

Yrd. Doç. Dr. İrfan AY  
Öğr. Gör. Raif SAKIN  
Balıkesir Üniversitesi

## Miller ve Akslarda Gözlenen Yorulma'nın Etkisi

### 1. GİRİŞ

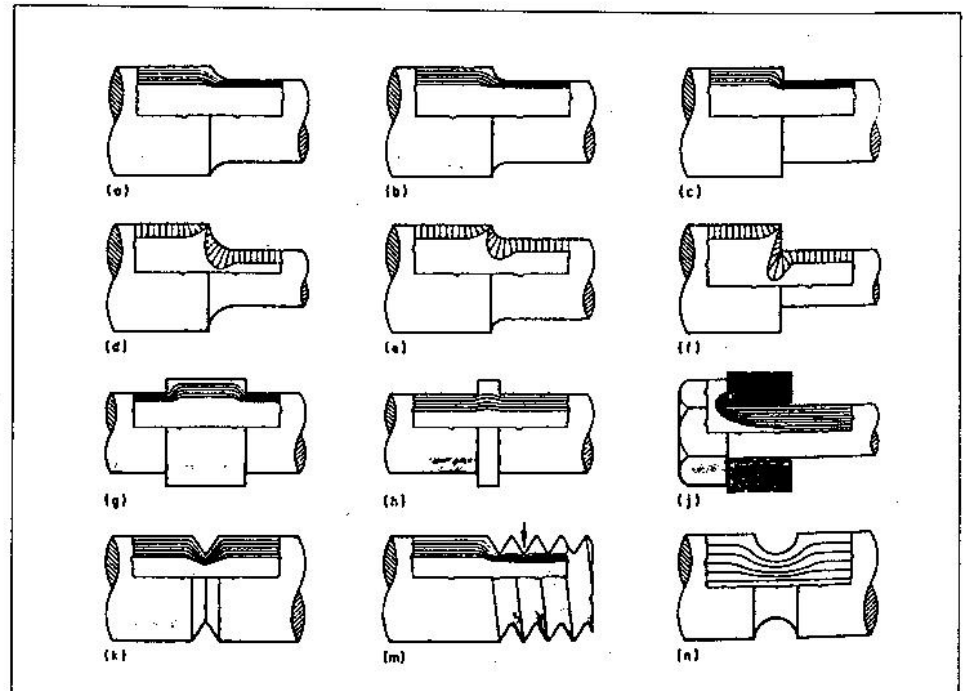
Mil ve aks birer makine elemanı olup, farklı boylarda, dairesel veya çokgen kesitlerde olabilir. Üzerlerine, dişliçark, voflan, kasnak, kavrama, tekerlek gibi makine elemanları takılabilir. Bu elemanlar mil ve akslara, kama, pim, civata veya somunlarla bağlanırlar. Üzerlerine takılan bu elemanlar sebebiyle akslar yalnızca eğilmeye maruz kalırken, miller hem eğilmeye hem de moment ilettikleri için burulmaya maruz kalırlar. Mil ve aksların kesitleri, içi dolu veya boş olabilir. Dik yada yatay monte edilip, radyal veya aksel yatak içinde çalışırlar. Bu çalışma anında hareketli olabildikleri gibi sabit de çalışabilirler. Özellikle millerin dış yüzeylerine, çok sert ve dayanıklı olması istenen yerlerde, semantasyon ve nitrürasyon işlemleri uygulanır. Millerin ve aksların çok çeşit ve kullanma alanları vardır. Tozlu, aşındırıcı ortamlarda çalıştıkları gibi çok soğuk kutup sıcaklıklarında veya gaz türbini gibi aşırı sıcak ortamlarda da çalışırlar.

Bu makalede "yorulma" olayının mil ve aksların hasarlarında oynadığı rol açıklanacak, uygulamadan örnek verilecektir.

