

678.046.36:620.194.8  
A 611 c

1996-1485

TÜRKİYE BİLİMSEL ve TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU  
MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU  
PROJE NO : 421

# CAM TAKVİYELİ PLÂSTİK KOMPOZİTLERDE YORULMA

TÜRKİYE  
BİLİMSEL ve TEKNİK  
ARAŞTIRMA KURUMU  
KÜTÜPHANESİ

Proje Yürütücüsü : Prof. Dr. Alpay ANKARA

TEMMUZ 1977  
ANKARA

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU

PROJE NO : 421

678.046.36 : 620.194.8  
A 611 c

CAM TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERDE  
YORULMA

Proje Yürütücüsü : Prof.Dr. Alpay ANKARA

Temmuz 1977

ANKARA

TÜRKİYE  
BİLİMSEL VE TEKNİK  
ARAŞTIRMA KURUMU  
MÜHÜRÜ

81941

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU  
MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU

PROJE NO : 421

CAM TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERDE  
YORULMA

Proje Yürütücüsü : Prof.Dr. Alpay Ankara

Bu Proje Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Desteği ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümünde Yapılmıştır.

Temmuz 1977 ANKARA

## ÖNSÖZ

Cam takviyeli plastik malzemelerde yorulma olaylarını inceleyen bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından desteklenen MAG-421 no.lu Araştırma Projesinin kesin raporudur. Araştırma ODTÜ, Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

Araştırmayı birinci dereceden destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumuna teşekkürü borç bilirim.

Deneyler için lüzumlu numunelerin yapımında ODTÜ, Metalurji Mühendisliği Bölümü Atelyesinde çalışan teknisyen arkadaşlarımdan katkısı çok büyük olmuştur. Çok uzun süreli ve büyük titizlik isteyen deneylerin yapımında büyük sabır ile çalışan Asistan Filiz Sarıoğlu'na ve ayrıca bu raporu büyük dikkat ile daktilo eden Sayın Emine Başkan ile Serap Erbakan'a teşekkür ederim.

## İ Ç İ N D E K İ L E R

	<u>Sahife</u>
Önsöz . . . . .	III
İçindekiler . . . . .	IV
Tabloların Listesi . . . . .	V
Şekillerin Listesi . . . . .	v
Resimlerin Listesi . . . . .	vi
Abstract . . . . .	vi
Abstract (İngilizce) . . . . .	vi
I. GİRİŞ	1
II. KONVANSİYONEL MALZEMELERDE YORULMA VE KIRILMA	2
III. KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA	6
IV. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	12
A. Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerde Yorulma	12
B. Literatürde Rastlanan Boşluklar	33
V. MATERYEL VE METOD	37
A. Materyel	37
B. Metod	42
VI. BULGULAR	50
A. Çekme Testleri	50
B. Çekme testinde hasar birikimi	54
C. Yorulma sonuçları.	
VII YORUMLAMA (Yorulma)	65
Çatlak İlerleme Mekanizmaları	76
VIII SONUÇLAR	78
IX ÖZET (TÜRKÇE)	80
X ÖZET (İNGİLİZCE)	81
XI LİTERATÜR LİSTESİ	82

## TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sahife</u>
1 Şekil 6`da kullanılan malzemeler ile ilgili açıklama .....	23
2 Sıvı pol`esterin özellikleri.....	37
3 Cam elyaf özellikleri .....	39

## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil No</u>	<u>Sahife</u>
1 Kompozit histerisiz eğrilerinin çekme sıfır yük ile zorlama sırasında denge durumuna gelişi.....	8
2 Pol`ester matris içinde fiber dağılım geometrisi.	17
3 Pol`ester-Cam fiber kompozitinde radyal ara yüzey gerilme dağılımı .....	18
4 Pol`ester-Cam fiber kompozitinde çekme yüklemesine dik yönde bulunan fiber ara yüzeyindeki radyal gerilme dağılımı .....	19
5 Pol`ester-Cam fiber kompozitinde çekme yüklemesine paralel yönde bulunan fiber ara yüzeyindeki radyal gerilme dağılımı .....	20
6 Kompozit elastik modülü ile ara yüzey bağlarının kopmaya başladığı çekme gerilmesi arasındaki bağlantı .....	25
7 CTP malzemelerde yük eksenine dik fiber ara yüzey bağlarının kopmasının periyodik gerilme ile değişimi .....	26
8 Numune yapımı için kullanılan kalıplar.....	40
9 Prizmatik numuneye ait gerilme-gerinme ve gerinme-akustik emisyon eğrileri.....	46

<u>Sekil No</u>		<u>Sahife</u>
10	Delikli numunelere ait gerilme-gerinme ve gerinme-akustik emisyon eğrileri.....	47
11	Çentikli numunelere ağıt gerilme-gerinme ve gerinme-akustik emisyon eğrileri.....	48
12	Periyodik zorlamalarla delikli numunenin elastik modülündeki değişimi ile periyodik zorlamaların sebep olduğu akustik emisyonlar.....	59
13	Periyodik zorlamalarla prizmatik numunelerde elastik modülü değişimi ile periyodik zorlamanın sebep olduğu akustik emisyonlar.....	60
14	Cam takviyeli polijester numunelere ait yorulma eğrileri.....	62
15	Çift Ankaestre numunede periyodik zorlamalar ile çatlak büyüme mekanizmaları.....	66

#### RESİM LİSTESİ

<u>Resim No</u>		<u>Sahife</u>
1	Cam takviyeli plastik yorulma numuneleri....	43
2	Polijesterin çekme kırılması (X15) .....	56
3	CTP melzemedeki çekme kırılması (X15).....	56
4	Çift ankaestre numunede çatlak başlangıcı ve yeni çatlağın ilerlemesi (X15).....	67
5	Çift ankaestre numunede çatlak ilerlemesi (X30)	67
6	Yorulma çatlağının lif bölgesinde görünümü (X50).....	68
7	Matriste oluşan yorulma çatlakları (X15)....	68

#### ABSTRAKT

Polyester, elastik modülü düşük zayıf bir malzemedir. Polyester, cam elyafı ile takviye edildiği zaman, kimya, elektrik, inşaat ve ulaşım sanayiinde kullanılabilen çok elverişli bir malzeme olmaktadır. Bu kompozit malzemenin periyodik zorlamaların etkisi altındaki tavrının tayini çalışmanın ana konusudur. Araştırmada, yorulma ömrü, yorulmayı etkileyen faktörler, ve periyodik zorlamalarda malzemede oluşan hasar birikimi, akustik emisyon ve polarize ışık teknikleri ile incelenmiştir.

#### ABSTRACT

Glass fibre reinforced plastics are composites made by reinforcing a resin with glass fibre. They can be given mechanical strength greater than any plastics material, comparable on a weight basis with some metals. They can be easily molded to the desired shape. It is the combination of these two characteristics which has made it possible for GRP to be used in building and construction, boat hulls, chemical plant, rail and road transportation and aerospace applications. The aim of this research work was to establish the behaviour of GRP under repeated loading. In the work the factors effecting the fatigue life and the damage accumulation during fatigue cycling has been investigated.



## I- GİRİŞ

Kimyasal yapıları farklı bir veya daha çok malzeme aralarında bir arayüzey kalmak şartı ile birleştirilecek olursa meydana gelen yeni malzemeye "Kompozit Malzeme" denilmektedir. İnsanlık tarihinin eski çağlarında bu tip malzemelere raslamak mümkündür. Çamura saman karıştırılarak yapılan tuğlalar, ok atımında kullanılan yaylar (ki tabakalar halinde kesilen değişik özelliğe sahip ağaçların birleştirilmesi ile yapılmıştır) eski kompozitlere örnek olarak verilebilir:

Kompozit kavramı aynı zamanda tabiatta da mevcuttur. Cam lif. öncülerinden Games Slayter, bamboo kamışı ile, cam elyafı ile takviye edilmiş plastikler arasındaki benzerliği eserinde<sup>1</sup> iyi bir şekilde belirtmektedir. Her iki malzemenin sağlamlığı zayıf mekanik özellikleri olan matris içine yüksek mukavemet ve modüllü elyafların, belirli yönde dağılmış olmasıyla izah edilmektedir.

Kompozit malzemelerin ve bu arada cam takviyeli plastiklerin 1960 lara kadar olan durumunu inceleyen birçok eser mevcuttur.<sup>2-9</sup>

Kompozit malzemelerin geçmişi çok eski olmakla beraber bu tip malzemelerdeki hızlı gelişme ancak 1960 lardan sonra olmuş ve çok kısa bir süre içinde bugünkü modern düzeyine ulaşmıştır.

Kompozit malzemelerin, dizayncı mühendis tarafından verimli bir şekilde kabullenebilmesi ancak, teknolojinin en önemli alanlarından birisi olan malzemenin kırılma ve yorulma olaylarının araştırılması ve anlaşılmasına bağlıdır.

Doğrusal elâstik kırılma mekaniği prensiplerinin kompozitlere uygulanması, bu malzemelerin izotropik ve

homojen olmamalarından veya kompoziti oluşturan fazlardan birinin plastik özellik gösterebilmesinden dolayı çok sınırlı kalmıştır.

Bunun dışında kompozitlerdeki hasar mekanizması homojen ve izotropik malzemelere oranla çok farklı olduğundan, bu tip basit malzemeler için geliştirilen ana kavram ve tahminler kompozit malzemeler için geçerli olmamaktadır.

## II- KONVANSİYONEL MALZEMELERDE YORULMA VE KIRILMA

Homojen malzemelerdeki yorulma olayını incelemeyen kompozitlerin yorulmasını incelemek mümkün değildir. Bu nedenle konvansiyonel malzemelerde görülen yorulma mekanizması ile kompozit malzemeye uygulanabilecek hususlara kısa bir atıfta bulunmak yararlı olacaktır.

### i. Mekanizma

Metallerde yorulma, çatlak teşekkülü; çatlak ilerlemesi ve kopma olarak üç kademeye ayrılmaktadır. Malzeme içindeki çatlak belirli ölçülere ulaştıktan sonra geri kalan yüzey yükü taşıyamıyacak seviyeye gelince veya çatlak ucundaki gerilme kritik bir değere ulaştıkça malzeme kopmaktadır.

Metallerde çatlak teşekkülü genellikle yüzeyde başlar. Yüzey geometrisi veya yüzeydeki hatalar yük gerilmelerine yol açarak çatlağı çekirdeklendirir. Düzgün yüzeylerde ise kayma bandları çatlağı başlatır. Çatlak, kayma düzlemine paralel kalacak şekilde malzemede ilerler. Kayma düzlemi en büyük gerilme yükü doğrultusunda olup yükleme doğrultusu ile  $45^{\circ}$  lik bir açı yapar. Çatlak bu yönde ilerlerken yüke ve tane boyutlarına bağlı olarak bir müddet sonra yükleme doğrultusuna dik yöne sapar. Sapma olana kadar gelişen kademeye, birinci kademe yani çatlak teşekkülü gözü ile bakılmaktadır.

Uzun ömürlü yön değiştiren yüklemelerde yorulma ömrünün büyük bir kısmı bu dönemde harcanmaktadır.

İkinci kademedeki çatlak ilerlemesi kristolografik değildir ve büyüme ancak çatlak ucundaki yükün bölgesel akma sınırını aşması dahilinde olur.

Düşük devirli yorulmada (Kırılma periyodu  $N_f < 10^5$  devir) yüksek uzama genlikleri uygulandığından yorulma ömrünün çoğunluğu ikinci kademedeki çatlak ilerlemesi ile oluşur ve malzeme yapısı çatlak büyüme hızını fazla etkilemez.

Yüksek devirli yorulmada ise ( $N_f > 10^5$  devir) uzama genliği küçük olup metalurjik instabilite (denge) büyük rol oynamaktadır. Örneğin gerilme ile sertleştirilmiş bölgede yorulma ile bir yumuşama olacaktır. (Metaller, yüksek elastik modüllü elyaflarla takviye edildiğinde, yükleme gerilmesi arttırılabileceğinden düşük devirli yorulma da kompozitlerin büyük avantajı ortaya çıkmaktadır.)

Plastik deformasyonlarla oluşan yorulmada yorulma ömrü  $N_f$  ve plastik zorlama alanı  $\Delta \epsilon_p$  arasında Coffin<sup>10</sup> tarafından aşağıdaki bağıntı verilmiştir.

$$N_f \cdot \Delta \epsilon_p = \text{Sabit (C)}$$

Sünekliği fazla olan malzemeler akma sınırı üstündeki yüklerle zorlandığında kalıcı bir deformasyon meydana geleceğinden toplam zorlama alanı elastik ve plastik gerinimlerin toplamına eşit olacaktır.

$$\Delta \epsilon_T = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p \quad \text{Burada,}$$

$$\Delta \epsilon_T = \text{Toplam gerinim alanı}$$

$$\Delta \epsilon_e = \text{Elastik gerinim alanı}$$

$$\Delta \epsilon_p = \text{Plastik gerinim alanıdır.}$$

Elastik bölgede Hook kanununun geçerliği kabul edilirse

$$\Delta \epsilon_p = \Delta \epsilon_T - \frac{\Delta \sigma}{E} \quad \text{veya}$$

$$\Delta E_T - \frac{\Delta \sigma}{E} = C/N_f^{1/2} \quad \text{yazılırki bu da yorulma}$$

ömrünün toplam gerilme alanına bağıntı kurmasını sağlar.

Koffin bağıntısı ufak değişimlerle, yorulma ömrü için bir disayn denklemi haline gelmiştir. Kısa ömürlü yorulma deneylerinde bulunan veri uzun ömürlü yorulma hadiseleri için ekstrapolasyonla bulunabilmektedir.

### ii) Sürekli Ortam Mekaniği Açısından Yorulma

Kırılma mekaniği kavramları yorulma çatlağının ilerlemesini çatlak ucundaki gerinim ve gerilme alanı ile izah ettiğinden kırılma malzemelerde dizayn karakterlerinin tesbitini sağlar. Kırılma mekaniğinin, elyaf takviyeli kompozitlere uygulanabilmesi için, ana prensiplerinin iyi bilinmesi gerekir.

### iii) Gevrek Kırılma Kriteri

Gevrek bir çatlağın ilerleyebilmesi için çatlak ucundaki gerilme alanının atomik bağları koparacak seviyede olması lazımdır. Griffith'e göre bu;

$$T_F = \sqrt{\frac{2 E \gamma}{\pi c}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

şartı ile mümkündür. Burada;

$T_F$  = Malzemenin kırılma gerilimi

$E$  = Elastiklik modül

$c$  = yarı çatlak boyu

$\gamma$  = Kırılan yüzeyin yüzey enerjisidir.

Çatlak ilerlerken çatlak başında bir miktar plastik deformasyon olursa, yerine  $\gamma_s + \gamma_p$  yazılabilir. Burada  $\gamma_s$  = yüzey enerjisi ve  $\gamma_p$  ise çatlak ilerlerken (plastik deformasyondan ötürü) absorbe edilen enerjidir.

iv) Gerilme Şiddet Faktörü

Çatlak etrafında yapılan elastik gerilme çalışmaları çatlak başında gerilmenin en yüksek düzeyde olduğunu göstermiştir. Burada, çatlak yüzeyine dik gerilme " $\sigma_{yy}$ " ile, çatlak yüzeyine paralel gerilme " $\sigma_{xx}$ " birbirine eşittir.

Ayrıca ;

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma \sqrt{c/2p} \text{ dir.}$$

Bağlantıda,  $p$  = çatlak ucundaki eğilim çapı,  
 $\sigma$  = malzeme üzerindeki gerilmedir.

Çatlak ucundaki gerilme yığılması ise (tariften)

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma} = \sqrt{\frac{c}{2p}} \text{ olur.}$$

gerilme şiddet faktörünün tarifi en genel anlamda,

$$K_c = \lambda \sigma \sqrt{\lambda c} \text{ olarak verilebildiğinden .....(2)}$$

$K_c$  ile  $K_{\sigma}$  arasında,

$$K_c = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{2} K_{\sigma} \sqrt{2p} \text{ bağıntısı mevcuttur.}$$

Eşitlikte  $\lambda$  geometrik bir parametredir. 1 ve 2 numaralı denklemler birleştirildiğinde;

$$K_c = \sqrt{2 E \gamma} \text{ bulunurki bu da malzemenin kırılması kriterini verir.}$$

Çatlak ilerlerken açığa çıkan, "zorlama enerjisi açığa çıkma hızı" kritik değere ulaşırsa ( $K_c$ ) veya çatlak ilerleme kuvveti ( $G_c$ ) kritik değeri geçerse malzeme kırılmaktadır. İnce plakalar için  $K_c$  ve  $G_c$  arasındaki bağıntı;

$$K_c^2 = E G_c \text{ dir.}$$

#### v) Kırılma Mekanizmasının Yorulmaya Uygulanması

Mikro çatlak çeşitli yollarla oluştuktan sonra çatlak ilerleme hızı yorulma ömrünü tayin eder. Plastik deformasyonlarla olan yorulma olayında çatlak ilerleme hızı;

$$\frac{dc}{dN} = B \sigma^k C^m \text{ bağıntısından bulunabilir.}$$

Burada B, k ve m birer sabit değerdir.

Eğer malzeme üzerindeki yük elastik bölgede kalıyorsa, kırılma mekanizması yaklaşımı, çatlak ilerleme hızı " $\frac{dc}{dN}$ " ile gerilme şiddet faktör alanı " $\Delta K$ " arasındaki korelasyondan birçok malzeme için çatlak büyüme eğilimini  $\sigma$  ve c cinsinden verir.

Bu bağıntı genellikle  $\frac{dc}{dN} = \alpha \Delta K^n$  olarak yazılabilir. Burada  $\alpha$  malzeme özelliği ve ortalama gerilime bağlı bir sabitedir. n üssü ise birçok malzeme için 4 olarak bulunmuştur.

### III- KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA

Konvansiyonel malzemeler için geliştirilen yorulma ve kırılma analizleri elyaf takviyeli kompozit özelliklerinin araştırılmasında da mevzuun bel kemiğini teşkil etmektedir. Kompozitlerin yorulma ve kırılma tavrını incelemek birçok yönden zorunludur. Bazı kompozitlerde çatlak ilerleme hızı kompoziti oluşturan elemanlardaki çatlak gelişme hızlarına oranla çok daha yavaştır. Kompozit-

bu tip malzemelerin çok çabuk kabul edilmesine yol açmaktadır. Hernekadar elastik elyaf ve plastik matrisli kompozitlerde çatlak ilerleme hızı, elyaf miktarının artırılmasıyla artmaktaysa da soğuk çekilmiş tel ile takviye edilmiş kompozitin davranışı yukarıdaki örneğe ters düşmekte, çatlak hızı ve gerilme dayanımı elyaf miktarı ile artış göstermektedir. Kompozitlerin mekanik enerjiyi absorbe edebilme özelliği elyaf özellikleri, matris özellikleri ve miktarları, matris elyaf ve ara yüzey sağlamlığına bağlı olmaktadır.

Kompozit malzemelerin yorulma özelliklerini incelemeyen önce takviye elemanı olan elyaf yön değiştiren gerilme-gerinme tavrılarını nasıl etkilediğini görelim. Konuyu basitleştirmek amacı ile bundan sonra adı geçen kompozitlerde elyafın devamlı ve birtek doğrultuda (yükleme doğrultusu) olduğu varsayılacaktır. Modülü  $E_f$  ve hacim yüzdesi  $V_f$  olan elyafın modülü  $E_m$  ( $E_f > E_m$ ) olan matrisle kuvvetli bağlarla bağlı olduğu bir kompoziti düşünelim.

... Kompozitin gerilme - gerinme bağıntısı, matrisin akma noktasına kadar;

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \text{ dir. } \dots\dots\dots(3)$$

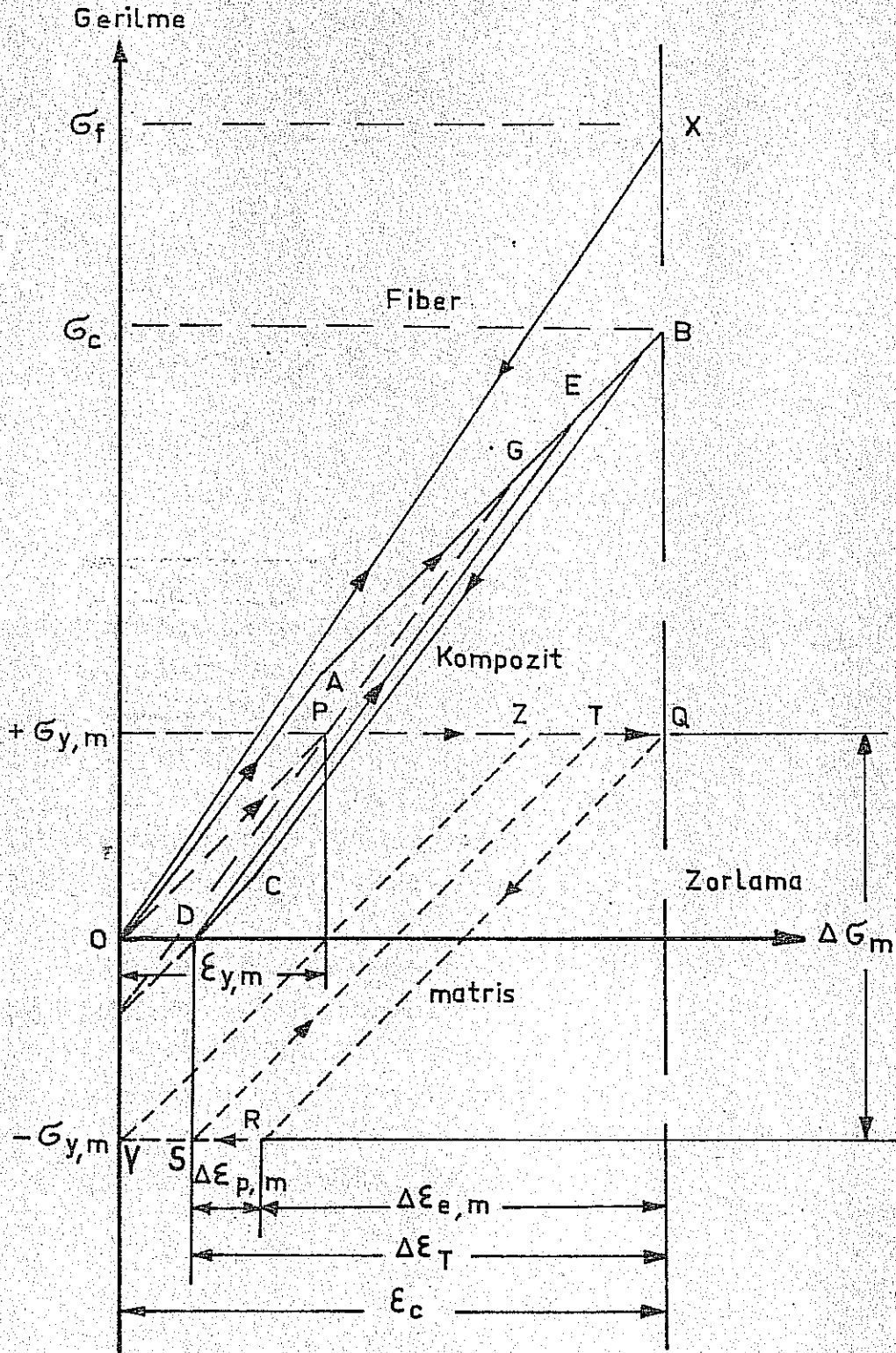
Bu noktadan sonra ise,

$$E_c = E_f V_f + \left[ \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right]_{m,f} (1-V_f) \text{ oluyor ki bu } \dots\dots(4)$$

ikinci modüldür. Kompozitin periyodik yüklemeye altındaki tavrı da yüke bağımlıdır.

