

METAL ESASLI MALZEMELERİN MEKANİK TESTLERİ YORULMA TESTLERİ



August Wöhler (1819 – 1914)

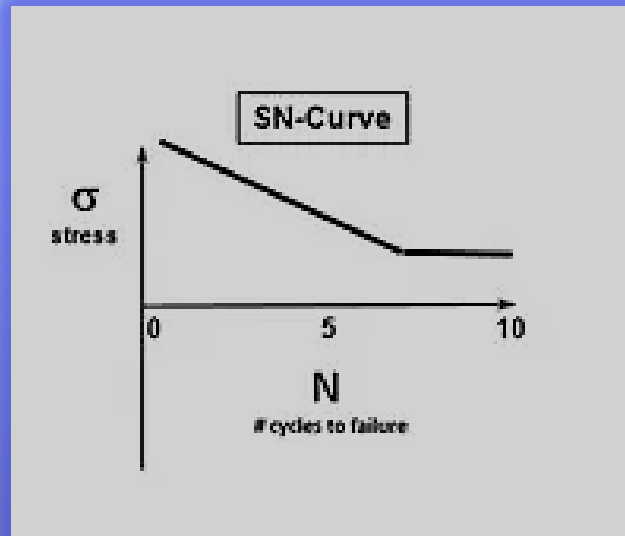
Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

SN Eğrileri, Fransa'nın Versailles kentinde 1842 yılında meydana gelen trafik kazası sonucunda Alman bilim adamı August Wöhler tarafından geliştirilmiştir . Bu çarpışmada, tren lokomotifinin aksı, tekrarlanan “düşük seviyeli” gerilme yükleri altında hasara uğramıştır.

Wöhler bu durumu araştırırken aks üzerinde çatlakların oluştuğunu ve aks yüzeyinde yavaşça büyüdüğünü keşfetti. Çatlakların, kritik bir boyuta ulaştıktan sonra aniden yayıldığını ve hasara yol açtığını buldu. Hasara yol açan yüklerin büyüklüğü malzemenin çekme mukavemetinden ve/veya akma mukavemetinden daha azdı.

Wöhler, demiryolu akslarına tekrarlanan yükler uygulamak için bir cihaz geliştirdi ve uygulanan yük miktarı ile hasar oluşana kadar tekrarlanan çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi grafiğe döktü.

Bu şekilde ortaya çıkan “Wöhler Eğrileri”, çevrimsel gerilme seviyelerinin hasarın oluştuğu çevrim sayısı ile ilişkisini göstermektedir.



Birçok makine parçaları ve yapı elemanları kullanım esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışır. Bu tür uygulamalarda, uygulanan gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. “Yorulma” adı verilen bu olay ilk defa 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır.

Yorulma olayına, dışardan uygulanan mekanik kuvvetlerin yanında ısı genleşme ve büzölmelerden doğan ısısal gerilmeler de neden olabilmektedir.

Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeyde bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta ve ani kesit değişimlerinin olduğu yerlerde başlar. Çatlak teşekkülü için aşağıdaki üç ana faktör gereklidir.

- a) Yeterli derecede yüksek bir çekme gerilmesi (anma gerilmesi),
- b) Uygulanan çevrimsel gerilmenin yeterli genliğe sahip olması,
- c) Yeterli sayıda çevrimin uygulanmış olması

Bunların yanında, parçadaki gerilme yığılması, korozyon, sıcaklık, ani ve aşırı yüklemeler, metalografik yapı, artık gerilmeler ve birleşik gerilme hali de yorulmayı etkileyen diğer faktörlerdir.

Yorulma deney sonuçları uygulamada karşılaşılan bütün şartları içermeyebilir. Bu nedenle, yorulma deney sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur. Son yıllarda, önemli parçaların yorulma davranışlarını daha iyi belirleyebilmek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece çok daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

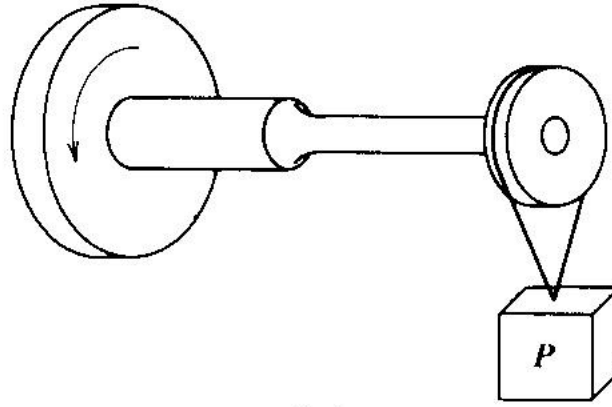
Yorulma Deney Türleri

- Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyleri;
- **1. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi:** En basit sistem olan bu tip deneyde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune eni boyunca da üniform olarak dağılır. Bu tip etkilerin olduğu uygulamalara en iyi örnek, içten yanmalı motorların bağlantı rotlarıdır (biyeller). Ancak burada eksenel gerilme yanında eğme kuvvetleri de oldukça etkilidir.
- **2. Eğme gerilmeli yorulma deneyi:** Bu deney türü kendi arasında ikiye ayrılır.
 - a) Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi
 - b) Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi

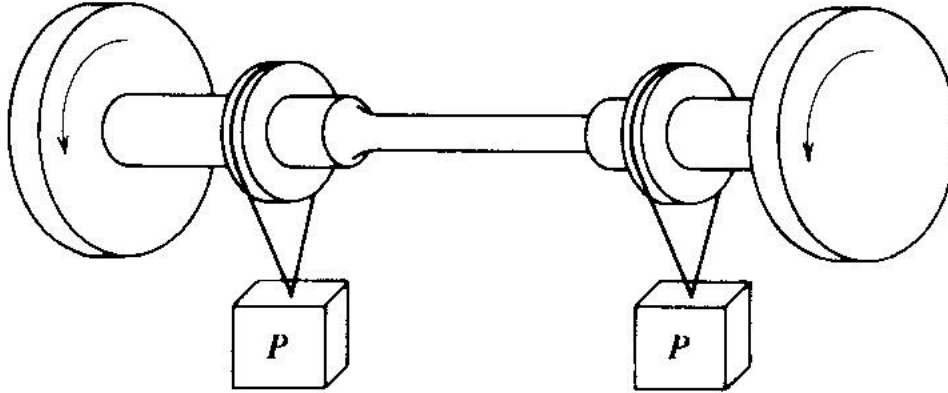
Birinci deney türünde, numune nötr bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin olduğu en güzel örnek, taşıtlarda kullanılan yaprak yaylarıdır (makas yayları).

İkinci deney türünde, numune devamlı dönen bir tarafsız eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere, örnek olarak hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir.

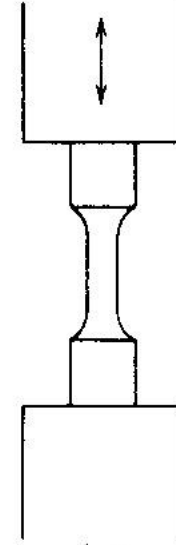
- **3. Burma gerilmeli yorulma:** Burada deney numunesi sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmesi altındadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burma gerilmeleri oluşur.
- **4. Bileşik gerilmeli yorulma deneyi:** Yukarıda sayılan farklı türdeki gerilmelerin ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusudur. 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.



(a)



(b)



(c)

Temel yorulma deney makinelerinin prensip şemaları. (a) Tek uçtan yüklemeli dönel eğmeli, (b) iki uçtan yüklemeli dönel eğmeli ve (c) eksenel gerilmeli (çeki-bası) [Hertzberg]

Yorulma deneyi ile ilgili terimler

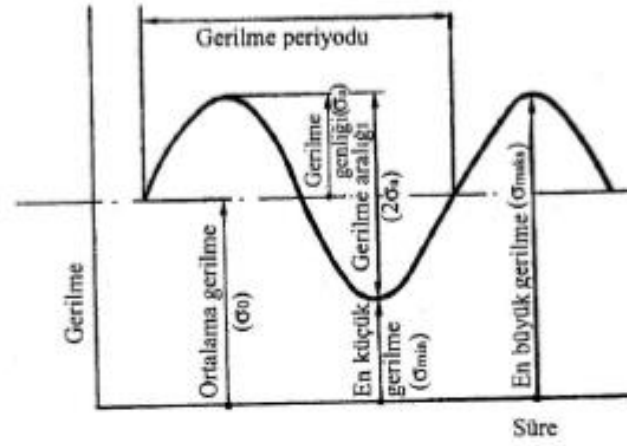
- **Çevrim (gerilme periyodu):** Gerilme-zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denir.
- **Maksimum gerilme (σ_{maks}):** Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir.
- **Minimum gerilme (σ_{min}):** Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.
- **Ortalama gerilme (σ_0):** Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$$

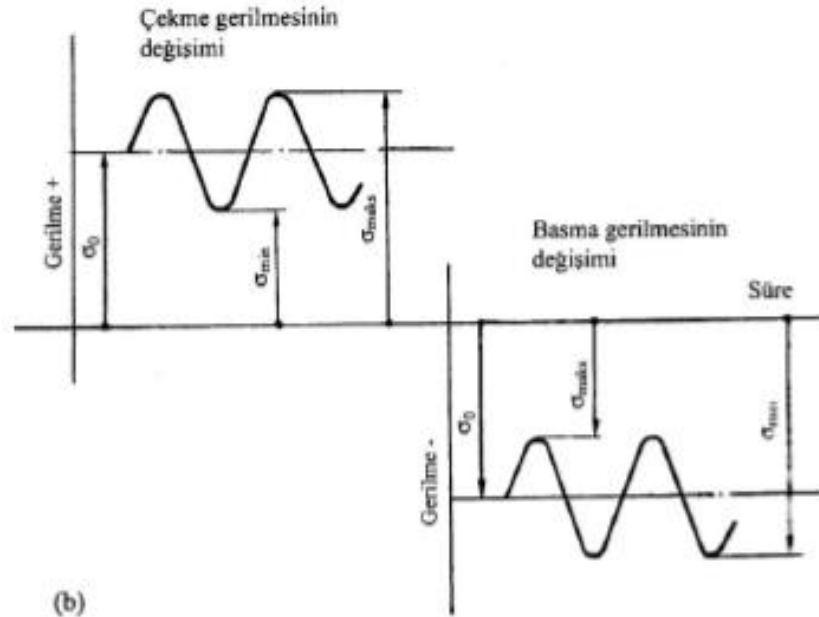
- **Gerilme aralığı ($\Delta\sigma$):** Maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki cebirsel farktır.

