



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

PLANET REDÜKTÖRLERDE DİŞLİ YORULMA
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Faruk URAL
Yüksek Lisans

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Şennur CANDAN

BİLECİK, 2014

Ref. No: 10049406



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

PLANET REDÜKTÖRLERDE DİŞLİ YORULMA
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Faruk URAL
Yüksek Lisans

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Şennur CANDAN

BİLECİK, 2014



BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY
Institute of Science
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering

**IMPROVEMENT OF FATIGUE PROPERTIES OF THE GEARS IN
PLANET REDUCTORS**

Faruk URAL
Master's Thesis

Thesis Adviser
Prof. Dr. Şennur CANDAN

BILECIK, 2014



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/05/2014 tarih ve 23/5 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/06/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Faruk URAL'ın "Planet Redüktörlerde Kullanılan Dişlilerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı tez çalışması Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Şennur CANDAN

ÜYE : Doç. Dr. Harun MİNDİVAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Şenol AVCI

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.../.../..... tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada 8620 kalite çelikten yapılan dişlilerin döküm, haddelenme ve dövme (hadde+dövme) yöntemi ile üretilmesi ve buna bağlı yorulma davranışları araştırılmıştır. Dövme dişlilerin üretimi için hadde biyetlerin dövülmesi ve daha sonra dişli açılması yoluna gidilmiştir. Üretilen dişlilere sementasyon işlemi uygulanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop yardımıyla yapılmıştır. Numunelere sertlik ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Yorulma deneyleri, üç nokta eğme deney düzeneğinde tekrarlı yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yorulma kırılması yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile incelenmiştir. Yorulma testlerinde numunelere kopma mukavemetlerinin %80'i civarında yük uygulanmıştır.

Sonuçlar, 8620 kalite çeliğin dövme sonucu tokluk ve yorulma mukavemetinin dikkate değer oranda arttığını göstermiştir. Hadde biyetlerden üretilen 8620 malzemedan yapılan çekme çubuğunun 23.500N'da koparken dövülmüş 8620 malzemenin 43.000N'da kırılma olduğunu göstermiştir. Hadde biyetlerden işlenen numunelerin dişleri 12 çevrim sonunda yorulma sonucu kırılırken, dövülmüş numuneler 85 çevrimin ardından yorulma kırılmasına maruz kalmışlardır.

Anahtar kelimeler: Planet dişli sistemleri, Yorulma, AISI 8620

ABSTRACT

In this study, production of the gears as-cast, rolled and forged (roll+forge) forms and their associated fatigue properties have been investigated. Machining of gear teeth has been carried out from the rolled and forged billets. Sementation processing has also been applied to the produced gear teeth.

Microstructural investigations were carried out by using optical microscopy. Hardness and tensile tests were applied to the produced samples. Their fatigue properties were evaluated by using three-point bending tests under the repeated loadings. Additionally, SEM analysis was used for the investigation of the ruptured surfaces. Approximately 80% of the tensile strengths were applied as the applied loads for the fatigue tests.

Results showed that both ductility and fatigue strengths of the 8620 steel were improved considerably after the forging. Tensile test samples produced by rolled billets were ruptured at 23.500N whereas the rupture was taken place at 43.000N for the forged samples. Fatigue strengths of the samples produced from rolled billets ruptured after the 12 repeats while the forged samples ruptured after 85 repeats.

Keywords: Planet gear systems, Fatigue, AISI 8620

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca bilimsel katkılarını esirgemeyen ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli danışman hocam, Prof. Dr. Şennur CANDAN'a

Çalışma boyunca büyük yardımlarını gördüğüm bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren kıymetli hocam Prof. Dr. Ercan CANDAN'a

Tezin laboratuvar çalışmalarında ve yazım aşamasında çok kıymetli zamanlarını bana ayıran, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Doç. Dr. Harun MİNDİVAN'a

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemenin tedariginde ve işlenmesinde büyük katkısı olan çok kıymetli dostum Talat DURSUN'a

Çalışmanın tüm safhalarında hep yanımda olan değerli dostum Öğretim Görevlisi Bülent TURAN'a ve Öğretim Görevlisi Dr. Mehmet AYDIN'a

Laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan ve birlikte çalışmaktan zevk aldığım Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü tüm Araştırma Görevlisi ve Uzmanlarına

Yoğun iş programlarına rağmen, malzemelerin işlenmesinde yardımcı olan Bilecik Baş Kardeşler Makine İşletme sorumluları Mehmet BAŞ ve Mahmut BAŞ'a

Isıl işlem ve dövme aşamalarında desteklerini esirgemeyen Ada Metalurji Isıl İşlem San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne

Ayrıca eşim ve kızıma desteklerinden dolayı en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Jüri Onay Sayfası	
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜRLER	ii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGE DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ	1
2. PLANET REDÜKTÖRLERİ	3
2.1. Planet Redüktörlerin Kullanım Alanları.....	3
2.2. Planet Dişli Sistemler.....	5
2.2.1. Planet Dişli Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	6
2.3. Tek Kademeli Planet Dişli Sistemleri.....	7
2.3.1. Yapısı ve Parçaları.....	7
2.3.2. Dişlinin Çalışması.....	7
2.4. Planet Dişli Sistemlerde Meydana Gelen Hasarlar.....	9
2.4.1. Yüzey Yorulması Hasarları.....	9
2.4.1.1. Başlangıç Pittingi.....	10
2.4.1.2. İlerleyen Pitting.....	11
2.4.1.3. Normal Pitting.....	13
2.4.1.4. Spalling (Pullanma).....	13
2.5. Kırılma.....	14
2.6. Dişlilerin Mekanik Özellikleri ve Modelleme Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	15
3.YORULMA	20
3.1. Malzemelerin Yorulması.....	20
3.2. Yorulma Deneyleri.....	22
3.3. Yorulma Deneyi Cihazları.....	23
3.4. Numuneler.....	24
3.4.1 Dairesel Kesitli Numuneler.....	25
3.4.2 Dikdörtgen Kesitli Numuneler.....	26
3.5. Yorulma Deneyi ile İlgili Terimler.....	28
3.6. S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı).....	29
Yorulma Dayanımı (N çevrim için).....	30
Yorulma Sınırı (Yorulma Dayanımı Sınırı).....	30
Yorulma Ömrü.....	31
3.7. Yorulma Hasarına Neden Olan Gerilme Türleri.....	31
3.8. Yorulma Mukavemetine Etkiyen Etkenler.....	32
3.8.1. Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi.....	33
3.8.2. Sıcaklık.....	33
3.8.3. Frekans.....	33
3.8.4. Çevrenin Kimyasal Etkisi.....	33
3.8.5. Gerilme Yığılması Etkisi.....	34
3.9. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı.....	34
3.9.1. Yorulma Kırılmasına Neden Olan veya Kırılmayı Kolaylaştıran Etkenler.....	35
3.9.1.1. Dış Etkenler.....	36
3.9.1.2. İç Etkenler.....	36

3.9.2. Yorulma Kırıklarının Mikroskobik Görünümleri ve Oluşum Şekilleri	38
3.9.3. Yorulma Kırılmasının Oluşum Şekilleri	39
3.9.4. Dış Kuvvetleri, Statik ve Dinamik Kuvvetler ve Zorlanmalar	43
4. ALAŞIMLI ÇELİKLER	46
4.1. Alaşımli Çeliklerin Sınıflandırılması	46
4.1.1. Az alaşımli çelikler	46
4.1.2. Yüksek alaşımli çelikler	48
4.1.3. Mikroalaşımli Çelikler	48
4.2. Çelik Tipleri	48
4.2.1. Yapı Çelikleri	48
4.2.1.1. Genel Yapı Çelikleri	49
4.2.1.2. Beton Çelikleri	49
4.2.2. Otomat Çelikleri	51
4.2.3. Islah Çelikleri	51
4.2.4. Yay Çelikleri	52
4.2.5. Sementasyon Çelikleri	53
4.2.6. Nitrasyon Çelikleri	54
4.2.7. Yüksek Mukavemetli Az Alaşımli Çelikler (HSLA Çelikleri)	55
4.2.8. Paslanmaz Çelikler	55
4.2.9. Takım Çelikleri	55
4.2.10. Ray Çelikleri	56
4.2.11. Çeliğe Uygulanan Yüzey Serleştirme İşlemleri	56
4.2.11.1. Sementasyon	57
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
5.1. Malzeme	59
5.2. Simulasyon Çalışmaları	60
5.3. Isıl İşlem	61
5.4. Mikroyapısal İncelemeler	61
5.4. Mekanik Deneyler	61
5.5.1. Sertlik ve Çekme Deneyleri	61
5.5.2. Yorulma Deneyi	63
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	65
6.1. Simülasyon Sonuçları	65
6.2. Mikroyapısal Karakterizasyon	66
6.3. Mekanik Deney Sonuçları	67
6.3.1. Sertlik ve Çekme Deneyi Sonuçları	67
6.3.2. Yorulma Deneyi Sonuçları	70
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	74
7.1. Sonuçlar	74
7.2. Öneriler	75
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Planet dişli sistemlerinin kullanıldığı alanlar	3
Şekil 2.2. (a) Transmikser (b) redüktör (c) redüktörün kesit görünüşü	4
Şekil 2.3. (a) Planet dişli sistemi (b) şematik görünümü (Kutay, 2013).....	6
Şekil 2.4. Planet dişli sistemi (Megep, 2006)	7
Şekil 2.5. Planet dişli sistemlerinde hız durumları (Megep, 2006).....	8
Şekil 2.6. Planet dişli sisteminde geri hareketin oluşumu (Megep, 2006).....	9
Şekil 2.7. Planet dişli gurubundaki ana elemanlar (Megep, 2006)	9
Şekil 2.8. Dişli yüzeyinde yorulmadan kaynaklanan pitting hasarları.....	10
Şekil 2.9. Başlangıç pittingi (Kızılaslan vd 2010)	11
Şekil 2.10. İlerleyen pitting.....	12
Şeki 2.11. Güneş dişlisinde meydana gelen pitting hataları	13
Şekil 2.12. Diş kökü yorulma kırılması (Kızılaslan vd, 2010).	15
Şekil 2.13. Talaşlı imalat ile üretilen ve dövme olarak yapılan dişlilerin yorulma dayanımları (www.forging.org, 2007)	16
Şekil 2.14. Dövme olarak yapılan (a) talaşlı imalat ile üretilen (b) dişlilerin mikroyapıları.(www.forging.org, 2007).....	16
Şekil 3.1. Yorulma hasar örnekleri (itu.edu.tr/temizv/vtdn/yorulma.pdf)	22
Şekil 3.2. Döner mil deney düzeneği	24
Şekil 3.3. Tekrarlanan eğilme deney düzeneği	24
Şekil 3.4. Dairesel kesitli numuneler (Kayalı vd.,1996).....	26
Şekil 3.5. Dikdörtgen kesitli numuneler (Kayalı vd.,1996).....	27
Şekil 3.6. Tipik bir yorulma gerilmesinin değişimi (Savaşkan 2004).	29
Şekil 3.7. Demir ve demir - dışı malzemelere ait tipik S–N diyagramı (Savaşkan 2004).	30
Şekil 3.8. Ters gerilme çevrimi.....	31
Şekil 3.9. Tekrarlı gerilme çevrimi.	32
Şekil 3.10. Düzensiz gerilme çevrimi.	32
Şekil 3.11. Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri (Kaynak).....	40
Şekil 3.12. Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları (kaynak).....	41
Şekil 3.13. Diş normal kuvveti (kaynak)	43
Şekil 3.14. Döndürme momentinin sabit olduğu durumda dişe etkiyen kuvvet.....	44
Şekil 3.15.Döndürme momentinin sabit olmadığı durumda dişe etkiyen kuvvet.....	44
Şekil 3.16. Dinamik kuvvetin bileşenlerinin gösterimi (Aydeniz, 2001).	45
Şekil 4.1 Tempcore prosesinin metalurjisi (Baydoğan vd. 2003).....	50
Şekil 4.2. Yapı çeliği ve yay çeliğinin gerilme-%uzama diyagramları (cems.com.tr)	53
Şekil 4.3. Çeliklere uygulanan ısıtma işlem sıcaklık aralıkları (kaynak)	58
Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan dişli numune	60
Şekil 5.2. Shimadzu mikrosertlik ölçüm cihazı.	62
Şekil 5.3. Shimadzu AG-X marka universal test cihazı.	63
Şekil 5.4. Yorulma deneyi için kullanılan üç nokta eğme deney düzeneğine ait şematik resim (E. Akata vd. 2003).	64
Şekil 5.5. Üç nokta eğme deney düzeneğine ait (a) üst ve (b) alt kısımlarına ait paçaların şematik resmi.	64
Şekil 6.1. Diş üstü gerilme dağılımı	65
Şekil 6.2. Diş dibi gerilme dağılımı.....	66

Şekil 6.3. Semantasyon işlemine tabi tutulmayan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	66
Şekil 6.4. Semantasyon işlemi uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	67
Şekil 6.5. Semantasyon uygulanmış döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliğin (a) diş ve (b) göbek yüzeyinden merkeze doğru sertlik değişimi.....	68
Şekil 6.6. Semantasyon uygulanan ve uygulanmayan döküm durumdaki 8620 kalite çeliğin çekme eğrileri.....	69
Şekil 6.7. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin çekme eğrileri.....	70
Şekil 6.8. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin kuvvet–birim şekil değişimi eğrisi.....	71
Şekil 6.9. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin üç nokta eğme deney düzeneğinde yorulma deney eğrileri.....	72
Şekil 6.10. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin üç nokta eğme deney düzeneğinden elde edilen yorulma deney sonuçları.....	72
Şekil 6.10. Haddelenmiş dişliden üretilen dişlinin (a) yorulma çatlak başlangıcı (b) nihai kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü.....	73
Şekil 6.11. Dövülmüş dişliden üretilen dişlinin (a) yorulma çatlak başlangıcı (b) nihai kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü.....	73

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. AISI 8620 ve EN 353 kalite çeliklerin kimyasal kompozisyonu	14
Çizelge 3.1. DIN 50113' e göre, dönen eğme gerilmelerinin uygulandığı yorulma deneylerine ait numune şekil ve boyutları (Kayalı vd.,1996)	28
Çizelge 4.1. Bazı az alaşımlı çeliklerin tipik mekanik özellikleri ve kullanım alanları (Baydoğan vd. 2003)	47
Çizelge 5.1. AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi.	59
Çizelge 5.2. İncelenen çeliğin semantasyon koşulları.	61
Çizelge 6.1. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin çekme deneyi sonuçları.	70

1.GİRİŞ

Redüktörler, transmikser haznesinin (drum) kendi eksenini etrafında döndürme işlevi için kullanılmaktadır. Oldukça düşük güçlü hidromotordan alınan tahrik ile drumun çevirme işlemi redüktör ile sağlanabilmektedir. Transmikser redüktörleri yapı itibari ile “planet dişli” mekanizmalarına sahiptir (Kutay 2013).

Dişli çarklar, endüstride çok yaygın olarak kullanılan, hem iletilebildiği güç hem de ulaşabildiği çevre hızları açısından özel bir makine elemanıdır. Planet dişli sistemi de normal dişlilerde olduğu gibi iki dişlinin birbirini kavrayarak hareket alıp verme durumuna göre çalışmaktadır. Bu hareket alınıp verilmesi sonucunda hız artışı veya düşüşünü sağlamaktadır. Planet dişli sistemleri kısaca hızı güce, gücü hıza dönüştüren, otomotiv ve uçak sektöründe otomatik vites kutuları, tank palet çevirme kutuları, transmikser redüktörleri gibi değişik alanlarda kullanılan sistemlerdir. Bir başka deyişle planet dişli sistemleri, sürüş şartlarına ve sürücünün isteğine göre tork ve hız sağlamak için değişik dişli oranları temin etmek, geri vites oluşumunu sağlamak, aracın boş vites konumunu sağlamaktır.

Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar, kompresör, pompa, türbin ve dişliler gibi makine parçalarında görülen hasarların çoğunun yorulma sonucunda olduğu düşünülmektedir. Dişlilerde görülen yorulmanın deneysel çalışmalarla önceden tespit edilmesiyle, dişlinin nasıl bir davranış sergileyeceği bilinerek tasarlanması gerekmektedir.

Literatürde planet dişlilerin hasar analizleri ile ilgili yayın oldukça az bulunmaktadır (Guo ve Parker, 2010a; Guo ve Parker, 2010b Yüksel ve Kahraman, 2004; David vd 2006; Bartelmus ve Zimroz, 2009; www.forging.org, 2007). Bu yayınların büyük oranı genelde titreşim ve modellemeleri üzerinedir (Guo ve Parker, 2010a; David vd 2006; Bartelmus ve Zimroz, 2009). Kısıtlı literatür hasarın genelde iki farklı kaynak merkezli olduğunu göstermektedir (Bartelmus ve Zimroz, 2009). Bunlar, yataklama hatalarından kaynaklanan titreşim ve buna bağlı yorulmalar ve malzeme kaynaklı hasarlardır.

Çalışmalar (www.forging.org, 2007), üretilen planet redüktörlerde dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan birinin yorulma ve buna bağlı malzeme seçimi olduğunu göstermektedir. Genelde malzeme olarak en çok 8620 serisi çelikler

kullanılmaktadır. 8620 kalite malzeme, zorlamalı olan parçalarda, makine ve otomobillerde, dişli çark, pim, mil, şalter kovani, soğuk şekillendirilen piston pimleri, zincir baklaları ve benzeri parçalarda kullanılır. Aynı zamanda sementaston ve nitrasyon (yüzey sertleştirmeye) işlemine uygun bir malzemedir. Çekirdekte yumuşak ve tokluğun istenildiği, yüzeyde ise sert ve aşınmaya dayanıklı olan ve darbeli yerlerde tercih edilen esnek bir yapı çeliğidir.

Literatür (www.forging.org, 2007) dövme çeliklerden yapılan dişlilerin yorulma ömürlerinin talaşlı işleme ile üretilenden daha iyi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, 8620 kalite çelikten yapılan dişlilerin döküm, hadde (dövme uygulanmamış) ve dövme (hadde+dövme) uygulanmış biyetlerden üretilen dişlilerin mikroyapı, sertlik, çekme ve yorulma dayanımları deneysel olarak araştırılmıştır. Isıl işlem öncesi ve sonrası numunelerin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Dişlilerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi için üç noktadan yükleme metodu kullanılarak “tek diş eğme testi” yorulma mukavemetleri değerlendirilmiştir.

2. PLANET REDÜKTÖRLERİ

2.1. Planet Redüktörlerin Kullanım Alanları

Planet dişli sistemleri tansmikser redüktörü, otomatik vites kutusu, iş makinaları ve askeri araçların tahrik sistemlerin de geniş kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 2.1. planet dişli sistemlerinin kullanıldığı bazı iş makinalarını göstermektedir.



Şekil 2.1 Planet dişli sistemlerinin kullanıldığı alanlar.

Redüktörler transmikserlerin beton haznesini kendi eksenini etrafında döndürme işlevi için kullanılmaktadır. Oldukça düşük güçlü hidromotordan alınan tahrik ile drumun çevirme işlemi redüktör ile sağlanabilmektedir. Şekil 2.2. Transmikser ve redüktörün bulunduğu konumu göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

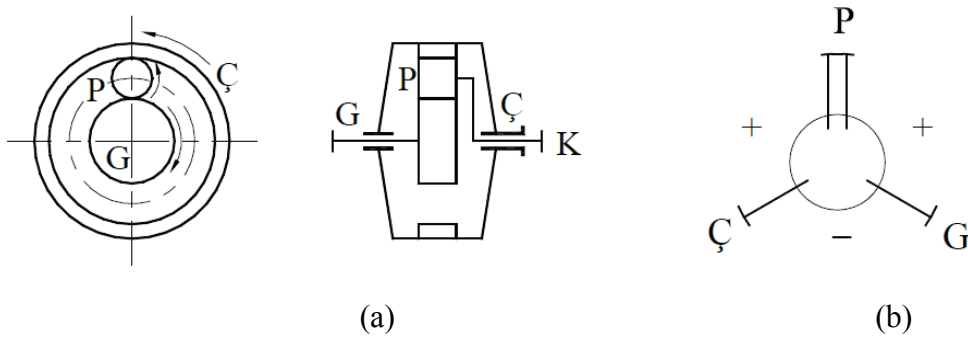
Şekil 2.2. (a) Transmikser (b) redüktör (c) redüktörün kesit görünüşü.

2.2. Planet Dişli Sistemler

Planet "**gezegen**" demektir. Adından da anlaşılacağı üzere planet dişliler tıpkı gezegenler gibi hem kendi eksenleri, hem de güneşin etrafında bir yörüngede dönerler. Ekseni etrafında döndükleri dişli "**güneş**", dış dişli ise "**çember**" olarak tanımlanır. Planeti veya planetleri taşıyan bir kol sistemi vardır bu bir kol veya bir ayna şeklindedir ve "**kovan**" olarak adlandırılır. Bu sistemde kullanılan dişliler ya silindirik veya konik dişlilerdir (Kutay, 2013). Şekil 2.3.'de silindirik planet dişlilerin en fazla kullanılan düzeni gösterilmiştir. Bu sistem basit bir planet sistemidir ve güneş-planet, çember ve kovan olmak üzere dört elemandan oluşmuştur (Kutay, 2013).

Planet dişli sistemi de normal dişlilerde olduğu gibi iki dişlinin birbirini kavrayarak hareket alıp verme durumuna göre çalışmaktadır. Bu hareket alınıp verilmesi de sonucunda hız arttırışı veya düşüşünü (moment artışı) oluşturacağından kısaca hızı güce, gücü hıza dönüştüren dişli sistemidir. Planet dişli sisteminin görevini kısaca şu şekilde saymak mümkündür; Sürüş şartlarına ve sürücünün isteğine göre tork ve hız sağlamak için değişik dişli oranları temin etmek, geri vites oluşumunu sağlamak, aracın boş vites konumunu sağlamaktır (Megep, 2006).

İmalatlarının gittikçe daha kolay yapılabilmesinden ötürü, planet dişli kademeleri gün geçtikçe makina sanayiinde daha çok kullanılır olmuşlardır. Genelde büyük güçlerin veya tahrik mili ile çıkış mili arasında aşırı büyük çevirme oranı isteyen yerlerde kullanılır. Belirtilmesi gereken en önemli fonksiyonları, bir redüktör içinde devir sayılarının üst üste konulup ayarlanması, hareket ve momentin bir kaç yöne dağıtılabilesidir (Kutay, 2013).



G Güneş dişlisi “güneş” ve güneş dişli mili, P Planet dişlisi “planet”, Ç Çember dişlisi “çember” ve çember dişli mili, K Planet taşıyıcısı, kısaca “kovan”

Şekil 2.3. (a) Planet dişli sistemi (b) şematik görünümü (Kutay, 2013).

2.2.1. Planet dişli sistemlerinin avantaj ve dezavantajları

Avantajları:

- Genelde birden fazla planet olduğundan ve iletilen kuvvet için aynı anda çalıştıklarından normal kademedeki dişlilere göre daha küçük modüllüdürler.
- Ağırlıkları ve boyutları normal mekanizmalara göre küçüktür. Genelde bu oran normal mekanizmaların yarısı veya üçte biri kadardır.
- Normalde tahrik mili ile çıkış mili aynı eksen üzerindedir. İstenilirse eksenler kaydırılabilir.
- Planet sistemlerinin randımanları, normal dişli mekanizmalarından daha yüksektir. Fakat çok büyük çevirme hızlarında randıman düşer.
- Redüktör içinde devir sayıları ayarlanabilir.
- Redüktör içinde güç, moment veya hareket bir kaç yöne dağıtılabilir.

Dezavantajları:

- Büyük hızlarda planetler büyük santrafuj kuvvetleri doğururlar dolayısıyla yataklandırma ve yağlama problemleri oluşur.
- Planet kutusu küçük olduğundan çabuk ısınır.

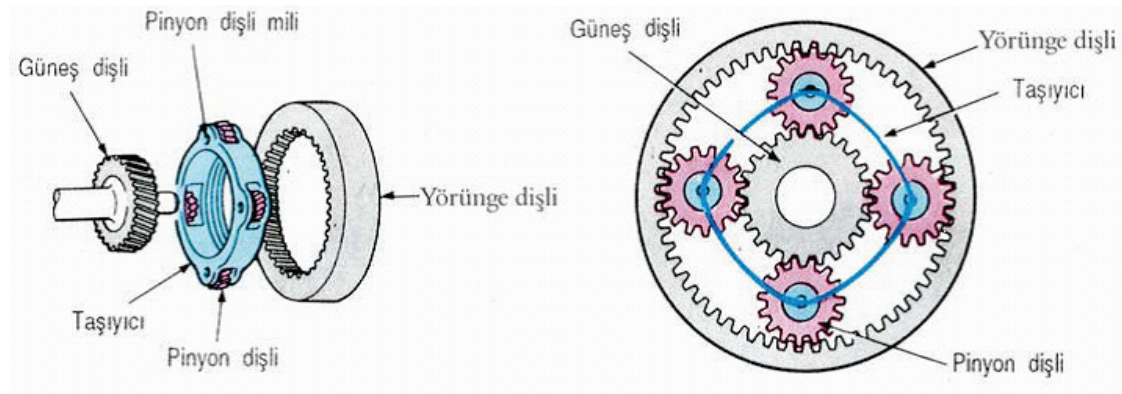
Planet dişlilerinde mukavemet hesapları silindirik veya konik dişli olduklarından, hesapları silindirik veya konik dişlilerinin aynı yöntemleriyle yapılır (Kutay, 2013). Bu

çalışmanın amacı planet dişli redüktörlerde dişli yorulma özelliklerinin geliştirilmesi olduğundan aşağıda dişli sistemlerinde en çok görülen hasarlar ve dişli malzemesi seçimi hakkında bilgi verilmiştir.

