



ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

YORULMA DENEY FÖYÜ

HAZIRLAYANLAR

Prof.Dr. Erdem KOÇ

Yrd.Doç.Dr. Kemal YILDIZLI

EKİM 2012

SAMSUN

YORULMA DENEYİ

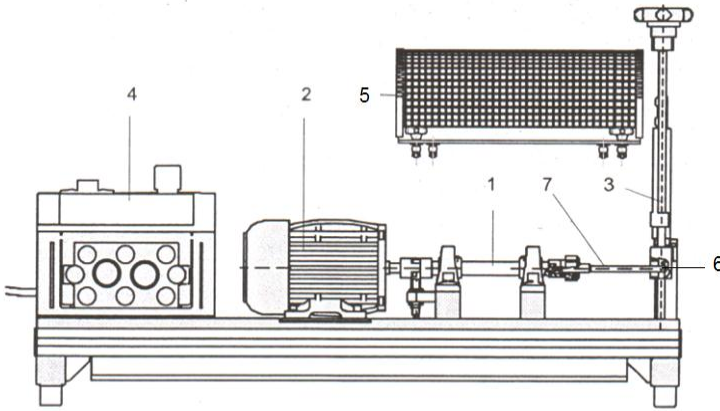
1. DENEYİN AMACI

Bu deneyde, metalik malzemelerde yorulma dayanımının belirlenmesini göstermek amaçlanmıştır. Wöhler diyagramının hazırlanması, bu diyagramda, farklı cins malzemelerin yorulma dayanımlarının karşılaştırılması, çentik etkisi ve yüzey pürüzlülüğü gibi yorulma dayanımı üzerindeki önemli parametrelerin etkileri kavratılmaya çalışılmıştır.

2. DENEY DÜZENEGİ

Döndürme-eğme tipi yorulma deney düzeneğinde, numune bir ucundan tutturulup, diğer ucuna kuvvet uygulanarak döndürülür. Böylece, silindirik numune üzerinde bir değişken eğilme gerilmesi meydana getirilir ve yorulma sonucunda numunenin kopması beklenir.

Bu amaçla geliştirilen deney düzeneğinin elemanları Şekil 1’de numaralandırılmıştır. Bunlar, numune tutucu (1), elektrik motoru (2), yükleme tertibatı (3), elektrik kontrollü şalter kutusu ve sayaç (4), koruyucu çerçeve (5), hareketli (yüzer) rulmanlı yatak (6) ve deney numunesi (7)’den ibarettir.



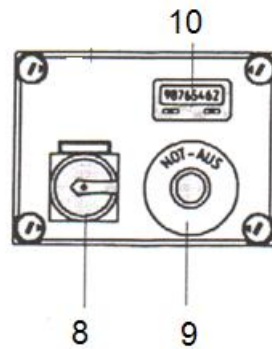
(a)



(b)

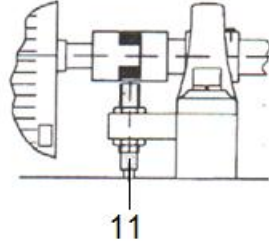
Şekil 1. Döndürme-eğme tipi yorulma deney düzeneği

Kontrol panosu üzerinde, motoru çalıştıran ana şalter (8), acil kapama şalteri (9), ve dijital sayaç (10) bulunmaktadır (Şekil 2). 8 dijitli sayaç, numunenin dönüş sayısını kaydeder. Dönüş hızı devir/dakika birimindedir.



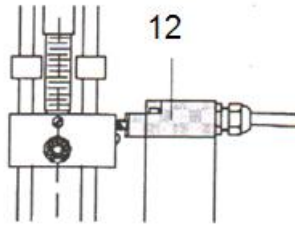
Şekil 2. Kontrol panosu

Kavramanın her turunda, motor kavraması altında yerleştirilmiş indüktif yakınlık sensörü (11) bu dönüşü algılar (Şekil 3).



Şekil 3. İndüktif yakınlık sensörü pozisyonu

Numune kırıldığında, optik sensör (12) üzerinden motor otomatik olarak durdurulur (Şekil 4).

