

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE PARÇALARININ ÖMÜR HESAPLARINDA
WEIBULL DAĞILIMININ HASAR TEORİLERİ VE
İSTATİSTİK DAĞILIM FONKSİYONLARIYLA
KARŞILAŞTIRILMASI**

Makine Mühendisi Tevfik Alp ÖZPAR

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Kontrol Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Necati TAHRALI

İstanbul, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. İSTATİSTİKSEL DAĞILIM FONKSİYONLARI TEORİK ANALİZİ	5
2.1. Normal Dağılım	5
2.2. Üstel Dağılım	9
2.3. Weibull Dağılımı	11
3. SANAYİDE WEIBULL ANALİZİNİN KULLANIMI	15
3.1. Weibull Diyagramında Noktaların Enterpolasyonla Yerleştirilmesi	15
3.2. Minimum Ömrün Weibull Dağılımı ile Grafikselsel Olarak Bulunması	17
3.2.1. Minimum Ömür.....	17
3.2.2. Ömür Karakteristiği, Form Parametresi, Ortalama Ömür, B10, B50, B90 Ömürleri	18
4. WEIBULL ANALİZİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
5. WEIBULL ANALİZİNE GÖRE KARAKTERİSTİK ÖMÜR, ORTALAMA ÖMÜR, B10, B50, B90 ÖMRÜ BULUNMASI	21
5.1. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 614 N/mm ²	21
5.2. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 490 N/mm ²	23
5.3. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 428 N/mm ²	25
5.4. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 304N/mm ²	27
5.5. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 262 N/mm ²	29
5.6. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 248 N/mm ²	31
5.7. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 235 N/mm ²	33
6. WÖHLER ANALİZİNE GÖRE ORTALAMA ÖMÜR, B10, B50, B90 ÖMRÜ BULUNMASI	36
6.1. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 614 N/mm ²	36
6.2. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 490 N/mm ²	37
6.3. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 428 N/mm ²	38
6.4. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 304 N/mm ²	39

6.5.	Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 262 N/mm ²	40
6.6.	Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 248 N/mm ²	41
6.7.	Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 235 N/mm ²	42
7.	WEIBULL DAĞILIMI İLE WÖHLER DAĞILIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	44
8.	WÖHLER EĞRİLERİNİN PRATİK ÇİZİMİ	45
9.	KÜMÜLATİF HASAR TEORİLERİ.....	48
9.1.	Linear Birikimli Hasar Teorileri.....	48
9.1.1.	Palmgren-Miner Teorisi.....	48
9.2.	Non Linear Birikimli Hasar Teorileri	51
9.2.1.	Marko-Starkey Birikimli Hasar Teorisi	52
9.2.2.	Henry Birikimli Hasar Teorisi.....	54
9.2.3.	Gatts Birikimli Hasar Teorisi	58
9.2.4.	Corten-Dolan Birikimli Hasar Teorisi	61
9.2.5.	Marin birikimli Hasar Teorisi	69
10.	SONUÇLAR	73
	KAYNAKLAR.....	75
	ÖZGEÇMİŞ.....	77

SİMGE LİSTESİ

t_0	Beklenen minimum değer
$F(t)$	Dağılımın birikimli fonksiyonu
S_q	Dayanım anlık değeri
n	Değişken miktarı
F_{maks}	Dişli çark üzerine uygulanan maksimum kuvvet
F_{min}	Dişli çark üzerine uygulanan minimum kuvvet
σ_{maks}	Gerilme genliğinin maksimum değeri
σ_{min}	Gerilme genliğinin minimum değeri
σ_g	Gerilme genliği
$R(X)$	Güvenirlilik fonksiyonu
j	Hasar sıra numarası
D	Hasar
E	Hasardan sonra yorulma sınırı
$F(X)$	İşe yaramama fonksiyonu
λ	İşe yaramama oranı
S_{N_l}	Logaritmik ömür değerlerinin standart sapması
k_0	Malzeme sabiti
σ_{zD3}	N=1000 yük tekrarını gerçekleştiren gerilme değeridir.
\bar{N}_l	Ortalama logaritmik ömür

E_0	Orijinal yorulma sınırı
θ	Ömür karakteristiği
S	Tam değişken gerilme
b	Weibull eğimi
N_{10}	%10 güvenirlikli ömür
N_{50}	%50 güvenirlikli ömür
N_{90}	%90 güvenirlikli ömür

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sürekli ve süreli mukavemet bölgeleri.....	3
Şekil 1.2. Çatlağın başlangıç, yayılma ve ani kırılma bölgelerini gösteren çelik bir mildeki yorulma kırığı yüzeyinin resmi.....	4
Şekil 2.1 Gauss-Laplace dağılımının yoğunluk fonksiyonu.....	6
Şekil 2.2 Dağılımın ortalaması, ortancası ve modu birbirine eşittir.....	7
Şekil 2.3 Standart normal dağılım fonksiyonu.....	7
Şekil 2.4 $P(X>a)$ ihtimalini gösteren taralı alan.....	7
Şekil 2.5. Birikimli dağılım fonksiyonu.....	8
Şekil 2.6. Normal dağılım için güvenilirlik ve işe yaramama eğrileri.....	8
Şekil 2.7 Ani işe yaramama oranı.....	9
Şekil 2.8 Üstel dağılım yoğunluk fonksiyonu.....	10
Şekil 2.9 Çeşitli b değerleri için elde edilen weibull dağılımları.....	11
Şekil 2.10 Çeşitli b değerleri için elde edilen weibull doğruları.....	14
Şekil 5.1. 614 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	22
Şekil 5.2. 490 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	24
Şekil 5.3. 428 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	26
Şekil 5.4. 304 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	28
Şekil 5.5. 262 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	30
Şekil 5.6. 248 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	32
Şekil 5.7. 235 N/mm ² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı.....	34
Şekil 6.1. Sürekli ve süreli mukavemet bölgelerine ait wöhler eğrileri.....	43
Şekil 8.1. Genel imalat çelikleri için Wöhler egrisinin pratik çizimi.....	46
Şekil 9.1 Her bir değişik gerilme seviyesi σ_i 'ye tekabül eden n_i çevrim operasyonlarının ve her σ_i için N_i toplam ömürün gösterildiği spektrum yüklemenin açıklanması.....	49
Şekil 9.2 Yorulma hasarı ve çevrim oranı arasındaki ilişki.....	51
Şekil 9.3 Birçok değişik çevrimli gerilme sırası için çizilmiş hasar	

durumu. Yükleme sırası: $\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_4 - \sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3$	54
Şekil 9.4 Marin birikimli hasar eğrisi.....	70

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Dişdibi kırılması deneyleri.....	20
Çizelge 5.1. 614 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	21
Çizelge 5.2. 490 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	23
Çizelge 5.3. 428 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	25
Çizelge 5.4. 304 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	27
Çizelge 5.5. 262 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	29
Çizelge 5.6. 248 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	31
Çizelge 5.7. 235 N/mm ² gerilme değerine göre sıra ortancaları.....	33
Çizelge 5.8. Gerilme-weibull eğimi-karakteristik ömür özet tablosu.....	35
Çizelge 6.1. 614 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	36
Çizelge 6.2. 490 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	37
Çizelge 6.3. 428 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	38
Çizelge 6.4. 304 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	39
Çizelge 6.5. 262 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	40
Çizelge 6.6. 248 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	41
Çizelge 6.7. 235 N/mm ² gerilme değerine göre logaritmik ömürler.....	42
Çizelge 7.1. Weibull ve wöhler sonuçları kıyaslama çizelgesi.....	44

ÖNSÖZ

Literatürde bulunan istatistiksel dağılım fonksiyonlarının analizi incelendikten sonra sanayide kullanılan weibull analizinin birebir uygulaması hakkında fikir veren bu çalışma on bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde istatistiksel dağılım fonksiyonlarının teorik analizi yapılmıştır. Bunu takip eden ikinci bölümde sanayide kullanılan weibull analizinin daha detaylı bir incelemesi yapılmıştır. Bu kısım teorik olmakla beraber uygulama yöntemini enterpolasyon da dahil olmak üzere açıklamaktadır. Dördüncü bölümde ise teorik çalışmayı somut bir uygulamayla canlandırmak için Sn. Necati Tahralı'nın Münih Teknik Üniversitesinde yapmış olduğu pülzatör deney sonuçları gösterilmiştir. Beşinci bölümde bu değerler kullanılarak weibull ihtimaliyat kağıtları her gerilme değerine göre hazırlanıp weibull eğrileri elde edilip parametreleri bulunmuştur. Altıncı bölümde yine sanayide oldukça fazla kullanım yerine sahip olan wöhler analizine göre tüm gerilme değerleri için wöhler eğrileri elde edilmiştir. Bu iki bölümde elde edilen değerler yedinci bölümde bir araya getirilip kıyaslanmıştır. Sekizinci bölümde ise wöhler eğrisinin bir pratik çizim uygulaması yapılmıştır. Son bölümde ise birikimli (kümülatif) hasar teorilerinin bir incelemesi yapılmıştır.

Tüm bu çalışmalarım sırasında bana destek veren değerli hocam Sn. Prof Necati TAHRALI'ya ve benden hiçbir zaman desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen babam, annem, eşim ve kızıma şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Bu tezin amacı, makine parçalarında yaşanan yorulma kırılmalarından elde edilen verilerin istatistiksel yöntemlerle değerlendirilerek ömürleri hakkında bilgi sahibi olmak ve kıyaslama yapabilmektir. Bir uygulama niteliği taşıyan bu çalışmamızda weibull analizinin çizimi tarafımızca yapılmış olup bir kıyaslama yapabilmek için wöhler eğrisi de ayrıca oluşturulmuştur. Deney noktalarının miktarı bu analizlerde oldukça önem taşımaktadır. Noktaların fazla olması durumunda çok daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir. Günümüz rekabet ve karmaşık teknolojik ortamında bir firmanın başarılı olabilmesi için ürününe güvenebilmesi ve optimum güvenilirlik seviyesinde üretim kontrol edebiliyor olması gerekmektedir. Bu da ürün güvenilirliğinden ve kalitesinden feragat etmeden kullanıcıya en uygun fiyat vererek ve üretim maliyetlerini en düşük seviyeye çekerek sağlanmalıdır. Güvenirlik konusu makine mühendisliğinde analizler yapmak için gerekli yöntem ve donanımları sağlamaktadır. Endüstride çok kullanılan weibull ve wöhler eğrileri pratik yöntemlerle çizildikten sonra sonuçları bu tezde değerlendirilmiştir. Makine parçaları tek bir gerilmeye çalışıldığında ömür değerleri birbirinden farklı olmakla beraber bir dağılım göstermektedir. Bu durumda belirli güvenilirlikle çizilen Wöhler ve Weibull diyagramları esas alınarak birikimli hasar ile meydana gelecek yorulmanın ömür hesaplarını bu diyagramlardan esas alınarak pratikte çok önemli olan birikimli hasar teorilerine göre ömür değerlendirilmeleri yapılabilmektedir.

ABSTRACT

COMPARISON of FATIGUE TEST RESULTS OF MACHINE PARTS WITH WEIBULL DISTRIBUTION AND OTHER STATISTICAL DISTRIBUTIONS

Tevfik Alp Özpar
Mechanical Engineering, M.S. Thesis

This research provides us information about statistical analysis of datas obtained from fatigue failure tests of machinery parts. Reliability is an important subject in mechanical engineering to provide necessary tools and methods to make analysis. Weibull diagrams have been prepared manually in order to get a paper-based application. In addition to that, Wöhler diagrams have been prepared for comparison of both results. Data amount is quite important for the evaluation of results. The results are more precise when there is more data points on the graph. In today's technological environment, key to success for many companies is to be able to rely on its product and to control its production facility with optimum reliability. This task should be performed with best price, minimum production cost and without decreasing the quality and reliability of the product. Results of both weibull and wöhler anaylsis has been evaluated at the end of this research. When machine parts have been exposed to durability tests with one single force, even if there are multiple life values they are easily put on one distribution. In this case, based on diagrams of weibull and wöhler, required life datas are obtained to be analysed with cumulative failure theories.

Keywords: Reliability, weibull, wöhler, fatigue, statistical analysis

1. GİRİŞ

İşçiliğin ve hammaddenin maliyetlerinin daha artmaya başlamadığı, malzeme seçiminin sınırlı ve minimum ağırlığın bir tasarım engeli olmadığı eski günlerde, deyiş şöyleydi “eğer şüpheniz varsa o zaman risk olabilecek bölgelerde tasarımda boyutları arttırın”. Ancak günümüzde, tasarımda boyutları arttırmak doğru bir yaklaşım olmaktan çıktı. Bazen boyutları arttırılmış tasarımlar bile faaliyete geçtikten hemen sonra kırılabilirler. Ürün geliştirme sırasında çok az seviyede hasar analizi yapan tasarımcılar genellikle birçok hasar problemi ile karşılaşılır. Kırılan veya eğilen parçalar ilk başta boyutları arttırılmış olarak tasarlanırsa da birkaç bin çevrim sonrasında yorulma kırılmasına maruz kalıp yamalanmak zorunda olabilirler. Limitli seviyede statik analiz yapan mühendis birçok hasarı engelleyebilir ama, makine hizmete alındıktan sonra birçok kırılmanın oluşmasını engellemek için yorulma analizi gereklidir. (1)

Yorulma analizleri ve istatistiksel dağılımların bütününe kapsayan güvenilirlik mühendisliği endüstride gittikçe önem kazanarak bir yer edinmiştir. “**Niçin Güvenirlik?**” sorusunun cevapları artan önemi açıklayıcı niteliktedir:

- **Marka:** Bir firmanın markası ürünlerinin güvenilirliği ile doğrudan ilgilidir.
 - **Müşteri Memnuniyeti:** Bir ürünün güvenilir olması müşteri memnuniyetini olumlu yönde çok etkilemese de, güvenilemeyecek bir ürün çok ciddi şekilde müşteri memnuniyetsizliğine sebep olur.
 - **Garanti Maliyetleri:** Eğer bir ürün garanti süresi içerisinde fonksiyonunu yerine getiremez hale gelirse, ürün değiştirme veya tamir maliyetleri firmanın karlılığını ciddi şekilde etkiler. Aynı zamanda olumsuz bir ilgiyi de üzerine çeker.
 - **Potansiyel İşler:** Güvenirliği arttıracak sürekli ve iradeli bir yaklaşım içerisinde bulunan firmalar ileride alınması olası işler için müşterilerde bir güven duygusu yaratır.
 - **Maliyet Analizi:** Üretici firma güvenilirlik verilerini diğer maliyet kalemleri ile beraber değerlendirerek ürünlerinin maliyet durumunu daha gerçekçi bir şekilde gösterebilir. Her ne kadar ilk üretim maliyetleri yüksek de olsa uzun vadede daha az bakım ve tamir gerektiren bir tasarım yaptıkları için rekabet ortamında büyük avantaj sağlarlar.
- (14)

Yorulma analizi ve onucunda ömür ve güvenilirlik tahminlerinde sanayide en etkili kullanılan dağılımlardan birisi Weibull dağılımıdır. Weibull dağılımının gücü esnekliğinden

gelmektedir. Form parametresinin aldığı değerlere bağlı olarak Weibull dağılımı bir üstel dağılımı veya bir normal dağılımı temsil edebilir.

Tez çalışmasının başında ihtimallere göre değerlendirme yapmak için kullanılan istatistiksel analiz yöntemleri ile ilgili teorik literatür araştırması yapılmıştır. Bu kısımda normal dağılım, üstel dağılım ve Weibull dağılımları için teorik inceleme yapılmıştır.

Bu araştırmanın ardından tezin esasını teşkil eden Weibull analizi için daha detaylı bir çalışma yapılmıştır. Öncelikle Weibull diyagramı üzerine verileri işaretledikten sonra bu noktalardan enterpolasyon yöntemiyle en yakın geçen doğrunun bulunmasının yöntemi incelenmiştir. Weibull yönteminin esnekliğini tekrar göstermek için burada üç parametrelilik, iki parametrelilik ve karışık dağılımlar hakkında bilgi verilmiştir.

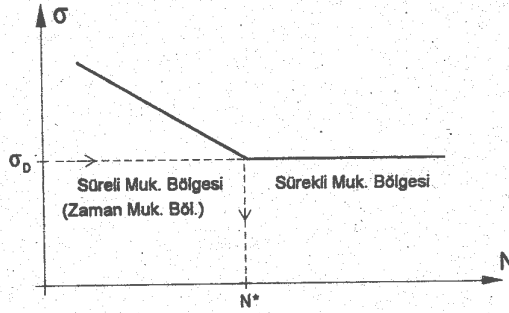
Ardından Weibull yöntemiyle çeşitli değerlerin tayin yöntemi incelenmiştir. Bu değerler, ömür karakteristiği, form parametresi, ortalama ömür, %10,50 ve 90 ömürleridir. Bu çalışmaların hazırlanmasında Fiat Auto firmasının teknik şartnamelerinden faydalanılmıştır. Bu tezde amaçlanan, grafiksel bir yaklaşımla kolay bir şekilde Weibull analizinin sanayide kullanımını göstermektir.

Weibull analizinde kullanılan verilerin tamamı Sn. Prof. Necati TAHRALI'nın Münih Teknik Üniversitesinde yapmış olduğu Hidro-Pülzator diş dibi kırılma testlerinin sonuçlarından alınmıştır.

Weibull analizi sonrasında kıyaslama imkânı bulmak için Wöhler analizi ile de hesaplama yapılmıştır.

Wöhler diyagramlarında iki bölge mevcuttur. (4)

- 1) Süreli (Zaman) mukavemet bölgesi: Belirli bir gerilme değerinde makine parçasının zorlanması durumunda, ömür değeri de belirlidir. Ne kadar yük tekrarı (veya işletme saati) ömrü olacağı, bundan sonra hasar meydana geleceğini belirten bölgedir.
- 2) Sürekli mukavemet bölgesi: Makina parçasının ömrünün (teorik olarak) sonsuz değerini gösterdiği bölgedir. Teorik olarak sonsuz ömür, gerçekte makine parçasından istenilen ömürden daha fazlasını belirtmektedir. (Şekil 1.1.)



Şekil 1.1. Sürekli ve süreli mukavemet bölgeleri (4)

Ömürlerin istatistik değerlendirmesinde, “Logaritmik Normal Dağılım” esas alınarak, ortalama logaritmik ömür \bar{N}_l ve logaritmik ömür değerlerinin standart sapması S_{N_l} hesaplanarak her iki mukavemet bölgesinde %10, %50, %90 güvenilirlikli değerler hesaplanmıştır.

Hem zaman mukavemeti hem de süreli mukavemet bölgelerinde elde edilen kırılma noktaları yük tekrar sayılarına ve olasılık durumlarına göre grafik olarak değerlendirilmiştir.

Bu tezde hem Wöhler hem de Weibull olarak grafik bir değerlendirme tarafımızca yapılmıştır.

İleriki bölümlerde ele alınacak birikimli hasar teorilerinin kullanılabilmesi için ilgilenilen malzemenin gerilme-ömür değerlerinin bilinmesi gereklidir. Eğer mevcutsa bu değerleri veren gerçek Wöhler eğrilerinin kullanılması uygun olur. Ancak bu eğrilerin bulunması için çok uzun testler yapılması gerektiğinden her zaman bu eğriler çıkarılamayabilir. Böyle bir durumda Wöhler eğrilerini pratik yoldan çıkarmak en iyi çözümdür. Eğrilerin nasıl elde edileceği bu bölümde incelendikten sonra birikimli hasar teorilerinin incelenmesine geçilmiştir.(9)

Bazı pratik uygulamalar ve malzemeler üzerindeki yorulma deneyleri maksimum ve minimum gerilme seviyeleri arasında çevrimler içerir. Bu tip zorlanmaya dinamik yükleme denilmektedir. Eğer dinamik zorlanmada gerilme seviyeleri sabitse buna sabit genlikli yükleme denir. Aksi durumda ise değişken genlikli yükleme adını alır.

