

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**TEKRARLI YORULMA YÜKLERİ ALTINDA ÇALIŞAN
KARDAN MİLİ BİRİM PARÇASININ
KARAKTERİZASYONU VE HASAR ANALİZİ**

Onur AKKAŞ

**Danışman
Doç. Dr. Osman ÇULHA**



MANİSA-2019

TEZ ONAYI

Onur AKKAŞ tarafından hazırlanan "**Tekrarlı Yorulma Yükleri Altında Çalışan Kardan Mili Birim Parçasının Karakterizasyonu ve Hasar Analizi**" adlı tez çalışması 23/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Doç. Dr. Osman ÇULHA
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Hülya DURMUŞ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Metin YURDDAŞKAL
Dokuz Eylül Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Onur AKKAŞ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLO DİZİNİ	IX
TEŞEKKÜR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	4
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Kardan Milleri	5
2.1.1. Giriş	5
2.1.2. Kardan Mili Yerleşimi	6
2.1.3. Kardan Mili Konstrüksiyonu	7
2.1.4. Kardan Milinin Temel Görevleri	8
2.1.4.1. Döndürme Momenti İletimi	8
2.1.4.2. Devir İletimi	8
2.1.4.3. Açısal Değişkenlik	8
2.1.4.4. Boy Değişkenlikleri	9
2.1.5. Kardan Mili Uygulama Detayları	9
2.1.5.1. Dayanıklılık.....	9
2.1.5.2. Döndürme Momenti Kapasitesi	10
2.1.5.3. Kardan Mili Devri	11
2.1.5.4. Mafsal Açısı	11
2.1.5.5. Boy Değişimi	12
2.1.5.6. Bağlantı Detayları	12
2.1.6. Kardan Mili Doğrulama Testleri.....	15
2.1.6.1. Statik Torsiyon Testi	16
2.1.6.2. Torsiyonel Yorulma Testi	16
2.1.6.3. Dinamik Dayanıklılık Testi.....	17
2.1.6.4. Çamur Testi ve Soğuk-Sıcak Testleri	18
2.2. Yorulma Olayı	20
2.2.1. Giriş	20
2.2.2. Çevrimsel Gerilmeler.....	21
2.2.3. S-N Eğrisi	23
2.2.4. Çatlak Oluşumu ve ilerlemesi.....	27
2.2.5. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler	30
2.2.5.1. Ortalama Gerilme	31
2.2.5.2. Yüzey Etkisi	31
2.2.5.3. Tasarıma Ait Faktörler	32
2.2.5.4. Yüzey İşlemleri	33
2.2.5.5. Çevresel Etkiler	35
2.2.5.3.1. Isıl Yorulma	35
2.2.5.3.2. Korozyonlu Yorulma	36
2.3. Hasar Analizi	38
2.3.1. Giriş	38
2.3.2. Teknolojik Hatalar	40

2.3.2.1. Tasarım Sırasında Yapılan Hatalar	40
2.3.2.2. Malzeme İçindeki Hatalar	41
2.3.2.3. İmalat Sırasında Yapılan Hatalar	41
2.3.2.4. Montaj Hataları	41
2.3.2.5. Uygun Olmayan Çalışma Şartları	42
2.3.3. Hasar Analizi Safhaları	42
2.3.3.1. Geçmişle İlgili Bilgi Toplamak ve Numunelerin Seçimi.....	44
2.3.3.1.1. Çalışma Geçmişi.....	44
2.3.3.1.2. Fotoğraf Kayıtları	45
2.3.3.1.3. Numunelerin Seçimi.....	45
2.3.3.1.4. Çalışma Şartları	45
2.3.3.2. Hasara Uğramış Parçanın Ön Etüdü	46
2.3.3.2.1. Gözle Muayene.....	46
2.3.3.2.2. Fotoğrafların Çekilmesi.....	47
2.3.3.3. Tahribatsız Deneyler	47
2.3.3.3.1. Manyetik Tozla Muayene.....	48
2.3.3.3.2. Penetran Sıvıyla Muayene	49
2.3.3.3.3. Girdap Akımıyla Muayene	50
2.3.3.3.4. Ultrasonik Muayene	50
2.3.3.3.5. Radyografi	51
2.3.3.3.6. Akustik Yayınımın Muayene.....	51
2.3.3.3.7. Deneysel Gerilme Analizi	52
2.3.3.4. Mekanik Deneyler	53
2.3.3.5. Kırık Yüzeylerinin Seçimi, Muhafazası ve Temizlenmesi	54
2.3.3.5.1. Temizleme	54
2.3.3.5.2. Kesme	55
2.3.3.5.3. Sekonder Çatlakların Açılması.....	56
2.3.3.6. Kırılma Yüzeylerinin Makroskobik İncelenmesi.....	56
2.3.3.7. Kırılma Yüzeylerinin Mikroskopik Etüdü	57
2.3.3.7.1. Optik Mikroskop	57
2.3.3.7.2. Transmisyon Elektron Mikroskobu.....	58
2.3.3.7.3. Tarayıcı Elektron Mikroskobu	58
2.3.3.8. Metalografik Kesitlerin Seçimi ve Hazırlanması.....	58
2.3.3.9. Metalografik Kesitlerin Etüdü ve Analizi	59
2.3.3.10. Kırılma Tipinin Saptanması	60
2.3.3.11. Kimyasal Analiz.....	60
2.3.3.12. Kırılma Mekanizmasının Uygulanması	60
2.3.3.13. Benzer Çalışma Koşulları Altında Deney	61
2.3.3.14. Delillerin Analizi, Sonuçlar ve Hasar Raporu.....	61
3. DENEYSEL KISIM.....	64
3.1. Numune Üretim Aşamaları Materyal ve Yöntem	64
3.1.1. Çatallı Flanş Dövme Prosesi.....	64
3.1.2. Isıl İşlem Prosesi	67
3.2. Yorulma Testi Materyal ve Yöntem.....	69
3.3. Hasar Analizi Materyal ve Yöntem.....	69
3.3.1. Kimyasal Analiz	69
3.3.2. Sertlik Ölçümü.....	70
3.3.3. Metalografik Analiz.....	73
3.3.4. Kırık Yüzey Analizi ve Malzeme Karakterizasyonu	75
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	77

4.1. Kimyasal Analiz	77
4.2. Sertlik Ölçümü	78
4.3. Metalografik Analiz	83
4.4. Kırık Yüzey Analizi	92
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	112



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

µm	Mikrometre
A	Uzama
AISI	Amerikan demir çelik enstitüsü
Al	Alüminyum
ASTM	Amerikan malzeme ve test derneği
C	Karbon
CCT	Sürekli soğuma dönüşümü
cm	Santimetre
Cr	Krom
Cu	Bakır
d	Yarıçap
DEFAM	Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi
dk	Dakika
EDS	Enerji Dispersiv Spektrum
EN	Euro Norm
G	Tane Boyutu
HBW	Brinell sertlik değeri
HRC	Rockwell sertlik değeri
HV	Vickers sertliği
ISO	Uluslararası Standart Organizasyonu
km	Kilometre
L	Kardan milinin araç üzerindeki montaj boyu
max	Maksimum
min	Minimum
mm	Milimetre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Megapascal
N	Çevrim sayısı
N	Newton
Ni	Nikel

P	Fosfor
P	Hasar olasılığı
R	Gerilme oranı
R_e	Akma değeri
R_m	Çekme değeri
S	Kükürt
SAE	Otomotiv mühendisleri birliği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
S-N Eğrisi	Stres – Çevri sayısı eğrisi
sn	saniye
t	Et kalınlığı
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TS	Türk Standartları
TTT	Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm
Z	Kesit daralması
α₁	Isıl genleşme katsayısı
β	Mafsal açısı
ΔT	Sıcaklık değişimi
E	Elastik modülü
σ	Gerilme miktarı
σ_{maks}	Maksimum çekme gerilmesi
σ_{min}	Minimum çekme gerilmesi
σ_{ort}	ortalama gerilme

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. BMW 520D araç yerleşimi	5
Şekil 2.2. Kardan mili yerleşiminin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.3. Çeşitli araç konfigürasyonları için kardan mili yerleşimleri.....	7
Şekil 2.4. Kardan mili mafsal ve kayıcı takım kompleleri.....	8
Şekil 2.5. Binek otomobillerde kardan mili türleri	13
Şekil 2.6. Orta ve ağır ticari araçlarda kullanılan kardan millerinin genel konstrüksiyonu	13
Şekil 2.7. Çatallı flanş	14
Şekil 2.8. Çatallı flanş bağlantı çeşitleri.....	14
Şekil 2.9. Çatallı flanş cıvata bağlantı detayları.....	15
Şekil 2.10. Statik torsiyon test cihazı	16
Şekil 2.11. Torsiyonel Yorulma Test Cihazı.....	17
Şekil 2.12. Dinamik dayanıklılık test cihazı	18
Şekil 2.13. Çamur test cihazı	18
Şekil 2.14. Klimatik kabin test cihazı	19
Şekil 2.15. Yorulma hasarına yol açan gerilmenin zamanla değişimi	22
Şekil 2.16. Çevresel eğme yorulma deneyinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.17. Logaritmik olarak hasarın çevrim sayısına göre değişimi	24
Şekil 2.18. Bir 7075-T6 alüminyum alaşımı için farklı hasar olasılıklarını gösteren S-N eğrileri	25
Şekil 2.19. Yaklaşık 30 HRC sertliğindeki AISI 1040 malzemedan yapılmış kamalı geçme şaftın çevresel eğme yorulma kırılması	27
Şekil 2.20. 2024-T3 alüminyum sac malzemede yük uygulama karakteristiğine göre oluşan ince yorulma çizgileri (striasyon) taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.....	28
Şekil 2.21. Yorulma kırık yüzeyi.	29
Şekil 2.22. Ortalama gerilmenin S-N eğrisi üzerinde olan etkisinin gösterilmesi ..	30
Şekil 2.23. Yüzey işleminin yorulma dayanımına etkisi	31
Şekil 2.24. Tasarımda değişikliklerle, gerilme yığılması etkisinin nasıl azaltılacağını gösteren şema	32
Şekil 2.25. Bilya püskürtme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış çeliklere ait şematik S-N eğrileri	33
Şekil 2.26. Kabuk sertleştirme işlemi uygulanmış bir çeliğin çekirdek (altta) ve kabuk (üstte) bölgelerini gösteren mikroyapı fotoğrafı	34
Şekil 2.27. Çevresel değişikliklerin çeliğin yorulma dayanımına etkisi.....	35
Şekil 2.28. The New York Times gazetesinde Neal Boenzi tarafından çekilen bir tanker kazası	36
Şekil 2.29. 28 Nisan 1988 tarihli Boeing 737-200 tipi uçak kazası.....	37
Şekil 2.30. Hasar analizi safhaları	41
Şekil 3.1. 41Cr4 malzeme özellikleri	62
Şekil 3.2. Kapalı kalıpta çapaklı dövme işlemi.....	63
Şekil 3.3. Dövme sonrası çatallı flanş nihai şekli	64
Şekil 3.4. Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı	65
Şekil 3.5. Sürekli soğuma dönüşüm diyagramı.....	65
Şekil 3.6. Örnek torsiyonel yorulma test cihazı	66
Şekil 3.7. Metal Spektrometre cihazı	67

Şekil 3.8. Otomatik kesme cihazı.....	67
Şekil 3.9. Sıcak kalıplama cihazı	67
Şekil 3.10. Zımparalama ve parlatma cihazı	68
Şekil 3.11. Hammadde numunesi	68
Şekil 3.12 Vickers sertlik cihazı	68
Şekil 3.13 Brinell sertlik cihazı.....	69
Şekil 3.14. Hammadeden alınan numune.....	70
Şekil 3.15. Hammadeden alınan inklüzyon inceleme numunesi.....	70
Şekil 3.16. Yorulma testi sonrası kırılan çatalı flanştan alınan numune.....	70
Şekil 3.17. Nikon MA100 metal mikroskopu ve Clemex görüntüleme yazımı.....	71
Şekil 3.18. Taramalı elektron mikroskopu.....	71
Şekil 3.19. Yorulma testi sonrası kırılan çatalı flanşın incelenen kırık yüzeyi.....	72
Şekil 4.1. Kimyasal analiz numunesi	73
Şekil 4.2. Çatalı flanş çelik hammaddesi sertlik taraması ve yüzey sertliği numuneleri.....	74
Şekil 4.3. Çatalı flanş çelik hammaddesinin vickers test cihazı ile yüzey sertlik taraması	75
Şekil 4.4. Çatalı flanş çelik hammaddesi brinell test cihazı ile yüzey sertliği ölçümü.....	76
Şekil 4.5. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatalı flanşın hasar görmemiş kısmından alınan numune	76
Şekil 4.6. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatalı flanş mikro Vickers sertlik taraması grafiği	77
Şekil 4.7. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatalı flanş Brinell yüzey sertlik ölçüm grafiği.....	78
Şekil 4.8 Çatalı flanş hammaddesi inklüzyon analiz numunesi.....	79
Şekil 4.9. Çatalı flanş hammaddesinden alınan numunenin inklüzyon görüntüleri.....	80
Şekil 4.10. Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrasında alınan çatalı flanş numunesi	81
Şekil 4.11 Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrasında çatalı flanş birim parçasından alınan numunenin inklüzyon analizi.....	82
Şekil 4.12. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatalı flanş numunesi yüzeyindeki yorulma sebebiyle ortaya çıkan yorulma çizgileri.....	83
Şekil 4.13. Çatalı flanş hammaddesinden alınan mikroyapı numunesi	83
Şekil 4.14. Çatalı flanş birim parçasının hammaddesi olan 41Cr4 kalite çeliğin metal mikroskopu ile metalografik analizi.....	85
Şekil 4.15. Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrası çatalı flanş birim parçası numunesi	86
Şekil 4.16. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testinden çıkan çatalı flanş mikroyapı görüntüleri	87
Şekil 4.17. Çatalı flanş hammaddesi olan 41Cr4 çelik çubuk parlatılmış halde inklüzyon SEM görüntüleri	89
Şekil 4.18. Çatalı flanş hammaddesi olan 41Cr4 çelik çubuğun parlatılmış halde inklüzyon SEM-EDS Elemental analizi	91
Şekil 4.19. Çatalı flanş hammaddesi olan 41Cr4 çelik çubuğun parlatılmış halde inklüzyon SEM-EDS Elemental analizi	94
Şekil 4.20. Yorulma testinden sonrası kırılan kardan mili çatalı flanş kırık yüzey inceleme numunesi	95

Şekil 4.21. Yorulma testi sonrası kırılan çatallı flanşın SEM analiz görüntüsü	97
Şekil 4.22. Yorulma testi sonrası kırılan çatallı flanş numunesinin EDS Elemental analizi	99
Şekil 5.1. Pantazopoulos ve arkadaşlarının Ø14 mm çapındaki inşaat çeliği örneklerinin yorulma testi sonrasında yapılan hasar analizi çalışması	103
Şekil 5.2. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin şematik diyagramı.....	104



TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. 41Cr4 malzeme özellikleri.....	61
Tablo 3.2. Hammaddenin kütlece kimyasal kompozisyonu	63
Tablo 3.3. Islah ısı işlem parametreleri.....	64
Tablo 3.4. Mikro vickers sertlik taraması	68
Tablo 3.5 Brinell sertlik testi.....	69
Tablo 4.1. Kimyasal analiz kütlece yüzde sonuçları.....	74
Tablo 4.2 Çatallı flanş çelik hammaddesi sertlik taraması, mikro Vickers sertlik taraması ve Brinell yüzey sertlik ölçümleri	75
Tablo 4.3. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatallı flanş mikro Vickers sertlik taraması ve Brinell yüzey sertlik ölçümü	77
Tablo 4.4. TS EN ISO 10083-3 standartına göre Su verilmiş temperlenmiş haldeki 41Cr4 çelik kalitesinin mekanik özellikleri.....	79
Tablo 4.5 ASTM E45 Metot A ya göre inklüzyon tayini	81

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında vebana destek olan, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim ve çalışma hayatımın tüm aşamasında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tanımaktan ve birlikte çalıőmaktan büyük onur duyduğum sevgili hocam Sn. Doç. Dr. Osman ÇULHA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamında firmanın olanaklarını değerlendirmeme imkân veren ve bünyesinde çalıőmaktan gurur duyduğum Tirsan Kardan San. ve Tic. A.Ő 'ye; bu çalışmanın her aşamasında bana rehberlik eden, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen yöneticim Sn. Efe IŞIK 'a; bu çalışmanın tamamlanmasında yardımlarını esirgemeyen Sn. Ercan GÜNERİ 'ye ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca bana destek olan, yol gösteren ve değerler kazandıran sevgili babama, anneme ve kardeőime sonsuz teşekkür ederim.

Varlığı ile hayatımı anlamlandıran ve değer katan, her anımda beni motive eden ve destekleyen, benden sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eőime ve değerli oğluma teşekkürlerimi sunarım.

Onur AKKAŞ
Manisa, 2019

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Tekrarlı Yorulma Yükleri Altında Çalışan Kardan Mili Birim Parçasının Karakterizasyonu ve Hasar Analizi

Onur AKKAŞ

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Osman ÇULHA

Arkadan itişli araçlarda motordan aldığı gücü arka diferansiyel ve aks mili yardımı ile tekerleklere aktaran parçaya kardan mili denir.

Kardan mili; tasarım doğrulama, proses doğrulama veya yıllık yapılması gereken kalite doğrulama amacıyla yorulma testlerine tabi tutulur. Kardan mili servis ömrü boyunca maruz kaldığı yükler yardımıyla tam dalgalı-tam değişkenli hızlandırılmış yorulma test verileri elde edilir. Bu yorulma testleri sonrasında kardan mili birim parçasında meydana gelen kırılmanın incelenmesi potansiyel hasarlar ve iyileştirme çalışmaları için önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, tam dalgalı tam değişkenli tekrarlı yorulma yükleri altında meydana gelen birim parça kırılmasının kök neden tespiti amacıyla birim parçanın karakterizasyonu ve hasar analizi çalışması icra edilmiştir. Normal üretim şartları altında üretilen kardan mili birim parçası yorulma testine tabi tutulmuştur. Daha sonra kırılan birim parçanın ham maddesi mekanik, kimyasal ve metalografik olarak incelenmiştir. Test sonrası kırılan birim parça ise mekanik, metalografik olarak incelenmiş; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı, enerji dispersiv spektrum (EDS) elemental analiz ile kırık yüzey karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kardan Mili, Yorulma, Malzeme Karakterizasyonu, Hasar Analizi, Kök Neden Analizi

2019, 127 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Failure Analysis and Characterization of Cardan Shaft's Part under Fully Reversed Torsional Fatigue Loading

Onur AKKAŞ

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Metallurgy and Materials Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman ÇULHA

Cardan shaft is a part of a vehicle that carries power from the engine to the wheels via rear differential and axle in rear wheel drive.

Cardan shaft is performed fatigue tests for design verification, process verification and layout qualification. It is called “fully reversed sinusoidal accelerated fatigue test” which data are acquired from the vehicle during the service life. Investigation of cardan shaft's part after failure is important to prevent potential service failure and to improve the performance.

In the scope of the thesis, characterization and failure analysis of the cardan shaft's part was performed so that the root cause of the fracture as a result of the fully reversed sinusoidal fatigue test. Cardan shaft, which was produced mass production condition, was performed fatigue test. Then, the raw material of fractured cardan shaft's part was investigated mechanically, chemically and metallographically. After that, the fractured cardan shaft's part was investigated mechanically and metallographically. And fractured surface of cardan shaft's part was characterised in scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS).

Keywords: Cardan Shaft, Fatigue, Material Characterization, Damage Analysis, Root Cause Analysis

2019, 127 pages

1. GİRİŞ

Kardan mili, arkadan itişli araçlarda kullanılan, motorda üretilen güç ve hareketi transmisyon aracılığı ile arka diferansiyele ve tekerleklere iletilmesini sağlayan önemli bir aktarma organıdır. Ayrıca, araç yerleşiminden gelen yükseklik farklılıklarını açısal ve zemin değişkenliğinden gelen arka aks hareketini boyutsal olarak kompanse eder.

Kardan milleri servis ömürleri boyunca değişken yüklere maruz kalarak tork, yük ve açısız deplasman isterlerini karşılaması gerekir. Bu sebeple, araçlar için kritik emniyet parçası olarak tanımlanırlar. Dolayısıyla kardan milinin tasarımı, üretimi ve montajı sonunda icra edilen ürünün performansının tespiti amacıyla doğrulama testleri çok dikkat bir şekilde yapılması ve test sonuçlarının detaylı bir şekilde irdelenmesi gerekir. Dolayısıyla, kardan mili üretiminde her ürünün ilk devreye alma sürecinden, proses ve tasarım değişikliğinden sonra performans özellikleri test edilmesi gerekir.

Otomotiv sektöründe her ana sanayi, araçlarında kullanılan parçaları piyasaya çıkarmadan önce belirli bölgelerde saha testlerine tabi tutar. Bu testlerde belli parçalardan sıcaklık, deplasman, titreşim, ses, tork gibi o parçanın performansını etkileyecek özellikleri kontrol eder ve performansını ölçer. Uzun çalışmalar neticesinde gerçekleşen saha testleri sonrasında elde edilen veriler ile araç servis ömrü arasında bir bağıntı kurulur ve hızlandırılmış test verileri elde edilir [1,2]. Dolayısıyla, bu çalışmada icra edilen torsiyonel yorulma testi tam dalgalı tam değişkenli karakteristikte ve kardan milinin kullanılacağı araç özellikleri göz önünde bulundurularak kardan mili test kriterleri tasarlanmıştır. Yorulma testi, kardan mili servis ömrünü doğrudan etkileyen ve sürekli maruz kaldığı yüklerin sonucu tespitini sağlayan en önemli yapısal testlerden biridir. Bu sayede, kardan mili tasarımı, üretim prosesi, birim parçaları malzeme özellikleri ile ürünün yorulma ömrü tespit edilir. Yorulma testi sonrasında meydana gelen kırılmanın kök nedeni belirlenir ve yorulma ömür artışı öngörüsü oluşturulur.

Sumit ve arkadaşları, farklı uygulamalarda kullanılan şaftların hasar analizi metodolojilerini gözden geçirmiş ve karşılaştırmışlardır. Böylece, tekrarlayan arızaları

önlemek için tavan vinci dişli kutusu şaftına en uygun metodolojiyi seçmiş ve hasar analizini gerçekleştirmişlerdir [3].

Hariom ve arkadaşları, tekstil endüstrisinde kullanılan merdane şaftlarının kök neden tespiti amacıyla hasar analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla literatür taramasından sonra en uygun inceleme yöntemini belirlemişler ve hasarın tekrarlanmasını önleyici faaliyetleri gerçekleştirmişlerdir, böylece uzun iş gücü kayıplarını engellemişlerdir [4].

Fonte ve arkadaşları, bir motorlu aracın krank mil hasarının vaka çalışması ve onun hasar analizini icra etmişlerdir. Krank mili, üç yıl servis ömrü sonunda yatak sarmış, daha sonra onarılmıştır. Daha sonra ise 30.000 km sonra tekrar hasarlanmış, metal dolgusu ilavesi ile tekrar onarılmıştır. Bu hatalı kullanım ile devam eden çalışma koşullarında, merkezde oluşan yorulma çatlakları sebebiyle krank mili, burulma yönünde kırılmış ve hasar incelemesi gerçekleştirmişlerdir [5].

Das ve arkadaşları, elektriklik santralının acil durum güç kaynağı sisteminin dizel jeneratörünü çalıştıran bir hava motor dişlisinin rutin kontrolü sırasında üç parçasında hasarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Operasyon sırasında küçük dişlinin bu beklenmedik çatlak oluşumu tespiti için bir hasar analiz çalışması yapılmıştır. Hasar analizi neticesinde, küçük dişlinin birinde yorulma çatlağı başlangıcı sonucunda kırıldığını belirlemişlerdir. Mevcut yanlış ayar ile dişlerinin karşılaşmaması nedeniyle, dişli çalışması sırasında küçük dişlinin dip radyüsünde yüksek stres konsantrasyonuna yol açtığı görülmüştür. Bunun sonucunda, ciddi aşınmaya ve aşırı ısı üretimine neden olmuştur. Ayrıca, uygun olmayan ısıl işlem, sülfür kalıntılarının düzensiz dağılımı ve keskin köşeler dişlinin hasarını hızlandırmıştır [6].

Lai ve arkadaşları, yüksek karbonlu çelik 100CrMnMoSi8 (martenzit ve beynit) ve tok-temperlenmiş orta karbonlu çelik 50CrMo4 ile dinamik burulma yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Numuneler parlatılmış yüzey ve sertlik dağılıma göre taşlanmış yüzey gibi farklı koşullarda yüzey işlemi uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, pürüzlü yüze sahip sertleştirilmiş yüksek karbonlu çeliklerin, yüzey çatlak başlangıcı ile büyük bir çoğunlukla hasar oluştuğu gözlemlenmiştir. Oysa ki numunelerin yorulma kırılması metalik olmayan inklüzyondan yüzey altı çatlak

başlaması yumuşak yüzey ile hasar görmeye meyillidir. Ayrıca, martenzitik numunenin yorulma dayanımı, yüzey yorulma kırılması hasarının olduğu düşük çevrimindeki beynitik numuneninkinden daha düşüktür, oysa bu fark, yüzey altından başlayan yüksek çevrimli yorulma testinde azalmıştır. Bununla birlikte, sertleşmemiş orta karbonlu çelik numuneleri, sadece yüzey çatlağı başlangıcında başarısız olur ve yorulma dayanımı, yüzey pürüzlülüğüne karşı daha az hassastır. Test edilen numunelerin yorulma dayanımını farklı mikro yapıları ve yüzey kalitesi ile tahmin etmek için birleşik bir model geliştirilmiştir [7].

Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, hava kompresörünün krank mili kırılmasının nedenini kimyasal bileşim, mekanik özellikler, makroskopik özellik, mikroskopik yapı ve teorik hesaplama yöntemleri ile analiz etmişlerdir. Analiz sonuçları, belirgin yorulma çatlağı olan krank milinin yorulma kırığına ait olduğunu göstermektedir. Yorulma çatlağı, yağlama deliğinin dolgu bölgesinden hem yetersiz dolgu hem de ana muylunun yanlış hizalanmasından kaynaklanan yüksek eğilme gerilimi konsantrasyonu nedeniyle başlamıştır. Krank mili yorulma kırılması sadece çevrimsel eğilme ve burulma altında yağlama deliğindeki yorulma çatlaklarının başlatılması ve ilerletilmesi sebebiyle olduğu belirlenmiştir. Yüksek burulma yüklemesi, hatanın temel nedenidir [8].

Sandip ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 15 yıllık bir hizmet ömrüne karşı 13 ay hizmetten sonra hasarlanan, bir ileri sürgülü tahrik şanzımanı giriş şaftı hasar analizi icra edilmiştir. Bulgular, giriş milinin gerilme korozyonu çatlamasından dolayı hasar aldığını göstermektedir. Kama kenarlarında başlattıktan sonra, çatlaklar pah çevresi boyunca aşamalı olarak ilerlemiştir. Milin kesiti kritik sınırın altına düştüğünde, ani burulma yükü nedeniyle hasar almıştır. Araştırma, yüksek miktarda MnS içeren uygunsuz çelik kullanımının stres korozyonu çatlamasından sorumlu olduğunu ortaya koymuştur [9].

Li ve arkadaşlar yaptıkları çalışmada kömür madeni indirgeyicisinde kullanılan izometrik poligonal milin hasar analizi gerçekleştirmişlerdir. Analizde kırılma nedenlerini belirlemek amacıyla kimyasal analiz, mikro yapısal karakterizasyon, metalografik test, sertlik ölçümleri, teorik hesaplamalar ve sonlu elemanlar analizinden yararlanmışlar. Analiz sonuçları, izometrik poligonal şaftın hasar

özelliklerinin yorulma kırığına ait olduğunu ve çok kaynaklı yorulma kırılması olduğunu göstermiştir. Şaft yüzeyinde yorulma çatlakları oluşmuş ve hem eğilme hem de burulma yükleri şaftın kırılmasına neden olmuştur. Şaft ve göbek deliği arasındaki kaçıklık, yüksek stres konsantrasyonu oluşturabilen yüksek eğme deformasyonuna neden olmuştur. Yüksek kaçıklık değeri, hasarın kök nedeni olabilmektedir [10].

1.1. Tezin Amacı

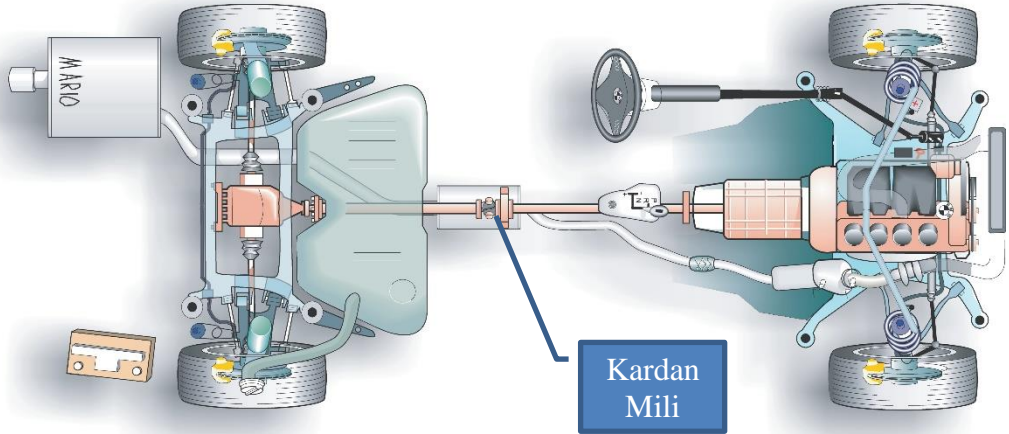
Bu çalışmada, arkadan itişli araçlarda kullanılan kardan milinin, araç kullanım koşullarında elde edilen verilerle icra edilen tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonunda, sıcak dövme tekniği ile üretilen kardan mili çatalı flanş birim parçasında meydana gelen kırılma hasarı kök nedeni analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kuruluş altyapısında mevcut koşullar çerçevesinde, çatalı flanş birim parçası ve hammaddesinde kullanılan malzemenin kimyasal analizi, sertlik ölçümü, mikroyapı analizi, tane boyutu ölçümü, dekarbürizasyon ölçümü, inklüzyon analizi ve SEM incelemesi ile malzeme özellikleri karakterize edilmiştir. Bunun sonucunda yapılan tespitler ile malzemenin, dolayısıyla kardan milinin, hasar tespiti sonucunda yorulma ömrünü arttırmaya yönelik belirli öngörüler yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kardan Milleri

2.1.1. Giriş

Tipik bir binek otomobilinin klasik otomobil düzeninde, motor önde ve arkadaki diferansiyelde bulunur. Güç kaynağında veya motorda üretilen gücü, dişli kutusundan diferansiyellere aktarmak için bir bağlantı mili veya tahrik elemanı gereklidir. Prensip olarak, bağlantı şaftı veya tahrik elemanı tipik bir otomobil tahrik elemanı düzenlemesinde burulma elastik bir eleman olarak hareket eder ve kıyaslandığında çok büyük dönme ataletine sahip elemanlar arasında burulma yayı olarak işlev görür. Uygulamada, bağlantı şaftları, bir katı şaft veya boru ile birleştirilmiş bir veya daha fazla kardan bağlantı parçası birleştirilerek oluşturulan bir kardan milidir. Kardan mili, motor tarafından üretilen ve dişli kutusu tarafından şafta veya diferansiyele sabit veya değişken açılarda iletilirken arka aksın hareketinden kaynaklanan aksel hareketleri telafi eder [11].



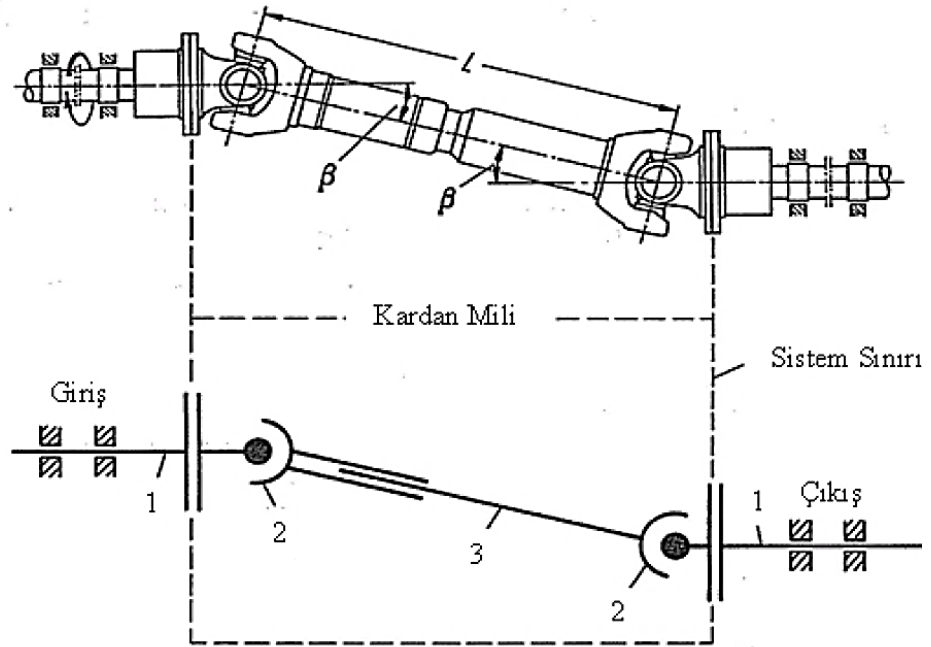
Şekil 2.1. BMW 520D araç yerleşimi [15]

Örneğin; diferansiyel, araç iskeletine esnek bir şekilde bağlanan sert bir dingilin parçasıdır ve aktarma organlarının da mutlaka aksel hareketine izin vermesi ve bağıl açılarda hareketlere izin veren kardan mili mafsalları olması gerekir. Yapıdaki esneklik ve montaj toleransları, diferansiyel araca bağlandığında bile, kardan mafsalları ile aksel hareket kullanımını gerektirir. [11].

Günümüzde, araçların çoğunda, bir veya daha fazla kardan mafsallı kardan milleri ve eksenel harekete izin verirken, motor tarafından üretilen gücü diferansiyele iletmek için kullanılmaktadır. Bu tür aktarma organları düşük maliyetli, kolay üretilebilir, düşük ağırlıklı, toplam montaj ağırlığı ve kurulumu ve servisi çok kolaydır. Bu yapı sayesinde, yalnızca aktarma elemanlarındaki tork, kardan mili üzerinden diferansiyellere iletilir. Süspansiyon hareketleri, motor hareketleri, ani kalkışlar sırasında aks hareketleri ve tekerleklerin dönmeye karşı direncinin neden olduğu kuvvetler de kardan milini etkiler. [11].

2.1.2. Kardan Mili Yerleşimi

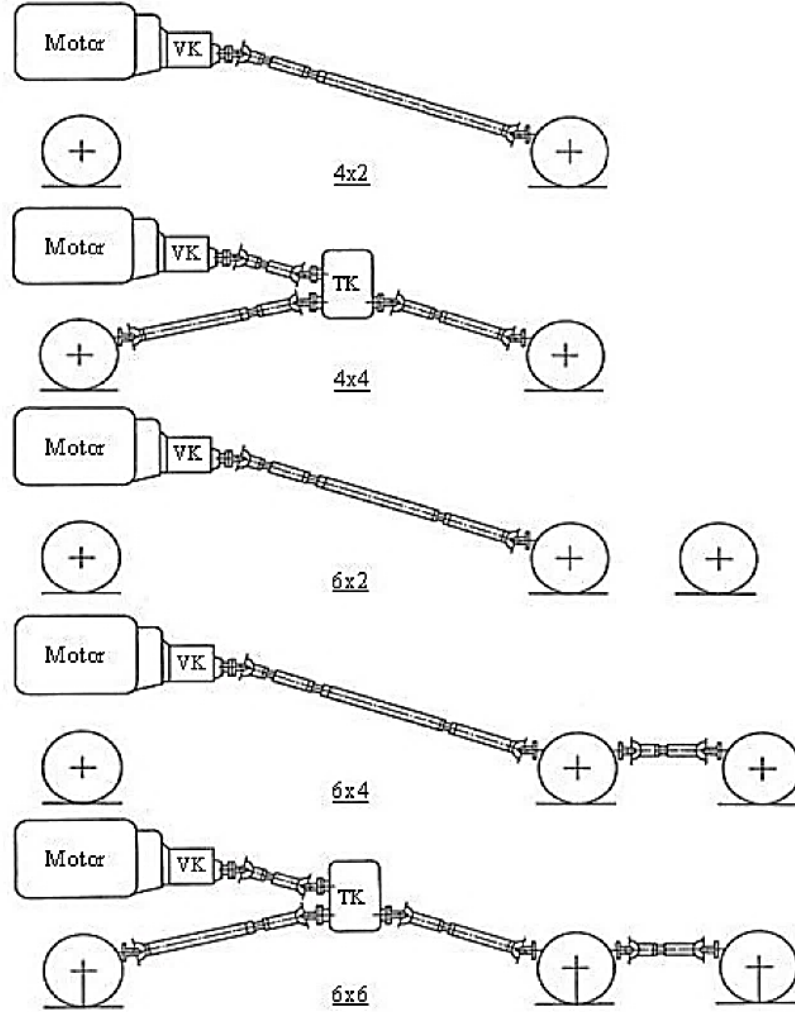
Kardan milleri, çok çeşitli uygulamalara bağlı olarak birçok konfigürasyona göre tasarlanabilir. Kardan milleri genellikle iki veya daha fazla mafsal olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.2, iki kardan mafsallı kardan milleri olan binek otomobilleri göstermektedir. β mafsal açısını gösterir, L araçtaki kardan milinin montaj uzunluğunu gösterir. “1” bağlantı milini, “2” üniversal mafsal ve “3” ara mildir. [11].



Şekil 2.2. Kardan mili yerleşiminin şematik gösterimi [11].

Özellikle askeri uygulamalarda kullanılan kamyonlarda, birden fazla hareketli aks uygulaması diğer yol ve arazi araçlarında uygulama bulmuş ve aktarma

organlarının çeşitliliğini arttırmıştır. Örneğin, 4x2 sürüş yapılandırmasına sahip araçlarda iki tekerlek tahriki kullanılırken, 4x4 sürüş yapılandırmasına sahip araçlarda dört tekerde tahrik sistemi vardır. Ek olarak, sırasıyla 6x2, 6x4, 6x6 tekerlek konfigürasyonunda iki tekerlek, dört tekerlek ve altı tekerlek tahriki kullanılmaktadır. Şekil 2.3, 4x2, 4x4, 6x2, 6x4 araçlar için kullanılan aktarma organları düzeneği şematik olarak gösterilmektedir [11].

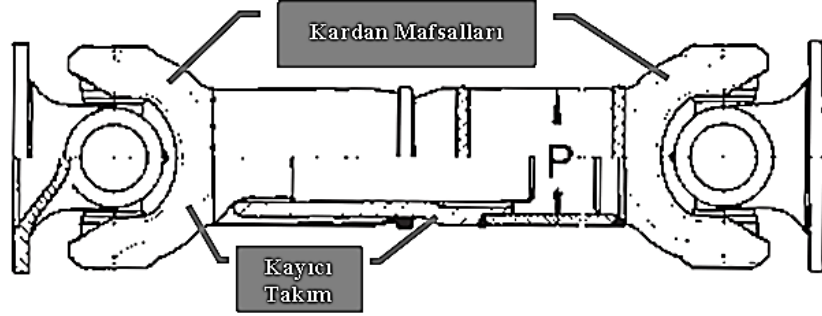


Şekil 2.3. Çeşitli araç konfigürasyonları için kardan mili yerleşimleri [11]

2.1.3. Kardan Mili Konstrüksiyonu

Çok sayıda aktarma organı uygulaması nedeniyle, kardan mili tasarımı değişkendir ve açısal ve aksel harekete izin verir. Çoğu binek ve kamyon uygulamasında, iki kardan mili bağlantısı olan kardan mili kullanılmaktadır. Bu tip

uygulamalarda, aksel hareket genellikle kardan mafsalları arasında yer alan kayıcı ile sağlanırken, taşıt üstü uygulamanın neden olduğu bağıl açısal hareket kardan mafsallarıyla absorbe edilmektedir. (Şekil 2.4) [11].



Şekil 2.4. Kardan mili mafsal ve kayıcı takım kompleleri [12]

2.1.4. Kardan Milinin Temel Görevleri

Aktarma organı grubunda kullanılan kardan mili aşağıdaki belli başlı temel görevleri karşılamalıdır [11]:

2.1.4.1. Döndürme Momenti İletimi

Kardan milinin ana görevi; araçta motorun sağladığı gücü, dişli kutusu aracılığıyla aktarılan torku (döndürme momentini) belli bir açıyla çalışan hareketli aksın üzerinde bulunan diferansiyele iletmektir. [11].

2.1.4.2. Devir İletimi

Kardan mili, seçilen uygulamaya bağlı olarak, belirli bir hız aralığında işlevselliğini kaybetmeden dönebilmelidir [11].

2.1.4.3. Açısal Değişkenlik

Kardan milinde açısal kompanzasyon sağlayan mafsalları, kardan milinin dönme eksenine kesik deşik veya sabit açılar altında çalışabilmelidir [11].

2.1.4.4. Boy Değişkenlikleri

Kardan mili, arka aksın hareketi ve montaj toleransları nedeniyle uzunluk değişimlerini absorbe etmelidir [11].

