

TÜBİTAK

Marmara Bilimsel ve Endüstriyel  
Araştırma Enstitüsü

# ÇELİK VE DÖKME DEMİRLERİN YORULMA DAYANIMI

MALZEME DAVRANIŞI, BİÇİM ETKİSİ VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Yazan

**Dr. Ing. Herbert Tauscher**

Çevirenler

**Prof. Dr. Şefik Güleç**

**Dr. Müh. Ahmet Aran**

MBEAE MATBAASI - GEBZE

1983

Dr.-Ing. Herbert Tauscher

DAUERFESTIGKEIT VON STAHL UND GUSSEISEN

Werkstoffverhalten, Gestalteinfluss und Berechnungsgrundlagen;  
Erläuterungen, Diagramme, Tabellen, Zahlenbeispiele.

Mit 175 Bildern und 43 Tabellen

Copyright by VEB Fachbuchverlag Leipzig 1971

ARCHIMEDES VERLAG - KREUZLINGEN / SCHWEIZ

539.43:669.14(02)=943.5

TAU

1983

Tauscher, Herbert

Çelik ve dökme demirlerin yorulma dayanımı.  
Malzeme davranışı, biçim etkisi ve hesaplama  
yöntemleri. Çev. Şefik Güleç-Ahmet Aran. Gebze.  
Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma  
Enstitüsü Matbaası, 1983.

210s., 175 şekil, 8.

TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma  
Enstitüsü Malzeme Araştırma Bölümü.

Konu: 1) Yorulma-metallerde 2) Çelik yorulma  
3) Dökme demir-yorulma.

## Ö N S Ö Z

Sanayi ürünleri ancak çağdaş bilimsel ve teknik bilgilere dayanarak tasarlanır ve üretilirlerse tekniğin gelişmiş durumunu simgelerler. Bu da tasarımcı açısından malzemenin ekonomik kullanımını gözönünde tutarak en uygun hafif yapının gerçekleştirilmesi, üretici bakımından da modern ve ekonomik yöntemlerin uygulanması anlamını taşır.

Statik zorlamalar altındaki makina parçalarının hafif tasarımı için, dış yüklerin belirli olması halinde oldukça basit bir hesaplama yeterlidir. Dinamik olarak zorlanan parçaların hafif tasarıma yönelik boyutlandırılması ise daha güç olup; yük kabulü ve ölçümünde, işletme zorlamalarının değerlendirilmesinde, biçimlendirmede, malzeme seçiminde, çağdaş teknolojilerin kullanılmasında ve herşeyden önce hesaplama yöntemlerinin uygulanmasında değişik sorunlara çözüm bulmak gerekir.

Yorulma dayanımını etkileyen değişik faktörler incelenirse, bunların çoğunlukla malzemenin özel davranışına yakından bağlı olduğu görülür. Bu nedenle kitapta malzeme ve üretim teknolojileri ile ilgili çeşitli önerilere yer verilip, okuyucunun geniş olan yorulma alanında gerek tasarımı gerekse malzeme ve üretim yöntemi seçimini kolaylaştırıcı bilgiler edinebilmesi amaçlanmıştır. Bu bilgiler şekil, diyagram, sayısal değerler yanında, tasarım ve hesaplama örnekleriyle de desteklenmiş bulunmaktadır.

Verilen çok sayıda kaynak gerektiğinde konunun ayrıntılarına inmek, alfabetik dizin ise özel soruların yanıtlarını çabuk bulmak için yararlı olabilir.

Kitap ile ilgili yapıcı eleştiri ve uyarılar her zaman şükranla karşılanacaktır.

Yazar ve Yayınevi

Türkçeye çevirdiğimiz bu kitabın, makina konstrüksiyonu ve imalatıyla uğraşan mühendislere yardımcı olacağı, hasar analizi sorunlarına da yorulma açısından ışık tutacağı kanısındayız.

Konuların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla çeviri oldukça serbest şekilde gerçekleştirilerek metin ve şekillerde bazı küçük değişiklikler yapılmış, dip notları konmuş, kitabın sonuna önemli görülen deyimlerin Almanca ve İngilizce karşılıkları eklenmiştir.

Çalışmalarımıza yazım, çizim ve basım işlemleriyle katkıda bulunan Enstitü görevlilerine teşekkür ederiz.

Çevirenler

## İ Ç İ N D E K İ L E R

1. YORULMA ZORLAMASI VE KIRILMASI	7
1.1. Genel	7
1.2. Yorulma Zorlamasının Özellikleri	8
1.3. Yorulma Kırılmasının Nedeni	9
1.4. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı	10
1.5. Yorulma Kırılmasına Neden Olan veya Kırılmayı Kolaylaştıran Etkenler	11
1.5.1. Dış Etkenler	12
1.5.2. İç Etkenler	12
2. KIRIKLARININ MAKROSKOPİK GÖRÜNÜMLERİ VE OLUŞUM ŞEKİLLERİ	15
2.1. Yorulma Kırıklarının Görünümü	15
2.2. Yorulma Kırılmasının Oluşum Şekilleri	15
2.3. Çekme veya Çekme-Basma Zorlamaları Altında Oluşan Yorulma Kırılmalarına Örnekler	20
2.4. Çekme ve Tek Taraflı Eğme Zorlaması Altındaki Bir Yorulma Kırılmasına Örnek	20
2.5. Çevresel Eğme ve Burma Zorlaması Sonucu Oluşan Yorulma Kırılmasına Örnek	22
2.6. Eğme ve Burmanın Neden Olduğu Bir Yorulma Kırılmasına Örnek	23
3. YORULMA DAYANIMININ SAPTANMASI VE GÖSTERİMİ	24
3.1. Genel	24
3.2. Yorulma Dayanımının Saptanması	24
3.3. Yorulma ile İlgili Semboller	27
3.4. Yorulma Dayanımına İlişkin Genel Tanımlar	29
3.5. Yorulma Dayanımına İlişkin Özel Tanımlar	29
3.6. Süreli Yorulma Dayanımı	29
3.7. Yorulma Ömrü	31
3.8. Yorulma Dayanımının Smith Diyagramı ile Gösterilişi	31
3.9. İşletme ve Zorlama Türleri	33
3.10. Yapı ve Konstrüksiyon Çeliklerinin Yorulma Dayanımı Diyagramları	37
3.11. Dökme Çeliklerin Yorulma Dayanımı Diyagramları	63
3.12. Lamel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Diyagramları	65
3.13. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Diyagramları	66
3.14. Temper Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Diyagramları	68
3.15. Cıvataların Çekme-Basma Zorlamaları Altındaki Yorulma Dayanımı	69
3.16. Perçin Bağlantılarının Yorulma Dayanımı	74
3.17. Çelik Teller, Helisel Yayılar ve Çelik Halatların Yorulma Dayanımları	75
3.18. Kaynak Bağlantılarının Yorulma Dayanımı	81
4. KOROZYON VE YÜZEY KORUMANIN YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ	96

5.	KONSTRÜKTİF ÇENTİKLERİN YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ	107
5.1.	Çentik Duyarlılığı ve Yorulma Çentik Katsayısı	107
5.2.	Faturalı Yuvarlak Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları	111
5.3.	Enine Delikli Yuvarlak Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları	113
5.4.	Delikli Yassı Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları	115
5.5.	Çevresel Çentikli Yuvarlak Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları	116
5.6.	Göbek Geçmeli Millerin Yorulma Çentik Katsayıları	122
5.7.	Kamalı ve Kama Yuvalı Miller İçin Yorulma Çentik Katsayıları	124
5.8.	Ucu Delikli Çubuklar İçin Yorulma Çentik Katsayıları	126
5.9.	Çentik Katsayısı, Çentik Duyarlılık Katsayısı ve Yorulma Çentik Katsayısının Hesap Yoluyla Bulunması	129
5.10.	Değişik Çentik Biçimleri İçin Çentik Katsayıları	133
5.11.	Gerilme Azaltıcı ve Artırıcı Çentikler	143
6.	MAKİNA ELEMANLARI İÇİN YORULMA DAYANIMININ HESAPLANMASI	149
6.1.	Genel	149
6.2.	Yorulma Dayanımına Boyut Etkisi	149
6.3.	Yorulma Dayanımına Yüzey Etkisi	153
6.4.	Kesit Biçiminin Yorulma Dayanımına Etkisi	154
6.5.	Zorlamada Darbelerin Etkisi	155
6.6.	Yorulma Zorlamalarında Emniyet Katsayısı, Seçimi ve Saptanması	156
6.7.	Yorulma Zorlamaları Altındaki Makina Parçalarının İşletme Dayanım Deneyleri Yardımıyla Boyutlandırılması	160
6.8.	Sürekli Yorulma Dayanımı İçin Hesap Yöntemi	161
6.9.	Aşırı Yüklemelerin Yorulma Dayanımına Etkisi	163
6.10.	Bileşik Zorlamalar Altında Yorulma Dayanımının Hesaplanması	166
7.	YORULMA DAYANIMI HESAPLARINDA GELİŞME YÖNLERİ	173
8.	SAYISAL ÖRNEKLER	179
8.1.	Hesaplama Sırası	179
8.2.	Sayısal Örnek-1	181
8.3.	Sayısal Örnek-2	183
8.4.	Sayısal Örnek-3	185
8.5.	Sayısal Örnek-4	192
8.6.	Sayısal Örnek-5	195
8.7.	Sayısal Örnek-6	197
8.8.	Sayısal Örnek-7	200
8.9.	Sayısal Örnek-8	203
	Bu kitapta kullanılan yorulma ile ilgili bazı deyimlerin Almanca ve İngilizce karşılıkları	206
	Alfabetik dizin	208

## 1. YORULMA ZORLAMASI VE KIRILMASI

### 1.1. Genel

Uygulamada statik zorlamalara ender olarak rastlanır. Makinalara ve dolayısıyla makina parçalarına, genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetler ile eğme ve burma momentleri etki ederler. Değişen zorlamalardan dolayı kırılma, sözkonusu malzemenin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde oluşabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir. Tasarım sırasında mukavemet bilgisinin temel denklemleri yardımıyla sadece anma gerilmelerinin hesaplanmasının yeterli olmayıp, gerilmelerin kesitteki dağılımlarının ve zamanla değişimlerinin de dikkate alınması gerektiği ancak belirli aşamalardan sonra anlaşılmıştır.

Konstrüktörler tasarımlarında malzemelerin ekonomik olarak kullanımını gözönünde bulundurmaya zorundadırlar. Mukavemet ve elastisite bilgisinin gelişmesi, giderek daha düşük güvenlik katsayılarının seçimi ve yüklerin daha kesin olarak tahmin edilebilmesi ile, malzeme değişikliğine gitmeden de makina ve yapı elemanlarının daha küçük kesitli olarak boyutlandırılabilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu durumda gerilmelerin akma sınırını aşmamasına yeterince özen gösterildiği halde, işletme sırasında makina parçalarında kırılmalar gözlenmeye başlanmıştır. Herhangibir şekil değiştirme yaratmadan ortaya çıkan bu kırıkların, yüksek yüklerin bir kez ve tek yönde uygulanması ile oluşan kırılma yüzeylelerinden, görünüşleri bakımından tamamiyle farklı oldukları saptanmıştır. Bu gözlemlere dayanarak kısa bir süre sonra yüklerin veya momentlerin büyüklüğü ve yönünde zamanla değişmelerin sözkonusu olduğu durumlarda, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirlemede yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Böylece bütün bu deneyimler yorulma dayanımı\* kavramının doğmasına neden olmuş ve deneysel olarak yorulma dayanımının, statik dayanım değerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır. Ancak işletme yüklerine göre hesaplanan gerilmeler, kullanılan malzemenin düzgün

---

\* ) Yorulma Dayanımı: Sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen kırılmaya neden olmayan en yüksek gerilme.

yüzeyle ve parlatılmış deney parçaları yardımıyla bulunan yorulma dayanımının çok altında kalmasına rağmen, makina parçalarının gene hasara uğradığı gözlenmiştir. Bunun üzerine yapılan deneylerle, şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makina parçasının bulunduğu ortam ve malzemenin iç yapısı gibi değişik iç ve dış etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği; dolayısıyla bu etkenleri dikkate almadan bulunan yorulma dayanımı değerlerinin mukavemet hesaplarında aynen kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

İşletme koşullarında değişen zorlamaları ve malzeme davranışını hesapsal olarak kapsamayı amaçlayan çalışmalar henüz tatmin edici olmamakla birlikte, parçaların gittikçe daha iyi bir yaklaşımla tasarlanmasını sağlamaktadır. Şimdiye kadar çok sayıda yorulma deneyi sonucu ve değişik hesaplama yöntemleri yayınlanmıştır. Bu kuramsal yöntemler, sorunun matematiksel çözümü yanında tasarım kuralları ile kullanılan malzemenin özelliklerinin iyi bilinmesi halinde güvenle uygulanabilmektedir. Ancak yorulmaya etki eden faktörlerin fazlalığından ötürü günümüzde de gene çok sayıda yorulma hasarına rastlanmakta; makina, taşıt v.b. konstrüksiyonlarda görülen hasarın % 90-95'i yorulmadan ileri gelmektedir.

Konstrüktörler değişen yükler ile zorlanan parçaların tasarımında verilere bağlı olarak aşağıdaki değişik hesaplama yöntemlerini izleyebilirler:

- a) Konstrüksiyonu belirleyen dört büyüklük de (şekil, boyutlar, malzeme ve zorlama) verilmişse, sadece kritik kesitlerde yorulmaya karşı güvenliğin yeterli olup olmadığının kontrolü gereklidir. Güvenliğin yeterli olmadığı durumlarda özel yöntemler ile malzemenin yorulma dayanımı yükseltilmeye çalışılır (yüzeylerin sertleştirilmesi, parlatma, ıslah etme, v.b.).
- b) Sadece malzeme ve zorlama şeklinin belirli olduğu durumlarda, parça gerekli güvenlik sağlanacak şekilde boyutlandırılır.
- c) Eğer parçanın şekli ve boyutları belirli ise, o zaman gerekli güvenlik sağlanacak şekilde, malzeme ve zorlama üst sınırı saptanır.

## 1.2. Yorulma Zorlamasının Özellikleri

Büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz bir şekilde sürekli değişen kuvvet veya momentlerin (eğme, burma) etkimesi yorulma zorlaması olarak adlandırılır. Zorlama sırasında yük istendiği kadar tekrarlanabilir veya zorlamanın yapılmadığı zaman aralıkları mevcut olabilir.

Yorulma zorlamasında yükün zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olduğundan, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilebilir. Birim zamandaki çevrim sayısı\*, çok düşük (örneğin saatte birkaç çevrim) veya malzemenin ısınmasına neden olacak kadar çok yüksek olmamak koşuluyla, yorulma ömrünü\*\* önemli ölçüde etkilemez. Kuvvetin veya momentin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Yorulma zorlamasının iki hali için özel isimler verilmiştir: Kuvvet veya moment aynı büyüklükte, fakat biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise değişken zorlama ve malzeme dayanımı bakımından değişken yorulma dayanımı değeri sözkonusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeri ile belirli bir diğeri sınır arasında değişiyor ise dalgalı zorlama ve malzeme dayanımı bakımından dalgalı yorulma dayanımı değeri deyimleri kullanılır. Yorulma zorlaması sadece dış kuvvetlerin değil, örneğin sıcaklık farkları nedeni ile oluşan iç kuvvetlerin etkimesi ile de görülebilir.

### 1.3. Yorulma Kırılmasının Nedeni

İşletme koşullarındaki zorlamalar sonucu ortaya çıkan gerilmeler mukavemet bilgisinin temel denklemlerine her zaman uymaz; dolayısıyla çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve burma gerilmelerinde yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermeyebilirler. Uygulamada bu kuramsal gerilme dağılımlarında\*\*\* az veya çok sapmalar görülür. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikroyapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile yerel gerilme yığılımları oluşur. Yorulma çatlağı gerilme yığılımlarının bulunduğu bölgelerde başlar. Ayrıca bir makina veya yapı elemanının öztitreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu oluşan rezonans titreşimlerine veya her zaman önlenmesi mümkün olmayan aşırı yüklere dayanacak şekilde tasarlanmış olmaması da yorulma çatlaklarına yol açabilir. Yorulma hasarının diğeri bir nedeni de montaj hatalarıdır. Örneğin balansı bozulmuş bir milde, hesaplarda öngörülenden daha yüksek gerilmeler oluşabilir.

\*) Çevrim: Periyot, yük tekrarı

Birim zamandaki çevrim sayısı: Frekans, yük tekrar hızı

\*\*) Yorulma Ömrü: Kırılmaya kadar geçen çevrim sayısı.

\*\*\*) Çekme veya basmada kesite eşit olarak dağıldığı varsayılan gerilmeye; eğme veya burmada doğrusal olarak değiştiği varsayılan gerilmenin maksimum değerine "Anma Gerilmesi" denir.



Ayrıca zorlanan bölgelerde dolgu kaynağı işlemlerinin uygun olarak yapılmaması halinde de yorulma çatlakları görülebilir. Aşırı zorlanan bir bölgede bir çatlağın başlaması durumunda yorulma kırılmasının önlenmesine çoğunlukla olanak yoktur. Çatlağın ilerleyerek kırılmanın oluşması ise çevrim sayısı yani (frekansa bağlı olarak) belirli bir zaman sorunudur. Bir yorulma çatlağının görülmesi kullanılan malzeme veya malzeme durumu için yerel bir gerilme yükselmesinin bulunduğuna işarettir. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkaracağından, gerilmeler bakımından durum daha kötüleşecek, bu suretle yaratılan çok yüksek gerilme yığılmaları çatlağın hızla ilerlemesi ve büyümesine neden olacaktır. Ayrıca yük taşıyan kesit sürekli küçüldüğünden, bu kesitte gerilmenin sınır değerleri giderek daha da yükselecektir. Gözlemler yorulma çatlağı ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Parçanın ikiye ayrılması çoğunlukla uzunca bir süreyi gerektirdiği ve zorlama sürekli değiştiği için olay yorulma kırılması olarak adlandırılır. Bazı hallerde ise yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılması ile sonuçlanmaz; çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalırsa veya çatlağın çevresinde gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi oluşursa çatlak ilerlemesi durabilir.

#### 1.4. 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, ayrı-

ca az da olsa frekansa bağlıdır. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu kanıtlamıştır [1]. 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 yolaçtığı yeterince araştırılmış ve tatmin edici bir kuramsal açıklama yapılmış değildir. Bununla birlikte örneğin X-ışını araştırmaları [2] hasar başlangıç kademeleri hakkında bazı bilgiler sağlamış ve yorulma sırasında iç gerilmelerin meydana geldiğini göstermiştir.  $-180^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta çekme-basma değişken yükleri ile zorlanan deney parçalarında yapılan mikroyapı gözlemleri de, gittikçe artan ölçüde ikiz oluşumunun varlığını ortaya koymuştur.

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

Hasar çok küçük ve sınırlı bir bölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden dışardan 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.

#### 1.5. Yorulma Kırılmasına Neden Olan veya Kırılmayı Kolaylaştıran Etkenler

Yorulma kırılmasını kolaylaştıran etkenler [3] 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 yük-

leme, montaj hataları, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerle ortaya çıkmaktadır.

#### 1.5.1. Dış Etkenler

1. Konstrüksiyonla ilgili çentikler: Örneğin yağ delikleri, kama yuvaları, keskin kesit değişimleri, faturalar, enine delikler v.b.
2. Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler: Örneğin civata kafaları, krank millerinin dirsekleri, sıkı geçmeler v.b.
3. Kuvvet etki noktaları: Örneğin toleranslı veya sıkı geçmeler, dingil başlıkları ve diğer noktasal veya çizgisel etkiyen kuvvetler.
4. Talaşlı işlemler sırasında oluşan yüzey zedelenmeleri: Örneğin taşlama izleri, taşlama çatlakları, torna izleri, yüzey çizikleri v.b.
5. 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.

#### 1:5.2. İç Etkenler

1. Çizgi halinde cüruflar, cüruf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler veya tek tek iri cüruf kalıntıları: Cürufların, oksitlerin, nitrürlerin ve karbürlerin tane sınırlarına çökmeleleri.
2. Her türden birikmeler (segregasyonlar).
3. Yüzey kabarcıkları.
4. Mikrolunkerler (örneğin döküm yapısındaki malzemelerde) veya soğuk şekil değiştirme sırasında sert kalıntılar içinde ve çevresinde oluşan mikroboşluklar (örneğin kaba lamelli perlit veya alüminyum oksit kalıntıları içeren çeliklerin soğuk şekil değiştirmesinde).
5. 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.
6. İç çatlak kümeleri: Haddelenmiş veya dövülmüş

çeliklerde veya çeliklerin ark kaynağı dikişlerinde görülür\*.

7. 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.
8. Sertleştirilmiş çeliklerde yapı farklılıkları: Örneğin martenzitte kısmen beynit, perlit veya ferrit bölgeleri; temperleme veya ostemperleme ısıl işleminden sonra yüksek oranda artı ostenit; ostemperlemeden sonra yüksek oranda ferrit veya perlit bulunması.
9. Aşırı ısıtılmış yapı: Örneğin Widmannstaetten yapısı veya kaba taneli yapılar. Perlit ve ferrit karışımlarında  $800..2500 \mu m^2$ , ince ilâ normal tane büyüklüğü olarak kabul edilebilir. Aşırı ısıtılmış yapılar yorulma dayanımını daima olumsuz yönde etkiler.
10. Bant veya ağ şeklinde veya bölge bölge yoğunlaşmış serbest karbürler: Örneğin takım çelikleri ve sementasyon çeliklerinde.
11. Sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş çelik parçaların yüzeyinde karbon azalması (dekarbürizasyon).
12. 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.
13. Bölgesel yüzey sertleştirilmesi yapılmış malzemelerin yük taşıyan bölgelerinde veya çentiklerde, sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş kısımlar arasındaki keskin geçişler.
14. Sementasyon ile sertleştirilmiş çelik malzemenin yüzeyinde artık ostenit bulunması.

---

\* ) Çok sayıda küçük iç çatlağın oluşturduğu böyle bir küme kırık yüzeyinde parlak leke (balık gözü) halinde belirir.

16. Sertleştirilmiş çeliklerde çeşitli nedenlerle yumuşak kalan bölgeler.
17. 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.
18. 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.
19. Kaynak dikişlerinde gaz boşlukları, gözenekler, cüruf kalıntıları, çatlaklar, erime oyukları bulunması. Yorulma zorlamasıyla karşılaşılabilecek kaynak bağlantılarının gerilme giderme ve normalizasyon tavlarının yapılmaması.
20. Kaynak dikişi dışındaki elektrot ateşleme izleri.
21. 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).
22. Talaşlı veya talaşsız şekil verme veya ısıtım işlemlerden 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 raslanılan hataları önem sırasımı 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.

- 
- [1] HEMPEL, M. ve E. HOUDREMONT: *Stahl u. Eisen* (1953) S. 1503 ... 1511
  - [2] MÜLLER, P. ve E. MACHERAUCH: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1949) S. 205...210.
  - [3] DITTSCHLAG, H. ve H. TAUSCHER: *Maschinenbautechnik* (1955) S. 303...311.

## 2. KIRIKLARININ MAKROSKOPİK GÖRÜNÜMLERİ ve OLUŞUM ŞEKİLLERİ

### 2.1. Yorulma Kırıklarının Görünümü

Yorulma kırıklarının görünümü [1], [2], 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 görünümleri bakımından birbirinden tamamen farklı iki bölge ortaya çıkar:

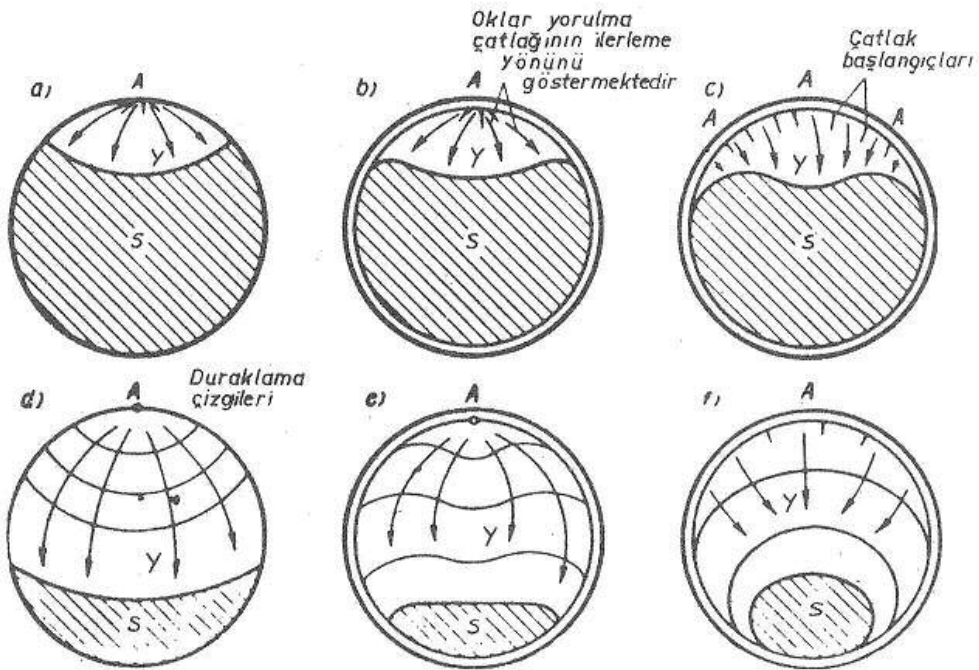
- a) Düzgün ve mat veya bazen sürtünerek parlamış bölge: Yorulma çatlağı
- b) Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında zorunlu olarak ani kırılmış bölge: Son kırılma yüzeyi.

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.

### 2.2. Yorulma Kırılmasının Oluşum Şekilleri

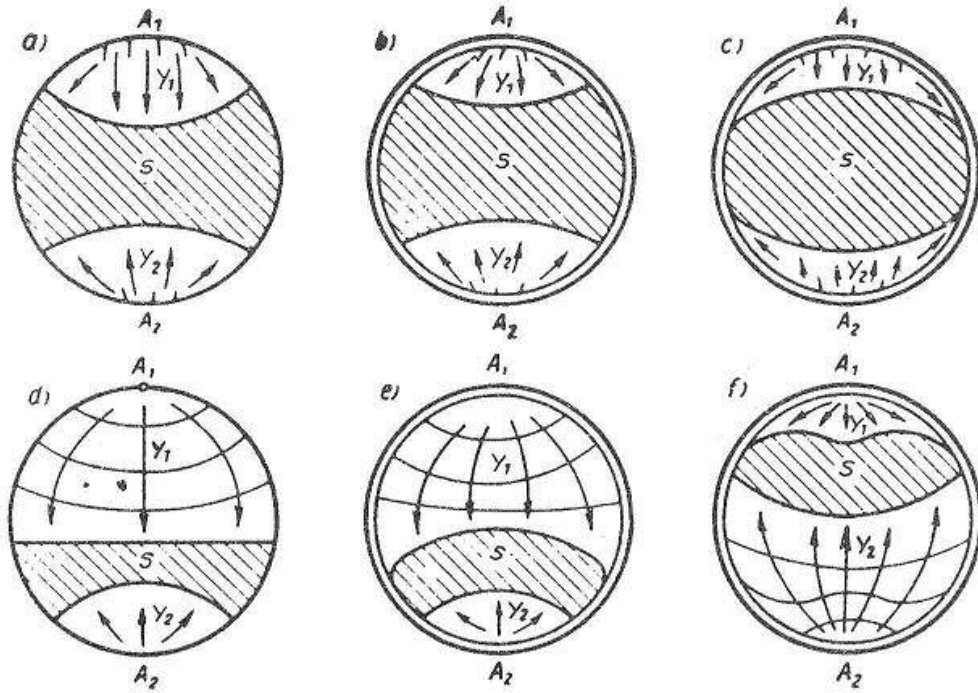
Şekil-la...f'de çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamasının ortak etkimesi sonucu görülebilecek yorulma kırılmalarının oluşum şekilleri şematik olarak gösterilmiştir. Çekme zorlamasının tek başına etkimesi çok ender rastlanan bir olaydır. Çoğunlukla kuvvet etkime noktasının çok az da olsa eksenden kaçması ile çekme zorlamalarına ek olarak tek taraflı eğmelerin ortaya çıkması ve ayrıca yorulma çatlağının ilerlemesi ile eğme gerilmelerinin artması sözkonusudur. 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-la...f'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-la...f: Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri. Y: yorulma çatlağı; 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.
- Çekme zorlaması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Cephe kenarları daha da hızlı ilerliyor.
- Çekme. Düşük anma gerilmesi. Küçük bir yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça. Çatlak cephesi A etrafında daireler şeklinde ilerliyor.
- Çekme. Düşük anma gerilmesi. Zayıf fakat çevresel olan çentik etkisi nedeniyle çatlak cephesi kenarları hızlı ilerliyor.
- Çekme. Düşük anma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Son kırılma hemen hemen tümüyle yorulma çatlağı ile çevrilmiş.



Şekil-2a...f: Çift taraflı eğme zorlamaları altında yorulma kırıklarının oluşumu

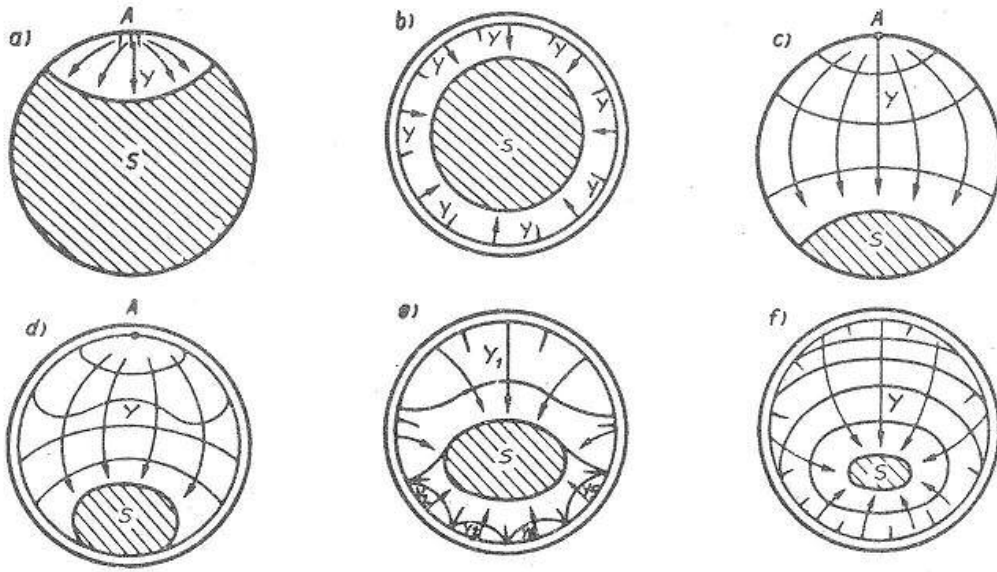
- a) Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf.
- b) Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi zayıf.
- c) Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi kuvvetli.
- d) Anma gerilmesi düşük, zayıf yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça.
- e) Anma gerilmesi düşük, tüm çevrede zayıf çentik etkisi.
- f) Anma gerilmesi düşük, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Şekil-2a...f 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-3a...f'de gösterilmiştir. Bu şekiller çekme veya tek taraflı eğmeye çok benzer olabilirler, ancak çatlakın ilerlemesi her ikisinden de daha hızlıdır.

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





Şekil 3-a...f: Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları

- 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. Çok sayıda çatlak başlangıcı.
- f) Düşük anma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Burma zorlaması sonucu meydana gelen yorulma kırık yüzeyleri, görünümleri 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 etkilediği bölgeler bulunan sünek malzemelerde burma yorulma çatlakları mil eksenine  $45^\circ$  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 bir çok

yerinde çatlak başlayarak halka şeklinde kesit ortasına ilerleyen bir yorulma çatlağı meydana gelir.

Burma yorulması çatlaklarının veya eğme ile burmanın ortak etkilediği durumlarda görülen yorulma çatlaklarının yorumlanması, bu konuda çok fazla deneyimi gerektirir.

Kır dökme demirin yorulma kırığı çeliklerinkinden değişik görünümde dir. 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 yüzbin ve hatta gerilmenin seviyesine bağlı olarak birkaç çevrim mertebesine kadar azalabilir. Böylece oluşan kırık yüzeyi, yorulma kırılması ile zorunlu kırılma\* arasında bir görünüme sahiptir. Sürelî 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, sürelî yorulma çatlağı kısmen yarıklar içeren basamaklı ve taneli bir görünümde dir. 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 sürelî 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.

---

\* ) Zorunlu Kırılma: Tek yönlü süreklî artan zorlama sonucu kırılma.

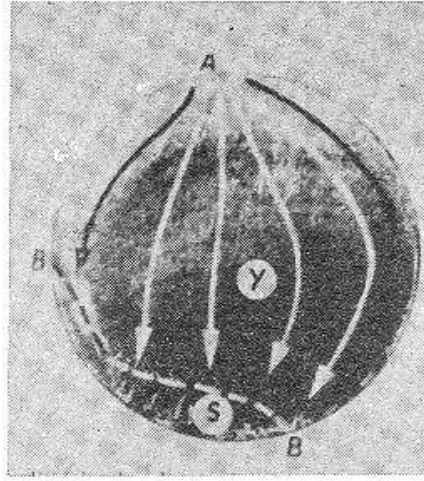
### 2.3. Çekme veya Çekme-Basma Zorlamaları Altında Oluşan Yorulma Kırılmalarına Örnekler

Şekil-4'te kroshead yuvası konik olan bir piston kolunun yorulma kırılması görülmektedir. Parça silindirik kısım ile toleranslı konik geçme arasındaki bölgede ve kama deliğinden 20 mm uzaklıkta kırılmıştır. Olay çekme ve çekme-basma zorlamaları altında oluşan bir yorulma kırılmasıdır. Çatlak A noktasında başlamış ve buradan oklar yönünde kesik çizgi ile gösterilen BB hattına kadar ilerlemiştir. BB hattına ulaşıldıktan sonra meydana gelen son kırılma yüzeyi S, yorulma çatlağı yüzeyi Y'ye göre oldukça küçüktür. Bu gözlemden piston kolundaki işletme zorlaması veya kırık yüzeyindeki anma gerilmesinin düşük olduğu sonucu çıkar. Oluşum şekli bakımından Şekil 4'de benzeyen kırık yüzeyinin görünümünden, çevresel değil A noktasında bulunan yerel bir çentik etkisinin sözkonusu olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan inceleme bir dolgu kaynağının yapıldığını, fakat daha sonra herhangi bir gerilme giderme ısıl işleminin uygulanmadığını ortaya çıkarmıştır.

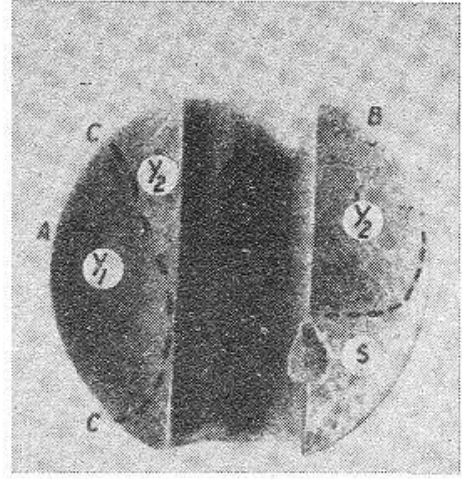
Şekil-5'te bir piston kolunun kama deliğinde meydana gelen çekme-basma yorulma kırığı görülmektedir. Dış yüzeyin kusursuz taşlanmış olmasına karşın, piston kolunun konik uç kısmının krosheade gevşek geçirilmesi sonucu yük dağılımı homojen olmayıp A ve B noktalarında ezilme ve aşınma izleri bulunmuştur. Oysa böyle bir bağlantı yerinin, yük tüm yüzey tarafından taşınacak şekilde, boşluksuz ve öngerilmeli olması gerekir. Bu durumun sağlanmaması nedeniyle A noktasında başlayan yorulma çatlağı Y<sub>1</sub> yüzeyinde ilerlerken, aynı kesitte B noktasından kaynaklanan ikinci bir çatlak daha kaba görümlü Y<sub>2</sub> kırık yüzeyi boyunca gelişip ilk çatlakla birleşmiştir. Son kırılma ise kayma kırılması olarak, yani çubuk eksemine 45° açı ile oluşmuştur. Son kırılma yüzeyi çok küçük olup tüm yüzeyin yaklaşık %20'si kadardır. Dolayısıyla piston kolunun yeterince kalın olarak boyutlandırıldığı söylenebilir.

### 2.4. Çekme ve Tek Taraflı Eğme Zorlaması Altındaki Bir Yorulma Kırılmasına Örnek

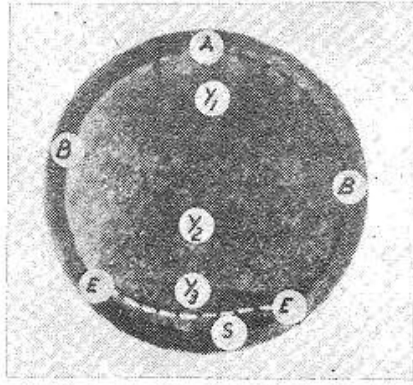
Şekil-6'da bir biyel civatasının yorulma kırılması gösterilmiştir. Biyel civatası uzar civata olarak boyutlandırılmış olup iki ayrı uzama boyuna sahiptir. Bunların ilki civata başı ile orta kılavuzlama bölgesi, diğeri ise kılavuzlama bölgesi ile dış açılmış kısım arasındadır. Uzar civataların, uzama boylarının taşlanmış, parlatılmış ve soğuk haddelenmiş temiz yüzeyler olarak hazırlanması ve ayrıca uzama boyu ile civata başı ve dış açılmış kısım arasındaki geçiş yarıçaplarının yeterince büyük olması halinde yorulma ömürlerinin en uzun olduğu



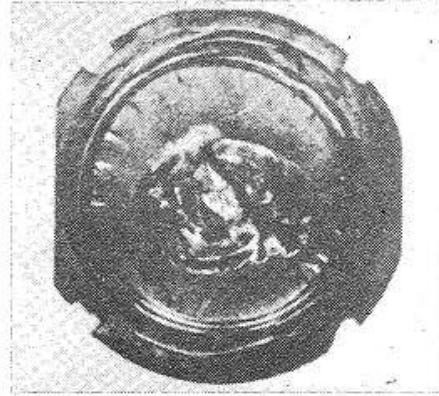
Şekil-4: Bir piston kolunun çekme-basma yorulma kırığı



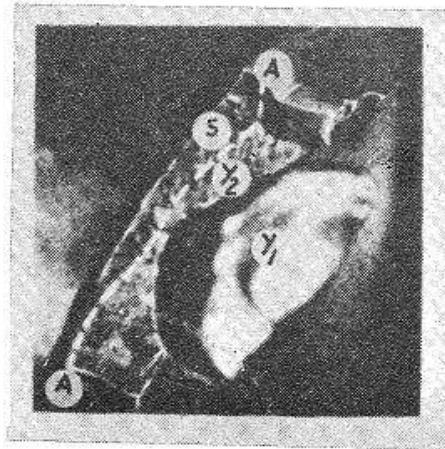
Şekil-5: Bir piston kolunun çekme-basma yorulma kırığı



Şekil-6: Bir biyel civatasında çekme ve tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi ile oluşan yorulma kırığı



Şekil-7: Eğme ve burmanın ortak etkimesi sonucu bir milde oluşan yorulma kırığı



Şekil-8: Bir krank mili muylusunda oluşan yorulma kırığı

bilinmektedir. İncelenen olayda uzama boylarının silindirik yüzeylerinde çok sayıda ince torna izleri vardır ve hem kafa hem de diş kısmına olan geçişlerin yarıçapları küçüktür. Bu geçişlerde küçük yarıçaplar ve torna izlerinden dolayı çentik etkileri oluşmuş ve anma gerilmesinin 3..4 katı büyük yerel gerilme yığılmaları ortaya çıkmıştır. Bu nedenle uzama boyu ile orta kılavuzlama bölgesi arasındaki geçişte yorulma kırılması meydana gelmiştir. Burada biyel cıvataları için karakteristik olan dalgalı çekme ile tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi sözkonusudur. Aşırı keskin geçiş ve torna izleri nedeniyle yüksek bir çevresel çentik etkisi vardır. Yüksek çentik etkisi ve orta seviyedeki anma gerilmesinden ötürü, çatlak başlangıç noktası A'da çok sayıda ve radyal yönde çatlaklar bulunmaktadır. Çatlak önce Y<sub>1</sub> yüzeyinde BB hattına kadar yürümüş, burada işletmenin durmasından veya zorlama seviyesinin düşmesinden kaynaklanan ilk duraklama meydana gelmiştir. Y<sub>2</sub> ile gösterilen ikinci yorulma kırığından sonra tekrar bir duraklama vardır. Bundan sonra EE hattına kadar kırılmanın oldukça hızlı ilerlediği görülmektedir. Son kırılma ise EE'den itibaren S alanında oluşmuştur ve bu kırık yüzeyi cıvata eksenine yaklaşık 45° lik bir açı yapmaktadır. Burada da son kırılma kayma dayanımının aşılması ile olmuştur. Bu olayda son kırılma yüzeyinin küçük olması anma gerilmesinin çok düşük olduğunu değil, çatlakın ilerlemesi ile cıvatanın uzayıp toplam yükün taşınmasında giderek daha az pay üstlendiğini gösterir. Böylece aşırı yüklenen diğer biyel cıvatasında da bir yorulma çatlak oluşması beklenir.

## 2.5. Çevresel Eğme ve Burma Zorlaması Sonucu Oluşan Yorulma Kırılmasına Örnek

Şekil-7'de eğme ve aynı zamanda etkiyen burma zorlamaları altındaki bir milde oluşan yorulma kırılması görülmektedir. Küçük olan son kırılma yüzeyi kırılma kesitinin yaklaşık olarak ortasındadır. Kırılan mil kısımlarının birbiri üzerinde çalışmalarından dolayı son kırılma yüzeyi ezilmiş ve yarılmıştır; bu nedenle de olduğundan büyük görülmektedir. Son kırılmanın konumu ve büyüklüğü ile çevrede bulunan çok sayıda radyal çatlak başlangıcı aşağıdaki bilgileri vermektedir:

1. Yorulma çatlaklarının başlamasında ve ilerlemesinde çevresel eğme yanında, önemli oranda burma zorlaması da sözkonusudur.
2. Kırık, kuvvetli çevresel çentik etkisinin bulunduğu kesittedir.
3. Kullanılan malzeme yapısal olarak çentik etkisine karşı oldukça duyarsızdır.

Yorulma kırılması dış açılmış kısmın ucundaki keskin

bir kalem dalma yerinden başlamış ve ayrıca malzemenin yorulma dayanımının düşük olması da kırılmayı kolaylaştırmıştır. Malzeme olarak 20MnCr5 sementasyon çeliği yüzey sertleştirmesi yapılmadan normalize halde kullanılmıştır. Oysa sözkonusu dalma keskin kenarlı değil, yeterince büyük bir yuvarlatma çapı ile yapılmış ve ayrıca malzeme olarak 90...100 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip bir ıslah çeliği seçilmiş olsaydı, bu milin yorulma kırılmasına uğramaması gerekirdi.

## 2.6. Eğme ve Burmanın Neden Olduğu Bir Yorulma Kırılmasına Örnek

Şekil-8'de eğme ve burma zorlamaları altındaki bir krank mili muylusunun yorulma kırılması görülmektedir. Y<sub>1</sub> yorulma çatlakları yağlama deliğinden başlamış ve kesitin 2/3'ünü kaplamıştır. Bundan sonra kırık yüzeyi beklenmedik bir şekilde eksene paralel olarak yanağa geçip AA hattına kadar Y<sub>2</sub> yorulma çatlakları olarak ilerlemiş ve daha sonra yanak kesitinde zorunlu kırılma ile hasar sona ermiştir. Şekil-8'de Y<sub>1</sub> çatlak yüzeyinin sınırları kısmen görülmektedir. Son kırılma kesitinin küçük olması, anma gerilmesinin küçük olduğu şeklinde yorumlanamaz, çünkü kırılan parçaların bir kavrama gibi birbirlerini tutarak moment taşımaları sözkonusudur. Krank milinin yüzey durumu ve şekillendirilmesi kusursuz olduğundan, yorulma çatlaklarının nedeninin bulunması için malzeme incelemesi yapılmıştır. Araştırmalar krank milinde iç çatlak kümelerinin varlığını göstermiş ve alanları 30 mm<sup>2</sup> ye kadar varan kümeler saptanmıştır. Bunlar sıcak şekil vermeden sonra soğutmanın yeterince yavaş olarak gerçekleştirilmediği ve çelikte hidrojenin bulunduğu durumlarda görülür. Ayrıca iç gerilmeler, segregasyonlar ve cüruf kalıntıları da olayı kolaylaştıran etkenler olarak bilinmektedir. Yüksek alaşımlı çelikler ile %0,2'den az karbon içeren çeliklerde genellikle raslanmayan sözkonusu hata, diğer çeliklerde de sıcak şekil vermeden (haddeleme veya dövme) sonra dikkatli bir soğutma ile önlenabilir.

---

[1] DITTSCHLAG, H. ve H.TAUSCHER : *Maschinenbautechnik* (1955) S. 303...311.

[2] RICHTER, G. : *Der Maschinenschaden* (1956) s.97...106.

### 3. YORULMA DAYANIMININ SAPTANMASI VE GÖSTERİMİ

#### 3.1. Genel

Yorulma dayanımı deyiminden düzgün veya çentikli parçalarda , belirli bir ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliği anlaşılır. Müsaade edilebilir şekil değiştirmenin miktarı yorulma deneyinin yapıldığı şartlara (örneğin deney sıcaklığı) veya deney malzemesi cinsine bağlıdır.

Sonsuz sayıda yük tekrarını kırılmadan veya aşırı şekil değişimine uğramadan taşıyabilen bir yapı elemanı, yorulmaya karşı dayanıklıdır denir. Taşınabilir en büyük anma gerilmesi genliği de yapı elemanının yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Bir yapı elemanının yorulma dayanımı sadece bir malzeme özelliği olmayıp, bunun yanında parçanın büyüklüğü, biçimi ve üretim şekline bağlı olduğundan, anma gerilmesi ile verilen yorulma dayanımı, belirli bir biçim ve yüzey kalitesindeki parçanın konstrüktif dayanımı diye de tanımlanır.

#### 3.2. Yorulma Dayanımının Saptanması

Malzemelerin yorulma dayanımlarının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak parlatılmış düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması için de, çentik katsayıları belirli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Bu makinaların deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500...15000 dak.<sup>-1</sup> (8...250 Hz) arasındadır. Söz konusu aralık için çelikten yapılmış düzgün parçaların yorulma dayanımları frekansa bağlı değildir. Ancak hafif metallerde ve çentikli çelik parçalarda yorulma davranışı frekansla değişir ve bu değişim süreli yorulma durumunda daha fazladır. Deney parçası örneğin asit içermeyen bir yağla soğutulmazsa, ısınma nedeniyle zamanından önce çatlayabilir. Süreli yorulma zorlamasında frekansın çok düşük veya çok yüksek olması, çeliklerde de düz veya çentikli tüm parçaların yorulma ömürlerinin azalmasına neden olur.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi

bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının herbiri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde çoğunlukla 6...10 adet parça gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlaması deney sırasında değiştirilmez, yani tek kademeli yorulma deneyi sözkonusudur. Buna karşın çok kademeli yorulma deneyinde zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır; zorlamaların sırası istenildiği gibi seçilebilir; yani giderek artabilir, azalabilir veya karışık olabilir. Sadece iki zorlama seviyesinin bulunduğu deneyler iki kademeli yorulma deneyi olarak adlandırılır.

Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa, düzgün deney parçalarında toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney parçalarında malzeme bünyesindeki değişik mekanizmalara bağlı böyle bir toparlanma olayının etkisi görülmez.

Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük veya şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve bu büyüklükler gerilme veya birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülür. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  veya alt gerilme  $\sigma_{alt}$  sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği  $\sigma_g$  seçilir. İlk deney parçası üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile, eğer noktalar büyük dağınıklar göstermiyor ise, Şekil-9'da verilen Wöhler eğrisi\* elde edilir. Bu grafikte normal olarak apsis (çevrim sayısı) logaritmik, ordinat (gerilme genliği) ise metrik bölümlü olarak seçilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilme genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık olan değer yorulma dayanımı olup  $\sigma_y$  veya  $\tau_y$  ile gösterilir. Diğer yandan belirli bir çevrim sayısından sonra ( $N_g$ : Sınır çevrim sayısı) eğri sonsuz çevrim sayısına yaklaşıyor kabul edilebilir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için  $10 \cdot 10^6$ , ağır ve hafif metaller ile yüksek sıcaklıklarda çelikler için  $100 \cdot 10^6$  veya daha fazla olarak alınır. Deney süresinin kısaltılması amacıyla çelik için  $2 \cdot 10^6$  ve hafif metaller için  $10 \cdot 10^6 \dots 50 \cdot 10^6$  sınır çevrim sayıları

\* ) Ortalama gerilme veya alt gerilmenin herbir değeri için ayrı bir Wöhler eğrisi bulunacağı unutulmamalıdır.



da kullanılmaktadır. Bu nedenle  $\sigma_Y$  sembolü yanında sözkonusu sınır çevrim sayısı da verilmelidir. Örneğin sınır çevrim sayısının  $10^6$  olması halinde  $\sigma_{Y(10^6)}$  gibi. \*



Şekil-9: Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi.

Yorulma dayanımından daha büyük gerilme genliklerinin bir süre uygulanmasının muhakkak hasara veya diğer bir deyişle yorulma dayanımının azalmasına yolaçacağı söylenemez. Önemli olan bu aşırı yüklemelerin seviyesi ve bunlara ait çevrimlerin sayısıdır. Hangi koşullarda hasarın başlayacağını belirten ve görünümü bakımından Wöhler eğrisine benzeyen "Hasar Çizgisi" süreli yorulma bölgesi için sözkonusu olup yüksek çevrim sayılarında Wöhler eğrisi ile birleşir (Şekil-9). Hasar çizgisi yorulma dayanımı üzerinde bir zorlamanın, daha sonra aynı parçada yorulma dayanımına eşit bir zorlamada kırılma meydana gelmemek koşuluyla, en çok kaç çevrim sayısı taşınabileceğini göstermektedir.

Yorulma dayanımını malzemeye bağlı, teknolojik ve deney tekniği ile ilgili çok sayıda faktör etkilediğinden, bu değerler normal Wöhler yöntemi yani 6..10 deney parçası yardımıyla güvenilir şekilde bulunabilmesi oldukça güçtür. Wöhler eğrisini dağılma bantının ortalama eğrisi olarak veya yorulma dayanımını belirli bir yüzde olasılıkla verebilmek için çok sayıda deney yapılması ve bunların istatistik olarak değerlendirilmesi zorunludur [1], [2]. Wöhler eğrisinin dağılma bantının güvenli

\*) Wöhler eğrisinin sınır çevrim sayısına kadar olan bölümüne "Süreli Yorulma Bölgesi" denir. Bu bölgede herhangi bir  $N_1$  çevrim sayısı için kırılmaya neden olacak en gerilme genliği de "Süreli Yorulma Dayanımı" adını taşır ve  $\sigma_{Y(N_1)}$  şeklinde gösterilir.

olarak saptanabilmesi, [2]'ye göre en az 40 ve [3]'e göre en az 200 deney parçasını gerektirir. Hasar çizgisinin de kesin belirlenebilmesi için çok sayıda deney yapılmalıdır.

Sürekli yorulma ve yorulma dayanımlarını hesaplayabilmek amacıyla Wöhler eğrisi için bazı analitik ifadeler önerilmiştir [4]. Ancak gerçek malzeme davranışlarını içermeyen bütün bu ifadeler, yorulma dayanımı ile statik deneylerden elde edilen değerler (örneğin çekme dayanımı) arasında kurulan ampirik bağıntılardan daha iyi sonuç vermezler. İstatistiksel olarak güvenli yorulma dayanımı değerleri elde etmek için "Merdiven Yöntemi" olarak adlandırılan yaklaşım kullanılabilir [5], [6], [7]. Bu yöntemde, saptanması istenen büyüklüğün beklenen dağılma bölgesi-örneğin yorulma dayanımı veya sürekli yorulma bölgesinde belirli bir çevrim sayısına tekabül eden gerilme genliği-basamaklara bölünür. Deneyler beklenen dağılma bölgesinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney parçası kırılırsa, bir sonraki deney bir alt basamağın gerilmesi ile yapılır; parça kırılmazsa bir üst basamağın gerilmesine geçilir. Başlangıç deneyi dışında bütün deneylerde uygulanacak gerilme genliği bir önceki deney sonucuna göre seçilir. Gerilme genliği bu şekilde değiştirilerek belirli sayıda deney yapıldıktan sonra sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu yöntemin üstünlüğü tüm deneylerin hepsinin kendiliğinden ortalama değer etrafında toplanmasıdır [6]. Bu arada her deney parçası sadece bir kez kullanılır. Sınır çevrim sayısı da dahil olmak üzere, çeşitli çevrim sayılarında dağılma bandının saptanması için en az 40 deney parçası gereklidir. Yöntem çentikli parçalar ve hasar çizgisine de uygulanabilir.

### 3.3. Yorulma ile İlgili Semboller

DIN 50100'e göre aşağıdaki semboller kullanılmakta ve deneylerle saptanan dayanım değerleri büyük indisler, mevcut zorlama şartlarını belirleyen yani önceden verilmiş olan değerler ise küçük indisler taşımaktadır \*.

- $\sigma_Y$  Yorulma dayanımı (genel anlamda)
- $\sigma_G$  Verilen bir  $\sigma_{ort}$  ortalama gerilmesi için bulunan yorulma dayanımının gerilme genliği
- $\sigma_{ÜST}$  Verilen bir  $\sigma_{ort}$  ortalama gerilmesi veya  $\sigma_{alt}$  gerilmesi için bulunan yorulma dayanımının üst gerilmesi (işaretten bağımsız olarak gerilmenin en büyük mutlak değeri) \*\*

\*) DIN 50100 de kullanılan sembollerin indisleri, ifade ettikleri sözcüklerin türkçe karşılıklarına uygun olarak değiştirilmiştir.

\*\*\*) Çekme gerilmeleri (+), basma gerilmeleri (-) işaretleriyle gösterilir.

- $\sigma_{ALT}$  Verilen bir  $\sigma_{ort}$  ortalama gerilmesi için bulunan yorulma dayanımının alt gerilmesi (işarettten bağımsız olarak gerilmenin en küçük mutlak değeri)
- $\sigma_{ORT}$  Deneye esas olarak  $\sigma_{alt}$  alt gerilmenin alınması halinde bulunan yorulma dayanımının ortalama gerilmesi
- $2\sigma_G$  Gerilme alanı ( $\sigma_{UST} - \sigma_{ALT}$ )
- R Gerilme oranı  $\sigma_{ALT}/\sigma_{UST}$  veya  $\sigma_{alt}/\sigma_{üst}$  (işaret dikkate alınacak)\*
- N Kırılma çevrim sayısı
- R'  $\sigma_{ORT}/\sigma_{UST}$  veya  $\sigma_{ort}/\sigma_{üst}$  oranı (işaret dikkate alınacak)
- $\sigma_G/\sigma_K$  Yorulma dayanımı oranı=Yorulma dayanımı gerilme genliğinin ( $\sigma_G$ ) çekme dayanımına ( $\sigma_K$ ) oranı

Yorulma dayanımının hangi  $\sigma_{ort}$  için bulunduğu aşağıdaki biçimlerde ve çoğunlukla da ilk gösterim şeklinde olduğu gibi belirtilir.

$$\sigma_Y = \sigma_{ort} \pm \sigma_G \quad \text{veya} \quad \sigma_{ort} = \dots \quad \text{için} \quad \sigma_Y = \pm \sigma_G$$

Yorulma dayanımının sayısal değeri ise genliğin mutlak değerine eşittir.

$$\sigma_Y = | \sigma_G |$$

Başka bir şekilde belirtilmediği takdirde yorulma zorlamasının türü çekme, basma ve eğme zorlamaları için sırasıyla ç, b ve e indisleri ile verilir, örneğin\*\*:

- $\sigma_{çY}$  Değişken çekme veya dalgalı çekme bölgesinde yorulma dayanımı
- $\sigma_{bY}$  Değişken basma veya dalgalı basma bölgesinde yorulma dayanımı
- $\sigma_{eY}$  Değişken eğme veya dalgalı eğme bölgesinde yorulma dayanımı
- $\sigma_{çbD}$  Çekme-basma değişken yorulma dayanımı

\*) *üst (UST) ve alt (ALT) gerilmeler gene en büyük ve en küçük mutlak değerler olarak alındıktan sonra işaretleri eklenir.*

\*\*\*) *Sembolleri verilen kavramlar 3.4 ve 3.5 bölümlerinde daha geniş olarak açıklanmıştır.*

$\sigma_{eD}$  Eğme değişken yorulma dayanımı

$\sigma_{\zeta Dal}$  Çekme dalgalı yorulma dayanımı gibi.

### 3.4. Yorulma Dayanımına İlişkin Genel Tanımlar

#### a) Değişken Bölgede Yorulma Dayanımı

Ortalama gerilme sıfırdan farklı ve gerilme genliğinden daha küçüktür. Alt ve üst gerilmeler ters işaretlidir ( $-1 < R < 0$ ). Şekil-10 değişken çekme\* bölgesinde yorulma dayanımı için zorlama durumunu göstermektedir.

#### b) Dalgalı Bölgede Yorulma Dayanımı

Ortalama gerilme sıfırdan farklı ve gerilme genliğinden daha büyüktür. Alt ve üst gerilmeler aynı işaretlidir ( $0 < R < +1$ ). Şekil-11 dalgalı çekme bölgesinde yorulma dayanımı için zorlama durumunu göstermektedir.

### 3.5. Yorulma Dayanımına İlişkin Özel Tanımlar

#### a) Değişken Yorulma Dayanımı $\sigma_D$

Ortalama gerilme her zaman sıfırdır, yani gerilme eşit ancak ters işaretli iki sınır değeri arasında değişir. Bu nedenle genliğin maksimum değeri alt ve üst gerilmelere eşit olup  $R = -1$ 'dir, Şekil-12. Eğmede  $\sigma_{eD}$ , burmada  $\tau_D$  ve çekme-basmada  $\sigma_{\zeta bD}$  sembolleri kullanılır\*\*.

#### b) Dalgalı Yorulma Dayanımı $\sigma_{Dal}$

Gerilme genliği ortalama gerilmeye eşittir. Alt gerilme  $\sigma_{alt}$  sıfır, dolayısıyla  $R = 0$  dır, Şekil-13. Zorlama türüne bağlı olarak  $\zeta$  (çekme),  $b$  (basma) veya  $e$  (eğme) indisleri  $\sigma_{Dal}$  sembolüne eklenerek kullanılır (örneğin eğme için  $\sigma_{eDal}$ ). Burmada dalgalı yorulma dayanımı  $\tau_{Dal}$  olarak gösterilir\*\*. Dalgalı yorulma dayanımının sayısal değeri, genel kural dışında gerilme genliğinin iki katı yani gerilme alanına eşit olarak da alınabilmektedir.

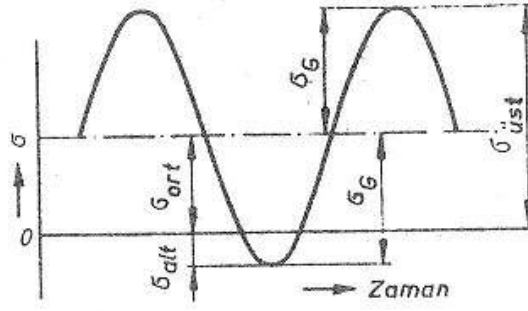
### 3.6. Süreli Yorulma Dayanımı

Daha önce 3.2 de de görüldüğü gibi, örneğin  $N = 10^5$  çevrim sayılı bir ömre karşılık olan süreli yorulma dayanımı genel olarak  $\sigma_Y(10^5)$  sembolüyle gösterilir. Özel durumlar da benzer şekilde belirtilir (Süreli değişken yorulma dayanımı için  $\sigma_D(10^5)$  gibi).

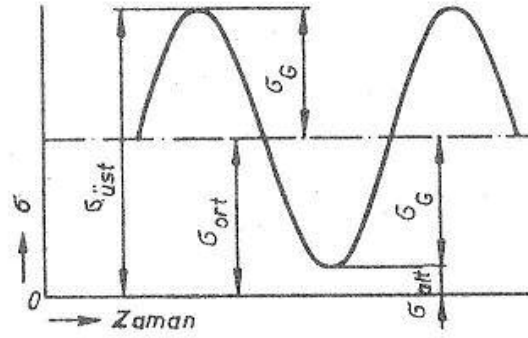
---

\*)  $\sigma_{ort} > 0$  olduğu ve dolayısıyla değişken zorlamanın çekme karakteri ağır bastığı için.

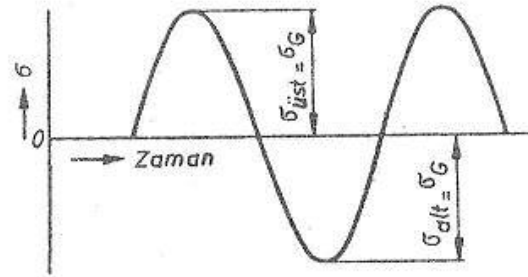
\*\*\*) Değişken ve dalgalı yorulma dayanımları için özel indisler dışında ayrıca ( $Y$ ) indisi kullanılmamaktadır.



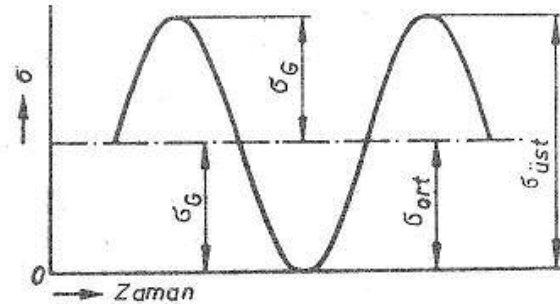
Şekil-10\*: Değişken çekme bölgesinde yorulma dayanımı,  $\sigma_Y = |\sigma_G|$   
(Verilen  $\sigma_{ort}$  için)



Şekil-11\*: Dalgalı çekme bölgesinde yorulma dayanımı,  $\sigma_Y = |\sigma_G|$   
(Verilen  $\sigma_{ort}$  için)



Şekil-12\*: Değişken yorulma dayanımı,  $\sigma_D = |\sigma_G|$



Şekil-13\*: Dalgalı yorulma dayanımı  $\sigma_{Dal} = |\sigma_G|$  veya  $|2\sigma_G|$

\*) Zorlama olarak sabit bir  $\sigma_{ort}$  veya  $\sigma_{alt}$  için uygulanan çeşitli  $\sigma_g$ 'lerden sonsuz ömür veren, deneyle saptanmış en büyük gerilme genliği değeri  $\sigma_G$  ile gösterilmiştir.

### 3.7. Yorulma Ömrü

Bir deney parçası veya yapı elemanının yorulma ömrü, yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilmeye kırılmanın olduğu çevrim sayısıdır. Yorulma ömrünün gösteriminde ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  ve gerilme genliği  $\sigma_g$ , sözkonusu kırılma çevrim sayısına indis olarak eklenir. Örneğin

$$N(+8\pm 14) = 2,2.10^6$$

gösterimi ile  $\sigma_{ort} = +8 \text{ kgf/mm}^2$  ve  $\sigma_g = \pm 14 \text{ kgf/mm}^2$  olan bir zorlamada, kırılmanın  $2,2.10^6$  çevrim sayısında olduğu anlaşılmaktadır.

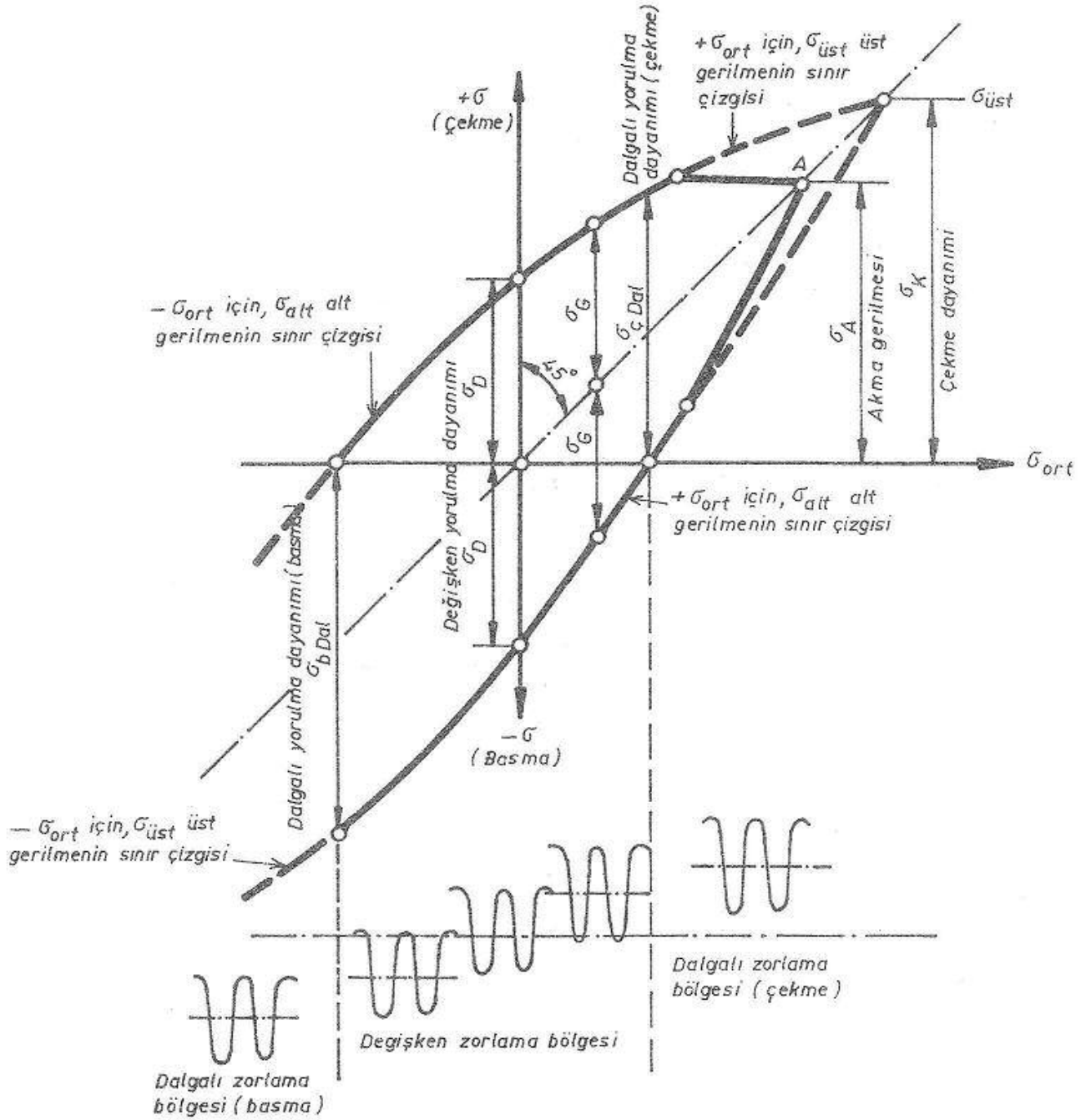
### 3.8. Yorulma Dayanımının Smith Diyagramı ile Gösterilişi

Değişken ve dalgalı bölgeler için saptanmış bir sıra Wöhler eğrisinden elde edilen sonuçlar Yorulma Dayanımı Diyagramlarında toplu olarak verilebilir. Bu diyagramlar her zorlama şekli için ortalama gerilme, gerilme genliği, alt gerilme ve üst gerilme arasındaki bağıntıları grafik olarak gösterir.

Yorulma dayanımına etki eden zorlama değerleri arasındaki bağıntılara en açık şekilde belirttiği için makina mühendisliğinde genellikle Smith Yorulma Dayanımı Diyagramı kullanılır. Birbirine dik iki eksenle apsise ortalama gerilmeler, ordinata ise herbir ortalama gerilmeye ait yorulma dayanımının alt ve üst gerilmeleri taşınır (Şekil-14). Değişik ortalama gerilmeler için bulunan noktaların birleştirilmesi ile alt ve üst gerilmelerin sınır çizgileri elde edilir. Ordinat ekseninin sağında üst sınır çizgisi üst gerilmeleri, alt sınır çizgisi alt gerilmeleri belirler. Ordinat ekseninin solunda ise alt sınır çizgisi üst gerilmeleri, üst sınır çizgisi alt gerilmeleri gösterir. Alt ve üst sınır çizgileri doğrudan çok az saptıklarından çizim kolaylığı bakımından birer doğru ile gösterilebilirler. Apsis ve ordinatta aynı ölçek kullanıldığından  $45^\circ$  açı ile çizilen açıortayı da ortalama gerilmelerin değerini verir ve gerilme alanı  $(2 \sigma_g)$ 'yi ortadan böler.  $\sigma_y = |\sigma_g|$  olduğuna göre her  $\sigma_{ort}$  değerine karşılık olan  $\sigma_y$  diyagramdan okunabilir. Böylece sıfır noktasında malzemenin değişken yorulma dayanımı; alt gerilme sınır çizgilerinin apsisi kestiği noktalarda da çekme ve basma dalgalı yorulma dayanım değerleri bulunur\*.

---

\*) Dalgalı yorulma dayanımı  $2 \sigma_g$  olarak gösterilmiştir.



Şekil-14: Çekme-Basma zorlamaları için SMITH Yorulma Dayanımı Diyagramı

Makina parçalarında çoğunlukla kalıcı şekil değişimlerine müsaade edilmediğinden, diyagram üstten akma gerilmesi ile sınırlanır. Akma gerilmesinin üzerindeki yorulma değerleri ancak çok özel durumlar için aranır ve kesikli çizgiyle gösterilen bu bölüm mukavemet hesaplarında kullanılmaz\*.

Yorulma dayanımı diyagramı olarak Smith diyagramı dışında daha birçok gösterim şekli vardır. Ancak bunlar sadece bazı sınırlı uygulama alanlarında geçerli olduklarından kitapta ayrıntılı olarak ele alınmamışlardır. Makina mühendisliğinde hemen hemen sadece Smith Diyagramı kullanılmasına rağmen, köprü ve vinç yapımında yorulma dayanımının diğer bir gösterim şekli tercih edilir. Burada alt gerilmeye bağlı olarak üst gerilmenin değişimi verilir. Apsise alt gerilmeler, ordinata ise tekrar alt gerilmeler ile buna tekabül eden üst gerilmeler taşınır.

Kaynak tekniğinde ise son yıllarda daha çok MOORE-KOMMER-JASPER diyagramından yararlanılmakta ve apsiste gerilme oranı  $R = \sigma_{ALT} / \sigma_{ÜST}$  ordinatta ise buna karşılık olan üst gerilme verilmektedir.

Sovyetler Birliğinde SMITH diyagramı yanında, HAIGH diyagramı da kullanılmaktadır. Bu diyagramda apsiste ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  ordinatta ise gerilme genliği  $\sigma_G$  bulunmaktadır.

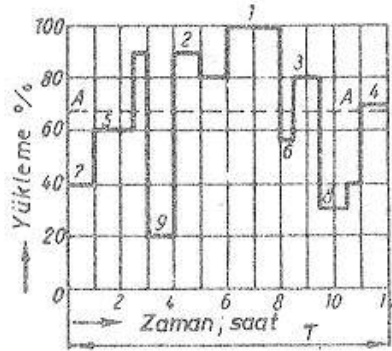
### 3.9. İşletme ve Zorlama Türleri

Bir metal malzemenin yorulma dayanımının saptanması için yapılan deneylerde, başlangıçta belirlenen yorulma zorlaması deneyin bitimine kadar, örneğin sınır çevrim sayısına veya kırılmaya kadar, değiştirilmeden uygulanır. Pratikte makina parçalarına etkiyen zorlamalar ise çok daha karmaşıktır. Ortalama gerilme ve üst gerilme değer ve uygulandığı çevrim sayısı bakımından periyodik olarak değişir. Etki eden kuvvet veya momentlerin belirli bir zaman süresine istatistik olarak dağılımı Yüklemeye Kollektifi olarak adlandırılır. Yorulma ömrü boyunca yüklemeye kollektifi az veya çok sayıda tekrarlanır. Belirli makina parçalarının yorulmaya karşı tasarımı için öncelikle sözkonusu makinanın işletme türü bilinmelidir. İşletme türü sürekli veya kesintili olabileceği gibi, yüklemeye şeklinin ve dolayısıyla gerilmelerin değişiminin de düzenli veya düzensiz olması mümkündür. Şekil-15 [8] sürekli çalışan bir basınçlı hava tesisindeki pistonlu kompresörün 12 saatlik bir zaman

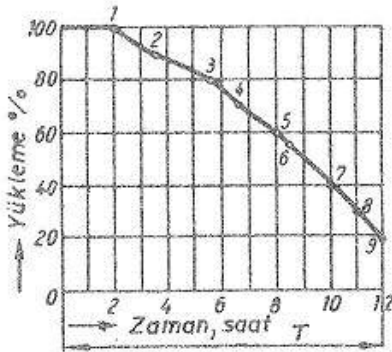
\*) Akma sınırı üzerindeki değişen zorlamalar "Kısa Ömürlü Yorulma" olarak adlandırılır. Süreli Yorulma bölgesinin üst sınırını oluşturan bu alan için kırılma çevrim sayıları genellikle  $10^4$  den küçüktür. Normal Wöhler eğrileri de çoğunlukla  $10^4$  çevrim sayısından başlamak üzere çizilir.