Yorulma, dinamik yükleme altında malzemenin veya parçanın mekanik özelliklerindeki azalma olarak tanımlanabilir. Genelde yorulma, herhangi bir yapıyı veya parçayı etkileyen bir problemdir. Arabalar, uçaklar (prensip olarak kanatları), dalgaların etkilediği gemiler, değişken sıcaklık şartlarında çalışan nükleer reaktörler ve türbinler (değişken termik

gerilmeler) ve bunlar gibi birçok hareketli parçanın çalıştığı durumlarda malzemenin yorulma davranışı önem kazanır. Metalik parçaların işletme durumundaki hasarlarınının %90'ının yorulmadan kaynaklandığı kabaca hesaplanmıştır. Bir yorulma kırığı, çoğunlukla kolaylıkla görülebilecek çizgisel bir yüzey (kumsala benzer) sergiler. Örneğin Şekil 1.2. yorulma hasarına uğramış çelik bir milin kırılma yüzeyini resmetmektedir. Bu tip bir hasarın ana bölümleri yorulma çatlak başlangıcı, çatlak yayılması (kumsal benzeri) ve çatlak boyu kritik bir değere ulaştığında yaşanan ani kırılma bölgesinden oluşur. Tipik olarak taşınabilecek gerilme değerlerinden çok daha düşük seviyelerde gerçekleşir. (8)



Şekil 1.2. Çatlak başlangıç, yayılma ve ani kırılma bölgelerini gösteren çelik bir mildeki yorulma kırığı yüzeyinin resmi (8)

Makine elemanları gerçekte tek bir gerilme genliği altında değil muhtelif gerilme genliklerine maruz kalarak çalışırlar. Standart deney çubuklarının yorulma deneyleri sonucunda elde edilen Wöhler (S-N) diyagramları sabit bir gerilme genliğinde çalışma sonucunda elde edilen eğrilerdir. Dolayısıyla Wöhler diyagramlarının değişik yüklemeler altında çalışan makine elemanları için uygulanması mümkün değildir. Muhtelif gerilme genliklerinde çalışan makine elemanlarının ömürlerinin tespit edilebilmesi için birçok teori geliştirilmiştir (Marco-Starkey, Henry, Gatts, Corten-Dolan, Marin, Manson v.b.). Bunların içerisinde Palmgren-Miner metodu basitliği ve çok iyi bir hasar tahmin güvenilirliği nedeni ile en çok kullanılan metottur.

2. İSTATİSTİKSEL DAĞILIM FONKSİYONLARI TEORİK ANALİZİ

Yapılan ömür testleri sonucunda elde edilen veriler çeşitli yöntemlerle değerlendirilerek bir sonuca varılır.

Bu değerlendirmelerin en çok kullanılanı Normal dağılımdır (Gauss-Laplace)

2.1. Normal dağılım (2)

Gauss-Laplace fonksiyonu olarak da bilinen bu dağılımın yoğunluk fonksiyonu $-\infty \leq X \leq +\infty$ olmak üzere,

$$f(X) = \frac{1}{\hat{X}\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left[\frac{(X-\bar{X})^2}{2\hat{X}^2}\right]} \quad 2.41$$

şeklinde ifade edilmektedir (Şekil 2.1.). Dağılımın ortalaması, ortancası ve modu birbirine eşittir.

$$z = \frac{X - \bar{X}}{\hat{X}} \quad 2.42$$

tarzında bir dönüşüm yapılırsa (Şekil 2.2.), ortalaması $\bar{X} = 0$, standart sapması $\hat{X} = 1$ olan ve standart normal dağılım fonksiyonu (Şekil 2.3.) denilen

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left[\frac{z^2}{2}\right]} \quad 2.43$$

şeklinde bir fonksiyon elde edilir.

Buna göre

$$z_\alpha = \frac{a - \bar{X}}{\hat{X}} \quad 2.44$$

değeri ile $P(X > a)$ ihtimalini

$$P(X > a) = P(z > z_\alpha) = \alpha \quad 2.45$$

tarzında ifade etmek mümkündür. Burada α Şekil 2.4’de gösterilen taralı alan olup değerleri z_α ’ya bağlı olarak literatürde çeşitli tablolarda belirtilmiştir. Dikkat edilmesi gereken husus, α değerinin $P(X > a) = P(z > z_\alpha)$ için verilmesidir. $P(X \leq a) = P(z \leq z_\alpha)$ ihtimalini hesaplamak için eğrinin altında kalan alanın 1 olduğu düşünülerek

$$P(X > b) + P(X \leq b) = 1 \quad 2.46$$

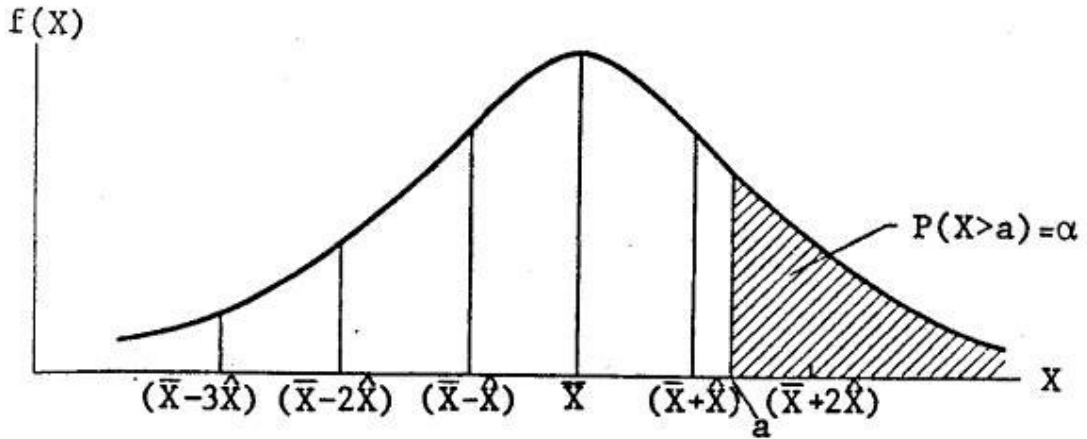
bağıntısından

$$P(X \leq b) = 1 - P(X > b) \quad 2.47$$

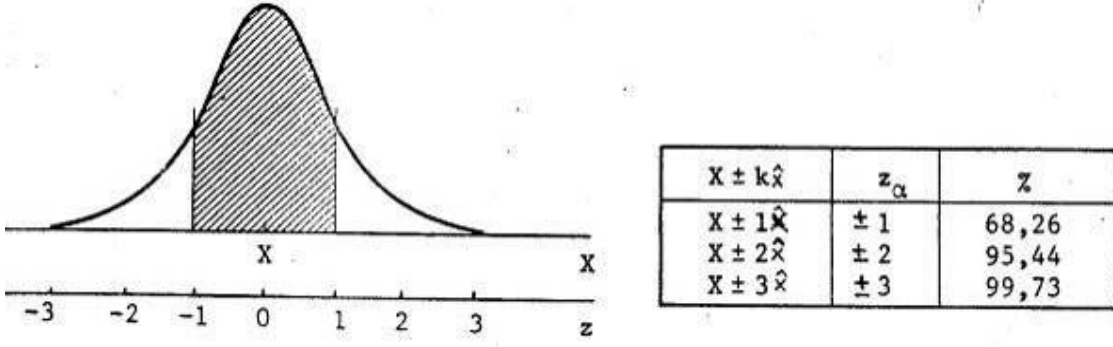
veya

$$P(z \leq z_\alpha) = 1 - P(z > z_\alpha) = 1 - \alpha \quad 2.48$$

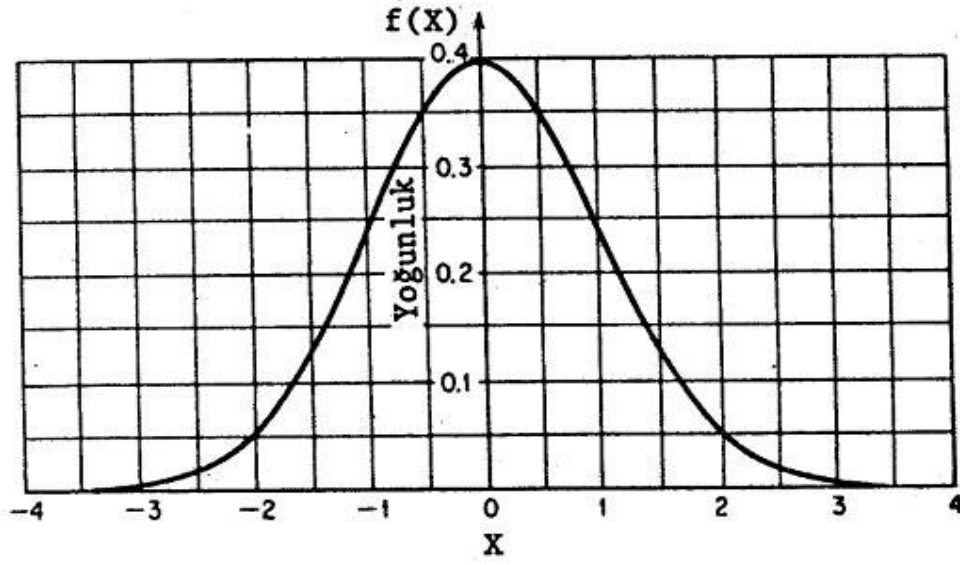
olarak bulunur.



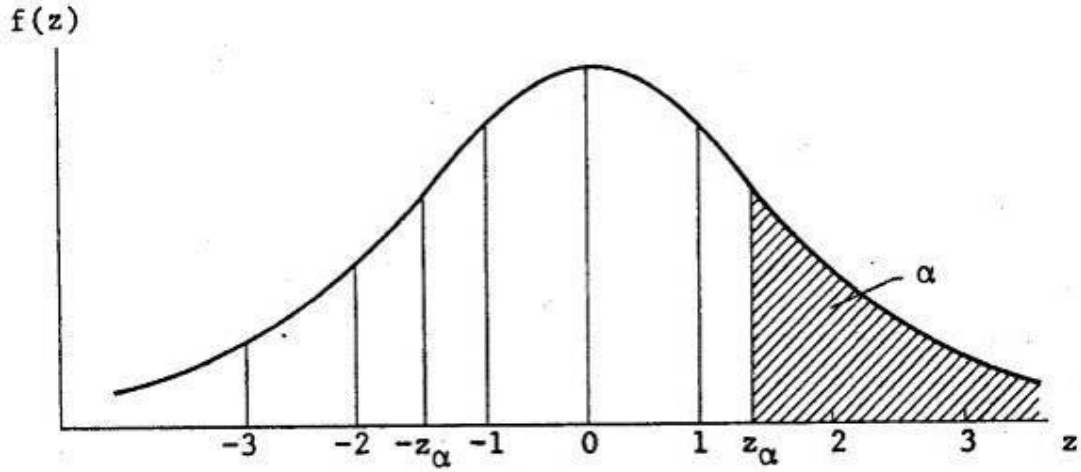
Şekil 2.1 Gauss-Laplace dağılımının yoğunluk fonksiyonu (2)



Şekil 2.2 Dağılımın ortalaması, ortancası ve modu birbirine eşittir (3)



Şekil 2.3 Standart normal dağılım fonksiyonu (3)

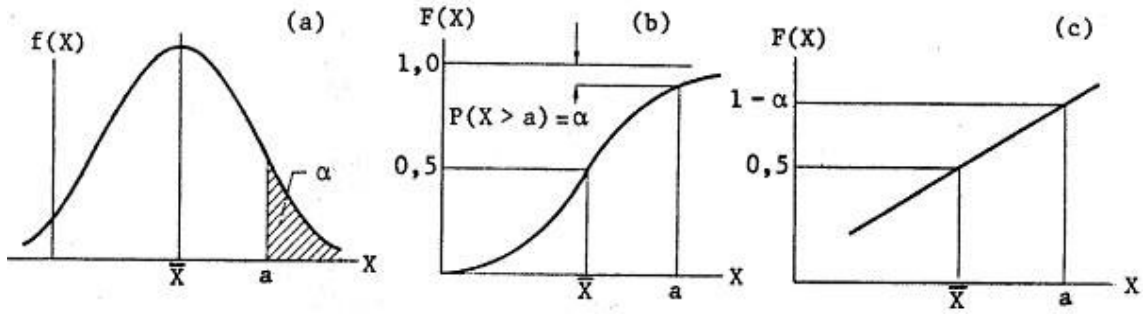


Şekil 2.4 $P(X>a)$ ihtimalini gösteren taralı alan (3)

Normal dağılımın işe yaramama olaylarını temsil eden

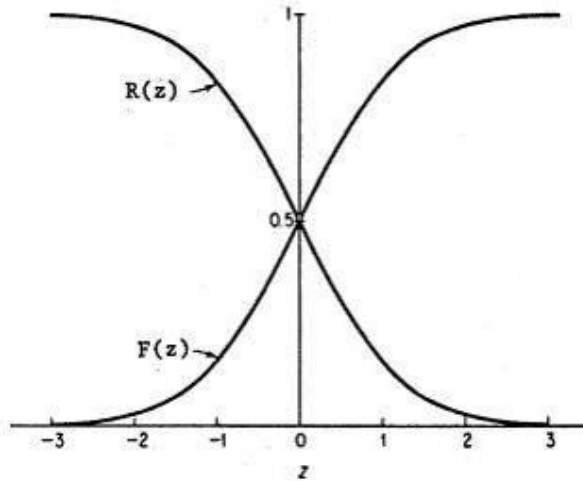
$$F(X) = \int_{-\infty}^X f(X)dX \quad \text{veya} \quad F(z) = \int_{-\infty}^z f(z)dz$$

Birikimli dağılım fonksiyonu Şekil 2.5 b'de gösterilmiştir. Burada $X \leq a$ olma ihtimali doğrudan doğruya eksen takımının düşey ekseninde okunabilir. $P(X > a) = \alpha$ ihtimali ise, düşey ekseninin 1 değerinden başlamak suretiyle okunur. Birikimli dağılım fonksiyonu normal ihtimaliyat kağıdı üzerinde temsil edilirse, Şekil 2.5 c'de gösterildiği gibi bir doğru elde edilir.

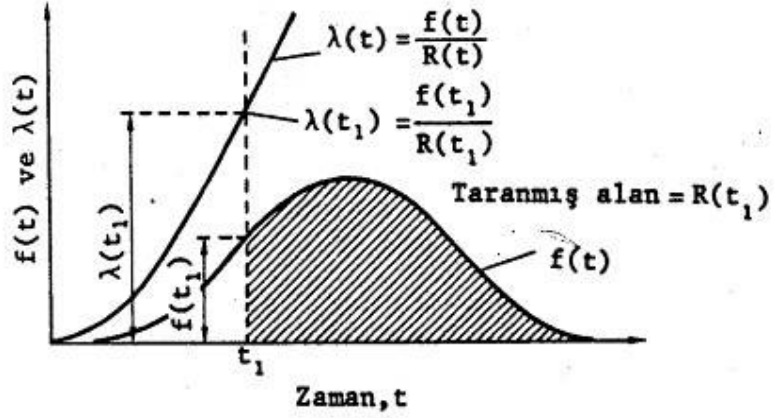


Şekil 2.5. Birikimli dağılım fonksiyonu (3)

Aslında $P(X > a) = 1 - F(X) = \alpha$, sistemin güvenilirliğini temsil etmektedir. Bu bakımdan güvenilirlik eğrisi $R(X)$ ile işe yaramama eğrisi $F(X)$ birbirlerini tamamlayan eğrilerdir. Normal dağılım için bu iki eğri Şekil 2.6'te gösterilmiştir. Normal dağılıma bağlı olup (2.22) denklemi ile ifade edilen ani işe yaramama oranı Şekil 2.7'te verilmiştir.



Şekil 2.6. Normal dağılım için güvenilirlik ve işe yaramama eğrileri (3)



Şekil 2.7 Ani işe yaramama oranı (3)

2.2. Üstel dağılım (2)

Bu dağılım, genellikle zamanın mevzubahis olduğu olaylarda kullanılmaktadır. Bu sebepten X gelişigüzel değişkeni yerine t konulursa, dağılımın yoğunluk fonksiyonu, $0 \leq t \leq \infty$ olmak üzere,

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad 2.54$$

tarzında olur. Burada λ işe yaramama oranıdır.

θ ile gösterilen sistemin ortalaması (2.29) denklemine göre

$$\bar{t} = \theta = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} \lambda t \cdot e^{-\lambda t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda} [-\lambda t \cdot e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t}]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad 2.55$$

olarak bulunur. Pratikte λ 'dan çok

$$\theta = \frac{1}{\lambda} \quad 2.56$$

şeklinde olan θ kullanılır ki, bu da işe yaramama olayları arasındaki ortalama zaman olarak bilinir. Bu değerle sistemin yoğunluk fonksiyonu

$$f(t) = \frac{1}{\theta} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)} \quad 2.57$$

şeklinde yazılabilir (Şekil 2.8 a). θ , dağılımı karakterize eden tek parametredir. Bu dağılımın işe yaramama olaylarını zamanla meydana gelmesini gösteren birikimli dağılım fonksiyonu (2.11.) denklemine göre

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt = \int_0^t \frac{1}{\theta} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)} dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)} \quad 2.58$$

şekindedir (Şekil 2.8b). Sistemin güvenilirliği (2.21) denklemine göre

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)} \quad 2.59$$

tarzındadır. Bu denklemin yaklaşık bir çözümü

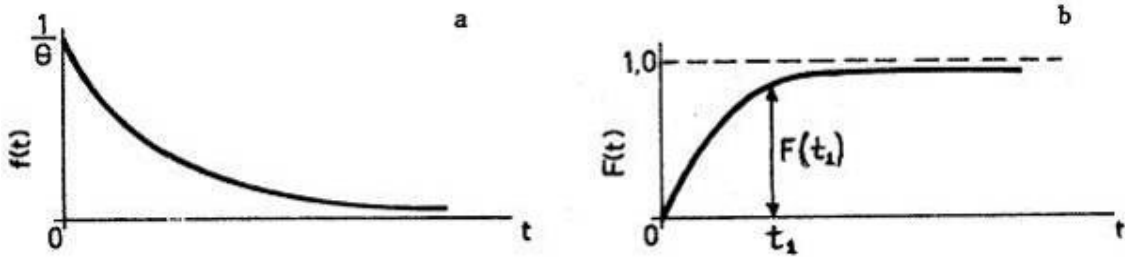
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)} = 1 - \left(\frac{t}{\theta}\right) \quad 2.60$$

şeklinde olup hata $\frac{t}{\theta} < 10^{-2}$ için ihmal edilebilir mertebededir. $\frac{t}{\theta} < 10^{-1}$ için hata yaklaşık olarak %5 civarındadır.

$t = \theta$ için 2.58 denkleminde

$$F(t) = 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{e} = 1 - \frac{1}{2,718} = 0,632$$

olarak bulunur; yani $t \leq \theta$ olma ihtimali %63,2'dir. Burada θ için yeni bir anlam çıkarmak kabildir. Bunda göre θ , kümeyi teşkil eden elemanların %63,2'sinin işe yaramaz hale geldiği ömürdür. Bu yüzden θ 'ya ömür faktörü de denir.



Şekil 2.8 Üstel dağılım yoğunluk fonksiyonu (3)

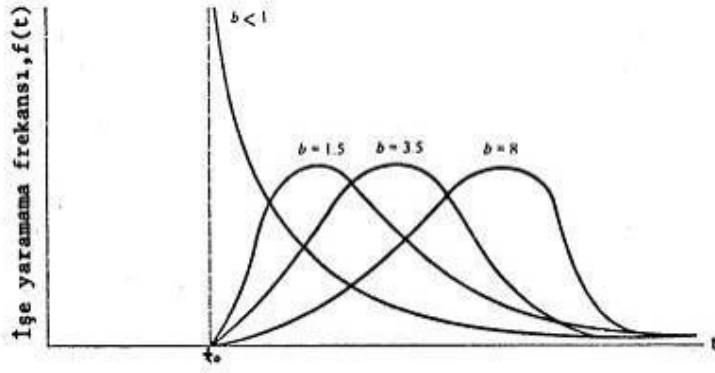
2.3. Weibull dağılımı (2)

Esasen yorulma deneylerinden elde edilen sonuçları değerlendirmek için ileri sürülmüş olan bu dağılım günümüzde birçok mühendislik problemlerinde kullanılmaktadır.

Weibull dağılımının yoğunluk fonksiyonu, $t_0 \leq t < \infty$ olmak üzere

$$f(t) = \left[\frac{b}{\theta - t_0} \cdot \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^{b-1} \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right] \quad 2.66$$

şeklindedir. Burada t_0 -beklenen minimum değer, b -weibull eğimi olarak isimlendirilen faktör ve θ -ömür karakteristiğidir. Çeşitli b değerleri için elde edilen weibull dağılımları Şekil 2.9 de gösterilmiştir. $b=3,5$ değerine tekabül eden dağılım, normal dağılıma çok yakındır. $t_0 = 0$ ve $b=1$ için ise, üstel dağılım olur.