2.3. Tek Kademeli Planet Dişli Sistemleri

2.3.1. Yapısı ve parçaları

Bu çeşit planet sistemleri genel olarak otomatik transmisyonların dışında moment istenen tüm makine sistemlerinde kullanılır (örneğin; marş motorlarında kullanılmaktadır). Şekil 2.4.' de görüldüğü gibi ortada bir güneş dişli, bu güneş dişlinin etrafında dönen üç-beş adet planet (pinyon) dişlisi, bunları tutan taşıyıcı ve planet dişlileri üzerinde hareket eden yörünge dişlisinden oluşmaktadır. Yörünge dişli, güneş dişli veya planet taşıyıcısının birisinin tutulması diğer dişlilerinse giriş ve çıkış olarak kullanılması hız artımını veya hız düşümünü sağlar. Ayrıca bu sistemden geri hareket almakta mümkün olur (Megep, 2006).



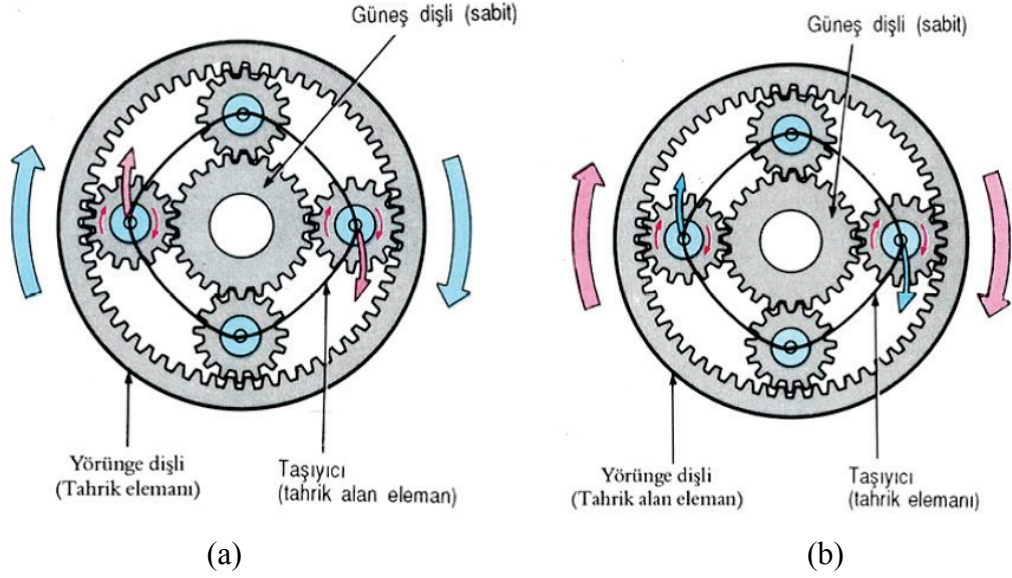
Şekil 2.4. Planet dişli sistemi (Megep, 2006).

2.3.2. Dişlinin çalışması

Hız azaltımı durumunda hareket yörünge dişliden verilip güneş dişli sabit tutulduğunda, taşıyıcıdan alınır. Bunun için yörünge dişlisi saat yönünde döndürülürken güneş dişlisi hareketsiz bırakılır ve hareket yine saat yönünde azalmış olarak taşıyıcıdan alınır. Şekil 2.5a'da hız azaltımı görülmektedir.

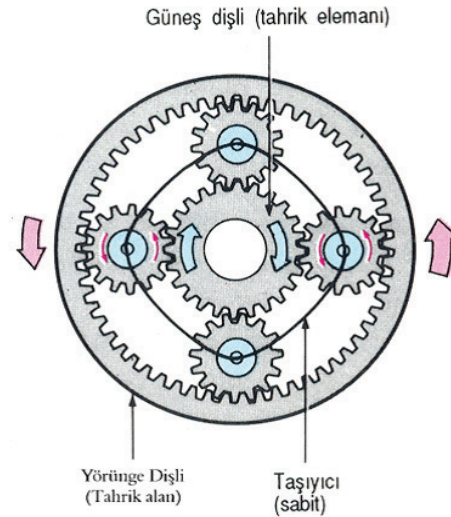
Hız artımı durumunda ise hareket, taşıyıcıdan verilip güneş dişli sabit tutulup yörünge dişliden alınır. Bunun için taşıyıcı saat yönünde döndürüldüğünde güneş sabit tutulursa hareket, yörünge dişlisinden saat yönünde hızı artmış olarak alınır. Şekil

2.5.(b)'de hızlanma durumunda planet sistemi görülmektedir. Geri hareket; güneş dişlisinden hareket saat yönünde verildiğinde taşıyıcı sabit tutulduğu zaman hareket yörünge dişlisinden ters yönde ve hız azalmış olarak alınacaktır.



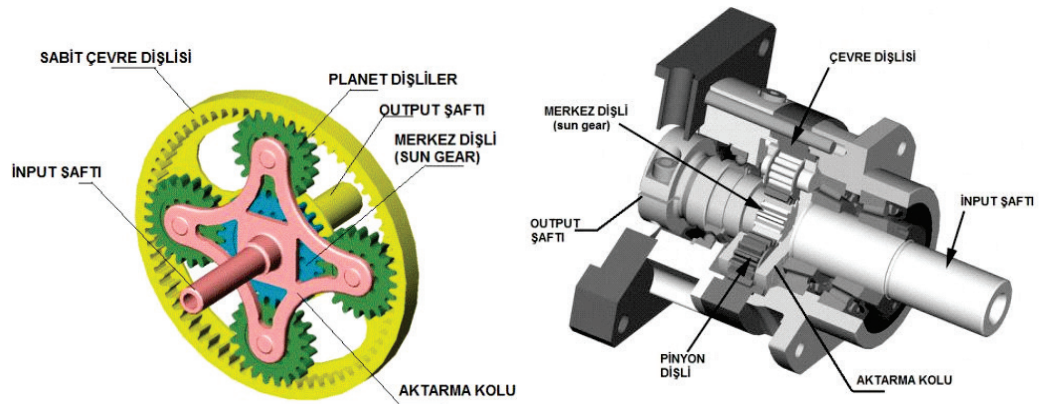
Şekil 2.5. Planet dişli sistemlerinde hız durumları (Megep, 2006).

Geri hareket; güneş dişlisinden hareket saat yönünde verildiğinde taşıyıcı sabit tutulduğu zaman hareket yörünge dişlisinden ters yönde ve hız azalmış olarak alınacaktır (Şekil 2.6). Sabit bir çevre dişlisi ve bunun etrafında dönen pinyon dişlilerden çıkış şaftına aktarılan düşük devir ve yüksek tork bu dişli grubunun temel çalışma prensibini oluşturur. Planet dişli gurubundaki ana elemanlar Şekil 2.7'de verilmiştir (Megep, 2006).



Şekil 2.6. Planet dişli sisteminde geri hareketin oluşumu (Megep, 2006).

Sabit bir çevre dişlisi ve bunun etrafında dönen pinyon dişlilerden çıkış şaftına aktarılan düşük devir ve yüksek tork bu dişli grubunun temel çalışma prensibini oluşturur (Megep, 2006).



Şekil 2.7. Planet dişli grubundaki ana elemanlar (Megep, 2006).

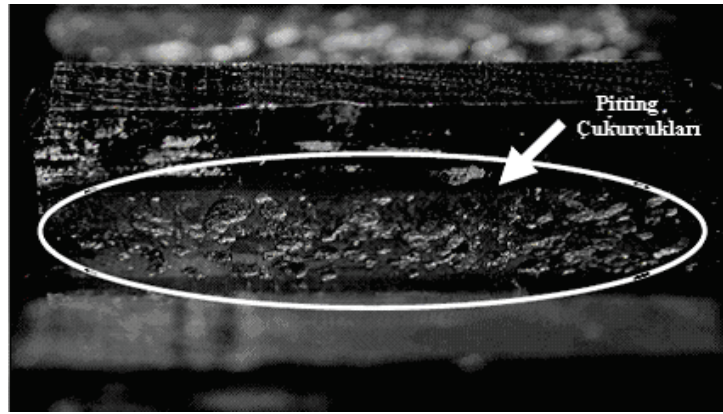
2.4. Planet Dişli Sistemlerde Meydana Gelen Hasarlar

Dişli tasarımı ve imalatında, dişli çarklarda görülen pek çok hasarın detaylı olarak bilmesi gerekmektedir. Amerikan Dişli Üreticileri Birliği (AGMA) ulusal standardında diş bozuklukları 5 grupta toplanmaktadır. Bunlar (Smidth, 2009; Kızılaslan vd., 2010; Dhanasekaran vd., 2010; Park vd., 2009);

- Yüzey yorulma hasarları
- Aşınma
- Plastik akma
- Kırılma
- İmalat sırasında oluşan hasarlar

2.4.1.Yüzey yorulması hasarları

Bu yorulma, malzemenin dayanım sınırı civarında tekrarlı yüzey veya yüzey altı gerilmelerinin sonucunda oluşan bir hasar türüdür. Yetersiz yağlama sonucunda oluşan aşınma hasarlarından farklıdır. İyi yağlama şartlarında bile görülür (Smidth, 2009).



Şekil 2.8. Dişli yüzeyinde yorulmadan kaynaklanan pitting hasarları.

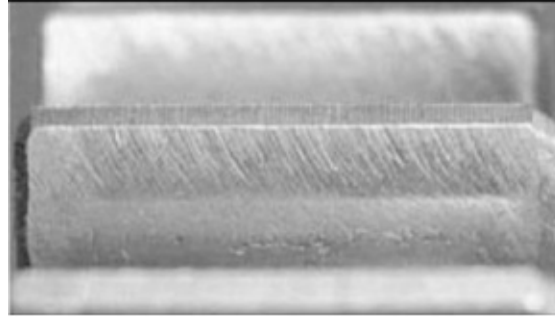
Pitting, dişli çarkın çalışmaya başlamasından kısa bir süre sonra oluşabilen (Şekil 2.8.) ve aşağıda verildiği gibi üç şekilde görülebilen bir yüzey yorulması hasar türüdür (Kızılaslan vd. 2010).

- Başlangıç pittingi
- İlerleyen (şiddetli) pitting
- Normal pitting

2.4.1.1.Başlangıç pittingi

Yeni dişlilerin pürüzlü yüzeyinden kaynaklanan yüksek gerilimler sebebiyle oluşur. Çok kısa zamanda gelişir, maksimum dereceye ulaşır ve devam eden servis sırasında yüzeyin parlayıp cilalanması ile etkisini kaybeder. Genellikle yuvarlanma

noktasının tam üzerinde veya biraz altında yer alan dar bir alan içinde ortaya çıkar. En çok tamamı sertleştirilmiş dişlilerde görülür (Şekil 2.9).

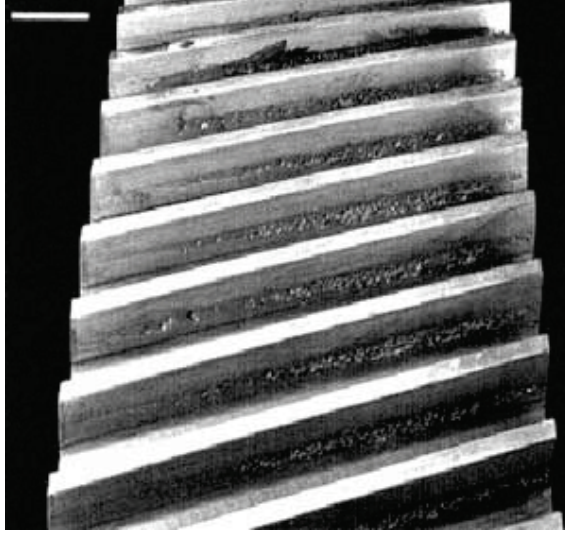


Şekil 2.9. Başlangıç pittingi (Kızılaslan vd 2010).

Sanayide kullanılan tamamen sertleştirilmiş dişlilerin çoğunda başlangıç pittingi için tedbir gerekmez. Çok kritik ve özel yerlerde kullanılacak dişlilerin imalatı sırasında hassas varış operasyonu ile tamamlanması, düşük hız ve yüklerde alıştırma (rodaj), dişlerin bakır ya da gümüş ile kaplanması, yüzey profillerinin hassas işlenmesi gibi tedbirler alınabilir (Kızılaslan vd 2010; Chen vd 2007).

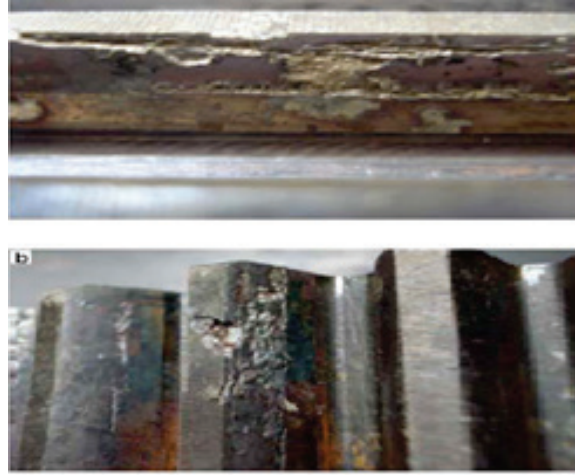
2.4.1.2. İlerleyen pitting

Genelde yuvarlanma çizgisi altında, yani dişin taksimat ve temel daireleri arasında kalan bölgesinde başlar. Çukurcuklar, hem boyut hem de sayı bakımından yüzey hasar görene kadar artış gösterir. Çalışma başlangıcında ilerleyen pitting, yaklaşık olarak başlangıç pittingi kadar yoğundur. İlerleyen pittingin zamanla yoğunluğu daha da artar (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. İlerleyen pitting.

İlerleyen pitting genellikle, başlangıç pittinginin hafifletilemediği, yüzey pürüzlülüğünün sebep olduğu aşırı gerilmeler sonucu oluşur. Eğer diş yüzeyinin sertliği belirli değerin altında ise bu bozulma kaçınılmazdır. Dişliler aşırı derecede yüke maruz bırakıldığı takdirde genellikle döndüren dişlinin (pinyon) diş dibi bölgesinde belli bir çevrim sonucunda şiddetli pitting oluşabilir (Chen vd 2007). Döndüren ve döndürülen dişlilerin temas eden yüzeyleri aynı gerilmelerin etkisi altında olmasına rağmen pinyon dişli, döndürülen dişliye nazaran daha fazla yıpranır. Çünkü genellikle küçük çaplı olan pinyon dişli daha çok çevrim yapar ve diş sayısı daha fazla sayıda gerilim tekrarının etkisi altında kalır. Bu durum planet dişli sistemlerinde en çok Güneş dişlisi üzerinde görülür (Dhanasekaran vd 2010). Ayrıca, pinyonun dişleri üzerindeki kayma yönü ile yüzeyler arasındaki yuvarlanma yönü terstir. Sonuçta malzeme yüzeyinde oluşan gerilme, yorulma çatlaklarının büyümesini kolaylaştırır. Dhanasekaran vd 2010 çalışmalarında planet dişli sisteminde güneş ve planet dişlisinde meydana gelen hasarları incelemişlerdir. İncelenen dişliler EN 353 kalite malzemeden oluşmuştur. Sonuçlar, dişlilerin her ikisinde de hasarın yüzey yorulması ve ilerleyen pitting şeklinde meydana geldiğini fakat daha yoğun olan hasarın güneş dişlisinde ve bunun sonucu olarak planet dişlilerdeki hataları da yüzey bozukluğundan dolayı tetiklediğini göstermiştir. Şekil 2.11.'de güneş dişlisinde meydana gelen hasarı göstermektedir.



Şeki 2.11. Güneş dişlisinde meydana gelen pitting hataları.

2.4.1.3.Normal pitting

Tam kapasite ile yüklenmiş, tamamen sertleştirilmiş dişlilerde yuvarlanma dairesi altında ortaya çıkan normal pitting, diş yüzeyinde yuvarlanma çizgisi altında kalan bölgeyi kaplayan, normal büyüklükteki çukurcuklar şeklinde kendini gösterir (Şekil 2.11). Devam eden çalışma sonucu çukurcuk sınırları, görünürde başka çukurcuklar oluşmayacak şekilde aşınır.

Yüzeydeki mikro çatlakların diş profili boyunca gösterdiği yönlenme sonucu, yuvarlanma çizgisi altında kalan bölge bu olaya dişin diğer bölgelerinden çok daha fazla açıktır. Hem çarkın hem de pinyonun yuvarlanma çizgisi altındaki bölgelerinde oluşan çatlaklar aynı zamanda yağlayıcıyı içinde hapseder. Hidrolik basıncın kama etkisi sonucunda bu çatlaklar hızlıca çukurcuk haline dönüşür. Yuvarlanma çizgisi üstündeki bölgede ise, temas sırasında yuvarlanma ile yüzeydeki boşluklar kapatılmaya fırsat kalmadan yağlayıcı, girmiş olduğu çatlaklardan dışarıya çıkmaya zorlanır. Bu nedenle söz konusu bölgedeki çatlaklar hidrolik kama etkisine maruz kalır ve çukurcuk oluşur.

2.4.1.4. Spalling (Pullanma)

Spalling, diş yüzeyinden bir parça koptuğu zaman, arkasında kalan büyükçe alanı tarif için kullanılan bir terimdir. Yüzey sertleştirilmiş dişlilerde ve yumuşak malzemelerde tek bir noktada üst üste gelmiş ya da iç içe geçmiş geniş çukurcukların bir araya gelmesi şeklinde ortaya çıkar. Pratikte ilerleyen pitting ile aynıdır. Spalling, diş yüzeyinin pürüzlü, kopmaya uygun bölgelerinin de katılımıyla yüksek temas gerilmeleri

tarafından ortaya çıkartılır (Chaari vd 2008). Yüzeyi sertleştirilmiş dişlilerde, yüzey veya yüzey altı hataları ile yanlış ısıl işlemlerden kaynaklanan iç gerilmeler spallingin temel nedenlerinden biridir.

Literatürde planet dişlilerin hasar analizleri ile ilgili yayın oldukça az bulunmaktadır (Guo ve Parker, 2010a; Guo ve Parker, 2010b Yüksel ve Kahraman, 2004; David vd 2006; Bartelmus ve Zimroz, 2009); www.forging.org, 2007). Bu yayınların büyük oranı genelde titreşim ve modellemeleri üzerinedir (Guo ve Parker, 2010a; David vd 2006; Bartelmus ve Zimroz, 2009). Kısıtlı literatür hasarın genelde iki farklı kaynak merkezli olduğunu göstermektedir (Bartelmus ve Zimroz, 2009). Bunlar, yataklama hatalarından kaynaklanan titreşim ve buna bağlı yorulmalar ve malzeme kaynaklı hasarlardır. Transmikser redüktörleri için dişlilerde Avrupa menşeli firmalar 8620 kalite çelik kullanırken Çin EN 353 kalite çelik kullanmaktadır. Çizelge 2.1 AISI 8620 ve EN 353 kalite çeliklerin kimyasal kompozisyonunu göstermektedir.

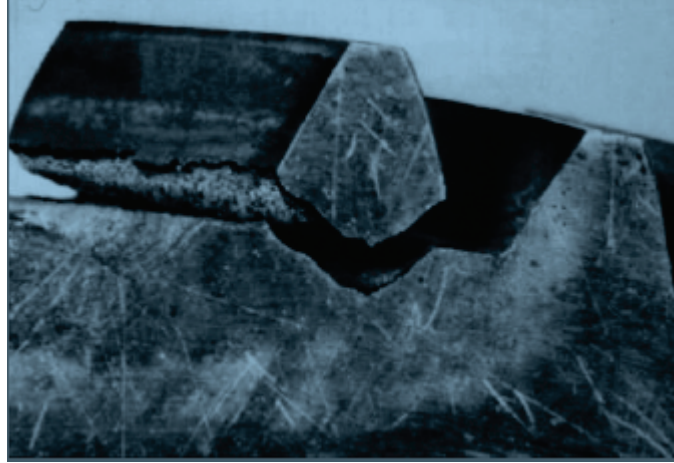
Çizelge 2.1. AISI 8620 ve EN 353 kalite çeliklerin kimyasal kompozisyonu Element (% ağırlığı).

Malzeme	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 8620	0.20	0.80	0.035	0.04	0.25	0.50	0.55	0.20
EN353	0.18	0.90	0.016	0.008	0.25	1.10	1.30	0.10

2.5. Kırılma

Dişlilerde kırılma olayı birçok hasar türüne göre daha tehlikeli ve daha risklidir. Özellikle bir helikopterde, asansörde veya bir vinçte çok tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle insan hayatının risk altında olduğu çalışma koşullarında dişlilerde kırılma için emniyet katsayısı büyük alınır. Kırılma hasar türü; klasik eğilme yorulmaları, aşırı yük, diş veya jant kırılmaları gibi farklı şekillerde karşımıza çıkabilir (Chaari vd ,2008). Çarkın dişlerini eğilmeye zorlayan kuvvetler, diş kökündeki kavislerde ve diş kökü ile diş profilinin kesiştiği noktalarda en yüksek gerilmelere sebep olur. Bir diş, temasın gerçekleştiği tarafta çekme, bunun karşı tarafında da basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Eğer kritik bölgelerde ortaya çıkan çekme gerilmesinin dişli malzemesinin mukavemet sınırını aşmasına izin verilirse, sonunda yorulma çatlakları oluşacak ve

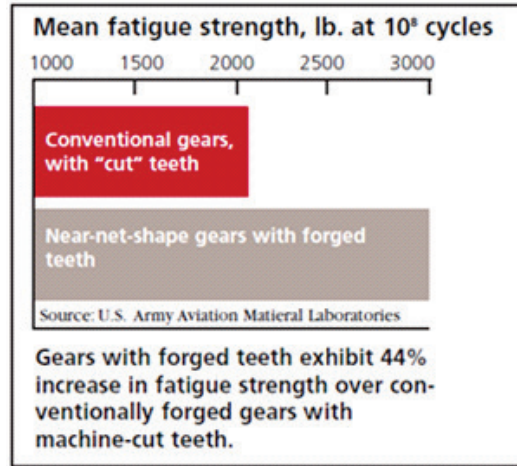
çalışma ile beraber dişin çark gövdesinden ayrılmasına kadar ilerleyecektir. Şekil 2.12.'de diş kökü kavisinde ortaya çıkan klasik yorulma kırılması görülmektedir (Kızılaslan vd, 2010).



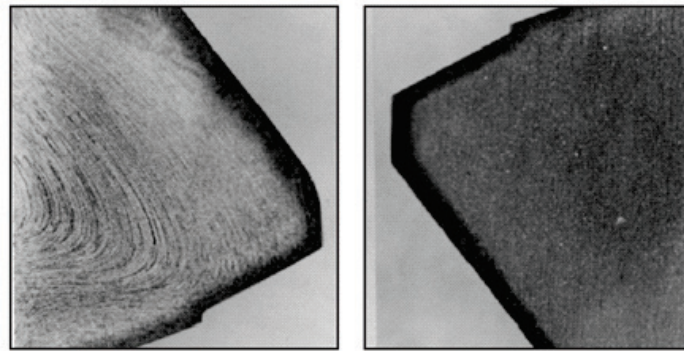
Şekil 2.12. Diş kökü yorulma kırılması (Kızılaslan vd, 2010).

2.6. Dişlilerin Mekanik Özellikleri ve Modelleme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yapılan literatür taramaları sonuçları, planet dişlilerde malzemeye bağlı pitting ve spalling hasarlarının birçoğunun yorulma temelli olduğunu göstermektedir. Bu noktadan, üretilecek planet redüktörlerde dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan biri malzeme seçimidir. Literatür (www.forging.org, 2007), üretilecek planet redüktörlerde dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan birinin yorulma ve buna bağlı malzeme seçimi olduğunu göstermektedir. Genelde malzeme olarak en çok 8620 serisi çelikler kullanılmaktadır. Literatür (www.forging.org, 2007) dövme çeliklerden yapılan dişlilerin yorulma ömürlerinin talaşlı işleme ile üretilenden daha iyi olduğunu göstermektedir (Şekil 3.1. ve 3.2).