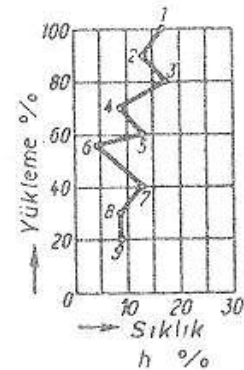
bölümü için yükleme grafiğini vermektedir. (Makinanın maksimum yüklenmesi 100 kabul edilerek diğer yüklenme durumları yüzde cinsinden ifade edilmiştir). Yükleme grafiğinden yararlanarak Şekil-16'da görülen yüklenme birikim eğrisi elde edilir. Bu eğri ele alınan işletme zamanı içinde belirli bir seviyedeki yüklemenin, kendisinden yüksek olanlarla birlikte ne kadar sürdüğünü gösterir. Buna karşılık her yüklenme seviyesinin sadece kendi süresi dikkate alınır Şekil 17'de görülen yüklenme sıklık eğrisi bulunur (12 saatlik zaman 100 kabul edilerek etki sürelerinin yüzdeleri bulunmuş ve bu değerler sıklık olarak verilmiştir). Yükleme grafiğine göre pistonlu kompresörün parçalarının, örneğin tahrik kısmındaki elemanlarının, düzensiz zorlandığı söylenebilir. Dolayısıyla aynı kompresörün krankına etkileyen eğme gerilmelerinin değişiminin Şekil-18'deki gibi olduğunu varsayalım. Bu şeklin sağında gerilmenin sıklık eğrisi görülmektedir.



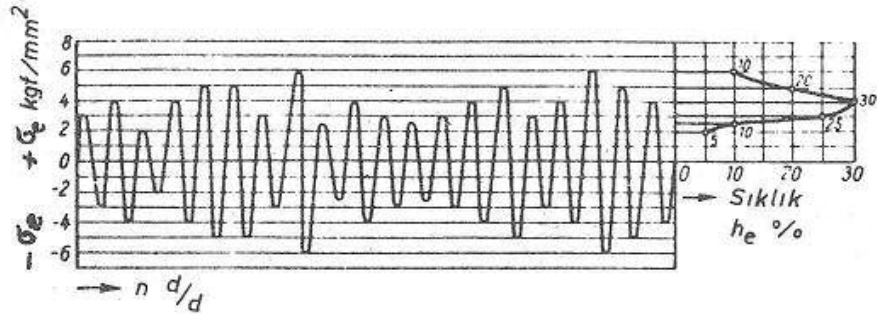
Şekil-15: Sürekli işletme türünde yüklenme grafiği. AA çizgisi: Düzenli sabit zorlama halinde yüklemenin seviyesi



Şekil-16: Şekil-15'e ait yüklenme birikim eğrisi

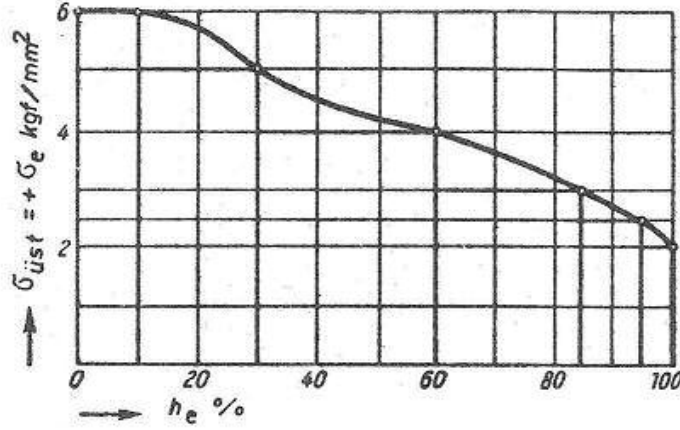


Şekil-17: Şekil-16'ya ait yüklenme sıklık eğrisi



Şekil-18: Eğme gerilmelerinin ( $\sigma_e$ ) işletme şartlarına bağlı olarak çevrim sayısı ile değişimi

Şekil-18'den yararlanarak eğme gerilmelerinin birikim eğrisi yüzde sıklık cinsinden çizilebilir, Şekil-19\*. Bu eğri herhangi bir gerilme genliği ile bunun üzerindeki tüm gerilme genliklerinin toplam zamanın yüzde kaçında etkidiğini verir. (örneğin  $\sigma_e \geq 5$  kgf/mm<sup>2</sup> için % 30 gibi). Çentik etkileri ve diğer gerilme yığılmaları nedeniyle birikim eğrisinin ordinatlarının daha üst seviyelere kayacağı muhakkaktır.



Şekil-19: Şekil-18'de verilen eğme gerilmelerine ait birikim eğrisi.

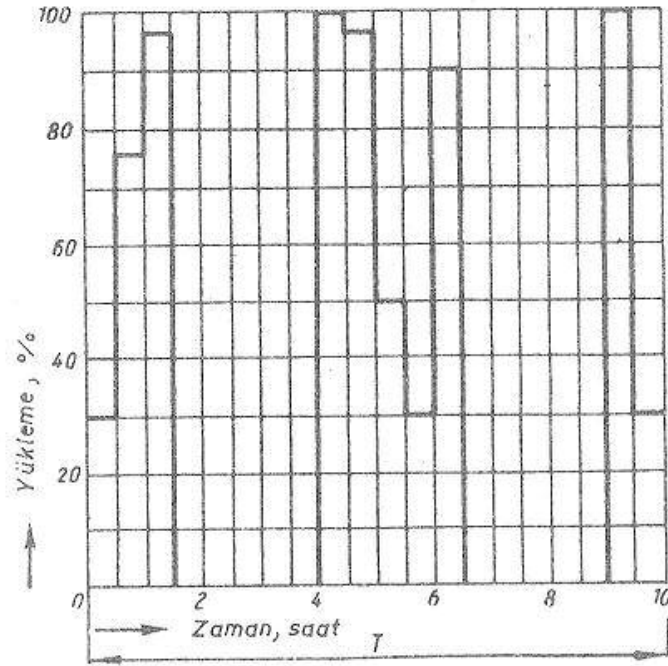
\* ) Birikim eğrisinin apsisi zaman, sıklık veya özellikle Wöhler ve hasar eğrileri ile yapılacak karşılaştırmalar için, çevrim sayısı olarak alınabilir.

İlerde ayrıntılı olarak açıklanacak klasik hesaplama yöntemlerinde, makina parçalarında oluşan en büyük gerilmelerin konstrüktif dayanım değerini aşmasına izin verilmez. Eğer en büyük gerilmenin konstrüktif yorulma dayanımı değerinden daha yüksek olmasına müsaade edilecekse, birikim eğrisi makina parçasının Wöhler veya Hasar eğrileri ile karşılaştırılmalıdır. Yorulma dayanımını aşan gerilme genliklerinin çok sık tekrarlanmaması halinde bunlar makina parçası için bir tehlike teşkil etmeyebilir, yani konstrüktif yorulma dayanımının azalmasına neden olmayabilirler. Ortalama yüklemeye karşılık olan gerilme düzeyinin yorulma veya konstrüktif dayanım gerilmesine yakın olması halinde, yorulma kırılmasının oluşmaması için aşırı yüklemelerin doğurduğu gerilmelerin ve bunların etkidiği çevrim sayısının hasar çizgisinin altında kalması gereklidir. Buna karşın sözkonusu gerilme düzeyi yorulma dayanımına göre küçükse, hasar bölgesine giren aşırı zorlamalara müsaade edilebilir; çok küçükse ve ayrıca aşırı yüklemelere çok ender rastlanıyorsa, bu aşırı yüklemelerin doğurduğu gerilmeler Wöhler eğrisine dahi ulaşabilir.

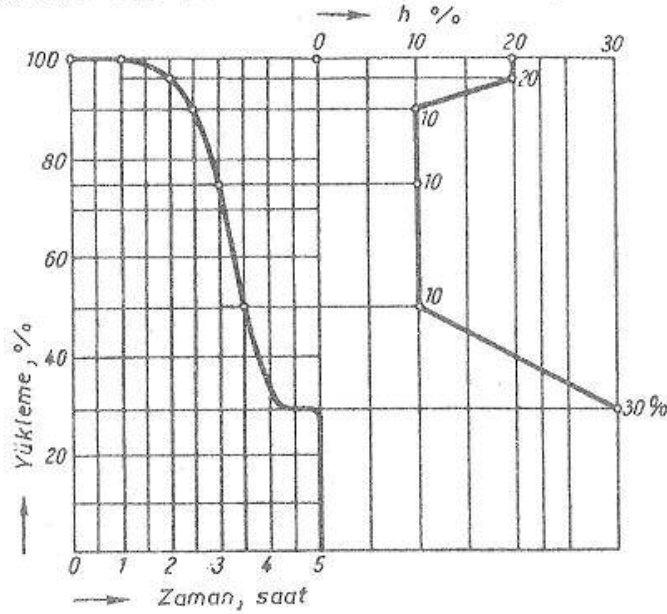
Makinanın yükleme grafiği Şekil-15'deki AA gibi yatay bir doğru ise, yani yükleme seviyesi ele alınan işletme süresinde sabit kalıyorsa, sözkonusu makinanın parçalarının düzenli değişen şekilde zorlandığı söylenebilir. Bu durumda gerilme değişimi, gerilme oranı R değerine bağlı olarak Şekil-10...13'te belirtilenlerden birine uygun olacaktır. Buraya kadar verilen örneklerin tümünde kuvvet santralleri, hidrolik tesislerdeki pompalar, demir-çelik işletmelerindeki makinalar ve çok vardiyalı çalışan tesisler gibi sürekli işletmeler ele alınmıştır.

Kesintili işletme türüne belirgin olarak asansör, vinç gibi makinalarda rastlanır. Kesintili çalışan bir işletmenin yükleme grafiği Şekil-20'de verilmiştir, buna ilişkin birikim ve sıklık eğrileri de Şekil-21'de görülmektedir. Ele alınan örnekte işletme süresi dikkate alınan sürenin %50'sini kapsamaktadır. Sürekli işletme ile kesintili işletme arasında kesin bir ayırım mümkün değildir. Birçok makina bu iki sınır durum arasında kalan işletme koşullarında kullanılır. Sadece zaman zaman devreye alınan takım tezgahları bu tür kullanım tarzına iyi bir örnektir. Kesintili işletmede de makina parçalarının yüklenmesi düzenli veya düzensiz olabilir.

Bunların dışında darbelerin sözkonusu olduğu işletme türlerinin de dikkate alınması gereklidir. Deneyimler yorulma bakımından küçük ve sık darbelerin, büyük fakat seyrek darbelerden daha zararlı olduğunu göstermiştir. Çok büyük darbeler ise makina parçalarında zorunlu kırılmaya neden olurlar.



Şekil-20: Kesintili bir işletmenin yükleme grafiği.



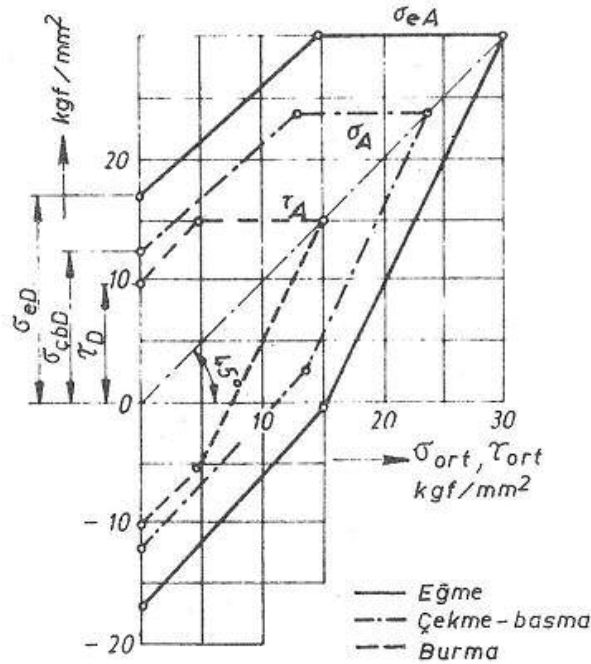
Şekil-21: Şekil-20'ye ait yükleme birikim (solda) ve sıklık (sağda) eğrileri.

### 3.10. Yapı ve Konstrüksiyon Çeliklerinin Yorulma Dayanımı Diyagramları

Şekil-22...46'da standartlara uygun çeliklerin yorulma dayanımları verilmiştir. Şekil 22...27 genel yapı çeliklerini, Şekil-28...32 özel yapı çelikleri ile az alaşımlı yapı çeliklerini kapsamaktadır. Şekil-33...46'da ise ıslah çeliklerinin yorulma dayanımı diyagramları görülmektedir.

Bu diyagramlar anılan çeliklerde eğme, çekme-basma ve burma zorlamaları için ayrı ayrı verilmiştir. Eğme yorulma dayanımlarının tümü yuvarlak çubuklarda ve çevresel eğme altında yapılan deneylerle elde edilmiştir. Yuvarlak çubuklarda ileri-geri eğme ile bulunan yorulma dayanımları, çevresel eğmeye ait bu değerlerden %10-20 daha küçüktür. İleri-geri eğme yapılan yassı deney parçalarında ise yuvarlak numunelerdekinden çoğunlukla biraz daha yüksek sonuçlar elde edilmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta diyagramlarda belirtilen yorulma dayanımlarının düzgün şekilli, parlatılmış ve 5...10 mm çapındaki (çoğunlukla 7,5 mm) yuvarlak deney parçaları yardımıyla 18..22°C olan oda sıcaklığında saptanmış olduğudur.

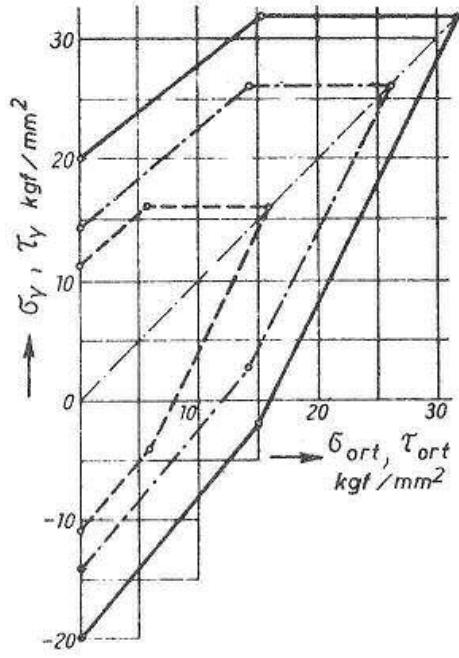
Malzemenin akma sınırı ve değişken yorulma dayanımı biliniyorsa yorulma dayanımı diyagramları çok sayıda deney yapılmadan da yaklaşık olarak çizilebilir. Şekil-47'de eğme zorlaması için yorulma dayanımı diyagramının yaklaşık çizimi görülmektedir. Çelikler için statik dayanım değerleri ile yorulma dayanım değerleri arasındaki bağıntılar Tauscher tarafından hazırlanan el kitabında [9] ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil-22: Normalize edilmiş St 37 yapı çeliği.

$\sigma_A$  : Akma sınırı  $\tau_A$  : Burma akma sınırı

$\sigma_{eA}$  : Eğme akma sınırı



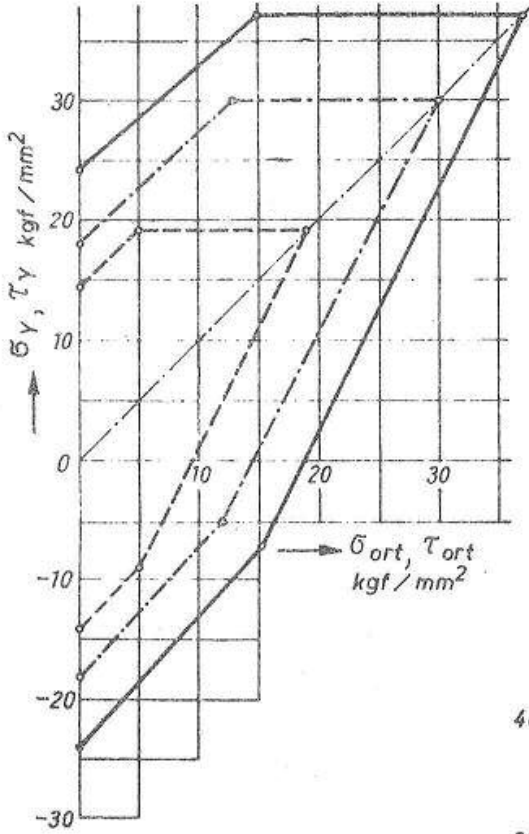
Şekil-23: Normalized edilmiş St42 yapı çeliği.

Yorulma dayanımı değerleri küçük kesitli deney parçalarında saptandığından, parça boyutlarının yorulma dayanımına etkisinin çok önemli olduğu eğme ve burma zorlamalarında bu durumun dikkate alınması gerekir. Buna karşın çekme-basma zorlamalarında bugüne kadar yapılan çalışmalar boyut etkisinin pek fazla önemli olmadığını göstermiştir. Dolayısıyla çekme-basma zorlamaları için verilen değerler büyük kesitlerde de doğrudan doğruya kullanılabilir.

Yorulma dayanımının üst gerilmesinin statik deneylerle saptanan akma gerilmesi veya 0,2 sınırı ile sınırlandırılması, kalıcı şekil değişimlerinin yorulma zorlamaları altında da yaklaşık aynı gerilmelerde oluşacağı varsayımına dayanmaktadır. Ancak yapılan deneyler ortalama gerilmenin çok yüksek olduğu durumlarda, yani alt gerilmenin üst gerilmeye oranı R değerinin 1'e yakın olduğu koşullarda, yorulma zorlamasının daha büyük kalıcı şekil değişimlerine neden olduğunu göstermiştir.

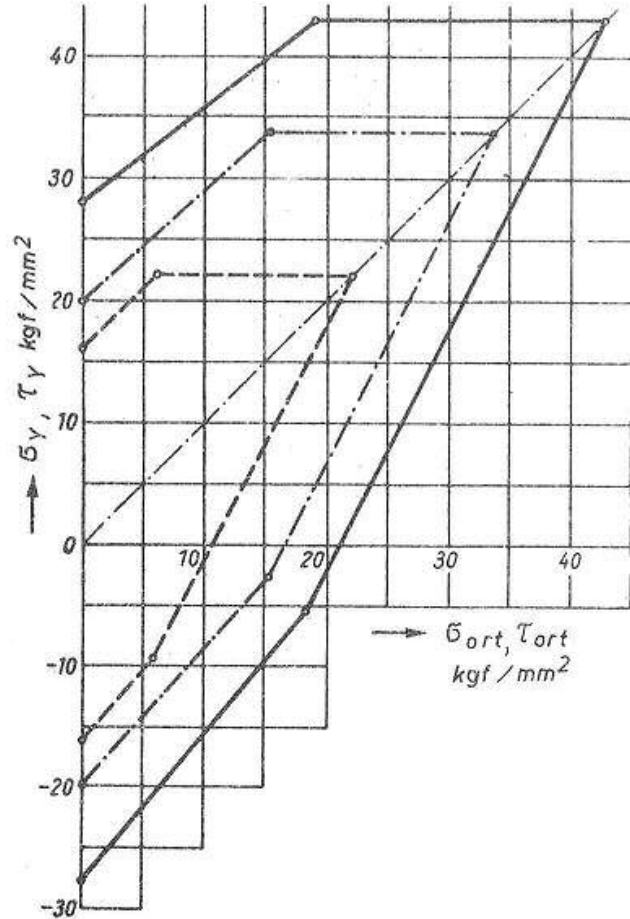
Wöhler eğrisinin saptanması için çok sayıda deney yapılması halinde, bütün eğri boyunca oldukça büyük bir dağılım görülür. Örneğin Epremian ve Mehl [3] tarafından alaşımsız SAE 1050 çeliğinde (yaklaşık olarak C 45'e karşılıktır) 200 deney parçası ile yapılan çevresel eğme deneyleri, parçaların %95'inde (olasılıklar hesabında  $\pm 2s$  bölgesi) eğme yorulma dayanımının 27...30 kgf/mm<sup>2</sup> arasında dağıldığını göstermiştir. Yani deney parçalarının %5'ine ilişkin sonuçlar bu alanın dışında kalmıştır.  $50 \cdot 10^6$  çevrim sayısına kadar sürdürülen sözkonusu deneylerde parçaların %68'i (olasılıklar hesabında  $\pm 1s$  bölgesi)

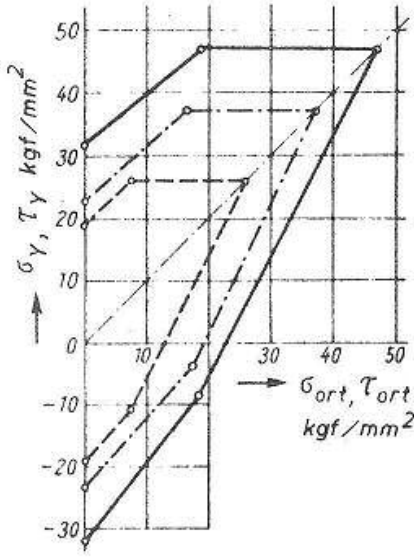
için yorulma dayanımı 28...29,5 kgf/mm<sup>2</sup> arasında bulunmuştur. Bütün bu olgulara rağmen yorulma dayanımı diyagramlarında dağılma bölgesinin tümü değil, sadece alt sınırı dikkate alınır.



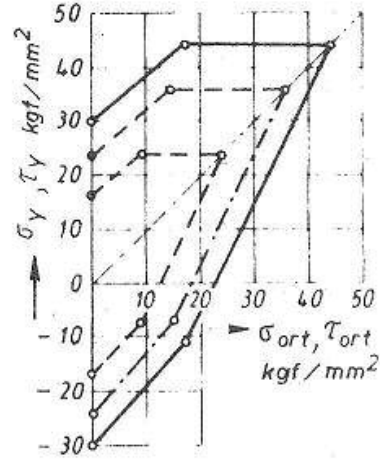
Şekil-24: Normalize edilmiş  
St50 yapı çeliği

Şekil-25:  
Normalize edilmiş  
St60 yapı çeliği

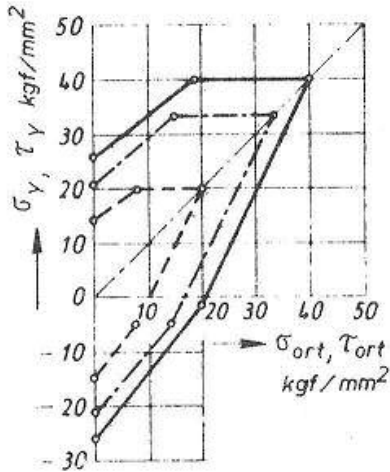




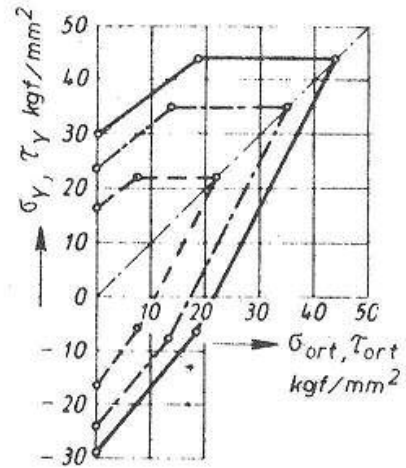
Şekil-26: Normalize edilmiş St70 yapı çeliği



Şekil-27: St52-3 yapı çeliği



Şekil-28: St30/45 özel yapı çeliği

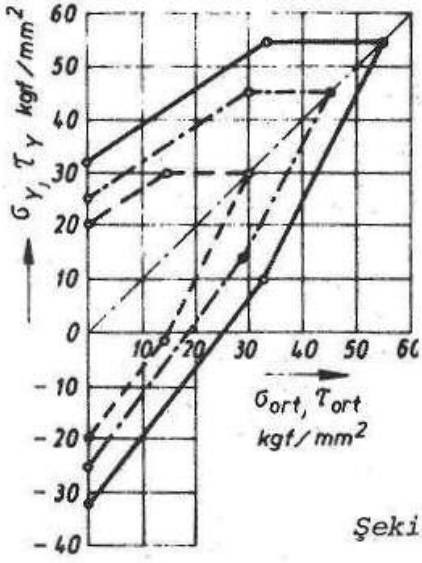


Şekil-29: St35/50 özel yapı çeliği

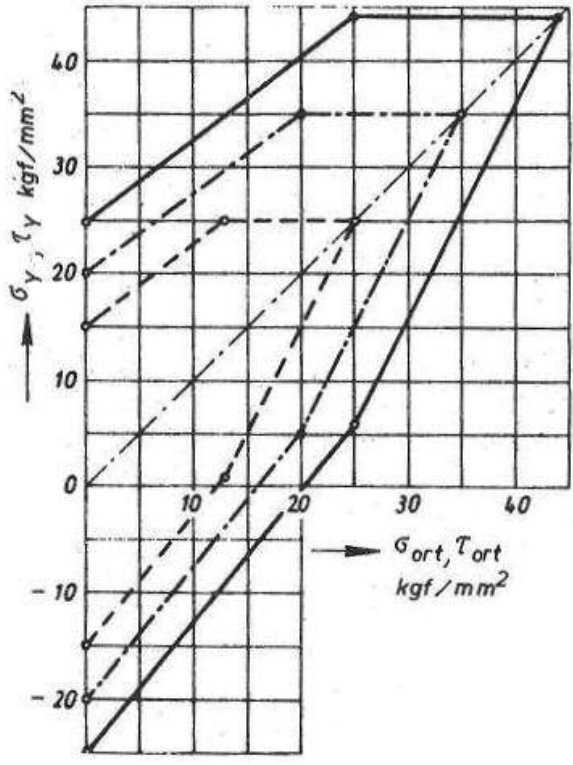
DeneySEL olarak saptanan yorulma dayanımı değerini iç ve dış etkenler olumsuz yönde değiştirilebilir. Örneğin deney parçasının yanlış bağlanması, yüklemenin darbeli yapılması veya yükün deney boyunca sabit kalmayışi yorulma dayanımı değerini az veya çok düşürür. Kullanılan deney parçalarının yüzeylerinin kötü olması veya boyutlarının parça eksenı boyunca az da olsa değişmesi deney sonucunu etkileyebilecek diğer faktörlerdir.

Deney malzemesinin teknolojik geçmişi de yorulma dayanımını olumsuz yönde değiştirebilir; bu duruma örnek olarak çeliklerde kalıntı yığılmaları, homojen olmayan soğuk şekil değiştirme sonucu yerel pekleşmeler, kritik bölgelerde çekme iç gerilmeleri, farklı tane büyüklükleri ve yüzeyden karbon kaybı gösterilebilir [11].



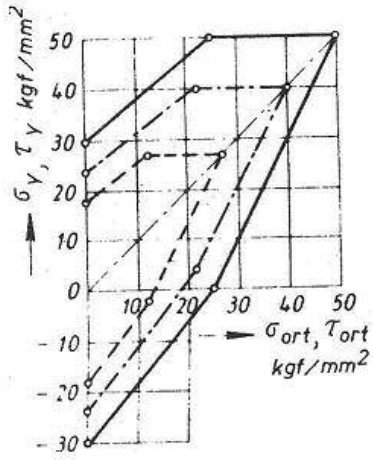


Şekil-30: St 45/60 özel yapı çeliği

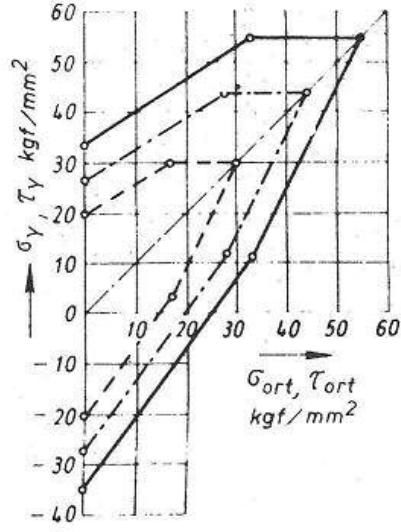


Şekil-31: 14 Mn 6 normalize edilmiş az alaşımlı yapı çeliği

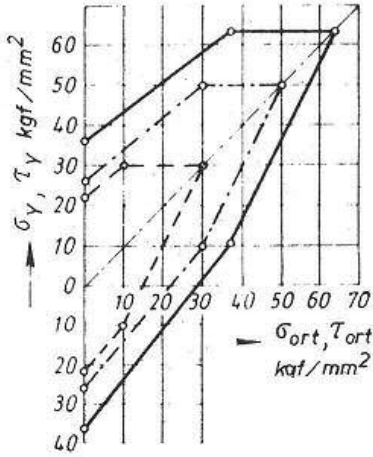
Haddelenmiş veya dövülmüş çeliklerde statik dayanım değerleri gibi yorulma dayanımı da, deney parçalarının akma çizgilerine göre konumuna bağlıdır. Akma çizgileri doğrultusuna dik yönde alınan deney parçaları en düşük, paralel yönde alınanlar ise en yüksek yorulma dayanımına sahiptirler. Dik yöndeki yorulma dayanımı, malzemenin haddelene veya dövülme oranı ve çekme dayanımına bağlı olarak paralel yöne göre % 50'ye kadar küçük değerler gösterebilir.



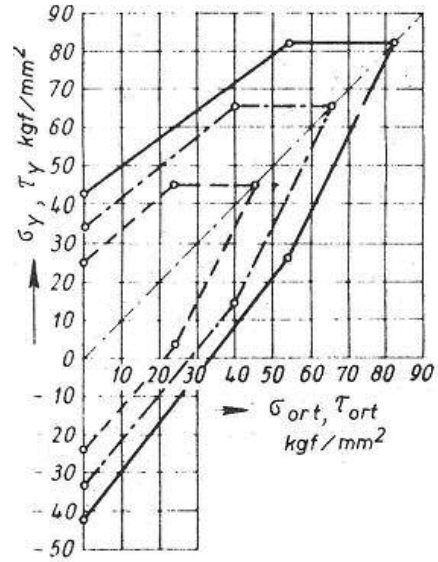
Şekil-32: 25 MnSi 6 normalize edilmiş az alaşımlı yapı çeliği



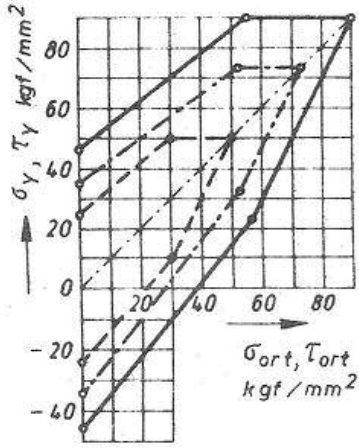
Şekil-33: C45 ıslah çeliği, 70...75 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



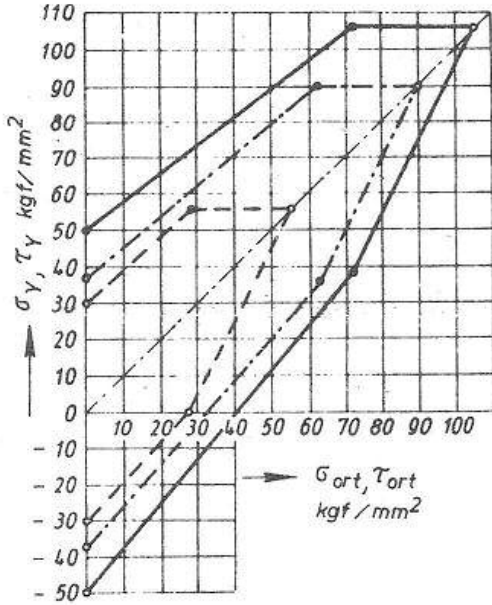
Şekil-34: 30 Mn 5 ıslah çeliği, 70...80 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



Şekil-35: 40 Cr 4 ıslah çeliği, 80...90 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



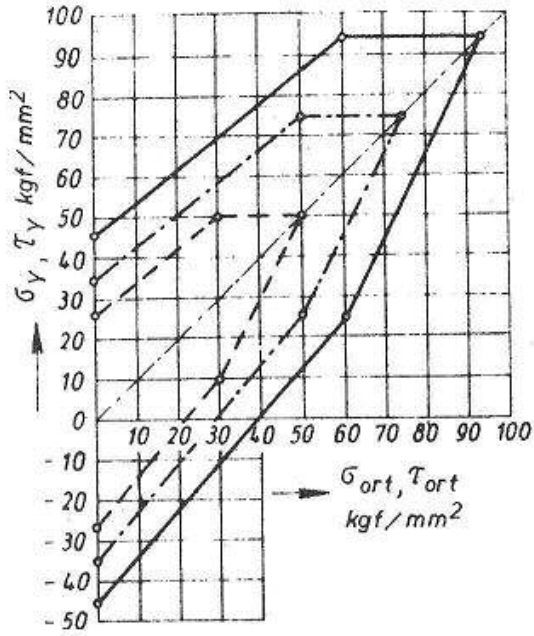
Şekil-36: 37 MnSi 5 ıslah çeliği, 90...100 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



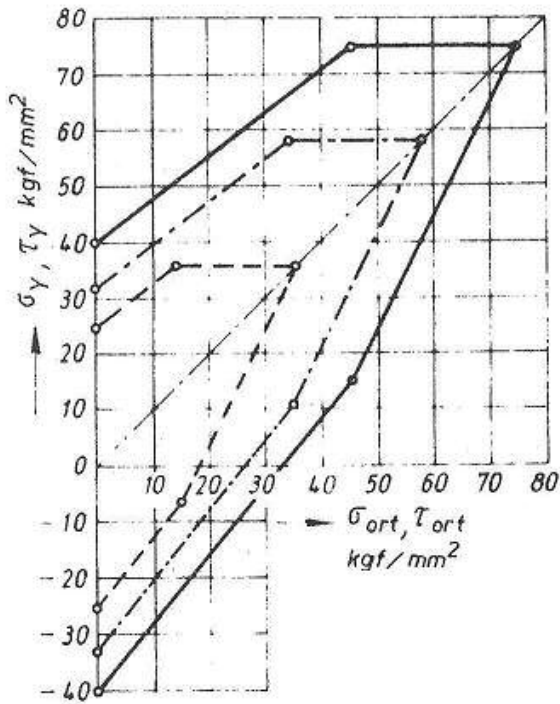
Şekil-37: 36 CrNiMo 4 ıslah çeliği, 100...120 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.

Düz veya çentikli deney parçalarının ve dolayısıyla makina parçalarının yorulma dayanımları, yüzey sertleştirmeye yönelik değişik teknolojik yöntemler uygulanarak önemli oranda yükseltilebilir. Bu yöntemler arasında sementasyon, nitrürasyon, alevle veya endüksiyonla sertleştirme ve pekleştirme (bilya püskürtme, soğuk çekiştirme v.b.) sayılabilir. Anılan yöntemlerin tümünde yorulma dayanımının yükselmesi yüzeyde basma iç gerilmelerinin oluşması\*, yüzeye yakın bölgelerin dayanımlarının artması ve bu suretle dislokasyon hareketlerinin engellenmesi yoluyla olmaktadır.

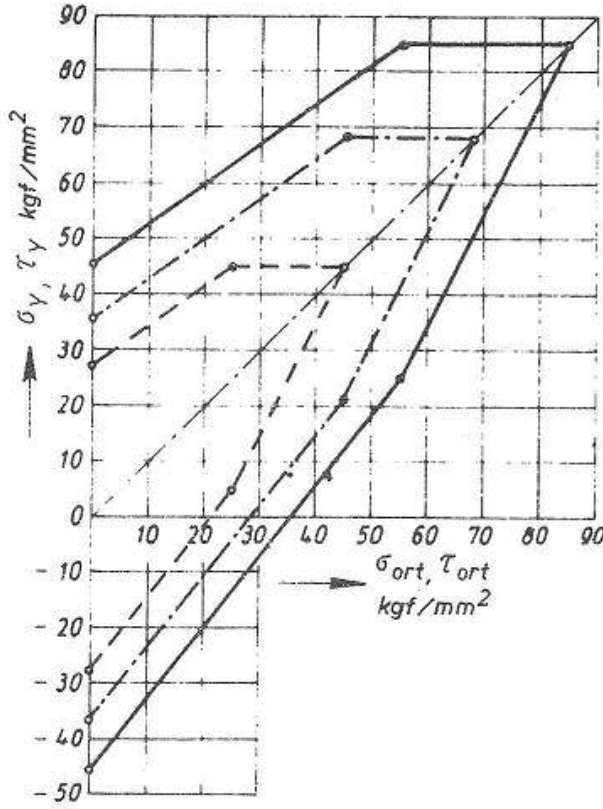
\*) Çatlağı ayırıcı etkisinden ötürü çekme gerilmelerinin basma gerilmelerinden daha tehlikeli olduğu bilinmektedir. Yüzeyinde basma iç gerilmelerinin mevcut olduğu bir parçaya çekme gerilmelerinin uygulanması halinde, dış gerilmelere iç gerilmelerin eklenmesi ile parça yüzeyinde çekme gerilmeleri düşük seviyelerde kalacaktır.



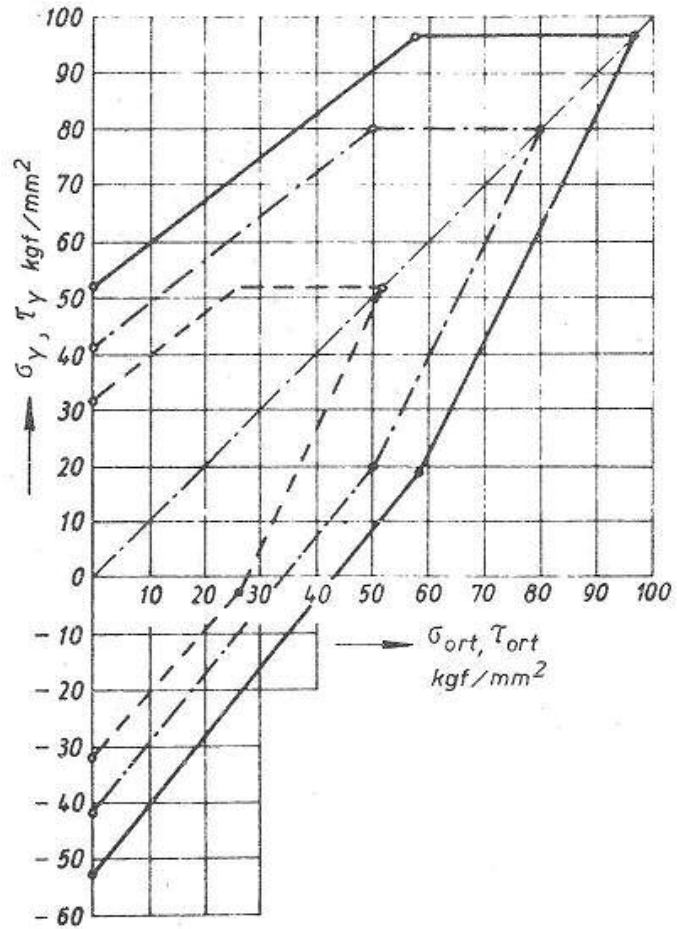
Şekil-38: 50 CrV 4 ıslah çeliği, 90...  
100 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



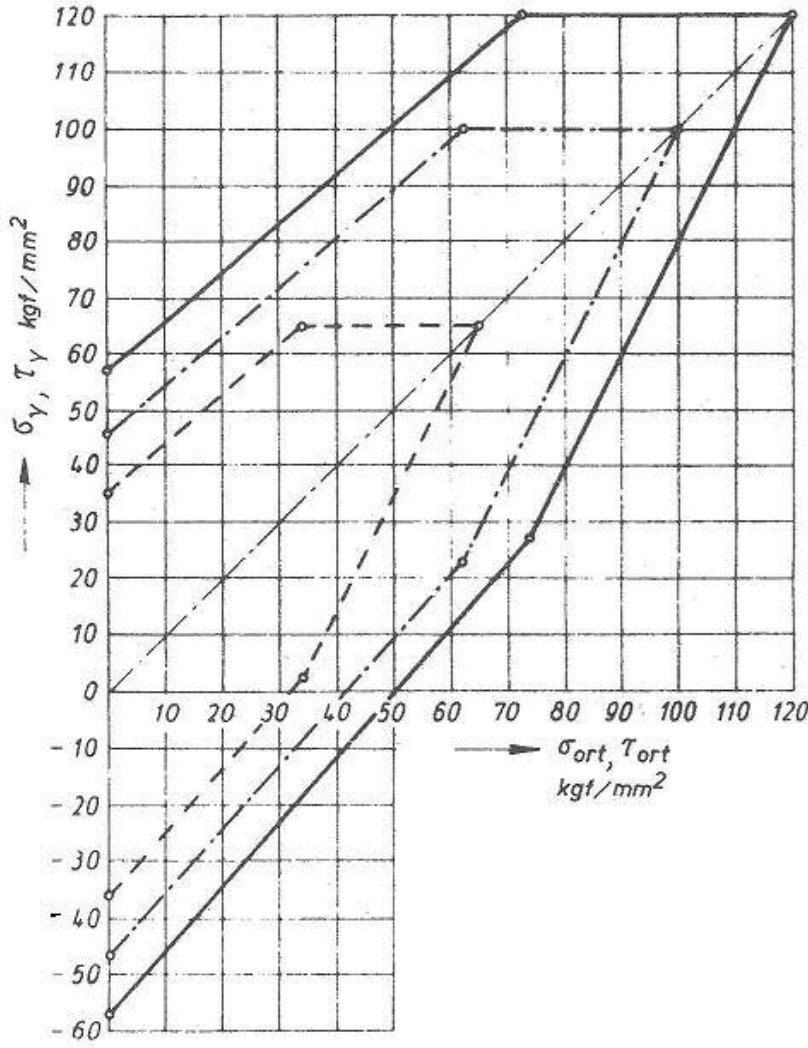
Şekil-39: 25 CrMo 4 ıslah çeliği  
75...85 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



Şekil-40: 34 CrMo 4 ıslah çeliği, 90...100 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.

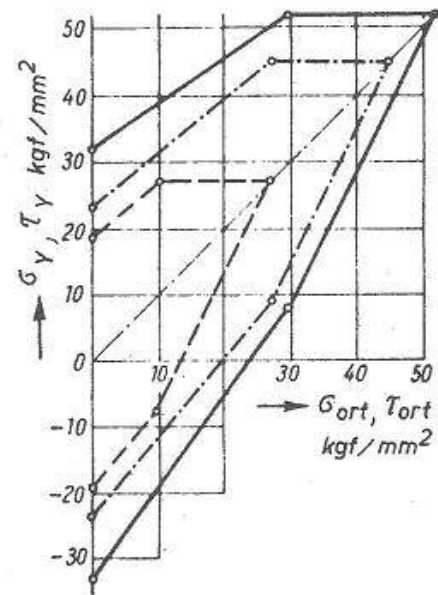


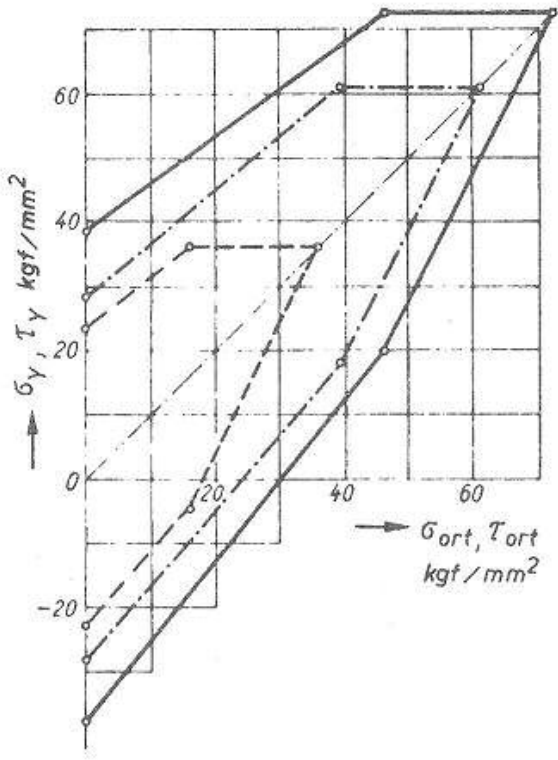
Şekil-41: 42 CrMo 4 ıslah çeliği, 100...110 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



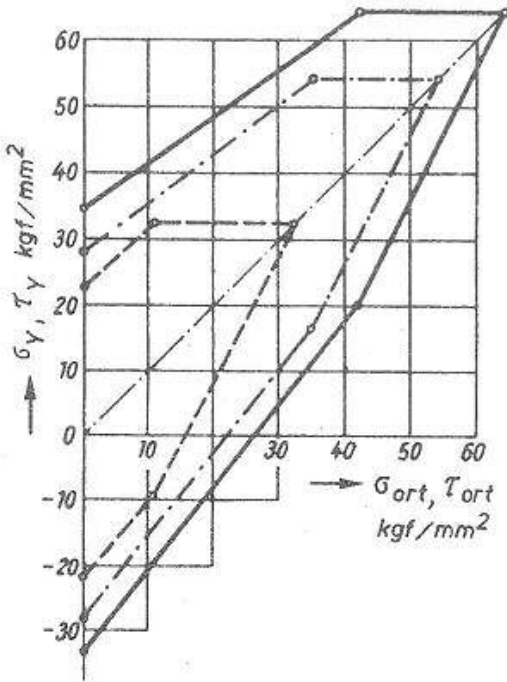
Şekil-42: 30 CrMoV 9 ıslah çeliği, 120...130 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.

Şekil-43: 20 NiCr 5,60...70 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.

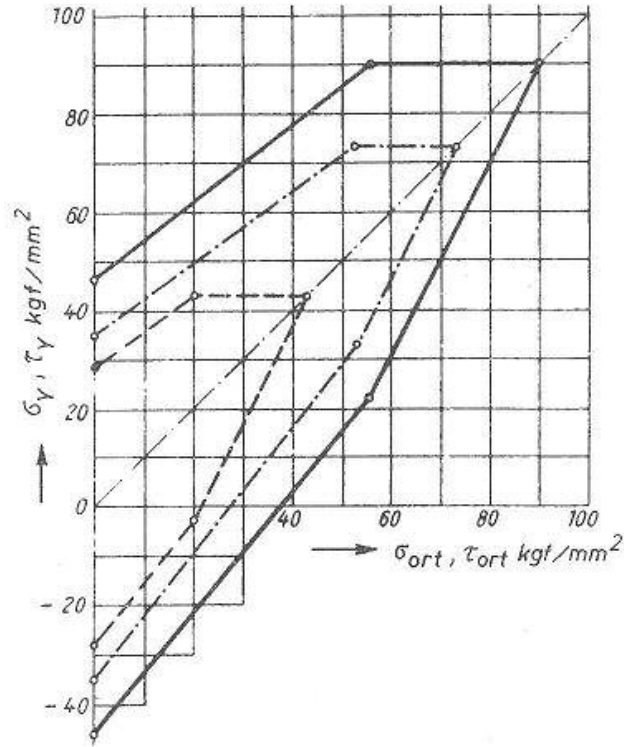




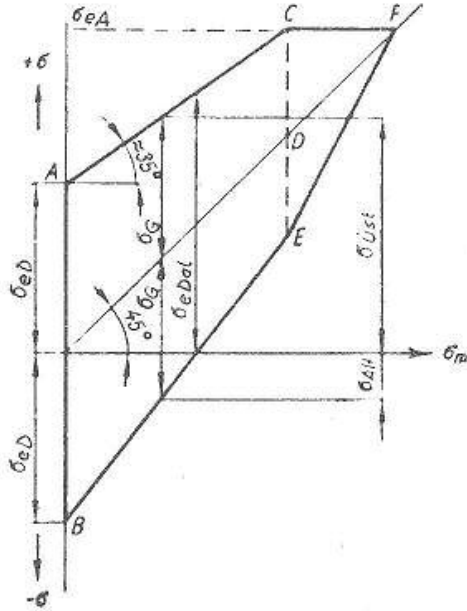
Şekil-44: 30 NiCr 12, 70...80  $\text{kgf/mm}^2$  çekme dayanımına ıslah edilmiş.



Şekil-45: 37 NiCr 10, 80...90  $\text{kgf/mm}^2$  çekme dayanımına ıslah edilmiş.



Şekil-46: 37 NiCr 13, 90...100 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.



Şekil-47:  $\sigma_{eD}$  ve  $\sigma_{eA}$  yardımıyla, eğme için yorulma dayanımı diyagramının çizimi.

$\sigma_G$  : gerilme genliği

$\sigma_{üst}$  : üst gerilme

$\sigma_{ALT}$  : alt gerilme

$\sigma_{eDal}$  : Eğme dalgalı yorulma dayanımı

$\sigma_{eD}$  : Eğme değişken yorulma dayanımı

$\sigma_{eA}$  : Eğme akma sınırı

$\sigma_{ort}$  : Ortalama gerilme

$\sigma_{eD}$  ve  $\sigma_{eA}$  yardımıyla A, B ve F noktaları saptanır. C ve E noktaları  $CD=DE=(0,7...0,8) \cdot \sigma_{eD}$  bağıntısı yardımıyla veya 35° açı ile AC doğrusunun çizilmesi ile belirlenir.



Çizelge-1 ve 2'de çok kullanılan bazı sementasyon çelikleri için düz ve çentikli deney parçalarında saptanan eğme değişken yorulma dayanımı değerleri verilmiştir [12].

Çizelge-1: Düzgün deney parçalarında sementasyon sertleşmesinin eğme değişken yorulma dayanımına etkisi

Malzeme	Deney parçası çapı, mm	Eğme değişken yorulma dayanımı, $\sigma_{ED}$ , kgf/mm <sup>2</sup>		Yorulma dayanımındaki artış, %
		A	B	
C 15	6,5	26	49	90
16 MnCr 5	6,5	41	84	105
20 MnCr 5	6,5	55	96	75
18 CrNi 8	5,0	45	91	100
20 MoCr 5	5,0	42	92	120

A-Sementasyonsuz sertleştirilmiş

B-Sementasyonlu sertleştirilmiş

Çizelge-2: Çentikli deney parçalarında sementasyon sertleştirmesinin eğme değişken yorulma dayanımına etkisi (çevresel yarım daire çentik,  $\alpha_{çen}=2$ )

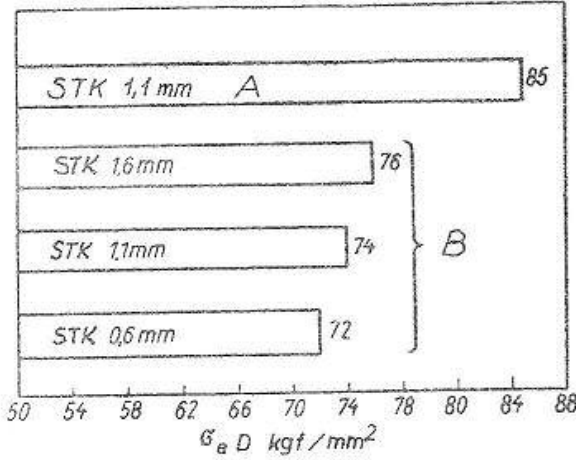
Malzeme	Deney parçası çapı, mm	Eğme değişken yorulma dayanımı, $\sigma_{ED}$ , kgf/mm <sup>2</sup>		Yorulma dayanımındaki artış, %
		A	B	
C 15	6,5	22	40	80
16 MnCr 5	6,5	20	39	95
20 MoCr 5	5,0	23	47	110

A-Sementasyonsuz sertleştirilmiş

B-Sementasyonlu sertleştirilmiş

Semente edilmiş makina parçaları veya deney parçalarının yorulma dayanımlarına zorlama ve üretim koşullarının (ısıtılma işlem, sementasyon kalınlığı, sementasyon tabakasındaki karbon yüzdesi v.b.) etkisi çok önemlidir. Şekil-48'de doğrudan sertleştirilebilir 20 MoCr 5 sementasyon çeliğinde su verme sıcaklığı ve sementasyon kalınlığının eğme değişken yorulma dayanımına etkisi gösterilmiştir. Bu çelikten üretilen makina parçaları yüksek aşınma dayanımları elde etmek için diğer çeliklerden

daha yüksek sıcaklıklarda menevişlenebilirler (yaklaşık 300°C) ve bu sırada mekanik özelliklerde olumsuz bir değişme görülmez [13].



Şekil-48: 20 MoCr 5 çeliğinden sementasyonla sertleştirilmiş (çentiksiz) deney parçalarında eğme değişken yorulma dayanımının su verme sıcaklığı ve sementasyon tabakası kalınlığı (STK) ile değişimi.

A: Önce soğutup, daha sonra 870°C den sertleştirme

B: Sementasyon sıcaklığı 920°C dan doğrudan sertleştirme

Alevle veya endüksiyonla yapılan yüzey sertleştirmesinde parametrelerin doğru seçilmesi halinde yorulma dayanımı sementasyonda olduğu gibi önemli oranda artırılabilir [14] [15] [16]. İslah çeliğinden üretilmiş ve endüksiyonla sertleştirilmiş parçaların burma yorulma dayanımlarının artması, sertleştirilen tabakanın parça kalınlığının en az % 10'u olması halinde mümkündür [17].

Nitrürasyon yöntemi ile de yorulma dayanımı önemli ölçüde yükseltilebilir. İşlemin gaz ortamında veya tuz banyosunda yapılması önemli bir fark doğurmaz [18] [19] [20] [21]. Ancak tuz banyosunda yapılan nitrürasyon sürenin kısalığı dolayısıyla ekonomik olarak daha avantajlıdır. Buna karşın yorulma dayanımının mutlak olarak artışı gazlı nitrürasyondan biraz daha düşüktür. Alaşımız çeliklerde yorulma dayanımının yükselişi (%100'e kadar) alaşımlı çeliklerden (genellikle %50'den az) daha fazladır. Gaz ortamında yapılan nitrürasyonda optimum yorulma dayanımı, yüzey sertliğinin fazla yüksek olmaması (650...700 kgf/mm<sup>2</sup> Vickers Sertlik Değeri arasında) ve yapının hiç serbest ferrit içermemesi veya çok az içermesi halinde elde edilir [22].

Yüzey dayanımını ve sertliğini arttırmayı hedef alan bütün yöntemler için dikkat edilmesi gereken husus, zorlanan tüm bölgelerde bu işlemin yapılması gereğidir. Dolayısıyla çentikli makina parçalarında yüzey dayanımı arttırılan bölge, çentiği de kapsamalıdır. Sertleştirilen bölgenin çentiğin önünde ve içinde bitirilmesi yanlış bir uygulamadır. Yorulma dayanımı artışlarında yüzeyde sertleşme ve kesitin orta kısmındaki çekme iç gerilmeleri ile dengelenen basma iç gerilmelerinin oluşumu esastır. Bu nedenle anılan yöntemlerle elde edilen yorulma dayanımı artışları, değişen çekme zorlamalarında eğme ve burma

zorlamalarına göre daha azdır\* [17]. Yukarıda sıralanan yüzey sertleştirme yöntemlerinde yorulma dayanımını belirleyen önemli bir diğer nokta da sertleştirilen tabakanın kalınlığının parça kalınlığına oranıdır ve bu oranın 0,10...0,15 arasında olması en uygundur. Ancak sementasyonla veya endüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş parçalarda yapılan bazı deneyler, yukarıdaki orandan farklı değerlerde de diğer faktörlerin olumlu etkisiyle yüksek yorulma dayanımlarının elde edilebileceğini göstermiştir [12][17].

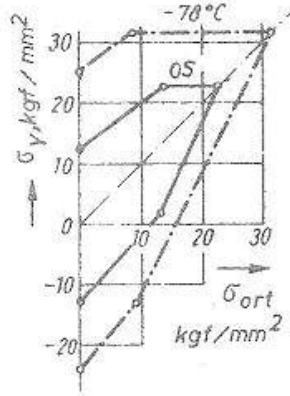
250°C sıcaklığın altında çalışan parça yüzey haddelme (soğuk haddelme, ezerek parlatma), bilya püskürtme veya kaynak dikişlerini çekişleme ile önemli artışlar sağlanabilir. Soğuk şekil değiştirme ile yorulma dayanımının artırılması sadece çeliklere değil, diğer metallere ve bu arada küresel grafitli dökme demirlere de uygulanabilir [23]. Bu yöntemlerin hepsinde de yorulma dayanımının yükselişi yüzeyde oluşan basma iç gerilmeleri ile ilgilidir. Ancak bütün iç gerilmelerin yorulma zorlamaları altında sabit kalmayıp zamanla bir miktar değişebileceğini unutmamak gerekir [24][25].

Yorulma dayanımı diyagramlarının tümü (Şekil-22... 47 ve daha sonrakiler) artı işaretli  $\sigma_{ort}$  ortalama gerilmeler için (çekme bölgesi) çizilmişlerdir. Eğme ve burmaya zorlanan parçalarda çekme-basma zorlamalarına benzer anlamda sadece eksi işaretli ortalama gerilmeler sözkonusu değildir\*\*. Çekme-basma zorlamalarında ise eksi işaretli ortalama gerilmeler (basma bölgesi) için yorulma dayanımı diyagramının sol kısmının da tamamlanması gerekebilir. Bu sırada basma dalgalı yorulma dayanımı  $\sigma_{bDal}$  ve basmadaki akma dayanımı (ezilme sınırı)  $\sigma_{bA}$ 'nın, çekme dalgalı yorulma dayanımı  $\sigma_{cDal}$  ve akma dayanımından  $\sigma_A$  daha yüksek olduğuna dikkat edilmelidir. Bu nedenle yorulma dayanımı diyagramları simetrik olmayıp (Şekil-14), bunların tam çizimi için basma dalgalı yorulma dayanımı ile ezilme sınırının bilinmesi veya tahmin edilmesi gereklidir.

Şimdiye kadar verilen tüm yorulma dayanımı diyagramları oda sıcaklığında saptanmış olup, sadece bu sıcaklık için geçerlidir. Sıcaklığın düşmesi ile düzgün parçalarda statik dayanım değerleri gibi (çekme dayanımı ve

\*) Eğme ve burma zorlamalarındaki gerilme gradyeninden ötürü yüzey bölgelerinde en yüksek gerilmeler olduğundan, yukarıda anılan yüzey dayanımını arttırıcı yöntemler özellikle bu tür zorlamalarda en büyük yorulma dayanımı artışlarını sağlamaktadır.

\*\*\*) Parçanın bir bölgesinde  $\sigma_{ort} < 0$  iken, diğer bölgesinde  $\sigma_{ort} > 0$  olan zorlamalar daima mevcuttur ve hasarı öncelikle bunlar oluşturur.



Şekil-49: Normalize edilmiş St34 yapı çeliği için çekme-basma zorlamasında, oda sıcaklığı değerlerinin (0S)  $t=-78^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında ki değerlerle karşılaştırılması.

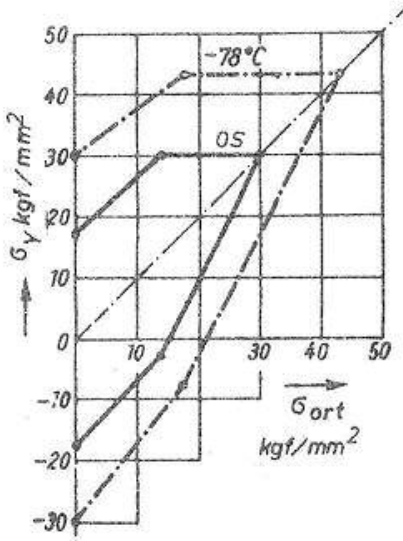
akma sınırı) yorulma dayanımı da artar; çentikli parçalarda ise statik dayanım değerleri düşer, yorulma dayanımı yaklaşık sabit kalır. Çentikli veya çentiksiz parçaların tümünde sıcaklığın düşmesi ile toklukta bir azalma görülür. Şekil-49...51'de St 34, St 50 ve St 70 için yorulma dayanımının  $-78^{\circ}\text{C}$ 'da hangi ölçülerde arttığı görülmektedir. Ayrıca St 50 çeliği için  $-188^{\circ}\text{C}$ 'da çekme-basma yorulma dayanımının  $64 \text{ kgf/mm}^2$  ve akma sınırının  $82 \text{ kgf/mm}^2$ 'ye çıktığı saptanmıştır.

Yüksek sıcaklıklardaki yorulma dayanımlarının bilinmesi, ısıya dayanıklı çelik ve alaşımlar için önemlidir. Sıcaklığın artması ile statik dayanım değerleri gibi yorulma dayanımı da azalır. Bu arada malzeme türü, sıcaklık ve ortalama gerilmeye bağlı olarak sürünme olayının da etkisi görülür. Özellikle yüksek ortalama gerilmeler için sürünme yoluyla oluşan kalıcı şekil değişimleri, yorulma dayanımı diyagramlarına ek sınırlama getirir. Bu şekil değişimleri zamana bağlı olarak arttığından, yorulma dayanımı  $500 \cdot 10^6$  çevrim sayısının üzerinde dahi bir asimptot değerine ulaşmaz [26]. Böylece çeliklerde yüksek sıcaklıklarda ki yorulma dayanımının alışılmış sınır çevrim sayısı için saptanması yeterli olmamakta, sürünmeye benzer biçimde deney süresinin\*de belirtilmesi gerekmektedir. Ayrıca çentik katsayısı da sıcaklığa, zorlama süresine, ortalama gerilmenin seviyesine ve gerilme genliğine bağlı olarak oda sıcaklığı değerinden düşük veya yüksek olabilir [27][28][29].

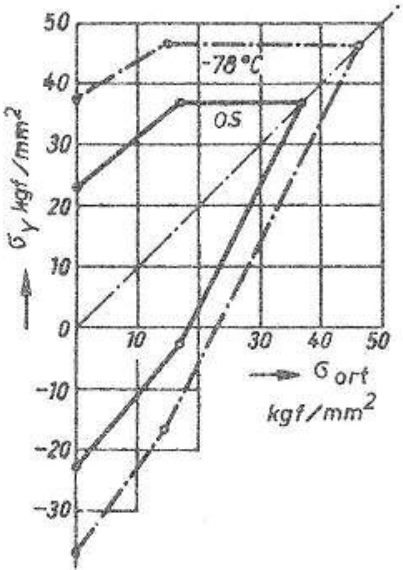
Şekil-52 ve 53'te oda sıcaklığında  $65 \text{ kgf/mm}^2$  çekme dayanımına sahip ostenitik X10CrNiWVTa 18.9 [27] çeliğinin  $20^{\circ}\text{C}$  ve  $600^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda düz ve çentikli deney parçaları için yorulma dayanımı diyagramları verilmektedir. Deney süresi 300 saattir. Isıya dayanıklı ıslah edilebilir X22CrMoV 12.1 çeliğinin [27]  $20^{\circ}\text{C}$  ve

\* ) Deney süresi seçilen çevrim sayısının frekansa bölümü olduğuna göre, yüksek sıcaklıkta frekans önemli bir etken olmaktadır.

500°C sıcaklıklarındaki yorulma dayanım diyagramları da Şekil-54 ve 55'te görülmektedir. Bu deney parçalarının oda sıcaklığındaki çekme dayanımları  $90 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Isıya dayanıklı çelikten yapılmış düzgün deney parçalarının, kalıcı şekil değişimine neden olan sürünme zorlamasını izleyen yüksek sıcaklıktaki dinamik bir zorlamada, yorulma dayanımında düşmeler görülmüştür. Bu düşüş, sürünme şekil değişiminin miktarına bağlıdır. Aynı koşullarda çentikli parçaların davranışı incelenmemiştir; ancak bunlara işletme sıcaklığındaki statik ön zorlamanın önemli bir etkisinin olmaması beklenir. Isıya dayanıklı çeliklerde de yüksek sıcaklık dayanımları yüzey pekleştirme işlemleri ile artırılabilir [30].

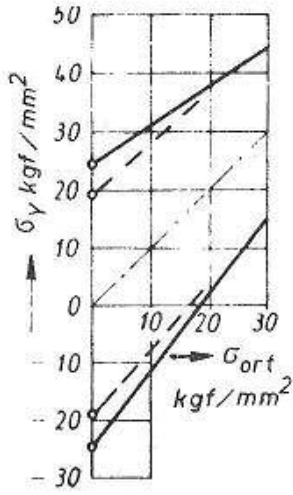


Şekil-50: Normalize edilmiş St50 yapı çeliği için çekme-basma zorlamasında, oda sıcaklığı değerlerinin (0S),  $t=-78^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındaki değerlerle karşılaştırılması.

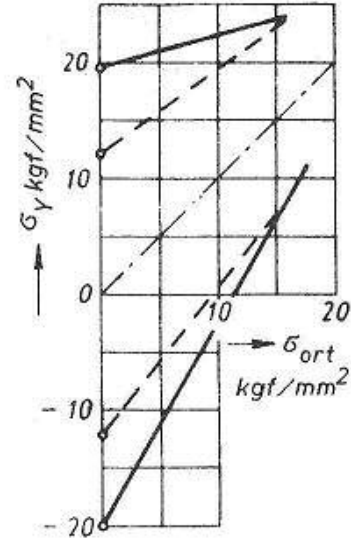


Şekil-51: Normalize edilmiş St70 yapı çeliği için çekme-basma zorlamasında, oda sıcaklığı değerlerinin (0S),  $t=-78^{\circ}\text{C}$  sıcaklığındaki değerlerle karşılaştırılması.

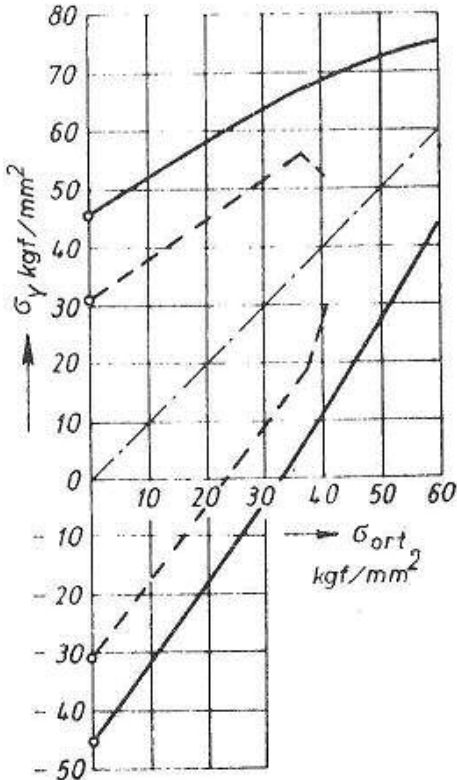
% 1,2 karbon ve %13 mangan içeren aşınmaya dayanıklı ostenitik sert mangan çeliğinin çekme-basma yorulma dayanımı diyagramı Şekil-56'da verilmiştir.



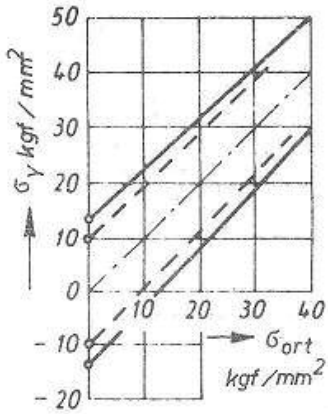
Şekil-52: Isıya dayanıklı X 10 CrNiWVTa 18.9 ostenitik çeliği, düzgün deney parçaları, Deney süresi 300 saat, Deney sıcaklıkları:  
 20°C ———  
 600°C - - - -  
 Oda sıcaklığında çekme dayanımı 65 kgf/mm<sup>2</sup>, çekme-basma zorlaması.



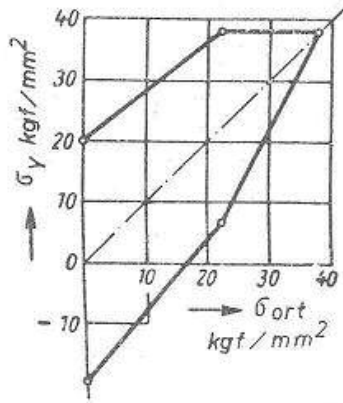
Şekil-53: Isıya dayanıklı X 10 CrNiWVTa 18.9 ostenitik çeliği, çentikli deney parçaları, (çevresel sivri çentik) Deney süresi 300 saat, Deney sıcaklıkları:  
 20°C ———  
 600°C - - - -  
 Çekme-basma zorlaması.



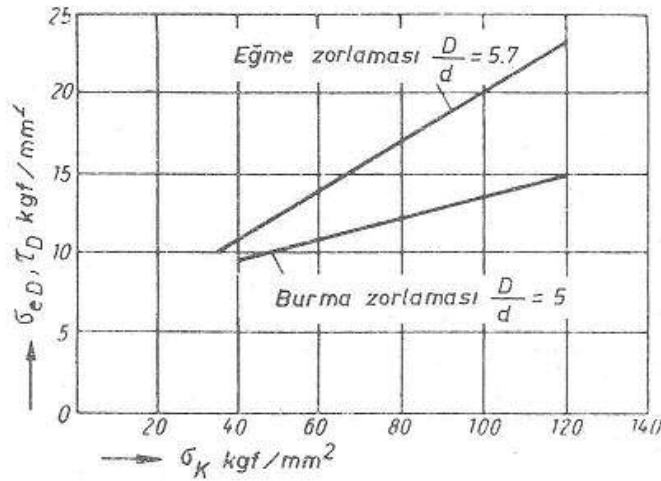
Şekil-54: Isıya dayanıklı X 22 CrMoV 12.1 ferritik çeliği, düzgün deney parçaları, Deney süresi 300 saat, Deney sıcaklıkları  
 20°C ———  
 500°C - - - -  
 Oda sıcaklığında çekme dayanımı 90 kgf/mm<sup>2</sup>, Çekme-basma zorlaması.



Şekil-55: Isıya dayanıklı X 22 CrMoV 12.1 Ferritik çeliği, çentikli deney parçaları (çevresel sivri çentik), Deney süresi 300 saat, Deney sıcaklıkları 20°C ——— 500°C - - - - Çekme-basma zorlaması.



Şekil-56: Sert mangan çeliği, çekme-basma zorlaması. %1,20C ve %13 Mn, ostenitik yapıda.



Şekil-57: Enine delikler içeren millerin yorulma dayanımı. D: milin çapı, d: deliğin çapı. D=30 mm.

Bütün bu malzemeler dışında paslanmaz çeliklerin de yorulma zorlamaları altında kullanılmaları sözkonusudur. Bu çelikler için yorulma dayanımı diyagramları mevcut değildir. Ancak ferritik paslanmaz krom çelikleri için (yaklaşık %0,1 karbon) eğme değişken yorulma dayanımı olarak  $\sigma_{eD} = 0,6 \sigma_K$  ve ıslah edilebilir paslanmaz krom çelikleri (yaklaşık %0,12...0,30 karbon) ile ostenitik krom-nikel çelikleri için  $\sigma_{eD} = 0,5 \sigma_K$  alınabilir.

Şekil-57'de enine delikler içeren millerin eğme ve burma yorulma dayanımlarının çekme dayanımı ve boyutlarla nasıl değiştiğini gösteren bir diyagram verilmiştir [31]. Yorulma dayanımı değerleri 30 mm çapındaki millerde saptanmıştır.

Schaal [32] tarafından yapılan deneyler, eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}$ 'nin (çevresel eğme), akma sınırı veya 0,2 sınırına bağlı olarak değiştiğini ve ayrıca tane büyüklüğünün de yorulma dayanımı üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Oda sıcaklığında yorulma bakımından en iyi özellikler ince taneli malzemelerde elde edilir. Ancak bu kural oda sıcaklığında çentikli parçalar için ve yüksek sıcaklıklarda hem düz, hem de çentikli parçalar için tam geçerli değildir. Şekil-58'de Schaal [33] tarafından hazırlanmış diyagramdan tane büyüklüğünün eğme değişken yorulma dayanımına etkisi görülmektedir. Çok küçük bir tane boyutu olan yaklaşık 1  $\mu$ m için eğme değişken yorulma dayanımı en büyük değere sahip olmakta ve artan tane büyüklüğü ile yorulma dayanımı azalmaktadır.

Bütün kesite uygulanan büyük kalıcı şekil değişimleri, kalıntılar ve yapıda bulunan diğer kırılğan faz ve bileşikler de eğme değişken yorulma dayanımı düşürürler. Akma sınırı sabit kalarak çekme dayanımının yükseltilmesi yolu ile yorulma dayanımı ancak çok az miktarda artırılabilir. Yüksek sıcaklıklarda ise tane büyüklüğünün etkisi ayrıca çelik cinsine, sıcaklığa, çentik etkisine ve deney süresine bağlıdır.

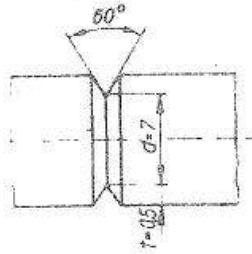
Çentik darbe dayanımı ile yorulma ve süreli yorulma dayanımları arasında bağıntılar arayan çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu tür bir bağıntının varlığı gösterilememiştir.

Düz ve çentikli çubuklar için çekme dayanımı yardımıyla yorulma ve süreli yorulma dayanımlarının yaklaşık olarak hesaplanmasını sağlayan bağıntılar Pomp ve Hempel [34] tarafından önerilmiştir (Çizelge-3).

Eğme değişken yorulma dayanımı çekme dayanımının belirli bir değerine kadar bu büyüklükle birlikte artar. NiCrMoV-alaşımli yüksek dayanımlı ıslah çeliklerinde [35] yapılan deneyler, özenle taşlanmış deney parçalarında eğme değişken yorulma dayanımının, çekme dayanımının 170 kgf/mm<sup>2</sup> değerine kadar arttığını göstermiştir. Daha yüksek çekme dayanımlarında eğme değişken yorulma dayanımının artmadığı ve hatta bir miktar düştüğü görülmüştür. Yorulma dayanımının artık artmadığı ve hatta düşmeye başladığı seviyeye karşılık olan çekme dayanımı, çeliğin bileşimine bağlı olarak 160..180 kgf/mm<sup>2</sup> arasındadır. Malzemenin yüzeyinde değişik yöntemlerle basma



gerilmeleri oluşturarak, ostemperleme ısıl işlemi yaparak veya sıvı çeliğe vakum işlemi uygulayarak yüksek dayanımlı ıslah çeliklerinde yorulma dayanımını daha da iyileştirmek mümkün olabilir.



