

TRAKYA UNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

34534

ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN  
ELYAF YÖNÜ, BOYU VE ÇAPININ DEĞİŞİMİNE GÖRE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞİMİNİN  
BİLGİSAYAR YARDIMI İLE İNCELENMESİ

Nilhan BEYLİKÇİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Tez Yöneticisi: Yrd.Doc.Dr. Vural CEYHUN



TRAKYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE  
ELYAF YÖNÜ, BOYU VE ÇAPININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN  
BİLGİSAYAR YARDIMI İLE İNCELENMESİ.

Mak.Müh. Nilhan BEYLİKÇİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr. Vural CEYHUN

TRAKYA UNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN  
ELYAF YÖNÜ, BOYU VE ÇAPININ DEĞİŞİMİNE GÖRE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞİMİNİN  
BİLGİSAYAR YARDIMI İLE İNCELENMESİ

Nilhan BEYLIKÇI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ


Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Tez **29/9**/1994 Tarihinde Aşağıdaki Jüri  
Tarafından kabul edilmiştir.

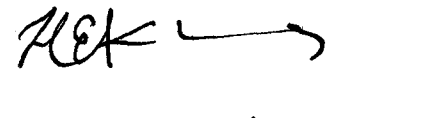
Danışman

  
Yrd. Doç. Dr. Vural Beyhan

Üye

  
Prof. Dr. Ahmet Ulvi Avcı

Üye

  
Doç. Dr. H. Erol Akdoğan

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iv
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER HAKKINDA GENEL BİLGİ .....	2
2. 1. KOMPOZİT MALZEMELERDE BOYUT KAVRAMI .....	12
2. 2. ELYAFLARLA PEKİŞTİRİLMİŞ KOMPOZİTLER .....	17
2. 2. 1. ELYAF KOMPOZİTLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ .....	18
2. 3. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME TASARIMINDA ÖZELLİKLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	19
2. 3. 1. ELYAF, BOY / YARIÇAP ORANI.....	19
2. 3. 2. ELYAFLARIN HACİM ORANI.....	20
2. 3. 3. ELYAFLARIN ORİANTASYONU.....	20
2. 3. 4. ELYAF MALZEMELERİ.....	21
2. 3. 5. MATRIX MALZEMELERİ.....	22
2. 4. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	23
2. 4. 1. PEKİŞTİRİLMİŞ BETON.....	23
2. 4. 2. ARAC LASTİKLERİ.....	23
2. 4. 3. FIBERGLASS.....	24
2. 5. ELYAF FAZLI İLERİ KOMPOZİTLER.....	24
BÖLÜM 3. KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROMEKANİĞİ.....	25
3. 1. ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ.....	26
3. 1. 1. ÖZGÜL AĞIRLIK.....	26

3. 1. 2.	ELYAF YÖNÜNDEKİ YOUNG MODÜLÜ VE POISSON ORANI.....	27
3. 1. 3.	ELYAFA DIK YÖNDEKİ YOUNG MODÜLÜ.....	31
3. 1. 4.	ELYAFA DIK YÖNDE YÜKLENMİŞ KOMPOZİT.....	32
3. 1. 5.	KAYMA MODÜLÜ.....	33
3. 2.	ELASTİSİTE DENKLEMLERİNİN ELYAF DÜZENİNE GÖRE MODİFİKASYONU.....	35
3. 3.	SÜREKLİ ELYAF KOMPOZİTLERİN DEFORMASYONU.....	39
3. 4.	SÜREKLİ ELYAF KOMPOZİTLERİN BASMA MUKAVEMETİ.....	46
<b>BÖLÜM 4.</b>	<b>SÜREKSİZ ELYAF KOMPOZİTLER.....</b>	<b>52</b>
4. 1.	ELYAF - MATRIX ARAYÜZEYİ VE GERİLİM TRANSFERİ.....	52
4. 1. 1.	SÜREKSİZ ELYAF KOMPOZİTLERİN ELASTİK MODÜL VE ÇEKME MUKAVEMETLERİ.....	60
4. 2.	ANİSOTROPİK ELASTİSİTE - GENEL HOOK KURALI.....	67
4. 2. 1.	ORTHOTROPİK SİMETRİ.....	69
4. 2. 2.	KESİT İSOTROPİK SİMETRİ.....	71
4. 2. 3.	İSOTROPİK SİMETRİ.....	72
4. 3.	ORTHOTROPİK MALZEMELERİN MÜHENDİSLİK SABİTLERİ...74	
4. 3. 1.	ORTHOTROPİK TABAKADA DÜZLEM GERİLME DURUMU İÇİN GERİLME - DEFORMASYON İLİŞKİLERİ.....	77
4. 3. 2.	ASAL EKSENLER DIŞINDAKİ GERİLME - DEFORMASYON İLİŞKİLERİ.....	79
4. 3. 3.	ORTHOTROPİK BİR TABAKA İÇİN MUKAVEMET KRİTERLERİ.....	86
<b>BÖLÜM 5.</b>	<b>HAZIRLANAN BİLGİSAYAR PROGRAMININ TANITILMASI.....</b>	<b>90</b>
5. 1.	GRAFİKLER.....	91

SONUÇLAR.....	117
BEMBOLLER.....	120
KAYNAKLAR.....	123
DZGEÇMİŞ.....	124



## ÖNSÖZ

Teknolojinin her alanında kullanılmaya başlanan kompozit malzemeler, imalatçılara büyük ölçüde kolaylık sağlamıştır. Üretim teknolojisinin çok özel olması ve çeşitlilik göstermesi, aynı zamanda yüksek teknoloji gerektirmesi, bu malzemenin üstünlüğünden bütün kullanıcıların yararlanmasını sınırlamaktadır. Gelişmiş ülkelerin tekelinde bulunan kompozit teknolojisi, elde bulunan malzemeye göre imalat değil de, imalata göre yada arzu edilen özelliklere göre malzeme üretimini mümkün kılar.

Kompozit malzemeden istenen özelliklerin gerçekleştirilmesi, bileşenlerin özelliklerine, daha çok güçlendirici olarak kullanılan malzemeye bağlıdır.

Bu çalışmada, kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin güçlendiricinin matris içindeki dağılımı, boyu, çapı, geometrik şekli ve temas derecesine bağlı olarak değişimi araştırılmıştır.

Kompozit malzemelerin mekanik hesaplarının yapılması ve buradan çıkan sonuçlarla malzemenin istenen mekanik özelliklere sahip olup olmadığının araştırılması, bilinen çözüm yöntemleri ile çok uzun zaman alan zahmetli bir çalışmayı gerektirmektedir. Bu çözümlemede matematik bilimi, tensörel ve sonlu elemanlar metodları ile yardımcı olmakta ise de, daha pratik ve kesin neticelerin alınması bakımından bir yardımcı eleman olarak bilgisayarın kullanılması günümüz teknolojileri için kaçınılmazdır. Bu bakımdan, kompozit malzeme bileşenleri olan matris ve güçlendiricilerin sabit ve değişken değerlerini kullanmak sureti ile ortaya çıkarılan ve sadece birkaç saniye içerisinde görülebilen sonuçların elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Beni böyle önemli ve güncel bir konuda çalışmaya yönelten Sayın Prof. Dr. A.Ulvi AVCI'ya çalışmayı başlatan ve yürüten Sayın Yrd. Doç.Dr. Vural CEYHUN'a ve bilgisayar programının hazırlanmasında yardımcı olan Sayın Elektronik Yük. Müh. Şadan ÖZCAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

## OZET

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyafın yönü, boyu ve çapının değişimine göre mekanik özelliklerin değişiminin bilgisayar yardımı ile incelenmesi.

Teknolojinin gelişmesi, imalat alanındaki araştırmaların sonuç vermesi, büyük ölçüde malzeme biliminin gelişmesine bağlıdır. Son yıllarda büyük ölçüde geliştirilmeye çalışan kompozit malzemeler yavaş yavaş şimdiye kadar kullanılan malzemelerin yerini almaktadır.

Bu çalışmada, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılan çeşitli elyaf malzemelerinin boy, yön ve çapındaki değişimlerin mekanik özelliklere ne ölçüde etki ettiği araştırılmış sonuçlar grafiklerle belirtilmiştir. Ayrıca yapılan bilgisayar programı ile değişik matriks ve elyaf çeşitleri için teknik sabitlerdeki değişimler yine grafiksel olarak belirtilmiştir.

Sonuç olarak çok uzun ve zahmetli mühendislik hesapları yapılarak bulunabilen bu değerler bilgisayar yardımı ile birkaç dakika içinde yapılabilecek hale gelmiştir



## ABSTRACT

A Composite material with respect to materials science and engineering can be defined as a materials system composed of a mixture or combination of two or more micro-macroconstituents that differ in form and chemical composition and which are essentially insoluble in each other.

Some fiber-reinforced -plastic composite materials are made with synthetic fibers of which glass, carbon and aramid are imported types.

In this work the stress concentration factors developed on the composite flat plates with reinforcement of various orientation and length are investigated. In the case of the concentrated loading of the axial symmetric plate, the analysis of the stresses are studied by using the computer aided discretization of tensor fields and finite element is realised.

The results of the stress concentration factor analyses have been given in terms of graphics.

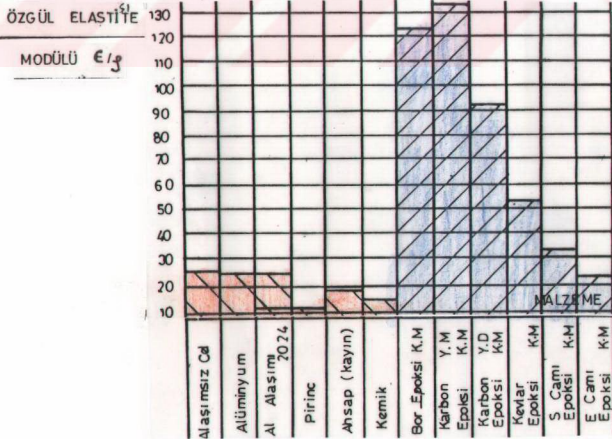
## BÖLÜM 1. GİRİŞ;

Teknolojinin ilerlemesi,yapılan teorik çalışmaların en iyi şekilde sonuç vermesi, büyük ölçüde kullanılan malzemeye bağlıdır.Bu yüzden tasarımcılar sürekli yeni malzeme arayışı içindedirler.Kullanılan malzemeler her ne kadar istenilen özelliklere sınırlı olarak sahip olsalar da artık yetersiz kalmaktadırlar. Makina imalat sanayiinde simdiye kadar kullanılan metaller, plastikler, ahşap ve seramikler, yerlerini yeni geliştirilmeye başlanan kompozit malzemelere bırakmak zorunda kalmışlardır. Çünkü artık bir malzemenin sadece hafiflik, sertlik ve ısıya dayanıklılık gibi tek bir özelliğinin yeterli olması değil bu ve bunun gibi bir çok özelliklerinin bir arada olması istenmekte ve kompozit malzemelerde bu isteğe cevap vermektedirler.Uçak sanayiini göz önüne alırsak; bu alanda kullanılan malzemelerde ısıya dayanıklılık, hafiflik, sertlik, aşınma dayanımı gibi özellikler aranır ve buda ancak karma malzeme kullanılarak gerçekleştirilebilir.

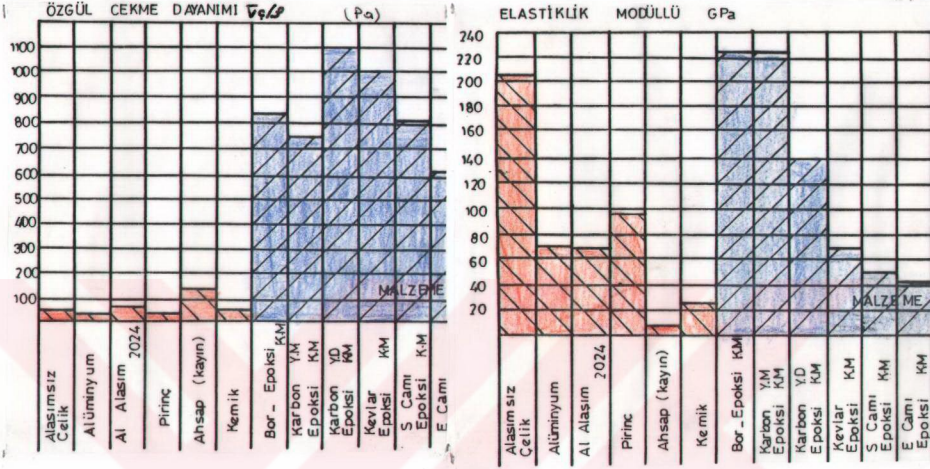
## BÖLÜM 2, KOMPOZİT MALZEMELER HAKKINDA GENEL BİLGİ

Kompozit malzemeler aslında yeni bulunmuş malzemeler değildir. Çok eski çağlardan beri hatta teknolojik alanda gelişmemiş toplumlarda bile kullanılmıştır. Örneğin, balçık içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç, veya ok yayı yapılırken kullanılan özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar bizim şimdi yeni olarak tanıdığımız kompozit malzemelerdir.

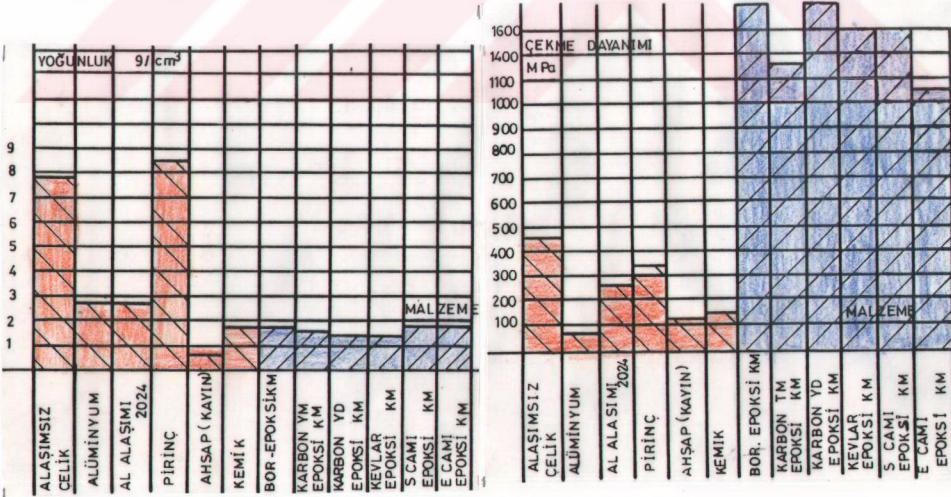
Kompozitler artık yavaş yavaş vazgeçilmez sanılan çoğu malzemelerin yerini almaktadır. Çünkü gelişmiş kompozitler dayanım, rijitlik, tokluk ve hafiflik gibi özellikler birlikte düşünüldüğünde alışlagelmiş malzemelerden çok daha üstündürler.



Şekil 2.1 Geleneksel malzemelerle kompozitlerin özgül elastisite modüllerinin karşılaştırılması.



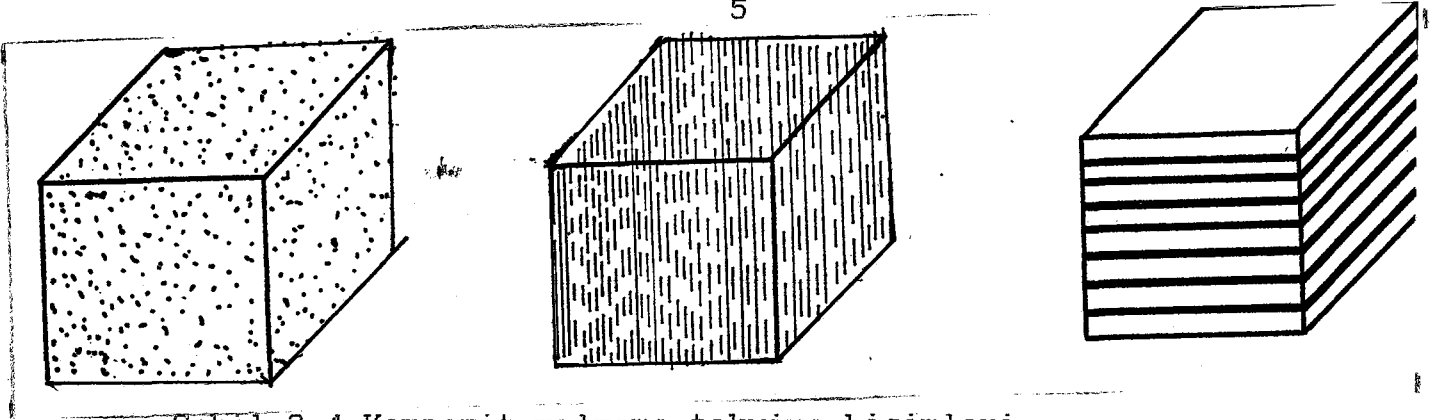
Şekil 2,2 Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri ve özgül çekme dayanımının diğer malzemelerle karşılaştırılması.



Şekil 2,3 Yoğunluk ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması.

Kompozit malzemeler, matris adı verilen bağlayıcı malzemeler ile güçlendirici malzemelerin çeşitli yöntemlerle biraraya getirilmesi ile oluşturulur. Karma malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi matris ve takviye olarak kullanılan malzemelerin üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ile yakından ilgilidir. Çünkü, matris içine katılan takviye malzemesi ne kadar ince taneli veya lifli olursa matrisle o kadar iyi uyum sağlar ve bu da karma malzemeden beklenen özellikleri en iyi şekilde verir. Ancak, mikron mertebesindeki liflerin ve tanelerin üretimi çok özel teknolojiler gerektirdiğinden gelişmiş bir karma malzeme üretimi tamamen matris ve takviye malzemesi üretim teknolojilerine bağlıdır.

Değişik takviye ve matris malzemeleri kullanarak çok değişik özelliklerde karma malzeme üretilebilir. Kompozit malzemenin özelliklerini belirleyecek en önemli faktörler; bileşenlerin hacim oranları, özellikleri, güçlendiricilerin boyları, liflerin matris içindeki dağılımları, geometrik şekilleri, bileşenler arasındaki bağlar, kuvvetin life tatbik açısı olarak sayılabilir. Bunlardan birinin mikro seviyede değişimi bile kompozit malzemenin dayanım ve mekanik özelliklerini (E, G,  $\sigma$ , v.b.) büyük oranlarda değiştirir.



Sekil 2,4 Kompozit malzeme takviye biçimleri.

Bu malzeme özelliklerinin değişimini sağlayan en önemli faktörde, kompozit malzeme içindeki elyaf oranıdır. Elyaf oranı belli bir limit değer üzerinde olmalıdır. Matris içindeki elyaf oranı belli bir değer altına düşerse, elyaf gerekli kuvvetleri taşıyamaz kopar. Buna karşılık lif oranı belli bir maksimum değeri aşarsa, lifler birbirleri ile sürtünerek uygulanan kuvvete ek bir sürtünme kuvveti meydana getirerek yine kopmalara sebep olabilir. Kompozit malzemenin dayanımı, elyafın dayanımı ile yakından ilgilidir. Çünkü lif koptuğu anda matris kopmasa bile malzeme artık eski özelliklerine sahip değildir. Bu sebeple kritik elyaf oranı  $v_{ekr}$  minimum elyaf oranı  $v_{emin}$  ve kritik elyaf boyu  $l_{kr}$  çok iyi tespit edilmiş olmalıdır. Kompozit malzemenin mekanik ve dayanım özellikleri hesaplanırken, içindeki elyafın sürekli veya süreksiz olması hesap yöntemlerini değiştirmektedir. Bu da kritik elyaf boyu  $l_{kr}$  ile belirlenir.



Elyafın sürekli veya süreksiz oluşu, yükün elyafa dik veya aynı yönde gelmesi ile değişen mekanik değerler arasında bir karşılaştırma yaparsak, genellikle elyaf yönünde takviyeli malzemelerde en yüksek, elyafa dik yönde de ise en düşük değerler elde edilir.

TAKVIYE BİCİMİ	TEK YON	TEK YON	İKİ YON	İKİ YON	DOKUNMA	DOKUNMA	KEÇE COK YON
OLCME YONU	0°	90°	0°	45°	0°	45°	her yönde
çekme MPa modülü	77	6	39	7	32	7	21
çekme Pa dayanımı	1400	28	644	98	525	210	200
basma MPa modülü	77	6	34	7	38	7	-
basma Pa dayanımı	280	140	203	126	175	126	-
egme MPa modülü	77	-	-	-	28	-	19
egme Pa dayanımı	630	-	-	-	350	-	249

### Sekül 2.5 Elyaf takviye yönünün özelliklere etkisi

Kompozit malzemelerde kuvvetleri takviye malzemeleri taşır. Matrisin asıl görevi kuvvetleri elyafa iletmek, lifleri ortamın etkisi ve darbelerden korumak, aynı zamanda malzemenin tokluğunu arttırmaktır. Ancak, matris malzemesine bağlı olarak, örneğin metal matrisli kompozit malzemelerde, yükü elyaf ile birlikte matris malzemesi de taşır.

Matris malzemesi olarak plastikler, seramikler ve metaller kullanılmaktadır. Bunlardan plastiklerin viskozite, sertleşme süresi, elyafı ıslatma kabiliyeti, dayanımı, mekanik özellikleri, kullanım sıcaklığı ve ortam etkilerine dayanıklılığı sürekli olarak araştırılarak, bu özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Matris olarak kullanılan fenolik reçineler asbest elyaf ile takviye edildiğinde 1000°C ye kadar kısa süreli, 300°C ye kadar uzun süreli kullanılabilirler.

Metal matris malzemeleri, organik reçinelere göre çok daha yüksek dayanımlıdır. Ayrıca kompozit malzemelerin tokluğunun ve kullanım sıcaklığının da yükselmesini sağlarlar. Ancak matrisin metal olduğu karma malzemelerin üretimi güçtür, her elyafıta kullanılamazlar.

Seramiklerin matris malzemesi olarak kullanılması halinde karma malzemeler 1300°C ye kadar kullanılabilirler. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, elyafın kalitesine bağlı olarak 1600°C ye kadar uzay araçlarının zırhlarında kullanılmaktadır. Karbon matris içine gömülü karbon elyafı malzemeler 4000 °C ye kadar ısıya dayanabilirler. Bu kompozitler, yüksek sıcaklıklarda çok büyük boyutlarda ısı ve mekanik özelliklere sahiptirler.



Karma malzemelerde kullanılan liflerin en önemli görevi, yükü taşıyarak malzemenin dayanım ve rijitliğini arttırmaktır Elyaf lar cam elyafı, bor elyafı, aramit elyafı, karbon elyafı seramik elyafı olabilir. Bunlar direkt olarak matrisle karıştırılıp kullanıldığı gibi matrisle daha iyi uyum sağlaması için uygun bir malzeme ile kaplanarak da kullanılabilirler. Lifleri kaplanması veya lif üretimi lifin inceliğine bağlı olarak çok özel teknolojiler gerektirebilir. Örneğin buharlaştırma-yoğuş turma yöntemi ile kılcal kristal ( Whisker ) üretimi yada buharlaştırma-çökertme yöntemi ile bor elyaf üretimi gibi.

KARA TAŞIMACILIĞI	% 33
DENİZ TAŞIMACILIĞI	% 19
YAPI SEKTÖRÜ	% 14
KOROZYONA DAYANIKLI ÜRÜN	% 10
EV ALETLERİ	% 6
TÜKETİM MALLARI	% 6
ELEKTRİK TESİSATI	% 6
UCAK VE UZAY SANAYİİ	% 2
DiĞER	% 5

-----

TOPLAM	% 100
--------	-------

TABLO 1.2: CTP Uygulamalarının sektörel dağılımı.

Kompozitler geliştirildikçe her alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ancak bu malzemeler diğer malzemelere oranla daha pahalıdır. Bu da üretimin zorluğu ve yaygınlaşmamasından kaynaklanmaktadır. Üretim yöntemlerinin gelişmesi bu malzemelerin her alanda günlük yaşamımıza girmesi ile birlikte maliyetlerin düşeceği de muhakkaktır.

---

**UÇAK VE UZAY SANAYİİ;** Uzay mekiği kargo kapıları, roket gövdeleri, uçaklarda çeşitli kanatçıklar, ana iniş takım kapağı, koltuklar, taban girişleri.

**TASIMACILIK;** Karoseri, yaprak yaylar, saftlar, taşınabilir köprü.

**SPOR MALZEMELERİ;** Oltalar, raketler, kayaklar, sörfler.

**MAKİNA SANAYİİ;** Türbin ve kompresör kanatları, satrifüjler, rügar değirmeni kanatları, deniz sondajı petrol boruları.

**TIP;** Tekerlekli sandalye, protezler.

---

#### KOMPOZİT MALZEMELERİ KULLANIM ALANLARI

---

**ELYAF SARMA;** Basınçlı tüpler, silolar, borular, füze gövdeleri.

**KAPALI KALIP;** Oto gövdeleri, kaplar, kimyasal gereçler, elektrik aletleri, ev aletleri, depolar.

**PROFİL ÇEKME;** Çubuklar, borular, profiller, yapı elemanları, elektrik tesisat malzemeleri.

**PUSKURTME ve EL YATIRMA;** Tekneler, silolar, oto karoserisi, motorsiklet, mobilya, kamyon, ev, depolar, yüzme havuzları, banyo küvetleri.

**TORBA KALIPLAMA;** Uçak parçaları, pervane kanatları, yüksek dayanımlı parçalar.

**ENJEKSİYON (Termoplastik);** Otomotiv parçaları, ev aletleri.

---

**TABLO.1.3:** Değişik yöntemlerle elde edilen CTP malzemelerin genel kullanım alanları.

KULLANIM YERİ	KULLANILAN KARMA MALZEME
UZAY SANAYİİ; Antenler, kons- trüksiyonlar.	B/Al , B/Mn , C/Mn
UÇAK SANAYİİ; Pilonlar, payan- dalar, kapılar, çerçeveler, dö- şemeler, fan ve kompresörler.	B/Al , SiC/Al , C/Al Elyaf takviyeli süperala- şımalar, in-situ kompozit
OTOMOTİV SANAYİİ; Motor gövde- leri, piston kolları, yaylar.	SiC/Al
ELEKTRİK ENDÜSTRİSİ; Elk.Mot. fırçaları.	C/Cu , Al O /Pb , Cam/Pb
TIP; Röntgen masaları, protez- ler, tekerlekli sandalyeler.	B/Al , SiC/Al
SPOR MALZ; Tenis raketleri, ka- yaklar, golf sopası, bisiklet,	B/Al , C/Al , SiC/Al
TEKSTİL; Mekik.	B/Al , C/Al , SiC/Al
DiĞER; Makine yatakları.	C/Pb , Al O /Pb

TABLO.1.4. Metal matrisli Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanım yerleri.

## 2, 1 KOMPOZİT MALZEMELERDE BOYUT KAVRAMI.

Kompozit malzemenin yaygın olarak kabul edilmiş bir tarifi yoktur. Sözlük anlamı olarak kompozit; farklı bölümlerden veya parçacıklardan oluşmuş parçalar bütünü olarak tarif edilir. Atomik seviyede, örneğin metal alaşımları ve polimerik malzemeler farklı atomik gruplaşmaları ve çeşitli oluşumlarından dolayı kompozit malzeme olarak adlandırılabilirler. Veya mikroyapı seviyesinde ( $10^{-4}$  /  $10^{-2}$  cm) bir metal alaşımı, örneğin sade karbon çeliğinde yapıyı oluşturan ferrit ve perlitin, optik mikroskopta görünen parçacıkların açıkça görünen farklılıklarından dolayı bir kompozit malzeme olarak adlandırılabilir. Makroyapı seviyesinde ( $10^{-2}$  veya daha büyük) bir cam elyaf takviyeli plastik, cam elyafın gözle görünür farklılığı nedeni ile kompozit malzeme kabul edilir. Kompozit malzeme tanımında, malzemeyi oluşturan unsurlardaki büyüklük sınırlamaları nedeni ile tanımlamada zorlandığımızı kabul ediyoruz. Diğer bir deyişle kompozit malzemelerin tanımında büyüklük kavramı ne derece önemlidir ve mikro anlamda kompozit tanımı yapılabilir mi ?

