

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

128595

**DİNAMİK KIRILMALARDA BİRİKİMLİ
(KÜMÜLATİF) HASAR METOTLARININ
İNCELENMESİ ve GTD MODEL 4X4 ASKERİ ARACIN
AKTARMA ELEMANLARINA UYGULANMASI**

Mak. Müh. Gökhan Erkin SAATÇI

**YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**



128595

F.B.E. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Necati TAHRALI



Prof. Dr. Ahmet TOPUZ 
Doç. Dr. İsmail YÜKSEK 

İSTANBUL, 2002

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| SİMGE LİSTESİ | viii |
| KISALTMA LİSTESİ..... | ix |
| ŞEKİL LİSTESİ | x |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xii |
| ÖNSÖZ | xiii |
| ÖZET | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Yorulma Kırılmasının Aşamaları | 5 |
| 2. WÖHLER EĞRİLERİNİN PRATİK ÇİZİMİ VE ÖMÜRLERİN SAPTANMASI | 8 |
| 2.1 Çevrimli Yüklemenin Tanımı..... | 8 |
| 2.2 Gerilme-Ömür (σ -N) Eğrileri..... | 8 |
| 2.3 Wöhler Eğrilerinin Log-Linear Koordinatlarda Pratik Çizimi | 11 |
| 2.4 Wöhler Eğrilerinin Log-Log Koordinatlarda Pratik Çizimi..... | 13 |
| 2.5 Ortalama Gerilmelerin Etkileri..... | 14 |
| 2.6 Düzensiz Haller İçin Çevrimlerin Belirlenmesi | 16 |
| 2.7 Yorulma Limiti ve Değişken Genlikli Yükleme | 20 |
| 3. KÜMÜLATİF HASAR TEORİLERİ..... | 22 |
| 3.1 Lineer Kümülatif Hasar Teorileri | 22 |
| 3.1.1 Palmgren-Miner Teorisi | 22 |
| 3.2 Non-Linear Kümülatif Hasar Teorileri | 29 |
| 3.2.1 Marco-Starkey Kümülatif Hasar Teorisi..... | 30 |
| 3.2.2 Henry Kümülatif Hasar Teorisi | 33 |
| 3.2.3 Gatts Kümülatif Hasar Teorisi..... | 34 |
| 3.2.4 Corten-Dolan Kümülatif Hasar Teorisi..... | 37 |
| 3.2.5 Marin Kümülatif Hasar Teorisi | 40 |
| 3.2.6 Manson Çift Linear Kümülatif Hasar Kuralı | 43 |
| 3.2.7 Çatlak Artışının Toplanması..... | 48 |
| 3.2.7.1 Tekrarlayan veya Sabit Durumlar İçin Özel Metot | 49 |
| 3.2.7.2 Gerilmelerin Sıralanış Etkileri..... | 52 |
| 3.3 Kümülatif Hasar Teorilerinin Nasıl Kullanıldığını Gösteren Uygulamalar..... | 54 |
| 4. BİLEŞİK GERİLME DURUMU | 68 |
| 4.1 Gerilmenin Çok Eksenli Olması Durumunun Etkisi | 68 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 4.2 | Bileşik Gerilmeler İçin Hasar Teorileri..... | 69 |
| 4.2.1 | Maksimum Normal Gerilme Teorisi..... | 69 |
| 4.2.2 | Maksimum Kesme Gerilmesi Teorisi..... | 70 |
| 5. | GTD MODEL 4X4 ASKERİ ARACIN AKTARMA ELEMANLARININ ÖMÜR HESAPLARI..... | 73 |
| 5.1 | Transfer Kutusu – Daimi İştirak Dişlisi Ömür Değerlendirmeleri..... | 74 |
| 5.1.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması..... | 75 |
| 5.1.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 75 |
| 5.1.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 76 |
| 5.1.1.3 | Marin Yöntemi..... | 76 |
| 5.1.1.4 | Manson Yöntemi..... | 77 |
| 5.1.1.5 | Gatts Yöntemi..... | 79 |
| 5.1.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 80 |
| 5.1.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 80 |
| 5.1.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 81 |
| 5.1.2.3 | Marin Yöntemi..... | 81 |
| 5.1.2.4 | Manson Yöntemi..... | 82 |
| 5.1.2.5 | Gatts Yöntemi..... | 83 |
| 5.2 | Transfer Kutusu – Grup A Dişlisi Ömür Değerlendirmeleri..... | 84 |
| 5.2.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması..... | 84 |
| 5.2.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 85 |
| 5.2.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 85 |
| 5.2.1.3 | Marin Yöntemi..... | 85 |
| 5.2.1.4 | Manson Yöntemi..... | 85 |
| 5.2.1.5 | Gatts Yöntemi..... | 85 |
| 5.2.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 86 |
| 5.2.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 86 |
| 5.2.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 86 |
| 5.2.2.3 | Marin Yöntemi..... | 86 |
| 5.2.2.4 | Manson Yöntemi..... | 86 |
| 5.2.2.5 | Gatts Yöntemi..... | 86 |
| 5.3 | Transfer Kutusu – Grup B Dişlisi Ömür Değerlendirmeleri..... | 87 |
| 5.3.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması..... | 87 |
| 5.3.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 87 |
| 5.3.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 88 |
| 5.3.1.3 | Marin Yöntemi..... | 88 |
| 5.3.1.4 | Manson Yöntemi..... | 88 |
| 5.3.1.5 | Gatts Yöntemi..... | 88 |
| 5.3.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 88 |
| 5.3.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 89 |
| 5.3.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 89 |
| 5.3.2.3 | Marin Yöntemi..... | 89 |
| 5.3.2.4 | Manson Yöntemi..... | 89 |
| 5.3.2.5 | Gatts Yöntemi..... | 89 |
| 5.4 | Transfer Kutusu – Seyyar Dişli Ömür Değerlendirmeleri..... | 90 |
| 5.4.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması..... | 90 |
| 5.4.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi..... | 90 |
| 5.4.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 90 |
| 5.4.1.3 | Marin Yöntemi..... | 91 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.4.1.4 | Manson Yöntemi | 91 |
| 5.4.1.5 | Gatts Yöntemi | 91 |
| 5.4.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 91 |
| 5.4.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 91 |
| 5.4.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 92 |
| 5.4.2.3 | Marin Yöntemi | 92 |
| 5.4.2.4 | Manson Yöntemi | 92 |
| 5.4.2.5 | Gatts Yöntemi | 92 |
| 5.5 | Transfer Kutusu – Daimi İştirak Mili Ömür Değerlendirmeleri | 93 |
| 5.5.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 93 |
| 5.5.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 93 |
| 5.5.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 93 |
| 5.5.1.3 | Marin Yöntemi | 93 |
| 5.5.1.4 | Manson Yöntemi | 94 |
| 5.5.1.5 | Gatts Yöntemi | 94 |
| 5.5.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 94 |
| 5.5.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 94 |
| 5.5.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 94 |
| 5.5.2.3 | Marin Yöntemi | 95 |
| 5.5.2.4 | Manson Yöntemi | 95 |
| 5.5.2.5 | Gatts Yöntemi | 95 |
| 5.6 | Transfer Kutusu – Prizdirek Mili Ömür Değerlendirmeleri | 95 |
| 5.6.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 96 |
| 5.6.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 96 |
| 5.6.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 96 |
| 5.6.1.3 | Marin Yöntemi | 96 |
| 5.6.1.4 | Manson Yöntemi | 96 |
| 5.6.1.5 | Gatts Yöntemi | 97 |
| 5.6.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 97 |
| 5.6.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 97 |
| 5.6.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 97 |
| 5.6.2.3 | Marin Yöntemi | 97 |
| 5.6.2.4 | Manson Yöntemi | 98 |
| 5.6.2.5 | Gatts Yöntemi | 98 |
| 5.7 | Transfer Kutusu – Kamalı Milin Ömür Değerlendirmeleri | 98 |
| 5.7.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 99 |
| 5.7.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 99 |
| 5.7.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 99 |
| 5.7.1.3 | Marin Yöntemi | 99 |
| 5.7.1.4 | Manson Yöntemi | 99 |
| 5.7.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 100 |
| 5.7.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 100 |
| 5.7.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 100 |
| 5.7.2.3 | Marin Yöntemi | 100 |
| 5.7.2.4 | Manson Yöntemi | 100 |
| 5.8 | Ön Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri | 101 |
| 5.8.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 101 |
| 5.8.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 101 |
| 5.8.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 101 |
| 5.8.1.3 | Marin Yöntemi | 101 |
| 5.8.1.4 | Manson Yöntemi | 101 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 5.8.1.5 | Gatts Yöntemi..... | 102 |
| 5.8.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 102 |
| 5.8.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 102 |
| 5.8.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 103 |
| 5.8.2.3 | Marin Yöntemi | 103 |
| 5.8.2.4 | Manson Yöntemi | 103 |
| 5.8.2.5 | Gatts Yöntemi..... | 103 |
| 5.9 | Ön Diferansiyel – Ayna Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri | 104 |
| 5.9.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 104 |
| 5.9.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 104 |
| 5.9.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 104 |
| 5.9.1.3 | Marin Yöntemi | 104 |
| 5.9.1.4 | Manson Yöntemi | 105 |
| 5.9.1.5 | Gatts Yöntemi..... | 105 |
| 5.9.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 105 |
| 5.9.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 105 |
| 5.9.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 106 |
| 5.9.2.3 | Marin Yöntemi | 106 |
| 5.9.2.4 | Manson Yöntemi | 106 |
| 5.9.2.5 | Gatts Yöntemi..... | 107 |
| 5.10 | Ön Diferansiyel – Mahruti Milinin Ömür Değerlendirmeleri..... | 108 |
| 5.10.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 108 |
| 5.10.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 108 |
| 5.10.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 108 |
| 5.10.1.3 | Marin Yöntemi | 108 |
| 5.10.1.4 | Manson Yöntemi | 109 |
| 5.10.1.5 | Gatts Yöntemi..... | 109 |
| 5.10.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 109 |
| 5.10.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 109 |
| 5.10.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 109 |
| 5.10.2.3 | Marin Yöntemi | 110 |
| 5.10.2.4 | Manson Yöntemi | 110 |
| 5.10.2.5 | Gatts Yöntemi..... | 110 |
| 5.11 | Arka Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri | 111 |
| 5.11.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 111 |
| 5.11.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 111 |
| 5.11.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 111 |
| 5.11.1.3 | Marin Yöntemi | 112 |
| 5.11.1.4 | Manson Yöntemi | 112 |
| 5.11.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 112 |
| 5.11.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 112 |
| 5.11.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 113 |
| 5.11.2.3 | Marin Yöntemi | 113 |
| 5.11.2.4 | Manson Yöntemi | 113 |
| 5.12 | Arka Diferansiyel – Ayna Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri..... | 113 |
| 5.12.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 114 |
| 5.12.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 114 |
| 5.12.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi..... | 114 |
| 5.12.1.3 | Marin Yöntemi | 114 |
| 5.12.1.4 | Manson Yöntemi | 115 |
| 5.12.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması..... | 115 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5.12.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 115 |
| 5.12.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 115 |
| 5.12.2.3 | Marin Yöntemi | 115 |
| 5.12.2.4 | Manson Yöntemi | 116 |
| 5.13 | Arka Diferansiyel – Mahruti Milinin Ömür Değerlendirmeleri | 116 |
| 5.13.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 117 |
| 5.13.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 117 |
| 5.13.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 117 |
| 5.13.1.3 | Marin Yöntemi | 117 |
| 5.13.1.4 | Manson Yöntemi | 117 |
| 5.13.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 118 |
| 5.13.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 118 |
| 5.13.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 118 |
| 5.13.2.3 | Marin Yöntemi | 118 |
| 5.13.2.4 | Manson Yöntemi | 118 |
| 5.14 | Kardan Milinin Ömür Değerlendirmeleri | 119 |
| 5.14.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 120 |
| 5.14.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 120 |
| 5.14.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 120 |
| 5.14.1.3 | Marin Yöntemi | 121 |
| 5.14.1.4 | Manson Yöntemi | 121 |
| 5.14.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 122 |
| 5.14.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 122 |
| 5.14.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 123 |
| 5.14.2.3 | Marin Yöntemi | 123 |
| 5.14.2.4 | Manson Yöntemi | 124 |
| 5.15 | Ön Aks Milinin Ömür Değerlendirmeleri | 125 |
| 5.15.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 125 |
| 5.15.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 125 |
| 5.15.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 125 |
| 5.15.1.3 | Marin Yöntemi | 125 |
| 5.15.1.4 | Manson Yöntemi | 126 |
| 5.15.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 126 |
| 5.15.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 126 |
| 5.15.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 126 |
| 5.15.2.3 | Marin Yöntemi | 126 |
| 5.15.2.4 | Manson Yöntemi | 126 |
| 5.16 | Arka Aks Milinin Ömür Değerlendirmeleri | 127 |
| 5.16.1 | Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması | 128 |
| 5.16.1.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 128 |
| 5.16.1.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 128 |
| 5.16.1.3 | Marin Yöntemi | 128 |
| 5.16.1.4 | Manson Yöntemi | 128 |
| 5.16.2 | Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması | 129 |
| 5.16.2.1 | Palmgren-Miner Yöntemi | 129 |
| 5.16.2.2 | Corten-Dolan Yöntemi | 129 |
| 5.16.2.3 | Marin Yöntemi | 129 |
| 5.16.2.4 | Manson Yöntemi | 129 |
| 6. | SONUÇLAR..... | 131 |

| | |
|--|-----|
| KAYNAKLAR..... | 135 |
| EKLER..... | 136 |
| Ek 1 Ömür Hesabı Yapılan Aktarma Elemanlarının Fotoğrafları..... | 137 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 139 |



SİMGE LİSTESİ

| | |
|----------------------------|---|
| a | hasar yayılma üssü |
| a_i | ilk çatlak boyu |
| Δa | çatlak büyümesi |
| c | her bir gerilmenin toplam ömürde uygulanma oranları |
| d | deneysel malzeme sabiti |
| D | hasar oranı |
| D' | çekirdek başına düşen hasar |
| K_b | boyut faktörü |
| K_φ | çentik faktörü |
| K_y | yüzey faktörü |
| m | hasarlı çekirdek sayısı |
| n | belli bir gerilme genliğinde yaşanan çevim sayısı |
| n_{ir} | belli bir spektrum yaşamış parçanın belli bir gerilmede kalan ömrü |
| N | belli bir gerilme genliğindeki toplam ömür |
| $N_{eş}$ | çeşitli gerilmelerde yüklenen parçanın eşdeğer ömrü |
| N', N_b | çatlak başlangıç periyodunu tamamlayana kadar geçen ömür |
| N_p, N_y | çatlağın başlangıç periyodundan yayılma periyodunun sonuna kadar ilerlemesindeki ömür |
| p | deneysel sabit |
| P | deneysel sabit |
| r | hasar yayılma oranının katsayısı |
| y | deneysel malzeme sabiti |
| β | yük çevrimlerin oranı |
| γ | gerilme genliğinin yorulma limitinin orjinal değerine oranı |
| γ_e | herhangi bir anki yorulma limitinin orjinal yorulma limitine oranı |
| σ_{ak} | akma gerilmesi |
| σ_{aq} | genel değişken gerilmenin tam değişken durumdaki eşdeğeri |
| σ_D | tam değişken yüklemde yorulma dayanımı (çekme, eğilme) |
| σ_{DT} | genel değişken yüklemde yorulma dayanımı (çekme, eğilme) |
| $\tilde{\sigma}_f$ | gerçek kırılma dayanımı |
| σ_g | gerilme genliği |
| σ_{ger}, τ_{ger} | gerçek gerilmeler |
| σ_k | kopma gerilmesi |
| σ_{max} | gerilme genliğinin maksimum değeri |
| σ_{min} | gerilme genliğinin minimum değeri |
| σ_o | gerilme genliğinin ortalama değeri |
| τ_D | tam değişken yüklemde yorulma dayanımı (burulma) |
| τ_{DT} | genel değişken yüklemde yorulma dayanımı (burulma) |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|-------------|--|
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| SWT | Smith, Watson ve Topper |



ŞEKİL LİSTESİ

| | Sayfa |
|------------|---|
| Şekil 1.1 | Motorlu bir taşıtın direksiyon sisteminin mafsal kolundaki gerilmelerin örnek kaydı..... 1 |
| Şekil 1.2 | Bir otomobilin lastikleri demiryoluna çarparken sol ön süspansiyonun aşağıdaki küresel mafsalı üzerinde oluşan hesaplanmış kuvvetler..... 2 |
| Şekil 1.3 | Bir helikopter pervanesinin herbir devrindeki yükler. Pervane kanadının eğiminin hava ile etkileşimi bu dinamik yüklere neden olur..... 2 |
| Şekil 1.4 | Bir uçağın bir uçuş süresince oluşan yükler (a), ve bu yüklemenin basitleştirilmiş hali (b)..... 2 |
| Şekil 1.5 | Yorulma-Gerilme çeşitlemeleri..... 3 |
| Şekil 1.6 | Karbonlu çeliğin üzerinde birikmiş yorulma hasarının sonraki yorulma ömrüne etkisinin gösterilişi 4 |
| Şekil 1.7 | Bir veya birden çok defa yüksek derecede yüklenme şekilleri..... 4 |
| Şekil 2.1 | a- hidrolik pülzator test yeri, b- pülzator çeneleri 9 |
| Şekil 2.2 | Wöhler eğrisindeki süreli ve sürekli bölgeler 10 |
| Şekil 2.3 | Wöhler eğrisinin pratik çizimi 12 |
| Şekil 2.4 | Düzensiz yüklemeler için açıklamalar..... 17 |
| Şekil 2.5 | Yüksek frekansta çevrim belirleme metodunu kullanarak bir çevrimi sayma işlemi 17 |
| Şekil 2.6 | Yüksek frekansta çevrim belirleme ile ilgili örnek 18 |
| Şekil 2.7 | Bir kara taşıtının transmisyon elemanındaki düzensiz bir yüklemenin zamana göre değişimini ve değişim ile ortalamasının muhtelif kombinasyonlarındaki Yüksek frekansta çevrim adetlerini veren bir matris..... 19 |
| Şekil 2.8 | Düşük dayanımlı bir çeliğin 0 ortalama gerilme ile sabit genlikli çevrim altındaki gerilme-ömür test dataları..... 21 |
| Şekil 3.1 | Herbir 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 22 |
| Şekil 3.2 | St 60 için pratik Wöhler diyagramı 25 |
| Şekil 3.3 | Tam değişken yüklenme durumu için Palmgren-Miner kuralının ömür tayini 25 |
| Şekil 3.4 | Ortalama değer değişimleri ile birlikte tekrarlayan gerilme hali için ömür tayini 26 |
| Şekil 3.5 | Birikimli hasara uğramış malzemenin yorulma limitindeki azalmanın gösterilişi..... 26 |
| Şekil 3.6 | Yorulma dayanımı – Çevrim ilişkisi 29 |
| Şekil 3.7 | Yorulma hasarı ve çevrim oranı arasındaki ilişki 30 |
| Şekil 3.8 | Yorulma hasarının, çevrim oranının bir fonksiyonu olarak gösterimi 31 |
| Şekil 3.9 | Birçok değişik çevrimli gerilme sırası için çizilmiş hasar durumu 32 |
| Şekil 3.10 | Gatts tarafından ortaya konan σ -N eğrisi yaklaşımı 35 |
| Şekil 3.11 | Teorik γ -L eğrileri ve çeliklerin sabit gerilme genliğindeki testlerinden karma bilgiler..... 37 |
| Şekil 3.12 | Corten-Dolan kümülatif hasar teorisinin fikirlerini ilerletebilmek için kullanılan basit bir iki-seviyeli çevrimli gerilme spektrumu 38 |
| Şekil 3.13 | Corten-Dolan teorisine göre iki değişik gerilme seviyesinin hasar-çevrim diyagramı 38 |
| Şekil 3.14 | Hasar – Çevrim oranı ilişkisi 41 |
| Şekil 3.15 | Hasar eğrilerinin mukayesesi 44 |
| Şekil 3.16 | SAE 4130 çeliği üzerindeki iki-gerilme-seviyeli testlerin deneysel sonuçlarının Manson'ın çift lineer hasar kuralının ve Palmgren-Miner lineer hasar kuralının |

| | | |
|--------------|---|-----|
| | yorulma davranışı tahminleri ile karşılaştırılması..... | 46 |
| Şekil 3.17 | İki aşamalı yorulma hali | 47 |
| Şekil 3.18 | İki aşamalı yorulma modelinin non-linear birikim diyagramı..... | 48 |
| Şekil 3.19 | Aşırı yüklemelerin, ortadan-çatlamış 2024-T3 alüminyum plakalardaki çatlak gelişimine etkisi | 53 |
| Şekil 3.20 | Örnek 1’le ilgili şekil..... | 54 |
| Şekil 3.21 | Açıklanan bakla tasarımında kullanılan 4340 çeliği için %99 güvenilirlikli σ -N eğrisi (Örnek 2) | 57 |
| Şekil 3.22 | Marin’in denkleminde σ -N eğrisi için x üssünü tayin edebilmek için σ -N datalarının logaritmik çizimi (Örnek 2)..... | 60 |
| Şekil 3.23 | Örnek 4’le ilgili şekil..... | 64 |
| Şekil 3.24 | Örnek 5’le ilgili şekil..... | 66 |
| Şekil 4.1 | Dalgalanan üç-eksenli gerilmeye maruz kalmış eleman | 69 |
| Şekil Ek 1.1 | Transfer içerisindeki dişliler ve miller | 137 |
| Şekil Ek 1.2 | Transfer kutusunun şematik olarak gösterilişi | 137 |
| Şekil Ek 1.3 | Ön ve arka ayna-mahruti dişlileri..... | 138 |
| Şekil Ek 1.4 | Ön ve arka aks milleri..... | 138 |
| Şekil Ek 1.5 | Kardan mili | 138 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | Sayfa |
|--------------|--|
| Çizelge 2.1 | Muhtelif sünek metallerin gerilme-ömür eğrileri için gerekli sabitler. Çentiksiz numunelerin tam değişken yüklenmesinden elde edilmiştir..... 11 |
| Çizelge 2.2 | Malzeme ve zorlanma farklılıklarına göre yorulma limitleri 11 |
| Çizelge 3.1 | Çeşitli metaller için Walker Denklemi'nde kullanılan sabitler 50 |
| Çizelge 3.2 | Örnekle ilgili bilgiler (Örnek 1)..... 55 |
| Çizelge 3.3 | %99 güvenilirlikli yorulma σ -N dataları (Örnek 2)..... 56 |
| Çizelge 3.4 | Palmgren-Miner çözümü için ilk deneme değerleri (Örnek 2)..... 57 |
| Çizelge 3.5 | Palmgren-Miner çözümü için ikinci deneme değerleri (Örnek 2)..... 58 |
| Çizelge 3.6 | Palmgren-Miner çözümü için üçüncü deneme değerleri (Örnek 2)..... 58 |
| Çizelge 3.7 | Henry çözümünün ilk deneme değerleri (Örnek 2) 59 |
| Çizelge 3.8 | Gatts çözümü için ilk deneme değerleri (Örnek 2)..... 60 |
| Çizelge 3.9 | Manson çözümünün ilk denemesi için temel bilgiler (Örnek 2) 62 |
| Çizelge 3.10 | Manson çözümündeki çatlak başlangıcı hakkındaki ilk deneme (Örnek 2)..... 62 |
| Çizelge 3.11 | Manson çözümündeki çatlak yayılması hakkındaki ilk deneme (Örnek 2) 62 |
| Çizelge 3.12 | Örnekle ilgili bilgiler (Örnek 4)..... 64 |
| Çizelge 3.13 | Örnekle ilgili bilgiler (Örnek 5)..... 66 |
| Çizelge 5.1 | Transfer Kutusu – Daimi İştirak Dişlisi ömür değerleri..... 84 |
| Çizelge 5.2 | Transfer Kutusu – Grup A Dişlisi ömür değerleri 87 |
| Çizelge 5.3 | Transfer Kutusu – Grup B Dişlisi ömür değerleri 90 |
| Çizelge 5.4 | Transfer Kutusu – Seyyar Dişli ömür değerleri..... 92 |
| Çizelge 5.5 | Transfer Kutusu – Daimi İştirak Mili ömür değerleri..... 95 |
| Çizelge 5.6 | Transfer Kutusu – Prizdirek Mili ömür değerleri 98 |
| Çizelge 5.7 | Transfer Kutusu – Kamalı Milin ömür değerleri 101 |
| Çizelge 5.8 | Ön Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin ömür değerleri 103 |
| Çizelge 5.9 | Ön Diferansiyel – Ayna Dişlisinin ömür değerleri 107 |
| Çizelge 5.10 | Ön Diferansiyel – Mahruti Milinin ömür değerleri 110 |
| Çizelge 5.11 | Arka Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin ömür değerleri 113 |
| Çizelge 5.12 | Arka Diferansiyel – Ayna Dişlisinin ömür değerleri 116 |
| Çizelge 5.13 | Arka Diferansiyel – Mahruti Milinin ömür değerleri 119 |
| Çizelge 5.14 | Kardan Milinin ömür değerleri 124 |
| Çizelge 5.15 | Ön Aks Milinin ömür değerleri 127 |
| Çizelge 5.16 | Arka Aks Milinin ömür değerleri 130 |

ÖNSÖZ

Literatürde bulunan birikimli hasar metotlarının incelenip pratikte karşılaşılan birbirinden farklı durumlarda hangi metodun uygulanması gerektiği hakkında bir fikir veren bu çalışma 6 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde malzeme yorulmasının ne olduğu hakkında kısaca bilgi verildikten sonra ikinci bölümde Wöhler diyagramlarının pratik olarak nasıl elde edilebileceği anlatılmış ve tam değişken yükleme ile genel değişken yükleme arasındaki farklar üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde ise çalışmanın temeli olan birikimli hasar metotları sunulmuş ve bu metotların nasıl kullanılacağını gösteren kısa örnekler verilmiştir. Dördüncü bölümde değişken gerilmelerin farklı eksenlerde uygulanması durumunda gözönüne alınması gereken bileşik gerilme halleri hakkında bilgi verilmiş ve beşinci bölümde de GTD model 4X4 askeri aracın aktarma elemanlarının sunulan birikimli hasar metotlarına göre yorulma ömürleri tayin edilmiştir. Son bölüm olan altıncı bölümde ise bulunan ömür değerlerin yorumu yapılmıştır.

Hesaplarda toplam 16 adet aktarma elemanının ömür değerlendirmesi yapılmıştır. Tüm parçalar aynı şekilde hesaplandığından sadece birinci parçanın hesapları detaylı bir şekilde verilmiş diğerlerinin ise sadece sonuçları kısa açıklamalarla belirtilmiştir.

Çalışmalarım sırasında bana her türlü konuda yardım eden değerli hocam Sn. Prof. Necati Tahrahi'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Malzemelerde oluşan yorulma hasarının incelenip önceden saptanabilmesi, yorulma kırılmalarını önleyebilmek için çok büyük önem kazanmaktadır. Malzemelerin yorulması, hasar birikimi ve ardından çevrimli yüklemeye bağlı olarak hasar oluşmasının sürecidir. 150 yıldan uzun bir süredir mühendislik çalışmaları yorulma hasarını önleyebilmek için çaba sarf etmektedir. Yorulma konusundaki en önemli konu ise çeşitli değişken gerilmelere maruz kalan malzemelerin gösterdikleri birikimli hasarlardır.

Bu çalışmada, çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konmuş birikimli hasar metotları sunulmuş, bunların hakkında örnekler verilmiş ve en son olarak bu metotlar çeşitli değişken gerilmeler altında çalışan 1013. Ord. Ana. Tam. Fabrikasında üretilen GTD model 4X4 askeri aracın aktarma elemanlarına uygulanmıştır. Her metodun kendine özgü kuralları bulunduğundan herbiri farklı sonuçlar vermiştir. Çalışmadaki amaç, pratikte karşılaşılan çeşitli birikimli hasar durumlarında bulunan metotlardan hangisinin kullanılması gerektiğini saptamaktır.

Ömür hesaplarında gerek duyulan Wöhler diyagramlarının pratik çizim kuralları hakkında bilgi verilmiş ayrıca formüllerde kullanılan çentik, yüzey düzgünlük, boyut faktörleri, gerilmelerin uygulanma yüzdeleri ve malzemenin mukavemet özellikleri yine bu örnek gösterilen araç üzerinde çalışılmış, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırlanan Sn. Serdar Ayaroğlu'nun yüksek lisans tezinden alınmıştır.

Elde edilen ömür değerleri yorumlanarak literatürdeki birikimli hasar metotlarından hangisinin nasıl bir çalışmada kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Ömür, Birikimli hasar, Tam değişken yükleme, Gerilme dizilişi

ABSTRACT

The prediction of fatigue failure in the materials has great importance in preventing of fatigue cracks. Fatigue of materials is the process of accumulating damage and then failure due to cyclic loading. Engineering efforts over more than 150 years, aimed at preventing fatigue failure. The most important thing in fatigue topic is the cumulative damage that can be seen in the materials subjected to several variable stresses.

In this study, the cumulative fatigue failure methods that are created by several researchers, are represented, examples about these methods are given and finally these methods are applied to the transmission components of "GTD model 4X4 military vehicle" that is being produced in "1013. Ord. Ana. Tam. Fabrikasi" which are working under several variable stresses. Because of having special characteristics, each method gave different solutions. This study is aimed at the problem that is encountered in practice which is the choice of the method for the several different cumulative failure conditions.

The Wöhler Diagrams that are needed for the life estimates are plotted by the easiest ways and this ways' rules are given. Beside this, notch-surface quality-dimension factors, stresses' applying percents and the materials strength properties used in the equations are taken from another master study made in "Y.T.Ü. – F.B.E." by Serdar Ayaroğlu which is again about this vehicle.

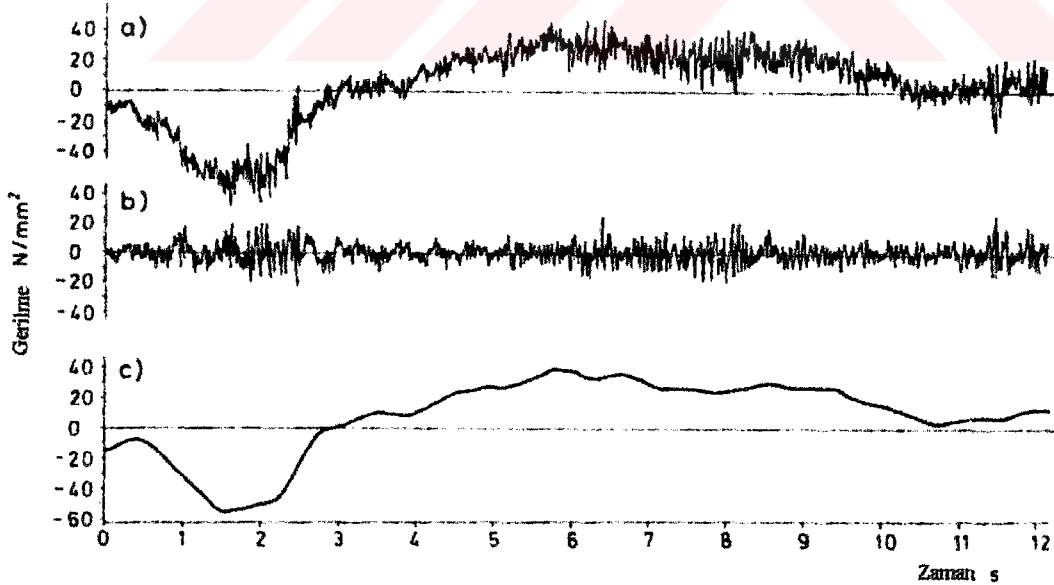
The estimated life solutions are interpreted and it is determined which one of the known cumulative damage methods must be used for the several situations.

Keywords: Fatigue, Service-Life, Cumulative damage, Completely-Reversed loading, Stress sequence

1. GİRİŞ:

Bazı pratik uygulamalar sabit bir genlikte çevrimli yükleme içerir. Fakat zamana göre düzensiz yükleme halleriyle daha çok karşılaşmaktadır. Şekil 1.1'den 1.4'e kadar bununla ilgili örnekler verilmiştir. Makina elemanları üzerindeki yükler, kaynaklarına bağlı olarak 4 kategoriye bölünebilirler. Statik Yükler değişmezler ve her zaman mevcuttur. İşletme Yükleri zamanla değişirler ve parçanın yerine getirdiği fonksiyonun sonucu olarak bu yüklerle maruz kalınır. Çevreden ileri gelen veya parçanın fonksiyonunun ikincil etkisi olarak karşımıza çıkan Titreşim Yükleri nispeten yüksek frekanslı çevrimli yüklerdir. Bunlara çoğunlukla akışkan türbülansı veya birbirine dokunan iki katı yüzeyin pürüzlülüğü neden olur. Normal koşullarda oluşmayan Olağan Dışı Yükler nadir olaylardır.

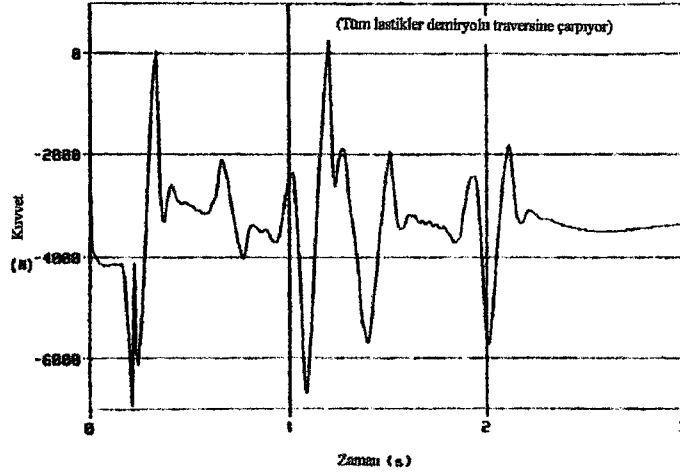
Örnek olarak, otoyollardaki viyadükleri düşünelim. Statik yükler, yolun ve yapının her zaman varolan ağırlığı nedeniyle oluşmuştur. Çevrimli işletme yükleri, viyadükten geçen taşıtların özellikle de ağır kamyonların ağırlıkları nedeniyle oluşur. İşletme yüklerine eklenen titreşim yükleri, lastiklerin yolun pürüzlülüğüyle olan etkileşimi ve taşıtların kasıslara vurmasından sonra zıplaması nedeniyle oluşurlar. Bir yakadan öbür yakaya uzanan köprüler aynı zamanda rüzgar türbülansına bağlı olan titreşim yüklerine de maruz kalır. Olağan dışı yükler ise bir kamyonun yüksekliği nedeniyle bir üst geçide çarpması veya bir deprem sebebiyle oluşabilirler.



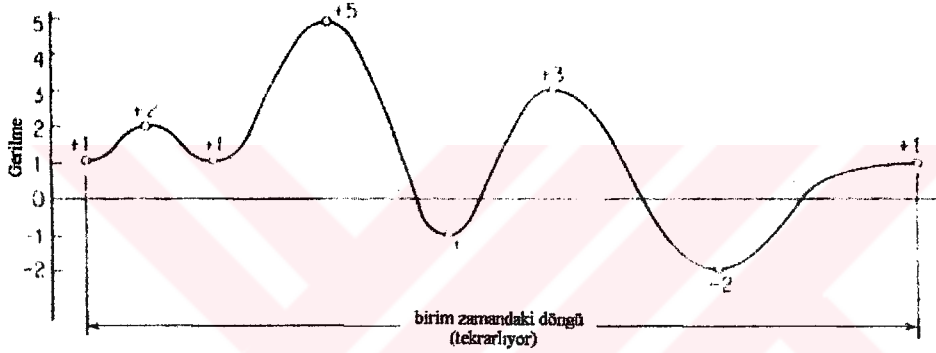
Şekil 1.1 Motorlu bir taşıtın direksiyon sisteminin mafsal kolundaki gerilmelerin örnek kaydı

a) orijinal gerilme-zaman durumu

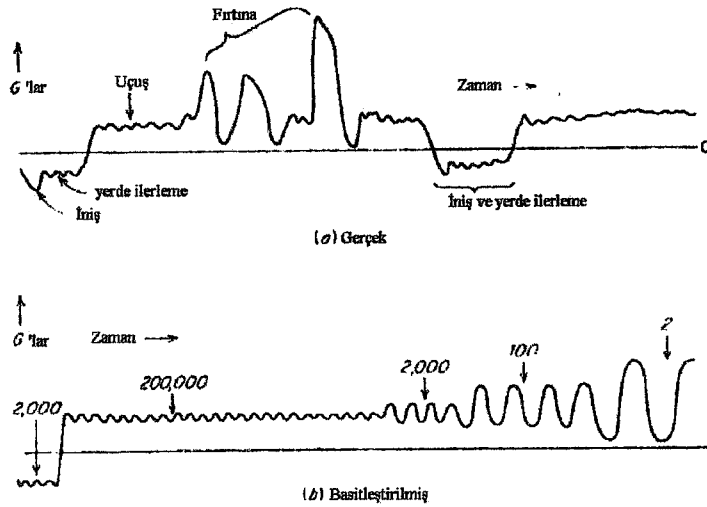
b), c) a şıkkının sırasıyla yolun pürüzlülüğüne göre oluşan titreşim yüküne (b) ve taşıtın manevrasına göre oluşan işletme yüküne (c) ayrılmış şekilleri (Dowling, 1999)



Şekil 1.2 Bir otomobilin lastikleri demiryoluna çarparken sol ön süspansiyonun aşağıdaki küresel mafsalı üzerinde oluşan hesaplanmış kuvvetler (Dowling, 1999)

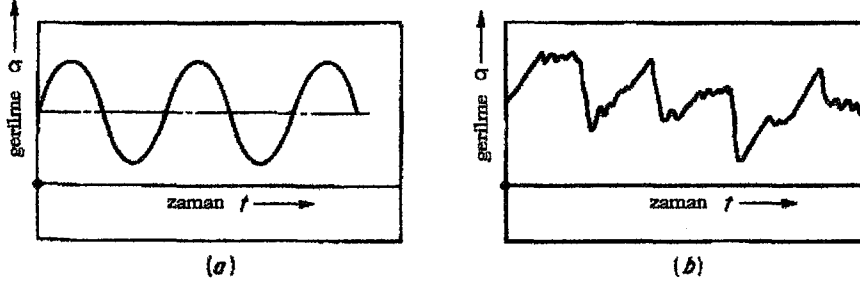


Şekil 1.3 Bir helikopter pervanesinin her bir devrindeki yükler. Pervane kanadının eğiminin hava ile etkileşimi bu dinamik yükler neden olur (Dowling, 1999)



Şekil 1.4 Bir uçağın bir uçuş süresince oluşan yükler (a), ve bu yüklemenin basitleştirilmiş hali (b). İşletme yükleri kalkışlara, manevralara ve inişlere bağlı olarak oluşur. Pistin pürüzlülüğüne ve fırtınadaki rüzgar yükleri gibi hava türbülansına bağlı olarak titreşim yükleri de vardır. (Dowling, 1999)

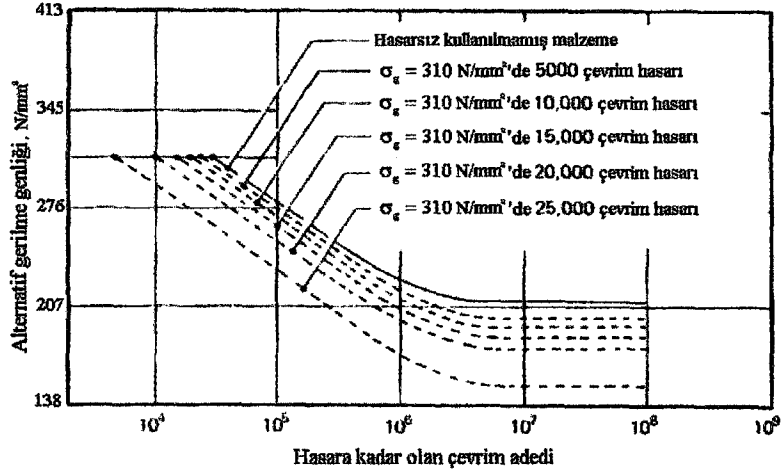
Şekil 1.5'te iki esas yorulma gerilmesi türü gösterilmiştir. Şekil 1.5a, bir lokomotifin sabit hızda çalışan iletici çubuğunda karşılaşıldığı gibi iki sabit değer arasındaki gerilme değişimlerini göstermektedir. Yorulma yüklenmesinin daha genelleşmiş tipi ise Şekil 1.5b'de gösterilmiştir. Burada gerilme değişimleri tekrarlayan bir şekilde değildir fakat gelişigüzel bir şekildedir.



Şekil 1.5 Yorulma-Gerilme çeşitlemeleri (Marin, 1966)

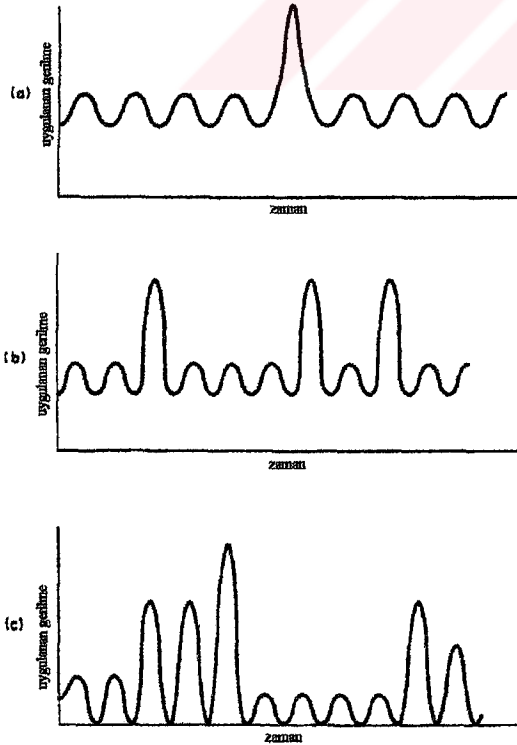
Yukarıda gerçek hayattan örneği verilen işletme ve titreşim yükleri ve de çoğunlukla bunların bileşke etkileri yorulma hasarını oluşturabilecek çevrimli yük sınıfına girer. Bununla birlikte statik yüklerin daha şiddetli olmasına rağmen çevrimli yüklere bağlı olan hasar daha büyüktür. Bunun yanında makina ve yapısal elemanlar her zaman Şekil 1.5a'da gösterildiği gibi aynı gerilme çevrimine maruz kalmazlar. Görüldüğü üzere, gerçekte her mühendislik uygulamasında makina parçalarının servis ömrü süresinde gerilme genliğinde Şekil 1.5b'de ifade edildiği üzere değişimler beklenebilir. Başka bir deyişle, belli bir zaman aralığında gerilme dizilerinin aynı sırayla ve büyüklükle tekerrür etmesi çok küçük bir olasılıktır. Bu yüzden gerilme genliğindeki bu değişimlerin de hesaba katılması gerekmektedir. Ancak değişken genlikli rasgele sıralanmış yükleme modelleri çok karışık fonksiyonlardır. Bu yüzden bazı yüklenme durumları açıklanabilir bir modelden yoksundur ve bir analitik fonksiyonla ortaya konamazlar. Bu tür yorulma zorlanması modellerine örnek olarak uçaklarda rüzgar zorlamaları, gemilerde ve deniz platformlarında dalga zorlaması ve köprülerde kamyonların oluşturduğu yüklemeler gösterilebilir. Ayrıca, yorulma hasarına veya bir parçanın bozulmasına neden olan olağan dışı yükler ise yorulmaya eklenen bir rol oynarlar. Bundan dolayı olağan yüklere kıyasla olağan dışı yüklerin neden olduğu yorulma daha hassastır. Bu yüzden, yorulma problemlerinde tüm kırılma prosesi içinde genellikle hasar birikimi teorisi de yorulma aşamaları arasında ayırt edilmeden hesaba katılır.

Çevrimli gerilmelerin uygulanması yüzünden oluşan hasar, her hasar verici çevrimin toplanmasıyla birikmektedir. Kümülatif hasar kavramı ile ilgili teoriler ileriki konularda detaylı bir şekilde tartışılacaktır fakat fikir Şekil 1.6'da dile getirilmiştir.



Şekil 1.6 Karbonlu çeliğin üzerinde birikmiş yorulma hasarının sonraki yorulma ömrüne etkisinin gösterilişi. Not: Kullanılmamış malzemenin $\sigma_g = 310 \text{ N/mm}^2$ 'deki yaklaşık ömrü 30000 çevrimdir (Collins, 1993)

Sabit genlikli çevrimli gerilme halleri ile değişken genlikli rasgele sıralanmış gerilme halleri arasında, karmaşıklıkları değişen derecelerde bir sürü gerilme modeli vardır. Bu durumların çoğu analitik fonksiyonlarla açıklanıp çeşit çeşit parametrelerle ortaya konmuştur. Bazı basit değişken genlikli yüklenme durumları, tek çevrimlik veya çok çevrimlik olmak üzere, sabit çevrim dalgalarının çok üzerinde bir şekilde yüklenmiş olarak Şekil 1.7'de görülmektedir (Barsom, Rolfe, 1999).