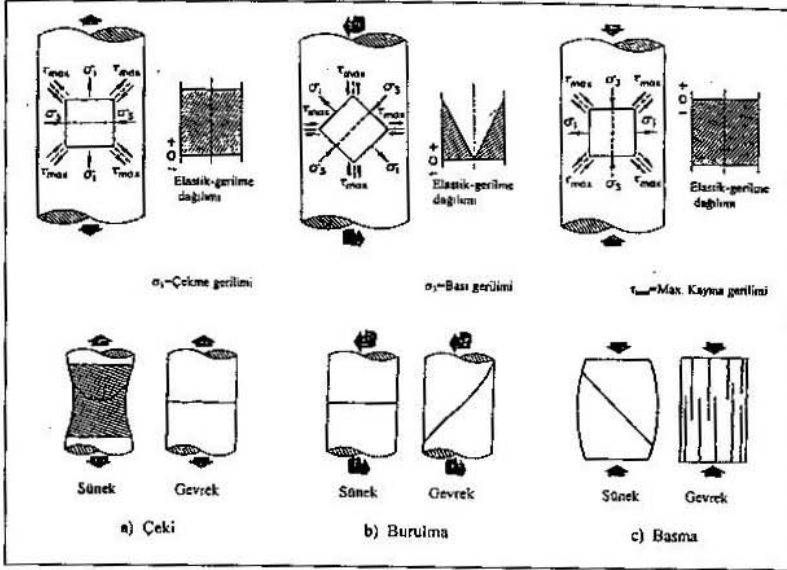
### 2. MİLLERDE GERİLİM ARTTIRICILAR VE GERİLME SİSTEMLERİ

Hasara uğramış millerin ve aksların kırılma nedeni sorgulanmadan önce, "gerilim arttırıcı" sebeplerin ve uygulanan yükten dolayı doğan gerilmelerin mutlaka

belirlenmesi gerekir. Basit millerin dışında, üzerinde yağ delikleri, kama oyukları v.b. gibi süreksizlikler bulunduran millerde gerilim birikmesi 1 kattan 5-10 kat'a kadar çıkabilir. Millerde, çap değişimleri, delikler, dik köşeler, kama oyukları, mil



Şekil 1. Millerde gerilim arttırıcılar ve gerilim yığılması



Şekil 2. Miller üzerinde olan gerilmeler ve mil malzemesinin sünek/gevrek oluşuna göre kırılma şekilleri

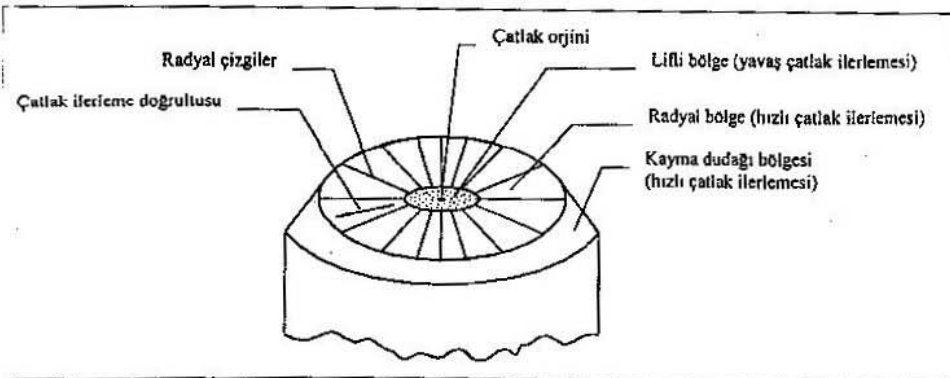
üzerine açılan dişler, ek yerleri, V-tipi çentikli oyuklar, işleme işaretleri, üretim veya servis esnasındaki kullanımdan doğan korozyon, çukur gibi yüzey pürüzleri, dökümden porozite, metal olmayan katkıları, çatlaklar gibi iç düzensizlikler "gerilim artırıcı" durumlardır (Bkz. Şekil 1).

Miller ve akstar çalıştıkları yerlerde farklı gerilmelerin etkisindedirler. Özellikle miller, çeki, bası ve burulma yükleri sonunda Şekil 2'de görülen gerilmelere maruz kalırlar. Şekil 2a'da görüldüğü gibi mile, eksen boyunca çekme gerilmesi uygulanırsa; kayma gerilmeleri 45°'lik düzlemlerde, basma gerilmeleri ise eksene dik olan 90°'lik düzlemlerde etkili olur. Mil malzemesi sünek ise milin kırılması, ayrıntıları Şekil 3'de görülen "kayma dudağı" şeklinde bir boğumlaşma ile başlar, "radyal bölge" ile devam eder ve "lifli bölge" de son bulur.