2.1.5. Kardan Mili Uygulama Detayları

Kardan mili tasarımı temel işlevleri, uygulamaya özel ayrıntıları ve parametreleri kapsamalıdır. Temel görevler ve uygulama detayları tork kapasitesini, araç servis ömrünü ve tasarımın dayanıklılığının tespit edilmesi gerekir. Konu tasarım parametreleri tecrübeyle, başarılı saha çalışmalarıyla veya tasarımın ön matematiksel modelindeki denemelerle belirlenebilir. Bununla birlikte, kardan milinin matematiksel modelindeki çalışmaların sonuçları ile fiziksel testlerin sonuçlarını (laboratuvar ve araç üstü testler) ilişkilendirmek yapılacak çalışmaların devamlılığı açısından önem arz etmektedir. Bağlantı kurulduktan sonra, test sonuçları ve tasarımın sınırları pratik uygulamaları ve özel uygulamaları yönlendirir ve araca özgü tüm gereksinimleri karşılayan bir kardan mili tasarımının oluşturulmasını kolaylaştırır [11].

2.1.5.1. Dayanıklılık

Kardan mili, tasarım aşamasında belirtilen tüm servis ömrü boyunca temel işlevlerini yerine getirmeli ve bu dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Her bir kardan milinin uygulamaya özel tasarımının dayanıklılığı veya servis ömrü limiti vardır [11].

Kardan mili tasarımı karşılaştırmalı bilgi ile tüm uygulama detaylarına göre yapılmaktadır. Kardan mili, motor tarafından üretilen torku, yorulma hasarı olmadan tekerleklere aktarabilmelidir [11].

Kardan mili mafsalları, uygulamaya özel bağlantı açılarında ve yol koşullarında motor tarafından oluşturulan tork ve hızı başarılı bir şekilde iletmelidir. Eksenel hareketi karşılayan kayıcı takımlar, diğer detay parçalar ve alt parçalar tork, eksenel deplasman ve yol şartlarının birleşik etkilerine dayanabilecek aşınma direnci ve yağlama özelliklerine sahip olacak şekilde dizayn edilmelidir. Kardan milinin diğer

tüm boyutları, dinamik kuvvetlerin etkilerini en aza indirecek ve maksimum çalışma hızında güvenle çalışacak şekilde belirlenmelidir [11].

Bahsi geçen dayanım özellikleri laboratuvar testleri ile doğrulanabilmesine rağmen, kardan milinin gerçek performansı saha testleri ile belirlenmektedir. Kardan mili üzerindeki tork, hız, mafsal açısı, uzunluk değişkenliği, çalışma koşulları, titreşim ve üretim limitlerinin etkisini belirlemek için araç üstü saha testleri ile uygulamaya yönelik olarak gerçekleştirilmektedir [11].

2.1.5.2. Döndürme Momenti Kapasitesi

Uygulamada, kardan mili, aktarma organları tarafından üretilen maksimum torku tekerleklerle aktarabilmelidir. Araç uygulamalarında, kardan mili servis ömrü çalışma şartları boyunca sürekli yükleme ve kısa süreli şok yükleri gibi bir dizi yükleme durumuna tabi tutulur. Bu yükleme koşulları sabit durumda veya belirli sabit hızlarda gerçekleşebilir veya yükleme kaynağına bağlı olarak hesaplanan maksimum torkun çok üzerinde şok yükleri olarak oluşabilmektedir [11].

Çalışma koşullarında maruz kalınan sürekli yükleme, kardan milinin araç servis ömrü boyunca ileteceği torkun büyük çoğunluğunu temsil etmektedir. Bu tork, normal sürüş koşullarında aracın hareket etmesi için ihtiyacı olan şanzıman çıkışındaki torku ifade etmektedir [11].

Kısa vadeli ani yüklemeler, motor tarafından üretilen torkun minimum vites oranı ile çarpımı sonucu elde edilen moment değerinden veya tekerlek kayma momentinden çok daha büyük olan ve genellikle ani kalkışlarda ortaya çıkan yüklemelerdir [11].

Pratikte, kardan mili tasarımı esnasında hem motor tarafından üretilen döndürme momenti ile vites kutusu üzerinden aktarılan döndürme momenti ve tekerleklerin kayma momentleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bunların yanında, uygulamaya yönelik güvenlik katsayıları yardımıyla kısa vadeli ani yükler dikkate alınmalıdır [11].

2.1.5.3. Kardan Mili Devri

Uygulamaya göre değişen oranlarda, kardan milinin, duruş anından motorun maksimum hızına kadar değişen geniş bir hız aralığında çalışma yeteneğine sahip olması gerekir. Aşırı veya yüksek hızlardaki durum şanzıman özelliklerine göre değişebilir. Ancak, kardan milinin güvenli bir şekilde çalıştığı aktarma organları ile birlikte kullanım süresi ve servis ömrü süresince yüksek hızlarda başarılı olması beklenir [11].

Güvenlik limitlerini korumak için, kardan milinin kritik çalışma hızı aktarma organlarının maksimum çalışma hızından daha büyük olmalıdır. Kardan milinin binek ve hafif ticari araç uygulamalarındaki kritik hızı, aktarma organlarının maksimum çalışma hızının %85'inden az veya buna eşitken, orta ve ağır ticari araçlar için bu %75'tir [11].

Kardan milinin kritik hız limiti, kardan milinin izin verilen maksimum montaj uzunluğunu, borunun dış çapını ve et kalınlığını etkilemektedir. Bu sebeple kritik hız değeri, araç üstü uygulaması ve şanzıman detayları tek parça kardan milinin güvenli kullanımına izin vermiyorsa, iki parçalı veya çok parçalı kardan mili tasarımına geçilerek, şanzıman elemanlarının yerleşimine ve şasi bağlantı noktalarına göre tasarım düzenlemelidir [11].

2.1.5.4. Mafsal Açısı

Kardan mili üzerindeki mafsallar, değişen yükleme koşulları ve değişken hızlar altında uygulamaya özel mafsal açılarıyla çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kardan mili mafsalinın gerçek açısal konumu, araçta üstü uygulamada veya bilgisayar destekli tasarımın sonucu olarak, aktarma organlarının normal ve olağandışı çalışma koşulları dikkate alınarak belirlenmektedir. Arka süspansiyonun aşırı çalışma koşullarından yola çıkarak, kardan mili üzerindeki kardan mafsallarının fiili çalışma açıları, kardan milinin yer değiştirmesi ve uzunluk değişkenliği belirlenebilir. Bunun neticesinde, kardan milinin toplam hareket alanı ortaya çıkarılabilir ve aktarma organının diğer üyeleri ile uyumlu çalışması sağlanabilir. Gerçek çalışma açılarının belirlenmesi,

kardan mafsallarının meydana getiren diğer parçaların (çatallı flanş, tüp çatal vb.) tasarımını belirlemektedir [41].

Kardan mili üzerindeki mafsalların fiili çalışma açılarının belirlenmesi, kardan milinin genel yapısı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Çünkü her bir mafsalin kullanım ömrü çalışma açısına bağlı olarak değişir [41].

2.1.5.5. Boy Değişimi

Kardan milinin boy değişkenli veya aksel kayma kapasitesi, montaj ve demontaj işlemlerini kolaylaştırmak ve bunun yanında değişken çalışma ve yükleme koşullarını sağlıklı hareket etmesi için gereklidir. Aracın montaj toleranslarını ve sıcaklık değişimlerini karşılamak için de aksel hareket kabiliyeti gerekmektedir [41].

Maksimum ve izin verilen yükleme koşullarında aksın sabit konumlarından başka noktalara hareket edeceği açıktır. Bu nedenle, belirli durumlarda çalışma konumlarını belirlemek, kardan milinin dinamik çalışma koşulları altında performansını ortaya koymak açısından elzem öneme sahiptir. Bu noktada, uzunluk değişkenliğini doğru bir şekilde belirlemek için bilgisayar destekli simülasyon tekniklerini kullanmanın yararlı olacağı ön görülmektedir [41].

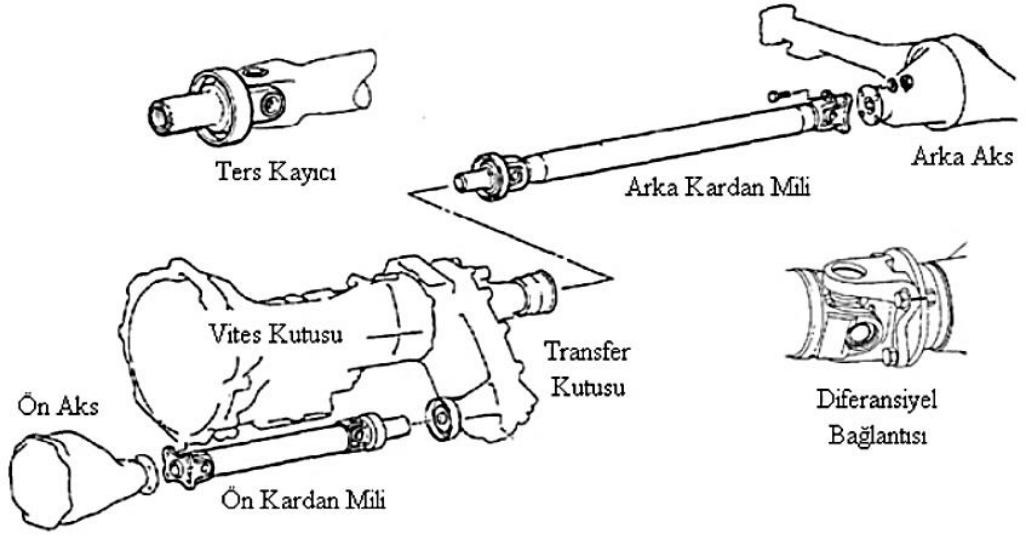
2.1.5.6. Bağlantı Detayları

Kardan mili aktarma organlarındaki diğer bileşenlere birden fazla şekilde montajlanabilmektedir. Kaplin görevlerinden biri, motorun ürettiği torku şanzıman yardımıyla ile tekerleklere iletmektir. Bağlantı özellikleri, kardan milinin diğer aktarma organlarına sağlıklı bir şekilde bağlanmasını sağlamaktadır. Kardan miliyle ilişkili tüm aktarma organları, kardan mili için bir destek görevi görür [11].

Kardan mili ve diğer aktarma organları arasındaki bağlantılar, farklı çalışma koşulları ve yükleme koşulları altında araç tarafından üretilen tüm yüklere dayanacak

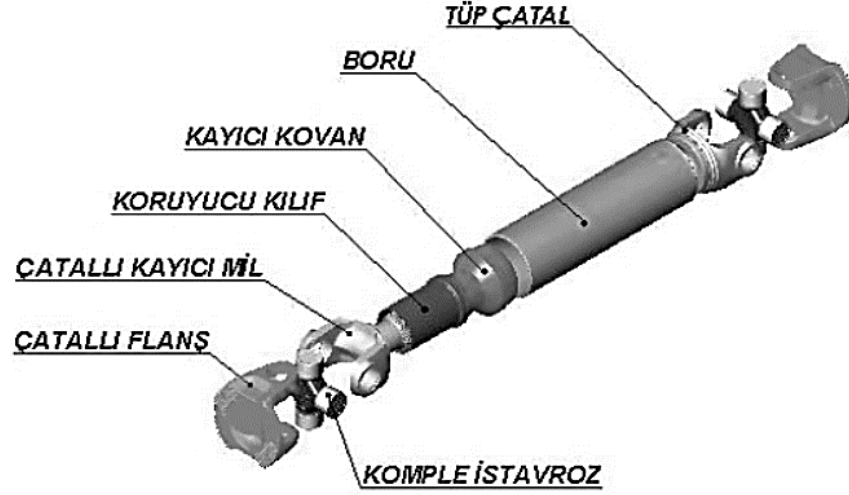
şekilde dizayn edilmelidir. Tüm bunlara ek olarak, bağlantı türünü seçerken montaj kolaylığı, sökme ve servis faaliyetleri dikkate alınmalıdır [11].

Binek ve hafif ticari araç uygulamalarında kardán mili, pratikte, vites kutusunun çıkış şaftına ters kayıcı ile bağlanırken, diferansiyel üzerindeki bağlantı flanşını cıvata ile sabitlenmektedir. Bu durum Şekil 2.5'te şematik olarak anlatılmaktadır [11].



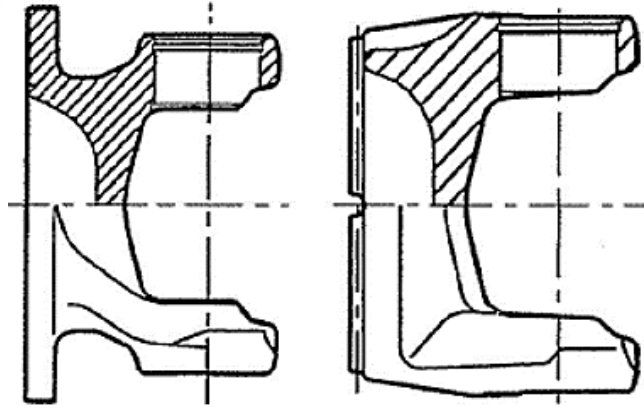
Şekil 2.5. Binek otomobillerde kardán mili türleri [11]

Orta ve ağır ticari araç gruplarında kullanılan kardán mili, çatallı flanş, istavroz, çatallı kayıcı mil, kayıcı kovan, koruyucu kılıf, dikişli boru ve tüp çatallı adı verilen altı adet birim parçadan oluşmaktadır ve genel yapısı şekil 2.6'da gösterilmektedir [11].



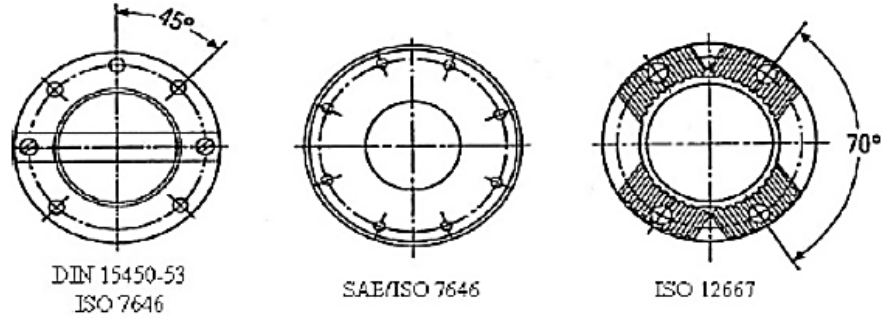
Şekil 2.6. Orta ve ağır ticari araçlarda kullanılan kardan millerinin genel yapısı [11]

Orta ve ağır ticari grubundaki kardan milleri, vites kutusu ve diferansiyel bağlantı flanşlarına, şekil 2.8’de ve şekil 2.9’da gösterildiği gibi çatallı flanş adı verilen parçanın cıvata ile sabitlenmektedir [11].

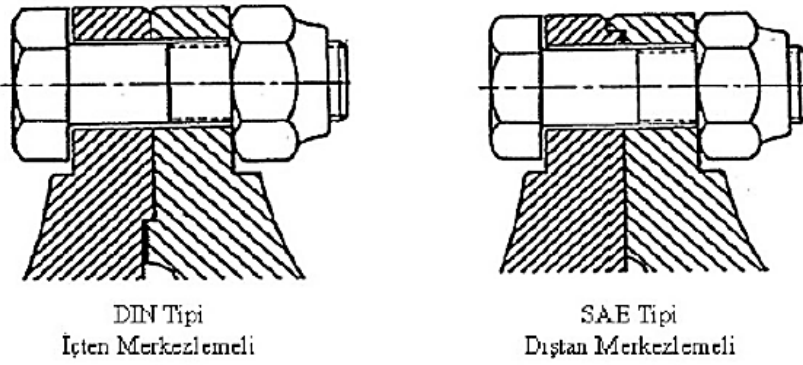


Şekil 2.7. Çatallı flanş [11]

Çatallı flanş, mafsalsızlığının kolay ayarlanabilmesine, boşlukların kontrol edilebilirliğine, kardan milinin dönme merkezine göre iyi merkezlenmesine ve yüksek dengeleme kapasitesine ulaşmasını sağladığı için bu bağlantılar tercih edilmektedir. Ayrıca, kardan millerinde kullanılmakta olan çatallı flanş bağlantı çeşitleri şekil 2.8’de, cıvata bağlantı detayları ise Şekil 2.9’de verilmiştir [11].



Şekil 2.8. Çatallı flanş bağlantı çeşitleri [11]



Şekil 2.9. Çatallı flanş civata bağlantı detayları [11]

2.1.6. Kardan Mili Doğrulama Testleri

Kardan mili, kardan mafsalinın, kardan mili alt bileşenlerinin ve kardan mili birim parçalarının işlevselliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için belli başlı testler icra edilmektedir. Kardan milinin araca özgü koşulları yerine getirip getiremediğini belirlemek için laboratuvar ve saha testleri önem arz etmektedir. Testler genellikle gerçek servis ve kullanım koşullarını simüle edecek şekilde tasarlanıp ve uygulanmaktadır [41].

Test sonuçlarının değerlendirilmesi için kardan milinin özellikleri, bütünlüğü, kontrolü ve fiziksel/mekanik özellikleri çok önemlidir. Bu sebeple, test numunesinin tasarımdaki fiziksel ve mekanik özellikleri ile test numunesinin fiili özellikleri test yapılmadan önce dikkatlice kontrol edilmelidir. Test bitiminde boyutsal, fonksiyonel ve görsel incelemelerden sonra, her birim parçasını tahribatlı ve/veya tahribatsız olarak incelemek yararlı olacaktır [41].

Laboratuvar testleri, kardan milinin şaftının gerçek çalışma koşullarını yakınsamak için tasarlanmış olsa da ekonomik şartlar nedeniyle laboratuvar koşullarında tüm koşulları canlandırmak mümkün değildir. Bu sebeple kardan milinin fiili performansı, gerçek çalışma koşullarını doğru şekilde yansıtan saha testleri ile görülebilir [41].

2.1.6.1. Statik Torsiyon Testi

Statik torsiyon testinde, kardan mili bir tarafa sabitlenir ve kardan mili alt parçaları veya alt bileşenleri zarar görene kadar belirli bir hızlarda tork uygulanır. Şekil 2.10'da örnek bir test cihazı gösterilmektedir. Test tamamlandıktan sonra da elastik akma sınırı, taşıyacağı maksimum yük ve kırılma noktaları belirlenir. Çoğu statik burulma test cihazında, tork uygulama hızı ($^{\circ}/dk$) ayarlanabilir ve test raporları grafiksel olarak oluşturulmaktadır [41].



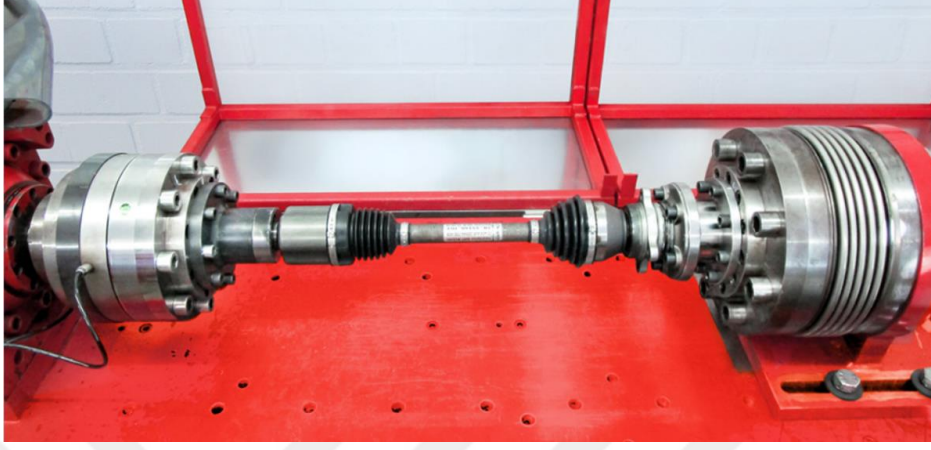
Şekil 2.10. Statik torsiyon test cihazı [13]

2.1.6.2. Torsiyonel Yorulma Testi

Kardan milleri, gerçek çalışma koşulları altında değişken yükleme ve yöndeki tekrarlayan burulma yüklerine maruz kalır. Araç kullanımına göre, torsiyonel yüklemesi ortalama yüke ek olarak tek yönlü, tam dalgalı veya tam değişken yükleme şeklinde gerçekleşebilir [41].

Torsiyonel yorulma testi, fiili araç üstü kullanım koşullarını simüle etmek için yapılmaktadır. Kardan mili, statik torsiyon testine benzer şekilde bir tarafa sabitlenir ve diğer yandan uygulamaya bağlı olarak şekil 2.11'deki gibi yüklenir. Ancak, çoğunlukla yükleme tam dalgalı tam değişken olarak gerçekleştirilir. Böylelikle hızlandırılmış yorulma testi simüle edilmesi amaçlanmaktadır. Yorulma testlerinde

gerçek yük değerlerinin kullanılması önerilir, ancak eğer yük değerleri mevcut değilse, kardan milinin ve birim parçalarının yorulma ömrünü belirlemek için, test sonuçları S-N eğrileri, Weibull analizi veya Goodman eğrilerinden faydalanılmaktadır [41].



Şekil 2.11. Torsiyonel Yorulma Test Cihazı [13].

2.1.6.3. Dinamik Dayanıklılık Testi

Kardan milinin tüm bileşen parçalarını, ekonomik nedenler sebebiyle gerçek uygulama ve çalışma koşulları altında test etmek her zaman mümkün değildir. Kardan mili mafsalı ile masura rulmanlarının aşınma özelliklerini ve yorulma ömrünü belirlemek amacıyla, kardan mili sabit bir açı, sabit bir tork ve sabit bir hızda veya değişken bir açıda, değişken bir tork ve değişken bir hızda test edilmektedir [41].

Dinamik dayanıklılık test cihazı şekil 2.12'de gösterilmektedir. Bu test cihazı 2 veya 4 kardan mili numunesini aynı anda testini gerçekleştirebilir. Olası hasarı önlemek için, kardan mili birim parçalarının ve alt bileşenlerinin tork taşıma kapasitesi testten önce tam olarak belirlenmelidir. Araç üstü saha testlerinde toplanan veriler yardımıyla tasarlanan hız, açı ve tork değerleri test sırasında belirli bir çevrim ve döngü ile program yardımıyla testte uygulanır. Bu noktada, çevre koşulları dışındaki tüm gerçek koşullar simüle edilir. Bununla birlikte, test sonuçlarının güvenilirliği, saha testleri sırasında toplanan test verilerinin doğruluğu ile doğru orantılıdır [41].



Şekil 2.12. Dinamik dayanıklılık test cihazı [14]

2.1.6.4. Çamur Testi ve Soğuk-Sıcak Testleri

Kardan mili araç üstü kullanım koşullarında, olumsuz ve aşırı çevresel etmenlere maruz kalarak çalışmaktadır. Kardan milleri için istavroz muylusu ve kayıcı takım gibi hayati önem taşıyan alt bileşenlerinin çamur testi (Şekil 2.13) ve soğuk-sıcak testleri (Şekil 2.14) ile her türlü çevre şartlarında görevlerini yapıp yapamayacağını görmek mümkündür [41].



Şekil 2.13. Çamur test cihazı [14]

Kardan mili sızdırmazlık elemanlarının özellikle her türlü çevre koşulunda performansı sadece çamur banyosu ve sıcak-soğuk kabin testleri ile simüle edilebilmektedir. Testi gerçekleştirmek için gereken tüm bilgiler gerçek uygulama koşullarından elde edilmektedir. [41].



Şekil 2.14. Klimatik kabin test cihazı [14]

Test ortamını hazırlamak ve kontrol etmek için çok ciddi bilgilere ihtiyaç vardır. Örneğin, kardan mili sıcak ve korozif bir ortamda çalışıyorsa, test ortamı ve koşulları da bu ortama uygun oluşturulmalıdır. Çevrenin gerçek etkilerini görmek amacıyla, kardan mili böyle bir ortamı belli bir hız ve açıda test eden kapalı bir kabinde test edilmeli ve sonuçlar buna göre irdelemelidir [41].

2.2. Yorulma Olayı

2.2.1. Giriş

Yorulma, dinamik veya değişken gerilmelere maruz kalan köprü, uçak ve makine parçaları gibi yapılarda oluşan bir hasar şeklidir. Bu koşullar altında, malzemenin statik yüklemdeki çekme veya akma dayanımının oldukça altındaki gerilme seviyelerinde bile yorulma hasarı uğraması mümkündür. Yorulma teriminin kullanılmasının nedeni, bu tür bir hasarın genellikle uzun bir süre boyunca tekrarlanan gerilme ya da şekil değişimi neticesinde oluşmasıdır. Metallerde meydana gelen hasarların %90'nının nedeni olması ya da bir diğer ifadeyle, metal hasarlarının tek ve en büyük sorumlusu olması nedeniyle yorulma son derece önemlidir. Polimerler ve seramik malzemeler de (camların dışında) bu tür hasara duyarlıdır. Ayrıca, yorulma hasarı hiç belirti göstermeden (yani uyarıcı nitelikte bir işaret vermeksizin) ani ve yıkıcı bir biçimde gerçekleşir [16].

Yorulma hasarı, sünek malzemeler için bile plastik deformasyonun oluşmadığı ya da oluşması durumunda bile sadece çok az bir miktarda meydana gelmesi açısından gevrek kırılmaya benzer bir şekilde meydana gelir. Çatlakların oluşması ve ilerlemesi ile gerçekleşen hasar sonucu oluşan kırılma yüzeyi, genellikle uygulanan çekme gerilmesine dik olarak uzanır [16].

Yorulma, tekrarlanan yükler altında hasara sebep olur. Bir yorulma kırığında üç faz vardır: çatlak başlatılması, çatlak yayılması ve kırılma. Bu aşamalar ayrılamaz. Süreç bir çatlak oluşumu olarak tanımlanabilir, çünkü tekrarlanan bölgesel plastisite, onun kritik bir boyuta ulaşılanaya kadar ilerlemesini ve daha sonra hasarlanmasına sebep olur. Genel olarak servis ömrü boyunca karşılaşılan hataların yaklaşık %90'ını yorulma hasarlarını kapsar [17].

Bir parça, titreşimler ve değişken stresler dahil olmak üzere çeşitli yükleme koşullarına maruz kalır. Değişken stres, değişken sıcaklık (termal yorulma) ve bunların herhangi biri korozif bir ortamlar veya yüksek sıcaklık sebebiyle çoğu servis arızasına, bunlarda çekme gerilmeleri sonucu oluşur [17].

2.2.2. Çevrimsel Gerilmeler

Uygulanan gerilme aksenal doğrultuda çekme-basma, eğme veya burma şeklinde olabilir. Genellikle, üç farklı değişken zorlanma modu söz konusudur. Bunlardan biri gerilme genliğinin, değeri sıfır olan bir ortalama gerilme etrafında simetrik bir şekilde, düzenli ve sinüzoidal olarak değiştiği zorlanma durumu olup Şekil 2.15a'da şematik olarak gösterilmiştir. Değişken zorlanma olarak anılan bu zorlanma durumunda gerilme bir maksimum çekme gerilmesi (σ_{maks}) değerinden, aynı büyüklükteki minimum basma gerilmesine (σ_{min}) doğru sinüzoidal bir şekilde değişir. Şekil 2.15b'de gösterilen maksimum ve minimum gerilmenin sıfır gerilme seviyesine göre asimetrik değer aldığı yükleme durumu çekme (ya da basma) bölgesinde değişken zorlanma olarak adlandırılır. Son olarak, Şekil 2.15c'de örnek olarak verilen zorlanma şeklinde, gerilme genliğinin büyüklüğü ve frekansı (tekrar sıklığı) düzensiz olarak değişmektedir [16].

Şekil 2.15b'de gösterilen parametreler, dinamik zorlanmayı tanımlamada kullanılır Gerilme genliğinin etrafında değiştiği ortalama gerilme (σ_{ort}), çevrimdeki maksimum ve minimum gerilmelerin ortalaması olarak tanımlanır [16],

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

Gerilme aralığı σ_{ara} , σ_{maks} ile σ_{min} arasındaki farktır [16].

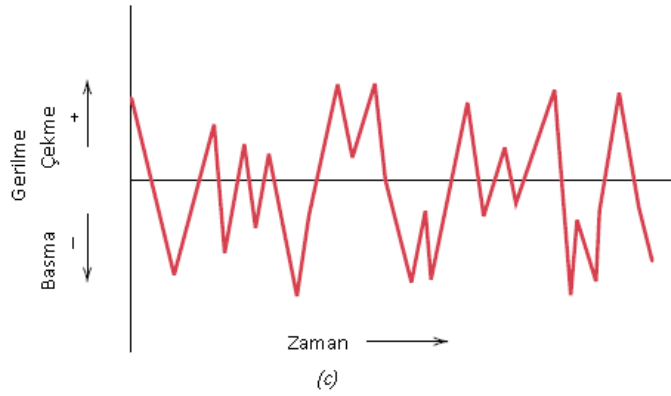
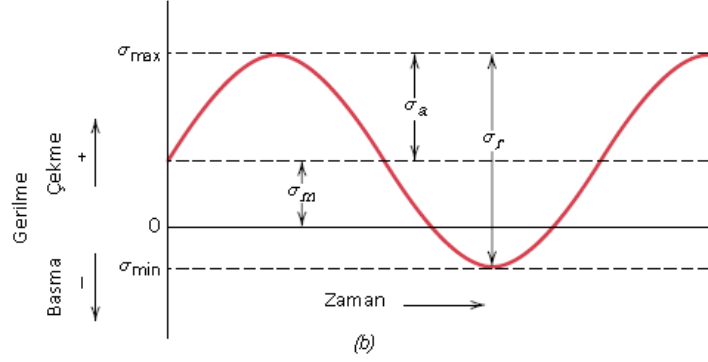
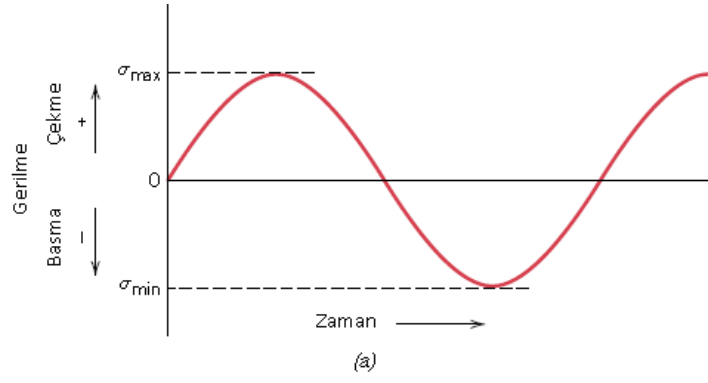
$$\sigma_{ara} = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (2.2)$$

σ_g Gerilme genliği ise gerilme aralığının yarısına eşittir [16],

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{ara}}{2} = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

Son olarak, gerilme oranı (R) minimum gerilmenin, maksimum gerilmeye oranıdır [16]:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} \quad (2.4)$$

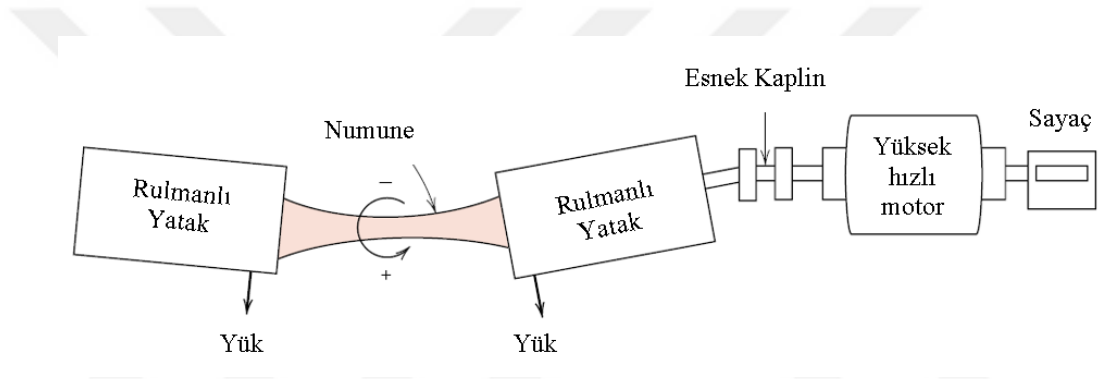


Şekil 2.15. Yorulma hasarına yol açan gerilmenin zamanla değişimi; a) Gerilmenin aynı büyüklükte bir maksimum çekme gerilmesi (+) ile maksimum bir basma gerilmesi (-) arasında değiştiği değişken gerilme çevrimi; b) maksimum ve minimum gerilmelerin sıfır gerilme seviyesine göre asimetrik olduğu çekme bölgesinde değişken gerilme çevrimi, ortalama gerilme σ_{ort} , gerilme aralığı σ_{ara} ve gerilme genliği σ_g ile gösterilmiştir; c) düzensiz gerilme çevrimi [16].

Genel bir kural olarak, çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri negatif işaretle belirtiler. Örneğin buna göre, değişken zorlanma için gerilme oranı (R) değeri, -1'dir [16].

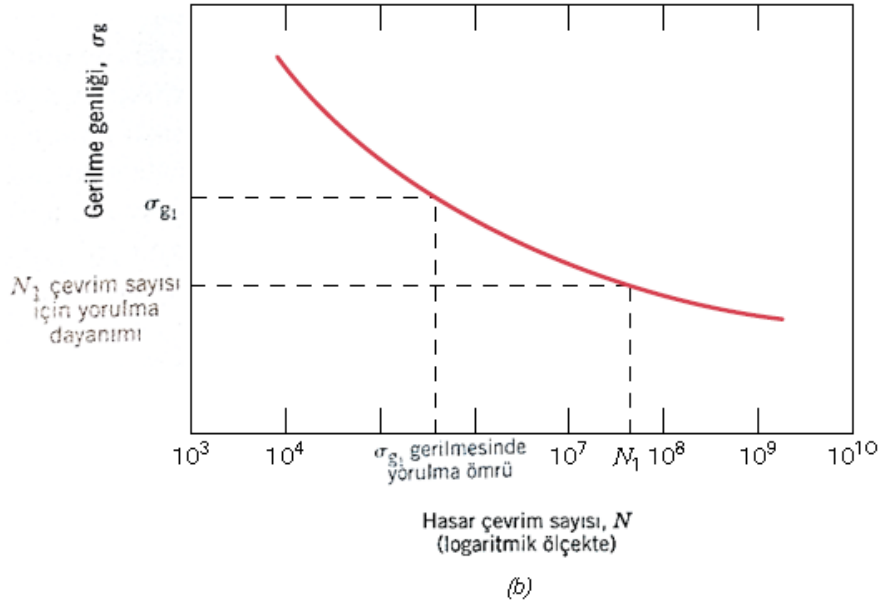
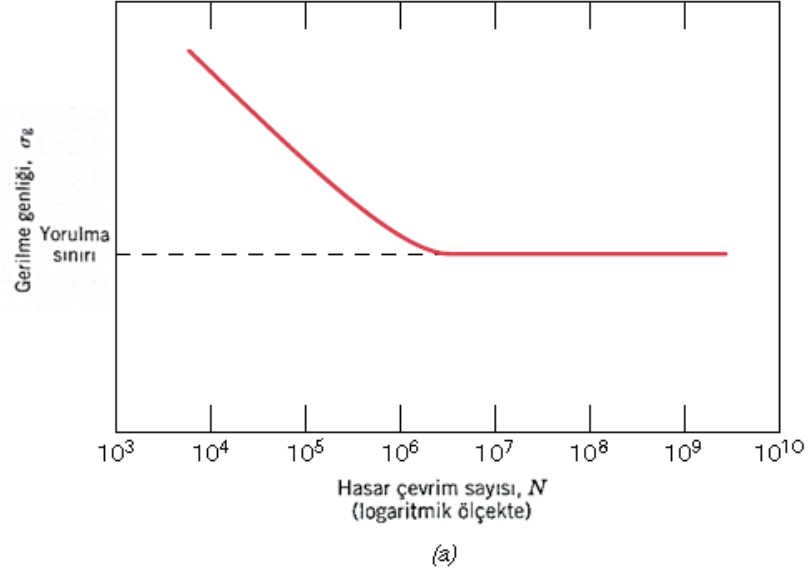
2.2.3. S-N Eğrisi

Diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi, malzemelerin yorulma özellikleri de laboratuvarda benzer zorlanma şartlarının oluşturulduğu deneylerler yardımıyla belirlenebilir. Deney düzeneği, çalışma koşullarındaki gerilme durumuna (gerilmenin seviyesi, frekans, gerilmenin değişim şekli) mümkün olduğunca benzer şekilde tasarlanmalıdır. Yorulma deneyleri için yaygın olarak kullanılan çevresel eğme (döner eğme) yorulma deney düzeneğinin şematik bir gösterimi Şekil 2.16'da verilmiştir. Burada dönen deney numunesi yükün etkisi altında sürekli olarak eğilmeye zorlanarak, basma ve çekme gerilmelerine maruz kalır. Bunun dışında, değişken aksenal çekme-basma gerilmelerinin uygulandığı deneyler de sıkça yapılmaktadır [16].



Şekil 2.16. Çevresel eğme yorulma deneyinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi [16]

Bir deney numunesine, genellikle statik çekme dayanımının üçte ikisi mertebesinde olan, nispeten yüksek bir gerilme genliğinde çevrimsel gerilme uygulanması ile deney serisine başlanır. Deneyler sırasında hasara kadar geçen çevrim sayısı kaydedilir. Bu işlem, büyüklüğü sürekli azalan gerilme genliklerinde diğer numuneler için tekrarlanır. Gerilme miktarı σ 'ya göre hasarın meydana geldiği çevrim sayısının logaritmasını gösteren bir eğri çizilir. Gerilme değeri σ olarak normalde gerilme genliği alınır (Denklem 2.3) ve bazen σ_{\min} veya σ_{\max} değerleri de kullanılabilir [16].



Şekil 2.17. a) Yorulma sınırı gösteren malzeme, b) Yorulma sınırı göstermeyen malzemeler için gerilme genliğinin, logaritmik olarak hasarın çevrim sayısına göre değişimi [16]

Şekil 2.17’de şematik olarak gösterildiği gibi, iki farklı yorulma davranışı söz konusudur. Eğrilerden görüleceği gibi, gerilme büyüklüğü arttıkça malzemenin hasara uğramadan dayandığı çevrim sayısı azalmaktadır. Bazı demir esaslı alaşımlarda ve titanyum alaşımlarında, S-N eğrisi yüksek çevrim sayılarında yatay hale gelmektedir (Şekil 2.17a). Yorulma sınırı olarak adlandırılan bu sınır gerilme miktarının altında yorulma hasarı meydana gelmez. Yorulma sınırı, sonsuz çevrim sayısında hasara yol

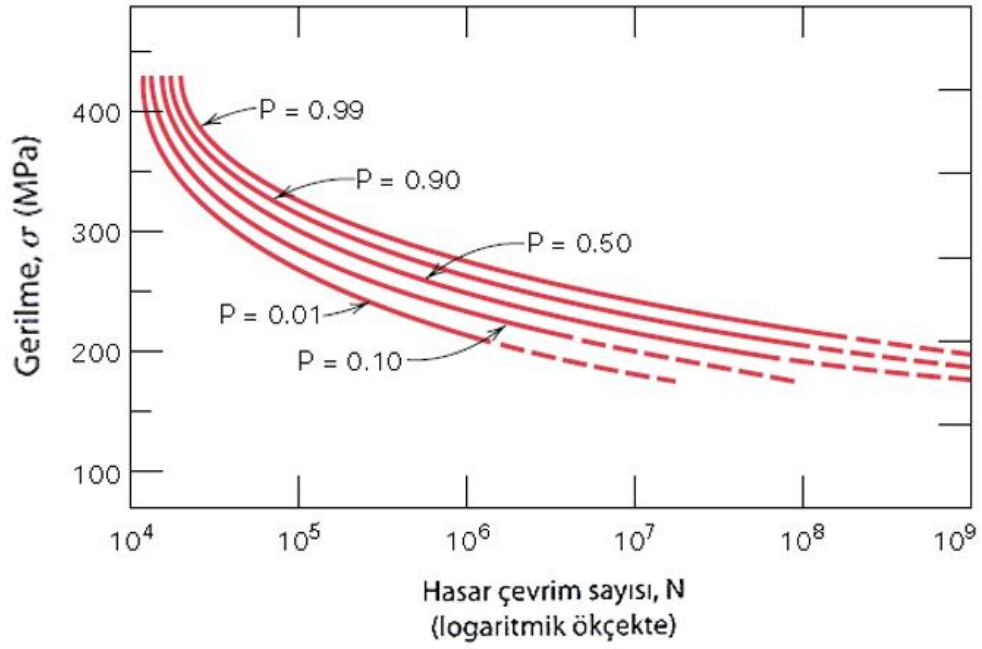
açmayan en büyük çevrimsel gerilme olarak ifade edilebilir. Birçok çelik için, yorulma sınırı çekme dayanımının yaklaşık olarak %35 ile %60'ı arasında değişir [16].

Çoğu demir dışı alaşım (örneğin, alüminyum, bakır, magnezyum) için böyle bir yorulma sınırı söz konusu değildir. Artan çevrim sayısı ile birlikte S-N eğrileri daha küçük gerilme değerlerine düşmeye devam eder (Şekil 2.17b). Bu nedenle, gerilme büyüklüğü ne kadar küçük olursa olsun, yorulma hasarı meydana gelecektir. Bu malzemelerde belirli bir çevrim sayısına (örneğin 10^7) karşılık gelen gerilme seviyesi, yorulma dayanımı olarak tanımlanır. Şekil 2.17b'de yorulma dayanımının nasıl belirlendiği gösterilmiştir [16].

Malzemenin yorulma davranışı tanımlayan bir diğer önemli parametre yorulma ömrü N_f 'dir. Şekil 2.17b'de S-N eğrisinde gösterildiği gibi yorulma ömrü, belirli bir gerilme seviyesinde hasara neden olan çevrim sayısıdır [16].