Şekil 2.9 Çeşitli b değerleri için elde edilen weibull dağılımları (3)

Dağılımın birikimli fonksiyonu $F(t)$ 'nin 3 parametresi arasındaki bağıntı şöyle yazılabilir:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right] \quad 2.67$$

ve güvenilirliği

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right] \quad 2.68$$

şeklindedir.

Bu parametrelerin anlamı önemlidir, çünkü bu parametrelerin değerleri $F(t)$ birikimli fonksiyon eğrisinin dağılımını belirler. Eğer minimum ömür değeri sıfır ise, 2 parametrelili bir Weibull dağılımı elde edilir:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b} \quad \text{ile } t \geq 0$$

Böylece, lineer dönüşüm sayesinde, 3 parametrelili bir dağılımdan 2 parametrelili bir dağılıma ulaşırız. Güvenilirlik analizinde kullanılan diğer fonksiyonlar, $F(t)$ birikimli hasar dağılımından elde edilir:

- $f(t)$ hasar olasılık yoğunluk fonksiyonu $F(t)$ fonksiyonunun türevi alınarak elde edilir:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{\theta - t_0} \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0}\right)^b}$$

Ani işe yaramama oranı ise

$$\lambda(t) = \frac{b}{\theta - t_0} \cdot \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0}\right)^{b-1} \quad 2.69$$

tarzında ifade edilir.

Ani hasar oranının $\lambda(t)$ zamana bağlı değişimi b form parametresinin bir fonksiyonudur:

- λ azalır EĞER $b < 1$ olursa
- λ sabit kalır EĞER $b = 1$ olursa
- λ artar EĞER $b > 1$ olursa

Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi Weibull dağılımı θ , b ve t_0 olmak üzere, üç parametre tarafından tayin edilmektedir. t_0 , dağılımın başlangıcını; θ , dağılımın ortalamasını ve b, dağılımın büyüklüğünü ifade etmektedir. $t_0 = 0$ olması halinde iki parametrelili olarak isimlendirilen Weibull dağılımının birikimli dağılım fonksiyonu

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b\right] \quad 2.70$$

şeklinde olur. Burada da $t = \theta$ için

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\theta}{\theta}\right)^b\right] = 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{2,718} = 0,632 \quad 2.71$$

dır. Bununla beraber $F(t)=0,5$ değeri ile B_{50} ömrü için 2.70 denklemi

$$0,5 = 1 - \exp\left[-\left(\frac{B_{50}}{\theta}\right)^b\right]$$

veya

$$\ln 2 = \left(\frac{B_{50}}{\theta}\right)^b$$

tarzında ifade edilirse,

$$\theta = \frac{B_{50}}{(\ln 2)^{1/b}} \quad 2.72$$

olarak bulunur.

2.70 denklemi

$$\frac{1}{1-F(t)} = \exp\left[\left(\frac{t}{\theta}\right)^b\right]$$

şeklinde yazılır ve ifadenin iki defa tabii logaritması alınırsa,

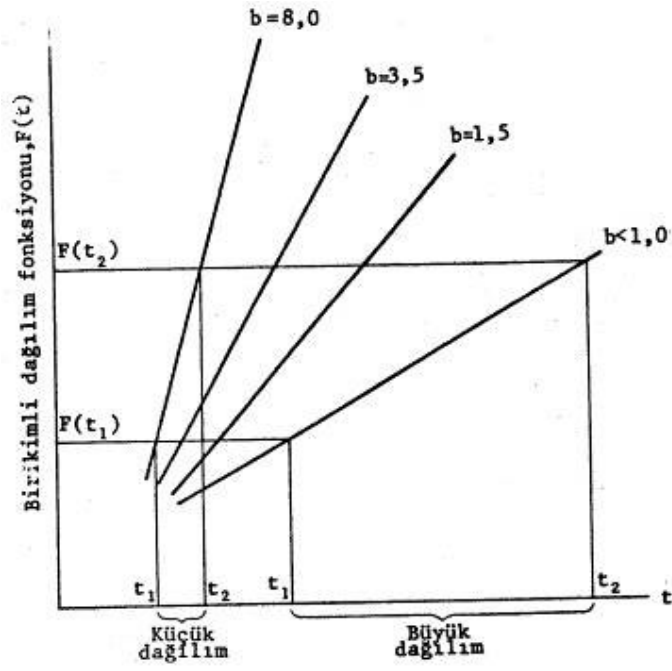
$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = b \ln t - b \ln \theta \quad 2.73$$

bağıntısı elde edilir.

$$y = \ln \ln \frac{1}{1-F(t)}, X = \ln t \text{ ve } C = -b \ln \theta \quad 2.74$$

ifadeleri kullanılırsa, 2.73 denklemi

$$y = bX + C \quad 2.75$$



Şekil 2.10 Çeşitli b değerleri için elde edilen weibull doğruları (3)

Tarzında yazılabilir. Bu denklem X , Y eksen bakımında eğimi b olan ve düşey eksen C noktasında kesen bir doğruyu temsil etmektedir (Şekil 2.10). Aslında bu doğrular özel taksimatlı Weibull ihtimaliyat kâğıdı üzerine çizilir.

Weibull metoduyla ömür verilerine göre güvenilirlik çalışması yapmak, bu fonksiyonlardan değer elde edip parametreleri değerlendirmektir.

3. SANAYİDE WEIBULL ANALİZİNİN KULLANIMI

3.1. Weibull diyagramında noktaların enterpolasyonla yerleştirilmesi (3)

Weibull diyagramı üzerine verileri işaretledikten sonra bu noktalardan “en küçük kareler yöntemi” ile en iyi doğrunun geçirilmesi gerekir.

Ömür değerleri, artan bir şekilde düzenlendikten sonra sıra ortancaları ile eşleştirilir ve bunlar enterpolasyon için gerekli verileri oluşturur.

Eksiksiz bir numune için sıra ortancasını hesap etmeye yarayan formül şöyle gösterilir:

$$p_j = \frac{j-0,3}{n+0,4}$$

bu formülde j hasar sıra numarasını, n ise değişken miktarını gösterir.

Verilerin enterpolasyonu, çeşitli senaryolar için farklı şekilde ele alınmalıdır:

1. Yeterli bir korelasyon ile doğrusal bir enterpolasyon mümkün olduğunda
2. Doğrusal enterpolasyon mümkün olmadığında ve böylece şu durumları ayırt etmek gerekir:
 - a. Farklı açılara sahip 2 doğru parçasına ait veriler kullanılıyorsa
 - b. Deney başlangıcından belirli bir süre δ sonra elde edilen veriler kullanılıyorsa, böylece 3 parametrelili bir Weibull dağılımı söz konusu oluyorsa.

Bu senaryolara bağlı olarak Weibull diyagramı üzerinde noktaların enterpolasyonu şöyle yapılır:

1. Tek bir doğru
2. İki durum mevcut:
 - a. Farklı açılara sahip iki doğru parçası
 - b. X eksenini t_0 değerlerine göre değiştirilmiş bir Weibull diyagramı üzerindeki tek bir doğru

Araştırmadaki ilk adım, Weibull diyagramı üzerindeki noktaların enterpolasyonu ile 2nci derece bir eğri (parabol) elde etmeye çalışmaktır.

Minimum kareler yöntemiyle bu eğrinin analitik ifadesi elde edildikten sonra, şu iki noktadaki tanjantları bulunur:

1. ilk ve ikinci deneysel verinin orta noktası
2. son ve sondan ikinci deneysel verinin orta noktası

Bundan sonra, yukarıda elde edilen iki açısız katsayının oranı bulunur.

Bu oranın değeri bize 3 adet enterpolasyon metodundan hangisinin daha iyi bir yaklaşım olacağı hakkında bilgi verir.

Yapılan birçok deney ve gözlemlerin ışığı altında, yukarıda belirtilen parametre şöyle değerlendirilir:

- a. Eğer oranın değeri $<0,4$ ise, 3 parametrelili bir Weibull dağılımına göre devam edilir. (t_0 parametresinin varlığı ortaya çıkar)
- b. Eğer oranın değeri $0,4$ ile $2,5$ arasında değişiyorsa (uç değerler dahil), 2 parametrelili bir Weibull dağılımına göre devam edilir. (tek bir doğru)
- c. Eğer oranın değeri $>2,5$ ise, iki ayrı hasar tipi söz konusudur. Yani istatistiksel bir bakış açısıyla, iki farklı popülasyon mevcuttur.

Her üç vakada da çalışmanın devamı farklıdır.

1. 3 parametrelili Weibull dağılımı

Fonksiyonu Weibull diyagramında göstermek için, tek tek her hasar için ömürden t_0 (minimum ömür) değerini çıkarmak gerekir.

Analitik bir değerlendirme yapacak olursak, δ değeri bir $x=t_0$ doğrusuyla temsil edilir ve bu doğru elde edilen olasılık fonksiyonun dikey asimptotunu oluşturur.

Enterpolasyonla bir doğru elde edebilmek için hasar verilerine daha önce tanımlanan ötelemesi uygulanmalıdır.

Buna ilave olarak, yine bu değer enterpolasyon doğrularının ilgileşimini güçlendirmektedir.

Doğrudan okunabilen parametreler artık b değerine bağılı olarak tanımlanan hasar mekanizmalarının bir temsilcisi değildir.

Bu sebeple, ani kırılmalar veya yorulma kırılmaları arasındaki farkları tespit etmek bu yöntemle mümkün değildir, ancak 2 parametrelili Weibull dağılımıyla mümkündür.

2. 2 parametrelili Weibull dağılımı

Bu dağılım ile Weibull diyagramında bir doğru ile gösterilebilir, bu sebeple standart uygulamadır.

3. Karışık Weibull dağılımı

Bu ele alınması en zor olan vakadır ve aynı dağılıma ait olmayan farklı hasar verilerini barındırır.

Bu tip durumlarda, ikiden fazla dağılıma ait verileri ayıklamak genel olarak mümkün değildir. Analizi iki dağılıma göre limitlemek, her durumda zamana bağlı hasarlar hakkında yorum yapabilmek için yeterli bilgiyi sağlar.

Bu yaklaşımı genel olarak kabul edersek, uygulanan analiz metodu ile 2 doğru tanımlarız.

Farklı açılara sahip doğrular, farklı zamanlardaki hasar durumlarını açıklar.

Weibull analizi, birikimli hasar olasılık fonksiyonu $F(t)$ ve sonuç olarak güvenilirlik fonksiyonu $R(t)$ 'nu belirli bir zaman aralığı içerisinde inceler. Bu zaman aralığı da ilk hasar gören numunenin ömrü ile son hasar gören numunenin ömrü arasındaki zaman aralığıdır.

Minimum ömrün %20 altında veya maksimum ömrün %20 üzerindeki ömürlerin dışında kalan bölgelerde güvenilirlik incelemesi yapmak mümkün değildir.

3.2. Minimum ömrün weibull dağılımı ile grafiksel olarak bulunması (3)

Eğer diyagramda işaretlenmiş noktalar bir doğru üzerinde bulunmuyorsa (X eksenini hasar ömrü, Y eksenini sıra ortancaları), t_0 minimum ömrünün ve Weibull dağılımının diğer karakteristik parametrelerinin bulunması için aşağıda belirtilen yöntemin izlenmesi gerekmektedir.

3.2.1. Minimum ömür

- a. Enterpolasyon sonucu işaretlenen noktalardan geçen doğruyu grafiksel yaklaşımla Weibull diyagramı üzerine çizin.

- b. İlk ve son hasarları gösteren noktalardan (sırasıyla t_A ve t_B olarak tanımlanır) Y ekseninde AC doğrusunu oluşturmak için iki adet yatay doğru çekin.
- c. AC doğrusunun orta noktasını B olarak tanımlayın.
- d. Doğru üzerindeki B noktasının X eksenindeki izdüşümünden t_B değerini bulun.
- e. İlk yaklaşım olarak, aşağıdaki formülü kullanarak t_0 minimum ömür değerini yaklaşık olarak bulun:

$$t_0 = t_B - \frac{(t_C - t_B) \cdot (t_B - t_A)}{(t_C - t_B) \cdot (t_B - t_A)}$$

- f. Aşağıdaki formülü kullanarak t_i ilk ömür değerlerini, t'_i değerlerine dönüştürün:

$$t'_i = t_i - t_0$$

- g. Sıra ortancası, t_i ve t'_i değerlerini (artan sırayla) kaydedin.
- h. Weibull ihtimaliyat kâğıdındaki diyagramı kullanarak t'_i değerleri için uygun bir zaman ölçeği oluşturun.
- i. X eksenine üzerine t'_i değerlerini işaretleyin ve Y eksenine üzerine sıra ortancası değerlerini işaretleyin.
- j. Noktaların bir doğru üzerine denk gelip gelmediğini kontrol edin.
- k. Eğer noktalar yaklaşık olarak bir doğru üzerine denk gelmiyorsa, (a)'da çizilen enterpolasyon doğrusunu değiştirin ve noktalar bir doğru üzerine denk gelene kadar (b)'den (j)'ye kadar olan işlemleri tekrar edin.
- l. Noktalar bir doğru üzerine denk geldiğinde, (e)'de hesaplanan t_0 değeri minimum ömür değerini ifade eder. Bu değeri de kaydedin.

3.2.2. Ömür karakteristiği, Form parametresi, Ortalama ömür, B10, B50, B90 ömürleri

- a. (a)'dan (k)'ye kadar olan bütün işlemleri tekrar edin.
- b. Weibull ihtimaliyat kâğıdındaki diyagram üzerine, noktaları grafiksel yaklaşımla enterpolasyonla veya regresyon analizi ile birleştiren bir doğru çizin.
- c. Ömür karakteristiği
 - a. Grafikte %63,2'ye denk gelen Y koordinatından çıkan ve (b)'deki doğru ile kesişen bir yatay doğru çizin.
 - b. Kesişen noktadan X eksenine iz düşüm alıp θ değerini okuyun.

- c. Aşağıda verilen formül yardımıyla, Weibull dağılımının tahmini ömür karakteristiği değerini θ minimum ömür değerine t_0 bağlı olarak hesaplayın ve kaydedin.

$$\theta = \theta' + t_0$$

- d. Form parametresi

- Weibull dağılımının tahmini form parametresi değerini b minimum ömür değerine t_0 bağlı olarak şöyle bulun:
- Elde edilen weibull eğrisini paralel olarak taşıyarak %63,2 değerine getirip b ölçek çizgisinden değeri okuyun.
- Bu değeri kaydedin ve (1)'de anlatıldığı şekilde hasarı değerlendirin.

- e. Ortalama ömür

- Weibull dağılımının tahmini ortalama ömür değerini θ minimum ömür değerine t_0 bağlı olarak şöyle bulun:
- (d.b.)'de çizilen doğru ile P_μ ölçek doğrusunun kesişimini bulun.
- Y eksenin üzerindeki izdüşümü değerini kaydedin.
- Bir önceki paragrafta bulunan bu değerden yatay bir doğru çekerek (3.b.)'deki doğru ile kesişinceye kadar devam edin.
- Kesişme noktasında, X eksenine izdüşülen θ' değerini okuyun.
- Aşağıda verilen formülü kullanarak, ortalama ömrü θ hesaplayın ve kaydedin.

$$\theta = \theta' + t_0$$

- f. B10, B50, B90 ömürleri

- Weibull dağılımının B10, B50 ve B90 ömür değerini θ minimum ömür değerine t_0 bağlı olarak şöyle bulun:
- Y eksenindeki %10, %50 ve %90 noktalarından üç adet yatay doğru çekerek (3.b.)'deki doğru ile kesişinceye kadar devam edin.
- X eksenindeki izdüşümden $B'_{10}, B'_{50}, B'_{90}$ değerlerini bulun.
- Aşağıda verilen formülleri kullanarak B10, B50 ve B90 değerlerini bulup kaydedin:

$$B_{10} = B'_{10} + t_0$$

$$B_{50} = B'_{50} + t_0$$

$$B_{90} = B'_{90} + t_0$$

4. WEIBULL ANALİZİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR (4)

Bu çalışmada değerlendirilen deneysel çalışmalar, Prof. Necati TAHRALI tarafından, Münih Teknik Üniversitesi, Dişli Çarklar ve Mekanizmaları Araştırma Merkezinde (FZG-TUM) yapılmıştır.

Hidro-pülzator veya rezonans-pülzator kullanılan bu deneylerde dişli çarklar, dişdibinden kırılıncaya kadar, değişken yük uygulanmıştır. Pülzatordeki yük frekansı, dişli çarkın uygulamadaki dönme sayısına göre ayarlanabilmektedir. Deneylerde dişli çark, pülzator çeneleri arasındaki bir F_{\min} basma kuvveti ile gerdirilmekte ve sonra kuvvet, $F_{\min} - F_{\max}$ arasında değişmektedir.

Bu çalışmada yeniden değerlendirilen bu deney sonuçları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Dişdibi kırılması deneyleri (7)

Zaman Mukavemeti Bölgesi		Sürekli Mukavemet Bölgesi	
Gerilme σ (N/mm ²)	Ömür N (yük tek.)	Gerilme σ (N/mm ²)	Ömür N (yük tek.)
614	15.500	262	1.202.300
	16.400		
	16.800		
	16.900		
	18.300		
	18.500		
	18.800		
	19.800		
	20.200		
20.300			
490	59.500	249	1.600.000
	65.900		1.900.000
	83.100		8.750.000
	84.100		
428	125.900	248	1.458.700
	148.700		2.028.600
	162.900		2.346.900
	169.100		3.254.200
	169.600		5.527.400
	180.600		6.172.000
	184.100		6.523.000
	212.200		8.950.000
	225.000		
286.300			
304	446.300	235	3.170.000
	543.000		5.546.000
	567.100		5.600.000
	586.900		5.800.000
	625.100		6.800.000
	660.700		8.786.000
	721.900		11.123.000
	755.800		15.063.000
	976.600		

5. WEIBULL ANALİZİNE GÖRE KARAKTERİSTİK ÖMÜR, ORTALAMA ÖMÜR, B10, B50, B90 ÖMRÜ BULUNMASI

5.1. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 614 N/mm²

Çizelge 5.1. 614 N/mm² gerilme değerine göre sıra ortancaları
Eleman sayısı: n=10

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
614	15500	1700	1	6,7
	16400	2600	2	16,32
	16800	3000	3	25,92
	16900	3100	4	35,57
	18300	4500	5	45,19
	18500	4700	6	54,81
	18800	5000	7	64,43
	19800	6000	8	74,06
	20200	6400	9	83,68
	20300	6500	10	93,30

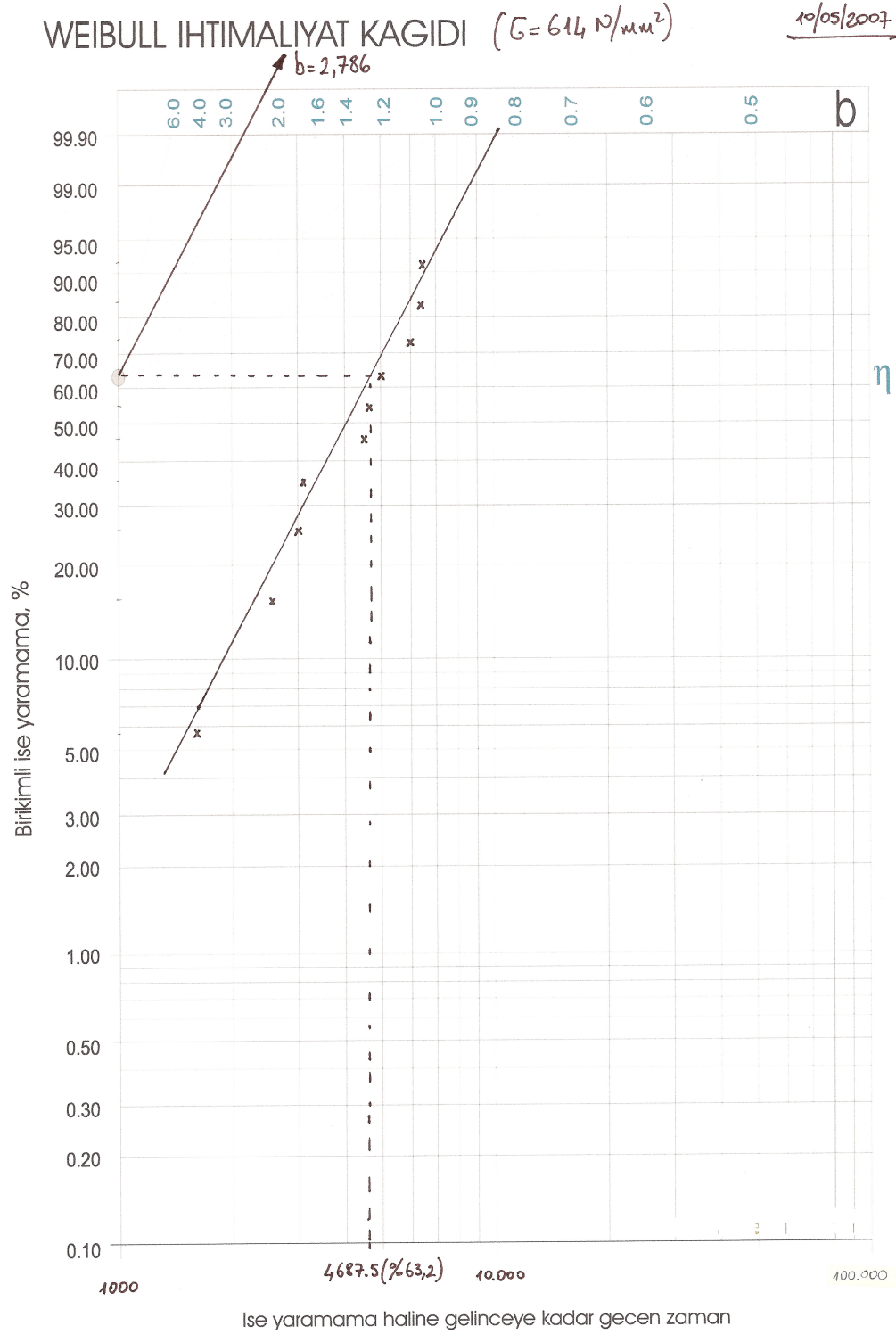
$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminde yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenirlilik için $N_{90} = 13800 + 5167 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{2,45}} = 15862,098$ çevrim

%50 güvenirlilik için $N_{50} = 13800 + 5167 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{2,45}} = 18249$ çevrim

%10 güvenirlilik için $N_{10} = 13800 + 5167 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,9} \right) \right]^{\frac{1}{2,45}} = 21062,4$ çevrim

N_0 değeri en düşük yük tekrarının %89'u elde edilerek pratik bir yaklaşımla hesaplanmıştır.

