

104152

**BİR TİCARİ TAŞIT SÜSPANSİYON ELEMANININ İKİ
EKSENLİ DİNAMİK ZORLAMAYA BAĞLI DENEYSEL VE
HESAPLAMALI ÖMÜR ANALİZİ**

**~~T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU~~
~~DOKÜMAN TAYIN MERKEZİ~~**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh.Yaşar TAŞKIN

Enstitü No : 50 395 10 69

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8.06.2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 28.06.2001

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Murat EREKE

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr.Orhan DENİZ (Y.T.Ü)

Doç.Dr.Doğan GÜNEŞ

HAZİRAN 2001

104152

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince vermiş olduğu destek, tezin oluşmasındaki katkı ve yönlendirmelerinden dolayı Sn.Hocam Prof.Dr.Murat EREKE'ye teşekkür ederim. Deneysel analiz aşamasında Mercedes-Benz Türk A.Ş. Geliştirme Test Merkezi imkanlarının kullanılması konusundaki desteğinden dolayı Sn.Dr.Şevket KOCAAYDIN'a, dinamik test ünitesi ve test yöntemleri konusunda verdiği bilgilerden dolayı Sn.Tuncay AYKAÇ'a da ayrıca teşekkür ederim.

Haziran 2001

Yaşar TAŞKIN



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	4
2.1. Taşıtlara Etki Eden Kuvvetler.....	4
2.1.1. Tekrarlı Dinamik Kuvvetler.....	4
2.1.1.1. Yol Pürüzlülüğü.....	4
2.1.1.2. Dinamik Tekerlek Yükü.....	5
2.2. Wöhler Eğrisi ve Sürekli Mukavemet.....	5
2.3. Yorulma Dayanımı ve Ömür.....	9
2.4. Palmgren-Miner Kuralıyla Ömür Hesabı.....	13
2.5. Yol Datası İşleme Yöntemleri.....	17
2.5.1. Level-Crossing.....	18
2.6. Yükleme Modelleri.....	18
2.6.1. Yükleme Kollektifinin Belirlenmesi.....	18
2.6.2. Yükleme Modelleri.....	19
2.6.2.1. Blok-Program Yükleme Modeli.....	21
2.7. Yaylar ve Genel Özellikleri.....	23
2.7.1. Yaprak Yaylar.....	24
3. SÜSPANSİYON ELEMANI.....	26
3.1. Monte Edildiği Taşıt Bilgileri.....	26
3.2. Yay Elemanı.....	26
3.2.1. Taşıta Montaj Şekli.....	26
3.2.2. Yay Malzemesinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri.....	28
3.2.3. Genel Özellikleri.....	29
3.2.3.1. Yay Oluşturan Parçalar.....	29
3.2.3.2. Geometrik özellikleri.....	30
3.3. Etki Eden Kuvvetler.....	31
3.4. Gerilme Değerlerini Hesaplama Yöntemi.....	32
4. DENEYSEL ANALİZ.....	34
4.1. Yol Datası Bilgileri.....	34
4.1.1. Datanın Kaydedildiği Pist.....	34

4.1.2. Data Kaydetme Yöntemi.....	35
4.1.3. Dataların İşlenmesi ve Yükleme Kollektifi Oluşturulması.....	38
4.2. Kuvvet Uygulama Yönlerinin Belirlenmesi.....	39
4.2.1. İki eksenli Yükleme.....	41
4.2.2.1. Z-Yönündeki Yükleme Değerlerinin Belirlenmesi.....	42
4.2.2.2. X-Yönündeki Yükleme Değerlerinin Belirlenmesi.....	43
4.3. Blok-Program Yükleme Değerlerinin Belirlenmesi.....	44
4.4. Test Düzenegi ve Test	48
4.4.1. Yükleme Frekansının Belirlenmesi.....	49
4.4.2. Test Süresinin Hesaplanması.....	51
4.5. Dinamik Test Ünitesi.....	52
4.5.1. Hidropuls Test Düzenegi.....	52
4.5.1.1. Hidrolik Güç Ünitesi.....	52
4.5.1.2. Dağıtıcı	52
4.5.1.3. Hidrolik Silindirler.....	55
4.5.1.4. Kontrol Cihazı	56
4.5.1.5. Sinyal Dönüştürücü	58
4.5.1.6. Kontrol Paneli.....	58
4.5.1.7. Isı Değiştirici	59
4.5.1.8. Soğutma Ünitesi	59
4.5.2. Yazılım.....	60
5. HESAPLAMA YÖNTEMİYLE ANALİZ.....	62
5.1. Malzemeye ait Wöhler Eğrisinin Elde Edilmesi.....	62
5.2. Süspansiyon Elemanına Etki Eden Gerilme Değerlerinin Hesaplanması....	65
5.3. Palmgren-Miner Kuralının Uygulanması.....	67
6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME.....	73
6.1. Deneysel Analiz Sonuçları.....	73
6.1.1. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	74
6.1.2. Numune Parçada Kırılma Oluşan Bölge.....	75
6.2. Hesaplama Yöntemiyle Analiz Sonuçları.....	76
6.3. Deneysel Analiz ve Hesap.Yönt. Analiz Sonuçlarının Tartışılması.....	79
KAYNAKLAR.....	82
EKLER.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	92

KISALTMALAR

MB	:	Mercedes Benz A.G.
SAE	:	Society of Automotive Engineers
FRF	:	Frequency Responce Function
RPC	:	Remote Parameter Control
LVDT	:	Lineer Variable Transducer
PIDF	:	Proportional,Integral, Derivate, Feed forward



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 : Yay Malzemesinin Mekanik Özellikleri.....	27
Tablo 3.2 : Yay Malzemesinin Kimyasal Özellikleri.....	27
Tablo 4.1 : Her Seviyedeki Yükleme Sayısı.....	39
Tablo 4.2 : Z-Yönünde Yükleme Kollektifi Değerleri.....	43
Tablo 4.3 : X-Yönünde Yükleme Kollektifi Değerleri.....	44
Tablo 4.4 : Bir Bloкта Bulunan Yükleme Sayısı.....	48
Tablo 4.5 : Bir Bloкта Z-Yönünde Yükleme Sıralaması ve Kuvvet Değerleri.....	46
Tablo 5.1 : Frenleme Sonucu Yaya Etki Eden Kuvvetler.....	66
Tablo 5.2 : Toplam Gerilme Değerleri.....	67
Tablo 5.3 : Toplam Gerilmenin Kopma Gerilmesine Oranları.....	68
Tablo 5.4 : İkinci Wöhler Eğrisine Göre Hasar Oranları.....	71
Tablo 6.1 : Test Sonuçları.....	73
Tablo 6.2 : Güvenirliğin Normal Dağılıma Göre Belirlenmesi.....	75
Tablo 6.3 : Birinci ve İkinci Wöhler Eğrilerine Göre Hesaplanan Ömür Değ.....	79
Tablo A.1 : Bir Bloкта Z-Yönünde Yükleme Sıralaması ve Kuvvet Değerleri.....	83
Tablo B.1 : Birinci Wöhler Eğrisine Göre Hasar Oranları.....	90

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Dinamik Tekerlek Yüğü.....	5
Şekil 2.2 : Yükleme Çeşitleri.....	6
Şekil 2.3 : Ömür Dağılımı.....	6
Şekil 2.4 : Wöhler Eğrisi.....	7
Şekil 2.5 : Wöhler Eğrisi (logaritmik eksenle).....	8
Şekil 2.6 : σ_m ile σ_{gs} arasındaki ilişki.....	8
Şekil 2.7 : σ_m ile σ_{gs} arasındaki ilişki.....	8
Şekil 2.8a : Dinamik Tekerlek Yüğü.....	9
Şekil 2.8b : Yükleme Kollektifi.....	9
Şekil 2.9 : Yükleme Kollektifi (genel halde)	10
Şekil 2.10 : Yükleme Kollektifi Formları.....	11
Şekil 2.11 : Ömür ve Gerilme Genliği Dağılımı.....	12
Şekil 2.12 : Güvenirlik.....	13
Şekil 2.13 : Ömür Hesabı Uygulaması.....	15
Şekil 2.14 : Yükleme Gerilmesi ve Yorulma Ömür Dağılımı arasındaki ilişki....	17
Şekil 2.15a : Level-Crossing Yöntemi.....	18
Şekil 2.15b : Yol Datası Dağılımı.....	18
Şekil 2.16 : Üç nolu noktaya ait tasarım ve test kollektifi.....	19
Şekil 2.17 : Yükleme Konusunda Temel Kavramlar.....	20
Şekil 2.18 : Yükleme Modelleri.....	21
Şekil 2.19 : Blok-Program Genel Şekli.....	22
Şekil 2.20 : Doğrusal yay karakteristiği.....	23
Şekil 2.21 : Yay Boyunca Gerilme Dağılımları.....	25
Şekil 3.1 : Numune Parça.....	26
Şekil 3.2 : Yayın Taşıta Montaj Görünümü.....	27
Şekil 3.3a : Test Parçasının Taşıta Montaj Şekli ve Diğer Elemanlar.....	28
Şekil 3.4 : Yaya etki eden kuvvetle yay deplasmanı arasındaki ilişki.....	29
Şekil 3.5 : Parabol Yaprak Yay Oluşturan Parçalar.....	30
Şekil 3.6 : Yayın Geometrik Özellikleri.....	31
Şekil 3.7 : Ön Aks Yayına Etki Eden Kuvvetler.....	32
Şekil 4.1 : Data Kaydedilen Bozuk Yol Pisti.....	36
Şekil 4.2a : Data Kaydetme Yöntemi.....	37
Şekil 4.2b : Deplasman Sensörü Çalışma Prensipleri.....	37
Şekil 4.3 : Yay Deplasmanı ile Yükleme Tekrar Sayısı Arasındaki İlişki.....	40
Şekil 4.4 : Taşıta Z ve Y-Yönünde Etki Eden Kuvvetler.....	41
Şekil 4.5 : Asimetrik Yaprak Yayların Frenleme Etkisindeki Şekli.....	41
Şekil 4.6 : Z-Yönünde Bir Blok Yükleme Sıralamasının Grafik Gösterimi.....	47
Şekil 4.7 : Kuvvetlerin Aparat Yardımıyla Uygulanması.....	49
Şekil 4.8a : Test Aparatı ve Kuvvet Uygulama Noktaları.....	50
Şekil 4.8b : Aparatın Test Düzenine Montaj Görünümü	50
Şekil 4.9 : Dinamik Test Ünitesi Genel Görünümü.....	53

Şekil 4.10	: Test Ünitesi Şematik Gösterimi.....	54
Şekil 4.11	: Hidrolik Ünitenin Genel Görünümü.....	52
Şekil 4.12	: Dağıtıcı (manifold).....	55
Şekil 4.13	: 100 kN'luk Hidrolik Silindir.....	55
Şekil 4.14	: 25 kN'luk Hidrolik Silindir	56
Şekil 4.15	: Test Düzenegi, Hidrolik Silindirler ve Aparatın Görünümü.....	57
Şekil 4.16	: Kontrol Cihazları.....	58
Şekil 4.17	: Sinyal Dönüştürücü.....	58
Şekil 4.18	: Kontrol Paneli.....	59
Şekil 4.19	: Soğutma Ünitesi.....	59
Şekil 4.20	: Isı Değiştirici.....	59
Şekil 5.1	: Wöhler Eğrisi Çizilmesi.....	63
Şekil 5.2	: Katsayılarla Birlikte Wöhler Eğrisi Çizilmesi.....	65
Şekil 5.3	: Birinci ve İkinci Wöhler Eğrileri	69
Şekil 5.4	: Palmgren-Miner Kuralının Uygulanması.....	70
Şekil 5.5	: İkinci Wöhler Eğrisine göre Hasar Oranları.....	72
Şekil 6.1	: Test Sonuçlarının Referans Ömür Değerleriyle Karşılaştırılması.....	74
Şekil 6.2	: Kırık Yay Parçaları.....	76
Şekil 6.3a	: Numune Parça ve Kırık Yay.....	77
Şekil 6.3b	: Kırığın yay üzerindeki konumu.....	77
Şekil 6.4	: Kırığın yayın Taşıta Montajına Göre Konumu.....	77
Şekil 6.5a	: Kırık Parça.....	78
Şekil 6.5b	: Kırık Detayı.....	78
Şekil 6.5c	: Kırık Detayı.....	78
Şekil 6.6	: Wöhler Eğrileri ve Test Sonuçları Dağılımı Arasındaki İlişki.....	80
Şekil 6.7	: Gerçek Wöhler Eğrisi ve Dağılım Arasındaki İlişki.....	80
Şekil A.1	: Z-Yönünde Bir Blok Yükleme Sıralamasının Grafik Gösterimi.....	84
Şekil A.2	: Random Yük.....	85
Şekil A.3	: Sistemin Cevabı.....	86
Şekil A.4	: Sistemin Transfer Fonksiyonu.....	87
Şekil A.5	: Birinci Seviyenin Yükleme Fonksiyonu.....	88
Şekil A.6	: Hidrolik Silindirlerin Yükleme Cevabı.....	89
Şekil B.1	: Birinci Wöhler Eğrisine Göre Hasar Oranları.....	91

SEMBOL LİSTESİ

k	:	Yay Katsayısı
δ	:	Yay Şekil Değiştirmesi
F	:	Yükleme Kuvveti
F_{Zstat}, F_{XStat}	:	Statik Kuvvet
F_{ZDin}, F_{XDin}	:	Dinamik Kuvvet
F_{ZOrt}, F_{XOrt}	:	Ortalama Kuvvetler
F_{ZMaks}, F_{XMaks}	:	En Büyük Kuvvetler
F_{ZMin}, F_{XMin}	:	En Küçük Kuvvetler
f	:	Test Frekansı
n, N	:	Çevrim Sayısı
N_{10}	:	% 10 Güvenirlilikteki Ömür Değeri
G_O	:	Ön Aks Yüğü
g_O	:	Yaylanmayan Elemanların Ağırlığı
t	:	Zaman
σ	:	Gerilme
σ_K	:	Kopma Gerilmesi
σ_{AK}	:	Akma Gerilmesi
σ_m	:	Ortalama Gerilme
σ_g	:	Genlik Gerilmesi
σ_{gS}	:	Sürekli Mukavemet Sınırı Gerilme Değeri
$\sigma_a, \sigma_{\bar{u}}$	:	Alt Gerilme, Üst Gerilme
σ_{Stat}	:	Statik Gerilmesi
σ_{Zdin}	:	Dinamik Gerilmesi
σ_{Fren}	:	Frenleme Gerilmesi
σ_T	:	Toplam Gerilmesi
b	:	Yay Genişliği
l_a, l_b	:	Yay Kolu Uzunlukları
h_0	:	Yayın Orta Bölgesindeki Kalınlığı
h_a	:	Yayın Monte Edildiği Yerin Zeminden Yüksekliği
D	:	Hasar Oranı
L	:	Ömür (Çevrim Sayısı)
C_L	:	Yükleme Katsayısı
C_G	:	Boyut Katsayısı
C_S	:	Yüzey Katsayısı
P_S	:	Güvenirlilik Oranı
D_b	:	Frenleme Etkisinde Hasar Oranı
D_s	:	Düz Yolda Kullanımın Hasar Oranı
D_c	:	Viraj Etkisinin Hasar Oranı
D_T	:	Test (Yükleme) Kollektifinin Hasar Oranı

BİR TİCARİ TAŞIT SÜSPANSİYON ELEMANININ İKİ EKSENLİ DİNAMİK ZORLAMAYA BAĞLI DENEYSEL VE HESAPLAMALI ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, bir ticari taşıtta kullanılması planlanan parabol yaprak yayın deneysel ve hesaplama yöntemiyle ömür analizi yapılmıştır. Deneysel analizde numune parçaların dayanım yeterliliğinin belirlenmesi amacıyla dinamik test ünitesinde ömür testleri gerçekleştirilmiştir.

Yol dataları MB-Evobus ölçüm ekibi tarafından Stuttgart'ta bulunan bozuk yol pistinde kaydedilmiştir. Prototip olarak üretilmiş taşıt üzerinde yay deplasman dataları kaydedilmiştir. Datalar, aynı ekip tarafından Level-Crossing yöntemiyle işlenmiştir ve bu datalardan yükleme kollektifi belirlenmiştir. Parçaların dayanım kriteri firma (MB) deneyimi olarak 2.500 bozuk yol km'si olarak belirlenmiştir. Kısa süreli kaydedilen datalar dayanım kriterine göre arttırılmıştır.

Deneysel analizde aynı anda ve aynı frekansta iki ekseninde dinamik yükleme yapılmıştır. Z-ekseninde, taşıt ağırlığı ve yükünden kaynaklanan statik kuvvet ve yol pürüzlülüğünden kaynaklanan dinamik kuvvet uygulanmıştır. X-ekseninde, frenleme kuvveti simüle edilmiştir. Kuvvet değerleri belirlenirken yay deplasmanı ile yay etki eden kuvvet arasındaki lineer ilişkiden yararlanılmıştır.

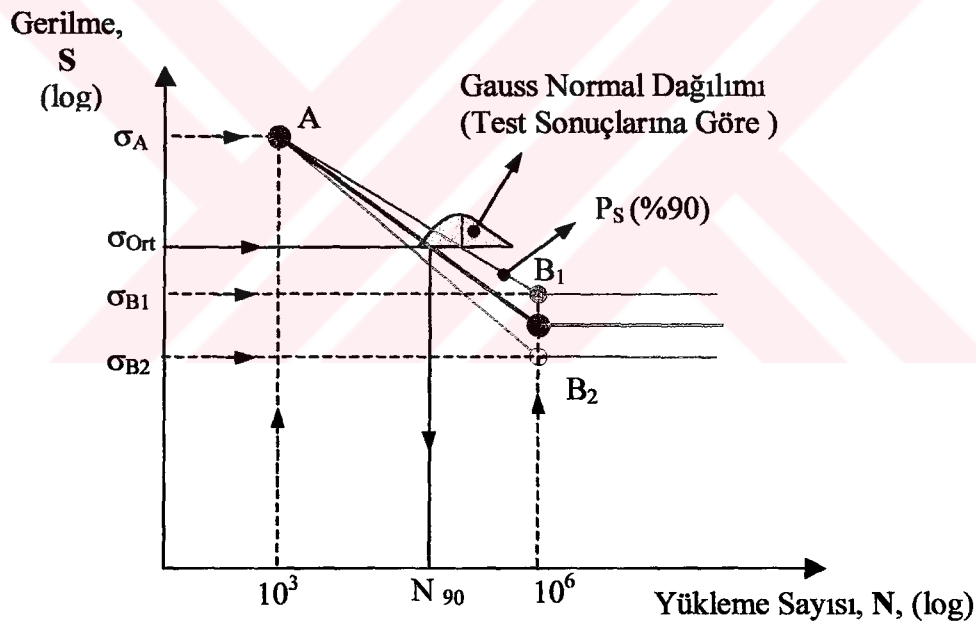
Blok-Program yükleme modeli tekrarlanabilir ve kolay tanımlanabilir olduğu için tercih edilmiştir. Toplam yol dataları, genlik değeri ve yükleme sayısı olarak birbirinin eşdeğeri olan elli blok'a ayrılmıştır. Her bir blok, içindeki yükleme seviye sayısı onbeş olarak uygulanmıştır. Yükleme, orta seviye bir genlik değeri olan 7inci yükleme seviyesinden başlatılmıştır. Bir blok içinde artan, azalan, tekrar artan ve tekrar azalan genlik değerleri olacak şekilde her bir yükleme seviyesi iki kere kullanılmıştır. Böylece yükleme seviyeleri sırasında genlik farkı küçük tutulmuştur.

Test düzeneği, taşıt geometrisi gözönünde bulundurularak hazırlanmıştır. Deneysel analizde toplam dört numune test edilmiştir. Numunelerin dayanım kriterinde hasar oluşmadığı görülmüştür. Hangi yükleme sayısında hasar oluşacağının belirlenmesi amacıyla testlere devam edilmiştir. Tüm numuneler, ikinci yaprağın aynı bölgesinden kırılmıştır. Kırık detayında yapılan incelemede yorulma kırılması başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve gevrek kırılma bölgeleri rahatlıkla görülebilmektedir. Numuneler, 82.224 ile 129.046 yükleme sayıları aralığında kırılmıştır. Test sonuçları Gauss normal dağılım yöntemine göre değerlendirilmiştir.

Hesaplama yöntemiyle analizde numune parçaların dayanım ömürleri Lineer Kümülatif bir yöntem olan Palmgren-Miner Hipotezine göre hesaplanmıştır. Bu hesaplama sırasında kullanılan Wöhler eğrisi bir yaklaşıma göre çizilmiştir. Üç ayrı katsayının hesaba katılmasıyla Wöhler eğrisinin hassasiyetinin artırılması sağlanmıştır.

Her yükleme seviyesinde yay elemanı üzerinde oluşan gerilme değerleri statik, dinamik ve frenleme kuvvetleri gözönüne alınarak hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme değerleri ve yaklaşık olarak çizilen Wöhler eğrileri aynı S-N grafiğine çizilmiştir. Şekil 1'de A ve B₁ noktaları birinci Wöhler eğrisi, A ve B₂ noktaları arasında ikinci Wöhler eğrisidir. Aynı şekil üzerinde deneysel analiz sonuçları normal dağılım şeklinde çizilmiştir. Wöhler eğrilerinin % 90 güvenirlilikte olan bölgeden geçirilerek çizildiği kabul edilmektedir. Hesaplama yöntemiyle yapılan analiz sonucuna göre 34.260 yükleme sonunda numunelerin kırılması beklenmelidir.

Test edilen numuneler, hesaplama yöntemiyle elde edilen dayanım ömrü değerine göre belirlenen ömür değerinden daha fazla yükleme sayısında hasar oluşmuştur. Gerçek Wöhler eğrisinin daha sağda ve yukarıda olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca test numune sayısının daha fazla olması durumunda normal dağılımı daha gerçekçi çizilebilirdi.



Şekil 1. Birinci ve İkinci Wöhler eğrisi, Test sonuçları dağılımı, gerçek Wöhler eğrisi (tahmini konumu).

Yorulma ömrüne yönelik teorik ve deneysel analizlerin birbirine yakın ve gerçekçi sonuçlar verebilmesi için deneysel çalışmalarda test ve numune sayısının yeterince fazla olması gerektiği gerçeği bu çalışma ile de doğrulanmıştır.

THE EMPIRICAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF A COMMERCIAL VEHICLE SUSPANSION ELEMENT UNDER 2-D DYNAMIC LOAD CONDITIONS.

SUMMARY

In this study, the durability analysis of a parabolic leaf spring is done through the empirical and theoretical methods. In the empirical method, the specimens are tested in the dynamic test system in order to define their durability life.

The road data acquisition is performed by the MB Evobus measurement group on the bad road in Stuttgart. The leaf spring displacement data are taken from the prototype vehicle. Data are analyzed through the Level-Crossing method and the loading collective is defined. According to the previous examples, the durability life of the subject parts are defined to be 2.500 bad road km. The acquired data for a short term sample road are extrapolated for the whole durability criteria.

During the empirical analysis, dynamic loading in two dimension are done at the same time and at the same frequency. In Z axis, the static load caused by the weight and the load of the vehicle and the dynamic load caused by the road conditions are applied. In X axis, the brake load is simulated. In order to calculate the load values, the linear correlation between the load and the displacement of the leaf spring is used.

The block program loading method is chosen since it is much more repeatable and easily definable. Total road data are divided into 50 blocks that are equivalent in amplitude and loading cycles. Each block consists of 15 different load levels. The loading starts from an average amplitude level which is the 7th level. Each block is combined from these 15 levels starting from 7th level then other levels used twice in ascending, descending and then again ascending and descending order. Thus, the difference between the amplitude of the loading cycles are kept in small values.

The test rig is prepared according to the vehicle geometry. In empirical analysis, 4 specimens are tested. None of the specimens showed damage within the test criteria 2.500 km. In order to find out in which km the damage will occur, the test continued. All the specimens are broken at the same region of the second leaf. Through the examination of the crack region, the crack initiation, propagation and plastic deformation regions are easily detectable. The specimens are broken between 82.224 and 129.046 loading cycles. The test results are evaluated according to the Gauss normal distribution method.

In numerical analysis method, the durability life values are calculated with the Palmgren-Miner Hypothesis which is a linear cumulative method. In this method, the

Wöhler curve is drawn with an approach. By including three different constants, the Wöhler curve sensitivity is increased.

In each loading level, the stress values are calculated according to the static, dynamic and braking forces. The calculated stress values and the Wöhler curves are drawn in the same S-N graphic. In picture 1, the line between A and B₁ is the first Wöhler curve and the line between A and B₂ is the second one. On the same picture, the test analysis results are drawn in a normal distribution. It is accepted that the Wöhler curve is drawn with a % 90 reliability. According to the analysis results of the calculation method, the specimens are expected to fail at the end of 34.260 cycles.

The test specimens have a durability life which is much more higher than the calculated one. The real Wöhler curve is accepted to be on the right and up compared to the drawn curves. Also, having more test data will provide to have the normal distribution more realistic.

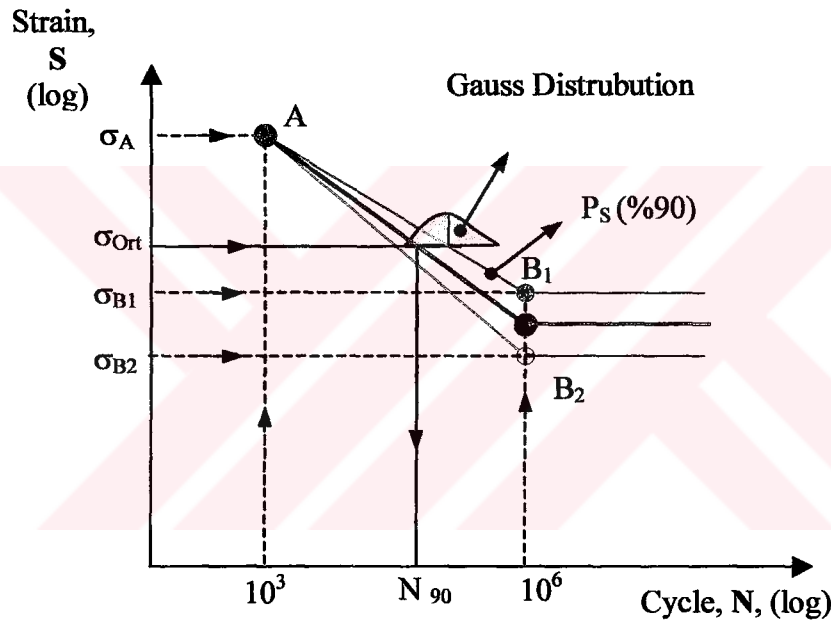


Figure 1. First and second Wöhler curve. The distribution of the test results, real Wöhler curve (expected position)

It is verified with this study that in order to have more realistic and comparable results between theoretical and empirical analysis, it is obviously necessary to have more specimens to be tested.

