



T.C.

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

YORULMA DENEY FÖYÜ

1. DENEYİN AMACI

Tekrarlı yüklemeler ve titreşim altında çalışan makine elemanlarının maruz kaldığı gerilmeler malzemenin akma değerinin altında olsa bile belirli bir tekrardan sonra malzemenin hasara uğramasına neden olacaktır. Bu olaya yorulma denilmektedir. Yorulma olayı tekrarlı olarak yüklenen malzemenin yüzeyinde bir çatlakla başlar. Belirli bir tekrar sayısına ulaşıldıktan sonra çatlak ilerleyerek kırılma meydana gelir. Tek eksenli yorulma deneyinin amacı ise tekrarlı veya titreşimli yüklere maruz kalan malzemelerin yorulma dayanımının belirlenmesidir.

2. DENEYİN ÖĞRENME ÇIKTILARI

- Yorulma hasar mekanizmasının öğrenilmesi
- Yorulma testi türlerinin öğrenilmesi
- Yorulma dayanımını arttırmak için alınması gereken önlemlerin öğrenilmesi
- Yorulma deneyinden elde edilen verilerin analiz edilmesi, yorumlanması ve Wöhler diyagramının oluşturulması

3. TEORİK BİLGİLER VE TANIMLAR

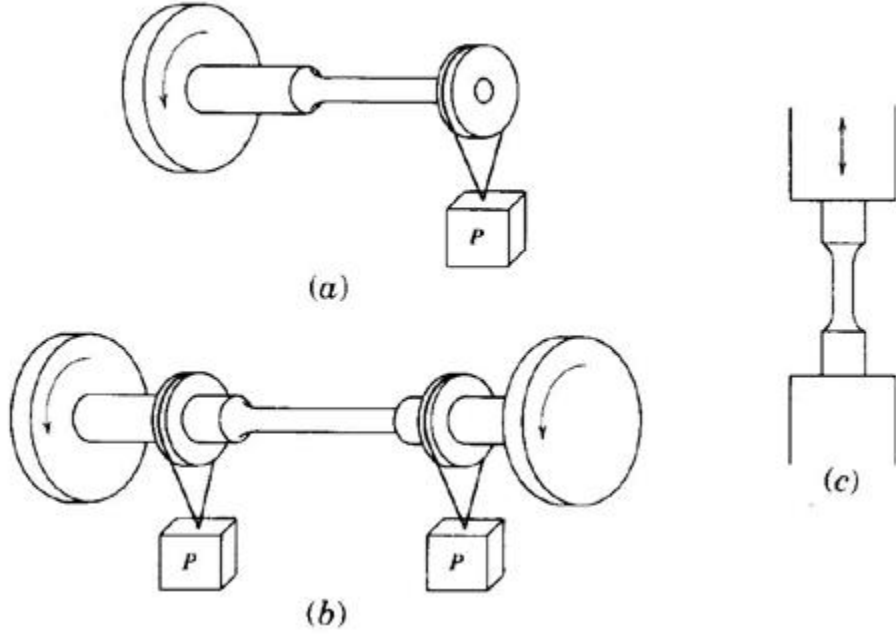
3.1.Yorulmanın Tarihçesi

Yorulmanın keşfi 1800' lerde araştırmacıların köprü ve demir yolu akslarının tekrarlı yüklemelere maruz kalarak çatlakların gözlenmesine dayanmaktadır. 1850' li yıllarda August WÖHLER demir yolu aksları üzerinde yorulma olayını anlamak için çalışmalar yapmıştır. Bu araştırmalar sonucunda elde ettiği verileri kullanarak kendi adını veren diyagramı oluşturmuştur.

3.2. Yorulma Deney Türleri

Deneyde uygulanan gerilme türü yorulma deneyine de adını vermektedir. Başlıca yorulma deney türleri aşağıdaki gibidir.

- Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi
- Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi
- Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi
- Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi



Şekil 1 Yorulma test cihazlarının şemaları a) Tek uçtan yüklemeli dönel eğmeli b) İki uçtan yüklemeli dönel eğmeli ve c) Eksenel gerilmeli (Çeki-Bası)

3.2.1 Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu test türünde numuneye uzunluğu boyunca çeki-bası gerilmesi uygulanır. Uygulanan gerilme numunenin eni boyunca homojen olarak dağılmaktadır.

3.2.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu test kendi içinde ikiye ayrılmaktadır.

- Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi
- Dönen Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

İlk test türünde, numune nötr bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Otomobillerde kullanılan yaprak yayları bu tarz yükleme için iyi bir örnektir. İkinci test türünde, numune devamlı dönen bir tarafsız eksene göre tekrarlanan gerilmeleri etkisi altındadır. Hareket halindeki otomobillerin aksları bu yükleme tipi için örnek olarak gösterilebilir.

3.2.3. Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu test türünde, test numunesi sabit bir eksene göre tekrarlı olarak burulma gerilmesi altındadır. Otomobillerin süspansiyon yaylarında ve çeki-bası kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür gerilmeler oluşur.

3.2.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

Yukarıda bahsedilen gerilme türlerinin ikisinin veya daha fazlasının bir arada olduğu durumlara bileşik gerilme hali denmektedir. Uygulamada en çok, eğme-burma gerilmeli ve aksenal-burma gerilmeli bileşik durumlar gözlenmektedir. Motorların krank mili başlıklarında gerilme, eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir.

3.3. Yorulma Deneyiyle İlgili Terimler

3.3.1. Çevrim (N)

Birçok yorulmalı deney cihazında sinüsoidal bir değişme gösteren bir gerilme uygulanır. Gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına çevrim denir.

3.3.2. Maksimum Gerilme (σ_{max})

Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir. Genel olarak çekme gerilmeleri (+), basma gerilmeleri (-) ile gösterilir.

3.3.3. Minimum Gerilme (σ_{min})

Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.

3.3.4. Ortalama Gerilme (σ_m)

Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$

3.3.5. Gerilme Aralığı (σ_r)

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

3.3.6. Gerilme Genliği (σ_a)

Gerilme aralığının yarısıdır.

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$$

3.3.7. Gerilme Oranı

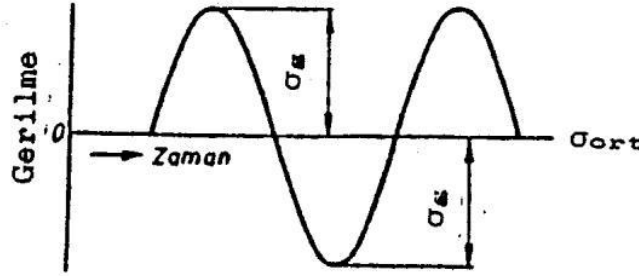
Maksimum gerilmenin minimum gerilmeye oranıdır.

$$R = \sigma_{max}/\sigma_{min}$$

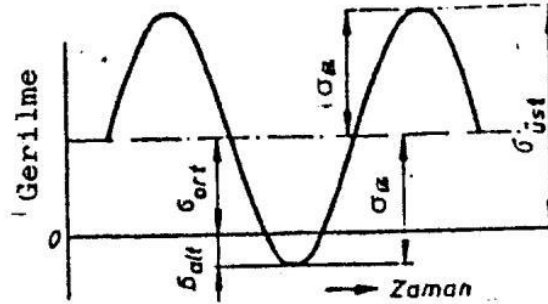
3.4. Yorulma Zorlaması Türleri

Yorulma zorlanmasında karşılaşılabilecek tipik gerilme çevrimleri aşağıda verilmiştir.

- Tam Değişken Yorulma Zorlaması ($\sigma_m=0$)

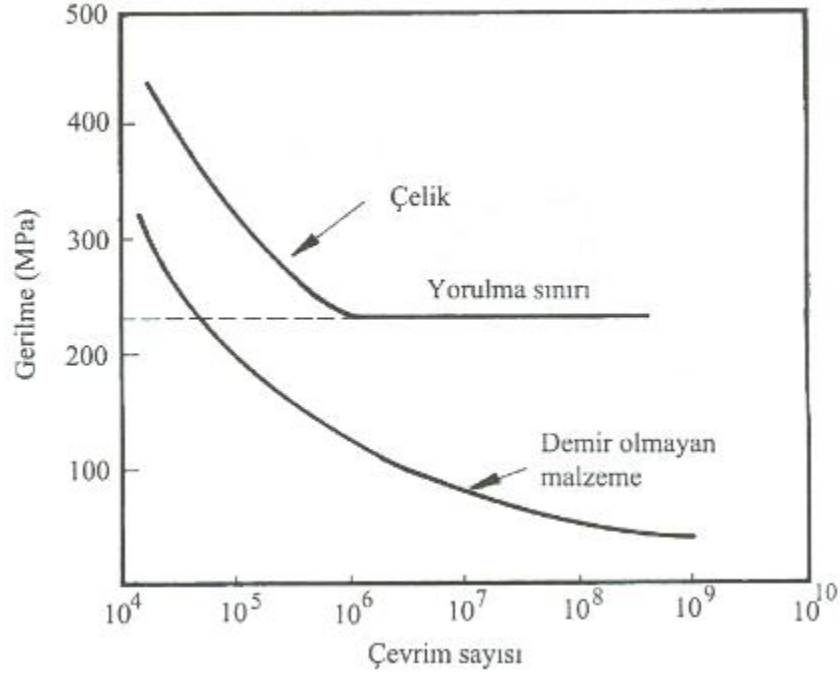


- Dalgalı Değişken Yorulma Zorlaması ($\sigma_m > 0$ ve $\sigma_{min} < 0$)