Şekil 5.1. 614 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

5.2. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 490 N/mm2

Çizelge 5.2. 490 N/mm2 gerilme değerine göre sıra ortancaları

Eleman sayısı: n=4

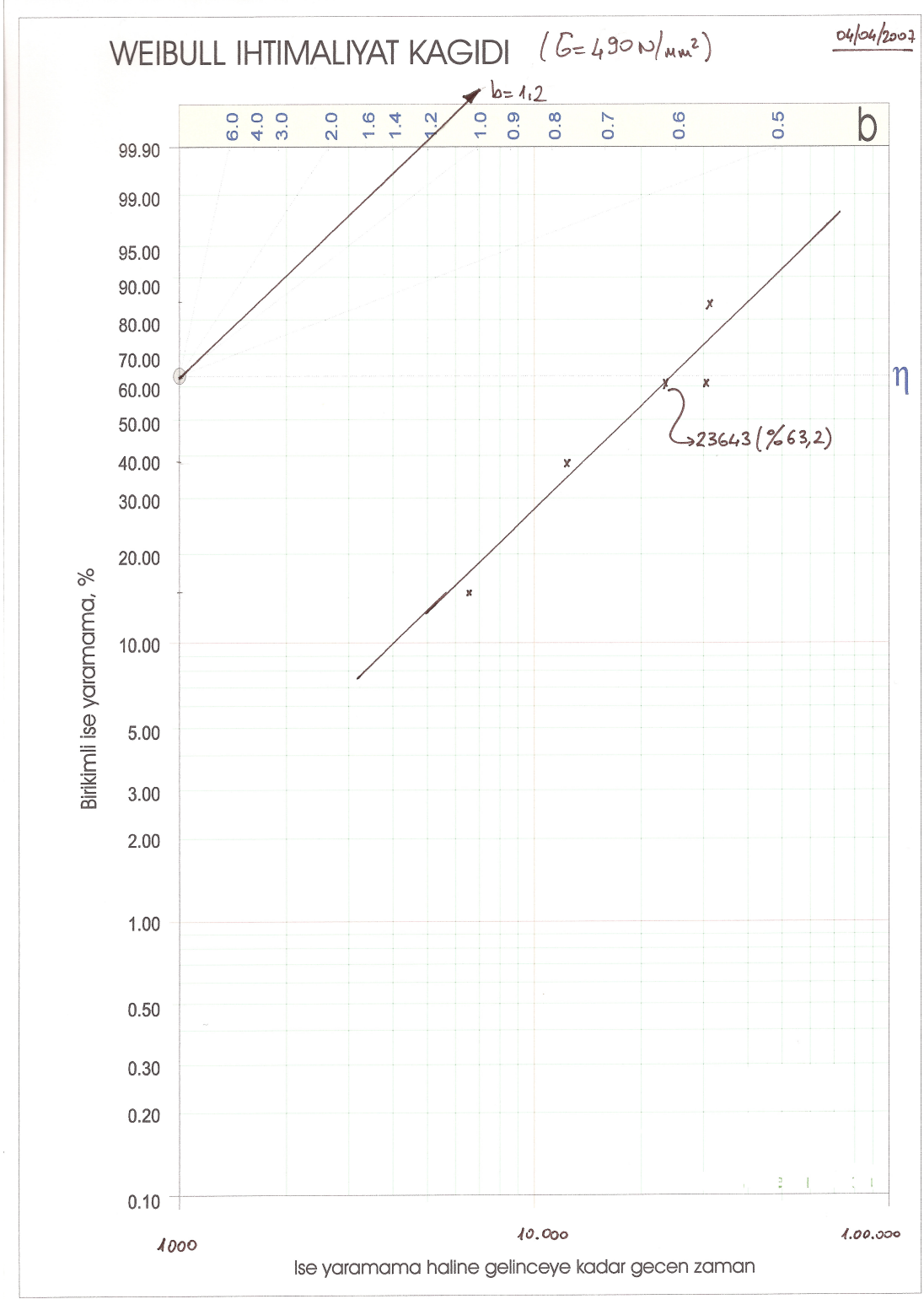
Gerilme [N/mm2]	Yük tekrarı (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
490	59500	6545	1	15,91
	65900	12945	2	38,64
	83100	30145	3	61,36
	84100	31145	4	84,09

$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminde yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenilirlik için $N_{90} = 52955 + 10769 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{1,85}} = 56145,8$ çevrim

%50 güvenilirlik için $N_{50} = 52955 + 10769 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{1,85}} = 61788,5$ çevrim

%10 güvenilirlik için $N_{10} = 52955 + 10769 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,9} \right) \right]^{\frac{1}{1,85}} = 69858,2$ çevrim

Şekil 5.2. 490 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

5.3. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 428 N/mm²

Çizelge 5.3. 428 N/mm² gerilme değerine göre sıra ortancaları

Eleman sayısı: n=10

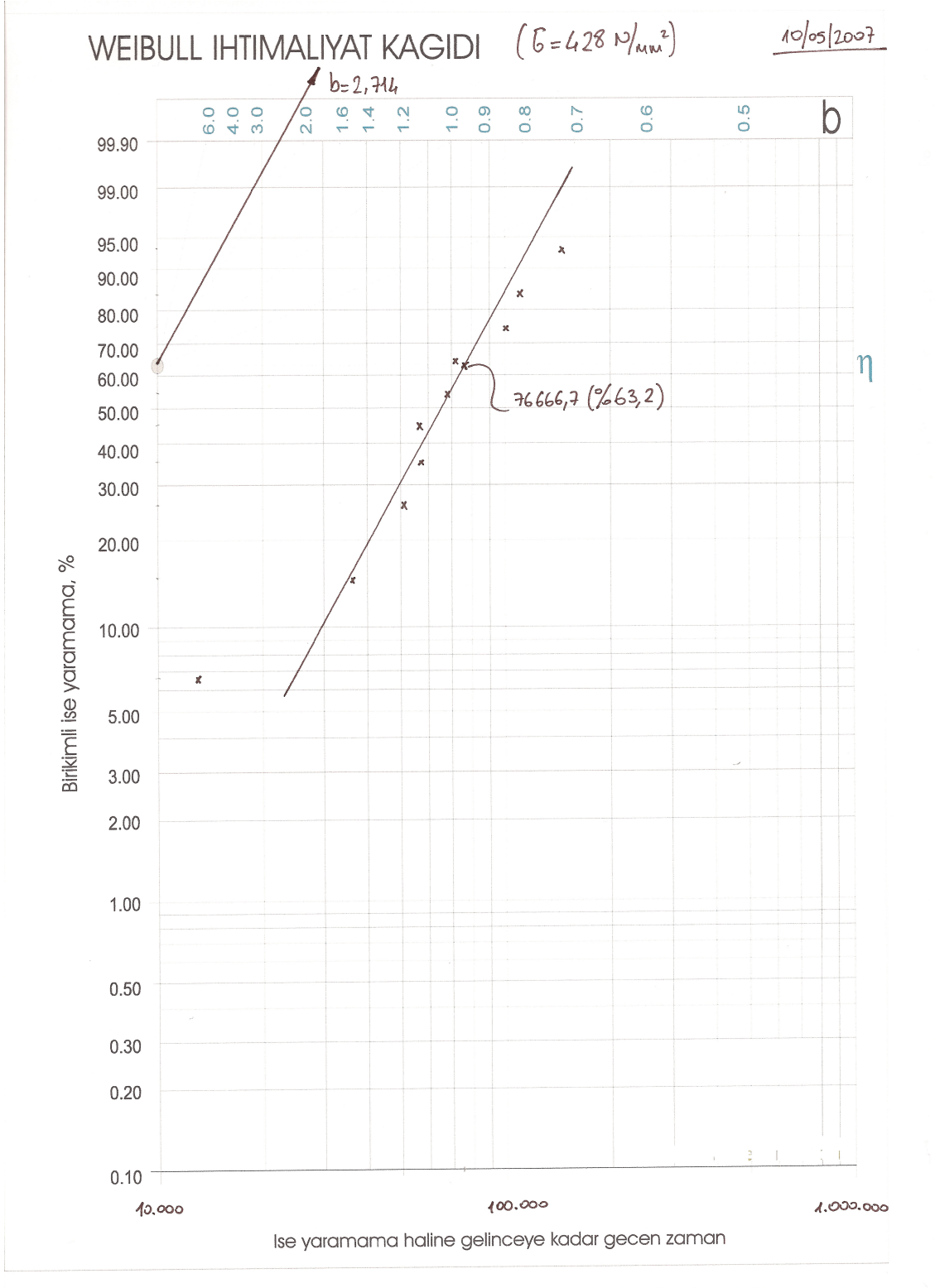
Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
428	125900	13900	1	6,7
	148700	36700	2	16,32
	162900	50900	3	25,92
	169100	57100	4	35,57
	169600	57600	5	45,19
	180600	68600	6	54,81
	184100	72100	7	64,43
	212200	100200	8	74,06
	225000	113000	9	83,68
	266300	154300	10	93,30

$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminde yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenirlilik için $N_{90} = 112000 + 76667 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{2,714}} = 145458,3$ çevrim

%50 güvenirlilik için $N_{50} = 112000 + 76667 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{2,714}} = 178982,14$ çevrim

%10 güvenirlilik için $N_{10} = 112000 + 76667 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,9} \right) \right]^{\frac{1}{2,714}} = 216248,64$ çevrim

Şekil 5.3. 428 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

5.4. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 304 N/mm²

Çizelge 5.4. 304 N/mm² gerilme değerine göre sıra ortancaları

Eleman sayısı: n=9

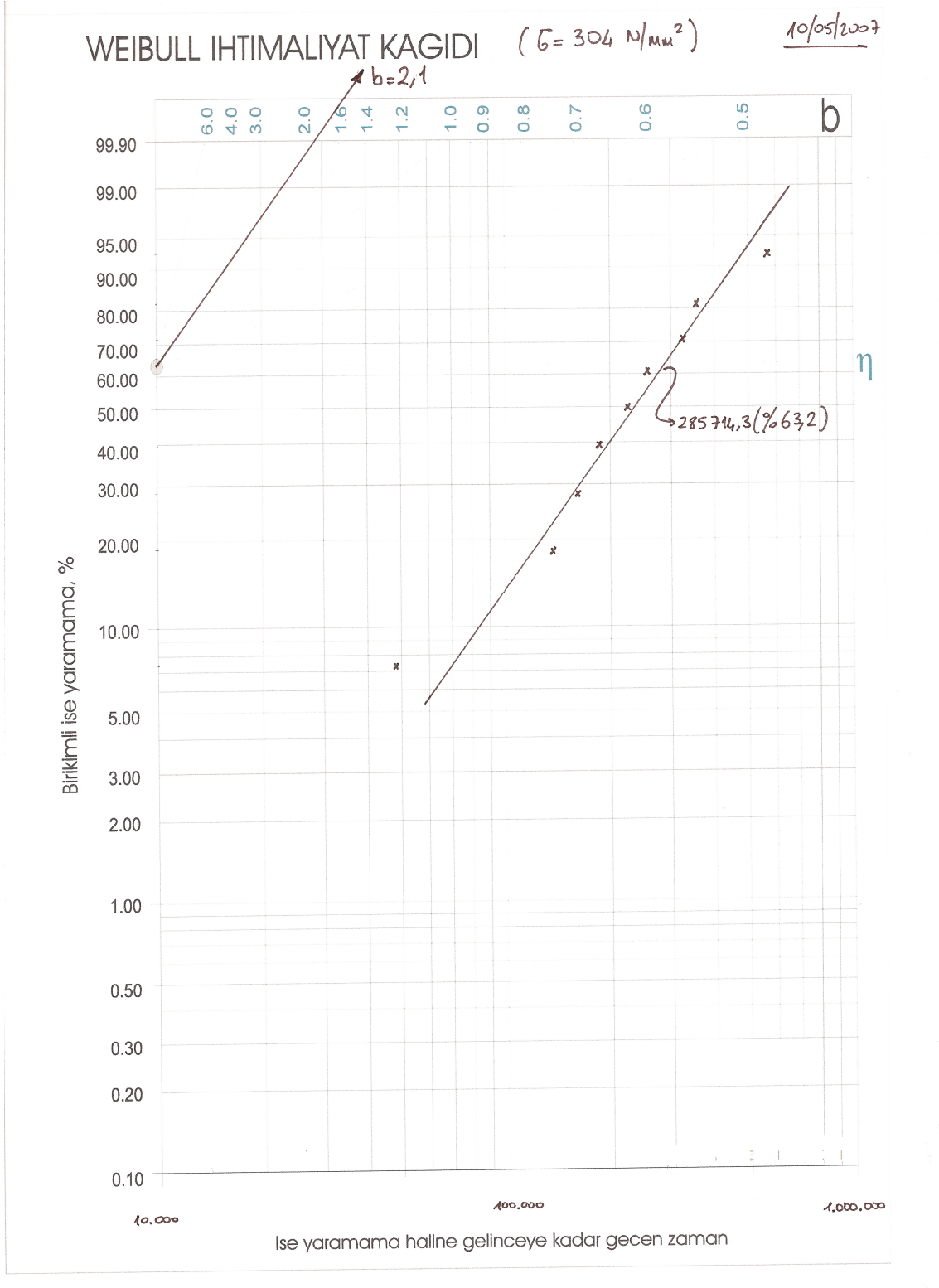
Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
304	446300	48300	1	7,4
	543000	145000	2	18,1
	567100	169100	3	28,7
	586900	188900	4	39,4
	625100	227100	5	50
	660700	262700	6	60,6
	721900	323900	7	71,3
	755800	357800	8	81,9
	976600	578600	9	92,6

$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminden yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenilirlik için $N_{90} = 398000 + 285714,3 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{2,1}} = 495845,4$ çevrim

%50 güvenilirlik için $N_{50} = 398000 + 285714,3 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{2,1}} = 637957,64$ çevrim

%10 güvenilirlik için $N_{10} = 398000 + 285714,3 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,9} \right) \right]^{\frac{1}{2,1}} = 823026,14$ çevrim

Şekil 5.4. 304 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

5.5. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 262 N/mm²

Çizelge 5.5. 262 N/mm² gerilme değerine göre sıra ortancaları

Eleman sayısı: n=5

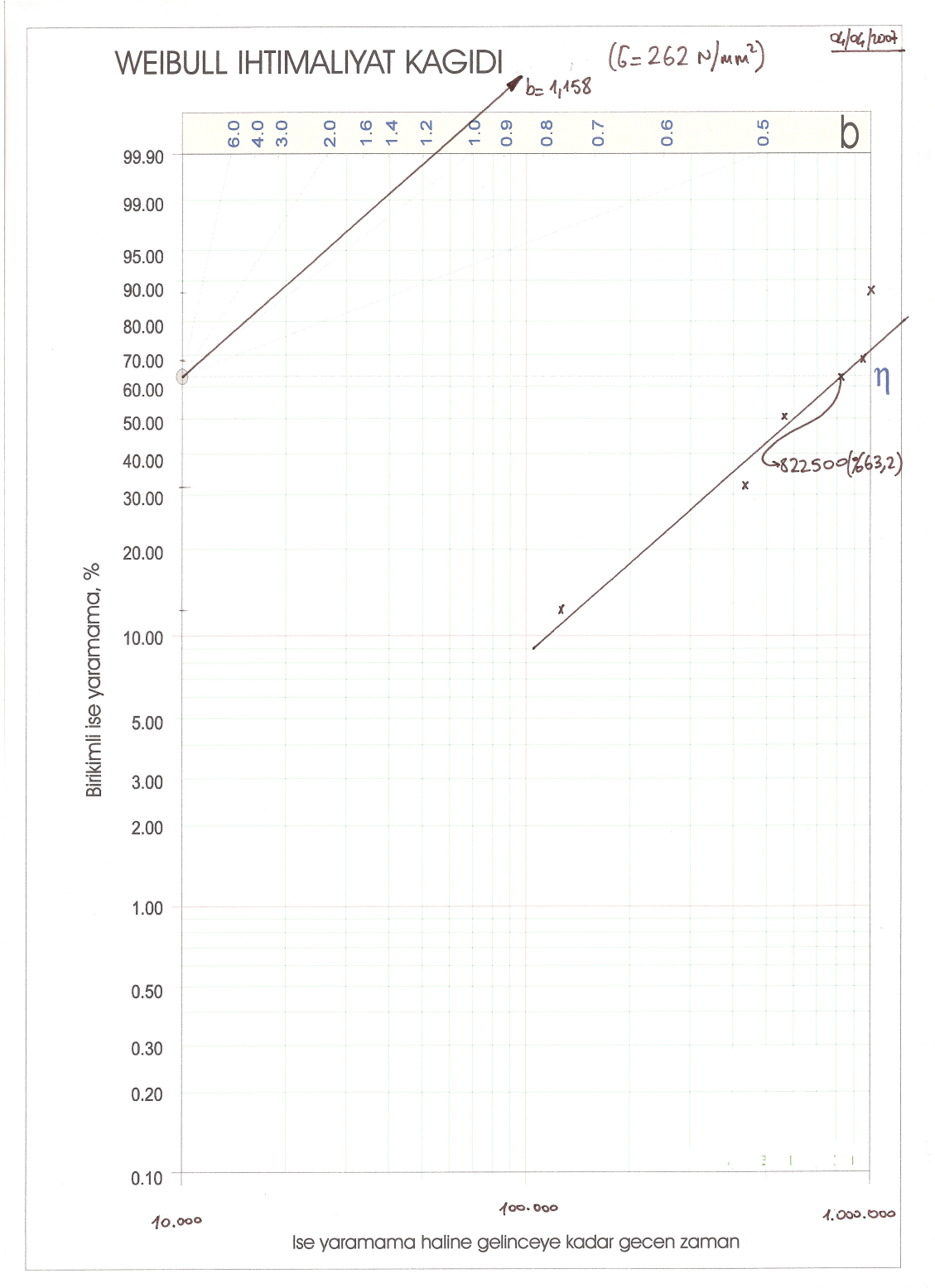
Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
262	1202300	132253	1	12,94
	1503200	433153	2	31,47
	1643500	573453	3	50,00
	2034300	964253	4	68,53
	2134900	1064853	5	87,06