Çizelge-3: Alaşimsız ve Cr, Ni, Mo ve V ile az alaşımlandırılmış %0,2...0,6 C'lu çeliklerin sivri çentikli ve çentiksiz deney parçalarında, çekme dayanımı  $\sigma_K$  ve taşınabilir çevrim sayısı N'e bağlı olarak, 20°C sıcaklıktaki  $\sigma_{\text{çbD}}$  değişken yorulma dayanımı ve  $\sigma_{\text{çbD}}^{\text{süre}}$  süreli yorulma dayanımı

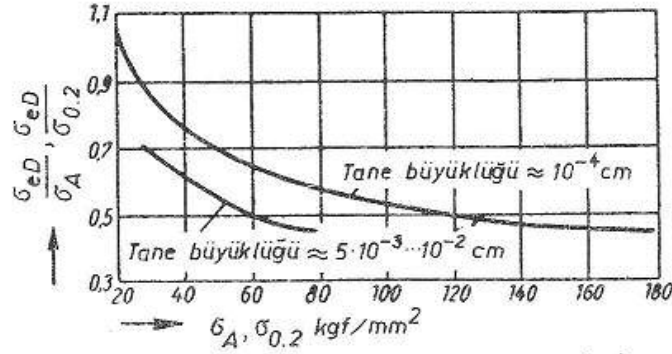
*Sivri Çentiğin Biçimi (Yuvarlatma yarıçapı  $r=0,1\text{mm}$ )  
Dolu çubuklarda değişken yorulma dayanımı ve süreli yorulma dayanımı düşük sıcaklıklarda artar. Çentikli çubuklarda ise önemli bir farklılık görülmez.*

N	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$
$\sigma_{\text{çbD}}$	$0,64 \sigma_K \pm 10\%$	$0,57 \sigma_K \pm 10\%$	$0,51 \sigma_K \pm 10\%$	$0,45 \sigma_K \pm 10\%$
$\sigma_{\text{çbD}}^{\text{süre}}$	$4,5 \sqrt{\sigma_K} \pm 10\%$	$3,25 \sqrt{\sigma_K} \pm 10\%$	$3 \sqrt{\sigma_K} \pm 20\%$	$1,75 \sqrt{\sigma_K} \pm 20\%$

Şekil-59, 40 SiCrNi 7.5 yüksek dayanımlı ıslah çeliği için eğme değişken yorulma dayanımının çekme dayanımı ile değişimini göstermektedir [36] [37]. Açıkta eritilmiş çelikte çekme dayanımının 160 kgf/mm<sup>2</sup>'ye ulaşması ile yorulma dayanımı tekrar azalmaya başlamaktadır. Aynı bileşimdeki vakum çeliğinde ise çekme dayanımının 200 kgf/mm<sup>2</sup>'ye ulaşmasına rağmen yorulma dayanımı hala en büyük değerine varmış değildir. Vakum çeliğinin yorulma dayanımının yüksek olmasında ana etken, özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde mekanik özellikler bakımından çok sakıncalı olan metal olmayan kalıntıların temizlenmiş olmasıdır.

Parlatılmış veya taşlanmış deney parçalarında bu tür çelikler üzerinde yapılan deneyler, yorulma kırılmalarının başlangıç noktasını metal olmayan kalıntıların oluşturduğunu göstermiştir. Hatta %0,2 karbonlu yumuşak alaşimsız çeliklerde bile metallurjik kirliliğin yorulma dayanımına etkisi saptanmıştır, ancak buradaki etki yüksek dayanımlı ıslah çeliklerinde olduğu gibi büyük değildir.

Bir çeliğin temizlenme derecesi kullanılan eritme yöntemine ve uygulamanın nasıl yapıldığına bağlıdır. Thomas yöntemi ile üretilen bir kitle çeliğinin yapısında

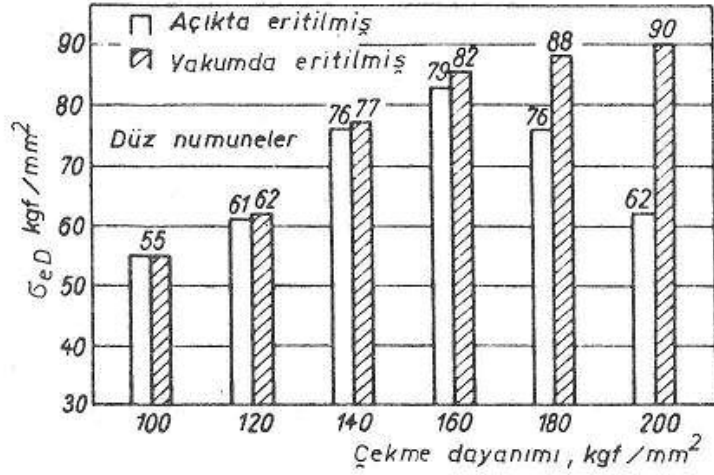


Şekil-58: Eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{ED}$ 'nin akma sınırı ve tane büyüklüğü ile değişimi. Deney parçası çapı 7,52 mm, sınır çevrim sayısı  $2 \cdot 10^6$ .

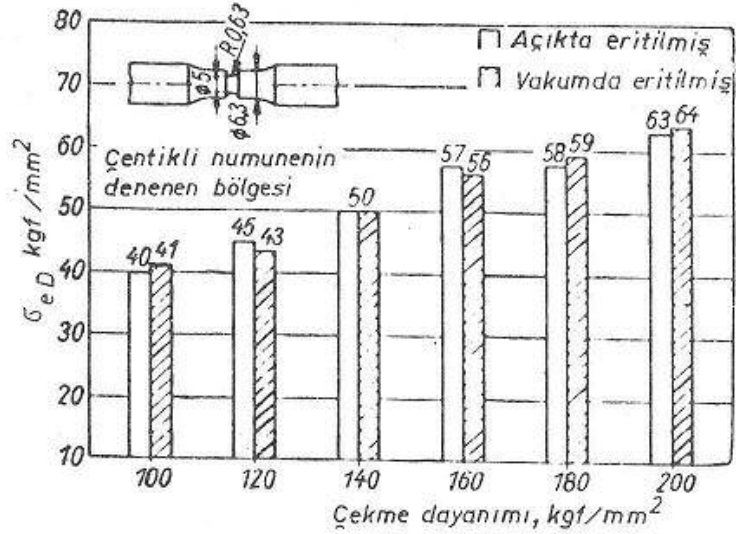
çok miktarda cüruf kalıntısı bulunabilir. Siemens-Martin yöntemi ile daha iyi bir temizlik derecesine ulaşmak mümkündür ve bu nedenle Siemens-Martin çelikleri kaliteli çelik kabul edilerek, daha yüksek zorlamaların sözkonusu olduğu alanlarda kullanılabilirler. Elektrik ocaklarında üretilen çelikler ise en temiz çelik olduklarından asil çelik sınıfına girerler ve en kritik uygulama yerlerinde tercih edilirler. Bu arada yüksek temizlik derecelerinden dolayı, asil çeliklerin kitle ve kalite çeliklerinden daha fazla çentik duyarlılığına sahip oldukları görülmüştür.

Vakumda eritilmiş yüksek dayanımlı ıslah veya rulman çeliğinden yapılmış düz deney çubukları için Şekil-59'da görülen yorulma dayanımı iyileşmeleri, sadece eriyikteki gaz miktarının azalmasına değil, metal olmayan kalıntılar bakımından hemen hemen mükemmel olan temizliğe bağlanmalıdır.

Çentikli deney parçalarında çeliğin çok temiz olması, dış çentik etkileri daha ağır bastığı için yorulma dayanımının artmasını sağlamaz, Şekil-60 [37]. Bu nedenle metal olmayan kalıntılar, özellikle parlatılmış ve taşlanmış deney parçaları ile konstrüksiyona bağlı çentikler içermeyen makina elemanlarında etkili olurlar. Makina parçasında dış çentik etkisi yapan yüzey, biçim ve şekil etkilerinin bulunması durumunda ise bu çentikler, cüruf kalıntıları ve malzeme hatalarının doğuracağı iç çentik etkilerinden daha fazla önem kazanırlar. Serbest dövmeyle imal edilmiş, manyetik parçacıklar yöntemi ile saptanabilecek, yüzeyde boyuna malzeme hataları içeren krank millerinin burma veya eğme yorulma deneyleri bu durumu kanıtlamıştır [38]. Sözkonusu deneylerde yorulma çatlağının hiçbir zaman mevcut malzeme hatalarından kaynaklanmadığı, çatlakların dış çentik etkilerinin bulunduğu noktalardan (yanak ile muylu arasındaki boyun veya yağ deliği) başladığı saptanmıştır.

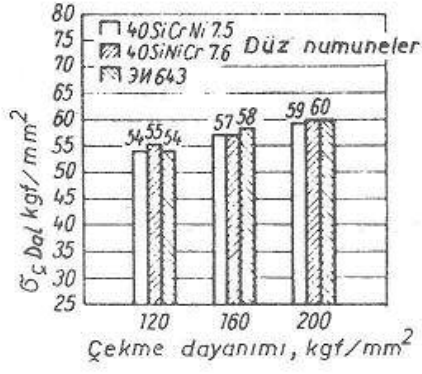


Şekil-59: Açıkta ve vakumda eritilmiş yüksek dayanımlı 40 SiCrNi 7.5 ıslah çeliğinden düz deney parçalarının eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}$ 'nin çekme dayanımı ile değişimi. Deney parçası çapı 5,0 mm. Sınır çevrim sayısı  $10 \cdot 10^6$ .

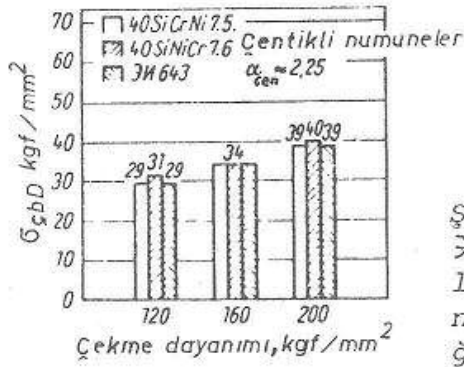


Şekil-60: Yüksek dayanımlı 40 SiCrNi 7.5 ıslah çeliğinden çentikli parçaların eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}$ 'nin eritme yöntemi ve çekme dayanımı ile değişimi. Sınır çevrim sayısı  $10 \cdot 10^6$ ;  $\alpha_{çen} = 2$ .

Böylece çeliğin yüksek temizlikte olmasının, ancak bu çelikten üretilecek makina elemanı için kusursuz boyut, biçim ve işleme şartları sağlanması veya kaçınılmaz bazı dış çentik etkilerinin ezerek parlatma, soğuk haddelme v.b. bir yöntemle giderilmesi halinde anlamı vardır. Yoksa gereksiz şekilde pahalı çelik kullanılmış olur.



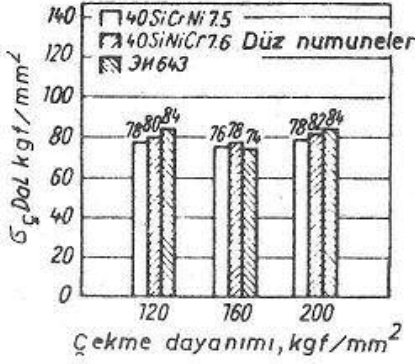
Şekil-61: 40 SiCrNi 7.5, 40 SiNiCr 7.6 ve 3N 643 çeliklerinden düz deney parçalarının çekme-basma değişken yorulma dayanımı. Sınır çevrim sayısı  $10^7$ , deney çubuğu çapı 10 mm.



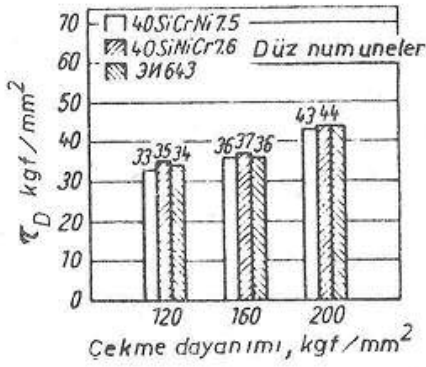
Şekil-62: 40 SiCrNi 7.5, 40 SiNiCr 7.6 ve 3N 643 çeliklerinden çentikli deney parçalarının çekme-basma değişken yorulma dayanımı. Sınır çevrim sayısı  $10^7$ , deney çubuğu çapı 10 mm.

Çeliklerin eğme değişken yorulma dayanımının çekme dayanımına bağlı olarak bir maksimum göstermesi, çekme-basma ve burma gibi diğer zorlama durumları için değişik ıslah çelikleriyle yapılan deneylerde bulunamamıştır. İncelenen malzemeler 40 SiCrNi 7.5, 40 SiNiCr 7.6 çelikleri ile 3N 643 Sovyet çeliğidir. Sonuçlar Şekil-61...64'te verilmekte ve çekme-basma ile burma yorulma deneylerinde çekme dayanımının 200 kgf/mm<sup>2</sup>'ye kadar yükselmesine rağmen yorulma dayanımındaki artışın durmadığı görülmektedir [39].

Şekil-22,23,28,29 ve 30'da yorulma dayanımı di-yagramları verilen yapı çelikleri, özel yapı çelikleri ve özel yüksek dayanımlı yapı çelikleri kaynak edilebilir ve bu durumda yorulma zorlamasına maruz yapı elemanlarında kullanılabilirler (Ayrıca bak:3.17). Ancak burada yüksek dayanımlı yapı çelikleri (örneğin St 45/60) genel yapı çeliklerinden (örneğin St 38) yorulma dayanımı bakımından sadece ortalama gerilmelerin yüksek olması halinde (gerilme oranı  $\frac{\sigma_{alt}}{\sigma_{üst}}$  yaklaşık 0,7... 0,8'i geçerse) daha iyidirler [57]. Bunların dışında ıslah çelikleri de uygun kaynak teknikleri ve ilave malzemeler seçilerek dinamik zorlamalar altında kaynak edilmiş durumda kullanılabilirler. Bununla birlikte değişken zorlama bölgesinde veya dalgalı zorlama bölgesinin alt kısımlarında söz konusu üstün kaliteli çelikler St38'e karşı büyük bir üstünlük sağlamazlar.

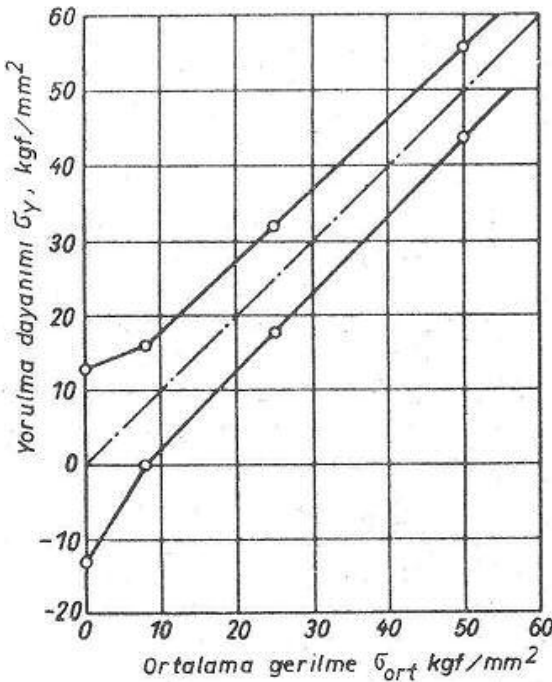


Şekil-63: 40 SiCrNi 7.5, 40 SiNiCr 7.6 ve 3H643 çeliklerinden düz deney parçalarında dalgalı yorulma dayanımı. Sınır çevrim sayısı  $10^7$ . Deney çubuğu çapı 10 mm.



Şekil-64: 40 SiCrNi 7.5, 40 SiNiCr 7.6 ve 3H643 çeliklerinden düz deney parçalarında burma yorulma dayanımı. Sınır çevrim sayısı  $10^7$ . Deney çubuğu çapı 10 mm.

Dolayısıyla bu çelikler ancak çok yüksek ortalama gerilmeler için, görece olarak yüksek gerilme genliklerini taşıyabilirler. Şekil-65'te 40 SiNiCr 7.6 çeliği için bu durum açıkça görülmektedir [41] [42]. Anılan çalışmada kullanılan deney parçaları 5 mm kalınlıkta sıcak haddelenmiş saçlardan, elle yapılan elektrik ark kaynağı yardımı ile alın bağlantısı olarak hazırlanmıştır.



Şekil-65: 195 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş kaynaklı deney parçalarının yorulma dayanımı diyagramı. Sınır çevrim sayısı  $10.10^6$ , çekme-basma zorlaması.

### 3.11. Dökme Çeliklerin Yorulma Dayanımı Diyagramları

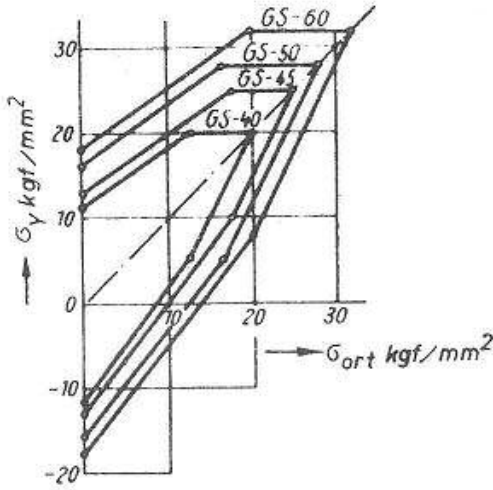
Haddelenmiş veya dövme çelikler gibi yüksek dayanımlı malzemelerin gerekli olmadığı ve lamel grafitli dökme demirlerin de düşük dayanımları veya darbeye karşı duyarlılıkları nedeniyle kullanılmadıkları yerlerde, dökme çelikler tercih edilirler. Dökme çelikler de haddelenmiş veya dövme çelikler ile aynı kimyasal bileşimde olup alaşımlı ve alaşımsız olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Süneklik, tokluk veya aşınma dayanımı bakımından özel isteklerin bulunması durumunda alaşımlı dökme çelikler seçilir. Alaşımsız dökme çelikler ise döküm sonrası kırılğan olduklarından genellikle normalize edilmiş durumda kullanılırlar. Isıl işlem uygulanırsa dahi dökme çelikler, mekanik şekil verme işlemleri sırasında döküm yapıları ortadan kaldırılan haddelenmiş veya dövme çelikler kadar homojen bir yapıya sahip değildirler. Dökme çeliğin mekanik özellikleri mikro boşluklar ve döküm yapısı ile ilgili diğer olumsuz faktörler nedeniyle daha düşüktür. Bu fark akma sınırı ve çekme dayanımı bakımından küçük olmakla birlikte, uzama ve tokluk değerleri bakımından önemli ölçüdedir.

Şekil-66'da çekme-basma, Şekil-67'de eğme ve Şekil-68'de burma zorlamaları için GS-40, GS-45, GS-50, GS-60 dökme çelik malzemelerin yorulma dayanımı diyagramları verilmiştir.

Yorulma dayanımı değerleri 7,5...10 mm çapında, işlenmiş ve yüzeyleri taşlanmış düz çubuklar için bulunmuştur. Çizelge-4'te GS-50 için verilen deney sonuçlarından da görüldüğü gibi döküm kabuğu yorulma dayanımını fazla etkilememektedir. İleri-geri eğme olarak yapılan deneylerde bulunan eğme dalgalı yorulma dayanımları, dekarbürizasyon tabakası kalınlığı değişik olan 12 mm kalınlığındaki deney parçaları üzerinde döküm kabuklu veya her iki yüzeyinden 1,5 mm taşlanmış durumunda saptanarak karşılaştırılmıştır.

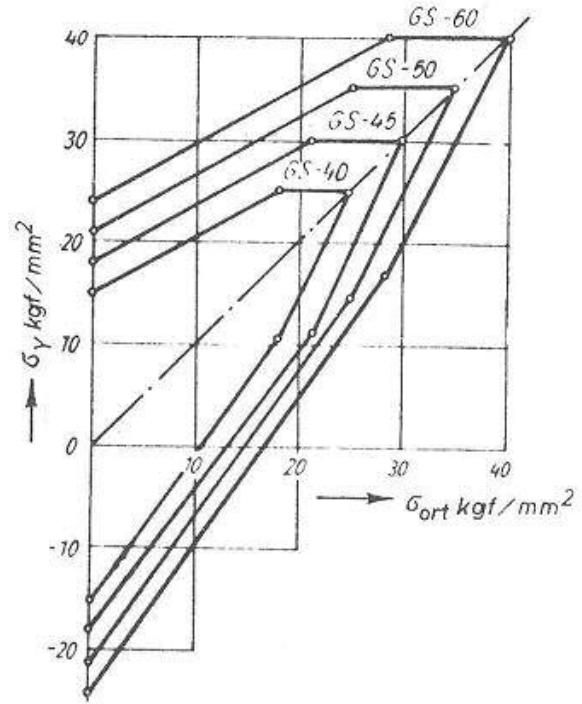
Çizelge-4: GS-50 dökme çeliğinin eğme dalgalı yorulma dayanımı (ileri-geri eğme)

	Dekarbürizasyon tabakası kalınlığı	
	0,7 mm	0,2 mm
$\sigma_{eDal}$ döküm kabuklu (kgf/mm <sup>2</sup> )	29	32
$\sigma_{eDal}$ döküm kabuksuz (kgf/mm <sup>2</sup> )	31	34

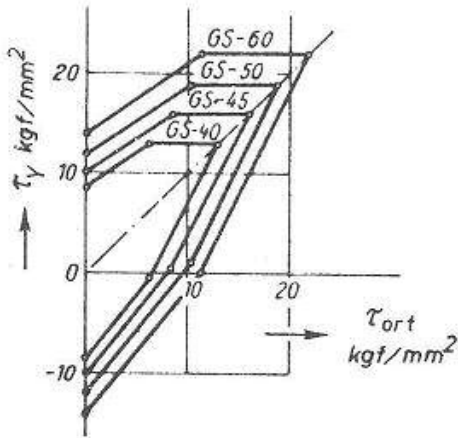


Şekil-66: Dökme çelikler, alaşımsız, normalize edilmiş, çekme-basma ve çekme zorlamaları.

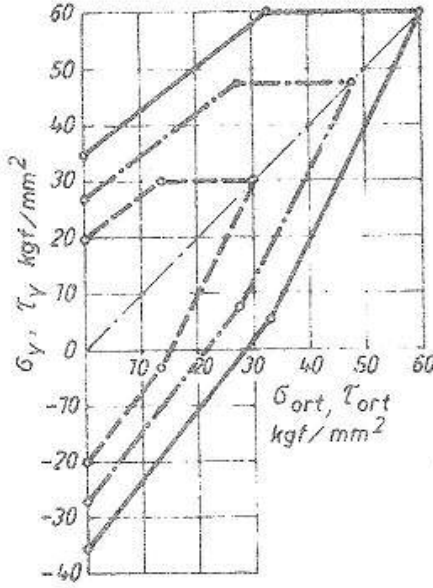
Şekil-67: Dökme çelikler, alaşımsız, normalize edilmiş, eğme zorlaması.



Alaşımlı dökme çeliklerde yapılan araştırmalar, eğme değişken yorulma dayanımının, çekme dayanımının yaklaşık %40'ı olduğunu göstermiştir [43]. Alaşımlı dökme çelik GS-37 MnSi 5 için yorulma dayanımı diyagramı Şekil-69'da verilmiştir.



Şekil-68: Dökme çelikler, alaşımsız, normalize edilmiş, burma zorlaması.



Şekil-69: Alaşımlı GS-37 MnSi 5 dökme çeliği, 80 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına ıslah edilmiş.

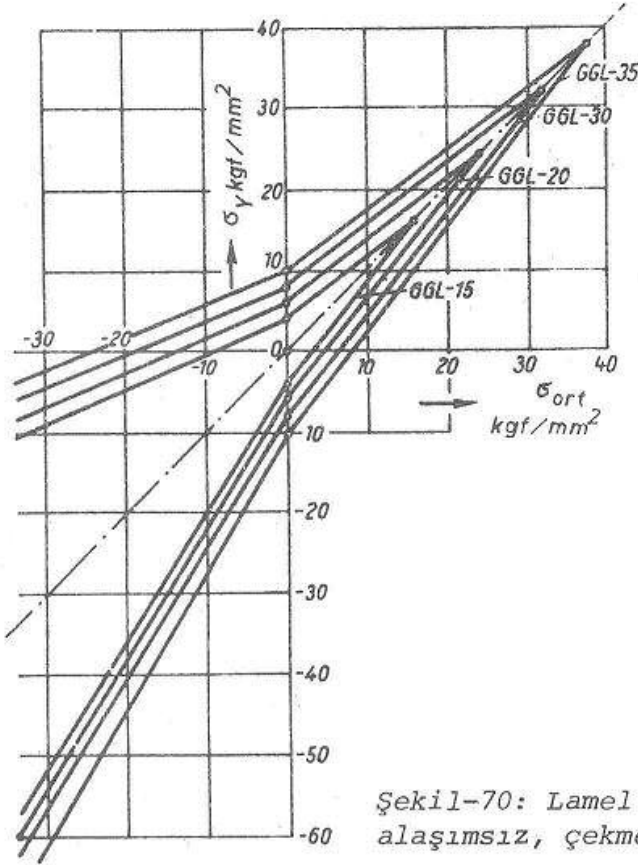
### 3.12. Lamel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Diyagramları

Lamel grafitli dökme demirler (kır veya gri dökme demirler) dayanımlarına göre standardize edilmişlerdir. Genellikle alaşımsız olarak kullanılan dökme demirlerin kimyasal bileşimleri çok geniş aralıklarda değişebilir. Normalin üstünde fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek için ender olarak Cr, Mo, Ni, V, Cu ve Ti ile alaşımlama yapılır. Dayanımları mikroyapılarına yani grafit lamellerinin büyüklüğü ve dağılımları ile matrisin\* türüne bağlıdır. En iyi durum perlitik bir matris içinde homojen olarak dağılmış ince lamelli grafitlerin bulunmasıdır. Döküm işleminin yapılışı ve kalıpta katılan dökme demirin soğuma hızı, dayanım değerlerini malzemenin bileşiminden daha çok etkilerler.

Şekil-70...72'de çekme-basma, eğme ve burma zorlamaları için lamel grafitli GGL-15, GGL-20, GGL-30, GGL-35 dökme demirlerin yorulma dayanımı diyagramları verilmiştir. Lamel grafitli dökme demirler özellikle basma zorlamaları altında daha yüksek dayanıma sahip olduklarından (dairesel kesitte basma dayanımı çekme dayanımının dört katıdır), Şekil-70'de görülen diyagram basma bölgesi için de çizilmiştir. Verilen yorulma dayanımı diyagramları yaklaşık 20 mm çapında işlenmiş yuvarlak çubuklar içindir. İşlenmemiş çubuklarda yorulma dayanımı %10...15 kadar daha düşüktür.

\* ) Grafitleri taşıyan ana kütle.



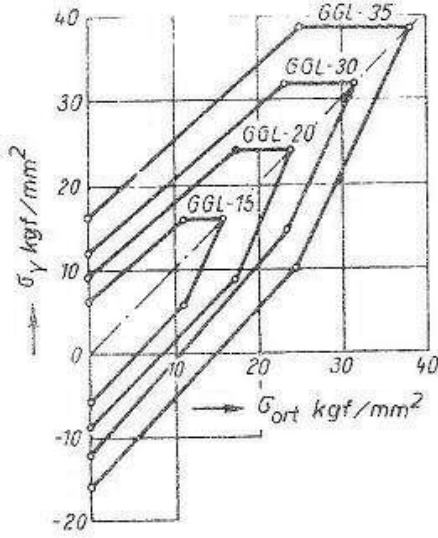


Şekil-70: Lamel grafitli dökme demir, alaşımsız, çekme-basma zorlaması.

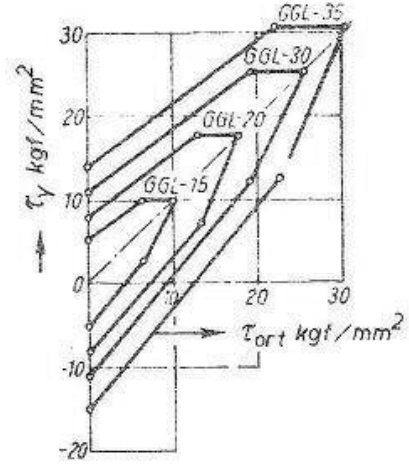
### 3.13. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Diyagramları

Yüksek statik ve dinamik zorlamaların sözkonusu olduğu yapı elemanlarında konstrüksiyon malzemesi olarak son yıllarda giderek artan bir şekilde küresel grafitli dökme demir (sfero dökme demir) kullanılmaktadır. Uygulanan metalurjik yöntemlerle grafitlerin lamel halden küresel duruma getirilmesi dayanım değerlerinde büyük artış sağlamaktadır. Ayrıca matrisin oluşumunu da kontrol ederek, alaşımsız ve az alaşımlı çelik dökümlerinin dayanım değerlerine eşdeğer, şekillendirilebilir ve tokluk özellikleri mükemmel olan malzemelerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Matrisin türüne bağlı olarak küresel grafitli dökme demirler, ferritik (GGG-40), ferritik-perlitik (GGG-45 ve GGG-50) veya perlitik (GGG-60 ve GGG-70) olmak üzere üç sınıfa ayrılır.

Küresel grafitli dökme demirler çentik davranışı bakımından çeliğe benzer özelliktedir ve bu nedenle yorulma zorlaması altında çalışacak makina parçaları için kullanılmaları uygundur. Çentik duyarlılığı lamel grafitli dökme demirden biraz yüksek, aynı dayanımdaki haddelenmiş veya dökme çelikten biraz daha düşüktür. Eğme ve burma zorlamaları altında, çeliklerde olduğu gibi bir büyüklük etkisi vardır ve yorulma hesaplarında bu etki dikkate alınmalıdır. Çelikler için sözkonusu olan tüm ısıl işlemler küresel grafitli dökme demire de

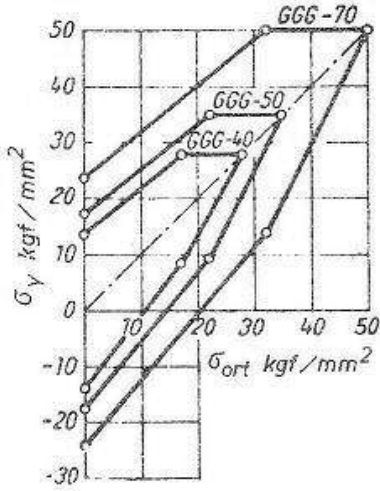


Şekil-71: Lamel grafitli dökme demir, alaşımsız, eğme zorlaması.

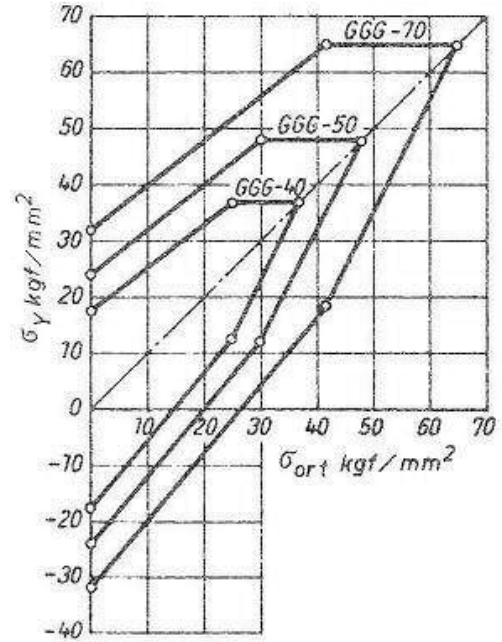


Şekil-72: Lamel grafitli dökme demir, alaşımsız, burma zorlaması.

uygulanabilir. Böylece ıslah yoluyla dayanım değerleri artırılabilir. veya yüzey sertleştirme yöntemleri ile aşınma dayanımları büyük ölçüde iyileştirilebilir.

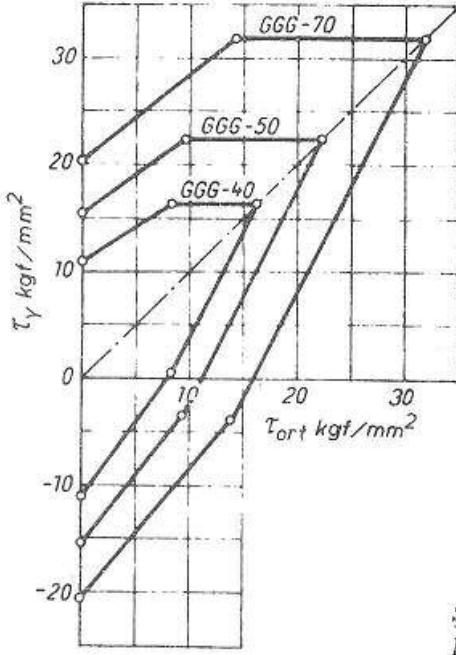


Şekil-73: Küresel grafitli dökme demir, çekme-basma ve çekme zorlamaları.



Şekil-74: Küresel grafitli dökme demir, eğme zorlaması.

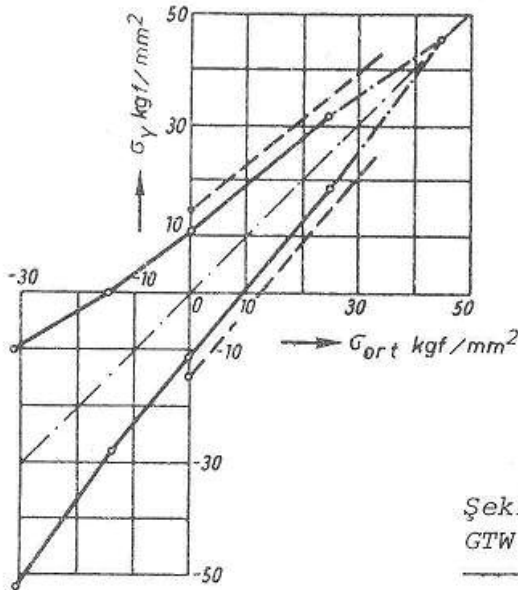
Şekil-73...75'te GGG-40, GGG-50 ve GGG-70 türleri için yorulma dayanımı diyagramları verilmiştir. GGG-45 ve GGG-60 için yorulma dayanımları ise interpolasyon yoluyla bulunabilir.



Şekil-75: Küresel grafitli dökme demir, burma zorlaması.

### 3.14. Temper Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Diyagramları

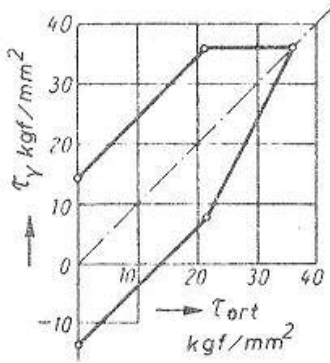
Temper dökme demir mekanik özellikleri bakımından dökme çelik ile lamel grafitli dökme demir arasındadır. Döküm kabiliyeti iyidir. Özellikle küçük ve ince cidarlı parçaların dökümünde kullanılır. Dar kesitli ve karmaşık şekilli çok küçük parçalar dahi temper dökümle temiz ve düzgün yüzeyle olarak üretilebilirler. Bu malzemenin talaş kaldırılarak işlenmesi de kolaydır. Temper döküm genellikle dinamik veya darbeli olarak zorlanacak ince cidarlı parçalarda, dökme çelik yetersiz akıcılığından dolayı kullanılamadığı için, tercih edilir.



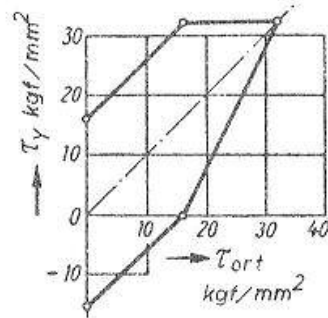
Şekil-76: Temper dökme demir  
GTW - 40  
— Çekme-basma ve çekme  
- - - Eğme

Şekil-76'da yüksek kaliteli beyaz temper dökme demir, GTW-40'ın çekme-basma zorlamaları için yorulma dayanımı diyagramı verilmektedir [44]. Bu diyagramın elde edilmesinde 23 mm çapında dairesel kesitli ve işlenmemiş deney parçaları kullanılmıştır. Bunun dışında döküm kabuğu işlenmiş ve 22...22,5 mm çapında deney parçaları yardımıyla, çekme-basma zorlamaları altında, döküm kabuğunun kayda değer bir etkisinin olmadığı saptanmıştır.

Lamel grafitli dökme demir (LGDD) gibi temper dökme demir de çekme zorlamalarına basma zorlamalarından daha az dayanımlıdır; ancak bu fark LGDD'deki kadar büyük değildir. Şekil-76'da çekme-basma yanında eğme zorlamaları için yaklaşık yorulma diyagramı çizilmiştir. Eğmede döküm kabuğu ile denenen parçalar işlenmiş parçalara göre %30 daha düşük değerler vermektedir. Şekil-77 ve 78'de burma zorlamaları için yorulma dayanımı diyagramları görülmekte olup, kullanılan deney parçalarının çapları, çekme-basma deneylerindeki aynıdır. Burmada döküm kabuğunun etkisi çok azdır.



Şekil-77: GTW-40 (döküm kabuklu) burma zorlaması.



Şekil-78: GTW-40 (işlenmiş) burma zorlaması.

### 3.15. Cıvataların Çekme-Basma Zorlamaları Altındaki Yorulma Dayanımı

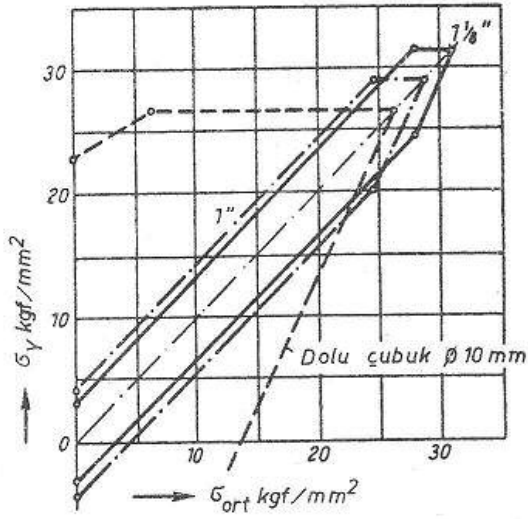
Talaş kaldırılarak, taşlanarak veya frezelenerek diş açılmış bir cıvatanın yorulma dayanımı, aynı kesite sahip düz çubuğun dayanımından çok küçüktür. Şekil-79 St 38'den talaş kaldırılarak üretilmiş cıvataların yorulma dayanımını vermektedir [45]. Dişlerin frezelenerek veya taşlanarak açılması durumunda da yorulma dayanımı yaklaşık olarak bu düzeyde kalır. Söz konusu şekil, diş çapının yorulma dayanımını etkilediğini ve dolu çubuğun taşıyabileceği gerilme genlikleri ile karşılaştırma yapıldığında, diş açılması ile dayanım değerlerinde çok büyük düşmelerin oluştuğunu göstermektedir.

Talaş kaldırarak üretilmiş cıvataların yorulma

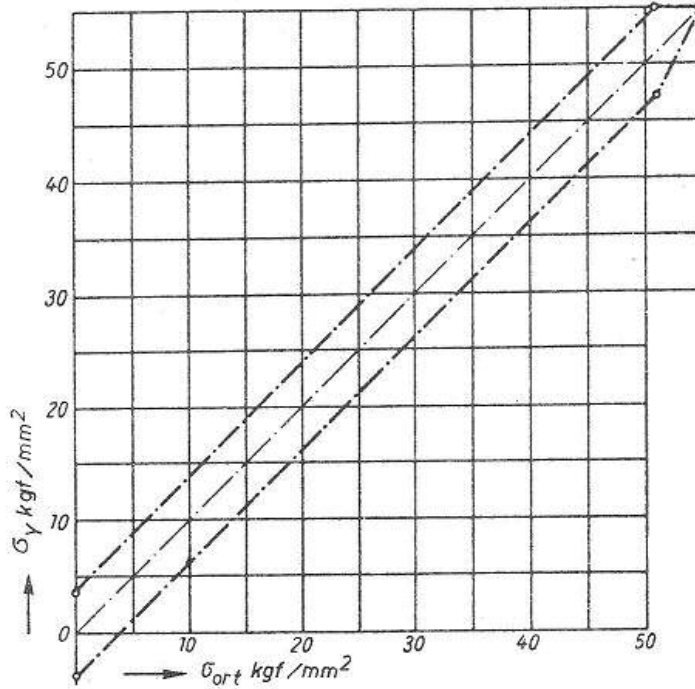
dayanımı diyagramları çelik türüne pek bağlı değildir. Şekil-80'den görüldüğü gibi alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde yapılacak bir ısıl işlemle yorulma dayanımı hiç değişmez veya çok az iyileşir. Buna karşın yüksek alaşımlı çelikler kullanarak yorulma dayanımı %50'ye kadar artırılabilir. Ancak bu durumda da dişler gene talaş kaldırılarak, taşlanarak veya frezelenerek açılırsa yorulma dayanımında bir iyileşme sağlanmaz; sadece akma sınırı biraz artarak ıslah edilmiş civatalara daha büyük ön gerilmelerin uygulanması mümkün olur. Şekil-79 ve 80'de verilen değerler Whitworth dişli civatalar üzerinde yapılan deneylerle bulunmuştur. Dişler metrik ise diş dibindeki yuvarlatma yarıçapının küçülmesinden dolayı yorulma dayanımı %10...20 daha da düşer.

Konstrüktif önlemlerle civata bağlantısındaki kuvvet akışının uygun olarak düzenlenmesi yorulma dayanımı değerlerini iyileştirebilir. Somunlu takma civata yerine, saplama kullanılması halinde bile yorulma dayanımında artış görülür. Değişen zorlamalar altında en uygun davranışın elde edilmesi öncelikle civata ile somun arasında düzgün bir kuvvet geçişinin sağlanmasına bağlıdır. Bunun için değişik konstrüktif önlemler alınabilir. Örneğin somunda dişlerin derinleştirilmesi, diş gibi çapına hafif koniklik verilmesi, diş kısmın konikleştirilmesi, oturma yüzeyinde oyuk açılması veya civatada dişlerden düz kısma geçişte çapı diş dibi çapından daha küçük boyun yapılması gibi. Önemli olan diğer bir konu da civata ile somun arasında boşluk kalmasını önlemektir. Bu amaçla yüksek ön gerilmeler uygulanarak dişlerin her zaman tam oturması sağlanmalıdır.

Konstrüktif önlemler dışında özel üretim teknikleri uygulayarak da yorulma dayanımlarının artırılması mümkündür. En uygun üretim yöntemi dişlerin haddelenerek açılmasıdır. Ayrıca ikinci bir haddelenmenin de yorulma dayanımını iyileştirici etkisi olduğu saptanmıştır. Normalize edilmiş çelikten haddelenerek üretilen civataların yorulma dayanımları, talaş kaldırılarak üretilen civatalardan %100 daha yüksektir. Normalize yerine ıslah edilmiş veya ıslah edilmiş yerine soğuk şekil verilerek pekleştirilmiş çeliklerin kullanılması yorulma dayanımı bakımından daha da uygun olmaktadır. Şekil-81'de C 45 çeliğinden üretilmiş M 8 civatalarının yorulma dayanımı diyagramları verilmektedir [46]. Kullanılan C 45 malzemesinin akma sınırı soğuk şekillendirme ile  $60 \text{ kgf/mm}^2$  değerine yükseltilmiştir. Söz konusu şekilde talaş kaldırılarak ve haddelenerek açılmış dişler için yorulma dayanımları karşılaştırılabilir. 3 numaralı diyagram ise haddelenerek diş açılmasından sonra ıslah edilmiş civatalara aittir. Görüldüğü gibi haddelenerek diş açılmasından sonra ısıl işlem uygulanması doğru değildir. Bu durumda yorulma dayanımı değeri, normalize edilmiş veya ıslah edilmiş bir çelikten talaş



Şekil-79: St 38 çeliğinden talaş kaldırılarak üretilmiş civataların yorulma dayanım diyagramları, 1" ve 1 1/8" çaplar ve çekme-basma zorlamaları için.



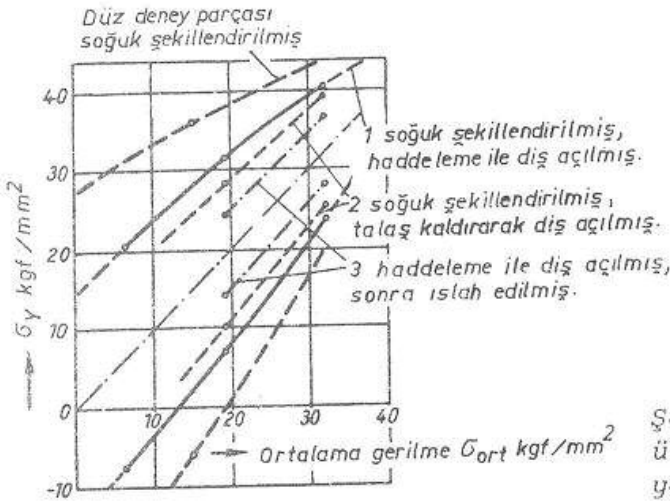
Şekil-80: C45 çeliğinden talaş kaldırılarak üretilmiş, ıslah edilmiş civataların yorulma dayanımı diyagramları, 1" çap, çekme-basma zorlamaları.

kaldırılarak üretilen civataların dayanımı düzeyine düşmektedir. Bu nedenle civata çeliklerinin ıslah işlemleri kesinlikle dişlerin şekillendirilmesinden önce olmalıdır.

C 45 çeliğinden üretilmiş M 12 civatalarında yapılan eğme değişken yorulma deneylerinde, talaş kaldırılarak üretilmiş civataların yorulma dayanımı 13,5 kgf/mm<sup>2</sup>, haddelenmiş civataların ise 38 kgf/mm<sup>2</sup> bulunmuştur.

Seresen'e [47] göre talaş kaldırılarak açılmış, taşlanmış ve hatta haddelenmiş dişlere sonradan hafif bir haddelendirme uygulanması ile yorulma dayanımının artırıl-

ması mümkündür. Bu araştırmacı 40 XHMA (40 NiCrMo 6 çeliği karşıtı) çeliğinden üretilmiş M10 civatalara ikinci haddelemenin etkisini, normalize veya ıslah edilmiş durumlar için ayrı ayrı olmak üzere incelemiştir. Taşlanarak dış açılmış normalize malzemede, ikinci haddeleme ile % 50'ye yakın bir yorulma dayanımı iyileşmesi sağlanmaktadır; ıslah edilmiş çelikten üretilen civatalarda ise dayanım artışı % 40'tır. Bütün yorulma deneyleri 25 kgf/mm<sup>2</sup>'lik bir ortalama gerilme ile yapılmış ve haddelemiş civata olarak sadece önceden ıslah edilmiş çelikten üretilen civatalar denenmiştir. Önemli bir diğer husus diş dibi yarıçapının yaklaşık 0,2 mm, yani metrik değil, Whitworth dişe uygun seçilmiş olmasıdır. Daha küçük yuvarlatma yarıçaplarında ise dayanım artışlarının daha yüksek olması beklenir. Diş dibi yuvarlatma çapının farklı olması dolayısıyla, ikinci haddeleme yoluyla elde edilen yorulma dayanım artışı için bir sayısal değer verilememekle birlikte, deney sonuçları yorulma dayanımının her durumda iyileştiğini göstermektedir. Bu da ikinci haddelemenin yüzey hata ve pürüzlerini ezerek kapatması ile açıklanabilir.



Şekil-81: C 45 çeliğinden üretilmiş M8 civataların yorulma dayanımı diyagramları.

Şekil-79...81'de verilen yorulma dayanımı diyagramları civata bağlantılarında değil tek tek civatalar üzerinde yapılan deneylerle bulunmuştur. Ön gerilmeli civata bağlantılarıyla gerçekleştirilen deneyler ise daha yüksek yorulma dayanımları vermektedir. Ancak bu sonuçlar ön gerilmeli durumda gerilme genlikleri sadece civatanın değil, bağlanan parçaların da elastik özelliklerine bağlı olduğu için genelleştirilemez.

Değişen zorlamalar altında çalışan civatalar için özellikle yüksek dayanımlı çeliklerin kullanılması halinde malzemenin hatasız olmasına özen gösterilmelidir. Civata eksenine dik hatalar dışında eksene paralel hatalar da (hadde çatlakları, katmerler, büyük ölçüde uzamış metalsel olmayan kalıntılar v.b.) yorulma dayanımını düşürürler.

Islah edilmiş NiCrMo-çeliğinden [48] üretilmiş civatalar üzerinde yapılan çekme dalgalı yorulma deneyleri boyuna çatlakların yorulma dayanımı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir. Bu deneylerde ıslah edilmiş çelikten talaş kaldırılarak üretilmiş 60 mm uzunluğunda, 6,3 mm dış çapında ve 0,9 mm hatveli civatalar kullanılmıştır. Kopma yükü statik çekmede 1850 kgf, kesmede 1670 kgf olarak bulunmuştur. Çekme dalgalı yorulma dayanımı deneyleri 1100 dak<sup>-1</sup> frekansta ve kuvvet değişim aralığının %10'u kadar bir ön yükü yapılmıştır. Tüm kırılmalar dış açılmış kısımda olup, Çizelge-5'te verilen kopma çevrim sayılarından boyuna çatlakların etkisi belirgin olarak görülmektedir.

Çizelge-5: Boyuna çatlaklar içeren NiCrMo-ıslah çeliğinden üretilmiş civataların çekme dalgalı zorlamalar altındaki kopma çevrim sayıları

Dalgalı olarak etkiyen kuvvet (kgf)	Civataların kopma çevrim sayıları		
	yok	boyuna hatalar hafif	derin
635	250 000	185 000	175 000
1035	49 000	48 000	35 000

Daha önce de belirtildiği gibi, civata shaft çapının dış dibi çapından daha küçük olması halinde yorulma dayanımında artış sağlanabilmektedir. Shaft kesitinin dış dibi kesitine oranının optimum değeri 0,9...1,0'dır. Ancak bu oran civatalarda değişen zorlamalara ek olarak çok sık rastlanan darbeli çekme zorlamaları için uygun bir değer değildir. Love ve Pringle [49] saf darbeli çekme zorlaması altında shaft kesitinin dış dibi kesitine oranının optimum değerinin üretim şekline göre 1,12...1,23 arasında olduğunu saptamışlardır. Bu deneylerde kullanılan civataların ısıl işlemleri ve malzemeleri Çizelge-6'da verilmektedir. Deneyler 8...11 mm dış çapında ince ve normal dişli Whitworth civatalarında yapılmıştır. Civatalara akma sınırının altında kalacak şekilde ön gerilme uygulanmıştır. Değişik shaft kesitleri tornalama veya kafa tarafından delme yoluyla sağlanmıştır. Tornalanan deney parçaları delinen deney parçalarından daha düşük değerler vermiştir. Yorulma deneylerinde kullanılan civatalarda kesitlerin oranı Çizelge-6'da verilen optimal değerlerin altında ise kırılma shaftta, üstünde ise dişli kısmında olmaktadır.

Darbeli çekme zorlamaları için soğuk şekillendirilmiş ideal civatanın shaftı düzgün yüzeyli ve mümkün olduğu kadar uzun, dış açılmış kısmı kısa, optimal kesit oranı sağlanmış olmalıdır.



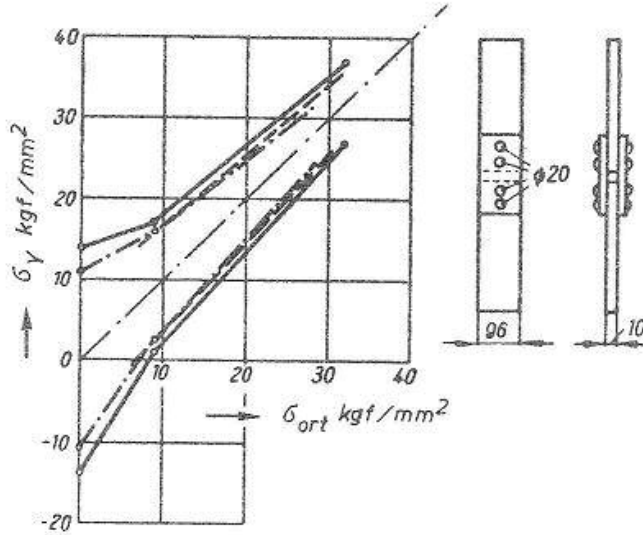
Çizelge-6: Darbeli çekme zorlamaları altındaki civataların şaft kesitinin dış dibi kesitine oranının optimum değerleri

Deney Serisi no.	Alaşimsız çelik malzemede % karbon	Üretim şekli ve ısıl işlem	Optimum kesit oranı
1	0,18	Soğuk haddelenmiş	1,23
2	0,18	Soğuk haddelenmiş ve 670°C'da tavllanmış	1,15
3	0,38	Soğuk haddelenmiş ve $\sigma_K = 90 \text{ kgf/mm}^2$ düzeyine ıslah edilmiş	1,12..1,17
4	0,38	Soğuk haddelenmiş ve 850°C sıcaklıkta tavllanmış	1,16

### 3.16. Perçin Bağlantılarının Yorulma Dayanımı

Perçin bağlantılarında Graf [50] tarafından yapılan yorulma deneyleri, yüksek dayanımlı yapı çelikleri için bulunan sonuçların St 38 çeliğinde elde edilen değerlerden çok farklı olmadığını göstermiştir, Şekil-82. Perçin bağlantılarının bulunduğu parçalarda yorulma çatlakları perçin deliğinin merkezinin bulunduğu düzlemde ve genellikle kuvvetin etkidiği yöne dik kesitte oluşmaktadır. Şekil-82'de verilen gerilme değerlerinin hesaplanmasında perçin deliğinin merkezinden geçen bu kesitten delik alanı çıkartılarak bulunan dolu kesit dik-kate alınmıştır.

Deneyler ( $\sigma : \tau$ ) oranının dalgalı yorulma değerini etkilediğini göstermiştir ( $\sigma$ : delik merkezinden geçen kesitteki anma gerilmesi,  $\tau$ : perçin kesitinde hesaplanan kayma gerilmesi). Deney sonuçları ( $\sigma : \tau$ ) oranının St 38 çeliğinde 1:0,9 ve St 52 çeliğinde de 1:0,8 olması gerektiğini göstermiştir; aksi halde perçinin eğmeye karşı dayanımı asıl belirleyici büyüklük olmaktadır. Saç St 38, perçinler St 34 ise ve ( $\sigma : \sigma_1$ ) oranı 1:2,4 ile 1:1,2 arasında kalıyorsa, perçin deliklerindeki yüzey basıncı  $\sigma_1$ 'in önemli bir etkisi olmamaktadır. St 52 saç ve St 44'ten üretilmiş perçinlerde ise ( $\sigma : \sigma_1$ ) oranının 1:1,9'dan 1:2,5'e değişmesi ile dalgalı yorulma dayanımı önemli derecede azalmaktadır. Perçin bağlantılarının çekme dalgalı yorulma dayanımı, parçaların kayma direncine büyük ölçüde bağlıdır. Kayma direnci ise öncelikle perçinin sıkıştırma gerilmesi ile değişir. Söz konusu gerilmenin büyüklüğünde perçin malzemesi, boyu ve perçinleme yöntemi ile ayrıca saç ve perçin kafalarının yüzey



Şekil-82: Perçin bağlantılarının çekme-basma zorlamaları altındaki yorulma dayanımı diyagramları

- İki sıralı, çift yanaklı perçin bağlantısı, saçlar St 52, perçin St 44; Sınır çevrim sayısı  $5 \cdot 10^5$
- Aynı bağlantı, Sınır çevrim sayısı  $10 \cdot 10^6$
- · — · — Tek sıralı, çift yanaklı perçin bağlantısı, saçlar St 38, perçin St 44; Sınır çevrim sayısı  $2 \cdot 10^6$ .

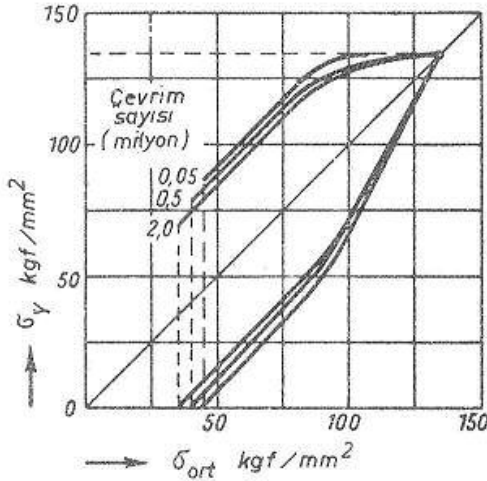
durumları da önemli bir rol oynar. Bu nedenle iki sıralı bir perçin bağlantısında yorulma dayanımı sülyenle boyanmış saçlarda, boyasız ve benzinle yağı alınmış saçlara göre %35 daha düşüktür.

### 3.17. Çelik Teller, Helisel Yaylar ve Çelik Halatların Yorulma Dayanımları

Çelik tellere uygulanmasına müsaade edilebilir zorlamaların seviyesini belirlemek için çekme dayanımı, eğme sayısı, burma sayısı gibi alışılmış mekanik-tekno- lojik deney sonuçlarının yanında, yorulma dayanımlarının da verilmesi gereklidir. Yapılan deneyler çelik tellerde yorulma dayanımının çekme dayanımına olan oranının aynı malzeme için normal deney parçası boyutlarında bulunan orana göre, genel olarak daha düşük olduğunu göstermiştir. Örneğin eğme yorulma dayanımının çekme dayanımına oranı düzgün yüzeyli silindirik parçalarda  $\sigma_{eD} : \sigma_K = (0,4... 0,6):1$  olmasına karşın, tellerde sadece  $\sigma_{eD} : \sigma_K = (0,25... 0,35):1$  düzeyindedir. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş (çekilmiş veya çekme işleminden sonra  $200^{\circ}\text{C}$ 'da meneviş- lenmiş) ve dayanımları  $75...260 \text{ kgf/mm}^2$  arasında değişen çelik tellerde saptanan yukarıdaki oranlar için ortalama değer olarak 0,29 bulunmuştur.

Çelik tellerin yorulma dayanımları üretim ve malzeme ile ilgili çok sayıda faktöre bağlıdır [51]. Tel çekme

sırasındaki toplam kesit küçülmesi, çekme kademeleri sayısı, kalıp malzemesi, çekme hızı ve çekme sıcaklığının etkileri yanında patent tavı görmüş tellerde bu tavin uygulama yöntemi de önemlidir. Aynı çelikte kurşunda yapılan tav, havada yapılan tavadan daha yüksek çekme ve yorulma dayanımları sağlamaktadır. Karbon miktarının ve tel çekmedeki kesit küçülmesinin artması ile çekme ve yorulma dayanımları genellikle yükselir. Çekme sonrası yapılacak bir menevişleme ısıl işleminin yorulma dayanımına olumlu etkisi vardır. Çeliğin karbon miktarına bağlı olarak %60 dolaylarındaki kesit küçülmesi için menevişleme sıcaklığı 150 ile 300°C arasında seçilir. Kesit küçülmesinin daha büyük olması halinde ise menevişleme ile ancak az veya orta karbonlu çeliklerin yorulma dayanımında iyileşme sağlanabilir.



Şekil-83: 135 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip bir çelik telin yorulma dayanımı diyagramı (çekme), tel kesiti % 49,5 daraltılarak 0,7 mm çapa çekilmiştir. Kimyasal bileşimi: %0,6 C; %0,22 Si; %0,72 Mn.

Kuvvetli yüzey dekarbürizasyonu teller ve bu tellerden üretilen mamullerin yorulma dayanımını olumsuz etkiler. Çekilmiş çelik tellere parlatma, taşlama ve bilya püskürtme gibi yüzey işlemlerinin uygulanması halinde yorulma dayanımlarını %30 dolayında artırmak mümkün olmaktadır. Kalıp çizikleri veya korozyon izleri gibi yüzey hataları ise yorulma dayanımını düşürürler.

Yüzey koruma tabakaları kaplamanın cinsine ve kaplama yöntemine bağlı olarak yorulma dayanımını artırıcı veya azaltıcı yönde etki ederler. Korozyonu engelleyen bu kaplamalar korozif ortamda süreli yorulma dayanımını ise her durumda yükseltirler. Şekil-83'te 135 kgf/mm<sup>2</sup> kopma dayanımına sahip bir çelik telin çekme dalgalı yorulma deneyleri ile elde edilen yorulma dayanımı diyagramı verilmiştir [52]. Aynı şekil, taşınabilir gerilme genliklerinin seçilen sınır çevrim sayısına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Dikkati çeken diğer bir husus da gerilme genliğinin ancak çok yüksek

ortalama gerilmelerde azalmaya başlamasıdır.

Çelik tellerden üretilen mamullerin yorulma dayanımları incelendiğinde, tele ait yorulma özelliklerinin doğrudan doğruya ürün için geçerli olmadığı görülür. Şekil-84'te helisel yayların yorulma dayanımları tellerin yorulma dayanımı ile karşılaştırılarak verilmiştir. Taşınabilir gerilme genliği, yüzeyleri pekleştirilmiş yaylarda (b çizgisi) 70 kgf/mm<sup>2</sup> ortalama gerilmeye kadar sabit kalmakta, yüzey pekleştirmesi yapılmamış çelik yaylarda ise artan ortalama gerilme ile düşmektedir.

Çelik teller ve helisel yaylar için Pomp ve Hempel [53] tarafından verilen burma yorulma dayanımlarının kopma dayanımlarına oranları Çizelge-7'de görülmektedir.  $\pm \tau_G : \sigma_K$  oranlarının ortalama değerleri, yüzey durumunun (taşlanmış veya bilya püskürtülmüş) etkisi yanında ortalama gerilme seviyesinin önemsiz olduğunu göstermektedir. Çizelge-8'de de yayların burma yorulma dayanımlarının tellerin eğme değişken yorulma dayanımlarına oranları belirtilmiştir.

Hempel'in [54] verilerine göre yüzeyi pekleştirilmemiş helisel yaylarda ortalama gerilmelerin 15...65 kgf/mm<sup>2</sup> olması durumunda, taşınabilir gerilme genlikleri  $\pm 12,5$  ile  $\pm 32,5$  kgf/mm<sup>2</sup> (çoğunlukla  $\pm 15$  ile  $\pm 25$  kgf/mm<sup>2</sup>) arasında değişmektedir. Yüzey pekleştirme yapılmış yaylarda aynı değerler 30...75 kgf/mm<sup>2</sup> ortalama gerilmeleri için  $\pm 22,5$ ... $\pm 42,5$  kgf/mm<sup>2</sup> (çoğunlukla  $\pm 30$  ile  $\pm 40$  kgf/mm<sup>2</sup>) arasında kalmaktadır.

Bleilöb ve Born'a [55] göre, yağda suverilmiş alaşımsız veya alaşımlı çelik telden yaylar, patent tavlı sert çekilmiş çelik tellerden üretilmiş yaylardan burma yorulma dayanımları bakımından daha iyidirler. Süreli yorulma dayanımı açısından ise durum bunun tersidir. Bu bulgular bilya püskürtme işlemi uygulananlar için olduğu kadar uygulanmayan yaylar için de geçerlidir. Yağda sertleştirilmiş yaylık teldeki yapısal bantların yayların yorulma dayanımına etkisi yoktur. Bilya püskürtme yoluyla yayların burma yorulma dayanımlarının %50 arttırılması mümkündür.

Yay elde edildikten sonra yağda suverme, sıcak banyo sertleştirilmesi veya ostemperleme gibi ısıl işlemlerin uygulanmasıyla yorulma dayanımı ancak çok az iyileştirilebilir. Süreli yorulma dayanımı bölgesinde ise ostemperleme işlemi yorulma ömrünü önemli oranda artırır [56].

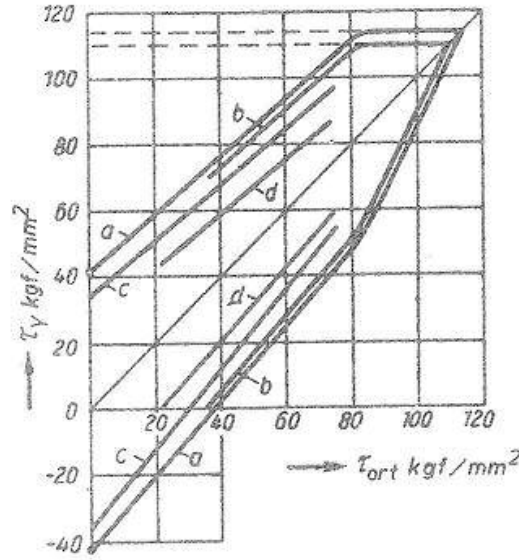
Yaylarda olduğu gibi çelik halatların dayanım özellikleri de, sadece çelik telin yorulma dayanımı değerlerinden yararlanarak belirlenemez. Çelik halatların yorulma ömürleri bakımından yapıları ve üretim yöntemleri

Çizelge-7: Çelik teller ve helisel yaylar için burma yorulma dayanımı  $\pm\tau_G$ 'nin çekme dayanımı  $\sigma_K$ 'ya oranı.

Deneysel parçası biçimi	Yüzey durumu	Deneysel Sayısı	Çekme dayanımı, $\sigma_K$ kgf/mm <sup>2</sup>	Ortalama gerilme, $\tau_{ort}$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\pm\tau_G/\sigma_K$		
					en küçük	ortalama	en büyük
T E L	Patent tavlı çekilmiş veya ıslah edilmiş.	43	74...183	0	0,073	0,284	0,183
	Taşlanmış.	45	81...187	10...50	0,067	0,384	0,152
		2	171	>50	0,130	0,143	0,136
	Bilya püskürtülmüş.	4	140...150	0	0,173	0,265	0,230
		8	101...154	10...50	0,153	0,247	0,211
		6	145...156	>50	<0,200	<0,233	<0,218
Y A Y	Patent tavlı çekilmiş veya ıslah edilmiş tel.	2	143,5	0	0,300	0,318	0,309
		128	110...199	10...50	0,058	0,197	0,131
	Taşlanmış tel.	60	130...206	>50	0,045	0,224	0,137
		3	149...172	23...50	0,140	0,154	0,145
	Bilya püskürtülmüş.	25	147...201	>50	0,109	0,214	0,155
		3	145...151	30...50	0,201	0,238	0,216
46	143...205	>50	0,151	0,284	0,215		

Çizelge-8: Yayların burma yorulma dayanımı  $\tau_G$ 'nin, tellerin eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}$ 'ye oranı

Tel	Çap mm	Çekme dayanımı, $\sigma_K$ kgf/mm <sup>2</sup>	Yorulma dayanımı, kgf/mm <sup>2</sup>		Oran $\pm\tau_G : \sigma_{eD}$
			Tel $\sigma_{eD}$	Yay $\tau_{ort} > 0,5\tau_G$ için $\pm\tau_G$	
1	1,00	230	81	36	0,445
2	1,00	265	75	26	0,374
3	1,35	220	80	37	0,460
4	1,35	265	74	34	0,460



Şekil-84: Yay telleri ve helisel yayların yorulma dayanımı diyagramları (burma)

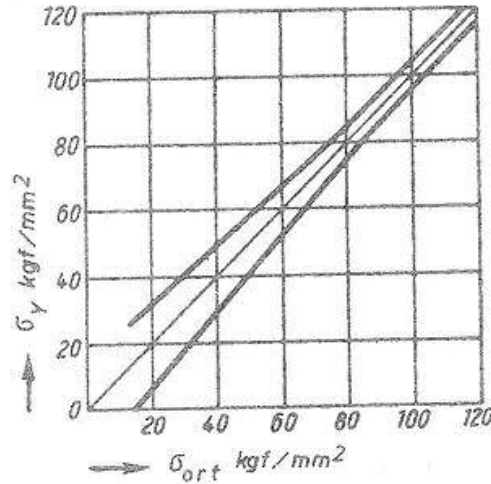
a çizgisi: Yay teli; %0,71 C; %0,21 Si; %0,60 Mn; çap=4,75 mm  $\sigma_K=148 \text{ kgf/mm}^2$

b çizgisi: Helisel yay; Yüzeyi pekleştirilmiş, C-çeliği; tel çapı=3 mm

c çizgisi: Çelik tel; %0,68 C; %0,23 Si; %0,56 Mn; çap=4,5 mm

d çizgisi: Helisel yay; %0,67 C; %0,23 Si; %0,71 Mn, tel çapı=3,75 mm,  $\sigma_K=150 \text{ kgf/mm}^2$ ; sarım çapı=28 mm; yağda su verilmiş.

yanında, çeşitli zorlama türlerinin (çekme, eğme, burma) birarada etkimesi ve aynı zamanda oluşan korozyon ile aşınma olayları da önem taşır. Çelik halatların yorulma ve sürekli yorulma dayanımları, yapıldıkları çelik telin dayanım değerlerinden daima daha düşüktür. Ancak halat-



Şekil-85: Halatların çekme zorlamaları altındaki yorulma dayanımı diyagramı

Çizelge-9: Tel Halatların Çekme Yorulma Dayanımları

K a y n a k	Deney Koşulları	Halatın deneme uzunluğu [mm]	Halat türü <sup>1)</sup>	Tel sayısı	Çap [mm]	Kopma day. [kgf/mm <sup>2</sup> ]	Yorulma dayanımı			
							Halat	Tel		
PÜNGEL, GEROLD ve BELDERÜHLE, VDI-Z (1943), S.493/497	n = 666/dak N = 2·10 <sup>6</sup>	500	v.y.	19	10,5	2,10 <sup>3</sup> )	81,7	-	14±14	-
									20±12	-
									40±7	-
									60±3	-
									11±11	20±20
									20±10	-
									40±8	-
									60±5	-
									80±3	-
									14±14	24±24
									20±13	-
									40±10	-
60±7	-									
80±4	-									
120±3	-									
GRAF ve BRENNER, Bautechnik (1941) S.410/415	n = 166/dak N = 10 <sup>6</sup>	2000	KH	150	65,0	-	-	-	10,5±10,5	-
									47±9	-
									51±13	-
									11±11	-
									20±10	-
									40±7,5	-
									60±5	-
									152,5	-
									145	-
									145	-
									145	-
									145	-
BECK, Dr.-Ing., Diss.T.H.Stuttgart 1940	n = 270/dak N = 10 <sup>6</sup>	2000	ÇD	222	6	0,28	150	160	25,5±22	-
									30,5±19	-
									19,0±13,5	-
									15,5±11,5	-
									187	-
									200	-
									200	-
									200	-
									200	-
									200	-
									200	-
									200	-

1) v.y.: veri yok; KH:Kapalı halat, DD:Düz dolamlı, ÇD:Çapraz dolamlı<sup>2)</sup> Tel şekli, Y:Yuvarlak  
T:Trapez; Z:Z-Profilli.<sup>3)</sup> Galvanizli tel.

ların kopma kuvvetinden küçük ve uzun süre sabit tutulan bir çekme yükü altında ön şekil değiştirmesiyle [54], süreli yorulma dayanımları artırılarak, tellerin süreli yorulma dayanımı değerlerine yaklaştırılabilir. Çelik halatların eğme yorulma dayanımı deneylerinin gerçeğe yakın biçimde yapılması zor olduğundan, genellikle çekme dalgalı yorulma deneyleri uygulanır. Düşük kopma dayanımlı çelik tellerden (80..90 kgf/mm<sup>2</sup>) üretilen halatlarda halatın çekme dalgalı yorulma dayanımı, çekme dayanımının %25...35'i kadardır. Daha yüksek dayanımlı çelik tellerden (170...200 kgf/mm<sup>2</sup>) yapılan çelik halatlarda ise bu oran ancak %10...20 düzeyindedir. Böylece yüksek dayanımlı tellerden yapılmış halatlar dinamik zorlamalar altında bir avantaj sağlamazlar, sadece halatın ağırlığı ve aşınmalar azalır.

Hempel'in [51] bir yayınından alınan Çizelge-9, halatlarda yapılan çekme dalgalı yorulma deneylerine ait sonuçlar içermekte ve bu tür zorlanan halatlar için yorulma dayanımı diyagramlarının tahminine imkan vermektedir. (Şekil-85).

### 3.18. Kaynak Bağlantılarının Yorulma Dayanımı

Sanayileşmiş ülkelerde haddelenmiş çeliklerin %40..50'si kaynak edilebilir özelliklerde üretilir ve çoğunlukla kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılırlar. Bu konstrüksiyonlarda kaynak bağlantılarının sadece statik zorlamalar değil, aynı zamanda yorulma zorlamaları altındaki özellikleri de giderek önem kazanmaktadır.

Miktar olarak kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin büyük çoğunluğunu özellikleri Çizelge-10'da verilen genel yapı çelikleri oluşturmaktadır. Bu çeliklerin akma sınırı, kopma dayanımı ve eğme değişken yorulma dayanımı gibi özellikleri birbirine çok yakın olup St 34, St 38 ve St 42 arasında dayanımlar bakımından tam bir ayırım yapmak mümkün değildir. Çoğu zaman diğer elastik ve elastik-plastik davranışlar (burkulma, burmalı burkulma, kirişlerin yana doğru burkulması, saçların burkulması gibi) arasındaki farklar daha büyüktür.

Çizelge-10: Genel Yapı Çeliklerinin Mekanik Özellikleri

Çelik Türü	Akma Sınırı $\sigma_A$ kgf/mm <sup>2</sup>	Çekme Dayanımı, $\sigma_K$ kgf/mm <sup>2</sup>	Eğme Değişken Yorulma Dayanımı $\sigma_{ED}$ , kgf/mm <sup>2</sup>
St 34	20...23	34...42	16...20
St 38	22...25	38...47	17...22
St 42	24...28	42...52	20...25
St 52-3	34...42	52...64	28...35



Çizelgede bulunan St 52-3 çeliği, aslında akma sınırları 55 kgf/mm<sup>2</sup>, kopma dayanımları da 65 kgf/mm<sup>2</sup> ye ulaşabilen yüksek dayanımlı yapı çeliklerinden sayılır. Yüksek dayanımlı yapı çelikleri de genelyapı çelikleri gibi normalize edilmiş durumda kullanılırlar. Yüksek dayanımlar, az miktarda alaşımlama (örneğin Mn, Mo, Cr ile), karbür yapıcıların katılması (V, Ti) veya azot ile sağlanır. Günümüzde birçok ülkede St 45/60 yüksek dayanımlı yapı çeliği olarak nitelenmektedir [57]; bu çelik akma sınırı için en az 45 kgf/mm<sup>2</sup>, kopma dayanımı için de en az 60 kgf/mm<sup>2</sup> lik değerlere sahiptir.

Yüksek dayanımlı yapı çelikleri için karakteristik olan dayanım sınırlarına ulaşmak ve aynı zamanda yeterli bir kaynak kabiliyeti sağlamak için ıslah edilmiş yapı çeliklerinin kullanılması zorunludur. Bu çelikler kimyasal bileşimleri bakımından düşük karbonludurlar ve katılan alaşım elemanları da sınırlıdır. Yüksek dayanımlı ıslah edilmiş yapı çelikleri en çok %0,2, özel durumlarda %0,25 karbon içerirler. Alaşım elemanlarının (örneğin Mn, Cr, Ni, Mo) toplamı çoğunlukla %2'nin altındadır; bunlara ayrıca tane büyümesini engelleyen (V, Ti, Nb, Al, N, Zr), ostenit dönüşümünü geciktiren (B, N) ve tav sırasında kararlılığı arttıran elementler (V, Nb, Cu) az miktarda katılır. Yarı mamullerin ısıtılması, suda suverme ve bunu takip eden 600...700°C arasında bir tavlama şeklinde, üretildikleri çelikhane veya haddehanelerde yapılır.

