

173579

HELİSEL OLARAK TAKVİYE EDİLMİŞ KOMPOZİT MALZEME BORULARINDA
YÜKLEME BİÇİMİNE GÖRE TAKVİYE MALZEMESİNİN OPTİMUM HELİS AÇISI

EGE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ FAKÜLTESİNE
DOKTORA TEZİ OLARAK SUNULMUŞTUR.

Hazırlayan : Onur SAYMAN

173579

Yöneten : Doç.Dr. Ekrem PAKDEMİRLİ

Eylül / 1975

T Ü R K İ Y E
B İ L İ M S E L v e T E K N İ K
A R A Ş T I R M A K U R U M U
K Ü T Ü P H A N E S İ

Ö n s ö z

Bu çalışmada, helisel olarak takviye edilmiş kompozit malzeme borularında yükleme biçimine göre takviye malzemesinin optimum helis açısının tayini teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Teorik ve deneysel neticelerin birbirlerine uydukları müşahede edilmiştir.

Doktorayı yöneten Doç.Dr.Ekrem Pakdemirli'ye ve jüride bulunan Prof.Kemal Karhan'a, Prof.Selim Palavan'a, Doç.Dr.İzak Kaya'ya, Doç.Dr.Özdemir Bengisu'ya teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Ö Z E T

Çalışma esas olarak, helisel olarak cam elyafı ile takviye edilmiş polyeşter boruların kompleks gerilme hallerindeki davranışlarını çeşitli kırılma teorileri ışığı altında incelemekten ibarettir. Takviye de kompleks gerilme hallerinde, optimum helis açılıarı hesabı, kompozit malzemelerin mukavemet özelliklerinde Pakdemirli (13) ve Holliday (11) in kullandığı model esas alınarak yapılmıştır.

Kompozit malzemeden üretilmiş boruların kompleks gerilme hallerindeki, maksimum distorsyon enerjisi teorisine uyduğu deneyler sonucunda bulunmuştur.

İnce cidarlı kompozit boruların çeşitli yükleme durumlarına göre optimum helis açısı teorik hesaplamaları deney sonuçları ile kabul edilebilir mertebede farklılıklar göstermiştir.

Farklılıklar esas olarak kompleks gerilme halinde, akmanın maksimum zorlanma enerjisi teorisine uyduğu kabulünden ileri gelmektedir. Çalışma içinde verilen deney neticeleri ile teorik bulgular bu farkı göstermektedir.

Takviye edilmiş ince cidarlı borular basit çekme, ve iç basınca tabi tutulduklarında çapraz (birbirine dik iki yönde) takviye için optimum helis açısının 0° — 90° olduğu bulunmuştur. Borular sadece burulma momentine tabi tutulduklarında optimum helis açısının 45° olduğu görülmüştür.

Boruların sadece aksenal yük (basit çekme ve basma) taşımaları halinde teorik ve deneysel neticelerin birbirine tam uyduğu bulunmuştur.

İçindekiler

1- Giriş	
a- Genel	1-2
b- Çalışmanın amacı	2
2- Teorik inceleme	
2.1- Durum tesbiti	2-8
2.2- Modelin kurulması	8-32
2.3- Modelin irdelenmesi	32-41
3- Deneysel çalışma	
3.1- Boru imalâtı ve tekniği	41-49
3.2- Deney standı	49-55
3.3- Deneysel çalışma neticeleri	55
4- Sonuç	
4.1-Deneysel ve teorik neticelerin karşılaştırılması	55-59
4.2-Deneylerin kritiği	59-60
4.3-Özet ve tavsiyeler	60-61
Kaynaklar	62-63

G İ R İ Ő

1. d. G e n e l

Takviye edilmiş (reinforced) kompozitler iki kısımdan meydana gelirler; amorf faz ve takviye malzemesi. Amorf faz ekseriya plastik malzemeden olur. Bu kısma plastik matrix veya sadece matrix denilir. Takviye malzemesi küresel, silindirik ve lif şeklinde olur. Sadece bir kompozitin içinde tek bir çeşit takviye malzemesi olacağı gibi birden fazla da olabilmektedir.

Kompozit malzemeler tarihin ilk çağlarından beri kullanılmaktadır. Kireç + Kum, kerpiç (saman + toprak) bunlara misâl teşkil eder. Kerpiçte takviye malzemesi olarak saman ve bazan çok yüksek inşaatlar için deve kılı küçük küçük ($2\frac{2}{3}$ cm boyunda) kesilerek kullanılmıştır. Yakın zamanlarda inşaatlarda çimento ile demir fazla miktarda uygulanmaya başlanmıştır. Bu da bir çeşit kompozittir.

Bugün kullanılan kompozitlere misâl, fiberglas (cam fiber + rezin), tungsten molibden takviyeli alüminyum, karbon takviyeli plastikler v.s...

Bilhassa fiberglas kompozitler fazla miktarda uygulama sahası bulmuştur. Dişli sanayinde dahi kullanılmaktadır. Fiberglasdan imâl edilen dişliler dişiş makinelerinde, arabaların kam mili dişlisinde kullanılmaktadır. Bunların mukavemet/özgül ağırlık oranı çok büyüktür. Dolayısıyla fazla ağırlık istenmeyen ve fazla mukavim olması gereken yerlerde çelik ve benzeri metallerin bir kısım yerini almıştır.

Teknolojinin istediği malzemelerin mevcut malzemelerden elde edilmesi zorlaşmıştır. Artık eski malzemeler bizim istediğimiz şartları sağlayamamaktadır. Bundan dolayı teknoloji kompozit malzemeye kaymıştır.

Purdy (18) mükemmel üretilmiş bir kısım kompozitlerin esas avantajlarını şu şekilde sıralamıştır.

a- Kullanılan metallerle kıyaslandığında daha yüksek bir yorulma mukavemeti,

- b- Yüksek elastik gerilme bölgesi ve elastisite modülü,
- c- Düşük ısıl genleşme katsayısı (grafit + rezin v.s. için).

Yukarıda görülen bir kısım mukavemet yönünden avantajlar yanında, kompozit malzemeler teknolojik yönden de bir takım avantajlara sahiptir. Meselâ kolay bir döküm, kolay kalıp hazırlama, kolay işleme gibi.

Bu ve buna benzer özelliklere haiz mevcut elementler tabiatta sınırlıdır. Halbuki bu özelliklere haiz kompozitleri heran türetebiliriz. Bu sebeplerden dolayı uygulama sahası devamlı olarak artmaktadır.

1. b- Çalışmanın gayesi

Gaye: Cam fiber takviyeli polyester boruların elastisite teorisi, plastisite teorisi ve teknolojik yönünden incelenmesi olarak tarif edilebilir.

Elastisite teorisi yönünden, ince cidarlı borularda küçük deformasyonlar için bulunan gerilme durumlarının pratik tahkiki şeklinde olup bunun için de ince levha problemi ve uzun silindir problemi için yapılan kabullerin kontrolü.

Plastisite teorisi yönünden, mevcut akma teorileri kuvvetlendirilmiş malzeme-ye uygulanabilir mi? uygulanamazsa bu tip malzemeler için yeni bir akma teorisinin kurulabilme imkânları.

Teknolojik yönden, ince cidarlı kompozit borunun imalâtı, kolay ve düzgün olarak λ helis açısı ile takviye malzemesinin sarılması, polyester ve cam lifi gibi malzemelerin mühendislik değerlerinin ölçülmesidir.

Teorik İnceleme

2.1- Durum tesbiti

Kuvvetlendirme malzemeleri ile kompozit teşkil edilmesi üzerine ilk ilmi

araştırmalar Bruggemann (1,2) ve Godier (3) tarafından yapılmıştır. Kerner (4) alışmayı genelleştirmiştir. Kerner küresel takviye malzemesi ile kompozitler üzerinde çalışarak şu formülü vermektedir.

$$\frac{G_c}{G_m} = \frac{\sum' \frac{G_f V_f}{(7 - 5 v_m) G_m + (8 - 10 v_m) G_f} + \frac{V_m}{15 (1 - v_m)}}{\sum' \frac{G_m V_f}{(7 - 5 v_m) G_m + (8 - 10 v_m) G_f} + \frac{V_m}{15 (1 - v_m)}} \quad (1)$$

Burada, G_c kompozitin, G_f kuvvetlendirme (takviye) malzemesinin, G_m matrixin kayma modülleri, V_f kuvvetlendirme malzemesinin birim hacime düşen yüzde miktarı (hacimsel konsantrasyon), V_m matrixin, birim hacime isabet eden yüzde, v_m matrixin poisson katsayısıdır. \sum' m hariç diğerk indeksli terimlerin değerlerinin toplamını göstermektedir. Bu netice Bruggemann ve Goodier'inkine benzerdir. Benzer metodlar Reiner (5) ve Hashin (6) tarafından kullanılmıştır.

Hashin rijit küresel takviye malzemeleri ile matrixi takviye ederek şu neticeleri çıkarmıştır

Bulk modülü için:

$$\frac{K_c}{K_m} = 1 + 3 \left(\frac{1 - v}{1 + v} \right) V_f \quad (2)$$

Kayma modülü için:

$$\frac{G_c}{G_m} = 1 + \frac{15}{2} \left(\frac{1 - v}{4 - 5v} \right) V_f \quad (3)$$

Paul bulk ve kesme modülleri için ise şu formülleri vermiştir.

$$\frac{1}{K_u} = \sum_{r=1}^n \frac{V_f}{K_f} \quad (4)$$

$$K_x = \sum_{r=1}^n K_f V_f$$

Burada K_u ve K_x değerleri K_m , K_f ve V_f için bulk modüllerinin alt ve üst limitlerini vermektedir; n faz sayısını göstermektedir. Bu formüle göre, kompozit malzeme iki fazdan teşekkül ediyorsa $K_{\bar{u}}$ (üst) ve K_a (alt) bulk modülleri

$$\frac{1}{K_{\bar{u}}} = \frac{1-c}{K_1} + \frac{c}{K_2} \quad (4.1)$$

$$K_a = (1-c) K_1 + c K_2 \quad (5.1)$$

dir; c , takviye malzemesi için "hacimsel konsantrasyon"dur.

Hashin ve Shtrikman (7) varyasyonel metodlar kullanarak daha dar sınırlar içinde alt ve üst limit değerleri hesap ettiler . Bu metod homogen ve izotropik plastik malzemeler için olup fazların topolojisini gözönüne almamaktadır. Bulk ve kayma modülleri için alt limit sınır değer olarak şu formüller ortaya çıkmıştır.

$$\frac{K_c}{K_m} = \frac{(K_f - K_m) V_f}{1 + \left(\frac{3 K_f - K_m}{3 K_m + 4 G_m} \right) V_m} \quad (6)$$

$$\frac{G_c}{G_m} = \frac{(G_f - G_m) V_f}{1 + \frac{6}{5} \left[\frac{(G_f - G_m) (K_m + 2 G_m)}{G_m (3 K_m + 4 G_m)} \right] V_m} \quad (7)$$

Üst limit değerler m ve f indislerinin yer değişimi ile elde edilirler. Elde edilen bu değerlerin grafiği şu şekildedir. Grafik(1).

Hill (8) silindirik bir takviye malzemesi ile kuvvetlendirilmiş kompozitlerde elastisite modülü için şu formülü vermiştir:

$$E_c = cE_f + (1 - c) E_m + \frac{4c (1 - c) (v_f - v_m)^2}{\frac{c}{K_m} + \frac{1 - c}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \quad (8)$$

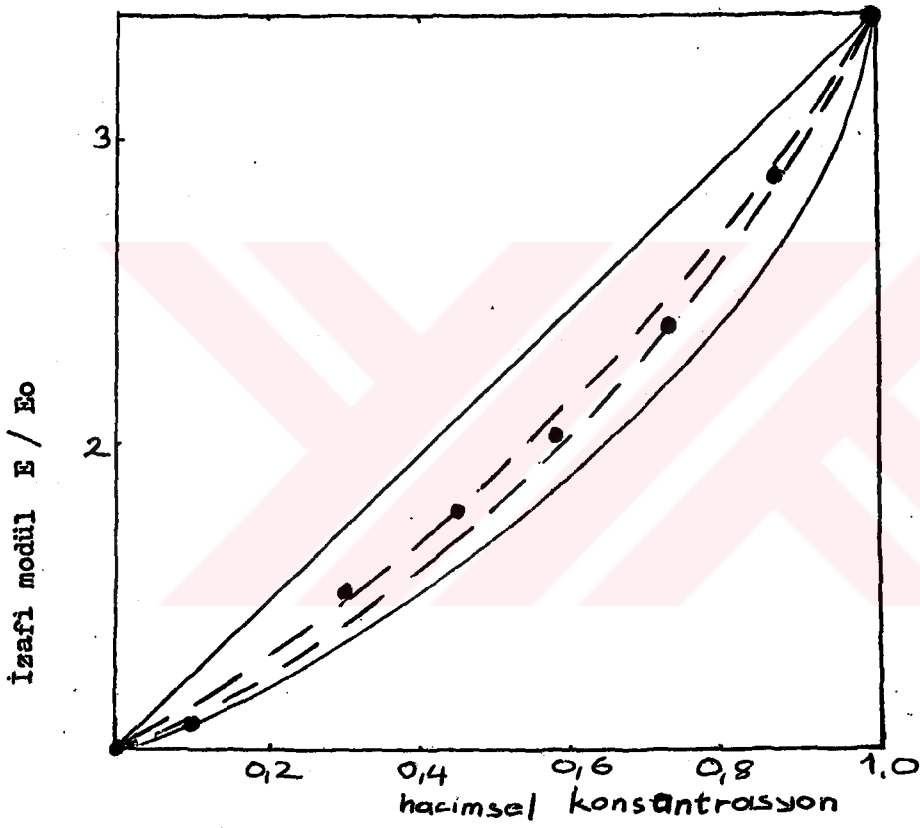
Burada c , E_f , E_m sırasıyla kompozitin, takviye malzemesinin (fiberin) ve matrixin elastisite modülleridir; v_f , v_m sırasıyla fiberin ve matrixin poisson katsayılarıdır.

Plastik matrix küresel köpükler ihtiva ederse, üstteki denklemler pratik netice vermezler. Bu durumda alt limit sıfıra gider. Elastik sabitler üzerinde fazlardaki boşlukların tesiri Mackenzie (9) tarafından araştırılmıştır. Her boşluğun etrafının bir hakiki malzeme (faz) tarafından çevrildiği kabulü ile şu denklem verilmektedir.

$$1 - \frac{G_c}{G_m} = \frac{5 (3 K_m + 4 G_m)}{9 (K_m + 8 G_m)} (V_p + A V_p^2) \quad (9)$$

Burada A bir sabit ve V_p hacim gözenek oranı. Coble ve Kingery (10) tarafından A ampirik olarak hesaplandı.

White ve Vlack (17) sinterize edilmiş nikel köpükleri polyester reçine içine sızdırdı. Böylelikle 3 fazlı bir kompozit meydana getirildi. Elastisite modülünü



Grafik 1. Elastisite modülünün üst ve alt limiti (Wolfram-Kobalt alaşımı için)

- Sınırlar (Paul)
- - - - - Sınırlar (Hashin)
- Deneysel netice

deneylerden gözlenen değer ile hesaplanacak şekilde ampirik bir formül verilmiştir. Bu

$$E_{gözlenen} = (1 - 1,9 f_p + 0,9 f_p^2) E_k \quad (10)$$

Burada f_p hacim gözenek oranıdır.

Takviye malzemesi olarak pratikte ekseriya uzun silindirik lifler (fiberler) kullanılmaktadır. Biz bu araştırmamızda bu tip takviye malzemesi kullanmış bulunuyoruz.

Fiberlerin matrix içindeki durumları üzerinde Holliday (11) şu klâsik kabul-leri yapmıştır:

- a- Fiberler gerilme eksenine paraleldirler ve biri diğerine değmez.
- b- Fiberler aynı boyda ve etrafları matrix ile kaplıdır.
- c- Fiberler ve matrix Hooke kanununa uyacak şekilde zorlanırlar.