$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminde yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenirlilik için $N_{90} = 1070047 + 822500 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{1,158}} = 1187851,46$ çevrim

%50 güvenirlilik için $N_{50} = 1070047 + 822500 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{1,158}} = 1669395,58$ çevrim

%10 güvenirlilik için $N_{10} = 1070047 + 822500 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,9} \right) \right]^{\frac{1}{1,158}} = 2760215,92$ çevrim

Şekil 5.5. 262 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

5.6. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 248 N/mm²

Çizelge 5.6. 248 N/mm² gerilme değerine göre sıra ortancalar

Eleman sayısı: n=11

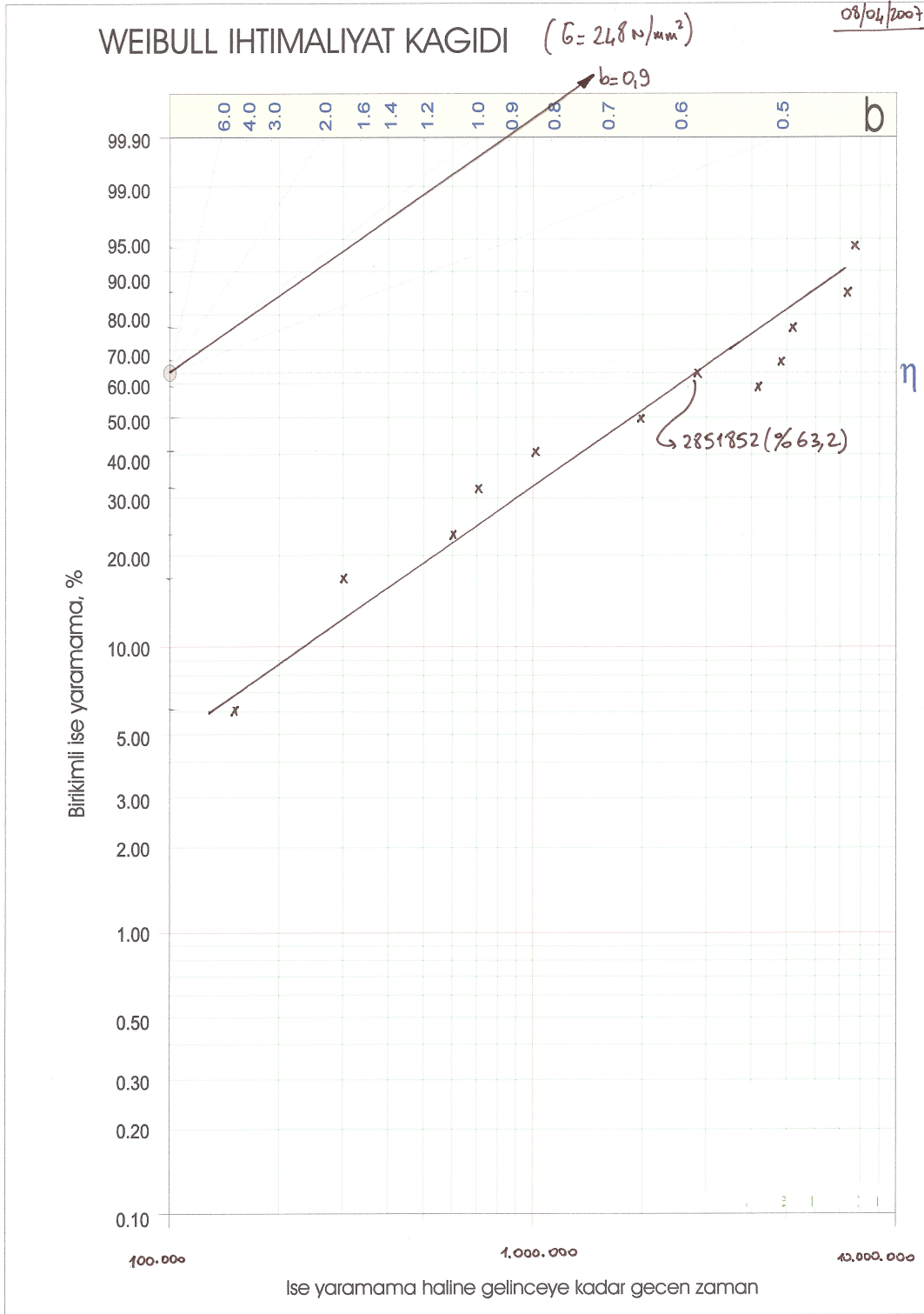
Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
248	1458700	160457	1	6,11
	1600000	301757	2	14,89
	1900000	601757	3	23,66
	2028600	730357	4	32,44
	2346900	1048657	5	41,22
	3254200	1955957	6	50,00
	5527400	4229157	7	58,78
	6172000	4873757	8	67,56
	6523000	5224757	9	76,34
	8750000	7451757	10	85,11
	8950000	7651757	11	93,89

$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminde yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenilirlik için $N_{90} = 1298243 + 2851852 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{0,9}} = 1532241,74$ çevrim

%50 güvenilirlik için $N_{50} = 1298243 + 2851852 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{0,9}} = 3196112,67$ çevrim

%10 güvenilirlik için $N_{10} = 1298243 + 2851852 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{0,9}} = 8502494,41$ çevrim

Şekil 5.6. 248 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

5.7. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 235 N/mm²

Çizelge 5.7. 235 N/mm² gerilme değerine göre sıra ortancaları

Eleman sayısı: n=8

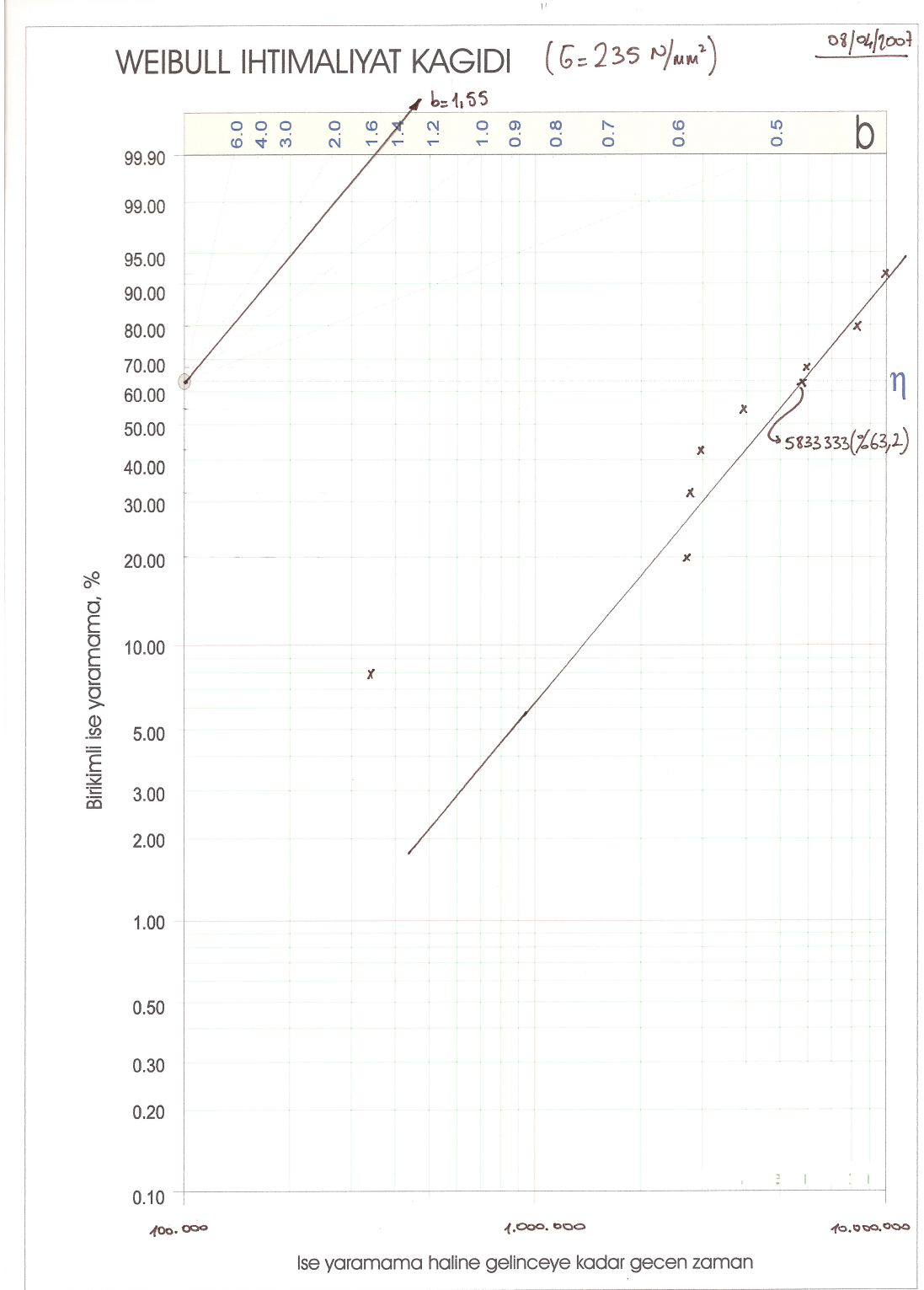
Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	$t - t_0$	Sıra no.	Sıra ortancası $M.R.(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$
235	3170000	348700	1	8,3
	5546000	2724700	2	20,21
	5600000	2778700	3	32,13
	5800000	2978700	4	44,04
	6800000	3978700	5	55,96
	8786000	5964700	6	67,87
	11123000	8301700	7	79,79
	15063000	12241700	8	91,70

$N = N_0 + \theta \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$ denkleminde yola çıkarak aşağıdaki değerler elde edilir:

%90 güvenirlilik için $N_{90} = 2821300 + 5833333 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,1} \right) \right]^{\frac{1}{1,55}} = 4187097$ çevrim

%50 güvenirlilik için $N_{50} = 2821300 + 5833333 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right) \right]^{\frac{1}{1,55}} = 7426235,15$ çevrim

%10 güvenirlilik için $N_{10} = 2821300 + 5833333 \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,9} \right) \right]^{\frac{1}{1,55}} = 12812193,06$ çevrim

Şekil 5.7. 235 N/mm² için elde edilen weibull ihtimaliyat kağıdı

Weibull ihtimaliyat kağıdına göre, deney yapılan her gerilme değeri için, Weibull eğimi (b) ve karakteristik ömür (θ) değerleri Çizelge 5.8.'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Gerilme-weibull eğimi-karakteristik ömür özet tablosu

Gerilme σ [N/mm^2]	Weibull eğimi b	Karakteristik ömür θ [yük tek.]
614	2,8	$4,7 \cdot 10^3$
490	1,2	$2,8 \cdot 10^4$
428	2,7	$7,7 \cdot 10^4$
304	2,1	$2,9 \cdot 10^5$
262	1,2	$8,2 \cdot 10^5$
248	0,9	$2,9 \cdot 10^6$
235	1,6	$5,8 \cdot 10^6$

6. WÖHLER ANALİZİNE GÖRE ORTALAMA ÖMÜR, B10, B50, B90 ÖMRÜ BULUNMASI

6.1. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 614 N/mm2

Çizelge 6.1. 614 N/mm2 gerilme değerine göre logaritmik ömürler
Eleman sayısı: n=9

Gerilme [N/mm2]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
614	15500	4,1903	1
	16400	4,2148	2
	16800	4,2253	3
	18300	4,2625	4
	18500	4,2672	5
	18800	4,2742	6
	19800	4,2967	7
	20200	4,3054	8
	20300	4,3075	9

$$\bar{N}_l = 4,2604$$

$$S_{N_l} = 0,0419$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,0419 + 4,2604 = 10^{4,2068} = 16099 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 4,2604 = 10^{4,2604} = 18214 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,0419 + 4,2604 = 10^{4,3140} = 20606 \text{ çevrim}$$

6.2. Süreli mukavemet bölgesi gerilme: 490 N/mm²

Çizelge 6.2. 490 N/mm² gerilme değerine göre logaritmik ömürler

Eleman sayısı: n=4

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
490	59500	4,7745	1
	65900	4,8189	2
	83100	4,9196	3
	84100	4,9248	4

$$\bar{N}_l = 4,8595$$

$$S_{N_l} = 0,0747$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,0747 + 4,8595 = 10^{4,7639} = 58063 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 4,8595 = 10^{4,8595} = 72360 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,0747 + 4,8595 = 10^{4,9551} = 90178 \text{ çevrim}$$

6.3. Süreli mukavemet bölgesinde gerilme: 428 N/mm²

Çizelge 6.3. 428 N/mm² gerilme değerine göre logaritmik ömürler

Eleman sayısı: n=10

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
428	125900	5,1000	1
	148700	5,1723	2
	162900	5,2119	3
	169100	5,2281	4
	169600	5,2294	5
	180600	5,2567	6
	184100	5,2651	7
	212200	5,3267	8
	225000	5,3522	9
	266300	5,4254	10

$$\bar{N}_l = 5,2568$$

$$S_{N_l} = 0,0930$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,0930 + 5,2568 = 10^{5,1378} = 137341 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 5,2568 = 10^{5,2568} = 180634 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,0930 + 5,2568 = 10^{5,3758} = 237575 \text{ çevrim}$$

6.4. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 304 N/mm²

Çizelge 6.4. 304 N/mm² gerilme değerine göre logaritmik ömürler

Eleman sayısı: n=9

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
304	446300	5,6496	1
	543000	5,7348	2
	567100	5,7537	3
	586900	5,7686	4
	625100	5,7959	5
	660700	5,8200	6
	721900	5,8585	7
	755800	5,8784	8
	976600	5,9897	9

$$\bar{N}_l = 5,8055$$

$$S_{N_l} = 0,0973$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,0973 + 5,8055 = 10^{5,6810} = 479734 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 5,8055 = 10^{5,8055} = 638999 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,0973 + 5,8055 = 10^{5,9300} = 851138 \text{ çevrim}$$

6.5. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 262 N/mm²

Çizelge 6.5. 262 N/mm² gerilme değerine göre logaritmik ömürler

Eleman sayısı: n=5

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
262	1202300	6,08	1
	1503200	6,177	2
	1643500	6,216	3
	2034300	6,308	4
	2134900	6,329	5

$$\bar{N}_l = 6,2222$$

$$S_{N_l} = 0,1013$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,1013 + 6,2222 = 10^{6,0925} = 1237371 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 6,2222 = 10^{6,2222} = 1668016 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,1013 + 6,2222 = 10^{6,3517} = 2247502 \text{ çevrim}$$

6.6. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 248 N/mm²

Çizelge 6.6. 248 N/mm² gerilme değerine göre logaritmik ömürle

Eleman sayısı: n=10

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
248	1458700	6,1640	1
	1600000	6,2041	2
	1900000	6,2788	3
	2028600	6,3072	4
	3254200	6,5124	5
	5527400	6,7425	6
	6172000	6,7904	7
	6523000	6,8144	8
	8750000	6,9420	9
	8950000	6,9518	10

$$\bar{N}_l = 6,5708$$

$$S_{N_l} = 0,3124$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,3124 + 6,5708 = 10^{6,1709} = 1482177 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 6,5708 = 10^{6,5708} = 3722203 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,3124 + 6,5708 = 10^{6,9707} = 9347597 \text{ çevrim}$$

6.7. Sürekli mukavemet bölgesinde gerilme: 235 N/mm²

Çizelge 6.7. 235 N/mm² gerilme değerine göre logaritmik ömürle

Eleman sayısı: n=8

Gerilme [N/mm ²]	Yük tekrarı t (artan şekilde)	LOG ömür	Sıra no.
235	3170000	6,5011	1
	5546000	6,7440	2
	5600000	6,7482	3
	5800000	6,7634	4
	6800000	6,8325	5
	8786000	6,9438	6
	11123000	7,0462	7
	15063000	7,1779	8

$$\bar{N}_l = 6,8446$$

$$S_{N_l} = 0,2090$$

%90 güvenirlilik için

$$N_l = -1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = -1,28 \cdot 0,2090 + 6,8446 = 10^{6,5771} = 3776591 \text{ çevrim}$$

%50 güvenirlilik için

$$N_l = \bar{N}_l = 6,8446 = 10^{6,8446} = 6991977 \text{ çevrim}$$

%10 güvenirlilik için

$$N_l = +1,28 \cdot S_{N_l} + \bar{N}_l = +1,28 \cdot 0,2090 + 6,8446 = 10^{7,1121} = 12944939 \text{ çevrim}$$

7. WEIBULL DAĞILIMI İLE WÖHLER DAĞILIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

%10, %50 ve %90 işe yaramama değerleri için, deney yapılan dişdibi gerilmesi değerlerindeki “N”ler hesaplanırsa, Çizelge 7.1.’deki sonuçlar elde edilir.

Tabloda, güvenilirlik (R=1-F) değerleri ayrı bir sütunda gösterilmiş ve aynı deney değerleri için, normal dağılımdan elde edilen sonuçlar da verilmiştir.

Çizelge 7.1. Weibull ve wöhler sonuçları kıyaslama çizelgesi

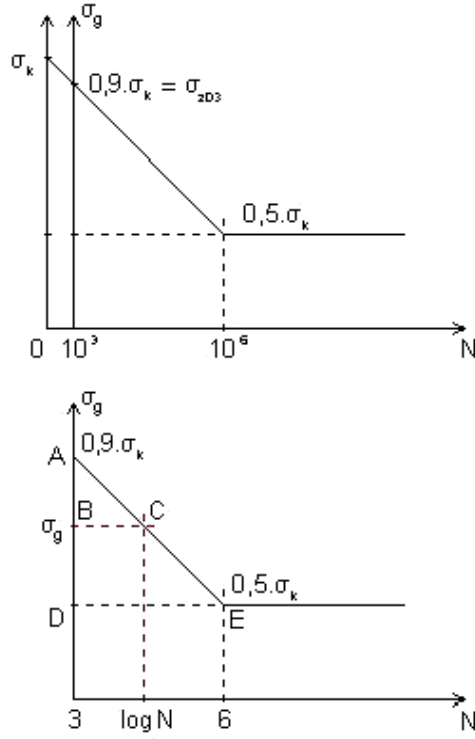
Gerilme $\sigma [N/mm^2]$			614	490	428	304	262	248	235
F=%10	R=%90	Weibull	15862	56146	145458	495845	1187851	1532242	4187097
		Wöhler	16099	58063	137341	479734	1237371	1482177	3776591
F=%50	R=%50	Weibull	18249	61789	178982	637958	1669396	3196113	7426235
		Wöhler	18214	72360	180634	638999	1668016	3722203	6991977
F=%90	R=%10	Weibull	21062	69858	216249	823026	2760216	8502494	12812193
		Wöhler	20606	90178	237535	851138	2247502	9347597	12944939

8. WÖHLER EĞRİLERİNİN PRATİK ÇİZİMİ (6)

Makine parçalarının dinamik zorlanmalarında mukavemet sınırlarının bilinmesi için, deneyler yapılması ve buna göre gerilme-ömür değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bir makine parçasının veya malzemenin bir test numunesi eğer çevrimli yüksek gerilmelere maruz kalırsa, parçayı tam hasara götüren bir yorulma çatlağı veya başka bir hasar oluşacaktır. Eğer test daha yüksek bir gerilme seviyesinde tekrarlanırsa, hasara kadarki çevrim adedi daha az olacaktır. Birkaç değişik gerilme seviyesinde yapılan bunun gibi testlerin sonuçları bir gerilme-ömür eğrisi elde etmek için çizilebilir. Bu eğri aynı zamanda da $\sigma - N$ eğrisi diye adlandırılır. Gerilme-ömür bağıntısını gösteren bu diyagramlara Wöhler diyagramları denilmektedir. Genelde bu eğrinin eksenleri gerilme genliği σ_g ile hasara kadarki ömür N ile isimlendirilir. (1,6)

Daha önce ele alınan birikimli hasar teorilerinin kullanılabilmesi için ilgilenilen malzemenin gerilme-ömür değerlerinin bilinmesi gereklidir. Eğer mevcutsa bu değerleri veren gerçek Wöhler eğrilerinin kullanılması uygun olur. Ancak bu eğrilerin bulunması için çok uzun testler yapılması gerektiğinden her zaman bu eğriler çıkarılamayabilir. Böyle bir durumda Wöhler eğrilerini pratik yoldan çıkarmak en iyi çözümdür.