Yüksek dayanımlı ıslah edilmiş yapı çeliklerinde 90 kgf/mm<sup>2</sup>'ye varan çekme dayanımları elde edilebilir. Çizelge-11'de bu türe örnek bazı çelikler için dayanım değerleri verilmiştir.

Çizelge-11: Bazı yüksek dayanımlı ıslah edilmiş yapı çeliklerinin dayanım değerleri

Çelik Cinsi	Üretilen Ülke	Akma veya 0,2-sınırı (kgf/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (kgf/mm <sup>2</sup> )
Aldur 58/72	Avusturya	En az 58	72...85
14 GSMFR	Sovyetler Birl.	64...75	75...80
12 ChG2SMF	Sovyetler Birl.	en az 75	en az 85
N-A-XTRA 70	A.B.D.	en az 70	80...95
Superelso 70	Fransa	en az 70	80...95
BH 65 V	Almanya	en az 70	75...90

Kaynaklı konstrüksiyonlarda daha yüksek dayanımların gerekli olması halinde diğer alışıl gelmiş ıslah çelikleri veya yüksek dayanımlı ıslah çelikleri kullanı-

labilir. Bu çeliklerle 75...180 kgf/mm<sup>2</sup> arasındaki akma sınırı değerleri ve 200 kgf/mm<sup>2</sup> üzerindeki çekme dayanımları elde edilebilir.

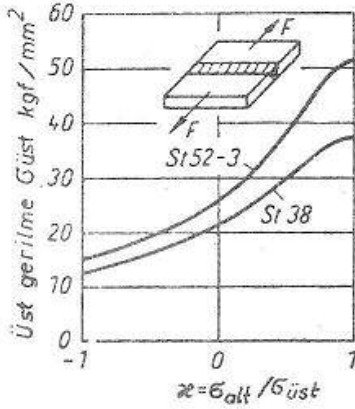
Düzgün, parlatılmış deney çubuklarında, normalize edilmiş ve hatta ıslah edilmiş durumlar için, yorulma dayanımı ile çekme dayanımı gibi statik özellikler arasında belirli bağıntılar bulunabilir. Çizelge-12'de bazı genel yapı çelikleri için yorulma dayanımı değerleri verilmiştir; ancak kaynak bağlantılarında dikişin hem işlenmiş, hem de işlenmemiş durumu için, bu dayanım değerlerine ulaşmak mümkün değildir.

Çizelge-12: Bazı yapı çelikleri için düzgün ve parlatılmış deney çubuklarında geçerli yorulma dayanımları (ortalama değerler) . Sınır Çevrim Sayısı 10.10<sup>6</sup>.

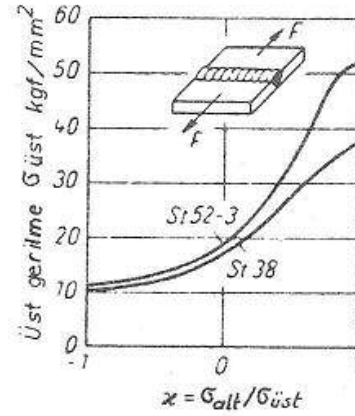
Dayanım Değeri (kgf/mm <sup>2</sup> )	St34	St38	St42	St52-3
Eğme değişken yor.day. $\sigma_{eD}$	17	20	21	30
Eğme dalgalı yor.day. $\sigma_{eDal}$	26	32	34	45
Çekme-basma değişken yor.day. $\sigma_{çbD}$	12	15	16	24
Çekme dalgalı yor.day. $\sigma_{çDal}$	21	25	26	36
Burma değişken yor.day. $\tau_D$	10	11	12	18
Burma dalgalı yor.day. $\tau_{Dal}$	13	15	17	25

Çekme-basma zorlamaları altında St 38 ve St 52-3 çeliklerinin saç yüzeyine kadar işlenmiş kaynak dikişlerinin yorulma dayanımları Şekil-86'da, işlenmemiş kaynak dikişlerinin dayanımları ise Şekil-87'de görüldüğü gibi Neumann [58] tarafından verilmiştir. Bu şekillerde ordinata yorulma dayanımının üst gerilmesi, apsise  $\sigma_{alt}/\sigma_{üst}$  oranı taşınmış, Şekil-88'de ise yorulma dayanımının ortalama gerilmesi de gösterilmiştir. R=-1'den R=+1'e kadar olan tüm alanda St 38 için yorulma dayanımının gerilme genlikleri 10 ile 0 kgf/mm<sup>2</sup>, St 52-3 için de 11 ile 0 kgf/mm<sup>2</sup> arasındadır. R=-1 ile R=0 arasındaki yorulma dayanımları bakımından bu çelikler arasında önemli bir farklılık yoktur. St 52-3'ün yorulma dayanımı açısından üstünlüğü süreli yorulma bölgesinde ve R-değerlerinin sıfırdan büyük olduğu durumlardadır.

Şekil-89'dan görüldüğü gibi St 52-3'den kaynaklı parçalarda saç kalınlığına ve sonradan uygulanan ısıl işleme bağlı olarak müsaade edilebilir gerilme genliği 17 ile 18,5 kgf/mm<sup>2</sup> veya 16 ile 18 kgf/mm<sup>2</sup> arasında değişmektedir.



Şekil-86: St38 ve St52-3 çeliklerinin saç yüzeyine kadar işlenmiş kaynak dikişlerinin yorulma dayanımları.



Şekil-87: St38 ve St52-3 çeliklerinin kaynak dikişlerinin işlenmemiş durumdaki yorulma dayanımları.

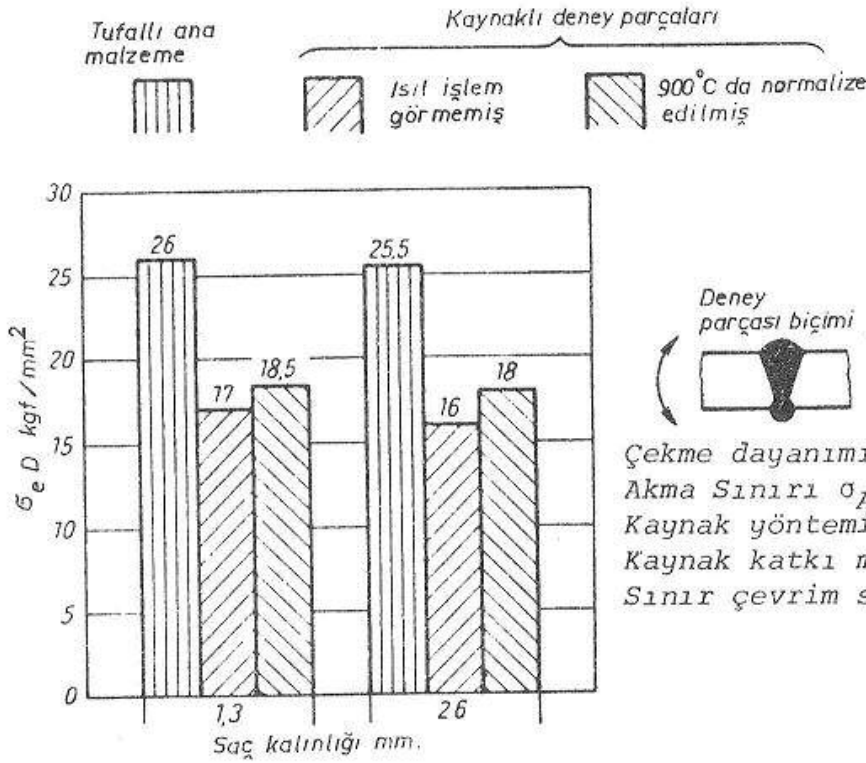
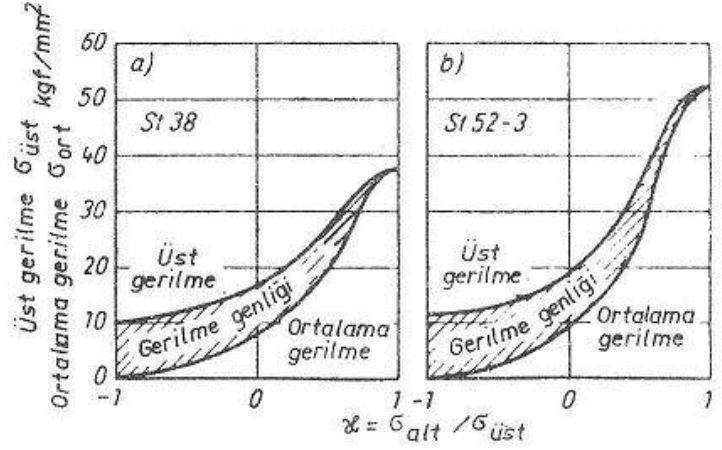
Literatürde St 38 veya benzeri çeliklerden, çeşitli dikiş biçimlerinde ve pozisyonlarında hazırlanmış kaynaklı parçalara ait çok sayıda deney sonucu, çekme-basma zorlaması için değişken zorlama alanı ile dalgalı zorlama alanınının alt kısmında ( $R < 0,5$ ) taşınabilir gerilme genliklerinin 4 ile 10 kgf/mm<sup>2</sup> arasında değiştiğini göstermektedir. Çekme-basma dışındaki zorlama türleri için yorulma dayanımındaki oransal farklar kaynaksız deney parçalarındaki farklarla yaklaşık aynı düzeydedir.

Şekil-90'dan anlaşılacağı gibi kaynak bağlantılarında yüksek dayanımlı yapı çelikleri, St 38 veya St 52-3'ten daha yüksek yorulma dayanımları göstermezler. Sonuçlar, bu çelik grubunun dayanım bakımından en üstün çeliklerinden sayılabilecek St 45/60 için verilmiştir. Dikişin saç yüzeyine kadar işlenmesine rağmen çekme-basma değişken yorulma dayanımı St 38'in dayanımının sadece biraz üzerinde ve hatta St 52-3'ün dayanımının altındadır. Bu nedenle yüksek dayanımlı yapı çelikleri dinamik zorlamalarda ancak belirli uygulamalar için kullanılır, çünkü daha üstün olan statik değerler aynı zamanda yorulma dayanımlarını artırmazlar. Bu çeliklerin kullanımı, sürekli yorulma dayanımlarının sözkonusu olduğu durumlarda veya yüksek ön gerilmelerin\* bulunduğu dalgalı zorlamalarda uygun olabilir.

Çizelge-11'de sıralanan yüksek dayanımlı ıslah edilmiş yapı çelikleri, kaynak bağlantılarında her zaman daha düşük yorulma dayanımları verir. Bu türden iki çelik ve bunlardan üretilen alın kaynaklı deney parçaları için değerler Çizelge-13'de belirtilmiştir; yorulma dayanımları şaşırtıcı derecede düşük olup St-38 çeliğinin düzeyinde dahi değildir.

\*) Ortalama gerilme

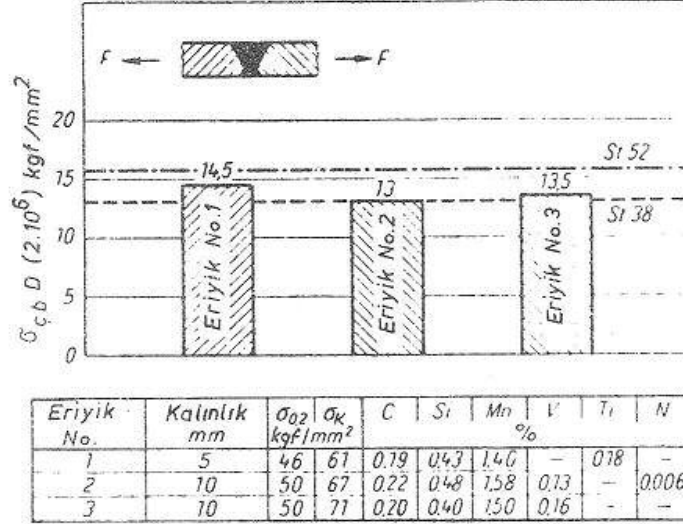
Şekil-88: İşlenmemiş kaynak dikişlerinde yorulma gerilme genliğinin gösterimi.



Şekil-89: St 52-3 çeliğinden kaynaklı ve kaynaklı deney parçalarının ileri-geri eğme zorlamaları altındaki  $\sigma_{eD}$  eğme değişken yorulma dayanımları.

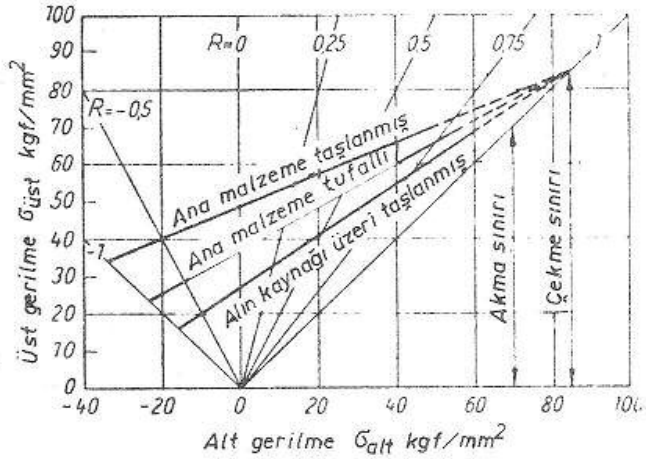
Şekil-91'de yüksek dayanımlı ıslah edilmiş yapı çeliği N-A-XTRA 70'in taşlanmış ve tufallı durumları ile taşlanmış alın kaynağı bağlantıları için yorulma dayanımları karşılaştırılmıştır [59]. Taşlanmış kaynak bağlantısının yorulma dayanımı, St 52-3'ün çekme-basma değişken yorulma dayanımı olan  $16 \text{ kgf/mm}^2$  değerine ancak ulaşabilmektedir. Böylece bu çeliklerin de dinamik zorlamalar altında kullanılması, sadece sürekli yorulma dayanımı bölgesinde veya yüksek ön gerilmeli durumlarda genel yapı çeliklerine göre ekonomik avantaj sağlayabilir.

Alışıl gelmiş veya yüksek dayanımlı ıslah çelikleri için de, değişken bölgede zorlanan kaynak bağlantılarında her zaman düşük yorulma dayanımları elde edilir. Bu olgu Şekil-92'de çekme dayanımları 120...195 kgf/mm<sup>2</sup> arasında değişen üç çelik için doğrulanmıştır [60].

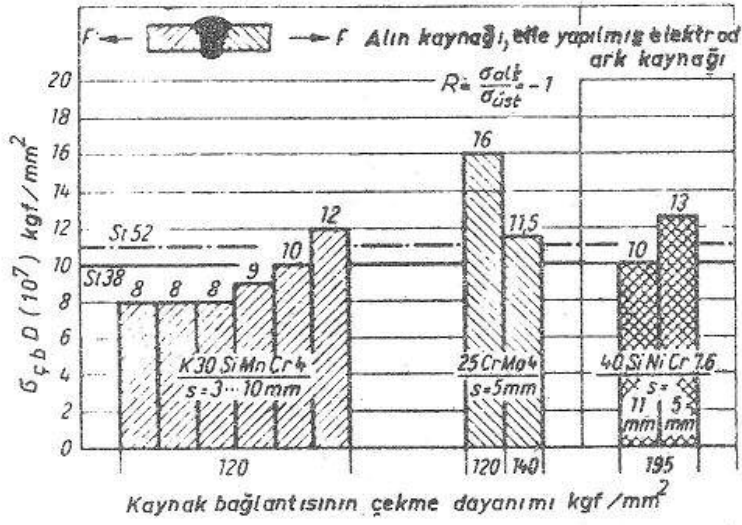


Şekil-90: St45/60 çeliğinden alın kaynaklı deney parçalarında  $\sigma_{\text{çbD}}$  çekme-basma değişken yorulma dayanımı ( $2 \cdot 10^6$ )

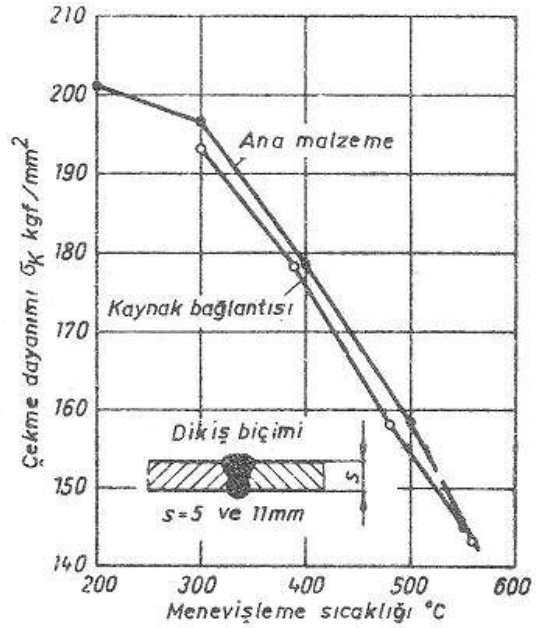
Şekil-91: Yüksek dayanımlı ıslah edilmiş N-A-XTRA 70 yapı çeliğinin yorulma dayanımı



Kaynak bağlantılarının ıslah edilmesi normal olarak kaynak-tan sonra yapılır; ancak sadece elektron ışını kaynağında daha önce de ıslah işlemi mümkündür. Islah edilen çeliklerin özelliklerine göre ön ısıtma, kaynak sırasında sıcak tutma v.b. önlemler alıp, uygun kaynak yöntemi ve katkı maddesi seçerek çok yüksek statik dayanım değerleri elde edilebilmesine rağmen (Şekil-93), yorulma dayanımları söz konusu olduğunda bu önlemler ancak dalgalı yorulma bölgesinin üst kısmında, yani ön gerilmelerin yüksek olduğu durumlarda anlam taşımaktadır.



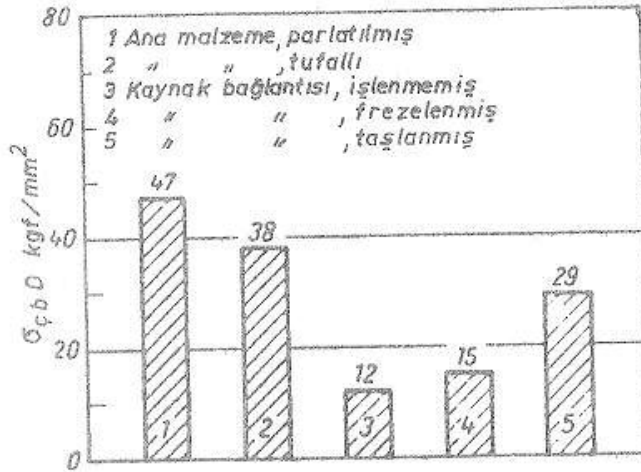
Şekil-92: K30 SiMnCr 4, 25 CrMo4 ve 40 SiNiCr 7.6 çeliklerinde alin kaynağı bağlantısının çekme-basma yorulma dayanımı (Sınır çevrim sayısı 10.10<sup>6</sup>).



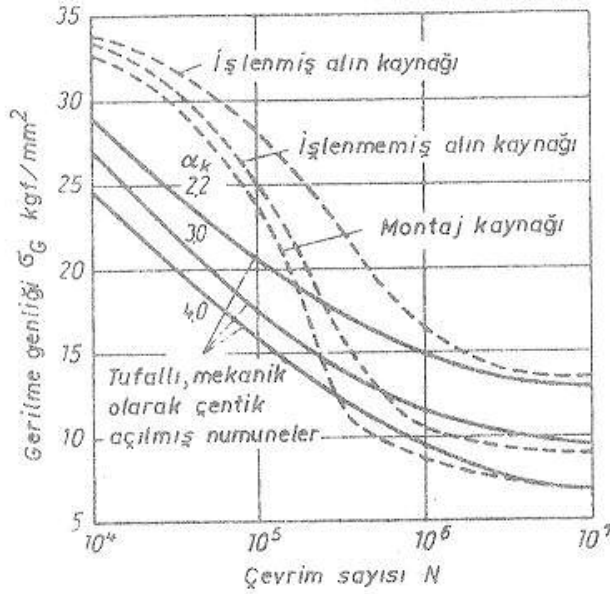
Şekil-93: Yüksek dayanımlı 40 Si NiCr 7.6 ıslah çeliğinde alin kaynağı bağlantısı ve ana malzemenin çekme dayanımlarının menevişleme sıcaklığı ile değişimi. 900°C'dan yağda sertleştirme, elle elektrik ark kaynağı.

Şekil-92'de incelenen değişik örneklerin yalnız üçü St 38'in çekme-basma değişken yorulma dayanımı üzerinde değerler vermektedir. Yüksek dayanımlı ıslah çeliği 40 SiNiCr 7.6 için kaynaklı deney parçalarında elde edilen yorulma dayanımı diyagramı Bölüm 3.9 Şekil-65'te görülmüştü.

Kaynak dikişlerini işleyerek hem genel, hem de ıslah edilebilir çeliklerde yorulma dayanımı arttırılabilir. Şekil-94 yüksek dayanımlı ıslah çeliği K 30 SiMnCr 4 için, kaynak dikişinin taşlanarak düzlenmesinin ve nüfuziyet oyuklarının frezelenerek giderilmesinin yorulma dayanımına etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil- 94: Yüksek dayanımlı K30 SiMnCr 4 ıslah çeliğinde alın kaynağı bağlantısı ve ana malzemenin çekme-basma değişken yorulma dayanımının, değişik yüzey işlemleri ile değişimi. Çekme dayanımı 120 kgf/mm<sup>2</sup>.



Şekil-95: St45/60 çeliğinden kaynaklı ve enine delikler içeren deney parçalarında yapılan çekme-basma değişken yorulma deneyleri ile elde edilen WÖHLER eğrileri.

Kaynak bağlantılarının yorulma dayanımlarının düşük olması ilk bakışta yüksek dış ve iç çentik etkileri ile açıklanmaktadır. İç çentikler olarak nüfuziyet hataları, cürufklar, gözenekler ve kaynak malzemesindeki diğer hatalar sıralanabilir. Dış çentikler ise çoğunlukla dikiş yüzeyi (Tırtıl, saç yüzeyinden yükseklik, nüfuziyet oyuğu) ile ilgilidir.

Çizelge-13: Yüksek dayanımlı ve ıslah edilmiş iki yapı çeliğinde  $2.10^6$  çevrim sayısı için geçerli çekme-basma değişken yorulma dayanımları

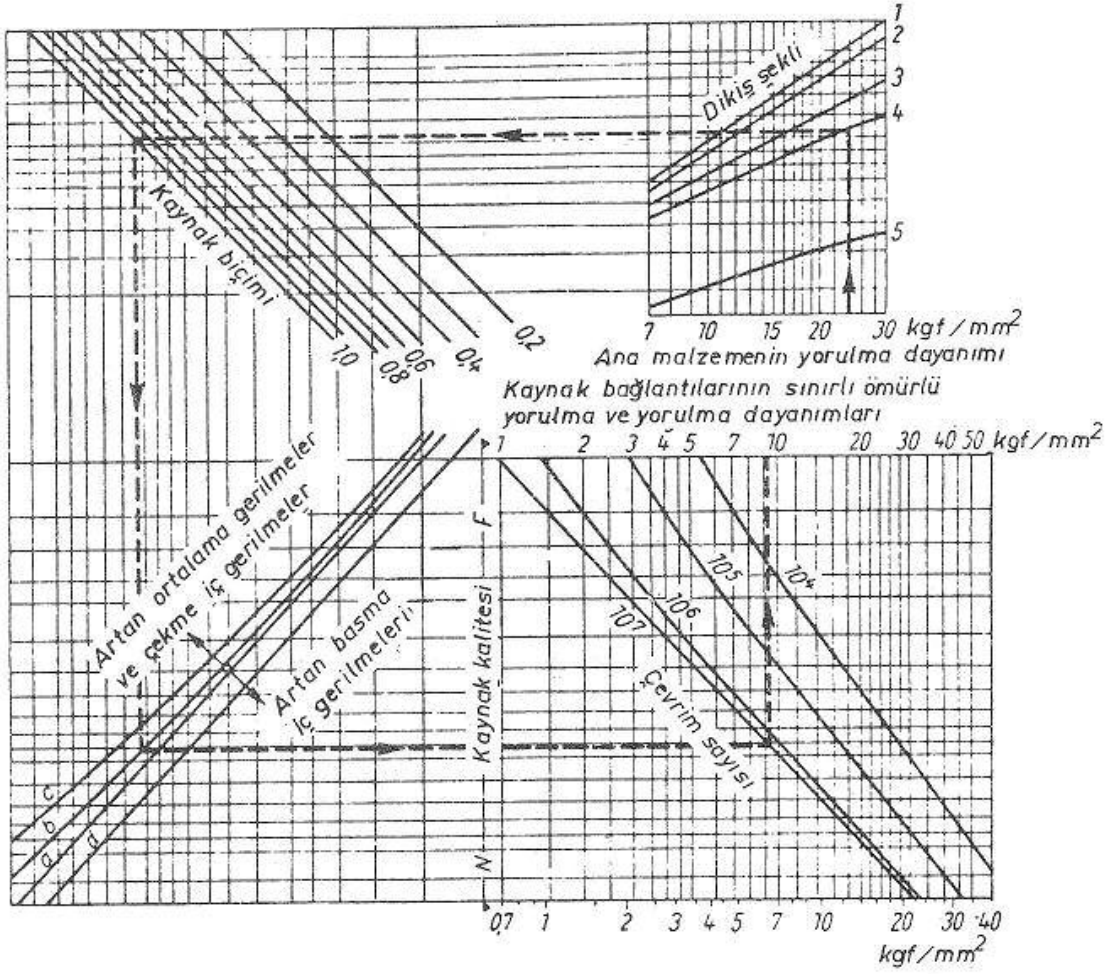
Çelik Türü	Ana malzemenin çekme dayanımı $\text{kgf/mm}^2$	Çekme-basma değişken yorulma dayanımı $\sigma_{\text{çbD}}$ , $\text{kgf/mm}^2$	
		Tufallı ana malzeme	Alın kaynaklı deney parçaları
12 ChG2SMF	90	27	8,5
12 G2SMF	85	30	9,0

Ancak yüksek veya çok yüksek dayanımlı çeliklerle yapılan kaynak konstrüksiyonları için bu açıklama yeterli olmayıp, kaynak bağlantısının etkisini tüm zorlama bölgeleri için geçerli dış çentiklerle temsil etmek mümkün değildir. Keding [54] yüksek dayanımlı St 45/60 yapı çeliğinde bunu denemiş ve alın kaynağı yapılmış deney parçaları ile çeşitli çentik katsayılarına sahip enine delinmiş deney parçalarının Wöhler eğrilerini karşılaştırmıştır, Şekil-95. Bu deneylerde çekme-basma değişken yorulma dayanımları sözkonusudur ve görüldüğü gibi sadece yorulma dayanımı bölgesinde eğriler birbirine yaklaşmaktadır. Süreli yorulma dayanımı bölgesinde eğriler ayrılmakta ve kaynaklı parçalar delinmiş deney parçalarından daha yüksek yorulma dayanımları göstermektedirler. Bu sonuç belirli geometrilerdeki kaynak hatalarının belirli sınırlar içinde dış çentiklerle karşılaştırılamayacağı anlamına gelmez. Ancak yüksek dayanımlı yapı çeliklerinin ve ıslah çeliklerinin düşük yorulma dayanımlarının tek nedeninin iç ve dış çentikler olmadığı, diğer olumsuz faktörlerin de rol oynadığı anlaşılmaktadır. Bu faktörlerin en önemlileri erime bölgesinde ve erime bölgesinden ana malzemeye geçişte malzemenin durumu ile iç gerilmeler olabilir.

Dinamik olarak zorlanan kaynak konstrüksiyonlarının bazıları için yasal talimatlar (örneğin basınçlı kaplar, çelik yapılar) mevcut olup, bunlar ve temel el kitapları [10] yardımıyla kaynak bağlantılarının boyutlandırılması ve hesaplanması mümkün olur. Thum ve Erker [40] makina yapımında kullanılan kaynak bağlantıları için basit bir grafik yöntem önermişlerdir. Bu sayede düşük ve orta dayanımlı yapı çeliklerinin kaynak bağlantılarının yorulma dayanımları yeterli bir yaklaşıklıkla tahmin edilebilir.

Şekil-96'da verilen diyagramda kaynak bağlantılarının yorulma dayanımlarına etki eden faktörler basitleştirilerek gösterilmiştir:





Şekil-96: Kaynak bağlantılarının süreli yorulma ve yorulma dayanımlarını veren diyagram.

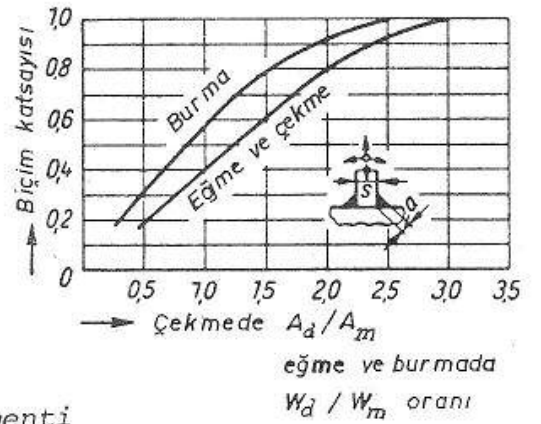
Şekil-97: Açı kaynağı bağlantılarında geçiş kesitinin biçim katsayısının saptanması. Dikiş kesiti için biçim katsayısı olarak 1,0 alınır. Kesme zorlaması altında uzun dikişlerde 0,5, kısa dikişlerde 0,8 alınır.

$A_d = a.l$ , kaynak dikişlerinin toplam kesit alanı

$A_m = s.l$  (veya  $\Pi S^2/4$ ), ana malzeme kesitinin alanı

$W_d$ : Kaynak dikişinin mukavemet momenti

$W_m$ : Ana malzeme kesitinin mukavemet momenti



- Dikiş biçiminin etkisi (Şekil-96, sağ üst kısımdaki 1...5 çizgileri). Bu çizgilerin kullanımı dikişe, dikiş-ana malzeme geçişinin durumuna, zorlama şekline ve zorlama yönüne bağlı olarak Çizelge-14'de açıklanmıştır.

Çizelge-14: Şekil 96'daki Çeşitli Dikiş Biçimi Çizgileri için Açıklamalar

Dikiş Biçimi	Kesit	Zorlama	Zorlamanın dikiş yönüne göre konumu	Çizgi	
X-dikişi V-dikişi ilave kök pasolu	Dikiş ve işlenmiş geçiş	herhangi	herhangi	1	
	İşlenmemiş geçiş	herhangi	enine	3	
boyuna			2		
ilave kök pasosuz V-dikişi	dikiş	herhangi	enine	4	
			boyuna	3	
	işlenmemiş geçiş	herhangi	enine	3	
			boyuna	2	
Aralıklı çift V-dikişi	dikiş	çekme- basma, eğme	enine	5	
			boyuna	4	
			herhangi	4	
Çift taraflı açı kaynağı*	dikiş	çekme- basma, eğme		5	
			kayma	4	
			işlenmemiş geçiş	herhangi	3**
					4***
					2
Derin çift taraflı açı kaynağı	dikiş, işlenmiş geçiş	herhangi	2		
			işlenmemiş geçiş	herhangi	3**
					4***

\*) Tek taraflı açı kaynaklarında da aynı çizgiler kullanılır, ancak uygun olmayan kuvvet iletiminden dolayı biçim katsayıları çift taraflıdan %30..50 daha düşük alınır.

\*\* ) Çukur dikiş

\*\*\* ) Düz dikiş

- Konstrüksiyonun dış biçiminin etkisi. Bu etki aynı şeklinin sol üst alanındaki doğrular ile belirlenir. Şekil-97'de bu doğruların kullanımı ile ilgili kurallar verilmektedir. Biçim katsayısı kaynak konstrüksiyonunda kuvvet akışını dikkate alır ve sadece dikiş-ana malzeme geçişi için kullanılır. Kaynak dikişi nedeniyle kuvvet akışında bir değişiklik söz konusu değilse, biçim katsayısı 1,0 kabul edilir. Kuvvet akışının değişimi ile gerilme dağılımında değişimler olduğundan, tasarımcı konstrüksiyondaki kuvvet akışını tahmin etmeli ve olumsuz bir etkinin bulunması halinde Şekil-97 yardımıyla biçim katsayısını belirlemelidir. Bunun için çekme-basma zorlamalarında kaynak dikişi kesitinin, bağlantının yapıldığı kesite oranı, eğme veya burma zorlamalarında ise kaynak dikişinin mukavemet momentinin bağlantı kesitinin mukavemet momentine oranı bilinmelidir.

- Kaynak işlemi ile işlem sırasında parçaların serbest hareket edememesi sonucu oluşan iç gerilmelerin ve yorulma zorlamasında ortalama gerilme seviyesinin etkisi. Bu etkileri Şekil-96'nın sol alt kısmındaki eğriler içermektedir. Bunların kullanımı Çizelge-15'te açıklanmıştır. Ancak bu eğriler kaynak sonrasında bir miktar plastik şekil değiştirme kabiliyeti bulunan iyi kaynak edilebilir çelikler için geçerlidir. Kaynak edilebilme özelliği sınırlı veya kötü olan çeliklerde kaynak işlemi sonrasında daha yüksek iç gerilmeler oluşur. Bu durum artan çekme iç gerilmeleri yönündeki bir üst eğri seçilerek dikkate alınabilir.

Eğer sıfırdan büyük ortalama gerilmeler ile yüksek veya çok yüksek iç gerilmeler biraraya gelirse, gene artan çekme iç gerilmeleri yönünde bir üst eğri kullanılır.

- Kaynak dikişi kalitesinin etkisi. F kalitesi tümüyle ve özenle kontrol edilen, çok küçük hataları dahi taşlanıp tekrar kaynak edilerek düzeltilen dikişler için geçerlidir.

N kalitesi ise yer yer kontrol edilen ve sadece büyük hataları taşlanıp ikinci bir kaynak işlemiyle düzeltilen dikişleri niteler.

Çizelge-15: Yüksek ortalama gerilme ve iç gerilmelere karşılık olan çizgiler

Ortalama gerilmeler	Çizgi	İç gerilmeler	Çizgi
0 (Saf değişken zorlama)	a	Düşük iç gerilmeler	a
		Yüksek iç gerilmeler	b
$\sigma_g$ veya $\tau_g$		Çok yüksek iç gerilmeler	c
(Dalgalı zorlama)	b	Basma iç gerilmeleri*	d

\*)Örneğin bölgesel ısıtma veya sonradan soğuk şekillendirme sonucu oluşan iç gerilmeler.

Sürekli yorulma bölgesinde gerilme genlikleri daha büyük alınabileceğinden, diyagramın sağ altında sözkonusu çevrim sayılarına karşılık olan eğriler taşınmıştır. Şekil-96'nın kullanımı kitabın son bölümünde 7 ve 8 numaraları sayısal örnekler yardımıyla da açıklanmıştır.

- 
- [1] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1956) S. 201...209.
  - [2] TGL 19336.
  - [3] EPREMIAN, E., ve R. F. MEHL: *Nat. Advis. Comm. Aeron., Techn. Note* 2719 (1952).
  - [4] WIRTHGEN, G.: *IfL-Mitt.* (1963) S. 74...81.
  - [5] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1957) S. 153...156.
  - [6] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: *Das Industrieblatt* (1958) S. 69...73.
  - [7] RANSOM, I. T., ve R. F. MEHL: *Amer. Soc. Test. Mater. Nr. 137* (1953) S. 3...24.
  - [8] HANCHEN, R.: *Neue Festigkeitsberechnung für den Maschinenbau* (1960).
  - [9] TAUSCHER, H.: *VEB Fachbuchverlag* (1969).
  - [10] NEUMANN, A.: *Schweisstechnisches Handbuch für Konstrukteure* (1961).
  - [11] HEMPEL, M.: *Draht* (1960) S. 589...600.
  - [12] TAUSCHER, H., ve E. STECHER: *Maschinenbautechnik* (1962) S. 37...44.
  - [13] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Maschinenbautechnik* (1963) S. 40...43.
  - [14] TAUSCHER, H., ve H. BUCHHOLZ: *Maschinenbautechnik* (1967) S. 462...468.
  - [15] TAUSCHER, H., ve H. BUCHHOLZ: *Die Technik* (1967) S. 371...374.
  - [16] TAUSCHER, H., ve H. BUCHHOLZ: *Draht* (1969) S. 231...239.
  - [17] TAUSCHER, H., ve H. BUCHHOLZ: *IfL-Mitt.* (1967) S. 81...85.
  - [18] TAUSCHER, H., ve G. HÖHNE: *Neue Hütte* (1961) S. 701...707.
  - [19] TAUSCHER, H., ve E. STECHER: *Die Technik* (1966) S. 440...445.
  - [20] TAUSCHER, H., ve E. STECHER: *IfL-Mitt.* (1967) S. 4...8.
  - [21] TAUSCHER, H., ve E. STECHER: *IfL-Mitt.* (1970) S. 1...9.
  - [22] TAUSCHER, H., ve E. STECHER: *Neue Hütte* (1961) S. 146...150.
  - [23] KUDRJA VZEV, I. V., ve E. I. SHUK: *Vestnik Maschinost.* (1964) S. 50...54.
  - [24] BÜHLER, H., ve H. BUCHHOLZ: *Stahl ve Eisen* (1933) S. 1330...1332.
  - [25] TAUSCHER, H., ve H. BUCHHOLZ: *IfL-Mitt.* (1969) S. 368...376.
  - [26] WEVER, F., ve M. HEMPEL: *Dauerschwingfestigkeit von Stählen bei erhöhten Temperaturen* (1956).
  - [27] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Materialprüfung* (1966) S. 458...464.

- [28] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *IfL-Mitt.* (1968) S. 247...259.
- [29] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Maschinenbautechnik* (1969) S. 474...480.
- [30] KUDRJAVZEV, I. V., ve B. ALEKSANDROV: *Die Bearbeitung warmfester Legierungen*, Moskau (1960).
- [31] LEHR, E., ve R. MAILANDER: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1937/38) S. 563.
- [32] SCHAAL, A.: *Metallkunde* (1950) S. 334...339.
- [33] SCHAAL, A.: *Metallkunde* (1951) S. 147...154.
- [34] POMP, A., ve M. HEMPEL: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1950) S. 53...66.
- [35] RAMSEY, P. W., ve D. P. KEDZIE: *Trans. Amer. Inst. Min. Metallurg. Engr.* 209 (1957) S. 401...406.
- [36] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Neue Hütte* (1962) S. 102...111.
- [37] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Neue Hütte* (1963) S. 326...329.
- [38] WUPPERMANN, A. TH.: *Stahl ve Eisen* (1957) S. 1117...1122.
- [39] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Maschinenbautechnik* (1967) S. 625...630.
- [40] THUM, A., ve A. ERKER: *Schweissen im Maschinenbau* (1943).
- [41] TAUSCHER, H.: *IfL-Mitt.* (1962) S. 46...60.
- [42] TAUSCHER, H.: *Neue Hütte* (1963) S. 91...95.
- [43] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: *Neue Hütte* (1961) S. 151...156.
- [44] POMP, A., ve M. HEMPEL: *KWI-Mitt.* (1949) S. 169.
- [45] POMP, A., ve M. HEMPEL: *KWI-Mitt.* (1963) S. 205...215.
- [46] AMEDICK, E.: *Konstruktion* (1953) S. 117...123.
- [47] SERENSEN, S. W.: *Höhere Gestaltfestigkeit durch Oberflächenverfestigung*. VEB Verlag Technik (1954).
- [48] VIGLIONE, I.: *Product Engng.* (1957) S. 203...205.
- [49] LOVE, R. I., ve O. A. PRINGLE: *ASME* (1956) S. 1489...1496.
- [50] GRAF: *VDI-Z.* (1936) S. 920...921.
- [51] HEMPEL, M.: *Draht* (1955) S. 119...129 ve 178...183.
- [52] POMP, A., ve M. HEMPEL: *KWI-Mitt.* (1938) S. 1...14.
- [53] POMP, A., ve M. HEMPEL: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1950) S. 243...262.
- [54] KEDING, H.: *Schweisstechnik* (1968) S. 193...197.
- [55] BLEILÖB, F., ve H. BORN: *Stahl ve Eisen* (1963) S. 119...129 ve S. 1605...1616.
- [56] WALZ, K. H.: *Draht* (1951) S. 14...17.
- [57] TAUSCHER, H., ve H. Buchholz: *IfL-Mitt.* (1968) S. 41...47.
- [58] NEUMANN, A.: *Probleme der Dauerfestigkeit von Schweissverbindungen* (1960).

[59] DEGENKOLBE, J.: *Schweizer Archiv* (1968) S.2...18.

[60] TAUSCHER, H.: *IfL-Mitt.* (1962) S.26...41.

#### 4. KOROZYON ve YÜZEY KORUMANIN YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ

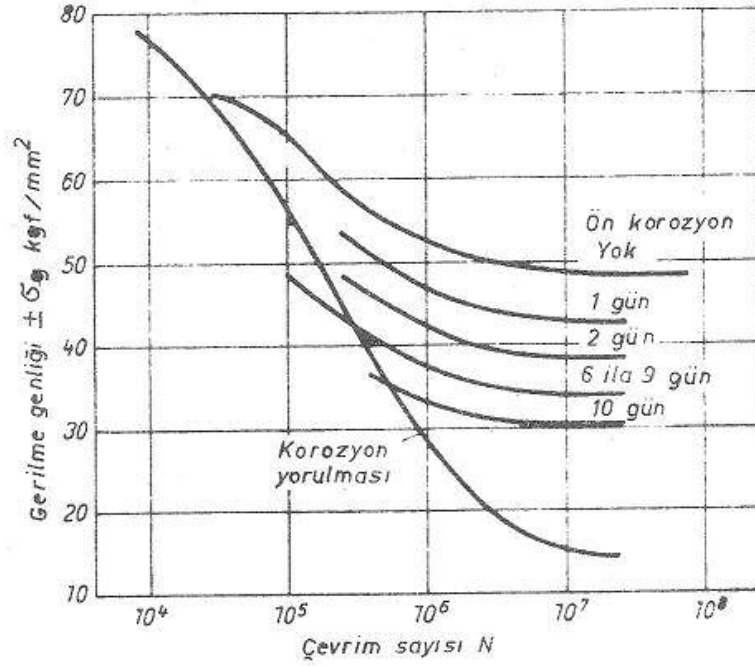
Değişen zorlamalar ile korozif ortamın ortak etkimesi sonucu ortaya çıkan olaya korozyon yorulması adı verilir [1]. Bu durumda uygun bir yüzey koruması öngörülmemiş ise yorulma dayanımında önemli azalma gözlenir; Wöhler eğrilerinde artan çevrim sayısı ile taşınabilir gerilme genlikleri sürekli düşer; yani Wöhler eğrisinin apsise paralel olmaya başladığı bir sınır çevrim sayısı saptanamaz. Böylece korozyon etkisine açık bir deney parçası veya makina elemanı için korozyon yorulma dayanımından değil, ancak sürelili korozyon yorulma dayanımından söz edilebilir.

Korozyon olayı ve yorulma zorlaması değişik zamanlarda birbirini izlerse gerilmesiz ön korozyon söz konusudur. Korozyon yorulmasından farklı olarak burada sınır çevrim sayısı bulunabilir, ancak yine de yorulma dayanımında önemli düşüşler görülür, Şekil-98 [2]. Gerilmesiz ön korozyonda oluşan hasarın şiddeti ön korozyon süresine ve korozyon ortamına bağlıdır.

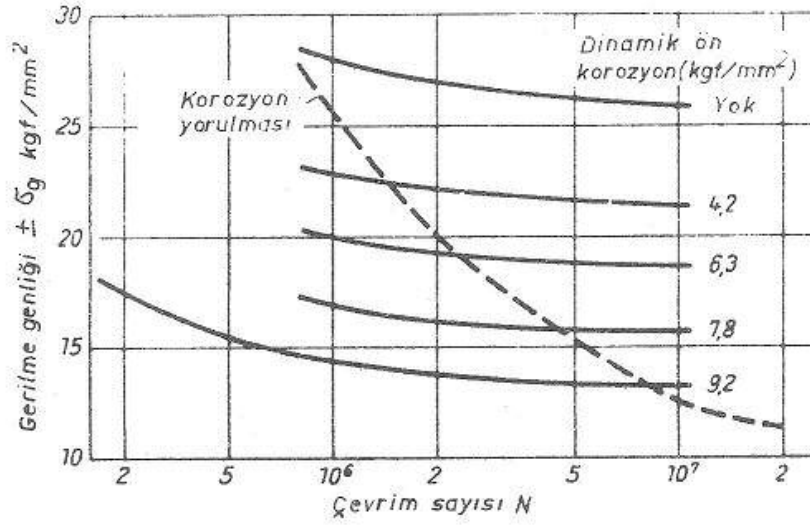
Ön korozyon sırasında makina veya deney parçalarına, genlikleri sürelili korozyon dayanımından küçük olmakla birlikte değişen gerilmeler de uygulanırsa, daha sonra korozif olmayan ortamda yapılacak yorulma deneyinde yorulma dayanımının gerilmesiz ön korozyona göre daha fazla düştüğü saptanır. Bu olay dinamik ön korozyon olarak adlandırılır. Şekil-99'da alaşimsız bir çeliğin eğme değişken yorulma dayanımına, gerilmesiz ön korozyon (en üst eğri) ve dinamik ön korozyonun (gerilme genliğine bağlı olarak) etkileri görülmektedir.

Bitmiş mamuller yüzeyleri korunmadan havada veya nemli yerlerde saklanırsa, paslanma ve karıncalanma nedeniyle gerilmesiz ön korozyon oluşabilir. Bu nedenle yorulmaya maruz kalacak ve özel bir yüzey koruması uygulanmamış çelik parçaların, depolama sırasında yağ veya gres yardımıyla geçici olarak korunması zorunludur. Yapılan deneylerde, yağ veya gres kaplı parçalar, yüzeyi korumakla birlikte paslanmamış olanlara göre eşit düzeyde veya biraz daha yüksek yorulma dayanımı göstermektedirler.

Parçalar nemli hava, deniz iklimi, endüstri atmosferi, su, tuz çözeltileri ve benzeri ortamlarda bulunuyorsa korozif etki çok daha şiddetli olur. Eski araştırmalara göre havadaki oksijen dahi yorulma zorlaması altındaki parçalara olumsuz yönde etki eder.



Şekil-98: Eğme değişken yorulma zorlaması altında ön korozyon ve korozyon yorulmasının etkisi, CrV-çeliği, çekme dayanımı 105 kgf/mm<sup>2</sup>, şehir suyu.



Şekil-99: Eğme değişken yorulma zorlaması altında dinamik ön korozyon ve korozyon yorulmasının etkisi, %0,29C'lu çelik, şehir suyu.

Değişik metal malzemeler üzerinde, vakum altında yapılan deneyler havadaki deneylere göre daha yüksek yorulma dayanımları vermiştir. Alaşimsız bir çelik üzerinde yapılan araştırma ise bunu doğrulamamıştır [3]. Hava, oksijen, azot, hidrojen ve argonda yapılan son deneyler yorulma dayanımının anılan ortamlardan etkilenmediğini göstermektedir. Ancak havadaki SO<sub>2</sub>, CO veya CO<sub>2</sub> gazlarının etkisi



tam anlaşılammamış olup, özellikle yüksek nem oranında bunlar önem kazanabilir.

C 45 çeliğinde çeşitli ortamların yorulma dayanımına etkisi Çizelge-16'da; yüksek alaşımlı çelikler için doymuş, sulu SO<sub>2</sub> eriyiklerinin etkisi de Çizelge-17'de görülmektedir [4]. Çizelge-17'deki malzemeler paslanmaz ve aside dayanıklı çelik olmalarına rağmen eğme değişken yorulma dayanımlarında korozyondan dolayı saptanan düşüşler oldukça büyüktür.

Çizelge-16: Değişik ortamların normalize edilmiş C45 çeliğinin eğme değişken yorulma dayanımına etkisi

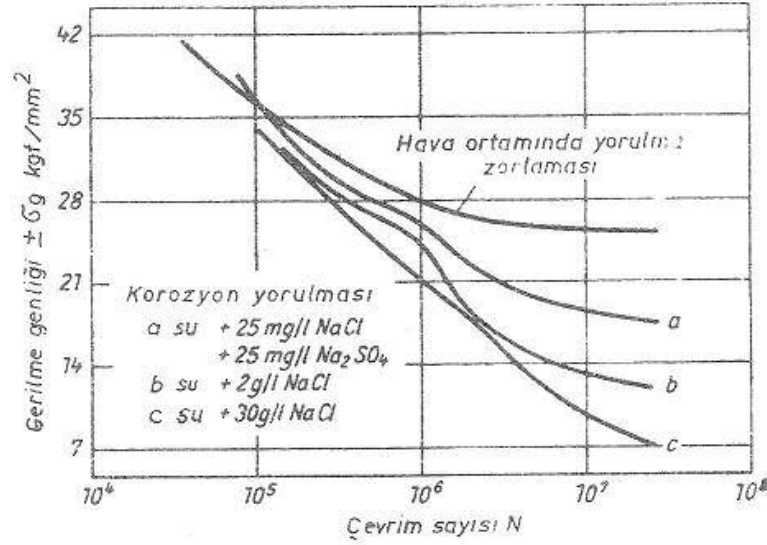
Ortam	Sürekli Korozyon Yorulma	
	Dayanımı $\sigma_{eD}$ (10 <sup>7</sup> ) kgf/mm <sup>2</sup>	%
Hava	25,5	100
%0,004'lük NaCl çözeltisi	14,7	58
%3'lük NaCl çözeltisi	10,0	39
H <sub>2</sub> S ile doyurulmuş		
%3'lük NaCl çözeltisi	9,2	36
0,5 n NaCl çözeltisi+0,01 n HCl	7,2	28
0,5 n NaCl;0,8 n Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ve		
0,8 n NaHCO <sub>3</sub> 'den oluşan çözelti	20,0	78

Ostenitik çeliklerde süreli korozyon yorulma dayanımı ayrıca yüzey ve işleme türüne (tornalanmış, taşlanmış, parlatılmış v.s.), dolayısıyla yüzeyde oluşan iç gerilme ve şekil değiştirme durumuna çok bağlıdır [5].

Çizelge-17: Sulu doymuş SO<sub>2</sub>-çözeltisinin eğme değişken yorulma dayanımına etkisi

Çelik	Havada	Sulu doymuş SO <sub>2</sub> - çözeltisindeki	
	eğme değişken süreli korozyon yorulma dayanımı kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{eD}$ (10 <sup>7</sup> ), Püskürtme sis	Sıvı ortam
X22 Cr Ni 17	51	saptanmamış	20
X 8 CrNiMo 26,5	38	28,0	24,3
X12 CrNi 18,8	26	15,5	12

Şekil-98 ve 99'dan da görüldüğü gibi şehir suyu dahi korozyon yorulmasına yol açmaktadır. Suda klorür bulunması ile bu etki daha da belirginleşir. Şekil-100'de suyun klorür miktarına bağlı olarak yorulma dayanımındaki düşmeler verilmiştir [6].

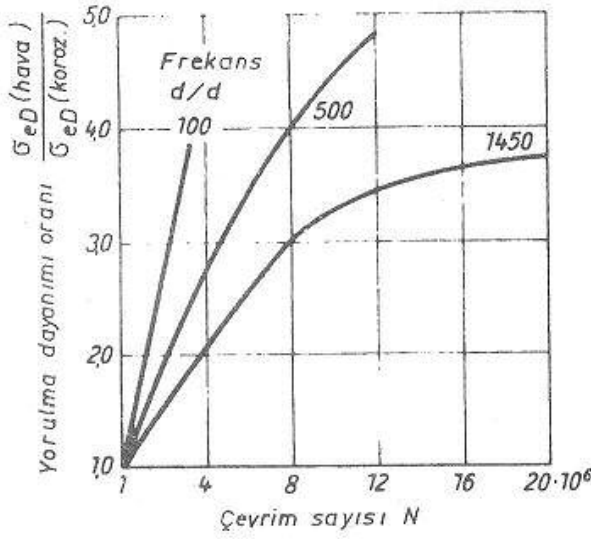


Şekil-100: Değişik miktarlarda tuz içeren suyun eğme değişken yorulma zorlamasına etkisi. % 0,42 C'lu çelik, çekme dayanımı 68 kgf/mm<sup>2</sup>.

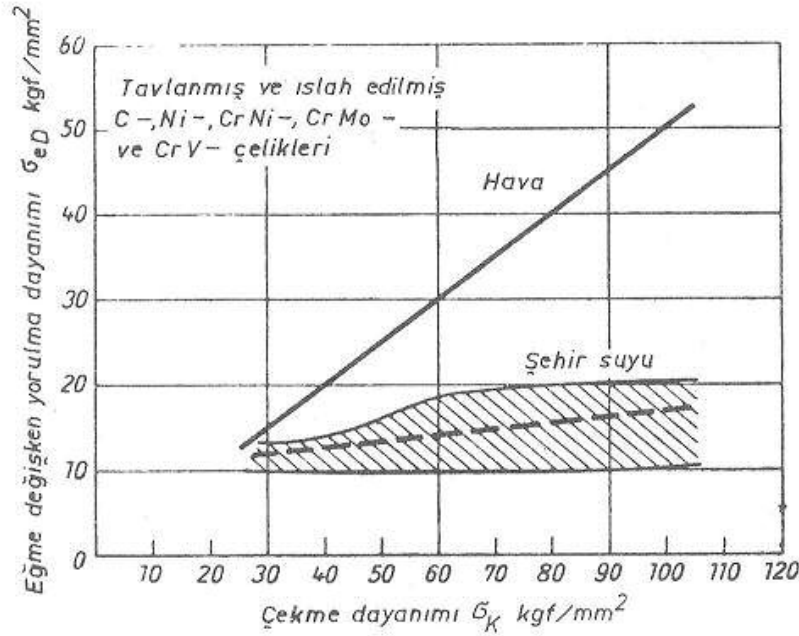
Korozyon yorulmasında birim zamandaki çevrim sayısının (frekans) da önemli etkisi vardır. Frekans ne kadar düşük ise, çevrim sayısı olarak ifade edilen süreli korozyon yorulma dayanımı da o kadar düşük olur, Şekil-101. Yani korozyonda ortamın mutlak etkime süresinin önemli olduğu görülmektedir. Dikkati çeken bir diğer nokta da, yüzey koruması yapılmadığı zaman alaşım ve alaşımlı çeliklerde gerek kimyasal bileşimin gerekse statik dayanım değerinin süreli korozyon yorulma dayanımına büyük bir etkisinin olmadığıdır. Şekil-102 şehir suyunda korozyon yorulmasına çeliğin artan çekme dayanımının etkisini göstermekte ve bunu korozyonsuz durumla karşılaştırmaktadır. Süreli korozyon yorulması dayanımları 10...20 kgf/mm<sup>2</sup>'lik bir bölgede dağılmakta, ortalama değerler ise çekme dayanımı ile hafifçe artmaktadır.

Korozyon yorulması altındaki deney parçası veya makina elemanlarında büyüklük etkisi, korozyonsuz yorulmadakinden daha azdır. Aynı durum çentikli parçaların süreli korozyon yorulma dayanımları için de geçerlidir. Dış çentikler nedeniyle gerilme yığılmalarının bulunması, süreli korozyon dayanımını korozyonsuz yorulmada saptanan oranda düşürmez.

Korozyon yorulmasının yavaşlatılması veya engellenmesi için değişik önlemler olup, en kolayı yüksek alaşımlı, korozyona karşı dayanıklı çeliklerin kullanılmasıdır. Ancak bu malzemeler fiyatlarının yüksek olması nedeniyle özel durumlarda seçilebilir. Sıvı korozif ortamlarda kimyasal inhibitörlerin yardımı ile de korozyon yorulması engellenebilir. Inhibitör olarak kromat, fosfat,



Şekil-101: Eğme değişken yorulma zorlamaları altında frekansın yorulma dayanımı oranına etkisi. CrV-çeliği, çekme dayanımı 128 kgf/mm<sup>2</sup>, şehir suyu.



Şekil-102: Alaşımsız ve az alaşımlı yapı çeliklerinde, çeliğin artan çekme dayanımının şehir suyundaki sürekli korozyon yorulma dayanımına etkisi.

sülfat, nitrat v.b.kullanılabilir. Korozyon ortamı ve diğer koşullara bağlı olarak bu inhibitörlerin en uygun olanını belirlemek gerekir.

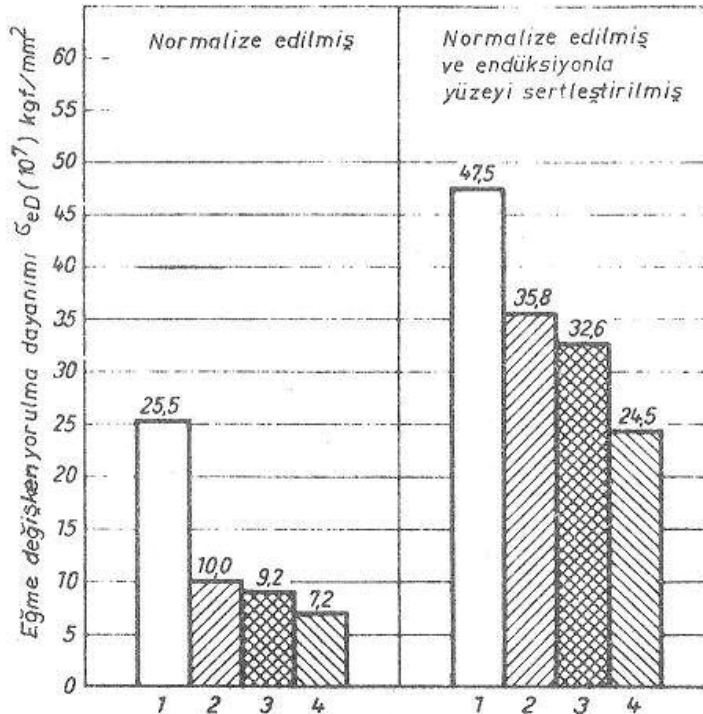
Bunun dışında yüzeyde oluşturulan basma iç gerilmeleri de korozyon yorulmasını engeller. Bu iç gerilmelerin ısıtma işlemleri sonucu veya pekleştirme yoluyla oluşturulması bir fark doğurmaz. Çizelge-18'de soğuk haddelemenin eğme sürekli korozyon yorulma dayanımını arttırıcı etkisini gösteren bazı sonuçlar verilmiştir [7].

Çizelge-18: Düzgün şekilli deney parçalarında soğuk haddelene ile oluşan basma iç gerilmelerinin, süreli korozyon yorulma dayanımını arttırması.

Ç e l i k	N = 5.10 <sup>7</sup> için eğme süreli korozyon yorulma dayanımı kgf/mm <sup>2</sup>			
	Basma iç gerilmesi yok hava		Basma iç gerilmesi var deniz suyu	
St 38	26	10 <sup>1)</sup>	29	16 <sup>1)</sup>
24 NiCr 14	36	8	41	22...24
Paslanmaz çelik döküm	32	8	35	11...20
X 10 CrNi 18.10	20	8	28	20

1) Şehir suyu

Yüzey sertleştirme de korozyon yorulmasını azaltır. Şekil-103 endüksiyonla yapılan bir yüzey sertleştirme işleminin olumlu etkisini göstermektedir [8]. İncelenen çeliğin eğme değişken zorlaması için süreli korozyon yorulma dayanımı %200'ün üzerinde yükselmektedir.



Şekil-103: Eğme çevresel zorlamasında endüksiyonla yüzey sertleştirmenin süreli korozyon yorulma dayanımına etkisi. C45 çeliği, STK (Sertlik tabakası kalınlığı)=1,6 mm. 1:Laboratuvar havası, 2:%3 NaCl'lük NaCl çözeltisi, 3:H<sub>2</sub>S ile doyurulmuş %3'lük Na-Cl çözeltisi, 4:HCl ile asitlendirilmiş %3'lük NaCl-çözeltisi.

Korozyon yorulmasına karşı sınırlı da olsa yüzeydeki organik tabakalar, emay, plastik, ve özellikle metalsel kaplamalar koruyucu olarak işlev görürler. Ancak bunlar bazı durumlarda yorulma dayanımını olumsuz yönde etkileyebilirler.

Metalsel yüzey kaplamaları sıvı metale daldırma, püskürtme, haddeleyerek kaplama veya galvanik yöntemlerle oluşturulabilir. Ayrıca metalleri yüzeyden içeri yayındırma yöntemi ile de (örneğin Sherard prosesi\*) koruyucu tabakalar yaratılabilir. Metalsel kaplama yöntemlerinin tümünde yüzeylerin bir ön işleminden geçirilmesi zorunludur. Bu amaçla çelikler bir asit banyosuna daldırıldığından, bu sırada ortaya çıkan yüzey pürüzlenmesi de yorulma dayanımını azaltabilir.

Eriyiğe daldırma veya yüzeyden içeri yayınma yoluyla çelik üzerine yapılan metalsel kaplamalar, kırılğan yüzey tabakaları oluşturmaları halinde yorulma dayanımını düşürürler. Örneğin daldırma yöntemi ile çinko kaplanmış deney parçalarında %55'e varan yorulma dayanımı düşüşleri saptanmıştır.

Çelik için galvanik kaplama yöntemlerinde özel bir dikkat gösterilmelidir [9]. Bu yöntem sırasında malzemeye atomsal olarak yayınan hidrojen malzemenin hasar görmesine ve bu arada yorulma dayanımında büyük düşüşlere neden olur. Hidrojen kırılğanlığı tehlikesi değişik şiddetlerde de olsa tüm çeliklerde ve metal kaplama yapılan tüm galvanik yöntemlerde söz konusudur. Bu bakımdan alaşımlı çelikler alaşımsız çeliklere göre çok daha duyarlıdır, ancak değişik alaşım elemanları değişik etkiler gösterirler. Ayrıca malzemenin yapısı da önemli bir faktördür. Ostemperlenmiş ve martenzitik yapılar hidrojen kırılğanlığına tavllanmış veya perlitik yapılardan daha duyarlıdırlar.

Hidrojen kırılğanlığının etkisi normal olarak galvanik işlemin süresi ve oluşan tabakanın kalınlığı ile artar. Kaplama şartlarının aynı kalması halinde malzemenin artan çekme dayanımı ile kırılğanlığın arttığı saptanmıştır. Çok yüksek dayanımlı ıslah çelikleri veya yay çelikleri bu nedenle yumuşak çeliklere göre hidrojen kırılğanlığına karşı daha duyarlıdırlar.

Hidrojen giderme olarak adlandırılan ve parçayı 160.. 200°C sıcaklıkta 2...2,5 saat tutarak yapılan ısıl işlem hidrojenin etkisini kısmen veya tümüyle yok edebilir. Bir araştırmaya [10] göre hidrojen, ısıtma sırasında

---

\*) Çelik parçaların çinko tozu ve kum karışımında 420°C sıcaklıkta tutulması.

malzeme bünyesinden dışarı çıkmamakta, sadece yeniden yayınma yoluyla dağılımını değiştirmektedir.

Hidrojen kırılğanlığı mekanizmasına ilişkin çeşitli teoriler öne sürülmüştür; ancak bunlardan hiçbiri olayı tümüyle açıklayamamaktadır. Bilinen gerçek, hidrojen içeren yüzey tabakalarında veya galvanik kaplamalarda çekme iç gerilmelerinin bulunduğu ve bu nedenle dış zorlama olmaksızın kristal kafeslerinin genişlediği ve hatta malzemede ayrılmaların oluştuğudur. Bu çekme iç gerilmelerinin yüzeyde ve kaplama tabakalarında yorulma dayanımı ve diğer özellikler üzerinde olumsuz bir etki doğuracağı açıktır.

Çekme dayanımları 60..100 kgf/mm<sup>2</sup> arasında değişen alaşımsız ve alaşımlı çeliklerin galvanik olarak nikel kaplanmasında, Kudrjavcev [11] düzgün şekilli deney parçalarının yorulma dayanımında %34'e, bakır kaplamada ise %13'e kadar varan düşüşler saptamıştır.

Galvanik çinko kaplamalarında ise yorulma dayanımlarında %12 ye kadar yükselme yanında %10'a ulaşan düşme [12] veya hiç değişim görülmüştür. Buna karşın Gustafson [13] bilya püskürtme ile yüzeyi pekleştirilmiş alaşımsız çelikten yapılmış helisel yaylarda, galvanik çinko veya kalay kaplama sonrasında burma yorulma dayanımında %50'ye varan belirgin düşmeler saptamıştır. K30 SiMnCr 4 ıslah çeliğinde yapılan yorulma deneyleri [9] çinko kaplama sonrasında, eğme yorulma dayanımının %15 arttığını, ancak burma yorulma dayanımının %9 azaldığını göstermiştir. Hidrojen giderilmesi için uygulanan ısıtma işlemlerin deney sonuçlarına bir etkisi bulunamamıştır.

Çinko kaplamada olduğu gibi, galvanik kadmiyum kaplamalar hakkındaki veriler de çok değişik ve birbiri ile çelişir durumdadır. Bazı araştırmalarda kadmiyum kaplamanın burma yorulma dayanımını %5,8 artırdığı [13], bazılarında [12] ve özellikle yüksek dayanımlı alaşımlı ıslah çeliklerinde [10] ise azalttığı belirtilmektedir. K30 SiMnCr 4 ıslah çeliğinde galvanik bir kadmiyum kaplamadan sonra eğme değişken yorulma dayanımının %12 düştüğü, burma değişken yorulma dayanımının ise etkilenmediği saptanmıştır. Yapılan hidrojen giderme ısıtma işlemi eğme değişken yorulma dayanımında bir iyileşme sağlamıştır.

Çentikli deney parçaları veya makina elemanlarında hidrojen kırılğanlığının yorulma dayanımına etkisi önemsizdir. Örneğin Kudrjavcev [11] çevresel yarı daire şeklinde çentikli yuvarlak deney parçalarında galvanik kaplama sonrası yorulma dayanımının çok az düştüğünü bulmuştur.

Sert krom kaplamanın etkisi çinko veya kadmiyum kaplamadan çok daha açık olarak bilinmektedir. Mevcut yayınlardan, sert krom kaplamanın yorulma dayanımı üzerinde büyük ölçüde olumsuz etkisi olduğu, buna karşın parlak krom kaplamanın yorulma dayanımını sadece çok az düşürdüğü anlaşılmaktadır. Bu olumsuz etki kaplanan çeliğin çekme dayanımı ile kuvvetli, kaplama kalınlığı ile hafif olarak artmakta; hidrojen giderilmesi için yapılacak bir tav işlemi diğer kaplamaların tersine yorulma dayanımının daha da düşmesine neden olmaktadır. Sert krom kaplamada yorulma dayanımının azalması diğer kaplamalardaki gibi öncelikle hidrojen gevrekliği ile değil, çok sert, kısmen kılcal çatlaklar içeren ve çekme iç gerilmelerinin etkisi altında bulunan krom tabakasının özellikleriyle açıklanmaktadır.

K 30 SiMnCr 4 çeliği üzerinde yapılan deneyler alaşımlı yüksek dayanımlı bir ıslah çeliğinin yorulma dayanımına sert krom kaplamanın etkisini göstermektedir, Çizelge-19. Buradan da görüldüğü gibi sert krom kaplamanın sebep olduğu yorulma dayanımı düşüşünün miktarına zorlama türünün de etkisi vardır. Eçme zorlamasının tersine, burma zorlamasında herhangi bir olumsuz etki saptanamamıştır. Hidrojenin giderilebilmesi için uygulanan ısıtma işleminden sonra dayanım düşüşünün daha fazla olduğu dikkati çekmektedir\*.

Bu arada alüminyum alaşımlarında da krom kaplama ve dağlamanın yorulma dayanımını düşürdüğünü, ancak bu düşüşün çelikten daha az olduğunu belirtmek yerinde olur.

Yukarıda verilen değerler, yüzey korumasız veya korumalı parçalar üzerinde havada yapılan deneylerin sonuçlarıdır. Deneyler su, tuz çözeltileri v.b. korozif ortamlarda yapılırsa durum tümüyle değişmekte; sert krom kaplamalı olanlar dışında, galvanik kaplamalar ile korunan parçalarda süreli korozyon yorulma dayanımı, kaplamasızlardan her zaman çok daha yüksek bulunmaktadır. Galvanik kaplamanın kusursuz olması durumunda aynı çevrim sayısı için verilmiş süreli korozyon yorulma dayanımı havadaki dayanımdan çoğunlukla %20'den fazla düşük değildir. Süreli korozyon yorulma dayanımındaki bu iyileşmeler çinko veya alüminyum tabakalarının püskürtülmesi, daldırma ile çinko kaplama veya Sherard yöntemi ile elde edilebilir.

Hidrojen kırılğanlığı sadece yorulma dayanımını değil, tokluk ve soğuk şekillendirilebilme özelliklerini de

---

\* ) Sert krom kaplamanın oluşturduğu mikro çatlakların ısıtma işlemi sonucu büyüdüğü düşünülebilir.

olumsuz yönde etkiler. Yukarıda sözü edilen K 30 SiMnCr 4 çeliği üzerinde yapılmış sert krom kaplama araştırmalarında tokluk ve soğuk şekillendirilebilme özelliği katlama deneyleri ile incelenmiştir. 5 ve 10 mm çapındaki kaplanmamış yuvarlak çubuklar, seçilen deney şartlarında 180° açığa kadar katlanmaya uygun iken, 100 µm kalınlığındaki bir sert krom kaplama ile bu açı 35°'ye düşmüş, daha sonra yapılan bir tavlama ile de 68° ye çıkmıştır.

Çizelge-19: Düzgün şekilli deney parçalarında sert krom kaplamanın K30 SiMnCr 4 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi

Kimyasal bileşim: %0,31 C; %1,02 Si; % 0,92 Mn; %0,81 Cr;  
Çekme dayanımı:  $\sigma_K = 113...119 \text{ kgf/mm}^2$ ; 0,2-Sınırı 103...107  $\text{kgf/mm}^2$ ; Isıl İşlem: 200°C da 2 saat; Deney parçalarının çapı: eğmede 7,5 mm, çekme ve burmada 8,00 mm. Galvanik kaplama kalınlığı 0,10 mm.

Deney Serisi	İşlem	Yorulma Dayanımı	
		$\text{kgf/mm}^2$	%
1	Krom kaplı değil <sup>1)</sup>	$\sigma_{eD} = 57$	100
2	Sert krom kaplı	$\sigma_{eD} = 37$	65
3	Sert krom kaplı ve ısıtıl işlem görmüş	$\sigma_{eD} = 26,5$	46
4	Krom kaplı değil <sup>1)</sup>	$\sigma_{\text{çDal}} = 40+40$	100
5	Sert krom kaplı	$\sigma_{\text{çDal}} = 25+25$	62
6	Sert krom kaplı ve ısıtıl işlem görmüş	$\sigma_{\text{çDal}} = 18+18$	45
7	Krom kaplı değil <sup>1)</sup>	$\tau_D = 34$	100
8	Sert krom kaplı	$\tau_D = 34$	100
9	Sert krom kaplı ve ısıtıl işlem görmüş	$\tau_D = 25$	74

<sup>1)</sup> Deney parçaları boyuna parlatılmıştır.

Çekme dayanımları 125  $\text{kgf/mm}^2$  üzerinde olan yüksek dayanımlı alaşımlı ıslah çeliklerinde, malzeme içine yayılan hidrojenin etkisi ile sabit yük altında ayrılma kırılmasına eğilim gözlenmiştir [14]. Hidrojen ile yüklenmiş bu tür çeliklerde oda sıcaklığında çekme dayanımlarının altındaki sabit gerilmelerde kırılmalar saptanmıştır.

Şimdiye kadar söylenenlerden tasarımcılar için şu sonuçlar çıkarılabilir: Bir galvanik kaplamanın yorulma dayanımını azaltıp azaltmadığı aynı malzemedeki yapılmış deney parçaları üzerinde belirlenmemişse, azalma olacağı varsayılabılır bunun öncelikle düzgün şekilli parçaların hesabında gözönünde tutulması zorunludur. Galvanik yöntem, çelik cinsi, çelik bileşimi ve çekme dayanımının seviyesine göre, hidrojen kırılma eğilimi sonucu yorulma dayanımında %50'ye kadar varabilen sözkonusu düşüş, kesit alanının



artırılması ile karşılanabilir veya galvanizleme öncesinde basma iç gerilmelerinin oluşturulması ile (örneğin nitrürasyon, soğuk haddelme, yüzey sertleştirme v.b.) kısmen veya tamamen dengelenebilir. Bu önlemlerin alınması mümkün olmazsa galvanik kaplamadan vazgeçilerek boyama, oksitleyici dağlama, fosfatlama, yağlama, metal püskürtme gibi başka bir yüzey koruma yöntemi uygulamak gerekir [15]. Yorulmaya zorlanan, özellikle 100 kgf/mm<sup>2</sup>'nin üzerinde çekme dayanımına sahip yüksek dayanımlı ıslah çelikleri ve yay çelikleri için galvanik kaplamaların kullanılmasında çok dikkatli olunmalıdır. Yüksek dayanımlı çeliklerde galvanik kaplama dışında, asitle dağlama veya elektrolitik yağ alma işlemlerinde de hidrojen kırılabilirliği görülebilir. Bu gibi durumlarda parçaların düzgün şekilli kesitleri, dış çentikler nedeniyle gerilme yığılmaları oluşan kesitlerinden daha kritiktir\*.

Koruyucu tabakaların yorulma dayanımına etkisi diğer metelsel malzemeler için de sözkonusudur. Bu olumlu veya olumsuz etkinin şiddeti ise malzeme cinsi ve kaplamaya bağlı olarak değişir [16].