3.4. Gerilme – Yorulma Ömrü (S-N) İlişkisi (Wöhler Diyagramı)

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S-N eğrisinin çizilmesi için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır (Şekil 2). Ortalama gerilme (σ_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (σ_a) deney süresince sabit tutulur.



Şekil 2 Demir ve Demir Dışı Malzemelerin S-N Diyagramı

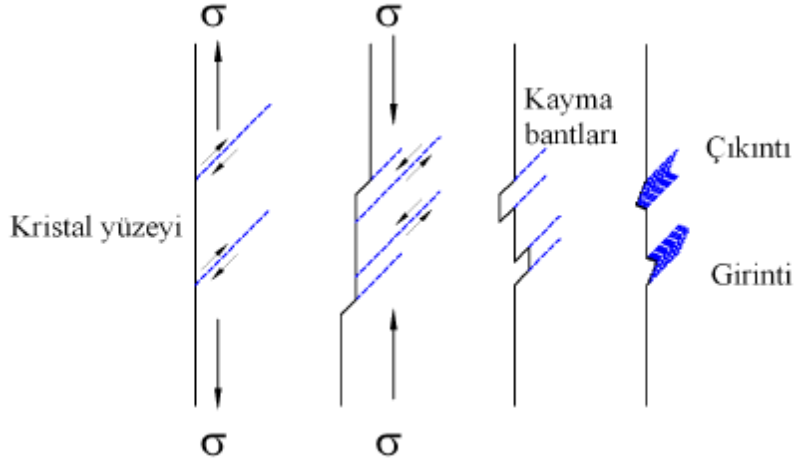
S-N eğrileri 10⁶ çevrimden sonra demir esaslı malzemeler için genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler.

3.5 Yorulma Hasar Mekanizmaları

Yorulma üzerinde yapılan çalışmalar, yorulma hasarı oluşum mekanizmasının dört farklı safhada meydana geldiğini göstermiştir. Bunlar;

- Çatlak oluşumu
- Çatlağın ilk aşamada kayma bantları boyunca ilerlemesi
- Çatlağın gerilmeye dik olarak devam etmesi
- Zorunlu kırılma

Yorulma çatlağı genellikle yüzeyden başlamaktadır. Çünkü en büyük gerilme yüzeyde meydana gelmektedir. Yüzeyler dış etkilere açıktır ve tekrarlı yüklemenin kristal içerisindeki kayma hareketleri yüzeyde son bulmaktadır.

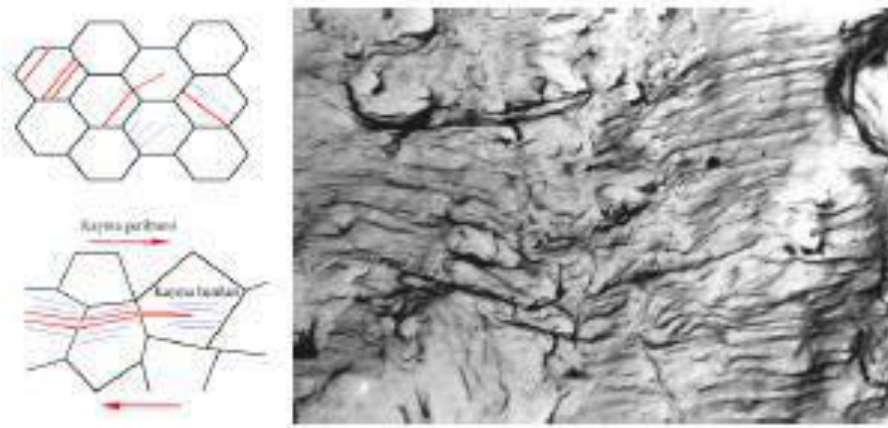


Şekil 3 Kayma Bantlarında Yorulma Çatlağının Başlaması

Çatlak oluşumunda; plastik şekil değiştirmeden kaynaklanan kayma bantları oluşmaktadır. Gerilmenin yön değiştirmesi kayma bantlarında oluşan kayma olayı bir takım yan etkilerden dolayı geri dönememektedir. Sonuç olarak malzeme yüzeyinde girinti ve çıkıntılarının oluşmasına sebep olur.