Şekil 2.13. Talaşlı imalat ile üretilen ve dövme olarak yapılan dişlilerin yorulma dayanımları (www.forging.org, 2007).



Grain flow that follows the contour of forged teeth in steel bevel gears is directly responsible for improvements in fatigue life over machined gears.

(a)

(b)

Şekil 2.14. Dövme olarak yapılan (a) talaşlı imalat ile üretilen (b) dişlilerin mikroyapıları.(www.forging.org, 2007).

Büyük zorlamalara maruz kalan makine parçalarının yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan sementasyon sonucunda; yüksek yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımı elde edilmektedir. Aynı zamanda bu işlem temas yorulma dayanımının da yüksek olmasını sağlamaktadır (Paris 1999). Fakat semente edilen parça çekmeye zorlanırsa, gerilmeler üst üste ekleneceği için artık gerilmeler yorulma dayanımı için zararlı olmaktadır (Krauss, 1989; Parrish, 1999).

Genel ve Demirkol çalışmasında, AISI 8620 çeliğin yorulma performansında efektif derinliğin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sementasyon süresinin

artmasıyla etkin derinliğin arttığını, etkin derinlik arttıkça sementasyonun başarılı olduğunu gözlemlemişlerdir (Genel ve Demirkol, 1999).

Özsaraç vd. çalışmalarında Amerikan standartlarına göre SAE 8620, Alman normlarına göre de 21 NiCrMo2 (1.6523) olarak bilinen çeliklerin kutu sementasyonu yöntemiyle karbürlenmesi ve sonrasında sertleştirilmesi incelenmiştir. Karbürleme sıcaklığı 930 °C, sertleştirme sıcaklığı ise 870 °C olup 25 dakika bekletilip su içerisinde sertleştirilmiştir. 0.5, 1, 5, 10 saat karbürleme dört ayrı sürede yapılmıştır. Çekirdek sertliği 439 VSD olan SAE 8620 sementasyon çeliğinin sementasyon işlemi sonunda sertlik değeri 742 VSD olmuş kabuk sertliğinde % 60 sertlik artışı sağlanmıştır. Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde üst kısım ötektoid üstü, iç kısımlara doğru ötektoid ve çekirdek bölgesi ferritik ve beynitik yapılardan oluşmaktadır. Sertleştirilen numunelerin dış kabuk kısmında oluşan küçük tanelerin sertlik değerleri artmakta, iç kısımlara doğru tane boyutlarında kabalaşma ve bunun sonucu sertlik değerlerinde azalma olduğu gözlenmiştir (Özsaraç vd., 2001)

Aslantaş çalışmasında, dişlilerde meydana gelen aşınma türlerinin genellikle çalışma şartlarına bağlı olarak değiştiğini fakat aşınma, temas eden iki diş yüzeyi arasında yağ filminin yetersiz veya hiç olmaması sonucu ortaya çıktığını söylemiştir. İki yüzey arasındaki yağ filminin yetersiz olması sonucunda iki diş yüzeyi arasında direkt temas meydana gelmekte ve aşınma başlamaktadır (Aslantaş 2003).

Farfa'n vd. çalışmalarında dişli ve şaft gibi taşıt aktarım elemanlarının yapımında kullanılan semente çeliklerin yorulma ve kırılmaları ile ilgili deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yorulma ömrü ve yorulma dayanımı sert tabaka kalınlığının etkisi incelenmiştir. Sementasyon numunelerin yorulma testleri düşük ve yüksek devir rejimlerde yürütülmektedir. Semente edilmiş çeliğin yorulma özelliklerinde etki derinliğinin etkili olduğu gözlenmiştir (Farfa'n vd.,2004) .

Asi vd. çalışmalarında gaz sementasyonu yapılmış SAE 8620 çeliğin yorulma performansını etki derinliğinin bir fonksiyonu olarak değerlendirmişlerdir. Sementasyonu, 940°C sıcaklıkta 45 dk, 3 ve 5 saat olarak uygulamışlardır. Yapılan minerolojik ve mikroyapı deneylerinden yorgunluk sınırının mikro yapı, etki derinliği, tutulan oksidasyon ve yüzey kenarlarındaki kalıcı gerilmelerle ilişkili olduğu görülmüştür (Asi vd.,2007).

Asi vd. çalışmalarında SAE 8620 çeliğinin geleneksel sıcaklıktaki sementasyon ile yüksek sıcaklıkta yapılan sementasyonu karşılaştırmışlardır. Bu amaçla farklı sementasyon zamanı uygulayarak etki derinliğinin değiştirmişlerdir. Tipik olarak 940°C sıcaklıkta 3 ve 5 saat, ve 980 °C sıcaklıkta 1 ve 2 saat uygulanmıştır. Numuneler üzerinde XRD, SEM ve EDX deneyleri yapılarak mikro yapıları incelenmiştir. Analiz sonuçlarından görülmüştür ki, yüksek sıcaklık gaz sementasyon yapılan numunelerin yorulma performansı geleneksel gaz sementasyon yapılan numunelerinkinden nispeten düşük çıkmıştır (Asi vd., 2009).

Yeğen ve Usta çalışmalarında endüstride yaygın olarak kullanılan semente edilmiş SAE 8620 and 16MnCr5 çeliğinin mekanik davranışı üzerinde çalışmışlardır. Deneyler sıcak ve soğuk haddelenmiş numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney sonuçlarından sementasyon zamanının artmasıyla sementasyon derinliğinin arttığı görülmüştür. Aşınma deneyi sonucunda sementasyon prosesiyle numunelerin aşınma direncinin arttığı ve yüzey sertliğinin aşınma direncini etkilediği görülmüştür (Yeğen ve Usta 2010).

Diğer taraftan literatüre baktığımızda, dişlilerin modelleme çalışmaları da oldukça yer almaktadır. Sonlu eleman yöntemlerinin dişli çarklara tatbikinde göz önüne alınması gerek hususları ilk olarak Wilcox ve Coleman (1973) makalelerinde belirtmişlerdir. İki boyutlu dişli çark geometrisinin sonlu elemanlar ile temsilini esasları belirtilmiş ve diş dibindeki gerilmeleri tayin eden teknik verilmiştir.

Özer çalışmasında diş kökünde oluşan gerilmeleri sonlu elemanlar metodu ile kritik bölgedeki gerilmelerin miktar ve dağılımını belirlemiştir. Sonuçları diğer amprik formüller ile karşılaştırarak, uygulamasının hızlı ve doğru sonuçlara ulaşım imkanı verdiğini görmüştür (Özer 1996).

Erten diş dibi mukavemeti ve gerilme hesaplarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak karşılaştırmıştır (Erten 1993) .

Soykök çalışmalarında dişli çarklarda diş üzerinde ve özellikle diş dibindeki kritik noktadaki gerilmeleri ve maksimum şekil değiştirmelerini ANSYS ve CosmosWorks paket programlarıyla sonuçların çok yönlü olarak, Mathcad sonuçlarında ise sadece düğüm noktalarındaki gerilme ve yer değişim büyüklüğünü inceleyebildiğini görmüştür (Soykök 2001) .

Shell çalışmasında üç boyutlu olarak düz ve helisel dişlinin modelini oluşturarak GAPP adlı programı ve analiz için NISA adlı programı kullanarak, işleme hatası, diş dibi gerilmesi ve kavrayan dişlerdeki yük dağılımı üzerine büyük etkisi olduğunu belirlemiştir (Shell 1992).

3.YORULMA

3.1 Malzemelerin Yorulması

Birçok makine parçaları ve yapı elemanları kullanılmaya esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadırlar. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlama sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. Genel anlamda, tekrarlı gerilme altında çalışan malzemelerde zamanla hasar meydana gelmesi olayına yorulma denir. Yorulma olayına neden olan tekrarlı gerilmeler, eksenel, kayma, eğilme ve burulma yüklerinden birinin veya birkaçının birlikte etkilemesi ile olabilir (Savaşkan 2004).

Yorulma ilk defa 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır. Günümüzde yorulma, pek çok mühendislik yapıları için tasarım şartnamelerinin bir parçasıdır (Kızılaslan vd., 2010). Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık %90'ı yorulma sonucunda olmaktadır. Yorulma olayına parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genleşme ve büzülmeyle doğan ısıl gerilmeler de neden olabilmektedir. Yorulma olayı genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak teşekkülü için genellikle şu üç ana faktör gereklidir:

- Yeteri derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesi
- Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması
- Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlama sayısı

Bu ana faktörler yanında çok sayıda yan faktörler de sayılabilir; örneğin yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, bileşik gerilmeler, gerilim konsantrasyonu, frekans, mikro yapı, (tane boyutu, faz dağılımı, inklüzyonlar, vs.) gibi.

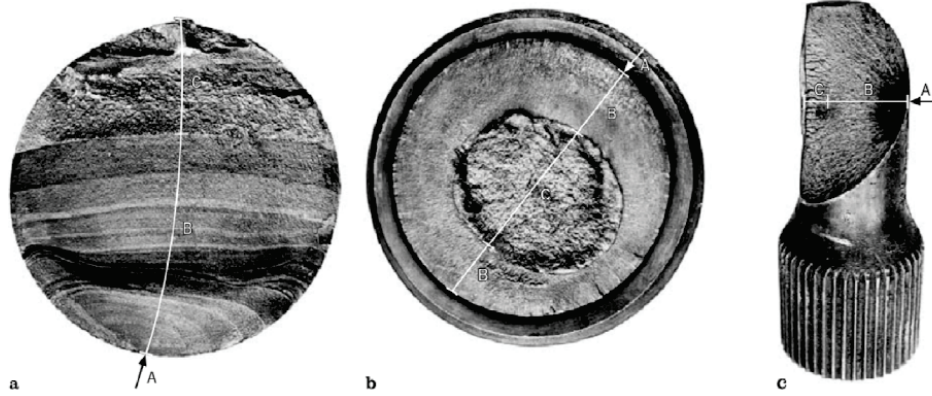
Yukarıda sayılan faktörler göz önünde bulundurulacak olursa, metalik parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü arttırmak için, etkili faktörleri en zararsız halde

bulunduracak çok iyi bir dizayna gerek vardır. Ancak küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarını karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür. Laboratuarda, standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterirler. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenlerle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılamazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Faktörlerin çok sayıda olmaları ve karmaşık etkilerde bulunmaları, uzun yıllar yorulma deneyi ile ilgili standartların hazırlanamamasına neden olmuştur. Değişik araştırmacı ve araştırma merkezleri özel cihazlar ve özel numuneler kullanarak konuyla ilgili çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Son yıllarda bazı ülkelerde hazırlanan standartlar da yine belirli koşullar için sınıflandırılmışlardır.

Yorulma kırılması yüzeyin ilginç bir görünüşü vardır. Yüzeyde çatlakların başladığı yorulma odağı ile onu çevreleyen midye kabuğunu andıran aynı merkezli eğriler ve bunların yanında taneli bir bölge görülür. Çatlak zamanla yavaş yavaş ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucu yorulma kırılması yüzeyi parlak görünür. Çatlak ilerleyip geri kalan dolu kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince ani kırılma meydana gelir ve kırılma yüzeyi taneli görünüştedir. Yorulma genellikle iç yapıda mevcut kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanır. Bundan dolayı yorulma olayı iç yapıya çok bağlıdır. İç yapıda bulunan çatlak, çentik boşluk sert parçacık ve ani kesit değişimleri civarındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyüktür. Bu gerilmeler etkisinde yerel plastik şekil değiştirme meydana gelir. Diğer taraftan başlangıçta hiçbir bozukluk içermeyen yüzeyi parlatılmış uniform kesitli bir metalde elastik sınır altında da dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar da yüzeyde çıkıntılar ve çöküntülerin doğmasına dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bütün bu hallerde tekrarlı zorlamalar etkisiyle oluşan tersinir olmayan plastik şekil değiştirme sonucu malzeme pekleşir, gevrekliği artar ani yorulma kırılması meydana getirir.

Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve içeriye doğru yayılır. Şekil 3.1’de yorulma hasar örnekleri görülmektedir (itu.edu.tr/temizv/vtdn/yorulma.pdf).



Şekil 3.1. Yorulma hasar örnekleri (itu.edu.tr/temizv/vtdn/yorulma.pdf).

- Eğilmeye maruz bir eksantrik kırıcıdaki yorulma hasarı
- Çok küçük yuvarlatma sonucu bir iticide oluşan yorulma kırığı
- Burulma çubuğunda oluşan yorulma kırığı

3.2. Yorulma Deneyleri

Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyodlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir. Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır;

- Eksenel gerilmeli yorulma deneyi;

En basit sistem olan bu sistemde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune enine de üniform olarak dağılır. Eksenel gerilmelerin söz konusu olduğu bir örnek, iç yanmalı motorların bağlantı rotorlarıdır. Ancak burada eksenel gerilme yanında eğme kuvvetleride oldukça etkilidir.

- Eğme gerilmeli yorulma deneyi; Bu deney türü kendi arasında ikiye ayrılır.

Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyinde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin olduğu en güzel örnek taşıtların yaprak yaylarıdır (makas yayları).

Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyinde, numune devamlı dönen bir nötr (tarafsız) eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere örnek olarak hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir. Aks başlıklarına (yatakların içinde kalan kısım) gelen yükün etkisi ve tekerleklerdeki tepkiden dolayı aksta eğme gerilmeleri oluşur. Ancak aks devamlı döndüğünden, aksın herhangi bir ekseni her turda bir çekme bir basma gerilmesine uğrar. Bu olay bir demiryolu mühendisi olan Wöhler'i yorulma üzerindeki çalışmalarına yönelten olaydır.

- Burma gerilmeli yorulma deneyi;

Deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma (dönme) işlemi uygulanmaktadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burma gerilmeleri oluşur.

- Bileşik gerilmeli yorulma deneyi;

Yukarıda sayılan farklı gerilme türlerinden ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusu olur. Uygulamada en çok rastlanan bileşik gerilme durumu eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durumdur. Motorların krank mili başlıklarındaki gerilme, eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir.

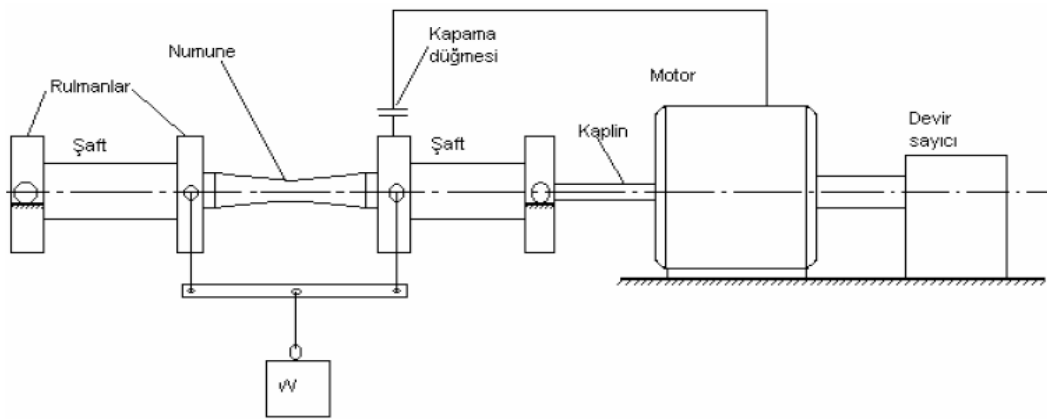
3.3 Yorulma Deneyi Cihazları

Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, bu cihazları numuneye uyguladıkları gerilme türü açısından 4 ana grupta toplamak mümkündür;

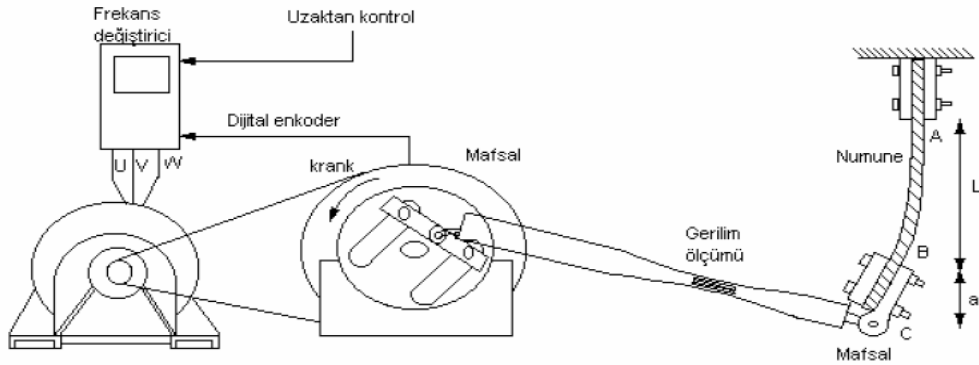
- Eksenel çekme – basma gerilmeleri uygulanan cihazlar
- Eğme gerilmeleri uygulanan cihazlar
- Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayanlar

- Döner eğme gerilmesi uygulayanlar
- Burma gerilmesi uygulayan cihazlar
- Bileşik gerilme uygulayan cihazlar

Yukarıda belirtilen her bir grup için değişik firma ve araştırma merkezlerince farklı cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlardan bazıları Şekil 3.2, Şekil 3.3'de verilmektedir (Kayalı vd., 1996).



Şekil 3.2. Döner mil deney düzeneği.



Şekil 3.3. Tekrarlanan eğilme deney düzeneği.

3.4. Numuneler

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllara kadar değişik araştırmacılar kullandıkları cihaza uygun

farklı numune tipleri geliştirmişlerdir. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir.

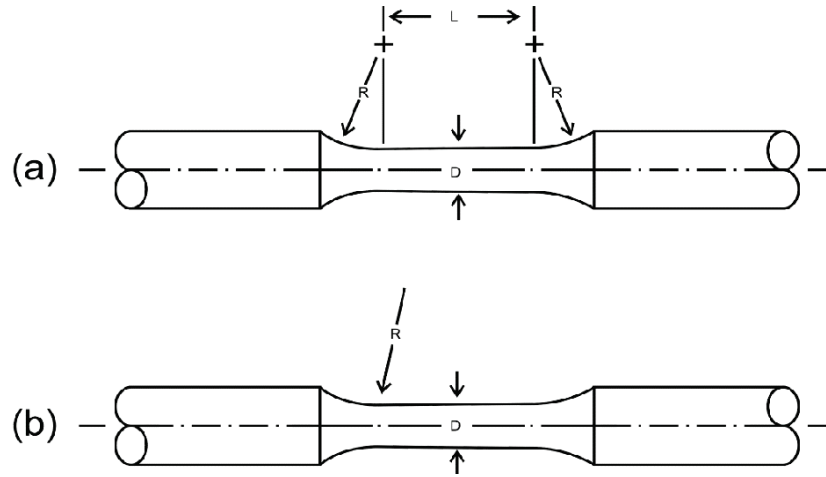
- Numune öylesine dizayn edilmelidir ki çatlama numunenin daraltılmış kesitinde olsun.
- Numunenin daraltılmış kesiti öylesine seçilmelidir ki maksimum gerilmenin mutlak değeri deney cihazının çalışma kapasitesinin en az %25'inde, minimum gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2.5' inde oluşsun.
- Numune boyutları öylesine seçilmelidir ki numunenin doğal frekansı, cihazın frekansının en az iki misli olsun.

Numunenin alındığı parçanın dikdörtgen veya dairesel kesitli olmasına göre numune şekilleri değişmektedir.

3.4.1 Dairesel kesitli numuneler

Şekil 3.4'de (a) ve (b) şekilleri ile gösterilen numuneler için daraltılmış kısmın çapı için 5 ila 25mm arasında bir değeri seçilmektedir. Numunenin cihaz çeneleri arasına giren kesitinin, daraltılmış kesite oranı en az 1.5 olmalıdır. Çentik etkisini minimuma indirmek için daraltılmış kesitin her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın (D) çapının en az 8 katı olmalıdır.

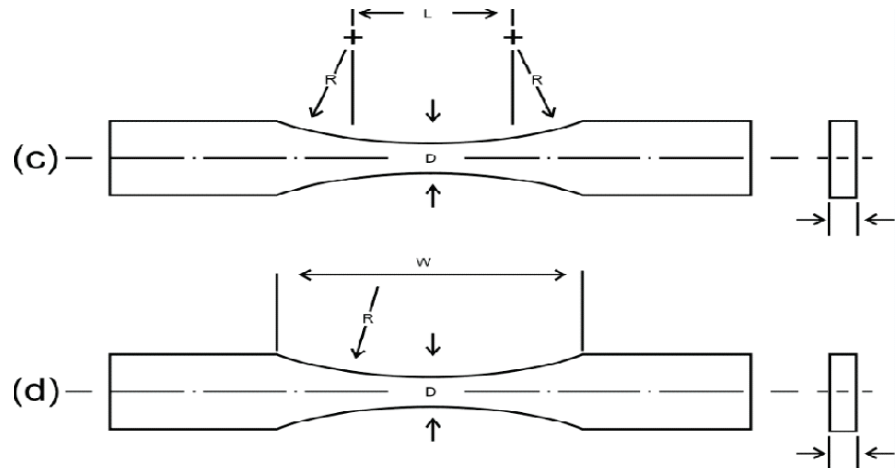
(b) numunesinde (D) çapına sürekli radius ile geçilmektedir. (a) numunesinde ise belirli bir daraltılmış uzunluk söz konusudur. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğu (D) çapının en az 3 katı olmalıdır. Ancak basma gerilmelerinin uygulanacağı durumlarda burkulmaları önlemek amacı ile (L) uzunluğu, (D) çapının 4 katından fazla olmalıdır.



Şekil 3.4. Dairesel kesitli numuneler (Kayalı vd.,1996).

3.4.2 Dikdörtgen kesitli numuneler

Bu numunelerde kesitin daraltılması tek boyutta ve genellikle genişlikte yapılır (Şekil 3.5). Dairesel kesitli numunelerde olduğu gibi, cihazın çeneleri arasında kalan kesitin daraltılmış keside oranı en az 1.5 olmalıdır. Daraltılmış uzunluğun her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı, daraltılmış kısmın (W) genişliğinin en az 8 katı olmalıdır. Daraltılmış kısımda (W) genişliğinin (T) kalınlığına oranı 2 ila 6 arasında olmalı ve daraltılmış kısmın kesiti tercihen 20 ila 650 arasında seçilmelidir. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğu daraltılmış kısımdaki (W) genişliğinin en az 3 katı olmalı, basma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda ise 4 katını geçmemelidir. Diğer özellikler dairesel kesitli numunelerle benzer durumdadır.




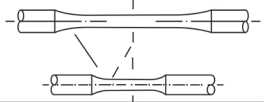
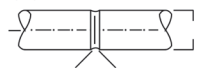
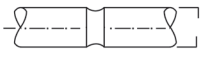
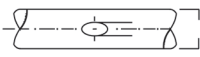

Şekil 3.5. Dikdörtgen kesitli numuneler (Kayalı vd.,1996).

DIN 50113 te dönen eğme gerilmelerinin uygulandığı yorulma deneyi için numune şekilleri ve boyutları verilmektedir. Bu deney türü için genellikle dairesel kesitli numuneler tavsiye edilmektedir. Çubuğun kendisi numune olarak kullanılabilceği gibi, özel olarak belirli bölgesi daraltılmış numuneler de kullanılmaktadır. Çentik hassasiyetini ölçmek için numuneye aşağıdaki türlerde çentikler açılmaktadır:

- Numuneyi halka şeklinde çeviren V ve U tipi çentikler
- Numuneyi enlemesine kateden delikler
- Ani kesit değişmelerini sağlayan çıkıntılar

Bu tür deneylerde en çok kullanılan numune tipleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Yorulma deney numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gerekmektedir. Talaş kaldırma işlemi keskin bir kalem ucu ile yapılmalı ve içi gerilmelerin oluşmasını engellemek için aşırı deformasyonlardan (büyük pasolardan) ve aşırı ısınmalardan kaçınılmalıdır. Talaş kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Talaş kaldırma işleminden sonra numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara işlemi uygulanmalıdır. Ancak bu işlemler sayesinde temiz ve parlak yüzeyler elde edilebilir.

Çizelge 3.1. DIN 50113' e göre, dönen eğme gerilmelerinin uygulandığı yorulma deneylerine ait numune şekil ve boyutları (Kayalı vd.,1996).

Numune Şekli	Açıklamalar
Dolu Kesitli Numune 	Özel hallerde kullanılır. Örneğin tellerde
Daraltılmış Kesitli Numune 	$\frac{r_0}{d_0} \geq 3$
V Çentik Numune 	$\frac{t}{d} = 0.1$ Çentiğin taban yarıçapı $\rho = 0.1 \text{ mm}$ $d_1 = d_2$ (çentik012 mukayese numunesi çapı) .
U Çentikli Numune 	$\frac{t}{d} = 0.1$ $\rho = t$ $d_k = d_0$ (do çentik012 mukayese numunesi çapı) .
Delikli Numune 	
Çıkıntılı Numune 	

Numune uzun zaman saklanacak ise, parlatılmış yüzey korozif olmayan bir yağla kaplanarak korunmalıdır.