- 
- [1] TAUSCHER, H. ve H. BUCHHOLZ: *Chemische Technik* (1969) S.404...408.
  - [2] McADAM, D. J.: *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* (1926) S.224.
  - [3] HEMPEL, M., A. KOCHENDÖRFER ve A. TIETZE: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1959) S.211...218.
  - [4] SPAHN, H.: *Metalloberfläche* (1966) S.151...164.
  - [5] SPECKHART, H.: *VDI-Berichte Nr.113* (1969) S.75...80.
  - [6] SPELLER, F. N., McCORKLE ve P. F. MUMMA: *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* (1929) S.238.
  - [7] OCHS, H.: *Mitt. Mat. Prüf. Anst. Darmstadt* (1935).
  - [8] SERENSEN, S. W.: *Höhere Gestaltfestigkeit durch Oberflächenverfestigung*. VEB Verlag Technik (1954).
  - [9] TAUSCHER, H.: *Draht* (1959) S.511...516 ve 571...577.
  - [10] KLIER, E. P., B. B. MUVDI ve G. SACHS: *Wright Air Developm.* (1957).
  - [11] KUDRJAVZEV, I. V.: *Eigenspannungen als Festigkeitsreserven im Maschinenbau*. Moskau (1951).
  - [12] HEMPEL, M.: *Draht* (1955) S.119...129 ve 178...183.
  - [13] GUSTAFSON, I. R.: *Proc. Amer. Soc. Test. Mat.* (1947) S.782...802.
  - [14] KLIER, E. P., B. B. MUVDI ve G. SACHS: *Trans. Amer. Inst. Min. Metallurg. Engr.* (1957) S.106...112.
  - [15] TAUSCHER, H.: *Draht* (1960) S.442...448.
  - [16] WEISSGERBER, R., J. WELLER ve S. REMAHNE: *IfL-Mitt.* (1963) S.81...87.

---

\*Çentikli kesitlerde gerilme yığılmaları nedeniyle yorulma dayanımındaki düşüş hesaba katılarak yeterli emniyet sağlandığı ve hidrojen gevrekleşmesi etkisi çoğunlukla dış çentik etkisine eklenmediği için.

## 5. KONSTRÜKTİF ÇENTİKLERİN YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ

### 5.1. Çentik Duyarlılığı ve Yorulma Çentik Katsayısı

Yorulma zorlamaları altında biçim ve yüzey etkilerine karşı olan duyarlılık malzemedeki malzemeye farklıdır. Sözkonusu davranışın ölçütü olarak yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$  tanımlanır. Bu katsayı düzgün şekilli yüzeyi parlatılmış dolu bir çubuğun yorulma dayanımının, çentikli bir parçanın yorulma dayanımına oranıdır:

$$\beta_{\text{çen}} = \frac{\sigma_Y \text{ çentiksiz}}{\sigma_Y \text{ çentikli}}$$

Yorulma dayanımı  $\sigma_Y$  olarak yorulma üst gerilmesi  $\sigma_{\text{üst}}$  alınır.  $\sigma_{\text{ort}}=0$  ise  $\sigma_{\text{üst}}$  aynı zamanda değişken yorulma dayanımı olacağından bu özel durum için,

$$\beta_{\text{çen}} = \frac{\sigma_D \text{ çentiksiz}}{\sigma_D \text{ çentikli}}$$

yazılabilir.

Yorulma çentik katsayısının saptanmasında aynı malzemedeki çentiksiz ve çentikli (yuvarlak veya sivri çentikli, boyunlu, enine delikler içeren v.b.) deney parçaları kullanılır. Çentikli parçada bulunan kuvvet veya momentten yorulma dayanımına geçebilmek için mukavemet bilgisinin temel denklemlerinden yararlanılır ve böylece çentiksiz parçanın yorulma dayanımından daha düşük değerler elde edilir. Çentikli parçalarda yorulma dayanımı olarak bu şekilde saptanan gerilme değerine, anma gerilmesi veya hesaplanan gerilme adı verilir. Gerçekte çentik dibinde ve çevresinde bu anma gerilmesinden oldukça yüksek gerilme yığılmaları bulunmaktadır.

Karmaşık bir biçime sahip makina parçalarında çentikli çubuklarda olduğu gibi gerilme yığılmalarına neden olan biçim etkileri vardır. Bu nedenle bir makina parçasının anma gerilmesi olarak verilen yorulma dayanımı aynı zamanda konstrüktif yorulma dayanımı olarak da adlandırılır. Sözkonusu değer saf malzeme özelliği olmayıp, biçim ve işleme şartlarının çoğunlukla olumsuz yöndeki etkilerini de taşır.

Yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$  belirlenirken daha güvenilir sonuçlara ulaşmak için değerlendirilmede istatistik yöntemler kullanılmalıdır. Bundan sonraki çizelge ve diyagramlarda verilen  $\beta_{\text{çen}}$ 'ler, eğer aksi belirtilmemişse, değişken zorlamalar ( $\sigma_{\text{ort}}=0$ ) altında ve belirli sınır çevrim sayıları için saptanmıştır. Bu ön koşullar sadece çekme-basma değil, eğme ve burma zorlamaları için de geçerlidir. Yorulma çentik katsayısına çentik şekli, çentik boyutları, malzeme, sıcaklık, ortam, ortalama gerilmenin seviyesi, zorlama türü (çekme, eğme, burma), zorlama frekansı ve zorlama süresi gibi değişik faktörler etki ettiğinden ilgili çizelge ve diyagramların kullanımında dikkatli olunmalıdır.

Çentik biçiminin keskinliği çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$  ile ifade edilebilir (Bk.Şekil-114). Bu değer sadece elastik alanda ve statik zorlamalar (sabit yük veya sürekli artan yükler) için geçerlidir.

Yorulma çentik katsayısına değişik faktörlerin etkisine örnek olarak X 22CrMoV 12.1 ısıya dayanıklı alaşımlı çeliği için, oda sıcaklığı ve 550°C sıcaklıkta, eğme değişken, çekme-basma değişken ve burma değişken zorlamaları altında çevresel sivri çentikli ( $r=0,1$ ) deney parçalarında saptanan yorulma çentik katsayısı değerleri Çizelge-20'de verilmiştir [1].

Sıcaklığa bağlı olarak değişik ortalama gerilme ve çentik keskinliklerinin etkisi ise Çizelge-21'deki deney sonuçlarından görülmektedir [1].

Kesit büyüklüğü, biçimi ve çentik biçiminin aynı kalması halinde çekme için en büyük, burma için en küçük eğme için de bunların arasında yorulma çentik katsayıları elde edilmektedir. Zorlama türünün yarattığı bu farkların mutlak değerleri malzemeye bağlıdır; çünkü sözkonusu durum doğrudan doğruya az zorlanan bölgelerin çentik dibindeki çok zorlanan bölgeleri koruyucu etkisinden kaynaklanmaktadır. Koruyucu etki ise malzemenin çentik duyarlılığının azalması ile artar. Yumuşak çeliklerde koruyucu etki sert çeliklere göre daha belirgin olduğundan değişik zorlama türleri için çok farklı yorulma çentik katsayıları elde edilebilir. Çekme zorlamasında yüzey gerilmeleri ile kesitteki gerilmeler arasındaki fark, eğme zorlamasına göre çok azdır. Bu nedenle koruyucu etki altında kalan bölgeler de sınırlıdır. Dolayısıyla yorulma çentik katsayısı çekme zorlamasında eğmeye göre daha yüksek olur. Aynı zorlama türü için en yüksek yorulma çentik katsayısı ortalama gerilmenin sıfır olduğu durumda, yani değişken yorulma dayanımı için bulunur.

Çizelge-20: X22 CrMoV 12.1 çeliğinde, yorulma dayanımı  $\sigma_Y$  ve yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$ 'in zorlama türü ve sıcaklıkla değişimi

Düzgün şekilli deney parçalarının çapı 7 mm, çentikli deney parçalarının çekme için  $\alpha_{çen}$  çentik katsayısı  $\approx 5,5$  (çevresel sivri çentik  $r=0,1$  mm),  $\sigma_K=90$  kgf/mm<sup>2</sup>.

Zorlama türü (değişken)	Deney Sıcaklığı °C	Yorulma Dayanımı $\sigma_Y$ kgf/mm <sup>2</sup>		Yorulma çentik katsayısı, $\beta_{çen}$
		Düz çubuk	Çentikli çubuk	
Eğme	20 <sup>1)</sup>	± 49	± 21,0	2,3
	550 <sup>2)</sup>	± 27	± 13,0	2,1
Çekme-Basma	20 <sup>1)</sup>	± 45	± 13,5	3,3
	550 <sup>2)</sup>	± 25	± 9,5	2,6
Burma	20 <sup>1)</sup>	± 33	± 21,0	1,6
	550 <sup>2)</sup>	± 22	± 14,0	1,6

1) Sınır çevrim sayısı  $10 \cdot 10^6$

2) Sınır çevrim sayısı  $38 \cdot 10^6$

Kopma çevrim sayısının azalması (yani gerilme genliğinin artması ve zorlama süresinin azalması) ile  $\beta_{çen}$  küçülür. Bu nedenle yorulma çentik katsayısı süreli yorulma dayanımı bölgesinde daha düşük olup,  $10^6$  ile  $0,5 \cdot 10^6$  çevrim sayıları arasında belirgin bir azalma gösterir. 5000 çevrim sayısının altında sünek malzemelerde yorulma çentik katsayısı 1'in altında değerler alabilmektedir.  $\beta_{çen}$  artan ortalama gerilmeler ile de benzer şekilde değişir.

İşletme koşullarına benzetilerek yapılan çok kademeli deneylerde çentik etkisinin tek kademeli deneylerdeki kadar şiddetli olmadığı görülmüştür.

Statik çekme, eğme veya burmada, kolay pekleyen sünek malzemeler için çentik etkisiyle statik dayanım değerleri genellikle yükselir [23], gevrek malzemelerde ise azalır. Çentiksiz parçanın statik dayanımının çentikli parçanın statik dayanımına oranı düşük sıcaklıklarda artar. Çelik cinsine bağlı olarak yüksek sıcaklıklardaki sürünme deneylerinde çentikli parçalar için çentiksiz parçalarınkinden daha büyük dayanım değerleri elde edilebilir.

Çizelge-21: X 22 CrMoV 12.1 çeliğinde, yorulma dayanımı  $\sigma_Y$  ve yorulma çentik katsayısı  $\alpha_{çen}$ 'in sıcaklık, ortalama gerilme ve çentik keskinliği ile değişimi.

Zorlama	Deney Sıcaklığı °C	$\sigma_Y$ düz deney parçası (d=7 mm) kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_Y$ çentikli deney parçası <sup>3)</sup> r=0,1 kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_Y$ çentikli deney parçası <sup>4)</sup> r=1 kgf/mm <sup>2</sup>	r=0,1	$\alpha_{çen}$	r=1
Çekme-Basma Değişken Yorulma Dayanımı	20 <sup>1)</sup>	+45,0	+13,0	+23,0	3,3		2,0
	500 <sup>2)</sup>	+31,0	+9,0	+18,5	3,4		1,7
	550 <sup>2)</sup>	+25,0	+9,5	+16,0	2,6		1,6
Çekme Dalgalı Yorulma Dayanımı	20 <sup>1)</sup>	32,5±32,5	11,0±11,0	21,0±21,0	2,9		1,5
	500 <sup>2)</sup>	23,0±23,0	8,0±8,0	17,0±17,0	2,9		1,4
	550 <sup>2)</sup>	21,0±21,0	8,0±8,0	14,5±14,5	2,5		1,4

1) Sınır Çevrim Sayısı 10.10<sup>6</sup>

2) Sınır Çevrim Sayısı 38.10<sup>6</sup>

3) Çevresel sivri çentik,  $\alpha_{çen} \approx 5,5$ , çentikli kesitin çapı 8 mm.

4) Çevresel yuvarlak çentik,  $\alpha_{çen} \approx 2,2$ , çentikli kesitin çapı 8 mm.

Yüzey dayanımını artıran sementasyon, alevle yüzey sertleştirme, endüksiyonla yüzey sertleştirme, nitrürleme, soğuk haddelme ve bilya püskürtme gibi işlemler sonucu yorulma çentik katsayıları azalır.

Sıcaklık, ortalama gerilme, yükleme süresi ve gerilme genliğine bağlı olarak ve çelik türüne göre yüksek sıcaklıktaki yorulma çentik katsayısı oda sıcaklığı değerinden düşük veya yüksek olabilir.

Düşük sıcaklıklarda ise yorulma çentik katsayısı az veya çok artar.

Önemli bir husus Wöhler deneyleri ile elde edilen yorulma çentik katsayılarının tek kademeli yorulma deneyleriyle saptanmasıdır.

## 5.2.Faturalı Yuvarlak Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları

Şekil-104 ve 105 burma ve çevresel eğme için geçerli olan yorulma çentik katsayılarını içermektedir.  $\beta_{\text{çen}}$  değerleri, yuvarlatma yarıçapının faturalı kısmın çapına oranı ile değişmekte ve çentik keskinleştikçe artmaktadır. Ayrıca her iki şekilde de çeliğin çekme dayanımı parametre olarak alınmıştır. Artan çekme dayanımı ile yorulma çentik katsayısı da yükselmektedir. Şekil-104 D:d=1,4 oranı, Şekil-105 ise D:d=2,0 oranı için geçerlidir. Yorulma çentik katsayılarının daha küçük çap oranları için bilinmesi gerektiğinde Şekil-106'dan yararlanılabilir.

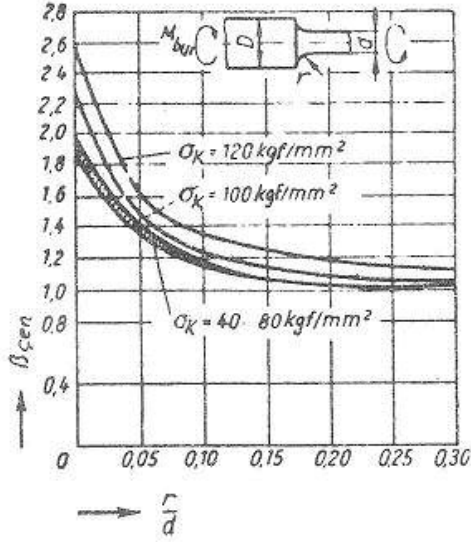
Bu şeklin 1 eğrisi burma, 2 eğrisi ise eğme zorlamaları için verilmiştir. D:d oranına bağlı olarak ordinatta

$$c = \frac{\beta_{\text{çen}}^{-1}}{\beta_{\text{çeno}}^{-1}}$$

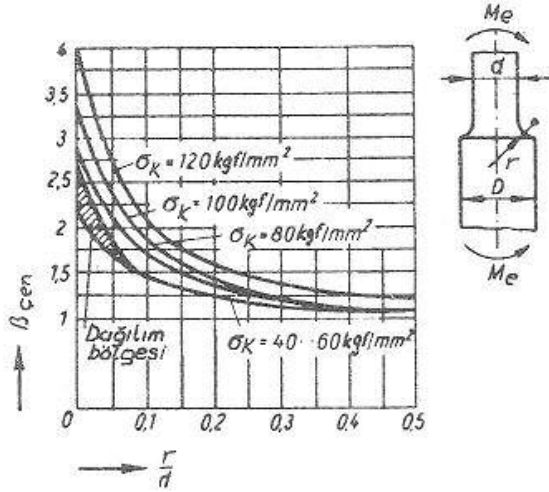
değeri okunabilir. Burada  $\beta_{\text{çen}}$  Şekil-104 ve 105'te verilenlerden daha küçük çap oranı için aranan yorulma çentik katsayısı,  $\beta_{\text{çeno}}$  ise Şekil-104 ve 105'ten r:d oranı için okunan yorulma çentik katsayısıdır. Bağıntının aranan  $\beta_{\text{çen}}$  değeri için düzenlenmesi ile

$$\beta_{\text{çen}} = c (\beta_{\text{çeno}} - 1) + 1$$

elde edilir.



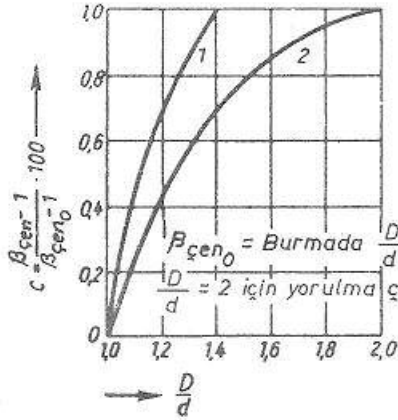
Şekil-104: Faturalı yuvarlak çubukların burma değişken zorlamaları için  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları.  $D/d=1,4$ ,  $d=12$  mm.



Şekil-105: Faturalı yuvarlak çubukların eğme değişken yorulma zorlamaları için  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları.  $D/d=2$ ,  $d=30$  mm, çevresel eğme.

Mil üzerinde faturanın hemen yanında preslenmiş bir rulmanlı yatak bulunması halinde yorulma kırılması tehlikesi artar. Faturalı kısmın doğurduğu çentik etkisine pres geçme rulmanlı yatağın etkisinin de eklenmesiyle yorulma dayanımında yaklaşık %50 bir düşme görülebilir.

Uygun biçimlendirme ve yüzey işlemleri ile parçanın konstrüktif yorulma dayanımı önemli oranda iyileşebilir. Yüzey sertleştirme veya soğuk haddelme ve bilya püskürtme yoluyla yüzeyin pekleştirilmesi, yorulma dayanımında %150'ye varan artışlar sağlayabilir. Geçiş bölgesinde veya rulmanın oturduğu kısımda yapılacak oyuklar yardımıyla yorulma dayanımı %15 yükseltilebilir. Rulmanın oturma yüzeyinin soğuk şekillendirilmesi ile konstrüktif yorulma dayanımında %55'e kadar varabilen yükselmeler görülmektedir. Yüzey dayanımını artıran bu yöntemlerle elde edilen olumlu değişimler, aynı zamanda oluşturulan basma iç gerilmelerinin sonucudur. Basma iç gerilmeleri işletme yüklerinden gelen ve yorulma zorlamasında tehlikeli olan çekme gerilmelerine karşı yönde etki ederler.



Şekil-106:  $D/d$  çap oranının etkisi

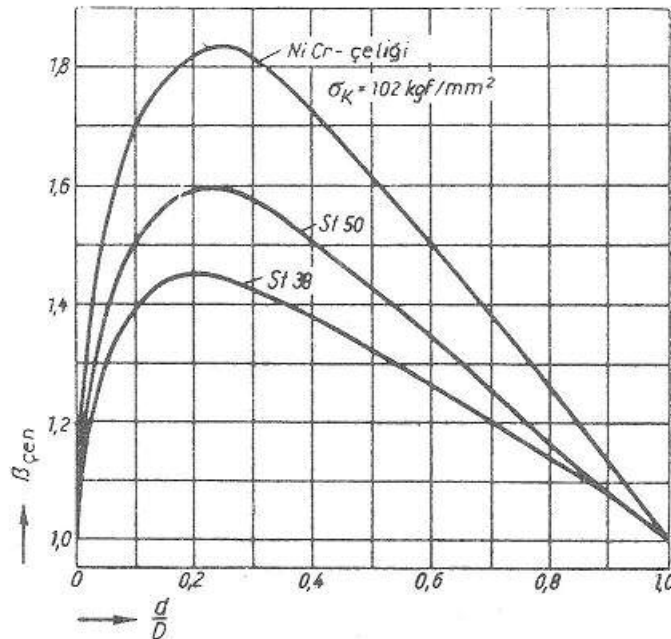
Eğri 1: Burma (Şekil-104,  $D/d < 1,4$  için)

Eğri 2: Eğme (Şekil-105,  $D/d < 2$  için)

### 5.3. Enine Delikli Yuvarlak Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları

Şekil-107'de Hempel tarafından enine delikli yuvarlak çubuklar üzerinde yapılan deneylerle elde edilen yorulma çentik katsayıları verilmiştir [2]. Çevresel eğme deneyine tabi tutulan çubuk malzemeleri, tavlanmış St 38 ve St 50 çelikleri ile ıslah edilmiş  $102 \text{ kgf/mm}^2$  çekme dayanımlı Ni-Cr çeliğidir. Diğer yapı çelikleri için de çekme dayanımının bilinmesi durumunda yorulma çentik katsayıları enterpolasyonla bulunabilir.

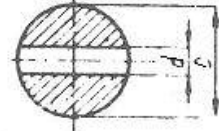
Eğme değişken zorlaması (çevresel eğme) için  $\beta_{\text{çen}}$  değerleri delik çapı  $d$ 'nin, mil çapı  $D$ 'ye oranına bağlı olarak Çizelge-22'de verilmiştir. Çizelge-23'de ise enine delikli millerin çekme-basma zorlamaları altındaki yorulma çentik katsayıları bulunmaktadır.



Şekil-107: Enine delikli yuvarlak çubukların eğme değişken zorlamaları (çevresel eğme) için  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları.



Çizelge-22:Enine delikli yuvarlak çubuklarda eğme  
değişken zorlamaları altında elde edilen  
 $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları



Malzeme	$\beta_{\text{çen}}$ yorulma çentik katsayısı		
	d:D	0,146	0,213
St 38 normalize edilmiş	1,4	1,4	1,3
St 50 normalize edilmiş	1,6	1,6	1,4
St 60 normalize edilmiş	-	1,6	-
St 70 normalize edilmiş	1,5	1,6	1,3
15 Cr3 semente edilmiş	1,5	-	-
16 CrMo4 semente edilmiş	1,4	-	-
13 NiCr4 semente edilmiş	1,4	-	-
25 CrMo 4 ıslah edilmiş	1,7...1,8	-	-
34 CrMo 4 ıslah edilmiş	1,5...1,7	-	-
42 CrMo 4 ıslah edilmiş	1,8	-	-
K 37 NiCr 13 normalize edilmiş	1,6	1,6	1,5
Yay çeliği, ıslah edilmiş	1,8	1,8	1,8
Lamel grafitli dökme demir	1,1	-	-

Şekil-108 çekme-basma, eğme ve burma zorlamaları için, çekme dayanımına bağlı olarak enine delikli yuvarlak çubuklarda yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$  değerlerinin ortalamalarını göstermektedir. Bu değerler 30 mm çapındaki çubuklarda ve  $d:D=0,15..0,25$  arasındaki oranlar için saptanmıştır. Şekil-109'da ise yorulma çentik katsayıları burma değişken zorlaması için verilmiştir.

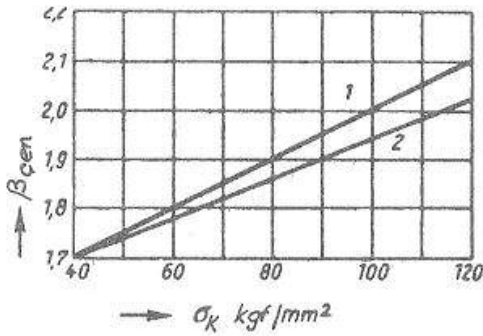
Çizelge-23: Enine delikli yuvarlak çubuklarda çekme-basma  
zorlamaları altında  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları

Malzeme	$\beta_{\text{çen}}$ yorulma çentik katsayısı			
	d:D	0,217	0,435	0,13
St 38 normalize edilmiş	1,8	1,5	-	-
St 50 normalize edilmiş	1,9	1,9	-	-
St 60 normalize edilmiş	1,9	1,8	-	-
St 70 normalize edilmiş	1,9	2,1	-	-
K 37 NiCr 13 ıslah edilmiş	1,9	1,7	-	-
Islah edilmiş yay çeliği	2,2	2,1	-	-
Lamel grafitli dökme demir (işlenmiş)	-	-	1,0	1,2

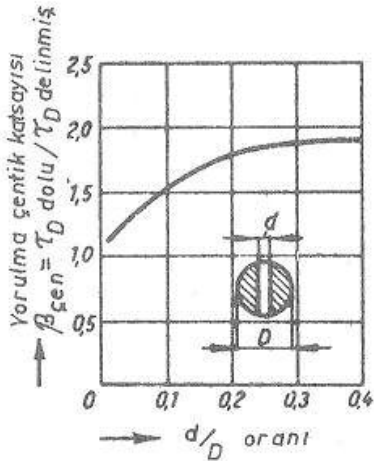
Bütün bu durumlarda delikli çubukların  $\sigma_{an}$  ve  $\tau_{an}$  anma gerilmeleri, delik dolayısıyla küçülmüş kesit alanı için hesaplanmıştır. Burma zorlamasında delikli çubuğun anma gerilmesi  $d < 0,5 D$  değerleri için aşağıdaki bağıntı kullanılarak iyi bir yaklaşımla hesaplanabilir:

$$\tau_{\text{an}}^{\text{delinmiş}} = \frac{\tau^*}{1-0,9d/D} \quad \tau^*: \text{Kesit dolu varsayılarak hesaplanan gerilme}$$

İçi boş kalın cidarlı millerde dolu millerin yorulma çentik katsayıları kullanılabilir; ince cidarlı millerde ise dolu milden daha yüksek değerlerin alınması gerekmektedir. İçi boş millerin diğer çentik biçimleri için de çentik katsayıları, benzer şekilde seçilebilir.



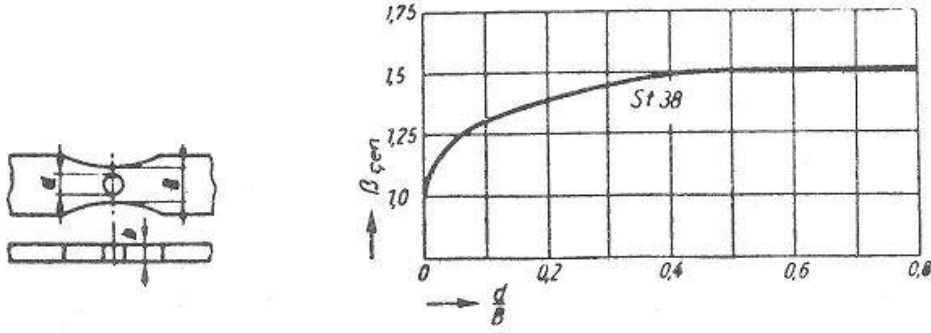
Şekil-108: Enine delikli yuvarlak çubukların çekme, basma, burma ve çevresel eğme zorlamaları için  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları,  $D=30$  mm ve  $d/D=0,15...0,25$  olan deney parçalarında saptanmıştır.  
Doğru 1: Çekme-basma ve eğme  
Doğru 2: Burma



Şekil-109: Enine delikli yuvarlak çubukların burma zorlamaları için  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayısının  $d/D$  oranına bağlı olarak değişimi.  $\sigma_K=100$  kgf/mm<sup>2</sup> dayanımında, 8 mm çapında, CrV- ve Mn- ıslah çeliklerinde saptanmıştır.

#### 5.4. Delikli Yassı Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları

Delikli yassı çubuklar için çok az sayıda deney sonucu mevcuttur. Şekil-110'da St 38 çeliğinden üretilmiş delikli yassı çubuklarda çekme-basma zorlamalarına ilişkin yorulma çentik katsayıları verilmiştir. Daha yüksek dayanımlı çelikler için daha büyük çentik katsayıları beklenmelidir. Tek tek yapılan bazı deney sonuçları yardımıyla yürütülen tahminlere göre, yüksek dayanımlı yapı çeliklerinde  $d:B > 0,4$  değerleri için  $\beta_{\text{çen}} = 1,5..2,5$  arasında değişmektedir.



Şekil-110: Delikli yassı çubuklarda çekme-basma zorlamaları için geçerli  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları.

Çizelge-24: Lamel grafitli dökme demirden delikli yassı çubuklarda ileri geri eğme zorlamaları altında  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları

Malzeme	$\frac{d}{B}$ oranı		Deney Parçasının Durumu İ:İşlenmiş D:Döküm kabuklu	Deney Parçası Kalınlığı b, mm
	0,256	0,246		
GGL-15		1,75	D	13
	2,0		İ	10
GGL-20		1,3	D	13
	1,6		İ	10
GGL-25		1,5	D	13
	1,75		İ	10

Çizelge-24'te lamel grafitli dökme demirin ileri-geri eğme zorlamaları için bulunan yorulma çentik katsayıları belirtilmiştir. Lamel grafitli dökme demirin grafit lamellerinin iç çentik etkisinin varlığından dolayı çentik duyarlılığının az olması gerekirken, delikli yassı çubuklarda çentik katsayıları şaşırtıcı derecede yüksek çıkmaktadır.

Delikli yassı çubukların,ileri-geri eğme zorlamasında çelikler için saptanmış yorulma çentik katsayıları bilinmemektedir.110 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımlı, ıslah edilmiş 40 NiCrMo 4 çeliğinde d/B=0,34 oranı için yorulma çentik katsayısı olarak sadece 1,1 değeri saptanmıştır. Bu sonuç ileri-geri eğmede yorulma çentik katsayılarının çekme zorlamasına göre çok düşük olduğunu göstermektedir.

#### 5.5. Çevresel Çentikli Yuvarlak Çubukların Yorulma Çentik Katsayıları

Çevresel çentikli yuvarlak çubuklar için çok sayıda

deney sonucu mevcuttur. Bu çentik türü için çevresel eğme zorlamaları altındaki yorulma çentik katsayıları, çentik derinliğinin deney parçası çapına olan oranına bağlı olarak Çizelge-25'te verilmiştir. Deneyler değişik çelikler üzerinde yapılmıştır. Artan çentik keskinliği ile birlikte yorulma çentik katsayılarının da doğal olarak arttığı görülmüştür. Çizelge-25'te bulunmayan çelikler için, çekme dayanımının bilinmesi halinde, yorulma çentik katsayıları enterpolasyonla bulunabilir.

Çeliklerde çevresel yarım daire çentikleri için, çevresel eğme zorlamaları altında geçerli olan yorulma çentik katsayıları Şekil-11'de verilmiştir.  $\beta_{çen}$  değerleri yuvarlatma yarıçapı  $r$ 'nin çubuk yarıçapı  $D$ 'ye oranına bağlı olarak değişmektedir.

Artan çekme dayanımı ile yorulma çentik katsayıları da artmaktadır. Çekme dayanımları  $\beta_{çen}$  değerleri bilinen çeliklerin çekme dayanım değerleri arasında kalan çelikler için, yorulma çentik katsayıları enterpolasyonla bulunabilir.

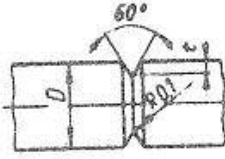
Çevresel sivri çentikli yuvarlak çubukların çekme-basma zorlamaları için Çizelge-26'da  $t:D$  oranına bağlı olarak yorulma çentik katsayıları belirtilmiştir. Çentik şekli Çizelge-25'te sonuçları verilen deneylerde kullanılanların aynıdır.

Pomp ve Hempel [3] çekme-basma değişken zorlamaları için, çekme dayanımı yardımıyla yorulma çentik katsayısının hesaplanmasını sağlayan formüller geliştirmişlerdir. Süreli yorulma bölgesinde çevrim sayısına bağlı olarak değişen bu bağıntılar Çizelge-27'de gösterilmiştir. Yorulma çentik katsayıları süreli yorulma dayanımı bölgesinde küçülür ve 5000 çevrim sayısının altında 1 değerinin altına dahi düşebilirler. Bütün bu denklemlerde kullanılan, sabit çentik biçiminde artan çekme dayanımı ile  $\beta_{çen}$  değerinin arttığı kabulü, her zaman doğru değildir. Malzeme, ısıl işlem, çentik biçimi, mikroyapı (örneğin beynitik yapı) gibi değişik koşullara bağlı olarak, bazı durumlarda artan çekme dayanımı ile  $\beta_{çen}$  değeri azalabilir.

Sıcaklığın düşmesi ile yorulma çentik katsayısı önce hafif, çok düşük sıcaklıklarda ise hızlı bir artış gösterir.

Çizelge-28'de normal ve düşük sıcaklıklar için yorulma çentik katsayıları verilmiştir.  $-78^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta çok az veya hiç artma görülmezken,  $-188^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta yorulma çentik katsayılarında önemli artışlar vardır.

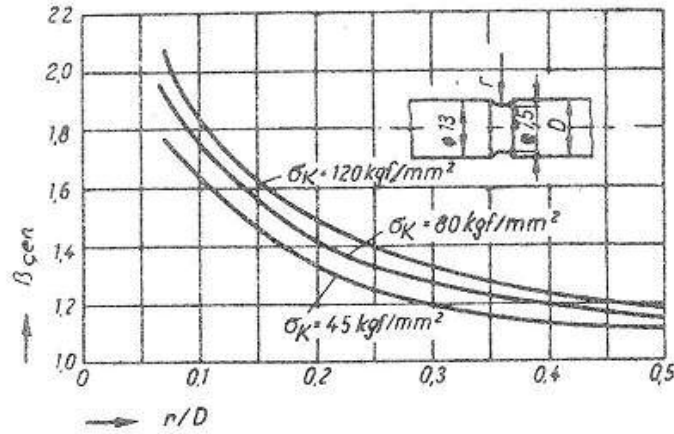
Çizelge-25: Çevresel sivri çentikli yuvarlak çubuklar için eğme değişken zorlamaları (çevresel eğme) altında bulunan  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları



Malzeme

Yorulma Çentik Katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$ 'in geçerli olduğu t:D oranı

	0,05	0,065	0,10	0,146
St 38 normalize edilmiş	-	-	1,5	-
St 50 normalize edilmiş	-	1,8	1,7	1,6
St 60 normalize edilmiş	-	-	1,6	-
St 70 normalize edilmiş	-	1,7	1,7	1,6
22 CrMo 4 semente edilmiş	-	-	1,7	-
13 NiCr 14 semente edilmiş	-	-	2,0	-
25 CrMo 4 ıslah edilmiş	-	-	1,7...2,0	-
34 CrMo 4 ıslah edilmiş	-	-	1,9...2,0	-
42 CrMo 4 ıslah edilmiş	-	-	2,0	-
K 37 NiCr 13 ıslah edilmiş	-	-	2,3	-
Islah edilmiş yay çeliği	-	-	2,3	-
Lamel grafitli dökme demir (bütün yüzeyleri işlenmiş)	1,0...1,1	-	-	-

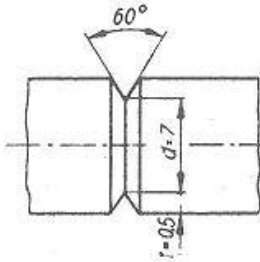


Şekil-111: Çevresel yarım daire çentikler için, çevresel eğme zorlamaları altındaki  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları.

Çizelge-26: Çevresel sivri çentikli yuvarlak çubuklar için çekme-basma zorlamaları altında bulunan  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları

Malzeme	Yorulma çentik katsayısı $\beta_{çen}$ 'in geçerli olduğu t: D oranı		
	0,053	0,065	0,152
St 38 normalize edilmiş	-	1,5	1,5
St 50 normalize edilmiş	-	1,8	1,7
St 60 normalize edilmiş	-	1,9	1,8
St 70 normalize edilmiş	-	1,9	1,8
25 CrMo 4, ıslah edilmiş	-	2,7	2,7
Islah edilmiş yay çeliği	-	2,4	2,3
Lamel grafitli dökme demir (bütün yüzeyleri işlenmiş)	1,0...1,3	-	-

Çizelge-27: Alaşımsız ve Cr,Ni,Mo,V ile az alaşımlandırılmış %0,2...0,6 C 'lu çelikler için, çekme-basma değişken zorlamaları altında ve sivri çentikli çubuklarda  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayısının  $\sigma_K$  çekme dayanımı ile değişimi. Çentik dişi yuvarlatma yarıçapı  $r=0,1$  mm, sıcaklık +20°C .



N	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$
$\beta_{çen}$	$\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_K}{100}\right)^2} \pm 20\%$	$\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_K}{70}\right)^2} \pm 20\%$	$\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_K}{47,5}\right)^2} \pm 20\%$	$\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_K}{37,5}\right)^2} \pm 20\%$

Yüzey sertleştirme ile, sadece yorulma dayanımlarının iyileşmesi değil, aynı zamanda çentik duyarlılığının da azalması sağlanır. Dolayısıyla yüzeyleri sertleştirilmiş çentikli parçaların yorulma çentik katsayıları, yüzeyleri sertleştirilmemiş olanlarınkinden daha düşüktür. Çizelge-29'da gaz ortamında nitrürasyonun eğme yorulma dayanımı ve yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$ 'e olan etkisi görülmektedir [4] ; Çizelge-30 ise tuz banyosunda nitrürasyon işlemi uygulanan parçalar için aynı sonuçları içermektedir [5]. Nitrürasyon işlemi sonrasında deneye tabi tutulan çeliklerde, eğme değişken yorulma dayanımı mutlak olarak artmakta çentik etkisi ise azalmaktadır. Burma zorlamaları altında da durum benzer olmakla birlikte, çekme-basma zorlamaları ve çentiksiz parçalar için yorulma dayanımında daha az bir artış görülür. Nitrürasyon işlemi ile yorulma çentik katsayısının düşmesi, kullanılan malzeme, nitrürasyon tabakasının kalınlığı ve çekirdek sertliğine bağlı olarak değişebilir.

Çizelge-28: Çevresel sivri çentikli yuvarlak çubuklarda çekme-basma zorlamaları ve değişik sıcaklıklar için  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları

Malzeme	t:D=0,063 oranı için $\beta_{\text{çen}}$ yorulma çentik katsayısı			
	St 38	St 50	St 70	25 CrMo 4
Sıcaklıklar, °C				
+ 20	1,5	1,8	1,8	2,7
- 78	1,9	1,9	1,95	2,7
-188	3,4	3,2	3,1	3,2

Çizelge-29: Gaz ortamında nitrürasyon işlemi görmüş çevresel yuvarlak çentikli yuvarlak kesitli çubukların eğme değişken zorlamaları (çevresel eğme) altındaki  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayıları.  
 $\frac{t}{D}$  oranı=0,08; çentik yarıçapı r=0,5 mm; D=6,5 mm.

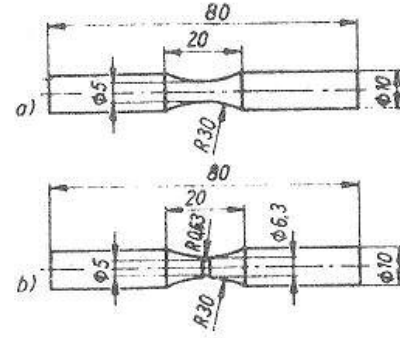
Malzeme	$\sigma_K$ (Çekirdek) kgf/mm <sup>2</sup>	Nitrürasyon Sıcaklık °C	Süre saat	Çentiksiz deney parçalarında eğme değişken yorulma dayanımı		$\beta_{\text{çen}}$	
				A	B	A	B
				CrMoAl- Nitrürasyon Çeliği	90	520	45
CrV-Nitr. Çeliği	102	520	45	48	64	1,3	1,3
CrMoV-Nitr. Çeliği	120	520	45	57	73	2,2	1,2
C-İslah çeliği	85	480	45	44	68	1,8	1,5
CrMo-İslah çeliği	110	500	45	56	84	2,1	1,6

A-Nitrürlenmemiş

B-Nitrürlenmiş

Yüzeyi endüksiyonla sertleştirilmiş 42 CrMo 4 ıslah çeliğinden [6] üretilen çentiksiz ve çentikli deney parçaları üzerinde yapılan yorulma deneylerinin sonuçları ve bunların yardımıyla saptanan yorulma çentik katsayıları Şekil-112'de görülmektedir. Gerek sertleştirilmiş tabakanın kalınlığı, gerekse başlangıç çekme dayanımı, yorulma çentik katsayısını etkilemektedir. Bütün yüzey sertleştirme işlemlerinde yorulma dayanım değerlerinin yükselişi, yüzey tabakalarının dayanımlarının artması, basma iç gerilmelerinin oluşması ve dislokasyonların hareketlerinin engellenmesi ile açıklanır. Yorulma dayanımındaki artışlara yukarıda sıralanan bu üç nedenden hangisinin hangi

Çizelge-30: Tuz banyosunda nitrürlenmiş çeliklerin eğme değişken zorlamaları altında (çevresel eğme)  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları. Nitrürasyon süresi 90 dakika.

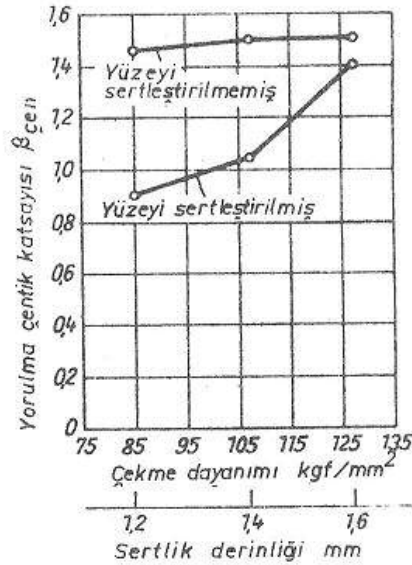
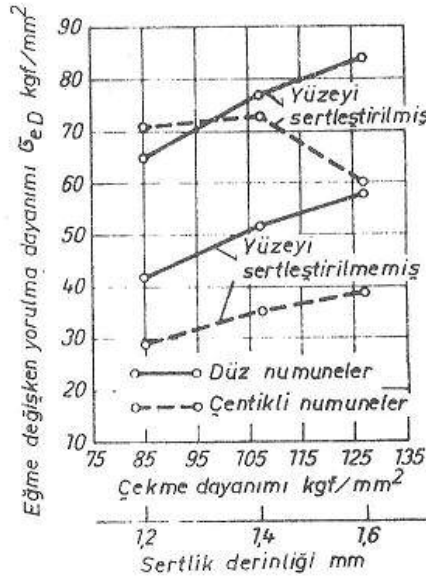


Çelik Cinsi	Çekirdek çekme dayanımı $\sigma_{kD}$ $\text{kgf/mm}^2$	Nitrürasyon sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$	Eğme değişken yorulma dayanımı $\text{kgf/mm}^2$				Yorulma çentik katsayısı $\beta_{çen}$	
			A		B		A	B
			a	b	a	b		
C 45	69 <sup>1)</sup>	570	36	14	51	24	2,6	2,1
C 45	84 <sup>2)</sup>	570	45	24	53	34	1,9	1,6
16 MnCr 5	57 <sup>1)</sup>	570	31	14	42	23	2,2	1,8
16 MnCr 5	82 <sup>2)</sup>	570	41	19	52	29	2,2	1,8
20 MoCr 5	57 <sup>1)</sup>	570	32	17	43	25	1,9	1,7
20 MoCr 5	108 <sup>2)</sup>	570	52	28	62	36	1,9	1,7
42 MnV 7	65 <sup>1)</sup>	570	35	17	51	30	2,0	1,7
42 MnV 7	102 <sup>2)</sup>	570	49	23	55	35	2,1	1,6

1) normalize edilmiş  
2) ıslah edilmiş

A) Nitrürlenmemiş  
B) Nitrürlenmiş

a) Çentiksiz  
b) Çentikli



Şekil-112: Yüzeyi endüksiyonla sertleştirilmiş 42 CrMo 4 ıslah çeliğinin eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}$  ve yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$ 'in başlangıç dayanımı  $\sigma_k$  ve sertlik tabakası kalınlığı ile değişimi. Düz deney parçası çapı 7,5 mm. Çevresel yarım daire çentik ( $\alpha_{çen}=1,8$ ), çentik dibindeki çap 7,5 mm, çevresel eğme.



oranda etkili olduğu, kullanılan kimyasal-ısı ve ısı yüzey sertleştirme yöntemine bağlı olarak değişir.

Bütün bunların yanında yorulma çentik katsayısının değerini, çentiğin işleme yöntemi de etkiler [7]. Ostenitik CrNi-çeliğinden (%14 Cr, %13 Ni) çevresel sivri çentikli ve çentiksiz parçalar kullanarak çevresel eğme yorulması deneyleri yapılmıştır. Çentiksiz deney parçalarında çap olarak 6,5 mm, çentikli deney parçalarında da çentik dibi çapı olarak yine 6,5 mm boyutları seçilmiştir. Tornalanarak açılan sivri çevresel çentikte  $\beta_{çen}=1,9$ , çentiğin taşlanması halinde ise  $\beta_{çen}=2,5$  değeri elde edilmiştir. Taşlanmış sivri çentiğin sonradan haddelenmesi ile yorulma çentik katsayısının değeri 1,3'e düşmüştür.

Sivri çevresel çentikli yuvarlak deney parçalarının burma değişken zorlamasına ait çentik katsayıları ile ilgili sadece birkaç deney sonucu bulunmaktadır. Çizelge-31'de, Çizelge-25'te verilenlerle aynı biçimde olan çentikler ve St 50 ile St 70 çelikleri için bulunan  $\beta_{çen}$  değerleri görülmektedir. Söz konusu yorulma çentik katsayıları çekme-basma veya eğme zorlamalarındaki gibi göre önemli ölçüde küçüktür.

Çizelge-31: Çevresel sivri çentikli yuvarlak çubuklarda burma değişken zorlamaları altında  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları

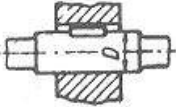
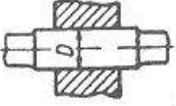
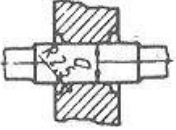
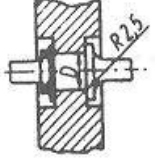
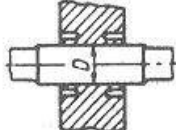
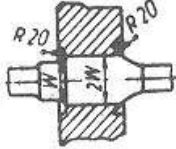
Malzeme	Yorulma çentik katsayısı $\beta_{çen}$ 'in geçerli olduğu t:D oranı				
	0,021	0,032	0,055	0,09	0,14
St 50 normalize edilmiş	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3
St 70 normalize edilmiş	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Dikkati çeken bir diğer husus da, çevresel sivri çentikli yuvarlak çubuklarda, 120°'ye kadar olan çentik tepe açılarının yorulma çentik katsayısı üzerinde çok az etkisinin bulunmasıdır. Çentik dibi yuvarlatma yarıçapının küçük olması, çekme-basma zorlamalarında, eğme zorlamalarından çok daha tehlikelidir.

#### 5.6. Göbek Geçmeli Millerin Yorulma Çentik Katsayıları

Değişik göbek geçmelerinde yorulma çentik katsayılarını Çizelge-32 toplu olarak vermektedir [8]. Bu çizelgeden görüldüğü gibi uygun bir biçimlendirme seçilerek malzemenin daha iyi kullanımını sağlanabilir.

Çizelge-32: Göbek geçmeli St 50 çeliğinden millerin eğme değişken zorlamaları (çevresel eğme) altındaki  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları ;  $\beta_{çen}$ 'in hesaplanmasında yararlanılan  $d=30$  mm çapındaki çentiksiz deney parçasının eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}=23$  kgf/mm<sup>2</sup>'dir.

Göbek geçme biçimi		$\beta_{çen}$	Açıklamalar
1		D=40 mm	2,0 Göbek sıkı geçirilmiştir. Mil üzerinde kama bulunmaktadır.
2		D=40 mm	2,0 Göbek % 2 çap farkı ile ısıtarak geçirilmiştir.
3		D=40 mm	1,7 Göbek sertleştirilmiş rulman çeliğindedir ve % 2 çap farkı ile ısıtarak geçirilmiştir.
4		D=40 mm	Göbek sertleştirilmiş rulman çeliğindedir ve kaymalı olarak geçirilmiştir.
5		D=40 mm	2,2 Göbek geçme için 1,5 Diş dibi için 1,6 Göbek % 2 çap farkı ile ısıtarak geçirilmiştir.
6			1,0 Göbek % 2 çap farkı ile ısıtarak geçirilmiştir. Geçme kısmının atalet momenti (2 W), 40 mm çapındaki milin atalet momentinin (W) iki katıdır.

$\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları burma zorlamalarında 1...5 göbek geçme biçimleri için eğme zorlamasındaki değerlerin yaklaşık %60 ...70'idir.

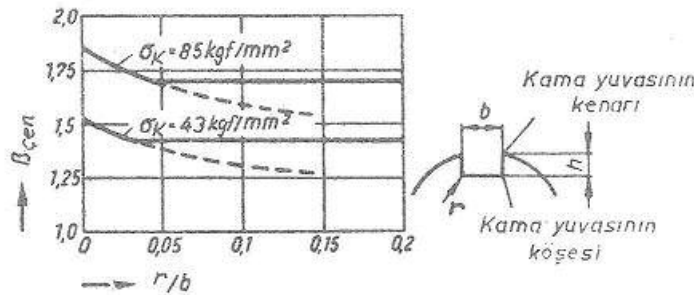
1..5 numaralı göbek geçmeleri için burma zorlaması altındaki yorulma çentik katsayıları eğme için verilen değerlerin yaklaşık % 60,.70'idir. Çizelge-32'de belirtilen değerlerin saptanmasında mil malzemesi olarak St 50 kullanılmıştır.Diğer çelikler için de yorulma çentik katsayısının bilinmesi gerekirse, 2 numaralı göbek geçmesi ile ilgili olarak Çizelge-33'ten yararlanılabilir. Değişik göbek geçmeleri ve mil malzemeleri için, St 50 çeliğinde geçerli yorulma çentik katsayıları yardımıyla  $\beta_{çen}$  değerlerinin bulunması son bölümdeki 2.sayısal örnekte ele alınmıştır.

Çizelge-33: 2 numaralı geçme biçimi için  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayısının kullanılan çeliğin  $\sigma_K$  çekme dayanımına bağlı olarak değişimi.

$\sigma_K$	kgf/mm <sup>2</sup>	40	50	60	70	85	100
$\beta_{çen}$		1,8	2,0	2,5	2,35	2,7	2,8

#### 5.7. Kamalı ve Kama Yuvalı Miller İçin Yorulma Çentik Katsayıları

Disk freze bıçağı ile boydan boya kama yuvası açılmış millerin burma değişken zorlamaları altındaki yorulma çentik katsayıları Şekil-113'te görülmektedir. Deneyler 40 mm çapındaki millerde, kama yuvası köşeleri değişik yarıçaplarla yuvarlatılarak ve kamalar takılarak yapılmış [9], mil malzemesi olarak 43 kgf/mm<sup>2</sup> ve 85 kgf/mm<sup>2</sup> çekme dayanımında alaşımsız çelikler kullanılmıştır.



Şekil-113: Boydan boya kama yuvası açılmış millerin burma değişken zorlamaları altındaki  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları, mil çapı  $D=40$  mm.

Burma anma gerilmeleri ( $\tau_{an}$ ) kama yuvası nedeniyle zayıflamış kesitler için hesaplanmıştır. Yani çap olarak mil çapından kama yuvası derinliği  $h$ 'nin iki katının çıkarılması ile bulunan değer alınmıştır. Burma değişken

zorlamaları altında ve kamaların takılı olması durumunda yorulma çatlağının başlaması için iki olasılık vardır:

1. Teğetsel gerilme yığılmaları nedeniyle, çatlak kama yuvasının köşelerinde başlar.
2. Normal gerilme yığılmaları nedeniyle, çatlak kama yuvası kenarlarında oluşur.

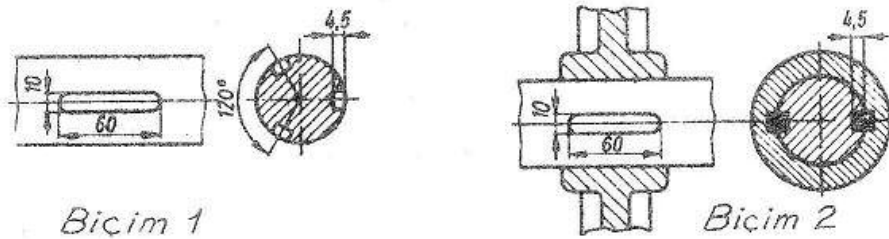
Kama yuvası köşelerinin çok keskin olması durumunda Şekil-113'te verilen deney sonuçlarına göre çatlak başlangıcı bu bölgelerde olur.  $r:b = 0,03$  değerinden itibaren yani artan yuvarlatma çapı ile birlikte, yorulma çatlağı başlangıçları kama yuvası köşelerinden normal gerilme yığılmalarının bulunduğu yuva kenarlarına kayar ve  $\beta_{çen}$  katsayısını veren eğriler apsise paralel olurlar. Böylece  $r:b$  oranının belirli bir değerinden sonra, yorulma hasarı bakımından yuva kenarlarındaki gerilme yığılmaları daha kritik olduğundan,  $r$ 'nin büyütülmesi bir yarar sağlamaz.

Kama takılı değilse kenarlarda normal gerilme yığılmaları sözkonusu olmadığından,  $r:b$  oranının büyük değerleri için dahi kama yuvası köşelerindeki gerilme yığılmaları önem taşır. Bu durumda  $\beta_{çen}$  değeri için Şekil-113'te kesikli olarak gösterilen eğriler geçerlidir.

Çizelge-34'te, üzerinde 2 veya 3 paralel kama yuvası bulunan miller için eğme değişken zorlaması altındaki yorulma çentik katsayıları verilmiştir. Anma gerilmeleri dolu kesit için hesaplanmış, yani yuvalar nedeniyle kesitin zayıflaması gözönüne alınmamıştır.

Çizelge-34: Paralel kama yuvaları bulunan millerin eğme değişken zorlamaları (çevresel eğme) altındaki  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları.

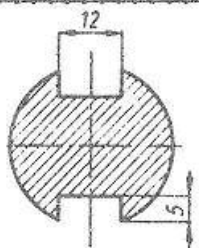
Mil çapı  $D=30$  mm




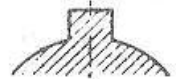

$\sigma_K$ $\text{kgf/mm}^2$	37	43	59	82
$\sigma_A$ $\text{kgf/mm}^2$	25	21	36	75
$\beta_{çen}$ (Biçim 1)	1,9	1,75	1,85	2,5
$\beta_{çen}$ (Biçim 2- çakılmış göbekte)	2,45	2,4	3,2	4,35

Çizelge-35'te üzerinde disk freze bıçağı ile açılmış 2 kama yuvası bulunan miller için değişken burma zorlamaları altında geçerli olan yorulma çentik katsayıları görülmektedir. Çizelge-36'da ise değişken burma zorlamaları altındaki kamalı miller için yorulma çentik katsayıları belirtilmiştir. Bu çizelgelerin kullanımında da anma gerilmesi  $\tau_{an}$ 'ın dolu kesit için hesaplandığı unutulmamalıdır.

Çizelge-35: Boydan boya kama yuvası bulunan millerin burma değişken zorlamaları altındaki  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları, Mil çapı D=30 mm.

$\sigma_K$ kgf/mm <sup>2</sup>	43	56	65	88	
$\sigma_A$ kgf/mm <sup>2</sup>	21	31	50	55	
$\beta_{çen}$	1,55	1,75	1,85	2,25	

Çizelge-36: Burma değişken zorlamaları altında kamalı millerin  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları

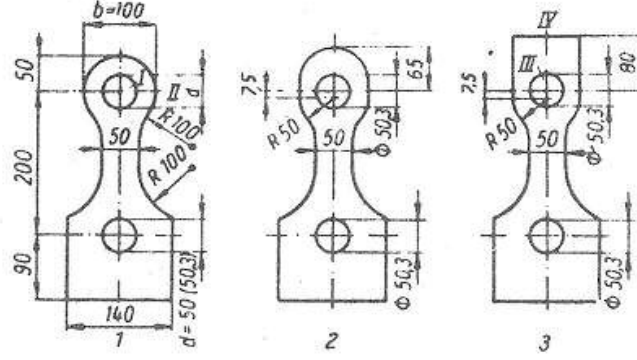
Biçim			
$\beta_{çen}$	2,25...2,7	2	1,25...1,5

#### 5.8. Ucu Delikli Çubuklar İçin Yorulma Çentik Katsayıları

Çizelge-37'de St 60 çeliğinden üretilmiş ucu delikli çubuklar üzerinde yapılan çekme dalgali yorulma deneylerinin sonuçları görülmektedir [10]. Sınır çevrim sayısı olarak  $N=2 \cdot 10^6$  alınmıştır. Çizelgede verilen çekme dalgali yorulma dayanımları I-II ana kesiti için hesaplanmıştır. Kullanılan St 60 çeliğinin çekme dayanımı  $\sigma_K=69,5$  kgf/mm<sup>2</sup>, akma sınırı  $\sigma_A=41$  kgf/mm<sup>2</sup> ve kopma uzaması  $\delta_{10}=17$  dir. Deneylerde ele alınan ucu delikli çubukların tüm yüzeyleri işlenmiştir. Aynı malzemeden üretilen pimler 1 numaralı kafa biçimi için, bir deney serisinde %0,6'lık bir boşlukla, ikinci deney serisinde ise boşluksuz olarak yerleştirilmiştir. Boşluk nedeniyle yorulma çentik katsayısı 2,4'ten 2,7'ye çıkmakta, yani %12,5 artmaktadır. 2 ve 3 numaralı kafa biçimleri için deneyler sadece boşluklu pim ile yapılmıştır.

Çizelge-37: St 60 çeliğinden ucu delikli çubukların  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayıları,  $N=2.10^6$ ; bütün deneylerde  $\sigma_{alt}=2 \text{ kgf/mm}^2$  alınmıştır.

I-II:Ana kesit  
III-IV:Tepe kesit



Kafa biçimi	$\frac{b}{d}$	Pim geçmesi	Çekme dalgalı Yorulma dayanımı $\sigma_{çdal}$ , $\text{kgf/mm}^2$	$\beta_{çen}$
1	2	Boşluksuz	13,4	2,4
		%0,6 boşluklu	11,8	2,7
2	2	%0,6 boşluklu	18,6	1,7
3	2	%0,6 boşluklu	18,4	1,7

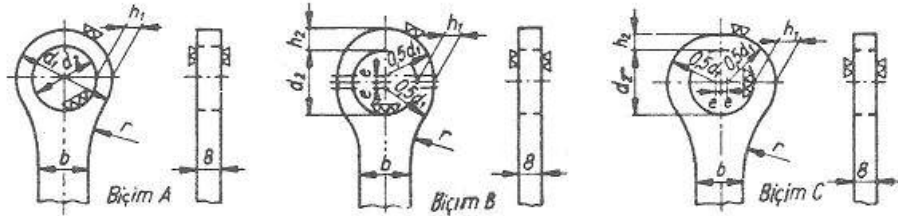
Ucu delikli çubuklarda kafa kısmından şafta yumuşak bir geçişle yorulma çentik katsayısının büyümesine engel olunabilir. Çubuklardaki yağ delikleri ek çentik etkisi doğurduklarından, ana kesite (I-II) veya tepe kesitine (III-IV) açılmamalıdır. Yağ deliklerinin ana ve tepe kesitleri arasında  $45^\circ$  açı ile bulunmaları halinde en düşük yorulma çentik katsayıları elde edilir.

Yukarıda sözü edilen deneylerde kullanılan malzemenin çekme dalgalı yorulma dayanımı  $32 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Yorulma kırılmaları tümüyle I-II ana kesitinde oluşup çubuk uçlarının eğilerek açılmasına neden olmaktadır. Tepe kesitinin yüksekliğinin %60 artırılması ile, boşluklu pimlerde ve 1 numaralı kafa biçiminde  $11,8 \text{ kgf/mm}^2$  olan dalgalı çekme dayanımı, 2 numaralı kafa biçiminde  $18,6 \text{ kgf/mm}^2$ 'ye yükselmektedir. Dolayısıyla yapılan bu biçim değişikliği yorulma çentik katsayısının 2,7'den 1,7'ye düşmesini sağlamaktadır.

Herm-Meyer [1], St 50 çeliğinden ucu delikli çubuklarda dalgalı çekme bölgesinde deneyler yapmıştır. Kullanılan malzemenin çekme dayanımı  $52 \text{ kgf/mm}^2$ , akma sınırı ise  $34 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Pim malzemesi olarak St 70

Çizelge-38: St 50 çeliğinden ucu delikli çubuklarda  $\sigma_{alt}/\sigma_{üst} = 0,2$  oranı için yorulma ve sürekli yorulma dayanımlarının  $\sigma_{üst}$  üst gerilme sınırları ile yorulma çentik katsayıları.

	Dairesel kafa biçimi (Biçim A)			Tepe kesiti %35 büyütülmüş kafa biçimi (Biçim B)			Yanaklar %35 büyütülmüş kafa biçimi (Biçim C)		
	$\frac{d_1}{d_2}$			$\frac{d_1}{d_2}$			$\frac{d_1}{d_2}$		
	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5
b mm	15	20	25	15	20	25	15	20	25
$d_1$ mm	30	40	50	30	40	50	30	40	50
$d_2$ mm	20	20	20	20	20	20	20	20	20
e mm	-	-	-	1,75	3,5	5,25	1,75	3,5	5,25
$h_1$ mm	5	10	15	5	10	15	6,75	13,5	20,25
$h_2$ mm	-	-	-	6,75	13,5	20,25	5	10	15
r mm	30	40	50	30	40	50	30	40	50



Sürekli yorulma dayanımı, kgf/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_{üst}$

( $N=5 \cdot 10^5$  için)

22,5 20,4 18,6 26,3 23,4 20,6 18,6 16,5 14,4

$\beta_{çen}$

1,8 2,0 2,2 1,5 1,7 2,0 2,2 2,4 2,8

Yorulma dayanımı, kgf/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_{üst}$

( $N=2 \cdot 10^6$  için)

19,4 17,3 15,7 23,2 20,3 17,6 16,3 14,2 12,3

$\beta_{çen}$

2,0 2,2 2,4 1,6 1,9 2,2 2,3 2,7 3,1

seçilmiş ve %0...0,15 arasında boşluk bırakılmıştır. Çizelge-38 deneylerde kullanılan ucu delikli çubukların biçim ve boyutlarını göstermektedir. Aynı çizelgede  $5.10^5$  çevrim sayısı için süreli yorulma dayanımının üst gerilmesi,  $2.10^6$  sınır çevrim sayısı için yorulma dayanımının üst gerilmesi ve yorulma çentik katsayıları da verilmiştir. Yorulma çentik katsayıları 8 mm x 17 mm dikdörtgen kesitli, çentiksiz deney parçalarında bulunan değerlerden yararlanılarak saptanmıştır.  $\sigma_{üst}/\sigma_{alt}=0,2$  oranı için çentiksiz deney parçalarında süreli yorulma dayanımı  $40,2 \text{ kgf/mm}^2$ , yorulma dayanımı  $38,1 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Ayrıca (A) biçiminde ve  $d_1/d_2=2,0$  olan deney parçalarında çeşitli  $\sigma_{üst}/\sigma_{alt}$  oranları için de deneyler yapılarak Çizelge-39'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Alt gerilmenin eksi işaretli olduğu deneylerde pimler boşluktuz olarak yerleştirilmiştir.

Çizelge-39: St 50 çeliğinden A biçimindeki (Çizelge-38)  $d_1/d_2=2,0$  çap oranına sahip ucu delikli çubuklarda, dalgalı çekme ve değişken zorlama bölgelerindeki yorulma dayanımı, süreli yorulma dayanımı ve yorulma çentik katsayısı değerleri

Gerilme oranı $\sigma_{alt}/\sigma_{üst}$	N= $5.10^5$ için süreli yorulma dayanımı ve yorulma çentik katsayısı, $\text{kgf/mm}^2$ .			N= $2.10^6$ için yorulma dayanımı ve yorulma çentik katsayısı, $\text{kgf/mm}^2$		
	$\sigma_{üst}$ (A)	$\sigma_{üst}$ (B)	$\beta_{çen}$	$\sigma_{üst}$ (A)	$\sigma_{üst}$ (B)	$\beta_{çen}$
+0,6	48,7	26,2	1,9	47,9	23,7	2,0
+0,2	40,2	20,4	2,0	38,1	17,3	2,2
-0,4	29,0	15,9	1,8	26,4	13,4	2,0
-1,0	22,0	15,6	1,4	19,8	13,0	1,5
A) Çentiksiz deney parçası			B) Ucu delikli çubuk			

#### 5.9. Çentik Katsayısı, Çentik Duyarlık Katsayısı ve Yorulma Çentik Katsayısının Hesap Yoluyla Bulunması

Çentiklerin yorulma dayanımına etkisini saptamak için, faturalı, delikli, sivri veya yuvarlak çentikli v.b. deney parçaları veya makina elemanları üzerinde yorulma deneylerinin yapılması gereklidir. Bu deneylerin sonuçlarının da gösterdiği gibi parçalarda çentiklerden ötürü gerilme yığılmaları oluşmakta ve böylece çekme-basma zorlamalarında kesitteki gerilme eşdağılımından, eğme ve burma zorlamalarında ise gerilme dağılımının doğrusallığından sapmalar olmaktadır. Yorulma zorlamalarında çentik etkisini sayısal olarak belirleyen değer, yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$ 'dir. Bu katsayı, düz çubu-



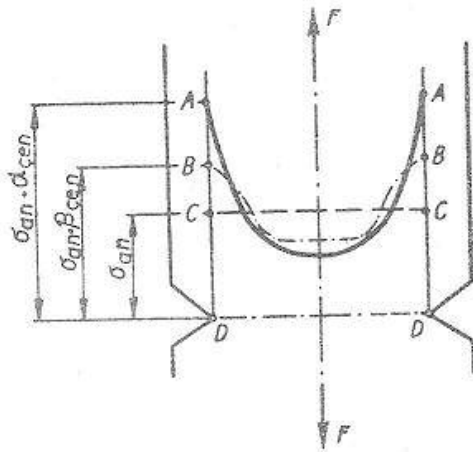
ğun yorulma dayanımının çentikli çubuğun yorulma dayanımına oranı olup; çentik biçimi, çentik boyutları, zorlama şekli, malzeme, sıcaklık, ortam, ortalama gerilme ve zorlama süresine bağlıdır.

Statik yük altında çentik diplerinde oluşan  $\sigma_{maks}$  gerilme tepelerinin belirlenerek anma gerilmesi  $\sigma_{an}$ 'a oranlanması ile bulunan ( $\sigma_{maks}:\sigma_{an}$ ) değeri,  $\alpha_{çen}$  çentik katsayısı olarak adlandırılır.

Değişik çentik biçimleri için çentik katsayıları mekanik, elektrik, gerilme optiği, röntgenografik veya teorik yöntemler kullanılarak malzemenin elastiklik alanı için saptanır. Maksimum gerilme elastik alanda kaldığı, yani malzeme davranışları Hooke kanununa uyduğu sürece, çentik katsayısı sadece çentik biçimi ve zorlama şekline bağlıdır. Dolayısıyla  $\alpha_{çen}$ , malzeme cinsinden bağımsız ve çekme zorlamasında en büyük, burma zorlamasında en küçük, eğme için ise ikisi arasında bir değere sahiptir. Elastik sınırının aşılması, diğer bir deyişle Hooke kanunundan sapmalar olması halinde,  $\alpha_{çen}$  çentik katsayısı malzemenin özelliklerine göre az veya çok küçülür; çentik biçimi ve zorlama şekline ek olarak malzemeye de bağlı olur.

Aynı çentik biçimi ve zorlama şekli için (çekme, basma, eğme veya burma) yorulma deneyi ile bulunan  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayısı, statik yükleme ile saptanan  $\alpha_{çen}$  çentik katsayısından daima küçüktür. Bunun nedeni statik ve değişen zorlamalar altında malzeme davranışının tamamen farklı olmasıdır. Bu farkın oluşmasında yorulma zorlamaları altında iç gerilme durumunun değişmesi ve gerilme tepelerinin alçılması, daha az zorlanan bölgelerin koruyucu etkisi, makroskopik ve mikroskopik düzeyde yapısal değişmeler rol oynarlar. Ancak günümüze kadar bu olayın henüz çok yönlü ve kapsamlı bir açıklanması yapılamamıştır.

Şekil-114'te çift taraflı sivri çentikler içeren yassı bir çubuğun çekme zorlamaları altında çentikli kesitindeki gerilme dağılımı görülmektedir. Burada AA eğrisi statik zorlama altında gerilme dağılımını, CC doğrusu ise anma gerilmesini vermektedir. Aynı şekilde statik ve değişen zorlamalarda çentik etkisini karşılaştırmak için, BB eğrisi ile yorulma zorlamaları altındaki hayali gerilme dağılımı da çizilmiştir. Burada yorulma zorlaması altında,  $\sigma_{an}$  anma gerilmesinin belirli bir katsayı ile artması gerektiği düşünülmüş ve katsayı olarak  $\beta_{çen}$  değeri alınmıştır. Düz parçanın yorulma dayanımının, çentikli parçanın yorulma dayanımına oranı şeklindeki  $\beta_{çen}$  tanımına uymayan, dolayısıyla malzeme mekaniği açısından tam doğru olmayan bu kabul yardımıyla, malzemenin çentik duyarlılığı için aşağıdaki bağıntı elde edilebilir, Şekil-114.



Şekil-114: Çekme zorlamaları altında sivri bir çentiğin kesitindeki gerilme dağılımı  $\alpha_{\text{çen}} = \frac{AD}{CD} = \frac{\sigma_{\text{maks. statik}}}{\sigma_{\text{an}}}$

$$\sigma_{\text{an}} = \text{anma gerilmesi} = F/A$$

$\overline{AD}$  doğru parçası elastiklik sınırı içinde ve statik yükleme altında çentik dibindeki  $\sigma_{\text{maks}}$  gerilme tepesini,  $\overline{BD}$  doğru parçası ise yorulma zorlaması için hayali gerilme tepesini göstermektedir. Anma gerilmesi üzerinde kalan gerilme değerlerinin oranı  $\overline{BC} : \overline{AC}$  çentik duyarlık katsayısı  $\eta_{\text{çen}}$  olarak tanımlanır.  $\eta_{\text{çen}}$  değerinin formül olarak ifadesi

$$\eta_{\text{çen}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} = \frac{\sigma_{\text{an}}(\beta_{\text{çen}}^{-1})}{\sigma_{\text{an}}(\alpha_{\text{çen}}^{-1})} = \frac{\beta_{\text{çen}}^{-1}}{\alpha_{\text{çen}}^{-1}} \quad (1)$$

şeklindedir.

$\beta_{\text{çen}}$  değeri,  $\alpha_{\text{çen}}$  değerinden daima küçük veya sınır halde eşit olabileceğinden,  $\eta_{\text{çen}}$ 'in sayısal değeri her zaman 1'den küçüktür.  $\eta_{\text{çen}}$  çentik duyarlık katsayısı,  $\alpha_{\text{çen}}$  yanında  $\beta_{\text{çen}}$  katsayısını da içerdiğinden çok sayıda faktöre bağlı olup; malzeme, zorlama şekli, gerilme durumu, çentik biçimi, çentik boyutları, sıcaklık, ortalama gerilme ve zorlama süresi ile değişir. (1) denklemi yeniden düzenlenerek

$$\beta_{\text{çen}} = 1 + (\alpha_{\text{çen}} - 1) \eta_{\text{çen}} \quad (2)$$

yazılabilir. Çizelge-40'ta çeşitli malzemeler için, çevresel yarım daire çentikli yuvarlak çubuklar üzerinde yapılan eğme yorulma deneylerinde (çevresel eğme) saptanan  $\eta_{\text{çen}}$  çentikli duyarlık katsayıları verilmektedir. Görüldüğü gibi  $\eta_{\text{çen}}$  değerlerinde büyük dağılmalar vardır ve bu nedenle  $\beta_{\text{çen}}$  değerinin  $\eta_{\text{çen}}$  ve  $\alpha_{\text{çen}}$  yardımıyla kesin olarak belirlenmesi mümkün değildir. Bu yüzden yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$  için başka bağıntılar da ileri sürülmüştür [12] [13]. Nitekim Bollenrath ve Troost [14] çekme-basma değişken zorlamada (3) denklemini önermişlerdir. Burada  $\beta_{\text{çen}}$  değeri, çentik katsayısı  $\alpha_{\text{çen}}$ , çekme

Çizelge-40: Çevresel yarım daire çentikli yuvarlak çubukların eğme yorulma deneyleri yardımıyla bulunan  $\eta_{\text{çen}}$  çentik duyarlık katsayıları

Deney parçası çapı	D=9 mm
Çentik dibindeki çap	d=8,5 mm
Çentik yarı çapı	r=0,75 mm
Çentik katsayısı	$\alpha_{\text{çen}}=2$

Malzeme	Çentik duyarlık katsayısı $\eta_{\text{çen}}$
St 38 normalize edilmiş	0,4 ...0,7
St 50 normalize edilmiş	0,5 ...0,85
St 70 normalize edilmiş	0,55...0,85
St 52-3 yapı çeliği	0,85...0,9
20 NiCr5;40 NiCr 5; 20 NiCr 14;30 NiCr12;normalize edilmiş.	0,65...0,75
20 NiCr 5; 40 NiCr5;20 NiCr 14;30 NiCr12;ıslah edilmiş.	0,8 ...0,95
%13 Cr'lu çelik	0,7 ...0,8
$\sigma_K=110 \text{ kgf/mm}^2$ dayanımına ıslah edilmiş yay çeliği	0,95...1,0
Ostenitik Çelikler	0,1 ...0,35
Hafif Metaller,dövülmüş veya haddelenmiş.	0,4 ...0,8

dayanımı  $\sigma_K$  ve çentik yarıçapı r yardımıyla saptanmaktadır:

$$\beta_{\text{çen}} = \alpha_{\text{çen}} \left( 1 - \frac{1540 \sigma_K}{1 + \frac{r}{2,3 a}} \right) \quad (3)$$

(3) denklemi eğme değişken zorlaması için kullanıldığında, r çentik yarıçapı yerine

$$\frac{r}{1 + \frac{r}{2,3 a}}$$

terimi gelir. Burada (a) değeri cm olarak, yassı çubuğun yarı genişliği veya yuvarlak çubuğun yarıçapıdır.

Bu durumda eğme için hesaplanan  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayısı, düzgün deney parçasının eğme yorulma dayanımının çentikli deney parçasının eğme yorulma dayanımına oranı değil, düz deney parçasının çekme-basma değişken

yorulma dayanımının çentikli deney parçasının eğme yorulma dayanımına oranına eşittir.