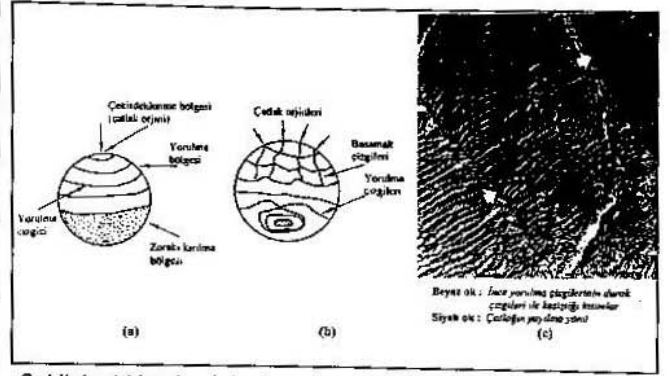
Mil malzemesi gevrek ise; milde hiçbir deformasyon görülmeden çeki gerilmesinin

etkisi ile eksene dik şekilde, pürüzlü bir görünüm alarak kırılır.

Şekil 2b'de görüldüğü gibi, mil burulma gerilmesine maruz kalmışsa, kayma gerilmeleri eksen boyunca ve eksene 90°'lik dik düzlemlerde etkili olurken, çekme ve basma gerilmeleri 45°'lik düzlemlerde etkili olur. Kayma gerilmeleri milin dış yüzeylerinde maksimum iken merkezlerde sıfırdır. Mil, sünek malzemeden yapılmış ise, kırılma, eksene dik düzlemlerde, gevrek malzemeden yapılmış ise 45°'lik eksen boyunca görülür. Şekil 2c'de görüldüğü gibi mil basma gerilmesine maruz kalmışsa; kayma gerilmeleri 45°'lik düzlemlerde, çekme gerilmeleri ise 90°'lik düzlemlerde etkili olur. Kayma gerilmeleri milin hasarında etkili olmasına rağmen, sonuçta kırılma görülmeyebilir. Mil, bu gerilmelerin altında fiçilaşmaya ve kısalmaya maruz kalır. Mil malzemesi sünek ise, fiçilaşmayı takip ederek 45°'lik düzlem boyunca kırılır. Mil malzemesi gevrek bir malzeme ise



Şekil 3. Dairesel kesitli çentiksiz bir mildeki kırılma yüzeyi görüntüsü



Şekil 4. a) Yorularak kırılan yüzeydeki bölgeler

b) Oluşan basamak çizgileri

c) 6061-T6 alüminyum alaşımında yorulma kırılması sonucu oluşan durak ve ince yorulma çizgileri

bazı gerilmelerin etkisi ile fiçilaşma görülmeyen, boyuna çatlakların etkisiyle kırılır.

### 3. YORULMA'NIN MİL HASARLARINA ETKİSİ

Malzemelerde tekrarlı yük uygulaması sonucunda doğan gerilmelerin etkisi ile meydana gelen kırılmaya "yorulma kırılması" adı verilir. Yorularak hasara uğrayan millerde Şekil 4a'da görülen bölgeler mevcuttur.

#### Çekirdeklenme Bölgesi (Çatlak orijini)

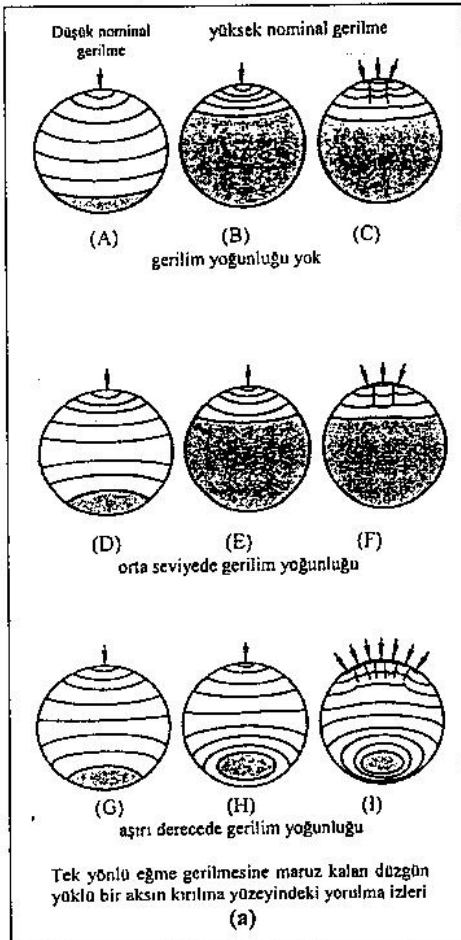
Çekirdeklenme bölgesi, yüzeyde talaş kaldırma sonucu bir çıkıntı, korozyon çukuru veya benzeri bir gerilim artırıcının neden olduğu ve ilk mikroçatlağın oluşarak çok az ilerlediği bölgedir. Ayrıca, mikroçatlak tek bir noktadan başlayabileceği gibi, birden fazla noktadan da başlayabilir

#### Yorulma Bölgesi (İnce yorulma izleri ve durak çizgileri)

Bu bölgede, her yük tekrarında doğmuş ve ancak elektron mikroskobu ile görülebilen "ince yorulma çizgileri", milin tekrarlı yükten muaf olduğu dinlenme safhasında görülen ve yorulma çatlağının oksitlenmesinin neden olduğu "durak çizgileri" mevcuttur (Bkz. Şekil 4c). Şayet çatlak orijini, kırılma yüzeyine dik gelecek şekilde ise durak çizgileri ile kesişir. Bu kesişen çizgilere "basamak çizgileri" denir (Bkz. Şekil 4b).