Kompozit malzemeler; rijitlik, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyona karşı direnci, sertlik ve ısı/ekonomik iletkenliği gibi fiziksel ve mekanik özelliklere ulaşılmak amacı ile bir veya birden çok, değişik kimyasal ve fiziksel özelliklerdeki malzemenin doğal veya yapay olarak biraraya gelmesiyle oluşan yeni özellikte malzemelerdir.

Bu tanıma göre; atomsal veya molekülse seviyede birleştirilen malzemeler, makroskobik olarak homojen olduğundan kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar.

Ayrıca kompozit malzemelerde yapı bileşenleri, diğer bileşenlerle katı eriyik yapmazlar. Bunların içinde çözünmezler ve hizmet süresince bileşenler büyük oranlarda termodinamik ve boyutsal kararlılıklarını korurlar. Sıcaklık, kimyasal ve mekanik aşınma gibi etkilerle düşük miktarlarda çözünme ve bileşenler arasında arayüzey (inter facial) reaksiyonlar meydana gelebilir.

Kompozitte esas unsur malzemenin makroskobik olarak incelenmesidir. Fakat farklı malzemeler, alaşımlarda olduğu gibi mikroskobik ölçüde birleşebilir. Netice itibarı ile malzeme mikroskobik olarak homojendir. Kompozit malzemeler, klasik mühendislik malzemelerinden farklı birçok karakteristik özelliğelere sahiptirler. Bazı karakteristikleri klasik hareketlerinin değiştirilmesidir, diğerleri ise ( özelliklerin yöne bağımlılığı gibi ) tamamen yenedir ve deneysel prosedürler isterler.

Mühendislik malzemelerinin çoğu homojen ve izotropiktir. Homojen bir yapı uniform özelliğe sahiptir ve yapının içindeki bir noktadaki özellikler diğer her noktada aynıdır.

Kompozit malzemeler; yapıları, uygulama alanları pekiştiricilerin şekil ve geometrisine göre çeşitli kriter ve kavramlara göre sınıflandırılırlar.

Örneğin, mikro yapıya göre sınıflandırmayı ele alalım;

- 1) Matriks içinde sürekli fiberler: Düzenli veya düzensiz.
- 2) Matriks içinde kısa fiberler: düzenli veya düzensiz.
- 3) Matriks içinde partiküller ( Küreler, elipsoitler, düzensiz dağılmış katışıklar )
- 4 ) Dispersiyonla sertleştirilmiş malzemeler (  $10^{-6}$  cm )
- 5 ) Tabaka yapıları.
- 6 ) İskelet ve şebeke yapıları.
- 7 ) Çok bileşenli ve elyaflı, partiküllü kompozit yapılar.

Yukarıda görüldüğü gibi herhangi bir kompozit malzemenin gerçek anlamda bir tanımı yoktur. Bununla birlikte yapısal kullanıma yönelik kabul edilebilir bir kompozit malzeme tanımı için belli başlı üç nokta bulunur.

A. Kompozit malzemeler fiziksel olarak birbirinden farklı ve mekanik olarak ayrılabilir. ( İki yada daha fazla )

B. Birbirinden farklı malzemeler birbirleri içersinde istenen üründeki en iyi özellikleri kazandırmak amacı ile dağıtılan ve yayındırılan malzemeler.

C. Bu yayındırma ve pekişme sonucu meydana gelen kompozit malzemelerin özellikleri, kompozit yapıda bileşen fazlarının tek başına olan fiziksel ve mekanik özelliklerinden daha üstündür.

Bu son nokta kompozit malzemelerin geliştirilmelerine, araştırılıp çeşitli endüstriyel uygulamalar için kullanılmasına önayak olmuş ve malzeme biliminde yeni bir sayfa açan karma malzemelerin itici gücü olmuştur. Elyafı pekiştirilmiş kompozit örneğin de olduğu gibi, mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklere sahip elyaf ve plastikler birleştirilerek yepyeni ve son derece üstün özelliklere sahip malzemeler üretilebilmektedir. Elyafın yüksek mukavemet ve elastik dayanım özelliği olduğundan kompozit malzemelerin tokluk özelliğini belirleyen bileşenidir.



Elyaf lar kullanım amaç larına ba ğ lı olarak 2-20  $\mu\text{m}$  arasında de ğ iŝ en çaplara sahip olabilirler. Matriks malzemesi olan plastikler ise, her türlü kimyasal ortama karŝ ı direnç lidirler ve sünek yada gevrek olabilirler. Elyaf lar ile reç inelerin birleŝ tirilmesinden ortaya mukavemeti ve toklu ğ u saf elyaf ın de ğ erlerine yakın ve kimyasal direnci, plasti ğ in direncine yakın bir malzeme  ıkar. Bu da malzemecilerin önüne yeni ufuklar a ar. Tokluk ve kimyasal direncin yanında di ğ er arzu edilen özellikler direngenlik ve bükme direncidir. Tokluk özelli ğ inin arttırılması ile matriks malzemesinde ilerleyen yada ilerleyebilecek her türlü atla ğ ın ilerlemesi durdurularak, çatlak a ılma enerjisinin kısmen yok edilmesi ve çatlak yolunun saptırılması gerç ekleŝ tirilir. Kompozit malzemelerde bükme direnci ise üzerinde yeni çalı ŝ ılan bir konudur. Özellikle matriks malzemesi ile elyaf yada di ğ er pekiŝ tirici arasındaki arayüzeyin özelliklerinden etkilenen bükme direnci kompozit bileŝ enlerden daha az genleŝ me katsayısına sahip olana do ğ ru bir e ğ ilim gösterir.

Buraya kadar a ıklananlar, kompozit malzemelerin ileri teknoloji uygulamaları i in geliŝ tirildiklerini gösterir.

Kullanım alanlarına göre mühendislik malzemelerinin fiziksel ve mekanik zellikleri ;

Çekme, basma, bükme, akma, düşük çevrimde yorulma mukavemeti, mikro ve makro sertlik, elastik mukavemet, direngenlik, tokluk ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerin yanısıra özgül ağırlık, spesifik modül, ısıl genleşme katsayısı gibi fiziksel özellikler ve çevre şartlarına ( kimyasal korozyon vb. ) karşı direnç gibi özellikler sıralanabilir. Bu çok çeşitli özellik yelpazesinde, önem derecesi istenen endüstriye ve uygulamaya yönelik değişir. Yine uygulamaya yönelik çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklerin yanısıra kompozit malzemelerin seçim ve dizaynında işçilik birim maliyeti, hammadde akışı gibi faktörlerle birlikte kolayca işlenebilirlik ve şekillendirme gibi faktörlerde göz önüne alınır.

## 2.2. ELYAFLARLA PEKİŞTİRİLMİŞ KOMPOZİTLER.

Elyafı pekiştirilmiş kompozitler veya başka bir deyişle elyaf takviyeli kompozitlerde yüksek mukavemet, yorulma direnci, rijitlik ve yüksek elastite modülü ile özgül ağırlık değeri bulunmaktadır. Bu üstün özellikli, güçlü, rijit ve gevrek elyaflara karşın daha yumuşak ve sünek olan matriks malzemeleri istenilen süneklik ve tokluğu sağlamakla, dış kuvvetleri elyafa iletmekle görevlidir.

Buna karşın elyaflar, yükün büyük bir kısmını hatta tamamını taşırlar. Dispersiyonla pekiştirilmiş kompozitlerin mukavemetine nazaran elyaf takviyeli kompozitlerde mukavemet; hem oda sıcaklığında hemde yüksek sıcaklıkta artar. Elyaf kompozitlerde pekiştirici malzeme olarak son derece geniş bir ürün yelpazesi vardır. Elyaf takviye, matriks içine çeşitli yönlerde ve çeşitli şekillerde katılabilir.

#### 2.2.1. ELYAF KOMPOZİTLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.

Partikül ve tabakalı kompozitler için geçerli olan karışım kuralı, elyaf takviyeli kompozitler için de geçerlidir. Bu kural kullanılarak kompozit malzemenin çeşitli fiziksel özellikleri belirlenebilir. ( Örneğin özgül ağırlık, elektrik iletkenliği, ısı iletkenliği, elastite modülü, gerilmeler, vb. )

Karışım kuralı elyafın takviye yönüne bağlı olarak genel bir ifade ile ;

$$\sigma_k = \sum_i v_i \cdot \sigma_i \quad ( \text{Elyafı aynı yönde} )$$

$$1/\sigma_k = \sum v_i / \sigma_i \quad ( \text{Elyafa dik yönde} )$$

şeklinde yazılabilir.

Bu yöntemle kompozit malzemelerde birçok fiziksel özelliği belirlemek mümkündür. Bunlardan sadece sertlik ve mukavemet özellikleri karışım kuralı ile tespit edilemez.

Bir kompozit malzemenin mukavemeti elyafla matriks arasında oluşan bağa bağlı olup, matriksin deformasyonu ile sınırlıdır. Yani gerçek anlamda kompozit malzemenin mukavemeti her zaman için, karışım kuralı ile tahmin edilen değerlerden daha düşüktür. Süneklik, darbe, yorulma ve sürünme özellikleri gibi diğer özellikleri belirlemede, çekme özelliklerini belirlemeye göre daha zordur.

### **2.3, ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME TASARIMINDA ÖZELLİKLERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.**

#### **2.3.1, ELYAF ,BOY / YARIÇAP ORANI.**

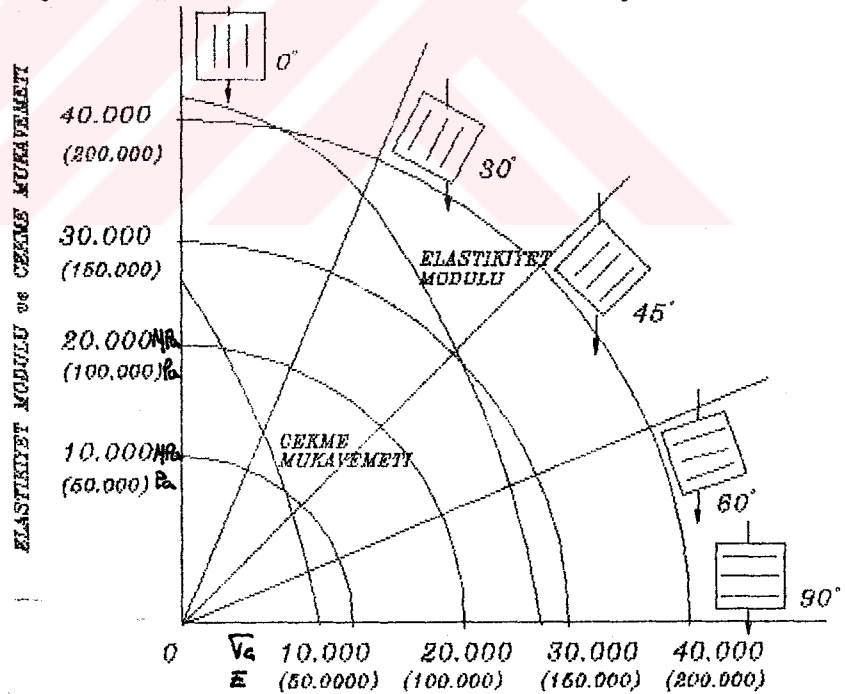
En iyi özellikleri veren sürekli elyafların imali ve matriks malzemesi içine yerleştirilmesi zordur. Süreksiz fiberlerden oldukça yüksek ( boy / yarıçap ) oranına sahip olanlar matriks içine kolayca yerleştirilir ve aynı zamanda yüksek rijitlik ve mukavemet sağlarlar.

### 2.3.2, ELYAFLARIN HACİM ORANI.

Bir kompozit malzemede, elyafların hacim oranlarının artması o malzemenin mukavemet ve rijitliğini arttıracaktır. Herhangibir kompozit malzemenin içersine elyaf katılmasındaki hacim sınırı yaklaşık % 80 dolayındadır. Bu oran elyafın matriks malzemesine sarılablmesinin üst sınırırır.

### 2.3.3, ELYAFLARIN ORYANTASYONU.

Yüklemenin elyafa paralel olması durumunda tek bir yönde pekiştirilmiş elyaflarda en uygun direngenlik ve mukavemet sağlanmaktadır. Bu durumda bazı mekanik ve fiziksel özellikler anizotropiktir. Elyafaların ortagonal veya karışık katmanlar halinde yerleştirilmesi durumunda maksimum mukavemetten vazgeçmek gerektiği, ama bunun yanında kompozit malzemede oldukça düzgün özelliklerin ortaya çıktığı söylenebilir.



Sekil 2.3.1 Elyaf yönünün özelliklere etkisi.

#### 2.3.4, ELYAF MALZEMELERİ.

Elyaf malzemesi, kuvvetli, direngen, hafif ve yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olmalıdır. Bu malzemenin özgül mukavemet ve özgül modülleri şu şekilde tanımlanabilir;

$$\text{Özgül Mukavemet} = \sigma / \rho$$

[ Kompozit malzemeler , 3/1991,İTÜ ]

$$\text{Özgül Modül} = E / \rho$$

Yüksek özgül mukavemet ve modüle sahip malzemeler elyaf olarak kullanılmak üzere tercih edilirler. En yüksek özgül modüle sahip malzemeler, düşük atom numaralı olanlar olup; kovalent olarak bağlanmışlardır. Bunlara örnek olarak Bor ve Grafit verilebilir. Her iki element te aynı zamanda yüksek mukavemet ve ergime sıcaklığına sahiptirler. Bu ilginç ve mükemmel özelliklerine rağmen bor ve grafit son derece gevrek ve kırılğan olduğundan sadece kompozit malzemelerde kullanılmaktadırlar.

Diğer ilginç elyaf adayı malzemelerin ilki Kevlar' dır. Bu malzeme, benzen halkalarını içeren bir omurga yapısı ile güçlendirilmiş aromatik poliamit polimerdir.

Kevlaların düşük sıcaklığına rağmen mükemmel mekanik özellikleri vardır. Cam ve Alümina her ikisinde hafif olup, yüksek özgül mukavemet ve modül özelliğine sahiptirler. Berilyum ve Wolfram, metalik bağa sahip olmalarına rağmen yüksek elastik modülünden dolayı oldukça elverişlidirler.

#### 2.3.5, MATRİKS MALZEMELERİ.

Bu malzemeler genellikle tok ve sünek olup yükü elyafa aktarırlar. Bu suretle kırılmış elyaflarda bulunan çatlakların bütün kompozit malzemenin içine yayılmasını önler. Matris, kompozitin tüm mukavemetine katkıda bulunduğu için aynı zamanda da kuvvetli olmak zorundadır.

Bu arada ergime sıcaklığı matrisin uygunluğunu yakından etkiler. Örneğin; polimer matrisli malzemelerden poliesterler 80°C ve polimer reçineler ise 315°C 'ye kadar olan uygulamalarda kullanılabilirler. Metal matrisler ise daha yüksek hizmet sıcaklıklarına izin verirler.

Matris ve güçlendiricilerin biraraya getirilmelerinin çeşitli yöntemleri vardır ve bu yöntemler matris ve güçlendiricinin birbiri ile uyumu gözönüne alınarak belirlenir.

#### 2.4, ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER.

Elyaf takviyeli kompozit gurubuna giren malzeme özellikleri ile ilgili çeşitli davranışları, kompozit malzemelerin metallere kıyasla özgül modül ve özgül mukavemetlerini şekil 2.1,2.2 ve 2.3 'te verilmişti. Grafiklerden de görüldüğü gibi cam,epoksi, fiberglas, gibi bazı kompozit malzemelerin özgül mukavemet ve özgül modül değerleri; titan, çelik gibi metallere aynı düzeye çıkmaktadır. Bunun başlıca sebebi, bu tür kompozitlerin matrikslerinin titan ve çeliğe nazaran daha zayıf kalmasıdır.

##### 2. 4. 1, PEKİŞTİRİLMİŞ BETON

Çelik çubuklarla pekiştirilmiş beton, esas itibarı ile bir, çift kompozittir. Beton, çimento ve çakıl ile hazırlanmış bir partikül kompozit olup daha sonra makro seviyede çelik çubuklarla pekiştirilerek kompozit haline getirilir. Çelik çubuklar betonun mukavemetini arttırır ve yapının çökmesini önler.

##### 2. 4. 2, ARAÇ LASTİKLERİ

Otomobil ve kamyon gibi taşıma araçlarının lastiklerinin üretiminde kauçugu pekiştirmek amacı ile nylon, kevlar ve çelik teller kullanılır.



### 2.4.3, FIBERGLAS

Polimer bir matriks içine cam elyafların yerleştirilmesi ile yapılmış bir kompozit malzemedir. Polimer matriks bir poliestere olup, elyafları genellikle kısa ve süresizdir. Bazı durumlarda camyünü ve örgülerde kullanılır. Cam elyaflar matriks içine yerleştirilmeden önce "silan" adındaki katışık elyafların üzerine serpilir ve bu sayede elyafların matriksle sağlam bir bağ oluşturması ve aynı zamanda su buharına karşı direncinin artması sağlanır.

### 2.5, ELYAF FAZLI İLERİ KOMPOZİTLER.

Tipik olarak ileri kompozit malzemelerde bor, grafit veya kevlar elyaflar polimer veya metal matriks içine yerleştirilir. Sonuç olarak bor, grafit veya kevlar elyafları ile pekiştirilmiş kompozitler, fiberglas veya daha yüksek mukavemet alaşımlarından daha mukavim ve daha fazla yorulma direncine sahiptirler.

İleri kompozit malzemeler, modern uçakların yapısal ve dış yüzey uygulamalarında kullanılır. Bunun sebebi ileri kompozitlerin yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmalarıdır. Yüksek sıcaklık uygulamaları için, alüminyum, titan veya nikel gibi metal matrikslere sahip , grafit, bor veya silisyum karbür gibi elyaflarla pekiştirilmiş kompozit malzemeler kullanılır.

Borsic pekistirilmis alüminyum; kuvvetli ve rijit bor elyafını içeren çok önemli bir kompozittir.

Bor ve alüminyum arasında iyi bir bağ oluşturabilmek için, elyaf ilk önce oldukça ince bir silisyum karbür veya bor nitrür tabakası ile kaplanır, bu kaplanan tabakanın hem bor, hem de alüminyum ile bağdaşık olması arzu edilir.

Kobalt ve nikel süperalaşımının pekişmesi için volfram elyaflar kullanılır. Yüksek sıcaklıktaki hizmet kabiliyeti, türbin motorlarının randımanını arttırdığından, önemli sayıdaki kanatçık ve diğer motor alaşımlarında kullanılır.

### BÖLÜM 3. KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROMEKANİĞİ

#### 3.1. ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ.

Mikromekanik yaklaşımlar, yapı bileşenleri ile birim kompozit parça arasındaki özellikleri belirler. Mikromekaniksel analizler içerisinde en bilineni karışım kuralı olup, birçok mikromekaniksel problemin çözümü için geçerlidir. Karışım kuralına göre kompozit özelliklerinin tespiti yapı bileşenlerinin ayrı ayrı özelliklerinin hacim oranları ile çarpılıp toplanması ile mümkündür.

##### 3.1.1. ÖZGÜL AĞIRLIK.

Kompozit malzemenin özgül ağırlığı karışım kuralına göre ifade edilir.

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f \quad (3.1)$$

Kütle fonksiyonu cinsinden;

$$\rho_c = 1 / [ (m_f / \rho_f) + (m_m / \rho_m) + (V_v / \rho) ] \quad (3.2)$$

$V_m$  = Matriksin hacim oranı.

$V_f$  = Elyafın hacim oranı.

$m_f$  = Elyafın kütle oranı.

$m_m$  = Matriksin kütle oranı.

$V_v$  = Boşlukların hacim oranı.

dir.

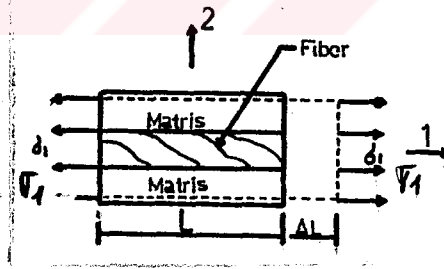
Aşağıdaki tabloda bazı elyaf malzemelerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Elyaf	Kevlar 49	E-camı	Karbon(YM)
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,38	2,08	1,58
Çekme day., 0° (MPa)	1400	1100	1250
Basma day., 0° (MPa)	280	586	800
Çekme day., 90° (MPa)	28	34	41
Basma day., 90° (MPa)	138	138	138
Çekme ve basma modülü			
0° (GPa)	77	39	210
90° (GPa)	8	9	8

Tablo 3.1. Tek yönde takviyeli bazı karma malzemelerin karşılaştırılması

### 3.1.2, ELYAF YÖNÜNDEKİ YOUNG MODULÜ ve POISSON ORANI.

Tek yönlü olarak sürekli elyaf ile pekiştirilmiş bir kompozit malzeme için elyaf ile paralel yönde çekme gerilmesi uygulandığında 1 ve 2 eksenleri kompozit malzemenin asal eksenleri olarak tanımlanır.



Şekil 3.1 Elyaf Eksenine Yönde Yüklenmiş Kompozit.

Karışım kuralından faydalanarak Young Modülü,

$$E_c = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m \quad ( 3.3 )$$

eşitliği ile bulunur. Bu denklem makromekaniksel analiz sonucu elde edilir. ( 1 ) yönündeki yükleme sonucu matriks ile elyafların arasındaki bağın oldukça kuvvetli olduğu kabul edilirse, toplam deformasyon; yapı bileşenlerinin ayrı ayrı deformasyon değerlerinin toplamına eşittir.

$$\epsilon_1 = \epsilon_m = \epsilon_f = \Delta L / L \quad ( 3.3a )$$

Gerilmeler ise;

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \epsilon_1$$

$$\sigma_f = E_f \cdot \epsilon_f \quad ( 3.3b )$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_m$$

dir.

(1) Yönündeki yük toplamı;

$$F_c = F_1 = F_m + F_f \quad ( 3.3c )$$

buradan;

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f$$

A = Kompozitin toplam kesit alanı.

A<sub>m</sub> = Matriksin toplam kesit alanı.

A<sub>f</sub> = Elyafaların toplam kesit alanı.

$$\frac{E_1 \cdot \epsilon_1 \cdot A}{A} = \frac{E_m \cdot \epsilon_m \cdot A_m}{A} + \frac{E_f \cdot \epsilon_f \cdot A_f}{A}$$

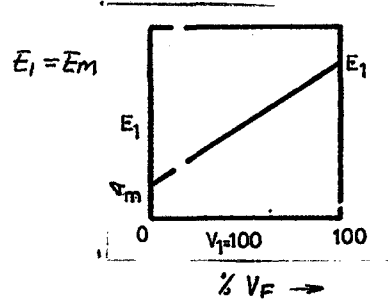
$$E_1 = \frac{E_m \cdot V_m}{1.\text{kısım}} + \frac{E_f \cdot V_f}{2.\text{kısım}} \quad ( 3.3d )$$

dir.

Elyafaların direngenliği matriks direngenliğinden oldukça fazla olduğundan 1. kısım sonucu etkilemez ve;

$$E_1 = V_F \cdot E_F \quad ( 3.3e )$$

olur.

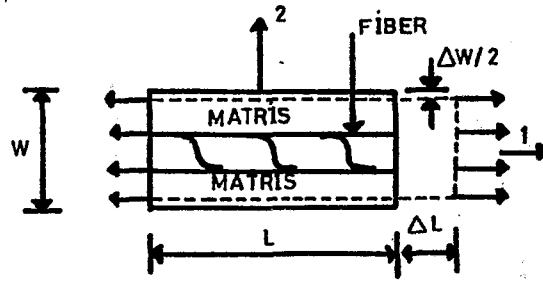


Sekil 3.2,  $E_1$  Modülünün Elyaf Hacim Oranına Göre Değişimi.

Elyafaların yönündeki poisson oranı da mikromekaniksel anlamda karışım kuralına göre belirlenebilir.

$$\nu = V_F \cdot \nu_F + V_m \cdot \nu_m \quad ( 3.4 )$$

Poisson oranını belirlemek için tekrar kompozit malzeme parçasına dönülecek olursa;



Sekil 3.3, (1) Yönünde Yüklenmiş Hacim Elementi.

Poisson oranı;

$$\nu_{12} = - (\epsilon_2 / \epsilon_1) \text{ dir.}$$

(1) Yönünde çekme gerilmesi uygulandığında;

$$\epsilon_2 = 1/2 [(\partial v / \partial y) + (\partial v / \partial y)] = 1/2 [-(\Delta D/D) - (\Delta D/d)]$$

$$\epsilon_2 = - (\Delta D/D)$$

$$D = - \Delta \epsilon_2 = \Delta \tau_{12} \cdot \epsilon_1 \quad ( 3.5 )$$

(2) Yönündeki deformasyon, (1) Yönündeki yükleme için, hem matriks hem de elyafta oluşan deformasyonun toplamına eşittir

Böylece;

$$\Delta D = \Delta D_f + \Delta D_m \text{ olur.}$$

Matriks ve elyaflardaki deformasyonlar şu şekilde tanımlanabilir;

$$\Delta D_m = D V_m \epsilon_1$$

$$\Delta D_f = D V_f \epsilon_1 \quad ( 3.6 )$$

Böylece:

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad ( 3.7 )$$

olur.

Elyafaların poisson oranını belirlemek oldukça güçtür, fakat eşitlik ( 3.7 ) den faydalanarak,

$$\nu_f = ( \nu_{12} - \nu_m V_m ) / V_f$$

yazılabilir.

### 3.1.3, ELYAFLARA DİK YÖNDEKİ YOUNG MODULU.

Kompozit malzemeye, elyaflara dik yönde çekme gerilmesinin uygulanması durumunda bu yöndeki elastik modül hesaplanırken matris ve elyaftaki gerilmelerin aynı ve  $\sigma_2$  gerilmesine eşit olduğu, kompozit malzemede (2) yönünde meydana gelebilecek deformasyonların da bileşenlerin deformasyonları toplamına eşit olduğu kabul edilir.

" Eş yükleme durumu "olarak adlandırılan bu yükleme koşulunda,

$$\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_f \quad ( 3.8 )$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_f + \epsilon_m \quad ( 3.9 )$$

denklemleri yazılabilir, Hooke kanununa göre ;

$$\epsilon_2 = \sigma_2 / E_2$$

$$\epsilon_f = \sigma_f / E_f$$

$$\epsilon_m = \sigma_m / E_m$$

olduğundan ve gerilmelerin eşit olduğu göz önüne alınırsa,

$$\sigma_2 / E_2 = (\sigma_f / E_f) \cdot V_f + (\sigma_m / E_m) V_m$$

$$1 / E_2 = (1/ E_f) \cdot V_f + (1/ E_m) V_m$$

$$E_2 = E_f \cdot E_m / E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f \quad ( 3.10 )$$

olur.



### 3.1.4, ELYAFLARA DIK YÖNDE YUKLENMİŞ KOMPOZİT.

$E_2$  ve  $E_1$  modülleri karşılaştırıldığında, pekiştirici elyafların (2) yönündeki rijitlik üzerinde oldukça zayıf bir etkiye sahip olduğu, bu yöndeki rijitliğin esas olarak matriksin kontrolünde olduğu görülebilir. 2-yönünde etkin bir pekiştirmenin sağlanabilmesi için elyaf rijitliğinin matriks rijitliğinden çok daha yüksek, yani  $E_f/E_m$  oranının büyük ve elyaf hacim oranının yüksek olması gerekir.