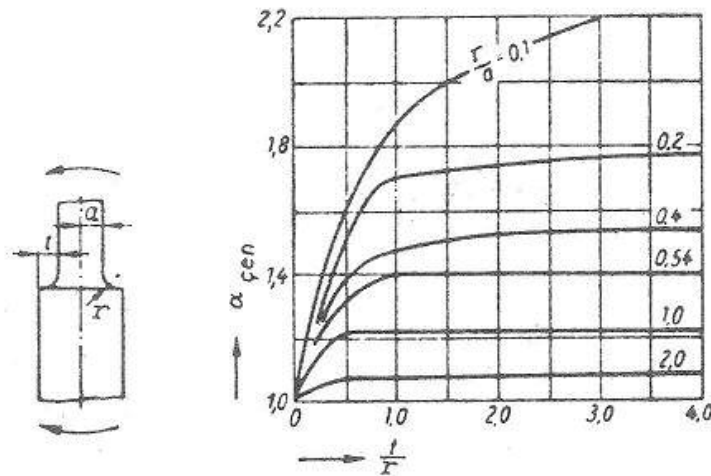
$$\beta_{\text{çen}} = \frac{\sigma_{\text{çbD düz}}}{\sigma_{\text{eD çen}}} \quad (4)$$

(3) denkleminde  $\sigma_K$  kgf/cm<sup>2</sup> ve  $r$  cm olarak alınmalıdır. Denklem çentik ucü ne kadar keskin ve çeliğin çekme dayanımı ne kadar düşük olursa  $\beta_{\text{çen}}$  ile  $\alpha_{\text{çen}}$  değerleri arasındaki farkın o kadar artacağını ifade etmekte ve deneysel sonuçlarla uyum halinde bulunmaktadır.  $\beta_{\text{çen}}$  değerine etki eden faktörlerin çokluğu düşünülürse, sadece  $\alpha_{\text{çen}}$ ,  $\sigma_K$  ve  $r$  değerlerinin kullanıldığı (3) denklemi yardımıyla çentik etkisinin tam olarak belirlenemeyeceği ortaya çıkar. Ancak bu denklem sayısal olarak kesinlikle bilinen değerleri içerdiğinden uygulamada (2) denkleminde tercih edilmektedir; çünkü (2) denklemindeki  $\eta_{\text{çen}}$  için çoğu zaman tahminde bulunulması gerekir. Ayrıca  $\beta_{\text{çen}}$  katsayısının hesaplanması için önerilen değişik denklemlerin, malzemenin çekme dayanımı ile çentik katsayısı  $\alpha_{\text{çen}}$ 'in belirli aralıklarda kalan değerleri için kullanılabilir sonuçlar verdiği gözönünde tutulmalıdır.

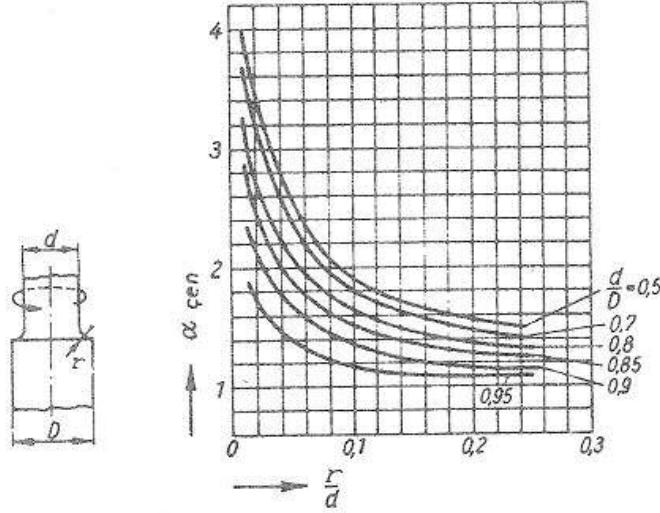
Yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}$ 'in hesapsal olarak bulunmasında doğabilecek sorunlara değişik araştırmacılar tarafından değinilmiş ve örneğin Heinrich [15] bu konudaki görüşleri bir makalede özetlenmiştir.

#### 5.10. Değişik Çentik Biçimleri için Çentik Katsayıları

Şekil-115 ve 116'da faturalı yuvarlak çubuklarda eğme ve burma zorlamaları için hesapsal olarak bulunan çentik katsayıları görülmektedir.

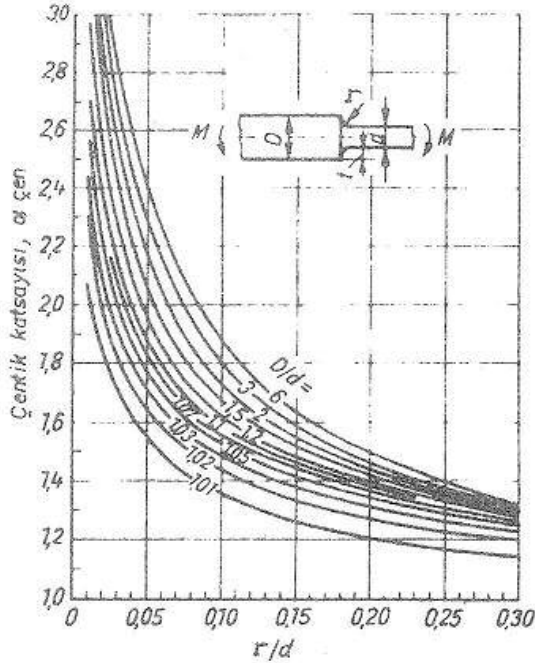


Şekil-115: Eğme zorlamaları için faturalı yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.



Şekil-116: Burma zorlamaları için faturalı yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.

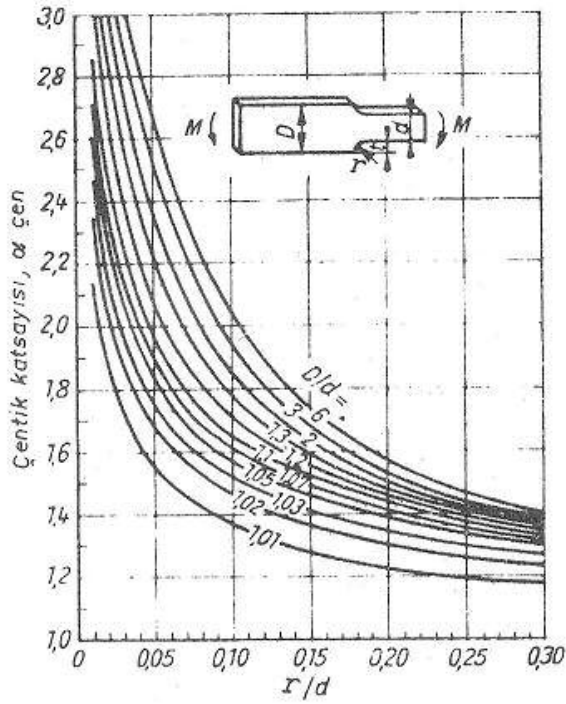
Aynı biçime sahip elemanların gerilme optiği yardımıyla saptanmış değerleri de Şekil-117'de verilmiştir [16]. Faturalı yassı çubuklar için ise Şekil-118...120 çubuk boyutlarına bağlı olarak çentik katsayılarının değişimini, Çizelge-41'de Petersen [17] tarafından  $\alpha_{\text{çen}}$ 'in saptanması için önerilen denklemleri göstermektedir.



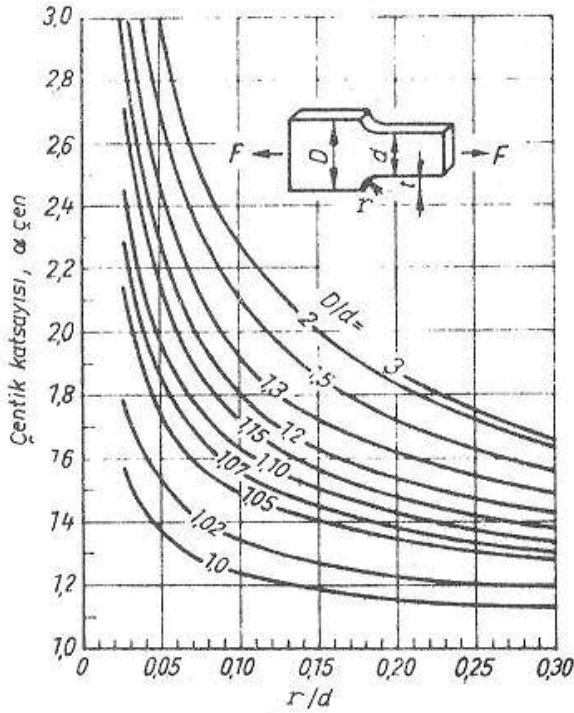
Şekil-117: Eğme zorlamaları için faturalı yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.

Çevresel çentikli yuvarlak çubukların çekme ve burma zorlamaları için  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları Şekil-121...123'den alınabilir.

Çift taraflı çentikler içeren yassı çubukların çentik katsayıları Şekil-124 ve 125'de; enine delikler içeren yuvarlak ve yassı çubukları ise Şekil-126 ve 127'de görülmektedir.



Şekil-118: Eğme zorlamaları için faturalı yassı çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.

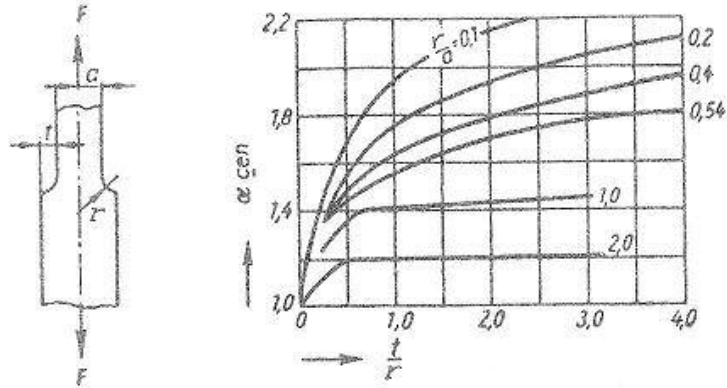


Şekil-119: Çekme zorlamaları için faturalı yassı çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.

Krank milleri ve diğer bir çok makina elemanında rastlanan yuvarlak köşeler için geçerli çentik katsayıları Şekil-128...130'da verilmiştir.

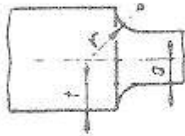
Köşelerin çentik katsayılarının hesaplanması için Stahl [18] St 60 çeliğinden krank mili modelleri üzerinde

çeşitli deneyler yapmış ve her bir boyutun etkisini ayrı ayrı incelemiştir. Bulunan sonuçlar genel olarak Şekil-128..130'da verilen değerlerle uyum içindedir.



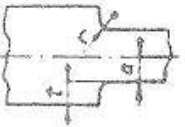
Şekil-120: Çekme zorlamaları için faturalı yassı çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.

Çizelge-41: Faturalı dolu çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları



Yuvarlak çubuk

$$\alpha_{\text{çen}} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{t/r} + H \frac{(1+a/r)^2}{(a/r)^3} + C \frac{a/r}{(t/r)^n (a/r + t/r)}}$$

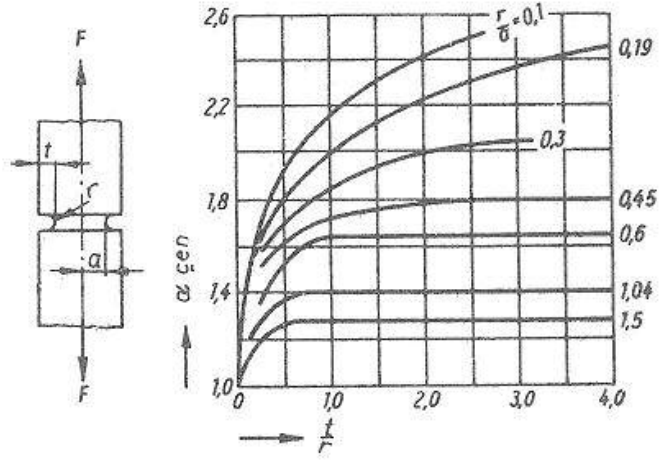


Yassı çubuk

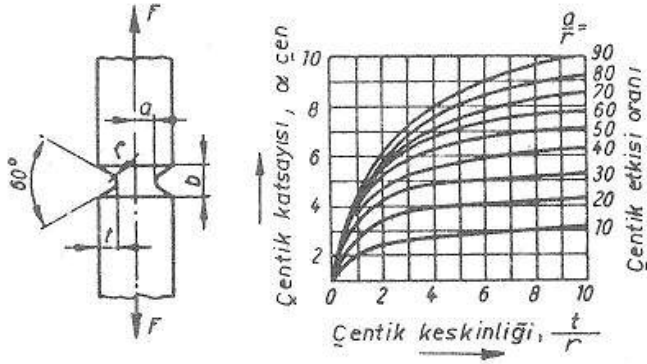
$$\alpha_{\text{çen}} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{A}{t/r} + H \frac{(1+a/r)^2}{(a/r)^3}}}$$

Çubuk biçimi	Yassı çubuk		Yuvarlak çubuk			
	A	H	A	H	C	n
Çekme	0,77	(1,3)	0,77	(2,1)	*)	*)
Eğme	0,77	(3,5)	0,77	3,86	0,2	3
Burma	-	-	3,14	14,3	0,2	3

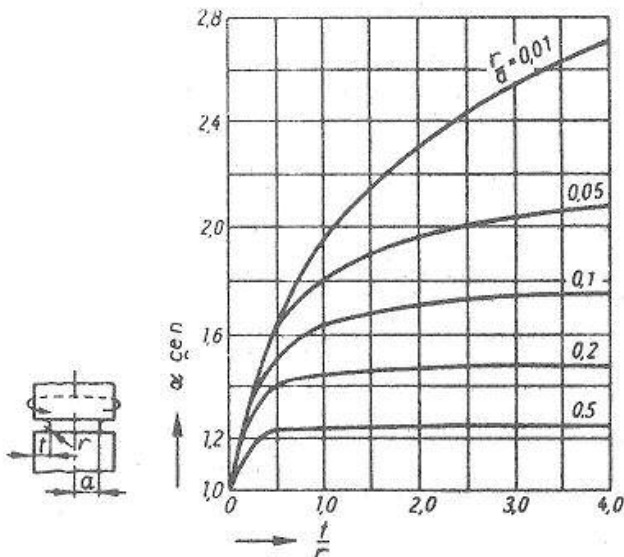
\*) C ve n belirli olmadığından, bu durumda formül  $t/r > 1$  için geçerlidir. Parantez içindeki değerler tahmin edilmiştir.



Şekil-121: Çekme zorlamaları için çevresel çentikli yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.



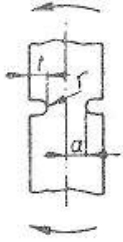
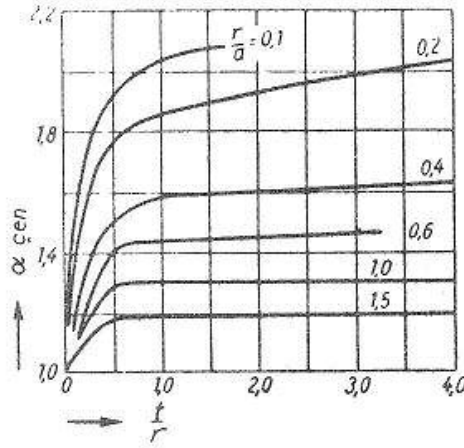
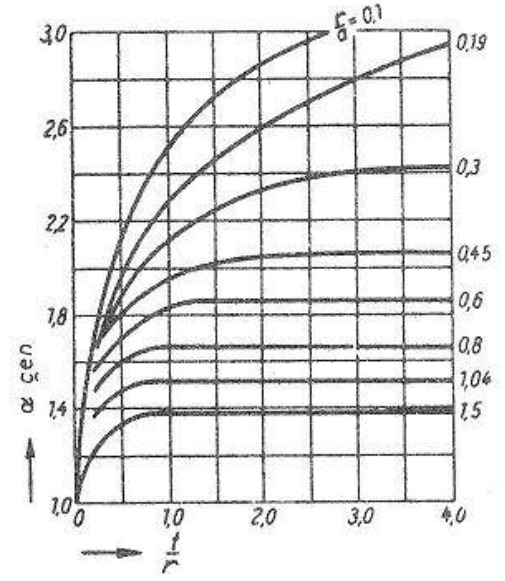
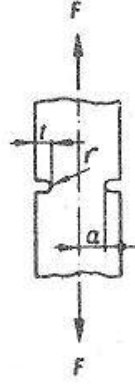
Şekil-122: Çekme ve zorlamaları için çevresel çentikli yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.



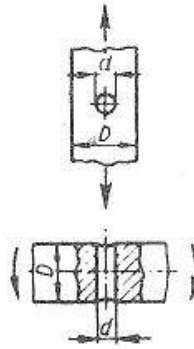
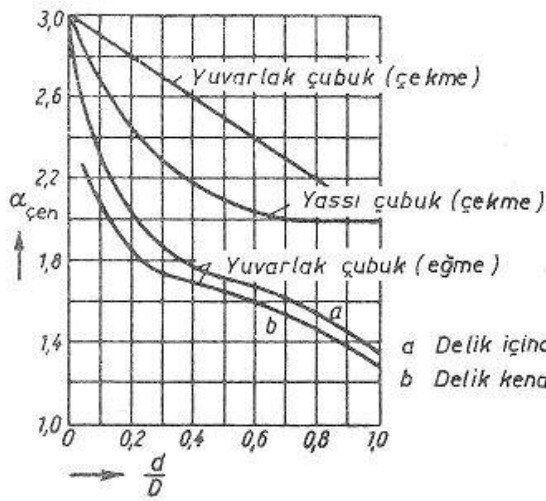
Şekil-123: Burma zorlamaları için çevresel çentikli yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.



Şekil-124: Çekme zorlamaları için çift taraflı çentikler içeren yassı çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.



Şekil-125: Eğme zorlamaları için çift taraflı çentikler içeren yassı çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.



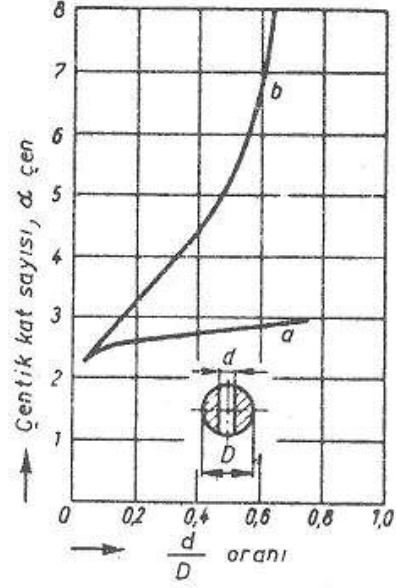
Şekil-126: Enine delikler içeren çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları;  $\sigma_{\text{an}}$  delik nedeniyle küçülmüş olan kesit için hesaplanmıştır.

Şekil-127: Burma zorlamaları için enine delikler içeren yuvarlak çubukların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları

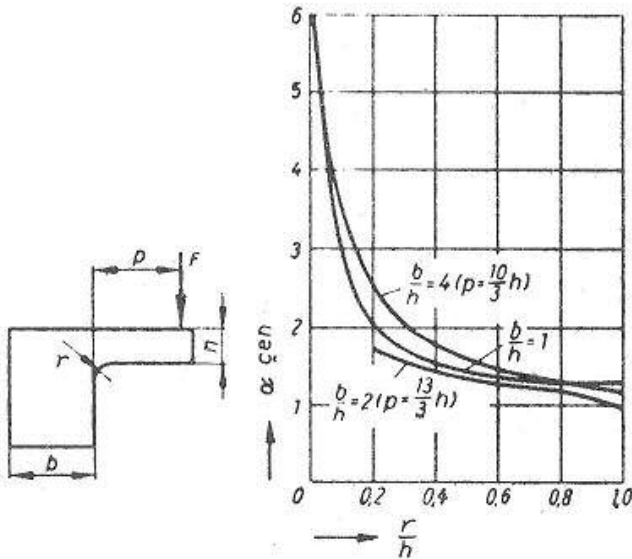
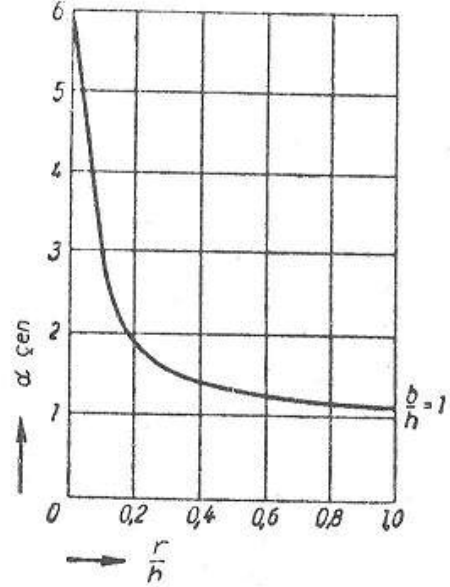
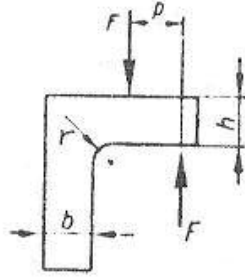
a:  $\tau_{\text{an}}$  delikli kesit için hesaplanmıştır.

b:  $\tau_{\text{an}}$  dolu kesit için hesaplanmıştır.

a ve b eğrileri delik kenarı için geçerlidir.

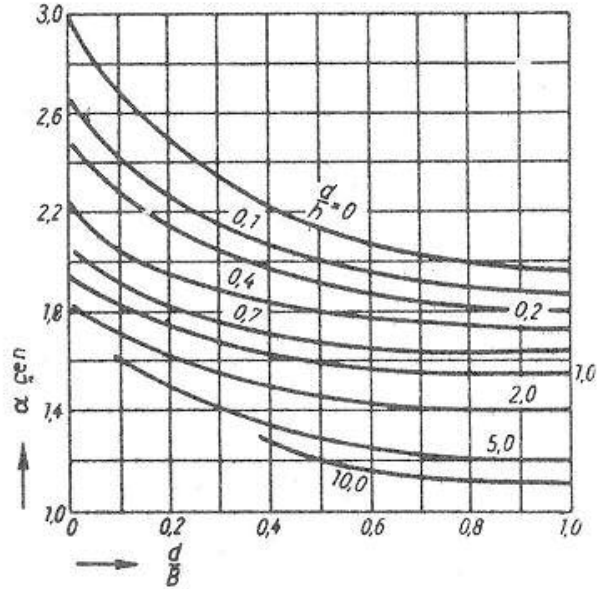
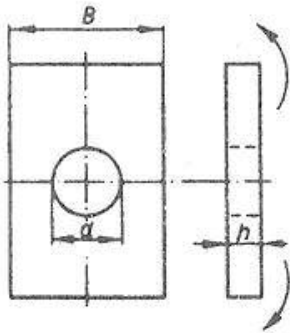
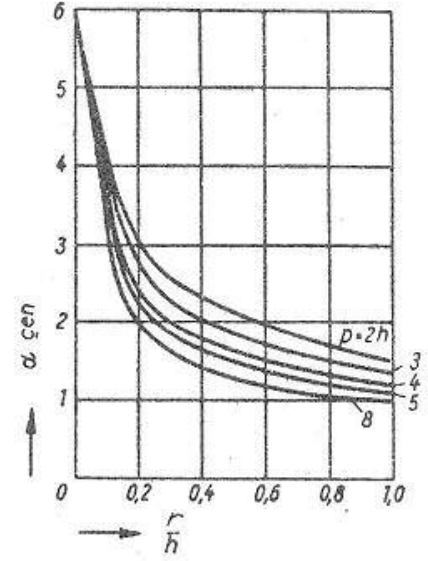
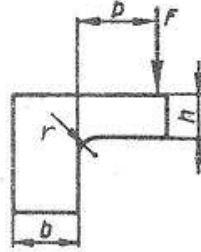


Şekil-128: Köşelerin  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları; saf eğme zorlaması altında.



Şekil-129: Köşelerin  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları;  $F^s$  kuvveti nedeniyle oluşan eğme zorlamaları altında.

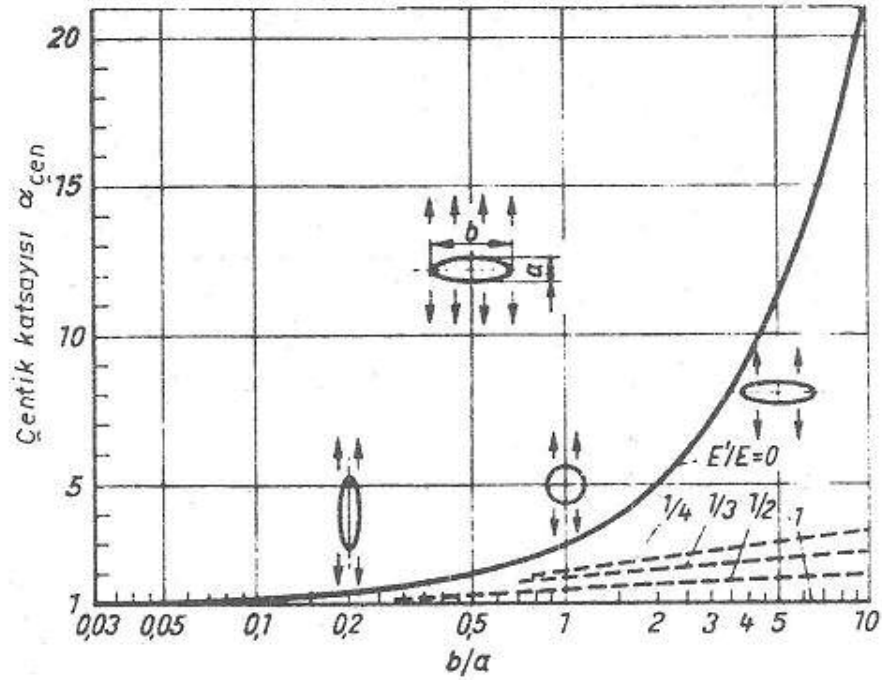
Şekil-130: Köşelerin  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları;  $F$  kuvveti nedeniyle oluşan eğme zorlamaları altında.



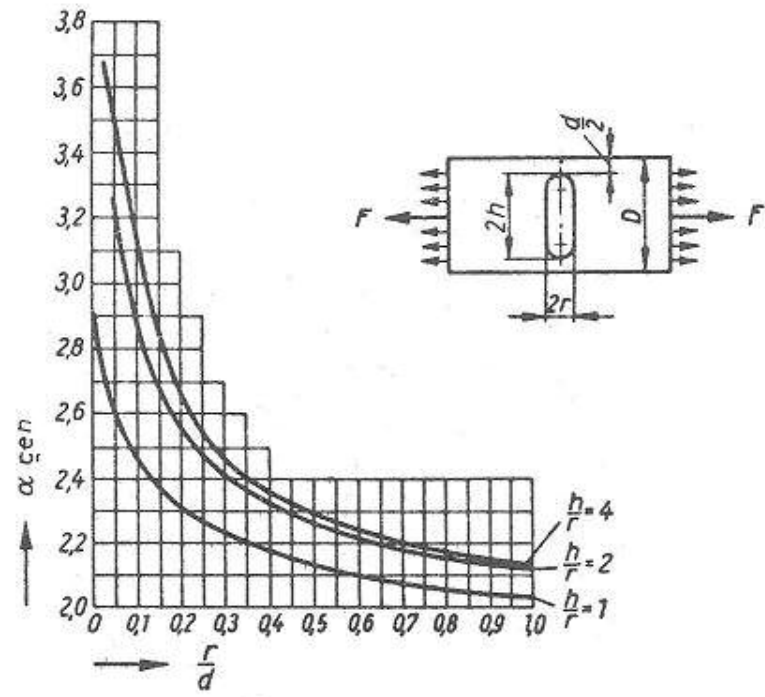
Şekil-131: Eğme zorlamaları için delikli levhaların  $\alpha_{\text{çen}}$  çentik katsayıları.

Stahl eğme zorlamaları yanında, burma zorlamaları için de çentik katsayılarını saptamıştır. Bunlar eğme zorlaması için geçerli değerlerden önemli oranda, örneğin %50 veya daha fazla küçük olabilmektedir. Söz konusu burma çentik katsayısı krank muylusundaki burma anma gerilmesi, eğme çentik katsayısı krank yanağındaki eğme anma gerilmesi esas alınarak saptanmıştır.

Değişik geometrilerde delikler içeren makina elemanları için çekme ve eğme zorlamalarındaki çentik katsayıları ise Şekil-131..134 ve Çizelge-42'de görülmektedir.

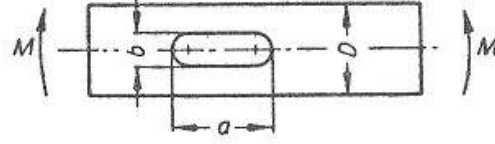


Şekil-132: Çekme zorlamaları için eliptik delikler içeren sonsuz genişlikte levhaların  $\alpha_{cen}$  çentik katsayıları. Kesikli çizgiler:  $E'$  elastiklik modülüne sahip levhanın eliptik deliklerinde  $E'$  elastiklik modülüne sahip ve ana malzeme ile bağlı ikinci bir malzemenin bulunması hali için geçerlidir.

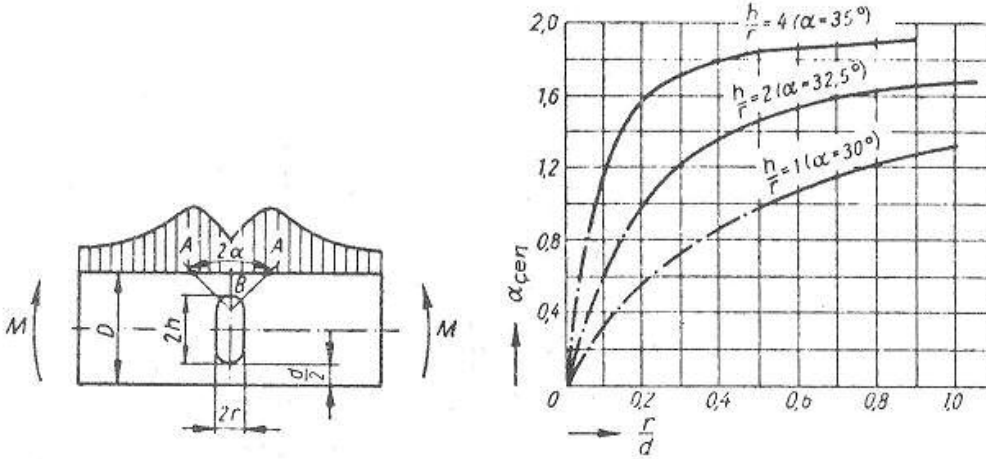


Şekil-133: Çekme zorlamaları için enine yarıklar içeren çubukların  $\alpha_{cen}$  çentik katsayıları.  $\sigma_{an}$  anma gerilmesi, yarıktaki küçülmüş kesit için hesaplanmıştır.

Çizelge-42: Boyuna yarıklar içeren çubukların eğme zorlamaları altındaki  $\alpha_{çen}$  çentik katsayıları.  $\sigma_{an}$  arma gerilmesi yarık nedeniyle küçülmüş kesit için hesaplanmıştır.



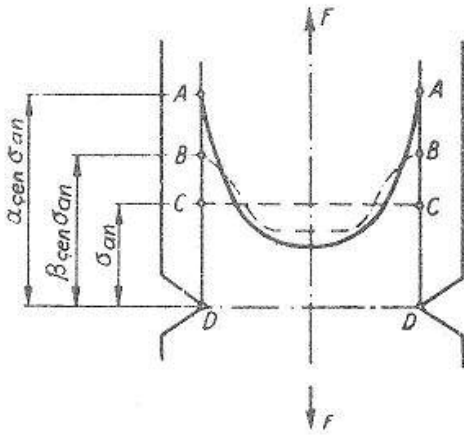
a/b	b/D	Çentik katsayısı $\alpha_{çen}$ Yarık kenarında	Çubuğun dış kenarında	a/b	b/D	Çentik katsayısı $\alpha_{çen}$ Yarık kenarında	Çubuğun dış kenarında
1,0	0,1115	2,067	1,060	2,0	0,100	1,320	1,026
	0,239	2,027	1,033		0,200	1,322	1,035
	0,364	2,060	1,024		0,300	1,320	1,012
	0,485	2,180	1,040		0,400	1,410	1,073
	0,600	-	1,100		0,500	1,672	1,162
1,5	0,100	1,430	1,045	2,5	0,100	1,160	1,077
	0,200	1,440	1,016		0,200	1,176	1,026
	0,300	1,520	1,045		0,300	1,300	1,054
	0,400	1,648	1,124		0,400	1,280	1,087
	0,500	1,910	-		0,500	1,235	1,138



Şekil-134: Eğme zorlamaları için enine yarıklı ve içeren çubukların  $\alpha_{çen}$  çentik katsayıları.  $\sigma_{an}$  arma gerilmesi yarıktaki küçülmüş kesit için hesaplanmıştır. Eğrilerin dolu çizgili kısımları: Gerilme tepesi A noktasında oluşmaktadır. Noktalı çizgili kısımları: Gerilme tepesi yarık üzerindedir, yani B noktasındaki gerilme A noktasındakinden daha yüksektir. B noktası için  $\alpha_{çen} = 1$  alınır.

## 5.11. Gerilme Azaltıcı ve Artırıcı Çentikler

Şekil 135'te çekme zorlamaları altında, çift taraflı sivri çentikli bir yassı çubuğun kesitindeki gerilme dağılımı tekrar verilmiştir. AA eğrisi, elastiklik sınırı altında kalan bir zorlamada oluşan teorik gerilme dağılımını göstermektedir. Değişen zorlamalar altındaki gerilme dağılımını BB eğrisi, gerilmelerin kesitte eşit dağılması durumundaki gerilmelerin seviyesini de (anma gerilmesi) CC doğrusu temsil etmektedir.



Şekil -135: Yassı bir çubuğun çentikli kesitindeki gerilme dağılımı.

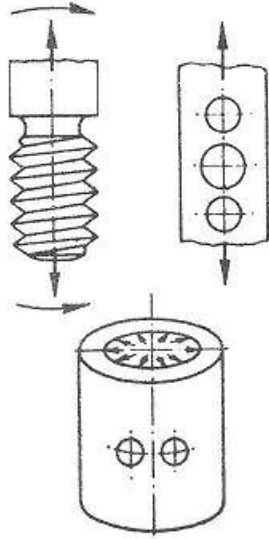
Çentik bölgesinde gerilmelerin eşdağılımı bozulmaktadır. Bir makina elemanında birbirinden uzakta birçok çentik bulunması halinde, her bir çentikte gerilme tepeleri birbirini etkilemeden ve etki bölgeleri çakışmadan oluşur. Ancak bir çentiğin etki bölgesine diğer bir çentik girerse her iki çentik birbirini karşılıklı olarak etkiler. Çok sayıda çentiğin birlikte bulunması ile oluşan toplam çentik etkisi, tek bir çentiğin etkisinden büyük veya küçük olabilir. Eğer ek çentiklerle mevcut çentik etkisi azalıyorsa gerilme azaltıcı çentikler, artıyorsa gerilme artırıcı çentikler sözkonusudur\*. Çok sayıda çentiğin yanyana gelmesi ile karşılaşabilecek durumlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Tek eksenli bir zorlamada çentikler, kuvvet eksenî yönünde arka arkaya dizilmiş ise seri çentikler (Şekil-136),

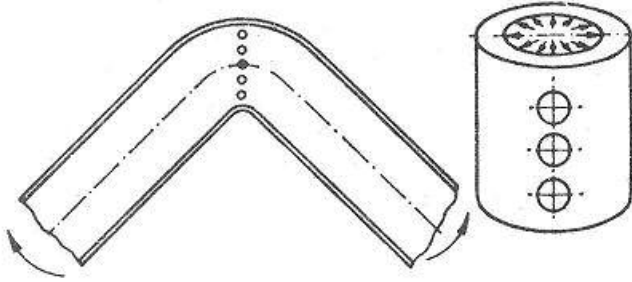
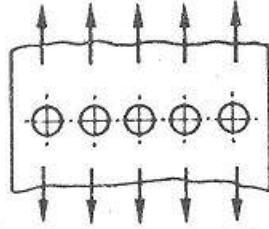
2. Kuvvet doğrultusuna dik ve yanyana dizilmiş ise paralel çentikler (Şekil-137).

Paralel ve seri çentiklerin birlikte görüldüğü durumlarda çentik alanından söz edilir. Şekil-138 tek eksenli zorlama altında bir çentik alanındaki gerilme dağılımını göstermektedir. Burada  $\sigma_t$  temel gerilme deliksiz bölgedeki gerilmeyi,  $\sigma_{an}$  ise deliklerin bulunduğu kesitteki anma gerilmesini belirtmektedir. Görüldüğü gibi

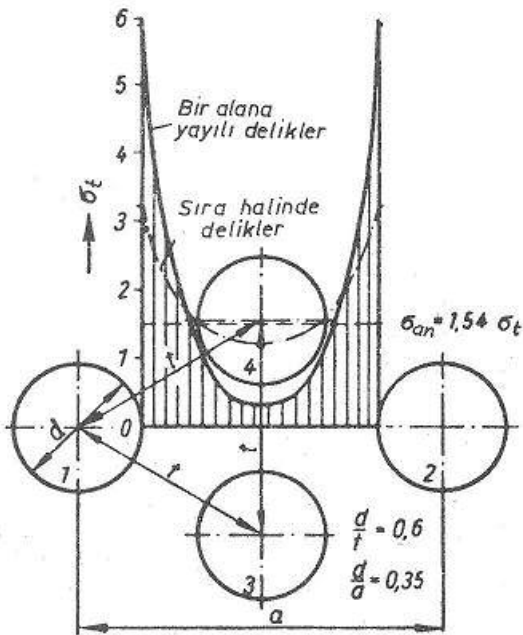
\* ) Diğer bir deyişle  $\sigma_{maks}$ . değerini azaltıcı veya artırıcı çentikler.



Şekil-136: Seri çentikler için bazı örnekler

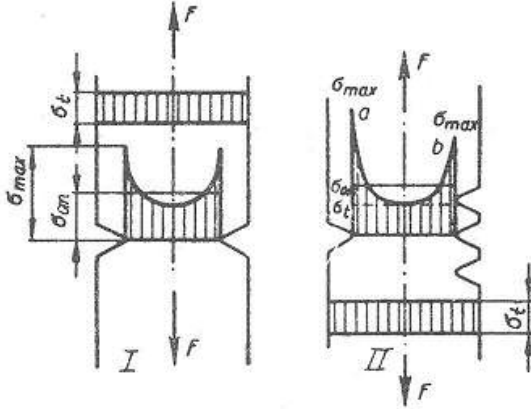


Şekil-137: Paralel çentikler için bazı örnekler.



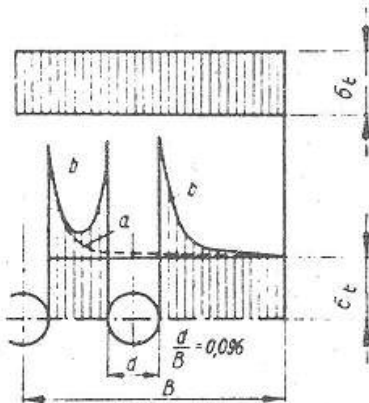
Şekil-138: Tek eksenli zorlanan bir çentik alanında gerilme dağılımı. Delik sırası 1,2 vb. için  $\alpha_{çen}=2,07$  Delik alanı 1...4 vb için  $\alpha_{çen}=3,83$   $\sigma_t$  : deliksiz bölgedeki temel gerilme.

çentik alanındaki gerilme tepesi, deliklerin yanyana sıralanmış durumundan yaklaşık iki kat daha yüksektir. Gerilme azaltıcı olarak etki eden seri çentiklerin bulunması durumunda gerilme dağılımına bir örnek Şekil-139'da verilmiştir.



Şekil-139: Çentikli çekme çubuklarındaki gerilme dağılımları  
I) çentikli çekme çubuğu  
II) gerilme azaltıcı çentikler bulunan (b) ve bulunmayan (a) çekme çubuğu.

Şimdiye kadar açıklandığı üzere her çentik dibinde gerilme tepeleri oluşmakta, ancak çentik dibinden içeri doğru biraz girildiğinde gerilme değeri hızla anma gerilmesinin altına düşmektedir. Gerilmenin yüksek olduğu bölüm çentiğin etki bölgesi, gerilmenin düşük olduğu bölüm de çentiğin gerilme gölgesi olarak adlandırılır. Etki bölgesi dışında başka çentiklerin bulunması halinde yeni gerilme tepeleri oluşur. Şekil-140'da  $\sigma_{maks}$  değerini değiştirmeyen paralel çentiklere bir örnek olarak yanyana dizilmiş delikler görülmektedir.

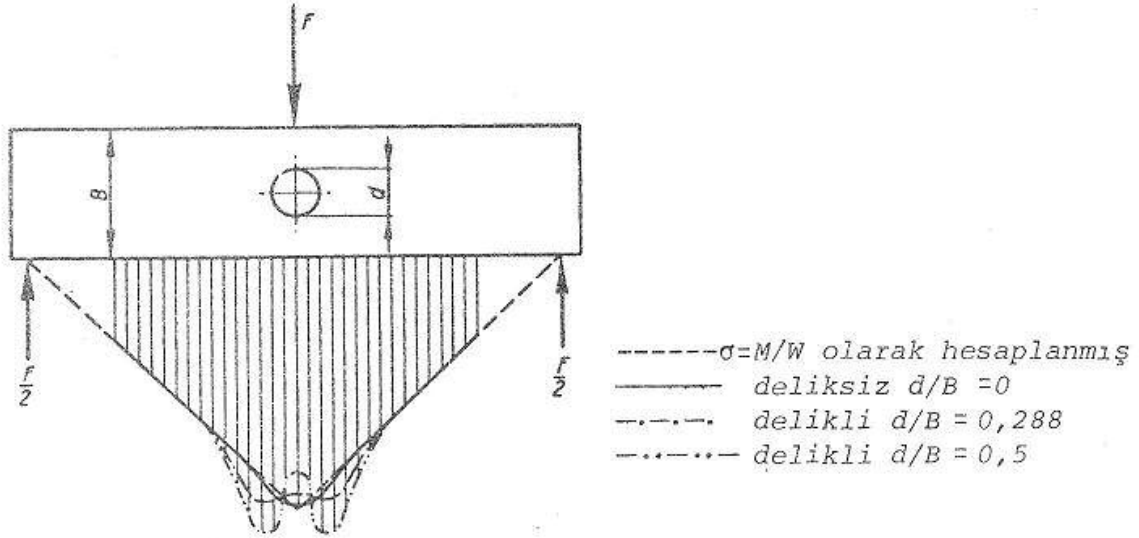


Şekil-140: Tek ve yanyana dizilmiş delikler içeren bir levhada çekme zorlamaları altındaki gerilme dağılımı  
a) Tek delik  
b) Yanyana delikler.

Tek bir deliğin bulunması halinde a eğrisi, yanyana birkaç deliğin bulunması halinde ise b eğrisi geçerlidir. Kesitin daha önce düşük gerilmeli olan bölümlerinde ek deliklerden dolayı gerilmeler artmakta, bu suretle de ek deliklerin açılması ile kesitin küçülmesi dengelenmektedir.



Bütün bunlar, komşu çentiklerin etki bölgelerinin birbirini çok az kesmesi halinde doğrudur. Ek çentiklerin biçim ve konum olarak uygun seçilmesi ile çentik katsayısındaki azalmanın, kesitin azalmasında daha büyük olması durumunda düşük gerilmeli bölgelerde çentiklerin açılması gerilme azaltıcı rol da oynayabilir.

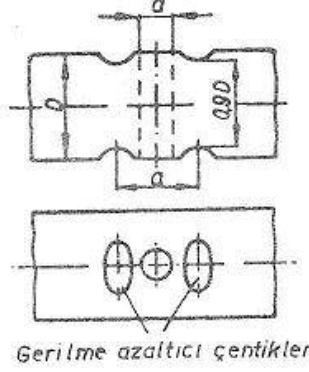


Şekil-141: Enine delik içeren bir çubukta üçgen şeklindeki bir moment alanındaki gerilme dağılımı.

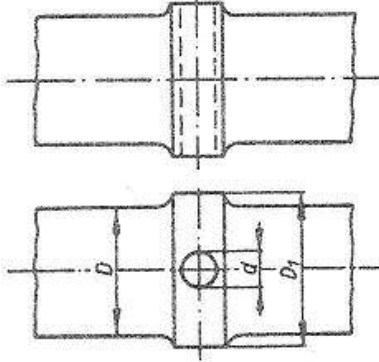
Şekil-141'de görülen iki destekli kirişte teorik moment ve buna bağlı gerilme dağılımı üçgen şeklindedir. Gerçekte kuvvet'in etkidiği yerde dolu çizgiyle gösterildiği gibi teorik dağılımdan farklılıklar mevcuttur. Taraflıksız eksen yakınına enine bir delik açılması halinde, kuvvetin etkidiği noktanın sağ ve solundaki düşük gerilmeli bölgeler daha fazla yüklenerek bu noktadaki gerilme düşmektedir. Delik fazla büyük açılırsa, kuvvetin etkidiği noktada gerilme daha da azalmakta, ancak her iki yandaki gerilme tepeleri deliksiz durumdakinden daha yüksek olmaktadır. Enine delikli millerin yorulma dayanımı basit teğetsel gerilme azaltıcı çentikler yardımıyla %10 artırılabilir. Teğetsel gerilme azaltıcı çentiklerin açılış biçimi Şekil-142'de gösterilmiştir. Gerilme azaltıcı çentikler yardımıyla kuvvet akışı, kritik olan delik kenarlarından uzaklaştırılır. (a) aralığı, çentikler deliğin tam kenarlarına gelecek şekilde seçildiğinde en olumlu etki sağlanır. Bu suretle delik kenarları ek çentiklerin gerilme gölgesine girerler. Gerilme azaltıcı çentiklerin ezme yoluyla soğuk şekillendirilerek gerçekleştirilmesi halinde %40'a varan yorulma dayanımı artışları [19] elde edilebilir. Ek çentiklerden önce delik kenarları da ezme yoluyla şekillendirilirse, dayanım artışları %95'e ulaşabilir. Mil üzerindeki deliklerin bir fatura üzerine açılması da yorulma dayanımı bakımından olum-

lu sonuçlar sağlar (Şekil-143).

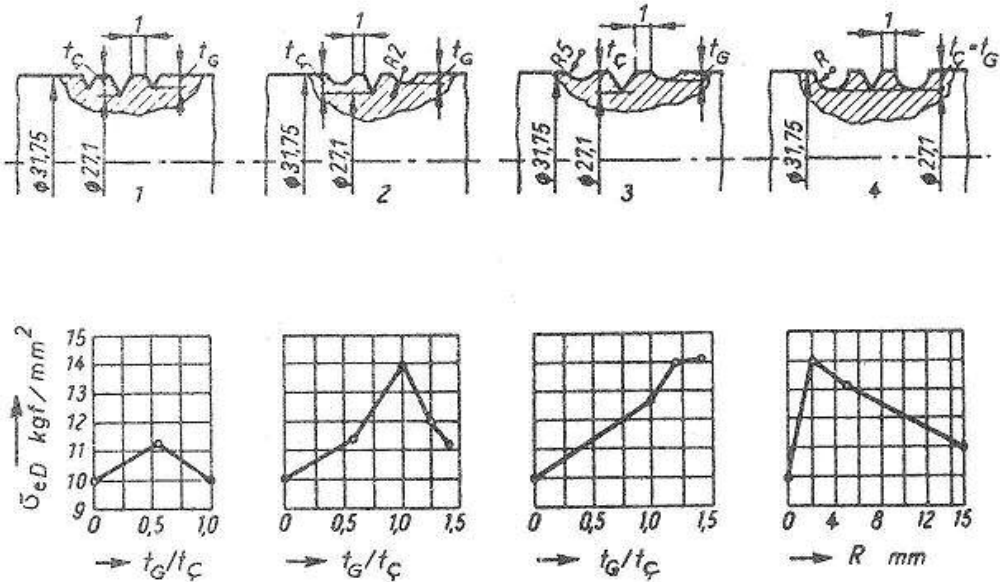
Enine delikli millerde deliğin bulunduğu yere bilya püskürtme veya soğuk haddelendirme uygulanması ile de yorulma dayanımında artışlar elde edilir.



Şekil-142: Enine delik içeren bir milde teğetsel gerilme azaltıcı çentiklerin açılış biçimi.



Şekil-143: Mil üzerindeki deliklerin bir fatura üzerine açılması.



Şekil-144: Çevresel sivri çentikli yuvarlak çubukta çevresel gerilme azaltıcı yuvarlak çentiklerin açılmasının eğme değişken yorulma dayanımına etkisi (çevresel eğme). Malzeme St 50. Sivri çentikler 1 1/4" 'lik diş için kullanılan torna kalemi ile açılmıştır.

Çevresel sivri çentiklerin olumsuz etkisi, ek çevresel yuvarlak çentiklerin açılması ile azaltılabilir. Şekil-144'te görüldüğü gibi bu iyileştirmenin derecesi ek çentiğin yuvarlatma yarıçapı ve derinliğine bağlıdır.

Çok sayıda çentik, çentik alanı, gerilme azaltıcı-çentikler, vb.konularda literatürde daha ayrıntılı bilgi bulunmaktadır [20].

Bir diğer önemli husus da, çentiğin keskinliğine bağlı olarak çentik dibi akma sınırının (çentik akma sınırı  $\sigma_{\text{çen-A}}$  olarak da adlandırılmaktadır) dolu çubuğun akma sınırına göre %100 daha yüksek olabilmesidir. Çentik akma sınırı artan çentik katsayısı  $\alpha_{\text{çen}}$  ile yükselir. [21] [22]. Çentikli parçaların sabit yükler altında çalıştırılması halinde tasarım sırasında yapılan hesaplarda  $\sigma_{\text{çen-A}}$ 'nın kullanılması malzeme ekonomisi sağlar.

- 
- [1] TAUSCHER, H. ve H. FLEISCHER: *IfL-Mitt.* (1968) S.247...259.
  - [2] HEMPEL, M.: *Archiv f.Eisenhüttenwesen* (1939) S.433.
  - [3] POMP, A. ve M. HEMPEL: *Archiv für Eisenhüttenwesen* (1950) S.53...66.
  - [4] WIEGAND, H.: *Härt. Techn. Mitt.* (1943) S.166...185.
  - [5] TAUSCHER, H. ve E. STECHER: *Die Technik* (1966) S.440...445.
  - [6] TAUSCHER, H. ve H. BUCHHOLZ: *Maschinenbautechnik* (1968) S.170...174.
  - [7] WIEGAND, H.: *Konstruktion* (1950) S.366...371.
  - [8] LEHR, E.: *Techn. Zbl. prakt. Metallbearbeitung* (1941) S.134...137.
  - [9] PUCHNER, O.: *Maschinenbautechnik* (1954) S.133...137.
  - [10] LEHR, E. ve K. H. BUSSMANN: *VDI-Z.* (1939) S.513...514.
  - [11] HERM-MEYER, K.: *IfL-Mitt.* (1964) S.14...23 ve (1965) S.110...115.
  - [12] BRAUNE, F.-G.: *IfL-Mitt.* (1965) S.193...199.
  - [13] BRAUNE, F.-G.: *VDI-Z.* (1966) S.1740...1744.
  - [14] BOLLENRATH, F. ve A. TROOST: *Archiv f.Eisenhüttenwesen* (1952) S.193...201.
  - [15] HEINRICH, B.: *IfL-Mitt.* (1969) S.322...327.
  - [16] SCHMITT, K.G. ve O. JAHN: *Der Maschinenschaden* (1967) S.27...31.
  - [17] PETERSEN, C.: *VDI-Z.* (1952) S.977...979.
  - [18] STAHL, G.: *Konstruktion* (1958) S.61...67.
  - [19] THUM, A. ve W. BAUTZ: *VDI-Z.* (1934) S.921...925.
  - [20] THUM, A. ve O. SVENSON: *VDI-Z.* (1950) S.225...230.
  - [21] SIEBEL, E. ve M. PFENDER: *Die Technik* (1947) S.117...121.
  - [22] SIEBEL, E. ve K. RÜHL: *Die Technik* (1948) S.218...233.
  - [23] POMP, A. ve M. HEMPEL: *Archiv f.Eisenhüttenwesen* (1950) S.53...76.

## 6. MAKİNA ELEMANLARI İÇİN YORULMA DAYANIMININ HESAPLANMASI

### 6.1. Genel

Biçim, yüzey kalitesi, çentikler vb. nedenlerle gerilme tepelerinin oluştuğu makina elemanları için yapılan yorulma dayanımı hesaplamalarında, bu etkilerin gözönünde tutulması gereklidir. Bu amaçla, parçada işletme zorlamalarında oluşan anma gerilmesi genliği ( $\sigma_G$ ) ile yorulma dayanımının gerilme genliği ( $\sigma_G$ ), aynı ortalama gerilme ( $\sigma_{ort}$ ) için aşağıda belirtilen etkiler de dikkate alınarak karşılaştırılır. Ayrıca belirli bir emniyet katsayısı ile doğabilecek aşırı yüklemeler de hesaba katılır.

### 6.2. Yorulma Dayanımına Boyut Etkisi

Yapılan kapsamlı araştırmalar, makina parçalarının büyüklüklerinin eğme ve burma yorulma dayanımlarını önemli oranda etkilediğini göstermiştir. Büyük parçaların yorulma dayanımları küçük parçalarınkinden daha düşüktür ve kullanılan çeliğin sertliği yükseldikçe bu fark daha da belirginleşir. Burma veya eğme gerilmeleri eşit olan iki değişik kalınlıkta çubuğun kesitlerindeki gerilme dağılımı ele alınırsa, büyük çaplı çubukta daha büyük bir hacmin yüksek gerilmeler altında olduğu, dolayısıyla yorulma çatlağını başlatacak herhangi bir hatanın bulunma olasılığının arttığı söylenebilir. Büyük çaplı çubukta eğme zorlamaları altında yüzey civarındaki gerilme durumu, çekme veya basma zorlamalarındakine yaklaşıp\*.

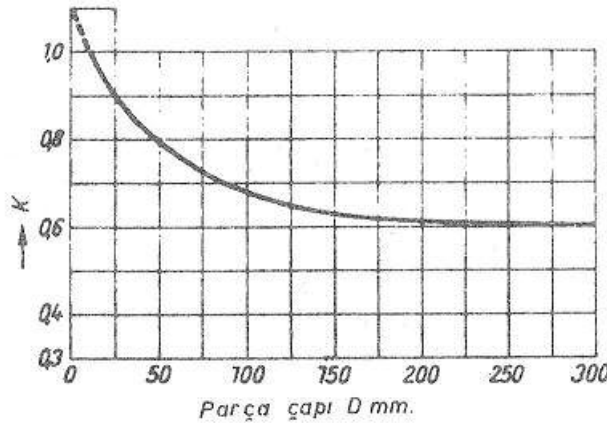
Boyut etkisi K sayısı ile belirtilir ve bu etkiyle  $\sigma_G$  yorulma dayanımı genliği  $\sigma_{G1}$  değerine düşer.

$$\sigma_{G1} = \sigma_G \cdot K$$

Şekil-145'te Lehr [1] tarafından dairesel veya halka kesitli çelik parçaların eğme ve burma zorlamaları için önerilen boyut etkileri biraz değiştirilmiş şekliyle görülmektedir. Yorulma dayanımı  $d=10$  mm çap için %100 olarak alınmıştır. 10 mm'den farklı çaplar için ordinatta boyut etki sayısı K verilmektedir. Uygulamada 7,5... 10 mm çapındaki küçük deney parçalarında saptanmış olan yorulma dayanımı değerlerinin ele alınan parçanın boyutuna ait K sayısı ile çarpılması gerekir. Boyut etkisi hakkında çok sayıda deney sonucu bulunmadığından, Lehr tarafından önerilen bu değerlerin hâlâ kullanılması yo-

\* ) Gradyenin yatıklığı dolayısıyla gerilme azalmayıp sabit kalıyor muş gibi düşünülebilir.

luna gidilmektedir. Oysa bugünkü bilgilerimize göre boyut etkisi sadece çapa değil, malzeme cinsi, malzemenin yapısı, dayanımı, üretim şekli, çentik etkisi ve kesit biçimine bağlıdır. Dolayısıyla K sayısı geometrik olanlarla birlikte birtakım başka büyüklüklerin de oldukça karmaşık bir fonksiyonudur. Ancak bu çeşitli etkiler, geometrik etkiyi çoğunlukla olduğundan daha kuvvetli gösteren Şekil-145'deki eğri ile dikkate alınmış olarak kabul edilebilir\*. Serensen [2] tarafından dökme demir üzerinde yapılan incelemeler, artan deney parçası çapı ile yorulma dayanımındaki düşüşün çeliktekenden biraz daha fazla olduğunu göstermiştir.



Şekil-145: Çeliklerin eğme ve burma yorulma dayanımının parça çapı ile değişimi. D=10 mm çap için yorulma dayanımı %100 olarak alınmıştır.

Banyoda nitrürleme veya sementasyon yoluyla sertleştirilen C 15 çeliğinden üretilmiş deney parçalarında da 7...38 mm çapları arasında Şekil-145'dekinden daha büyük bir boyut etkisi bulunmuştur [3].

Kudrjavzev ve Andrenko [4] boyut etkisini burma değişken zorlamaları altında ve St 42 çeliğinden yapılmış miller üzerinde incelemişlerdir. 60 mm çap için 13,5 kgf/mm<sup>2</sup> olan burma değişken yorulma dayanımı, 260 mm çap için 8,5 kgf/mm<sup>2</sup> değerine düşmüştür. Burma değişken yorulma dayanımındaki bu %37'lik düşüş Şekil-145'de verilen değerlerden oldukça büyüktür.

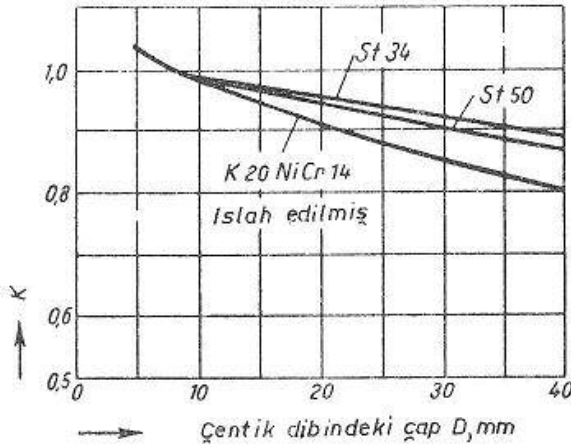
Diğer bir incelemede [5] ise yüksek dayanımlı St 52-3 yapı çeliğinin eğme değişken yorulma dayanımı değerlerine boyut etkisi saptanmıştır. Deneylerde kesit alanları 60 ile 3000 mm<sup>2</sup> arasında değişen, yüksekliği genişliğinin yarısı olan dikdörtgen kesitli deney parçaları kullanılmıştır. Aynı alana sahip dairesel kesitler

\* ) Ayrıca bundan sonra verilen bazı örnekler, büyüklük etkisinin sözkonusu eğridekinden daha fazla olabileceğini de göstermektedir.

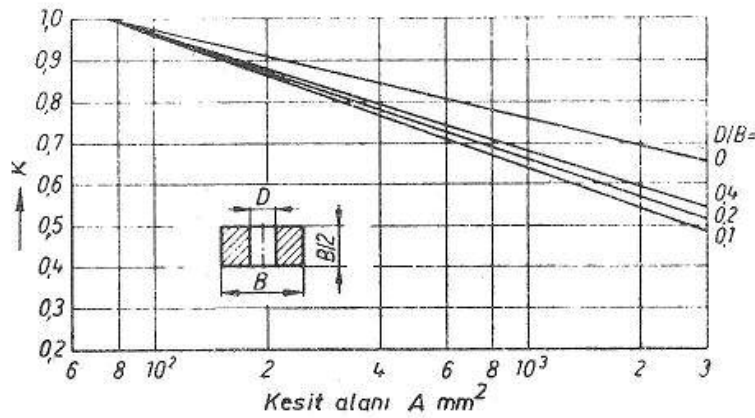
ile karşılaştırıldığında boyut etki sayıları Şekil-145'te verilen eğrinin biraz altında kalmaktadır (Şekil-147'deki  $D/B=0$  doğrusuna bakınız).

Schaal'e [6] göre, deney parçası çapının sabit olması durumunda, yorulma dayanımı parçanın yüzeyindeki tane büyüklüğüne bağlıdır. Yüzeydeki tanelerin iri olması halinde yorulma dayanımları ince taneliye göre daha düşük bulunmaktadır. Bu gözlemden yorulma kırılmalarının nedenlerinin açıklanmasında yararlanılabilir.

Çevresel çentikli deney parçaları üzerinde değişik tür çelikler için saptanmış olan boyut etki sayıları Şekil-146'da görülmektedir. Ele alınan çelikler arasındaki dayanım farklarının etkisi oldukça büyüktür. St 42-3 çeliğinden enine delikli dikdörtgen kesitli deney parçaları üzerinde yapılan bir araştırmanın sonuçları da Şekil-147'de verilmiştir [5]. Burada boyut etki sayısının çentik keskinliğine olan bağımlılığı belirgindir.



Şekil-146: Eğme değişken yorulma dayanımının parça çapı ile değişimi; çevresel çentikli deney parçalarında saptanmıştır.



Şekil-147: Eğme yorulma dayanımının kesit alanını ile değişimi; ileri-geri eğme zorlamaları altında St 52-3 çeliğinden enine delikli deney parçalarında saptanmıştır.

Schaal'in [7] incelemelerine göre eğme yorulma dayanımında boyut etkisi Şekil-145 ve 146'da gösterilenden çok daha küçüktür. Ayrıca bu etki sadece 4...15 mm arasındaki boyutlarda mevcuttur ve 15 mm'nin üzerinde yorulma dayanımında önemli bir düşme, 4 mm'nin altında ise önemli bir artma görülmez. Bu iddia kapsamlı yorulma deneylerinin sonuçlarına dayanarak değil, eğme akma sınırının çekme akma sınırına oranı yardımıyla, statik çekme ve eğme deneyleri sonuçları değerlendirilerek yapılmıştır. Bu nedenle ve ayrıca boyut etki sayısı muhtemelen yüzey durumu ile diğer üretim faktörlerini de kapsadığından, sanayide üretilen değişik boyutlardaki parçalar için daha önce verilen bilgiler esas alınmalıdır.

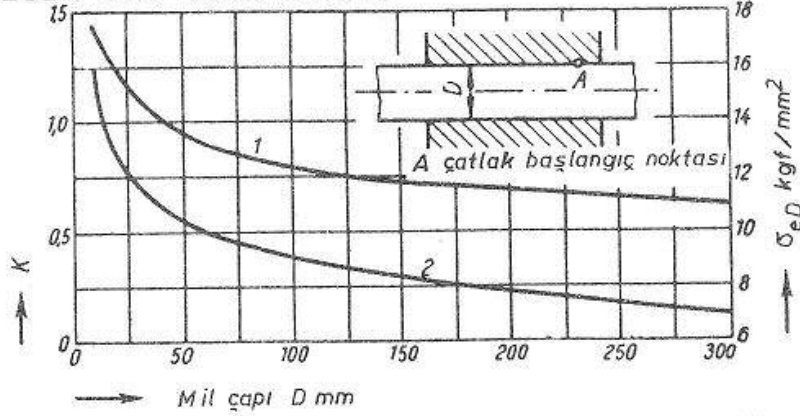
Çekme-basma zorlamaları için şimdiye kadar yapılmış deneylerde çok büyük kesitler dışında önemli bir farklılık görülmemiştir. Ancak çekme-basma zorlamaları için az da olsa bir boyut etkisinin bulunduğunu gösteren bazı deney sonuçları mevcuttur.

Sürekli yorulma bölgesinde ise, çekme ve çekme-basma zorlamaları için de belirli bir boyut etkisi görülmekte olup, parçanın çapının veya kalınlığının artması ile kopma çevrim sayısı da artmaktadır. Buna neden olarak çatlak başlangıcından son kırılmaya kadar geçen sürenin büyük parçada küçük parçaya göre daha uzun olması gösterilebilir.

Göbek geçmeli millerde boyut etkisi çok önemlidir [1]. Şekil-148'de 1 eğrisi boyut etki sayısı  $K_y$ 'yı, 2 eğrisi ise St 50 çeliğinden üretilmiş göbek geçmeli miller için eğme değişken yorulma dayanımının mutlak değerini vermektedir. Daha yüksek çekme dayanımlı çeliklerde taşınabilir gerilme genliği  $\sigma_G$  artmaktadır. Mil malzemesinin  $\sigma_K=90 \text{ kgf/mm}^2$  çekme dayanımında olması halinde  $\sigma_G$  gerilme genliği yaklaşık  $2,5 \text{ kgf/mm}^2$  artar. Çekme dayanımları  $50..90 \text{ kgf/mm}^2$  arasında olan malzemeler için yorulma dayanımının gerilme genlikleri enterpolasyonla bulunabilir. 2 eğrisi yardımıyla çizilen 1 eğrisinin biçiminde mil malzemesinin değişmesi ile önemli bir değişiklik olmaz.

Kudrjavzev ve Andrenko [4] tarafından yapılan deneyler, burma zorlamaları altındaki göbek geçmeli millerde de benzer bir boyut etkisinin olduğunu göstermektedir. Göbek geçmeli millerin yorulma dayanımı yüzey sertleştirme veya yüzey haddelendirme yoluyla 1,5...2,5 katı kadar artırılabilir [8] [9]. Yüzey dayanımını yükselterek elde edilen yorulma dayanımı artışları mil çapına bağlıdır. Büyüyen mil çapı ile yorulma dayanımının mutlak artışı azalır ve 240 mm çap için sadece %30 dolayındadır. Isıya dayanıklı çeliklerde yorulma dayanımındaki bu iyileş-

meler yüksek çalışma sıcaklıklarında da devam eder [10]. Yüzey haddeme sonucunda yorulma dayanımı yanında, pres geçmeli göbeklerin tutma dayanımları da taşlanmış veya tornalanmış geçmelere göre daha yüksek olur. Yorulma ve tutma dayanımındaki bu artışlar yüzeyde oluşan basma iç gerilmeleri ile açıklanır.



Şekil-148: Göbek geçmeli düz millerde çapın eğme yorulma dayanımına etkisi; mil malzemesi St50.  
1 eğrisi: Boyut etkisi K; D=40 mm için yorulma dayanımı %100 olarak alınmıştır.  
2 eğrisi: Eğme değişken yorulma dayanımının mil çapı ile değişimi, mil malzemesi St 50.

### 6.3. Yorulma Dayanımına Yüzey Etkisi

Parçaların biçimlendirilmesi sırasında oluşan yüzey durumu ve yüzey kalitesi de yorulma dayanımını etkiler. Daha önce belirtildiği gibi bu kitaptaki şekil ve çizelgelerde verilen tüm değerler parlatılmış deney çubukları için geçerlidir. Daha düşük kaliteli yüzeyler düz deney parçalarında yorulma dayanımını azaltır. Yüzey etki sayısı  $\mathcal{Z}$  ile gösterilirse, yorulma dayanımı gerilme genliği  $\sigma_G$  hem boyut hem yüzey etkisiyle,

$$\sigma_{G2} = \sigma_G \cdot K \cdot \mathcal{Z}$$

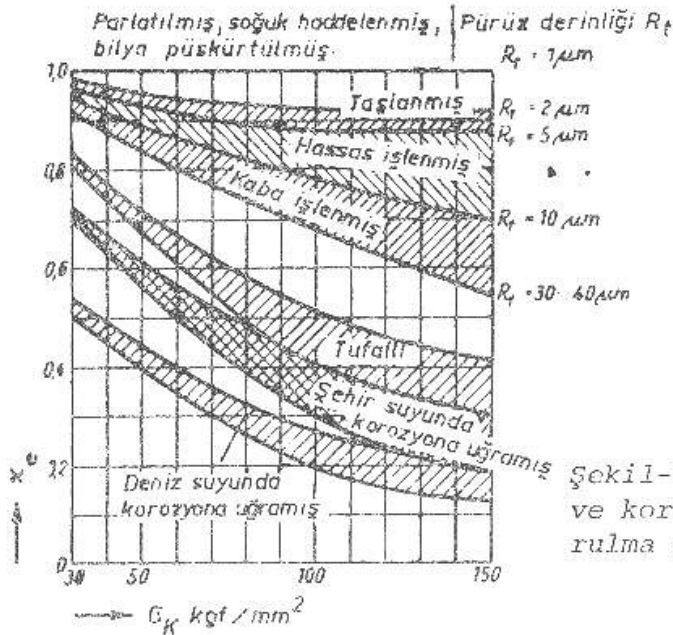
değerine düşer.

Şekil-149'da eğme yorulma dayanımı için geçerli olan  $\mathcal{Z}_e$  sayıları çekme dayanımına bağlı olarak verilmiştir. Bu şekil aynı zamanda şehir suyu ve deniz suyunun korozyon etkisine ilişkin değerleri de göstermektedir. Şeklin sağ tarafında parlatılmış, taşlanmış, hassas veya kaba işlenmiş yüzey durumları için işleme yönüne dik olarak ölçülen en büyük pürüz derinliği  $R_t$  değerleri görülmektedir. Soğuk haddeme sonucu parlatılmış duruma eşdeğer  $\mathcal{Z}_e=1$  değeri elde edilir. Bilya püskürtülmüş yüzeyler için de  $\mathcal{Z}_e=1$  alınabilir. Bilya püskürtme sonucu oluşan pürüzlenmiş yüzey pekleşmesi nedeniyle önemli bir etki doğurmaz. Burma zorlamaları altında yüzey etki sayısı

$$\mathcal{Z}_b = 0,575 \mathcal{Z}_e + 0,425 \text{ dir.}$$



Çekme veya basma için yüzey etki sayısı  $\beta$  olarak eğmedeki değerler geçerlidir.



Şekil-149: Değişik yüzey kaliteleri ve korzyon etkileri için eğme yorulma dayanımındaki düşüşler.

Konstrüksiyonlar'ın kritik bölgelerindeki çentiklerin yüzeyleri taşlanmış veya hassas işlenmişse, yüzey etki sayısı  $\beta$ 'nin kullanılması gerekli olmayabilir. Bu durumda çentik etkisi yalnız  $\beta$  çen yorulma çentik katsayısı ile dikkate alınmış olur.

#### 6.4. Kesit Biçiminin Yorulma Dayanımına Etkisi

3.bölümde verilen yorulma dayanımı diyagramlarındaki değerlerin tümü dairesel kesitli ve aksi belirtilmediği takdirde parlatılmış yüzeyler için geçerlidir. Kesit biçiminin yorulma dayanımına etkisi hakkında çok az sayıda deney yapılmıştır. Örneğin bazı araştırmalar [11] [12] ve pratik deneyimler dairesel olmayan kesitler için yorulma dayanımı değerlerinin değiştiğini göstermiştir. Ancak deneyler birbirinden farklı kesit ve yüzey kaliteleri için yapıldığından genel ve güvenilirdir sonuçlar bulunamamıştır.

Yüzey kalitesinin sabit kalması halinde ve çekme-basma zorlamaları altında dikdörtgen kesitlerde yorulma dayanımı dairesel kesitlere göre daha düşüktür. Bu fark yaklaşık %20 kadardır. Kesit biçiminin dikkate alınması için  $q$  katsayısı kullanılırsa, dikdörtgen kesitli parçalar için çekme-basma zorlamalarında verilen yorulma dayanımı değerlerinin  $q=0,8$  ile çarpılması gerekir.

Eliptik kesitlerdeki eğme dayanımları dairesel kesitler ile aynı düzeydedir. Eşkenar dörtgen kesitli deney parçalarında dairesel kesitli parçalardan daha yüksek yorulma dayanımlarına ulaşır. Bu artış kesit etki sayısı  $q=1,2$  seçilerek dikkate alınır.

Burma zorlamalarında kesit etki sayıları belirlenmemiştir. Ancak bu değerlerin eğme için geçerli olanlarla aynı olduğu tahmin edilmektedir.

Buraya kadar yapılan açıklamalara göre, hesaplanan kesitlerin dairesel kesitten farklı olması durumunda yorulma dayanımı diyagramlarından alınan  $\sigma_G$  gerilme genliklerini, boyut etki sayısı  $K$  ve yüzey etki sayısı  $\mathcal{A}$  yanında, bir de kesit etki sayısı  $q$  ile çarpmak gerekir ve bu suretle yorulma dayanımının gerilme genliği olarak

$$\sigma_{G3} = \sigma_G \cdot K \cdot \mathcal{A} \cdot q$$

elde edilir\*.

### 6.5. Zorlamada Darbelerin Etkisi

Dayanımı hesaplanan bir makina parçası darbeleri yükleri altında çalışıyorsa, hasara uğrama olasılığındaki artış gözönünde tutulmalıdır. Bu durumda zorlamayı belirleyen gerilme değerleri,örneğin anma gerilmesi genliği  $\sigma_g$  (veya  $\tau_g$ ), darbe etki sayısı  $\varphi$  ile çarpılır.

Darbe etki sayısı  $\varphi$ 'nin büyüklüğü işletme şekli ve parçanın bulunduğu makinaya bağlıdır. Değişik makina türleri için  $\varphi$  sayıları Çizelge-43'den alınabilir.

Çizelge-43: Değişik işletme şartları ve makina türleri için darbe etki sayıları

Darbe tipi	Makina türlerine örnekler	Darbe etki sayısı $\varphi$
hafif	Buhar ve su türbinleri, döner kompresör ve pompalar, elektrik makinaları, taşlama tezgahları	1,0...1,1
orta	Buhar makinaları, içten yanmalı kuvvet makinaları, pistonlu kompresör ve pompalar, tornalar, planyalar	1,2...1,5
kuvvetli	Dövme presleri, abkant presleri, profil demir makasları, zımba makinaları, öğütücüler, çekme tezgahları	1,5...2,0
çok kuvvetli	Mekanik çekiçler, hadde tezgahları, taş kırıcılar	2,0...3,0

\* ) Çentik etkisi de dikkate alınırsa,

$$\frac{\sigma_{G3}}{\beta_{\text{çen}}} = \frac{\sigma_G \cdot K \cdot \mathcal{A} \cdot q}{\beta_{\text{çen}}} = \sigma_G' \text{ olarak gösterilir ve}$$

$\sigma_G'$  indirgenmiş yorulma dayanımı genliği adını alır.

## 6.6. Yorulma Zorlamalarında Emniyet Katsayısı, Seçimi ve Saptanması

Statik zorlanan bir parçada gerilmenin malzemenin  $\sigma_A$  akma veya  $\sigma_{0,2}$  sınırına ulaşmaması için  $v$  emniyet katsayısı 1,3...2,0; akma veya 0,2 sınırı bulunmayan malzemelerde ise (örneğin suverilmiş çelikler)  $\sigma_K$  çekme dayanımı esas alınarak 3..4 arasında seçilir\*. Yumuşatma veya normalizasyon tavlama uygulanmış alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde akma sınırının çekme dayanımına oranı 0,55 ile 0,65; ıslah edilmiş çeliklerde ise 0,7 ile 0,8 arasındadır.