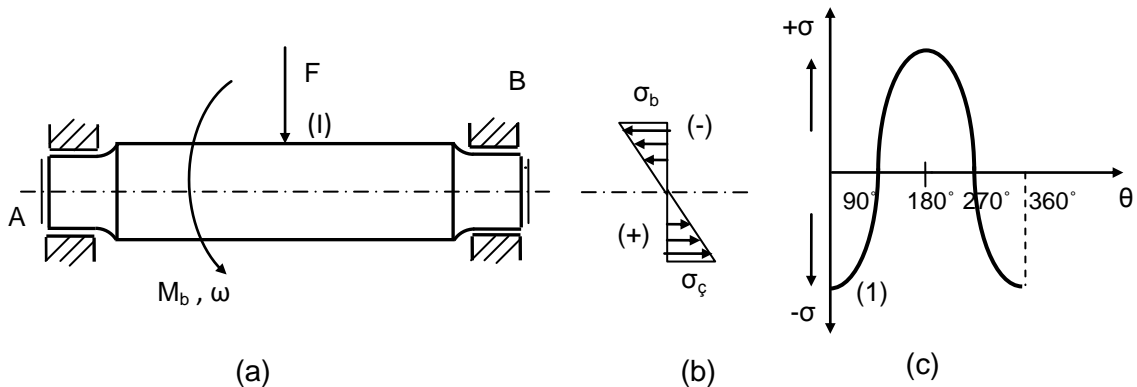


Şekil 4. Durdurma sensörü (deney düzeneği yandan görünüş)

3. TEORİK ESASLAR

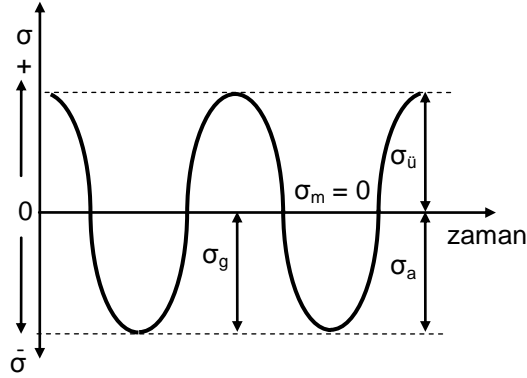
3.1. Dinamik Gerilmenin Oluşumu

Eğilme kuvvetine (F) maruz ω açısal hızı ile dönen bir milde, gerilme dağılımı, alt yarısında çekme (σ_c) üst yarısında basma gerilmesinden (σ_b) oluşan nominal eğilme gerilmesi şeklinde olacaktır. En büyük gerilmeler, milin en dış yüzeyindeki liflerde olacak, en alt lif maksimum çekme, en üst lif maksimum basma gerilmesine maruz kalacaktır. Milin 90° 'lik dönüşlerinde, en üstteki maksimum basma gerilmesinin veya yükü taşıyan bir liftteki gerilmenin bir tam dönüşteki değişimi Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Dinamik gerilmenin oluşumu [1]

180°'lik dönüş halinde, daha önce basmaya çalışan lifler çekmeye, çekmeye çalışan lifler basmaya zorlanacaktır. Başlangıçta (0°) basma gerilmesine maruz lifin, 90°'de gerilmesinin sıfır olduğu görülür. Bu noktadan sonra gerilmenin işareti değişir ve 180° de lifin en alt konumda oluşundan dolayı maksimum çekme gerilmesi ile zorlanır. 360°'de, lif tekrar maksimum basma gerilmesine maruz kalır. Böylece elemanın lifleri pozitif ve negatif eşit değerler arasında periyodik bir değişim gösteren gerilmelere maruz kalır. Bu gerilme değişimi **"tam değişken"** olarak tanımlanmaktadır. Tam değişken gerilme durumundaki önemli büyüklükler, gerilmelerin maksimum (üst) ve minimum (alt) değerleri ile ortalama değer (σ_m) ve gerilme genliği (σ_g) Şekil 6'da gösterilmiştir[1].



Şekil 6. Tam değişken gerilme hali [1]

σ_m ortalama gerilme olup

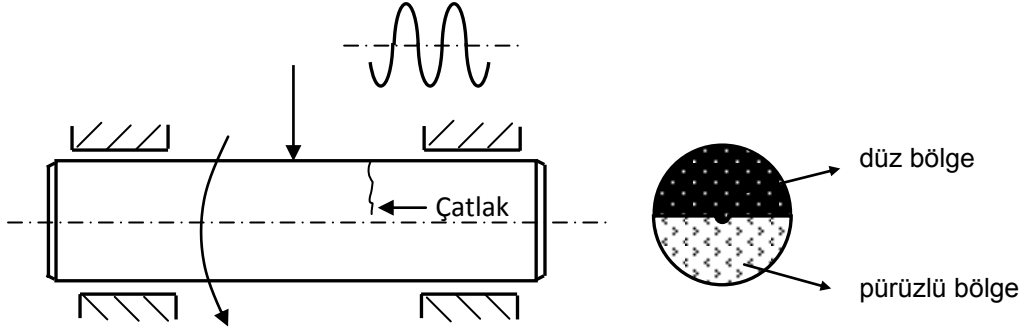
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\bar{u}} + \sigma_a}{2} \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Gerilme genliği ise $\sigma_g = \frac{\sigma_{\bar{u}} - \sigma_a}{2}$ olur. Bu özel durumda $\sigma_{\bar{u}} = |\sigma_a| = \sigma_g$ olmaktadır.