#### Zoraki kırılma bölgesi

Bu bölge kopma, ayrılma şeklinde kendini belli eder. Bu bölgenin büyüklüğü, uygulanan yükün büyüklüğü hakkında bilgi verir. Çok küçük çatlak boylarında hemen kritik kırılma tokluğu ( $K_{IC}$ ) değerine ulaşılır. Millerde yorulma olayı, genelde eğilme yorulması, burulma yorulması ve eksenel yorulma olarak gözlenir.

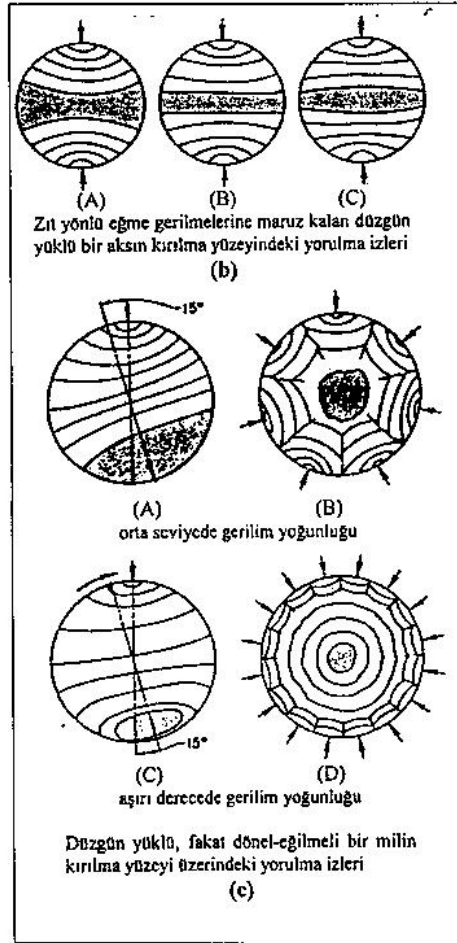


Şekil 5. a) Tek yönlü eğilme yorulması  
b) Zıt yönlü eğilme yorulması  
c) Dönel eğilme yorulması

### 3.1. Eğilme Yorulması

Bu yorulma üç farklı şekilde gerçekleşir:

**a) Tek yönlü eğilme yorulması:** Şekil 5a'da tek yönde eğilme yüklü altında gerilmesine maruz kalmış, dönmeyen bir milin (aksın) kırılan yüzeyindeki yorulma izleri görülmektedir. (3). Tek ok (↓) işareti, tek çatlak başlangıç noktasını, birden fazla ok (↓↓↓) işareti, yüzeyde pek çok düzensizlik (mikroçatlak başlangıcı) noktası olduğunu gösterir. Aynı anda birden fazla çatlak ilerlerken durak izleri ile kesişerek basamak çizgilerini oluşturur. Zoraki kırılma bölgesinin tüm kesite oranla fazla olması, uygulanan gerilmenin yüksek ve malzemenin gevrek olduğunun göstergesidir. Uygulanan gerilme düşük, gerilim birikmesi az ise yorulma izleri konkav şeklindedir. Gerilim birikmesi artınca merkeze kadar konkav giden "yorulma durak izleri" merkezden sonra konveks hal alırlar Sünek malzemeleri yorulmasında "zoraki kırılma bölgesi" tüm kesite oranla daha az yer kaplar.



Şekil 6. Yorulma kırılması hasara uğramış ve A6 takım çeliğinden yapılmış boru eğme makinesi mili ve yüzey görüntüsü

eğilip bükülmektedir. Kırılmadan önce kaç defa eğilip büküldüğü bilinmemektedir. Milyonluk çeki gerilmesi periyodiktir.