#### i) Çekme/Sıfır yük, Sabit Gerilme

Şekil 1, histerisiz eğrilerinin denge durumuna gelişini tam plastik matris ve tam elastik lif için göstermektedir. Matris "p" de static  $\epsilon_{ym}$  zorlamasında, ve  $E_{my}$  gerilmesinde akmaktadır. (OP eğimi  $E_m$  değerini verir.) Elyaf yüklenmesi OX boyunca olmaktadır. OA eğimi 3 nolu denklemde AEB eğimi ise 4 nolu eşitlikte verilmiştir.



Sekil: 1- Kompozit histerisiz eğrilerinin çekme/sıfır yük ile zorlama sırasında denge durumuna gelişi



Kompozit en büyük gerilmeye ( $\bar{\sigma}_c$ ) B de ulaşmakta ve buna karşı gelen gerilme ise  $\epsilon_c$  olmaktadır.

$\bar{\sigma}_c = E_f \epsilon_c V_f + \bar{\sigma}_{my} (1-V_f)$  olup, matris PTQ boyunca deforme olmaktadır. Yükün kaldırılması BC boyunca olurken matristeki gerilmenin azalması Q'dan R'ye doğru olmaktadır. Bauschinger tesirini düşünmeyecek olursak, matris basma gerilmesi R noktasında akma sınırına ( $-\bar{\sigma}_{my}$ ) ulaşmaktadır. Bu noktada gerilme;

$$\epsilon_c - 2\epsilon_{ym} = \epsilon_c - (2 \bar{\sigma}_{ym}/E_m) \text{ dir}$$

Kompozit gerilme gerinimi CD boyunca oluşurken matris RS boyunca deforme olmaktadır. Ancak matris plastik deformasyona uğradığından gerilme henüz sıfır noktasına ulaşamamıştır. Tekrar yükleme de kompozitin elastik uzaması DE, matrisinki ST ve ondan sonra ise ilk yüklemdeki yol boyunca olur. Böylece  $\bar{\sigma}_{my}$  her 1/2 periyotta bir artış göstererek histerisiz eğrileri kapanarak ortadan kalkar. Bu andan sonra deformasyon elastik olur, ki biz buna denge haline ulaşmış durum diyoruz.

Matris ile kompozitin histerisiz eğrilerindeki genişlik farkı bu iki malzemenin farklı elastik modülü neticesi ortaya çıkmaktadır. Matristeki plastik gerilme alanı " $\Delta\epsilon_{mp}$ " ile kompozitin çeşitli parametreleri arasındaki ilişki aşağıda gösterildiği gibi verilebilir. Karışım kaidesine göre kompozit malzemelerdeki gerilme;

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_c &= \bar{\sigma}_f V_f + \Delta\bar{\sigma}_m (1-V_f) \\ &= \epsilon_f \Delta\epsilon_T V_f + 2\bar{\sigma}_{my} (1-V_f) \text{ olup,} \\ \Delta\epsilon_T &= \frac{1}{E_f V_f} \left[ \bar{\sigma}_c - 2\bar{\sigma}_{my} (1-V_f) \right] \text{ dir.} \end{aligned}$$

Matris ve elyaftaki gerilme eşit olduğundan

$$\Delta\epsilon_T = \Delta\epsilon_{em} + \Delta\epsilon_{pm} \text{ olup,}$$

$$\Delta \varepsilon_{pm} = \frac{2 \sqrt{\sigma_{ym}}}{E_m} - \frac{(\sigma_c - 2 \sqrt{\sigma_{ym}}(1 - V_f))}{E_f V_f} \text{ dir.}$$

Bu ideal durumu yansıtmaktadır. Gerçekte  $\Delta \sqrt{\sigma_m}$  nadiren bilinen bir değerdir. Histerisiz eğrisi denge durumuna ulaştığında yük kaldıracak olursa matris de bir basma gerilmesi ve buna eşit olarak da elyaflarda çekme gerilmesi kalacaktır.

$$\sigma_c = \sigma_{fR} V_f + \sigma_{mR} (1 - V_f) = 0$$

Burada R artık gerilmeyi göstermektedir.

$\sigma_{mR} = - \sigma_{fR} V_f / (1 - V_f)$  olduğundan artık gerilme ilk yüklemde matris içindeki plastik uzamanın bir fonksiyonu olup bu histerisiz eğrisinin kapanma hata (OD) miktarıdır. Şekil 1'den;

$OD = \varepsilon - \Delta \varepsilon_T$  olup (burada  $\varepsilon$  = ilk zorlama miktarıdır.)

$$\sigma_{fR} = E_f (\varepsilon - \Delta \varepsilon_T) \text{ ve}$$

$$\sigma_{mR} = - \frac{E_f (\varepsilon - \Delta \varepsilon_T) V_f}{(1 - V_f)} \text{ dir.}$$

Tam plastik bir matris için " $\sigma_{mR}$ ", " $- \sqrt{\sigma_{ym}}$ " olur.

### ii) Çekme / Sıfır yük, Sabit Zorlama

Histerisiz eğrisi denge durumuna gelince orijinin D noktasına kaydığı düşünülebilir. Bundan sonra sıfır yük ile  $\sigma_c$  arasındaki gerilme yüklemesinin " $\Delta \varepsilon_T$ " gerilme alanı içinde olduğu farz edilebilir. Tabii bu durumda malzeme çalışma sertleşmesinin olmaması gerekir.

### iii) Çekme / Basma Yorulması

Yukarıda belirlenen koşullar çekme-basma şeklindeki yorulmaya da uygulanabilir. Burada, matris ile kompozitin histerisiz eğrileri ortak bir orijine göre konsantriktir.

Basma yarı periyodunda elyaf sıkışma yükü altında olup flambaja maruz kalabildiklerinden yorulma olayı çok kompleks bir şekilde almaktadır. Bu daldaki çalışma, daha gerçek durumu yansıtmamasına rağmen, diğer yorulma araştırmalarına oranla çok azdır. Yorulma olayının anlaşılabilmesi için kantitatif çalışmaların yanında mikroyapısal araştırmalara da önem vermenin zorunluluğu bu nedenle ortadadır.

#### iv) Yorulmanın Mikroyapısal Özellikleri

Elyaf takviyeli kompozitlerde yorulma ömrünü geliştiren iki ana unsur, elyafın...

1. Verilen bir gerilme genliğinde toplam zorlama alanını azaltmaları,
2. Matristeki çatlak ilerleme hızını azaltmalarıdır.

Kompozitlerde hasar birikimine yol açan mekanizmalar kompoziti teşkil eden malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Özellikle matrisin çalışma-sertleşmesi yorulma hayatını birinci dereceden etkileyebilecek bir unsur olarak görülmektedir. Diğer taraftan, çok gevrek elyaf kompozit içinde gerilmenin yığılmasına sebep olup yorulma performansını negatif yönde etkilemektedir. Her kompozitte değişik türden bir problem mevcut olabilmektedir. Bu nedenle elyaf takviyeli kompozitlerde yorulma olayını incelemek üzere bütün kompozit malzemeleri üç grupta toplamak uygun görülmektedir.

1. Metal Matrisli Kompozitler,
2. Yüksek - Modüllü elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler,
3. Düşük Modüllü elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler.

Yurdumuzda en geniş uygulama alanı düşük modüllü elyaf (cam elyaf) takviyeli plastik kompozitlerde olduğundan cam elyafı ile takviye edilmiş plastik malzemelerin yorulması incelenecektir.

#### IV- LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

##### A) Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerde Yorulma

###### i) Genel Durum

Cam elyafı ile takviye edilmiş plastiklerde yorulma hasarı genel olarak çekme yüküne dik yönlerde bulunan elyafalarda başlamaktadır. Matris ile elyaf arasındaki bağın kopması ilk hasarı oluşturmaktadır. Bu hasar yükleme periyodu ile artmakla beraber, kompozitteki hasarın gelişmesi takviye elemanlarının özelliği ve geometrisine bağlı olmaktadır. Cam takviyeli plastiklerdeki hasarların yol açtığı durumlar tam anlamı ile araştırılmadığı ve bilinmediği için, hasar durumlarına göre desayn kriterleri henüz oluşturulamamıştır. Cam takviyeli plastiklerle yüksek modüllü elyaf takviyeli (örneğin karbon elyaf takviyeli) plastikler karşılaştırıldığında, karbon takviyeli kompozitlerin yorulma dayanıklarının çok daha üstün olduğu ve hatta normal oda sıcaklıklarında buhar veya yağlı ortamlardan etkilenmediği görülmektedir. Karbon takviyeli kompozitlerin büyük üstünlüğü için yüksek özgül yorulma dayanımı ile yüksek özgül modülünden ileri gelmektedir. Elyafın bu iki özelliği karbon elyaflı kompozitlere de büyük ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. Karbon elyaf takviyeli plastiklerin yorulma ömrü kesme yükü altında çok azaldığından dizaynlarda başarı malzeme üzerindeki kesme yükünü en düşük düzeyde tutmakla mümkündür. Karbon fiberli kompozitlerin kompleks yük altındaki yorulma olayı henüz bakir olup bu dalda birçok araştırmanın yapılması gerekmektedir. Metal matrisli kompozitlerde durum aşağı yukarı aynıdır. Saf metal ve alaşımlara oranla metal matrisli kompozitlerde yorulma ömrü çok daha uzundur. Takviye edilmiş metaller daha dayanıklıdır, yüksek sıcaklıklarda bu dayanıklarını koruyabilir ve hatta

bazı hallerde yorulma çatlaklarının ilerlemesine büyük ölçüde karşı koyabilir. Fakat metal matrisli kompozitlerde güvenilirlik ve kırılma mekanizması hakkında bilgi noksanlığı bu malzemelerin daha geniş alanlarda kullanılmasını sınırlandıran en önemli iki unsurdur. Durum böyle iken bu dalda yapılan çalışmaların çok sınırlı oluşu da dikkati çekmektedir.

ii) Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerle Metallerdeki Yorulmanın Karşılaştırılması

Metalik malzemelerde yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak teşekkülüne kadar harcanmaktadır. Çatlak meydana geldikten sonra ise çatlak büyümesi oldukça süratli olmakta ve malzeme kırılmaktadır<sup>11</sup>. Buna karşı cam elyaf takviyeli plastiklerde çatlak, maksimum çekme dayancından çok daha düşük orandaki yüklemelerle hemen başlar, ancak malzeme mekanik özelliklerinde bu çatlakların (elastik modüldeki bir miktar azalma dışında) fazla etkisi görülmez.<sup>12,13,14</sup> Metallerde çatlak yüzeyde, çentiklerde, ve homojen olmayan bölgelerde teşekkül eder ve bir tek çatlakın malzeme kesitinde ilerlemesi ile malzeme kırılır. Cam takviyeli plastiklerde kırılma, değişik hasar mekanizmalarının birbirlerine katkılarıyla ve bütün kesit boyunca oluşur.<sup>15</sup> Metallerde, yüzey işlemleri yorulma ömrünü<sup>11</sup> çok arttırmasına rağmen takviyeli plastiklerde yorulma ömrü yüzey koşullarına fazla bağlı değildir. Genelde yüzey pürüzlerinin yorulma ömrüne olan etkileri detaylı bir şekilde araştırılmadığından henüz yeterli bilgi birikimi mevcut değildir.<sup>15</sup>

Sıcaklık, takviyeli plastiklerin yorulma ömrünü çok etkilemektedir. Oda sıcaklığının biraz üzerindeki kompozit özelliklerinde ani ve büyük değişimler olabilmektedir.<sup>14-15</sup> Metallerde durum böyle değildir. Yine metallerde frekansın yorulma ömrüne olan etkileri çok az olmakla beraber takviyeli plastiklerde frekansın artması malzemede ısı depolanmasını arttırdığından yorulma ömrü çok kısalmaktadır.<sup>16</sup>

Diğer enteresan bir karşılaştırma da Korozyon olayında görülebilir. Plastik kompozitler, genellikle düşük yükler altında, açık hava (nem) veya deniz suyu ortamlarından fazla etkilenmemektedir. Ancak, yük, maksimum çekme dayanımının %50 sinden fazla olduğu hallerde malzeme su absorpsiyonunda önemli bir artış olduğundan mekanik özelliklerde bir kötüleşme görülmektedir.<sup>17</sup> Bu olay termoset reçineleri için oldukça önemlidir. Çünkü termoset reçinelerinde, gerek elyaf dağılımını kolaylaştırmak ve gerekse mamul fiyatını düşürmek için, kireçtaşı, kil gibi geçirgenliği arttıran dolgu malzemeleri kullanılmaktadır.

### iii) Bugüne Kadar Cam Takviyeli Plastik Alanında Yapılmış Çalışmaların Özeti

Cam elyafı ile takviye olmuş plastikler yüklendiğinde, malzemelerde tekrar düzelmeyen hasarlar oluşmaktadır. Bazı hallerde kopma dayanımının %10 kadar küçük yükler dahi hasara yol açabilmektedir. Daha önce de belirlendiği gibi hasarın durumu, yüklemenin şekli, takviye elemanının dağılımı, matris, elyaf ve bunlar arasındaki ara yüzeyin özelliği gibi çeşitli değişkenlere bağlıdır. Kompozitlerin uygulanmasında çoğunlukla takviye elemanı birden çok yönde dağılmıştır. Çekme yükü altında yük yönüne dik durumda olan elyaflarda ara yüzey bağlarının kopması ile malzemede hasar birikimi başlar. Yük arttıkça hasar yoğunlaşarak matris ile elyaf tamamen birbirinden ayrılır. Hasar miktarının artışı zaman ve yükleme sayısına bağlıdır.

Cam takviyeli plastiklerde (CTP) hasar birikimi ara yüzeyde başladığından, kompozit malzeme içindeki gerilme ve gerilme dağılımlarının incelenmesi malzeme kırılma mekanizmasının anlaşılabilmesi için ilk adımı teşkil etmektedir. Elyaf ve matris malzemeleri tek tek düşünüldüğünde, bunların elastik, i.otropik ve homojen olmalarına rağmen elastiklik modülleri, poisson oranları ve ısı ile uzama kat sayıları

farklıdır. Eğer kompozit, bir sıcaklık değişimine veya bir yüklemeye tabi tutulursa, gerilme ve gerinme mikro ölçüler içinde çok karışık bir dağılım gösterecektir. Kompozit üzerinde çalışan ilk araştırmacılar bu durumu bilmekle beraber probleme nümerik bir çözümü ancak büyük bilgi sayarların devreye girmesi ile 1966 da gerçekleştirilebilmiştir.<sup>18</sup>

Tipik bir elyaf matris sistemi için bir bilgi sayar programı yazıldıktan sonra, farklı elyaf dağılımları ve bileşenlerin değişik elastik özellikleri için kompozit malzemenin elastik özellikleri, matris içindeki gerilme, gerinme dağılımları elyaf-matris ara yüzeyi etrafındaki gerilme durumları hesaplanarak kırılma kriterleri tesbit edilebilir.

Cam takviyeli plastik kompozitler için böyle bir çalışma Duker<sup>19</sup> tarafından (zayıf ara yüzey için) yapılmıştır. Şekil 2'de poljester matris içinde muntazam dağılım gösteren cam elyafların konumu belirtilmektedir. Malzemede devamlılığın sağlanabilmesi için ana elemanın sınırlarının yük altında da doğru olarak kalması gerekir. Şekil 3'de denge halinde bulunan kompozitte 1°C lık sıcaklık düşmesi ile büzülen bileşenlerin açığa çıkardığı gerilme dağılımı verilmektedir. Genellikle büzülmeden dolayı izole edilmiş bir elyafların yüzeyinde basma gerilmesi beklenir. Fakat yüksek elyaf oranlarında ara yüzeyin bazı bölgelerinde çekme gerilimi de doğmaktadır. Esasında elyafların birbirlerine temas ettiği limit durumunu düşünürsek çekme geriliminin şart olduğunu görebiliriz. Uygulamada kullanılan kompozitlerde fiber dağılımı muntazam olmadığından, her zaman elyafların birbirlerine çok yakın olduğu ve hatta değdiği bölgeler olacaktır. Bu nedenle poljesterin sertleşme (Cure temperature) sıcaklığı dışındaki ortamlarda ara yüzeyin bir bölgesinde çekme gerilmesi oluşacaktır.

Hakiki kompozitlerde elyaf dağılımı değişik yönlerde olacağından bazı takviye elemanları yüklemeye yönüne dik, bazıları ise paralel durumda bulunacaktır. Şekil 4 ve 5, içinde

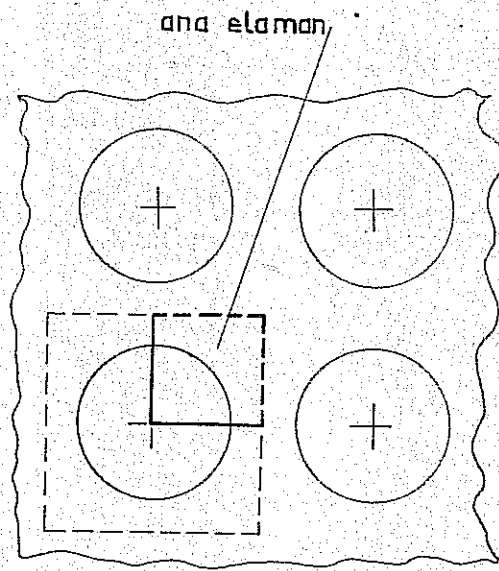
hacımsal olarak %65 oranında cam elyaf bulunan çekme yükü altındaki polijester matrisli kompozitlerin dik ve paralel konumlu elyafdaki radyal ara yüzey gerilimini göstermektedir. Her iki halde de gerilmeye maruz kalan kısım mevcuttur.

Şekil 2-5'de verilen değerleri %100 doğru kabul ederek malzeme dayanıcı için yapılan hesaplar fazla sıhhatli olmamaktadır. Bunun nedenini programlama şartlarında aramak gerekir. Herşeyden önce program muntazam dağılım veren model sistem için geliştirilebilir. Hakiki sistemde elyaflar arasındaki mesafe çok değişmektedir. Bazı bölgelerde elyaflar birbirleri ile temas ettiği halde diğer bölgelerde aralarındaki mesafe oldukça büyük değerlere ulaşabilmektedir. Hatta elyaf çaplarında bile değişmeler mevcuttur. Sertleşen reçinenin hacim değişimi ile meydana getirdiği gerilme miktarları da tam olarak bilinmemektedir. Zira o sıcaklıklarda gerilmeye plastik akma ile bir miktar rahatlama olabilmektedir.

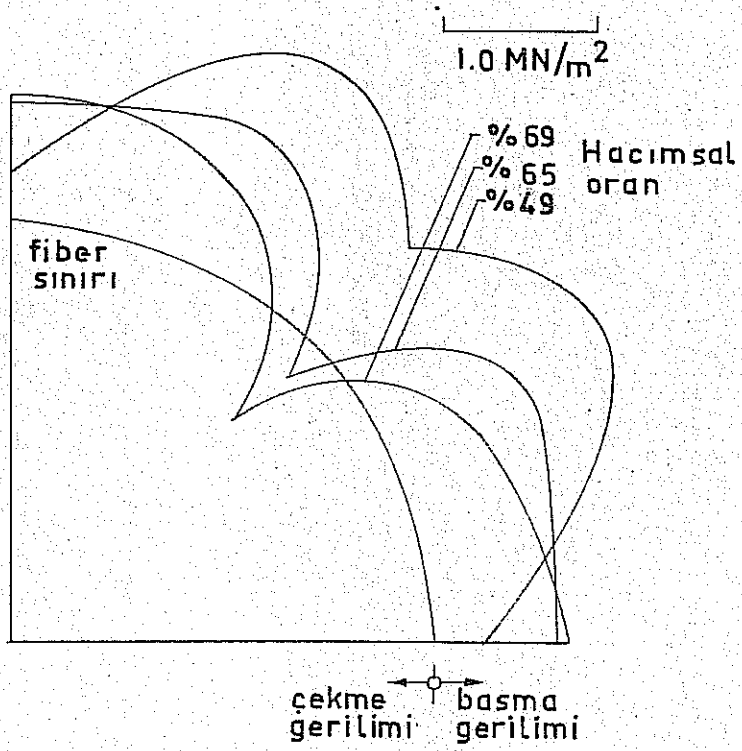
Owen<sup>20</sup> 1967'de hasar gelişmesini E-cam keçesi ile takviye edilmiş polyesterde mikroskop altında incelenmiştir. Çekme yükü altında ilk hasar yükleme yönüne dik konumda olan elyaflarda ara yüzey bağlarının kopması ile başlamış yükün artmasıyla yük eksenine ile daha küçük açı yapan diğer elyaflar sırası ile hasara uğramıştır. Hasar elyaf uçlarından ziyade elyafın herhangi bir bölgesinde başlayarak, matrisin lifden her iki yönde de ayrılması ile devam etmiş ve yük belirli bir düzeye ulaşınca matris içinde çatlaklar teşekkül etmeye başlamıştır. Yapılan çalışmada ara yüzey bağlarının kopmasının, maksimum çekme dayanıcının %30 seviyesindeki yüklerle, matris çatlaklarının ise %70 seviyedeki yüklerde başladığı görülmüştür.

Ara yüzey bağlarının kopması, matrisde çatlak teşekkülü ve nihai kırılma yükleme periyoduna bağlı olarak gelişme gösterdiği yine aynı araştırmacılarca bulunmuştur.

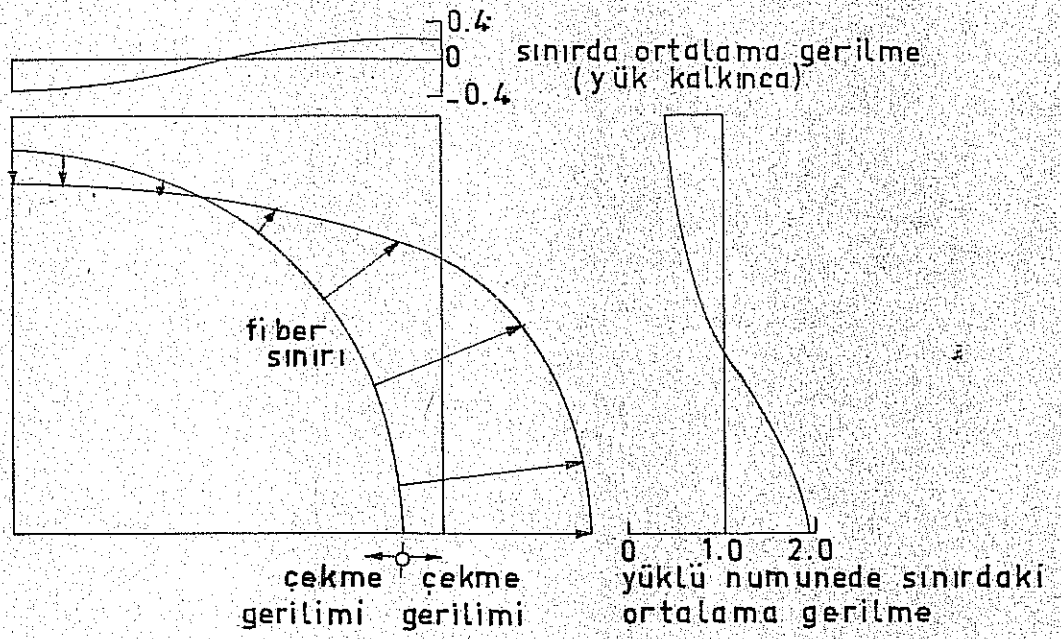




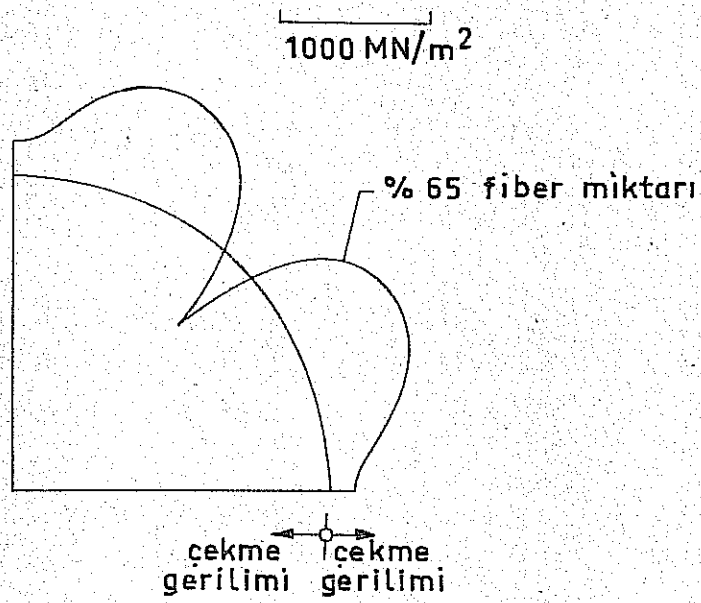
Sekil: 2 - polyster matris içinde fiber dağılım geometrisi  
(Dukes 1968)



Şekil : 3 - polüester - cam fiber kompozitinde radyal ara yüzey gerilim dağılımı (gerilimler 1°C lık bir ısı düşmesi neticesidir.)