Genel imalat çelikleri için, tam değişken eğilme haline ait Wöhler diyagramı pratik yoldan Şekil 8.1.'deki gibi çizilebilir. (9)



Sekil 8.1. Genel imalat çelikleri için Wöhler eğrisinin pratik çizimi [6]

σ_{zD3} , $N \times 10^3$ yük tekrarını gerçekleştiren gerilme değeridir. Yani statik yük, bütün ömür içinde, 10^3 defa tesir ettirilebilir. Genel imalat çelikleri için, çekme ve eğilmelerde bu değer $\sigma_{zD3} = 0,9 \cdot \sigma_k$ olarak hesaplanmıştır.

Herhangi bir gerilme genliği değerine karşılık N ömrünü bu eğri üzerinden okuyabilmek için şekildeki N yük tekrarındaki σ_g gerilmesini ele alalım. Burada ABC ve ADE üçgenlerine göre aşağıdaki şekilde benzer üçgen bağıntısı yazılarak bir denklem elde edilebilir.

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{AD}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{DE}}$$

$$\overline{AB} = 0,9 \cdot \sigma_k - \sigma_g$$

$$\overline{AD} = 0,9 \cdot \sigma_k - 0,5 \cdot \sigma_k = 0,4 \cdot \sigma_k$$

$$\overline{BC} = \log N - \log 10^3 = \log N - 3$$

$$\overline{DE} = \log 10^6 - \log 10^3 = 3$$

Olduğundan bu değerler yukarıdaki bağıntıda kullanılırsa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\frac{3,1294 \cdot \sigma_k - 3,4771 \cdot \sigma_g}{0,165 \cdot \sigma_k} + 3 = \log N$$

$$\log N = 21,9661 - 21,073 \cdot \frac{\sigma_g}{\sigma_k}$$

9. KÜMÜLATİF HASAR TEORİLERİ (6)

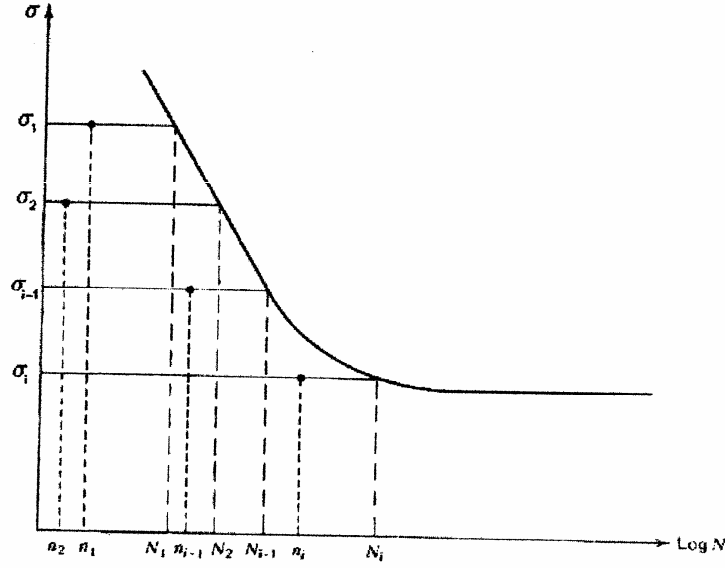
Bütün mühendislik uygulamalarındaki yorulma önemli bir kırılma şeklidir. Değişken gerilme genliği, bütün parça ömrü boyunca bir vesileyle değişebilir. Bu gerilme genliğindeki değişimler (spectrum loading) S-N eğrilerinin kullanımını imkânsız kılar. Çünkü bu eğriler sabit gerilme genlikleri için geliştirilmişlerdir. Sonuçta bu eğrileri kullanarak değişik yükleme şartlarındaki çalışmalarda iyi tahmin yapabilecekleri teorileri sahip olmak tasarımcılar için önemlidir.

Değişken yüklemelerle uğraşan bütün yorulma araştırmacıları tarafından bilinen kural, herhangi bir dairesel gerilme genliğindeki çalışma, yorulma hasarına sebep olur. Bu hasarın seviyesi, o gerilme genliğindeki yük tekrarı sayısına ve aynı zamanda o gerilme genliğinde hasarsız deney parçasının kırılmaya yol açması beklenen toplam yük tekrarına bağlıdır. Ek olarak şu da bilinir ki meydana gelen hasar kalıcıdır ve bir seri dâhilinde değişik gerilme genliklerindeki çalışma, toplam hasarın birikmesiyle sonuçlanacak ki bu da her müstakil gerilme seviyesindeki hasar artışı toplamına eşittir. Toplam birikmiş hasar, kritik bir değere ulaştığında, yorulma kırılması meydana gelir. Prensipte kavram basit olmasına rağmen, pratikte bazı zorluklarla karşılaşılır. Çünkü hasar miktarının gerilme genliğinin sebep olabileceği yorulma hasarı tahmini amacıyla ve değişken yüklemedeki kırılma tahmininin hasar artışına etkisini tahmin amacıyla tartışmaya sunulmuşlardır.

9.1. Lineer Birikimli Hasar Teorileri:

9.1.1. Palmgren-Miner Teorisi:

İlk birikimli hasar teorisi 1924 senesinde Palmgren tarafından yayınlanmıştır ve daha sonra Miner tarafından 1945 senesinde geliştirilmiştir. Halen geniş çapta kullanılan bu lineer teori, Palmgren-Miner hipotezi veya doğrusal hasar kuramı olarak anılır. Teori şekil 9.1 deki S-N eğrisiyle açıklanabilir.



Şekil 9.1 Her bir değişik gerilme seviyesi σ_i 'ye tekabül eden n_i çevrim operasyonlarının ve her σ_i için N_i toplam ömürün gösterildiği spektrum yüklemenin açıklanması (4)

Bu S-N eğrisini açıklayacak olursak, S_i sabit gerilme genliğindeki çalışma N_i devirde tümüyle hasar veya kırılma meydana getirecektir. N_i 'den küçük olmak şartıyla n_i kadarlık yük tekrarı süresince, S_i gerilme genliğinin uygulanması daha küçük bir hasar kesri meydana getirecektir. Buna D_i diyelim. D_i hasar kesri olarak anılır. Değişken yükleme durumunda çalışma halinde, S_i seviyesindeki gerilmelerin her biri için D_i hasar kesirleri oluşur. Bu hasar kesirleri toplamı 1 olduğunda kırılma meydana gelir. Böylece kırılmanın

$$D_1 + D_2 + \dots + D_i \geq 1 \quad 9.1$$

gerçekleştirdiğinde meydana geleceği tahmin edilir.

Palmgren-Miner hipotezine göre, herhangi S_i gerilme seviyesindeki hasar kesri o ana kadarki yük tekrarının, kırılmaya sebep olacak yük tekrarı sayısına oranıyla doğrudan orantılıdır. Yani

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad 9.2$$

Palmgren-Miner hipoteziyle, (9.2) ve (9.1) kullanılarak şöyle yazabiliriz:

Kırılma şu halde meydana gelir:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad 9.3$$

veya

$$\sum_{j=1}^i \frac{n_j}{N_j} \geq 1 \quad 9.4$$

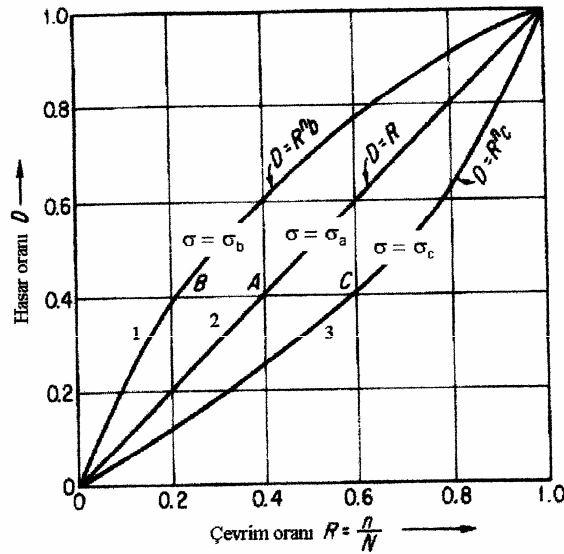
Bu Palmgren-Miner denklemlerinin veya doğrusal hasar kuramının tam tarifidir. Kullanımı basittir ve bu yüzden yaygın şekilde faydalanılır. Kabul edilmelidir ki, bu basitlik içinde bazı etkiler açıklanamaz ve kırılma tahmin hataları beklenebilir. Belki doğrusal teorinin en esaslı açığı şudur ki, hipotezde değişik gerilme seviyelerinin sırası göz ardı edilir ve hasarın, geçmiş gerilmelere bakılmaksızın, aynı oranda arttığı kabul edilir. Deneysel veriler göstermektedir ki değişik gerilme seviyelerinin parça üstünde mühim etkisi vardır ve aynı zamanda, uygulanan gerilme genliğindeki hasar oranı evvelki gerilmelerin bir fonksiyonudur. Mesela iki seviyeli bir testi, laboratuarda $S_1 > S_2$ olacak şekilde yapacak olursak ve 2 grup üzerinde bunu yapacak olursak, 1.grupta S_1 den sonra S_2 uygulansın, 2. Grupta ise S_2 den sonra S_1 uygulansın. Bu iki grup için, kırılma anında Miner'in toplamı farklıdır. Gerilmelerin azaldığı grupta, Miner toplamı 1'den küçüktür. Gerilmelerin arttığı grupta ise, bu toplam 1'den büyüktür. Gerilmelerin arttığı veya azaldığı çalışma durumları göz önüne alındığında, deneysel değerler sonucu olarak Miner toplamının $\frac{1}{4}$ ile 4 arasında değiştiği gözlenmiştir. Seri olarak farklı gerilme genliklerinin karışık bir şekilde kullanılması halinde, kırılma anında deneysel Miner toplamı 0,6-1,6 arasında değişme gösterir. Normal durumda birçok uygulama bu koşullarda çalıştığından Palmgren-Miner doğrusal hasar kuramının kullanımı, kırılma tahmininde genelde başarılıdır.

Gerçek hayatta makine ve benzeri elemanların değişken yüklemeye maruz kalmasıyla elde edilen sonuçlar, laboratuvar deneylerinin aksi şekildedir. Yani gerilmelerin arttığı hallerde Miner toplamı 1'den küçük, gerilmelerin azaldığı hallerde Miner toplamı 1'den büyüktür. Tamamen zıt bir eğilim görülmektedir. Bu görülen terslik tam açıklanamamıştır, ama şüphesiz ki yapısal bağlarda ve süreksizlik gösteren noktalardaki birikmiş gerilmelere bağlıdır. Önce yüksek gerilmelerin uygulanması ve ardından daha düşük gerilmelerin tatbiki, o alanın kendi gerilme yoğunluğunda, bir birikmiş aşırı gerilmeyle sonuçlanır ve daha düşük gerilmelerin sonra tatbiki, evvelki aşırı etki tesir etmişse, az hasar meydana getirir. Uygulanan aşırı gerilim bir yük tekrarı bile olsa, yorulma kırılması üstüne önemli bir etkiye sahiptir.

Zikredilen bütün problemlere rağmen, Palmgren-Miner doğrusal hasar teorisi, basitliği dolayısıyla sıkça kullanılır ve deneysel sonuçlar gösterir ki birçok birikimli hasar teorisi, kırılma tahmini güvenilirliğinde esaslı bir gelişme sağlayamaz. Birikimli hasarın işleyişinin daha iyi anlaşılması, diğer yayınlanan teorilerin incelenmesiyle mümkün olabilir.

9.2. Non Linear Birikimli Hasar Teorileri

Palmgren-Miner lineer hasar teorisi D hasar kesrinin n/N yük tekrarı sayıları oranına fonksiyonu olarak çizdirilirse, Şekil 9.2'de görülen 2 no.'lu doğru şeklinde düz bir çizgiyle sonuçlanır. Deneysel sonuçlar esas alınır, yorulma hasarı genelde lineer olmayan bir tarzda ilerler (Şekil 9.2'de 1 ve 3 no.lu eğrilerde görüldüğü gibi). Buna ek olarak, deneysel sonuçlar işaret eder ki, şekil 9.2'deki hasar eğrileri tam değişken gerilme genlik seviyelerinin fonksiyonudur (daha düşük eğriler daha düşük gerilme seviyelerine tekabül eder). Şekil 9.2'deki 1 no.lu eğri 2'ye göre daha yüksek gerilme seviyesini gösterir, 2 no.lu eğride 3'e göre daha yüksek gerilme seviyesini gösterir. 1 ve 3 eğrilerinin gerekliliğini vurgulamak için; Palmgren-Miner teorisinden 0,4 hasar kesri değeri için, $n/N=0,4$ buluruz ki aynı yük tekrarı oranı 1 eğrisi için 0,78, 3 eğrisi için 0,08 hasar kesri değerini verir. Yük tekrarı oranı ve hasar arasındaki non-linear ilişki için birçok yaklaşık teoriler öne sürülmüştür.



Şekil 9.2 Yorulma hasarı ve çevrim oranı arasındaki ilişki

9.2.1. Marko-Starkey birikimli hasar teorileri

İlk non-linear birikimli hasar teorisi Marco ve Starkey tarafından yayınlandı. Benzer bir hipotez Richart ve Newmark tarafından da yayınlandı. Marco Starkey teorisi aşağıdaki temellere dayanır.

- 1- Tam değişken gerilme genliği için, hasar eğrileri aşağıdaki biçimde tanımlanabilir.

$$D = \left(\frac{n}{N} \right)^{m_i} \quad 9.5$$

- 2- Belli sırada tam değişken gerilmelere maruz bırakılmış bir numune $D=1$ 'e ulaştığında kırılacaktır.
- 3- Kırılma veya %100 hasar, $\sum \frac{n}{N}$ kritik değere ulaştığında, meydana gelecektir. O da şu eşitlikten elde edilebilir.

$$\sum \frac{n}{N} \approx \int \frac{\left[1 + \frac{n_1}{N_2} + \frac{n_1}{N_3} + \dots + \frac{n_1}{N_i} \right] \cdot dD}{\left[1 + \frac{n_1}{N_2} \cdot r_2 \cdot D \cdot \left(\frac{r_2 - 1}{r_2} \right) + \dots + \frac{n_1}{N_i} \cdot r_i \cdot D \cdot \left(\frac{r_i - 1}{r_i} \right) \right]} \quad 9.6$$

Burada,

N_1, N_2, \dots, N_i = Tam değişken gerilmeler olan S_1, S_2, \dots, S_i 'lerin kırılmaya yol açacak ömür değerleri ki 1,2,.....,i gerilmelerin uygulanış sırasındır.

D = Hasar

r_i = Hasar eşitliğinde S_i ve S_1 'e tekabül eden iki üssün (m_i/m_1) oranıdır.

m_i = Hasar eşitliğinde i gerilme seviyesiyle anılan üs

Denklem 9.6'nın kullanımı zordur ve eşitlikteki sabitleri doğru olarak elde edebilmek için birçok deneysel verilere ihtiyaç vardır. Elverişli olması maksadıyla, teorinin kullanımı Şekil 9.2'ye dönülerek gösterilebilir ki D hasarı 3 ayrı gerilme seviyesi için yük tekrarı oranı n/N bağlı olarak çizilmiştir. Mesela σ_1 ve σ_3 için iki ayrı çalışma düşünelim. İlk olarak, σ_1 , $n/N=0,5$ yük tekrarı oranı için uygulanır. Sonra σ_3 , $D=1$ 'de kırılma gerçekleşinceye kadar

tatbik edilir. 2. Uygulama için, σ_3 , $n/N=0,5$ olana kadar tatbik edilir ve sonra σ_1 seviyesindeki gerilim kırılma meydana gelinceye kadar uygulanır.

İlk uygulama için, Şekil 9.2'den, kırılmayı verecek yük tekrarı oranı eğriden şöyle hesaplanır:

$$\sum \frac{n}{N} = \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_1} + \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_3} \quad 9.7$$

veya

$$\sum \frac{n}{N} = 0,5 + (1-0,98) \quad 9.8$$

veya

$$\sum \frac{n}{N} = 0,52 \quad 9.9$$

Aynı iki gerilmenin ikinci uygulaması için, kırılmayı verecek yük tekrarı oranı eğriden şöyle hesaplanır:

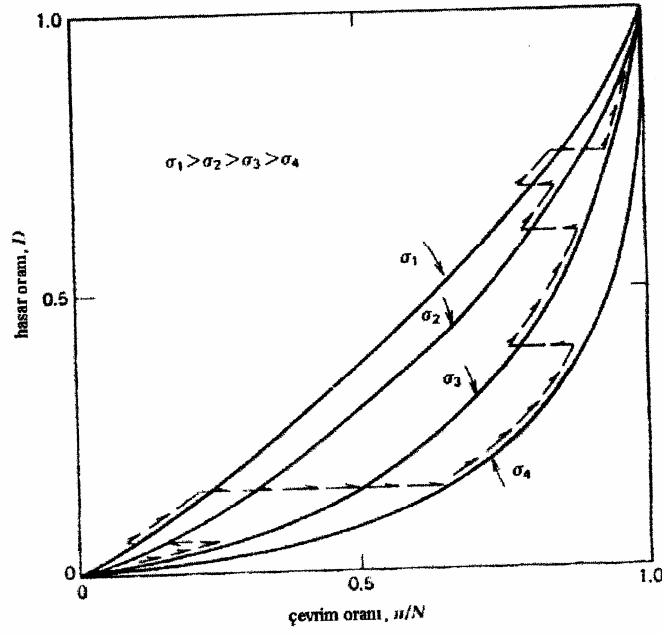
$$\sum \frac{n}{N} = \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_3} + \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_1} \quad 9.10$$

veya

$$\sum \frac{n}{N} = 0,5 + (1+0,03) \quad 9.11$$

veya

$$\sum \frac{n}{N} = 1,47 \quad 9.12$$



Şekil 9.3 Birçok değişik çevrimli gerilme sırası için çizilmiş hasar durumu. Yükleme sırası:

$$\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_4 - \sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3$$

σ_1 'in σ_3 'den büyük olduğu biliniyor. Açıkça görülmektedir ki, büyük gerilme önce uygulandığı takdirde toplam yük tekrarı oranı 1'den küçük olmaktadır ve düşük seviyeli gerilme önce uygulandığında toplam yük tekrarı oranı 1'den büyük olmaktadır. Bu sonuç ise laboratuvar testlerindeki deneysel sonuçlara uyum sağlamaktadır.

Bu teori özetlenirse, eğer kırılmaya tekabül eden yük tekrarı oranını bilmek istenirse önce D ve n/N'e bağlı her gerilme seviyesi için eğri çizilmelidir. Bu eğrilerin her biri denklem 9.5'teki deneye dayalı bir formülle ifade edilebilir. Sonra çalışma gerilmelerinin sırası tespit edilip bu sıra eğri üzerinde gösterilmelidir.

9.2.2. Henry birikimli hasar teorisi

Henry tarafından ortaya atılan bu teori yorulma hasarının artışına göre S-N eğrisinin taşınması esasına dayanır ve yorulma hasarı, yorulma sınırındaki azalmanın, hasarsız malzemenin orijinal yorulma sınırına oranı olarak tanımlanabilir.

