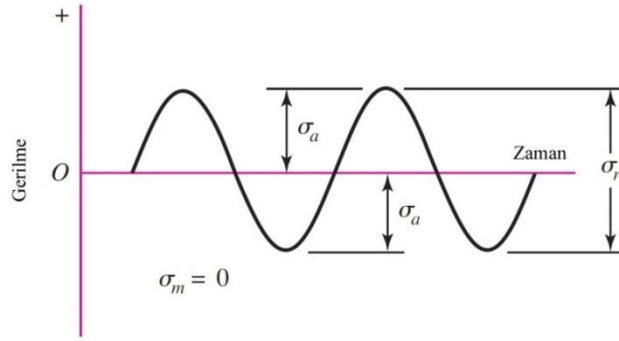
Kısa ömürlü yorulma, hasar çevrim sayısı 10^4 'den daha düşük olan yorulma hasarlarına verilen genel isimdir. Akmanın ötesinde plastik şekil değişimlerinin söz konusu olduğu kısa ömürlü yorulma, uzun yorulmanın aksine gerilme genliği ile değil Şekil 2.2'de görüldüğü gibi birim şekil değişimi genliği ile kontrol edilmektedir.



Şekil 2.2. Kısa Ömürlü Yorulma Çevrimi [3], [7]

2.1.1.2. Uzun Ömürlü Yorulma

Uzun ömürlü yorulma, Şekil 2.3’de görülen ve tam değişken olan, hasar çevrim sayısı 10^5 ’ten daha büyük olan yorulma hasarlarına verilen genel isimdir. Akmanın söz konusu olmadığı uzun ömürlü yorulmada, gerilme genliği ile devir sayısı kontrol edilmektedir.



Şekil 2.3. Uzun Ömürlü Yorulma [5]

2.1.2. Yorulma Çeşitleri

2.1.2.1. Isıl Yorulma

Makine elemanında sıcaklık değişimleri sonucu oluşan gerilmeler, ısıl yorulmaya yol açar. Sıcaklık değişimleri sırasında parçanın boyut değiştirmesi herhangi bir şekilde sınırlanırsa parçada iç gerilmeler doğar. Sıcaklık azalmasında bu gerilme pozitif yani çekme yönünde, sıcaklık artışında ise negatif yani basma yönünde oluşur. Çevrim sayısına bağlı olarak yorulma çatlakları ilerleyerek makine elemanının Şekil 2.4’de görüldüğü gibi hasara uğramasına yol açar [7].

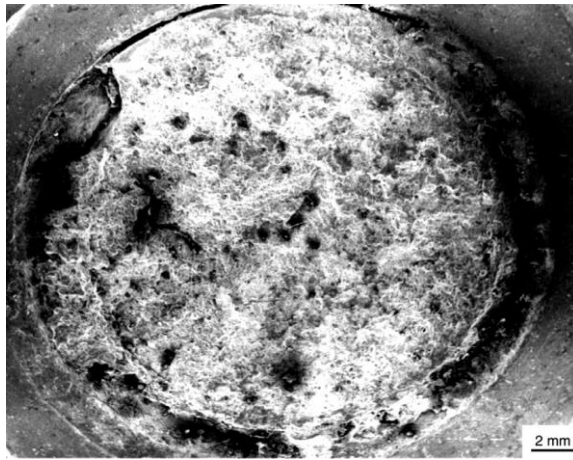


Şekil 2.4. Isıl Yorulma

Hasar ısı gerilmenin tek bir uygulaması sırasında oluşursa buna ısı şok, çok sayıdaki tekrar sonrasında oluşursa ise buna ısı yorulma adı verilir. Bu tür yorulma daha çok yüksek sıcaklık etkisi altında çalışan makine parçalarında görülmektedir. Bu tür yorulmaya en duyarlı davranan malzeme östenitik paslanmaz çeliklerdir. Çünkü yüksek ısı uzama katsayılarının yanı sıra, bu malzemeler düşük ısı iletimi özelliğine sahiptir.

2.1.2.2. Korozyonlu Yorulma

Malzemeye, çevrimsel gerilmenin saldırgan bir ortamda etkimesi sonucu Şekil 2.5’de görüldüğü gibi korozyonlu yorulma meydana gelir [1]. Malzemenin yorulma dayanımı böyle ortamlarda önemli ölçüde azalır ve çatlak ilerleme hızında çok büyük artışlar görülür. Korozyon ortam malzemelerin yorulma çatlak oluşum safhasından çok, yorulma çatlak ilerleme safhasında etkilidir. Çok kaba olarak yorulma hasar ömründe yarı yarıya azalmalar olabilir.

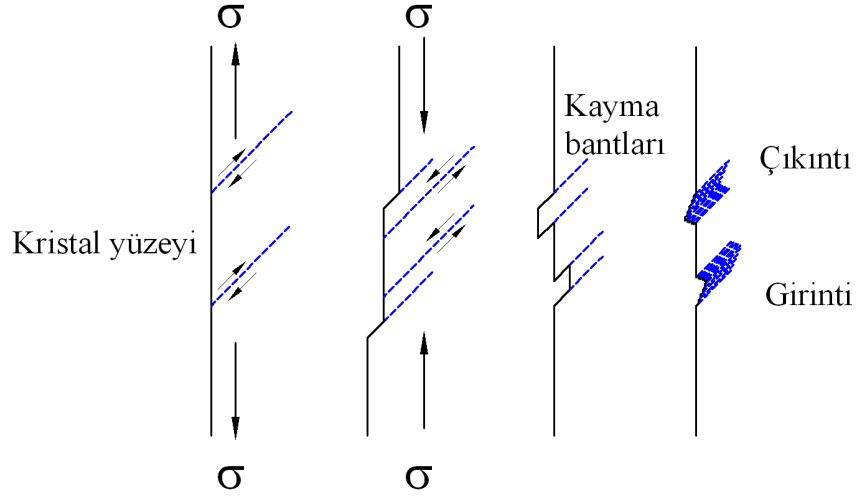


Şekil 2.5. Korozyonlu Yorulma Kırılması Yüzeyi

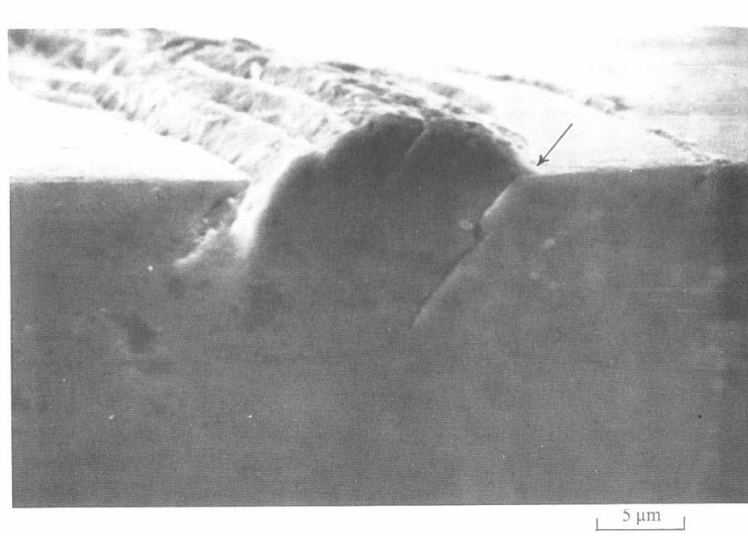
2.1.3. Yorulma Hasarı Oluşum Mekanizması

Yorulma hasarının oluşum mekanizması üzerine yapılan araştırmalar neticesinde hasarın dört değişik safhada oluştuğu ortaya konmuştur. Bunlar;

2.1.3.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu



Şekil 2.6. Yorulma Çatlağı Oluşum Mekanizması [8]



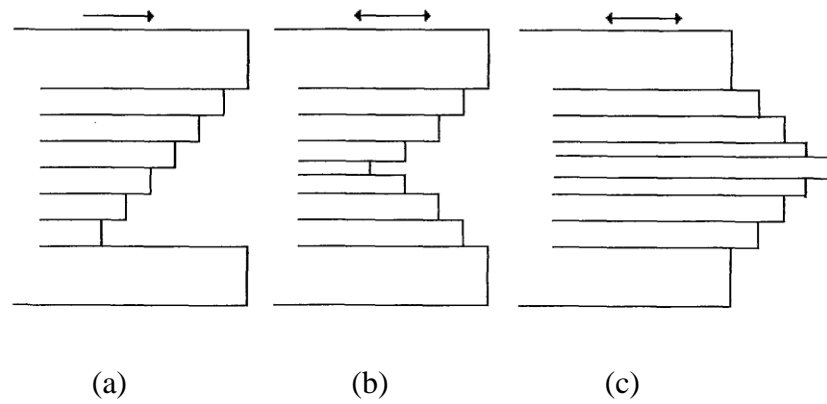
Şekil 2.7. Yorulma Çatlağı Kesit [8]

Parça üzerine etki eden kuvvet sonucu oluşan gerilme, parça yüzeyinde büyük değere ulaşır. Çevrimsel zorlanmalar neticesinde oluşan ve Şekil 2.6'da şematik çizimi belirtilen kristal içindeki kayma hareketleri, yüzeyde son bulur. Yorulma çatlağı büyük olasılıkla Şekil 2.7'de görüldüğü gibi parçanın yüzeyinde başlar. Çatlak oluşumunda, önce mikro ölçekte plastik şekil değişimlerinden kaynaklanan kararlı kayma bantları meydana gelmektedir. Gerilmenin yön değiştirmesiyle birlikte, kayma bantlarında meydana gelen kayma olayı bir takım yan etkilerden dolayı tam

anlamıyla geri dönememekte, böylece malzeme yüzeyinde girinti ve çıkıntılarının oluşmasına yol açmaktadır. Atomik mertebedeki oluşan, bu yüzey pürüzlülüğü zorlanmalar sırasında gerilme yığılmalarına yol açar. Bu gerilme yığılmaları neticesinde büyük değerlere ulaşan gerilme, yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesini sağlar. Bu mekanizma toplam yorulma ömrünün yaklaşık % 10'unu kapsamaktadır.

Yorulma çatlaklarının oluşumu ile ilgili çeşitli teoriler vardır. Bunlardan GOUGH'a göre; metal çevrimsel gerginlik altında aynı yönlü ve tek eksenli gerginlikte olduğu gibi aynı kristalografik yönlerde kayar.

Yalnız tek eksenli kayma, yapının her yerinde görülürken, yorulmada bazı tanelerde kayma bantları görülmez. Kayma hatları ilk birkaç bin çevrimde ortaya çıkar. Çevrim sayısı arttıkça, kayma bantları da artar. Fakat kayma bantlarının sayısı, çevrim sayısı ile doğru orantılı değildir. Birçok metalde kayma, bir doygunluk değerine ulaşır. Bu, daha çok ağır kayma bölgesinde görülür. İşte çatlaklar, genellikle başlangıçta kayma bandına paralel olan ağır deformasyon bölgesinde ilerler. Çatlaklar yorulma sınırının altındaki gerilmelerde oluşmuştur. Yani; yorulma esnasında kaymanın oluşması, çatlakların oluşacağı anlamına gelmez. Yorulma testi bir yerde kesilip yüzey elektro parlatma ile parlatıldığı zaman bile yok olmayan inatçı kayma bantları, embiryonik yorulma çatlaklarıdır. Bu tür bantlar toplam yorulma ömrünün % 5'inden sonra görülür. Bu bantlarda küçük bir çekme gerilmesi uygulanmasıyla bantlar geniş çatlaklara dönüşür.



Şekil 2.8. Wood'un Mikrodeformasyon Teorisi [8]

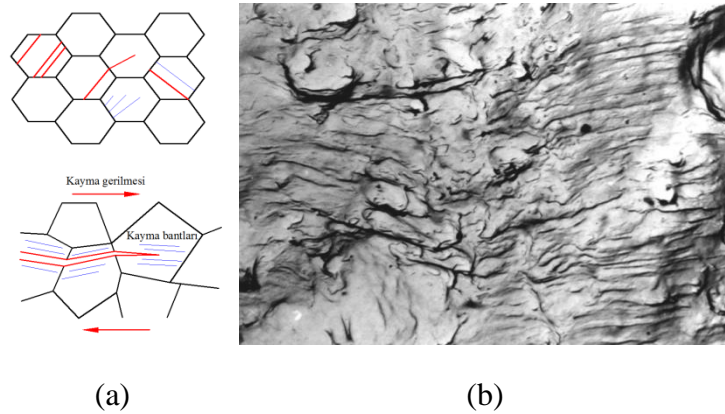
Kayma bantları bir müddet sonra Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, yüzeyde çentikler ve pürüzler oluşturur. Yorulma, buradaki gerilme yoğunlaşması sonucu başlamamaktadır.

Wood’un teorisine göre; küçük mikro kayma hareketlerinin sistematik bir şekilde önemli oranda bir deformasyon sertleşmesi meydana getirmeden, büyük miktarda toplam deformasyona izin verdiğine inanılmaktadır. Wood’un teorisi, yorulmanın iki aşamada meydana geldiğini ileri sürmektedir.

Birinci aşamada başlangıçta çatlak, inatçı kayma boyunca ilerler. Çok kristalli metallerde çatlak ilerlemesi ikinci çatlağa geçmeden önce, sadece birkaç atom çapı boyutunda ilerler. Birinci aşamada, çatlak ilerleme hızı genellikle çok düşüktür (sadece; birkaç μm / çevrim).” İkinci aşamada ise, mikron/çevrim mertebesindedir. Birinci aşamaya ait kırık yüzeyi genellikle belirgin özellikte değildir. İkinci aşamaya ait kırık yüzeyinde ise her biri, her bir çevrimde oluşmuş kırığı gösteren çizgili bir görünüm vardır. Bu çizgiler, çekme gerilmesine diktir. Adeta bu çizgiler sayılarak çevrim sayısı belirlenebilir. Bunlar ancak elektron mikroskobu ile görülebilir.

İkinci aşamada artık çatlak oluşmuştur. İnküzyonlar ya da ikinci faz parçacıkları, plastik deformasyon bölgesi içinde boşluklar oluşturarak birbiri ve çatlak ucuyla birleşir. Bu nedenle, çatlak ilk duruma göre daha hızlı ilerler. Uzun ömürlü yorulmada $\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{ak}}$, $\sigma_{\text{min}} < \sigma_{\text{ak}}$; ömrün tamamı çatlak oluşumu için harcanır.

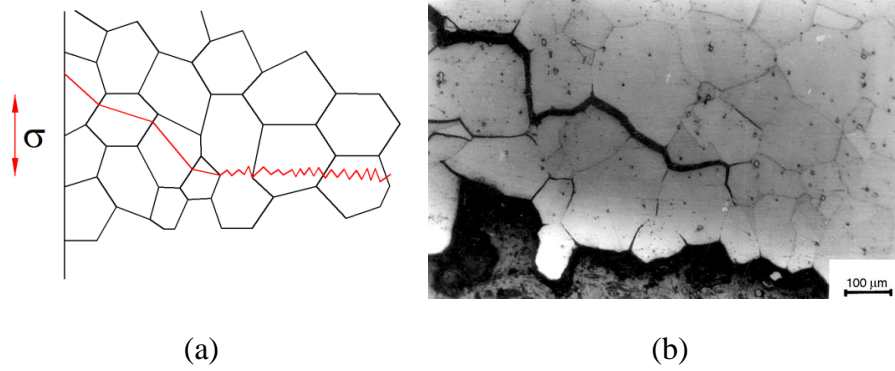
2.1.3.2. Çatlağın Kayma Bantlarında İlerlemesi



Şekil 2.9. Çatlağın Kayma Bantlarında İlerlemesi [9], [10]

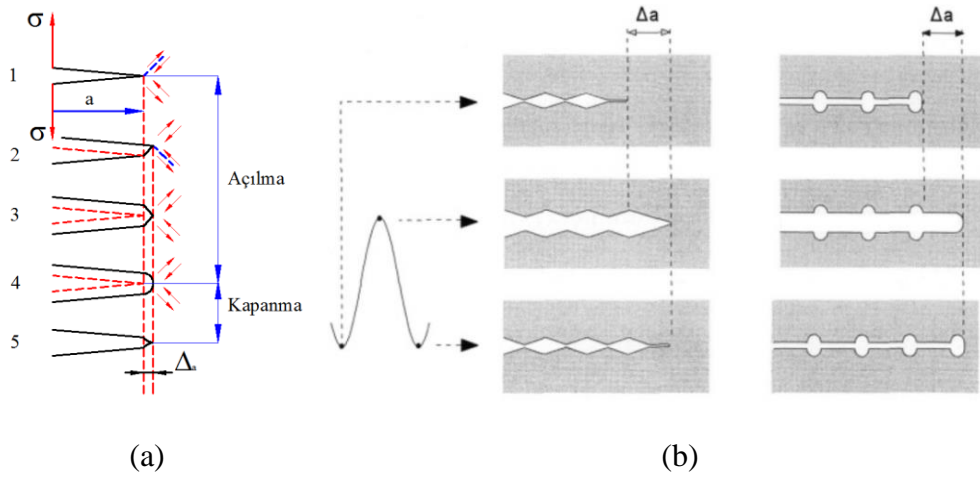
Oluşan mikro çatlaklar Şekil 2.9’da görüldüğü gibi önce kayma bantları boyunca ilerler. Bu ilerleme genellikle parça üzerine etki eden gerilmenin eksenine 45° ’lik bir açı yaparak taneler içinde gelişmesini sürdürür.

2.1.3.3. Çatlağın Gerilmeye Dik Yönde İlerlemesi



Şekil 2.10. Çatlağın Gerilmeye Dik Yönde İlerlemesi [9], [11]

Gerilmeler neticesinde çatlak gerilme yönüne dik olarak ilerlemeye başlar ve Şekil 2.10’da görülen kararlı çatlak ilerleme safhasını oluşturur. Bu safhadan sonra çatlak ilerlemesi gerilme doğrultusuna dik olarak ilerler.

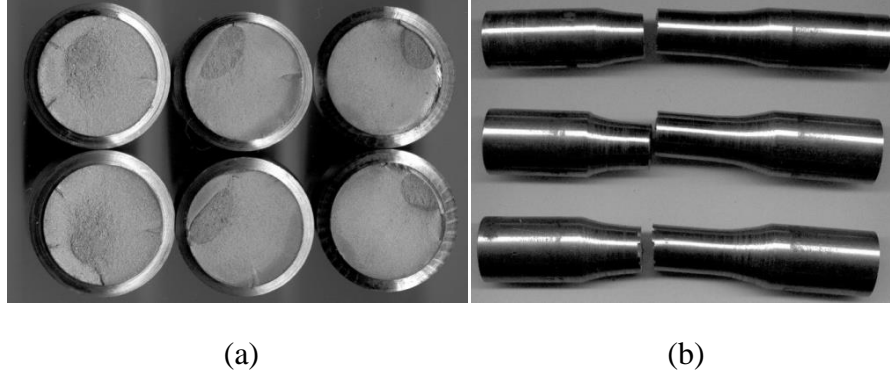


Şekil 2.11. Çatlak İlerleme Mekanizması [2], [12], [13]

Çatlak açılma sırasında Şekil 2.11’de görüldüğü gibi kayma mekanizması yardımıyla bir miktar uzamakta, bu sırada çatlak dibindeki plastik şekil değişimi neticesinde, burada körelme (blunting) gerçekleştiğinden gerilme şiddeti azalmakta ve ilerleme

durmaktadır. Ancak kapanma sırasında çentik dibi bu defa keskinleşmekte ve takip eden açılma sırasında gerilme olmaktadır. Bu olay her çevrim esnasında tekrarlanmakta olup yorulma striasyonlarının (çizgileri) oluşumu da bu şekilde açıklanmaktadır.

2.1.3.4. Zorunlu Kırılma



Şekil 2.12. Zorunlu Yorulma Kırılması [14]

Malzeme üzerine etki eden kuvvetler sonucu kesitte meydana gelen gerilme, kesitin taşıyamayacağı değerlere ulaştığında Şekil 2.12’de görüldüğü gibi malzeme kırılarak hasara uğrar. Bu kırılma ani olur ve kırılma yüzeyi yorulma yüzeyinden farklı olarak gözenekli bir görünümündedir. Kırılma yüzeyinin büyüklüğü ve şekli malzemenin hangi gerilme ve şiddeti altında hasara uğradığı konusunda bilgi verir.

2.1.4. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler

2.1.4.1. Ortalama ve Bileşik Gerilmenin Etkisi

Yorulmaya değişen gerilme genliği yol açar. Literatürdeki malzemelere ait yorulma sınırını veya dayanımını veren verilerin büyük çoğunluğu değişken yorulma zorlaması ($\sigma_m = 0$) için tayin edilmiş değerleri içermektedir. Ancak gerçekte yorulma zorlanmaları ideal durumdan farklılıklar göstermektedir. Özellikle işletme şartlarında malzemelere gerilme genliğinin yanı sıra, ortalama gerilmenin de etkidiği görülmektedir. Çoğunlukla ortalama gerilmenin pozitif olduğu durumda basma yönündeki ortalama gerilmelerden daha tehlikeli durumlar ortaya çıkardığı

bilinmektedir. Ortalama ve bileşik gerilmenin varlığı durumunda yorulma dayanımının hangi değere indirgeneceğinin bilinmesi gerekmektedir [15].

2.1.4.2. Boyut Etkisi

Makine parçalarının boyutlarının, malzemenin eğme ve burulma yorulma dayanımlarını önemli oranda etkilediğini ortaya koymuştur. Parça büyüdükçe yorulma dayanımı azalmaktadır. Bu değişim 10 ile 200 mm çap (ya da kalınlık) aralığında söz konusudur [14].

2.1.4.3. Parça Biçiminin Etkisi

Literatürde verilen yorulma dayanımları çoğunlukla dairesel kesitli parçalarda yapılan deneylerden elde edilen verileri kapsamaktadır. Bu konuda çok kısıtlı sayıda deney yapılmasına karşılık dörtgen kesitli parçaların yorulma dayanımlarının dairesel kesitlilerine göre daha düşük olduğu belirtilmektedir [14].

2.1.4.4. Yüzey İşlemlerinin Etkisi

Gerek parçaların şekillendirilmesi, gerekse çalıştıkları ortam neticesinde oluşan yüzey durumu ve yüzey kalitesi de yorulma dayanımı üzerinde etkin rol oynamaktadır. Literatürde yorulma dayanımı veya sınırı değerlerini veren tüm veriler yüzeyi parlatılmış deney parçalarında elde edilmiş değerlerdir. Yüzey kalitesi azaldıkça veya pürüzlülük arttıkça yorulma dayanımının azaldığı görülür. Bu azalma malzemenin çekme dayanımı arttıkça daha belirginleşmektedir [14].

2.1.4.5. Korozyon Ortamının Etkisi

Bir cisim korozyon ortam içinde iken değişken kuvvetlerin etkisi altında kalması sonucu oluşan yorulmaya korozyon yorulması denir. Bu olay yorulma olayının en tehlikeli halidir. Korozyon ortam metalin yüzeyini pürüzlü hale sokarak çentik etkisinin oluşmasına yol açar. Yüzeyde oluşan çentikler malzemenin yorulma dayanımının düşmesine sebep olur[14].

2.1.4.6. Sıcaklığın Yorulmaya Etkisi

Sıcaklık azaldıkça yapıdaki ısıl aktivasyonun neden olduğu olaylar gerektiği gibi gerçekleşemezler. Dolayısıyla boşluk oluşumu ve arayer atomlarının hareketleri sınırlanmış olur. Bu ise malzemenin şekil değiştirme yeteneğini kısıtlar ve sonuçta malzemenin dayanımı artar. Yorulma dayanımı da bu değişime paralel olarak sıcaklık düşüşü ile artış gösterir. Ancak yüksek frekanslı zorlanmalarda darbe etkisi söz konusu olduğundan çatlak ilerlemesi safhasında daha düşük ömür beklenmelidir.

Yüksek sıcaklıklarda ise bu mekanizmanın tersi çalıştığı için, hatta ek olarak çapraz kayma ve tırmanma gibi mekanizmalar da işlerlik kazandığı için dayanım düşer ve buna paralel olarak yorulma dayanımı da azalır. Çok yüksek sıcaklıklarda sürtünme mekanizmaları da kendini gösterir ve yorulma ile beraber etkin olur. Yüksek sıcaklıklardaki dinamik zorlanmalarda ortalama gerilme ve frekansın da çok büyük önemi vardır. Özellikle düşük frekansın neden olduğu uzun tutma süreleri ve yüksek ortalama çekme gerilmesi sürtünme mekanizmalarını sürekli olarak çalıştırdığı için yorulma dayanımının önemli oranda düşmesine neden olur.

2.1.4.7. Metal ve Alaşımın Soğuk İşlenmesi

Sünek metallerin soğukta işlenmeleri halinde yorulma sınırlarında bazı değişiklikler olur. Çelik çubuklarda yapılan deneyler, orta derecede işlenmiş bir elemanda yorulma dayanımının biraz arttığını göstermiştir. Daha büyük bir soğuk işlemede ise, yorulma sınırlarının azaldığı görülür. Soğuk işlemeden sonra eleman belirli bir süre kaynar suda bırakılırsa veya sabit sıcaklıkta tutulursa, azalmış olan yorulma sınırının yine biraz arttığı görülür.

Soğuk işleme dikkatli olmayı gerektiren bir işlemdir. Dikkat edilmezse elemanda çatlaklar ve önemli artık gerilmeler meydana gelebilir.

2.1.4.8. Frekansın Etkisi

Wöhler'in yaptığı deneylerde tekrar sayısı dakikada 60 devir kadar iken, daha sonra Reynolds tarafından dakikada 2500 devir için deneyler yapılmış, arkasından Hopkinson 7000 devir/dk.'lık deneyler yaparak, yorulma dayanımlarında %10 bir

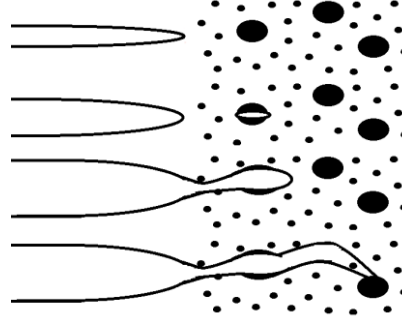
artış olduğunu göstermiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte bugün çok daha yüksek tekrar sayılarında deneyler yapılarak, yorulma sınırlarındaki artışlar öğrenilebilmektedir [14].

Düşük frekanslarda zamanın uzamasıyla korozyon etkisi kuvvetlenmediği, yüksek frekanslarda da ise sönümlenme nedeniyle deney parçası çok fazla ısınmadığı sürece, frekans yorulma dayanımına önemli bir etki yapmaz. Çok düşük frekanslarda sürünme ve gerilme gevşemesi olayları ortaya çıkabilir. Çok yüksek frekanslarda ise yorulma dayanımının arttığı görülür.

2.1.4.9. Mikro Yapının Etkisi

Tane yapısı, ortalama tane boyutu ve mikro yapı hataları yorulma ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Döküm şekli, sıcak ve soğuk şekil verme, fazların dağılımı, malzemede farklı mikro yapılar oluşturmaktadır. Tane büyüklüğünün uzun ömürlü yorulma koşullarını nasıl etkilediğinin değerlendirilmesi oldukça zordur. Çünkü tane büyüklüğünü değiştirmek için uygulanacak işlemler, malzemenin yorulma özelliklerinde olumsuz bir değişime neden olabilir.

Genellikle hata olarak tanımlanan, malzeme içerisindeki kalıntılar ve boşluklar gerilme yığılmalarına sebep olmakta ve yapının mukavemetini dolayısıyla da yorulma dayanımını/ömrünü azaltmaktadır. Bu kalıntılar malzeme yapısına göre daha kırılabilir ve yüklemenin etkisi ile matris gibi kolay şekil değiştirmediğinden kalıntı sınırlarında veya içerisinde mikro boşluklar oluşturmaktadır. Bu boşlukların başlaması, ilerleme ve birleşmesi Şekil 2.13’de görüldüğü gibi çatlak uzamasını karakterize edebilmektedir. Büyük kalıntılar küçük kalıntılara göre daha büyük boşluk oluşturmaktadır.



Şekil 2.13. Mikro Boşluk Oluşumu ve Boşlukların Birleşmesi

2.1.4.10. Artık Gerilmelerin Etkisi

Makine parçasının üretimi sırasında bünyesinde oluşacak artık gerilmeler, işletme gerilmeleri yönünde ise yorulma ömründe azalmalara neden olur. Ancak işletme gerilmesinin ters yönünde bir artık gerilme malzeme bünyesinde yaratılmışsa bu defa yorulma ömürde bir artış söz konusu olacaktır. Çünkü gerilmelerin vektörel olarak toplanabilmesi esasına göre işletme sırasında oluşacak gerilmeler önce artık gerilmenin üzerine çıkmaya çalışacağından gerçek değerinde azalmaya uğrayacak, bu ise yorulmaya neden olan gerilme genliğinin daha düşük seviyede kalmasına neden olacaktır.

Endüstriyel uygulamalarda bu etkiden çok yaygın olarak yararlanılmaktadır. Yorulmaya çalışan makine parçalarının sadece yüzeyleri ve yüzeye çok yakın bölgeleri bilya püskürtülerek plastik deformasyona uğratılmaktadır. Bu işleme Bilya Püskürtme (Shot Peening) adı verilmekte olup sonuçta malzeme yüzeyinde basma yönünde artık gerilmek oluşturmaktadır. Böylece çekme zorlaması altında yorulmaya çalışan makine parçalarının ömürlerinde 2-10 misline varan artışlar sağlanabilmektedir.

2.1.4.11. Yüzey Sertliğinin Etkisi

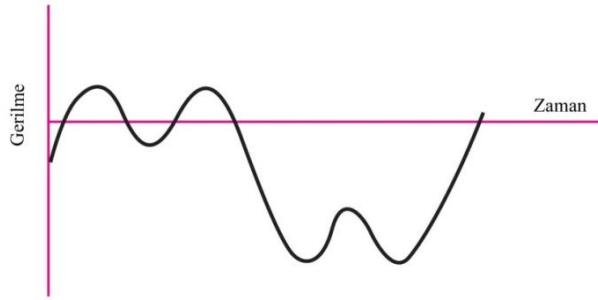
Yorulma çatlakları yüzeyde olduğu için yüzey şartlarının, yorulma hasar ömrünün artırılıp azaltılmasında büyük önemi vardır. Malzeme yüzeyine nitrüleme ve sementasyon gibi yüzey sertleştirme yöntemlerinin uygulanması yorulma dayanımının artırılmasını sağlamakta, dekarburizasyon gibi yüzeyde yumuşamaya neden olan işlemler ise yorulma dayanımını azaltmaktadır.

2.1.4.12. Darbe Etkisi

Makine parçası darbeli yükler altında çalışıyorsa, gerilme genliğinde artış beklenmelidir. Bu durumda çevrimsel zorlanma sırasında oluşan gerilme genliği değeri artmakta ve yorulma dayanımını azaltmaktadır.