Burada, yorulma verilerinde her zaman önemli miktarda bir saçılımın (dağılım) söz konusu olduğu vurgulanmalıdır. Yani, aynı gerilme seviyesinde test edilen numunelerden farklı çevrim sayıları (N) elde edilir. Bu farklılık, yorulma ömrünün ve/veya yorulma sınırının (ya da dayanımının) dikkate alındığı tasarımlarda ciddi belirsizliklere yol açmaktadır. Bu saçılım, yorulmanın kesin bir şekilde kontrol edilmesi mümkün olmayan bir takım deney ve malzeme parametrelerine duyarlı olmasından kaynaklanır. Numune imalatı ve yüzeylerinin hazırlanması, metalurjik değişkenler, numunenin cihaza bağlanması, ortalama gerilme ve deney frekansı deney sonuçlarında saçılıma yol açan parametreleri oluşturur [16].

Şekil 2.17'deki gibi, S-N eğrileri, deney verilerinin ortalamalarına en uygun olarak çizilen eğrilerdir, istatistiksel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, test edilen numunelerin yaklaşık olarak yansının, eğriden okunan değer yaklaşık %25'i kadar altında bulunan gerilme seviyelerinde hasara uğraması rahatsız edici bir durumdur [16].



Şekil 2.18. Bir 7075-T6 alüminyum alaşımı için farklı hasar olasılıklarını gösteren S-N eğrileri; P hasar olasılığını belirtmektedir [16]

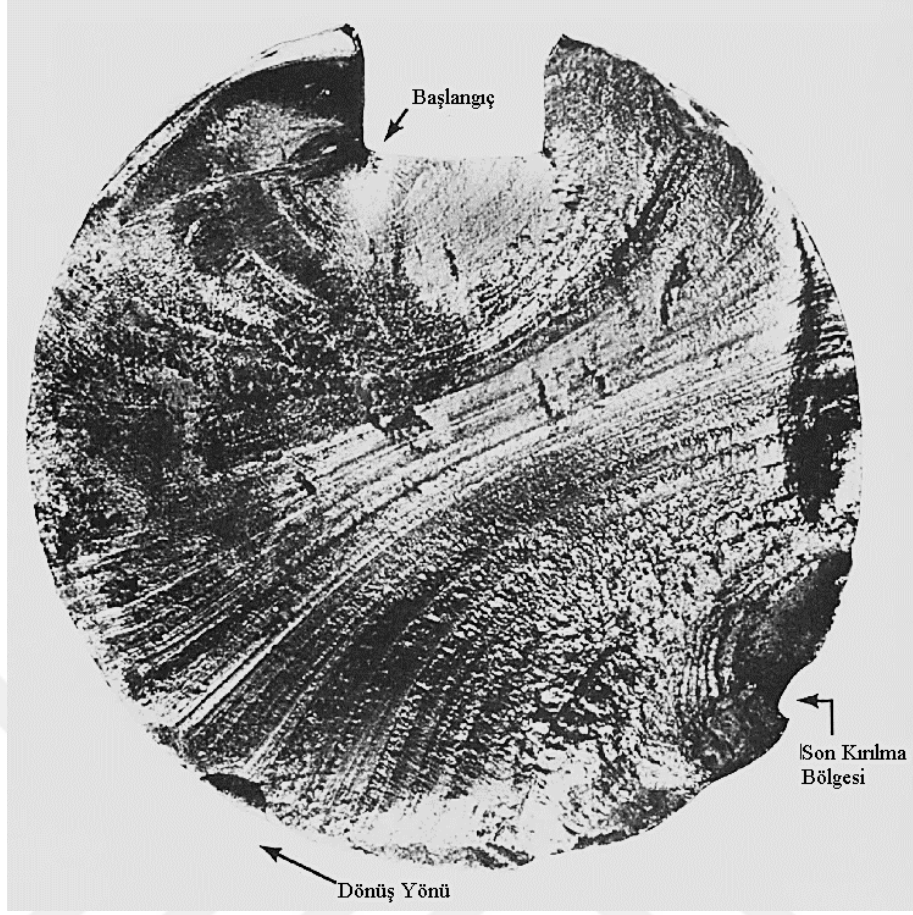
Yorulma ömrünü ve yorulma sınırını, olasılık değerleriyle birlikte belirlemek için birkaç farklı istatistiksel teknik geliştirilmiştir. Verileri istatistiksel olarak sergilemenin bir yolu, sabit olasılık eğrileriyle birlikte sunmaktır (Şekil 2.17). Burada, her bir eğrinin P değeri, o eğri için hasar olasılığını işaret etmektedir. Örneğin, 200 MPa'lık bir gerilmede, numunelerin % 1'nin 10^6 çevrimde, %50'sinin 2×10^7 çevrimde hasara uğramaları beklenmektedir. Literatürde verilen S-N eğrilerinin, aksi belirtilmedikçe, ortalama değerleri gösterdikleri unutulmamalıdır [16].

Şekil 2.17a ve şekil 2.17b'de verilen yorulma eğrileri iki bölgeye ayrılabilir. Birinci bölge; çevrimsel gerilmenin sadece elastik değil, aynı zamanda plastik şekil değişimi de oluşturduğu, gerilmenin nispeten yüksek olduğu bölgedir. Dolayısıyla, yorulma ömrünün nispeten kısa olduğu bu bölgeye kısa-ömürlü-yorulma bölgesi adı verilmiştir. Bu bölgede yorulma hasarı 10^4 ile 10^5 'den daha az çevrim sayılarında oluşur. Şekil değişiminin tamamen elastik olduğu, düşük gerilme seviyelerinde yorulma ömrü daha uzundur. Yorulma hasarı için nispeten yüksek çevrim sayılarının gerekli olduğu bu bölgeye uzun-ömürlü yorulma bölgesi adı verilmiştir. Uzun ömürlü yorulmada, ömür, yaklaşık olarak 10^4 ile 10^5 'den çevrim sayılarından daha büyüktür [16].

2.2.4. Çatlak Oluşumu ve İlerlemesi

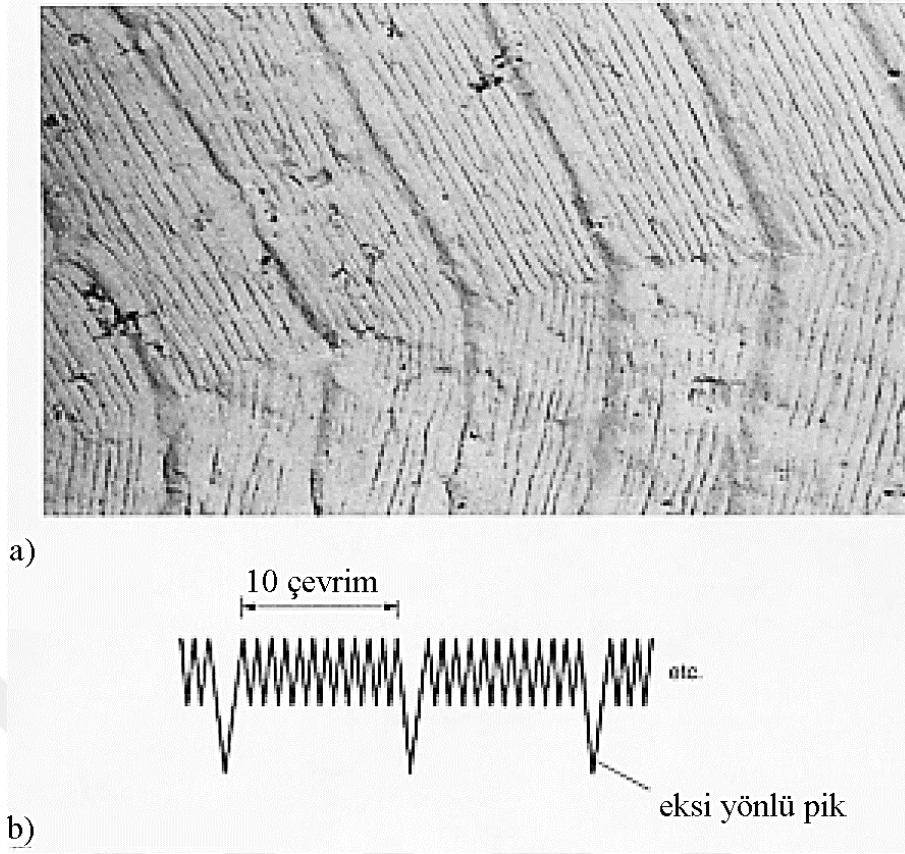
Yorulma hasarına ait süreç üç farklı safhaya ayrılabilir: (1) çatlak başlangıcı, gerilme yığılmasının yüksek olduğu bir noktada küçük bir çatlağın oluşması; (2) çatlak ilerlemesi, her bir gerilme çevriminde çatlağın adım adım ilerlemesi; (3) kırılma, çatlağın kritik büyüklüğe ulaşmasıyla kırılmanın çok hızlı bir şekilde meydana gelmesi. Yorulma hasarına yol açan çatlaklar, genellikle parçanın yüzeyinde gerilme yığılmasının gerçekleştiği bir noktada oluşur. Çatlak oluşumu ya da başlangıç bölgelerine örnek olarak, yüzey çizikleri, keskin köşeler, kama yatağı, vida dişi, girintiler ve buna benzer noktalar verilebilir. Ayrıca, çevrimsel yükleme altında dislokasyonların kayma adımları oluşturmaları, yüzeyde mikro ölçekte süreksizliklerin meydana gelmesine yol açabilir. Yüzeyde oluşan bu kayma adımları gerilme yığılmasına ve dolayısıyla da çatlakların oluşmasına neden olabilir [16].

Çatlak ilerlemesi safhası sırasında oluşan kırılma yüzeyi, durak çizgileri ve ince yorulma (striasyon) çizgileri olarak adlandırılan iki tür iz ile ayırt edilebilir. Bu izler herhangi bir anda, çatlak ucunun yerini ve dolayısıyla çatlak cephesini gösteren ve merkezleri çatlak başlangıç yerine (ya da yerlerinden) denk gelen dairesel veya yan dairesel çizgiler olarak görünür. Durak çizgileri makro ölçekte boyutlara sahip olduğundan (Şekil 2.19), çıplak gözle görülebilir. Bu izler çatlak ilerleme safhasının kesintiye uğradığı parçalarda görülür. Buna örnek olarak, sadece gündüz vardiyasında çalışan bir makine verilebilir. Her bir durak çizgisi aralığı, çatlağın ilerlediği bir zaman dilimini işaret eder [16].



Şekil 2.19. Yaklaşık 30 HRC sertliğindeki AISI 1040 malzemeden yapılmış kamalı geçme şaftın çevresel eğme yorulma kırılması [18]

Diğer taraftan, mikro ölçekte boyutlara sahip olan ince yorulma çizgileri, ancak elektron mikroskopuyla (TEM veya SEM) gözlenebilir. Şekil 2.20'de bu çizgilerin görüldüğü bir kırık yüzeyi fotoğrafı verilmiştir. Her bir ince yorulma çizgisinin, tek bir yükleme çevrimi sırasında, çatlak cephesinin ilerleme mesafesini temsil ettiği düşünülmektedir. Bu çizgilerin arasındaki genişlik, gerilme aralığına bağlıdır. Gerilme aralığının artması bu çizgilerin arasındaki mesafeyi artırır [16].



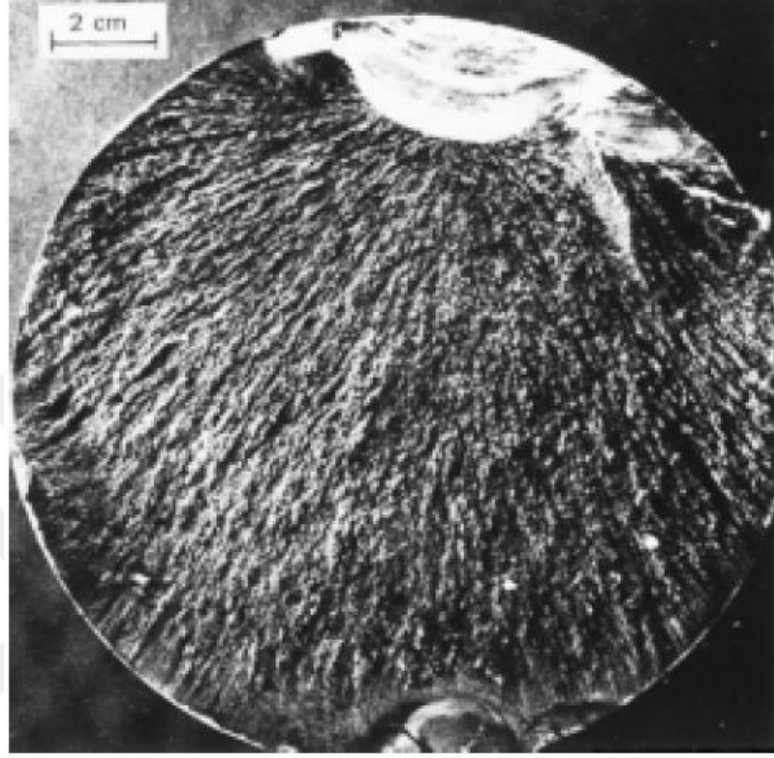
Şekil 2.20. 2024-T3 alüminyum sac malzemedeki yük uygulama karakteristiğine göre oluşan ince yorulma çizgileri (striasyon) taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [19]

Bu noktada, yorulma kırılması yüzeyine özgü ve görünüşlerinde benzer izleri taşımalarına rağmen, durak ve ince yorulma çizgilerinin oluşma nedenlerinin ve büyüklüklerinin birbirlerinden farklı olduğunun altı çizilmelidir. Tek bir durak çizgisinde gerçekte binlerce ince yorulma çizgisi bulunabilir [16].

Genellikle hasar nedenleri kırık yüzeylerinin incelenmesinden sonra anlaşılır. Kırık yüzeylerinde, durak çizgilerinin ve/veya ince yorulma çizgilerinin varlığı, hasarın yorulmadan kaynaklandığını gösterir. Bununla beraber, bunlardan birisinin veya her ikisinin bulunmaması, hasarın yorulma sonucu oluşmadığı anlamına gelmez [16].

Kırık yüzeyi ile ilgili son olarak, hızlı çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölgede durak ve ince yorulma çizgilerinin görülmediği vurgulanmalıdır. Aksine, hızlı çatlak ilerisini sünek ya da gevrek şekilde meydana gelebilir. Sünek kırılmada plastik

deformasyonu işaret eden bulguların (izlerin) varlığı söz konusu iken gevrek kırılmada böyle izler bulunmaz. Hasarın hızlı bir şekilde meydana geldiği bu bölge, Şekil 2.21'teki kırık yüzeyinde görülmektedir [16].



Şekil 2.21. Yorulma kırık yüzeyi.

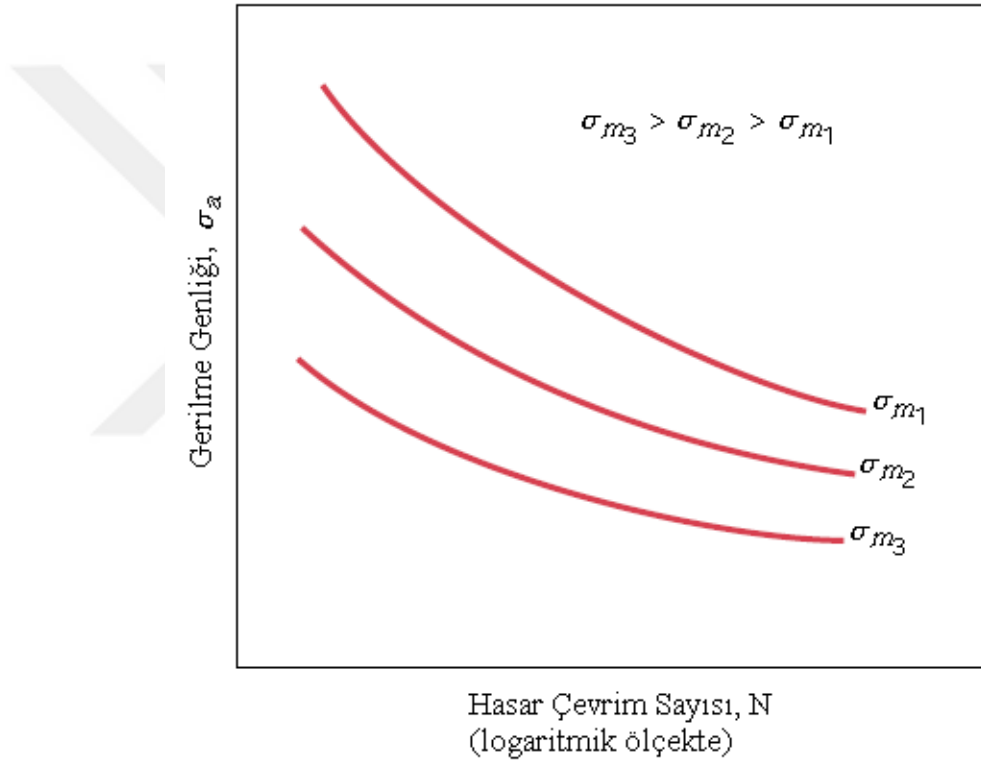
Çatlak üst tarafta başlamıştır. Üst kenara yakın düz bölge, yavaş çatlak ilerleme bölgesidir. Ani kırılma bölgesi ise büyük alana sahip olup mat ve lifli görüntüdedir. Yaklaşık X0,5 büyütme [16]

2.2.5. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

Mühendislik malzemelerinin yorulma davranışı birçok değişkenden önemli oranda etkilenir. Ortalama gerilme seviyesi, tasarım geometrisi, yüzey kalitesi, metalürjik değişkenler ve ortam koşulları bu faktörlerin bir kısmını oluşturur. Bu kısım, bu faktörlerin etkisi ve yapısal parçaların yorulma direncini artırmak için alınabilecek önlemlere ayrılmıştır [16].

2.2.5.1. Ortalama Gerilme

Yorulma ömrünün gerilme genliğine göre değişimi S-N eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Bu yorulma eğrileri sabit ortalama gerilme (σ_{ort}) değerleri için, çoğu kez de değişken zorlanma durumu ($\sigma_{ort} = 0$) için elde edilir. Ancak ortalama gerilme yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu etki farklı ortalama gerilme değerine sahip bir seri S-N eğrisiyle Şekil 2.22’de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, ortalama gerilme seviyesinin artması yorulma ömründe azalmaya yol açmaktadır [16].



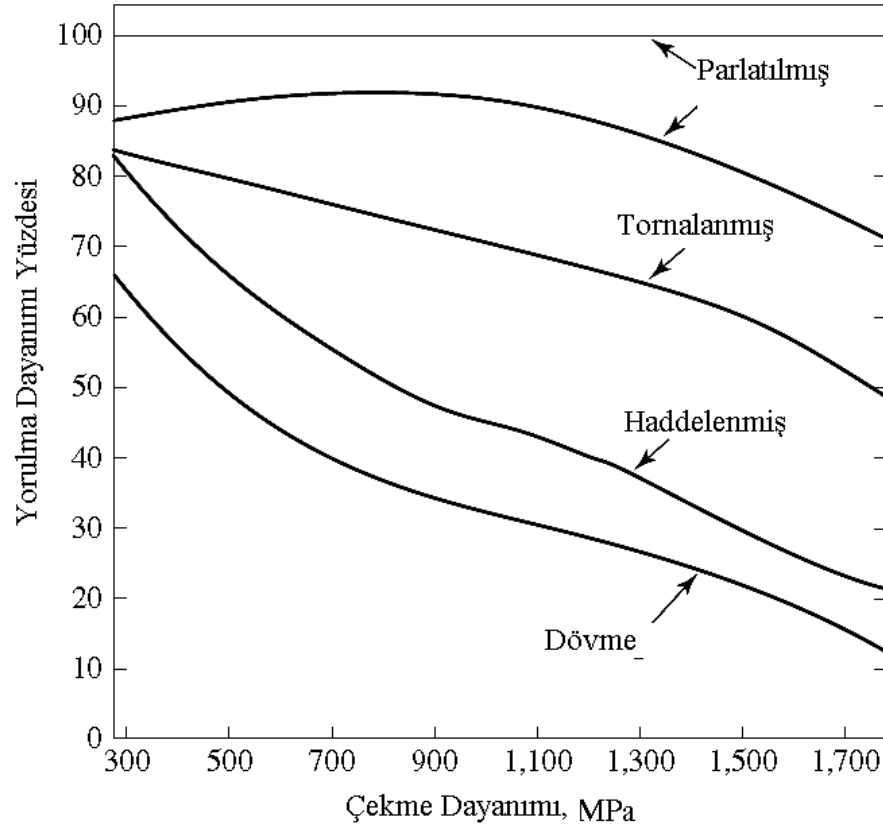
Şekil 2.22. Ortalama gerilmenin S-N eğrisi üzerinde olan etkisinin gösterilmesi

[16]

2.2.5.2. Yüzey Etkisi

Çoğu yükleme durumu için maksimum gerilme, yapı veya onu oluşturan parçanın yüzeyinde oluşur. Dolayısıyla, yorulma hasarına yol açan çoğu çatlak, yüzeyden özellikle de gerilme yığılmasının olduğu bölgelerden başlar. Bu nedenle yorulma ömrünün parçanın özellikle yüzey durumu ve koşullarına duyarlı olduğu

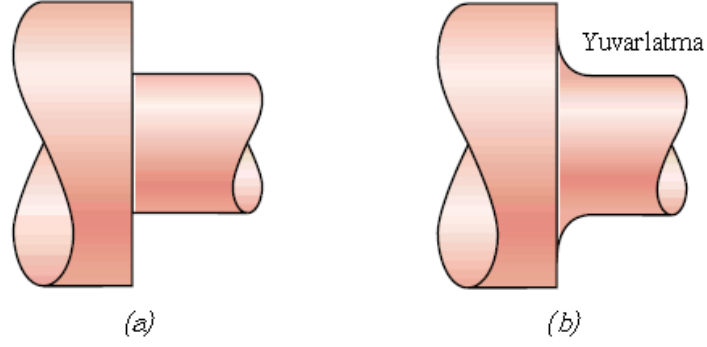
gözenmiştir. Yorulma direncini etkileyen çok sayıdaki faktörün uygun bir şekilde düzenlenmesi yorulma ömründe artış sağlayacaktır (Şekil 2.23). Bu, tasarım prensiplerinin yanı sıra çeşitli yüzey işlemlerim içerir [16].



Şekil 2.23. Yüzey işleminin yorulma dayanımına etkisi [20]

2.2.5.3. Tasarıma Ait Faktörler

Parça tasarımı, parçanın sergileyeceği yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Herhangi bir çentik veya geometrik süreksizlik gerilme yığılmasına yol açabilir ve çatlak başlangıç yeri olarak davranabilir. Tasarımda yer alan yivler, delikler, kama yuvaları, vida dişi ve benzerleri bunlara örnek olarak verilebilir. Süreksizlikler ne kadar keskin (yuvarlatma yarıçapı küçük) ise gerilme yığılması şiddeti o kadar yüksek olacaktır. Mümkün olması durumunda böyle yapısal düzensizliklerden kaçınılması veya keskin köşelere yol açan ani kesit değişikliklerinin önlenmesi için tasarımda değişikliğe gidilmesi yorulma başarımının oluşma olasılığı azaltılabilir. Şekil 2.24'te dönen faturalı bir milde, çap değişiminin gerçekleştiği geçiş noktasında yuvarlatma yarı çapının büyük tutulması buna örnek olarak verilebilir [16].



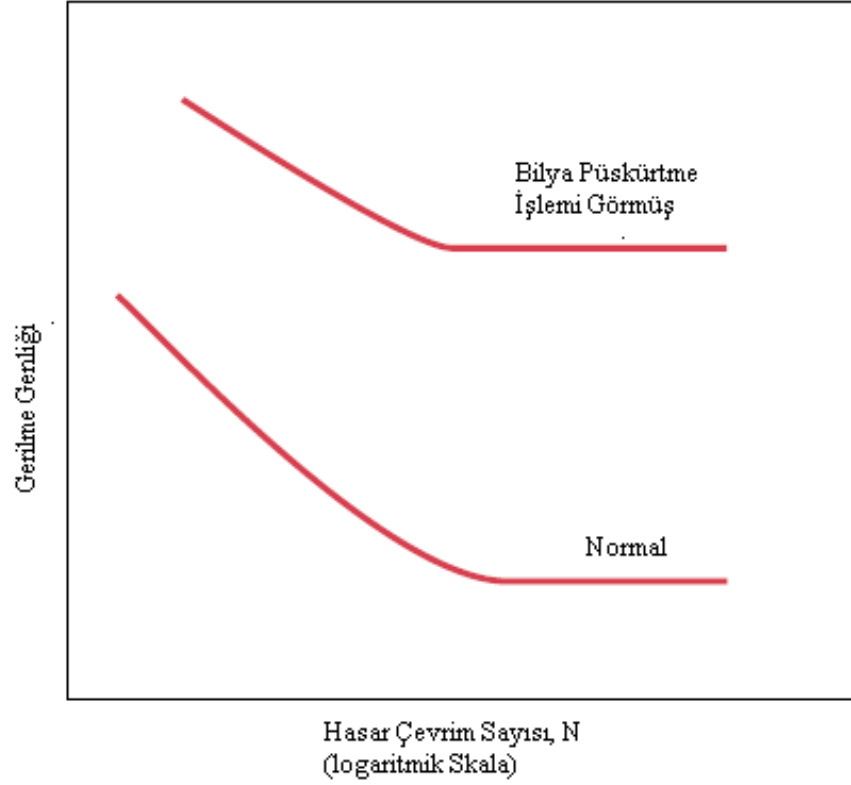
Şekil 2.24. Tasarımda değişiklikle, gerilme yığılması etkisinin nasıl azaltılacağını gösteren şema; a) Yanlış tasarım: keskin köşe, b) Doğru tasarım: mil çapının geçtiği geçiş bölgesinde yuvarlatma yarıçapının büyük tutularak yorulma ömrünün artırılması [16]

2.2.5.4. Yüzey İşlemleri

Talaşlı imalat sırasında kesme takımının hareketi sonucu iş parçasının yüzeyinde her zaman küçük çizik ve yivler oluşur. Yüzeydeki bu izlerin varlığı yorulma ömrünü sınırlar. Son işlem olarak parlatmayla yüzey kalitesinin iyileştirilmesi parçanın yorulma ömrünü önemli miktarda artıracaktır [16].

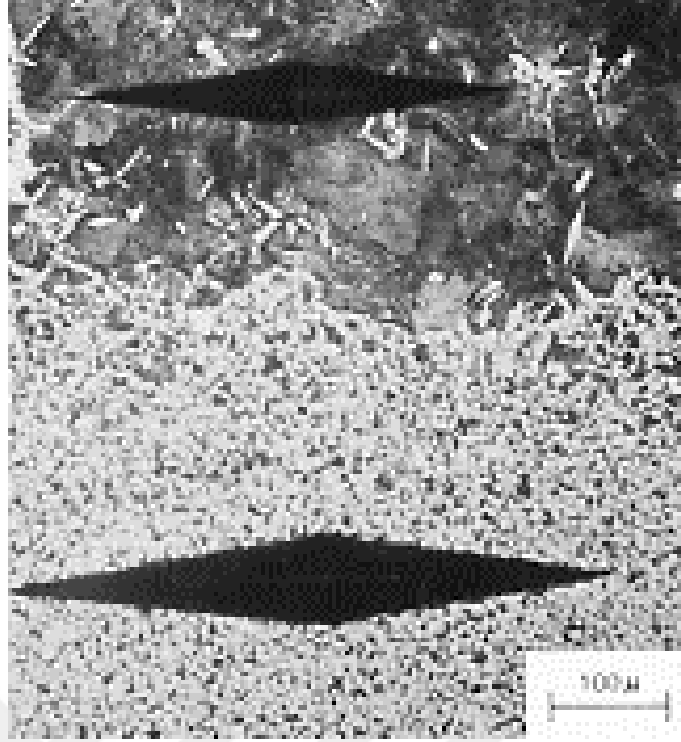
Yorulma performansını arttırmak için en etkili yöntemlerden biri en dış yüzey tabakasında basma artık gerilmeleri oluşturmaktır. Bu sayede, yüzeyde dış kuvvetlerin oluşturduğu çekme gerilmelerinin bir kısmı, basma artık gerilmelerinin büyüklüğü kadar giderilmiş ya da azaltılmış olur. Böylece, çatlak oluşumunun ve dolayısıyla yorulma hasarı olasılığı düşürülmüş olur [16].

Genellikle, sünek metallerde basma artık gerilmeleri mekanik olarak yüzeyde yerel plastik deformasyon ile oluşturulur. Çoğu zaman, bu işlem ticari olarak bilya püskürtme denilen bir yöntemle gerçekleştirilir. Boyuttan 0,1 mm ile 1 mm arasında değişen küçük ve sert parçacıklar (bilya) yüksek hızda metal yüzeyine doğru püskürtülür. Yüzeyde oluşan deformasyon bilya çapının çeyreği ile yansı arasındaki bir derinlikte basma gerilmeleri oluşturur. Bilya püskürtmenin çeliklerin yorulma davranışı üzerine olan etkisi şekil 2.25'te şematik olarak gösterilmiştir [16].



Şekil 2.25. Bilya püskürtme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış çeliklere ait şematik S-N eğrileri [16]

Kabuk sertleştirme çelik alaşımlarında hem yüzey sertliğinin hem de yorulma ömrünün arttırıldığı bir yöntemdir. Bu işlem, parçanın yüksek sıcaklıkta karbonca ya da azotça zengin bir ortama maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilen sementasyon (karbürleme) ya da nitrürleme işlemleriyle yapılabilir. Gaz fazından metalin yüzeyinden içeriye doğru gerçekleşen atomsal yayınma sonucu, karbon veya azotça zengin bir yüzey tabakası (kabuk) oluşturulur. Kabuk kalınlığı genelde 1 mm mertebelerindedir ve sertliği iç kısma göre dahi yüksektir. Yorulma özelliklerindeki iyileşme, sadece kabuktaki sertlik artışından değil, aynı zamanda karbürleme veya nitrürleme işlemi sonucu meydana gelen basma artık gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Dişlide, kesiti alınan kısımda karbonca zengin kabuk bölgesi, koyu tonda görülmektedir. Kabuk sertliğindeki artış Şekil 2.26'da verilen fotoğrafta gösterilmiştir. Burada koyu renkte ve geniş eksenli baklava biçimli şekil, Knoop mikro sertlik ölçümüne aittir ve karbürlenmiş tabakaya ait üstteki sertlik ölçüm izi, çekirdek bölgesindeki izden daha küçüktür [16].



Şekil 2.26. Kabuk sertleştirme işlemi uygulanmış bir çeliğin çekirdek (altta) ve kabuk (üstte) bölgelerini gösteren mikroyapı fotoğrafı. Kabuk bölgesi, sertlik ölçümüne ait izin küçük olmasından anlaşılacağı gibi daha serttir [16].

2.2.5.5. Çevresel Etkiler

Çevresel faktörler de malzemelerin yorulma davranışını etkileyebilmektedir. Burada ısıl (termal) yorulma ve korozyonlu yorulma olmak üzere çevre etkisinde oluşan iki tip yorulma hasarına ilişkin özet bilgi verilecektir [16].

2.2.5.3.1. Isıl Yorulma

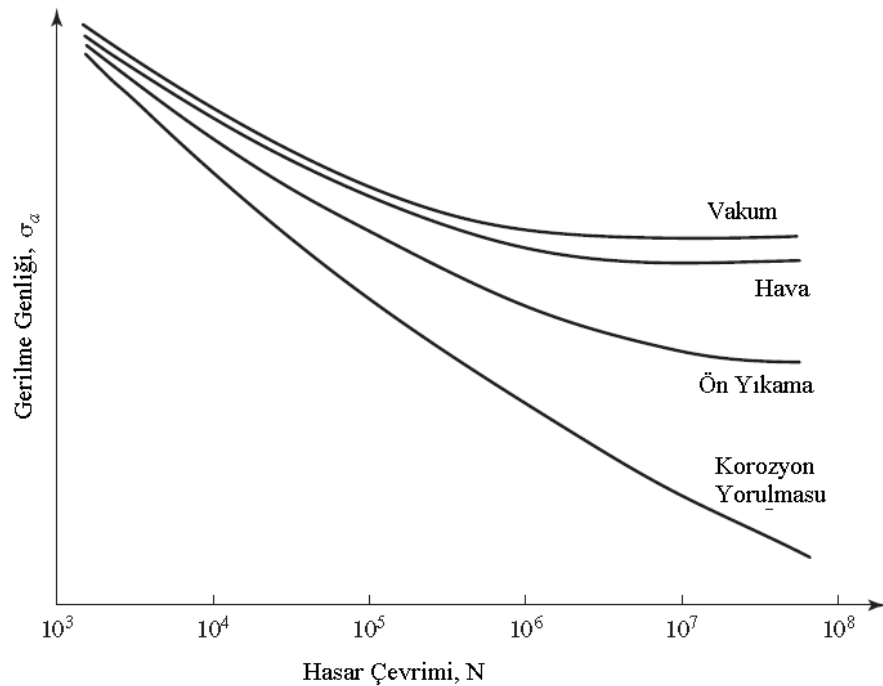
Isıl yorulma, dış kaynaktan gelen mekanik gerilmelere gerek olmadan, değişken ısıl gerilmeler neticesinde genellikle yüksek sıcaklıklarda oluşur. Isıl gerilmeler, sıcaklığın değişmesi ile yapısal bir parçada doğal olarak meydana gelecek boyutsal genleşme ve/veya daralmanın kısıtlanmasından kaynaklanır. Sıcaklıkta ΔT kadar bir değişme olduğunda, oluşan ısıl gerilmenin büyüklüğü, ısıl genleşme katsayısı α_1 , ve elastik modülü E 'ye göre aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [16]:

$$\sigma = \alpha_1 E \Delta T \quad (2.5)$$

Mekanik bir sınırlamanın bulunmaması durumunda, doğal olarak bir ısı gerilme oluşmaz. Dolayısıyla, bu tür yorulmanın meydana gelmemesi için başvurulabilecek en basit yöntem, hiç şüphesiz şekil değişimine ait sınırlamaları ortadan kaldırmak veya en aza indirmek ya da uygun fiziksel özelliklere sahip malzeme seçimi yapmaktır [16].

2.2.5.3.2. Korozyonlu Yorulma

Çevrimsel gerilme ve kimyasal etkinin birlikte etkimesi neticesinde oluşan hasara korozyonlu yorulma adı verilir. Korozyon etkiye sahip ortamlar, yorulma davranışını kötüleştirici etkiye sahip olup yorulma ömrünü kısaltırlar. Normal atmosfer şartları bile bazı malzemelerin yorulma davranışını etkileyebilir. Malzeme ile korozyon ortam arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda yüzeyde oluşan küçük oyuklar, gerilme yığılmasına yol açıp çatlak başlangıç bölgeleri olarak davranır, ilave olarak korozyon ortamının varlığı çatlak ilerleme hızını artırır. Çevrimsel gerilmenin doğası da yorulma davranışını etkiler. Örneğin, çevrimsel gerilme frekansının düşürülmesi, zorlanmanın etkisinde açılan çatlakın korozyon ortamla olan temas süresini uzatır ve bu şekilde yorulma ömrünün kısılmasına yol açar [16].



Şekil 2.27. Çevresel değişikliklerin çeliğin yorulma dayanımına etkisi [20]

Korozyonlu yorulmaya karşı alınabilecek çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Korozyon hızını azaltmaya yönelik önlemler alınabilir. Koruyucu yüzey kaplamaları oluşturmak, korozyona dirençli malzeme seçmek ve ortamın korozif etkinliğini azaltmak, bu önlemlere verilebilecek örnekler arasındadır. Ayrıca, yorulma hasar olasılığını minimize etmek için daha önce ana hatları verilen önlemlere, örneğin uygulanan çekme gerilmesi seviyesini azaltacak ve parça yüzeyinde basma türü artık gerilmeler oluşturacak işlemlere başvurulabilir (Şekil 2.27) [16].



2.3. Hasar Analizi

2.3.1. Giriş

Mühendislik malzemelerinde hasarın oluşması, başta can kaybı olmak üzere, ekonomik kayıplara neden olmasının yanı sıra bir ürün ya da bir işin tamamlanmasına engel olduğu için, neredeyse hiçbir zaman istenmez. Hasara yol açan etkenler ve malzeme davranışı bilinse bile, alınan önlemler sayesinde hasarların oluşmayacağı güvencesinin verilmesi zordur. Hatalı tasarım ve malzeme seçimi, imalat ve kullanım hataları, tipik hasar nedenleri olarak sıralanabilir. Yapı parçalarının çalışma sırasında hasara uğramaları mümkün olduğu için, emniyetli bir tasarım kapsamında düzenli kontrol, tamir veya değiştirme işlemlerinin yapılması kritik öneme sahiptir. Olası bir hasarı önceden öngörmek ve buna karşı planlama yapmak, hasarın oluşması durumunda da nedenlerini değerlendirmek ve daha sonra gelecekte tekrarlanmaması için gerekli önlemleri almak mühendisin sorumluluk alanı içindedir [16].



Şekil 2.28. The New York Times gazetesinde Neal Boenzi tarafından çekilen bir tanker kazası [16]

Şekil 2.28'deki fotoğraf, gövdesini çepeçevre saran bir çatlak ilerlemesi sonucu gevrek şekilde kırılmış bir akaryakıt tankerine aittir. Hasara yol açan çatlak, küçük bir çentik veya keskin geometriye sahip bir kusurdan başlamıştır. Denizde demir atmış

halde ya da seyir halindeyken şilepte meydana gelen gerilmeler, bir kusurun veya çentiğin uç kısmında, bir çatlağın oluşmasını ve hızlı bir şekilde ilerlemesine neden olacak şekilde önemli bir miktarda yükselmiş ve nihayet şilebin ikiye ayılmasına (kırılmasına) yol açmıştır [16].



Şekil 2.29. 28 Nisan 1988 tarihli Boeing 737-200 tipi uçak kazası [21]

Şekil 2.29'deki fotoğrafta, 28 Nisan 1988'de Aloha hava yollarına ait, 243 sefer sayılı Boeing 737-200 tipi bir ticari uçakta, patlama etkisi oluşturacak şekilde meydana gelen ani bir basınç düşmesi neticesinde, uçağın gövdesinde oluşan yapısal hasarı göstermektedir. Yapılan incelemelerden, kaza nedeninin uçağın nem ve tuz oranının yüksek olduğu iklim şartlarına sahip kıyı bölgesinde çalıştırılması ve buna bağlı olarak gövdede meydana gelen aralık korozyonunun şiddetlendirdiği metal yorulması olduğu sonucuna varılmıştır. Uçağın gövdesindeki çevrimsel gerilmeler, kısa süreli uçuşlar sırasında, uçağın kabin basıncının, dış basınca göre artması ve azalması neticesinde meydana gelmektedir. Bu uçağa hava yolu şirketi tarafından uygun bir bakım programı uygulaması olsaydı, gövdedeki yorulma hasarı önceden tespit edilmiş ve böylece kaza da önlenmiş olacaktı [16].

Hasar, bir yapının veya yapı elemanının kendisinden beklenen işlevi yerine getiremez hale gelmesidir. Hasar genelde aşırı zorlanma sonucu meydana gelir. Aşırı zorlanmış parçada hasar iki şekilde ortaya çıkar:

- Elemana etki eden yüklerin, elemanın taşıyabileceği yükten büyük olması (örneğin, aşırı yükleme),

- Elemanın dayanımının gerekli dayanımdan düşük olması (örneğin, malzeme seçiminde yapılan hata) [22].

Hasar analizinin amacı, teknolojik hataları ortaya çıkarmaktır. Bu iki nedenle gerekebilir:

- Teknolojik hatayı bularak bu hatayı engelleyici daha etkin tasarım veya kontrol yöntemleri geliştirip bu tip hasarların gelecekte tekrarını önlemek,
- Hasar sonrası oluşan yasal sorunlara sorumlu tarafı tespit etmek [22].

Daha geniş kapsamda hasar analizi, hasara neden olan teknolojik hatanın cinsini ve hasarın sorumlusunu ortaya çıkarmak ve hasarın benzer yapılarda tekrarını önleyici tedbirleri önermek amacıyla gerçekleştirilen faaliyetlerin tümüne verilen addır [22].

Hasar, yapının tasarım, imalat, montaj ve işletme safhalarının birinde yapılan teknolojik hata nedeniyle ortaya çıkar. Tasarım sırasında yapılan hatalar, tasarım hataları ve malzeme seçiminde yapılan hataları kapsar. Bu hatalardan tasarımcı sorumludur. İmalat safhasında rastlanan teknolojik hatalar ise; imalat hatalarını ve malzeme içindeki hataları kapsar. Bu hatalardan imalatçı sorumludur. Sistemin montajı sırasında yapılan hatalar montaj hataları olarak adlandırılır ve bundan montajı yapanlar sorumludur. İşletme sırasında yapılan hatalar ise, aşırı yükleme ve bakım hataları olup, bundan ise işletmeci sorumludur [22].

2.3.2. Teknolojik Hatalar

Teknolojik hatalar, hasarın, korozyona ve aşınma gibi hasarlarla, elastik veya plastik distorsiyon ve kırılma da dahil olmak üzere muhtelif hasar tiplerinden biriyle veya birkaçıyla meydana gelmesi sonucunu doğururlar [38].

2.3.2.1. Tasarım Sırasında Yapılan Hatalar

Bu gruba, tasarlanan parça geometrisinde çok şiddetli gerilme yığılmalarına neden olan süreksizliklerin mevcut olması, karmaşık parçalarda rasyonel gerilme

hesaplarının mümkün olmayışı ve yetersiz gerilme analizi, oluşması muhtemel hasar tipinin her biri için, malzemenin bu hasara karşı direncinin bir ölçüsü olan, etkin malzeme parametrelerini kullanmak yerine daha başka özellikleri göz önüne alarak tasarım yapmak, çalışma şartlarına veya öngörülen imal usulüne uygun olmayan malzeme seçmek gibi hatalar girer [38].