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$$

- **Gerilme genliği (σ_a):** Gerilme aralığının yarısına eşittir. Maksimum ve minimum gerilme ile ortalama gerilme arasındaki farktır.



(a)



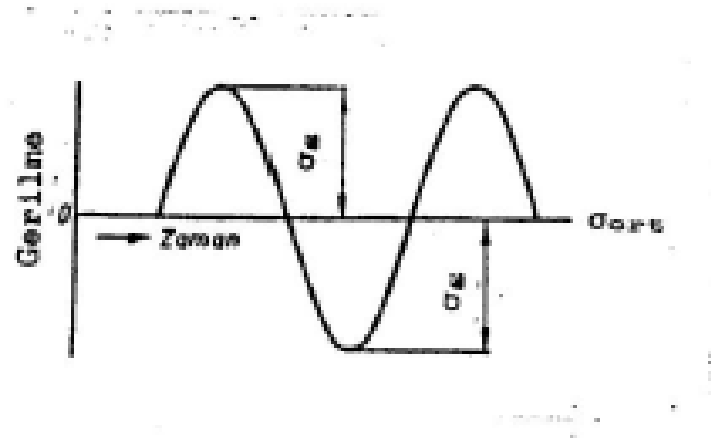
(b)

Şekil 6.2. (a) Yorulma deneyi ile ilgili tipik bir gerilme-zaman eğrisi ve (b) basma gerilmelerinin değişimi [Savaşkan]

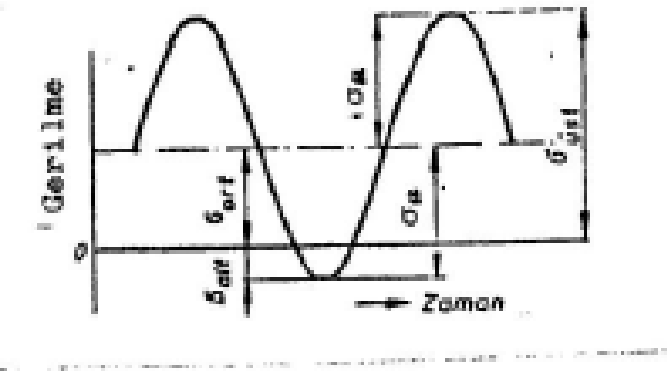
Yorulma zorlaması türleri

Yorulma zorlanmasında karşılaşılabilecek tipik gerilme çevrimleri aşağıda verilmiştir.

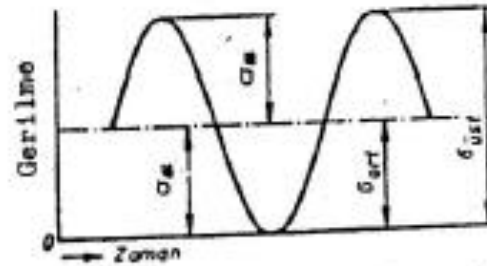
a) Değişken yorulma zorlanması ($\sigma_{ort}=0$)



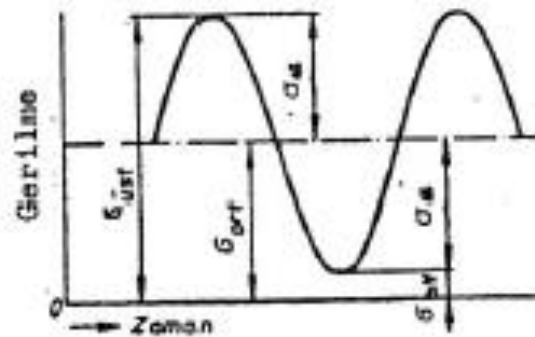
b) Değişken çekme bölgesinde yorulma zorlanması ($\sigma_{ort} > 0$ ve $\sigma_{min} < 0$)



c) Dalgalı yorulma zorlanması ($\sigma_{ort} > 0$ ve $\sigma_{min} = 0$)



d) Dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlanması ($\sigma_{ort} > 0$ ve $\sigma_{min} > 0$)



Aynı terminoloji basma bölgesi için, $\sigma_{ort} < 0$ olacak şekilde kullanılabilir.

Gerilme-yorulma ömrü (S-N) ilişkisi (Wöhler Diyagramı)

Bir malzemeye, ortalama gerilmesi sıfır olan bir çevrimsel zorlanma uygulandığında, yorulma hasarının değişken gerilme genliğine bağlı olarak hangi çevrimde oluşacağını bildiren grafiklere Wöhler Eğrileri (veya S-N eğrileri) denir. Bu eğriler, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösterir.

Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit kalmak üzere farklı numunelere farklı çevrimsel gerilmeler uygulayarak numunenin çatlamasına veya kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Deneylerin tümünde gerilme genliği sabit tutulur. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Gerilme eksenini ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya maksimum gerilme, ya minimum gerilme ya da gerilme genliğinden biri kaydedilir. Çevrim sayısı olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır.

Wöhler eğrileri, metal veya alaşımların kristal yapısına bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir. Örneğin, HMK yapıdaki metaller (özellikle demir ve çelikler) belirli bir gerilme genliğinin altındaki zorlanmalarda yorulmaya uğramamaktadır. Bunu belirleyen eşik değere “Yorulma Sınırı (Fatigue Limit)” adı verilir ve o metalin yorulma dayanımını belirler.

Yorulma dayanım sınırı, çatlak oluşumuna neden olabilecek hareketli dislokasyonlar etrafında karbon atomlarının bir atmosfer oluşturarak veya küçük partiküller halinde çökelerek onları kilitlemeleri sonucu oluşan deformasyon yaşlanması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Ayrıca deformasyon yaşlanması gösteren bazı alüminyum alaşımları gibi demir dışı malzemelerde de bu durum gözlenebilmektedir.

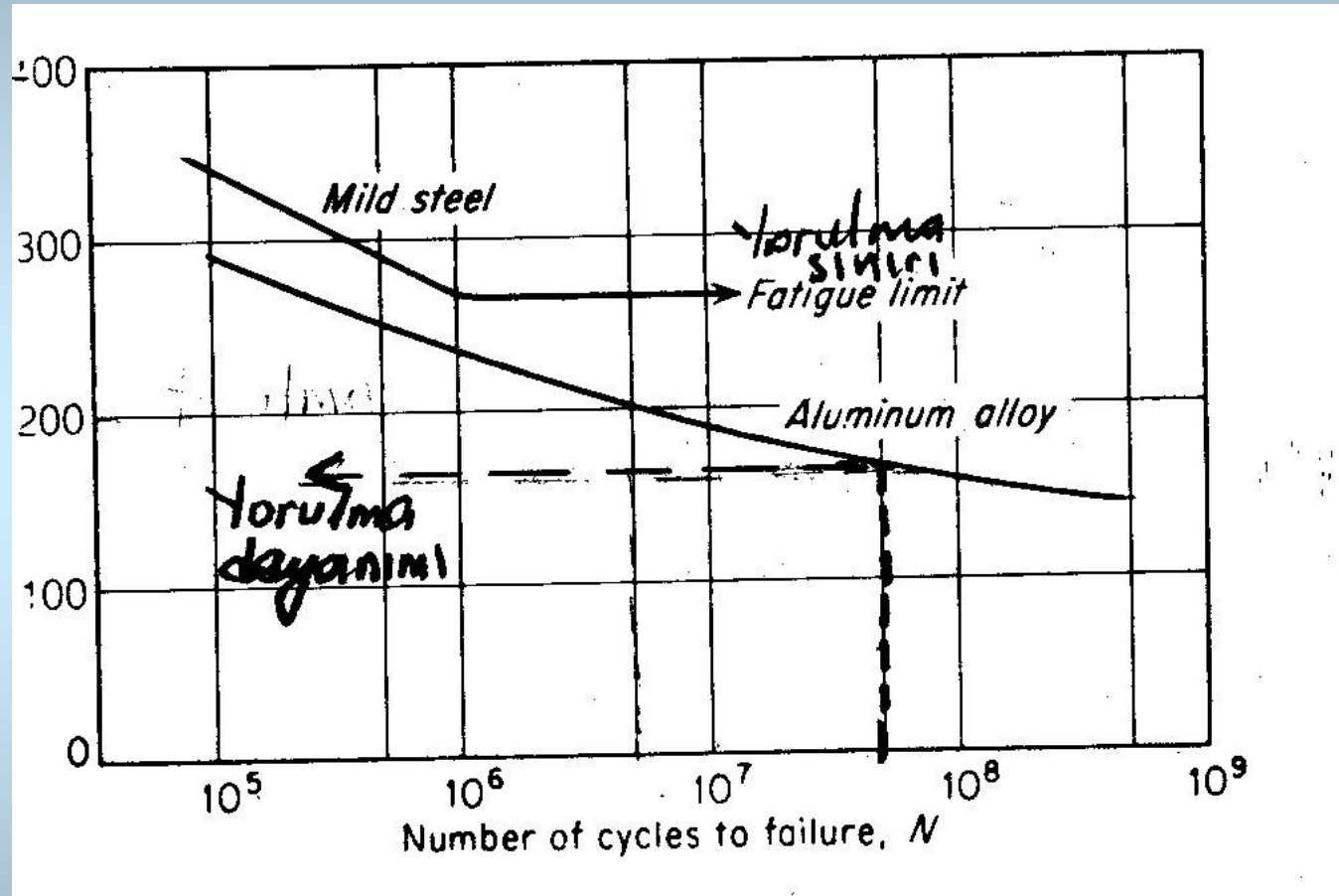
Demir dışı, yani YMK ve SDH yapıya sahip metal ve alaşımlarda istisnai durumlar dışında bu özelliğe rastlanmaz. Diğer bir değişle gerilme genliğinin azalmasıyla ömürde sürekli bir artış söz konusudur. Genellikle bu tür malzemeler için “Yorulma Dayanımı (Endurance Limit)” olarak 5×10^7 çevrimde yorulma hasarı oluşturacak gerilme genliği esas alınır.

a) Yorulma dayanımı (fatigue strength): Malzemenin N çevrim sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değeri olarak tanımlanır.

b) Yorulma sınırı (Yorulma dayanım sınırı) (fatigue limit): S-N diyagramında eğrinin asimtotik durum aldığı gerilmeye “yorulma sınırı” veya “Yorulma dayanım sınırı” denir. Bu gerilmenin altındaki çevrimsel gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanacağı kabul edilir.

c) Yorulma ömrü (Fatigue life): Belirli büyüklükte tekrarlı gerilme uygulanan bir malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısına denir.