2.1.5. Zorlanma Türleri

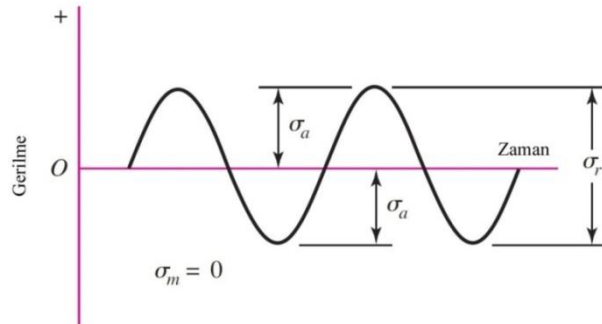
2.1.5.1. Rassal (rasgele) Zorlanma



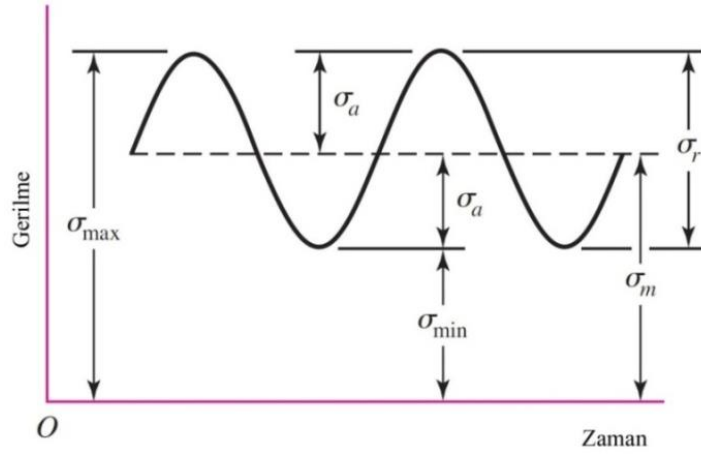
Şekil 2.14. Rassal Gerilme Diyagramı [5]

Rasgele zorlanma, Şekil 2.14'de görüldüğü gibi makine veya elemanı zorlayan kuvvetin, momentin ve yahut da makine veya elemanın kesitinde meydana gelen gerilmenin zamana göre düzensiz değiştiği zorlanma şeklidir [16]. Bu tür zorlanmalara maruz kalan makine ve elemanın dinamik çalıştığı kabul edilir. Genellikle bu tür gerilmeler arazi araç ve gereçlerinde sıkça görülür.

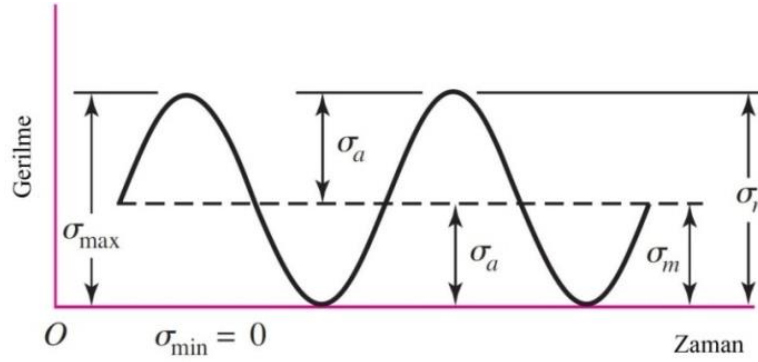
2.1.5.2. Değişken Zorlanma



Şekil 2.15. Sabit Genlikli Değişken Gerilme Diyagramı [5]



Şekil 2.16. Ön Gerilmeli Sabit Genlikli Değişken Gerilme Diyagramı [5]



Şekil 2.17. Ön Gerilmeli Sabit Genlikli Değişken Gerilme Diyagramı [5]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

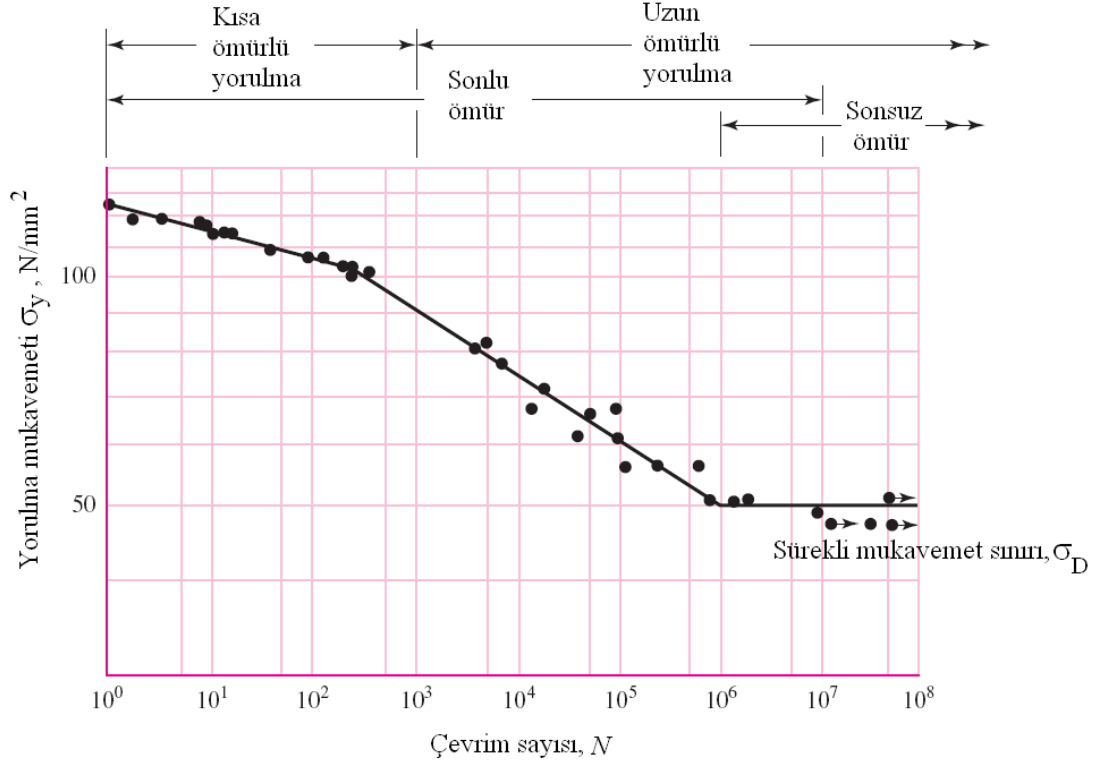
σ_m : Ortalama Gerilme (N/mm²)

σ_a : Gerilme Genliği (N/mm²)

Değişken zorlanma, makine veya elemanı zorlayan kuvvetin, momentin veyahut da makine veya elemanın kesitinde meydana gelen gerilmenin zamana göre düzenli değiştiği zorlanma şeklidir. Bu tür zorlanmalara maruz kalan makine ve elemanın dinamik çalıştığı kabul edilir. Genellikle bu tür gerilmeler kasnak muylularında ve krank millerinde sıkça görülür.

2.1.6. Yorulma Diyagramları

2.1.6.1. Wöhler Yorulma Diyagramı

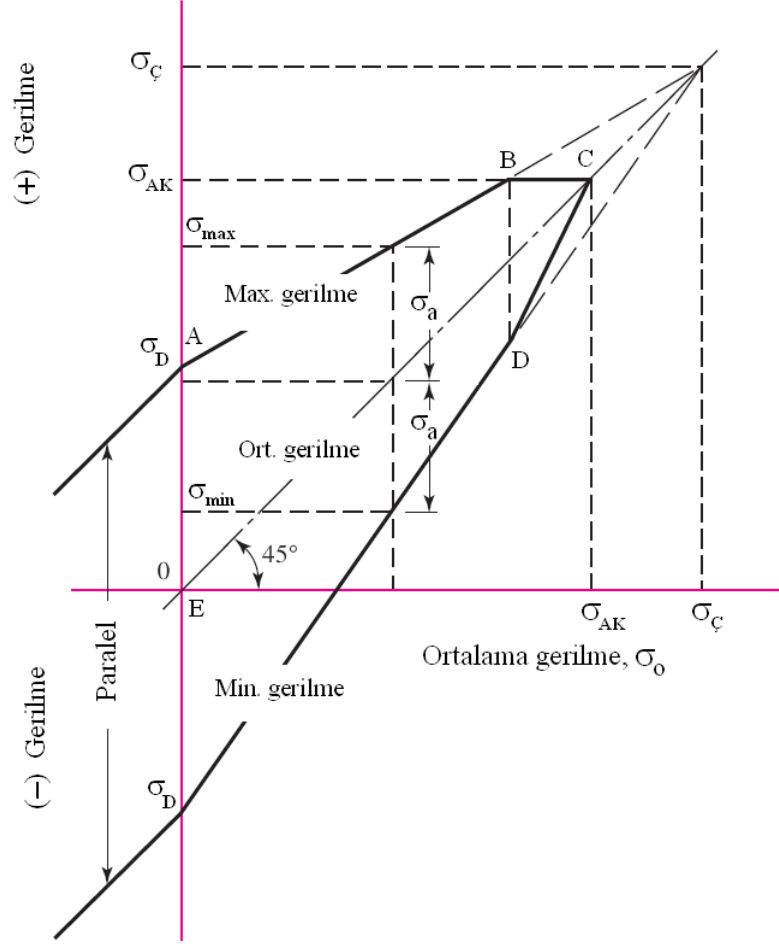


Şekil 2.18. Wöhler Eğrisi [5], [17], [18]

Wöhler tarafından, 1866'da yapılan deneylerle zaman mukavemeti ve sürekli mukavemet konusunda ilk sonuçlar alınmıştır. Bu nedenle gerilme genliği ve yük tekrar sayısı arasındaki bağıntıyı veren deney sonuçlarını gösteren Şekil 2.18'de belirtilen eğrilere Wöhler Eğrisi denilmiştir. Bu eğride yatay eksen çevrim sayısını, dikey eksen ise gerilme genliğini temsil eder. Wöhler eğrisini elde etmek için ortalama, 40-200 numuneye yorulma deneyi yapılır ve elde edilen sonuçlar neticesinde sağlıklı bir Wöhler eğrisi çizilir. Hacim ve ağırlık sorunu olan hava araçlarında, parçaların tasarımında Wöhler eğrisi hasar çizgisinin üzerine çıkılmamalıdır [19]. Yorulma deneyleri merdiven yöntemiyle yapılmalıdır. Deneyler hasara uğrayacak gerilme genliğinden hasara uğramayacağı gerilme genliğine doğru yapılmalıdır. Çelikler için sürekli mukavemet sınırı (yorulma dayanımı) $N=1.10^7$ çevrim olmalıdır, fakat bazı kaynaklara göre 2.10^6 çevrim sayısında hasara uğramayan numunelerin artık hasara uğramayacağı kabul edilerek deney

durdurulabilir. Hafif metallerin yorulma dayanımının tespiti için ise çevrim sayısı $N=5 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8$ olmalıdır.

2.1.6.2. Smith Yorulma Diyagramı

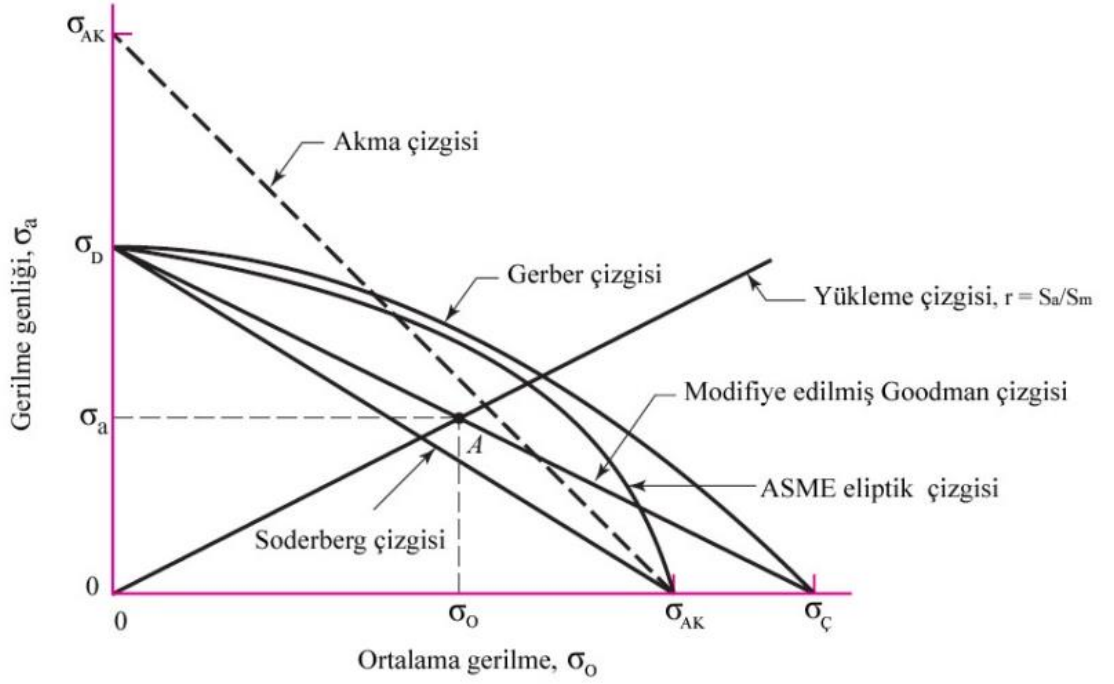


Şekil 2.19. Smith Diyagramı [5]

Sünek malzemeler için geçerli olan ve Şekil 2.19’da belirtilen Smith diyagramı herhangi bir malzeme için gerekli tüm mukavemet değerlerini içerir. Yatay ve dikey eksenler lineer ölçekli olup dikey eksen gerilme genliğini, yatay eksen ise ortalama gerilme değerlerini verir. Dikey ve yatay eksen üzerinde ilgili malzemenin akma ve kopma gerilme değerleri işaretlenir. Yatay eksene 45° açı yapacak şekilde bir doğru çizilir ve yatay eksende ortalama gerilme değeri işaretlenip çizilen 45° açılı çizgiye dik çıkılır. Bu noktada aşağı ve yukarı bir çizgi çizilerek bu çizgi üzerinde gerilme

genliği işaretlenir. Bu işlem ilgili malzemenin çekme ve basma gerilmeleri altında yapılmış tüm ortalama gerilme değerleri için yapılarak diyagram oluşturulur.

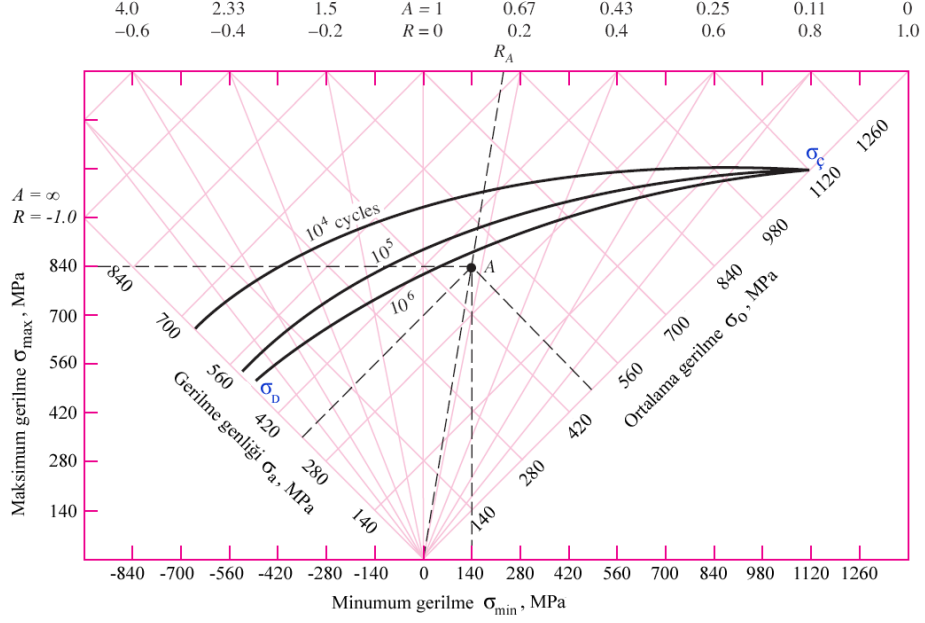
2.1.6.3. Gerber - Goodman – Soderberg – ASME Yorulma Diyagramı



Şekil 2.20. Gerber – Goodman – Soderberg - ASME Yorulma Diyagramı [5], [20]

Sünek malzemeler için Gerber ve modifiye edilmiş Goodman diyagramı, gevrek malzemeler için ise Soderberg ve ASME eliptik diyagramı kullanılır. Şekil 2.20’de tüm diyagramların birleştirilmiş bir örneği verilmiştir. Genellikle eliptik olmaları sebebiyle hesaplamalarda gevrek malzemeler için ASME, sünek malzemeler için ise Gerber diyagramı kullanılır. Bu diyagramlarda yatay eksen ortalama gerilmeyi, dikey eksen ise gerilme genliğini temsil etmektedir. A noktasına orijinden bir doğru çizilerek, hangi diyagram kullanılacak ise doğrunun diyagramı kestiği A noktasından yatay ve düşey eksene doğrular çizilir. Yatay eksene çizilen doğrunun kestiği nokta ortalama gerilmeyi, düşey eksene çizilen doğrunun kestiği nokta ise gerilme genliğini vermektedir. Bu diyagramlar genellikle sonsuz ömürlü parça tasarımında kullanılır. Bu diyagramlar kullanılarak ömürlü yorulma hesaplaması yapmak mümkün değildir. Genellikle bileşik gerilmeye maruz kalan makine elemanlarının tasarımı için oldukça kullanışlı diyagramlardır.

2.1.6.4. Master Yorulma Diyagramı



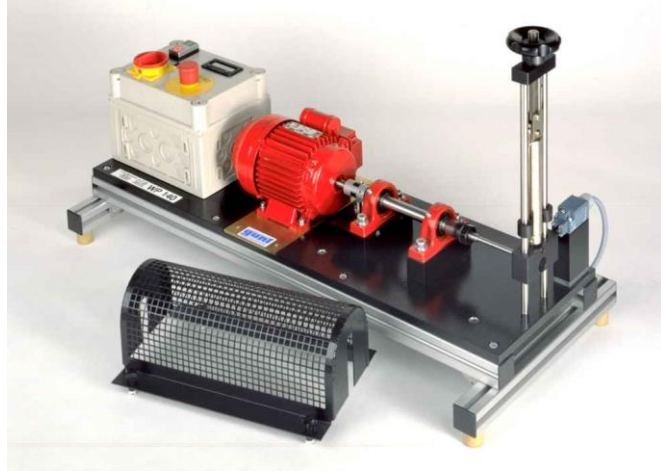
Şekil 2.21. Master Yorulma Diyagramı [5]

Çalışma sırasında makine parçaları bileşik gerilmelerin etkisi altında yorulmaya maruz kalırlar. Bu yüklerin etkisi altında bünyelerinde bileşik gerilmeler oluşur. Bileşik gerilmeler, mukavemet hesaplarında güvenlik katsayısının belirlenmesinde oldukça önemlidir. Özellikle boyut ve kütleinin önemli olduğu hava taşıtlarında yorulma ömrü büyük önem kazanır. Çünkü birçok parça sonsuz ömürlü olarak tasarlanamaz. Yapılan tasarımda parçanın hangi gerilme etkisi altında görevini yerine getirebileceğinin bilinmesi önemlidir. Bütün bu gerekli bilgilerin tamamının birleştirildiği grafiklere ihtiyaç vardır. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi Master yorulma diyagramının yatay eksenini minimum gerilmeyi, dikey eksenini ise maksimum gerilmeyi temsil eder. Ortadaki kısım Gerber diyagramının 45^0 dönmüş halidir. Burada sağa 45^0 olan eksen ortalama gerilmeyi, sola 45^0 olan eksen ise gerilme genliğini temsil eder. Diyagramın üst kısmında R ve A oranları bulunmaktadır.

2.1.7. Yorulma Makineleri

Yorulma test cihazları amaçları, kritik kesitte oluşturulan gerilmenin türü, yük oluşturma mekanizmaları, işlem karakteristikleri, vs. bakış açılarına göre değişik

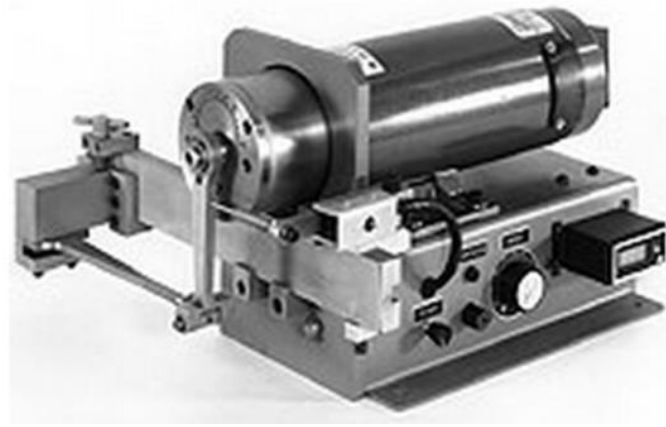
şekillerde sınıflandırılabilir. Bir araştırmacı için deneyin en önemli aşaması deneyin amacı ve buna uygun yorulma makinesinin tespitidir. Araştırmacı numune üzerine ne tür gerilmeleri uygulayacağını bilir ve bu gerilmeleri numune üzerinde hangi makineyle oluşturabileceğine karar vererek uygun makineyi seçer. Yorulma test makineleri kritik kesitte oluşan gerilme türlerine çeşitli isimlerle ayrılmıştır. Bu makineler; Şekil 2.22’de belirtilen dönen eğmeli ankastre tip yorulma makinesi [21], Şekil 2.23’de belirtilen R. R. Moore dört noktalı dönen eğmeli yorulma makinesi [22], Şekil 2.24’de belirtilen tekrarlı eğme yorulma makinesi [23], Şekil 2.25’de belirtilen çok eksenli yorulma makinesi, Şekil 2.26’da belirtilen servo hidrolik yorulma makinesi [24], [25] ve Şekil 2.27’de belirtilen burulma yorulma makinesidir [26].



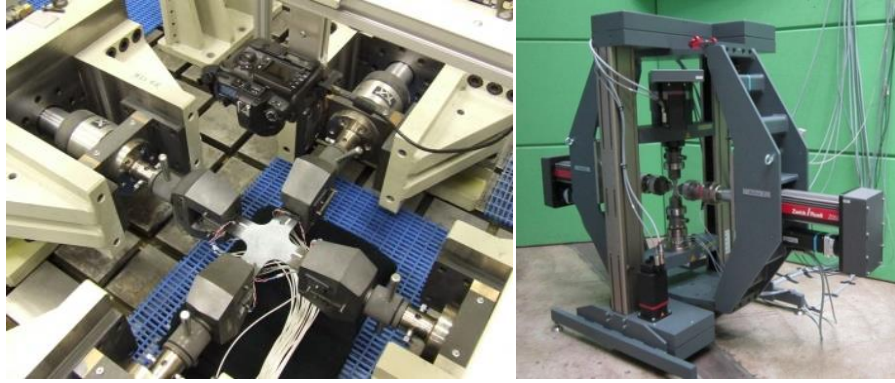
Şekil 2.22. Dönen Eğmeli Ankastre Tip Yorulma Makinesi



Şekil 2.23. R. R. Moore Dört Noktalı Dönen Eğmeli Yorulma Makinesi



Şekil 2.24. Tekrarlı Eğme Yorulma Makinesi



Şekil 2.25. Çok Eksenli Yorulma Makinesi



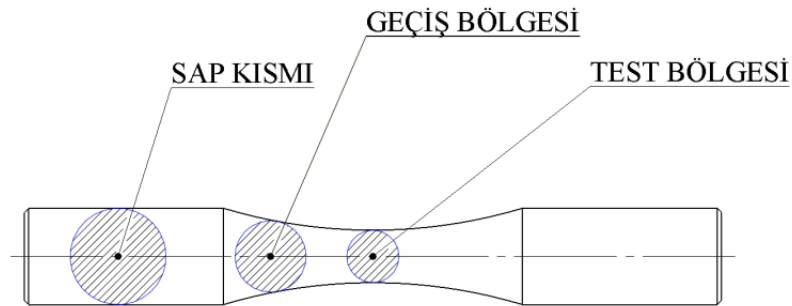
Şekil 2.26. Servo Hidrolik Yorulma Makinesi



Şekil 2.27. Burulma Yorulma Makinesi

2.1.8. Yorulma Test Numuneleri

Yorulma numunesi deneyin amacına ve kullanılan yorulma makinesinin türüne göre değişik şekil ve boyutlarda olabilir. Deney numunesi araştırılacak malzemenin özelliklerini yansıtacak boyutta ve kesitte olmalıdır. Numune temel olarak; test bölgesi, geçiş bölgesi ve tutuculara bağlanan sap kısmı olmak üzere üç bölümden oluşur. Numunenin test bölgesi kritik gerilmenin oluşturulduğu bölüm olması sebebiyle numunenin en önemli kısmıdır. Numune üzerine etki eden yük sonucu oluşan gerilmenin, istenilen noktada oluşması amaçlanmıştır ve Şekil 2.28’de de görüldüğü gibi diğer kısımlara göre kesiti azaltılmıştır.

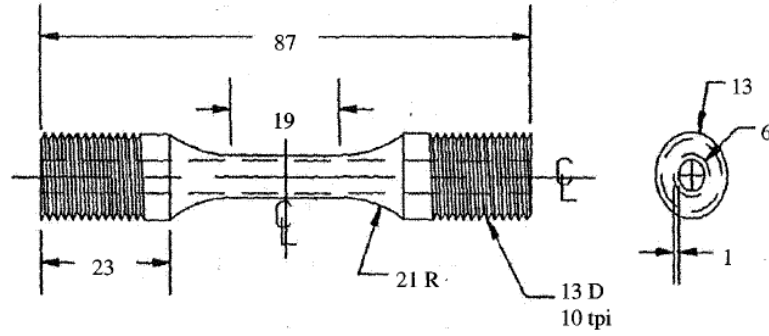


Şekil 2.28. Yorulma Deneyi Test Numunesi Bölümleri

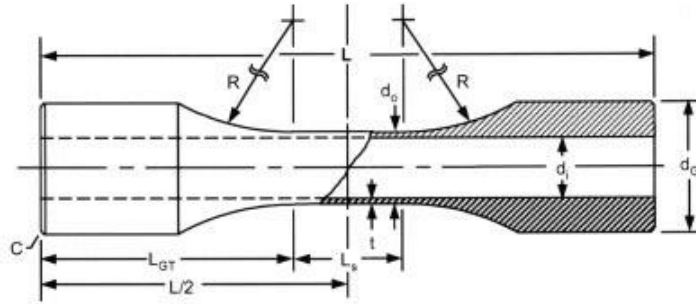
Bu bölge üzerinde çentik etkisi oluşturacak çiziklerin olmaması gerekmektedir [27]. Numune üzerinde olabilecek çentikler gerilme yığılmalarına yol açıp, oluşturulmak istenen gerilmenin farklı noktalarda oluşmasına sebep olur. Bu nedenle numuneler

üzerinde çentik etkisi yaratacak çizikler istenmez. Bu çizikleri ortadan kaldırmak için numuneler kesitlerine uygun olarak yüzeyleri parlatılır. Parlatma işlemi genellikle numune eksenine boyunca olacak şekilde yapılır ve parlatma işlemi sırasında yüzeyde artık gerilmelerin oluşturulmamasına dikkat edilir.

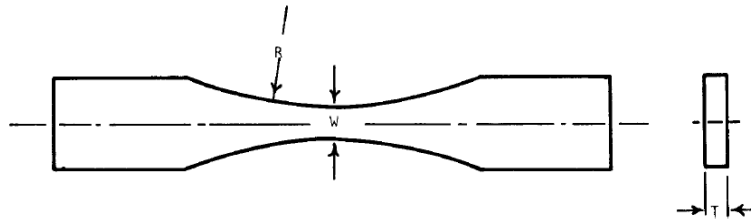
Numunelerin tutma kısımlarının tasarımı kullanılacak makineye göre tasarlanır. Şekil 2.29-34’de ASTM yorulma numuneleri verilmiştir. Yorulma numuneleri her ne kadar standartlaştırılmaya çalışılsa da, test edilecek makine parçasını simüle etmesi istendiğinden çok eksenli yorulma testlerinde kullanılan deney numunelerinin Şekil 2.35’de de görüldüğü gibi şekil ve kesitlerinde farklılıklar görülebilmektedir.



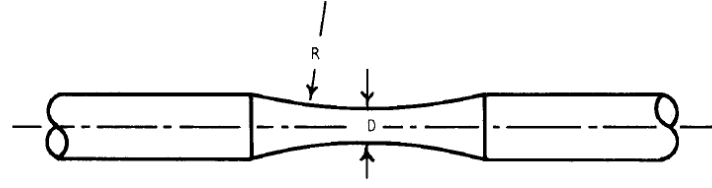
Şekil 2.29. Kontrollü Gerinim Termomekanik Yorulma Test Numunesi [28], [29]



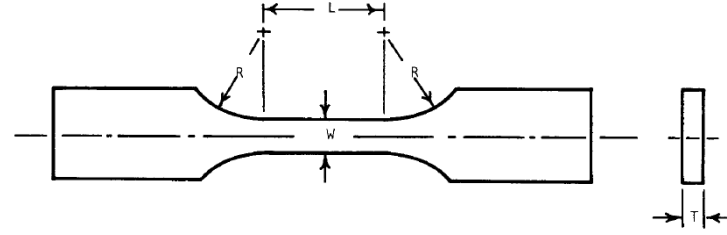
Şekil 2.30. Kontrollü Eksenel Gerinim ve Burulma Testi Boru Numunesi [30]



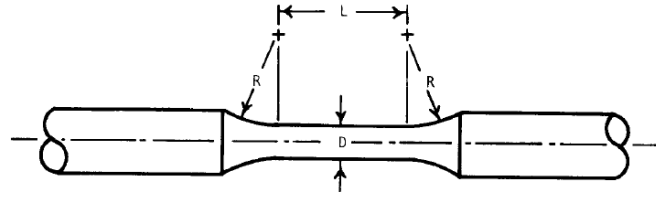
Şekil 2.31. Tekrarlı Eğilme Yorulması Test Numunesi [30], [31]



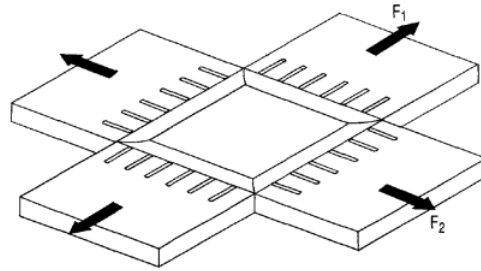
Şekil 2.32. Dönen Eğmeli Yorulma Test Numunesi [30], [31]



Şekil 2.33. Kontrollü Eksenel Gerinim Düz Yorulma Test Numunesi [30], [31]



Şekil 2.34. Kontrollü Eksenel Gerinim Silindirik Yorulma Test Numunesi [30]

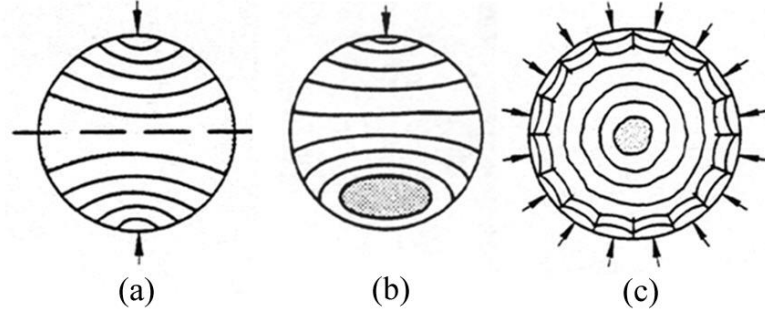


Şekil 2.35. Çok Eksenli Yorulma Test Numunesi [30], [15], [32]

2.1.9. Yorulma Kırılması Hasar Analizi

Çalışma sırasında maruz kaldığı yüklemeler neticesinde, makine elemanının bünyesinde farklı gerilmeler oluşur. Oluşan gerilmelerin etkisi altında makine elemanları yorulmaya maruz kalarak kırılır. Kırılma yüzeylerine bakarak, oluşan hasarın hangi gerilmenin sonucu olarak oluşmuş olabileceğini belirlemek mümkündür. Şekil 2.36 (a)'da tekrarlı eğme gerilmesine maruz kalmış bir parçada oluşan kırık yüzeyi, (b) ve (c)'de dönen eğmeli gerilme maruz kalmış bir parçada

oluşan kırık yüzeyi görülmektedir. Makine elemanının tasarımında bu gerilmelere karşı önlemler alınarak, bir daha bu tür hasarların oluşmasının önlenmesi yapılacak olan analizle mümkündür [33].