2.3.2.2. Malzeme İçindeki Hatalar

Metal olmayan kalıntılar ve yapıyı gevrekleştirici fazlar oluşturan kimyasal bileşim ile malzemenin yarı mamul hale getirilme safhasındaki döküm ve plastik şekil verme sırasında oluşan segregasyon, gözeneklilik, kendini çekme boşluk ve çatlakları, katmerler, homojen olmayan içyapı, kalan gerilmeler, aşırı yerel plastik deformasyonlar bu sınıfa girer [38].

2.3.2.3. İmalat Sırasında Yapılan Hatalar

Malzemeye tasarımda öngörülen son şeklinin verilmesi sırasında kullanılan imal usullerinin uygulanması sırasında ortaya çıkan hatalarla ısıl işlem ve yüzey işlemleri sırasında ortaya çıkan hataları kapsar. Bunlara örnek olarak; talaşlı imalat sırasında ortaya çıkan yırtılma ve çatlama; kaynak sırasında ortaya çıkan gözeneklilik, yanma olukları, erime azlığı, çatlaklar, kalan gerilmeler, ısı etkisi altındaki bölge; ısıl işlem sırasında ortaya çıkan yanma, çatlama, distorsiyon, tane büyümesi, taneler arası gevrek faz oluşumu; yüzey işlemleri nedeniyle ortaya çıkan hidrojen gevrekleşmesi verilebilir [38].

2.3.2.4. Montaj Hataları

İmalatçı ve alıcının muayenesi sırasında tespit edilememiş montaj hataları, yapının başlangıçtaki çalışmasının görünür biçimde engellemese de daha sonra yapıda hasara neden olur. Montaj hataları, tasarımda göz önüne alınmamış ilave gerilmeler ve değişik yükleme şekilleri oluşturarak aşınma, yorulma ömrünün azalması, distorsiyon ve benzeri hasarlara neden olur. Montaj hataları yanlış, yetersiz veya net olmayan montaj talimatnamelerinden doğduğu gibi montaj operatörünün hata ve

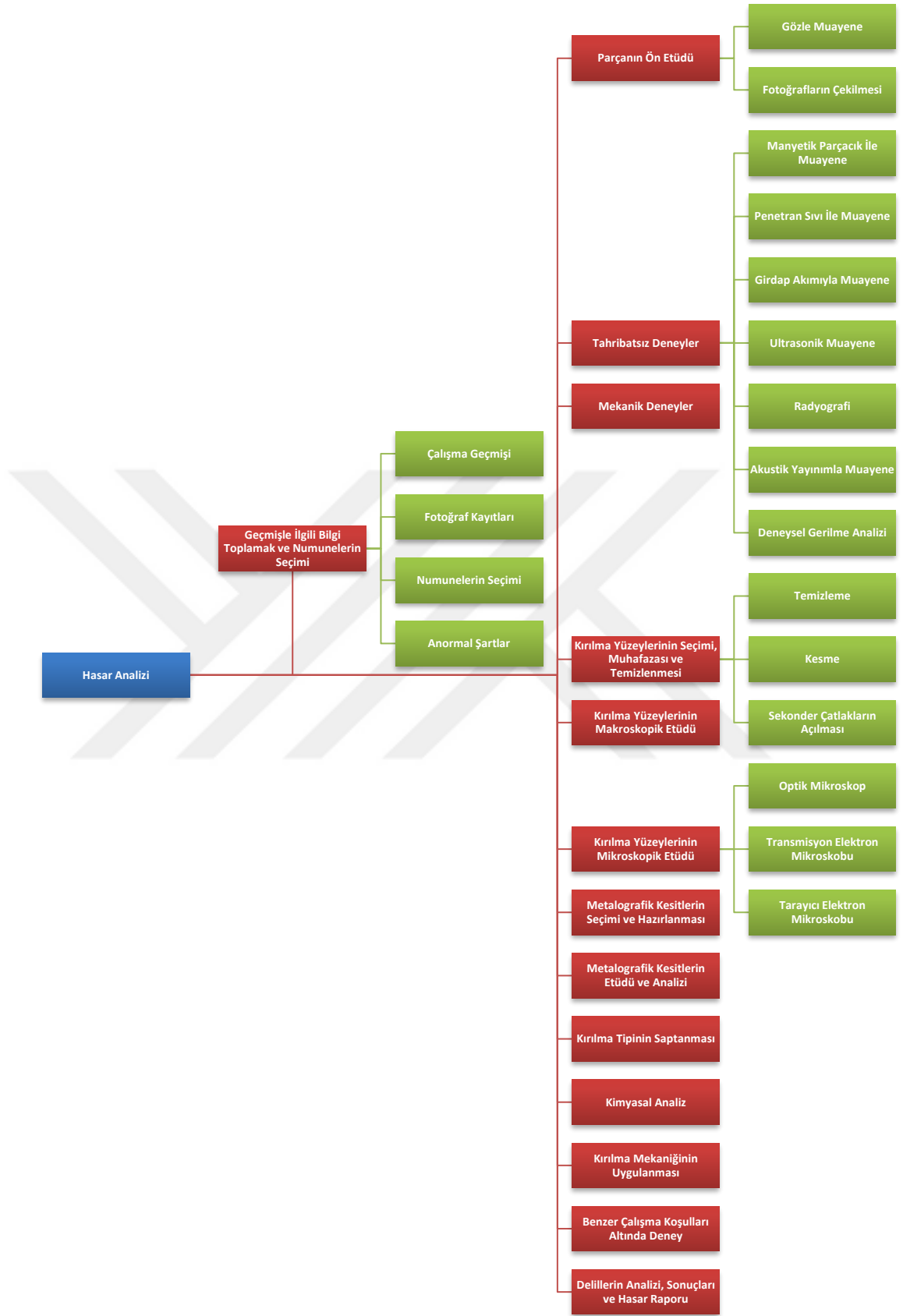
kayıtsızlığından kaynaklanabilir. Montaj hatalarına örnek olarak perçin deliklerindeki eksen kaçıklıkları, şaft, dişli, yatak ve kaplinlerdeki eksen kaçıklıkları, somunların uygun torkta ve üniform biçimde sıkılmaması verilebilir. Ayrıca bir montaj aracı olan kaynakta da daha önce açıklanan hatalar ortaya çıkabilir [38].

2.3.2.5. Uygun Olmayan Çalışma Şartları

Yapının tasarımında öngörülen çalışma şartlarından farklı şartlarda çalışması sonucu da hasar meydana gelir. Bunlara örnek olarak aşırı yükleme, çalışma ve ortam koşullarındaki ani ve beklenmedik değişimler, uygun olmayan işletme ve bakım koşulları, kasıtlı hareket verilebilir [38].

2.3.3. Hasar Analizi Safhaları

Hasardan sonra hiç vakit kaybetmeden hasara uğrayan sistemin bulunduğu yere giderek aşağıda sıralanan faaliyetlere girişilir. Bu faaliyetlerin sırası, göz önüne alınan hasarın doğasına bağlı olarak değişmekle birlikte, bunlar bir hasar analizinde takip edilecek temel safhalardır [38].



Şekil 2.30. Hasar analizi safhaları

2.3.3.1. Geçmişle İlgili Bilgi Toplamak ve Numunelerin Seçimi

Başlangıçta hasar araştırması hasarla ilgili tüm detayların öğrenilmesine, hasara uğramış elemanın veya yapının imalatı ve işletme geçmişiyle ilgili mevcut bilgilerin toplanmasına ve hasara neden olan olaylar sırasının mümkün olduğunca yeniden inşa edilmesine yönelik olmalıdır [22].

Belgelere dayalı bilgiler çok daha güvenlidir. Bunlar, hasarın tarihi ve zamanı, hava durumu, raporlar, kayıtlar ve olay yerinde çekilmiş fotoğraflar gibi gerçek bilgilerdir. Bir elemanın makine imalat geçmişiyle ilgili bilgi toplama, şartnameler ve teknik resimlerin elde edilmesiyle başlanmalı ve elemanın tüm tasarım hususlarını kapsamalıdır. İmalatla ilgili bilgiler aşağıdaki gruplar içinde toplanabilir:

- Mekanik işlemler: Soğuk şekil verme, çekme, eğme, talaş kaldırma, taşlama ve parlatma,
- Termal işlemler: Sıcak şekil verme, ısıtma işlemler, kaynak, sert ve yumuşak lehimleme,
- Kimyasal işlemler: Temizleme, elektro-kaplama, difüzyonla kaplama [22].

2.3.3.1.1. Çalışma Geçmişi

Parçanın çalışma geçmişiyle ilgili olarak elde edilebilecek bilgiler hasardan önce ne kadar detaylı ve tatmin edici kayıt tutulduğuna bağlıdır. Yeterli çalışma kayıtlarının mevcut oluşu hasar analizi ile ilgili kararların verilmesini büyük ölçüde kolaylaştırır. Buna karşılık birçok halde doyurucu işletme kayıtları mevcut değildir. Bu durumda hasar analizci eksik ve yetersiz işletme bilgisiyle çalışmak zorunda kalır. Sonuçta birçok şey hasar analizcinin tecrübe ve yorum kabiliyetine bağlı olup, yanlış bir karar bilginin hiç mevcut olmadığı hale nazaran çok daha zararlı doğurabilir [22].

Geçmişle ilgili olarak toplanacak bilgilerinde aşağıdaki gibi olması gerekir [22]:

- Parça ne zamandan beri çalışmaktadır?
- Tasarımda seçilen malzeme nedir?
- Tasarımda öngörülen çalışma şartları nedir?

- Tasarlanan çalışma ömrü nedir?
- Çalışma ortamındaki sıcaklık ve basınçlar nedir?
- Statik ve dinamik yükleme şartları nedir?
- Korozif erozif şartlar nedir?
- Titreşim ve değişken yükleme var mıdır?
- Parça uygun şekilde monte edilmiş midir?
- Muayene ve bakım programı var mıdır?
- Ortam ve yükleme şartlarında ani ve beklenmedik bir değişiklik meydana gelmiş midir? [22]

2.3.3.1.2. Fotoğraf Kayıtları

Hasar analizi hasara uğramış yapının veya elemanın fotoğraflarının gerekli olup olmadığına karar vermelidir. Bir ön araştırmada önemsiz gibi görünen bir hasarın daha sonra çok önemli olduğu ortaya çıkabilir. Bu nedenle hasarın tam bir fotoğraf kaydının yapılması gerekebilir. Bu iş için çeşitli merceklerle, uzatma körüğü ve pille çalışan flaşla donatılmış 35 mm'lik bir kamera mükemmel sonuçlar verir [38].

2.3.3.1.3. Numunelerin Seçimi

Özellikle araştırma uzun sürecekse numuneler esas etütlere başlamadan önce seçilmelidir. Hasar analizci, fotoğraflarda da olduğu gibi, numunelerin amaca uygun olmasını ve hasarın özelliklerini temsil etmesini sağlamaktan sorumludur. Hemen belirgin olmayan ilave hasar delillerinin araştırılması yerinde olur. Genellikle, hasara uğramış elemanın, benzer fakat hasara uğramamış elemanla mukayese edilmesi gerekir. Bunun nedeni, hasarın çalışma şartları nedeniyle mi yoksa elemanın imalatı sırasında yapılan bir hata sonucu mu ortaya çıktığını araştırmaktır [38].

2.3.3.1.4. Çalışma Şartları

Hasara uğramış parçanın veya yapının geçmişiyle ilgili genel bilgilerin toplanması sırasında aşağıdaki konularda da bilgi edinmek gerekir:

- a) Hasar öncesi herhangi bir anormal durum ortaya çıktı mı?

- b) Çalışma sırasında hasara katkıda bulunacak herhangi bir olay meydana geldi mi?
- c) Hasardan az önce herhangi bir bakım veya tamir yapıldı mı? Yapıldıysa neden yapıldı?
- d) Etüt edilen hasar tek bu olay mıdır? Yoksa göz önüne alınan elemanda veya benzer tasarıma sahip diğer bir elemanda daha önce ortaya çıkmış mıdır?

Bir gerek kırılmanın rutin etüdünde, hasar sırasında sıcaklığın düşük olup olmadığının ve darbe şeklinde bir yükleme olup olmadığının araştırılması gerekir. Krank millerinin veya diğer millerin hasarıyla ilgili çalışmalarda da yatakların durumunun etüt edilmesi ve göz önüne alınan makina içinde tahrik eden ve tahrik edilen elemanlar arasında herhangi bir kaçıklığın olup olmadığının araştırılması gerekir [22].

2.3.3.2. Hasara Uğramış Parçanın Ön Etüdü

Hasara uğramış eleman, bu elemandan kırılarak ayrılmış tüm yerlerde de dahil olmak üzere, herhangi bir temizleme işlemi uygulanmadan önce derinlemesine gözle etüt edilmiştir. Eleman üzerinde bulunan kir ve kalıntılar hasarın nedenini veya hasarı doğuran olaylar sırasını saptamada yararlı bir delil olabilir. Örneğin, bir kırık yüzeyinin bir kısmında bulunan bir boya izi, kırılma oluşmadan önce yüzeyde boyanın girebildiği bir çatlağın mevcut olduğuna dair bir delildir. Bu tip delillere dikkat edilmeli ve mevcut olanlar derhal kaydedilmelidir [40].

2.3.3.2.1. Gözle Muayene

Muayene çıplak gözle yapılan inceleme ile başlar. Çıplak göz mükemmel bir odak derinliğine ve geniş alanları hızlı bir şekilde etüt etme, renk ve dokudaki değişimleri tespit etme yeteneğine sahiptir. Bu avantajların bazıları herhangi bir optik veya elektro-optik cihaz kullanıldığında kaybolur. Etüt sırasında kırık yüzeylerine ve çatlağın takip ettiği yollara özellikle dikkat edilmelidir. Anormal şartların veya çalışma sırasındaki kötü kullanım belirtilerinin etkisi üzerinde durulmalı ve elemanın tasarım ve işçiliği konusunda genel değerlendirme yapılmalıdır. Tüm önemli hususlar,

elemanın boyutları da dahil olmak üzere, yazıyla, kroki veya fotoğraf yoluyla kaydedilmelidir. Etüt mümkün olduğunca etkin bir şekilde yerine getirilmelidir. Çünkü hasar nedeniyle ilgili ipuçları daima mevcuttur ve analizi yapan kişi bu ipuçlarını ortaya çıkaracak kadar dikkatli ve hazırlıklı değilse bunlar gözden kaçabilir [40].

2.3.3.2.2. Fotoğrafların Çekilmesi

Hasarda kırılma mevcutsa ön araştırmadaki ikinci adım kırılmış elemanın, kırılarak ayrılmış parçaları da dahil olmak üzere, genel fotoğrafının çekilmesi, bunların boyutlarının ve şartlarının kaydedilmesidir. Bunu kırılma yüzeyinin çeşitli açılarda ve büyütmelerde dikkatli bir şekilde etüt edilmesi takip eder. Etüt direkt aydınlatma ile başlamalı ve çeşitli açılardaki eğik aydınlatma ile devam etmelidir. Böylece kırık yüzeyinin özelliklerinin hangi eğimdeki aydınlatma ile ortaya çıktığı tespit edilebilir. Bu aynı zamanda kırık yüzeyinin hangi alanlarının birinci derecede öneme sahip olduğunu ve ince detayların ortaya çıkarılmasında hangi büyütmenin kullanılması gerektiğinin saptanmasında da yardımcı olmalıdır. Değerlendirme tamamlandıktan sonra fotoğraflar çekilmeye başlanmalı ve her fotoğraf çekiminde, bu fotoğrafın neyi gösterdiği, büyütmesinin ne olduğu ve diğer fotoğraflarla ilişkisinin ne olduğu kaydedilmelidir [38].

2.3.3.3. Tahribatsız Deneyler

Tahribatsız muayene bilimi gerek öncesinde gerek sonrasında kullanılan yoğun işlem matematiği ile farklı test yöntemleri ve bunların uygulamalarını kapsayan geniş bir çalışma alanıdır. Test edilecek parçanın bütünlüğüne zarar vermeksizin yapılan muayenelerde, günümüzde üretimde kendine hızla yer bulan polimer ürünler ve kompozitler de dahil olmak üzere, demir ve demir dışı ürünlerin arzu edilen özelliklerde olup olmadığı incelenmektedir. Plastik şekil verme (ekstrüzyon, hadde, dövme vb.), döküm, talaşlı imalat (tornalama, frezeleme, kesme vb.) veya kaynak yöntemleriyle üretilen malzemelerde rastlanan ve gözle muayenede görülemeyen yapısal kusurlar (korozyon/yorulma çatlakları vb.), malzemelerin mekanik özelliklerinde düşmeye neden olmaktadır. Hatta, malzemelerin iç yapısında ihtiva ettikleri çatlaklar zamanla

yüzeye doğru ilerleyip, kırılmalara sebep olmaktadır. Özellikle yapı malzemeleri sektöründe (köprü, bina imalatı vb.) ve otomotiv endüstrisinde kullanılan parçalardaki iç yapı çatlakları ani kırılmalara sebebiyet vereceğinden, öngörülemediği ve önlem alınmadığı takdirde hayati tehlikelere yol açabilmektedir [39].

2.3.3.3.1. Manyetik Tozla Muayene

Bu yöntem ferromanyetik malzemelerde yüzeydeki veya yüzey altındaki süreksizlikleri manyetik alan kullanarak belirleme esasına dayanır. Muayene edilecek parça manyetlendiğinde manyetik alan doğrultusuna dik doğrultuda yatan süreksizler parça yüzeyi üzerinde bir sızıntı alanı oluşturur. Bu sızıntı alanı ve bu nedenle de süreksizliğin mevcudiyeti yüzey üzerine uygulanan ferromanyetik tozlar yardımıyla tespit edilir. Bu tozların bazıları sızıntı alanı tarafından bir araya getirilerek süreksizliğin uç noktaları arasında bir köprü oluştururlar. Manyetik olarak toplanmış bu tozlar süreksizliğin profilini çıkararak bunun şekil ve boyutunu belirtirler. Genellikle tozla bir floresan malzeme karıştırılarak hatanın mor ötesi ışık altında gözle kolaylıkla görülebilmesi sağlanır. Manyetik kuvvet çizgileri etüt edilen parçadan büyük elektrik akımı geçirilerek, mıknatıs ve manyetikleştirici sargı kullanarak oluşturulabilir. Muayeneden sonra eleman demanyetize edilmelidir. Manyetik tozla muayenenin aşağıdaki avantajları vardır:

- Özellikle çok küçük, sığ ve yabancı madde ile dolmuş çatlaklar da dahil olmak üzere yüzey çatlaklarının araştırılmasında kullanılabilen en iyi ve en uygun yöntemdir,
- Uygulama tekniğinin öğrenilmesi çok kolaydır. İşlem basit ve hızlı olup, gerçekleştirilmesi pahalı değildir,
- İzler doğrudan parça üzerinde meydana getirilir ve bunlar gerçek süreksizliğin manyetik bir resmidir. Kalibre edilecek veya uygun çalışma şartlarında tutulacak bir elektrik devresi veya elektronik okumaya ihtiyaç yoktur,
- Denenecek parçanın şekli ve boyutları üzerinde herhangi bir sınırlama yoktur,
- Genelde hassas bir ön temizliğe ihtiyaç yoktur. İşlem ince bir boya kaplaması veya diğer metalik olmayan kaplamalar mevcut olsa bile kolaylıkla çalışır [40].

Manyetik tozla muayenenin sınırlamaları şu şekildedir:

- Tamamen yüzey altında kalan süreksizliklerin yerini belirlemede kullanılmaya uygun değildir,
- Manyetik alanın doğrultusu süreksizliğin esas düzlemini kesecek şekilde olmalıdır,
- Yüzeyde elektriksel temasın olduğu noktalarda yerel ısınmadan ve yanmadan kaçınmak için özel dikkat gerekir [22].

2.3.3.3.2. Penetran Sıvıyla Muayene

Bu yöntem parçadaki yüzey hatalarının araştırılması amacıyla manyetik olmayan ve bu nedenle de manyetik tozla muayene edilmesi mümkün olmayan malzemelerin muayenesinde kullanılır. Bu yöntemde penetran sıvı parça üzerine püskürtülür. Penetran sıvı yüzey üzerinde 1 mikrona kadar aralığa sahip çatlak ve hataların içine kapiler etkiyle girer. Yüzeyde kalan fazla sıvı silinerek temizlenir. Daha sonra yüzeye bir geliştirici uygulanarak yüzeye açık olan çatlak ve hataların içindeki sıvı yüzeye çekilir. Sıvının kendisi genellikle parlak renklidir veya floresan parçacıklar içerir. Böylece mor ötesi ışığın altında malzeme yüzeyindeki süreksizlikler kolayca görülür [40].

Penetran sıvıyla muayenenin aşağıdaki avantajları vardır:

- Metal olmayan malzemelerde de kullanılabilirler,
- Maliyeti düşüktür ve kolayca taşınabilir,
- Muayene sonuçları kolaylıkla değerlendirilebilir [40].

Penetran sıvı yönteminin sınırlamaları ise şunlardır:

- Muayene edilecek süreksizlikler yüzeye açık olmalıdır,
- Penetran sıvı metali korozyona uğratabileceğinden parça muayeneden sonra temizlenmelidir,
- Yüzey filmleri süreksizliklerin tespitini güçleştirir,
- Bu yöntem genel olarak, toz metalürjisiyle üretilmiş düşük yoğunluğa sahip parçaların ve diğer gözenekli malzemelerin muayenesine uygun değildir [40].

2.3.3.3.3. Girdap Akımıyla Muayene

Bu yöntem elektriği ileten tüm malzemelerde kullanılabilir. Eğer alternatif akım ileten bir sargı parçanın etrafına veya parça yüzeyinin yakınına yerleştirilecek olursa parça içinde elektromanyetik indüksiyon yoluyla girdap akımları ortaya çıkar. Bu akımlar uyarıcı sargıdaki veya yakındaki diğer bir sargıdaki empedansı etkiler. Parça içindeki çatlak ve hatalar girdap akımlarında distorsiyonlara neden olur. Bu ise sargı empedansının distorsiyonuna neden olur. Bu nedenle ortaya çıkan empedans değişimi uygun bir elektrik devresi ve bir ölçü aleti yoluyla tespit edilebilir. Hata ve çatlaklar ölçü aleti üzerindeki sapmalar ve titreşimlerle kendini gösterir [40].

Girdap akımıyla muayenenin avantajları şunlardır:

- Hem yüzey ve hem de yüzey altı hataları tespit edilebilir,
- Özel bir operatör hüneri gerekmez,
- Sürekli muayene uygun bir işlemdir,
- Otomatik hale getirilebilir ve yüksek hızlarda kullanılabilir,
- Herhangi bir prob temasına gerek yoktur [40].

Girdap akımıyla muayenenin sınırlamaları şunlardır:

- Nüfuziyet derinliği azdır,
- Muayene edilecek malzeme elektriği iletmelidir,
- Referans standartlar gereklidir [40].

2.3.3.3.4. Ultrasonik Muayene

Bu yöntemde, parça yüzeyindeki ve yüzey altındaki hataları tespit etmek, parçanın kalınlığını veya hatanın uzaklığını ölçmek için parçaya yüksek frekanslı akustik enerjiye sahip dalgalar gönderilir. Bir ultrasonik dalga parça içindeki bir ara yüzeye veya bir süreksizliğe çarpıncaya kadar hareket eder. Ara yüzeyler ve hatalar gelen akustik enerjinin bir kısmını geri yansıtır. Yansıtılan akustik enerji miktarı, ara yüzeyin veya hatanın özelliklerinin ve oryantasyonunun bir fonksiyonu olduğu gibi, yansıtıcının akustik empedansının da bir fonksiyonudur. Çeşitli ara yüzeylerden ve hatalardan yansıtılan enerji, hataların mevcudiyetini ve yerini, malzemenin kalınlığını veya hatanın yüzeyden uzaklığını belirlemede kullanılır [40].

Ultrasonik muayenenin avantajları şunlardır:

- Çok küçük çatlakların tespitine dahi imkân veren çok yüksek hassasiyet,
- Çok büyük kalınlıkların muayenesinde dahi imkân veren büyük nüfuziyet gücü,
- Hatanın yerini ve boyutlarını tahmin etmedeki hassasiyeti [40].

Ultrasonik muayenenin aşağıdaki sınırlamaları mevcuttur:

- Parçanın boyut ve şeklinin karmaşık oluşu ve süreksizliğin uygun yönde olmayışı, alınan sinyallerin değerlendirilmesinde güçlük çıkarır,
- İstenmeyen içyapı değerlendirmeyi benzer şekilde zorlaştırır (örneğin: tane büyüklüğü metalik olmayan kalıntı, boşluk),
- Referans standartlar gereklidir [40].

2.3.3.3.5. Radyografi

Bu yöntem, nüfuz eden radyasyonun etüt edilen parça tarafından farklı miktarlardaki absorpsiyonu esasına dayanır. Bu radyasyon ya çok kısa dalgalı elektromanyetik radyasyon veya parçacık radyasyonu olabilir. Yoğunluktaki farklılıklar ve parça kalınlığındaki değişiklikler nedeniyle veya bileşimdeki değişimlerin neden olduğu farklı absorpsiyon karakteristikleri nedeniyle, bir deney parçasının farklı bölgeleri farklı miktarlarda radyasyon absorbe eder. Parça boyunca yol alan absorbe edilmemiş radyasyon bir film üzerine veya foto hassas bir kâğıt üzerine kaydedilir, floresan bir ekran üzerinde gözlenir veya çeşitli tipteki radyasyon detektörleri ile kaydedilir. Radyografik muayene yoğun bir şekilde döküm ve kaynaklı parçalara uygulanır. Bu uygulama özellikle iç hata içermeyen parçaların kullanımı gerektiği zaman önem kazanır [40].

2.3.3.3.6. Akustik Yayınım Muayene

Akustik yayılım, malzeme içinde çatlak ilerlemesi, plastik deformasyon ve faz dönüşümleri sırasında oluşan hızlı şekil değiştirme enerjisi boşalması nedeniyle üretilen yüksek frekanslı gerilme dalgalarıdır. Bu enerji çatlak ilerlemesi halinde depo edilen elastik enerjiden, faz dönüşümü halinde ise depo edilmiş kimyasal serbest

enerjiden kaynaklanır. Malzeme içinde gerilme dalgaları üreten diğer akustik yayının kaynakları içine aşağıdaki yerel dinamik hareketler de girer. Çatlağın oluşumu ve ilerlemesi, ikizlenme, kayma ve martenzitik faz dönüşümü. Akustik yayınımla muayenede dış gerilmeler altındaki malzeme içindeki süreksizliklerden üretilen akustik yayının sinyalleri tespit ve analiz edilir. Bu sinyallerin analizi, tespit edilen süreksizliğin yapısal önemi ve yeri ile ilgili bilgiler sağlar [40].

Akustik yayınımla muayenenin önemli uygulama alanlarından bazıları şunlardır:

- Aktif hatanın tespiti ve yerinin belirlenmesi için basınçlı kapların ve nükleer basınçlı kapların sürekli yakın takibe alınması,
- Uçaklardaki yorulma çatlaklarının tespiti,
- Eritme ve direnç kaynaklarının kaynak ve soğuma sırasındaki kontrolü,
- Hassas yapılardaki hidrojen hasarı ve gerilmeli korozyon çatlamaının ortaya çıkışının tespiti,
- Malzemelerin yük altındaki davranışı ve kırılma mekanizmalarının araştırılması için yapılan çalışmalarda bir araştırma aracı olarak kullanılması [40].

2.3.3.3.7. Deneysel Gerilme Analizi

Deneysel gerilme analizi çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bunların tümü hasara neden olabilen makine yüklerini ve elemandaki gerilmeleri Saptamada kullanılabilen yöntemlerdir. Kaplama yöntemi yüksek şekil değiştirmelere sahip alanların belirlenmesinde, asal şekil değiştirme doğrultularının tayininde, çekme ve basma birim şekil değiştirmelerinin şiddetini yaklaşık olarak ölçmede kullanılabilir. Daha sonra, yüksek şekil değiştirmelerin mevcut olduğu alanlara veya asal şekil değiştirme doğrultularına gerinim pulları yerleştirilerek, 0,5 mm'den 150 mm'ye kadar ölçme uzunluklarında şekil değiştirmeler hassas olarak ölçülebilir. Şekil değiştirmeleri hassas olarak ölçebilen çeşitli mekanik, optik ve elektriksel bazlar olmakla birlikte, gerinim pulları genel laboratuvar ve saha kullanımı için standart bir ölçme yöntemi haline gelmiştir. Laboratuvarlarda gerilme Kümü için fotoelastik kaplama yöntemi de kullanılmaktadır. Bu teknikte, kontrollü kalınlıktaki kaplama deney parçasına yansıtıcı

bir bağlayıcı ile yapıştırılır. Optik analiz genel analize benzerdir ancak özel ekipman gerektirir. Analiz bir kamera yardımıyla renkli filme kaydedilebilir. Kristal sahip malzemelerde yüzeydeki kalan gerilmeleri tahribatsız olarak kullanılacak mevcut tek yöntem x ışınlan difraksiyonudur. Gerilmeler, gerilme altındaki malzemede difraksiyona uğrayan x ışınlarının difraksiyon açısı ölçülerek saptanır [40].

2.3.3.4. Mekanik Deneyler

Mekanik deneyler içinde en basit olanı sertlik deneyidir ve bu deney hasar e çok değişik amaçlarla kullanılabilir. Sertlik deneyi birçok uygulamaların yansıra parçaya uygulanan ısıt işlemin değerlendirilmesinde (hasara uğramış elemanın sertliği ile tasarımda belirtilen sertliği kıyaslayarak) çeliğin çekme dayanımını yaklaşık olarak tahmin etmede, pekleşmeyi tespit etmede veya aşırı ısınma, karbon kaybı yoluyla oluşan yumuşamayı saptamada kullanılabilir. Sertlik deneyi, mikrosertlik deneyinde olduğu gibi özel parçası hazırlığı gerektiren haller dışında temelde tahribatsız bir deneydir [40].

Diğer mekanik deneyler hasara uğramış elemanın şartnamelere uygunluğu onaylamada veya parçanın yüzey şartlarının mekanik özelliklere etkisini değerlendirmede yarar vardır. Deney parçalarının imalatı için yeterli malzemenin olması şartıyla, gerekli olduğunda çekme, yorulma ve darbe deneyleri yapılmalıdır. Ayrıca kırılma tokluğunun deneysel olarak saptanması gerekebilir. Çalışma şartlarına benzer şartlar yaratmak için yüksek veya düşük sıcaklıklarda deneyler yapılabilir. Deney parçasına, hasara uğramış elemanın çalışma sırasında maruz kaldığı ısıt işleme benzer bir ısıt işlem uygulayarak bu işlemin mekanik özellikleri nasıl değiştirdiği araştırılabilir. Bir düşük karbonlu çeliğin gevrek kırılmasının araştırılmasında sünek-gevrek geçiş sıcaklığının saptanması yararlı olabilir. Hasar analiz uzmanı mekanik deney sonuçlarını değerlendirirken dikkatli olmalıdır. Örneğin, bir malzemenin çekme dayanımı şartnamede belirtilen minimum değerin %5-10 altında çıkarsa, elemanın bu nedenle hasara uğradığı sonucuna varılmamalıdır. Diğer bir husus da küçük deney parçalarıyla yapılmış deneylerin çalışma şartlarındaki çok daha büyük elemanın özelliklerini yeterli derecede temsil etmemesidir. Örneğin, büyük yapıda gevrek kırılmanın oda sıcaklığında oluşması mümkünken, daha sonra laboratuvarda yapılan

çentik-darbe deneyinde geçiş sıcaklığı $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin çok daha altında olabilir. Parça boyutunun yorulma, gerilmek korozyon ve hidrojen gevrekleşmesi hasarlarına etkisi iyi anlaşılammıştır. Ancak mevcut sınırlı bilgilere dayanarak bu hasar tiplerine karşı direncin parça boyutları arttıkça azaldığı söylenebilir [40].

2.3.3.5. Kırık Yüzeylerinin Seçimi, Muhafazası ve Temizlenmesi

Kırılma yüzeylerinin seçimi, muhafazası ve temizlenmesi önemli delillerin tahribini önleme açısından çok önemlidir. Kırılma yüzeyleri mekanik veya kimyasal tahribe maruz kalabilir. Mekanik tahripler, diğer bir cismin kırılma yüzeyine çarpması da dahil olmak üzere çeşitli nedenlerle ortaya çıkar. Bu çarpma kırılma meydana gelirken olabileceği gibi, kırılmış parçanın analiz için çıkarılması ve taşınması sırasında da olabilir. Kırılma yüzeyi taşıma sırasında pamuk veya örtüyle örtülebilir. Fakat bu, yüzey üzerinde bulunan ve kırılma nedenini ortaya çıkarmada yardımcı olabilecek bazı malzemelerin uzaklaşmasına da neden olabilir. Bu kırılma yüzeyine asla parmakla dokunulmamalı ve yüzey parmakla silinmemelidir. Kırılmış parçanın iki yüzeyi birbiriyle temas haline getirilmemelidir. Bu, kırık yüzeylerinin tahribine neden olur. Kırılma yüzeylerinin kimyasal yolla tahribi çeşitli şekillerde engellenebilir. Ancak, kırılma nedeninin genel değerlendirilmesi sırasında kırılma yüzeyi üzerinde mevcut yabancı malzemelerin ne olduğunun saptanması önemli olduğundan, birçok laboratuvar kırık parçalar üzerinde korozyon önleyici kaplamalar kullanmak istemez. Mümkün olan hallerde kırılmış parçayı sıkıştırılmış kuru hava jetiyle kurutma tercih edilmelidir. Bu aynı zamanda yüzeyin en dışındaki yabancı maddelerin uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Parça bundan sonra bir desikatöre yerleştirilmeli veya uygun bir desikantla paketlenmelidir. Mümkün olan her halde kırık yüzeylerinin suyla yıkanmasından kaçınılmalıdır. Ancak, deniz suyuna veya yangın söndürme sıvılarına maruz kalmış parçaların desikatöre yerleştirilmesinden önce su ile ve daha sonra da aseton veya alkolle yıkanması gerekir [40].

2.3.3.5.1. Temizleme

Kırılma yüzeyleri muhakkak gerekliyse temizlenmelidir. Temizleme, yüzeyde incelemeyi imkânsız kılan kirler varken veya elektron mikroskobunda muayeneye

hazırlık sırasında yapılır. Temizleme sırasında kuru hava akımı veya yumuşak kıllı ressam fırçası kullanılabilir. Parça inorganik çözeltilere daldırılır veya inorganik çözelti jetine, yumuşak asitlere veya alkali çözeltilere maruz bırakılır. Bu çözeltiler yüzey üzerindeki yabancı maddelere saldırırken esas metale karşı pasifirler. Bunlara ek olarak ultrasonik temizleme ve plastik replika ile temizleme, özellikle kırılma yüzeyi korozyondan etkilenmişse en yararlı yöntemlerden biridir. 1 mm kalınlığında ve uygun boyuttaki asetat tabaka asetona daldırılarak yumuşatılır ve kırılma yüzeyine yerleştirilir. Bu tabaka yumuşatılmamış bir parça asetat tabaka tarafından desteklenir ve bir mengene veya uygun sıkıştırıcılar kullanılarak replika kırılma yüzeyine bastırılır. Kuruma zamanı replikasyon malzemesinin yumuşama derecesine bağlıdır ve bunu belirleyen faktör de kırılma yüzeyinin yapısıdır. Kurumuş replika kırık yüzeyinden neşter veya cımbız kullanılarak kaldırılır. Kırık yüzeyi çok kirli ise replikasyon yöntemi birkaç kez tekrarlanabilir. Temiz bir replika elde edildiğinde işlem tamamlanmış demektir. Bu yöntemin avantajı, kırık yüzeyden uzaklaştırılan yabancı maddelerin muhafaza edilmiş olmaları ve bu maddelerin ne olduğunun saptanması gerektiğinde daha sonraki muayene için elde mevcut olmalarıdır [40].

2.3.3.5.2. Kesme

Sertlik cihazı, optik ve elektron mikroskopları da dahil olmak üzere muayene cihazlarında kullanılabilecek deney parçası boyutları sınırlı olduğu hasara uğramış elemandan muayeneye uygun boyutlarda parça almak gerekir. Bu sırada parçanın elemanın neresinden alındığını belirten bir kayıt tanımlanmalıdır. Sertlik Kesme öncesi, kırılma yüzeyi dikkatle korunmalıdır. Kesme sırasında kırık yüzeyinin ve buna yakın bölgelerin tahribata veya değişime maruz kalmamasına dikkat edilmelidir. Büyük parçalarda deney parçası çıkarmanın en yaygın yolu alevle kesmedir. Kesme kırılma bölgesinden yeteri derecede uzakta yapılmalıdır. Böylece kırık yüzeyi altındaki malzemenin mikroyapısı alev ısı ile değişmez, kırık yüzeyine erimiş metal parçacıkları sıçramaz. Çeşitli boyuttaki parçalar için kesme taşları ve testereler kullanılabilir. Kuru kesme tercih edilmelidir. Çünkü sıvı soğutucular kırılma bölgesini korozyona uğratırlar veya kırık yüzeyi üzerindeki yabancı maddeleri yüzeyden uzaklaştırırlar. Eğer kesme kırılma bölgesinden yeteri derecede uzakta bir bölgede

yapılamıyorsa, kırılma bölgesini ısı ile tahrip etmemek için bir soğutucu gerekebilir [40].

2.3.3.5.3. Sekonder Çatlakların Açılması

Primer kırık yüzeyi tahrip olduğunda veya kırılma nedenini ortaya çıkaracak bilgilerin çoğunun korozyon nedeniyle yok olması halinde sekonder çatlakların muayenesi için yüzeylerin açılması gerekir. Bu durumlarda sekonder çatlaklar, primer kırılma yüzeyinden çok daha fazla bilgi sağlarlar. Eğer çatlaklar sıkıca kapalıysa korozif etkilerden korunmuş olabilirler veya bunlar primer çatlama başlangıcından daha sonra oluşmuşlarsa daha az korozyona maruz kalırlar. Diğer taraftan tam kırılmaya neden olmamış primer çatlakların da açılması gerekebilir. Çatlakların muayene için açılması sırasında yüzeylerin tahrip olmamasına dikkat etmek gerekir. Açma işlemi, kırık yüzeyleri birbirinden uzaklaşacak şekilde yapılırsa yüzeyler tahrip olmaz. Genellikle kırılmış parçanın arka kısmı çatlak ucuna yakın bir noktaya kadar testere ile kesilir. Böylece kırılması gerekli metal miktarı azaltılmış olur. Deney parçasının nihai kırılması aşağıdaki yollardan biri yapılabilir [40]:

- Eğer parça şekli müsaade ediyorsa parçanın iki tarafını çekme makinesine bağlayarak çekmek,
- Parçayı bir mengeneyle bağlayıp, çekiçleyerek eğme yoluyla bir yarımını diğerinden ayırmak [40].

Çatlağın açılması sırasında meydana gelen kırılma yüzeyi ile daha önce çatlama sırasında meydana gelen yüzeyin birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Bu işlemin sırasında farklı bir kırılma mekanizması sağlayarak gerçekleştirilebilir. Bunun için de bu kırılma çok düşük sıcaklıkta oluşturulur [40].

2.3.3.6. Kırılma Yüzeylerinin Makroskobik İncelenmesi

Kırılma yüzeylerinin 1'den 100'e kadar büyütmelelerdeki detaylı etüdü çıplak gözle, bir el büyüteciyle veya düşük büyütmele optik mikroskopla yapılabilir. Bazen düşük büyütmede tarayıcı elektron mikroskobu kullanmak da yararlı olabilir. Deney parçalarının fotoğraflarının çekilmesi için 20 büyütmele kadar yüksek kaliteli kamera

ve 20-50 büyütme arasında makro objektiflere ve aydınlatma sistemine sahip metalograf gereklidir. 50-100 büyütme için standart metalografide kullanılan aydınlatma sistemi ve objektifler yeterlidir [40].

Kırık yüzeyinin düşük güçteki büyütmeyle etüdünden elde edilen bilgiler oldukça fazladır. Kırık yüzeyinin geometrisinin etüdü hasan oluşturan gerilme sistemi hakkında bilgi verir. Statik çekme altında oluşan hasarlar düzlem şekil değiştirme şartlarında, maksimum çekme gerilmesine dik düzlemlerde dik kırılma adı verilen bir kırık yüzeyi, düzlem gerilme şartlarında ise maksimum çekme gerilmesi ile 45° açı yapan eğik kırılma yüzeyi oluştururlar. Saf düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme şartları uygulamada nadiren karşılaşılan durumlar olduğundan birçok kırık yüzeyi merkezde dik olup çevresi eğik kırılma ile sarılmıştır. Bunun nedeni, merkezde düzlem şekil değiştirme haline yakın bir gerilme halinin, yüzeylere yakın bölgelerde de düzlem gerilme halinin oluşmasıdır. Bu davranışa ait bir örnek olarak, sünek malzemelerin çekme deneyindeki kırılması sırasında oluşturduğu kap ve koni şeklindeki kırılma yüzeyi verilebilir. Değişik yüklemeler sonucu kırık yüzeyinde oluşan değişik görüntülere ait bilgiler ileride verilecektir [40].

Makroskopik muayene ile genellikle çatlakların ilerleme yönü ve bu yolla da hasarın orijini saptanabilir. Gevrek dik kırılmalarda çatlak ilerleme yönü ve çatlak orijini kırılma yüzeyinde oluşan “çavuş işaretleri” yardımıyla yapılır [40].

2.3.3.7. Kırılma Yüzeylerinin Mikroskopik Etüdü

Kırılma yüzeylerinin mikroskopik etüdü optik mikroskop, transmisyon mikroskobu ve/veya tarayıcı elektron mikroskobu kullanılarak yapılır [40].