3.5. Yorulma Deneyi ile İlgili Terimler

Yorulma deneyinin incelenmesinde özel terimler kullanılmaktadır. Bunlar;

Çevrim; birçok deney cihazında zamanla sinüsoidal bir değişme gösteren yük (gerilme) uygulanır. Şekil 3.6'de görülebileceği gibi (gerilme-zaman) eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denmektedir.

Maksimum Gerilme; uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir. Diğerlerinde olduğu gibi çekme gerilmeleri pozitif (+), basma gerilmeleri (-) işaretlerle gösterilmektedir.

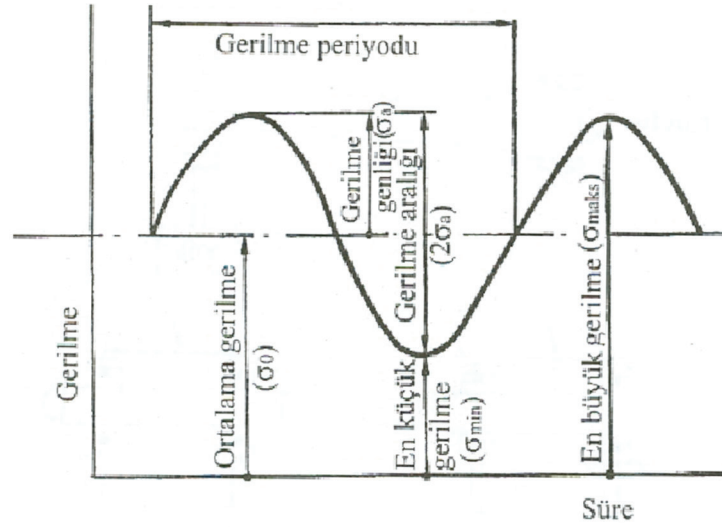
Minimum Gerilme; uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.

Ortalama Gerilme; maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

Gerilme Aralığı; gerilme aralığı max. gerilme ile min. gerilme arasındaki cebirsel farktır (Şekil 3.5).

Gerilme Genliği; gerilme genliği gerilme aralığının yarısına eşittir. Başka bir deyimle maksimum veya minimum gerilme ile ortalama gerilme arasındaki farktır (şekil 3.5).

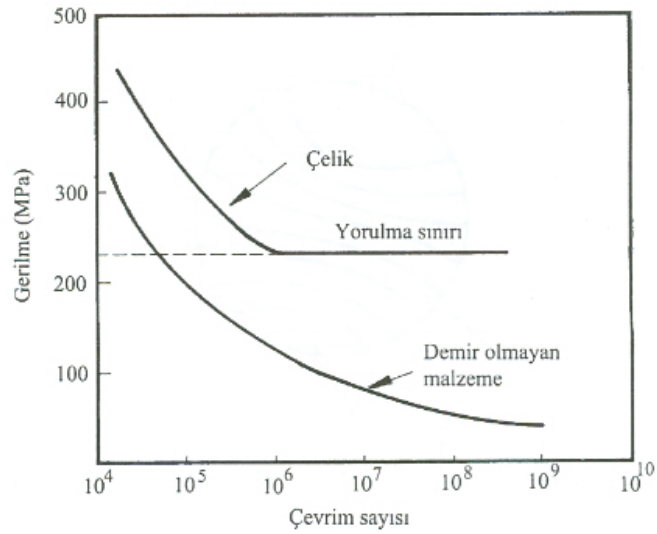
Gerilme Oranı; genellikle 'R' ile gösterilir ve minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranıdır.



şekil 3.6. Tipik bir yorulma gerilmesinin değişimi (Savaşkan 2004).

3.6. S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı)

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda atlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S-N eğrisinin çizilmesi için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır (şekil 3.7). Ortalama gerilme (S_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Küçük gerilmeler için atlamamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (S_a) deney süresince sabit tutulur.



Şekil 3.7. Demir ve demir - dışı malzemelere ait tipik S–N diyagramı (Savaşkan 2004).

Gerilme eksenini olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya maksimum gerilme (S_{max}), ya minimum gerilme (S_{min}) veya gerilme genliğinden (S_a) biri kaydedilir. Çevrim sayısı eksenini olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır. S-N eğrileri 10^6 çevrimden sonra demir esaslı malzemeler için genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler.

Yorulma Dayanımı (N çevrim için)

Malzemenin tam N çevrim sonunda çatlama (veya kopma) gösterdiği gerilme olarak tanımlanır. Bu değer bazı hallerde benzer numunelerin N çevrime dayanabileceği gerilmelerin medyan ortalaması olarak alınır, bazı hallerde ise ortalama gerilme sıfır iken ($S_m = 0$) N çevrimde benzer numunelerin %50'sinin dayanabileceği gerilme olarak alınır.

Yorulma Sınırı (Yorulma Dayanımı Sınırı)

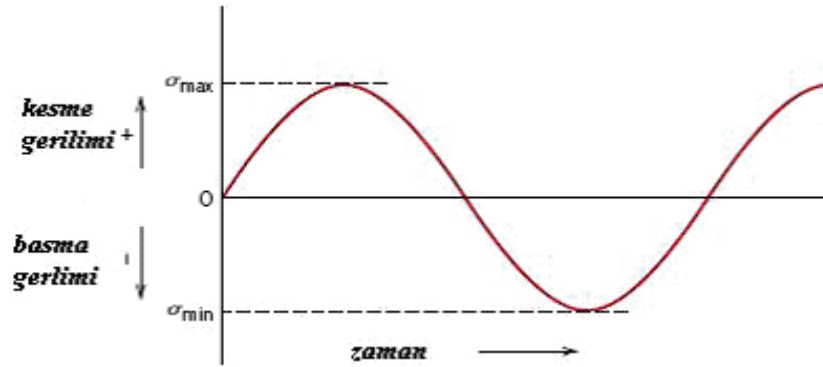
S-N diyagramında, eğrinin asimptotik durum aldığı gerilmeye 'Yorulma sınırı' veya 'Yorulma dayanımı sınırı' denir. Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir.

Yorulma Ömrü

Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme altında çatlama (veya kopma) gösterdikleri (N) çevrim sayılarının medyan ortalaması şeklinde tanımlanır. Yorulma deneylerinde genellikle medyan ortalamalar, aritmetik ortalamaya tercih edilirler. Bunun nedeni medyan ortalamanın daha sağlıklı sonuç vermesidir. Bazı keyfi hallerde, uygulanan gerilme altında, numunelerin belirli bir yüzdesinin (örneğin %90, %95 v.s.) çatlama olmadan dayandığı çevrim sayısı yorulma ömrü olarak alınmaktadır.

3.7. Yorulma Hasarına Neden Olan Gerilme Türleri

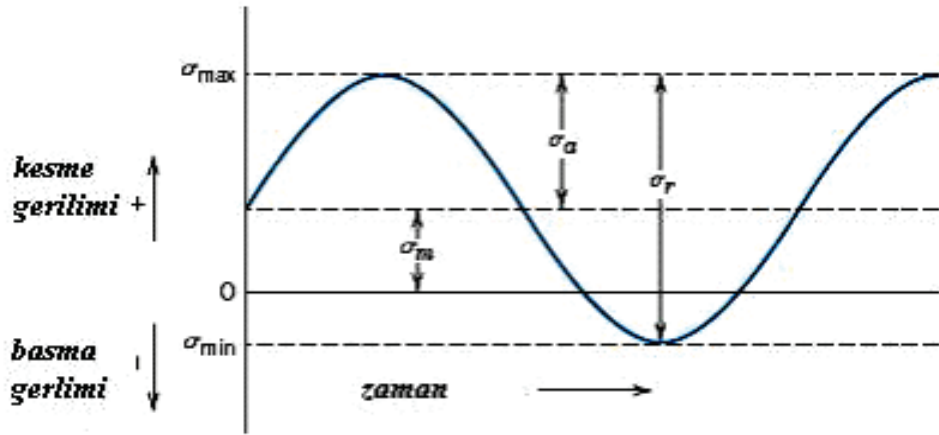
Yorulma hasarına neden olan gerilme çevrimleri genel olarak üç farklı gerilme-zaman grafiği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan birincisi, düzenli ve sinüs dalgasına benzeyen ters gerilme döngüsüdür (Şekil 3.8). Bu grafikte genlik zaman eksenine göre simetriktir ve çekme ile basma gerilmeleri birbirine eşittir.



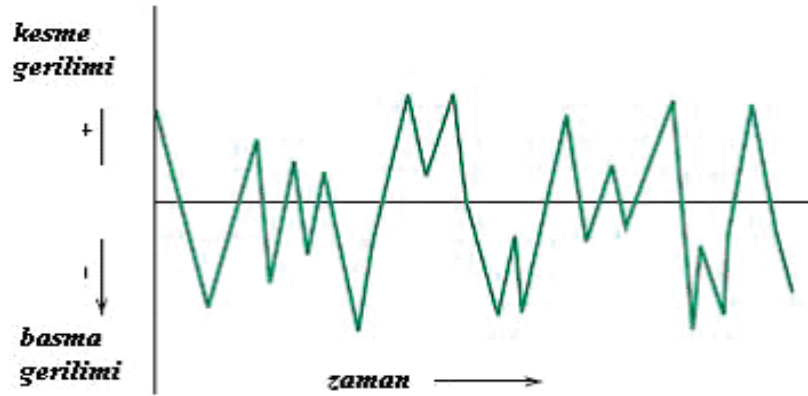
Şekil 3.8. Ters gerilme çevrimi.

Diğer bir gerilme çevrimi ise tekrarlı gerilme çevrimidir. Tekrarlı gerilme çevriminde de elde edilen grafik sinisoidal olmasına karşın zaman eksenine göre asimetriktir (Şekil 3.9).

Üçüncü durum ise düzensiz gerilme çevrimidir (Şekil 3.10). Bu döngüde gerilme belirli bir kurala bağlı olmaksızın iniş çıkış gösterir. Uçak kanatlarında meydana gelen gerilme çevrimi bu tür bir gerilme çevrimidir.



Şekil 3.9. Tekrarlı gerilme çevrimi.



Şekil 3.10. Düzensiz gerilme çevrimi.

3.8.Yorulma Mukavemetine Etkiyen Etkenler

Yorulma mukavemetine etkiyen başlıca etkenler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Parçanın yüzey işleme kalitesi
- Sıcaklık
- Çevrenin kimyasal etkisi
- Frekans
- Gerilme

Gerilme koşulları sabit kaldığı zaman yukarıdaki ilk dört etkenin yaratacağı sonuçlar ayrı ayrı saptanabilir. Bunların yanında ayrıca gerilme koşulları da yorulma

mukavemetine etkir. Özellikle çok eksenli gerime hallerinin getireceği Şekil değiştirme kısıtlamaları malzeme 3mrünü arttırıcı y3nde etkiler.

3.8.1. Parçanın y3zey işleme kalitesi

Yorulma çatlağı çoğu zaman y3zeyde başlayıp içeriye doğru yayıldığından y3zey işleme kalitesinin 3nemi b3y3kt3r. Y3zeydeki p3r3zler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Y3zey işleme kalitesi arttıķça yorulma mukavemeti b3y3r. Yorulmadan dolayı y3zey kopma ihtimalini en aza indirmek için, bazen oldukça iyi parlatılmış y3zeyler hazırlanır (Askeland 1998)

3.8.2. Sıcaklık

Y3ksek sıcaklık altında çalışan malzemelerin çoğunda, yorulma çatlağının başlaması için az sayıda çevrim yeterli olmaktadır. Karbon çeliklerinde 400 3C'ye varan artan sıcaklıklarda yorulma belirtileri g3r3ld3đ3, bunun altındaki sıcaklıklarda ise yorulma mukavemetinde bir iyileŐme g3r3ld3đ3 bilinmektedir. Bazı malzemelerde, optimum sıcaklık ve frekansta, zorlanma yaŐlanması meydana gelmekte olup, plastik deformasyon oluŐması sonucu, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti artmaktadır (Akkurt 1975).

3.8.3. Frekans

Normal koşullarda frekansın yorulma mukavemetine etkisi 3nemsizdir. Bundan dolayı yorulma deneylerinde deney s3resini kısaltmak için y3ksek frekanslı gerilme uygulayan deney makineleri tercih edilir. Ç3k y3ksek frekanslarda plastik Şekil değiştirme için daha az zaman kaldığından genellikle yorulma mukavemeti yaklaşık %10 kadar artar. Y3ksek frekanslı 3zel yorulma aletlerinde, bug3n ki durumda dakikada frekans 6000-8000 arasında bir değere kolaylıkla ulaŐabilmektedir (Savaşkan 2004).

3.8.4. Çevrenin kimyasal etkisi

Değişken gerilme altında çevrenin kimyasal etkisi daha Şiddetli olur, dolayısıyla yorulma 3mr3 kısalır. Uygulamada korozyon yorulması 3nemli sorun yaratabilir. Korozyonlu ortamlarda kimyasal tepkimeler yorulmayı ç3k hızlandırır (Topbaş 1992). Tekrarlı s3r3nen y3zeylerde korozyon daha etkili olur. Fretting korozyonu denen bu

olay yorulma mukavemetini azaltır. Özellikle asma köprülerde çelik kablo ile bağlantı kelepçelerinin temas yüzeylerinde bu tür korozyon oluşur, bu da köprü ömrünü etkileyen en önemli olaydır.

3.8.5. Gerilme yığılması etkisi

Parça kesitinde çentik, delik ve ani kesit değişimlerin bulunması yorulma ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Kama yuvaları, vida dişlileri, pres geçmeler ve delikler gibi geometrik süreksizlikler nedeniyle oluşan gerilme yığılmaları sonucunda makine parçalarında yorulma çatlaklarının bulunması kaçınılmazdır (Meyers 1995). Gerilime maruz malzemede yorulma çatlakları, gerilimin maksimum olduğu yüzeyde başlar. Yüzeydeki herhangi bir tasarım veya üretim hatası gerilimleri yoğunlaştırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasını teşvik eder.

3.9. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın, yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, dolayısıyla şekil değiştirme sürekli yön değiştirerek artma-azalma gösterir. Söz konusu şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından tam elastik olarak karşılanabildikleri sürece tehlikeli değildir. Küçük kalıcı şekil değiştirmeler de kırılma olmadan kristal kafesi tarafından taşınabilirler. Kalıcı şekil değiştirmeler kristal kafesin çarpılması ile değil, kafesin değişik bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi yoluyla oluşurlar. Kafes kısımlarının birbirlerine göre ötelenmelerine kayma adı verilir ve olay kayma düzlemleri olarak adlandırılan tercihli bazı düzlemlerde olur. Kayma düzlemlerinin kristal kafesindeki konumu kristal yapısı ile ilgilidir.

Yorulma zorlamaları sonucu meydana gelen kayma, tek yönlü zorlamalardaki gibi dislokasyonların oluşumu ve ilerlemesi ile açıklanır. Bu şekil değiştirme mekanizması, parlatılmış deney parçalarının yüzeyinde yorulma sınırına yakın zorlamalar altında kayma çizgileri oluşmasıyla görünür duruma gelebilir. Tek yönlü zorlamalarda olduğu gibi yorulma zorlamaları sırasında da pekleşme olayı görülür. Pekleşme sadece şekil değiştirmenin miktarına değil, ayrıca az da olsa frekansa bağlıdır. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu kanıtlamıştır. Bazı gözlemlerde ancak kayma ve yerel

sıcaklık artışlarının varlığı ile açıklanabilecek çökelmeler görülmüştür. Tekrarlanan şekil değiştirmeler kristal kafes tarafından sürekli olarak taşınmadığı için, yorulma zorlamasının pekleşme dışında hasar etkisi de vardır. Kaymaların miktarına ve bir ölçüde de frekansa bağlı olarak belirli bir çevrim sayısından sonra ortaya çıkan hasara malzeme yapısıyla ilgili olarak hangi olayların yol açtığı yeterince araştırılmış ve tatmin edici bir kuramsal açıklama yapılmış değildir. Bununla birlikte Örneğin X-ışını araştırmaları hasar başlangıç kademeleri hakkında bazı bilgiler sağlamış ve yorulma sırasında iç gerilmelerin meydana geldiğini göstermiştir. -180°C sıcaklıkta çekme-basma değişken yükleri ile zorlanan deney parçalarında yapılan mikro yapı gözlemleri de, gittikçe artan ölçüde ikiz oluşumunun varlığını ortaya koymuştur(Tauscher H. 1971)

Şimdiye kadar elde edilen bilgilere dayanarak, yorulma zorlaması sırasında tekrarlanan kalıcı şekil değiştirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu, malzemenin ayrılma dayanımının aşıldığı noktalarda mikroskobik boyuttan da küçük çatlaklar oluştuğu söylenebilir. Zorlama sırasında dışarıdan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak bunlar mikro ve makro çatlaklar olarak birleşir ve sonunda bu çatlaklardan herhangi biri yorulma kırılmasına neden olur.

Hasar çok küçük ve sınırlı bir bölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden dışarıdan herhangi bir kalıcı şekil değiştirme görülmez ve bu nedenle yorulma kırılmaları şekil değiştirmesiz olarak nitelenir. Hasarın ilk oluştuğu nokta çoğunlukla yüzeyde veya yüzeyin hemen altındadır, ancak heterojenliklerin veya malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısmında da bulunabilir.

3.9.1. Yorulma kırılmasına neden olan veya kırılmayı kolaylaştıran etkenler

Yorulma kırılmasını kolaylaştıran etkenler dış etkenler (Şekil, yüzey durumu ve zorlama şekli) ile iç etkenler (malzemenin durumu) olarak ikiye ayrılabilir. Bir yorulma hasarının oluşmasında genellikle birçok etkenin aynı anda varlığı söz konusudur, ancak sadece tek bir olumsuz etkenin kırılmaya neden olduğu durumlar da görülmüştür.

Deneyimlere göre yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu (yaklaşık %85-90) malzeme hatalarından dolayı değil, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkileri, aşırı yükleme, montaj hataları, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerle ortaya çıkmaktadır.

3.9.1.1. Dış etkenler

Konstrüksiyonla ilgili çentikler: örneğin yağ delikleri, kama yuvaları, keskin kesit değişimleri, faturalar, enine delikler v.b.

Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler: örneğin cıvata kafaları, krank millerinin dirsekleri, sıkı geçmeler v.b.

Kuvvet etki noktaları: örneğin toleranslı veya sıkı geçmeler, dingil başlıkları ve diğer noktasal veya çizgisel etkiyen kuvvetler.

Talaşlı işlemler sırasında oluşan yüzey zedelenmeleri: örneğin taşlama izleri, taşlama çatlakları, torna izleri, yüzey çizikleri v.b.

Diğer yüzey zedelenmeleri: örneğin korozyona uğramış noktalar (Özellikle karıncalanma ve tane sınırı korozyonu), aşınmış bölgeler, sertleştirme çatlakları, hadde veya dövme hataları, katmerler, katlanmalar v.b.

3.9.1.2. İç etkenler

Çizgi halinde cüruflar, cüruf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler veya tek tek iri cüruf kalıntıları: Cürufların, oksitlerin, nitrürlerin ve karbürlerin tane sınırlarına çökelmeleri.

- Her türden birikmeler (segregasyonlar).
- Yüzey kabarcıkları

Mikro kalıntılar (örneğin döküm yapısındaki malzemelerde) veya soğuk şekil değiştirme sırasında sert kalıntılar içinde ve çevresinde oluşan mikro boşluklar (örneğin kaba lamelli perlit veya alüminyum oksit kalıntıları içeren çeliklerin soğuk şekil değiştirmesinde).

Tane sınırlarında oksitlenme (yanma) veya tanelerin içinde oksijen miktarının artması: Her ikisi de sıcak şekil verme veya ısıl işlem sırasında aşırı yüksek sıcaklıklar nedeni ile ortaya çıkabilir.

İç çatlak kümeleri: Haddelenmiş veya dövülmüş çeliklerde veya çeliklerin ark kaynağı dikişlerinde görülür. Normalize edilmiş çelikte aşırı heterojen yapı, örneğin yapıda perlit ve ferrit bulunması halinde ferritin ağ şeklinde olması, düşük ferrit

oranlarında ferrit dağılımının homojen olmayışı veya perlit ve ferritin kaba bant yapısı oluşturması.

Sertleştirilmiş çeliklerde yapı farklılıkları: örneğin martenzitte kısmen beynit, perlit veya ferrit bölgeleri temperleme veya ostemperleme ısıl işleminden sonra yüksek oranda artık ostenit ostemperlemeden sonra yüksek oranda ferrit veya perlit bulunması.

Aşırı ısıtılmış yapı: Örneğin Widmannstaetten yapısı veya kaba taneli yapılar. Perlit ve ferrit karışımlarında 800... 2500 μm^2 ince ilâ normal tane büyüklüğü olarak kabul edilebilir. Aşırı ısıtılmış yapılar yorulma dayanımını daima olumsuz yönde etkiler.

Bant veya ağ şeklinde veya bölge bölge yoğunlaşmış serbest karbürler: örneğin takım çelikleri ve sementasyon çeliklerinde.

Sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş çelik parçaların yüzeyinde karbon azalması (dekarbürizasyon).

Yayınma tabakaları ile ana malzeme arasında keskin geçişler: Örneğin sementasyon çeliklerinde karbürize edilmiş yüzeyden ana malzemeye olan keskin geçiş bölgelerinde faz dönüşümü nedeniyle oluşan yapısal gerilmelere ek olarak iç çentik etkisi ile gerilme yığılmaları meydana gelir.

Bölgesel yüzey sertleştirilmesi yapılmış malzemelerin yük taşıyan bölgelerinde veya çentiklerde, sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş kısımlar arasındaki keskin geçişler.

Sementasyon ile sertleştirilmiş çelik malzemenin yüzeyinde artık ostenit bulunması. Sertleştirilmiş çeliklerde çeşitli nedenlerle yumuşak kalan bölgeler.

Çelik parçalarda yüzeyde veya yüzeyin hemen altında bulunan sertleşmiş küçük bölgeler: örneğin manyetik parçacıklar yöntemi ile yapılan muayenede elektrod temas noktalarında aşırı ısınma veya punta kaynağı sonucu ortaya çıkan bölgeler.

Yük taşıyan kısımlarda yapılan dolgu kaynakları: Şayet kaynak öncesi, parça 200-300 C sıcaklığa ön ısıtılmamış ve dolgu malzemesinin yavaş katılaşmasından sonra bütün parça normalize veya ıslah edilmemiş ise,

Kaynak dikişlerinde gaz boşlukları, gözenekler, cüruf kalıntıları, çatlaklar, erime oyukları bulunması. Yorulma zorlamasıyla karşılaşılabilecek kaynak bağlantılarının gerilme giderme ve normalizasyon tavrının yapılmaması.

Kaynak dikişi dışındaki elektrot ateşleme izleri.

Soğuk şekil değiştirmiş küçük bölgeler: Bunlar örneğin montaj veya işletme sırasında darbe sonucu oluşabilir. Özellikle çeliğin yaşlanma özelliği varsa çatlama neden olur (Perçin deliği çatlağı gibi).

Talaşlı veya talaşsız şekil verme veya ısıtma işlemlerinden kaynaklanan iç gerilmeler, Özellikle bunların çekme gerilmesi olması durumunda.

Yukarıda belirtilenler dışında yorulma hasarını kolaylaştıran veya doğrudan hasara neden olan başka malzeme veya yapı hataları da bulunabilir. Verilen liste, en çok rastlanılan hataları önem sırasını dikkate almadan kapsamaktadır. Esasen hataların yorulma hasarını kolaylaştırıcı etkilerine göre sıralanması da mümkün değildir. Malzeme ve yapı hatalarının değerlendirilmesi, daima zorlama şekli ve yorulma hasarının oluşumu ile bağıntı kurularak yapılmalıdır,

3.9.2. Yorulma kırıklarının mikroskobik görünüşleri ve oluşum şekilleri

Yorulma kırıklarının görünümü, özellikle çelikler için, hemen hemen her olayda zorlamanın şekli ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgiler verir. Kırılmanın başladığı yerler çoğunlukla saptanabilir. Yorulma kırılmasının ilerleyişinden de noktasal veya çevresel çentik etkilerinin var olup olmadığı anlaşılabilir. Çeliklerin çekme ve eğme zorlamalarında kırık yüzeyindeki görünüşleri bakımından birbirinden tamamen farklı iki bölge ortaya çıkar:

- Düzgün ve mat veya bazen sürtünerek parlamış bölge: yorulma çatlağı
- Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında zorunlu olarak ani kırılmış bölge: son kırılma yüzeyi.