- a) Bir defalık yüksek yüklenme
- b) Birden çok defa yüksek yüklenme
- c) Birden çok defa değişken yüksekliklerde yüklenme

Şekil 1.7 Bir veya birden çok defa yüksek derecede yüklenme şekilleri (Barsom, Rolfe, 1999)

Düzensiz yükleme durumlarındaki sık sık *spektrum yüklemesi* olarak ima edilen yükleme genliğindeki değişiklikler sabit genlikli testlerden elde edilen standart σ -N (gerilme-ömür) eğrilerinin direkt kullanımını önlerler. Çünkü bu eğriler sabit gerilme genlikli yüklemeler için bulunup sunulmuştur. Önemli olan temel fikir, çevrimli yüklemenin neden olduğu yorulma hasarı birikiminden sonra malzemenin değiştiği ve yeni ve değişik bir σ -N eğrisi sergilediği gerçeğidir. Bu nedenle, Şekil 1.6'da gösterildiği gibi σ -N eğrisi hasar oluşturan gerilme çevrimlerinin toplanmasıyla sürekli olarak değişmektedir. Bundan dolayı bir tasarımcının, deneysel gözlemlerle doğruluğu kanıtlanmış geçerli bir teoriye veya hipoteze sahip olması önem kazanır. Bu teoriler, daha kolay elde edilen standart σ -N eğrilerinin spektrum yüklenme şartlarında kullanılıp iyi tasarım hesaplarının çıkmasına imkan sağlar.

Spektrum yükleme konusunda çalışan tüm araştırmacılar tarafından kabul edilen temel ön gerçek, herhangi bir verilen çevrimli gerilme genliğinin yorulma hasarı oluşturacağıdır. Buradaki ciddiyet, bu ön gerçeğin verilen gerilme genliğindeki yüklemelerin çevrim adediyle ve aynı zamanda bu gerilme genliğindeki hasar almamış bir numunenin yorulmasını mecbur kılacak toplam çevrim adediyle ilişkili olmasıdır. Daha sonra, hasara uğramanın sürekli olduğu ve dizi halinde çeşitli gerilme genliklerinde çalışmada toplam hasarın birikimli olmasıyla sonuçlandığı ve bu toplamın her bir gerilme seviyesinin kendi hasarını ekleyip çoğaltmasıyla oluştuğu varsayılmıştır. Birikmiş toplam hasar kritik bir değere ulaştığı zaman, yorulma hasarı gerçekleşir. Prensipite fikrin basit olmasına rağmen, pratikte birçok zorlukla karşılaşılır. Çünkü, yüklemelerde belirtilmiş n_i çevrim sayısı için verilen herhangi bir gerilme seviyesi olan σ_i tarafından uğratılan hasarın ne kadar olduğu gerçeği doğru dürüst tahmin edilemez. Yüklemelerde verilen herhangi bir gerilme seviyesi yüzünden oluşan yorulma hasarını tayin etmek ve spektrum yükleme şartları altında hasarı düzgün olarak önceden haber verebilmek adına hasar çoğaltımlarını toplamak için tasarlanan birçok değişik kümülatif hasar teorisi ortaya konmuştur (Collins, 1993).

1.1 Yorulma Kırılmasının Aşamaları:

Çevrimli yüklenmeye maruz bir yapıda, kırılma prosesi ilk aşama olarak mikro çatlaklar şeklinde gelişmeye başlar. Ardından makro çatlaklar oluşur, yayılır ve sonunda tüm yapı kırılır.

Çoğunlukla, imal kusurları (çentikler, çatlaklar gibi) bulunan bir yapı için, kırılmanın ilk devresi (gizli devre) çok kısa geçebilir veya hiç olmayabilir. Bu gizli aşamanın uzunluğu ile makro çatlak oluşum aşamasının uzunluğu arasındaki ilişki yapının geometrisine ve imal

kusurlarının yapısına bağlıdır. Çatlak oluşum zamanı, numunenin tüm ömrünün %10'u ile %80'i arasındadır.

Gizli devredeki hasar birikimini hesaplamak zordur. Aynı zamanda, bir kural olarak, makro çatlakların oluşumunun ilk anını tayin etmek te zordur.

Eğer yapı artık gerilmeler içermiyorsa ve yeterince homojen ise, gizli devre çok uzun olabilir. Bu taktirde kırılma ömrü, standart düzgün numunelerin yorulma değerleri kullanılarak kabaca hesaplanabilir.

Böylece hasar şöyle ifade edilir,

$$D = \frac{n}{N} \quad (1.1)$$

Burada n yapılan çevrim adedi, N ise o gerilme genliğinde devamlı çalışılması durumunda kırılmanın olacağı çevrim adedidir (Kachanov, 1986).

Yorulma yüklemesi tipleri elemanın ömrü boyunca uygulanan gerilmenin çevrim adedinin küçük veya büyük olmasına bağlı olarak ta sınıflandırılabilir. Gemilerde ve trenlerde kullanıldığı gibi geleneksel iletim ekipmanlarında, yorulma ömrü ve ömür içinde uygulanan gerilme çevrimi sayısı büyüktür. Köprülerde olduğu gibi bazı durumlarda ise, yapının ömrü uzundur fakat ömür içinde uygulanan gerilme çevrimi sayısı nispeten azdır. Füzeler ve roketlerde olduğu gibi modern oluşumlarda hem gerilme çevrimi sayısı az hem de ömür kısadır.

Çevrimli yüklemedeki iki rejimi ayırt etmek gereklidir:

- 1) Düşük - Çevrimli yorulma,
- 2) Yüksek - Çevrimli yorulma.

İlk rejim yüksek gerilme seviyesinde (bazen akma gerilmesinden de yüksek) nispeten düşük ömür (yüzler, binler) göstermesiyle karakterize edilir.

İkinci rejim yüksek-çevrimli yorulma ise, düşük gerilme seviyesi ve uzun ömür (milyonlar) göstermesi ile karakterize edilir.

Yüksek-çevrim yorulmasında olduğu gibi, düşük-çevrimli yorulma hasarı değerlendirme için çevrimli gerilme genliği bir spektrum içindeki değerlerde değiştiği zamanki koşullar altında kümülatif hasar teorisinin kullanımını gerektirir. Birçok araştırmacı düşük-çevrimli (low-cycle) yorulmada kümülatif hasar etkileri üzerinde çalışmış ve genel sonuç olarak bunu

EC FİNANSMAN KURULU
EKONOMİK VE SOSYAL İLERİLEME BAKANLIĞI

bulmuşlardır. Eğer bölgesel gerilme-gerinim davranışı uygulanan yüklerin bir fonksiyonu olarak doğru bir şekilde tanımlanabilir ve eğer çevrim sayma düzgün olarak iletilirse, lineer bir hasar kuralı olan Palmgren-Miner teorisi kabul edilebilir sonuçlar verir. Çeşitli spektrum yüklemeleri altındaki koşullarda hasara tekabül eden $\sum(n/N)$ değerlerinin değişiminin çeşitli malzemeler için 0,6'dan 1,6'ya kadar olduğu rapor edilmiştir. Bu, yüksek-çevrimli yorulmada gözlemlenene göre daha sınırlı bir değişimdir. Tüm bunlara rağmen, gerilmenin çok eksenli olması halinde lineer hasar kanununun çok daha az inanılır olacağı da not edilmelidir (Collins, 1993).

Çevrimlerin düşük veya yüksek olmasının yanısıra hesaba katılması gereken diğer değişkenler ise sıcaklığın yorulma özelliklerine olan etkisi ve rezonansın malzemelerin dinamik davranışları üzerindeki etkileridir.



2. WÖHLER EĞRİLERİNİN PRATİK ÇİZİMİ VE ÖMÜRLERİN SAPTANMASI:

2.1 Çevrimli Yüklemenin Tanımı:

Bazı pratik uygulamalar ve malzemeler üzerindeki yorulma deneyleri maksimum ve minimum gerilme seviyeleri arasında çevrimler içerir. Eğer bu gerilme seviyeleri sabitse buna *sabit genlikli yükleme* denir. Aksi durumunda ise, ki bu çalışmada bu hal söz konusudur, *değişken genlikli yükleme* adını alır.

Gerilme değişimi, $\Delta\sigma$, maksimum ve minimum değerler arasındaki farktır. Maksimum ve minimum değerlerin ortalamasını almak *ortalama gerilme* σ_o 'yu verir. Ortalama gerilme 0 da olabilir ancak çoğunlukla 0 olmaz. Gerilme değişiminin yarısı gerilme genliği σ_g diye adlandırılır. Burada anlatılan bu ifadelerin matematiksel karşılıkları şöyle olur:

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

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

Şunları da belirtmek uygun olacaktır:

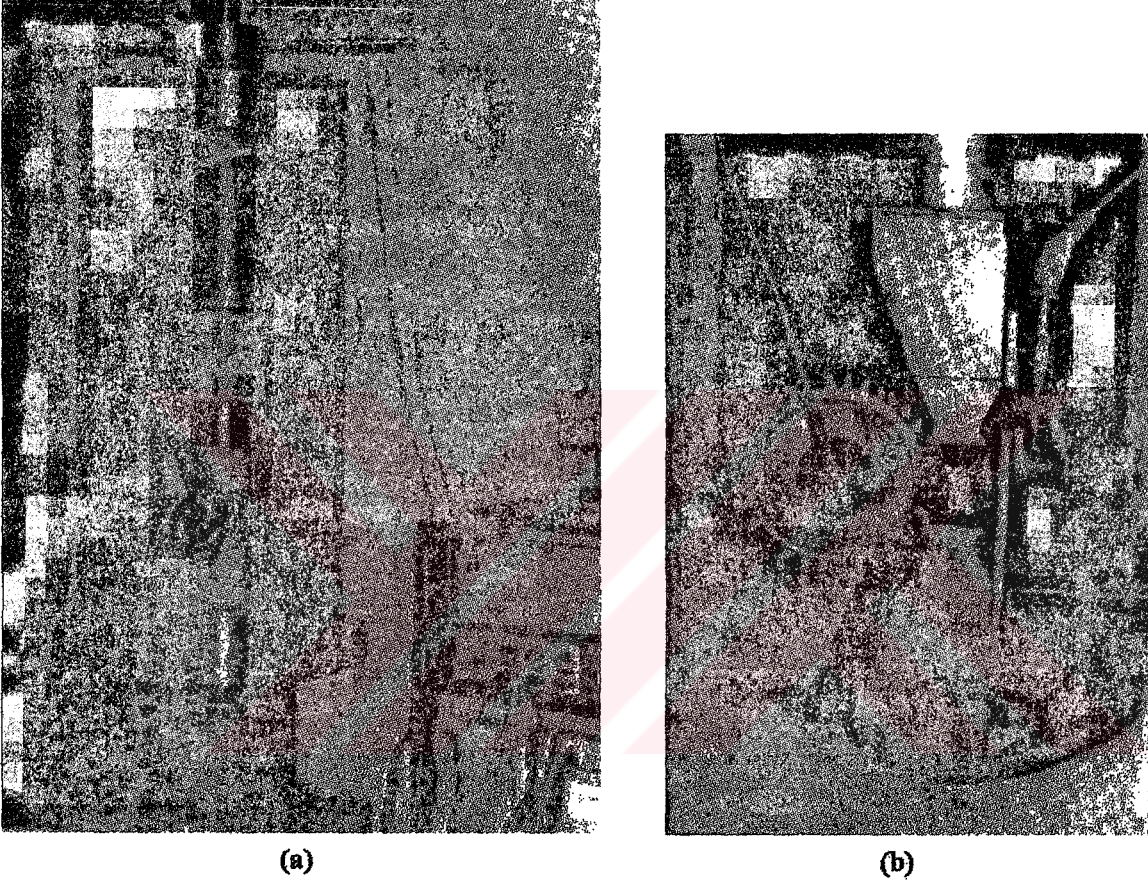
$$\sigma_{\max} = \sigma_o + \sigma_g \quad , \quad \sigma_{\min} = \sigma_o - \sigma_g \quad (2.2)$$

2.2 Gerilme-Ömür (σ -N) Eğrileri:

Makina parçalarının dinamik zorlanmalarında mukavemet sınırlarının bilinmesi için, deneyler yapılması ve buna göre gerilme-ömür değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bir makina parçasının veya malzemenin bir test numunesi eğer çevrimli yüksek gerilmelere maruz kalırsa, parçayı tam hasara götüren bir yorulma çatlakı 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 σ -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.

Makina parçalarının dinamik gerilmelerle zorlanmaları çekme-basma veya eğilme deneyleri pülzator adı verilen, Şekil 2.1’de gösterilen düzenekler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Zorlayıcı kuvvet hidrolik ise “hidropülzator”, mekanik ise “rezonans pülzator” denilmektedir (Tahralı, Dikmen, 1995).

Güvenilir deney şartları, makina parçasının gerçek dinamik zorlanma durumuna eşdeğer olmalıdır.

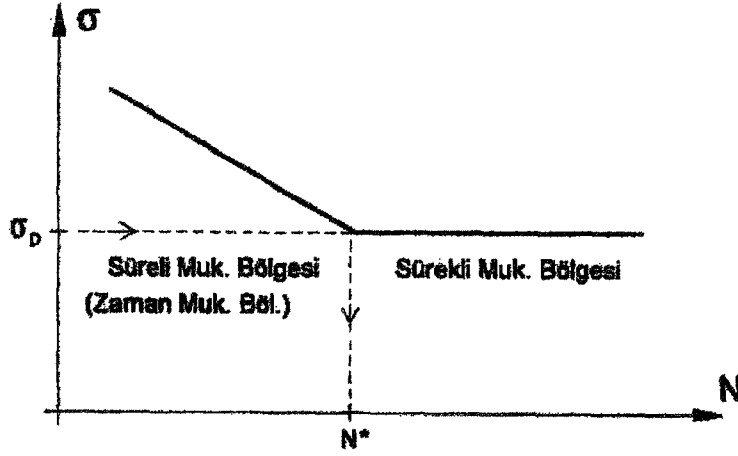


Şekil 2.1 a- hidrolik pülzator test yeri, b- pülzator çeneleri (alt çene hareketlidir)
(Tahralı, Dikmen, 1995)

Wöhler diyagramlarında iki bölge mevcuttur:

1) Süreli (zaman) Mukavemet Bölgesi: Belirli bir gerilme değerinde makina 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 makina parçasından istenilen ömürden (N^*) daha fazlasını belirtmektedir. (Şekil 2.2)



Şekil 2.2 Wöhler eğrisindeki süreli ve sürekli bölgeler (Tahralı, Dikmen, 1995)

Gerilme seviyesinin değişimiyle beraber hasara kadarki çevrim adedi hızla değişmektedir ve düşük ömürlerdeki çevrim adetleri düzgün okunamamaktadır. Bu nedenle, çevrim sayıları genelde logaritmik ölçekte çizilir (Dowling, 1999).

Eğer σ - N verileri log-lineer grafikte yaklaşık bir düz çizgi olarak çizilirse eğrinin denklemi aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\sigma_g = C + D \cdot \log N \quad (2.3)$$

Buradaki C ve D sabitlerdir. Bu sabitlerin nasıl bulunacağı daha ileriki bölümde açıklanmıştır.

Eğer veriler log-log grafikte düz bir çizgi olarak çizilmek istenirse şu denkleme göre hareket edilir:

$$\sigma_g = A \cdot N^B \quad (2.4)$$

Bu ikinci denklem çoğunlukla aşağıdaki değişik formda kullanılır:

$$\sigma_g = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N)^b \quad (2.5)$$

Her iki biçimdeki denklemlerdeki sabitler birbirleriyle şöyle ilişkilidir:

$$A = 2^b \cdot \sigma'_f \quad , \quad B = b \quad (2.6)$$

Bu denklemlerdeki sabitler çeşitli mühendislik metalleri için Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bunlar tam değişken yükleme ($\sigma_o = 0$) altında test edilen çentiksiz numunelerin uygun test verilerine dayanmaktadır. Buradaki σ'_f sabiti çoğunlukla yaklaşık olarak bir çekme testindeki

gerçek kırılma dayanımı $\tilde{\sigma}_f$ 'ye eşittir ve ayrıca sünek malzemeler için kopma dayanımı σ_k 'dan daha büyük bir değer olacağı da not edilmelidir.

Çizelge 2.1 Muhtelif sünek metallerin gerilme-ömür eğrileri için gerekli sabitler. Çentiksiz numunelerin tam değişken yüklenmesinden elde edilmiştir (Dowling, 1999)

| Malzeme | Akma gerilmesi σ_{sk} | Kopma gerilmesi σ_k | Gerçek kırılma dayanımı $\tilde{\sigma}_f$ | $\sigma_s = \sigma'_f (2.N)^b = A.N^B$ | | |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|--|--|------|---------|
| | | | | σ'_f | A | b = B |
| <i>Çelikler</i> | | | | | | |
| AISI 1015 | 227 | 415 | 725 | 976 | 886 | -0,14 |
| Man-Ten | 322 | 557 | 990 | 1089 | 1006 | -0,115 |
| RQC-100 | 683 | 758 | 1186 | 938 | 897 | -0,0648 |
| AISI 4142 | 1584 | 1757 | 1998 | 1937 | 1837 | -0,0762 |
| AISI 4340 | 1103 | 1172 | 1634 | 1758 | 1643 | -0,0977 |
| <i>Diğer metaller</i> | | | | | | |
| 2024-T4 Al | 303 | 476 | 631 | 900 | 839 | -0,102 |
| Ti-6Al-4V | 1185 | 1233 | 1717 | 2030 | 1889 | -0,104 |

Not: Birimsiz b = B değeri dışında tüm değerler N/mm² cinsindedir.

2.3 Wöhler Eğrilerinin Log-Linear Koordinatlarda Pratik Çizimi:

Genel imalat çelikleri için, tam değişken eğilme haline ait Wöhler diyagramı Şekil 2.3'teki gibi çizilebilir (Tahralı, Dikmen, 1995).

Genel olarak eğilme zorlanmalarında yorulma dayanımı $\sigma_D \cong 0,5.\sigma_k$ alınır. Bu konu ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Malzeme ve zorlanma farklılıklarına göre yorulma limitleri

(Tahralı, Dikmen, 1995)

| Malzeme | Dinamik Zorlanmalar | | | | | |
|---------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------|
| | Çekme | | Eğilme | | Burulma (Torsiyon) | |
| | σ_D | σ_{DT} | σ_D | σ_{DT} | τ_D | τ_{DT} |
| Genel İmalat Çeliği | $0,45.\sigma_k$ | $1,3.\sigma_D$ | $0,49.\sigma_k$ | $1,5.\sigma_D$ | $0,35.\sigma_k$ | $1,1.\tau_D$ |
| İslah Çeliği | $0,41.\sigma_k$ | $1,7.\sigma_D$ | $0,44.\sigma_k$ | $1,7.\sigma_D$ | $0,30.\sigma_k$ | $1,6.\tau_D$ |
| Semantasyon Çeliği ⁰ | $0,40.\sigma_k$ | $1,6.\sigma_D$ | $0,41.\sigma_k$ | $1,7.\sigma_D$ | $0,30.\sigma_k$ | $1,4.\tau_D$ |
| Dökme Demir | $0,25.\sigma_k$ | $1,6.\sigma_D$ | - | - | $0,36.\sigma_k$ | $1,6.\tau_D$ |
| Hafif metal | $0,30.\sigma_k$ | - | - | - | $0,25.\sigma_k$ | - |

σ_k : Kopma gerilmesi

σ_D : Tam değişken zorlanmada sürekli mukavemet değeri ($\sigma_o = 0$)

σ_{DT} : Genel değişken zorlanmada (dalgalı zorlanma) sürekli mukavemet değeri ($\sigma_o = \sigma_g / 2$)

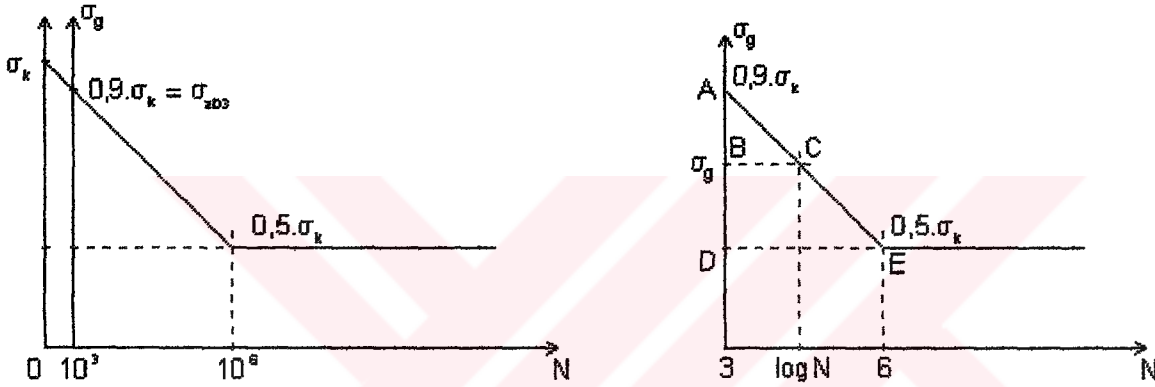
Makina konstrüksiyonunda, yük tekrar sayısına göre; genellikle

$N < 10^3$: Statik zorlanma bölgesi

$10^3 < N < 10^6$: Süreli mukavemet bölgesi (zaman mukavemeti)

$N > 10^6$: Sürekli mukavemet bölgesi

olarak kabul edilir.



Şekil 2.3 Wöhler eğrisinin pratik çizimi

σ_{zD3} , $N = 10^3$ yük tekrarını gerçekleştiren gerilme değeridir. Yani statik yük, bütün ömür içinde, 10^3 defa tesir ettirilebilir. Genel imalat çelikleri için, çekme ve eğilmede bu değer $\sigma_{zD3} = 0,9.\sigma_k$ 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 benzer üçgen bağıntısı yazılırsa,

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{AD}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{DE}} \quad (2.7)$$

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

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

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

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

olduğundan bu değerler yukarıdaki bağıntıda kullanılırsa:

$$\frac{0,9 \cdot \sigma_k - \sigma_g}{0,4 \cdot \sigma_k} = \frac{\log N - 3}{3} \quad (2.8)$$

elde edilir. Bu denklem biraz düzenlenirse:

$$\boxed{\log N = 9,75 - 7,5 \frac{\sigma_g}{\sigma_k}} \quad \text{genel denklemini bulunur.} \quad (2.9)$$

Burada çıkarılan bu formül sadece yöntemin nasıl çalıştığını açıklamak amacıyla kullanılmıştır. Formül, kullanılan malzeme ve yükleme durumlarına göre değişiklik gösterecektir. Bu değişik durumlar için gerekli σ_D değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

2.4 Wöhler Eğrilerinin Log-Log Koordinatlarda Pratik Çizimi:

Wöhler eğrisini log-log koordinatlarda çizmek için 2.4 denkleminde yararlanılacaktır. 2.4 denklemini iki gerilme genlik seviyesi için yazalım (Dowling, 1999):

$$\sigma_1 = A \cdot N_1^B, \quad \sigma_2 = A \cdot N_2^B$$

Eğer ilk ifadeyi ikinci ifadeye bölersek ve her iki tarafın logaritmasını alırsak şu çıkar:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^B \quad \log \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = B \cdot \log \frac{N_1}{N_2}$$

Bu son ifadeyi B için çözersek B sabitini tayin etmiş oluruz:

$$B = \frac{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{\log \frac{N_1}{N_2}} = \frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\log N_1 - \log N_2}$$

B artık bilindiğine göre, A'yı bulabilmek için σ_1 veya σ_2 eşitliklerinden birini kullanabiliriz:

$$A = \frac{\sigma_1}{N_1^B} = \frac{\sigma_1}{N_1^{\frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\log N_1 - \log N_2}}}$$

A ve B sabitleri bulunduğuna göre eğrinin $\sigma = A.N^B$ şeklindeki genel denklemi artık yazılabilir. Buradan N değeri çekilirse:

$$N = \left(\frac{\sigma}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (2.10)$$

Dikkat edilirse son iki bölümde Wöhler eğrilerini elde etmenin pratik yolları verilmiş ve elde edilen grafiklerin eksenlerinden en az biri logaritmik skalada seçilmiştir. Bu noktada aklımıza şöyle bir soru gelmektedir: “Eksenleri lineer-lineer seçemez miyiz?” Eğer eksenler lineer-lineer seçilseydi Wöhler eğrisinin aslı olan eğri formunun bulunması lazım gelirdi ki bu biçime matematiksel bir fonksiyon uydurulamazdı. Aslında lineer-lineer eksenlerde çizilen Wöhler diyagramları eğri biçimindedir ve tamamen deneysel verilerden elde edilir. Ancak matematikten bilindiği üzere lineer skaladaki bir eğri, logaritmik skalada bir doğruya dönüşmektedir. İşte eksenlerden birinin logaritmik skalada seçilmesinin nedeni de budur. Böyle bir seçimle eğri yerine doğru bulunmakta ve bu doğruya kolaylıkla bir fonksiyon uydurulabilmektedir.

2.5 Ortalama Gerilmelerin Etkileri:

Makina parçalarında ortalama gerilmenin yorulma sınırı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ortalama gerilme değeri arttıkça yorulma dayanımı sınırı azalmaktadır. Diğer bir deyişle, aynı gerilme genliği için ortalama gerilme değeri arttıkça yorulma ömrü azalmakta, ortalama gerilme değeri azaldıkça yorulma ömrü artmaktadır. Belli bir ömür değeri için ortalama gerilme değerinin artması, gerilme genliğinin azalmasını zorunlu kılar. Tasarımcı inceleyeceği malzemenin ortalama gerilme altında tespit edilen diyagramını bulabilirse mutlaka onu kullanmalıdır. Master diyagram diye adlandırılan bu diyagramlarda malzemenin belli bir çentik faktörü ve çentiksiz durumlarına göre ve her ortalama gerilme değeri ve gerilme genliğindeki ömürleri diyagramdan rahatlıkla okunabilir. Fakat önerilen malzeme için bu tip diyagramlar yok ise muhtelif bağıntılar kullanılarak ortalama gerilme değeri sıfır olmayan yüklemeler eşdeğer tam değişken gerilme genliklerine dönüştürülebilir (Ayaroğlu, 2002).

Şuna dikkat edilmelidir ki, 2.4 konu başlığı altında geçen tüm σ_g 'ler aslında tam değişken gerilme genliğidir. Peki eğer bizim parçamıza dalgalı değişken zorlanma türü ($\sigma_o \neq 0$) etkirse o zaman ne yapacağız? Bu çeşit zorlanmada karşımıza bir σ_o - ortalama gerilme sorunu çıkacağından σ_g değerlerini 2.4'te verilen formüllere direkt olarak koyamayız. Yukarıdaki

formülleri kullanabilmek için σ_g 'leri, tam değişken yükleme durumuna tekabül eden eşdeğer σ_{aq} 'lar ile değiştirmeliyiz. Bu eşdeğer gerilmeleri hesaplamak için çeşitli araştırmacılar tarafından aşağıdaki formüller ileri sürülmüştür:

$$\text{Goodman Eşitliği:} \quad \frac{\sigma_g}{\sigma_{aq}} + \frac{\sigma_o}{\sigma_k} = 1 \quad (2.11)$$

$$\text{Gerber Parabolik Eşitliği:} \quad \frac{\sigma_g}{\sigma_{aq}} + \left(\frac{\sigma_o}{\sigma_k} \right)^2 = 1 \quad (\sigma_o \geq 0) \quad (2.12)$$

$$\text{Soderberg Eşitliği:} \quad \frac{\sigma_g}{\sigma_{aq}} + \frac{\sigma_{ak}}{\sigma_k} = 1 \quad (2.13)$$

$$\text{Eliptik Eşitlik:} \quad \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_{aq}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_o}{\sigma_k} \right)^2 = 1 \quad (2.14)$$

Gerber eşitliğinde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, bu eşitliğin sadece çekme ortalama gerilmeleri ($\sigma_o \geq 0$) için geçerli olduğu ve eğer basma ortalama gerilmelerinde ($\sigma_o < 0$) kullanılırsa hatalı sonuçlar vereceğidir (Dowling, 1999).

Goodman eşitliğinden yararlanarak herhangi bir $\sigma_o - \sigma_g$ kombinasyonuna ait yüklemenin tam değişken eşdeğer gerilme genliği aşağıdaki formülle bulunur.

$$\sigma_{aq} = \frac{\sigma_g}{1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_k}} \quad (2.15)$$

Böylece ortalama gerilmesi σ_o , gerilme genliği de σ_g olan bir yüklemenin ömrü; ortalama gerilme değeri sıfır ($\sigma_o = 0$), gerilme genliği de σ_{aq} olan eşdeğer tam değişken gerilme ömrüne eşit olur (Ayaroğlu, 2002).

Yüksek dayanımlı çelikler gibi nispeten düşük süneklik gösteren metaller Goodman denkleminde yaklaşırlarken buna karşın sünek metallerin verileri Gerber parabolik eşitliğine daha yatkındır. Sünek metaller için Goodman eşitliğindeki σ_k yerine bir çekme testiyle onaylanmış gerçek kırılma dayanımı $\tilde{\sigma}_B$ 'nin veya $\sigma_o = 0$ için verilen ve çentiksiz σ -N eğrisinden elde edilen 2.5 denklemindeki σ_f' sabitinin konması çoğu kez uygun sonuçlar verir.

Goodman denklemindeki bu değişiklik J. Morrow tarafından ileri sürülmüştü. Buna tekabül eden yeni denklem ise şöyledir:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_{aq}} + \frac{\sigma_o}{\tilde{\sigma}_{FB}} = 1 \quad , \quad \frac{\sigma_g}{\sigma_{aq}} + \frac{\sigma_o}{\sigma'_f} = 1 \quad (2.16)$$

σ'_f sabiti çoğunlukla yaklaşık olarak $\tilde{\sigma}_{FB}$ 'ye eşittir ve bu değerlerin ikisi de sünek metallerde σ_k 'dan yüksektir. Genellikle çelikler için σ'_f 'nün kullanılması kabul edilebilir sonuçlar verir. Buna rağmen bazı alüminyum alaşımları için σ'_f ile $\tilde{\sigma}_{FB}$ önemli farklılıklar gösterir. Bu gibi durumlarda $\tilde{\sigma}_{FB}$ 'yi kullanmak test sonuçlarıyla daha fazla yakınlık sağlar (Dowling, 1999).

Bunlara ilavaten yaygın olarak kullanılan bir başka bağıntı ise Smith, Watson ve Topper (SWT) denklemdir.

$$\sigma_{aq} = \sqrt{\sigma_{max} \cdot \sigma_g} \quad (\sigma_{max} > 0) \quad (2.17)$$

$\sigma_{max} = \sigma_o + \sigma_g$ olduğuna göre bu denklem sadece σ_g ve σ_o 'ya bağlıdır ve diğerleri gibi herhangi bir malzeme sabitine bağlı olmamak gibi bir avantajı vardır. SWT denklemini birçok yapısal metal için kabul edilebilir sonuçlar verir ve özellikle de alüminyum alaşımları için düzgün çalışır (Dowling, 1999).

Sonuç olarak, hangi ortalama gerilme denkleminin seçileceği malzemenin test verileriyle kıyaslanarak en benzer denklemin seçilmesi yönünde olmalıdır.

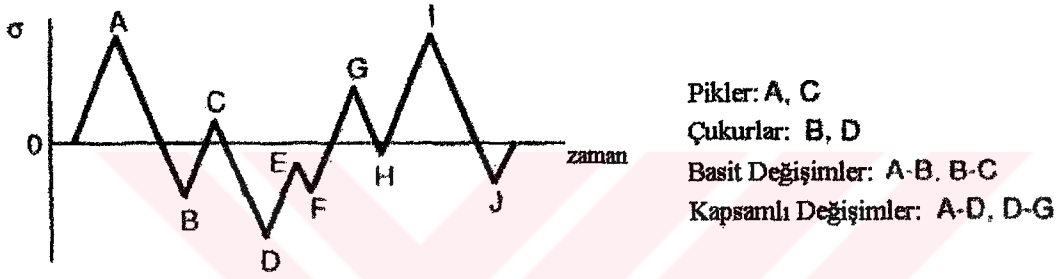
Tanıtılan bu denklemler aynı zamanda çok eksenli yüklemenin basit durumlarının ömür hesabı için kullanılabilir. σ_g ve σ_o değerleri, bileşik gerilme teorilerinden bulunacak bir efektif gerilme genliği $\bar{\sigma}_g$ ve üç yöndeki ortalama gerilmelere bağlı olan hidrostatik gerilmeyle orantılı olan bir efektif ortalama gerilme $\bar{\sigma}_o$ ile değiştirilir.

2.6 Düzensiz Haller İçin Çevrimlerin Belirlenmesi:

Şekil 1.1, 1.2, 1.3 ve 1.4'te olduğu gibi, zaman içinde daha düzensiz yükleme varyasyonlarında, daha ileride tanıtılacak herhangi bir birikimli hasar kuralının kullanılabilmesi için çevrimler gibi bireysel olayların nasıl ayırt edileceği ve açıklanacağı belli değildir. Geçmiş yıllarda doğru prosedüre dair hatırı sayılır şüphe ve tartışmalar vardı ve bir takım değişik metotlar ileri sürülüp kullanılmıştı. Yine de, bir oy birliği en iyi yaklaşımın 1968'lerde Japonya'da Prof. T. Endo ve meslektaşları tarafından geliştirilen *Yüksek Frekansta*

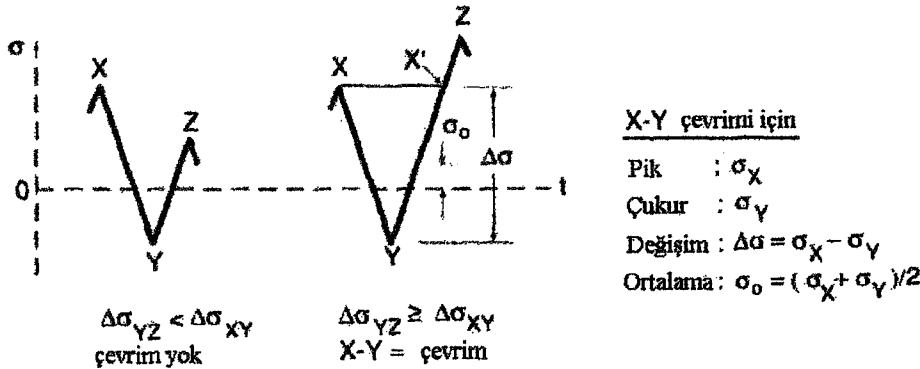
Çevrim Belirleme (rainflow cycle counting) yönteminin veya esasen buna denk bazı başka yöntemlerin kullanılmasıyla olacağını ortaya çıkarmıştır (Dowling, 1999).

Düzensiz bir gerilme hali Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, yüklem yönünün değiştiği bir dizi tepe ve çukur değer içerir. Dikkati çeken başka bir konu da *değişimlerdir*. Yani, tepe ve çukur değerler arasında veya çukur ve tepe değerler arasında ölçülen gerilme farklarıdır. Bir *basit değişim* bir tepe ve bir sonraki çukur değer arasında veya bir çukur ve bir sonraki tepe değer arasında ölçülmüştür. Bir *kapsamlı değişim* ise, bir tepe değerle bir sonraki olmayan ancak daha sonra oluşan bir çukur değer arasında veya bir çukur ile daha sonraki bir tepe değer arasında ölçülmüştür. Şekil 2.4'te $\Delta\sigma_{AB}$ ile $\Delta\sigma_{BC}$ basit değişimler, $\Delta\sigma_{AD}$ ile $\Delta\sigma_{DG}$ ise kapsamlı değişimlerdir.



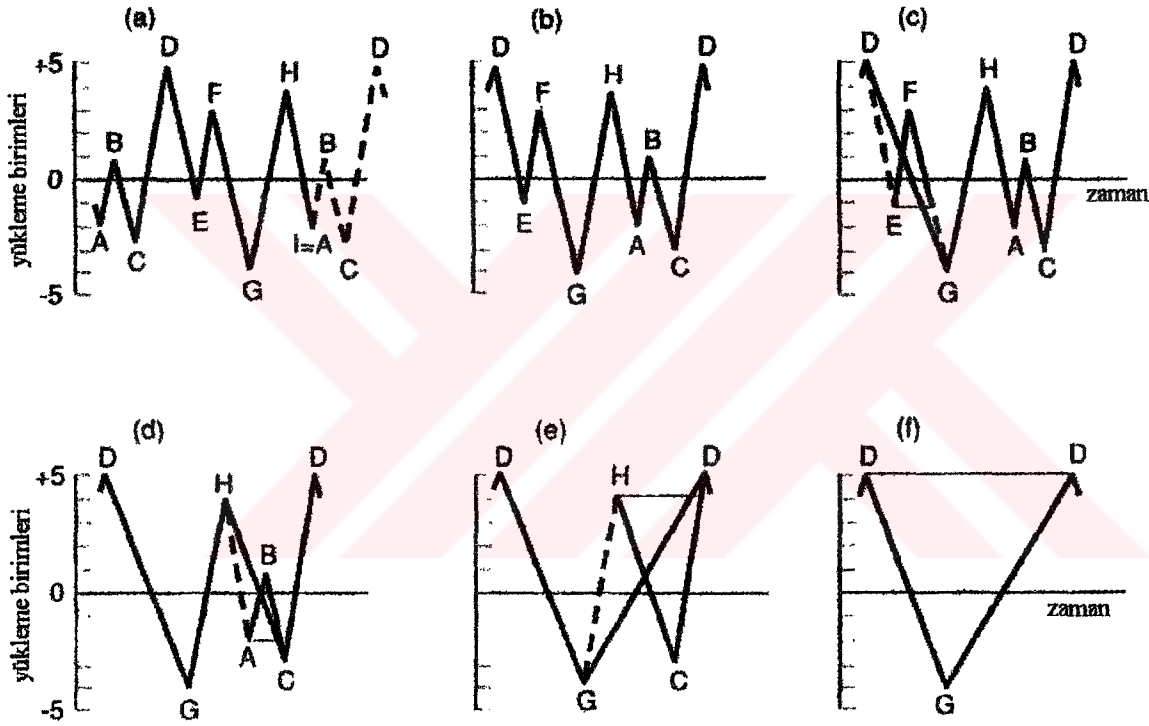
Şekil 2.4 Düzensiz yüklemeler için açıklamalar (Dowling, 1999)

Yüksek frekansta çevrim belirleme metodunun icra edilmesinde, eğer bir çevrim Şekil 2.5'te gösterilen kritere rastlarsa, o zaman bu çevrim teşhis edilir veya *sayılır*. Eğer ikinci değişim $\Delta\sigma_{YZ}$, birinci değişim $\Delta\sigma_{XY}$ 'den büyük veya ona eşitse, yüklem durumundaki X-Y-Z'nin bir çevrim içerdiği düşünülür. Eğer ikinci değişim gerçekten büyük veya eşitse, ilk değişime ($\Delta\sigma_{xy}$) eşit bir çevrim sayılır. Bu çevrim için ortalama değer, σ_x ve σ_y 'nin ortalamasıdır.



Şekil 2.5 Yüksek frekansta çevrim belirleme metodu ile bir çevrimi sayma işlemi (Dowling, 1999)

Yöntemin bitirilmiş hali Şekil 2.6 örneğini kullanarak açıklanabilir. Verilen gerilme halinin tekrarlanarak uygulandığını varsayalım. Böylece herhangi bir tepe veya çukur değerden işe başlayabiliriz. Bu esasta, yüklenme halinin bir kısmını son bölüme taşımak elverişli olacaktır. Böylece mutlak değerce en yüksek değerdeki gerilmeye sahip bir tepe veya çukur değer ile başlayıp biten bir sıra elde edilir. Şekil 2.6a ve b bunu resimlerle açıklamaktadır. Bunların ardından, çevrim sayma yeniden düzenlenmiş durumun başından başlayarak ve Şekil 2.5 kriterini kullanarak işe başlar. Eğer bir çevrim sayılmışsa, bu bilgi kaydedilir ve daha ileriki çevrim sayımları amacıyla bunun tepe ve çukurlarının bulunmayacağı varsayılır. (c'deki E-F çevriminde gösterildiği gibi.) Eğer bu yerdeki hiçbir çevrim sayılmazsa, bir çevrim oluşturana kadar biri ilerler. Örneğin d'de, E-F sayıldıktan sonra bir sonraki sayım A-B'ye rastlar.

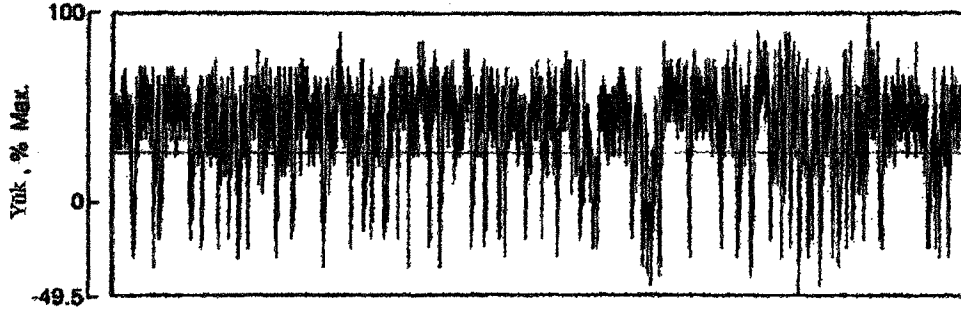


| çevrim | değişim | ortalama |
|--------|---------|----------|
| E-F | 4.0 | 1.0 |
| A-B | 3.0 | -0.5 |
| H-C | 7.0 | 0.5 |
| D-G | 9.0 | 0.5 |

Şekil 2.6 Yüksek frekansta çevrim belirleme ile ilgili örnek (Dowling, 1999)

Tüm durumlar bittikten sonra sayım işi bitmiştir. Bu örnek için, sayılan çevrimler E-F, A-B, H-C ve D-G'dir, ve bunların değişimleri ile ortalamaları Şekil 2.6'nın altında bir çizelge şeklinde verilmiştir. Orijinal durumda sayılan çevrimlerin bir kısmının E-F ve A-B gibi basit değişimlere, diğerlerinin ise H-C ve D-G gibi bir uçtan öbür uca kapsamlı değişime tekabül

ettiğini not ediniz. Sayılan en büyük değişim değeri her zaman en yüksek tepe değeri ile en alçak çukur değer arasında (bu örnek için D-G) olur.



| | | Ortalama | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|----------|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| Değişim | -15 | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | Hepsi |
| 20 | 4 | 1 | 5 | 2 | 2 | 5 | — | — | 3 | 6 | 15 | 27 | 29 | 32 | 22 | 12 | 6 | 2 | — | 173 |
| 25 | 2 | 4 | 3 | 9 | 8 | 10 | 4 | 6 | 2 | 7 | 17 | 37 | 36 | 43 | 33 | 13 | 7 | 1 | 2 | 244 |
| 30 | 1 | 1 | 5 | 3 | 1 | 1 | 4 | 3 | — | 4 | 13 | 20 | 20 | 23 | 20 | 8 | 6 | 1 | — | 134 |
| 35 | 1 | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | — | 1 | 3 | 2 | 8 | 17 | 16 | 11 | 11 | 7 | 2 | — | — | 91 |
| 40 | — | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | — | — | 4 | 7 | 15 | 16 | 9 | 8 | 2 | — | — | — | 68 |
| 45 | — | 1 | — | 4 | 3 | — | — | — | — | 2 | 1 | 9 | 7 | 2 | 3 | 1 | — | — | — | 33 |
| 50 | — | — | 2 | 2 | 2 | 1 | — | — | — | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | — | — | 21 |
| 55 | — | — | 1 | 1 | — | — | — | — | — | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | — | 1 | — | 1 | — | 18 |
| 60 | — | 1 | 1 | — | — | — | — | — | — | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | — | — | — | — | — | 10 |
| 65 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 2 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | 3 |
| 70 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 2 | — | 1 | — | — | — | — | — | — | 3 |
| 75 | — | — | — | — | — | — | 1 | — | — | — | 1 | 2 | — | — | — | — | — | — | — | 4 |
| 80 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 85 | — | — | — | — | 1 | — | 1 | 3 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 8 |
| 90 | — | — | — | — | — | — | — | — | 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 4 |
| 95 | — | — | — | — | — | 1 | — | 1 | 4 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 7 |
| 100 | — | — | — | — | — | — | — | 5 | 3 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 9 |
| 105 | — | — | — | — | — | — | — | 3 | 3 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 9 |
| 110 | — | — | — | — | — | — | — | — | 2 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 5 |
| 115 | — | — | — | — | — | — | — | — | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 3 |
| 120 | — | — | — | — | — | — | 1 | — | 1 | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 3 |
| 125 | — | — | — | — | — | — | — | — | 2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 2 |
| 130 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 135 | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 |
| 140 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 145 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 150 | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 |

Şekil 2.7 Bir kara taşıtının transmisyon elemanındaki düzensiz bir yüklemenin zamana göre değişimini ve değişim ile ortalamanın muhtelif kombinasyonlarındaki Yüksek frekansta çevrim adetlerini veren bir matris. Değişim ve ortalama değerler tepe yükünün yüzdelik oranıdır ve bunlar matrisin yapısında farklı değerlere yuvarlanmıştır (Dowling, 1999)

Daha uzun durumlar için, yüksek frekansta çevrim belirleme neticelerini, değişim ve ortalamanın muhtelif kombinasyonlarında oluşan çevrim adetlerini veren bir matris şeklinde ortaya koymak uygun olacaktır. Buna bir örnek Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Değişim ve

ortalama değerlerin uygun ölçüde bir matris çıkması için yuvarlandığını not ediniz. Çevrim sayma çoğunlukla direkt olarak yükleme durumlarına uygulanır.