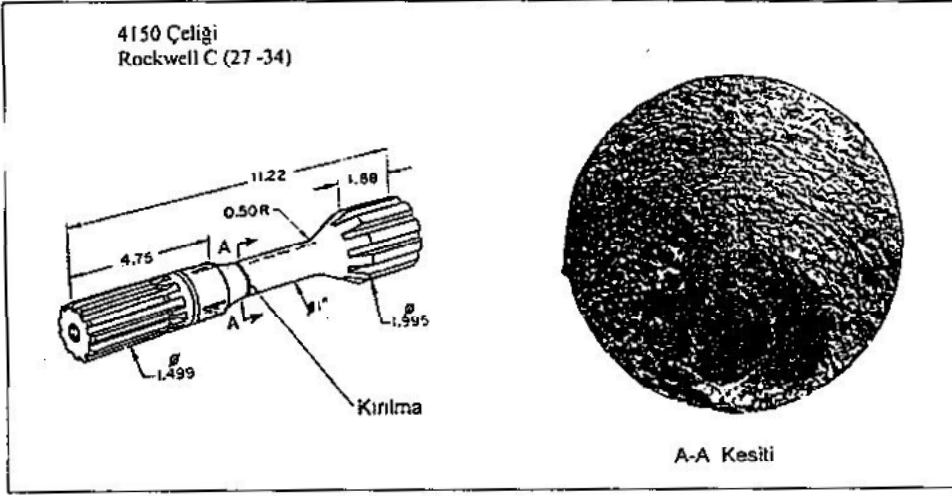
### İnceleme

Mil malzemesinin kimyasal analizi yaptırarak, bütün elementlerin olması gereken sınırlar içerisinde olduğu görüldü. Mil üzerindeki ortalama sertlik 48 HRC olarak ölçüldü. İç yapı, ince dağılmış ve uçmuş kirli tipinde mangan sülfürlerin (MnS) olduğu temperlenmiş martenzit'ten oluşmuştur. Ayrıca,  $Fe_4Mo_2C$ ,  $Fe_4Cr_2C$  gibi karbid'lere benzeyen ( $M_6S$ ) yüksek alaşım-lı kompleks karbid'ler olarak tanınan beyaz küre şeklinde partiküller de vardır. Kırılan yüzeyin kenar kısmında da bir miktar metalik olmayan oksit-sülfür ayrımı (segregasyonu) gözlenmiştir. Kırılma izi çıplak gözle incelendiğinde, hem düz hem de kaba taneli kısım görülmüştür. Demek ki, düz kısım; tipik yorulma kırılmasını göstermektedir. Bu kırılma, eğilme gerilmesiyle açılıp kapanan çatlakın oluşturduğu sürtünme hareketinden doğmuştur. Burada da dikkatli incelenirse "durak çizgi"leri görülür. Kaba fakat kristalini, parlak gözüken kısmı ise son kırılma (zoraki kırılma) bölgesini göstermektedir. Yorulma bölge geniş nispeten büyük, zoraki kırılma bölgesi ise küçüktür. Buradan gerilim yoğunluğunun az olduğu söylenebilir. Tek taraflı eğme yüklü söz konusudur. Yorulma çatlak Şekil 6'da görülen  $0.010''R$  (yarıçap  $R 0.254 \text{ mm}$ )'lik keskin köşede başlamıştır. Ayrıca kritik yerde metalik olmayan bir inklüzyon, çatlakın oluşumunda önemli bir rol oynamıştır.

### Sonuç

Bu milde hasar, yüksek titreşimli tek yön

## ÖRNEK



Şekil 7. Zıt yönlü eğilme yükü ve burulma yorulması sonucu kırılan pompa mili ve yüzeyi

lü eğilme yükü sonunda meydana gelmiştir. Keskin köşedeki çok küçük radyus ve keskin köşenin yüzeyle kesiştiği yerlerde metalik olmayan inklüzyon olması, çatlakların başlamasına ve sonuçta kırılmaya neden olmuştur.

### Öneri

Yeni shaft yapılırken keskin köşenin radyusu 0.010"R (R 0.254 mm)'den 3/32" R (R 2.38125 mm) 'ye artırılmalıdır. Büyük radyüs bu bölgedeki gerilim birikimini azalatacak ve hasarı önleyecektir.

**b) Zıt yönlü eğilme yorulması;** Şekil 7b'de, zıt yönde (iki taraftan) etkili olan eğilme yükünden dolayı eğilme gerilmesine maruz kalmış dönmeyen bu milin (aksın) kırılan yüzeyinde gözlenen yorulma izleri görülmektedir. Zıt yönde karşılıklı iki ok (↕↕), aynı anda iki çatlak başlangıcını ifade eder. Uygulanan yükler farklı olursa, hem çatlak uzunlukları değişir, hem de orijinleri çok az yer değiştirir. Bu tip yüklemelerde zoraki kırılma bölgesi merkezde oluşur.