Yorulma çatlağında zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeniyle, ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer duraklama çizgileri bulunabilir. Duraklama çizgileri yorulma kırılmasının kesin bir işaretidir ve bu çizgilerin şeklinden yorulma kırılmasının başlaması ile ilerlemesi hakkında bilgiler elde edilir.

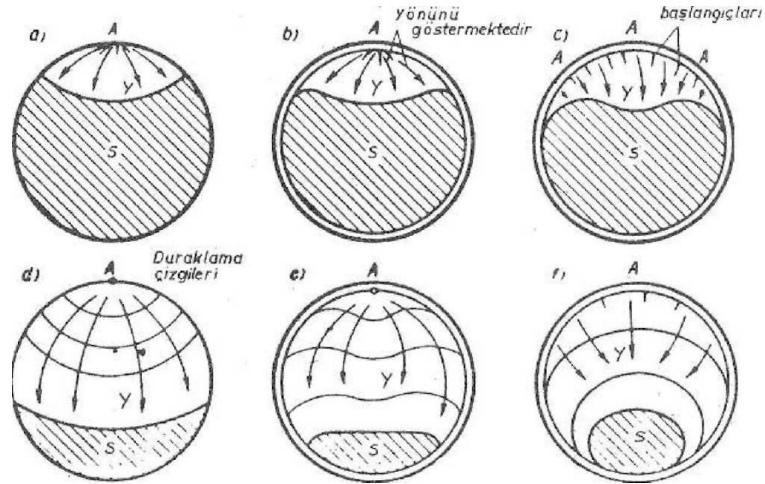
3.9.3. Yorulma kırılmasının oluşum şekilleri

Şekil 3.11’de çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamasının ortak etkimesi sonucu görülebilecek yorulma kırılmalarının oluşum şekilleri şematik olarak gösterilmiştir. Çekme zorlamasının tek başına etkimesi çok ender rastlanan bir olaydır. Çoğunlukla kuvvet etkiye noktasının çok az da olsa eksenden kaçması ile çekme zorlamalarına ek olarak tek taraflı eğmelerin ortaya çıkması ve ayrıca yorulma çatlaklarının ilerlemesi ile eğme gerilmelerinin artması söz konusudur. Yorulma kırılmasının oluşum şekilleri kolaylık bakımından dairesel kesitte gösterilmiş ve çevresel çentik etkisinin bulunduğu durumlar Çift daire ile belirtilmiştir. Yorulma kırılması sırasında oluşan son kırılma yüzeyinin tüm kesite oranı, etki eden işletme zorlamasının seviyesine bağlıdır. Bu oranın büyük olması yüksek bir zorlamanın uygulandığını veya yorulma zorlaması için malzemenin uygun seçilmediğini gösterir.

Şekil 3.11.’de verilen temel şekillerde çatlak başlangıcı olan A noktasının daima yüzeyde olduğu varsayılmıştır, ancak bu zorunlu bir durum değildir. Genellikle düşük anma gerilmelerinde (son kırılma yüzeyi küçük) tek bir başlangıç noktası, yüksek anma gerilmelerinde ise aynı düzlemde birkaç çatlak başlangıcı bulunur.

Şekil 3.12’de çift taraflı eğme zorlamaları sırasında yorulma kırıklarının oluşumunu şematik olarak göstermektedir. Bu yorulma kırılmalarında işletme gerilmelerinin yüksek olması halinde son kırılma yüzeyleri kesitin ortasında oluşmaktadır. Düşük anma gerilmelerinde ise, ikinci çatlak oluşumu birinciye göre gecikme gösterdiğinden son kırılma yüzeyi genellikle ortada değildir.

Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğme) sonucu oluşan yorulma çatlaklarının temel şekilleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu şekiller çekme veya tek taraflı eğmeye çok benzer olabilirler ancak çatlakın ilerlemesi her ikisinden de daha hızlıdır.



Şekil 3.11. Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri. (Tauscher H. 1971)

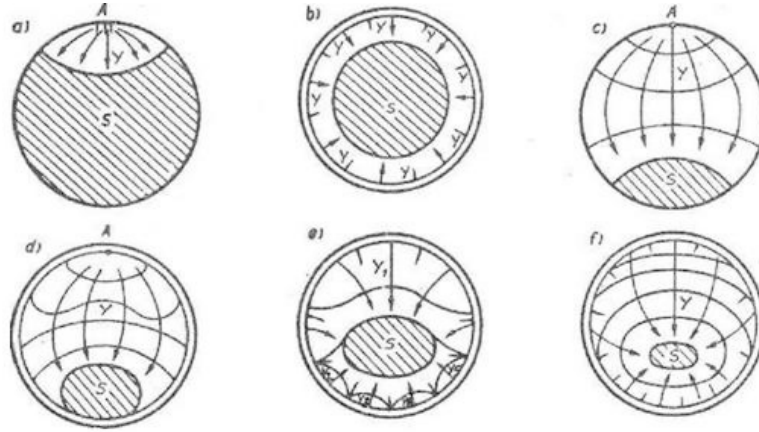
Y: yorulma çatlak; **S:** son kırılma yüzeyi, Çekme zorlaması altında yorulma kırılması - "Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf. Çekme zorlaması altında yorulma kırılması . *Anma gerilmesi yüksek tüm çevrede zayıf bir çentik etkisi, çatlak cephesinin kenarları daha hızlı ilerliyor.

a) Çekme zorlaması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Cephe kenarları daha da hızlı ilerliyor.

b) Çekme düşük anma gerilmesi. Küçük bir yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça çatlak cephesi A etrafında daireler şeklinde ilerliyor.

c) Çekme düşük anma gerilmesi. Zayıf fakat çevresel olan çentik etkisi nedeniyle çatlak cephesi kenarları hızlı ilerliyor.

d) Çekme düşük anma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Son kırılma hemen hemen tümüyle yorulma çatlak ile çevrilmiş.



Şekil 3.12. Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları(Tauscher H. 1971).

- a) Yüksek anma gerilmesi yerel çentik etkisi.
- b) Yüksek anma gerilmesi tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.
- c) Düşük anma gerilmesi yerel çentik etkisi.
- d) Düşük anma gerilmesi tüm çevrede zayıf çentik etkisi.
- e) Düşük anma gerilmesi tüm çevrede zayıf çentik etkisi.
- f) Düşük anma gerilmesi tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Çekme veya eğme zorlamalarında görülen yorulma kırılmalarında kırık yüzeyi daima gerilmelere dik yönde oluşur. Aynı anda etkiyen kayma gerilmelerinin yorulma çatlağının ilerlemesinde hiçbir katkısı yoktur. Buna karşın kayma gerilmeleri sünek malzemelerde son kırılmayı etkileyebilir. Bu durumda son kırılma normal gerilmeye göre 45° açı ile oluşur.

Burma zorlaması sonucu meydana gelen yorulma kırık yüzeyleri, görünüşleri bakımından çekme ve eğme zorlaması kırıklarından çok farklıdır. Ayrıca gösterdikleri çeşitlilikten ötürü, şematik olarak karakteristik tiplerinin verilmesi de mümkün değildir. Düzgün şekilli gevrek malzemelerde ve düzgün şekilli olmakla birlikte enine delikleri veya yüzeyinde basma kuvvetlerinin etki ettiği bölgeler bulunan sünek malzemelerde burma yorulma çatlağı mil eksenine 45° eğimle başlar. Çatlak ilerlemesi spiral şeklinde devam edebilir veya malzemenin kaymaya duyarlılığı ile zorlama durumuna bağlı olarak parça eksenine dik ya da paralel yöne dönebilir. Spiral şeklinde ve yarıklar içeren

çatlaklarda kırılan iki parça bir kavrama gibi çalışarak moment taşıyabilir. Böylece çok küçülen son kırılma yüzeyine bakarak işletme gerilmesinin seviyesi hakkında tahminde bulunulamaz.

Sünek malzemelerde görülen burma yorulması kırılmaları, eksene dik veya paralel yönde kayma kırılmaları olarak, yani kayma gerilmesinin en yüksek olduğu yönlerde ortaya çıkar. Çentik etkisinin çevresel olarak yüksek olduğu durumlarda ise (kanallar derin boyunlar v.b.) kırılma, gevrek ve sünek malzemelerin her ikisinde de eksene dik düzlemlerde oluşur. Ayrıca çevresel çentiğin birçok yerinde çatlak başlayarak halka şeklinde kesit ortasına ilerleyen bir yorulma çatlağı meydana gelir.

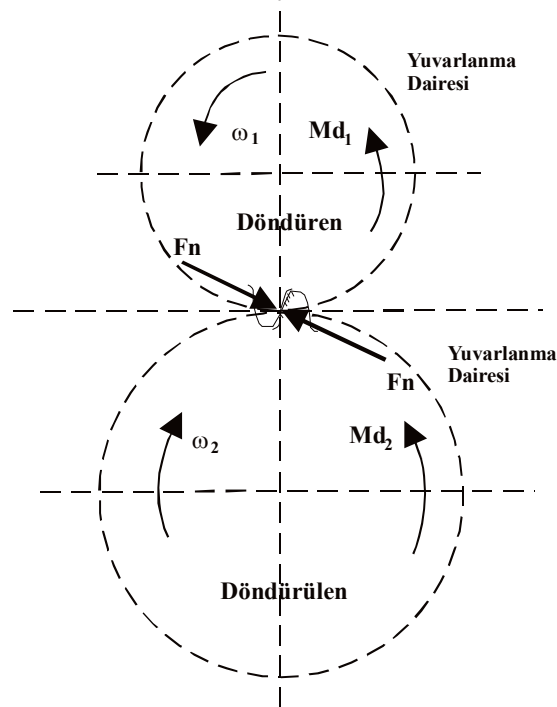
Kır dökme demirin yorulma kırığı çeliklerinkinden değişik görünümündedir. Grafit lamellerin iç çentik etkilerinden dolayı, yorulma çatlağı birçok noktadan ve çoğunlukla birçok düzlemden başlar; böylece kademeli bir kırık yüzeyi, oluşur. Son kırılma yüzeyi ise genellikle yorulma çatlağı yüzeyinden daha düzgündür.

Parçada yönleri dış zorlamaların yönünden farklı yüksek iç gerilmelerin bulunması halinde yorulma çatlağının normal oluşumundan sapmalar görülür. Ayrıca malzemenin üretim özellikleri dolayısıyla da (örneğin bantlı yapı) sapmalar olabilir. Bir parçaya değişen zorlamalar uygulandığında, anma gerilmesi malzemenin yorulma dayanımının altında olduğu halde yerel yüksek gerilmeler nedeniyle (örneğin çentik etkisi) meydana gelebilen kırılmaya, yorulma kırılması denir. Anma gerilmesinin yorulma dayanımını aşması durumunda ise yorulma ömrü hiçbir zaman sonsuz olmayıp, birkaç yüz bin ve hatta gerilmenin seviyesine bağlı olarak birkaç çevrim mertebesine kadar azalabilir. Böylece oluşan kırık yüzeyi, yorulma kırılması ile zorunlu kırılma arasında bir görünüme sahiptir. Süreli yorulma kırılması olarak adlandırılan bu durumda genellikle aynı anda birçok çatlak başlar ve sonuçta yalnız ayrılma değil, şekil değiştirme kırılması da meydana gelir. Yorulma çatlak yüzeyinin düzgün olmasına karşın, süreli yorulma çatlağı kısmen yarıklar içeren basamaklı ve taneli bir görünümündedir. Duraklama çizgileri yerine de çoğunlukla daha büyük aralıklı çıkıntılar oluşur. Tüm yorulma kırılmalarında çatlağın ilerlemesi sırasında kalan kesitin gittikçe küçülmesi sonucu çoğunlukla gerilme arttığından, yorulma çatlağı ile zorunlu kırılan son kırık yüzeyi arasında belirgin bir süreli yorulma çatlağı görülür. Kırık yüzeyinin incelenmesiyle zorlama şekli, seviyesi ve çatlak oluşumu hakkında bilgiler elde edilerek

hasara öncelikle aşırı yüklemenin mi, yoksa yüzeyden veya içerden başlayan bir çentik etkisinin mi neden olduğu anlaşılabilir (Tauscher H. 1971).

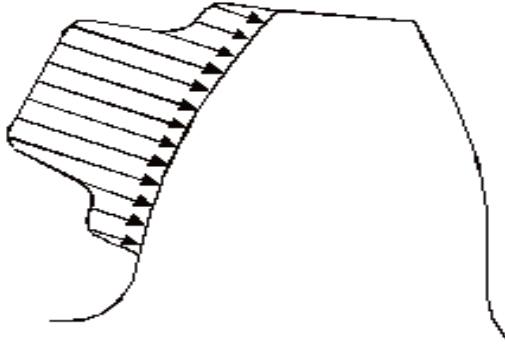
3.9.4. Diş kuvvetleri, statik ve dinamik kuvvetler ve zorlanmalar

Dişlilerle ilgili herhangi bir çalışmaya başlamadan önce diş kuvvetleri, bu kuvvetlerin kaynağı ve sınıflandırılması ile bu kuvvetlerin sebep olduğu zorlanmaların doğru olarak bilinmesinde büyük yarar vardır. Eş çalışan düz alın dişli çark mekanizmasında temasta olan diş çifti veya çiftlerinde dişlerin birbirine uygulamakta olduğu kuvvete, sürtünme kuvveti ihmal edilirse, diş normal kuvveti denir (Şekil 3.13). Birden fazla diş çifti temasta ise bu kuvvet diş çiftleri arasında paylaşılır.

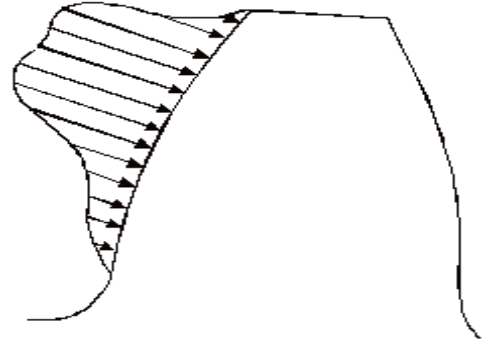


Şekil 3.13. Diş normal kuvveti (Aydeniz, 2001).

Diş normal kuvvetinin iletilmekte olan güçten kaynaklanan bileşenine (bölümüne) statik yük denir. Örnek olarak; iletilmekte olan güç ve hız sabit ise (döndürme momentleri Md_1 , Md_2 sabit) kavrama oranı 2'den küçük bir evolvent dişlinin dışında bu kuvvetin durumu Şekil 3.14.'deki gibidir.



Şekil 3.14. Döndürme momentinin sabit olduğu durumda dişe etkiyen kuvvet.

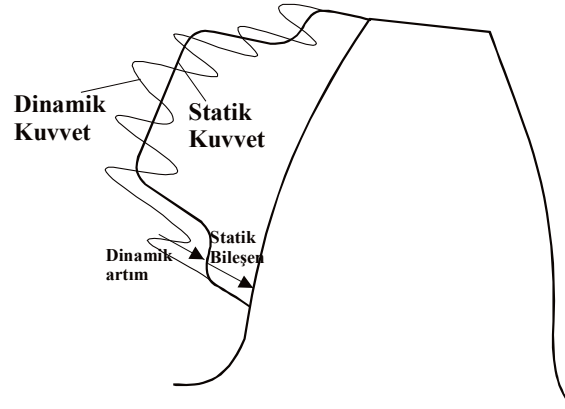


Şekil 3.15. Döndürme momentinin sabit olmadığı durumda dişe etkiyen kuvvet.

Eğer döndürme momentleri dişin temasta olduğu süre içinde bir değişim gösterirse Şekil 3.15'deki durumda olabilir. Temasta olan diş çiftlerine gelen kuvvetin bileşkesi olan kuvvet (Şekil 3.13'deki F_n kuvveti) sabit olan bile diş çiftleri arasındaki yük paylaşımının sonucu olarak her bir dişe gelen kuvvetin değiştiği (Şekil 3.14) görülecektir. Bu kuvvetin dişte oluşturduğu zorlanmalar da değişecektir. Diş kuvvetindeki bu değişimin nedeni dişli çiftinde mevcut olan düzgünsüzlükler olmadığı için bu durumda da bu kuvvetler ve zorlanmalar statik kuvvet ve zorlanma olarak algılanmalıdır. Burada statik kelimesi bu konuya özgü özel anlamı ile anlaşılmalıdır.

Dişli çiftinin temas noktasında ortaya çıkan kuvvetin dişli mekanizmasının kendine ait bazı düzgünsüzlüklerden kaynaklanan, negatif veya pozitif olabilen bir bileşeni vardır. Dişli çarklarda mevcut olan düzgünsüzlükler; imalattan kaynaklanan profil, taksimat ve diş doğrultusu hataları, temasta olan diş çifti sayısında periyodik olarak ortaya çıkan değişim, diş çiftinin bir yay gibi düşünüldüğünde yaylanma sayısının temas boyunca değişimi olarak sınıflandırılabilir.

Dişli çark çifti ideal geometriye sahip olsa bile, son iki düzgünsüzlük yine de sistemde mevcuttur. Çalışma sırasında bu düzgünsüzlükler iletilmekte olan güç ile ilgili hareketler (dönme hareketleri) ile eklenen bazı ek hareketlere neden olur (dinamik davranış). Dinamik davranış sonucu oluşan ek kuvvetler (dinamik artım) statik bileşene eklenir. Sonuç olarak diş çiftini ya da çiftlerini etkileyen ve statik kuvvet ile dinamik artımın bileşkesi olan kuvvete dinamik kuvvet ve bu kuvvet etkisinde oluşan zorlanmalara dinamik zorlanma denir (Şekil 3.16). Dinamik kuvvet = Statik bileşen + Dinamik artım (Aydeniz, 2001).



Şekil 3.16. Dinamik kuvvetin bileşenlerinin gösterimi (Aydeniz, 2001).

4. ALAŞIMLI ÇELİKLER

Çelikler demir-karbon alaşımları olup, diğer bazı alaşım elementlerini de bileşimlerinde bulundurlar. Çok farklı bileşimde ve/veya değişik ısıl işlem uygulamalarına tabi tutulmuş binlerce çelik türü vardır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah, normalizasyon vb.) ile içyapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik elde edilir.

4.1. Alaşımli Çeliklerin Sınıflandırılması

Alaşım çelikleri bileşiminde sade karbonlu çeliklerde belirtilen oranları aşan veya özel maksatla bünyesinde diğer alaşım elementlerinden bir veya birden fazla bulunan çeliklerdir. Bileşimindeki karbon dışında alaşım elementlerinin toplamı %5'i geçmeyen çelikler az alaşımli, %5'i aşan çelikler yüksek alaşımli çelikler ve mikroalaşımli çelikler olarak sınıflandırılır. Alaşım elementleri çeliklerin mekanik ve işleme özelliklerini geliştirir. Alaşımli çeliklerde karbon çelikleri için belirtilen değerlerin üzerinde manganez, silisyum veya bakır bulunur veya bir veya daha fazla alaşım elementleri belirlenmiş aralıklarda bulunur (Baydoğan vd. 2003).

Çeliklerde karbon dışında çok kullanılan alaşım elemanları şunlardır; krom (Cr), manganez (Mn), Nikel (Ni), volfram (tungsten) (W) vanadyum (V), kobalt (Co), bakır (Cu), alüminyum (Al), magnezyum (Mg), kurşun (Pb), bizmut (Bi), berilyum (Be), kalay (Sn), bor (B), silisyum (Si), titanyum (Ti), tantalyum (Ta), zirkonyum (Zr), niyobyum (Nb).

4.1.1. Az alaşımli çelikler

Alaşımli çelikler alaşım elementi ve elementlerinin toplamı % 5'den az olan, genellikle su verilip temperlendikten sonra (ıslah edilmiş durumda) kullanılan çeliklerdir. Tokluk, mukavemet, korozyon direnci, gibi özelliklerin arandığı servis koşulları için daha ucuz olan alaşımsız çeliklere göre tercih edilirler. Az alaşımli çelikler alaşım çeliklere oranla daha yüksek sertleşme özelliğine sahip ve aynı zamanda ısıl işlem sırasında daha düşük çatlama ve çarpılma eğilimindedirler. Az alaşımli çeliklerin bileşiminde ana alaşım elementi olarak Mn, Ni, Cr, Mo ve W bulunur. Bu çeliklere V, Co, B, Cu, Al, Pb, Ti ve Nb gibi alaşım elementleri de ilave edilebilir.

Çizelge 4.1’de bazı az alaşımlı çeliklerin tipik mekanik özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir (Baydoğan vd. 2003).

Çizelge 4.1. Bazı az alaşımlı çeliklerin tipik mekanik özellikleri ve kullanım alanları (Baydoğan vd. 2003).

AISI/SAE Simgesi	Nominal Bileşim, % ağı.	İşlem Durumu	Akma Mukavemeti, MPa	Çekme Mukavemeti, MPa	Kopma Uzaması, %	Tipik Uygulama Alanı
Manganezli çelikler						
1340	0.40 C, 1.75 Mn	Tavlanmış Temperlenmiş*	435 1421	704 1587	20 12	Kalıp, makas bıçağı, makine parçaları, yüksek mukavemetli civata
Kromlu çelikler						
5140	0.40 C, 0.80 Cr, 0.80 Mn	Tavlanmış Temperlenmiş*	297 1449	573 1580	29 10	Otomobillerin transmisyon dişlisi, hava tabancası kalemleri
5160	0.60 C, 0.80 Cr, 0.90 Mn	Tavlanmış Temperlenmiş*	276 1773	725 2000	17 9	Otomobil amortisör ve yayları
Krom-Molibdenli çelikler						
4140	0.40 C, 1.0 Cr, 0.90 Mn, 0.20 Mo	Tavlanmış Temperlenmiş*	421 1433	655 1550	26 9	Uçak türbin dişlisi, transmisyon dişlisi, traktör paleti
Nikel-Molibdenli Çelikler						
4620	0.20 C, 1.83 Ni, 0.55 Mn, 0.25 Mo	Tavlanmış Normalleştirilm iş	373 366	517 573	31 29	Transmisyon dişlisi, zincir halkası, şaftlar, rulmanlar
4820	0.20 C, 3.50 Ni, 0.60 Mn, 0.25 Mo	Tavlanmış Normalleştirilm iş	462 488	683 690	22 60	Çelik tesislerindeki ekipman dişlileri, kağıt makineleri, madencilik makineleri
Nikel (%1.83) - Krom-Molibdenli Çelikler						
4340	0.40 C, 1.83 Ni, 0.90 Mn, 0.80 Cr, 0.20 Mo	Tavlanmış Temperlenmiş*	469 1587	745 1725	22 10	Büyük kesitli parçalar, iniş takımları, kamyon parçaları, şaftlar, sıcak iş kalıbı
Nikel (% 0.55) - Krom-Molibdenli Çelikler						
8620	0.20 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Tavlanmış Normalleştirilm iş	407 359	531 635	31 26	Transmisyon dişlileri
8650	0.50 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.25 Mo	Tavlanmış Temperlenmiş*	386 1552	710 1725	22 10	Küçük makinelerin aksları, şaftlar, sıcak iş kalıpları

* Temperleme sıcaklığı: 315 °C.

4.1.2 . Yüksek alaşımlı çelikler

Yüksek alaşımlı çelikler, alaşım elementi ve/veya elementlerinin toplamı % 5'den yüksek olan çeliklerdir. “Paslanmaz Çelikler” ve “Takım Çelikleri” bu gruba giren en önemli çelik türlerine örnek verilebilir (Baydoğan vd. 2003).

4.1.3. Mikroalaşımlı çelikler

Bu gruba, az karbonlu, bileşiminde düşük oranlarda alaşım elementi bulunan ve genellikle yassı mamul üretiminde kullanılan çelikler girmektedir. Yüksek mukavemetli az alaşımlı (HSLA) çelikler, çift fazlı (DF) çelikler, arayer atomsuz (IF) çelikler mikroalaşımlı çeliklere örnek olarak verilebilir (Baydoğan vd. 2003). Mikroalaşımlama terimi, çok düşük oranlarda Nb, V ve Ti ilavesi anlamına gelir. Genelde mikroalaşımlama, çok düşük karbon içeren çeliklerden hemen hemen ötektoid kompozisyonlu çeliklere kadar yapılır. Mikroalaşımlı çelikler aynı anda değişik sertleştirme mekanizmalarının ve uygun termomekanik işlemlerin uygulanması ile yüksek dayanım, yüksek tokluk, düşük sıcaklıkta gevrek kırılma emniyeti, mükemmel kaynaklanabilirlik ve korozyona dayanım gibi değişik, çok iyi özelliklere sahip bir malzeme grubudur. Yassı ve dövme mamuller şeklinde üretilirler. Uygulama yoğun olarak yassı mamullerde (gaz ve petrol boru hatları, of-shore konstrüksiyonlar) gerçekleşir. Son yıllarda otomotiv endüstrisine yönelik dövme mamullerin üretiminde de bir gelişme vardır. Bugün, bu çelikler, kontrollü haddelenmiş plakalar, levhalar, profiller, dövme ürünleri olan çubuk ve barlarda kullanılmaktadır.