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde insanoğluna özgürlük ve konfor hissini veren en önemli araçlardan biri de hiç şüphesiz taşıtlardır. İnsanoğlu farklı amaçlarla taşıtlara büyük miktarda mali kaynak ayırmaktadır. Pazarın büyük olması firmalar arasında rekabeti beslemektedir ve rekabetin sonucunda da kalite artmaktadır. Pazar beklentileri sonucu, teknik elemanlar her geçen gün daha konforlu, daha estetik, daha az yakıt tüketen, daha dayanıklı ve çevreyle daha barışık taşıtlar tasarlamak göreviyle karşı karşıya kalmaktadırlar. Taşıt parçalarının tasarımında kullanılan klasik yöntemde, parça üzerine etki edebilecek en büyük yük değerlerine göre hesaplama yapılmaktadır. Eğer parça dinamik yüklemeye maruz kalıyorsa bir emniyet katsayısı ilavesiyle parça boyutları belirlenmektedir. Fakat tekrarlı yüklemelere maruz parçalarda statik sınırların altındaki yükleme değerlerinde dahi hasarlamalar olduğu bilinmektedir. Hasara sebep olan kırılma, yorulma kırılması olarak tanımlanmaktadır.

Yorulma kırılması teriminin ilk defa su değirmenlerinin tasarımından sorumlu Poncelet tarafından kullanıldığı iddia edilmektedir [3]. Wöhler, sabit genlikli testler yaparak malzemelere ait karakteristik yorulma eğrilerini (kendi ismiyle anılan) elde etmiştir ve ayrıca değişik numuneler için test metodları geliştirmiştir. Wöhler, eğilme zorlanmasında sürekli mukavemet sınırının akma dayanımının yarısından fazla olamayacağını göstermiştir. Uçak sanayisinin gelişmesi özellikle 1930-40'lı yıllarda yorulma konusunda yapılan çalışmaların artmasına sebep olmuştur. Almanya'da Dr.Gassner yükleme sıralarının etkisini araştırdı, 1939'da programlı ve değişken genlikli yorulma testlerini (Blok-Program) başlatmıştır. 1945-1956 yılları arasında ömür tahmini ve özellikle uçak sanayiinde yorulma testleri metodları ile ilgili olarak iki önemli makale yayınlanmıştır. Birincisi, Palmgren'in orijinal teorilerinin devamı olan Miner'ın kümülatif hasar hipotezi ile ilgili makalesidir, ikincisi ise

Dr.Gassner'ın blok programı tartıştığı makalesidir. 1956'dan günümüze kadar yorulma kırılması ile ilgili çok sayıda makale yayınlanmıştır [3].

Dinamik zorlamaya maruz taşıt parçalarının tasarımınn uygunluğunun belirlenmesinde iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi  zel olarak hazırlanmış bozuk yol pistinde dayanım testleri yapmak, ikincisi ise laboratuvar ortamında gerçek yol şartlarında etki eden yükleri simüle eden dayanım testleri uygulamaktır. Bozuk yol pistindeki dayanım testlerinde dinamik yükler etki eden taşıt parçaları, ön tasarım olarak imal edilerek taşıt üzerine monte edilir ve yol testine tabi tutulur. Bu yöntemde numune üzerinde oluşacak hasarın belirlenmesine kadar bir bekleme süresi bulunmaktadır. Hasar tipi ve şeklinin belirlenmesi sonucu numune parçanın imalat yönteminde ve gerekiyorsa tasarımında iyileştirme yapılmaktadır. İkinci adımda iyileştirme yapılan numune aynı şartlarda (kullanım, yol karakteri, hız, frenleme, vb.) tekrar denenmektedir. Bu tekrarlanan tasarım ve iyileştirme adımları tasarımı hazırlayan kişinin yeteneğine ve tasarlanacak parça hakkında elde bulunan bilgilere bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Bu yöntemle yapılan testlerin maliyeti çok yüksektir. Ayrıca testlerin uzun sürede gerçekleşmesi, test maliyetinin artmasının dışında taşıtın pazarlanması açısından belirlenmiş olan stratejik zamanda taşıt üzerindeki parçaların tasarım ve testlerinin bitirilmemesi riskini doğurmaktadır. Bu risk karşısında iki alternatif bulunmaktadır; birincisi testleri sonuçlandırılmamış parçalar üzerinde bulunan bir taşıtı pazarlama stratejisi açısından gerekli olduğu için satışa sunmaktır. Bu alternatifin dezavantajı müşterinin belirli bir kullanımı sonrasında garanti kapsamında bulunan parçalarda hasar oluşma ihtimalidir. Müşteri taşıtlarında hasarlı parçaların değiştirilmesinin maliyeti çok yüksektir ve ayrıca firma itibarı açısından olumsuz kanaat oluşurmaktadır. İkinci alternatif ise testler tamamlanıncaya kadar taşıtın satılmasını ertelemektir. Bu alternatifin dezavantajı ise pazar beklentilerine zamanında cevap verilememesi üzerine potansiyel müşterinin diğer taşıtları tercih etmeleri ile toplamda hedeflenen satışın elde edilememesidir. Sonuçta test s resinin uzaması firmaların hedeflerine büyük zararlar verebilmektedir ve ayrıca firmanın prestij kaybına da sebep olabilmektedir.

Bu dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla günümüzde laboratuvar ortamında gerçek yol şartlarında etki eden yükleri hızlandırarak simüle eden yorulma

ömür testleri yaygın olarak uygulanmaktadır. Tez kapsamında, numune parçalara dinamik test ünitesinde yorulma ömür testleri uygulanmıştır. Bozuk yol pistindeki testler yaklaşık 3 ayda sonuçlandırılabilirken, dinamik test ünitesinde bu süre yaklaşık 1 haftaya inmektedir. Ayrıca günlük çalışma saatlerini arttırarak (vardiyalı çalışma) bu süreyi daha da kısaltmak mümkündür.

Dinamik yüklemelere maruz parçaların dayanım ömürlerinin hesaplanması konusunda Palmgren-Miner Kuralı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hesaplama sonucunda elde edilen değerler ile test sonuçları arasında büyük farklar olabilmektedir. Daha iyi sonuç veren bir yaklaşım olmadığı için halen en iyi ömür hesabı yöntemi kabul edilmektedir [3].

Testleri yapılacak numuneler, Mercedes Benz Türk A.Ş. Aksaray Kamyon Fabrikasında üretilmesi planlanan hafif sınıf bir kamyonu ait ön aks yaylarıdır. Ülkemizde faaliyet gösteren bir yan sanayi firmasında bu yayların gerekli dayanım şartlarını sağlayacak şekilde üretilmesi sonucunda taşıt üretim maliyetinin azaltılması hedeflenmektedir.

Tezin içeriği kısaca aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır :

İkinci bölümde, tez kapsamında kullanılan kavramlar ve yapılan hesaplamalarda kullanılacak yöntem ve formüllerin hakkında bilgiler bulunmaktadır.

Üçüncü bölümde, asimetric parabol yaprak yayın özellikleri hakkında bilgiler bulunmaktadır.

Dördüncü bölümde, deneyler sırasında kullanılan yükleme değerlerinin belirlenmesi için yapılan hesaplamalar, test düzeneğinin hazırlanmasında kullanılan bilgi ve yaklaşımlar ve dinamik test ünitesi hakkında bilgi bulunmaktadır.

Beşinci bölümde, numune yayın dayanım ömrü ile ilgili olarak Palmgren-Miner kuralının uygulandığı hesaplama kısmı bulunmaktadır.

Altıncı bölümde ise deneysel analizle elde edilen sonuçlarla hesaplama ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar hakkındaki yaklaşım ve değerlendirme bulunmaktadır.

2. TEORİK BİLGİLER :

2.1. Taşıtlara Etki Eden Kuvvetler :

Bir taşıta etki eden kuvvetler statik kuvvetler ve tekrarlı dinamik kuvvetler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Taşıta etki eden kuvvetlerin büyüklüğünün önemi kadar, kuvvetlerin tekrar sayısı da önemlidir. Kuvvetleri periyodik olarak değiştirmek ve değişimin sayısını yeter derecede arttırmakla bir malzemeyi statik sınırların çok altında hasarlamak mümkündür. Statik kuvvetler, değişken olmayan kuvvetler ile aracın ömrü boyunca en fazla 5.000 defa tekrarlanan kuvvetlerdir. Statik kuvvetler, taşıtın kendi ağırlığı ve yükü, fren ve kalkış kuvvetleri, viraj kuvvetleri, burulma kuvvetleri, darbe kuvvetleri, çekici ile römork arası bindirme kuvvetleri olarak sayılabilir. Tekrarlı dinamik kuvvetler ise $2-5 \cdot 10^6$ tekrar sayısından başlayan yol pürüzlülüğü, lastik çevresinin düzgünsüzlüğü gibi sebeplerle ortaya çıkan kuvvetlerdir [2].

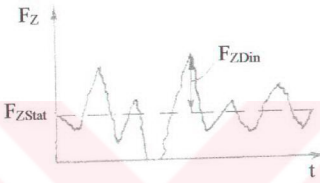
2.1.1 Tekrarlı Dinamik Kuvvetler

2.1.1.1 Yol Pürüzlülüğü

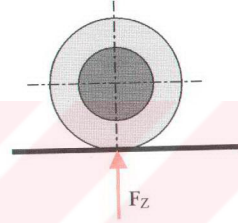
Dinamik yükler tekrar sayısının fazla olmasından dolayı yorulma mukavemeti açısından statik yüklere göre ön plana çıkarlar. Bu kuvvetlerin sebebi yol pürüzlülüğü ve lastik çevresinin düzgünsüzlüğüdür. Yoldan gelen pürüzler belirli bir yol için, teorik olarak deterministik olarak saptanabilir. Fakat bunun bir anlamı yoktur ve bir yolda bulunan sonuçtan diğer yollardaki sonuç hakkında hiçbir şey söylenemez. Pratikte yolları bir istatistiki olay olarak gözönüne almak çok daha faydalıdır.

2.1.1.2. Dinamik Tekerlek Yüğü

Dinamik tekerlek yüğü, taşıt ağırlığından gelen statik bir bileşen ile yol pürüzlüğünün sebep olduğu titreşimlerden meydana gelen dinamik bir bileşenden meydana gelir (Şekil 2.1). Dinamik bileşenin (F_{ZDin}) negatif değeri, mutlak olarak statik yükten (F_{ZStat}) büyük olduğunda toplam tekerlek yüğü sıfırdan küçük olacaktır. Şekil 2.1'de statik yük ile dinamik yük arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.1.Dinamik Tekerlek Yüğü

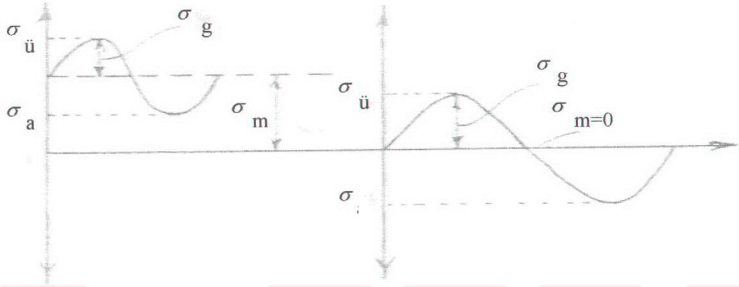


2.2. Wöhler Eğrisi ve Sürekli Mukavemet Sınırı

Klasik hesaplama yönteminde kullanılan statik hasarlanma gerilme değerinin çok altındaki gerilme değerleri tekrarlı olarak yüklenmeleri durumunda hasara sebep olmaktadır. Periyodik olarak eğilmeye ve burulmaya zorlanan malzeme belirli şartlar altında bir yük tekrarıdan sonra hasarlanır. Deneyler göstermiştir ki, yükü, belirli bir ortalama değerde (σ_m) sabit tutup, onun etrafında sabit genlikler (σ_g) halinde periyodik olarak değiştirmek ve değişim sayısını yeter derecede arttırmakla bir malzemeyi statik sınırların çok altında hasar oluşturmaktadır. Taşıt parçalarının dizaynında yorulma dayanımı bu bakımdan çok önemlidir.

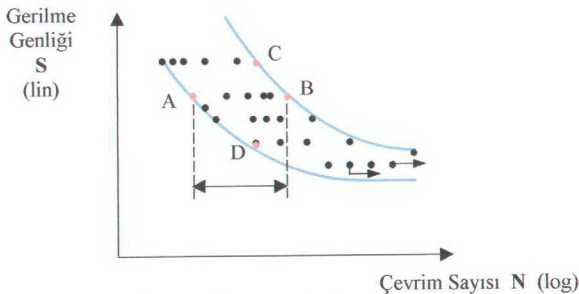
Malzemeye ait yorulma dayanımı Wöhler Yöntemiyle bulunur. Bu yöntem bir dizi deneyi gerektirir. Deneyde önce bir ortalama genlik gerilmesi seçilir ve bir deneme grubunda bu şiddette olmak üzere, bir çok harmonik titreşimler bindirerek denemeler yapılır (Şekil 2.2). Test sonucunda malzemenin bu tip zorlanmada kaç adet değişimi kaldırdığı saptanır. Bütün testlerden elde edilen sonuçlar bir grafikte işaretlenir (Şekil 2.3). Yorulma kırılmalarının çizildiği bu grafiğe S-N diyagramı

denilmektedir. Y-ekseninde gerilme değerleri ve X-ekseninde ise hasara sebep olan gerilmelerin uygulama sayısı (veya çevrim) olmak üzere grafik çizilir. Gerilme S ile çevrim sayısı N ile sembolize edilir.



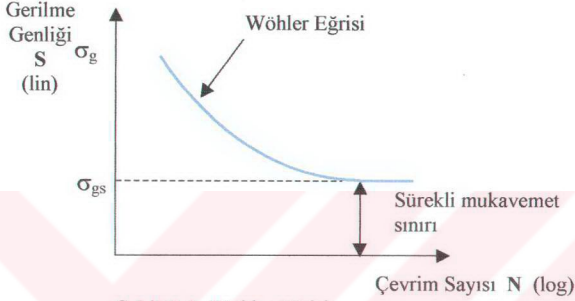
Şekil 2.2. Yükleme Çeşitleri

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere testler sonucunda numuneler aynı gerilme değerinde çok farklı ömürlerde hasara uğrayabilmektedir. B ve A noktaları arasındaki ömür oranı 7:1 mertebelerinde olabilmektedir [4]. Belirli bir ömür değeri referans alındığında farklı gerilme seviyelerinde aynı ömür değeri hasar oluşmaktadır. C ve D noktaları arasındaki gerilme değeri oranı 8:7 mertebelerinde olabilmektedir [4]. Bu dağılım içerisinde malzeme karakterini ifade eden tek bir eğri geçirilmesi oldukça güçtür. Kaba bir yaklaşımla bu dağılımın bir gauss normal dağılımı olduğu kabul edilebilir. Belirli bir güvenilirlik oranını sağlayan (genellikle % 90 güvenilirlikte) bir eğri geçirilir. Bu eğriye Wöhler Eğrisi adı verilir.



Şekil 2.3. Ömür Dağılımı

Düşük gerilme değerlerinde gerilmeler lineer olarak azalırken numune ömürlerinin progresif olarak arttığı görülür [4]. Bu sebepten dolayı ömür eksenini progresif eksenle değerlendirmek çok daha pratiktir ve logaritmik ölçek bundan dolayı kullanılmaktadır. Şekil 2.4’de gerilme eksenini (S) aritmetik ölçekte, ömür eksenini (N) ise logaritmik ölçekte çizilmiştir.

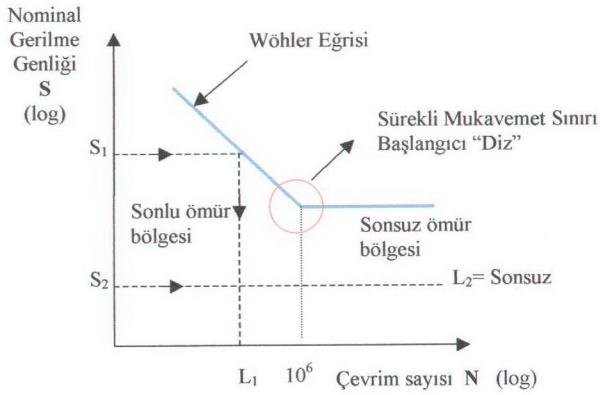


Şekil 2.4. Wöhler Eğrisi

Wöhler eğrisinin yaklaşık 10 milyon yükleme sonunda ömür eksenine paralel bir asimtota sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu değer demir kökenli parçaların tipik özelliğidir. Bu yükleme sayısına karşılık gelen gerilme değerinin altındaki yükleme değerlerinde teorik olarak hasarlanma beklenmez, bu gerilme değerine sürekli mukavemet sınırı denir. Sürekli mukavemet sınırı sayısal olarak maksimum gerilme değerinin yarısı olarak kabul edilebilir [4].

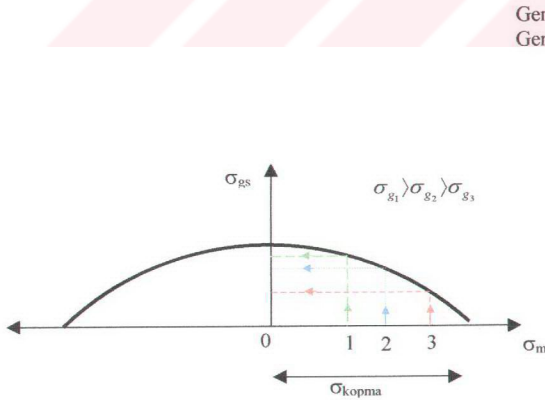
Bazı araştırmacılar S-N diyagramının “log/log” formunu tercih etmektedirler. Bu grafikte log S ve log N arasındaki lineer ilişkiyi veren yüksek gerilme bölgesinden sürekli mukavemet sınırına doğru inen eğrinin sürekli mukavemet sınır ile kesiştiği bölgede keskin köşesi bulunur. Şekil 2.5’te görüldüğü gibi bu keskin köşe (“diz”) aynı zamanda sürekli mukavemet sınırının başlangıcının tanımlanmasında kullanılmaktadır [4]. Sürekli mukavemet sınırı (gerilme) değeri yerine ömürle tanımlanmaktadır.

Sürekli mukavemet sınırı belirli bir ortalama gerilme için bulunmuştur. Ortalama gerilme σ_m değiştirilecek olursa asemtotik genlik σ_{gs} değişir ve dolayısı ile sürekli mukavemet sınırları da değişir.

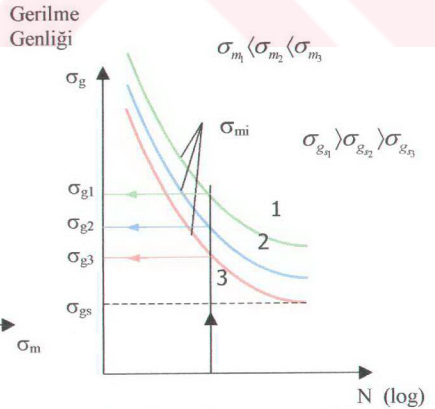


Şekil 2.5 Wöhler Eğrisi

Şekil 2.6’de ortalama gerilme σ_m ile gerilme genlik değerleri σ_{gs} arasındaki bağıntı şematik olarak görülmektedir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi ortalama gerilme değerinin artırılması ($\sigma_{m_1} < \sigma_{m_2} < \sigma_{m_3}$) sürekli mukavemet sınırının ($\sigma_{g_{s_1}} > \sigma_{g_{s_2}} > \sigma_{g_{s_3}}$) aşağıya çekilmesi sonucunu vermektedir. Aynı dayanım ömrü (N_1) referans alındığında genlik gerilmesi değeri ($\sigma_{g_1} > \sigma_{g_2} > \sigma_{g_3}$) azalmaktadır.



Şekil 2.6. σ_m ile σ_{gs} arasındaki ilişki



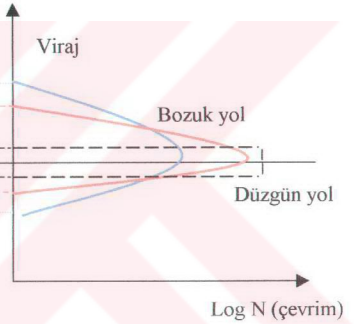
Şekil 2.7. σ_m ile σ_{gs} arasındaki ilişki

2.3. Yorulma Dayanımı ve Ömür

Malzemeye ait yorulma dayanımının Wöhler yöntemi ile nasıl belirlendiği Bölüm 2.2’de anlatılmıştı. Bu yöntemde elde edilen değerler belirli bir ortalama gerilme ve bu ortalama gerilme etrafında periyodik olarak değişen sabit genlikler için geçerlidir. Gerçekte taşıtları zorlayan dinamik kuvvetlerin belirli bir kurala uymayan tesadüfi kuvvetler olduğu bilinmektedir. Bu kuvvetler, yol pürüzlülüğü, lastik düzgünsüzlüğü, ve viraj gibi yol ve işletme şartlarına bağlı olarak ortaya çıkarlar. Gerek yol pürüzlülükleri (asfalt, parke, stabilize vs.) gerekse yol şartları (düz yol, viraj vs.) bir istatistikî olay olarak gözönüne alınabilir.

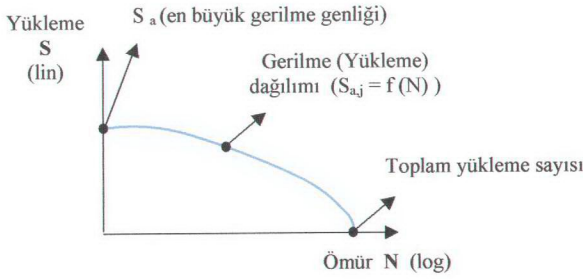


Şekil 2.8a. Farklı yol şartlarındaki dinamik tekerlek yükleri



Şekil 2.8b. Bu yollara ait yükleme sıklığı

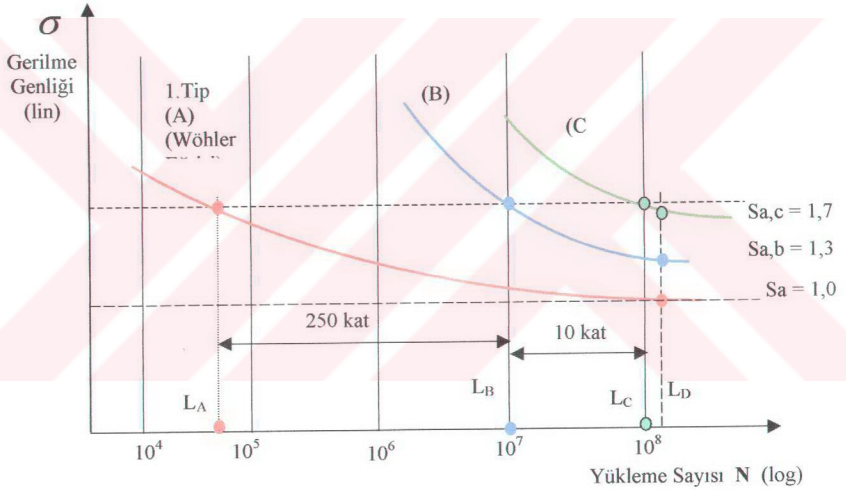
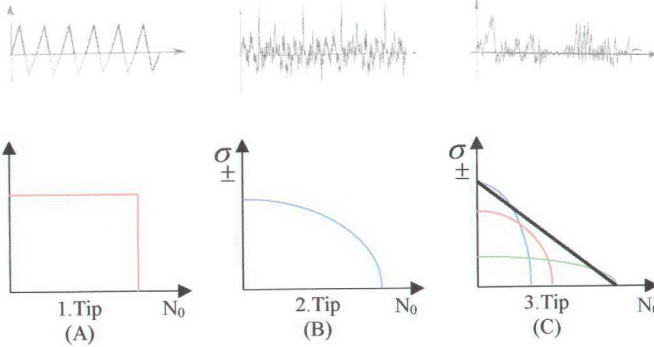
Şekil 2.8a’da farklı yol şartlarında kaydedilen dinamik tekerlek yüklerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 2.8b’de ise bu yüklerin ne sıklıkta dağıldığı ayrı ayrı verilmiştir. Her üç yükleme şartının birlikte değerlendirilmesi sonucu elde edilen sıklık eğrisine Yükleme Kollektifi adı verilir. Bu eğri bize ihtimal hesabı yardımıyla ömür belirlenmesinde kullanılan bilgiler verir [2]. Yükleme kollektifinin genel özellikleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Yükleme Kollektifi

Şekil 2.10'de üç ayrı tip yükleme kollektifi ve bunlara ait ömür eğrileri verilmiştir. Birinci tip yükleme kollektifi, yükün belirli bir ortalama değerde sabit tutulup, onun etrafında sabit genlikler halinde sinüs karakterli değişimine aittir. Bu durumda oluşan yükleme kollektifi dikdörtgendir ve ona ait olan eğride Wöhler eğrisidir. İkinci tip yükleme kollektifi, normal dağılım gösteren kollektiftir. Yük şiddetinin aynı kalması durumunda ikinci tip kollektifin kırılmaya maruz kaldığı yük tekrar sayısının (L_B) birinciye nazaran 250 katı fazla olduğu görülmüştür. Bu tip zorlanmaya örnek olarak taşıtın sadece belirli bir kalitedeki asfalt, parke veya stabilize yoldaki seyri verilebilir ki, bu da söz konusu yol pürüzlülüğünün doğurduğu tesadüfi zorlanmalardan başka bir şey değildir. Üçüncü tip yükleme kollektifi ise, normal dağılımı gösteren ikinci tip kollektiften birkaç tanesinin üst üste toplanmış halidir. Bu tür yükleme kollektifi dinamik zorlanmaya maruz taşıt parçaları için en gerçekçi hali vermektedir. Zira, taşıt ömrü boyunca tek tip zorlanmaya maruz kalmaz, düz yol, bozuk yol, viraj gibi çeşitli şartlar altında kullanılır. Bu tipe ait yük tekrar sayısının (L_C) da ilkinе nazaran 2500 katı fazla olduğu görülmüştür. Yükleme kollektifleri gerek ölçme yöntemi ile gerekse hesap yöntemi ile elde edilebilirler.

Belirli bir tasarım ömrü (L_D) için izin verilen gerilme değerleri cinsinden yükleme kollektifleri karşılaştırılabilir. Sürekli mukavemet sınırı değerinin 1'e eşit olduğu kabuluyla B yükleme kollektifinin izin verilen yükleme gerilme değeri sürekli mukavemet sınırından %30 daha yüksek ($S_{a,b}=1,3$) olabilecektir. C yükleme kollektifinin izin verilen yükleme gerilme değeri sürekli mukavemet sınırından %70 daha yüksek ($S_{a,c}=1,7$) olabilecektir [8].



Şekil 2.10. Farklı yüklem kolektifi formları

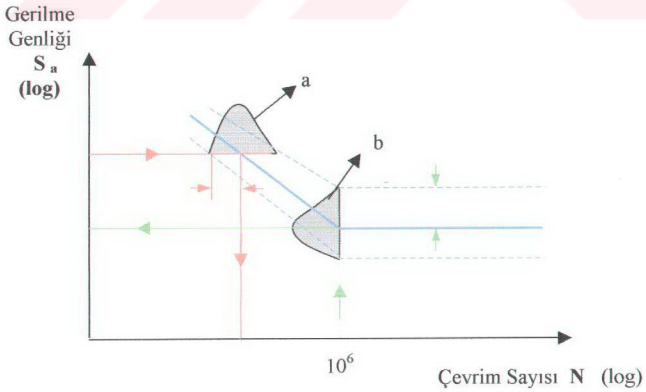
Klasik hesap yönteminde gerek nominal değerler ve gerekse malzeme mukavemet sınırları tekil değerler olarak kabul edilir. Oysa hem taşıt parçalarını zorlayan kuvvetlerin belirli bir kurala uyamayan tesadüfi kuvvetler olması, hem de parçaların yeteri kadar homojen ve izotrop olamamaları, iç bünyedeki kristal yapılarında çeşitli hataların bulunması, sıcak soğuk şekil verme, ısıtılma işlemi gibi imal

usullerinin etkisi, deneylerin çalışma şartlarına göre çok basit şartlar altında yapılması gibi sebeplerle malzeme mukavemet sınırlarının gelişi güzel değişen değerler olması, dinamik zorlamaya maruz taşıt parçalarının tasarımında güvenilirlik fikrine dayanan istatistik hesap yöntemini de gündeme getirmiştir [2].