3.2. Yorulma Kırılması

Bir makine elemanı üzerindeki yükler statik olsa dahi, çalışma sırasında kesitteki gerilmeler değişken olabilir. Değişken gerilmelere maruz makine elemanlarında, kopma statik sınırların çok altında gerçekleşir. Statik koşullarda oluşan kırılma ayrılma kırılması, dinamik koşullarda oluşan kırılmada yorulma kırılması şeklindedir. Dinamik yüklemde yükün tekrar etmesi sonucu malzemede yorulma olayı gerçekleşmektedir. Değişken gerilmeler etkisinde, malzeme iç bünyesindeki değişiklikler yorulma, elemanın kopuncaya kadar direnç gösterebildiği süreye (zamana) da ömür denmektedir. Genellikle elemanın ömrü, yük tekrar sayısı (N) ile tarif edilmektedir.

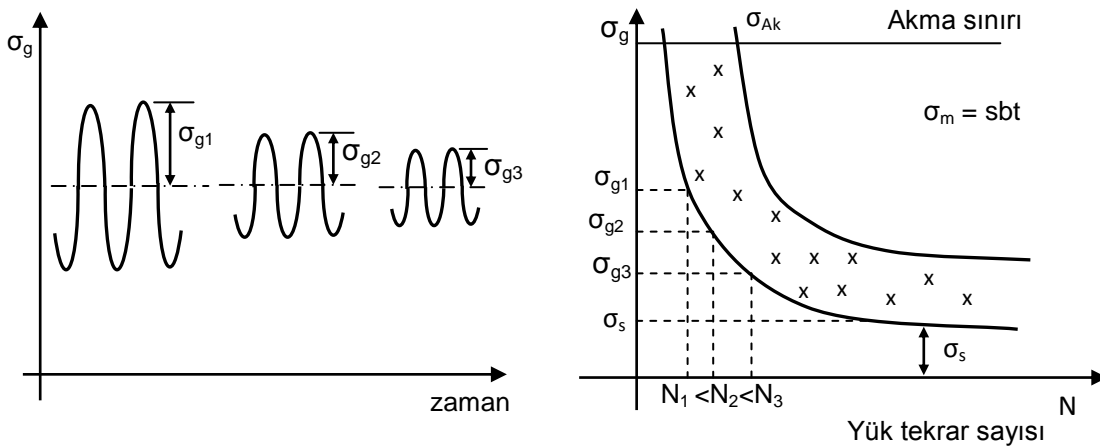
Dinamik yük altında malzemenin en çok zorlanan lifleri en erken yorulur ve bu noktalarda ilk kılcal çatlaklar ortaya çıkar. Çalışma sürdükçe bu çatlaklar derinleşir. Geri kalan kesit, gerilme mukavemet sınırını veya kopma mukavemetini aşınca malzeme yükü taşıyamaz ve çentik etkisi ile parça aniden kırılır. Bu şekildeki kırılmaya **yorulma kırılması** denir. Yorulma sonucu kırılan yüzeyinde iki farklı bölge veya görünüş vardır. Çatlağın ilerlemesi ile birbirine sürtünen iki yüzey birbirini cilalar, düzgün bir yüzey oluşturur. Kopma mukavemetini aştığı için aniden kırılan kısma ait yüzey ise taneli pürüzlü bir görünümdedir. Şekil 7, dinamik yüklemde oluşan yorulma kırılmasını ve kırılan yüzeyin farklı bölgelerini göstermektedir [1].



Şekil 7. Yorulma kırılması [1]