Yüksek frekansta çevrim belirleme ile ilgili daha fazla bilgi ASTM Standart No. E 1049'da ve SAE Fatigue Design Handbook (Rice 1997)'ta bulunabilir. Bahsedilen referanslardan ikincisi aynı zamanda konuyla ilgili bilgisayar programlarını da içermektedir (Dowling, 1999).

2.7 Yorulma Limiti ve Değişken Genlikli Yükleme:

Çoğu çelikler ve bazı başka malzemeler belirgin bir yorulma limiti sergilerler. Yani, yorulma hasarının ortaya çıktığı gerilmenin altında bir gerilme asla oluşmaz. Bazı durumlarda, bir mühendislik parçası tasarlamak mümkün olmaktadır, böylece gerilmeler her zaman malzemenin yorulma limitinin altında kalacaktır. Mekanik tasarım kitaplarında bunun gibi bir yaklaşım yaygın bir şekilde tavsiye edilir.

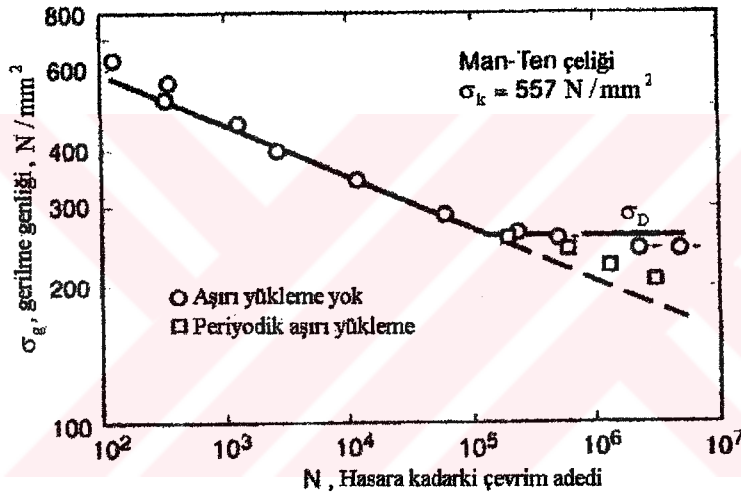
Yine de birçok durumda, büyük bir miktarda düşük gerilmeli çevrimlerle birleşmiş arasıra oluşan şiddetli çevrimler vardır. Düşük gerilmeli çevrimlerin pek çoğu bir makinanın, taşıtın veya yapının rutin çalışması nedeniyle oluşan tipik kullanım veya titreşim gerilmeleridir. Yüksek genlikli çevrimler, bir otomobilin büyük bir çukura düşmesi sırasında olduğu gibi nispeten nadir olaylara bağlıdır. Başka bir örnek ise, bir güç makinasındaki türbinlerin bakım için durdurulup ardından tekrar çalıştırıldığı örneğinde olduğu gibi bir makinada rotasyonel gerilmelerin nadiren kaldırılıp tekrar uygulanmasıdır. Bu gerilmelere merkezkaç gerilmeleri denir.

Tesadüfe bağlı bu yüksek gerilme çevrimlerinin bizzat kendileri yorulma ömrünü sınırlayan en büyük faktör olabilir. Bu yüzden, bu gerilmeler herhangi bir yorulma ömrü hesabında gözönüne alınmalıdır. Buna ek olarak, bu tesadüfi yüksek çevrimler malzemenin davranışını değiştirebilir ve böylece bunlara eşlik eden düşük gerilme çevrimleri Palmgren-Miner kuralının beklediği hasara oranla daha fazla yorulma hasarına neden olur. Bu tesadüfi yüksek çevrimler, belirgin bir yorulma sınırı olan çelikler için eşlik eden düşük gerilme çevrimlerinin sanki yorulma limiti yokmuş gibi rol oynamasına neden olur.

Bunu açıklayan düşük dayanımlı bir çelik için test verileri Şekil 2.8'de verilmiştir. Periyodik aşırı yüklemeye karşılık gelen data noktaları için, malzeme her 10^5 çevrim aralığında bir şiddetli çevrime maruz kalmıştır. Aşırı yükleme çevrimlerindeki kümülatif ömür oranı $\sum n/N$ birkaç yüzdeyi asla aşmamasına rağmen, artık σ_D yorulma limiti altında oluşan hasarla beraber ömür üzerinde büyük bir etki olmuştur. Bu malzeme için Çizelge 2.1'deki

sabitlerle birlikte yorulma limiti altındaki bu hasarlar 2.5 denkleminin çizgisinin ekstrapolasyonuna makul ölçüde yakındır.

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaların deney sonuçları, belirgin yorulma limitine sahip tüm çeliklerde bunun gibi bir davranışın oluştuğunu, ve belirgin bir yorulma limiti olan herhangi bir başka metalin de buna benzer bir davranış göstereceğinin muhtemel olduğunu belirtirler. Bu yüzden, değişken genlikli yüklemenin hem yorulma limiti üzerinde, hem de yorulma limiti altında gerilme çevrimleri içerdiği yerlerde, gerilme-ömür ilişkisinin yorulma limiti altında bir log-log grafiğinde düz bir çizgi olarak ekstrapolasyon edilmesi ve hesaplar için bu çizginin kullanılması tavsiye edilir. Buradan, 2.4 veya 2.5 denklemleri formundaki bağıntılar isteğe bağlı uzun ömürlerde kullanılır ve tüm gerilmeler yorulma limiti altında olmadıkça yorulma limiti altındaki gerilmelerin sonsuz ömür vereceği varsayılmaz.



Şekil 2.8 Düşük dayanımlı bir çeliğin 0 ortalama gerilme ile sabit genlikli çevrim altındaki gerilme-ömür test dataları. Periyodik aşırı yüklenme testleri, her 10⁵ çevrimde şiddetli bir çevrim uygulamasını ve bunların $\sum n/N$ 'sinin birkaç yüzdeyi aşmamasını içerir

(Dowling, 1999)

Eğer en şiddetli gerilmeler yorulma limitini sadece küçük bir miktar aşarsa, yukarıdaki yöntem aşırı derecede konservatif olabilir. Ne yazık ki, ömür hesabını daha mükemmelleştirebilmek için genel kabul görmüş hiçbir metot bulunmamaktadır. Davranışları kesin değerlendirebilmek için bir opsiyon ise, ilgilenilen malzeme veya makine elemanı üzerinde işletmede karşılaşılabilecek umulan gerilme haline benzer bir gerilme hali ile test yapmaktır (Dowling, 1999).

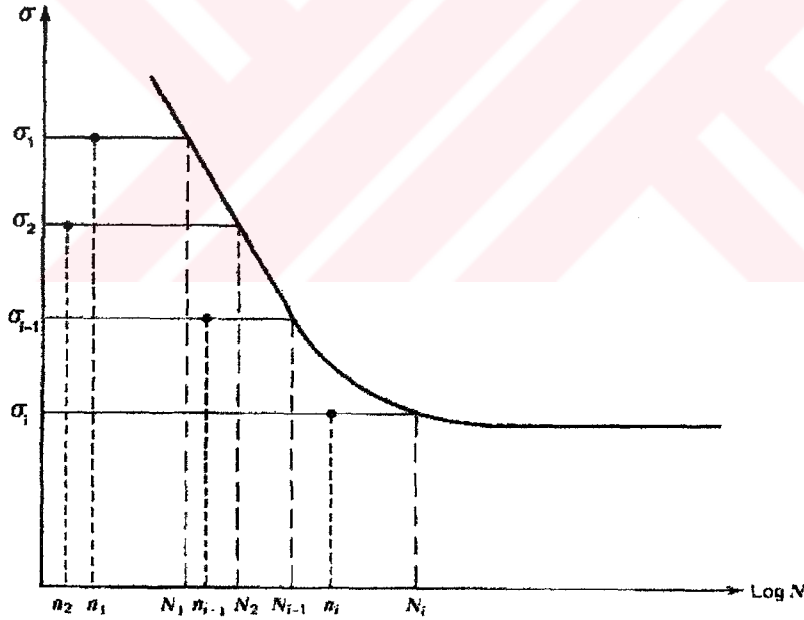
3. KÜMÜLATİF HASAR TEORİLERİ:

3.1 Lineer Kümülatif Hasar Teorileri:

3.1.1 Palmgren-Miner Teorisi:

Değişik seviyelerdeki gerilmelere bağlı olarak, yorulma hasarının lineer veya lineer olmayan birikimleri sorunu uygulamalarda büyük önem taşır.

Şekil 1.5b'de gösterilen değişken genlikli şartlardaki yorulma dayanımını önceden tahmin edebilmek adına, sabit genlikler için olan σ -N yorulma eğrilerini kullanan bazı girişimler olmuştur. İlk kümülatif hasar teorisi 1920'lerde rulmanlı yatakların ömürlerini tahmin etmek için İsveç'te A. Palmgren tarafından uygulanmıştır. Ardından 1937'de daha genelleştirilmiş koşullarla B. F. Langer kullanmıştır. Yine de kural, 1945'te M. A. Miner'in bir dokümanında ortaya çıkıncaya kadar yaygın bir şekilde bilinip kullanılmıyordu. Halen yaygın bir şekilde kullanılan bu lineer teori, *Palmgren-Miner Hipotezi* veya *Lineer Hasar Kuralı* olarak anılır. Teori Şekil 3.1'de gösterilen σ -N çizimini kullanarak açıklanabilir.



Şekil 3.1 Herbir 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 (Collins, 1993)

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi değişken genlikli bir yükleme durumunu düşünelim. σ -N eğrisinin tanımına göre, σ_1 gibi bir sabit gerilme genliğinde çalışmak, N_1 çevrim sonra tümüyle hasar veya işe yaramama oluşturacaktır. σ_1 gerilme genliğinde N_1 'den daha küçük

olan n_1 çevrim sayısında çalışmak ise D_1 diyebileceğimiz daha küçük bir hasar oranı oluşturacaktır. D genellikle hasar oranını ifade eder. Pekçok değişik gerilme seviyesi spektrumunda çalışmak, spektrumdaki her değişik gerilme seviyesi σ_i için D_i hasar oranı oluşturacaktır. İşte bu gerilmelerin her biri elemanda ayrı hasarlar meydana getirdiğinden ve kırılmaya sebep olan hasar bunların birikmesinden ileri geldiğinden bu olaya kümülatif veya birikmiş hasar yorulması denilmektedir. Yani bahsedilen hasar oranlarının toplamı K 'ya erişince, hasar olacağı beklenir:

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{i-1} + D_i = K \quad (3.1)$$

Palmgren-Miner hipotezi herhangi bir gerilme seviyesi σ_i 'deki hasar oranının, çalışmadaki çevrim sayısının, yine bu gerilme seviyesinde hasarı gerçekleştirecek toplam çevrim adedine oranıyla doğru orantılı olduğunu kesinlikle söylemektedir.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2)$$

Bunun ardından Palmgren-Miner Kuralı'na göre, basit olarak bu çevrim oranlarının toplamı K 'ya ulaştığında yani ömür % 100 tükendiğinde yorulma hasarının bekleneceği ifade edilir. 3.2'den yararlanarak 3.1'i şöyle yazabiliriz:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{i-1}} + \frac{n_i}{N_i} = K \quad (3.3)$$

veya

$$\sum_{j=1}^i \frac{n_j}{N_j} = K \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada n_1, n_2, \dots, n_i sırası ile $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i$ 'ye tekabül eden yük tekrarları, N_1, N_2, \dots, N_i sırası ile $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i$ 'ye tekabül eden elemanın ömrü ve K deneysel olarak tayin edilen ve değeri 0,7 ile 2,2 arasında değişen bir sabittir. En çok tavsiye edilen $K = 1$ değeri ile 3.3 denklemi şuna dönüşür (Akkurt, Kent, 1975):

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{i-1}} + \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.5)$$

ve buradan da eşdeğer ömür $N_{eş}$ 'in kırılmaya kadar yapılan çeşitli gerilme genliklerindeki

çevrim oranlarının toplamı olacağı açıkça görülmektedir.

$$N_{eş} = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i$$

n_1, n_2, \dots, n_i değerlerinin tespiti çok güç olduğundan, bunlar c_1, c_2, \dots, c_i orantı faktörleri olmak üzere elemanın $N_{eş}$ toplam ömrünün $n_1 = c_1 \cdot N_{eş}$, $n_2 = c_2 \cdot N_{eş}$, ..., $n_i = c_i \cdot N_{eş}$ kısımları olarak ifade edilirse, 3.5 denklemi

$$\frac{c_1}{N_1} + \frac{c_2}{N_2} + \dots + \frac{c_i}{N_i} = \frac{1}{N_{eş}} \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$c_1 \cdot N_{eş} + c_2 \cdot N_{eş} + \dots + c_i \cdot N_{eş} = N_{eş} \quad \text{ve} \quad c_1 + c_2 + \dots + c_i = 1 \quad \text{dir.}$$

Palmgren-Miner denkleminin kullanılış şekli bir örnek ile açıklanacaktır. Şekil 3.2'de St 60 için Wöhler diyagramı çizilmiştir. Bu malzemeden yapılmış olan bir eleman, toplam ömrün %10'una ($c_1 = 0,1$), %40'ına ($c_2 = 0,4$) ve %50'sine ($c_3 = 0,5$) tekabül eden süreler içinde sırası ile $\sigma_1 = 50$ daN/mm², $\sigma_2 = 44$ daN/mm² ve $\sigma_3 = 38$ daN/mm² değerlerinde tam değişken bir gerilmeye maruzdur. Şekil 3.2'de verilmiş Wöhler diyagramından görüleceği üzere (Akkurt, Kent, 1975)

$$\sigma_1 = 50 \text{ daN/mm}^2 \quad \text{için} \quad N_1 = 3 \cdot 10^3 \text{ yük tekrarı}$$

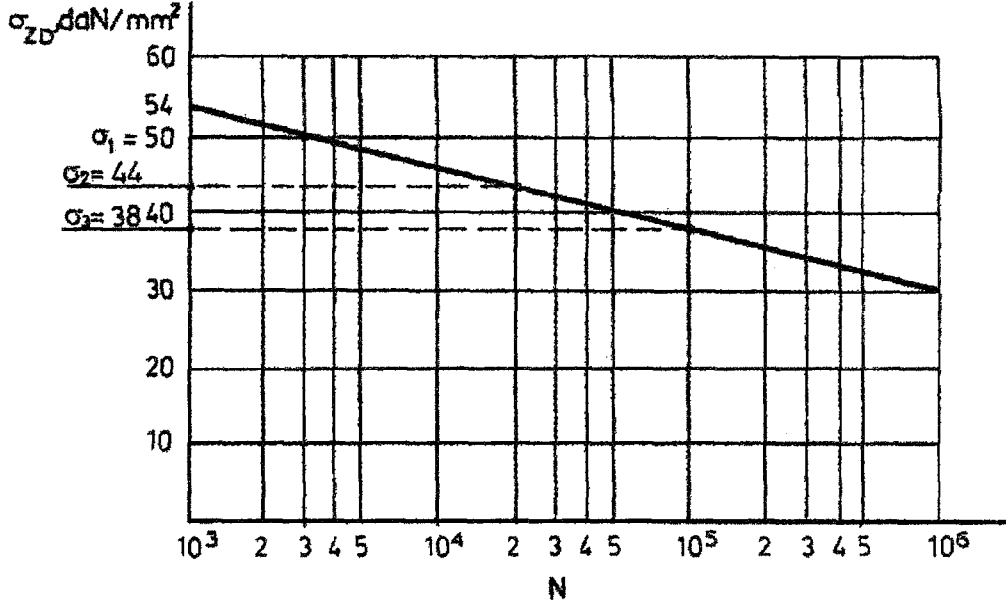
$$\sigma_2 = 44 \text{ daN/mm}^2 \quad \text{için} \quad N_2 = 2 \cdot 10^4 \text{ yük tekrarı}$$

$$\sigma_3 = 38 \text{ daN/mm}^2 \quad \text{için} \quad N_3 = 1 \cdot 10^5 \text{ yük tekrarı}$$

karşılık gelir. Bu değerler ile 3.6 denklemi

$$\frac{0,1}{3 \cdot 10^3} + \frac{0,4}{2 \cdot 10^4} + \frac{0,5}{1 \cdot 10^5} = \frac{1}{N_{eş}}$$

şeklinde yazılır ve bundan da $N_{eş} = 1,71 \cdot 10^3$ yük tekrarı olarak elde edilir (Akkurt, Kent, 1975).

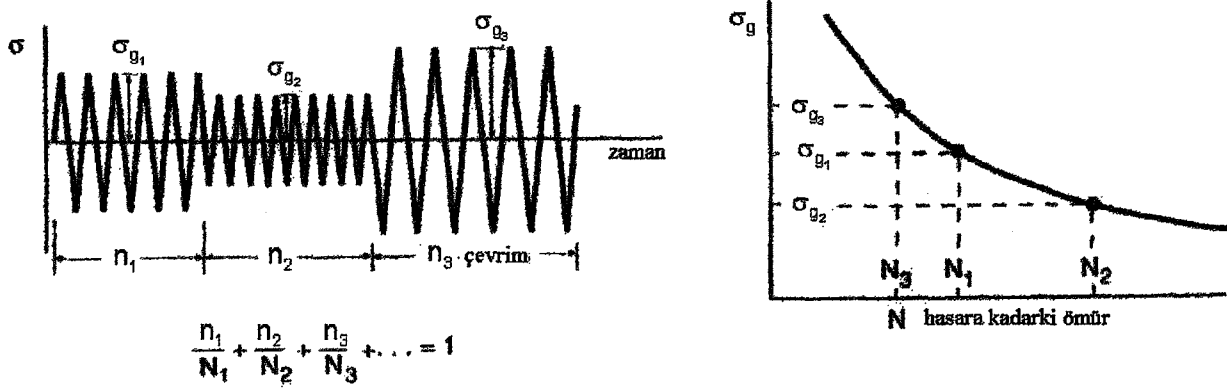


Şekil 3.2 St 60 için pratik Wöhler diyagramı (Akkurt, Kent, 1975)

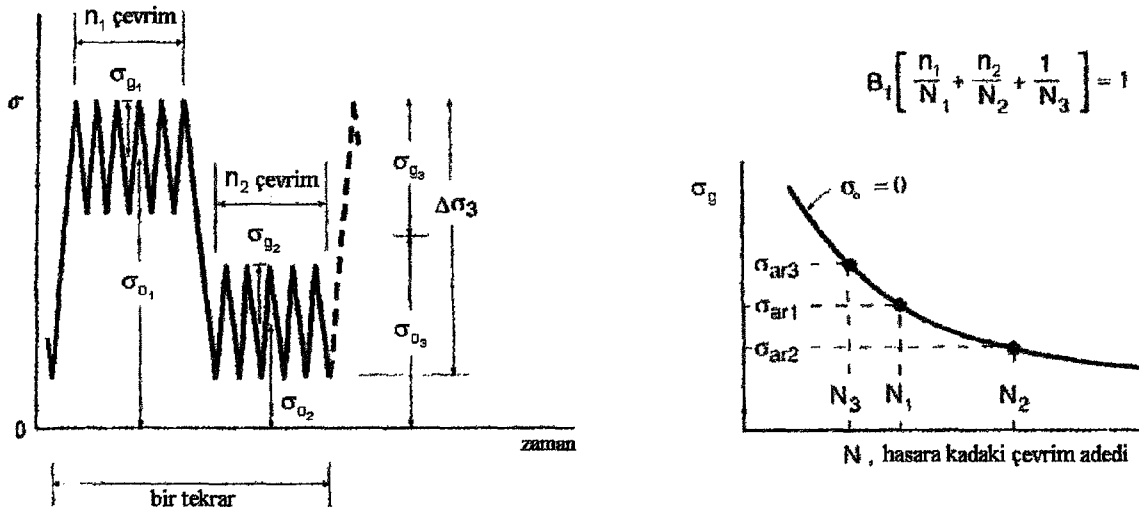
Çoğu kez, bir dizi değişken genlikli yükleme defalarca tekrarlanır. Böyle bir durumda, yani bir tekrarın üzerindeki hallerde, çevrim oranlarını toplamak ve ardından bunu toplamın 1'e ulaşması için gerekli sayıdaki tekrarla mayla çarpmak elverişli olacaktır (Dowling, 1999).

$$B_f \left[\sum_{\text{bir tekrarlama}} \frac{n_j}{N_j} \right] = 1 \quad (3.7)$$

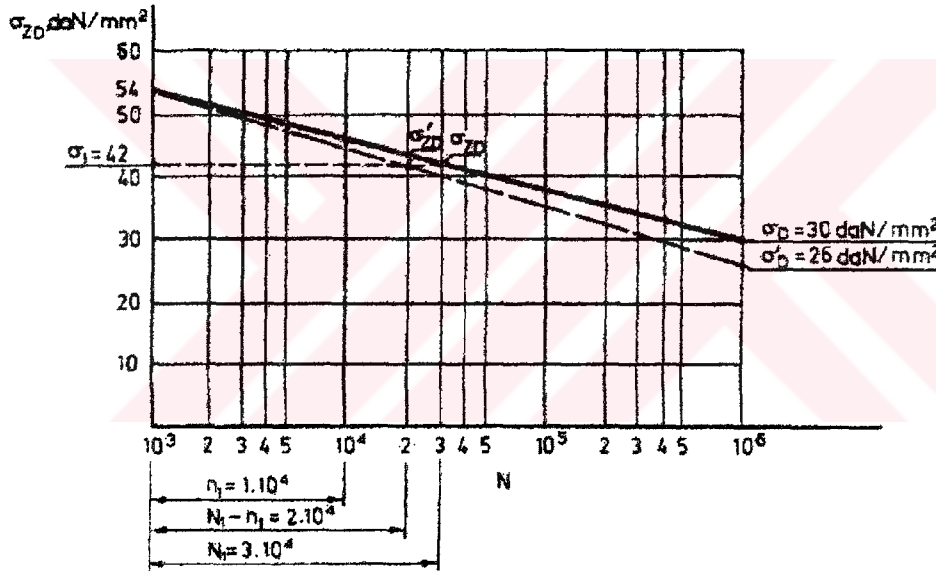
Burada B_f hasara kadarki çevrim bloğunun tekrarlama sayısıdır. Bu, Şekil 3.4'de gösterilmiştir (Dowling, 1999).



Şekil 3.3 Tam değişken yükleme durumu için Palmgren-Miner kuralının ömür tayini (Dowling, 1999)



Şekil 3.4 Ortalama değer değişimleri ile birlikte tekrarlayan gerilme hali için ömür tayini
(Dowling, 1999)



Şekil 3.5 Birikimli hasara uğramış malzemenin yorulma limitindeki azalmanın gösterilişi
(Akkurt, Kent, 1975)

Malzemenin orjinal tam değişken sürekli mukavemet sınırı σ_D olduğuna göre, birikmiş hasara uğramış bir malzemenin sürekli mukavemet sınırı σ'_D ile gösterilirse $\sigma'_D < \sigma_D$ olması gerekir. σ'_D değerini bulmak için yeterli bir yaklaşıklık ile Miner kaidesine dayanarak Mason yöntemi kullanılabilir. Buna göre Şekil 3.5'te Wöhler diyagramı çizilmiş olan St 60 malzemesinin $n_1 = 1.10^4 = 10000$ yük tekrarı süresince $\sigma_1 = 42$ daN/mm²'lik tam değişken bir gerilmeye maruz kaldığı düşünülürse, bu gerilmeye karşılık gelen ömür $N_1 = 3.10^4 = 30000$ yük tekrarı olarak diyagramdan okunur. Demek ki $n_1 = 1.10^4$ yük tekrarı

süresince $\sigma_1 = 42 \text{ daN/mm}^2$ 'lik gerilmenin uygulanmasından sonra malzemenin kalan ömrü

$$N_1 - n_1 = 30000 - 10000 = 20000 = 2 \cdot 10^4 \quad \text{yük tekrarı olur.}$$

$\sigma_1 = 42 \text{ daN/mm}^2$ ve $N_1 - n_1 = 2 \cdot 10^4$ kalan yük tekrarı için birikmiş hasara uğramış malzemenin zamana bağlı mukavemet sınırı σ'_{zd} 'dir (Şekil 3.5). σ'_{zd} ve $N = 10^3$ yük tekrarı için σ_{zd} noktalarını birleştiren doğru (şekilde St 60 için $\sigma_{zd} = 54 \text{ daN/mm}^2$ 'dir) hasara uğramış malzemenin Wöhler eğrisini teşkil etmektedir ve $N = 10^6$ yük değişme sayısı için hasara uğramış malzemenin sürekli mukavemet sınırı $\sigma'_D = 26 \text{ daN/mm}^2$ 'dir (Akkurt, Kent, 1975).

Palmgren-Miner hipotezinin veya diğer adıyla lineer hasar kuralının gerçek bir üstünlüğü vardır: Basitlik; ve bu nedenle çok yaygın kullanılır. Yine de, bu basitliğin içinde bazı önemli etkilerin gözardı edildiği itiraf edilmelidir. Bu yüzden hasar tahmininde hatalar beklenebilir. Belkide lineer teorisinin en önemli ihmalleri, uygulanan çeşitli gerilme seviyelerinin uygulanış sırasının hiçbir etki yapmaması ve geçmiş yükleme durumlarına aldırmadan hasarın verilen bir gerilme seviyesinde aynı oranla birikmesinin varsayılmasıdır. Deneysel sonuçlar çeşitli gerilme seviyeleri uygulandığındaki sıranın önemli bir etkisi olabileceğini ve ayrıca verilen bir gerilme seviyesindeki hasar oranının önceki çevrimli gerilme değerinin bir fonksiyonu olabileceğini göstermektedir. Örnek olarak, çevrimsel gerilme seviyeleri $\sigma_1 > \sigma_2$ 'ye maruz kalan laboratuvar numuneleri kullanarak ve iki grup numune test ederek iki adımlı bir test yapılsın. Eğer ilk grupta önce σ_1 uygulanır takiben σ_2 uygulanırsa ve ikinci grupta σ_2 önce uygulanır ve ardından σ_1 uygulanırsa, Miner'in ömür hesaplarında iki ayrı grup için önemli farklar çıkar. Azalan gerilme dizisi için, yani önce σ_1 çevrimleri uygulanacak takiben σ_2 çevrimleri, Miner'in toplamı $\sum(n/N)$ 1'den düşük çıkar. Artan gerilme dizisi için, yani önce σ_2 çevrimleri uygulanacak takiben σ_1 çevrimleri, Miner'in toplamı $\sum(n/N)$ 1'den büyük çıkar. Miner'in hasar anı toplamı için deneysel değerler çoğu kez yaklaşık 1/4 ile 4 arasında değişir. Bu kullanılan çevrimli gerilme genliklerinin azalan veya artan tipine göre değişir. Eğer çeşitli çevrimli gerilme genlikleri sırada bir yarı-rasgele yoluyla karıştırılmışsa, Miner'in toplamı hasar anında 1'e daha çok yaklaşır. (Bu sefer hasara tekabül eden Miner toplamları yaklaşık 0,6 ile 1,6 arasında değişir.) Çoğu işletme uygulamalarında gerilmeler yarı-rasgele iniş çıkışları içerdiğinden, hasar tahmini için Palmgren-Miner lineer hasar kuralının kullanışı çoğu kez tatmin edicidir (Collins, 1993).

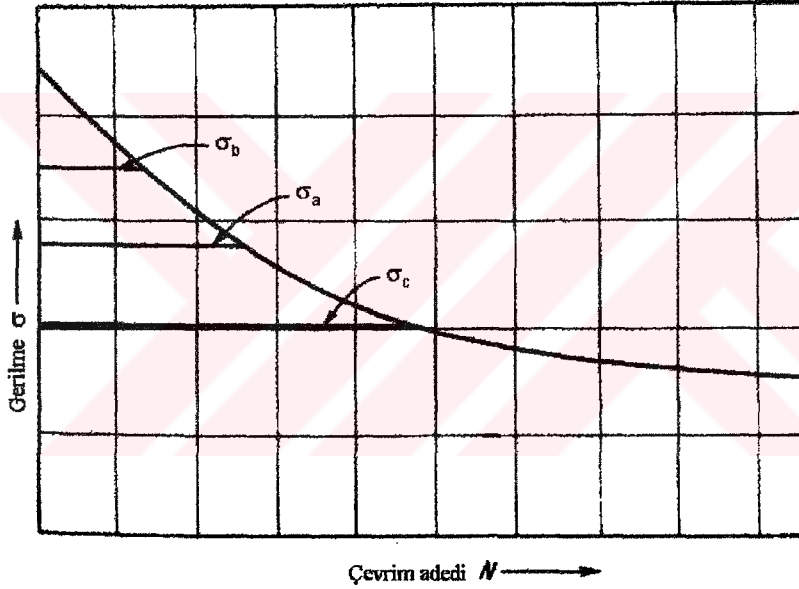
Artan gerilme genlik sıraları için 1'den daha büyük $\sum(n/N)$ deneysel değeri ve azalan gerilme genlik sıraları için 1'den daha küçük değerler gösteren laboratuvar numunesi sonuçlarını gölgelemek için parçaların ve yapıların spektrum yükleme testi sonucu raporları sürekli zıt bir eğilimdeymiş gibi görünür. Bundan, parçalar ve yapılar için aynı gerilme genliği çevrim bloklarının azalan bir sırada olmasına kıyasla, artan gerilme genliği sıralarının daha çok hasara yol açtığı ortaya çıkar. Bu çelişkili durum henüz açık bir şekilde ifade edilememiştir. Ama şüphesizki bu, parçaların ve yapıların yapısal birleşme ve süreksizliklerindeki gerilme konsantrasyonunun etkisiyle parça ve yapıların içinde kalan artık gerilmelerle ilişkilidir. Önce yüksek gerilmenin uygulanması ve ardından gevşemesi yerel gerilme konsantrasyonu bölgelerinde artık basma gerilmesi alanı oluşmasıyla sonuçlanır ve eğer artık basma hiçbir şekilde teşvik edilmezse daha sonra uygulanan düşük seviyeli çevrimli gerilmeler daha az hasar oluşturur. Yorulma hasarında, yüksek gerilme seviyesinde tek bir çevrimin bile önemli bir etkisi olabilir (Collins, 1993).

Değişken genlikli yüklemenin bazı çevrimleri ortalama gerilme içerebilirler. Bu taktirde, tam değişken σ -N eğrisini uygulamadan önce eşdeğer tam değişken gerilmelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu yapılmazsa ortalama gerilme etkilerini zaten gözönüne alan bir ömür denklemi uygulanır. Buna ilave olarak, ortalama değerdeki değişim yüzünden değişen gerilmenin de çevrim oranları toplanırken hesaba katılması gerekmektedir. Örneğin Şekil 3.4'te, genlik-ortalama kombinasyonları $(\sigma_{g_1}, \sigma_{o_1})$ ve $(\sigma_{g_2}, \sigma_{o_2})$ 'deki çevrimler apaçık ortadır. Yine de, ilave bir çevrimi de $(\sigma_{g_3}, \sigma_{o_3})$ hesaba katmak gerekir. Aslında eğer σ_{g_1} ve σ_{g_2} gerilmeleri küçükse, bu son çevrim yorulma hasarının çoğuna neden olmaktadır. Bu yüzden bu gerilmeyi ihmal etmek ciddi bir non-konservatif ömür tahminiyle sonuçlanır. Çevrimleri teşhis etmenin modeli, daha önceden açıklandığı gibi çevrim saymayla geniş bir biçimde ele alınabilir (Dowling, 1999).

Bahsedilen tüm problemlerine rağmen, basitliği ve diğer bir sürü karışık kümülatif hasar teorilerinin hasar tahmin güvenilirliğine her zaman önemli sayılacak bir katkısı bulunmadığı için Palmgren-Miner lineer hasar kuralı belkide en sık kullanılan yöntemdir. Yine de, kümülatif hasar prosesini daha iyi anlayabilmek için ortaya konmuş diğer çeşitli kümülatif hasar teorilerini de sınamak gerekir.

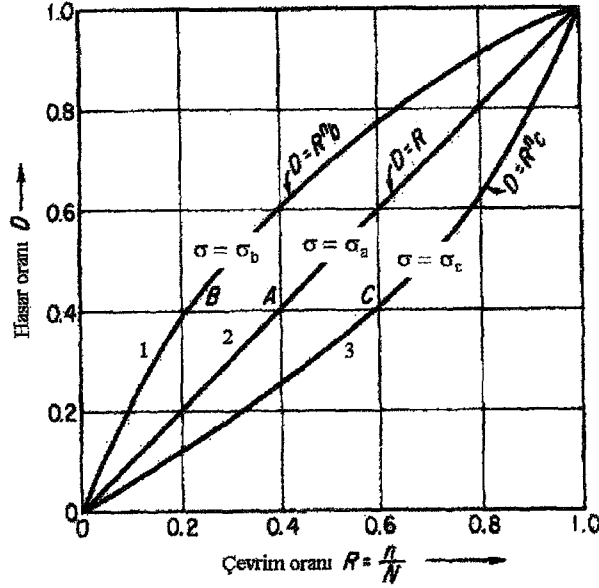
3.2 Non-Linear Kümülatif Hasar Teorileri:

Palmgren-Miner denklemi bazı malzemelerin deneysel sonuçlarıyla yaklaşık olarak uyuşmasına rağmen, genelde hasarı tanımlamak için yetersiz bir temeldir. Palmgren-Miner denklemindeki bu yanlışlığın bir nedeni, önceki bölümde açıklandığı üzere denklemde uygulanan gerilmelerin sırasının yorulma ömrüne hiçbir etkisinin olmadığı düşünülmesidir. Başka bir deyişle, eğer σ_A , σ_B ve σ_C gibi üç gerilme seviyesi ve $\sigma_A > \sigma_B > \sigma_C$ olduğu varsayılırsa, Miner denklemi yüksek gerilme olan σ_A 'nın ilk önce veya en son uygulanması arasında hiçbir fark olmayacağını ima etmektedir. Buna rağmen testler, malzeme üzerinde yüksek gerilmenin önce uygulanmasının daha büyük bir hasar etkisi, malzeme üzerinde düşük gerilmenin önce uygulanmasının ise yararlı bir gerilme sertleşmesi etkisi oluşturabileceğini göstermektedir (Marin, 1966).



Şekil 3.6 Yorulma dayanımı – Çevrim ilişkisi (Marin, 1966)

Eğer Palmgren-Miner lineer hasar teorisi hasar oranı D 'nin çevrim oranı n/N 'nin bir fonksiyonu olacak şekilde çizimlendirilirse, sonuç Şekil 3.7'de 2 nolu eğriyle gösterilen düz çizgi olur. Şekil 3.7, Şekil 3.6'daki gerilme seviyeleri için çizilmiştir. Buna rağmen, deneysel sonuçların dikkatle incelenmesine dayanarak, yorulma hasarı sık sık Şekil 3.7'de 1 ve 3 nolu eğrilerle gösterildiği gibi non-lineer olarak birikir. Ayrıca deneysel kanıtlar gösterir ki, Şekil 3.7 gibi bir diyagramdaki hasar eğrileri çevrimli gerilme genlik seviyelerinin bir fonksiyonudur. (Düşük eğriler düşük gerilme seviyelerine tekabül ederek) Böylece, Şekil 3.7'de, 1. eğri 2. eğriden daha yüksek bir gerilme seviyesine tekabül edecek ve 2. eğri ise 3. eğriden daha yüksek bir gerilme seviyesine tekabül edecektir.



Şekil 3.7 Yorulma hasarı ve çevrim oranı arasındaki ilişki (Marin, 1966)

1 ve 3 nolu eğrilerin anlamını vurgulamak için, 0,4'lük bir hasar oranı Palmgren-Miner teorisinin önceden haber verdiği üzere $n/N = 0,4$ 'lük bir çevrim oranında oluşacaktır, ancak aynı çevrim oranı gerçekte 1. eğri şartlarında 0,6'lük bir hasar oranı veya 3. eğri şartlarında 0,25'lik bir hasar oranı oluşturacaktır. Başka bir deyişle, aynı hasar oranı için, σ_a gerilmesinden daha yüksek bir gerilme olan σ_b gerilmesinde yüklemek daha düşük bir çevrim oranı n/N 'e (veya daha kısa ömre), σ_a gerilmesinden daha düşük bir gerilme olan σ_c gerilmesinde yüklemek ise daha yüksek bir çevrim oranı n/N 'e (veya daha uzun ömre) götürür. Şekil 3.7'deki eğrilerle gösterilen bu gözlemler deneylerle doğrulanmıştır.

Kümülatif hasarı yorumlayabilmek için Şekil 3.7'de gösterildiği gibi gerilmelerin uygulanış sırasının etkisini de hesaba katan bir takım metotlar ileri sürülmüştür. Aşırı yüklemenin hasar etkisini hesaba katan yani hasar ve çevrim oranı arasındaki non-lineer ilişkiyi vurgulayan bu teorilerin sınanması, bunların karmaşık olduğunu göstermiştir.

3.2.1 Marco-Starkey Kümülatif Hasar Teorisi:

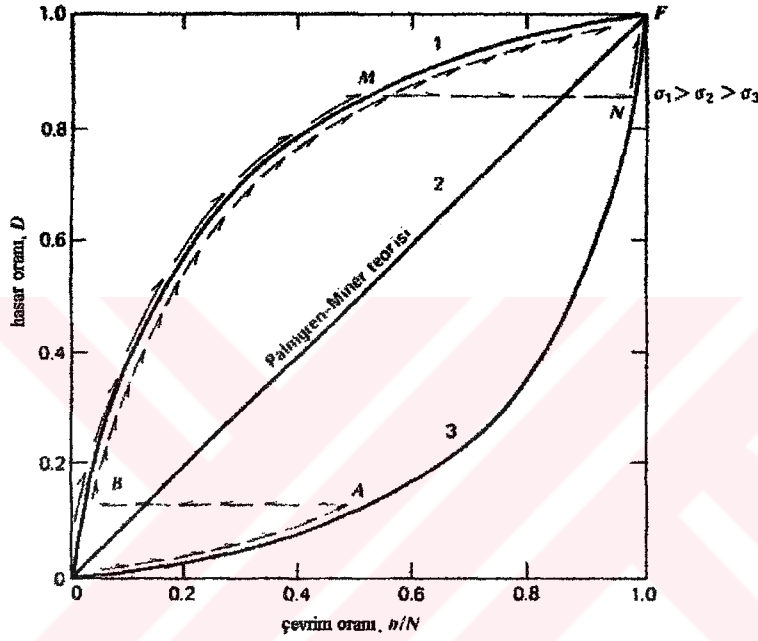
Non-lineer kümülatif hasar teorilerinin ilklerinden biri Marco ve Starkey tarafından ileri sürülmüştür. Benzer bir hipotez aynı zamanda Richart ve Newmark tarafından da ileri sürülmüştür. Marco-Starkey Teorisi şu şartlara dayanmaktadır (Collins, 1993):

- Tüm seviyelerdeki, tam değişken sinüsoidal gerilme genlikleri için hasar eğrileri şu ilişkiyle tanımlanabilir:

$$D = \left(\frac{n}{N} \right)^{m_i} \quad (3.8)$$

Burada m_i gerilme seviyesinin bir fonksiyonudur.

- Bir numune tam değişken sinüsoidal gerilmelerin herhangi bir sırasına maruz kaldığında, D'lerin toplamı 1'e ulaştınca bozulacaktır.
- $\sum (n/N)$ kritik bir değere ulaştığında kırılma yani %100 hasar gerçekleşecektir.



Şekil 3.8 Yorulma hasarının, çevrim oranının bir fonksiyonu olarak gösterimi (Collins, 1993)

Bu teorinin kullanılışı hasar D'nin oran n/N 'e göre 3 değişik gerilme seviyesi için çizildiği Şekil 3.8 üzerinde açıklanabilir. Örnek olarak farzedelim ki σ_1 ve σ_3 gerilme seviyeleri olsun. İlk durum olarak, önce çevrim oranı $n/N = 0,5$ olana kadar σ_1 uygulansın ardından $D = 1$ 'de kırılma gerçekleşinceye kadar σ_3 uygulansın. İkinci durum içinse, önce $n/N = 0,5$ olana kadar σ_3 uygulansın, takiben kırılma olana dek σ_1 uygulansın.

İlk durumu Şekil 3.8'de O-M-N-F ile tarif edilen yol göstermektedir; ve bu durumda kırılmayı oluşturacak çevrim oranı eğriden şöyle hesaplanabilir:

$$\sum \frac{n}{N} = \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_1} + \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_3} \quad (3.9)$$

$$\sum \frac{n}{N} = 0,5 + (1 - 0,98) \quad (3.10)$$

$$\sum \frac{n}{N} = 0,52 \quad (3.11)$$

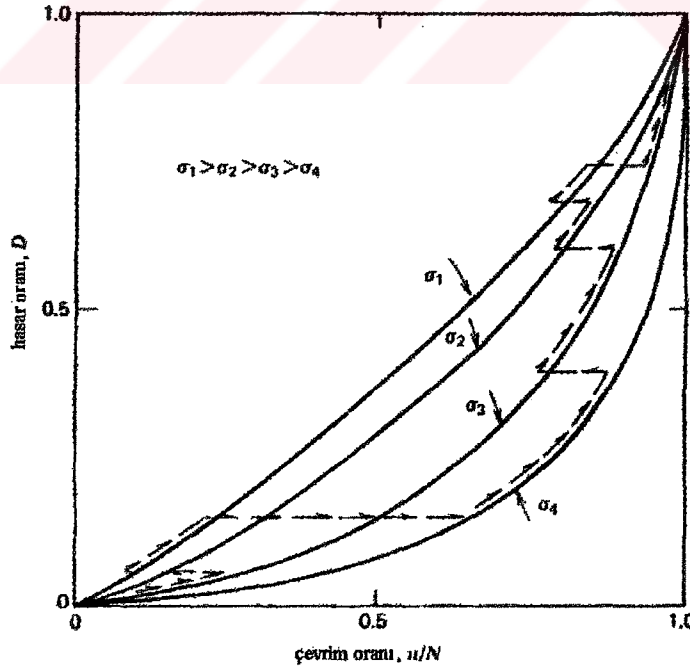
Aynı iki gerilmenin ikinci durumunda izlenen yol O-A-B-F ile tarif edilmiştir; ve bu durumdaki kırılmayı oluşturacak çevrim oranı ise eğriden şu şekilde hesaplanabilir:

$$\sum \frac{n}{N} = \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_3} + \left(\frac{n}{N} \right)_{\sigma_1} \quad (3.12)$$

$$\sum \frac{n}{N} = 0,5 + (1 - 0,03) \quad (3.13)$$

$$\sum \frac{n}{N} = 1,47 \quad (3.14)$$

Bilindiği gibi σ_1 , σ_3 'ten daha büyüktür. Bu analizin sıra itibariyle yüksek gerilme önce uygulandığında biriken çevrim oranının 1'den düşük çıktığını ve düşük gerilme önce uygulandığında ise biriken çevrim oranının 1'den yüksek çıktığını gösterdiğini gözlemleyebiliriz. Bu sonuç, laboratuvar testlerindeki deneysel sonuçlarla uyum içindedir.



Şekil 3.9 Birçok değişik çevrimli gerilme sırası için çizilmiş hasar durumu. Yükleme sırası:

$$\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_4 - \sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3 \quad (\text{Collins, 1993})$$

Bu teorinin fikrini özetlemek gerekirse, eğer hasar olduğu ana tekabül eden çevrim oranını yani parçanın ömrünü hesaplamak istenirse öncelikle Şekil 3.9'da gösterildiği gibi gerilme seviyelerinin bir fonksiyonu olarak hasar oranı - çevrim oranı eğrileri çizilmelidir. Bu eğrilerin herbiri 3.8 formülünün empirik halleriyle tanımlanabilir. Ardından çalışılan gerilme seviyesi sıraları yerleştirilir ve Şekil 3.9'da olduğu gibi hasar oranı 1'e ulaşmaya kadar sırasıyla herbir gerilme kendine özgü eğride ilerleyerek hasar durumu çizilir. Eğriden eğriye sabit hasar çizgileriyle geçilir. (Yatay çizgiler)

3.2.2 Henry Kümülatif Hasar Teorisi:

Henry, yorulma limitleri bilinen malzemeler için ve σ -N bağıntısını $N = k(\sigma_D - \sigma_{D_1})$ olarak farz ederek bir teori geliştirmiştir. Bu kümülatif hasar teorisine göre σ -N eğrisi, yorulma hasarı birikimi olarak değiştirilmiş ve bu yorulma hasarı, yorulma limitindeki azalmanın kullanılmamış malzemenin orjinal yorulma limitine oranı ile tanımlanabilir. Burada hasar D, aşırı yüklenme yüzünden yorulma limitindeki azalma olarak tanımlanmıştır (Collins, 1993).

$$D = \frac{\sigma_D - \sigma_{D_1}}{\sigma_D} \quad (3.15)$$

Burada; D : hasar

σ_D : orjinal yorulma limiti

σ_{D_1} : hasardan sonraki yorulma limiti

Yukarıdaki formülün çözülebilmesi için σ_{D_1} 'nin verilmesi gerekir (Collins, 1993):

$$\sigma_{D_1} = \frac{\sigma \left(1 - \frac{n}{N}\right)}{\left(\frac{\sigma - \sigma_D}{\sigma_D}\right) + \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad (3.16)$$

3.16 denklemini Henry Teoremi'nin kullanışlı bir biçimidir. Bu denklem kullanılan σ_{D_1} terimini ifade etmektedir. σ_{D_1} , n çevrim adedi için σ gerilme genliği uygulandıktan sonraki yorulma limitidir. Orjinal yorulma limiti σ_D 'dir. Devamlı σ gerilme genliğindeki kırılma ömrü ise N çevrim adedidir. 3.16 denklemini, 3.15 denklemini kullanarak hasar denklemine dönüştürülürse şunu verir:

$$D = \frac{\frac{n}{N}}{1 + \left(\frac{\sigma_D}{\sigma - \sigma_D} \right) \left(1 - \frac{n}{N} \right)} \quad (3.17)$$

Burada; D: hasar oranı

n: σ gerilme genliğindeki çevrim adedi

N: hasara kadar olan ömür

σ_D : orjinal yorulma limiti

σ : uygulanan gerilme genliği

Henry Teoremi, 3.16 veya 3.17 denklemlerinin birbiri ardına gelen çeşitli gerilme değerlerine sırayla uygulanmasıyla, değişik gerilme seviyesi dizileri için genişletilebilir. Ardı ardına gelen bu proseste, σ_D değeri herbir gerilme genliğinin uygulanmasından sonra yeniden hesaplanmalıdır. Böylece σ_D , σ_{D_1} , σ_{D_2} , ... gibi bir dizi yorulma limiti değeri bulunacaktır.