Pakdemirli (13) modeli daha genişleterek teorik olarak elastisite modülünü değişik fiber oriyantasyonları ve rezinler için hesaplanmış olup çalışmadaki kabuller kısaca şunlardır:

- a- Herbir fiber bir düzlem içindedir ve bütün düzlemler birbirlerine paraleldirler.
- b- Herbir faz yalnız başına izotropik halde iken, kendi aralarında anizotropiktir.
- c- Zorlanma sahası ne homojen ve ne de süreklidir.
- d- Fiberlerin boyunun çapa oranları çok büyüktür; böylece fiberler yalnız aksenal yönde çeken kuvvetlerle zorlanmalıdırlar.
- e- Matrix gerilim olabilme kapasitesine sahiptir.

Bu kabulleri gördükten sonra, şimdi teorik modelin kurulmasını görebiliriz.

2.2.1- Modelin Kurulması

Önce kompozitin hesaplamalara esas olacak bir hacim elemanının tarifini verelim. Bu tarif literatürde şöyle yapılmaktadır. Kompozitin birim hacim elemanı: Kompozitin fiziksel ve diğer özelliklerine haiz ve her istikametteki fiziksel sabitler kompozitin aynı doğrultudaki fiziksel sabitlerinin aynısıdır; veya kompozitin fizik özelliklerine haiz en küçük hacim elemanı olarak ifade etmek de mümkündür.

İki fazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini bulmak için yukarıda tarif edilen birim hacim elemanı içinde fiber dağılımını temsil edecek bir $\varphi(\theta)$ fonksiyonu ile matrixin dağılımını gösetercek $\varphi^*(\theta)$ fonksiyonu tarif edelim. Burada bütün fiberlerin aynı düzlem içinde kalmalarından dolayı eksenlerinin belli bir istikametle yaptıkları açığı vermek kâfidir. Bir başka deyimle, bu fonksiyonlar sadece θ gibi bir serbest değişkenlidir. Bu, tarif edilen dağılım fonksiyonları şu özelliklere sahiptirler:

$$\int_0^{\pi} \varphi(\theta) d\theta + \int_0^{\pi} \varphi^*(\theta) d\theta = 1$$

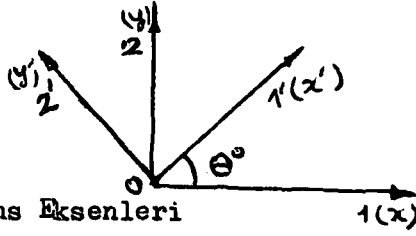
veya

$$\int_0^{\pi} [\varphi(\theta) + \varphi^*(\theta)] d\theta = 1 \quad (11)$$

Bu fonksiyonlar aynı zamanda fiberlerin oriyantasyon istikametine dik doğrultulardaki sayıları ile de orantılıdır.

Tatbikatlarda daha çok, kompozitin kalınlığı diğer boyutlarına nazaran küçük olduğundan sistem düzlem gerilme hali olarak incelenmektedir. Bu kabul hesaplarda kolaylık sağlamakta ve izotropik olmayan ortamın müstakil mukavemet sabitlerinin sayı-

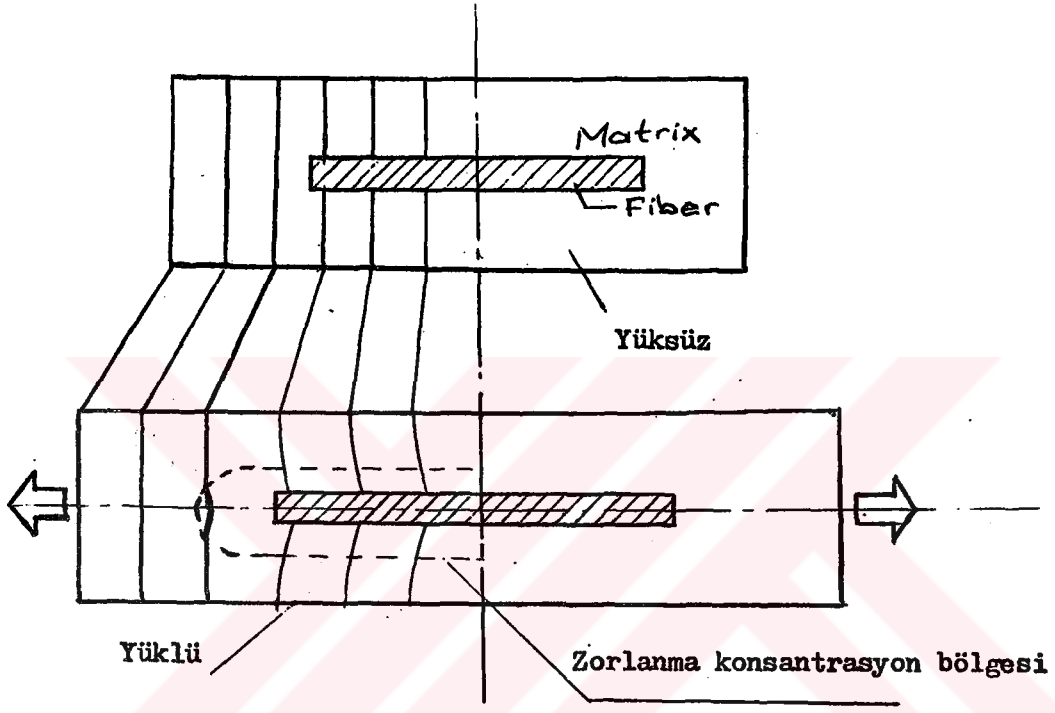
sını 6'ya indirgemektedir. Şimdi yukarıdaki bilgilere göre bir lifi matematik olarak gösterelim. Şekil 1 kompozit içinde 1 ci eksene θ° açısı ile oriyente edilen bir fiberi gösteriyor.



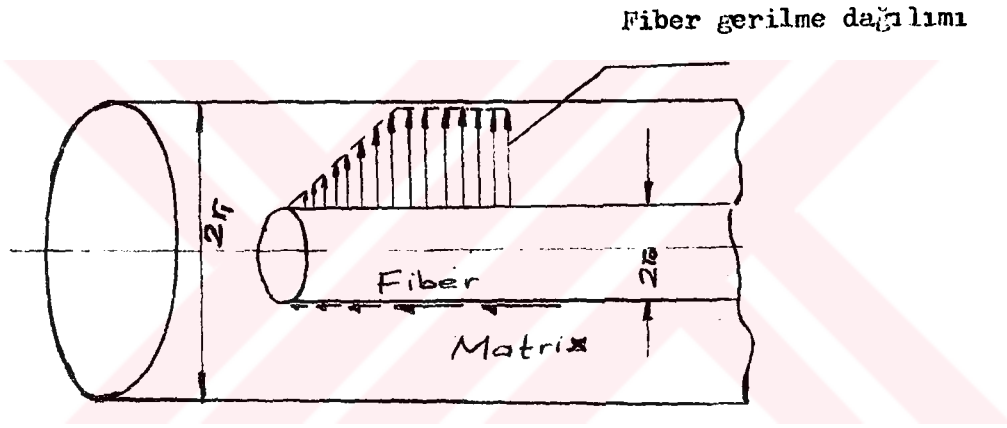
Şekil: 1 Referans Eksenleri

G_{ij} ve E_{ijxy} düzleminde gerilme ve zorlanma tansörleri olsunlar. Birinci eksenle θ° açısı yapan herhangi bir fiberin ekseni boyunca zorlanması $E_{rs} = a_{ij} e_{js} E_{ij}$ (12) dir. Şekildeki fiber için $r = s = 1$ ve $i, j = 1, 2$ sınırları içinde değışeceğı tabiidir.

Lifler için olan bu zorlanma beraber bulunduğu matrix için geçerli değildir. Çünkü, zorlanma alanı homojen değildir. Kristallit ile matrix arasındaki zorlanma alan farklılıklarını Ψ fonksiyonu ile gösterilebilir. Ψ "zorlanma iletim fonksiyonu" diye adlandırılır. $\Psi = \Psi(E_m, E_f, G_m, G_f, l, r)$ dir Burada E_m matrixin elastisite modülü, E_f fiberin elastisite modülü, G_m matrixin kayma elastisite modülü, G_f fiberin kayma elastisite modülü, l fiberin boyu ve r fiberin ortalama yarıçapını göstermektedir. Ψ Bu parametrelerin fonksiyonudur. Her iki alandaki gerilmeler tansörel büyüklük göstermektedir, bunların farklılıklarını gösteren Ψ 'nin de bir tansörel büyüklük olması gerekmektedir. Fakat hesaplarda kolaylık olması için Ψ skaler bir kemiyet olarak alınmıştır. Matrix içine silindirik bir fiber yerleştirerek ve bu fiberi yükliyerek Ψ 'nin varlığı görülebilir. Matrixe tatbik edilen bir zorlanma fibere aynı şekilde iletilmemektedir. Şekil (2) matrix içinde bulunan bir fibere zorlanma iletimini göstermektedir. Fiber içinde doğan gerilmelerin uç noktadaki dağılımını Pakdemirli (13, 20) lineer olarak incelemiştir. Bu artış lineer değil de parabol, hiperbol, elips ve buna benzer eğriler de olabilirdi. (Şekil: 3)



Şekil: 2 Matrix içinde bulunan bir fibere zorlama iletimi



Şekil : 3 Silindirik bir matrix içinde bulunan silindirik bir fibere gerilme iletimi.

silindirik bir matrix içinde bulunan silindirik bir fibere gerilme iletimini (iki uçta lineer halde) göstermektedir. Gerilme dağılımı bir müddet sonra σ gerilmesine eşit olmakta (ortalarda) ve iki alan arasındaki fark da sıfır olmaktadır. Demek ki matrixe tatbik edilen bir gerilme aynen fibere iletilmemektedir. Fiber uçlarında matrix ile fiber arasındaki zorlanma farkı maksimum ortalarda ise (yukarıdaki hâl için) sıfır olmaktadır.

Macloughlin (12) matrix içine gömülü lifi iki uçta yükliyerek foto elastisite deneyleri yapmıştır. Deneylerde lif uçlarında fazla miktarda kayma gerilmesi yığılması ve dolayısıyla fazla miktarda zorlanma olduğunu müşahade etti. Şekil (4) liflere gelen kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Bu tecrübe zorlanma alanının üniform olmadığını açıklığa kavuşturmuştur. ψ "zorlanma iletimi katsayısı"; eğer iki farklı yüzeyin birleştiği ortamda doğan şekil değiştirme mikro seviyede ise büyüktür. Eğer iki ortamın birleştiği yerde makro seviyede bir şekil değiştirme farklılığı mevcut ise ψ küçüktür. Buna misâl, metal fiberlerin plastik matrix içindeki durumlarıdır. Eğer metal fiber ve plastik matrix birbirlerine tam yapışmamış iseler, sisteme tatbik edilen gerilme tam olarak fibere nakledilmeyecektir. Dolayısıyla fiber için $\epsilon'_{rs} = \psi \epsilon_{rs}$ dir (14) Yani fiber içindeki zorlanma dağılımı matrix içindeki zorlanma dağılımından şiddet olarak küçüktür. Netice olarak matrix ve fiber için gerilmeler

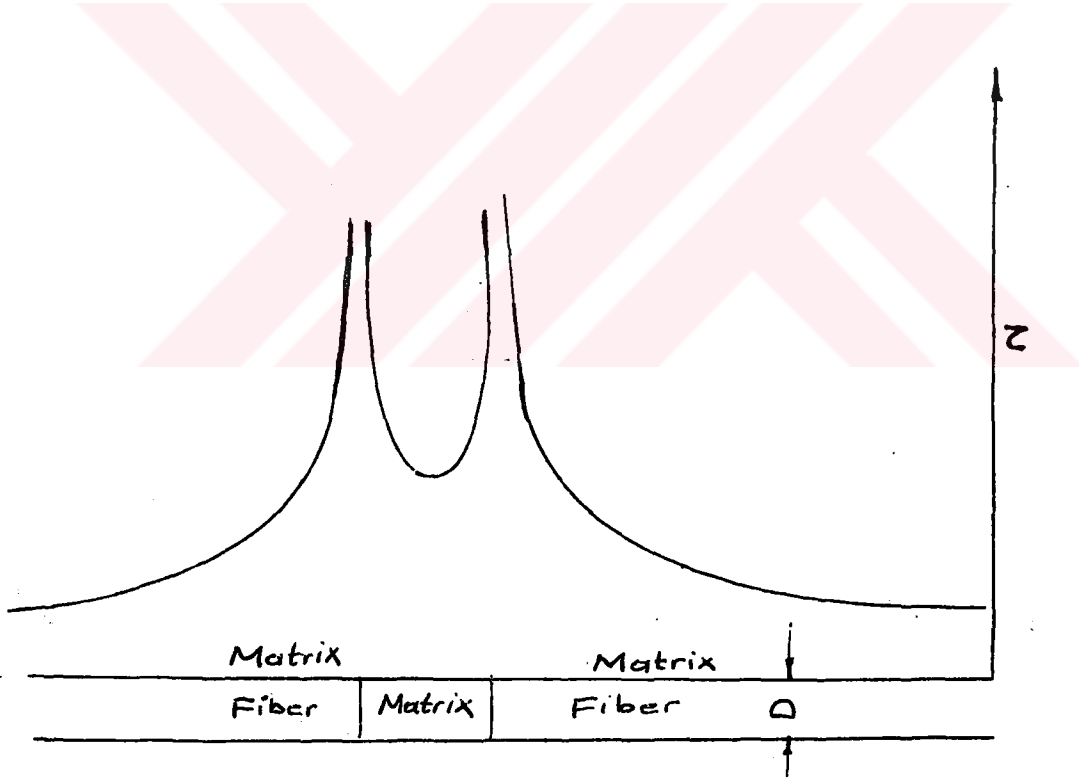
Matrix için $E_m \epsilon_{rs}$

Fiber için $E_f \epsilon'_{rs} = E_f \psi \cdot \epsilon_{rs}$

(15)

olur.

Daha önce fiberlerin ekseni boyunca zorlanmaların hesabını görmüştük. 1 ve 2 yani (x, y) eksenleri doğrultularında netice gerilmeler şu şekilde bulunur.



Şekil :4 Fiber sınırlarında ve uçlarında τ kayma gerilmesinin değişimi.

$$\sigma'_{kn} = \int_0^\pi (\psi E_f \epsilon_{rs} \varphi(\theta)) a_{1k} a_{1n} d\theta \quad (16)$$

$$k, n = 1, 2$$

Fiber için (1) işareti kullanılmıştır. Genelleştirilmiş Hooke kanunu ile Love notasyonu kullanılırsa, burada gerilmeler zorlanmalara şu formüllerle bağlıdır.

$$\begin{aligned} X_a &= C_{ab} \cdot e_b & a, b &= 1, 2, \dots, 6 & (17) \\ X_1 &= \sigma_{11} & , & & X_2 &= \sigma_{22} & , & & X_3 &= \sigma_{33} \\ X_4 &= \sigma_{13} & , & & X_5 &= \sigma_{23} & , & & X_6 &= \sigma_{12} \text{ dir.} \end{aligned}$$

Zorlanma içinde şu matris kullanılır.

$$\begin{aligned} e_a &= S_{ab} \cdot X_b & a, b &= 1, 2, 3 \dots 6 & (18) \\ e_1 &= \epsilon_{11} & , & & e_2 &= \epsilon_{22} & , & & e_3 &= \epsilon_{33} & , & & e_4 &= 2\epsilon_{13} \\ e_5 &= 2\epsilon_{23} & \text{ ve } & & e_6 &= 2\epsilon_{12} & \text{ yi göstermektedir.} \end{aligned}$$

C_{ab} ve S_{ab} simetrik matrislerdir. Düzlem gerilme halinde (e) matrisinde genel halde 6 sabite vardır (simetriden).