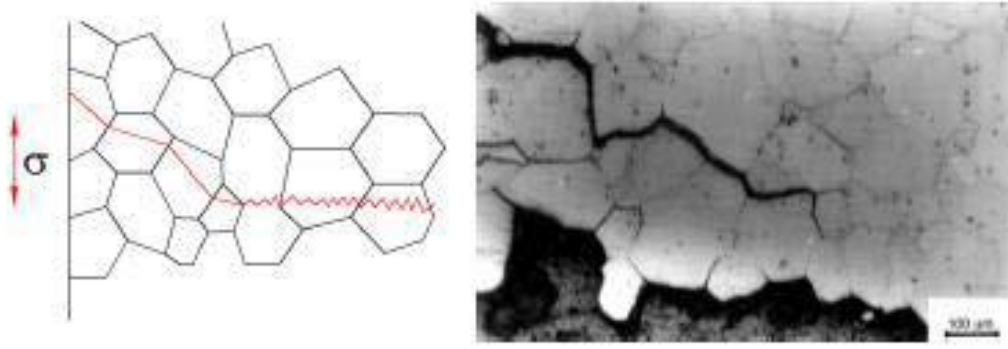
3.5.1. Çatlak İlerlemesi

Oluşan mikro çatlaklar Şekil 4’ de görüldüğü üzere önce kayma bantları boyunca ilerler. Bu ilerleme çoğu zaman parça üzerine etki eden gerilmenin eksenine 45° bir açı yaparak taneler içinde gelişmesini sürdürür.



Şekil 4 Çatlağın Kayma Bantlarında İlerlemesi

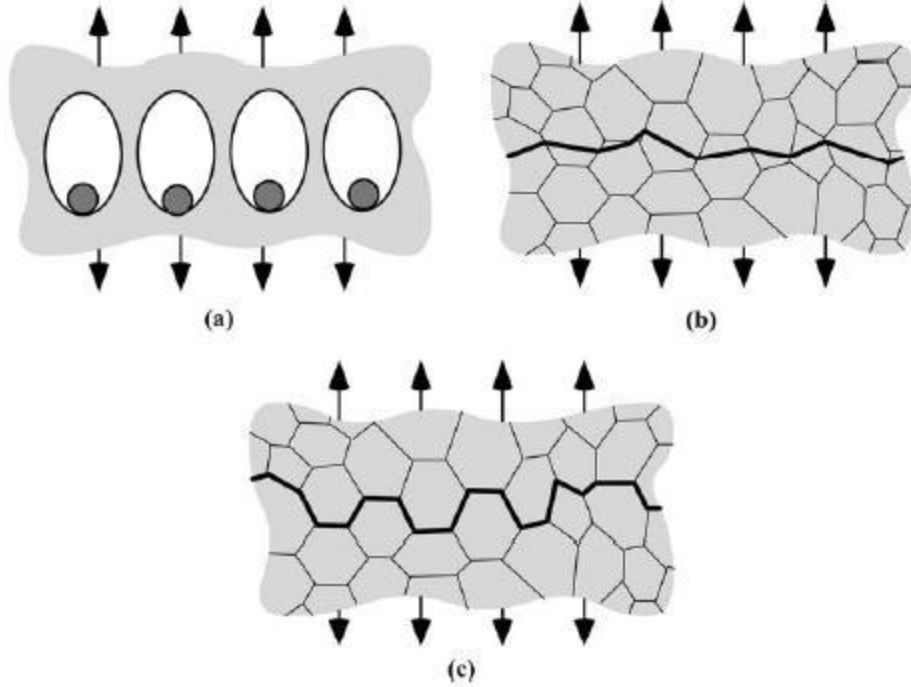
Gerilmeler sonucunda oluşan çatlak, gerilme yönüne dik olarak ilerlemeye başlar ve Şekil 5’ de görülen kararlı çatlak ilerleme safhasını oluşturur. Bu safhadan sonra çatlak ilerlemesi gerilme doğrultusuna dik olarak ilerler.



Şekil 5 Çatlağın Dik Yönde İlerlemesi

3.6. Yorulma Kırılmaları

Metallerde sıklıkla görülen kırılma mekanizmalarından üçü, aşağıda şematik olarak gösterilmektedir (Şekil 6). Sünük malzemeler, genellikle kalıntılarda ve ikinci faz parçacıklarında başlayan mikroskobik boşlukların oluşması ve birleşerek büyümesi sonucu kırılırlar. Ayrılma kırılması, genellikle gevrek kırılma olarak adlandırılmasına rağmen, öncesinde büyük ölçüde plastik birim şekil değiştirme ile çatlak büyümesi görülebilir.