Bu durum  $E_f / E_m$  oranı;

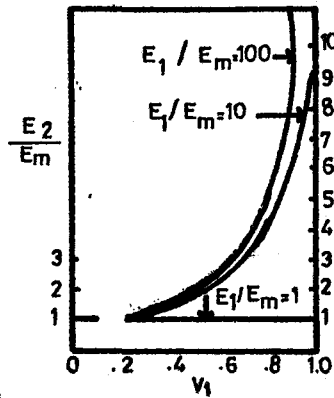
$$E_2 / E_m = E_f / (E_m V_f + E_f V_m)$$

şeklinde yazılıp pay ve payda  $E_m$  ile bölünürse;

$$E_2 / E_m = ( E_f / E_m ) / V_f + ( E_f/E_m ) V_m \quad ( 3.11 )$$

elde edilir.

Belirli bir hacim oranı için  $E_f/E_m$  'e değişik değerler verilerek (2) yönündeki rijitliğin matriks rijitliğinin kaç katına ulaşacağı hesaplanabilir.



Sekil 3.4,  $E_2 / E_m$  nin Elyaf Hacim Oranına Göre Değişimi.

$E_2$  rijitliğinin hesaplanmasında bileşenlerdeki gerilmelerin eşit olduğu kabul edilmiştir, ancak muhtemelen bu gerilmeler farklıdır. Ayrıca elyaf ve matriksin poisson oranları eşit olmadığından (2) yönünde etkiyen gerilme (1) yönünde elyaf ve matrikste çekme gerilmeleri, elyaf-matriks arayüzeyinde ise kayma gerilmeleri oluşturur. Bu nedenle  $E$  rijitliğini veren bağıntı ancak yaklaşık bir anlam taşır.

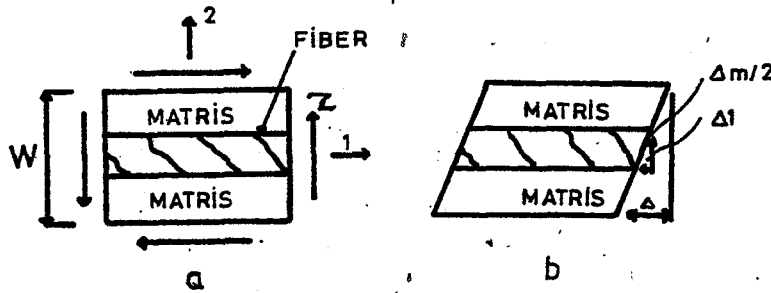
### 3.1.5, KAYMA MODULU.

Kompozit malzemenin  $G_m$  kayma modülünün belirlenmesi için yapılan analizlerde elyaf ve matriksteki kayma gerilmelerinin aynı olduğu toplam kayma deformasyonunda, bileşenlerdeki toplam defrmasyonlara eşit olduğu kabul edilir.

Elyaf kompozitlerin gösterdiği doğrusal olmayan kayma gerilimi, kayma deformasyonu davranışları ihmal edilip, tamamen doğrusal davrandıkları varsayıldığında matriks ve elyaftaki birim deformasyonlar;

$$\tau_m = \tau / G_m \quad , \quad \tau_f = \tau / G_f$$

olur.



Sekil 3.5, Kayma Gerilmesinin Oluşturduğu Deformasyonlar.

Kompozitteki toplam kayma deformasyonu  $\Delta$ , matris ve elyaftaki deformasyonlar ise  $\Delta_m$  ve  $\Delta_f$  ile gösterilirse;

$$\Delta = \tau \cdot W$$

$$\Delta_m = \tau_m \cdot W \cdot V_m$$

$$\Delta_f = \tau_f \cdot W \cdot V_f$$

yazılıp,

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_f = \tau W \quad ( 3.13 )$$

$$\tau W = \tau_m \cdot W \cdot V_m + \tau_f \cdot W \cdot V_f$$

$$\tau = \tau_m \cdot V_m + \tau_f \cdot V_f$$

yazılabilir.

$$\tau_m = \tau / G_m \quad , \quad \tau_f = \tau / G_f$$

Birim deformasyonlar ile ;

$$\tau / G_{12} = (\tau / G_m) \cdot V_m + (\tau / G_f) \cdot V_f$$

veya

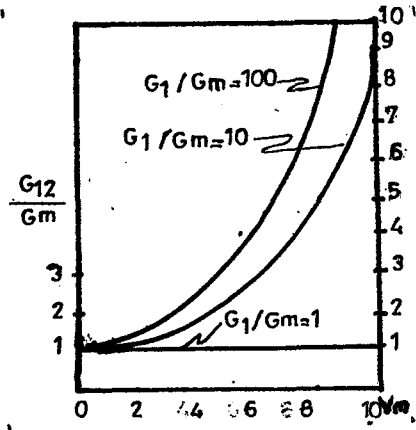
$$G_{12} = (G_m \cdot G_f) / (G_m \cdot V_f + G_f \cdot V_m)$$

olur.

$E_z$  modülüne benzer şekilde, elyafların kompozitin kayma modülü üzerindeki etkisi nispeten zayıf olup, kayma deformasyonunu kontrol eden esas bileşen matristir.  $G_{12}$  modülünün  $G_m$  'e oranı

$$G_{12} / G_m = (G_f / G_m) / [ V_f + (G_f / G_m) \cdot V_m ] \quad ( 3.15 )$$

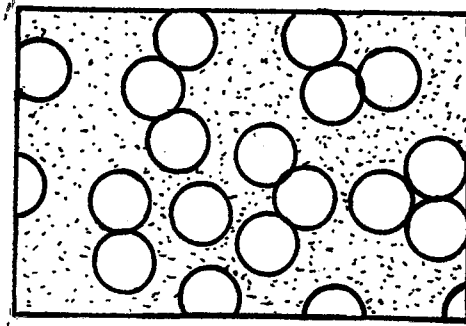
$G_{12} / G_m$  oranının elyaf hacim oranına göre değişimi farkı  $G_f / G_m$  değerleri için aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.6.  $G_{12} / G_m$  'in Elyaf Hacim Oranına Göre Değişimi.

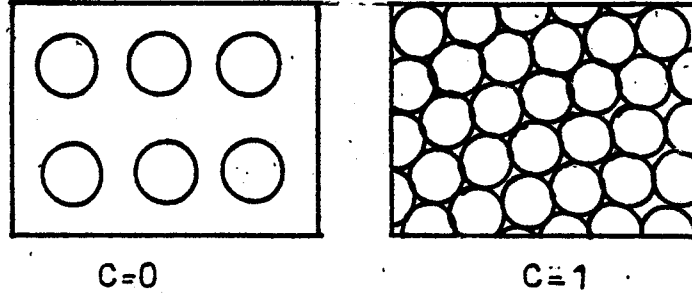
### 3.2. ELASTİTE DENKLEMLERİNİN ELYAF DÜZENİNE GÖRE MODİFİKASYONU

Elyaf kompozitlerin üretim koşullarında elde edilen pekçok yapısal düzen, pekiştiricilerin düzgün ve homojen bir sıralama gösterdikleri ideal yapıdan oldukça farklıdır. Bu nedenle kusursuz bir elyaf düzenine göre yapılan mikromekaniksel analizlerle elde edilen elastite denklemlerinin bu düzensizliklere göre modifike edilmeleri gerekir. İdeal bir yapıda tüm elyaflar matriks tarafından birbirinden ayrılmıştır ve elyaflar arasında temas yoktur. Gerçekte ise birbiri ile temas eden çok sayıda elyaf vardır.



Şekil 3.7. Gerçek Elyaf Düzeninin Şematik Görünümü.

Eğer temas derecesi C ile gösterilirse, birbiri ile temas eden elyafların bulunmaması durumunda C = 0, tüm elyafların temas ettiği durumda ise C = 1 olacaktır.



Sekil 3.8. Elyaf Temas Derecesinin Sınırları.

Tsai, elyaf temas derecesini göz önünde tutarak E modülü için aşağıdaki eşitliği önermiştir;

$$E_z = 2[1 - \nu_f + (\nu_f - \nu_m)V_m] \cdot \left[ \frac{(1-C)K_f \cdot (2K_m + G_m) - G_m(K_f - K_m)V_m}{(2K_m + G_m) + 2(K_f - K_m)V_m} \right]$$

$$+ C \cdot \frac{K_f[2K_m + G_f(K_m - K_f)]V_m}{(2K_m + G_f) - 2(K_m - K_f)V_m} \quad (3.16)$$

Bu eşitlikte;

$$K_f = E_f / 2 (1 - \nu_f)$$

$$K_m = E_m / 2 (1 - \nu_m)$$

$$G_f = E_f / 2 (1 + \nu_f)$$

$$G_m = E_m / 2 (1 + \nu_m)$$

( 3.17 )

dir.

C, E -  $V_f$  eğrilerini değişik C değerleri için karşılaştırarak belirlenebilir. Belirli bir malzeme için deneysel verilere uyumlu olan C değeri elastite denklemlerinde kullanılır. Poisson oranı, kayma modülü ve  $E_1$  modülü ise aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\begin{aligned} \nu_{12} = & (1-C) \cdot \left[ \frac{K_f \cdot \nu_f \cdot (2K_m + G_m) \cdot V_f + K_m \cdot \nu_m \cdot (2K_f + G_m) \cdot V_m}{K_f (2K_m + G_m) - G_m (K_f - K_m) V_m} \right] \\ & + C \cdot \left[ \frac{K_m \cdot \nu_m \cdot (2K_f + G_f) \cdot V_m + K_f \cdot \nu_f \cdot (2K_m + G_f) \cdot V_f}{K_f \cdot (2K_m + G_m) + G_f \cdot (K_m - K_f) \cdot V_m} \right] \quad (3.18) \end{aligned}$$

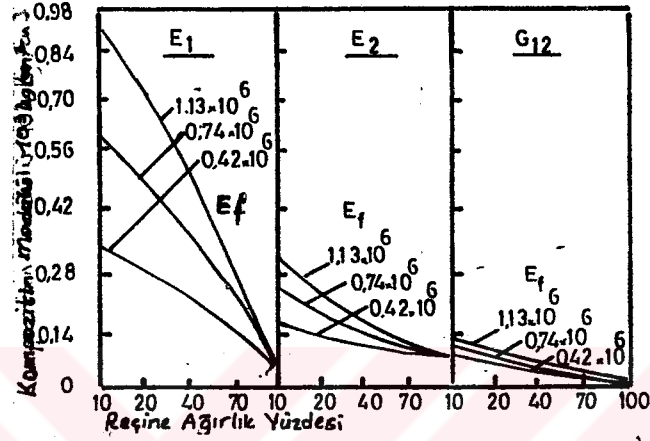
$$G_{12} = (1-C) \cdot \left[ \frac{G_m \cdot 2G_f - (G_f - G_m) V_m}{2G_m + (G_f - G_m) V_m} + C \cdot \frac{G_f \cdot (G_f + G_m) - (G_f - G_m) V_m}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m) V_m} \right] \quad (3.19)$$

$$E_1 = k \cdot (E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m) \quad (3.20)$$

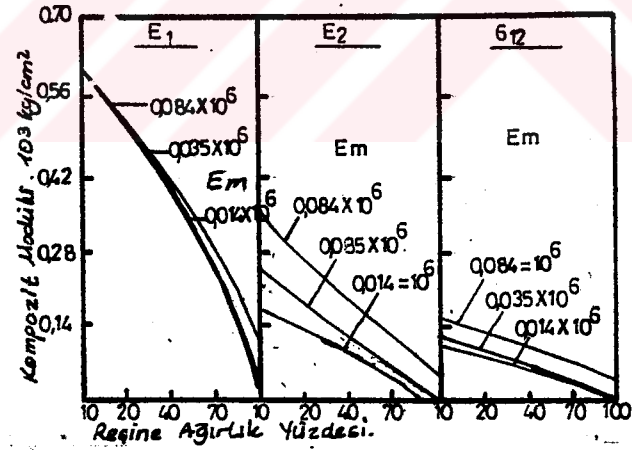
Tsai, bütün elyafların paralel bir sıralama göstermeyebileceğini göz önünde tutarak,  $E_1$  modülünü hatalı yönlenme faktörü  $k$  ile çarparak 3.20 denkleminde olduğu gibi değiştirmiştir. Şekil verme tekniğine önemli ölçüde bağlı olan  $k$  sabiti deneysel olarak belirlenir ve genellikle 0.9' dan daha yüksek değerler alır. Bu nedenle iki eşitlik arasında önemli bir fark görülmez.

Kompozitin  $E_1$  modülünün elyaf,  $E_2$  ve  $G_{12}$  modüllerinin ise esas olarak matriks tarafından kontrol edildiği anlaşılır.

Elyaf teması ve elyafların hatalı yönlendirmelerinin yanısıra, elyafların şekli ve matriks içinde dağılım düzenleri de elastik özellikleri etkiler. Bu etki özellikle elyaflara dik yöndeki  $E_2$  modülü ile  $G_{12}$  modülü üzerinde görülür.



Şekil 3.9.  $E_f$  'nin  $E_1$ ,  $E_2$  ve  $G_{12}$  'ye Katkısı.



Şekil 3.10  $E_m$  'nin  $E_1$ ,  $E_2$  ve  $G_{12}$  'ye Katkısı.

### 3.3, SÜREKLİ ELYAF KOMPOZİTLERİN DEFORMASYONU ve EKSENEL ÇEKME MUKAVEMETLERİ.

Sürekli elyaflarla tek yönlü olarak pekiştirilmiş kompozitlerin gerilme deformasyon diyagramlarında elyaf ve matriksin sünek ve gevrek davranmasına bağlı olarak dört ayrı bölge görülebilir.

- 1- Elyaf ve matriksin elastik olarak deforme oldukları bölge
- 2- Elyafların elastik deformasyonunun devam ettiği, matriksin ise plastik deformasyon gösterdiği bölge.
- 3- Her iki bileşenin de plastik deformasyon gösterdiği bölge.
- 4- Elyaflarda kırılmanın başladığı ve bundan hemen sonra kompozitte kırılmanın meydana geldiği bölge.

Elyafların sadece elastik davranış göstermeleri durumunda 3. bölge, her iki bileşenin de elastik davranması durumunda 2. ve 3. bölgeler görülmeyecektir. 1. bölgede kompozitin elyafla paralel yöndeki Young Modülü;

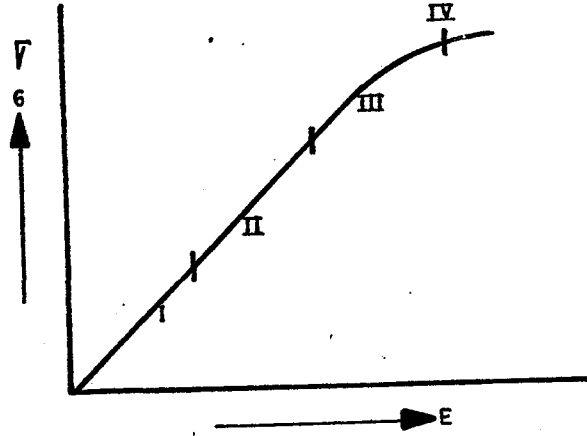
$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

eşitliği ile yaklaşık olarak belirlenebilir.

Sürekli elyaf kompozitlerin aksenel mukavemetleri iki farklı duruma göre belirlenebilir.

- a) Elyafların kopma deformasyonu değerinde, matriks max çekme mukavemetine ulaşmıştır.
- b) Elyafların kopma deformasyonu değerinde matriksteki gerilme, max çekme mukavemeti altındadır.





Sekil 3.11 Sürekli Elyaf Kompozitlerin Genel  $\sigma$ - $\epsilon$  Diyagramı.

2. bölgedeki modülü ise;

$$E = E_f V_f + (d\sigma_m / d\epsilon_m) \epsilon_f V_m \quad ( 3.21 )$$

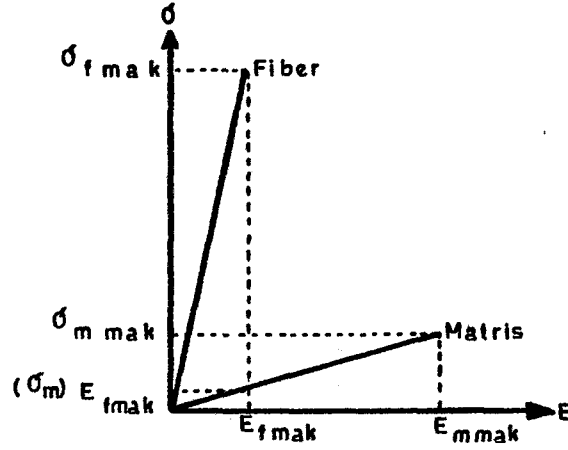
Bu eşitlikteki  $d\sigma_m / d\epsilon_m$  terimini elyafların kopma deformasyonuma karşı gelen deformasyon değerinde matriksin  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisinin eğimini gösterir.

2. bölgedeki young modülü yaklaşık olarak

değerindedir. Bu bölgede kompozit kompozit melzeme yarı elastik davranış gösterir. Yük kaldırıldığında deney parçası hemen hemen ilk boyutlarına döner, ancak matrikste bir miktar basma, elyafta ise çekme gerilmelerinin etkisinde küçük deformasyonlar kalır.

Sürekli elyaf kompozitlerin aksenal mukavemetleri iki farklı duruma göre belirlenebilir.

a) Elyafaların kopma deformasyonu değerinde, matriks maksimum çekme mukavemetine ulaşmıştır.



Şekil 3.12, Elyaf ve Matriks için Sematik E-σ Eğrileri.

b) Elyafaların kopma deformasyonu değerinde matriksteki gerilme, maksimum çekme mukavemeti altındadır.

Kompozit malzemelerin aksenal mukavemeti için yapılan analizlerde, dairesel kesitli elyafaların eşit mukavemette oldukları ve eşit şekilde yüklendikleri, yapı içinde birbirine paralel ve homojen bir şekilde dağıldıkları ve elastik davrandıkları kabul edilir. Eğer kompozitlerin elyaf hacim oranı belirli bir minimum değer üzerinde ise, kompozit malzemenin maksimum mukavemetine, elyafaların maksimum mukavemetine karşılık gelen deformasyon değerine ulaşır. Yani;

$$\epsilon_{kmax.} = \epsilon_{fmax.} \quad ( 3.22 )$$

$\epsilon_{kmax.}$  = Kompozitin çekmedeki max deformasyonu.

$\epsilon_{fmax.}$  = Elyafın çekmedeki max deformasyonu.

Elyafaların kopma deformasyonunda matriksteki gerilme maksimum değerine ulaşmışsa, kompozitin aksenal çekme mukavemeti;

$$\sigma_k = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad ( V_f > V_{min} ) \quad ( 3.23 )$$

eşitliği ile belirlenebilir.

$\sigma_k$  = Kompozitin max çekme mukavemeti.

$\sigma_f$  = Elyafın max çekme mukavemeti.

$\sigma_m$  = Matriksin max çekme mukavemeti.

Matriksin çekme deformasyon, genellikle gevrek davranış gösteren elyaflara göre daha yüksektir. Pekleştirici olarak kullanılan metalik tellerin dışındaki elyaflar sadece düşük düzeylerde elastik deformasyon gösterirler. Kompozit malzemenin maksimum çekme mukavemetine elyafların kırılma deformasyonunda ulaştığı kabul edildiğinden ve elyafların kopmasını matriksteki kopma izleyeceğinden;

$$\epsilon_k = \epsilon_f = \epsilon_m \quad ( 3.24 )$$

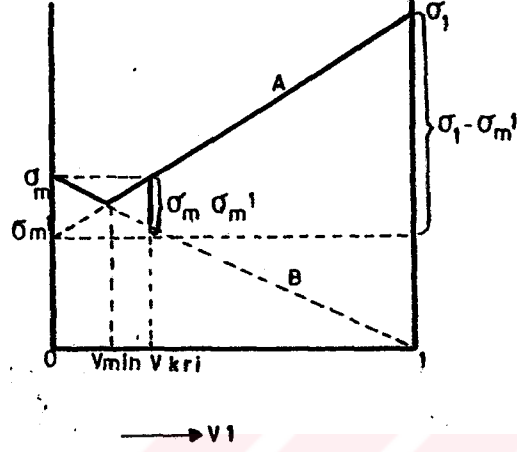
yazılabilir.

Matrikste bu küçük deformasyonu oluşturacak  $\sigma_m$ ' gerilmesi matriksin maksimum kayma gerilmesinden daha düşüktür. Bu nedenle kapasitesinin altında yüklenen matriksin, kompozitin mukavemeti üzerindeki etkisi de düşük olacak ve yukarıdaki denklem,

$$\sigma_k = \sigma_f V_f + \sigma_m' V_m \quad ( V_f > V_{min} ) \quad ( 3.25 )$$

şeklinde değişecektir.

Kompozit malzemenin aksenal çekme mukavemetinin elyaf hacim oranı  $V_f$ 'ye göre değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.13 Kompozitin Aksenal Çekme Mukavemetinin Elyaf Hacim Oranına Göre Değişimi.

3.23, 3.25 Eşitliklerinin uygulanabilirlik koşulu olarak ifade edilen minimum elyaf hacim oranı  $V_{min}$  ile, kritik elyaf hacim oranı  $V_{kr}$  grafikte gösterilmiştir.

A doğrusu 3.25 denklemine göre, B doğrusu ise,

$$\sigma_k = \sigma_m (1 - V_f) \quad ( 3.26 )$$

denklemine göre çizilmiştir.  $\sigma_m$ , matriksin maksimum çekme mukavemetini gösterir. A ve B doğrularının kesim noktası minimum elyaf hacim oranını vereceğinden,

$$\sigma_f V_f + \sigma_m' V_m = \sigma_m (1 - V_f)$$

$$V_f \text{ veya } V_{min.} = (\sigma_m - \sigma_m') / (\sigma_f + \sigma_m - \sigma_m')$$

olur.

Elyaf hacim oranının  $V_{min}$ 'dan daha düşük olması matriksin deformasyonunu kontrol edecek oranda elyafın olmaması anlamını taşır. Bu durumda, elyafların kırılma deformasyonuna kadar yüklendiğinde matriks henüz yük taşıyabilecek durumdadır ve deformasyon sertleşmesi gösterir. Ancak, elyafların kopması sonucu yük taşıyabilen etkin kesiti küçüleceğinden, maksimum çekme mukavemetine ulaşmadan kopacaktır. Böylece minimum değerden daha az oranda elyaf pekiştirilmiş kompozitlerin mukavemetleri, pekiştirilmemiş matriks mukavemetinin altında kalır ve;

$$\sigma_k = \sigma_m (1 - V_f)$$

denklemleri ile belirlenir.

Bu durumda 3.23 ve 3.25 denklemleri uygulanamaz.

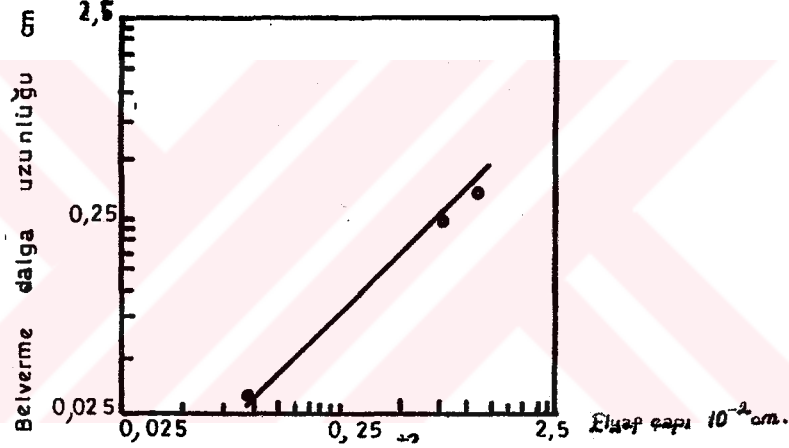
Şekil 3.13'ten görüleceği gibi, kritik elyaf hacim oranında kompozitin çekme mukavemeti, pekiştirilmemiş matriksin çekme mukavemetine eşittir. Ancak bu oran aşıldığında pekiştirme gerçekleşebilir. Kompozit malzemenin çekme mukavemetini belirleyen

$$\sigma_k = \sigma_f V_f + \sigma_m' V_m$$

denkleminde  $V_f$  değeri olarak kritik elyaf hacim oranı  $V_{kr}$  alındığında kompozit mukavemeti pekiştirilmemiş matriksin mukavemetine eşit olacaktır;

### 3.4, SÖREKLİ ELYAF KOMPOZİTLERİN BASMA MUKAVEMETİ.

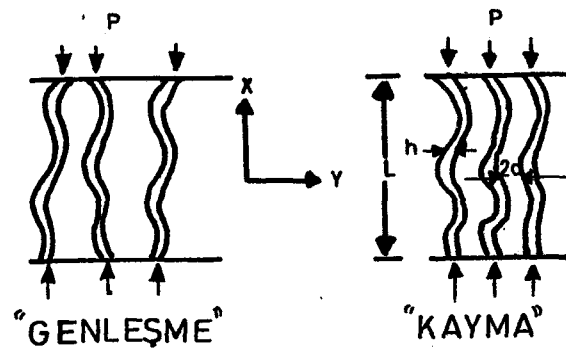
Elyaf kompozitlerin basma mukavemetlerinin analizinde, kompozit malzemeye elyafla paralel yönde basma yüklerinin etkidiği kabul edilir. Bu şekilde yükleme durumunda kompozitteki burulma, elyaflarda küçük dalga uzunluklarında belvermeler sonucu gürülür ve elastik bir zemin üzerine oturtulmuş kolonun belvermesine özdeştir. Elyafların dairesel kesitli olduğu kabul edildiğinde belverme dalga uzunluğu elyaf çapı ile orantılı olacaktır.



Şekil 3.14, Epoxy-Cam Elyaf Kompozitinde Elyaf Çapının Etkisi

Epoksi reçinesinin sertleşme sıcaklığından oda sıcaklığına kadar soğuması sırasında gösterdiği hacimsel büzülme, cam elyaflar üzerinde basma gerilmeleri oluşturarak elastik bir kararsızlığın ortaya çıkmasına neden olur.

Elyaf kompozitlerin basma davranışları aşağıdaki model yardımı ile açıklanabilir.

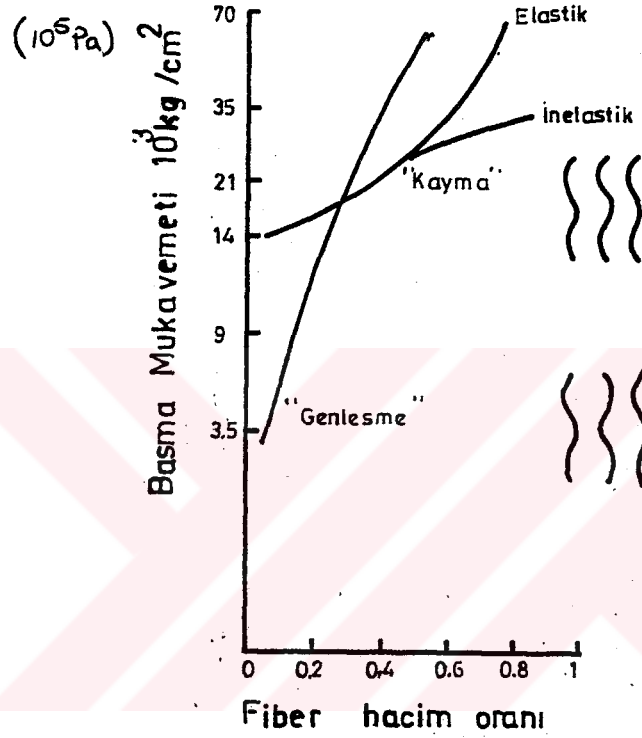


Sekil 3.15, Elyaf Kompozitin Basma Mukavemeti İçin Analitiksel model.

l uzunluğunda, h kalınlığındaki elyafların birbirinden  $2c$  mesafesinde homojen bir matriks içersinde düzgün bir şekilde dağıldıkları ve herbir elyafa aynı P yükünün etki ettiği kabul edilir. Bu koşullar altında kompozit malzemede görülecek bozulma, elyafların deformasyon şekillerine göre iki mekanizma ile gerçekleşir. İki komşu elyaftaki belverme ters yönde olduğunda, elyafa dik yöndeki matrikste genleşme şeklinde bir deformasyon meydana gelir ve " Genleşme şekli " olarak adlandırılır. Bu mekanizmada elyafların matriksten daha rijit olduğu ve kayma şeklindeki deformasyonların ihmal edilebileceği kabul edilir.