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad 9.13$$

D=Hasar

E_0 =Orijinal yorulma sınırı

E=Hasardan sonra yorulma sınırı

Henry teorisinde düşünülür ki ilk S-N eğrisi, gerilmeye bağlı eşkenarlı bir hiperbol eğrisi gibi temsil edilebilir. Bu eğrinin asimptotu yük tekrarı oranı eksenine paralel ve E_0 'dan geçen bir doğrudur. Böylece S-N eğrisi için düşünülen eşitlik şöyledir.:

$$N = \frac{k_0}{S - E_0} \quad 9.14$$

N= S gerilme genliğinde kırılmaya sebep olacak yük tekrarı sayısı

S= Tam değişken gerilme

k_0 = Malzeme sabiti

E_0 = Orijinal yorulma sınırı

Bu gelişmede ima edilir ki, çalışmadan dolayı, yorulma sınırının altındaki gerilme seviyelerinde hiçbir hasar meydana gelmez. Ayrıca Henry'nin varsayımına göre hasardan sonra S-N eğrisi, gene şu şekilde eşkenarlı bir hiperbol tarafından temsil edilebilir:

$$N_r = \frac{k}{S - E} \quad 9.15$$

N_r = S gerilme genliğinde, kırılmaya sebep olacak kalan yük tekrarı sayısı

S= Tam değişken gerilme

k= Malzeme sabiti

E= Hasardan sonra yorulma sınırı (E_0 'dan küçük)

Bazı deneylerden alınan verilere dayanarak ve bazı ilmi yaklaşımlarla, Henry şunun yaklaşık olarak doğru olduğunu kabul etmiştir:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{E}{E_0} \quad 9.16$$

Evvelki kabuller temel alınarak, Henry tarafından hasar ilişkisi şöyle geliştirilmiştir: Eğer S gerilme genliğinde n yük tekrarı sayısı numuneye uygulanırsa, o gerilme genliğinde, kalan şöyle bulunur:

$$N_r = N - n \quad 9.17$$

Burada N, S gerilme genliği konu olduğunda, hasarsız malzemenin kırılmaya uğraması için öngörülen yük tekrarı sayısıdır. (9.15) ve (9.17)'yi birleştirirsek:

$$N - n = \left(\frac{k}{S - E} \right) \quad 9.18$$

ve N'e bölünürse:

$$1 - \frac{n}{N} = \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{k}{S - E} \right) \quad 9.19$$

(9.19)'da, N (9.14)'den çekilirse:

$$1 - \frac{n}{N} = \frac{S - E_0}{k_0} \cdot \left(\frac{k}{S - E} \right) \quad 9.20$$

veya

$$1 - \frac{n}{N} = \frac{k}{k_0} \cdot \frac{(S - E_0)}{(S - E)} \quad 9.21$$

Sonra, (9.16)'daki kabulü kullanılırsa:

$$1 - \frac{n}{N} = \frac{E}{E_0} \cdot \frac{(S - E_0)}{(S - E)} \quad 9.22$$

E buradan çözülürse:

$$E = \frac{S \cdot \left(1 - \frac{n}{N} \right)}{\left(\frac{S - E_0}{E_0} \right) + \left(1 - \frac{n}{N} \right)} \quad 9.23$$

(9.23) eşitliği Henry teorisinin kullanışlı bir formudur. Bu eşitlikte s gerilme genliğinin n devri kadar tesirinden sonraki E yorulma sınırı elde edilir. Burada N, S gerilme genliğindeki toplam ömürdür ve E_0 'da orijinal yorulma sınırıdır. (9.23) eşitliği kolaylıkla, (9.3) eşitliği kullanılarak hasar eşitliğine çevrilebilir.

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \frac{S \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right)}{(S - E_0) + E_0 \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad 9.24$$

$$D = \frac{\left(\frac{n}{N}\right)}{1 + \left(\frac{E_0}{S - E_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad 9.25$$

D= Hasar kesri

n= S gerilme genliğinde uygulanan yük tekrarı sayısı

N= Hasar yük tekrarı sayısı

E_0 = Orijinal yorulma sınırı

S= Uygulanan gerilme genliği

Henry teorisi, uygulanan gerilme seviyeleri sırasıyla (9.23) ve (9.24)'e uygulanırsa, farklı gerilme seviyelerinin serileri için genişletilebilir. Bu zincirleme izleme, E_0 değeri, her gerilme genliğinin uygulanmasından sonra yenilenmelidir. Böylece, yorulma sınırı için değer serileri E_0, E_1, E_2, \dots olarak elde edilir. Burada E_0 orijinal yorulma sınırı, E_1 , S_1 gerilme seviyesinin n_1 yük tekrarı etkimesinden sonraki yorulma sınırı, v.s. Böylece biz, biriken hasara karşılık, azalan yorulma sınırını tahmin edebiliriz. Henry teorisinin kullanışlı bir şekli şöyledir: Bütün S-N eğrileri geçilir, 1.devirde S_u gerilmesi işaretlenir. Bu nokta, 10^6 yük tekrarı için hesaplanan E değerine doğru bir çizgiyle bağlanır. Bu yarı logaritmik diyagramda gerçekleştirilir ve her hasar seviyesindeki S-N eğrisi elde edilir.

9.2.3. Gatts birikimli hasar teorisi

Henry ve Gatts teorileri arasında birçok benzerlikler vardır. Gatts şunu savunmaktadır ki, yorulma dayanımı ve yorulma sınırı gerilmenin uygulandığı her devirde değişir ve bu değişme gerilme genliğinin bir fonksiyonu ile orantılıdır. Bu kabul sonucu eşitlik şöyle bir hal alır:

$$\frac{dS_q}{dn} = -k \cdot D(S) \quad 9.26$$

S_q = Dayanım anlık değeri

n = uygulanan gerilme devirlerinin sayısı

k = oranlılık sabiti

$D(S)$ = hasar fonksiyonu, gerilmenin bir fonksiyonudur.

(9.26)'dan yararlanırsak, anlaşılabilir ve doğru bir $D(S)$ hasar fonksiyonu tanımlamak gereklidir. Gatts yayınlamıştır ki üslü fonksiyon olarak düşünülen $D(S) = -k \cdot (S - S_e)^\rho$, (9.26) eşitliğini şu hale getirir:

$$\frac{dS_q}{dn} = -k \cdot (S - S_e)^\rho \quad 9.27$$

S_e = yorulma sınırı

k, ρ = deneye dayalı sabitlerdir

Bu sabitleri elde edebilmek için, Gatts şöyle hareket etmiştir. Hasar fonksiyonu gerinim enerjisiyle ilişkilendirilir ki o da gerinim ve yorulma sınırını aşan gerilmeyle ifade edilir. (9.27) şöyle yazılabilir:

$$\frac{dS_q}{dn} = -k' \cdot \int_{\epsilon_e}^{\epsilon} (\sigma_\epsilon - S_e) \cdot d\epsilon \quad 9.28$$

$\sigma_\epsilon = E' \cdot \epsilon$ kabulünü yaparsak, (9.28) şöyle yazılabilir:

$$\frac{dS_q}{dn} = -k_1 \cdot \int_{S_e}^S (\sigma - S_e) \cdot d\sigma \quad 9.29$$

S_e bir sabit ise (n. yük tekrarı boyunca bu çok az değişeceğinden) bütünleşme elde edilir:

$$\frac{dS_q}{dn} = -k \cdot (S - S_e)^2 \quad 9.30$$

$S_e = C \times S_q$ olarak kabul edilir ki C malzeme sabitidir. S_e 'yi (9.30)'da yerine konulursa:

$$\frac{dS_q}{dn} = -k \cdot (S - C \cdot S_q)^2 \quad 9.31$$

veya

$$\frac{dS_e}{dn} = -k \cdot (S - S_e)^2 \quad 9.32$$

S_{e0} orijinal yorulma sınırimız olarak tanımlanırsa. (9.32) bütünleşmiş edilerek:

$$k \cdot n = \frac{1}{S - S_{e0}} - \frac{1}{S - S_e} \quad 9.33$$

S_{e0} = yorulma sınırı (n=0)

S_e = yorulma sınırı, değişken gerilmenin fonksiyonu, sabit değil

S= uygulanan değişken gerilmenin genliği

n= uygulanmış gerilmenin yük tekrarı sayısı

aynı zamanda ortaya konan şudur ki, sınır şartları şöyle kurulabilir:

$$\begin{aligned} S_q = S_u &\rightarrow n = 0 \\ S_q = S &\rightarrow n = N \end{aligned} \quad 9.34$$

Neticede, S-N eğrisi için düşünülen eşitlik (9.33) ve (9.34)'den şöyle bulunur:

$$k \cdot N = \frac{1}{S - S_{e0}} - \frac{1}{S(1-C)} \quad 9.35$$

Gatts'ın teorisinde sonraki adım, S-N eğrilerinin S-N eğrilerinin düzeltilmiş (normalize edilmiş) şekillerini oluşturmaktır. Bunu başarmak maksadıyla, aşağıdaki tanımlamalar yapılır.

$\gamma = \frac{S}{S_{e0}}$ = gerilme genliği oranı, gerilme genliğinin orijinal yorulma sınırındaki değere oranıdır.

$\beta = \frac{n}{N}$ = yük tekrarı oranı, uygulanmış yük tekrarı sayısının, S gerilme genliğindeki yorulmaya yol açacak yük tekrarı sayısına oranı

$\gamma_e = \frac{S_e}{S_{e0}}$ = yorulma sınırı oranı, o andaki yorulma sınırı değerinin, orijinal yorulma sınırına oranı

$L = \frac{N}{N^*}$ = ömür oranı, kırılmaya yol açacak gerilme genliği oranı γ 'deki N yük tekrarı sayısının, kırılmaya yol açacak anlık referans değeri $\gamma(\gamma^*)$ 'deki N yük tekrarı sayısına oranı

Bu tanımlamalarla (5.35) şöyle yazılabilir. ($K = k \times S_e$)

$$K \cdot N = \frac{1}{\gamma-1} - \frac{1}{\gamma \cdot (1-C)} \quad 9.36$$

(9.36) eşitliği, γ^* 'in herhangi anlık referans değeri için şöyle elde edilebilir:

$$K \cdot N^* = \frac{1}{\gamma^*-1} - \frac{1}{\gamma^* \cdot (1-C)} \quad 9.37$$

(9.36)'yi (9.37)'e bölersek

$$K^* \cdot L = \frac{1}{\gamma-1} - \frac{1}{\gamma \cdot (1-C)} \quad 9.38$$

K^* şöyle ifade edilebilir:

$$K^* = \frac{1}{\gamma^*-1} - \frac{1}{\gamma^* \cdot (1-C)} \quad 9.39$$

Şu noktayı tebarüz ettirmelidir ki, (9.30) ölçülendirilmemiş bir eşitliktir ve gerilme genliği oranı γ 'yi ömür oranı L 'ye bağlar. Bu eşitlik, birçok malzemenin yorulma verilerinin $\gamma-L$ eğrisi üzerine çizilmesine olanak tanır ki burada C sabiti bütün malzemeler için aynı ve referans değeri γ^* bütün çizilen malzemeler için aynı tutulur. Birçok çelik için orijinal yorulma sınırı S_{e0} , kopma gerilmesinin yarısı kadardır ki, bu da (1-31) eşitliğini $C=0,5$ olarak ortaya çıkarır. (9.38) ifadesinde elde edilen bize yararlı sonuç; yeni bir alaşımın S-N eğrisi çabucak iyi bir yaklaşımla hesaplanabilir ki sadece deneysel olarak S_{e0} ve N^* değerlerini elde etmek ve sonra, $\gamma-L$ eğrisini (9.38)'dan elde etmek kafidir.

Sonuçta, Gatts tarafından yayımlanan hasar ifadesi, (9.33) ve (9.35)'yi birleştirerek yazılır. (β ve γ için verilen tanımlamaları kullanarak)

$$\gamma_e = \gamma \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta}{1-C} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot (1-\beta)} \right] \quad 9.40$$

Bu ifadeyi (9.23)'le karşılaştırsak, görülebilir ki, Gatts ve Henry hasar eşitlikleri birbirine çok yakındır. Gerçekten, (5.40)'de, $(S_e)_N = C \times S$ yerine, $(S_e)_N = 0$ kabulü yapılırsa (9.40) şu hali alacaktır:

$$\gamma_e = \frac{\gamma \cdot (1-\beta)}{\gamma-\beta} \quad 9.41$$

ki bu da Henry teorisinin (9.23) ifadesine eşdeğerdir.

9.2.4. Corten-Dolan birikimli hasar teorisi

Bu teori 6 kabulü esas almaktadır ki bunlar deneysel verilerce desteklenmektedir:

- 1- Hasarın oluşması için bir başlangıç periyodu istenir.
- 2- Eleman boyunca yayılan mikroskop altı hasar boşlukları gerilme arttıkça artar.
- 3- Verilen gerilme genliğindeki hasar, yük tekrarı sayısının artışıyla beraber, artan bir oranda artar.
- 4- Yük tekrarı sayısı başına hasar, gerilme arttıkça artar.
- 5- Verilen elemanda kırılmaya sebep olan toplam hasar, uygulanan bütün gerilme toplulukları için sabittir.

- 6- Hasar, uygulanan gerilme hasara yol açacak gerilmeden düşük olsa bile, o gerilmede yayılmaya devam eder.

Corten ve Dolan teorilerini basitçe geliştirmek için ilk planda başlangıç periyodu 0 kabul edilir.

$$N' = 0 \quad 9.42$$

N' = başlangıç periyodu

Daha sonra, oluşabilecek en küçük hasar boşluğu başına hasarın uygulanan yük tekrarı sayısı ilişkisi şöyle kabul edilir.

$$D' = r \times N^a \quad 9.43$$

D' = oluşabilecek en küçük hasar boşluğu başına hasar

r = hasar yayılma oranı katsayısı, gerilme seviyesinin bir fonksiyonudur.

N = uygulanan gerilmenin yük tekrarı sayısı, hasara bağlı

a = hasar yayılma üsteli

(9.43)'den, toplam hasar boşluğu sayısı m ile tanımlanırsa, toplam yorulma hasarı D şöyle verilir.

$$D = m \cdot D' = m \cdot r \cdot N^a \quad 9.44$$

Mesela, 2 farklı, sabit S_1 ve S_2 gerilme genliğindeki hasar D_f ise:

$$D_f = m_1 \cdot r_1 \cdot N_1^{a_1} = m_2 \cdot r_2 \cdot N_2^{a_2} \quad 9.45$$

Bu eşitlik temel alınarak, D birikimli hasar kesri yük tekrarı sayısının fonksiyonu olarak yazılabilir. 2 eğri, S_1 ve S_2 gerilmelerini temsil etmektedir. Bu teoremin gelişimini göstermek amacıyla, basit bir 2 seviyeli gerilme programı bloklar halinde uygulansın.

S_1 = büyük olan gerilme genliği

S_2 = küçük olan gerilme genliği

n_r = tekrar edilen bloklarda toplam yük tekrarı sayısı

$\alpha = n_2$ yük tekrarının uygulanan gerilme bloğu içindeki yüzdesi

Bu gerilmelerin tekrar eden bloklar halinde uygulanışı hasar eğrisinde gösterilebilir.

Şunu belirtmekte yarar var ki, bir kere başladı mı, hasarın yayılması S_1 ve S_2 gerilmelerinin ikisinde de devam eder. Teorinin geri kalanında şu kabul de yapılmalıdır ki, S_1 gerilmesinin sebep olduğu m_1 hasar boşluğu sayısı iki gerilme seviyesinde de yayılacaktır. Ve toplam hasar, S_1 gerilmesindeki hasar artışı artı, S_2 gerilmesindeki hasar artışıdır. Hasar artışlarını toplamının bir kolay yolu, S_2 gerilmesinin S_1 deki gerçek yük tekrarı sayısı $n_r(1-\alpha)$ olduğu halde S_1 deki eşdeğer yük tekrarı sayısını bulmaktır. Bu başarılı olduğu takdirde, S_1 eğrisi üzerinde çalışmak mümkün olacaktır.

ΔD hasar artışı, S_1 veya S_2 eğrisinin herhangi bir takip eden bir prosesle ifade edilebilir.

ΔN 'nin küçük değerleri için, buna bağlı ΔD hasar artışı, hasar eğrisinin eğimi ve yük tekrarı artışı cinsinden yazılabilir. ΔN 'nin küçük değerleri için,

$$\frac{\Delta D}{\Delta N} = \text{hasar eğrisinin eğimi} \quad 9.46$$

Hasar eğrisinin eğimi (9.44)'in devire bağlı türevinden elde edilir.

$$\text{Hasar eğrisinin eğimi} = \frac{d}{dN} (m \cdot r \cdot N^a) \quad 9.47$$

veya

$$\text{Hasar eğrisinin eğimi} = \frac{d}{dN} (m \cdot r \cdot a \cdot N^{a-1}) \quad 9.48$$

(9.46) (9.48) ile birleştirilse,

$$\frac{\Delta D}{\Delta N} = (m \cdot r \cdot a \cdot N^{a-1}) \quad 9.49$$

(9.49) temel alınarak, hasar artışı şöyle yazılabilir.

$$\Delta D = m_1 \cdot r_1 \cdot a_1 \cdot N_d^{a_1-1} \cdot \Delta N_1 \quad 9.50$$

Benzer şekilde, c noktasında S_2 eğrisi üzerindeki hasar artışı şöyle yazılabilir:

$$\Delta D = m_1 \cdot r_2 \cdot a_2 \cdot N_e^{a_2-1} \cdot \Delta N_2 \quad 9.51$$

Şu belirtilmelidir ki, yayılan hasar boşluklarının sayısı için m_2 yerine m_1 kullanılmıştır. Çünkü m_1 sayısının oluşumuna S_1 gerilmesi sebep olmuştur ve bu yayılmanın S_2 de devam ettiği farz edilir. Şimdi, ΔD hasar artışı S_1 ve S_2 gerilmelerinden herhangi birinde aynı olduğundan, (9.50) ve (9.51) eşitlenebilirler.

$$m_1 \cdot r_1 \cdot a_1 \cdot N_d^{a_1-1} \cdot \Delta N_1 = m_1 \cdot r_2 \cdot a_2 \cdot N_e^{a_2-1} \cdot \Delta N_2 \quad 9.52$$

Bu eşitlik, ΔN_1 için çözümlürse:

$$\Delta N_1 = \left(\frac{a_2}{a_1} \right) \cdot \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \cdot \frac{N_e^{a_2-1}}{N_d^{a_1-1}} \cdot \Delta N_2 \quad 9.53$$

Aynı zamanda (9.44)'den, e ve d' deki hasar aynı olduğundan

$$D = m_1 \cdot r_1 \cdot N_d^{a_1} = m_1 \cdot r_2 \cdot N_e^{a_2} \quad 9.54$$

buradan

$$N_d = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\frac{1}{a_1}} = N_e^{\frac{a_2}{a_1}} \quad 9.55$$

(9.55)'yi (9.53)'e eklersek,

$$\Delta N_1 = \left(\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot \left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot \frac{N_e^{a_2-1}}{\left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\frac{1}{a_1}} \cdot N_e^{\frac{a_2}{a_1}}\right]^{a_1-1}} \cdot \Delta N_2 \quad 9.56$$

sonuçta

$$\Delta N_1 = \left(\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\frac{1}{a_1}} \cdot N_e^{\left(\frac{a_2}{a_1}\right)-1} \cdot \Delta N_2 \quad 9.57$$

Eşitliği basitleştirmek için 2 tanım yapalım:

$$A = \frac{a_2}{a_1} \quad 9.58$$

$$R = \frac{r_2}{r_1} \quad 9.59$$

bu tanımlamalarla, (9.57) şöyle yazılabilir:

$$\Delta N_1 = A \cdot R^{\frac{1}{a_1}} \cdot N_e^{A-1} \cdot \Delta N_2 \quad 9.60$$

(9.60), (9.44) ile kullanılırsa, sonra bütün hasar artışlarının toplamı olarak S_1 hasar eğrisine tekabül eden bir eşitlik yazılabilir.

$$D = \sum_{i=1}^g \Delta D_i = m_1 \cdot r_1 \cdot \left[N_g \alpha + AR^{\frac{1}{a_1}} (1-\alpha) n_r \left\{ n_r^{A-1} + (2n_r)^{A-1} + (3n_r)^{A-1} + \dots + (gn_r)^{A-1} \right\} \right]^{a_1} \quad 9.61$$

N_g = bütün “g” tekrarlanan bloklarında gerilme devirlerinin toplam sayısı

g = tekrarlanan blokların sayısı

$n_r, 2n_r, 3n_r, \dots$ = her tekrarlanan blok için (toplamda) N_e ’nin (9.59) gerçek değeri (9.61)’deki seriler basitleştirilebilir:

$$D = m_1 \cdot r_1 \cdot \left[N_g \cdot \alpha + R^{\frac{1}{a_1}} \cdot (1-\alpha) \cdot N_g^A \right]^{a_1} \quad 9.62$$

Şimdi hatırlanırsa, 6 kabulün birisi şuydu ki kırılmaya yol açan hasar gerilme blokları ne olursa olsun sabitti. Yani, kırılmadaki hasar, sabit gerilme genliği S_1 kullanılarak elde edilebilir ve yük tekrarı sayısı kırılma için N_1 'dir. Hipotez tarafından, bu yolla hesaplanan kırılmadaki hasar, (9.62)'le hesaplanan kırılma hasarına eşit olacaktır. (9.44) ve (9.62)'ün her ikisini kırılmaya zamanında sağlayarak sonuçları eşitlenirse:

$$D_f = m_1 \cdot r_1 \cdot N_1^{a_1} = m_1 \cdot r_1 \cdot \left[(N_g)_f \cdot \alpha + R^{\frac{1}{a_1}} \cdot (1 - \alpha) \cdot (N_g)_f^A \right]^{a_1} \quad 9.63$$

$(N_g)_f$ = bütün tekrarlanan bloklar için kırılmaya kadarki toplam yük tekrarı sayısı (9.63)'ü basitleştirilirse,

$$D_1 = (N_g)_f \cdot \alpha + R^{\frac{1}{a_1}} \cdot (1 - \alpha) \cdot (N_g)_f^A \quad 9.64$$

görülebilir ki, a_1 ve a_2 yaklaşık eşit olsaydı, $A=1$ olacaktı ve (9.64) şu halde olacaktı:

$$(N_g)_f = \frac{N_1}{\alpha + R^{\frac{1}{a}} \cdot (1 - \alpha)} \quad 9.65$$

Geniş aralığa sahip gerilme genlikleri için, özellikle çelik malzemeler için, $a_1 = a_2 = a$ deneysel olarak uygundur.