2.4. Güvenirlik :

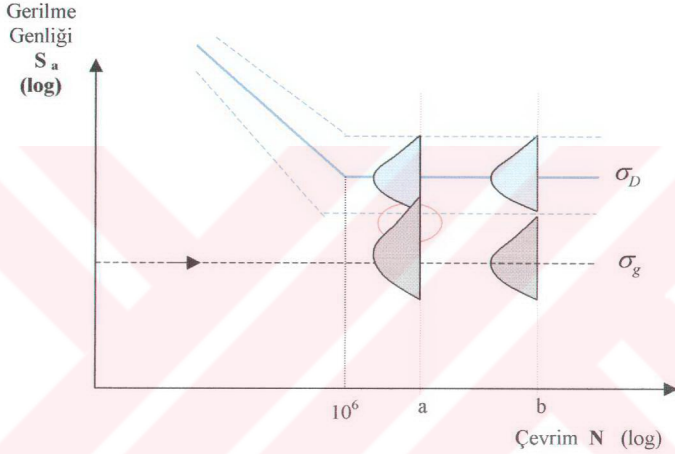
Herhangi bir teknik sistemin belirli şartlar altında belirlenen bir zaman içinde öngörülen fonksiyonunu memnun edici bir şekilde yerine getirme ihtimaline güvenilirlik denir. Eğer sistemde öngörülen süre içinde bir arıza meydana gelir ve fonksiyonunu yerine getiremez durum olursa bu hale de işe yaramama denir. Esas olarak güvenilirlik bir ihtimaliyet problemidir ve bu bakımdan istatistik analize ve ihtimaliyet teorisine dayanan bir çalışma gerektirir.

Değişken zorlama ile ilgili istatistik hesap yönteminde esas olan husus, nominal gerilme genliklerinin σ_g ve yorulma mukavemet sınırlarının σ_D ve σ_{DN} dağılımdır. Bu dağılımlar logaritmik normal dağılımlar olarak kabul edilir. Değişken zorlamada problem iki şekilde ortaya çıkabilir. Şekil 2.11’de a ile gösterilen dağılım belirli bir gerilme genliği için elemanın ömür dağılımıdır, b ile gösterilen dağılım ise belirli bir ömür için elemanın taşıyabileceği gerilme genliği dağılımıdır.



Şekil 2.11. Ömür ve Gerilme Genliği Dağılımı

Sonsuz ömür için ikinci hal gözönüne alınırsa parçaya etki eden gerilme dağılımı (σ_g) ve malzemeye ait dayanım gerilmesi dağılımı (σ_D) arasındaki durum Şekil 2.12'de gösterildiği gibi olur. Burada iki durum ortaya çıkabilir. Birincisi (a ile gösterilen) eğriler birbiri ile çakışabilir. Bu durumda çakışma alanının büyüklüğüne bağlı olarak elemanların bir kısmı $2 \cdot 10^6$ yük tekrarından önce kırılır. İkincisinde ise eğriler birbiri ile çakışmaz (b ile gösterilen). Bu durumda hiçbir elemanda hasar olmaz, yani parçanın güvenilirliği % 100'dür.



Şekil 2.12 Güvenirlik

2.4. Palmgren-Miner Yöntemiyle Ömür Hesabı :

Yorulma ömür hesabı için İsveçli Palmgren (1924) tarafından önerilen ve Amerikalı Miner (1945) tarafından geliştirilen lineer kümülatif hasar hesaplama yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Palmgren ve Miner mantıksal bir yaklaşımla eğer bir numune tekrarlı bir biçimde 10^5 çevrimde hasara sebep olacak bir gerilme düzeyinde yüklenirse her bir çevrimin bu 10^5 çevrimlik toplam ömürden bir birimini tüketeceğini öne sürmüşlerdir. Yine benzer şekilde 10^4 çevrimde hasar yaratan bir gerilme düzeyi için her bir çevrim 10^4 çevrimlik toplam ömürden bir birimi tüketecektir. Bu şekilde

gerilme seviyesi-toplam çevrim sayılarının oranlarını topladığımızda numunenin % 100'lük toplam ömrüne ulaşmış oluruz.

Bu yaklaşıma göre numune tekrarlı yüke maruz kalmakta, fakat yüklemeler aynı gerilme genliğinde olmamakta ve belirli bir genliğe ait herbir çevrim bloğu parçanın ömründen belirlenebilir bir kısmını tüketmektedir. Her bir bloğun hasarı (D_j) bir oran olarak ifade edilmekte ve değişik oranların toplamı 1'e eşit olduğunda parça ömrünü tamamlamış olmaktadır. Matematiksel olarak Palmgren-Miner Hipotezini şöyle ifade edebiliriz; sabit genlikli bir σ_1 gerilmesinde parça N_1 çevrimde hasara uğruyor ve bu σ_1 kısa süreli n_1 çevrimi kadar uygulanıyorsa tüketilen ömür miktarı $\frac{n_1}{N_1}$ dir [3]. Bütün gerilme değerleri için (2.1) formülü kullanılmaktadır [3,4].

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1 \quad (2.1)$$

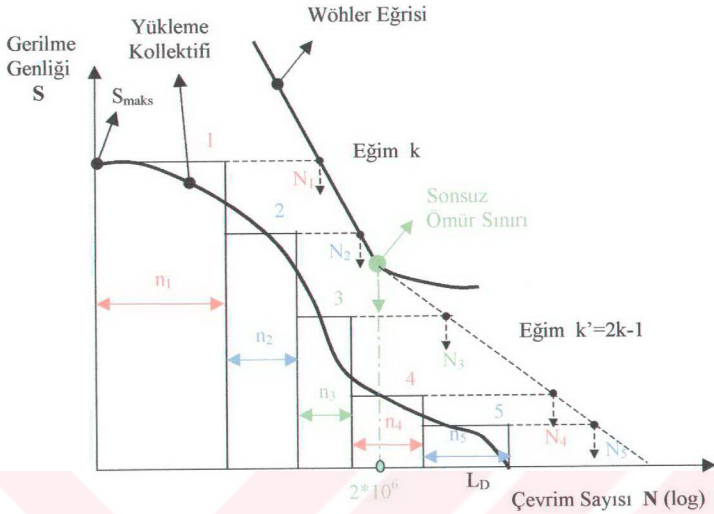
$$\text{Genel ifadeyle} \quad \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 2.13'de S-N grafiği üzerinde ömür hesabında kullanılan değerlerin nasıl belirlendiği şematik olarak gösterilmiştir. Bir nolu gerilme seviyesinin Wöhler eğrisini kestiği noktadan ömür eksenine dik inilir ve N_1 çevrim sayısı değeri grafik üzerinden bulunur. Diğer gerilme seviyeleri için bu işlem tekrar edilerek N değerleri belirlenir. Sürekli mukavemet sınırı altında kalan bölgede gerilme uygulanıyorsa bu bölge için eğimi $k' = 2k - 1$ olan bir doğru çizilmektedir [8]. Sürekli mukavemet sınırı altındaki bölgedeki ömür değerleri bu doğruya göre belirlenmektedir.

Eğer yükleme kolektifi tekrarlanabilir bir karaktere sahip ise (blok-program yükleme olduğu gibi) sadece bir yükleme bloğunun toplam ömürden harcadığı oran formül (2.3)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_k = D \quad (2.3)$$



Şekil 2.13. Ömür hesabı uygulaması

Ömür (L) formül (2.4)'te gösterildiği gibi ,bir sayısının bir blok yükleme sonucunda oluşan hasar değerine (D) bölünmesiyle hesaplanmaktadır.

$$L = \frac{1}{D} \quad (2.4)$$

Palmgren-Miner Hipotezinin kullanılabilmesi için malzemeye ait Wöhler (S-N) diyagramına ve yükleme kollektifine gerek vardır. S-N diyagramı belirli bir numunenin genlik değerleri ile yükleme sayısı arasındaki ilişkiyi gösterir. S-N diyagramı malzeme özelliğiyle belirlendiği için hazır çizilmiş olarak temin edilebilir. Bu diyagram temin edilemiyorsa malzemenin kopma gerilmesini referans alan yöntemle yaklaşık olarak çizilebilir [4]. Bu yöntemde iki nokta belirlenir, birincisi 10^3 yükleme sayısına karşılık gelen gerilme değeridir ve malzemenin kopma gerilmesinin 0,9 katı kabul edilmektedir ve formül (2.5)'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$S_{10^3} = 0,9S_u \quad (2.5)$$

İkinci nokta ise 10^6 yükleme sayısına karşılık gelen gerilme değeridir. Bu nokta sürekli mukavemet sınırının başlangıç noktasıdır. Malzemenin kopma gerilmesinin 0,5 katı kabul edilmektedir [4].

$$S_{10^6} = 0,5S_u \quad (2.6)$$

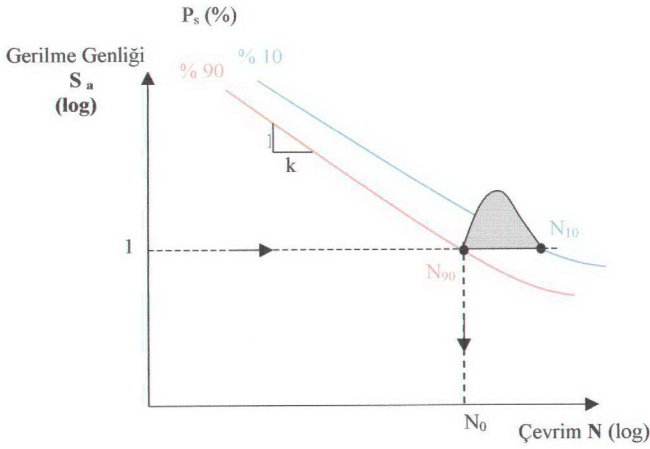
Gerçekte sürekli mukavemet sınırının belirlenmesinde bir çok etkenin rol oynadığı bilinmektedir. Bunları bir yaklaşımla hesaplamaya katmak için üç ayrı katsayının etki ettiği kabul edilmiştir. Birincisi yükleme katsayısı (C_1), ikincisi yüzey katsayısı (C_S), üçüncüsü ise gradyant katsayısı (C_G)'dır. Bu katsayılar a ait değerler kaynak 4 sayfa 270'de bulunan Tablo 8.1'den belirlenir. Bu durumda formül (2.7)'deki şekilde olmaktadır.

$$S_{10^6} = 0,5S_u C_L C_S C_G \quad (2.7)$$

Yükleme kolektifi ise yol şartlarında kaydedilen dataların data işleme yöntemlerinden biriyle işlenmesinden sonra parça için hedeflenen ömür değerine göre belirlenmektedir. Yükleme kolektifi şekilleri hakkında Bölüm 2.6'de kapsamlı açıklamalar bulunmaktadır.

Wöhler eğrisi hazır olarak temin edilse dahi parçaların kimyasal özellikleri, imalat yöntemleri, imalat adımları vb. etkilerden dolayı malzemeye ait dağılımın bandının neresinde olduğu tam olarak belirli değildir. Hesaplama sırasında kullanılan Wöhler eğrisinin tam olarak numuleri temsil etmediği için hesaplama sonuçları ile test sonuçları arasında büyük farklılıklar oluşabilmektedir.

Ayrıca Bölüm 2.4'te güvenilirlik konusunda ifade edildiği gibi Wöhler eğrisinin çizilmesi sırasında hangi güvenilirlik oranına sahip eğrinin kullanıldığı ömür hesabı sonuçlarını etkilemektedir. Sonsino makalesinde [9] üretim tekniğine ve kalitesine bağlı olarak % 10 güvenilirlik ile % 90 güvenilirlik durumlarına karşılık gelen ömür değerleri arasında 3 ile 4 katı arasında ($\frac{N_{10}}{N_{90}} = 3-4$) bir fark olabileceğini ifade etmektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Yükleme gerilmesi ile yorulma ömür dağılım arasındaki ilişki

2.5.Yol Datası İşleme Yöntemleri :

Yorulma dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılacak testte kullanılacak yüklem değerlerinin belirlenmesi için gerçek yol ve kullanım şartlarında parçaya etki eden yüklemelerin bilinmesi gereklidir. Taşıtın kullanılacağı şartları en iyi simüle edebilecek yol karakterine sahip olan bir güzergahta kısa süreli bir data kaydı yapılır. Kaydedilen data parçanın taşıt üzerindeki konumuna ve fonksiyonelliğine göre farklılık gösterir. İhtiyaca göre deplasman (δ), gerilme (ε) veya ivme değerlerinden biri veya birkaçı ölçülerek kaydedilmektedir.

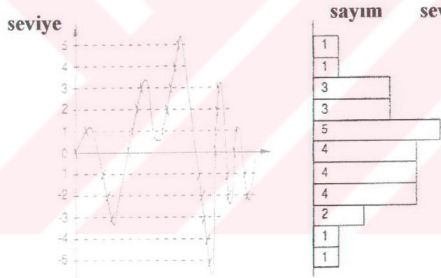
Datalar zaman ekseninde kaydedilmektedir. Dataları zamandan bağımsız duruma getirerek değerlendirmek, karşılaştırmak ve kullanmak çok daha kolay ve uygundur. Dataların değerlendirilmesinde iki genel yöntem bulunmaktadır. Birincisi dataların deterministik olarak değerlendirilmesidir. Fakat kaydedilen bu datalar yalnızca kayıt yapılan yola ait veriler olacaktır ve diğer yollar için aynı bilginin kullanılması mümkün olmayacaktır. Taşıtların çok farklı yol şartlarında kullanıldığı bilinmektedir. Bundan dolayı dataların istatistiki olarak incelenmesi sözkonusudur.

İstatistiki olarak dataların işlenmesi konusunda günümüzde bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bunlar Range and Range-Mean, Peak Value, Level-Crossing gibi yöntemlerdir. Bu yöntemlerin hangi yeterlilikte yol datalarını değerlendirebildiği

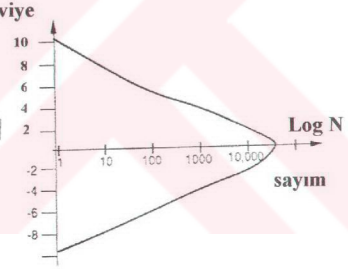
tartışılmaktadır [9]. Tez kapsamında data işleme yöntemi olarak Level-Crossing kullanıldığı için bölüm 2.5.1’de yöntem hakkında bilgi verilmiştir ve diğer yöntemlere değinilmeyecektir.

2.5.1. Level-Crossing Yöntemi

Bu yöntemde zaman ekseninde kaydedilen datalar parçanın özelliğine bağlı olarak yükleme seviyelerine ayrılmaktadır. Herbir yükleme seviyesini ifade eden bir çizgi çizdirilir ve bu çizgileri kesen data sayısı belirlenmektedir. Her bir yükleme seviyesindeki kesişme sayıları toplanır ve sonucunda Şekil 2.15a’da gösterilen seviye, sayı dağılımı ortaya çıkmaktadır. Bu dağılım x-ekseninde logaritmik tekrar sayısı (N), y-ekseninde ise yükleme seviyelerini (S) ifade etmek üzere çizdirilir. Böylece yol datalarından taşıt parçasına etki eden tasarım kolektifi bulunmuş olmaktadır. Şekil 15b’de tasarım kolektifine bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.15a. Level-Crossing Yöntemi



Şekil 2.15b. Yol datası dağılımı

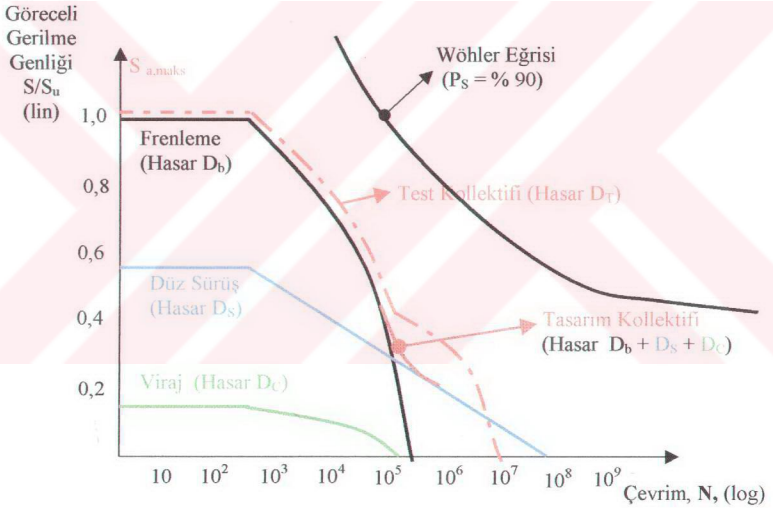
2.6.Yükleme Modelleri :

2.6.1. Yükleme Kolektifinin Belirlenmesi

Farklı yol şartlarında elde edilen dataların işlenmesinden sonra değerlendirilmekte ve tasarım kolektifi belirlenmektedir. Tasarım kolektifi içindeki

düşük genlikli datalar etkisinin az olmasından dolayı ihmal edilmektedir ve orta genlikli datalar yükleme sayıları artırılarak test kolektifi belirlenmektedir.

Sonsino makalesinde [9] numune parça aks poryası üzerinde beş ayrı nokta belirlemiştir. Herbir noktadan farklı yol ve kullanım şartlarında data kaydedilmiştir. Bu noktalardan birine ait farklı yolların etkisi (düz, viraj) ve kullanım şartlarının (frenleme) etkisi ayrı ayrı kaydedilmiş ve level-crossing yöntemi ile işlenmiştir. Şekil 2.16'ta görüldüğü gibi farklı yol şartlarından elde edilen yükleme kolektifleri gözönünde bulundurularak tasarım kolektifi belirlenmiştir. Düşük genlikli datalar elenmiştir ve orta genlikte dataların yükleme sayıları bir miktar artırılmıştır ve böylece test kolektifi elde edilmiştir. Şekilde aks poryasının bu noktası için yorulma kırılmasına neden olacak etkinin frenleme olduğu görülmektedir.



Şekil 2.16. Üç nolu noktaya ait tasarım ve test kolektifleri

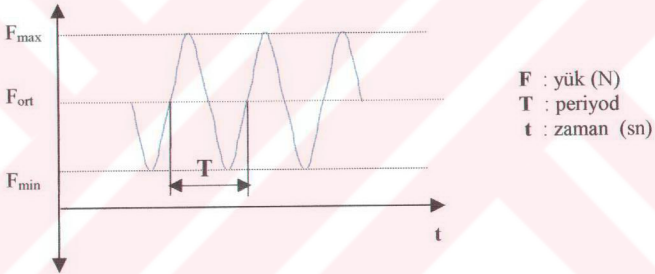
2.6.2. Yükleme Modelleri

Yükleme (test) kolektifi belirlendikten sonra bu değerlerin numune parça üzerine hangi formda (model) uygulanacağına karar verilmesi gereklidir. Yükleme modeli çeşitlerine geçmeden önce yükleme konusunda kullanılan bazı temel

kavramları kısaca ifade edersek bunlar maksimum yük, minimum yük, ortalama yük, genlik, frekans ve çevrim'dir. Yükleme sinüsoidal bir yük dalgasından oluşmaktadır (Şekil 2.17). Verilen azami ve asgari yükler maksimum ve minimum yüke tekabül etmektedir. Frekans ise bir saniyede oluşan yükleme sinyalinin adedidir, birimi Hertz (Hz)'dir. Çevrim, şekilde T ile gösterilen bir periyotta oluşan sinyaldir. Ortalama yük ve genlik kavramları matematiksel olarak formül (2.8) ve (2.9)'da tanımlanmıştır.

$$\text{Ortalama Yük} = \frac{(\text{Maksimum Yük} + \text{Minumun Yük})}{2} \quad (2.8)$$

$$\text{Genlik} = \frac{(\text{Maksimum Yük} - \text{Minumun Yük})}{2} \quad (2.9)$$



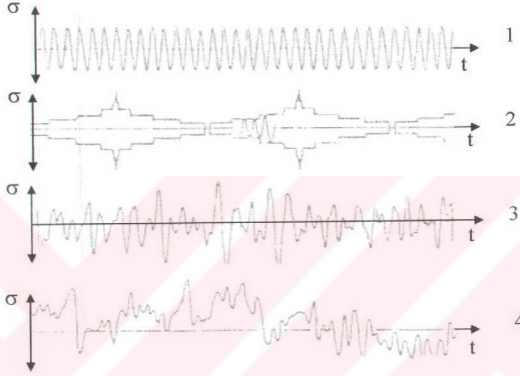
Şekil 2.17. Yükleme konusunda temel kavramlar

Yorulma ömür testleri farklı yükleme modelleri ile gerçekleştirilmektedir. (Bkz.Şekil 2.18). Bu modellerden birincisi sabit ortalama gerilme üzerine sabit genlikli yükleme yapılmasıdır. Gerçek yol şartlarında ise parçalar üzerine değişken ortalama yükte ve değişken genlikte yüklemeler gelmektedir. Bu farklılıktan dolayı bu yöntem gerçekten uzakta sonuçlar vermektedir. Bu yöntem günümüzde yorulma ömür testlerinde kullanılmamaktadır. Fakat malzeme özelliklerinin belirlenmesinde halen kullanılan bir yöntemdir.

İkinci model Dr.Gassner tarafından geliştirilen bir yöntemdir ve farklı yükleme seviyeleri ve bu seviyelerin biraraya gelmesinden meydana gelen

bloklardan oluşur, bundan dolayı blok-program yükleme modeli olarak tanımlanır. Sabit genlikli yükleme modeline göre gerçek koşullara daha uygun olan bir yükleme şeklidir. Bu yükleme modeli Gaus normal dağılımını verir. Blok-programla ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.6.2.1.'de verilmiştir.

Üçüncü tip yükleme modeli ise yol dataları içinde ömüre etkisi az olanlarının elenmesi ile elde edilir. Bu yükleme modeli de Gaus normal dağılımı göstermektedir.



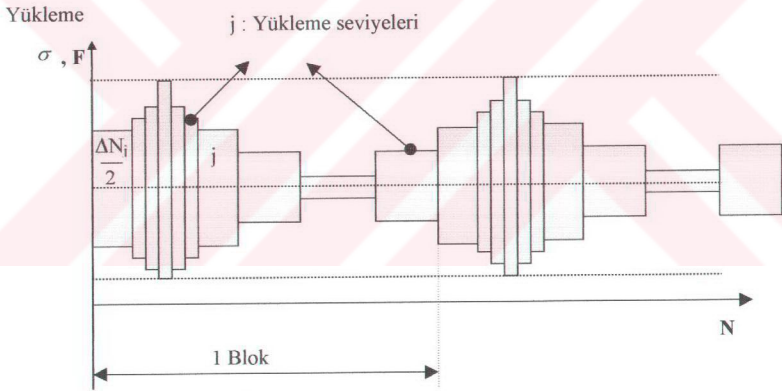
Şekil 2.18. Yükleme Modelleri

Dördüncü tip yükleme modeli ise yol şartlarında kaydedilen dataların numune parça üzerine bire bir uygulandığı yükleme modelidir. Bu yükleme modeli Gaus normal dağılımına benzer bir dağılım vermekle beraber asimetrikliği bulunmaktadır. Yükleme modelleri arasında en gerçekçi olanıdır [3]. Bununla birlikte en önemli dezavantajı, ömüre etkisi az olan datalar elenmediği için test süresi çok uzun olmaktadır.

2.6.2.1. Blok-Program Yükleme Modeli :

İlk defa Dr.Gassner tarafından önerilen ve kullanılmaya başlayan bir yöntemdir. Günümüzde uçak sanayiinde ve birçok otomotiv firmasında kalite güvence testlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Yükleme kolektifi belirlendikten sonra bu kolektif eşit aralıkta genliklere ayrılır. Bu herbir genlik değerine seviye denir ve j ile sembolize edilir. Dr.Gassner seviye sayısını sekiz adet olarak kullanmış ve önermiştir. Günümüzde genlik değerleri arasındaki geçişleri yumuşatmak için seviye sayısı daha fazla seçilebilmektedir. Yüklem kolektifi üzerinde bu seviyeler işaretlenerek herbir seviye için gerekli toplam yüklem tekrar sayısı (N_j) belirlenir. Yüklem kolektifi test sırasında oluşacak hasarın tanımlanabilmesi ve farklı numunelerle testin tekrarlanması durumunda numuneler arasında karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla bloklara ayrılmaktadır (Şekil 2.19). Blok sayısının en az 25 adet olması bu yöntemi kullanmada deneyimi olanlar tarafından önerilmektedir [3]. Blok sayısı belirlendikten sonra yüklem kolektifindeki herbir seviyedeki toplam yüklem tekrar sayısı (N_j) değerleri blok sayısına bölünür ve her bir bloktaki seviyelere ait yüklem değerleri (ΔN_j) bulunmuş olur.



Şekil 2.19. Blok-Program yüklem modelinin genel şekli.

Bir blok içerisinde artan ve azalan yüklem genliklerinin (F_j, σ_j) bulunması blok-programın karakteristik özelliğidir. Dr.Gassner yüklemenin orta büyüklükte bir yüklem değerinde başlamasını ve sonrasında giderek artan, en büyük yüklem genliği uygulandıktan sonra azalan, en küçük genlik değeri uygulandıktan sonra tekrar orta yüklem genliğine kadar artan bir karakterde olmasını önermektedir[5].

Bu modelde herbir blokta kullanılan yükleme seviyelerindeki yükleme sayılarını tekrar ikiye bölmek ($\frac{\Delta N_f}{2}$) ve sıralandırmak gerekmektedir.

2.7.Yaylar ve Genel Özellikleri :

Yaylar, belirli bir kuvvet altında bir dereceye kadar büyük elastik şekil değiştiren elemanlardır; kuvvet kaldırıldığı durumda eleman kısmen veya tamamen eski konumuna gelir. Yük altında, şekil-değiştirme esnasında yaylar bir enerji (şekil-değiştirme enerjisi) biriktirirler. Boşalmada kısmen bu enerjiyi geri verirler.[1]

Yay Karakteristiği ve Rijitliği ; Yayların rijitliği genel olarak formül (2.7)'deki şekilde ifade edilmektedir.

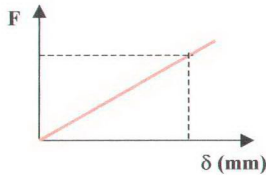
$$k = \frac{dF}{d\delta} \quad (2.10)$$

Doğrusal karakteristiğe sahip yayların rijitliğinin hesaplanmasında, F yaya etki eden kuvvet, (N), ve δ kuvvet sonucu oluşan yay deplasmanı (mm) olarak kullanılırsa rijitlik formül (2.8)'deki gibi yazılmaktadır.

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (2.11)$$

Rijitliğin birimi $\frac{N}{mm}$ olur. Kuvvet ve yay deplasmanı arasındaki lineer ilişki Şekil

2.20'de görülmektedir. Doğrusal karakteristiğe sahip yayların rijitliği sabittir.



Şekil 2.20 Doğrusal yay karakteristiği

Yayların sanayide çok farklı kullanım alanları ve tipleri bulunmaktadır. Taşıtlarda kullanılan yaylar konumuzla ilişkili olduğu için yalnızca bu tip yaylara değinilecektir.