İkinci deformasyon şeklinde ise, elyafların aynı dalga uzunluğunda ve aynı fazda belvermeleri ihtimali gözönüne alınır.

Kompozitin 3500 kg/cm<sup>2</sup> lik değerinde bir basma mukavemetine sahip olabilmesi için elyaflara paralel yönde % 5'lik bir kısalmanın meydana gelmesi gerekir ki, bu değer epoksi reçinesinin orantılılık sınırının üstünde kalmaktadır.



Şekil 3.16 Epoxy-Cam Kompozitlerinin Basma Mukavemeti.

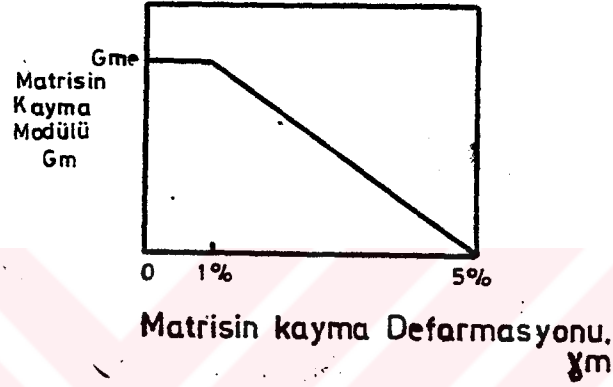
Bu nedenle mekaniksel analiz sonuçlarının, matriks malzemesinin inelastik deformasyonu gözönüne alınarak düzeltilmesi gerekir.

İnelastik davranış için basit bir yaklaşım;

$$\sigma_k = G_m / (1 - V_m) \quad ( 3.33 )$$



( 3.33 ) denklemindeki  $G_m$  modülü yerine, % 1-5 kayma deformasyonları arasında doğrusal olarak değişen kayma modülünün kullanılmasıdır ( şekil 3.17 ). Bu şekilde hesaplanan basma mukavemeti şekil 3.16 ' de " inelstik kayma şekli " eğrisi ile gösterilmiştir ve deneysel verilere daha uygundur.



Şekil 3.17, Matrisin Kayma Modülünün Kayma Deformasyonu ile Değişimi.

Elde edilen sonuçlar şekil 3.18 'de farklı bir şekilde gösterilmiştir.

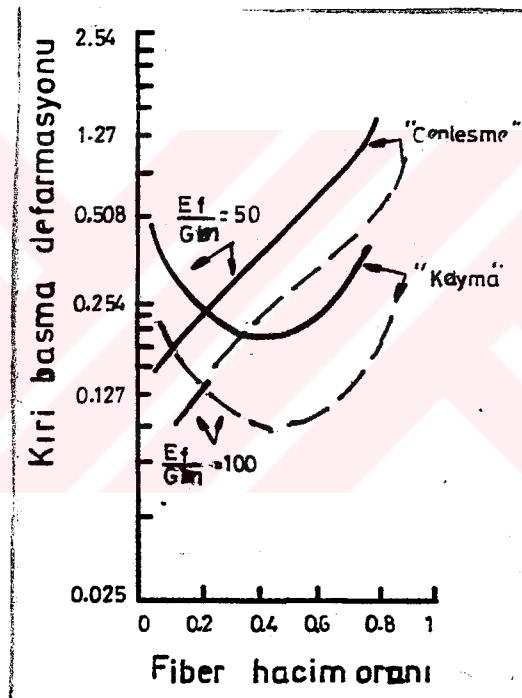
Poisson oranı 0,25 olan bir matris için kompozit malzemede bozulmanın meydana geldiği kritik basma deformasyonunun değişimi iki farklı  $E_f/G_m$  için çizilmiştir. Bu diyagramdan anlaşılacağı gibi kompozitin basma mukavemetinde matrisin kayma deformasyonu etkili olmaktadır.

$E_f/G_m$  oranında iki kat değerinde bir değişim kompozitin basma deformasyonunda aynı düzeyde bir değişime neden olur. Bu durum inelastik deformasyon sonucu matriksin kayma modülündeki düşmenin etkisini açıkça göstermektedir.

Kompozit malzemenin kritik basma deformasyonu;

$$\epsilon_{kri.} = \frac{1}{V_f(1-V_f)} \cdot \frac{G_m}{G_f} \quad ( 3.34 )$$

eşitliğinden hesaplanabilir.

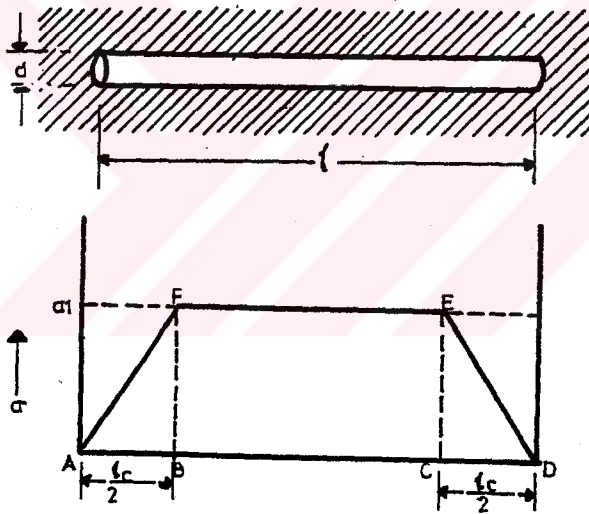


Şekil 3.18 Elyaf Kompozitlerde Kritik Basma Deformasyonu.

#### BÖLÜM 4. SÜREKSİZ ELYAF KOMPOZİTLER

##### 4.1, ELYAF-MATRİKS ARAYÜZEYİ ve GERİLİM TRANSFERİ.

Mühendislik uygulamaları için geliştirilen kompozit malzemelerin çoğunda süreksiz elyaflar kullanılır. Elyaflar malzemenin tam boyunca uzamadıklarından elyafla matris arasındaki bağ, orta kısımlara göre daha düşük oranlarda gerilme taşıyan elyaf uçlarında kopar. Böylece süreksiz bir elyaftaki çekme gerilmesi, elyaf uzunluğuna göre aşağıda gösterildiği gibi değişecektir.



Şekil 4.1, Süreksiz Elyaf Kompozitlerde Çekme Gerilmesinin Elyaf Boyuna göre Değişimi.

$\sigma_f$  = Elyafın max. çekme mukavemeti.

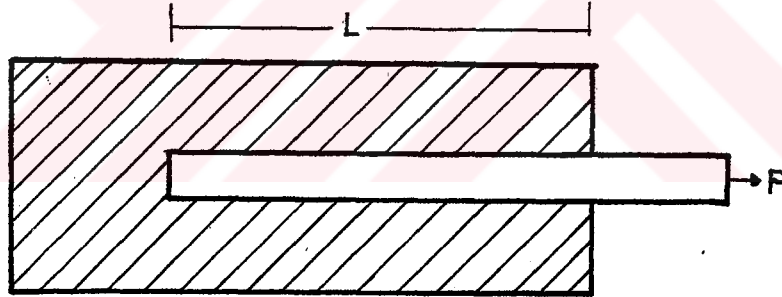
$\bar{\sigma}_f$  = Elyafın ort. çekme mukavemeti.

$l, d$  = Elyaf uzunluğu, elyaf çapı.

$l_c$  = Kritik elyaf uzunluğu.

Şekil 4.1' den görüldüğü gibi elyaflardaki gerilme, uçlarda düşük olup belirli bir mesafede max. değerine ulaşmakta ve elyafların orta kısımlarında sabit kalmaktadır. Gerilmenin uç kısımlarda düşük olması nedeniyle mukavemet hesaplamalarında elyafların max. gerilmesi yerine ortalama gerilmesinin alınması gerekir.

Süreksiz elyaf kompozitlerde elyaflar genellikle elastik davranış gösterirler. Elyafların elastik matrisin elastik veya plastik davranışlarına göre kompozit malzemeye gelen gerilmenin elyaflara ne şekilde transfer edildiğini anlamak için Şekil 4.2 'de gösterilen sistemi göz önüne alalım.



Şekil 4.2, Matris İçerisine Gömülmüş Elyaf.

$D$  çapındaki bir elyafların, matris içerisinde  $l$  mesafesine kadar yer aldığı ve matris ile kusursuz bir arayüzey bağı oluşturduğunu kabul edelim.

Elyafa bir çekme gerilmesi uygulandığında elyaf-matriks arayüzeyinde kayma gerilmesi oluşur. Bu kayma gerilmesine göre elyaf üzerine etkiyen kuvvet;

$$F = 2 \cdot \sigma_f \cdot r \cdot l \cdot \tau \quad (4.1)$$

olacaktır.

Elyaf-matriks arayüzeyindeki kayma gerilmesinin maksimum değeri  $\tau_{max}$ , elyafın kopma gerilmesi  $\sigma_f$  ile gösterildiğinde, elyaf üzerindeki çekme kuvveti arttırılırsa elyafın matriksten ayrılmadan ( ara yüzeyden sıyrılmadan ) kopabilmesi için;

$$2\sigma_f r l \tau_{max} > \sigma_f r^2 \quad (4.2)$$

olmalıdır.

$$d = 2r \quad (4.3)$$

alındığında bu koşul ;

$$l/d \geq \sigma_f / 4 \tau_{max} \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir.  $l/d$  oranı

" şekil oranı " olarak adlandırılır. Bu oran elyafın matriksten ayrılmadan kopabilmesi için gereken değerdir.

( 4.4 ) denkleminde, elyafın mukavemet artışında etkili olması için yeterince ince ve uzun olması gerektiğini göstermektedir.

Ara yüzeydeki kayma gerilmesi yüksek olduğunda  $l/d$  oranının küçülmesi mümkündür.

Şekil 4.1' e göre elyafın çekme mukavemetine

$$l = l_c / 2$$

mesafesine ulaşıldığından,

$$l/d \geq \sigma_f / 4 \text{ max.}$$

denkleminde,

$$l = l_c / 2$$

yazılırsa,

$$l_c / d = \sigma_f / 2 \tau_{\text{max.}}$$

elde edilir.

$l_c / d$  ; " kritik şekil oranı " olarak adlandırılır.

Bu eşitliklerde elyaf-matriks arayüzeyindeki kayma gerilmesinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Metal matriksler için kayma gerilmesi ( $\tau$ ) olarak matriksin kaymadaki akma gerilmesi  $\tau_y$  değeri alınabilir.

Böylece ;

$$l_c/d = \sigma_f / 2 \tau_{\text{max.}} \quad (4.5)$$

denklemini

$$l_c/d > \sigma / 2 \tau_y \quad (\tau_y = \text{sbt.})$$

yazılabilir.

$\tau$  gerilmesi sabit olduğunda, elyaf uçlarından itibaren gerilmenin artışı şekil 4.1'de görüldüğü gibi doğrusal olacaktır.

Elyafaların gerilme uçlarından itibaren x mesafesinde

değişeceğinden ortalama elyaf gerilmesi  $\bar{\sigma}_f$  ;

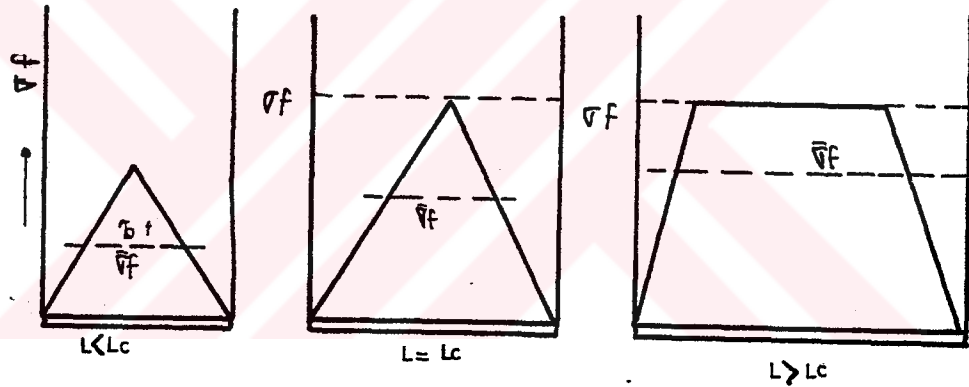
$$\bar{\sigma}_f = 1/l \int_0^l \sigma_x \cdot dx \quad (\zeta = sbt) \quad (4.6)$$

$$\bar{\sigma}_f = (\sigma_f/l) \cdot (1-l_c) + (\sigma_f/l) \cdot (l_c/2)$$

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f \cdot [1 - (l_c/2l)] \quad (4.7)$$

olur.

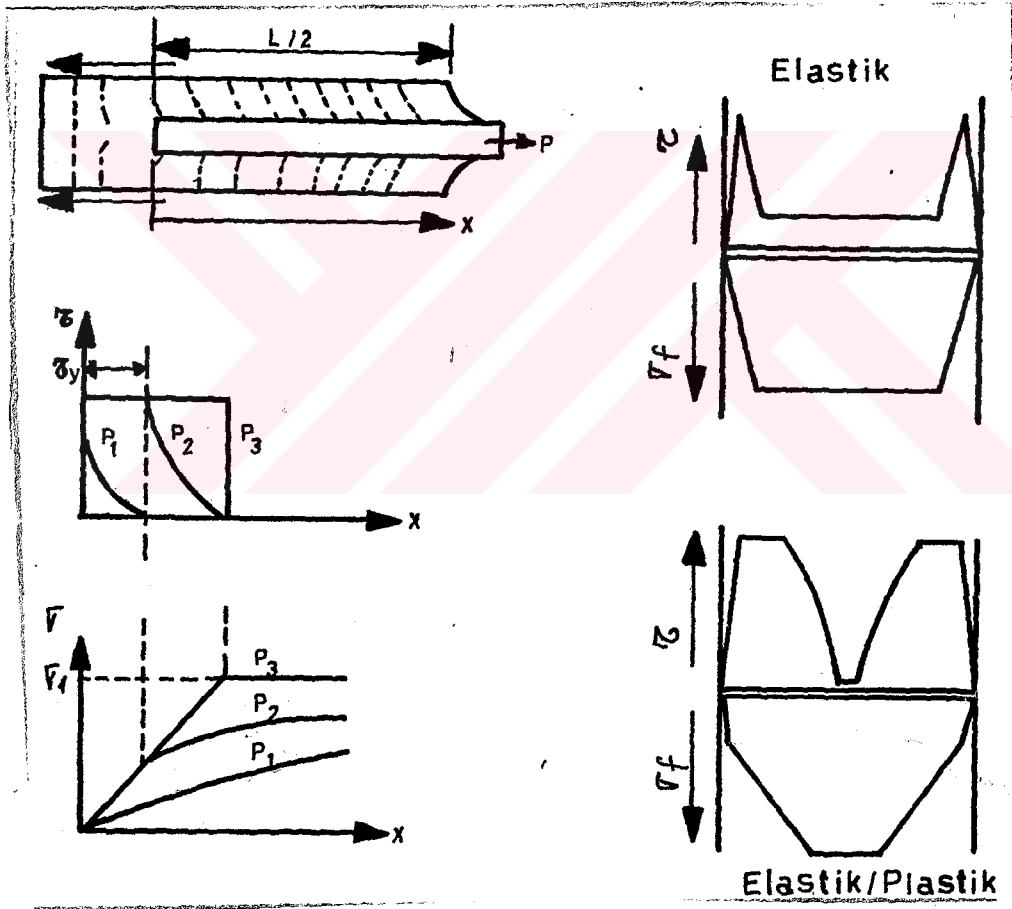
Bu oran " elyaf transfer oranı " olarak adlandırılır ve elyaflardaki ortalama gerilmeyi belirler. d çapındaki bir elyafta ortalama gerilmenin elyaf uzunluğuna bağlı olarak değişimi şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3, Ortalama Elyaf Gerilmesinin Elyaf Boyuna Göre Değişimi.

Bir çekme yükü, elastik bir matrikse uygulandığında, yük ile orantılı olarak uzayacaktır. Eğer elastiklik modülü daha yüksek bir matriks yapısında yer alırsa matriksin elyaf çevresinde serbestçe uzaması sınırlanır. ( Şekil 4.4 )

Elyaf ile matriks arasında kusursuz bir bağıın mevcut olması durumunda elyaf çevresindeki matriksin uzaması elyafın uzamasına eşit olacaktır. Matriks ve elyafın elastik davranış göstermesi durumunda elyaftaki çekme gerilmesi ile ara yüzeydeki kayma gerilmesinin elyaf boyunca değişimi (Şekil 4.5 ) görülmektedir.



Şekil 4.5, Elyaf-Matris Arayüzeyinde Gerilme Transferi



Kayma gerilmesi elyaf uçlarında max değerini aldıktan sonra düşer ve orta kısımlarında sabit kalır. Matriksin kayma modülünün elyafın Young Modülüne oranı ;  $G_m/E_f$  ne kadar büyük olursa elyafların uç kısımlarında gerilme artışı o derece hızlı olur. Kayma gerilmeleri elyaf uçlarında konsantre olur ve elyafla matriksin elastik modülleri arasındaki fark ile orantılıdır.

Elyaf çevresindeki matriks, genellikle kompozitin max çekme mukavemetinin çok altındaki değerlerde deforme olmaya başlar. Metalik matrikslerde, matriksin akma deformasyonu genellikle elyafın kopma deformasyonundan düşüktür. Kompozit malzemeye çekme yükü uygulandığında matriks ile elyaf arasındaki diferansiyel yer değişimi elyaf uçlarına yakın matrikste kayma gerilmeleri oluşturur. Küçük düzeydeki P1 yüklemede (Şek.4.5 ) kayma gerilmesi matriksin kontrolündedir. Daha büyük değerde bir P2 yükü uygulandığında plastik deformasyon başlar ve kayma gerilmesi, matriksin akma gerilmesi düzeyinde bir sınır değere ulaşır P2 yüklemede matrikste akma başlamış fakat elyaf max gerilmesine ulaşmamıştır. Daha yüksek değerde P3 yükü uygulandığında elyaftaki gerilme max değere ulaşır.

Matriksin plastik olarak deforme olduğu elyaf gerilmesinin max değere ulaşmadığı yükleme koşullarında (P2), elyaf ucundan x mesafesindeki elyaf gerilmesi aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$\pi r^2 \sigma_x = \sigma / x \int_0^x 2\pi r \tau_x dx, \quad r=2d \text{ alınarak,}$$

$$\sigma_x = 2/r \cdot \sigma / x \int_0^x \tau_x dx \quad (4.8)$$

$$x/d = \sigma_x / 4 \tau_x \quad (4.9)$$

Bu denkleme ;

x = elyafın max. çekme mukavemetine ulaşmayan parçasının uçtan itibaren uzunluğu, (cm) .

d = elyaf çapı (cm)

$\tau_x$  = x mesafesindeki kayma gerilmesi (Pa).

$\sigma_x$  = x mesafesinde elyaftaki gerilme (Pa).

4.9, eşitliğinde elyafın x parçası yerine toplam uzunluğu l,  $\sigma_x$  yerine elyafın çekme mukavemeti  $\sigma_f$  ve  $\tau_x$  yerine kayma gerilmesinin maksimum değeri  $\tau_{max}$ . alındığında 4.4 eşitliği elde edilir. Elyafın elastik, matriksin plastik deformasyon gösterdiği kompozitlerde elyaf çekme gerilmesi ile kayma gerilmesinin elyaf boyunca değişimi Şekil 4.5 'de görülmektedir. Matriks plastik deformasyon gösterdiğinde kritik elyaf uzunluğu  $l_c$  büyüdüğünden, yani matriksteki gerilmelerin transfer edildiği uzunluk arttığından, elyafın maksimum gerilmesine ulaştığı uzunluğu azalacaktır.

Bu nedenle belirli çaptaki elyafın ortalama gerilmesi düşecek ve aynı yükü taşımak için daha uzun elyafın kullanılması gerekecektir. Matriks elastik davranış gösterdiğinde elyaftaki gerilme daha kısa mesafelerde (küçük  $l_c$  değerinde) max değerine ulaşır.

Doğrusal bir gerilme-deformasyon davranışı göstermeyen termoplastik esaslı matrikslerde, elastik ve plastik davranışlar arasında kesin bir ayrım olmadığından  $\tau$  kayma gerilmesi sabit değildir. Bu nedenle elyaf uçlarında gerilme artışı doğrusal değildir ve ortalama elyaf gerilmesi 
$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f [1 - (1-\beta) \cdot l_c / l] \quad (4.10)$$
 değerindedir.

Bu eşitlikte  $\sigma_f$ , uçlardan  $l_c/2$  mesafesindeki ortalama elyaf gerilmesini verir.  $\beta$  'nin değeri matriks ve elyafın elastik sabitlerine, elyaf çapına ve elyaflar arası mesafeye bağlıdır.

#### 4.1.2, SÜREKSİZ ELYAF KOMPOZİTLERİN ELASTİK MODÜL VE ÇEKME MUKAVEMETLERİ

Süreksiz elyaflarda uç kısımlardaki gerilmenin düşük olması nedeniyle maksimum çekme mukavemetleri yerine:

$$\sigma_c = \sigma_f (1 - l_c / 2l)$$

ile verilen ortalama çekme mukavemetleri alındığından, kompozitin Young Modülüne katkıları  $E_f.V_f$  ile belirlenen değerlerinden daha düşük olacaktır. Aynı bileşenlerin aynı hacim oranlarında kullanıldığı süreksiz ve sürekli elyaf kompozitlerin Young Modülleri arasında:

$$E_{dc} = E_{cc} [ 1 - (r/2 \cdot \gamma_y \cdot L) E_f \cdot \epsilon ] \quad ( \gamma_y = s/bt ) \quad ( 4.11 )$$

şeklinde bir bağıntı vardır.

$E_{dc}$  = Süreksiz elyaf kompozitin young modülü (Pa),

$E_{cc}$  = Sürekli elyaf kompozitin young modülü (Pa),

$l, c$  = Süreksiz elyafın boyu ve yarıçapı (cm),

$\epsilon$  = Kompozit malzemenin kopmadaki deformasyonu (Pa),

$\gamma_y$  = Matriksteki kayma gerilmesi (Pa),

Yukarıdaki bağıntıda matriksin elastikiyet modülünün etkisi ihmal edilmiştir.

Matriksin polimer esaslı olması durumunda , kompozit malzeme düşük oranlarda deformasyon oluşturan gerilmeler elyaf uçlarına yakın matrikste kayma sonucu bozulmalar meydana getirebilir. Bu nedenle deformasyon arttığında kompozit malzemenin Young Modülü düşer. Elyaf uçlarından itibaren gerilme artışı doğrusal olarak kabul edilebilir. Ancak bu gerilmeler matriksin elastik deformasyonundan çok, matriks ile elyaf arasındaki kayma sürtünmelerinin etkisindedir.

Matriksteki kayma ihmal edildiğinde, elyaftaki gerilmeyi

veren :

$$\sigma_x = 2/r \int_0^x \tau_x dx \quad (4.12)$$

eşitliği  $r = d/2$  alınarak:

$$\sigma_x = (\mu \cdot 2p \cdot x)/r \quad (4.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu eşitlikte;

$\mu$  : Elyaf ile matriks arasındaki kayma sürtünme katsayısı.

$P$  : Fiber ile matriks arasındaki radyal basınç (Pa)

Böylece polimer matriksli süreksiz elyaf kompozitlerin kritik şekil oranı ve Young Modülleri;

$$l_c/d = \sqrt{\epsilon_f} \cdot 2 \cdot \max$$

ve

$$E_{dc} = E_{cc} [(1 - r/2\mu p l) E_f \epsilon]$$

eşitliklerinde  $\tau_y = \mu p$  alınarak bulunabilir.

$$l_c/d = \sigma_f / 2\mu p \quad (4.14)$$

$$E_{dc} = E_{cc} [1 - (r/2\mu p L) E_f \epsilon] \quad (4.15)$$

Elyaf matriks ara yüzeyindeki kayma sürtünme katsayısı  $\mu$ , çevresel koşullara, özellikle neme karşı duyarlıdır.

Polimerlerin pekçoğu sertleşme işleminden sonra soğutulurken hacımsal büzülme gösterirler. Bu büzülmenin meydana getirdiği radyal basınç :

$$P = t \cdot \sigma_y / d \quad ( 4.16 )$$

değerinde olup,

t = Komşu elyaflar arasındaki minimum mesafe (cm)

d = Elyaf çapı (cm)

y = Matriksin çekmedeki akma gerilmesidir (Pa)

Süreksiz elyaf takviyeli kompozitlerin çekme mukavemetleri, elyafların tamamen rastgele bir dağılım göstermeleri ve hacim oranlarının belirli bir minimum değer in üstünde olması durumunda :

$$\sigma_k = \sigma_f V_f + \sigma_m' ( 1 - V_f ) \quad ( 4.17 )$$

eşitliği ile belirlenebilir.

Bu eşitlikte  $\bar{\sigma}_f$  , ortalama elyaf mukavemetini gösterir. Eğer  $l_e/2$  mesafesindeki elyaf uçlarında gerilme artışı doğrusal değilse ortalama elyaf gerilmesi :

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f \left[ 1 - (1-\beta) l_e/1 \right] \quad ( \beta = 1/2 ) \quad ( 4.18 )$$

bağıntısından bulunur. Bu bağıntı ( 4.17 ) eşitliğinde yerine konulup,  $\alpha = 1/l_e$  alınır sa, gerilme artışının doğrusal olmadığı sistemler için ;

$$\bar{\sigma}_k = \sigma_f \cdot V_f [ 1 - (1-\beta)/\alpha ] + \sigma_m' (1-V_f) \quad (V_f > V_m) \quad ( 4.19 )$$

elde edilir.

4.19 eşitliği elyaf hacim oranı 0.60' a kadar çıkan kompozitlerde deneysel verilere uygundur. Daha yüksek elyaf hacim oranlarında ortaya çıkan elyaf-elyaf etkileşimleri sapmalara neden olur .

Sürekli elyaf kompozitlerin aksenal çekme mukavemetini veren ;

$$\sigma_k = \sigma_f V_f + \sigma_m^2 V_m \quad ( V_f > v_{min} )$$

eşitliği ile süreksiz elyaf takviyeli kompozitlerin çekme mukavemetini veren ( 3.25 ), ( 4.17 ) ve ( 4.18 ) eşitlikleri karşılaştırılırsa sürekli elyafların mukavemetlendirici etkilerinin daha yüksek olduğu görülür. Ancak  $\alpha = l_e/l_c$  oranı 5 mertebesinde olduğunda her iki malzemenin mukavemeti yaklaşık olarak eşittir.

Süreksiz elyaf takviyeli kompozitler için kritik elyaf hacmi  $V_{kri}$ , ( 3.25 ) eşitliğinde  $\sigma_f$  yerine, ( 4.10 ) eşitliği ile verilen ortalama elyaf gerilmesi  $\sigma_f$  alınıp  $l_e/l_c = 1/\alpha$  yazılarak;

$$V_{kri} = \frac{\sigma_m - \sigma_m^2}{\sigma_f [1 - (1-\beta) 1/\alpha] - \sigma_m^2} \quad ( 4.21 )$$

bulunabilir.

(4.17) ve (4.19) eşitliklerinin uygulanabilmesi için elyaf hacim oranının belirli bir minimum değeri aşması gerekir.

Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde  $V_{min}$  değerinin belirlenmesinde izlenen yola benzer şekilde elyaflardan hemen sonra kompozit malzemede kırılmanın meydana gelme koşulu yazıldığında;

$$\sigma_k \geq \sigma_m ( 1 - V_f ) + \beta/\alpha. (\sigma_f V_f) \quad ( 4.22 )$$

eşitliği elde edilir.

