

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### TAŞIT MALZEMELERİNİN DAVRANIŞI VE İRDELENMESİ

#### 4.1. GİRİŞ

Bir yapı analizcisinin taşıt malzemelerinin davranışlarını iyi bilmesi, akıllıca bunları irdelemesi ve dizaynın kısıtlayıcı şartlarına göre, işletme şartlarına en uygun malzemeyi seçmesi büyük önem taşır.

Bir taşıt yapısının çeşitli kısımlarında kullanılan malzemeler değişik kriterlere göre seçilir. Kısıtlayıcı şartlara ve taşıtın ve bunun kısımlarının işletme gereksinimlerine göre kriterler tanımlanır. Bazı önemli gereksinimler şunlarla ilgilidir:

- 1- Çevre ortamı
- 2- Yorulma
- 3- Sıcaklık
- 4- Korozyon
- 5- Sürünme
- 6- Mukavemet ve rijitlik
- 7- Ağırlık kısıtlamaları
- 8- Maliyet
- 9- İnsan faktörü

Bu bölümde okuyucuya taşıt yapılarında kullanılacak malzemelerin nihai seçimi ve bunların irdelenmesinde bazı gereksinimlerin oynadığı roller açıklanacaktır.

## 4.2. MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Malzemeler, genellikle kendilerini oluşturan fazların bir veya birden fazla sayıda oluşlarına göre sınıflandırılabilir. Alüminyum, çelik ve titanyum gibi bütün metaller tek fazlı malzemelerdir. Matrislere (bağlayıcılara) gömülmüş elyaflardan (liflerden) oluşan karma (kompozit) malzemeler çok fazlı malzeme olarak adlandırılır. Takviye edilmiş cam elyafı ve kontroplak çok fazlı malzemelere örnek olarak verilebilir.

Tek ve çok fazlı malzemelerin hemen hemen tümünün önemli yapı özellikleri üç temel deney ile elde edilir; çekme, basınç ve kesme. American Society for Testing Materials (ASTM) malzeme deneyleri için bütün spesifikasyonları ve deney işlemlerini belirlemiştir.

### Çekme Deneyi

Şek. 4.1'de bir çekme deney elemanının esas şekli gösterilmektedir. Bir çekme deney makinası kullanılarak yavaş yavaş P yükü uygulanır. Gerek bir elektrikli strain-gauge tekniği ile gerekse çeşitli P çekme yükleri altında etkin L ölçü uzunluğunda olacak toplam  $\delta$  uzamaları ölçülerek  $\epsilon_n$  normal şekildeğişimi bulunur. Küçük yükler altında L ölçü uzunluğunda toplam uzamanın uniform olduğu farzedilir ve böylece normal şekil değişimler matematiksel olarak

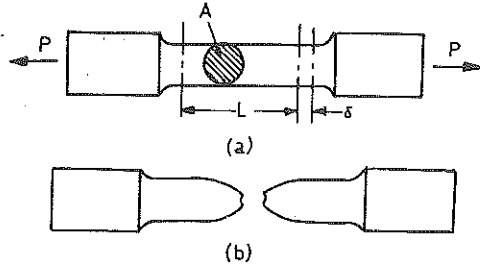
$$\epsilon_n = \frac{\delta}{L} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\delta$  ve L aynı uzunluk birimi ile ölçülmüştür. Buna karşılık gelen  $\sigma$  normal gerilmesinin de deney parçasının A kesidine üniform olarak yayıldığı farzedilir ve

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \quad (4.2)$$

olarak belirlenir.

Mühendislik birimleri ile P yükü Newton, A alanı  $\text{mm}^2$  ve  $\sigma$  gerilmesi MPa veya  $\text{N/mm}^2$  dir. Şek. 4.2'de gösterildiği gibi malzeme için gerilme-şekildeğişimi diyagramı,  $\epsilon$  şekildeğişimlerine karşılık gelen  $\sigma$  gerilmelerinin işaretlenmesi ile elde edilir. Gerilmenin düşük değerleri için Şek.4.2'deki eğrinin OA parçası doğru bir hattır. Eğrinin bu kısmında gerilmenin şekildeğişimine oranının sabit değeri

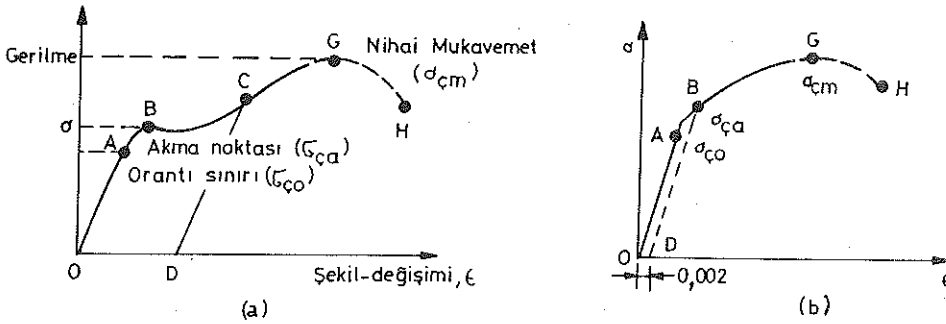


Şekil 4.1

elastisite modülü E olarak isimlendirilir ve

$$E = \frac{\sigma_n}{\epsilon_n} \quad (4.3)$$

denklemleri ile tanımlanır. Burada E,  $\text{mm}^2$  başına Newton veya MPa birimindedir.



Şekil 4.2

Genellikle köprü ve binalarda kullanılan düşük-karbonlu çelik gibi malzemeler Şek.4.2a'daki gösterildiği gibi bir gerilme-şekildeğişimi diyagramına sahiptir. B noktasında, yükte bir artma olmaksızın uzamada artma görülür. Bu noktadaki gerilmeye akma gerilmesi  $\sigma_{\text{ca}}$  denir ve bu değer malzeme deneylerinden kolayca elde edilir.

Gerilme-şekildeğişimi eğrisinin doğru yörüngeyi terkettiği A noktasına orantı sınırı denir ve bu gerilme  $\sigma_{\text{ço}}$ 'dır. Bu değer in deney sırasında ölçülmesi zordur. Yapı çelikleri spesifikasyonlarında, orantı sınırı gerilmesi yerine akma gerilmesinin kullanılmasının sebebi bu değerlerin daha kolay elde edilebilmesidir.