- Demir esaslı ve demir dışı malzemelerin tipik S-N (Wöhler) eğrileri (Dieter)

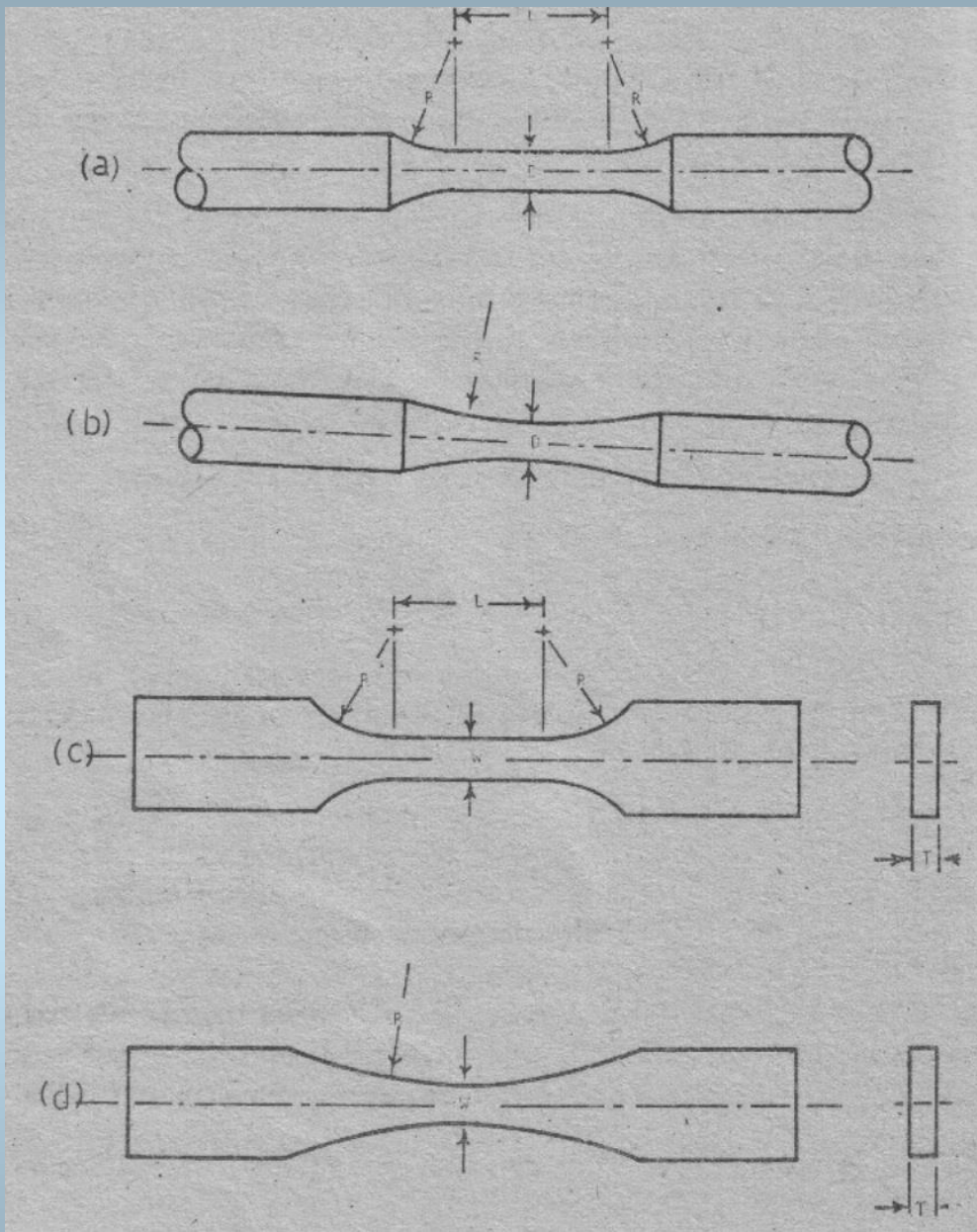


Yorulma Numuneleri

Yorulma deneyinde kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. ASTM-466'da eksenel gerilmeli yorulma deneyi için aşağıda verilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir. Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallara dikkat edilmelidir.

- a) Numune, çatlağın numunenin daraltılmış kesitinde olacak şekilde dizayn edilmelidir.
- b) Numunenin daraltılmış kesiti öyle seçilmelidir ki, max. gerilme deney cihazının çalışma kapasitesinin en az %25'inde, min. gerilme ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2.5'inde oluşsun.
- c) Numune boyutları öyle seçilmelidir ki, numunenin doğal frekansı cihazın frekansının en az iki katı olmalıdır.

Yorulma numuneleri dairesel veya dikdörtgen kesitli olabilir. Dairesel kesitli numunelerin baş kısmının çapı daraltılmış kısmının çapının en az 1.5 katı olmalıdır. Çentik etkisini minimuma indirmek için daraltılmış kesitin her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın (D) çapının en az 8 katı olmalıdır. Dikdörtgen kesitli numunelerde kesit daraltılması tek boyutta ve genellikle genişlikte yapılır. Diğer boyutlar dairesel kesitli numuneler gibi seçilir. Daraltılmış kısımda genişliğin kalınlığa oranı 2-6 arasında olmalıdır. Daraltılmış kısmın uzunluğu, daraltılmış kısımdaki genişliğin en az 3 katı olmalı, basma gerilmesi uygulandığı durumlarda 4 katını geçmemelidir.



Yorulma numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gereklidir. Talaş kaldırma işlemi keskin bir kalem ucu ile yapılmalı ve iç gerilmelerin oluşmasını engellemek için aşırı deformasyonlardan ve aşırı ısınmalardan kaçınılmalıdır.

Yüzeyde çizik ve çentik oluşturulmamalıdır. Talaş kaldırma sonrası numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara işlemi uygulanmalıdır. Numuneler korozif olmayan bir ortamda saklanmalıdır.

ASTM E-466'ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri (Kayalı)

SN Eğrisi Nasıl Oluşturulur?

Günümüzde bu eğriler çoğunlukla bir metal kupon test makinesi (Resim 2) kullanılarak geliştirilmektedir. Küçük bir metal kupon makineye yerleştirilir ve metal kuponda bir çatlak veya hasar meydana gelene kadar çevrimsel gerilme uygulanır.