2.3.3.7.1. Optik Mikroskop

Optik mikroskop düşük büyütmede (<100X) fraktografi için yoğun bir biçimde kullanılmakla birlikte mikrofraktografide uygulanabilirliği çok sınırlıdır. Bunun nedeni optik mikroskobun sınırlı seçme gücüne sahip olmasıdır. Seçme gücü, küçük objelerin birbirlerinden ayırt edilebilir görüntülerini oluşturma kabiliyeti olup, bu

değer bir mikroskobun kullandığı ışığın dalga boyuna yaklaşık eşittir. Işık mikroskobunda bu değer 1 mikron mertebesindedir. Ek olarak ışık mikroskobunun gözlem derinliği de sınırlıdır bu yüzden kaba yüzeylerde netlik sağlanamaz [22].

2.3.3.7.2. Transmisyon Elektron Mikroskobu

Transmisyon elektron mikroskobu için deney parçaları elektron ışınlarının geçişine imkân verecek kadar ince olması gerektiğinden kırılma yüzeylerinin replikaları elde edilmelidir. Bu amaç için birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak, 3 nm'nin altında seçme gücüne sahip tarayıcı elektron mikroskoplarının kullanılması replikasyon tekniklerine ihtiyacı önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla birlikte, malzeme biliminde aşağıda örnekleri verilen özel problemlerde direkt replika tekniği hala kullanılmaktadır: Büyük parçaları kesmeden bunların kırılma yüzeylerinin incelenmesi, radyoaktiviteye karşı korunmasız olan adi mikroskoplarda radyoaktif malzemelerin incelenmesi, ince yorulma çizgilerinin incelenmesi [22].

2.3.3.7.3. Tarayıcı Elektron Mikroskobu

Bu mikroskop metalik malzemelerin mikroyapılarının araştırılmasında kullanılan çok fonksiyonlu bir cihazdır. Optik mikroskopla kıyaslandığında seçme gücü aralığı çok geniştir ve rutin cihazlarda yaklaşık 10 nm olan bu değer 3 nm'nin altına kadar inebilir. Böylece kullanışlı büyütme 10.000X'den 60.000X'e kadar artar ve bu şekilde optik mikroskop ile transmisyon elektron mikroskobu arasındaki boşluk tarayıcı elektron mikroskobu ile kapanır. Optik mikroskopta fokus derinliği 10.000 büyütmede 1 mikrondan 10 büyütmede 2 mm'ye kadar değişirken, tarayıcı elektron mikroskobunda bu değerler iki merteye daha büyüktür [22].

2.3.3.8. Metalografik Kesitlerin Seçimi ve Hazırlanması

Parlatılmış ve dağlanmış kesitlerin optik mikroskop ve elektro-optik tekniklerle etüdü hasar araştırmasının en önemli kısmıdır. Metalografik muayene, göz önüne alınan malzemenin sınıfı ve yapısı hakkında bilgi sağlar. Eğer anormallikler mevcutsa, bunlar erken hasara neden olan faktörlerle her zaman ilişkili değildir.

Mikroskop, etüt edilen parçanın imalat yöntemi ve maruz kaldığı ısıl işlemlerle ilgili bilgi sağlar. Bunlar imalat sırasında bilhassa oluşturulduğu gibi çalışma sırasında kaza nedeniyle de oluşabilir. Çalışma şartlarından doğan, korozyon, oksidasyon ve yüzeylerin aşın pekleşmesi gibi diğer etkiler de ortaya çıkarılabilir ve bunların derecesi araştırılabilir. Aynı zamanda mevcut herhangi bir çatlakın özellikleri, ilerleme tipi ve bunun oluşması ve gelişmesinden sorumlu faktörlerle ilgili bilgi sağlanır. Birçok muayenede kırılma yüzeyine yakın bir bölgeden alınmış deney parçası yapısının, elemanın bir bütün olarak yapışım temsil edip etmediği etüt edilmelidir. Bu, elemanın başka bölgelerinden çıkarılmış deney parçalarının yapılan da etüt edilerek gerçekleştirilir. Yorulma çatlaklarının etüdünde çatlak orijininin deney parçası alınması yararlıdır. Bu şekilde çatlamanın bir kaynak hatasından, karbon kaybetmiş bir yüzeyden, metalik olmayan kalıntılarca zengin bir bölgeden veya döküm bir parçada aşırı boşluk içeren bir bölgeden oluşup oluşmadığı anlaşılabilir. Ancak, çok sayıda çatlak orijini mevcutsa bu yöntem pratik değildir. Böyle bir durumda çatlakın yerel hatalardan başlama olasılığı çok düşüktür. Bazı hallerde kırılma yüzeyinin, kesme ve kalıplamadan önce, nikel ile kaplanması gerekir. Böylece kırık yüzeyindeki tepeler ve vadiler bu işlemler sırasında tahripten korunmuş olur [22].

2.3.3.9. Metalografik Kesitlerin Etüdü ve Analizi

Birçok hasar analizinde metalografik kesitler mikroskop altında etüt edilirler. Bunun nedeni, mikroskopun imalat sırasında ortaya çıkan malzeme hatalarını saptaması, çeşitli çalışma şartlarında ve çevresel şartlarda hasara bulunabilen faktörleri saptamadaki kapasitesidir [22].

Metalografik kesitlerin mikroskopik muayenesiyle metalik olmayan kalıntılar, mikroyapısal segregasyonlar, karbon kaybı, karbon kazanımı, hatalı ısıl işlem, temperlenmemiş beyaz martenzit, taneler arası korozyon ve birçok metalürjik hatalar ortaya çıkarılabilir. Belirli bir metalürjik hatanın mevcut olmadığı hallerde bile metalürjik kesitlerin etüdü araştırmacıya, örneğin sertleşmiş tabaka derinliğinin, kaplama kalınlığının, tane büyüklüğünün ve ısı etkisi altında kalan bölge genişliğinin ölçülmesinde yarar sağlar. Tüm bunlar hasar nedeniyle ilişkili olabilir [22].

2.3.3.10. Kırılma Tipinin Saptanması

Hasar bölgesindeki kırılma yüzeyinin ve metalografik kesitlerin etüdünden elde edilen bilgileri kırılma nedenini saptamada kullanabilmek için kırılma tipinin saptanması gereklidir. Uygulamada karşılaşılan kırılma tipleri şu şekilde sıralanabilir: sünek kırılma, tane içi gevrek kırılma, yorulma kırılması, gerilmeli korozyon çatlama, sıvı metal gevrekleşmesi, hidrojen [deşmesi, sünme ve sünme kopması ve kompleks hasarlar [22].

2.3.3.11. Kimyasal Analiz

Bir hasarın araştırılması sırasında, malzemenin öngörülen malzeme olup olmadığını saptamak amacıyla, kimyasal analiz yapmak gerekir. Belirtilen kimyasal bileşimden hafif sapmalar hasar analizinde pek önemli değildir. Gerçekte hasarların çok az bir kısmı uygun olmayan veya hatalı malzeme nedeniyle olduğundan, kimyasal analiz sonuçları nadiren hasar nedenini ortaya çıkarır, özellikle korozyon ve gerilmeli korozyonun mevcut olduğu bazı hallerde, hasarın esas nedenini saptarken yüzey üzerindeki çöküntülerin, tufal veya diğer korozyon ürünleri ile malzemenin temas halinde olduğu ortamın kimyasal analizinin yapılması gerekir. Analiz sonucunda belirli bir element şartnamede belirtilen değerden daha fazla bulunursa, hasarın bu sapmadan kaynaklandığı sonucuna varılmamalıdır. Genellikle böyle bir sapmanın hasara en ufak bir katkısı yoktur, örneğin, yapı çeliklerinde kükürt ve fosfor miktarı %0,04 ile sınırlandırılmıştır. Ancak bir hasar halinde, bu değeri geçen kükürt miktarı hasardan nadiren sorumlu tutulur. Belirli sınırlar içinde, mikroyapısal bileşenlerin malzeme içindeki dağılımı, bunların malzeme içindeki oranlarından çok daha önemlidir [22].

2.3.3.12. Kırılma Mekaniğinin Uygulanması

Kırılma nedeniyle oluşan hasarların araştırılmasında ve benzer hasarları önleyici tedbirlerin tasarlanmasında yük altındaki metallere oluşan kırılmanın mekaniği, kırılma mekaniği kavramlarının tasarıma uygulanması ve elemanların çalışma ömürlerinin önceden tahmin edilmesi giderek önem kazanmaktadır. Kırılma

mekaniği kavramları yorulma, gerilmeli korozyon çatlama ve hidrojen gevrekleşmesinde de kullanılmaktadır [22].

2.3.3.13. Benzer Çalışma Koşulları Altında Deney

Bir araştırmanın sonuç safhasında hasarın oluştuğuna inanılan şartlar yaratılarak deney yapmak gerekebilir. Benzer çalışma koşulları altında deney genellikle çok pahalı cihazlar gerektirdiğinden pratik değildir. Pratik olsa bile tüm çalışma koşullarının bilinmesi veya anlaşılması da mümkün değildir. Örneğin, korozyon hasarlarının laboratuvar ortamında yeniden oluşturulması zordur. Buna karşılık sınırlamalar iyi bir şekilde anlaşılırsa, çalışma şartlarında karşılaşılan seçilmiş bazı değişkenlerin etkilerini saptamada ve benzer hasarlardan kaçınmak için gerekli tedbirlerin planlanmasında, en azından çalışma ömrünü uzatmada, benzer çalışma koşulları altında deney yapmak yararlıdır. Bir yağlayıcıya katılan özel katkıların aşınmayı azaltmadaki etkinliğini değerlendirmek için, seçilmiş sayıda çalışma değişkenleri kullanarak, benzer çalışma koşulları altında deney yapmak buna örnek olarak verilebilir [22].

2.3.3.14. Delillerin Analizi, Sonuçlar ve Hasar Raporu

Her araştırmanın belirli bir safhasında deneylerden elde edilen bilgiler analiz edilir, düzenlenir ve ön sonuçlar ortaya çıkarılır. Birçok araştırma art arda gelen çok sayıda safhayı içermez. Hasarın muhtemel nedeni araştırmanın başlangıç safhasında ortaya çıkmışsa, araştırmanın bundan sonraki kısmı bu muhtemel nedenin doğrulanmasına ve diğer ihtimallerin elenmesine doğru yönelecektir. Bu özelliğe sahip olmayan araştırmalar ise daha önce açıklanan safhalarda gerçekleştirilecek ve her safhadaki bulgular araştırmanın nasıl ilerleyeceğini de belirleyecektir. Yeni gerçekler ilk izlenimi değiştirdiğinde farklı bir hasar hipotezi geliştirilecek ve hipotez daha sonraki bulguların etkisiyle ya terk edilecek veya muhafaza edilecektir. Araştırmacı büyük bir laboratuvar donanımına sahipse, bir ön sonucun formülleştirilmesine teşebbüs etmeden önce mekanik deneyler, kimyasal analiz, fraktografi ve mikroskopi sonuçlarını bir araya getirmek için büyük ölçüde çaba harcayacaktır. Hasar nedeninin

kolaylıkla saptanamadığı araştırmalarda hasar nedeni ile ilgili bir çıkış yolu bulmak için benzer hasarların yayımlanmış raporlarının taranması gerekebilir [22].

Bazı hallerde, kırılma yüzeyinin gözle muayenesi veya tek bir metalografik deney parçasının muayenesi gibi basit bir araştırma faaliyetiyle hasarın nedeniyle ilgili fikir edinmek mümkündür. Ancak, kesin sonuca ulaşmadan önce, başlangıçtaki fikri destekleyen ek deliller de aranmalıdır [22].

Aşağıda verilen ve bir dizi sorudan oluşmuş liste, deney bulgularının analizinde ve sonuçların ortaya çıkarılmasında yardımcı olmak için verilmiştir. Bu sorular, araştırma sırasında gözden kaçabilecek bazı detaylara da dikkati çeker [22]:

- Hasarın oluşum sırası saptandı mı?
- Hasarda çatlama veya kırılma mevcutsa bunların başladığı yerler saptandı mı?
- Çatlama yüzeyde mi, yoksa yüzeyin altında mı başladı?
- Çatlama bir gerilme yığılmasıyla ilişkili mi?
- Çatlak ne kadar süreden beri mevcuttur?
- Yükün şiddeti nedir?
- Yüklemenin tipi (statik, tekrarlı) nedir?
- Gerilmelerin yönü nedir?
- Hasar mekanizması nedir?
- Hasar sırasındaki çalışma sıcaklığı neydi?
- Sıcaklığın hasara bir katkısı var mıdır?
- Aşınmanın hasara bir katkısı var mıdır?
- Korozyonun hasara bir katkısı var mıdır?
- Uygun bir malzeme kullanıldı mı?
- Bu tip bir çalışma için parça kesiti yeterli midir?
- Malzemenin kalitesi şartnamelere göre kabul edilebilir düzeyde midir?
- Malzemenin mekanik özellikleri şartnamelere göre kabul edilebilir düzeyde midir?
- Hasara uğrayan eleman uygun şekilde ısıtılma işlemi görmüş müdür?
- Hasara uğrayan eleman uygun şekilde üretilmiş midir?
- Hasara uğrayan eleman uygun şekilde monte edilmiş midir?
- Eleman çalışma sırasında tamir edilmiş midir? Edilmişse, tamirat uygun şekilde yapılmış mıdır?

- Eleman uygun şekilde çalıştırılmış mıdır?
- Eleman uygun şekilde bakılmış ve yağlanmış mıdır?
- Hasar çalışma sırasındaki kötü kullanımla mı ilgilidir?
- Benzer hasarları önlemek için eleman daha iyi bir şekilde tasarlanabilir mi?
- Şu anda çalışmakta olan benzer elemanlarda da hasar oluşma olasılığı var mıdır? Bunların hasarını engellemek için ne yapılabilir?

Genel olarak bu soruların cevabı, daha önce gerçekleştirilen deneyler ve tutulan kayıtlardan elde edilir. Ancak hasarın nedeni veya nedenleri daima kesin olarak saptanamayabilir. Bu durumda araştırma sonucunda hasarın en olası nedeni veya nedenleri belirtilir [22].

Bundan sonraki safha hasar analiz raporunun yazılmasıdır. Hasar analiz raporu açık, kısa ve tutarlı bir biçimde kaleme alınmalıdır. Rapor aşağıdaki temel bölümlerden oluşmalıdır [22]:

- Hasara uğrayan elemanın tanımı,
- Hasar sırasındaki çalışma şartları,
- Hasar öncesi çalışma geçmişi,
- Elemanın imalat ve işlem geçmişi,
- Hasarın mekanik ve metalürjik etüdü,
- Kalitenin metalürjik değerlendirilmesi,
- Hasara neden olan mekanizmaların özetlenmesi,
- Benzer hasarların önlenmesi ve halen çalışmakta olan benzer elemanların düzeltilmesi için tavsiyeler [22].

Her raporda, yukarıda belirtilen bölümlerin tümünün olması gerekmeyebilir. Uzun raporlar bir özetle başlamalıdır. Hasar analiz raporlarının okuyucuları genelde satın alma, işletme ve muhasebe personeli olduğundan raporda çok zor bir teknik dilden kaçınmak gerekir. Rapora bir de terimler sözlüğü eklemek yararlı olabilir. Rapora detaylı hesaplan, denklemleri, kimyasal ve metalürjik bulgu tablolarını içeren eklerin koyulması, raporu bir bütün olarak daha iyi anlaşılır hale getirir [22].

3. DENEYSEL KISIM

Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan kardan milinin sıcak dövme birim parçalarından çatallı flanşın tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonucundaki kırılmasının hasar analizi çalışması icra edilmiştir.

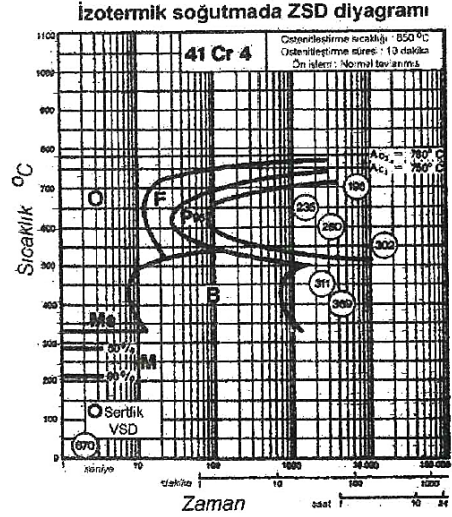
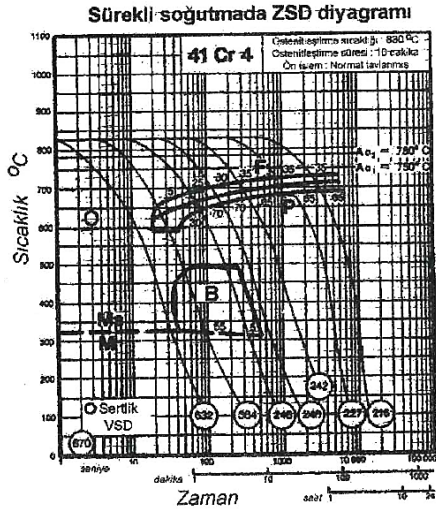
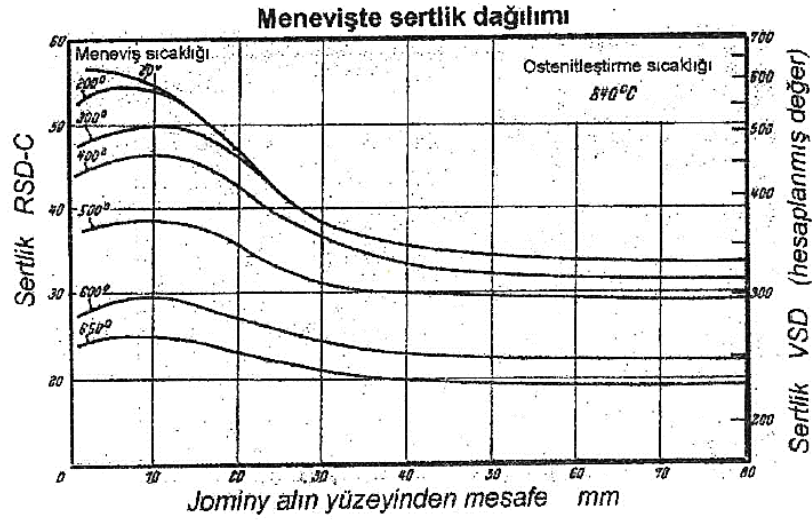
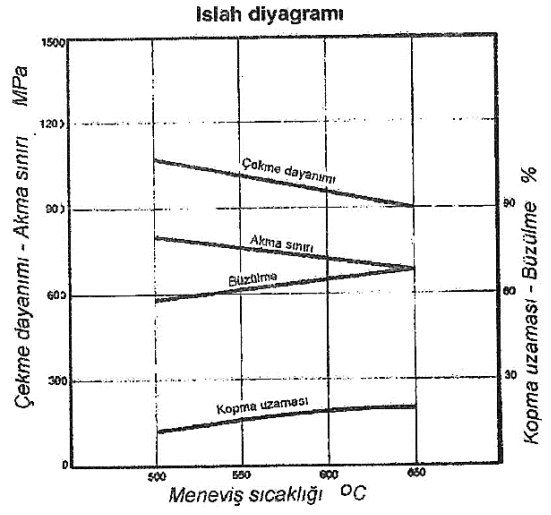
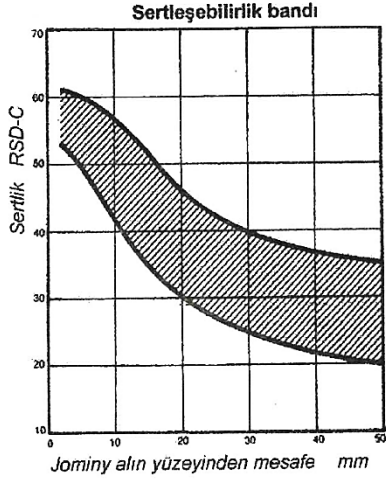
3.1. Numune Üretim Aşamaları Materyal ve Yöntem

3.1.1. Çatallı Flanş Dövme Prosesi

Çatallı flanş üretiminde kullanılan 41Cr4 (Malz. No: 1.7035) ıslah çeliği dövme prosesine uygun olarak Ø75 mm çapında haddelenmiş uzun ürün kullanılmıştır. 41Cr4 'ün malzeme özellikleri tablo 3.1. ve şekil 3.1. 'de gösterilmiştir [23].

Tablo 3.1. 41Cr4 malzeme özellikleri [24]

	KİMYASAL BİLEŞİM, %																			
	C	Si	Mn	P _{max}	S	Cr	Mo	Ni	V											
max	0,45	0,40	0,80	0,035	0,035	1,20	-	-	-											
min	0,38	0,15	0,50	-	0,020	0,90	-	-	-											
ISIL İŞLEM KOŞULLARI																				
	Sıcak Şekillendirme Sıcaklığı	Yumuşak Tavlama Sıcaklığı	Yumuşak Tavlama Sertlik	Normal Tavlama Sıcaklık	Sertleştirme Ortamı ve Soğutma Sıcaklıkları		Meneviş Sıcaklığı													
	°C	°C	≥ BSD 30	°C	Su °C	Yağ °C	°C													
max	1050	720	-	880	850	860	680													
min	850	680	241	840	820	830	540													
ISLAH EDİLMİŞ HALDE MEKANİK ÖZELLİKLER																				
	Akma Sınırı R _e				Çekme Dayanımı R _m				Kopma Uzaması A				Büzülme Z				Çentik Darbe İş (DVM) J			
	≤16 mm	>16 ≤40 mm	>40 ≤100 mm	>100 ≤160 mm	≤16 mm	>16 ≤40 mm	>40 ≤100 mm	>100 ≤160 mm	≤16 mm	>16 ≤40 mm	>40 ≤100 mm	>100 ≤160 mm	≤16 mm	>16 ≤40 mm	>40 ≤100 mm	>100 ≤160 mm	≤16 mm	>16 ≤40 mm	>40 ≤100 mm	>100 ≤160 mm
	≥MPa				≥MPa				≥ %				≥ %				J			
max	-	-	-	-	1200	1100	950	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
min	800	660	560	-	1100	900	800	-	10	12	14	-	30	35	40	-	35	40	40	-
ÖNEMLİ KULLANIM YERLERİ																				
Şanzıman parçaları, mil, piston kolu gibi talaşlı şekillendirilecek ıslah çeliği parçalar; ayrıca, siyanür banyosunda sertleştirilebilecek dişli çarklar																				



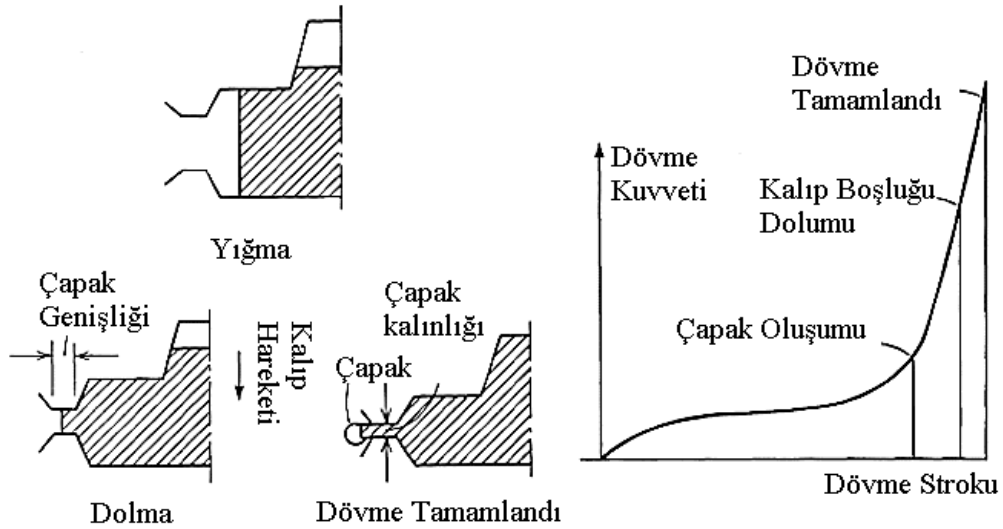
Şekil 3.1. 41Cr4 malzeme özellikleri [24]

Çatallı flanş üretimi için kullanılan çelik hammaddenin kimyasal kompozisyonu tablo 3.2 'de verilmiştir.

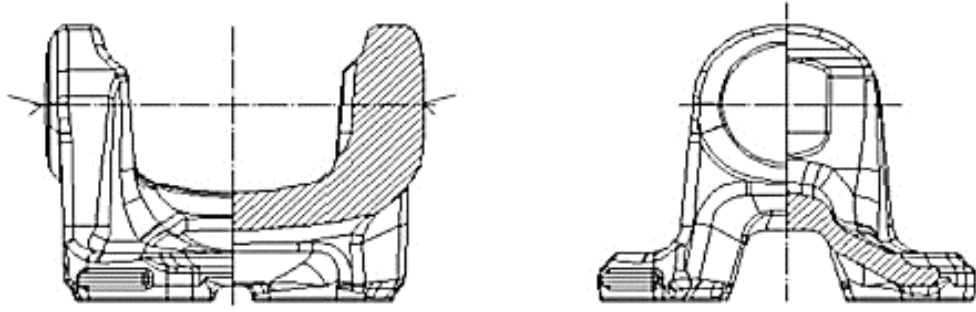
Tablo 3.2. Hammaddenin kütlece kimyasal kompozisyonu

	Kimyasal Kompozisyon, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
max	0,45	0,40	0,90	0,025	0,035	1,20	-	-	-	-
min	0,38	-	0,60	-	-	0,90	-	-	-	-
41Cr4	0,40	0,26	0,72	0,007	0,025	1,04	0,03	0,10	0,16	0,017

41Cr4 kalite Ø75 çap çelik çubuk 200 – 215 mm uzunluğa kesildikten sonra dövme prosesine alınır. 1200 – 1000 °C indüksiyon ile ön ısıtma yapılarak dövme işlemine uygun olan plastik şekil verme sıcaklığına ısıtılır. Daha sonra fiçılama ve sabun yapma ile nihai şekil öncesi uygun ebatları getirilme üzere, parça ön şekillendirilir. Ardından ilk şekillendirme ve son şekillendirme adımları ile parça ham şeklini alır (Şekil 3.2). Daha sonra çapak kesme ile parça temizlenir, ütüleme işlemi ile parça nihai ölçülerine getirilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Kapalı kalıpta çapaklı dövme işlemi [25]



Şekil 3.3. Dövme sonrası çatallı flanş nihai şekli

3.1.2. Isıl İşlem Prosesi

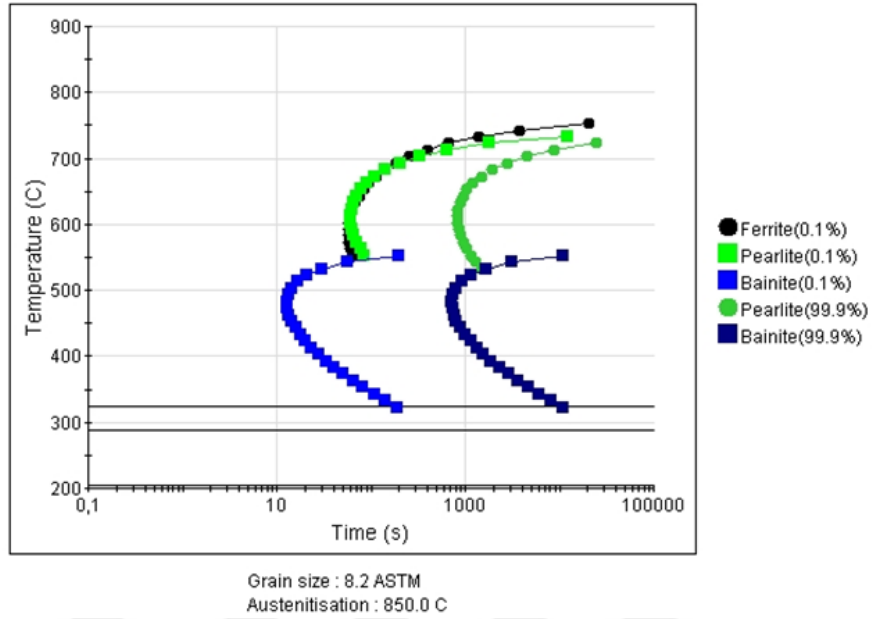
Dövme sonrasında parçaya istenilen mekanik özellikleri sağlaması ve homojen bir iç yapı elde edilmesi amacıyla, ıslah ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu ıslah ısıl işlemi atmosfer kontrollü, kamaralı tip fırınlarda gerçekleştirilmiş, su verme ajanı olarak yağ kullanılmıştır. Islah adımları tablo 3.3 'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Islah ısıl işlem parametreleri

	Sıcaklık, °C	Zaman, dk
Fırında Bekleme	875 - 825	200 - 180
Su Verme, yağda	80 - 60	35 - 25
1. Temperleme	570 – 550	160 – 140
2. Temperleme	580 – 560	160 - 140

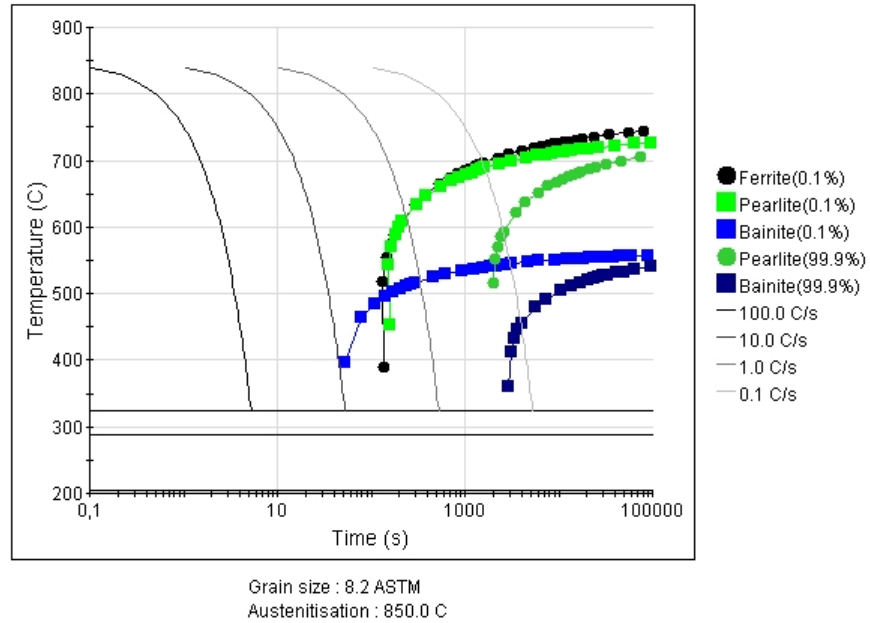
Isıl işlem parametrelerine göre elde edilen verileri doğrulamak adına JMatPro yazılımı yardımıyla şekil 3.4 'de TTT diyagramı ve şekil 3.5 'de CCT diyagramı elde edilmiştir.

TTT



Şekil 3.4. Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı

CCT

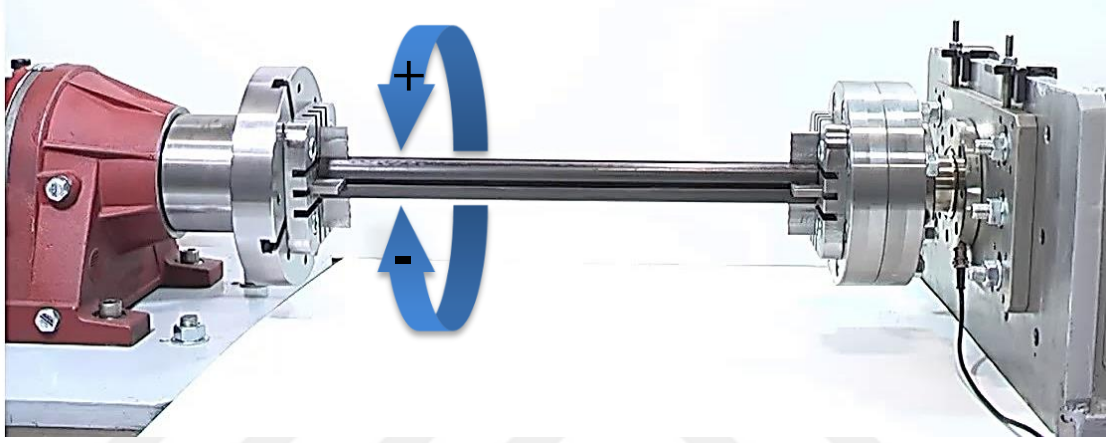


Şekil 3.5. Sürekli soğuma dönüşüm diyagramı

Isıl işlem sonrasında çatallı flanş birim parçası talaşlı imalat prosesi ve daha sonra montaj işlemi ile kardan mili kompleksini oluşturmuştur.

3.2. Yorulma Testi Materyal ve Yöntem

Yorulma ömrünü tespit edilmesi maksadıyla kardan mili hızlandırılmış ömür testine tabi tutulmuştur. Test parametreleri kardan milinin kullanıldığı araçtan alınan verilerden elde edilmiştir ve araç üzerindeki yerleşimine göre test cihazına bağlanmıştır. Bu sebeple kardan mili, tam dalgalı tam değişkenli karakteristiğe sahip kırılıncaya kadar tekrarlanmak üzere torsiyonel yorulma testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Örnek torsiyonel yorulma test cihazı, [26]

3.3. Hasar Analizi Materyal ve Yöntem

Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrasında çatalı flanş birim parçasında meydana gelen kırılmanın kök neden analizini gerçekleştirmiştir. Bu amaçla öncelikle hammadde olarak kullanılan çelik çubuğun ve kırılma sonrası çatalı flanş parçasında kimyasal analiz, sertlik taraması, mikroyapı incelemesi gibi tahribatlı testler yapılmıştır. Ayrıca kırılma nedeninin tespiti amacıyla da SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Kimyasal Analiz

Hammaddeden alınan $\varnothing 75$ mm numune kimyasal analiz öncesinde bir yüzeyi 80 numaralı alüminyum oksit zımpara kâğıdı ile susuz olarak zımparalanarak yüzey hazırlanmıştır. Zımpara sonunda Q4 Tasman marka metal spektrometre (Şekil 3.7)

cihazı ile Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (DEFAM) 'inde malzemenin kimyasal içeriği tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. Metal Spektrometre cihazı

3.3.2. Sertlik Ölçümü

Kırılmış olan çatallı flanş birim parçası ve parçanın hammaddesinden örnekler alınmıştır. Kesme cihazı (Şekil 3.8) ile uygun ölçülere getirilen numuneler bakalit yardımıyla sıcak kalıplanmış (Şekil 3.9) ve 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımpara kademeleri ile zımparalanmış ve 6 µm elmas solüsyon yardımıyla da parlatılmış (Şekil 3.10), mikrosertlik taramasına elverişli duruma getirilmiştir.



Şekil 3.8. Otomatik kesme cihazı, Metkon Servocut-401AA



Şekil 3.9. Sıcak kalıplama cihazı, Metkon Metapress-A

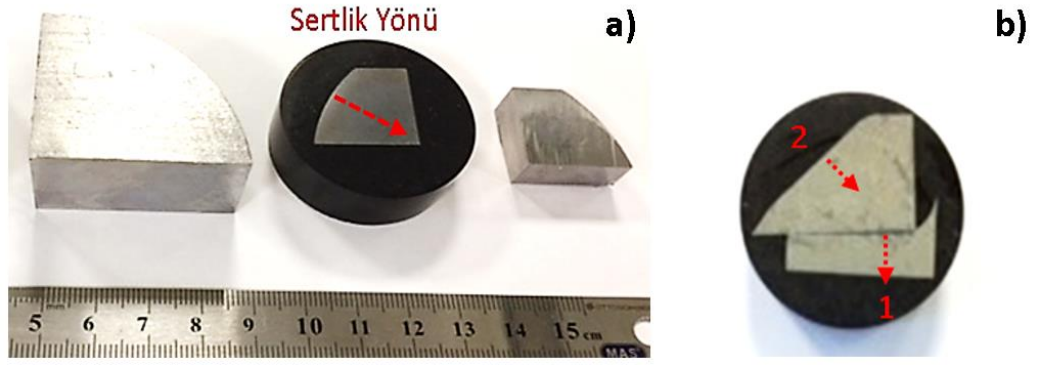


Şekil 3.10. Zımparalama ve parlatma cihazı, Metkon Forcipol-2V

Mikro vickers sertlik taraması için hazırlanan numuneler (Şekil 3.11) yüzeyden 100 μm içeriden 200 μm aralıklarla parça merkezine doğru TS EN ISO 6507-1 [27] standartına göre ölçümler alınmıştır. Ölçüm parametreleri tablo 3.4’de belirtilmiştir.

Tablo 3.4. Mikro vickers sertlik taraması

Test Cihazı	Zwick ZHV10
Ölçü Skalası	HV 0,5
Test Yüğü	4,903 N
Yük Uygulama Süresi	10 – 15 sn.



Şekil 3.11. Hammadde numunesi (a) ile birim parça numunesi (b) ve sertlik ölçüm yönleri



Şekil 3.12. Vickers sertlik cihazı, Zwick ZHV10

Hammadde ve birim parça yüzey sertliklerini ölçmek amacıyla TS EN ISO 6506-1 [28] standartına göre brinell sertlik testi (Şekil 3.13) yapılmıştır. Test parametreleri tablo 3.5 'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Brinell sertlik testi

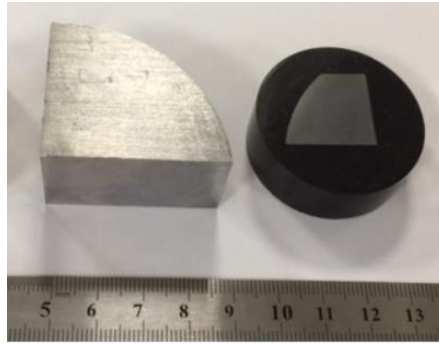
Test Cihazı	BULUT BMS3000-OBPC
Ölçü Skalası	HBW 10 / 3000
Test Yüğü ve Ucu	29.420 N - Ø10
Test Süresi	15 sn.



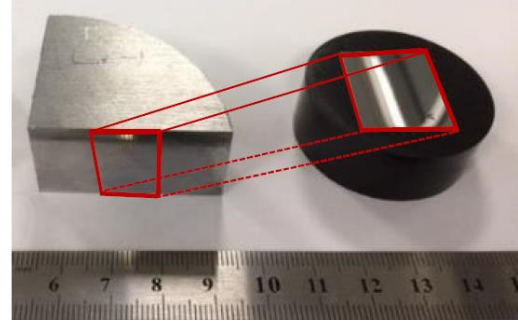
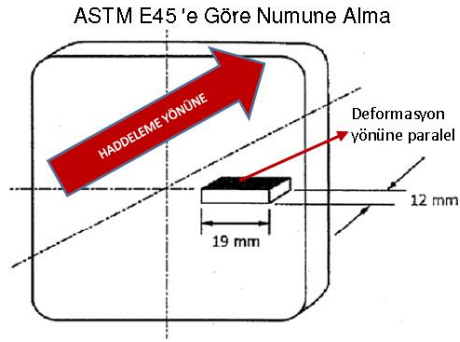
Şekil 3.13. Brinell sertlik cihazı, BULUT BMS3000-OBPC

3.3.3. Metalografik Analiz

Sıcak dövme öncesinde çatallı flanş hammaddesinin ve tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testinde kırılan çatallı flanş birim parçasının mikro yapı özellikleri, faz dağılımları, dekarbürizasyon durumu, tane boyutu ve inklüzyon incelemesi amacıyla belirlenen numuneler hazırlanmıştır (Şekil.3.14-16). Özellikle inklüzyonun tespiti amacıyla numune alma yönü ASTM E45 standartında belirtildiği gibi malzemenin plastik şekillendirme yönüne paraleldir (Şekil 3.15).



Şekil 3.14. Hammaddeden alınan numune



Şekil 3.15. Hammaddeden alınan inklüzyon inceleme numunesi



Şekil 3.16. Yorulma testi sonrası kırılan çatallı flanştan alınan numune

Malzemenler mikro yapı incelemesine uygun olarak bir dizi numune hazırlama aşamasından geçmiştir: Şekil 3.8 de gösterilen kesme cihazı ile numune incelenecek boyuta getirilmiş, şekil 3.9'daki sıcak kesme cihazı ile bakalite alınmış, şekil 3.10'daki otomatik zımparalama ve parlatma cihazı ile 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 zımparalanmış, 6µm'luk elmas pasta ile parlatılmıştır. İnküzyon incelemesi yapılan numune parlatılmış halde; faz analizi, tane boyutu, dekarbürizasyon incelemesi yapılması planlanan numune ise %5'lik nital çözeltisi ile 5 sn dağlanmış halde şekil 3.17 deki mikroskop ve yazılım yardımıyla incelenmiştir.



Şekil 3.17. Nikon MA100 metal mikroskobu ve Clemex görüntüleme yazımı

3.3.4. Kırık Yüzey Analizi ve Malzeme Karakterizasyonu

Çatallı flanş sıcak dövme işleminde hammadde olarak kullanılan yuvarlak çelik çubuktan alınan numunenin inklüzyon incelemesi ve tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testinde kırılan çatallı flanş birim parçası kırık yüzey incelemesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezinde Carl Zeiss marka 300VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Taramalı elektron mikroskobu, Carl Zeiss 300VP [29]

Yorulma testi sonrası kırılan numune (Şekil 3.19) inklüzyon inlemesi amacıyla kesme cihazı yardımıyla incelemeye uygun boyuta getirilmiş; 120, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh ile zımparalandıktan sonra 6 μm 'luk elmas pasta ile de parlatılmıştır. Yorulma testinde kırılan parça ile SEM analizine uygun olarak kesilmiştir. Daha sonra

bu numune, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde ultrasonik temizleme cihazı ile yüzeyin kir ve pastan arındırılmıştır.



Şekil 3.19. Yorulma testi sonrası kırılan çatalı flanşın incelenen kırık yüzeyi.