3.3. Wöhler Diyagramı

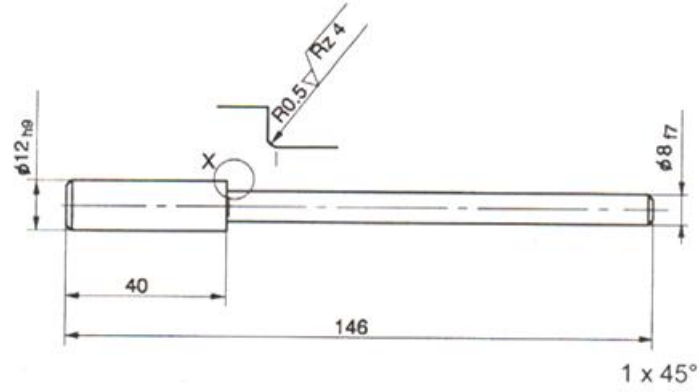
Değişken yükler altında malzeme davranışı, ilk defa 1866'da Wöhler tarafından vagon akslarında görülen erken kırılmaların nedeni araştırılırken izah edilmeye çalışılmıştır. Deneyler, ömrün, değişken gerilmenin genliğine bağlı olduğunu göstermiştir. Yükün veya gerilmenin genliği ne kadar büyükse ömür de o kadar kısa olmaktadır. Yükün veya gerilmenin periyodik değişimi, bir yük tekrar olup, bir eleman yoruluncaya kadar ne kadar periyodik tekrar sayısına dayanabilirse ömrü o yük tekrar sayısı (N) kadar olmaktadır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, sabit bir σ_m ortalama gerilme için, değişik genlik değerlerinde eleman kopuncaya kadar yüklenir ve bir seri (σ_g, N) değerleri wöhler diyagramına taşınır. Eleman, tespit edilmiş bir σ_m değerinde σ_{g1} genliği ile yüklenince N_1 , σ_{g2} genliği ile yüklenince N_2 yük tekrar sayısına direnç gösterebilmektedir. Gerilme genliği giderek küçültülürse, elemanın kırılıncaya kadar dayanabildiği yük tekrar sayısı da artmaktadır. Eleman için bir sınır gerilme değerine ulaşılmakta ve böyle bir gerilme genliği ve daha küçük gerilme genlik değerlerinde elemanın sonsuz ömre eriştiği söylenebilmektedir. Bu sınır değer, sürekli mukavemet değeri veya genliği (σ_s) olarak tanımlanmaktadır [1].



Şekil 8. Wöhler eğrisi [1]

4. DENEY NUMUNESİ

Çelik malzemelerde, çentik etkisinin yorulma dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için hazırlanmış bir deney numunesi Şekil 9'da verilmiştir. Numuneler, C_k 35 temperlenmiş aynı cins çelik çubuktan talaşlı imalatla en az 3 adet hazırlanır. Deney numunelerinin, maksimum çekme dayanımı $\sigma_c=560$ N/mm²; % 0,2 birim uzamaya karşılık gelen akma gerilmesi $\sigma_{0,2}= 420$ N/mm² olarak çekme deneyi ile önceden belirlenmiştir. Ayrıca, çentik yarıçapı 2 mm ve yüzey pürüzlülük değeri 25 µm olan, şekildekinden farklı iki ayrı tipte deney numunesi daha mevcuttur.

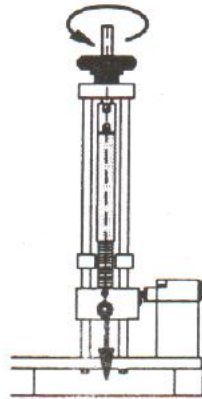


Şekil 9. Yorulma deney numunesi ölçüleri

5. DENEYE HAZIRLIK

5.1. Deney Numunesinin Yerleştirilmesi

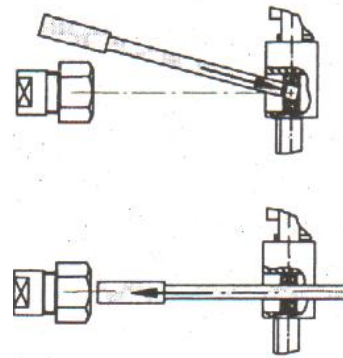
- Şekil 10'da görüldüğü gibi, el çarkı gösterilen yönde döndürülerek hareketli rulmanlı yatağın üzerinden numuneye aktarılan yük boşaltılır. Yüzer rulmanlı yataktan, gözle bakılarak, numune tutucu merkezi görülmeye çalışılır, rulman merkezi ile numune tutucunun aynı ekseninde olması sağlanır.



Şekil 10. Yükün kaldırılması

- Numunenin bir ucu, hareketli rulmanlı yatağa doğru Şekil 11'deki gibi ok yönünde hareket ettirilerek yerleştirilir.