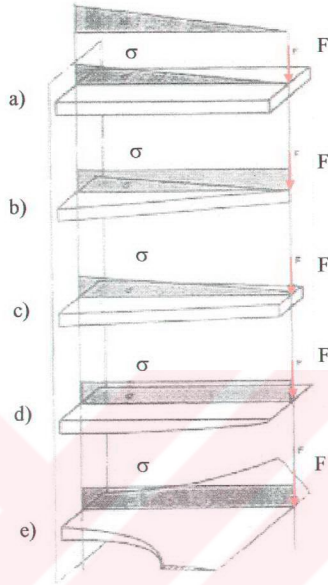
Yaylar taşıtların süspansiyon sisteminin önemli bir elemanıdır. Günümüze kadar taşıtlarda çeşitli yaylar kullanılmıştır. Helisel, pnömatik ve yaprak yaylar günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tez kapsamında yapılan testlerde özne parça bir çeşit yaprak yay olduğu için diğer yay çeşitlerine değinilmeyecektir.

2.7.1.Yaprak Yaylar :

Yaprak yayların bir çok çeşidi bulunmaktadır. Yaprak yayın kesitine ve geometrik şekline göre adlandırılmaktadır. Yaprak yayları karşılaştırmak amacıyla beş farklı yaprak yay üzerine aynı F kuvveti uygulandığında yaylar üzerinde oluşan gerilme dağılımları farklılık göstermektedir [7]. Bu durum Şekil 2.21’de sembolik olarak gösterilmiştir.

Yay dikdörtgen kesitli olduğunda (a şıkkı) gerilmenin mesnetli olan bölgeye doğru arttığı görülmektedir. Yaprak genişliği üçgen şeklinde (b) olursa gerilme değeri yay boyunca sabit olur. Üçgen şeklinde olması taşıt üzerine uygulanması güç olan bir geometri oluşturmaktadır. Yay genişliği sabit, kesit kalınlığı parabolik olarak değişirse (d) gerilme değeri yay boyunca sabittir. Yay genişliği ve kesit kalınlığı hiperbolik olarak değişirse (e) gerilme değerleri sabit olur, fakat geometrik olarak montaj güçlüğüne sebep olur. Gerilme dağılımının yay boyunca homojenliği ve taşıta montaj uygunluğu açısından d şıkkında gösterilen parabol yaprak yayların kullanılması tercih edilmektedir. Parabolik şeklinden dolayı imalat yönteminde dikkat ve özen gerektirmektedir.

Parabol yaprak yaylar gerilme dağılımının yay boyunca aynı olmasından dolayı dikdörtgen kesitli yaylara oranla % 30-40 daha hafif tasarlanabilmektedir.



Şekil 2.21. Farklı yaprak yaylar üzerine gelen kuvvetlere göre yay eleman üzerinde oluşan gerime dağılımları

3. SÜSPANSİYON ELEMANI

Testlerle analizi yapılan süspansiyon elemanı giriş bölümünde sözü edilen taşıta ait ön aks yaylarıdır. Yayın monte edildiği taşıt hakkında bilgiler Bölüm 3.1.'de verilmiştir.

3.1. Monte Edildiği Taşıt Bilgileri :

Taşıt Tanımı : MB 1215 Hafif Sınıf Kamyon (Atego)

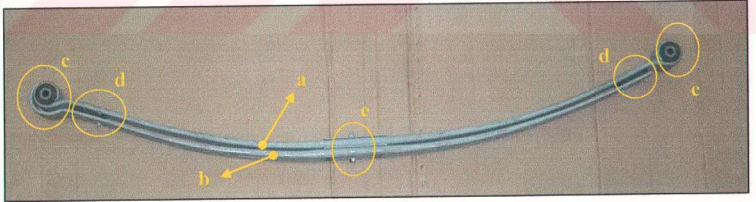
Ön aks nominal yükü (yükülü) : 4.400 kg

Ön aks yükü (yüksüz) : 2.650 kg

Yaylanmayan Kütleler : 500 kg

3.2.Yay Elemanı :

Namuneler, yaprak yaylar sınıfında bulunan parabol yaprak yaylardır. Monte edildiği kol uzunlukları farklı oldukları için asimetrik yay tanımına uymaktadır [6,11].



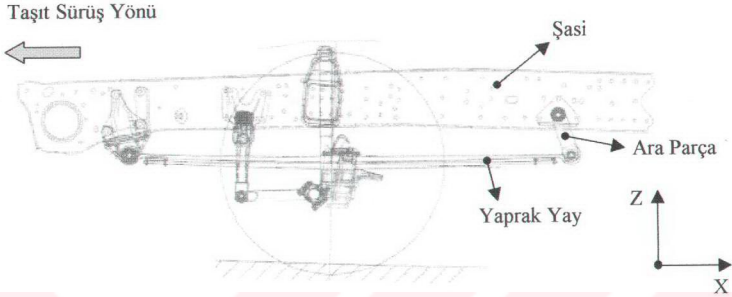
Şekil 3.1. Numune parça

3.2.1. Taşıta Montaj Şekli :

Taşıtın ön aks sol tekerlek bölgesi ve yaprak yayın taşıta montaj şekli Şekil 3.2'de verilmiştir. Yay taşıtın ön tarafındaki bağlantı ucundan sabit olarak, arka tarafındaki bağlantı ucundan bir ara parçaya monte edilmiştir. Ara parça, yaya kuvvet

etki ettiğinde bir açı tarayarak yay elemana serbestlik kazandırmaktadır. Yay orta bölgesinden ön aksa monte edilmiştir.

CATIA ortamında çizilmiş montaj resmi Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.2 Parabol yaprak yayın taşıta montaj görünümü

3.2.2. Yay Malzemesinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri :

Numune parçalar özel çelikler sınıfında bulunan 50 Cr V 4 malzemesinden imal edilmiştir. Bu malzemeye ait mekanik özellikleri (kaynak 1, syf. 323) DIN 17.222'ye göre Tablo 3.1.'de verilmiştir.

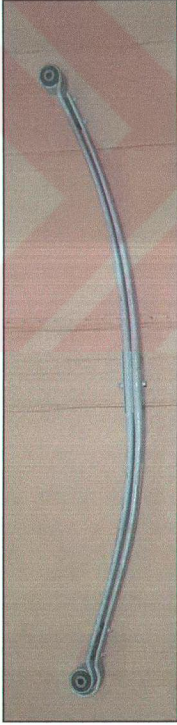
Tablo 3.1. 50 Cr V 4 malzemesinin mekanik özellikleri [1]

Kopma Gerilmesi (σ_K) (N/mm ²)	Akma Gerilmesi (σ_{Ak}) (N/mm ²)	Sertlik	
		HB 30	HRc
1.670	1.570	235	49

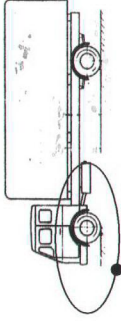
Tablo 3.2. 50 Cr V 4 malzemesinin kimyasal özellikleri [7]

C	Si	Mn	P	S	V
0,47- 0,55	0,15 - 0,40	0,70 -1,10	0,035	0,90 - 1,20	0,10 - 0,20

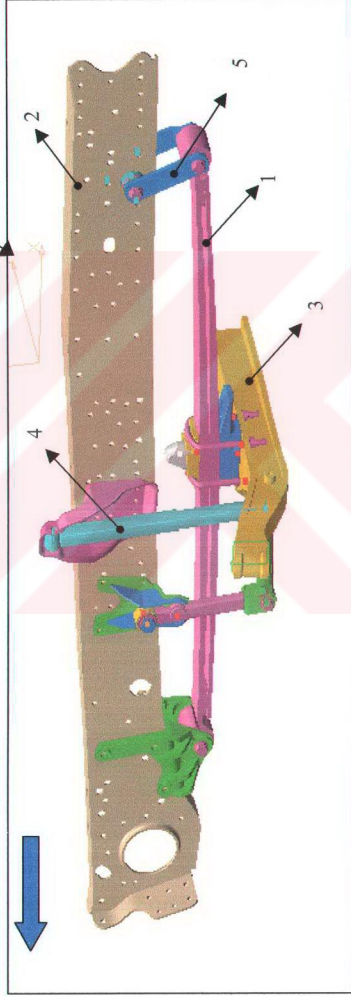
Numune yayın nominal yay katsayısı $k = 122 \frac{N}{mm}$ dir. Şekil 3.4'de yaya etki eden kuvvetle yay deplasmanı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.3a. Test parçasının taşıta montaj konumundaki görünümü.

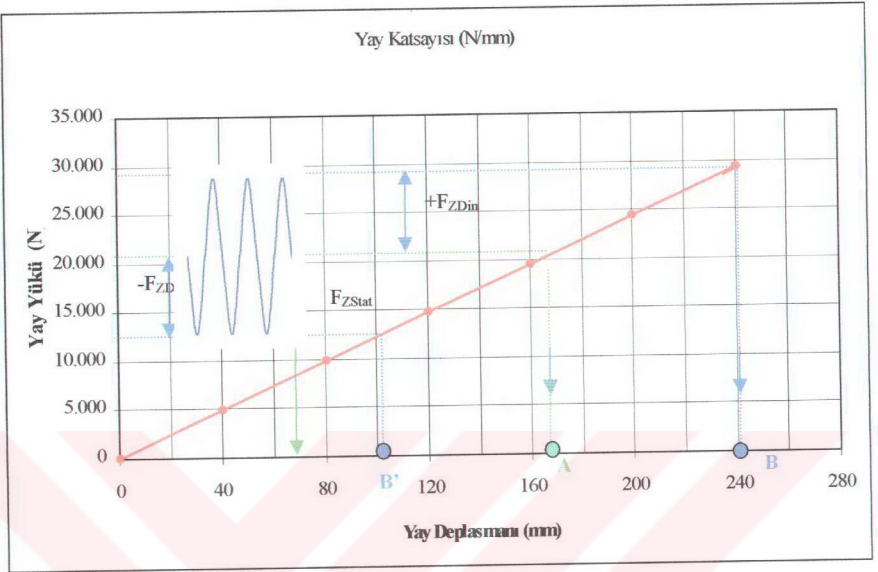


Taşıt Sürüş Yönü



- 1) Yaprak Yay
- 2) Şasi
- 3) Ön Aks
- 4) Amortisör
- 5) Ara Parça

Şekil 3.3b. Test parçasının araca montaj şekli (Ön aks sol tekerlek bölgesi).



Şekil 3.4. Yaya etki eden kuvvetle yay deplasmanı arasındaki ilişki.

Yay üzerine etki eden F_{ZStat} kuvveti etkisiyle yay Z-yönünde 168 mm yer değiştirmektedir. $+F_{ZDin}$ kuvveti etkisi ile 168-233 mm arasında yer değiştirmektedir. $-F_{ZDin}$ kuvveti etkisi ile 103-168 mm arasında yer değiştirmektedir.

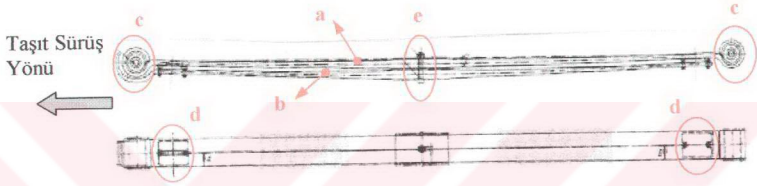
3.2.3. Genel Özellikleri :

Bu bölümde yayı oluşturan parçalar ve hesaplamalarda kullanılacak olan yaya ait geometrik boyutların neler olduğu açıklanmıştır.

3.2.3.1. Yayı Oluşturan Parçalar

Yaprak yay bir çok parçanın montajı sonucu meydana gelmektedir. Şekil 3.5'te harflerle işaretlenmiş olan parçalar aşağıda kısaca tanımlanmıştır :

- **Birinci yaprak (a)** : Her iki ucunda büküm ve bükümün ortasında montaj lastiği (c) bulunmaktadır. Yay, taşıt şasesine bu yaprak ile monte edilmektedir. 50 Cr V 4'den imal edilmiştir.
- **İkinci yaprak (b)** : Birinci yaprağa (a) orta noktasında bir cıvata ile bağlanmaktadır. Birinci yay ile sürtme yüzeyini azaltmak amacıyla üzerine iki adet ara parça (d) monte edilmiştir. Yayın sabit olarak taşıt şasisine monte edildiği ucunda koruma bükümü bulunmaktadır. 50 Cr V 4'den imal edilmiştir.



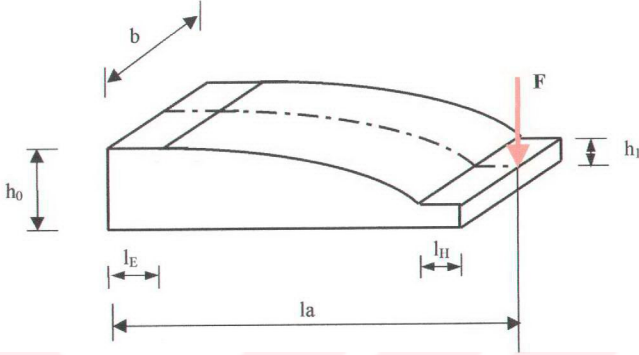
Şekil 3.5 Parabol yaprak yayı oluşturan parçalar

- **Montaj Lastiği (c)** : Birinci yaprağın (a) taşıta monte edildiği her iki ucuna bulunmaktadır. Yay ile taşıt arasındaki kuvvet iletiminde ses oluşumunu engellemektedir. Lastik malzemeden imal edilmiştir ve Shore 65 özelliğini sağlamaktadır.
- **Ara Parça (d)** : İki yaprak yay arasında sürtünme yüzeyini azaltarak sürtünmeden dolayı ısıya dönüşen enerji miktarı azaltılmaktadır. İki sac parça ve bunların arasında bulunan lastikten oluşmaktadır.
- **Bağlantı cıvatası (e)** : Birinci (a) ve ikinci yaprağın (b) birbirine monte edilmesini sağlamaktadır.

3.2.3.2. Geometrik Özellikleri

Yayın sabit monte edilen kolunun uzunluğu l_a , hareketli ara parçaya monte edildiği kol uzunluğu l_b , toplam yay uzunluğu l olarak sembolize edilir (Şekil 3.8). Yaprak genişliği b , yaprağın orta bölgesindeki kalınlığı h_0 , uç bölgedeki

kalınlığı h_1 ve yaprak sayısı n ile sembolize edilir. Şekil 3.6'de parabol yaprak'ın bir kolu üzerinde geometrik özellikler tanımlanmıştır.



Şekil 3.6. Parabol Yaprak Yayın Geometrik Özellikleri

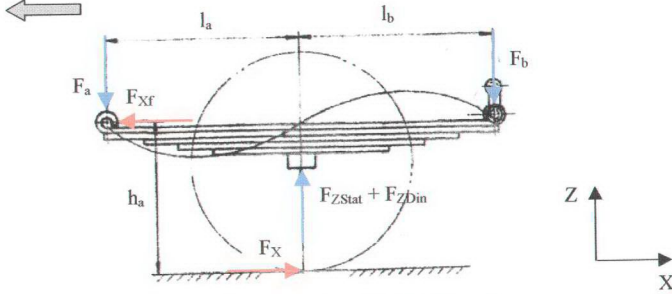
3.3. Etki Eden Kuvvetler

Yaylar taşıt üzerinde çeşitli kuvvetlerin etkisi altında kalmaktadırlar. Bunlardan birincisi taşıtın nominal aks yükünden oluşan statik kuvvettir, Z-yönünde etki eder ve hesaplamalarda $F_{Z,Stat}$ ile sembolize edilmiştir. İkinci kuvvet ise yol yüzeyindeki pürüzlülüklerin etkisinden dolayı $F_{Z,Stat}$ kuvvetinin doğurduğu dinamik kuvvettir, Z-yönünde etki eder ve hesaplamalarda $F_{Z,Din}$ ile gösterilmiştir. Üçüncü kuvvet ise, taşıtın frenlemesi ve ivmelenmesi sırasında oluşan kuvvetidir, X-yönünde etki eder ve hesaplamalarda F_x ile gösterilecektir. Dördüncü kuvvet ise taşıtın virajlı yolda oluşan kuvvettir, Y-yönünde etki eder ve hesaplamalarda F_y ile gösterilecektir. Şekil 3.7'de ön aks yayına etki eden kuvvetler gösterilmiştir.

Frenleme kuvveti ile Z-yönündeki kuvvetlerin toplamı arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır. Z-yönündeki kuvvetlerin toplamı frenleme ivmesi ile yerçekimi ivmesi arasındaki oran ($\mu = \frac{b}{g}$) ile çarpılarak frenleme kuvveti bulunmaktadır [7, syf. 86].

$$F_X = \mu (F_{Z_{Stat}} + F_{Z_{Din}}) \quad (3.1)$$

Taşıt Sürüş Yönü



Şekil 3.7 Ön aks yayına etki eden kuvvetler

3.4. Gerilme Değerlerini Hesaplama Yöntemi :

Yaylara etki eden toplam gerilme en genel halde statik gerilme, dinamik gerilme ve frenleme gerilmesinin toplanması sonucu elde edilmektedir [7]. Toplam gerilme formül (3.2)'ye göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_T = \sigma_{Stat} + \sigma_{Z_{Din}} + \sigma_{Fren} \quad (3.2)$$

Taşıt yüksüz ağırlığı ve maksimum yük değerinin toplamı sonucu yay üzerinde $F_{Z_{Stat}}$ kuvveti oluşmaktadır, bu kuvvetin oluşturduğu gerilmeyi statik gerilme olarak tanımlamak mümkündür. Yayın orta bölgesinde (h_0) oluşan statik gerilme formül (3.3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{Stat} = \frac{6F_{Z_{Stat}} l_a l_b}{nbh_0^2 (l_a + l_b)} \quad (3.3)$$

Formülde bulunan l_a , l_b , b , h_0 değerleri asimetrik parabol yaya ait geometrik boyutlardır (Şekil 3.6 ve 3.7). Bu geometrik özellikler Bölüm 3.2'te açıklanmıştır. n ise yaprak sayısıdır. Bütün yaprakların kalınlıklarının aynı olması durumunda (3.3)'teki formül geçerlidir.

Taşıtın yol şartlarında kullanımı sırasında yol pürüzlülüğünden kaynaklanan dinamik yüklerde ilave gerilme oluşturmaktadır. Bu gerilmeye dinamik gerilme denilmektedir ve formül (3.4)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{Z_{din}} = \frac{F_{Z_{din}} \sigma_{Stat}}{F_{Z_{Stat}}} \quad (3.4)$$

Ayrıca taşıtın frenlenmesi durumunda oluşan frenleme kuvvetinden (F_{X_f}) dolayı yay üzerinde ilave bir gerilme daha oluşmaktadır. Bu gerilmeye frenleme gerilmesi denilmektedir ve formül (3.5)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{Fren} = \frac{F_{X_f} \sigma_{Stat}}{F_{Z_{Stat}}} \quad (3.5)$$

Böylece yay elemana etki eden gerilmelerin toplamını formül (3.6)'ya göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma_T = \sigma_{Stat} \left(1 + \frac{F_{Z_{din}} + F_{X_f}}{F_{Z_{Stat}}} \right) \quad (3.6)$$

4. DENEYSEL ANALİZ

Bu bölümde yorulma testlerinin uygulanması için gerekli yol datası bilgileri, test (yükleme) kollektifi değerleri (kuvvet değerleri, kuvvet doğrultuları, frekans, yüklenme sayıları) elde etme, değerlendirme ve uygulama yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca test düzeneği hakkında detaylı bilgiler de bulunmaktadır.

4.1.Yol Datası Bilgileri

4.1.1.Datanın Kaydedildiği Pist

Data kayıtları Almanya'nın Stuttgart şehrinde bulunan MB'e ait bozuk yol pistinde yapılmıştır. Bu pist MB-Evobus (Otobüs üretim grubu) bünyesinde prototip aşamasında bulunan taşıtların yol testlerinin yapılması amacıyla kullanılan pisttir.

Bozuk yol pisti yol kalitesi olarak bir taşıtın gerçek yol şartlarında karşılaşılabileceği yollara göre çok daha ağır etkiler yapabilecek şekilde hazırlanmıştır. Şekil 4.1'de pistin bölümlerini açıklayan bir çizim bulunmaktadır.

Pist beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde otoban şartları simüle edilmektedir. Bu yolun uzunluğu 200 m'dir ve taşıt bu yolda 50 km/h hızla kullanılır.

İkinci bölümünde viraj etkisi ve bozuk yol şartları birlikte simüle edilmektedir. Yol uzunluğu 200 m'dir ve taşıt bu yolda 20 km/h hızla kullanılır. Ardından bozuk yolda oluşan etkilerin azaltılması amacıyla hazırlanmış bulunan kısa bir mesafe otoban yolu bulunmaktadır.

Üçüncü bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi yolun sağ tarafında yüzey kalitesinin daha fazla bozulmasını simüle etmektedir. Taşıtın sağ tekerleği, üzerinde çukurlar bulunan yolda iken sol tekerleği yüzey kalitesi iyi bir yolda bulunur. Yol uzunluğu 20 m'dir ve taşıt bu yolda 18 km/h hızla kullanılır. İkinci kısım ise taşıtın süspansiyon sistemi elemanlarının performansının denenmesine yönelik

hazırlanmıştır. Bu kısımda önce küçük ve sık tümsekler, sonra giderek büyüyen ve seyrekleşen tümsekler bulunmaktadır. Yol uzunluğu 40 m'dir ve taşıt bu yolda 18 km/h hızda kullanılır.

Dördüncü bölüm çok bozuk yol şartlarını simüle etmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu yolda taşıt ve sürücü üzerinde oluşan etkinin büyüklüğünü ifade etmek için “cehennem yolu” tanımı kullanılmaktadır. Yol yüzeyi üzerine taşlar farklı büyüklükte belirli bir düzende yerleştirilmiştir. Yol uzunluğu 380 m'dir ve taşıt bu yolda 35 km/h hızda kullanılır.

Beşinci bölüm bozuk yol şartlarında taşıt ve sürücü üzerinde oluşan etkileri azaltmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu yolda virajlı otoban ve ardından düz otoban simüle edilmektedir. Yol uzunluğu 700 m'dir ve taşıt bu yolda 50 km/h hızla kullanılır.

Beş ana bölümden oluşan bu pistin uzunluğu 1.640 m'dir. Bu bölümler arasında bozuk yolun etkilerini simüle eden bölümlerin (2inci, 3üncü ve 4üncü bölüm) toplam uzunluğu ise 640 m'dir.

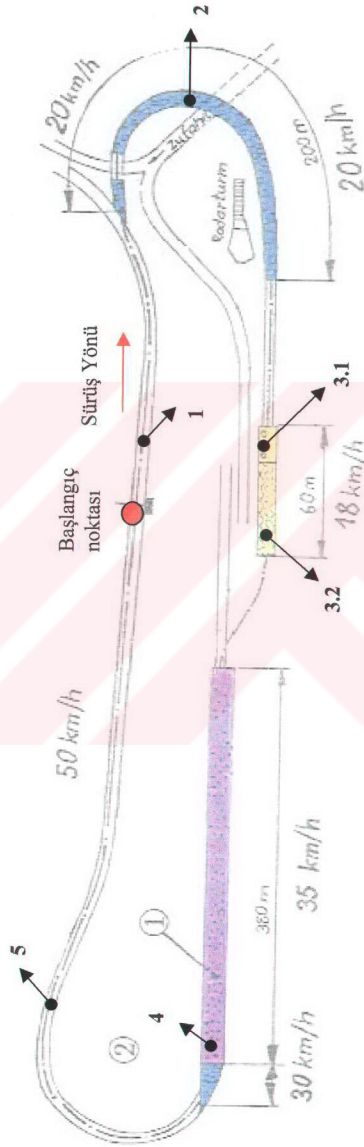
4.1.2. Data Kaydetme Yöntemi

Yorulma testlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerçek yol şartlarında taşıt parçası üzerine etki eden yüklerin (kuvvet, gerilme) belirlenmesi gereklidir. Testleri yapılacak olan yayın karakteristiği biliniyorsa, deplasman değerlerinin ölçülmesi ile etki eden kuvvet değerleri (2.11) formülü ile hesaplanabilmektedir. Bundan dolayı data kaydetme aşamasında yay deplasman değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Data kayıtları MB-Evobus ölçüm ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili ekip tarafından aktarılan bilgilere göre data kaydetme yöntemi açıklanmıştır. Ölçme yöntemi Şekil 4.2'de sembolik olarak çizilmiştir. Ölçüm sırasında taşıtın şasisi referans olarak kabul edilmiştir. Deplasman sensörü taşıt şasisi üzerine sabit olarak monte edilmiştir. Deplasman sensörü içerisinde bulunan ölçüm teli bir makaraya sarılı durumda bulunmaktadır ve telin ucu yay elemana monte edilmiştir.

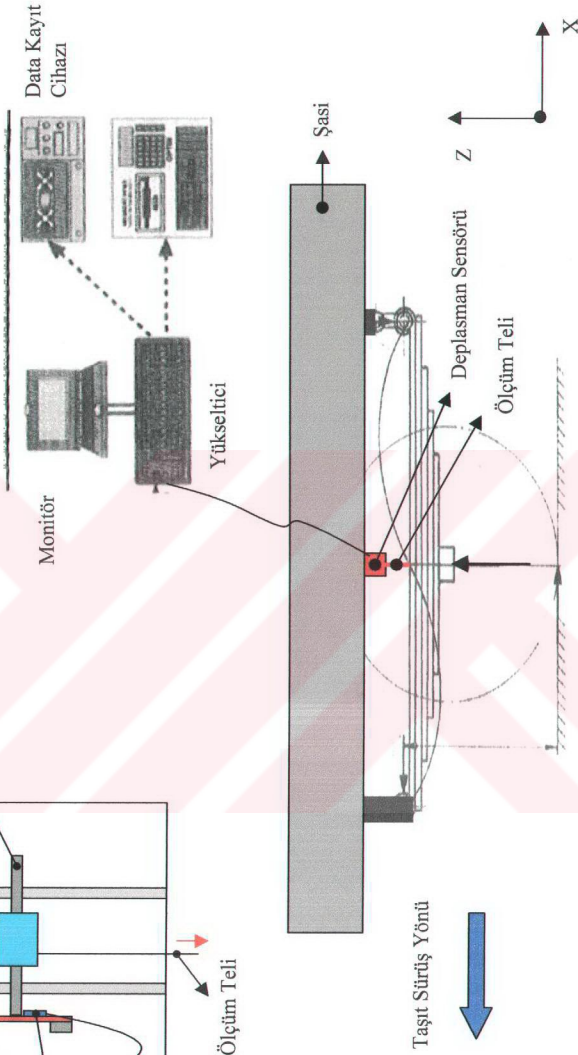
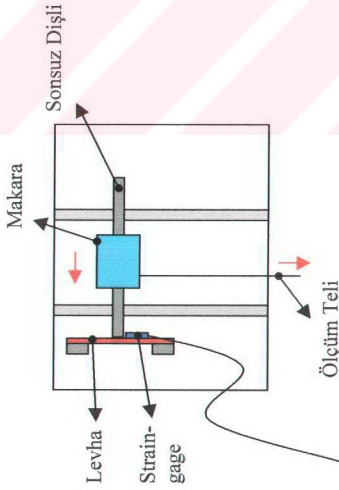
Çukurlu, tümsekli yol (Cehennem Yolu)
 Kasisli yol
 Çukurlu, tümsekli, virajlı yol (Isınma Yolu)
 Sağ tekerlek bölgesi çukurlu yol
 Düzgün asfalt

Gütergah uzunluğu : 1.640 m
 Bozuk yol uzunluğu : 640 m



Şekil 4.1. Data kaydedilen bozuk yol pistinin şematik gösterimi.