Taramalı elektron mikroskopunda görüntülemeye uygun olarak hazırlanan numunelerde gerçekleştirilen inklüzyon incelmesinde EDS detektörü ile malzeme içerisindeki inklüzyonların nitel ve nicel elemental analizi yapılmış ve haritalandırma ile elementlerin dağılımı belirlenmiştir.

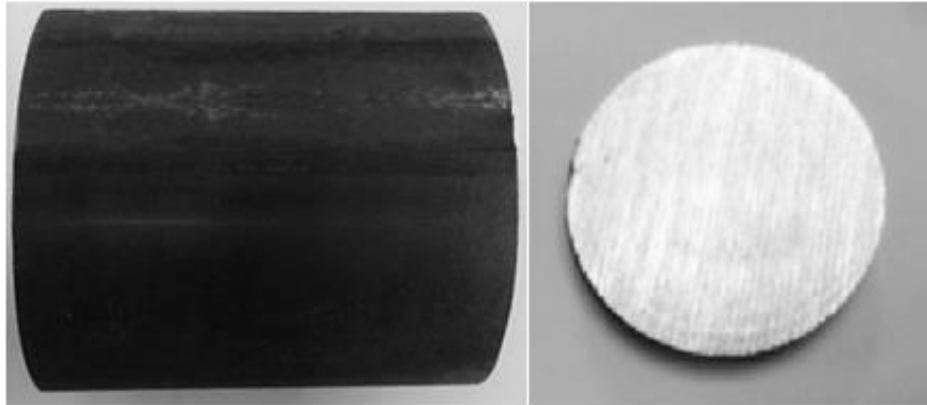
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu alıŐma sıcak dövme öncesi çatallı flanş birim parçasında kullanılan hammadde incelemesi ve tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatallı flanş birim parçası incelemesi olarak iki kısmına ayrılmıştır. Bu kapsamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir:

- Kimyasal analiz,
- Sertlik lvme
- Metalografik analiz
 - İnklyzyon analizi
 - Faz analizi
 - Tane boyutu analizi
 - Dekarbürizasyon analizi
- Kırık yzey SEM ve EDS elemental analizi

4.1. Kimyasal Analiz

Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testinde kullanılan birim parçanın hammaddesi Şekil 4.1'deki gibi kesilmiş ve spektrometre kimyasal analiz cihazıyla lvme yapılmıştır. Burada kullanılan malzeme kalitesinin TS EN ISO 10083-3 standartına göre 41Cr4 olduğu tablo 4.1'de gösterilmiştir [23].



Şekil 4.1. Kimyasal analiz numunesi

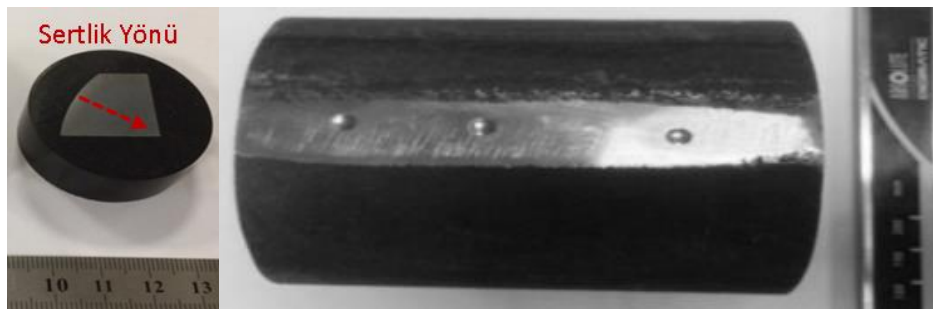
Tablo 4.1. Kimyasal analiz kütlece yüzde sonuçları

TS EN ISO 10083-3		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	max	0,45	0,40	0,90	0,025	0,035	1,20	*	*	*	*
min	0,38	*	0,60	*	*	0,90	*	*	*	*	
41Cr4 Mat.No. 1.7037	1	0,42	0,26	0,75	0,010	0,034	1,08	0,03	0,11	0,16	0,016
	2	0,44	0,27	0,75	0,010	0,034	1,08	0,03	0,11	0,16	0,015
	3	0,43	0,27	0,75	0,009	0,030	1,08	0,03	0,11	0,16	0,018
	4	0,42	0,26	0,74	0,009	0,032	1,06	0,03	0,11	0,16	0,016
	5	0,45	0,27	0,77	0,009	0,033	1,08	0,03	0,12	0,17	0,021
	Ø	0,43	0,27	0,75	0,009	0,033	1,08	0,03	0,11	0,16	0,017

Beş farklı noktadan yapılan kimyasal ölçüm sonucunda malzeme 41Cr4 kalite standartları gereği, istenilen değer aralığı içerisinde kaldığı anlaşılmaktadır. Kimyasal analiz sonuçları irdelendiğinde karbon miktarının yüksek tutulması martenzit sertliğini arttıracığı, mangan ve krom yardımıyla sertleşebilirliği arttıracığı ve aynı zamanda plastisiteye olumlu etkileyeceği düşünülmektedir. Bunun yanında kükürt ihtivasında işlenebilirliği iyileştirmektedir.

4.2. Sertlik Ölçümü

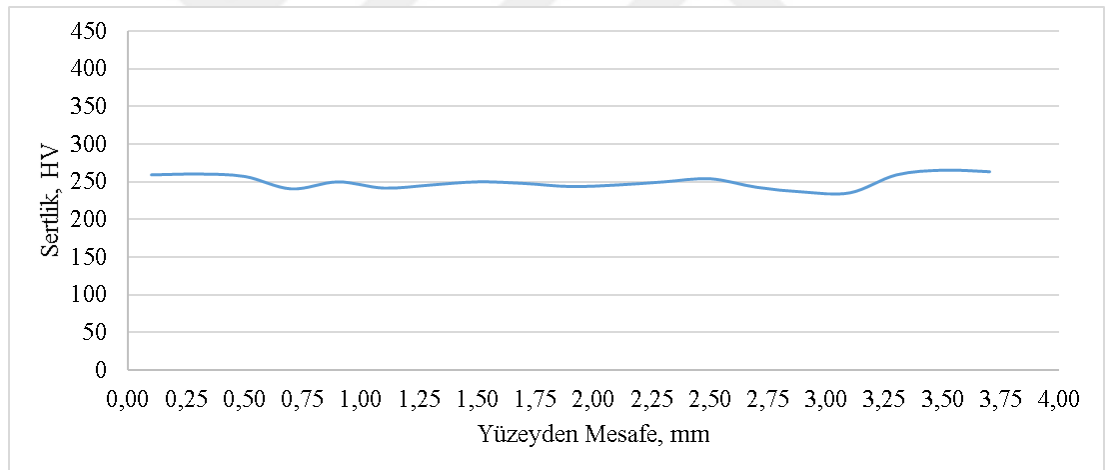
Sıcak dövme prosesinde kullanılan hammadde ve test sonrası kırılan çatalı flanş birim parçasının yüzey sertlikleri ve yüzeyden içeri doğru sertlik taraması yapılmıştır. Yüzey sertlik ölçümünde brinell sertlik cihazı, yüzeyden içeri doğru sertlik taramasında ise mikro vickers sertlik cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Çatalı flanş çelik hammaddesi sertlik taraması ve yüzey sertliği numuneleri

Tablo 4.2. Çatallı flanş çelik hammaddesi sertlik taraması, mikro Vickers sertlik taraması ve Brinell yüzey sertlik ölçümleri

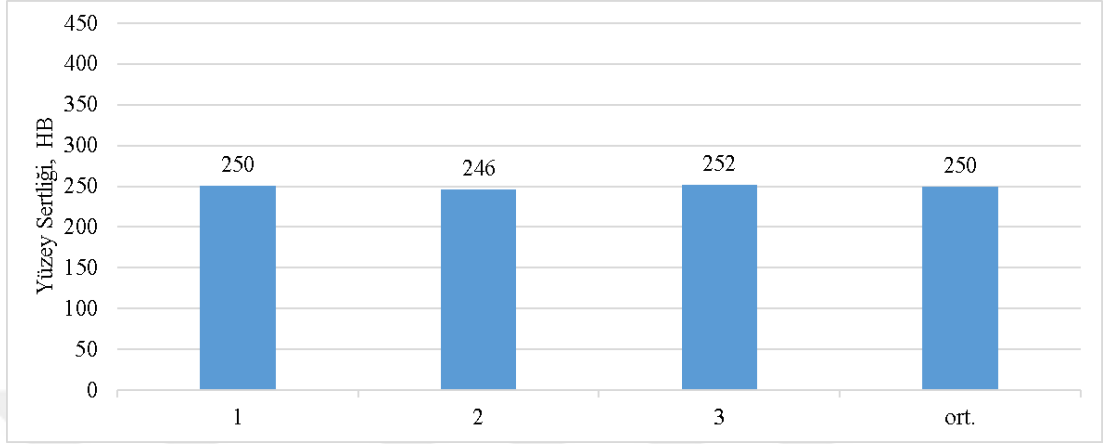
Mikro Vickers Sertlik Taraması						Brinell Yüzey Sertliği	
S.No	Yüzeyden Mesafe	Sertlik	S.No	Yüzeyden Mesafe	Sertlik	S.No	Yüzey Sertliği
	<i>mm</i>	<i>HV0,5</i>		<i>mm</i>	<i>HV0,5</i>		<i>HB</i>
1	0,10	259	11	2,10	246	1	250
2	0,30	260	12	2,30	250	2	246
3	0,50	257	13	2,50	254	3	252
4	0,70	241	14	2,70	243	ort.	250
5	0,90	250	15	2,90	237		
6	1,10	242	16	3,10	236		
7	1,30	246	17	3,30	259		
8	1,50	250	18	3,50	265		
9	1,70	248	19	3,70	263		
10	1,90	244	20	-	-		



Şekil 4.3. Çatallı flanş çelik hammaddesinin vickers test cihazı ile yüzey sertlik taraması

Mikro vickers sertlik testinde hassas ölçüm alabilmek için numune bakalite alma cihazı ölçülerine göre uygun boyutta kesilmiş, kalıplanmış ve otomatik zımparalama parlatma cihazı ile 120-400-600-800-1000-1200 ve 6 µm'luk kademelerden geçirilmiştir. 4,903 N yük ve 10-15 sn yük uygulama süresi ile 19 ölçüm alınmıştır. Yüzeyden içeri doğru toplam 3,70 mm'lik hat boyunca sertlik ölçülmüştür. Sonuç olarak, yüzeyden 3,5 mm mesafede 265 HV en yüksek, yüzeyden 3,1 mm mesafede 236 HV en düşük ölçümler tespit edilmiş, ortalama değer 250 HV

hesaplanmıştır. Genel olarak, çatallı flanş hammaddesinde sertlik değişkenliğine sebebiyet verecek dekarbürizasyon ve malzeme hatalarının olmadığı, böylece sertlik sonuçlarının stabil bir karakteristik göstermiştir.



Şekil 4.4. Çatallı flanş çelik hammaddesi brinell test cihazı ile yüzey sertliği ölçümü

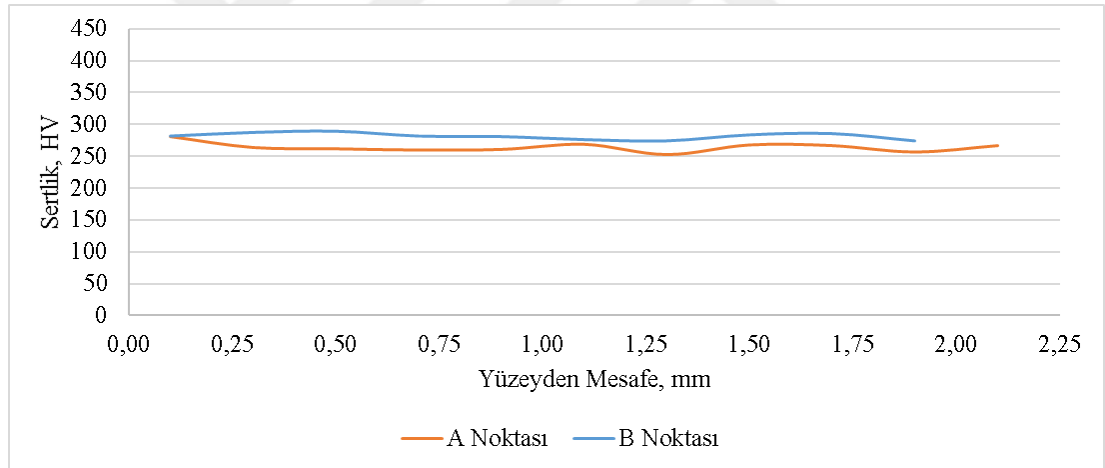
Brinell yüzey sertlik ölçüm numunesinin yüzeyinden tufal ve oksit tabası kaldırılarak, üç farklı noktadan ölçüm alınmıştır. En düşük 246 HB, en yüksek 252 HB ve ortalama 250 HB olarak yüzey sertliği tespit edilmiştir. TS EN ISO 10083-3 standartına göre 41Cr4 malzeme için soğuk kesilebilirlik şartı olan 255 HB sertlik değerinin üzerine çıkılmamıştır [23]. Bunun sonucunda, malzemeyi şekillendirmek/kesmek için kullanılan takımların ömrü arttırılmış ve performansı iyileştirilmiş olmaktadır.



Şekil 4.5. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatallı flanşın hasar görmemiş kısmından alınan numune, A: Spotface Bölgesi, B: Dış Çap

Tablo 4.3. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatallı flanş mikro Vickers sertlik taraması ve Brinell yüzey sertlik ölçümü

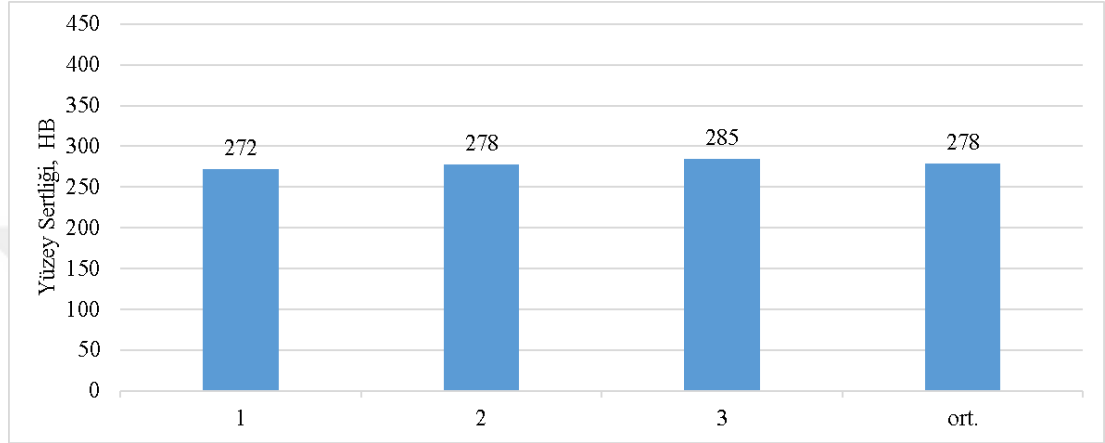
S.No	Yüzyden Mesafe <i>mm</i>	Sertlik		S.No	Yüzy Sertliği <i>HB</i>
		A Noktası <i>HV0,5</i>	B Noktası <i>HV0,5</i>		
1	0,10	281	282	1	272
2	0,30	264	288	2	278
3	0,50	262	290	3	285
4	0,70	260	282	Ort.	278
5	0,90	261	281		
6	1,10	269	276		
7	1,30	253	274		
8	1,50	268	284		
9	1,70	267	286		
10	1,90	257	274		
11	2,10	267	-		



Şekil 4.6. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatallı flanş mikro Vickers sertlik taraması grafiği, A: Spotface Bölgesi, B: Dış Çap

Mikro vickers sertlik testinde hassas ölçüm alabilmek için numuneler bakalite alma cihazı ölçülerine uygun olarak kesilmiş, kalıplanmış ve otomatik zımparalama parlatma cihazı ile 120-400-600-800-1000-1200 ve 6 µm'luk kademelerden geçirilmiştir. 4,903 N yük ve 10-15 sn yük uygulama süresi ile A noktasından 11 ve B noktasından 10 ölçüm alınmıştır. Yüzyden içeri doğru toplam 1,90- 2,10 mm'lik hat boyunca sertlik taraması yapılmıştır. A noktasında yüzyden 0,1 mm mesafede 281 HV en yüksek, yüzyden 1,3 mm mesafede 253 HV olmak üzere en düşük ölçümler

tespit edilmiş, ortalama değer 264 HV hesaplanmıştır. B noktasında yüzeyden 0,5 mm mesafede 290 HV en yüksek, yüzeyden 1,30 ile 1,90 mm mesafede 274 HV olmak üzere en düşük ölçümler tespit edilmiş, ortalama değer 282 HV hesaplanmıştır. Genel olarak, çatalı flanş numunesinde ıslah işleminden gelebilecek sertlik değişkenliğine neden olan dekarburizasyon, ısıtma işlem hatalarının tespit edilmediği, böylece sertlik sonuçlarının kararlı bir davranış göstermiştir.



Şekil 4.7. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatalı flanş Brinell yüzey sertlik ölçüm grafiği

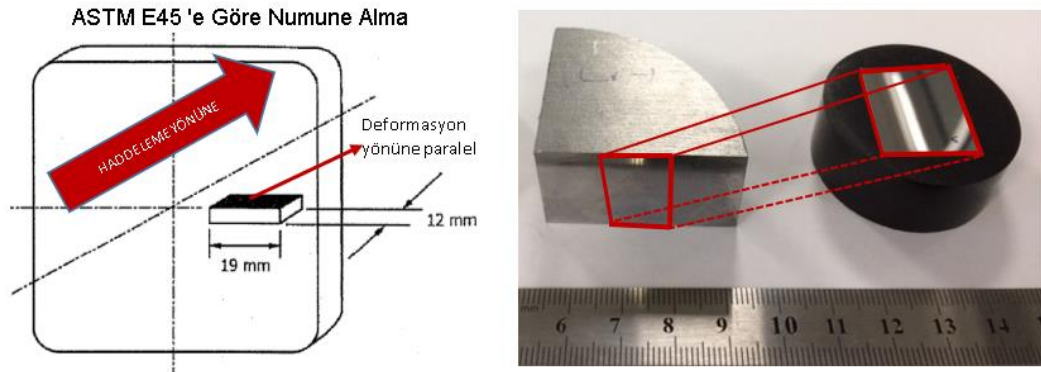
Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrasında çatalı flanş numunesinin yüzey sertliği kontrol etmek amacıyla Brinell sertlik ölçümüne uygun olarak numune alınmış, yüzey hafifçe zımparalanacak dövme yapısından kurtarılmış ve sertlik ölçümüne hazır duruma getirilmiştir. Üç farklı noktadan alınan ölçüm sonucunda en düşük, 272 HB; en yüksek 285 HB ölçülmüş ve ortalama 278 HB hesaplanmıştır. ISO 18265 [30] standardında yer alan metalik malzemeler dönüş tablosuna göre, 278 HB Brinell sertlik değeri 883 MPa çekme dayanımına eşdeğerdir. Tablo 4.4'deki özelliklere bakıldığında ısıtma işlem prosesi sonrasında 883 MPa olarak çevrilmiş malzemenin çekme değeri istenilen 800-950 MPa aralığındadır.

Tablo 4.4. TS EN ISO 10083-3 standartına göre Su verilmiş temperlenmiş haldeki 41Cr4 çelik kalitesinin mekanik özellikleri [23]

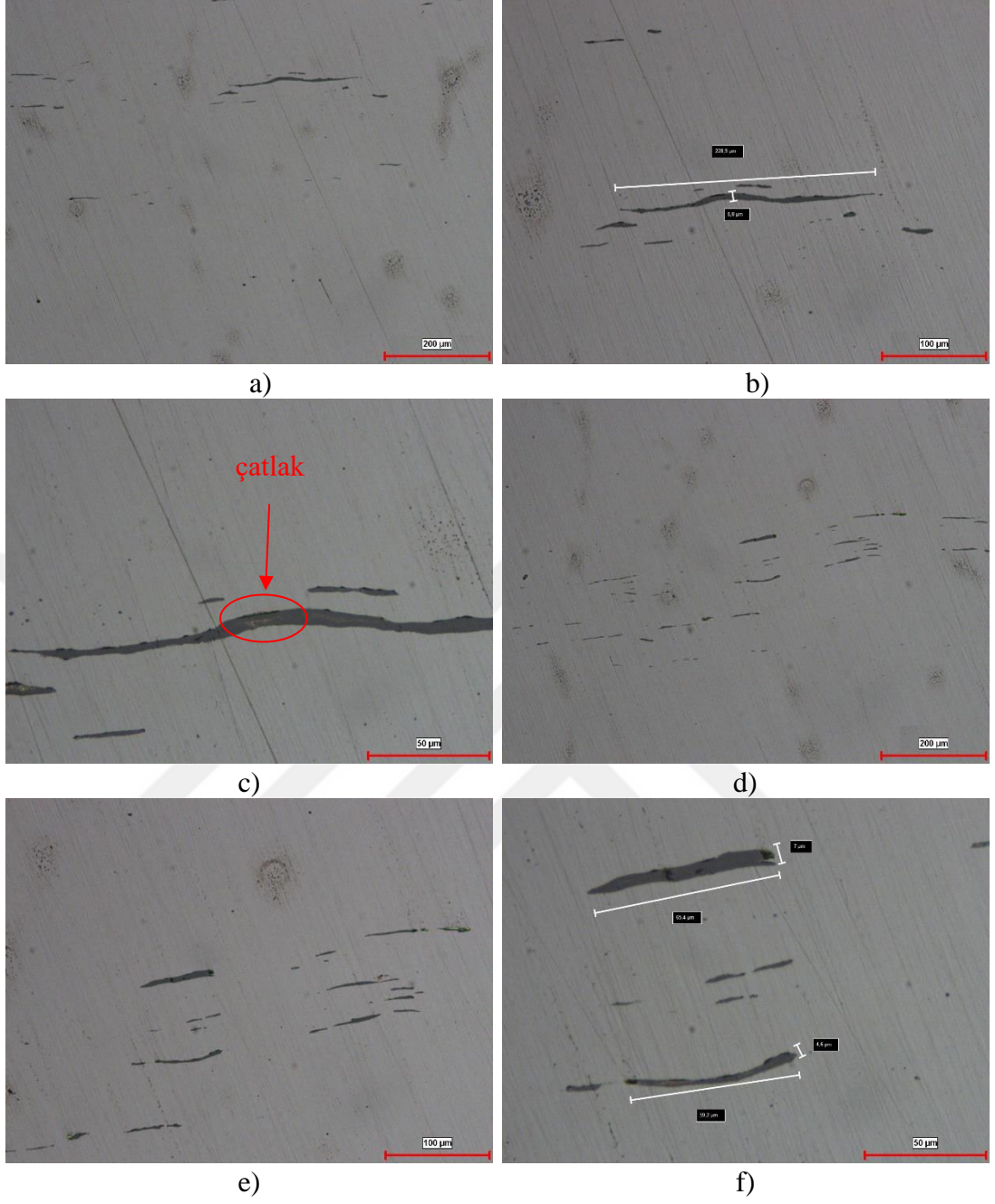
Su verilmiş temperlenmiş haldeki oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri						
Kalite	Malz. No	R _e min. <i>MPa</i>	R _m <i>MPa</i>	A min. %	Z min. %	KV min. <i>J</i>
41Cr4	1.7035	560	800- 950	14	40	35
<i>40 mm < d ≤ 100 mm; 20 mm < t ≤ 60 mm</i>						

4.3. Metalografik Analiz

Sıcak dövme amacıyla kullanılan 41Cr4 kalite yuvarlak çelik çubuk sürekli döküm yöntemi ile dökülür, kütük haline getirilir ve yuvarlak kesitte getirilmek üzere haddeleme işlemi uygulanır. Çatallı flanş birim parçasında hammadde olarak kullanılan bu hadde ürününden dövme prosesi öncesinde numune alınmıştır. Optik mikroskopta görüntülemek amacıyla bakalit ile sıcak kalıplanan numune sırasıyla 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 6 µm'lık zımparalama – parlatma kademelerinden geçirilir. İnklüzyon analizi için parlatılmış halde faz, dekarburizasyon, tane boyutu analizi için %3'lük nital çözeltisi ile dağlanmış halde numune incelenmiştir.



Şekil 4.8. Çatallı flanş hammaddesi inklüzyon analiz numunesi



Şekil 4.9. Çatallı flanş hammaddesinden alınan numunenin inklüzyon görüntüleri
a) Plastik şekil verme yönünde uzamış sülfür inklüzyonların, 100X; b) 228,9 x 8,8 µm
inklüzyon, 200X; c) Uzamış sülfür inklüzyonu ile metal matriksi arasında kılcal çatlak,
500X; d) Uzamış sülfür inklüzyonları, 100X; e) Uzamış sülfür inklüzyonları, 200X; f)
60,4 x 7 µm ve 59,24 x 4,6 µm uzamış sülfür inklüzyonu, 500X.

ASTM E45 standartına göre plastik şekil verme yönüne paralel kesilerek alınan numune ile inklüzyon görüntüleri şekil 4.9'daki gibidir [31]. Kimyasal analizde de görüldüğü üzere talaşlı imalat ve işlenebilirlik amacıyla malzemede ihtiva eden sülfür

oranının yüksek olması metal mikroskop ile yapılan iç yapı görüntülerinden anlaşılmaktadır. Yapılan incelemede şekil 4.9.b’de görüldüğü gibi 228,9 x 8,8 µm ebadındaki inklüzyonda plastik şekil verme sebebiyle metal matris arasında çatlak tespit edilmiştir. Bu tür inklüzyonların dövme sonrasında düşük tork yüksek çevrimli yorulma davranışlarında çatlak başlangıç noktaları olabileceği öngörülmektedir.

Tablo 4.5. ASTM E45 Metot A ya göre inklüzyon tayini [31]

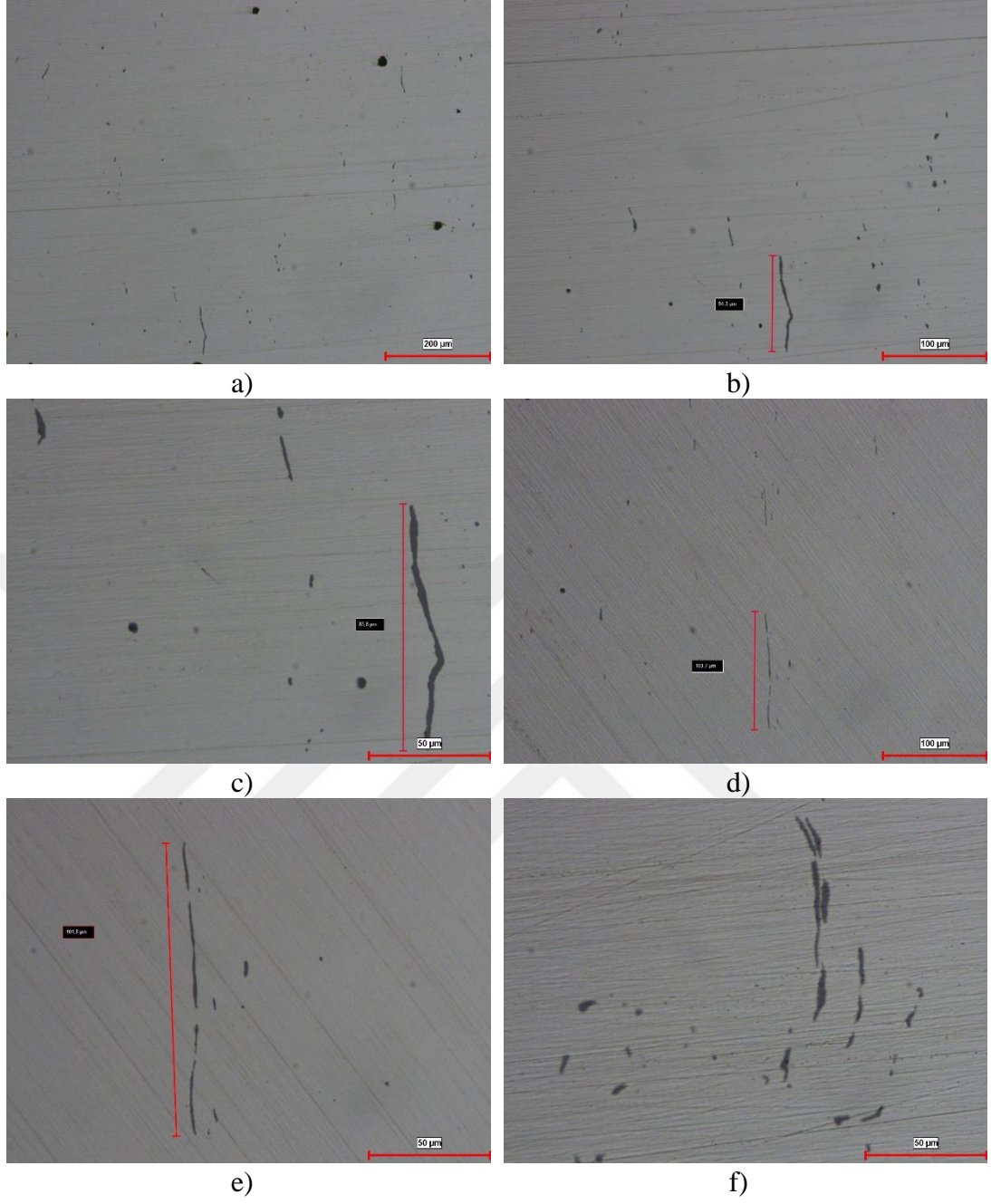
ASTM E45 Metot A					
		A	B	C	D
41Cr4	T	3,00	0,60	0,00	1,00
	H	1,00	0,16	0,00	0,50

Çatallı flanş üretiminde kullanılan çelik hammaddenin üretim sertifikasında belirtilen inklüzyon tayin sonucunda da A tipi olarak adlandırılan sülfürlerinde yüksek oranda bulunduğu görülmektedir. ASTM E45 Metot A’ya göre A-Tipi Thin(T) sülfürün 3,00 olması, 2 – 4 µm genişliğinde minimum 898,0 – 1.181,0 µm uzunluğunda sülfür inklüzyonu ihtiva ettiği; A-Tipi Heavy (H) 1,00 olması 127,0 – 261 µm uzunluğunda 4 – 12 µm genişliğinde inklüzyon ihtiva ettiği anlamına gelmektedir. Şekil 4.9.b’de tespit ettiğimiz inklüzyon ise ASTM E45 Metot A ya göre, A-Tipi Heavy (H) ve şiddeti de 1,00 olarak sınıflandırılır [31].



Şekil 4.10. Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrasında alınan çatallı flanş numunesi

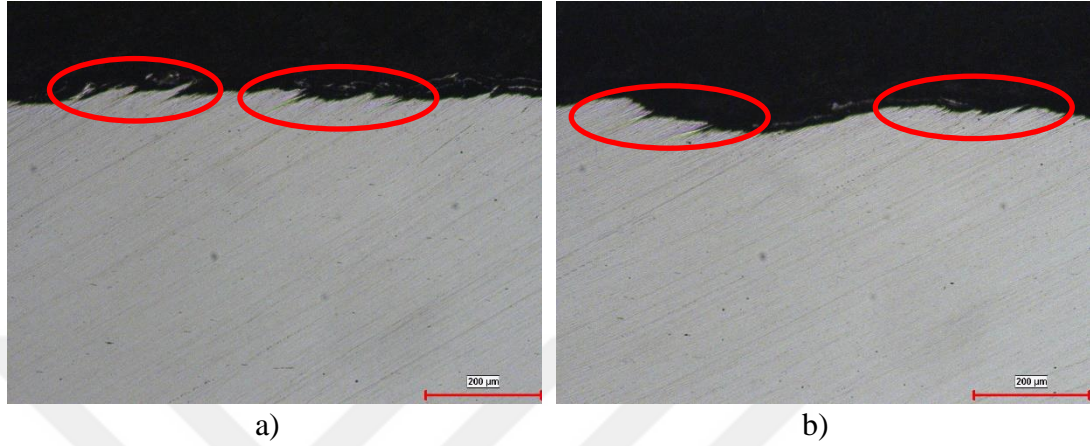
Çatallı flanş birim parçasından testten sonra inklüzyon incelemesi amacıyla şekil 4.10’daki gibi numune alınmış ve parlatılmış halde mikro yapısı incelenmiştir.



Şekil 4.11. Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrasında çatalı flanş birim parçasından alınan numunenin inklüzyon analizi; a) Uzamış sülfür ve küresel oksit inklüzyonu, 100X; b) 85,8 µm uzunluğunda uzamış sülfür inklüzyonu, 200X; c) 85,8 µm uzunluğunda uzamış sülfür inklüzyonu, 500X; d) Uzamış sülfür ve küresel oksit inklüzyonu, 200X; e) 101,8 µm uzunluğunda uzamış sülfür inklüzyonu, 500X; f) Uzamış sülfür inklüzyonu, 500X

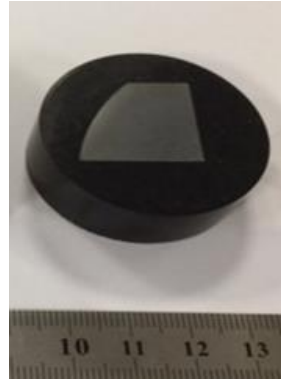
Şekil 4.11’de görüldüğü üzere çatalı flanş birim parçasında yapılan inceleme sonunda malzemede gelen olarak uzamış sülfür inklüzyonları ihtiva ettiği, bunun

yanında az miktarda küresel oksit yapılan görülmektedir. Yuvarlak çelik hammadde inklüzyon incelemesindeki gibi uzunlukta inklüzyonlar tespit edilememiştir. Şekil 4.11.b’de 85,8 µm uzamış sülfür inklüzyonu ve şekil 4.11.e’de 101,8 µm uzamış sülfür inklüzyonu ölçülmüştür.



Şekil 4.12. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonrası çatallı flanş numunesi yüzeyindeki yorulma sebebiyle ortaya çıkan yorulma çizgileri, a) Yüzey, 100X; b) Yüzey, 100X.

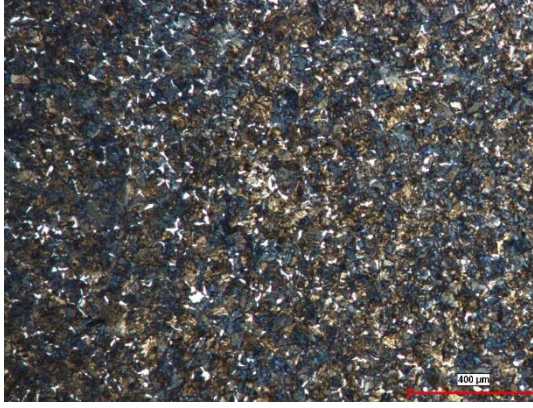
Yorulma testi sonrasında kırılan çatallı flanş birim parçası parlatılmış numune yüzey incelemesinde yorulma bant izleri şekil 4.12 deki gibi tespit edilmiştir [33].



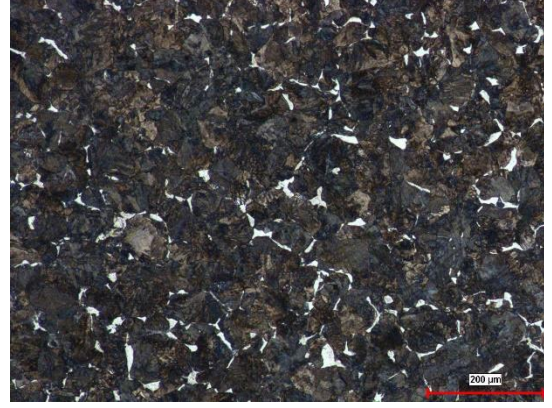
Şekil 4.13. Çatallı flanş hammaddesinden alınan mikroyapı numunesi

Sıcak dövme prosesine girecek olan hammaddeden alınan parçadan numune alınarak uygun boyutları getirilmiş ve bakalit yardımıyla sıcak kalıplanmıştır. 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 6 µm’luk kademelerle zımpara ve parlatma işlemlerinden

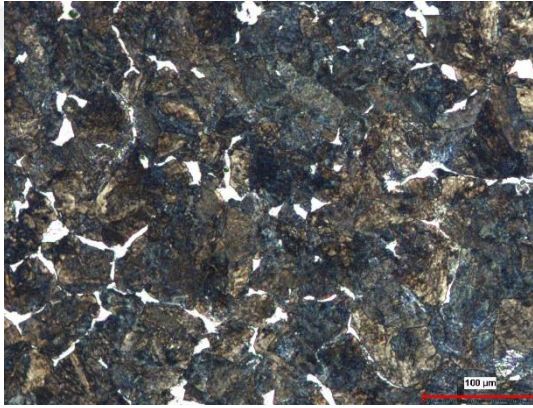
sonra %3'lük nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Faz analizi, tane boyutu ve dekabürizasyon analizi gerçekleştirilmiştir.



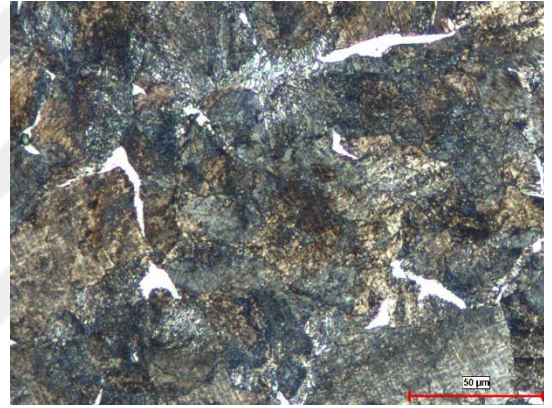
a)



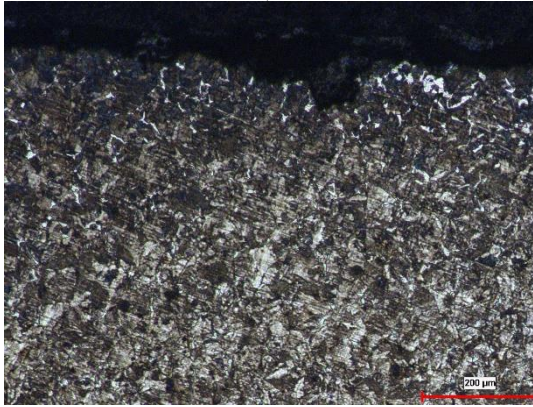
b)



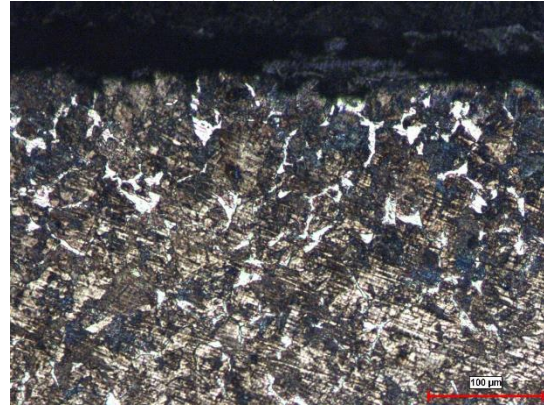
c)



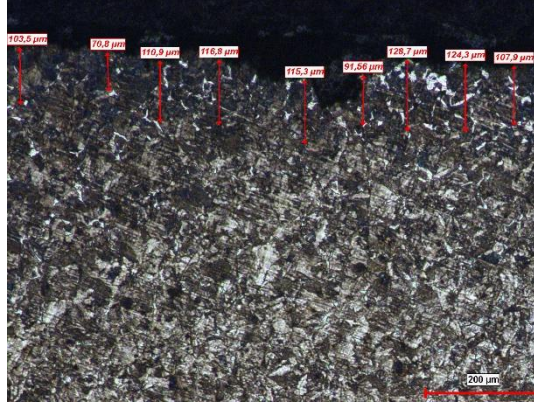
d)



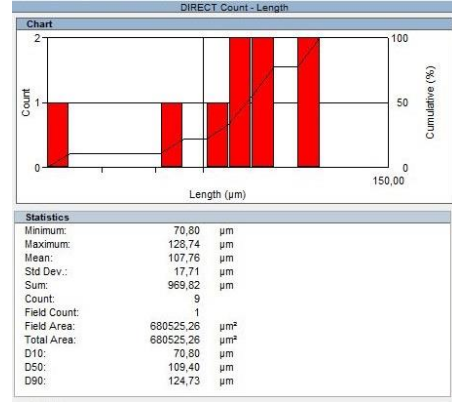
e)



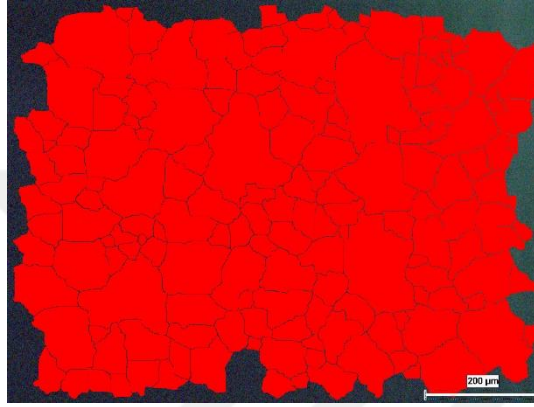
f)



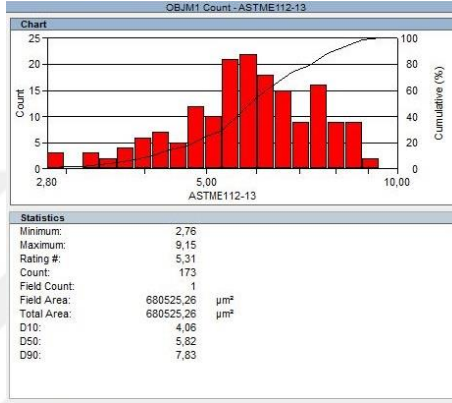
g)



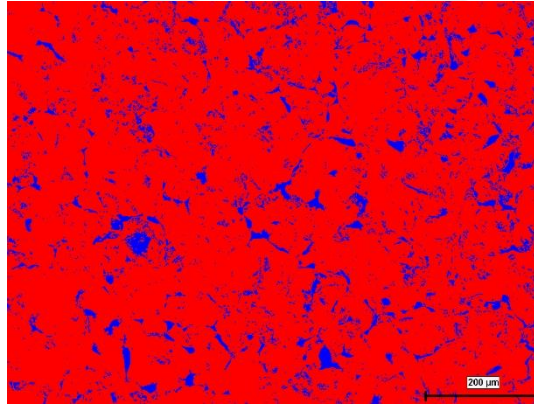
h)



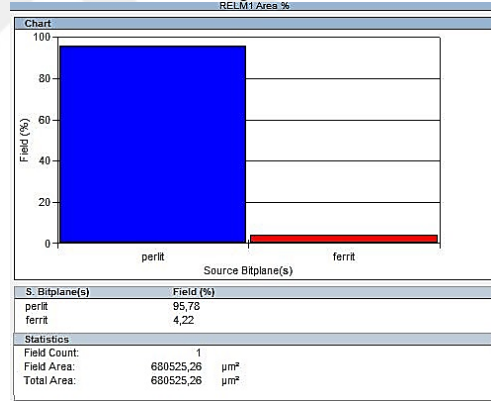
i)



j)



k)



l)

Şekil 4.14. Çatallı flanş birim parçasının hammaddesi olan 41Cr4 kalite çeliğin metal mikroskobu ile metalografik analizi, a) Çekirdek görüntüsü, 50X; b) Çekirdek görüntüsü, 100X; c) Çekirdek görüntüsü, 200X; d) Çekirdek görüntüsü, 500X; e) Yüzey görüntüsü, 100X; f) Yüzey görüntüsü, 200X; g) Dekarbürizasyon ölçümü, 100X; h) Dekarbürizasyon analizi; i) Tane boyutu ölçümü, 100X; j) Tane boyutu analizi; k) Faz analizi, 100X; l) Faz oranı

Hammaddeden alınan numuneden elde edilen mikroyapıdan 50X, 100X, 200X ve 500X büyütmeden görüntüler alınmıştır. %43 C oranı ve %1,08 krom alaşımı

ihlavası sebebiyle perlitik bir çeliktir. Şekil 4.14.k ve şekil 4.14.l faz analizi sonucunda belirtildiği üzere malzeme %95,78 oranında perlit ve %4,22 oranında ferrit içermektedir.