Burada σ_D orijinal yorulma limiti, σ_{D_1} σ_1 gerilme seviyesinde n_1 çevrim adedi uygulandıktan sonraki yorulma limiti ve böyle sürüp gider. Bu tür bir prosedür hasar eklendikçe azalan yorulma limitinin hesaplanmasını sağlar. Henry Teoremi'nin kullanışlı bir modifikasyonunda, bir çevrimde tüm σ -N eğrileri σ_k noktasından geçer ve bu nokta tüm hasar seviyeleri için tamamlanmış σ -N eğrisini elde edebilmek adına yarı logaritmik bir σ -N diyagramında 3.16 formülünden hesaplanan 10^6 çevrimdeki σ_{D_1} değeriyle düz bir çizgi ile birleştirilir (Collins, 1993).

3.2.3 Gatts Kümülatif Hasar Teorisi:

Yukarıda açıklanan Henry Teoremi ile Gatts tarafından ortaya konan kümülatif hasar teorisi arasında birçok benzerlik vardır. Yine de, Gatts, gerilme çevrimlerinin uygulanmasıyla birlikte yorulma dayanımı ve yorulma limitinin sürekli olarak değiştiği ve bu değişimlerin gerilme genliğinin bazı fonksiyonlarıyla orantılı olduğu gerçeklerini kabul etmiştir. Bu gerçeklerden, σ -N eğrisinin denklemi şöyle kurulabilir (Collins, 1993):

$$k.N = \frac{1}{\sigma - \sigma_D} - \frac{1}{\sigma.(1-C)} \quad (3.18)$$

Burada, σ_D : $n = 0$ olduğu andaki yorulma limiti

σ_{D_1} : yorulma limiti (çevrimli gerilmenin bir fonksiyonu, bir sabit değil)

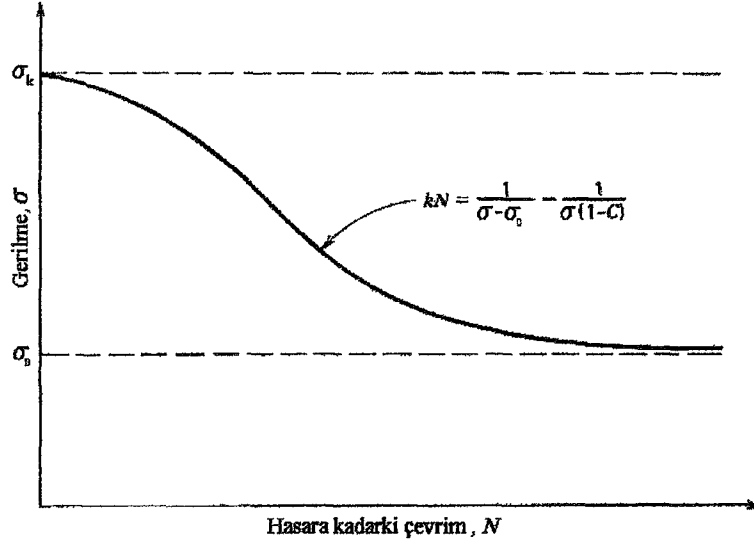
σ : uygulanan çevrimli gerilmenin genliği

n: uygulanan gerilmenin çevrim adedi

İC YATIRIM MENKUL DEĞERLER A.Ş.
EĞİTİM MENKUL DEĞERLER A.Ş.

k : empirik bir sabit

C : malzeme sabiti



Şekil 3.10 Gatts tarafından ortaya konan σ - N eğrisi yaklaşımı (Collins, 1993)

Bu denklem Şekil 3.10'da görülen eğrinin denklemdir ve bu deneysel olarak saptanan birçok σ - N eğrisiyle nitelik bakımından uyuşma içersindedir.

Gatts'ın bir sonraki adımı normalize edilmiş bir σ - N eğrisi versiyonu geliştirmektir. Bununla ilerleyebilmek için, aşağıdaki açıklamalar saptanmıştır:

$\gamma = \frac{\sigma}{\sigma_D}$: gerilme genliği oranı – gerilme genliğinin yorulma limitinin orijinal değerine oranı.

$\beta = \frac{n}{N}$: çevrim oranı – σ gerilme genliğinde uygulanan çevrim adedinin, aynı genlikte kırılmaya kadarki çevrim adedine oranı.

$\gamma_{e_i} = \frac{\sigma_{D_i}}{\sigma_D}$: yorulma limiti oranı – o anki yorulma limiti değerinin orijinal yorulma limiti değerine oranı.

$L = \frac{N}{N^*}$: ömür oranı – herhangi bir verilen gerilme genliği oranı γ 'daki hasara neden olacak çevrim adedi N 'nin, γ 'nın daha doğrusu γ^* 'ın keyfi referans değerindeki hasara neden olan N^* çevrim adedine oranıdır.

Bu açıklamalardan sonra 3.18 denklemini, $K = k \cdot \sigma_{D_i}$ ile yeniden yazılırsa,

$$K \cdot N = \frac{1}{\gamma - 1} - \frac{1}{\gamma \cdot (1 - C)} \quad (3.19)$$

şuradan:

$$K^* \cdot L = \frac{1}{\gamma - 1} - \frac{1}{\gamma \cdot (1 - C)} \quad (3.20)$$

buradaki K^* şöyle tanımlanmıştır:

$$K^* = \frac{1}{\gamma^* - 1} - \frac{1}{\gamma^* \cdot (1 - C)} \quad (3.21)$$

Not edilmelidir ki, birçok çelik için orijinal yorulma limiti σ_D kopma dayanımının yarısı kadardır ve $C = 0,5$ değerini vermektedir. Çelik malzeme için çeşitli kaynaklardan alınan bilgilerle ve 3.20 denklemine göre Gatts Şekil 3.11'i çizmiştir. Çeşitli değişik çeliklerin çizilmesine rağmen 3.20 denklemi ile alınan bilgiler arasında iyi bir uyuma olduğu not edilebilir.

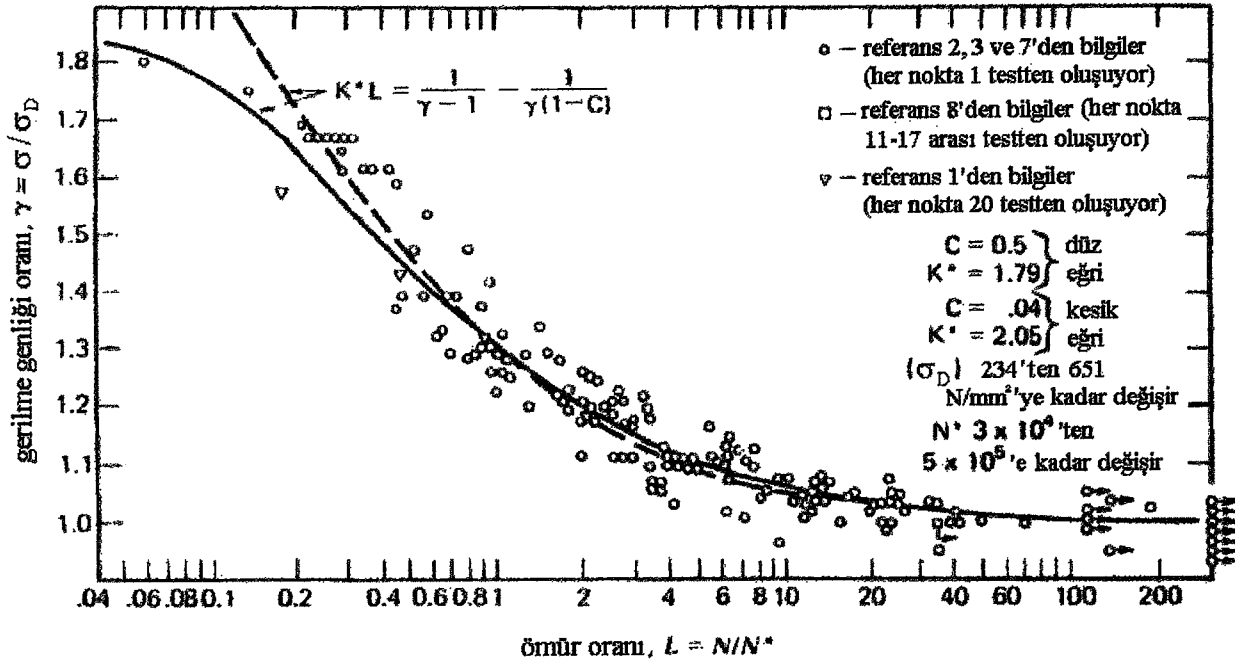
Sonuç olarak, Gatts tarafından ortaya konmuş hasar ifadesi, verilmiş β ve γ açıklamalarını da kullanarak şöyle yazılır:

$$\gamma_o = \gamma \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta}{1 - C} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} (1 - \beta)} \right] \quad (3.22)$$

Bu ifadeyi 3.16 denkleminde kıyaslırsak Gatts hasar denkleminin ve Henry hasar denkleminin çok benzer olduğu gözlemlenebilir. Gerçekte, eğer 3.22 denkleminde $(\sigma_{D_i})_N = 0$ 'dan ziyade $(\sigma_{D_i})_N = C \cdot \sigma$ farz edilirse, 3.22 denkleminin şuna indirgenecektir:

$$\gamma_o = \frac{\gamma \cdot (1 - \beta)}{\gamma - \beta} \quad (3.23)$$

ki bu da 3.16'daki Henry ifadesine denktir.



Şekil 3.11 Teorik γ -L eğrileri (boyutlandırılmamış σ -N eğrileri) ve çeliklerin sabit gerilme genliğindeki testlerinden karma bilgiler (Collins, 1993)

3.2.4 Corten-Dolan Kümülatif Hasar Teorisi:

Corten-Dolan kümülatif hasar teorisi en azından nitelik bakımından bilgilerle iyi desteklenmiş altı kabüle dayanır. Bu kabüller (Collins, 1993):

- 1- Bir çekerdekleme periyodu (belkide küçük sayıdaki çevrim adedinde) kalıcı yorulma hasarının başlamasına yol açabilir.
- 2- İç yapıda baştan başa oluşan hasarlı çekerdeklerin sayısı gerilme arttıkça artar.
- 3- Verilen bir gerilme genliğinde çevrim sayısı arttıkça hasar da artan bir oranda yayılır.
- 4- Gerilme arttıkça, çevrim başına düşen hasar oranı artar.
- 5- Verilen bir iç yapı içinde kırılmayı meydana getiren toplam hasar tüm uygulanabilir gerilme durumları için sabittir.
- 6- İlk hasarı meydana getiren minimum gerilmeden daha düşük gerilmelerde de hasar yayılmaya devam edecektir.

Corten ve Dolan'ın hipotezinin gelişimini basite indirmek için, Corten ve Dolan başlangıç olarak çekerdekleme periyodunun (başlangıç periyodu) 0 olmasını kabul etmişlerdir.

$$N' = 0 \quad (3.24)$$

Burada N' çekerdek hasarının oluşması için gereken σ gerilme seviyesindeki çevrim adedidir.

Bundan sonra, çekirdek başına hasar ve uygulanan çevrimler arasında bir güç-kanunu ilişkisinin var olduğu farz edilmiştir.

$$D = m.D' = m.r.N^a \quad (3.25)$$

Burada, D : toplam yorulma hasarı

m : hasarlı çekirdek sayısı

D' : çekirdek başına düşen hasar

r : hasar yayılma oranının katsayısı (gerilme seviyesinin bir fonksiyonudur)

N : hasara tekabül eden gerilme çevrimlerinin sayısı

a : hasar yayılma üssü

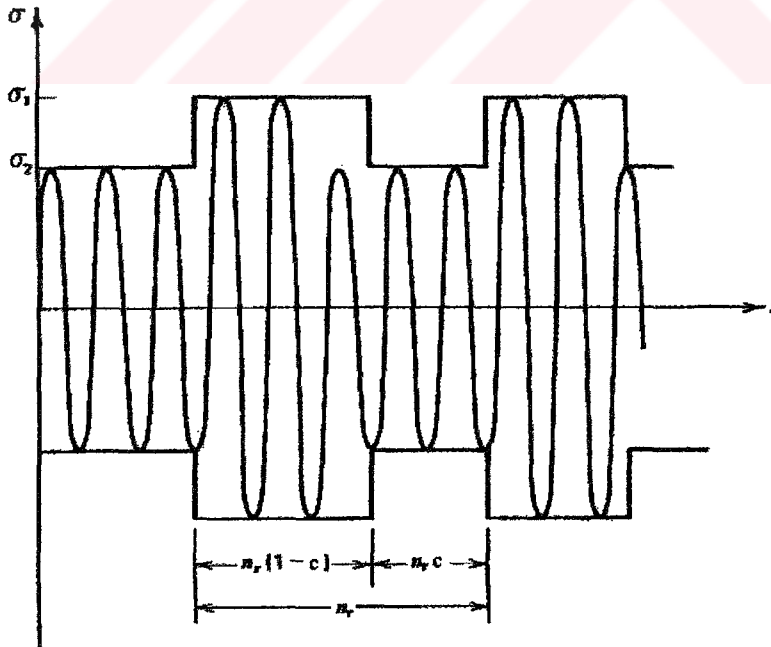
Bu teoriyi açıklayabilmek için, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi blok çevrimler olarak basit bir iki-seviyeli çevrimli gerilme hali uygulanmıştır. Aşağıdaki açıklamalar Şekil 3.12'den yazılabilir:

σ_1 : yüksek gerilme genliği

σ_2 : düşük gerilme genliği

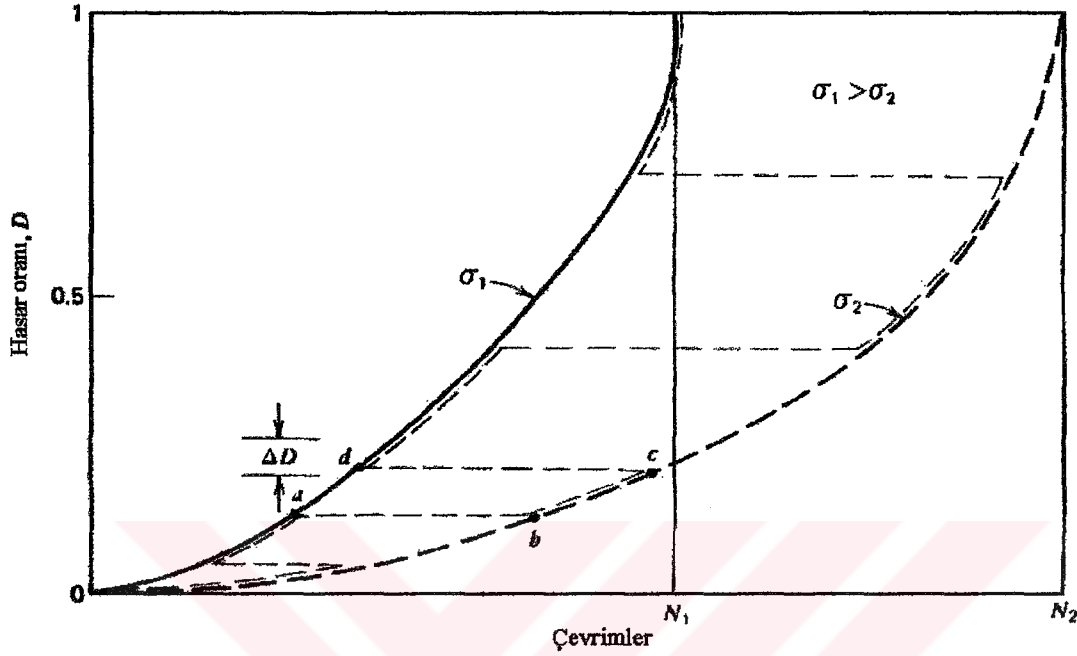
n_i : tekrarlayan her bloktaki toplam çevrim adedidi

c : yüksek gerilme seviyesi σ_1 'de hedeflenen n_1 çevrimlerinin oranı



Şekil 3.12 Corten-Dolan kümülatif hasar teorisinin fikirlerini ilerletebilmek için kullanılan basit bir iki-seviyeli çevrimli gerilme spektrumu (Collins, 1993)

Şekil 3.12’de bir bloğunun gösterildiği gibi tekrarlayan bir gerilme spektrumu bloğunun uygulanmasında, gerilme seviyesinin periyodik olarak σ_1 ’den σ_2 ’ye ve tekrar σ_1 ’e değişmesi Şekil 3.13’te kesik çizgilerle işaret edildiği gibi bir hasar diyagramında tasvir edilebilir.



Şekil 3.13 Corten-Dolan teorisine göre iki değişik gerilme seviyesinin hasar-çevrim diyagramı
(Collins, 1993)

Bu fikirleri ve henüz şimdi verilmiş olan varsayımları kullanarak Corten ve Dolan birçok değişik tekrarlayan gerilme seviyesi blokları için ömür hesaplarını veren şöyle bir ifade geliştirmişlerdir:

$$N_{es} = \frac{N_1}{c_1 + c_2 \cdot (\sigma_2 / \sigma_1)^d + c_3 \cdot (\sigma_3 / \sigma_1)^d + \dots + c_i \cdot (\sigma_i / \sigma_1)^d} \quad (3.26)$$

Burada, N_{es} : düzensiz inip çıkmaya zorlanan gerilme genliği hali şartları altındaki hasara kadar geçen toplam çevrim adedi

d : malzeme sabiti

N_1 : en yüksek gerilme genliği σ_1 ’deki hasara kadar olan ömür

c_1, c_2, \dots, c_i : sırasıyla $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i$ gerilmelerindeki oranlar

Deneysel bir değer olan d , ilgilenilen her malzeme için elde edilmelidir. Corten ve Dolan’ın testlerinde kullandıkları çelik malzeme (Brite Basic alaşımı çelik tel, 0,05 inch çapında) için d

değeri 6,2 ile 6,9 arasında değişmiş, orta yol olarak $d = 6,57$ çıkarmıştı. Kullandıkları alüminyum alaşım (7075-T6) ise $d = 6,0$ 'lık bir ortalama değer çıkarmıştır.

Marin'in teorisiyle karşılaştırmak için, 3.26 denklemini aşağıdaki gibi değişik bir formda dile getirmek uygun olacaktır:

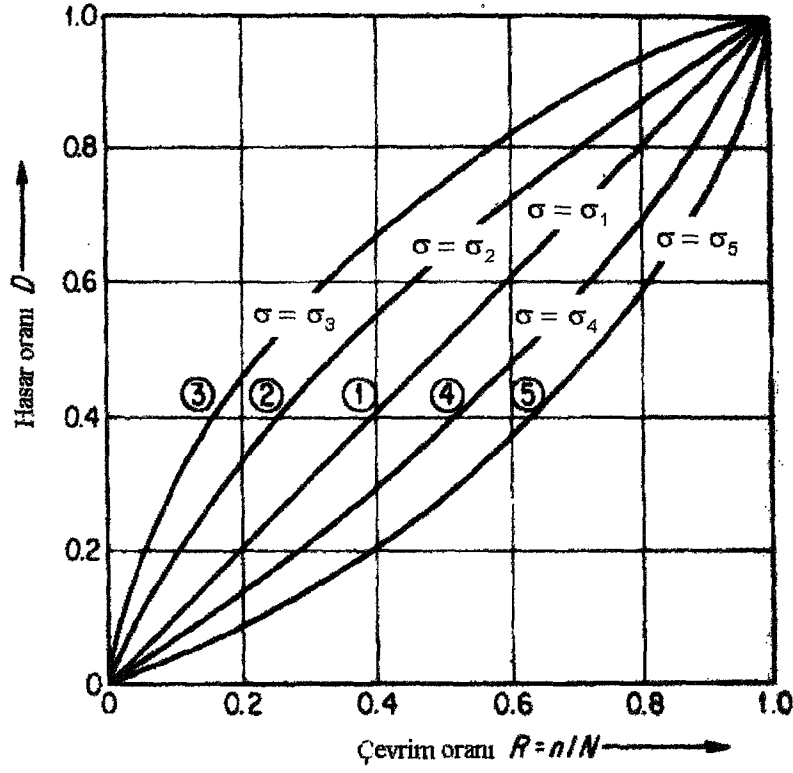
$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right)\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^d + \left(\frac{n_3}{N_1}\right)\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right)^d + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right)\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_1}\right)^d = 1 \quad (3.27)$$

3.2.5 Marin Kümülatif Hasar Teorisi:

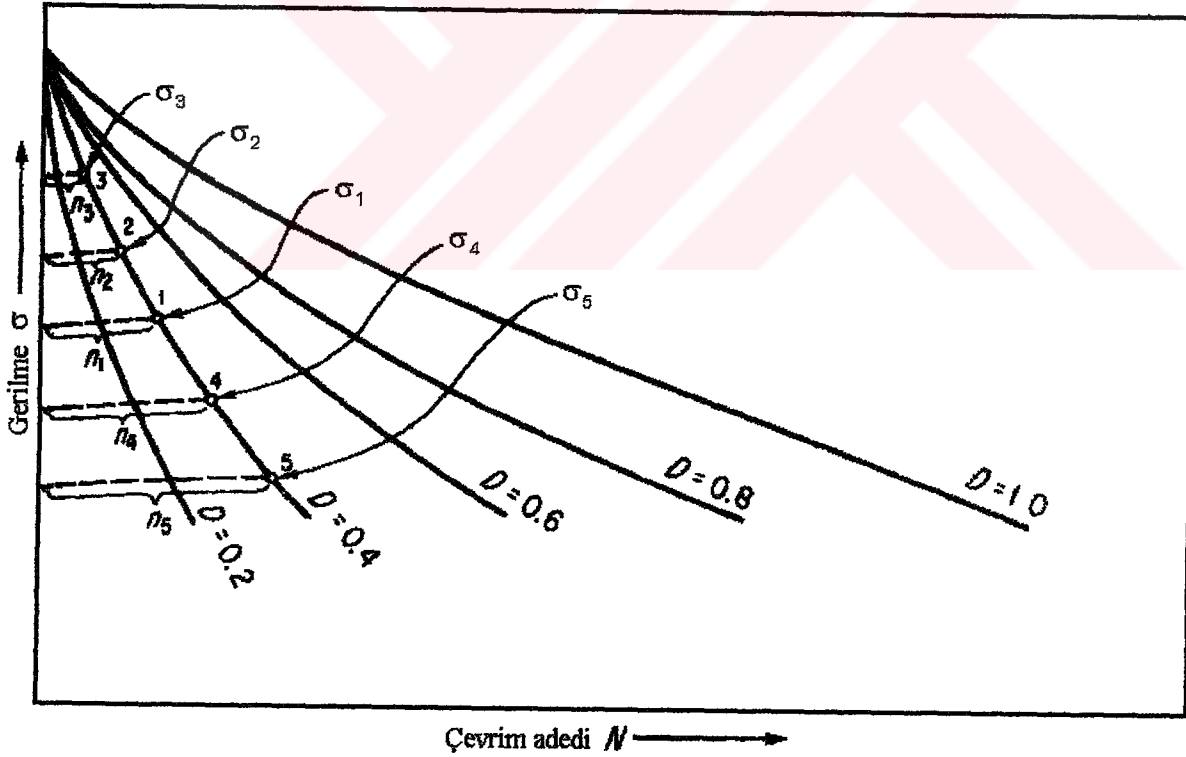
Marin'in kümülatif hasar teorisi, çevrim oranının bir fonksiyonu olan hasar ile hasar birikimine bağlı olan σ -N eğrisindeki değişikliklerin arasındaki ilişkinin göz önünde tutulmasına dayanır. Test sonuçlarına dayanan ve Şekil 3.14'te gösterilen hasar-çevrim oranı ilişkisini kullanarak bunlara karşılık gelen hasar eğrileri Şekil 3.15'te gösterildiği gibi elde edilebilir. Şekil 3.15'teki eğrileri tayin edebilmek için, Şekil 3.14'teki $D = 0,4$ değerine karşılık gelen yatay çizgiyi ele alalım. Bu çizginin hasar eğrileriyle kesişmesi bir dizi σ değerine tekabül eden bir dizi n/N değeri verir. Bu n/N ve σ değerleriyle, Şekil 3.15'te gösterildiği gibi $D = 0,4$ için hasar eğrisi çizilebilir. Başka bir deyişle, Şekil 3.14'teki 1'den 5'e kadar olan noktalar, Şekil 3.15'teki 1'den 5'e kadar olan noktalara karşılık gelir. Başka hasar eğrileri de benzer olarak Şekil 3.15'ten elde edilebilir. Şekil 3.15'e dayanarak, aşırı yüklemenin yorulma hasarı üzerindeki etkisi artık açık olarak tanımlanabilir. Örnek olarak, σ_2 gerilme seviyesinde n_2 çevrim için yüklemek, referans gerilme σ_1 'de n_1 çevrim veya σ_3 gerilmesinde n_3 çevrim yüklemeye denktir (Marin, 1966).

σ -N diyagramındaki sabit hasar çizgileri kavramı direkt olarak herhangi bir gerilme seviyesi σ_i 'deki n_i çevrimin oluşturduğu hasarın σ_1 gerilme seviyesinde n_1 ($n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$ 'lerin hepsi sabit hasar eğrisinde birer noktadılar) çevrim adedininkine tamamen denk olduğu gözlemine ulaştırır. Bundan dolayı, gerçek gerilme seviyesi σ_i 'deki n_i çevrimlik işletmenin oluşturacağı hasarla aynı hasarı oluşturacak bir referans gerilme seviyesinde denk bir çevrim adedi bulmak mümkün olur. Bu fikri kullanarak Marin şu ifadeyi geliştirmiştir (Collins, 1993):

Yüksek gerilme σ_2 'nin σ_1 'e göre daha çok hasar etkisi olduğundan, referans gerilme σ_1 'deki denk gerilme çevrimi adedi n_{2e} , n_2 'den büyüktür. Bunun için şu farz edilecektir:



Şekil 3.14 Hasar - Çevrim oranı ilişkisi (Marin, 1966)



Şekil 3.15 Hasar eğrilerinin mukayesesi (Marin, 1966)

$$n_{2e} = n_2 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^y, \quad n_{3e} = n_3 \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^y, \quad \dots, \quad n_{ne} = n_n \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_1} \right)^y \quad (3.28)$$

3.28 denkleminde $\sigma_2 > \sigma_1$ için, eğer y 1'den büyük bir sayıysa, $(\sigma_2/\sigma_1)^y$ 1'den büyük olur. Bunun anlamı, büyük hasar aşırı yüklenme tarafından üretildiğinden dolayı n_{2e} n_2 'den büyüktür (Marin, 1966).

Değişik gerilme seviyeleri için referans gerilme σ_1 'e dayalı harcanan ömür kesirleri şunlardır:

$$R_1 = \frac{n_1}{N_1}, R_2 = \frac{n_{2e}}{N_1}, R_3 = \frac{n_{3e}}{N_1}, \dots, R_n = \frac{n_{ne}}{N_1} \quad (3.29)$$

Ömür oranları R 'lerin toplamının 1'e eşit olması gerekir. Yani 3.29 denkleminde

$$R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = 1 \quad \text{veya,}$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_{2e}}{N_1} + \frac{n_{3e}}{N_1} + \dots + \frac{n_{ne}}{N_1} = 1 \quad (3.30)$$

3.28 denklemindeki n değerleri 3.30 denkleminde yerlerine yazılırsa:

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_1}\right)\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^y + \left(\frac{n_3}{N_1}\right)\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right)^y + \dots + \left(\frac{n_n}{N_1}\right)\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_1}\right)^y = 1 \quad (3.31)$$

σ - N ilişkisinin matematiksel ifadesiyle, d denklemi artık her bir gerilme seviyesinin çevrim oranı terimleriyle ifade edilebilir. Marin ifadesinin ileri geliştirmesinde, aşağıdaki denklem formuyla σ - N eğrisine yeterli derecede yaklaşılabildiği farz edilmiştir.

$$\sigma \cdot N^{1/x} = q_1 \quad (3.32)$$

3.32 denklemini σ_2 ve σ_1 gerilmeleri için uygulayalım:

$$\sigma_1 \cdot N_1^{1/x} = q_1 \quad \text{ve} \quad \sigma_2 \cdot N_2^{1/x} = q_1 \quad (3.33)$$

3.33 denkleminde,

$$N_2 \cdot \sigma_2^x = N_1 \cdot \sigma_1^x \quad (3.34)$$

benzer olarak,

$$N_n \cdot \sigma_n^x = N_1 \cdot \sigma_1^x \quad (3.35)$$

3.31 denklemindeki N_2, N_3, \dots, N_n değerlerini 3.34 ve 3.35 denklemlerinde açıklananlarla

değiştirdiğimizde:

$$\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_2}\right)\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^q + \left(\frac{n_3}{N_3}\right)\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right)^q + \dots + \left(\frac{n_i}{N_i}\right)\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_1}\right)^q = 1 \quad (3.36)$$

$$\text{Burada, } q = y - x \quad (3.37)$$

Eğer $q = 0$ yani $y = x$ olursa, 3.36 denkleminin Miner'in hipotezine indirgeneceğini not etmek ilginç olacaktır (Collins, 1993).

Başka bir yöntem kullanan Corten ve Dolan'da 3.36 denklemini elde etmiştir. Eğer 3.27 denkleminde verilen Corten-Dolan ifadesindeki d üssü 3.31'de gösterilen Marin'in bağıntısındaki y üssüne eşit yapılabilirse, iki sonucun da tamamen aynı olduğunu gözlemleyebiliriz. Corten-Dolan'ın d değerini 6,57 olarak bulduğu bir önceki konuda belirtilmişti.

Bunun ardından, eğer malzeme sabiti q ve malzeme için ellenmemiş tam değişken yükleme durumuna ait σ - N eğrileri bilirse, 3.36 değişik gerilme seviyelerinde yüklemenin yorulma ömrüne olan etkisini tayin etmede kullanılabilir. Eğer bilinen bir spektrum altındaki işletmeden sonra verilen bir σ_i gerilme seviyesinde kalan ömürle ilgilenilirse, 3.36 denklemi n_i için çözümlenerek elde edilebilir:

$$n_r = N_i \cdot \left[1 - \frac{n_1}{N_1} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i}\right)^q - \left(\frac{n_2}{N_2}\right) \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_i}\right)^q - \dots - \left(\frac{n_{i-1}}{N_{i-1}}\right) \left(\frac{\sigma_{i-1}}{\sigma_i}\right)^q \right] \quad (3.38)$$

Burada, n_r : σ_1 gerilme seviyesinde n_1 çevrim, σ_2 gerilme seviyesinde n_2 çevrim, ..., σ_{i-1} gerilme seviyesinde n_{i-1} çevrim uygulandıktan sonra σ_i gerilme seviyesinde yapılabilecek çevrim adedi. (başka bir deyişle kalan ömür) (Collins, 1993)

3.2.6 Manson Çift Lineer Kümülatif Hasar Kuralı:

1960'ta Grover, yorulma prosesini çatlak başlangıç evresi ve çatlak yayılma evresi olarak ayırmak ve her bir evreye ayrı ayrı lineer hasar kuralını uygulamak suretiyle kümülatif hasar hesaplarının geliştirilebileceğini ileri sürdü. Yine de, Manson bu iki evrenin değişikliklerini ve hasar denklemlerini tespit etmek için empirik bir teknik ortaya koyuncaya kadar, bu iki evrenin nicelik değişimleri için hiçbir esas önerilmemiştir. Manson, çatlak yayılma periyodunun şöyle ifade edilebileceğini önermiştir (Collins, 1993):

$$N_p = P.N_i^p \quad (3.39)$$

burada, N_p : çatlak başladıktan sonra, hasara kadar yayıldığı çevrim adedi

N_i : hasara kadarki toplam çevrim adedi

P : deneysel olarak saptanacak yayılma katsayısı

p : deneysel olarak saptanacak yayılma üssü

Bundan sonra çatlak başlangıç periyodu N' 'nün şöyle yazılabileceği not edilmiştir:

$$N' = N_i - N_p \quad (3.40)$$

veya, 3.39 denklemini kullanarak,

$$N' = N_i - P.N_i^p \quad (3.41)$$

Yayılma üssü p Manson tarafından birçok değişik malzeme bilgilerinin birleştirilmesiyle 0,6 olarak seçilmiştir. Yayılma katsayısı P ise iki-gerilme-seviyesi spektrum testiyle deneysel olarak tayin edilmiş ve en uygun değer olarak 14 bulunmuştur. Böylece, 3.39 ve 3.41 denklemleri şu şekli alır:

$$N_p = 14.N_i^{0,6} \quad (3.42)$$

ve

$$N' = N_i - 14.N_i^{0,6} \quad (3.43)$$

İlave deneyler Manson'ı bu denklemleri 730 çevrimi geçen bir dizi yorulma ömrü N_i 'e sınırlamasına götürmüştür. 730 çevrimden düşük toplam ömür durumlarında, düşük ömürlerle ilişkili olan yüksek gerilme seviyesi ve bütün ömür N_i 'in yayılma evresiyle ilişkili olması şeklinde gözüküğünden, çatlak başlangıcı ilk gerilme çevriminde oluşmuş gibi gözükür.

Özetlemek gerekirse:

$$\left. \begin{array}{l} N' = N_i - 14.N_i^{0,6} \\ N_p = 14.N_i^{0,6} \end{array} \right\} N_i > 730 \text{ çevrim için} \quad (3.44)$$

ve

$$\left. \begin{array}{l} N' = 0 \\ N_p = N_i \end{array} \right\} N_i \leq 730 \text{ çevrim için} \quad (3.45)$$

Burada:

N' : çatlak başlatacak çevrim sayısı

N_p : çatlak başlangıç aşamasından, son kırılma aşamasına kadarki yayılma çevrim adedi

N_i : hasara kadarki toplam çevrim adedi

Bu empirik ifadelerden yararlanarak, hasar başlangıcını ve son hasar tahminini verebilmek için aşağıda olduğu gibi her evreye teker teker bir lineer hasar kuralı uygulanır:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N'_i} = 1 \quad (3.46)$$

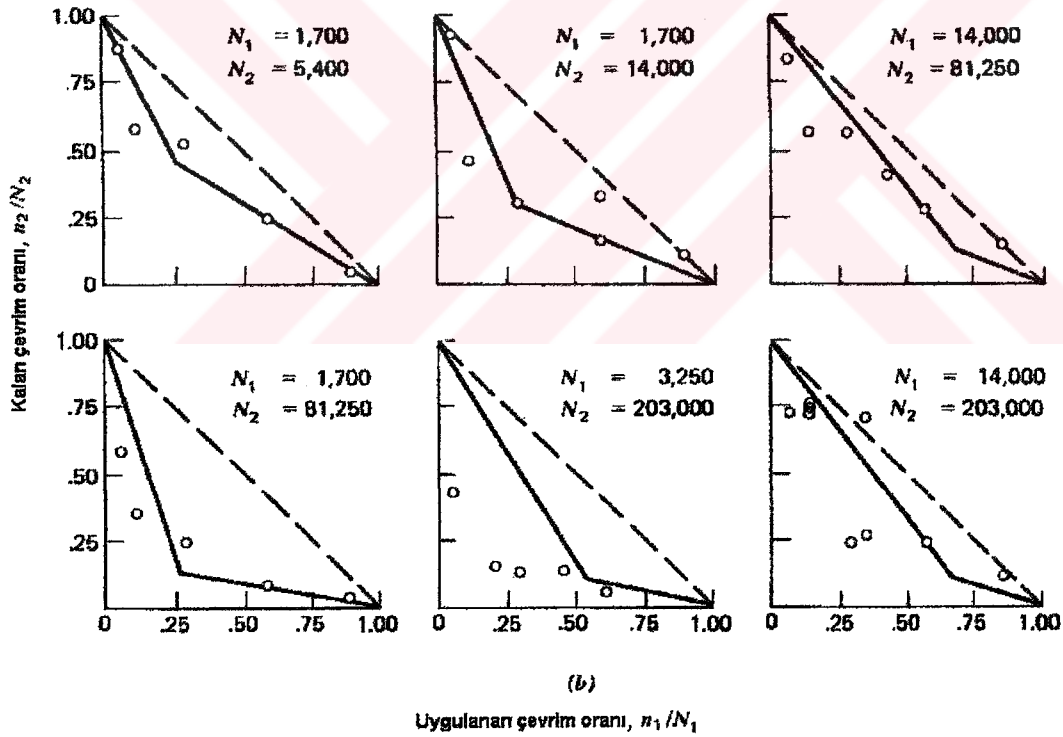
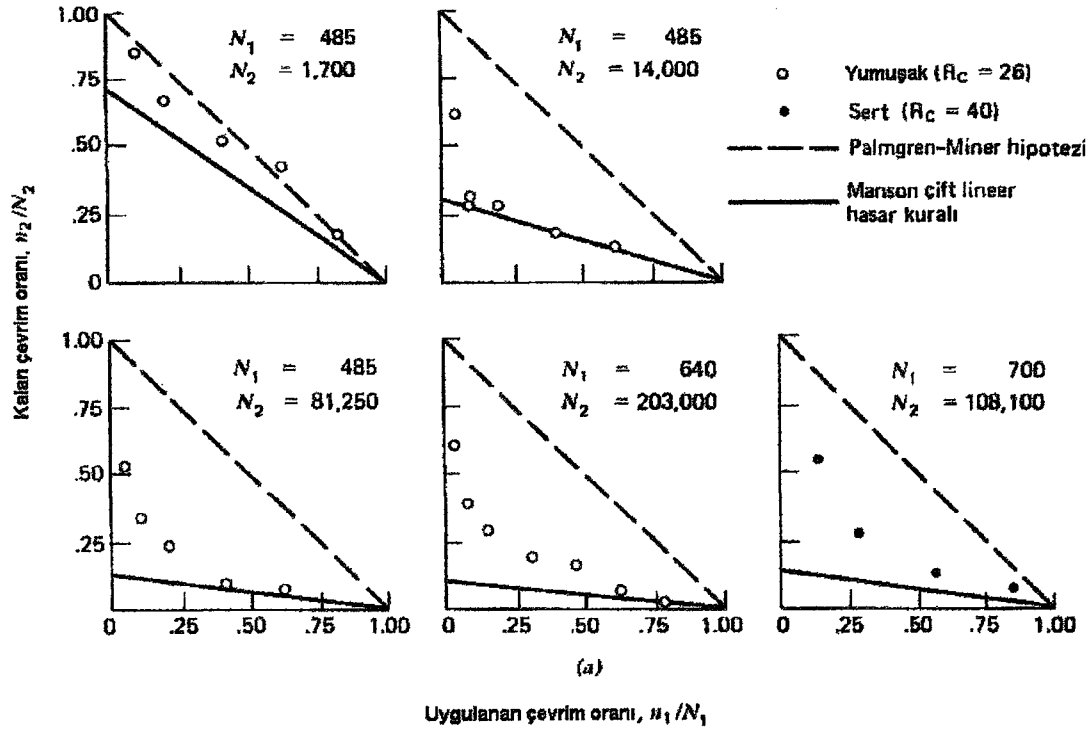
olduğu zaman kritik boyutta yorulma çekirdeği başlamıştır. Ve eğer kritik boyuttaki çatlaklar başlamışsa, hasara kadarki yorulma çatlaklarının yayılması:

$$\sum_{j=1}^q \frac{n_j}{(N_p)_j} = 1 \quad (3.47)$$

Her iki denklemde de n , i 'nci veya j 'inci gerilme seviyesinde uygulanan çevrim adedidir.

Bu nedenle, 3.46 denklemi kritik bir çatlak başlayıncaya kadar ve ardından 3.47 denklemi ise son hasarın tahminine dek uygulanmalıdır. Bu çift lineer hasar kuralının kullanılması sayesinde, birçok malzeme için iki-gerilme-seviyeli testlerle nispeten daha iyi bir uyum yakalanır. Şekil 3.16, SAE 4130 çeliği ile yapılan iki-gerilme-seviyesi testlerindeki deneysel sonuçları hem Manson'ın çift lineer hasar kuralı tahminleri ile, hem de Palmgren-Miner hipotezinin tahminleri ile karşılaştırmasını göstermektedir.

Sonuç olarak, bu fiziksel açıklamalar daha çok I ve II bölgelerindeki davranışı açıklamaya terk edilmiş ve çift hasar eğrisi yaklaşımı denilen yalnız ömür-tabanlı hasar tahmini yaklaşımını geliştirir. Metodun detayları bu tartışmanın kavrama gücünün ötesindedir.



Şekil 3.16 SAE 4130 çeliği üzerindeki iki-gerilme-seviyeli testlerin deneysel sonuçlarının Manson'ın çift lineer hasar kuralının ve Palmgren-Miner lineer hasar kuralının yorulma davranışı tahminleri ile karşılaştırılması (Collins, 1993)

(a) yüksekte alçak gerilmeye – düşük başlangıç ömrü,

(b) yüksekte alçak gerilmeye – nispeten yüksek başlangıç ömrü

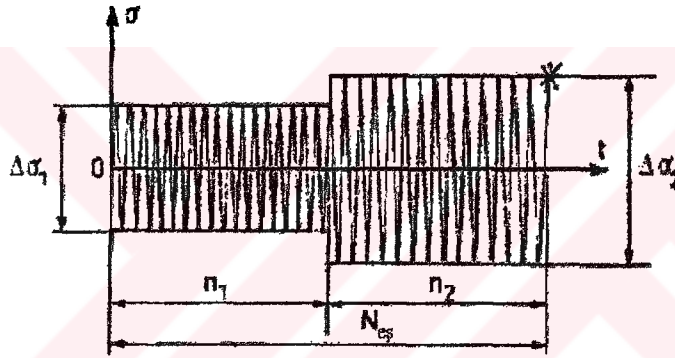
Şekil 3.16'nın Yorumlanması:

Şekil 3.16'yı, burada bulunan çizimlere benzeyen ve daha kapsamlı olan başka bir şekilde açıklamak uygun olacaktır.

Şekil 3.17'deki gibi iki aşamalı tek eksenli bir yükleme modeli düşünelim. Bu şekle göre önce düşük aşamalı yüklenme (yani yüksek çevrimli yorulma), sonra yüksek aşamalı yüklenme (yani düşük çevrimli yorulma) olacaktır. Aşağıda yazıldığı gibi Manson ifadelerinin başka bir şekilde yazılmasıyla ortaya çıkan yüksek çevrim hasar gelişim modelini kullanarak (Lemaitre, 1996)

$$D = D_{1c} \frac{n - N'_{(\Delta\sigma)}}{N_{es} - N'_{(\Delta\sigma)}} \quad (3.48)$$

(buradaki N' çatlak başlayana kadar geçen çevrim adedidir.)