Şekil 4.2b. Deplasman sensörünün çalışma prensibi.



Şekil 4.2a. Data kaydetme yönteminin sembolik gösterimi

Makara, bir sonsuz dişli üzerine monte edilmiştir ve makara döndüğünde bu dişli bir yöne doğru ilerlemektedir. Dişlinin ilerlediği yönde bir levha bulunmaktadır ve levha üzerinde dört adet strain-gage bulunmaktadır.

Taşıtın yol şartlarında kullanımı sırasında yayın şasiye yaklaşması ve uzaklaşması sonucu ölçüm teli makaraya sarılmaktadır. Telin makaraya sarılması sonucu sonsuz dişli levha üzerine kuvvet uygulamaktadır. Bu kuvvet sonucu levhada sehim oluşmaktadır ve levhanın sehimi strain-gage'ler üzerinden geçen gerilim değerini değiştirmektedir. Strain-gage'ler üzerinden geçen gerilim değerleri yükselticide arttırılmaktadır ve data kayıt cihazında kaydedilmektedir. Gerilim değerleri değişimiyle ölçüm sensörü üzerindeki elemanların geometrik özelliklerinden yararlanarak yay deplasmanı arasında lineer ilişki kurulmaktadır. Böylece deplasman dataları elde edilmektedir.

4.1.3. Dataların İşlenmesi ve Yükleme Kollektifi Oluşturulması

Datalar, bozuk yol pistinde 10 tur boyunca kaydedilmiştir. Bu on tur içinde bozuk yol uzunluğu toplam 6.400 m'dir. Yükleme kollektifi oluşturulurken sadece bozuk yoldan elde edilen datalar kullanılmıştır. Bu datalar data işleme yöntemlerinden biri olan Level-Crossing yöntemi işlenmiştir. Bu yöntem Bölüm 2.5.1'de açıklanmıştır. Parçanın arzu edilen dayanım ömrünün belirlenmesi gereklidir. Yorulma dayanımına onay verilmesi için firma (MB) deneyimi olarak bu pistte süspansiyon sistemi elemanlarının 2.000 km bozuk yolda kullanılması gerekmektedir. Eğer numune parçada bu test süresinde hasar oluşmazsa yeterli dayanımda olduğu kabul edilmektedir. Bu değer Avrupa ülkelerindeki yol şartları için önerilmektedir. Fakat taşıtın ülkemizde kullanılacağı gözönünde bulundurularak bu değer % 25 oranında arttırılarak 2.500 km olması gerektiğine karar verilmiştir.

Yay deplasman dataları ikişer milimetre aralıkla yükleme seviyelerine ayrılmıştır. Toplam yükleme seviye sayısı (j) onbeş olarak belirlenmiştir. Bölüm 2.6.2.1'de seviye sayısının belirlenmesinde ne amaçlandığı açıklanmaktadır. Her seviyedeki datalar 2.500 km'ye göre arttırılarak (ekstrapole edilerek) yükleme kollektifi belirlenmiştir. Tablo 4.1'de her bir seviye de yay deplasman değerine karşılık yükleme sayısı (N_j) değerleri verilmiştir.

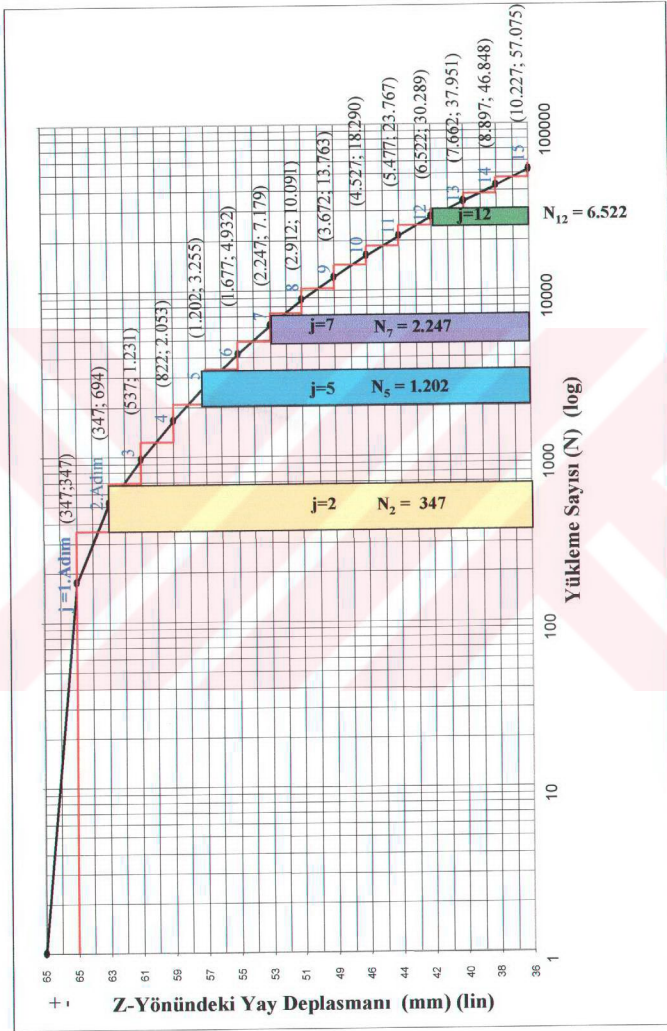
Toplam 57.075 adet yükleme yapılmıştır. Bu değer SAE yay tasarımı ile ilgili kitabında önerilen en az 50.000, en fazla 100.000 yükleme sayısı değeri ile uyusmaktadır [6]. Şekil 4.3'te X-ekseninde yükleme sayıları logaritmik ölçekte ve Y-ekseninde yay deplasman değeri (mm) lineer ölçekte olmak üzere yükleme kolektifi çizilmiştir.

Tablo 4.1. Her seviyedeki yükleme sayıları.

Seviye (j)	Yükleme Sayısı (N _j)	Yay Deplasmanı (mm)
1	347	65
2	347	63
3	537	61
4	822	59
5	1.202	57
6	1.677	55
7	2.247	53
8	2.912	51
9	3.672	49
10	4.527	46
11	5.477	44
12	6.522	42
13	7.662	40
14	8.897	38
15	10.227	36
Toplam	57.075	

4.2. Kuvvet Uygulama Yönlerinin Belirlenmesi

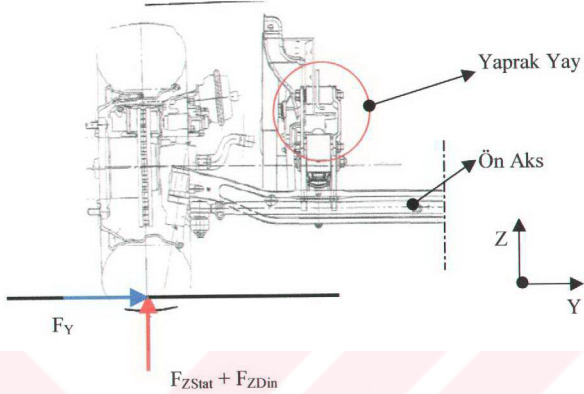
Yay elemanına etki eden kuvvetlerin neler olduğu ve bunların hangi yönlerden etki ettiği Bölüm 3.3'te açıklanmıştır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te kuvvetler gösterilmiştir. Testin yapılacağı Dinamik Test Ünitesi'nde iki adet hidrolik silindir bulunmaktadır. Yaya etki eden üç yöndeki kuvvetten etkisi az olanı ihmal etmek gerekmektedir.



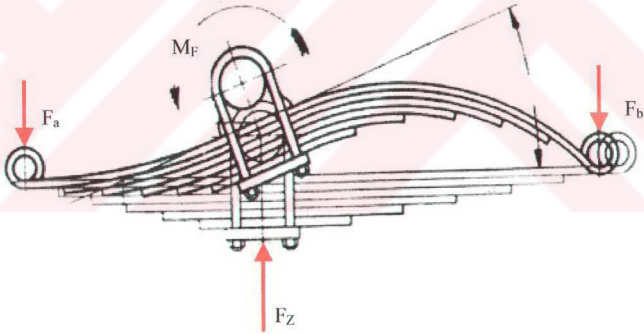
$$(N_j \sum N_j)$$

Şekil 4.3 . Yay deplasman değerleriyle yüklemeye tekrar sayısı arasındaki ilişki ,

Yayın geometrisinden dolayı X-yönünde taşıtın frenlemesi sonucunda yaya etkisi büyük olmaktadır. Bundan dolayı Y-yönündeki viraj kuvveti ihmal edilmiştir.



Şekil 4.4 Taşıta Z ve Y-yönünde etki eden kuvvetler (Ön aks sağ tekerlek bölgesinde)



Şekil 4.5 Asimetrik yaprak yayların frenleme etkisinde aldıkları şekil görülmektedir. [6]

4.2.1.İki Eksenli Yükleme

Testler sırasında aynı anda Z-yönünde ve X-yönünde kuvvet uygulandığı için iki eksenli dinamik yükleme tanımı kullanılmıştır.

4.2.1.1. Z-Yönündeki Yükleme Değerlerinin Belirlenmesi

Yaya etki eden kuvvetlerin hesaplanmasında yay elemanının yerdeğiştirmesi ile yaya etki eden kuvvetler arasındaki lineer ilişki (2.11) kullanılmıştır. Z-yönünde yaya etki eden dinamik kuvvetler bu ilişkiden hesaplanmıştır. Bu kuvvet genel hali formül (4.1)'de verilmiştir.

$$F_{ZDin_j} = k \times \delta_j \quad (4.1)$$

Formül (4.1)'deki k, yay elemana ait nominal yay katsayısıdır.

Bölüm 3.3'te taşıtın kendi ağırlığı ve taşıt yükünün toplamından meydana gelen bir statik yük bulunduğu anlatılmıştır. Ön aksa yaylarına düşen toplam yükü ön aksın nominal yük değerinden (G_o) yaylanmayan elemanların ağırlığının (g_o) çıkartılması ile elde edilmektedir. Bir adet ön aks yayına etki eden yük, bu değerin yarısı olmaktadır. Statik yük değeri formül (4.2)'de şekilde hesaplanmaktadır.

$$F_{ZStat} = \frac{(G_o - g_o)}{2} \quad (4.2)$$

Bu yükleme şeklinde bütün seviyelerdeki ortalama kuvvet değeri¹ F_{ZStat} 'e eşit olmaktadır. Her yükleme seviyesindeki en büyük yük değerini ifade eden F_{ZMaks} değeri F_{ZStat} ile F_{ZDin_j} değerlerinin toplamına eşittir (4.3).

$$F_{ZMaks_j} = F_{ZStatik} + F_{ZDin_j} \quad (4.3)$$

Her yükleme seviyesindeki en küçük yük değerini ifade eden F_{ZMin} değeri F_{ZStat} 'dan F_{ZDin_j} değerlerinin çıkartılması ile hesaplanmıştır. (4.4).

$$F_{ZMin_j} = F_{ZStatik} - F_{ZDin_j} \quad (4.4)$$

¹ Ortalama kuvvet değeri nasıl hesaplandığı formül (2.8)'de verilmiştir.

Z-yönündeki yüklemeye ait F_{ZStat} , F_{ZDin} , F_{ZMaks} , F_{ZMin} değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Z-Yönünde Yükleme Kollektifi Değerleri.

Seviye	Yükleme Sayısı	Yay Deplasmanı	Statik Yük F_{Zstat}	Dinamik Yük F_{Zdin}	Maksimum Yük $F_{ZMaks} = F_{Zstat} + F_{Zdin}$	Minumun Yük $F_{ZMin} = F_{Zstat} - F_{Zdin}$
(j)	(N_j)	(mm)	[kN]	(kN)	(kN)	(kN)
1	347	65	20,48	7,97	28,45	12,51
2	347	63	20,48	7,73	28,21	12,75
3	537	61	20,48	7,47	27,95	13,01
4	822	59	20,48	7,21	27,69	13,27
5	1.202	57	20,48	6,96	27,44	13,52
6	1.677	55	20,48	6,70	27,18	13,78
7	2.247	53	20,48	6,44	26,92	14,04
8	2.912	51	20,48	6,18	26,66	14,30
9	3.672	49	20,48	5,93	26,41	14,55
10	4.527	46	20,48	5,67	26,15	14,81
11	5.477	44	20,48	5,41	25,89	15,07
12	6.522	42	20,48	5,15	25,63	15,33
13	7.662	40	20,48	4,90	25,38	15,58
14	8.897	38	20,48	4,64	25,12	15,84
15	10.227	36	20,48	4,38	24,86	16,10
Toplam	57.075					

4.2.1.2. X-Yönündeki Yükleme Değerlerinin Belirlenmesi

Bölüm 3.3’te yay X-yönünde etki eden kuvvet taşıtın frenlemesi sırasında oluşan kuvvetler olduğu açıklanmıştır. X-yönündeki kuvvet frenleme sırasında oluşabilecek maksimum kuvvet gözönüne alınarak belirlenmiştir. Bu yöndeki dinamik kuvvetler Z-yönündeki toplam kuvvetlerin belirli bir oranı olarak hesaplanmıştır. X-yönünde her seviye için hesaplanan kuvvet değerleri Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3. X-Yönündeki Yükleme Kolektifi Değerleri.

Seviye (j)	Yükleme Sayısı (N _j)	Minumum Yük F _{XMinj} [kN]	Maksimum Yük F _{XMaksj} (kN)	Ortalama Yük $F_{XOrtj} = (F_{XMaksj} + F_{XMinj})/2$ (kN)
1	347	0	23,40	11,70
2	347	0	23,20	11,60
3	537	0	22,99	11,50
4	822	0	22,78	11,39
5	1.202	0	22,57	11,29
6	1.677	0	22,36	11,18
7	2.247	0	22,14	11,07
8	2.912	0	21,93	10,97
9	3.672	0	21,72	10,86
10	4.527	0	21,51	10,76
11	5.477	0	21,30	10,65
12	6.522	0	21,09	10,55
13	7.662	0	20,87	10,44
14	8.897	0	20,66	10,33
15	10.227	0	20,45	10,23
Toplam	57.075			

4.3. Blok-Program Yükleme Değerlerinin Belirlenmesi :

Yol dataları elde edildikten sonra yükleme modelinin belirlenmesi gereklidir. Bölüm 2.6.2.'de açıklanan modellerden biri olan Blok-Program yükleme modeli kullanılmıştır.

Bölüm 2.6.2.1.'de Blok-program yükleme modeli hakkında detaylı bilgiler bulunmaktadır. Yükleme seviye sayısı, seviyeler arasındaki geçişlerii yumuşatmak (genlik farklarını azaltmak) amacıyla onbeş olarak belirlenmiştir. Her bir seviyedeki yay deplasman değeri (δ_j) ve bu seviyedeki yükleme tekrar sayısı (N_j) değerleri bilinmektedir (Tablo 4.1).

Blok-Program yükleme modelinin karakteristik özelliği toplam yükleme sayısının bloklara ayrılmasıdır. Bu blokların herbirinde her seviyeden yükleme değerleri bulunmalıdır. Bu yöntemi uygulamada deneyimli kişiler tarafından blok sayısının en az 25 adet olması önerilmektedir [3]. Bu bilgi referans alınarak blok sayısı 50 adet olarak belirlenmiştir. Tablo 4.1’de bulunan yükleme seviyeleri 50’ye bölünerek bir bloktaki yükleme sayıları (ΔN_f) belirlenmiştir. Hesaplama sonucu bir blokta bulunması gereken yükleme sayıları Tablo 4.4’de verilmiştir. Her blok aynı yükleme sayısına sahiptir. Tablo 4.1’deki yükleme sayıları 2.500 km bozul yol testinin karşılığı olduğu için bir blok yüklemenin 50 km bozuk yol testinin karşılığı olduğu kabul edilmiştir.

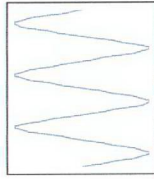
Yükleme genlik değerleri arasındaki farkın büyük olması yorulma sonucu kırık oluşması ve bu kırığın ilerlemesi mekanizmasının hızlanmasına imkan vermektedir. Bunun oluşmaması için genlik değerleri arasındaki farkın küçük olması için bir blokta bulunan her seviyedeki genlik değerleri ikiye ($\frac{\Delta N_f}{2}$) bölünmüştür ve bir blok yüklemede iki defa kullanılmıştır.

Blok yükleme orta büyüklükte bir genlik olan 7inci seviyeden itibaren başlatılmıştır. Yedinci seviyeden sonra genlik değerleri daha büyük olan 6ıncı, 5inci, ..., 1inci seviyeler sıralandırılmıştır. Maksimum genlik değerini ifade eden 1inci seviyenin tekrar yüklenmesinin ardından giderek azalan genlik değerleri içeren 2nci, 3üncü, ...15inci seviyeler sıralandırılmıştır. Minumum genlik değerini ifade eden 15inci seviyenin tekrar yüklenmesinin ardından giderek artan genlik değerleri içeren 14üncü, 13üncü, 8inci seviyeler sıralandırılmıştır. Böylece herbir seviyede iki kere yükleme gerçekleştirilmiştir.

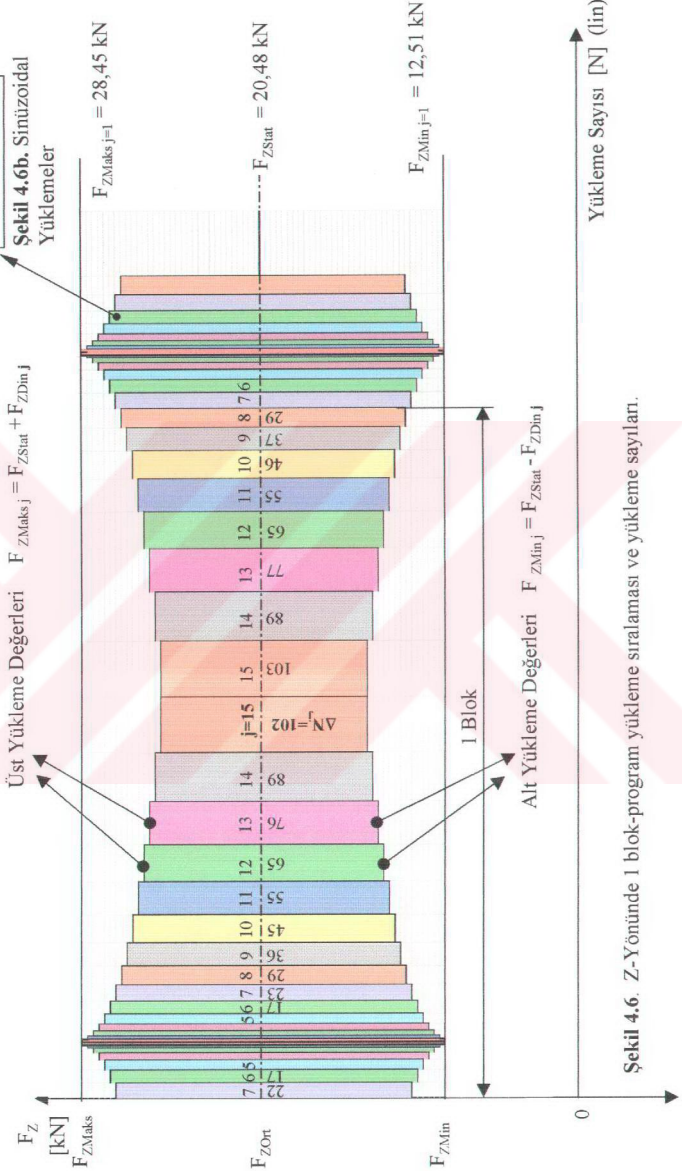
Z-yönündeki yükleme seviyelerinin sıralandırılması ve kuvvet değerleri Tablo 4.5’te sayısal değer olarak ve Şekil 4.6’da ölçekli grafik olarak verilmiştir. X-yönündeki yükleme seviyelerinin sıralandırılması ve kuvvet değerleri Tablo A.1’de sayısal değer olarak ve Şekil A.1’de ölçekli grafik olarak verilmiştir.

Tablo 4.5. Bir blokta Z-yönünde uygulanan yükleme sıralaması ve kuvvet değerleri

Seviye (j)	Yükleme Sayısı ($\Delta N_j / 2$)	Ortalama Yük (F_{ZOrtj}) (kN)	Dinamik Yük ($F_{Zdin j}$) (kN)	Maksimum Yük $F_{zMaksj}=F_{ZOrtj} +$ $F_{Din j}$ (kN)	Minumun Yük $F_{ZMinj}=F_{ZOrtj} -$ $F_{Din j}$ (kN)	Frekans (Hz)
7	22	20,48	6,44	26,92	14,04	1
6	17	20,48	6,70	27,18	13,78	1
5	12	20,48	6,96	27,44	13,52	1
4	8	20,48	7,21	27,69	13,27	1
3	6	20,48	7,47	27,95	13,01	1
2	4	20,48	7,73	28,21	12,75	1
1	4	20,48	7,97	28,45	12,51	1
1	3	20,48	7,97	28,45	12,51	1
2	3	20,48	7,73	28,21	12,75	1
3	5	20,48	7,47	27,95	13,01	1
4	8	20,48	7,21	27,69	13,27	1
5	12	20,48	6,96	27,44	13,52	1
6	17	20,48	6,70	27,18	13,78	1
7	23	20,48	6,44	26,92	14,04	1
8	29	20,48	6,18	26,66	14,30	1
9	36	20,48	5,93	26,41	14,55	1
10	45	20,48	5,67	26,15	14,81	1
11	55	20,48	5,41	25,89	15,07	1
12	65	20,48	5,15	25,63	15,33	1
13	76	20,48	4,90	25,38	15,58	1
14	89	20,48	4,64	25,12	15,84	1
15	102	20,48	4,38	24,86	16,10	1
15	103	20,48	4,38	24,86	16,10	1
14	89	20,48	4,64	25,12	15,84	1
13	77	20,48	4,90	25,38	15,58	1
12	65	20,48	5,15	25,63	15,33	1
11	55	20,48	5,41	25,89	15,07	1
10	46	20,48	5,67	26,15	14,81	1
9	37	20,48	5,93	26,41	14,55	1
8	29	20,48	6,18	26,66	14,30	1
Toplam	1.142					



Şekil 4.6b. Sinüzoidal Yükleme



Şekil 4.6. Z-Yönünde 1 blok-program yükleme sıralaması ve yükleme sayıları.

Tablo 4.4. Bir bloktaki yükleme sayıları

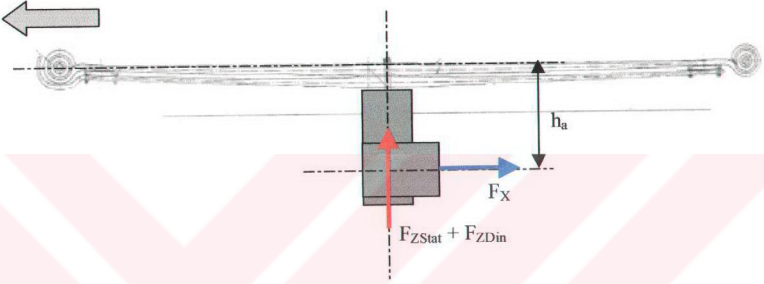
Seviye (j)	Yükleme Sayısı (ΔN_j)	Yay Deplasmanı (mm)
1	7	65
2	7	63
3	11	61
4	16	59
5	24	57
6	34	55
7	45	53
8	58	51
9	73	49
10	91	46
11	110	44
12	130	42
13	153	40
14	178	38
15	205	36
Toplam	1.142	

4.4. Test Düzenegi ve Test

Yükleme kuvvetlerini uygulama noktaları, taşıt ile yay arasındaki geometrik ilişki gözönünde bulundurularak test düzeneğinin hazırlanması gereklidir. İlgili taşıta ait bir şasi temin edildi ve şasi hidrolik silindirlerin montajına imkan vermek için test ünitesinin pleytine Z-yönünde ters monte edildi (tekerlekler yukarıda olacak şekilde). Hidrolik silindirlerin kuvvet uygulayabilmeleri için taşıyıcı sistemler imal edilmiştir. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi Z-yönündeki kuvvet yay elemana aksa monte edildiği noktadan etki etmektedir. X-yönündeki kuvvet frenleme kuvveti olduğu için tekerleğin yola temas ettiği noktadan etki etmektedir ve yayın şasiye monte edildiği nokta ile yol arasındaki mesafe h_a ’dır. Hidrolik silindirlerin yaya kuvvet uygulayabilmeleri için bir ara parça hazırlanması gereklidir. Bu ara parçaya aparat denilmektedir.

Şekil 4.7’de yay elemanın taşıta montaj şekline göre aparatın kuvvetlerin uygulanmasındaki görevi gösterilmiştir. Aparatın tasarımında uygulanacak kuvvetlerde rijit davranacak şekilde kesitler seçilmesine dikkat edildi. Aparatın rijitliğinin yeterli olmaması durumunda dinamik test ünitesi tarafından gönderilen yükleme sinyalleri ile hidrolik silindirden alınan cevap sinyalleri arasında sapma sonucunda yükleme hassasiyetinin azalması söz konusu olabilmektedir .

Taşıt Sürüş Yönü

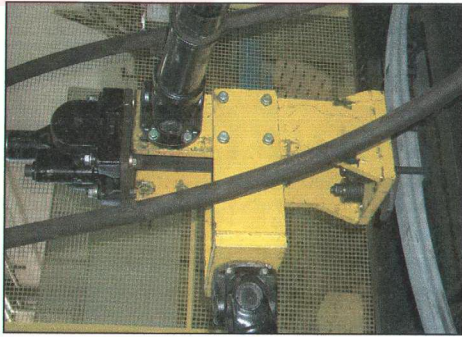


Şekil 4.7 Z-yönündeki ve X-yönündeki kuvvetlerin aparat yardımı ile simüle edilmesi.

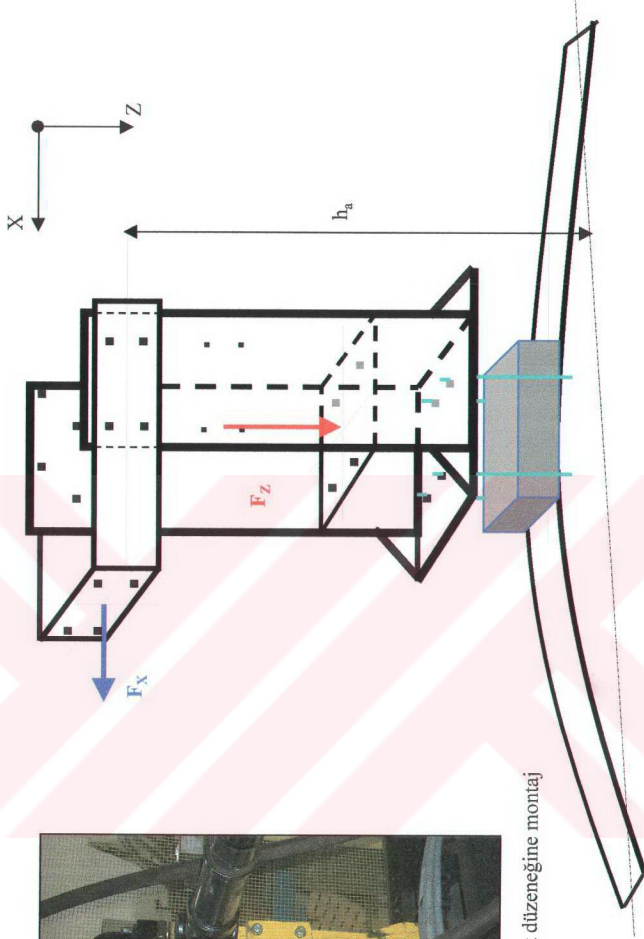
Bu hassasiyetin azalması test sonucunu etkileyebilecek sonuçlar ortaya çıkarabildiği için aparat tasarımında yeterli rijitlikte tasarlanması önem arz etmektedir. Tasarlanmış olan aparat Şekil 4.8.’de görülmektedir.