Matrix, yalnız başına homojen ve izotropik farzedildi. Kompozit içindeki matrix için de homojen ve izotropik olduğu farzedildi. Bu durumda, düzlem gerilme halinde matrix içindeki asal zorlanmalar

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu \sigma_2] \\ e_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu \sigma_1] \\ e_6 &= \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_6 \text{ dir.} \end{aligned} \quad (19)$$

Bu denklemlerden σ_1, σ_2 ve σ_6 çekilirse

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-v^2} (e_1 + v e_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-v^2} (e_2 + v e_1) \end{aligned} \quad (20)$$

elde edilir. $\sigma_6 = \frac{E}{2(1+v)} e_6$

Buradan,

$$* \text{Cab}_= \begin{array}{|c|} \hline \frac{E}{1-v^2} \quad \frac{v E}{1-v^2} \quad \dots \dots \dots \\ \hline \frac{v E}{1-v^2} \quad \frac{E}{1-v^2} \quad \dots \dots \dots \\ \hline \cdot \quad \cdot \quad \dots \dots \dots \\ \hline \cdot \quad \cdot \quad \dots \dots \dots \\ \hline \cdot \quad \cdot \quad \dots \dots \dots \\ \hline \cdot \quad \cdot \quad \dots \dots \dots \frac{E}{2(1+v)} \\ \hline \end{array} \quad (21)$$

yazılır.

Noktalar sıfır veya ihmal edilebilir değerde terimleri göstermektedir.

Matrix tarafından alınan gerilme mitaları ise

$$\begin{array}{|c|} \hline x_1 \\ \hline x_2 \\ \hline x_3 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \frac{1}{1-v^2} \quad \frac{v}{1-v^2} \quad \cdot \\ \hline \frac{v}{1-v^2} \quad \frac{1}{1-v^2} \quad \cdot \\ \hline \cdot \quad \cdot \quad \frac{1}{2(1+v)} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \int_0^\pi e_1 E_m \psi^*(\theta) d\theta \\ \hline \int_0^\pi e_2 E_m \psi^*(\theta) d\theta \\ \hline \int_0^\pi e_6 E_m \psi^*(\theta) d\theta \\ \hline \end{array} \quad (22)$$

olmaktadır.

Şüphesiz izotropi olması halinde yukarıdaki denklem eksenlerin ötelemesi veya dönmesi halinde invarianttır (değişmezdir).

Fiberlerin katsayıları ise (12), (16), (17) denklemlerin kombinezonundan hesaplanmalıdır. Ve denklemler birleştirilirse, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$X'_{kn} = \int_0^{\pi} \psi E_f \varphi(\theta) a_{i1} a_{j1} e_{ij} a_{ik} a_{in} d\theta \quad (23)$$

$k, n = 1, 2$

Fiberin terimleri düzenlenirse

$$\begin{aligned} C'_{11} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^4 d\theta \\ C'_{12} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^2 a_{21}^2 d\theta \\ C'_{16} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^3 a_{21} d\theta \\ C'_{21} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^2 a_{12}^2 d\theta \\ C'_{22} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{21}^2 a_{12}^2 d\theta \\ C'_{26} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{12}^2 a_{11} a_{21} d\theta \\ C'_{66} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{12}^2 a_{11}^2 d\theta \quad \text{elde edilir.} \end{aligned} \quad (24)$$

Düzlem kartezyen koordinatlar için $a_{12} = a_{21} = \sin\theta$ ve $a_{22} = a_{11} = \cos\theta$ dir.

Kompozit için bu iki matris toplanır bu zaman:

$$X_k = C_{kr} e_r = (C'_{kr} + C''_{kr}) e_r \quad (25)$$

Her ikisi için bulunan bu değerler beraberce kombine edilirse, gerilme matrisinin katsayıları şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1}{1-\nu^2} E_m \int_0^{\pi} \varphi^*(\theta) d\theta + E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^4 d\theta \\ C_{12} &= \frac{\nu}{1-\nu^2} E_m \int_0^{\pi} \varphi^*(\theta) d\theta + E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^2 a_{21}^2 d\theta \\ C_{16} &= E_f \int_0^{\pi} \psi \varphi(\theta) a_{11}^3 a_{21} d\theta \end{aligned} \quad (26)$$

$$C_{22} = \frac{1}{1-\nu^2} E_m \int_0^\pi \psi^*(\theta) d\theta + E_f \int_0^\pi \psi \psi(\theta) a_{12}^2 a_{21}^2 d\theta$$

$$C_{26} = E_f \int_0^\pi \psi \psi(\theta) a_{12}^2 a_{11} a_{21} d\theta$$

$$C_{66} = \frac{1}{2(1+\nu)} E_m \int_0^\pi \psi^*(\theta) d\theta + E_f \int_0^\pi \psi \psi(\theta) a_{12}^2 a_{11}^2 d\theta$$

Mukavemette kullanılan terimler ile kompozitin elastisite ve kayma modülleri şunlardır:

$$E_x = C_{11} \lambda \quad (27)$$

$$E_y = C_{22} \lambda$$

$$G_{xy} = C_{66}$$

$$\text{Burada } \lambda = 1 - \nu_{12} \nu_{21} \quad \nu_{12} = C_{12}/C_{11}, \quad \nu_{21} = C_{12}/C_{22}$$

$$\text{dir. ve } \lambda = 1 - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{11} C_{22}} \quad \text{olarak bulunur.}$$

$$E_x = C_{11} \left[1 - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{11} C_{22}} \right] \quad (28.a) \quad E_y = C_{22} \left[1 - \frac{C_{12} C_{21}}{C_{11} C_{22}} \right] \text{ dir. } (28.b)$$

Böylece kompozitin istikamete bağlı mukavemet sabitleri elde edilmiş oldu.

Kompozit malzemelerde fiberler çeşitli şekilde dizilirler. Leno (14)

bir takviyede aynı fiber hacim yüzdesini mahafaza ederek, fiberlerin dizilmesinin değişmesiyle elde edilen kompozit malzemelerin farklı mukavemet değerlerinde olduğunu göstermişlerdir. Kompozitler fiberler vasıtasıyla çeşitli şekilde takviye edilirler. Aşağıda bazı takviye şekilleri incelenmiştir.

2.2.2. Aynı İstikamette takviye

Takviyenin bu tipinde bütün fiberler birbirlerine paraleldirler ve birinin diğerine değmediği farzedilmektedir. Bu farzetmeden dolayı dikine kesitler dairesel ve lif çaplarına eşittir. Şekil (5) da aynı aynı istikamette takviyenin dikine kesiti görülmektedir.

Fiberlerin "hacimsel konsantrasyonu" KLMN içinde bulunan fiber alanının toplam alana bölünmesiyle bulunur.

$$c = \frac{\pi D^2}{4 S^2} \text{ dir. } (29)$$

Burada D fiberlerin çapını ve S ise iki fiber eksenini arasındaki mesafeyi göstermektedir. $S \rightarrow D$ olursa maksimum "hacimsel konsantrasyon" elde edilir. Bu da % 78,4'dür. Fiberlerin bu hâline "açık hâl" denilir.

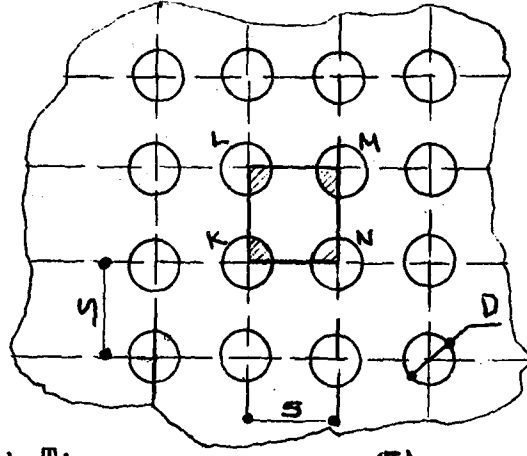
Diğer bir tip, hexagonal diziliş, buna da "kapalı hâl" denilir. Şekil (6) de hexagonal diziliş görülmektedir. Birim alan ABC ve "hacimsel konsantrasyon"

$$c = \frac{\pi D^2}{2\sqrt{3} S^2} (30)$$

dir.

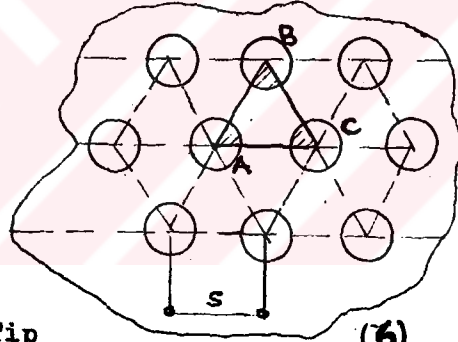
Fiberlerin maksimum "hacimsel konsantrasyonu" $S=D$ iken elde edilir. Bu zaman $c = \% 90,8$ dir.

Materyelin herhangi bir ortotropik oriyantasyonu için, fiberlerin dağılımı ile alâkalı bir fonksiyon kurulamıyor. Mamafih bir $\varphi(\Theta)$ fonksiyonu aşağıdaki dirac-delta fonksiyonuna analog olarak tarif edilmiştir.



Açık Tip

(5)



Kapalı Tip

(6)

Şekil:5-6Fiber aranjmanlarının iki tipi.

$$\varphi(\theta) \begin{cases} = 0 & 0 < \theta < \pi - \varepsilon \\ = \frac{c}{2\varepsilon} & \pi - \varepsilon \leq \theta \leq \pi + \varepsilon \\ = 0 & \pi + \varepsilon < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (31)$$

Bu fonksiyon ile ilgili şu integrallerin miktarının tesbiti gerekmektedir.

$$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) d\theta$$

$G(\theta)$ sürekli fonksiyonu için

$$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) G(\theta) d\theta, \quad \int_0^{2\pi} \varphi(\theta) G(\theta - a) d\theta$$

Bunun için $\varphi(\theta)$ fonksiyonuna uygun bir Fourier serisi türetmek gerekir. Serinin katsayıları şöyle hesaplanır.

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi(\theta) \cos k\theta d\theta$$

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi - \varepsilon} \varphi(\theta) \cos k\theta d\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi - \varepsilon}^{\pi + \varepsilon} \varphi(\theta) \cos k\theta d\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi + \varepsilon}^{2\pi} \varphi(\theta) \cos k\theta d\theta$$

ilk ve son integraller sıfırdır. Buradan

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_{\pi - \varepsilon}^{\pi + \varepsilon} \frac{c}{2\varepsilon} \cos k\theta d\theta$$

$$A_k = \frac{c}{2\pi\varepsilon k} \left| \sin k\theta \right|_{\pi - \varepsilon}^{\pi + \varepsilon}$$

$$A_k = \frac{c}{\pi\varepsilon k} \cos k\pi \sin k\varepsilon \text{ bulunur.}$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \varphi(\theta) \sin k\theta d\theta$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi - \varepsilon} \varphi(\theta) \sin k\theta d\theta + \int_{\pi - \varepsilon}^{\pi + \varepsilon} \varphi(\theta) \sin k\theta d\theta + \int_{\pi + \varepsilon}^{2\pi} \varphi(\theta) \sin k\theta d\theta$$

ilk ve son integraller sıfırdır.

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_{\pi - \varepsilon}^{\pi + \varepsilon} \frac{c}{2\varepsilon} \sin k\theta d\theta + 0 + 0$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_{\pi-\epsilon}^{\pi+\epsilon} \frac{c}{2\epsilon} \sin k\theta d\theta$$

$$B_k = \frac{c}{2\pi\epsilon} \left[-\frac{1}{k} \cos k\theta \right]_{\pi-\epsilon}^{\pi+\epsilon} = \frac{c}{2\pi\epsilon k} \left[\cos k(\pi-\epsilon) - \cos k(\pi+\epsilon) \right]$$

$$B_k = \frac{c}{2\pi\epsilon k}, 0 = 0 \text{ bulunur.}$$

Sabit Terim

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\epsilon} \psi(\theta) d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi-\epsilon}^{\pi+\epsilon} \psi(\theta) d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\epsilon}^{2\pi} \psi(\theta) d\theta$$

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi-\epsilon} 0 \cdot d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi-\epsilon}^{\pi+\epsilon} \frac{c}{2\epsilon} d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\epsilon}^{2\pi} c \cdot d\theta$$

$$A_0 = \frac{c}{4\pi\epsilon} \left[\theta \right]_{\pi-\epsilon}^{\pi+\epsilon} = \frac{c}{4\pi\epsilon} \left[\pi+\epsilon - (\pi-\epsilon) \right] = \frac{c}{2\pi} \text{ bulunur.}$$

$$A_k = \frac{c \cdot \cos k\pi \sin k\epsilon}{\pi\epsilon k} \text{ idi}$$

$\epsilon \longrightarrow 0$ için $A_k = \frac{0}{0}$ belirsiz oluyor. Bu ifadeyi belirli hale getirmek

için pay ve paydanın türevleri alınırsa $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} A_k = \frac{c \cdot \cos k\pi \cos k\epsilon \cdot k}{\pi k} = \frac{c \cos k\pi}{\pi}$

bulunur. Öyleyse $k=1,2,3 \dots \dots \dots$ için

$$\frac{c}{\pi} \left[\frac{1}{2} - \cos \theta - \cos 3\theta - \cos 5\theta - \dots + \cos 2\theta + \cos 4\theta - \dots \right]$$

$$\psi(\theta) = \frac{c}{2\pi} + \frac{c}{\pi} \left[-\cos \theta - \cos 3\theta - \cos 5\theta - \dots + \cos 2\theta + \cos 4\theta + \dots \right]$$

Şimdi gerekli intergraller alınabilir.

$$\int_0^{2\pi} \psi(\theta) d\theta = \int_0^{2\pi} \left[\frac{c}{2\pi} + \frac{c}{\pi} (-\cos \theta - \cos 3\theta - \dots + \cos 2\theta + \cos 4\theta + \dots) \right] d\theta$$

cosinüslü terimlerin integralleri sıfırdır. Dolayısıyla buradan

$$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) d\theta = \frac{c}{2\pi} \cdot 2\pi = c \quad (32)$$

bulunur.

$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) G(\theta) d\theta$ nin integrali. Bunun için (θ) Maclourin serisine açılır

Yani $G(\theta) = G(0) + \frac{G'(0)}{1!} \theta + \frac{G''(0)}{2!} \theta^2 + \frac{G'''(0)}{3!} \theta^3 + \dots$

yazılır, buradan

$$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) G(\theta) d\theta = \frac{c}{\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} - \cos \theta - \cos 3\theta - \dots + \cos 2\theta + \cos 4\theta + \dots \right) \left(G(0) + \frac{G'(0)}{1!} \theta + \dots \right) d\theta$$

Diğer integraller sıfırdır, sadece aşağıdaki terimler kalır.

$$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) G(\theta) d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{c}{2\pi} \left[G(0) + \frac{G'(0)}{1!} \theta + \frac{G''(0)}{2!} \theta^2 + \dots \right] d\theta$$

$$\frac{c}{2\pi} \left[G(0)\theta + \frac{G'(0)}{1!} \cdot \frac{\theta^2}{2} + \frac{G''(0)}{2! \cdot 3} \theta^3 + \dots \right]_{\theta=0}^{2\pi}$$

$$\frac{c}{2\pi} \left[G(0)2\pi + \frac{G'(0)}{2!} (2\pi)^2 + \frac{G''(0)}{3!} (2\pi)^3 + \dots \right]$$

$$\frac{c}{2\pi} \cdot 2\pi \left[G(0) + \frac{G'(0)}{2!} 2\pi + \frac{G''(0)}{3!} (2\pi)^2 + \dots \right]$$

$$c \left[G(0) + \frac{G'(0)}{1!} \pi + \frac{G''(0)}{3!} (2\pi)^2 + \dots \right]$$

çok küçük 2ϵ aralığında $G(\theta)$ lineer bir fonksiyon olarak alınabilir. Bu zaman üçüncü ve diğer terimler ihmal edilir. Şu halde integral

$$= c \cdot \left[G(0) + \frac{G'(0)}{1!} \pi \right]$$

Yani Halbuki

$$G(\pi) = G(0) + \frac{G'(0)}{1!} \pi + \frac{G''(0)}{2!} \pi^2 + \frac{G'''(0)}{3!} \pi^3 + \dots$$

dir. İkinci terimden sonraki terimler yine aynı sebeple ihmâl edildiğinde, integrale ait parantez içi terimlerinin $G(\pi)$ ye eşit olduğu görülür. Öyleyse netice olarak

$$\int_0^{2\pi} \psi(\theta) G(\theta) d\theta = c G(\pi) \quad (33)$$

dir. $\int_0^{2\pi} \psi(\theta) G(\theta-a) d\theta$ nin integrali

$$\int_0^{2\pi} \psi(\theta) G(\theta-a) d\theta = \frac{c}{\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} - \cos \theta - \cos 3\theta - \dots + \cos 2\theta + \cos 4\theta + \dots \right) G(\theta-a) d\theta$$

$G(\theta-a)$ seriye açılırsa

$$G(\theta-a) = G(a) + \frac{G'(a)}{1!} (\theta-a) + \frac{G''(a)}{2!} (\theta-a)^2 + \dots$$

dir. Bu seri integraldeki $G(\theta-a)$ yerine konur ve parantezler açılırsa, $\cos n\theta \cdot (\theta-a)^k$ lı terimler ile aşağıdaki terimler gelecektir.