Hava-taşıtı yapıları, genellikle belirgin bir akma noktası bulunmayan alüminyum alaşımları, yüksek karbonlu çelikler veya karma malzemelerden yapılır, ve bunlar Şek.4.2b'de gösterildiği gibi gerilme-şekildeğişimi davranışı gösterirler. Bu gibi malzemelerde 0,002 m/m'lik kalıcı şekildeğişiminin elde edildiği gerilme, akma gerilmesi olarak anılır. Şek.4.2b'deki B noktası akma gerilmesini temsil eder ve sıfır gerilmeli 0,002 m/m'lik D noktasından OA'ya paralel bir BD doğru çizilerek elde edilir. Bir deney parçasında yük, orantı sınırını aştıktan sonra yük kaldırıldığında deney parçası orijinal uzunluğuna dönmeyip kalıcı bir şekildeğişimi içerir. Şek. 4.2a ile temsil edilen malzemede, C noktasında yük kaldırılabilirse D noktasına gelinir. OD şekildeğişimi gerilmemiş hal içindir. Yükün tekrar uygulanması halinde gerilme-şekildeğişimi eğrisi DC doğrusu ve CG eğrisini takip eder. Benzer şekilde Şek.4.2b'de temsil edilen malzeme, B noktasında boşaltılırsa, gerilme-şekildeğişimi eğrisi gerilme bulunmayan kalıcı 0,002'lik şekildeğişimi elde edilen BD doğrusunu izler.

$\sigma$  verilmesi hesaplanırken deney parçasının boyun yapan kesit alanı yerine, ilk alan olan A'yı kullanmak alışılmıştır. Daralmış alanla hesaplanan gerilme, kopma olana kadar yükselmeye devam eder. İlk alanla hesaplanan görünen gerilme, GH kesikli çizgisi ile Şek.4.2'de gösterildiği gibi azalır. Gerçek işe yaramama H noktasında meydana gelir fakat G ile temsil edilen görünen gerilme, dizayn hesaplarında kullanılan önemli bir gerilmedir. Bu değer  $\sigma_{\text{çm}}$  mukavemet gerilmesi olarak tanımlanır. Taşıtı yapılarının çekmeye çalışan elemanları için elemanın ilk kesit alanının ve görünen mukavemet değerinin kullanılması daha doğrudur. İlerideki bölümde belirtileceği gibi kirişlerin eğilme mukavemet değerlerini hesaplamada kullanılan gerilme-şekildeğişimi eğrileriyle yapılacak hesaplarda sonuçlar biraz daha emniyetlidir, çünkü kirişler çekme elemanları gibi boyun yapmazlar.

## Basınç Deneyi

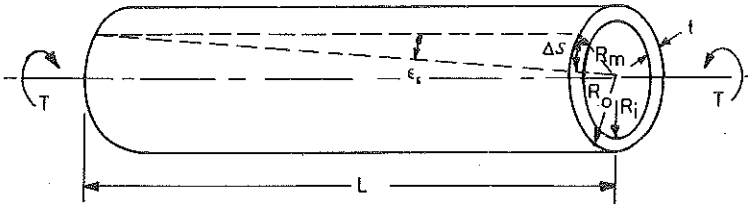
Malzemelerin basınç mukavemetlerini, gerilme-şekildeğişimi eğrileri ile belirlemek çekme mukavemetine nazaran daha zordur. Mühendislik uygulamalarındaki birçok yapı dizaynında basınç işe yaramazlığı, mukavemet gerilmesinden çok akma sınırı ile ilgili olan kararsızlıktan ileri gelir. Yüzde 0,2'lik kalıcı şekildeğişimi yöntemi ile elde edilen akma gerilmesi değerleri, birçok metalde kararsızlıklarla korelasyon yapıldığında oldukça başarılı değerler vermesine rağmen metal olmayanlarda, özellikle karma yapılarda korelasyon daha az başarılıdır. Deney parçasının geometrisi ve mesnetleme şekli, basınç deneyi sonuçlarında oldukça etkilidir. Birçok malzemenin basınç altında gerilme-şekildeğişimi eğrisi, çekme halindeki gerilme-değişimi eğrisine benzerdir.

## Kesme Deneyi

Bellibaşlı temel mekanik özellikler arasında düzlem içi kayma özelliklerini belirleme işlemi zor elde edilebilen ve en az standartlaşmış deney işlemlerinden biridir. Üniform kayma gerilmesine maruz bir deney kesidi bulunan bir kesme-deney parçasının dizaynı imkansızdır. Muhtemelen buna en yakın pratik yaklaşım Şek.4.3'te gösterildiği gibi ince cidarlı, burulmaya maruz dairesel silindirdir. Küçük deplasmanlar için kayma şekildeğişimi;

$$\epsilon_s = \frac{\Delta S}{L} \quad (4.4)$$

ile ifade edilir. Burada



Şekil 4.3

$\epsilon_s$  = kayma şekildeğişimi  
 $\Delta S$  = yay uzunluğundaki değişme  
L = etkin ölçü uzunluğu

Kayma gerilmesi, iyi bir şekilde bilinen cisimlerin mukavemeti konusu içinde geçen burulma denkleminde

$$\sigma_s = \frac{Tr}{J} \quad (4.5)$$

elde edilebilir. Burada

$\sigma_s$  = kayma gerilmesi  
r = silindir yarıçapı  
J = kesidin kutupsal atalet momenti

Çok ince cidarlı silindirik deney parçaları için Denklem (4.5);

$$\sigma_s = \frac{Tr_o}{J_o} \quad (4.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $r_o$  = ortalama yarıçap =  $(r_d + r_i)/2$  ve  $J_o = 2\pi r_o^3 t$ 'dir.

Kesme kayma-kayma şekildeğişimi diyagramından, kayma elastisite modülü;

$$G = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \quad (4.7)$$

şeklinde elde edilebilir.

#### 4.3. GERİLME-ŞEKİLDEĞİŞİMİ EĞRİLERİNİN İDEALLEŞTİRİLMESİ İÇİN DENKLEMLER

Taşıt yapı elemanlarının dizaynında, gerilme-şekildeğişimi eğrilerinin elastiklik sınırlar üzerine çıkan gerilmelerin gözönünde bulundurulması gerekir. Diğer yapı ve

makina dizaynlarında yalnızca elastiklik sınırları altındaki gerilmeleri gözönünde bulundurmak yeterlidir, fakat hava taşıtları dizaynında ağırlık o kadar önemlidir ki her bir elemanın mukavemet değerlerini ayrıca hesaplamak gerekir ve toplam yapının her parçası için aynı emniyet katsayısı öngörülür. Birçok elemanın eğilme veya basınç mukavemet değerlerini hesaplamak zordur ve komple elemanların tahribatlı deneylerinden bilgi elde etmek gerekir. Bir deney elemanından elde edilen sonuçların, bir başka malzemeden yapılmış benzer elemanlarda kullanılabilmesi için çeşitli malzemelerin gerilme-şekildeğişimi denklemlerinin analitik ifadelerinin elde edilmesini gerektirir.