**c) Dönel eğilme yorulması;** Şekil 5c'de eğilme yükünden dolayı eğilme gerilmesine maruz kalmış dönen bir mil'de yorulma sonucu oluşan yorulma izleri görülmektedir. Zoraki kırılma bölgesi, çatlak orijininden geçen ve dönme ekseninin ters tarafından yaklaşık 15°'lik açıdaki bir ekseninde meydana gelir. Şayet yüzeyde düzensizlik (çentik, korozyon v.s.) birden fazla ise gerilim birikmesinin az veya çok oluşuna bağlı olarak "zoraki kırılma bölgesi" kesit merkezine doğru yaklaşır. Tekrarlı yüklerin frekansına bağlı olarak da çatlak orijinleri eşit aralıklarla oluşur.

### Ön Bilgi

Şekil 7'de görülen mil, bir pistonlu pompaya aittir. Pompa 1585 dev/dak. ile dönmekte, 57°C'lik sıcaklıkta yaklaşık 140 Kp/cm<sup>2</sup>'lik bir basınca maruz kalarak çalışmakta ve yaklaşık 170 cm<sup>3</sup>/s'lik debi basmaktadır. Bu pompa mili SAE 4150 alaşımli makine yapımı (DIN 50 CrMo4) çeliğinden yapılmıştır. Minimum çeki mukavemeti yaklaşık 9070 Kp/cm<sup>2</sup> dir. Isıl işlem yapıldıktan sonraki sertlik değeri 27-30 HRC olarak ölçülmüştür. Bu mil çalışmaya başladıktan 12 ay sonra kırılmıştır.

### İnceleme

Kırılma yüzeyinde önce gözle sonra makro seviyede mikroskopla yapılan inceleme sonucunda "durak izleri" ne rastlanmıştır. "Zoraki kırılma bölgesi", oval ve gri şeklinde olup, kesitin %15'ini kapsamaktadır. Kırılma yüzeyi parlak ve karanlık oluşmaktadır. Karanlık bölgeler, sertlik veren alaşımın zengin olduğu (44.5-45.5 HRC), parlak bölgeler ise sertlik veren alaşımın fakir olduğu (29-30 HRC) kısımlar olarak, belirlenmiştir. Milin yüzeyinde sertlik yaklaşık 29-33 HRC bulunurken, tam kırılma yerinde ise 30 HRC olarak ölçülmüştür.

### Sonuç

Kırılma yerin görüntüsü incelendiğinde, kırılmanın; zıt yönlü eğilme yorulması veya dönel eğilme yorulması sonucu olduğu ve gerilim birikmesinin yoğun olmasına rağmen nominal yüklemeye meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

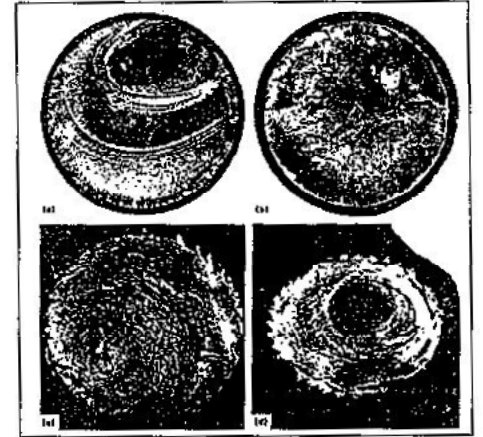
### Öneri

Şayet milin çapı Ø1" (25.4 mm)'den

Ø1.125" (28.575 mm)'e büyütülürse, uygulanan gerilme yükü %25 oranında azalacaktır. Böylece mil daha emniyetli ve uzun olarak çalışabilecektir.

### 3.2. Burulma Yorulması

Burulma gerilmesi neticesinde yorulan millerin çatlakları, eğilme gerilmesi neticesinde oluşan yorulma çatlaklarına benzerdir. Milin eksenı boyunca varolan gerilim arttıncılardan "inklüzyonlar", eğilme gerilmesi altındaki yorulma olayında zararsız olurken, burulma gerilmesi altındaki yorulmada çok zararlıdır. Çünkü dönme eksenı boyunca istenmeyen, fakat her zaman varolabilen bir "inklüzyon", 45°'lik açıdaki düzlemde bulunabilir ve burulma çatlaklarının başlamasına sebep olur. Bu noktadaki çevresi çeki gerilmeleri, bazen kayma gerilmesinin 4 katını aşabilir. Bunun sonucu, 45°'lik düzlemde kırık yüzeyi oluşur.