Genel olarak şekil 4.14 deki mikroyapı görüntülerine bakıldığında malzeme tane içi ferrit ve tane sınırı pro-ötektoid ferrit oluşumları ile perlitik – ferritik yapıdadır.

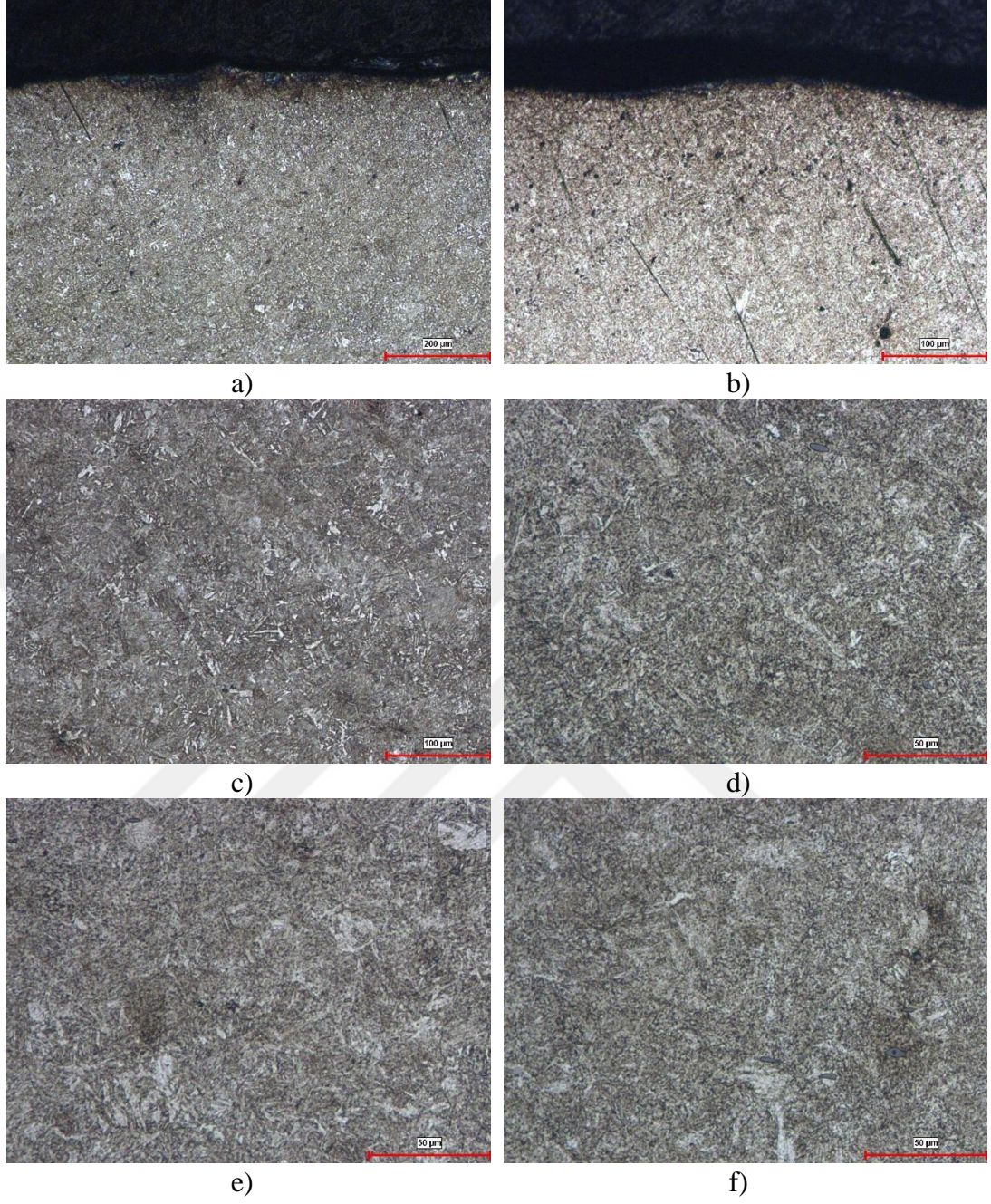
Hammaddede 107,76 µm oranında az miktarda dekarbürizasyon ölçülmüştür. Bu oran genel olarak düşük olmakla birlikte nihai çatallı flanş parçasının yüzey sertliğini etkilememiş ve çatallı flanş birim parçası mikro yapısında dekarbürizasyon tespit edilmemiştir.

Tane boyutu incelemesi sonucu şekil 4.14.i ve şekil 4.14.j de gösterilmektedir. Toplamda 173 adet tane ölçümü yapılmış ve ASTM E112 ye göre tane büyüklüğü, $G = 5,31$ olarak tespit edilmiştir [32]. Bu da dövme öncesi istenen $G = 5 - 8$ tane büyüklüğü aralığındadır.



Şekil 4.15. Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testi sonrası çatallı flanş birim parçası numunesi

Tam dalgalı tam değişkenli yorulma testinden çıkan çatallı flanş birim parçasından numune alınarak inceleme için uygun boyutları getirilmiş ve bakalit yardımıyla sıcak kalıplanmıştır. 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 6 µm'luk kademelerle zımpara ve parlatma işlemlerinden sonra %3'lük nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Daha sonra metal mikroskobundan görüntü alınmıştır.



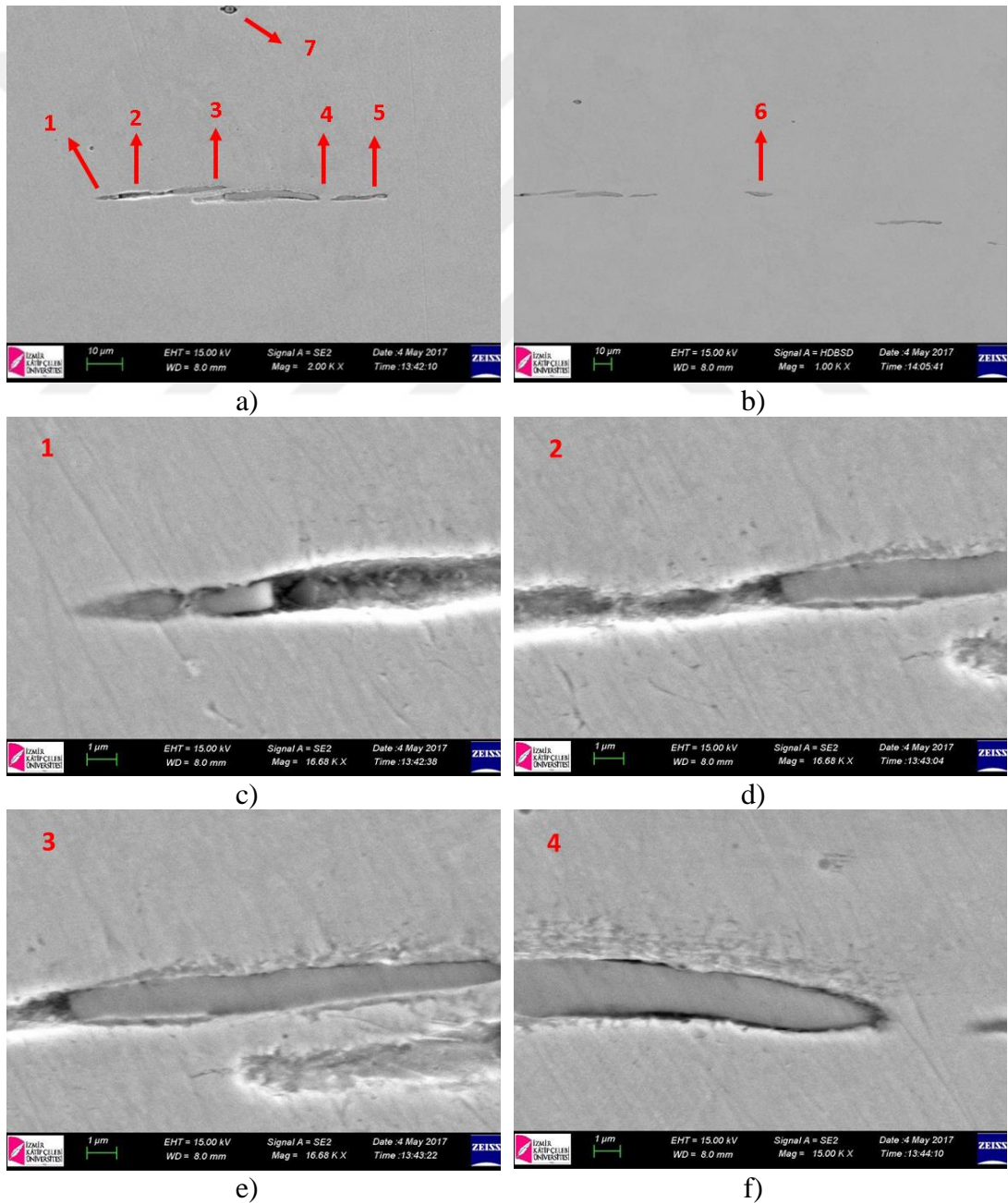
Şekil 4.16. Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testinden çıkan çatalı flanş mikroyapı görüntüleri; a) Numune yüzeyi görüntüsü, 100X, b) Numune yüzeyi, 200X; c) Numune merkezi görüntüsü, 200X; d) Numune merkezi görüntüsü, 500X; e) Numune merkezi görüntüsü, 500X; f) Numune merkezi görüntüsü, 500X

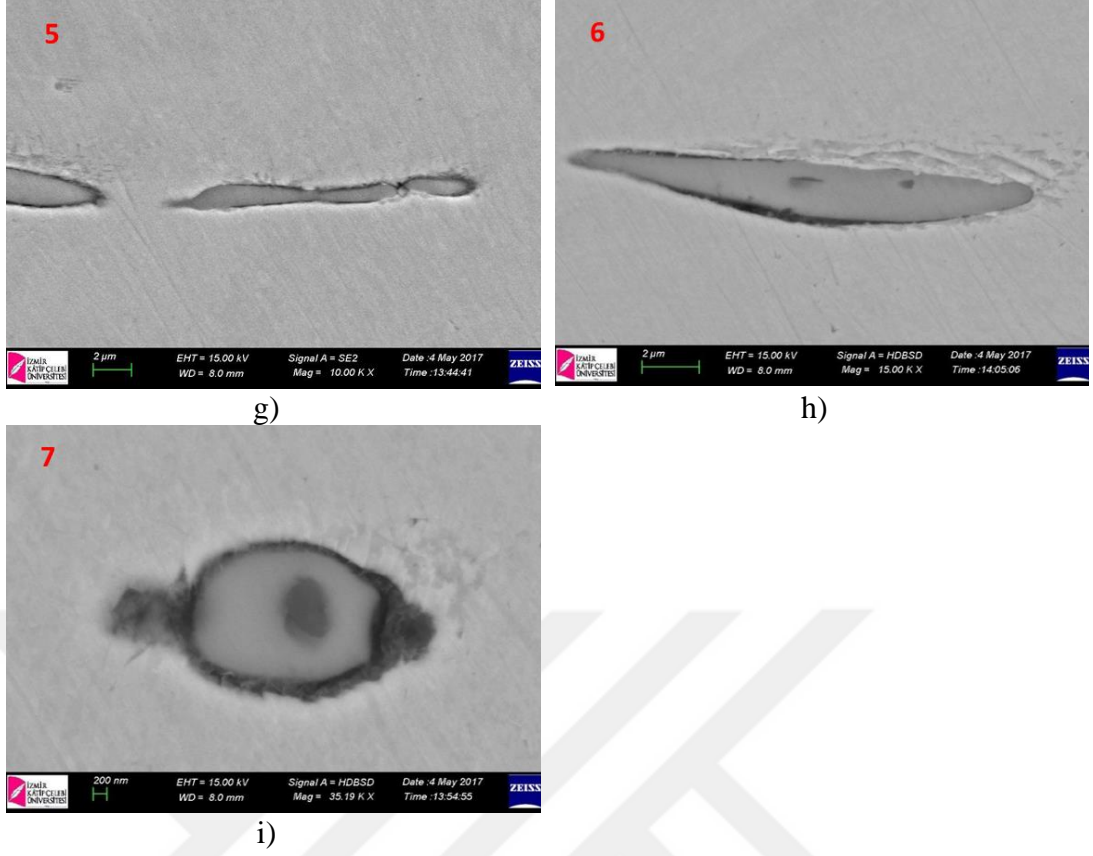
Çatalı flanş numunesinden elde edilen görüntüler sonucunda parça yüzeyinde dekarbürizasyon tespit edilmemiştir. Şekil 4.16.a ve 4.16.b'de görüntülerinden yüzeyde temperlenmiş martenzit, beynit ve kalıntı östenit yapıları görülmektedir.

Parça merkezinden elde edilen görüntülere göre temperlenmiş martenzit, beynit ve perlit yapıları görülmektedir.

4.4. Kırık Yüzey Analizi

Çatallı flanş hammaddesi yuvarlak çelik numune parlatılmış haldeki inklüzyon incelemesi sonrasında tespit edilen uzamış sülfür ve küresel oksit inklüzyonlarında SEM ve EDS analizi icra edilmiştir. Bu inceleme sonrasında elde edilen SEM görüntüleri şekil 4.17'deki gibidir.

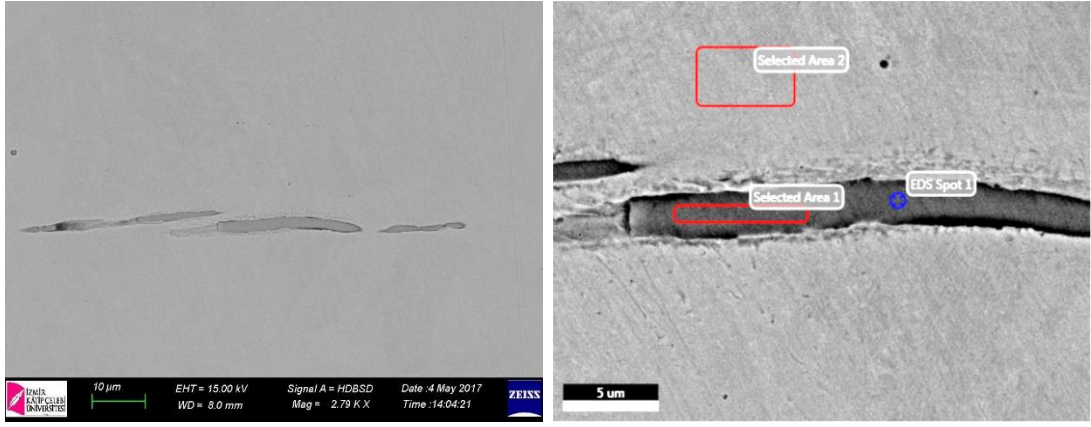




Şekil 4.17. Çatallı flanş hammaddesi olan 41Cr4 çelik çubuk parlatılmış halde inklüzyon SEM görüntüleri; a) Inklüzyon genel görünümü, 2.000X; b) Inklüzyon genel görünümü, 1.000X; c) Uzamış inklüzyon, 16.000X; d) Uzamış inklüzyon, 16.000X; e) Uzamış inklüzyon, 16.000X; f) Uzamış inklüzyon, 15.000X; g) Uzamış inklüzyon, 10.000X; h) Uzamış inklüzyon, 15.000X; i) Kompleks küresel inklüzyon, 35.000X.

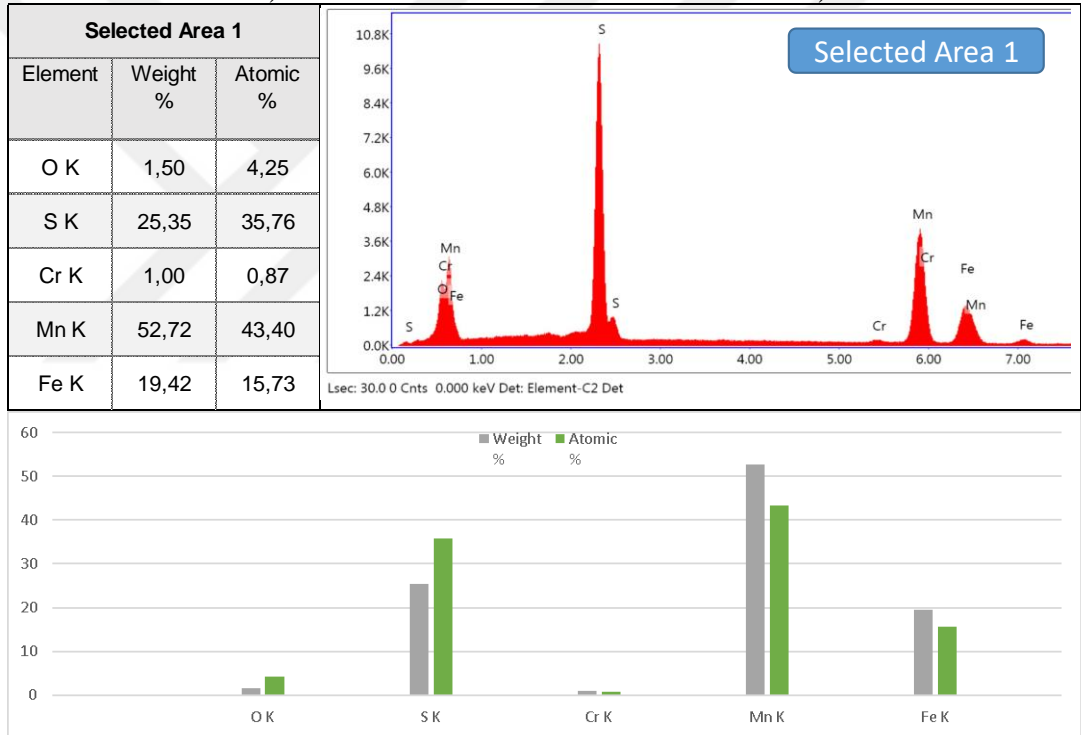
Çatallı flanş hammaddesinden alınan SEM görüntülerinde uzamış inklüzyon yapısı ve kompleks küresel oksit inklüzyonu tespit edilmiş ve incelenmiştir. Sülfür inklüzyonunun şekil 4.17 de görüldüğü üzere plastik şekil verme ile deformasyon yönünde uzamıştır. Ayrıca, bu tip inklüzyonları deformasyon sırasında metal matris ile farklı davranış göstermesi sebebiyle inklüzyon ve metal matris arasında boşluk olduğu görülmektedir. Bu ara yüzeylerin özellikle yorulma mekanizmalarında çatlak başlangıç noktaları olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.17.c 'de numune hazırlama aşamasında numuneyi zımparalama ve parlatma işleminde inklüzyonun koptuğu ve bu sebeple görüntüde topografi farklılığı olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.17.i 'de ise

birden fazla inklüzyon çeşidinin aynı yapı içerisinde bulunduğu kompleks oksit yapısı görülmektedir.

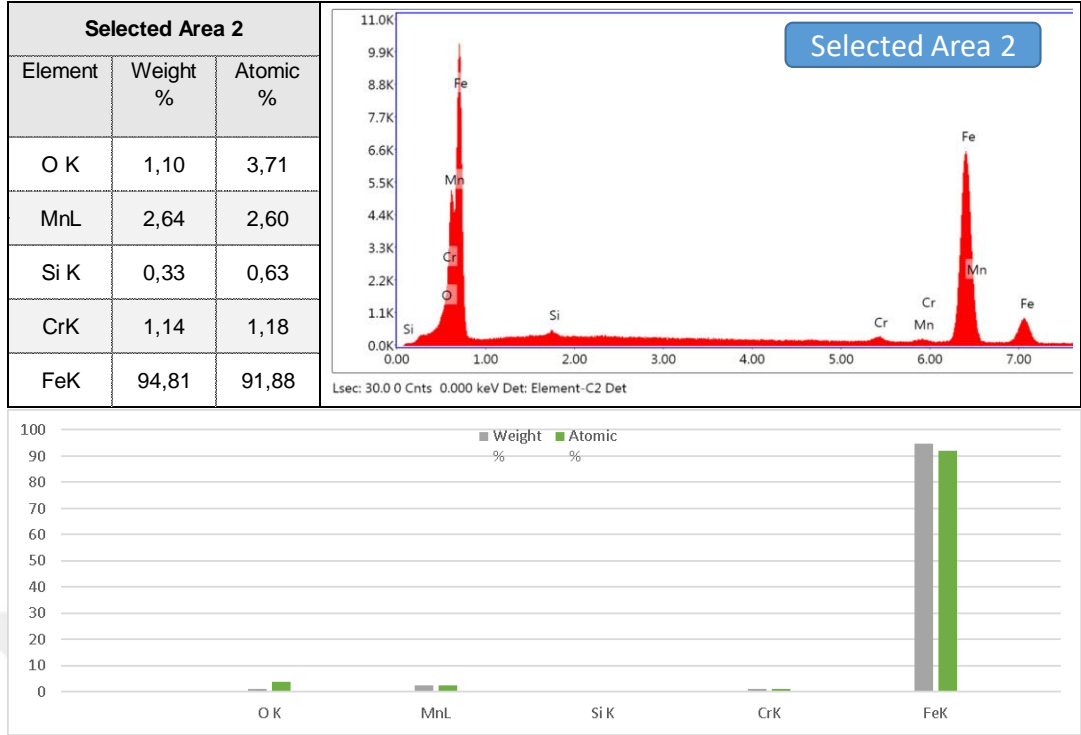


a)

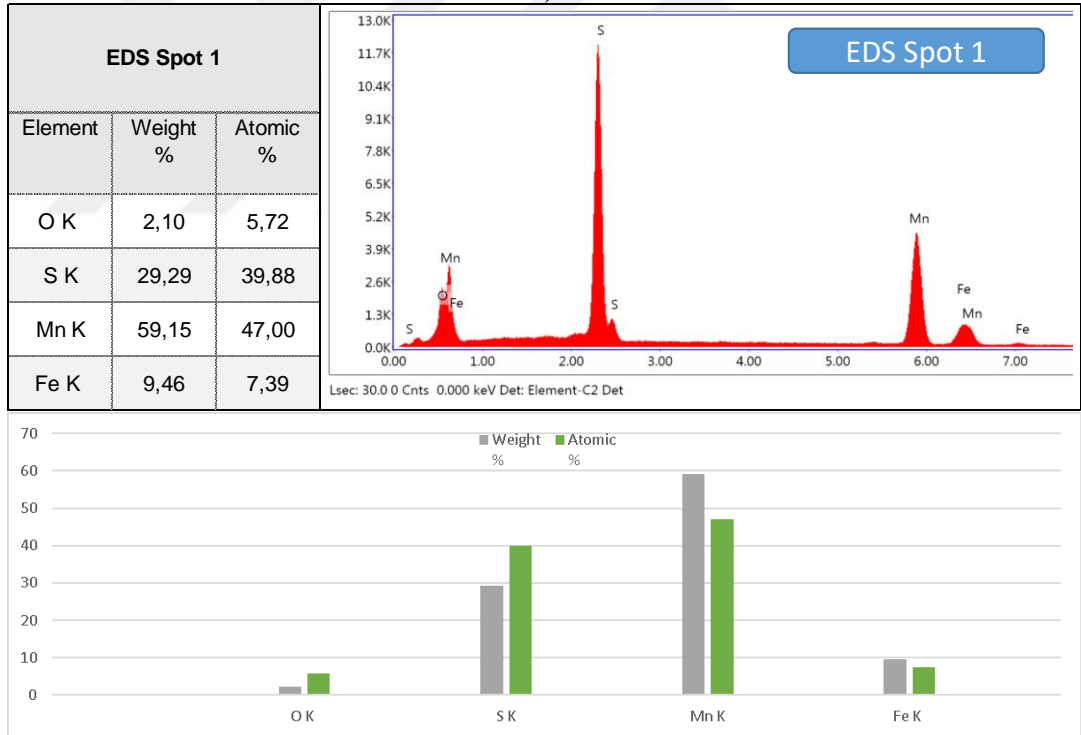
b)



c)



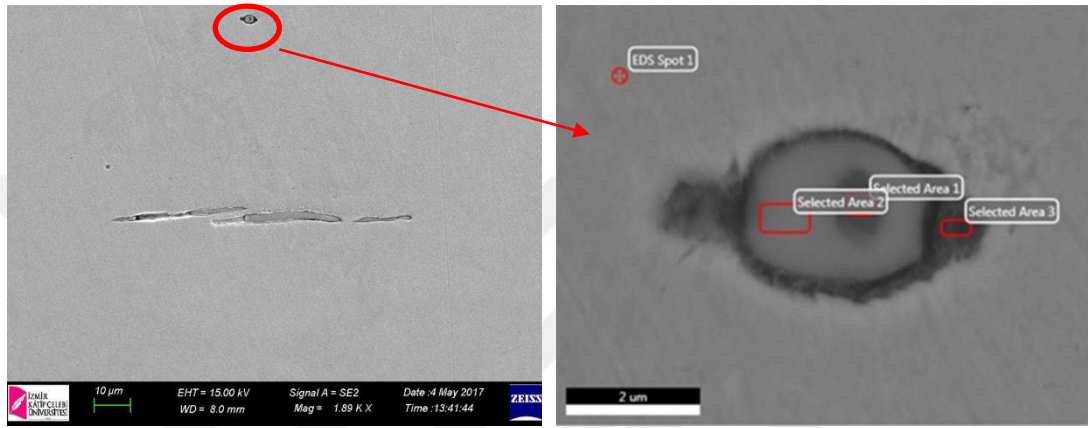
d)



e)

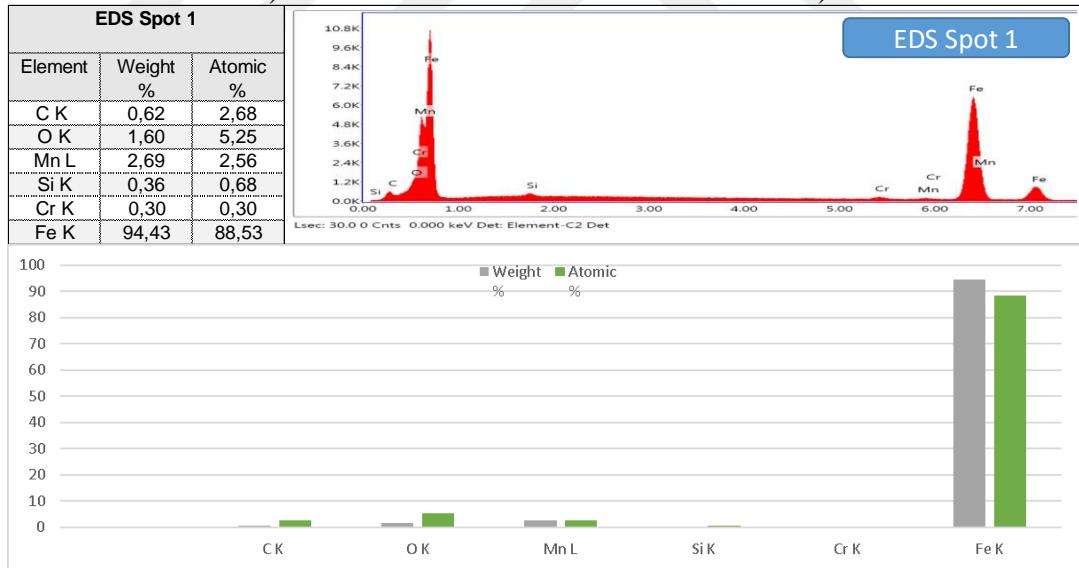
Şekil 4.18. Çatallı flanş hammaddesi olan 41Cr4 çelik çubuğun parlatılmış halde inklüzyon SEM-EDS Elemental analizi, a) Uzamış inklüzyon genel görünüm, 2.800X; b) EDS Elemental analiz bölgeleri; c) Uzamış inklüzyonun EDS Elemental analizi; d) Metal matris EDS Elemental analizi; e) Uzamış inklüzyon noktasal EDS analizi.

Çatallı flanş hammaddesinden alınan EDS analizleri incelendiğinde uzamış inklüzyonların MnS bileşiği olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.18.c ve şekil 4.18.e). Malzemenin kimyasal analizinde üst limite yakın olan kükürt oranı ve inklüzyon tayininde sülfür inklüzyonlarının yüksek oranda olduğunu tespit, SEM analizi sonuçlarıyla örtüşmektedir. Malzemenin metal matrisi üzerinde yapılan EDS analizinde, şekil 4.18.d’de görüldüğü gibi, kimyasal analiz ile eşdeğer olarak yüksek oranda Fe içermekle birlikte Mn, Cr ve O elementleri de tespit edilmiştir.

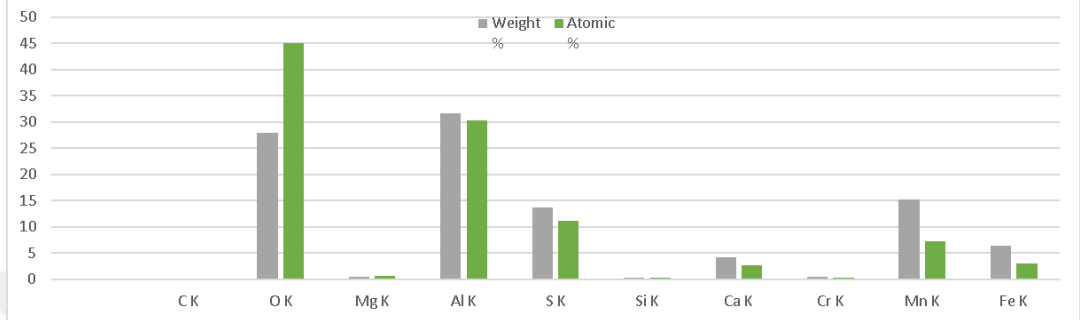
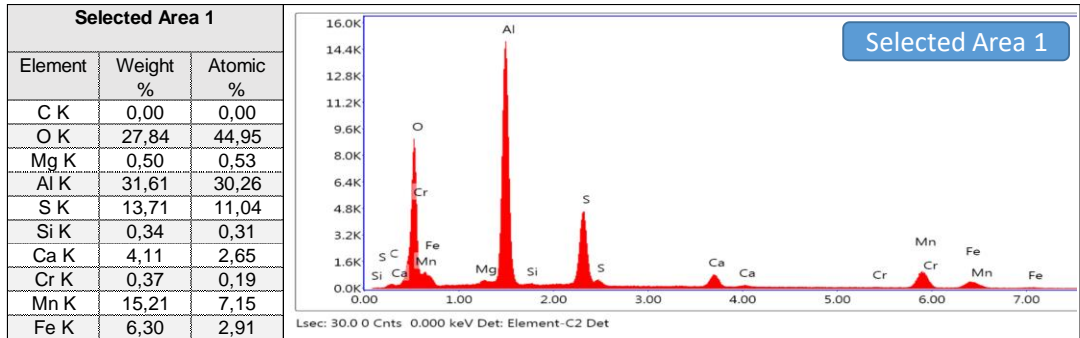


a)

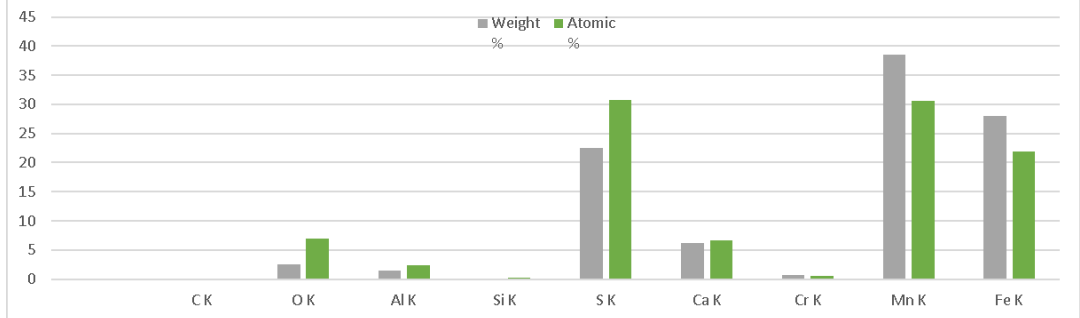
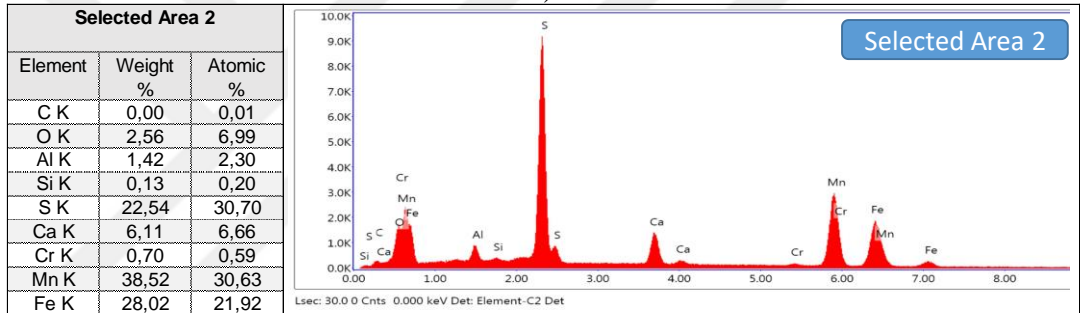
b)



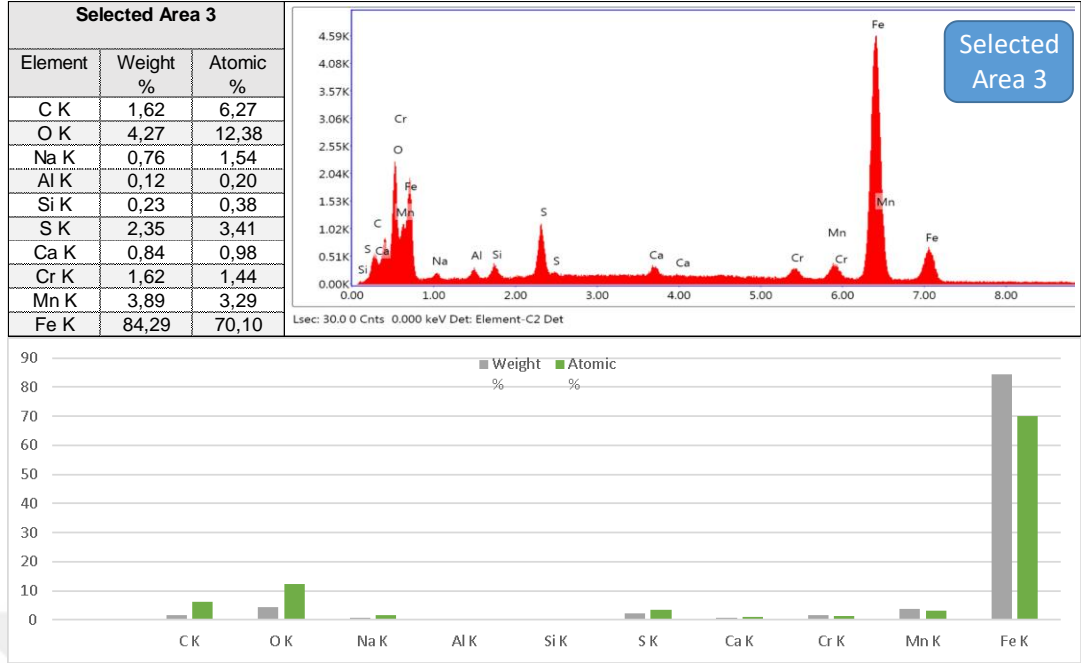
c)



d)



e)



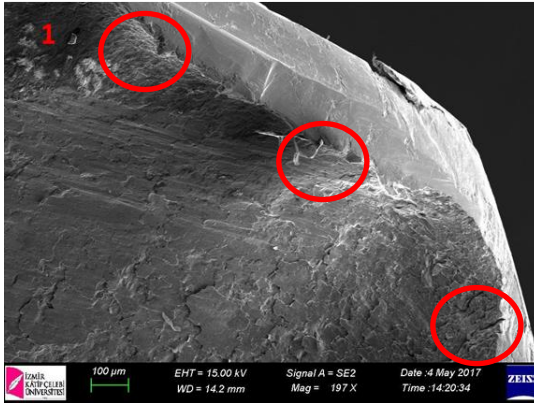
f)

Şekil 4.19. Çatallı flanş hammaddesi olan 41Cr4 çelik çubuğun parlatılmış halde inklüzyon SEM-EDS Elemental analizi, a) Küresel kompleks inklüzyon, 900X; b) EDS Elemental analiz bölgeleri; c) Metal matris üzeri noktasal EDS analizi; d) Küresel kompleks inklüzyon EDS analizi; e) Küresel kompleks inklüzyon EDS analizi; f) Küresel kompleks inklüzyon EDS analizi

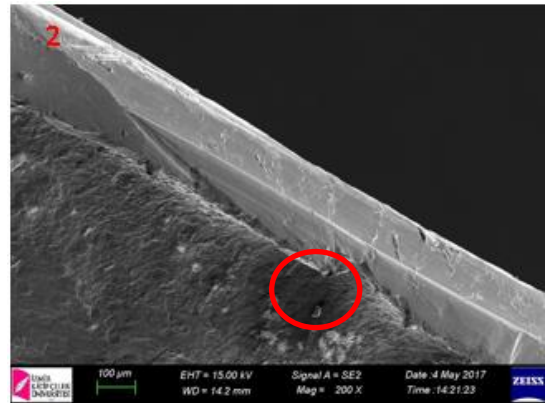
Küresel kompleks inklüzyon elemental analizi doğrulama için metal matris üzerinde noktasal ölçüm alınmış ve kimyasal kompozisyondaki elementlerle örtüşmektedir (Şekil 4.19.c). Diğer EDS ölçümlerinden çok fazla element tespit edilmiştir. Şekil 4.19.d 'deki EDS ölçümünde sırasıyla O, Al, Mn, S elementleri yüksek oranlarda ölçülmüştür. Bu sonuçlar ile Al_2O_3 ve MnS bileşiklerinin olduğu tespit edilmiştir.



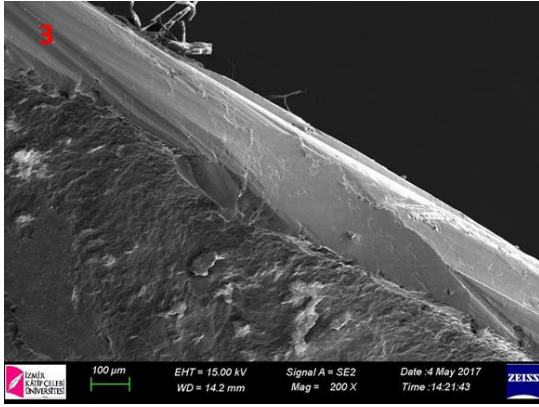
Şekil 4.20. Yorulma testinden sonrası kırılan kardan mili çatallı flanş kırık yüzeyi inceleme numunesi.