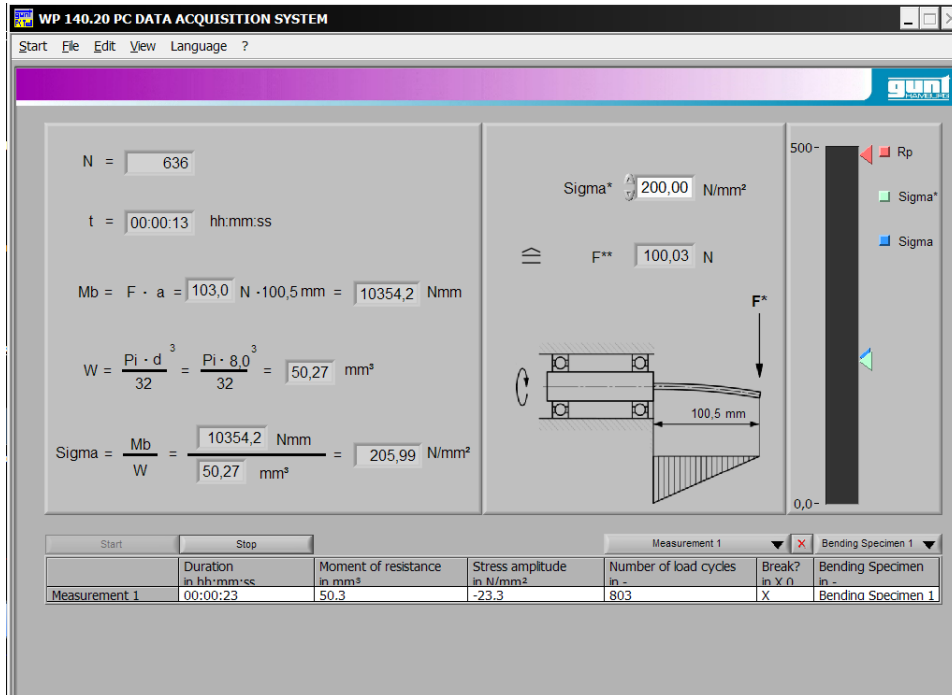
- Daha sonra numunenin diğer ucu somun içindeki durma noktasına kadar itilir ve somun sıkılır.
- Numuneye elle birkaç tur attırılarak sıklığı kontrol edilir.
- Koruyucu çerçeve yerine takılır ve vidalarla kilitlenir.



Şekil 11. Numunenin yerleştirilmesi

5.2. Bilgisayar Yazılımının Çalıştırılması

Deney düzeneğinin, data logger (veri toplayıcı) ile bağlantısı kurulup, bilgisayar yazılımı çalıştırılır. Şekil 12’de görüldüğü gibi, yazılım penceresinin sol tarafında yukarıdan aşağıya sırası ile yük tekrar sayısı (N), deney süresi (t), eğilme momentinin anlık değişimi (M_e), eğilme kesit mukavemet momenti (W) ve değişken gerilme genliği (σ_g) değerleri takip edilebilir. Sağ tarafta ise, σ^* bölümüne manuel olarak arzu edilen değişken gerilme değeri (Örn: 200 N/mm²) yazılır. Deney sırasında kuvvet sensörünce anlık olarak etkiyen kuvvetin büyüklüğüne bağlı anlık gerilme genliği (Mavi üçgen) otomatik hesaplanır ve teorik gerilme genliği ile (yeşil üçgen) ile kıyaslanabilir. Ayrıca, değişken gerilme genliğinin, deney numunesinin akma gerilmesine (Rp) göre mevcut seviyesi, siyah sütun grafik üzerinden takip edilebilmektedir.

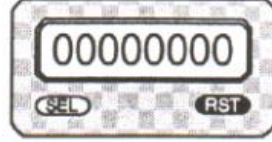


Şekil 12. Deney parametrelerinin yazılımdan takibi

6. DENEYİN YAPILIŞI

Deney yapılırken aşağıdaki prosedür takip edilmelidir.

- Kontrol panosundan RST tuşunu kullanarak sayaç sıfırlanır (Şekil 13), aynı anda, bilgisayar ekranında görülen yazılım penceresindeki start tuşuna basılır.
- Kontrol panosundan motor çalıştırılır.
- Numune Bölüm 6.1'deki gibi yüklenir. İzin verilen en fazla yük, skaladan ayarlanarak hızla uygulanır. Uygulanan yüke karşılık oluşan değişken gerilme değeri, Bölüm 6.2'deki gibi hesaplanır. Bu gerilme, malzemenin akma gerilmesini aşmamalıdır.



Şekil 13. Kontrol panosu üzerindeki sayacın sıfırlanması

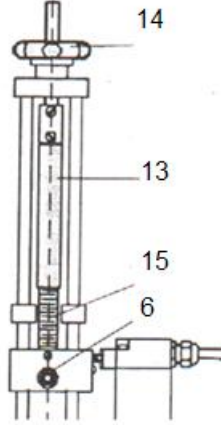
- Numune kırıldığında motor otomatik olarak durur. Yük tekrar sayısı (N) sayaçtan okunur ve Tablo 1'e kaydedilir.
- Koruyucu çerçeve sökülerek, kırılan numune parçaları sökülür. Yeni deney numunesi takılır.
- Takılan her numuneye, tatbik edilen yük her seferinde azaltılarak, deney prosedürü aynen tekrarlanır. Deneylere hasarın meydana gelmediği yükleme şartları bulununcaya kadar devam edilir.
- Tablo 1'deki değerler kullanılarak Wöhler diyagramı Bölüm 6.3'de anlatıldığı gibi çizilir.