4.2. Çelik tipleri

Endüstrinin yaygınlaşmasına bağlı olarak geliştirilen çok sayıda ve çok farklı tipte çelik tipleri geliştirilmiş ve üretilmektedir.

4.2.1. Yapı çelikleri

Sertleştirme işlemi öngörülmeleyen genel olarak konstrüksiyon çelikleri olarak düşünülen yapı çelikleri, kullanım yerine göre çekme dayanımları ve akma sınırı değerleri göz önünde tutularak, örneğin çelik konstrüksiyon, köprü yapımı, basınçlı kap ve donanımları, taşıt yapımı ve makine konstrüksiyonlarında kullanılırlar. Bu çelikler daha çok haddelenmiş halde, fakat kısmen de normal tavlı olarak kullanılırlar. Bu

nedenle, haddeleme ısısından yapılan ısıl işlem bu çeliklerde daha fazla önem taşımaktadır. İyi kontrol edilen haddeleme sıcaklığından yararlanılarak yapılan normal tavlama da oldukça iyi dayanım özelliklerine ulaşılabilir. Kontrollü haddeleme tarzında uygulanacak termomekanik işlemle ise iyileştirilmiş mekanik özelliklere, özellikle çentik darbe dayanımına ulaşmak olanaklıdır. Bunun yanında yeterli süneklilik ve gerektiğinde tokluk aranır. Bu çeliklerin en başta kaynak olmak üzere, talaş kaldırma, soğuk şekil verme (örneğin bükme, zımbalama, derin çekme) gibi bazı imal usulleri ile ilgili teknolojik özellikler aranan çalışma alanlarında çok önemli yer alırlar (Baydoğan vd.2003).

4.2.1.1. Genel yapı çelikleri

Genel yapı çelikleri deyimi çok geniş uygulama alanında kullanılan çelikleri içine alır. Toplam çelik üretimi içerisinde en büyük paya sahiptirler. Alaşımız ve kütle çeliği olarak, sıcak biçimlendirmeden sonra normalleştirilmiş, bazen de soğuk biçimlendirilmiş durumda kullanılırlar. Çekme dayanımına göre ifade edilen yapı çelikleri, öncelikli olarak çekme gerilmeleri ve akma sınırı değerleri dikkate alınan, çelik konstrüksiyon, köprü yapımı, basınçlı kap ve donanımları, taşıt imalatı ve makine konstrüksiyonlarında kullanılmak üzere tercih edilir. Genellikle ısıl işlem için öngörülmezler, karbon içerikleri % 0.25 den az olan çeliklerdir, en az çekme dayanımları 290 N/mm^2 'den 670 N/mm^2 'ye, en az akma gerilmeleri de 175 N/mm^2 'den 365 N/mm^2 'ye kadar değişir. İyapıları ferritik-perlitiktir. Dayanım değerleri; katı çözültü sertleşmesi, tane inceliği, perlit oranı gibi faktörlerin ortak etkimesi ile artar. (Baydoğan vd.2003).

4.2.1.2. Beton çelikleri

Beton çelikleri ülkemizde JIS G 3112 ve ASTM A 615 standartlarında kullanılırlar. Bunların kalite sınıfları da benzer olarak kimyasal bileşim ve mekanik özelliklere göre tanımlanırlar.

Beton çeliklerinden; yüksek akma gerilmesi, iyi kaynak edilebilirlik, tokluk ve süneklilik istenir. Yüksek akma gerilmesinin diğer özelliklerle birlikte sağlanması klasik

4.2.2. Otomat çelikleri

Çelikten imal edilmiş malzemelerden istenen özellikler arasında talaşlı işlenebilirlik kabiliyeti çok önemlidir. İmalatlarda, yüksek kesme hızları ve buna bağlı olarak işlem zamanı, takım ömrü, iyi yüzey kalitesi, daha düşük kesme kuvvetleri kullanarak sağlanacak enerji tasarrufu gibi kriterler, diğer faktörlerle birlikte malzeme kalitesiyle de direkt alakalıdır. Belirtilen kaliteyi oluşturmak amacıyla otomat çelikleri geliştirilmiştir. Otomat çelikleri karbon oranı %0,07-0,60 arasında değişen ve kükürt (S) oranı %0,15 ile %0,40, fosfor (P) oranı %0,07-0,10 arasında olan çeliklerdir. Kükürt ve fosforun diğer tüm kalitelerde azaltılmaya çalışmasına karşın, talaşlı işlem kabiliyetini artırmasından dolayı otomat çelikleri içine özellikle ilave edilir. İlave edilen bu elementler malzemede metalik kırılmalık sağlayarak, kısa kırılmalık talaş oluşumunu sağlar. Bunun yanı sıra S ve P ilavesi yağlama etkisi yaparak, parça dayanımının artmasına, temiz yüzey elde edilmesine imkan tanır. Otomat çelikleri Pb ile alaşımlandırılmış şekilde de bulunabilir. Eklenen Pb çeliğin mekanik özelliklerini değiştirmemekle birlikte yağlama özelliğini artırır. Otomat çeliklerinin ıslah edilebilme ve sementede edilebilme özellikleri de vardır (Baydoğan vd. 2003).

4.2.3. Islah çelikleri

Islah çelikleri, % 0.2- 0.65 C içeren sertleştirmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımlı ve alaşımsız makine imalat çelikleridir. Islah işlemi, sonuçta çelik parçaya yüksek tokluk özelliğinin kazandırılacağı önce bir sertleştirme ve arkasından temperleme işlemlerinin bütünü olarak tarif edilir. Islah çelikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı, çeşitli makine ve motor parçaları, dövme parçalar, çeşitli civata, somun, krank milleri, akslar, çeşitli miller, dişliler gibi parçaların imalinde olmak üzere geniş alanda kullanılırlar. Bu nedenle, ıslah çelikleri inşaat ve alaşımsız çeliklerden sonra, en çok üretilen ve kullanılan çelik türüdür (Baydoğan vd. 2003).

Sertleştirme ıslah işlemlerinin ilk işlemidir, çelik parçanın östenit faz sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutularak, uygun bir ortamda hızla soğutulması yani martensite dönüştürme işlemidir. Östenit sıcaklığında tutma süresini,

çelik parçanın östenit fazda homojen bir yapıya ulaşması belirler ve bu süre çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. Sertleştirme sonrası elde edilen martensit yapı birçok uygulama için fazlasıyla sert ve gevrekler. Aynı zamanda östenitin martensite dönüşümü, parçada yüksek gerilimler bırakır. Bu nedenlerden dolayı, parçanın iç gerilimlerini ve gevrekliğini gidererek tok bir yapı kazandırmak için temperleme işlemi uygulanır.

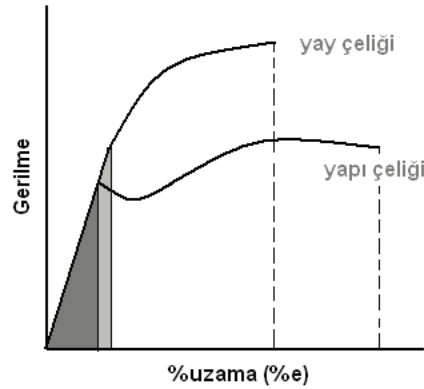
Temper gevrekliğine tane sınırlarındaki bazı faz çökeltmeleri neden olabilir. Yüksek Mn, P ve Cr temper gevrekliği duyarlılığını artırırken, Mo gevrekliği azaltıcı etki yapmaktadır. Bu nedenle ıslah çeliklerinin birçok kalitesi bileşiminde Mo bulundurur (Baydoğan vd. 2003).

4.2.4. Yay çelikleri

Çeşitli kesitlerde olabilen yayların imalatında kullanılan çeliklerdir. Bu çeliklerin C oranları yapı çeliklerine göre daha yüksektir ve takım çeliklerinin C oranlarına göre de alt sıralardadır. “Akma sınırı/Çekme dayanımı” oranının yüksek ve elastisite modülünün kararlı olması gereken, su alabilen çeliklerdir. Yayların yapımında kullanılan çelik malzemeler, çalışma koşullarına göre değişmektedir. Yayların çalışma koşullarında yüklemeler: çekme, basma ve burkma (ters döndürme) şeklinde olabilir. Yay malzemesi olarak kullanılacak çeliklerde istenilen özellikler, yeterli yük dayanımı, iyi esneklik, kırılmaya karşı sınırsız emniyet şeklinde tariflenebilir. Bu özellikler ancak uygun çelik seçimi ve ısı işlemi ile mümkün olabilir. Yük dayanımının artırılması ile malzemenin sünekliğini kaybetmemesi esastır.

Esnek parçaların üretimi hususunda dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri parçaların kaynak edilmesinin sakıncasıdır. Bunlara ek olarak; yüzey çentik etkisi, ısı işleminden kaynaklanabilecek iç çatlaklar, yüzeyde oluşan ve malzemenin homojen sertliğini bozar etkideki dekarbürasyon gibi olaylar, kırılma etkisini artıran sebepler olarak belirtilebilir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün hassasiyeti, termokimyasal sertleştirme (nitrürasyon), kumlama gibi işlemler kırılma tehlikesini azaltıcı işlemler olarak söylenebilir. Çelik malzemeye şekil verme işlemi oda sıcaklığında gerçekleşirse, yüksek oranda eğilme gerilmeleri meydana gelir ki, bu durum üretilen parçanın esnekliğini düşürür. Bu sebeple şekil verilmiş parçaların düşük

sıcaklıklarda tavlanması uygun olur (Baydoğan vd. 2003, cems.com.tr). Şekil 4.2’de yapı çeliği ve yay çeliklerine ait gerilme-% uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.2. Yapı çeliği ve yay çeliğinin gerilme-%uzama diyagramları (cems.com.tr).

4.2.5. Sementasyon çelikleri

Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalatında kullanılan, düşük karbonlu ($\%C < 0,2$), alaşımlı ve alaşımsız çeliklerdir. Parçaya özelliklerin kazandırılması, çelik yüzeyine karbon emdirilmesi suretiyle olur. Sementasyon işlemi sonrasında, çekirdek bölgesi yumuşaklığını koruyacağından, sertleştirme sırasında ortaya çıkabilecek çarpılmalar oldukça azdır. Sementasyon çelikleri, dişliler, miller, piston pimleri, zincir baklaları, zincir dişlileri ve makaraları, diskler, klavuz yatakları rulmanlı yataklar, merdaneler, bir kısım ölçü ve kontrol aletleri, orta zorlamalı ve zorlamalı parçalar, soğuk şişirilerek ve fişkırtılarak (ekstürüzyon) şekillendirilen parçalar, kesici takımlar gibi parçaların imalinde kullanılan çelik türüdür .

Alaşımsız veya düşük alaşımlı olan bu çelikler; hem kütle halinde üretilen kaliteli çelik hem de asil çelik sınıfından olabilirler. Oksijen konverterlerinde, Siemens Martin ocaklarında ve elektrik ocaklarında üretilerek sönük olarak dökülürler ve haddeleme, dövme ve presleme yoluyla sıcakta şekillendirilirler. Sementasyon çelikleri piyasaya sıcakta haddelenmiş veya dövülmüş olarak blum, slab, kütük, yuvarlak, dört köşe, altı köşe, lama şeklinde çubuk; filmaşın, sıcak çekilmiş saç, band ve geniş lama; dikişsiz

boru, elde veya kalıpta dövülmüş parçalar halinde verilirler. Sıcakta şekillendiği gibi; yumuşatma tavı görmüş; belirli bir dayanım verecek biçimde su verilmiş veya belirli ferritik-perlitik yapı elde edecek biçimde tavlanmış olarak teslim edilirler. Yapıları esas olarak ferritik-perlitiktir (Alkın 1993).

4.2.6. Nitrasyon çelikleri

Nitrasyon bir yüzey işlem prosesidir. Çelik parça yüzeyine azot atomlarının ara yer atomu olarak gönderilmesi ile yüzeyde sert bir tabakanın oluşturulması esasına dayanır. Her malzemenin bir nitrasyon kabiliyeti vardır. Nitrasyon bazı çeliklerde korozyon direnci ve yorulma dayanımını artırır. Bazı çeliklerde ise korozyon direncini düşürür. Düşük sıcaklıkta uygulanması ve yüksek soğuma hızı gerektirmemesi nedeni ile parçalarda çarpılma minimum seviyededir. Nitrasyon çeliği olarak tanımlanan bu çelikler de çelik grupları içinde, diğer yüzey sertleştirme işlemlerinde olduğu gibi çekirdek özelliklerinin iyi olduğu ve ıslah edilebilir çeliklerin oluşturduğu bir gruptur. (Alper ısıtım San. Ve Tic. A.Ş. www.alper.com.tr).

Örneğin takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, yüksek mukavemetli çelikler ve paslanmaz çelikler birçok uygulama alanı bulmuştur. Araç ve makine yapım endüstrisinde kullanılan parçalar için düşük alaşımlı bir çok çeliğe ve sementasyon ve ısıtım işlem uygulanabilen ıslah çeliklerine nitrasyon işlemi diğer çeliklere oranla daha yaygın olarak uygulanır.

Genel olarak tüm çelikler için nitrasyon sıcaklığı 495-580°C arasında değişir. Nitrürleme işlemi Al, Cr, Mo, Ti ve V gibi nitrür oluşturan elementleri içeren çeliklere uygulanmaktadır. Nitrasyon çelikleri birçok yöntemle nitrürlenebilirler. Bu yöntemler tuz banyosunda nitrasyon, gaz nitrasyon, iyon nitrasyonu, plazma nitrasyonu gibidir. Nitrasyon sonucunda oluşturulan nitrürleme tabakası, difüzyon tabakasından ve nitrür bileşiklerinden meydana gelir. Genellikle nitrür tabakası 50µm den daha yüksek kalınlıklara sahiptir. Demir tamamiyle demirnitür veya demirkarbonitüre dönüşür. Difüzyon tabakasının sertliği nitrürleme sıcaklığına ve çeliklerin kimyasal bileşimine bağlıdır. Örneğin alaşımlandırılmamış ısıtım uygulanabilen çelikler yaklaşık 400 HV sertlik değerine kadar sertleştirilebilir. Bununla birlikte Cr, Mo, V, Al gibi sert nitrür oluşumunu sağlayan alaşım elementlerinin ilavesi ile bu çelikler 1100 HV sertlik

değerine ulaşırlar. Ayrıca çelik içerisindeki karbon içeriğinin azalmasıyla nitrasyon tabakasının sertliğinde artış elde edilebilir (Baydoğan vd. 2003)

4.2.7. Yüksek mukavemetli az alaşımlı çelikler (hsla çelikleri)

Çeliklerin şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, tokluk, mukavemet vb. özelliklerinin iyileştirilmesi için, çeliklerin bileşiminde bazı değişiklikler yapılarak ve mikro alaşımlama teknikleri ile ve ısı veya termomekanik işlemlerle malzeme mikro yapısı ve dağılımı kontrol edilmiş “Yüksek Mukavemetli Az Alaşımlı Çelikler” - HSLA - yaygın adıyla tanınan çelikler geliştirilmiştir. İlk defa ABD ‘de geliştirilen bu çelikler karbonlu yapı çeliklerinden daha yüksek mukavemetlere sahip olan çeliklerdir. Fakat bu çeliklerin yüksek mukavemet düzeylerinin (275 - 760 MPa) yanında üstün özellikleri de vardır. Bu çeliklerin ilk geliştirilme nedeni, bunları en çok kullanan sanayi dalı olan taşıma araçları ve gemi yapım sanayiinde, mukavemet - ağırlık oranı daha yüksek olan çelikler kullanarak ağırlıktan, dolayısıyla enerjiden kazanmaktı (Baydoğan vd. 2003).

4.2.8. Paslanmaz çelikler

Paslanmaz çelikler, % 12’den daha yüksek oranda Cr içeren ve bir çok ortamda üstün korozyon direnci gösteren çelik türüdür. Klasik teoriye göre, bileşiminde bulunan Cr, yüzeyde ince oksit tabakası oluşturarak çeliği korozyondan korumaktadır. Kristal yapıya ve sertleştirme mekanizmasına bağlı olarak paslanmaz çelikleri; ferritik paslanmaz çelikler, martensitik paslanmaz çelikler, Ostenitik paslanmaz çelikler ve çökeltme ile sertleşen paslanmaz çelikler olmak üzere dört gruba ayırmak mümkündür.

4.2.9. Takım çelikleri

Takım çelikleri, sıcak veya soğuk haldeki iş parçasını kesme, dövme vb. yöntemlerle şekillendiren takım ve kalıpların yapımında kullanılan çelik grubudur. Yüksek nitelikte üretilen takım çelikleri, takım ve kalıp yapımı dışında spesifik özellik isteyen makine parçalarının imalatında da kullanılmaktadır. Diğer sınıflardaki çeliklere göre daha ağır çalışma koşullarında kullanılan takım çeliklerinden düşük veya yüksek sıcaklıklardaki kullanımları sırasında yüksek hızlarda ve yüksek gerilmelerde deforme olmaksızın, kırılmaksızın ve aşınmaksızın, sürekli aynı performansı göstermeleri istenir. Çalışma koşullarının gerektirdiği özellikler, karbonun yanı sıra bileşimde bulunan alaşım elementleri ile sağlanır. Takım çelikleri, bileşimlerinde % 50’ye varan oranlarda

alaşım elementleri içerebilir. Bu çeliklere üstün özellikler kazandıran başlıca alaşım elementleri; Cr, Mo, V, W ve Co'tır. Bileşimde Mn, Ni ve Si'un yanı sıra Al, Ti ve Zr gibi tane küçültücü elementler de bulunabilmektedir. Empürite elementleri olan P ve S'ün en çok % 0.03 düzeyinde bulunmasına izin verilir. P ve S miktarı ne kadar düşük olursa çeliğin niteliği o kadar yükselir. Günümüzde 100'den fazla farklı bileşim ve özellikte takım çeliği mevcuttur (Baydoğan vd. 2003).

4.2.10. Ray çelikleri

Demiryolu rayları çok değişik iklim, sıcaklık, yük ve hızlar altında çalışmak ve yüksek gerilimlere dayanmak üzere tasarlanırlar. Bu nedenle demiryolu raylarının üretiminde kullanılan çelikler üstün mekanik özellikler taşımak zorundadır.

Tren tekerleklerinden raylara iletilen hızlanma yavaşlama ve yol alma sırasında oluşan aksel yükler yüksek dinamik gerilmelere, yüksek deformasyon ve temas bölgesinde deformasyon sertleşmesine neden olurlar. Bu nedenle, ray çeliklerinin en önemli özellikleri temas bölgesindeki mekanik özellikleridir. Bu mekanik özellikler arasında akma mukavemeti, çekme mukavemeti (700-1300 MPa), yorulma dayanımı, deformasyon sertleşmesi davranışı ve deformasyon davranışı sayılabilir (Baydoğan vd. 2003).

Haddelenmiş olarak kullanılan rayların birçoğu sade karbonlu çelikten veya Cr ve düşük miktarlarda V ve Mo içeren düşük Mn içeriğine sahip çeliklerden yapılmaktadır.

4.2.11 Çeliğe uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri

Bazı uygulamalarda kullanılan çelik parçaların (dişli, mil yapımında kullanılan düşük C'lu çelik) hem aşınma direncinin hem de darbe dayanımının yüksek olması istenir. Bunun için söz konusu parçaların yüzeylerinin sert, iç veya merkez bölgelerinin ise nispeten yumuşak olması gerekir.

Bu durumu sağlamak için parçalara yüzey sertleştirme işlemi uygulanır. Çelik parçaların yüzeyleri genelde karbürleme (sementasyon), nitrürleme (nitrürasyon), alev ve endüksiyon yöntemleriyle sertleştirilir. En uygun yöntemin seçiminde parçanın kimyasal bileşimi, şekil ve boyutları dikkate alınır. Bu çalışmada yüzey sertleştirme yöntemlerinden karbürleme yüzey işlemi uygulandığından aşağıda bu konuya yer verilecektir.

4.2.11.1. Sementasyon

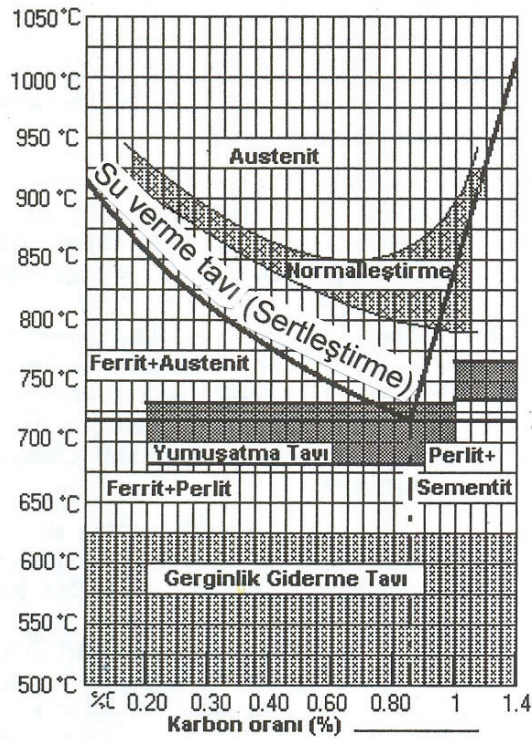
En eski ve en yaygın olarak kullanılan yüzey sertleştirme metotlarından birisidir. Sementasyon işleminde, düşük karbonlu çelikten yapılmış, hemen hemen veya tamamen bitmiş bir halde olan parça karbon verici gereçler içinde tavllanır. Yani düşük karbonlu çelik parçasının yüzeyine karbon emdirilmesi işlemidir. Bu işleme sementit teşekkülü dolayısıyla “karbürizasyon” veya “sementasyon” denilir. Böylece parçanın yüzeyi karbon bakımından zenginleşerek akabinde yapılan su verme işlemi sonunda martenzitik dönüşüme uğrayarak sertleşir. Düşük karbonlu çeliklerden (0.25 C) üretilen makine parçaları, sementasyon ile yüksek karbonlu sert bir yüzey (0.8-0.9 C) ve düşük karbonlu tok bir merkeze sahip olmaktadır. Aynı zamanda, yüzey ve merkezin, farklı hızlarda soğumaları ve oluşan mikroyapıların farklı olması, genellikle yüzeyde basma, merkezde ise çekme kalıntı gerilmeleri oluşturmaktadır. Yüzeyde oluşan basma kalıntı gerilmeleri, eğme ve burma zorlamalarında faydalı olmaktadır. Sementasyon işlemi, aşınma direnci, eğme ve burma yorulma dayanımı ile temas yorulma dayanımının yüksek olmasını da sağlamaktadır (Parish, 1999).

Söz konusu çeliklerin sementasyonu, karbon verici bir ortamda ve Ac_3 çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta uygun bir süre tutularak gerçekleştirilir (Şekil 4.3). Fe-C denge diyagramına bakıldığında karbonun ferrit içerisindeki en yüksek çözünme oranının %0,025, ostenit içerisindeki çözünme oranının ise %2,0 dolayında olduğu görülür (Şekil 4.3). Bu nedenle, semente edilecek çelik parçalar ostenit bölgesinde 900-950°C arasındaki bir sıcaklıkta, karbon verici bir ortamda yeterli bir süre tavlanırlar. Karbürize edici ortamdan karbonun iletimi daima bir gaz fazı yardımıyla gerçekleşir. Karbon verici ortamlar katı (odun komürü ile baryum karbonat karışımı), sıvı (erimiş siyanür banyosu) veya gaz (hidrojen ya da azotla karıştırılan karbonmonoksit, metan ve propan gibi gazlar) olabilir.

Karbürizasyon derinliği, ya çeliğin yüzeyinin altında belli bir karbon konsantrasyonuna kadar olan mesafe veya karbonun yayılmış olduğu toplam derinlik olarak tanımlanır. Zaman ve sıcaklığın yanı sıra karbürizasyon derinliğine etki eden faktörler karbürizasyon ortamının karbon potansiyeli ve çeliğin kimyasal bileşimidir. Ortamın karbon potansiyeli ne kadar yüksek ise yayınma sonrası denge haline ulaşıldığında karbürizasyon derinliği de o derece fazla olur.

İstenilen bir sementasyon kalınlığının elde edilmesi ve aynı zamanda yüzeydeki C oranının %0,8-0,9 düzeyinde tutulması için tavlama sıcaklığı ve süresinin iyi ayarlanması gerekir. Karbon oranının bu sınırı aşması durumunda, yapıda oluşan sementit ağı yüzeyin çatlamasına neden olabilir. Ancak sementasyon işlemi sonucunda yapı tamamen martensite dönüşmez ve yapıda kalıntı östenit fazı kalmaktadır. Dolayısıyla sementasyon yapılmış çeliklerin mikroyapıları, büyük ölçüde temperlenmiş martensit ve kalıntı östenitten oluşmaktadır. Sementasyon işleminden sonra yapıda bulunan kalıntı östenit gevrekliği artırıcı bir özelliğine sahip olup mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir (Parish, 1999 ; Krauss,1995).