Şekil 3.17 İki aşamalı yorulma hali (Lemaitre, 1996)

$n_1 \geq N'_1$ olduğu zaman için son kırılmaya kadar geçen ömrü tayin edelim (Lemaitre, 1996):

$$D_{(n_1)} = D_{1c} \frac{n_1 - N'_1}{N_1 - N'_1}$$

$$D_{1c(N_{es})} = D_{(n_1)} + D_{1c} \frac{N_{es} - n_1}{N_2 - N'_2}$$

$$N_{es} = n_1 + (N_2 - N'_2) \left(1 - \frac{n_1 - N'_1}{N_1 - N'_1} \right) \quad (3.49)$$

Palmgren-Miner'in lineer birikim kuralının hangi durum için geçerli olacağını bulalım;

$$N_{es} - n_1 = n_2$$

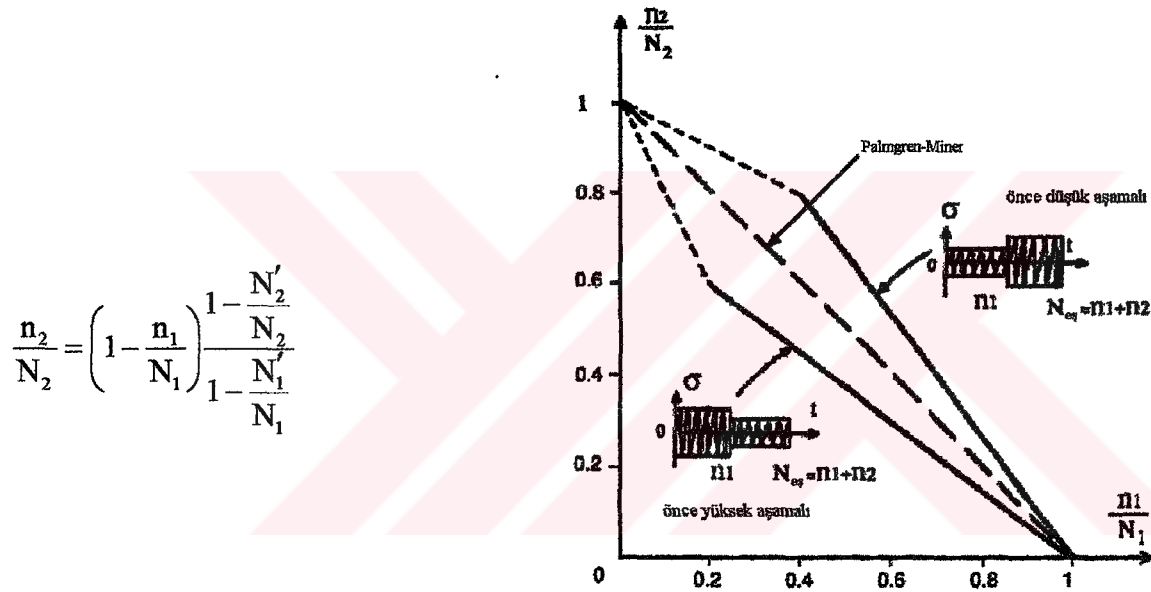
$$\frac{n_2}{N_2} = \left(1 - \frac{N'_2}{N_2} \right) \left(1 - \frac{n_1 - N'_1}{N_1 - N'_1} \right)$$

İ.C. YÜKSEKTEKİNİN KURULU
 İNCELEME VE DENEYLER MERKEZİ

Palmgren-Miner kuralının doğru çıkması için $N'_1/N_1 = N'_2/N_2$ şartının bulunması gerekir. Eğer bu şart sağlanıyorsa, Manson'ın denklemi $n_1/N_1 + n_2/N_2 = 1$ ifadesine dönüşür ki bu da Palmgren-Miner denklemiyle aynıdır (Lemaitre, 1996).

Deneysel göstermiştir ki, Palmgren-Miner özelliğinin uygulanabilmesi için genlik farklarının çok fazla olmaması gerekir. Eğer genlik farkları %10 veya %20 farklıysa bu denklem yanlış sonuçlar verebilir (Lemaitre, 1996).

Bu farkları belirleyebilmek için n_2/N_2 'yi, n_1/N_1 'in bir fonksiyonu olarak çizmek gerekir. İşte Şekil 3.16'da da yapılan şey aslında budur. Aşağıda n_2/N_2 , n_1/N_1 cinsinden yazılmış ve Şekil 3.18'de buna ait diyagram çizilmiştir (Lemaitre, 1996).



Şekil 3.18 İki aşamalı yorulma modelinin non-linear birikim diyagramı (Lemaitre, 1996)

- Önce düşük aşamalı olan: $N'_1/N_1 = 0,4$, $N'_2/N_2 = 0,2$ (Şekil 3.17)
- Önce yüksek aşamalı olan: $N'_1/N_1 = 0,2$, $N'_2/N_2 = 0,4$
- Palmgren-Miner gerilme sıralanış etkilerini gözönüne almadığı için $N'_1/N_1 = N'_2/N_2$ kabul eder.

3.2.7 Çatlak Artışının Toplanması:

Değişken genlikli yüklemenin her bireysel çevrimindeki çatlak büyümesi Δa , da/dN 'den malzemenin ΔK eğrisiyle hesaplanabilir. Uygulanan çevrim adetlerinin hesabını tutarken, bu Δa 'ları toplamak bizi bir ömür hesabına ulaştırır. Bunun gibi bir yöntem, yukarıdaki N 'den ziyade a 'nın bağımlı değişken olduğu bir nümerik integrasyona eşdeğerdir (Dowling, 1999).

Buradan, eğer şimdiki çatlak boyu a_j ve artış miktarı Δa_j ise, bir sonraki çevrimin çatlak boyunun yeni değeri a_{j+1} şu olur:

$$a_{j+1} = a_j + \Delta a_j = a_j + \left(\frac{da}{dN} \right)_j \quad (3.51)$$

Burada, bir çevrim için $\Delta N = 1$ olduğu sürece Δa 'lar sayısal olarak da/dN 'ye eşittir. İlk çatlak boyunu a_i olarak göstererek, N çevrim sonraki çatlak boyu şu olur:

$$a_N = a_i + \sum_{j=1}^N \left(\frac{da}{dN} \right)_j \quad (3.52)$$

Bu tek çevrim için her da/dN ΔK ve R 'den hesaplanmıştır. Burada ΔK bu tek çevrimin o anki çatlak uzunluğu a_j 'den ve $\Delta \sigma$ 'dan elde edilmiştir. R ise $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ veya F_{\min} / F_{\max} 'tır. $f = f(a/b)$ şeklinde değişen herhangi bir bağıntı için ve da/dN 'nin herhangi bir formu için, ΔK bağıntısı bu yöntemle kolayca kullanılabilir. Daha büyük düzensiz yüklemelerde çevrimleri tanımlamak için Bölüm 2'de anlatılan yüksek frekansta çevrim belirleme yöntemi kullanılabilir.

Bir yükleme tepe değerine rastlayana kadar toplama işlemi devam eder. Bu, tamamıyla plastik akmaya veya gevrek kırılmaya neden olabilecek derecede şiddetlidir. Bu noktada, hesaplama sona ermiştir ve biriken çevrimler tahmin edilen çatlak oluşum ömrüdür.

Bir daire veya elipsin bir parçası gibi olan eğri yüzeyli çatlaklar için, gerilme şiddeti K çatlağın çevresinde değişir. Bu aynı zamanda büyüme oranının da bu çevrede değişmesine neden olur. Böylece çatlak büyüdükçe şeklini değiştirir. Bu karmaşıklık, çatlak büyümeleri toplandıkça çatlağın şeklini güncelleyerek ve geometri fonksiyonu f 'i uygun bir şekilde uyarlayarak ele alınabilir. f için gerekli detaylar Newman (1986)'da bulunabilir. NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı olan NASGRO bunun gibi bir yeteneği içermektedir.

3.2.7.1 Tekrarlayan veya Sabit Durumlar İçin Özel Metot:

Bazı durumlarda, gerçek işletme durumunu tekrarlayarak uygulanan sınırlı uzunlukta bir yükleme dizisine eşdeğer kabul ederek yaklaşmak yerinde olur. Bu, bir kreyndeki kaldırma çevrimlerinde, bir uçağın uçuşunda ve aynı zamanda *sabit yükleme* diye adlandırılan, zamanla sabit kalan karakteristikteki rasgele yüklemelerde kullanışlıdır. Bunun ardından, çatlak

büyüme ömrü çatlak artış miktarlarının toplanmasına eşdeğer bir alternatif yöntemle hesaplanabilir. Gerekli matematiksel türetimler aşağıdadır. Denklemlerde kullanılan sabitler çeşitli malzemeler için Çizelge 3.1’de verilmiştir (Dowling, 1999):

Çizelge 3.1 Çeşitli metaller için Walker Denklemi’nde kullanılan sabitler (Dowling, 1999)

| Malzeme | Akma | Kırılma Tokluğu | Walker Denklemi | | | |
|-------------------------|---------------|---------------------------|--|-------|--------------|-----------|
| | σ_{ak} | K_{Ic} | C_1 | m_1 | γ | γ |
| | N/mm^2 | $\frac{N}{mm^2} \sqrt{m}$ | $\frac{mm/çevrim}{\left(\frac{N}{mm^2} \sqrt{m}\right)^{m_1}}$ | | $(R \geq 0)$ | $(R < 0)$ |
| Man-Ten çeliği | 363 | 200 | $3,28 \cdot 10^{-9}$ | 3,13 | 0,928 | 0,22 |
| RQC-100 çeliği | 778 | 150 | $8,01 \cdot 10^{-11}$ | 4,24 | 0,719 | 0 |
| AISI 4340 çeliği | 1255 | 130 | $5,11 \cdot 10^{-10}$ | 3,24 | 0,42 | 0 |
| 17-4 PH çeliği | 1059 | 200 | $3,29 \cdot 10^{-8}$ | 2,44 | 0,79 | - |
| 2024-T3 Al ² | 353 | 34 | $1,42 \cdot 10^{-8}$ | 3,59 | 0,68 | - |
| 7075-T6 Al ² | 523 | 29 | $2,71 \cdot 10^{-8}$ | 3,7 | 0,641 | 0 |

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3.53)$$

Öncelikle, da/dN 'in ΔK davranışının 3.53 denkleminin bir güç bağıntısı formuna riayet ettiği farz edilir. Ardından herhangi bir çevrim için ($\Delta N = 1$) çatlak boyundaki artış 3.54 denklemindeki gibi olur:

$$\Delta a_j = C(\Delta \bar{K}_j)^m \quad (3.54)$$

$$\Delta \bar{K} = K_{max} \cdot (1 - R)^\gamma \quad (3.55)$$

Burada, 3.55 denklemini kullanarak bir yaklaşım yapan Walker gibi, R-oranları eşdeğer bir sifira yaklaşan gerilme değeri $\Delta \bar{K}$ 'nın hesaplanmasında kullanılmıştır. Eğer tekrarlayan yük durumu N_B çevrimleri içerirse, bir tekrarlamaadaki çatlak uzunluğundaki artış toplamıyla elde edilir.

$$\Delta a_B = \sum_{j=1}^{N_B} \Delta a_j = \sum_{j=1}^{N_B} C(\Delta \bar{K}_j)^m \quad (3.56)$$

Durumun bir tekrarındaki çevrim başına ortalama büyüme oranı ise:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{ortalama}} = \frac{\Delta a_B}{N_B} = \frac{C \cdot \sum_{j=1}^{N_B} (\Delta \bar{K}_j)^m}{N_B} \quad (3.57)$$

$\Delta \bar{K}$ 'nin kullanımına bağlı olarak C'nin sabit olduğu not edilmelidir ve bunun için toplamdan ayrılabilir.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{ortalama}} = C \cdot \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\Delta \bar{K}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} = C \cdot (\Delta K_e)^m \quad (3.58)$$

burada,

$$\Delta K_e = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\Delta \bar{K}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} \quad (3.59)$$

ΔK_e niceliği, eşit sayıda N_B çevrimi kadar uygulandığında değişken genlikli durumda olduğu gibi aynı çatlak oluşumuna neden olacak bir eşdeğer sifira yaklaşan gerilme yoğunluğu değişimi olarak yorumlanabilir.

Herhangi bir verilen çatlak boyu için, K ve nominal gerilme σ orantılı olduğundan, aynı bir eşdeğer sifira yaklaşan gerilme seviyesi tanımlanabilir.

$$\Delta \sigma_e = \frac{\Delta K_e}{f \sqrt{\pi \cdot a}} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\Delta \bar{\sigma}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} \quad (3.60)$$

Burada, durumdaki her çevrim için olan $\Delta \bar{\sigma}$ R etkeni için doğrulanmış sifira yaklaşan gerilme değerlerine eşdeğerdir. Eğer bu 3.55 denklemini kullanarak Walker yaklaşımına dayanarak yapılırsa, bu değerler şuradan elde edilir:

$$\Delta \bar{\sigma} = \sigma_{\max} (1 - R)^y \quad (3.61)$$

$\Delta\sigma_e$ 'yi kullanarak sanki $R = 0$ 'da sabit genlikli bir yükleme varmış gibi bir ömür hesabı yapılabilir (örneğin 3.62 denklemini kullanarak). Yine de, tamamıyla plastik akma veya gevrek kırılma yüzünden oluşan son çatlama boyunu tayin etmek için, durumun bir tekrarındaki gerçek tepe gerilmesi σ_{\max} kullanılmalıdır.

$$N_{if} = \frac{a_f^{1-m/2} - a_i^{1-m/2}}{C(f\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m (1-m/2)} \quad (m \neq 2) \quad (3.62)$$

Eğer işletme yüklemesini ortaya koyan örnek yükleme halinin bir tekrarında çatlak boyu a büyük miktarda değişmezse, yukarıdaki yöntem nümerik olarak çatlak artışlarının toplamıyla eşdeğer olur. Eğer tekrarlayan yükleme durumu son derece uzun olursa, tekrarlayan durumun değişik bölümlerinde yükleme şiddetinin bariz değiştiği yerlerdeki hesaplamalar yaklaşık olur.

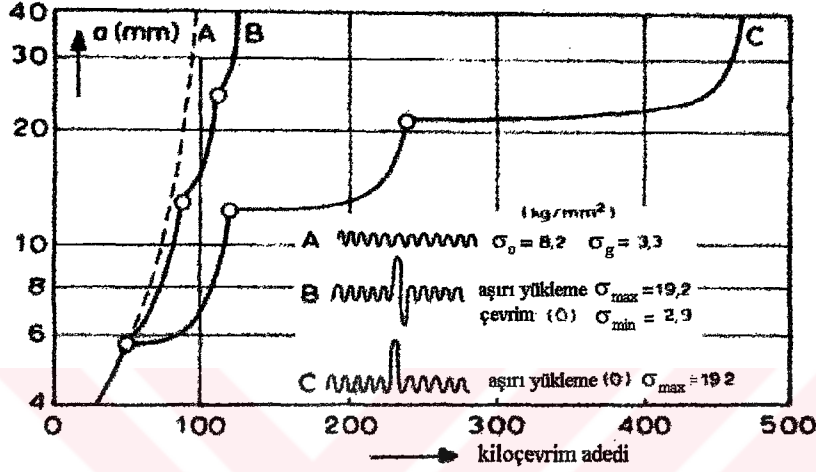
Bazı yazarlar *kök-ortalama-kare yaklaşımı* diye adlandırılan buna benzer bir yaklaşım önerirler. Burada ΔK_e , $m=2$ konularak 3.59 denkleminde elde edilen denklem tarafından hesaplanır. Eğer gerçek değer $m=2$ 'den çok fazla farklıysa, bunun gibi bir basitleştirme görünüşte yanlış görünür ve hataya götüreceği düşünülür.

3.2.7.2 Gerilmelerin Sıralanış Etkileri:

Değişken genlikli yüklemenin şimdiye kadarki ele alış biçimlerinde, verilen bir çevrimdeki çatlak gelişiminin yükleme halinin ilk durumlarından etkilenmediği farz edilmiştir. Buna rağmen, bu varsayım bazen önemli hatalara ulaştırabilir. Şekil 3.19'daki durumu düşünelim. C durumundaki gibi yüksek bir aşırı çekme gerilmesi uygulandıktan sonra, düşük seviyeli çevrimlerdeki çatlak gelişim oranı azalır. Aşırı yüklemekten etkilenen bölgenin dışındaki çatlak büyüme kadar, normal büyümeden daha yavaş büyüme çok miktarda çevrim için devam eder. Etkilenen bölgenin boyutu, aşırı yüklemenin neden olduğu çatlak-ucu plastik bölgenin boyutuyla ilişkilidir. Şekille açıklanan durum için, sadece üç aşırı yüklemenin toplam etkisi ömrü yaklaşık 10 kat arttırmıştır. Aşırı çekme yüklemelerinin bu yararlı etkisi *çatlak gelişim geciktirmesi* diye adlandırılır (Dowling, 1999).

Bir aşırı çekme yüklemesi, çatlak ucu çevresinde bir basma artık gerilmesine neden olur. Bu basma, çatlak büyümesini geciktiren daha sonraki düşük seviyeli çevrimler sırasında çatlak ucunu kapalı tutmaya eğilimlidir. Etkinin büyüklüğü (magnitudu) $\sigma_{\max 2} / \sigma_{\max 1}$ oranıyla ilişkilidir. Burada $\sigma_{\max 2}$ aşırı yükleme gerilmesi, $\sigma_{\max 1}$ ise düşük seviyenin tepe değeridir. 2,0

civarından daha yüksek oranlar için, çatlak büyümesi tamamıyla durdurulabilir. Diğer taraftan, eğer oran 1,4 civarından daha düşükse etki az olur. Aşırı basma yüklemelerinin zıt ama daha az bir etkisi vardır. Etkinin o kadar büyük olmamasının nedeni aşırı yükleme sırasında çatlakların kapanma eğiliminde olmasıdır. Onun içindir ki, çatlakların yüzeyleri basma yükünün büyük bir kısmını tutar ve çatlak ucunu onun etkisinden korur. Ayrıca Şekil 3.19'daki B durumundaki gibi eğer çekme aşırı yüklemesi bir basma aşırı yüklemesiyle takip edilirse, çekme aşırı yüklemesinin etkisi çok düşer.



Şekil 3.19 Aşırı yüklemelerin, ortadan-çatlamış 2024-T3 alüminyum ($b = 80$, $t = 2$ mm) plakalardaki çatlak gelişimine etkisi (Dowling, 1999)

Aşırı yüklemelere bağlı olan gerilme sırası etkilerini çatlak gelişim hesaplarına dahil etmek için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Kullanılan genel yaklaşım, yukarıda anlatıldığı gibi ve 3.51 ile 3.52 denklemleriyle bağlantılı olarak ömür hesabını her çevrim için hesaplanan çatlak gelişim artışına dayandırmaktır. Yine de, kullanılan da/dN değerlerinin her biri aşırı yüklemelerin ilk halleri tarafından belirlenen bir davranış değişikliğindedir. Bu genellikle artık gerilme alanlarına veya çatlak kapanma seviyelerine bağlı olarak değişmiş efektif bir ΔK 'dan da/dN tayin etmekle yapılır. Daha detaylı açıklamalar Chang (1984), Broek (1986 ve 1988) ve Suresh (1991)'de bulunabilir.

Bir yönde ağır basan yüksek aşırı yüklemeler oluştuğunda aşırı yükleme dizi etkilerinin önemli olacağı akla yatkındır. Bu, bazı uçaklarda arasına olan şiddetli fırtına yüklemelerinin veya manevra yüklemelerinin dizi etkilerini başlattığı işletme koşullarında oluşur. Yine de, eğer aşırı yüklemeler her iki yönde de oluşursa veya gerilme durumu çok fazla düzensizse veya aşırı yüklemeler nispeten yumuşaksa az bir etki beklenir. Bu etkinin esas olarak çatlak gelişimini geciktirdiği not edilmelidir. Gerilmelerin sıralanmış etkilerini ihmal etmek genellikle

mühendislik uygulamalarında birçok durumda çatlak gelişim ömrü için yeterli olan konservatif hesapları gerektirir. Şiddetli basma aşırı yüklemeleri içeren yüklemeleri, beklenenden daha hızlı çatlak gelişimine neden olabilmeleri olasılığına bağlı olarak dikkatle ele alınmalıdır.

3.3 Kümülatif Hasar Teorilerinin Nasıl Kullanıldığını Gösteren Uygulamalar:

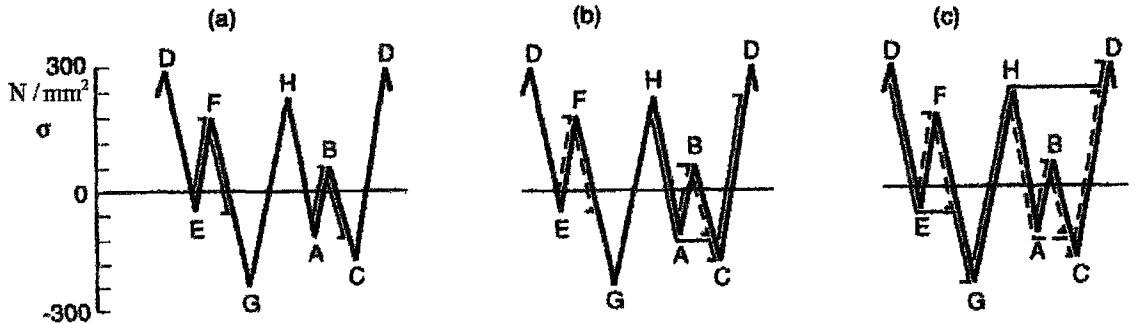
ÖRNEK 1: (Dowling, 1999)

2024-T4 alüminyum malzemedeki çentiksiz bir elemana Şekil 2.6a'daki yüklem durumu tek eksenli bir şekilde tekrarlanarak uygulanmıştır. Gerilme değeri σ 1 birim için 60 N/mm^2 'dir. Yorulma hasarının oluşması için gereken tekrarlama adetini tayin ediniz.

Çözüm:

Her bir çevrim sayıldıkça durumun grafiği üzerinde işaretlemek uygun olacaktır. Bunu takiben, işaretlenmiş çevrimler sanki kaldırılmış gibi görmezlikten gelinecektir. Metot, Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

Bu durum Şekil 2.6a ve b'de görüldüğü gibi, ilkinde ister yüksek bir tepe değeri ister alçak bir çukur değeriyle başlaması için tekrar düzenlenmiştir. Tekrar düzenlenen durumun başından başlayarak, Şekil 2.5'teki sayma şartı D-E-F sonucuyla karşılaşmaz. Bir noktayı G'ye doğru ileri yürüterek ve E-F-G'yi hesaba katarak, a'da gösterildiği gibi bir E-F çevrimi sayılıp işaretlenir. Ardından bir zamanda bir noktayı ileriye taşıyarak ve çevrimleri kontrol ederek D-G-H için, G-H-A için veya H-A-B için hiçbir şey bulunmamıştır. Sonunda A-B çevrimi A-B-C için bulunmuş ve a'da da gösterildiği gibi işaretlenmiştir. D'ye doğru ileri giderek ve H-C-D'yi hesaba katarak, b'de gösterildiği gibi H-C çevrimi bulunup işaretlenmiştir. Sadece D-G-D olayı kalmıştır ve bu c'de işaretlendiği gibi bir D-G çevrimi meydana getirir.



Şekil 3.20 Örnekle ilgili şekil (Dowling, 1999)

Çizelge 3.2 Örnekle ilgili bilgiler (Dowling, 1999)

| Çevrim | n_i | σ_{\min} | σ_{\max} | σ_g | N_i |
|--------|-------|-----------------|-----------------|------------|----------------------|
| E – F | 1 | - 60 | 180 | 120 | $2,6 \cdot 10^7$ |
| A – B | 1 | - 120 | 60 | 90 | $2,32 \cdot 10^{10}$ |
| H – C | 1 | - 180 | 240 | 210 | $4,08 \cdot 10^5$ |
| D – G | 1 | - 240 | 300 | 270 | $3,99 \cdot 10^4$ |

Her bir çevrimdeki σ_{\min} ve σ_{\max} değeri sayıldıkça Çizelge 3.2'ye girilmiştir. Bu durumda her biri sadece bir kere oluşmuştur. Bütün gerilmeler N/mm^2 cinsindedir ve σ_g değerleri 2.1 denkleminde hesaplanmıştır. Bunun ardından N değerleri SWT (Smith-Watson-Topper) denkleminde dayanan σ_g ve σ_{\max} 'dan tayin edilmiştir ve 2024-T4 alüminyum için sabitler σ'_f ile b Çizelge 2.1'den alınmıştır. N_i 'leri hesaplayabilmek için şu ifadelerden yararlanır:

$$\sigma_{\text{aq}} = \sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_g} \quad , \quad \sigma_{\text{aq}} = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N)^b \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_g} = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N)^b$$

buradan N çekilirse:

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_g}}{\sigma'_f} \right)^{1/b}$$

Çizelge 3.2'deki tüm N_i değerleri buradan hesaplanmıştır.

Hasara kadarki tekrarlamalar artık 3.7 denklemini kullanarak çözülebilir.

$$B_f = \frac{1}{\left[\sum \frac{n_j}{N_j} \right]_{\text{bir tekrarlama}}} = \frac{1}{\frac{1}{2,6 \cdot 10^7} + \frac{1}{2,32 \cdot 10^{10}} + \frac{1}{4,08 \cdot 10^5} + \frac{1}{3,99 \cdot 10^4}}$$

$$B_f = 36300 \text{ tekrarlama}$$

ÖRNEK 2: (Collins, 1993)

Isıl işleme Rockwell C-35 sertliğine getirilen 4340 çeliğinden yapılmış bir katı dairesel zincir baklasının tasarım problemini düşünelim. Zincir baklasının aksenal yükleme spektrumuna maruz kalması ve bozulmama olasılığının %99 olması isteniyor. Tam değişken yükleme durumu için deneysel test sonuçlarına dayanan %99 güvenilir σ -N dataları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 %99 güvenilirlikli yorulma σ -N dataları (4340 çeliği Rockwell C-35)
(Collins, 1993)

| Gerilme genliği, σ (N/mm ²) | N, çevrim |
|--|-----------|
| 1158 | 100 |
| 1103 | 1350 |
| 1034 | 3500 |
| 965 | 7100 |
| 896 | 14200 |
| 827 | 28000 |
| 758 | 55500 |
| 689 | 110000 |
| 620 | 216000 |
| 551 | 445000 |
| 483 | 1980000 |
| 469 | ∞ |

Gerçek bakla her işletme çevriminde aşağıdaki tam değişken yüklenme spektrumuna maruz kalacaktır:

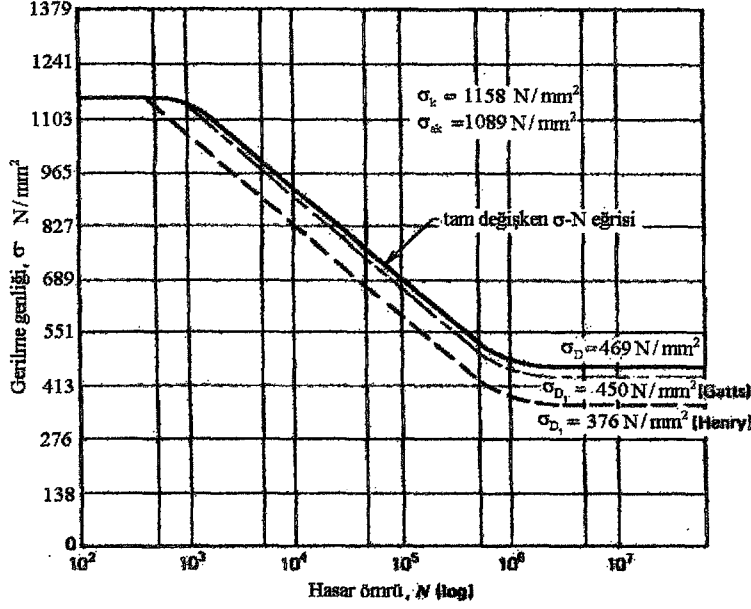
$$\begin{aligned}
 F_A &= 97856 \text{ N (maks.)} && 1200 \text{ çevrim için} \\
 F_B &= 53376 \text{ N (maks.)} && 7000 \text{ çevrim için} \\
 F_C &= 28912 \text{ N (maks.)} && 50000 \text{ çevrim için}
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

Bu işletme çevrim grubu çubuğun ömrü boyunca 3 kez tekrarlanacaktır. Palmgren-Miner, Henry, Gatts, Corten-Dolan, Marin ve Manson teorilerini kullanarak %99 güvenilir kesit alanını bulmak istenmektedir. (yani %99 olasılıkla kopmayacak)

Çözüm:

Çözüme devam edebilmek için, Şekil 3.21'de %99 güvenilir σ -N eğrisi çizilmiştir. Baklanın gerekli kesit alanını tayin etmede kullanılacak yöntem her altı teori için de deneme yanılma şeklinde olacaktır. Palmgren-Miner teorisine dayanarak gerekli kesit alanını hesaplamak için ilk tahmin olarak kesit alanının 129 mm^2 olacağı keyfi olarak seçilmiştir. Bu, gerilmeleri 34 denkleminde kullanabilmek için bir ilk-durum hesaplamasına izin verir. Şöyle ki:

İC. YÜKSELİM KURU
DOKÜMANLARI VE
TEKNOLOJİLERİ



Şekil 3.21 Açıklanan bakla tasarımında kullanılan 4340 çeliği için %99 güvenilirlikli σ -N eğrisi. İlk adımda “hasar görmüş” σ -N eğrileri hem Henry, hem de Gatts’ın hasar teorileri için gösterilmiştir (Collins, 1993)

$$\begin{aligned}\sigma_{A_1} &= \frac{F_A}{A_1} = \frac{97856}{129} = 758 \text{ N/mm}^2 && 1200 \text{ çevrim için} \\ \sigma_{B_1} &= \frac{F_B}{A_1} = \frac{53376}{129} = 414 \text{ N/mm}^2 && 7000 \text{ çevrim için} \\ \sigma_{C_1} &= \frac{F_C}{A_1} = \frac{28912}{129} = 224 \text{ N/mm}^2 && 50000 \text{ çevrim için}\end{aligned}\quad (3.64)$$

Bu gerilme blokları, baklanın ömrü boyunca 3 kez yüklenecektir. Şekil 3.21’deki σ -N eğrisinden ve 3.64 denkleminde yararlanılarak, ilk deneme için Çizelge 3.4’te gösterilen çizelgeyi yapabilir ve Çizelge 3.4’ün son sütunundan şunu elde ederiz:

$$\sum \frac{n}{N} = 0,065 \quad (3.65)$$

Çizelge 3.4 Palmgren-Miner çözümü için ilk deneme değerleri (Collins, 1993)

| Yük Seviyesi | F (N) | A_1 (mm ²) | σ_1 (N/mm ²) | N_1 (çevrim) | n_1 (çevrim) | n_{1r} (çevrim) | n_{1r} / N_1 |
|--------------|-------|--------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| A | 97856 | 129 | 758 | 55500 | 1200 | 3600 | 0,065 |
| B | 53376 | 129 | 414 | ∞ | 7000 | 21000 | 0 |
| C | 28912 | 129 | 224 | ∞ | 50000 | 150000 | 0 |

Çizelge 3.5 Palmgren-Miner çözümü için ikinci deneme değerleri (Collins, 1993)

| Yük Seviyesi | F (N) | A _{II} (mm ²) | σ _{II} (N/mm ²) | N _{II} (çevrim) | n _{II} (çevrim) | n _{II,T} (çevrim) | n _{II,T} / N _{II} |
|--------------|-------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| A | 97856 | 96,7 | 1011 | 4500 | 1200 | 3600 | 0,80 |
| B | 53376 | 96,7 | 551 | 445000 | 7000 | 21000 | 0,05 |
| C | 28912 | 96,7 | 298 | ∞ | 50000 | 150000 | 0 |

Çizelge 3.6 Palmgren-Miner çözümü için üçüncü deneme değerleri (Collins, 1993)

| Yük Seviyesi | F (N) | A _{III} (mm ²) | σ _{III} (N/mm ²) | N _{III} (çevrim) | n _{III} (çevrim) | n _{III,T} (çevrim) | n _{III,T} / N _{III} |
|--------------|-------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| A | 97856 | 95,5 | 1025 | 3800 | 1200 | 3600 | 0,948 |
| B | 53376 | 95,5 | 560 | 400000 | 7000 | 21000 | 0,053 |
| C | 28912 | 95,5 | 303 | ∞ | 50000 | 150000 | 0 |

Çevrim oranlarının toplamı 1'den düşük olduğu için seçilen alanın çok büyük olduğu anlaşılmış ve daha küçük yeni bir alan seçimine gidilmiştir.

A_{II} = 96,7 mm² olarak deneyelim. Bununla Çizelge 3.5'teki çizelge oluşturulur ve tablonun son sütunundan şu elde edilir:

$$\sum \frac{n}{N} = 0,85 \quad (3.66)$$

Bu toplam 1'e çok daha yakındır ancak alan hala hafif tertip büyüktür. Son olarak A_{III} = 95,5 mm² denenmiş ve Çizelge 3.6 oluşturulmuştur. Çizelge 3.6'nın son sütunundan:

$$\sum \frac{n}{N} = 1,00 \quad \text{elde edilir.} \quad (3.67)$$

Buradan, Palmgren-Miner teorisine göre tasarlanan alan 95,5 mm² olacaktır.

Bakla için aranan alanı Henry Teorisi'ne göre hesaplamak için, 3.15 ve 3.16 denklemleri σ-N eğrisiyle birleştirilmiş ve tekrarlanarak kullanılmıştır. Alanın ilk hesaplamasında, Palmgren-Miner'in A = 95,5 sonucundan yararlanılacaktır. Bunların ardından 3.7 çizelgesini yapabiliriz.

Hasarın 2. yükleme bloğunun C seviyesindeki yüklemesi sonunda oluşacağı açıktır, çünkü bu gerilme seviyesindeki yorulma ömrü 50000 çevrimdir ve 50000 çevrim zorlanmıştır. Bu nedenle kalan yorulma ömrü 0 olmuş ve 3.15 denklemiyle hasar 1'e ulaşmıştır. Bu da hasarı açıklar. Sonuç olarak seçilen alan çok küçüktür ve bir sonraki deneme için daha büyük bir alan seçilmelidir. Tasarımın odaklandığı şey 3. bloğun son çevrim seviyesi olan C seviyesi uygulandıktan sonra çevrim oranı n/N 'in 1 değerine ulaşması için en uygun alanı seçebilmektir. (Yani ömür ne az ne de fazla olacak)

Çizelge 3.7 Henry çözümünün ilk deneme değerleri (Collins, 1993)

| σ_D (N/mm ²) | Yük Seviyesi | Blok Sayısı | F (N) | A_1 (mm ²) | σ_1 (N/mm ²) | N_1 (çevrim) | n_1 | $\frac{n_1}{N_1}$ | $\frac{\sigma - \sigma_D}{\sigma_D}$ |
|------------------------------------|-----------------|----------------|----------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------|-------|-------------------|--------------------------------------|
| $\sigma_{D_1} = 469$ | A | 1 | 97856 | 95,5 | 1025 | 3800 | 1200 | 0,316 | 1,19 |
| $\sigma_{D_2} = 376$ | B | 1 | 53376 | 95,5 | 560 | 160000 | 7000 | 0,044 | 0,49 |
| $\sigma_{D_3} = 367$ | C | 1 | 28912 | 95,5 | 303 | ∞ | 50000 | 0 | - |
| $\sigma_{D_4} = 367$ | A | 2 | 97856 | 95,5 | 1025 | 1400 | 1200 | 0,857 | 1,80 |
| $\sigma_{D_5} = 75$ | B | 2 | 53376 | 95,5 | 560 | 8000 | 7000 | 0,875 | 6,40 |
| $\sigma_{D_6} = 10,7$ | C | 2 | 28912 | 95,5 | 303 | 50000 | 50000 | 1 | (hasar) |
| $\sigma_{D_6} = 0$ | | | | | | | | | |

Aranılan alanın Gatts Teorisi'ne göre hesaplanması az önce açıklanmış Henry Teorisi'ne çok benzer. Gatts'ın 3.22 denklemindeki $\gamma_e = 0$ olduğunda hasarın gerçekleşmesi beklenir. İlk deneme olarak 96,7 mm²'lik bir alan ve $C = \sigma_D / \sigma_k = 0,4$ değeri için Çizelge 3.8 kurulabilir.

Tabloda gösterilen prosedür sırasıyla her 3 yükleme bloğu için uygulanmıştır. Tasarımın hedefi 3. bloğun son çevrim seviyesi C biter bitmez $\beta = 1$ değerini yakalayabilmektir. Bu koşullar altında, 3.22 denklemi hasarın $\gamma_e = C_\gamma$ olduğunda oluştuğunu değerlendirmiştir veya yorulma limitinin kalan değeri büyüklük olarak $C \cdot \sigma'$ ya düştüğünde hasarın olacağı beklenir.

Bakla için aranılan değeri Corten-Dolan Teorisi'ne dayanarak elde etmek için 3.27 denkleminde yararlanılmıştır. Deneme alanı olarak 96,7 mm²'yi ve ortalama değer olarak $d = 6,57$ 'yi seçerek, ilk deneme için Corten-Dolan denklemi şu şekli alır:

$$D = \left(\frac{3600}{4500} \right) + \left(\frac{21000}{4500} \right) \left(\frac{551}{1011} \right)^{6,57} + \left[\left(\frac{150000}{4500} \right) \left(\frac{298}{1011} \right)^{6,57} \right]^2 = 1 \quad (3.68)$$

$$D = 0,89$$

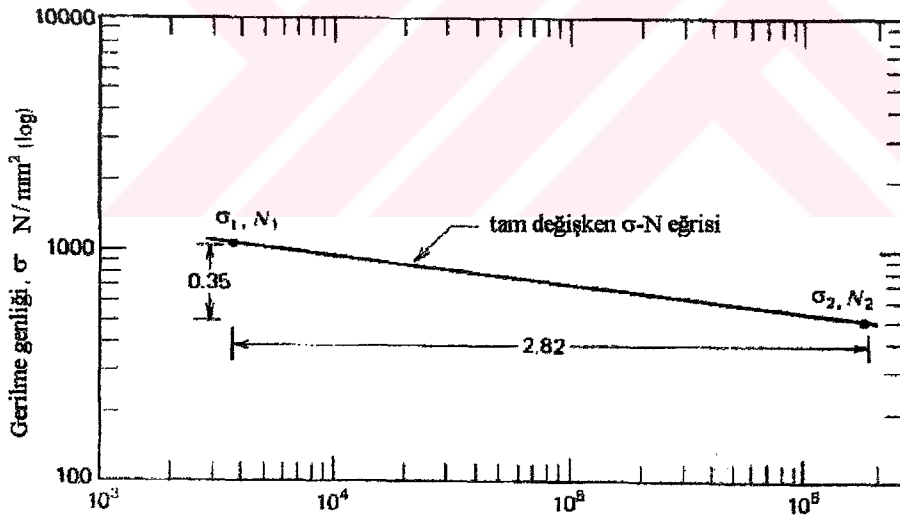
$$(3.69)$$

Bu değer 1'den düşük olduğu için, seçilen alan birazcık büyük gelmiştir. 3.27 denkleminde seçilen alan 1 değerini verinceye kadar ilave denemeler yapılmalıdır.

Çizelge 3.8 Gatts çözümü için ilk deneme değerleri (Collins, 1993)

| σ_D (N/mm ²) | Yük Seviyesi | Blok Sayısı | F (N) | A _r (mm ²) | σ_1 (N/mm ²) | N ₁ (çevrim) | n ₁ | β_1 | γ_1 | γ_e |
|------------------------------------|-----------------|----------------|----------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|-----------|------------|------------|
| $\sigma_{D_1} = 469$ | A | 1 | 97856 | 96,7 | 1011 | 4500 | 1200 | 0,266 | 2,16 | 0,96 |
| $\sigma_{D_2} = 450$ | B | 1 | 53376 | 96,7 | 551 | 350000 | 7000 | 0,02 | 1,22 | 0,998 |
| $\sigma_{D_3} = 449,5$ | C | 1 | 28912 | 96,7 | 298 | ∞ | 50000 | 0 | 0,66 | 1,0 |
| $\sigma_{D_4} = 449,5$ | A | 2 | 97856 | 96,7 | 1011 | 3600 | 1200 | 0,33 | 2,25 | 0,96 |
| $\sigma_{D_5} = 431$ | B | 2 | . | . | . | . | . | . | . | . |

3.36 denkleminde ifade edilmiş Marin Teorisi'ni kullanmak için, öncelikle x üssünün büyüklüğünü tayin etmek adına (bu malzeme için 8,05 olduğu Şekil 3.22'den görülmektedir) Şekil 3.22'de gösterildiği gibi σ -N dataları logaritmik koordinatlara çizilmelidir.



$$x = \frac{\log N_2 - \log N_1}{\log \sigma_1 - \log \sigma_2} = \frac{2.82}{0.35} = 8.05$$

Şekil 3.22 Marin'in denkleminde σ -N eğrisi için x üssünü tayin edebilmek için σ -N datalarının logaritmik çizimi (Collins, 1993)

Corten-Dolan bilgilerine dayanarak y değerini 6,57 olarak kabul edersek, 3.36'daki Marin bağıntısı 96,7 mm²'lik alan için şu şekli alır:

$$D = \left(\frac{3600}{4500} \right) + \left(\frac{21000}{445000} \right) \left(\frac{551}{1011} \right)^{-1,48} + \left[\left(\frac{150000}{\infty} \right) \left(\frac{298}{1011} \right)^{-1,48} \right] = 1 \quad (3.70)$$

$$D = 0,92 \quad (3.71)$$

D'nin bu değeri 1'den küçük olduğu için, seçilen alan birazcık büyüktür. Hesaplanan D değeri 1 oluncaya kadar yani seçilen alan tasarım gereksinimlerini karşılayana dek, doğru alanı uydurabilmek için ilave denemeler yapmak gereklidir.

Son olarak, deneme alanı olarak $96,7 \text{ mm}^2$ ve 3.44 veya 3.45 denklemlerini sırasıyla 3.46 ve 3.47 denklemleriyle birlikte kullanarak *Manson Teoremi* uygulanabilir. σ -N eğrisinden gözlemlenebilir ki, spektrumdaki en yüksek gerilme seviyesi için toplam ömür N_1 730 çevrimi geçmektedir ve böylece 3.44 denklemleri kullanılacaktır. Her 3 gerilme seviyesi σ_A , σ_B ve σ_C için de 3.44 denklemi kullanılarak Çizelge 3.9'da gösterilen sonuçlar elde edilir.

Ardından, 3.46 denkleminin değeri 1'e ulaşıncaya kadar bu denklem başlangıç hasarı için uygulanır. Bu yöntem Çizelge 3.10'da gösterilmiş ve buradaki alt indis I, alandaki ilk denemeyi temsil etmektedir.

Böylece, gerilme seviyesi A'nın ikinci bloğunda $\sum n/N$ 1'i aştığı için bu blok çevriminde bir kritik çekirdeğin oluştuğu sonucuna varılmıştır. Blok: 2 - gerilme seviyesi: A sırasında 1'e ulaşılmasının tam olarak ne zaman olduğunu tayin edebilmek için, şu not edilmelidir:

$$0,534 + \frac{n'_{2A}}{2320} = 1 \quad \text{veya}$$

$$n'_{2A} = 2320 \cdot (1 - 0,534) = 1080 \quad \text{çevrim} \quad (3.72)$$

Burada n'_{2A} gerilme seviyesi A'nın 2. bloğunda kritik çekirdek oluşumu bittikten sonra geçilmiş olan çevrim adedidir. Bu gerilme seviyesinde kalan 120 çevrim ve diğer tüm kalan çevrimler yayılma safhasına katılacaktır. Yayılma safhası için, Çizelge 3.11'de gösterildiği gibi 3.47 denklemi kullanılmıştır. Burada not edilmelidir ki, 3. blok yüklenmenin B gerilme seviyesi sırasında hasar olacağı açıkça beklenmektedir. Bu seçilen alanın hafif tertip küçük olduğunu göstermektedir.

Yükleme seviyesi C'nin hiç hasar üretmeyeceği de göz önünde bulundurularak bulunan bu sonuç istenilen memnuniyete yakın olmasına rağmen, prensipte birazcık geniş bir alan kabul

edilmesi ve tasarım kriteri olan yüklem spektrumunun son bloğunun son gerilme seviyesindeki son çevrim de tamamlandıktan sonra $\sum n/N_p = 1$ 'e ulaşması ile birlikte tüm hesaplamalar tekrarlanmalıdır.

Çizelge 3.9 Manson çözümünün ilk denemesi için temel bilgiler (Collins, 1993)

| Yük Seviyesi | F (N) | A_I (mm ²) | σ_I (N/mm ²) | N_{I_i} (çevrim) | $N_{I_i}^{0,6}$ | N_{P_i} (çevrim) | N'_I (çevrim) |
|--------------|-------|--------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| A | 97856 | 96,7 | 1011 | 4500 | 156 | 2180 | 2320 |
| B | 53376 | 96,7 | 551 | 445000 | 2450 | 34300 | 410700 |
| C | 28912 | 96,7 | 298 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

Çizelge 3.10 Manson çözümündeki çatlak başlangıcı hakkındaki ilk deneme (Collins, 1993)

| Yük Seviyesi | Blok Sayısı | F (N) | A_I (mm ²) | σ_I (N/mm ²) | n_i (çevrim) | N'_I (çevrim) | $\frac{n_i}{N'_I}$ | $\sum \frac{n_i}{N'_I}$ |
|--------------|-------------|-------|--------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| A | 1 | 97856 | 96,7 | 1011 | 1200 | 2320 | 0,517 | 0,517 |
| B | 1 | 53376 | 96,7 | 551 | 7000 | 410700 | 0,017 | 0,534 |
| C | 1 | 28912 | 96,7 | 298 | 50000 | ∞ | 0 | 0,534 |
| A | 2 | 97856 | 96,7 | 1011 | 1200 | 2320 | 0,517 | 1,051 |

Çizelge 3.11 Manson çözümündeki hasara kadarki çatlak yayılması hakkındaki ilk deneme (Collins, 1993)

| Yük Seviyesi | Blok Sayısı | F (N) | A_I (mm ²) | σ_I (N/mm ²) | n_i (çevrim) | N_{P_i} (çevrim) | $\frac{n_i}{N_{P_i}}$ | $\sum \frac{n_i}{N_{P_i}}$ |
|--------------|-------------|-------|--------------------------|---------------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|
| A | 2 | 97856 | 96,7 | 1011 | 120 | 2180 | 0,06 | 0,06 |
| B | 2 | 53376 | 96,7 | 551 | 7000 | 34300 | 0,20 | 0,26 |
| C | 2 | 28912 | 96,7 | 298 | 50000 | ∞ | 0 | 0,26 |
| A | 3 | 97856 | 96,7 | 1011 | 1200 | 2180 | 0,55 | 0,81 |
| B | 3 | 53376 | 96,7 | 551 | 7000 | 34300 | 0,20 | 1,01 |

ÖRNEK 3: (Marin, 1966)

SAE – 430 ısıtılmış bir çelik değişken genlikli gerilmeye maruz kalan bir eleman için kullanılacaktır. Bu malzeme için σ -N bağıntısı yaklaşık olarak $\sigma^{6,4} \cdot N = 758^{6,4} \cdot 31000$ ile bulunabilir. $\sigma_1 = 827$ N/mm² değeri için Marin'in 3.38 denklemindeki q sabiti 6'dır. Eleman şu spektruma maruz kalacaktır:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 827 \text{ N/mm}^2 & n_1 &= 10^3 \text{ çevrim} \\ \sigma_2 &= 758 \text{ N/mm}^2 & n_2 &= 10^3 \text{ çevrim} \\ \sigma_3 &= 620 \text{ N/mm}^2 & n_3 &= 10^4 \text{ çevrim} \\ \sigma_4 &= 551 \text{ N/mm}^2 & n_4 &= 5 \cdot 10^5 \text{ çevrim}\end{aligned}$$

$\sigma_i = 689 \text{ N/mm}^2$ için kalan n_i ömrünü çevrim adedi olarak tayin ediniz.