Şekil 2.36. Yorulma Kırığı Yüzeyi [30]

2.1.10. Literatür Araştırması

Akkuş çalışmasında; üç farklı sac kombinasyonuna sahip nokta kaynaklı numunelerin her bir serisinden sekiz adet özdeş deney numunesi hazırlayarak, servo hidrolik yorulma makinesinde uzun ömürlü yorulma deneyleri yapmış ve hasara uğrayıncaya kadar geçen tekrar sayılarını belirleyerek S-N eğrilerini elde etmiştir. Buna göre, her üç sac kombinasyonunda da yorulma sınırı gösterme eğilimini bulmuş ve en yüksek yorulma sınırı gösteren bağlantı galvanizli çelik saclardan oluşan bağlantı olduğunu tespit etmiştir. Yorulma sonucunda çekirdekte oluşan boyut değişimlerini incelemiştir. Aynı kaynaklı bağlantıda, yorulma sonrası çekirdek boyutlarındaki değişimleri ve dolayısıyla da çatlak boylarını mekanik yöntemler ve bilgisayar programları yardımıyla ölçmüştür. Bu değerler yardımıyla bu tip nokta kaynaklı bağlantıya ait malzeme sabitleri ve çatlak ilerleme hızını veren bağıntıyı elde etmiştir [34].

Öncel çalışmasında; AISI 4140 çeliğine iyon nitrasyon ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri uygulayıp, yorulma dayanımlarını incelemiştir. Yorulma deneyleri için 450 °C'de 18 saat ve 19,5 saat iyon nitürleme işlemi uygulamış ve 850 °C'de indüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş numuneler hazırlamıştır. Aynı zamanda yorulma dayanımlarının karşılaştırılabilmesi için işlem görmemiş AISI 4140 çelik numuneleri hazırlamıştır. Yüzey sertleştirme işlemleri neticesinde

hazırlanan yorulma numunelerini dönen eğmeli ankastre tip yorulma makinesinde yorulma deneyine tabi tutmuştur. Yapılan deneyler sonucunda iyon nitrürleme ile yüzey sertleştirme işleminin indüksiyonla yüzeyi sertleştirilen numunelere göre yorulma dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir [35].

Akyıldız çalışmasında; talaşlı imalat ile vida açmada yüzey özelliklerini belirleyen faktörlerin ve imalat ortamının yorulma dayanımına etkilerini teorik ve deneysel olarak araştırmıştır. Araştırmasında Re Re Moure Dört Noktadan Döner Eğilmeli Yorulma test cihazını tasarlayıp üretmiştir. Bu cihazda yaptığı deneylerde yorulmayı etkileyen en önemli faktörün yüzey tabakasının fiziksel ve mekanik özellikleri olduğunu tespit etmiştir [14].

Tan çalışmasında; Al-25Zn-3Cu alaşımını kokil kalıba döküm yöntemiyle üretmiş ve ürettiği alaşımın yapı ve mekanik özellikleri belirlendikten sonra dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki yorulma özelliklerini döner eğmeli yorulma deney düzeneği yardımıyla incelemiştir. Uygulanan homojenleştirme ve T6 ısıtılmış işlemleri sonucunda alaşımın dendritik Al-25Zn-3Cu alaşımından en yüksek yorulma dayanımını T6 ısıtılmış işlemi görmüş, en düşük yorulma dayanımı ise dökülmüş durumlarda elde etmiştir. Söz konusu alaşımın yorulma dayanımı bakımından Zn-40Al- (2-3)Cu alaşımları ile hemen hemen aynı, Al-12Si alaşımından ise çok daha üstün olduğunu gözlemlemiştir. Al-25Zn-3Cu alaşımının yorulma dayanım sınırı ile akma dayanımı arasında yer alan gerilme aralığındaki yorulma davranışının Basquin eşitliği ile ifade edilebileceği belirlemiştir [36].

Saçkesen çalışmasında; uçaklarda kullanılan yüksek mukavemetli metal malzemelerde karşılaşılan yorulma ve korozyon problemlerini servo hidrolik yorulma test cihazında araştırmıştır. Belirgin olarak yaşlanma etkilerine maruz kalmış yüksek mukavemetli 7075 alüminyum alaşımının yorulma ve korozyon özelliklerini iyileştirmek için, son zamanlarda geliştirilmiş bir ısıtılmış işlem olan RRA (Retrogression and re-aging) işlemi yanında, ısıtılmış işlemle mekanik yüzey işlemi birleştirilerek termomekanik bir süreç geliştirmiştir. Her iki yaklaşımın da sonuçlarını deneyler aracılığıyla irdlemiştir. Numuneler üzerinde yapılan ölçümlerden, özellikle termomekanik işlemin yorulma ömrü üzerinde önemli olumlu etkilerini saptamıştır [37].

Genel çalışmasında; iyon nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin yorulma ve korozyonlu yorulma davranışını ankastre tip dönen eğilmeli yorulma makinesinde incelemiştir. Hava ortamı ve iyon nitrürlenmiş parçaların yorulma dayanımları ile kabuk kalınlığı arasında ampirik bağıntı kurmaya çalışmıştır. Yaptığı çalışmada kabuk kalınlığının yorulma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı sonucuna ulaşmıştır [38].

Subaşı çalışmasında; AISI 4140 çeliğinde sertlik, yorulma dayanımı ve kalıcı gerilme ilişkisini döner eğmeli ankastre tip yorulma test makinesinde araştırmıştır. Numuneler sertleştirilmeye tabi tutularak farklı sertlik değerleri elde edilmiş ve AISI 4140 çelik malzemesinin yorulma dayanımının kalıcı gerilmeye etkisi katman kaldırma (elektro kimyasal) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler 40, 45 ve 50 HRC sertlik değerine getirilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda tornalanmış, 40, 45 ve 50 HRC sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımları sırası ile 463, 783, 792, 739 Mpa olarak bulunmuştur. 45 HRC sertleştirilmiş numunede en iyi yorulma dayanımı değeri elde edilmiştir. Kalıcı gerilme ölçümleri sonucunda numunelerin yüzeylerinde sırası ile 210, 169, 299, 203 MPa kalıcı çekme gerilmelerini bulmuştur [39].

Turan çalışmasında; mekanik yüzey işlemlerinin alüminyum bakır alaşımı olan AA2014 malzemesinin yorulma davranışına etkisini R. R. Moore dört noktalı dönen eğmeli yorulma makinesi kullanarak araştırmıştır. Çalışmasında derin haddeleme işleminin yüzey pürüzlülüğü, Vickers sertliği ve yorulma dayanımı üzerinde etkilerinin araştırılmasını amaçlamıştır. Her biri 14 adet numuneden oluşan üç farklı gruba numunelerini ayırmıştır. Birinci grup 14 tane numune derin haddeleme işlemine tabi tutulmamış, kalan iki farklı gruptaki 14'er numune ise 50 ve 75 bar basınç altında derin haddeleme işlemine tabi tutulmuştur. Tüm numune grupları, döner eğmeli yorulma makinesi kullanılarak yorulma deneyine tabi tutulmuş ve her bir grup için S-N eğrileri çizilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Numunelerin kırık yüzeyleri elektronik taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek yorulma deney sonuçları yorumlanmıştır [40].

Akbulut çalışmasında; AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışı üzerinde mekanik yüzey işleminin etkisini araştırmıştır. Çalışmasında, AISI 1045 çeliğin yorulma davranışı üzerinde farklı basınçlardaki (100, 200 ve 300 bar) Bilyeli Parlatma

(DR)'nın etkisini incelemiştir. Bilyeli parlatma uygulanmış numuneler, oda sıcaklığında döner eğilmeli yorulma makinesi kullanılarak dinamik olarak deforme edilmiştir. Referans bir durum olarak göz önüne alınan, yüzey işlemi yapılmamış numunelerle mukayese edilmiştir. Yorulma test sonuçları işlemsiz numuneler ile mukayese edildiğinde, farklı basınçlarda uygulanan bilyeli parlatma işleminin, yorulma limitini ve yorulma ömrünü önemli şekilde geliştirdiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, farklı Bilyeli Parlatma işlem basınçlarında elde edilen yorulma ömürlerinin farklı olduğunu tespit etmiştir. Yorulma davranışlarındaki bu gelişim, mekanik yüzey işleminin sebep olduğu soğuk deformasyon, artan yüzey sertliği ve yüzeye yakın basma artık gerilmelerinin bir sonucu olabileceğini değerlendirmiştir [41].

Saygın çalışmasında; AISI 1020 çeliklerinden imal edilmiş olan yorulma numunelerini 900- 950- 1000 ve 1050 °C'de 2- 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemine tabi tutarak döner eğilmeli ankastre tip yorulma makinesinde yorulma ömürlerini tespit etmiştir. Özellikle borlama ısı işlem koşullarının yorulma ömrü üzerine etkisi ortaya çıkarmıştır [42].

Kumru çalışmasında; ETİAL 141, ETİAL 145 ve ETİAL 160 malzemesinden döküm yoluyla numuneler hazırlamış, çalışmanın amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli yorulma makinesi tasarlamış ve imal ederek yorulma deneyleri yapmıştır. Tüm numune gruplarında 10 basamakta farklı sehimlerde yapılan yorulma testleri sonucunda elde edilen deneysel verileri kullanarak S-N diyagramlarını (Wöhler eğrileri) çizmiştir. Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak, ortalama $N = 10^7$ çevrimine karşılık gelen eğilme gerilmesini temel almıştır. Yorulma deneyleri sonuçlarına göre en yüksek yorulma ömrünün, ETİAL 160 serisi döküm malzemesinden elde edilmiş numunelerde olduğunu tespit etmiştir [43].

Sayaca çalışmasında; sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilen 2014 tipi alüminyum alaşımı eğilme yorulma davranışı incelemiştir. Çalışmasının amacı, alüminyum alaşımlarından farklı parametrelerde sürtünme karıştırma kaynağı ile imal edilen numunelerinin eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı incelemeyi amaçlamıştır. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için çalışmasının amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli

yorulma makinesi tasarlamış ve imal etmiştir. Öncelikle tüm malzeme gruplarındaki numunelerle yorulma deneyleri yaparak, elde edilen sonuçlar ile yorulma analizi için S-N diyagramları Wöhler eğrileri oluşturmuştur [44].

Kovan çalışmasında; oksit dispersiyon sertleştirilmesi yapılmış NiCr8020 (2.4869) nikel esaslı süper alaşımın termomekanik yorulma davranışının belirlenmesi amacıyla, toz metalürjisi ile imal edilmiş nikel esaslı süper alaşım PM 1000'in termomekanik davranışını 450 - 850 °C sıcaklık aralığında servo hidrolik yorulma makinesinde incelemiştir. PM 1000 alaşımı için oluşturulan yüksek sıcaklık yorulma ömrü tahmin modelinde yapay sinir ağları yöntemi kullanmıştır. Oluşturulan bu model hem termomekanik yorulma hem de izotermal yorulma için uygun sonuçlar verdiğini tespit etmiştir [45].

Akyıldız ve arkadaşları çalışmalarında; SAE 4340 çeliğinden üretilen vidalı yorulma numuneleri üzerinde imalat faktörlerinin etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında yorulma ömrü üzerinde en etkili faktörlerin takım aşınması ve kesme hızı olduğunu belirlemiştir [46].

Novovic ve arkadaşları çalışmalarında; mekanik ve termal yüzey işleme yöntemlerinin yorulma ömrü üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında mekanik ve termal işlemler sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı artık gerilmelerinin yorulma ömrü üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir [47].

Bayraktar ve arkadaşları çalışmalarında; SAE 8620 çeliğinde bileşik gerilme altında R=1 ve R= 0,7 oranı için, yüzey sertliği, yüzey pürüzlülüğü ve korozyonun yorulma davranışı üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında yüzey sertliğinin yorulma ömrü üzerinde olumlu yönde etki sağladığını, yüzey pürüzlülüğünün R= 0,7 oranında etkili olmadığını, korozyonun ise yüzeyde çatlak başlamasından sonra etkili olduğunu belirlemiştir [48].

Benedetti ve arkadaşları çalışmalarında; Al-7075-T6 malzemesinde, çok eksenli gerilme altında artık gerilme ve yüzey pürüzlülüğünün yorulma davranışına etkilerini incelemiştir. Artık gerilme oluşturmak için uygulanan bilyeli dövme yöntemiyle

yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve yüzey tabakasında oluşan artık gerilmelerin yorulma direncini arttırdığını belirtmişlerdir [49].

Mercan ve arkadaşları çalışmalarında; AISI 2205 ve AISI 1020 çeliğini sürtünme kaynağı ile birleştirerek, yapılan kaynaklı birleştirmelerin dönel eğmeli yorulma cihazında yorulma davranışlarını incelemişlerdir [50].

Nagarajan ve arkadaşları çalışmalarında; AISI 4140 malzemesinde yorulma çatlak büyümesine çözünmüş hidrojen etkisini incelemişlerdir. Hidrojen yüklü numunelerin yorulma çatlak büyümesi davranışı, çözünmüş hidrojen olmayan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Haddelenmiş, tavlanmış ve östemperlenmiş numunelerden çatlak büyüme hızının tavlanmış numuneler ile karşılaştırıldığında, östemperlenmiş örneklerde daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [51].

Şirin ve arkadaşları çalışmalarında; AISI 4340 düşük alaşımlı çeliğinde korozyon direnci ve çelik yüzey sertliğini, yorulma dayanımını artırmak için iyon nitrüleme uygulamışlardır. İyon nitrüleme ile yüzey işlemenin yorulma dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir [52].

2.1.11. Tezin Amacı

Literatür taraması sonucu yapılan araştırmalar değerlendirildiğinde, malzemelerin tek tip gerilmeye maruz kaldığı dönen eğmeli, tekrarlı eğmeli veya servo hidrolik yorulma test makinelerinde yorulmaya maruz bırakılarak, araştırmaların yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu tip makinelerde malzeme, sabit genlikte gerilme etkisi altında çalıştırılır. Makine elemanları çalışma ortamlarında deney ortamının aksine, sürekli değişken ve bileşke yüklemeler neticesinde bünyelerinde oluşan bileşke gerilmelere maruz kalarak fonksiyonlarını yerine getirmeye çalışırlar. Makine elemanları basma, çekme, eğme ve burulma gerilmelerinden bazen birine, bazen de birden fazla gerilme etkisine maruz kalarak yorulmaya zorlanırlar. Bileşke gerilmeler gerilme yığılmalarına, bu gerilme yığılmaları da yorulma hasarının başlamasına ve malzemenin beklenenden daha önce hasara uğrayarak işlevini yitirmesine yol açar. Özellikle kütle ve hacim sıkıntısının ön planda olduğu hava taşıtlarında bileşke

gerilmelerinin, malzemenin yorulma dayanımı üzerindeki etkilerinin çok iyi bilinmesi malzemenin ömrünün tayini açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı; AISI (SAE) 4140 çeliğini bileşik gerilme etkisi altında yorulma testine tabi tutmaktır. Elde edilen veriler uygun grafiklere dönüştürülerek, tasarımcılara tasarlamış oldukları parçaların hangi gerilme etkisi altında çalıştığında, yorulma ömürlerinin ne olabileceği konusunda bilgi ve yorum yapma imkânı sağlamaktır. Bileşik yorulma deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için bileşik yorulma test cihazı tasarlanmış, üretilmiş ve araştırma bu bileşik gerilmeli yorulma makinesinde yapılmıştır. Öncelikli olarak AISI 4140 malzemesi deney için gerekli şartları sağlayacak şekilde hazırlanmış, teorik hesaplamalar yapılarak elde edilen değerlerle deneysel veriler karşılaştırılarak makinenin kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra eğme-çekme ve eğme-basma gerilmeleri etkisi altında malzemeye yorulma testi uygulanmıştır.

3. YÖNTEMLER

3.1. Malzeme

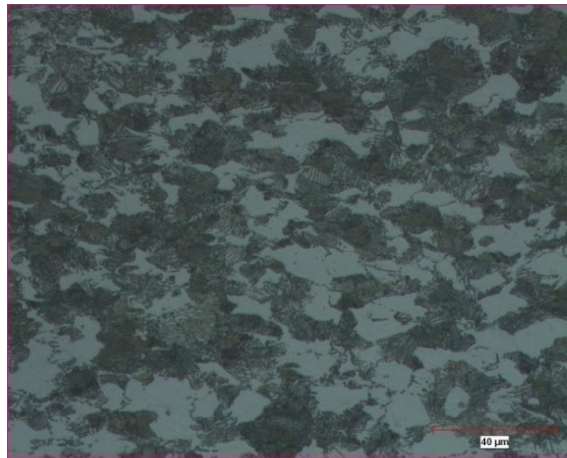
Yapılan deneysel çalışmada, imalat endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılan orta karbonlu düşük alaşımlı SAE 4140 (DIN 42CrMo4) çeliği seçilmiştir. Numuneler aynı parti malzemeden Ø12 mm çaplı ve 150 mm boyunda kesilerek hazırlanmıştır. Malzemenin spektrometre cihazı kullanılarak kimyasal bileşimi ölçülmüş ve elde edilen malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. SAE 4140 Çeliği Kimyasal Bileşimi

Fe	Co	Nb	Si	Cr	Ni	Ti	Al	Cu
96,948	0,009	0,005	0,290	0,953	0,164	0,002	0,012	0,181
P	V	Mn	Pb	W	C	Mo	S	Fe*I
0,008	0,006	0,788	0,001	0,002	0,424	0,187	0,022	25116

3.2. Isıl İşlem

Malzeme ısıtıl işlem öncesi içyapı analizine tabi tutulmuştur. Soğuk haddelenerek üretilmiş Şekil 3.1’de iç yapı görüntüsü verilen Perlitik-Ferritik yapıda, 255 HB sertliğe sahip malzemeden numuneler, üretim için uygun boyutlarda hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Soğuk Haddelenmiş AISI 4140 Çeliği İç Yapı Görüntüsü

Hazırlanan numuneler Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 45'erli gruplar halinde PROTHERM PLF 160/7 (1600 °C) ısıtım fırınında, fırın içi sıcaklığı 870°C'ye [53] ulaştıktan sonra 20 dakika bekletilip yağda sertleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Isıl İşlem Fırınında Isıtılan Parçalar



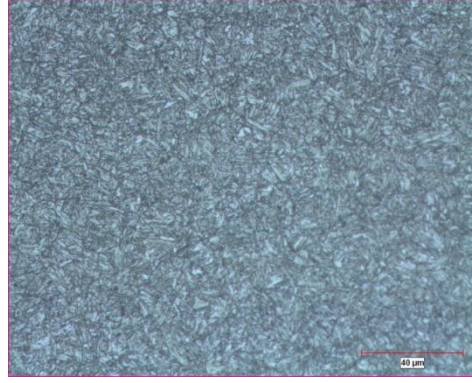
(a)

(b)

(c)

Şekil 3.3. Yağda Sertleştirme

Elde edilecek deney sonuçlarının olumsuz etkilenmemesi için numunelerin birer tarafı işaretlenmiş ve numuneler yağ banyosuna işaretlendikleri taraftan dik olarak sokulmuştur. Numuneler yağ banyosunda Şekil 3.3'de görüldüğü gibi sekiz rakamı çizecek şekilde gezdirilerek, her tarafının eşit soğuması sağlanmıştır. Numunelerin tamamını aynı şartlarda ısıl işleme tabi tutabilmek için, fırın iç sıcaklığı ve sertleştirme yağı sıcaklığı sürekli kontrol edilmiştir. Sertleştirme sırasında ortam sıcaklığı 22 °C ve ısıl işlemin gerçekleştirildiği yağın sıcaklığı ise 22-48 °C olarak ölçülmüştür. Sertleştirilen numuneler daha sonra fırın içi sıcaklığı 540°C'de iki saat süre ile menevişlenmiştir. Numuneler menevişlenme sonrası Şekil 3.4'de iç yapı görüntüsü verilen Temper-Martenzit iç yapıya dönüşmüştür. Isıl işlem sonrası malzemenin sertliği 295 HB (31 HRC) olarak ölçülmüştür.

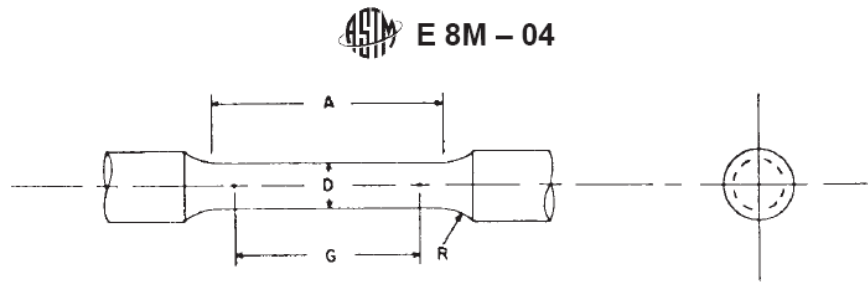


Şekil 3.4. Temper-Martenzit İç Yapı Görüntüsü

Isıl işlem uygulanan numunelerde çarpılma olup olmadığı granit plaka üzerinde yuvarlanarak kontrol edilmiştir. Sertleştirme sırasında, yağa sokulduktan sonra numunelerin ilk hareket ettirildiği tarafın tersine, tüm numunelerin bir miktar çarpıldıkları gözlemlenmiştir. Bu çarpılmanın sertleştirme sonucu oluşan çekme artık gerilmelerden oluştuğu değerlendirilmektedir.

3.3. Mekanik Ölçümler

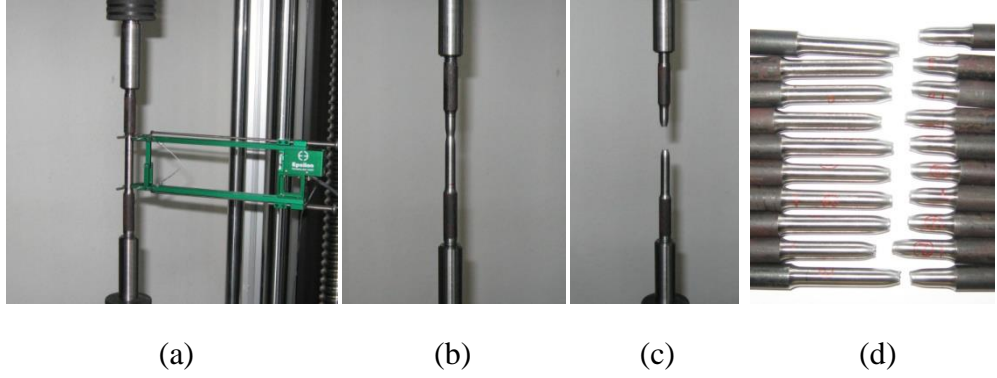
Numunelerin tamamına tahribatsız muayene yöntemlerinden ses muayenesi ve manyetik parçacık testi uygulanmış ve hasarlı numuneler tespit edilerek ayrılmıştır. Sağlam numunelerin tamamının sertlik ölçümleri, KARL SCHRÖDER KG 311/5 sertlik ölçme cihazında, sap kısımlarından ölçülerek yapılmıştır.



Şekil 3.5. Çekme Deney Numunesi [54]

Tablo 3.2. Çekme Deney Numunesi Ölçüleri

D (mm)	R (mm)	G (mm)	A (mm)
9	8	50	54



Şekil 3.6. Çekme Deneyi

İstenilen sertliğe ulaşmış numunelerden, Şekil 3.5’de teknik resmi [54] ve Tablo 3.2’de ölçüleri verilen çekme on adet numune hazırlanıp, ALŞA UMT 100 KN çekme cihazında mekanik testleri yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen malzeme mukavemet değerleri Tablo 3.3’de istatistik değerlendirme sonuçları ise Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Malzeme Mukavemet Değerleri

Akma Gerilmesi (N/mm ²)	Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	Kopma Gerilmesi (N/mm ²)	Poisson oranı
1058,95	1159,19	798,23	0,29

Tablo 3.4. İstatistik Tablosu

Gerilme Türü (N/mm ²)	Ortalama Gerilme	Standart Sapma	%95 Olasılık (N/mm ²)
Akma Gerilmesi	1058,95	54,03	1058 ±40
Çekme Gerilmesi	1159,19	10,84	1159 ±8
Kopma Gerilmesi	798,23	18,77	798 ±14

3.4. Test Numunesi Üretimi

Yorulma deneyleri; deneyin amacına göre çeşitli tip ve boyutlardaki yorulma numuneleri ile yorulma test makineleri kullanılarak yapılır. Deney sırasında en önemli husus, deney sonuçlarına etki edebilecek ve kontrol edilemeyen minimum belirsizliklere sahip numunenin imalatının yapılmasıdır. Bu belirsizlikler tolerans

sınırları içinde yüzey ve yüzey tabakadaki özellik değişimleridir (sertlik değişimleri, artık gerilmeler, faz dönüşümleri). İmalat sırasında yüzeyde oluşan basma artık gerilmeleri yorulma ömrünü arttırırken, çekme artık gerilmelerinin yorulma ömrünü düşürdüğü çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [19], [7], [8]. Yorulma çatlaklarının oluşmasında yüzey çentikleri, malzeme içindeki boşluklar, sertlik değişimi sonucu tabakalar arası gerilme yığılmaları önem arz etmektedir. Genel kanı olarak araştırmacılar yorulma çatlaklarının yüzeyde başlayıp, önce taneler içinde kayma bantlarından, sonra tane sınırlarından ve belirli bir çatlak uzunluğuna ulaştığında ise, gerilme eksenine dik ilerlediğini belirtmişlerdir. Bu araştırmalar da göstermiştir ki; numunenin deney sırasında üzerinde oluşan gerilmelerin, en fazla etkilediği ve kısa sürede hasar mekanizmasının olduğu kısmı yüzey tabakasıdır. Bu tabakanın oluşumuna işleme aşaması doğrudan etki etmektedir. Yorulma deneyine tabi tutulacak numunelerin yüzeyleri imalattan sonra, deney öncesi parlatılsa da, gerçek uygulamalarda makine ve parçaları imalat sırasında yüzeyde oluşan tabaka ile çalışırlar. Yüzeye yapılan çeşitli işlemler, çentik etkisini azaltsa da, yüzeyde belirli bir kalınlıkta imalat sırasında oluşmuş tabaka ortadan kaldırılamaz. Bu yüzden imalat aşamasında, son pasolarda kaldırılan talaş kalınlığı makine parçalarının yorulma ömrüne direkt etki etmektedir. Son pasolarda parça üzerinden kaldırılmak istenen talaşın oluşumu sırasında, kesme kuvvetleri numunenin yüzey tabakasında malzemenin genel mukavemet özelliklerinden farklı özellikte bir tabaka oluşmasına yol açar. Bu tabaka numune çapına bağlı olarak yorulma ömrünü direkt etkiler. Malzemenin yorulma dayanımını belirlemek amacı ile yapılan yorulma deneyleri için numunelerin imalat prosedürü ASTM ince işleme koşullarına göre tarif edilmiştir [3].