Şekil 8. a-b) Dönen bir mile eğilme gerilmesi uygulanması sonucu oluşan kırılma yüzeyleri

c-d) Dönen bir mile burulma gerilmesi uygulanarak yorulma sonucu oluşan kırılma yüzeyleri

Şekil 8'de görüldüğü gibi, dönen bir milin eğilme yükü altında yorulmuş kırılmasından sonraki görüntüsü ile burulma yükü sonucu yorulmuş kırılma sonucundaki görüntüsü benzerdir ve yalnız yorulmalara sebebiyet verebilir.

Şekil 8a'da görülen "durak çizgileri" kırılmanın yorulma sonucu olduğunu gösterir. Fakat Şekil 8b'de bu çizgiler sürtünme sonucu yok olmuştur. Dış yüzeydeki "mandal dişi" şeklindeki izler, eğilme yükü altında dönen bir milin yorulmasının göstergesidir. Şekil 8c'de sıvanmış metal görüntüsündeki kırılma yüzeyi, burulma sonucu kesilerek oluşmuştur. Bir başka deyişle, yorulma sonucu oluşmamıştır. Bu

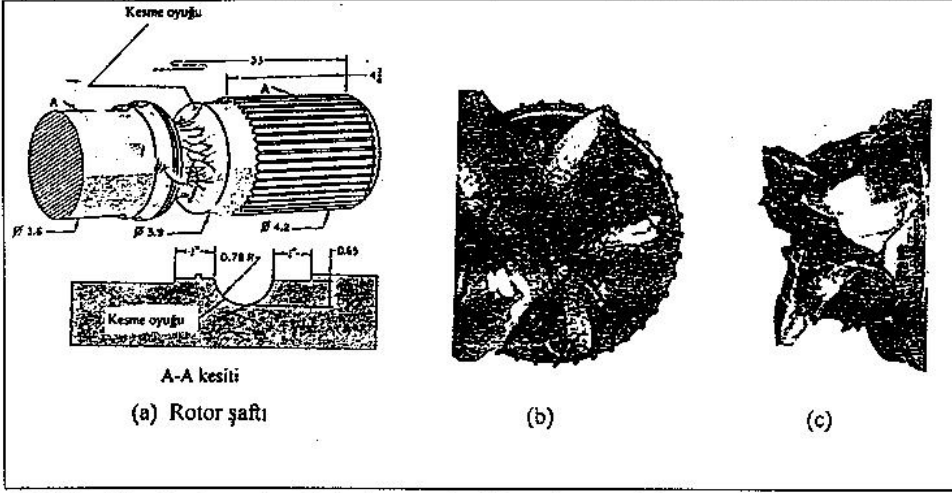


## ÖRNEK

4340 Çeliği (Rocwell C 30-30.5)

oyuğunda yüzey pürüzlülüğü yok denecek kadar azdır. Oyuқта sertlik 30-30.5 HRC

mesi uygulanırsa, yorulma çatlaklarının açısı değişecektir. Bu çatlak, mil ekseninin 45°'lik kısmından farklı bir oluşacaktır.



Şekil 9. a) Burulmalı yorulma ile kırılan ve ani yüklemelerden dişli mekanizmasını korumak için kesme oyuğu dizaynı yapılan, SAE 4340 çeliğinden yapılmış bir rotor şaftının şematik şekli. b) Şaftın kırılan yüzeyi üzerinde yıldız şeklindeki görüntüler. c) Titreşimin sebep olduğu ve yüksek pik yapan yükler sonucu kesme oyuğu yüzeyi üzerinde uzunlamasına ve çapraz şekilde oluşan çatlaklar.

yüzden yorum yapılırken, dikkat edilmesi ve kanıtlanmaması gerekir. Şekil 8'deki kırılma yüzeyi yorulma olarak oluşmuş kırılma yüzeyine çok az benzemektedir. Fakat, bu kırılma tipi de burularak kesme sonucu oluşmuştur. Kırılma yüzeyinin tümünde "zoraki kırılma bölgesi" çok iyi belirlenmemiştir. Bu gibi kırılma yüzey görüntüleri, kamalı millerde, kamaların bulunduğu parça ile uyumsuzlukları sonucu doğan deformasyon nedeniyle meydana gelebilir.