Corten-Dolan teorisinin başında $N' = 0$ kabul edilmişti. Bununla birlikte şu doğru olabilir ki, yorulma hasarı boşluğunu meydana getirmek için ehemmiyetli sayıda yük tekrarı gerekir. Bu ihtimal göz önüne alınır, (9.45)ki N_i yerine $(N_i - N'_i)$ konulursa,

$$D_f = m_1 \cdot r_1 \cdot (N_1 - N'_1)^{a_1} = m_2 \cdot r_2 \cdot (N_2 - N'_2)^{a_2} \quad 9.66$$

Değişken gerilme genlikleri altındaki başlangıç periyodunu en yüksek gerilme olan S_1 altındaki başlangıç periyoduyla eşit (her nasılsa kabul edilebilir çünkü hasar boşlukları sayısı en yüksek gerilmenin fonksiyonu olarak yayınlanır.) ve $A=1$ denirse, (9.63) şöyle yazılabilir:

$$(N_g)_f = \frac{(1 - \beta) \cdot N_1}{\alpha + R^{\frac{1}{a}} \cdot (1 - \alpha)} + \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \cdot N_1 \quad 9.67$$

ki burada

$$\beta = \frac{N'_1}{N_1} \quad 9.68$$

(9.67) eşitliği, (9.63)'de N_2 yerine $(N_i - N'_i)$ konularak ve $(N_g)_f$ için çözümlenerek geliştirilir. Bu ilave doğrudur, zira S_1 ve S_2 gerilmelerindeki $\frac{N'_1}{\alpha}$ toplamı S'_1 deki N'_1 devrini bulmak için istenir ve bu devirinde S_1 gerilmesinde hasar boşluğunun oluşmasına sebep olması istenir. Şu vurgulanmalıdır ki, (9.67), (9.65) ile çok benzerdir. Fakat (9.67) başlangıç periyodunu da içerir.

Yeterli miktarda deneysel veriler üzerinde çalışılırsa, yukarı-aşağı test metodunu kullanarak ve ortalama %95'li güvenilirlik için her noktada 20 deney yaparak ve çelik tel numunelerini kullanarak, Corten ve Dolan teori ve deney arasında çok iyi bir yakınlık tespit etmişlerdir ($A=1$ ve $\beta=0$). Geniş bir aralıktaki gerilme seviyelerinde test edilen çeliklerde sonuçlar çok doğrudur. Hatta aynı görüşler daha sonra 7075-T6 alüminyum alaşımına yapılan testlerle de doğrulanmıştır.

Daha sonra Corten-Dolan tarafından yapılan öneri şudur ki: gerilmeye bağlı R oranı, kolayca elde edilebilecek S_1 ve S_2 gerilmelerini içeren başka bir orana denk olabilir. Bu düşüncüyü takip ederek, şu ilişki bulunmuştur:

$$R^{\frac{1}{a}} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^d \quad 9.69$$

(9.65)'yi oluşturmakta kullanılan kavramlar ve (9.69)'in sonuçları kullanılarak, Corten ve Dolan ayrı gerilme seviyelerine sahip tekrarlanan bloklar için kırılmaya yol açacak ömür tahmin etmek için kullanılan şu eşitliği geliştirdi.

$$(N_g)_f = \frac{N_1}{\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^d + \alpha_3 \cdot \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^d + \dots + \alpha_i \cdot \left(\frac{S_i}{S_1} \right)^d} \quad 9.70$$

Burada

$(N_g)_f$ = Değişen gerilme genliği serisinde, toplam kırılmaya yol açacak devir sayısı

d= Malzeme sabiti

N_1 = En yüksek gerilme S_1 için kırılma yük tekrarı sayısı

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i = S_1, S_2, \dots, S_i$ gerilmelerine tekabül eden yük tekrarı kesirleri

Bu kabul $A=1$ ve $\beta=0$ olan durum içindir. Bu teoriyi kullanırken, d deneysel değeri her malzeme için elde edilmelidir.

Marin teorisiyle karşılaştırmak amacıyla, (9.70)'yi değişik bir formda yazmak uygun olacaktır. Bunu yapmak amacıyla,

$$\alpha_1 \cdot n_r + \alpha_2 \cdot n_r + \alpha_3 \cdot n_r + \dots + \alpha_i \cdot n_r = n_r \quad 9.71$$

burada n_r bir tekrarlayan bloktaki yük tekrarı sayısıdır ve α_i 'ler S_i gerilme seviyesiyle ilgili yük tekrarı sayıları kesridir. Aynı zamanda

$$g \cdot n_r = N_g \quad 9.72$$

Burada g tekrarlanan blok sayısıdır ve N_g tekrarlanan bütün bloklar boyunca toplam yük tekrarı sayısıdır. (9.71)'ü g ile çarpılırsa,

$$\alpha_1 \cdot g \cdot n_r + \alpha_2 \cdot g \cdot n_r + \alpha_3 \cdot g \cdot n_r + \dots + \alpha_i \cdot g \cdot n_r = g \cdot n_r \quad 9.73$$

(9.72)'den

$$\alpha_1 \cdot N_g + \alpha_2 \cdot N_g + \alpha_3 \cdot N_g + \dots + \alpha_i \cdot N_g = N_g \quad 9.74$$

Aynı zamanda n_i , her S_i gerilme seviyesinin toplam yük tekrarı sayısı ise şu görülebilir ki,

$$\begin{aligned} n_1 &= \alpha_1 \cdot N_g \\ n_2 &= \alpha_2 \cdot N_g \\ &\cdot \\ &\cdot \\ n_i &= \alpha_i \cdot N_g \end{aligned} \quad 9.75$$

Her iki tarafı da (9.70)'nin kırılma durumundaki N_g ile bölersek $(N_g)_f$ ve (9.75)'yi kullanırsak;

$$1 = \frac{N_1}{n_1 + n_2 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^d + n_3 \cdot \left(\frac{S_3}{S_1}\right)^d + \dots + n_i \cdot \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^d} \quad 9.76$$

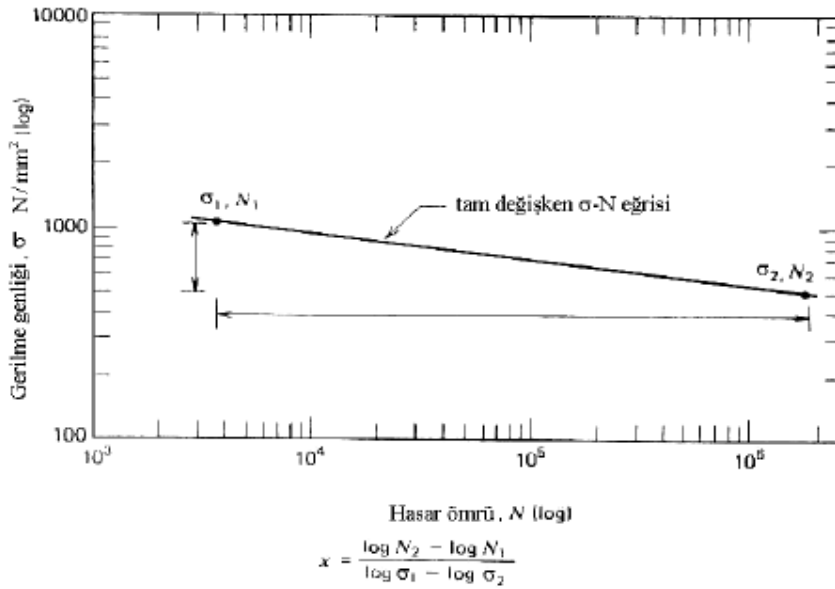
Pay, payda N_1 ile bölünürse ve eşitlik düzenlenirse, elde edilir ki

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^d + \left(\frac{n_3}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{S_3}{S_1}\right)^d + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^d = 1 \quad 9.77$$

Teoriden çıkan bu formdaki bir ilişki daha ileride Marin birikimli hasar teorisiyle karşılaştırma için kullanılacaktır.

9.2.5. Marin birikimli hasar teorisi

Bu teori, yük tekrarı oranının fonksiyonu olan hasarla, hasarın artmasıyla S-N eğrisindeki değişme arasındaki ilişkiyi temel almıştır. Eğer değişik gerilme seviyelerine ait hasar eğrileri şekil 9.4'deki gibi çizilseydi, sabit bir hasar çizgisi seçilebilirdi. Mesela, $D=0,4$, ve her nokta $D=0,4$ hasarını belirtecek şekilde her eğride farklı bir nokta tanımlanabilirdi. Bu noktalar, şekil 9.4'de 1'den 7'ye belirtilmiştir. Bu 7 nokta daha sonra S-N eğrisinde 7 gerilme seviyesinde, 7 hasar eğrisine bağlı olarak çizilebilir. Bu yolla çizilen S-N eğrisi $D=0,4$ sabit hasar eğrisidir. Malzeme için asıl S-N eğrisi $D=1,0$ sabit hasar olandır.



Şekil 9.4 Marin birikimli hasar eğrisi

S-N eğrisindeki sabit hasar çizgileri kavramı bizi şu gözleme götürür ki: herhangi S_i gerilme seviyesindeki n_i yük tekrarı çalışma sonucu hasar, S_1 gerilme seviyesindeki n_1 yük tekrarı çalışmaya denktir ki n_1, n_2, \dots, n_i hepsi aynı hasar eğrisi üzerindedir. Böylece, referans aldığımız gerilme seviyesinde denk yük tekrarı sayısını bulmak mümkündür ki aynı hasarı oluştursun (S_1, n_1 yük tekrarı yaptığında). Bu kavramı kullanarak, en yüksek gerilme seviyesi S_1 'i referans gerilme seviyesi olarak alarak, Marin şöyle yazmıştır;

$$\begin{aligned}
 n_{2e} &= n_2 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^y \\
 n_{3e} &= n_3 \cdot \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^y \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 n_{ie} &= n_i \cdot \left(\frac{S_i}{S_1} \right)^y
 \end{aligned}
 \tag{9.78}$$

burada,

$n_{ie} = S_i$ gerilmesinde n_i yük tekrarıyla oluşacak hasara denk hasarı, S_1 'de oluşturmak için gerekli yük tekrarı sayısı

$n_i = S_i$ gerilme seviyesindeki gerçek yük tekrarı sayısı

$S_i =$ Hasarın oluşturduğu gerçek çalışma gerilme seviyesi

(9.78)'de gözlenmektedir ki; $y \geq 1$ olursa, n_{ie}, S_1 referans gerilme seviyesi öteki S_i gerilmelerinden büyük olduğundan, n_i 'den daima küçük olacaktır. (9.78) esas alınarak, Marin her gerilme seviyesindeki çalışmaya tekabül eden hasar oranları serisini tanımladı.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{n_1}{N_1} \\
 R_2 &= \frac{n_{2e}}{N_1} \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 R_i &= \frac{n_{ie}}{N_1}
 \end{aligned}
 \tag{9.79}$$

Kırılma anında bu ömür oranları toplamı 1 olmalıdır.

$$R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_i = 1 \quad 9.80$$

(9.79), (9.80)'ye eklenirse,

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_{2e}}{N_1} + \dots + \frac{n_{ie}}{N_1} = 1 \quad 9.81$$

Sonuçta, buradaki n_{ie} ifadelerini (9.78) 'dekilerle değiştirirsek kırılma tahmini formülü şöyle elde edilir.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_{2e}}{N_1} \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^y + \dots + \frac{n_{ie}}{N_1} \cdot \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^y = 1 \quad 9.82$$

(9.82)'ü Corten-Dolan sonuçlarıyla (9.76) karşılaştırırsak şunu görürüz ki, $y=d$ olduğu takdirde sonuçlar birbirine eşit olacaktır.

Marin teorisi, S-N eğrisine tam olarak şu formülle yaklaşılabılır kabulüyle geliştirildi.

$$S^x \cdot N = k \quad 9.83$$

Bu kabule dayanarak, şu doğrudur ki;

$$\begin{aligned} S_2^x \cdot N_2 &= S_1^x \cdot N_1 \\ S_3^x \cdot N_3 &= S_1^x \cdot N_1 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ S_i^x \cdot N_i &= S_1^x \cdot N_1 \end{aligned} \quad 9.84$$

Bu eşitlikler N_i değeri için çözülrse ve sonuçlar doğru olarak N_1 değeri için eklenirse (9.82) şöyle olur:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_1} \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^q + \dots + \frac{n_i}{N_1} \cdot \left(\frac{S_i}{S_1}\right)^q = 1 \quad 9.85$$

$$q=y-x \quad 9.86$$

İlginçtir ki $g=0$, yan, $Y=x$ olduğu takdirde (9.85) Miner'in hipotezine döner.

(9.85)'den, kırılma, malzeme sabiti q ve tam değişken gerilme için S-N eğrisi bilinirse, değişik gerilmeler altında tahmin edilebilir. Eğer S_1 gerilme seviyesinde kalan ömür merak edilirse (9.85)'den şu elde edilir.

$$n_{ir} = N_i \cdot \left[\left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot \left(\frac{S_1}{S_i} \right) - \left(\frac{n_2}{N_i} \right) \cdot \left(\frac{S_2}{S_i} \right)^q - \dots - \left(\frac{n_{i-1}}{N_{i-1}} \right) \cdot \left(\frac{S_{i-1}}{S_i} \right) \right] \quad 9.87$$

n_{ir} = kalan ömür

10. SONUÇLAR

Bu çalışmada, (Münih Teknik Üniversitesi Dişli Çarklar ve Mekanizmaları Araştırma Merkezinde, Prof. Necati Tahralı tarafından yapılan yorulma deney sonuçları), tezin konusunu oluşturan istatistik yöntemlere göre irdelenmiştir. Elde edilen verilerden yola çıkılarak Weibull ve Wöhler diyagramları pratik yollarla her gerilme için ayrı ayrı çizilmiştir.

Sürekli ve sürekli mukavemet bölgelerinde bulunan her gerilme için %90, %50 ve %10 güvenilirlikli ömür değerleri elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar Çizelge 7.1.'de toplu halde verilmiştir. Hatırlamak amacıyla bu çizelge burada bir kez daha verilecektir.

Çizelge 7.1. Weibull ve wöhler sonuçları kıyaslama çizelgesi

Gerilme $\sigma [N/mm^2]$			614	490	428	304	262	248	235
F=%10	R=%90	Weibull	15862	56146	145458	495845	1187851	1532242	4187097
		Wöhler	16099	58063	137341	479734	1237371	1482177	3776591
F=%50	R=%50	Weibull	18249	61789	178982	637958	1669396	3196113	7426235
		Wöhler	18214	72360	180634	638999	1668016	3722203	6991977
F=%90	R=%10	Weibull	21062	69858	216249	823026	2760216	8502494	12812193
		Wöhler	20606	90178	237535	851138	2247502	9347597	12944939

Weibull dağılımı ile Wöhler dağılımı yoluyla elde edilen sonuçlar arasında oluşan farkların büyük çıkmasının sebebi deney noktalarının azlığından kaynaklanmaktadır. Deney noktalarının en az sekiz olması daha sağlıklı bir sonuç verebilirdi. Şöyle bir benzetme yapılabilir; deney noktaları az olduğunda elde edilen eğri sanki histogram tepelerinin birleştirilmesinden elde edilmiş gibidir. Oysa deney noktalarının sayısı daha fazla olsa elde edilen eğri sanki integrasyonla elde edilmiş gibidir.

Deney noktalarının olmadığı durumlarda Wöhler eğrisinin pratik olarak elde edilişi de bir sonraki bölümde incelenmiştir.

Uygulama kolaylığı sebebiyle Wöhler diyagramı tercih edilmesine rağmen Weibull diyagramıyla yaklaşık sonuçların elde edilmesi ömür hesaplarında kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, örnek teşkil etmesi açısından weibull eğrileri tarafımızca çizilmiştir.

Wöhler diyagramı bu tezde, gerilme-ömür deneyleriyle elde edilen çizimi esas alınarak veya buna yakın olan pratik wöhler çizimleri esas alınarak birikimli (kümülatif) zorlanma durumlarında ömür hesapları bu diyagramlardan alınacak değerlere göre hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

Ullman, D. (1987), Mechanical Design Failure Analysis, New York & Basel 1987

Akkurt, M. (1997), Makina Konstrüksiyonunda Güvenilirlik, Birsen yayınevi, 1997

Vianello ve Bignoli (1999), Weibull Analysis, Fiat Auto Normazione , Italy

Tahralı, N. ve Dikmen F. (1995), Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik ve Ömür Hesapları, Y.T.Ü. Makine Fakültesi, İstanbul

Carter, A.D.S. (1997), Mechanical Reliability and Design, Macmillan Press, London

Saatçı, G.E. (2002), Dinamik Kırılmalarda Birikimli (kümülatif) hasar metotlarının incelenmesi ve GTD model 4x4 askeri aracın aktarma elemanlarına uygulanması, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

Dikmen, F. (1997), Dişli Çarklarda Emniyetli Dişdibi Gerilmesinin Weibull Dağılımı Yardımıyla Belirlenmesi, YTÜD, İstanbul

Tahralı N. ve Saatçı G.E. (2003), Birikimli Hasar Teorileri ve Yorulma Çatlağına Göre Ömür Değerlendirmeleri, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, İstanbul

Tahralı N. ve Saatçı G.E. (2003), Birikimli Hasar Teorileri ve Hareket İletim Elemanına Uygulanması, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, İstanbul

Tahralı N. (1984), Pülzatör Deneyleleriyle Dişliçarklarda Diş Dibi Mukavemetinin İstatistiki Olarak Bulunması, Yıldız Üniversitesi, İstanbul

Neto F.L. ve Bolfarine H. ve Rodrigues J. (2001), Comparing Two Weibull Models With Accelerated Data, Taylor&Francis, Brasil

Dowling N.E. (1993), Mechanical Behavior Of Materials, Prentice-Hall Int., New Jersey

Collins, J.A. (1993), Failure of Materials in Mechanical Design, John Wiley&Sons, Ohio

Weibull.com / Reliability Engineering

Ayarođlu M.S. (2002), GTD Model 4X4 Askeri Aracın Aktarma Elemanlarının Birikimli Hasar Durumlarına Göre mr Değerlendirmeleri, Y.T.. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	02.02.1975	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1986-1994	Özel Saint Joseph Fransız Lisesi
Lisans	1994-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-1994	Galatasaray Üniversitesi & Panthéon Sorbonne Sosyal Bilimler Enstitüsü Uluslararası İşletme Bölümü, MBAIP

Çalıştığı kurumlar

1997-2004	ZF Sachs Türkiye, Ürün Geliştirme Mühendisi
2004-2007	A.Raymond Türkiye, Üretim Müdürü
2007-Devam ediyor	Ulus Metal , İşletme Müdürü