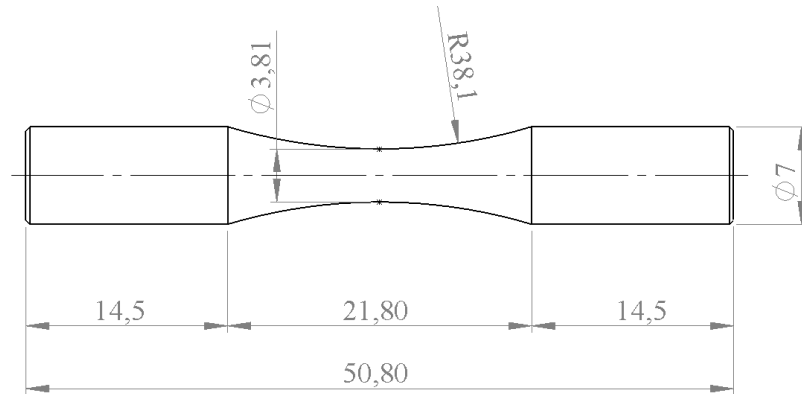
Bu çalışmada; numunelerin üretim aşamasına başlamadan önce universal kopya torna tezgahı ve CNC torna tezgahı kalibrasyon edilmiştir. Genellikle universal tezgahlarda kullanılan aynalarda, zamanla ayakların aşınması veya fazla sıkma sonucu ayaklarda oluşan deformasyonlar aynaya bağlanan parçanın eksantrik dönmesine yol açar. Bu ayna ayaklarında oluşan hasar yüzünden punta deliği önceden delinmiş numuneler aynaya bağlandığında ayna döndürme eksenini ile punta eksenini farklı olacağından imal edilecek parça üzerinde bir eğilme gerilmesi oluşur. Bu gerilme imalat aşamasında parça üzerinde oluşan artık gerilmeleri de etkiler. Parça tezgâhtan söküldüğünde bağlama sırasında oluşan eğilme gerilmesinin etkileri

anında görülür. Çünkü imalat sırasında eğilme gerilmesi altında, bünyesinde oluşan artık gerilmelerin dengesi bozulduğundan parça eğilir. Yorulma numunesinin 0,125 mm'lik toplam bir eksen kaçıklığından daha az bir eksen kaçıklığı ile yorulma testine tabi tutulması ASTM yorulma el kitabına göre beklenir [3]. Ayrıca bağlama sırasında oluşan eğilme sonucu, talaş kaldırma işleminde dönen numunenin çevresinde talaş kalınlığı değişir. Bu değişim numunenin hassas üretim aşmasında, olumsuz etkiler ortaya çıkarır. Özellikle çap küçüldükçe punta ucunun parça ekseninde uyguladığı itme kuvveti (radyal kuvvet) numunenin eğilmesiyle birlikte, imalat sırasında kesme kuvvetlerinin etkilerini arttırmakta ve kaldırılmak istenilen talaş miktarını azaltmaktadır. Ünlversal tezgâhlarda her operatörün parçayı ayna-punta, firdöndü puntası-punta arasında bağlarken, punta ucu ilerleme civatasına uyguladığı tork farklılık arz etmektedir. Bu tork her numuneyi farklı basma kuvvetleriyle etkilemektedir. Numune eksenini boyunca oluşan kuvvetlerin her numunede farklı olması, numunelerin farklı etkiler altında işlenmesine yol açmaktadır. Tezgâhın kullanım ömrüne bağlı olarak fener mili yataklarında, tezgâh kayıt ve kızaklarında, araba ilerleme mekanizmasında oluşan aşınmalar da hassas üretimi etkilemektedir. Silindirik yorulma numunesinin geometrik şekli sebebiyle klasik üniversal torna tezgâhlarında üretilmesi zordur. Mutlaka bir profil master yardımı ile hidrolik kopya torna tezgahlarında yada CNC torna tezgahında imalatının yapılması gerekir. Hidrolik torna tezgâhlarında kopya edilen masterın, fener mili eksenine paralel bağlanıp bağlanmadığı numune ölçülerini de doğrudan etkiler. Ayrıca, hidrolik sistemin kararlı çalışması kaldırılmak istenilen talaş miktarına da etki etmektedir.

CNC torna tezgâhlarında, üretim öncesi yumuşak ayaklar mutlaka üretimi düşünülen parça çapına uygun tornalanarak fener mili döndürme eksenini ile ayna döndürme ekseninin aynı olması sağlanmalıdır. CNC torna tezgâhlarında imalat sırasında parça üzerine etki eden faktörler çok fazla değişmediğinden, imalat parametrelerinin deney sonuçlarına etkileri genellikle daha azdır. Bütün bu veriler ışığında istenilen deney numunesi geometrisini hassas olarak elde edebilmek için aşağıdaki dört farklı yöntem denenmiştir. Bunlar; kopya torna tezgâhında ayna-punta ve firdöndü aynası-punta arasında imalat ile CNC torna tezgâhında ayna-punta ve ayna-ayna arasında imalattır.

Bu yöntemlerle numuneler üretilmiş ve üretilen numunelerin yüzeylerinde geçiş ve kritik test bölgelerindeki yüzey pürüzlülüğü, kritik kesitte yüzeyden içe doğru mikro sertlik ölçümleri yapılmış, son pasoda kaldırılan talaşın kalınlığı açısından işleme yöntemleri karşılaştırılmış, numune üretimi için en uygun imalat yöntemi belirlenmiştir. Denenen bu yöntemlerin amacı, yorulma deney numunelerinin talaşlı imalatı sırasında imalat açısından oluşabilecek belirsizlikleri azaltmak, işlem parametrelerini belirli hale getirebilmektir. Numunelerin imalatı sırasında yüzey tabakada oluşabilecek değişiklikleri, aynı numune gurubu için en aza indirmek ya da en azından bütün numune gurubunda aynı miktarda değişimin oluşumu amaçlanmıştır.

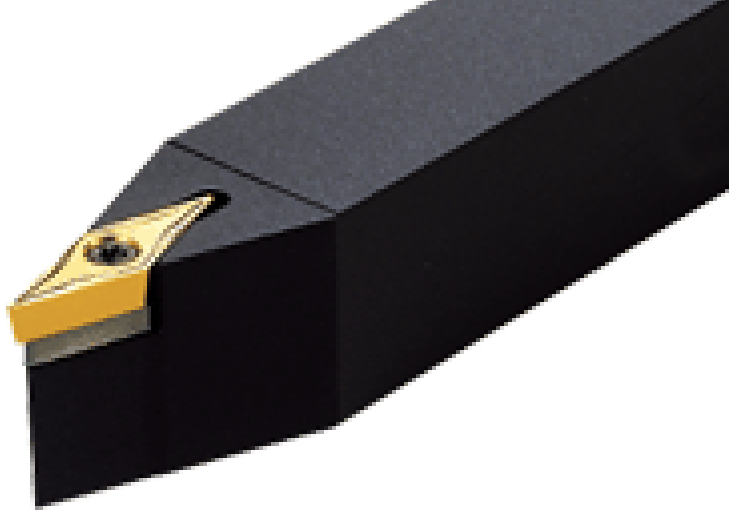
Numunelerin üretimi sırasında yüzey tabakasında oluşacak istenmeyen mekanik değişimler, deney sonuçlarının güvenilirliğini azaltmaktadır. Talaşlı imalatla üretilen numuneler imalat sırasında kontrol edilemeyen faktörlerle karşı karşıya kalmaktadır. Kontrol edilemeyen faktörlerin azaltılması numune üretimi sırasında esas amaç olmalıdır. Şekil 3.7’de verilen ve özel profillere sahip deney numuneleri, üzerine etki eden gerilmenin istenilen noktada oluşabilmesi için, test bölgesinin her noktasında aynı yüzey pürüzlülüğüne sahip olarak üretilmelidir.



Şekil 3.7. Yorulma Deney Numunesi

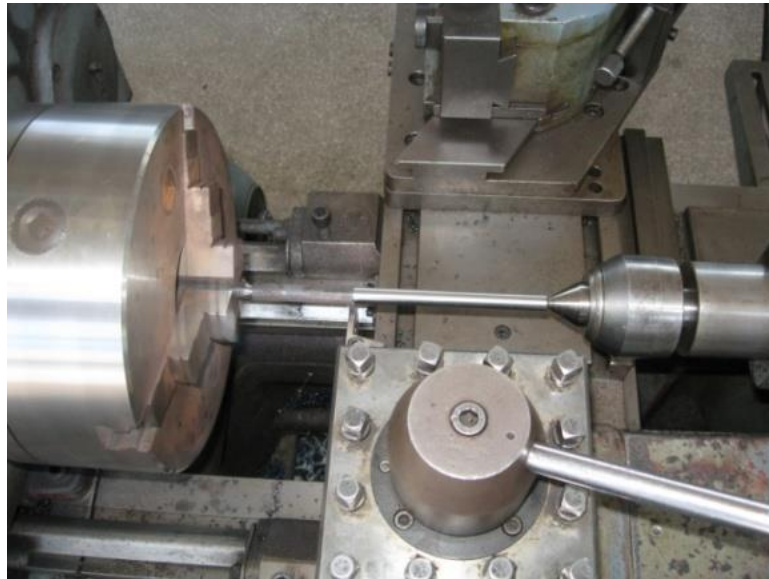
Yapılan deneyler sırasında Şekil 3.8’de belirtilen kater SWCN 2525M-16 ve kesici VCMT 160404 IC520N kullanılmıştır. Devir sayısının her iki tezgâhta da aynı parametreleri yakalaması için, devir sayısı olarak 1400 devir/dk. ve ilerleme 0.08 mm/devir kullanılmıştır. İmalat aşamasında numunelerin test bölgesi çapı

5 mm'ye ulaştıktan sonra sırasıyla 0,5, 0,5, 0,25, 0,25, 0,1, 0,1 mm talaş kaldırılmıştır.



şekil 3.8. Torna Kateri ve Kesici Uç

Ayrıca; imalat sırasında talaş kesitinde meydana gelebilecek değişimlerin tırlamaya yol açacağı göz önüne alındığında, numunelerde ısıl işlem sırasında oluşan iç gerilmelerin oluşturduğu çarpılmaların giderilmesi amacıyla, şekil 3.9'da görüldüğü gibi tüm numuneler iki punta arasında tornalanarak, tornalama sırasında talaş kesitinde değişimlere yol açan ekiler ortadan kaldırılmıştır.



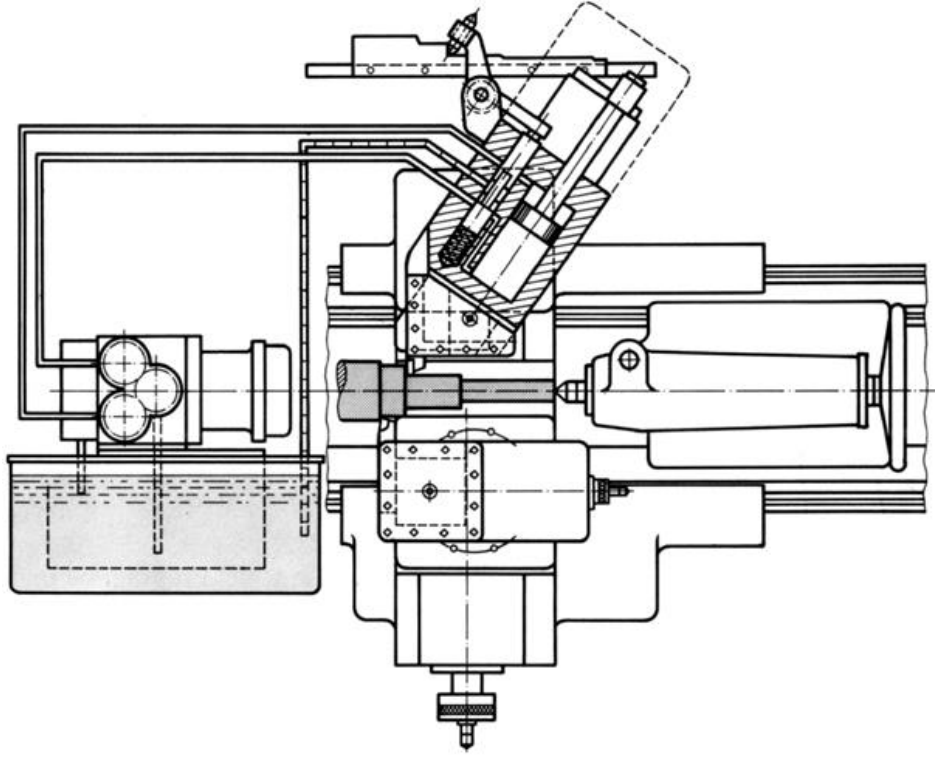
şekil 3.9. İki Punta Arasında Tornalama

3.4.1. Kopya Torna Tezgâhında Numune Üretimi



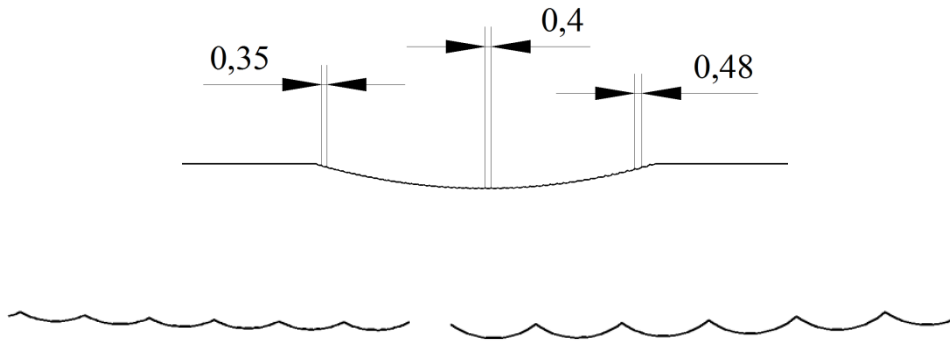
Şekil 3.10. Kopya Torna Tezgâhı

Yorulma numunesi imalatı sırasında, üniversal kopya torna tezgâhında imalat yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.10'da görülen bu tezgâhlarda kopyalama sistemi olarak, iş mili ekseni ile açılı çalışan, hidrolik tahrikli kalemlik mekanizması bulunur. Şematik görüntüsü Şekil 3.11'de verilen kopya tertibatının kademeli parçaların üretiminde sağlıklı çalışması için, iş parçası eksenine, kesiciyi hareket ettiren hidrolik silindirin bağlı bulunduğu kızak arasında 60°'lik bir açı bulunmaktadır. Bu açı sayesinde, araba ilerlemeye devam etmesine rağmen hassas izleyici uç, hidrolik silindiri geriye iterek master üzerinde bulunan kademelerin iş parçası üzerine aktarılmasına olanak sağlar. Yani araba iş parçası boyunca hareket etmesine rağmen kesici iş parçası eksenine dik veya açılı hareket eder. Parçaların düz kısımlarında kopyalama mekanizması silindiri hareket etmediğinden, arabanın ilerleme hızı ile kesicinin ilerleme hızı aynıdır. Fakat açılı veya yorulma numunesi gibi radüs profile sahip parçalarda arabanın ilerlemesi ile, kopya sisteminin iş parçası eksenine ile yaptığı açıdan dolayı, kesicinin iş parçası üzerinde bir turda aldığı yol farklılık göstermektedir.



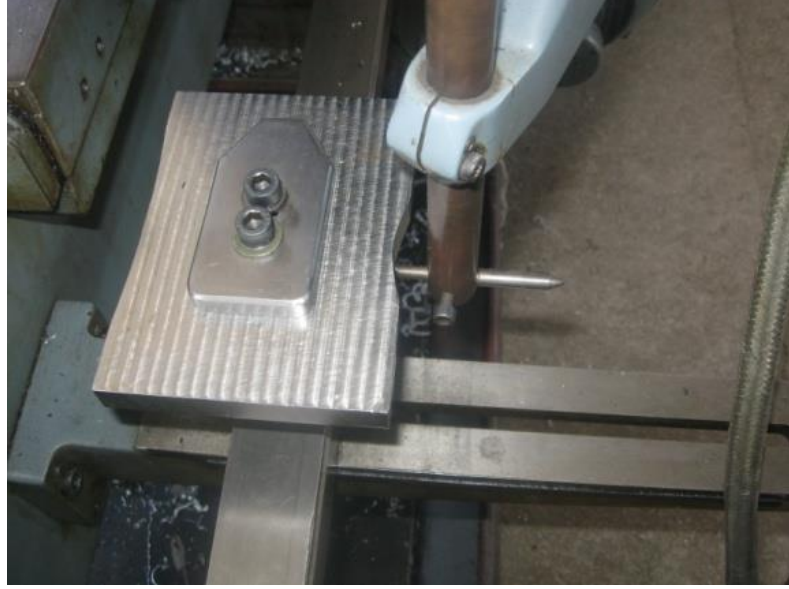
Şekil 3.11. Kopya Torna Tezgâhı Şematik Görüntüsü

Bu ilerlemede oluşan farklılık numunenin geçiş ve test bölgesinde farklı yüzey pürüzlülüklerinin oluşmasına yol açmaktadır. Oluşan farklı ilerleme değerleri Şekil 3.12’de görülmektedir. Bu farklılıklar test sırasında numune üzerinde sürekli bir bölgede gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Test bölgesinde oluşan bu faktörler deneyleri olumsuz etkilemektedir.



Şekil 3.12. İlerleme Değişimi

Kopya torna tezgâhında Şekil 3.13’de görüldüğü gibi imalatı yapılacak numune profili şeklinde bir kopyalama mastarı bulunmaktadır.



Şekil 3.13. Kopya Torna Tezgâhı Kopyalama Mastarı

Tezgâh çalıştırıldıktan sonra bu mastara izleyici uç temas ettirilir ve tezgâh arabasının tahrik mekanizması çalıştırılır. Ayna dönmeye başladığında arabanın parça boyunca hareketi başlar. İzleyici uç master üzerine belirli bir baskı kuvveti uygulayarak masterın profilini takip eder. İzleyici ucun tahrik ettirdiği hidrolik silindir kesiciyi iş parçasına izleyici ucun hareketlerine göre yaklaştırıp uzaklaştırır. İzleyici ucun mastara yaptığı baskı kuvveti ile hidrolik silindirin itme kuvveti aynı değildir. İzleyici uç master sonuna geldiğinde otomatik olarak itme silindirine ters tahrik vererek kesiciyi iş parçasından uzaklaştırır. Tezgâh ters çalıştırılarak bir sonraki talaş kaldırma işlemi için (paso) izleyici uç master başlangıç noktasına getirilir. Hidrolik torna tezgâhlarında toplam talaş derinliği, genelde beş eşit parçaya veya istenilen derinliklerde ayarlanacak dayamalar kullanılarak kaldırılır. Bu dayamalar Şekil 3.14’de görülmektedir.



Şekil 3.14. Kopya Torna Tezgâhı Hidrolik Dayama Sistemi

Fakat istenilirse bu dayamaların hepsi aynı bu boyda ayarlanarak talaş Şekil 3.15’de görünen kesici ilerletme sisteminden komparatörle istenilen miktarda da kesici ilerletilerek, kaldırılacak talaşın kalınlığı ayarlanıp istenilen çap ölçüsüne ulaşınca kadar kesici ilerletilebilir.



Şekil 3.15. Kopya Torna Tezgâhı Kesici İlerletme Sistemi

Bu çalışmada dayamalar aynı boyda ayarlanmış ve talaş derinliği kesici ilerletme mekanizması (komparatör) yardımıyla istenilen talaş derinliklerinde talaş kaldıracak şekilde ayarlanmıştır. Devir sayısı ve ilerleme imalat sırasında sabit tutulmuştur.

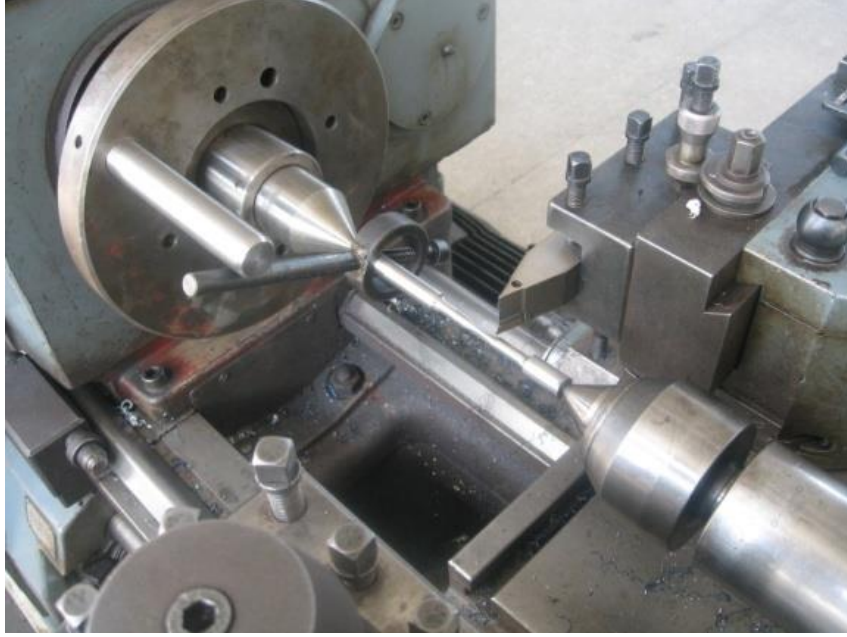
4.2.1.1. Kopya Torna Tezgâhında Ayna-Punta Arası Numune Üretimi



Şekil 3.16. Kopya Torna Tezgâhı Ayna-Punta Arası Numune Üretimi

Kopya torna tezgâhında numunelerin tezgâha Şekil 3.16’da görüldüğü gibi ayna-punta arası bağlanması sırasında, punta ucunun iş parçası üzerine etki eden aksenal kuvveti standart olarak ayarlanamamaktadır. Aksenal kuvvetin standart olmaması, numunenin üretimi sırasında kesme kuvvetlerinin de etkisiyle, numune ekseninde değişimlere yol açmaktadır. Bu olumsuzluk kaldırılmak istenen talaşın kesitinde değişimlere ya da, numuneden kaldırılmak istenen talaşın kaldırılamamasına sebep olmaktadır. Ayrıca, kesme hızının çap değişimine bağlı sabit tutulamaması, son pasoda kaldırılmak istenen talaşın kontrol edilememesi, her numunenin yüzeyinde kesme sırasında oluşan kuvvetler sonucu, içyapıdan farklı kalınlıklara sahip, tabakaların oluşmasına yol açmaktadır. Yüzeyde oluşan bu tabaka yorulma deneylerini olumsuz etkilemektedir.

4.2.1.2. Kopya Torna Tezgâhında Firdöndü-Punta Arası Numune Üretimi



Şekil 3.17. KTT Firdöndü Aynası-Punta Arası Numune Üretimi

Kopya torna tezgâhında numunelerin Şekil 3.17’de görüldüğü gibi tezgâha firdöndü aynası-punta ucu ile desteklenerek bağlanması sırasında, iki ucundan punta ucu ile desteklenmesi numunenin üzerine etki eden aksenal kuvveti arttırmaktadır. Aksenal kuvvetin artması imalat sırasında oluşan kuvvetlerinde etkisiyle, numune ekseninin kesiciden uzaklaşmasına yol açmaktadır. Parça ekseninde oluşan sehim numunede tırlamaya yol açmaktadır. Oluşan tırlama firdöndü aynası-punta arasında yapılan üretimde talaş kesiti kontrolünü oldukça zorlaştırmaktadır. Talaş kesitinin kontrol edilmesinde yaşanan zorluklar, numunenin yüzey tabakasında içyapıdan tamamen farklı bir tabakanın oluşmasına yol açmaktadır.

3.4.2. CNC Torna Tezgâhında Numune Üretimi

CNC torna tezgâhları son yıllarda imalat sanayisinde çok yaygın kullanılan tezgâhlardır. Kontrol sistemi, programı yapılan her geometrinin imalatının yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada Şekil 3.18’de görünen çift aynalı SPINNER TC77 SMCY CNC torna tezgâhı kullanılmıştır.



Şekil 3.18. CNC Torna Tezgâhı

CNC torna tezgâhında imalat için parça profiline uygun program yazılmış ve imalat gerçekleştirilmiştir. İmalat önce karşı aynaya yay baskılı punta bağlanarak ayna-punta arasında, daha sonra ise imalat iki ayna arasında gerçekleştirilmiştir. İmalat sırasında ilerleme ve devir sayısı sabit tutulmuştur. Çift aynalı tezgâhlarda ana iş mili tahrik mekanizması ile karşı ayna tahrik mekanizmasının farklı olması sebebiyle numuneler önce ana iş mili aynasına bağlanmış ve tezgâh çalıştırılmıştır. Daha sonra program içinde aynalar arası devir senkronizasyonu komutu tezgâha verilerek aynaların aynı devirde dönmesi sağlanmıştır. Programda kesme hızı ve devir sabit tutulmuştur. Aynalar aynı devirde döndükten sonra karşı ayna yaklaştırılarak karşı ayna ayakları kapatılmış veya yay baskılı döner punta ile parça desteklenmiştir. İmalat sırasında hidrolik kontrollü kopya torna tezgâhında olduğu gibi soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Parça imalatı bittikten sonra aynalar durdurulmadan karşı ayna ayakları açılmış ve karşı ayna iş parçasında uzaklaştırılmıştır. Numunelerin üretimi sırasında son pasolarda talaş kaldırmadan önce tezgâh durdurma prosedürü uygulanarak tezgâh durdurulmuş olup kaldırılmak istenen talaş miktarının kaldırılıp kaldırılmadığı kontrol edilmiştir. Aynı işlem hidrolik kontrollü kopya torna tezgâhında da gerçekleştirilmiştir.

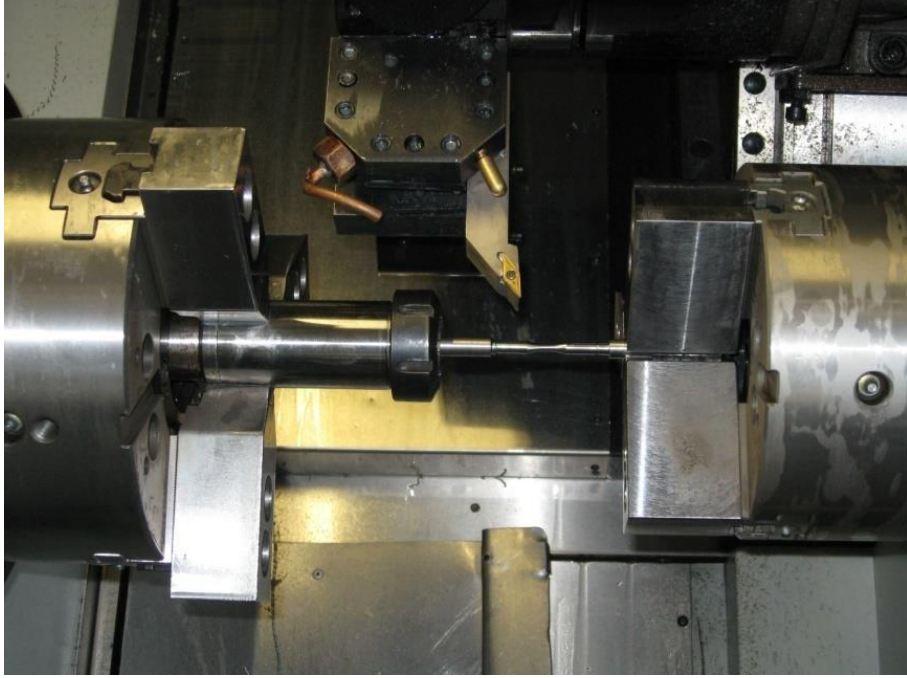
3.4.2.1. CNC Torna Tezgâhında Ayna-Punta Arasında Numune Üretimi

CNC torna tezgâhı, arabanın iş parçası eksenini boyunca hareketi sırasında kesiciyi eksen motorları yardımıyla iş parçası eksenine yaklaştırma ve uzaklaştırma prensibiyle çalışmaktadır. Konvansiyonel tezgâhlara göre kızak yapıları ve hareket vidalarının rijitliği CNC tezgâhların hassasiyetini arttırmaktadır. Kızaklardaki boşlukların az olması kaldırılmak istenilen talaşın kontrolünü kolaylaştırır. Kaldırılan talaşın kontrol edilebilir olması üretim sırasında parça yüzeyinde oluşan ve deneyleri etkileyen, kontrol edilemeyen faktörleri azaltır. CNC torna tezgâhında ayna punta arasında imalat süresince, kesici iş parçası eksenini boyunca istenilen ilerleme değerinde talaş kaldırıp ilerleyerek istenilen profili oluşturur. Bu yöntemde oluşan dezavantaj punta baskısının her numunede eşit olmasına rağmen deney numunesi çapının küçük olması sebebiyle, talaş kaldırma sırasında oluşan kuvvetlerin etkisiyle iş parçası ekseninin kesiciden uzaklaşmasıdır. İş parçası ekseninde oluşan sehim, kaldırılan talaşın kesitinin her noktada aynı olmamasına yol açar. Bu yöntemde kaldırılan talaşın kesiti her noktada aynı değildir. Isıl işlem sonucu malzemenin sertliğinde oluşan değişimler kaldırılan talaşın kontrolünü zorlaştırmaktadır.

3.4.2.2. CNC Torna Tezgâhında Ayna-Ayna Arasında Numune Üretimi

Üretim sırasında her ne kadar iş parçası ayna tarafından rijit bağlansa da, punta tarafında rijitliğin kontrol edilmesi oldukça güçtür. Talaşlı üretim sırasında oluşan kesme kuvvetlerinden dolayı numunelerin ekseninin değişmemesi talaş kontrolü açısından çok önemlidir. İş parçası çapının küçülmesi sonucu, kesme kuvvetleri ve punta itme kuvvetinin bileşkesi numunenin ekseninde değişime sebep olur. Talaş kontrolünün tam olabilmesi için iş parçası ekseninde değişim olmamalıdır. Deney numunesinin imalat sırasında ekseninde değişim olmaması için, her iki ucundan rijit bir şekilde bağlanarak imalat yapılmalıdır. Numune iki ucundan rijit bağlanırsa kaldırılmak istenilen talaşın kontrolü kolaylaşır. Numuneyi iki ucundan rijit olarak bağlamak için numunenin her iki tarafının ayna veya pens ile bağlanması gerekmektedir. Şekil 3.19’da iki ucundan rijit bağlanarak yapılmış olan ayna-ayna arasında imalat görülmektedir. Bu yöntemde numuneler her iki tarafından ayna ile rijit bağlantı yapılarak, kesme sırasında iş parçası ekseninde oluşan sehim minimize edilmiştir. Eksende oluşan sehimin azalması, kaldırılmak istenilen talaşın kontrolünü

kolaylaştırmıştır. Talaşın kontrollü olması numunenin imalat sonrası yüzey pürüzlülüğünü olumlu etkilemiştir.



Şekil 3.19. CNC Torna Tezgâhında Numune Üretimi

3.4.3. Talaşlı Üretim Verileri

Her iki tezgâhta da aynı parametreleri elde etmek için devir sayısı 1400 devir/dk. ve ilerleme hızı 0,08 mm/devir olarak belirlenmiştir. İmalat aşamasında numunelerin test bölgesi çapı 5 mm'ye ulaştıktan sonra 0,5, 0,5, 0,25, 0,25, 0,1, 0,1 mm derinliğinde talaş kaldırılmış ve her metotla üretilen beşer numunenin üretim aşamasında ölçümleri yapılarak Tablo 3.5'deki değerler elde edilmiştir. Numuneler istenilen ölçüye, kopya torna tezgâhı üzerindeki ayar mekanizması ya da CNC torna tezgâhında parça programı yardımı ile getirilmiştir. Ancak her bir durumda da talaş kaldırmanın doğasından kaynaklanan sapmalar olmuştur. Bu sapmalara kesme kuvvetleri, tezgâh mekaniği, takım ve parça sisteminin esnekliği yol açmıştır. Tablo 3.5'de verilen değerler, talaş kaldırma sonucunda çaptan kaldırılamayan talaş miktarlarıdır. Örnek olarak 4,0 mm çap ölçüsünde olması gereken numune, talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve diğer faktörlerin etkileri sonucu 4,064 mm olarak ölçülmüştür. Çapta 0,064 mm talaş kaldırılamamış olarak kabul

edilmiştir. Eğer numunenin geometrik hassasiyeti göz önüne alınırsa, imalatın yapıldığı tezgâh ve üretim metodunun önemi ortaya çıkmaktadır.

Yapılan bir çalışmada talaş kaldırma ile imal edilmiş vidalı yorulma numunelerinin yorulma dayanımlarının diğer parametreler aynı kalmak koşulu ile sadece kaldırılan tabakanın kalınlığının(kesme derinliğinin) değişmesi ile %10 civarında değiştiği tespit edilmiştir [14]. Bu durumda son pasoda kaldırılan paso kalınlığının dikkatli ayarlanması gereği ortaya çıkmaktadır. Yine yapılan diğer bir çalışmada, talaş kaldırma ile imal faktörlerindeki değişmelerin vida yüzey tabakasındaki mikrosertlik ve artık gerilmeleri önemli oranlarda etkilediği görülmektedir.