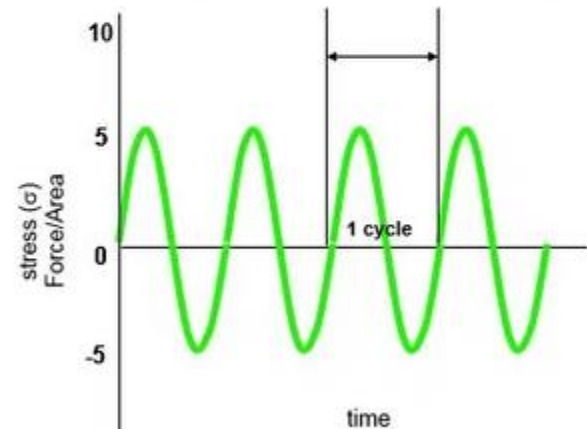
Coupon Testing Machine



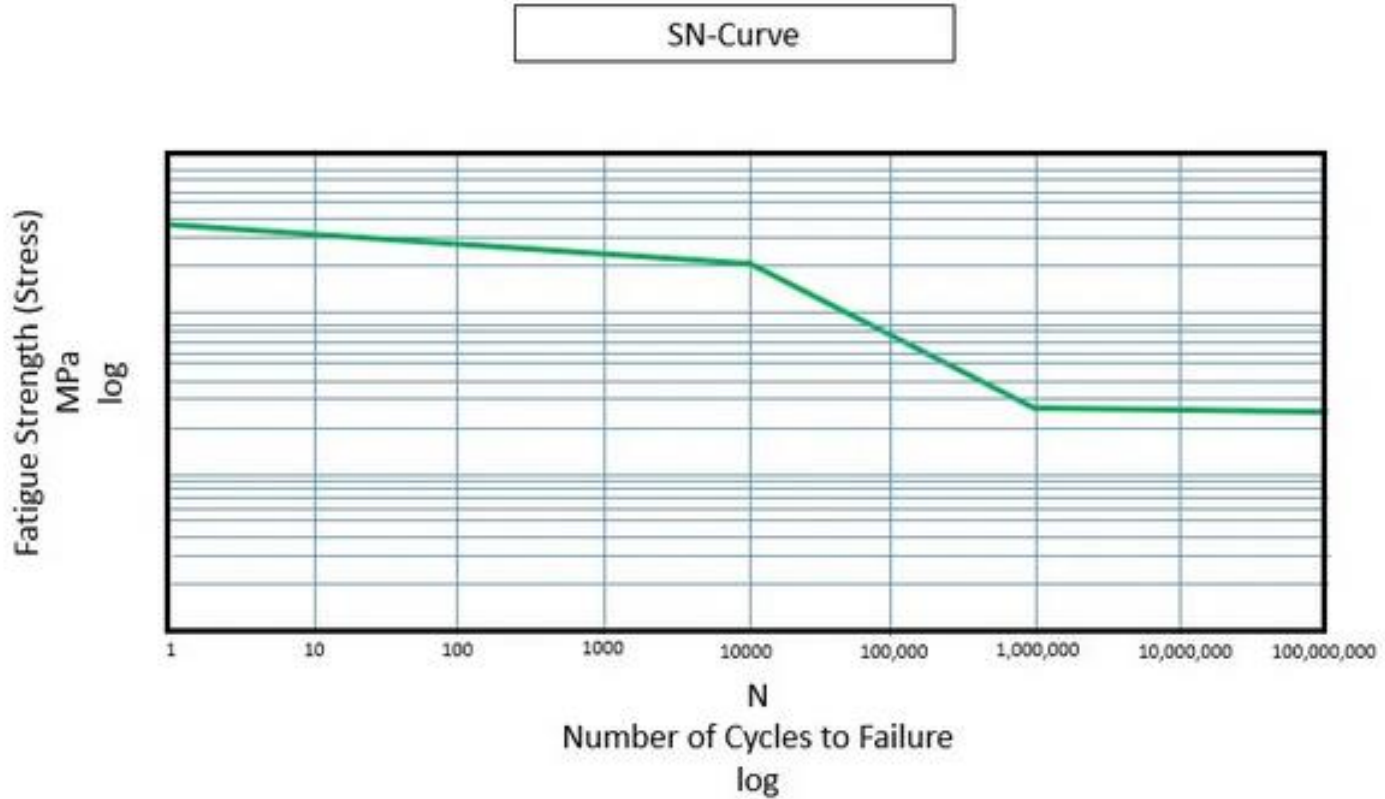
Metal Coupon Loads



Cyclic Stress Time History

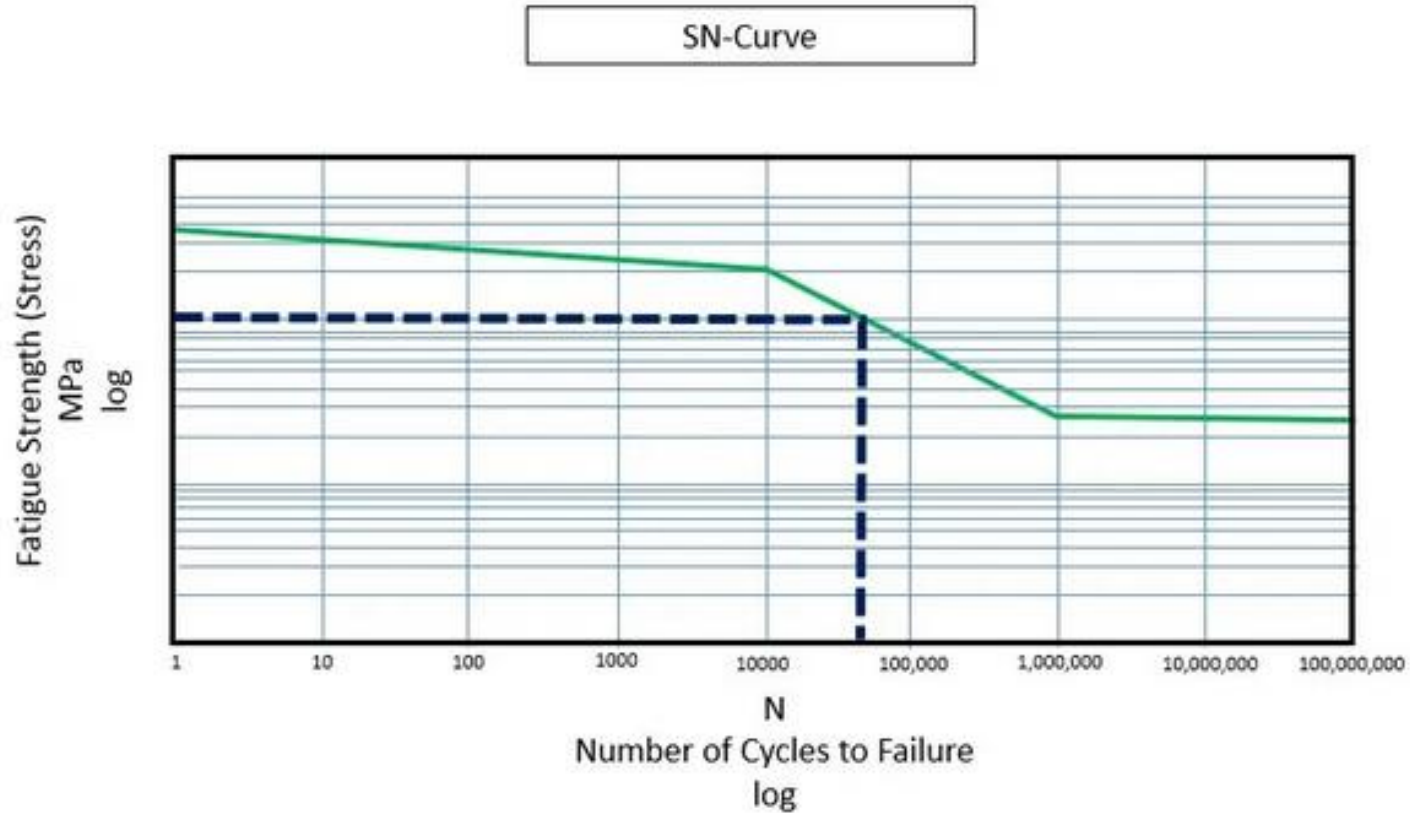


Bir SN Eğrisinin oluşturulabilmesi için çeşitli kuponların farklı gerilme seviyelerinde test edilmesi gerekir. Resim 3, metal kuponların test edilmesinden elde edilen tipik bir SN Eğrisini göstermektedir.



Resim 3: Malzemeler için SN Eğrisi: Yüksek genlikteki gerilme çevrimleri hasarın oluşması için düşük çevrim sayılarına neden olur.

Bir SN Eğrisi, gerilme genliği ile hasarın oluştuğu çevrim sayısı arasında bir "arama tablosu" olarak işlev görür. Çoğu SN Eğrisi genel olarak sol üstten sağa doğru eğimlidir. Bu durum, yüksek genlikli çevrimlerin, düşük genlikli çevrimlere kıyasla hasar oluşturmak için daha az sayıda çevrim sayısına ihtiyaç duyduğunu gösterir.



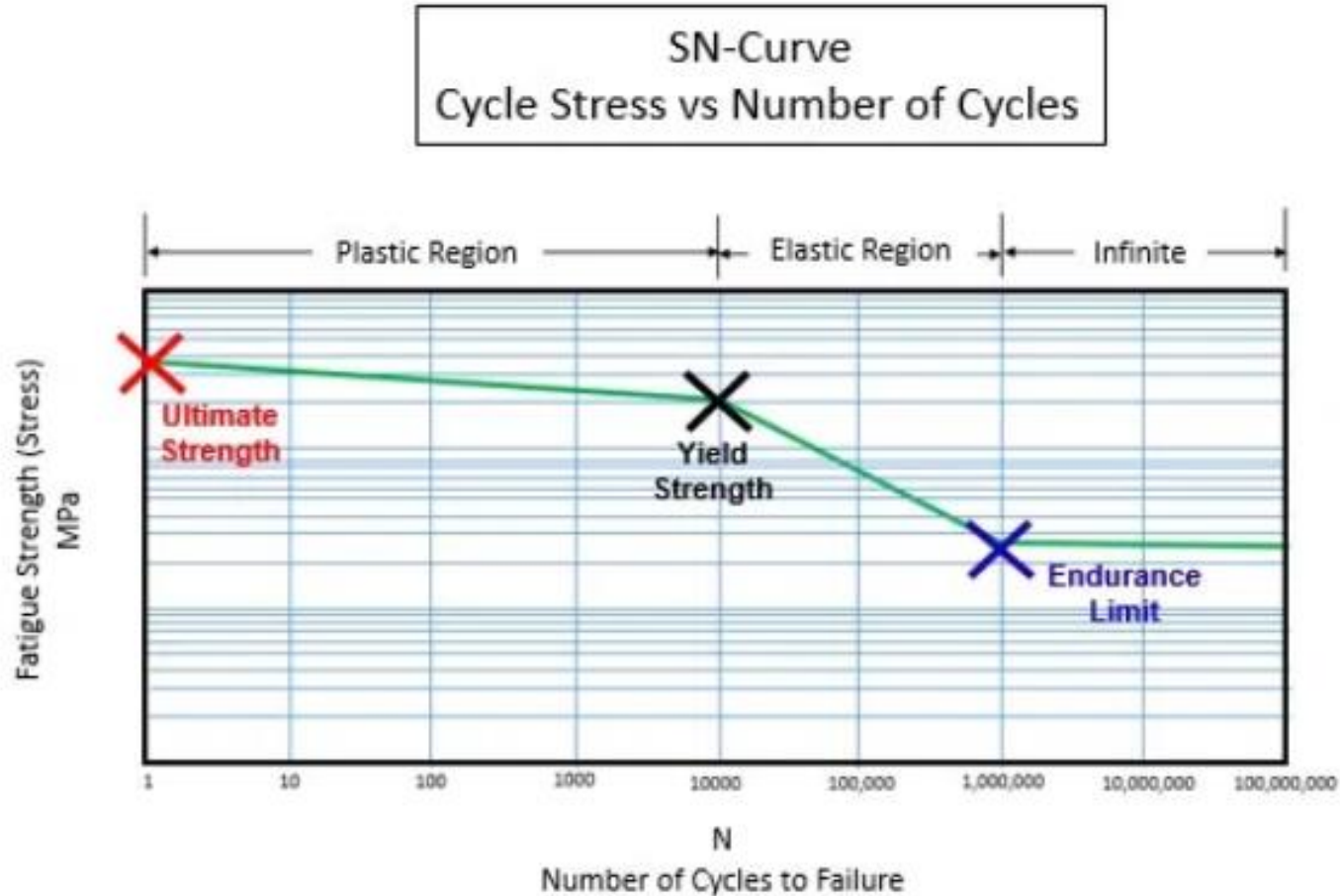
Resim 4: Koyu mavi çizgi ile gösterilen Hasar İçin Gerekli Çevrim Sayısı ile Gerilme Seviyesine İlişkin SN Eğrisi.

Böyle bir yorulma testinde, yük çevrimlerinin uygulandığı frekans, hasar için gerekli çevrim sayısını değiştirmez. SN eğrisindeki sonuçları etkileyen faktör çevrimlerin uygulanma hızı değil, sayısıdır.

Gerçek hayatta çevrimlerin frekansının parçanın doğal frekansı ile çakışması durumu hasarı etkileyen bir faktör olabilir.

Plastik, Elastik ve Sonsuz Ömür Bölgeleri

Bir SN Eğrisi plastik bölge, elastik bölge ve sonsuz ömür bölgesi gibi birkaç farklı alanı içerebilir.