4.4.1. Yükleme Frekansının Belirlenmesi

SAE’nin yay tasarımı için hazırladığı kitabında yaprak yayların yorulma ömür testlerinde 0,5 ile 2 Hz arasında frekansta yükleme yapılması önerilmektedir [6,10]. Bu aralıkta frekans değeri belirlendikten sonra yükleme sırasında test parçası yüzeyindeki sıcaklık değerinin $+ 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’yi geçmemesi tavsiye edilmektedir. Bu yüzey sıcaklık değerinin üzerine çıkılması durumunda yay yüzeyinde malzeme özelliklerinin değişmesi söz konusu olmaktadır [6,10]. Test parçasının malzeme özelliklerinin kısmende olsa değişmesi test sonucuna etki etmektedir.



Şekil 4.8b. Aparatın test düzeneğine montaj görünümlü.



Şekil 4.8a. Test aparatı ve kuvvet uygulama noktaları.

Her iki yöndeki yüklemeler için frekans değeri 1 Hz olarak belirlenmiştir. Testler sırasında numune yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri elle kontrol edilmiştir. Yüzey sıcaklığının + 90 °C mertebelerine ulaşmadığı belirlenmiştir. Seçilen frekans değerinin uygun olduğuna karar verilmiştir.

4.4.2. Test Süresinin Hesaplanması

Toplam yükleme sayısı 50 bloğa ayrılmıştır. Herbir blokta toplam 1.142 adet sinüzoidal yükleme bulunmaktadır. Yükleme frekansı 1 Hz olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir blok yükleme için gerekli olan süre 1.142 sn'dir.

Bir blokta 15 farklı seviye yükleme genliği bulunmaktadır ve bütün yüklemeler ardarda yapılamamaktadır. Dinamik test ünitesi bir seviyedeki yüklemeyi gerçekleştirdikten sonra sıradaki yükleme seviyesine geçişte yazılımın yeni yükleme dosyasını okuması ve kontrol cihazına bu dosyaya ait sinyali göndermesi işlemleri sırasında bir süre geçmektedir. Bu yükleme zamanının haricinde oluşan vakit kaybını toplam test süresi içerisine ilave etmek gerekmektedir. Bu zaman kaybı bir oran olarak değerlendirilmektedir. Bu oranın yaklaşık 1.3 olduğu kabul edilmiştir.

Bu oranın bir blok yükleme için gerekli süre ile çarpımı sonucu 1485 sn'de bir blok yükleme yapılabileceği hesaplanmıştır. Elli blok yükleme için 74.250 sn zaman gerekmektedir. Bu durumda toplam test süresi yaklaşık 21 saat olmaktadır. Test cihazının aktif olarak günlük kullanım süresi 7 saat olarak kabul edilmiştir. Bu durumda bir adet numune yayın testinin yaklaşık 3-4 iş gününde gerçekleştirileceği hesaplanmıştır.

Günlük çalışma saatlerini artırılmasıyla (vardiyalı çalışma) test süresini kısaltma potansiyeli bulunmaktadır.

4.5. Dinamik Test Ünitesi

Dinamik test ünitesi, hidropuls test düzeneği ve bu düzeneğini kontrol eden bir yazılımdan oluşmaktadır. Yorulma ömür testi uygulanması amacıyla MTS firması tarafından tasarlanmış bir test düzeneğidir. Hidrolik güç, dijital sinyallerle kumanda edildiği için verilen Hidropuls tanımı kullanılmaktadır. Test cihazı dinamik yüklemeleri yüksek hassasiyetle (0,01 mm) gerçekleştirebilmektedir. Kontrollü yükleme 100 Hz frekansına kadar gerçekleştirebilmektedir. Test cihazının genel görünümü Şekil 4.9'da verilmiştir. Test cihazı elemanları arasındaki sinyal, güç, kontrol ilişkilerini ifade eden şema Şekil 4.10'de verilmiştir. Test düzeneği elemanları aşağıdaki bölümlerde kısaca tanıtılmıştır.

4.5.1. Hidropuls Test Düzeneği

4.5.1.1. Hidrolik Güç Ünitesi :

Hidrolik güç ünitesi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır ;

- Yağ pompası : 210 bar yağ basıncı oluşturarak sisteme göndermektedir.
- Elektrik motoru: 90KW gücündeki motor yağ pompasını tahrik etmektedir.
- Yağ tankı : 1100 lt yağ hacmi kapasitesi bulunmaktadır.

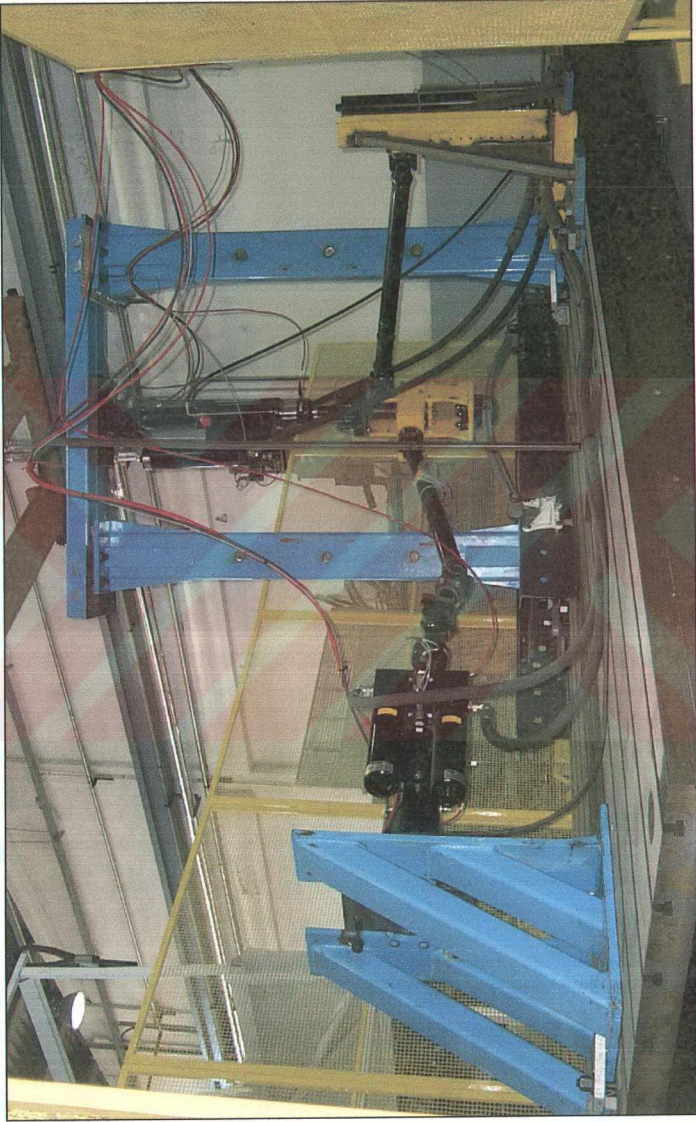
Şekil 4.11'de Hidrolik güç ünitesi görülmektedir.



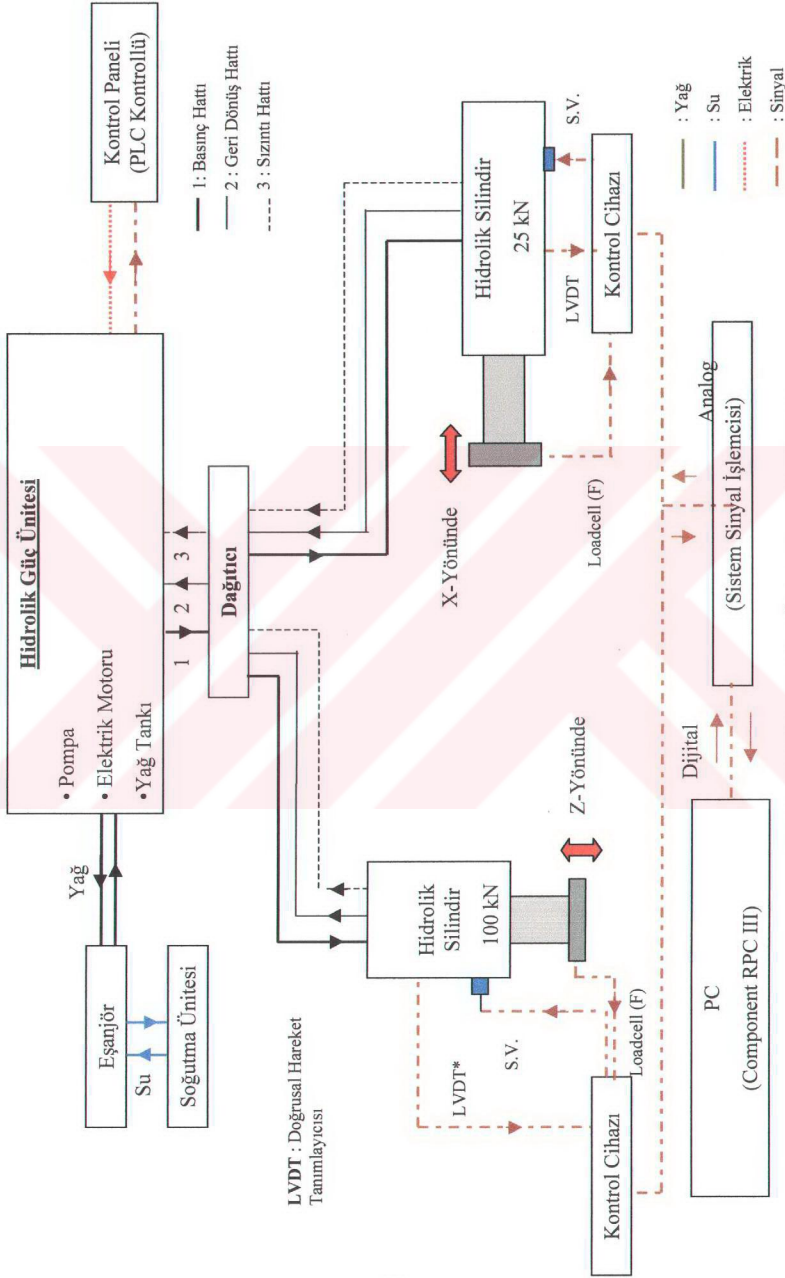
Şekil 4.11. Hidrolik Ünitenin Genel Görünüşü
(Elektrik Motoru, Pompa ve Yağ Tankı)

4.5.1.2. Dağıtıcı (Manifold) :

Dağıtıcı, pompadan gelen basınçlı yağın farklı hidrolik çevrimlere gönderilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.9 Dinamik Test Ünitesi Genel Görünüşü



Şekil 4.10. Hidropuls Test Ünitesi Şematik Gösterimi

Üzerinde iki adet basınç kontrol dağıtıcısı bulunmaktadır. Dağıtıcının çalışma sınırı basıncı 210 bar'dır. Çalışma aralığı 14 bar ile 138 bar arasında seçilebilmektedir. Üzerine monte edilmiş bir adet 5 lt'lik hidrolik akümülatör bulunmaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Dağıtıcı (Manifold)



Şekil 4.13. 100 kN'luk Hidrolik Silindir

4.5.1.3. Hidrolik Silindirler :

Dağıtıcıdan gelen basınçlı yağı kontrol ünitesinden (Component RPC III) gelen sinyallere göre test parçası üzerine deplasman, kuvvet olarak uygulayan elemandır. Test düzeneğinde iki adet hidrolik silindir bulunmaktadır.

a) 25 kN'luk Hidrolik Silindir :

Hidrolik Silindir lineer hareket yeteneğine sahiptir. Silindir modeli firma tarafından 248.03 numarası ile ifade edilmektedir. Dinamik olarak maksimum (+/-) 25 kN kuvvet uygulayabilmektedir. Hidrolik silindirin toplam stroğu 250 mm'dir. Stroğun ortası O noktası kabulü ile artı ve eksi yönde 125 mm aktif strokta yükleme yapılabilmektedir. Silindir çekme ve basma yönünde kuvvet uygulayabildiği için çift etkili olarak tanımlanmaktadır. Yükleme hassasiyetinin sağlanması amacıyla silindir içinde bulunan pistonun lineer hareketi LVDT tipi konum belirleyici ile kaydedilip kontrol ünitesine gönderilmektedir. Hidrolik silindir Şekil 4.16'da test düzeneğine monte edilmiş durumda görülmektedir. Hidrolik silindir üzerine monte edilmiş bulunan elemanlar :



Şekil 4.14. 25 kN'luk Hidrolik Silindir

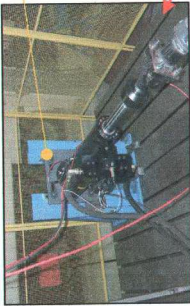
- **Hidrolik Servovalfler** : Kontrol cihazından gelen analog sinyallere göre silindir içindeki pistonun hareketi için gerekli olan yağ miktarını belirleyen elemandır. Maksimum 70 bar basınçta çalışabilmektedir. İki yönlü dört yollu valf sınıfına girmektedir.
- **Basınç Farkı Sensörü** : Yüksek ivme ile uygulanan kuvvetlerde kapalı çevrimin kararlılığını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca ani basınç artmalarında filtrenin hasarlanmasını da engellemektedir.
- **Hidrolik Akümülatör** : Şok veya yüksek dinamik özellikler yüklenmesi gerektiğinde depoladığı basınçlı yağ ile hidrolik silindirin kararlılığın desteklemektedir. Silindir üzerinde bir litre hacminde iki adet akümülatör bulunmaktadır.

b) 100 kN'luk Hidrolik Silindir :

Dinamik olarak maksimum +/- 100 kN kuvvet uygulayabilmektedir. Diğer özellikleri 25 kN'luk hidrolik silindir ile benzer olduğu için tekrarlanmamıştır. Silindirin test düzeneğine monte edilmiş durumu Şekil 4.13'te görülmektedir. Test düzeneği, hidrolik silindirler, numune parça ve test aparatı Şekil 4.15'te verilmiştir.

4.5.1.4. Kontrol Cihazı :

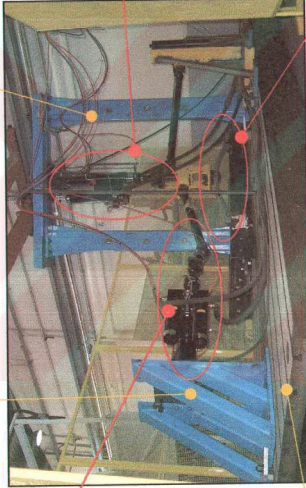
Her bir hidrolik silindir için bir adet kontrol cihazı bulunmaktadır. Üretici firma tarafından Model 407 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.15b. 25 kN'lık Hidrolik silindir ve taşıyıcı sistem.

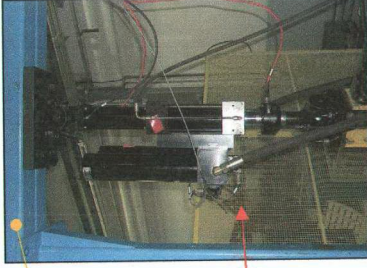
Taşıyıcı sistem

Taşıyıcı sistem

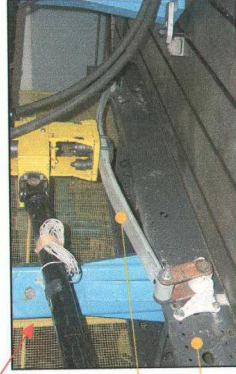


Pleyt

Şekil 4.15a. Test düzeneğinin genel görünüşü. Hidrolik silindirler ve taşıyıcı sistemleri (mavi renkli elemanlar)



Şekil 4.15c. 100 kN'lık Hidrolik silindir ve taşıyıcı sistem.



Numune Parça

Taşıt Şasisi

Şekil 4.15d. Test düzeneğinde taşıt şasisi, numune parça, aparatın (sarı renkli eleman) montaj şekli.

Cihazların herbiri bir kanallı PIDF otomatik kontrol (Proportional, Integral, Derivate, Feed forword) sistemidir. İki veya üç kademeli bir adet valf kumandası bulunmaktadır. Kare ve üçgen dalga gibi temel fonksiyonları 0.1 Hz ile 100 Hz arasında uygulayabilmektedir. Yol datası gibi kompleks dataları ise maksimum 500 Hz'e kadar uygulanabilmektedir. Ayrıca test düzeneği kontrolü işlemlerini gerçekleştirmektedir. Test çevrimlerini sayabilmekte ve acil durumlarda test düzeninin durudurulması sağlanmaktadır. Yüksek ivmelenmeli kuvvetlerde kapalı çevrimlerin kararlı olmasını sağlamaktadır. Şekil 4.16'de kontrol cihazları görülmektedir.



Şekil 4.16. Kontrol Cihazları



Şekil 4.17. Sinyal Dönüştürücü

4.5.1.5. Sinyal Dönüştürücü :

Kontrol yazılımından (Component RPC III) gelen dijital sinyalleri analog sinyallere dönüştürmektedir ve kontrol cihazına göndermektedir. Hidrolik silindirler üzerinde bulunan yükleme vericisinden (Loadcell) kontrol cihazına gelen analog sinyalleri dijital sinyale dönüştürerek kontrol yazılımına gönderir. Sinyal dönüştürücü Şekil 4.17.'de görülmektedir.

4.5.1.6. Kontrol Paneli :

Elektrik motorunun enerjisini temin eder ve hidrolik silindirlerden yağ tankına dönen yağın belirli sıcaklık (20-70 °C) aralığında kalmasını sağlamaktadır. Bunu manyetik valfleri PLC kontrollü olarak kumanda ederek gerçekleştirir. Kontrol paneli Şekil 4.18'te görülmektedir.



Şekil 4.18. Kontrol Paneli



Şekil 4.19. Soğutma Ünitesi

4.5.1.7. Isı Değiştirici :

Hidrolik silindirlerle test parçası üzerine yükleme oluşturulması sırasında yağ ısınmaktadır. Yükleme değerinin hassasiyetinin korunabilmesi için yağ viskozitesinin korunması gerekmektedir. Viskoziteyi belirleyen yağ sıcaklık değerinin korunması amacıyla su ile soğutma yapan ısı değiştirici bulunmaktadır. Isı değiştirici Şekil 4.20’te görülmektedir.



Şekil 4.20. Eşanjör

4.5.1.8. Soğutma Ünitesi :

Isı değiştiricide sıcaklığı artan su soğutma ünitesindeki fanlar yardımıyla cebri olarak hava ile soğutulmaktadır. Soğutma ünitesi Şekil 4.19’de görülmektedir.

4.5.2. Yazılım

Dinamik test ünitesi Component RPC III yazılımı kontrol ve kumanda edilmektedir. Bu yazılım sinüsoidal, kare, rampa fonksiyonları gibi basit sinyalleri uygulamasının yanı sıra değişik frekanslarda random sinyalleri de uygulayabilmektedir. Yazılımın en büyük özelliği yol verilerinin simüle edilmesine imkan vermesidir.

Yolda kaydedilen verinin dijital duruma getirilmesi, analizi, dinamik test ünitesinin transfer fonksiyonunun hesaplanması ve gerekli iterasyonların yapılmasıyla istenilen yol verilerinin test edilecek düzeneğe uygulanması bu yazılım aracılığı ile yapılabilmektedir. Programın ana menüsünde bulunan ayarlar bölümüne gerekli parametreler (deplasman, yük ve ivme kontrolü), filtre ayarları, bu parametrelerin limitleri girilerek istenilen kullanıma göre ayarlar yapılmaktadır. Bu parametreler verinin toplanması, örneklenmesi ve düzeneğe ulaştırılması için gereklidir. Yay elemana ait deplasman dataları MB-Evobus ölçüm ekibi tarafından kaydedildiği için yazılım yol datası kaydı için kullanılmamıştır.

Yazılımın ana amaçlarından biri de sistemin transfer fonksiyonunu tanımlamaktır. Bu amaçla bir random yük yaratılmakta ve bu yük kontrol ünitesi üzerinden düzeneğe iletilmektedir. Elde edilen cevap yazılım tarafından çeşitli işlemlerden geçirilerek test düzeneğine ait transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Bu fonksiyon daha sonra uygulanması düşünülen her türlü yüklemeye kullanılabilmektedir.

Test edilecek yapıya yay test düzeneğine monte edildikten sonra uygulanan random yük Şekil A.2’de, sistemin bu yüklemeye verdiği cevap Şekil A.3’te verilmiştir. Yazılım random yük ve sistemin cevabına göre sisteme ait transfer fonksiyonu hesaplamaktadır. Sistemin transfer fonksiyonu Şekil A.4’de verilmiştir.

Transfer fonksiyonu tanımlandıktan sonra kullanılmak istenilen esas veriye ulaşmak için gerekli dijital filtre işlemleri tanımlanmalı, uygulanmalıdır ve veri transfer fonksiyonu ile analiz edilmelidir. Ardından gerekli iterasyonlar yapılarak test parçası üzerinde istenilen veriye ulaşılmasını sağlayacak yükleme dosyası belirlenmektedir. Birinci yükleme seviyesi ($j=1$) için cevap olarak alınması

istenilen (arzu edilen) sinyal Şekil A.5’de verilmiştir. Bu cevap sinyalinin alınabilmesi için uygulanması gerekli olan yükleme sinyali yazılım tarafından hesaplanmıştır ve Şekil A.6’da verilmiştir. Benzer işlemler her seviye yükleme için tekrar edilerek blok program için gerekli olan yükleme sıralaması oluşturulmuştur.

Yazılımın görüntüleme bölümü ile elde edilen her türlü drive, cevap, filtre, transfer fonksiyonu, istatistik, hata dosyaları incelenebilmekte veya iki ayrı dosya karşılaştırılabilmektedir. İstatistik seçeneği gerekli istatistik hesaplarını sağlamakta, edit menüsü ise veri dosyaları üzerinde her türlü ekleme, çıkarma ve birleştirme işlemlerine imkan vermektedir.

5. HESAPLAMA YÖNTEMİYLE ANALİZ

Dinamik kuvvetlerle zorlanan bir parçanın dayanım ömrünü hesaplama yöntemiyle belirlemek mümkündür. Bu bölümde süspansiyon elemanının dayanım ömrü hesabının nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Ömür hesabı, Palmgren-Miner Hipotezi olarak isimlendirilen bir yöntemle yapılmıştır. Bu Hipotez lineer bir hesaplama yöntemidir ve bu yöntem sonucunda yaklaşık sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu hipotezin uygulanabilmesi için, test parçasının malzeme özelliklerine göre belirlenmiş olan Wöhler eğrisi ve uygulanan kuvvetler sonucu parça üzerinde oluşan gerilme değerleri ve bu gerilme değerlerinin hangi tekrar sayısında uygulandığının bilinmesi gerekmektedir. Bölüm 5.1’de test parçasının imal edildiği malzemeye ait Wöhler eğrisinin nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Bölüm 5.2’de test parçalarına etki eden kuvvetler sonucu yay eleman üzerinde oluşan gerilme değerlerinin nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. Bölüm 5.3’te Wöhler eğrisi ile yay eleman üzerinde oluşan gerilme değerleri aynı S-N grafiğine taşınarak Palmgren-Miner Hipotezinin nasıl uygulandığı anlatılmıştır.

5.1. Malzemeye Ait Wöhler Eğrisinin Elde Edilmesi

Wöhler eğrisi malzemeye ait bir özelliktir. Bundan dolayı her malzemeye ait ayrı bir Wöhler Eğrisi bulunmaktadır. Yay malzemesine (50 Cr V 4) ait eğri çizilmiş olarak temin edilememiştir. Bu eğrinin çizilmesi ile ilgili bir yaklaşım kullanılmıştır [4]. Bu yaklaşım kısaca açıklanmıştır ; 10^3 yükleme sonucunda malzemenin kırılması için gerekli olan gerilme değerinin (σ_A) malzemenin kopma gerilmesinin 0,9 katı olduğu öngörülmüştür. 10^3 yükleme sayısı ile bu yüklemede hasara neden olan gerilme değerinin kesiştiği nokta Wöhler eğrisinin başlangıç noktasıdır¹.

¹ Wöhler eğrisini elde edilmesi için yapılan testlerde 10^3 yükleme sayısından daha düşük değerler belirsiz bir durum göstermektedir. Bundan dolayı 10^3 yükleme değerinden küçük değerler için bir doğru çizdirilmeyecektir.

Bu nokta $A(10^3; \sigma_A)$ harfi ile sembolize edilmiştir.

$$\sigma_A = 0,9\sigma_K \quad (5.1)$$

Demir kökenli malzemeler için sürekli mukavemet sınırı 10^6 mertebelerinde yükleme sayısına karşılık gelen gerilme değeri olduğu kabul edilmektedir. 10^6 yükleme sonucunda malzemenin kırılması için gerekli olan gerilme değerinin (σ_B) malzemenin kopma gerilmesinin 0,5 katı olduğu öngörülmüştür (5.2). Bu nokta $B_1(10^6; \sigma_{B_1})$ harfi ile sembolize edilmiştir.

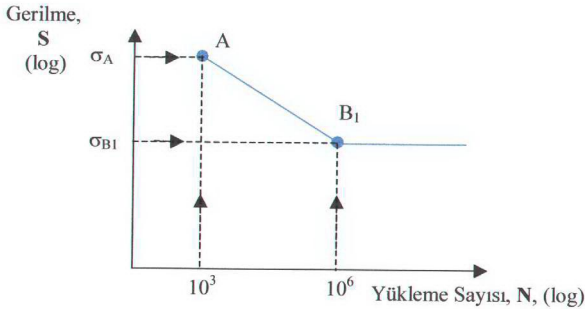
$$\sigma_{B_1} = 0,5\sigma_K \quad (5.2)$$

Yay elemanın imalatında kullanılan malzemeye (50 Cr V4) ait kopma dayanımı değeri Tablo 3.1’de verilmiştir ($\sigma_K = 1.670 \text{ N/mm}^2$). A ve B_1 noktalarına ait gerilme değerleri formül (5.1) ve (5.2) ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_A = 1.503 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{B_1} = 835 \text{ N/mm}^2$$

A ve B_1 noktaları S-N grafiği üzerinde belirlenmiştir ve bu iki nokta bir doğru ile birleştirilmiştir. Böylece Wöhler eğrisi çizilmiştir. Şekil 5.1’de Wöhler eğrisi görülmektedir.



Şekil 5.1. Wöhler Eğrisi Çizilmesi

Wöhler eğrisi belirlenmesi için yapılan testlerde özel hazırlanmış test numuneleri kullanılmaktadır. Bu numunelerin hazırlanma yöntemleri, üretim kalitesi gibi şartlar test sonuçlarını etkilemektedir.