Çelik parçasının yüzeyinden karbon kaybetmesi olayına da dekarbürizasyon (karbonsuzlaşma) olayı denilir. Dekarbürizasyon, sıcaklığın ve çelikteki karbon miktarının artması ile artar (Tabur 2003).



Şekil 4.3. Çeliklere uygulanan ısıtım sıcaklık aralıkları (Tabur 2003).

5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 8620 kalite çeliğin kimyasal bileşimi spektrofotometrik yöntemle belirlenmiş ve Çizelge 5.1’de verilmiştir. İncelenen çeliğin kimyasal bileşimi literatür değerleriyle karşılaştırılarak uyumlu oldukları görülmüştür.

Çizelge 5.1: AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi.

Çelik	Kimyasal Bileşim, % ağı.							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S
8620	0.23	0.90	0.35	0.60	0.20	0.55	0.030	0.040

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında döküm, haddelenmiş ve dövme (hadde+dövme) olarak temin edilen AISI 8620 kalite çelik Şekil 6.1’de görülen boyutlarda işlenen dişliye daha sonra semantasyon işlemi uygulanmıştır. İndüksiyon tüneline parça fazla tufal atmayacak şekilde 1050 ila 1120°C arasında ısıtılmıştır. Tane büyümesini önlemek için dövme prosesi mümkün olduğunca kısa tutulmaya çalışılmıştır. Malzeme ağırlığına göre pres gücü seçilmiştir. Min. 150 ton ile parça ağırlığına göre 4000 ton ve 10.000 ton gücündeki prese kalıp bağlanmıştır. Bu kalıp dövmeden önce ön gerilim olarak 300 ila 400°C arasında ısıtılmıştır. Daha sonra 1050 ila 1120 °C arası ısıtılan parça pres altına koyulup ilk vuruş yapılmıştır. Dövme sırasında sıcaklığın 850 °C nin altına düşmemesine dikkat edilmiştir. Dövme işleminde sonra biyetler kum içerisinde mümkün olduğunca yavaş soğutulmuştur. İşlemler Ada Mühendislik Danışmanlık Hizmetleri ve Metalurji Makina Sanayi ve Tic. Ltd.Şti.’ de yapılmıştır.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan dişli numune.

5.2.Simulasyon Çalışmaları

Yorulma sonrası kırılmanın nerede meydana geleceğinin modellenmesi yapılmıştır. Numune malzemelerin modellenmesi ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme dişli dönme sırasında diş ucundaki diş kuvveti ve diş dibi gerilme dağılımı analizi olmak üzere iki farklı modelleme yapılmıştır.

Modelleme çalışmalarında malzeme şartları AISI 8620 sıcak haddelenmiş malzeme olarak seçilmiştir. Modellemede malzeme özellikleri olarak:

Elastik Modülü (GPa) 205 GPa

Possion oranı 0.28

Tet10node92/Sollid92 eleman tipi kullanılmıştır.

Element sizes on picked lines= 5

Düğüm noktası sayısı= 124965

Elemanların sayısı= 83986

Bir diş yüzeyine $F/2$ ($43000\text{N}/\text{mm}^2$) yayılı kuvvet uygulanmıştır.

Sınır koşulları şaftlara uygulanmış ve tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır.

5.3. Isıl İşlem

Uygulanan semantasyon ısıl işleminin sıcaklık ve süreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2: İncelenen çeliğin semantasyon koşulları.

Sementasyon koşulu (sıcaklık, süre, ortam)

1. 550°C de ön ısıtma (60 dakika)
2. 920-930°C de asetilen (C₂H₂) ortamı vasıtasıyla karbürleme (25 dakika)
3. 930°C de difüzyon (120 dakika)
4. 850°C sertleştirme sıcaklığı (15-30 dakika)
5. 60°C yağda sertleştirme (15 dakika)
6. 300°C temperleme (180 dakika)

5.4. Mikroyapısal İncelemeler

Mikroyapısal inceleme için, Şekil 5.1’de görülen dişlinin diş ve göbek bölgelerinden çıkarılan numuneler, standart yöntemlerle zımparalanıp parlatıldıktan sonra % 2 Nital ile dağlanarak Nikon marka optik mikroskopta incelenmiştir.

5.5. Mekanik Deneyler

5.5.1.Sertlik ve çekme deneyleri

Sementasyon işlemiyle yüzeyi sertleştirilen 8620 kalite çelikte mikrosertlik deneyi yapılarak yüzeyden merkeze doğru sertlik dağılımı belirlenmiştir. Bu amaçla Shimadzu HMV-2 modeli cihaz (Şekil 5.2), elmas piramit uç ve 200 g yük kullanılmıştır. Mikrosertlik deneylerinde, deney sonucu en az 3 sertlik ölçümünün ortalamasını yansıtmaktadır.



Şekil 5.2. Shimadzu mikrosertlik ölçüm cihazı.

Semantasyon işlemi uygulanmış numunelerin çekme deneyleri, 100 kN yükleme kapasiteli Shimadzu AG-X marka çekme deney cihazında yapıldı (Şekil 5.3). Numuneler çeneler arasında bağlanıp gerekli parametreler (numune çap ve uzunluk) girildikten sonra 25 mm/dk sabit çekme hızında deneyler gerçekleştirildi. Söz konusu deneyler sonucunda numunelerin temsil ettiği malzemeye ait çekme mukavemeti ve % uzama değerleri belirlenmiştir.

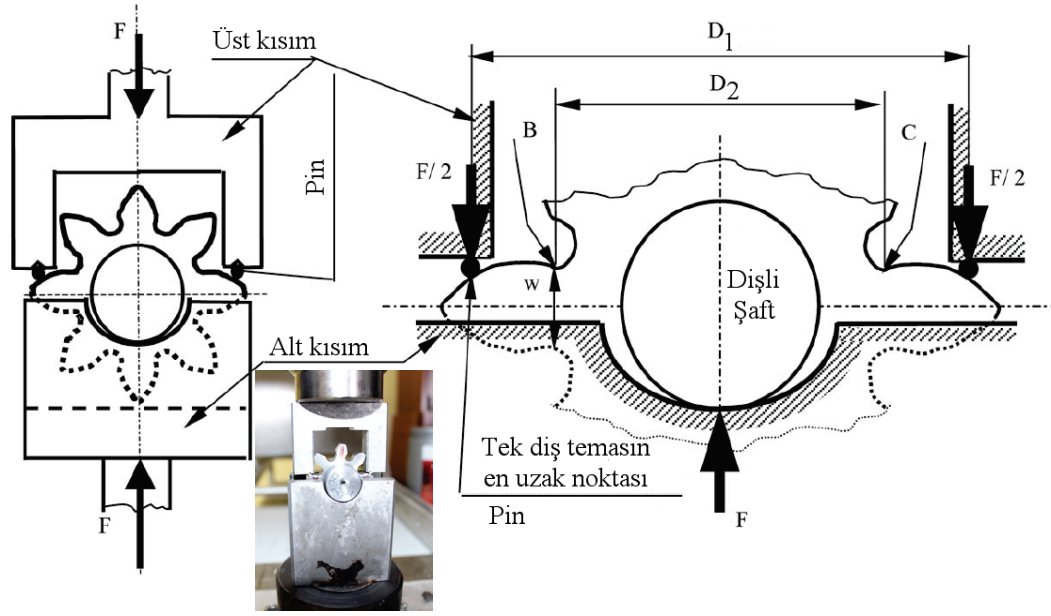


Şekil 5.3. Shimadzu AG-X marka universal test cihazı.

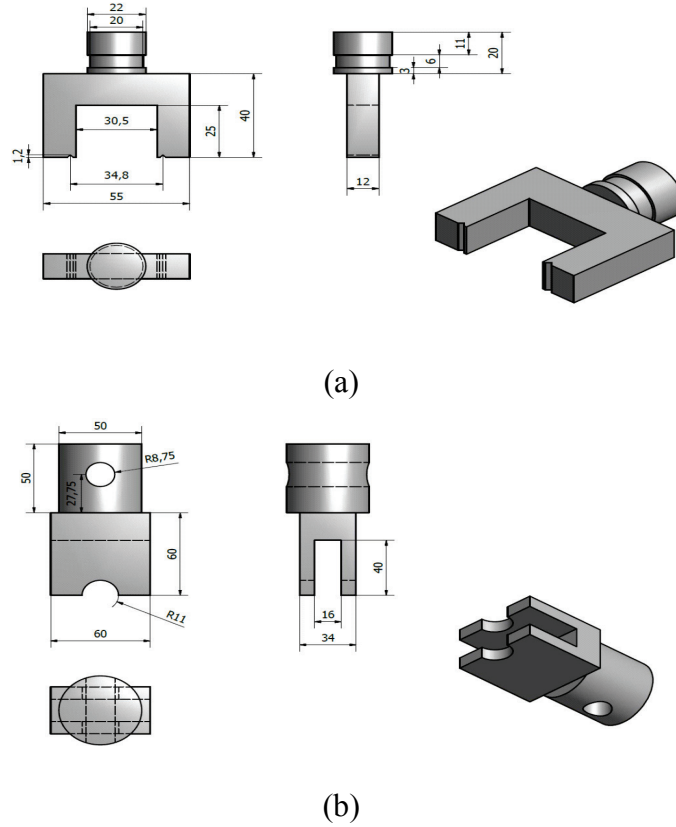
5.5.2. Yorulma deneyi

Yorulma deneyi üç nokta eğme deney düzeneği yardımı ile iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, Şekil 5.4’de verilen üç nokta eğme deney düzeneği kullanılarak sementasyon işlemi gören dişli üzerinde basma deneyi yapılmıştır. Basma deneyi Shimadzu AG-X marka universal test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, deney cihazının çene hızı 25 mm/dk olarak seçilmiştir. İkinci aşamada ise yine üç nokta eğme deney düzeneğinde birinci aşamada tespit edilen basma kırılma yük değerinin altında kalacak şekilde sabit bir yük altında tekrarlı yüklemelere maruz kalan iki dişten birinde oluşacak hasarın (çatlak oluşumu veya kırılma) gerçekleştiği çevrim sayısı tespit edilmiştir. Tekrarlı yükleme deneyleri de 25 mm/dk çene hızında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deney düzeneği için tasarlanan parçalar Şekil 5.5’de verilmiştir. Numuneler üzerinde D_1 ve D_2 mesafeleri ölçülerek tekrarlı eğme moment değerleri Eşitlik (5.1) yardımı ile belirlenmiştir.

$$M_B = \frac{F}{2} x \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (\text{Eşitlik 5.1})$$



Şekil 5.4. Yorulma deneyi için kullanılan üç nokta eğme deney düzeneğine ait şematik resim (E.Akata vd. 2003).



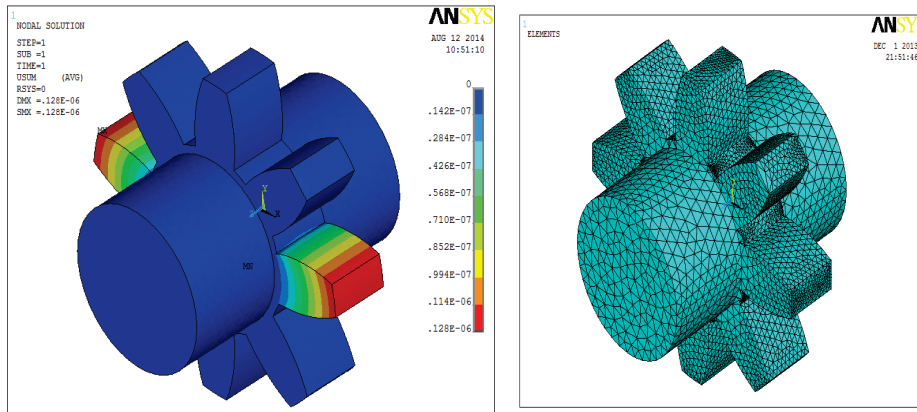
Şekil 5.5. Üç nokta eğme deney düzeneğine ait (a) üst ve (b) alt kısımlarına ait paçaların şematik resmi.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

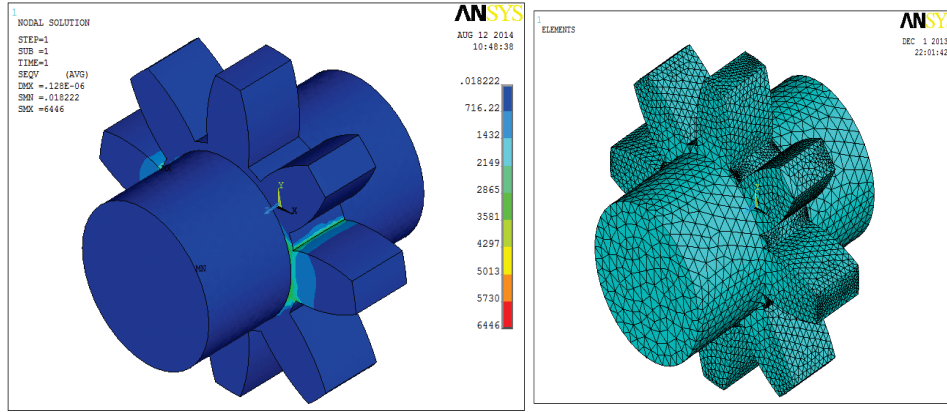
Literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler ışığında, üretilecek planet redüktörlerde dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan birinin yorulma ve buna bağlı malzeme seçimi olduğu göze çarpmaktadır. Bu araştırma kapsamında yapılan çalışmalarda Alman ve İtalyan üreticilerin kullandığı 8620 kalite çelik kullanılmıştır. Bu çalışmada onlardan farklı olarak 8620 kalite çeliğine dövme işlemi uygulandıktan sonra dişli üretimi yapılmıştır.

6.1. Simülasyon Sonuçları

Kullanılacak planet dişlilerinin simülasyon ile modelleme çalışmaları ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme dişli dönme sırasında diş ucundaki diş kuvveti ve diş dibi gerilme dağılımı analizi olmak üzere iki farklı modelleme yapılmıştır. Diş üstü gerilmeler Şekil 6.1’de diş dibi gerilme dağılımı ise Şekil 6.2’de verilmiştir. Yapılan uygulamalı deneylerde modellemenin de öngördüğü şekilde kırılmanın trokoid eğrisinin hemen üst bölgesinde meydana gelmiştir.



Şekil 6.1. Diş üstü gerilme dağılımı.



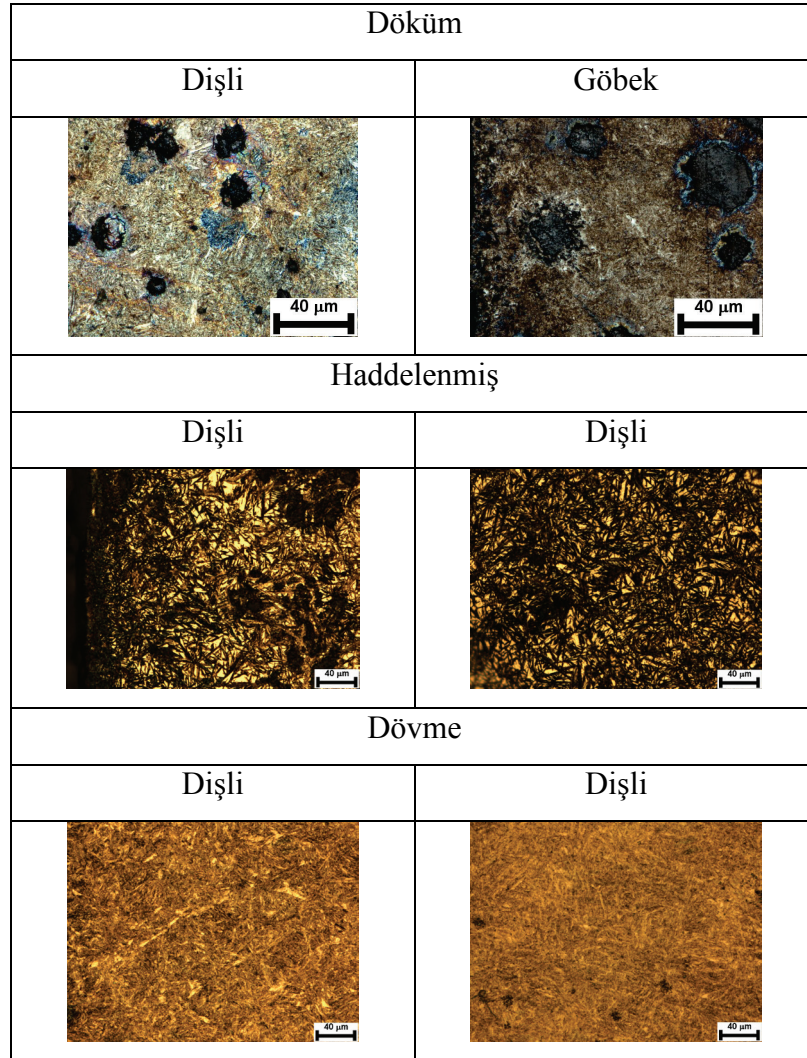
Şekil 6.2. Diş dibi gerilme dağılımı.

6.2. Mikroyapısal Karakterizasyon

Semantasyon işlemine tabi tutulmayan döküm, dövme ve haddelenmiş durumdaki 8620 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.3’de görülmektedir. Genel olarak mikroyapının ferrit (açık renkli) ve perlit (koyu renkli) fazlarından oluştuğu görülmektedir. Döküm halindeki çeliğin mikroyapısı boşluk içerse de, dövme ve haddelenmiş durumdaki çeliklerin mikroyapısında boşluk oluşumu gözlenmemektedir. Özellikle dövme halindeki çelikte ince taneli yapı morfolojisi belirgin olarak görülebilmektedir. Öte yandan semantasyon işlemiyle östenitin martensite dönüşmesinin beklenmesi, optik mikroyapı fotoğraflarından (Şekil 6.4) kolaylıkla belirlenebilecek bir mikroyapısal dönüşümdür. Özellikle dövme halindeki çeliğin mikroyapısında bulunan martensit mikroyapısı, döküm ve haddelenmiş çelikten nispeten daha ince bir görünümde.

	Döküm	Haddelenmiş	Dövme
Mikroyapı/ Numuneler			
Tane Boyutu (µm)	24±5	22±4	13±2

Şekil 6.3. Semantasyon işlemine tabi tutulmayan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 6.4. Semantasyon işlemi uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin optik mikroyapı fotoğrafları.

6.3. Mekanik Deney Sonuçları

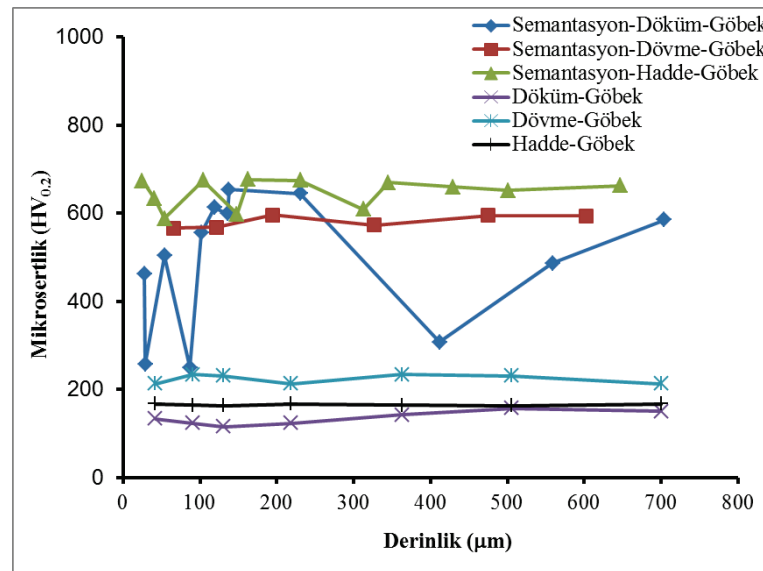
6.3.1. Sertlik ve çekme deneyi sonuçları

Döküm, dövme ve haddelenmiş 8620 kalite çelik semantasyon işlemine tabi tutulduğundan, bu çelikte yüzeyden merkeze doğru mikrosertlik taraması yapılmış ve sonuçlar Şekil 6.5’de verilmiştir. Semantasyon işlemine tabi tutulmayan döküm 8620 kalite çelik numunenin sertliği 135 ± 5 HV_{0.2} iken semantasyon işlemiyle sertlik geniş bir aralıkta (290-590 HV_{0.2}) değişmektedir. Yine semantasyon işlemine tabi tutulmayan haddelenmiş ve dövme çeliklerin sertliği sırasıyla 165 ± 10 HV_{0.2} ve 226 ± 10 HV_{0.2} iken semantasyon işlemiyle haddelenmiş ve dövme haldeki çeliklerin sertliği sırasıyla 700 ± 5 HV_{0.2} ve 600 ± 5 HV_{0.2} olarak belirlenmiştir. Semantasyon işlemi uygulanan 8620 kalite çeliğin sertliği yüzeyden merkeze doğru azalmamaktadır. Yüzeyde ve kesitte en

yüksek sertlik haddelenmiş durumdaki çelik, en düşük sertlik ise mikroyapısında boşluk içeren döküm halindeki çelik sergilemiştir. İnce tanelerin, sertlik değerini yükselttiği ve kalıntı östenit miktarını düşürdüğü bilinmektedir, dolayısıyla, sertliğin yüksek değerde olması buna bağlıdır. Dövmeye nazaran haddelenmiş durumdaki çeliğin sertliğindeki artış iri taneli yapının martensite dönüşmesinden kaynaklanabilir.



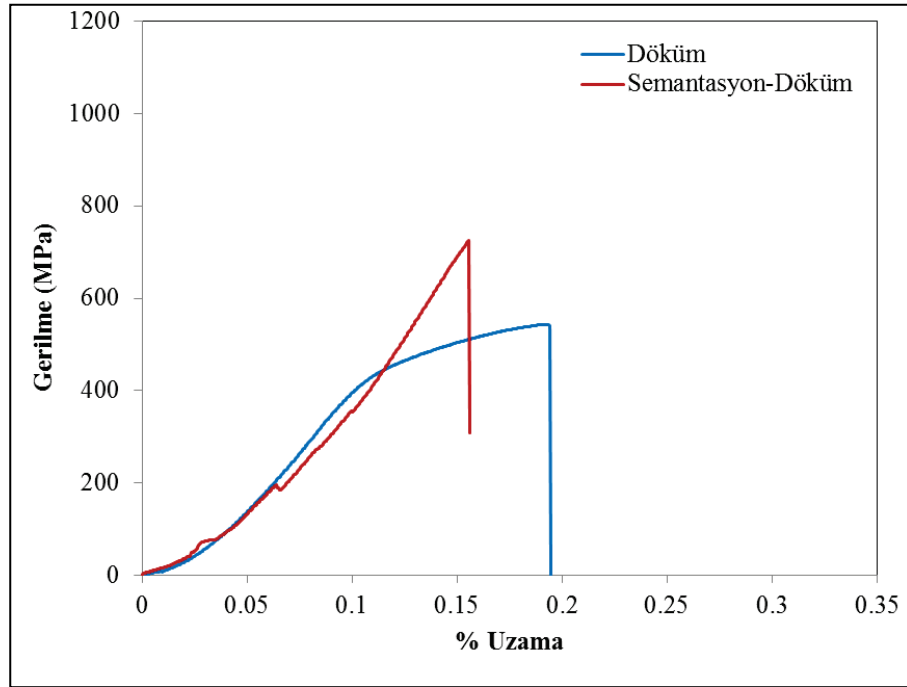
(a)



(b)

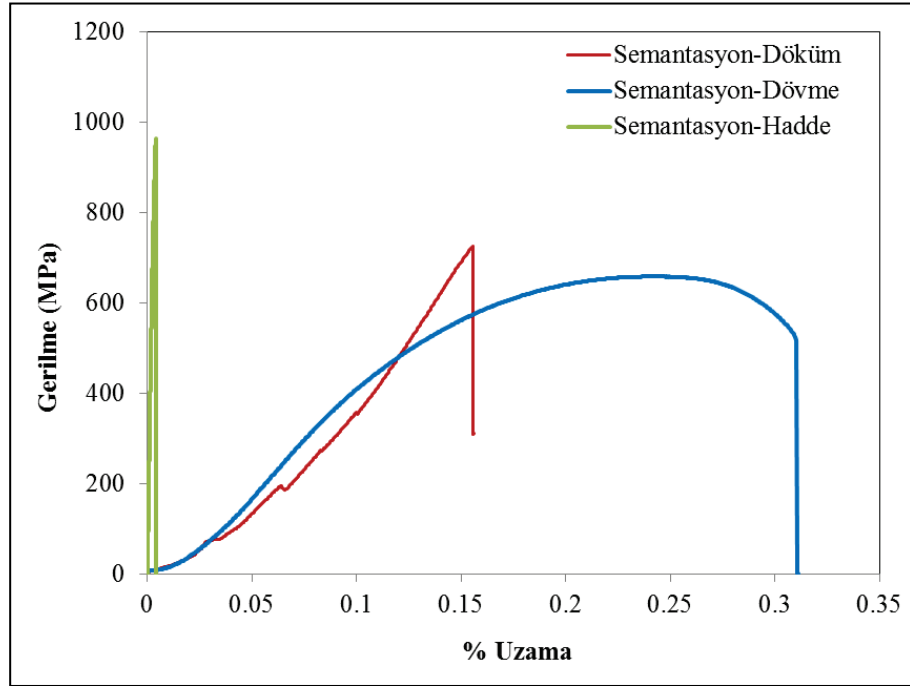
Şekil 6.5. Sementasyon uygulanmış döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliğin (a) dış ve (b) göbek yüzeyinden merkeze doğru sertlik değişimi.