Makina parçaları değişen zorlamalar altında çalışıyorsa, malzemenin yorulma dayanımı genliği ( $\sigma_G$ ) ve zorlamanın anma gerilmesi genliği ( $\sigma_g$ ) yardımıyla, yorulma zorlamalarında emniyet katsayısı

$$v = \frac{\sigma_G}{\sigma_g}$$

olarak tanımlanır. Ancak boyut, yüzey, biçim, çentik ve darbe etkileri gözönünde tutulursa,  $\sigma_G$  yerine  $\sigma_G'$  indirgenmiş yorulma dayanımı genliği ve  $\sigma_g$  yerine de  $\sigma_g \cdot \varphi$  geleceğinden (bk.6.4 ve 6.5),

$$v = \frac{\sigma_G'}{\sigma_g \cdot \varphi} = \frac{\sigma_G \cdot K \cdot q \cdot \alpha}{\sigma_g \cdot \varphi \cdot \beta_{\text{çen}}} \quad (5)$$

bulunur. Bu durum Şekil-150'de şematik olarak da açıklanmıştır.

(5) bağıntısında yukarıda belirtilen etkilerden dikkate alınmayacaklar varsa, bunlarla ilgili katsayılar 1 kabul edilir.  $\beta_{\text{çen}}$  yorulma çentik katsayısı (4) bağıntısı yardımıyla hesaplanmışsa, (4) de çentiksiz deney parçasının  $\sigma_{\text{çbd}}$  değeri ile çentikli deney parçasının  $\sigma_{\text{ed}}$  değerini karşılaştırıldığı düşünülerek, (5) de  $K=1$  ve  $\sigma_G$  olarak da çekme-basma değişken yorulma dayanımının genliği ( $\sigma_{\text{çbd}}$ ) alınır.

Yorulma emniyet katsayısının seçiminde genel olarak aşağıdaki faktörler gözönünde tutulmalıdır:

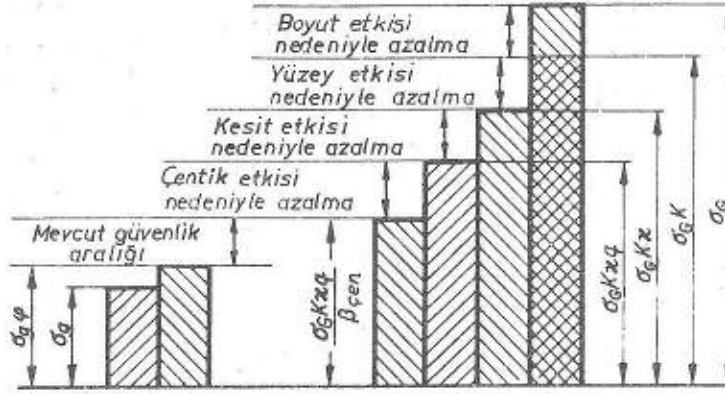
- Yüklerin seviyesi, zamanla değişimi ve bunların tahminindeki gerçeğe yakınlık,
- Malzemenin durumu (örneğin mikroyapı, homojenlik, özelliklerin anizotropisi, iç gerilme durumu),

\*)

$$v = \frac{\sigma_A(\sigma_{0,2}) \text{ veya } \sigma_K}{\text{Parçadaki en büyük gerilme}}$$

- Hesaplanacak parçaların imalat teknolojisine olan hakimiyet.

Bütün bu veriler belirli ise, ayrıca eş veya benzer parçalarda uygulamaya ilişkin deneyimler ile işletme testleri sonuçlarından yararlanma olanağı varsa ve hasar oluşması halinde teknik veya ekonomik bir facia doğması tehlikesi yoksa, emniyet katsayısı genellikle 1,5...2,0 arasında seçilir. Yorulma dayanımı için emniyet katsayıları bu değişik faktörlerin etkilerinin tam olarak bilinemediği oranda yüksek alınır. Tüm etkenlerin tam olarak değerlendirilmesinin mümkün olduğu durumlarda emniyet katsayısı 1,5'e kadar düşürülebilir.



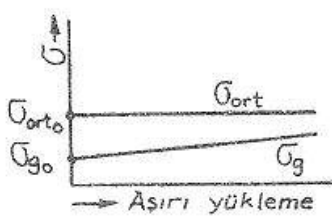
Şekil-150: Yorulma zorlamalarında emniyet katsayısının saptanmasının şematik olarak gösterimi.

Emniyet katsayısının seçiminde, ayrıca en büyük gerilme genliklerinin hangi sıklıkta etkidiği de dikkate alınır. Yüksek genlikler seyrek olarak etkiliyorsa emniyet katsayısı da düşük seçilebilir.

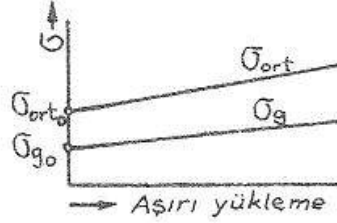
Makina parçalarının biçimlerinin, işletme koşullarının ve zorlama türlerinin çok değişik olması nedeni ile emniyet katsayıları için genel olarak geçerli değerlerin belirlenmesi mümkün değildir. Her bir özel durum için, işletme koşulları ve oluşabilecek bir yorulma hasarının doğuracağı sonuçlar dikkate alınarak emniyet katsayısı seçilir; bu seçimlerde büyük ölçüde deneyimlerden yararlanılır.

Bir makina elemanının hangi güvenlikle kullanıldığının saptanması için aşırı zorlamalar sırasında yüklenme karakteristiğinin, yani parçanın kesitlerindeki ortalama gerilme ve gerilme genliğinin nasıl değiştiğinin bilinmesi gereklidir. Bazı durumlarda  $\sigma_{ort}$  ortalama gerilme, bazen de ortalama gerilmenin gerilme genliğine

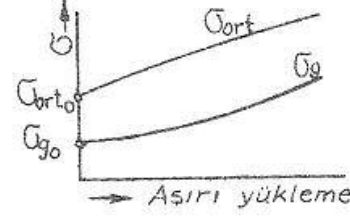
olan oranı  $(\sigma_{ort}:\sigma_g)$  sabit olabilir.



Şekil-151:  $\sigma_{ort} =$  sabit için yüklenme karakteristiği.



Şekil-152:  $(\sigma_{ort}:\sigma_g) =$  sabit için yüklenme karakteristiği.



Şekil-153:  $\sigma_{ort} = f(Y)$  ve  $\sigma_g = f(Y)$  genel durumu için yüklenme karakteristiği.

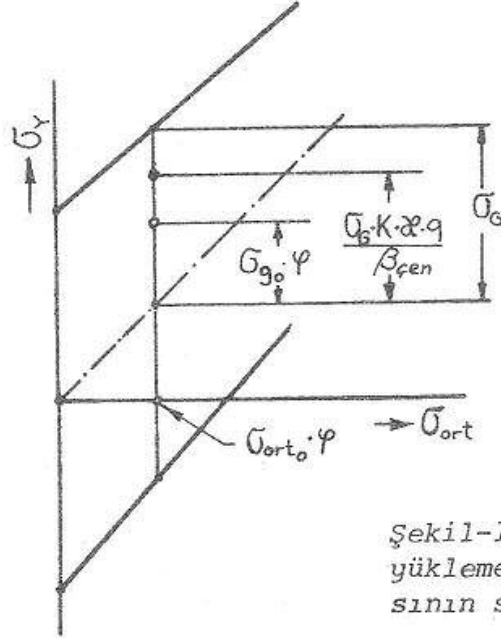
Şekil-151'de ortalama gerilmenin, Şekil-152'de de  $(\sigma_{ort}:\sigma_g)$  oranının sabit kalması halinde yüklenme karakteristikleri verilmiştir. Sabit ortalama gerilme durumunda artan aşırı yüklenme ile gerilme genliği doğrusal artmakta, sabit  $(\sigma_{ort}:\sigma_g)$  oranında ise ortalama gerilme ve gerilme genliği birlikte doğrusal olarak değişmektedirler. Uygulamada bu iki özel hal dışında, ortalama gerilmeler ve gerilme genlikleri aşırı yüklenme sırasında çoğunlukla belirli bir kurala bağlı olmaksızın farklı ölçülerde değişebilirler. Bu genel durum Şekil-153'te şematik olarak gösterilmiştir.

Çoğunlukla kesin yüklenme karakteristiği, ancak çalışma sırasında parçada, yapımı zor ve deneyimli personel gerektiren ölçmeler ile saptanabildiğinden,  $\sigma_{ort}$  ve  $\sigma_g$  değerlerinin artan aşırı yüklenme ile değişimi genellikle tahmin edilmek zorunda kalınır. Şekil-154,  $\sigma_{ort} =$  sabit özel durumu için, (5) denkleminde kullanılacak yorulma dayanımı gerilme genliği  $\sigma_G$  değerinin nasıl bulunacağını göstermektedir.

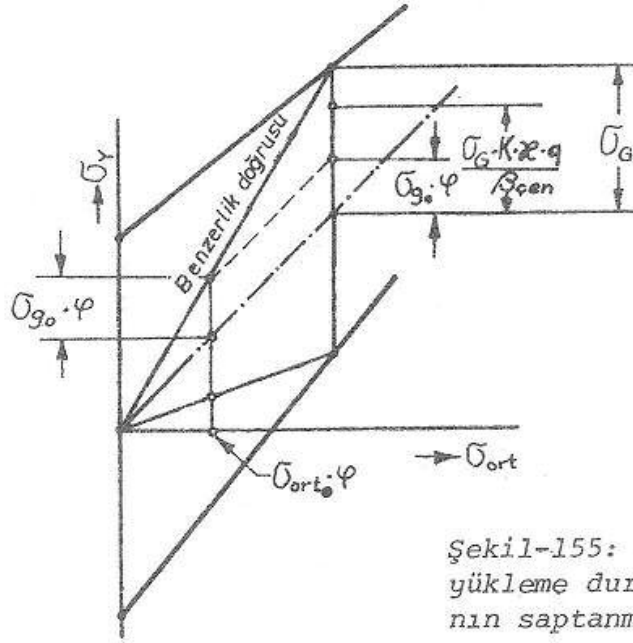
Şekil-155'de  $(\sigma_{ort}:\sigma_g) =$  sabit hali ele alınmıştır. Görüldüğü gibi, yorulma diyagram başlangıcından ve  $\sigma_{ort0} \cdot \varphi$  için  $\sigma_{g0} \cdot \varphi$  gerilme genliğini veren noktadan geçen bir benzerlik doğrusu çizilerek aşırı yüklemeye dikkate alınacak yorulma dayanımı genliği  $\sigma_G$  bulunur.

$(\sigma_{ort}:\sigma_g)$  oranı ile birlikte  $\sigma_{alt}$  gerilmesi de sabit kalırsa emniyet katsayısının nasıl saptanacağı Bölüm-8.6 daki 5. sayısal örnekle açıklanmıştır. Anılan örnekte ve ilerdeki bazı hesaplamalarda görüleceği gibi,  $\beta_{çen}$  uygulamada çoğunlukla malzemenin indirgenmiş yorulma dayanımının değil, işletme sırasındaki zorlamalara ilişkin gerilme değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bunun için  $\beta_{çen}$  tanımına tam uymamakla birlikte, çentikli parçada oluşan gerilme tepesi  $\sigma_{maks}$  ile anma gerilmesi  $\sigma_{an}$  arasındaki

$$\sigma_{maks} = \sigma_{an} \cdot \beta_{çen}$$



Şekil-154:  $\sigma_{ort} = \text{sabit}$  için aşırı yüklenme durumunda emniyet katsayısının saptanması\*.



Şekil-155:  $\sigma_{ort}/\sigma_g = \text{sabit}$  için aşırı yüklenme durumunda emniyet katsayısının saptanması\*.

\*  $\sigma_{g0}$  aşırı yüklenmemiş durumdaki değerlerdir (Bak Şekil-153). Emniyet katsayısı her iki durumda da

$$v = \frac{\sigma_g \cdot K \cdot \alpha \cdot q}{\sigma_{g0} \cdot \varphi \cdot \beta_{\text{çen}}} \text{ dır.}$$

bağıntısından\* yararlanılır. Bu durumda malzemenin indirgenmiş yorulma dayanımı genliği  $\sigma_G' = \sigma_G \cdot K \cdot \mathcal{L} \cdot q$  ve darbe etkisi de düşünülüp parçadaki gerilme tepesi genliği  $\sigma_{\text{maks}g} = \sigma_g \cdot \varphi \cdot \beta_{\text{çen}}$  olarak alınır, v emniyet katsayısı için (5) eşitliği değişik yoldan aynen bulunmuş olur:

$$v = \frac{\sigma_G'}{\sigma_{\text{maks}g}} = \frac{\sigma_G \cdot K \cdot \mathcal{L} \cdot q}{\sigma_g \cdot \varphi \cdot \beta_{\text{çen}}}$$

#### 6.7. Yorulma Zorlamaları Altındaki Makina Parçalarının İşletme Dayanım Deneyleri Yardımıyla Boyutlandırılması

Bölüm 6.1'den 6.5'e kadar verilen bilgilerden de görüldüğü gibi, makina parçalarının yorulma dayanımlarının hesaplanmasında birçok belirsizlikler bulunmakta ve bu durum seçilen bir emniyet katsayısı ile dengelenmektedir. Bu belirsizlikler çoğunlukla kullanılan boyut etkisi, yüzey etkisi v.b. ile yorulma çentik katsayılarından kaynaklanmaktadır.

Parçalar üzerinde gerçek zorlamaya benzeterek yapılan deneylerle bu belirsizliklerin giderilmesine çalışılır. Söz konusu deneyler İşletme Yorulma Dayanımı Deneyleri [13] [14] [15] [16], saptanan değerler de İşletme Yorulma Dayanımı olarak adlandırılır. Bu tür deneylerin yapılabilmesi için, zorlama şekli yükleme kollektifi ve gerekli yorulma ömrü ile belirlenir. İşletme yorulma dayanımı deneyleri gerçek zorlamalara olanaklar ölçüsünde yakın olacak şekilde, gerekirse korozif ortamlarda ve doğrudan doğruya makina parçaları üzerinde yapılır.

Sürekli yorulma ve yorulma dayanımı değerlerinin düz veya çentikli deney parçalarında saptanan malzeme özellikleri olmasına karşın, işletme yorulma dayanımı, malzeme yanında teknolojik ve konstrüktif etkileri de içeren ve makina parçalarına, makina gruplarına veya makinanın tümüne yorulma zorlaması uygulanarak bulunan bir değerdir. Yorulma zorlaması, yüklerin büyüklüğü ve yönünün zamana bağlı olarak değişimler gösterdiği bir zorlama türüdür. Bu tanımda tek ve çok kademeli yorulma deneyleri, zorlama duraklamaları, çalışma sıcaklığı, frekans etkisi, korozif etki v.b. kapsamaktadır. İşletme yorulma deneyleri ancak uygulanan zorlama, duraklamalar işletme sıcaklığı, korozif ortam v.b. bakımlardan gerçeğe yakın olmaları halinde incelenen parçanın gerçek

\* ) Söz konusu bağıntı  $\sigma_{\text{maks}}$  ve  $\sigma_{\text{an}}$ 'ya ait  $\sigma_{\text{ort}}$  ortalama gerilmesi,  $\sigma_g$  gerilme genliği v.b. tüm büyüklükler için geçerlidir.

davranışları hakkında güvenilir sonuçlar verirler.

Böyle bir deneyin yapılması çoğu zaman mümkün olmadığından, elde edilen sonuçlar yine de belirsizlikler içerebilir. İşletme yorulma deneylerinin önemi çoğunlukla incelenen parçanın dayanımı üzerine değişik parametrelerin etkilerinin karşılaştırılmasındadır.

İşletme yorulma dayanımının saptanmasında karşılaşılan başlıca sorunlar, deney süresinin bazen gereğinden kısa tutulması zorunluluğundan, yük kabullerindeki hatalardan [17] [18], işletme zorlamalarının ölçüm ve değerlendirilmesinden, yük kollektifinin oluşturulması ve bunların deneylerle tekrarlanabilir şekilde uygulanmasından doğar. Sonuçlar, parçanın üretim yöntemi ile ilgili faktörlerden, düz veya çentikli deney parçalarına göre, daha çok etkilenir ve doğal olarak çok daha fazla dağılım gösterirler. Kesin ve kullanılabilir sonuçlar elde edilmesi, ancak istatistiksel değerlendirmeye imkan verecek kadar çok sayıda parçanın denenmesi ile sağlanabilir.

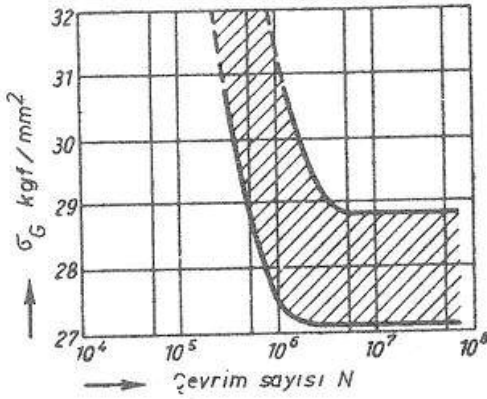
İşletme yorulma dayanımı deneyleri, çok pahalı ve zaman alıcı olduklarından, ancak süreli yorulma bölgesindeki dayanım özelliklerinin tam olarak kullanılmasını gerektiren (örneğin uçak ve diğer taşıtların üretiminde) çok kritik makina parçaları ve grupları için uygulanırlar.

#### 6.8. Süreli Yorulma Dayanımı İçin Hesap Yöntemi

Makina parçalarının süreli yorulma dayanımı, yani belirli bir yorulma ömrü için hesaplanması, bu konuda yeterli sayıda araştırma sonucu bulunmadığından sadece yaklaşık olarak yapılabilir. Böyle bir hesaplama yönteminin gerçekleştirilmesi sınırlı ömürlü makina parçalarında boyutların gereğinden büyük seçilmemesini ve dolayısıyla malzeme tasarrufunu sağlar. Sınır çevrim sayısından daha küçük olan kırılma çevrim sayılarında, taşınabilir gerilme genliği doğal olarak yorulma dayanımından daha büyüktür. Süreli yorulma dayanımı için hesaplanan makina parçalarında işletme yorulma dayanımı deneylerinin de yapılması gereklidir. Bu tür deneyler süreli yorulma bölgesinde yorulma ömrü olarak, parlatılmış düz deney parçalarındakinden daha büyük dağılımlar göstermektedir. Şekil-156, C45 çeliğinin karşılığı olan bir çelikten üretilmiş, parlatılmış deney parçaları üzerinde yapılan yorulma deneylerinin dağılım alanını vermektedir [19]. Bu dağılım alanı 200 deney parçası yardımı ile saptanmıştır. Süreli yorulma dayanımı bölgesinde dağılım genliği daha büyüktür.  $N=10^6$  çevrim sayısı için süreli yorulma dayanımının gerilme genliği 27,5 ile 31,5 kgf/mm<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Dağılımın seviyesi için sayısal



bir değer aranırken belirli bir gerilme genliği esas alınır, örneğin 30 kgf/mm<sup>2</sup>. Bu gerilme genliği için yorulma ömrünün en küçük değeri olarak  $N_{\min}=4.10^5$ , en büyük değeri olarak  $N_{\max}=1,7.10^6$  ve dolayısıyla ( $N_{\min}$ :  $N_{\max}$ ) oranı için 1:4,3 değeri elde edilir. Gassner'in [20] verilerine göre seri olarak üretilen makina parçalarında yorulma ömrü dağılımı yaklaşık olarak 1:3'tür. Yüzey pekleştirme işlemleri uygulanmış parçalarda bu dağılım 1:2'ye kadar düşebilir. Bütün bu bilgiler, makina elemanlarının süreli yorulma ömrü için hesaplanmasındaki güçlükleri ortaya koymaktadır.



Şekil-156: Alaşımsız bir çeliğin (C45) eğme değişken zorlamaları altındaki Wöhler eğrisinin dağılım alanı.

Kimmelman [21] parlatılmış bir deney parçası veya makina elemanının süreli değişken yorulma dayanımının yaklaşık olarak hesaplanmasına imkan veren aşağıdaki formülü önermiştir.

$$\sigma_{D_{\text{süre}}} = \sigma_D \sqrt{\frac{N_s}{N_{\text{süre}}}} \quad (6)$$

(6) denkleminde  $\sigma_D$  süre,  $N_{\text{süre}}$  çevrim sayısı için aranan süreli değişken yorulma dayanımı,  $\sigma_D$  değişken yorulma dayanımı ve  $N_s$  sınır çevrim sayısıdır. Bu denklemin kullanımında, kök üsteli m değerinin büyük dağılım göstermesi nedeniyle güçlükler doğmaktadır. Sınır çevrim sayısı  $N_s=10^7$  olan çeliklerde Kimmelman'a göre  $m=6...10$ 'dur. Kimmelman tarafından sonuçları verilen diğer araştırmalarda ise m değeri, düz deney parçaları için 8,4 ilâ 12 veya 15 ilâ 20; çentikli deney parçaları için 15 ilâ 20 veya 9 ilâ 14 arasında bulunmuştur. Kök üsteli m hakkındaki bu çelişkili bilgiler sözkonusu değerlerin tamamen Wöhler eğrisinin biçimine bağlı olduğunu göstermektedir.

Belirli bir  $N_{\text{süre-1}}$  çevrim sayısı için süreli değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{D_{\text{süre-1}}}$  belirli ise, bir diğer  $N_{\text{süre-2}}$  çevrim sayısı için süreli değişken yorulma

dayanımı

$$\sigma_{\text{Dsüre-2}} = \sigma_{\text{Dsüre-1}} \sqrt{\frac{N_{\text{süre-1}}}{N_{\text{süre-2}}}} \quad (7)$$

denklemini yardımıyla bulunabilir.

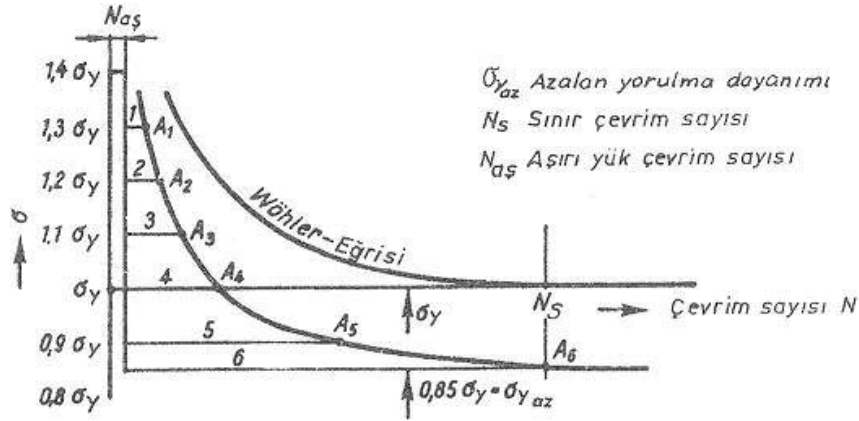
Sürekli yorulma dayanımı bölgesi için hesap işlemleri çok güvensiz olacağından imkanların elverdiği ölçüde deney yapmaya çalışmalıdır. Hesaplamalarda ise, bu deneylerde bulunan yorulma ömrü dağılım alanının alt sınırını veya belirli bir dayanma olasılığına (örneğin %90) karşıt gelen değer kullanılmalıdır.

#### 6.9. Aşırı Yüklemelerin Yorulma Dayanımına Etkisi

Bir makina parçasında çentik ve darbe etkisi dikkate alınarak hesaplanan gerilmeler, bu parçanın boyut ve yüzey etkileri dikkate alınarak indirgenmiş yorulma dayanımının altında kaldığı sürece yorulma kırılması tehlikesi yoktur. Şekil-9'daki hasar eğrisi ile de gösterildiği gibi, düz deney parçalarında sürekli yorulma dayanımı bölgesinde, daha sonraki yorulma dayanımını etkilemeyen aşırı zorlamalara belirli oranda müsaade edilebilir. Ancak yorulma dayanımı üzerinde bulunan ve hasara neden olmadan taşınabilen bu gerilme genlikleri Şekil-9'da belirtilen hasar bölgesi dışında kalmalıdır. Çentikli deney parçalarında veya makina elemanlarında da durum benzerdir. Yani Wöhler eğrisi yanında bir de hasar çizgisi bulunur ve bu çizgi altında kalan aşırı yüklemeler herhangi bir hasar oluşturmaz. Söz konusu aşırı yüklemelerin değişik seviyelerde olması ve etkiye sırası önemli değildir.

Aşırı yüklemelerin hasar alanı içine girecek seviyede olması halinde durum farklıdır. Bu zorlamalar çok az sayıda çevrim sayısı için uygulanırsa, malzemenin pekleşme etkisi nedeniyle yorulma dayanımının artması söz konusu olabilir. Çok kısa süre etkileyen birkaç aşırı yüklemenin yorulma dayanımını yükseltmesi malzemenin yorulmaya alışması olarak adlandırılır. Bu özellik her malzemede bulunmayıp yumuşak ve orta sertlikteki çeliklerde belirgin olarak görülür. Aşırı yüklerin uygulandığı çevrim sayısı artarsa, hasar eğrisi üzerinde bir noktaya ulaşıldığından malzemede hasar oluşur ve aynı parçaya daha düşük gerilmelerde yorulma deneyi uygulanırsa yorulma dayanımının düştüğü görülür. Yorulma dayanımındaki bu düşüş aşırı yüklemenin seviyesi ve uygulandığı çevrim sayısına bağlıdır. Möller ve Hempel'in [22] yaptığı deneyler bu tür bir hasarın gerilim giderme veya normalizasyon tavlama ile yok edilemeyeceğini göstermiştir. Çevresel eğme uygulanmış deney parçalarında en

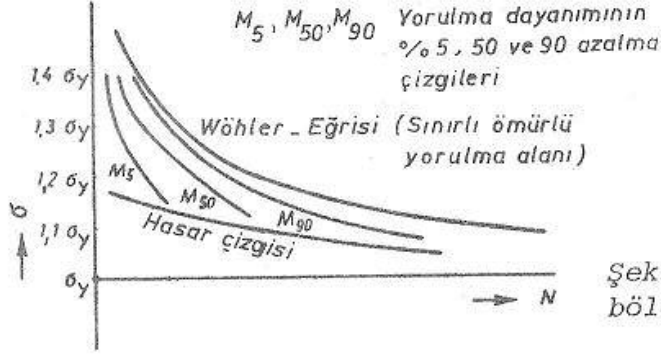
az 0,5 mm'lik bir yüzey tabakasının talaş kaldırılarak alınması ile hasarlı bölge giderilebilmiştir. Aşırı yüklemenin etkisini deneysel olarak saptamak için, başlangıçta belirli bir süre belirli düzeyde aşırı yüklenmiş deney parçalarına sonra daha düşük gerilmeler uygulanarak kırılma çevrim sayıları bulunur. Şekil-157'de  $\sigma_{aş} = 1,4 \sigma_Y$  gerilmesi ile  $N_{aş}$  çevrim sayısı kadar aşırı yüklenmiş durumda yorulma dayanımındaki düşüşün aşağıda açıklanan yöntemle saptanması şematik olarak gösterilmiştir.



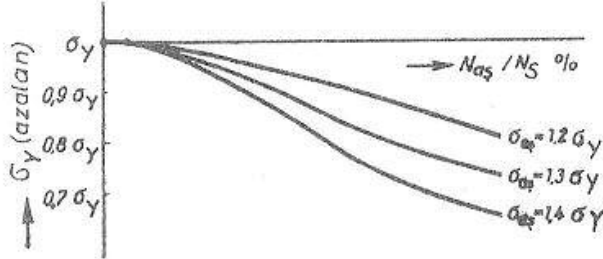
Şekil-157: Wöhler eğrisi ve aşırı yükleme nedeniyle yorulma dayanımındaki düşüşler.

1 numaralı deney parçası  $\sigma_{aş} = 1,4 \sigma_Y$  aşırı yükü ile  $N_{aş}$  çevrim sayısı kadar önyüklenir ve daha sonra  $1,3 \sigma_Y$  ile yüklemeye devam edilir. Kırılma örneğinin  $A_1$  ile gösterilen noktada oluşur. 2 numaralı deney parçası aynı önyüklemeyi sürdürür, 1,2  $\sigma_Y$  gerilmesi ise  $A_2$  çevrim sayısında kırılma oluşana kadar yorulmaya tabi tutulur. Aynı şekilde 3,4 numaralı deney parçaları ile deneylere devam edilerek  $\sigma_{aş}$  gerilmesinin  $N_{aş}$  çevrim sayısı kadar aşırı yüklenmesi sonunda sınır çevrim sayısına ulaşılan durum bulunur. Şekil-157'de verilen örnekte  $\sigma_{aş}$  ve  $N_{aş}$  aşırı yükleme şartı için azalan yorulma dayanımının  $0,85 \sigma_Y$ 'de olduğu görülmektedir. Bunun anlamı, seçilen örnekte aşırı yüklemenin %15'lik bir yorulma dayanımı düşüşüne neden olmasıdır. Benzer deneyler yardımıyla Wöhler eğrisinin süreli yorulma dayanımı bölgesine azalma çizgileri çizilebilir. Bu çizgiler, kendilerine ulaşan gerilme ve çevrim sayılarındaki aşırı yüklemelerin yaratacağı yorulma dayanımı azalışını yüzde olarak belirtirler. Şekil-158'de Wöhler ve hasar eğrileri ile birlikte verilen azalma çizgilerinden görüleceği üzere değişik  $\sigma_{aş}$  ve  $N_{aş}$  çiftleri yorulma dayanımında aynı oranda düşüşe neden olabilirler. Yorulma dayanımındaki bu azalmalar, Şekil-159'da  $(N_{aş}:N_S)$  oranına bağlı olarak gösterilmiştir.

tir ( $N_S$ :Sınır çevrim sayısı). Şekildeki eğriler  $1,4 \sigma_Y$ ,  $1,3 \sigma_Y$  ve  $1,2 \sigma_Y$  aşırı yüklemelerini belirtmektedir.



Şekil-158: Wöhler eğrisi ve hasar bölgesindeki azalma çizgileri,



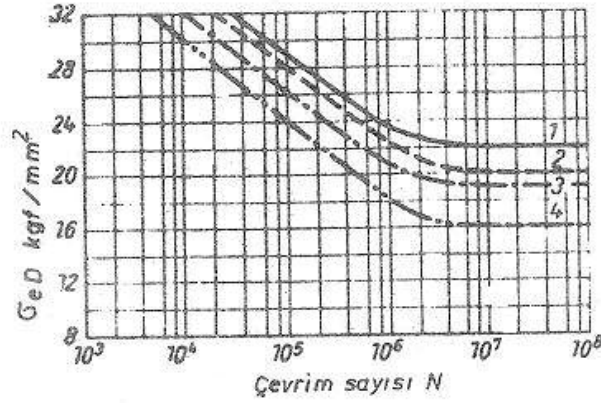
Şekil-159:  $N_{as}/N_S$  oranına bağlı olarak yorulma dayanımındaki azalmalar.

St 38 çeliği için, yorulma dayanımı üzerindeki gerilme genlikleri ile aşırı zorlanmış parçaların eğme değişken yorulma dayanımındaki düşüşler Şekil-160'ta verilmiştir [23]. Bu gösterim tarzında sadece yorulma dayanımı düşüşleri değil, tüm Wöhler eğrisinin konumundaki değişim görülmektedir.

Şimdiye kadar yapılan açıklamalardan, aşırı yüklemeye dışı gerilmelerin hasar bölgesine giren aşırı yüklemeler dolayısıyla azalan yorulma dayanımının altında kalması halinde, herhangi bir tehlikenin sözkonusu olmayacağı anlaşılmaktadır. Ancak şüpheli bir durum varsa kesin değerlendirme için deney yapılması gerekir.

Yorulma dayanımı üzerinde az sayıda, fakat değişik yük seviyelerindeki zorlamaları içeren yük kollektifleri etkirse, bu hasarın nasıl toplanacağına belirlenmesi özel bir sorun oluşturur. Hasar birikiminin saptanması için değişik teoriler önerilmiştir, bunlar arasında varsayımlar bakımından farklar mevcuttur:

1. Doğrusal hasar birikimi: Çok kademeli zorlamalarda, toplam hasar kısmî hasarların oluşma sırasına bağlıdır. Bu teori Miner kuralı olarak tanınır [24].



Şekil-160: Aşırı zorlanmış parçaların eğme değişken yorulma dayanımındaki (çevresel eğme) düşüşler; malzeme St 38.

1. eğrisi: aşırı yükleme yok.
2. eğrisi:  $\sigma_{a\dot{s}} = 32 \text{ kgf/mm}^2, N_{a\dot{s}} = 1.10^4$
3. eğrisi:  $\sigma_{a\dot{s}} = 32 \text{ kgf/mm}^2, N_{a\dot{s}} = 2.10^4$
4. eğrisi:  $\sigma_{a\dot{s}} = 32 \text{ kgf/mm}^2, N_{a\dot{s}} = 2,5.10^4$

2. Doğrusal olmayan hasar birikimi: Bu varsayıma dayanan teorilerde kısmi hasarların oluşma sırasının toplam hasarı etkilediği kabul edilir.

Hasar birikimine ilişkin değişik teoriler, gerçek hasarın ancak yaklaşık olarak saptanabilmesine imkân verir; çünkü bu teoriler çatlak başlangıçlarının oluşması ve çatlak ilerleme mekanizmaları gibi hususları dikkate almamaktadır. Bu olaylar dış yüklerin yanında, malzeme yapısı, iç gerilmeler, sıcaklık ve ortama bağlıdır. Yorulma dayanımı üzerindeki gerilme genlikleri etkisiyle malzeme özellikleri (örneğin akma sınırı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, elastiklik modülü) farklı oranda değişirler. Bu nedenle genel olarak geçerli ve kullanılabilir sonuçlar verecek bir hasar teorisi malzeme içinde oluşan yapısal mekanizmaları da dikkate almalıdır [25] [26].

#### 6.10. Bileşik Zorlamalar Altında Yorulma Dayanımının Hesaplanması

Bu bölümde çok eksenli ve bileşik zorlamalar için geçerli değişik mukavemet hipotezleri mukavemet bilgisi kitaplarında bulunabilecek ayrıntılara girilmeden verilecektir.

Bileşik yorulma zorlamaları ile şimdiye kadar yapılan deneyler, tok malzemeler için en çok sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezinin kullanılabilir sonuçlar verdiğini göstermiştir. Gevrek malzeme veya keskin çentikli parçalar için ise en büyük normal gerilme hipotezi tercih edilmelidir. Yorulma zorlamaları altında çalışacak parçalar çoğunlukla tok malzemelerden üretildiğinden sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezi

önem kazanmaktadır. Uygulamada normal ve burma gerilmelerinin aynı anda etkimesi durumuna çok sık raslanmaktadır; buradaki normal gerilme çekme, basma veya eğme zorlamaları sonucu oluşabilir. Sabit biçim değiştirme enerjisi hipotizinde kesite aynı anda etkiyen normal gerilme  $\sigma$  ve kayma gerilmesi  $\tau$  ise, aşağıdaki denklem yardımıyla bir  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesi hesaplanabilir:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Bu hipotez başlangıçta elastiklik sınırı içinde kalan statik zorlamalar için önerilmiştir ve eğme akma sınırı  $\sigma_{eA}$ 'nın burma akma sınırı  $\tau_A$ 'ya oranının 1,73 olduğunu varsaymaktadır. Anılan oran statik zorlamalarda tok çelikler için hipotezdeki varsayıma yakındır.

Yapılan yorulma deneyleri, eğme yorulma dayanımının burma yorulma dayanımına oranı için de benzer değerler alınabileceğini göstermiştir. Bu nedenle bileşik zorlamaların sözkonusu olduğu durumlarda sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezinin en uygun sonuçları vermesi beklenir.

Düz ve çentikli çubuklarda yapılan bileşik yorulma zorlamaları deneylerinin sonuçları [27] [28] [29] [30] [31] değerlendirilerek bazı formüller oluşturulmuştur. Ancak bunlar kullanım açısından pratik olmayıp sadece belirli türden parçalar (örneğin enine delikler içeren miller) için geçerlidirler. Bu nedenle bileşik statik zorlama durumundakine benzer aşağıdaki hesaplama yönteminin kullanılması amaca daha uygundur. Sözkonusu yöntemin uygulanmasında yapılabilecek hata küçüktür ve hesaplamadaki emniyet katsayısı kapsamına girer. Buna göre  $\sigma_g$  ve  $\tau_g$  anma gerilme genlikleri gerekli yorulma çentik katsayıları (eğme için  $\beta_{çen_e}$  ve burma için  $\beta_{çen_b}$ ) ile (darbeli bir zorlama varsa ayrıca darbe sayısı ile de) çarpılarak elde edilen maksimum gerilme genlikleri için  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesi saptanır:

$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma_g \cdot \beta_{çen_e})^2 + 3 (\tau_g \cdot \beta_{çen_b})^2} \quad (8)$$

Karşılaştırma gerilmesinin belirlenmesinden sonra (9) denklemi ile  $v$  emniyet katsayısı hesaplanabilir.

$$v = \frac{\sigma_G \cdot K \cdot \mathcal{L}_e}{\sigma_k} \quad (9)$$

Diğer bir yöntem de hesapların bir karşılaştırma momenti  $M_k$  yardımıyla yapılmasıdır. Eğme ve burma momentleri bilinirse karşılaştırma momenti (10) denklemi yardımıyla bulunur.

$$\sigma_k = \frac{M_k}{W} = \sqrt{\left(\frac{M_e}{W} \cdot \beta_{\zeta_{en_e}}\right)^2 + 3 \left(\frac{M_b}{2W} \cdot \beta_{\zeta_{en_b}}\right)^2}$$

$$\sigma_g = \frac{M_e}{W} \quad \text{ve} \quad \tau_g = \frac{M_b}{W_{pol}} = \frac{M_b}{2W}$$

olduğundan

$$M_k = \sqrt{(M_e \cdot \beta_{\zeta_{en_e}})^2 + 0,75 (M_b \cdot \beta_{\zeta_{en_b}})^2} \quad (10)$$

yazılabilir.

Karşılaştırma momenti  $M_k$ 'nin saptanmasından sonra  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesine

$$\sigma_k = \frac{M_k}{W}$$

denklemini yardımıyla geçilir. Bu şekilde elde edilen karşılaştırma gerilmesi (9) denkleminde kullanılarak emniyet katsayısı bulunur. Bileşik zorlama halinde emniyet katsayısının ve karşılaştırma gerilmesinin belirlenmesi için diğer bir yöntem de indirgenmiş yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\zeta_{en}}$ -ind. ile çalışmaktır. Bu durumda karşılaştırma gerilmesi

$$\sigma_k = \sigma_g \cdot \beta_{\zeta_{en}} \text{-ind.} \quad (11)$$

olur. Burada

$$\beta_{\zeta_{en}} \text{-ind.} = \sqrt{\beta_{\zeta_{en_e}}^2 + 3 x^2 \beta_{\zeta_{en_b}}^2} \quad (12)$$

$$x = \tau_{an} / \sigma_{an} \quad \text{veya} \quad x = \tau_g / \sigma_g$$

dir. Bu şekilde elde edilen karşılaştırma gerilmesinden de (9) denklemini yardımıyla emniyet katsayısı bulunur. Belirli bir bileşik zorlama hali için (8), (10) veya (11) denklemleri karşılaştırma gerilmesi olarak aynı değerleri verirler. Çünkü (10) ve (11) zaten (8) denklemine dayanmaktadır.

Çoğunlukla bileşik statik zorlamalar, bazen de bileşik yorulma zorlamaları için kayma gerilmesi hipotezi kullanılmakta ve bu hipotezin statik zorlamalarda sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezinden daha uygun olduğu belirtilmektedir [32]. Anılan hipotez yardımıyla elde edilen teorik emniyet katsayısı sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezinde elde edilenden daha düşüktür. Kayma gerilmesi hipotezine göre karşılaştırma gerilmesi aşağıdaki denklem yardımıyla bulunur.

$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma_g \cdot \beta_{\zeta_{en_e}})^2 + 4 (\tau_g \beta_{\zeta_{en_b}})^2} \quad (13)$$

Karşılaştırma momenti  $M_k$  veya indirgenmiş yorulma çentik katsayısının saptanması için ise

$$M_k = \sqrt{(M_e \beta_{\text{çen}_e})^2 + (M_b \beta_{\text{çen}_b})^2} \quad (14)$$

$$\beta_{\text{çen-ind}} = \sqrt{\beta_{\text{çen}_e}^2 + 4 x^2 \beta_{\text{çen}_b}^2} \quad (15)$$

denklemleri kullanılır.

Gevrek malzemeler (kır dökme demir, sertleştirilmiş çelikler v.b.) veya yüksek gerilme yığılması bulunan parçalarda normal gerilme hipotezi daha uygundur. Burada karşılaştırma gerilmesi

$$\sigma_k = \frac{1}{2} \left( \sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4 \tau^2} \right) \quad (16)$$

olarak verilir. Emniyet katsayısı ise gene (9) denklemi ile hesaplanır.

Ancak uygulamada bileşik yorulma zorlamaları altında kırılğan malzemelerin veya yüksek çentik etkisi bulunan parçaların kullanılmasına çok ender raslanır.

(8), (9), (12), (13), (14), (15) ve (16) denklemleri sadece normal ve kayma gerilmelerinin aynı yükleme durumunda (değişken, dalgalı v.b.) olmaları halinde geçerlidir.  $\sigma$  ve  $\tau$ 'nin yükleme durumları farklı ise, denklemlerin  $\alpha_0$  zorlama oranı ile düzeltilmesi gereklidir. Bu oran, statik zorlamalar için

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{em}}{\varphi \cdot \tau_{em}} \quad (17)$$

olarak tanımlanır. (17) denklemindeki  $\varphi$  değeri (darbe etki sayısı ile karıştırılmamalıdır) biçim değiştirme enerjisi hipotezinde 1,73; kayma gerilmesi hipotezinde 2 ve normal gerilme hipotezinde 1 alınır. Zorlama oranının katılması ile kayma gerilmesi ve biçim değiştirme enerjisi hipotezleri aynı denklemi verdiklerinden, hesaplamalarda hangisinin kullanıldığı önem taşımaz. Statik yüklere ilişkin zorlama oranındaki emniyet gerilmeleri yerine, değişen yüklerin sözkonusu farklı durumları için geçerli eğme ve burma yorulma dayanımı değerleri konulup,

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_Y}{\varphi \cdot \tau_Y} \quad (18)$$

yazılabilir. Ancak  $\sigma_Y$  ve  $\tau_Y$  olarak,  $\sigma_{ort}$  ve  $\tau_{ort}$  ortalama



gerilmelerine ait yorulma dayanımlarının  $\sigma_{üst}$  ve  $\tau_{üst}$  üst gerilmeleri alınır (Bak.8.7).

$\alpha_o$  zorlama oranına yerverilmesi ile, biçim değiştirme enerjisi hipotezine dayanan (8) (10) ve (12) denklemleri aşağıdaki şekillere dönüşürler.

$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma \cdot \beta_{çen_e})^2 + 3(\alpha_o \cdot \tau \cdot \beta_{çen_b})^2} \quad (19)$$

$$M_k = \sqrt{(M_e \cdot \beta_{çen_e})^2 + 0,75(\alpha_o \cdot M_b \cdot \beta_{çen_b})^2} \quad (20)$$

$$\beta_{çen-ind} = \sqrt{\beta_{çen_e} + 3(\alpha_o \cdot x \cdot \beta_{çen_b})^2} \quad (21)$$

Kayma gerilmesi hipotezinin kullanılması durumunda da (13) (14) ve (15) denklemlerinde benzer düzeltmeler yapılmalıdır.

Bileşik yorulma zorlamalarında eğme ve burma için  $v_e$  ve  $v_b$  emniyet katsayılarının aşağıdaki gibi ayrı ayrı saptanması ve (22) denklemi ile emniyet katsayısı  $v$ 'nin bulunması da mümkündür.

$$v_e = \frac{\sigma_G \cdot K \cdot \alpha_e}{\sigma_g \cdot \beta_{çen_e}} \quad v_b = \frac{\tau_G \cdot K \cdot \alpha_b}{\tau_g \cdot \beta_{çen_b}}$$

$$\frac{1}{v^2} = \frac{1}{v_e^2} + \frac{1}{v_b^2} \quad (22)$$

(22) denklemi kısmen kayma gerilmesi hipotezini esas alır, kısmen de bu hipoteze bir yaklaşımı temsil eder.  $\sigma$  ve  $\tau$  'nun uygulamada genellikle raslanan oranları için (22) denklemi ile saptanan emniyet katsayısı, kayma hipotezinin kullanılması ile elde edilenden daha büyüktür. Aynı katsayı sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezi ile bulunana yakın olup, aradaki fark  $\sigma/\tau$  oranına bağlıdır.

Enine delikler içeren millerin bileşik yorulma zorlamasında normal gerilme tepeleri ile kayma gerilmesi tepelerinin delik kenarının değişik noktalarında oluştuğuna dikkat edilmelidir. Bu durumda karşılaştırma gerilmesi, normal ve kayma gerilmeleri tepeleri yardımıyla hesaplanırsa, gerilmeler gerçek durumdan daha yüksek çıkar.

Çekme kuvveti ve eğme momentinin birlikte uygulan-

masındaki gibi, değişik normal gerilmelerin ortak etkimesi sözkonusuysa gerilme tepeleri toplanmalıdır. Emniyet katsayısı ise basit yorulma zorlamalarında olduğu şekilde bulunur.

Çok eksenli normal gerilme durumunda yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$  ve darbe sayısı  $\varphi$  dikkate alınarak saptanan en büyük asal gerilmeler büyüklük sırasına göre  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  ise, sabit biçim değiştirme enerjisi hipotezine göre karşılaştırma gerilmesi, aslında statik zorlamalar için kullanılan (23) denklemi yardımıyla hesaplanır.

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (23)$$

Asal gerilmeler aynı işaretli ise (örneğin çekme), o zaman çok eksenli gerilme durumunun şekil değiştirmeyi engelleyici özelliğinden dolayı, gerçek yorulma dayanımı tek eksenli bir  $\sigma_k$  gerilmesinin etkimesine göre daha yüksek olur. Asal gerilmelerin işaretleri farklı ise, şekil değiştirme kolaylaşacağından yorulma dayanımı azalır.

(8)...(23) denklemleriyle açıklanan hesaplama yöntemi, esasında sadece iki zorlamanın aynı fazda olduğu bileşik yorulma zorlamaları için geçerlidir. Faz farklılıklarının veya değişik frekansların sözkonusu olduğu durumlarda, yukarıdaki yöntemle hesaplanan emniyet katsayıları gerçek emniyet katsayılarından daha düşük olur [30] [31].

- 
- [1] LEHR, E.: *Stahl u. Eisen* (1941) S.965...975.
  - [2] SERENSEN, S.W.: *Memoires Scientifiques Rev. Metallurg.* (1959) S.713...720.
  - [3] SAUER, G.: *Industrieanzeiger* (1965) S.95...104.
  - [4] KUDRJAVCEV, I.V. ve W.M.ANDRENKO: *Vestnik Maschinost.* (1964) S.50...54.
  - [5] KERMES, J. ve J.BUZEK: *IFL-Mitt.* (1969) S.377...384.
  - [6] SCHAAL, A.: *Metallkunde* (1951) S.147...154.
  - [7] SCHAAL, A.: *Metallkunde* (1951) S.279...284.
  - [8] EICHINGER, A.: *VDI-Z.* (1950) S.35...39.
  - [9] SERENSEN, S.W.: *Höhere Gestaltfestigkeit durch Oberflächenverfestigung.* VEB Verlag Technik (1954).
  - [10] KUDRJAVZEV, I.V. ve M.I.ALEKSANDROV: *Obrabotka zaroprocych splavor, Moskau* (1960) S.41...52.
  - [11] POMP, A., M.HEMPEL: *KWI-Mitt.* (1936) S.1...14.

- [12] TROST, A.: *Metall* (1952) S.665...674 ve 756...762.
- [13] GASSNER, E.: *ATZ* (1951) S.286...287.
- [14] GASSNER, E.: *Konstruktion* (1954) S.97...104.
- [15] GÜNTHER, W.: *IfL-Mitt.* (1963) S.50...59.
- [16] HEMPEL, M.: *Stahl u. Eisen* (1964) S.485...491.
- [17] PAASCH, F.: *IfL-Mitt.* (1963) S.210...219.
- [18] PAASCH, F.: *IfL-Mitt.* (1966) S.2...6.
- [19] EPREMIAN, E. ve R.F.MEHL: *Nat. Advis. Comm. Aeron., Techn. Note 2719* (1952).
- [20] GASSNER, E.: *Konstruktion* (1954) S.97...104.
- [21] KIMMELMANN, D.N.: *Berechnung von Maschinenteilen auf Dauer- u. Zeitschwingfestigkeit*, VEB Verlag Technik Berlin (1953).
- [22] MÖLLER, H. ve M. HEMPEL: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (1954) S.39..60.
- [23] MÜLLER-STOCK, H.: *Kohle u. Eisenforschung* (1938) S.83...107.
- [24] MINER, M.: *Journ. Appl. Mech.* (1954) S.159...164.
- [25] LAMMEL, E.: *IfL-Mitt.* (1963) S.66...73.
- [26] LAMMEL, E.: *IfL-Mitt.* (1965) S.343...351.
- [27] GOUGH, H. I.: *Proc. Inst. Mechan. Eng.* (1949) S.417...440.
- [28] PUCHNER, O.: *Schweiz. Archiv* (1951) S.46...63.
- [29] SAG, N.: *The Engineer* (1951) S.172...176.
- [30] THUM, A. ve W. KIRMSER: *VDI-Forschungsheft Nr.419* (1943).
- [31] LÜBECK, K.-H.: *Schweisstechnik* (1969) S.402...415.
- [32] BALEVSKY, A. T.: *Maschinenbautechnik* (1955) S.496...499.

## 7. YORULMA DAYANIMI HESAPLAMALARINDA GELİŞME YÖNLERİ

Kitabın buraya kadar olan bölümlerinde, çentik etkisinin var olması halindeki gibi homojen olmayan gerilme dağılımları için önerilen yorulma mukavemet hesaplamalarının bazı açılardan tatmin edici olmadığı görülmektedir. Özellikle boyut etkisi ve malzemelerin çentik duyarlılığı konularındaki bilgilerimiz sınırlıdır. Bu nedenle bazı araştırmacılar yorulma dayanımı hesaplamalarını yeni bir temele oturtmaya çalışmaktadırlar. Bu önerilerden birinde eşdağılım göstermeyen gerilmelerin bulunduğu düz ve çentikli çubuklarda yorulma dayanımını kontrol eden büyüklüğün en büyük gerilme  $\sigma_{maks}$  değil en büyük gerilme gradyeni

$$\frac{d\sigma_{maks}}{dx}$$

olduğu belirtilmektedir, Şekil-161. Gerilme gradyeni, tek veya çok eksenli gerilme durumlarında gerilme dağılımını veren eğrinin eğimidir. Bu eğim o noktadaki gerilmeye bölünürse oranlanmış gerilme gradyeni  $\chi$  elde edilir.

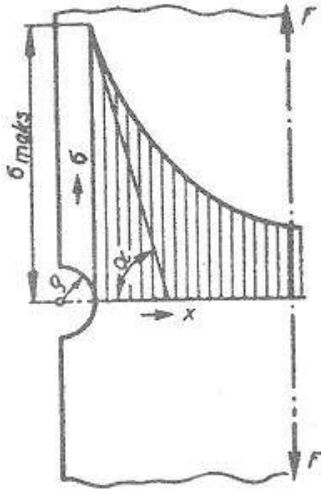
$$\chi = \frac{1}{\sigma_{maks}} \cdot \frac{d\sigma_{maks}}{dx} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (24)$$

Eğmeye zorlanan düz bir çubuk için Şekil-162'den de görüldüğü gibi

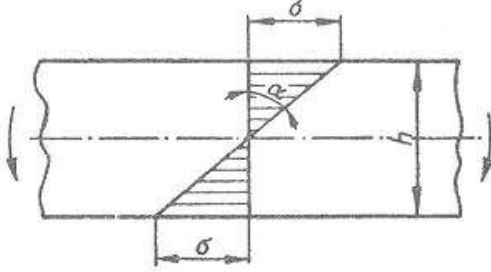
$$\chi = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dx} = \frac{1}{\sigma} \tan\alpha = \frac{2}{h} (\text{mm}^{-1}) \quad (25)$$

$$\tan\alpha = \frac{d\sigma_{maks}}{dx} \quad \left( \frac{\text{kgf/mm}^2}{\text{mm}} \right)$$

$\chi$ -değeri deney parçası kalınlığı arttıkça sifıra yaklaşır ve parça kalınlığı azaldıkça yükselir. Çentikli deney parçalarında oranlanmış gerilme gradyeni çentiğin yarıçapı  $\rho$ 'ya yani çentik keskinliğine bağlı olup, çentik biçiminden hemen hemen bağımsızdır. İncelenen çentikli kesit için gerilme dağılımı formüle edilebilirse, oranlanmış gerilme gradyeni de hesaplanabilir. Ancak böyle bir formülasyon genellikle mümkün olmadığından ve ayrıca gerilme gradyeni ölçümler yardımıyla da saptanamadığından, çentikli parçalar için  $\chi$  değerini tahmin etmek zorunda kalınır.



Şekil-161: Çentikli bir çekme çubuğunda gerilme dağılımı.



Şekil-162: Eğmeye zorlanan düz bir çubuk kesitindeki gerilme dağılımı.

Çentikli çekme çubukları için

$$\chi \approx \frac{2}{\rho} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (26)$$

çentikli eğme çubukları için (h:çentik dibindeki çubuk çapı)

$$\chi \approx \frac{2}{h} + \frac{2}{\rho} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (27)$$

burma zorlamaları altındaki çevresel veya boyuna çentikli yuvarlak çubuklar için

$$\chi \approx \frac{2}{d} + \frac{1}{\rho} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (28)$$

enine delikler içeren çubuklar için ( $\rho$ =delik yarı çapı),

$$\chi \approx \frac{3}{\rho} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (29)$$

kabul edilir.Yapılan yorulma deneyleri, yorulma dayanımının oranlanmış gerilme gradyenine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.Bu bağıntı çelikler için Şekil-163'de görülen karakterdedir.Oranlanmış gerilme gradyeninin artması ile yorulma dayanımının artışı, az zorlanan kısımların daha yüksek düzeyde zorlanan kenar bölgeleri üzerindeki koruyucu etkisi ile açıklanır. Koruyucu etki çentiğe duyar-sız, yani yumuşak olan çeliklerde daha belirgindir.

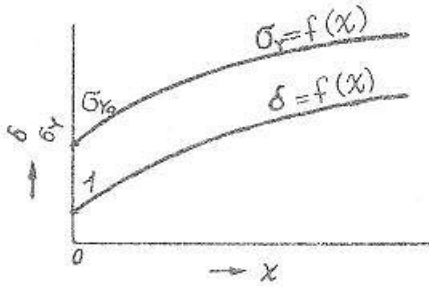
$\chi=0$  yani çekme veya çekme-basma zorlamaları altındaki düz deney parçası için yorulma dayanımı  $\sigma_{Y0}$  olsun,  $\sigma_Y=f(\chi)$  değeri  $\sigma_{Y0}$  ile bölünürse, yorulma dayanımı oranı  $\delta$  elde edilir.  $\delta$  böylece oranlanmış gerilme gradyeninin bulunduğu gerilme yığılması noktasında, düz deney parçasının  $\sigma_{Y0}$  yorulma dayanımının ne ölçüde arttığını göstermektedir:

$$\sigma_Y = \delta \cdot \sigma_{Y0} \quad (30)$$

Belirli bir malzeme için  $\delta =f(\chi)$  bilinirse, zorlanan parçanın anma gerilmesi  $\sigma_{an}$ , çentik katsayısı  $\alpha_{çen}$  ve  $\chi$  yardımıyla emniyet katsayısı  $v$  aşağıdaki formülden bulunabilir.

$$v = \frac{\delta \cdot \sigma_{Y0}}{\alpha_{çen} \cdot \sigma_{an}} \quad (31)$$

Yorulma dayanımının ve yorulma dayanımı oranının  $\chi$ 'ya bağlı olarak değişiminin saptanması için yapılan deneyler, bu değerlerin büyük dağılımlar gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.



Şekil-163: Yorulma dayanımı  $\sigma_Y$  ve yorulma dayanımı oranı  $\delta$ 'nın  $\chi$  ile değişimi.

Yorulma dayanımı ile  $\chi$  değeri arasında teorik, dolayısıyla matematik olarak ifade edilebilen bir bağıntı da yoktur. Şekil-163'deki eğrinin şekli malzemeye bağlıdır ve özellikle çelik ile demir dışı metaller arasında büyük farklılıklar vardır. Eşdağılım göstermeyen gerilmeler altında malzemelerin değişik davranışı kristal yapıda mikrogerilmeler yaratan olaylardan ileri gelir; bunların deneysel olarak ölçülmesi de olanaksızdır. Bu nedenle  $\rho^*$  yapısal çentik kavramı önerilmiştir. Malzeme içindeki olayları basit bir şekilde hesaplamalara dahil etmeye yarayan  $\rho^*$  değeri mm boyutunda olup malzemenin iç yapısına bağlıdır; matematiksel olarak formüle edilmesine veya ölçümler yapılarak izlenmesine de olanak yoktur. Bu değer ancak yorulma deneyleriyle saptanabilir. Elde edilen sonuçlara göre çekme, eğme ve burma zorlamaları için eşit izlenimini vermekte ve çelikler için milimetrenin binde biri ile onda birleri arasında değişmektedir.  $\rho^*$  değerinin yorulma dayanımı ile bağıntısı aranırsa, dağılımın çok büyük olduğu görülür. Oranlanmış gerilme gradyeni  $\chi$  ve yapı-

sal çentik  $\rho^*$ 'dan başka  $\chi=0$  için  $\sigma_{Y_0}$  yorulma dayanımı da belirli ise,  $\sigma_Y$  yorulma dayanımı aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir.

$$\sigma_Y = \sigma_{Y_0} \cdot (1 + \sqrt{\rho^* \cdot \chi}) \quad (32)$$

kayma gerilmeleri için

$$\tau_Y = \tau_{Y_0} \cdot (1 + \sqrt{\rho^* \cdot \chi}) \quad (33)$$

denklemleri kullanılır.  $\tau_{Y_0}$  değeri ince cidarlı borular üzerinde yapılan deneylerle saptanır.

Böylece emniyet katsayısı için

$$v = \frac{\sigma_Y}{\alpha_{\text{çen}} \cdot \sigma_{\text{an}}} = \frac{\sigma_{Y_0} (1 + \sqrt{\rho^* \cdot \chi})}{\alpha_{\text{çen}} \cdot \sigma_{\text{an}}} \quad (34)$$

(30) ve (32) karşılaştırılırsa  $\delta$  için de

$$\delta = 1 + \sqrt{\rho^* \cdot \chi} \quad (35)$$

elde edilir.  $\sigma_{Y_0}$  ve  $\rho^*$  değerleri malzemeye bağlıdır. Biçim etkisi  $\alpha_{\text{çen}}$ , deney parçası boyutu ise  $\chi$  ile dikkate alınır.

Yorulma çentik katsayısı sözkonusu büyüklükler cinsinden

$$\beta_{\text{çen}} = \alpha_{\text{çen}} \frac{1 + \sqrt{\rho^* \cdot \chi_{\text{düz}}}}{1 + \sqrt{\rho^* \cdot \chi_{\text{çentikli}}}} \quad (36)$$

olarak yazılabilir.

Önerilen (32) denklemi gayet açık ve basittir ve bu nedenle daha önceki bölümlerde belirtilen hesaplama yöntemine göre daha üstün olarak nitelendirilebilir. Ancak bu denklem de malzemenin kristal kafesindeki olayları temsil etmemektedir; çünkü burada sadece elastik zorlamalar için geçerli olan büyüklükler kullanılmış ve yorulma zorlamaları sırasındaki plastik şekil değiştirme olayları gözönünde tutulmamıştır;  $\chi$  ve  $\rho^*$  gibi deneyler veya tahminlerle saptanan, dolayısıyla büyük ölçüde hatalı olabilen değerler bulunmaktadır. Ayrıca deney parçası kalınlığının azalması ile homojen olmayan gerilme dağılımlarında, yorulma dayanımının artması, çok ince deney parçalarında dayanımın çok yüksek olması gerekir. (32) denkleminden doğal olarak çıkan bu sonuç gerçekte bağdaşmamaktadır. Bilindiği gibi çok ince deney parçalarında yorulma dayanımı tekrar düşmeye başlar. Aynı bağıntıda çentiğin boyutlarının, yapısal çentik  $\rho^*$ 'dan daima büyük olması gereği de vardır, aksi halde (32) denkleminin elde edilmesi sırasında yapılan kabuller yerine getirilmiş olmaz. Bunun dışında darbeler, süreli yorulma dayanımı alanındaki zorlamalar, aşırı yüklemeler, alçak veya yüksek çalışma sıcak-

lıkları veya bileşik zorlamaların hesaba katılmasında şimdiye kadarkinden daha yüksek emniyet sağlandığı söylenemez. Aşırı yüklemeler için (32) denkleminde konulacak  $\sigma_{y0}$  yorulma dayanımı değerinin saptanması da çok güçtür.

Yukarıdaki sakıncalara rağmen bu denklemin kullanılmasındaki pratiklik ortadadır, ancak bu denklemden her soruna çözüm olması da beklenmemelidir. Tasarımcıların değişik metal malzemeler için  $\chi$  ve  $\rho^*$  değerlerini veya  $\chi$ 'ya bağlı olarak yorulma dayanımını elde edilebilecekleri yeterli sayıda güvenilir deney sonucu bulunmadığından, ayrıca uygulamada gerekli deneyim kazanılmadığından, anılan yeni yönteme geçilmesi genel olarak tavsiye edilemez. Ancak ayrıntıları için [1...10] kaynaklarına başvurulabilecek bu hesaplama yönteminin daha da geliştirilmesi mümkündür; yeterli deney sonuçları ve deneyim birikimi oluştuğunda, hesaplama işlemlerini kitapta gösterilenden daha basit hale getireceği söylenebilir. Literatürde bu yönde belirtilen ümitlerin gerçekleşmesi için böylece daha beklemek gerekecektir. Gelecekte problemin matematiksel uygulamasının geliştirilmesinden çok, yorulma zorlamaları sırasında değişik malzemelerin davranışlarının tümüyle açıklanmasına ağırlık verilmelidir. Malzeme davranışları tam açıklanmadığı sürece, bununla ilgili belirsizlikler hesaplamalarda bugünkü oranda kalacak ve bu belirsizlikler her zaman tasarım hesaplarında yorulma dayanım genliği ile zorlama genliği arasında bir emniyet aralığı bırakılarak dengelenecektir.

Elastik zorlama alanında malzemeye bağlı bir "Yapısal Uzunluk" tanımı yapılarak mikro koruyucu etki teorisi yardımıyla; elastik-plastik alanda ise (örneğin süreli yorulma dayanımı bölgesi veya yüksek gerilmeler için) doğrusal olmayan gerilme yığılması teorisinin formülasyonu ile yorulma dayanımının hesaplanması girişimleri de yukarıdaki genel görüş içinde değerlendirilmelidir [11]. Burada da, önerilen denklemler ampirik karakterdedir ve deneysel olarak doğrulanmaları gerekir. Bu sorunlara mikro ve makro koruyucu etki teorileri ile bunlardan çıkan sonuçların incelendiği bir makalede değinilmektedir [12].

Öte yandan yorulma dayanımına etki eden malzeme ile ilgili faktörlerin çokluğu dikkate alınır (Bak Bölüm-1.5.2) , bu etkilerin tümünün hesapsal bir yöntem içinde kapsanması beklenmemelidir.

Malzeme tasarrufu konusunda tasarımcıları sınırlayıcı bir diğer önemli gerçek de yük kabulündeki belirsizliktir. Bu ise yeni hesaplama yöntemleri geliştirilerek giderilemez, ancak emniyet katsayısının yüksek seçilmesi ile dengelenebilir. Taşıt ve uçak sanayi gibi konstrüksiyonun emniyetine zarar vermeden az malzeme kullanmanın çok önemli olduğu alanlarda ise işletme yüklerinin deneysel olarak saptanması veya doğru olarak öngörülmesi özellikle çok güçtür.



- [1] MEUTH ,H.O.:Metall (1955)S.861...867.
- [2] NEUBER,H.:Die Technik (1951) S.287...291.
- [3] PETERSEN,C.:Metallkunde (1951)S.161...170.
- [4] PETERSEN,C.:VDI-Z (1952) S.977...979.
- [5] SIEBEL,E.:Die Technik (1946)S.265...269.
- [6] SIEBEL,E.ve M.PFENDER:Die Technik(1947)S.117...121.
- [7] SIEBEL,E.ve K.H.BUSSMANN:Die Technik (1948)S.249...252.
- [8] SIEBEL,E. ve H.O.MEUTH:VDI-Z.(1949)S.319...323.
- [9] SIGWART,H.:Konstruktion (1952)S.65...71.
- [10] TROOST,A.:Metall (1952)S.665...674 ve 756...762.
- [11] NEUBER,H.:Konstruktion (1968)S.245...251.
- [12] HEINRICH,B.:IfI-Mitt.(1969)S.322...327.

## 8. SAYISAL ÖRNEKLER

### 8.1. Hesaplama Sırası

Yorulma dayanımı hesaplamaları için bazı sayısal örnekler vermeden önce, aşağıda bir makina parçasının tasarımında izlenecek hesaplama sırası tekrar özetlenmiştir.

#### a) Dış kuvvetlerin ve momentlerin belirlenmesi

Dış kuvvet ve momentlerin belirlenmesi sırasında, bunların zamanla değişimi, en büyük yük ve bunun yüzde olarak sıklığı saptanmalı veya tahmin edilmelidir. Birçok durumda zorlamanın zamanla değişiminin şematik olarak gösterilmesi uygun olur.

#### b) Gerilmelerin saptanması

Mukavemet bilgisinin temel denklemleri yardımıyla ana gerilmeleri (ortalama, alt ve üst gerilmeler ve gerilme genliği) saptanır. Bu şekilde, bulunan  $\sigma_{an}$  ve  $\tau_{an}$  gerilmeleri sadece makina parçalarının düz kısımları için geçerlidir. Bileşik zorlamalar altında ise Bölüm-6.10'da açıklandığı gibi bir karşılaştırma gerilmesi  $\sigma_k$  hesaplanır.

#### c) Emniyet katsayısının seçimi

$v$  emniyet katsayısı Bölüm-6.6,da verilen esaslara göre seçilir. Hesaplama sırasında esas alınan değerler çoğunlukla tahmin edilmiş ise, bu durumda emniyet katsayısı biraz daha yüksek tutulmalıdır.

#### d) Malzemenin seçimi

Genel kural olarak tasarım ve hesaplama, sözkonusu elemanın mümkün olduğu kadar hafif olmasını sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Ancak bu kural abartılarak uygulanırsa, çok ince bir parçanın işletme zorlamaları altında büyük biçim değişimlerinden dolayı hatalı çalışması veya yüksek elastiklik nedeni ile kritik titreşim bölgesine girmesi tehlikesi doğar. En hafif tasarımı elde etme hedefi çoğunlukla ucuz malzeme kullanma esası ile çelişir. Bu nedenle tasarımcı, malzemeci ile beraber, hangi hedefin daha önemli olduğunu değerlendirerek, en ekonomik çözümü aramalıdır. Öncelikle alaşımsız makina yapı çeliklerinin kullanılmasına çalışılmalıdır. Çünkü alaşımlı çeliklere geçildiğinde, malzemenin dayanım özellikleri fiyatıyla aynı oranda artmaz. Dolayısıyla ekonomik bakımdan yüksek

dayanımlı alaşımsız çeliklerin seçilmesi avantajlıdır. Buna karşın anılan çeliklerde en önemli sakınca dayanım- la birlikte çentik duyarlılığının da artmasıdır.

Düzenli değişen ve darbesiz zorlamalarda alaşımsız çelikler normalize edilmiş durumda kullanılabilirler. Ancak böyle parçalar için, imalat sırasında doğabilecek iç gerilmeler dolayısıyla, 550° ile 600°C sıcaklıkları arasında bir gerilim giderme tava tavsiye edilir.

Hesaplanan makina parçaları düzensiz değişen ve hafif darbeli türde zorlanacaksa, alaşımsız çeliklere uygun bir ısıtma işlemi, örneğin ısıtma çeliklerine ısıtma işlemi uygulanmalıdır. Parçaların ayrıca aşınma dayanımını artırmak amacı ile yüzeyleri sertleştirilecekse, bunun yorulma dayanımı en yüksek değere ulaşacak şekilde yapılması gerekir. Alaşımsız çeliklerin ısıtma edilmiş durumda kullanımında, bu çeliklerin su alma derinliklerinin az olduğu gözönünde tutulmalıdır. Boyutların büyük olması halinde parçanın iç kısımlarında da belirli bir sertlik değerine ulaşabilmek için alaşımlı çeliklerin seçilmesi zorunludur. Ayrıca çeliklere ısıtma işlemi uygulanmasının oldukça pahalı bir işlem olduğu unutulmamalıdır.

Düzensiz değişen zorlamalarda ve kuvvetli darbelerin yani zorunlu kırılma tehlikesinin bulunduğu durumlarda, az veya orta alaşımlı çelikler ısıtma işlemi görmüş şekli ile kullanılmalıdır.

Çeliklerin alaşımlandırılmasında yararlanılan Mn, Ni, Mo, Cr, V, W v.b. elementler pahalı olduğundan, mümkün olduğu kadar az alaşımlı bir çelik olarak uygun ısıtma işlemleriyle optimal statik ve dinamik dayanım özelliklerinin elde edilmesi yoluna gidilmelidir.

Yüksek veya alçak sıcaklıklarda çalışacak malzemelerin seçiminde ise sözkonusu sıcaklıkların özellikle dikkate alınması gerekir.

Dökme demir, dökme çelik ve temper dökümün kullanımı ile ilgili genel bilgiler daha önce Bölüm-3.10, 3.11, 3.12 ve 3.13 de özetlenmişti.

e) İndirgenmiş yorulma dayanımının saptanması

Malzeme seçiminden sonra, yorulma dayanımı diyagramı yardımıyla aşırı zorlama durumu için yorulma dayanımı genliği  $\sigma_G$  bulunur. Malzemenin yorulma dayanımı diyagramı mevcut değilse, bu diyagram diğer mekanik özellikler yardımıyla yaklaşık olarak çizilebilir. Boyut, yüzey ve kesit etki sayılarının da saptanmasından sonra  $\sigma_G$  genliği bu değerlerle çarpılır, çentik etkisi varsa  $\beta_{çen}$  yorulma çentik katsayısına bölünür ve bu şekilde  $\sigma'_G$  indirgenmiş yorulma dayanımına geçilir. Bu değer emniyet katsayısının belirlenmesinde kullanılır.

## 8.2. Sayısal Örnek-1

St 50 çeliğinden faturalı bir mil yorulma zorlamaları altında fatura dibinden kırılmıştır. Mile darbesiz değişken bir burma momenti etkimektedir.

$$M_b = +215 \text{ kgfm}$$

$$D = 60 \text{ mm}$$

$$d = 50 \text{ mm}$$

$$r = 1 \text{ mm}$$

Anma gerilmesi\*

$$\tau_{an} = \frac{M_b}{W_{pol}} = \frac{21500}{24,54} \frac{\text{kgfcm}}{\text{cm}^3} \approx 880 \text{ kgf/cm}^2 \text{ dir.}$$

Şekil-24'e göre St 50 çeliğinin burma değişken yorulma dayanımı  $\tau_D = 14 \text{ kgf/mm}^2$  olup, görüldüğü gibi anma gerilmesi malzemenin yorulma dayanımının oldukça altındadır. Yüzey hassas işlenmiş olduğundan Şekil-149'dan yüzey etki sayısı  $\alpha_e = 0,9$  bulunur.

$$\alpha_b = 0,574 \alpha_e + 0,425$$

bağıntısından burma için geçerli yüzey etki sayısı  $\alpha_b = 0,94$  olarak hesaplanır. Boyut etki sayısı ise Şekil-145'e göre  $d=50 \text{ mm}$  için  $K=0,8$  dir.

Şekil-106'dan  $D:d=1,2$  oranı için  $c=0,70$  ve Şekil-104'den  $D:d=1,4$  oranı için alınan  $\beta_{\zeta en_0}$  değeri yardımıyla yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\zeta en}$  belirlenebilir. Çentik keskinliği  $r:d=1:50=0,02$  için  $\beta_{\zeta en_0}=1,65$  olduğundan

$$\beta_{\zeta en} = c \cdot (\beta_{\zeta en_0} - 1) + 1 = 0,70 \cdot (1,65 - 1) + 1 = 1,45$$

elde edilir.

Böylece indirgenmiş burma değişken yorulma dayanımının gerilme genliği olarak

$$\tau'_G = \frac{\tau_G \cdot K \cdot \alpha_b}{\beta_{\zeta en}} = \frac{14 \cdot 0,8 \cdot 0,94}{1,45} \text{ kgf/mm}^2 = 7,25 \text{ kgf/mm}^2$$

bulunur.

---

\*)  $\tau_{ang}$  anma gerilmesi genliği kısaca  $\tau_{an}$  anma gerilmesi olarak belirtilmiştir.

İndirgenmiş yorulma dayanımı genliği anma gerilmesinden düşüktür. Yani aşağıda görüldüğü gibi emniyet katsayısı 1'den küçük olup, yorulma kırılması kaçınılmazdır.

$$v = \frac{\tau'_G}{\tau_{an}} = \frac{725}{880} = 0,82$$

Bu nedenle mil daha yüksek dayanımlı, örneğin St 70 çeliğinden üretilmelidir. Yapılacak hesaplama St 70 kullanımında da yorulma hasarı tehlikesinin ortadan kalkmadığını göstermektedir. Şekil-26'ya göre St 70 için burma değişken yorulma dayanımı  $\tau_D=19 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Boyut etki sayısı yine  $K=0,8$  olur; çekme dayanımı arttığından yüzey etki sayısı  $\alpha_e=0,87$  ve dolayısıyla burma için  $\alpha_b=0,92$  elde edilir.