Tablo 1. Farklı yükler için tespit edilmiş hasarın oluştuğu yük tekrar sayıları

| Deney No | F [N] | σ_g [MPa] | N [Yük tekrarı] | Süre[dakika, saat] |
|----------|-------|------------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 200 | 400 | 14030 | 5 dak. |
| 2 | 170 | 340 | 48800 | 17 dak. |
| 3 | 150 | 300 | 167000 | 60 dak. |
| 4 | 130 | 260 | 455000 | 2 saat 42 dak. |
| 5 | 120 | 240 | 1280800 | 7 saat 37 dak. |
| 6 | 100 | 200 | - | Hasar yok. |

6.1. Numunenin Yükleneşmesi

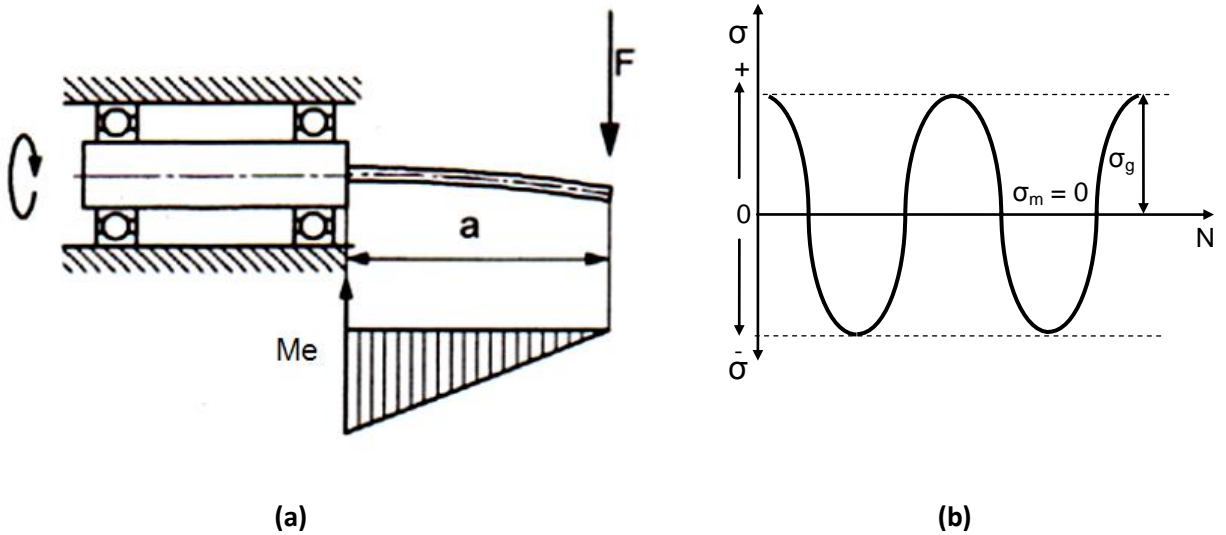
Hareketli rulmanlı yatak (6) ile bağlantılı yay destekli bir dinamometre (13) kullanılarak numuneye yükleme yapılır. Yükleme ayarlaması, el çarkı (14) döndürüldüğünde oluşan vida mekanizması hareketi ile uygulanır. Uygulanacak yükün seviyesi, dinamometre üzerindeki kalibreli skaladan (15) okunur (Şekil 14).



Şekil 14. Yükleme tertibatı

6.2. Değişken Gerilme Hesabı

Bir uçtan etkiyen kuvvete maruz çubukta eğilme gerilmesi oluşur. Bu yükleme numunede, Şekil 15.a' da gösterildiği gibi, üçgen şeklindeki eğilme momenti dağılımına sebep olur.



Şekil 15. Bir uçtan F kuvvetine maruz dönen bir çubukta eğilme momentinin değişimi

Durgun halde, eğilme momenti sabit, fakat çubuk döndüğünde, b'de görülen bir sinüs eğrisi şeklinde değişken eğilme gerilmesiyle yüklenir. Bu, tam değişken eğilme gerilmesidir. Bu yüzden yalnızca, döndürme-eğme tipi yorulma deney düzeneğinde yorulma dayanımını belirlemek mümkündür.

Eğilme momenti, aşağıdaki formülden basitçe hesaplanır:

$$M_e = F.a$$

Burada, F eğilme kuvveti [N], a ise numunenin tutucu dışında kalan kısmından uca kadar ölçülen mesafe [mm] 'dir.

Deney düzeneğinde a = 100,5 mm ve numune çapı (d) = 8 mm olarak sabit olduğundan, numunenin kesit eğilme mukavemet momenti $W_e = \frac{\pi d^3}{32}$ formülü kullanılarak, değişken gerilme genliğinin hesaplanması mümkündür.

Örnek bir hesaplama; titreşimli gerilme genliği (σ_g) bulunuşu aşağıda gösterilmiştir.