Semantasyon işleminin etkisini görmek için semantasyon uygulanan ve uygulanmayan döküm durumdaki 8620 kalite çeliğin çekme eğrileri Şekil 6.6'da verilmiştir. Genel olarak semantasyon uygulanan 8620 kalite çeliğin çekme mukavemeti değeri, semantasyon uygulanmayan 8620 kalite çeliğinkinden daha yüksektir. Ancak tokluk azalmıştır.



Şekil 6.6. Semantasyon uygulanan ve uygulanmayan döküm durumdaki 8620 kalite çeliğin çekme eğrileri.

Semantasyon uygulanan döküm, dövme ve haddelenmiş durumdaki 8620 kalite çeliklerin çekme eğrileri ve çekme deneyi sonuçları sırasıyla Şekil 6.7'de ve Çizelge 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.4 ve 6.7 beraber incelendiğinde boşluklu yapı içeren döküm durumdaki çelik gevrek davranış sergilerken, ince taneli yapıya sahip dövme durumdaki çeliğin tokluğunun yüksek olduğu görülmektedir. Öte yandan haddelenmiş durumdaki çeliğin mikroyapısında iri taneli martensit yapının olması, malzemenin tokluğunda azalma, sertlik ve çekme mukavemetinde artış meydana getirmiştir (Şekil 6.5 ve Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin çekme eğrileri.

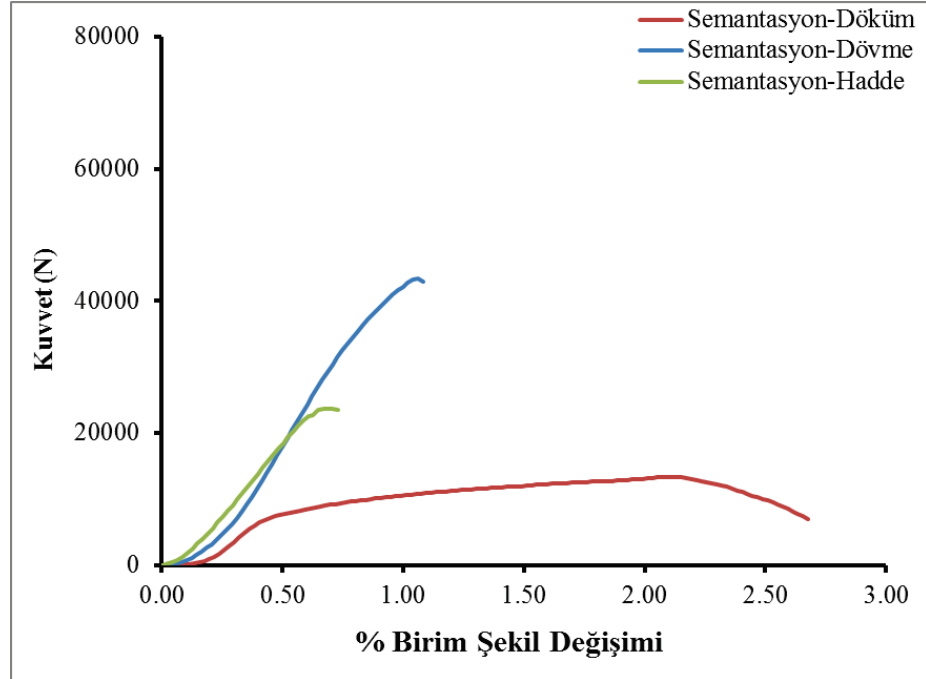
Çizelge 6.1. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin çekme deneyi sonuçları.

Mekanik özellik / Numuneler	Döküm	Haddelenmiş	Dövme
Çekme Muk. (σ_{TS} , MPa)	701	947	658
Kopma Uzaması (e_f , %)	15,2	3,8	30,6
Tokluk ($\sigma_{TS} \times e_f$, J/m ³)	$10,6 \times 10^7$	$3,6 \times 10^7$	$20,1 \times 10^7$

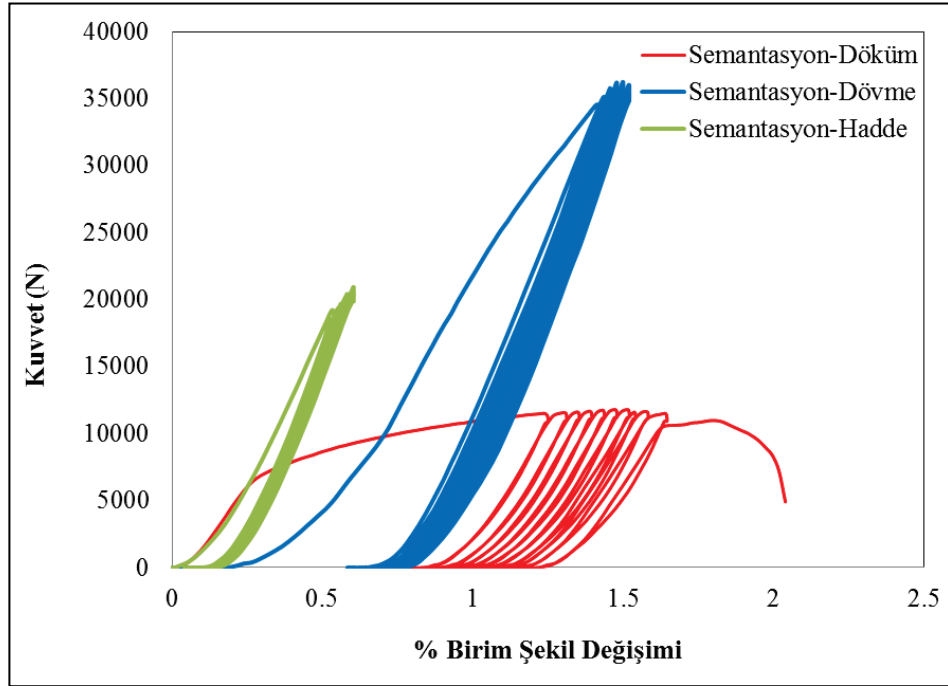
6.3.2. Yorulma deneyi sonuçları

Şekil 6.8'de üç nokta eğme deney düzeneği yardımı ile basma deneyi yapılan semantasyon işlemine tabi tutulan çelik dişlilere ait kuvvet-birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. Döküm, dövme ve haddelenmiş durumdaki çelik dişlilerin hasara uğradığı yük değerleri sırasıyla 13000 N, 43000 N ve 24000 N olarak tespit edilmiştir. Bu yük değerleri dikkate alınarak yapılan tekrarlı yükleme sonuçları ise Şekil 6,9'da verilmiştir. Şekil 6.10'da sırasıyla döküm biyetten üretilen dişli 11000 N ve 10 çevrim, haddelenmiş biyetten üretilen dişli 23500 N ve 12 çevrim, dövülmüş biyetten üretilen

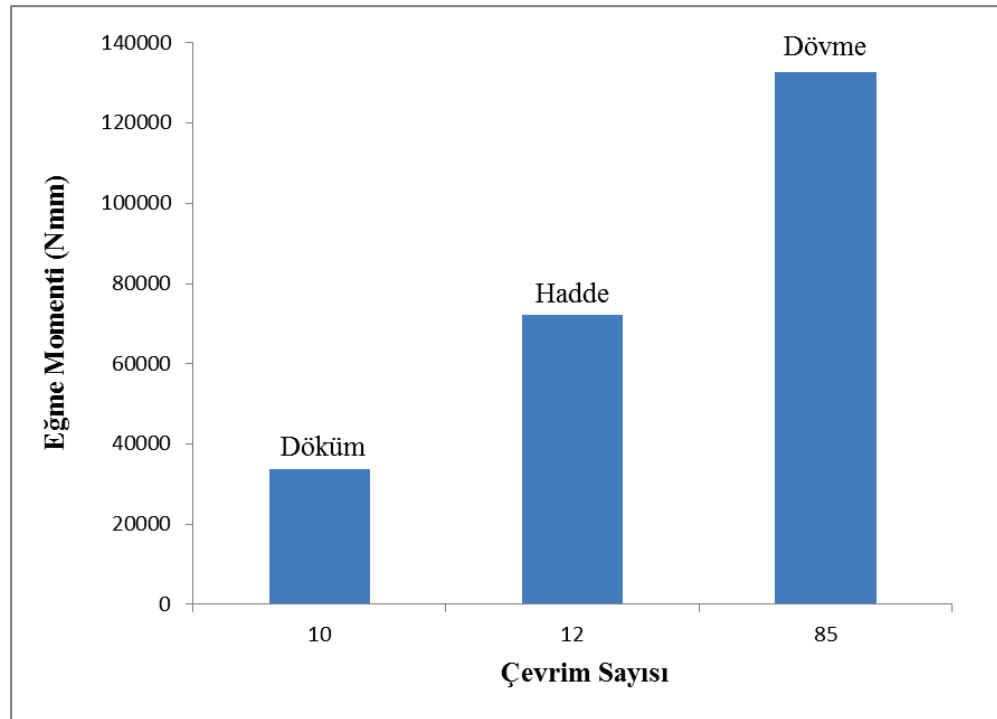
dişli ise 43200 N ve 85 çevrim sonucunda kırılmıştır. İncelenen numuneler içerisinde en yüksek yorulma dayanımı dövülmüş biyetlerden üretilen dişliden, en düşük yorulma dayanımı ise döküm biyetlerden üretilmiş dişliden elde edilmiştir.



Şekil 6.8. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin kuvvet–birim şekil değişimi eğrisi.



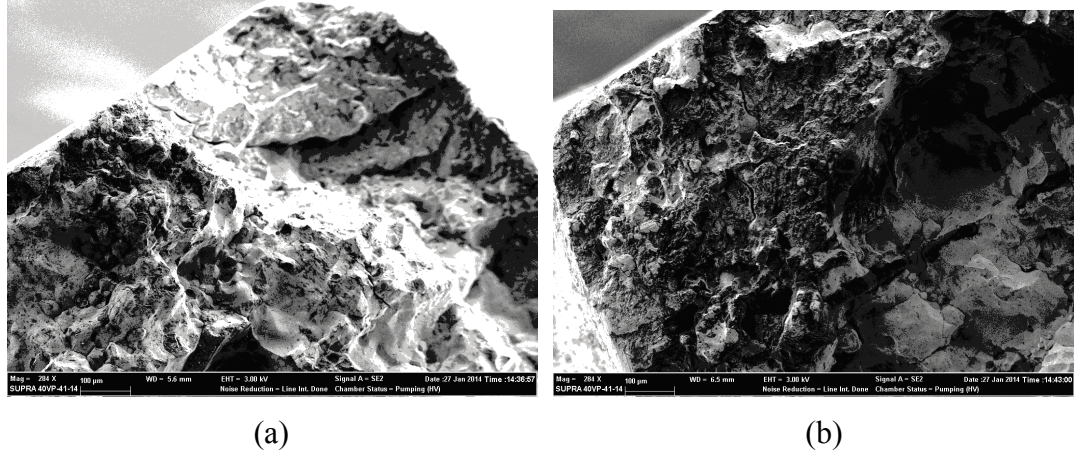
Şekil 6.9. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin üç nokta eğme deney düzeneğinde yorulma deney eğrileri.



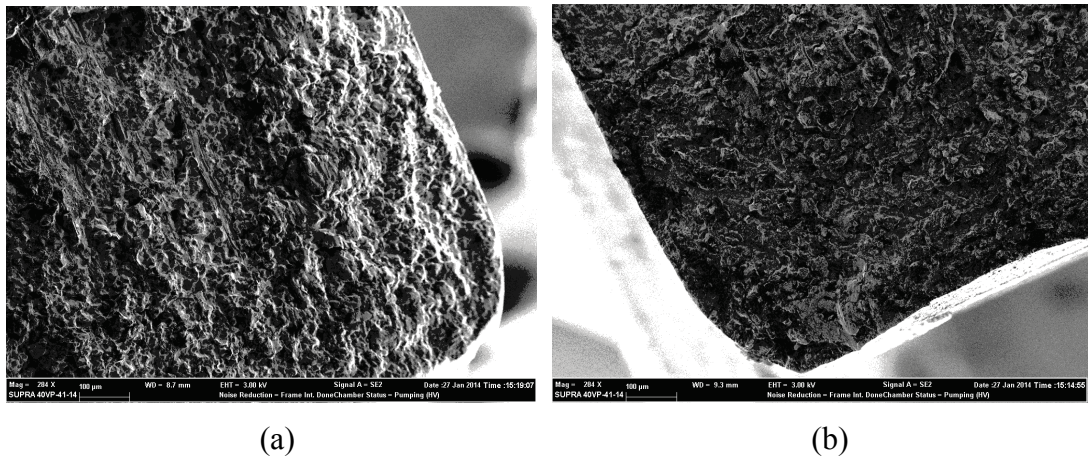
Şekil 6.10. Semantasyon uygulanan döküm, haddelenmiş ve dövme durumdaki 8620 kalite çeliklerin üç nokta eğme deney düzeneğinden elde edilen yorulma deney sonuçları.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemeler sonucunda (Şekil 6.10 ve Şekil 6.11) düşük ve yüksek yüklerde yorulma deneyine tabi tutulan

numunelerin çatlak başlangıç noktası açısından kıyaslandığında, yükün düşük olduğu haddelenmiş biyetlerden üretilen dişli numunenin yüzeyinde çok sayıda çatlak başlangıç noktasının bulunduğu gözlenmiştir. Bu durum, semantasyon işlemine tabi tutulan haddelenmiş biyetten üretilen numunenin yüzeyinde ve altında sert iri taneli martensit yapının, yüzeyde çatlak başlangıcını teşvik edici bir etkisi olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.10. Haddelenmiş dişliden üretilen dişlinin (a) yorulma çatlağı başlangıcı (b) nihai kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü.



Şekil 6.11. Dövülmüş dişliden üretilen dişlinin (a) yorulma çatlağı başlangıcı (b) nihai kırılma bölgesine ait SEM görüntüsü.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada döküm, haddelenmiş ve dövme biyetlerden üretilen 8620 kalite çelikten yapılan dişlilerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop yardımıyla yapılmıştır. Numunelere sertlik ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Yorulma deneyleri, üç nokta eğme deney düzeneğinde tekrarlı yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yorulma kırılması yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan çalışmaların genel sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1. Numune malzemelerin modellenmesi ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamalı deneylerde modellenmenin öngördüğü şekilde kırılmanın trokoid eğrisinin hemen üst bölgesinde meydana gelmiştir.
2. Semantasyon işlemine tabi olmayan döküm, haddelenmiş ve dövme biyetlerden üretilen dişlilerin mikroyapısı ferrit ve perlit yapısından oluşmaktadır. Öte yandan haddelenmiş ve dövme biyetlerin tersine döküm biyet boşluklu yapı içermektedir.
3. Semantasyon işlemiyle döküm, haddelenmiş ve dövme çeliklerin mikroyapısında martensit yapısı elde edilmiştir. Ancak hem semantasyon uygulanan hem de semantasyon uygulanmayan döküm ve haddelenmiş 8620 kalite çeliklere nazaran dövme durumundaki çelik ince tanelidir.
4. Yüzeyde ve kesitte en yüksek sertlik haddelenmiş durumdaki çelik, en düşük sertlik ise mikroyapısında boşluk içeren döküm halindeki çelik sergilemiştir. Dövmeye nazaran haddelenmiş durumdaki çeliğin sertliğindeki artış iri taneli yapının martensite dönüşmesinden kaynaklanabilir.
5. Genel olarak semantasyon uygulanan 8620 kalite çeliğin çekme mukavemeti değeri, semantasyon uygulanmayan 8620 kalite çeliğinkinden daha yüksek olduğu ancak tokluğun azaldığı gözlenmiştir. Boşluklu yapı içeren döküm durumdaki çelik

gevrek davranış sergilerken, ince taneli yapıya sahip dövme durumdaki çeliğin tokluğunun yüksek olduğu görülmüştür.

6. Yorulma sonuçları, hadde biyetlerden üretilen 8620 malzemedan yapılan çekme çubuğunun 23.500N'da koparken dövülmüş 8620 malzemenin 43.000N'da kırılma olduğunu göstermiştir. Hadde biyetlerden işlenen numunelerin dişleri 12 çevrim sonunda yorulma sonucu kırılırken, dövülmüş numuneler 85 çevrimin ardından yorulma kırılmasına maruz kalmışlardır.

Biyetlerin dövülüp daha sonra dişli üretimi ile yorulma mukavemetlerinin ciddi oranda artırılmasının sağlanması dikkate değer bir sonuçtur.

7.2. Öneriler

Değişik sıcaklık ve zamanda sementasyona bağlı yorulma davranışları çalışılabilir.

Döküm-dövme ile hadde-dövme arasındaki yorulma davranışları çalışılabilir.

Yukarıdaki önerilerin sonuçları kullanılarak ANSYS programında simülasyon için gerekli katsayıların çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Akkurt, M., Makine Elemanları, **İTÜ yayını**, Cilt 1, İstanbul, 34-240 1975.
- Alper ısıtım işlem San. Ve Tic. A.Ş. www.alper.com.tr
- Asi, O., Can, A. Ç., Pineault, J., Belassel, M., “The relationship between case depth and bending fatigue strength of gas carburized SAE 8620 steel”, **Surface & Coatings Technology**, 201, 5979–5987(2007).
- Asi, O., Can, A. Ç., Pineault, J., Belassel, M., “The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel”, **Materials and Design**, 30 1792–1797(2009).
- Aslantas, K., “Ostemplenmiş Kuresel Grafitli Dokme Demirden imal Edilen Düz Dislilerde Yüzey Yorulma Hasarlarının Analizi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2003.
- Askeland, D.R., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Çeviren: Erdoğan M., **Nobel Yayınevi**, 114-117 (1998).
- Aydeniz, A. İ., “Dişli Çark Mekanizmalarında Taksimat Hatasının Statik ve Dinamik Zorlanmaya Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bil. Enst.**, İstanbul, 2001.
- Bartelmus, W., Zimroz, R., “Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load”, **Mechanical Systems and Signal Processing**, 23(1), 246-257(2009).
- Baydoğan M., Başman G., Mindivan H., Arısoy F., Çimenoglu H., Şeşen M.K., Çeliklerin Sınıflandırılması, **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası**, Isdemir, İskenderun, 2003.

Çemsa Çelik Metal Makine İmalat San. Ve Tic. Ltd. Şti. cemsacom.tr

Chaari, F., Baccar, W., Abbas, M.S., Haddar, M., “Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a one stage spur gear transmission”, *Eur. J. Mechanics*, 691-701(2008).

Chen, Y., Yamamoto, A., Omori, K., “Improvement of Contact Fatigue Strength of Gears by Tooth surface Modification Processing”, *12th IFTOMM World Congress*, Besançon (France), June18-21, 2007.

David M., Jonathan B., Keller, A., “Detection of a fatigue crack in a UH-60A planet gear carrier using vibration analysis”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(8), 2095-2111(2006).

Dhanasekaran, R. Kumar, P.S. Santhi, K., “Crack Failure of Planetary Gearbox Sun Gear”, *International J. of Recent Trends in Engineering and Technology*,3(6), 2010.

E. Akata, M.T. Altınbalık, Y.Çan “Three point load application in single tooth bending fatigue test for evaluation of gear blank manufacturing methods” , *International journal of Fatigue*, 26,785-789(2004).

Erten, M. “Dişli Çarklarda Yük Taşıma Kapiliyetinin ve Diş dibi Gerilmelerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü Fen Bil. Enst.*, İstanbul, 1993.

Farfa'n S., Rubio-Gonzalez, C., Cervantes-Hernandez T., Mesmacque, G., “High cycle fatigue, low cycle fatigue and failure modes of a carburized steel”, *International Journal of Fatigue*, 26, 673–678(2004).

Friedberg, C., “*Fatigue Behavior of Sheet Steels*”, M.Sc.Thesis, Mechanical, *Industrial & Manufacturing Engineering Department*, University of Toledo, 2012.

Genel, K., Demirkol, M., "Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel" ,*INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE* ,21, 207-212 – 212(1999).

Guo, Y. Parker, R. G., “Purely rotational model and vibration modes of compound planetary gears”, *Mechanism and Machine Theory*,45(3), 365-377(2010).

Guo, Y., Parker, R. G., “Dynamic modeling and analysis of a spur planetary gear involving tooth wedging and bearing clearance nonlinearity”, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 29(6), 1022-1033(2010).

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bölümü deney Föyleri

Kayalı, E., Ensari, C, Dikeç F., “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, *İ.T.Ü. Metalürji ve Malzeme Bölümü*, 3. Baskı ,1996.

Kızılaslan, K., İşel, B., Yavuz, İ., “Disli Çarklarda Meydana Gelen Hasar Türleri”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 119-129(2010).

Krauss, G., “Microstructure and Performance of Carburized Steel, Part II : Austenite, Part III: Austenite & Fatigue Special Papers”, *ASM International*, Metals Park OH, 5-15 (1995).

Kutay, M. G. “Dişli Çarklar”, www.guven-kutay.ch, 2013.

Krauss, G., Steels: Heat Treatment and Processing Principles, *ASM International*, 1989.

Meyers, M.A., Chawla, K.K., Mechanical Behavior of Materials, 593-636(1995).

Özer, H. “Düz Dişli Çarkların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *SA. Ü Fen Bil. Enst.*, Sakarya, 1996.

- Özsaraç,U., Yılmaz,R., Ekerer, F.A., Uzun,H., "Sementasyon İşlemi yapılan Çeliklerde Mikro sertlik ve Mikroyapı Değişiminin İncelenmesi", *Metalurji Dergisi*,34 – 38(2001).
- Smidt, M.R., “Internal vibration monitoring of a planetary gearbox”, *University of Pretoria*, 2009.
- Park, S. Lee, J. Mon, U. Kim, D., “Failure analysis of a planetary gearcarrier”, *J.Eng.Failanalys*, 2009.
- Parish, G, “Carburizing: Microstructures and Properties”, *ASM International*, Metals Park OH, 1999.
- Forging Solutions Design Engineering Information From F1a,
<http://www.forging.org/engineer/pdf/ColdForgingArticles.pdf>
- Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, *K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü*, 3. Baskı, Trabzon 1990.
- Shell, D. J., “Finite Element Modelling Spur and Helical Gears in Contact”, *SAE Technical Paper Series*, The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 922440, 1 – 7(1992).
- Soykök, İ. F., “Mathcad Programı Ortamında Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Silindirik Düz Dişli Çark Dişlerinde Meydana Gelen Gerilme ve Şekil Değişimlerinin Hesabı”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü Fen Bil. Enst.*, İstanbul, 2001.
- Tabur, M., “Farklı Isıl İşlemlerdeki 8620 Sementasyon Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışları”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 112, 2003.
- Tauscher H., Çeviri: Güleç Ş., Aran A.,Gebze 1983

Temiz, V., Makina Elemanlarının Sürekli Mukavemete Göre Hesabı,
(itu.edu.tr/temizv/vtdn/yorulma.pdf).

Topbaş, M. A., Çeliğin Isıl İşlemi, *Yıl. Üniv. Yay.*, İstanbul 1992.

Wilcox, L. ve Coleman, W., “Application of Finite Elements to The Analysis of Gear Tooth Stresses”, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 95, 1139 – 1147(1973).

Yeğen, Usta, M. “The effect of salt bath cementation on mechanical behavior of hot-rolled and cold-drawn SAE 8620 and 16MnCr5 steels”, 85 (3), 390-396(2010).

Yuksel, C., Kahraman, A., “Dynamic tooth loads of planetary gear sets having tooth profile wear”, *Mechanism and Machine Theory*, 39(7),695-715(2004).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Faruk URAL

Doğum Yeri ve Tarihi : Sakarya 1974

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü

İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar : 2001-2008 yılları arası Sakarya Üniversitesi'nde Uzman olarak görev yaptı. 2008 yılından itibaren Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde çalışmaya devam etmektedir.

İletişim

Adres : Ertuğrugazi Mah. Mürvet Sok. Caner Sitesi No: 20/ I-2

Merkez / BİLECİK.

Tel : 0228 2150056

E-Posta Adresi : faruk.ural@bilecik.edu.tr