$D:d=1,4$  oranı için belirlenen  $\beta_{\text{çen}_0}$  yorulma çentik katsayısı da seçilen malzemenin dayanımının yüksek olmasından dolayı değişir. St 70 çeliği ve  $\sigma_K=80 \text{ kgf/mm}^2$  için Şekil-104'den  $\beta_{\text{çen}_0}=1,75$  bulunur; c değeri aynı kalacağından, yorulma çentik katsayısı

$$\beta_{\text{çen}} = 0,70 \cdot (1,75-1) + 1 = 1,52$$

olur. Bu değerler yardımıyla St 70 çeliği için indirgenmiş burma değişken yorulma dayanımı

$$\tau'_G = \frac{19 \cdot 0,8 \cdot 0,92}{1,52} = 9,20 \text{ kgf/mm}^2$$

emniyet katsayısı  $v$  ise

$$v = \frac{\tau'_G}{\tau_{an}} = \frac{920}{880} = 1,04$$

Görüldüğü gibi emniyet katsayısı 1'e çok yakındır ve daha yüksek dayanımlı alaşımsız bir çelik seçilmesi ile de yorulma hasarı tehlikesi ortadan kalkmamaktadır. Bunun nedeni yeni malzemede yorulma dayanımı artışı ile birlikte çentik duyarlılığının da artmasıdır. Dolayısıyla faturalı milin biçimini değiştirmek olanağı yoksa, çözüm olarak faturalı kısımda bir yüzey sertleştirmesi yapılması, ya da alaşımsız veya az alaşımlı bir ıslah çeliğinin ıslah edilmiş durumda kullanılması önerilebilir. Fatura dibindeki yuvarlatma yarıçapı değiştirilebilirse, daha ucuz olan St 50 çeliğinin normalize durumunda kullanılması mümkündür. Bu malzeme için aşağıda yapılan hesaplama da görüldüğü gibi, yuvarlatma yarıçapı  $r$ 'nin 5 mm'ye yükseltilmesi ile, emniyet katsayısının 1'den büyük olması sağlanabilir.  $r=5 \text{ mm}$  için  $r:d=0,1$  ve  $\beta_{\text{çen}_0}=1,15$ 'dir. c değeri yardımıyla yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen}}=1,1$  bulunur. Bu durumda indirgenmiş burma değişken yorulma dayanımı

$$\tau_D' = \frac{14 \cdot 0,8 \cdot 0,94}{1,1} = 9,6 \text{ kgf/mm}^2$$

emniyet katsayısı ise

$$v = \frac{960}{880} = 1,09$$

olur. Emniyet katsayısı hala düşüktür; ancak darbesiz ve ani aşırı yüklemelerin olmadığı bir zorlama durumu için kabul edilebilir. Aksi halde yuvarlatma yarıçapının daha büyütülmesi, yüzeyin parlatılması ya da soğuk had-delenmesi veya bir ıslah çeliğinin kullanılması gerekecektir.

### 8.3. Sayısal Örnek-2

Şekil-164'te görülen, üzerine iki göbek geçirilmiş aksın darbesiz yorulma zorlamaları altındaki emniyet katsayısının hesaplanması istenmektedir. Göbekler %0,2 çap farkı ile ısıtılarak geçirilmiştir. Aksın malzemesi St50 çeliğidir.

$$F=1130 \text{ kgf}$$

$$D= 75 \text{ mm}$$

$$a= 230 \text{ mm}$$

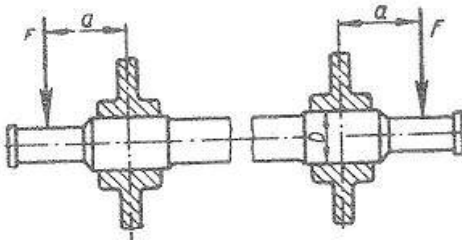
olarak verildiğine göre anma eğme gerilmesi

$$\sigma_{an} = \frac{M_e}{W} = \frac{1130 \cdot 23}{41,4} = 630 \text{ kgf/cm}^2 \text{ bulunur.}$$

Çizelge-32'de 2 numaralı göbek geçme biçimi için  $\beta_{çen}=2$  dir. Bu değer yardımıyla hayali maksimum gerilmenin genliği

$$\sigma_{maks} = \beta_{çen} \cdot \sigma_{an} = 1260 \text{ kgf/cm}^2$$

olur. Yorulma hesaplarında  $\beta_{çen}$  değerinin yorulma dayanımının indirgenmesinde veya hayali bir gerilme genliğinin hesaplanmasında kullanılması, elde edilen sonuçta bir fark yaratmaz. İkinci yol seçildiğinde çentik nedeni ile oluşan tehlikeli durum daha belirginleşir.



Şekil-164: Üzerine iki göbek geçirilmiş, darbesiz zorlanan aks.

Çizelge-32'de verilen yorulma çentik katsayılarının,

40 mm çapında göbek geçmeli ve 30 mm çapında düz miller üzerinde yapılan deneylerle belirlendiği hatırlanarak Şekil-145 yardımıyla boyut etki sayısı K'nın saptanmasında doğrudan 75 mm çapa karşılık olan sayı değil, 75 mm ve 30 mm çaplar için bulunan sayıların (0,72 ve 0,88) oranı dikkate alınmalıdır\*. Yoksa sonuçta gerçek değerden daha küçük bir emniyet katsayısı elde edilir. Böylece

$$K = \frac{0,72}{0,88} = 0,82$$

olur. Çizelge - 32'deki yorulma çentik katsayılarından yararlanıldığında, taşlanmış veya hassas tornalanmış yüzeyler için ayrıca yüzey etki sayısının hesaba katılmasına gerek yoktur. Çünkü bu çizelgede verilen  $\beta_{çen}$  değerlerini saptamak için yapılan deneylerde anılan kalitedeki yüzeylerle çalışılmıştır. Şekil-24'ten elde edilen  $\sigma_{ED} = 24 \text{ kgf/mm}^2$  değeri yardımıyla indirgenmiş yorulma dayanımı  $\sigma'_{ED} = 24 \text{ kgf/mm}^2 \cdot 0,82 = 20 \text{ kgf/mm}^2$ , yorulma dayanımının aşılması tehlikesine karşı emniyet katsayısı olarak da

$$v = \frac{2000}{1260} = 1,6$$

bulunur.

St 50'den farklı malzemelerin kullanılması halinde 2 numaralı göbek biçimi için geçerli yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çen}$  Çizelge-33'ten alınmalıdır. Hem malzeme St 50'den, hem de biçim 2 numaralıdan farklı ise  $\beta_{çen}$  değeri aşağıdaki şekilde belirlenir.

Göbek geçmenin 3 numaralı biçimde ve mil malzemesinin St 70 çeliği olduğunu varsayalım. Bu göbek geçme için Çizelge-32'deki  $\beta_{çen} = 1,7$  değeri ve

$$\eta_{çen} = \frac{\beta_{çen} - 1}{\alpha_{çen} - 1} \quad \alpha_{çen} = \frac{\beta_{çen} - 1}{\eta_{çen}} + 1$$

bağıntısı yardımıyla  $\alpha_{çen}$  çentik katsayısı bulunur. Bu bağıntıdaki  $\eta_{çen}$  çentik duyarlılık katsayısının tahmin edilmesi gerekir. St 50 çeliği için  $\eta_{çen} = 0,5$ ; St 70 çeliği için  $\eta_{çen} = 0,7$  olsun. Çizelge-32'deki  $\beta_{çen}$ 'den yararlanıldığına göre,  $\alpha_{çen}$ 'nin hesaplanmasında St 50 ye ait  $\eta_{çen}$  kullanılmalıdır. Böylece

$$\alpha_{çen} = \frac{1,7 - 1}{0,5} + 1 = 2,4$$

elde edilir. Çentik katsayısı  $\alpha_{çen}$  bütün malzemeler için aynıdır. St 70 çeliği için kabul edilen  $\eta_{çen} = 0,7$  değeri yardımıyla da 3 numaralı göbek biçiminin yorulma çentik

\* ) Şekil-145'de 10 mm çaplı parçanın yorulma dayanımı %100 alınırken, Çizelge-32'de aynı durum 30 mm çaplı parça için sözkonusu olduğundan.

katsayısı

$$\beta_{\text{çen}} = 1 + (\alpha_{\text{çen}} - 1) \cdot \eta_{\text{çen}} = 1 + (2,4 - 1) \cdot 0,7 \approx 2$$

olarak bulunur.

Şekil-164'de görülen aksın emniyet katsayısı Şekil-148'den yararlanılarak, daha kolay hesaplanabilir. Bu şekle göre 75 mm göbek çapı ve St 50 çeliği için eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD} = 9,5 \text{ kgf/mm}^2$  dir. Göbek geçmeli mil için verilen bu değer gerçekte bir indirgenmiş yorulma dayanımı olup, gerilme yığılmaları ve boyut etkisini de kapsar. Emniyet katsayısının bulunması için sözkonusu büyüklük doğrudan doğruya anma gerilmesine bölünebilir.

$$v = \frac{\sigma_{eD}}{\sigma_{an}} = \frac{950}{630} = 1,5$$

Hafif darbeli veya düzensiz bir zorlamada bu emniyet katsayısı yeterlidir. Dolayısıyla verilen örnekte yorulma dayanımının aşılması tehlikesi yoktur.

#### 8.4. Sayısal Örnek-3

St 50 çeliğinden üretilmiş, boyutları Şekil-165'de verilen bir vites kutusu milinin yorulma hasarına karşı emniyet katsayısının saptanması istenmektedir. Döndürme momenti 3 numaralı dişliden darbesiz olarak girmekte ve vites durumuna bağlı olarak 1 veya 2 numaralı dişliler tarafından iletmeye devam etmektedir. Kritik kesitler I ve II olup, 3 numaralı dişlideki çevresel kuvvet  $F_3 = 1000 \text{ kgf}$ 'dir. Şekil-165'te verilen boyutlar yardımıyla 1 ve 2 numaralı dişlilerde çevresel kuvvetler hesaplanabilir ( $\eta_{\text{yatak}}$ : Yatak verimi).

$$F_2 = F_3 \cdot \frac{d_3}{d_2} \cdot \eta_{\text{Yatak}} = 1000 \cdot \frac{100}{180} \cdot 0,99 = 550 \text{ kgf}$$

$$F_1 = F_3 \cdot \frac{d_3}{d_1} \cdot \eta_{\text{Yatak}} = 1000 \cdot \frac{100}{120} \cdot 0,99 = 825 \text{ kgf}$$

#### A durumu

Döndürme momenti giriş ve çıkışı aynı taraftadır;  $F_3$  çevresel kuvveti ile  $F_1$  ve  $F_2$  çevresel kuvvetlerinin yönleri terstir.

#### 1.Yükleme Şeması

2 numaralı dişli devrede olup, bu duruma ait yükleme şeması Şekil-166'dadır.

$$F_A = 458 \text{ kgf}$$

$$F_B = 8 \text{ kgf}$$



I kesitindeki eğme momenti

$$M_{eI} = 2,5 \text{ cm} \cdot F_A = 1150 \text{ kgfcm}$$

II kesitindeki eğme momenti

$$M_{eII} = 6 \text{ cm} \cdot F_A - 2 \text{ cm} \cdot F_3 = 750 \text{ kgfcm}$$

olarak bulunur.

## 2. Yükleme Şeması

1 numaralı dişli devrede olup, bu duruma ait yükleme şeması Şekil-167'dedir.

$$F_A = 640 \text{ kgf}$$

$$F_B = 465 \text{ kgf}$$

I kesitindeki eğme momenti

$$M_{eI} = 2,5 \text{ cm} \cdot F_A = 1600 \text{ kgfcm}$$

II kesitindeki eğme momenti ise

$$M_{eII} = 6 \text{ cm} \cdot F_A - 2 \text{ cm} \cdot F_3 = 1840 \text{ kgfcm}$$

olarak bulunur.

I ve II kesitlerindeki eğme momentlerinden görüldüğü gibi 2.yükleme şemasındaki durum, yani burma momentinin 1 numaralı dişliden iletildiği durum daha kritiktir.

## I kesitinde emniyet katsayısının hesaplanması:

$$D : d = 35 : 30 = 1,17$$

$$r : d = 1 : 30 = 0,033$$

Şekil-105 yardımıyla  $D:d=2$  ve  $r:d=0,033$  için  $\beta_{çeno} = 2,1$  ve Şekil-106'dan da  $D:d=1,17$  için  $c=0,40$  bulunur. Bu değerler yardımıyla

$$\beta_{çen} = c (\beta_{çeno} - 1) + 1 = 0,40 \cdot (2,1 - 1) + 1 \approx 1,45$$

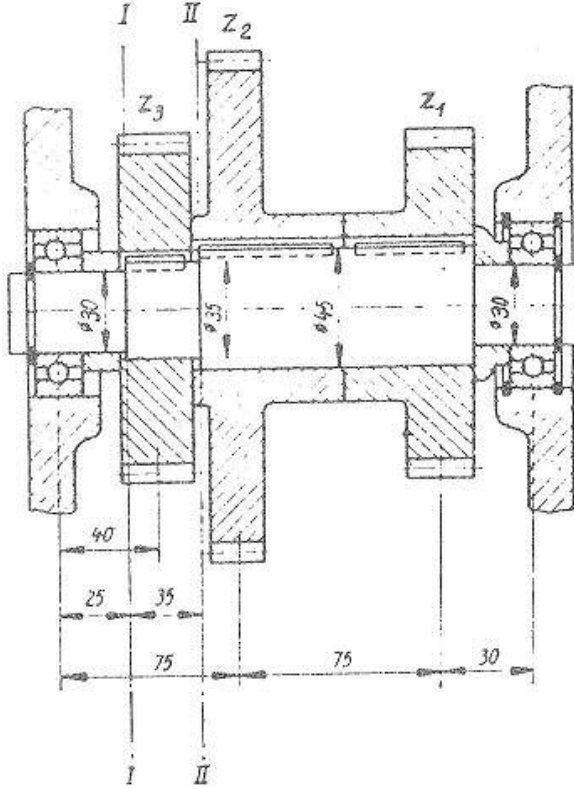
elde edilir. Boyut etki sayısı olarak Şekil-145'den 30 mm çap için  $K=0,88$  alınır. Hassas işlenmiş yüzeyin etki sayısı  $\alpha_e=0,9$  dur.

$$\sigma_{an} = \frac{M_{eI}}{W} = \frac{1600}{2,65} = 604 \text{ kgf/cm}^2,$$

bu malzeme için  $\sigma_{eD} = 24 \text{ kgf/mm}^2$  olduğuna göre

$$v_I = \frac{\sigma_{eD} \cdot K \cdot \mathcal{L} e}{\sigma_{an} \cdot \beta_{\text{gen}}} = \frac{2400 \cdot 0,88 \cdot 0,9}{604 \cdot 1,45} = 2,2 \text{ dir.}$$

Bulunan bu emniyet katsayısı yeterlidir; yani I kesitin-  
de yorulma hasarı tehlikesi yoktur.



Şekil-165: St 50 çeliğinden  
üretilmiş vites kutusu mili.  
Dişli çapları:  $D_1=120 \text{ mm}$

$$D_2=180 \text{ mm}$$

$$D_3=100 \text{ mm}$$

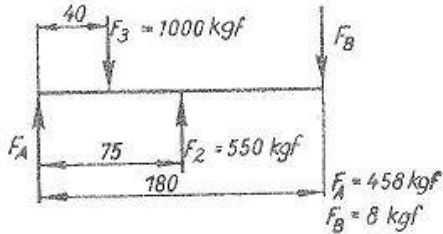
Fatura yuvarlatma  
yarıçapı:  $r=1 \text{ mm}$

Mil çapları:  $d_1=45 \text{ mm}$

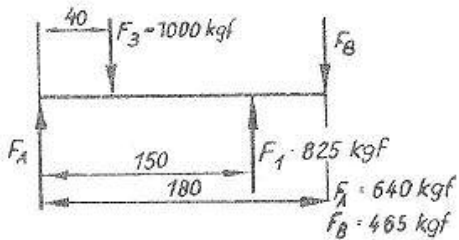
$$d_2=35 \text{ mm}$$

$$d_3=30 \text{ mm}$$

Mil yüzeyi: Hassas işlenmiş.



Şekil-166: 1.Yükleme şeması.



Şekil-167: 2.Yükleme şeması.

II kesitinde yorulma emniyet katsayısının hesaplanması:

Bu kesite, I kesitinden farklı olarak hem eğme, hem de burma momenti etki etmektedir. Aşağıdaki hesaplamalarda önce a) eğmeye, daha sonra b) burmaya karşı emniyet ele alınmıştır.

$$a) \quad \sigma_{an} = \frac{M_{eII}}{W} = \frac{1840}{4,21} = 437 \text{ kgf/cm}^2$$

D:d=45:35=1,29 ve r:d=1:35=0,029 için Şekil-105'de  $\beta_{\text{çeno}}=2,1$  verilmektedir. Şekil-106'dan ise D:d=1,29 için  $c=0,58$  bulunur. Bu suretle yorulma çentik katsayısı olarak  $\beta_{\text{çen}}=1,65$  elde edilir. Boyut etki sayısı  $K=0,85$  ve yüzey etki sayısı  $\alpha_e=0,9$ 'dur. Bu değerler yardımıyla emniyet katsayısı

$$v_{\text{IIe}} = \frac{2400 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{437 \cdot 1,65} = 2,5$$

$$b) \quad \tau_{\text{an}} = \frac{M_b}{W_{\text{pol}}} = \frac{F_3 \cdot D_3}{2W_{\text{pol}}} = \frac{1000 \cdot 5}{8,42} = 594 \text{ kgf/cm}^2$$

olarak hesaplanır.

Şekil-104'de r:d=0,029 ve D:d=1,4 için yorulma çentik katsayısı olarak  $\beta_{\text{çeno}}=1,55$  bulunur. Gerçek çap oranı D:d=1,29 için Şekil-106'dan  $c=0,88$  değeri yardımıyla

$$\beta_{\text{çen}} = 0,88 \cdot (1,55-1) + 1 \approx 1,5$$

elde edilir. Boyut etki sayısı eğmede olduğu gibi  $K=0,85$  alınır. Yüzey etki sayısı ise  $\alpha_b=0,95$ 'dir.

Çevresel eğme zorlamalarında daima  $\sigma_{\text{ort}}=0$  olmasına karşın, burma zorlamalarında sadece sürekli olarak yön değiştirme durumu için gerektiğinde  $\tau_{\text{ort}}=0$  kabul edilebilir. Böylece sözkonusu dişli kutusunun iki yönlü çalıştırıldığı ve aşırı yüklenme sırasında da  $\tau_{\text{ort}}=0$  olduğu varsayımı ile, emniyet katsayısı burma değişken yorulma dayanımına göre saptanabilir. St 50 için  $\tau_D=14 \text{ kgf/mm}^2$  alınarak emniyet katsayısı

$$v_{\text{IIb}} = \frac{\tau_D \cdot K \cdot \alpha_b}{\tau_{\text{an}} \cdot \beta_{\text{çen}}} = \frac{1400 \cdot 0,85 \cdot 0,95}{594 \cdot 1,5} = 1,25$$

bulunur. Eğme ve burma için ayrı ayrı hesaplanan bu emniyet katsayıları yardımıyla toplam emniyet katsayısı Bölüm 6.10'da verilen (22) denklemi yardımıyla belirlenebilir:

$$\frac{1}{v_{\text{II}}^2} = \frac{1}{v_{\text{IIe}}^2} + \frac{1}{v_{\text{IIb}}^2} = \frac{1}{2,5^2} + \frac{1}{1,25^2} ; v_{\text{II}} = 1,12$$

Bu değer, emniyet katsayısı olarak düşüktür; ancak darbelerin bulunmaması ve zorlamanın düzenli olması durumunda, yeterli kabul edilebilir. İşletme koşulları böyle değilse, ya konstrüksiyon değiştirilmeli veya bir ıslah çeliği seçilmelidir. Mevcut mil çapı için alaşımsız bir ıslah çeliği yeterli olacaktır. Ancak daha büyük boyut-

ların sözkonusu olduğu durumlarda çelik seçimi, mümkün olduğu kadar tüm kesit ıslah edilebilecek şekilde yapılmalıdır. St 50 çeliğinde ve mevcut boyutlarda faturalı kısımda bir yüzey sertleştirme, örneğin yüzey haddeleme işlemi ile de yorulma dayanımı artırılabilir.

Eğme ve burma zorlamaları altındaki II kesitin emniyet katsayısı Bölüm 6.10'daki (8), (10) veya (12) denklemleri ile de bulunabilir. Bu denklemlerin kullanımında önce bir  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesi saptanır ve hesaplamalara basit eğme durumundaki gibi devam edilir.

c) Emniyet katsayısının (8) denklemi yardımıyla hesaplanması:

$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma_{an} \cdot \beta_{\zeta en_e})^2 + 3 \cdot (\tau_{an} \cdot \beta_{\zeta en_b})^2}$$

denkleminde eğme ve burma için geçerli olan yorulma çentik katsayıları e ve b indisleri ile belirtilmektedir. Yukarıda a) ve b) hesaplamalarındaki değerlerin

$$\begin{array}{ll} \beta_{\zeta en_e} = 1,65 & \beta_{\zeta en_b} = 1,5 \\ \alpha_e = 0,9 & \tau_{an} = 595 \text{ kgf/cm}^2 \\ \sigma_{an} = 437 \text{ kgf/cm}^2 & K = 0,85 \\ \sigma_{eD} = 24 \text{ kgf/mm}^2 & \end{array}$$

kullanılması ile

$$\sigma_k = 100 \cdot \sqrt{(4,37 \cdot 1,65)^2 + 3 \cdot (5,94 \cdot 1,5)^2} = 1700 \text{ kgf/cm}^2$$

$$v_{II} = \frac{\sigma_{eD} \cdot K \cdot \alpha_e}{\sigma_k} = \frac{2400 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{1700} = 1,08$$

bulunur.

d) Emniyet katsayısının (10) denklemi yardımıyla hesaplanması:

Bu denklem yardımıyla bir karşılaştırma momenti hesaplanır.  $M_{eII} = 1840 \text{ kgfcm}$  ve  $M_b = 5000 \text{ kgfcm}$  değerleri kullanılarak aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$M_k = \sqrt{(M_b \cdot \beta_{\zeta en_e})^2 + 0,75 \cdot (M_b \cdot \beta_{\zeta en_b})^2}$$

$$= 1000 \cdot \sqrt{(1,84 \cdot 1,65)^2 + 0,75 \cdot (5 \cdot 1,5)^2}$$

$$M_k = 7160 \text{ kgfcm}$$

$$\sigma_k = \frac{M_k}{W} = \frac{7160}{4,21} \text{ kgf/cm}^2 = 1700 \text{ kgf/cm}^2$$

$$v_{II} = \frac{\sigma_{eD} \cdot K \cdot \alpha_e}{\sigma_k} = \frac{2400 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{1700} = 1,08$$

e) Emniyet katsayısının (12) denklemi yardımıyla hesaplanması:

Bu denklemde  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesi indirgenmiş yorulma çentik katsayısı  $\beta_{\text{çen-ind}}$  yardımıyla saptanır.

$$\sigma_k = \sigma_{an} \cdot \beta_{\text{çen-ind}} = \sqrt{\beta_{\text{çen-e}}^2 - 3x^2 \cdot \beta_{\text{çen-b}}^2}$$

$$x = \frac{\tau_{an}}{\sigma_{an}} = \frac{594}{437} = 1,36$$

$$\beta_{\text{çen-ind}} = \sqrt{1,65^2 + 3 \cdot 1,36^2 \cdot 1,5^2} = 3,9$$

$$\sigma_k = 437 \cdot 3,9 = 1700 \text{ kgf/cm}^2$$

$$v_{II} = \frac{2400 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{1700} = 1,08$$

Görüldüğü gibi (8), (10) ve (12) denklemlerinin tümünde yorulma emniyet katsayısı olarak hep aynı değer ( $v=1,08$ ) elde edilmektedir.

### B Durumu

Döndürme momenti giriş ve çıkışı arasında  $180^\circ$  lik bir açı vardır,  $F_1, F_2$  ve  $F_3$  çevresel kuvvetlerinin yönleri aynıdır.

### 3. Yükleme Şeması

2 numaralı dişli devrededir. Yükleme şeması Şekil-168'de görülmektedir.

$$F_A = 1100 \text{ kgf}$$

$$F_B = 450 \text{ kgf}$$

Eğme momentleri I kesitinde  $M_{eI}=2750 \text{ kgfcm}$ , II kesitinde  $M_{eII}=4600 \text{ kgfcm}$  olarak elde edilir.

### 4. Yükleme Şeması

1 numaralı dişli devrededir. Yükleme şeması Şekil-169'daki gibidir.

$$F_A = 915 \text{ kgf}$$

$$F_B = 910 \text{ kgf}$$

I kesitine  $M_{eI}=2290$  kgfcm, II kesitine ise  $M_{eII}=3490$  kgfcm'lik eğme momentleri etki eder. Dolayısıyla B durumu için momentlerin daha yüksek olduğu 3.yükleme şeması dikkate alınmalıdır.

I kesitinde emniyet katsayısının hesaplanması:

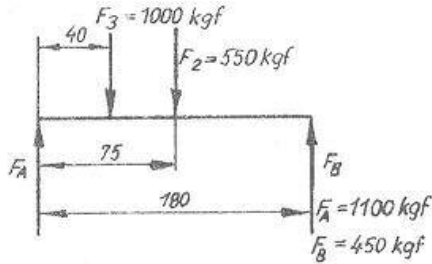
$$v_I = \frac{\sigma_{eD} \cdot K \cdot \alpha_e \cdot W}{M_{eI} \cdot \beta_{\text{çen}}} = \frac{2400 \cdot 0,88 \cdot 0,9 \cdot 2,65}{2750 \cdot 1,45} = 1,25$$

II kesitinde emniyet katsayısının hesaplanması:

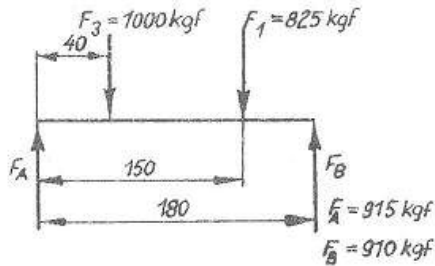
a) Eğme zorlamaları için emniyet katsayısı:

$$M_{eII} = 4600 \text{ kgfcm}$$

$$v_{IIe} = \frac{\sigma_{eD} \cdot K \cdot e \cdot W}{M_{eII} \cdot \beta_{\text{çen}}} = \frac{2400 \cdot 0,85 \cdot 0,9 \cdot 4,21}{4600 \cdot 1,65} = 1,02$$



Şekil-168: 3.Yükleme Şeması.



Şekil-169: 4.Yükleme Şeması.

b) Burma zorlamaları için emniyet katsayısı

$$M_{bII} = 5000 \text{ kgfcm}$$

$$v_{IIb} = \frac{\tau_D \cdot K \cdot \alpha_b \cdot W_{pol}}{M_b \cdot \beta_{\text{çen}}} = \frac{1400 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \cdot 8,42}{5000 \cdot 1,5} = 1,25$$

Eğme ve burma zorlamaları için ayrı ayrı saptanan bu emniyet katsayıları yardımıyla toplam emniyet katsayısı,

$$\frac{1}{v_{II}^2} = \frac{1}{v_{IIe}^2} + \frac{1}{v_{IIb}^2} = \frac{1}{1,02^2} + \frac{1}{1,25^2}$$

$$v_{II} = 0,8$$

olarak bulunur.

Böylece Şekil-165'te gösterilen dişli kutusunun döndürme momenti giriş ve çıkışı arasında 180°lik bir açı olması halinde yorulma hasarına karşı yeterli emniyet mevcut değildir. Emniyet katsayısı 1'den küçük olduğundan yorulma hasarı kaçınılmazdır. Dolayısıyla dişli kutusunda moment giriş ve çıkışının aynı tarafa alınması uygun olur.

#### 8.5. Sayısal Örnek-4

Şekil-170'te görülen  $F_1=400$  kgf,  $F_2=900$  kgf kuvvetleri ve  $F_1$  kuvvetinin etki noktasındaki  $M_b=+12600$  kgfcm değişken burma momenti ile zorlanan bir milin yorulmaya karşı emniyet katsayısının hesaplanması istenmektedir. Moment çıkışı  $F_2$  kuvvetinin etki noktasındadır ve zorlama darbesizdir.

Kritik kesitler I, II ve III dür.

#### I kesitinin kontrolü

$M_{eI}=55 \cdot 33=2900$  kgfcm'lik eğme momentine ek olarak  $M_b=12600$  kgfcm değerindeki burma momenti etkimektedir. Şekil-145'e göre  $K=0,64$  ve taşlanmış yüzeylerde  $\alpha_e=0,93$  seçilir. Kama yuvası nedeniyle oluşan çentik etkisi, Çizelge-32'de eğme zorlamaları için  $\beta_{\text{çene-kama}}=2$  olarak verilmektedir. K boyut etki sayısının seçiminde 2 numaralı sayısal örnekteki gibi  $D=30$  mm çap esas alınarak bir düzeltme gereklidir; çünkü Çizelge-32'deki değerler 30 mm çapındaki düz ve 40 mm çapındaki göbek geçmeli miller üzerinde yapılan deneylerle saptanmıştır. Ancak bu düzeltme emniyet katsayısını yükselteceğinden, işlemi basitleştirmek amacıyla ihmal edilmiştir.

Kama yuvasındaki yorulma çentik katsayısı burma zorlamaları için Çizelge-32'ye göre, eğme için verilen değerler yaklaşık %60...70'idir; yani  $\beta_{\text{çenb-kama}} = 0,7 \cdot \beta_{\text{çene-kama}} = 1,4$  olur.

Mildeki enine delik kama yuvası civarında yorulma çatlaklarının en çok görüldüğü kritik bölgelerde bulun-

duğundan, her iki çentik etkisinin tam olarak toplandığını (gerçekte böyle olmasa dahi) varsaymak daha emniyetli olur. Şekil-107'de  $d:D=15:136=0,11$  oranı için  $\beta_{\text{çene-delik}}=1,5$ ; Şekil-109'da da  $100 \text{ kgf/mm}^2$  çekme dayanımındaki bir çelik ve farklı boyutta yuvarlak çubuk için  $\beta_{\text{çenb-delik}}=1,5$  verilmektedir. Bu değer in St 50 çeliği ve Şekil-170'teki boyutlar dikkate alınarak azaltılması gerektiğinden  $\beta_{\text{çenb-delik}}=1,2$  seçilmiştir. Eğme ve burma için toplam yorulma çentik katsayıları, delik ve kamanın yorulma çentik katsayılarının çarpımı ile elde edilir.

$$\beta_{\text{çene}} = \beta_{\text{çene-kama}} \cdot \beta_{\text{çene-delik}} = 2,0 \cdot 1,5 = 3$$

$$\beta_{\text{çenb}} = \beta_{\text{çenb-kama}} \cdot \beta_{\text{çenb-delik}} = 1,4 \cdot 1,2 = 1,7$$

Karşılaştırma momenti (10) denklemi yardımıyla

$$M_k = \sqrt{(M_e \cdot \beta_{\text{çene}})^2 + 0,75 (M_b \cdot \beta_{\text{çenb}})^2}$$

$$M_k = 1000 \cdot \sqrt{(2,9 \cdot 3)^2 + 0,75 (12,6 \cdot 1,7)^2}$$

$$M_k = 20500 \text{ kgfcm},$$

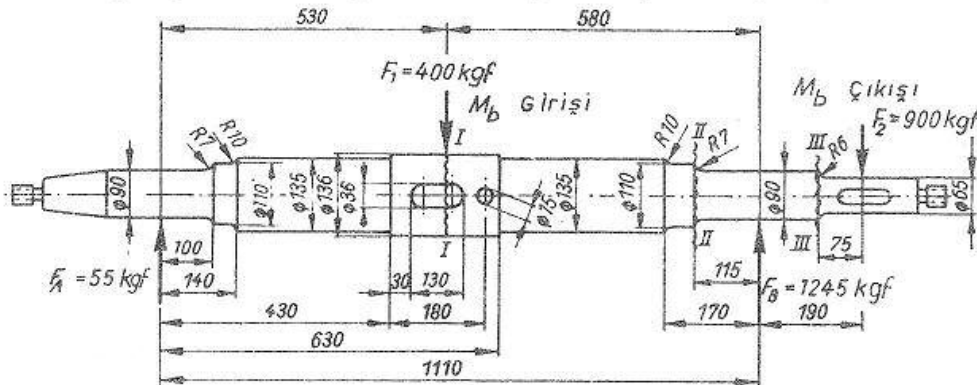
karşılaştırma gerilmesi ise

$$\sigma_k = \frac{M_k}{W} = \frac{20500}{247} = 83 \text{ kgf/cm}^2$$

olarak bulunur. St 50 çeliği için verilen eğme değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}=24 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir. Dolayısıyla emniyet katsayısı

$$v_I = \frac{\sigma_{eD} \cdot K \cdot \alpha_e}{\sigma_k} = \frac{2400 \cdot 0,64 \cdot 0,93}{83} = 17 \text{ dir.}$$

Görüldüğü gibi emniyet katsayısı çok büyüktür.



Şekil-170:  $F_1$  ve  $F_2$  kuvvetleri ile darbesiz olarak zorlanan mil, malzeme St 50, yüzey taşlanmış.



## II kesitinin kontrolü

II kesitine eğme momenti olarak

$$M_{IIe} = (900.30,5 - 1245.11,5) = 13130 \text{ kgfcm},$$

burma momenti olarak ise

$$M_{IIb} = 12600 \text{ kgfcm}$$

etkimektedir. Şekil-105'e göre  $r:d=0,08$  için  $\beta_{çeno}=1,5$ ; Şekil-106'ya göre  $D:d=1,22$  değeri için  $c=0,50$  dir. Böylece eğme için yorulma çentik katsayısı  $\beta_{çeno}=1,25$  bulunur.

Burma için Şekil-104'e göre  $\beta_{çenob}=1,2$  ve Şekil-106 ya göre  $c=0,75$  alınarak  $\beta_{çenb}=1,15$  elde edilir. (10) denklemi yardımıyla karşılaştırma momenti  $M_k=20060$  kgfcm, karşılaştırma gerilmesi ise

$$\sigma_k = \frac{M_k}{W} = \frac{20060}{71,6} = 288 \text{ kgf/cm}^2$$

olarak hesaplanır. Yüzey etki sayısı  $\alpha_e=0,93$  ve boyut etki sayısı  $K=0,68$  değerleriyle II kesiti için emniyet katsayısı

$$v_{II} = \frac{2400.0,68.0,93}{288} = 5,3$$

olur. Bu kesitte de emniyet katsayısı yeterince yüksektir.

## III kesitinin kontrolü

Gene eğme ve burmaya zorlanan bu kesitte emniyet katsayısı her iki zorlama ayrı ayrı gözönünde tutularak hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} \text{Eğme } M_{IIIe} &= 900.7,5 = 6750 \text{ kgfcm} \\ W &= 27 \text{ cm}^3 \\ \sigma_{an} &= 250 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

Boyut etki sayısı  $K=0,75$ , yüzey etki sayısı ise  $\alpha_e=0,93$ 'dür. Şekil-105 ve 106 yardımıyla yorulma çentik katsayısı olarak  $\beta_{çene}=1,35$  elde edilir. Böylece emniyet katsayısı

$$v_{IIIe} = \frac{2400.0,75.0,93}{250.1,35} = 5,0$$

olur.

## Burma

Burma anma gerilmesi

$$\tau_{an} = \frac{M_b}{W_{pol}} = \frac{12600}{54} = 234 \text{ kgf/cm}^2 \text{ dir.}$$

Şekil-104'e göre  $\beta_{çen_b} = 1,2$  bulunur.  $D:d=90:65=1,4$  olduğundan Şekil-106'ya göre bir düzeltme yapılmasına gerek yoktur. Yüzey etki sayısı  $\mathcal{X}_b = 0,96$  olarak hesaplanır; boyut etki sayısı ise eğmedeki gibi  $K=0,75$  dir.

Malzemenin burma değişken yorulma dayanımı  $\tau_D = 14$  kgf/mm<sup>2</sup> olduğundan

$$v_{III_b} = \frac{1400 \cdot 0,75 \cdot 0,96}{234 \cdot 1,2} = 3,6$$

elde edilir. Toplam emniyet katsayısı ise

$$\frac{1}{v_{III}^2} = \frac{1}{v_{III_e}^2} + \frac{1}{v_{III_b}^2}$$

denklemleri yardımıyla  $v_{III} = 2,9$  olarak bulunur ve bu kesit de güvenlik açısından yeterli olarak nitelendirilebilir. Çentikli kesitlerde yüzeyin hassas işlenmesi halinde  $\mathcal{X} = 1$  alınabileceğinden, III kesiti için gerçekte daha da yüksek bir emniyet katsayısı sözkonusudur. Hesaplar  $\mathcal{X} = 1$  için tekrarlanırsa  $v_{III} = 3,1$  elde edilir.

## 8.6. Sayısal Örnek-5

Bir fren sistemine ait Şekil-171'de görülen çekme çubuğu  $F_{\ddot{o}} = 1000$  kgf değerindeki sabit bir kuvvet ile ön-yüklenmiştir. Dalgalı olarak etkiyen  $F$  işletme yükü 0 ile 1000 kgf değerleri arasında değişmektedir. Çekme çubuğunun malzemesi St 42'dir. Yükleme darbeleri olup darbelerin şiddeti orta seviyededir. Çizelge-43'e göre darbe sayısı olarak  $\varphi = 1,3$  alınabilir.

Çubuğun düz kısmında oluşabilecek üst gerilme

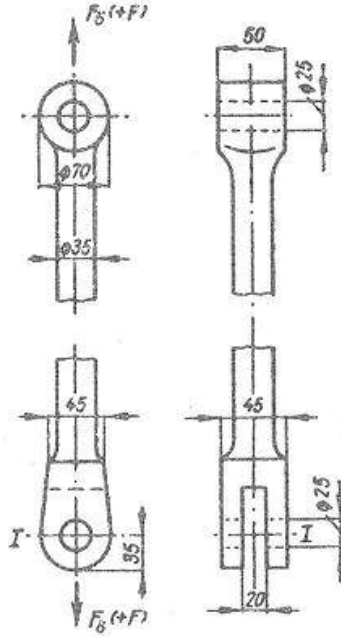
$$\sigma_{üst} = \frac{F_{\ddot{o}} + F}{A} \cdot \varphi = \frac{1000 + 1000}{9,6} \cdot 1,3 = 270 \text{ kgf/cm}^2 \text{ dir.}$$

Buna karşın çentik etkisi bulunan I-I kesitinde, Çizelge-37 ye göre kafa biçimi 1 ve boşluklu pim için  $\beta_{çen} = 2,7$  olduğundan, üst gerilme

$$\sigma_{üst} = \frac{F_{\ddot{o}} + F}{A_{I-I}} \cdot \varphi \cdot \beta_{çen}$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{2000 \cdot 1,3 \cdot 2,7}{2 \cdot (7,0 - 2,5) \cdot 1,25} = 624 \text{ kgf/cm}^2$$

bulunur. Bu gerilme düz kısımdaki gerilmeden daha yüksek olduğundan yorulma hesabının sadece I-I kesiti için yapılması yeterlidir.



Şekil-171: Bir fren sistemine ait çekme çubuğu.

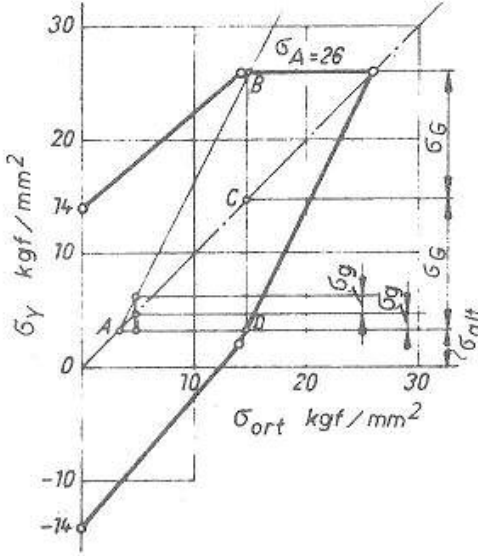
I-I kesitindeki alt gerilme ise

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{F_{\text{ö}}}{A} \cdot \varphi \cdot \beta_{\text{çen}} = \frac{1000 \cdot 1,3 \cdot 2,7}{2 \cdot (7,0 - 2,5) \cdot 1,25} = 312 \text{ kgf/cm}^2$$

dir; zorlamanın gerilme alanı

$$2 \sigma_g = \sigma_{\text{üst}} - \sigma_{\text{alt}} = 312 \text{ kgf/cm}^2$$

ve dolayısıyla gerilme genliği  $\sigma_g = 156 \text{ kgf/cm}^2$  olur. Aşırı yükleme durumunda  $F_g$  ön yükü sabit kalacak ve sadece dalgalı çekme kuvveti değişecektir. Şekil-172'de St 42 çeliği için yorulma dayanımı diyagramı görülmektedir. I-I kesitinde oluşan gerilmeler de aynı şekilde gösterilmiştir. Aşırı yükleme durumunda  $\sigma_{\text{alt}}$  gerilmesi sabit kalmakta ve  $\sigma_{\text{ort}}: \sigma_g = \text{sabit}$  koşulunun özel bir hali söz konusu olmaktadır. Aşırı yükleme durumu AB benzerlik doğrusu ile temsil edilebilir.  $\sigma_{\text{alt}} = \text{sabit}$  doğrusunun eksenlerin açığı ortayını kestiği A noktası ile  $\sigma_{\text{üst}}$  den geçecek şekilde çizilen benzerlik doğrusu yorulma dayanımı diyagramının üst sınır çizgisini B noktasında kesmektedir. Aşırı yükleme durumu için yorulma dayanımının genliği BC=CD ve sayısal değeri  $\sigma_G = 11,5 \text{ kgf/mm}^2$ 'dir.



Şekil-172: Aşırı yükleme durumunda yorulma dayanımının gerilme genliği  $\sigma_G$ 'nin saptanması.

Çekme çubuğu hassas işlendiğine göre Şekil-149'dan  $\sigma_k=45 \text{ kgf/mm}^2$  için  $\alpha = 0,9$  okunur. Çekme zorlamalarında boyut etkisi söz konusu değildir; fakat kesit dikdörtgen olduğundan Bölüm 6.5'e göre kesit etki sayısı olarak  $q=0,8$  alınması gerekir. Bu değerler yardımıyla indirgenmiş yorulma dayanımı

$$\sigma'_G = \sigma_G \cdot \alpha \cdot q = 11,5 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 8,3 \text{ kgf/mm}^2$$

ve emniyet katsayısı

$$v = \frac{\sigma'_G}{\sigma_g} = \frac{830}{156} = 5,3$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi emniyet katsayısı oldukça büyüktür ve çubuğun yorulma hasarına uğraması tehlikesi yoktur.

### 8.7. Sayısal Örnek-6

Şekil-173'te görülen serbest muyluya paralel kama yardımıyla bir dişli çark geçirilmektedir. I-I kritik kesiti, diş kuvveti  $F$ 'den dolayı çevresel eğmeye ve kesmeye zorlanmaktadır. Kesite ayrıca burma momenti (Diş kuvveti  $F$  · Taksimat dairesi yarıçapı) etki etmektedir. Mil sadece tek yönde döndürülüp zaman zaman durdurulduğundan, burma momenti ve kesme kuvveti dalgalı karakterdedir. Zorlamalar hafif ilâ orta şiddette darbeli olup darbe sayısı  $\varphi = 1,2$  alınabilir.

Mil malzemesi olarak  $\sigma_k=80 \text{ kgf/mm}^2$  çekme dayanımına ıslah edilmiş 25 CrMo4 çeliği kullanılmıştır.

Diş kuvveti  $F=1800 \text{ kgf}$ , burma momenti  $M_b=8100 \text{ kgfcm}$  dir.

- a) Eğme zorlaması için I-I kesitinde üst gerilme hesabı:  
Eğme anma gerilmesinin üst değeri

$$\sigma_{an_e} = \frac{M_e}{W} = \frac{2,5 \cdot 1800}{6,28} = 720 \text{ kgf/cm}^2$$

Şekil-111 yardımıyla  $r:D=0,095$  ve  $\sigma_k=80 \text{ kgf/mm}^2$  için  $\beta_{\text{çene}} = 1,75$  bulunur. Böylece çentik dibindeki maksimum gerilmenin üst değeri

$$\sigma_{maks_e} = \beta_{\text{çene}} \cdot \varphi \cdot \sigma_{an_e} = 1,2 \cdot 1,75 \cdot 720 = 1510 \text{ kgf/cm}^2$$

elde edilir.

- b) Burma zorlaması için I-I kesitinde üst gerilme hesabı:

$$\tau_{an_b} = \frac{M_b}{W_{pol}} = \frac{8100}{12,56} = 645 \text{ kgf/cm}^2$$

$\beta_{\text{çenb}}$ 'nin tahmin edilmesi gerekir. Aynı kesit ve çentik biçimi için yorulma çentik katsayıları çekmede eğmeden daha yüksek, burmada ise daha düşüktür. Buna göre  $\beta_{\text{çenb}}=0,8$ .  $\beta_{\text{çene}}=0,8 \cdot 1,75=1,4$  alınarak

$$\tau_{maks_b} = \beta_{\text{çenb}} \cdot \varphi \cdot \tau_{an_b} = 1,2 \cdot 1,4 \cdot 645 = 1080 \text{ kgf/cm}^2$$

- c) Kesme zorlaması için I-I kesitinde üst gerilme hesabı:

$$\tau_{an_k} = \frac{F}{A} = \frac{1800}{12,56} = 145 \text{ kgf/cm}^2$$

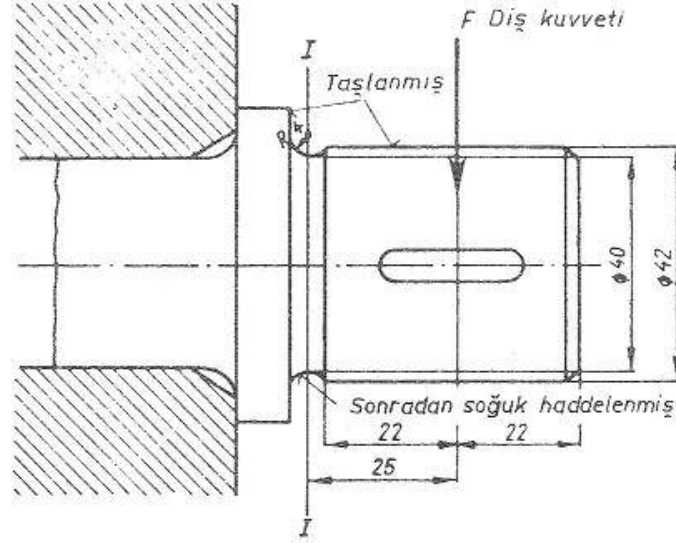
$$\beta_{\text{çenk}} = \beta_{\text{çenb}} = 1,4$$

$$\tau_{maks_k} = \varphi \cdot \beta_{\text{çenk}} \cdot \tau_{an_k} = 1,2 \cdot 1,4 \cdot 145 = 240 \text{ kgf/cm}^2$$

- d) I-I kesiti için  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesinin hesaplanması:

Bu örnekte farklı yükleme durumları\* sözkonusu olduğundan, (18) denklemine göre  $\sigma_0$  zorlama oranının hesaplanması gereklidir. Sabit biçim değiştirme enerjisi

\*)  $\sigma$  çevresel eğmeden dolayı değişken,  $\tau$  ise dalgalıdır.



Şekil-173: Paralel kama yardımıyla dişli çark geçirilen serbest muylu.

hipotezi için

$$\alpha_o = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3} \cdot \tau_Y}$$

dir. Anılan denklemde yorulma dayanımlarının üst gerilmelerinin kullanılması ve eğme zorlamasının çevresel olması nedeniyle,  $\sigma_Y$  yerine değişken yorulma dayanımı  $\sigma_{eD}$  konur. Şekil-39'da bu değer  $\sigma_{eD}=40 \text{ kgf/mm}^2$  olarak verilmektedir. Kesikli bir işletme varsayıldığından, burma ve kesme zorlamalarında alt gerilme sıfır yani  $\tau_Y = \tau_{Dal}$  alınabilir. Şekil-39'a göre burma için dalgalı yorulma dayanımı  $\tau_{Dal}=36 \text{ kgf/mm}^2$  dir. Böylece zorlama oranı

$$\alpha_o = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 36} = 0,64$$

elde edilir.  $\sigma = \sigma_{maks_e} = 1510 \text{ kgf/mm}^2$  ve  $\tau = \tau_{maks_b} + \tau_{maks_k} = 1320 \text{ kgf/mm}^2$  değerleri ile  $\sigma_k$  karşılaştırma gerilmesi (19) denklemi yardımıyla

$$\begin{aligned} \sigma_k &= \sqrt{\sigma^2 + 3 (\alpha_o \cdot \tau)^2} = 1000 \cdot \sqrt{1,51^2 + 3(0,64 \cdot 1,32)^2} \\ &= 2100 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

olarak bulunur.

Emniyet katsayısının saptanması için ayrıca boyut etki sayısı  $K$  ve yüzey etki sayısı  $\mathcal{X}_e$  belirlenmelidir. Çevresel yuvarlak çentik, taşlandıktan sonra soğuk hadde-

lendiğinden  $\alpha_e = 1$  dir. Boyut etki sayısı ise  $K=0,83$  olup, bu değerler yardımıyla

$$v = \frac{\sigma_e D}{\sigma_k} = \frac{4000 \cdot 0,83}{2100} = 1,6$$

sonucuna varılır. Emniyet katsayısı yeterlidir. Yuvarlak çevresel çentiğin soğuk haddelenmesi nedeniyle yorulma dayanımı daha da artacağından, gerçek emniyet katsayısı biraz daha büyüktür.

#### 8.8. Sayısal Örnek-7

Şekil-174'te görülen kaynaklı dişli çarka  $M_b = \pm 120$  kgfm değerinde darbesiz değişken burma momenti etkimekte-dir. Yorulmaya karşı emniyet katsayısının hesaplanması istenen dişlinin çalışma ömrü boyunca, momentin  $10 \cdot 10^6$  dan daha fazla yön değiştirmesi sözkonusudur. Malzeme St 50 çeliği, kaynak kalitesi ise F'dir. St 50 çeliği yaklaşık %0,32 C içerdiği, bu nedenle de kaynak kabiliyeti iyi olmadığı için, kaynak işleminin özenle yapılması (mümkünse malzeme önısıtılarak) ve dikişlerin muayenesi gerekir. Dişli çark iki uçtan yataklı milin tam ortasına doğrudan kaynak edilmiş olup, yataklar arası uzaklık 180 mm'dir.

Kaynak bağlantılarının dikiş ve geçiş bölgeleri emniyet katsayılarının belirlenmesinde:

- 1) Kaynak dikişinde ve kaynak edilen parçaların dikişe komşu kritik kesitlerinde anma gerilmeleri hesaplanır (Aşağıda görüleceği gibi dikişle ilgili büyüklükler için  $d$ , ana malzeme yani kaynak edilmiş parçalar için de  $m$  endisi kullanılmıştır).
- 2) Malzemenin indirgenmiş yorulma dayanımı olarak sözkonusu bölgeye özgü "Kaynak bağlantısının yorulma dayanımı" alınır.

#### a) Mil-iç çevresel dikiş geçişi (I-I kesiti)

Milin aksenal atalet momenti:  $W_m = 33,7 \text{ cm}^3$

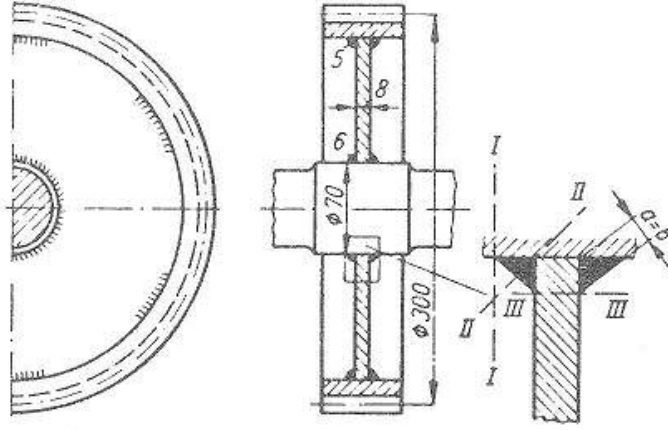
Milin polar atalet momenti:  $W_{pol_m} = 67,4 \text{ cm}^3$

İki iç çevresel dikişin polar atalet momenti:

$$W_{pol_d} = 2 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot [(D+2a)^4 - D^4] \cdot \frac{1}{\frac{D}{2} + a} = 102 \text{ cm}^3$$

( $a=6$  mm dikiş kalınlığı ve  $D=70$  mm mil çapıdır). Çevresel kuvvet (Diş basıncı)

$$F = \frac{M_b}{D/2} = \frac{120000}{15} = 800 \text{ kgf}$$



Şekil-174: Darbesiz değişken bir burma momenti ile zorlanan kaynaklı dişli çark.

çevresel dikişler üzerinden mile iletilmektedir. Dolayısıyla kısa ve eşdağılım göstermeyen iki yayılı eğme yükü sözkonusudur. Bunların kesin matematiksel tanımı yapılmadığından, çevresel yükün mil ortasında tek yük olarak etkidiği kabul edilmiştir.

Yataklar arası  $l=180$  mm olan bir milin ortasındaki eğme momenti

$$M_e = \frac{F \cdot l}{4} = 3600 \text{ kgfcm},$$

Mildeki eğme anma gerilmesi genliği\*

$$\sigma_{an_e} = \frac{M_e}{W_m} = 107 \text{ kgf/cm}^2,$$

burma anma gerilmesi genliği\* ise

$$\tau_{an} = \frac{M_b}{W_{pol_m}} = 178 \text{ kgf/cm}^2$$

olarak hesaplanır.

Şekil-96 yardımıyla kaynak bağlantısının eğme değişken yorulma dayanımı bulunabilir. Çizelge-14 den çift taraflı açılı kaynağı, işlenmemiş geçiş ve düz dikiş için 4 çizgisinin kullanılması gerektiği görülmektedir. Buna göre ana malzemenin eğme yorulma dayanımı  $\sigma_{ED}=24 \text{ kgf/mm}^2$  den çıkararak 4 çizgisine kadar gidip, daha sonra kaynak biçimi

\*) Zorlama değişken, yani ortalama gerilme sıfır olduğu için üst gerilme genliğe eşittir.



için sola l doğrusuna devam edilmektedir (iki kısa ve çevresel kaynak dikişi ile milin eğme zorlaması sırasındaki kuvvet akışının değişmeyeceği ve gerilme yığılmaları oluşmayacağı varsayılarak biçim katsayısı 1,0 olarak seçilmiştir). Kaynak kabiliyeti sınırlı bir çeliğin çevresel kaynağının geçiş bölgesinde yüksek iç gerilmeler oluşacağından b doğrusuna kadar inilir ve buradan sağa devam edilerek istenen yorulma ömrü  $10^7$ 'ye ulaşılır. Kaynak kalitesi F için üst skaladan okuma yapılarak kaynak bağlantısının yorulma dayanımı (genliği)

$$\sigma'_G = 9,2 \text{ kgf/mm}^2$$

bulunur. Eğme için emniyet katsayısı ise

$$v_e = \frac{9,2}{1,07} = 8,6 \text{ 'dır.}$$

Sözkonusu geçiş için burma zorlamalarında da 4 çizgisi kullanılır. Biçim katsayısı ise 1'den küçük seçilmelidir. Çünkü burmada kuvvet akışı ve gerilme dağılımı dikişten etkilenmektedir. Şekil-97 den

$$\frac{W_{pol_d}}{W_{pol_m}} = \frac{102}{64,7} = 1,5$$

oranı için biçim katsayısı 0,8 alınır. İç gerilmeler için yine b doğrusu geçerlidir. Dolayısıyla ana malzemenin yorulma dayanımı  $\tau_D = 14 \text{ kgf/mm}^2$  yardımıyla kaynak bağlantısının yorulma dayanımı (genliği)  $\tau'_G = 5,6 \text{ kgf/mm}^2$  ve burma emniyet katsayısı

$$v_b = \frac{5,6}{1,78} = 3,1$$

olarak bulunur.

Toplam emniyet katsayısı ise

$$\frac{1}{v^2} = \frac{1}{v_e^2} + \frac{1}{v_b^2} \quad ; \quad v = 2,9$$

olur.

b) İç çevresel dikiş (kesit II-II)

İç çevresel dikişlere sadece burma momenti etkimektedir. Anma gerilmesi genliği

$$\tau_{an} = \frac{M_b}{W_{pol_d}} = \frac{120000}{102} = 118 \text{ kgf/cm}^2$$

dir.  $\tau_D=14 \text{ kgf/mm}^2$  dayanımından 4 çizgisine, biçim katsayısı 1,0 değerinden de, gerilme giderme veya normalizasyon tavrı yapılmaması halinde kaynak dikişindeki iç gerilmeler yüksek olacağından, c doğrusuna gidilerek

$$\tau'_G = 6 \text{ kgf/mm}^2$$

$$v = \frac{6}{1,18} = 5,1$$

değerleri bulunur.

c) İç çevresel dikiş-dişli çark geçişi (Kesit III-III)

Geçiş bölgesindeki çap:  $D_1 = 87 \text{ mm}$

Kalınlık :  $s = 8 \text{ mm}$

Kesmeye çalışan alan :  $A_m = \pi \cdot D \cdot s = 21,9 \text{ cm}^2$

Kesme kuvveti :  $F = \frac{M_b}{D_{1/2}} = \frac{120000}{4,35} = 2760 \text{ kgf}$

Kesme anma gerilmesi genliği :  $\tau_{an} = \frac{27,60}{21,9} = 126 \text{ kgf/cm}^2$

Dikiş biçimi için 4 çizgisi, biçim etkisi için burmadaki gibi 0,8 ve iç gerilmeler için de b doğrusu geçerlidir.  $\tau_D=14 \text{ kgf/mm}^2$  dayanımından başlayarak kaynak bağlantısının yorulma dayanımı (genliği)

$$\tau'_G = 5,4 \text{ kgf/mm}^2 ,$$

$$v = \frac{5,4}{1,26} = 4,3$$

olarak elde edilir.

Üst çevresel dikişlerin, dişli çarkın rijitliğini sağlayabilmek için daha da kalın yapılması öngörüldüğünden, yorulma bakımından kontrolü gereksizdir.

8.9. Sayısal Örnek-8

Şekil-175'teki çekme çubuğunun yorulmaya karşı emniyet katsayısının hesaplanması istenmektedir. Darbesiz olan çekme kuvveti  $F_{üst}=3000 \text{ kgf}$  değerindedir ve dalgalı olarak etkimektedir ( $F_{alt}=0$ ). Çekme çubuğunun malzemesi St 38'dir.

a) Lama-Kaynak dikişi (yanak dikiş) geçişi

$A_d$ : İki yanak dikişinin kesiti =  $2a.l=8 \text{ cm}^2$

$F_g$ : Kuvvet genliği =  $\frac{F_{\text{üst}}}{2} = 1500 \text{ kgf}$

$A_m$ : Bir lamanın (ana malzemenin) kesiti =  $b.s=8 \text{ cm}^2$

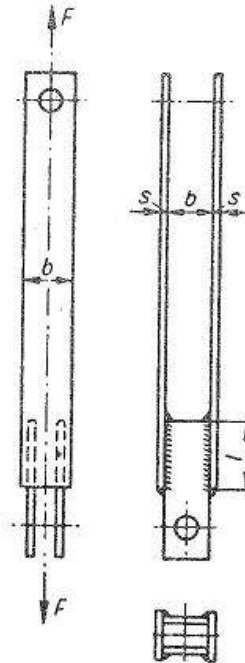
Anma gerilmesi genliği

$$\sigma_{\text{an}} = \frac{F_g}{2.A_m} = \frac{1500}{2.8} = 94 \text{ kgf/cm}^2$$

Aşırı yüklemde zorlamanın karakteri değişmiyorsa, emniyet katsayısı hesabında dalgalı yorulma dayanımı esas alınır. St 38'in dalgalı yorulma dayanımı Şekil-22'den  $\sigma_{\text{Dal}}=22 \text{ kgf/mm}^2$  yani  $\sigma_G=11 \text{ kgf/mm}^2$  dir. Geçiş işlenmemiş açıl kaynağı ve çukur dikiş sözkonusu olduğundan, Çizelge-14'e göre 3 çizgisi kullanılmalıdır.  $A_d/A_m=1$  için Şekil-97'de biçim katsayısı olarak 0,4 değeri verilmektedir. İç gerilmeler düşüktür, ancak yüksek ortalama gerilmeler nedeniyle Çizelge-15'e göre b doğrusu seçilir. Bu suretle N dikiş kalitesi ve  $10^7$  çevrim sayısı için Şekil-96'dan  $\sigma'_G=2,1 \text{ kgf/mm}^2$  bulunur. Böylece emniyet katsayısı

$$v = \frac{2,1}{0,94} = 2,2$$

olur.



Şekil-175: Darbesiz dalgalı bir çekme kuvvetinin etkidiği çekme çubuğu, kaynak dikişlerinin kalınlığı:  $a=4 \text{ mm}$ , dikiş uzunluğu:  $l=100 \text{ mm}$ ,  $b=80 \text{ mm}$ ,  $s=10 \text{ mm}$ .

b) Kaynak dikiş

Anma gerilmesi genliği

$$\tau_{an} = \frac{F_g}{2 \cdot A_d} = \frac{1500}{16} = 94 \text{ kgf/cm}^2$$

Dikiş için Şekil-96'daki 4 çizgisi geçerlidir. Kesmeye zorlanan yanak dikişlerinde biçim katsayısı uzunluğa bağlı olarak 0,5+0,8 dir; bu örnekte dikiş uzun kabul edilerek 0,5 alınmıştır. Ortalama gerilme yüksek olduğundan b doğrusu seçilmelidir.  $\tau_{Dal}=15 \text{ kgf/mm}^2$ , yani

$$\tau_G = \frac{\tau_{Dal}}{2} = 7,5 \text{ kgf/mm}^2$$

için kaynak dikişinin yorulma dayanımı

$$\tau'_G = 1,8 \text{ kgf/mm}^2$$

elde edilir. Emniyet katsayısı ise

$$v = \frac{1,8}{0,94} = 1,9$$

bulunur.

BU KİTAPTA KULLANILAN YORULMA İLE İLGİLİ BAZI DEYİMLERİN  
ALMANCA VE İNGİLİZCE KARŞILIKLARI

Alt gerilme	Unterspannung	Minimum stress
Aşırı yükleme	Überlastung	Overloading
Bileşik gerilmeler	Zusammengesetzte Spannungen	Combined stresses
Boyut etki sayısı	Grösseneinflusszahl	Size factor
Çentik duyarlık katsayısı	Kerbempfindlichkeitszahl	Notch sensitivity factor
Çentik katsayısı	Formzahl	Stress concentration factor
Çevresel eğme	Umlaufbiegung	Rotating bending
Çevrim	Lastspiel	Cycle
Çok kademeli yorulma deneyi	Mehrstufen-Schwingversuch	Multi-step fatigue test
Dalgalı yorulma dayanımı	Schwellfestigkeit	Fluctuating stress fatigue strength
Darbe etki sayısı	Stosszahl	Factor of safety for shock loading
Değişken yorulma dayanımı	Wechselfestigkeit	Reversed stress fatigue strength
Duraklama çizgileri	Rastlinien	Beach markings (rings)
Emniyet katsayısı	Sicherheit	Factor of safety
Frekans	Lastspielfrequenz	Frequency
Gerilme alanı	Schwingbreite	Stress range
Gerilme azaltıcı çentik	Entlastungskerbe	Stress-relieving notch
Gerilme genliği	Spannungsausschlag	Stress amplitude
Gerilme gradyeni	Spannungsgefalle	Stress gradient
Hasar birikimi	Schadenshaefung	Cumulative damage
Gerilme oranı	Spannungsverhaeltnis	Stress ratio
Gerilme yığılması	Spannungskonzentration	Stress concentration
İndirgenmiş yorulma dayanımı	Reduzierte Dauerfestigkeit	Reduced fatigue strength
Hasar çizgisi	Schadenslinie	Damage line
Karşılaştırma gerilmesi	Vergleichsspannung	Equivalent stress

Kesit etki sayısı	Querschnittszahl	Shape factor
Kırılma çevrim sayısı	Bruchlastspielzahl	Number of cycles to fracture
Kısa ömürlü yorulma	Plastoermüdung	Low-cycle fatigue
Koruyucu etki	Stützwirkung	Size effect
Malzemenin yorulmaya alışması	Trainieren	Coaxing
Merdiven yöntemi	Treppenstufenverfahren	Staircase method
Ortalama gerilme	Mittelspannung	Mean stress
Son kırılma	Restbruch	Final fracture
Sürelı korozyon yorulma dayanımı	Korrosions-Zeitfestigkeit	Corrosion fatigue strength
Sürelı yorulma dayanımı	Zeitfestigkeit	Endurance limit (finite life)
Üst gerilme	Oberspannung	Maximum stress
Yorulma çatlağı	Ermüdungsriß	Fatigue crack
Yorulma çentik katsayısı	Kerbwirkungszahl	Fatigue strength reduction factor (fatigue notch factor)
Yorulma dayanımı	Dauerfestigkeit	Fatigue strength (limit)
Yorulma dayanımı diyagramı	Dauerfestigkeits-schaubild	Fatigue diagram
Yorulma hasarı	Dauerfestigkeits-schaedigung	Fatigue damage
Yorulma kırılması	Dauerbruch	Fatigue fracture
Yorulma ömrü	Lebensdauer	Endurance
Yorulma zorlaması	Dauerbelastung	Fatigue loading
Yüzey etki sayısı	Oberflaechenzahl	Surface finish factor
Wöhler eğrisi	Wöhler-Kurve	Wöhler curve
Zorlama oranı	Anstrengungsverhaeltnis	Stress ratio (for combined stress)

## ALFABETİK DİZİN

- Aks,hesaplama örneği 183  
Alt gerilme 28  
Anma gerilmesi 107  
Asal gerilmeler 171  
Aşırı yüklemeler 163  
Azalma çizgileri 164
- Basma zorlamaları 52  
Bileşik yorulma zorlaması 166  
Bilya püskürtme,  
  yorulma dayanımına etkisi 52  
  yorulma çentik katsayısına  
  etkisi 111  
Biyel civatası,yorulma kırılması 20  
Boyut etki sayısı 149  
Burma yorulma kırılması 22,23
- Cıvata bağlantılarının yorulma  
  dayanımı 69  
Cıvata dişlerinin haddelenmesi 71  
Cıvatalar,  
  darbeli çekme zorlaması altında 73  
  üretim yönteminin etkisi 69
- Çelik dökümler 63  
Çelik halatlar 77  
Çelik teller 75  
Çentiğin gerilme gölgesi 145  
Çentik akma sınırı 148  
Çentik alanı 143  
Çentik duyarlılığı 107  
Çentik duyarlık katsayısı 131  
Çentik etki bölgesi 145  
Çentik katsayısı, 108,130,133  
  boyuna ve enine yarıklı çubuk-  
  ların 141  
  çentikli yassı çubukların 138  
  çentikli yuvarlak çubukların 137  
  delikli levhaların 140  
  faturalı yassı çubukların 135  
  faturalı yuvarlak çubukların 133  
  köşelerin 139  
Çentikler,  
  gerilme azaltıcı 143  
  paralel durumda 143  
  seri durumda 143  
  yorulma dayanımına etkisi 107  
Çevresel eğme 17,38  
Çevrim 9
- Çevrim sayısı 9  
Çinko kaplama 104  
Çok kademeli yorulma deneyi 25
- Dalgalı yorulma dayanımı 9,29  
Dalgalı zorlama 9  
Dalgalı zorlama bölgesi 29  
Darbe etki sayısı 155  
Darbeler 155  
Değişken yorulma dayanımı 9,29  
Değişken zorlama 9  
Değişken zorlama bölgesi 29  
Dekarbürizasyon 76  
Delikli levhalar 140  
Dökme çelikler 63  
Dökme demir,  
  küresel grafitli 66  
  lamel grafitli 65  
  temper 68  
Duraklama çizgileri 15  
Düşük sıcaklıklar 53
- Emniyet katsayısı,156  
  bileşik yorulma zorlamalarında 170  
Enine delikli miller 56
- Faturalı yassı çubuklar 135  
Faturalı yuvarlak çubuklar 133  
Frekans 9,24  
Fren çekme çubuğu,hesaplama örneği 195
- Gerilme alanı 28  
Gerilme artırıcı çentikler 143  
Gerilme azaltıcı çentikler 143  
Gerilme genliği 27  
Gerilme gradyeni 173  
Gerilme gölgesi 145  
Gerilme oranı 28  
Gerilme yığılmaları 9  
Göbek geçme biçimleri 123  
Göbek geçmeli miller 153
- Hasar birikimi 165  
Hasar çizgisi 26  
Helisel yaylar 77  
Hesaplanan gerilme 107

- Hidrojen gevrekliği 102  
Hidrojenin giderilmesi 102
- Isıya dayanıklı elikler 55  
İslah elikleri 43  
İslah etme,tüm kesiti 180
- İndirgenmiş yorulma çentik katsayısı 168  
İndirgenmiş yorulma dayanımı 156,180  
İşlemenin etkisi(Bak.Yüzey etkisi)  
İşletme türleri 33  
İşletme yorulma dayanımı 160
- Kadmiyum kaplama 103  
Kalay kaplama 103  
Kama yuvaları 124  
Kamalı miller 126  
Karşılaştırma gerilmesi 167  
Karşılaştırma momenti 168  
Kaynak bağlantıları 81,200,203  
Kesintili işletme 33,36  
Kesit biçimi 154  
Kesit etki sayısı 154  
Kırılma evrim sayısı 25  
Kısa ömürlü yorulma 33  
Konstrüktif yorulma dayanımı 24,107  
Korozyon 96  
Koruyucu etki 108  
Krank mili 59  
Krank mili muylusu 23,140  
Krank mili yanağı 140  
Küresel grafitli dökme demir 66
- Lamel grafitli dökme demir 65
- Malzeme hataları 12  
Malzeme seçimi,yorulma zorlamasında 179  
Malzemenin yorulmaya alişması 163  
Mangan sert eliği 56  
Merdiven yöntemi 27  
Miller,hesaplama örneği 181  
Mukavemet hipotezleri 166
- Nikel kaplama 103  
Nitrürasyon,  
yorulma dayanımına etkisi 119
- yorulma çentik katsayısına etkisi 119
- Oranlanmış gerilme gradyeni 175  
Ortalama gerilme 28
- Ön korozyon,  
dinamik 96  
gerilmesiz 96  
Özel yapı elikleri 41
- Paralel entikler 143  
Paslanmaz elikler 56  
Perçin bağlantıları 74  
Piston kolunun yorulma kırılması 20  
Pürüz derinliği 153
- Rulman oturma yüzeyleri 112
- Sayısal örneklemler 179  
Sementasyon 50  
Serbest muylu,hesaplama örneği 107  
Seri entikler 143  
Sert krom kaplama 104  
Sınır evrim sayısı 25  
Sıcaklıklar 70  
Son kırılma 15  
Sürekli işletme 33,36  
Sürekli korozyon yorulma dayanımı 96  
Sürekli yorulma dayanımı, 26,29 bölgesi 26  
hesaplama yöntemi 161  
yorulma çentik katsayısı 109  
Sürekli yorulma kırılması 19
- Tane büyüklüğünün etkisi 57  
Tek kademeli yorulma deneyi 25  
Tel halatlar 77  
Temel gerilme 143  
Temper dökme demir 68
- Ucu delik ubuklar 126  
Uzar cıvata 20
- Üst gerilme 27



Wöhler eğrisi 26  
Wöhler yöntemi 24

Yapı çelikleri 38  
Yapısal çentik 175  
Yapısal uzunluk 177  
Yaylar 77  
Yorulma çatlağı 11,15  
Yorulma çentik katsayısı, 107  
  çevresel çentikli yuvarlak çubuk-  
  ların 116  
  delikli yassı çubukların 115  
  düşük sıcaklıklarda 117  
  enine delikli yuvarlak çubukla-  
  rın 113  
  faturalı yuvarlak çubukların 111  
  göbek geçmeli millerin 122  
  hesaplanması 129  
  içi boş millerin 115  
  indirgenmiş 168  
  kama yuvalı millerin 124  
  kamalı millerin 124  
  yüksek sıcaklıklarda 108  
Yorulma dayanımı, 7, 24  
  akma çizgileri doğrultusunun  
  etkisi 42  
  artırılması 44  
  aşırı yüklemelerin etkisi 163  
  azalma çizgileri 164  
  boyut etkisi 149  
  enine delikli millerin 56  
  frekansın etkisi 24  
  genel tanımlar 29  
  gösterimi 28  
  konstrüktif çentiklerin etkisi 107  
  korozyonun etkisi 96  
  metallurjik yapının etkisi 58  
  özel tanımlar 29  
  paslanmaz çeliklerin 56  
  saptanması 24  
  sıcaklığın etkisi 52  
  tane büyüklüğünün etkisi 57  
  yüksek sıcaklıklarda 53  
  yüzey kaplamaların etkisi 102  
Yorulma dayanımı diyagramı, 31  
  cıvataların 71  
  çelik halatların 79  
  çelik tellerin 79  
  dökme çeliklerin 63  
  Haigh'e göre 33  
  helisel yayların 79  
  kaynak bağlantılarının 81

küresel grafitli dökme demirlerin 66  
lamel grafitli dökme demirlerin 65  
Moore-Kammers-Jasper'e göre 33  
perçin bağlantılarının 75  
Smith'e göre 31  
temper dökme demirlerin 68  
yaklaşık çizimi 38  
yapı ve konstrüksiyon çeliklerinin 37  
Yorulma dayanımı oranı 175  
Yorulma deneyi,  
  çevresel eğme 38  
  çok kademeli 25  
  ileri-geri eğme 38  
  sonuçların dağılımı 25  
  tek kademeli 25  
Yorulma hasarı 11  
Yorulma ile ilgili semboller 27  
Yorulma kırılması, 7, 10, 19  
  dış etkenler 12  
  iç etkenler 12  
  görünümü 15  
  nedeni 9  
  oluşumu 10  
  örnekler 20  
  öztitreşim nedeni ile 9  
Yorulma ömrü, 9, 31  
  dağılım alanı 162  
Yorulma zorlaması, 8  
  bileşik 166  
Yükleme birikim eğrisi 34  
Yükleme grafiği 34  
Yükleme karakteristiği 157  
Yükleme kollektifi 33  
Yükleme sıklık eğrisi 34  
Yüksek dayanımlı ıslah çelikleri 57  
Yüksek sıcaklıklar 53  
Yüzey etki sayısı 153  
Yüzey haddelenmesi 52  
Yüzey kalitesi 153  
Yüzey sertleştirme,  
  yorulma çentik katsayısına etkisi 119  
  yorulma dayanımına etkisi 44

Zorlama oranı 169  
Zorlama türleri, 33  
  yorulma çentik katsayısına etkisi 109  
Zorunlu kırılma 19