Bu bağıntıda yer alan  $(\beta / \alpha) \cdot \sigma_f \cdot V_f$  terimi, elyaflarda kopma meydana gelmeden önce  $l_c / 2$  mesafesi içinde kalan elyaf

uçlarının matristen kopmadan sıyrılacakları gerçeğini göstermektedir. Böylece (4.19) eşitliği (4.22) de yerine konulduğunda ;

$$\sigma_k = \sigma_f V_f [1 - (1 - \beta / \alpha)] + \sigma_m^* (1 - V_f) > \sigma_m (1 - V_f) + (\beta / \alpha) \sigma_f V_f$$

veya,

$$V_{min} = (\sigma_m - \sigma_m^*) / \sigma_f (1 - 1/\alpha) + \sigma_m - \sigma_m^* \quad (4.23)$$

elde edilir. Eğer  $l > l_c$  ise (4.23) eşitliğindeki  $V_{min}$  değerine ulaşılmaz ve kompozit malzemedeki bozulma matrisin deformasyonu ile gerçekleşir.

Süreksiz elyafların kritik boyları  $l_c$ , değişik tekniklerle belirlenebilir. Kompozit malzemenin kırık yüzeyi incelendiğinde kopma görülen elyafların sayısı  $n_f$ , kopmadan sıyrılan elyafların sayısı  $n_p$  ile gösterilirse ;

$$n_f / n_p = (l / l_c) - 1$$

bağıntısından kritik uzunluk belirlenebilir.

Diğer bir yöntem ise kompozit malzemenin çekme mukavemetinin elyaf hacim oranına göre değişimini deneysel olarak belirlemektir.



( 4.19 ) eşitliği;

$$\sigma_k = \sigma_f V_f [1 - (1-\beta)/\alpha] + \sigma_m^2 (1-V_f) \quad ( V_f > V_m )$$

$$d\sigma_k / d\sigma_f = \sigma_f [1 - (1-\beta)/\alpha] - \sigma_m^2$$

$$= ( \sigma_f - \sigma_m^2 ) - \sigma_f (1-\beta) / \alpha \quad l > l_c$$

şeklinde yazılabilir.

$\beta = 1/2$  alındığında ;

$$d\sigma_k / dV_f = ( \sigma_f - \sigma_m^2 ) - ( \sigma_f / 2 ) \cdot l_c / 2$$

$$l_c = \frac{2l [ \sigma_f - \sigma_m^2 - (d\sigma_k / dV_f) ]}{\sigma_f} \quad ( 4.25 )$$

elde edilir.

Elyaf ve matristeki gerilmeler ve kullanılan elyaf uzunluğu bilindiğinde, deneysel olarak ölçülen çekme mukavemetinden kritik elyaf uzunluğu belirlenecektir.

Elyaf boyu ve hacim oranı, belirli bir uygulama için malzemeden beklenen özelliklere göre seçilir. Yüksek mukavemet değerlerine ulaşmak için elyaf hacim oranı yeterince yüksek, elyaf boyu uzun olmalıdır. Tokluk özelliği yüksek kompozitlerin üretimi için ise, elyafların kopmadan ara yüzeyden sıyrılabilirmeleri için kısa boylu elyaflar veya boyları  $l_c$ 'den uzun ve kısa olan elyafların karışımı kullanılabilir,  $l_c$  boyunu uzatarak tokluğu arttırmak için, kayma mukavemeti düşük matrisler seçilebileceği gibi, ara yüzey kayma mukavemetini düşüren tekniklerde uygulanabilir.

#### 4.2, ANİSOTROPİK ELASTİSİTE - GENEL HOOKE KURALI.

isotropik bir cisim x- eksenini boyunca yüklendiğinde sadece x- yönünde değil ( $\epsilon_{xx}$ ), aynı zamanda y ve z yönlerinde de ( $\epsilon_{yy}$  ve  $\epsilon_{zz}$ ) deforme olur. Bu yüzden, deformasyon tensörünün sıfır olmayan bileşikleri ile gerilme tensörü arasında bire bir ilişki olduğu söylenemez. Bire bir ilişki yerine, her gerilme bir seri deformasyon bileşkesinin bütünü ve yine her deformasyon, bir seri gerilme bileşkesi bütünü ile ilgilidir. Bu yüzden, gerilme ile deformasyon matrislerini bir bütün olarak ele almak ve aralarında ilişki sağlayacak tensör ve matrisler tanımlamak gerekir.

Gerilmenin Genel Tanımı

Deformasyonun Genel Tanımı

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Hem gerilme hem de deformasyon için altı bağımsız elastik sabit vardır. O halde ;

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ \sigma_6 & \sigma_2 & \sigma_4 \\ \sigma_5 & \sigma_4 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad \epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_6 & \epsilon_5 \\ \epsilon_6 & \epsilon_2 & \epsilon_4 \\ \epsilon_5 & \epsilon_4 & \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Hooke kuralı gerilme ve deformasyonun tüm bileşikleri arasındaki genel lineer ilişkidir. Belli başlı iki şekli vardır ve her iki şekli tensor notasyonunda ifade edebiliriz :

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \epsilon_j, \quad \epsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (4.28)$$

Matris denklemleri şeklinde yazılırsa;

$$[ \sigma ] = [ C ] [ \epsilon ] \text{ ve } [ \epsilon ] = [ S ] [ \sigma ] \quad (4.29)$$

Burada  $[ C ] =$  Rijitlik (Stifness) matrisi,

$[ S ] =$  Uyum (compliance) matrisi'dir.

a) Rijitlik matrisi:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$C_{11}, C_{12}, \dots, C_{66}$  rijitlik bileşekeleridir ve birimi gerilme birimidir [MPa]

b) Compliance matrisi:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Böylece hem rijitlik hem de compliance matrisinin 36 adet elastik sabiti olduğu görülür. Bununla birlikte elastik sabitlerinin hepsi bağımsız olmayıp anisotropik cisimlerde bile birbirlerine bağımlıdırlar. Elastik deformasyon enerji analizinden yola çıkarak aşağıdaki bağıntı bulunabilir:

$$C_{ij} = C_{ji} \text{ ve } S_{ij} = S_{ji}$$

Rijitlik ve compliance matrisleri simetriktir ve bu nedenle her iki matris için 21 bağımsız elastik sabit vardır.

Anisotropik malzemelerde hiçbir simetri eksenini ve düzlem içermeyen gerilme-deformasyon veya deformasyon-gerilme ilişkilerini tanımlayan bu matrisler " Triklik simetri" matrisleri olarak tanımlanır. Her hangi bir düzlemin simetri düzlemi olması durumuna " Monoklinik simetri" denilir.

Compliance ve katılık matrisleri yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Aynı şekilde compliance matrisi de yazılır:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

21 adet sıfırdan farklı sabit olduğu bunlardan 13 tanesinin bağımsız olduğu görülür. Koordinat sistemi değiştiğinde yani gelişigüzel yükleme anında triklik simetri matrisleri geçerli olur.

#### 4.2.1, ORTHOTROPIK SIMETRI

Monoklinik simetride olduğu gibi malzemelerde simetri derecesi arttıkça bağımsız elastik sabitlerin sayısı azalır. Eger birbirine dik ( ortogonal ) üç düzlemde simetri varsa, bu tür malzemelere orthotropik malzeme denilir ve kompozit malzemelerin en genel durumlarından birini ifade eder.

Orthotropik malzeme ve simetri halinde bağımsız sabitlerin sayısı 9 adettir. Bir başka deyişle simetri düzlemleri seçilen koordinat sistemi ile çakışıkça bu simetriyi tanımlayan Hook kuralı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Orthotropik malzemelerde yükleme durumu, seçilen koordinat sistemine nazaran gelişigüzel bir konumda ise, yani yükleme eksenleri ve asal eksenler birbirlerinden farklı ve çakışık durumda değılseler; anisotropik Hooke kuralının en genel haline yani (4.28) denklemine dönölür. Bu denklemde 21 adet sabit vardır. Fakat, orthotropik simetride genel yükleme şartlarında ( asal eksenler dışı yüklemelerde ) 21 adet elastik sabit olsa da bunların 9 adedi bağımsızdır. Sonuç olarak orthotropik malzemelerde simetri düzlemlerinin konumu ve yerleşiminden etkilenmeyen 9 adet bağımsız elastik sabit bulunur.

#### 4.2.2, KESİT İSOTROPİK SİMETRİ (Transversly Isotropic Symmetry)

Malzeme simetrisinin bir üst seviyesi karşıt isotropik simetri ve malzemelerde bulunur. Bu tür malzemelerde 5 adet bağımsız elastik sabit vardır. Eğer isotropik düzlem koordinat sisteminin düzlemlerinden birisi ile çakışıkça sıfırdan farklı bileşke sayısı 9 adettir ve bunlardan 5 adedi bağımsızdır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{22}-C_{23})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22}-S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Kesitsel isotropi yani kesit alanda elastik özelliklerin tüm yönlerde aynı olmasından ötürü 5 adet bağımsız elastik sabit vardır. (  $C_{22}=C_{33}$  ,  $C_{13}=C_{12}$ ,  $C_{55}=C_{66}$ ,  $C_{44}=(C_{22}-C_{23})/2$ ,  $S_{22} = S_{33}$ ,  $S_{13} = S_{12}$ ,  $S_{55}=S_{66}$ ,  $S_{44}=2 ( S_{22}-S_{23} )$  ).

#### 4.2.3, ISOTROPİK SİMETRİ

Eğer bir kompozit malzeme tamamen isotrop ise yani yükleme altında tüm doğrultularda elastik sabitlerin sayısı 5 adet iken 2 ye düşer.Yani;

$$C_{11} = C_{22} = C_{33}$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{31}$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = ( C_{11}-C_{12} )/ 2 \quad \text{olur.} \quad ( 4.38 )$$

Aynı şekilde compliance bileşkelerinden  $S_{44}$ ,  $S_{55}$  ve  $S_{66}$  birbirlerine eşittir. Yani;  $S_{44} = S_{55} = S_{66} = 2(S_{11}-S_{12})$  dir.

öylece Hooke denklemi şu şekli alır;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

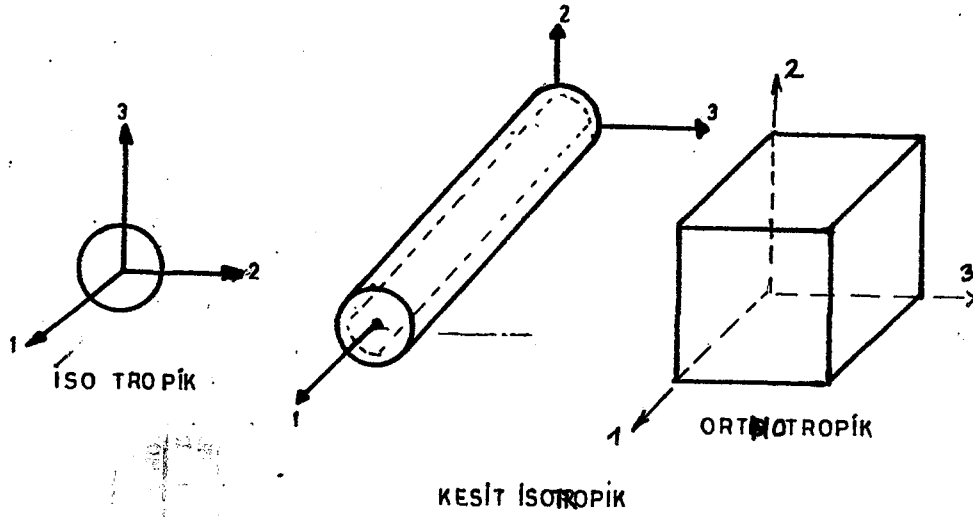
$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Tablo (4.1) 3- boyutta malzeme simetri esasları

Malzeme simetrisi türü	Bağımsız Elastik sabit say.	Sıfır olmıyan E.S. say. Asal eksen boyunca.	Sıfır olmıyan E.S. say. Asal eksen harici	Genel elastik elastik sabit say.
Triklinik	21	36	36	36
Monoklinik	13	20	36	36
Ortotropik	9	12	20	36
Kesitsel isotropik	5	12	20	36
İsotropik	2	12	12	12

Yukarıdaki tabloyu kullanarak eksenler harici yüklemeler için herhangi bir simetri durumundan diğerine geçişte gereken elastik sabit sayısı ve dolayısı ile istenen Hooke ilişkisi belirtilebilir.





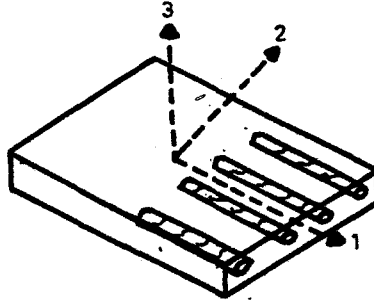
Şekil (4.6 En Çok Gözlenen Simetri Durumları

#### 4.3, ORTHOTROPİK MALZEMELERİN MÜHENDİSLİK SABİTLERİ.

Orthotropik karakterli malzemelerde, anisotropik malzemelerden farklı olarak  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  normal gerilmeleri ile  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{23}$ ,  $\tau_{31}$  kayma deformasyonları ve  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{23}$  kayma gerilmeleri ile,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  normal deformasyonları arasında bir etkileşim yoktur.

Young Modülü, Poisson oranı, kayma modülü ve elastik sabitler tek eksenli çekme veya kayma testi ile belirlenirler.

Deneylerde genellikle , malzemeye uygulanan gerilmelerin oluşturduğu deformasyonlar veya yer değişimleri ölçülür. Bu nedenle  $S_{ij}$  compliance matrisinin elemanları  $C_{ij}$  matrisindeki elemanlara göre daha kolay bir şekilde belirlenebilir.



Şekil (4.7) Orthotropik bir tabakada asal yönler.

Böyle bir tabakanın  $S_{ij}$  matrisindeki elemanları mühendislik sabitleri cinsinden aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

( 4.41 )

$E_1, E_2, E_3$ , sırasıyla 1, 2, 3 yönlerindeki Young Modülleri;  
 $\nu_{ij}$ , poisson oranı,  $G_{23}, G_{31}, G_{12}$  sırasıyla 2-3 3-1 ve 1-2 düzlemlerindeki kayma modülleri'dir.

Orthotropik tabakanın  $S_{ij} = S_{ji}$  simetrisi nedeniyle;

$$\tau_{ij} / E_i = \tau_{ji} / E_j \quad i, j = 1, 2, 3$$

dir.

Rijitlik ve compliance matrisleri birbirinin tersi olduğundan iki matrisin elemanları arasındaki bağıntı cebirsel işlemlerle bulunabilir. Bu bağıntılar;

$$\begin{aligned} C_{11} &= (S_{22} S_{33} - S_{23}^2) / S & C_{22} &= (S_{33} S_{11} - S_{13}^2) / S \\ C_{12} &= (S_{13} S_{23} - S_{12} S_{33}) / S & C_{23} &= (S_{12} S_{13} - S_{23} S_{11}) / S \\ C_{13} &= (S_{12} S_{23} - S_{13} S_{22}) / S & C_{33} &= (S_{11} S_{22} - S_{12}^2) / S \\ C_{44} &= 1/S_{44} \quad , \quad C_{55} = 1/S_{55} \quad , \quad C_{66} = 1/S_{66} \quad (4.43) \end{aligned}$$

$S = S_{11} \cdot S_{22} \cdot S_{33} - S_{11} \cdot S_{23}^2 - S_{22} \cdot S_{13}^2 - S_{33} \cdot S_{12}^2 + 2S_{12} \cdot S_{23} \cdot S_{13}$  dir.

Orthotropik malzemenin  $C_{ij}$  rijitlik matrisindeki elemanları

mühendislik sabitleri cinsinden göstermek için ,  $S_{ij}$  (4.41)

matrisinin tersi alınır veya bu matrisin elemanları (4.43)'de yerine konur.

$$\begin{aligned} C_{11} &= (1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}) / E_2 \cdot E_3 \cdot \Delta \\ C_{12} &= (\nu_{21} + \nu_{31} \cdot \nu_{23}) / E_2 \cdot E_3 \cdot \Delta = (\nu_{12} + \nu_{32} \cdot \nu_{13}) / E_1 \cdot E_3 \cdot \Delta \\ C_{13} &= (\nu_{31} + \nu_{21} \cdot \nu_{32}) / E_2 \cdot E_3 \cdot \Delta = (\nu_{13} + \nu_{12} \cdot \nu_{23}) / E_1 \cdot E_2 \cdot \Delta \\ C_{32} &= (1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}) / E_1 \cdot E_3 \cdot \Delta \\ C_{23} &= (\nu_{32} + \nu_{12} \cdot \nu_{31}) / E_1 \cdot E_3 \cdot \Delta = (\nu_{23} + \nu_{21} \cdot \nu_{13}) / E_1 \cdot E_2 \cdot \Delta \\ C_{33} &= (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) / E_1 \cdot E_2 \cdot \Delta \\ C_{44} &= G_{23} \quad , \quad C_{55} = G_{31} \quad , \quad C_{66} = G_{12} \end{aligned}$$

$$\Delta = \frac{(1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21} - \nu_{23} \cdot \nu_{32} - \nu_{31} \cdot \nu_{13} - 2 \cdot \nu_{21} \cdot \nu_{32} \cdot \nu_{13})}{E_1 \cdot E_2 \cdot E_3}$$

elde edilir.

#### 4.3.1, ORTHOTROPIK TABAKADA DOZLEM GERILME DURUMU IÇIN

##### GERILME - DEFORMASYON İLİŞKİLERİ.

Orthotropik tabakanın 1 - 2 düzleminin ( şekil 4.7) gerilme etkisinde olma durumunda;

$$\sigma_3 = 0, \quad \tau_{23} = \tau_{31} = 0, \quad \tau_{23} - \tau_{31} = 0 \text{ olacağından (4.40)}$$

denklemleri ,

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad ( 4.46 )$$

şeklinde basitleşir.

$S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$ , ve  $S_{66}$  terimlerini mühendislik sabitleri cinsinden yazılırsa;

$$S_{11} = 1/E_1$$

$$S_{12} = -\nu_{12} / E_1 = -\nu_{21} / E_2 \quad ( 4.47 )$$

$$S_{22} = 1/E_2$$

$$S_{66} = 1/G_{12}$$

elde edilir.

Deformasyon - Gerilme ilişkisi ( 4.46 ) eşitliğinin dönüştürülmesi ile elde edilir.  $S_{ij}$  matrisinin tersi alınırsa;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad ( 4.48 )$$

ve indirgenmiş rijitlikler olarak adlandırılan  $Q_{ij}$ ;

$$Q_{11} = S_{22} \backslash (S_{11} S_{22} - S_{12}^2)$$

$$Q_{12} = - S_{12} \backslash S_{11} S_{22} - S_{12}^2$$

$$Q_{22} = S_{11} / S_{11} S_{22} - S_{12}^2$$

$$Q_{66} = 1 \backslash S_{66}$$

elde edilir.

Mühendislik sabitleri indirgenmiş sabitler cinsinden

aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{12} = \nu_{12} E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}) = \nu_{21} E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

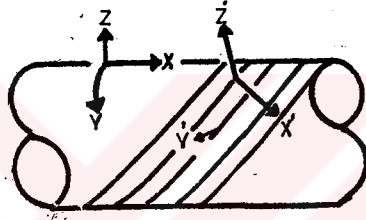
$$Q_{66} = G_{12}$$

#### 4.3.2, ASAL EKSENLER DIŞINDAKİ GERİLME DEFORMASYON İLİŞKİLERİ.

Gerilmelerle deformasyonlar arasındaki ilişkiyi belirleyen 4.46 ve 4.48 eşitlikleri orthotropik bir tabakada malzeme asal yönleri (elyafa paralel ve dik yönler) için tarif edilmişlerdir.

Ancak bazı durumlarda orthotropinin asal eksenleri problemin çözülmesi için seçilmesi gereken koordinat eksenleri ile çakışmaz.

Örneğin; Sürekli elyafların silindirik bir kabuk üzerine helisel bir şekilde sarılması durumunda gerilme deformasyon ilişkisinin belirlenmesi için silindirin  $x, y, z$  koordinatlarının seçilmesi gerekir. Bu koordinatlar  $x', y', z'$  ile gösterilen malzeme asal eksenleri ile çakışmaz.



Sekil 4.8 Elyafarla Helisel Biçimde Sarılmış Silindirik Kabuk.

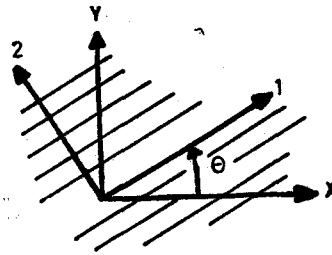
Sarma açısı  $\cos(y', y) = \cos\alpha$  olup  $z=z'$  dür. Farklı elyaf yönlenmesine sahip tabakaların birleştirilmesi ile elde edilen yapılarda da aynı durum söz konusudur.

Her bir tabakadaki gerilme ve deformasyonlar, bileşik tabaka için seçilen tek bir koordinat takımına dönüştürülerek bileşik tabakanın gerilme ve deformasyonları belirlenebilir. Elemanter mekanikte tanımlanan bu dönüşüm denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy}/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \tau_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Bu eşitliklerde malzemenin 1-2 koordinat sistemindeki gerilme ve deformasyonları x-y koordinat sistemine dönüştürülmüştür. X eksenini ile 1 eksenini arasındaki açı  $\theta$  ile gösterilmiştir.



Sekil 4.9 x-y Eksenlerinin Malzeme Asal Eksenlerine Göre Pozitif Rotasyonu.

Dönüşüm denklemleri aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \tau_{12}/2 \end{bmatrix}$$

(4.53)

Bu eşitliklerde tanımlanan (T) dönüşüm matrisi;

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

dir.

Dönüşüm denklemlerini kullanarak yapılan matris işlemleri ile x-y koordinatlarındaki gerilme -deformasyon ilişkisi,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}\cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{22}\sin^4\theta$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{12}(\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}\sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{22}\cos^4\theta$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{66}(\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

(4.56)



eşitliklerinden belirlenebilir.  $\bar{Q}_{1,1}$  matrisi "Dönüştürmüş İndirgenmiş Rijitlik Matrisi" olarak adlandırılır. Sürekli elyaflarla pekiştirilmiş düz bir tabaka göz önüne alındığında, elyaflarla  $\theta$  açısı teşkil eden bir yöndeki deformasyonlar bilindiğinde, bu deformasyonları oluşturacak gerilmeler 4.55 ve 4.56 eşitliklerinden belirlenebilir. Servis koşullarında tolere edilebilen deformasyonları oluşturacak gerilme sınırlarının belirlenmesi açısından bu bağıntı oldukça yararlıdır. Sürekli elyaflarla tek yönlü pekiştirilmiş bir kompozit tabakada pekiştirme yönü ile  $\theta$  açısı oluşturan yükleme koşullarında (eksen dışı yükleme) tabakada oluşacak deformasyonlar, 4.55 eşitliğinin tersi alınıp deformasyon-gerilme bağıntısı şeklinde ifade ederek bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta$$

$$\bar{S}_{12} = S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

(4.58)

x,y koordinatlarındaki deformasyonların belirlenmesinde izlenebilecek diğer bir yöntem, bu koordinatlarda verilen gerilmeleri dönüşüm denklemleri ile asal yönlerde tanımlayıp oluşturacağı asal deformasyonları 4.48 denkleminde bulmak ve yine dönüşüm denklemleri ile x,y koordinatlarına çevirmektir. 4.55 ve 4.57 eşitlikleri x,y koordinat sisteminde normal gerilmelerle kayma deformasyonları ve kayma gerilmeleri ile normal deformasyonlar arasında bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Bu bağlantı  $\bar{Q}_{1e}$ ,  $\bar{Q}_{2e}$ ,  $\bar{S}_{1e}$ ,  $\bar{S}_{2e}$  terimleri ile ifade edilmiştir. Örneğin x,y koordinatlarındaki gerilmeler  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  olarak verildiğinde, bu koordinat sisteminde meydana gelecek deformasyonlar 4.57 eşitliğine göre,

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \sigma_x \bar{S}_{11} + \sigma_y \bar{S}_{12} + \tau_{xy} \bar{S}_{1e} \\ \epsilon_y &= \sigma_x \bar{S}_{12} + \sigma_y \bar{S}_{22} + \tau_{xy} \bar{S}_{2e} \\ \epsilon_{xy} &= \sigma_x \bar{S}_{1e} + \sigma_y \bar{S}_{2e} + \tau_{xy} \bar{S}_{ee} \end{aligned} \quad ( 4.59 )$$

olacaktır.

X ve y yönlerindeki  $\epsilon_x$  ve  $\epsilon_y$  normal deformasyonları;  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  normal gerilmeleri ile  $\tau_{xy}$  kayma gerilmesinin oluşturduğu normal deformasyonun toplamına eşittir. Buna göre  $\tau_{xy} \bar{S}_{1e}$  çarpımı x yönündeki normal deformasyona, xy düzlemine uygulanan  $\tau_{xy}$  kayma gerilmesinin katkısını gösterecektir.

Benzer şekilde x-y düzleminde meydana gelen  $\tau_{xy}$  kayma deformasyonuna  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  normal gerilmelerinin etkisi,  $\sigma_x \bar{S}_{1\epsilon}$  ve  $\sigma_y \bar{S}_{2\epsilon}$  düzeyinde olacaktır. Yani 1-2 asal koordinatlarında orthotropik özellik gösteren tabaka, x-y koordinatlarında bu özelliğini kaybederek anisotropik davranış gösterir.

Anisotropik malzemelerde gerilme deformasyon ilişkisini belirleyen aşağıdaki eşitlikler yazılırsa ;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{2\epsilon} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{\epsilon\epsilon} \\ Q_{1\epsilon} & Q_{2\epsilon} & Q_{\epsilon\epsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{1\epsilon} \\ S_{12} & S_{22} & S_{2\epsilon} \\ S_{1\epsilon} & S_{2\epsilon} & S_{\epsilon\epsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

4.61 eşitliğindeki mühendislik sabitleri;

$$\begin{aligned} S_{11} &= 1/E_1 & S_{\epsilon\epsilon} &= 1/G_{12} \\ S_{12} &= -\nu_{12} / E_1 = -\nu_{21} / E_2 & S_{1\epsilon} &= \eta_{12.1} / E_1 = \eta_{1.12} / G_{12} \\ S_{22} &= 1/E_2 & S_{2\epsilon} &= \eta_{12.2} / E_2 = \eta_{2.12} / G_{12} \end{aligned}$$

bulunur. ( 4.62)

4.62 bağıntısında  $S_{1\epsilon}$  ve  $S_{2\epsilon}$  terimlerinde yer alan  $\eta_{1.12}$  sabitleri " karşılıklı etki katsayıları " olarak adlandırılırlar.