### Ön bilgi

Şekil 9'da görülen SAE 4340 çeliğinden yapılmış büyük bir rotorun bir mili periyodik yüklemeye maruz kalmıştır. Yerine takıldıktan 3 hafta gibi kısa bir zamandan sonra da kırılmıştır. Mil üzerinde dişli vardır ve bu yüzden dönme hızı düşmektedir. Milin üzerindeki dişli mekanizmasına zarar gelmemesi için bir kesme oyuğu açılmıştır. Rotor, saniyede 3 kez sürekli fakat küçük değerlerde, aşırı yüklemeye maruz kalmaktadır.

### İnceleme

Mil oyuğundan kırılmıştır. Kırık yüzeyinin kesit görüntüsü "yıldız" şeklindedir. Çatlak, mil eksenine 45°'lik açıda oluşmuştur. Kesme oyuğunda, çapraz kayma geril

melerinin doğurduğu küçük küçük, fakat uzunlamasına çatlak oluşmuştur. Kesme

arasında ölçülmüştür ve SAE 4340 çeliği için de bu sertlik normaldir. Kimyasal kompozisyonda da anormal katkıya rastlanmamıştır.

### Sonuç

Kırılma, burulma yorulması ile olmuştur. Yorulma çatlakları kesme oyuğunun çevresinde uzunlamasına ve çapraz şekilde gelişmiştir. Bu çatlaklar, aşırı kayma gerilmeleri sonucu doğmuştur. Gerilim birikmesi, maksimum çeki gerilmesine dik ilerlemektedir. Bunun sonucunda da, mil eksenine 45°'lik düzlemde "yıldız" formu meydana gelmiştir. Mildeki kesme oyuğu, dişliye zararı önlemek için tasarlanmıştır. Fakat, mil beklenenden daha düşük yükte kırılmıştır.

### Öneri

Milin yorulma mukavemeti kesme oyuğunun çekiçlenmesi ile artırılabilir. Makinedeki çalışma minimuma indirilmelidir. Dik açılı iki burulma gerilmesi sonucu oluşan yorulma çatlaklarının gelişimi, uygulanan momentin büyüklüğünü de belirtir. Eğer çatlaklar ilk oluşma düzleminde aynı uzunlukta iseler, momentleri de eşit demektir. Mil her yönde moment iletiyor, fakat çatlaklar dik açılarda oluşuyorsa, momentin zıt yönlü olduğu düşünülebilir. Eğer, moment ileten mile eğilme geril

### 3.3. Eksenel Yorulma

Çeki ve bası yüklerinin eksen boyunca değişken veya kararsız şekilde yüklenmesi ile eksenel yorulma oluşur. Bu tip yorulma çatlaklarının görüntüsü, eğilme yorulmasındaki görüntüye benzerdir. Yorulma çatlakları genellikle, yüzeyden ziyade milin içindeki bir süreksizlikten başlar.

### 4. SONUÇ

Makine sanayinde en fazla kullanılan makine elemanları mil ve akslardır. Mil ve aksların bir çoğu değişik kaynaklar sebebiyle hasara uğrarlar. Yorulma ise, mil ve aksların hasara uğramasındaki en önemli parametrelerden birisidir. Genel olarak eğilme, burulma ve eksenel yorulma şeklinde gözlenir.

Her yorulma şeklinde kendine özgü kuralları vardır ve bu kurallar çevresinde, yüklemenin cinsine göre değişik kırılma tarzları meydana gelebilir.

Mil ve aksların kırılması incelenirken dikkat edilmesi gereken önemli noktalar vardır. Bazı mil ve aksların yorulma ve kırılması sonucunda; bu elemanların eğme yüküyle doğan kırılma yüzeyi ile burulma sonucu kesilerek kırılma yüzeylerinde benzerlik olur. Bu benzerliklerden dolayı da yanlış yorumlar yapılarak çözüm getirilemeyebilir. Bu sebeple mil ve aksların yorulma hasar vermeleri hakkında dikkatli ve doğru bilgi edinmesi şarttır. Sonuçta bu bilgilerin ışığında doğru tedbirler alınarak, yıllık hasar maliyetleri azaltılabilir.

### 5. KAYNAKLAR

1. Babalık, F. "Makine Elemanları ve Konstriksiyon Örnekleri", Uludağ Üniversitesi Müh. Fak. U.Ü.Yayıncılık, Bursa, 1985
2. Eryürek, B. "Hasar Analizi", İ. T. Ü. Makine Fakültesi, İstanbul, 1993
3. Metals Handbook, "Failure Analysis and Prevention", 8th Edition Vol. 10, A. S. M. pp. 373-397, 1975