Çözüm:

Yorulma ömrü değerleri N_1, N_2, N_3 ve N_4 şu eşitlikten tayin edilir.

$$\sigma^{6.4} \cdot N = 758^{6.4} \cdot 31000$$

σ değeri yerine sırasıyla 827, 758, 620 ve 551 konarak N değerleri bulunur:

$$N_1 = (758/827)^{6.4} \cdot 31000 = 17700 \text{ çevrim}$$

$$N_2 = (758/758)^{6.4} \cdot 31000 = 31000 \text{ çevrim}$$

$$N_3 = (758/620)^{6.4} \cdot 31000 = 112000 \text{ çevrim}$$

$$N_4 = (758/551)^{6.4} \cdot 31000 = 238000 \text{ çevrim}$$

$$N_i = (758/689)^{6.4} \cdot 31000 = 57000 \text{ çevrim}$$

Yukarıda sözü edilen N, n ve σ değerleri 3.38 denkleminde yerine yazılırsa:

$$n_i = 57000 \cdot \left[\left(1 - \frac{10^3}{17,7 \cdot 10^3} \right) \left(\frac{827}{689} \right)^6 - \left(\frac{10^3}{31 \cdot 10^3} \right) \left(\frac{758}{689} \right)^6 - \left(\frac{10^4}{11,2 \cdot 10^4} \right) \left(\frac{620}{689} \right)^6 - \left(\frac{5 \cdot 10^5}{2,38 \cdot 10^5} \right) \left(\frac{551}{689} \right)^6 \right]$$

$$n_i = 123232 \text{ çevrim}$$

ÖRNEK 4: (Dowling, 1999)

Şekil 3.23'te gösterilen gerilme durumu Çizelge 2.1'deki AISI 4340 çeliğinden yapılmış çentiksiz bir elemana tek eksenli gerilme olarak ve tekrarlanarak uygulanmıştır. Yorulma hasarının oluşması için tekrarlama adedini hesaplayın.

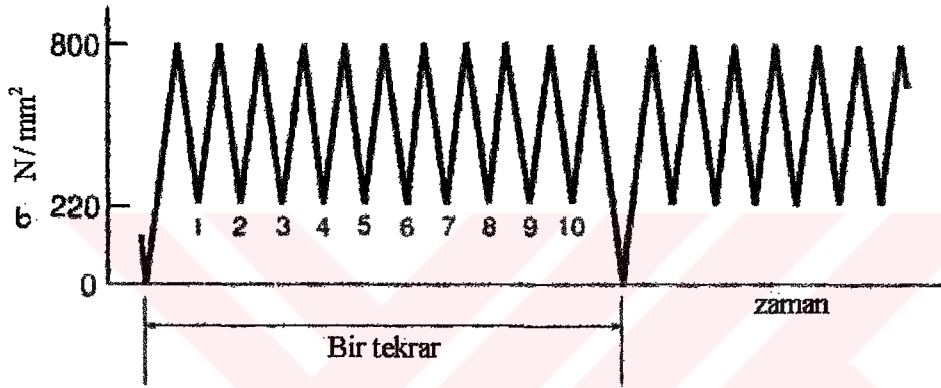
Çözüm:

Durumun bir tekrarı için, gerilme 0'dan 800 N/mm^2 'ye yükselmekte, sonra tekrar 0'a

düşmekte ve böylece bir çevrimi $\sigma_{\min} = 0$ ve $\sigma_{\max} = 800$ N/mm² olacak şekilde tamamlamaktadır. Ayrıca $\sigma_{\min} = 220$ ve $\sigma_{\max} = 800$ N/mm² olan 10 çevrim daha vardır. Aşağıda verilen tablo kullanışlı olacaktır. Tüm gerilme değerleri N/mm² cinsindedir.

Çizelge 3.12 Örnekle ilgili bilgiler (Dowling, 1999)

| j | n _j | σ_{\min} | σ_{\max} | σ_g | σ_o | N _j |
|---|----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|----------------------|
| 1 | 1 | 0 | 800 | 400 | 400 | 1,36.10 ⁵ |
| 2 | 10 | 220 | 800 | 290 | 510 | 1,54.10 ⁶ |



Şekil 3.23 Örnekle ilgili şekil (Dowling, 1999)

Çevrimli hallerin her iki seviyesi de bir tablo şeklinde Çizelge 3.12’de verilmiştir. Gerilme genliği σ_g , ortalama gerilme σ_o ve karşılık gelen ömür N değerleri aşağıdaki denklemlerden hesaplanmıştır:

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_o = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad N = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_g}{\sigma'_f - \sigma_o} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Sabitler $\sigma'_f = 1758$ N/mm² ve $b = -0,0977$ olarak Çizelge 2.1’den alınmıştır. Tekrarlamalardaki ömür B_f , 3.27 denklemi formundaki Palmgren-Miner kuralı ile Çizelge 3.12’deki n ve N değerlerinden hesaplanabilir:

$$B_f = \frac{1}{\left[\sum \frac{n_j}{N_j} \right]_{\text{bir tekrarlamaya}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,36.10^5} + \frac{10}{1,54.10^6}} = 72000 \text{ tekrarlamaya}$$

ÖRNEK 5: (Dowling, 1999)

Çizelge 3.1'den, AISI 4340 çeliğinden ortadan çatlayan bir plaka $b = 38 \text{ mm}$ ve $t = 6 \text{ mm}$ ölçüleriyle $a_i = 1 \text{ mm}$ 'lik ilk çatlama boyuna sahiptir. $a_f = 15,8 \text{ mm}$ ve $f = 1,03$ 'tür. Plaka Şekil 3.24'teki tekrarlayan yüklenme haline maruz kalmıştır. Yorulma hasarı olmadan bu durumda kaç tekrarlama uygulanabilir?

Çözüm:

Öncelikle yüklenme durumu için 3.60 denkleminde eşdeğer bir sıfıra yaklaşan gerilme seviyesi hesaplayacağız. Böylece bu $\Delta\sigma_e$, sanki basit bir sıfıra yaklaşan gerilme ($R=0$) yüklemesi varmış gibi, N_f ömrünü hesaplamak için 3.62 denkleminde kullanılabilir. Buna ek olarak, Çizelge 3.1'deki malzeme özellikleri gerekmektedir.

$$C = C_1 = 5,11 \cdot 10^{-13} \frac{m/\text{çevrim}}{\left(\frac{N}{\text{mm}^2} \cdot \sqrt{m}\right)^{m_1}} \quad (R = 0)$$

$$m = m_1 = 3,24 \quad \gamma = 0,42$$

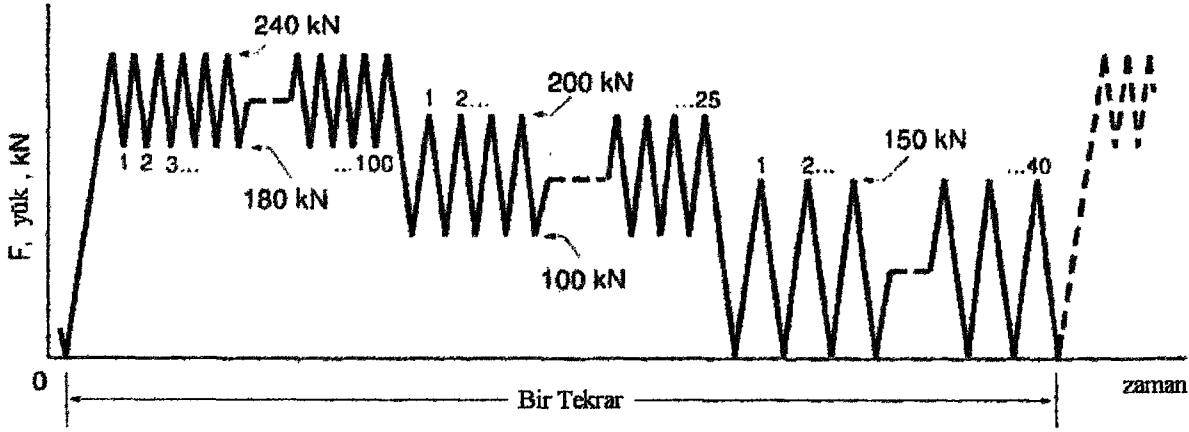
Çizelge 3.13'te görüldüğü gibi, yükleme hali muhtelif F_{\max} ve F_{\min} kombinasyonlarında çevrimler içermektedir. $k=4$ için olan tek çevrim yüksek frekansta çevrim belirleme metodundan en yüksek tepe noktası değeri ile en alçak çukur değer arasındaki büyük çevrim olarak yükselmektedir.

Bunun ardından, aşağıdaki hesaplamalar her yük seviyesi k için gerekli olacaktır:

$$R = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} \quad , \quad \sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{2 \cdot b \cdot t} \quad , \quad \Delta\bar{\sigma} = \sigma_{\max} \cdot (1 - R)^\gamma$$

Her dört yük seviyesinde de birçok çevrim olduğundan, 3.60 denkleminin toplamı şu formda yapılabilir:

$$\sum_{j=1}^{N_B} (\Delta\bar{\sigma}_j)^m = \sum_{k=1}^4 n_k \cdot (\Delta\bar{\sigma}_k)^m$$



Şekil 3.24 Örnekle ilgili şekil (Dowling, 1999)

Çizelge 3.13 Örnekle ilgili bilgiler (Dowling, 1999)

| k | n_k çevrim | F_{\max} kN | F_{\min} kN | R | σ_{\max} N/mm ² | $\Delta\bar{\sigma}_k$ N/mm ² | $n_k \cdot (\Delta\bar{\sigma}_k)^m$ |
|----------|-----------------|------------------|------------------|------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 100 | 240 | 180 | 0,75 | 526,3 | 294 | $9,94 \cdot 10^9$ |
| 2 | 25 | 200 | 100 | 0,5 | 438,6 | 327,8 | $3,54 \cdot 10^9$ |
| 3 | 40 | 150 | 0 | 0 | 328,9 | 328,9 | $5,72 \cdot 10^9$ |
| 4 | 1 | 240 | 0 | 0 | 526,3 | 526,3 | $6,56 \cdot 10^8$ |
| Σ | 166 | | | | | | $1,986 \cdot 10^{10}$ |

Alt kısmında toplamın bulunduğu Çizelge 3.13'te detaylar verilmiştir. $N_B = \sum n_k = 166$ çevrim olduğunu not edersek artık $\Delta\sigma_e$ 'yi hesaplayabiliriz.

$$\Delta\sigma_e = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N_B} (\Delta\bar{\sigma}_j)^m}{N_B} \right]^{1/m} = \left[\frac{1,986 \cdot 10^{10}}{166} \right]^{1/3,24} = 311,3 \text{ N/mm}^2$$

Ardından bu değer, çatlak büyümesi için olan çevrim adedini elde edebilmek için 3.62 denkleminde kullanılır.

$$N_{if} = \frac{a_f^{1-m/2} - a_i^{1-m/2}}{C \cdot (f \cdot \Delta\sigma_e \cdot \sqrt{\pi})^m \cdot (1-m/2)} = \frac{0,0158^{-0,62} - 0,001^{-0,62}}{5,11 \cdot 10^{-13} \cdot (1,03 \cdot 311,3 \cdot \sqrt{\pi})^{3,24} \cdot (-0,62)}$$

$$N_{if} = 2,23 \cdot 10^5 \text{ çevrim}$$

Burada bulunan tüm nicelikler metre ve N/mm^2 birimleri cinsindedir. Ayrıca, R-oran etkileri zaten $\Delta\bar{\sigma}$ değerlerine katıldığından $C = C_1$ değeri $R = 0$ içindir. Sonuç olarak hasara kadarki tekrarlama adedi şudur:

$$B_{if} = \frac{N_{if}}{N_B} = \frac{2,23 \cdot 10^5}{166} = 1340 \quad \text{tekrarlama}$$



4. BİLEŞİK GERİLME DURUMU:

Yapı ve makina elemanları üzerinde rol oynayan dalgalanan yükler çoğu kez birden fazla yönde oluşan yorulma gerilmeleri üretirler. Örnek olarak, eğilme ve burulma yükleri altında dönen bir şaft çift eksenli yorulma gerilmelerine maruz kalır. Değişken bileşik gerilmeler aynı zamanda akslar, iletici çubuklar, buhar ve gaz türbinlerinde kullanılan dönen şaftlar, krank milleri ve bileşik dalgalı yüklerin üretildiği veya elemanın yapısı nedeniyle bileşik halli gerilmelerin olduğu birçok mekanizma ve yapı gibi dönen ve ileri-geri hareket eden (piston kolu gibi) parçalarda üretilir. Nispeten az bir miktar deneysel bilgi gerilmelerin bileşik haline maruz kalmış metallerin yorulma dayanımları üzerinde işe yaramaktadır. Cidar kalınlığı ince silindirlerde uygulanmış dalgalanan iç basınç ve eksenel yükleme deneyleri az miktarda olmasına rağmen, bileşik yorulma dayanımı üzerindeki çoğu deneyler katı dairesel numunelerin üzerine dalgalanan bileşik burulma ve eğilme yüklerinin uygulanmasıyla yapılır. Bu şekilde, esas gerilmelerin oranı σ_2/σ_1 0'dan 1'e kadar dikkatle incelenebilir. 0'dan 1'e kadar çift-eksenli pozitif gerilme oranı σ_2/σ_1 ve negatif gerilme oranı σ_2/σ_1 için işe yarayan sadece birkaç test sonucu olmasına rağmen diğer çift-eksenli gerilme kombinasyonları ve tüm üç-eksenli gerilme kombinasyonları için test sonuçları hiç yoktur. Başka bir deyişle, malzemelerin bileşik yorulma dayanımlarını önceden söylemek için kullanılacak herhangi bir teori dikkatle ele alınmalıdır. İlerleyen konularda bileşik gerilmelerdeki yorulma dayanımının tahmininde yaygın olarak kullanılan teoriler tartışılacaktır.

4.1 Gerilmenin Çok Eksenli Olması Durumunun Etkisi:

Gerilmenin çok eksenli olması halinin düşük-çevrimli yorulma davranışına etkilerinin detaylı işlenmesi bu çalışma konusunun ötesindedir, fakat bu koşullar altında düşük-çevrimli yorulma ömrünün hesaplanması için önerilen teknikler vardır. Önerilen teknik, eşdeğer bir gerilme ve eşdeğer bir toplam gerinim değişimi tanımlanmasını içerir. Böylece çok eksenli haldeki gerilme koşulları altında eşdeğer toplam gerinim değişimine dayanan ömür hesapları, gerilmenin tek eksenli düşük-çevrimli yorulma datası şeklinde toplam gerinim değişimine karşı hasar ömrü ifadesiyle yapılabilir. Ancak hala bu tekniğin geçerliliğini sorgulayan birçok soru cevaplanmayı beklemektedir. Yine de, bugün için bu yöntem en uygun yaklaşım olarak görülmektedir. Eğer yorulma özellikleri anizotropik, veya malzeme özelliklerine etkileyen çevrimli plastisite yüzünden anizotropik olursa, yükleme yönünün yorulma özelliklerinin yönüne göre durumu önem kazanacağı için tek bir eşdeğer gerilme veya gerinim fikri artık geçerli olamayacaktır (Collins, 1993).

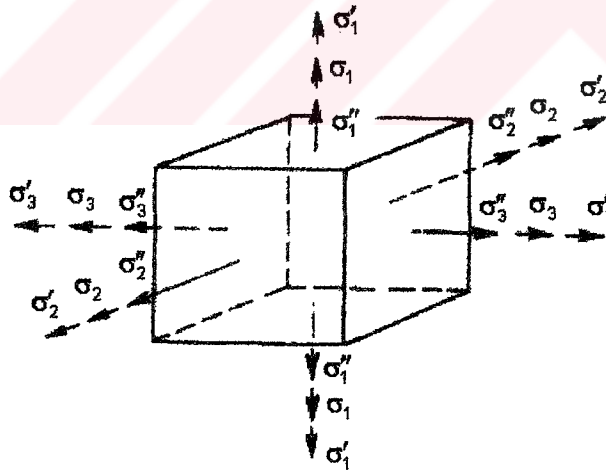
4.2 Bileşik Gerilmeler İçin Hasar Teorileri:

Dikkate alınacak teoriler için aşağıdaki varsayımlar ve sınırlar koyulacaktır:

- 1- Yükleme sırasında esas gerilmelerin yönleri değişmeyecektir.
- 2- Her bir esas gerilmenin maksimum (ve minimum) değerleri aynı zamanda oluşacaktır.
- 3- Maksimum ve minimum gerilme bileşenlerinin değerleri zamanla değişmeyecektir. Yani, değişken gerilme genlikleri ve spektrum tipi yükleme hesaba katılmamıştır.
- 4- Tek-eksenli (uniaxial) yorulma dayanımı bağıntısının konservatif Soderberg bağıntısıyla ortaya konacağı farz edilmiştir.
- 5- Malzemenin homojen ve izotropik olduğu varsayılır.
- 6- Her bir teori bazı gerilme fonksiyonlarının sınırlanan değerlerini açıklayan spesifik bir fiziksel kavrama dayanır.

Teorilerin geliştirilmesi için yukarıdaki 1'den 5'e kadar olan çeşitli varsayımlar lazım değildir. Yine de, basitlik ve üzerinde az bir şey bilinen olayın görünümü için, yukarıda sözü edilen varsayımlar tartışılan teorilere uygulanacaktır. Geliştirilen teoriler maksimum normal gerilmenin ve maksimum kesme gerilmesinin fiziksel kavramlarına dayanacaktır.

4.2.1 Maksimum Normal Gerilme Teorisi:



Şekil 4.1 Değişken üç-eksenli gerilmeye maruz kalmış eleman (Marin, 1966)

Şekil 4.1 değişken üç-eksenli gerilmelere maruz kalmış bir elemanı göstermektedir. Esas gerilmeler σ_1 , σ_2 ve σ_3 değişmektedirler. Bu yüzden bunların maksimum değerleri sırasıyla σ'_1 , σ'_2 ve σ'_3 , ve bunların ortalama değerleri ise σ''_1 , σ''_2 ve σ''_3 diye adlandırılmıştır. Soderberg bağıntısı tek-eksenli yorulma için, maksimum tek-eksenli gerilme σ_{max} cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_{\max} = (1-p)\sigma_0 + \sigma \quad (4.1)$$

burada $p = \sigma/\sigma_{yp}$ dir.

Maksimum gerilme teorisine göre, eğer σ_1 bu üç esas gerilmenin en kritik değeri ise, ortalama gerilmeler σ_0 ve σ_1'' 'nin eşit değerleri için ve σ_{\max} σ_1' ile yer değiştirilirse hasar için σ_1' değeri 4.1 denklemiyle şöyle açıklanır:

$$\sigma_1' = (1-p)\sigma_1'' + \sigma \quad (4.2)$$

Eğer σ_2 veya σ_3 kritik gerilme ise,

$$\sigma_2' = (1-p)\sigma_2'' + \sigma \quad (4.3)$$

$$\sigma_3' = (1-p)\sigma_3'' + \sigma \quad (4.4)$$

Esas ortalama gerilmelerin ilgili değerlerine bağlı olarak, 4.2, 4.3 veya 4.4 denklemlerinden biri hasarı maksimum gerilme teorisine göre açıklar.

İki yönlü gerilmeler için, hem $\sigma_3' = \sigma_3'' = 0$ 'dır hem de 4.2 veya 4.3 denklemlerinden biri uygulanır. Gerilme bileşenlerinin σ_x' , σ_x'' , σ_y' , σ_y'' , σ_{xy}' ve σ_{xy}'' olduğu iki yönlü gerilmeler için yorulma hasarı bağıntısının şöyle olduğu gösterilebilir:

$$(\sigma_x' + \sigma_y') - (1-p)(\sigma_x'' + \sigma_y'') \pm \sqrt{[(\sigma_y' - \sigma_x') - (1-p)(\sigma_y'' - \sigma_x'')]^2 + 4[\sigma_{xy}' - (1-p)\sigma_{xy}'']^2} = \pm 2\sigma \quad (4.5)$$

4.5 denklemindeki gerilme bileşenlerinden σ_x' haricindekilerin hepsinin bilinmesi durumunun dikkate alınmasıyla 4.5 denkleminin fiziksel bir yorumu yapılabilir. Böylece maksimum gerilme teorisine göre σ_x' değeri, 4.5 denklemi tarafından diğer bilinen gerilme bileşenleri ve malzeme sabitleri p ve σ cinsinden verilir.

4.2.2 Maksimum Kesme Gerilmesi Teorisi:

Soderberg tarafından bileşik yorulma gerilmeleri için bir maksimum kesme teorisi ileri sürülmüştür. Bu teori, 4.1 denklemindeki tek-eksenli yorulma bağıntısına dayanmakta ve maksimum kesme gerilmesinin hasarı tanımlayan limit gerilme fonksiyonu olduğunu farz etmektedir. Bu teoriyi formülleştirmek için, öncelikle esas kesme gerilmelerinin maksimum

ve ortalama değerleri ifade edilecektir. Bu değerler:

$$\begin{aligned}\tau'_1 &= \frac{\sigma'_1 - \sigma'_2}{2}, \quad \tau'_2 = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{2}, \quad \tau'_3 = \frac{\sigma'_3 - \sigma'_1}{2} \\ \tau''_1 &= \frac{\sigma''_1 - \sigma''_2}{2}, \quad \tau''_2 = \frac{\sigma''_2 - \sigma''_3}{2}, \quad \tau''_3 = \frac{\sigma''_3 - \sigma''_1}{2}\end{aligned}\quad (4.6)$$

Tek-eksenli çekme gerilmesi için maksimum ve ortalama kesme gerilmeleri şu yer değiştirmeler yapılarak 4.6 denkleminde elde edilir:

$$\sigma'_2 = \sigma''_2 = \sigma'_3 = \sigma''_3 = 0, \quad \sigma'_1 = \sigma_{\max} \quad \text{ve} \quad \sigma''_1 = \sigma_0$$

böylece,

$$\tau' = \frac{\sigma_{\max}}{2}, \quad \tau'' = \frac{\sigma_0}{2}\quad (4.7)$$

4.1 denklemindeki σ_{\max} ve σ_0 yerine 4.7 denkleminde bulunan değerleri yazıldığında kesme gerilmesi cinsinden olan tek-eksenli yorulma bağıntısı artık bulunabilir. Böylece,

$$\tau' = (1-p)\tau'' + \frac{\sigma}{2}\quad (4.8)$$

Ortalama kesme gerilmelerinin eşit değerleri

$$\tau'' = \tau''_1 = \tau''_2 = \tau''_3$$

için ve 4.8 denklemindeki τ' değeri 4.6 denklemindeki maksimum kesme gerilmeleri değerleriyle değiştirildiğinde, bu teori bileşik gerilmeler için hasarı açıklamış olacaktır. Şöyle ki:

$$\begin{aligned}\sigma'_1 &= \sigma'_2 + (1-p)(\sigma''_1 - \sigma''_2) + \sigma \\ \sigma'_2 &= \sigma'_3 + (1-p)(\sigma''_2 - \sigma''_3) + \sigma \\ \sigma'_3 &= \sigma'_1 + (1-p)(\sigma''_3 - \sigma''_1) + \sigma\end{aligned}\quad (4.9)$$

4.9 denklemlerinden hangisinin geçerli olacağı altı esas gerilmenin ilgili değerlerine bağlıdır ve hasarı tanımlamada her üç denklem de hesaba katılmalıdır. $\sigma'_3 = \sigma''_3 = 0$ yapılarak 4.9 denklemleri iki yönlü gerilmeler için kullanılabilir. σ_x , σ_y ve σ_{xy} gerilme bileşenleri

cinsinden ifade edilmiş iki yönlü gerilmeler için, maksimum kesme teorisi ile yorulmayı açıklayan denklemler şöyle gösterilebilir:

$$\sigma'_x = (1-p)\sigma''_x + \sigma$$

$$\sigma'_y = (1-p)\sigma''_y + \sigma \quad (4.10)$$

$$\sigma = \sqrt{[(1-p)(\sigma''_x - \sigma''_y) - (\sigma'_x - \sigma'_y)]^2 + 4[(1-p)(\sigma''_{xy} - \sigma'_{xy})]^2}$$

4.10 denklemlerindeki gerilme bileşenlerinin ilgili değerleri tayin edilecektir. Aynı işaretli esas gerilmeler için, 4.10 denklemlerinin ilk iki bağıntısı geçerli olacak, zıt işaretli esas gerilmeler için 4.10 denklemlerinin son bağıntısı geçerli olacaktır.

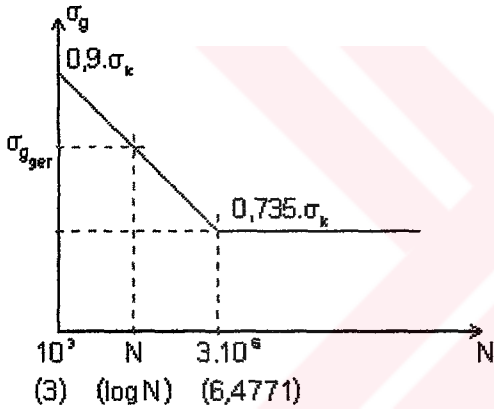
5. GTD MODEL 4X4 ASKERİ ARACIN AKTARMA ELEMANLARININ ÖMÜR HESAPLARI:

Aşağıdaki hesaplarda bulunan tüm σ değerleri N/mm^2 birimindedir. Ayrıca bu bölümde kullanılan tüm sabit sayılar Ayaroğlu'nun (2002) tezinden alınmıştır.

Bununla beraber, aşağıda log-log koordinatlarda çizilen eğri formülünde dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. σ_g olarak gösterilen değer altında Goodman formülünden bulunacak eşdeğer gerilme σ_{aq} 'dur.

- Dişliler, transfer milleri ve mahruti dişli milleri için kullanılacak Wöhler eğrileri:

Log-Linear Koordinatlar:



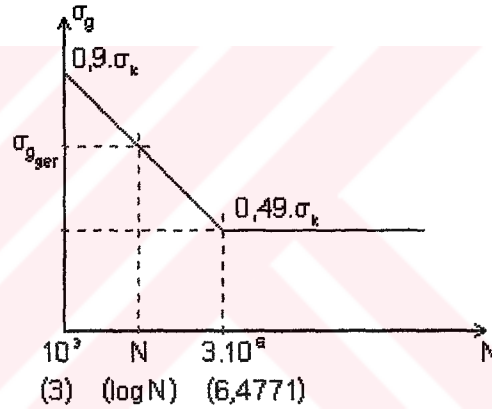
$$\frac{0,9 \cdot \sigma_k - \sigma_g}{0,9 \cdot \sigma_k - 0,735 \cdot \sigma_k} = \frac{\log N - 3}{6,477121 - 3}$$

$$\log N = \frac{3,1294 \cdot \sigma_k - 3,477121 \cdot \sigma_g}{0,165 \cdot \sigma_k} + 3$$

$$\log N = 3 + 18,96606 - 21,073 \frac{\sigma_g}{\sigma_k}$$

$$\log N = 21,96606 - 21,073 \frac{\sigma_g}{\sigma_k}$$

Log-Log Koordinatlar:



$$\sigma_g = A \cdot (N)^B$$

$$\sigma_a = 0,9 \cdot \sigma_k \quad \sigma_a = 837 \quad N_a = 10^3$$

$$\sigma_b = \sigma_D \quad \sigma_b = 455,7$$

$$N_b = 3 \cdot 10^6$$

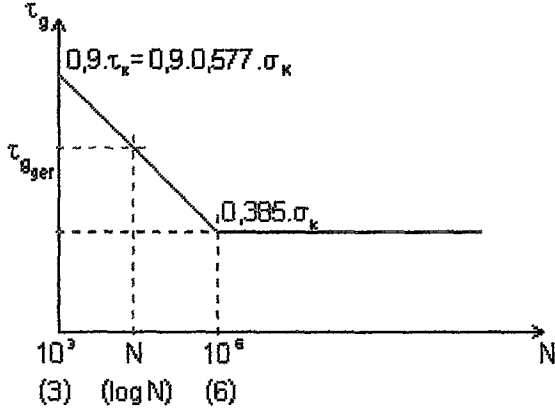
$$B = \frac{\log \sigma_a - \log \sigma_b}{\log N_a - \log N_b} \quad B = -0,07594$$

$$A = \frac{\sigma_D}{(N_b)^B} \quad A = 1414,3$$

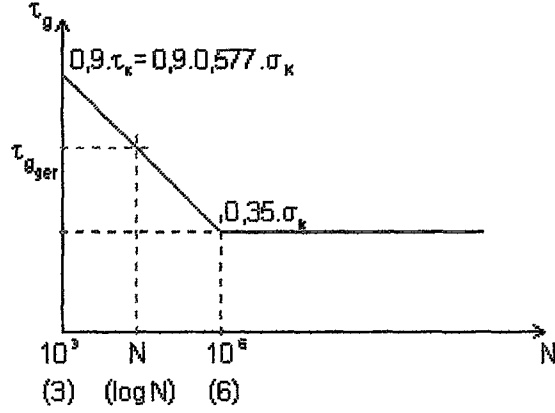
$$N = \left(\frac{\sigma_g}{1414,3} \right)^{-13,168}$$

- Akslar ve kardan milleri için kullanılacak Wöhler eğrileri:

Log-Lineer Koordinatlar:



Log-Log Koordinatlar:



$$\frac{0.9\tau_k - \tau_g}{0.9\tau_k - 0.385\sigma_k} = \frac{\log N - 3}{6 - 3}$$

$$\frac{0.519\sigma_k - 0.577\sigma_g}{0.519\sigma_k - 0.385\sigma_k} = \frac{\log N - 3}{3}$$

$$\log N = \frac{1.5588\sigma_k - 1.732\sigma_g}{0.1346\sigma_k} + 3$$

$$\log N = 3 + 11.58098 - 12.8677 \frac{\sigma_g}{\sigma_k}$$

$$\log N = 14.58098 - 12.8677 \frac{\sigma_g}{\sigma_k}$$

$$\tau_g = A(N)^B$$

$$\tau_a = 0.9\tau_k \quad \tau_a = 483.24 \quad N_a = 10^3$$

$$\tau_b = \tau_D \quad \tau_b = 325.5 \quad N_b = 10^6$$

$$B = \frac{\log \tau_a - \log \tau_b}{\log N_a - \log N_b} \quad B = -0.04936$$

$$A = \frac{\tau_D}{(N_b)^B} \quad A = 679.564$$

$$N = \left(\frac{\tau_g}{679.564} \right)^{-20.2593}$$

$$N = \left(\frac{\sigma_g}{1177.04} \right)^{-20.2593}$$

5.1 Transfer Kutusu – Daimi İştirak Dışlısı Ömür Değerlendirmeleri:

$$\sigma_k := 930$$

$$\sigma_{DT} := 1.5 \cdot 0.49 \cdot \sigma_k$$

$$K_\varphi := 1.397$$

$$\sigma_{DT} = 683.55$$

$$\sigma_D := 0.49 \cdot \sigma_k$$

$$K_b := 0.956$$

$$\sigma_D = 455.7$$

$$K_y := 0.72$$

(σ_{DT} değeri için bkz. Çizelge2.2: genel imalat çeliğinin *genel değişken eğilme zorlanması*)

Gerilmeler 0 - 254, 0 - 139, 0 - 92 N/mm² arasında değişmektedir. (Ayaroğlu, 2002)

Aşağıda direkt olarak gerilmelerin genlik değerleri yazılmıştır. Bu açıklamadan sonra gerilmelerin artık genlik gerilmesi olduğu bilindiği için “g” indisi kullanılmayacaktır.

$$\sigma_1 := 127 \quad \sigma_{1ger} := \sigma_1 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b} \quad \sigma_{1ger} = 257.76 \quad \sigma_{o1} := \sigma_1$$

$$\sigma_2 := 69.5 \quad \sigma_{2ger} := \sigma_2 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b} \quad \sigma_{2ger} = 141.06 \quad \sigma_{o2} := \sigma_2$$

$$\sigma_3 := 46 \quad \sigma_{3ger} := \sigma_3 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b} \quad \sigma_{3ger} = 93.36 \quad \sigma_{o3} := \sigma_3$$

5.1.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\log N := 21.96611593 - 21.07346215 \cdot \frac{\sigma_{1ger}}{\sigma_k} \quad \log N = 16.1254458 \quad N_1 := 10^{16.1254458}$$

$$\log N := 21.96611593 - 21.07346215 \cdot \frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_k} \quad \log N = 18.7698437 \quad N_2 := 10^{18.7698437}$$

$$\log N := 21.96611593 - 21.07346215 \cdot \frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_k} \quad \log N = 19.8505976 \quad N_3 := 10^{19.8505976}$$

$$N_1 = 1.33489 \times 10^{16}$$

$$N_2 = 5.88632 \times 10^{18}$$

$$N_3 = 7.08921 \times 10^{19}$$

5.1.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07 \quad c_2 := 0.87 \quad c_3 := 0.06$$

$$N_{eş} := \frac{1}{\frac{c_1}{N_1} + \frac{c_2}{N_2} + \frac{c_3}{N_3}} \quad (\text{bkz. denklem 3.6})$$

$$N_{eş} = 1.85442 \times 10^{17}$$

Her bir gerilme safhasında yaşanan ömürleri bulmak için şu hesaplamaları yapmak gerekmektedir:

$$n_1 := c_1 \cdot N_{eş} \quad n_1 = 1.29809 \times 10^{16} \quad N_1 - n_1 = 3.67967 \times 10^{14}$$

$$n_2 := c_2 \cdot N_{eş} \quad n_2 = 1.61335 \times 10^{17} \quad N_2 - n_2 = 5.72498 \times 10^{18}$$

$$n_3 := c_3 \cdot N_{eş} \quad n_3 = 1.11265 \times 10^{16} \quad N_3 - n_3 = 7.08809 \times 10^{19}$$

$$n_1 + n_2 + n_3 = 1.85442 \times 10^{17}$$

5.1.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$d := 6.57$ deneysel sabit

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_1} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d + \left(\frac{n_3}{N_1} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d = 1.2037 \quad (\text{bkz. denklem 3.27})$$

$$N_{eş} := \frac{N_1}{c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d + c_3 \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d} \quad (\text{bkz. denklem 3.26})$$

$$N_{eş} = 1.5406 \times 10^{17}$$

5.1.1.3 Marin Yöntemi:

$$x := \frac{\log(N_2) - \log(N_1)}{\log(\sigma_{1ger}) - \log(\sigma_{2ger})} \quad (\text{bkz. şekil 3.22})$$

$$x = 10.1001 \quad y := 6.57 \quad q := y - x \quad q = -3.5301$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^q + \left(\frac{n_3}{N_3} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^q = 1.20831 \quad (\text{bkz. denklem 3.36})$$

Marin yöntemine göre eşdeğer ömrü bulmak istersek şu hesaplamayı yapmalıyız:

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}}\right)^q = 1.20265$$

$$\frac{n_1}{N_1} = 0.97243$$

Bu ifadelerden parçamızın n_2 çevrimlerini yaşarken kırılacağı görülmektedir. Yani parçamız n_1 çevrimlerinin tümünü sorunsuzca yaşayacak ve n_2 sırasında kırılacaktır. Eğer yaşadığı n_{2i} çevrimleri bulunursa bunları n_1 ile toplayarak $N_{eş}$ 'i bulabiliriz. O halde n_1 çevrimlerinden sonra kalan ömür ifadesini veren 3.38 denklemi kurulursa n_{2i} çevrim adedi hesaplanabilir:

(Not: Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$n_{2i} := N_2 \cdot \left[\left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{1ger}}{\sigma_{2ger}}\right)^q \right] \quad n_{2i} = 1.93179 \times 10^{16}$$

$$N_{eş} := n_1 + n_{2i} \quad N_{eş} = 3.22988 \times 10^{16}$$

5.1.1.4 Manson Yöntemi:

$$p := 0.6 \quad P := 14 \quad (\text{deneysel sabit})$$

Her durumda ömür 730 çevrimi geçtiği için 3.44 denklemleri kullanılacaktır:

$$N_y := P \cdot N^p \quad N_b := N - N_y$$

$$N_{y_1} = 6.6282 \times 10^{10}$$

$$N_{b_1} = 1.33488 \times 10^{16}$$

$$N_{y_1} + N_{b_1} = 1.33489 \times 10^{16}$$

$$N_{y_2} = 2.55879 \times 10^{12}$$

$$N_{b_2} = 5.88632 \times 10^{18}$$

$$N_{y_2} + N_{b_2} = 5.88632 \times 10^{18}$$

$$N_{y_3} = 1.1389 \times 10^{13}$$

$$N_{b_3} = 7.0892 \times 10^{19}$$

$$N_{y_3} + N_{b_3} = 7.08921 \times 10^{19}$$

$$\frac{n_1}{N_{b_1}} = 0.97244 \quad \frac{n_2}{N_{b_2}} = 0.02741 \quad \frac{n_3}{N_{b_3}} = 1.5695 \times 10^{-4}$$

$$\frac{n_1}{N_{b_1}} + \frac{n_2}{N_{b_2}} + \frac{n_3}{N_{b_3}} = 1.00000484$$

Bu toplam 1'i geçtiği için parçamızdaki yorulma çatlakları bu 3 gerilme sonucunda başlangıç safhasından yayılma safhasına geçmiştir. Bu geçişin hangi gerilme seviyesinde olduğunu bulabilmek için teker teker gerilmeleri ihmal edelim. Önce σ_3 gerilmesini çıkaralım:

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$\frac{n_1}{N_{b_1}} + \frac{n_2}{N_{b_2}} = 0.99985$$

Demekki parçamızdaki yorulma çatlakları σ_3 gerilmesinin belirli bir n_{3i} çevriminde yayılma aşamasına geçmiştir. Bu n_{3i} çevrimini bulabilmek için şöyle bir hesap yapabiliriz:

$$1 - 0.99985 = 1.5 \times 10^{-4} \quad n_{3i} := N_{b_3} \cdot (1.5 \times 10^{-4}) \quad n_{3i} = 1.06338 \times 10^{16}$$

Yani yorulma çatlakları n_1 , n_2 ve n_{3i} çevrimlerinden sonra yayılma safhasına geçecektir. Yayılma aşamasında σ_3 gerilmesinde yaşanacak kalan ömür n_{3j} olsun. Eğer n_{3j} 'i bulursak $N_{eş}$ 'i bulabiliriz.

$$n_{3j} := N_{y_3} \quad n_{3j} = 1.1389 \times 10^{13}$$

$$N_{eş} := n_1 + n_2 + (n_{3i} + n_{3j})$$

$$N_{eş} = 1.84961 \times 10^{17}$$

Eğer en düşük gerilmenin ilk olarak uygulanacağı varsayılırsa:

$$\frac{n_3}{N_{b_3}} + \frac{n_2}{N_{b_2}} + \frac{n_1}{N_{b_1}} = 1.00000484$$

$$\frac{n_3}{N_{b_3}} + \frac{n_2}{N_{b_2}} = 0.02757$$

$$1 - 0.02757 = 0.97243$$

$$n_{1i} := N_{b_1} \cdot 0.97243 \quad n_{1i} = 1.29808 \times 10^{16}$$

$$n_{1j} := N_{y_1} \quad n_{1j} = 6.6282 \times 10^{10}$$

$$N_{eş} := n_3 + n_2 + (n_{1i} + n_{1j}) \quad N_{eş} = 1.85442 \times 10^{17}$$

5.1.1.5 Gatts Yöntemi:

$$\beta_1 := \frac{n_1}{N_1} \quad \beta_2 := \frac{n_2}{N_2} \quad \beta_3 := \frac{n_3}{N_3} \quad (\text{bkz. sayfa: 35})$$

$$C := \frac{\sigma_{DT}}{\sigma_k} \quad C = 0.735$$

$$\gamma_1 := \frac{\sigma_{1ger}}{\sigma_{DT}} \quad \gamma_1 = 0.37709 \quad (\text{bkz. sayfa: 35})$$

$$\gamma_{e1} := \gamma_1 \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_1}{1-C} + \frac{\gamma_1 \cdot (1-\beta_1)}{\gamma_1 - 1}} \right] \quad (\text{bkz. denklem 3.22})$$

$$\gamma_{e1} = 0.27386 \quad \sigma_{DT1} := \gamma_{e1} \cdot \sigma_{DT} \quad \sigma_{DT1} = 187.19396$$

$$\gamma_2 := \frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{DT1}} \quad \gamma_2 = 0.75353$$

$$\gamma_{e2} := \gamma_2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_2}{1-C} + \frac{\gamma_2 \cdot (1-\beta_2)}{\gamma_2 - 1}} \right] \quad \gamma_{e2} = 1.016078$$

γ_e değeri 1'i geçtiğine göre parçamız n_2 çevrimlerini yaşarken kırılmıştır. O halde eğer $\gamma_e = 1$ anındaki n_{2s} çevrimleri bulunursa $N_{eş}$ bulunabilir. Bu işlem deneme-yanılma metoduyla yapılmıştır:

$n_{2s} := 5.3686 \cdot 10^4$ için $\gamma_c = 1$ olmaktadır (denemeyle bulunmuştur)

$$\beta_{2i} := \frac{n_{2s}}{N_2} \quad \gamma_{2i} := \frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{DT1}} \quad \gamma_{2i} = 0.75353$$

$$\gamma_{e2i} := \gamma_{2i} \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_{2i}}{1-C} + \frac{\gamma_{2i}(1-\beta_{2i})}{\gamma_{2i}-1}} \right] \quad \gamma_{e2i} = 1$$

$$N_{eş} := n_1 + n_{2s}$$

$$N_{eş} = 1.29809 \times 10^{16}$$

5.1.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq1} := \frac{\sigma_{1ger}}{1 - \frac{\sigma_{o1}}{\sigma_k}}$$

$$\sigma_{aq2} := \frac{\sigma_{2ger}}{1 - \frac{\sigma_{o2}}{\sigma_k}}$$

$$\sigma_{aq3} := \frac{\sigma_{3ger}}{1 - \frac{\sigma_{o3}}{\sigma_k}}$$

$$\sigma_{aq1} = 298.52$$

$$\sigma_{aq2} = 152.45$$

$$\sigma_{aq3} = 98.22$$

$$N_1 := \left(\frac{\sigma_{aq1}}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$$

$$N_2 := \left(\frac{\sigma_{aq2}}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$$

$$N_3 := \left(\frac{\sigma_{aq3}}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$$

$$N_1 = 7.8744 \times 10^8$$

$$N_2 = 5.48945 \times 10^{12}$$

$$N_3 = 1.79386 \times 10^{15}$$

5.1.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} := \frac{1}{\left(\frac{c_1}{N_1} + \frac{c_2}{N_2} + \frac{c_3}{N_3} \right)}$$

$$N_{eş} = 1.12291 \times 10^{10}$$

Her bir gerilmeye tekabül eden çevrimleri bulmak için gene aynı yol izlenecektir:

$$\begin{aligned} n_1 &:= c_1 \cdot N_{eş} & n_1 &= 7.86038 \times 10^8 & N_1 - n_1 &= 1.40167 \times 10^6 \\ n_2 &:= c_2 \cdot N_{eş} & n_2 &= 9.76933 \times 10^9 & N_2 - n_2 &= 5.47968 \times 10^{12} \\ n_3 &:= c_3 \cdot N_{eş} & n_3 &= 6.73747 \times 10^8 & N_3 - n_3 &= 1.79386 \times 10^{15} \\ n_1 + n_2 + n_3 &= 1.12291 \times 10^{10} \end{aligned}$$

5.1.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$d := 6.57$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{aq2}}{\sigma_{aq1}} \right)^d + \left(\frac{n_3}{N_3} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{aq3}}{\sigma_{aq1}} \right)^d = 1.14882$$

$$N_{eş} := \frac{N_1}{c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{aq2}}{\sigma_{aq1}} \right)^d + c_3 \cdot \left(\frac{\sigma_{aq3}}{\sigma_{aq1}} \right)^d}$$

$$N_{eş} = 9.77447 \times 10^9$$

5.1.2.3 Marin Yöntemi:

$$x := \frac{\log(N_2) - \log(N_1)}{\log(\sigma_{aq1}) - \log(\sigma_{aq2})} \quad x = 13.1686 \quad y := 6.57 \quad q := y - x$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{aq2}}{\sigma_{aq1}} \right)^q + \left(\frac{n_3}{N_3} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{aq3}}{\sigma_{aq1}} \right)^q = 1.14882$$

Marin yöntemine göre eşdeğer ömrü bulmak istersek şu hesaplamayı yapmalıyız:

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{aq2}}{\sigma_{aq1}} \right)^q = 1.14825$$

$$\frac{n_1}{N_1} = 0.99822$$

Bu ifadelerden parçamızın n_2 çevrimlerini yaşarken kırılacağı görülmektedir. Yani parçamız n_1 çevrimlerinin tümünü sorunsuzca yaşayacak ve n_2 sırasında kırılacaktır. Eğer yaşadığı n_{2i} çevrimleri bulunursa bunları n_1 ile toplayarak $N_{eş}$ 'i bulabiliriz. O halde n_1 çevrimlerinden sonra kalan ömür ifadesini veren 3.38 denklemi kurulursa n_{2i} çevrim adedi hesaplanabilir:

(Not: Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$n_{2i} := N_2 \cdot \left[\left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{aq1}}{\sigma_{aq2}} \right)^q \right] \quad n_{2i} = 1.15912 \times 10^8$$

$$N_{eş} := n_1 + n_{2i}$$

$$N_{eş} = 9.0195 \times 10^8$$

5.1.2.4 Manson Yöntemi:

$$p := 0.6 \quad P := 14$$

$$N_y := P \cdot N^p$$

$$N_b := N - N_y$$

$$N_{y1} = 3.0469 \times 10^6$$

$$N_{b1} = 7.84393 \times 10^8$$

$$N_{y1} + N_{b1} = 7.8744 \times 10^8$$

$$N_{y2} = 6.16375 \times 10^8$$

$$N_{b2} = 5.48883 \times 10^{12}$$

$$N_{y2} + N_{b2} = 5.48945 \times 10^{12}$$

$$N_{y3} = 1.98793 \times 10^{10}$$

$$N_{b3} = 1.79384 \times 10^{15}$$

$$N_{y3} + N_{b3} = 1.79386 \times 10^{15}$$

$$\frac{n_1}{N_{b1}} = 1.0021$$

$$n_{a1} := N_{b1}$$

$$n_{b1} := n_1 - n_{a1}$$

$$n_{a1} = 7.84393 \times 10^8$$

$$n_{b1} = 1.64523 \times 10^6$$

$$\frac{n_{b1}}{N_{y1}} = 0.53997$$

$$\frac{n_2}{N_{y2}} = 15.84965$$

$$\frac{n_3}{N_{y3}} = 0.03389$$

Parçanın n_2 çevrimlerini yaşarken kırıldığı görülmektedir. Eğer n_2 çevrimlerinin neresinde kırıldığı bulunursa toplam ömür hesaplanabilir.

$$1 - 0.53997 = 0.46003$$

$$n_{2a} := N_{y_2} \cdot 0.46003$$

$$n_{2a} = 2.83551 \times 10^8$$

$$N_{eş} := (n_{a1} + n_{b1}) + n_{2a}$$

$$N_{eş} = 1.06959 \times 10^9$$

5.1.2.5 Gatts Yöntemi:

$$\beta_1 := \frac{n_1}{N_1} \quad \beta_2 := \frac{n_2}{N_2} \quad \beta_3 := \frac{n_3}{N_3}$$

$$C := \frac{\sigma_D}{\sigma_k} \quad C = 0.49$$

$$\gamma_1 := \frac{\sigma_{aq1}}{\sigma_D} \quad \gamma_1 = 0.65509$$

$$\gamma_{e1} := \gamma_1 \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_1}{1-C} + \frac{\gamma_1 \cdot (1-\beta_1)}{\gamma_1-1}} \right]$$

$$\gamma_{e1} = 0.31982$$

$$\sigma_{D1} := \gamma_{e1} \cdot \sigma_D$$

$$\sigma_{D1} = 145.74067$$

$$\gamma_2 := \frac{\sigma_{aq2}}{\sigma_{D1}}$$

$$\gamma_2 = 1.04603$$

$$\gamma_{e2} := \gamma_2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_2}{1-C} + \frac{\gamma_2 \cdot (1-\beta_2)}{\gamma_2-1}} \right]$$

$$\gamma_{e2} = 0.999925$$

$$\sigma_{D2} := \gamma_{e2} \cdot \sigma_{D1}$$

$$\sigma_{D2} = 145.72974$$

$$\gamma_3 := \frac{\sigma_{aq3}}{\sigma_{D2}}$$

$$\gamma_3 = 0.67398$$

$$\gamma_{e3} := \gamma_3 \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_3}{1-C} + \frac{\gamma_3 \cdot (1-\beta_3)}{\gamma_3-1}} \right]$$

$$\gamma_{e3} = 1.00000023858975$$

γ_e değeri 1'i geçtiği için parça n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Tam olarak nerede kırıldığını bulursak toplam ömrü bulabiliriz. Parçanın kırıldığı n_{3s} çevrimi deneme-yanılma yoluyla aşağıdaki gibi bulunabilir:

$n_{3s} := 14$ (denemeyle bulunmuştur)

$$\beta_{3i} := \frac{n_{3s}}{N_3} \quad \gamma_{e3i} := \gamma_3 \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\beta_{3i}}{1-C} + \frac{\gamma_3 \cdot (1 - \beta_{3i})}{\gamma_3 - 1}} \right] \quad \gamma_{e3i} = 1$$

$$N_{e\varnothing} := n_1 + n_2 + n_{3s}$$

$$N_{e\varnothing} = 1,05554 \times 10^{10}$$

Parçayla ilgili bulunan tüm ömür değerlerini bir çizelge şeklinde vermek uygun olacaktır.