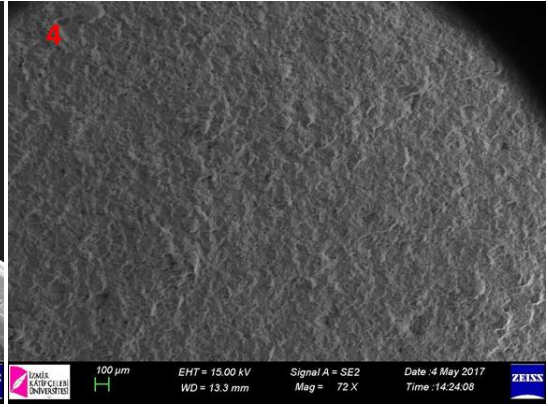
a)



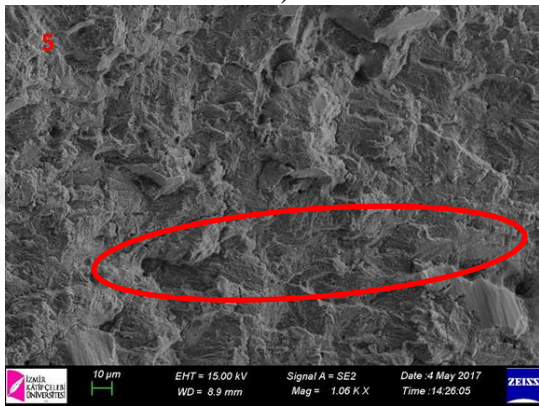
b)



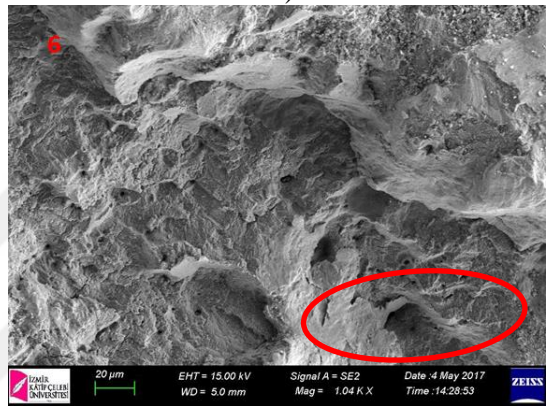
c)



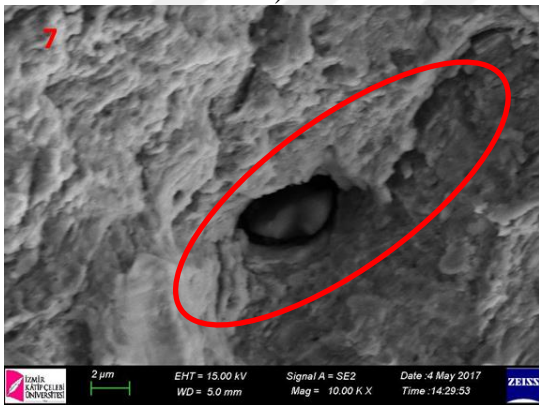
d)



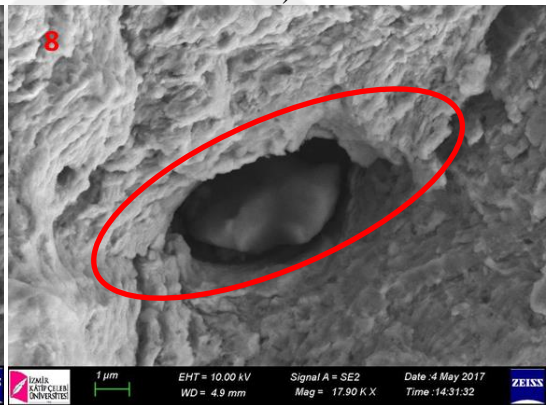
e)



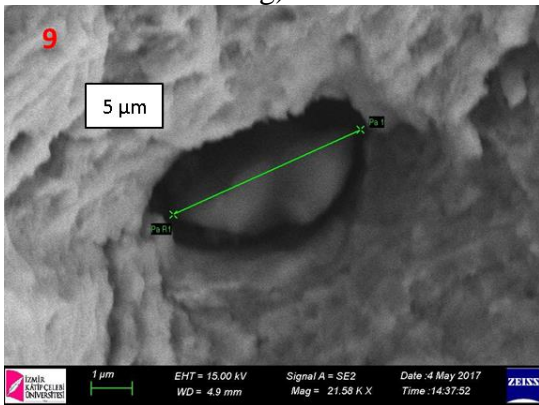
f)



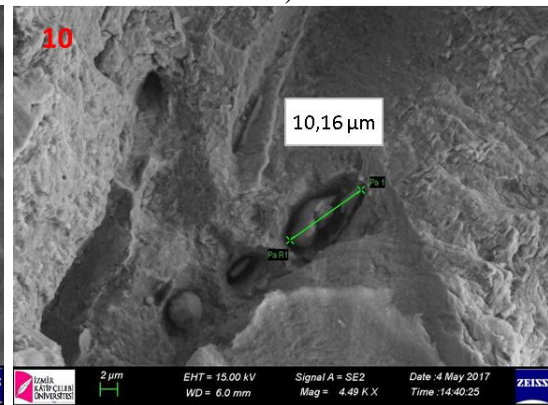
g)



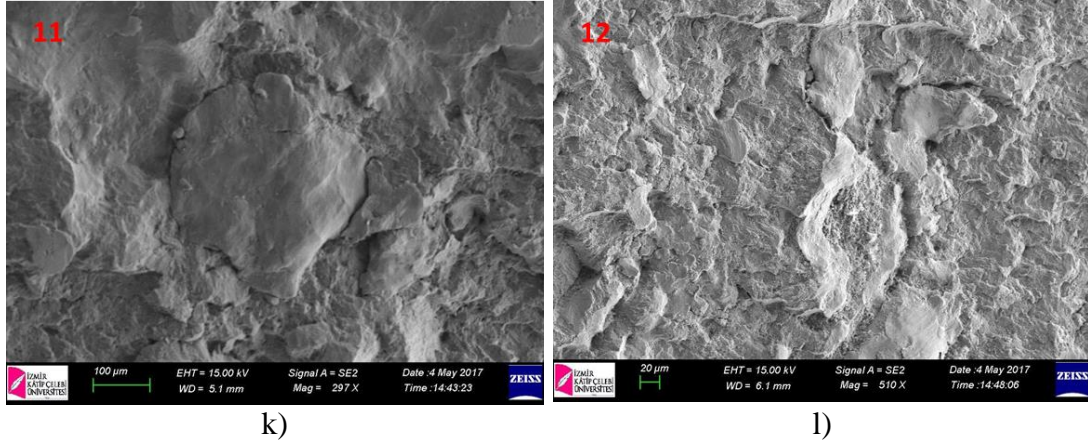
h)



i)

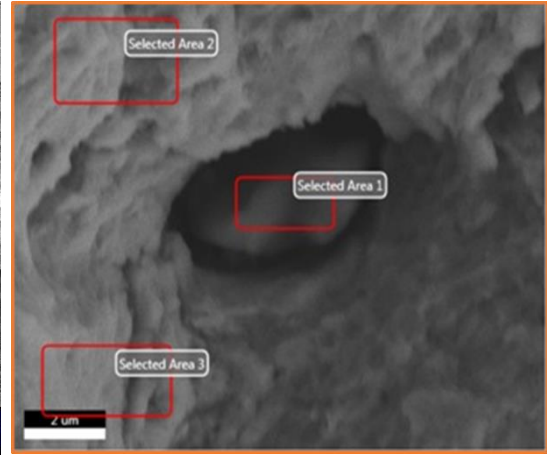
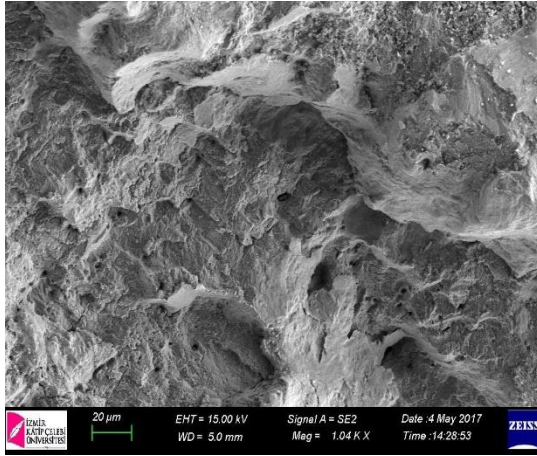


j)



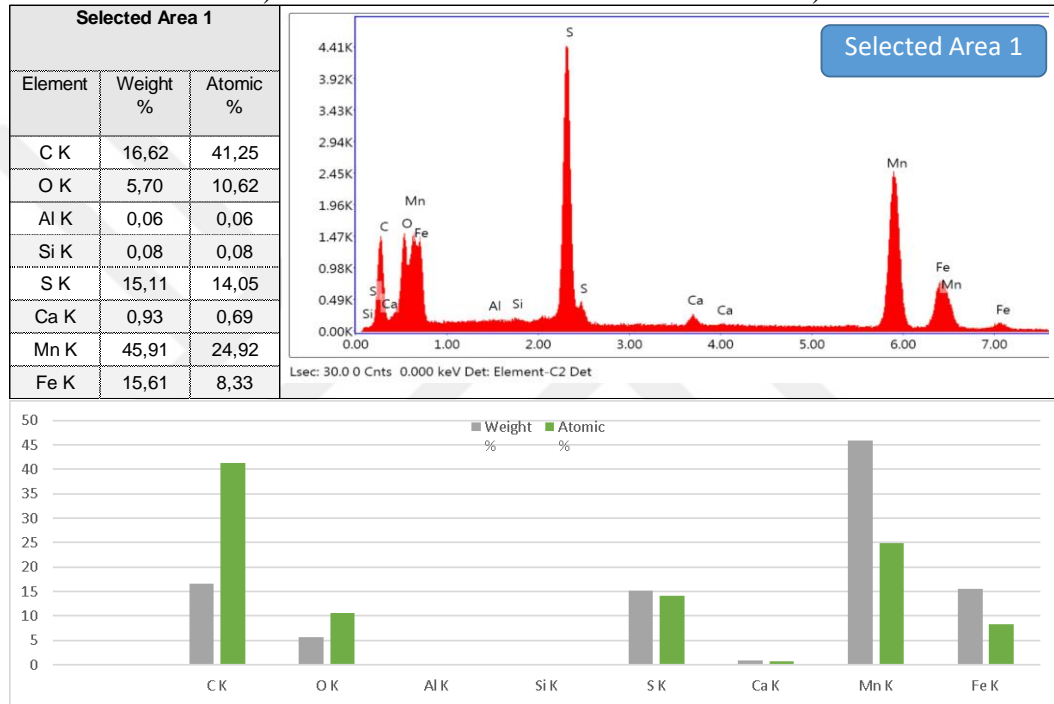
Şekil 4.21. Yorulma testi sonrası kırılan çatalı flanşın SEM analiz görüntüsü; a) Kırılma yüzey bölgesi, 197X; b) Kırılma yüzey bölgesi, 200X; c) Kırılma yüzey bölgesi, 200X; d) Kırılma yüzeyi alt bölgesi, 72X; e) Kırılma yüzeyi, 1060X; f) Kırılma yüzeyi, 1040X; g) Çatlak ilerleme bölgesindeki kırılmanın kestiği uzamış inklüzyon, 10.000X; h) Çatlak ilerleme bölgesindeki kırılmanın kestiği uzamış inklüzyon, 17.900X; i) 5 µm inklüzyon genişliği, 21.580X; j) inklüzyon dizileri, 4.490X; k) Kırılma yüzeyi, 297X; l) Kırılma yüzeyi, 510X.

Tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sırasında çatalı flanş birim parçasında ani bir hasar gerçekleşmez. Bunun yerine, belli belirsiz başlayan çatlak belli süre sonra burulma yönünde uzar, parça çatlak bölgesinde kritik taşıma kapasitesine kadar ilerler. Hasar bölgesi bu yükler altında ayrılan bölgeler birbirine temas ederek birbirini aşındırmaya başlar. Şekil 4.21.a-b-c de de görüldüğü gibi yüzey bölgesinde kırılan parça birbiri üzerinde çalışarak yüzeyi aşındırmış ve bu sebeple yorulma çizgileri ve çatlak başlangıç noktası net olarak görülememektedir. Hammadde de ve çatalı flanş numunelerinde gerçekleştirilen inklüzyon analizine eşdeğer görüntülerde inklüzyonlar görüntülenmiştir. Detaylı olarak bakıldığında çatlağın, inklüzyon ve metal matrisi ara yüzeyinde ilerlediği düşünülmektedir.

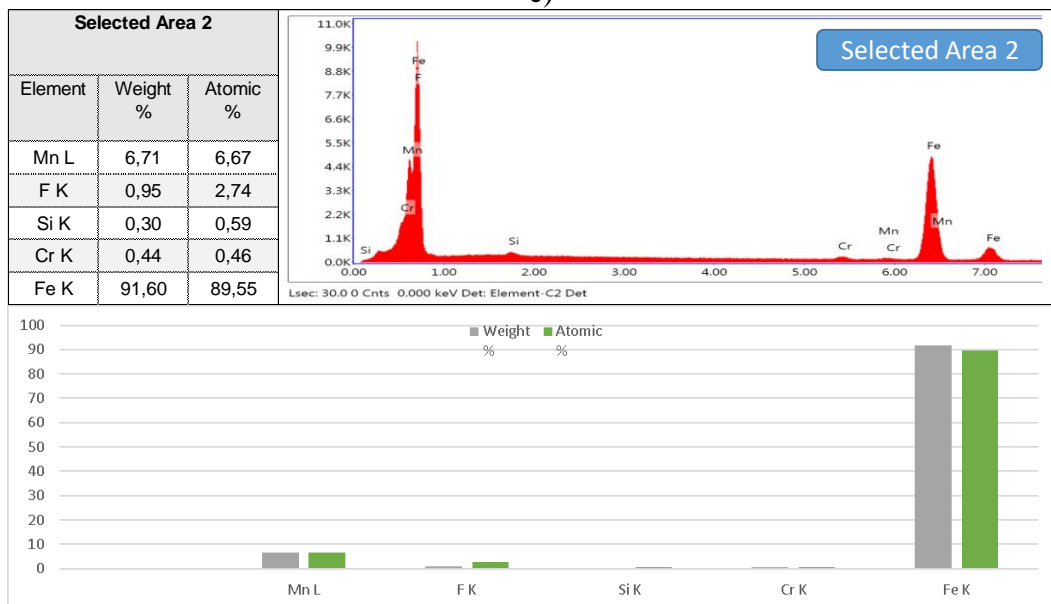


a)

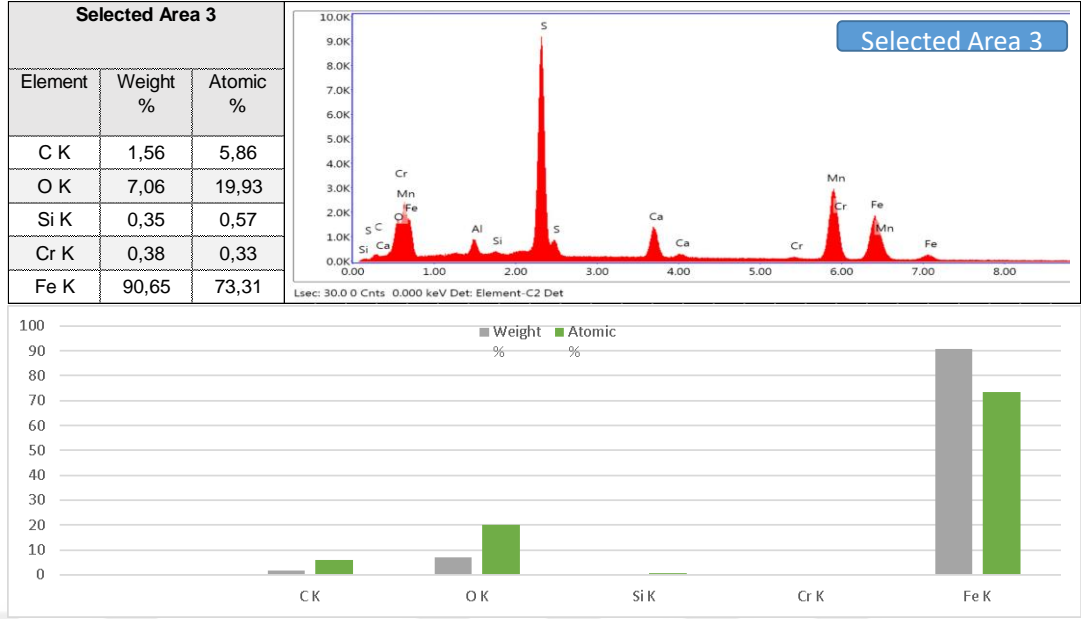
b)



c)



d)



e)

Şekil 4.22. Yorulma testi sonrası kırılan çatallı flanş numunesinin EDS Elemental analizi; a) Analiz görüntüsü, 1040X; b) Analiz noktaları; c)1. Nokta EDS ölçüm, d) 2. Nokta EDS ölçüm sonucu, e) 3. Nokta EDS ölçüm sonucu.

Çatallı flanş kırılması sonrasında kırılma yüzeyi görüntülerinden elde edilen EDS Elemental analizinde birinci bölgede inklüzyon üzerinden alınan ölçümde yüksek oranda Mn ve S elementleri tespit edilmiş ve bu da MnS bileşiğini temsil etmektedir. Bunun yanında ikinci ve üçüncü bölgeler kırılmanın olduğu metal matrisinde ise yüksek oranda Fe içerdiği ve geri kalan alaşım elementleri görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada arkadan itişli araçlarda kullanılan kardan milinin, araç kullanım koşullarına göre gerçekleştirilen tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonucunda, sıcak dövme tekniği ile üretilmiş kardan mili çatallı flanş birim parçasında meydana gelen kırılma hasarı kök neden analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple, hasarın tipini ve muhtemel gerçekleşme nedenini belirlemek amacıyla hammadde ve ürün özelinde kimyasal, mekanik ve metalografik incelemeler yapılmıştır.

- I. İlk aşamada; tam dalgalı tam değişkenli yorulma testinde hasar alan çatallı flanş birim parçasının hammadde incelenmiştir. Kimyasal, mekanik ve metalografik olarak incelenen sıcak haddelenmiş yuvarlak çelik çubuk, daha sonra SEM ve EDS analiz ile inklüzyon özellikleri karakterize edilmiştir.
- II. İkinci aşamada; tam dalgalı tam değişkenli yorulma testinde hasar alan çatallı flanş birim parçası, kimyasal, mekanik ve metalografik olarak incelenmiştir.
- III. Son olarak; tam dalgalı tam değişkenli yorulma testinde hasar alan çatallı flanş birim parçasının kırılma yüzeyi incelemesi gerçekleştirilmiştir: SEM analizi ile kırılma yüzeyi incelenmiş, tespit edilen inklüzyon kırılması ile hammadde içerisinde mevcut kalıntı tipi örtüştürülmüştür.

Kırılan parçanın hammaddesinde gerçekleştirilen kimyasal analiz sonucu tablo 4.1 'e göre, malzemenin 41Cr4 olduğu doğrulanmıştır. C ve S değerlerinin üst limite yakın olduğu tespiti yapılmıştır. C oranının yüksek olması sertlik, mukavemet ve sertleşebilirlik performansını arttıracaktır; S oranının yüksek olması ise talaşlı imalat işlemlerinde işlenebilirliği iyileştirebileceği ve takım ömür artışı sağlayacağı düşünülmektedir. Malzeme içerisinde belirli oranlarda ihtiva eden Cr ve Mn miktarları parça dayanımı ve darbe sönümlenme özelliklerini arttırmaktadır.

Parça hammaddesi ve kırılan parçada gerçekleştirilen sertlik testleri sonucunda hammaddede minimum 236 HV, maksimum 265 HV, ortalama 250 HV ölçülürken; kırılan parçada minimum 253 HV, maksimum 290 HV ve ortalama 273 HV ölçülmüştür. Bu değerler göre ıslah görmüş ürünlerdeki sertlik artışı görülmektedir. Ayrıca, ölçümler sonucunda, şekil 4.3 ve şekil 4.6 da görüleceği gibi, sertlik değişkenliğine sebep olacak mikroyapıda herhangi bir dekarbürizasyon veya süreksizlik gibi belirtiler tespit edilmemiştir.

Metalografik analiz kapsamında inklüzyon, dekarbürizasyon, faz analizi, tane boyutu özellikleri tespit edilmiştir. Parlatılmış halde gerçekleştirilen inklüzyon incelemesinde hammaddede ASTM E45 'e göre sülfür (A tipi) inklüzyonlarının 2-4 µm x 898 – 1.181 µm boyutlarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, analiz sırasında sülfür inklüzyonu ile metal matris arasında çatlak görülmüştür. Kırılan parçada yapılan inklüzyon analizlerinde hammadde de görülen yapıda inklüzyonlar tespit edilirken, inklüzyon geometrisi dövmenin etkisi ile farklılaştığı görülmektedir. Çatallı flanş hammaddesinde mikroyapı analizi sonucunda içyapıda tane içi ferrit/tane sınırı pro-ötektoid ferrit ile perlit yapıları görülmektedir; ayrıca analiz sonucunda %95,78 perlit ve %4,22 ferrit faz oranı tespit edilmiştir. Parça yüzeyinde yapılan incelemede ise, 107,76 µm dekarbürizasyon ölçülmüştür. ASTM E112 'ye göre Tane boyutu ölçümünde ise G: 5,31 olarak hesaplanmıştır. Kırık numunedan alınan numunede ise iç yapıda ve yüzeyde herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiştir; yüzeyde temperlenmiş martenzit, beynit ve kalıntı östenit yapıları görülürken, parça merkezinde temperlenmiş martenzit, beynit ve perlit yapıları görülmektedir.

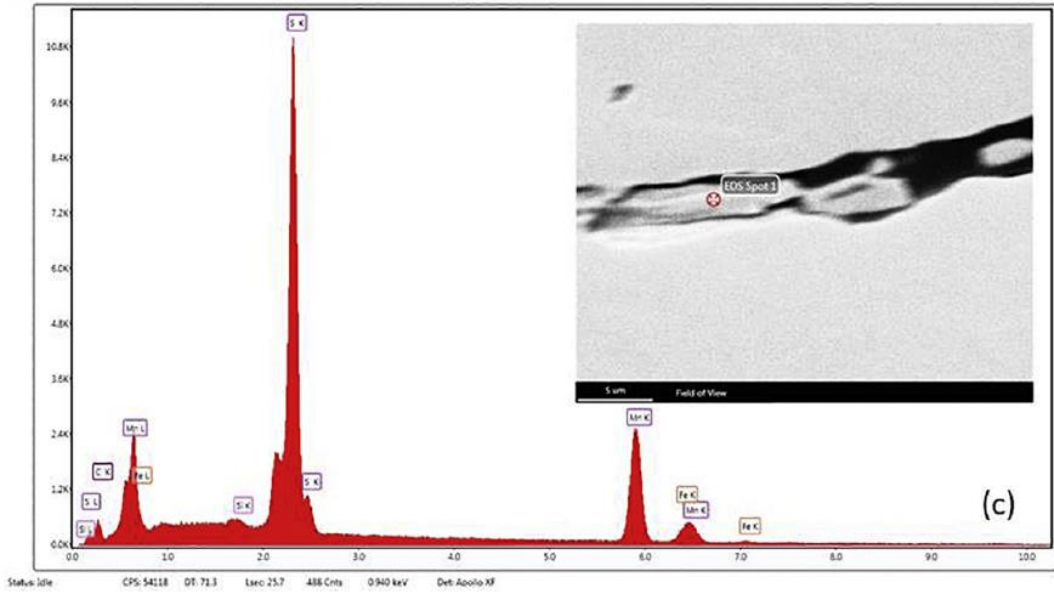
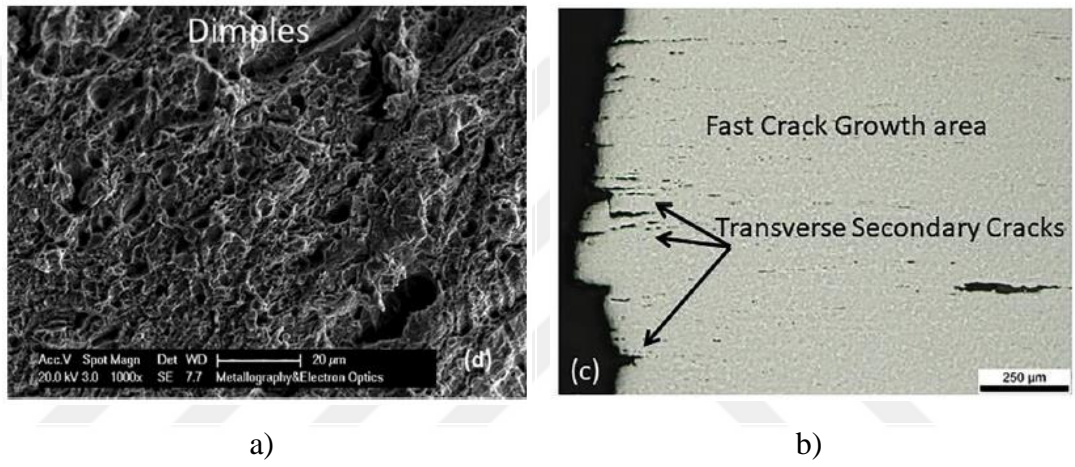
Çatallı flanş hammaddesinde SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Hammaddeden metal mikroskobu ile benzerlik göstermekte iken, genel olarak yapıda uzamış sülfür ve yer yer küresel oksitler görülmüştür. EDS ile yapılan elemental analizde ise uzamış sülfür yapılarında MnS yapısı görülürken, küresel oksit yapılarında ise Al₂O₃ ve MnS gibi kompleks yapılar görülmektedir.

Kırık yüzeyde gerçekleştirilen hasar incelemesinde çatlak başlangıç bölgeleri şekil 4.21.a-b-c 'de görülmektedir. Burada çatlak oluşması sonrasında parça çalışmaya devam etmiştir. Torsiyonel olarak yapılan testte parça tasarımı çatlağın ani kırılması yerine çatlak ilerlemesine olanak vermiştir. Ancak parça çalışırken hasar yüzeyi

burulma yönünde zarar görmüştür. Bu sebeple yorulma hasarının tespiti amacıyla yüzey altındaki çatlak ilerleme bölgeleri incelenmiştir (Şekil 4.21. d-e-f-g-h-i-j). Hasara sebep olan inklüzyonlar şekil ve boyut olarak uzamış sülfür kalıntılarının dikey yönde kesen hasar nedeniyle inklüzyonun eni görülmektedir. Inklüzyon ölçümü sonucunda 5 – 10 µm eninde ölçülmüş, bu değer optik mikroskop görüntüleri ile örtüşmektedir (şekil 4.9). Inklüzyonun EDS analizi sonrasında MnS olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.22).

Literatürde, inklüzyon sebebiyle oluşan yorulma hasarları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde bu tez çalışması ile örtüşen sonuçların tespit edildiği öngörülmüştür. Zhang ve arkadaşları (2007) yaptıkları çalışmada farklı inklüzyon oranlarına sahip çelikler üzerinde gerçekleştirdiği yorulma testler sonrasında inklüzyon oranı yüksek konvansiyonel çelik kalitesi ile vakumlu çelikleri karşılaştırmış ve inklüzyon oranı yüksek olan testlerde kırılmaların çoğu yüzey ve yüzey altı olmak üzere inklüzyon kaynaklı iken vakumlu çeliklerde inklüzyonun dışında farklı süreksizlikler sebebiyle hasar aldığı tespit etmiştir [34]. Ma ve arkadaşları (2010) ise, sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çeliklerin anizotropik yorulma davranışları, yükleme ve dönme yönü arasında farklı açılara sahip örnekler için incelenmiştir; yükleme açılarının artmasıyla, çatlak başlatma bölgesinin, yüzeyin matrisinden iç inklüzyonlara (alümina veya MnS) geçtiği ve yorulma mukavemetinin önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir. [35]. Pantazopoulos ve arkadaşları (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada; BS 4449 standardına göre yapılan yorulma testleri sırasında Ø14 mm çapındaki inşaat çeliği örneklerinin $5,0 \times 10^6$ isterinin çok altında $1,67 \times 10^6$ çevrimde erken yorulma kırılması sonucunda, bir stres konsantrasyon noktası olarak kabul edilen bir yüzey geometrik süreksizlik kökünün (“meme başı”) yakınında bir çatlak başlangıç yeri tespit etmişlerdir. Daha sonra sırasıyla; ışık optik mikroskobisi, mikro sertlik testi, SEM/EDS ve sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Şekil 5.1). Fraktografik incelemede, Paris yasa rejimi altında sürekli çatlak büyüme periyodunu ile net bir şekilde çözülen ince yorulma şeritlerinin varlığını ve ardından anlık nihai kırılma bölgesi olarak çukurlu sünek bir bölge olduğunu ortaya koymuşlardır. Üretim kusurlarının (MnS inklüzyonları) / geometrik düzensizliklerin varlığının, uygulanan ortalamanın 2 ila 3,3 katına kadar ekstra bir stres getirdiğini doğrulamışlardır. Stres seviyesi, numunenin beklenen kullanım ömründe etkili bir düşüşe yol açtığı tespit edilmiştir [36]. Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; alaşım ilavesinin sıcak

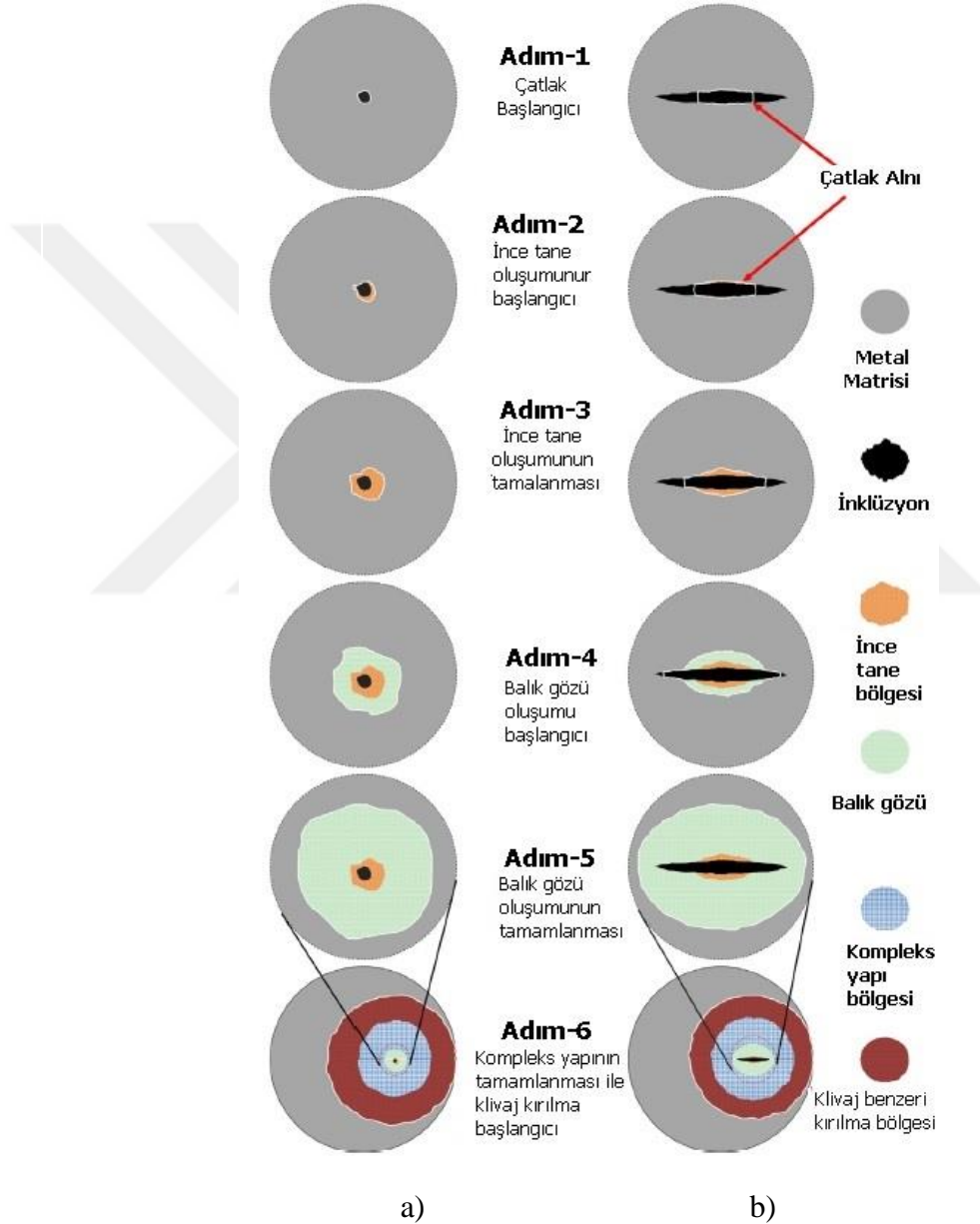
haddelenmiş yüksek karbonlu krom içeren çeliğin yorulma özellikleri üzerindeki etkisini, özellikle de çatlakların başlangıç ve ilerlemesinin netleştirilmesini amaçlanmış; çok yüksek çevrim yorulma testinde uzamış inklüzyonların davranışları incelenmiştir. Bu sebeple, sıcak haddelenmiş rulman çeliklerinde alaşım elementi ilavesi ve yalın karbonlu olarak üretilmiş edilmiş enine ve boyuna örnekler üzerinde ultrasonik çekme-basma yorulma testleri sonucunda; genellikle karmaşık inklüzyonlar ve (Ca, Mn)S uzamış inklüzyonlar temiz olan çeliğin yorulma dayanımını etkilemiştir, bunun yanında MnS inklüzyonların enine davranışı farklı özellikler göstermiştir (Şekil 5.2) [37].



c)

Şekil 5.1. Pantazopoulos ve arkadaşlarının Ø14 mm çapındaki inşaat çeliği örneklerinin yorulma testi sonrasında yapılan hasar analizi çalışması, a) Nihai kırılma

ile hızlı çatlak büyüme bölgesindeki ikincil çatlaklar ve çukurlu kırılma (Dimples) morfolojisine sahip bölge, b) Hızlı çatlak yayılma bölgelerinde gözlemlenen ikincil enine çatlaklar, çatlak yüzeyinden başlamış ve çıkıntılarının doğrusal yönünü izleyerek inşaat çeliğinin içine doğru yayılmıştır, c) Uzamış inklüzyona yapılan EDS analizi ile inklüzyonun MnS olduğu doğrulanmıştır [36].



Şekil 5.2. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin şematik diyagramı, a) Inklüzyon tanesi, b) Uzamış inklüzyonlar [37].

Sonuç olarak; arkadan itişli araçlarda kullanılan kardan milinin, araç kullanım koşullara göre gerçekleştirilen tam dalgalı tam değişkenli hızlandırılmış yorulma testi sonucunda, sıcak dövme tekniği ile üretilmiş kardan mili çatalı flanş birim parçasında meydana gelen kırılma hasarının malzemedeki MnS inklüzyonları sebebiyle oluştuğu, bu çalışma kapsamında tespit edilmiştir. Bu çalışmanın çıktığı olarak gerçekleştirilecek ileriki çalışmalar için kullanım yerine göre farklı inklüzyon oranları denemesiyle istenilen ömür çevrimine göre en uygun inklüzyon oranı ASTM E45 'e göre belirlenebilir. Buna ek olarak tane boyutu inceltici proses ve kimyasal katkıları ile yorulma ömrü performans iyileştirmesini sağlanabileceği öngörülebilir.



KAYNAKLAR

1. Ceylan A., Duruş M., Akarsu C., Aydın R., Aray A., Hatık G., Tutuk E., Özkardeşler B. C. Wheel hub fatigue performance under non-constant rotational loading and comparison to eurocycle test. *Procedia engineering*. 2015, 101, 77 – 84.
2. Abdullah S., Nizwan C. K. E., Yunoh M. F. M., Nuawi M. Z., Nopiah Z. M. Fatigue features extraction of road load time data using the s-transform. *International journal of automotive technology*. 2013, 14(5), 805–815.
3. Sumit P.R., Laukik P.R. A review of various techniques used for shaft failure analysis. *International journal of engineering research and general science*. 2014, 2, 2091-2730.
4. Hariom, Kumar V., Chandrababu D. A review of fundamental shaft failure analysis. *International research journal of engineering and technology*. 2016, 3(10), 389-395.
5. Fonte M., Li B., Reis L., Freitas M. Crankshaft failure analysis of a motor vehicle. *Engineering failure analysis*. 2013, 35, 147–152.
6. Das C.R., Albert S.K., Bhaduri A.K., Ray S.K. Failure analysis of a pinion. *Engineering failure analysis*. 2005, 12, 287–298.
7. Lai J., Huang H., Busing W. Effect of microstructure and surface roughness on the fatigue strength of high-strength steel. *Procedia structural integrity*. 2016, 2, 1213-1220.
8. Wei L., Yan Q., Xue J. Analysis of a crankshaft fatigue failure. *Engineering failure analysis*, 2015, 55, 139–147.
9. Sandip B., Banerjee A., Chakrabarti I., Bhaumik B. K. Failure analysis of an input shaft of skip drive gearbox. *Engineering failure analysis*. 2008, 15, 411–419.
10. Wei L., Yan Q. Failure analysis of an isometric polygonal shaft fracture. *Engineering failure analysis*. 2015, 58, 192–205.
11. Işık, E. Topoloji optimizasyonu çatalı flanş uygulaması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon-İmalat Anabilim Dalı, İzmir, 2009, 91 s. (Yüksek Lisans Tezi)
12. Anonim. Elbe Product Catalogue. Elbe the original since 1919. Almanya. 2013.
13. ATESTEO GmbH (2019) 01.03.2019 tarihinde <https://www.atesteo.com/en/drivetrain-testing/component-testing-torsion/> adresinden erişilmiştir.
14. Anonim. Encopim brain crafted test rigs. Encopim ürün kataloğu, Almanya. 2018, 04, 32 s.
15. Eriksson L., Nielsen L., Modeling and Control of Engines and Drivelines. Ed.: Thomas Kurfess. John Wiley and Sons Ltd., United Kingdom, 2014, 567 s.
16. Callister W. D., Rethwisch D. G. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (C. Bindal, K. Genel, M. Demirkol, R. Artır, M. Bakkal, A. Parasız, Çev.). Ankara, Nobel Yayınları, 2015, 971 s.
17. Colangelo V. J., Heiser F. A. Analysis of Metallurgical Failures. John Wiley and Sons Ltd., New York, 1986, 359 s.
18. Wolpi J. D. Understanding How Components Fail. ASM International. Indiana, 2000, 293 s.
19. ASM Handbook Committee. Failure Analysis and Prevention. Ed.: William T. Becker, Roch J. Shipley. ASM International, United States of America, 2002, 2909 s.
20. McEvily A. J. Metal Failures. John Wiley and Sons Ltd. New Jersey, 2013, 479 s.
21. Wingsnews (2019) 01.03.2019 tarihinde <http://www.wingsnews.org/pilots-landed-a-roofless-plane-aloha-airlines-flight-243/> adresinden erişilmiştir.

22. Eryürek B. Hasar Analizi. İTÜ Yayınları. İstanbul, Türkiye, 1993, 171s.
23. TS EN 10083-3. Su verilmiş ve Temperlenmiş Çelikler - Bölüm 3: Alaşımli Çeliklerin Teknik Teslim Şartları, 2008.
24. Toptaş M. A. Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı. Prestij Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 1998, 592 s.
25. ASM Handbook Committee. Forming and Forging. ASM International, United States of America, 1996, 2110 s.
26. DRC S.r.l. (2019) 01.03.2019 tarihinde <http://www.litem.info/en/> adresinden erişilmiştir.
27. TS EN ISO 6507-1, Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu, 2018.
28. TS EN ISO 6506-1, Metalik malzemeler - Brinell sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu, 2014.
29. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi (2019) 01.03.2019 tarihinde <http://merkeziarastirmalab.ikc.edu.tr/S/15260/sem> adresinden erişilmiştir.
30. TS EN ISO 18265, Metal malzemeler - Sertlik değerlerinin çevrimi, 2015.
31. ASTM E45, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, 2018.
32. ASTM E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 2013.
33. Milella P. P. Fatigue and Corrosion in Metals. Springer-Verlag, Italy, 2013, 844 s.
34. Zhang J.M., Li S.X. Yang Z.G., Li G.Y., Hui W.J., Weng Y.Q., Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime. International journal of fatigue, 2007, 29, 765–771.
35. Maa J., Zhang B., Xu D., Han E., Ke W. Effects of inclusion and loading direction on the fatigue behavior of hot rolled low carbon steel. International journal of fatigue, 2010, 32, 1116–1125.
36. Pantazopoulos G., Pressas I., Vazdirvanidis A. Fatigue failure analysis of a Ø14 B500C steel rebar: metallurgical evaluation and numerical simulation. Engineering failure analysis. 2019, 101, 180–192.
37. Yang C., Liu P., Luan Y., Li D., Li Y. Study on transverse-longitudinal fatigue properties and their effective inclusion-size mechanism of hot rolled bearing steel with rare earth addition. International journal of fatigue. 2019, 128, 105-193.
38. Yavuz, İ. Taşıtlarda Güç Aktarma Organlarında Meydana Gelen Hasarların Analizi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 2005, 101 s (Yüksek Lisans Tezi).
39. Yağcı T., Çiğdem A., Durmuş H., Geçmişten Günümüze Tahribatsız Muayene Yöntemleri. MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 2018, 27-3.
40. Bircan, Ayşenur. Makina Parçalarının Hasar Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2011, 115 s (Yüksek Lisans Tezi).
41. SAE Driveshaft Committee. Universal Joint and Driveshaft Design Manual. Advance in Engineering Series, United States of America, 1991, 7, 435 s.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Onur AKKAŞ
Doğum Yeri ve Yılı : F. Almanya, 1989
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : onurakkas@outlook.com

Eğitim Durumu

Lise : Menemen Anadolu Lisesi, 2007
Lisans : Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 2012
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Halen

Mesleki Deneyim

Özkan Demir Çelik, Yeni Ürün Geliştirme ve Ar-Ge Mühendisi, 2012-2014
Tirsan Kardan, Ar-Ge Merkezi, Test Mühendisi, 2016-halen

Yayınları

Akkaş O., Işık E., Özgen A. G., Saha S., Kardan Mili Uygulamalarında Kaynaklı Bağlantıların Elastisite Modülünün Nanoindentasyon Yöntemi ile Belirlenmesi. X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi, 17-18 Kasım 2017, Ankara.