$\cos n\theta \cdot (\theta-a)^k$ lı terimlerin 0 ile 2π arasındaki integralleri sıfırdır. Öyleyse

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \psi(\theta) G(\theta-a) d\theta &= \frac{c}{\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{2} G(a) + \frac{1}{2} \frac{G'(a)}{1!} (\theta-a) + \frac{G''(a)}{2!} (\theta-a)^2 + \dots \right] d\theta \\ &= \frac{c}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \left[G(a)\theta + \frac{G'(a)}{1!} \frac{(\theta-a)^2}{2} + \frac{1}{2!} G''(a) \frac{(\theta-a)^3}{3} + \dots \right]_0^{2\pi} \\ &= \frac{c}{2\pi} \left[G(a)2\pi + \frac{G'(a)}{1!} \frac{(2\pi-a)^2}{2} - \frac{G'(a)}{1!} \cdot \frac{0^2}{2} + \dots \right] \end{aligned}$$

Çok küçük 2ϵ aralığında $G(\theta-a)$ fonksiyonu lineer olarak alınabilir. Bu durumda diğer terimler ihmâl edilebilir. Buradan

$$\begin{aligned} &= \frac{C}{2\pi} \left[G(a) \cdot 2\pi + \frac{G'(a)}{1!} \cdot \frac{(2\pi - a - a)(2\pi - a + a)}{2} \right] \\ &= \frac{C}{2\pi} \left[G(a) \cdot 2\pi + \frac{G'(a)(2\pi - 2a)(2\pi)}{2!} \right] \\ &= \frac{C}{2\pi} \cdot 2\pi \left[G(a) + \frac{G'(a)}{1!} \cdot (\pi - a) \right] \end{aligned}$$

dir. Halbuki $G(\theta - a)$ lineer kabul edildiğinde, parantez içi $G(\pi - a)$ ya eşittir. Öyleyse

$$\int_0^{2\pi} \varphi(\theta) G(\theta - a) d\theta = C G(\pi - a) \quad (34)$$

dir.

2π periyot için bulunan bu ifadeler π ve $\frac{\pi}{2}$ periyotlar içinde aynı şekilde küçük bir dönüşümle hesaplanır. Aynı istikamette takviye için aşağıdaki gibi bir $\varphi(\theta)$ fonksiyonu seçilirse

$$\varphi(\theta) \begin{cases} = 0 & 0 < \theta < \frac{\pi - \epsilon}{2} \\ = \frac{C}{\epsilon} & \frac{\pi - \epsilon}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi + \epsilon}{2} \\ = 0 & \frac{\pi + \epsilon}{2} < \theta < \pi \end{cases} \quad (35)$$

buradan benzer yolla

$$\int_0^{\pi} \varphi(\theta) = c$$

ve $G(\theta)$ sürekli fonksiyonu için

$$\int_0^{\pi} \varphi(\theta) G(\theta) d\theta = c G\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (36)$$

$$\int_0^{\pi} \varphi(\theta) G(\theta - a) d\theta = c G\left(\frac{\pi}{2} - a\right)$$

değerleri bulunur.

Şimdi farzedelim ki Ψ , θ ya bağlı olmasın (yani lifler x eksenine paralel)

bu durumda gerilme matrisinin katsayıları şöyle bulunur.

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - c}{1 - v^2} E_m \\ C_{12} &= \frac{1 - c}{1 - v^2} v E_m \\ C_{22} &= \frac{1 - c}{1 - v^2} E_m + \Psi c E_f \end{aligned} \quad (37)$$

$$C_{66} = \frac{1 - c}{2(1 + v)} E_m$$

$$C_{16} = C_{26} = 0$$

İstikamet fiziki sabitler ise

$$E_x = \frac{1 - c}{1 - v^2} E_m \left[1 - \frac{(1 - c) v^2 E_m}{(1 - c) E_m + (1 - v^2) c \Psi E_f} \right]$$

$$\begin{aligned} E_y &= (1 - c) E_m + \psi c E_f \\ G_{xy} &= \frac{1 - c}{2(1 + \nu)} E_m \end{aligned} \quad (38)$$

olarak elde edilirler.

$\psi = 1$ olursa (bu durumda ψ max. degerdedir). ikinci denklem $E_y = (1 - c) E_m + cE_f$ (39) haline dönüşür. Bu denklemin iki tarafı E_m ile bölünürse

$$\frac{E_y}{E_m} = (1 - c) + \psi c \frac{E_f}{E_m} \quad \text{bulunur.} \quad (40)$$

Eğer $E_f = E_m$ ise, kompozitin elastisite modülleri olan E_x ve E_y birbirlerine eşit olur. veya $E_x = E_y$ ise $E_m = E_f$ dir. Cam fiber- plastik ve metal fiber-plastik kompozitlerde E_f/E_m oranı çok büyüktür. Dolayısıyla fiberler istikametinde kompozitin mukavemeti çok büyük, fiberlere dik istikametlerde ise küçüktür.

Fiberle λ açısı yapan bir doğrultuda gerilme matrisinin katsayıları şunlardır:

$$C_{11} = \frac{1 - c}{1 - \nu^2} E_m + \psi c E_f \cos^4 \lambda$$

$$C_{12} = C_{21} = \frac{(1 - c) \nu E_m + \psi c E_f \sin^2 \lambda}{1 - \nu^2} \cos^2 \lambda$$

$$C_{16} = \psi c E_f \cos^3 \lambda \sin \lambda$$

$$C_{22} = \frac{1 - \nu}{1 - \nu^2} E_m + \psi c E_f \sin^4 \lambda \quad (41)$$

$$C_{26} = \psi c E_f \sin^3 \lambda \cos \lambda$$

$$C_{66} = \frac{1 - \nu}{2(1 + \nu)} E_m + \psi c E_f \sin^2 \lambda \cos^2 \lambda$$

Bu doğrultuda elastisite modülü

$$E_\lambda = C_{11} + \frac{C_{12} (C_{16} C_{26} - C_{12} C_{66}) + C_{16} (C_{12} C_{26} - C_{16} C_{22})}{C_{22} C_{66} - C_{26} C_{16}} \quad (42)$$

dir.

2.2.3. Çapraz Takviye

Bu takviye şeklinde farklı istikametteki fiberler birbirlerine diktirler. Şekil(?)
de herhangi bir çapraz takviye modeli görülüyor.

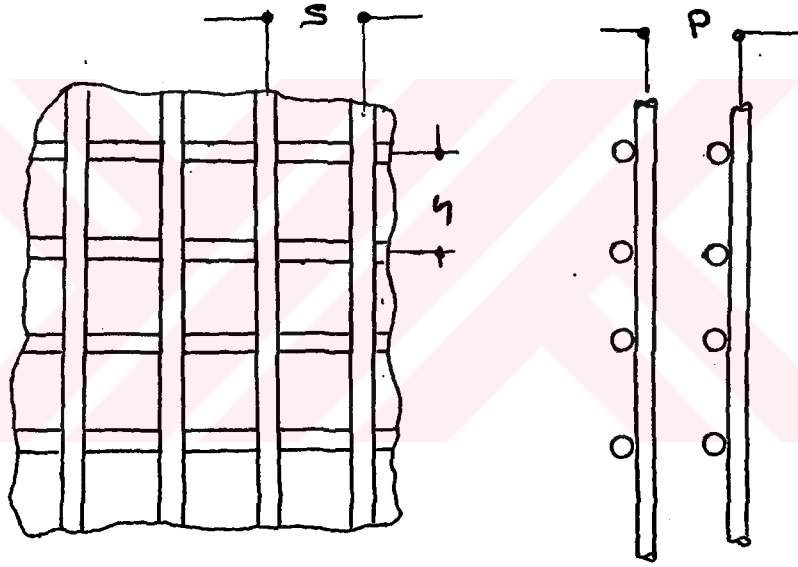
Eğer Piki örgü tipi arasındaki mesafe ise, " hacimsel konsantrasyon" oranı

$$c = \frac{\pi D^2}{2 S P} \quad (43)$$

dir. Tek örgü kullanılmışsa

$$c = \frac{\pi D^2}{2 S} \text{ bulunur.} \quad (44)$$

P → 2D ve S → D olunca c en büyük değere sahip olur. Bu durumda $c = \frac{\pi}{78}$
bulunur. P → 2D ve $\frac{D}{S} = \frac{1}{3}$ hâli için maximum c değeri % 26,2 dir. Bu tip takviyede



Şekil: 7 Çapraz takviye için fiber dizilişi.

fiberlerin x ve y istikametindeki bileşenlerinin toplamları gözününe alınır. Dolayısıyla

$\varphi(\theta) = \varphi'(\theta) + \varphi''(\theta)$ dir. Burada

$$\varphi'(\theta) \begin{cases} = 0 & \varepsilon < \theta < \frac{\pi}{2} \\ = \frac{c}{2\varepsilon} & 0 \leq \theta \leq \varepsilon \end{cases} \quad (46)$$

$$\varphi''(\theta) \begin{cases} = \frac{c}{2\varepsilon} & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \varepsilon \\ = 0 & 0 < \theta < \frac{\pi}{2} - \varepsilon \end{cases}$$

dir. Ve bu fonksiyonlar şu özelliklere sahiptir:

$$\int_0^{\pi} \varphi'(\theta) d\theta = \frac{c}{2}$$

$$\int_0^{\pi} \varphi''(\theta) d\theta = \frac{c}{2}$$

G(θ) sürekli fonksiyonu için

$$\int_0^{\pi} \varphi'(\theta) G(\theta) d\theta = \frac{c}{2} G(0)$$

$$\int_0^{\pi} \varphi''(\theta) G(\theta) d\theta = \frac{c}{2} G\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\int_0^{\pi} \varphi'(\theta) G(\theta - \lambda) d\theta = \frac{c}{2} G(-\lambda)$$

$$\int_0^{\pi} \varphi''(\theta) G(\theta - \lambda) d\theta = \frac{c}{2} G\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right)$$

(47)

dir. (46) ve (47) denklemleri (26) denklemde yerine konularsa aşağıdaki sabitler elde edilir.

$$\begin{aligned} C_{11} = C_{22} &= \frac{1-c}{1-v^2} E_m + 0,5 \psi c E_f \\ C_{12} = C_{21} &= \frac{v(1-c)}{1-v^2} E_m \\ C_{66} &= \frac{1-c}{2(1+v)} E_m \\ C_{16} = C_{26} &= 0 \end{aligned} \quad (48)$$

Elastisite modülü:

$$E_x = E_y = \frac{1-c}{1-v^2} E_m + 0,5 c \psi E_f - \frac{(1-c)^2 v^2 E_m^2}{(1-v^2)(1-c) E_m + 0,5(1-v^2) \psi c E_f} \quad (49.a)$$

Kayma modülü:

$$G_{xy} = \frac{(1-c) E_m}{2(1+v)} \quad (49.b)$$

Fiberle herhangi bir λ açısı yapan doğrultudaki gerilme matrisi katsayıları şunlardır:

$$\begin{aligned} C_{11} = C_{22} &= \frac{1-c}{1-v^2} E_m = 0,5 \psi c E_f [\cos^4 \lambda + \sin^4 \lambda] \\ C_{12} = C_{21} &= \frac{v(1-c)}{1-v^2} E_m + \psi c E_f [\sin^2 \lambda + \cos^2 \lambda] \\ C_{16} = C_{26} &= 0,5 c \psi E_f [\cos^3 \lambda \sin \lambda + \sin^3 \lambda \cos \lambda] \\ C_{16} = C_{26} &= 0,5 c \psi E_f \sin \lambda \cos \lambda \end{aligned} \quad (50)$$

$$C_{66} = \frac{(1-c) E_m}{2(1+\nu)} + \psi c E_f \sin^2 \lambda \cos^2 \lambda$$

Bu, λ doğrultusundaki elastisite modülü ise

$$E_\lambda = C_u + \frac{C_{12}(C_{16} C_{26} - C_{12} C_{66}) + C_{16}(C_{12} C_{26} - C_{16} C_{12})}{(C_{22} C_{66} - C_{26} C_{62})} \quad (51)$$

dir. Bu formül λ 'nın 0 ve $\frac{\pi}{2}$ değerleri için E_x ve E_y 'yi verir. Kayma modülü

$$G_{xy} = \frac{(1-c) E_m}{2(1+\nu)} \quad \text{dir.} \quad (52)$$

Gerilmeler ise aşağıdaki matrisle hesaplanır.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{26} \\ C_{61} & C_{62} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (53)$$

Burada σ_x , σ_y , σ_{xy} , gerilmeleri; ϵ_x , ϵ_y , ϵ_{xy} , ise zorlanmaları göstermektedir.

Matris açılırsa

$$\sigma_x = C_{11} \epsilon_x + C_{12} \epsilon_y + C_{16} \epsilon_{xy}$$

$$\sigma_y = C_{21} \epsilon_x + C_{22} \epsilon_y + C_{26} \epsilon_{xy}$$

$$\sigma_{xy} = C_{61} \epsilon_x + C_{62} \epsilon_y + C_{66} \epsilon_{xy}$$

dir. Eğer kompozit malzemeye sadece x doğrultusunda gerilme tatbik edilirse, bu zaman

$\sigma_y = 0$, $\sigma_{xy} = 0$ dir. Buradan

$$\sigma_x = \left(\sigma_x + \frac{C_{12} (C_{16} C_{26} - C_{12} C_{66}) + C_{16} (C_{12} C_{26} - C_{16} C_{12})}{C_{22} C_{66} - C_{26} C_{62}} \right) \epsilon_x \quad (54)$$

olarak bulunur.

Aynı tarzda, aynı istikametteki takviye için gerilmeler (41) deki denklemler (53) deki gibi tasnif edilerek elde edilirler.

2.3.1- Helisel boru, ince silindirlerin fiber takviyesi

Şekil (8) λ helis açısı ile boruya sarılmış tek bir fiberi göstermektedir.