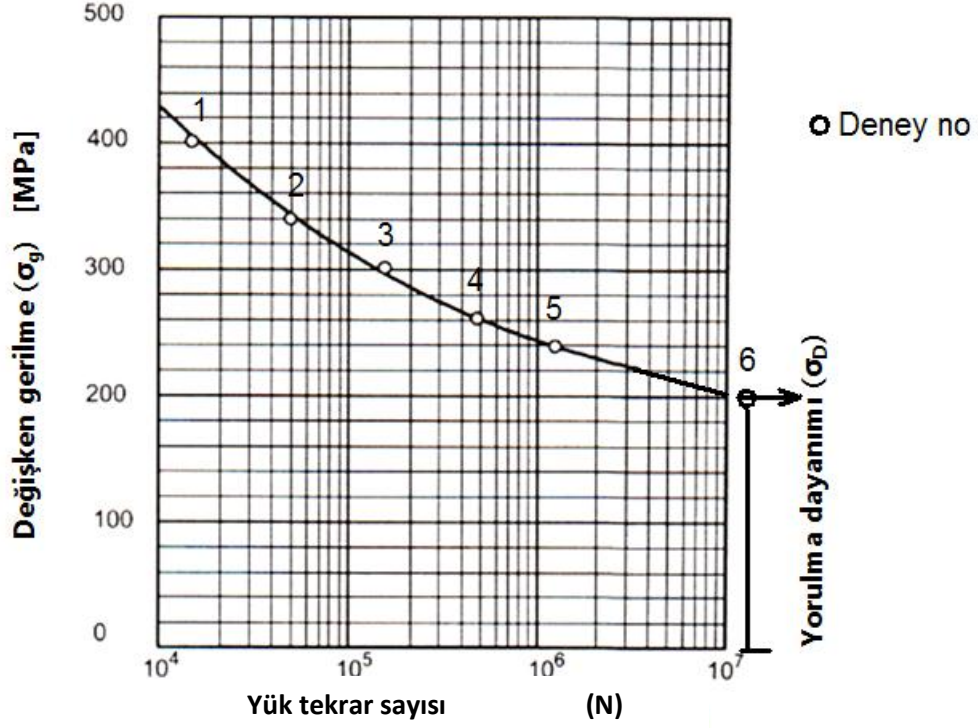
$$\sigma_g = \frac{M_e}{W_e} = \frac{32a}{\pi d^3} F$$
$$\sigma_g = \frac{32.(100,5\text{mm})}{\pi.8^3\text{mm}^3} F$$
$$\sigma_g = 2.0 \times \frac{1}{\text{mm}^2} F \text{ [N]}$$

Gerilme genliği, $\sigma_g = 2.F \text{ [N/mm}^2\text{]}$ olarak bulunur.

Bu formül, değişken gerilme değerinin, deney numunesine etkiyen kuvvetin iki katı olduğu anlamına gelir. Örneğin 100 N kuvvet etkisi altında iken, deney numunesi $200 \text{ N/mm}^2 = 200 \text{ MPa}$ değişken eğilme gerilmesine maruz demektir.

6.3. Wöhler Diyagramının Oluşturulması

Wöhler diyagramında, düşey eksen değişken gerilmeyi, yatay eksen yük tekrar sayısını göstermektedir. Yatay eksen, logaritmik ölçekli olarak hazırlanmalıdır. Bunun nedeni, farklı değişken gerilmeler altında erken kırılan numuneler (örnek: 1000 devir) ve geç kırılan numunelerin (10000000 devir) yük çevrim sayılarını bir arada sunulmasını mümkün kılmasıdır. Şekil 16'da, C_k 35 çeliği için yapılmış 6 deneyin, Tablo 1'deki verilerine göre hazırlanmış wöhler diyagramı görülmektedir. İlk deneyde, uygulanan yükün maksimum değeri F=200 N'a karşılık olarak $\sigma_g = 400 \text{ N/mm}^2$ iken, numunenin kırıldığı yük tekrar sayısı 14030 ($1,403 \times 10^4$) olarak diyagramda işaretlenir. Aynı şekilde, 2,3,4 ve 5 nolu deneylerdeki değişken gerilme değerlerine karşılık gelen yük tekrar sayıları sırası ile yerleştirilir. Değişken gerilme genliği altında çalışırken, 6 nolu ve sonrasında yapılacak deneylerde görüldüğü gibi yük daha da azaltılırsa, numunenin artık kırılmadığı gözlenir ve numune sonsuz ömre ulaştığı kabul edilir. Bu durumda değişken gerilme değeri sabit, yatay eksen sonsuza doğru gittiği için, eğri yatay hal alır. Buna karşılık gelen gerilme değerine yorulma dayanımı adı verilir. Çelik ve dökme demirde yorulma dayanımının belirlenmesi için 10^7 tekrar; alüminyumda 5×10^8 tekrarda malzeme sonsuz ömrüne ulaştığı kabul edilir.