Sekil: 4 - polüester - cam fiber kompozitinde çekme yüklemesine dik yönde bulunan fiber ara yüzeyindeki radyal ara yüzey gerilimi ( $V_f = \% 65$ ) dağılışı



Şekil : 5 - polüester - cam fiber kompozitinde çekme yüklemesine paralel yönde bulunan fiber ara yüzeyindeki radyal ara yüzey gerilme dağılışı

Owen ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda<sup>21</sup> genel S-N eğrilerini ara yüzey bağlarının kopması, reçine içinde çatlak teşekkülü ve nihai kırılma için ayrı ayrı uygulayabilmiştir. Deney süresince hasar birikimi devamlı artış gösterdiğinden çatlak teşekkülü, ara yüzey bağlarının kopması gibi olaylar malzemenin çeşitli bölgelerine dağılarak yorulma ömrü için fazla önemli rol oynamamıştır. Yorulma ömrünü birinci dereceden hasar birikim hızı etkilemiştir. Bu, dolayısıyla elyaf yönleri, ara yüzey kesme gerilmesi, ara yüzeyde kopan bağlar, malzemenin sıcaklığı, malzemenin yapıldığı sıcaklık, sertleştirme sıcaklığı (Cure cycle) gibi değişkenlere bağlı bir fonksiyondur.<sup>20</sup> Bazı fiber boyları kritik elyaf uzunluğundan az olduğundan bu fiberlerdeki ara yüzey bağ kopmaları malzeme özellikleri yönünden fazla önemli olmamaktadır.<sup>22</sup> Elyaflar homojen bir dağılım gösterdiği sürece her zaman yükleme doğrultusuna dik durumda elyaf olacak ve ilk hasar burada oluşacaktır.

Broutman<sup>14</sup> bu tip elyafda yorulma hayatının %1 inde hasarların en yüksek yoğunluğa eriştiğini ve yük, kopma dayanımının %75 civarında olması halinde ise paralel elyafda hasarların yorulma ömrünün başlangıcında oluştuğunu bulmuştur. Çatlak yoğunluğu başlangıçta hızla artmakla beraber çabuk stabilize olmaktadır. Yorulma ömrünün büyük bir kısmında çatlak yoğunluğu çok az değişmekte ve ömrün sonlarına doğru tekrar hızlı bir artışla malzeme kopmaktadır.

CTP üzerinde yapılan çalışmalar, kullanılan farklı reçine, takviye camı, ön işlemler nedeniyle çok çeşitli ve dağınıktır. Kompozitlerde ilk hasar matris-elyaf ara yüzeyinde başladığından, yorulma ve kırılma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için araştırmaların bu bölgede yoğunlaştırılması genellikle kabul edilmiştir.<sup>15-20-23-24-25</sup> Eakins'e<sup>26</sup> göre bu bölge üç katagoriye ayrılabilir.

1. Esas cam-reçine ara yüzeyi,
2. Ara yüzeye yakın ve gerilmeli reçine bölgesi,
3. Çatlak ucu cam yüzeye yaklaşırken, kırılmayı tedricen sağlayan bir enerji yayıcı ara yüzey.

Esas ara yüzey yanında, gerilmeli bir reçine tabakasının varlığı Throckmorton<sup>23</sup> tarafından gösterilmiştir. Throckmorton, periyodik yüklemeye tabi tuttuğu numunelerinin kesit yüzeyleride aşağıda belirlenen üç bölgenin fotoğraflarını mikroskop aracılığı ile çekmiştir.

1. Cam elyaf bölgesi (cam elyaf yüzeye paralel)
2. Birleşme bölgesi (cam-reçine ara yüzeyi)
3. Reçine bölgesi.

Çekilen resimler çatlak teşekkül bölgesinin cam-reçine ara yüzeyine 0.2  $\mu$ . luk bir mesafe içinde bulunduğunu kanıtlamaktadır. Cam-reçine arasındaki bağın kopması ile aynı anda oluşan mikro çatlaklar, ara yüzey boyunca büyümektedir. Buradan araştırmacı, kırılmanın cam elyaflar bir hasara uğramadan, ancak ara yüzey bağlarının kopması ile başladığı sonucuna varmıştır. (Bu da gösteriyorki fiberlerin yük taşıma kapasitelerinden tam anlamı ile yararlanılamamaktadır. Ara yüzey bağlarını kuvvetlendirici haşılalar kullanıldığında, bu ara yüzey bağının kopması engellenerek daha büyük yüklerin fiberler tarafından taşınması sağlanabilir.)

Kooper ve Kelly'nin de bulguları aynı yönde olmuştur. Tek yönde takviye edilmiş CTP kompozitlerde elyaf yönüne dik olarak açılan çentiklerde çatlak teşekkül ederek büyümekte ve elyafa ulaşınca da adeta yön değiştirerek elyaf boyunca gelişmektedir. Diğer bir deyişle ara yüzey bağları kopmaktadır. Duruma başka bir açıdan da bakmak mümkündür. Çatlak elyafa ulaşınca ilerlemesi elyaf tarafından engellenmektedir.

Adı geçen çalışmaların hepsinde ya takviye elemanı olan elyaf tek yönde matris içine yerleştirilmiştir veya kısa liflerin üst üste atılması ile oluşturulan cam keçe kullanılmıştır. Endüstride kullanılan takviye elemanlarının bir kısmı, cam elyaf bükülerek iplik haline sokulduktan sonra kumaş ve hasır biçiminde dokunmaktadır. Hasır biçiminde dokunan malzeme ile takviye edilmiş reçinelerde de ara yüzey kopması yük yönüne dik durumda bulunan elyafda başlamakta. Zamanla reçine bakımından zengin bölgelerde çatlaklar oluşmakta fakat ileri safhalarda ise yerlerini liflerin birbirlerini kestiği bölgeye terk etmektedir.<sup>21</sup>

Çeşitli şekillerde uygulanan takviye elemanı ile yapılan CTP malzemelerde, kompozitin elastik modülü ile ara yüzey bağlarının kopmaya başladığı yük karşılıklı olarak bir eğri şeklinde gösterilecek olursa doğrusal bir bağıntının var olduğunu görmekteyiz. Böyle bir eğri şekil 6'da verilmiştir.<sup>29</sup> Eğri üzerindeki noktaların açıklaması Tablo 1'de yapılmıştır.

TABLO I

Şekil 6'da Kullanılan Malzemeler ile İlgili Açıklama

Kullanılan Harf	Reçine	Takviye Elemanı
P	Reaktif polüester	1/4" lik lifli keçe
Q	Polüester	2" lik lifli keçe
R	Isopatalik polüester	Cam keçe (2oz/ft <sup>2</sup> )
S	Reaktif Polüester	Cam keçe (2 oz/ft <sup>2</sup> )
T	Polüester	Cam keçe (1- $\frac{1}{2}$ oz/ft <sup>2</sup> )
U	Az reaktif polüester	Cam keçe (2 oz/ft <sup>2</sup> )
V	Polyester+%25 vinil asetat	Cam keçe (1- $\frac{1}{2}$ oz/ft <sup>2</sup> )
W	Epoksi	Tek yönlü elyaf
X	Reaktif polüester	Cam kumaş
Y	Epoksi	2 yönlü dizilmiş elyaf
Z	Reaktif polüester	Cam kumaş

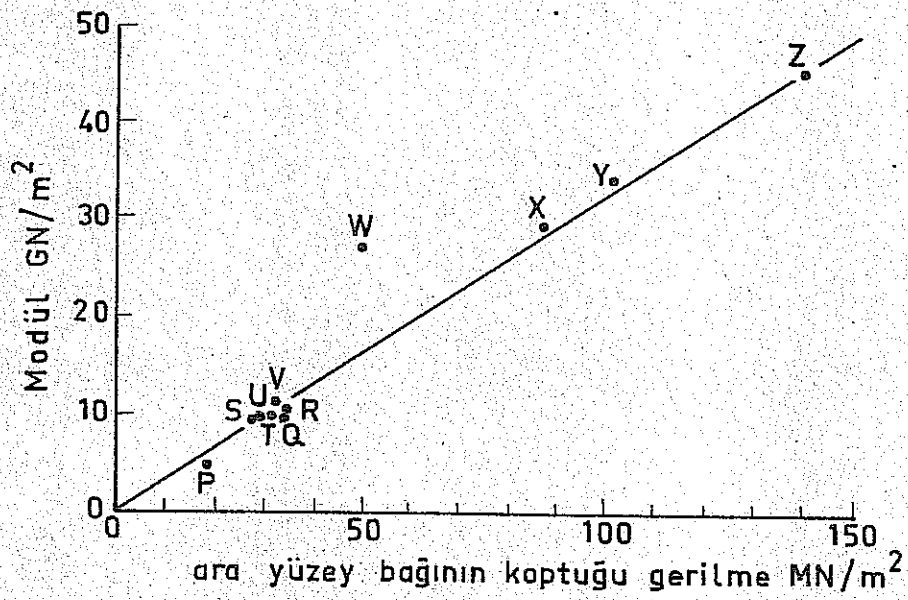
Şekil 6'da verilen eğrinin, eğimi 0.3% lik bir gerinme (yüzde uzama miktarı) dır. Başlangıçta bu biraz tuhaf olarak nitelendirilebilse bile takviye elemanı içinde bulunan elyaf topluluğu %0.3 lük bir zorlamaya tabi tutulduğunda, matris ile elyaf arasındaki ara yüzey gerilmelerinin aşağı yukarı aynı olması gerekir. Çünkü epoksi matris ile polyester matrisin elastik özellikleri benzerdir.

Çeşitli şekillerde takviye edilmiş CTP kompozitlerde çekme yükü altında ara yüzey bağlarının kopmasına yüzde uzama miktarlarına bağlamak mümkün olduğundan Owen<sup>21</sup> CTP kompozitlerin yorulma özelliklerini ara yüzey kopma sınırı içinde incelemiştir. Bulunan neticeler periyodik gerinme alanının (strain) fonksiyonu olarak verildiğinde Şekil 7'de görüldüğü gibi çeşitli CTP malzemeler için yorulma özellikleri superimpoze olmaktadır. Eğer şekil 7'de verilen yorulma özellikleri gerilmenin bir fonksiyonu olarak çizilmiş olsa idi eğriler birbirlerinden çok farklı olurdu. 10<sup>6</sup> lık bir yüklemenden sonra emniyetli gerinme yalnız %0.12 dir. Birçok CTP için bu kopma sınırının ancak küçük bir oranıdır. Yorulma ömrü için ara yüzey kopması kriter olarak kabul edilirse durumun çok kısıtlayıcı olacağı ortadadır.

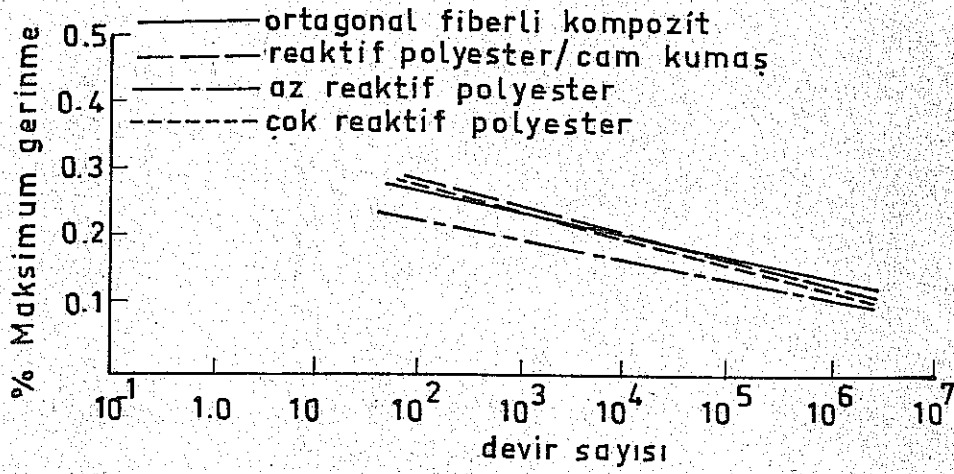
Mevcut araştırmalardan çıkan netice ilk mikro çatlakların takviye elemanının geometrisi ne olursa olsun arayüze çok yakın bir bölgede başlayıp ara yüze ulaştığı zaman oradaki bağları koparttığıdır. Yük artışı veya zorlama periyodu ile hasar gittikçe fazlalaştığından öyle bir an gelmektedir ki elyaf üzerinde hiç yük kalmamaktadır. Bu durumda bütün yük matris üzerine bindiğinden matris ve dolayısıyla kompozit kırılmaktadır. Elyafların birçoğunda ara yüzey bağlarının kopması ile yük artık matristen elyafa

aktarılamayacak bu duruma erişilince, matris özelliklerinin kompozit yorulma ömrüne büyük etkisinin olması beklenebilir. Bu konuda çok veya az reaktif reçineler ve değişik elastik modüllü reçine ile yapılmış bir takım araştırma mevcuttur.<sup>28</sup> Yüksek plastik akma özelliği olan reçinelerin





Şekil: 6 - Kompozit elastik modülü ile ara yüzey bağlarının kopmağa başladığı çekme gerilmesi arasındaki ilişki



Sekil:7- çeşitli CPT malzemelerde yük eksenine dik konumlu elyaf ara yüzey bağlarının kopmasının periyodik gerilme ile değişimi

yorulma hasarını düzeltebileceği veya matris çatlamasını tamamen ortadan kaldıracabileceği zaman zaman düşünülmüştür. Kopma uzaması fazla olan poljester reçineler üretildiğinde bu tip reçinelerin elastik modüllerinin çok düşük olduğu ve aynı zamanda gerilme gerinme eğrilerinin de doğrusal olmadığı saptanmıştır. Owen ve Rose<sup>30</sup> poljester reçinelerin, cam keçe takviyeli kompozitlerin yorulma kırılmasına etkilerini araştırmıştır. Araştırmada ortopatalik poljester kullanılmış ve poljestere poli propolin maleat adipat ilâvesi ile malzemenin sünekliği arttırılmıştır. Başlangıçta kopma uzaması %1.5 olan poljesterin 50% lik katkı ilâvesi ile kopma uzaması %60'a ulaşmıştır. Fakat bu orandaki kopma uzaması (poljester, cam keçe ile takviye edildiğinde) kompozite yansımamıştır. Kompozitler %15-%20 oranındaki katkı ilâvesi ile en yüksek çekme dayanıcına erişmiş ve kopma uzaması %3 değerine ulaşabilmiştir. Poljestere %15-20/<sup>lik katkı</sup> ilavesi matris içindeki çatlamaları büyük ölçüde azaltmasına rağmen ara yüzey bağlarının kopma özelliğini hiç etkilememiştir.

Kompozit numuneler çekme yerine yorulma testine tâbi tutulduklarında ara yüzey bağlarının kopması ve reçine içindeki çatlak teşekkülü poljestere ilâve edilen katkı miktarına bağlı olmamıştır. Katkı ilâvesi ile matris içindeki çatlak teşekkülü 100 civarında az zayıdaki periyodik bir zorlamadan sonra ortaya çıkmaktadır. Yani matrise süneklilik kazandıran katkılar çatlak teşekkülünü çok kısa bir zaman aralığı için geciktirmektedir.

Daha yakın bir zamanda Owen ve Rose tarafından yapılan kırılma tokluğu (Fracture toughness) ve çatlak büyüme testlerinde poljester reçineyi yumuşatan katkıların etkileri araştırılmıştır.<sup>31</sup> Düzlemsel gerinim kırılma tokluğu, katkılarla sünekliği değiştirilen poljesterde hep sabit kalmış ve değişmemiştir. Sabit gerilim şiddet alanı (stress intensity range) içindeki yorulma deneylerinde çatlak büyüme hızı %30'a kadar

olan katkılar için değişmeyecek hep aynı değerde kalmıştır. Çekme zorlamasında görülen reçine içindeki çatlamların katkı ilâvesi ile azalması kırılma tokluğu ile ifade edilememektedir. Periyodik zorlamalarla kopan ara yüzey bağları, tekrarlanan yüklemelerle çok çabuk çatlakları oluşturabilmektedir.

Ara yüzey bağlarının çekme ve kesme mukavemetinden giderek yapılan hesaplamalarda, daha sünek matrisli kompozitlerde, elyaf uclarındaki ara yüzey bağlarının kopmasının bu matrislerin değişen termik ve elastik özelliklerinden ileri geldiği bulunmuştur. Stereo elektron mikroskopunda, kırılma tokluğu ve yorulma ile kırılan yüzeyler çeşitli sünekliliği olan reçineler için incelendiğinde çok farklılıklar göze çarpmaktadır. Halbuki aynı reçineler cam elyafı ile takviye edildiğinde kırılma yüzeylerindeki farklılık kaybolmaktadır.

Owen ve Rose tarafından yapılan bu çalışmada sünekliliği giderek artan bir seri reçine bulunamadığından deneyler polüester reçine içine değişik miktarlarda sünekliliği arttırıcı katkı malzemesi koymakla gerçekeştirilmiştir.

Kullanılan reçine tipinin yorulma ömrü üzerindeki etkilerinin fazla önemli olmadığı ve cam-reçine arasındaki bağların ise yorulma ömrünü birinci derecede etkilediği anlaşıldıktan sonra bu bağların niteliğini araştırmak önem kazanmıştır.

Statik çekme yükü altında, basit model sistemlerde bağ dayancı tesbiti için pek çok çalışma olmakla beraber yön değiştiren yüklemelerle yapılan çalışma sayısı azdır. Bağ dayancısını veren birçok değer bulunmakla beraber<sup>20</sup> bu bağların ne kadarının fiziki sürtünme kuvvetinden ve ne kadarının kimyasal bağlardan oluştuğu henüz kesinlik kazanamamıştır. Reçine içine gömülmüş bir cam elyaf, elyaf doğrultusuna paralel bir basma yükü ile zorlandığında,

reçine ve camın poison oranındaki farklılık nedeni ile ara yüzeyde bir çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu olaydan yararlanılarak bağ kopma dayançları hesaplanılmağa çalışılmış, reçine ve reçineyi sertleştirme koşullarına bağlı olarak 400 ile 1500 psi arasında değerler bulunmuştur.<sup>32</sup>

Owen ve arkadaşlarının çalışmalarında<sup>21</sup> ise içinde 204 adet lif bulunan cam fitili reçine içine gömerek yorulma numunesi hazırlanmıştır. Periyodik yüklemelerle liflerin birbirinden ayrılmasından sonra reçinede çatlak oluşarak parça kırılmıştır. Çalışmada bağ dayancı bildirilmemekle beraber; dayancın tesbiti için cam fitil kesit alanı boyunca ortalama gerinimi bulmak gereği ve bunun zorluklarından bahis edilmiştir.

Neticeler reçinenin özelliklerinin önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Reçinenin sertleşme sıcaklığı ve koşulları CTP kompozitlerde fiber etrafında sıcaklığa bağlı uzama katsayılarındaki farklılık nedeni ile<sup>33</sup> iç gerilmelere yol açtığından (ki bu ara yüzey bağ dayancını birinci dereceden etkileyecektir) bu şartların yorulmaya etkisi de araştırılan konular arasına girmiştir.

Outwater<sup>24</sup> geometrisi altıgen verecek şekilde dizilmiş fiber takviyeli model kompozitlerde foto elastisite çalışmaları yaparak bağ dayancını bulmaya çalışmıştır. Bağ dayancının iç gerilme ile oluştuğu (mekanik bağ) bu sistemde ara yüzey kesme dayancı 5000 psi olarak saptanmıştır. İç gerilmelerdeki büyük farklılıklara rağmen, cam ve reçinenin ısı ile uzama katsayılarındaki fark nedeni ile büzülme esnasında fiberde buruşma<sup>34</sup> (buckling) olmadığı taktirde, iç gerilmelerin ara yüzey bağ dayancını büyük ölçüde etkilediği ispatlanmıştır.

CTP kompozitlerde, yön değiştiren yüklerin hasar birikiminin giderek arttığı bilinen bir gerçektir. Yorulma laboratuvar deneylerinin büyük bir kısmının sabit bir gerilim altında yapılmasına karşın serviste kullanılan malzemeler çoğunlukla

keyfi değişen yükler altında yorulmaktadır. Tedrici hasar birikimini araştırmak üzere sabit ve değişen gerinim genliklerinde yapılmış deneyler ile metallerde hasar birikimini veren birçok bağıntı mevcuttur. Bu bağıntılarda hasar n/N oranı (malzemenin yüklendiği devir sayısı bölü malzeme ömrü) ile belirlenmektedir. Zira metallerde sabit gerilim genliği altında, çatlak deney süresinin ileri safhalarında ve sadece bir bölgede oluşarak malzemenin kırılmasına dek büyümektedir.

Metallere oranla CTP'de hasar birikimini aydınlatıcı çalışma çok azdır. Boller<sup>35</sup> epoksi reçine kullanarak yaptığı kompozitlere iki kademeli yükleme uygulayarak n/N oranını Miner bağıntısı<sup>36</sup> ile karşılaştırmıştır. Yükleme sırasının etkisinin bulunduğu Boller'in neticeleri istatistiki yönden fazla değer taşımamaktadır. Hafer ve Olsen'in<sup>37</sup> cam kumaş takviyeli epoksi kompozitlerde yaptığı çalışmalar Boller'in çalışmaları ile aynı parad de olup neticeler olayı yete - rince aydınlatmamaktadır. Zaten araştırmacılar daha fazla deneyin yapılmasını önermektedirler.

CTP malzemelerde hasar bütün yorulma ömrü boyunca arttığı ve hasar birikimi kolayca mikroskop altında takip edilebildiği halde 1969 senesine kadar böyle bir araştırma yapılmamıştır. Brautman ve Salu birbirlerine dik yönde cam elyaf ile takviye edilmiş epoksi reçinede yükleme yönüne dik konumdaki elyaflarda ara yüzey bağlarının kopuşunu ve bunun yorulma ömrü başlarında doyma noktasına eriştiğini gören ilk araştırmacılardandır. Bu hasar sonra gelişerek paralel konumlu elyaflara ulaşmaktadır. Aynı araştırmacılar hasar birikimini veren bir bağıntıyı<sup>39</sup> tek - lif etmişlerdir.