Sürekli mukavemet sınırının belirlenmesinde bu etkenlerin hesaba katılması gerekmektedir. Sürekli mukavemet sınırının başladığı noktanın belirlenmesinde hassasiyetin artırılması amacıyla üç ayrı katsayı tanımlanmıştır². Bu katsayıların birincisi yükleme katsayısı (C_L), ikincisi yüzey katsayısı (C_S), üçüncüsü ise gradyant katsayısıdır (C_G). Bu katsayıların hesaba katılmasıyla yeni sürekli mukavemet sınırı başlangıç noktasına ait gerilme değeri bulunmuştur. Bu nokta $B_2(10^6; \sigma_{B_2})$ ile sembolize edilmektedir.

$$\sigma_{B_2} = C_L C_S C_G 0,5 \sigma_K \quad (5.3)$$

C_L katsayısı yükleme şekline göre belirlenmektedir. Yükleme şekli eğilme olduğu için Tablodan³ $C_L=1$ olarak belirlenmiştir. C_S katsayısı numune parçanın yüzey kalitesine göre belirlenmektedir. Numunelerin parlatılmış yüzeye sahip oldukları kabulü ile grafikten⁴ $C_S= 0,9$ değerinde olduğu belirlenmiştir. C_G katsayısı ise numunelerin çapına bağlı olarak belirlenmektedir. Tablo³'dan $C_G= 0,9$ olarak belirlenmiştir.

Böylece (5.3) nolu formülde C_L , C_S , C_G katsayıları yerlerine konulunca B_2 noktasına karşılık gelen gerilme değeri (σ_{B_2}) hesaplanmıştır.

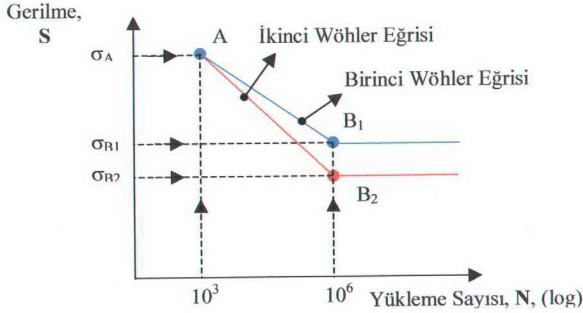
$\sigma_{B_2} = 676 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Yeni mukavemet sınırı başlangıcı olan B_2 noktasının konumu Şekil 5.2'te gösterilmiştir.

Palmgren-Miner hipotezinin uygulanmasında A ve B_1 noktaları arasındaki eğriye İnci Wöhler eğrisi, A ve B_2 noktaları arasındaki eğriye de Zinci Wöhler eğrisi (katsayılarla birlikte) tanımı kullanılmıştır.

2 Kaynak 4, sayfa 270, Tablo 8.1

3 Kaynak 4, sayfa 270'te bulunan Tablo 8.1 kullanılmıştır.

4 Malzeme yüzey sertliği değeri 235 HB30 olduğu kabulü ile kaynak 4, sayfa 268'deki grafikten C_S değeri bulunmuştur.



Şekil 5.2. Katsayılarla Birlikte Wöhler Eğrisi Çizilmesi

Şekil 5.3'te birinci ve ikinci Wöhler eğrileri logaritmik eksenle çizilmiştir.

5.2. Süspansiyon Elemanında Oluşan Gerilme Değerlerinin Hesaplanması

Test numunelerine Z ve X-yönünde etki eden kuvvet değerleri (Tablo 4.2 ve 4.3) bilinmektedir. Bu kuvvetlerin test numunesi üzerinde oluşturduğu gerilme değerleri Bölüm 3.4'de verilen formül (3.6.) ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_I = \sigma_{Stat} \left(1 + \frac{F_{Z_{din}} + F_{X_f}}{F_{Z_{Stat}}} \right)$$

$F_{Z_{Stat}}$ taşıtın nominal aks yükünden, yaylanmayan elemanların ağırlığının çıkartılması ile elde edilen kuvvettir. Değeri 20,48 kN'dur.

$F_{Z_{Din}}$ kuvveti, $F_{Z_{Stat}}$ yükünün yol pürüzlülüğünden dolayı oluşturduğu dinamik bileşenidir. F_{X_f} , taşıtın frenlenmesi sırasında yaya etkiyen kuvvettir ve formül (5.4)'teki şekilde hesaplanmaktadır [7].

$$F_{X_f} = \frac{F_X h_a}{l_a} \quad (5.4)$$

Burada h_a , yayın şasiye monte edildiği noktanın yerden yüksekliğidir, l_a ise yaya ait kol uzunluğudur (Bkz.Şekil 3.7).

$$h_a = 425 \text{ mm}$$

$$l_a = 860 \text{ mm'dir.}$$

F_{x_j} değerleri Tablo 4.3'te bulunmaktadır. Her yükleme seviyesi için hesaplanan F_{x_j} değerleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Frenleme Sonucu Yaya Etki Eden Kuvvetler

Seviye (j)	F_{x_j} (N)	$F_{x_{rj}}$ (N)
1	23.400	11.564
2	23.200	11.465
3	22.990	11.361
4	22.780	11.258
5	22.570	11.154
6	22.360	11.050
7	22.140	10.941
8	21.930	10.838
9	21.720	10.734
10	21.510	10.630
11	21.300	10.526
12	21.090	10.422
13	20.870	10.314
14	20.660	10.210
15	20.450	10.106

σ_{Stat} , süspansiyon elemanına taşıtın nominal yükünden dolayı etki eden kuvvetin oluşturduğu gerilmedir. Statik gerilme değerinin hesaplanması için asimetrik parabol yaprak yay için formül (3.3) kullanılmıştır.

$$\sigma_{Stat} = \frac{6F_{z_{Stat}} l_a l_b}{nbh_0^2 (l_a + l_b)}$$

l_a , l_b , b , h_0 yaprak yaya ait geometrik özelliklerdir.

$$l_a = 860 \text{ mm}$$

$$l_b = 940 \text{ mm}$$

$$b = 80 \text{ mm}$$

$$h_0 = 25 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

Bu değerler formül (3.3)'de yerlerine konulunca σ_{Stat} değeri hesaplanmıştır. Statik gerilme değeri $\sigma_{Stat} = 552 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Böylece bütün yükleme seviyelerinde meydana gelen toplam gerilmelerini σ_T hesaplamak için gerekli değerler elde edilmiştir. Her seviye yükleme için meydana gelen gerilme değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Toplam Gerilme Değerleri

Seviye (j)	$F_{ZDin j}$ (N)	F_{Xrj} (N)	σ_{Tj} (N/mm ²)
1	7.970	11.564	1.079
2	7.730	11.465	1.069
3	7.470	11.361	1.060
4	7.210	11.258	1.050
5	6.960	11.154	1.040
6	6.700	11.050	1.030
7	6.440	10.941	1.020
8	6.180	10.838	1.011
9	5.930	10.734	1.001
10	5.670	10.630	991
11	5.410	10.526	982
12	5.150	10.422	972
13	4.900	10.314	962
14	4.640	10.210	952
15	4.380	10.106	942

5.3.Palmgren-Miner Hipotezinin Uygulanması

Yöntemin uygulanmasında genellikle S-N grafiğinde Y-ekseninde gerilme oranı S/S_u (σ_j / σ_K) değerleri kullanılmaktadır [3]. Her seviyedeki gerilme değerleri kopma gerilmesi değerine bölünerek gerilme oranları bulunmuştur. Bu gerilme oranları Tablo 5.3'te verilmiştir.

A, B₁, B₂ noktaları için benzer hesaplama yapıldığında bu noktalara karşılık gelen gerilme oranları sırasıyla 0.9 , 0.5, 0.4 değerinde olduğu görülmüştür. S/Su (log) ve N (log) grafiği ölçekli olarak Şekil 5.3'te çizilmiştir. Bu grafik üzerinde herbir gerilme değerine karşılık gelen gerilme oranları işaretlenmiştir. Bu oranda gerilme uygulandığında 1inci Wöhler eğrisine göre hasarlanma ömrü (N_j) değerleri Şekil 5.4'teki grafik üzerinden belirlenmiştir. Bir blok yüklemeye kullanılan herbir seviyeye ait yükleme sayıları (n_j) Tablo 4.4'ten alınmıştır. Böylece her seviyeye ait hasar oranları (D_j) hesaplanmıştır. Hasar oranları Tablo B.1'de verilmiştir. Ayrıca hasar oranlarının dağılımını veren bir grafik Şekil B.1'de verilmiştir.

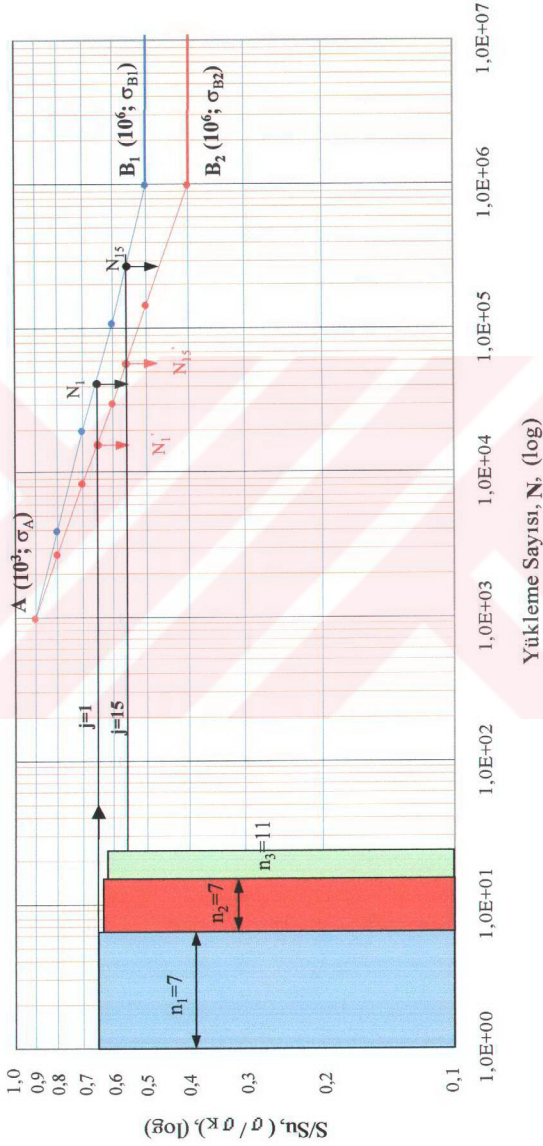
Tablo 5.3. Toplam Gerilmenin Kopma Gerilmesine Oranı

Seviye (j)	σ_{Tj} (N/mm ²)	σ_K (N/mm ²)	σ_{Tj}/σ_K (N/mm ²)
1	1.079	1670	0,6458
2	1.069	1670	0,6403
3	1.060	1670	0,6345
4	1.050	1670	0,6286
5	1.040	1670	0,6229
6	1.030	1670	0,6170
7	1.020	1670	0,6111
8	1.011	1670	0,6052
9	1.001	1670	0,5995
10	991	1670	0,5936
11	982	1670	0,5877
12	972	1670	0,5819
13	962	1670	0,5761
14	952	1670	0,5702
15	942	1670	0,5643

Hasar oranları belirlendikten sonra ömür hesabı yapılmıştır. Ömür, bir sayısının bir blok yükleme sonucunda elde edilen hasar sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Böylece numune parçaların kaç blok yükleme sonucunda hasarlanacağını hesaplanmıştır.

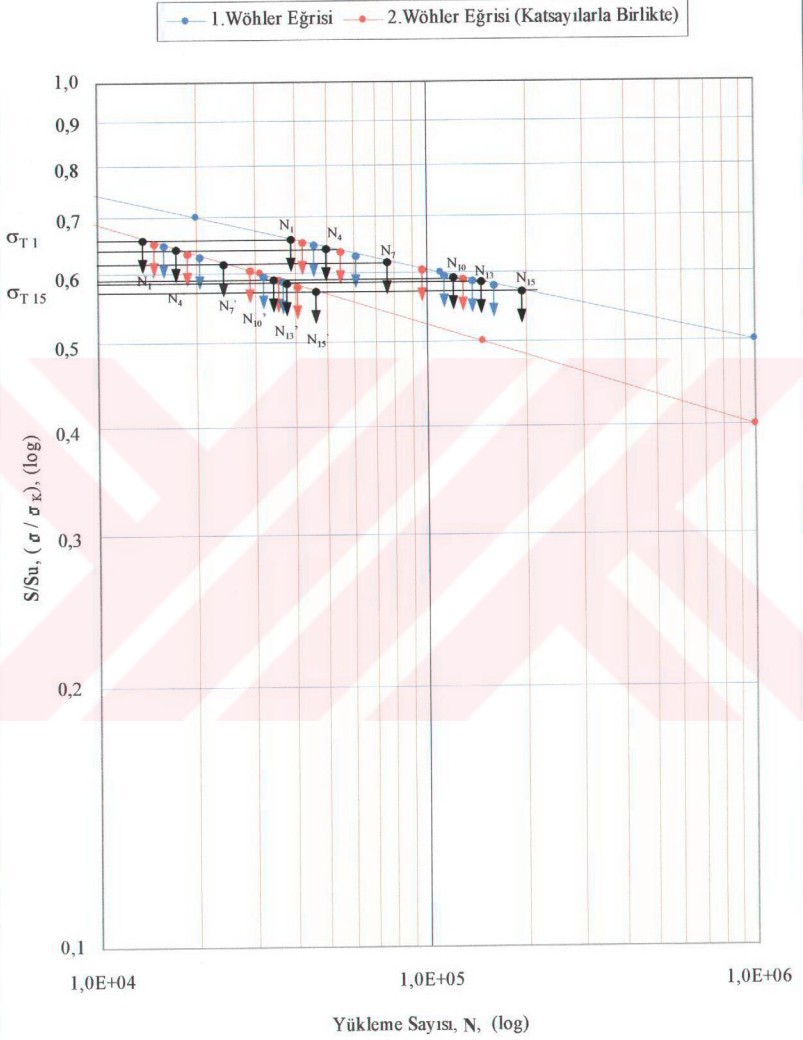
Wöhler Eğrisi (50 Cr V 4)

—●— 1. Wöhler Eğrisi —●— 2. Wöhler Eğrisi (Katsayılarla Birlikte)



Şekil 5.3. Birinci ve İkinci Wöhler Eğrileri.

Palmgren-Miner Hipotezinin Uygulanması



Şekil 5.4. Palmgren-Miner Kuralının Uygulanması

$$L = \text{Ömür}(\text{BlokYüklemeSayısı}) = \frac{1}{\Sigma D_j} \quad (5.5)$$

Bir blok yükleme sonucunda hasar oranlarının toplamının $\Sigma D_j=0,009738$ olduğu hesaplanmıştır. Birinci Wöhler eğrisine göre belirlenen N_j değerlerine göre bulunan ömür L_1 ile sembolize edilmiştir. L_1 Ömrü 103 blok olarak hesaplanmıştır.

$$L_1 = \frac{1}{0,009738} = 103 \text{ (Blok yükleme)}$$

İkinci Wöhler eğrisinden (katsayılarla birlikte) hasarlanma ömrü (N'_j) değerleri Şekil 5.4'deki grafik üzerinden belirlenmiştir. Her seviyeye ait hasar oranları (D'_j) hesaplanmıştır. Hasar oranları Tablo5.4'de verilmiştir. Hasar oranlarının dağılımını veren bir grafik Şekil 5.5'te verilmiştir.

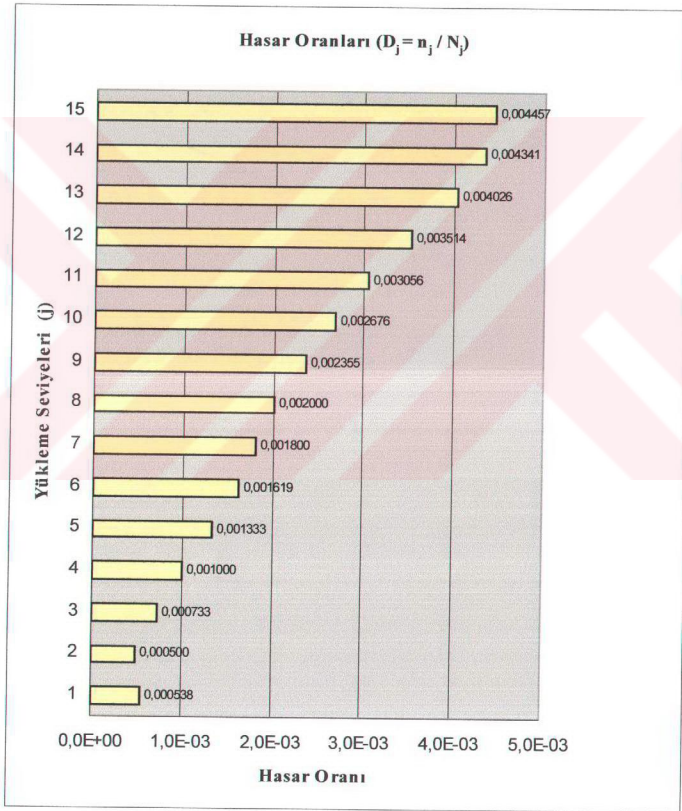
Tablo 5.4. İkinciWöhler Eğrisine (Katsayılarla Birlikte) Göre Hasar Oranları

Seviye (j)	n_j	N'_j	$D'_j = n_j / N'_j$
1	7	13.000	0,000538
2	7	14.000	0,000500
3	11	15.000	0,000733
4	16	16.000	0,001000
5	24	18.000	0,001333
6	34	21.000	0,001619
7	45	25.000	0,001800
8	58	29.000	0,002000
9	73	31.000	0,002355
10	91	34.000	0,002676
11	110	36.000	0,003056
12	130	37.000	0,003514
13	153	38.000	0,004026
14	178	41.000	0,004341
15	205	46.000	0,004457
		ΣD_j	0,033949

Bir blok yükleme sonucunda hasar oranlarının toplamının $\Sigma D_j = 0,033949$ olduğu hesaplanmıştır. İkinci Wöhler eğrisine (katsayılarla birlikte) göre belirlenen N_j değerlerine göre hesaplanan ömür L_2 ile sembolize edilmiştir.

$$L_2 = \frac{1}{0,033949} \cong 30 \text{ (Blok yükleme)}$$

L_2 ömrü yaklaşık 30 blok olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.5. İkinci Wöhler eğrisine (katsayılarla birlikte) göre yükleme seviyelerinin hasar oranları

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bölüm 6.1’de deneysel analiz sonuçları, bu sonuçların Gauss dağılımı şeklinde irdelenmesi ve numune parçaların hangi bölgelerinden hasara uğradıkları hakkında bilgiler bulunmaktadır. Bölüm 6.2’de hesaplama yöntemiyle elde edilen ömür hesabı sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bölüm 6.3’te ise deneysel analizle elde edilen sonuçlarla hesaplama yöntemiyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve aralarındaki farklılığın nedenleri tartışılmıştır.

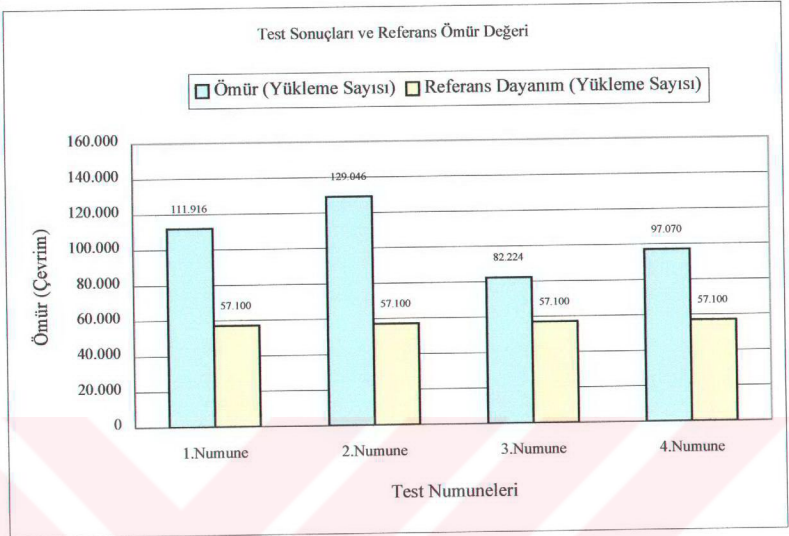
6.1. Deneysel Analiz Sonuçları

Toplam 4 adet numune test edilmiştir. Testler sırasında numunelerin referans¹ olarak kabul edilen 57.100 yükleme sayısına geldiğinde kırılmadığı görülmüştür (Şekil 6.1). Numunelerin hangi yükleme sayılarında kırıldığının belirlenmesi amacıyla testlere devam edilmiştir. Tablo 6.1’de her bir numuneye ait test sonuçları verilmiştir. Testler sonucunda numune parçaların ömürlerinin bir dağılım gösterdiği görülmüştür.

Tablo 6.1. Test Sonuçları

	Ömür (Yükleme Sayısı)	Ömür (Blok)	Ömür (Bozuk Yol km'si)	Test Sonucu
1.Numune	111.916	98	4.900	Numune Kırıldı
2.Numune	129.046	113	5.650	Numune Kırıldı
3.Numune	82.224	72	3.600	Numune Kırıldı
4.Numune	97.070	85	4.250	Numune Kırıldı

¹ Bölüm 4’te dayanım kriterinin Türkiye şartları için bozuk yol pistinde 2.500 km (57.100 çevrim veya 50 Blok) kullanıma dayanımının yeterli olduğu belirtilmişti.



Şekil 6.1. Test Sonuçlarının Referans¹ Ömür Değeriyle Karşılaştırılması.

6.1.1. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi :

Yorulma testi sonuçlarının değerlendirilmesinde normal dağılım (Gauss) yöntemi kullanılmıştır. Buna göre önce (6.1.) formülü kullanılarak ortalama ömür değeri hesaplanmıştır [4].

$$L_{Ort} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_j \quad (6.1)$$

n , test numunesi sayısı ve L_j ise bu numunelerin ömürleri olmak üzere Tablo 6.1'deki ömür değerleri (yükleme sayısı) kullanıldığında ortalama ömür değeri 105.064 yüklem sayısı olarak bulunmuştur. Standart sapma değeri ise (6.2)'deki formülle hesaplanmıştır [4].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_j - L_{Ort})^2} \quad (6.2)$$

L_{ort} , L_j ve n değerleri formülde yerlerine konularak standart sapma değeri 20.064 yüklemeye sayısı olarak bulunmuştur.

$$\sigma = 20.064 \text{ (yüklemeye sayısı, çevrim)}$$

Tablo 6.2’de standart sapma katsayısı λ ’nın 1, 2 veya 3 değerleri için Gauss dağılımına göre maksimum ve minimum ömür değerleri belirlenmiştir. Test edilen numune parçaların ömürlerinin standart sapma katsayısı λ ’nın iki ($\pm 2\sigma$) olduğu aralık içinde kaldığı görülmüştür. Standart sapma katsayısının iki olması durumunda minimum ömür değerinin % 95 güvenirlkte olduğu kabul edilmektedir [3].

Tablo 6.2. Normal Dağılıma (Gauss) Göre Güvenirliğin Belirlenmesi

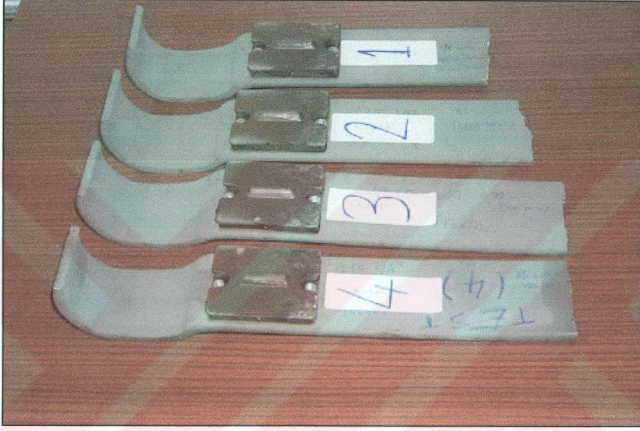
Standart Sapma Katsayısı	Ömür, $L_{ort} + \lambda \sigma$	Güvenirlik Oranı	Ömür, $L_{ort} - \lambda \sigma$	Güvenirlik Oranı
(λ)	(Yüklemeye Sayısı)	(%)	(Yüklemeye Sayısı)	(%)
1	125.128	32	85.000	68
2	145.191	5	64.937	95
3	165.255	1	44.873	99

6.1.2. Numune Parçalarda Kırılmanın Oluştığı Bölge

Test edilen numunelerin hepsi ikinci yaprak’ın aynı bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.2’de testler sonucunda ikinci yaprak’ın kırılan parçaları görülmektedir. Kırık parçalar üzerindeki numaralar test sırasını göstermektedir. Bir nolu kırık yay parçasının boyu diğerlerine göre 20 mm daha kısadır. Bunun nedeni birinci numunenin testi öncesinde test düzeneği hazırlanırken X-yönünde etki eden frenleme kuvvetinin uygulama noktasının yaya olan uzaklığının (h_a) hatalı belirlenmesidir. Diğer testler bu hata giderildikten sonra yapılmıştır.

Kırık oluşan bölgenin yay üzerindeki konumu Şekil 6.3a’da ve Şekil 6.3b’de gösterilmiştir. Yayın taşıt üzerindeki monte edildiği durumda kırık bölgenin konumu Şekil 6.4’de verilmiştir.

Parçanın kırık bölgesinde yapılan incelemede yorulma kırılması olduğuna dair önemli işaretler rahatlıkla görülebilmektedir. Şekil 6.5'te kırık yüzeyi büyütülmüş olarak gösterilmiştir. Çatlak başlangıcı noktaları ve çatlak ilerleme yönleri, ayrıca gevrek kırılma olan bölgeler rahatlıkla görülebilmektedir. Çatlak başlangıç noktaları ve çatlak ilerleme yönleri oklarla işaretlenmiştir. Çatlakların iki yaprağın birbirine bakan yüzeyinde başladığı anlaşılmaktadır. Çatlak başlangıcı iç yüzeyde olduğu için testler sırasında çatlak ilerlemesi gözlemlenememiştir.

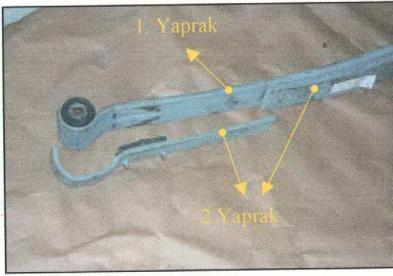


Şekil 6.2. Kırılan Yay Parçaları.

6.2.Hesaplama Yöntemiyle Analiz Sonuçları :

Numune parçaların dayanım ömrü Palmgren-Miner Hipotezine Bölüm 5'te hesaplanmıştı. Bu hipotezin uygulanması sırasında iki adet Wöhler eğrisi kullanılmıştır. Bunlardan birincisi en genel halde belirlenen Wöhler eğrisidir. İkincisi ise bu eğrinin doğruluğunu (hassasiyetini) arttırmak amacıyla üç ayrı katsayının hesaba katılmasıyla bulunmuştur .

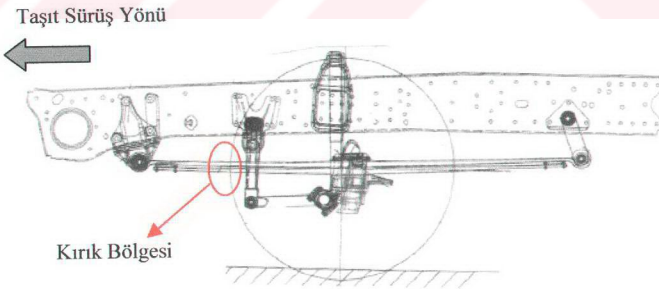
İkinci Wöhler eğrisi kullanılarak yapılan ömür hesabına göre 30 blok yükleme (34.260 yükleme sayısı, çevrim) sonucunda hasar oluşması beklenmelidir.