$\eta_{1.1j}$  katsayısı  $ij$  düzleminde etkiyen  $\tau_{1j}$  kayma gerilmesinin  $i$  yönünde meydana getirdiği normal deformasyonun  $\eta_{ij}$  düzlemindeki  $\tau_{1j}$  kayma deformasyonuna oranıdır;

$$\eta_{1.1j} = \epsilon_1 / \tau_{1j} \quad (4.62)$$

$\eta_{1j.1}$  katsayısı ise  $i$  yönünde etkiyen  $\sigma_1$  normal gerilmesinin  $i,j$  düzleminde meydana getirdiği kayma deformasyonunun  $i$  yönündeki normal deformasyona oranını gösterir;

$$\eta_{1j.1} = \tau_{1j} / \epsilon_1 \quad (4.63)$$

Orthotropik bir tabakanın  $xy$  koordinatlarında düzlem gerilme durumu için mühendislik sabitleri;

$$1/E_x = (1/E_1) \cos^4\theta + [ (1/G_{12}) - (2\nu_{12}/E_1) ] \sin^2\theta \cos^2\theta + (1/E_2) \sin^4\theta$$

$$\nu_{xy} = E_x [ \{ (\nu_{12}/E_1) (\sin^4\theta + \cos^4\theta) \} - \{ (1/E_1) + (1/E_2) - (1/G_{12}) \} \sin^2\theta \cos^2\theta ]$$

$$1/E_y = (1/E_1) \sin^4\theta + [ (1/G_{12}) - (2\nu_{12}/E_1) ] \sin^2\theta \cos^2\theta + (1/E_2) \cos^4\theta$$

$$1/G_{xy} = 2 [ (2/E_1) + (2/E_2) + (4\nu_{12}/E_1) - (1/G_{12}) ] \sin^2\theta \cos^2\theta + (1/G_{12}) (\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

$$\eta_{xy.x} = E_x [ (2/E_1) + (2\nu_{12}/E_1) - (1/G_{12}) ] \sin\theta \cos^3\theta - [ (2/E_2) + (2\nu_{12}/E_1) - (1/G_{12}) ] \sin^3\theta \cos\theta$$

$$\eta_{xy.y} = E_y [ (2/E_1) + (2\nu_{12}/E_2) - (1/G_{12}) ] \sin^3\theta \cos\theta - [ (2/E_2) + (2\nu_{12}/E_1) - (1/G_{12}) ] \sin\theta \cos^3\theta$$

$$\text{dir.} \quad (4.64)$$

#### 4.3.3, ORTHOTROPİK BİR TABAKA İÇİN MUKAVEMET KRİTERLERİ.

Tek yönlü elyaflarla pekiştirilmiş orthotropik bir tabakanın mukavemeti elastik özelliklerine benzer şekilde pekiştirilme yönüne bağlı olarak değişir. Kompozit malzemenin asal yönlerdeki mukavemetleri; asal yönleri bilindiğinde elyaflarla bir  $\theta$  açısı teşkil eden eksen dışı yükleme durumunda kullanılabileceği gerilme sınırları belirlenebilir. Max gerilme ve max deformasyon kriterleri bu amaçla uygulanabilir.

Max gerilme kriterlerinde prensip, malzemenin asal yönlerinde etkiyen gerilmeleri, bu yöndeki mukavemetleri ile karşılaştırmaktır. Kompozit malzemenin asal yönlerdeki mukavemetleri gerilmelerden daha az ise malzemede bozulma meydana gelecektir. Kompozit malzemenin elyaflara paralel yöndeki çekme mukavemeti;

$$\sigma_k = \sigma_f V_f + \sigma'_m V_m \quad ( V_f > V_{min} )$$

denkleminde hesaplanabilir. Elyafa dik yöndeki kompozit mukavemeti çekme testi ile belirlenebilir. Bu yöndeki mukavemet esas olarak matris ve matris - elyaf arayüzeyinin mukavemetinin kontrolündedir. Bu nedenle 2-yönündeki Y mukavemeti için;

$$Y = \sigma_m V_m \quad ( 4.65 )$$

veya

$$Y = \sigma_1 V_f \quad ( 4.66 )$$

yazılabilir.

$\sigma_m$  , matrisin çekme mukavemetini,  $\sigma_1$  ise ara yüzeyin çekme mukavemetini gösterir. 2- yönünde etkiyen  $\sigma_2$  gerilmesi 4.65 ve 4.66 eşitlikleriyle karşılaştırılabilir. Kompozit malzemenin 1 - 2 düzlemindeki  $S_{12}$  kayma mukavemeti ise matrisin kayma mukavemetinin veya elyaf-matris arayüzey mukavemetinin kontrolündedir.

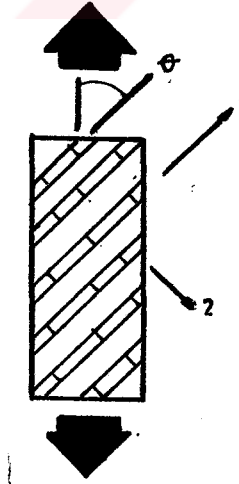
Kompozit malzemenin mukavemeti asal yönlerde tanımlandığından, eksen dışı yükleme durumunda maksimum gerilme kriterinin uygulanabilmesi için gerilmelerin asal yönlerdeki bileşenleri alınmalıdır.

Kompozit malzemeye elyafla  $\theta$  açısı oluşturan  $\sigma_x$  çekme gerilmesi uygulandığında (şekil 4.10 ) bu gerilmenin asal yönlerdeki bileşenleri dönüşüm denklemlerinden bulunabilir:

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta$$

$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta$$

$$\tau_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta$$



Şekil 4.10 Tek Eksenli Eksen Dışı Yükleme

Maksimum gerilme kriterine göre, kompozit malzemenin  $\sigma_x$  gerilmesini taşıyabilmesi için;

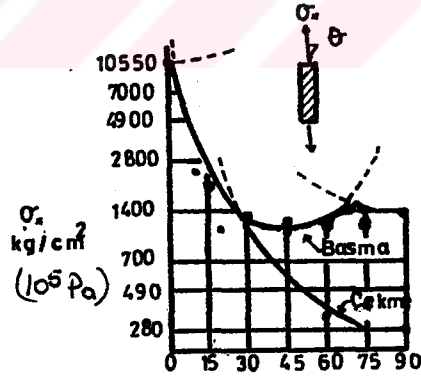
$$X > \sigma_x \cos^2 \theta$$

$$Y > \sigma_x \sin^2 \theta \quad (4.67)$$

$$S > \sigma_x \sin \theta \cos \theta$$

eşitsizlikleri sağlanmalıdır. Kompozit malzemenin asal yönlerdeki mukavemeti kayma gerilmesinin işaretinden bağımsızdır.

Yalnız dikkat edilmesi gereken husus max gerilme kriterine ve max deformasyon kriterine göre yapılan hesaplarla deneysel sonuçlar birbirine tam olarak uymamaktadır.



Şekil 4.11 Max Gerilme Kriterine Göre E-Camı-Epoxy Kompozitinin Mukavemeti

TEZ İLE İLGİLİ BİLGİSAYAR PROGRAMININ TANITIMI  
VE ÇALIŞMA ŞEKLİ.

Tez konumun sonuç kısmını oluşturan bilgisayar programı TUBO PASCAL ile hazırlanmış olup, Kompozit malzemeler ile ilgili değişken ve sabitlerden faydalanmak sureti ile elimizdeki ve imali istenen kompozit malzemenin mekanik dayanımları hakkında net ve çabuk sonuçlar elde etmeye yarar.

Programın iki tane "EXE" dosyası vardır. Bunlardan ilki çalıştırıldığında karşımıza çıkan menüde;

- A: TEMAS DERESESİNE BAĞLI OLARAK MUHENDİSLİK SABİTLERİNİN DEĞİŞİMİ.
- B: ELYAF YÖNÜNE GÖRE MEKANİK ÖZELLİKLERİN DEĞİŞİMİ.
- C: ELYAF ÇAPININ ÇEKME MUKAVEMETİNE ETKİSİ.
- X: ÇIKIŞ.

ifadeleri görülür. A,B ve c seçeneklerinden herhangi birini seçecek olursak karşımıza yeni bir menü çıkar. Bu menüde görülenler;

- A: VERİLERİN İŞLENMESİ.
- B: TABLO HALİNDE SONUÇLAR.
- C: GRAFİK HALİNDE SONUÇLAR.
- X: ÇIKIŞ

ifadeleridir.



A: seçeneği kullanıldığında; özellikleri istenen malzemeye ait mühendistik sabitleri ve değişkenler girildikten sonra, sonuç seçeneklerinden herhangi birisini kullanırsak tablo halinde ve grafik halinde sonuçları almak mümkündür.

ikinci "EXE" dosyasında ise;

D: YOUNG MODULÜ.

E: ÇEKME MUKAVEMETİ.

F: SUREKSİZ ELYAF KOMPOZİTLERDE ELYAF BOYUNA GÖRE ORTALAMA ÇEKME GERİLMESİNİN DEĞİŞMESİ.

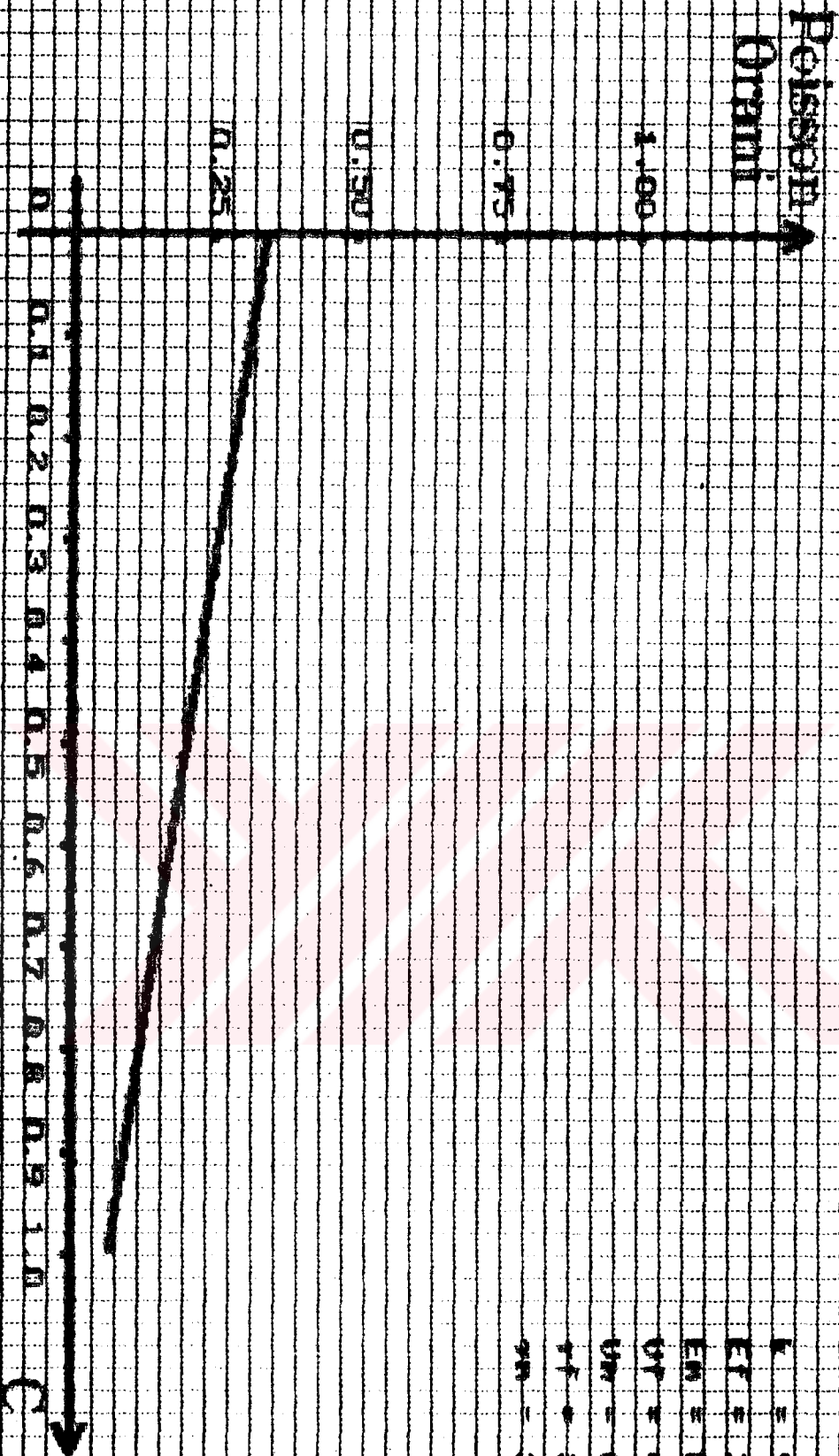
seçenekleri bulunmakta ve çalışma prensibinde aynen bir önceki şekilde anlatıldığı gibi olmaktadır.

Bu çalışma sadece ortotropik malzemeler için geçerlidir.





# Temas Derecesine Bağlı Olarak Mühendislik Sabitlerinin Değişimi



$$E = 950E-8$$

$$E_T = 1130000 E+5 Pa$$

$$E_M = 84000 E+3 Pa$$

$$U_T = 400E-3$$

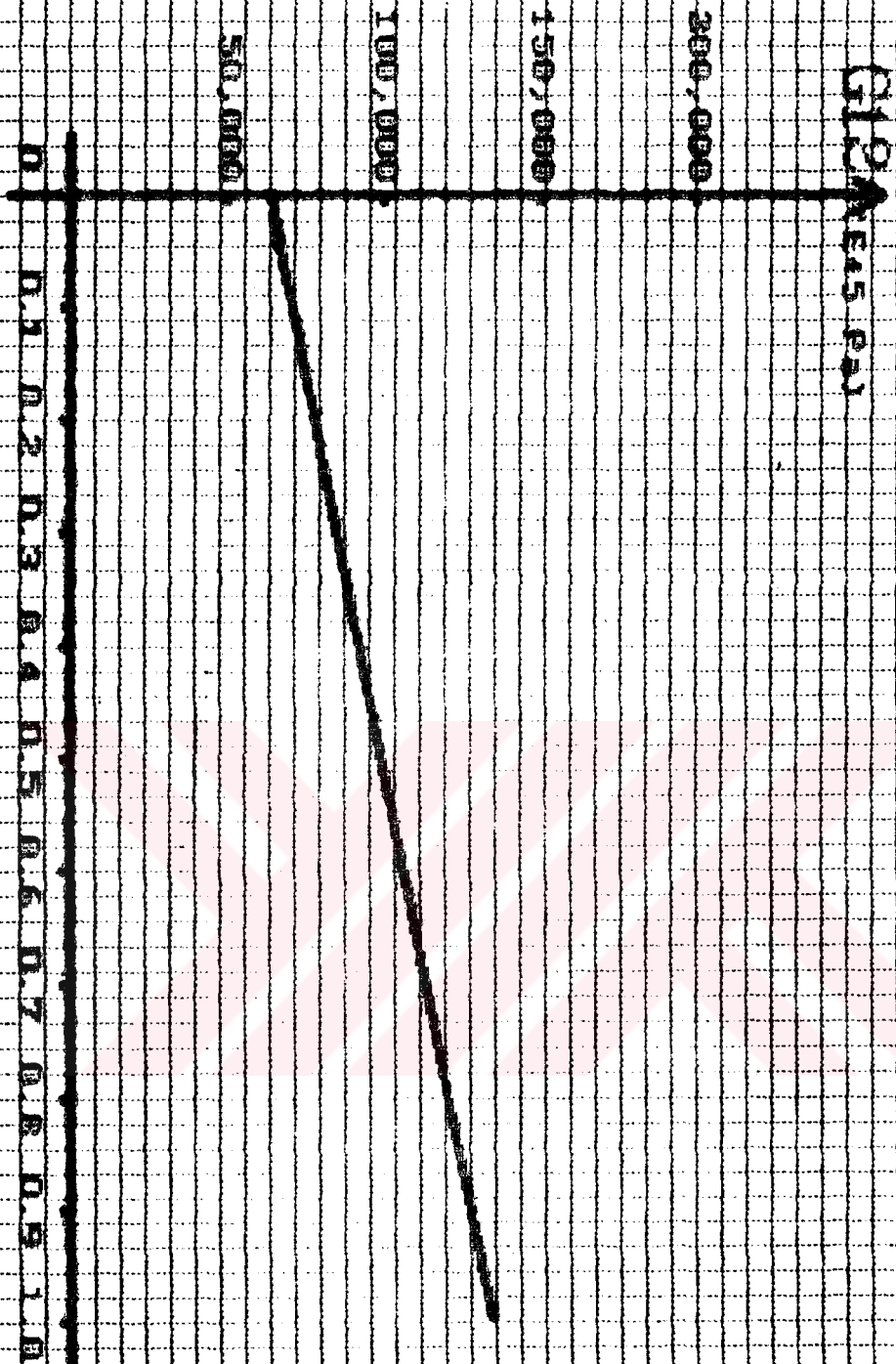
$$U_M = 600E-3$$

$$U_T = 390E-3$$

$$U_M = 250E-3$$

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

# Temas Derecesine Bağlı Olarak Mühendislik Sabitlerinin Değişimi

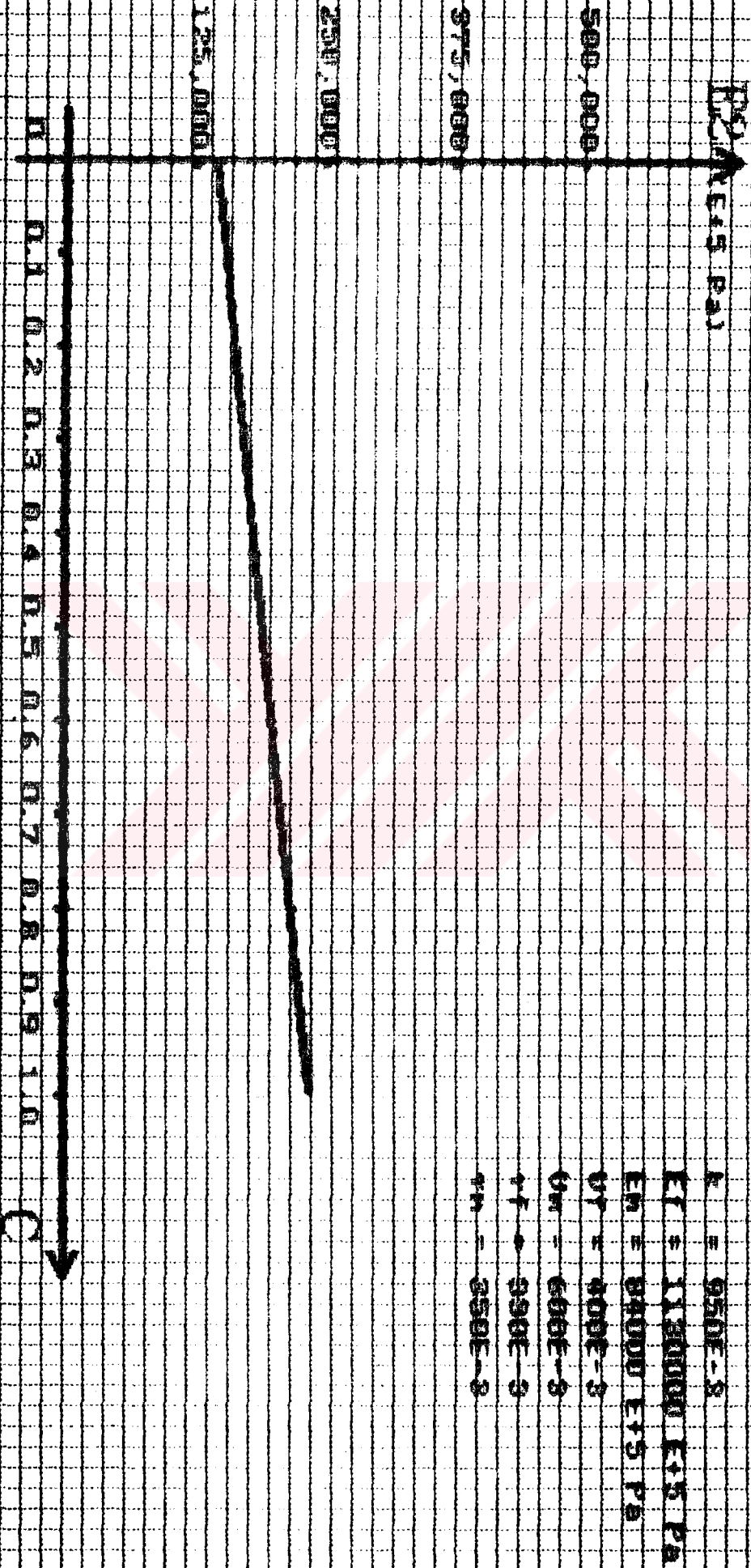


$k = 950E-8$   
 $E_T = 1130000 E+5 Pa$   
 $E_M = 84000 E+5 Pa$   
 $V_T = 400E-3$   
 $U_M = 600E-2$   
 $U_F = 300E-3$   
 $U_M = 350E-2$

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

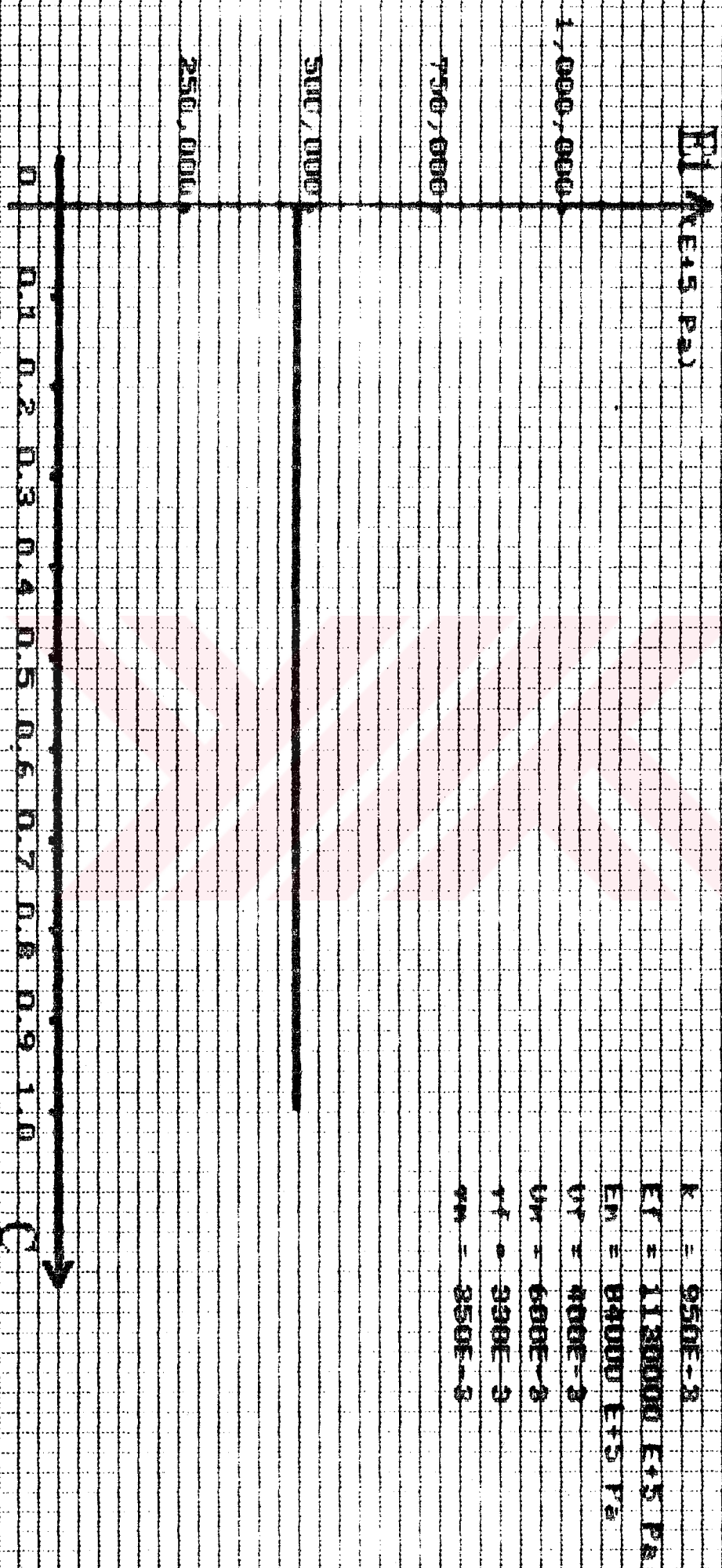


# Temas Derecesine Bağlı Olarak Mühendislik Sabitlerinin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

Temas Derecesine Bağlı Olarak  
Mühendislik Sabitlerinin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

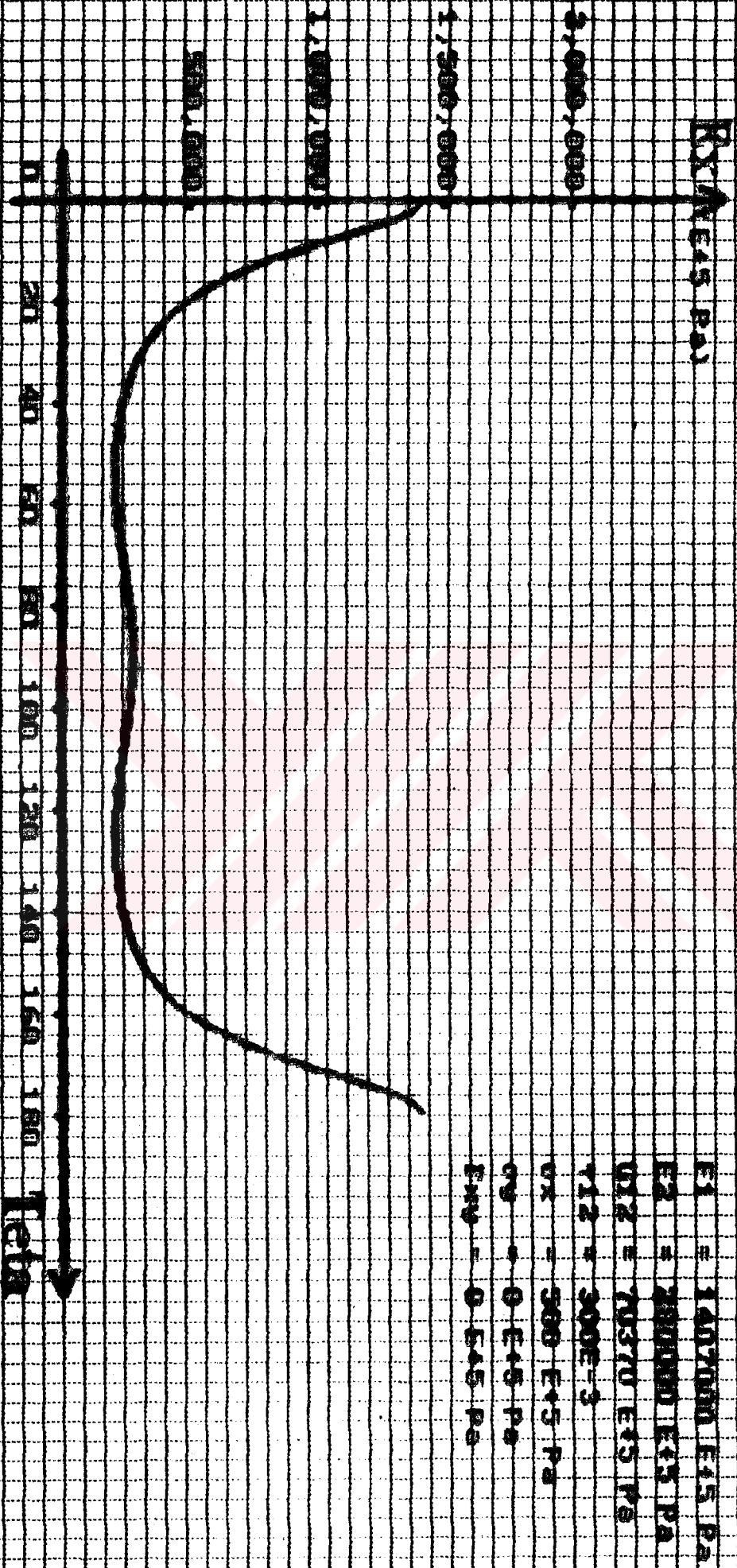
İsmas Derecesine DAĞU VİRALAK  
Mühendislik Sabitlerinin Değişimi

C x 100	E1 E+5 Pa	E2 E+5 Pa	Pois. x 100	G12 E+5 Pa
0	477280	145069	34	63944
5	477280	149696	33	67489
10	477280	154322	31	71034
15	477280	158949	30	74579
20	477280	163576	29	78124
25	477280	168203	27	81669
30	477280	172830	26	85214
35	477280	177457	25	88760
40	477280	182084	23	92305
45	477280	186711	22	95850
50	477280	191338	20	99395
55	477280	195965	19	102940
60	477280	200592	18	106485
65	477280	205219	16	110030
70	477280	209846	15	113575
75	477280	214473	14	117120
80	477280	219100	12	120665
85	477280	223726	11	124210
90	477280	228353	9	127755
95	477280	232980	8	131300
100	477280	237607	7	134845

Devam için Herhangi Bir Tüsa Basınız



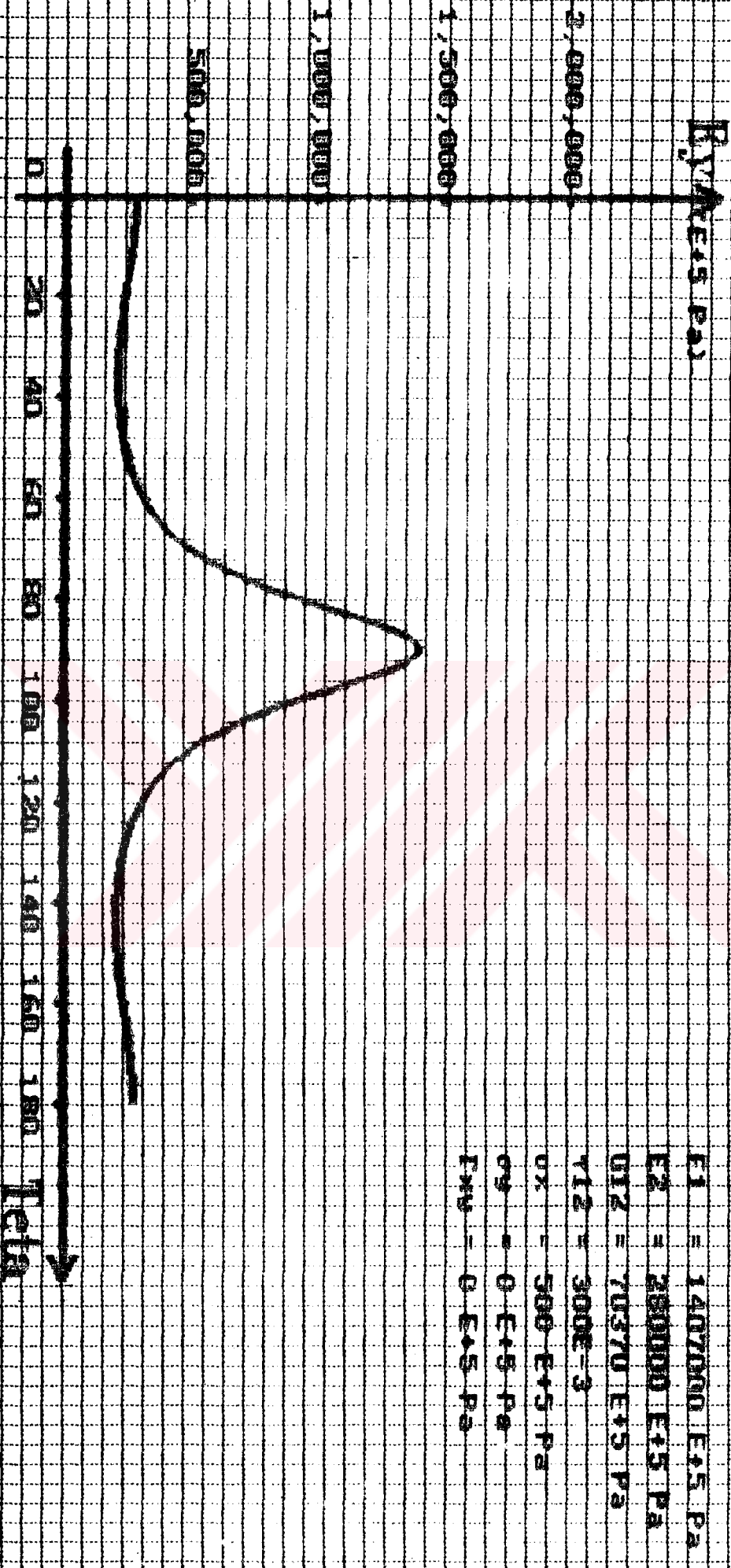
# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

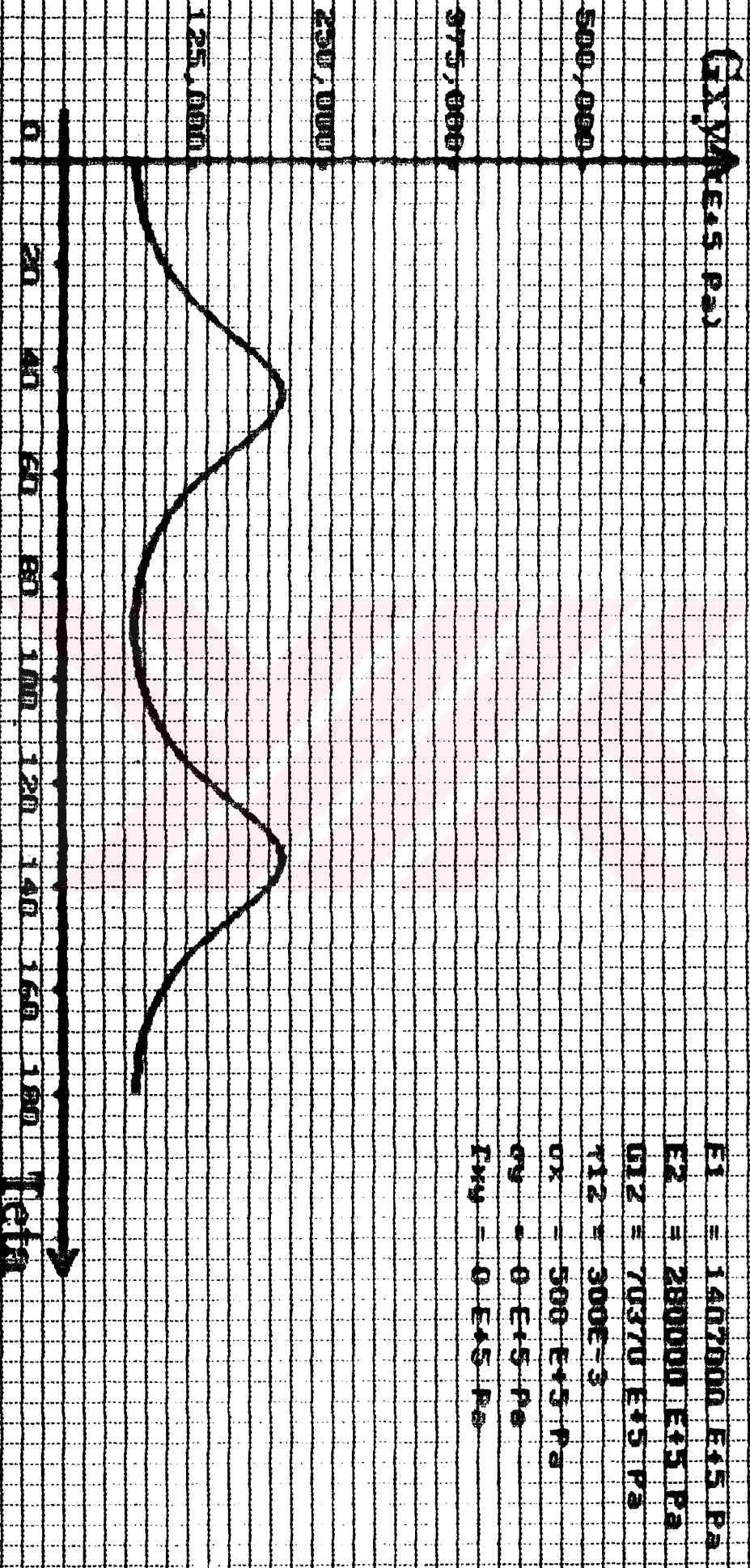


# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

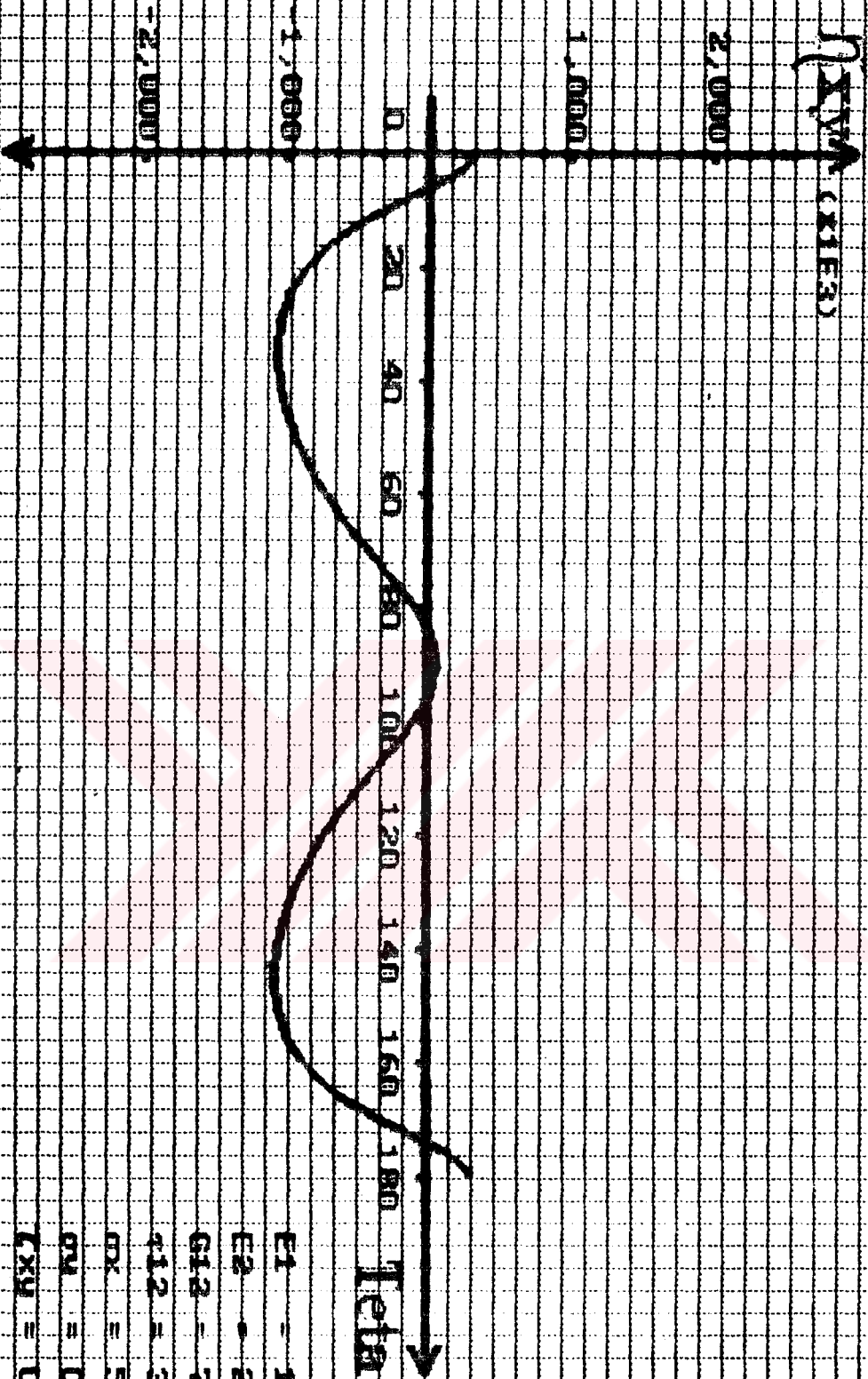
# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



Devam için Herhangisi Bir Tusa Basınız



# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



$$E1 = 1407000 \text{ E+5 Pa}$$

$$E2 = 200000 \text{ E+5 Pa}$$

$$G12 = 70270 \text{ E+5 Pa}$$

$$\nu12 = 300E-3$$

$$\sigma_x = 500 \text{ E+5 Pa}$$

$$\sigma_y = 0 \text{ E+5 Pa}$$

$$\tau_{xy} = 0 \text{ E+5 Pa}$$

Devam için Herhangisi Bir Tusa Basınız

# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



$$E1 = 1487000 \text{ E+5 Pa}$$

$$E2 = 209900 \text{ E+5 Pa}$$

$$G12 = 70270 \text{ E+5 Pa}$$

$$\nu12 = 300E-3$$

$$\nu21 = 500 \text{ E+5 Pa}$$

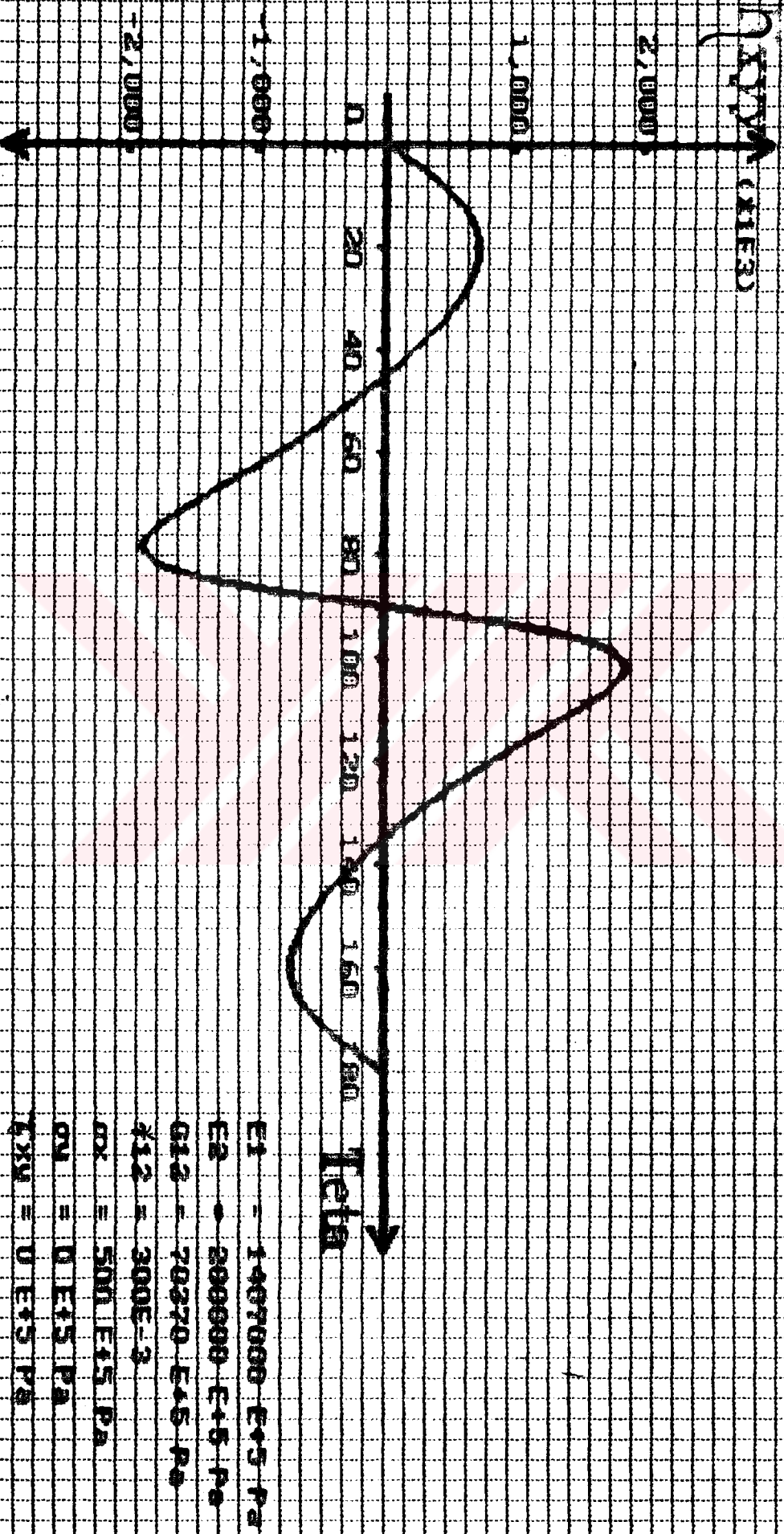
$$\nuxy = 0 \text{ E+5 Pa}$$

$$\nuxy = 0 \text{ E+5 Pa}$$

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

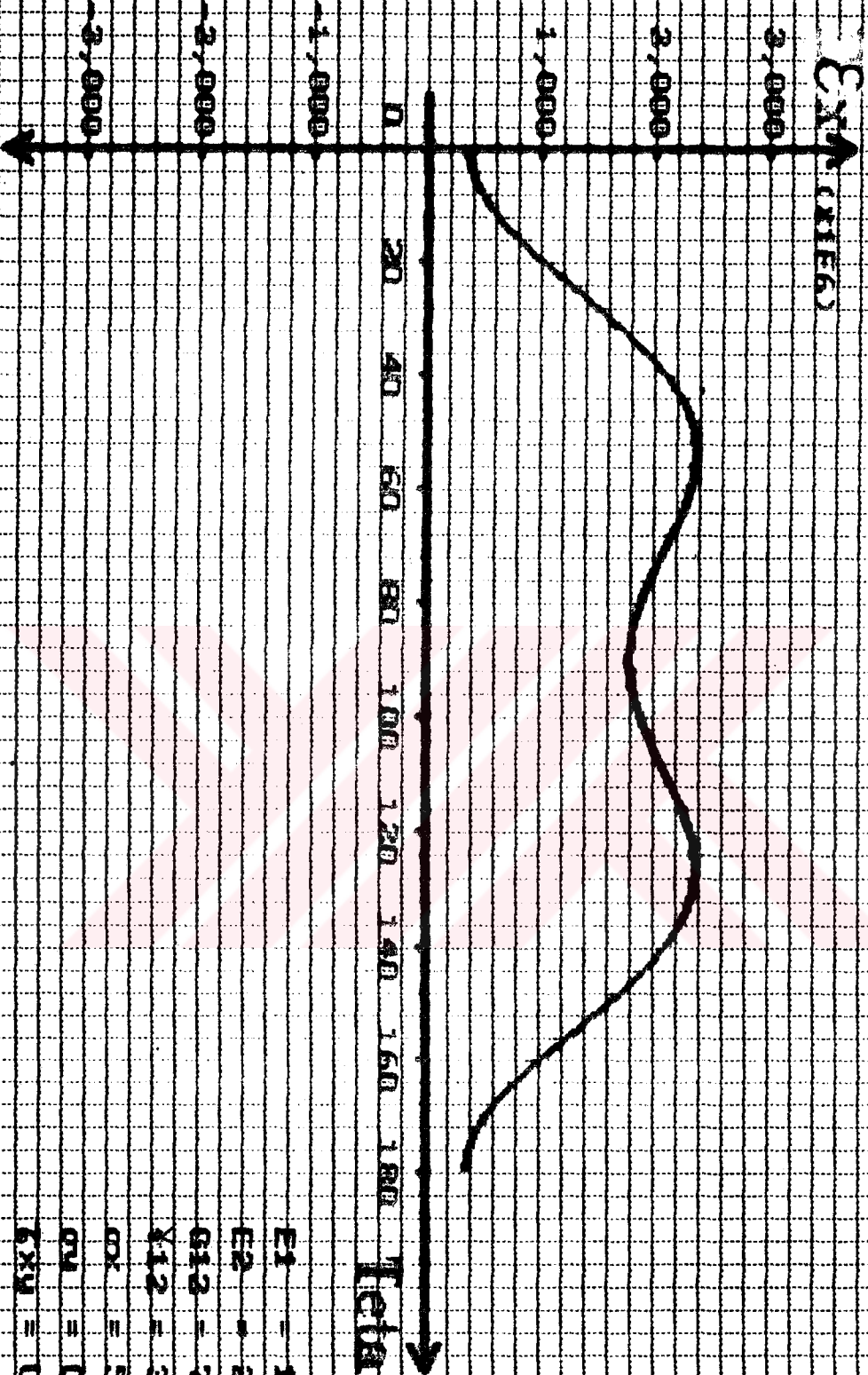


# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa E ' iz

# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



$$E1 = 1407000 \text{ E+5 Pa}$$

$$E2 = 200000 \text{ E+5 Pa}$$

$$G12 = 70370 \text{ E+5 Pa}$$

$$\chi12 = 300\text{E-3}$$

$$\nu_{12} = 500 \text{ E+5 Pa}$$

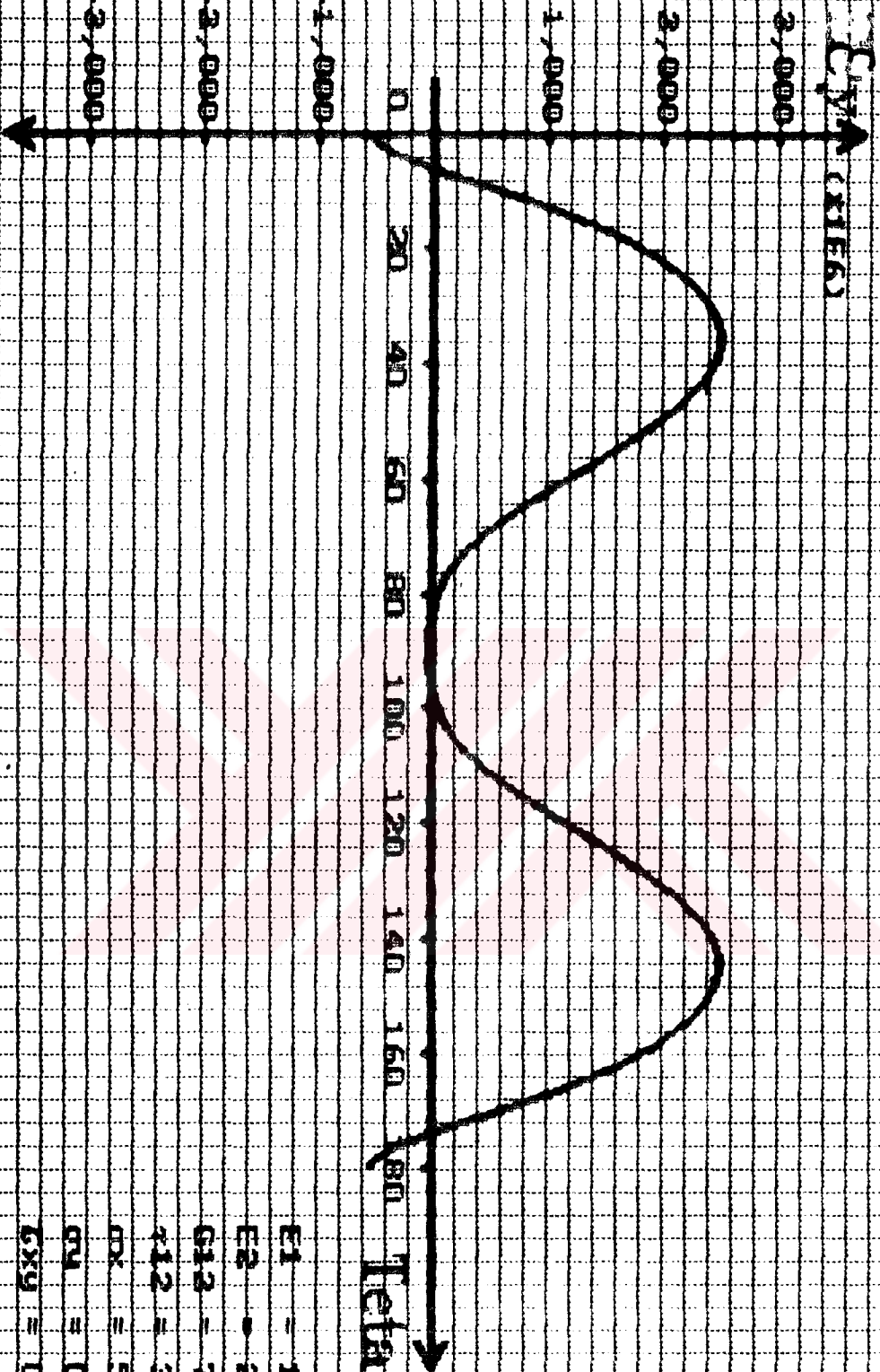
$$\nu_{21} = 0 \text{ E+5 Pa}$$

$$\nu_{xy} = 0 \text{ E+5 Pa}$$

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

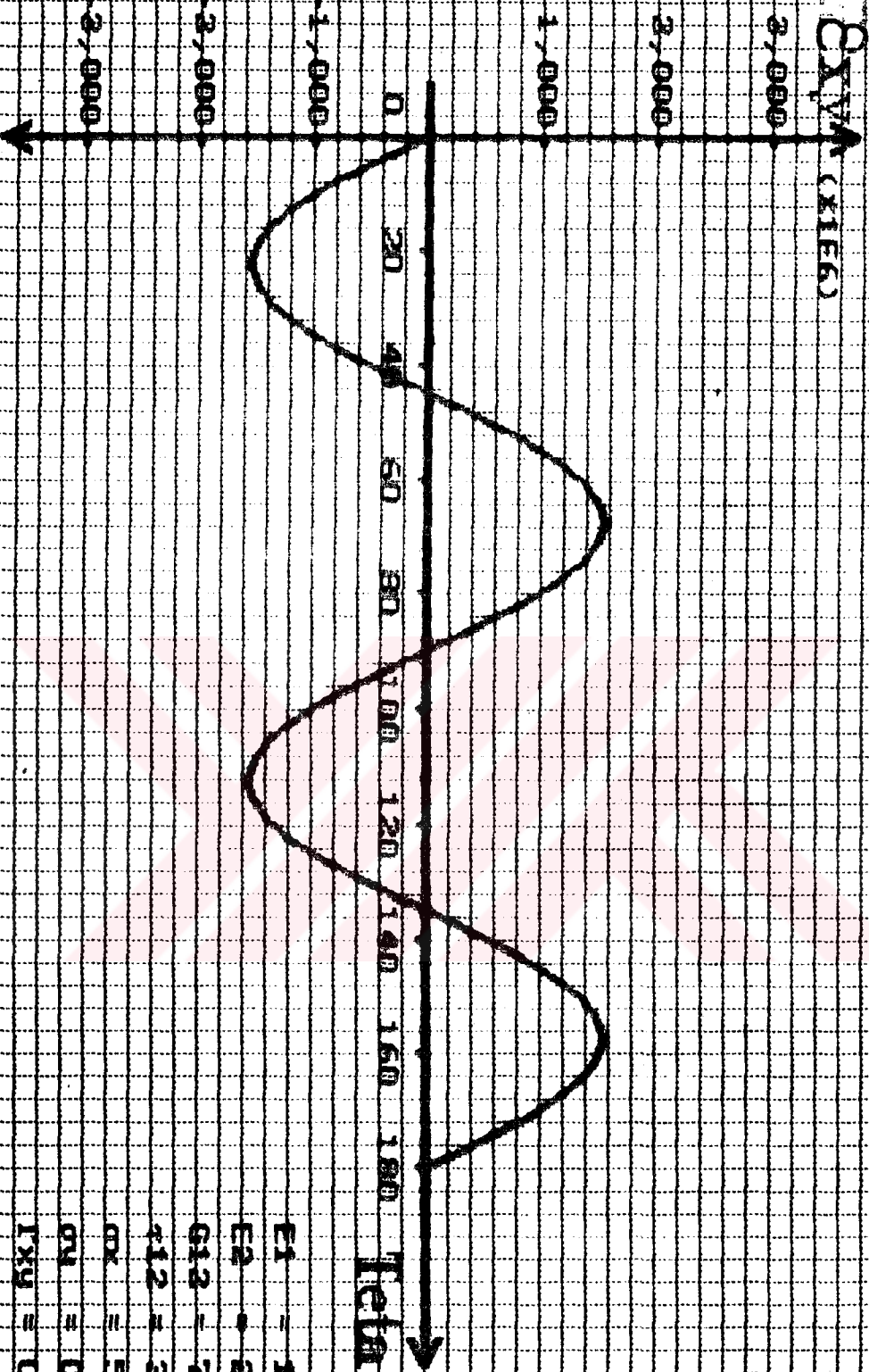


# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi



$$\begin{aligned}
 E1 &= 1407000 \text{ E+5 Pa} \\
 E2 &= 200000 \text{ E+5 Pa} \\
 G12 &= 70270 \text{ E+5 Pa} \\
 \nu12 &= 300E-3 \\
 \sigma_x &= 500 \text{ E+5 Pa} \\
 \sigma_y &= 0 \text{ E+5 Pa} \\
 \tau_{xy} &= 0 \text{ E+5 Pa}
 \end{aligned}$$