Owen ve Howe'un<sup>40</sup> cam keçe takviyeli poljesterle yaptığı çalışma hasar birikimi konusuna daha açıklık getirmektedir. Araştırmacılar kısa ve uzun yorulma ömrü sağlamak üzere deneylerini çekme-basıma ile çekme- sıfır yük altında yapmıştır. Hasar birikimi, belirli bölgelerin yorulma

ömrü boyunca devamlı filmlerinin çekilmesi ile tesbit edilmiştir. Bulunan neticeleri özetleyecek olursak, basit çekme deneyinde çekme dayanımının %30 na kadar olan yükler için çok az ara yüzey bağları kopmaktadır. Yük %70 oranına ulaşıncaya kadar arayüzey bağlarının kopması çok hızlanmakta ve bunun üstünde ise çatlaklar reçine içine girmektedir. Yorulma koşulları altında ise ara yüzey bağlarının kopması yorulma ömrünün başlangıcında doyma noktasına gelmekte ve ömrün sonunda tekrar hızlı bir artış göstermektedir. Reçine çatlaması çok daha ağır başlamakta ve n/N oranının dördüncü kuvveti seviyesinde gelişmektedir. Aynı araştırmacılar bir miktar yordurulan numunelerin çekme mukavemetini da tesbit etmişlerdir. Bir kısım ara yüzey bağlarının kopması çekme mukavemeti değiştirmemiştir. Ancak reçine içinde çatlakların başlaması ile çekme mukavemetinde azalma görülmüş ve bu azalma reçine çatlaklarına dördüncü dereceden bir fonksiyon ile bağıntılı bulunmuştur.

Yorulmuş numunelerin çekme mukavemeti Brautman ve Sahu<sup>39</sup> yukarıdaki bulguların aksine yorulma gerilimine bağlı bulunmamıştır. Bunun anlamı, yorulmada nihai kopma bölgesel hasarın denge durumunu aşması ile oluşmasıdır. Bu şekilde hasar yoğunluğunun çok yüksek olduğu bölgeler görülebilmıştır.

Yukarıda verilen bilgilerin ışığı altında tedrici hasar birikim teorilerini: doğrusal, doğrusal olmayan, gerilimle bağımlı veya bağımsız olmak üzere kısımlara ayırabiliriz. Miner<sup>36</sup> bağıntısında bu, linear ve gerilime bağımlıdır. Owen ve Howe<sup>40</sup> cam keçe takviyeli poljesterde tedrici hasar birikimini, doğrusal ve gerilime bağımlı olmayan ikinci dereceden bir bağıntı ile ifade etmiştir.

$$\Delta = \sum_i B (n_i/N_i) - C (n_i/N_i)^2$$

Burada kırılma anında  $\Delta = 1$

B ve C sabit birer değer

$n_i$  = yükleme sayısı

$N_i$  = Yükleme ömrü'dür.

CTP kompozitlerde başlangıçta görülen hasar birikimi malzeme çekme mukavemetini etkilememekle beraber malzemenin elastik modülünün azalmasına yol açmaktadır. Sabit yük altında çalışan yorulma test cihazı kullanıldığında elastik modüldeki değişim kolaylıkla takip edilebileceğinden ( $E \epsilon = \text{sabit}$  olup elastik modüldeki azalma gerinimi arttıracaktır ve bu kolaylıkla deney süresince ölçülebilir) ara yüzey bağlarının kopması ile oluşan hasar ve kinetiğini izlemek mümkündür. Bazı CTP malzemelerde yorulmanın başında görülen hasarlar, malzeme çekme mukavemetini<sup>13</sup> etkilemediğinden pratik uygulamada belirli bir seviyeye kadar hasar birikimine izin verilebilir. Küçük gerilimli periyodik yüklemelerde gerilim-gerinim eğrileri doğrusaldır. Yükün arttırılması ile cam ve reçinenin birbirinden kopması ile gerilim-gerinim eğrisinde ani bir sapma görülür. Bu sapma kompozit malzemenin birinci elastik modülden, ikinci elastik modüle geçiş noktasını belirler. Bazı CTP kompozitlerde ikinci bir sapma görülürki bu da reçine içindeki çatlak oluşumu ile izah edilebilir. Eğer deney makinasında hassas bir şekilde gerilme ve gerinme değerleri okunabilirse verilen yorulma ömürleri için birinci ve ikinci sapmanın başladığı değer normal S-N (gerilme-yüklemeye sayısı) eğrisinde gösterilebilir. Böylece hangi yüklemeye sayısında ve gerilmeye ne tip bir hasarın başlayacağı saptanmış olur. Maalesef yorulma cihazlarının büyük çoğunluğu metal yorulması için tasarlanıldığından yorulma deneylerinde gerilme ve gerinme eğrilerini hassas bir şekilde elde etmek mümkün olmamaktadır. Hatırda tutulması gereken diğer bir faktörde yorulmanın malzeme sıcaklığına çok bağlı oluşudur. Metal yorulma cihazları en verimli olarak yüksek yüklemeye devirlerinde çalıştığından plastikler için bir sakınca teşkil etmektedir.



## B) LİTERATÜRDE RASLANAN BOSLUKLAR

Konu düşük veya orta mukavemetli cam takviyeli kompozit malzemeleri içermektedir. Yurdumuzda bu tip kompozit malzemelerin en belirgin uygulaması cam keçe ile takviye edilmiş polüesterdir. Bu günlerde yavaş yavaş cam kumaş dokumacılığı da başladığından cam kumaş ile takviye edilmiş polüesterlere giderek rastlanacaktır. Dokunan cam kumaşlar hafif malzeme olarak sınıflandırılmakta olup diğer normal kumaşlarda olduğu gibi sık şekilde dokunmamaktadır. Dünyada üretilen cam fitil, keçe ve cam kumaş takviyeli kompozit malzemeler piyasasının büyüklüğü düşünülecek olursa buna karşılık bu tip malzemeler üzerinde yapılan araştırmaların azlığı ve hasar mekanizmasının çok az incelenmesi şaşırtıcıdır.

Yurdumuzda üretilen kompozitlerde elyaf dağılımı bir çok yöndedir. Bu nedenle hasar ara yüzey bağlarının çekme zorlaması altında kopması ile başlamaktadır. Literatür kısmında yapılan açıklamalarda, arayüzey çekme gerilmelerinin çekme ve basma yükü altında, yük doğrultusuna paralel veya dik konumdaki elyaflar üzerinde meydana gelebileceği görülmüştür. Sıcaklıkdaki değişmelerde elyaflar üzerine benzer şekilde tesirler meydana getirir.

Hasar çalışmalarının çoğu tek bir yükleme veya periyodik yüklemelerle oluşan hasarları içermektedir. Bu durumda yük eksenine paralel konumlu elyafların takviye edici özellikte olduğu ve buna dik konumda bulunanların ise hasara başlamasına sebep olduğu farz edilebilir. Basma yükünün etkileri, yüksek modüllü elyaf kompozitlerde incelenmiş olmasına rağmen CTP malzemelerde fazla araştırılmamıştır. Bunun nedenini cam elyaf modülünün küçüklüğüne ve dolayısıyla elyafların büyük basma yükleri altında kolayca flamboja uğramalarında aramak lazımdır. Kür sıcaklığının (Cure temperature) hasar başlangıcına etkileri de araştırılmamış konular arasındadır.

Reçine yönünden zengin bölgeleri bulunan CTP kompozitlerde hasarın ara yüzeyden ziyade bu bölgelerde kolayca geliştiği ve hatta daha tok reçineler veya kırılma tokluğu daha yüksek olan reçinelerin kullanılması halinde dahi çatlak büyüme hızlarını etkilemediği bilinmektedir. (Bu izlenime zıt görüşlere de raslanmaktadır. Mc Garry kompozit içinde reçine yönünden zengin olan bölgelerden ziyade çatlakların, reçinedeki boşluklarda ve dolayısıyla elyafların çok sık olup birbirlerine temas ettiği bölgelerde geliştiğini iddia etmiştir). Bu konularda literatürde büyük bir boşluk olup araştırma için geniş alanlar mevcuttur.

CTP'de hasar çalışmaları da yetersizdir. Hasar görülmüş, yorulmada hasar birikimi ve bazı mekanik özelliklere etkileri bir miktar araştırılmıştır. Çok küçük gerilme veya gerinmenin yorulma hasarına yol açtığı bilindiğinden, malzemenin en uygun koşullarda kullanılabilmesi için dizaynlarda bir miktar hatanın oluşumu kabul edilebilmelidir. Bu durumda dizayncı, bu hasarın malzemenin tüm fiziksel ve mekanik özelliklerini kendi koşulları altında nasıl etkileyeceğini çok iyi bilmesi gerekir. Bunun dışında malzemenin geri kalan ömrünü de hesaplayabilmelidir. Bugünkü bilgi düzeyinde bu imkânsızdır. Yorulma ile hasar birikimi dallarında yapılan çalışmalar kesin sonuç verecek şekilde değildir. Zira çalışmaların hemen hemen hepsinde, mekanik özellikler numune eksenine boyunca, yani hasarı meydana getiren yük doğrultusunda tayin edilmiştir. Görülüyorki kompozit malzemeler homojen olarak kabullenilmiş ve bir yönde oluşan hasarın, diğer yöndeki mekanik özellikleri aynı ölçülerde etkileyeceği varsayılmıştır. Halbuki tam bir araştırma için her yöndeki hasarların girişimlerini incelemek gerekir ve bu henüz yapılmamıştır.

Son yıllarda akustik emisyon tekniği ile malzeme hasar tayini çalışmaları<sup>42-43</sup> önem kazanmıştır. Takehana ve Kimpara<sup>44</sup> akustik emisyon çalışmaları ile doğrusal uzamanın sonuna doğru malzemede çeşitli hasar birikiminin hızlandığını göstermiştir.

Fuwa<sup>42</sup> ve arkadaşları ise periyodik yön değiştiren zorlamalarla bu hata miktarındaki artışı izlemiştir. Fuwa aynı zamanda Mc Garry'nin<sup>41</sup> 1968 deki bulgularını destekleyici mahiyette hatanın ilk birkaç zorlama periyodunda meydana geldiğini göstermiştir. A.Ankara<sup>43</sup> tarafından yapılan araştırmada akustik emisyon ile "Dough Molding Compound" olarak adlandırılan, takviye edilmiş ve pres ile şekillendirilmiş pol'esterlerde hata birikimi araştırılmıştır. Bu tip tahribatsız muayene çalışmaları servis koşulları altında malzeme yapılması hakkında geniş bilgi verebilecek mahiyettedir.

Tahribatsız muayene ve hasar tesbit teknikleri ile kompozit malzemelerdeki fiziki hasar tesbiti ve hasarın önem derecesini tayin edebilme olanaklarının güvenilir bir düzeye ulaştırılması günün popüler araştırma konuları arasına girmekte ve bu alan yüzlerce araştırma konusunu içermektedir.

Literatürde, malzemelerdeki delik ve çentiklerin yorulma hayatına etkileri hakkında birbirine uymayan birçok eser mevcuttur. Boller<sup>35-45</sup> keskin çentiklerin ve yuvarlak deliklerin malzeme yorulmasına etkilerini araştırmış ve  $10^7$  yüklemde yorulma dayancının fazla etkilenmediğini görmüştür. 1968 de Owen ve arkadaşları,<sup>46</sup> 1970 de Owen ve Rose<sup>30</sup> ve 1972 de Owen ve Found<sup>47</sup> elyaf takviyeli kompozitlerdeki kusurların yorulma mekanizmasını çeşitli şekillerde etkilediğini ortaya koymuştur.

Owen ve Bishop'un<sup>48</sup> 1972 de CTP malzemelerde deliklerin çekme dayanımına olan etkilerini araştırmıştır. Aynı araştırmacılar<sup>49</sup> bir sene sonra yaptıkları çalışmada ise deliklerin CTP kompozitlerde hasarları başlattığı görüşünü savunmaktadır. Bu görüşe göre deliklerin hata başlangıcını da hızlandırması gerekmektedir. Hernekadar delikler hata başlangıcını teşvik ediyorsada, malzemenin yorulma ile nihai kırılmasında deliklerin etkenliği fazla olmamıştır.

Bu duruma göre yön değiştiren yükler altında alışan CTP malzemelerde bir miktar hasar kabul edilebilmelidir. Fakat, henüz, ne kadar hasar telore edilebilir sorusu cevapsız kalmaktadır.

Bu malzemelere kırılma mekaniği konseptlerinin uygulanması ile çatlak büyüme çalışmaları yeterli değildir ve yorulma çatlağının hangi koşullarda denge durumunda kalacağı ve hangi koşullarda ilerleyeceği kesinlik kazanmamıştır.

## V. MATERİYEL ve METOD

### A. MATERİYEL

Araştırmada matris malzemesi olarak Dewilux firmasının imal ettiği genel maksat poljesteri crystic 196 kullanılmıştır. Crystic/196 dan üretilen cam takviyeli kompozitler sağlamlığı, darbe mukavemeti gibi özellikleri nedeni ile nakil vasıtası gövdeleri, depo yapımı ve çeşitli endüstriyel kalıp imalatında kullanılmaktadır. Poljester reçine oda sıcaklığında sertleşebildiğinden, yurdumuzda en çok tüketilen reçine tipidir. Crystic/196 nın el yatırma metoduna çok elverişli oluşu ve yurdumuzdaki cam takviyeli plastik mamul üretiminin büyük kısmının bu metod ile yaptırılması nedeni ile adı geçen reçine araştırmada numune olarak seçilmiştir

Kullanılan sıvı poljesterin özellikleri Tablo 2 de verilmiştir.

TABLO 2 SIVI POLJESTERİN ÖZELLİKLERİ

Vizkozite 25°C	7-11 poise
Bağıl yoğunluk 25°C/25°C	1.12
Asit değeri	17-25 mg KCH/g
Ucucu Madde	% 31-35
Görünüm	Saman rengi

Sertleşmiş Polüesterin özellikleri ise

Barkol sertliği	45
Su absorpsiyonu	15 mg (0.15%)
Kırılmaya kadar uzaması	%2
Gerilim mukavemeti	55 MN/m <sup>2</sup>
Gerilim modülü	3.7 GN/m <sup>2</sup>
Bağıl yoğunluk 20°C	1.23

Polüester reçineyi takviye ederek kompozit numune üretmek üzere CAM ELYAF Sanayii A.Ş. tarafından üretilen cam fitil kullanılmıştır. Anılan cam fitil 16 adet devamlı cam demetlerinin paralel ve bükümsüz olarak silindirik biçimde sarılması ile üretilmektedir. Cam demetler 10-15 mikron çapındaki cam liflerden 200 adedinin bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Cam lifleri, reçine ile cam arasında kimyasal bir bağ kurabilen ve aynı zamanda lifleri koruyan bir haşıl ile kaplanmış olarak satışa arz edilmektedir.

Takviye malzemesi olan cam fitil, E-tipi, düşük alkali oranlı borosilikat camından çekilerek yapılmaktadır. Genel özellikleri: Yüksek çekme mukavemetine, mükemmel stabiliteye, iyi kimyevi dirence, düşük rutubet alma niteliğine, üstün dielektrik özelliklere sahip olması ve yanmamasıdır.

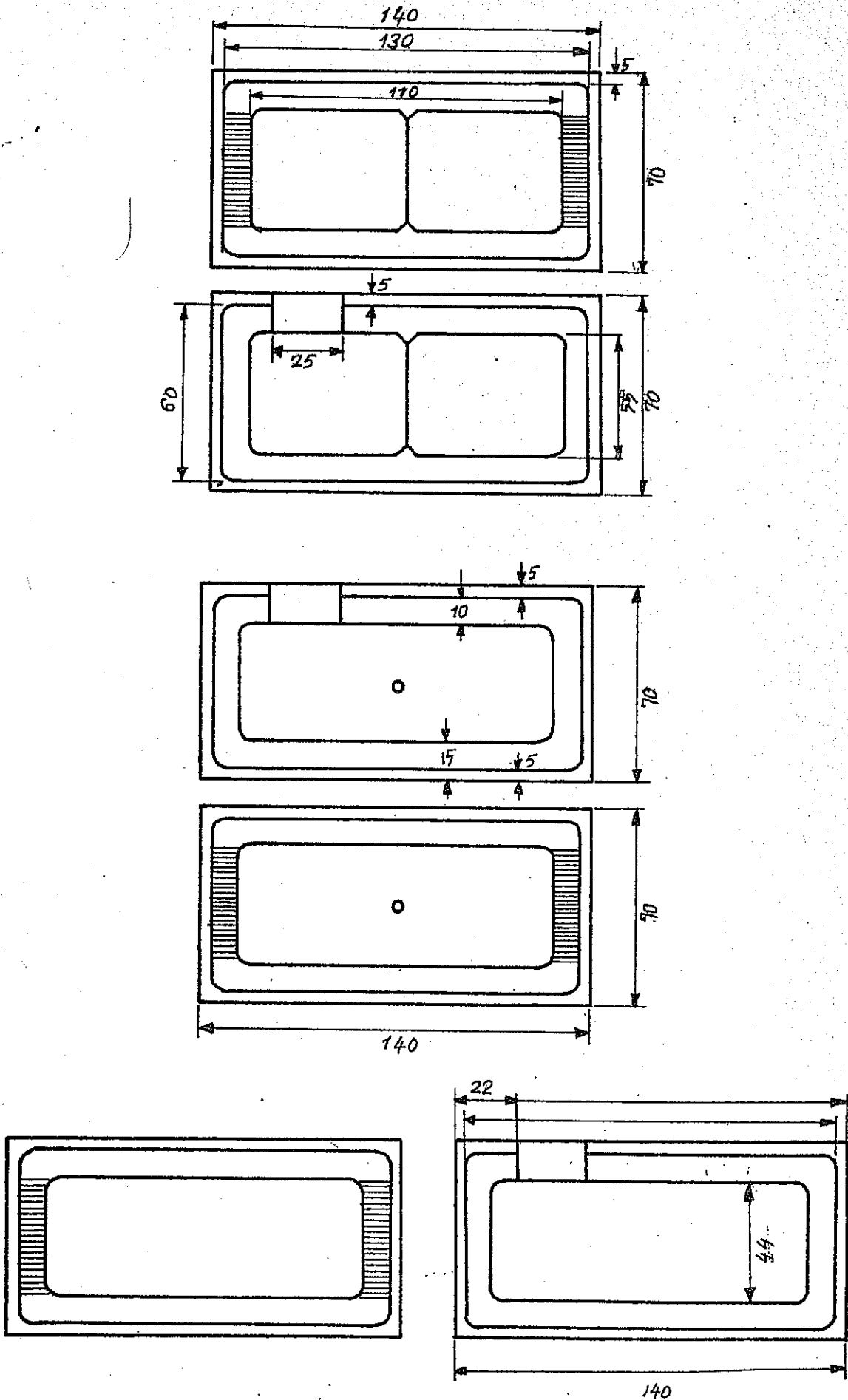
Kullanılan camın özellikleri Tablo 3 de verilmiştir.

TABLO 3: CAM ELYAFIN ÖZELLİKLERİ

Özgül ağırlık	: 2.55
Kırılma uzaması	: %2.5
Çekme mukavemeti	: 17.600 kg/cm <sup>2</sup>
Kopma mukavemeti	: 34.500 kg/cm <sup>2</sup>

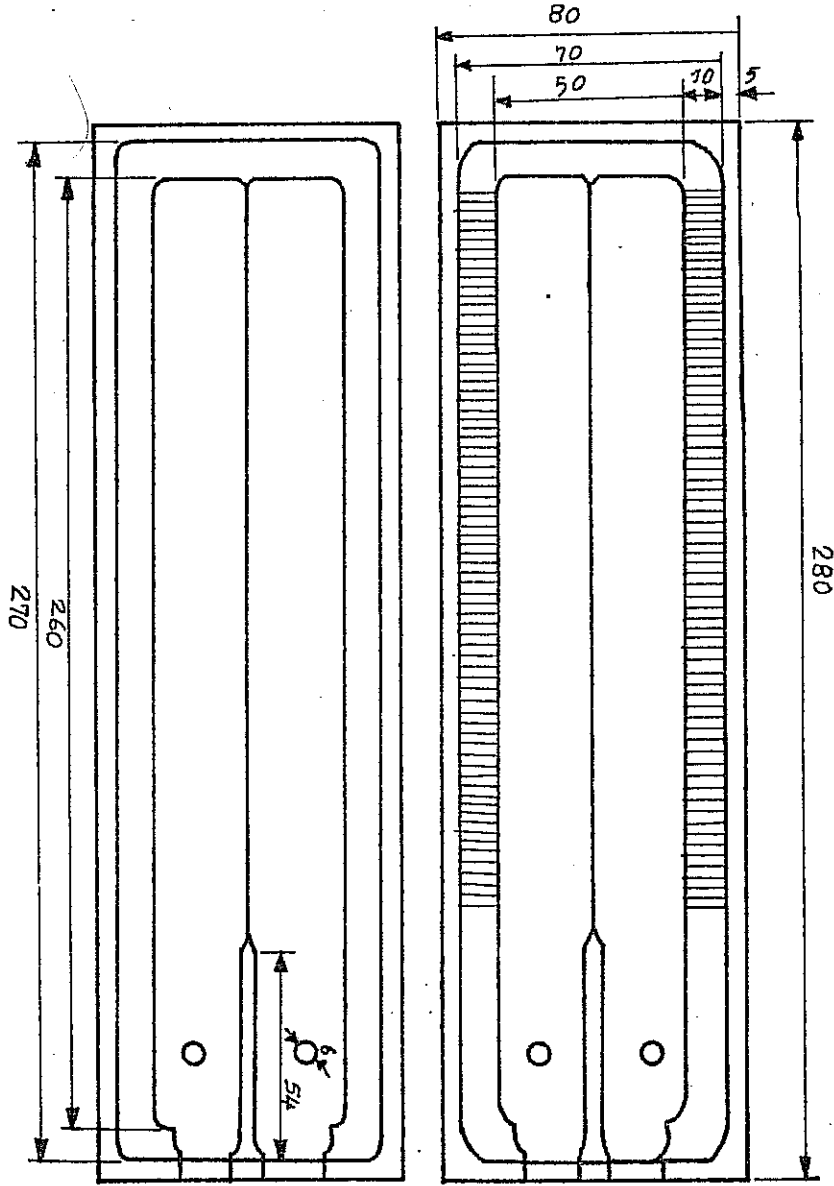
Matris özelliklerinin kompozit malzemeye olan etkilerini araştırmak üzere, polüester içine değişik ölçülerde dolgu maddeleri konmuştur. Endüstriyel problemleri içermesini sağlama-sı bakımından polüesterde kullanılan dolgu maddeleri pigment pastaları arasından seçilmiştir. Araştırmada Dewilux beyaz pasta, Dewilux sarı 106 pasta, Dewilux yeşil 131 pasta, Dewilux siyah 106 pasta olmak üzere 4 ayrı tip boya dolgu maddesi kullanılmıştır. Bunun dışında Krizotil asbest sağlamlığı artırıcı bir dolgu maddesi olarak incelenmiştir.