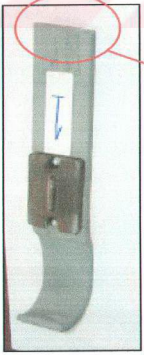
Şekil 6.3a Yayın kırıldığı bölge (kırık 2.yaprak'ta oluştu).



Şekil 6.3b Kırık bölgesinin yay üzerindeki konumu.



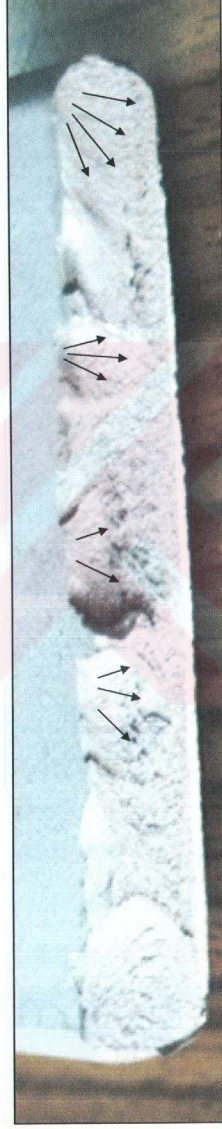
Şekil 6.4 Kırık oluşan bölgenin yayın taşıta montaj şekline göre konumu



Şekil 6.5a Kırık parça



Şekil 6.5b Kırık detayı. Kırık başlangıç noktaları, çatlak ilerlemeleri ve gevrek kırılma bölgesi görülebilmektedir.



Şekil 6.5c. Kırık detayının başka açıdan görünümü. Çatlak ilerlemeleri ve gevrek kırılma bölgesi görülebilmektedir

Birinci Wöhler eğrisi kullanılarak yapılan ömür hesabına göre ise 103 blok yükleme (117.626 yükleme sayısı, çevrim) sonucunda hasar oluşması beklenmelidir.

Her iki eğriye göre bir blok yükleme (1.142 yükleme) sonucunda oluşan hasar oranları toplamı ve bu eğrilere göre beklenen hasar oluşma süresi blok yükleme ve yükleme sayısı cinsinden Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. 1'inci ve 2'nci Wöhler Eğrilerine Göre Hesaplanan Ömür Değerleri.

	Hasar Oranları Toplamı (ΣD_j)	Dayanım Ömrü (L_j) (Blok)	Dayanım Ömrü (L_j) (Yükleme Sayısı)
1'inci Wöhler Eğrisi	0,009738	103	117.626
2'nci. Wöhler Eğrisi (Katsayılarla birlikte)	0,033949	30	34.260

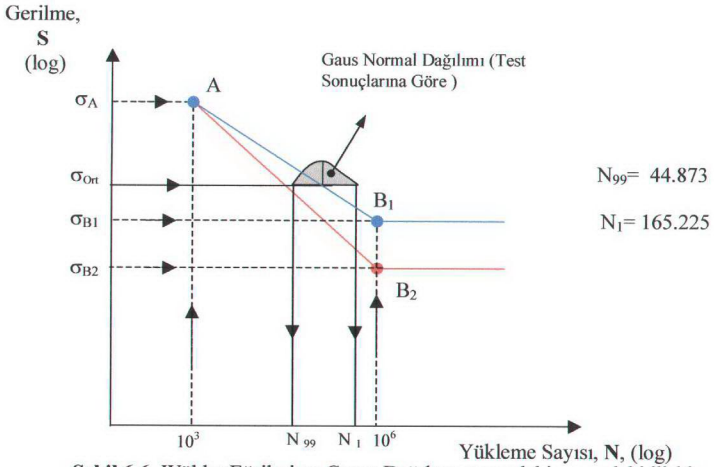
6.3. Deneysel Analiz ve Hesaplama Yöntemiyle Analiz Sonuçlarının Tartışılması

Deneysel analizde yapılan testlerin sonuçlarına göre elde edilen numunelerin güvenilirliğini ifade eden normal dağılım Şekil 6.6'te çizilmiştir. Test sonuçlarına göre numunelerin % 99 güvenilir olduğu ömür değeri (N_{99}) 44.873 yükleme sayısıdır. Numunelerin % 1 güvenilir olduğu ömür değeri (N_1) ise 165.255 yükleme sayısıdır.

Hesaplama yöntemiyle yapılan analizde ikinci Wöhler eğrisine göre Palmgren-Miner hipotezinin uygulanmasıyla hesaplanan ömür değeri 34.260 yükleme sayısı olarak bulunmuştur (Bkz.Tablo 6.3).

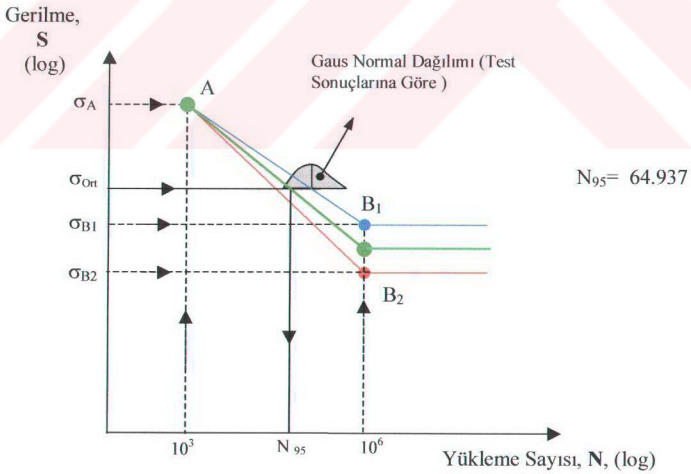
İkinci Wöhler eğrisine göre hesaplanan ömür sonucuna göre testlerini yaptığımız numunelerin daha az yükleme sayısında hasarlanmaları gerekmektedir. Bir yaklaşım olarak çizilmiş bulunan ikinci Wöhler eğrisi numunelerin dayanım özelliklerini yeteri kadar ifade ettiği söylenemez.

Fakat bu farklılık numunelerin hesaplama sonuçlarına göre daha dayanıklı olmalarından dolayı rahatsız edici yönde değildir. Malzemeye ait gerçek Wöhler eğrisinin S-N grafiği üzerinde daha sağda ve yukarıdan geçtiğini kabul etmek gerekmektedir.



Şekil 6.6. Wöhler Eğrileri ve Gauss Dağılımı arasındaki ilişki

Grubisic, makalesinde Palmgren-Miner Hipotezinin uygulanması sırasında Wöhler eğrisini % 90 güvenilirlikte olan bir bölgeden geçirdiği görülmektedir [8]. Öyleyse gerçek Wöhler eğrisinin test sonuçlarına göre çizilen Gauss dağılımının % 95 güvenilirlikte olduğu bölgeden geçtiği söylenebilir. Gerçek Wöhler eğrisinin tahmini yeri Şekil 6.7’te yeşil çizgiyle çizilmiştir.



Şekil 6.7. Gerçek Wöhler Eğrisi ve Normal (Gauss) Dağılımı

Hesaplama yöntemiyle bulunan ömür değeri 34.260 yükleme sayısıydı (% 90 güvenilirliğe göre) , gerçek Wöhler eğrisinin % 95 güvenilirlik için bulunan değeri 64.937 olduğuna göre gerçek ömrün yaklaşık % 52'si olarak hesaplandığı görülmektedir. Hata oranın % 89 olduğu söylenebilir.

Bu farklılığın hangi sebeplerden kaynaklandığını irdelersek ;

Normal dağılım, dört adet numunenin test sonucuna göre belirlenmiştir. Bu sayısının az olmasından dolayı numunelerin gerçek ömür dağılımların hakkında doğru bilgi sahibi olunduğunun söylenmesi güçtür.

Hesaplama yönteminde N değerleri, S-N grafiği üzerinde bulunan Wöhler eğrisine göre grafik üzerinden okunarak belirlenmiştir. Grafik üzerinden değer belirlenmesi ömür hesabı içerisinde bir miktar hata bulunmasına neden olmaktadır.

Yükleme kolektifi, yol datalarının işlenmesinden sonra belirlenmektedir. Data işleme yöntemlerinin yol datalarını hangi yeterlilikte değerlendirdikleri tartışılmaktadır. Bu konuyla ilgili yapılmış olan çalışmalarda da, örneğin Sonsino'nun level-crossing, peak value, range-pair yöntemlerinin güvenilirliğinin karşılaştırıldığı makalesinde [9], testleri yapılan numune için level-crossing yönteminin en iyi sonucu vermiş olmasına rağmen parça üzerindeki kritik bölge için 13 kat hatalı sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Bu bakımdan yorulma ömrüne yönelik teorik ve deneysel analizlerin birbirine yakın ve gerçekçi sonuçlar verebilmesi için deneysel çalışmalarda test ve numune sayısının yeterince fazla olması gerektiği gerçeği bu çalışma ile de doğrulanmıştır.

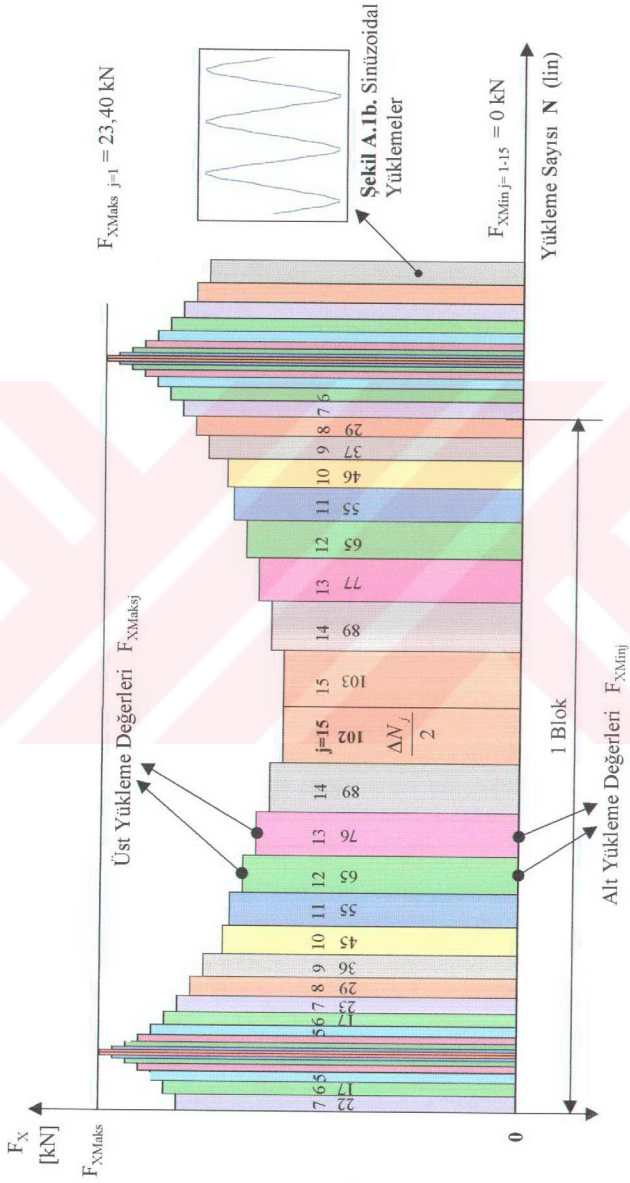
KAYNAKLAR

- [1] **Akkurt M.**, 1990. Makina Elemanları Cilt I, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- [2] **Ereke M.**, 1994. Şasi ve Karoseri Tasarımı Lisans Ders Notu, İstanbul. Syf.22-74.
- [3] **H.Wright Don**, 1993. Testing Automotive Materials and Components, *Society of Automotive Engineers*, Inc.Warrendale, PA, USA. pp.32-106
- [4] **Juvinall R., and Marshek K.**, 1991. Fundamentals of Machine Component Design, John Wiley & Sons,Inc.New York. pp.225-304
- [5] **Radaj Dieter Prof.Dr.(Daimler-Benz AG, Stuttgart)**, 1995. Ermüdungsfestigkeit Grundlagen für Leichtbau, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1995. pp.165-210
- [6] **Spring Design Manual**, 1996. Second Edition, AE-21, Published by: *Society of Automotive Engineers*, Inc.pp.3-104
- [7] **Warm Geformte Federn**, 1987. HOESCH Hohenlimburg AG, pp.42-226
- [8] **V.Grubisic, V. and Fischer G.**, 1997. Methodology for Effective Design Evaluation and Durability Approval of Car Suspension Components, *SAE Feb.1997*
- [9] **V. Sonsino M., Grubisic, and Kaufmann H.**, 1997. Transferability of Material Data for the Example of a Randomly Loaded Forged Truck Stub Axle, *SAE Feb.1997*
- [10] **Fatigue Testing Procedure for Suspension-leaf springs**, *SAE J1528 JUN90*
- [11] **Leaf Spring for Motor Vehicle Suspension-Made to Metric Units**-SAE J1123 NOV92

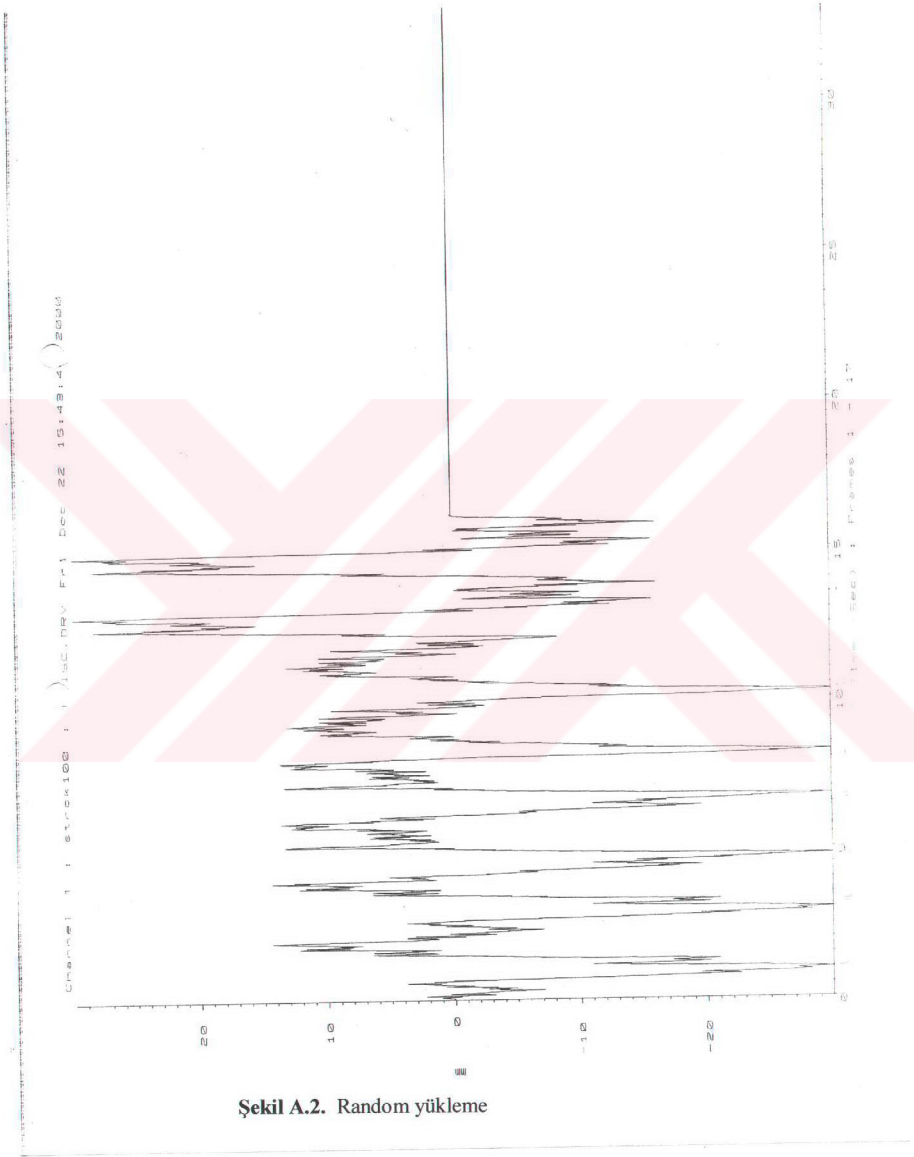
EKLER

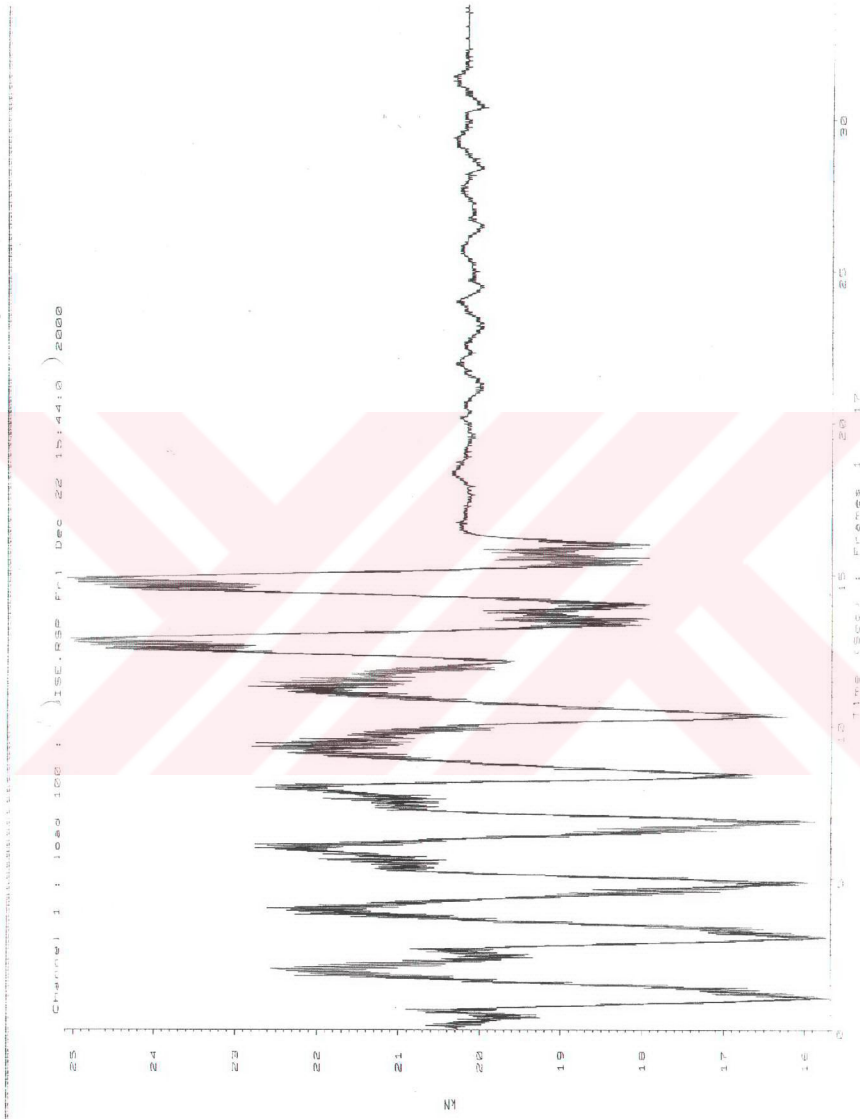
Tablo A.1. Bir blokta X-yönünde yükleme sıralaması ve kuvvet değerleri.

Seviye (j)	Yükleme Sayısı ($\Delta N_j / 2$)	Minumum Yük (F_{XMinj}) (kN)	Maksimum Yük (F_{XMalsj}) (kN)	Ortalama Yük $F_{XOrt j}$ (kN)	Frekans (Hz)
7	22	0	22,14	11,07	1
6	17	0	22,36	11,18	1
5	12	0	22,57	11,29	1
4	8	0	22,78	11,39	1
3	6	0	22,99	11,50	1
2	4	0	23,20	11,60	1
1	4	0	23,40	11,70	1
1	3	0	23,40	11,70	1
2	3	0	23,20	11,60	1
3	5	0	22,99	11,50	1
4	8	0	22,78	11,39	1
5	12	0	22,57	11,29	1
6	17	0	22,36	11,18	1
7	23	0	22,14	11,07	1
8	29	0	21,93	10,97	1
9	36	0	21,72	10,86	1
10	45	0	21,51	10,76	1
11	55	0	21,30	10,65	1
12	65	0	21,09	10,55	1
13	76	0	20,87	10,44	1
14	89	0	20,66	10,33	1
15	102	0	20,45	10,23	1
15	103	0	20,45	10,23	1
14	89	0	20,66	10,33	1
13	77	0	20,87	10,44	1
12	65	0	21,09	10,55	1
11	55	0	21,30	10,65	1
10	46	0	21,51	10,76	1
9	37	0	21,72	10,86	1
8	29	0	21,93	10,97	1
Toplam	1.142				



Şekil A.1a. X-Y yönünde 1 blok yükleme sıralaması ve yükleme sayıları.





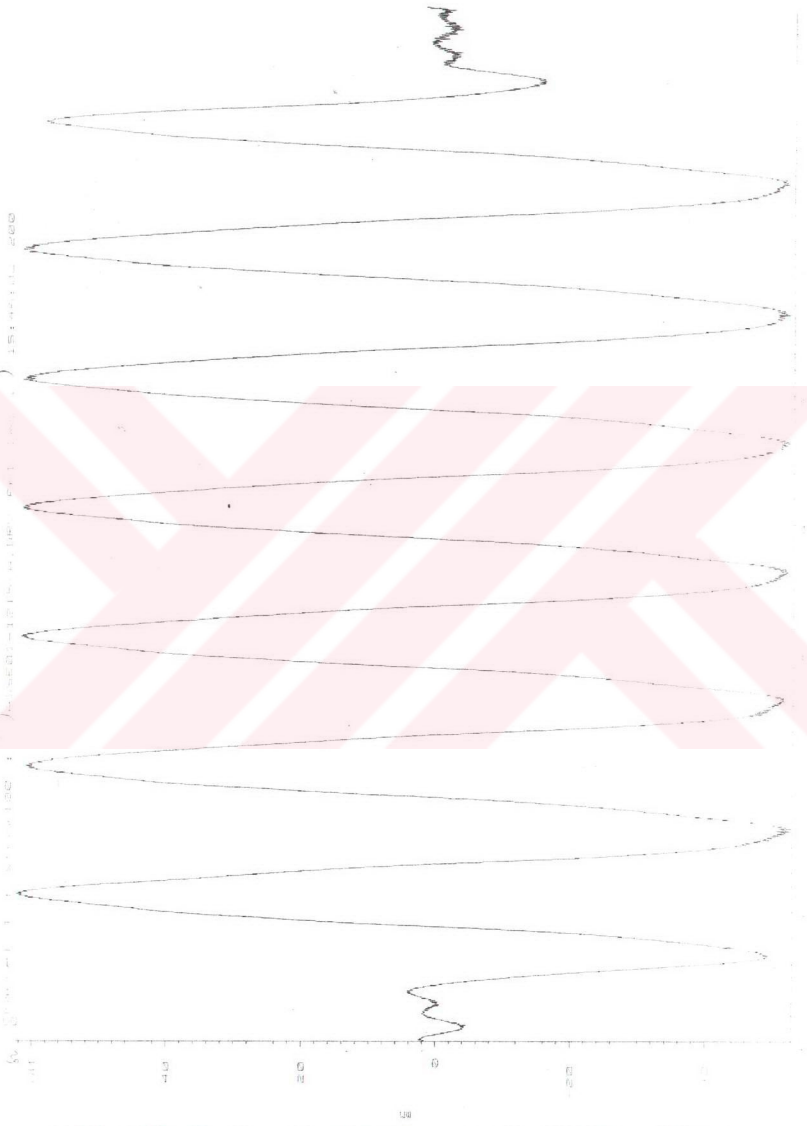
Şekil A.3. Sistemin Cevabı



Şekil A.4. Transfer Fonksiyonu



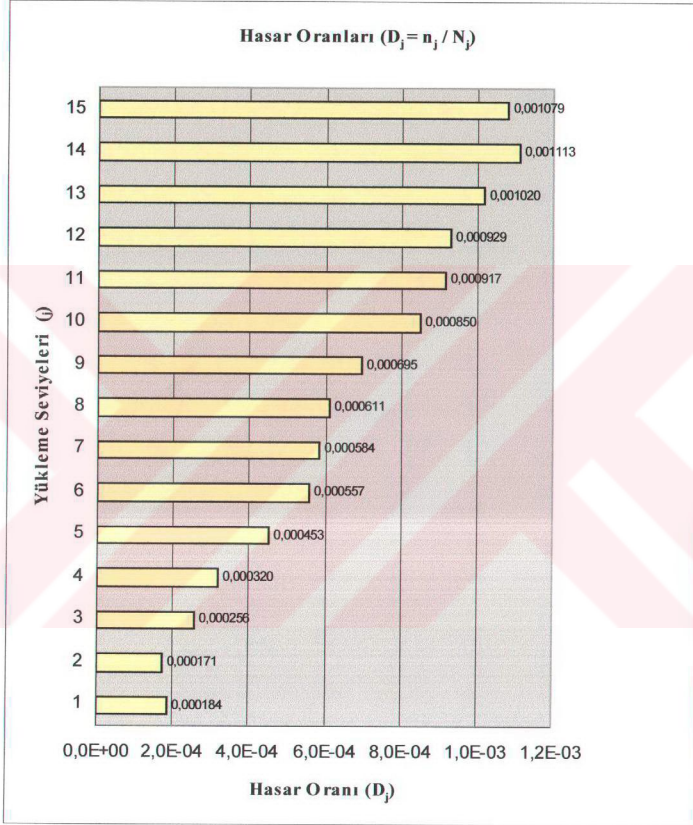
Şekil A.5. Yükleme Sonucunda Alınması İstenilen Sinyal



Şekil A.6. İstenilen Cevap Sinyalinin Alınması için Gerekli Yükleme (Birinci Seviye için)

Tablo B.1 Birinci Wöhler Eğrisine Göre Hasar Oranları

Seviye (j)	n_j	N_j	Hasar Oranı $D_j = n_j / N_j$
1	7	38.000	0,000184
2	7	41.000	0,000171
3	11	43.000	0,000256
4	16	50.000	0,000320
5	24	53.000	0,000453
6	34	61.000	0,000557
7	45	77.000	0,000584
8	58	95.000	0,000611
9	73	105.000	0,000695
10	91	107.000	0,000850
11	110	120.000	0,000917
12	130	140.000	0,000929
13	153	150.000	0,001020
14	178	160.000	0,001113
15	205	190.000	0,001079
		ΣD_j	0,009738



Şekil B.1. Birinci Wöhler Eğrisine Göre Hasar Oranları

ÖZGEÇMİŞ

1968 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adapazarı'nda tamamladı. 1990 yılında İTÜ Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı. İngilizce hazırlık sınıfı eğitimini ve ardından Fakülte eğitimini 1995 yılında tamamladı. Aynı yıl Yüksek Lisans sınavında Otomotiv anabilim dalını kazandı. 1996 yılında askerlik görevini yapmak amacıyla kayıt dondurdu. 1997 yılında kayıt yenileyerek yüksek lisans derslerini 1997-1998 öğretim yılında tamamladı.

1996 yılında Mercedes Benz Türk A.Ş. firmasında çalışmaya başlamıştır ve halen bu firmanın Geliştirme, Test ve Homologasyon bölümünde çalışmaktadır.