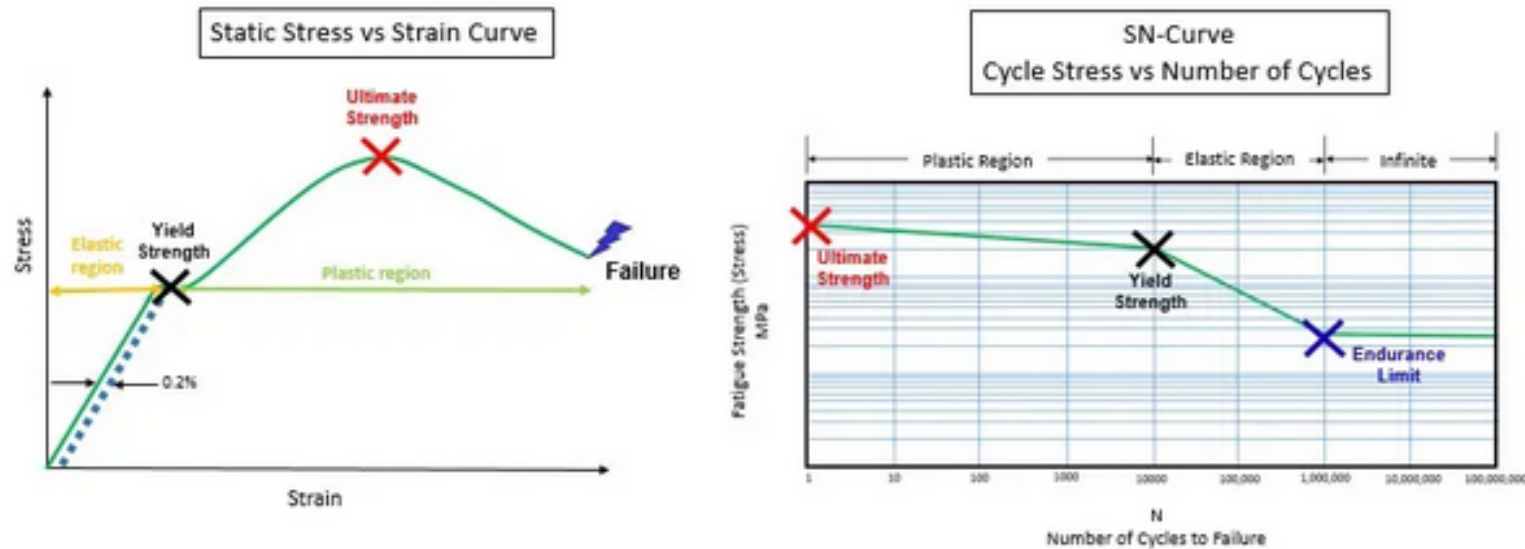


Resim 5: SN Eğrisi üzerindeki Çekme Gerilmesi, Akma Gerilmesi ve Yorulma Sınırı.

Plastik, elastik ve sonsuz ömür bölgelerini ayıran üç önemli değer vardır (Resim 5):

- Çekme Gerilmesi: Tek çevrimde hasar oluşturmak için gereken gerilme seviyesi.
- Akma Gerilmesi: Elastik ve plastik bölgenin ayrıldığı nokta.
- Yorulma Sınırı (Endurance Limit): Tüm çevrimler bu gerilme genliğinin altında ise, hasar meydana gelmez.

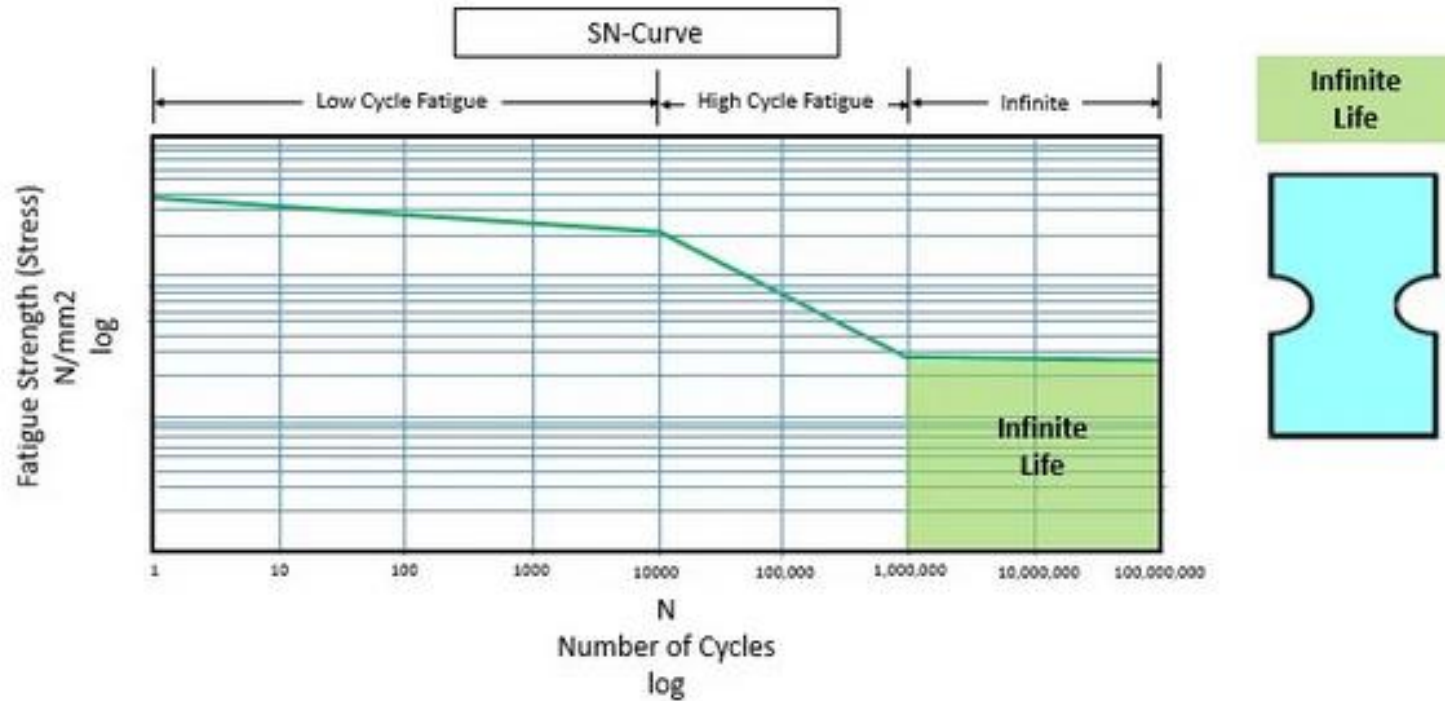
SN Eğrisindeki değerlerin birçoğu, bir malzeme kuponu ile statik gerilme testi yapılarak bulunabilir (Resim 6).



Resim 6: Çekme Gerilmesi ve Akma Gerilmesi statik gerilme-gerinim testleriyle elde edilebilir.

Sonsuz Ömür

Çelik gibi bazı malzemeler, sonsuz ömür bölgesine sahiptir (Resim 7). Uygulanan gerilme seviyeleri belirli bir seviyenin altındaysa, hasara neden olmadan sonsuz sayıda çevrim uygulanabilir.



Resim 7: SN Eğrisindeki sonsuz ömür bölgesi.

Kritik parçalar (örneğin, motor krank mili ve kolları) sonsuz ömür bölgesinde tasarlanmıştır. Sonsuz ömür elde edebilmek için parçanın maruz kaldığı tüm çevrimsel gerilme seviyeleri yorulma sınırının altında olmalıdır.

Sonsuz ömür belirli koşullar altında geçerli değildir:

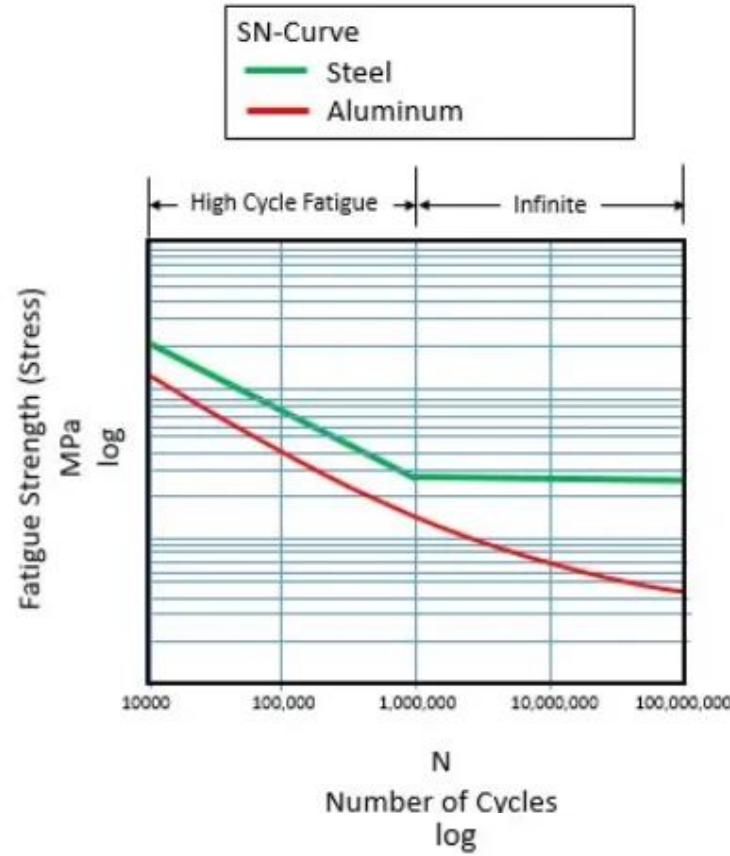
- Sonsuz ömür sadece gerilme çevrimlerinin sayısına bağlıdır. Bu koşulda korozyonun ve diğer faktörlerin mevcut olmadığı varsayılır.
- Çevrimsel gerilme seviyelerinden herhangi biri yorulma sınırından yüksek ise sonsuz ömür artık geçerli değildir.

Farklı metallerin yorulma sınırları farklıdır. Bazı tipik yorulma sınırları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Typical Endurance Limits of Specific Metals		
Material	Percentage of Ultimate Tensile Strength (UTS)	Endurance Limit
Steel	50%	690 MPa
Iron	40%	165 MPa
Aluminum	40%	131 MPa
Copper	40%	97 MPa

Tablo 1: Bazı metallerin yorulma sınırları.

Alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları gibi birçok demir dışı metal ve alaşımlar, iyi tanımlanmış yorulma sınırları göstermemektedir (Resim 8).

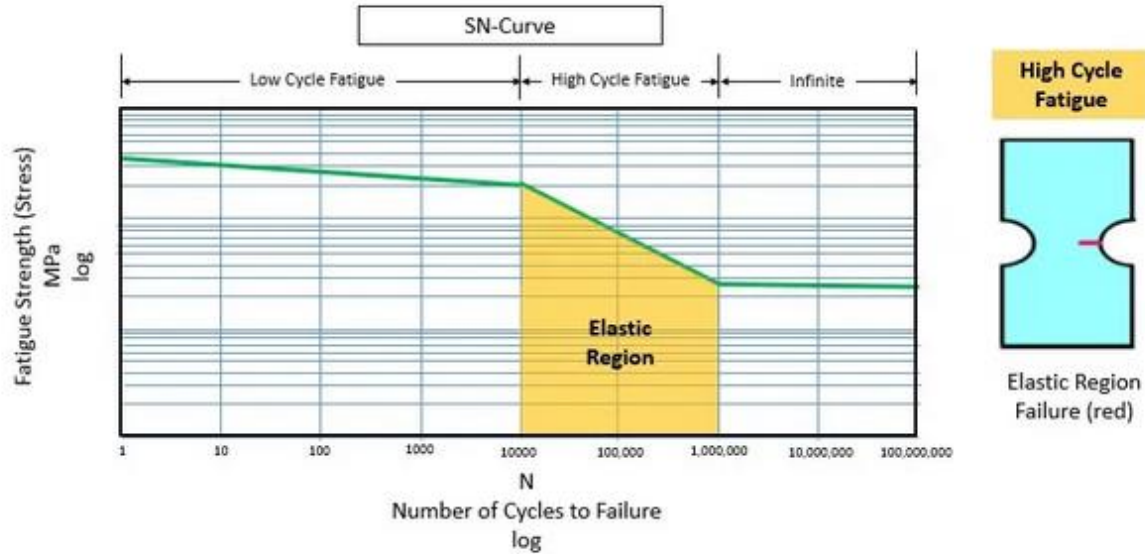


Resim 8: Alüminyumun yorulma sınırı (kırmızı) çeliğin yorulma sınırı (yeşil) kadar belirgin değildir.

Yorulma sınırı bölgesindeki eğrinin eğiminde çeliklerde kesin bir değişim olurken, alüminyum ve diğer metallerde her zaman belirgin bir değişiklik olmamaktadır.

Elastik Bölge

Elastik bölgede (Resim 9), gerilme ve gerinim arasında doğrusal ilişki vardır. Bir yük çevrimi uygulandığında ve kaldırıldığında, malzeme orijinal şekline ve/veya uzunluğuna geri döner. Bu bölgeye "Yüksek Çevrim Yorulması" (High Cycle Fatigue) bölgesi denir. Zira düşük genlikteki çok sayıda gerilme çevrimi parçanın hasara uğramasına neden olabilir.

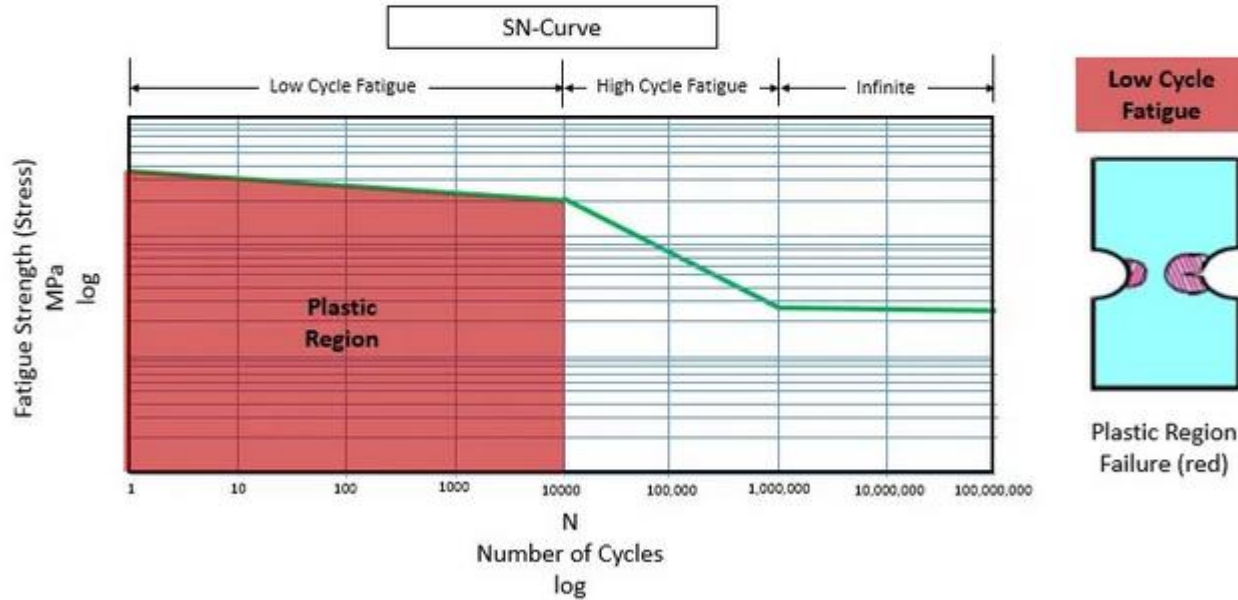


Resim 9: SN Eğrisinin elastik ömür bölgesi.

Bir malzemenin elastik bölgedeki performansını etkileyen tipik faktörler artık gerilmeler ve geometrik özelliklerdir. Örneğin, malzemedeki keskin geometri değişikliğinin çatlak başlatma olasılığı, yumuşak geometri değişikliğine kıyasla daha yüksek olabilir.

Plastik Bölge

Plastik bölgede (Resim 10), malzeme, gerilme çevrimlerinin tekrar tekrar uygulanması nedeniyle şekil ve/veya geometrinin değişimine neden olacak yüksek gerilmelere maruz kalır. Bu bölge, SN Eğrisinin "Düşük Çevrim Yorulması" (Low Cycle Fatigue) bölgesi olarak da adlandırılır. Bu durumda, düşük sayıdaki yüksek genlikli gerilme çevrimleri hasar ile sonuçlanır.



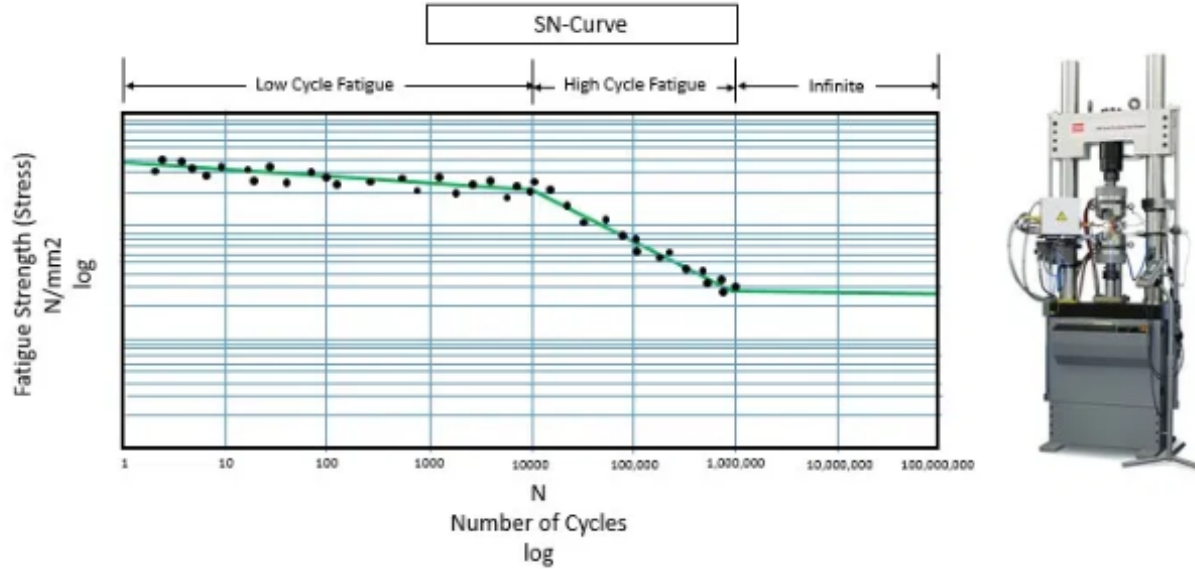
Resim 10: SN Eğrisinin plastik ömür bölgesi.

Malzeme plastisitesi ve geometri plastik bölgedeki hasar için gerekli çevrim sayısını büyük miktarda etkiler.

Bir malzemenin plastik bölgesindeki yorulma ömrünü veya hasarını SN Eğrisi kullanarak hesaplamaktan kaçınmak gerekir. Çevrimsel gerilme seviyeleri plastik bölgedeyse, EN (Gerinim/Döngü sayısı) içeren bir gerinim ömrü yaklaşımının kullanılması önerilir. Gerinim ömrü, yüklerin uygulandığı sırayı da hesaba katar.

SN Eğrisi Kütüphaneleri

Malzeme testlerinin yapılması genellikle pahalı olabilmektedir. İdeal durumda, testler birçok kez ve birçok farklı gerilme seviyesinde tekrar edilmelidir. Yeterli testler yapıldığında SN Eğrisi, ana eğri etrafında güvenli bir aralık oluşturacaktır.



Resim 11: SN Eğrisi birçok testten elde edilen değerlerin eğri uydurma yöntemi kullanılarak çizilmesi ile oluşturulur.

Bazı malzemeler çok yaygın kullanıldıklarından eğrileri çok iyi bilinmektedir. Bazı malzemelerde ise durum biraz daha zordur. Yeni bir alaşım geliştirildiğinde, SN Eğrisi tamamen bilinmeyebilir ve eğriyi belirlemek için testler yapmak gerekir. Geleneksel olarak, SN Eğrisini belirlemek için minimum şart olarak her seviye için üç tekrar içeren beş farklı gerilme seviyesi kabul edilir.

"FKM Analytical Strength Assessment" kitabı çok sayıda malzeme için SN Eğrisi içermektedir. Alman mühendislik şirketleri birliği olan VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) tarafından yayınlanmıştır.