Kompozit yorulma numunelerini yapmak üzere 4 ayrı tip kalıp kullanılmıştır. Kalıplar Teflon malzemedan frezede işlenmek sureti ile iki ayrı yarım parçadan oluşturulmuştur. Şekil 8 de numune hazırlanmasında kullanılan kalıplar görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kalıplar üzerinde cam

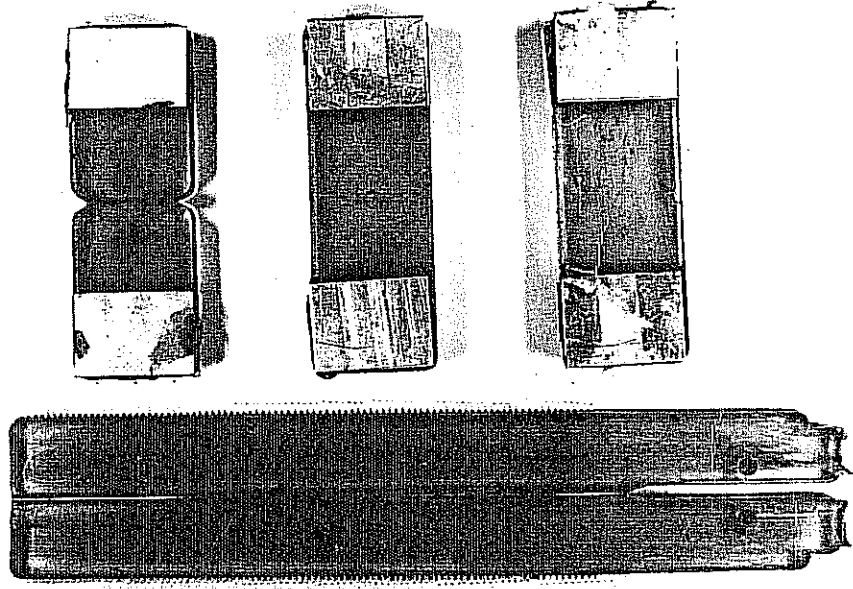


Şekil.8. Numune yapımında kullanılan kalıplar (Ölçüler mm).





Şekil.8. Numune yapımında kullanılan kalıplar(Ölçüler mm).



Resim.1. Numuneler

Ham maddesi ftalik asit, maleik asit, propilen glikol ve stiren olan genel amaçlı poliester reçineden yarım kilo alınarak polietilen bir kap içine konmuştur. Reçine içine <sup>×</sup> ağırlıkça %1 oranında Kobalt naftanat hızlandırıcı karıştırıldıktan sonra yine ağırlıkça %1 oranında metil-etil-keton-peroksit katalizörü katılarak reçine iyice karıştırılmıştır. Hava kabarcıklarından arınması için karışım 3-4 dakika oda sıcaklığında bekletilmiş ve sonra kalıplara yavaş yavaş dökülmüştür. Celleşme ve bilhare kısmi katılaşma için numuneler kalıp içinde 1 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılarak bir kısım numune 85°C deki etüv içine konmuştur. Son sertleşmesi için etüv içinde 10 saat süre ile tutulan numuneler etüvden çıkartıldıktan sonra testler için hazır duruma gelmiştir. Fotoğraf 1 de bu numuneler görülmektedir. Bir kısım numunelerin ise kırmızı ötesi (infrared) ışık ile son sertleşmesi sağlanmıştır. Kırmızı ötesi ışığın son sertleşmeyi 3 saatlik bir süreye indirdiği görülmüştür.

Numuneler : Deneylerde dört ayrı tip numune kullanılmıştır. Bunlardan birincisi dikdörtgenler prizması şeklinde ve 110x38x12 mm boyutunda çentikli ve çentik hizasında kanal bulunan numunedir. İkinci tip numuneler aynı boyutlarda fakat

× Adı geçen yarımşar kiloluk kaplar Şaşmaz firmasından temin edilmiş ve her numune için yeni bir kap kullanılmıştır.

çentiksiz, üçüncü tip numuneler ise geniş yüzeyin ortasında ve yüzeye dik 1 mm çapında delik bulunacak şekilde hazırlanmıştır. Dördüncü tip numune çatlak ilerleme hızı ile gerilme tokluğu arasındaki bağıntıyı incelemeye olanak sağlayacak türde çift ankestre numunedir. Boyutları 260x50x12 mm olan numunede çatlağın arzu edilen doğrultuda ilerlemesini sağlamak üzere bir kanal mevcuttur. Kanal cam elyaf doğrultusuna dik olarak bütün numune boyunca açılmıştır. I

Elyaf miktarı ile yorulma olayı arasındaki ilişkinin saptanabilmesi için her dört tip numuneye 1 mm ve 10 mm aralıklarla elyaf yerleştirilmiştir. Matris özelliklerini saptamak için takviye edilmemiş numuneler de hazırlanmıştır.

## B. METOD

### Mekanik Testler

Bütün mekanik testler atmosferik ortamda ve oda sıcaklığında kapalı-devre elektrohidrolik test cihazı ile yapılmıştır. Cihaz Materials Testing Systems firmasının imalatı olup 10 tonluk bir cihazdır.

Numunelere uygulanacak yorulma gerilmelerinin büyüklüklerini saptamak üzere başlangıçta gerek kompozit ve gerek

polyester numuneler standard çekme testine tabi tutulmuştur. Kopmaya kadar devam ettirilen çekme testleri 0.1 mm/dak.lık bir çekme hızı ile yapılmıştır. Yorulma deneyleri önceden belirlenen gerilme yükü ile sıfır yük arasında 10 Herzlik bir frekansta yapılmıştır. Bazı deneyler ise 0.1 Herzlik frekansta tekrarlanarak yükleme hızının yorulma ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Cihazın hidrolik kısmından kumanda alarak germeyi (yüklemeyi) sağlayan sistem, sıfır yükten önceden seçilerek ayarlanan maksimum yüke sabit bir hız ile ulaşmakta ve maksimum yüke ulaştınca yükün yönü değişerek aynı hız ile sıfır yüke dönmektedir. Bu ise üçgen bir dalga şekli vermiştir. Seçilen maksimum bir yük için zamana karşı çizilen uzama eğrileri doğrusal olup bunların sabit bir eğimi vardır. Bu nedenle yük arttırıldığı zaman frekans sabit tutulduğundan bu eğim artmıştır yani çekme hızı fazlalaşmıştır.

Bütün yorulma deneylerinde malzemenin elastiklik modülü devamlı bir şekilde kayıt edilmiştir. Kayıt için çift kalemli bir kayıt edici kullanılmış ve maksimum ve minimum zorlama alanları zamana karşı kayıt edilmiştir. Malzeme büyük bir hasar meydana gelmesi halinde zorlama alanındaki artış bu hasar anını belirlemiştir. Linear bir malzeme için (yükün maksimum değerinin değişmemesi nedeni ile) gerinimdeki değişim malzemenin elastiklik modülündeki düşmeyi gösterecektir.

Periyodik yüklemelerde, malzeme içinde birtakım olaylar gelişmekte ve bunun sonucunda malzeme içinde biriken hasar malzemeyi kullanılmaz hale sokmaktadır. Bu hasar miktarı elastik modül değişimi ile takip edilebilse de bunların esas nedenlerinin açıklanması ve izahına yetecek verileri sağlayamaz. Malzeme içinde oluşan hasarlar akustik emisyon aracılığı ile detaylı bir biçimde incelenebileceğinden deneylerde akustik emisyonla yol açan olayların sayısı ve bunların şiddeti yorulma deneyi boyunca kayıt edilmiştir.

#### Akustik Emisyon

Akustik emisyon, yükleme sırasında gerilme veya basınç dalgalarının malzeme içinde ağığa çıkması olayı olarak izah edilebilir. Bu nedenle adı geçen teknik, plastik deformasyon, çatlak teşekkülü veya ilerlemesi olaylarının incelenmesinde çok etken olarak kullanılabilir. Akustik emisyon bölgesel sönümlü dengesizliklere son derece duyarlıdır. Yük altında bulunan bir malzeme, her zaman en düşük enerji konumuna dönüşme eğilimini göstereceğinden, bilhassa kompozit malzemelerde toptan bir dengesizlik başgöstermeden önce bölgesel dengesizlikler oluşacaktır. Bu durum çatlak başlangıcı veya büyümesi, ara yüzey bağlarının kopması, elyaf kopması gibi dinamik hareketlere yol açacaktır. Araştırma konusu olan cam takviyeli

kompozit numunelerde bu bölgesel dengesizlikler malzemenin deformasyon ve kırılma kıraterlerini oluşturacaktır. Şekil 9-11 de cam demetleri ile takviye edilmiş numunelerin çekme deneyinde görülen akustik emisyonun yüke bağlı olarak değişimi bir örnek olarak verilmiştir.

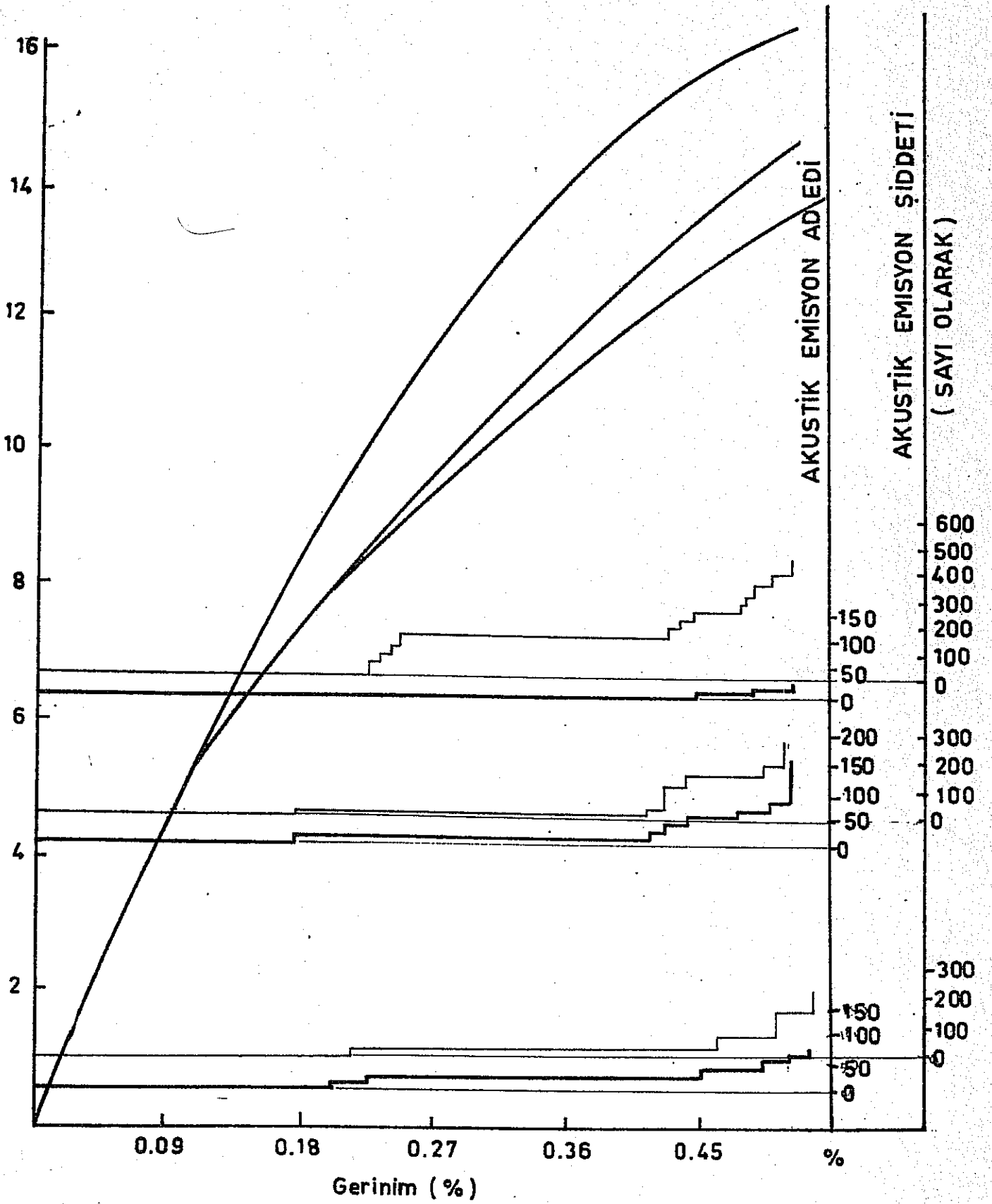
Akustik emisyon cihazının detaylı tarifi ve laboratuvar deneylerinde uygulanmasına ait teknikler literatürde 50, 51, 52 mevcut olduğundan bunlara burada değinilmeyecektir.

Akustik emisyonlar gerilim dalgaları olduklarından piezo elektrik transduserler aracılığı ile ölçülebilir. Araştırmada kullanılan piezo elektrik transduseri numune üzerine silikonlu bir gres ile tutturulmuştur. Kullanılan transduser geniş bir band aralığındaki frekansları duyabilen ve rezonans frekansı 120 Hz olan bir kristaldir.

Deneylerde 75 dB büyütme kullanılmıştır.

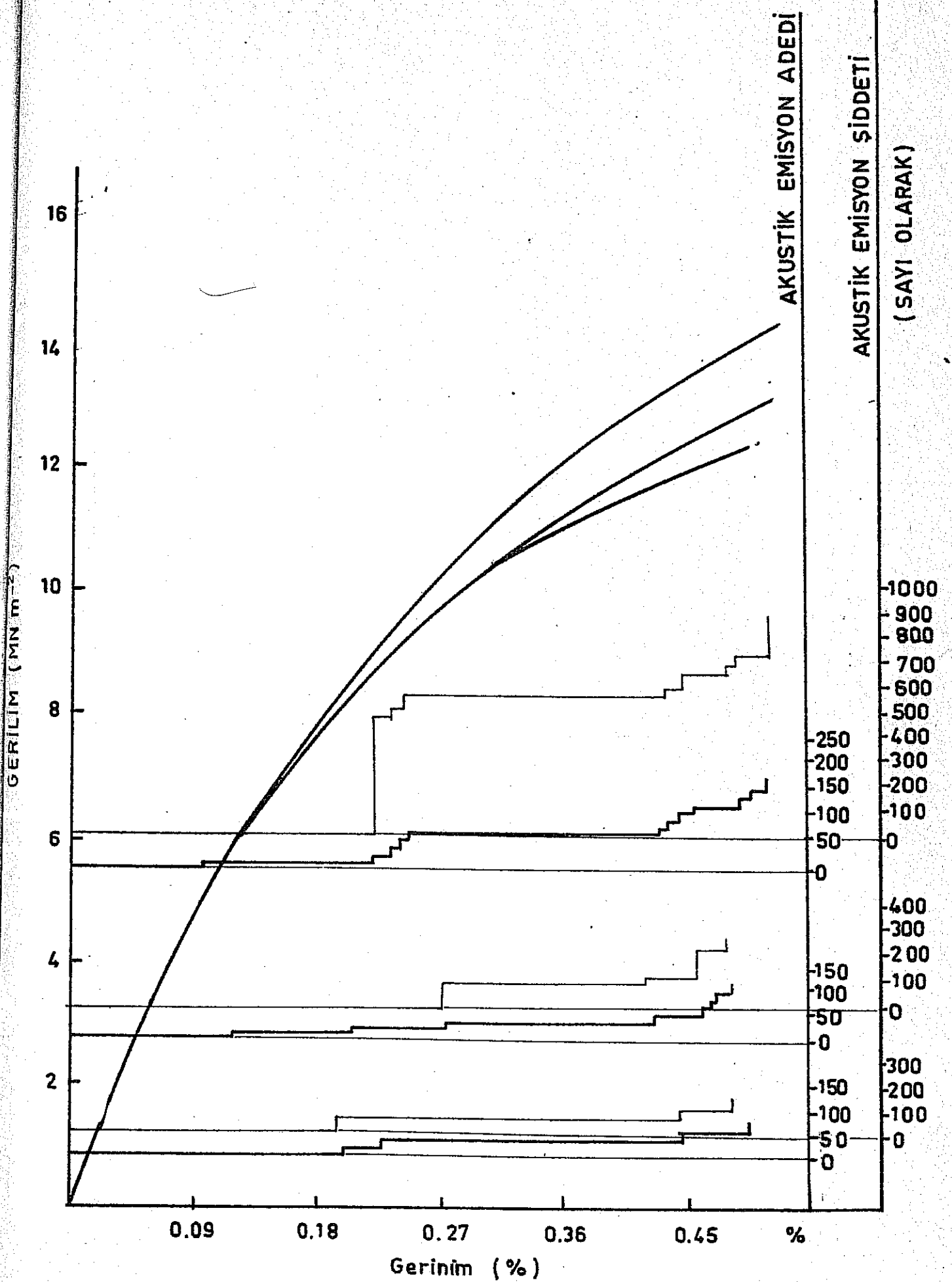
### Girişim Saçakları

Bütün testlerde numuneler polarize bir ışık kaynağı ile aydınlatılmıştır. Numuneler saydam olduklarından polarize ışık altında gerilimin neden olduğu girişim saçaklarını (stress-fringes) izlemekle malzeme içindeki gerilme dağılımını incelemek mümkün olmaktadır. Bu metod ile çatlak ilerlemesi, matris ile lif arasındaki bağın kopması lif kopması gibi diğer olaylarda



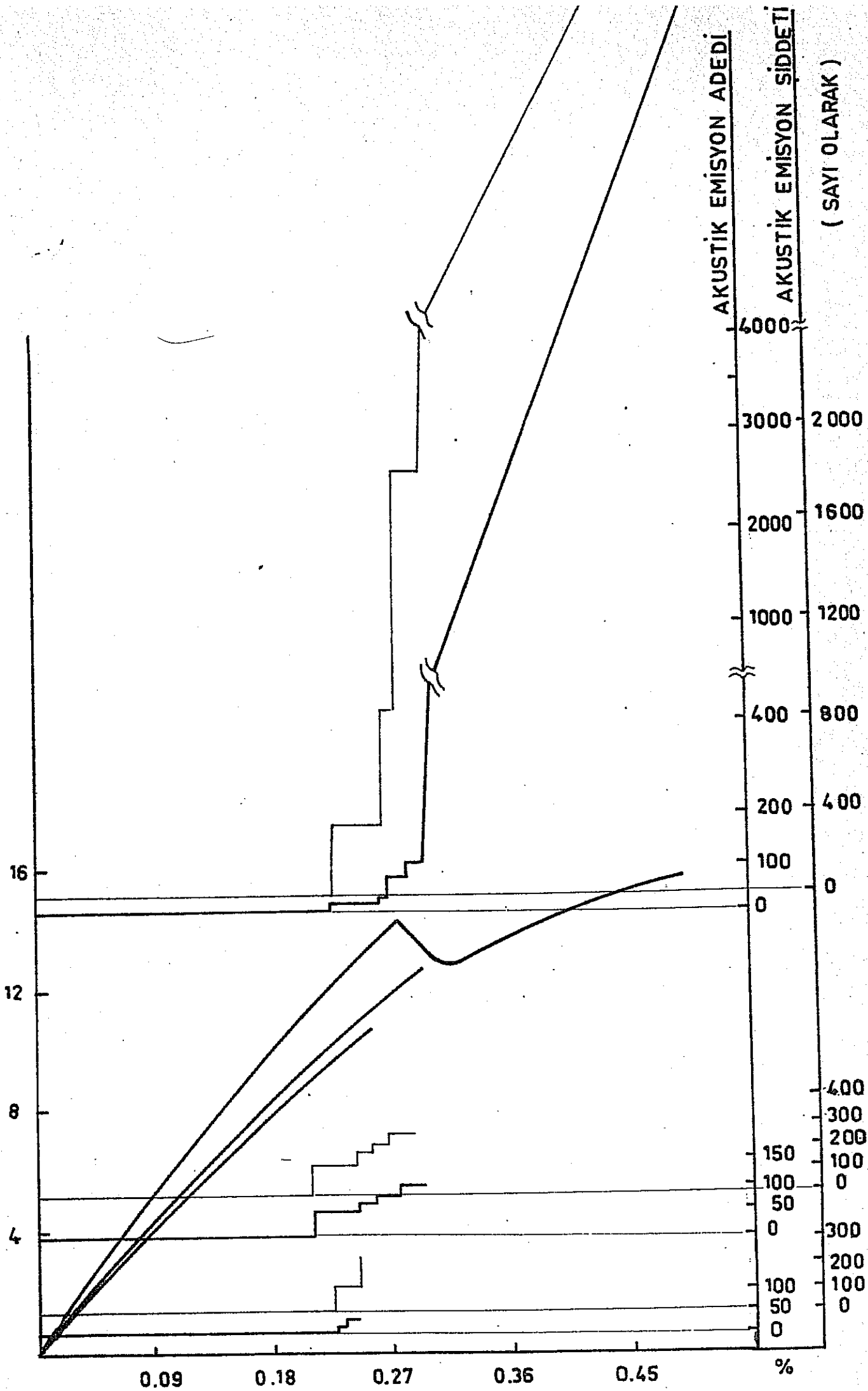
Şekil. 9 - Prizmatik numunelere ait gerilme - gerinme ve gerinme akustik emisyon eğrileri





Şekil. 10 - Delikli numunelere ait gerilme - gerinme ve gerinme akustik emisyon eğrileri

GERİLİM ( MN m<sup>-2</sup> )



AKUSTİK EMİSYON ADEDİ

AKUSTİK EMİSYON ŞİDDETİ

( SAYI OLARAK )

4000  
3000  
2000  
1600  
1200  
800  
400  
200  
100  
0  
400  
300  
200  
150  
100  
50  
0  
300  
200  
100  
0

0.09 0.18 0.27 0.36 0.45 %

kolaylıkla izlenebilmiştir. Işık kaynağı olarak bir masa lambasından yararlanılmış ve lamba MTS cihazına monte edilmiştir. Numunenin her iki tarafına konulan poloroid plakalar ile polarize ışık elde edilmiş ve girişim saçakları göze görünür hale getirilmiştir.

## VI. BULGULAR

### A. ÇEKME TESTLERİ

Yapılan deneyler bulguları ile birlikte her tip numune türü için ayrı ayrı verilecektir.

i, prizmatik numunelere ait çekme uzama eğrileri Şekil 9 da verilmiştir. Aynı şekilde akustik emisyonla yol açan olay sayısı ve her olaya ait olay şiddetini gösteren eğrilerde bulunmaktadır. Numunelere ait yük uzama eğrileri tamamen doğrusal olmayıp, lineer bağıntı ancak eğrinin başlangıcında görülmektedir. Kopma dayanımının %30-50 seviyesinde doğrusal ilişki bozulmakta ve malzeme yük ile az da olsa giderek artan tempo ile uzama göstermektedir. Polüester malzemede belirgin bir akma sınırı yoktur ve polüester gevrek metallerde görünen bir kırılmaya benzer bir kopma göstermektedir. Polüestere 10 mm aralıklarla cam elyaf bulunduğu kopma mukavemetinde çok ufak bir artma görülmüştür. Ancak bu artış fazla belirgin değildir. Cam elyaf aralığı 1 mm ye indirildiğinde gerek malzemenin elastik modülü ve gerek kopma mukavemeti artmıştır. Çekme ile oluşan hasarlar aynı Şekil 9 da görülebilmektedir.

Çekme işlemi başlangıcında malzemede hiç bir hasar olmamaktadır. Ancak yük kopma mukavemetinin %30-50 değerine ulaşınca malzemede polarize ışık altında görülemiyen fakat akustik emisyon ile fark edilebilen bir kaç muhtemel mikro

çatlak teşekkül etmektedir. Bu olaylara karşı gelen akustik emisyon şiddeti eğrilerine bakılacak olursa bu olayların pek zayıf ve dolayısıyla önemsiz olduğu görülmektedir. Malzeme kopma mukavemeti değerine yaklaşıncaya kadar bundan başka hiç bir hata teşekkül etmemektedir. Kopma yükünün %85-95 civarında ise mikro çatlak teşekkülü ve bunların birleşmesi birdenbire başlayarak giderek artan bir hız ile gelişmekte ve malzemenin kopmasına neden olmaktadır. Malzemede cam elyaf miktarı arttıkça yani lifler arasındaki uzaklık azaldıkça gerek akustik emisyon miktarı ve gerek bu emisyonların şiddeti fazla-laşmaktadır.

ii) Delikli prizmatik numunelerin çekme özellikleri:

Delikli numuneler aynen prizmatik numunelerde görülen özellikleri vermektedir. Hatta 1 mm çaplı deliğin malzemenin akma veya kopma özelliklerini etkilemediği görülmüştür. Bu da malzemenin çentiğe karşı hassas olmadığıнын bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Görünen mekanik özelliklerde bir değişme olmamakla beraber delik akustik emisyonu biraz daha erken başlatmış ve sayısını da biraz daha arttırmıştır. Ancak bu emisyonların şiddeti son derece küçük olduğundan malzemede oluşturduğu hasarlar son derece önemsiz olmaktadır. Delikli numunelere ait çekme neticeleri Şekil 10 da verilmiştir.