Şekil 6 Metallerdeki Kırılma Mekanizması a) Sünük Kırılma b) Ayrılma Kırılması c) Taneler Arası Kırılma

3.7. Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Yorulma dayanımını etkileyen başlıca etkenler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

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

3.7.1. Parçanın Yüzey İşleme Kalitesi

Yorulma çatlakları çoğu zaman yüzeyde başlayıp içeriye doğru yayıldığından yüzey işleme kalitesinin önemi büyüktür. Yüzeydeki pürüzler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi arttıkça yorulma mukavemeti büyür. Yorulmadan dolayı yüzey kopma ihtimalini en aza indirmek için, bazen oldukça iyi parlatılmış yüzeyler hazırlanır.

3.7.2. Sıcaklık

Yüksek sıcaklık altında çalışan malzemelerin çoğunda, yorulma çatlaklarının başlaması için az sayıda çevrim yeterli olmaktadır. Karbon çeliklerinde 400 °C'ye varan artan sıcaklıklarda yorulma belirtileri görüldüğü, bunun altındaki sıcaklıklarda ise yorulma mukavemetinde bir iyileşme görüldüğü bilinmektedir. Bazı malzemelerde, optimum sıcaklık ve frekansta, zorlanma yaşanması meydana gelmekte olup, plastik deformasyon oluşması sonucu, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti artmaktadır.

3.7.3. Frekans

Normal koşullarda frekansın yorulma mukavemetine etkisi önemsizdir. Bundan dolayı yorulma deneylerinde deney süresini kısaltmak için yüksek frekanslı gerilme uygulayan deney makineleri tercih edilir. Çok yüksek frekanslarda plastik şekil değiştirme için daha az zaman kaldığından genellikle yorulma mukavemeti yaklaşık %10 kadar artar. Yüksek frekanslı özel yorulma aletlerinde, bugün ki durumda dakikada frekans 6000-8000 arasında bir değere kolaylıkla ulaşabilmektedir.

3.7.4. Çevrenin Kimyasal Etkisi

Değişken gerilme altında çevrenin kimyasal etkisi daha şiddetli olur, dolayısıyla yorulma ömrü kısalmır. Uygulamada korozyon yorulması önemli sorun yaratabilir. Korozyonlu ortamlarda kimyasal tepkimeler yorulmayı çok hızlandırır. Tekrarlı sürünen yüzeylerde korozyon daha etkili olur. Fretting korozyonu denen bu olay yorulma mukavemetini azaltır. Özellikle asma köprülerde

çelik kablo ile bağlantı kelepçelerinin temas yüzeylerinde bu tür korozyon oluşur, bu da köprü ömrünü etkileyen en önemli olaydır.

3.7.5. Gerilme Yığılması Etkisi

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

4. DENEYİN YAPILIŞI

Bu deneyin ana amacı malzemenin değişken yükler altında ne kadar çevrim sayısına dayandığını tespit ederek wöhler diyagramını çıkartmaktır. Wöhler diyagramını oluşturmak için genellikle 6-8 adet numune kullanılır. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için maksimum gerilme (σ_{\max}) ve minimum gerilme (σ_{\min}) arasındaki oran sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği (σ_a) seçilir. İlk deney numunesi üst gerilme, genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney numunelerine ise azalan şekilde 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 Wöhler eğrisi (S-N, Gerilme-Ömür eğrisi) elde edilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilme genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık olan değer, yorulma dayanımıdır.



Şekil 7 Tek Eksenli Yorulma Test Cihazı

Yorulma deneyi Şekil 7' de görülen tek eksenli yorulma test cihazında yapılacaktır.

5. RAPOR İÇİN İSTENENLER

- Yorulma deneyi nasıl yapılmıştır?
- Deney sonucundan elde edilen verilerden Wöhler diyagramını oluşturunuz.

6. KAYNAKLAR

- Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Prof.Dr.Gençağa Pürçek Metalik Malzemelere Uygulanan Mekanik Deneyler (Ders Notları)
- Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yorulma Deney Föyü
- Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yorulma Deney Föyü
- Anderson, T.L., 2005. Fracture Mechanics Fundamental And Applications. CRC Press
- Çelik D., 2018. Sae 4340 Çeliğinde Isıl İşlem Parametrelerinin Yorulma Ve Mikro Yapı Üzerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.