Ramberg ve Osgood<sup>19</sup> herhangi bir gerilme-şekildeğişimi eğrisinin E elastisite modülü,  $\sigma_1$  gerilmesi (yaklaşık olarak akma gerilmesine eşit) ve n malzeme şekil katsayısı ile ifade edildiği bir yöntemi geliştirmiştir. Gerilme-şekildeğişimi diyagramı eğrisi

$$\bar{\epsilon} = \bar{\sigma} + \frac{3}{7} \bar{\sigma}^{-n} \quad (4.8)$$

dir. Burada  $\bar{\epsilon}$  ve  $\bar{\sigma}$

$$\bar{\epsilon} = \frac{E\epsilon}{\sigma_1} \quad (4.9)$$

ve

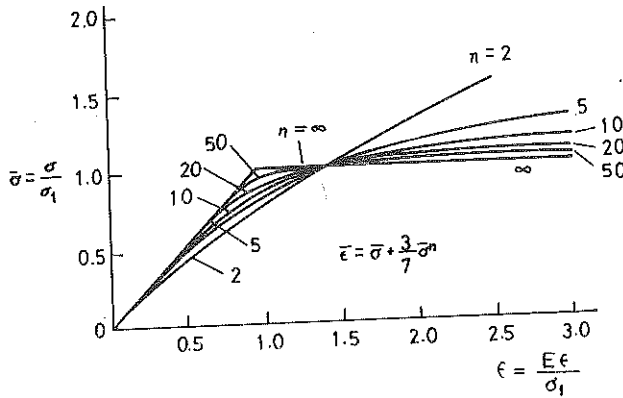
$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_1} \quad (4.10)$$

şeklinde tanımlanan boyutsuz terimler ve

$$n = 1 + \frac{\ln 17/7}{\ln (\sigma_{0.7}/\sigma_{0.85})} \text{ 'dir.}$$

Denklem (4.8) ile ifade edilen eğriler, çeşitli n değerleri için Şek.4.4'te

çizilmiştir. Akma sınırı üzerinde gerilmenin sabit kaldığı yumuşak çelik gibi bir malzeme  $n = \infty$  eğrisi ile temsil edilmiştir. Çeşitli gerilme-şekildeğişim eğrilerine sahip diğer malzemeler, diğer  $n$  değerleri ile temsil edilebilirler. Bütün malzemelerin gerilme-şekildeğişimi diyagramlarını tek bir denklemle temsil etmek için akma gerilmesi yerine  $\sigma_1$  referans gerilme değerinin kullanılması gerekir.  $\sigma_1$  değeri, Şek.4.5'te gösterildiği gibi gerilme-şekildeğişimi eğrisinin orijinden geçen  $\sigma = 0,7 E\epsilon$  doğrusu ile kesiştiği noktanın koordinatı olarak alınır. Tipik hava taşıtları malzemelerinde  $\sigma_1$  gerilmesi yaklaşık olarak akma gerilmesine eşittir.  $n$  değeri ise Denklem (4.8)'in arzu edilen kısımda, deneysel gerilme-şekildeğişimi eğrisine uyacak şekilde seçilebilir. Ramberg ve Osgood, birçok malzeme için  $n$  değerinin  $\sigma_1$  ve  $\sigma = 0,85 E\epsilon$  doğrusu üzerinde buna benzer bir  $\sigma_2$  gerilmesi ile hassasa yakın bir şekilde elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.4

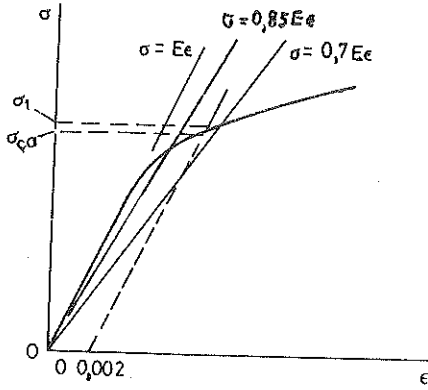
Burada belirtmek gerekir ki, çeşitli malzemelerin kesme kayma-kayma şekildeğişimi eğrileri, benzer denklemlerle basitleştirilip çeşitli kayma deney sonuçlarına uydurulabilir.

#### 4.4 YORULMA

Yorulma, gerilmelerin tekrarlı uygulanması sonucu yapıda mikroskopik çatlakların oluşması ve bunların makroskopik çatlaklara dönüşmesi olarak tanımlanabilecek dinamik bir olaydır. Yorulma, dinamik gerilmeler etkisi altında,



malzemede yerel olarak oluşan ve ilerleyen bir yapısal kırılma işlemidir. Yükün bir kere uygulanması ile göçmeyecek bir yapı, aynı yükün tekrarlı uygulanması sonucunda kolayca göçebilir. Tekrarlı veya çevrimsel olarak uygulanan yük altındaki bu göçme haline "yorulma göçmesi" veya "yorulma işeyaramazlığı" denir.



Şekil 4.5

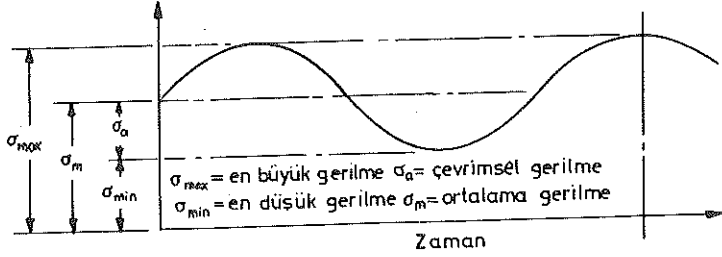
Yıllardır sürdürülen birçok çalışma ve sayısız deneye rağmen; yorulma, bugün de birçok yapı ve makinada en yaygın işeyaramazlık nedenidir ve diğer yapı davranışları arasında en az anlaşılabilenidir. Anlaşılmasının nedeni mikroskopik çatlakların başlamasının ve gelişmesinin istatistiksel tabiatta olmasıdır. Bir analizci, gerçekte, aşağıda belirtilen hususlarla ilgili istatistiklerde büyük farklılıklarla karşılaşır: (1) Hizmet türü ve çevre koşulları, (2) hizmet yükünün şiddeti ve oluşma frekansı, (3) üretim işlemleri sırasında kalite kontrolü, (4) gerilmelerin hesaplanmasında kullanılan analizin hassasiyeti ve kapsamı, (5) malzeme mukavemet verilerinin uygulanabilirliği.

Tüm yorulma analizi ve deneylerinin ana hedefi kararlı yükler altında, verilen bir yapı veya bir makina parçasının yorulma ömrünün öngörülmesidir. Bu yükler Şek.4.6'da gösterildiği gibi sabit genlikte olabilir, fakat hava taşıtları yapılarında, yük uygulaması, genellikle Şek. 4.7'de gösterildiği gibi gelişigüzel tabiattadır.