.iii) Çentikli ve Kanallı Numuneler:

Delikli numunelerle yapılan çalışmalar, malzemenin, ucu keskin olmayan çentiğe fazla duyarlı olmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle bu tür numunelerle çalışmanın en büyük avantajı çatlağın ve kırılmanın malzemenin bilinen bir bölgesinde oluşmasını sağlamak olmuştur. Diğer numunelerde ise kırılma malzemenin herhangi bir noktasında meydana gelebildiğinden, malzemede biriken hasarlardan hangisinin kırılmaya etken olduğunun anlaşılması oldukça güçleşmektedir. Çentikli numunelere ait çekme uzama eğrileri şekil 11 de görülmektedir. Çentikli malzemeler gevrek kırılma özelliği göstermekle beraber eiyaf miktarının yüksek olduğu ( ... lifler arası mesafe 1 mm) numunelerde ilk bakışta bir akma sınırının var olduğu görünümü bulunmaktadır. Ancak deney sırasında akma gibi görünen noktada matris kanal boyunca boydan boya çatladığı için gerilme alanı azalarak (relaxation) yükte bir düşme olmuştur. Bu andan sonra yük tamamen ... liflere intikal etmiş ve malzeme boydan boya çatlak olmasına rağmen yük ... lifler kopana dek artmıştır. Gerilme alanındaki artım bu nedenle sağlam malzemenin özelliği olarak görülmemelidir. Akustik emisyon sonuçlarına bakıldığında malzeme kopmasına yol açan hasarların ancak kopma noktasına yakın yüklerde başladığı ve malzeme kırılana dek

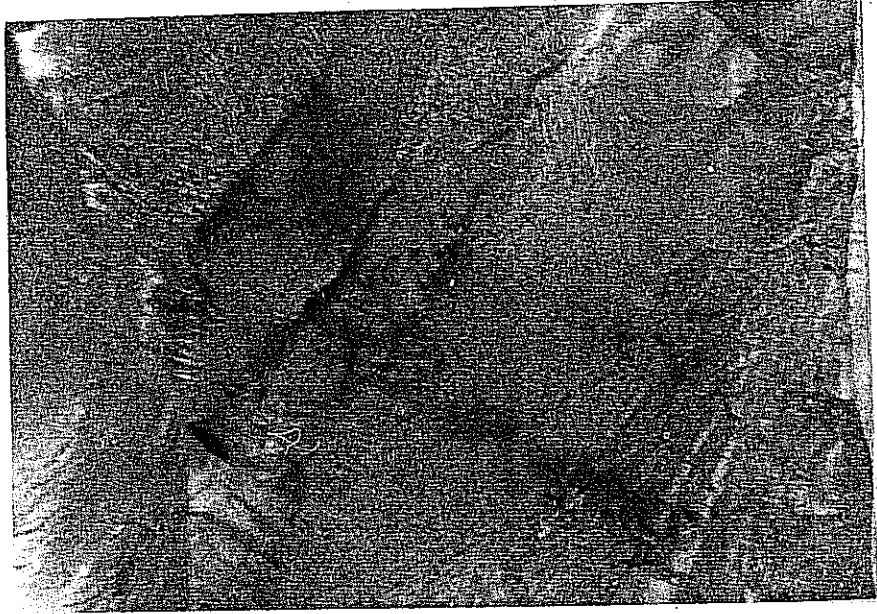
sürdüğü anlaşılmaktadır. Malzemede fiber sayısı arttıkça akustik emisyonu yol açan olay sayısı ve bu olayların büyüklüğü fazlalaşmaktadır.

iii)Çift ankastre numuneler. Bu tür numuneler malzemeye ait çekme özelliklerinin tesbiti için elverişli olmayıp daha ziyade malzemenin kırılma tokluğu hakkında bilgi sağlarlar. Standart çekme ile kırılan numunelerde malzeme içinde ilerliyen çatlağın ( lifler arasındaki mesafe kısa olması halinde) bir liften bir diğerine ani olarak ilerlediği ve çatlağın devamlı şekilde çatlak önünde bulunan elyaf tarafından tutularak ilerlemesi engellendiği görülmüştür. Çatlak ilerlemesi ani hamleler halinde çoğu kez bir lif aralığı kadar olmakla beraber bazı hallerde çatlak bir hamlede 2-3 lif aralığı da geçtiği olmuştur. Ne var ki her durumda çatlağın yeni bir fiberde son bulduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada matris için kırılma tokluğunun ( $K_{1c}$ )  $0.6 \text{ MNm}^{-3/2}$  olduğu ve numuneye 10mm aralıkla cam lif yerleştirildiğinde bu değer  $14 \text{ MNm}^{-3/2}$  ye ve 1 mm cam lif aralığı için ise  $50 \text{ MNm}^{-3/2}$  ye ulaştığı bulunmuştur. Cam lif yüzdesi arttıkça numuneye ait kırılma tokluğu buna paralel bir artım göstermektedir.

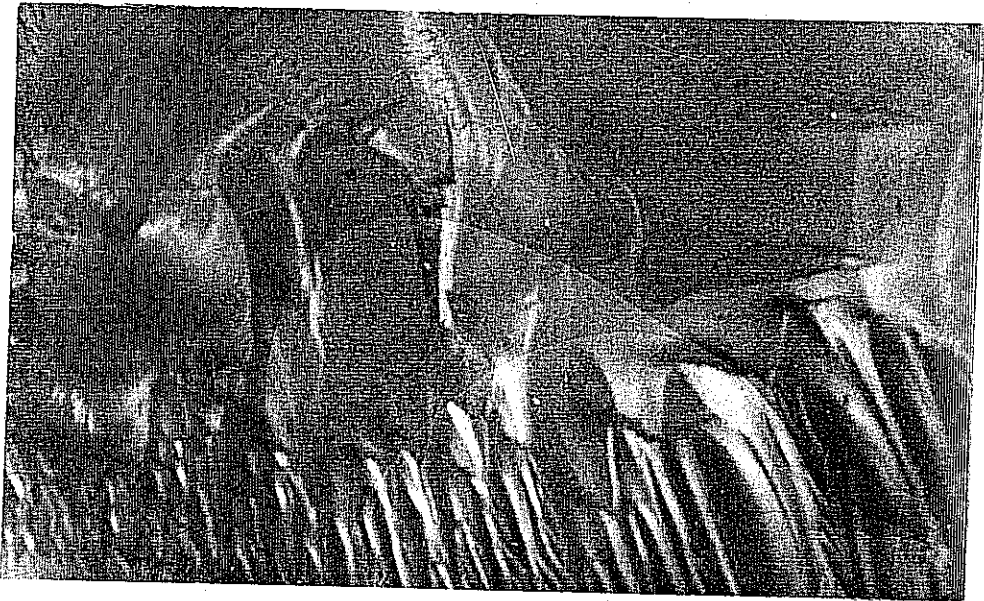
## B. ÇEKME TESTİNDE HASAR BİRİKİMİ

Normal çekme testi sonunda, kırılmaya yol açan hasarın her tür numunede kopma gerilmesine yakın değerlerde yoğunlaştığı görülmüştür. Bu yük değerinde matris içinde mikro çatlak sayısında büyük bir artış olmakta ve bu mikro çatlakların büyük bir kısmı birbirleri ile birleşmektedir. Elyafı numunelerde mikro çatlakların yanı sıra elyaf-matris bağının kopması ve bir miktar elyaf kopması da görülmektedir. Çentiksiz numunelerde büyük sayıda çatlakların olduğu bölgede büyük boyutlara ulaşan çatlaklardan bir kısmı birleşerek malzemenin kırılmasına yol açmaktadır. Kırılma ile açığa çıkan zorlama alanı enerjisi liflerin çatlak boyunca koparak numunenin ikiye ayrılmasını sağlamaktadır. Çentikli numunelerde ise lifler arası mesafe 1 mm olması halinde matrisin tamamen kırılması halinde açığa çıkan enerji bütün liflerin kırılmasına alanak sağlayacak düzeye ulaşmadığından matris çentikler arasında boydan boya çatlamasına rağmen numune ikiye ayrılmamakta ve lifler yükü taşımaya devam etmektedir. Fotoğraf 2 ve 3 de çekme ile kırılan numunelerin kırılma yüzeyi görülmektedir. Kırılma yüzeyi matris çatlakları ile dolu olup dumanlanmış bir görünüm kazanmıştır. Cam elyafı çevresinde matris içindeki kırılmalarda bir miktar azalmıştır.





Resim 2. Polyesterde gekme kırılması (x15)



Resim 3. CTP Malzemedede gekme kırılması (x15)

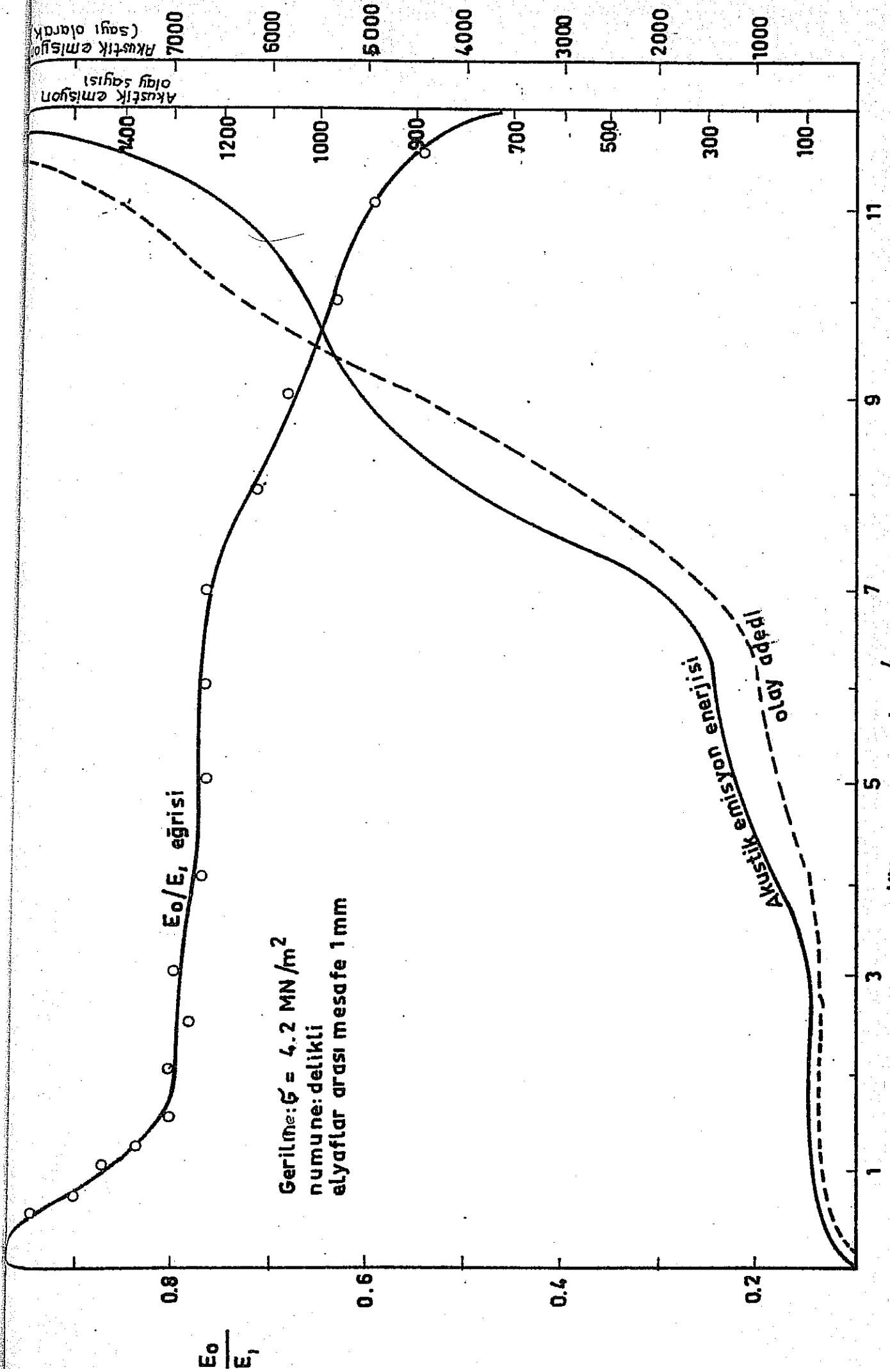
Cam takviyeli malzemenin kırılmasını tekrar özetleyecek olursak, çekme kırılması, yükün malzeme kopma değerinin % 80-90 ın üzerine ulaşması halinde malzemedeki mikro çatlakların oluşması, elyaf ve elyaf matris bağlarının kopması ile başlamakta ve yükün artması ile çatlak miktarlarının hızlı bir artış göstererek bunların birleşmesi sonucu olmaktadır.

### C. YORULMA TEST SONUÇLARI

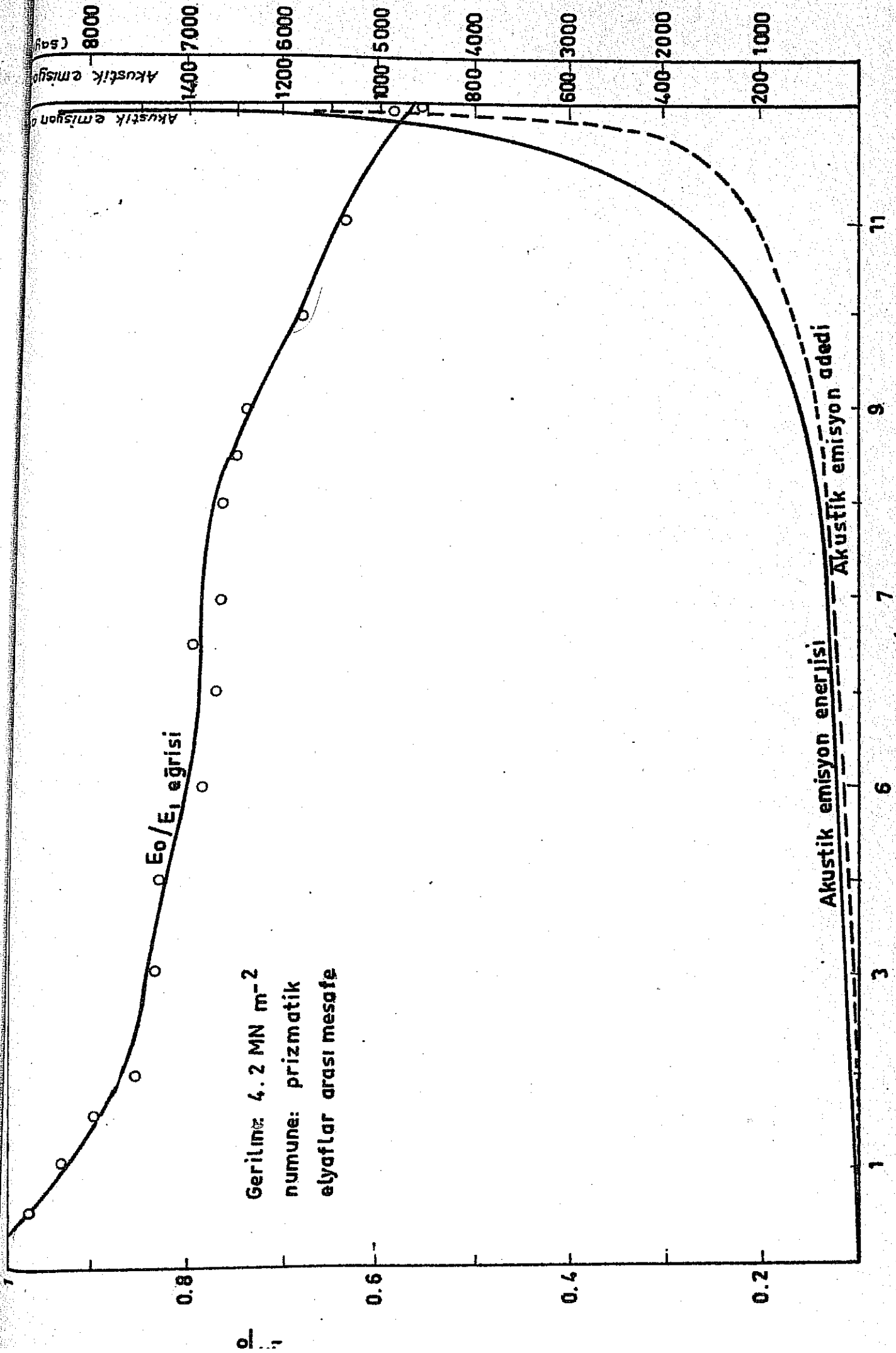
İzotropik olmayan numunelerin testlerinde, kırılmanın tarifi çok önemlidir. HOMOJEN malzemeler için kırılma fiziki yönden parçanın ikiye veya daha çok parçaya ayrılması olarak tarif edilebilir. Bu durumda parça, tatbik edilmiş yükü taşıyamaz duruma girer. Yorulmada genellikle bu, bir çatlak giderek büyümesi ve geri kalan parça kesit yüzeyinde yükün kopma değerine ulaşması ile olur. İzotropik olmayan elyaf takviyeli kompozit malzemelerde malzemenin yük taşıma özelliğini yitirmesi, mikro çatlak teşekkülü bunların birleşmesi, elyaf kopması, matris-elyaf bağlarının kopması ile olur. Bütün bu olaylar, malzeme fiziki olarak ikiye ayrılmadan önce yüksek bir düzeye ulaşarak malzemeyi kullanılamaz kılarlar. Bu nedenle numunenin hangi değerde kırılmış olarak kabul edileceğinin tayini, bazı yorulma zorluklarını beraberrinde getirmektedir.

Birçok yorulma çalışmasında elastik modüldeki ani düşme kırılma noktası olarak alınmakla beraber, projede kullanılan numunelerde liflerin matrise oranla hacim olarak küçük miktarda olması nedeni ile parçanın fiziki olarak ikiye ayrılması kırılma noktası olarak kabul edilmiştir. Zaten matris içindeki çatlağın numune kesiti boyuna ulaşması ancak liflerin kopması ile mümkün olmuştur.

Şekil 12 ve 13'de sıfır yük ile  $4.2 \text{ MN m}^{-2}$  lik çekme yükü arasında periyodik zorlama ile malzemenin elastik modülündeki değişim yükleme sayısına bağlı olarak verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi daha yorulma yüklemelerinin başında elastik modülde bir miktar düşme olmaktadır. Ancak malzeme kısa bir yükleme periyodundan sonra denge durumuna girmekte ve uzun yorulma ömrünün çok büyük bir bölümünde elastik modülde bir değişim olmamaktadır. Ancak yorulma ömrünün sonuna yaklaşıncaya elastik modülde çok hızlı bir düşme başlamakta ve bunun hemen sonunda malzeme kırılmaktadır. Elastik modülde yorulma ile görülen değişim, liflerin 1 mm aralıklarla bulunduğu numunelerde az, fakat 10 mm aralıklı  $\frac{1}{3}$  dağılımı olan numunelerde çok daha hızlı olmuştur.



Şekil.12 - Periyodik zorlamalarla delikli numunelerin elastik modülündeki değişim ile periyodik zorlamanın sebep olduğu akustik emisyonlar.

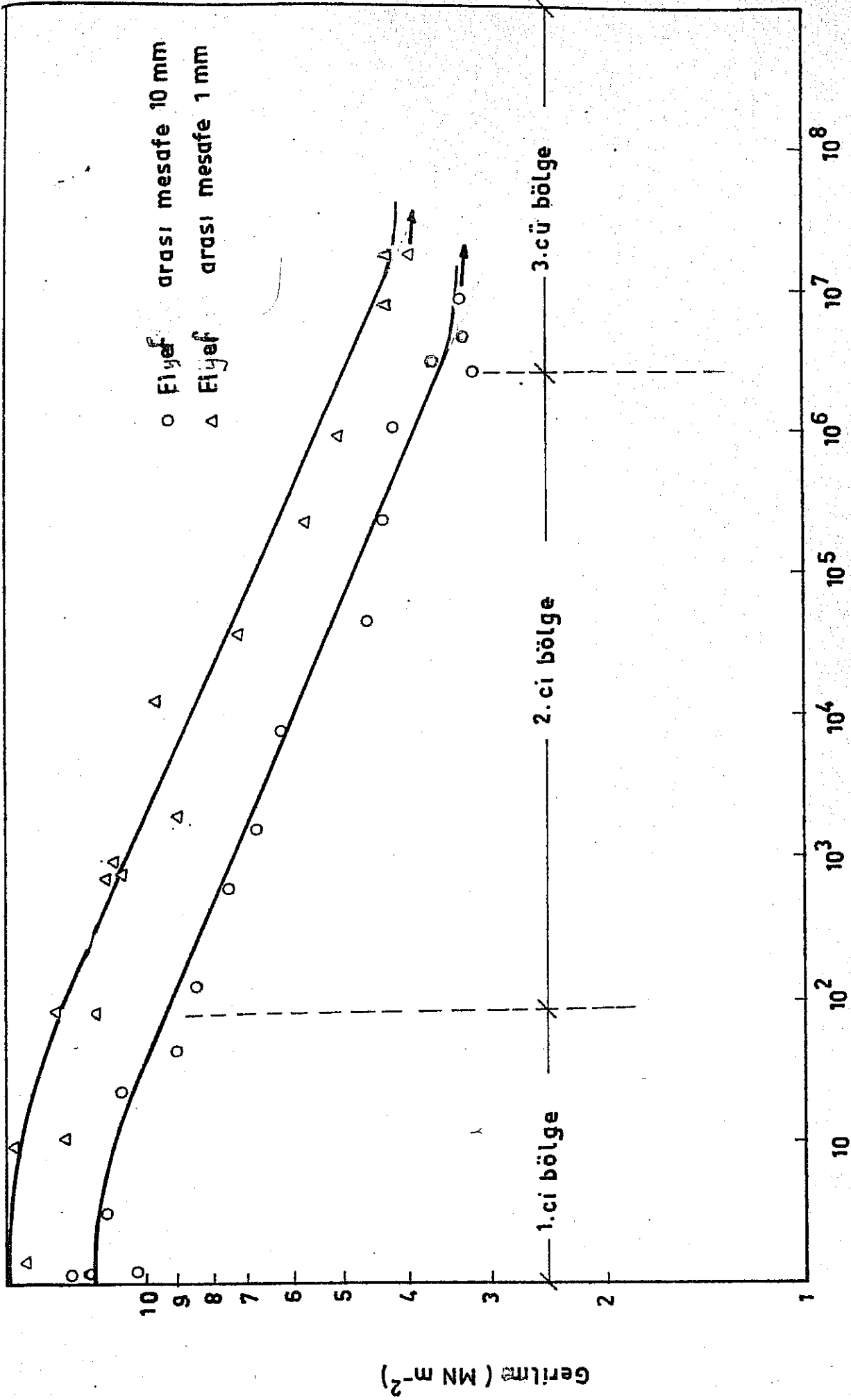


Şekil: 13 - Prizmatik numunelerde periyodik zorlama ile akustik emisyon ve etkinliği arasındaki ilişki.

Matris içine katılan renk paştası, asbest gibi dolgu maddelerinin elastik modülü üzerindeki etkilerini bulmak üzere bir miktar numune içine %2 oranına kadar dolgu maddesi konularak hazırlanmıştır. Ancak yapılan yorulma testlerinde bulunan sonuçlar matris içinde %2 oranında bulunan bu dolgu maddelerinin numunenin yorulma ömrünü ve elastik modüldeki değişmeyi hiç etkilenmediğini ortaya koymuştur.