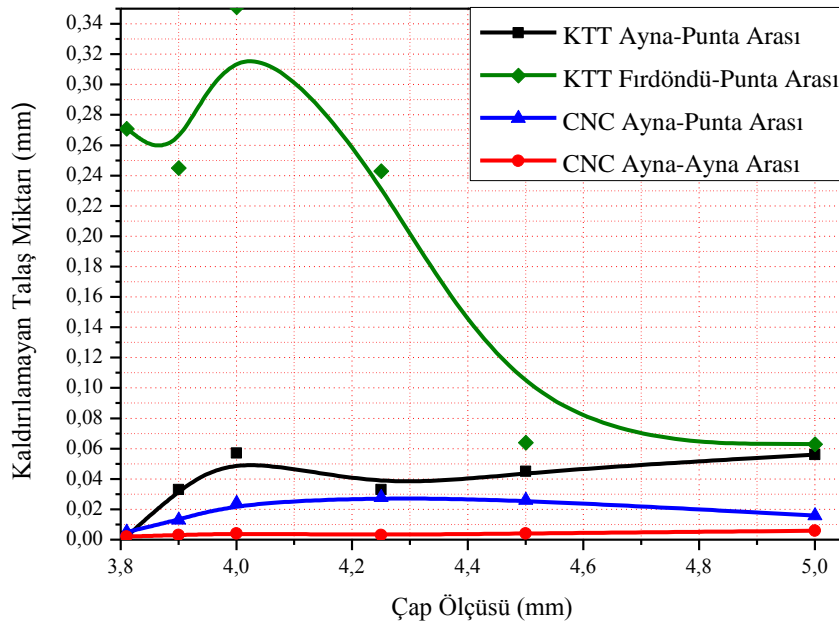
İmalat sırasında kopya torna tezgâhında talaş derinliği, 0,001mm hassasiyetli komparatör yardımı ile verilmiştir. Her talaş kaldırma işleminden sonra tezgâh durdurulmuş ve numune çapları PREISSER 0-25 mm 0,001mm hassasiyetli dijital mikrometrenin uçlarına bilya takılarak noktasal ölçüm yapılarak ölçülmüştür.

Tablo 3.5. Son Pasolarda Kaldırılmayan Talaş Miktarları

Numune Çapı (mm)	Talaş Miktarı (mm)	Kaldırılmayan Talaş Miktarı (mm)			
		Kopya Torna Tezgâhı		CNC Torna Tezgâhı	
		Ayna Punta Arası	Fırdöndü Punta Arası	Ayna Punta Arası	Ayna Ayna Arası
5,00	0,50	0,056	0,063	0,016	0,006
4,50	0,50	0,045	0,064	0,026	0,004
4,25	0,25	0,033	0,243	0,028	0,003
4,00	0,25	0,057	0,351	0,024	0,004
3,90	0,10	0,033	0,245	0,013	0,003
3,81	0,09	0,002	0,271	0,005	0,002

Tablo 3.5’de elde edilen verilerine göre oluşturulan Şekil 3.20 grafiği incelendiğinde, her dört işleme metodunda son pasoda kaldırılmayan talaş miktarının, CNC Torna tezgahında iki ayna arasında yapılan üretim metodunda en az olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi numunenin iki ucundan rijit olarak bağlanması sonucu kesme

kuvvetlerinin üretim sırasında numune ekseninde oluşturduğu değişimin minimum olmasıdır. Eğer numune geometrik olarak çok hassas işlenmek istenirse, verilen pasolardan sonra kalıntı olan ve kaldırılamayan bu talaş kalınlıklarının da çeşitli yöntemlerle kaldırılması gerekir. Bunun için tezgâhın rijitliğinin belirlenmesi ve paso miktarlarının bu belirlenen rijitlik değerine göre planlanması gerekir. Bir nevi tezgahın bu özel durum için kalibrasyon eğrisinin çıkarılması ve rijitliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu işlem numunenin geometrisi ve çap ölçüsü değiştikçe tekrarlanmalıdır. Görüldüğü gibi numune üzerinden ölçüm yapılarak, kalan kalıntı talaşın kaldırılması numunenin imalat faktörlerini etkilemekte ve bu faktörleri değiştirmektedir. Bu değişik kalınlıktaki son paso talaşları, numunenin yüzey tabakasının oluşumunu sağlamaktadır. Numunelerin son pasolarda bir sistematik içinde talaş kaldırılarak imalatlarının yapılması, kontrol edilemeyen faktörleri ve yorulma deney sonuçlarında oluşan dağılımları azaltmaktadır.



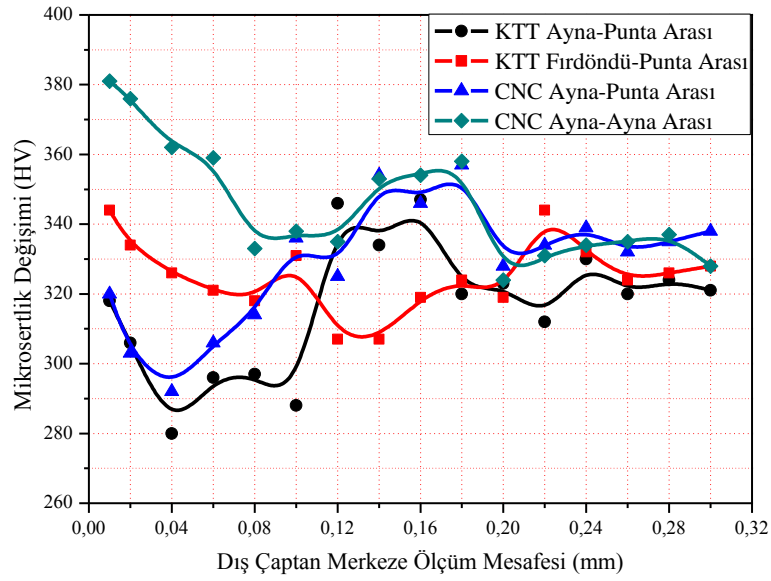
Şekil 3.20. Kaldırılmayan Talaş Miktarı Değişimi [55]

Tablo 3.6. Mikro Sertlik Ölçümleri

Dış Çaptan Merkeze Ölçüm Mesafesi (mm)	Mikro Sertlik (HV)			
	Kopya Torna Tezgâhı		CNC Torna Tezgâhı	
	Ayna Punta Arası	Fırdöndü Punta Arası	Ayna Punta Arası	Ayna Ayna Arası
0,01	318	344	320	381
0,02	306	334	303	376
0,04	280	326	292	362
0,06	296	321	306	359
0,08	297	318	314	333
0,10	288	331	336	338
0,12	346	307	325	335
0,14	334	307	354	353
0,16	347	319	346	354
0,18	320	324	357	358
0,20	323	319	328	324
0,22	312	344	334	331
0,24	330	332	339	334
0,26	320	324	332	335
0,28	324	326	335	337
0,30	321	328	338	328

İmalat sonrası numuneler test bölgesinden kesilmiş ve kesilen yüzeyler parlatılarak METKON MH-6 dijital mikro sertlik cihazında dış çaptan merkeze doğru ölçülmüştür. Tablo 3.6’da elde edilen verilerine göre Şekil 3.21 grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik incelendiğinde her dört işleme metodunda da mikro sertliğin dış çapta belli bir tabaka kalınlığında değiştiği tespit edilmiştir. İmalat sonrası ana malzemeden farklı mikro sertliğe sahip tabakanın yaklaşık 0,2 mm kalınlığında olduğu ölçülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde mikro sertliğin en fazla CNC Ayna-Ayna arasında yapılan üretim metodunda olduğu, en az mikro sertlik değişiminin ise KTT Ayna-Punta arasında yapılan imalatta olduğu gözlemlenmiştir.

CNC Ayna-Ayna arasında yapılan üretim metodunda mikrosertliğin fazla olmasının nedeninin, imalat sırasında kontrol edilemeyen faktörlerin diğer yöntemlere göre daha az olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca dış yüzeyde artan mikro sertliğin mekanik özellikleri olumlu yönde etkileyeceği ve yorulma ömrü artışına olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



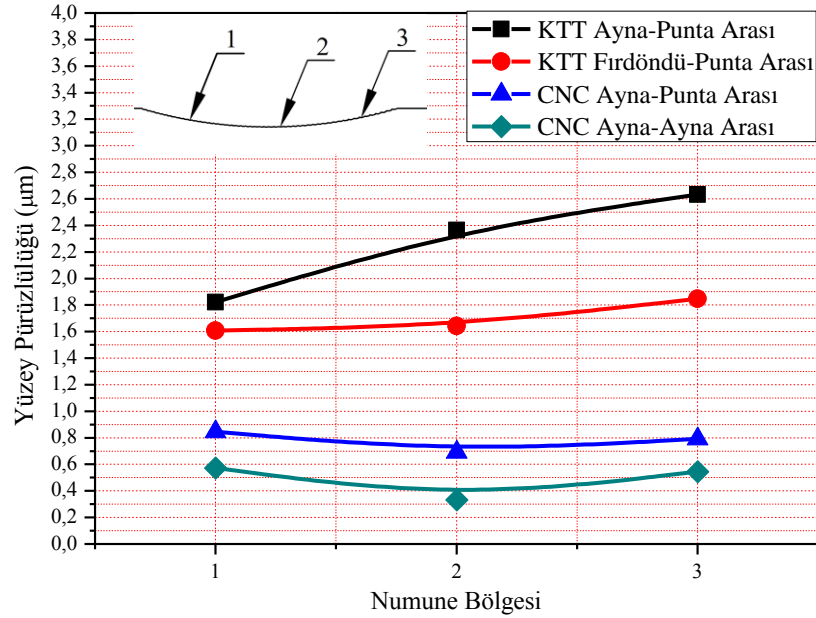
Şekil 3.21. Mikro Sertlik Değişimi

İmalat sonrası numunelerin geçiş bölgeleri (numunenin sap kısmı ile kritik kesitinin bulunduğu bölge arasındaki geçiş kısmı) ve test bölgesi (yorulma deney numunesinin kırılmasının beklendiği kritik test bölgesi) pürüzlülükleri ölçülmüş ve elde edilen veriler Tablo 3.7’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Mahr MarSurf PS1 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır.

Tablo 3.7. Numune Üzerinde Yapılan Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Numune işleme yöntemi	Geçiş Bölgesi (Ra)(μm)	Test Bölgesi (Ra)(μm)	Geçiş Bölgesi (Ra)(μm)
KTT Ayna-Punta Arası	1,822	2,364	2,632
KTT Fırdöndü -Punta Arası	1,607	1,643	1,847
CNC Ayna-Punta Arası	0,846	0,692	0,793
CNC Ayna-Ayna Arası	0,573	0,332	0,546

Elde edilen verilere göre oluşturulan Şekil 3.22'deki grafik incelendiğinde kopya torna tezgâhında yapılan üretim yöntemlerinde pürüzlülüğün fazla, CNC torna tezgâhında yapılan üretimlerde ise pürüzlülüğün az olduğu gözlemlenmiştir. Hatta kopya torna tezgâhının mekanik yapısından dolayı geçiş bölgeleri arasında yüzey pürüzlülüğünün farklı olduğu grafikten de anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün farklı olması yüzeyde farklı mekanik özelliklere sahip yüzey tabakalarının oluşmasına ve bu farklılığın da gerilme yığılmalarına yol açacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 3.22. Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi

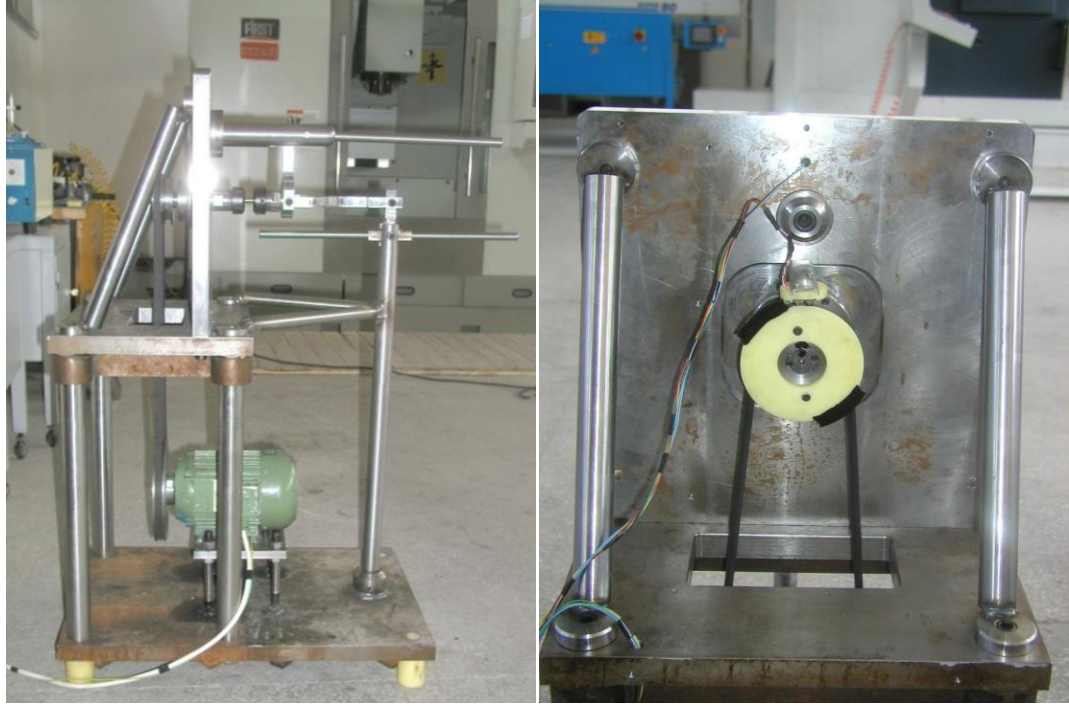
Yorulma deneylerinde oluşabilecek dağılımları en aza indirmek için, dört talaşlı üretim metodu araştırılmıştır. Araştırmalar neticesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri, CNC torna tezgâhında ayna-ayna arasında yapılan imalatla elde edilen numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedeni CNC torna tezgâhında üretim sırasında numunenin iki ucundan rijit olarak bağlanması, numune eksenini boyunca etki eden ve talaş kaldırmayı olumsuz etkileyen bir kuvvetin olmaması, tüm parça boyunca ilerlemenin sabit kalması ve iki aynanın da ayaklarının tornalanması sonucu ayna döndürme eksenini fener mili ekseninde sapmanın olmamasıdır.

3.5. Yorulma Makinesi Tasarımı ve Üretimi

Dönel eğmeli ankastre tip veya R. R. Moore dört noktalı dönen eğmeli yorulma makinesi, deney numunesi üzerinde kritik kesitte eğme gerilmesi oluşturmak amacıyla tasarlanmış yorulma makineleridir. Bu makineler numunenin dönmesiyle kritik kesitte eğme gerilmesine bağlı olarak çekme ve basma gerilmeleri oluşturur. Kesitte oluşan çekme ve basma gerilmeleri sistemin mekaniği gereği eşittir. Kesitte uygulanacak ilave çekme veya basma gerilmesi dengeyi bozacaktır. Bozulan denge sonucu eğer kesite çekme gerilmesi uygulanıyorsa dönen eğme gerilmesi sonucu çekme bölgesinde çekme gerilmesinin etkisi artarken, basma bölgesinde basma gerilmesinin etkisi azalacaktır. Eğer kesite basma gerilmesi uygulanıyorsa çekme gerilmesinin etkisi azalırken basma bölgesindeki basma gerilmesi miktarı artacaktır.

Bir taraftan ankastre sabitlenmiş bir mil eğme gerilmesine maruz bırakılırsa kesitin bir tarafında çekme diğer tarafında ise basma gerilmesine maruz kalır. Eğer ankastre edilmiş mil dönüyorsa kesite oluşan gerilmeler değişerek basma gerilmesi çekmeye, çekme gerilmesi olan bölgede basma gerilmesine maruz kalır. Bu gerilme değişimi sürekli tekrarlanırsa belirli bir çevrim sonucu malzeme hasara uğrayarak kırılır. Eğme gerilmesi altında çalışan bir mile çekme veya basma gerilmesi etki ederse kesitte olan denge bozulur. Makine elemanlarının çoğu ön gerilmeli bileşik gerilme etkisi altında çalışırlar. Özellikle bileşik gerilme, ağırlık ve hacmin önemli olduğu uzay ve havacılık sanayinde büyük öneme sahiptir. Makine elemanlarının ne kadarlık ön gerilme etkisi altında, ne kadarlık bir gerilme genliğinde, ömürlerinin ne olabileceğinin bilinmesi çok önemlidir. Bu sebeple ön gerilmeli yüklemeler altında yorulma ömürlerinin belirlenmesi için özel yorulma makinelerine gerek vardır. Klasik yorulma makinelerinde ön gerilme oluşturacak sistemler bulunmamaktadır. Bu çalışma için kritik kesitte bileşik gerilme oluşturacak bir yorulma makinesi tasarlanarak üretimi yapılmıştır. Tasarlanan makinede eğme gerilmesi ile birlikte basma veya çekme gerilmesini birlikte oluşturacak bir sistem oluşturulmuştur. Kayış-kasnak mekanizması yardımıyla 6300 devir/dk. ile çalışacak şekilde tasarlanmış ve devir sayısı kontrolü Şekil 3.23'de de görüldüğü gibi iş mili arkasına bağlanan sayıcı yardımıyla sağlanmıştır. Gövde kesitleri ve destek parçaları çalışma esnasında titreşimlerden etkilenmeyecek şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Hareket

aktarımı V kayış ile sağlanmış ve kasnakların balans sonucu titreşim yapmamları için balans ayarları yapılmıştır. Yorulma numunesi üzerine istenilen gerilme dışında herhangi bir gerilmenin etkimesi için tüm sistem dengeleme ağırlıkları ile dengelenmiştir.

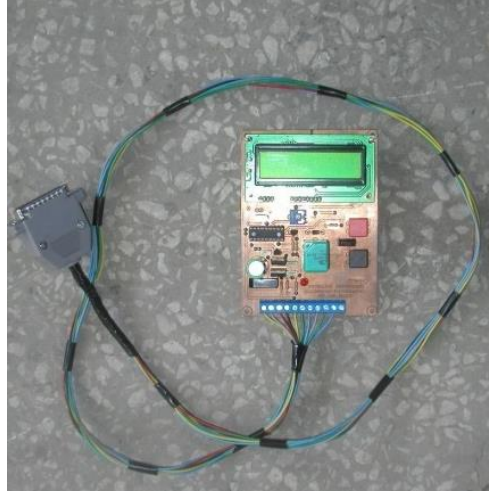


(a)

(b)

Şekil 3.23. Bileşik Gerilmeli Yorulma Makinesi Üretimi

Ayrıca yükleme parçalarının hareketli kısımlarında bulunan deliklerin tamamının delik iç yüzeyleri, sürtünmeyi azaltmak için mikroler ile işlenmiş ve sürtünmeye yol açabilecek etkiler minimum seviyeye indirilmiştir. Yükleme kolları üzerine ağırlık konum kontrolü için kanallar açılarak çelik cetveller takılmıştır. Numune hasara uğradığında sistemi durduracak sensörler takılarak çevrim sayısının net olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Şekil 3.24'de görülen kontrol devresinin çevresel parazitlerden etkilenmemesi için sisteme ilave filtre takılmıştır.



Şekil 3.24. Elektronik Kumanda Devresi

Tasarım ve üretimi yapılan makineye yorulma numunesi takılarak deneyler yapılmış ve istenilen noktada gerilmenin oluşturulup oluşturmadığı araştırılmıştır. Şekil 3.25’de de görüldüğü gibi bileşik gerilme yükleme sistemi test edilmiştir. Yapılan testler sonunda istenilen noktada eğme-basma ve eğme-çekme gerilmelerinin oluşturulduğu yapılan deneme testleriyle tespit edilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.25. Bileşik Gerilme Yükleme Sistemi

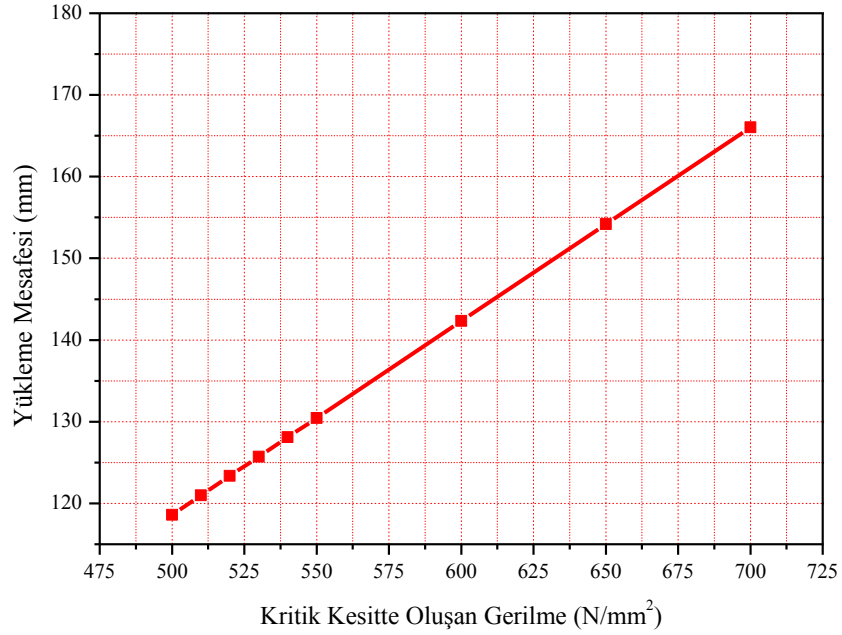
3.6. Teorik Hesaplamalar

Deneylerde elde edilen bulguların doğruluğunun ispatı için, bilinen denklemler kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar önemlidir. Çünkü araştırma sırasında elde

edilen bulguların doğru olup olmadıklarının karşılaştırılması, deneyin güvenilirliği açısından çok önemlidir. Bu maksatla, çalışmada önce değerler teorik olarak hesaplanmış ve sonra deneysel araştırmaya geçilmiştir.

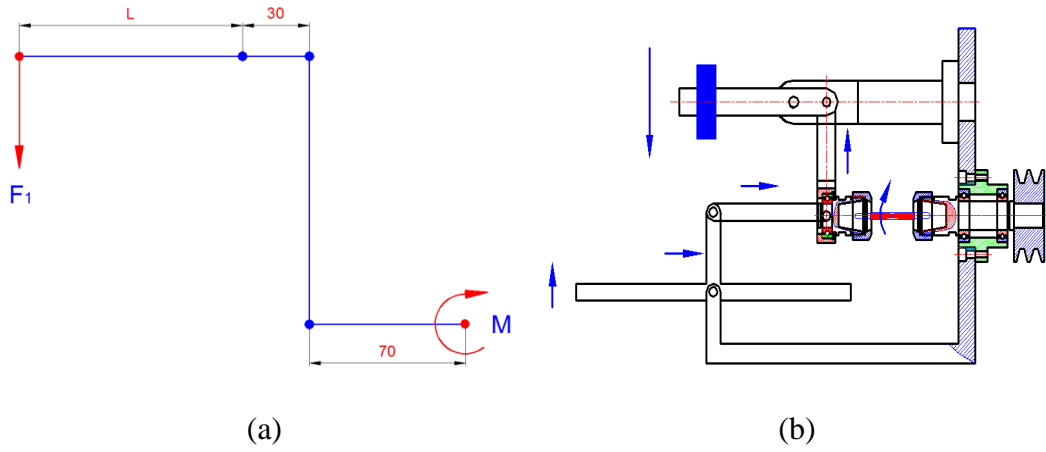
3.6.1. Eğme Gerilmesi Hesabı

Tasarlanan makinenin mekanik yapısında, numune kritik kesitinde oluşturulacak eğme gerilme değerinin belirlenmesi için yükleme değerleri hesaplanmalıdır. Kesitte oluşan gerilmeyi ve yükleme ağırlığının asılacağı mesafenin belirlenmesi amacıyla, Şekil 3.26'da çizilen gerilme-yükleme mesafesi eğrisi veya çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Çizilen egride numune çapı ve yükleme ağırlığı dikkate alındığında kesitte oluşturulacak gerilme ve yükleme ağırlığı mesafesi yükleme eğrisi yardımıyla da kolaylıkla bulunabilir.



Şekil 3.26. Gerilme-Yükleme Mesafesi Eğrisi

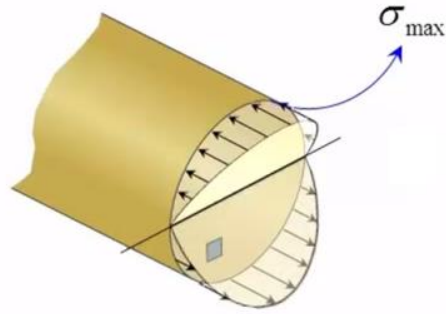
Yorulma makinesi, eğme gerilmesi yükleme sisteminin Şekil 3.27'de şematik resmi verilmiştir. Yükleme mesafesinin tespiti için, şematik resminde belirtilen değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.27. Yorulma Makinesi Eğme Gerilmesi Şematik Resmi

$$\sigma = \frac{M * \frac{d}{2}}{I} \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{M * d * 64}{2 * \pi * d^4} \quad (3.2)$$



Şekil 3.28. Eğme Gerilmesi

Bu eşitliklere göre yapılan hesaplamada, Şekil 3.28’de görüldüğü gibi kesitte oluşturulmak istenen gerilme değeri $\sigma = 700 \text{ N/mm}^2$ ve yükleme ağırlığının $F_1 = 9,81$ (1 kgf) N olması durumunda yükleme mesafesi (L);

$$\sigma = \frac{F_1 * L * d * 35 * 64}{\pi * 30 * d^4} \quad (3.3)$$

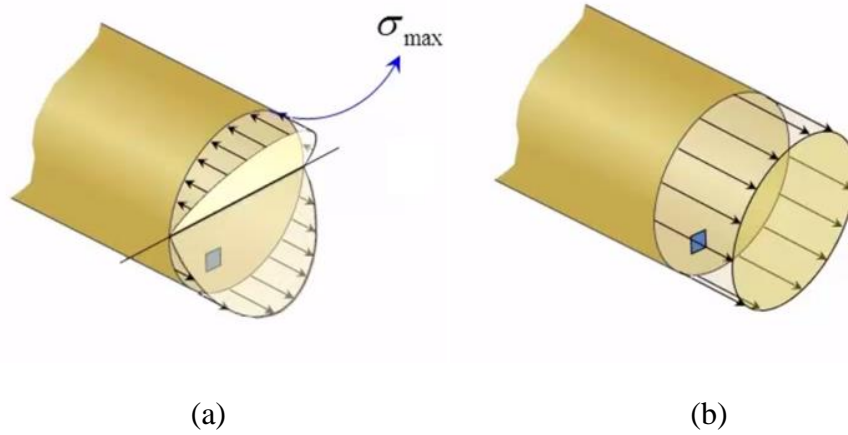
$$L = \frac{\sigma * 30 * \pi * d^4}{F_1 * d * 35 * 64} \quad (3.4)$$

$$L_{700} = \frac{700 \cdot 30 \cdot \pi \cdot 3,81^4}{9,81 \cdot 3,81 \cdot 35 \cdot 64} \quad (3.5)$$

$L_{700} = 166,04$ mm olarak hesaplanmıştır.

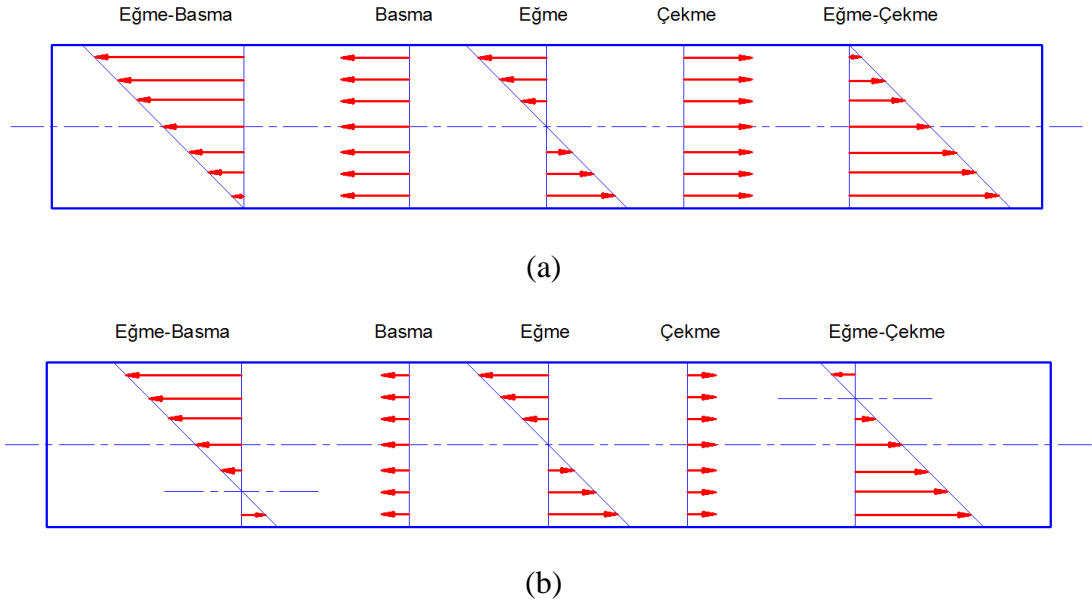
3.6.2. Bileşik Gerilme Hesabı

Eğme-Çekme veya Eğme-Basma gerilmesinin, aynı anda numune üzerinde oluşturulması durumunda kesitte bileşik gerilme oluşur. Numune üzerine sadece eğme gerilmesi etki ettiğinde, Şekil 3.29'da da görüldüğü gibi kesitte gerilmeler tarafsız eksene göre eşit ve zıttır. Çekme veya basma gerilmesinde ise, kesitte büyüklüğü eşit dağılmış ve aynı yönlü bir gerilme oluşur. Tarafsız eksene göre, numunenin dönmesine bağlı eğme gerilmesi kesitte sürekli eşit ve zıt yönlü olarak değişmekte iken, çekme veya basma gerilmesinde gerilmenin yönü değişmez.