Çizelge 5.1 Transfer Kutusu – Daimi İştirak Dişlisi ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|--|--|
| Palmgren-Miner | $N_{e\varnothing} = 1,85442 \cdot 10^{17}$ | $N_{e\varnothing} = 1,12291 \cdot 10^{10}$ |
| Corten-Dolan | $N_{e\varnothing} = 1,5406 \cdot 10^{17}$ | $N_{e\varnothing} = 0,97745 \cdot 10^{10}$ |
| Marin | $N_{e\varnothing} = 0,323 \cdot 10^{17}$ | $N_{e\varnothing} = 0,09019 \cdot 10^{10}$ |
| Manson | $N_{e\varnothing} = 1,84961 \cdot 10^{17}$ | $N_{e\varnothing} = 0,10696 \cdot 10^{10}$ |
| Gatts | $N_{e\varnothing} = 0,1298 \cdot 10^{17}$ | $N_{e\varnothing} = 1,05554 \cdot 10^{10}$ |

Diğer parçalar için de hesaplama yöntemleri ve formüller değişmeyeceği için bu noktadan itibaren ara işlemler gösterilmeyip sadece bulunan değerler sunulacaktır.

5.2 Transfer Kutusu – Grup A Dişlisi Ömür Değerlendirmeleri:

$$K_{\varphi} := 1.43$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.956$$

$$K_y := 0.72$$

Gerilmeler 0 - 245, 0 - 133, 0 - 89 N/mm² arasında değişmektedir. (Ayaroğlu, 2002)

$$\sigma_{1ger} = 254.5$$

$$\sigma_{2ger} = 138.16$$

$$\sigma_{3ger} = 92.45$$

5.2.1 Eşdeğer Ömrün Log - Linear Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.58241 \times 10^{16}$$

$$N_2 = 6.84808 \times 10^{18}$$

$$N_3 = 7.43427 \times 10^{19}$$

5.2.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.0625 \quad c_2 := 0.875 \quad c_3 := 0.0625$$

$$N_{eş} = 2.45201 \times 10^{17}$$

$$n_1 = 1.53251 \times 10^{16} \quad n_2 = 2.14551 \times 10^{17} \quad n_3 = 1.53251 \times 10^{16}$$

5.2.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 2.01866 \times 10^{17}$$

5.2.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilirse:

$$N_{eş} = 4.29463 \times 10^{16}$$

5.2.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 2.44905 \times 10^{17}$$

5.2.1.5 Gatts Yöntemi:

Bu yöntemle göre parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılacaktır. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$n_{2s} := 5.968 \cdot 10^4 \quad \text{için } \gamma_o = 1 \text{ olmaktadır} \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 1.53251 \times 10^{16}$$

5.2.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 293.1$$

$$\sigma_{aq_2} = 148.79$$

$$\sigma_{aq_3} = 97.1$$

$$N_1 = 1.00224 \times 10^9$$

$$N_2 = 7.55544 \times 10^{12}$$

$$N_3 = 2.08717 \times 10^{15}$$

5.2.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.2.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 1.60062 \times 10^{10}$$

$$n_1 = 1.00039 \times 10^9 \quad n_2 = 1.40054 \times 10^{10} \quad n_3 = 1.00039 \times 10^9$$

5.2.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 1.37822 \times 10^{10}$$

5.2.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 1.16018 \times 10^9$$

5.2.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1.39439 \times 10^9$$

5.2.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu teoreme göre parça n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır.

$n_{3s} := 16$ (denemeyle bulunmuştur)

$$N_{es} = 1.50058 \times 10^{10}$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Transfer Kutusu – Grup A Dışlısı ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{es} = 2,45201 \cdot 10^{17}$ | $N_{es} = 1,60062 \cdot 10^{10}$ |
| Corten-Dolan | $N_{es} = 2,01866 \cdot 10^{17}$ | $N_{es} = 1,37822 \cdot 10^{10}$ |
| Marin | $N_{es} = 0,42946 \cdot 10^{17}$ | $N_{es} = 0,11602 \cdot 10^{10}$ |
| Manson | $N_{es} = 2,44905 \cdot 10^{17}$ | $N_{es} = 0,13944 \cdot 10^{10}$ |
| Gatts | $N_{es} = 0,15325 \cdot 10^{17}$ | $N_{es} = 1,50058 \cdot 10^{10}$ |

5.3 Transfer Kutusu – Grup B Dışlısı Ömür Değerlendirmeleri:

$$\sigma_k := 930$$

$$K_\phi := 1.397$$

$$K_b := 0.956$$

$$K_y := 0.72$$

Gerilmeler 0 - 343, 0 - 187, 0 - 125 N/mm² arasında değişmektedir. (Ayaroğlu, 2002)

$$\sigma_{1ger} = 348.07$$

$$\sigma_{2ger} = 189.77$$

$$\sigma_{3ger} = 126.85$$

5.3.1 Eşdeğer Ömrün Log - Linear Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.19926 \times 10^{14}$$

$$N_2 = 4.63548 \times 10^{17}$$

$$N_3 = 1.23529 \times 10^{19}$$

5.3.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07$$

$$c_2 := 0.87$$

$$c_3 := 0.06$$

$$N_{es} = 1.70772 \times 10^{15}$$

$$n_1 = 1.1954 \times 10^{14}$$

$$n_2 = 1.48571 \times 10^{15}$$

$$n_3 = 1.02463 \times 10^{14}$$

5.3.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 1.3905 \times 10^{15}$$

5.3.1.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimlerinde kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilirse:

$$N_{eş} = 1.40278 \times 10^{14}$$

5.3.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_2 çevrimlerinin yayılma evresi bölümünde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1.59418 \times 10^{15}$$

5.3.1.5 Gatts Yöntemi:

Bu yönteme göre parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılacaktır. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$n_{2s} := 3.9 \cdot 10^3$ için $\gamma_e = 1$ olmaktadır (denemeyle bulunmuştur)

$$N_{eş} = 1.1954 \times 10^{14}$$

5.3.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 426.77$$

$$\sigma_{aq_2} = 210.98$$

$$\sigma_{aq_3} = 135.99$$

$$N_1 = 7.11513 \times 10^6$$

$$N_2 = 7.60825 \times 10^{10}$$

$$N_3 = 2.47172 \times 10^{13}$$

5.3.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.3.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 1.01527 \times 10^8$$

$$n_1 = 7.10687 \times 10^6 \quad n_2 = 8.83282 \times 10^7 \quad n_3 = 6.0916 \times 10^6$$

5.3.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 9.06026 \times 10^7$$

5.3.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 7.95267 \times 10^6$$

5.3.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlığı n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 9.26725 \times 10^6$$

5.3.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu teoreme göre parça n_2 çevrimleri biter bitmez n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Aslında σ_3 gerilmesinde hiçbir çevrim gerçekleşmemiştir.

$$n_{3s} := 0 \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 9.54351 \times 10^7$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Transfer Kutusu – Grup B Dişlisi ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 1,70772.10^{15}$ | $N_{eş} = 1,01527.10^8$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 1,3905.10^{15}$ | $N_{eş} = 0,90603.10^8$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,14028.10^{15}$ | $N_{eş} = 0,07953.10^8$ |
| Manson | $N_{eş} = 1,59418.10^{15}$ | $N_{eş} = 0,09267.10^8$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,11954.10^{15}$ | $N_{eş} = 0,95435.10^8$ |

5.4 Transfer Kutusu – Seyyar Dişli Ömür Değerlendirmeleri:

$$K_{\varphi} := 1.397$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.956$$

$$K_y := 0.72$$

Gerilmeler 0 - 286, 0 - 156, 0 - 104 N/mm² arasında değişmektedir. (Ayaroğlu, 2002)

$$\sigma_{1ger} = 290.23$$

$$\sigma_{2ger} = 158.31$$

$$\sigma_{3ger} = 105.54$$

5.4.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 2.45252 \times 10^{15}$$

$$N_2 = 2.39294 \times 10^{18}$$

$$N_3 = 3.75544 \times 10^{19}$$

5.4.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07$$

$$c_2 := 0.87$$

$$c_3 := 0.06$$

$$N_{eş} = 3.45935 \times 10^{16}$$

$$n_1 = 2.42154 \times 10^{15}$$

$$n_2 = 3.00963 \times 10^{16}$$

$$n_3 = 2.07561 \times 10^{15}$$

5.4.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 2.84196 \times 10^{16}$$

5.4.1.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimlerinde kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilirse:

$$N_{eş} = 4.0834 \times 10^{15}$$

5.4.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_3 çevrimlerinin yayılma evresi bölümünde gerçekleşmiştir. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.44034 \times 10^{16}$$

5.4.1.5 Gatts Yöntemi:

Bu yönteme göre parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılacaktır. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$n_{2s} := 2.058 \cdot 10^4 \quad \text{için } \gamma_o = 1 \text{ olmaktadır} \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 2.42154 \times 10^{15}$$

5.4.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 342.97$$

$$\sigma_{aq_2} = 172.8$$

$$\sigma_{aq_3} = 111.79$$

$$N_1 = 1.26621 \times 10^8$$

$$N_2 = 1.05409 \times 10^{12}$$

$$N_3 = 3.26339 \times 10^{14}$$

5.4.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.4.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 1.80617 \times 10^9$$

$$n_1 = 1.26432 \times 10^8 \quad n_2 = 1.57137 \times 10^9 \quad n_3 = 1.0837 \times 10^8$$

5.4.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 1.58937 \times 10^9$$

5.4.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 1.4349 \times 10^8$$

5.4.2.4 Manson Yöntemi:

Çatlak, başlangıç evresinden yayılma evresine n_1 çevrimleri sırasında geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1.68916 \times 10^8$$

5.4.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu teoreme göre parça n_2 çevrimleri biter bitmez n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır.

$n_{3s} := 2$ (denemeyle bulunmuştur)

$$N_{eş} = 1.6978 \times 10^9$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 Transfer Kutusu – Seyyar Dişli ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 3,45935 \cdot 10^{16}$ | $N_{eş} = 1,80617 \cdot 10^9$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 2,84196 \cdot 10^{16}$ | $N_{eş} = 1,58937 \cdot 10^9$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,40834 \cdot 10^{16}$ | $N_{eş} = 0,14349 \cdot 10^9$ |
| Manson | $N_{eş} = 3,44034 \cdot 10^{16}$ | $N_{eş} = 0,16891 \cdot 10^9$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,24215 \cdot 10^{16}$ | $N_{eş} = 1,6978 \cdot 10^9$ |

5.5 Transfer Kutusu – Daimi İştirak Mili Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçadaki ömür değerlendirme hesapları en kritik nokta için yapılacaktır.

$$\sigma_k := 930$$

$$K_\varphi := 1$$

$$K_b := 0.9$$

$$K_y := 0.85$$

$$\sigma_{1ger} = 262.75$$

$$\sigma_{2ger} = 143.79$$

$$\sigma_{3ger} = 95.42$$

5.5.1 Eşdeğer Ömrün Log - Linear Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.02898 \times 10^{16}$$

$$N_2 = 5.10349 \times 10^{18}$$

$$N_3 = 6.36537 \times 10^{19}$$

5.5.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07 \quad c_2 := 0.87 \quad c_3 := 0.06$$

$$N_{eş} = 1.43384 \times 10^{17}$$

$$n_1 = 1.00369 \times 10^{16} \quad n_2 = 1.24744 \times 10^{17} \quad n_3 = 8.60307 \times 10^{15}$$

5.5.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 1.18747 \times 10^{17}$$

5.5.1.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimlerinde kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilirse:

$$N_{eş} = 2.3311 \times 10^{16}$$

5.5.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_3 çevrimlerinin yayılma evresi bölümünde gerçekleşmiştir. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1.43052 \times 10^{17}$$

5.5.1.5 Gatts Yöntemi:

Bu yönteme göre parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılacaktır. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$n_{2s} := 4.561 \cdot 10^4 \quad \text{için } \gamma_e = 1 \text{ olmaktadır} \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 1.00369 \times 10^{16}$$

5.5.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 378.84$$

$$\sigma_{aq_2} = 172.55$$

$$\sigma_{aq_3} = 107.31$$

$$N_1 = 3.41603 \times 10^7$$

$$N_2 = 1.07447 \times 10^{12}$$

$$N_3 = 5.59152 \times 10^{14}$$

5.5.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.5.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 4.87811 \times 10^8$$

$$n_1 = 3.41468 \times 10^7 \quad n_2 = 4.24396 \times 10^8 \quad n_3 = 2.92687 \times 10^7$$

5.5.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 4.55616 \times 10^8$$

5.5.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 3.65133 \times 10^7$$

5.5.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 4.0888 \times 10^7$$

5.5.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu teoreme göre parça n_1 çevrimleri biter bitmez n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır.

$$n_{2s} := 0 \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 3.41468 \times 10^7$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5 Transfer Kutusu – Daimi İştirak Mili ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 1,43384.10^{17}$ | $N_{eş} = 4,87811.10^8$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 1,18747.10^{17}$ | $N_{eş} = 4,55616.10^8$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,23311.10^{17}$ | $N_{eş} = 0,36513.10^8$ |
| Manson | $N_{eş} = 1,43052.10^{17}$ | $N_{eş} = 0,40888.10^8$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,10037.10^{17}$ | $N_{eş} = 0,34147.10^8$ |

5.6 Transfer Kutusu – Prizdirek Mili Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçadaki ömür değerlendirme hesapları en kritik nokta için yapılacaktır:

$$\sigma_k := 930$$

$$K_\phi := 1.94$$

$$K_b := 0.9$$

$$K_y := 0.9$$

$$\sigma_{1ger} = 98.2$$

$$\sigma_{2ger} = 55.09$$

$$\sigma_{3ger} = 35.93$$

5.6.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 5.50802 \times 10^{19}$$

$$N_2 = 5.22249 \times 10^{20}$$

$$N_3 = 1.41921 \times 10^{21}$$

5.6.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07$$

$$c_2 := 0.87$$

$$c_3 := 0.06$$

$$N_{eş} = 3.35681 \times 10^{20}$$

$$n_1 = 2.34976 \times 10^{19}$$

$$n_2 = 2.92042 \times 10^{20}$$

$$n_3 = 2.01408 \times 10^{19}$$

5.6.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 6.1485 \times 10^{20}$$

5.6.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralanmasının kabul edilmesine rağmen parça beklenenden daha uzun ömür vermiştir. n_1 ve n_2 çevrimleri beklenen miktarda gerçekleşirken n_3 çevrimleri çok daha uzun sürmüştür.

$$N_{eş} = 9.85399 \times 10^{21}$$

5.6.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_3 çevrimlerinin son kısımlarına doğru, yayılma evresi

bölümünde gerçekleşmiştir. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.35678 \times 10^{20}$$

5.6.1.5 Gatts Yöntemi:

Gatts yöntemine göre ise parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılacaktır. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$n_{2s} := 7.897 \cdot 10^6 \quad \text{için } \gamma_o = 1 \text{ olmaktadır} \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 2.34976 \times 10^{19}$$

5.6.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq1} = 117.99$$

$$\sigma_{aq2} = 60.63$$

$$\sigma_{aq3} = 38.27$$

$$N_1 = 1.603 \times 10^{14}$$

$$N_2 = 1.0302 \times 10^{18}$$

$$N_3 = 4.40484 \times 10^{20}$$

5.6.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.6.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 2.28559 \times 10^{15}$$

$$n_1 = 1.59991 \times 10^{14} \quad n_2 = 1.98846 \times 10^{15} \quad n_3 = 1.37135 \times 10^{14}$$

5.6.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 1.97919 \times 10^{15}$$

5.6.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 1.84564 \times 10^{14}$$

5.6.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 2.11973 \times 10^{15}$$

5.6.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu teoreme göre parça n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır.

$$n_{3s} := 3.3499 \cdot 10^6 \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 2.14845 \times 10^{15}$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Transfer Kutusu – Prizdirek Mili ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 0,33568 \cdot 10^{21}$ | $N_{eş} = 2,2856 \cdot 10^{15}$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 0,61485 \cdot 10^{21}$ | $N_{eş} = 1,97919 \cdot 10^{15}$ |
| Marin | $N_{eş} = 9,85399 \cdot 10^{21}$ | $N_{eş} = 0,18456 \cdot 10^{15}$ |
| Manson | $N_{eş} = 0,33568 \cdot 10^{21}$ | $N_{eş} = 2,11973 \cdot 10^{15}$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,0235 \cdot 10^{21}$ | $N_{eş} = 2,14845 \cdot 10^{15}$ |

5.7 Transfer Kutusu – Kamalı Milin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçadaki ömür değerlendirme hesapları en kritik nokta için yapılacaktır:

$$K_{\phi} := 2.1$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.9$$

$$K_y := 0.9$$

$$\sigma_{1ger} = 121.85$$

$$\sigma_{2ger} = 103.7$$

$$\sigma_{3ger} = 70$$

5.7.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.60324 \times 10^{19}$$

$$N_2 = 4.13264 \times 10^{19}$$

$$N_3 = 2.39851 \times 10^{20}$$

5.7.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07$$

$$c_2 := 0.87$$

$$c_3 := 0.06$$

$$N_{eş} = 3.89587 \times 10^{19}$$

$$n_1 = 2.72711 \times 10^{18}$$

$$n_2 = 3.3894 \times 10^{19}$$

$$n_3 = 2.33752 \times 10^{18}$$

5.7.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 4.29672 \times 10^{19}$$

5.7.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmasının kabul edilmesine rağmen parça beklenenden daha uzun ömür vermiştir. n_1 ve n_2 çevrimleri beklenen miktarda gerçekleşirken n_3 çevrimleri daha uzun sürmüştür.

$$N_{eş} = 7.09267 \times 10^{19}$$

5.7.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş, son kırılma ise n_3 çevrimlerinin sonlarına doğru, yayılma evresinde gerçekleşmiştir. (Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.89586 \times 10^{19}$$

5.7.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 153.76$$

$$\sigma_{aq_2} = 125.91$$

$$\sigma_{aq_3} = 79.29$$

$$N_1 = 4.9032 \times 10^{12}$$

$$N_2 = 6.81558 \times 10^{13}$$

$$N_3 = 3.00536 \times 10^{16}$$

5.7.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.7.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 3.69778 \times 10^{13}$$

$$n_1 = 2.58845 \times 10^{12} \quad n_2 = 3.21707 \times 10^{13} \quad n_3 = 2.21867 \times 10^{12}$$

5.7.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 1.60871 \times 10^{13}$$

5.7.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 1.11939 \times 10^{13}$$

5.7.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_3 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.48471 \times 10^{13}$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 Transfer Kutusu – Kamalı Milin ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 3,89587.10^{19}$ | $N_{eş} = 3,69778.10^{13}$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 4,29672.10^{19}$ | $N_{eş} = 1,60871.10^{13}$ |
| Marin | $N_{eş} = 7,09267.10^{19}$ | $N_{eş} = 1,11939.10^{13}$ |
| Manson | $N_{eş} = 3,89586.10^{19}$ | $N_{eş} = 3,48471.10^{13}$ |

5.8 Ön Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçaya uygulanan gerilmeler 0 - 339, 0 - 185, 0 - 123 N/mm² arasında değişmektedir.
(Ayaroğlu, 2002)

$$K_{\phi} := 1.672$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.944$$

$$K_y := 0.72$$

$$\sigma_{1ger} = 416.97$$

$$\sigma_{2ger} = 227.55$$

$$\sigma_{3ger} = 151.29$$

5.8.1 Eşdeğer Ömrün Log - Linear Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 5.84982 \times 10^{12}$$

$$N_2 = 6.45587 \times 10^{16}$$

$$N_3 = 3.45116 \times 10^{18}$$

5.8.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.0625$$

$$c_2 := 0.875$$

$$c_3 := 0.0625$$

$$N_{eş} = 9.34784 \times 10^{13}$$

$$n_1 = 5.8424 \times 10^{12}$$

$$n_2 = 8.17936 \times 10^{13}$$

$$n_3 = 5.8424 \times 10^{12}$$

5.8.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 7.41 \times 10^{13}$$

5.8.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığının kabul edildiği bu yöntemle göre parça n_2 çevrimleri içinde kırılmıştır.

$$N_{eş} = 6.23921 \times 10^{12}$$

5.8.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlağı n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_2 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 8.0901 \times 10^{13}$$

5.8.1.5 Gatts Yöntemi:

Parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. n_2 çevrimlerinin neresinde kırıldığı aşağıda verilmiştir. (denemeyle bulunmuştur)

$$n_{2s} := 5.35 \cdot 10^2$$

$$N_{eş} = 5.8424 \times 10^{12}$$

5.8.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq1} = 509.9$$

$$\sigma_{aq2} = 252.68$$

$$\sigma_{aq3} = 162$$

$$N_1 = 6.82987 \times 10^5$$

$$N_2 = 7.07451 \times 10^9$$

$$N_3 = 2.46556 \times 10^{12}$$

5.8.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.8.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 1.0913 \times 10^7$$

$$n_1 = 6.82065 \times 10^5 \quad n_2 = 9.5489 \times 10^6 \quad n_3 = 6.82065 \times 10^5$$

5.8.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 9.59014 \times 10^6$$

5.8.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 7.7497 \times 10^5$$

5.8.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir.

$$N_{eş} = 9.18662 \times 10^5$$

5.8.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu yöntemle göre parça n_2 çevrimleri biter bitmez n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Aslında σ_3 gerilmesinde hiçbir çevrim gerçekleşmemiştir.

$$n_{3s} := 0 \quad (\text{denemeyele bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 1.0231 \times 10^7$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 Ön Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 9,34784.10^{13}$ | $N_{eş} = 1,0913.10^7$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 7,41.10^{13}$ | $N_{eş} = 0,95901.10^7$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,62392.10^{13}$ | $N_{eş} = 0,0775.10^7$ |
| Manson | $N_{eş} = 8,0901.10^{13}$ | $N_{eş} = 0,09186.10^7$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,58424.10^{13}$ | $N_{eş} = 1,0231.10^7$ |

5.9 Ön Diferansiyel – Ayna Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçaya uygulanan gerilmeler 0 - 543, 0 - 296, 0 - 197 N/mm² arasında değişmektedir:

(Ayaroğlu, 2002)

$$K_{\phi} := 1.569$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.944$$

$$K_y := 0.72$$

$$\sigma_{1ger} = 626.74$$

$$\sigma_{2ger} = 341.65$$

$$\sigma_{3ger} = 227.38$$

5.9.1 Eşdeğer Ömrün Log - Linear Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 5.81282 \times 10^7$$

$$N_2 = 1.67677 \times 10^{14}$$

$$N_3 = 6.51237 \times 10^{16}$$

5.9.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.0625$$

$$c_2 := 0.875$$

$$c_3 := 0.0625$$

$$N_{eş} = 9.30046 \times 10^8$$

$$n_1 = 5.81279 \times 10^7$$

$$n_2 = 8.1379 \times 10^8$$

$$n_3 = 5.81279 \times 10^7$$

5.9.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 7.37419 \times 10^8$$

5.9.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığının kabul edildiği bu yönteme göre parça n_2 çevrimleri içinde kırılmıştır.

$$N_{eş} = 5.81431 \times 10^7$$

5.9.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_2 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 6.02378 \times 10^7$$

5.9.1.5 Gatts Yöntemi:

Parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. n_2 çevrimlerinin neresinde kırıldığı aşağıda verilmiştir. (denemeyle bulunmuştur)

$$n_{2s} := 1$$

$$N_{eş} = 5.81279 \times 10^7$$

5.9.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 885.15$$

$$\sigma_{aq_2} = 406.31$$

$$\sigma_{aq_3} = 254.32$$

$$N_1 = 478.779$$

$$N_2 = 1.35899 \times 10^7$$

$$N_3 = 6.49793 \times 10^9$$

5.9.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.9.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 7.657 \times 10^3$$

$$n_1 = 478.543 \quad n_2 = 6.7 \times 10^3 \quad n_3 = 478.543$$

Burada şöyle bir açıklamanın yapılması uygun olacaktır: Gerek N çevrimleri gerekse de n çevrimleri parçanın yüklenme adedini gösterdikleri için tamsayı olmak zorundadırlar. Ve eğer tamsayı değerleri gözönüne alınırsa $n_1 = N_1$ çıkmakta ve Palmgren-Miner de dahil olmak üzere birçok yonteme göre hasar oluşmakta, böylelikle eşdeğer ömür sadece n_1 çevrim adetlerinden ibaret olmaktadır. Ancak matematiksel olarak $n_1 < N_1$ olduğundan parçanın az dahi olsa hala bir miktar ömrü kalmıştır. Aslında bu kalan ömür σ_1 gerilme genliğinde ekstra

tek bir çevrim bile yaptıramaz fakat tam bu kritik noktada daha düşük gerilme genliklerine geçildiği için bu gerilmelerde yukarıda hesaplanan çevrim adetlerini yaptırabilmektedir. Gerçi her ne kadar bu açıklamanın Palmgren-Miner yöntemi için bir değeri olmasa da aşağıdaki diğer yöntemler için büyük önemi vardır. Bu açıklamanın Palmgren-Miner için önemsiz olmasının nedeni gerilme sıralanışının $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ yerine $\sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_1$ şeklinde olmasının hiçbir fark getirmeyeceğindedir. Eğer gerilmeleri bu yöntem için ikinci şekilde sıralarsak kritik nokta diye bir şey kalmayacaktır. Ancak diğer yöntemlere göre gerilme dizilişleri önem taşıdığından bu açıklamanın da gözönünde bulundurulmasıyla çıkan değerlerin matematiksel değerleri kullanılacaktır.

5.9.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 7.065 \times 10^3$$

5.9.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 518$$

5.9.2.4 Manson Yöntemi:

Bu yöntemin formülasyonunda diğer parçalarınkine göre küçük bir değişiklik olduğu için tüm denklemlerin uzun uzun verilmesi faydalı olacaktır:

$N_1 < 730$ çevrim olduğu gerçeğine dikkat edersek formül gereği artık 3.45 denklemini kullanmamız gerekecektir. Bu bilgiyi de gözönünde bulundurarak formüllerimizi kurarsak:

$$p := 0.6 \quad P := 14$$

$$N_y := P \cdot N^p \quad N_b := N - N_y$$

$$N_{y_1} := N_1$$

$$N_{b_1} := 0$$

$$N_{y_1} + N_{b_1} = 478.77866$$

$$N_{y_2} = 2.66721 \times 10^5$$

$$N_{b_2} = 1.33232 \times 10^7$$

$$N_{y_2} + N_{b_2} = 1.35899 \times 10^7$$

$$N_{y_3} = 1.08092 \times 10^7 \quad N_{b_3} = 6.48712 \times 10^9 \quad N_{y_3} + N_{b_3} = 6.49793 \times 10^9$$

Dikkat edilirse $N_1 < 730$ çevrim olduğundan N_{b_1} bölümü 0 alınmış ve direkt olarak tüm ömür N_{y_1} olarak verilmiştir.

$$\frac{n_1}{N_{y_1}} = 0.99951 \quad \frac{n_2}{N_{y_2}} = 0.02512 \quad 1 - 0.99951 = 4.9 \times 10^{-4} \quad n_{2a} := N_{y_2} \cdot 0.02512$$

$$n_{2a} = 6.70004 \times 10^3$$

$$N_{eş} := n_1 + n_{2a}$$

$$N_{eş} = 7.179 \times 10^3$$

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında direkt olarak yayılma evresinden gelişmeye başlamış ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmekten en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

5.9.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu yöntemle göre parça n_1 çevrimleri biter bitmez n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Aslında σ_2 gerilmesinde hiçbir çevrim gerçekleşmemiştir.

$$n_{2s} := 0 \quad (\text{denemeyle bulunmuştur})$$

$$N_{eş} = 479$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 Ön Diferansiyel – Ayna Dişlisinin ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 9,30046.10^8$ | $N_{eş} = 7,657.10^3$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 7,37419.10^8$ | $N_{eş} = 7,065.10^3$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,58143.10^8$ | $N_{eş} = 0,518.10^3$ |
| Manson | $N_{eş} = 0,60238.10^8$ | $N_{eş} = 7,179.10^3$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,58128.10^8$ | $N_{eş} = 0,479.10^3$ |

Bu parçanın ömür değerlerinin Log-Log koordinatların esas alınıp bulunmasında gerçek hayatla uyuşmayan mantıksız sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçların irdelenmesi ve yorumlanması bu bölüm sonundaki sonuçlar kısmında ele alınacaktır.

5.10 Ön Diferansiyel – Mahruti Milinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçanın ömrü adı geçen tezde belirtilen en kritik noktaya göre hesaplanacaktır: (Ayaroğlu, 2002)

$$K_{\phi} := 1$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.9$$

$$K_y := 0.9$$

$$\sigma_{1ger} = 616.05$$

$$\sigma_{2ger} = 332.1$$

$$\sigma_{3ger} = 220.99$$

5.10.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.01546 \times 10^8$$

$$N_2 = 2.75981 \times 10^{14}$$

$$N_3 = 9.09109 \times 10^{16}$$

5.10.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.07$$

$$c_2 := 0.87$$

$$c_3 := 0.06$$

$$N_{eş} = 1.45064 \times 10^9$$

$$n_1 = 1.01545 \times 10^8$$

$$n_2 = 1.26206 \times 10^9$$

$$n_3 = 8.70386 \times 10^7$$

5.10.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır.

$$N_{eş} = 1.19347 \times 10^9$$

5.10.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralandığının kabul edildiği bu yöntemle göre parça n_2 çevrimleri içinde kırılmıştır.

$$N_{eş} = 1.01572 \times 10^8$$

5.10.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_2 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1.04908 \times 10^8$$

5.10.1.5 Gatts Yöntemi:

Parçamız n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. n_2 çevrimlerinin neresinde kırıldığı aşağıda verilmiştir. (denemeyle bulunmuştur)

$$n_{2s} := 2$$

$$N_{eş} = 1.01545 \times 10^8$$

5.10.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq1} = 746$$

$$\sigma_{aq2} = 366.37$$

$$\sigma_{aq3} = 235.69$$

$$N_1 = 4.553 \times 10^3$$

$$N_2 = 5.30799 \times 10^7$$

$$N_3 = 1.76961 \times 10^{10}$$

5.10.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.10.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 6.497 \times 10^4$$

$$n_1 = 4.548 \times 10^3 \quad n_2 = 5.6524 \times 10^4 \quad n_3 = 3.898 \times 10^3$$

5.10.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 5.8241 \times 10^4$$

5.10.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 5.066 \times 10^3$$

5.10.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 5.883 \times 10^3$$

5.10.2.5 Gatts Yöntemi:

Bu yönteme göre parça n_2 çevrimleri biter bitmez n_3 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Aslında σ_3 gerilmesinde hiçbir çevrim gerçekleşmemiştir.

$$n_{3s} := 0 \text{ (denemeyle bulunmuştur)}$$

$$N_{eş} = 6.1072 \times 10^4$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10 Ön Diferansiyel – Mahrutli Milinin ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 1,45064.10^9$ | $N_{eş} = 6,497.10^4$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 1,19347.10^9$ | $N_{eş} = 5,8241.10^4$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,10157.10^9$ | $N_{eş} = 0,5066.10^4$ |
| Manson | $N_{eş} = 0,10491.10^9$ | $N_{eş} = 0,5883.10^4$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,10155.10^9$ | $N_{eş} = 6,1072.10^4$ |

5.11 Arka Diferansiyel – Mahruti Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçaya uygulanan gerilmeler 0 - 194, 0 - 105, 0 - 70, 0 - 49, 0 - 38, 0 - 195, 0 - 106, 0 - 71 N/mm² arasında değişmektedir: (Ayaroğlu, 2002)

$$K_{\phi} := 1.784$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.933$$

$$K_y := 0.72$$

$$\sigma_{1ger} = 257.6$$

$$\sigma_{2ger} = 139.42$$

$$\sigma_{3ger} = 92.95$$

$$\sigma_{4ger} = 65.06$$

$$\sigma_{5ger} = 50.46$$

$$\sigma_{6ger} = 258.93$$

$$\sigma_{7ger} = 140.75$$

$$\sigma_{8ger} = 94.28$$

5.11.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.34557 \times 10^{16}$$

$$N_2 = 6.40915 \times 10^{18}$$

$$N_3 = 7.2428 \times 10^{19}$$

$$N_4 = 3.10291 \times 10^{20}$$

$$N_5 = 6.64875 \times 10^{20}$$

$$N_6 = 1.2555 \times 10^{16}$$

$$N_7 = 5.98012 \times 10^{18}$$

$$N_8 = 6.758 \times 10^{19}$$

5.11.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.03$$

$$c_2 := 0.28$$

$$c_3 := 0.43$$

$$c_4 := 0.13$$

$$c_5 := 0.04$$

$$c_6 := 0.005$$

$$c_7 := 0.07$$

$$c_8 := 0.005$$

$$N_{eş} = 3.71792 \times 10^{17}$$

$$n_1 = 1.11538 \times 10^{16}$$

$$n_2 = 1.04102 \times 10^{17}$$

$$n_3 = 1.59871 \times 10^{17}$$

$$n_4 = 4.8333 \times 10^{16}$$

$$n_5 = 1.48717 \times 10^{16}$$

$$n_6 = 1.85896 \times 10^{15}$$

$$n_7 = 2.60254 \times 10^{16}$$

$$n_8 = 1.85896 \times 10^{15}$$

5.11.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır. (yani bu parçaya göre gerilmeler $\sigma_6 - \sigma_1 - \sigma_7 - \sigma_2 - \sigma_8 - \sigma_3 - \sigma_4 - \sigma_5$ şeklinde sıralanmıştır)

$$N_{eş} = 3.09156 \times 10^{17}$$

5.11.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığının kabul edildiği bu yöntemle göre parça n_6 çevrimlerini bitirdikten sonra n_1 çevrimleri içinde kırılmıştır.

$$N_{eş} = 1.29225 \times 10^{16}$$

5.11.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_3 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.64881 \times 10^{17}$$

5.11.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 287.6 \quad \sigma_{aq_2} = 147.77 \quad \sigma_{aq_3} = 96.58 \quad \sigma_{aq_4} = 66.83$$

$$\sigma_{aq_5} = 51.51 \quad \sigma_{aq_6} = 289.26 \quad \sigma_{aq_7} = 149.26 \quad \sigma_{aq_8} = 98.02$$

$$N_1 = 1.286 \times 10^9 \quad N_2 = 8.27798 \times 10^{12} \quad N_3 = 2.23734 \times 10^{15} \quad N_4 = 2.85942 \times 10^{17}$$

$$N_5 = 8.808 \times 10^{18} \quad N_6 = 1.19271 \times 10^9 \quad N_7 = 7.25196 \times 10^{12} \quad N_8 = 1.84253 \times 10^{15}$$

5.11.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.11.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 3.6289 \times 10^{10}$$

$$n_1 = 1.089 \times 10^9 \quad n_2 = 1.01608 \times 10^{10} \quad n_3 = 1.56 \times 10^{10} \quad n_4 = 4.71753 \times 10^9$$

$$n_5 = 1.45155 \times 10^9 \quad n_6 = 1.81444 \times 10^8 \quad n_7 = 2.54021 \times 10^9 \quad n_8 = 1.81444 \times 10^8$$

5.11.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 3,0963 \times 10^{10}$$

5.11.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_1 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 1,23159 \times 10^9$$

5.11.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_7 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1,629 \times 10^9$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11 Arka Diferansiyel – Mahrutu Dişlisinin ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 3,71792 \cdot 10^{17}$ | $N_{eş} = 3,6289 \cdot 10^{10}$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 3,09156 \cdot 10^{17}$ | $N_{eş} = 3,0963 \cdot 10^{10}$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,12923 \cdot 10^{17}$ | $N_{eş} = 0,12316 \cdot 10^{10}$ |
| Manson | $N_{eş} = 3,64881 \cdot 10^{17}$ | $N_{eş} = 0,1629 \cdot 10^{10}$ |

5.12 Arka Diferansiyel – Ayna Dişlisinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçaya uygulanan gerilmeler 0 - 315, 0 - 172, 0 - 114, 0 - 79, 0 - 62, 0 - 317, 0 - 173, 0 - 115 N/mm² arasında değişmektedir. (Ayaroğlu, 2002)

$$K_{\varphi} := 1.586$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.933$$

$$K_y := 0.72$$

$$\sigma_{1ger} = 371.85$$

$$\sigma_{2ger} = 203.04$$

$$\sigma_{3ger} = 134.57$$

$$\sigma_{4ger} = 93.26$$

$$\sigma_{5ger} = 73.19$$

$$\sigma_{6ger} = 374.21$$

$$\sigma_{7ger} = 204.22$$

$$\sigma_{8ger} = 135.76$$

5.12.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 3.46813 \times 10^{13} \quad N_2 = 2.31868 \times 10^{17} \quad N_3 = 8.2547 \times 10^{18} \quad N_4 = 7.12727 \times 10^{19}$$

$$N_5 = 2.03077 \times 10^{20} \quad N_6 = 3.06617 \times 10^{13} \quad N_7 = 2.18017 \times 10^{17} \quad N_8 = 7.7616 \times 10^{18}$$

5.12.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.03$$

$$c_2 := 0.28$$

$$c_3 := 0.43$$

$$c_4 := 0.13$$

$$c_5 := 0.04$$

$$c_6 := 0.005$$

$$c_7 := 0.07$$

$$c_8 := 0.005$$

$$N_{eş} = 9.71181 \times 10^{14}$$

$$n_1 = 2.91354 \times 10^{13} \quad n_2 = 2.71931 \times 10^{14} \quad n_3 = 4.17608 \times 10^{14} \quad n_4 = 1.26254 \times 10^{14}$$

$$n_5 = 3.88473 \times 10^{13} \quad n_6 = 4.85591 \times 10^{12} \quad n_7 = 6.79827 \times 10^{13} \quad n_8 = 4.85591 \times 10^{12}$$

5.12.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır. (yani bu parçaya göre gerilmeler $\sigma_6 - \sigma_1 - \sigma_7 - \sigma_2 - \sigma_8 - \sigma_3 - \sigma_4 - \sigma_5$ şeklinde sıralanmıştır)

$$N_{eş} = 7.53907 \times 10^{14}$$

5.12.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmenden en alçak gerilmeye doğru sıralandığının kabul edildiği bu yonteme göre parça n_6 çevrimlerini bitirdikten sonra n_1 çevrimleri içinde kırılmıştır.

$$N_{eş} = 3.17574 \times 10^{13}$$

5.12.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma yayılma evresinde n_8 çevrimleri içerisinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.7524 \times 10^{14}$$

5.12.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 447.67$$

$$\sigma_{aq_2} = 223.73$$

$$\sigma_{aq_3} = 143.36$$

$$\sigma_{aq_4} = 97.39$$

$$\sigma_{aq_5} = 75.71$$

$$\sigma_{aq_6} = 451.09$$

$$\sigma_{aq_7} = 225.17$$

$$\sigma_{aq_8} = 144.7$$

$$N_1 = 3.792 \times 10^6$$

$$N_2 = 3.51215 \times 10^{10}$$

$$N_3 = 1.23311 \times 10^{13}$$

$$N_4 = 2.00436 \times 10^{15}$$

$$N_5 = 5.522 \times 10^{16}$$

$$N_6 = 3.4296 \times 10^6$$

$$N_7 = 3.22872 \times 10^{10}$$

$$N_8 = 1.09088 \times 10^{13}$$

5.12.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.12.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 1.0661 \times 10^8$$

$$n_1 = 3.198 \times 10^6 \quad n_2 = 2.98513 \times 10^7 \quad n_3 = 4.584 \times 10^7 \quad n_4 = 1.38595 \times 10^7$$

$$n_5 = 4.26447 \times 10^6 \quad n_6 = 5.33059 \times 10^5 \quad n_7 = 7.46282 \times 10^6 \quad n_8 = 5.33059 \times 10^5$$

5.12.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 9.1954 \times 10^7$$

5.12.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_1 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 3.57839 \times 10^6$$

5.12.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_7 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir.

(Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeye en düşük gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 4.48038 \times 10^6$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 Arka Diferansiyel – Ayna Dişlisinin ömür değerleri

| | Log-Lineer Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 9,71181 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 1,0661 \cdot 10^8$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 7,53907 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 0,91954 \cdot 10^8$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,31757 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 0,03578 \cdot 10^8$ |
| Manson | $N_{eş} = 3,7524 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 0,0448 \cdot 10^8$ |

5.13 Arka Diferansiyel – Mahruti Milinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçanın ömür değerlendirmeleri adı geçen tezde belirtilen en kritik noktaya göre yapılacaktır.

$$K_{\phi} := 1$$

$$\sigma_k := 930$$

$$K_b := 0.9$$

$$K_y := 0.9$$

$$\sigma_{1ger} = 374.07$$

$$\sigma_{2ger} = 203.7$$

$$\sigma_{3ger} = 135.8$$

$$\sigma_{4ger} = 93.83$$

$$\sigma_{5ger} = 74.07$$

$$\sigma_{6ger} = 376.54$$

$$\sigma_{7ger} = 204.94$$

$$\sigma_{8ger} = 137.04$$

5.13.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 3.0884 \times 10^{13}$$

$$N_2 = 2.24008 \times 10^{17}$$

$$N_3 = 7.7425 \times 10^{18}$$

$$N_4 = 6.91873 \times 10^{19}$$

$$N_5 = 1.93919 \times 10^{20}$$

$$N_6 = 2.71509 \times 10^{13}$$

$$N_7 = 2.10034 \times 10^{17}$$

$$N_8 = 7.2595 \times 10^{18}$$

5.13.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.03$$

$$c_2 := 0.28$$

$$c_3 := 0.43$$

$$c_4 := 0.13$$

$$c_5 := 0.04$$

$$c_6 := 0.005$$

$$c_7 := 0.07$$

$$c_8 := 0.005$$

$$N_{eş} = 8.64173 \times 10^{14}$$

$$n_1 = 2.59252 \times 10^{13}$$

$$n_2 = 2.41969 \times 10^{14}$$

$$n_3 = 3.71595 \times 10^{14}$$

$$n_4 = 1.12343 \times 10^{14}$$

$$n_5 = 3.45669 \times 10^{13}$$

$$n_6 = 4.32087 \times 10^{12}$$

$$n_7 = 6.04921 \times 10^{13}$$

$$n_8 = 4.32087 \times 10^{12}$$

5.13.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

Formülün gereği olarak gerilme seviyeleri en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanmıştır. (yani bu parçaya göre gerilmeler $\sigma_6 - \sigma_1 - \sigma_7 - \sigma_2 - \sigma_8 - \sigma_3 - \sigma_4 - \sigma_5$ şeklinde sıralanmıştır)

$$N_{eş} = 6.70175 \times 10^{14}$$

5.13.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığının kabul edildiği bu yöntemle göre parça n_1 çevrimleri içinde kırılmıştır.

$$N_{eş} = 2.81593 \times 10^{13}$$

5.13.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_2 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.31663 \times 10^{14}$$

5.13.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\sigma_{aq_1} = 451.22$$

$$\sigma_{aq_2} = 224.73$$

$$\sigma_{aq_3} = 144.84$$

$$\sigma_{aq_4} = 98.04$$

$$\sigma_{aq_5} = 76.63$$

$$\sigma_{aq_6} = 454.79$$

$$\sigma_{aq_7} = 226.09$$

$$\sigma_{aq_8} = 146.15$$

$$N_1 = 3.417 \times 10^6$$

$$N_2 = 3.31289 \times 10^{10}$$

$$N_3 = 1.07774 \times 10^{13}$$

$$N_4 = 1.8364 \times 10^{15}$$

$$N_5 = 4.714 \times 10^{16}$$

$$N_6 = 3.08038 \times 10^6$$

$$N_7 = 3.0595 \times 10^{10}$$

$$N_8 = 9.56659 \times 10^{12}$$

5.13.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.13.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 9.603 \times 10^7$$

$$n_1 = 2.881 \times 10^6 \quad n_2 = 2.68883 \times 10^7 \quad n_3 = 4.129 \times 10^7 \quad n_4 = 1.24839 \times 10^7$$

$$n_5 = 3.84119 \times 10^6 \quad n_6 = 4.80148 \times 10^5 \quad n_7 = 6.72208 \times 10^6 \quad n_8 = 4.80148 \times 10^5$$

5.13.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 8.2882 \times 10^7$$

5.13.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_1 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 3.21849 \times 10^6$$

5.13.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_7 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir. (Gerilme seviyelerinin en yüksek

gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 4.002 \times 10^6$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13 Arka Diferansiyel – Mahruti Milinin ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 8,64173 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 9,603 \cdot 10^7$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 6,70175 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 8,2882 \cdot 10^7$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,28159 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 0,32185 \cdot 10^7$ |
| Manson | $N_{eş} = 3,31663 \cdot 10^{14}$ | $N_{eş} = 0,4002 \cdot 10^7$ |

5.14 Kardan Milinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçanın ömür değerlendirmeleri adı geçen tezde belirtilen en kritik noktaya göre yapılacaktır. Buradaki hesaplarda bazı farklılıklar olduğundan detayların verilmesi uygun olacaktır:

$$\sigma_k := 475$$

$$\tau_k := 0.577 \cdot \sigma_k$$

$$K_\phi := 2$$

$$\tau_k = 274.075$$

$$\tau_{DT} := 0.35 \cdot 1.1 \cdot \sigma_k$$

$$\tau_{DT} = 182.875$$

$$K_b := 0.85$$

$$\sigma_{DT} := \frac{\tau_{DT}}{0.577}$$

$$\sigma_{DT} = 316.94107$$

$$K_y := 0.77$$

$$\tau_1 := 3$$

$$\tau_{1ger} := \tau_1 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b}$$

$$\tau_{1ger} = 9.17$$

$$\sigma_{1ger} := \frac{\tau_{1ger}}{0.577}$$

$$\sigma_{1ger} = 15.89$$

$$\tau_2 := 1.4$$

$$\tau_{2ger} := \tau_2 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b}$$

$$\tau_{2ger} = 4.28$$

$$\sigma_{2ger} := \frac{\tau_{2ger}}{0.577}$$

$$\sigma_{2ger} = 7.41$$

$$\tau_3 := 0.9$$

$$\tau_{3ger} := \tau_3 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b}$$

$$\tau_{3ger} = 2.75$$

$$\sigma_{3ger} := \frac{\tau_{3ger}}{0.577}$$

$$\sigma_{3ger} = 4.77$$

$$\tau_4 := 0.6 \quad \tau_{4ger} := \tau_4 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b} \quad \tau_{4ger} = 1.83 \quad \sigma_{4ger} := \frac{\tau_{4ger}}{0.577} \quad \sigma_{4ger} = 3.18$$

$$\tau_5 := 0.5 \quad \tau_{5ger} := \tau_5 \cdot \frac{K_\phi}{K_y \cdot K_b} \quad \tau_{5ger} = 1.53 \quad \sigma_{5ger} := \frac{\tau_{5ger}}{0.577} \quad \sigma_{5ger} = 2.65$$

5.14.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

Burada ömür formülü olarak sayfa 74'te log-lineer eksenler için çıkarılan formül kullanılacaktır. Hatırlatmak amacıyla aşağıda bir kere daha verilmiştir:

$$\log N := 14.58098 - 12.8677 \cdot \frac{\sigma_{ger}}{\sigma_k}$$

$$N_1 = 1.41442 \times 10^{14} \quad N_2 = 2.39953 \times 10^{14} \quad N_3 = 2.8305 \times 10^{14}$$

$$N_5 = 3.23035 \times 10^{14} \quad N_4 = 3.12536 \times 10^{14}$$

5.14.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.035 \quad c_2 := 0.35 \quad c_3 := 0.435 \quad c_4 := 0.13 \quad c_5 := 0.04$$

$$N_{eş} = 2.64362 \times 10^{14}$$

$$n_1 = 9.25267 \times 10^{12} \quad n_2 = 9.25267 \times 10^{13} \quad n_3 = 1.14998 \times 10^{14}$$

$$n_4 = 3.43671 \times 10^{13} \quad n_5 = 1.05745 \times 10^{13}$$

5.14.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$d := 6.57$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}}\right)^d + \left(\frac{n_3}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{1ger}}\right)^d + \left(\frac{n_4}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{4ger}}{\sigma_{1ger}}\right)^d + \left(\frac{n_5}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{5ger}}{\sigma_{1ger}}\right)^d = 0.0701$$

$$N_{eş} := \frac{N_1}{c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d + c_3 \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d + c_4 \cdot \left(\frac{\sigma_{4ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d + c_5 \cdot \left(\frac{\sigma_{5ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^d}$$

$$N_{eş} = 3.77134 \times 10^{15}$$

5.14.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir. Ancak buna rağmen hem bu yöntemle göre hem de Corten-Dolan yöntemine göre ömür değerleri Palmgren-Miner yöntemine göre çok yüksek çıkmıştır.

$$x := \frac{\log(N_2) - \log(N_1)}{\log(\sigma_{1ger}) - \log(\sigma_{2ger})} \quad x = 0.69351 \quad y := 6.57$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^q + \left(\frac{n_3}{N_3} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^q + \left(\frac{n_4}{N_4} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{4ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^q + \left(\frac{n_5}{N_5} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{5ger}}{\sigma_{1ger}} \right)^q = 0.07015$$

$$n_{5i} := N_5 \cdot \left[\left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{1ger}}{\sigma_{5ger}} \right)^q - \left(\frac{n_2}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{2ger}}{\sigma_{5ger}} \right)^q - \left(\frac{n_3}{N_3} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{3ger}}{\sigma_{5ger}} \right)^q - \left(\frac{n_4}{N_4} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{4ger}}{\sigma_{5ger}} \right)^q - \left(\frac{n_5}{N_5} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{5ger}}{\sigma_{5ger}} \right)^q \right]$$

$$n_{5i} = 1.12322 \times 10^{19}$$

$$N_{eş} := n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_{5i}$$

$$N_{eş} = 1.12324 \times 10^{19}$$

Bu son iki yöntemle bulunan sonuçlar mantıksız olmasına rağmen verdikleri değerler kıyaslama yapmak için hesaplanmıştır.

5.14.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_s çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_s çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 2.61291 \times 10^{14}$$

5.14.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

Log-log koordinatlar için sayfa 74'te bir formül çıkarılmış olmasına rağmen orada esas alınan τ_k değeri bu parçanınkiyle aynı olmadığından yeni formül çıkarılacaktır:

$$\tau_D := 0.35 \cdot \sigma_k$$

$$\tau_D = 166.25$$

$$\tau_a := 0.9 \cdot \tau_k$$

$$\tau_a = 246.6675 \quad N_a := 10^3$$

$$\tau_b := \tau_D$$

$$\tau_b = 166.25 \quad N_b := 10^6$$

$$\tau := A \cdot (N)^B$$

$$B := \frac{\log(\tau_a) - \log(\tau_b)}{\log(N_a) - \log(N_b)}$$

$$B = -0.05712$$

$$N := \left(\frac{\tau_{aq}}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$$

$$A := \frac{\tau_D}{(N_b)^B}$$

$$A = 365.98409$$

$$\tau_{aq} := \frac{\tau_{ger}}{1 - \frac{\tau_o}{\tau_k}}$$

$$\tau_{aq_1} = 11.57$$

$$\tau_{aq_2} = 4.83$$

$$\tau_{aq_3} = 2.97$$

$$\tau_{aq_4} = 1.93$$

$$\tau_{aq_5} = 1.59$$

$$N_1 = 1.825 \times 10^{26}$$

$$N_2 = 8.19194 \times 10^{32}$$

$$N_3 = 3.90482 \times 10^{36}$$

$$N_4 = 7.46547 \times 10^{39}$$

$$N_5 = 2.221 \times 10^{41}$$

5.14.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.14.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{e3} = 5.2149 \times 10^{27}$$

$$n_1 = 1.825 \times 10^{26} \quad n_2 = 1.8252 \times 10^{27} \quad n_3 = 2.26846 \times 10^{27}$$

$$n_4 = 6.77931 \times 10^{26} \quad n_5 = 2.08594 \times 10^{26}$$

5.14.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$d := 6.57$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_2}}{\tau_{aq_1}}\right)^d + \left(\frac{n_3}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_3}}{\tau_{aq_1}}\right)^d + \left(\frac{n_4}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_4}}{\tau_{aq_1}}\right)^d + \left(\frac{n_5}{N_1}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_5}}{\tau_{aq_1}}\right)^d = 1.03358$$

$$N_{eş} := \frac{N_1}{c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{\tau_{aq_2}}{\tau_{aq_1}}\right)^d + c_3 \cdot \left(\frac{\tau_{aq_3}}{\tau_{aq_1}}\right)^d + c_4 \cdot \left(\frac{\tau_{aq_4}}{\tau_{aq_1}}\right)^d + c_5 \cdot \left(\frac{\tau_{aq_5}}{\tau_{aq_1}}\right)^d}$$

$$N_{eş} = 5.0454 \times 10^{27}$$

5.14.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$x := \frac{\log(N_2) - \log(N_1)}{\log(\tau_{aq_1}) - \log(\tau_{aq_2})} \quad x = 17.508 \quad y := 6.57 \quad q := y - x$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_2}}{\tau_{aq_1}}\right)^q + \left(\frac{n_3}{N_3}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_3}}{\tau_{aq_1}}\right)^q + \left(\frac{n_4}{N_4}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_4}}{\tau_{aq_1}}\right)^q + \left(\frac{n_5}{N_5}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_5}}{\tau_{aq_1}}\right)^q = 1.0335$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \left(\frac{n_2}{N_2}\right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq_2}}{\tau_{aq_1}}\right)^q = 1.0319$$

$$\frac{n_1}{N_1} = 0.999997771$$

$$n_{2i} := N_2 \cdot \left[\left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot \left(\frac{\tau_{aq1}}{\tau_{aq2}} \right)^q \right] \quad n_{2i} = 1.27522 \times 10^{23}$$

$$N_{e\varnothing} := n_1 + n_{2i}$$

$$N_{e\varnothing} = 1.82647 \times 10^{26}$$

5.14.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiş ve kırılma n_3 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir.

(Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeye en düşük gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$\frac{n_1}{N_{b1}} + \frac{n_2}{N_{b2}} + \frac{n_3}{N_{b3}} + \frac{n_4}{N_{b4}} + \frac{n_5}{N_{b5}} = 1.00000000043813$$

$$\frac{n_1}{N_{b1}} + \frac{n_2}{N_{b2}} = 0.99999999857099 \quad 1 - 0.99999999857099 = 1.42901 \times 10^{-10}$$

$$n_{3a} := N_{b3} \cdot (1.42901 \times 10^{-10}) \quad n_{3a} = 5.58003 \times 10^{26}$$

$$n_{3b} := N_{y3}$$

$$N_{e\varnothing} := n_1 + n_2 + (n_{3a} + n_{3b})$$

$$N_{e\varnothing} = 2.56585 \times 10^{27}$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.14'te verilmiştir.

Çizelge 5.14 Kardan Milinin ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|--|--|
| Palmgren-Miner | $N_{e\varnothing} = 2,64362 \cdot 10^{14}$ | $N_{e\varnothing} = 5,2149 \cdot 10^{27}$ |
| Corten-Dolan | $N_{e\varnothing} = 37,7134 \cdot 10^{14}$ | $N_{e\varnothing} = 5,0454 \cdot 10^{27}$ |
| Marin | $N_{e\varnothing} = 112324 \cdot 10^{14}$ | $N_{e\varnothing} = 0,18265 \cdot 10^{27}$ |
| Manson | $N_{e\varnothing} = 2,61291 \cdot 10^{14}$ | $N_{e\varnothing} = 2,56585 \cdot 10^{27}$ |

5.15 Ön Aks Milinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçanın ömür değerlendirmeleri adı geçen tezde belirtilen en kritik noktaya göre yapılacaktır.

$$\sigma_k := 1080$$

$$\tau_k := 0.577 \cdot \sigma_k$$

$$K_\phi := 1$$

$$\tau_k = 623.16$$

$$\tau_{DT} := 0.35 \cdot 1.1 \cdot \sigma_k$$

$$\tau_{DT} = 415.8$$

$$K_b := 0.9$$

$$\sigma_{DT} := \frac{\tau_{DT}}{0.577}$$

$$\sigma_{DT} = 720.62$$

$$K_y := 0.72$$

$$\tau_{1ger} = 217.59$$

$$\tau_{2ger} = 192.9$$

$$\tau_{3ger} = 128.09$$

$$\sigma_{1ger} = 377.11$$

$$\sigma_{2ger} = 334.32$$

$$\sigma_{3ger} = 221.99$$

5.15.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 1.2243 \times 10^{10}$$

$$N_2 = 3.96042 \times 10^{10}$$

$$N_3 = 8.632 \times 10^{11}$$

5.15.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.0625$$

$$c_2 := 0.875$$

$$c_3 := 0.0625$$

$$N_{eş} = 3.6669 \times 10^{10}$$

$$n_1 = 2.29181 \times 10^9$$

$$n_2 = 3.20854 \times 10^{10}$$

$$n_3 = 2.29181 \times 10^9$$

5.15.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 2.65569 \times 10^{10}$$

5.15.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.

Kırılma n_2 çevrimleri içerisinde gerçekleşmiştir.

$$N_{eş} = 2.42473 \times 10^{10}$$

5.15.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_3 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma da n_3 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 3.60992 \times 10^{10}$$

5.15.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\tau_{aq1} = 281.22$$

$$\tau_{aq2} = 241.3$$

$$\tau_{aq3} = 147.77$$

$$N_1 = 1.773 \times 10^8$$

$$N_2 = 2.58681 \times 10^9$$

$$N_3 = 1.38584 \times 10^{13}$$

5.15.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.15.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 1.4477 \times 10^9$$

$$n_1 = 9.048 \times 10^7$$

$$n_2 = 1.26671 \times 10^9$$

$$n_3 = 9.04796 \times 10^7$$

5.15.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 4.624 \times 10^8$$

5.15.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_2 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 3.27864 \times 10^8$$

5.15.2.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_2 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine

geçmiş ve kırılma n_2 çevrimleri sırasında gerçekleşmiştir.

(Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1,35107 \times 10^9$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.15'te verilmiştir.

Çizelge 5.15 Ön Aks Milinin ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 3,6669 \cdot 10^{10}$ | $N_{eş} = 1,4477 \cdot 10^9$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 2,6557 \cdot 10^{10}$ | $N_{eş} = 0,4624 \cdot 10^9$ |
| Marin | $N_{eş} = 2,42473 \cdot 10^{10}$ | $N_{eş} = 0,32786 \cdot 10^9$ |
| Manson | $N_{eş} = 3,60992 \cdot 10^{10}$ | $N_{eş} = 1,35107 \cdot 10^9$ |

5.16 Arka Aks Milinin Ömür Değerlendirmeleri:

Bu parçanın ömür değerlendirmeleri adı geçen tezde belirtilen en kritik noktaya göre yapılacaktır.

$$\sigma_k := 1080$$

$$\tau_k := 0.577 \cdot \sigma_k$$

$$K_\phi := 1.39$$

$$\tau_k = 623.16$$

$$\tau_{DT} := 0.35 \cdot 1.1 \cdot \sigma_k$$

$$\tau_{DT} = 415.8$$

$$K_b := 0.9$$

$$\sigma_{DT} := \frac{\tau_{DT}}{0.577}$$

$$\sigma_{DT} = 720.62$$

$$K_y := 0.72$$

$$\tau_{1ger} = 418.29$$

$$\tau_{2ger} = 227.38$$

$$\tau_{3ger} = 152.3$$

$$\tau_{4ger} = 105.11$$

$$\tau_{5ger} = 81.51$$

$$\tau_{6ger} = 420.43$$

$$\tau_{7ger} = 229.52$$

$$\tau_{8ger} = 152.3$$

$$\sigma_{1ger} = 724.93$$

$$\sigma_{2ger} = 394.07$$

$$\sigma_{3ger} = 263.95$$

$$\sigma_{4ger} = 182.16$$

$$\sigma_{5ger} = 141.27$$

$$\sigma_{6ger} = 728.65$$

$$\sigma_{7ger} = 397.78$$

$$\sigma_{8ger} = 263.95$$

5.16.1 Eşdeğer Ömrün Log - Lineer Koordinatlara Göre Bulunması:

$$N_1 = 8.78465 \times 10^5 \quad N_2 = 7.68876 \times 10^9 \quad N_3 = 2.7298 \times 10^{11} \quad N_4 = 2.57391 \times 10^{12}$$

$$N_5 = 7.90351 \times 10^{12} \quad N_6 = 7.9329 \times 10^5 \quad N_7 = 6.94325 \times 10^9 \quad N_8 = 2.72979 \times 10^{11}$$

5.16.1.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

$$c_1 := 0.03 \quad c_2 := 0.28 \quad c_3 := 0.43 \quad c_4 := 0.13$$

$$c_5 := 0.04 \quad c_6 := 0.005 \quad c_7 := 0.07 \quad c_8 := 0.005$$

$$N_{eş} = 2.46904 \times 10^7$$

$$n_1 = 7.40713 \times 10^5 \quad n_2 = 6.91332 \times 10^6 \quad n_3 = 1.06169 \times 10^7 \quad n_4 = 3.20976 \times 10^6$$

$$n_5 = 9.87618 \times 10^5 \quad n_6 = 1.23452 \times 10^5 \quad n_7 = 1.72833 \times 10^6 \quad n_8 = 1.23452 \times 10^5$$

5.16.1.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 1.94328 \times 10^7$$

5.16.1.3 Marin Yöntemi:

Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir. Kırılma n_1 çevrimleri içerisinde gerçekleşmiştir.

$$N_{eş} = 8.16181 \times 10^5$$

5.16.1.4 Manson Yöntemi:

Parçamızdaki yorulma çatlakları n_1 çevrimleri sırasında başlangıç evresinden yayılma evresine geçmiştir. Ayrıca kırılma n_7 çevrimlerinin yayılma evresinde gerçekleşmiştir.

(Gerilmelerin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 1.01354 \times 10^6$$

5.16.2 Eşdeğer Ömrün Log - Log Koordinatlara Göre Bulunması:

$$\tau_{aq_1} = 608.79$$

$$\tau_{aq_2} = 273.98$$

$$\tau_{aq_3} = 171.88$$

$$\tau_{aq_4} = 114.08$$

$$\tau_{aq_5} = 86.81$$

$$\tau_{aq_6} = 613.35$$

$$\tau_{aq_7} = 277.1$$

$$\tau_{aq_8} = 171.88$$

$$N_1 = 238$$

$$N_2 = 2.79975 \times 10^8$$

$$N_3 = 9.82358 \times 10^{11}$$

$$N_4 = 1.28595 \times 10^{15}$$

$$N_5 = 1.537 \times 10^{17}$$

$$N_6 = 209$$

$$N_7 = 2.29618 \times 10^8$$

$$N_8 = 9.82358 \times 10^{11}$$

5.16.2.1 Palmgren-Miner Yöntemi:

c değerlerimiz 5.16.1.1 ile gene aynı kalacaktır

$$N_{eş} = 6.662 \times 10^3$$

$$n_1 = 200$$

$$n_2 = 1.865 \times 10^3$$

$$n_3 = 2.865 \times 10^3$$

$$n_4 = 866$$

$$n_5 = 266$$

$$n_6 = 33$$

$$n_7 = 466$$

$$n_8 = 33$$

5.16.2.2 Corten-Dolan Yöntemi:

$$N_{eş} = 5.887 \times 10^3$$

5.16.2.3 Marin Yöntemi:

Parça n_1 çevrimleri sırasında kırılmıştır. Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.

$$N_{eş} = 218$$

5.16.2.4 Manson Yöntemi:

Dikkat edilirse n_6 ve n_1 çevrimleri 730'dan küçüktür. Daha önceden de olduğu gibi bu durum gözönüne alınırsa çatlağın direkt olarak yayılma safhasından başladığı görülmektedir. Bu durumda yorulma çatlağı yayılma evresinde n_6 , n_1 ve çok az miktarda n_7 çevrimi yaşadktan sonra kırılacaktır. (Gerilme seviyelerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralanacağı kabul edilmiştir.)

$$N_{eş} = 246$$

Bu parçanın değerleri ise toplu olarak Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16 Arka Aks Milinin ömür değerleri

| | Log-Linear Koordinatlara göre | Log-Log Koordinatlara göre |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 2,46904.10^7$ | $N_{eş} = 6,662.10^3$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 1,94328.10^7$ | $N_{eş} = 5,887.10^3$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,08162.10^7$ | $N_{eş} = 0,218.10^3$ |
| Manson | $N_{eş} = 0,10135.10^7$ | $N_{eş} = 0,246.10^3$ |

6. SONUÇLAR:

Bu çalışmada, yine Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırlanan Serdar Ayaroğlu'nun tezinde incelediği Askeri Arac'ın toplam 16 adet aktarma elemanının gösterdiği yorulma ömürleri tezin konusunu oluşturan yorulmada birikimli hasar metotlarına göre irdelenmiştir. Birikimli hasar metotlarını kullanabilmek için gerekli olan malzemenin Wöhler diyagramları Bölüm 2'de açıklanan pratik yollarla iki değişik şekilde çizilmiştir. Sonuç olarak her bir parçanın askeri aracın kullanımı boyunca vereceği ömür değerleri bu iki değişik yolla çizilmiş Wöhler diyagramları ışığında çeşitli birikimli hasar metotları ile hesaplanmıştır. Her parça için birçok ömür değeri bulunmuş ve bu değerlerin bazıları birbirine çok yakın bazıları ise çok uzak çıkmıştır. Çalışmadaki tüm parçalarda çıkan bu düzensiz sonuçlar genelde tüm parçalarda aynı hata oranıyla çıktığı için burada sadece bir parçanın sonuçları irdelenecek ve bu sonuçların yorumlanması tüm parçalar için geçerli olacaktır.

Burada yorumlanacak parça Bölüm 5.1'de hesapları uzun uzun verilen Transfer Kutusu'ndaki Daimi İştirak Dişlisi olacaktır. Bu parça üzerine etkiyen 3 farklı değişken gerilmenin nominal değerleri ve bu parça ile ilgili boyut, yüzey ve çentik faktörleri direkt olarak kaynak tezdin alınmıştır (Ayaroğlu, 2002). Bu faktörler gerilmelerin nominal değerlerine gerektiği gibi eklenip (bkz. sf. 75) gerçek gerilmeler bulunmuş ve diğer tüm hesaplarda gerçek gerilmeler kullanılmıştır. Bilindiği gibi hesaplarla bulunan nominal gerilmeler sadece çentiksiz laboratuvar çubukları için geçerli olmaktadır. Gerçek makina parçalarında gerilme artırıcı faktörler bulunduğu için bunların da gözönüne alınıp bulunan gerilmeler gerektiği gibi yükseltilmelidir. Ancak malzemenin kopma mukavemeti ve yorulma dayanımı değerleri malzemenin kendine has değerleridir. Çünkü parça çentikli olsa da olmasa da malzemenin kopma gerilmesi ve yorulma limiti gibi karakteristik verileri hiçbir şekilde değişmeyecektir. Faktörlerin getireceği tek ekstra yük uygulanan gerilmelerin parça tarafından daha yüksek bir mertebede yaşanması şeklinde kendini gösterecektir. İşte bu yüzden malzemenin kopma mukavemeti ve yorulma dayanımı değerlerine bahsedilen faktörler ilave edilmemiştir.

Bu işlemlerden sonra her bir gerilme genliğindeki yorulma ömürlerinin tayini için Wöhler diyagramları çizilmiş ve bu diyagramlardan çıkarılan formüllerle her bir gerilme genliğine tekabül eden ömürler saptanmıştır. Bu işlem hem log-lineer eksenlerde, hem de log-log eksenlerde yapılmış ve aynı gerilme için iki değişik yolla bulunan ömür sonuçlarının arasında çok büyük farklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark, incelenen her parçada çıkmıştır.

İncelediğimiz parça Palmgren-Miner, Corten-Dolan, Marin, Manson ve Gatts teorilerine göre

incelenmiş ve bulunan sonuçlar Çizelge 5.1’de toplu halde verilmiştir. Hatırlamak maksadıyla bu çizelge burada da bir kez daha verilecektir. (Çizelge 5.1, sf:84)

| | Log-Linear Koordinata göre | Log-Log Koordinata göre |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| Palmgren-Miner | $N_{eş} = 1,85442.10^{17}$ | $N_{eş} = 1,12291.10^{10}$ |
| Corten-Dolan | $N_{eş} = 1,5406.10^{17}$ | $N_{eş} = 0,90878.10^{10}$ |
| Marin | $N_{eş} = 0,323.10^{17}$ | $N_{eş} = 0,08596.10^{10}$ |
| Manson | $N_{eş} = 1,84961.10^{17}$ | $N_{eş} = 0,10696.10^{10}$ |
| Gatts | $N_{eş} = 0,1298.10^{17}$ | $N_{eş} = 1,05554.10^{10}$ |

Sonuçlarımızda log-linear eksenlere göre belirlenmiş N ömürlerini esas alarak bulunan değerlerin 10^{17} çarpanıyla çarpıldığı, log-log eksenlerin ışığında bulunan değerlerin ise 10^{10} çarpanıyla çarpıldığı görülmüştür. Ancak log-linear ve log-log gruplarına kendi aralarında bakarsak arada çok büyük farklar olmadığı görülmektedir. Gene de ufak farklar mevcuttur. Aslında böyle ufak farkların bile çıkması insanı “Acaba hangi yöntem daha doğru sonucu veriyor?” sorusuna yöneltmektedir. Çünkü bu ufak farkları 10^{17} çarpanıyla çarptığımızda bu farklar çok büyümektedir.

Bu farkları açıklamak için burada verilen formüllerin nasıl kullanıldığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bölüm 3’te de belirtildiği gibi Palmgren-Miner yöntemi gerilme sıralanışlarını hesaba katmayan bir yöntem, aksine diğer bütün yöntemler gerilme sıralanışlarını hesaba katan metotlardır. Bilhassa Corten-Dolan metodu en yüksek gerilme seviyesinin ilk olarak düşünülmesi gerektiğini savunmaktadır. Ayrıca diğer yöntemlere göre de hesaplar yapılırken gerilme dizilişlerinin en yüksek gerilmeden en alçak gerilmeye doğru sıralandığı kabul edilip yapılmıştır. Şu noktada hangi yöntemin doğru sonuç verdiğini belirleyebilmek için şu sorunun gözönünde bulundurulması gerekmektedir: “Acaba pratik hayatta gerilmeler nasıl sıralanıyor? Büyükten küçüğe mi yoksa küçükten büyüğe mi? Yoksa tamamen karışık bir şekilde midir?” İşte bu sorunun cevabına göre yöntemin belirlenmesi gerekir. Yapılan bu çalışmada incelenen parçalara gelen gerilmeler bir taşıtın 1., 2. ve 3. viteslerinde taşıdığı 3 adet gerilmeden oluşmakta ve en yüksek gerilme 1. viteste, en düşük gerilme ise 3. viteste gelmektedir. Gerçek kullanım şartlarında aracın ömrü boyunca bu viteslerdeki sürüşleri karışık bir şekilde devam edeceğine göre “gerilme sıralanışları küçükten büyüğe veya büyükten küçüğe” şeklinde bir açıklama yanlış olacaktır. Zaten Corten-Dolan büyükten küçüğe sıralanma şartını baştan

koyduğuna göre bu çalışma için vereceği ömürler gerçek değerlerden düşük çıkacaktır. Düşük çıkmasının nedeni ise gerilmeleri büyükten küçüğe sıralamanın ömrü kısaltıcı etki göstermesindedir. Demekki böyle bir çalışmada Corten-Dolan yöntemini kullanmak hatalı sonuç verecektir. Diğer yöntemlerde böyle bir şart olmasa da buna alternatif olarak küçükten büyüğe sıralama durumunu sunmaktadırlar ki bu durum da bahsedilen işletme durumuna uymamaktadır. Burada en uygun çözümü Palmgren-Miner yöntemi verecektir. Çünkü bu yöntem gerilme sıralanışına önem vermemekte ve pratik hayatta gerilmeler karışık sıralandığı için en uygun çözüm çıkmaktadır. Sonuç olarak Palmgren-Miner'in verdiği ömürler esas kabul edilecektir.

Ancak unutmamak gerekir ki Palmgren-Miner sadece bu tezde örnek gösterilen, bir taşıtın elemanları gibi ömrü boyunca karışık yüklemeye maruz kalacak elemanlarda doğru sonuçlar verecektir. Eğer gerilme dizilişleri biliniyorsa Palmgren-Miner hataya götürür. Hataya götürmesinin nedeni de Bölüm 3'te uzun uzun açıklandığı gibi gerilme sıralanışlarını dikkate almamasıdır. Oysa şiddetli gerilmenin önce uygulanması malzemenin özelliklerini etkilemekte ve normalden daha fazla ömür harcanmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden gerçek ömür değeri düşmektedir. Ancak Palmgren-Miner teorisi bu etkiyi göz önüne almadığından ömürdeki bu düşüşü de gösteremez. Bu durumun tersi olarak eğer alçak gerilme önce uygulansaydı bu seferde de Palmgren-Miner teorisi (eğer 1'e eşitlenirse) hatalı ömür verecek ancak bu hata ömür değerini gerçeğe kıyasla daha az göstermek yönünde olacaktır. Böyle bir durumun nedeni ise, alçak gerilmelerin önce uygulanmasının sanki antremana hazırlanan bir sporcunun ısınması gibi malzemeyi daha zor yüklerle hazırlaması şeklinde davranması ve aynı spektrumu daha az bir ömür harcayarak geçmesi şeklinde açıklanabilir.

Tez sonuçları haricindeki durumlar için yapılan bu kısa açıklamadan sonra, Palmgren-Miner'in verdiği iki değişik ömür üzerinde durmak gerekmektedir. Genel olarak her makina parçasının $0.9 \cdot \sigma_k$ 'da 10^3 ömür verdiği ve irdelediğimiz dişli çark için süreli bölgeden sürekli bölgeye geçişin yaşandığı yorulma dayanımı noktasının $3 \cdot 10^6$ ömür vereceği kabul edilmiştir. Zaten teorik olarak yorulma dayanımının altında bir gerilmeyle zorlanan bir parçanın sonsuz ömür vermesi beklenir. Pratikte ise çok çok uzun ömür vereceği beklenmelidir. Sonuç olarak Palmgren-Miner'in verdiği ömür değerleri yorulma sınırının çok çok altında olan bir gerilme genliği için 10^{17} ve 10^{10} mertebelerindedir. Bu örnekte her iki değer de $3 \cdot 10^6$ değerinden yeterince büyük görünmelerine karşın diğer parçaların analizinde log-log eksenlerde bulunan değerler (sürekli bölgede olmasına rağmen) $3 \cdot 10^6$ sınırına daha yakındır.

Teorik olarak sonsuz ömür beklendiğine göre bulunması gereken gerçek ömürün bu sınırdan çok büyük olması gerektiği düşünülürse log-lineer eksenlerde bulunan ömürlerin daha doğru sonuçlar vereceği görülmektedir.

Zaten Bölüm 5.9'da incelenen Ön Diferansiyel – Ayna Dişlisi'nin ömür hesapları sonuçlarında da, gerçek hayatta parçanın çok daha uzun ömür vermesine rağmen log-log eksenlere göre bulunan sonuçların gerçek hayatla uyuşmayan çok çok düşük değerler olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu tezde incelenen her parça log-lineer eksen başlığı altındaki Palmgren-Miner'in verdiği ömür değerlerine göre değerlendirilmelidir.



KAYNAKLAR

Akkurt, M., Kent, M., (1975), Makina Elemanları 1. Cilt, İ.T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Sayı: 106, İstanbul.

Ayaroğlu, M. S., (2002), GTD Model 4x4 Askeri Aracın Aktarma Elemanlarının Birikimli Hasar Durumlarına Göre Ömür Değerlendirmeleri, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Barsom, J. M., Rolfe, S. T., (1999), Fracture and Fatigue Control In Structures, 3. Edition, ASTM, A.B.D.

Collins, J. A., (1993), Failure of Materials in Mechanical Design, 2. Edition, John Wiley & Sons, A.B.D.

Dowling, N. E., (1999), Mechanical Behaviour of Materials, Prentice Hall, 2. Edition, A.B.D.

Kachanov, L. M., (1986), Introduction to Continuum Damage Mechanics, Kluwer Academic Publishers, Hollanda.

Lemaitre, J., (1996), A Course On Damage Mechanics, 2. Edition, Springer, Berlin.

Marin, J., (1966), Mechanical Behaviour of Engineering Materials, Prentice Hall of India, New Delhi.

Tahralı, N., Dikmen, F., (1995), Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik ve Ömür Hesapları, Y.T.Ü. Makina Fakültesi Sayı: 303, İstanbul.

EKLER

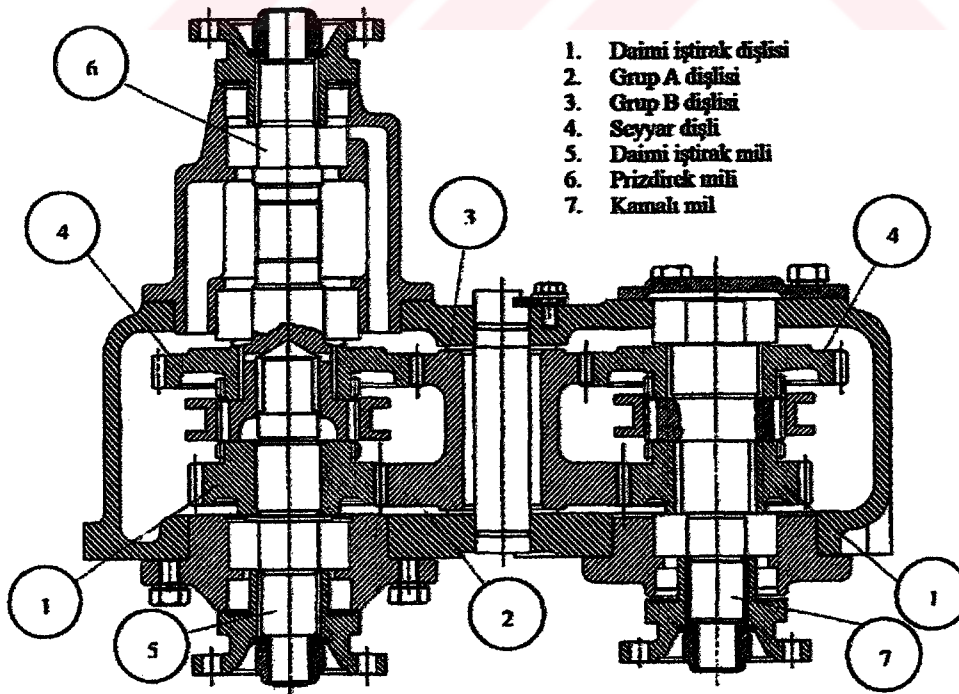
Ek 1 Ömür Hesabı Yapılan Aktarma Elemanlarının Fotoğrafları



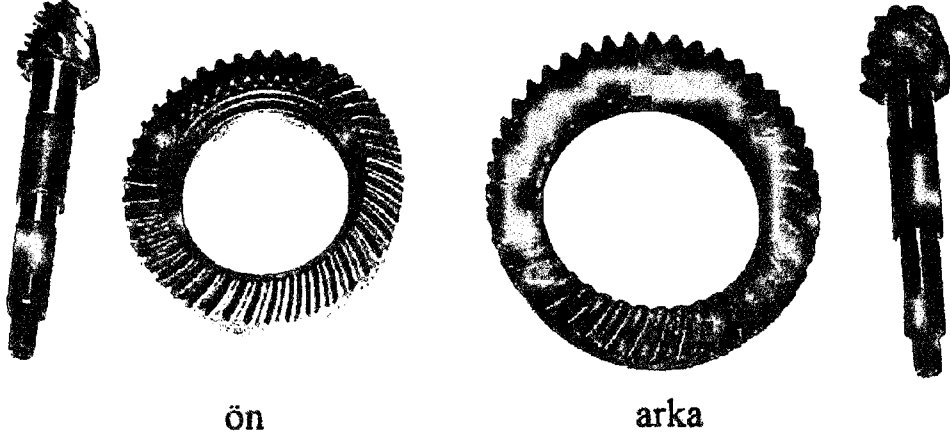
Ek 1 Ömür Hesabı Yapılan Aktarma Elemanlarının Fotoğrafları



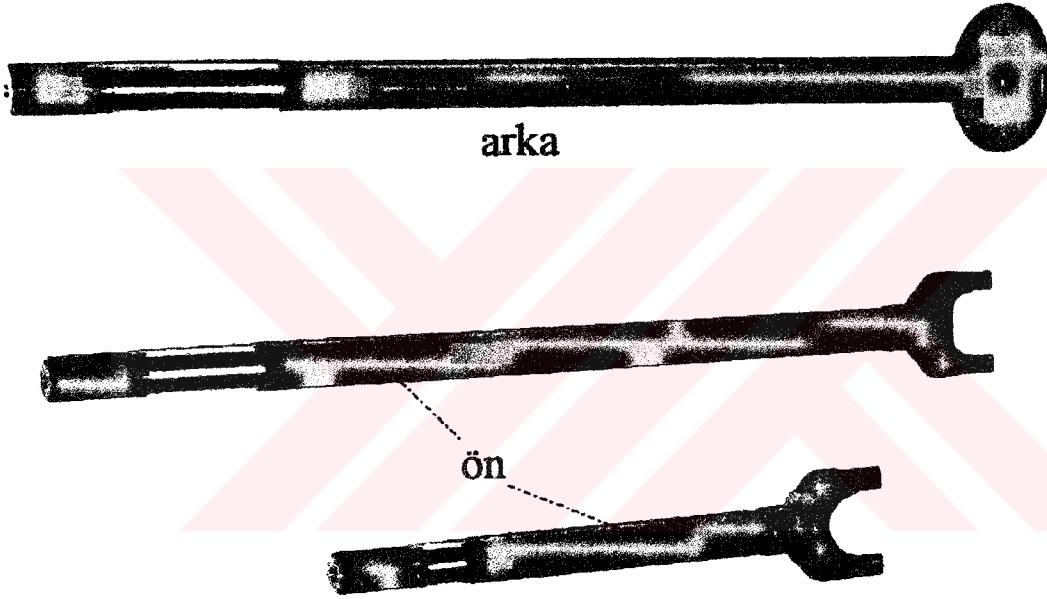
Şekil Ek 1.1 Transfer içerisindeki dişliler ve miller (Ayaroğlu, 2002)



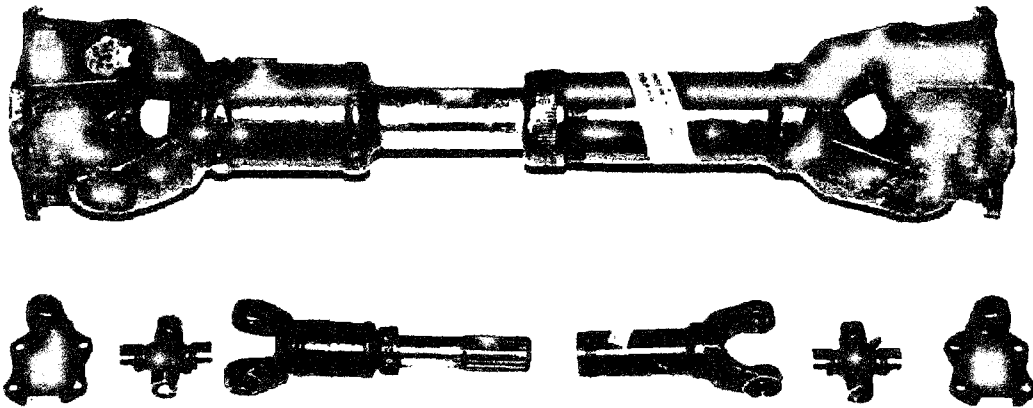
Şekil Ek 1.2 Transfer kutusunun şematik olarak gösterilişi (Ayaroğlu, 2002)



Şekil Ek 1.3 Ön ve arka ayna-mahruti dişlileri (Ayaroğlu, 2002)



Şekil Ek 1.4 Ön ve arka aks milleri (Ayaroğlu, 2002)



Şekil Ek 1.5 Kardan mili (Ayaroğlu, 2002)

ÖZGEÇMİŞ

| | | |
|---------------|------------|---|
| Doğum tarihi | 26.12.1978 | |
| Doğum yeri | İstanbul | |
| Lise | 1993-1996 | İstek Özel Acıbadem Lisesi |
| Lisans | 1996-2000 | Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü |
| Yüksek Lisans | 2000-2002 | Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mak. Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı |

Çalıştığı kurum

2002-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

**YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DÜZENLEME VE İZLENİM MERKEZİ**