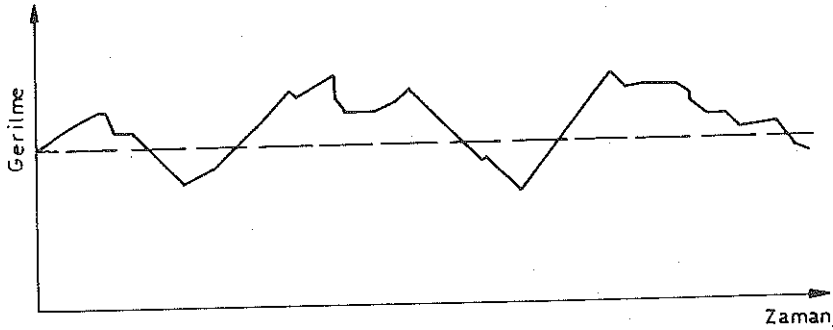
### Yorulma ömrünün öngörülmesi

Yapıların tasarımında kullanılan yorulma ömrünü öngörme yöntemlerinin çoğu sinüs uyarı dalgaları ile elde edilen yorulma verilerine dayanır. Gerçek gelişigüzel yüklemeye deneyleri için kapalı çevrim, otomatik kontrollü hidrolik makinaların

kullanılması ancak yakın zamanda mümkün olmuştur. Yorulma deneyi verileri genel olarak grafik şeklinde gösterilir (Şek.4.8) ve bunlara müsaade edilebilir S-N eğrileri denir. "Birikimli hasar" kavramı ile ilgili eğriler, yorulma ömrünün öngörülmesinde kullanılan birçok yöntemin esasını oluşturur.



Şekil 4.6 Sinüzoidal yüklemeye



Şekil 4.7. Gelişigüzel gerilme yüklemesi

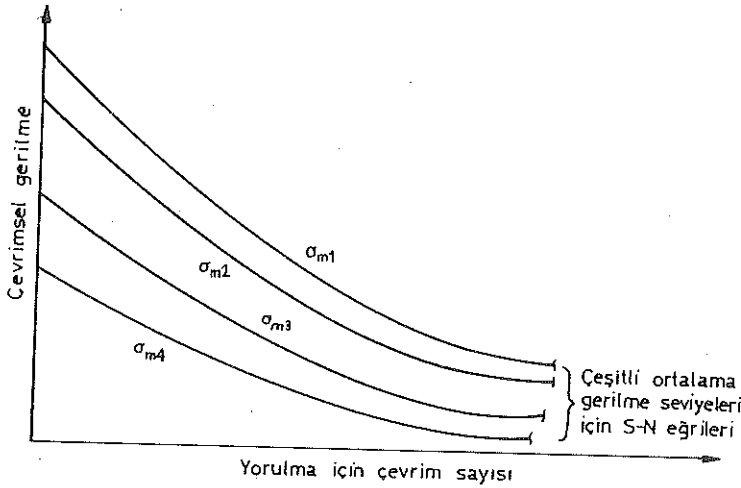
Yorulma ömrünün öngörülmesi için geliştirilen birçok kuram arasında Palmgren-Miner kuramı<sup>26</sup>, basitlik nedeni ile en çok kullanılanıdır. Bu yöntemde faydalı ömrün sarfedilen kısmının, belirli bir sabit  $\sigma_i$  gerilmesinin uygulandığı  $n_i$  çevrim sayısının bu gerilme altında elde edilen işçaramazlık çevrim sayısı  $N_i$ 'ye oranı şeklinde olduğu varsayılır. Bütün bu oranların toplamı 1'e vardığında işçaramazlık meydana gelmelidir. Bu işçaramazlık, matematiksel olarak;

$$\left(\frac{\eta_1}{N_1}\right) \sigma_{i=S_t} + \left(\frac{\eta_2}{N_2}\right) \sigma_{i=S_t} + \dots + \left(\frac{\eta_r}{N_r}\right) \sigma_{i=S_t} = 1$$

şeklinde yazılır veya

$$\sum_{i=1}^r \left(\frac{\eta_i}{N_i}\right) \sigma_{i=S_t} = 1 \quad (4.11)$$

Palmgren-Miner kuramında yorulma ömrünü etkileyen; çentik duyarlılığı, yükleme sırası (yüksek-düşük veya düşük-yüksek) ve çeşitli ortalama gerilme seviyelerinin oluşum sırası gibi etkileri gözönüne almak için herhangi bir değerlendirmenin burada yapılmadığına dikkat etmek gerekir.



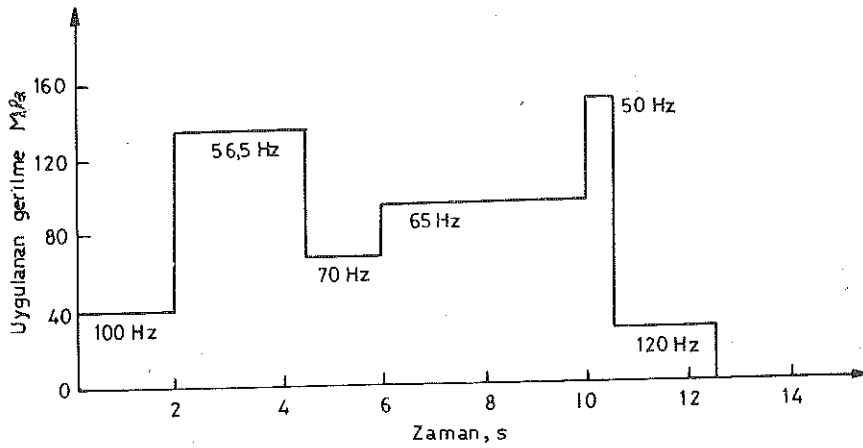
Şekil 4.8. Yorulma eğrileri

Gerçekte Gassner<sup>20</sup>, Kowalewski<sup>21</sup>, ve Corten ve Dolan<sup>22</sup>,ın ele aldığı bazı deneylerle bu kavramın emniyetli olmayan sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Denklem (4.11)'in kullanımını göstermek için bir uçak kokpitinde bulunan bir elektronik kutuyu tutan bir kelepçe gözönüne alınsın. Tipik bir görev sırasında kelepçe

Şek.4.10'da idealize edilerek gösterilen bir gerilme geçmişi spektrumuna maruz kalsın. Problem, kelepçe işeyaramaz duruma gelene kadar uçağın yapabileceği görev uçuşları sayısını belirlemektir.

Şek.4.9 ile 4.10'dan yararlanarak Tablo 4.1 kolayca hazırlanabilir. Buradan, bir görev uçuşu sonrasında kelepçenin faydalı ömrünün yüzde 0,433'ünün geçirilmiş olduğu görülür. Denklem (4.11) esas alınarak bu, kelepçe işeyaramaz duruma gelmeden önce uçağın 200 civarında görev uçuşu yapabileceği anlamına gelir.