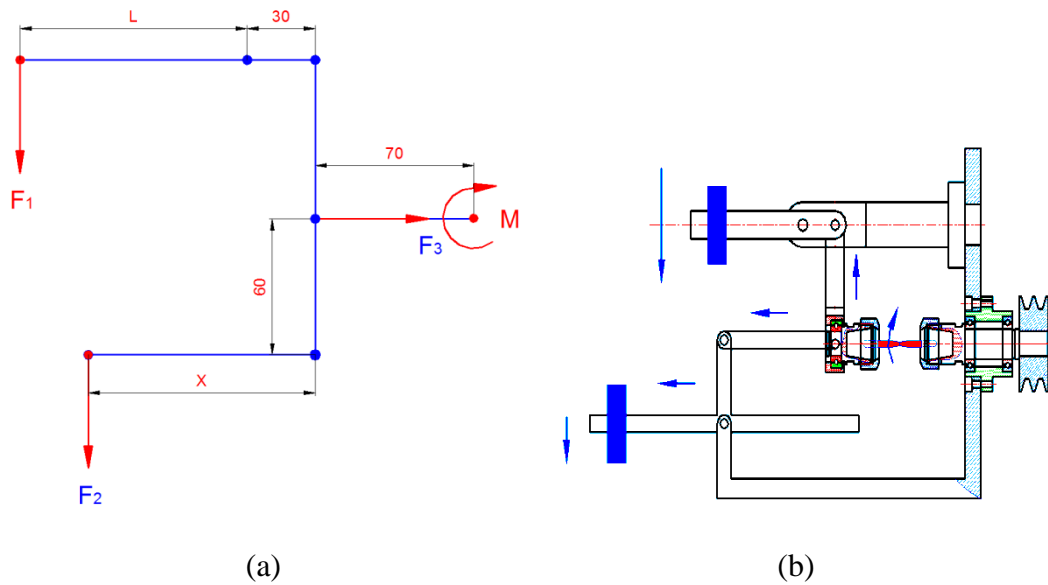
Şekil 3.29. Eğme ve Çekme Gerilmesi

Eğer numune kesitine etki eden eğme gerilmesine, çekme veya basma gerilmesi etki ederse, tarafsız eksene göre kesitte oluşan gerilmenin büyüklüğü ve yönü değişir. Şekil 3.30 (a)'da eğme gerilmesine, çekme ve basma gerilmesinin eşit olması durumunda kesitteki gerilme dağılımı, (b)'de ise gerilmeler arasında fark olması durumunda tarafsız eksene göre gerilmelerin durumu şematik olarak gösterilmiştir.

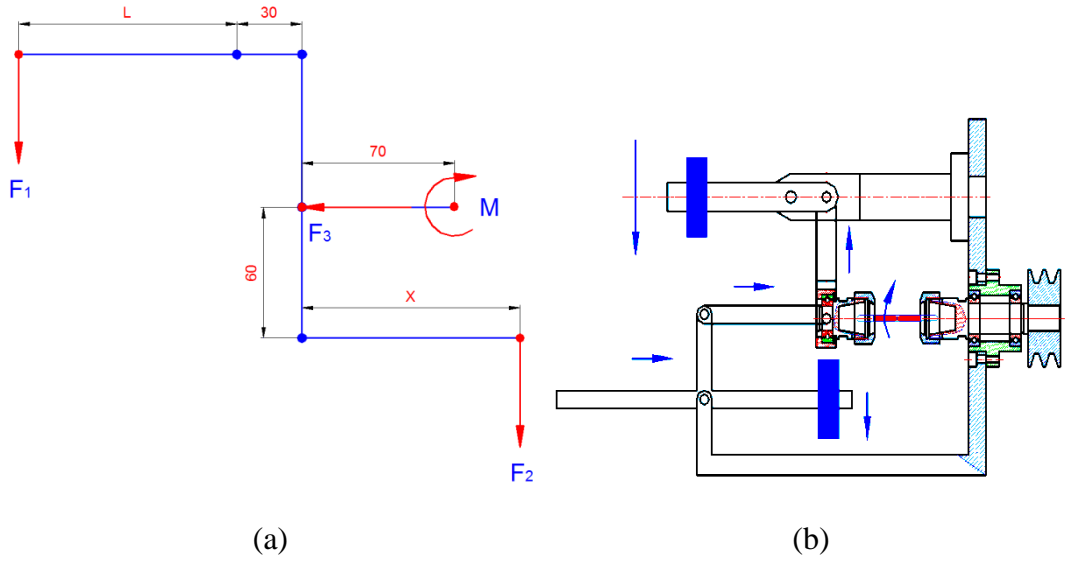


Şekil 3.30. Gerilme Dağılımı

Yorulma deneyleri, genellikle kesitte sadece eğme gerilmesi oluşturularak yapılır. Bu sebeple kesitte bileşik gerilme oluşması durumunda yorulma ömründe ne gibi değişimlerin olacağı tam olarak bilinmemektedir. Bu değişimin araştırıldığı bu çalışmada, numune üzerinde aynı anda Eğme-Çekme veya Eğme-Basma gerilmelerini oluşturacak mekanik sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sisteme ait şematik çizimler Şekil 3.31 ve Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.31. Yorulma Makinesi Eğme-Çekme Gerilmesi Şematik Resmi



Şekil 3.32. Yorulma Makinesi Eğme-Basma Gerilmesi Şematik Resmi

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_2 * x * 4}{\pi * d^2 * 60} \quad (3.6)$$

$$x = \frac{\pi * d^2 * 15 * \sigma_{\zeta}}{F_2} \quad (3.6)$$

Çekme gerilmesi için verilen eşitliklere göre yapılan hesaplamada, kesitte oluşturulmak istenen gerilme değeri $\sigma = 45 \text{ N/mm}^2$ ve yükleme ağırlığının $F_1 = 294,3$ (30 kgf) N olması durumunda yükleme mesafesi (x);

$$x = \frac{\pi * 3,81^2 * 15 * 45}{294,3} \quad (3.6)$$

$x = 104,59 \text{ mm}$ olarak hesaplanır.

3.6.4. Sürekli Mukavemet Değeri Hesabı

Makine parçalarının çalışma sırasında, üzerlerine etki eden gerilme etkisi altında hangi çevrim sayılarına kadar fonksiyonlarını yerine getirebilecekleri ile ilgili hesaplamalar mevcuttur. Fakat yapılan hesaplamalara kontrol edilemeyen birçok etken tam olarak yansıtılmadığı için genellikle elde edilen değerler, net olarak

belirlenebilen değerler değildir. Fakat elde edilen değerlerin gerçek çalışma şartlarında elde edilen değerlere yakın olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada numunelere etki edecek gerilmelerin etkisi altında, çalışma omrlerinin ne olacağı teorik olarak hesaplanmış ve elde edilen değerlerle deneysel sonuçlar karşılaştırılarak yapılan deneyin güvenilirliği kontrol edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Sürekli mukavemet gerilmesi değerini belirlemek için 3.7 eşitliği kullanılmaktadır [5].

$$\sigma_Y = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * \sigma'_Y \quad (3.7)$$

Bu eşitlikteki faktörlerden yüzey faktörü (k_a); yüzey iyileştirme veya düzeltme faktörü de denilen yüzey faktörü; parçanın yüzeyine uygulanan son imalat işlemine ve parça malzemesinin çekme mukavemetine bağlı olarak değişir. Sürekli dayanım mukavemeti, maksimum gerilme altında son uygulanan yüzey işlemine bağlı olarak değişir. Yüzey faktörünü hesaplamak için 3.8 eşitliği ve Tablo 3.8'deki değerler kullanılır.

$$k_a = a * \sigma_c^b \quad (3.8)$$

k_a : Yüzey faktörü:

a : Yüzey faktörü katsayısı

b : Yüzey faktörü üstel katsayısı

σ_c : Çekme mukavemeti (N/mm^2)

Tablo 3.8. Yüzey Faktörü ve stel Katsayısı:

Son yüzey işlemi	Faktör "a"	stel katsayı
Taşlama	1,58	-0,085
İşleme veya soğuk ekme	4,51	-0,265
Sıcak haddeleme	57,7	-0,718
Soğuk Dvmeye	272	-0,995

Boyut faktörü (k_b); boyut faktörü hesaplanırken birçok veriye ihtiyaç vardır. Bu verileri sadeleştirmek için yataklama ve moment (k_b) katsayı değerleri 3.9 ve 3.10 eşitliğinde verilmiştir.

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} \quad (3.9)$$

$$k_b = \begin{cases} (d/7,62)^{-0,107} = 1,27 * d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51 * d^{-0,157} & 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.10)$$

Yükleme faktörü (k_c); yorulma deneyleri sırasında eğilme, aksenal çekme-basma ve moment etkisi altında yorulma dayanımı çekme dayanımına bağlı olarak farklılıklar gösterir. Yorulma dayanımı hesaplamalarında genel olarak 3.11 eşitliğinde verilen katsayılar kullanılır.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{Eğme} \\ 0,85 & \text{Çekme - Basma} \\ 0,59 & \text{Burulma} \end{cases} \quad (3.11)$$

Sıcaklık faktörü (k_d); yorulma dayanımına sıcaklığın etkisi büyüktür. Ortam sıcaklığı malzemenin çalışma performansını etkilediği için malzemenin oda sıcaklığı ile çalışma ortamı sıcaklığına bağlı olarak belirli katsayılar belirlenmiştir. σ_t/σ_{rt} oranına ait katsayılar Tablo 3.9'da verilmiştir.

$$k_d = \frac{\sigma_t}{\sigma_{rt}} \quad (3.12)$$

Tablo 3.9. Sıcaklık Faktörü Katsayı Değerleri

Sıcaklık oC	σ_t/σ_{rt}
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

Güvenilirlik faktörü (k_e); genellikle güvenilirlik katsayısı iki alındığında en iyi ortalama yorulma dayanımı verisini elde etmek için $\sigma'_Y = 0,5 * \sigma_C$ eşitliği kullanılır. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere güvenilirlik faktörü birçok hesaplamada % 100'e yakındır. Ağırlığın önemli olduğu durumlarda güvenilirlik faktörü önem kazanır. Haugen ve Wirching tarafından yayınlanan bilgilerde 3.13 eşitliği güvenilirlik faktörü için en iyi katsayıyı verdiği belirtilmiştir [5]. Güvenilirlik katsayısına bağlı olarak dönüşüm katsayısı (z_a) değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

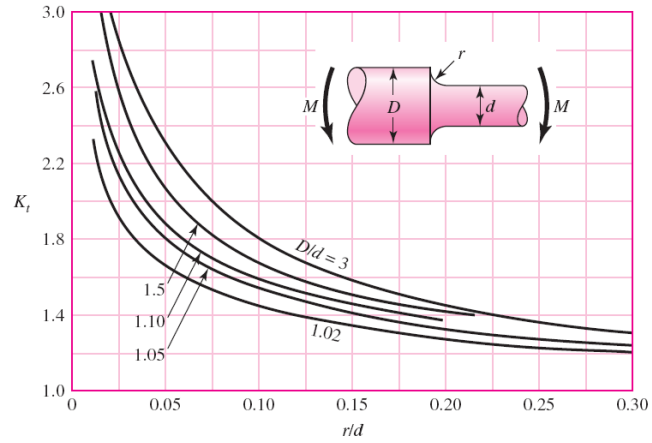
$$k_e = 1 - 0.08 * z_a \quad (3.13)$$

Tablo 3.10. Güvenilirlik Katsayı Tablosu [5]

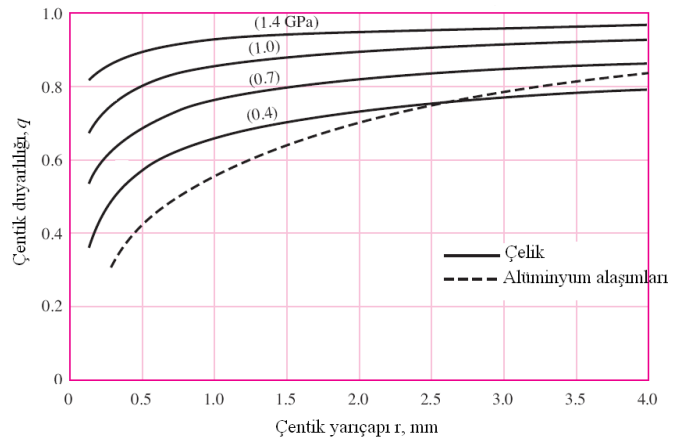
Güvenilirlik %	Dönüşüm katsayısı z_a	Güvenilirlik faktörü k_e
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99.9	3,091	0,753
99.99	3,719	0,702
99.999	4,265	0,659
99.9999	4,743	0,620

Diğer etkiler (k_f); faktörü kontrol edilemeyen faktörlerden dolayı yorulma dayanımında meydana gelen azalmaları incelemeye yarar [56]. Fakat bu faktörün gerçek değerleri her zaman bulunamayabilir. k_f faktörünü etkileyen etkilere ait katsayı değerleri Şekil 3.33 ve Şekil 3.34 kullanılarak belirlenir.

$$k_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (3.14)$$



Şekil 3.33. K_t Katsayısı [5]



Şekil 3.34. q Katsayısı [5]

Yukarıda belirtilen faktörler kullanılarak yapılan hesaplamada;

$$\sigma_Y = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * \sigma'_Y$$

$$k_a = 4,51 * 1159^{-0.265} = 0,695$$

$$k_b = \left(\frac{3,81}{7,62}\right)^{-0,107} = 1,076$$

$$k_c = 1$$

$$k_d = 1$$

$$k_e = 1 - 0,08 * 1,645 = 0,868$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0,4}{3,41} = 0,12$$

$$\frac{D}{d} = \frac{3,81}{3,41} = 1,11$$

$$K_t = 1,58$$

$$k_f = 1 + 0,82(1,58 - 1) = 1,48$$

$$\sigma'_Y = 0,5 * \sigma_C$$

$$\sigma'_Y = 0,5 * 1159$$

$$\sigma'_Y = 579,5 \text{ N/mm}^2$$

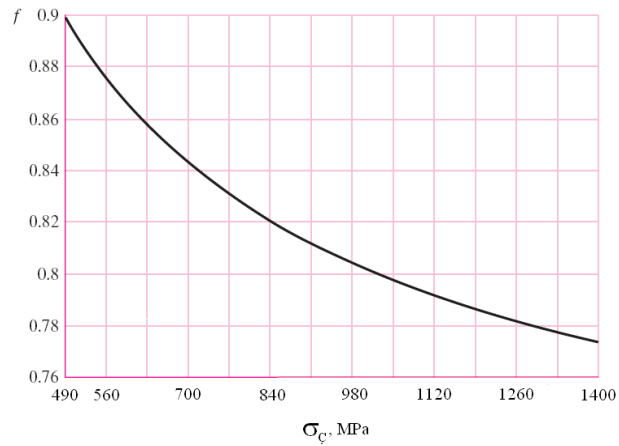
$$\sigma_Y = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * \sigma'_Y$$

$$\sigma_Y = 0,696 * 1,076 * 1 * 1 * 0,868 * 1,48 * 579,5$$

$$\sigma_Y = 557,52 \text{ N/mm}^2$$

olarak bulunur.

3.6.5. Teorik Yorulma Ömrü Hesabı



Şekil 3.35. f Katsayısı [5]

$$a = \frac{(f * \sigma_C)^2}{\sigma_Y} \quad (3.15)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f * \sigma_{\zeta}}{\sigma_Y}\right) \quad (3.16)$$

$$\sigma_Y^* = a * N^b \quad (3.17)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikler ve Şekil 3.35 kullanılarak yapılan teorik hesaplama sonucu 10000 devir için

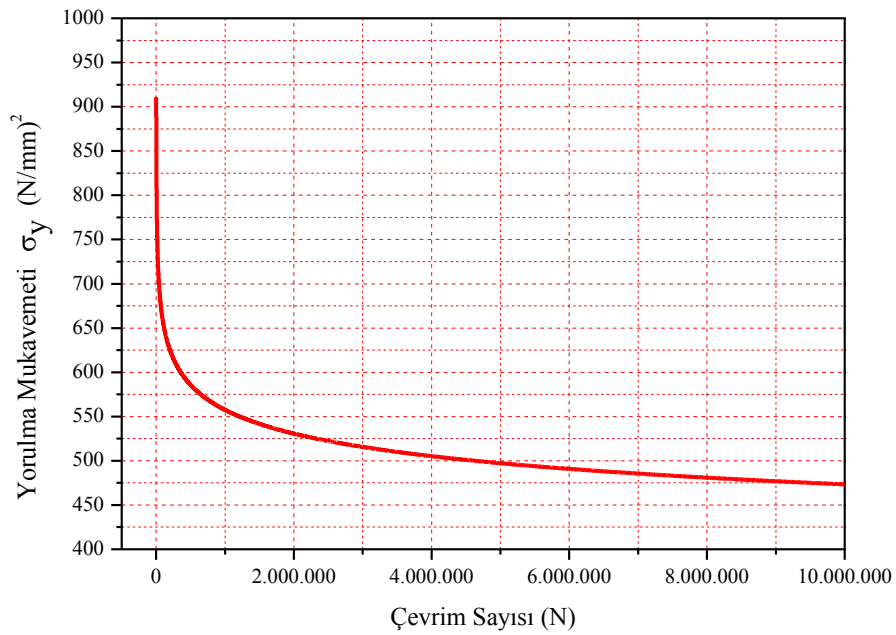
$$a = \frac{(0,786 * 1159)^2}{557,52} = 1488,51 \text{ N/mm}^2$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{0,786 * 1159}{557,52}\right) = -0,0711$$

$$\sigma_Y^* = 1488,51 * (10^4)^{-0,0711}$$

$$\sigma_Y^* = 773,31 \text{ N/mm}^2$$

bulunur. Şekil 3.36'da yukarıda belirtilen eşitlikler kullanılarak, teorik yorulma eğrisi çizilmiştir.



Şekil 3.36. Teorik Yorulma Eğrisi

3.6.6. Gerber Eğrisi Teorik Hesaplama

Gerber denklemine göre aşağıdaki eşitlikler kullanılarak $r=1$ ve r_{kritik} değerleri için gerilme değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen veriler kullanılarak Şekil 3.37'deki Gerber Teorik Yorulma Eğrisi çizilmiştir.

$$\sigma_Y = 557,52 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_a = \frac{r^2 * \sigma_C^2}{2 * \sigma_Y} * \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * \sigma_Y}{r * \sigma_C} \right)^2} \right] \quad (3.18)$$

$$\sigma_a = \frac{1^2 * 1159^2}{2 * 557,52} * \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 557,52}{1 * 1159} \right)^2} \right]$$

$$\sigma_a = 467 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{r} \quad (3.19)$$

$$\sigma_m = \frac{467}{1}$$

$$\sigma_m = 467 \text{ N/mm}^2$$

$$r_{\text{kritik}} = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (3.20)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_C^2}{2 * \sigma_Y} * \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2 * \sigma_Y}{\sigma_C} \right)^2 * \left(1 - \frac{\sigma_{Ak}}{\sigma_Y} \right)} \right] \quad (3.21)$$

$$\sigma_m = \frac{1159^2}{2 * 557,52} * \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 557,52}{1159} \right)^2 * \left(1 - \frac{1058}{557,52} \right)} \right]$$

$$\sigma_m = 709,27 \text{ N/mm}^2$$

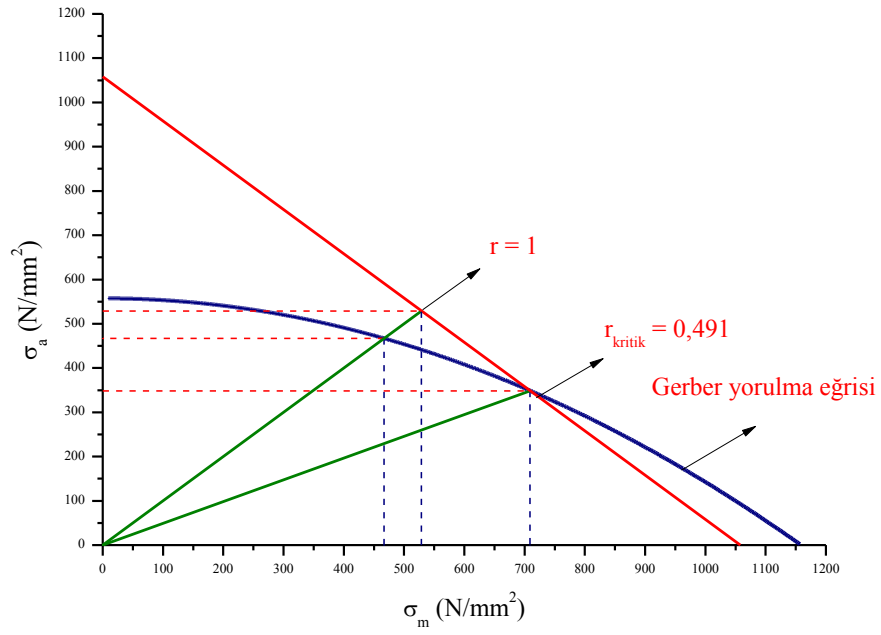
$$\sigma_a = \sigma_{Ak} - \sigma_m \quad (3.22)$$

$$\sigma_a = 1058 - 709,27$$

$$\sigma_a = 348,73 \text{ N/mm}^2$$

$$r_{\text{kritik}} = \frac{348,73}{709,27}$$

$$r_{\text{kritik}} = 0,491$$



Şekil 3.37. Gerber Teorik Yorulma Eğrisi

3.6.7. Goodman Eğrisi

Goodman denklemine göre aşağıdaki eşitlikler kullanılarak $r=1$ ve r_{kritik} değerleri için gerilme değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen veriler kullanılarak Şekil 3.38'deki Goodman Teorik Yorulma Eğrisi çizilmiştir.

$$\sigma_Y = 557,52 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_a = \frac{r * \sigma_Y * \sigma_C}{r * \sigma_C + \sigma_Y} \quad (3.23)$$

$$\sigma_a = \frac{1 * 557,52 * 1159}{1 * 1159 + 557,52}$$

$$\sigma_a = 376,43 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{r} \quad (3.24)$$

$$\sigma_m = \frac{376,43}{1}$$

$$\sigma_m = 376,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{Ak} - \sigma_Y) * \sigma_{\zeta}}{\sigma_{\zeta} - \sigma_Y} \quad (3.25)$$

$$\sigma_m = \frac{(1058 - 557,52) * 1159}{1159 - 557,52}$$

$$\sigma_m = 964,38 \text{ N/mm}^2$$

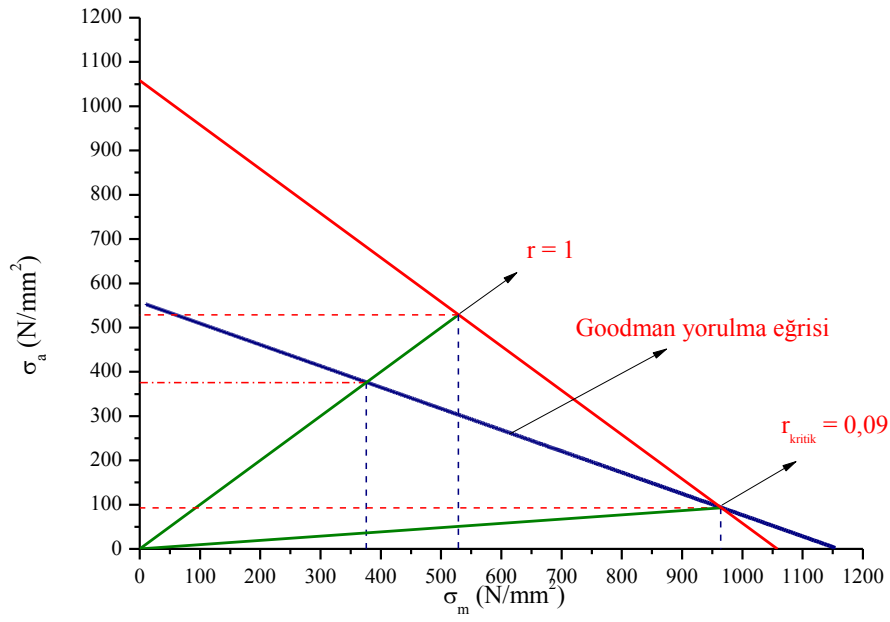
$$\sigma_a = \sigma_{Ak} - \sigma_m \quad (3.26)$$

$$\sigma_a = 1058 - 964,38$$

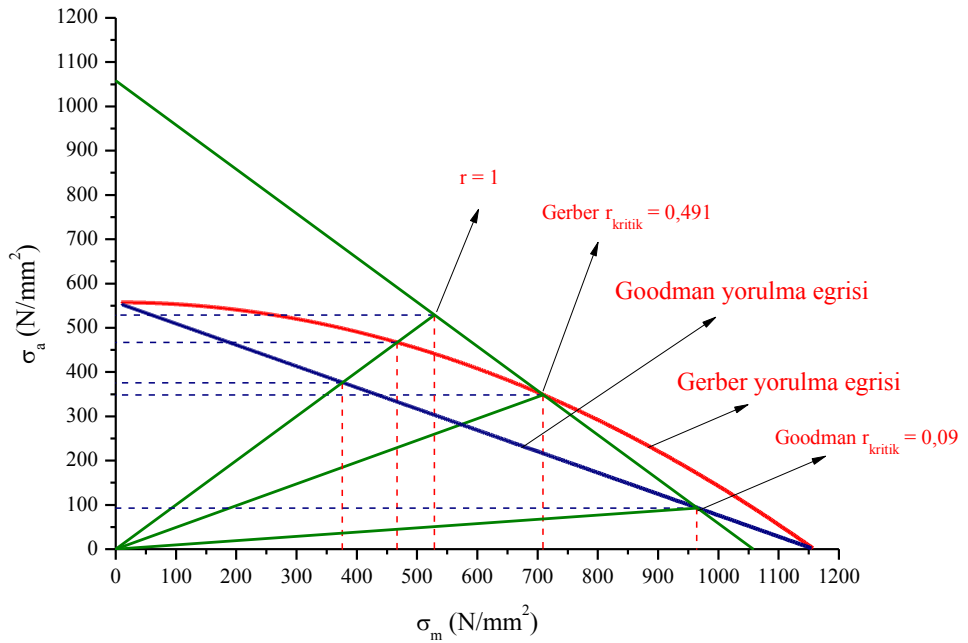
$$\sigma_a = 93,61 \text{ N/mm}^2$$

$$r_{\text{kritik}} = \frac{93,61}{964,38}$$

$$r_{\text{kritik}} = 0,09$$



Şekil 3.38. Goodman Teorik Yorulma Eğrisi



Şekil 3.39. Goodman-Gerber Teorik Yorulma Eğrisi

3.6.8. Kontrol Edilemeyen Faktör Etkili Gerilme Hesaplaması

L= 10 mm için

$$\sigma_{ao} = \frac{9,81 * 10 * 3,81 * 35 * 64}{\pi * 30 * 3,81^4}$$

$$\sigma_{ao} = 42,16 \text{ N/mm}^2$$

L= 50 mm için

$$\sigma_{ao} = 210,79 \text{ N/mm}^2$$

L= 100 mm için

$$\sigma_{ao} = 421,57 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = K_f * \sigma_{ao} \quad (3.27)$$

L= 10 mm için

$$\sigma_m = 1,48 * 42,16$$

$$\sigma_m = 62,40 \text{ N/mm}^2$$

L= 50 mm için

$$\sigma_m = 1,48 * 210,79$$

$$\sigma_m = 311,97 \text{ N/mm}^2$$

L= 100 mm için

$$\sigma_m = 1,48 * 421,57$$

$$\sigma_m = 623,92 \text{ N/mm}^2$$

3.6.9. Gerber Güvenlik Katsayısı Hesaplaması

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_m} \right)^2 * \frac{\sigma_a}{\sigma_Y} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * \sigma_m * \sigma_Y}{\sigma_c * \sigma_a} \right)^2} \right] \quad (3.28)$$

L= 10 mm için

$$n_f = \frac{1}{2} * \left(\frac{1159}{62,40} \right)^2 * \frac{62,40}{557,52} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 62,40 * 557,40}{1159 * 62,40} \right)^2} \right]$$

$$n_f = 7,48$$

L= 50 mm için

$$n_f = \frac{1}{2} * \left(\frac{1159}{311,97} \right)^2 * \frac{311,97}{557,52} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 311,97 * 557,40}{1159 * 311,97} \right)^2} \right]$$

$$n_f = 1,49$$

L= 100 mm için

$$n_f = \frac{1}{2} * \left(\frac{1159}{623,92} \right)^2 * \frac{623,92}{557,52} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 623,92 * 557,40}{1159 * 623,92} \right)^2} \right]$$

$$n_f = 0,748$$

3.6.10. Goodman Güvenlik Katsayısı Hesaplaması

$$n_f = \frac{\sigma_c * \sigma_Y}{\sigma_a * \sigma_c + \sigma_m * \sigma_Y} \quad (3.29)$$

L= 10 mm için

$$n_f = \frac{1159 * 557,52}{62,4 * 1159 + 62,4 * 557,52}$$

$$n_f = 6,03$$

L= 50 mm için

$$n_f = \frac{1159 * 557,52}{311,97 * 1159 + 311,97 * 557,52}$$

$$n_f = 1,21$$

L= 100 mm için

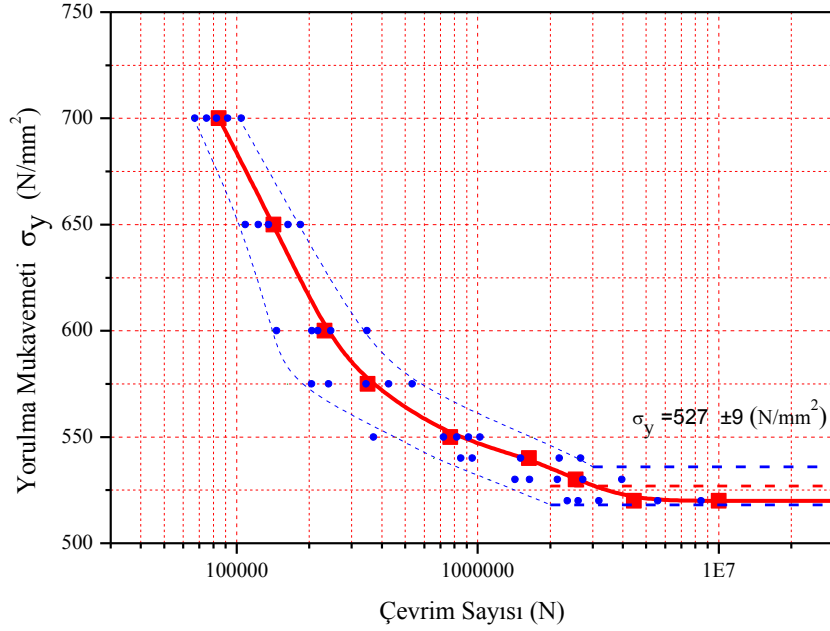
$$n_f = \frac{1159 * 557,52}{623,92 * 1159 + 623,92 * 557,52}$$

$$n_f = 0,60$$

4. BULGULAR

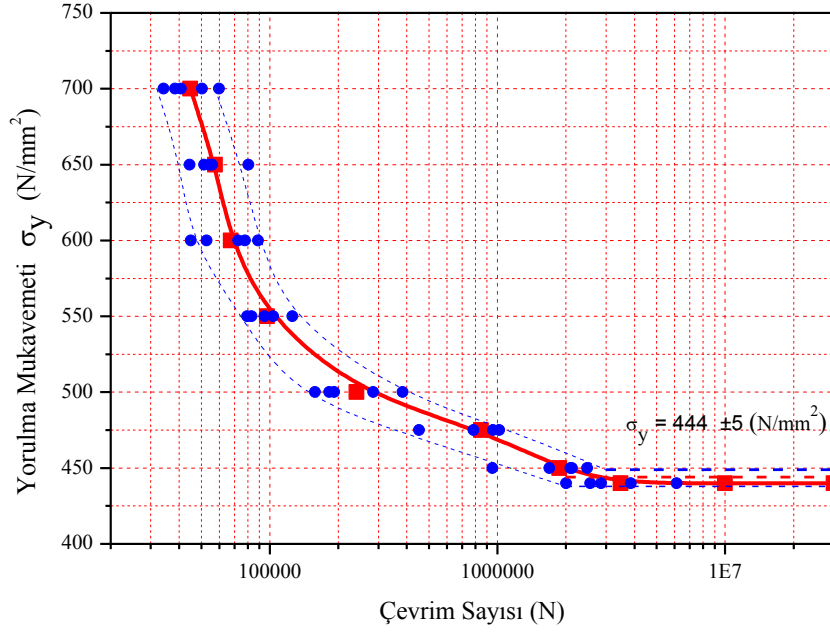
4.1. Wöhler Yorulma Eğrileri

Teorik hesaplamalar göz önünde bulunularak yapılan deneylerde, her gerilme değerinde beşer adet deney numunesi ile malzeme yorulma testine tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgular değerlendirilerek yorulma grafikleri oluşturulmuştur.