Periyodik yüklemenin elastik modülde meydana getirdiği değişimin nedenlerinin araştırılması için test süresince akustik emisyon olay sayısı ve bu olayların şiddeti kayıt edilmiştir. Şekil 12 ve 13 de yükleme periyodu ile akustik emisyon verileri arasındaki ilişkiler elastik modüldeki değişim ile aynı şekil üzerinde verilmiştir. Böylece belirli emisyonlara karşı gelen elastik modüldeki değişimin ve bunların arasındaki korelasyonun açıkça görülmesi mümkün olmaktadır.

Şekil 14 de bütün yorulma sonuçları özetlenmiştir. Şekilde gerilme genliğine karşı periyodik zorlanmaların sayısı çizilmiştir. Periyodik zorlanmayı gösteren X eksenindeki 1 değeri çekme kopmasını vermektedir. Eğrilerden de anlaşıldığı gibi numune şekli ne olursa olsun (delikli, deliksiz veya çentikli) %15 yüzdesinde bir değişim olmadığı takdirde numune geometrisi yorulma ömrünü fazla etkilenmemiştir.



Şekil: 14 - CTP Malzemede yorulma

Çift ankestre numuneler ile yapılan çalışmalardan numunede yorulma çatlaklarının ilerleme koşulları incelenmiştir. Cam takviyeli polyeester numunede çatlak ilerlemesi, metal malzemelerde görülen belirli çatlak ilerleme kanununa benzer bir durum göstermemektedir. Çatlak ilerlemesi şu bira ile olmaktadır.

1) Yükün en büyük olduğu yer olan çentikte çatlak başlıyarak numunede açılan kanal boyunca yavaş yavaş birinci lif kadar periyodik zorlama ile ilerlemektedir.

2) Elyafa dik olarak ilerliyen çatlak ilk fibere geldikten sonra çatlak ilerleme hızı durmakta ve periyodik zorlama ile matris ile lif arasındaki bağ kopana dek çatlak ilerlemesi olmamaktadır.

3) Matris- lif arasındaki bağın kopması ile lif yönüne paralel olarak teşekkül eden yeni çatlak ilk ilerliyen çatlak ucunun keskinliğini kaybetmesine yol açmaktadır.

4) Şu anda çatlak numunede bulunan kanal boyunca ilerliyebilmesi ancak yeni bir çatlak körelmiş bulunan çatlak ucundan tekrar çekirdeklenmesi ile mümkün olmaktadır.

5) Yeni çatlak çekirdeklendikten sonra periyodik zorlama ile çatlak tekrar ilerlemeye başlarken ancak bu ilerleme çok ağır bir şekilde olmaktadır. Çatlak geçmiş olduğu ilk elyaf henüz kopmadığından bu lif çatlak anı olarak ikinci lif ulaşmasını önlemektedir.



6) Bundan sonra çatlak ilerlemesi matris-elyaf arasındaki bağı sağlamlığına ve matrisin bölgesel durumuna bağlı olarak ya yukarıda belirlenen şekilde ilerlemesine devam edecek veya aşağıda belirlenen şekilde ilerleyecektir.

7) Çatlak yavaş yavaş ilerlerken çatlak önünde bulunan lifde matris-elyaf bağı kopabilmektedir. Bu olay bazı durumlarda çatlak life ulaşınca olduğu gibi ulaşmadan çok öncede gerçekleşebilmektedir. Bu halde ilerliyen çatlak

lif yerine yeni bir çatlakta son bulacaktır ve bu nedenle büyüme için gerekli yeni çatlağın çekirdeklenmesi daha kolay olacaktır.

8) Bazı hallerde çatlak daha life ulaşmadan lifin önünde matris içinde yorulma ile yeni bir çatlak oluşarak, bu kez her iki çatlakta iki yönden periyodik zorlamalarla fibere yaklaşarak çatlağın ani olarak büyük ilerleme göstermesine neden olmaktadır.

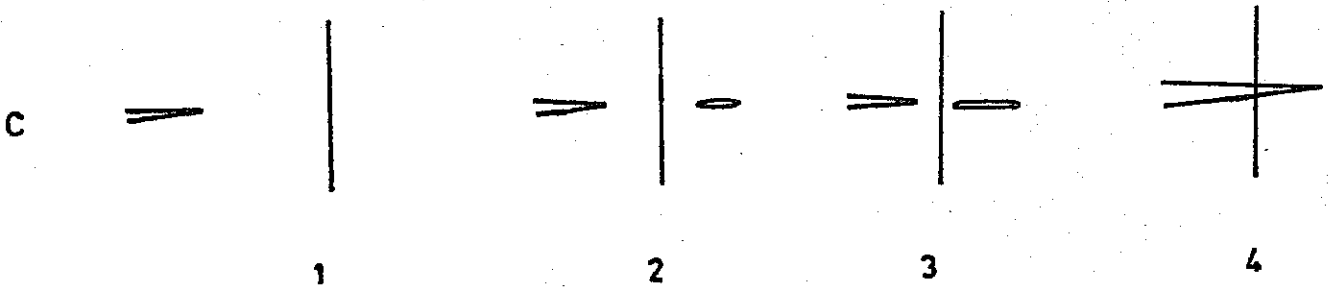
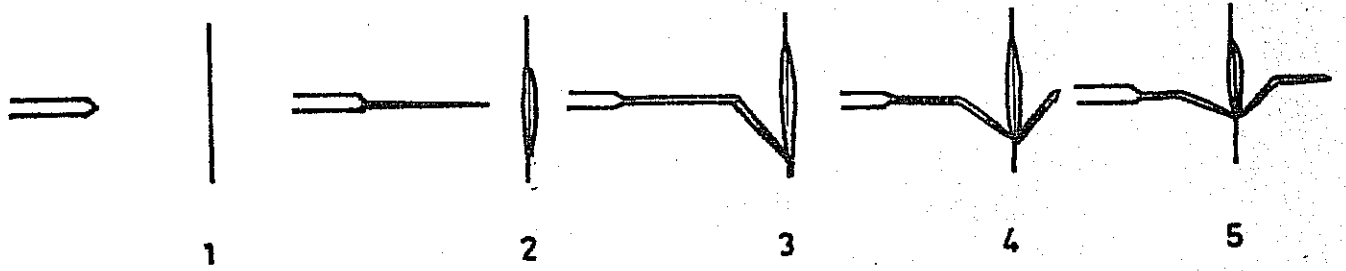
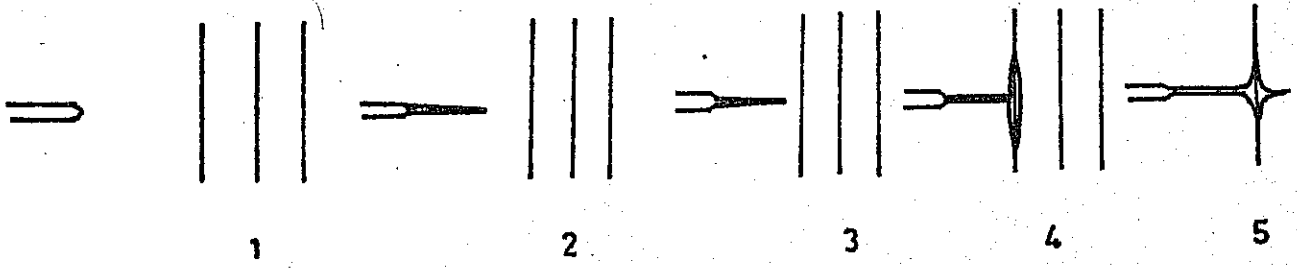
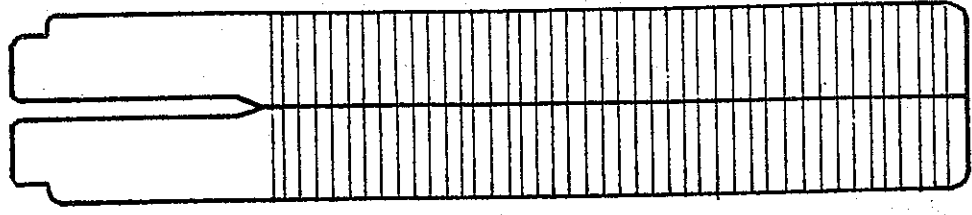
9) Numunede çatlak ilerlemesini kontrol altında tutan çatlak boyunca bulunan fiberlerdir. Bilhassa çatlak başlangıç noktasında bulunan ilk lif çok etkili olmaktadır. Örneğin bir çatlakta 5 veya 6 fiberin bulunduğunu kabul edecek olursak çatlak ilerleme hızı  $dc/dN$  çok yavaş olacaktır. Bu çatlak içindeki ilk fiber deney süresi içinde dış bir müdahale ile koparıldığında çatlak ani olarak hızla ilerlemekte ancak bir müddet sonra hız tekrar yavaşlamaktadır. Bundan sonra çatlağın ilerlemesi yorulma ile ikinci

... kopması ile ancak tekrar hızlanmaktadır.

10) Numunede çatlak ilerleme mekanizmaları Şekil 15 de şematik olarak gösterilmektedir. Fotoğraf 4, 5, 6 ve 7 de ise bu şekillere karşı gelen kırılmaların kırılma yüzeyi üzerindeki görünüşleri yer almaktadır.

## VII. YORUMLAMA

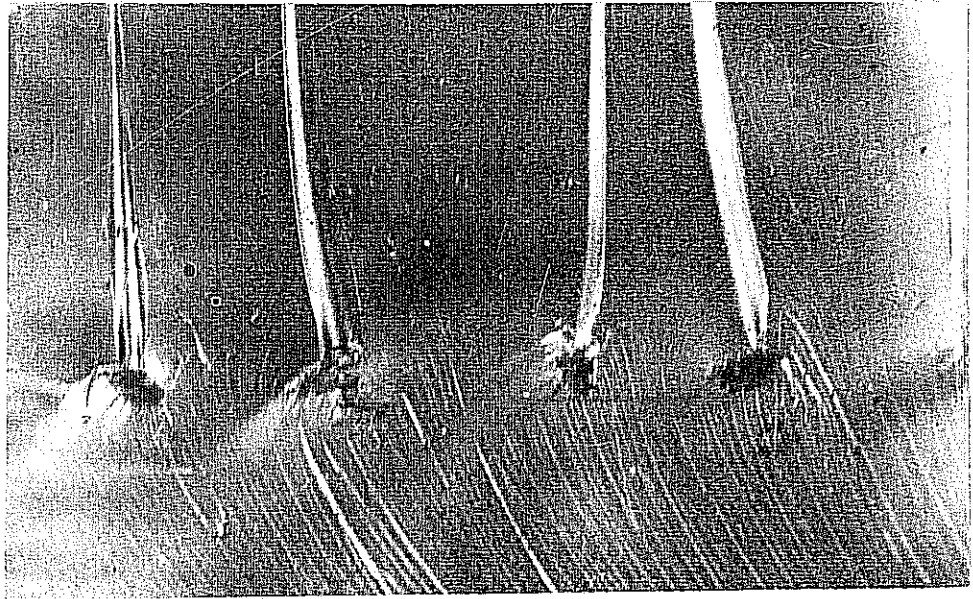
Cam elyaf takviyeli poljester reçine üzerinde yapılan çeki deneyleri, kompozit numunelerde kırılmanın gevrek bir kırılma olduğunu göstermektedir. Matrisin kırılma uzamasının cam elyafa oranla daha az olması kırılmanın tamamen matris içinde başlamasına neden olmuş ve gerilme alanı arttıkça matris için de kırılmaların arttığı görülmüştür. Kırılan numunelerin makroskopik görünümü (Fotoğraf 2 ve 3) kırılmanın hemen hemen matris içinde olduğunu ve elyafda fazla bir hasarın olmadığını kanıtlamaktadır. Ancak malzeme tamamen kırıldıktan sonra açığa çıkan elastik zorlama enerjisi ile fiberlerde kopma olmaktadır. Matris içinde oluşan binlerce çatlaktan, kırılmanın birçok merkezde çekerdeklenildiği ve ancak bunlardan çok büyük boyutlara ulaşan birkaçının birleşmesi ile nihai kırılmanın olduğu yine aynı fotoğraftan anlaşılmaktadır. Numunelerde cam elyaflar, matris



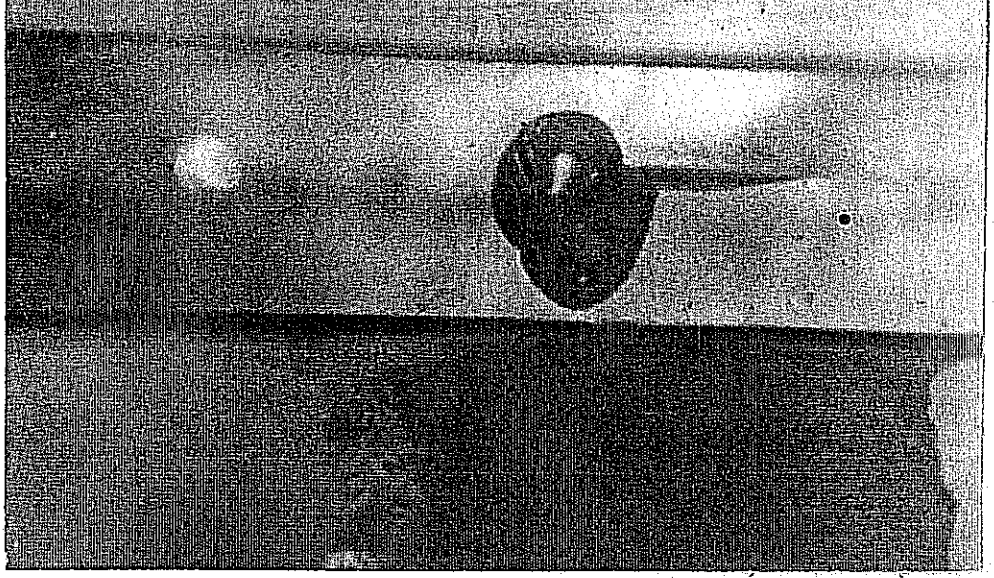
Şekil. 15 - Çift ankaştre numunede görülen periyodik zamanlarla çatlak büyüme mekanizmaları



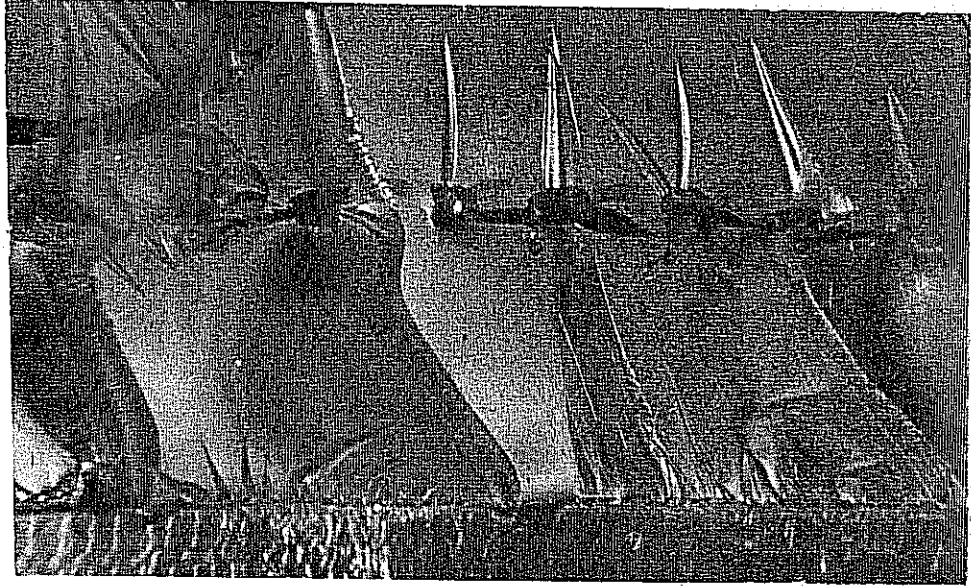
Resim 4. Çift ankastre numunede çatlak başlangıcı ve yeni çatlağın ilerlemesi (x15)



Resim 5. Çift ankastre numunede çatlak ilerlemesi (x30)



Resim 6. Yorulma çatlağının lif bölgesinde görünümü



Resim 7. Matriste oluşan yorulma çatlakları (x15)

içinde gelişen çatlakların geometresini bir miktar değiştirecek, elyaf çevresindeki lokal bölgede ancak bir veya ancak birkaç çatlağın oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bu olay fotoğraf 3'de açık bir şekilde görülmektedir. Elyaf oranı arttıkça matris içinde (kırılmadan önce) oluşan çatlak sayısındaki gerileme matrisin kırılma buzlanması nisbetindeki azalmandanda görülebilmektedir. Nitekim, cam elyafın elastik modülü, polüestere oranla daha büyük olduğundan numune üzerindeki yükün büyük kısmı elyaflar tarafından taşınır. Bu ise matris içindeki gerilimi azaltarak polüesterin birçok yerde çatlamasını önler. Ancak zayıf bölgelerde oluşan birkaç çatlak gelişerek malzemenin kırılmasına yol açar. Akustik emisyon sayı ve şiddeti değerlerine bakıldığı zaman elyaf miktarı az olan numunelerde gerek emisyon sayısının az ve gerekse bu emisyonla ait enerjinin oldukça küçük olduğu görülmüştür. Elyaf miktarı yükseldikçe akustik emisyon sayısında bir artış olmaktadır. 1 mm fiber aralığı olan numunedeki toplam emisyonun ortalama % 10'unda enerji seviyesi normal emisyonun 20 ile 40 katı olmuştur. Bu da matris malzemedeki çatlakların oluşması ile çok küçük çapta enerjinin açığa çıktığını kanıtlamaktadır. Cam elyaf miktarı arttıkça kompozit malzeme üzerindeki yükün daha büyük bölümü elyaflar tarafından taşınır. Elyafda meydana gelen hasar ise daha büyük enerjinin açığa çıkmasına yol açar ki emisyonlar da bunu göstermektedir. Bu nedenle yorulma ile kompozit malzemedeki oluşan hasara bağlı akustik emisyon sayısı ve bunların enerji seviyelerinin incelenmesi ile numunede yorulma hasarlarının elyaf veya matrisde oluştuğu öğrenilebilir. Matris olarak kullanılan polüester reçine içindeki  $10^4$  miktarının artması ile

akustik emisyon hacminde artış olduğunu söylemiştik. Akustik emisyonların artışı numune içinde depolanan elastik gerinimi azaltan bir dizi olay olduğundan, akustik emisyonların artması malzeme tokluğundaki (toughness) artımı yansıtır. Çekme testinde akustik emisyonların kopma gerilmesinin %85-95 'i üzerindeki değerlerde büyük bir artış göstermesi, numunede hasarların ancak bu yüklerde yoğunlaşarak kritik değere ulaştığını göstermektedir. Malzeme, emisyonların logaritmik bir artış göstermesi sonucu kırılmaktadır. Matrisin tamamen ara kesit boyunca kırılması ile açığa çıkan elastik gerinim enerjisi, o kesitte bulunan elyafların kopmasına yol açtığından malzeme fiziki olarak ikiye bölünmektedir. Ancak çentikli ve kanallı numunelerde hasar ancak çok küçük bir bölgede oluşabildiğinden matrisin kanal kesiti boyunca kırılması ile açığa çıkan gerinim enerjisi fiber oranının yüksek olması halinde lifin kopmasına yetecek düzeyde olamamaktadır. Bu nedenle yüksek  $\sqrt{a}$  miktarlı çentikli numunelerin gerilim-gerinim eğrilerinin, şekil yönünden yumuşak çeliklerde görünen akmaya benzer bir görünümü vardır. Ancak ilk akma noktası gibi görünen yerde matris tamamen kırıldığında bütün yük elyafa aktarılmakta ve bundan sonra elyaf matris içinde herhangi bir yerde koparak matris dışına çekilmektedir. Eğrideki ilk akmayı andıran noktadan sonra yukarıda belirlenen olaylar dizisi eğrinin bu noktadan sonraki kısmını oluşturmaktadır.

Yorulma deney sonuçlarına gelince, bunlara yorumu Şekil 12, 13 ve 14 de yapılabilir. Şekil 12`de verilen bir yük için (uzun ömürlü yorulma) elastik modüllerde değişime yüklemeye sayısına bağlı olarak başlangıçta küçük bir düşme gösterip hemen denge durumuna gelmektedir. Elastik modülde ilk yüklemelerde görülen düşme numüne içinde bulunan ve henüz denge konumuna gelememiş hasarların denge durumuna ulaşması ile izah edilebilir. Bu düşmeye yol açan hasarlara ait emisyonların az ve çok küçük enerjili olması hasarın matris içinde ve muhtemelen numüne hazırlama işlemi sırasında teşekkül eden fazla önemsenemeyecek kusurlardan oluştuğu kabul edilebilir. Yorulmanın daha sonraki yüklemelerinde elastik modülde bir değişim olmadığı gibi böyle bir değişmeye olanak verecek bir emisyon da görülmemiştir. Ancak yorulma ömrünün sonlarına yaklaştıkça numünede emisyonlar önceleri küçük enerji seviyesinde olmak üzere tekrar başlayarak hızlı bir gelişme göstermektedir. Emisyonlar arttıkça bazı emisyonların yüksek enerjili olduğu görülmektedir. Bu da elyaf üzerinde birtakım yorulma hasarlarının oluştuğunu kanıtlamaktadır. Nitekim polarize ışık altında yapılan karşılaştırmada numunede kopan fiberleri böyle yüksek enerjili emisyonlar verdiği görülmüştür. Ancak bu kopma ile oluşan emisyon enerjileri hakkında kesin bir değer vermek mümkün olmamaktadır. Zira elyaf kopmasının numunenin kırılma ara kesitinden olan fizikliğine bağlı olarak bu emisyonların şiddeti değişik düzeylerde olmaktadır. Ancak kopma sırasındaki emisyonların



mikro çatlaklar yüzeyde başlamış ve periyodik zorlamalarla yavaş yavaş ilerlemiştir. Periyodik zorlamanın sayısı arttıkça malzeme içinde ilerleyen çatlağın hemen önündeki  $\sigma_c$  de  $\sigma_c$  -matris bağları kopmuş ve gerek böyle bir  $\sigma_c$  üzerinde ve gerek matris içindeki ufak bir hata üzerinde yeni çatlaklar oluşarak bunlar zamanla ilerleyen çatlakla birleşmiştir. Çatlağın ilerlemesi çatlağın önünde veya içinde bulunan cam elyafın korozyonlu yorulma ile kopmasına çok bağlı olmuştur. Çatlak çekirdeklendikten sonra elyafın korozyonlu yorulma ömrü kompozit malzemenin ömrünü kontrol eden birinci dereceden olay olmaktadır. Matris içindeki mikro çatlaklar burada iki ayrı fonksiyonu oluşturmaktadır. Bunlardan ilki bölgesel gerinim yoğunluğu oluşturmak diğeri ise atmosferdeki nemi fibere ulaştırarak burada su olumsuz etkisini fiberlere eklemektedir. Başlangıçta çatlak yük yönüne dik olarak (Mode I) ilerlemektedir. Bu nedenle yüzeye yakın olan fiber bu bölgelerde yükün etkisi ile kopmaktadır. Ancak çatlak büyüyüp fiberler boyunca kesme yükü arttıkça yük yönüne dik olarak ilerleyen çatlaklar fiberlere paralel yöne dönmektedir. Bunu kontrol eden parametre ise kesme ile açığa çıkan çatlak enerjisinin açığa çıkma hızıdır. (Crack energy release rate).

Bu bölgedeki çatlak ilerleme hızı verilerinden yük ile yükleme periyodu arasında

$$\sigma N^n = C$$

bağıntısının geçerli olduğu görülmektedir. Burada

$\sigma$ : Numuneye uygulanan maksimum çekme gerilimi

N: Yükleme sayısı

n : Sabit üs

C : Sabit sayı 'dır.