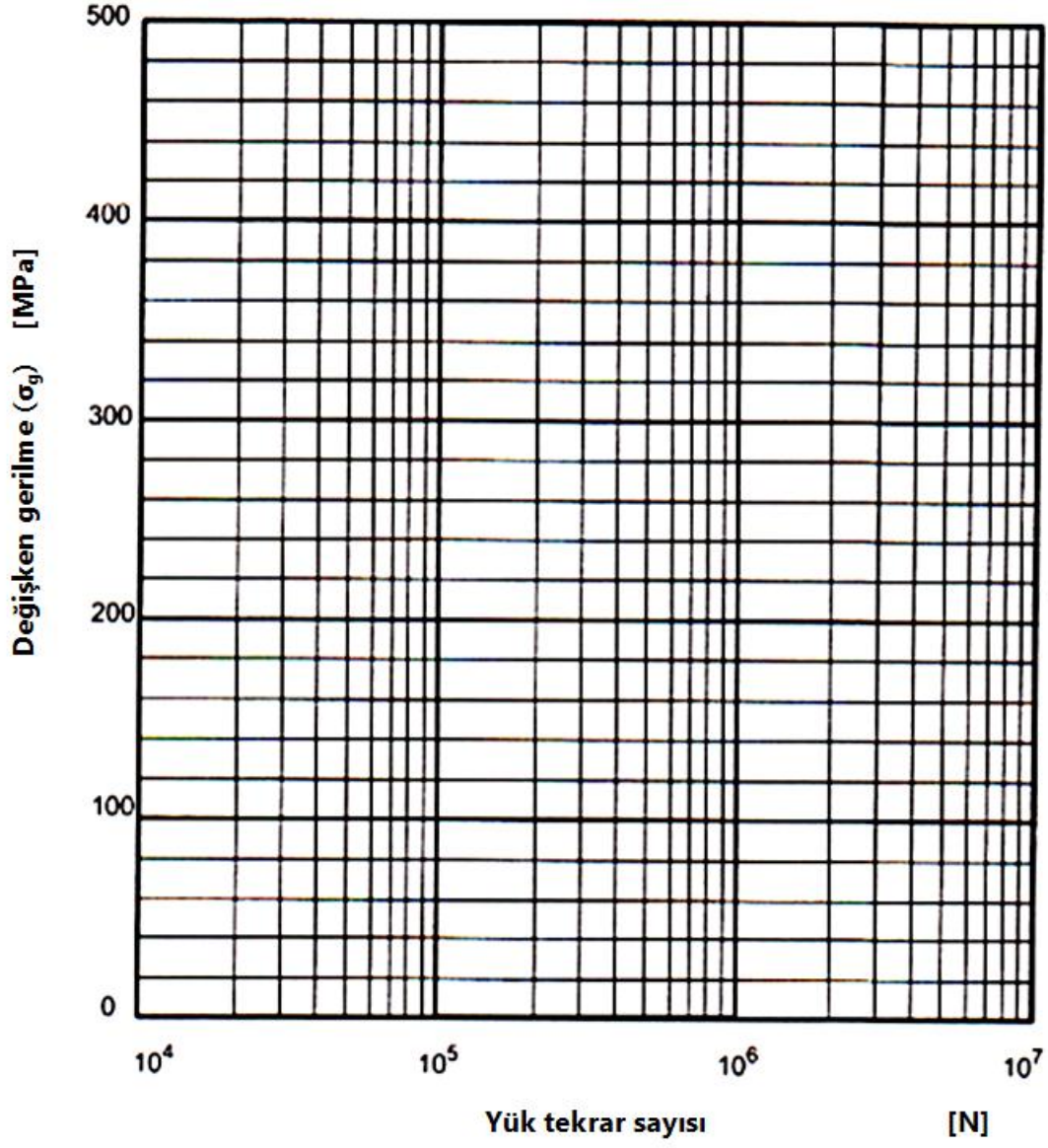
Şekil 16. C_k35 düşük karbonlu çelik numune için wöhler eğrisi

Şekle göre, tam değişken gerilme altında yorulma dayanımı (σ_D) 200 N/mm² civarında olduğu belirlenir. Bu, değer, C_k35 çeliğinin, çekme dayanımı ($\sigma_c=560$ N/mm²) dikkate alındığında çok düşüktür.

7. İSTENENLER

-DeneySEL verileri, bilgisayar ortamında Şekil 17'deki gibi, bir wöhler diyagramı hazırlayarak gösteriniz.

- Çizilen bu diyagramdan yararlanarak, yorulma dayanımını belirleyiniz.



Şekil 17. Örnek wöhler diyagramı

8. KAYNAKLAR

- [1]. E.KOÇ. Makina Elemanları, Cilt-1 Nobel Yayınevi, 4. Baskı, Adana, 2006
- [2]. G.U.N.T. WP 140 Fatigue Tester Catalouge, 2010