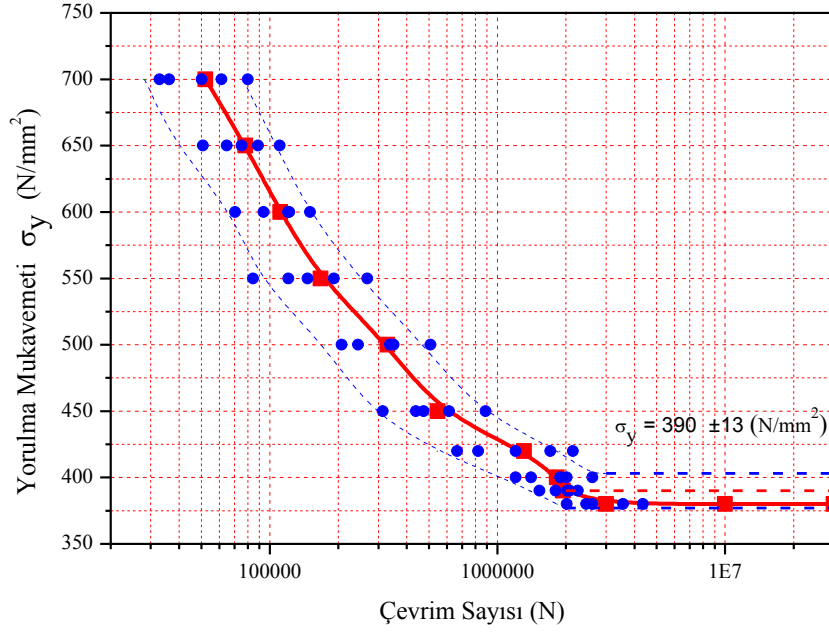
Şekil 4.1. Deneysel Yorulma Eğrisi

Dönel eğmeli ankastre test cihazında, 40 deney numunesi ile çekme veya basma ön gerilme etkisi olmadan sadece eğme gerilmesi etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri %95 güvenilirlikle Şekil 4.1 grafikte görüldüğü gibi 527 ± 9 N/mm^2 ve standart sapması 8 olarak elde edilmiştir [57], [58] [59], [60]. Deney sonuçlarına göre, her gerilme değeri için ortalama gerilme ve %95 güven aralığı istatistiksel olarak hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir. 520 N/mm^2 ortalama gerilmenin üzerindeki değerlerde malzeme hasara uğrarken, 520 N/mm^2 ortalama gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramamıştır.



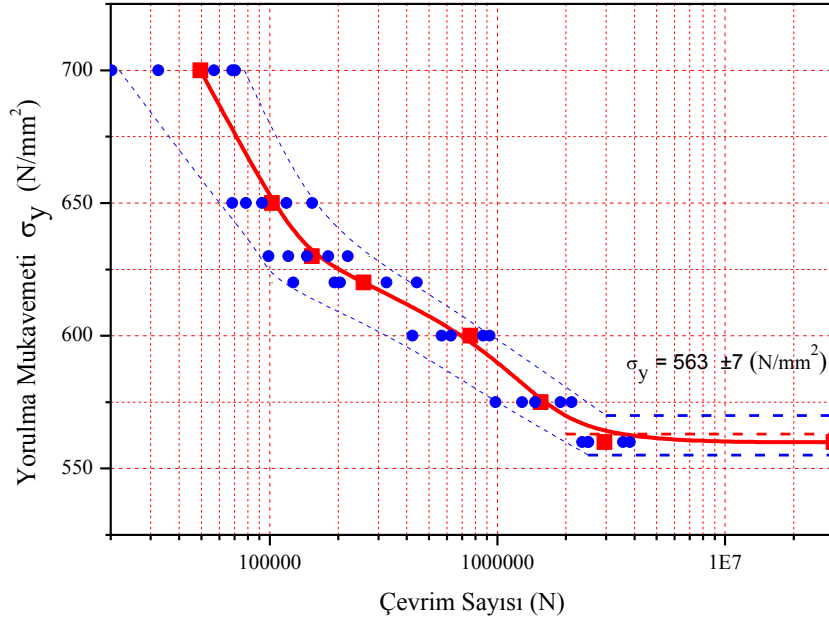
Şekil 4.2. 45 N/mm² Çekme Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi

Dönel eğmeli ankastre test cihazında 40 deney numunesi ile 45 N/mm² çekme ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri %95 güvenlilikle Şekil 4.2 grafikte görüldüğü gibi 444 ± 5 N/mm² ve standart sapması 5 olarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her gerilme değeri için ortalama gerilme ve %95 güven aralığı istatistiksel olarak hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir. 45 N/mm² çekme ön gerilme etkisi altında 440 N/mm² ortalama gerilmenin üzerindeki değerlerde malzeme hasara uğrarken, 440 N/mm² ortalama gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramamıştır. 45 N/mm² çekme ön gerilme etkisi altında malzemenin yorulma mukavemet değerinde 83 N/mm² bir azalma olmuştur. Şekil 4.1 grafik ile Şekil 4.2 grafik karşılaştırıldığında çekme ön gerilmesinin yorulma mukavemet değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca özellikle çekme ön gerilmesi düşük çevrim sayılarında malzemenin hasara uğramasına yol açmıştır. Elde edilen değerler incelendiğinde çekme ön gerilmesinin deney sonuçlarındaki saçılmayı azalttığı gözlemlenmiştir.



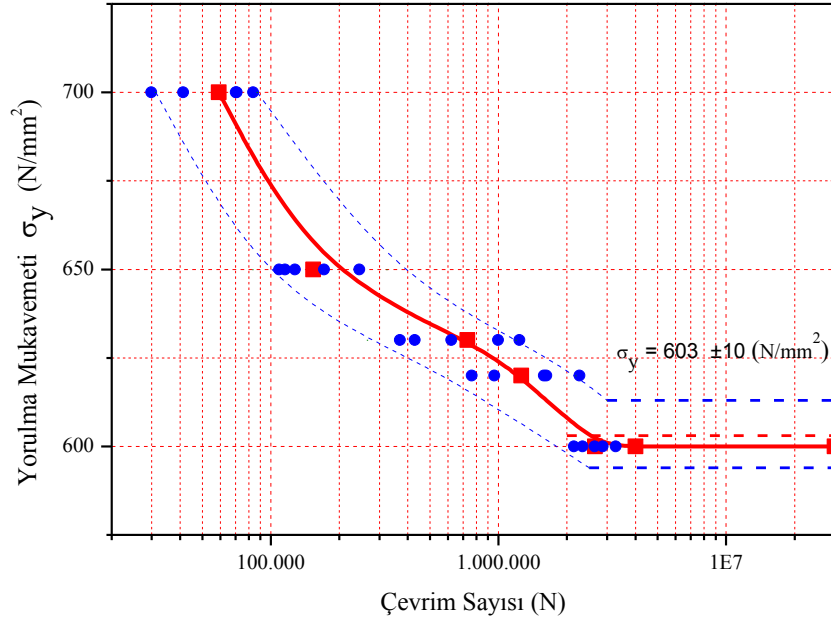
Şekil 4.3. 90 N/mm² Çekme Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi

Dönel eğmeli ankastre test cihazında 50 deney numunesi ile 90 N/mm² çekme ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri %95 güvenilirlikle Şekil 4.3 grafikte görüldüğü gibi 390 ± 13 N/mm² ve standart sapması 12 olarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her gerilme değeri için ortalama gerilme ve %95 güven aralığı istatistiksel olarak hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir. 90 N/mm² çekme ön gerilme etkisi altında 380 N/mm² ortalama gerilmenin üzerindeki değerlerde malzeme hasara uğrarken, 380 N/mm² ortalama gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramamıştır. 90 N/mm² çekme ön gerilme etkisi altında malzemenin yorulma mukavemet değerinde 137 N/mm² bir azalma olmuştur. Şekil 4.1 grafik, Şekil 4.2 grafik ve Şekil 4.3 grafik karşılaştırıldığında çekme ön gerilmesinin yorulma mukavemet değerini iyice düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca özellikle çekme ön gerilmesinin artmasıyla daha düşük çevrim sayılarında malzemenin hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde çekme ön gerilmesinin deney sonuçlarındaki saçılmayı azalttığı gözlemlenmiştir.



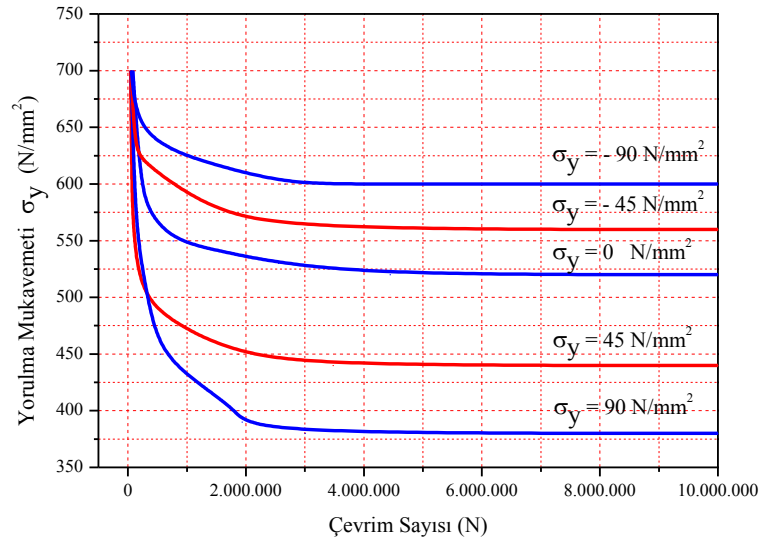
Şekil 4.4. 45 N/mm² Basma Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi

Dönel eğmeli ankastre test cihazında 35 deney numunesi ile 45 N/mm² basma ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri %95 güvenilirlikle Şekil 4.4 grafikte görüldüğü gibi 563 ± 7 N/mm² ve standart sapması 6 olarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her gerilme değeri için ortalama gerilme ve %95 güven aralığı istatistiksel olarak hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir. 45 N/mm² basma ön gerilme etkisi altında 560 N/mm² ortalama gerilmenin üzerindeki değerlerde malzeme hasara uğrarken, 560 N/mm² ortalama gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramamıştır. 45 N/mm² basma ön gerilme etkisi altında malzemenin yorulma mukavemet değerinde 36 N/mm² bir artış olmuştur. Şekil 4.1 grafik ile Şekil 4.4 grafik karşılaştırıldığında basma ön gerilmesinin yorulma mukavemet değerini arttırdığı, yüksek gerilme değerlerinde ise daha fazla çevrim sayısında malzemenin hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde basma ön gerilmesinin deney sonuçlarındaki saçılmayı azalttığı gözlemlenmiştir.



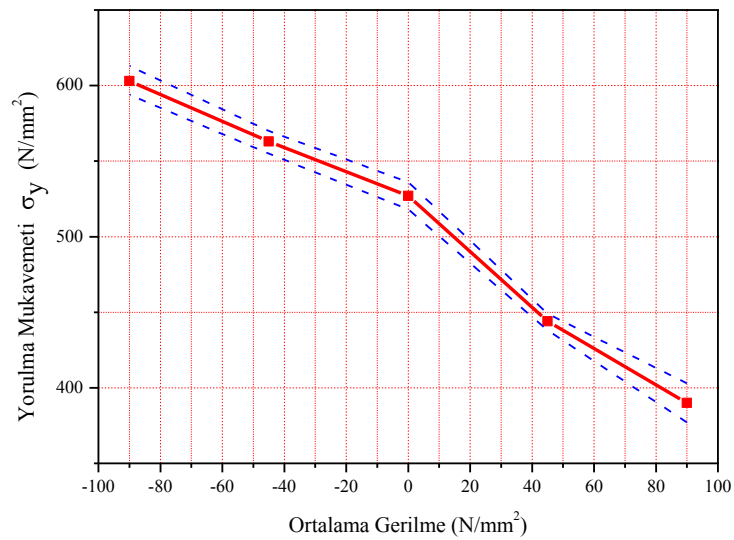
Şekil 4.5. 90 N/mm² Basma Ön Gerilmesi Etkisi Altında Yorulma Eğrisi

Dönel eğmeli ankastre test cihazında 25 deney numunesi ile 90 N/mm² basma ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri %95 güvenilirlikle Şekil 4.5 grafikte görüldüğü gibi 603 ±10 N/mm² ve standart sapması 7 olarak elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her gerilme değeri için ortalama gerilme ve %95 güven aralığı istatistiksel olarak hesaplanmış ve grafikte gösterilmiştir. 90 N/mm² basma ön gerilme etkisi altında 600 N/mm² ortalama gerilmenin üzerindeki değerlerde malzeme hasara uğrarken, 600 N/mm² ortalama gerilmede yapılan deneylerde malzeme hasara uğramamıştır. 90 N/mm² basma ön gerilme etkisi altında malzemenin yorulma mukavemet değerinde 76 N/mm² bir artış olmuştur. Şekil 4.1 grafik, Şekil 4.4 grafik ve Şekil 4.5 grafik karşılaştırıldığında basma ön gerilmesinin yorulma mukavemet değerini arttırdığı, yüksek gerilme değerlerinde ise belirgin bir şekilde daha fazla çevrim sayısında malzemenin hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde basma ön gerilmesinin, uygulanan gerilme ile doğru orantılı olmayacak şekilde yorulma mukavemet değerini arttırdığı gözlemlenmiştir.



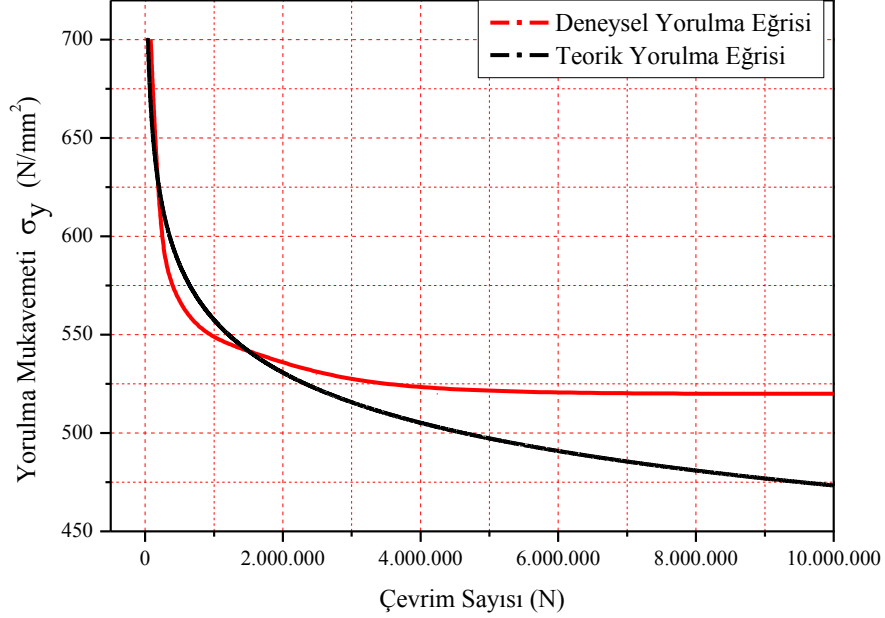
Şekil 4.6. Deneysel Yorulma Eğrileri

Yorulma mukavemet değerleri Şekil 4.6 grafik üzerinde incelendiğinde basma gerilmesiyle birlikte yorulma mukavemet değerinin arttığı, çekme gerilmesi uygulandığında ise yorulma mukavemet değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Basma gerilmesi uygulanan numunelerde düşük çevrim sayılarında yorulma mukavemet değerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Deneysel Yorulma Eğrileri Doğrusal Grafik

Yorulma mukavemet sınırında, Şekil 4.7'deki grafik incelendiğinde doğrusal olarak değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

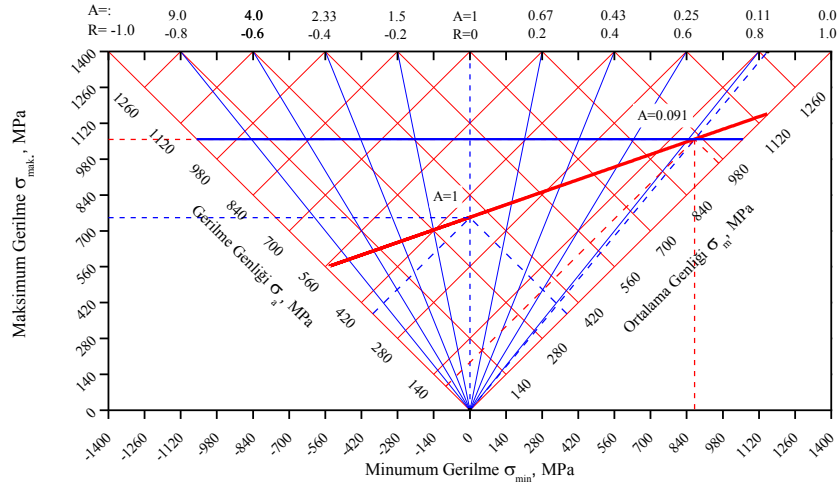


Şekil 4.8. Deneysel ve Teorik Yorulma Eğrisi

Yorulma mukavemet sınırı olarak Şekil 4.8'deki grafik incelendiğinde, teorik hesaplama ile deneysel çalışmada elde edilen değerler arasında fazla bir fark bulunmadığı gözlemlenmiştir. Teorik hesaplamada düşük tekrar sayılarında daha fazla yükleme değerleriyle malzeme yüklenebilirken deneysel çalışmada düşük çevrim sayılarında daha az yükleme yapılabildiği gözlemlenmiştir.

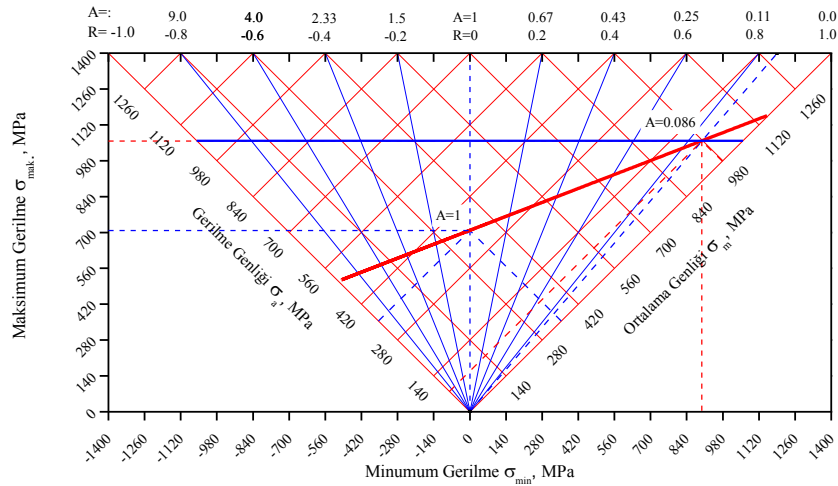
4.2 Goodman Master Diyagramları

Elde edilen mukavemet değerleri kullanılarak Goodman Master diyagramları oluşturulmuştur. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda $A = 1$ için $\sigma_m : 376 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_a : 376 \text{ N/mm}^2$ ve $R = 0$ için $\sigma_{\max} : 752 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{\min} : 0 \text{ N/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Kritik değer $A = 0,091$ için $\sigma_m : 964 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_a : 93 \text{ N/mm}^2$ ve $R = 0,82$ için $\sigma_{\max} : 1057 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{\min} : 871 \text{ N/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.9'da belirtilen Goodman Teorik Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.9. Goodman Teorik Master Diyagramı

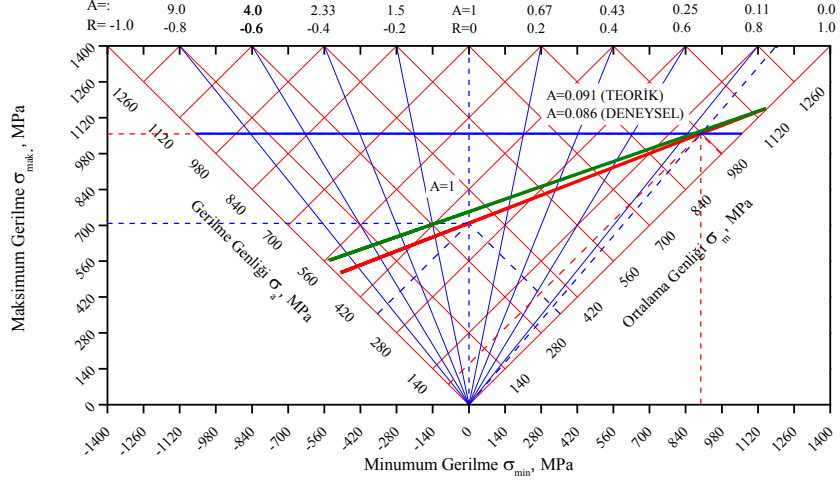
Yorulma deneyleri sonucu elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, $A=1$ için σ_m : 362 N/mm^2 , σ_a : 362 N/mm^2 ve $R=0$ için σ_{max} : 724 N/mm^2 , σ_{min} : 0 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Kritik değer $A=0,086$ için σ_m : 973 N/mm^2 , σ_a : 84 N/mm^2 ve $R=0,842$ için σ_{max} : 1057 N/mm^2 , σ_{min} : 890 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.10'da belirtilen Goodman Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.10. Goodman Deneysel Master Diyagramı

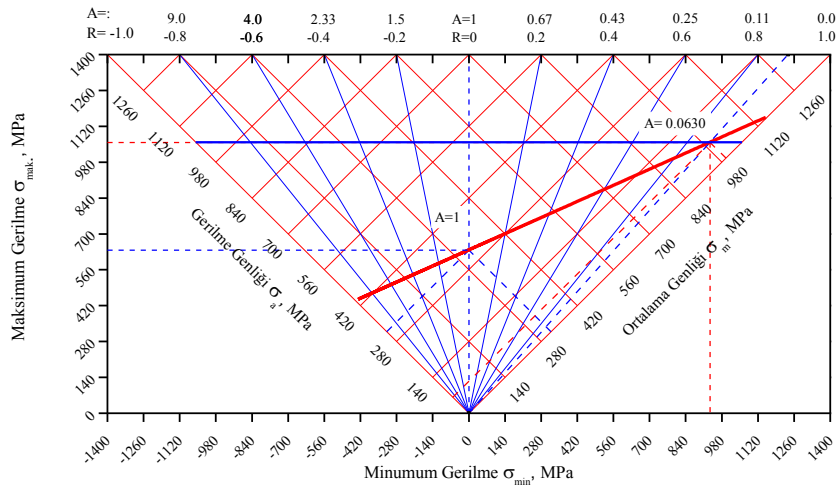
Deneysel olarak elde edilen verilerle σ_y : 527 N/mm^2 bulunurken, teorik olarak hesaplamada σ_y : 557 N/mm^2 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11'de belirtilen grafik

incelendiğinde, teorik hesaplama ile bulunan yorulma mukavemet değeri ile deneysel yorulma mukavemet değeri arasında %5,3'lük bir fark oluşmuştur.



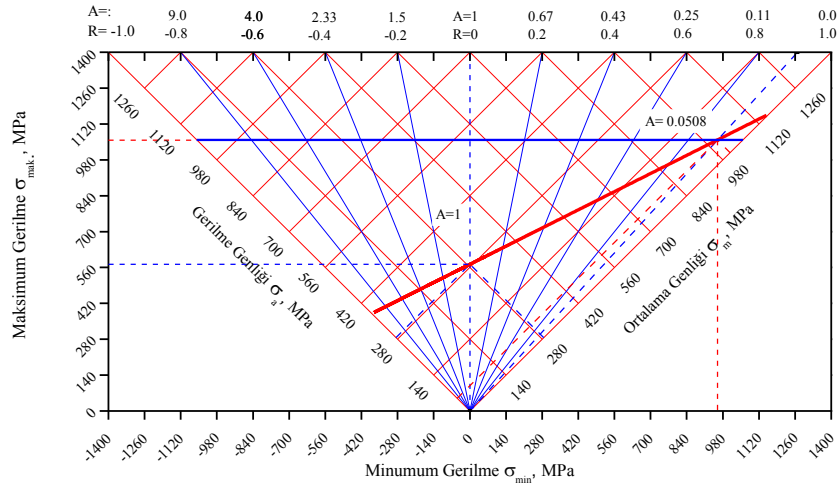
Şekil 4.11. Goodman Deneyisel-Teorik Master Diyagramı

45 N/mm² çekme gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A = 1 için σ_{\min} : 321 N/mm², σ_a : 321 N/mm² ve R = 0 için σ_{\max} : 642 N/mm², σ_{\min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,063 için σ_{\min} : 995 N/mm², σ_a : 62 N/mm² ve R = 0,881 için σ_{\max} : 1057 N/mm², σ_{\min} : 932 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.12’de belirtilen 45 N/mm² Çekme Gerilmeli Goodman Deneyisel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



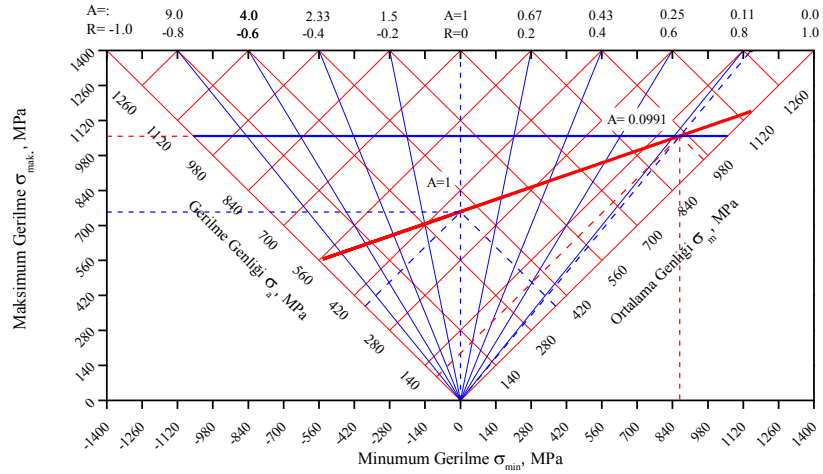
Şekil 4.12. 45 N/mm² Çekme Gerilmeli Goodman Master Diyagramı

90 N/mm² çekme gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A = 1 için σ_m : 291 N/mm², σ_a : 291 N/mm² ve R = 0 için σ_{max} : 583 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,051 için σ_m : 1006 N/mm², σ_a : 51 N/mm² ve R = 0,903 için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 955 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.13'te belirtilen 90 N/mm² Çekme Gerilmeli Goodman Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



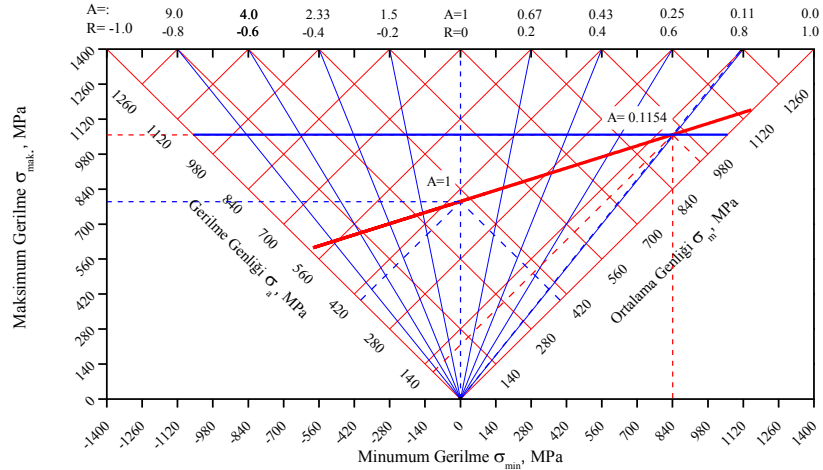
Şekil 4.13. 90 N/mm² Çekme Gerilmeli Goodman Master Diyagramı

45 N/mm² basma gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A = 1 için σ_m : 378 N/mm², σ_a : 378 N/mm² ve R = 0 için σ_{max} : 757 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,099 için σ_m : 962 N/mm², σ_a : 95 N/mm² ve R = 0,820 için σ_{ma} : 1057 N/mm², σ_{min} : 867 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.14'te belirtilen 45 N/mm² Basma Gerilmeli Goodman Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.14. 45 N/mm² Basma Gerilmeli Goodman Master Diyagramı

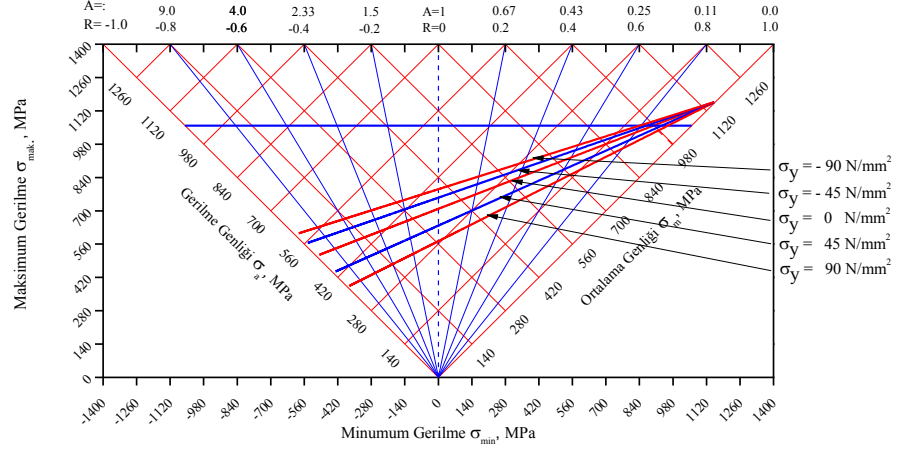
90 N/mm² basma gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, $A = 1$ için σ_m : 396 N/mm², σ_a : 396 N/mm² ve $R = 0$ için σ_{max} : 793 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer $A = 0,115$ için σ_m : 948 N/mm², σ_a : 109 N/mm² ve $R = 0,792$ için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 838 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.15'te belirtilen 90 N/mm² Basma Gerilmeli Goodman Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.15. 90 N/mm² Basma Gerilmeli Goodman Master Diyagramı

Çekme ve basma gerilmelerinin yorulma mukavemet değeri üzerindeki etkisinin gözlemlenmek maksadıyla, elde edilen veriler kullanılarak tüm grafiklerin bir arada

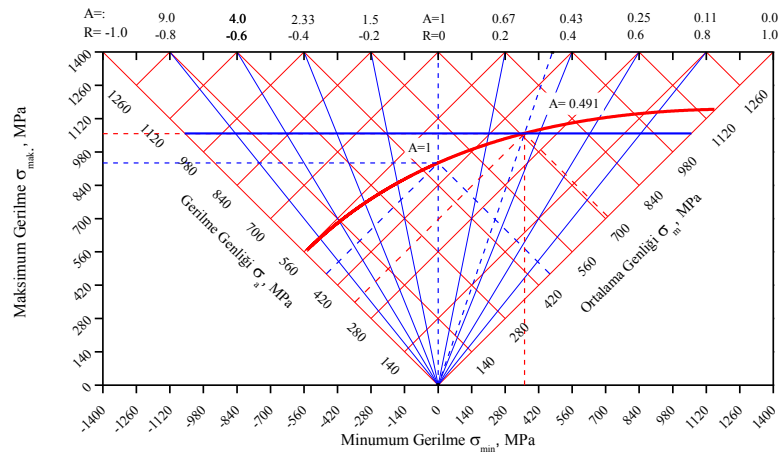
sunulduğu, Şekil 4.16’da belirtilen Goodman Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.16. Goodman Deneysel Master Diyagramı

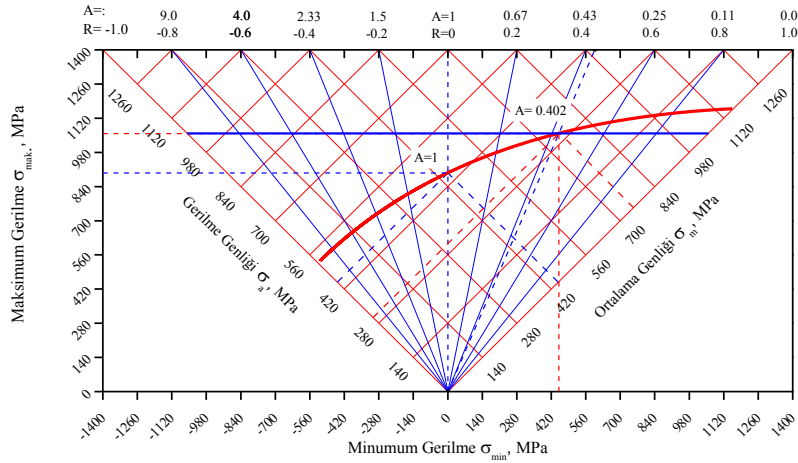
4.3. Gerber Master Diyagramları

Tasarımcılara farklı bir bakış açısı oluşturmak için, elde edilen mukavemet değerleri kullanılarak Gerber Master diyagramları oluşturulmuştur. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda $A=1$ için σ_m : 467 N/mm², σ_a : 467 N/mm² ve $R = 0$ için σ_{max} : 934 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer $A = 0,491$ için σ_m : 709 N/mm², σ_a : 348 N/mm² ve $R=0,341$ için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 361 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.17’de belirtilen Goodman Teorik Master Diyagramı oluşturulmuştur.