Deneylerde 'n' 10 ile 11 arasında değişmiştir.

Üçüncü bölge, 10.000.000 yüklemeden sonra oluşan bölge yorulma eğrisinin üçüncü bölümünü oluşturmaktadır. Statik kopma mukavemetinin  $\approx 30-75\%$ 'i veya daha küçük yüklerle numune periyodik zorlamaya tabi tutulduğunda malzemede hiç akustik emisyonla rastlanmamıştır. Ancak yorulma deneyi süresinde bazı emisyonlar görülmüşse de bunların şiddeti son derece küçük kalıp (bir iki akustik emisyon sayısını geçmemiştir), emisyonlar hiçbir zaman devamlı bir konuma girmemiştir. Buradan da bu yükler altında numunede bir hasarın gelişerek birkaç milyon yüklemeye numunenin kırılmasına olanak verecek düzeye erişemeyeceği bulunmuştur. Diğer bir deyişle yorulma yüklemesi ile numunede çok da az olsa birtakım mikro çatlak teşekkül etmektedir. Ancak bu çatlaklar cam elyaflarını geçebilecek yük gerilimine sahip olmadığından malzeme birkaç milyon yüklemeden sonra bile kırılmamaktadır.

Yorulma deneyleri delikli numuneler üzerinde yapıldığı zaman delikler numunenin yorulma ömrünü etkilememiştir. Çoğu kez numune, deliğin bulunduğu kesit yerine tamamen başka bir kesit boyuna kırılmıştır. Kırılma yüzeyi, numune içinde bulunan hasarların istatistik dağılımının en yüksek bulunduğu bölgede oluştuğu düşünülecek olursa numune içindeki 1 mm çapındaki deliğin ancak yükleme başlangıcında etkili olabileceği ortadadır. Nitekim yorulma ömrünün başlangıcında delikli numunelerde deliksiz numunelere oranla çok daha fazla akustik emisyon kayıt edilmiştir. Delik çevresindeki gerilim yo-

ğunluğu ile hasarların o bölgenin zayıf noktalarında başlaması ile ilk emisyonlar oluşmaktadır. Ancak bu hasarlar çok çabuk denge durumuna ulaşmaktadır.

Endüstriyel uygulamada ürün görünümünü daha cazip kılmak üzere çeşitli boya pastaları (%2'e kadar) üretim proseslerini kolaylaştırıcı çeşitli dolgu modülleri matris malzemesi olan polüester için katılmaktadır. Ancak yurdumuzda üretilen cam takviyeli plastik malzemelerde bunun gibi katkı malzemelerinin oranı % 5'den daha fazla değildir. Araştırmada bu nokta göz önüne alınarak % 2 civarındaki katkıların malzeme yorulması üzerindeki etkileri araştırılmış daha yüksek katkı oranlarına gidilmemiştir. Çalışmalarda araştırılan katkı malzemeleri, Dewilux firmasının beyaz, siyah, kahverengi, kırmızı, sarı boya pastaları ile,  $\text{CaCO}_3$  ve krizotil asbesttir. Yukarıda belirtilen katkı maddeleri, asbest haricinde, % 2 nisbetinde polyestere katılmıştır. Katkı malzemesi olarak krizotil asbest kullanıldığında % 2'lik karışım polüesterin viskozitesini çok yükselttiği için polüester içine sadece % 0.2 oranında katılmıştır. Katkılı matrisli numunelerde yapılan yorulma çalışmaları katkı miktarının yukarıda belirlenen seviye içinde kalmak şartı ile malzeme ömrünü etkilemediği görülmüştür. Kullanılan katkı maddesinin tane boyutlarının (kesit) 300 mikrondan küçük olması buralarda özürlü bölgeler yaratmamaktadır. Zaten tane yüzeyi ile polüester arasında çok iyi bir bağ kurulabildiğinden yorulma gerilimi bu noktalarda hasar oluşturacak düzeye ulaşmamaktadır.

### ÇATLAK İLERLEME MEKANİZMALARI.

Yapılan araştırmada yorulma çatlağının ilerlemesini sağlayan olaylar, akustik emisyon ve polarize ışık aracılığı ile çift ankastre numunede incelenmiştir. Çift ankastre numunede çatlak numunenin çentik kısmından başlayarak yavaş yavaş ilk lif kadar ilerlemiştir. Yeni çatlak teşekkül ettikten sonra ani bir şekilde bir ilerleme göstermemiştir. Bundan sonra çatlağın ilerlemesi Şekil 15'de gösterildiği gibi üç ayrı mekanizma ile olmuştur. Bunlar sıra ile şöyledir.

i. Şekil 15 A'da görüldüğü gibi çatlak ilk lif ulaştıktan sonra periyodik zorlamanın etkisi ile lif-matris arasındaki bağ kopmaktadır. (15-A-4) Bu çatlak ucunun körelmesi olayıdır. Çatlak büyümesi ancak (15-A-5)'de görüldüğü gibi yeni bir çatlağın genişleyen çatlak ucundan tekrar çekirdeklenmesi ile mümkündür. Bu mekanizma genellikle deney başlangıcında (çatlak henüz küçük iken) ankastre numune üzerindeki yük az olduğu zaman görülmektedir. Bu nedenle daha ziyade küçük yüklü yorulmadaki (yorulma eğrisinin ikinci bölümünün sonları) çatlak ilerleme mekanizmasıdır. Bu fotoğraf 4'de görüldüğü gibi çatlak sol uçtaki çentikte balçanmış ve yavaş yavaş fiberlere doğru ilerlemiştir. Bu bölgede görülen ince ince çizgiler çatlağın her ilerlemesinden sonra durmuş olduğu bölgeyi göstermektedir. Çatlak ilk fibere ulaştıktan sonra ilerlemesi yine yavaş yavaş olmuş ancak bu ilerleme 30 defa büyütme fotoğraf 5'de daha ayrıntılı olarak görülebilmektedir. Aynı fotoğrafta elyafların çatlağın ilerlemesini durdurması sonucu biriken çeşitli hasarlar da görülmektedir.

Çatlağın büyümesi ile, (yükün değişmemesi halinde dahi,) moment kolu büyüdüğünden ara kesit üzerindeki gerilim artmaktadır. Daha büyük yükler altında (yorulma eğrisinin 2. bölümünün başlangıcı) çatlak ilerleme mekanizması Şekil 15 B ve C'de görüldüğü gibi olmaktadır. Şekil 15 B'de  $45^\circ$  yaklaşan çatlak henüz  $45^\circ$  ulaşmadan, önündeki lifin matris ile olan bağının kopmasına yol açmaktadır. Böylece malzeme içinde birbirine dik iki çatlak kesme kuvvetinin maksimum olduğu  $45^\circ$  lik doğrultu boyunca birleşmektedir. Şekil(15 B.3) Genişleyen çatlakta, yeni çatlağın çekirdeklenmesi, bu iki çatlağın birleşme yeri olup burada çekirdeklenen çatlak yine  $45^\circ$  lik (Şekil 15-B-4) bir açı altında kanala (kanal boyunca kesit küçük olduğundan) doğru yönelip tekrar kanal boyunca bir diğer fibere ilerleyecektir. Şekil(15-B-5) Çatlak bu şekilde ilerlediğinde kesit yüzeyinde fiberin bulunduğu noktanın bir kısmında bir çukur diğer kısmında ise bir çıkıntı oluşacaktır. Fotoğraf 6'da bu tür bir çatlağın ilerlemesi ile  $45^\circ$  etrafında oluşan çıkıntı ile diğer  $45^\circ$  etrafındaki çukur (daha az bariz) görülmektedir.

İlerleyen çatlağın önündeki  $45^\circ$  ile matris arasındaki bağlar, matrisce oranla (matrisdeki ufak hatalar nedeni ile) daha kuvvetli olması halinde, çatlak  $45^\circ$  ulaşmadan önce fiberin ilerisinde matris içinde Şekil 15.C'de görüldüğü gibi yeni mikro çatlaklar oluşarak bu kez periyodik zorlamaların etkisi ile her iki çatlak iki yönden  $45^\circ$  yaklaşacaktır. Her iki çatlağın birleşmesi ile ana çatlak ani olarak olacaktır. Fotoğraf 7'de fiberler etrafındaki daha koyu bölgeler matrisde bu şekilde oluşan ikinci çatlak alanlarını kanıtlamaktadır.

VII LSONUÇLAR

1. Cam takviyeli polyeſter malzemelerin yapımında daima malzemede bir miktar özür kalmaktadır. Bu özürlü bölgelerde hasar birikimi başlamaktadır.

2. Çekme deneylerinde numunede hasar genellikle matris içinde oluşmakta ve matris içinde oluşan çatlaklar bilahare birleşerek elyafların kopmasına neden olmaktadır.

3. Periyodik zorlamaların numuneye etkisi üç ayrı bölümde incelenebilmektedir. 100 adet yüklemeye kadar olan birinci kısımda yorulma ömrü ile periyodik zorlama arasında çok yakın ilişki bulunmamaktadır. Malzemenin yorulma kırılması daha çok matris ve elyafların zayıf bölgelerinde başladığından bu gibi bölgelerin numune içindeki nitelikleri malzeme hayatını etkileyen birinci dereceden etken olmaktadır. 10.000.000 yüklüme kadar olan ikinci bölgede ise yüklenme sayısının logaritması ile malzemeye uygulanan maksimum gerilme alanının logaritması arasındaki ilişki doğrusaldır. Bu bölgede yorulma kırılması matris de oluşan çatlakların ilerleyerek birbirleri ile birleşmesi ve yine bazı zayıf elyafların bu bölgede kopması ile olmaktadır. Matris çatlağının belirli boyuta ulaşması ile, v-f-matris arasında kesme hasarları yorulma kırılmasına katkıda bulunan diğer bir mekanizmadır.

10.000.000 yüklemenin üzerindeki yorulma bölümü olan üçüncü bölgede yük numunede mikro çatlak oluşturacak seviyede olmadığından numune periyodik zorlamalarla kırılmamıştır. İlk iki bölümde mikro çatlaklar yorulma hayatının başlangıcında oluşup sonradan ilerlemesine rağmen bu bölümde yük

mikro çatlakların oluşmasına olanak sağlamamıştır. Periyodik zorlamaların çok büyük bir kısmında ancak mikro çatlaklar çekirdeklenebilmiştir. Bu mikro çatlaklar bu bölümde büyüme ve birleşme koşullarını bulamadığından malzeme kırılmıştır.

4. Numune içine açılan 1 mm çapındaki delikler bölgesel gerilim yoğunluğu yaratmasına rağmen bunlar yorulma üzerinde fazla etkili olmamaktadır.

5. % 2 oranına kadar matris içine katılan katkı malzemeleri numunenin yorulma ömrünü etkilememiştir.

6. Cam elyaf ile takviye edilen polüester matrisin kırılma tokluğundaki büyük artış cam elyaflarının çatlakların açılmasını (kopan yüzeylerin birbirinden ayrılmasını) önlenmesinden ileri gelmektedir. Çatlak boyunca bulunan ve henüz kopmayan elyaflar çatlak kesiti boyunca yükün büyük kısmını taşımakta ve çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunu azaltmaktadır.

7. Akustik emisyon adet ve bunların şiddetlerinin ölçülmesi, kompozit malzemelerin yorulma ömürlerinin tayini ve malzemede oluşan hasarlar hakkında çok önemli bilgiler vermektedir.

8. Akustik emisyon ile malzemede oluşan hasarın matris, lif ve ara yüzey gibi hangi kritik noktalarda meydana geldiği öğrenilebildiğinden kompozit malzeme dizayn kriterleri bu teknik ile elde edilebilir.

## CAM TAKVİYELİ PLASTİKLERDE YORULMA

## Ö Z E T

Takviye edilmiş malzemeler üzerindeki çalışmalar devam ettiği sürece kompozitlerin yorulma tavırlarının incelenmesi üzerindeki araştırmalarda yoğunlaşmaya devam edecektir. Yorulma davranışları farklı iki malzemedен oluşan kompozitler tamamen değişik özellikte problemleride beraberlerinde getirmektedir. Örneğin düşük devirli (Plastik alandaki) yorulma için, sünekliği fazla fakat düşük dayanıklı metaller daha iyi netice vermektedir. Diğer taraftan yüksek dayanıklı fakat az sünek metaller uzun yorulma ömrü için tercih edilmektedir. Farklı özellikleri olan iki metalden bir kompozit üretildiğinde, bu kompozitin karakteri her iki bileşenden de geleceğinden, düşük ve yüksek devirli yorulmaya dayanıklı bir malzeme elde edilebilecektir. Bu, kompozitlerin en cazip yönlerinden birini teşkil etmektedir.

Kompozit malzemelerin yorulması olayında matris-elyaf ara yüzeyinin rolü çok önemli olduğundan, birçok araştırmacı bu konu üzerinde çalışmıştır. Malzemedeki çatlak ilerlemesi, ara yüzey özelliklerinin yorulma ömrü üzerine etkisi büyük olmaktadır. Ara yüzey bağlarının kolay kopması sağlandığında malzeme tokluğu arttığı halde matris elyaf arasındaki yük



transferleri olumsuz yönde etkilenerak 114in takviye edici özelliği kaybolmaktadır. Kompozit malzemelerin yorulması ile ilgili bilgi birikimine katkıda bulunmak amacı ile cam elyaf ile takviye edilmiş polüester numuneler üzerinde yorulma çalışmaları yapılmıştır. 10 herzlik bir yorulma frekansının uygulandığı deneylerde malzeme ömrü yüke bağlı olarak tayin edilmiş ve deney süresince malzemede oluşan hasarlar polarize ışık ve akustik emisyon tekniklerinden yararlanılarak takip edilmiştir. Yorulma ömrünün yüke bağımlılığı gerilim değerine göre üç ayrı eğilim göstermiştir. Malzemenin çekme dayancına yakın gerilmelerle malzeme yorulduğunda, yorulma ömrünün periyodik zorlama sayısına fazla bağımlı olmadığı görülmüştür. Bunun altındaki gerilmelerde ise yükleme sayısının logaritması ile maksimum gerilme alanının logaritması arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Kopma gerilmesinin % 30 undan küçük yüklerde ise malzemede yorulma olmamaktadır.

Yorulma hasarları, numunenin özürlü bölgelerinde başlıyarak daha çok matris içinde geliştiği görülmüştür.

## FATIGUE BEHAVIOUR OF COMPOSITE MATERIALS

### SUMMARY

As the studies on reinforced materials will continue, the fatigue behaviour of composites will become an area of intensive research. Composites made out of two materials with entirely different fatigue behaviour will bring its own problems with them. For example, for low cycle fatigue, low strength but high ductility metals are preferred. On the other hand for high-cycle fatigue, metals exhibiting high strength are superior. Composites composed of these two metals may exhibit superior fatigue characteristic both at low and high cycles, thus the true benefit of the composite becomes obvious.

The interface between fiber and matrix is as important as the components in determining the fatigue characteristics of composites. Interfacial failure may easily deflect a growing crack away from its preferred-growth direction. So, a weak interface may be advantageous when fatigue of composites is of prime concern. However the load transfer from matrix to fiber might then become impossible. The research work was undertaken to enlighten the fatigue phenomenon to improve the quality and performance of composites. Tensile-going zero-tension axial fatigue tests with a triangular waveform were performed mainly at 10 Hz. The apparent modulus of the sample, the acoustic emission counts and peaks, were continuously monitored during periodic cycling.

The damage accumulation was also detected under polarized light. The fatigue data was summarized in a plot of the logarithm of the stress amplitude against the logarithm of the number of stress cycles to failure. The fatigue response of the samples can be conveniently divided into three regions each corresponding to markedly different slopes on the plot. In the first region the stress level is close to UTS and the applied stress level seemed to be only slightly dependent upon cycling. For lower stresses a linear relationship was obtained between the logarithm of applied stress and the logarithm of the number of reversals. The specimens tested at stress levels below 30% of UTS did not fail.

During fatigue cycling first defects were formed in the matrix. It may be highly possible that microcracks are initiated from crazes.

## LITERATUR

1. G. Slayter, History of Composites, Sc., Am, 206 (1) 124, Jan. 1962
2. J.S. Hicks, Low Pressure Laminating of Plastics, Reinhold 1947
3. D.V. Rosato, Nonwoven Fibers in Reinforced Plastics, Ind. Eng. Chem. 54 (8) Aug. 1962
4. B. Parkyn and G.C. Hulbert, Twelve Years of Reinforced Plastics, Appl. Plast. London April 1959
5. L.J. Developments and Trends in Lightweight Composite Constraction, ASTM Special Technical Publication No 118, 1952
6. D.V. Rosato and G. Lubin. The application of Reinforced Plastics in Spacecraft , 4 th International RP Conference London, England, The British Plastic Federation Nov.25-27 1964
7. D.V. Rosato, Plastics in Missiles. Brit. Plastics 348-352 Aug. 1960
8. R.D. Deanin, Fiberglass-Reinforced Thermoplastics, SPE Jour. 8790 June 1967
9. N.T. Baldanza, Fiber Reinforced Plastics Applications, Molding Techniques and Performance data, Plastic Report 26, May 1966.
10. L.F. Coffin, Jr. Low cycle fatigue, App. Mat. Research Vol.1, No 3, 129-141, Oct. 1962
11. P.G. Forrest, Fatigue of Metals, Addison Wesley 1962
12. L.J. Broutman, Failure Mechanisms for filament reinforced plastics. Mod. Plast. 42 143-153 (Jan.1965)

13. T.R. Smith, M.J. Owen, Progressive nature of fatigue damage in reinforced plastics, Mod. Plast. 88 (5) 128 May 1959
14. L.J. Broutman and S. Sahu, Progressive damage of GRP during fatigue 24<sup>th</sup> Annual Tech. Conf. 1969 Soc. of Plastic Industry (11-D) 1-12.
15. M.J. Owen, Fatigue testing of fiber reinforced plastics, J. Comp. Mats. 4 354-361. Dec. 1970
16. J.W. Dall and L.J. Broutman, Frequency effects on the fatigue of glass reinforced plastics, J. Comp. Mats, 1 424-442, 1967
17. F.J. Mc. Garry and M.B. Desai, Failure Mechanisms in GRP, ASTM Bulletin No 239, 76 (1959)
18. Tsai, S.W., Adams. D.F., Doner D.R. Analysis of Composite Structures, (1966) NASA Contractor Rep. NASA GR-620
19. R. Dukes Mikrostress and mikrostrain distributions among fiber arrays in composites Ph.D. Thesis Univ. of Nottingham Nottingham England (1968)
20. M.J. Owen, R. Dukes Fatigue damage in GRP J. Strain Anal. 2 272-279 (1967)
21. M.J. Owen, T.R. Smith, R. Dukes, Damage Produced by tensile testing of CSM resin Laminates Plast. Poly in, 37 227-233 (1969)
22. A. Kelly, Strong Solids, Ox. Un. Press Chp. V. 1966
23. P.E. Throckmurtor, H.M. Hickman, M.F. Browne. Origin of stress failure in GRP Mod. Plast. 41, 2, 140-150 and 189-198 Nov. 1967
24. J.C. Outwater and D.C. West Stress distribution in the resin of reinforced plastics, Mod. Plast. 39, 1, 154-168 Sept. 1961.

25. W.C. Wake, R.H. Norman, Studies of Glas-Resin interface. 4 H. Int. Reinf. Plast. Conf. 1964 (BPF London)
26. W.J. Eakens. The effect of water on glass fiber-resin bonds ASTM 452-137-148 (1969)
27. G.A. Cooper, A.Kelly, The tensile properties of fiber reinforced materials, J.Mech. Phys. Sol. 15, 279-286 (1967)
28. T.W. Chou and A.S. Tetelman, Dislocation arrays and elastic-plastic cracks in a two phase system J.Com. Mats. 4 222-230 Apr. 1970
29. T.R. Smith, M.J. Owen, Int. R.P. Conf. 6th. Brit. Plast Fal. London paper 27.
30. M.J. Owen, R.G. Rose, Fatigue crack growth relationships for glass reinforced plastics Mod. Plast. 47 130-138, (1970)
31. M.J. Owen R.G. Rose, Res projects Cont. 3rd. Plast Inst. London. Plast. Polym. 40 325-330 (1972)
32. L.J. Broutman an F.J. Mc.Garry, Glass-Resin joint strength studies, 17th. Reinforced Plast Cont. 1962 Society of Plast. Ind. New York.
33. J.O. Outwater and G.H. Dewey, Pressure on objects embedded in crosslinked polymers, Mod. Plast. 37 142 (1968)
34. A. Matting and G. Ehrenstein, Tension Development and tension State at boundary surface of GRP, Int. Conf. Adhesion 1966(Joint Services, Non Metallic Materials Research board Nottingham)

35. K.H. Boller, Effect of Single Stress Change in Stress on fatigue life of Plastic Laminates Reinforced with unwoven E glass fibers, Tech. Rep. AF ML-TR- 66-270 Dec. 1966
36. M.A. Miner, J. Appl. Mech. JAMCA 12, A159-A164, 1945
37. K.E. Hoter, E.M. Olsen, A investigation of the fatigue and creep Properties of Glass Reinforced Plastics for primary air craft structures, AD-652415 IIT Research Inst. Chicago III. April 1967
38. L.J. Broutman, S.Sahu, A new theory to predict Cumulative fatigue damage in FRP. Ann. Tec. Conf. SPI, 24<sup>th</sup>. Washington D.C. Sect. 11-D (1969)
39. L.J. Broutman, S.Sahu, Reprint, 21d ASTM Conf. Comp Mater. Testing and Design 2nd. Anaheim Calif. (1971)
40. M.J. Owen and R.J. Howe, Ind. R.P. Conf. 8th. Brit. Plast. Fed. Brighton Engl. (1972)
41. F.J. Mc.Quancy Fundamental aspects of Fibre reinforced composites, eds R.T. Schwartz and H.S. Schwartz, Interscience, 63 (1968)
42. M.Fuwa, A.R. Bunsell, B. Harris. Acoustic Emission and fatigue of reinforced plastics, composites-standards Testing and Design IPC Sciences Technology Press. 77-79 (1964)
43. O.A. Ankara, and B. Harris. The fatigue behaviour of some GRP., School of Applied Science, Univ. of Sussex. Brighaam, England. (1975)
44. M.E. Takehana, I Kimpara, Proc. International Conf. on Mech. Behaviour of Mats. Soc. Mat. Sci. Japan Vol.5, 156 (1972)

45. K.H. Boller, Mod. Plast. 34 163-86 (1957)
46. M.J. Owen, R. Dukes, T.R. Smith. Fatigue Properties of FRP Proc. 23rd. Reinforced Plast. Conf. Section 9B (New York SPI) 1968
47. M.J. Owen and MF Found, Faraday Spec. Discuss Chem. Soc. 2 77-89 1972
48. M.J. Owen and PT Bishop Fatigue of Glass reinforced plastics. J.Phys. D. Appl. Phys. 5, 1621-36 (1972)
49. M.J. Owen and PT Bishop, Fatigue properties of Glas reinforced plastics containing a stress concentrator. J.Phys. D. Appl. Phys. 6 2057-2064, (1973)
50. M. Fuwa, A.R. Bunsell ve B. Harris, Composites Standards Testing and Design. IPC Science Tech. Press. 77, (1974)
51. M. Fuwa, A.R. Bunsell ve B. Harris. An Evaluation of Acoustic Emission Techniques Applied to Carbon Fiber Composites, J.Phys. E.Scientific Instruments (1975)
52. J. Becht, H.J. Schwalbe, J. Eisenblaetler. Acoustic Emission as an Aid for Investigating the Deformation and Fracture of Composites, 245, (Oct. 1976)