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız



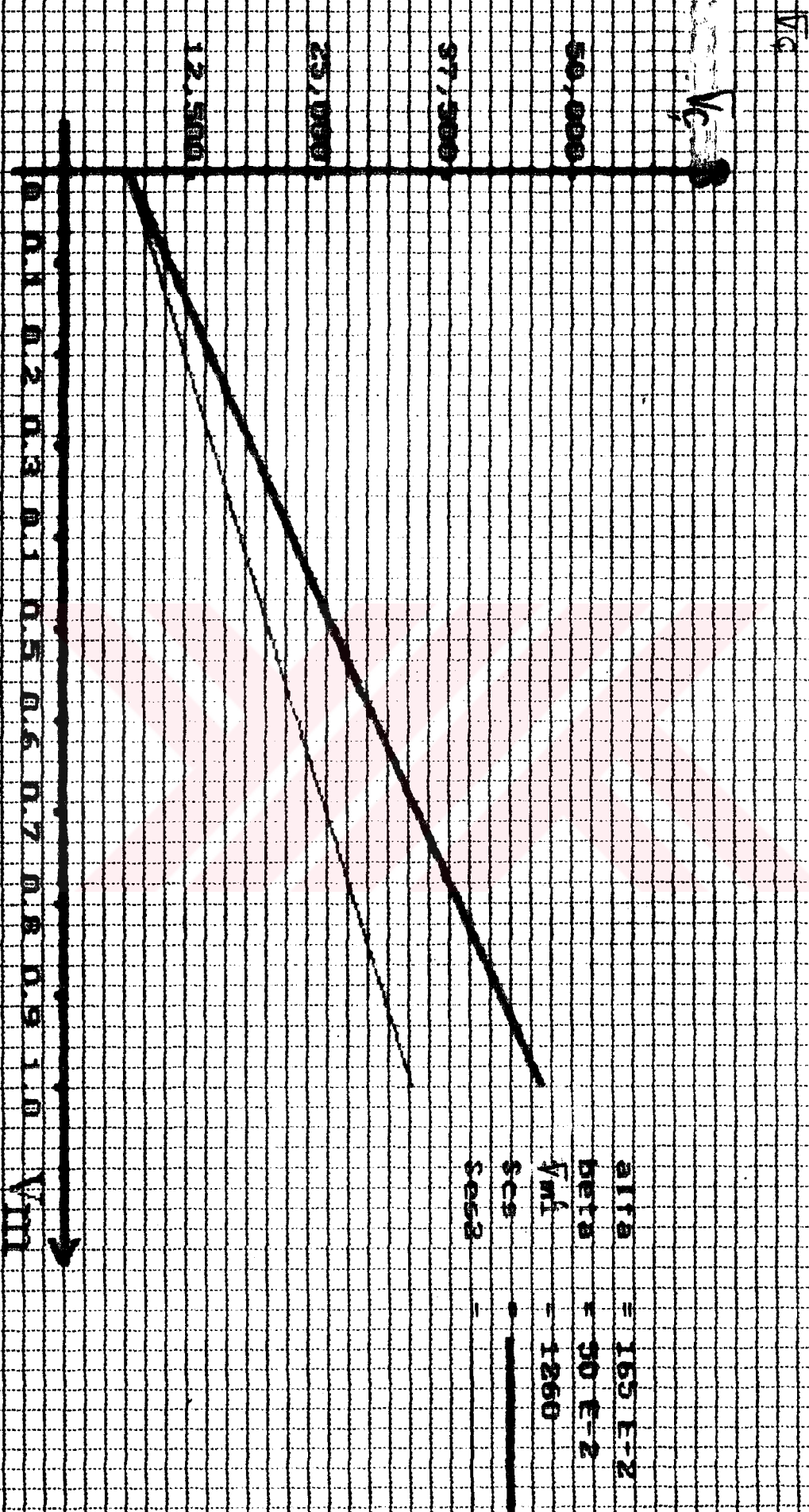
# Elyaf Yönüne Göre Mekaniksel Özelliklerin Değişimi Hesabı

İtaf Der.	Ex EFS Pa	Ey EFS Pa	GKX	MXK X E3	KKX/X X E3	KKX/LX X E3
0	1407000	280000	70370	300	0	0
5	1243638	276142	71818	88	-1315	292
10	930342	265742	76341	-316	-1848	528
15	668343	251656	84494	-648	-1789	674
20	493372	237063	97233	-859	-1502	722
25	382311	224493	115813	-980	-1164	683
30	311766	215616	14161	-1039	-834	577
35	266703	211510	171818	-1057	-530	420
40	238290	213068	200195	-1042	-252	225
45	221406	221406	212377	-1000	0	0
50	213068	238290	200195	-932	225	-252
55	211510	266703	171818	-838	420	-530
60	215616	311766	141161	-719	577	-834
65	224493	382311	115813	-575	683	-1164
70	237063	493372	97233	-413	722	-1502
75	251656	668343	84494	-244	674	-1789
80	265742	930342	76341	-90	528	-1848
85	276142	1243638	71818	19	292	-1315
90	280000	1407000	70370	60	0	0

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

# Çekme Mukavemeti

107



$\alpha_{178} = 165 \text{ E-}2$

$\beta_{178} = 30 \text{ E-}2$

$\gamma_{m1} = 1260$

$\sigma_{cs}$

$\sigma_{cs2}$

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

# Çekme Mukavemeti

Um	E-3	SGS	E+S Pa	SGS2	E+S Pa
	0		1260		1260
	50		3297		2661
	100		5334		4061
	150		7371		5462
	200		9408		6863
	250		11445		8263
	300		13482		9664
	350		15519		11064
	400		17556		12465
	450		19593		13866
	500		21630		15266
	550		23667		16667
	600		25704		18068
	650		27741		19468
	700		29778		20869
	750		31815		22270
	800		33852		23670
	850		35889		25071
	900		37926		26471
	950		39963		27872
	1000		42000		29273

Devam için Herhangi Bir Tüsa Basınız



Elgof çapının  
Çekme Mulaemetine Etikisi

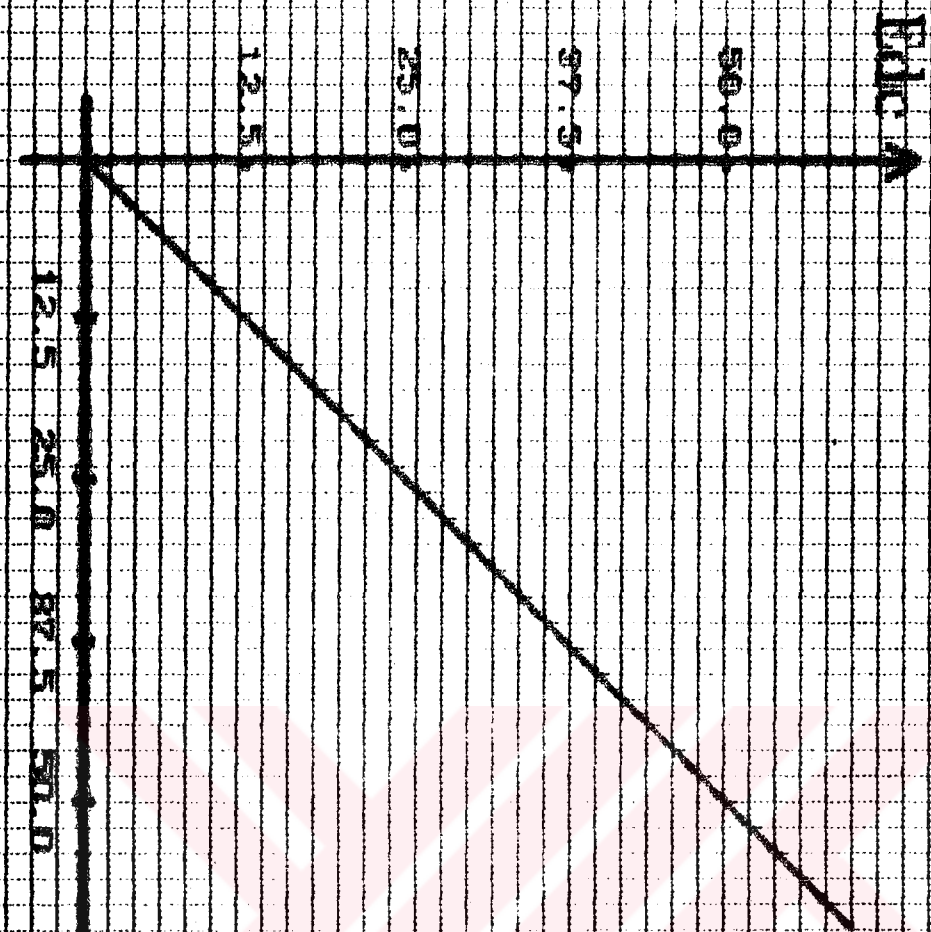
1716 E-1	07 (Pa)
2	39480
3	38220
4	36960
5	35700
6	34440
7	33180
8	31920
9	30660
10	29400
11	28140
12	26880
13	25620
14	24360
15	23100
16	21840
17	20580
18	19320
19	18060
20	16800
21	15540
22	14280

Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız





# Young Modülü



$F = 6.2 \cdot 10^{-2} \text{ N}$   
 $U = 1.25 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$   
 $D = 2000000 \text{ E} + 5 \text{ F}$   
 $l = 1.30 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$   
 $E_{ps} = 904 \text{ E} + 6$

Kuvvet →

Devam için Herhangi Bir Tüsa Basınız



S. No.

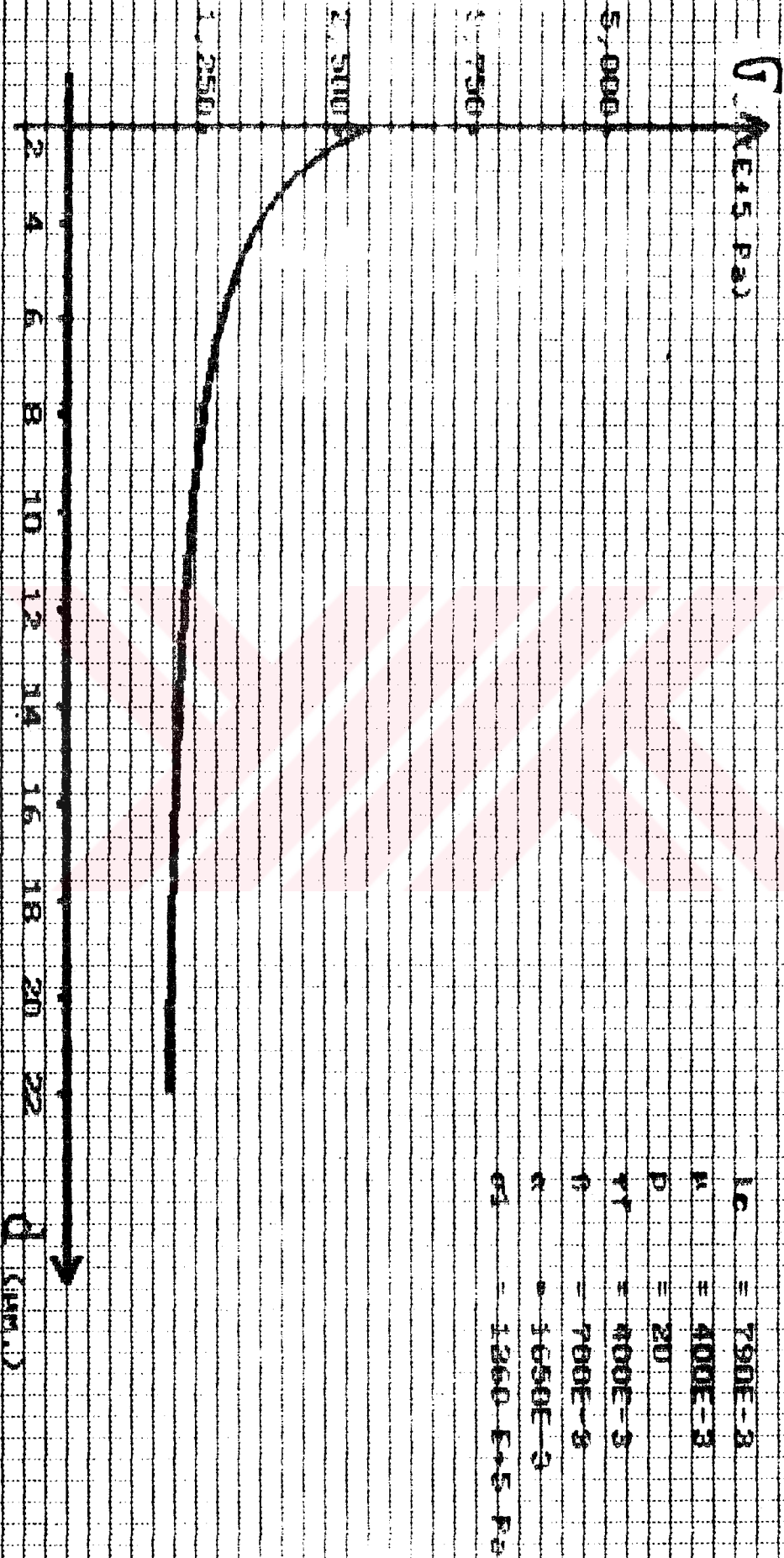
SK. ETS. Pa.

2	2824
3	2135
4	1790
5	1983
6	1445
7	1347
8	1273
9	1216
10	1170
11	1132
12	1101
13	1074
14	1051
15	1032
16	1015
17	999
18	986
19	974
20	963
21	953
22	944

Devam için Herhangî Bir Tüsa Basınız

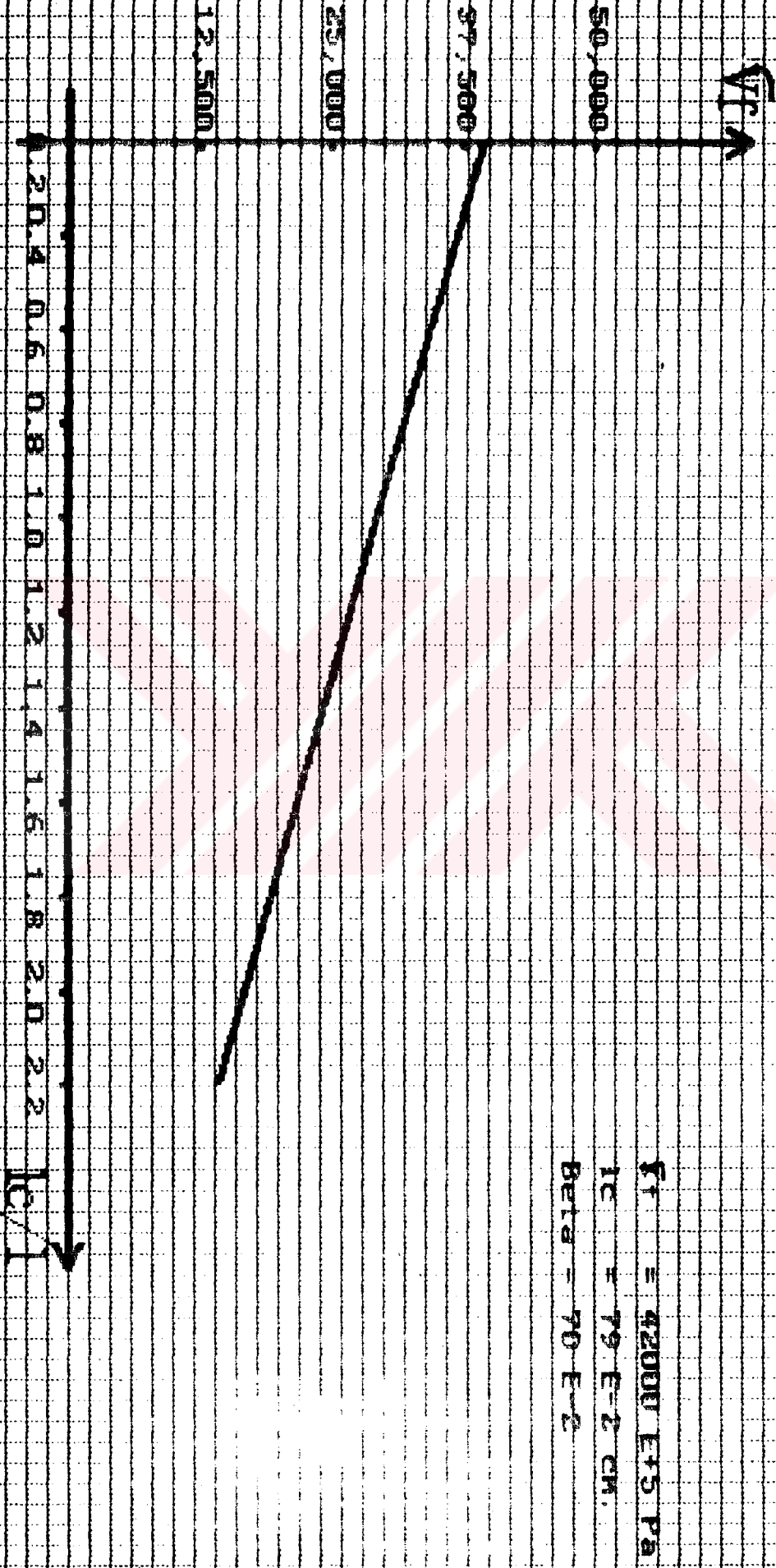


# Fiber Çapının Çekme Mukavemetine Etkisi



Devam için Herhangi Bir Tüsa Basınız

# Sürekli Elyaf Kompozitlerde Elyaf Boyuna Göre Ortalama Çekme Gerilmesinin Değişimi



Devam için Herhangi Bir Tusa Basınız

## SONUÇLAR

Grafik çıktılarında da görüldüğü gibi kompozit malzeme içersindeki güçlendiricinin matris içindeki yapısal ve biçimsel değişimi kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin değişiminde büyük rol oynar.

Bu değişim elyafın boyunda, çapında ve geometrik şeklinde olabileceği gibi gerilme yönü ile teşkil ettiği açıda meydana gelebilir. Bunların hepsini birer değişken kabul ederek kompozit malzemede arzu ettiğimiz gerilmeleri veya diğer mühendislik sabitlerini uygun değişkenleri değiştirerek teorik olarak gerçekleştirebiliriz. Elde ettiğimiz bu değerlerin deneysel çalışmalarla çakışması grafiklerin eldesinde kullanılan teknik sabitlerin, ve yükleme değerlerinin mümkün olduğu kadar gerçek test değerleri kullanılmasına bağlıdır.

Daha önce yapılan araştırma ve test sonuçları ile bu program karşılaştırıldığında hemen hemen bütün grafiklerde gerçeğe en yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

1) Tek yönlü elyaf pekiştirilmiş kompozit malzemelerde Poisson Oranının çok büyük bir yaklaşıklıkla sabit kabul edilebileceği belirlenmiştir.

2) Elyafaların birbirleri ile temas derecesine göre 1-yönündeki elastikiyet modülü sabit kalmakta, fakat 2-yönündeki yani elyafa dik yöndeki elastikiyet modülü temas derecesi arttıkça artmaktadır.

3) En iyi özellikleri veren sürekli elyafın imali ve matriks içine yerleştirilmesi oldukça zordur. Süreksiz elyaflarda oldukça yüksek( boy / yarıçap) oranına sahip olanlar matriks içine kolay yerleştirilirler ve aynı zamanda yüksek rijitlik ve mukavemet sağlarlar.

4) Kompozit malzemede elyaf hacim oranının artması o malzemenin hem mukavemet hem de rijitliğini arttıracaktır. Ayrıca maksimum elyaf hacim oranı yaklaşık % 80 dolayındadır ve bu oran matriksin elyafa sarılabilmesinin üst sınırıdır. Daha fazla elyaf oranında elyaf-elyaf etkileşimi başlayacağından mukavemet değerlerinde düşmeler görülür.

5) Yüklemenin elyafa paralel olması durumunda tek yönde pekiştirilmiş elyaflarda en yüksek rijitlik ve mukavemet elde edilmektedir. Elyafın ortogonal veya karşılıklı katmanlar halinde yerleştirilmesi durumunda maksimum mukavemetten kısmen fedakarlık etmek koşuluyla, kompozit malzemenin fiziksel özelliklerinde iyileşmeler söz konusu olabilir.

5) Elyafın kompozit malzemenin kayma modülü üzerindeki etkisi oldukça zayıf olup, kaymayı ve kayma deformasyonunu kontrol eden esas yapı bileşeninin matriks malzemesi olduğu belirlenmiştir.



## KULLANILAN SEMBOLLER

E	: Elastikiyet Modülü	(MPa)
G	: Kayma Modülü	(MPa)
$\nu_{12}$	: Poisson Oranı	
$\sigma$	: Çekme Mukavemeti	(Pa)
$\rho$	: Özgül Ağırlık	(gr/cm <sup>3</sup> )
v <sub>kr</sub>	: Kritik Hacım	
V <sub>emin</sub>	: Min Elyaf Hacmi	( cm <sup>3</sup> )
l <sub>kr</sub>	: Kritik Elyaf Boyu	( cm )
$\rho_c$	: Kompozit Malzemenin Özgül Ağırlığı	( gr/cm <sup>3</sup> )
V <sub>m</sub>	: Matriksin Hacım Oranı	
$\rho_m$	: Matriksin Özgül Ağırlığı	( gr/cm <sup>3</sup> )
V <sub>f</sub>	: Elyafın Hacım Oranı	
$\rho_f$	: Elyafın Özgül Ağırlığı	( gr/cm <sup>3</sup> )
m <sub>f</sub>	: Elyafın Kütle Oranı	
m <sub>m</sub>	: Matriksin Kütle Oranı	
V <sub>v</sub>	: Boşlukların Hacım Oranı	
E <sub>c</sub>	: Kompozit Malzemenin Young Modülü	( 10 <sup>5</sup> Pa)
E <sub>f</sub>	: Elyafın Young Modülü	( 10 <sup>5</sup> Pa )
E <sub>m</sub>	: Matriksin Young Modülü	( 10 <sup>5</sup> Pa )
A	: Kompozit Malzemenin Toplam Kesit Alanı	( cm <sup>2</sup> )
A <sub>m</sub>	: Matriksin Toplam Kesit Alanı	( cm <sub>2</sub> )



- $A_f$  : Elyafın Toplam Kesit Alanı (  $\text{cm}^2$  )  
 $\Delta D$  : Toplam Deformasyon (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\Delta D_f$  : Elyafta Oluşan Toplam Deformasyon (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\Delta D_m$  : Matrikste Oluşan Toplam Deformasyon (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\nu_m$  : Matriksin Poisson Oranı  
 $\nu_f$  : Elyafın Poisson Oranı  
 $\tau$  : Kayma Gerilmesinin Oluşturduğu Deformasyon (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\tau$  : Kayma Gerilmesi (  $10^5 \text{ Pa}$  )  
 $C$  : Temas Derecesi  
 $\epsilon_{kmax}$  : Kompozitin Çekmedeki Max Deformasyonu (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\epsilon_{fmax}$  : Elyafın Çekmedeki Max Deformasyonu (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\sigma_k$  : Kompozitin Max Eksenel Çekme Mukavemeti (  $10^5 \text{ Pa}$  )  
 $\sigma_f$  : Elyafın Max Eksenel Çekme Mukavemeti (  $10^5 \text{ Pa}$  )  
 $\sigma_m$  : Matriksin Max Eksenel Çekme Mukavemeti (  $10^5 \text{ Pa}$  )  
 $\sigma_m'$  : Elyafların Kopma Deformasyonuna Karşılık Gelen Matriks Gerilmesi (  $10^5 \text{ Pa}$  )  
 $\Delta T$  : Potansiyel Enerji Farkı  
 $\epsilon_{kri}$  : Kritik Basma Deformasyonu (  $\text{cm/cm}$  )  
 $\bar{\sigma}_f$  : Elyafın Ortalama Çekme Mukavemeti (  $10^5 \text{ Pa}$  )  
 $l$  : Elyaf boyu (  $\text{cm}$  )  
 $d$  : Elyaf Çapı (  $\text{mm}^2$  )  
 $l_c$  : Kritik Elyaf Boyu (  $\text{cm}$  )

- F : Elyaf Uzerine Etkiyen Kuvvet
- $\zeta_{\max}$  : Max Kayma Gerilmesi
- $\zeta_y$  : Matristeki Kayma Gerilmesi
- E<sub>dc</sub> : Süreksiz Elyaf Kompozitin Young Modülü
- E<sub>cc</sub> : Sürekli Elyaf Kompozitin Young Modülü
- $\epsilon$  : Kompozit Malzemenin Kopmadaki Deformasyonu
- S<sub>ij</sub> : Compliance (Uyum) Matrisi
- C<sub>ij</sub> : Rijitlik (Stifness) Matrisi
- Q<sub>ij</sub> : Dönüşüm Matrisi
- $\eta_{ij,i}$  : Karşılıklı Etki Katsayısı
- $\eta_{ij,j}$  : Karşılıklı Etki Katsayısı



## KAYNAKLAR

- [1] DEMİRKESEN E. "Kompozit Malzemeler" İ.T.Ü. Kütüphanesi  
No:3 / 1991 , Ders notları 1991.
- [2] ASHBEE K.H.G., RACHEFF I. "Fundamental Principles of  
Fiber Reinforced Composites" 1990.
- [3] N.N " Kompozit Materials" T.Ü. Kütüphanesi  
1989.
- [4] N.N " Journal of Composites Technology &  
Research" TUBİTAK , 1986.
- [5] N.N " Conferans Reports" TUBİTAK,1989.
- [6] AVCI A.U. " Kompozit malzemeler ders notları" 1992.
- [7] SAYMAN O. " Kompozit malzemeler mekaniği araştırma  
raporu " FBE / MAK - 90 - AR - 235.
- [8] JONES R.M " Mechanics of composite materials" 1975.
- [9] N.N " Introduction to engineering materials"  
B.Ü.Kütüphanesi. 1978.
- [10] PARATT N.J. " Fibre-Reinforced Materials Technology"  
1972.

**ÖZGEÇMİŞ**

Nilhan BEYLİKÇİ, 1965 yılında Merzifon`da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Edirne`de 1982 yılında tamamladı. 1982-83 öğretim yılında Edirne D.M.M.Akademisi Makina Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini 1985 yılında T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 1986 yılında evlendikten sonra Lüleburgaz`a yerleşti. 6 Ay Çorlu belediyesinde Proje Mühendisliği yaptıktan sonra T.P.A.O Lüleburgaz II. Bölge Müdürlüğü'nde sırası ile, İnşaat ve Motor Atelyelerinde çalıştıktan sonra Bakım Onarım Mühendisliğine bağlı Torna Atelyesi'nde 30 ay süre ile atelye şefliği yaptı. 1989 yılında doğum sebebi ile görevden ayrıldı. 1990-91 yılları arasında özel bir trafik okulunda Trafik öğretmenliği yaptı. 1991 yılında girdiği yeterlilik sınavını kazanarak Lüleburgaz Endüstri Meslek Lisesi Motor Bölümü'nde , Motor Öğretmeni olarak göreve başladı. 1994 yılında halen çalışmakta olduğu Edirne Endüstri Meslek Lisesi Motor Bölümü'ne tayin edilen Nilhan BEYLİKÇİ , evli ve bir çocuk annesi olup, İngilizce bilmektedir.