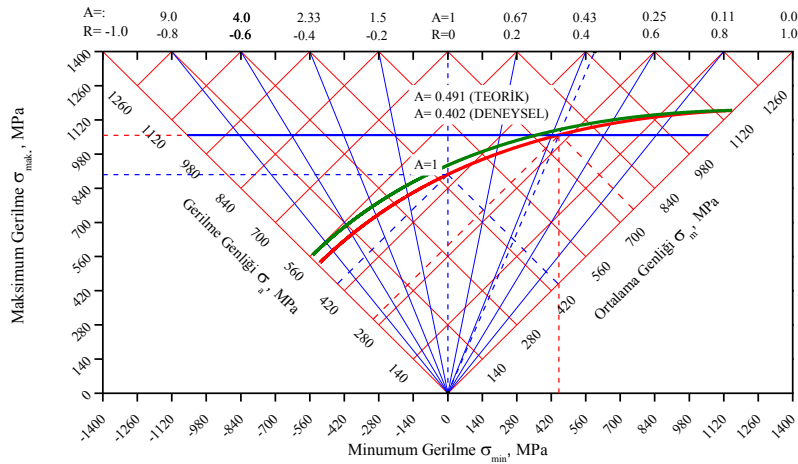
Şekil 4.17. Gerber Teorik Master Diyagramı

Yorulma deneyleri sonucu elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, $A=1$ için σ : 448 N/mm², σ_a : 448 N/mm² ve $R=0$ için σ_{max} : 896 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer $A = 0,402$ için σ_m : 754 N/mm², σ_a : 303 N/mm² ve $R=0,426$ için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 451 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.18’de belirtilen Gerber Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



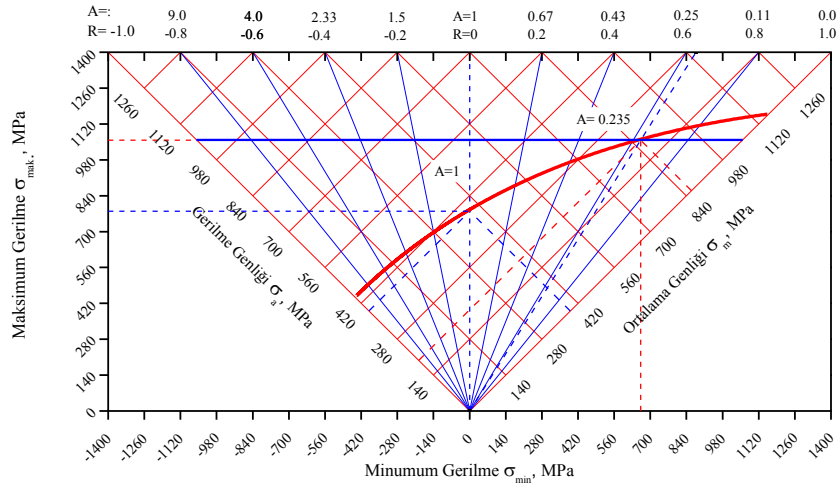
Şekil 4.18. Gerber Deneysel Master Diyagramı

Deneysel olarak elde edilen verilerle σ_y : 527 N/mm² bulunurken, teorik olarak hesaplamada σ_y : 557 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.19’da belirtilen grafik incelendiğinde, teorik hesaplama ile bulunan yorulma mukavemet değeri ile deneysel yorulma mukavemet değeri arasında %5,3’lük bir fark oluşmuştur.



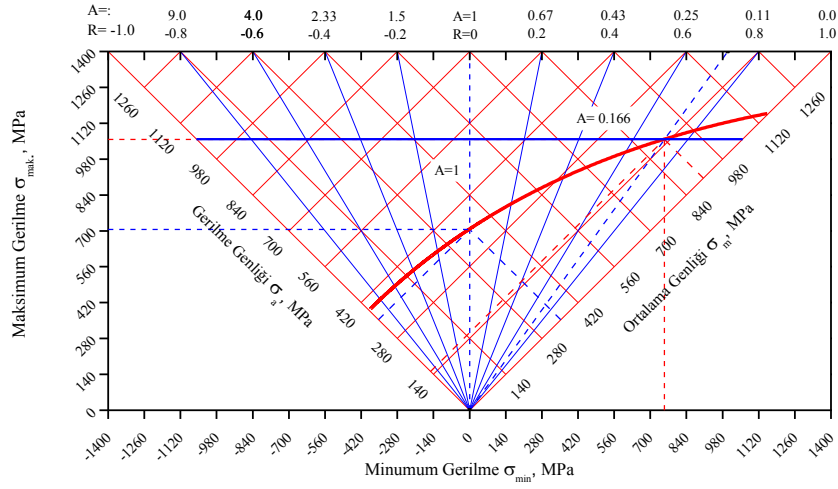
Şekil 4.19. Gerber Deneysel-Teorik Master Diyagramı

45 N/mm² çekme gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A=1 için σ_m : 392 N/mm², σ_a : 392 N/mm² ve R = 0 için σ_{max} : 785 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,235 için σ_m : 856 N/mm², σ_a : 201 N/mm² ve R = 0,619 için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 655 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.20’de belirtilen 45 N/mm² Çekme Gerilmeli Gerber Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



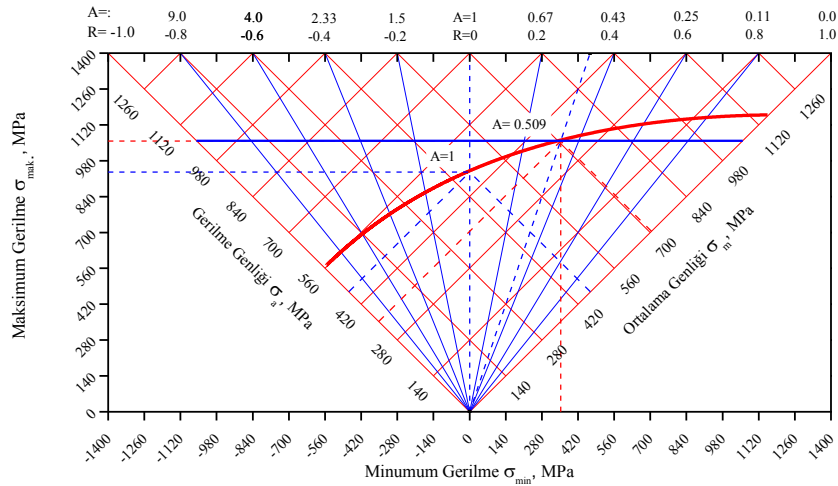
Şekil 4.20. 45 N/mm² Çekme Gerilmeli Gerber Master Diyagramı

90 N/mm² çekme gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A=1 için σ_m : 353 N/mm², σ_a : 353 N/mm² ve R = 0 için σ_{max} : 707 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,166 için σ_m : 906 N/mm², σ_a : 151 N/mm² ve R = 0,716 için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 757 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.21’de belirtilen 90 N/mm² Çekme Gerilmeli Gerber Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.21. 90 N/mm² Çekme Gerilmeli Gerber Master Diyagramı

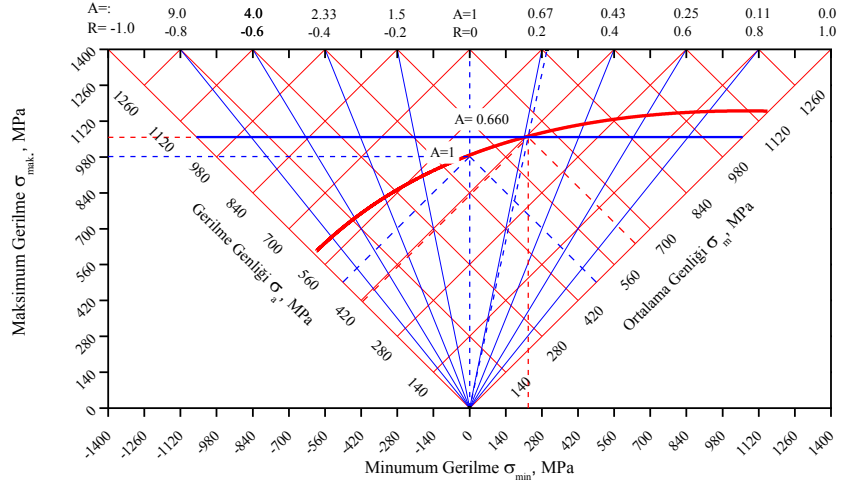
45 N/mm² basma gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A=1 için σ_m : 470 N/mm², σ_a : 470 N/mm² ve R = 0 için σ_{max} : 940 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,509 için σ_m : 700 N/mm², σ_a : 357 N/mm² ve R= 0,324 için σ_{max} : 1057 N/mm², σ_{min} : 343 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.22’de belirtilen 45 N/mm² Basma Gerilmeli Gerber Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.22. 45 N/mm² Basma Gerilmeli Gerber Master Diyagramı

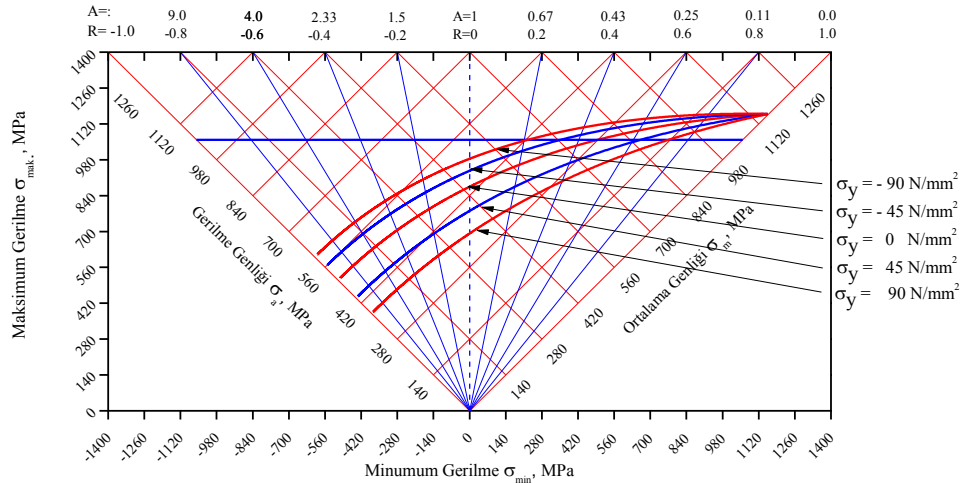
90 N/mm² basma gerilmesi etkisi altında elde edilen yorulma mukavemet değerleri ile yapılan hesaplamalarda, A=1 için σ_m : 493 N/mm², σ_a : 493 N/mm² ve R = 0 için σ_{max} : 987 N/mm², σ_{min} : 0 N/mm² olarak elde edilmiştir. Kritik değer A = 0,660 için

σ_m : 637 N/mm², σ_a : 420 N/mm² ve $R = 0,204$ için σ_{max} :1057 N/mm², σ_{min} : 216 N/mm² olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerle Şekil 4.23'te belirtilen 90 N/mm² Basma Gerilmeli Gerber Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.23. 90 N/mm² Basma Gerilmeli Gerber Master Diyagramı

Çekme ve basma gerilmelerinin yorulma mukavemet değeri üzerindeki etkisinin gözlemlenmek maksadıyla, elde edilen veriler kullanılarak tüm grafiklerin bir arada sunulduğu, Şekil 4.24'te belirtilen Gerber Deneysel Master Diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 4.24. Gerber Deneysel Master Diyagramı

5. TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada SAE 4140 çeliğinin bileşik gerilme etkisi altında yorulma davranışı incelenmiştir. SAE 4140 çeliği ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, yorulma deneylerinin genellikle dönel eğmeli ankastre tip yorulma cihazlarında yapılmaktadır. Numune üzerine dönme sırasında sabit çekme veya basma gerilmesi uygulanması sonucu yorulma gerilme değerinin değişimi ile ilgili fazla araştırma bulunmamaktadır. Yorulma çatlaklarının yüzeyde başladığı düşünüldüğünde yüzey tabakası büyük önem arz etmektedir. İmalat sırasında yüzey tabakasında oluşan çentikler kaldırılan talaş miktarı ve mikro sertlik yorulma ömrünü doğrudan etkilemektedir. Yüzey tabakasında oluşan değişimlerin, imalat aşamasında olduğu göz önüne alındığında son yüzey işleminin yapıldığı imalat yöntemi yorulma ömrü açısından çok önemlidir. Yüzey tabakasının oluşması sırasında son imalat aşamalarında kontrol edilemeyen faktörlerin minimum olması istenmektedir.

Bu çalışmada yorulma deneylerine başlamadan önce, deney sonuçları üzerine olumsuz etki edebilecek faktörleri azaltmak amacıyla dört talaşlı imalat yönteminin etkileri araştırılmış ve daha sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Dört işleme metodu arasında son pasoda kaldırılamayan talaş miktarının Şekil 3.20'de görüldüğü gibi 0,002 mm ile en az, CNC Torna tezgâhında iki ayna arasında yapılan üretim metodunda olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, numunenin iki ucundan rijit olarak bağlanması sonucu, kesme kuvvetlerinin üretim sırasında numune ekseninde oluşturduğu değişimin minimum olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Numunelerin son pasolarda bir sistematik içinde talaş kaldırılarak imalatlarının yapılması, kontrol edilemeyen faktörleri ve yorulma deney sonuçlarında oluşan dağılımları azaltmaktadır.

Mikro sertliğin, Şekil 3.21 incelendiğinde 381 HV sertlik ile en fazla CNC Ayna-ayna arasında yapılan üretim metodunda olduğu, en az mikro sertlik değişiminin ise 318 HV sertlik ile KTT Ayna-punta arasında yapılan imalatta olduğu gözlemlenmiştir. CNC Ayna-ayna arasında yapılan üretim metodunda mikro sertliğin yüksek olmasının nedeninin, imalat sırasında kontrol edilemeyen faktörlerin diğer yöntemlere göre daha az olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca dış

yüzeyde artan mikro sertliğin mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği ve yorulma ömrü artışına olumlu katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olarak Şekil 3.22 incelendiğinde, kopya torna tezgâhında yapılan üretim yöntemlerinde pürüzlülüğün fazla, CNC torna tezgâhında yapılan üretimlerde ise pürüzlülüğün az olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün farklı olması, yüzeyde farklı mekanik özelliklere sahip yüzey tabakalarının oluşmasına, bu farklılığın da gerilme yığılmalarına yol açtığı değerlendirilmektedir.

Yorulma deneylerinde oluşabilecek dağılımları en aza indirmek için dört üretim metodu araştırılmıştır. Araştırmalar neticesinde en iyi sonuçlar, CNC torna tezgâhında ayna-ayna arasında yapılan imalatla elde edilen numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedenleri, CNC torna tezgâhında üretim sırasında numunenin iki ucundan rijit olarak bağlanması, numune eksenini boyunca talaş kaldırmayı olumsuz etkileyen bir kuvvetin oluşmaması, tüm parça boyunca ilerlemenin sabit kalması ve iki aynanın da ayaklarının tornalanması sonucu ayna döndürme eksenini ile fener mili ekseninde sapmanın oluşmamasıdır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ön gerilmesiz olarak yapılan deneylerde yorulma mukavemet değeri $527 \pm 9 \text{ N/mm}^2$ elde edilmiştir. 45 N/mm^2 çekme ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri $444 \pm 5 \text{ N/mm}^2$, 90 N/mm^2 çekme ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde malzemenin yorulma mukavemet değeri $390 \pm 13 \text{ N/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Çekme ön gerilmesi etkisi altında malzemenin yorulma mukavemet değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. 45 N/mm^2 basma ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde, malzemenin yorulma mukavemet değeri $563 \pm 7 \text{ N/mm}^2$, 90 N/mm^2 basma ön gerilme etkisi altında yapılan deneyde malzemenin yorulma mukavemet değeri $603 \pm 10 \text{ N/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Basma ön gerilmesi etkisi altında ise yorulma mukavemet değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Çekme ön gerilmesi ile birlikte mukavemet değerinde oluşan azalmanın, çekme etkisiyle yüzeyde oluşan yorulma çatlaklarının daha hızlı ilerlemesi sonucu oluştuğu değerlendirilmektedir. Basma ön gerilmesi ile birlikte mukavemet değerinde oluşan artışın, basma etkisiyle yüzeyde oluşan yorulma çatlaklarının daha yavaş ilerlemesi sonucu oluştuğu değerlendirilmektedir.

Yorulma mukavemet değerleri kullanılarak elde edilen Goodman ve Gerber Master Diyagramları incelendiğinde, ön gerilmesiz yorulma deneyinde elde edilen verilere göre kritik A değeri, Goodman için $A= 0,086$ ve Gerber için $A= 0,402$ olarak elde edilmiştir. 45 N/mm^2 çekme gerilmesi etkisi altında kritik A değeri Goodman için $A= 0,063$ ve Gerber için $A= 0,235$, 90 N/mm^2 çekme gerilmesi etkisi altında kritik A değeri Goodman için $A= 0,051$ ve Gerber için $A= 0,166$ olarak elde edilmiştir. 45 N/mm^2 basma gerilmesi etkisi altında kritik A değeri Goodman için $A= 0,099$ ve Gerber için $A= 0,509$, 90 N/mm^2 basma gerilmesi etkisi altında kritik A değeri Goodman için $A= 0,115$ ve Gerber için $A= 0,660$ olarak elde edilmiştir. Basma ön gerilmesi ile birlikte gerilme genliği değerinin arttığı, çekme ön gerilmesi ile birlikte gerilme genliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek genlikli yüklemelerde Gerber Master Diyagramlarının, düşük genlikli gerime değerlerinde Goodman Master Diyagramlarının kullanılmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir. Gerilme genliğinin düşük, ortalama gerilmenin yüksek olduğu yüklemelerde Goodman Master Diyagramlarının kullanılmasının, sabit genlikli yüklemelerde ise Gerber Master Diyagramlarının kullanılmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Tauscher, H., Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, s. 7-33, MBEAE Matbaası, Gebze,1983.
2. Demirkol, M., Malzemelerin Mekanik Davranışı, s. 5-2, İTÜ Matbaası, İstanbul, 2004.
3. ASM Handbook Committee., Fatigue and Fractur Volume 19 ASM Handbook, s.148-1475, United States of America, 1997. .
4. McKeighan, P.C., Ranganathan, N., Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions, s. 26-34, ASTM International, United States of America, 2005.
5. Budynas, R.G., Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Desing, s.265-330, Higher Education, Singapore, 2011.
6. Almen, J.O., Black, P.H., Residual stresses and Fatigue in Metals, s. 8-78, New York, United States of America 1963.
7. Kalluri, S., Bonacuse, P.J., Multiaxial Fatigue and Deformation: Testing and Prediction, s.1-100, ASTM International, United States of America, 2000.
8. Lee, Y., Pan, J., Hathaway, R., Barkey, M., Fatigue Testing and Analysis, s. 57-103, Technology Rights Department in Oxford, UK, 2005.
9. Socie, D. F., Multiaxial Fatigue, University of Illinois at Urbana-Champaign, s.5-127, United States of America, 2005.
10. Reddy, A.V., Aeronautical and Engineering Component Failures, Part2 s. 1-67, New York, United States of America, 2004.
11. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R.R., Fuchs, H.O., Metal Fatigue in Engineering, s. 59-83, New York, United States of America 2000.
12. Schijve, J., Fatigue of Structures and Meterials, s. 310-487, New York, 2001.
13. Gladwell, G.M.L., Metal Fatigue, s. 15-81, Ontario, Canada, 2007.
14. Akyıldız,H.K., VidalarınTalaş Kaldırma ile İmalatında İmal Faktörlerinin Vidanın Yorulma Dayanımına Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2005.
15. Carpinteri, A., Freitas, M., Spagnoli, A., BiaxialMultiaxial Fatigue and Fracture, s. 83-143, Lisbon, Portugal, 2001.

16. E 1049 – 85, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis¹, ASTM International, United States of America, 1997.
17. E 468 – 90, Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials¹, ASTM International, United States of America, 2004.
18. E 739 – 91, Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data¹, ASTM International, United States of America, 2004.
19. Weibull, W., Fatigue Testing and Analysis of Results, s. 7-64, Pergamon Press, New York, United States of America, 1961.
20. Swanson, S.R., Handbook of Fatigue Testing, s. 19-72, ASTM International, United States of America, 1974.
21. WP 140 Fatigue Testing Machine, Mutiara Nata Abadi, <http://www.mutiaranata.com/product/detail/wp-140-fatigue-testing-machine>.
22. Rotating Bending Fatigue Test, <http://kstestmc.blogspot.com.tr>
23. Fatigue Testing – Sheet & Plate Bending (Flexural Fatigue), The VSS-40H.
24. E 1942 – 98, Standard Guide for Evaluating Data Acquisition Systems Used in Cyclic Fatigue and Fracture Mechanics Testing¹, ASTM International, United States of America, 2004.
25. E 467 – 98a, Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System¹, ASTM International, United States of America, 2004.
26. MT Serisi Düşük Kapasite Burma Test Cihazları, <http://www.instron.com.tr/tr-tr/products/testing-systems/torsion-systems/low-capacity>.
27. E 1823 – 96, Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing¹, ASTM International, United States of America, 2002.
28. E 606 – 92, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing¹, ASTM International, United States of America, 1993.
29. E 2368 – 04, Standard Practice for Strain Controlled Thermomechanical Fatigue Testing¹, ASTM International, United States of America, 2002.
30. E 2207 – 02, Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin - Walled Tubular Specimens¹, ASTM International, United States of America, 2002.

31. E 466 – 96, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials¹, ASTM International, United States of America, 2002.
32. Backstrom, M., Multiaxial Fatigue Life Assessment of Welds Based on Nominal and Hot Spot Stresses, s. 21-39, Espoo, Filland, 2003.
33. Kinyon, S., Hoepfner, David W., Mutoh, Y., Fretting Fatigue: Advances in The Basic Understanding and Applications, s. 35-45, United States of America, 2001.
34. Akkuş, A., Galvanizli ve Östenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynaklı Bağlantılarının Yorulma Dayanımlarının Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.
35. Öncel, E., Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 2011. .
36. Tan, O., Al-25 Zn-3Cu Alaşımının Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2013.
37. Saçkesen, İ., Yüksek Mukavemetli 7075 Alüminyum Alaşımının Yorulma ve Korozyon Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2007.
38. Genel, K., İyon Nitrürlenmiş AISI 4140 Çeliğinin Yorulma ve Korozyonlu Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000.
39. Subaşı, M., AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı ve Kalıcı Gerilme İlişkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2006.
40. Turan, M.Y., Mekanik Yüzey İşlemlerinin Yorulma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2011.
41. Akbulut, M., AISI 1045 Çeliğinin Yorulma Davranışı Üzerinde Mekanik Yüzey İşlemlerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2011.
42. Saygın, M., AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2006.
43. Kumru, N., Etial-141, 145 ve 160 Tipi Döküm Alüminyum ile Plaka Tipi Alüminyum Malzemeler için Yorulma Makinası Tasarımı ve Eğilmeli Yorulma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2007.
44. Sayaca, T., Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 2000 Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2010. .

45. Kovan, V., Oksit Dispersiyon Sertleştirmesi Yapılmış NiCr8020 Nikel Esaslı Süper Alaşımın Termomekanik Yorulma Davranışının Belirlenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2006.
46. Akyıldız, Hamza K., et al., Effects of Machining Parameters on Fatigue Behavior of Machined Threaded Test Specimens, *Material and Design*, 31 (2010) 1015-1022, 2009.
47. Novovic, D., et al., The Effect of Machined Topography and Integrity on Fatigue Life, *International Journal of Fatigue*, 44 (2004) 125-134, 2003.
48. Bayraktar, E., et al., Heat Treatment, Surface Roughness and Corrosion Effects on The Damage Mechanism of Mechanical Components in The Very High Cycle Fatigue Regime, *International Journal of Fatigue*, 31 (2009) 1532-1540, 2009.
49. Benedetti, M., et al., Multiaxial Fatigue Resistance of Shot Peened High-Strength Aluminum Alloys, *International Journal of Fatigue*, 61 (2014) 271-282, 2013.
50. Mercan, S., et al., Effect of Welding Parameters on The Fatigue Properties of Dissimilar AISI 2205–AISI 1020 Joined by Friction Welding, *International Journal of Fatigue*, 81 (2015) 78-90, 2015.
51. Nagarajan, V.R., et al., Influence of Dissolved Hydrogen on The Fatigue Crack Growth Behaviour of AISI 4140 Steel, *International Journal of Fatigue*, 62 (2014) 236-248 36, 2013.
52. Sirin,S.Y., et al., Effect of The Ion Nitriding Surface Hardening Process on Fatigue Behavior of AISI 4340 Steel, *Material Characterization*, 59 (2008) 351-358, 2007.
53. ASM Handbook Committee., *Mechanical Testing and Evaluations Volume 4* ASM Handbook, s.497-510, United States of America, 1991. 2000.
54. ASM Handbook Committee., *Mechanical Testing and Evaluations Volume 8* ASM Handbook, s.1571-1827, United States of America, 2000.
55. Kaya, M.T., Akyıldız, H.K., Livatyalı, H., Yorulma Deney Numunesinde İmalat Yöntemlerinin Deney Numunesi Üzerine Etkileri, *Utis 2010*, 343-355, Konya, 2010.
56. Murakami, Y., *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, s. 35-55, Amsterdam, The Netherlands, 2002.
57. Bülbül, S. E., *Çözümsel İstatistik*, s. 367-494, Alfa Basım Yayın Dağıtım, İstanbul, 2001.

- 58.** Erbaş, S.O., Olmuş, H., Deney Düzenleri ve İstatistik Analizleri,s.69-268, Gazi Kitapevi, Ankara, 2006.
- 59.** Gürsakal, N., Çıkarımsal İstatistik, s. 337-426, Dora Yayınevi, Bursa, 2013.
- 60.** Ross, S.M., Mühendisler ve Fenciler için Olasılık ve İstatistiğe Giriş, s.353-473, Nobel, Ankara, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Balıkesir ili Edremit ilçesi Tahtakuşlar köyünde dünyaya gelmiştir. İlk ve orta öğrenimini Güre ilköğretim okulunda lise öğrenimini Balıkesir Teknik Lisesinde, lisans eğitimini Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümünde tamamlamıştır. 2001-2014 yılları arası Balıkesir Astsubay Meslek Yüksek Okulu Mekatronik Öğretim Elemanı olarak görev yapmıştır. 2014 genel atamaları ile Genelkurmay Başkanlığına atanmıştır. Halen Genelkurmay Başkanlığına bağlı ODTÜ-TSK MODSİMMER’de görev yapmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.

İletişim Bilgileri

Adres : Genelkurmay Başkanlığı- Kızılay Çankaya/ANKARA

Telefon : (534) 440 88 36

E-posta : mehmettuncaykaya@yahoo.com.tr