İnce cidarlı boru olduğu için şu kabuller yapılır:

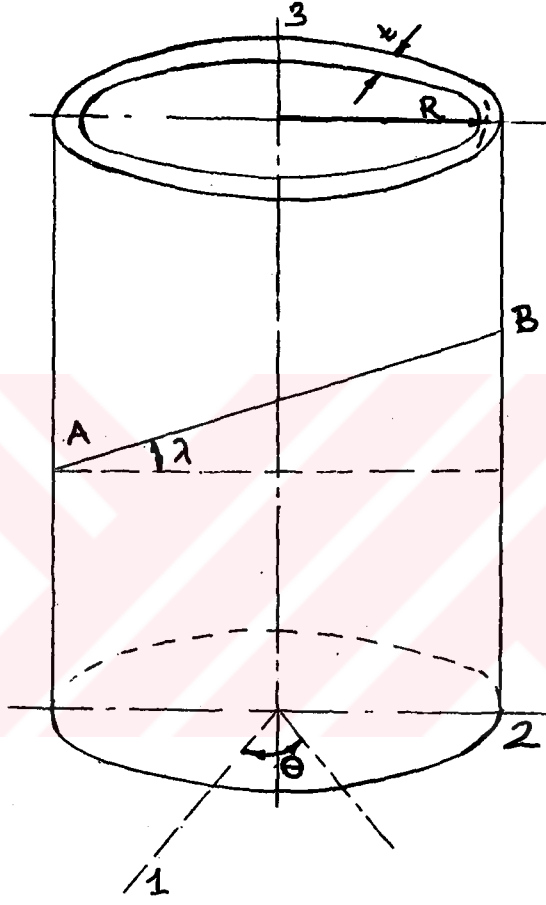
a- Bütün fiberler aynı yarıçaplı silindir içindedir.

b- σ_r (radyal bileşen), ince cidarlı borularda diğer bileşenlerin yanında küçük olduğu için ihmal edilmektedir; dolayısıyla cidarın ince olması sebebiyle model, düzlem gerilme hali olarak kabul edilmektedir. Bu kabullerden sonra

$$\sigma_x = \frac{P \cdot R}{2 t}, \quad \sigma_\theta = \frac{P \cdot R}{t}, \quad \sigma_r = 0 \quad (55)$$

yazılır. Buradan P iç basıncı, R silindirin yarıçapını, t ince cidarlı silindirin et kalınlığını, σ_x silindir boyu yönünde olan gerilmeyi, σ_θ ise σ_x e dik bileşeni göstermektedir. Bu denklemlerden görülüyor ki θ istikametinde akma diğerinden daha evvel vukubulmaktadır. Farzedelim ki kompozit herhangi bir doğrultuda zayıflıyor ve akıyor.

Bu halde



Şekil: 8. Fiber takviye edilmiş silindir.

$$\overline{G}_x = \frac{P \cdot R}{2t} = E_x \epsilon^y \quad \overline{G}_\theta = \frac{P \cdot R}{t} = E_y \epsilon^y \quad (56)$$

dir. Burada ϵ^y kompozitin akma zorlanmasıdır. Denklemden ϵ^y elimine edilirse

$$E_y = 2 E_x \quad (57)$$

bulunur.

Üç boyutlu helisel fiberde c (hacimsel konsantrasyon) nin teorik hesabı şöyle yapılır: Helisel fiberin parametrik denklemleri

$$\begin{aligned} x &= R \cos \theta \\ y &= R \sin \theta \\ z &= R \theta \operatorname{tg} \lambda \end{aligned} \quad (58)$$

dir. Burada (λ) helis açısı ve R silindirin yarıçapıdır. Helis üzerinde bir \overline{AB} segmentinin uzunluğu integral olarak

$$\begin{aligned} AB &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} ds = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (dx^2 + dy^2 + dz^2)^{\frac{1}{2}} d\theta \\ &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\sqrt{R^2 \sin^2 \theta + R^2 \cos^2 \theta + R^2 \operatorname{tg}^2 \lambda} \right) d\theta \\ &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{R}{\cos \lambda} d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} R \sec \lambda d\theta \quad (59) \quad \text{dir.} \end{aligned}$$

Silindirin birim yüksekliğini gözönüne alalım. Fiberlerin ortalama çapı $2r$ olsun. Birim yükseklikteki hacim $n\pi r^2 L$ dir. Burada L fiberin boyudur. Böylece "hacimsel konsantrasyon" şöyle bulunur:

$$s^2 = R^2 \theta^2 + R^2 \theta^2 \tan^2 \lambda = R^2 \theta^2 (1 + \tan^2 \lambda) = R^2 \theta^2 \frac{1}{\cos^2 \lambda}$$
$$C = \frac{n \pi r^2 \int_0^{2\pi} R \sec \lambda d\theta}{2 \pi R t h} \quad (60)$$

0 ile 2π arasında $h = z = R \cdot 2\pi \tan \lambda$ dir.

$$C = \frac{n \pi r^2 R \sec \lambda \cdot 2\pi}{2 \pi R t \cdot R 2\pi \tan \lambda}$$
$$C = \frac{nr^2}{2Rt} \operatorname{cosec} \lambda$$

bulunur.

$$a = \frac{nr^2}{2Rt} \quad (61)$$

a herhangi bir özel takviye şekli için sabittir.

2.3.2- İnce cidarlı helisel borunun yüklenmesi

Boruya çeşitli gerilmeler ve bunların kombinasyonları verilebilir. Bunlar: içten P basıncı, T torsiyon momenti, borunun iki ucundan çekme ve basma, boru dışından P basıncı ile bu gerilmelerin çeşitli kombinasyonlarıdır. Bu gerilmeler sırasıyla şunlardır.

a- Yalnız içten P basıncı verilirse, bu anda gerilmeler

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot R}{t} \quad (62)$$
$$\sigma_x = \frac{vP \cdot R}{t}$$

dir.

b- İçten P basıncı verilir ve borunun bir ucu serbest olursa, bu anda doğan gerilmeler

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot R}{t} \quad (63)$$
$$\sigma_x = \frac{P \cdot R}{2t}$$

c- Boruya yalnız T torsiyon momenti tatbik edilmişse, bu anda meydana gelen τ kayma gerilmesi

$$\tau = \frac{T}{2\pi tR^2} \quad (64)$$

dir.

d- Boruya içten P basıncı, T torsiyonmomenti tatbik edilirse, gerilmeler

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot R}{t}$$

$$\sigma_x = \frac{\nu P \cdot R}{t} \quad (65)$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi tR^2}$$

dir.

e- Boruya içten p basıncı, bir ucuna T torsiyon momenti tatbik edilir ve bir uç serbest olursa, gerilmeler

$$\sigma_{\theta} = \frac{PR}{t} \quad (66)$$

$$\sigma_x = \frac{PR}{2t}$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi tR^2} \quad (66)$$

dir.

f- Boruya içten p basıncı, bir ucuna T torsiyon momenti ve ayrıca borunun iki ucuna q çekme veya basma gerilmesi verilirse gerilmeler

$$\sigma_{\theta} = \frac{P R}{t}$$

$$\sigma_x = \frac{v pR}{t} \mp q \quad (67)$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi tR^2}$$

dir.

g- Boruya içten p basıncı, bir ucuna T torsiyon momenti ve ayrıca borunun iki ucuna q çekme veya basma gerilmesi verilir ve bir uç serbest olursa, gerilmeler

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot R}{t}$$

$$\sigma_x = \frac{P \cdot R}{2t} \mp q \quad (68)$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi tR^2}$$

dir. Borunun hangi istikamette ve ne zaman akacağını bulmak için matrix ve fiberlerin akma zorlanmaları kontrol edilir; hangisi küçükse kompozitteki zorlanmalar bu değere gelinece, kompozitte akma olayı başlar. Eğer matrix olarak polyester ve fiber olarak cam lifi

alınırsa, polyester kırılğan malzemedir ve akma zorlanması ϵ_m cam lifinin akma zorlanması ϵ_f 'den küçüktür. Çünkü, cam lifi sünek bir malzemedir. Bu zaman (53) denklemden ϵ_x , ϵ_y , ve ϵ_{xy} akma zorlanması yerine polycesterin ϵ_m ve ϵ_{xy} değerleri konulur.

Bu akma değerlerinden ince cidarlı kompozit borunun akma eğrisi çıkarılır ve bu eğrinin mevcut akma teorilerine uyup uymadığı kontrol edilir.

Mevcut akma teorileri σ_1 nlardır:

a- Maksimum gerilme teorisi (Rankine, Lamé, Clapeyron teorisi):

Bu teori, malzemenin herhangi bir noktasındaki akmanın asal gerilmenin bu malzemenin basit çekmedeki akma gerilmesine ulaştığı anda aktığını ifade eder. Asal gerilmeler σ_1 ve σ_2 ise ve malzemenin çekme ve basmadaki akma gerilmeleri σ_0 , σ_0, c ile gösteriliyorsa; $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_0, c$ olduğunda malzemede akma başlayacaktır. Bu teori basit çekme veya ($\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$) yahut ($\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$) gibi bazı özel üçgen gerilme hallerinde doğruya çok yakın sonuç verir. Font, beton gibi gevrek malzemeler için yanlış sonuç verir.

b- Maksimum zorlanma (Saint-Venant) teorisi: Bu teori, malzemedeki asal zorlanmaların basit çekmedeki akma zorlanmalarına eşit olduğu zaman malzemede akmanın başlayacağını ifade eder.

$$E \epsilon_1 = \sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3) = \mp \sigma_0$$

şeklinde tarif edilen ϵ_1 için malzemede akma başlayacaktır. Düzlem gerilme özel hali için ($\sigma_3 = 0$):

$$\begin{aligned} E \epsilon_1 &= \sigma_1 - \mu \sigma_2 = \mp \sigma_0 & |\sigma_1| &\geq |\sigma_2| \\ E \epsilon_2 &= \sigma_2 - \mu \sigma_1 = \mp \sigma_0 & |\sigma_2| &\leq |\sigma_1| \end{aligned}$$

Bu teori ile de tatbikatda pek uygunluk temin edilmez.

c- Maksimum kayma gerilmeleri teorisi (Trescakriteri) : Malzemenin herhangi bir noktasındaki kayma gerilmelerinin, basit çekmedeki maksimum kayma gerilmesine ulaştığı anda akmanın başlayacağını ifade eder. Genel halde maksimum kayma gerilmeleri çekmedeki kayma gerilmelerine eşit olduğundan ($\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_0$) ;

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \mp \sigma_0, \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \mp \sigma_0, \quad \sigma_3 - \sigma_1 = \mp \sigma_0$$

ifadeleri yazılabilir.

Düzlem gerilme hali için ($\sigma_3 = 0$) aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\begin{array}{ll} \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0 & \sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0 \\ \sigma_1 - \sigma_2 = -\sigma_0 & \sigma_1 < 0, \sigma_2 > 0 \\ \sigma_2 = \sigma_0 & \sigma_2 > \sigma_1 > 0 \\ \sigma_1 = -\sigma_0 & \sigma_1 > \sigma_2 > 0 \\ \sigma_2 = -\sigma_0 & \sigma_2 < \sigma_1 < 0 \end{array}$$

Bu teori sürekli malzeme cinsinden olan metal ve metal alaşımlarında doğruya çok yakın netice vermektedir. Beton, font gibi gevrek malzemeler için doğru netice vermez.

d- Maksimum zorlanma enerjisi teorisi veya " Beltrami enerjisi teorisi" :

Bu teoriye göre malzemenin herhangi bir noktasında doğan birim hacimdeki zorlanma enerjisi, basit çekme halinde, akma sınırındaki birim hacimdeki zorlanma enerjisine eşit olduğu anda malzemede akma başlar. Basit çekmede birim hacimdeki zorlanma enerjisi

$$U = \frac{1}{2} \sigma_0 \epsilon_0 = \frac{1}{2E} \sigma_0^2$$

dir.

Kompleks gerilme halinde birim hacim enerjisi

$$U = \frac{1}{2} (\sigma_1 e_1 + \sigma_2 e_2 + \sigma_3 e_3) = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)]$$

buradan $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3) = \sigma_0^2$

şeklinde bulunur.

Düzlem gerilme hali için ($\sigma_3 = 0$) :

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\mu \sigma_1 \sigma_2 = \sigma_0^2$$

Bu fonksiyon σ_1, σ_2 düzleminde bir elips gösterir. Bu teori bazı gerilme hallerinde doğru sonuç vermez. Meselâ idrostatik basınç halinde bir elemanın kırılması icabedeceği sonucunu verir.

e- Distorsiyon enerjisi teorisi (Von Mises akma kriteri) :

Malzemede akma, içindeki birim hacimde hasıl olan, distorsiyon enerjisinin basit çekmedeki hasıl olan distorsiyon enerjisine eşit olduğunda meydana gelir.

$$U_d = \frac{1}{2G} J_2 = \frac{3}{4G} \tau_0 c^2 \quad \text{Basit çekme için } J_2 = \frac{1}{3} \sigma_0^2 \quad \text{olduğundan}$$

$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \sigma_0^2$$

ve iki eksenli gerilme halinde

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = \sigma_0^2$$

denklemleri elde edilir. Bu fonksiyon σ_1, σ_2 eksen takımında bir elips gösterir ve bu elipsin 6 noktası Tresca akma kriteri ile çakışmaktadır. Yalnız kayma gerilmelerinin

bulunması halinde

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = k, \quad \sigma_3 = 0 \quad \text{ise} \quad J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \sigma_1^2 = k^2$$

olduğundan, Von Mises akma kriterine göre $k^2 = \frac{1}{3} \sigma_0^2$ ve $k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$ elde edilir. Bu teori sünek malzeme düzlem gerilme hali ve idrostatik basınç hali gibi özel hallerde doğru sonuç verir.

f- Mohr akma teorisi: Mohr, Tresca akma teorisini genişleterek kendi adı ile anılan bu teoriyi ortaya koymuştur. Bu teoriye göre: Kayma gerilmesi basit çekmedeki akma sınırındaki kayma akma gerilmesine bağlı olduğu gibi, tatbik edilen normal gerilme ile değişmektedir. Mohr teorisi ortalama basma ve çekmenin tesirlerini de gözönüne almaktadır. Beton, font, cam gibi gevrek malzemelerde iyi netice verir.

g- İç sürtünme teorisi: Mohr teorisinin özel bir halidir. Kritik kayma gerilmesinin (akmanın başladığı kayma gerilmesi), maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu düzleminde normal gerilmenin lineer bir fonksiyonu olarak alındığını ifade eder. İki eksenli gerilme halinde,

(σ_0 akma, $\sigma_{0,c}$ basma akma gerilmeleri olmak üzere)

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{0,c}} \cdot \sigma_3 = \sigma_0 \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad \sigma_2 = 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_{0,c} \quad \sigma_1 > \sigma_3 \quad \sigma_3 = -\sigma_{0,c}$$

denklemleri yazılır.

3- Deneysel çalışma

3.1- Cam lifli takviyeli ince cidarlı boru imalatı ve tekniği

Deneysel çalışmada matrix olarak döküm polyesteri ve takviye malzemesi olarak cam lifli kullanıldı. Bunlar ayrı ayrı incelenirse

3.1.1- Cam lifi

Cam lifleri piyasada keçe, cam fitil, düzgün kumaş halinde bulunmaktadır. İnce cidarlı boru imalatında, imalatın kolay ve düzgün, helisin teorik çalışmaya uygun olması için, düzgün dokunmuş kumaş halinde cam lifleri tercih edilmiştir. Kumaş halinde cam lifi teorik modellerden çapraz takviye tipine uymaktadır.

Liflerin boyu, çaplarına nazaran çok büyük olduğu için kumaş kolaylıkla bükül-
mekte ve lifler basma gerilmesi taşımamaktadır. 1 m² kumaş lif 350 gram gelmekte ve bu
lif çok sayıda birbirine paralel cam liflerinden meydana gelmektedir. Yapılan ölçme-
lerden tek bir cam lifinin kesiti 0,0017 cm² bulunmuştur. Cam lifinin özgül ağırlığı civa
metodu ile tayin edildi. Bunun için cam lifi önce hassas terazide tartıldı. Civa kabına
civa konuldu ve üst kapak kabın üzerinde hareket ettirilerek fazla civa taşırıldı. Daha
sonra kabın içine cam lifi atıldı ve üst kapak vasıtasıyla cam lifi civaya batırıldı;
taşan civa miktarı hassas terazide tartıldı. Civanın ağırlığı özgül ağırlığına bölünerek
cam lifinin hacmi bulundu. Yapılan hassas tartı ile de ağırlık elde edildiğinden lifle-
rin özgül ağırlıkları hesab edildi. Bu deneyler birçok kereler tekrar edildi ve bulunan
bu değerlerin ortalaması alınarak cam lifinin özgül ağırlığı 2,55 gr/cm³ olarak tesbit
edilmiştir.

Lifin mukavemet değerleri şu şekilde tayin edildi. Tek bir cam lifi alındı bu-
nu ölçme cihazına bağlayabilmek için uçları polyester ve keçe lif ile takviye edildikten
sonra kurutuldu. Takviye yapılmadığında Instron ölçme cihazının çekme çenelerinin lifi
kestiği görüldü. Bu lifler Instronda çekme deneyine tabi tutuldu. Her belli yüklerde
lifin uzama miktarı ölçüldü ve akma sınırına kadar yükletilerek lifin akması temin edil-
di. Bu deneyler diğer aynı boyutlu lifler (20 cm boyunda, 0,0017 cm² kesitinde) için
tekrar edildi; ve deneylerin ortalaması alınarak

$$\sigma_{akma} = 5300 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 2,8 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Elastisite modülü) olarak tesbit edildi.}$$

3.1.2 Polyester

Kimyasal Özellikleri :

Polyester bir termoset plastiktir. Yani bu reçine bir kimyevi reaksiyon ile sert çözünmeyen ve ergimeyen bir madde haline dönüştürülür. Sertleşme işlemi geriye dönüştürülemez bir işlemdir. Bu maddede, ısıtılınca yumuşama olmamaktadır.

Polyester normal sıcaklıklarda sıvı halde bulunmaktadır. Bunu katılaştırmak için hızlandırıcı ve sertleştirici elemanlardan faydalanılır. Hızlandırıcı, katalizör özelliği görmektedir. Kimyasal reaksiyona hız vermekte ve çabuk olmasına vesile olmaktadır. Polyesteri asıl sertleştiren, sertleştiricidir. Eğer bu iki katkı, maddesinin oranları az konursa kimyasal reaksiyon yavaş olmakta, oranları fazla olursa reaksiyon hızı yüksek olmaktadır. Reaksiyon hızı arttıkça kırılgenlik de artmaktadır.

20°C ortam sıcaklığında 1 litre polyestere 5 cm³ hızlandırıcı ve 10 cm³ sertleştirici konulursa; polyester 20 dakika sonra sertleşmeye başlamakta ve 8 saat sonra sertleşme tamam olmaktadır. Burada dikkat edilcek nokta, hızlandırıcı ile sertleştiricinin hiçbir surette yanyana getirmemelidir. Yoksa, kendi aralarında bir anda reaksiyona girmektedirler. Bundan dolayıdır ki, polyesteri sertleştirirken (içine önce hızlandırıcı ilâve edilmelidir) hızlandırıcı ile polyesteri, karıştırıcı ile iyice karıştırmak gerekir. Eğer polyesterin üzerinde hızlandırıcı kalırsa, sertleştirici ilâve edildiğinde, hızlandırıcı ile sertleştirici hemen reaksiyona girmekte ve sertleşme olayı sekteye düşmektedir.

Polyester ile hızlandırıcı ve sertleştirici reaksiyona girdiğinde, polyesterden çıkan buharlar yakıcı ve zehirleyicidir. İmalâtı yapan kimse mümkün mertebe bu

buharlardan korunmalıdır. Döküm neticesinde fırça, kutu v.s. asetonla yıkanır ve polyesterden temizlenirler.

Polyesterin fiziki özellikleri

Polyester normal sıcaklıkta sıvı halde bulunmaktadır. Bizim deney şartlarında katılaştırdığımız zaman özgül ağırlığı $1,24\text{gr/cm}^3$ 'dür. Sertleşince meydana gelen malzeme buzlu cam gibi yarı saydamdır.

Deneylerde kullanılan döküm polyesterinin (20°C ortam sıcaklığı, 5 cm^3 hızlandırıcı, 10cm^3 sertleştirici, 1 litre polyester şartlarında) mukavemet değerleri şunlardır.

Çekme halde	akma	=	410 kg/cm^2
Torsiyon halde	akma	=	760 kg/cm^2
Elastisite modülü	E	=	$2,8 \cdot 10^4\text{ kg/cm}^2$
Poisson katsayısı	v	=	0,12

Bu değerler şu şekilde ölçüldü. Ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlandı. Çünkü imalâtın yapıldığı andaki ortamın sıcaklığı polyesterin mukavemetine tesir etmektedir. 1 litre polyesterin içine önce 5 cm^3 hızlandırıcı ilâve edilde ve iyice karıştırıldı. Daha sonra karışıma 10 cm^3 sertleştirici ilâve edildi bu da karıştırıcı ile iyice karıştırıldı. Dolayısıyla homojen bir karışım temin edilmiş oldu. Yoksa sertleştirici, kısmî sertleşmelere sebep olmakta ve bazı noktalar farklı sertleştiği için çatlaklar olmaktadır. Bu halde ilk 20 dakikanın içinde dökümü yapmak gereklidir. Yoksa polyester kabda donmaktadır. Polyester, çekme çubuğu modeline uygun bir kalıp içine döküldü. Çekme çubuğunun uçları cam lifi ile takviye edildi.

Polyester kırılğan olduğu için çekilirken, çekme cihazının çeneleri arasında ufalanmaktadır. Bu çekme çubuğu, Instronda yüklendi ve belirli yüklerde boyca uzama ve ence kısıalma miktarları tayin edildi. Daha sonra malzeme akma sınırına kadar yükletildi ve koparıldı. Bu deneyler, aynı boyutlu deney çubukları üzerinde birçok kereler tekrar edildi; çıkan neticelerin ortalamaları alınarak "elastisite modülü", "poisson katsayısı", "akma gerilmesi" tayin edildi. Silindirik bir polyester çubuğa burulma momenti tatbik edildi ve polyesterin kayma akma gerilmesi tayin olundu.

Polyester ayrıca basma deneylerine tabi tutuldu. Bu deneyler neticesinde $\sigma_{akma} = 1100 \text{ kg/cm}^2$ olarak elde edildi.

Cam lifi ve polyester beraberce döküldü. Bu deney çubuğuna çekme cihazında belirli yüklerle yükleme yapıldı; her yüklemede çubuğun uzama miktarı ölçüldü. Buradan "elastisite modülü"

$$E_{top} = 1,9 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

olarak elde edildi. Formül (38) de bu E_{top} yerine konularak ψ değeri hesaplandı. Hesap neticesinde $\psi = 0,91$ çıktı. Cam lifi ve polyester birbirlerine iyice yapıştıklarından ψ değeri bire yakın çıkmaktadır.

Polyester ile cam lifinin karışım hacim yüzdeleri deneysel olarak şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Toplam ağırlık} \quad P = P_1 + P_2 \quad (\text{a})$$

$$\text{Polyesterin ağırlığı} \quad P_1 = V_1 d_1 \quad (\text{b})$$

$$\text{Cam lifinin ağırlığı} \quad P_2 = V_2 d_2 \quad (\text{c})$$

$$\text{Cam lifin özgül ağırlığı: } d_2$$

Polyesterin özgül ağırlığı: d_1

Kompozit malzemenin özgül ağırlığı : D

Kompozit malzemenin hacmi ve özgül ağırlığı civa metodu ile hesaplandı. (b) ve (c), (a) de yerine konulursa

$$VD = V_1 d_1 + V_2 d_2$$

elde edilir. Halbuki kompozitin hacmi $V = V_1 + V_2$ dir. Her iki taraf V ile kısaltılır ve $\frac{V_2}{V}$ yerine c koyarsak, $\frac{V_1}{V} = 1 - c$ olur. Öyleyse

$$d_1 (1 - c) + d_2 c = D$$

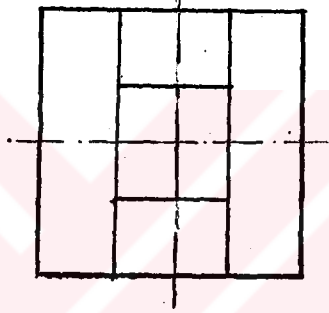
dir; ve buradan

$$c = \frac{D - d_1}{d_2 - d_1} \quad (69)$$

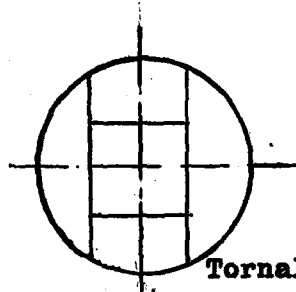
olarak bulunur.

3.1.3 - Boru imalatı

Boru dökümü için tahta kalıp kullanıldı. Bunun için 5 tane gürgen tahta alındı şekil (9) daki gibi çivilendi ve tornalandı. Kalıp tornadan 6 cm çapında ve 30 cm den biraz büyük çıkarıldı. Parçaların yerlerinin belirtilmesi için markalama yapıldı. Kalıp 30 cm boyunda kesildi. Çivili kısımlar bu 30 cm'nin dışında buldukları için otomatikman atılmış oldular. Dolayısıyla kalıp 5 parça olarak çıkmış oldu.



Tornalanmadan evvel



Tornalandıktan sonra

Şekil: 9. Döküm kalıbının hazırlanışı.

Polyesterin Hazırlanması

Polyester 1 litrelik ölçülü kaba boşaltıldı ve içindeki hava habbelerinin çıkması için bir miktar (5 dakika) kadar beklendi. Hava habbecikleri tam olarak çıktıktan sonra üzerine 5 cm³ hızlandırıcı ilâve edildi ve karıştırıcı ile iyice karıştırıldı. (Bu sırada ortam sıcaklığı 20°C ayarlandı). Karışmamış hiç hızlandırıcı kalmadığı zaman, üzerine 10 cm³ sertleştirici ilâve edildi ve karıştırıldı. Böylece polyester döküme hazır hale getirildi.

Kalıp ve Cam Lifin Hazırlanması

Dökümün kolayca çıkması ve polyesterin kalıba yapışmaması için kalıbın üzerini Jelatin kâğıt geçirildi ve bakır teller ile jelatin kâğıt uç kısımlarda iyice sıkıştırıldı. Böylece kalıbın orjinal şeklini alması ve jelatin kâğıdın kalıbı iyice sarması ve dolayısıyla pürüz kalmaması sağlandı. Jelatin kâğıt iyi bir kalıp ayırıcısı vazifesini görmekte ve dökümün daha güzel çıkmasını sağlamaktadır.

Cam lifi hangi helis açısı ile sarılacaksa kumaştan lif o açıda kesildi. Boruyu bir defa sarmada bir miktar pay gerekmektedir; bu pay da verildi. Bu pay dikiş yerlerine gelmektedir.

Dökümün Yapılışı

Sertleşmeğe hazır polyester fırça ile jelatin kâğıt üzerine iyice sürüldü. Üzerine, cam lifi kumaş halinde sarıldı ve tekrar cam lifi polyestere iyice doycak şekilde fırça ile polyester sürüldü (Bu işlemi bizim şartlarımızda ilk 20 dakikanın içinde bitirmek gerekir). Sonra döküm kurumağa bırakıldı. 8 saat sonra polyester artık katılaşmıştır. Önce merkezdeki parça hafif tıklatılarak çıkarıldı. Bu çıkarma işlemi sırasında tahta,

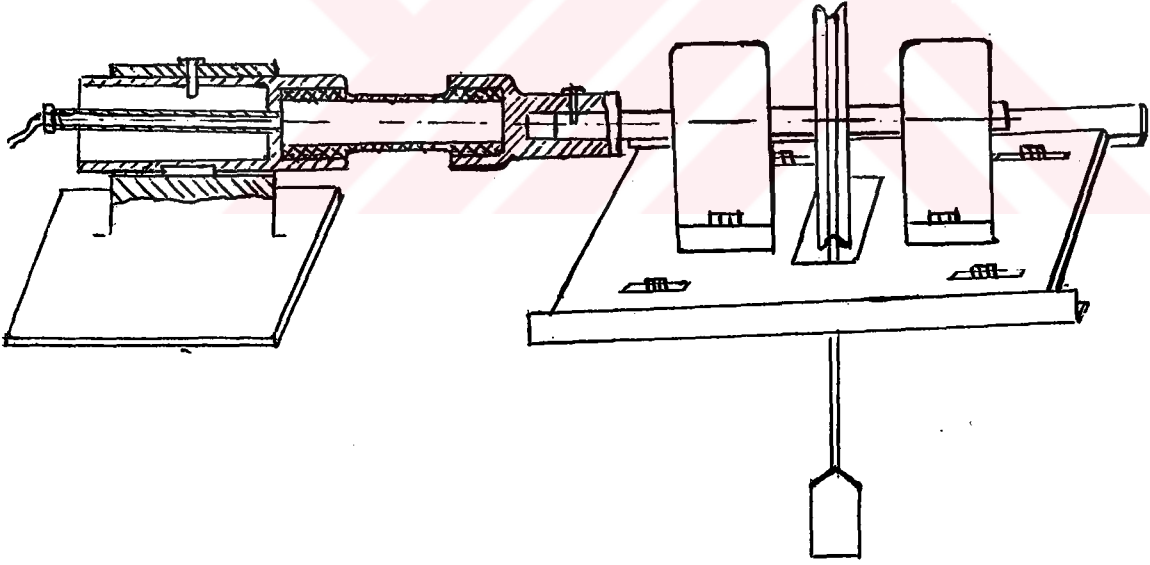
tahta üzerinde kaydığından boruya bir tesiri olmamaktadır. Sonra ortadaki diğer tahtalar hafif tıklatılma ile polyester borudan uzaklaştırıldı ve kanal içinden itilerek çıkarıldı. Her iki uçta bulunan parçalar boru uçlarında hafif tıklatma ile polyester borudan uzaklaştırıldı ve çıkarıldı. Bütün bu işlemler bitince içteki jelatin kâğıt çıkarıldı ve işlem tamamlanmış oldu. 0° - 90° , 15° - 75° , 30° - 60° , 45° - 45° lik helis açılı borular döküldü.

Lenoe (14) deney parçalarının hep aynı boyutta olması gerektiğini bildirmiştir. Dolayısıyla deney borularının aynı boyutta olmasına dikkat edildi. 30 cm lik borular 15 cm lik borulara ayrıldı. Bu borular ortalarında 5 cm boş kısım kalacak şekilde iki ucundan tekrar cam liflerle takviye edildi. Takviye esnasında keçe cam lifler kullanıldı. Keçe cam liften talaş kaldırması çok kolay olmaktadır. Bundan dolayı bu gibi yerlerde tercih edilmektedir. Borular tornaya bağlandı ve takviye edilen kısımların üzerlerine dış açıldı. Böylece borular deney yapılmağa elverişli hale geldi.

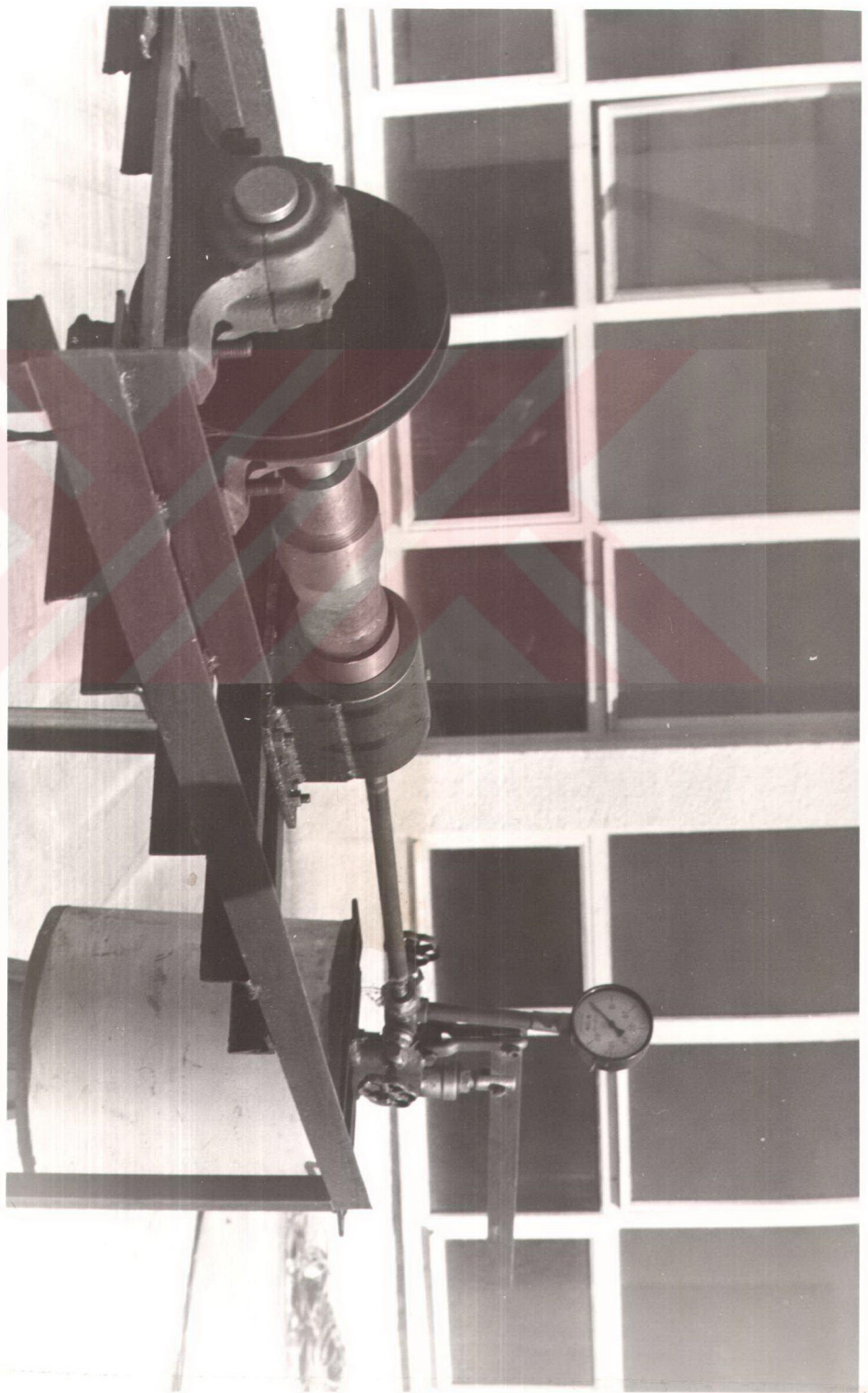
Borulardan bir miktar parça alınarak özgül ağırlığı civa metodu ile tayin edildi ve (69) formülünden $c = 0,71$ olarak bulundu.

3.2- Deney standının hazırlanması

Borular üzerine çeşitli yüklemeler verebilmek için şekil (10) veya fotoğraf (1) deki alet geliştirildi. Bu aletde boruya vidalanan iki çelik kafa bulunmaktadır. Sol taraftaki kafa (içi delik ve yağ basıncı verilen kafa) silindir içinde yatay hareket etmekte ve dönmemesi için kama tertibatından istifade edilmektedir. Yani kama tertibatı bu kafanın silindir için yatay hareket etmesini sağlamakta fakat dönmesine mani olmaktadır. Ayrıca bu kafanın yatay hareketine gerektiğinde mani ^{/olmak} için silindir ile her ikisine müşterek bir vida açıldı. Bu kafa, yağ basıncı vermek için içinden delindi ve hidrolik pompaya uygun dış açılmış bir boru buraya kaynak edildi.



Şekil: 10 Deney Standı.



Sağ taraftaki kafa bir rulmanlı yatak-kasnak tertibatına monte edilmiştir. Rulmanlı yatak-kasnak tertibatının mili bu kafa içinde hareket etmektedir. Bir vida ile mil bu kafaya monte edilmektedir. Rulmanlı yatak-kasnak tertibatı, borunun her durumunda konstrüksiyonu sağlamak için bir u yatak içine yerleştirilmiştir. Boru bu kafalara takıldıktan sonra rulmanlı yatak-kasnak tertibatını masaya raptetmek için tertibatın tablasına civata yarığı açıldı. ve hangi durumda konstrüksiyon yapılacaksa o konumda civata somunları ile sıkıştırıldı. Bu, sürtünmeden hasil olan kavvetler, tertibata gelen aksenel kuvvetlerden daha büyük olduğu için yatay hareket önlenmiş oldu.

Borunun dışları, sızdırmazlık sağlamak için keten ile dolduruldu ve boru önce soldaki kafaya monte edildi. Sonra ikinci (sağdaki) kafa boruya monte edildi; ve mil bu kafa içinde ayarlanarak rulmanlı yatak-kasnak tertibatı bu kısma monte edildi. Böylece boru, üzerinde deney yapılmağa elverişli duruma getirilmiş oldu.

Deney standının ve borunun boyutlarından dolayı yüklemelerle alskalı gerilmeler pratik olarak şu şekilde elde edilirler. Borunun dış yarıçapı 30.5 mm ve iç yarıçapı 30 mm olduğuna göre, et kalınlığı $t = 0,5$ mm dir; ve içten verilen P basıncı için

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot 30}{0,5} = 60P$$

dir. Diğer uç serbest değilse (yani boruda boyca uzama yoksa)

$$\sigma_x = v \cdot \sigma_{\theta} = 0.12 \cdot 60 P = 7,2 P$$

dir. Eğer diğer uç serbest ise

$$\sigma_x = \frac{1}{2} \sigma_{\theta} = 30P$$

dir.

τ burulma momentinden doğan τ kayma gerilmesi

$$\tau = \frac{\tau}{2\pi \cdot 0,5 \cdot 3^2}$$

dir. G kasnağa asılan ağırlık ise,

$$\tau = G \cdot r \quad (r \text{ kasnağın yarıçapı})$$

$$r = 9,5 \text{ cm olduğuna göre}$$

$$\tau = 3,3 G \text{ bulunur.}$$

Deney borularına tatbik edilecek gerilmelerin verilmesi:

Deney borularına içten P basıncı hidrolik pompa ile verildi. Borunun bir ucunun serbest olması gerektiği durumlar sol kafadaki civata çıkarılarak yapıldı. Dolayısıyla sol kafanın kama yarığı üzerinde dönmeden yatay hareketi sağlandı. τ burulma momenti kasnağa asılan G ağırlığı ile ve borunun iki ucu arasına verilecek basma gerilmesi, basma cihazında temin edildi.

Davis (16) kompozit malzemenin mukavemetinin deney ortamının sıcaklığına gerilmelerin tatbik zamanına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bundan dolayı deneyler 20°C oda sıcaklığında yapıldı; ve dinamik gerilmelerin hasıl olmaması için deney parçalarına yavaş (statik) bir yükleme yapıldı. Akma başladığı andaki gerilme değerleri tesbit edildi. Akmanın başladığı, polyesterin cam liflerini bıraktığı andaki çitirtiden anlaşılmaktadır. Çünkü daha önceki deneylerde görüldü ki, polyesterin akma zorlanması cam lifinin akma zorlanmasından daha küçüktür. Gerilme çok artarsa polyester bu gerilmeden hasıl olan zorlanmayı taşıyamamakta ve akmaktadır. Bu akma esnasında çitirtı

		$0^\circ - 90^\circ$	$15^\circ - 75^\circ$	$30^\circ - 60^\circ$	$45^\circ - 45^\circ$
Çekme Gerilmesi	Teorik	1490	980	340	232
	Pratik	1580	1020	360	240
Basma Gerilmesi	T.	330	330	330	330
	P.	316	316	316	316
Burulma momentleri	T.	116	134	176	330
	P.	126	145	182	354
Basıncı	T.	$\sigma_e = 1492$ $\sigma_x = 190$	$\sigma_e = 965$ $\sigma_x = 130$	$\sigma_e = 336$ $\sigma_x = 52$	$\sigma_e = 268 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_x = 46 \text{ kg/cm}^2$
	P.	$\sigma_e = 1320$ $\sigma_x = 160$	$\sigma_e = 1200$ $\sigma_x = 144$	$\sigma_e = 720$ $\sigma_x = 86$	$\sigma_e = 480$ $\sigma_x = 58$
Basıncı + Çekme gerilmesi	T.	$\sigma_e = 1510$ $\sigma_x = 820$	$\sigma_e = 970$ $\sigma_x = 475$	$\sigma_e = 334$ $\sigma_x = 162$	$\sigma_e = 285 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_x = 150 \text{ kg/cm}^2$
	P.	$\sigma_e = 1680$ $\sigma_x = 840$	$\sigma_e = 1500$ $\sigma_x = 750$	$\sigma_e = 720$ $\sigma_x = 360$	$\sigma_e = 600$ $\sigma_x = 300$
Basıncı + Burulma Momentleri	T.	$\sigma_e = 1492$ $\sigma_x = 190$ T= 100	$\sigma_e = 850$ $\sigma_x = 100$ T=100	$\sigma_e = 455$ $\sigma_x = 54$ T=100	$\sigma_e = 526$ $\sigma_x = 63$ T=264
	P.	$\sigma_e = 1440$ $\sigma_x = 166$ T= 100	$\sigma_e = 1020$ $\sigma_x = 120$ T= 100	$\sigma_e = 600$ $\sigma_x = 72$ T=100	$\sigma_e = 540$ $\sigma_x = 65$ T=264
Basıncı + Çekme Gerilmesi + Burulma Momentleri	P.	$\sigma_e = 1510$ $\sigma_x = 820$ T= 100	$\sigma_e = 700$ $\sigma_x = 350$ T= 100	$\sigma_e = 390$ $\sigma_x = 195$ T=100	$\sigma_e = 583$ $\sigma_x = 297$ T=264
	T.	$\sigma_e = 1560$ $\sigma_x = 780$ T= 100	$\sigma_e = 780$ $\sigma_x = 390$ T= 100	$\sigma_e = 540$ $\sigma_x = 270$ T= 100	$\sigma_e = 660$ $\sigma_x = 330$ T= 264

uyulmakta ve cam lifi serbest kaldığı için bariz şekilde dışarıdan görülmektedir.

3.3.- Deneysel Çalışma Neticeleri

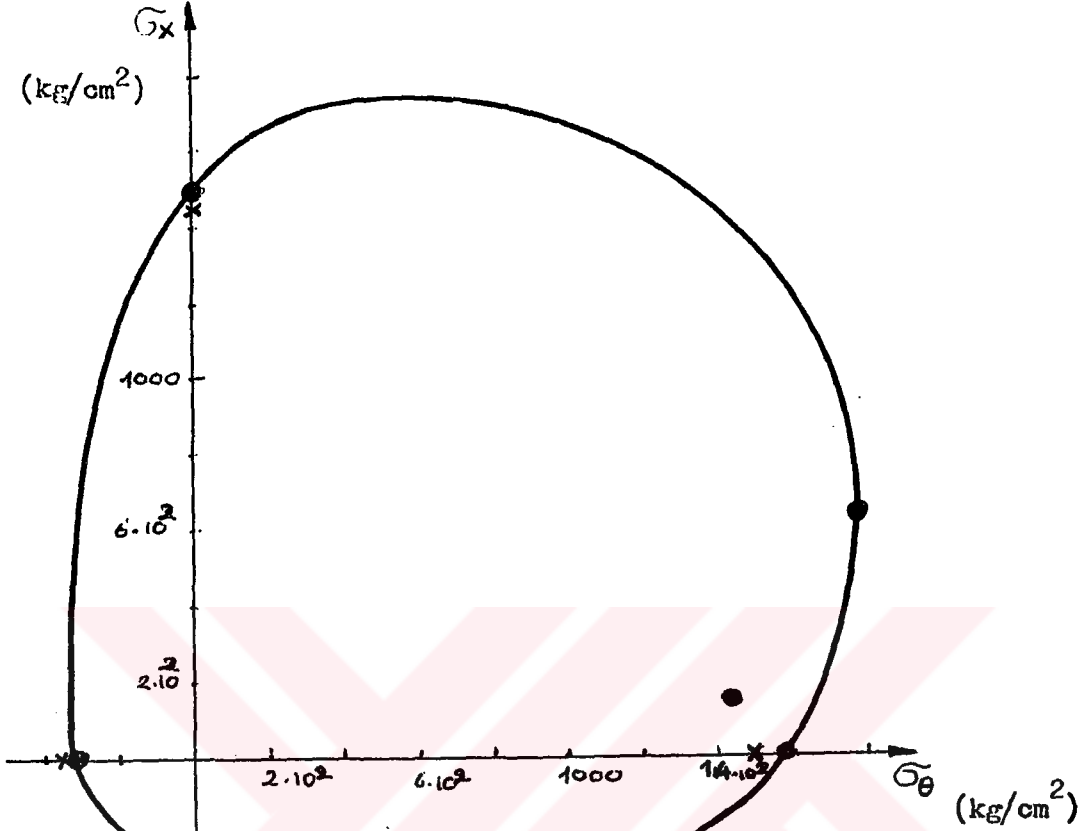
$0^{\circ}-90^{\circ}$, $15^{\circ}-75^{\circ}$, $30^{\circ}-60^{\circ}$, $45^{\circ}-45^{\circ}$ helis açıları ile çapraz şekilde cam lifleri ile takviye edilmiş borulara çeşitli gerilmeler verildi. Akmanın başladığı gerilme değerleri her helis açısı için (σ_{θ} , σ_{χ}) eksen takımında yerleştirildi. Buradan akma eğrileri çıkarıldı (grafik (2)).

4- S o n u ç

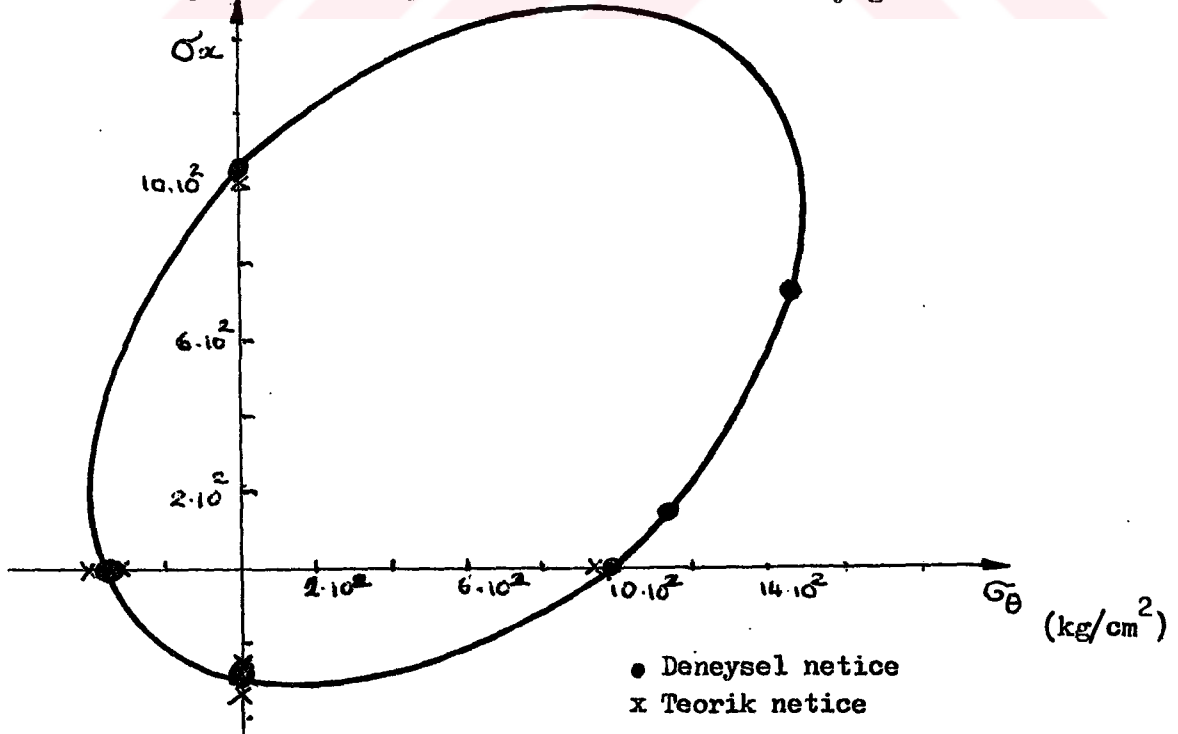
4.1- Deneysel ve teorik neticelerin karşılaştırılması $0^{\circ}-90^{\circ}$, $15^{\circ}-75^{\circ}$, $30^{\circ}-60^{\circ}$, $45^{\circ}-45^{\circ}$ helis açıları ile çapraz şekilde takviye edilmiş boruların teorik ve deneysel neticeleri tablo (1) de görülmektedir.

Borulara yalnız çekme gerilmesi verildiğinde teorik ve pratik değerler birbirlerine uymaktadır. Aynı zamanda bu borulardan bir kısım parçayı keser Instronda çekersek yine teorik neticeye uygun değerler çıkmaktadır. Teorik ve deneysel neticelerde sadece çekme gerilmesi için en fazla % 6 sapma olmuştur. $0^{\circ}-90^{\circ}$ helis açısı ile takviye edilmiş borularda teorik akma gerilmesi 1490 kg/cm^2 , deneysel 1580 kg/cm^2 , $15^{\circ}-75^{\circ}$ helis açısı ile takviye edilmiş borularda çekme gerilmesi için teorik akma gerilmesi 980 kg/cm^2 , deneysel netice 1020 kg/cm^2 ; $30^{\circ}-60^{\circ}$ helis açısı ile takviye edilmiş borularda teorik netice 340 kg/cm^2 , deneysel netice 360 kg/cm^2 ; $45^{\circ}-45^{\circ}$ helis açısı ile takviye edilmiş borularda teorik netice 132 kg/cm^2 , deneysel netice 240 kg/cm^2 dir.

Buradan görülmektedir ki yalnız basit çekme hali için teorik ve deneysel neticeler birbirlerine uymaktadır. En büyük akma gerilmesi $0^{\circ}-90^{\circ}$ helis açısı ile takviye edilmiş borulardır. Öyleyse yalnız basit çekme halinde akma gerilmesi en yüksek olan optimum helis açısı $0^{\circ}-90^{\circ}$ dir.

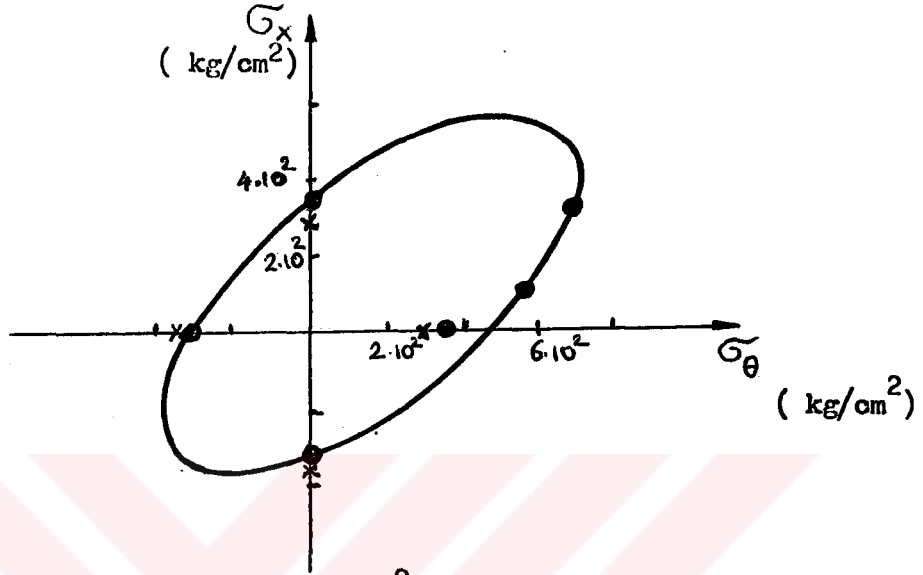


Helis açısı $\lambda = 0 - 90^\circ$ olması halinde akma diyagramı

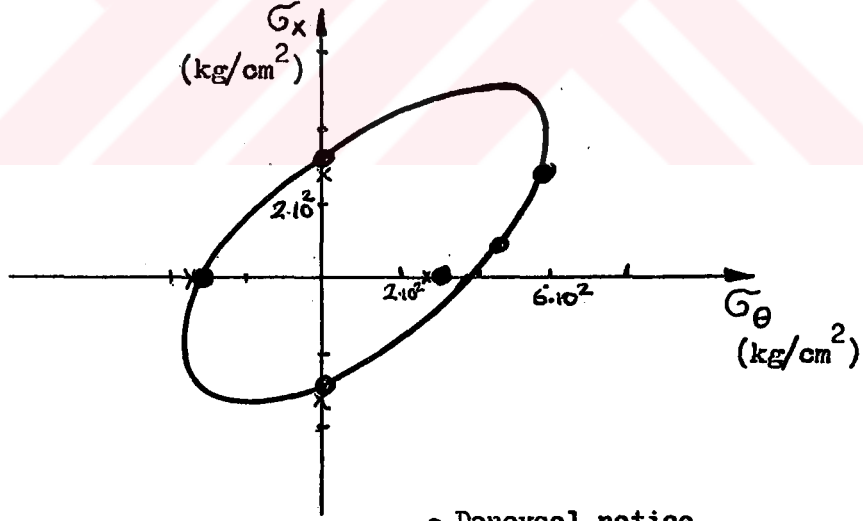


Helis açısı $\lambda = 15^\circ - 75^\circ$ olması halinde akma diyagramı

Grafik 2 a) Akma diyagramı ($c=0,71$ için)



Helis açısı $\lambda = 30 - 60^\circ$ olması halinde akma diyagramı



- Deneysel netice
- x Teorik netice

Helis açısı $\lambda = 45^\circ - 45^\circ$ olması halinde akma diyagramı

Grafik 2 b) Akma diyagramı ($c \approx 0,71$ için)

Borulara yalnız iki uçundan basma gerilmesi verildiğinde teorik akma gerilmesi bütün λ helis açıları için 330 kg/cm^2 ve ortalama deneysel akma gerilmesi 316 kg/cm^2 dir. Bu değerlerde birbirlerine uymaktadır; ve liflerin ağırlık taşıyamaz kabulü de gerçekleşmiş oldu. Bu yükleme şekli bu tip kompozit malzemeler için fazla öneme haiz değildir. Çünkü bu tip liflerin bu tip yüklemeye fazla bir fonksiyonu olmamaktadır. Yalnız basma gerilmesi halinde helis açısının bir fonksiyonu yoktur; optimum helis açısı olarak herhangi biri alınabilir.

Borulara yalnız burulma momenti verildiğinde teorik ve deneysel neticeler birbirlerine uymaktadır. $0^\circ-90^\circ$, $15^\circ-75^\circ$, $30^\circ-60^\circ$, $45^\circ-45^\circ$ λ helis açıları ile takviye edilmiş borularda teorik τ kayma akma gerilmeleri sırasıyla 116 kg/cm^2 , 134 kg/cm^2 , 176 kg/cm^2 ve 330 kg/cm^2 dir. Bu τ kayma gerilmeleri (53) de σ_x ve σ_y sıfır alınarak bulundu. Bu halde

$$\sigma_{xy} = - \frac{2 C_{61}^2}{C_{22} + C_{12}} \epsilon_{xy} + C_{66} \epsilon_{xy} \quad (70)$$

dir. Deneysel neticeler $0^\circ-90^\circ$, $15^\circ-75^\circ$, $30^\circ-60^\circ$ ve $45^\circ-45^\circ$ λ açılı borular için sırasıyla 126 kg/cm^2 , 145 , 182 ve 354 kg/cm^2 dir. Demek ki yalnız burulma momenti tatbik edildiği halde en büyük kayma gerilmesine haiz optimum λ helis açısı ile takviye edilmiş borunun sarım açısı $45^\circ-45^\circ$. Bu durum teorik olarak (70) denkleminde türev alınarak da görülebilir.

Borulara yalnız iç basınç tatbik edilirse ve borunun bir ucu serbest olsun veya olmasın bu durumda teorik ve deneysel olarak akma gerilmesi yönünden en yüksek λ sarım açılı boru $0^\circ-90^\circ$ çıkmaktadır. Teorik olarak (53) de, $\sigma_{xy} = 0$ ve σ_y yerine bir uç kapalı hâl için $v\sigma_x$, bir uç serbest hâl için $0,5\sigma_x$ veya $\sigma_y = \sigma_x$ alınarak bu durum isbat edilebilir.

Eğer borularda her üç gerilme σ_x, σ_y , σ_{xy} , tatbik edilir ve her üçü polyes-
rin akma zorlanmasına kadar zorlanırsa teorik olarak (54) denkleminde görülmektedir ki
durumda en yüksek akma gerilmesine sahip λ helis açısı $45^\circ-45^\circ$ dir. Deneysel olarak
 45° helis açılı boruya 264 kg/cm^2 tatbik edildiğinde boru $\sigma_\theta = 600 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_x = 300$
 kg/cm^2 de akmaya başlamaktadır. "albuki bu boru tek yönde çekme gerilmesine maruz kalırsa
 0 kg/cm^2 de akmaktadır

4.2- Deneylelerin Kritiği

σ_θ ve σ_x eksen takımında akma değerleri incelenirse $\lambda = 0^\circ-90^\circ$ helis açısı
e takviye edilmiş borularda teorik ve deneysel neticelerin birbirlerine uydukları görülmektedir.
 σ_θ ve σ_x 'nin (+) olduğu kısımlarda eğri büyük bir alanı kapsamakta ve σ_θ
 σ_x nin (-) olduğu bölgeye nazaran daha şişman bulunmaktadır. Eğri kısmen büyük asal
seni yönünde bastırılmış (şekil değiştirmiş) bir elipse benzemektedir. Diğer λ açıla-
için akma eğrileri elipse benzemektedir. $30^\circ-60^\circ$ ve $45^\circ-45^\circ$ lik açılarla takviye
ilmiş borularda basma akma gerilmesi ile çekme akma gerilmesi birbirlerine yakın olduğun-
n akma eğrileri elipse daha çok benzemektedir. Bu elipsler elipsin büyük asal eksenini yönün-
biraz daha uzamış şekilde çıkmaktadır. $45^\circ-45^\circ$ helis açısı ile takviye edilmiş borularda
durum daha bariz şekilde görülmektedir.

Dolayısıyla bu boruların akma diyagramları distorsiyon akma teorisine benzemekte-
r, Purdy (18) kompozit malzemelerde akma teorisi olarak distorsiyon teorisi-
tavsiye etmektedir. $30^\circ-60^\circ$ ve $45^\circ-45^\circ$ helis açısı ile takviye edilen boruların akma
yagramlarına uyan elipsin bir miktar asal eksen yönünde uzamış çıkması, borulara sızdır-
zlık verilirken meydana gelen kısmi sıkıştırma momentinden meydana gelmektedir. Çünkü
orik olarak da görülmektedir ki 45° ve ona yakın açılarda kayma gerilmesinin tesiri

diğer açılara nazaran daha fazla olarak görülmektedir. Bunlara kısmen bu gerilme durumlarında liflerin polyester akmadan önce bir miktar açısal konumlarını değiştirmesinin, boru şekil değiştirirken borunun kısmen bir membran problemi haline dönüşmesinin de tesirleri vardır.

4.3- Özet ve Tavsiyeler

Helisel olarak takviye edilmiş kompozit malzeme borularında görülmektedir ki akma eğrileri distorsiyon enerjisi teorisine benzemektedir. Bu durum 45° - 45° helis açısı ile takviye edilmiş kompozit borularda kendini daha bariz şekilde göstermektedir.

Sadece çekme gerilmesi verildiğinde bu gerilmeyi en iyi şekilde taşıyacak takviye malzemesi helis açısı 0° - 90° dir.

Sadece burulma momenti verildiğinde bu momentten doğan kayma gerilmesini en iyi şekilde üzerinde taşıyacak takviye malzemesi helis açısı 45° - 45° dir.

Sadece basma gerilmesi verildiğinde borunun taşıyacağı yük miktarı takviye malzemesinin helis açısına bağlı değildir.

Boruya içten sadece P basıncı verildiğinde, borunun bir ucu serbest olsun veya olmasın bu durumda meydana gelen gerilmeleri en iyi şekilde taşıyacak takviye malzemesi helis açısı 0° - 90° dir.

Eğer boru X ve θ yönlerinde polyester sınırına kadar yüklenir ve tatbik edilen τ kayma gerilmesi de akma sınırına yaklaşırsa bu durumda meydana gelen, gelen gerilmeleri üzerinde en iyi şekilde taşıyacak takviye malzemesi helis açısı 45° - 45° dir.

Boruya sadece θ ve x yönlerinde yükleme yapılırsa bu durumda meydana gelen gerilmeleri üzerinde en iyi şekilde taşıyacak takviye malzemesi helis açısı 0° - 90° dir.

Deneyleler $0^{\circ}-90^{\circ}$, $15^{\circ}-75^{\circ}$, $30^{\circ}-60^{\circ}$, $45^{\circ}-45^{\circ}$ helis aılları ile takviye edilmiş ince cidarlı kompozit borular üzerinde yapıldı. Bu deneyleler helis aılları daha da oaltilarak yapılabilir. Ve tatbik edilen gerilme eşitleri de arttırılabilir. Aynı zamanda deneysel çalışma kompozit malzemenin elemanlarının cinsleri değiştirilerek de yapılabilir.

Erdoğan, zbek (15) fiberlerin poisson katsayısını hesaba katarak fiber sınırlıdaki akmaları incelemişlerdir. Dolayısıyla bu çalışma bu hâl için de incelenebilir.

Herrman (19) kompozit malzemelere dinamik yükleme yapıldığında problemin nasıl üzüleceğini belirtmiştir. Buradaki deneysel çalışmalarda borulara statik gerilmeler tatbik edilmiştir. Borulara dinamik gerilmeler tatbik edilebilir ve bu hâl içinde bu mevzu incelenebilir.

K A Y N A K L A R

- 1- D.A.G. Bruggemann, Phys.Z., 37 (1936) 906.
- 2- D.A.G. Bruggemann, Ann Phys., 29 (1937) 160.
- 3- E.H.Kerner, Proc Phys. Soc. (London), 69 B (1956) 802.
- 4- J.N.Goodier, J Appl. Mech., 55 (1933) A-39.
- 5- M. Reiner, Deformation Strain and Flow, H.K. Twist Co., London, 1960 P.214
- 6- Z.Hashin, Bull. Res. Counc. Israel, 5 C (1955) 46.
- 7- Z.Hashin and S. Shtrikman, 31 Mech. Phy. Solids 10 (1962) 235.
- 8- Hill, R.Theory of mechanical properties of fiber - strengthened materials, I, Elastic Behaviour, J.Mech. Phys. Solids, V.12, PP.199 - 212, 164.
- 9- J.K. Mackenzie, Proc. Phys. Soc. (London),. 63 B (1950) 2.
- 10- R.L. Coble and W.D. Kingery, J Am. Ceram. Soc., 39 (1956) 377.
- 11- Holliday, L. Composite Materials Elsevier Publ. London 1966 Chapt. 2 P.29-42
- 12- Maclaughlin, Thomas F. Effect of Fiber Geometry on Stress in Fiber - reinforced Composite Materials experimental Mechanics October 1966
- 13- Pakdemirli E. Metallic Fibre reinforcement of Plastics and The Effect of Cold Working Ph. D.Tesis Uni. Lon May. 1967.
- 14- Edward M, Lece A.M, Testing and Design of Advanced Composite Materials, Asce Annual Meeting and National Meeting on structural Engineering Pittsburgh, 1968

- 15- Erdoğan, F.Özbek, T. Stresses in Fiber-Reinforced Composites with Imperfect Bonding, Journal of App. Mech. December 1969.
- 16- Davis, L.W. Characterization of Metal Matrix Composites, Asme December 1968
- 17- White, P.L. Van Vlack, L.H. Elastic Properties of Model Two - Phase Continuous Composites, Polym. Eng. Sci. September, 1970
- 18- Purdy, D.M. Schaeffer, Asme January 1971
- 19- Herrmann, G. Dynamics of Composite Materials, Northwestern University, Evanston, Illinois
- 20- Pakdemirli, E. Kısmi Kristallit Polimerlerin Soğuk İşlenmeleriyle Elastisite Modülünün Değişimi, E.Ü. Müh.Bil.Fak. 1972