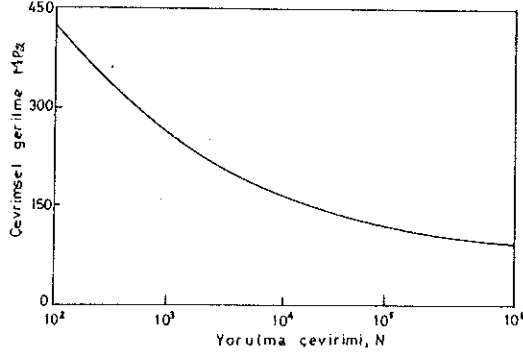
Şekil 4.9. Görev başına kelepçenin gerilme-geçmişi spektrumu

**Yorulma deney verisi: S-N eğrileri** Çok değişik maksatlarla yorulma deneyleri yapılır. Bunlardan biri malzemelerin yorulma ömürlerini veya genel olarak, bilinen S-N eğrilerini belirlemektir. Statik deney sonuçlarının aksine, yorulma deney sonuçlarındaki saçılmanın oldukça fazla olduğu gözlenmiştir. Yaygın olarak kullanılan istatistiksel dağılım fonksiyonu ortalama değeri;

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln N_i \quad (4.12)$$

olan log-normal dağılımıdır. Burada n = aynı gerilme seviyesinde denenen deney parçası

toplam sayısı ve  $N_i = i$ . deney parçasının işeyaramazlık çevrim sayısıdır.



Şekil 4.10. S - N eğrileri

Şekil 4.10

Tablo 4.1

$\eta_i$ , çevrim	$\sigma_i$ , MPa	$N_i$ , çevrim	$\frac{\eta_i}{N_i}$
200	40	$\infty$	0
141	135	50.000	0,00282
105	65	$\infty$	0
260	100	$10^6$	0,00026
25	145	$2 \times 10^4$	0,00125
240		$\infty$	0
$\sum \frac{\eta_i}{N_i}$	30		0,00433

$\bar{N}$ 'nin eğilimsiz standart sapması

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\ln N_i - \bar{N})^2}{n-1} \right] \quad (4.13)$$

şeklinde tanımlanır. Bir güvenilirlik seviyesi esas alınarak işeyaramazlığın olduğu çevrim sayısını hesaplamak için u standart değişkeni

$$u = \frac{\ln N - \bar{N}}{\sigma} \quad (4.14)$$

veya

$$\ln N = \bar{N} + u\sigma \quad (4.15)$$

şeklinde alınır.  $\ln N$  çevrimine dayanma olasılığı

$$\text{olasılık} (\ln N) = P (\ln N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (4.16)$$

dır. Tablo 4.2'de gösterildiği gibi çeşitli u standart değişken değerleri için Denklem (4.16), dayanma olasılığı değerlerini bulmak için kullanılabilir.

İşlemi göstermek için yedi deney parçasından elde edilen gerçek yorulma deney sonuçları gözönüne alınsın:

Deney parça no.	Yorulma çevrimi, $N_i$
1	61.318
2	39.695
3	62.803
4	51.039
5	83.910
6	35.631
7	96.500

Denklem (4.12)'den ortalama değer için

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln N_i = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \ln N_i \\ &= \frac{1}{7} (\ln 61.318 + \ln 39.695 + \dots + \ln 96.500) \\ &= 10,97095\end{aligned}$$

hesaplanır.

Tablo 4.2

u	Dayanma olasılığı, %
- 1,280	90,0
- 1,645	95,0
- 2,330	99,0

Denklem (4.13)'ten eğilimsiz standart sapma;

$$\begin{aligned}\sigma &= \left[ \sum_{i=1}^7 \frac{(\ln N_i - N)^2}{6} \right]^{1/2} \\ &= \left[ \frac{(\ln 61.318 - 10,97095)^2}{6} + \dots + \frac{(\ln 96.500 - 10,97095)^2}{6} \right]^{1/2} \\ &= 0,3659\end{aligned}$$

olur. %95'lik bir dayanma olasılığı farzedilirse, Denklem (4.15)'ten

$$\ln N = \bar{N} + u\sigma = 10,97095 + (-1,645)(0,3659) = 10,369$$

Böylece %95 dayanma olasılığı ile, işyaramazlığa kadarki çevrim sayısı

$$N = \text{antilog } 10,3690 = 31.860 \text{ çevrim olur.}$$

#### 4.5. MALZEMELERİN MUKAVEMET-AĞIRLIK KARŞILAŞTIRMASI

Hava-uzay yapı malzemelerinin seçiminde kullanılan kriter, genellikle minimum ağırlıktır. Bu ise optimum dizaynı vermek üzere, ağırlığın, minimize edilecek fonksiyon olarak ele alındığı durumda, malzeme ve yapısal oranlarının uygun bir bileşimini seçmekle ilgilidir. Malzemelerin ağırlık karşılaştırması korrozyona dayanıklılık, yorulma davranışı, sürünme özelliği, mukavemet ve benzerleri gibi birçok faktöre göre yapılabilmesine rağmen burada yalnızca mukavemet bakımından ele alınacaktır.

Bir uygulama olarak Şek. 4.11'de gösterildiği gibi üç değişik yükleme altındaki elemanlar ele alınsın; basitlik açısından, dizaynda, serbest değişken olarak bir değişkenin (burada t kalınlığı) bulunduğu farzedilsin. Şek.4.11'a, b ve c'deki elemanların dizaynını yönlendiren kriter, nihai tek eksenli çekme, nihai tek eksenli basınç veya burkulma ve nihai eğilmedir. Uygulanan dış yüklerle, gerçek gerilmeler arasındaki bağıntılar;

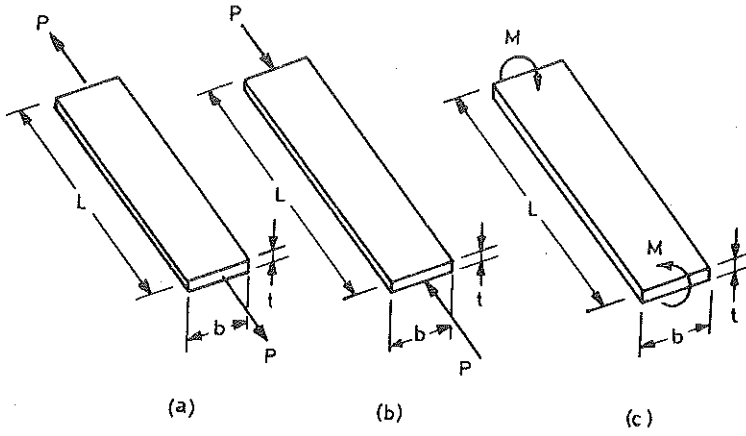
$$\text{Çekme: } \sigma_c = \frac{P}{A} \quad (A = bt) \quad (4.17)$$

$$\text{Basınç (burkulma): } \sigma_b = \frac{\pi^2 EI}{AL^2} \quad (I = \frac{bt^3}{12}) \quad (4.18)$$

$$\text{Eğilme: } \sigma_e = \frac{Mt}{2I} \quad (4.19)$$

şeklindedir. Burada  $\sigma_c, \sigma_b, \sigma_e$  = sırasıyla nihai çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri





Şekil 4.11. Yüklenmiş elemanlar (a) Safi çekme; (c) Safi eğilme

A= kesit alanı

I = elemanın kesit atalet momenti

dir.

Elemanların ağırlığı, sabit ve serbest geometrik büyüklükler ve özgül ağırlığı ( $\gamma$ ,  $N/mm^3$ ) cinsinden ifade edilebilir:

$$W = \gamma Lbt \quad (4.20)$$

Denklem (4.17)'den (4.19)'a kadarki ifadelerden serbest değişken çözülür ve Denklem (4.20)'ye konursa, herbir dizayn kriterini sağlayacak malzeme ağırlığı bulunur:

$$W = \frac{PL\gamma}{\sigma_{\varphi}} \quad (\text{çekme}) \quad (4.21)$$

$$W = Lb\gamma \left( \frac{12P_{kr} L^2}{\pi^2 Eb} \right)^{1/3} \text{ (basınç)} \quad (4.22)$$

$$W = L\gamma \left( \frac{6Mb}{\sigma_e} \right)^{1/2} \text{ (eğilme)} \quad (4.23)$$

Denklem (4.21)-(4.23) elde olduğundan değişik malzemelerin ağırlık karşılaştırmaları artık yapılabilir. Eksenel P yükünü taşıyabilecek iki farklı malzemenin ağırlıkları Denklem (4.21)'den;

$$W_1 = \frac{PL \gamma_1}{\sigma_{\varphi_1}} \quad W_2 = \frac{PL \gamma_2}{\sigma_{\varphi_2}}$$

şeklinde elde edilir. Buradaki 1 ve 2 indisleri 1 ve 2 malzemelerini gösterir ve  $\sigma_{\varphi_1}$  ve  $\sigma_{\varphi_2}$  sırasıyla 1 ve 2 malzemelerinin nihai çekme mukavemetleridir.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \frac{\sigma_{\varphi_2}}{\sigma_{\varphi_1}} \quad (4.24)$$

Benzer şekilde aynı burkulma (basınç) yükünü taşıyacak değişik malzemelerden yapılmış iki elemanın ağırlık oranları, Denklem (4.22)'den kolayca elde edilir:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^{1/3} \quad (4.25)$$

Yine benzer şekilde aynı eğilme momentini taşıyacak iki değişik malzemenin yapılmış iki elemanın ağırlık oranları Denklem (4.23)'ten yararlanılarak elde edilebilir:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left( \frac{\sigma_{e_2}}{\sigma_{e_1}} \right)^{1/2} \quad (4.26)$$

Denklem (4.24)-(4.26) yardımıyla levha halindeki tipik hava taşıt malzemeleri, Tablo 4.3'te karşılaştırılmaktadır. Çeşitli malzeme ağırlıkları 2024-T3 alüminyum alaşımları ile karşılaştırılmıştır. Çekme elemanlarının 5. sütunda gösterilen ağırlık oranları fazlaca değişmemektedir. Eğilme altındaki elemanlardan bariz avantajlı olanları 6. sütunda görülmektedir. Benzer şekilde düşük özgül ağırlıklı malzemeler, 7. kolondan anlaşılacağı gibi burkulmada daha fazla avantaj sağlamaktadır.  $\sigma$  değerleri, levha kalınlıkları ile değişmektedir ve burada görülenler yalnızca karşılaştırma yapabilmek içindir.

Tablo 4.3'teki hesaplar, düşük özgül ağırlıklı son üç malzemenin, alüminyum alaşımlarına üstün geldiğini vurgulamaktadır; fakat magnezyum alaşımlarının daha fazla korozyona uğradığına, ahşap ve plastiklerin, plastik şekildeğiştirme kabiliyetlerinin daha az olduğuna dikkati çekmek isteriz. Yerel yüksek gerilme birikmelerine yol açan birçok civata bağlantısı olan, parçalı ve kesip-çıkarmalı yapılarda kırılğan malzeme kullanılması arzu edilmez. Nihai çekme mukavemetindeki birim uzama değeri büyük, plastik şekildeğiştirme kabiliyeti fazla olan malzemeler, yüksek gerilmelerin oluştuğu yerel noktalarda biraz akarak gerilmeyi düşürürken, kırılğan malzemeler aynı şartlarda geçebilir. Hava taşıtlarında elyaf takviyeli plastiklerin başarıyla kullanılması 1940'lara ve 1950'lerin başlarına kadar uzanır. O günlerdeki bellibaşlı takviye malzemesi, yapıştırma malzemesi poliestere içine gömülmüş cam elyafı idi. Daha sonraları ve son yıllarda yüksek modüllü (boron, silikon karbür, grafit ve berilyum gibi) elyaflarla, yüksek modüllü, yüksek sıcaklıklara dayanıklı (sikloalifatik epoksiler, polimerize ve polibenzimidazol reçine gibi) reçinelerin birleşimlerinin hava, deniz ve kara nakil vasıtaları yapılarında kullanılması, malzemelere yeni bir boyut kazandırmıştır. Reçine içine gömülmüş takviyeler şeklindeki hazır karma yapılar, yapıya gelecek yük şiddeti ve doğrultusu gereksinimi bakımından analizciye (karma yapıyı tek doğrultulu bir dizi kat şeklinde imal ederek) tam bir biçme serbestliği sağlar.

**Tablo 4.3 Malzemelerin mukavemet-ağırlık karşılaştırmaları**

Levha malzeme (1)	$\sigma$ , MPa (2)	$(10^{-6})$ ortalama $\delta$ , N/mm <sup>3</sup> (3)	E GPa (4)	Ağırlığın 2024-T3 alüminyum alaşımı ağırlığına oranı		
				Çekme Eğilme		Burkulma
				$\frac{\delta_1}{\delta_2} \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{12}}$ (5)	$\frac{\delta_1}{\delta_2} \sqrt{\frac{\sigma_{b2}}{\sigma_{b1}}}$ (6)	$\frac{\delta_1}{\delta_2} \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$ (7)
Paslanmaz çelik	1275	78	178	1,02	1,71	2,12
2024-T3 alüminyum ala.	455	27.2	72	1,00	1,00	1,00
7075-T6 " "	530	27.4	71	0,86	0,94	1,01
Magnezyum alaşımı	275	17.6	34	1,07	0,83	1,79
Katlı plastik	207	13.5	17	1,10	0,74	0,81
Ladin ağacı	65	4.2	89	1,08	0,41	0,31

Çalışmalar göstermiştir ki, karma yapıların kullanılması ile hava taşıtlarının toplam ağırlıkları, yüzde 35'ten daha fazla düşürülebilir.

#### 4.6. SANDÖVIÇ KONSTRÜKSİYON

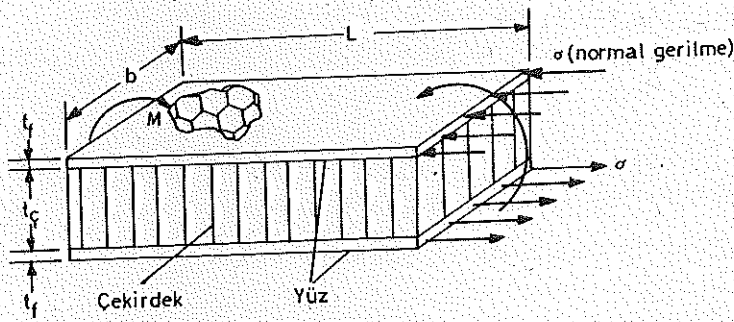
Hava-uzay yapılarında malzeme kalınlığı artırılırken ağırlığın da artması problemi, genellikle sandöviç konstrüksiyon kullanılarak giderilmeye çalışılır. Bu tür konstrüksiyon, yüksek yoğunluklu ince, dış ve iç iki yüzey kat arasına düşük yoğunluklu çekirdek malzemesi kullanılarak yapılır.

Hava-uzay yapı uygulamalarında yüzler, aracın görev özelliğine göre takviyeli karma yapılar, titanyum, alüminyum, çelik v.b'den yapılabilir. Sandöviç konstrüksiyonlarda çeşitli çekirdek şekilleri ve çekirdek malzemeleri kullanılır. Bunların en çok kullanılan yüzeylere dik ince folyadan yapılmış altugen "balpetoği" çekirdeğidir.

Sandöviç konstrüksiyon kavramı yeni olmamakla birlikte yalnızca son yüzyılda roketler, füzeler, fırlatıcılar ve uzay araçları dahil bütün hava-uzay araçlarında kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunun başlıca sebebi, sandöviç konstrüksiyonla yüksek bir yapısal verimliliğin elde edilebilmesidir. Sandöviç konstrüksiyonların diğer avantajları; mükemmel titreşim ve flater karakteristiği, üstün izolasyon kalitesi ve dizayn çeşitliliğidir.

Bir sandöviç giriş elemanı Şek.4.12'de gösterilmiştir. Basitlik açısından

yüzeylerin eşit  $t_y$  kalınlığında olduğu farz edilmiş ve çekirdek kalınlığı  $t_ç$ 'dir. Aynı zamanda çekirdeğin herhangi bir  $\sigma$  normal gerilmesi taşımadığı farzedilmektedir. Bir M eğilme momenti taşıyan sandöviç kirişin ağırlığını minimum kılacak yüzey kalınlıklarının bulması durumu gözönüne alınsın. Genellemede herhangi bir fedakarlık yapılmadan b ve L birim değerde alınabilir ve karşılanan eğilme momenti;



Şekil 4.12. Sandöviç kiriş elemanı

$$M = \sigma t_y (t_y + t_ç)$$

olarak ifade edilebilir.  $t_y$ 'nin  $t_ç$ 'ye nazaran küçük olduğu farzedilirse, ki bu normal bir durumdur, yukarıdaki denklem;

$$M = \sigma t_y t_ç$$

şekline indirgenir veya

$$M = \sigma \beta t_ç^2 \quad (4.27)$$

olur. Burada  $t_y$ ,  $t_y = \beta t_ç$  denklemi yardımı ile  $t_y$ ,  $t_ç$  cinsinden ifade edilmiştir.

Kirişin birim elemanın ağırlığı yaklaşık olarak;

$$W = \gamma_{\varphi} t_{\varphi} + 2\gamma_y \beta t_{\varphi} \quad (4.28)$$

dir. Burada  $\tau_{\varphi}$  ve  $\tau_y$  sırasıyla çekirdek ve yüzün yoğunluklarıdır. Denklem (4.27) ve (4.28)'den  $t_{\varphi}$  değişkeni çıkarılırsa;

$$W = (\gamma_{\varphi} + 2\gamma_y \beta) \sqrt{\frac{M}{\beta\sigma}} \quad (4.29)$$

de edilir. Minimum ağırlık için  $\beta$  değeri, Denklem (4.29)'un  $\beta$ 'ya göre türetilip, türevin sıfıra eşitlenmesi ile elde edilebilir. Türetme işlemi yapıp  $\beta$ 'ya göre çözümlerse;

$$\beta = \frac{\gamma_{\varphi}}{2\gamma_y} \quad (4.30)$$

bulunur. Denklem (4.30), eğilme momentini karşılayan sandöviç malzemede, iki tabaka yüzey malzemesinin yaklaşık olarak çekirdek ağırlığında olmasıyla minimum ağırlığın elde edilebileceğini gösterir. Eğer giriş elemanı basınç (burkulma) yükü tesirinde ise bu tür minimum ağırlığı vermeyeceğine dikkat edilmelidir.

Artık sandöviç giriş eleman ağırlığını, yüzey malzemesinden yapılmış dolu bir giriş ağırlığı ile karşılaştırmak mümkündür. Burada her ikisinin de aynı yükü taşıdığı zedilmektedir. Eğilme momenti taşımak üzere diyazn edilmiş bir sandöviç elemanın toplam ağırlığı, yüzey ve çekirdek malzemeleri aynı ağırlıkta ise, yüzeylerin toplam ağırlığının iki katına eşit olacaktır. Denklem (4.28)'den

$$W = 4\gamma\beta t \quad (4.31)$$

Denklem (4.27)'ye göre çözümlür ve bu Denklem (4.31)'de yerine konursa, sandöviç eleman için şu ağırlık bulunur:

$$W = 4\gamma\beta \sqrt{\frac{M}{\beta\sigma}} \quad (4.32)$$

Denklem (4.23)'ten dolu kiriş elemanının  $W_s$  ağırlığı

$$W_s = \gamma \sqrt{\frac{6M}{\sigma}} \quad (4.33)$$

olur. Böylece sandöviç kiriş elemanı ağırlığının, yüzey malzemesiyle aynı malzemeden yapılmış dolu kiriş elemanı ağırlığına oranı

$$\frac{W}{W_s} = \frac{4\gamma\beta \sqrt{M/(\beta\sigma)}}{\gamma \sqrt{6M/\sigma}} = 1,63 \sqrt{\beta} \quad (4.34)$$

şeklindedir.

Denklem (4.34)'ün, yalnızca yüzeylerin toplam ağırlığının çekirdek ağırlığına eşit olması halinde geçerli olacağını hatırlatmak gerekir. Sandöviçlerin ağırlığının Tablo 4.3'te incelenen dolu elemanlarla karşılaştırılmasını yapmak için, yüzeyleri 2024-T3 alüminyum alaşımından yapılmış ve çekirdek özgül ağırlığı  $2,72 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$  olan bir kiriş elemanı düşünölsün. Denklem (4.30)'dan;

$$\beta = \frac{\gamma_\varphi}{2\gamma_y} = \frac{(2,72 \times 10^{-6})}{2(27,2 \times 10^{-6})} = 0,05$$

Denklem (4.34)'ten

$$\frac{W}{W_s} = 1,63 \sqrt{0,05} = 0,37$$

bulunur. Buradan, aynı eğilme momentini taşıyan sandöviçin, dolu kiriş ağırlığının yalnızca yüzde 37'si olduğu görülür. 0,37 değerinin Tablo 4.3'ün 6. sütunundaki diğer değerlerden az olduğuna dikkati çekmek gerekir.

Önceki incelemelerde kalınlık oranlarının yalnızca teorik düşüncelerden dolayı

kısıtlandığını belirtmek gerekir. Gerçek yapılarda pratik görüşler daha önemlidir. Örneğin yüzey malzeme kalınlığı genellikle teorik değerlerden daha fazladır; çünkü çok ince levhaların imali ve bunlara şekil verilmesi elverişli olmayabilir. Benzer şekilde çekirdek malzemenin, dolu bir elemanda olduğu gibi yüzeyleri desteklediği farzedilir; fakat gerçekte düşük yoğunluklu çekirdek malzeme bunu sağlayamayabilir.

#### 4.7. MALZEMELER İÇİN TİPİK DİZAYN VERİLERİ

Belirli bir malzemeden imal edilen bütün parçaların birbirinin aynı yapısal özellikler göstermesi mümkün değildir. Aynı malzemeden yapılmış deney parçalarının nihai mukavemet değerleri yüzde 10'a kadar varan farklar gösterir. Böylece bir hava-uzay taşıt yapısının dizaynında o malzemeden yapılmış parçaların denenmesinden elde edilen minimum değerlerin gerilmeler için kullanılması gerekmektedir. Bu değerler, imalatçının garanti ettiği minimum değerler olarak isimlendirilir Lisans ve onay veren kuruluşlar hava-uzay taşıtlarının dizaynında minimum değerlerin kullanılmasını önerirler. Bu değerler MIL-HDBK-5A, MIL-HDBK-5, MIL-HDBK-17, MIL-HDBK-23 gibi Askeri El-kitaplarında bulunur. Tablo 4.4'te hava-uzay yapılarının dizaynında kullanılacak tipik mekanik veriler gösterilmiştir. Normal olarak bu veriler şu esaslardan birine göre düzenlenir:

A esası: Yüzde 95 güvenilirlikle bütün mekanik özellik değerlerinin yüzde 99'u, belirtilen değerlerin üzerindedir.

B esası: Yüzde 95 güvenilirlikle bütün mekanik özellik değerlerinin yüzde 90'ı, belirtilen değerlerin üzerindedir.

C esası: Minimum mekanik özellik değerleri çeşitli kuruluşlarca belirtildiği gibidir.



Tablo 4.4 Malzemeler için tipik mekanik veriler

---

Çekme	
$\sigma_{\text{çn}}$	Nihai gerilme
$\sigma_{\text{ça}}$	Akma gerilmesi
$\sigma_{\text{ço}}$	Orantı sınırı
E	Elastisite modülü
e	Uzama
Basınç	
$\sigma_{\text{bn}}$	Nihai (blok) gerilme
$\sigma_{\text{ba}}$	Akma gerilmesi
$\sigma_{\text{bo}}$	Orantı sınırı
$\sigma_{\text{ko}}$	Kolon akma gerilmesi
$E_b$	Elastisite modülü
Kayma	
$\sigma_{\text{kn}}$	Nihai gerilme
$\sigma_{\text{kb}}$	Yırtılma burulma modülü
$\sigma_{\text{ko}}$	Orantı sınırı (burulma)
G	Rijitlik modülü (burulma)
Yırtılma	
$\sigma_{\text{yn}}$	Nihai gerilme
$\sigma_{\text{ya}}$	Akma gerilmesi

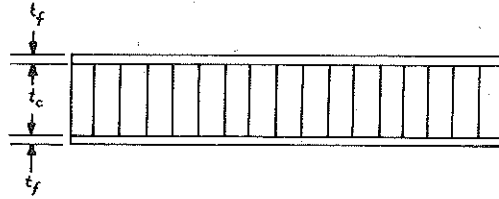
---

#### PROBLEMLER

4.1 Bir sandöviç kolonun burkulma yükü, yaklaşık olarak  $P = \pi^2 EI / L^2$  ile verilir. Kolonun optimum dizaynında (minimum ağırlık), yüzey kalınlığının çekirdek kalınlığına oranını bulunuz.

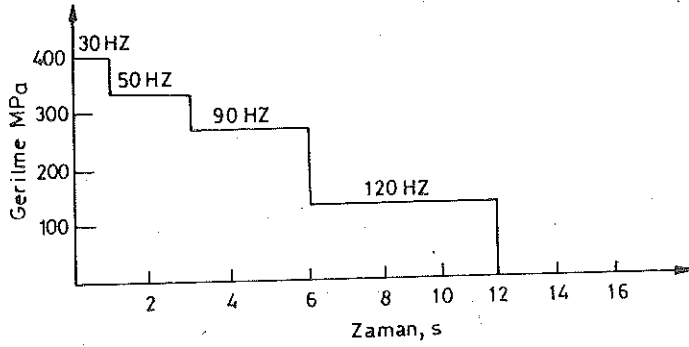
4.2. Prob. 4.2'deki sonucu çekirdek özgül ağırlığı  $4,1 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$  olan ve yüzey malzemeleri şu malzemelerden yapılmış duruma uygulayın:

- (a) 2024-T3 alüminyum alaşımı (özgül ağırlığı =  $27,2 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
- (b) 6Al-4V titanyum (özgül ağırlığı =  $43,4 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
- (c) 321 paslanmaz çelik (özgül ağırlığı =  $77,7 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
- (d) Inconel (özgül ağırlığı =  $81,5 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
- (e) Berilyum (özgül ağırlığı =  $18,7 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
- (f) Takviyeli karma malzeme (tek doğrultulu)
  - (1) Cam elyafı (özgül ağırlığı =  $24,4 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
  - (2) Boron elyafı (özgül ağırlığı =  $25,8 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )
  - (3) Grafit (özgül ağırlığı =  $28,6 \times 10^{-6} \text{ N/mm}^3$ )



Şekil P4.1

4.4. Bir uçağın roket taşıyan elemanı, uçağın her bir görevi sırasında Şek.P4.4'de gösterilen yük geçişine maruz kalmaktadır. Eğer malzemenin müsaade edilebilir yorulma değerleri Şek.4.10'da gösterildiği gibi ise, kaç uçuştan sonra bu taşıyıcı eleman işeyaramaz hale gelebilir?



Şekil P4.4

4.5. On parça aynı gerilme seviyesinde yorulma deneyine tabi tutulmuş ve şu işyaramazlık çevrimleri rapor edilmiştir.

Parça No.	Yorulma çevrimi
1	300.000
2	190.000
3	225.000
4	350.000
5	260.000
6	280.000
7	490.000
8	310.000
9	360.000
10	390.000

Kullanma sırasında değiştirme olmadan aşağıda belirtilen yüzdelerde işyaramazlığın olması için parça hangi çevrimden sonra değiştirilmelidir?

- (a) 1
- (b) 5
- (c) 10