SN Eğrisinin Logaritmik Doğası: Çift genlikli vs Çift çevrimli örnek

Aşağıdaki yükleme geçmişlerini göz önünde bulunduralım:

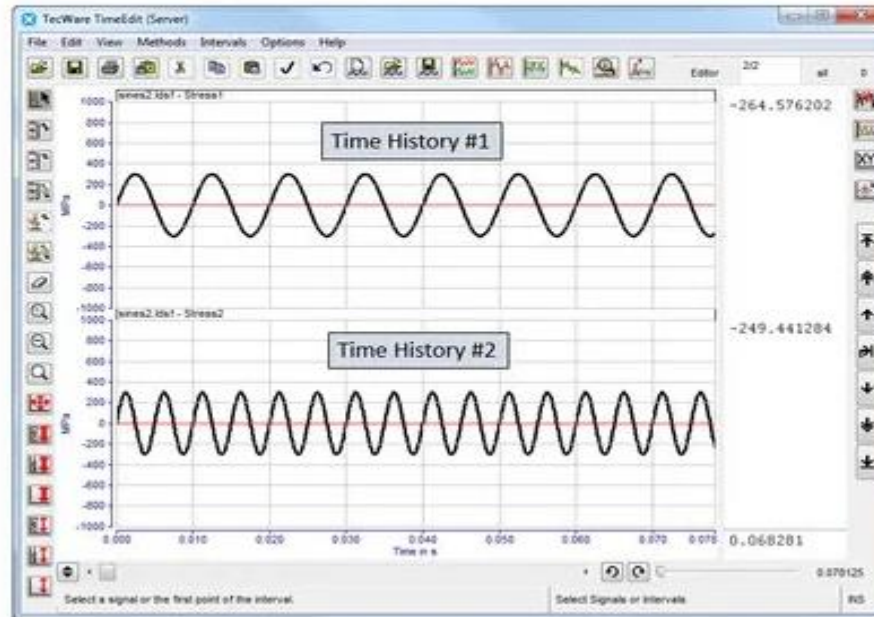
1. 1000 çevrim için 300 MPa'lık gerilme
2. 2000 çevrim için 300 MPa'lık gerilme
3. 1000 çevrim için 600 MPa'lık gerilme

Önce yükleme geçmişi #1 ve yükleme geçmişi #2'yi düşünelim. Bu yükleme geçmişi:

- Aynı genlikteki çevrimleri
- Farklı sayıdaki çevrimleri (biri diğerinden iki kat daha fazladır)

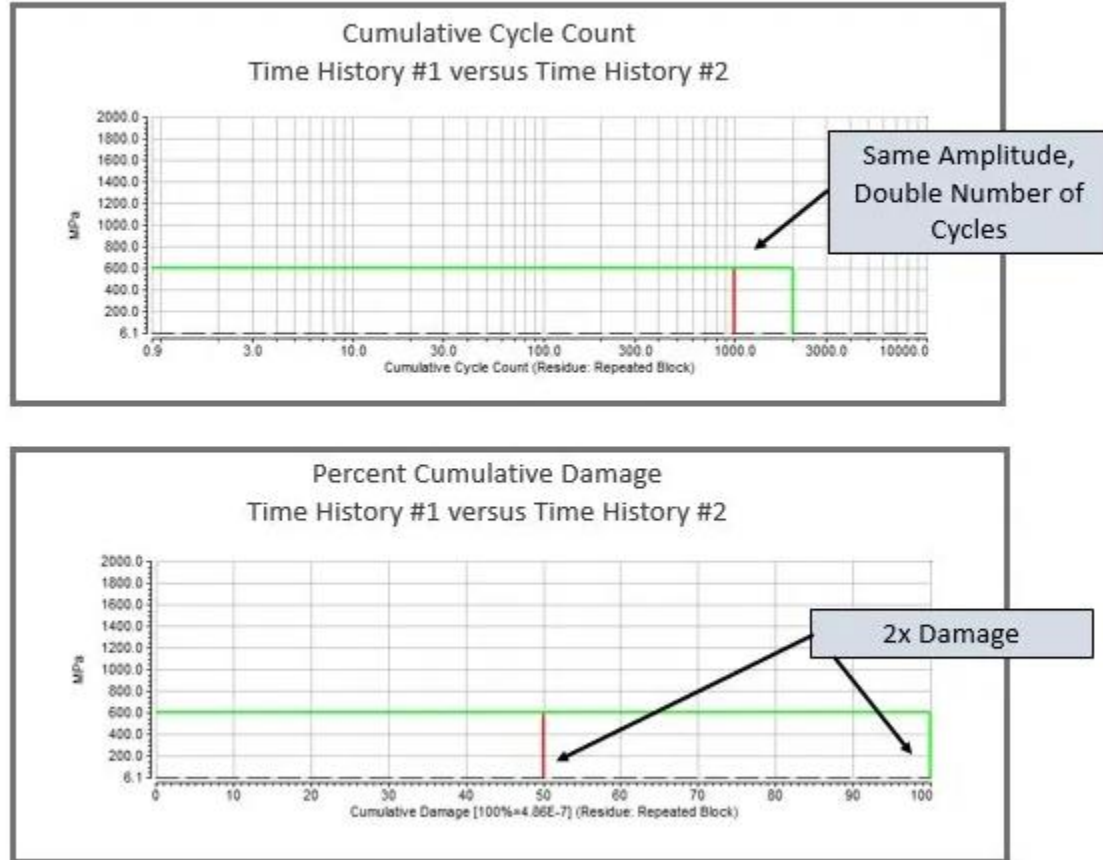
Önce yükleme geçmişi #1 ve yükleme geçmişi #2'yi düşünelim. Bu yükleme geçmişi:

- Aynı genlikteki çevrimleri
- Farklı sayıdaki çevrimleri (biri diğerinden iki kat daha fazladır)



Resim 12: Zaman geçmişi #1 ve Zaman geçmişi #2

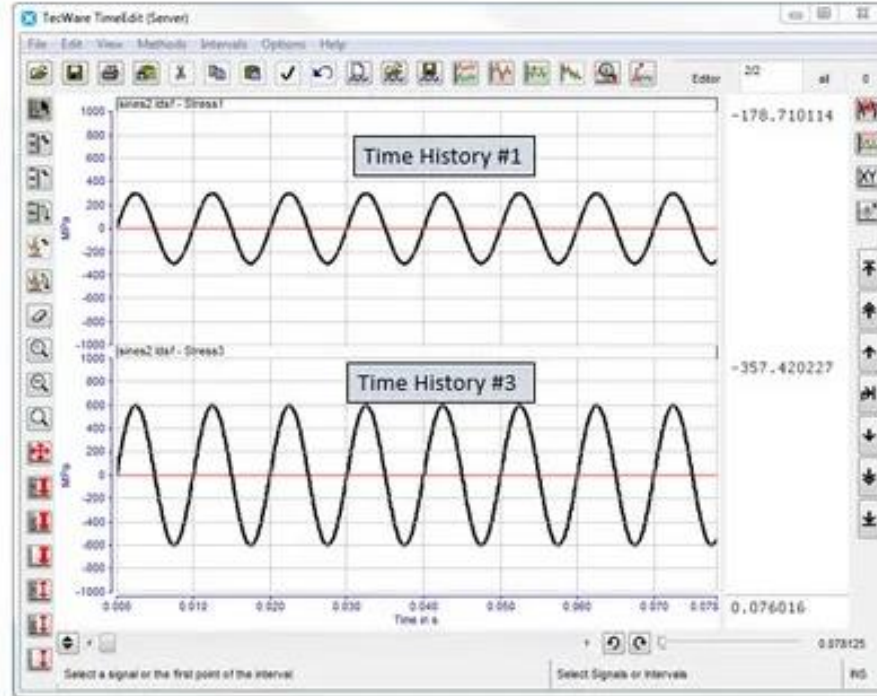
Miner Kuralı'nı kullanarak, zaman geçmişi #2'nin birikimli hasarının zaman geçmişi #1'e kıyasla iki katı olduğunu görürüz (bkz. Resim 13).



Resim 13: Zaman geçmişi #1 ve zaman geçmişi #2 için kümülatif çevrim hesaplaması ve kümülatif hasar.

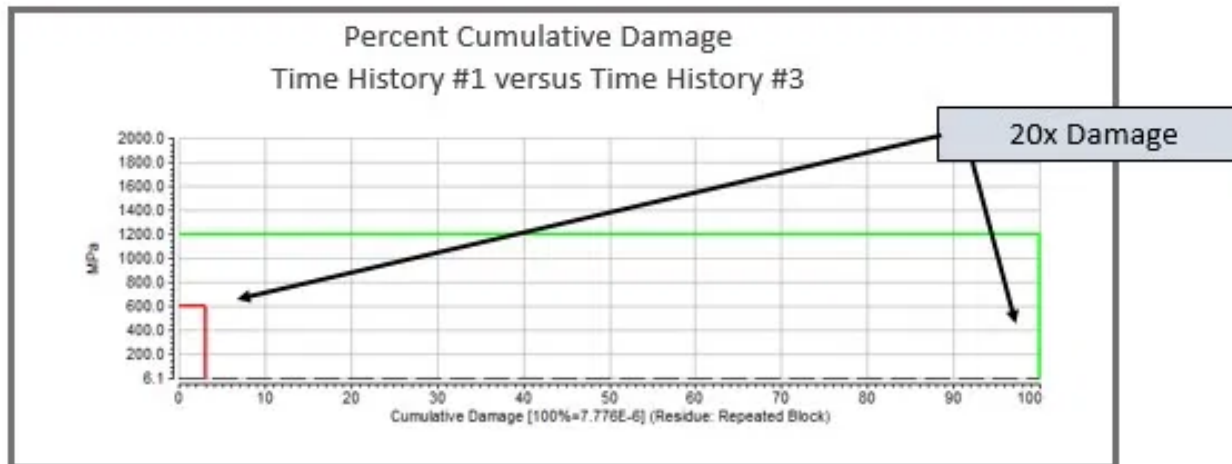
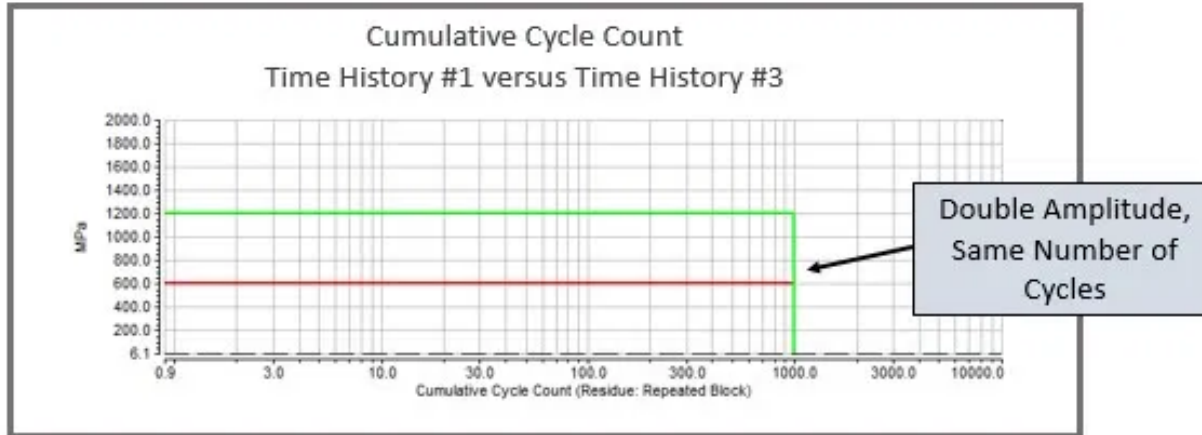
Sonraki örnek olarak yükleme zamanı geçmişİ #1 ve zaman geçmişİ #3'teki hasar durumunu karşılaştıralım. Bu zaman geçmişleri:

- Farklı genlikteki çevrimleri (zaman geçmişİ #3'ün genliğı, zaman geçmişİ #1'in genliğinin iki katıdır)
- Aynı sayıda çevrim sayısı



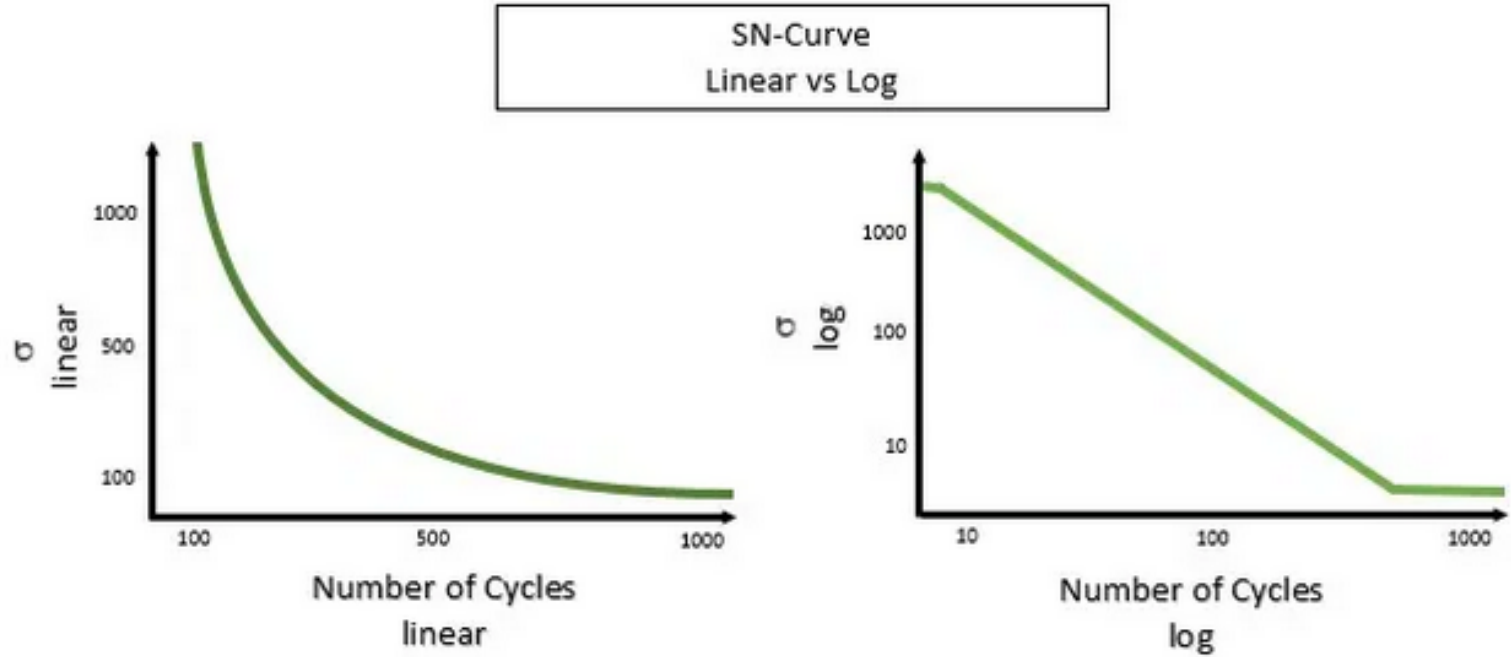
Resim 14: Zaman geçmişİ #1 ve Zaman geçmişİ #3

SN Eğrisi ve Miner Kuralı'nı kullanarak, zaman geçmişi #3'ün birikimli hasarının, zaman geçmişi #1'e (Resim 14) kıyasla 20 kat olduğunu görürüz. Ancak, çevrimlerin genliği zaman geçmişi #3'te zaman geçmişi # 1'e kıyasla yalnızca iki kat fazladır.



Resim 15: Zaman geçmişi #1 ve zaman geçmişi #3 için kümülatif çevrim hesaplaması ve kümülatif hasar.

Gerilme seviyesini iki katına çıkarmanın hasarı yirmi katına çıkarması SN Eğrisinin aslında bir log vs log grafiği olmasından kaynaklanmaktadır. SN Eğrisinin log-log gösteriminde düz olarak görünen çizgiler aslında aşağıdaki gibidir (Resim 16).



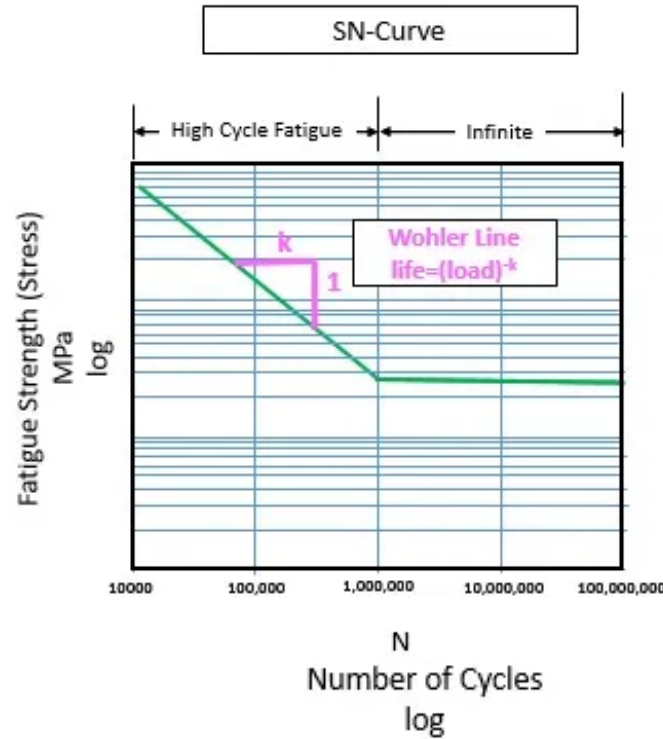
Resim 16: Lineer-lineer ve log-log çizdirilmiş SN Eğrileri.

Gerilme seviyesi ve hasara kadar olan çevrim sayısı arasındaki ilişki doğrusal değildir.

SN Eğrisinin Eğimi: K-faktörü

SN Eğrisinin log-log gösteriminin eğimi "K-Faktörü" ile tanımlanır. Bu "K Faktörü", gerilme seviyesi ile hasara neden olan çevrim arasındaki ilişkiyi yönetir.

"K faktörü" yükü (yani gerilmeyi) hasara kadar olan çevrim sayısına kolayca bağlamak için Wöhler tarafından geliştirilmiştir. Resim 17, Wöhler eğrisinin K-Faktörü kullanılarak malzeme ömrünü nasıl etkilediğini göstermektedir.



Resim 17: K-Faktörü ile açıklanmış SN Eğrisinin eğimi.

Bu log-log ilişkisi nedeniyle, yükün genliğindeki küçük bir değişiklik yorulma ömründe veya hasarında çok büyük bir değişime neden olmaktadır. Aşağıda gösterilen Tablo 2’de k faktörü 5 olduğunda yükteki %15’lik bir değişim, yorulma ömründe 2 kat değişikliğine neden olmaktadır.

	k factor 3	k factor 5	k factor 7
Stress Level	Fatigue Life	Fatigue Life	Fatigue Life
1	1	1	1
1.15	0.66	0.5	0.375
0.87	1.5	2	2.65

Tablo 2: K-Faktörü, gerilme seviyesi ve yorulma ömrü.

Yorulma testinin hızlandırılmasında, değişen gerilme seviyesi ile hasara neden olan çevrim sayısı arasındaki logaritmik ilişki önemli bir husustur. K faktörü büyüdükçe, gerilmedeki küçük artışlar parçanın ömründe giderek daha büyük değişiklikler yaratır. Bu, dayanıklılık testini hızlandırmak için kullanılabilir. Yükün küçük bir miktar arttırılması ile test süresinde büyük düşüşler sağlanabilir.

Genel kural olarak, k-faktörleri aşağıdaki gibi ilişkilendirebilir:

- K faktörü 7: Alüminyum
- K-Faktörü 5: Çelik
- K-Faktörü 3: Kaynak

KAYNAKÇA

- 1) Chandler, H; Hardness Testing, Second Edition, ASM International, United States of America, 1999.
- 2) Kayalı, E.S.; Ensari, C. ve Dikeç, F.; Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İ.T.Ü. Kimya Metalürji Fa. Ofset Atölyesi, İstanbul, 1990.
- 3) Güleç, Ş. ve Aran, A.; Malzeme bilgisi, Cilt 1, TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Gebze, 1988.

<http://www.serdarkorkut.com/>

<https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve>