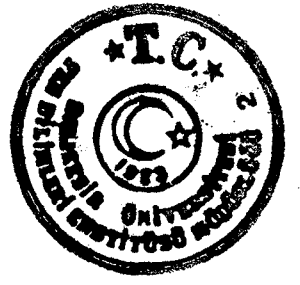


33569



Yüksek Lisans Tezi

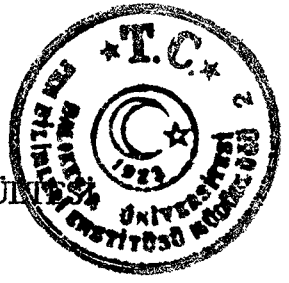
DÜZLEMSEL RASGELE DAĞILIMLI KEÇE ELYAFLA TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMEDE KIRILMA TOKLUĞUNUN ELYAF HACMİ, ELYAF YÖNLENMESİ VE
DEFORMASYON HIZI İLE DEĞİŞİMİNİN SAPTANMASI

Hazırlayan
Makina Mühendisi
RAİF SAKİN

Bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne
"Yüksek Lisans Tezi" olarak sunulmuştur.

BAÜ Mühendislik - Mimarlık Fakültesi
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Balıkesir, Eylül 1994



BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK - MİMARLIK FAKÜLTESİ

DÜZLEMSEL RASGELE DAĞILIMLI KEÇE ELYAFLA TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMEDE KIRILMA TOKLUĞUNUN ELYAF HACMİ, ELYAF YÖNLENMESİ VE
DEFORMASYON HIZI İLE DEĞİŞİMİNİN SAPTANMASI

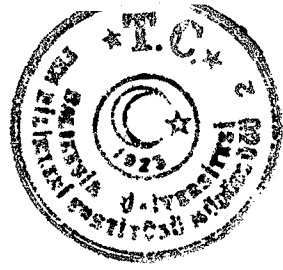
Mak. Müh. RAİF SAKİN

Bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne
"Yüksek Lisans Tezi" olarak sunulmuştur.

Tez Yöneticisi : Yrd.Doç. Dr. İRFAN AY

BAÜ Mühendislik - Mimarlık Fakültesi
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Balıkesir, Eylül 1994



Bu çalışma, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulmak üzere hazırlanmıştır.

Tez yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. İrfan AY

Bu tez tarafımdan incelenmiş, seviyesi, orijinalliği ve içeriği yönünden BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetmeliğine uygun olarak hazırlandığı saptanmıştır.

JÜRİ ÜYELERİ

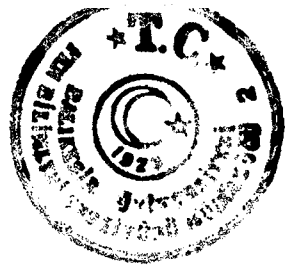
1- Yrd. Doç. Dr. İrfan AY (Danışman)

2- Yrd. Doç. Dr. Nedim GERGER

3- Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ

4-

.....

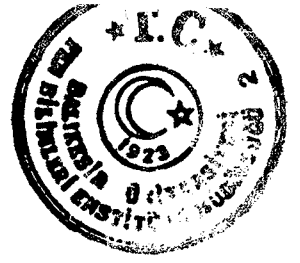


ÖNSÖZ

Metalik malzemelerle kıyaslandırıldığında kompozit malzemelerin en belirgin üstünlükleri, malzemenin birim ağırlık başına düşen elastiklik modülü (spesifik elastiklik modülü)' nün ve mukavemetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Böylece kompozit malzemeler ileri mühendislik uygulamalarında, bilhassa yüksek rijitlik/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranlarının önemli olduğu havacılık ve otomobil endüstrisinde her geçen gün daha da yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler heterojen ve anizotropik bir yapıya sahip olduklarından, bu malzemelerin kırılma davranışları alışlagelmiş homojen ve izotropik malzemelerden farklıdır. Bu alandaki bilgi ve deneyimlerin yetersizliği elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mühendislik yapılarında kullanımının daha da yaygınlaşmasını sınırlayan en önemli etkenlerden biridir. Fakat buna rağmen, yapılan teorik ve deneysel çalışmalarda gevrek metallere uygulanan Lineer-elastik kırılma mekaniği esasları bu tür kompozitlere uygulanmaya çalışılmaktadır. Bu konuda tam bir uzlaşmaya varılamamasına rağmen soruna deneysel yaklaşılmaktadır.

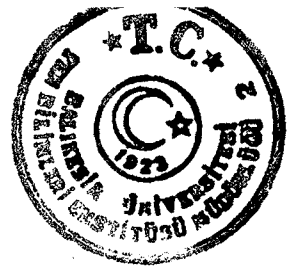
Bu sebeple bu çalışmada ; polyester reçinesi içerisine, düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyaf takviye edilerek oluşturulan kompozit malzemeler kullanılmış ve Lineer-elastik kırılma mekaniği esaslarına uyularak, kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerinden K_{Ic} ile kırılma olayı deneysel olarak incelenmiştir.



ÖZET

Bu çalışmada, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kırılma tokluğu (K_{IC})' ye elyaf yönü, elyaf hacmi ve deformasyon hızının etkisi üzerine bir araştırma sunulmuştur. Deneylerde matris malzeme olarak polyester reçinesi, takviye malzemesi olarak ise düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyafı kullanılmıştır. Elyaf için cam hacim oranları, %24, %20, %16, %12, %8 ve %4 olarak belirlenmiştir. 10 mm kalınlıkta el yatırması yöntemiyle hazırlanmış plakalardan ASTM - E 399 uyarınca üç noktadan eğme deney parçaları hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Deney parçalarındaki elyaf tabakalarının yönleri 0, 30, 45, 60, 90 derece olarak alınmış ve bu şekilde her yön için ayrı ayrı kırılma toklukları saptanmıştır. Ayrıca deneyler sırasında her bir numune için deformasyon hızı 5, 25, 50 mm/dak olarak değiştirilmiştir.

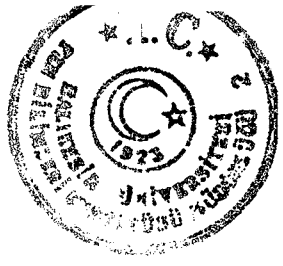
Deneyler sonucunda fiber (elyaf) yönlerinin kırılma tokluğuna etkisinin çok fazla olmadığı görülmüştür. Elyaf oranına göre ise kırılma tokluğu artmaktadır. Deformasyon hızı ile de Kırılma Tokluğu' nun değiştiği görülmüştür.



SUMMARY

In this study , an investigation on the influence of fibre direction , fibre volume and deformation velocity to fracture toughness (K_{IC}) is presented for the fibre reinforced composite material . In the experiments , polyester resin for matrix material and unidirectional fibre laminate for reinforced material have been used . The ratios of fibre volume have been selected as %24 , %20 , %16 , %12 , %8 and %4 respectively . Specimens thickness were selected 10 mm and they were manufactured by the hand lay-up technique in the glass moulds . The three-point bending specimens prepared according to the ASTM E-399 were used in the experiments . Directions of fibre laminate were also selected 0 , 30 , 45 , 60 , 90 degrees . Fracture toughness for each direction was determined respectively . Also in the experiments , deformation velocities of each specimen were selected as 5 , 25 , 50 mm/min .

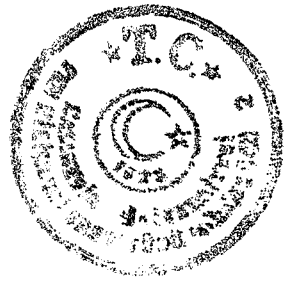
At the end of experiments, it has been observed that fibre directions didn't influence much to fracture toughness. Also, fracture toughness increased by the fibre volume ratio and changed by deformation velocity.



TEŞEKKÜR

Böyle bir konuda çalışma imkanını sağlayan ve çalışmamın gerçekleştirilmesinde değerli yardım ve teşviklerini esirgemeyen hocam Yrd. Doç. Dr. İrfan AY' a teşekkür ederim. Yine tez konusunda yaptığı yardım ve yol göstericiliğinden dolayı değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Nedim GERGER' e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca deney tesisatının kurulması sırasındaki yardımlarından dolayı Necdet ŞEKER' e tezin yazılması aşamasındaki yardımlarından dolayı Öğr.Gör.Neslihan İNANÖZ' e teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
ÖZET	II
SUMMARY	III
TEŞEKKÜR	IV
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
BÖLÜM 3. KOMPOZİT MALZEMELER	11
3.1. Giriş	11
3.2. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler (CTP)	17
3.2.1. CTP'lerin Kullanılma Avantajları	17
3.3. Bazı ETKM'lerin Özellikleri ve Kullanım Alanları	19
3.3.1. Cam Elyaf Takviyeli Plastikler (CTP)	20
3.3.2. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	24
3.3.3. Bor Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler (BTKM)	27
3.3.4. Kevlar Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler (KevTKM)	28
3.3.5. Metal Matrisli Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	31
3.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	33
3.4.1. Reçine Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	33
3.4.1.1. Islak Kalıplama	33
3.4.1.1.1. El Yatırması Metodu	34
3.4.1.1.2. Püskürtme Metodu	36
3.4.1.2. Reçine Enjeksiyonu	37
3.4.1.3. Köpük Rezervuar Kalıplama	39

3.4.1.4.	Soğuk Pres	39
3.4.1.5.	Sıcak Pres	40
3.4.1.6.	Elyaf Sarma	41
3.4.1.7.	Savurma Döküm	42
3.4.1.8.	Levha Devamlı Üretimi	43
3.4.1.9.	Profil Çekme (Pultrusion)	44
3.4.1.10.	Torba Kalıplama Yöntemi	45
3.4.2.	Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	46
3.4.2.1.	Sıcak Presleme	46
3.4.2.2.	Toz Metalurjisi Tekniği	46
3.4.2.3.	Sıvı Metal Emdirilmesi	47
3.4.2.4.	Vakumda Presleyerek Birleştirme	47
3.4.2.5.	Elektrolitik Yöntem	48
3.4.2.6.	Buhar Çökeltme (Depoze)	48
3.4.2.7.	Haddeleme	48
3.4.2.8.	Birlikte Ekstrüzyon	48
3.4.2.9.	Plazma Püskürtme	48
3.4.2.10.	In-situ Kompozit Malzemeler	48
3.5.	Kompozit Malzemelerde Kullanılan Yapı Elemanları	50
3.5.1.	Matris Malzemeleri	50
3.5.1.1.	Plastik Matris Malzemeleri	50
3.5.1.1.1.	Polyester Reçineler	52
3.5.1.1.2.	Epoksi Reçineler	55
3.5.1.1.3.	Yüksek Sıcaklık Reçineleri	55
3.5.1.2.	Metal Matris Malzemeleri	56
3.5.1.3.	Çok Yüksek Sıcaklık Matrisleri	57
3.5.2.	Takviye Malzemeleri	57
3.5.2.1.	Elyaf Türleri	58
3.5.2.1.1.	Cam Elyaf	58
3.5.2.1.2.	Bor Elyaf	63
3.5.2.1.3.	Aramid Elyaf	64
3.5.2.1.4.	Karbon Elyaf	65
3.5.2.1.5.	Yüksek Sıcaklık Elyafları	67
3.5.2.1.6.	Kılcal Kristaller (Whiskerler)	67
3.6.	Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri	68
3.6.1.	Sürekli Elyafla Takviyeli Kompozit Malzemeler	70
3.6.1.1.	Takviye Doğrultusundaki Elastiklik Modülünün Hesaplanması	70

3.6.1.2.	Takviyeye Dik Doğrultudaki Elastiklik Modülünün Hesaplanması	73
3.6.1.3.	Takviyeye Θ Açısı Altında Yükleme Yapıldığında Kompozitin Elastisite Modülü	76
3.6.1.4.	ν_{12} Poisson Oranının Hesaplanması	77
3.6.1.5.	G_{12} Kayma Modülünün Hesaplanması	79
3.6.1.6.	Kopma Dayanımı	81
3.6.1.7.	Akma Dayanımı	88
3.6.2.	Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozit Malzeme	89
3.6.2.1.	Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemede Kopma Dayanımı	92

BÖLÜM 4. KIRILMA VE TEORİSİ

4.1.	Giriş	94
4.2.	Kırılmanın Tanımı ve Sınıflandırılması	94
4.2.1.	Gevrek Kırılma	95
4.2.2.	Sünek Kırılma	95
4.2.3.	Sürünme Kırılması	95
4.2.4.	Yorulma Kırılması	96
4.3.	Kırılma Tipleri	96
4.3.1.	Klivaj Kırılması	96
4.3.2.	Kayma Kırılması	97
4.3.3.	Taneler Arası Kırılma	97
4.3.4.	Taneleri Keserek Kırılma	97
4.4.	Kırılma Mekanikliği	98
4.4.1.	Kırılma Mekanikliği Yaklaşımları	99
4.4.1.1.	Lineer - Elastik Kırılma Mekanikliği Yaklaşımı	99
4.4.1.1.1.	Lineer - Elastik Malzemelerde Teorik Mukavemet	100
4.4.1.1.2.	Griffith Teorisi	104
4.4.1.1.3.	Gerilme Şiddet Faktörü (Stress Intensity Factor)	109
4.4.1.1.4.	Düzlem Deformasyon (Plane - Strain) - Düzlem Gerilme (Plane - Stress)	113
4.4.1.2.	Elasto - Plastik Kırılma Mekanikliği Yaklaşımı	114
4.4.2.	Kırılma Tokluğu Ölçüm Yöntemleri	120
4.4.2.1.	K_{IC} Yöntemi	121
4.4.2.1.1.	Numune Formu ve Boyut Sınırlaması	122
4.4.2.1.2.	Çatlak Açıklığı Ölçümü	125
4.4.2.1.3.	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	126
4.4.2.2.	Kritik Çatlak Açıklığı (Crack Opening Displacement COD)	129

4.4.2.3. J - İntegrali	132
------------------------	-----

BÖLÜM 5. KOMPOZİT MALZEMELERDE KIRILMA VE TOKLUK

5.1. Giriş	137
5.2. Çatlak Ucu İlerlemesi	138
5.3. Kompozitlerde Çatlak Yayılması	140
5.3.1. Matrisin Etkileri	140
5.3.2. Elyaf Etkileri	140
5.3.3. Elyaf / Matris Bileşiminin Etkisi	141
5.4. Kompozitlere Kırılma Mekanığı' nin Uygulanışı	142
5.4.1. Çentikli Kompozitlerin Mukavemeti ve Çentik Hassasiyeti	142
5.4.2. Kırılma Mekanığı Yaklaşımı	142

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

6.1. Giriş	145
6.2. Seçilen Matris Malzeme ve Takviye Elemanı	145
6.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	147
6.3.1. Kalıbın Hazırlanması	147
6.3.2. Keçe Elyafının Hazırlanması	147
6.3.3. Kompozit Numuneler İçin Hesaplamalar	147
6.3.4. Kompozit Malzemelerin El Yatırması Yöntemiyle Döküm Aşaması	151
6.3.5. Numunelerin Kesimi	153
6.3.6. Ön Yorulma Çatlağının Açılması	153
6.4. Test Ekipmanları	155
6.4.1. Kuvvet Ölçer	155
6.4.2. Çentik Ucu Açılmasını Ölçer (Clip - Gauge)	157
6.4.3. Numune Eğme Aparatı	157
6.4.4. Amplifikatör, XY Recorder ve Test Makinası	158
6.5. Alınan (P - V) Eğrileri	161
6.6. Hesaplamalar	178
6.6.1. Numunelerin İçerdikleri Elyaf Oranlarına Göre Kopma Genilmeleri	178
6.6.2. Elde Edilen Eğrilerden Bulunan Sonuçlar ve K_{IC} Hesaplamaları	179
6.7. Sonuçlar ve Değerlendirme	202

KAYNAKÇA	206
----------	-----

BİOGRAFİ	208
----------	-----



BÖLÜM 1

GİRİŞ

İmalat sanayinde kullanılan tüm malzemelerin sağlıklı bir şekilde kullanılması için onların tüm karakteristik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bilinmesi gereken bu mekanik özellikler, Çekme dayanımı, Basma dayanımı, Eğme dayanımı, Kesme dayanımı, Yorulma dayanımı, Aşınma dayanımı, Korozyon dayanımı, Yüksek sıcaklık özellikleri, Isıl iletkenlik, Elektrik iletkenliği gibi başlıca özelliklerdir. Bunun yanında mühendislikte kullanılan malzemelerin bilinmesi gereken en önemli mekanik özelliklerden biri de "Kırılma Tokluğu" dur.

Mühendislik malzemelerinde geleneksel tasarım yöntemi; statik yükü orantı sınırının altında tutarak aşırı sehimi önleme, statik yükün yapının taşıyabileceği max. yükün altında tutarak burkulma ve boyun teşekkülünden koruma, yükleme statik halden üniform olmayan gerilme dağılımı şeklinde ise (çentikli yapı), max. gerilme civarında lokal plastik deformasyonların müsaade edildiği, geri kalan tüm yapıda büyük elastik gerilmelerin hakim olduğu, çentik katsayılarının kullanıldığı plastik tasarım yöntemidir.(5)

Bu yöntemlerde çalışma yükleri, akma, çekme ve kırılma mukavemet değerlerinin altında tutularak hesaplanmaktaydı. Oysa, bahsedilen tasarım yöntemleri ile dizayn edilmiş pek çok yapı, hesaplanan gerilmelerin çok altındaki işletme gerilmelerinde hasara neden olmuşlardır. Yapılan hesaplarda teorik mukavemet ortalama E/10 olarak çıkarılmıştır. Fakat deneysel sonuçlar ise bu değerden 10-1000 misli daha düşük çıkmıştır./12/ Bu tür klasik tasarım hesapları ile yapılan hesaplamalar sonucunda, özellikle 2. Dünya savaşı sırasında pek çok yapı, köprü, gemi hasara uğramıştır. Ne yazık ki tarih bu tür kırılma olaylarının yarattığı facialarla doludur. Bu konudaki ilk yazılı belge 1844'de Oldham İngiltere'de bir değirmendeki dökme demir ana milin kırıldığını ve 20 kişinin öldüğünü belirtmektedir. Çok yakın zamana kadar klasik dizayn kriterleri ile bu tür olaylar açıklanmaya çalışılmış fakat başarısız olmuştur. Yine bu faciaların en iyi bilinenleri İngilizlerin Turbojet Comet uçakları ile T2 Tanker ve Liberty gemilerinde olanlardır. Toplamı 5000 kadar, parçaları kaynak kullanılarak eklenmiş bu gemilerden, 1000 tanesinde çatlaklar olmuş, 200 tanesi ciddi bir şekilde hasar görmüş ve 16 tanesi de ortadan ikiye ayrılmıştır. Bunlara ek olarak daha yakın zamanlarda F111 A.B.D.

Hava Kuvvetleri uçakları düşmüş, Alaska-Kanada petrol boru hattında patlamalar meydana gelmiş, Melborn Avustralya'da King's Köprüsü aniden çökmüştür. (6)

Buradan çıkan sonuç, bu yapıların düşük yüklerde bozulmasına neden olan en önemli etken, yapı içerisindeki mikro çatlaklardır. Son yıllarda mikro çatlakların etkileri ve yukarıda açıklanan etkiler "Kırılma Mekaniği" adlı bilim dalıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Kırılma Mekaniği yaklaşımları ise mühendislik malzemeleri için Lineer-elastik Kırılma Mekaniği yaklaşımları ve Elasto-plastik Kırılma Mekaniği yaklaşımları olarak ayrılmıştır. Özellikle gevrek malzemeler için Lineer-elastik Kırılma Mekaniği yaklaşımları ve parametrelerinin uygun olduğu yapılan çalışmalar sonucu bulunmuştur. Çok ilginç olanı yapılan çalışmalar sonucu malzemenin içerisindeki çok küçük (mikro) eliptik bir çatlağın malzemenin mukavemetini yaklaşık 1000 kat kadar düşürdüğü görülmüştür.(4) Kırılma mekaniğinde, kırılma ile ilgili parametre Kırılma Tokluğu (fracture toughness) veya gerilme şiddet faktörü (K) dır. Gerilme Şiddet Faktörü (K), çatlak civarındaki gerilme alanını belirleyen çok önemli bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır. (14)

Malzemenin kırılmaya karşı direncini deneysel olarak tesbit için, başlangıçta kalitatif sonuçlar veren deneyler yapılmıştır. Sonraki çalışmalar, yapı içerisindeki çatlak ilerlemesine karşı malzeme direncini kantitatif olarak ölçülebilecek Kırılma Mekaniği analitik ifadeli K_{IC} , COD, J integrali gibi deneysel metodlar üzerine yapılmıştır. (5)

Bütün bunların çerçevesinde, mühendislik malzemelerinde Kırılma Mekaniği ve malzemenin mekanik özelliğini belirten Kırılma Tokluğu parametresinin ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

Teknolojik gelişmelerin ilerleme hızı, belirli koşullarda birden fazla özelliği aynı anda sağlayabilecek malzemelerle sınırlıdır. Bu gerçek yeni özellikleri içeren yüksek performanslı malzeme gereksinimi kavramını geliştirmiştir. Alışlagelmiş malzemeler, metal ve alaşımları bu çeşit istekler karşısında sınırlı cevap verme durumuna gelmişlerdir. (21) Yeni geliştirilen malzeme grupları anılan yetersizliklere çözüm bulmuş ve kullanıma yeni boyutlar getirmiştir. Metallerle kıyaslandığında, mühendislikte kullanılan polimerlerin en belirgin problemi, sahip oldukları düşük rijitlikleri ve mukavemetleridir. Günümüzde bu problem matrise takviye edici partüküllerin veya elyafların ilavesiyle bir ölçüde bertaraf edilmiş durumdadır. Bu ilave sonucu elde edilen yeni malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılmakta olup bugün ileri seviyede birçok mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılır duruma gelmiştir.

Metalik malzemelerle kıyaslandığında kompozit malzemelerin en belirgin üstünlükleri; malzemenin birim ağırlık başına düşen elastik modülünün ve mukavemetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Böylece kompozit malzemeler ileri mühendislik uygulamalarında, bilhassa yüksek rijitlik/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranlarının önemli olduğu havacılık ve otomobil endüstrisinde her geçen gün daha da yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Diğer taraftan ucuz üretim yöntemi ve kolay imal edilebilmeleri de gözönünde bulundurulduğunda ekonomik açıdan tercih nedeni olan malzemeleri oluşturmaktadır. (21, 24)

Metalik malzemeler üzerine Kırılma Mekanik Parametreleri deneysel ve teorik olarak uygulanmış ve başarılı olmuştur. Kompozit malzemelerin Kırılması ve Kırılma Mekanik Parametrelerinin uygulanması üzerine daha önce birçok bilim adamı çalışmıştır. Fakat kompozit malzemelerin yapılarının çok karmaşık oluşu ve yapı elemanlarının çok farklı ve zengin oluşu yüzünden tam bir anlaşma sağlanamamıştır. Sonuçlara deneysel olarak yaklaşılmaya çalışılmış ve optimum bir malzeme üretme üzerine teorik ve deneysel çalışmalar devam etmektedir.

Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler (ETKM) günümüzde en çok kullanılan kompozit tipidir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler heterojen ve anizotropik bir yapıya sahip olduklarından, bu malzemelerin kırılma davranışları alışlagelmiş homojen ve izotropik malzemelerden çok farklıdır. Bu alandaki bilgi ve deneyimlerin yetersizliği ETKM'lerin mühendislik yapılarında kullanımının yaygınlaşmasını sınırlayan en önemli etkenlerden biridir. ETKM'lerde çatlak oluşumu ve ilerleyişini etkileyen diğer bir etken de değişik nedenlerle malzeme içinde başlangıçta bulunan kusurlardır. Nitekim kırık elyaf, elyaf/matris bağındaki süreksizlikler yada matris çatlakları gibi malzeme kusurları da kırılma davranışını yapının heterojenliği ve anizotropluğu kadar etkiler.

Çok tabakalı bir ETKM'de tabakaların gerilmeye dik düzlemlerde kırılması, tabakaların ayrılması (delaminasyon), elyaf kırıkları, matris çatlakları, elyaf/matris bağının bozulması, kırık liflerin çekilmesi, matris akması, vb. Bu hasar biçimlerinden hangilerinin etkin olacağını ise elyaf ve matris arasındaki mağın mekanik davranışları gibi etkenler etkiler.

ETKM'lerin kırılma davranışını etkileyen etkenlerin bu kadar çok olması, olayın deneysel yada teorik karakterizasyonunu güçleştirir. Ancak kırılma davranışının belirlenmesi, bu malzemelerin uygulamadaki artan kullanımında güvenlik açısından çok önemli olduğundan, yukarıda da bahsedildiği gibi son yıllarda bu alandaki araştırmalar yoğunluk kazanmıştır. Bu konuda günümüze değin yapılan çalışmalarda önerilen yaklaşımlar, mikromekanik yaklaşımlar, makromekanik yaklaşımlar ve anizotropik sürekli ortam yaklaşımı

olmak üzere üç grupta toplanabilir. Mikromekanik yaklaşımlarda kompozit malzemelerin özellikleri, bileşenlerin özellikleri yardımıyla lif kopmaları, matris kırıkları, elyaf/matris bağı bozulmaları benzeri makro düzeydeki davranışlar göz önüne alınarak belirlenmeye çalışılmıştır. Makromekanik yaklaşımlarda ise malzeme homojen ve izotropik kabul edilir ve enine çatlak oluşumu, delaminasyon (zayıf ara yüzeylerin ayrılması) vb. makro düzeydeki kırılma mekanizmaları dikkate alınır. Anizotropik sürekli ortam yaklaşımlarında ise tüm kompozit malzeme bir sürekli ortam kabul edilerek kırılma davranışı lineer-elastik kırılma mekaniği esasları kullanılarak açıklanmaya çalışılır. Bu üç yaklaşımın yanısıra bunların birleştirilmesi ile geliştirilmiş değişik yaklaşımlar da vardır. Bunlar iki başlık altında toplanır. Bu yaklaşımlardan ilki, LEKM esasları yardımıyla geliştirilmiş sürekli ortam yaklaşımları, ikincisi ise süreksizlik önündeki gerilme dağılımını esas alan gerilme kırılması kriteridir. (3)

Bu tez çalışmasında, kırılma mekaniği yaklaşımlarında Lineer-elastik Kırılma mekaniği Parametreleri ve bu yaklaşımda gevrek malzemeler için uygun olan K_{IC} Kırılma Tokluğu ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin kırılması için ortaya atılan Sürekli ortam yaklaşımlarının esasları kabul edilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde kompozit malzemelerin kırılma davranışları ve kompozit malzemelerle ilgili olarak yapılan bazı çalışmalar ve kısaca sonuçları verilmektedir. Bu çalışmalar tarih sırasına göre sıralandırılmıştır.

M.Wu. Edward , Anizotropik Plakaların Kırılma Mekanizması adlı çalışmasını başlıca iki bölüme ayırmıştır. Birinci bölümde kırılma mekaniği için geliştirilen matematiksel modellerden daha çok kırılma mekaniğinin önemli kavramları üzerinde durmuştur. İkinci bölümde ise anizotropik kompozitlere kırılma mekaniği esaslarının uygulanabilirliği üzerinde durmuştur. Özellikle ikinci bölüm çalışmada teorik ve deneysel olarak geliştirilen detaylar sunulmuştur. Bu teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda ise genellikle metalik malzemeler için geçerliliği bilinen kırılma mekaniği esaslarının anizotropik plakalar (kompozitler) için de bazı kısıtlamalar çerçevesinde kullanılabilmesi söylenmiştir. (9)

G.R. Irwin'in Kompozit malzemelerin kırılma davranışları ile ilgili fikirleri şunlardır ; "Kompozit malzemelerin kırılma davranışı beklenildiği gibi çok karmaşık olduğu görülmüştür. Fakat, devam eden çalışmalarla yeni, basitleştirilmiş analiz fikirlerinin geliştirilmesi mümkündür. Çünkü hem bu tür çalışmalar, hem de kompozit malzemelerin kırılma davranışlarının biçimi bu konudaki gelişmelere yardımcı olacak şekilde devam etmektedir". (13)

G.C. Sih ve E.P.Chen doğrusal olmayan kompozitlerin kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Bu incelemeye göre ; kırılma mekaniği esasları genellikle, doğrusal olmayan kompozitlerin gevrek kırılma analizleri için uygulanır. Bu çalışmada doğrusal olmayan kompozitler için geliştirilen S_C teorisinden söz edilmektedir. S_C teorisine dayanan analitik ön kabuller, scotchply 1002 kompozit numuneleri üzerindeki deneysel verilerle iyi uyum sağlamıştır. S_C teorisi, klasik gerilme şiddet faktörü K_C den bir miktar farklılık göstermiştir. Elde edilen sonuçlara bakılırsa, doğrusal olmayan kompozitler için geliştirilen S_C teorisi en az K_C teorisi kadar iyi uyum sağlamıştır.(18)

S.K. Gargar ve L.J. Broutman, rasgele dağılımlı lifli kompozitlerdeki kırılmaya çatlak ucunun yaptığı etkiyi inceleyen bir araştırma yapmışlardır. Rasgele dağılımlı cam lifleri ile takviyeli epoksi reçine içindeki bir çatlak ucunun ilk hasarı incelenmiş ve bu hasarın yaklaşık olarak kırılma yükünün %65'inde meydana geldiği görülmüştür. Hasar bölgesi ise artan yüklerle beraber büyümüşür. Hasar bölgesine karşılık gelen etkili çatlak uzunluğu uygun bir kalibrasyon tekniği kullanılarak tayin edilmiştir. Önceden çentik açılmış numuneler, sabit yüklemeye maruz bırakılarak etkili çatlak uzunluğunun artışı ve çatlak ağzı açıklığının değişimi ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda ise ; kırılmanın, gerilme şiddeti faktörü (K)'nın kritik bir (K_C)'ye ulaştığı zaman meydana geldiği görülmüştür. (10)

J.M. Slepetz ve L. Carlson, grafit/epoksi, S-camı/epoksi , cross-ply kompozit yapıları ve Compact tension numuneleri kullanarak kırılma deneyleri yapmışlardır. Bu deneylerde kırılma tokluğu değerleri, yük-çatlak ağzı açıklığı (Complians) eğrileri ve bu Complians eğrilerinin kalibrasyonu yardımıyla hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan numunelerdeki çatlak ilerlemesinin her zaman liflere paralel ve çatlak buyutuna bağlı olduğu bulunmuştur. Kırılma tokluğu değeri, S-camı/epoksi numunelerde yüklemeye doğrultusundaki lif yönlerine göre belirgin olarak değişmiştir. Cross-ply ve S-camı numuneleri üzerinde yapılan testler ise geçerli olmamıştır. Çünkü bu numunelerde çatlak ilerlemesi meydana gelmemiştir. Bu numunelerde artan yük etkisi ile yüzeysel paralel çatlaklar ve diğer hasar türleri meydana gelmiştir. Bu çalışmanın sonunda Complians kalibrasyon metodu ile elde edilen tokluk değerlerinin diğer metodlarla elde edilen tokluk değerleri ile uyduğu gözlenmiştir. (19)

S. Parhizgar, L.W. Zachary ve C.T. Sun yaptıkları çalışmada ; ortotropik kompozit plakalardaki kırılma olayını incelemiş ve izotropik plakalardaki kırılma ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca çalışmalarında Lineer-Elastik Kırılma mekaniği prensiplerinin ortotropik plakalara uygulanabilirliği üzerinde çalışmışlardır. Kırılma mekaniği prensiplerinin geçerliliği için cam/epoksi kompozit malzeme çiftini kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucu, doğrusal olmayan kompozitlerin kırılma tokluğunun çatlak boyundan bağımsız, fakat lif yönüne bağımlı olduğu bulunmuştur. Farklı çatlak-lif yönleri için kırılma tokluğu ,Compact-tension numuneleri ve sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca farklı çatlak-lif yönleri için malzemenin kırılma tokluğu ile ilgili ampririk bir formül geliştirilmiştir.(17)

$$K_{IC\alpha} = \left(0,739.\alpha^2 + 0,19.\alpha + 1 \right).K_{IC0}$$

B. Lauke ve W. Pompe'nin "Kısa liflerle takviyeli termoplastiklerin kırılma tokluğu" adlı çalışmasına göre ; Kısa liflerle takviyeli termoplastiklerin kırılması Mod I, Mod II ve Mod III gibi farklı kırılma mekanizmaları ile tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada gevrek veya sünek matrislerin lif matris arayüzeyi boyunca kayarak hasara uğramasını içeren Mod II tarzı kullanılmıştır. Çentik ucunun ilerleme bölgesi hasar bölgesi olarak kabul edilmiştir. Kırılma tokluğunun veya kırılma enerjisinin kırılma moduyla değiştiği bilinmektedir. Buna göre bir enerji prensibine dayanarak statik ve dinamik kırılma tokluğu için teorik ifadelerin çıkarılmasına çalışılmış ve bunlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu teorik ifadelerin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu gözlenmiştir. (16)

Afacan M. ve Aran A. ,elyaf takviyeli kompozit levhaların çentikli dayanımını belirlemede kullanılan Gerilme Kırılması Kriterleri, yalnızca dairesel delik biçimindeki süreksizlik geometrileri için incelenmiş ve Cam Takviyeli Plastikler (CTP) üzerinde delik etkisini belirlemeye yönelik olarak gerçekleştirilen bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda ise , dairesel deliklerin dayanımda belirgin bir düşmeye neden olmadığı görülmüştür.Yani el yatırması ile imal edilmiş CTP malzeme sistemlerinde dairesel delik açılmasının yük taşıyıcı kesitin azalmasından başka olumsuz bir etkisi yoktur. (3)

Vardar Ö. ve Elaldı F. yaptıkları çalışmada, çentik geometrisinin cam elyaf takviyeli kompozitin kırılma davranışına etkisini incelemişlerdir. Cam elyafı ile gelişigüzel yönlerde takviye edilmiş kompozit malzemelerin kırılma tokluğu ile ilgili özelliklerinin çatlak ucunun yuvarlaklığı ve yine bu uçta yaratılmış yorulma hasar bölgesiyle nasıl değiştiği saptanmıştır. Kırılma tokluğu değerini saptamada %5 sekant çizgisinin yük-deplasman eğrisinin kesmesinden ayrı olarak, elyaf-polyester ara yüzeylerinin ayrılmaya başladığı nokta ve kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı nokta göz önüne alınmıştır. Bu çalışmanın sonucunda 0,25 - 2,5 mm arasında değişen çatlak ucu yuvarlaklığının bu malzemeyi önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Yorulma yüklemesi ise elyaf-polyester ara yüzeylerinin ayrılmasıyla ortaya çıkan hasar nedeniyle malzemenin tokluk değerini düşürmektedir. Ayrıca K_{IC} test yönteminin elyaf takviyeli kompozitler için uygun olduğu söylenebilir. (23)

Yayla P. ve Uzman İ. Elyaf takviyeli kompozitlerde tabaka ayrılmasını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu kişilere göre ; Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden biri de malzemenin tabaka ayrılmasına karşı gösterdiği dirençtir. Tabaka ayrılmasının oluşumu, sadece yapının tamamen tahrip olmasına yol açmakla kalmayıp aynı zamanda yapının rijitliğinde de önemli bir düşüşe sebep olmaktadır. Yapılan bu çalışmada elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin mod I, mod II ve karışık mod I/II

kırılma dirençlerini tesbit etmek üzere halen üzerinde çalışılan değişik deney teknikleri ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir. (24)

Bu çalışmanın sonucunda ise ; kompozit malzemede tabakalar arası çatlak ilerleme direnci mod I, mod II ve karışık mod I/II kırılma türleri için farklı deneyler kullanılarak tesbit edilmiştir. Karışık mod I/II durumu için toplam çatlak ilerleme direnci G_C değeri, G_{IC} ve G_{IIC} olarak ikiye ayrılıp ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan malzeme için saf mod II kırılma direnci (G_{IIC}), saf mod I direnci (G_{IC}) değerinden %21 kadar daha fazla olduğu gözlenmiştir. (24)

Ünal A. ve Keleşoğlu E. yaptıkları çalışmada termoset plastiklerden polyester reçine matrisli E-Camı fiberlerle destekli Kompozit plakalarda Kırılma Tokluğu (K_{IC})'ye fiber türü ve geometrisinin etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneylerde gelişigüzel dağılımlı keçe, düzlemsel dokuma ve eş yönlü sürekli cam fiberlerle desteklenmiş CTP'ler kullanılmıştır. Düzlemsel keçe için cam hacim oranı %20, %25, %30, düzlemsel dokuma ve eş yönlü fiberler için ise %30, %40, %50 olacak şekilde 10 mm kalınlıkta elyatarması yöntemiyle hazırlanmış plakalardan ASTM E-399 uyarınca Compact deney parçaları hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Deney parçaları yönleri 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 derece olarak alınmış ve bu şekilde her yön için ayrı ayrı kırılma toklukları bulunmuştur. Deneyler sırasında yükleme hızı sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonrası şu sonuçlar bulunmuştur. (21)

a) CTP malzemeler anizotrop malzemeler olup kırılma tokluğu değerleri yöne bağlı değişim göstermektedir. Düzlemsel dokuma ve eş yönlü fiberlerle destekli polyester matrisli CTP'lerle yapılan kırılma tokluğu deneyleri sonucu anılan malzemelerin kırılma tokluklarının yöne bağlı değişimleri bulunmuştur.

b) Düzlemsel keçe destekli CTP'de mekanik özellikler keçe düzleminde yönden bağımsızdır. Bu yüzden tasarımda böylesi malzemeler düzlemsel izotropik olarak düşünülebilir.

c) Düzlemsel dokuma ve eş yönlü fiberlerle destekli CTP'de kırılma tokluğu değerleri yöne bağımlı olduğundan tasarımda kırılma tokluğunun minimum değerinin göz önüne alınması yada anılan yönde yükleme yapılması önerilmiştir.

d) Ön yorulma çatlaklarının açılmasında polyester matrisin çatlak durdurucu etki yapması nedeniyle yüksek çevrim sayılarında bile doğrusal ilerleme başarı ile gerçekleştirilememiştir. Buna karşılık ön yorulma çatlakları kama yardımıyla kolayca açılabilen ve sonuçlar sağlıklı olarak elde edilmektedir.

e) Deneyle sonunda elde edilen yük-çatlak ağız açıklığı eğrilerinden, ASTM E-399 da yer alan koşullar sağlanmıştır. Buda geçerli deney yapıldığının bir kanıtıdır.

L. Ye, kompozit malzemelerdeki tabakalar arası çatlak ilerlemesinin esasları üzerinde durmuştur. T300/634.DDS karbon lifli epoksi kompozitin Mod I tarzındaki kırılma davranışı üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gerilme şiddet faktörünün kullanılabilmesi için basit bir model ve düzeltme faktörünün elde edilmesine çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucu olarak ise; kompozit malzemeler için bilinen G_{IC} ve K_{IC} (kırılma tokluğu) ifadeleri üzerinde lineer-elastik kırılma mekaniği esasları kullanılarak doğrultma yapılabileceği söylenmiştir. (25)

Yapılan bütün çalışmalardan elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirilirse, Lineer-Elastik Kırılma Mekaniği esaslarının kompozit malzemeler için de geçerli olabileceği kanıtlanmıştır. Fakat bazı araştırmacılara göre kompozitlerde kırılma mekaniği esaslarının tam olarak geçerli olabilmesi için bazı düzeltme katsayılarının kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Bu sonuçlara genel olarak bakarak bizde yaptığımız bu tez çalışmasında, daha ziyade gevrek kompozitler için uyumlu sonuçlar veren Lineer-Elastik Kırılma Mekaniği esaslarını kullanarak, Elyaf Takviyeli kompozitlerin Mod I tarzındaki (K_{IC}) kırılma tokluğunu inceledik. Yapılan deneysel çalışmalarda gördük ki, kırılma tokluğu testlerinde genellikle Compact-tension numuneleri kullanılmış deformasyon hızı sabit tutulmuştur. Bu tez çalışmasında ise üç farklı deformasyon hızında, yedi farklı elyaf hacim oranında ve beş değişik lif (elyaf) yönü esas alınarak üç noktadan eğme numuneleri kullanılmıştır. Böyle bir çalışmaya literatür araştırmasında rastlanmamıştır.

BÖLÜM 3

KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. GİRİŞ

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır. (Tablo 3.1) Dayanım ve tokluk özellik çiftinin en uygun olduğu grup olan metaller makina mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan malzeme türüdür.

Tablo 3.1 : Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin Karşılaştırılması

Malzeme Grubu	Yoğunluk	Dayanım	Tokluk	Isıl Kararlılık	Biçimlendirme	Birleştirme
METALLER	orta yüksek	orta	iyi	orta	orta	orta
SERAMİKLER	düşük yüksek	yüksek	düşük	yüksek	kötü	kötü
PLASTİKLER	düşük	düşük	düşük	düşük	iyi	iyi

Bu üç ana grubun yanında, aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemede toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkartmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, Kompozit malzemeler (Karma Malzemeler) olarak adlandırılırlar. Atomsal veya molekül düzeyde birleştirilen malzemeler (örneğin alaşımlar) makroskopik olarak homojen olduklarından Kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar. (2)

Diğer bir tanım ise şöyle yapılabilir ; İki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun bir malzeme oluşturmak için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelere kompozit malzemeler denir. Doğrudan doğruya istenilen amaçla kullanılmaya, enaz iki ayrı malzemedan belli olan bir

özelliği elde edebilmek için bunların belli şartlar altında ve belli bir oranda fiziksel olarak birleştirilmesiyle elde edilirler. Kompozit malzemeler genellikle matris adı verilen ana faz ile takviyelendirici olarak adlandırılan tali fazdan oluşurlar. (1)

20. Asrın ikinci yarısında tekniğin hızla gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Fakat bu gelişim, yeryüzünde bulunan ana malzemelerin sınırlı olmasından dolayı, malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri, teknolojisinin gelişmesine ayak uyduramamıştır. Uzay araçlarının yapımına geçilen asrımızda, bilim adamları çağın yenilikleri ile birlikte mevcut malzemelerin özelliklerinden bilimin gelişmesi paralelinde günün şartlarına uyacak şekilde gerek ekonomik gerekse teknik yönden daha uygun malzemeler imal etme yolunu seçmişlerdir. Dolayısıyla hem ekonomik hem daha mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin oluşumu için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece malzemeyi oluşturan bileşenlerin, özellikleri farklı olan kombinasyonlarının verdikleri, kompozit malzemeler, büyük bir önem kazanmıştır. (1, 24)

Kompozit malzemeler özelliklerini doğadan almış olup çok uzun bir kullanım tarihine sahiptirler. Başlangıçları hakkında kesin bir şey bilinmemekle beraber, çok eski yıllardan beri kullanılmaktadırlar. Doğada bulunan kompozit yapıya en iyi örnek çam ağacıdır. Çam ağacının gövdesi bir kompozit yapı göstermektedir. Gövde içinde yaz ve kış mevsimlerinde meydana gelmiş olan yaş halkaları iç içe bir görünümündedir; ve kış halkaları sert fakat kırılğan yaz halkaları ise yumuşak fakat esnektir. Böylece çam ağacının bir özelliği benzeri bir yapıya sahip olmayan kavak ve kayın gibi ağaçlara kıyasla daha sağlam olmasını sağlar. Ülkemizin kırsal bölgelerinde yapı malzemesi olarak saman çöpleri ile takviye edilmiş kerpiçler kompozit malzemelerin en ilkel örneklerindedir. Ok yayı yapılırken üst üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar Kompozit bir malzeme oluştururlar. Ayrıca Kompozit malzemeler doğada da değişik biçimlerde bulunmaktadır (ahşap malzemeler, kemik v.s.). Bugün kullanılan kompozitler ise camfiber reçine (polyester), tungsten, molibden takviyeli alüminyum, karbon ve çelik takviyeli plastiklerdir. Bunlar genellikle plastik/plastik, plastik/dolgu maddesi, plastik/cam elyaf, plastik/metal fiber, metal matriksli kompozitler, seramikler olarak sınıflandırılırlar. (1)

Kompozit malzeme üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940 'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler (CIP) elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeni ile bu amaç için kullanılabilir en uygun malzemedir. İlk CIP tekne 1942'de yapılmış, ilk elyaf sarma patenti ise 1946' da A.B.D'de

alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri Kompozit malzemeden yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde %30'a varan oranlarda kullanılan Kompozit malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler (Plastikler) içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron lifleri veya 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alışımlı içerisine oluşturulmuş nikel- niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir. Bu üstün nitelikli Kompozit malzemelerin yanında ucuzluğu ve elde edilmesi oldukça kolay olan cam elyaf-polyester (CTP) malzeme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Verilen örneklerden de anlaşılacağı gibi kullanılacak Kompozit malzeme istenen mekanik özellikler, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet vb. özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye-matris çifti oluşturabilmektedir. (2)

Son zamanlarda yüksek mukavemet/ağırlık, katılık/ağırlık oranlarına sahip olan fiber takviyeli reçine kompozitleri uçak ve uzay taşıtları gibi ağırlığa hassas uygulamalarda önemli kullanım sahaları bulmuşlardır. Düne kadar saçtan, tahtadan yapılan tekneler, yatlar, kotralar yerlerini artık polyester-cam elyaftan yapılan benzerlerine bırakıyorlar. Bakım onarım açısından daha avantajlı kompozit malzemeden yapılan tekneler aynı zamanda hafif, uzun ömürlü ve süratli olmaları ile de tercih edilmektedirler. İmalat sanayinde birçok parça artık kompozit malzemeden yapılmaktadır. Bu malzeme grubu hava ve uzay endüstrileri yanında kara ve deniz taşımacılığı, çeşitli spor malzemeleri (yüksek atlama sıırıkları, bisiklet, tenis, sörf, yat ve yarış tekneleri vs.), tıp gereçleri, robot yapımı (eylemsizlikleri az ve rijit olduklarından), kimya sanayii (korozyona dayanıklı olduklarından), elektroteknik ve elektronik (yalıtkan olduklarından) ve müzik aletleri yapımı gibi birçok uygulama sahası bulmuş durumdadır. (2, 8)

Farklı malzemeler mikroskopik seviyede birleştirilebilirler. Fakat sonuçta metal alaşımlarında olduğu gibi makroskopik olarak homojendir. Kompozit malzemeler ise makroskopik seviyede anizotropiktir. Kompozit malzemeler genellikle kendilerini meydana getiren bileşenlerin en iyi özelliklerini biraraya getirecek tarzda oluştururlar. İşte bu kompozit malzemelerin (Karma malzemelerin) en büyük avantajıdır. Fazla ağırlık istenmeyen fakat fazla mukavim olması istenen yerlerde çelik ve benzeri metallerin yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. (15)

Yukarıda da belirtildiği gibi Kompozit malzemelerin avantajı bileşenlerinin en iyi özelliklerini biraraya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır;

- Mukavemet (dayanım)
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Elektrik iletkenliği
- Isıl İletkenlik
- Rijitlik (katılık)
- Isı ızalasyonu
- Akustik izolasyon
- Yüksek sıcaklık özellikleri (Isıya dayanıklılık)
- Fiyat
- Ağırlık
- İmalat kolaylığı
- Estetik görünüm v.s.

Bu sayılan özelliklerin hepsi aynı anda iyileşmez ve zaten buna gerek de yoktur. Bileşenlerinin özellikleri bilinen bir Kompozit malzemenin, bazı özellikleri hesaplanarak bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb.). Bazı özellikler için ise bu mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.). Tasarımcı bu durumda emniyetli davranarak emniyet katsayılarını çok yüksek seçmek zorunda kalır ve Kompozit malzeme kullanımı ekonomik olmaktan çıkabilir. (1,15)

Yukarıda sözlü edilen uygulamalarda Kompozit malzemeler geleneksel bazı malzemelerle yarış halindedir. Tablo 3.2 de Kompozit malzemeler geleneksel malzemelerle mekanik özellikleri bakımından karşılaştırılmaktadırlar. (2)

Tablo 3.2 : Bazı Kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması

Malzeme	Yoğunluk g/cm ³	Çekme dayanımı MPa	Elastiklik Modülü GPa	Özgül Çekme dayanımı σ_f/ρ	Özgül Elastisite Modülü E/ ρ
Alaşımsız Çelik	7,9	459	203	58	26
Alüminyum	2,8	84	71	30	25
Al alaşımı 2024	2,8	247	69	88	25
Pirinç	8,5	320	97	38	11
Ahşap (kayın)	0,7	110	13	157	19
Kemik	1,8	138	26	75	14
Bor-Epoksi KM	1,8	1600	224	889	124
Karbon (YM)					
• Epoksi KM	1,6	1260	218	788	136
Karbon (YD)					
• Epoksi KM	1,5	1650	140	1100	93
Kevlar					
• Epoksi KM	1,4	1400	77	1000	55
S Camı					
• Epoksi KM	1,8	1400	56	824	33
E Camı					
• Epoksi KM	1,8	1150	42	639	23

Kompozit malzeme oluşturma seçenekleri sonsuzdur; dolayısıyla bunları sınıflandırmak da oldukça güçtür. Burada sadece makina mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan türler üzerinde durulacaktır. (2)

Sınıflandırma değişik açılardan yapılabilir; örneğin biçimlerine göre yapılacak bir sınıflandırmada üç grup söz konusudur:

- a) Elyafly Kompozit Malzemeler (CTP)
- b) Parçacıklı Kompozit Malzemeler (beton)
- c) Tabakalı Kompozit Malzemeler (formika)

Mühendislikte kullanılan Kompozit malzemelerin büyük çoğunluğu takviye edilerek özellikleri geliştirilmiş malzemelerdir. Takviyelerin yapılışı bakımından yapılacak sınıflandırmada ise üç ayrı grup düşünülebilir:

a) Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler (ETKM) :

Bunlarda matris kuvvetleri elyafa iletir. Kuvvet tümüyle elyaf tarafından taşınır. Elyafın genellikle yönlendirilerek kullanıldığı bu malzemelerde özellikler anizotropiktir. Örnek: Cam Takviyeli Plastikler.

b) Küçük Parçacıklarla Dayanımı Arttırılmış Malzemeler :

Kuvvetler matris tarafından taşınır. Küçük parçacıklar (0,01-0,1 μm), metal malzemede dislokasyonların hareketini engelleyerek dayanımı arttırırlar. Özellikler izotropiktir. Örnek : Çökelme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımı.

c) İri Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler :

Yükü matris ve elyafyla birlikte taşırlar. Özellikler izotropiktir. Örnek: beton, sert metal uçlar vs.

Kompozit Malzemelerin diğer bir sınıflandırılması ise kullanılan matris malzemeye göre şöyle yapılabilir.

A) REÇİNE MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

- *Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler (CTP)*
- *Bor Elyaf Takviyeli Kompozitler*

B) METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Biz bu tezde genelde Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeleri (ETKM) içeren ve bunlar içerisinde de Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelere (CTP) ağırlık vereceğiz. Bunun sebepleri ise Bölüm 3.2.1'de açıklanmıştır.



3.2. CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER (CTP)

Son 35-40 yıldan bu yana elyaf takviyeli termoset reçine ile üretilen ürünler tüm dünyada çok değişik uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Cam takviyeli plastikler genel olarak cam elyafı ile takviye edilmiş polyester reçineleri ifade etmektedir. Ancak polyester yerine diğer termoset ve termoplastik reçinelerde kullanılabilir.

Elyaf takviyeli reçine sistemi, takviye elemanının termoset reçine içerisine yayılmasından oluşan bir kompozit malzemedir. Ayrıca, dolgu maddeleri ve pigmentler gibi bazı maddelerde bünyede bulunmakla birlikte kompozit malzemenin esasını oluşturmaz. Genel olarak kullanılan reçine, uygun bir katalist sistemi ilavesi ile şebeke yapısı (cross-link) oluşturan ve ısı ile eritilmez bir katı cisim haline gelebilen bir sıvıdır.

Keçe veya dokuma şeklindeki elyafli malzemenin katalizlenmiş reçine ile ıslatılıp sertleşmesi beklenerek, kompozit malzeme elde edilir. Bu işlem açık veya kapalı bir kalıpta yapılır ve elde edilen ürün kalıbın tüm şeklini ters olarak gösterir. (2, 8)

3.2.1. CTP' LERİN KULLANILMA AVANTAJLARI

CTP'nin avantajlarını kısaca şöyle özetleyebiliriz,

- 1) Termoset
- 2) Avantajlı mukavemet/ağırlık oranı ve sertlik
- 3) Sınırsız kalıplama boyutları
- 4) Kolay üretim
- 5) Çok sayıda üretim tekniği
- 6) Küçük sermaye yatırımı (El yatırması için)
- 7) Düşük maliyetle az sayıda üretim olanağı (prototip)
- 8) Tasarım esnekliği
- 9) Diğer malzemelerle bağdaşma özelliği (takviye amacı ile köpük kullanımı)
- 10) Mükemmel su dayanımı
- 11) Çok sayıda kimyasal maddeye dayanım
- 12) Hava koşullarına ve UV ışınlarına dayanım
- 13) Kendinden reklendirilme olanağı
- 14) İstenildiği takdirde yanmazlık özelliği
- 15) İsteğe bağlı olarak ışık geçirgen özellikte üretilebilme olanağı
- 16) Çok iyi elektrik ve termik özellikler

CTP kullanımıyla ilgili bir diğer faktör de maliyet faktörüdür. Cam Takviyeli Plastik ürünlerde kullanılan reçineler genellikle petrol türevlerinden üretildikleri için fiyatları ham petrol fiyatları ile bağıntılıdır. Bu durumda CTP tüketimi diğer ekonomik faktörlerin avantajına bağılı olacaktır. (8)



3.3. BAZI ETKM'LERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Gelişmiş kompozit malzemeler dayanım, rijitlik, tokluk ve hafiflik gibi özellikler birlikte düşünüldüğünde alışıl gelmiş metal malzemelerden daha üstündürler. Kompozit malzemelerde takviyelerin miktarı ve geometrik düzeni temel kullanım özelliklerini belirleyen en önemli faktördür. Genellikle elyaf yönünde en iyi dayanım özellikleri, buna dik yönde ise en düşük değerler elde edilir. Tablo 3.3 de görüldüğü gibi iki yönlü ve çok yönlü takviye durumunda özellikler daha dengelidir. ($0^\circ / 90^\circ$) düzeninde 0° ve 90° doğrultularındaki dayanımlar en yüksek olup birbirine eşittir. 45° açı yapan doğrultuda ise en düşük dayanımlar elde edilir. (2)

Tablo 3.3 : Takviye biçiminin özelliklere etkisi

Takviye biçimi	Tek yönlü		İki yönlü		Dokuma		Keçe Çok yönlü
	0°		$0^\circ / 90^\circ$		$0^\circ / 90^\circ$		
Ölçme yönü	0°	90°	0°	45°	0°	45°	her yönde
Çekme modülü (GPa)	77	6	39	7	32	7	21
Çekme dayanımı (MPa)	1400	28	644	98	525	210	200
Basma modülü (GPa)	77	6	39	7	33	7	-
Basma dayanımı (MPa)	280	140	203	126	175	126	-
Eğme modülü (GPa)	77	-	-	-	28	-	19
Eğme dayanımı (MPa)	630	-	-	-	350	-	249

Dokuma biçimindeki takviyelerde ise takviyenin etkisi biraz daha düşüktür.

3.3.1. CAM ELYAF TAKVİYELİ PLASTİKLER (CTP)

Cam takviyeli plastiklerde uygulanan üretim yöntemi ve buna bağlı olarak elde edilen elyaf hacim oranı, özellikleri etkileyen en önemli faktördür. Tablo 3.4 de epoksi reçine içinde %50 hacim oranında takviye içeren CTP lerin mekanik özellikleri verilmiştir.

CTP malzemelerin özelliklerinin zamanla değişip değişmediği uzun yıllardır incelenen bir konudur. Ultraviyole ışınları ve nemin olumsuz etkileri bulunduğu bilinmektedir. Ultraviyole etkisinden korumak amacıyla koruyucu boya tabakaları uygulanmakta, ancak nemin etkisi önlemede boya ve organik koruyucu tabakalar yetersiz kalmaktadır. Nemin etkisi elyafa koruyucu bir tabaka (sizing) uygulanarak azaltılmaktadır. Tam bir koruma ise yüzeyi ince folyalar kaplanarak sağlanabilir. Öte yandan uzun yıllar kullanılmış CTP malzemeler üzerinde yapılan incelemeler dayanım düşüşlerinin çok önemli seviyelerde olmadığını göstermiştir. (2)

Tablo 3.4 : %50 Cam Takviye içeren Epoksi Matrisli Karma malzemelerin Mekanik Özellikleri

Elyaf Türü	E Camı	S Camı	Kuvartz
Yoğunluk (g/cm ³)	1,8	1,7	1,8
Çekme dayanımı, tek yönlü (MPa) , dokuma	1150 420	1400 595	1200 495
Çekme modülü , tek yönlü (GPa) , dokuma	42 24	56 28	40 21
Basma dayanımı , dokuma (MPa)	350	420	280

CTP malzemelerden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır, uygulama alanlarının bazı örnekleri Tablo 3.5 de toplu olarak verilmiştir. Cam takviyeli plastiklerin daha ayrıntılı kullanım alanları ve kullanılmaları ile sağladığı yararlar Tablo 3.6'da görülmektedir. Tablo 3.7'de ise CTP kullanımının hangi sektörlere ne oranda dağıldığını gösterilmektedir. Genel kullanım içinde payı en düşük olmasına rağmen uzay ve uçak sanayi en gelişmiş parçaların kullanıldığı alanlardır. Yapı sektöründe prefabrik ev ve banyo gereçleri üretimi en yaygın kullanım yerleridir. Tüketim mallarına örnek olarak sörfler, tenis raketleri, kaynaklar v.s.

gösterilebilir. CTP lerin kimyasal davranışları kullanılan matris reçinesinin özellikleri ile belirlendiğinden, kullanım yerine uygun reçinenin seçimi çok önemlidir. Elektrik endüstrisinde CTP yalıtkanlığı nedeniyle tercih edilmektedir. Deniz taşıtlarında CTP'nin kullanılmaya başlaması bu alanda bir devrim yaratmıştır. Petrol fiyatlarının artmasından sonra kara taşımacılığında hafiflik ve dolayısıyla CTP kullanımını önem kazanmıştır. (2)

Tablo 3.5 : Değişik Yöntemlerle Üretilen CTPlerin Kullanım Alanları

ELYAF SARMA	PÜSTİKÜRTME VE EL YATIRMA
Basınçlı tüpler	Tekneler
Silolar	Silo
Borular	Oto Karoserisi
Füze gövdeleri	Motorsiklet
KAPALI KALIP	Mobilya
Oto gövdeleri	Kamyon
Kaplar	Ev
Kimyasal gereçler	Depolar
Elektrik aletleri	Yüzme havuzları
Ev aletleri	Banyo küvetleri
Depolar	TORBA KALIPLAMA
PROFİL ÇEKME	Uçak parçaları
Çubuklar	Pervane kanatları
Borular	Yüksek dayanımlı parçalar
Profiller	ENJEKSİYON (Termoplastikler)
Yapı elemanları	Otomotif parçaları
Elektrik tesisat malzemeleri	Ev aletleri

Tablo 3.6 : Cam takviyeli plastiklerin ayrıntılı uygulama alanları

KULLANIM ALANLARI	ÜRETİCİYE SAĞLADIKLARI YARARLAR	KULLANICIYA SAĞLADIKLARI YARARLAR	ÜRÜN ÖRNEKLERİ
Otomativ Endüstri	<ul style="list-style-type: none"> Seri üretim ve düşük yatırım olanağı Kolay ve ucuz model değiştirme olanağı Düşük kalıp maliyeti Kapasitenin tam kullanılabilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek mekanik dayanım Ucuz ve kolay onarım olanağı 	<ul style="list-style-type: none"> Otomobil, kamyon kaputu, kamyon ve otobüs karoseri parçaları, traktör parçaları, iç donanımı Demiryolu vagonları iç döşemesi
Ev Aletleri	<ul style="list-style-type: none"> Komple ve karmaşık parça üretimi Montaj kolaylığı Elektrik izolasyonundan tasarruf 	<ul style="list-style-type: none"> Hafiflik Elektriksel etkilerden korunum 	<ul style="list-style-type: none"> Dikiş makinası, mikser, şalter Çöp kutuları, özel kutular
Havacılık	<ul style="list-style-type: none"> Hafif malzeme Yüksek mekanik dayanım 	<ul style="list-style-type: none"> Aynı mekanik dayanımın daha hafif malzemeyle sağlanması 	<ul style="list-style-type: none"> Uçak burun parçası, uçak iç dekorasyonu, uzay araçlarında kullanım, helikopter parçaları, planör gövdesi, plotsuz deney uçak modelleri
İş Makinaları	<ul style="list-style-type: none"> Kalıplama kolaylığı Parça sayısını azaltma olanağı Tek parça üretimi 	<ul style="list-style-type: none"> Elektriksel etkilerden korunum Hafiflik 	<ul style="list-style-type: none"> İş makinalarının koruma kapakları Çalışma kabinleri
İnşaat Sektörü	<ul style="list-style-type: none"> Tasarım esnekliği ve kolaylığı Ucuz izolasyon Hafiflik Montajda ve nakliyede kolaylık 	<ul style="list-style-type: none"> Hafiflik Bakım giderlerinin ortadan kalkması İzolasyon sorununa çözüm Yüksek mekanik dayanım 	<ul style="list-style-type: none"> Cephe kaplamaları Tatil evleri, büfeler, otobüs durakları Soğuk hava depoları, inşaat kalıpları Komple banyo ünitesi Ondüle levhalar

Tablo 3.6'nın devamı : Cam takviyeli plastiklerin ayrıntılı uygulama alanları

Elektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Seri ve ucuz üretim • Tek parçada ve karmaşık biçimli ürün yapımı 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek izolasyon güvencesi • Montaj kolaylığı 	<ul style="list-style-type: none"> • Şalterler • Yüksek gerilim izolatörleri • Devre kesiciler • Bağlantı kutuları • Aydınlatma armatürleri
Taşımacılık	<ul style="list-style-type: none"> • Kolay kalıplama olanağı • Malzemeden tasarruf • Düşük maliyet 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek ısı izolasyonu • Kolay temizlenebilirlik 	<ul style="list-style-type: none"> • Frigorik kamyon kasaları • Nakliye tankerleri • Kamyon kasaları • Tren vagonları
Mobilya	<ul style="list-style-type: none"> • Seri ve ucuz üretim • Tek parçada ürün yapma olanağı • Kolay model değiştirme • Tasarımda kolaylık ve esneklik • Çok sayıda standart ürünün kısa sürede üretilebilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek mekanik dayanım • Alışılmıştan farklı modern görünüm ve tasarım 	<ul style="list-style-type: none"> • Masa, sandalye, sehpa • Koltuk, kütüphane • Mutfak dolapları • Dekoratif eşyalar
Şehircilik	<ul style="list-style-type: none"> • Montajdan tasarruf • Ucuz maliyet • Hafiflik 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek izolasyon değerleri • Yüksek mekanik dayanım 	<ul style="list-style-type: none"> • Toplu konutların yapımı • Şehir süslemeleri (heykel, çöp bidonu, elektrik direği, bankalar)
Tarım Sektörü	<ul style="list-style-type: none"> • Seri üretim • Kolay montaj • Düşük yatırım 	<ul style="list-style-type: none"> • Dağcı koşullarına dayanıklılık • Yüksek mekanik dayanım • Korozyona dayanıklılık • İstek üzerine ışık geçirgenlik 	<ul style="list-style-type: none"> • Seralar • İlaçlama depoları • Sulama kanalları • Tahıl depolama siloları

Tablo 3.6'nın devamı : Cam takviyeli plastiklerin ayrıntılı uygulama alanları

Kitle Ulaşımı	<ul style="list-style-type: none"> Seri üretim Düşük yatırım olanağı 	<ul style="list-style-type: none"> Onarım kolaylığı Darbe dayanımı 	<ul style="list-style-type: none"> Şehir içi otobüsleri, tren-tranvay vagonları, tren makiniist kabinleri, teleferik vagonları, iç donanım, onarım modülleri
---------------	--	--	---

Tablo 3.7 : CTP Uygulamalarının Sektörlere Göre Dağılımı

Kara Taşımacılığı	%33
Deniz Taşımacılığı	%19
Yapı Sektörü	%14
Korozyona dayanıklı ürünler	%10
Ev Aletleri	% 6
Tüketim Malları	% 6
Elektrik Tesisatı	% 5
Uçak ve Uzay Sanayi	% 2
Diğer	% 5
TOPLAM	%100

3.3.2. KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

Yüksek zorlanmaların sözkonusu olduğu parçalarda çok yaygın olarak kullanılan karbon/epoksi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3.8 de özetlenmiştir.

Yorulma dayanımı bakımından, karbon takviyeli kompozit malzemeler metal malzemelerden daha üstündür. Tablo 3.9 daki çentikli ve çentiksiz parçalar için yorulma dayanımları karşılaştırılmaktadır. Yaklaşık izotrop olan ($0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ$) ile 2024-T4 alüminyum alaşımının karşılaştırılması özellikle ilginçtir, statik dayanımın daha düşük olmasına rağmen, hem çentikli hemde çentiksiz parçalar için KTKM'nin yorulma dayanımı daha yüksektir. Öte yandan bu kompozit malzemenin yoğunluğunun, alüminyumunkinin yarısı, çeliğinkinin ise beşte biri olduğu hatırlanırsa hafifliğin önemli olduğu uygulamalarda yaklaşık izotrop olan kompozit malzemelerin dahi metallere göre üstün olduğu ortaya çıkar. (2)

Tablo 3.8 : Karbon/Epoksi Kompozit Malzemenin Özellikleri

Kompozit Malzeme Türü	En Yüksek Değerler			
	Çekme		Basma	
	Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Kırılmış elyaf içeren hazır kalıplama bileşimi (izotrop)	357	110	476	-
YD Elyaf (0°)	1650	140	1008	115
YD Elyaf (0°/±45°)	504	58	511	51
OD Elyaf (0°)	1477	149	1428	133
OD Elyaf (0°/±45°)	511	66	511	65
YM Elyaf (0°)	1260	218	770	179
Dokuma, OD Elyaf	518	71	518	64

Tablo 3.9 : Karbon Takviyeli Kompozit Malzeme ile Diğer Bazı Malzemelerin Özelliklerinin Karşılaştırılması

Malzeme Türü	Takviye Düzeni	Statik Çekme Dayanımı (MPa)	Yorulma Dayanımı (MPa) ($N_e = 10^7$ ve $R = 0,1$ için)	
			Çentiksiz	Çentikli
OD Karbon/Epoksi	0°	1155	812	420
	0°/90°	770	455	420
	0°/±45°/90°	406	315	210
Kevlar-49/Epoksi	0°	1260	882	-
2024 Al Alaşımı	-	539	294	196
Cam/Epoksi	0°	1860	280	-

Karbon takviyeli reçine matrisli kompozit malzemelerde ısı ve elektriksel iletkenlikler elyaf yönünde çok iyi, buna dik yönde ise çok düşüktür. Ayrıca metalsel malzemelerle yapılan birleştirmelerde dikkatli olmak gerekir, çünkü temas halinde galvanik korozyon tehlikesi ortaya çıkar. Örneğin alüminyum perçin kullanılırsa bunların zamanla korozyon nedeniyle hasara uğramaması için uygun yalıtkan tabakaların kullanılması veya katodik koruma uygulanması gerekir.

Tablo 3.10 : KTKM / Epoksi, CTP ve Çeliğin Fiyat Karşılaştırması

MALZEME	Özgül Çekme Dayanımı	Özgül Rijitlik	Özgül Yorulma Dayanımı	Fiyat bir. day.	Fiyat bir. rijt.	Fiyat bir.yor.day
Karbon/Epoksi	4	5	15	17,5	14	4,7
CTP	4	0,85	4	1,7	8,4	1,9
Çelik	1	1	1	1	1	1

Karbon takviyeli kompozit malzemeler günümüzde genellikle uçak ve uzay sanayinde kullanılır. Bu malzemenin mükemmel özellikleri şimdiye kadar düşünülmemiş parçaların dahi gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Ancak kompozit yapılar örneğin çelikten daha pahalıdır. Tablo 3.10 da Karbon / Epoksi, CTP ve çelik malzemeleri fiyat bakımından karşılaştırmaktadır. Bu tabloda karbon takviyeli kompozit malzemelerin daha pahalı olduğu

açıkça görülmektedir. Ancak kullanımın giderek yaygınlaşmasıyla kompozit malzeme fiyatlarının hızla düşeceği muhakkaktır.

Başta uçak ve uzay sanayi olmak üzere, karbon takviyeli kompozit malzemeler değişik alanlarda kullanılmaktadır. Tablo 3.11 de bu uygulamalara ait değişik örnekleri içermektedir.
(2)

Tablo 3.11 : Karbon Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

UÇAK VE UZAY SANAYİ	MAKİNA SANAYİ
Uzay mekiği	Türbin ve kompresör kanatları
• Kargo kapıları	Santrifujlar
• Roket gövdeleri	Rüzgar değirmeni kanatları
Uçaklar	Petrol boruları (deniz sondajı)
• Çeşitli kanatçıklar	TIP
• Ana iniş takımı kapağı	Tekerlekli sandalyeler
• Koltuklar	Protezler
• Taban kirişleri	
TAŞIMACILIK	SPOR MALZEMELERİ
Karoseri	Oltalar
Yaprak yaylar	Raketler
Şaftlar	Kayaklar
Taşınabilir köprüler	Sörfler

3.3.3. BOR ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER (BTKM)

Bor / Epoksi kompozit malzemelerin bazı özellikleri Tablo 3.12 de verilmiştir. Çekme dayanımı YD-karbon elyaf ile aynı olan bor elyafın 2480 MPa'a varan basma dayanımı,yaklaşık iki katıdır. Öte yandan maliyetler bakımından, bor elyaf bütün diğer türlerden daha pahalıdır. Bu nedenle hem bor elyafın yüksek dayanım özelliklerinden yararlanmak, hem de kompozit malzemenin fiyatını çok yükseltmemek için, bor elyaf diğer elyaf türleri ile ortak olarak kullanılır.

Bor takviyeli kompozit malzemelerin en yaygın olarak kullanıldıkları alan spor malzemeleri üretimidir. Başlangıçta karbon elyafı üretilen bazı ürünlerde yüksek zorlama altındaki karbon takviyenin yetersiz kaldığı bölgelerde kırılmaların görülmesi önemli bir sorun olmuştur. Örneğin golf sopalarında bazı firmalar bu sorunu kesitleri artırarak çözmüş, bazıları ise biçimi sabit tutarak karbon ve bor elyafı birlikte kullanmışlardır. Benzer durum iri balıklar için kullanılan oltalarda da vardır. Bor takviyeli kompozit malzemelerin kullanıldığı diğer spor malzemeleri ise şunlardır : tenis racketleri, yaylar, kayalar ve yarış bisikleti gövdeleri (KTKM gövde 1,7 kg, BTKM gövde 1,0 kg). (2)

Spor malzemesi dışındaki diğer bazı kullanım örnekleri :

- Çok yüksek hızlı santrifuj gövdeleri (Elyaf sarma)
- Tekerlekli sandalyeler (Yarış amaçlı)
- Yelken direkleri (Alüminyum esaslı, ekstrüzyonla)

Tablo 3.12 : Tek Yönde Takviyeli Bor / Epoksi Kompozit Malzemenin Dayanım Değerleri

Özellik	Oda Sıcaklığı	175 C°
Çekme dayanımı (MPa), 0°	1600	1260
Çekme modülü (GPa), 0°	224	196
Çekme dayanımı (MPa), 90°	70	35
Çekme modülü (GPa), 90°	21	10
Basma dayanımı (MPa), 0°	2480	770

3.3.4. KEVLAR ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER (KevTKM)

Kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemelerin en belirgin avantajı cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelere oranla daha düşük yoğunluklu olmalarıdır. Daha önce verilen Tablo 3.9 , Kevlar-49 takviyeli kompozit malzemelerin mühendislik özelliklerini içermekte idi. Tablo 3.13 de ise tek yönde takviyeli KevTKM ile CTP ve KTKM karşılaştırmasını vermektedir.

Görüldüğü gibi KevTKM, CTP'den %34, KTKM'den ise %10 daha hafiftir. Bu hafiflik özellikle uçak sanayi gibi alanlarda önemli avantajlar sağlar. Çekme dayanımı diğer ikisinden de yüksek, çekme modülü ise camdan iyi , ancak karbondan düşüktür. Diğer özellikler yaklaşık

olarak birbirine yakındır, ancak KevTKM'nin basma dayanımı CTP ve KTKM'den çok daha düşüktür. Basma zorlanmaları altında gerilme-birim uzama eğrisi metallerdeki gibi yatıktır ve sünek bir davranış gösterir.

Yorulma dayanımı bakımından Kevlar takviyeli kompozit malzeme oldukça iyi özelliklere sahiptir ve karşılaştırma yapılırsa CTP ve aliminyum alaşımlarından yüksek, BTKM ve KTKM ile yaklaşık eşit yorulma dayanımına sahiptir.

Kevlar takviyeli kompozit malzemenin önemli bir üstünlüğü darbelere karşı dayanımının diğer kompozit malzemelerden daha yüksek olmasıdır. Ayrıca titreşimleri söndürme kabiliyeti de çok iyidir. Serbest titreşimleri söndürme kabiliyeti örneğin çeliğin 8 katıdır. (2)

Tablo 3.13 : Tek yönde takviyeli bazı kompozit malzemelerin karşılaştırılması

Elyaf	Kevlar 49	E-Camı	Karbon (YM)
Yoğunluk (g/cm^3)	1,38	2,08	1,56
Çekme dayanımı, 0° (MPa)	1400	1100	1250
Basma dayanımı, 0° (MPa)	280	586	800
Çekme dayanımı, 90° (MPa)	28	34	41
Basma dayanımı, 90° (MPa)	138	138	138
Çekme ve basma modülü			
0° (GPa)	77	39	210
90° (GPa)	6	9	6

Elektriksel özellikleri bakımından Kevlar mükemmel bir yalıtkandır, elektromanyetik dalgaları ise çok iyi geçirir (radar). Isıl genleşme katsayısı eksi işaretlidir, yani ısındıkça kısalır. Elyafın kimyasal dayanımı çok iyidir, dolayısıyla kompozit malzemenin kimyasal dayanımını matrisin özellikleri belirler.

Kevlar, karbon ve cam lifler birbirinden farklı özelliklere sahip olduklarından, bunların üstün yönlerinden yararlanmak için aynı kompozit malzeme içinde birlikte kullanılırlar : Melez (hybrid) KM. Kevlar özellikle cam elyaf ile ortak olarak kullanıldığında iyi sonuçlar verir. Bu tür "melez" malzemelerde , Kevlar hafiflik, modül, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, cam elyaf ise basma dayanımı bakımından katkıda bulunur.

Kullanım Alanları :

Kevlar takviyeli kompozit malzeme en yaygın olarak uçak ve uzay sanayinde, ayrıca bunun yanında gemi ve otomotiv endüstrisi ile spor malzemeleri üretiminde kullanılmaktadır. Diğer elyaflarda olduğu gibi hafiflik, dayanım ve modül özellikleri yanında, özellikle tokluk (darbe dayanımı), yorulma dayanımı, titreşim sönümleme kabiliyeti, boyut kararlılığı, sürünme dayanımı ve korozyona dayanım gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Tek başına kullanılmasının yanında karbon ve cam ile birlikte "melez" kompozit malzeme elde etmek için de kullanılmaktadır.

Uygulama Örnekleri :

- Roket motoru gövdeleri elyaf sarma yöntemi ile KevTKM olarak üretilebilir. Örneğin C-4 denizaltı balistik nükleer füzelerinde üç kademede de roket motoru gövdesi bu kompozit malzemeden üretilmiştir.
- Uzay mekiğinde değişik gazların (sıvı O_2 , N_2 v.s.) depolandığı 17 adet basınçlı kap vardır. Bunlar iç kısımlarında bir metal gömlek bulunan Kevlar-49/Epoksi kompozit malzemeden üretilmişlerdir.
- Uçak sanayinde değişik kanatcıkların, iniş takımı kapılarının vb. yük taşıyan parçaların üretiminde uygulanmaktadır. Ayrıca iç kısımlarda da hafif olmaları nedeniyle örneğin gösterge panoları, konsollar, kotuklar v.s. gibi bir çok yerde kullanılmaktadır.
- Hafiflik ve rijitlik yanında darbe dayanımlarının da çok iyi olması nedeniyle kano üretiminde tercih edilir. Ayrıca büyük gemilerden küçük teknelere kadar değişik kullanım yerleri vardır. Özellikle güç sınırlı yarış tekneleri KevTKM'den imal edilirler. Motor gücü sınırlı olan bu teknelerde hafiflik çok önemlidir ve diğer malzemelerden üretilen teknelerin KevTKM ile üretilmiş teknelerle rekabet şansı çok azdır.
- Spor malzemesi olarak KevTKM tenis raketleri, oltalar, kar ve su kayakları, golf sopaları, yaylar vb. malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır.
- Otomotiv sanayinde ise bu malzemelerin yaygın olarak kullanılmasını sınırlayan faktör, seri üretime uygun imalat yöntemlerinin yeterince geliştirilmiş olmamasıdır. Üretilen parçalara örnek olarak: makas yayları, şaftlar, tampon kolları, tekerler jantları, bazı gövde elemanları ve özellikle fren ve debriyaj balataları gösterilebilir.

3.3.5. METAL MARTİSLİ ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

Metal matrisli kompozit malzemeler için ucuz, kolay ve oda sıcaklığında gerçekleştirilebilen üretim yöntemleri yeterince geliştirilemediğinden, bu malzemeler reçine matrisli kompozit malzemelere oranla daha az kullanılmaktadır. Ancak bir çok uygulama için gerekli olan önemli üstünlüklere sahiptirler:

- Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur,
- Şekillendirilebilirler,
- Birleştirilmeleri kolaydır (kaynak),
- Mekanik özellikleri daha iyidir (tokluk),
- Bazı ortamlarda korozyona daha dayanıklıdır (örneğin nemli).

Tablo 3.14 : Metal matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanım yerlerine örnekler (w: whisker)

Kullanım Yeri	Kullanılan Kompozit Malzeme
Uçak Sanayi • Pilonlar, payandalar, kapılar, çerçeveler, döşeme girişleri, fan ve kompresörler	B/Al, SiC/Al, C/Al Elyaf takviyeli süperalaşımalar in-situ kompozitler
Otomotiv Sanayi • Motor gövdeleri, piston kolları, yaylar	SiC ^w / Al
Elektrik Endüstrisi • Elektrik motoru fırçaları • Akü plakaları • Elektrik kabloları	C/Cu Al ₂ O ₃ / Pb, C / Pb, Cam/ Pb C/Cu
Tıp • Röntgen masaları, protezler, tekerlekli sandalyeler	B/Al, SiC/Al
Spor Malzemesi • Tenis raketleri, kayaklar, golf sopaları, bisiklet gövdeleri	B/Al, C/Al, SiC ^w / Al
Uzay Sanayi • Konstrüksiyonlar, antenler	B/Al, B/Mg, C/Mg
Tekstil • Mekik	B/Al, C/Al, SiC/Al

Tablo 3.14'ün devamı : Metal matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanım yerlerine örnekler)

Diğer	
• Makina yatakları	C/Pb
• Kimyasal gereçler	Al ₂ O ₃ / Pb

Halen kullanılan bir çok metal matrisli KM vardır. Matris olarak alüminyum ve magnezyum gibi düşük yoğunluklu metaller olduğu gibi, bakır gibi elektrik iletkenliği veya süperalaşım gibi yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle tercih edilen malzemelerde kullanılmaktadır. Tablo 3.14 değişik alanlarda kullanılan metal matrisli kompozit malzemelere ait örnekleri içermektedir. (2)

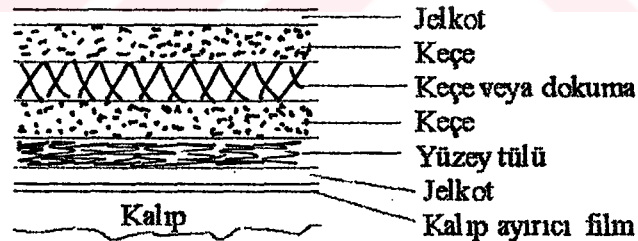
3.4 KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit malzeme türleri çok farklı olduğundan ve değişik biçimlerdeki parçaların üretiminde kullanıldıklarından, birbirinden farklı çok sayıda üretim yöntemi geliştirilmiştir. Özellikle Cam Takviyeli Plastik üretiminde, üründen beklenen özelliklere göre değişik yöntemler kullanılabilir. Ürünün tek yüzünün düzgün olması yeterli ise, El Yatırması yöntemi yeterlidir. Ancak her iki yüzü düzgün ürün elde etmek ve kısa sürede üretim yapabilmek için daha karmaşık yöntemler kullanılması gerekir. Şimdi bu yöntemlerden başlıcalarını kullanılan matris türüne göre sınıflandıralım. (2)

3.4.1. REÇİNE MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMİ

3.4.1.1 ISLAK KALIPLAMA

Bu yöntem, tek yüzü düzgün küçük çapta üretim için uygundur. Genellikle CTP (Cam Takviyeli Plastik) kalıp kullanılır. Kalıp yüzeyi ile temas eden CTP yüzeyi düzgün, diğer yüzey pürüzlü olur. Genellikle 2 - 10 mm kalınlıklar için bu yöntem kullanılır. Büyük boyutlu parçalarda kalınlık daha fazla olabilir, ancak 2 mm' nin altında kalıplama tavsiye edilmez. Tipik bir yatırma örneği Şekil 3.1'de görülmektedir. (8)



Şekil 3.1 Tipik bir laminat yapısı

Genellikle tekne, oto kaportası, cephe kaplama elemanları, depo ve tank gibi ürünlerin yapımında kullanılan bu kalıplama yöntemi iki teknikle yapılır.

- El Yatırması
- Püskürtme

Kalıp hazırlaması ve jelkot uygulaması her iki teknik içinde aynıdır. Kalıp, önce silikonsuz kalıp ayırıcı vaks ile parlatılır, jelkot uygulanır. Jelkot uygulaması fırça ile veya

püskürtme ile yapılabilir. Toplam jelkot kalınlığı 0,3 - 0,6 mm (400-500 gr/m²) civarında olmalıdır. (8)

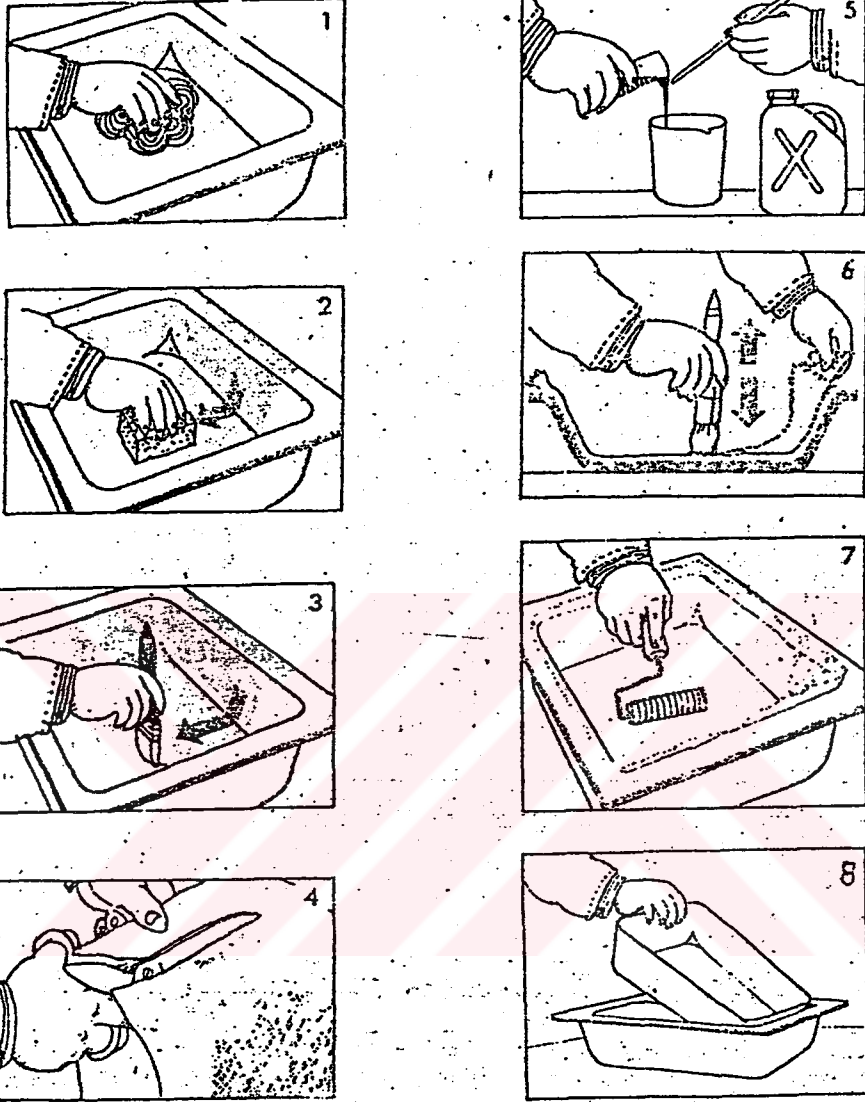
3.4.1.1.1. EL YATIRMASI METODU

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde en basit üretim yöntemi özellikle CTP üretiminde kullanılan el yatırmasıdır. Bu yöntem , tek yüzü düzgün, küçük çapta üretimler için uygundur. Kalıp yüzeyi ile temas eden yüzey düzgün, diğer yüzey pürüzlü olur. El yatırmasında polyester ve epoksi en yaygın olarak kullanılan reçine türleridir. Tutuşma tehlikesini engellemek, ağırlığı arttırmak veya görünüm gibi nedenlerle reçineye değişik dolgu maddeleri katılabilir.

El yatırma yönteminde araç ve gereç için yapılan yatırım düşüktür ve genellikle az sayıda parça üretimi (model, prototip vs.) için kullanılır. Bu yöntemle elde edilebilecek en yüksek elyaf hacim oranı (V_e) %30'dur. Daha yüksek elyaf hacim oranı ise, prepreg (öngömülmüş elyaf) kullanılarak elde edilebilir.

Kalıp, üretilmek istenen malzemeye uygun olarak seçilir. Tahta, alçı, plastik, balmumu, kil, metal, kağıt, cam, cam takviyeli plastik veya başka bir malzemeden üretilecek ürüne uygun bir kalıp yapılır. Kalıp yapılırken, kalıp yüzeyinin çok düzgün olması, hava kabarcığı, delik, çatlak gibi hataların bulunmaması gerekir. Kalıp üzerine daha sonra ayırıcı malzeme tatbik edilir. Kalıp ayırıcı sürülen yüzeye, jelkot uygulanır. (Jelkot viskozitesi yüksek polyester reçinesidir. Kalıp üzerine 0,4 mm' den daha fazla sürülmemelidir). Jelkot tabakası kurumadan, ikinci kat uygulaması veya polyester uygulaması yapılmamalıdır. (8)

Kalıp hazırlama, kalıp ayırıcı ve jelkot uygulaması bittikten sonra cam keçe, dokuma veya fitil kalıba uygun olarak önceden kesilerek hazırlanır. Kesilen bu parçalar, jelkot tabakası kurumadan kalıp üzerine konur. Daha önceden hazırlanmış polyester karışımı, bu takviye malzemesinin üzerine yayılır ve fırça kullanılarak hafif darbelerle elyafa emdirilir. Boyuna ve enine dişli rulolar yardımı ile arada kalan hava kabarcıkları çıkarılır. Hava kabarcıklarını çıkarma işlemlerine ne kadar çok dikkat ve özen gösterilirse, kompozit malzeme o kadar hatasız ve mukavim olur. İstenen kalınlığa ulaşılan kadar takviye elemanı ve polyester tatbikine devam edilir. Bir başka deyişle bütün tabakalar birbiri ardından işlenebilir. Ancak dört kattan daha kalın ürünlerde, ekzotermik reaksiyondan ötürü oluşan ısının dışarı atılabilmesi için belli bir süre beklenip, diğer katların bu beklemeden sonra işlenmesine dikkat edilmelidir. El yatırmanın aşamaları Şekil 3.2 de görülmektedir. (2)



- 1) Kalıp silindikten sonra birinci kalıp ayırıcı olarak vaks sürülür,
- 2) Sünger ile ikinci ayırıcı polivinil alkol uygulanır,
- 3) Fırça ile viskozitesi yüksek reçine (jelkot) sürülür,
- 4) Takviye olarak kullanılacak elyaf hazırlanır,
- 5) Reçine hazırlanarak katkıları karıştırılır (Hızlandırıcı, sertleştirici),
- 6) Jelkot üstüne reçine sürüldükten sonra keçe yerleştirilir ve fırça darbeleri ile reçine keçeye emdirilir,
- 7) Rulolanarak hava kabarcıkları giderilir,
- 8) İşlem istenilen kalınlığa kadar devam ettirilerek, sertleşme beklenir ve ürün kalıptan çıkarılır.

Şekil 3.2. : El Yatırmanın Aşamaları

Kompozitin bünyesine gömülecek takviye elemanlarının herhangi bir deformasyona neden olmaması için, ürün kısmen sertleştikten sonra yerleştirilmesi gerekir. Tam sertleşme beklendiği takdirde sonradan eklenen parçaların bünyeye tam intibakı sağlanamaz.

Yapılan son ürünün, kalıptan çıkarılarak kullanılabilmesi için, ürünün belli bir sertliğe ulaşması gerekir. Sertleşme, polimerizasyon süresinin sonuçlanmasına bağlıdır. Jelleşme, Sertleşme, Olgunlaşma olaylarından oluşur.

Jelleşme : Katalizör ve hızlandırıcı katılan reçinenin pıhtılaşması olayıdır. Bu olayın meydana geliş süresi genellikle 5-10 dakikadır. Bu süreye Jelleşme Süresi denir.

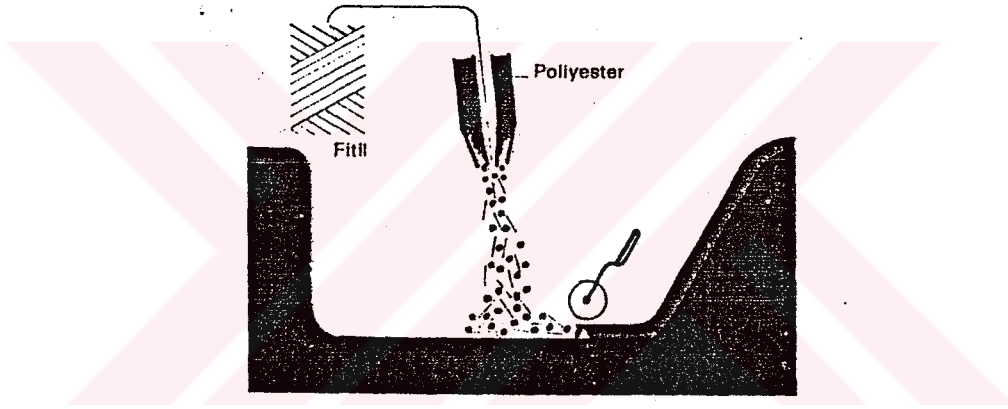
Sertleşme : Reçinenin pıhtılaştıktan sonra kalıptan çıkarılabilecek sertliğe ulaşması için geçen zaman ve bu sırada meydana gelen olaydır. Genellikle 3-4 saat arasında değişir.

Olgunlaşma : Malzeme veya ürünün ulaşabileceği maksimum sertliktir. Bu olayın meydana gelişinde geçen zamana olgunlaşma zamanı denir. Kullanılan katkı maddelerine, katalizör ve hızlandırıcıya bağlı olarak birkaç saatten birkaç haftaya kadar değişen süreler olabilir. Olgunlaşma süresini kısaltmak için özel fırınlarda kullanılabilir. Herhangi bir karışım için 20 °C de iki hafta olan olgunlaşma süresi 80 °C de iki saat civarındadır. Kalıptan çıkarma sertliği için ise 10-15 saat yeterlidir. (1)

3.4.1.1.2. PÜSKÜRTME METODU

Metod olarak El yatırma metoduna benzer. El yatırma metodunun biraz daha makinalaşmış halidir. Daha fazla ürün elde etmek için kullanılır. El yatırma metodunda olduğu gibi kalıp hazırlanır, üzerine vaks sürülür, ikinci kat olarak PVA (Polivinil Alkol) kuruyan vaks üzerine sürülür. Önceden yapılacak ürüne göre hazırlanan polyester hızlandırıcı sertleştirici karışımı özel tabancalar yardımı ile kalıp üzerine püskürtülür. Püskürtme sırasında tabanca, cam fitili istenen boylarda keserek polyesterle birlikte kalıbın üzerine püskürtür. Daha gelişmiş özel tabancalar, polyester, hızlandırıcı, sertleştirici ve cam fitili istenen miktarlarda karıştırarak püskürtebilir. Püskürtme işlemi yüzeye dik olarak yapılmalı ve böylece malzeme israfı önlenmelidir. Tabanca ile malzeme püskürtme işleminde önemle dikkat edilecek olan husus malzeme kalınlığının homojen olması ve bir defada çok kalın malzemenin kalıp üzerine püskürtülmemeyerek hava kabarcıklarının çıkartılmasına imkan verilmelidir. Yapılan deneylerde bir defada 300 ile 500 gr/m² arasında malzemenin püskürtülebileceğini ortaya çıkarmıştır. Eğer daha kalın malzemeler elde edilmek istenirse hava kabarcıklarının dikey dişli merdaneler

(rulolar) yardımı ile çıkarıldıktan sonra ikinci katın atılması gerekir. Tabiki el yatırma metodunda olduğu gibi üç kattan daha fazla malzeme püskürtülecek ise, polimerizasyon sırasında meydana gelecek olan ekzotermik olay sonucu açığa çıkacak olan ısı ve bu ısının kompozit malzeme üzerindeki etkileri düşünülmelidir. Bu tip imalatta üç kattan sonra polyesterin jelleşmesi için bir süre beklemeli ve daha sonra dördüncü ve diğer katların uygulanmasına geçilmelidir. Püskürtme metodunda da El yatırma metodunda olduğu gibi tek tarafı düzgün mamül ürünler elde etmek mümkündür. (1, 8) . Şekil 3.4 de Püskürtme metodu görülmektedir.



Şekil 3.4 : Püskürtme Metodu

4.4.1.2. REÇİNE ENJEKSİYONU

Reçine enjeksiyonu yöntemi, ıslak kalıplama ile soğuk pres yöntemi arasında bir yöntemdir. CTP ürünün her iki yüzünde düzgün olmasını sağlar. Prensibi basittir. Çift cidarlı bir kalıp içerisine cam elyafı yerleştirilir ve bir veya birkaç enjeksiyon deliğinden polyester, kalıp içine yaklaşık 1 atmosferlik bir basınçla verilir. Cam elyafının polyesterle ıslanması tamamlandınca reçine fazlası, tahliye borularından çıkar.

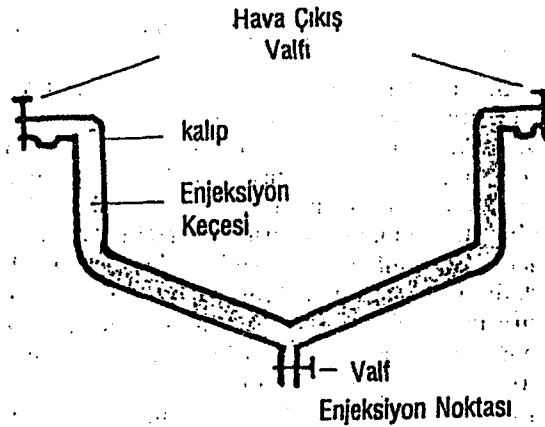
Kullanılan kalıplar genel olarak takviye elemanları ile takviye edilmiş CTP'dir. Bu yöntemde kullanılan cam elyafı ise, ya bağlayıcısı geç çözünen keçe olmalı, ya da devamlı elyafli keçe olmalıdır. Aksi halde enjeksiyon noktası etrafındaki cam elyafı, polyester ile birlikte sürüklenebilir.

Reçine enjeksiyonu yönteminde de ortalama cam oranı %30 mertebesindedir. Enjeksiyon işlemi, püskürtme makinasına benzeyen bir makina ile yapılır. Kullanılan reçinenin de düşük viskoziteli olması, cam elyafının çabuk ıslanması açısından gereklidir. (8, 15)

Reçine enjeksiyonu yönteminin avantajları şöyle sıralanabilir :

1. Her iki yüzü düzgün ürün elde etme olanağı
2. Sabit şekil ve ağırlıkta ürün elde etme olanağı
3. Tek kalıpta üretilen ürünlerden daha kaliteli ürün elde etme olanağı
4. Takviye elemanları ve diğer parçaların tek işlemde eklenebilme olanağı
5. Kapalı kalıp kullanılması nedeni ile stiren buharklaşmasının azalması
6. Sertleşmenin ortam sıcaklığından fazla etkilenmemesi
7. Daha temiz çalışma ve az fire verme olanağı
8. İşçilik maliyetinde azalma

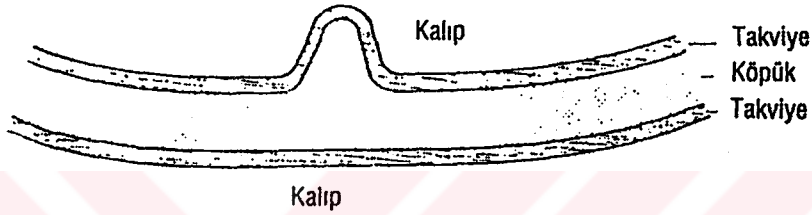
Bu yöntemin dezavantajları ise, ilk maliyetin daha yüksek olması ve kalıpların büyük bir özenle, 1'den daha fazla sayıda hazırlanması gereğidir.



Şekil 3.5 : Enjeksiyon Uygulaması

3.4.1.3 KÖPÜK REZERVUAR KALIPLAMA

Bu yöntem de, çift kalıp ile her iki yüzü düzgün ürünlerin yapımında kullanılır. Prensibi çok basittir. Yumuşak köpük bir malzemeye (örneğin 12-15 dansiteli poliüretan köpük) polyester emdirilir ve kuru cam elyafı yerleştirilmiş iki kalıp parçası arasında sıkıştırılır. Köpüğe emdirilmiş polyester, sıkışma nedeniyle cam elyafını da ıslatır ve sertleşmesi beklendikten sonra iki yüzü düzgün bir CTP ürün elde edilir. Kullanılan cam elyafı ve köpük kalınlığına bağlı olarak değişik mekanik özellik sağlanması mümkündür. (8, 15)



Şekil 3.6 : Tipik Bir Köpük Rezervuar Kalıplaması

3.4.1.4 SOĞUK PRES

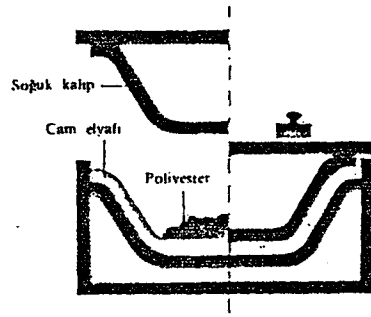
Bu yöntem, ıslak kalıplama ile sıcak pres arasındaki boşluğu doldurmak için kullanılır. Kalıplar genellikle CTP'den yapılır. Basıncın eşit ve tekdüze olarak kalıbın her yanına ulaşması amacıyla ile takviyeler kullanılır. Takviye malzemesi olarak ahşap, çelik, beton kullanılabilir.

Dişi ve erkek kalıplar arasında ürünün kalınlığı kadar bir boşluk bırakılması ve basınç uygulanması sırasında reçinenin kalıp içerisinde yürüebilmesi için hava tahliye deliklerinin bulunması gereklidir.

Ayrıca, kalıp kenarından reçine sızmasının önlenmesi ve kalıbın kapatılması sırasında cam elyafı takviyesinin sıyrılarak iç kısımlara kaçmasını engellemek amacıyla ile kalıp flanşlarında bir set bulunması gereklidir.

Soğuk pres'de kalıbın dışarıdan ısıtılması söz konusu değildir. İlk kalıplama sırasında meydana gelen egzotermik reaksiyon sonucu kalıp içi belli bir miktar ısınarak kalıplama süresinin kısalmasını sağlar.

Bu yöntemde uygulanması gereken basınç çok yüksek değildir, ($\approx 0,5 \text{ MPa} \approx 5 \text{ kg/cm}^2$) basit bir pres ile bu basınç kolaylıkla sağlanabilir. (8, 15)



Şekil 3.7 : Soğuk Pres Yöntemi

3.4.1.5. SICAK PRES

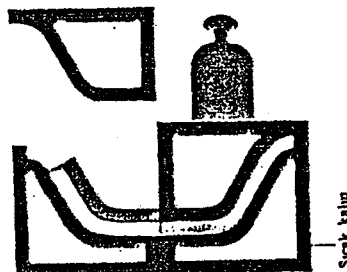
Yüksek üretim miktarı için oldukça ekonomik bir üretim yöntemidir. Her iki yüzü düzgün ürün verir. Kalıp maliyetinin yüksekliği nedeni ile küçük çaplı üretimler için ekonomik değildir.

Isıtılmış metal kalıplarda ve hız kontrollü otomatik hidrolik preslerde üretilmesi mümkündür. Kalıp yüzeyinin çok düzgün olması ve krom ile kaplanması gereklidir. Böyle bir kalıptan 100.000 civarında ürün alınabilir. Kalıbın tüm yüzeyinde ısı farklılığı 2-5°C'yi geçmemelidir.

Kalıplama süresi, parçanın kalınlığına bağlı olarak 1-8 dakika arasında değişir. Kullanılan sıcaklık 100-170°C arasında, kullanılan basınç ise 0,5-15 MPa arasında değişmektedir. (8, 15)

Sıcak pres kullanımını için dört ayrı yöntem vardır:

- Sıvı reçine/cam keçe
- Sıvı reçine/önceden şekil verilmiş cam elyafı
- Hazır kalıplama bileşimli levha (SMC)
- Hazır kalıplama bileşimli hamur (BMC-DMC)



Şekil 3.8 : Sıcak Pres Yöntemi

3.4.1.6. ELYAF SARMA

Elyaf sarma yöntemi, boru, tüp, silindir, küre gibi özel üretimlerde yüksek basınca dayanım sağlamak için kullanılır.

Prensibi, polyester banyosundan geçen cam elyafının döner bir kalıp üzerine belli açılarla sarılması ve kalıp üzerinde sertleşmesinin sağlanmasından ibarettir.

Bu prosesinde kullanılan cam elyafi, devamlı "E" camından oluşan fitillerdir. Sarma makinasının kapasitesine göre 10-90 bobin cam elyafi sisteme yerleştirilir ve bütün bobinler bir bant oluşturacak şekilde polyester banyosuna yerleştirilir. Polyester banyosu, iki yönde hareket eden bir araba üzerine oturtulmuştur.

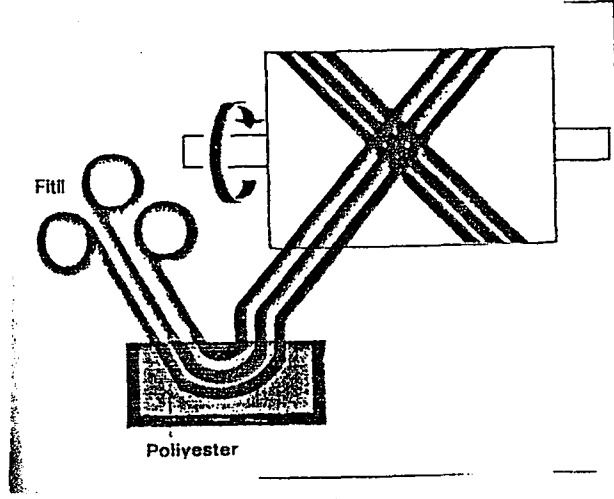
Kalıbın dönmesi ile polyester banyosundan geçen cam elyafi kalıp üzerine sarılmaya başlar. Arabanın hareketi ise, elyafın kalıp üzerine belirli bir açı ile sarılmasını sağlar. Cam elyafının sarım açısı kalıbın dönme hızına ve arabanın hareket hızına bağlıdır.

Arabanın bir kaç kez gidip gelmesi sonunda tüm kalıp yüzeyi elyaf ile sarılmış olur. Reçine banyosuna reçine beslemesi, elle veya otomatik olarak yapılır. Ayrıca reçine banyosunda cam elyafını ıslatmak için değişik sistemler uygulanabilir.

Ürünün kalıptan kolay çıkması için kalıbın küçülebilir nitelikte olması gerekmektedir.

Sarım açısı, son üründen beklenen mekanik mukavemet özelliklerine bağlı olarak seçilmeli ve ayarlanmalıdır.

Cam elyafi/reçine oranı bu yöntemde oldukça yüksek değerlere ulaşabilir. (yaklaşık %70-80) cam elyafının yüksek oranda olması mekanik dayanımı artırıcı bir etkidir. Ancak, kimyasal dayanım konusunda aynı başarıyı gösteremez. Bu nedenle kimyasal dayanım aranan uygulamalarda kalıp üzerine önce kırılmış cam elyafi ve polyester uygulanır. (Cam/reçine oranı %25-30) Bu uygulamadan sonra elyaf sarımına geçilir. Böylece hem kimyasal dayanım hemde mekanik dayanım sağlanmış olur. (8, 15)



Şekil 3.9 : Elyaf Sarma Metodu

3.4.1.7. SAVURMA DÖKÜM

Savurma döküm yöntemi, homojen bir et kalınlığı aranan silindirik cisimlerin yapımında kullanılır. Başlıca kullanım alanı 5 m'ye kadar geniş çaplı boruların üretimidir. Poliester, vinil ester veya epoksi reçine kullanılarak üretim yapılabilir. Bu yöntem uygulanarak yapılan borularda hava kabarcığı bulunmaz ve her iki yüzü düzgün ürün elde edilir.

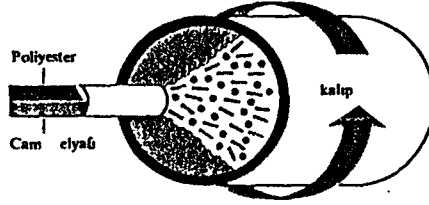
Yöntemin prensibi, metalik döner iki kalıbın içerisine cam elyafının yerleştirilmesi ve poliester reçinenin kalıp boyunca püskürtülerek dönmeden kaynaklanan merkezkaç kuvvet etkisiyle reçinenin kalıp yüzeyine homojen olarak dağılmasını sağlamaktan ibarettir.

Bir diğer yöntem, cam elyafı ve poliesterin aynı zamanda kalıp yüzeyine püskürtülmesiyle aynı sonucun elde edilmesine olanak verir.

Kalıbın dışarıdan su buharı ceketini ile kaplanmış olması halinde, su buharı ile kalıbın ısıtılması veya iç kısımdan sıcak hava ceceryanı geçirilmesi ile çabuk sertleşme sağlanabilir.

Kalıbın dönüş hızı kalıp çapı ile bağıntılıdır. Yaklaşık 2 m çapında bir ürün için dakikada 180 devir yeterlidir. Böylece çevresel hız da yaklaşık 70 km/saat'e ulaşır. Kalıbın döndürülmesine ürün sertleşinceye kadar devam edilir.

Bu yöntem ile elde edilen ürünün sertliğini sağlamak üzere kullanılan takviye arasında kum dolgululu poliester ile ayrı bir tabaka elde etmek ve bu tabakanın üzerine cam elyafı ile takviye edilmiş bir poliester tabakayı daha uygulamak da mümkündür. (8, 15)



Şekil 3.10 : Savurma Döküm Yöntemi

3.4.1.8. LEVHA DEVAMLILIK ÜRETİMİ

Levha devamlı üretimi yöntemi, genellikle oluklu veya düz çatı ve sera örtülerinin üretiminde kullanılır. Bu amaçla kullanılan makineler değişik tip ve boyuttadır. Üretim prensibi basittir. Reçine ve cam elyafı iki ayırıcı film tabakası arasında sıkıştırılır ve ısıtılmış kalıplar arasından geçirilerek sertleştirilir. Ayırıcı film olarak poliyester film veya selofan film kullanılabilir.

Reçine, ayırıcı film tabakası üzerine düzgün bir kalınlık oluşturacak şekilde yayılır ve üzerine cam takviyesi keçe olarak veya kırılmış cam elyafı olarak yayılır. Bu tabaka üzerine yayılan ikinci tabaka ayırıcı film ile birlikte tamamı rulolar arasından geçerek oluşmuş hava kabarcıkları giderilir ve levhanın sabit kalınlıkta olması sağlanır.

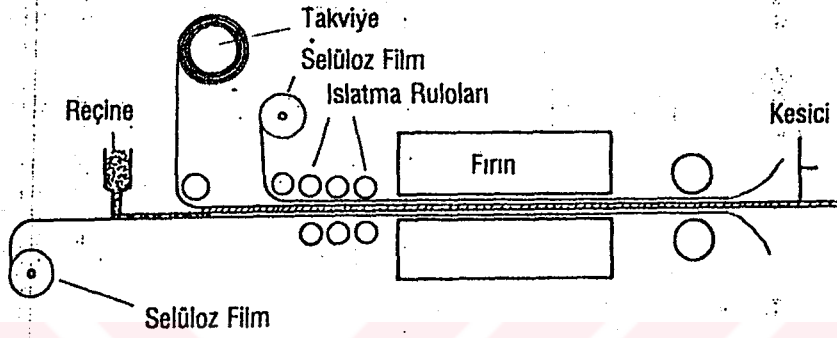
İkinci kademede tüm sistem verilecek şekle göre hazırlanmış kalıplardan ısıtılmış bir bölge içerisinde geçer ve bu fırınlama sırasında reçinenin sertleşmesi sağlanır.

Sertleşmiş levhaların kesimi ile üretim tamamlanır. devamlı levha üretim makinelerinde dakikada 12 m'lik bir hız elde edilebilir.

Işık geçirgen levha üretimi için cam takviyesinin toz bağlayıcı keçe olarak veya kırılmış cam elyafı olarak kullanılması ve poliyester reçinenin de cam elyafının kırılma indisi ile eş değerde bir kırılma indisine sahip olması gereklidir. Bu amaçla özel poliyester geliştirilmiştir.

Cam takviyesi olarak, özel hallerde dokunmuş cam elyafı da kullanılabilir. Böyle bir uygulamada cam dokumanın önce polyester banyosundan geçirilip, reçine fazlası sıyrıldıktan sonra ayırıcı film tabakaları arasında sıkıştırılması tavsiye edilir.

Hava koşulları ile temas edecek levhaların özellikle reçine/cam oranının yüksek olması gereklidir. Bu oran 3/1'den aşağı olmamalıdır. (8, 15)



Şekil 3.11. Levha devamlı Üretimi

3.4.1.9. PROFİL ÇEKME (PULTRUSION)

Bu yöntem, istenilen şekilde profillerin üretimi için kullanılır. Profil şekilleri tamamen kullanılan kalıba bağlıdır ve ürünlerde boyuna mukavemet çok yüksektir. Yaklaşık %60-65 hacim oranında cam elyafı kullanılabilir.

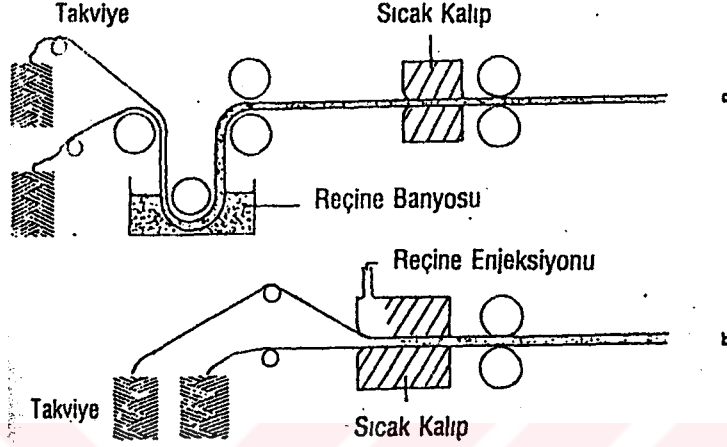
Cam takviyesi olarak devamlı fitil, dokunmuş fitil, keçe veya bunların kombinasyonları kullanılabilir. Bu seçim, son üründe aranan mukavemet ve sertlik özelliklerine bağlıdır.

Çekme yönteminde genellikle iki sistem sözkonusudur.

Birinci sistemde, çekilecek cam elyafı önce katalizlenmiş polyester banyosundan geçirilir ve sonra ısıtılmış kalıplardan polyester fazlası sıyrılarak çekilir. Kalıplar aynı zamanda profilin şeklini belirler.

İkinci yöntemde cam elyafı belli bir gerilim ile kuru olarak ısıtılmış kalıplardan geçirilir ve kalıp içerisinde reçine enjekte edilir. Reçine enjeksiyon basıncı 0,1-0,5 MPa mertebesindedir. (1 MPa \approx 10 kg/cm²) Sertleştirmeyi çabuklaştırmak açısından cam elyafı, kalıp içerisine sokulmadan önce 100°C'ye kadar ısıtılabilir. Üretim hızı olarak dakikada 1 m erişilebilecek bir hızdır.

Çekme sisteminin iyi yapılması halinde düzgün profiller elde edilir. Ayrıca, "post cure" işlemi için kalıptan sonra ürünün bir tünel fırından geçirilmesi tavsiye edilir. (8, 15)



Şekil 3.12 : Çekme Yöntemi (a) Reçine Banyolu
(b) Reçine Enjeksiyonu

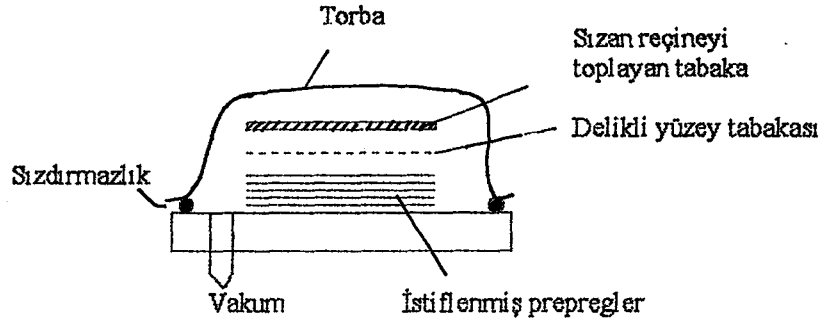
3.4.1.10 TORBA KALIPLAMA YÖNTEMİ

Torba kalıplama yöntemi, kalıp üzerine istiflenerek hazırlanan kompozit malzemelerin sertleştirilmesinde kullanılır. Yüksek kalitede kompozit malzemeler elde etmek ve yapıda kalan havayı çıkartmak için uygulanan bir yöntemdir.

Vakum torbası yönteminde yerleştirilen prepregler veya reçine ile takviye malzemeleri, delikli bir yüzey tabakası ve bir kat sızan reçineyi toplayan tabaka ile kaplanır. Bu durumda fazla reçine ve hava dışarı atılabilir. En üstte esnek bir film (torba : sefyon veya naylon) konularak kenarlarında sızdırmazlık sağlanır. Daha sonra vakum uygulanır. Bu işlem yerleştirmeden hemen sonra ve reçinenin sertleşmesine izin verilmeden yapılmalıdır.

Bu torbalama sisteminin tümü otoklav içine konularak sertleştirme basınçlı bir gaz (örneğin azot) altında ve yüksek sıcaklıkta da yapılabilir. Sıcak gazın sirkülasyonu üniform bir sıcaklık sağlar.

Basınçlı torba yöntemi bu yöntemlerin en ekonomisidir. Vakum uygulamadan, sadece basınçlı gaz yardımıyla torba kalıba bastırılır. (2)

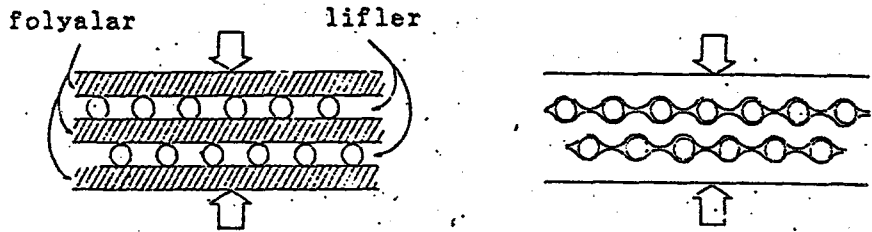


Şekil 3.13 : Torba Kalıplama

3.4.2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.4.2.1. SICAK PRESLEME

Bu yöntemde lifler alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi metal folyalar arasına yerleştirilerek yüzeye püskürtülen ve presleme sırasında yanacak olan bir bağlayıcı ile konumlarından kaymamaları sağlanır. Bu şekilde hazırlanan kompozit malzeme istenilen boyutlara kesilerek sıcak preslenir. (2)



Şekil 3.14 : Sıcak Presleme

3.4.2.2. TOZ METALURJİSİ TEKNİĞİ

Toz metalurjisi tekniği yardımıyla toz biçimindeki metal yada seramik malzemeler birleştirilebilir. Bunlar üniform bir şekilde karıştırıldıktan sonra katı hal difüzyonu için yeterli bir sıcaklıkta ve basınç altında sinterlenir. Bakır, nikel, alüminyum, kobalt ve çelik gibi metal

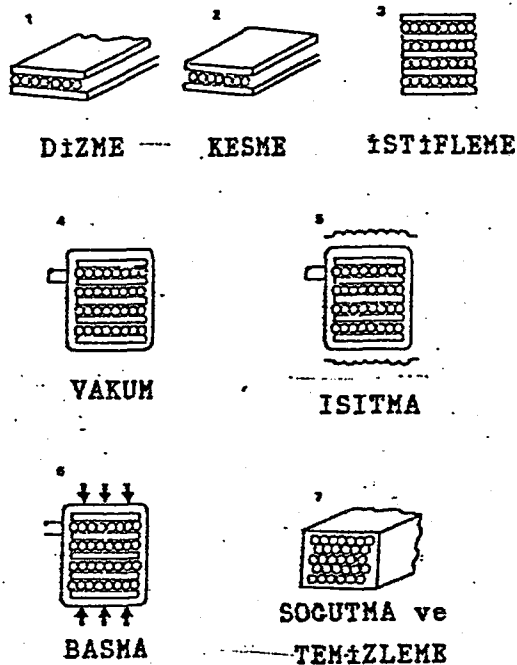
malzemeler bu tekniklerle kompozitlerde matris olarak kullanılabilirler. Kırılmış elyaf veya kılcal kristallerle karıştırılan tozlar presleme, sinterleme, sıcak ekstrüzyon yada haddeleme ile kompozit malzeme olarak istenilen biçimde elde edilebilirler. Yüksek sıcaklıkta kalma sürelerinin uzun olması bazı kompozitlerin özelliklerinin olumsuz etkileyebilir. (2)

3.4.2.3. SIVI METAL EMDİRİLMESİ

Bu yöntemde erime sıcaklıkları düşük olan aliminyum, magnezyum, gümüş ve bakır, matris malzemesi olarak kullanılır. Bir kalıpta düzenlenerek hazırlanan elyaf, sıvı metal ile ıslatılır. Çubuk ve profil gibi uzun ürünler aynı yöntemle bir elyaf demetinin sıvı metal banyosunun içinden geçirilmesiyle sürekli olarak üretilirler. Bu şekilde katılan malzemelerin yapısı, tek yönde üniform olarak takviye edilmiştir ve ek işlemler gerektirmez. Ancak bu yöntemin uygulanabileceği elyaf-matris çiftleri sınırlıdır. (2)

3.4.2.4. VAKUMDA PRESLEYEREK BİRLEŞTİRME

Sinterlemede olduğu gibi bu yöntemde de birleştirme yüksek sıcaklıkta ve basınç altında yapılır. Paslanmaz çelik, bor ve silisyum karbür gibi elyaf, aliminyum ve titanyum gibi matrislerle birlikte kullanılır. Gerekli yüzey işlemlerinden sonra, lifler istenilen aralıklarda ve yönlerde metal sacların üzerinde düzenlenir. Tabakalar halinde hazırlanan bu malzemeler bir metal kaba yerleştirilir, sızdırmazlık sağlanır ve vakuma alınır. Sonra tümü ısıtılarak yayılma ve birleştirmenin sağlanması için preslenir. (2)



Şekil 3.15 : Vakumda presleme ile B-Al Kompozit malzeme üretimi

Bir diğer teknik de bant şeklinde plazma pũskũrtme, sıcak haddeleme ve buhar yoğuşturma ile elde edilmiş 6n biçimlerin ısı ve basınç altında yayınma ile birleştirilmesidir.

3.4.2.5. ELEKTROLİTİK YÖNTEM

Elektroliz banyosuna, katot olarak görev yapan bir mandrel daldırılır. Mandrele sarılmış elyafın arasına çökelen matris metali, kompozit malzemeyi oluşturur. Bor, silisyum karbür ve volfram gibi elyaf türleri bu yöntemle örneğin nikel bir matrise gömülebilir. İşlem düşük sıcaklıkta yapıldığından elyafın özellikleri bozulmaz. (2)

3.4.2.6. BUHAR ÇÖKELTME (DEPOZE)

Buhar fazına alınan matris takviye malzeme üzerine çökeltilir. Alçak sıcaklıkta yapılması önemli bir avantajdır. Yüksek elyaf yoğunluğu elde edilebilir, ancak pahalı olması önemli bir dezavantajdır. Alüminyum ve nikel gibi matrisler bu yöntem için uygundur. (2)

3.4.2.7. HADDELEME

Metal bantlar ve elyaf birlikte sürekli bant olarak haddelenir. Temas süresi kısa olmasına rağmen sıcaklık ve basınç etkisiyle yayınma bağı sağlanır. Daha sonra bu şekilde elde edilen tabakalar üst üste konularak malzemenin kalınlığı artırılabilir. (2)

3.4.2.8. BİRLİKTE EKSTRÜZYON

Kompozit malzemeden tellerin üretiminde örneğin çelik çekirdekli alüminyum tel kullanılır. İki bileşen de aynı anda matrisler geçirilerek üretim gerçekleşir. (2)

3.4.2.9. PLAZMA PÜSKÜRTME

Plazma halindeki matris takviye malzeme üzerine pũskũrtũlũr. Örneğin alüminyum silisyum karbür kaplı bor elyaf üzerine başarıyla pũskũrtũlebilir. (2)

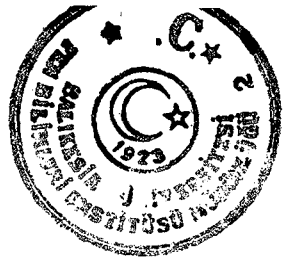
3.4.2.10. IN-SITU KOMPOZİT MALZEMELER

Metal alaşımlarının kontrollũ katılaştırılması ile de belirli bir geometrik düzene sahip iç yapıların oluşması sağlanabilir. Özellikle ötektik alaşımlar yönlendirilmiş katılaşma ile fazın biri matris daha sert ve gevrek olan diğeri ise levha veya çubuk biçimindeki takviye

olmak üzere katılaştırılabilirler. Bu tür kompozit malzemeler in-situ kompozitler olarak adlandırılırlar.

In-situ kompozitler özellikle türbin kanatçıkları gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan parçalarda kullanılırlar. Yüksek sıcaklık malzemeleri olarak önceleri Fe, Ni veya Co esaslı Cr, Mo ve W gibi alaşım elementleri içeren süper alaşımlar kullanılmaktaydı. Ancak bu malzemelerde zamanla ikinci bir faz çökelip özellikleri değiştirdiğinden parçaların kullanım sıcaklık ve süreleri sınırlı olmaktadır. Öte yandan yüksek sıcaklıklardaki tane içi dayanımı tane sınırı dayanımından yüksek olduğundan süper alaşımlarda hasar gerilmeye dik olan tane sınırlarından ayrılmalar ile başlar. Ötektikleri yönlendirerek yapılan yeniden katılaştırmada ise fazlar etkiyen gerilmeye paralel olarak katılaştırıldığından, gerilmeye dik faz sınırları bulunmaz. Bu tür malzemeler elyaf ve matris ayrı ayrı üretilip sonradan birleştirilerek de elde edilebilir. Ancak In-situ kompozitlerin üstünlüğü tek bir işlemle elde edilmeleri ve iç yapılarının çok daha kararlı olmasıdır.

Özet olarak, In-situ kompozitler yönlendirilmiş katılaşma ile mekanik ve fiziksel özellikleri (dayanım, sürtünme, tokluk, iç yapı kararlılığı) mükemmelleştirilmiş ve yüksek sıcaklıklarda ikinci bir fazın çökmesinin söz konusu olmadığı metal matrisli kompozit malzemelerdir. (2)



3.5. KOMPOZİT MALZEMELERDE KULLANILAN YAPI ELEMANLARI

Kompozit malzemelerde iki tür yapı elemanı kullanılır. Bunların genel isimleri ;
Matris malzemeler ve Takviye malzemeleridir.

3.5.1. MATRİS MALZEMELERİ

Matris, elyaf takviyeli kompozitmalzemelerin önemli iki bileşeninden biri olup, elyaf takviyelerin öngörülen zorlamaları taşıması matrisin uygun olarak seçilmesine bağlıdır. Matrisin başlıca görevleri;

- Kuvvetleri elyafa iletmek
- Lifleri ortamın etkisi ve darbelerden korumak
- Kompozit malzemenin tokluğunu arttırmak

olarak sıralanabilir. (2)

3.5.1.1. PLASTİK MATRİS MALZEMELERİ

Plastikler kompozitmalzemelerde matris olarak yaygın bir biçimde kullanılırlar. Bunların yapı ve özellikleri metaller kadar tanınmadığından burada kısaca ele alınacaktır. Plastik matris malzemelerin başlıca üretim ve kullanım özellikleri şunlardır :

Üretim özellikleri :

- Vizkozite ve sertleşme süresi
- Elyafı ıslatma kabiliyeti
- Üretim sırasında uygulanan sıcaklık ve basınç
- Gözenek oluşma tehlikesi
- Saklama süresi

Kullanım özellikleri :

- Mekanik özellikleri

- Yoğunluk
- Kullanım sıcaklığının sınırları
- Korozyon gibi ortam etkilerine karşı dayanıklılık

Elyaf takviyeli kompozitmalzemelerde matris olarak kullanılan plastik reçineler *termoset* ve *termoplastikler* olarak sınıflandırılabilir.

Termoset plastikler küçük monomer moleküllerini uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı (katalizör) katılması ve bazen enerji verilmesi (ısı, mikrodalga vb.) gereklidir. Sıvı reçine önce jelleşir, daha sonra tam sertleşir. Kovalent üç boyutlu bağların oluşması nedeniyle termosetler oldukça rijittirler. Polimerizasyon reaksiyonu tersinir olmadığından tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar. Yüksek sıcaklıklarda ise kovalent bağlar kopar ve malzeme giderek kömürleşir. Polyester, epoksi, fenolik ve silikon gibi termoset polimerler elyaf takviyeli kompozitmalzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir.

Termoplastikler ise rijit bir ağ yapısına sahip değildirler. Burada önce çizgisel molekül zincirleri oluşur, sonra bunlar birbirlerine genellikle zayıf Van der Waals bağları ile bağlanırlar. Bir termoplastik malzeme kritik bir "camsı duruma geçiş sıcaklığının" üzerine ısıtılırsa yumuşar ve sıcaklık arttıkça plastiğin viskozitesi düşer. Bu malzemeler tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Buharlaşma ile bileşimleri değişmediği sürece bu çevrim istenildiği kadar tekrarlanabilir. Termoplastik matrisli KM üretimi daha güçtür, çünkü termoset reçinelerin sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda termoplastiklerin viskozitesi hala yüksektir. Dolayısıyla matris-elyaf bağının gerçekleştirilmesi daha zordur. Bu malzemelerin kullanım sıcaklıkları da termoset malzemelerden daha düşüktür.

Plastik matrisli kompozitmalzemeler üretim masrafları düşük olduğu için yaygın olarak kullanılırlar. Düşük yoğunlukları, düşük elektrik ve ısı iletkenlikleri ile yüksek korozyon dayanımları bu malzemelerin başlıca üstünlükleridir. Genellikle termosetler tercih edilir, ancak şekillendirme kabiliyetlerinin çok iyi olması nedeniyle elyaf takviyeli termoplastikler de giderek yaygınlaşmaktadır. (2)

3.5.1.1.1. POLYESTER REÇİNELER

Polyester reçineler iki ana grupta toplanırlar.

- a) Doymuş polyesterler
- b) Doymamış polyesterler

Doymuş polyester reçineler polietilen tereftalat veya retilen gibi termoplastik özellik gösteren ve enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan reçinelerdir.

Doymamış polyester reçineler ise, uygun bir katalizör ile "cross-link" (şebeke yapısı) oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam Takviyeli Plastik üretiminde genellikle doymamış poliyester reçine kullanılır ve değişik amaçlar için, değişik özellikte doymamış polyester reçine türleri geliştirilmiştir.

Polyester reçine üretiminde kullanılan başlıca maddeler, bir dibazik organik asit veya anhidridi ile dihidrik alkol (Glikol) dur. Termoset reçine içinde polimer zincirinin cross-link yapabilmesi için dibazik asitin bir bölümünde doymamış grup veya çifte bağ bulunması gereklidir. Ancak, doymamışlık, aromatik olmayan bir madde ile sağlanmalıdır. Aksi takdirde, cross-link yine sağlanamaz. Örneğin stiren (vinil benzen) peroksit katalizör eşliğinde cross-link yaparken, benzen halkası bozulmaz, yalnızca vinildeki çifte bağ açılır.

Basit bir polyester reçine propilen glikol, maleik anhidrid (doymamış) ve ortoftalik anhidrid (doymuş) ile hazırlanabilir. Her iki anhidrid'in oranında yapılacak değişiklik polyester reaktivitesini etkiler. Doymamış anhidrid oranı arttıkça polyesterin reaktivitesi de artış gösterir. Kullanılan değişik cins Glikol ve Dibazik asitlerle, değişik özelliklere sahip polyester reçinelerin elde edilmesi mümkündür.

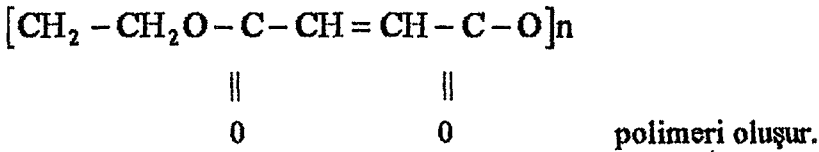
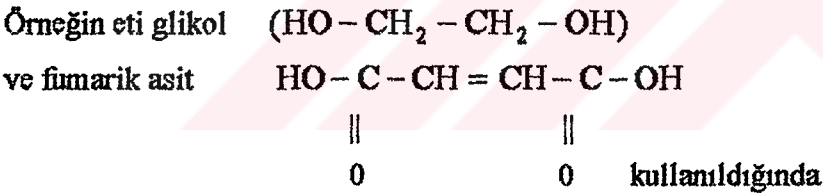
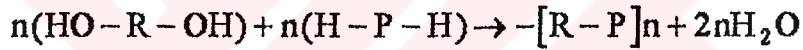
Polyester reçine içinde ayrıca stiren monomeri bulunur. Bu monomerin rolü hem polyester zinciri için çözücü teşkil etmek, hem viskoziteyi düşürmek, hem de cross-link'i sağlamaktır. Sertleşme sırasında, stiren monomeri, doymamış gruplarla birleşerek polyester zincirlerini birbirine bağlar ve cross-link oluşturur.

Kısaca bakılacak olursa, polyester üretimi için gerekli olan maddeler;

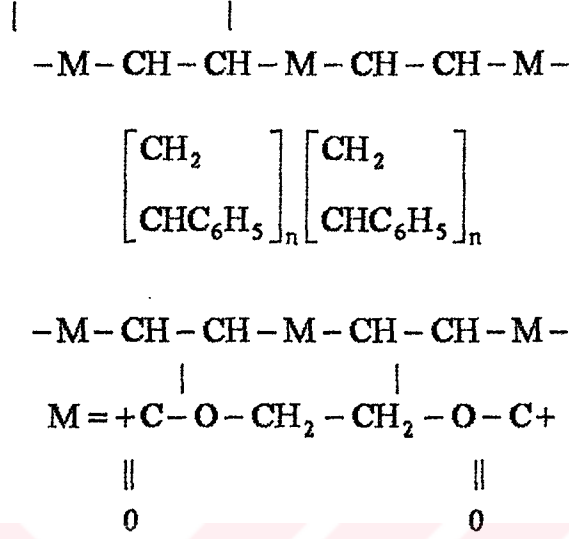
1. Bir glikol,
2. Bir doymamış dibazik asit,
3. Bir doymuş dibazik asit,
4. Bir reaktif monomer'dir.

Ancak, ticari bir polyester reçine üretiminde bunlara ek olarak bir madde daha kullanmak gereklidir. Bu madde inhibitördür ve stoklama sırasında polyesterin kendi kendine jelleşmesini önlemek için polyester üretiminden sonra ambalajlama sırasında kullanılır.

Kompozit malzeme matrisi olarak, özellikle cam elyaf takviye ile birlikte yaygın olarak kullanılır. Ester grubunun sertleşmesi ile oluşur. Ester polimerizasyonunda reaksiyon, dibazik ve diasitik monomerlerin birleşmesidir;



Burada karbon atomları arasında çift bağ bulunması polimerin doymamış olduğunu gösterir. Bu çift bağlar doymamış bir monomer yardımıyla polimer zincirleri arasındaki çapraz bağların kurulmasına ve üç boyutlu, kuvvetli bir ağı oluşturulmasına (sertleşme) olanak sağlar. Bu durumda sertleştirici olarak kullanılan monomer ağı bir parçası olur. Sertleşmenin derecesi ve hızı bir hızlandırıcı yardımıyla kontrol edilir.



Polyesterlerde bağların şekli değiştirilerek çok farklı özellikler elde edilebildiğinden, bunlar hakkında genel bir fikir vermek oldukça güçtür. Polyester reçineler 100°C sıcaklığın altında mekanik ve kimyasal dayanım bakımından iyi olup, fiatları düşüktür. Polyesterin sertleşme öncesinde viskozitesi düşüktür ve cam elyafını çok iyi ıslatır. Kompozitmalzemelerde matris olarak kullanılırken dolgu malzemeleri katılabilir. (2, 8)

Polyesterin zayıf yönleri :

- Sertleşme sırasında kendini çekme oranı yüksektir (%5..12) ve bu durum liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına neden olabilir. Bu nedenle malzemelerin basma zorlanmaları altındaki dayanımı düşüktür ve düzgün yüzey elde etmek güçtür.
- Özellikle alkali ve bazik ortamlarda korozyon dayanımı düşüktür.
- Bünyesine su alarak bozundur.

3.5.1.1.2. EPOKSİ REÇİNELER

Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir ve uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan kompozitmalzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Sertleşme süresi 1 saat dolayında olup 127 ve 177° C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250° C'ye kadar ısı kararlı türleri de geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Dayanımları yükseltir, birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir. (2)

3.5.1.1.3. YÜKSEK SICAKLIK REÇİNELERİ

127'den 316° C sıcaklığa kadar kullanılan *polimit* reçine türleri vardır, ancak bunların üretimleri güçtür. Fiyatları epoksiye göre daha yüksektir.

Fenolik reçineler 300° C'ye kadar sürekli, asbest elyafı takviye edildiği takdirde 1000° C'ye kadar kısa süre ile kullanılabilir. Viskozitesi yüksek olan bu reçinelerde gözenek oluşması tehlikesi vardır, yüksek kalıplama basınçları uygulanır. Sertleşme sonrası 250° C sıcaklığa kadar bir ısı işlemin uygulanmasını gerektirir. Alkalilere karşı duyarlı olup, suya ve birçok aside karşı dayanıklıdır.

Silikon, mekanik özellikleri düşük olmasına rağmen 250° C'ye kadar sürekli çalışabilir. Pahalı olmasına rağmen mekanik ve elektriksel özellikleri ile suya, ısıya ve oksidasyona karşı dayanımları mükemmeldir.

Kompozit malzeme matrisi olarak kullanılan bazı termoset reçinelerin özellikleri Tablo 3.15.'de verilmiştir. (2)

Tablo 3.15 : Kompozitmalzeme matrisi olarak kullanılan bazı reçinelerin özellikleri

Özellik	Polyester	Epoksi	Polimit
Yoğunluk gr / cm ³	1,1 - 1,4	1,1 - 1,2	1,43 - 1,9
Çekme Modülü GPa	1,2 - 4,0	2,0 - 5,0	3,1 - 4,9
Kayma Modülü GPa	1,0 - 2,0	1,5	-
Çekme Dayanımı MPa	42 - 90	55 - 120	70 - 110
Basma Dayanımı MPa	140	-	289
Poisson Oranı	0,35 - 0,36	2,5 - 3,9	-
Kopma Uzaması (%)	2 - 6	1,5 - 8,5	1,5 - 3
Isıl Genleşme Katsayısı cm/cm °C ⁻¹ (x10 ⁻⁸)	60,0 - 70,0	55,0 - 70,0	-
Kullanım Sıcaklığı (°C)	100	150	300
Çekme (%)	5 - 12	1 - 5	-

3.5.1.2. METAL MATRİS MALZEMELERİ

Metaller organik reçinelere göre çok daha yüksek dayanımlı matrislerdir. Buna ek olarak metal matris, kompozit malzemelerin tokluğunun ve kullanım sıcaklığının yükselmesini sağlar. Ancak matrisin metal olduğu kompozit malzemelerin üretimi güçtür ve bunlar her elyaf ile birlikte kullanılamazlar. Metal matris için en kolay kullanılabilen elyaf en nadir ve pahalı elyaf türü olan bor ve borsic (yüzeyi silisyum kaplı bor) elyafıdır. Yaygın olarak kullanılan metal matrislere örnek olarak 6061 ve 2024 alüminyum alaşımları ile 1010 saf alüminyum gösterilebilir. Burada kompozit malzeme 450-550 °C sıcaklıkta sıcak presleme ile üretilebilir. Böyle bir kompozit malzeme 300 °C'ye kadar, oda sıcaklığındaki özelliklerini korur. Titanyum alaşımları da yayınma bağı yoluyla borsic ve SiC elyafı ile birleştirilerek matris olarak kullanılabilir. Bu tür bir kompozit malzemenin kullanım sıcaklığı 420-520 °C'ye çıkar. Karbon elyaf da alüminyum alaşımı içine gömülebilir, ancak karbon ile alüminyum arasındaki galvanik korozyonun önlenmesi için önce yüzeyinin nikel veya gümüşle kaplanması gerekir. (2)

3.5.1.3. ÇOK YÜKSEK SICAKLIK MATRİSLERİ

Seramiklerin matris olarak kullanılması halinde kompozit malzemeler 1300 °C' ye kadar kullanılabilme şansına sahip olur. Bu tür kompozit malzemelerin en gelişmişlerine örnek olarak SiC veya Al₂O₃ elyaf ile takviye edilmiş, SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir. Karbon elyafın da kullanılabildiği bu tür matrislerde (cam, seramik, mullit, MgO, Al₂O₃, SiC) liflerin rolü farklıdır. Mekanik özellikleri bakımından matrisden çok farklı olmayan elyafın buradaki görevi daha çok malzemenin tokluğunu arttırmaktır.

Karbon matris içine gömülü karbon elyafından oluşmuş kompozitlerin 4000 °C ye kadar dayanma şansı vardır. Burada matris bir organik matrisin poligonizasyonu veya buhar çökeltme ile elde edilir. Bu kompozitler yüksek sıcaklıklarda olağanüstü ısı ve mekanik özelliklere sahiptirler. (2)

3.5.2 . TAKVİYE MALZEMELERİ

Takviye malzemeleri, genel anlamda sertleşmiş reçine sistemlerinin mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla kullanılan her türlü elyafı kapsamaktadır. Ancak genelde takviye olarak kullanılan elyaf sayısı oldukça düşüktür. Takviye olarak kullanılan elyaf boyu, kullanılan yöntemeye göre 3 milimetreden kilometrelerce uzunluğa kadar olabilir. Başlıca takviye malzemesi, cam elyafıdır. Takviye elemanı olarak kullanılan cam elyafı "E" camıdır ve yüksek mekanik mukavemete sahip, alkali miktarı düşük olan bir cam türüdür. Devamlı fitil, dokuma, keçe gibi değişik türlerde kullanılır.

Cam elyafı dışında karbon elyafı, akrilik, asbest, pamuk, naylon, poliakrilo nitril, polietilen teraftalat ,selüloz elyafı ve yün elyafı da takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, çok yüksek mekanik mukavemete sahip olan karbon elyafının geliştirilmesi özellikle mukavemet ve hafifliğin önem kazandığı havacılık endüstrisinde yeni boyutlar getirmiştir.

Son zamanların bir diğer yeni uygulaması aromatik poliamid elyafı (Kevlar) dır. Bu tür elyafın kullanılması, cam elyafı takviyeye oranla %30, alüminyum alaşımına oranla %50 civarında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. (1, 8)

3.5.2.1. ELYAF TÜRLERİ

Kompozit malzemelerde, elyafın birinci görevi yükü taşıyarak dayanım ve rijitliği arttırmaktır. Bir malzemenin elyaf olarak adlandırılabilmesi için ASTM'ye göre ;

- Uzunluk/enine ortalama boyut enaz 10/1
- En büyük kesit $\leq 0,05 \text{ mm}^2$
- En büyük genişlik $\leq 0,25 \text{ mm}$ koşulları verilmektedir.

Sürekli elyaf, fitil veya filament olarak da adlandırılır. Metal lifler için ise tel adı da kullanılır. Bir elyafın kesitinde, genişlik/kalınlık oranı 4:1 ise, şerit adı verilir. Elyaf lar genellikle üç gruba ayrılır: (2)

- Doğal Elyaf lar (örneğin yün, pamuk, asbest)
- Rejenere Elyaf (doğada bulunan uzun makro moleküllerden yararlanılarak elde edilirler, rayon)
- Yapay Elyaf (nylon, kevlar)

3.5.2.1.1. CAM ELYAFI

Reçine matrisli kompozit malzemelerde cam elyafı en yaygın kullanılan ve ucuz takviye türüdür. Esas olarak SiO_2 olan camda diğer elementlerin oksitleri de bulunur. Değişik özellikler (elektriksel, kimyasal, korozyon dayanımı ve elastiklik modülü) elde etmek için farklı kimyasal bileşimlerde olan camlar üretilir. Takviye olarak en yaygın kullanılan iki tür camın özellikleri diğer elyaf türleriyle karşılaştırmalı olarak Tablo ??'de verilmiştir. En yaygın olarak kullanılan tür E-camıdır. Alüminyum ve magnezyum oksit içeriği daha yüksek olan S-camının ise mekanik özellikleri daha iyidir. Daha çok A.B.D.'de üretilen S-camının, yaklaşık aynı özelliklerde olan Avrupa'da R-camı olarak piyasaya sunulmaktadır. Kuvarz yüksek saflıkta silikadır (%99,95 SiO_2). Pahalı olduğundan, mükemmel dielektrik özelliklerinin ve yüksek sıcaklık dayanımının gerektiği yerlerde kullanılır. 1600 °C sıcaklığa kadar kararlı olup, örneğin uzay araçlarının ısı zırhlarında kullanılabilir.

Cam elyafının üstünlükleri ucuzluğu, yüksek çekme ve darbe dayanımı, yüksek kimyasal dayanım olup, zayıf yönleri ile düşük elastiklik modülü, liflerin sürünerek birbirini aşındırması,

düşük yorulma dayanımı ve matrise tutunmanın az oluşudur. Cam yanmaz, mekanik özellikleri ise yüksek sıcaklıklarda çok fazla düşmez. Çok güçlü alkaliler ve hidroflorik asit dışında korozyon dayanımı mükemmeldir.

Cam elyaf sürekli ve süreksiz olarak üretilir. 1300 °C sıcaklıktaki sıvı cam, bir platin kovanın tabanındaki çok sayıdaki delikten aşağıya demet halinde çekilir. Bir soğutma işleminden sonra, koruyucu (sizing) yüzey kaplaması uygulanır. Bu tabakanın görevleri :

- Sürtünmeyi azaltarak hem aşınmayı önler, hem de üretilen sırasında liflerin birbirine göre hareketini kolaylaştırır,
- Matris ile ara yüzeyi oluşturur.

Tablo 3.16 : Bazı elyaf türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması

Elyaf	E-Camı	S-Camı	Kuvar z	Bor	Karbon	Kevlar 49
Elyaf yoğunluğu (g / cm ³)	2,54	2,49	2,2	2,68	1,85	1,44
$\sigma_{\text{çs}}$ (MPa)	3448	4585	3100	3448	2900-2000	2706
E_0 (GPa)	72,4	85,5	68,9	413,7	520-220	131
d_0 (mm)	0,003- 0,02	0,003- 0,013	0,01	0,1- 0,2	0,005- 0,013	0,012
Isıl Genleşme Kat. °C ⁻¹ (x10 ⁻⁶)	5	2,9	2,9	3	-1	-2
Kopma Uzaması (%)	2,75	-	-	0,7	0,5-1,13	2,5
Fiyat (\$/kg)(1980)	1	16	-	500	-	28

Bazı durumlarda ise geçici bir sizing uygulanarak, bu tabaka kompozit malzeme üretimi sırasında uzaklaştırılarak matris / elyaf ara yüzeyinde daha yüksek dayanım sağlayan bir bağlayıcı (coupling) tabaka uygulanır.

Lifler daha sonra fitil olarak adlandırılan demetler halinde toplanır. Bu üretim sırasında hız 3 km/dak'ya kadar ulaşabilir. Bobinlere sarılan elyaf kondisyonlanır ve kurutulur. Bu sırada sizing içindeki solvent ve su giderilir. (2, 8)

Camın viskozitesi, sıcaklığı ve çekme hızı değiştirilerek farklı çaplarda (ticari olarak 2,5 μ m-20 μ m) elyaf elde edilebilir. Piyasaya sunuluşu ;

- Fitol (bükümsüz),
- Fitol (yarı bükülmüş),
- Bükülmüş iplik,
- Keçe,
- Dokuma şeklindedir.

Devamlı Fitol

Devamlı fitil, bir veya daha çok sayıda cam elyafı demetinin, bükümsüz olarak bir mandrel üzerine birbirine paralel olarak sarılması ile oluşturulur.

Demet sayısı ve bobin boyutları son kullanım amacına göre farklılık gösterir. Bazı özel uygulamalar için cam elyafı demetleri kendi içinde iki veya daha çok ayrıma bölünebilir. Elyaf üzerindeki bağlayıcı genellikle polyester reçine ile bağdaşabilen türdür. (8)

Değişik gereksinimleri karşılamak üzere fitiller değişik tiplerde üretilirler.

Kırılmış Demet

Kırılmış Demet, HKB hamuru üretimi için veya termoplastiklerin takviyesi için kullanılır. Uzunlukları 3 mm ile 50 mm arasında değişir. Ayrıca devamlı cam elyafını öğüterek 0,08 mm'den 0,2 mm'ye kadar değişen uzunlukta cam elyafı elde etmek mümkündür. Bu tür elyaf genellikle dolgu malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca laminat yüzeyinde çatlamları ve çekmeleri engellemek

ve reçineye tiksotropil özellik kazandırmak için de kullanılabilir. Ağırlıkça %40 oranına kadar kullanmak mümkündür. (8)

Keçe

Keçe, CTP üretiminde kullanılan cam elyafı türleri içerisinde en çok kullanılanıdır. Gerek mekanizasyon gerek püskürtme yöntemi konusunda yapılmış olan geliştirmeler bir çok ülkede, işyerinde stiren buharlaşma miktarının kanunla kısıtlanması sonucu daha az kullanılır hale gelmiştir. Özellikle kapalı kalıplarda keçe ile CTP üretimi en çok kullanılan üretim prosesi haline gelmiştir.

Keçe, kırılmış cam elyafının tesadüfi bir dağılımından sonra birbirine eklenerek tekdüze bir yapı meydana getirmesiyle oluşur. Genellikle kırılmış elyaf boyu 50 mm'dir ve keçe ağırlığı 225-600 gr/m² arasında değişmektedir.

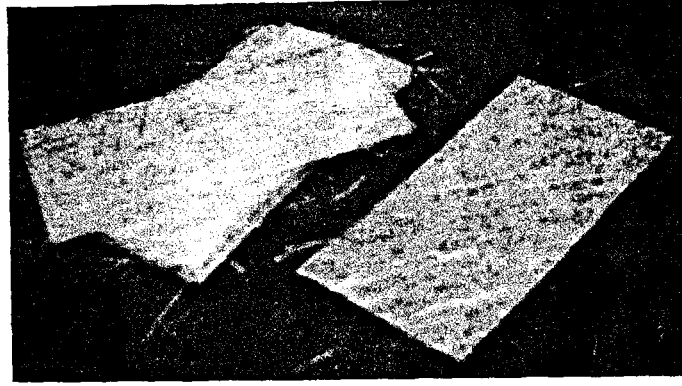
Cam keçeler, değişik amaçlara yönelik olarak değişik nitelikte üretilmekle birlikte, elyafın birbirine bağlanması genelde iki türde olmaktadır :

- a) Sıvı bağlayıcı ile
- b) Toz bağlayıcı ile

Sıvı bağlayıcı genellikle polivinil asetat emülsiyonu ile ; toz bağlayıcı, bisfenolik polyester ile bağlanmayı sağlar.

Bağlayıcı miktarı ve cinsi, keçeden keçeye farklılık gösterir. Bazı keçe türlerinde çabuk çözünen bağlayıcı %3-6 arasında, bazı tür keçelerde geç çözünen bağlayıcı %13-17 arasında kullanılır. Yüksek çözünürlüklü bağlayıcı kullanılan keçeler, kısa jelleşme süreli reçine ile, kısa zamanda iyi ıslanma gerektiği zaman kullanılır. Presle kalıplama prosesinde ve HKB hazırlanmasında, reçineyle elyafın akmasını önlemek için, geç çözünen bağlayıcı keçe kullanılır.

Cam elyafı genellikle tüm polyester reçinelerle uyuşabilir. Krom ve Silan bağlayıcılar ile kaplanır. Bazı keçeler, epoksi reçine sistemleri içinde diğerlerine oranla daha iyi sonuç verir. Bağlayıcıların epoksi reçine sistemleri içinde tamamen erimeleri çok nadirdir ve genellikle sertleşmiş laminatta elyaf belirgindir. (8)



Şekil 3.16 : Keçe

Cam Dokuma

Cam dokumalar fitillerden ve bükümlü ipliklerden hazırlanmış olarak iki sınıfa ayrılabilirler. Fitol dokuma, E camından üretilmiş cam fitillerin bükümsüz olarak dokunmasıyla oluşturulur. Fitiller önceden özel bağlayıcı uygulamasıyla dokuma prosesine hazırlanmıştır.

Katlar arasındaki iç gerilmelerden dolayı, laminatın zayıf olmaması için dokuma, keçe katları arasında kalıplanır.

Bükümlü iplik esaslı kumaşlar veya dokumalar, tekstil bağlayıcı uygulanmış ve bobin üzerine sarılmadan önce bükülmüş, devamlı cam elyafından dokunurlar. Bu bağlayıcı dokuma ipliğini dokuma sırasında korur ve kolay işlenmesini sağlar. Metrede 20-40 bükümlü cam elyafı ile üniform bir kumaş dokuma mümkündür. Genellikle dokumalar E camından yapılır. Fakat özel olarak kimyasal dayanımı arttırmak amacıyla "C" camından da dokuma yapıldığına rastlanmıştır.

Bükümlü iplikle dokumadan sonra bu bağlayıcı yakılır veya yıkanır ve yerine, kullanılacak reçine sistemiyle uyuşabilen nitelikte nihai bağlayıcı uygulanır. Eğer sıcak temizleme nisbeten düşük sıcaklıkta yapılırsa, uygulanmış bağlayıcı bozulabilir ve dokumayı karartır. Ancak çok yüksek sıcaklık uygulaması ile tam beyaz kumaş elde edilebilir. Sıcak temizleme ile bağlayıcısı giderilmiş dokumaya, kullanılacak reçine sistemiyle uyum sağlamak amacı ile, değişik bağlayıcılar uygulanabilir. Bunların bazıları; krom, silan, vinil silan, epoksi silan ve amino silandır ve kullanım amacına göre sipariş edilmelidir.

Cam elyafı ile bu bağlayıcıların kullanılmasının bir önemli etkisi, su içerisinde kalan laminatın su absorpsiyonunu azaltmasıdır. Sonuç olarak devamlı suda kalan laminatların performanslarını, ömürlerini artırırlar, bükülme mukavemetindeki düşmeyi azaltırlar.

Dokuma için kullanılan bükümlü iplikler, tek kat, katlanmış veya çok kat olabilirler. Yanlış bir bükme operasyonu uygulanmış tek kat bükümlü iplikler, dengesizdirler ve bükümlerini açarak orijinal şekillerine dönme eğiliminde olabilirler. Bunlar katlanmış, kablo şeklinde ve kat kat bükümlü ipliklerin hazırlanmasında kullanılırlar. Katlanmış bükümlü iplikler, tek kat bükümlü ipliklerin, iki veya daha fazla bükülmesiyle elde edilirler. Bunlar dengelidirler ve bükümlerini açma eğiliminde değildirler. Bunlar şerit üretiminde, dokumada, tel kaplama malzemelerinde kullanılırlar. Kablo şeklindeki bükümlü iplikler, iki veya daha fazla katlanmış bükümlü ipliğin beraber bükülmesiyle elde edilirler. Bunlar halat, şerit üretiminde kullanılırlar.

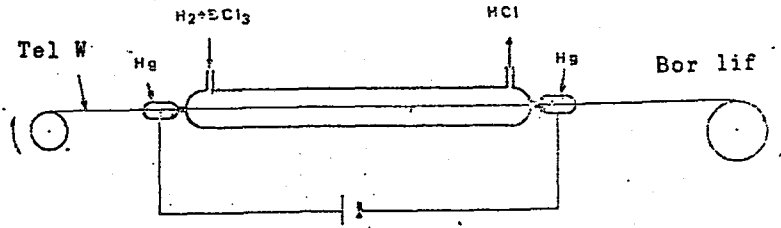
Cam kumaşlar, elektrik tesisatlarında, baskılı devrelerde, devre kesici tüplerde, taşıt gövdeleri, tank, tekne gibi birçok alanlarda kullanılır. Keza cam dokumalarda birçok alanda mukavemeti ve rijitliği arttırmak için kullanılır. Aynı zamanda maliyeti düşürücü olarak da etkisi vardır. (8)

3.5.2.1.2. BOR ELYAF

Bor, periyodik cetvelde oda sıcaklığında katı durumda olan ikinci hafif elementtir. 1960'lı yıllarda elyaf olarak üretildiklerinde gelecekte çok parlak görülüyordu. Ancak bor elyaftan bir kaç yıl sonra üretilmeye başlanan karbon elyaf bir çok uygulamada bunların yerini almıştır. Pahalı olmasına rağmen bor elyaf, yüksek dayanımı nedeniyle özellikle metal matrisler ile bazı uygulamalarda hala kullanılmaktadır. Bor sert ve gevrek olduğundan doğrudan lif olarak çekilemez. Bu nedenle hidrojenle ve bortriklorürün elektriksiz olarak 815 °C sıcaklığa ısıtılmış W teli üzerinde çöktürülmesiyle elde edilir (Şekil 3.17). W tel pahalı olup yaklaşık 10 µm kalınlığındadır. Lifin son çapı 150-200 µm civarındadır. Üretim parametrelerinin çok sıkı olarak kontrolü gereklidir, üretim hızı en çok 150 m/h'dir. Metal matrisle birleştirilirken sıcak presleme sırasında elyafın özelliklerinin bozulmaması için yüzeye bor karbür (B_4C) yada silisyum karbür (SiC) kaplanır.

Bor lifler kompozit malzemelerde kullanılan en kalın elyaf türü olup (Tablo 3.16) karbon liften 20 kat daha kalındır. Burkulmaya karşı dayanımlarının yüksek olması nedeniyle çekme yanında basma dayanımları da iyidir.

Çoğunlukla metal matrislerle kullanılır. Metallerle birleştirilmeleri diğer elyaflara göre daha kolaydır. Örneğin bor takviyeli alüminyum borular uzay araçlarında konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılırlar. (2)



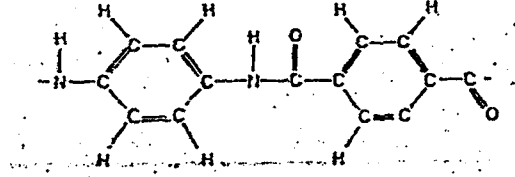
Şekil 3.17 : Bor elyafın elde edilişi

3.5.2.1.3. ARAMİD ELYAF

Değişik yapay elyaf türleri otomobil lastikleri, balonlar, paraşütler gibi yerlerde takviye olarak kullanılmaktadırlar. Bunlar arasında en çok tanınanlar amin gruplarının tekrarlandığı polimerler, ürneğin polyamid veya naylon ile benzen halkaları içeren aromatik polyamidlerdir (aramidler). Aramid ailesi içinde Dupond firmasının geliştirerek 1970'li yıllarda piyasaya sunduğu Kevlar 29 ve Kevlar 49 en çok kullanılan türlerdir. Aramidler erimediklerinden çözeltiden elde edilirler ve çözeltinin molekülsel düzeni özelliklerini belirler. Örneğin Kevlar'da molekül "poli p-fenilentereftalamid:PPT"dir.

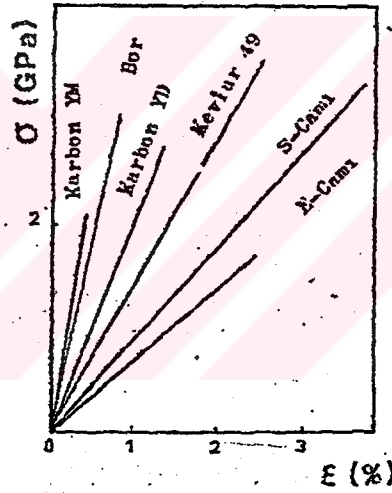
Kevlar 49 çok ilginç bir elyafır ve önceleri oto lastiklerinde çelik tellerin yerini alması için üretilen bu malzemenin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Camdan hafif ve rijit olup, fiyatı camdan pahalı, diğer elyaflardan daha ucuzdur. Elyafa işlem yapmak çok kolaydır ve üretimleri değişik biçimlerde gerçekleştirilebilir (iplik, fitil, dokuma). Elyaf sarmada başarı ile uygulanabilirler (basınçlı kaplar ve roket gövdeleri). Basma dayanımlarının düşük olması kullanımlarını sınırlar. Isındıkça kısalırlar ve bu durum tasarımda gözönüne alınmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımları oldukça iyidir. En zayıf yönleri kolay eğilmeleridir. Kesmesi zordur. Birçok ortamda korozyon dayanıklılığı iyi olmasına rağmen sülfirik aside ve güneş

işinlarına karşı duyarlıdır. 100 °C sıcaklığa kadar çekme dayanımı ve E modülü sabit kalır, 300 °C'den sonra ani olarak düşür. (2)



Şekil 3.18 : Kevlar'ın molekül yapısı

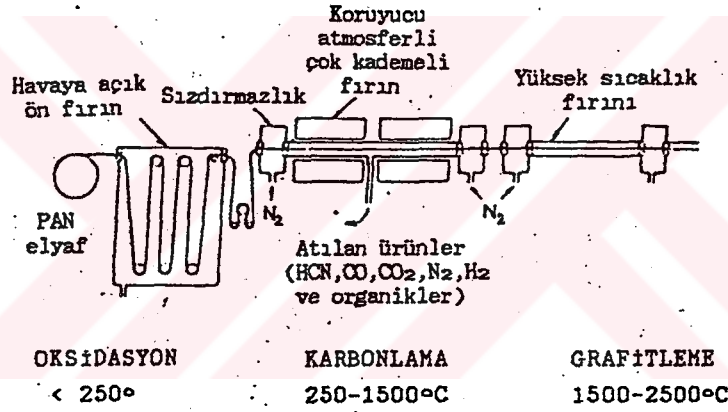
3.5.2.1.4. KARBON ELYAF



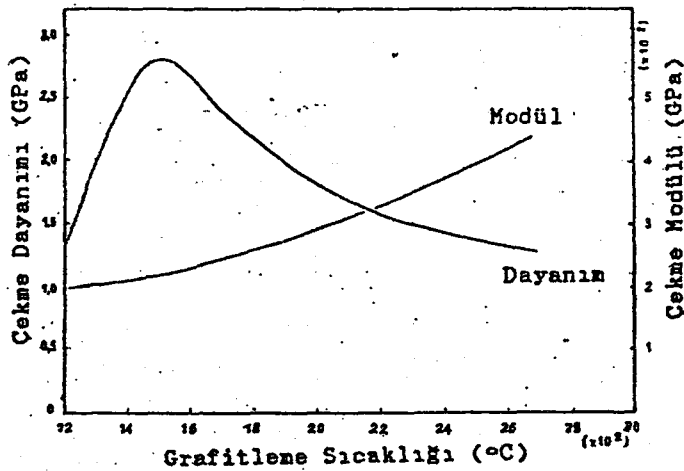
Şekil 3.19 : Değişik elyaf türlerinin elastiklik modülleri

1965'ten sonra geliştirilen ve öncelikle uçak ve uzay sanayinde geniş uygulama alanı bulan karbon elyaf, kompozit malzeme teknolojisinde büyük öneme sahiptir. Yüksek elastiklik modülüne sahip karbon elyafın yoğunluğu düşük, yüksek sıcaklık dayanımı iyidir. Önceleri kılcal kristal (whisker) olarak elde edilebilen bu malzeme, geliştirilen teknikler sayesinde sürekli lifler olarak da üretilmektedir. Bu yöntemlerde yüksek oranda karbon içeren bir ön mamül kullanılır (örneğin rayon ve polyacrylonitrile-PAN). Isıl ve mekanik etkilerle karbon dışındaki elementler giderilmeye ve elyafta güçlü karbon-karbon bağları elyaf eksenine getirilmeye çalışılır.

Elyafın özellikleri son işlemin sıcaklığına bağlıdır. (Şekil 3.21) Düşük sıcaklıklarda elyaf amorf bir yapıya sahip, yüksek sıcaklıklarda ise grafit sdh kristal yapıya sahiptir. Bu işlem sıcaklığı değiştirilerek farklı özelliklerde elyaf üretilebilir (YD: yüksek dayanım, YM: yüksek modül). Karbon elyafın, petrolün damıtılmasında elde edilen katrandan doğrudan üretimi mümkündür ve karbon elyaf tüketimi arttığında, şu anda uygulanmasına yeni başlanan bu tekniğin yaygınlaşmasıyla elyafın fiyatı da düşecektir. Karbon takviyeli kompozit malzemeler uçak ve uzay sanayinde kullanılan klasik malzemeler arasına girmiştir. Çapları 6-10 μm olan çok ince liflerin üretiminde kullanılmaları güç olduğundan 1000-1600 lif içeren demetler üretilir. Satışa sunulan biçimler ise fitil ve dokumadır. Uygulamada daha çok matris malzemesi içine önceden gömülerek hazırlanmış yarı mamülleri kullanılır (prepreg). (2)



Şekil 3.20 : Karbon elyaf üretim şeması



Şekil 3.21 : Karbon elyafın çekme dayanımı ve elastiklik modülünün grafitleme sıcaklığı ile değişimi

3.5.2.1.5. YÜKSEK SICAKLIK ELYAFLARI

Karbon matris içinde karbon elyaftan oluşan kompozitmalzeme oksitleyici olmayan ortamlarda 3000 ° C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılabilir. 1000 °C sıcaklık bölgesinde ise iki elyaf sözkonusudur : Alüminyum oksit ve silisyum karbür.

Al_2O_3 polikristal liflerin oksidasyona karşı dayanımları iyi olup yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özelliklere sahiptirler ($\sigma_c = 1500$ Pa, $E=380$ GPa, $\rho=3,9$ g/cm³). Yaklaşık 20 µm çapındaki lifler çok kırılmandır ve genellikle metal matrislerle birlikte 700-800 °C sıcaklıklara ulaşan uygulamalar için kullanılır. Nikel, demir esaslı yüksek sıcaklık alaşımları ve refrakter alaşımlar, en çok kullanılan matris malzemeleridir.

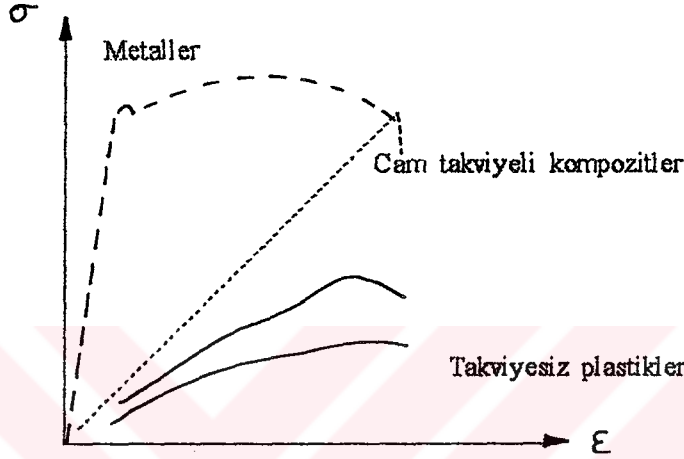
SiC elyaf, metal matrisler için dayanım ve fiyat bakımından belkide en uygun elyaftır. Bor elyafın elde edilmesine benzer bir yöntemle üretilir. 1000 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda sürekli çalışabilir. Önemli bir özelliği sıvı alüminyum içinde 30 dakika kadar etkilenmeden kalabilmesidir. Dolayısıyla SiC takviyeli alüminyumlar ucuz ve kolay olarak üretilbilirler (basınçlı döküm, kalıba döküm, sürekli döküm). (2)

3.5.2.1.6. KILCAL KRİSTALLER (Whiskerler)

Wiskerler elyaf biçimindeki kılcal tek kristallerdir. İçlerinde hemen hemen hiç kristal kafes kusuru yoktur. Çok değişik malzemelerin wiskerleri üretilmiştir (metaller, oksitler, karbürler, organik bileşikler). Yüksek sıcaklık özellikleri çok iyi, elastiklik modülleri de çok yüksektir. Pahalıdırlar. Çok değişik yöntemlerle üretilbilirler (örneğin buharlaştırma-yoğuşurma). (2)

3.6. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Takviyeli plastik malzemelerin, Gerilme - Şekil değiştirme eğrileri, çoğu metallere farklıdır. Bu tür malzemeler kısa süreli deneylerde doğrusal bir gerilme - şekil değiştirme eğrisi verirler.



Şekil 3.22 : Çeşitli malzemeler için gerilme - şekil değiştirme eğrileri

Çoğu metallere ve plastiklerde gerilme - şekil değiştirme eğrileri akma noktasına kadar doğrusal bir değişim gösterir. Bu noktadan sonra şekil değişimi, gerilme ile hızla artarak bir maksimuma ulaşır ve kopar. Takviyelendirilmiş plastiklerde ise ancak çok hassas testler sonucunda hafif bir eğrilik görülür. Şekil 3.22 .(15)

Plastik malzemeler için, gerilme - şekil değiştirme eğrileri ile verilen değerler, konstrüksiyon için metallere nazaran daha az anlam taşır ; çünkü bu değerler plastiklerde, çekme hızına ve deney sıcaklığına çok bağlıdır. Çekme deneylerinde muayene sıcaklığını ve deformasyon hızını büyük aralıklarda değiştirerek bulunacak sonuçlar, konstrüktör için daha güvenilir bilgiler verir. (1)

Gelişmiş elyaf takviyeli kompozit malzemeler her biri farklı doğrultularda takviye edilmiş çok sayıda tabakadan oluşur. Böyle bir malzemenin özellikleri, metallere gibi homojen ve izotrop malzemelerden çok farklıdır. (2)

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekaniği genellikle iki gruba ayrılarak ele alınır :

a) **Makromekanik'** te elyaf takviyeli kompozit malzeme homojen fakat anizotrop bir cisim gibi düşünülerek mekanik davranışı incelenir.

b) **Mikromekanik'** te ise kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin (elyaf ve matrisin) ve bunların geometrik düzeninin, malzemenin genel özelliklerini nasıl etkilediği araştırılır.

Mikromekanikte amaç, cisme etki eden dış kuvvetlerin etkisiyle heterojen kompozit malzeme içinde oluşan gerilme veya şekil değiştirme alanını tarif etmektedir. Bu şekilde heterojen yapıdaki bileşenlerin özelliklerinin kompozit malzemenin genel özelliklerini nasıl etkilediği araştırılır.

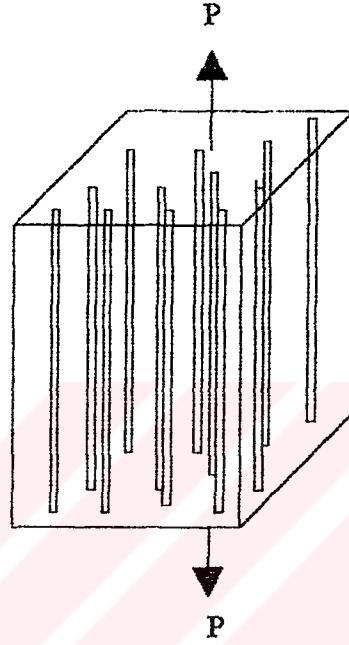
Kompozit malzemenin genel özelliklerine etki eden faktörlerin başlıcaları :

- a) Bileşenlerin hacim oranları, biçim ve büyüklükleri ile düzenlenişi,
- b) Bileşenlerin özellikleri,
- c) Bileşenler arasındaki bağların özellikleridir.

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri bulunurken, takviye malzemesinin kompozit yapı içerisindeki durumu ve yüklemenin yönü göz önüne alınır. (2)

3.6.1 SÜREKLİ ELYAFLA TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

3.6.1.1. Takviye Doğrultusundaki Elastiklik Modülünün Hesaplanması



Şekil 3.23 : Sürekli ve elyafları tek doğrultuda düzenlenmiş kompozit malzeme

Sürekli ve elyafları tek yönde düzenlenmiş bir kompozit malzeme alalım, Şekil 3.23 . Bu malzemeye yük uygulandığında elyaf, matris ve kompozit malzeme aynı anda uzayacağından (Eş birim uzama) ;

$$\epsilon_k = \epsilon_e = \epsilon_m \quad (3.1)$$

yazılabilir. (k : kompozit malzeme , e : elyaf, m : matris).

Şekil 3.23 de görüldüğü gibi kompozite etkiyen kuvveti P, ve kuvvete dik kesit alanını A_k ile gösterecek olursak ,

$$P = \sigma_k \cdot A_k \quad (3.2)$$

olacaktır.

A_k : Kompozitin dik kesit alanı

σ_k : Kompozitteki gerilme

Kompozite etkiyen P kuvveti, elyaflar ve matris tarafından taşınır. Bu sebeble kompozit malzemenin taşıdığı yük ise :

$$P_k = P_e + P_m \quad (3.3)$$

olur.

$$P_e = \sigma_e \cdot A_e \quad (3.4)$$

$$P_m = \sigma_m \cdot A_m \quad (3.5)$$

$$P_k = \sigma_k \cdot A_k = \sigma_e \cdot A_e + \sigma_m \cdot A_m \quad (3.6)$$

Buradan ,

$$\sigma_k = E_k \cdot \varepsilon \quad (3.7)$$

ise ,

$$E_k \cdot \varepsilon \cdot A_k = E_e \cdot \varepsilon \cdot A_e + E_m \cdot \varepsilon \cdot A_m \quad (3.8)$$

$$E_k = \frac{E_e \cdot A_e}{A_k} + \frac{E_m \cdot A_m}{A_k} \quad (3.9)$$

$$\frac{A_e}{A_k} = \frac{\text{Elyafların dik kesit alanı}}{\text{Kompozitin dik kesit alanı}} = V_e ,$$

$$\frac{A_m}{A_k} = \frac{\text{Matrik sin dik kesit alanı}}{\text{Kompozitin dik kesit alanı}} = V_m$$

$$V_e + V_m = 1 \quad (3.10)$$

yazılabilir. Bu oranlar sırasıyla, elyafın kompozit içindeki hacimsel yüzdeleridir.

$$E_k = E_c \cdot V_c + E_m \cdot V_m \quad (3.11)$$

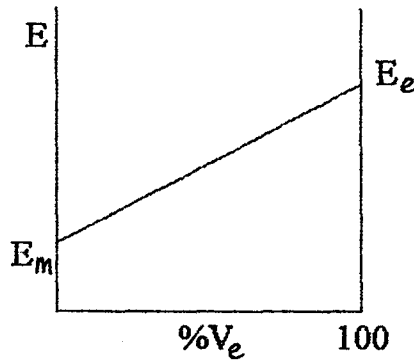
$$V_c = 1 - V_m \quad (3.12)$$

Buradan ;

$$E_k = E_c \cdot V_c + E_m \cdot (1 - V_c) \quad (3.13)$$

bulunur. Bu denklem *Karışımlar Kuralında Paralel Toplama* olarak adlandırılır. (2, 12, 15)

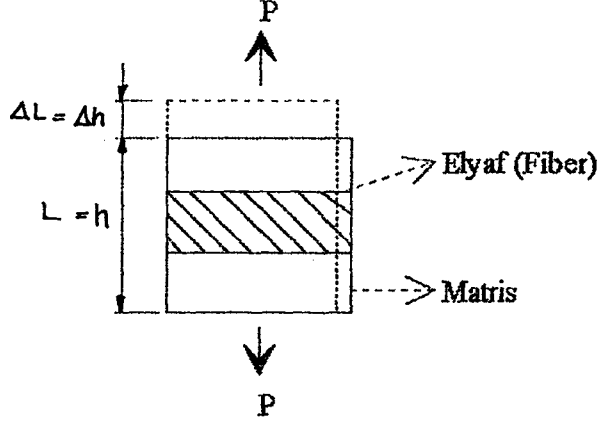
Aşağıdaki grafikten elyafın hacimsel yüzde miktarına göre elastisite modülü ve bulunabilir. Şekil 3.24 .



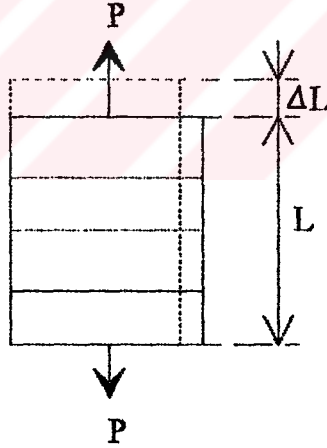
Şekil 3.24 : Kompozitin elastisite modülünün elyaf yüzdesiyle değişimi

Bu durumda her bir malzemedeki gerilme ; elastisite modülü ile belirtilir. Yüksek modüllü malzemeler, yüksek gerilmeler, düşük modüllü malzemeler düşük gerilmelere sahip olacaklardır. Bu sebeple, düşük mukavemetli malzemeler, yüksek elastisite modüllü malzemelerle birleştirilerek takviye edilebilirler. (12, 15)

3.6.1.2. Takviyeye Dik Doğrultudaki Elastiklik Modülünün Hesaplanması (E_2)



Şekil 3.25 : Tek bir elyaf ile takviyeli ve elyafa dik yönde çekme yüküne maruz kompozit malzeme modeli



Şekil 3.26 : Birden fazla elyaf ile takviyeli ve elyafa dik yönde çekme yüküne maruz kompozit malzeme

Eğer kompozit malzeme, Şekil 3.26 da görüldüğü gibi yüklenmişse, yani yük, takviye doğrultusuna dik yönde etkiyorsa bu malzemeler paralel haldedir denir. Kabul olarak P yükü, fiber ve matriste eşit olarak taşınır. Bu yükleme durumundaki elastisite modülleri E_2 olarak gösterilirse.

$$P = P_m = P_f \quad (3.14)$$

$$P_m = \sigma_m \cdot A_m \quad (3.15)$$

$$P_e = \sigma_e \cdot A_e \quad (3.16)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_m \quad (3.17)$$

$$\sigma_e = E_e \cdot \epsilon_e \quad (3.18)$$

$$\sigma_k = E_2 \cdot \epsilon \quad (3.19)$$

Elyafa dik yöndeki zorlanmalarda yapı bileşenlerinin aynı gerilmeler altında kaldığı kabul edilebilir. (Eş gerilme) ;

$$\sigma_k = \sigma_e = \sigma_m \quad (3.20)$$

P yükü uygulandığında L boyundaki malzeme ΔL kadar uzuyor ise bu uzama matrisin ve elyafın uzamalarının toplamıdır.

Malzemenin bu yöndeki uzaması ;

$$\Delta L = \Delta L_m + \Delta L_e \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir. Öte yandan ;

$$\Delta L = \epsilon_k \cdot L$$

$$\Delta L_m = \epsilon_m \cdot L_m \quad (3.22)$$

$$\Delta L_e = \epsilon_e \cdot L_e$$

olduğundan

$$\epsilon_k \cdot L = \epsilon_m \cdot L \cdot V_m + \epsilon_e \cdot L \cdot V_e$$

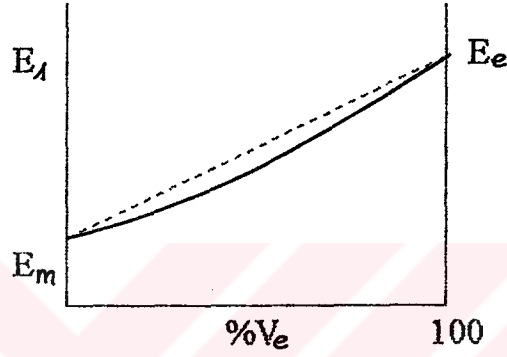
$$\epsilon_k = \epsilon_m \cdot V_m + \epsilon_e \cdot V_e \quad (3.23)$$

$$\frac{\sigma_k}{E_k} = \frac{\epsilon_m}{E_m} \cdot V_m + \frac{\sigma_e}{E_e} \cdot V_e$$

gerilmeler eşit olduğundan

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_e}{E_e} \quad (3.24)$$

bulunur. Yani elyafa dik doğrultudaki elastiklik modülü "*Karışımlar Kuralı*" ile bulunmaktadır. (2, 15)



Şekil 3.27 : Elyaf yüzdesine bağlı olarak E_2 'nin değişmesi

Bu şekilde bulunan Elastisite Modülüne Transverse Modülü de denilmektedir ve ayrı yolla aşağıdaki eşitlikle de bulunabilir. (15)

$$E_2 = 2 \cdot [1 - \nu_e + (\nu_e - \nu_m) \cdot V_m] \cdot \left[\frac{K_e \cdot (2 \cdot K_m + G_m) - G_m \cdot (K_e - K_m) \cdot V_m}{2 \cdot K_m + G_m + 2 \cdot (K_e - K_m) \cdot V_m} \right] \quad (3.25)$$

Burada ;

$$K_e = \frac{E_e}{2.(1 - \nu_e)} \quad \nu_e: \text{Elyafin poisson oranı}$$

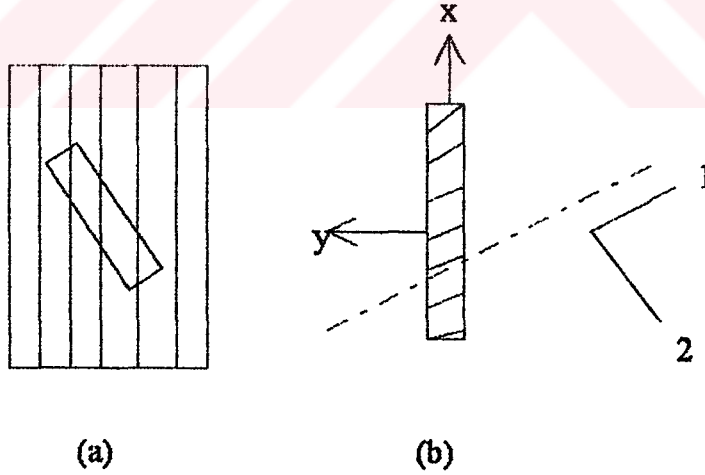
$$K_m = \frac{E_m}{2.(1 - \nu_m)} \quad \nu_m: \text{Matri sin poisson oranı}$$

$$G_e = \frac{E_e}{2.(1 + \nu_e)} \quad G_e: \text{Elyafin kayma modülü}$$

$$G_m = \frac{E_m}{2.(1 + \nu_m)} \quad G_m: \text{Matri sin kayma modülü}$$

Transverse modülü için iki eşitliğin vermiş olduğu sonuçlar hemen hemen birbirinin aynıdır.

3.6.1.3. Takviyeye θ açısı altında yükleme yapıldığında kompozitin elastisite modülü



Şekil 3.28 : Tek yönlü takviyenin değişik yönlerde yükleme hali

Şekil 3.28b'de görüldüğü gibi kompozit, takviye doğrultusunda veya takviyeye dik doğrultuda değil de, herhangi bir doğrultuda yüklenirse yükleme doğrultusundaki elastisite modülü ;

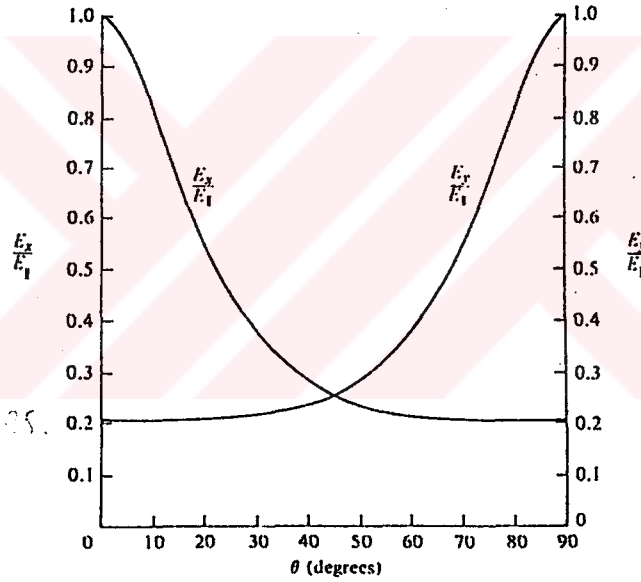
$$E_x = \frac{E_1}{\cos^4\theta + \frac{E_1}{E_2} \cdot \sin^4\theta + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2 \cdot \nu_{12} \right) \cdot \sin^2 2\theta} \quad (3.26)$$

$$E_y = \frac{E_1}{\sin^4\theta + \frac{E_1}{E_2} \cdot \cos^4\theta + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2 \cdot \nu_{12} \right) \cdot \sin^2 2\theta}$$

şeklinde bulunur. (15)

G_{12} : Tek yönlü takviyeli kompozitlerde takviye yönündeki kayma modülü.

ν_{12} : Tek yönlü takviyeli kompozitlerde takviye yönündeki poisson oranıdır.

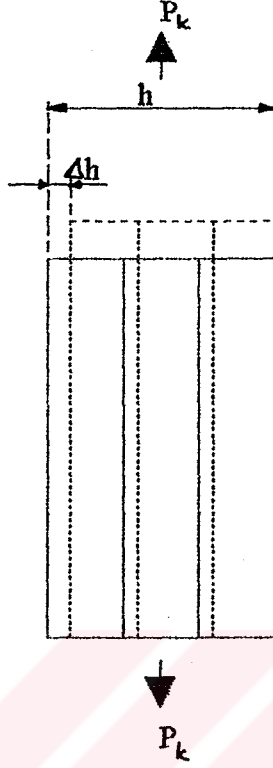


Şekil 3.29 : θ Açısına göre elastisite modülündeki değişim. (12)

3.6.1.4. ν_{12} Poisson Oranının Hesaplanması

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (3.27)$$

$$\epsilon_2 = -\frac{\Delta h}{h} \quad (3.28)$$



Şekil 3.30 : Elyafların tümünün kalınlık boyunca tek bir elyaf gibi düşünül düğü model

$$\Delta h = -h \cdot \epsilon_2 = h \cdot \epsilon_1 \cdot v_{12} \quad (3.29)$$

Öte yandan Δh elyaf ve matristeki daralmaların toplamıdır :

$$\Delta h = \Delta h_e + \Delta h_m \quad (3.30)$$

Eş birim uzama sözkonusu ise, yani ϵ_1 her iki bileşen için de aynı ise ;

$$\begin{aligned} \Delta h_m &= -h_m \cdot \epsilon_{2m} \\ \Delta h_m &= h \cdot V_m \cdot \epsilon_1 \cdot v_m \end{aligned} \quad (3.31)$$

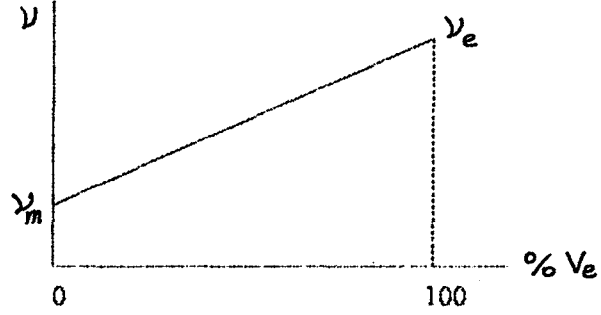
$$\Delta h_e = h \cdot V_e \cdot \epsilon_1 \cdot v_e$$

Dolayısıyla ;

$$h \cdot \epsilon_1 \cdot v_{12} = h \cdot V_m \cdot \epsilon_1 \cdot v_m + h \cdot V_e \cdot \epsilon_1 \cdot v_e \quad (3.32)$$

$$v_{12} = V_e \cdot v_e + V_m \cdot v_m \quad (3.33)$$

yazılabilir. Görüldüğü gibi ν_{12} Poisson sayısı da paralel toplama ile elde edilmektedir. (2)

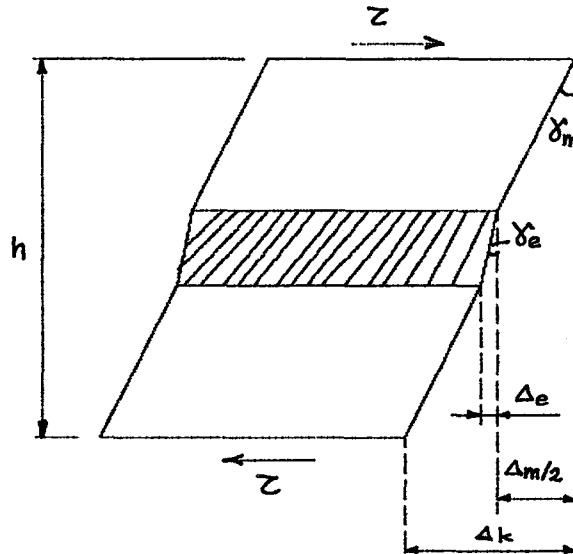


Şekil 3.31 :Elyaf yüzdesine bağlı olarak Poisson oranının değişmesi. (15)

Transverse Poisson oranı ise ; (15)

$$\nu_{21} = \nu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (3.34)$$

3.6.1.5. G_{12} Kayma Modülünün Hesaplanması



Şekil 3.32 : Tek bir elyaf ile takviyeli ve kayma gerilmesine maruz kompozit malzeme

Elyaf takviyeli kompozit malzemeye bir kayma gerilmesinin etkimesi halinde, elyaf ve matrisin aynı τ gerilmesi altında olduğu kabul edilebilir. Kayma gerilmesinden dolayı kompozit malzeme Şekil 3.32 de görüldüğü gibi şekil değişikliğine uğrar. Ancak bu şekil değişikliği çok az olduğundan kalınlık değişimi de ihmal edilebilir ($h \cong$ sabit).

γ_m matrisin, γ_f fiberin, τ kayma gerilmesi altındaki dönme açılarıdır. Bu dönme açıları çok küçük olduğundan, tanjantları radyan olarak açının kendisine eşittir.

Şekil değişimleri

$$\Delta_k = \Delta_m + \Delta_e \quad (3.35)$$

şeklinde yazılabilir, burada

$$\begin{aligned} \Delta_k &= h \cdot \gamma_{12} \\ \Delta_m &= h \cdot V_m \cdot \gamma_m \\ \Delta_e &= h \cdot V_e \cdot \gamma_e \end{aligned} \quad (3.36)$$

ve

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= \frac{\tau}{G_{12}} \\ \gamma_m &= \frac{\tau}{G_m} \\ \gamma_e &= \frac{\tau}{G_e} \end{aligned} \quad (3.37)$$

olduğundan

$$h \cdot \gamma_{12} = h \cdot V_m \cdot \gamma_m + h \cdot V_e \cdot \gamma_e \quad (3.38)$$

yazılabilir.

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= V_m \cdot \gamma_m + V_e \cdot \gamma_e \\ \frac{\tau}{G_{12}} &= \frac{\tau}{G_m} \cdot V_m + \frac{\tau}{G_e} \cdot V_e \end{aligned} \quad (3.39)$$

gerilmeler eşit olduğundan

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_m}{G_m} + \frac{V_e}{G_e} \quad (3.40)$$

bulunur. Görüldüğü gibi burada da seri toplama kullanılabilir. (2, 15)

3.6.1.6 *Kopma Dayanımı*

Bölüm 3.6.1.1 de kompozit malzemelerin elastisite modülü ;

$$E_k = E_e \cdot V_e + E_m \cdot V_m$$

olarak bulunmuştu. Kompozitin elastisite modülü gerilme ve şekil değiştirme cinsinden yazılırsa ;

$$E_k = \frac{\sigma_k}{\epsilon} \quad (3.41)$$

Aynı şekilde Elyafın ve Matrisin elastisite modülü ;

$$E_e = \frac{\sigma_e}{\epsilon} \quad (3.42)$$

$$E_m = \frac{\sigma_m}{\epsilon} \quad (3.43)$$

(3.2) Nolu denklemde Elastisite modülleri, gerilmeler cinsinden yazılırsa

$$\frac{\sigma_k}{\epsilon} = \frac{\sigma_e}{\epsilon} \cdot V_e + \frac{\sigma_m}{\epsilon} \cdot V_m \quad (3.44)$$

elde edilir.

$$\epsilon = \epsilon_k = \epsilon_e = \epsilon_m \quad (3.45)$$

kabul edilirse.

Kompozit malzemelerin mukavemet değeri karışımlar kanununa göre verilebilir: (1, 12, 15)

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m \quad (3.46)$$

$$V_m = 1 - V_e$$

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e) \quad (3.47)$$

bulunur. Burada ;

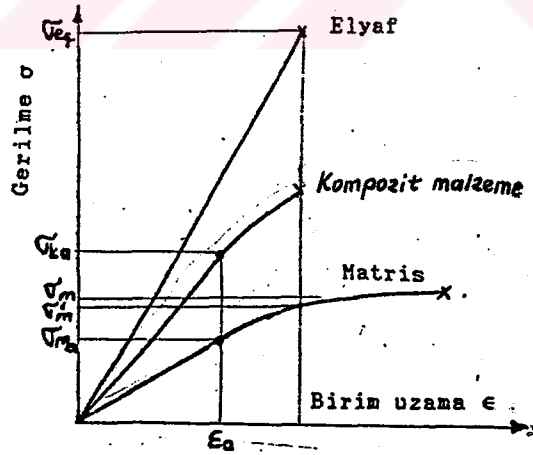
σ_k : kompozitin mukavemet değeri

σ_e : elyafın mukavemet değeri

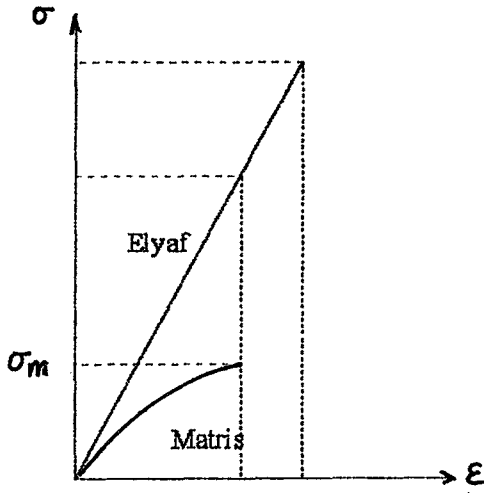
σ_m : matrisin mukavemet değeri

Kompozit gerilme ifadesi, Şekil 3.33'de grafik olarak verilmiştir. Fakat unsurların incelenmesi için gerilme - şekil değiştirme diyagramı basit bir modeldir.

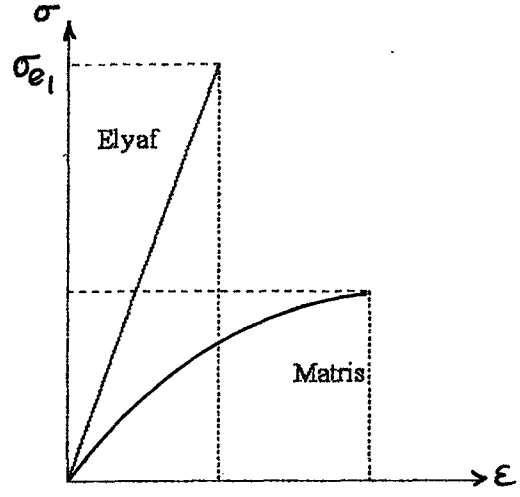
Şekil 3.34. ve Şekil 3.35.'de Hooke Kanununa göre, elyaf (fiber) ve matris için, gerilme - şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.33 : Sürekli elyafıla takviyeli kompozit malzemenin gerilme diyagramı



Şekil 3.34 : kompozitte $\epsilon_e > \epsilon_m$ olduğu durumda $\sigma - \epsilon$ diyagramı



Şekil 3.35 : kompozitte $\epsilon_m > \epsilon_e$ olduğu durumda $\sigma - \epsilon$ diyagramı

Burada ;

- ϵ_e : Elyafın koptuğu andaki şekil değişimi
- ϵ_m : Matrisin koptuğu andaki şekil değişimi
- σ_{m_1} : Elyafın koptuğunda matristeki gerilme
- σ_{e_1} : Matris koptuğunda elyafındaki gerilme

Kompozit malzemelerdeki kopma olayı incelenirken değişik durumlar ortaya çıkabilir. Çünkü kopma anında elyafdaki ve matristeki uzamalar eşit olmamaktadır. Şekil 3.35'de görüldüğü gibi elyaf, ϵ_e kadar uzadıktan sonra kopmaktadır, matrisin kopma uzaması elyafın kopma uzamasından fazladır. Matris bu durumda kopmaz ancak malzeme bu gerilmeyi de taşıyamaz. Elyaf koptuğu anda matristeki gerilme σ_{m_1} değerindedir ve bu da maksimum gerilmenin altında bir değerdir. (12, 15)

Şekil 3.34'de ise matrisin koptuğu andaki uzaması, elyafın uzamasından daha azdır. Bu durumda kompozit gerilmesini veren ifade şu şekli alır.

$$\sigma_k = E_e \cdot \epsilon \cdot V_e + E_m \cdot \epsilon \cdot V_m \quad (3.48)$$

ϵ : Matrisin (veya elyafın) koptuğu andaki en düşük uzama miktarıdır.

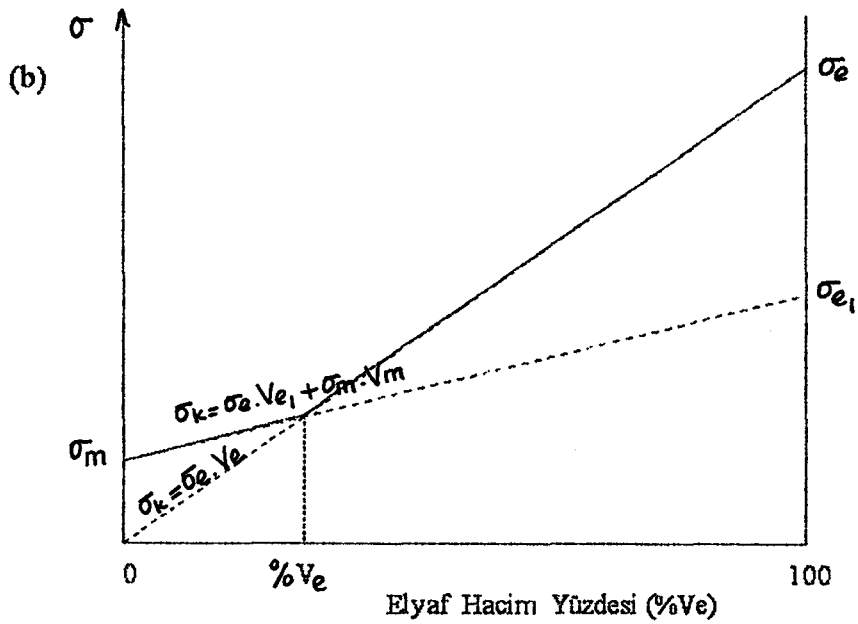
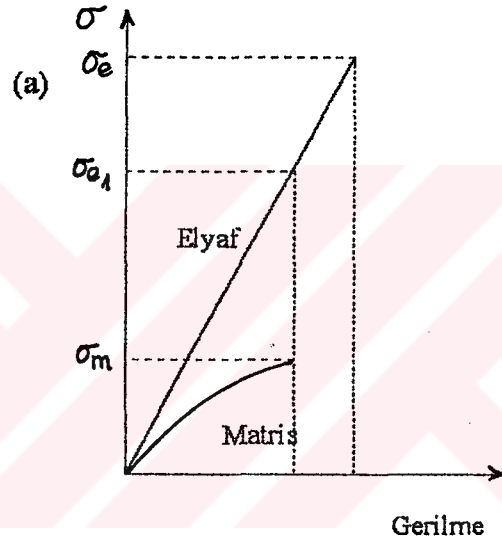
Kompozit malzemenin gerilmesini veren ifade bu iki duruma göre aşağıdaki şekillerde verilebilir ;

İlk elyaf kopuyorsa $\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m$ (3.49)

İlk matris kopuyorsa $\sigma_k = \sigma_{e1} \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m$ (3.50)

Kompozit malzemenin gerilme durumunu bir kaç değişik şekilde tanımlayabiliriz.

- İlk kez matrisin kopma durumuna göre
- İlk kez elyafın kopma durumuna göre
- Maksimum yük taşıma kapasitesine göre



Şekil 3.36 : (a) Elyafın Şekil değiştirme miktarının Matrisin Şekil değiştirme miktarından büyük olduğu durumda ($\epsilon_e > \epsilon_m$) Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı (b) $\epsilon_e > \epsilon_m$ durumundaki Elyaf yüzdesi - Gerilme diyagramı

Şekil 3.36 da $\epsilon_e > \epsilon_m$ durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilen elyaf miktarı çok düşük tek yönlü kompoziti düşünelim. Bu durumda kompozitin mukavemeti matrisin mukavemetine eşit kabul edilir. Kompozitin uzaması, matrisin kopma uzamasına eşit olduğunda kopar ve yük elyaflara aktarılır. Elyaf miktarı da (hacimsel olarak) az olduğunda bu yük altında koparlar. Bu durumda kompozitteki gerilme ; (12, 15)

$$\sigma_k = \sigma_{e_1} \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m \quad \text{dir.} \quad (3.51)$$

Eğer elyaf miktarı fazla ise matrisin kopması kolay farkedilmez. Taşıdığı küçük miktardaki yük elyaflara transfer edilir, ancak bu önemsiz bir durumdur. Kompozit yükü, elyaflar kopma uzamasına ulaşmaya kadar taşır (teorik olarak). Bu durumda kompozitteki gerilme ;

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e \quad (3.52)$$

Bu daha basit bir durumdur. Çünkü matris yükü elyaflara transfer etmeyecek kopma daha önce gerçekleşecektir.

Şekil 3.36b de kompozitteki gerilmenin, elyafın hacimsel yüzde miktarına göre nasıl değiştiği görülmektedir. Bu iki durum için ortak nokta yukarıdaki eşitliklerden bulunabilir ;(15)

$$\sigma_{e_1} \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m = \sigma_e \cdot V_e$$

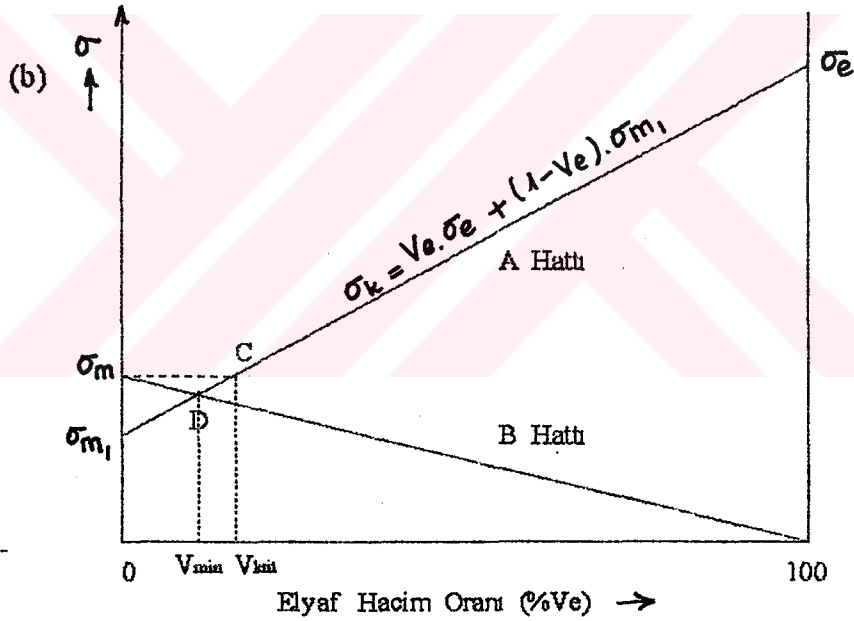
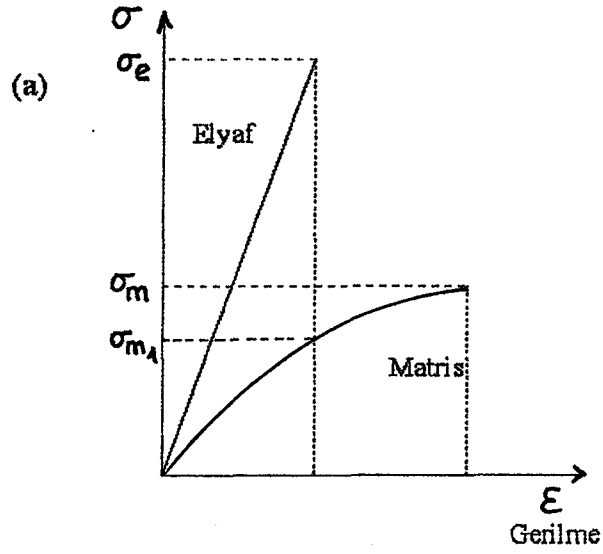
$$V_m = (1 - V_e) \quad \text{idi}$$

$$\sigma_{e_1} \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e) = \sigma_e \cdot V_e$$

$$\sigma_{e_1} \cdot V_e + \sigma_m - \sigma_m \cdot V_e = \sigma_e \cdot V_e$$

$$\sigma_m = V_e \cdot (\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{e_1})$$

$$V_e = \frac{\sigma_m}{\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{e_1}} \quad (3.53)$$



Şekil 3.37 : (a) Matrisin Şekil değiştirme miktarının Elyafın Şekil değiştirme miktarından büyük olduğu durumda ($\epsilon_m > \epsilon_e$) Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı (b) $\epsilon_m > \epsilon_e$ durumundaki Elyaf yüzdesi - Gerilme diyagramı

Şekil 3.37 de $\epsilon_m > \epsilon_e$ durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilen, tek yönlü, elyaf yüzdesi az olan bir kompoziti düşünelim. Elyafın kopma uzaması, matrisden az olduğundan, matrisin kopma uzamasına erişilmeden elyaf kopacaktır. Ancak kompozit yükü, matrisin kopma uzamasına erişilinceye kadar taşıyacaktır. Ancak, elyaf miktarının az olmasına rağmen kompozitin mukavemeti gerçekte azalacaktır.

Bu kez elyafın kompozit içindeki hacimsel yüzdesinin fazla olduğunu kabul edelim. Yine elyaflar önce kopacaktır, ancak oranın fazla oluşu ve yüksek modüllerden dolayı yükün büyük bir oranını taşımaktadırlar. O halde, kompozitin, matrisin mukavemetinden daha düşük mukavemet değerine sahip olduğu durumlarda, elyaf miktarı için kritik bir değer vardır. Bu durum Şekil 3.37 b de verilmiştir. (12, 15)

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviye etkisinin gerçekleşmesi için bulunması gereken minimum bir elyaf hacim oranı vardır. Bu değer in altında yani çok az elyaf ile yapılan takviyelerde, daha rijit olan ve kuvveti tümüyle taşımak zorunda kalacak olan lifler kırılacaktır. Dolayısıyla böyle bir takviyenin hiçbir yararı olmayacağı gibi kuvveti taşıyacak olan matris kesitini de azalttığından dayanım düşüşlerine de neden olacaktır. Malzeme dayanımının en düşük olduğu noktadaki elyaf hacim oranı V_{min} ile gösterilir. (2, 15)

A hattı aşağıdaki eşitliği ifade eder. $V_e > V_{min}$ ise yükü elyaf ve matris ortak olarak taşırlar. Bu durumda kopma dayanımı:

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m_1} \cdot V_m \quad (3.54)$$

Bu eşitlik, basit karışımlar kanunu eşitliğidir. σ_{m_1} ise elyaf koptuğu anda matrisdeki gerilmedir

B hattı ise matris yüzde miktarına göre gerilimdeki değişimi ifade eder. $V_e < V_{min}$ ise yükü matris taşıyacağından kopma dayanımı ;

$$\sigma_k = \sigma_m \cdot V_m = (1 - V_e) \cdot \sigma_m \quad (3.55)$$

Grafikteki C noktası V_{krit} olarak bilinir ve kompozitin mukavemetinin, matrisin mukavemetine eşit olduğu hacimsel elyaf yüzdesini ifade etmektedir. D noktası kompozitin mukavemetini minimum yapan hacimsel yüzdesini vermektedir. D noktası ile belirtilen V_{min} değeri kompozitin mukavemetini veren yukarıdaki eşitliklerden bulunur. (15)

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m_1} \cdot V_m \quad (3.56)$$

$$\sigma_k = \sigma_m \cdot V_m$$

V_{min} değerini bulmak için iki bağıntı eşitlenerek, $V_e = V_{min}$ yazılır ve ,

$$\sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m = \sigma_m \cdot V_m$$

$$V_m = 1 - V_e$$

$$\sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot (1 - V_e) = \sigma_m \cdot (1 - V_e)$$

$$V_e \cdot (\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{m1}) = \sigma_m - \sigma_{m1}$$

$$V_{\min} = \frac{\sigma_m - \sigma_{m1}}{\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{m1}} \quad (3.57)$$

V_{krit} , değeri de benzer olarak bulunur.

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m$$

$$C \text{ noktasında } \sigma_k = \sigma_m$$

$$\sigma_m = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot (1 - V_e)$$

$$\sigma_m = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} - \sigma_{m1} \cdot V_e$$

$$\sigma_m - \sigma_{m1} = V_e \cdot (\sigma_e - \sigma_{m1})$$

$$V_{\text{krit}} = \frac{\sigma_m - \sigma_{m1}}{\sigma_e - \sigma_{m1}} \quad (3.58)$$

Şekil 3.37 b den de görüldüğü gibi kompozit malzemenin dayanımının matrisin dayanımından büyük olması için, en az V_{krit} kadar elyafı takviye edilmelidir. (2, 12, 15)

3.6.1.7. Akma Dayanımı

Bu tür malzemelerin akma dayanımı matrisin akmaya başladığı noktada hesaplanır.

$$\epsilon_a = \sigma_{ma} / E_m$$

$$\sigma_{ka} = E_k \cdot \epsilon_a = (V_e \cdot E_e + V_m \cdot E_m) \cdot (\sigma_{ma} / E_m)$$

$$\sigma_{ka} = \left[1 + \left(\frac{V_e \cdot E_e}{V_m \cdot E_m} \right) \right] \cdot V_m \cdot \sigma_{ma} \quad (3.59)$$

Matrisin Akmasından Sonraki Elastiklik Modülü

$$E_k' = V_e \cdot E_e + V_m \cdot \left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} \right) \quad (3.60)$$

$$\left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} \right) : \text{Matrisin pekleşme hızı}$$

$$E_k' \equiv V_e \cdot E_e \quad (3.61)$$

olarak hesaplanabilir. (2)

3.6.2. SÜREKSİZ ELYAFLA TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

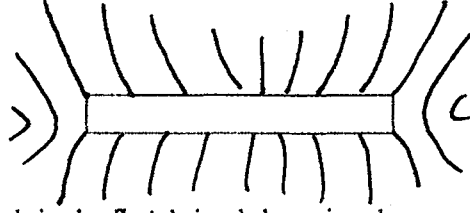
Bu durum da takviye olarak sürekli elyaftan kırılarak elde edilmiş veya kılcal kristaller (Whisker) gibi kısa olarak üretilmiş elyaf kullanılmakta olup malzemede oluşan şekil değişimleri artık homojen değildir, (Şekil 3.38). Lif uçlarındaki gerilme sıfırdır, bu gerilme lif-matris ara yüzeyinde etkiyen kayma gerilmelerinin life ilettiği kuvvetler nedeniyle ortaya doğru giderek artar. Lifin dz boyundaki bir dilimim elyaf ile matris arasında ilettiği dP kuvveti

$$dP = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot \tau_z \cdot dz \quad (3.62)$$

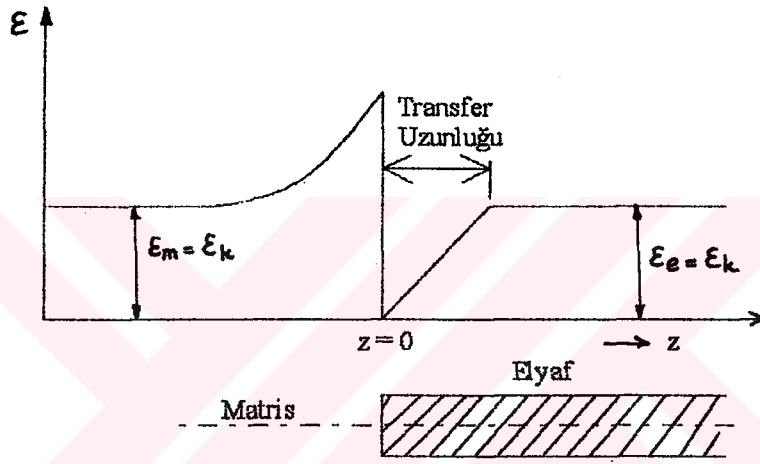
olarak yazılabilir. Burada r_e : elyaf çapı , τ_z : uçtan z uzaklıkta arayüze etkiyen kayma gerilmesidir.

Arayüzeylerdeki kayma gerilmesinin değeri sabit ise (τ_0) yukarıdaki denklemin integre edilmesi ile :

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot \tau_0 \cdot z \quad \text{bulunur.} \quad (3.63)$$



Şekil 3.38 : Süreksiz elyaf takviyede homojen olmayan şekil değişimleri



Şekil 3.39 : Süreksiz elyafda birim uzamaların dağılımı

Böylece arayüzeyde ayrılma olmadan uçtan z uzaklıkta life etkileyen gerilme değeri olarak

$$\sigma_e = \frac{P}{\pi \cdot r_e^2} = \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot z}{r_e} \quad (3.64)$$

elde edilir.

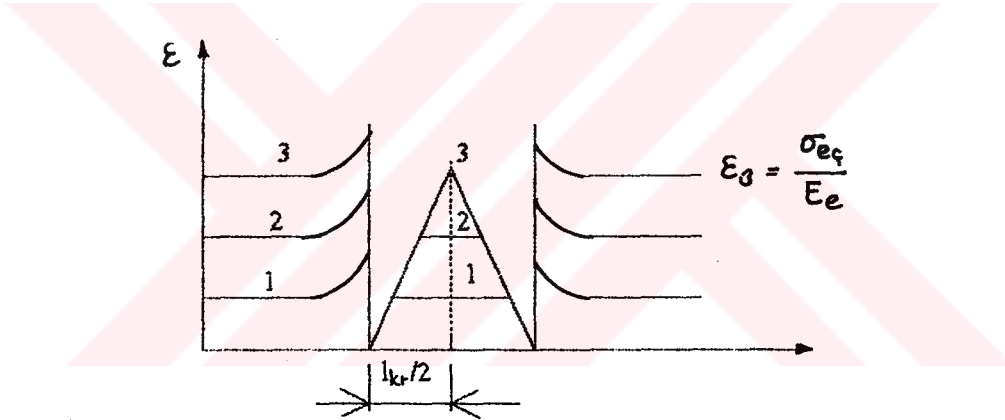
Öte yandan malzemedeki ortalama birim uzama ϵ_k ise , lifteki gerilme uçtan itibaren doğrusal olarak artarak

$$\sigma_{e\max} = E_e \cdot \epsilon_k \quad (3.65)$$

değerine kadar yükselir.

Matrisin lif ucuna çok yakın olan bölgede kısmen akması nedeniyle, buradaki birim uzama (ϵ_m) kompozit malzeme içindeki ortalama birim uzama değerini aşar. Lifte ise birim uzama (ϵ_e) uçtan itibaren doğrusal olarak artarak ortalama değere ulaşır. Kuvvetin matris tarafından life aktarılması için gerekli uzunluk "Transfer Uzunluğu" olarak adlandırılır.

Kompozit malzemeye etkileyen kuvvetler arttırıldıkça transfer uzunluğu ve gerilmenin en büyük değeri Şekil 3.40'da görüldüğü gibi artar. Zorlama arttıkça kuvvetlerin elyafa aktarılması için gerekli olan transfer bölgeleri büyüyerek lifin ortasında buluşabilir, ancak lif uzun ise zorlama lifin çekme dayanımına ulaşılan kadar arttırılabilir. Lif dayanımının tam olarak kullanılabilmesi için lif boyunun belirli bir kritik değerden (l_{kr}) büyük olması gereklidir, ancak bu şekilde elyaf-matris arayüzeyinin en az lifin taşıyabileceği kadar bir kuvveti transfer etmesi sağlanır.



Şekil 3.40 : Zorlamalar ile birlikte transfer uzunluğu ve gerilmelerin artması

Bu kritik değeri bulmak için Şekil 3.40'daki 3. zorlama seviyesindeki gerilmenin, elyafın çekme dayanımına eşit olması koşulunu yazalım :

$$\frac{2 \cdot (l_{kr} / 2) \cdot \tau_0}{r_e} = \sigma_{eç} \quad (3.66)$$

Buradan

$$l_{kr} / d_e = l_{kr} / 2 \cdot r_e = \sigma_{eç} / 2 \cdot \tau_0 \quad (3.67)$$

bulunur.

Bu denklemlerdeki τ_0 değeri olarak metal matrislerde matrisin akma gerimesi τ_{ma} alınabilir. Pekleşen bir metalde ise, lif uçlarında şekil değiştiren bölgelerin akma gerilmesi artacağından malzemenin dayanımı artabilir. Dolayısıyla τ_0 yerine en büyük kayma gerilmesini ($\sigma_m / 2$) almak daha doğru olacaktır.

Epoksi veya Polyester gibi gevrek plastik matris malzemelerinde ise, ayrılma elyaf-matris arayüzeyinde olur ve lif matris içinde bir boşluk bırakarak çekilir. Bağ önce uç kısımda ayrılır ve lif boyunca ilerler. τ_0 değeri çok değişik faktörlere bağlıdır. Bunlara örnek olarak, plastiğin kendini çekmesi sonucu ortaya çıkan gerilmeler, sürtünme katsayısı, plastiğin akma gerilmesi ve lifler arasındaki plastiğin kalınlığı gösterilebilir. Ancak bu değerlerin deneysel olarak saptanması çok güçtür. Sayısal değerler 5 MN/m^2 (cam elyaf) ile 100 MN/m^2 (karbon elyaf) arasında değişebilir. Bu değerlerin çok yüksek olması da istenmez, aksi halde malzemenin kırılması sırasında lifin enerji yutarak matristen çekilmesi yerine, kopması söz konusu olur ve kompozit malzemenin kırılma tokluğu düşer. Değişik malzemeler için l_{kr} / d_e ile τ_0 değerleri Tablo 3.17 de verilmektedir. Görüldüğü gibi kritik oranlar 20 ile 150 arasında değişmektedir, pratikte ise bu değerlerin en az 10 katı alınır. Whisker üretiminde bu kritik uzunluklara ulaşılamadığı durumlar olabilir. (2)

Tablo 3.17 : Bazı kompozit malzemelerde l_{kr} / d_e ile τ_0 değerleri

Elyaf	Tungsten tel	Cam	Karbon	Seramik - Whisker
Matris	Bakır	Epoksi	Epoksi	Metal
d_e (μm)	2000	7,5	7,0	2
$\sigma_{e\phi}$ (MPa)	3000	2000	2000	15000
τ_0 (MPa)	80	10 - 35	70	50
l_{kr} / d_e	19	100 - 30	70	150
l_{kr} (mm)	38	0,75 - 0,2	0,5	0,32

3.6.2.1. Süreksiz Elyafı Takviyeli Kompozit Malzemede Kopma Dayanımı

Süreksiz elyafı takviyeli kompozit malzemelerde elyafın taşıdığı ortalama kopma gerilmesi şu şekilde yazılabilir :

$$\bar{\sigma}_e = [(1 - l_{kr} / l) \cdot \sigma_e + [l_{kr} / l] \cdot (\sigma_e / 2)] \quad (3.68)$$

$$\bar{\sigma}_e = \sigma_e \cdot [1 - (l_{kr} / 2 \cdot l)] \quad (3.69)$$

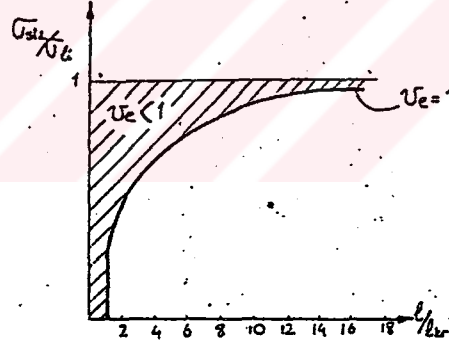
Görüldüğü gibi bu denklemde ortalama gerilmenin σ_e 'ye yakın olabilmesi için $l_{kr}/2.l \ll 1$ olmalı, yani mümkün olduğu kadar uzun elyaf kullanılmalıdır. Kompozit malzemenin kopma dayanımı ise sürekli elyaf için çıkarılan denklemde σ_e yerine $\bar{\sigma}_e$ koyarak;

$$\sigma_k = V_e \cdot \bar{\sigma}_e \cdot (1 - l_{kr}/2.l) + (1 - V_e) \cdot \sigma_{m_1} \quad (3.70)$$

şeklinde elde edilir. Sürekli ve süreksiz elyaf için bulunan dayanım değerlerinin oranı V_e ve $l_{kr}/2.l$ nin fonksiyonudur.

$$\left[\frac{(\sigma_k)_{süz}}{(\sigma_k)_H} \right] = f(l_{kr}/2.l, V_e) \quad (3.71)$$

Bu oranın l/l_{kr} ile değişimi Şekil 3.41 de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi oran lif boyu arttıkça artmakta, elyaf hacim oranı arttıkça azalmaktadır. $l/l_{kr} > 4$ için oran 1'e çok yakın olur. $V_e < 1$ için iki değer birbirine daha da yaklaşır. (2)



Şekil 3.41: Sürekli ve süreksiz elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dayanımları oranının l/l_{kr} ile değişimi

BÖLÜM 4

KIRILMA VE TEORİSİ

4.1. GİRİŞ

Metalsel malzemelerin kullanılmayacak hale gelmeleri, çatlak oluşumu bu çatlak yayılması ve sonuçta kırılma nedeniyledir. Çatlak oluşumu, yayılması ve kırılma birbirini tamamlayan kavramlardır. 2. Dünya savaşına kadar geleneksel tasarım yöntemlerinin amacı metalsel malzemeye etkiyen statik yükü ya akma mukavemetinin altında tutarak sehimden korumak yada max. çekme mukavemetinin altında tutarak burkulma ve boyun teşekkülünden korumaktı. Bu yöntemlerde malzemenin kırılma direnci akma mukavemetinden büyük, çekme mukavemetinden küçüktü. Halbuki 2. Dünya savaşı yıllarında bu yöntemlerle yapılmış pek çok gemi, köprü, basınçlı kaplar büyük maddi kayıplar doğuran hasarlar meydana getirmişlerdir. Bu hasarların sebebi ne olabilirdi ? Yapılan araştırmalarda hasara neden olan gemilerin çok düşük değerde olduğu görülmüştür. Hasara kaynak hataları, mevcut çatlaklar, tasarım nedeniyle çentikler ve bunlara artık gerilmelerin ilavesinin sebep olduğu anlaşılmıştır. Hasarların düşük gerilmelerde meydana gelmesi araştırmaları çatlakların hangi şartlarda oluştuğu, çatlak uzunluğu ile tatbik olan gerilme arasında ne gibi analitik ifadelerin bulunduğu gibi soruların cevabını aramaya yöneltmiştir. Böylece "Kırılma Mekaniği doğmuş oldu. (4)

4.2. KIRILMANIN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Malzemelerin, çeşitli gerilmeler altında iki veya daha fazla parçaya ayrılmasına KIRILMA denir. Kırılmanın karakteri malzemeden malzemeye değişir ve genellikle tatbik edilen gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. kırılma başlıca iki aşamadan oluşur. Birinci aşama "Çatlak oluşumu", ikinci aşama ise "Çatlakların ilerlemesi"dir. Yani kırılma, karakteri ne olursa olsun Matlak oluşumu + Çatlakların ilerlemesi ile oluşur. (14)

Kırılma sorununa yapılan yaklaşımların kökenini, çatlak ucu ve çevresindeki gerilme alanlarının analizi konu alan Kırılma Mekaniğini de içeren, kararlı ve kararsız çatlak ilerlemelerinin koşullarını inceleyen daha geniş bir bilim dalıdır.

Kırılma türleri üç ayrı bakış açısı ile farklı şekillerde gruplanmaktadır. Birinci şekil kırılma sırasında malzeme dokusunun gözlemlenen görünümü ile ilgili olup örnek olarak "Ayrılma Kırılması" ve "Kayma Kırılması" verilebilir. İkinci şekil malzeme kırılırken oluşan kalıcı biçim değişikliklerinin oranı ile ilgili olup "taneler arası kırılma" ve "taneleri keserek kırılma" bu türe örnek olarak gösterilebilir. Üçüncü şekil ise doğrudan kırılma mekaniği ele alınarak yapılan gruplamadır ki, örnek olarak süneç kırılma, gevrek kırılma, sürünme kırılması ve yorulma kırılması verilebilir.

Endüstriyel uygulamalarda oluşan kırılmanın nedenlerinin araştırılmasında, olayı etkileyen birincil üç önemli etken, Kırılma Tokluğu yada Gerilim Şiddet Faktörü, Çatlak Uzunluğu ve uygulanan Gerilme veya Akma Dayanımdır. Bunların yanında ikincil etkenler ise sıcaklık, biçim değiştirme yada yükleme hızı ve gerilme birikimleridir.

Doğrudan Kırılma Mekanikliği ele alınarak yapılan kırılma tipleri

4.2.1. GEVREK KIRILMA

Çok az veya hiçbir plastik deformasyon bırakmadan malzemenin kırılmasına Gevrek Kırılma denir. Genellikle camlar, seramikler ve bazı metaller gevrek olarak kırılırlar. Birçok hallerde gevrek olarak kırılan malzemelerde, yalnız çatlak yüzeyi civarında az miktarda plastik deformasyon meydana gelir. (14)

4.2.2. SÜNEK KIRILMA

Kırılma öncesi malzemede plastik deformasyon meydana gelirse bu tip kırılmaya Sünek Kırılma denir. Sünek kırılmanın meydana gelebilmesi için cisimde belirli bir miktarda plastik deformasyonun meydana gelmesi gerekir, çünkü sünek kırılmayı oluşturmak için plastik deformasyon gereklidir. Bu sebeple de sünek kırılmayı meydana getirmek için uygulanan gerilmenin, malzemede plastik deformasyonu sağlayacak seviyede olması gerekir.(14)

4.2.3. SÜRÜNME KIRILMASI

Yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılmasına, Sürünme Kırılması denir. Makroskopik açıdan bakıldığında,

sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur, bu sebeble Sünek kırılmaya benzer. Mikroskopik açıdan ise, Sürünme Kırılması, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sünek kırılmadan farklıdır. (14)

4.2.4. YORULMA KIRILMASI

Malzemelerin elastik limit veya çekme dayanımı altındaki alternatif yükler altında kaldıklarında zamanla kırılma gösterirler, bu olaya Yorulma Kırılması adı verilir. Yorulma kırılmaları genel olarak plastik deformasyon meydana gelmeden de olabilir. Bazen yorulma kırılmaları sünek kırılmalara benzerse de yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklı olup, çatlak her bir yükleme periyodunda ancak belirli bir miktar ilerler. (14)

4.3. KIRILMA TİPLERİ

Mikroskopik açıdan incelendiğinde; malzemeyi meydana getiren bir tanenin kırılması, kristallografik düzlemler üzerinde veya kristallografik düzlemleri kesen atomlar arası bağın kopması, yani atomlar arası kohezyon kuvvetinin sıfıra inmesi sonunda oluşur. Malzemelerin kırılması mikroskopik açıdan farklı şekilde, aşağıda açıklandığı gibi sınıflandırılabilir. (14)

Buna göre, kırılma sırasında iç yapının alacağı görünüme göre kırılma tipleri

4.3.1. KLİVAJ KIRILMASI

Kırılma, klivaj düzlemleri diye bilinen belirli kristallografik düzlemler boyunca meydana gelirse, buna *Klivaj Kırılması* denir. Klivaj düzlemleri en düşük yüzey enerjisine sahip düzlemlerdir. Bu tip kırılma, klivaj düzlemine dik normal gerilmelerin kritik bir değeri aşması ile klivaj düzlemine dik atom bağlarının koparılması sonucunda olur. Tek eksenli gerilme halinde çatlak çekme yönüne dik olarak ilerleme eğilimi gösterir, bu sebeble de klivaj kırılmaları düz bir görünüm gösterir. Çok taneli malzemelerde, klivaj düzlemlerinin oryantasyonu her tanede farklı olup, bir taneden diğer taneye geçildikçe çekme doğrultusuna dik olmayacaktır. Dolayısıyla bir tane boyutundan daha büyük mesafelerdeki klivaj kırılması düz görünüm göstermeyecektir, tane değiştikçe yön değiştirecektir.

Malzemelerin gevrek kırılması, genellikle klivaj kırılması şeklinde olur. Klivaj kırılması granüler veya kriitalin bir görünüşüne sahiptir, çünkü bu tip kırılma her bir tane içerisindeki bir düzlemde meydana gelir. Klivaj kırılmasında genellikle tanelerin şekli bozulmaz ve yüzeyin görünüşü düzdür, kırılma yüzeyi ışığı çok iyi yansıtır ve parlak olarak görünür. (14)

4.3.2. KAYMA KIRILMASI

Kayma kırılması, kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması ile atom düzlemlerinin kayması sırasında atom bağlarının kopması suretiyle meydana gelir. Atom bağlarının kayma ile kopması sonucunda meydana gelen bu kırılma, bölgesel homojen olmayan plastik deformasyon işleminden ibarettir. Metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Bu düzlemlere kayma düzlemleri adı verilir. Metalik malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir. Çatlağın takip ettiği yol yükleme şekline, iç gerilmeler meydana getiren faktörlere ve matris yapısına bağlıdır. Bu tip kopma, çatlak ilerleyişi makroskopik olarak çekme yönüne dik olduğundan normal kopma veya kırık yüzeyi görünüşü lifli olduğundan, lifli kırılma adını alır. Mikroskopik olarak, çatlak çekme eksenine ile 45° lik açı yapan düzlemlerde ilerleyerek kayma kırılması meydana getirir. (14)

Kırılma, tane sınırlarından veya taneleri keserek oluş şekline göre de aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

4.3.3. TANELER ARASI KIRILMA

Çok taneli malzemelerde tane sınırlarındaki kohezyonun çeşitli sebeplerle az olması halinde, malzemenin kırılması tane sınırları yüzeylerinden tanelerin birbirinden ayrılması şeklinde meydana gelir. Bu tip kırılmaya *taneler arası kırılma* veya intergranüler kırılma adı verilir. (14)

4.3.4. TANELERİ KESEREK KIRILMA

Taneleri keserek meydana gelen kırılma şekline "*transgranüler kırılma*" adı verilir. Transgranüler kırılma, kayma gerilmelerinin etkisiyle tanelerin kayma kırılması şeklinde kopmasıyla meydana gelmişse buna "*transgranüler kayma kırılması*" adı verilir. Eğer

transgranüler kırılma, tanelerin klivaj düzlemleri boyunca kırılması şeklinde ise buna da "*tansgranüler klivaj kırılması*" denir. (14)

Malzemelerin yükleme şekli, yani gerilme ve şekil değişimi ile ortam şartları meydana gelerek kırılmanın ne tip olacağını tayin ederler. Çok çeşitli dış etkilere rağmen, ancak çok az malzeme tek bir kırılma tipi gösterirler. Aynı bir malzeme üzerinde birden fazla kırılma tipini görmek mümkündür. Örneğin bazı hallerde bir malzemei klivaj kırılması, kayma kırılması ve intergranüler kırılma bir arada görülebilir. (14)

4.4. KIRILMA MEKANİĞİ

Bölüm 4.2'de de yapıldığı gibi Kırılma, çeşitli türde zorlama sonucu malzemelerin birden fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda oluşan kırılmanın nedenlerinin araştırılmasında, olayı etkileyen birincil üç önemli etken Kırılma Tokluğu yada Gerilme Şiddeti Faktörü, Çatlak Uzunluğu ve Uygulanan Gerilme veya Akma Dayanımıdır. Bunların yanında ikincil etkenler ise sıcaklık, biçim değiştirme yada yükleme hızı ve gerilme birikimleridir.

Adı geçen etkenlere göre Kırılma Mekanizmasının kökenini, makina elemanı ömrünün başlıca etkeni olan dokusal homojensizliği kabul ederek, malzemenin içerisinde doğal olarak bulunan mikro çatlak ve benzeri kusurları açıklamak için sayısal bir yöntem geliştirme oluşturmaktadır.

Kırılma türü ne olursa olsun, tüm kırılma olayları çatlak oluşumu, oluşumu izleyen ikinci aşamada ise çatlak ilerlemesi şeklinde simgelenebilir. (21, 22)

Kırılma mekanizmasının en önemli yönü, gerilme altında malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu artırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerini incelemesidir. Makina ve konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilir. Malzemelerin üretimi sırasında da çeşitli nedenlerle (örneğin inklüzyonlar sebebiyle) kılcal çatlaklar bulunabilir. Bu çatlaklar civarında gerilme konsantrasyonu oluşur ve kırılmaya sebep olur. Gerilme konsantrasyonları sebebiyle meydana gelen çatlaklar, kullanılan malzemenin akma gerilmesinden daha düşük gerilmelerde de olabilir. Yapısında kılcal çatlaklar

veya plastik deformasyona uğramayan iri inklizyonları bulunduran malzemeler genellikle gevrek kırılma gösterirler.

Metalik malzemelerin öncelikle gevrek kırılma karakterini inceleyen teoriler ve deneyler geliştirilmiştir. Bu deneyler kantitatif deneyler olup malzemelerin karşılaştırmasında yararlıdır. Fakat bir konstrüksiyon mühendisi veya kırılma ile yakından ilgilenen araştırmacılar için bu deneyler yeterli değildir. Kırılma mekaniği kantitatif olarak daha faydalıdır. Kırılma mekaniği analizi ile hem malzemenin kırılma nedeni anlaşılabilir, hemde imalat veya kullanılma sırasında herhangi bir çatlakın oluşması önenebilir.

Kırılma mekaniğinde, kırılma ile ilgili parametre kırılma tokluğu (fracture toughness) ve gerilme şiddet faktörüdür (K). Gerilme şiddet faktörü (K), çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlakın yeri ve şekline bağlıdır. (14)

4.4.1. KIRILMA MEKANİĞİ YAKLAŞIMLARI

Kırılma Mekaniği yaklaşımları, çatlak ucundaki gerilim şiddet faktörü, çatlak uzunluğu ve uygulanan gerilmeye dayanarak malzeme güvenliği açısından somut bir değerlendirme sağlamaktadır.

Anılan etkenlere göre kırılma mekaniği yaklaşımları kırılmanın karakteri bakımından iki bölümde incelenecektir. (22)

a) Lineer-Elastik Kırılma Mekaniği

b) Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği

4.4.1.1. LİNEER-ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ YAKLAŞIMI

Lineer-Elastik Kırılma Mekaniğinde malzemenin zorlanması yalnızca lineer-elastik sınırlar içerisinde gerçekleştiği ve plastik şekil değişimine karşı tamamen ilgisiz olduğu kabul edilir. (6)



Lineer-Elastik Kırılma Mekanîği, kırılma analizine yaklaşım sağlayan üç varsayım içermektedir.

I. Malzeme dokusunda üretim koşullarından dolayı doğal olarak çatlak ve benzeri kusurlar bulunur.

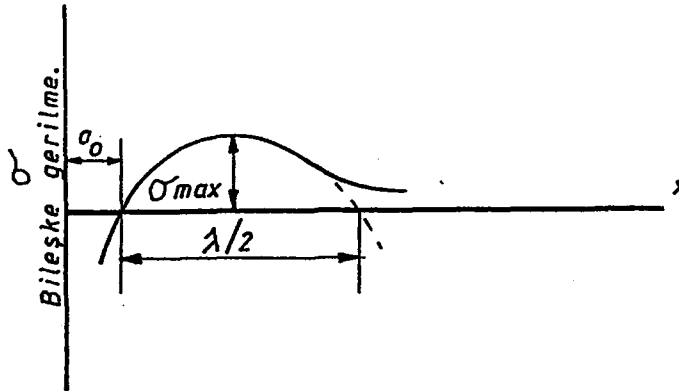
II. Çatlak tümüyle elastik gerilme altında bulunan düz ve bağımsız bir iç yüzeydedir. Ayrıca elastik gerilme bölgesindeki bu çatlak da düz ve eliptiktir.

III. Çatlaklı malzemede, çatlak yayılırken bırakılan depolanmış enerji (G), numune ve parça boyutundan bağımsız temel bir malzeme özelliğidir.

İlk yapılan kabulün geçerliliğini ispatlayacak pek fazla delil yoktur. Araştırmalar, çatlakların daha çok deformasyonla oluştuğunu göstermiştir. İkinci kabul, çatlak ucu çevresindeki gerilmelerin matematiksel tanımına aittir. Üçüncü kabul, ispatı yapılmış temel bir malzeme özelliğidir. (5, 22)

4.4.1.1.1. LİNEER-ELASTİK MALZEMELERDE TEORİK MUKAVEMET

Lineer-elastik malzemelerin teorik mukavemet değeri ile gerçek deneysel mukavemet değerleri arasında çok fark olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.1 : Bileşke gerilmenin mesafeyle değişimi

Metallerin dayanımını atomlar arası bağ kuvvetleri belirler. Aşağıdaki şeklimizde atomlar arası mesafenin bağ kuvvetine etkisi görülmektedir.

Malzeme çekme yüküne tabi tutulduğunda atomlar arası (x) mesafesi arttıkça, itici kuvvetler çekici kuvvetlere nazaran hızla düşer, aradaki fark çekme kuvveti ile karşılanır. (x) mesafesi arttıkça itici kuvvetler ihmal edilecek kadar azalır ve böylece şekildeki max. noktaya ulaşılır. Bu değer malzemenin teorik mukavemetidir. Bu eğriyi sinüs eğrisi haline çevirirsek;

$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \quad (4.1)$$

Küçük deformasyonlar için $\sin(x) = x$ alınabildiğinden;

$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

Eğer malzeme Lineer-Elastik malzeme ise (gevrek malzeme, plastik deformasyon göstermiyor.)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot x}{a_0} \quad (4.3)$$

Bu son iki denklemden;

$$\sigma_{\max} = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{E}{a_0} \quad (4.4)$$

elde edilir. Malzeme gevrek olduğu için kuvvetin yapacağı iş çatlak oluşturmak, yani iki yüzey oluşturmaktır. Bu yüzeylerin birim alanının sahip olduğu enerjiye yüzey enerjisi (γ) denir. O halde malzemeyi kırmak için yapılan iş şekildeki alana eşittir;

$$U_0 = \int_0^{\lambda/2} \sigma_{\max} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \cdot dx = \frac{\lambda \cdot \sigma_{\max}}{\pi} \quad (4.5)$$

Bu enerji birim yüzey için hesaplanmış olduğundan, birim yüzeyin yüzey enerjisine (γ) eşittir.

$$\frac{\lambda \cdot \sigma_{\max.}}{\pi} = 2 \cdot \gamma \quad (4.6)$$

veya;

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot \gamma}{\sigma_{\max.}} \quad (4.7)$$

Bu (4.7) ve (4.4) nolu denklemlerden;

$$\sigma_{\max.} = \left[\frac{E \cdot \gamma}{a_0} \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

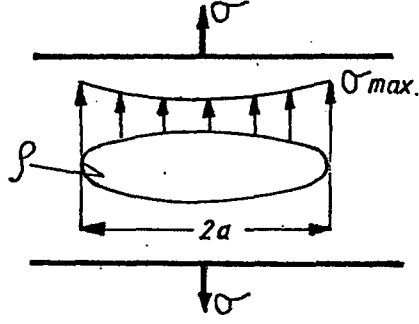
elde edilir. Bağıntıdaki parametrelerin değerlerini yerine koyarsak (çelik için) ;

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$$

$$a_0 = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\gamma = 10^{-3} \text{ kp.cm/cm}^2$$

$\sigma_{\max.} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$ bulunur. Veya elastik modül cinsinden $\sigma_{\max} \cong \frac{E}{7}$ elde edilir. Daha hassas yapılan hesaplamalar neticesinde $\sigma_{\max.}$, $E/4 + E/15$ arasında değişir. Ortalama olarak $E/10$ alınabilir. Halbuki deneysel neticeler bu değerden 10 -1000 misli daha düşüktür. Sadece içerisinde kusur bulundurmayan Wiskers kristali bu neticeye yaklaşır. Lineer-Elastik (gevrek) malzemelerde dislokasyonlar hareketsiz olduğundan (plastik deformasyon yok) mukavemetin düşmesine, malzeme içindeki çatlakların, yarıkların sebep olduğu neticesine varılabilir. Çünkü çatlak civarındaki gerilmeler, bilindiği gibi, diğer bölgelere kıyasla çatlakın şekline göre daha fazla olmaktadır.



Şekil 4.2 : Eliptik çatlak

Yukarıdaki şeklimizde, sonsuz geniş bir levhadaki $2a$ boyundaki eliptik çatlakda, çatlak uçunun eğrilik yarıçapı ρ olsun. Çatlak ucundaki maksimum gerilme;

$$\sigma_{\max} = \sigma \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \right] \cong 2 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

denklemdede görüleceği gibi σ_{\max} ρ küçüldükçe σ 'ya göre daha da büyüyecektir. Yani σ henüz küçük değerlerde iken σ_{\max} teorik değere ulaşabilecektir. σ gerilmesine kırılma gerilmesi σ_k diyecek olursak (çünkü malzeme kırıldığında elde ettiğimiz makro gerilme bu gerilmedir) (4.8) ve (4.9) nolu denklemlerimizden;

$$\sigma_k \cong \left(\frac{E \cdot \gamma \cdot \rho}{a \cdot 4 \cdot a_0} \right)^{1/2} \quad (4.10)$$

elde edilir. En keskin çatlak ucu eğrilik yarı çapı olarak $\gamma \cong a_0$ yazabiliriz. O halde;

$$\sigma_k \cong \left(\frac{E \cdot \gamma}{4 \cdot a} \right)^{1/2} \quad (4.11)$$

olur. Denklemdede;

$$E : 2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$$

$$\gamma : 10^3 \text{ kp.cm/cm}^2$$

$$a_0 : 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

ve çatlak uzunluğunu;

$$a : 10^4, \quad a_0 : 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

olarak kabul edersek;

$$\sigma_k = \left(1,45 \cdot 10^3 \text{ kp/cm}^2 \right) = \frac{E}{1450} \quad (4.12)$$

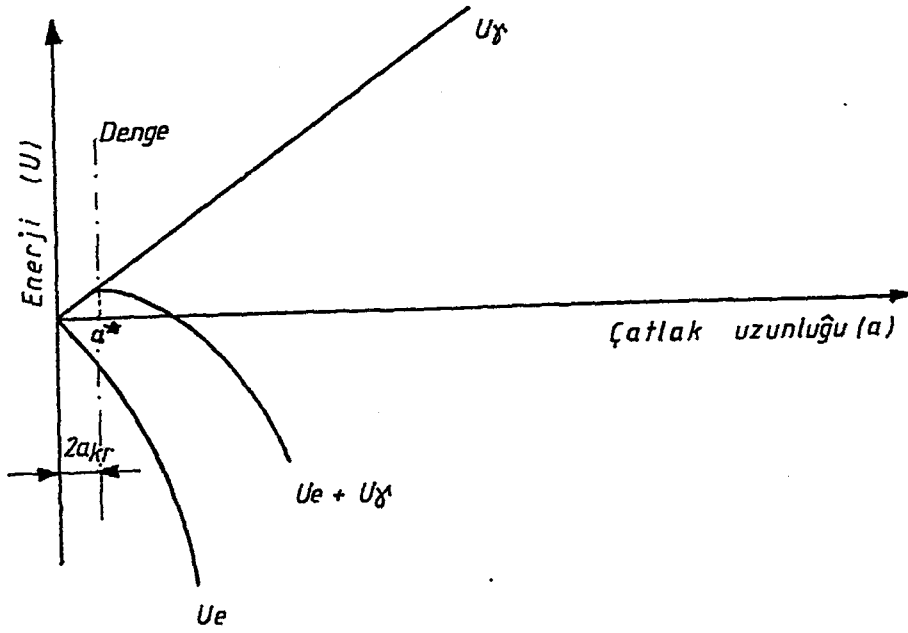
bulunur.

Görüldüğü gibi gevrek malzemelerde çok küçük bir çatlak malzemenin mukavemetini çok fazla düşürmektedir. (4, 5, 6)

4.4.1.1.2. GRIFFITH TEORİSİ

Griffith'e göre, lineer-elastik bir malzeme yoğun ince çatlaklar ihtiva etmekte ve çatlak uçlarında yeteri büyüklükte gerilim yığılmaları içermektedir. Bu durumda, çatlak ucundaki gerilmeler (σ_{max}) teorik mukavemete çabucak erişirler ve lokal olarak çatlak yayılmaları başlar. Yayılan çatlağın yüzey enerjisinde artma meydana gelir. Artan bu enerjinin kaynağı, çatlak yayılırken bırakılan elastik deformasyon enerjisidir. Griffith bir çatlağın yayılmaya başladığı anı : "Elastik deformasyon enerjisindeki azalma, yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gereken enerjiye eşit olduğu anda yayılmaya başlayacaktır." şeklinde ifade etmiştir. (5)

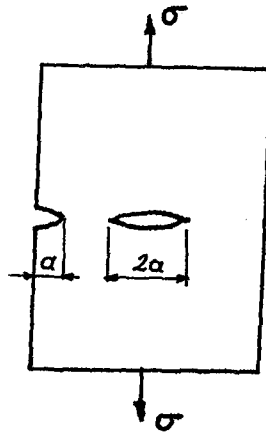
Çatlak oluşumu ve yayılması esnasında enerji dönüşümleri olmaktadır. Griffith'in ifadesinden de görüldüğü gibi yük tatbiki malzemede bir iş yapar. Yük tatbiki ile malzemede depolanan enerji U_E olsun Çatlağın büyüyebilmesi için bırakılan elastik deformasyon enerjisinin bir sonucu olarak enerji girişinin olması şarttır. Bu enerji çatlağın baş tarafındaki atom bağı kırarak, daha sonra ve ondan sonra devam edecek atom bağlarını kırarak için gerekli enerji demektir. Bu enerjiye yüzey enerjisi adı verilir ve U_γ olarak gösterilir. Herbir çatlak uzunluğuna karşılık gelen ve birbirine dönüşen bu iki enerji toplanabilir ($U_\gamma + U_E$).



Şekil 4.3 : Çatlak uzunluğu ile enerji değişimi

Şekil 4.3: 'de görüldüğü gibi yüzey enerjisi U_γ çatlak bbyu ile lineer olarak artar ve sistemin giriş enerjisi olduğundan pozitif (+) değerdedir. Elastik deformasyon enerjisi ise yeni çatlak yüzeyi oluşturmada enerji salıvermesinden dolayı negatif (-) değerdedir. Sistemin toplam enerjisinde çatlak uzunluğu a , $0 < a < a^*$ arasında olduğunda, sisteme enerji verilir ve çatlak kararlı bir şekilde büyür. $a = a^*$ ise, çatlağın büyümesi sona erer. $a > a^*$ ise, çatlak kararsız bir şekilde büyür ve sistemin enerjisi bırakılır.

Bu açıklamaların analitik ifadelerini bulmak için, ince bir plakada kenar çatlak uzunluğu (a) , içteki çatlak uzunluğu $(2a)$ olan bir çatlak düşünelim.



Şekil 4.4 : Griffith'in çatlak modeli

Burada birim kalınlık başına elastik deformasyon enerjisi;

$$U_E = - \left(\frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2}{E} \right) \quad (4.13)$$

olur. Mevcut çatlaklardan dolayı yüzey enerjisi;

$$U_\gamma = 4 \cdot a \cdot \gamma_s \quad (4.14)$$

olur. Toplam enerji;

$$U_{top} = U_E + U_\gamma \quad (4.15)$$

dır. Griffith'in ifadesine göre, çatlak boyu $a = a^*$ olması halinde, U_γ daki artış, U_E deki azalma ile dengelenecektir.

İnce plakalar düzlem-gerilme şartlarını, kalın plakalar düzlem-deformasyon şartlarını belirtirler.

Enerji bırakma hızları :

Enerji ifadelerinin çatlak uzunluğu c 'ye göre birinci türevi, enerji bırakma hızını verir.

Yani;

$$\frac{dU_E}{da} = \frac{d}{da} \left(- \frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2}{E} \right) \quad (4.16)$$

$$\frac{dU_E}{da} = - \frac{(2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sigma^2)}{E} = G \quad (4.17)$$

ile ifade edelim. Bu değer çatlak büyütmeye çalışır.

$$\frac{dU_{\gamma}}{da} = \frac{d}{da}(4 \cdot a \cdot \gamma_s) \quad (4.18)$$

$$\frac{dU_{\gamma}}{da} = 4 \cdot \gamma_s = R \quad (4.19)$$

ile ifade edelim. Bu değerde çatlakın büyümesine engel olur. $a = a^*$ olması halinde;

$$G = R \quad (4.20)$$

olur. Bu bağıntı çatlakın kararlı olarak büyümesinin son bulduğu andır. Bu noktadan sonra $a > a^*$ çatlak kararsız bir şekilde yayılacaktır.

Denge durumu kritik bir an olduğundan, kritik çatlak boyunu ($2a_k$) ve kritik gerilme (σ_{kr}) yi bulabiliriz. Denge halinde ;

$$\frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot 2a}{E} = 4 \cdot \gamma_s \quad (4.21)$$

$$2a_k = \frac{4 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot \sigma^2} \quad (4.22)$$

Sonuç olarak Griffith gevrek bir malzemede bir çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıyı geliştirmiştir.

$$\sigma_{kr} = \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a} \right)^{1/2} \quad (\text{Griffith denklemi}) \quad (4.23)$$

Burada ;

σ_{kr} : Kırılma Gerilmesi

γ_s : Yüzey Enerjisi

E : Elastiklik Modülü

a : Çatlak boyunun yarısı

Griffith denkleminde göre, kırılmaya sebep olan gerilme miktarı (σ_{kr}), mevcut çatlak boyu (a) ile ters orantılıdır.

Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre (G) kullanılır. Bu durumda denklem ;

$$\sigma_{kr} = \left[\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a} \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

şeklini alır.

Burada ; $G_c = 2 \cdot \gamma_s$ olup, kırılma için gerekli toplam işi gösterir. Griffith analizinde, deformasyon enerjisinin çatlak ilerlemesi sırasında arayüzey enerjisine dönüşümünü esas almıştır. Dolayısıyla G , aynı zamanda çatlak birim yüzeyinde çatlak ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarıdır. Kırılma, G 'nin kritik bir değeri olan G_c 'de meydana gelir.

(4.22) ve (4.23) denklemlerinde, her iki ifadede ki (E) elastisite modülü değerleri ;

$$E = (E) \quad \text{Düzlem - gerilme şartları için,}$$

$$E = \left(\frac{E}{1 - \nu^2} \right) \quad \text{Düzlem - deformasyon şartları için,}$$

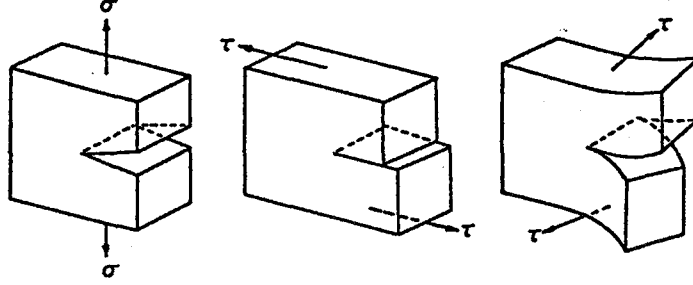
ν : Poisson oranıdır.

Denklem (4.23) 'ü aşağıdaki şekilde yazabiliriz .

$$\sigma_k \cdot (\pi \cdot a_k)^{1/2} = (2 \cdot E \cdot \gamma_s)^{1/2} \quad (4.25)$$

Denklem (4.25)' in sağ tarafı, malzeme boyutlarına bağlı olmayan bir malzeme karakteristiğidir. Sol tarafı ise, çatlak geometrisi ve yükleme parametreleriyle ilgilidir. (4, 5)

4.4.1.1.3 GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜ (Stress Intensity Factor) :



Şekil 4.5 : Kırılma tipleri

Kırılma tokluğu ölçülürken, kırılmada üç model düşünülür. (Şekil 4.5)

I. Tip kırılma şeklinde gerilmenin normal bileşeni çatlak yüzüne dik olarak y eksenini doğrultusunda etki etmektedir.

II. Tip kırılma şeklinde gerilmenin kayma bileşeni çatlaka x eksenini doğrultusunda etki etmektedir.

III. Tip kırılma şeklinde gerilmenin kayma bileşeni çatlaka z eksenini doğrultusunda, çatlakın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir.

En sık rastlanan tip I. tip çatlak açılma türüdür. II. ve III. tip çatlak açılma MOD' larında çatlak yüzeylerinin birbiri üzerinden kayma durumu vardır.

Lineer-elastik sonsuz genişlikte ince bir sac plakada, çatlak ucu yarıçapı $\rho = 0$ olan $2a$ uzunluğundaki bir çatlaktan r uzaklıktaki noktada gerilim dağılımı aşağıda gösterildiği gibidir. (5)

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \cdot \left[\left(\cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \sigma_y &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \cdot \left[\left(\cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \tau_{xy} &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \cdot \left[\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right]\end{aligned}\quad (4.26)$$

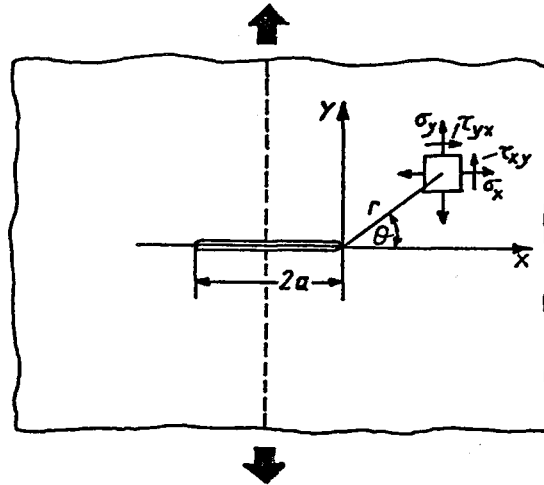
Şekil e bakarsak $\theta = 0$ olması halinde,

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \quad (4.27)$$

ve

$$\tau_{xy} = 0 \quad (4.28)$$

olur.



Şekil 4.6 : Çatlak ucu gerilmeleri

Irwin ve arkadaşları gevrek kırılmayı ayrı bir görüşle analiz etmişlerdir. Onlar analizlerinde çatlak ucu civarındaki gerilme durumunu esas almışlardır. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasından, bir gerilme şiddet faktörü (K) parametresi geliştirilmiştir. Gerilme şiddet faktörü (K), uygulanan gerilmenin, çatlak boyut ve şeklinin ve bir geometrik faktörün fonksiyonudur. (14)

Griffith denklemi aşağıdaki şekilde yazıldığında ;

$$\sigma_{kr} \cdot [\pi \cdot a]^{1/2} = [E \cdot G_c]^{1/2} \quad (4.29)$$

elde edilir.

Yukarıdaki eşitlikten ; $\sigma_{kr} \cdot [\pi \cdot a]^{1/2}$ nin değerinin $[E \cdot G_c]^{1/2}$ ye eriştiğinde çatlak ilerleyeceği anlaşılmaktadır. $\sigma_{kr} \cdot [\pi \cdot a]^{1/2}$ teriminin çatlak ilerlemesi için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek, bu terim *gerilme şiddet faktörü* olarak isimlendirilir.

Yani ;

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.30)$$

olarak gösterilir. Gerilme şiddet faktörü K'nın kritik bir K_c değerinde kırılma olur. Bu durumda ;

$$K_c = \sqrt{E \cdot G_c} \quad \text{dir.} \quad (4.31)$$

Kritik gerilme şiddet faktörü (K_c) genellikle *Kırılma Tokluğu* olarak isimlendirilir.

Gerilme şiddet faktörü (K), yalnız gerilme durumuna ve çatlak geometrisiyle ilgili bir parametre olup malzemenin özelliklerine bağlı değildir. Halbuki kırılma tokluğu (K_c) malzemenin özelliği ile ilgili bir parametredir.

Kırılma tokluğu (K_c) özelliğini tesbit etmek için gerilme şiddet faktörü (K) ölçülür. $K = K_c$ olduğunda çatlak ilerler ve kırılma olur. (14)

Denklemler (4.26) daki çatlak ucunda gerilim dağılımını K ifadesi ile yazılırsa ;

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K}{(2.\pi.r)^{1/2}} \cdot \left[\left(\cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \sigma_y &= \frac{K}{(2.\pi.r)^{1/2}} \cdot \left[\left(\cos \frac{\theta}{2} \right) \cdot \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{(2.\pi.r)^{1/2}} \cdot \left[\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right]\end{aligned}\quad (4.32)$$

şeklinde ifade edilir. (5)

Lineer-elastik malzemelerin sonsuz genişlikte ve ince, çatlak ucu eğrilik yarıçapı $\rho = 0$ kabulü ile geliştirilen yukarıdaki gerilme değerlerinin , belirli boyuttaki malzemelere uygulanabilmesi için bir düzeltme faktörü belirlenmelidir. Genişliği (W) olan bir levhada düzeltme faktörü ile birlikte K faktörü ;

$$K = \sigma \cdot \left[\pi \cdot a \cdot f \left(\frac{a}{W} \right) \right]^{1/2} \quad (4.33)$$

olarak gösterilir. Burada ;

$f \left(\frac{a}{W} \right)$: Sonsuz genişlikteki bir levhaya nazaran (W) genişliğindeki levha için düzeltme faktörüdür.

$f \left(\frac{a}{W} \right) = \alpha$ olarak gösterilirse K gerilim şiddeti faktörü ;

$$K = \alpha \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.34)$$

olur. (22) Çatlak ucundaki deformasyon değerlerini içeren formüller literatürde mevcuttur.

4.4.1.1.4. *Düzlem Deformasyon (Plane-strain) - Düzlem Gerilme (Plane-stress)*

Kırılma mekaniğinde düzlem deformasyon (Plane-Strain) ve düzlem gerilme (Plane-Stress) kavramları önem taşır. Bu kavramlarda, bir malzemede gerilmeler ve şekil değişimlerinin durumu ele alındığında, temel şekil değişimlerinden biri veya temel gerilmelerden birinin sıfır olduğu durum ele alınmıştır.

Düzlem deformasyon ve düzlem gerilme durumları aşağıda belirtilmiştir.

Düzlem Deformasyon (Plane Strain)

$$\begin{array}{ll} \sigma_x \neq 0 & \epsilon_x \neq 0 \\ \sigma_y \neq 0 & \epsilon_y \neq 0 \\ \sigma_z \neq 0 & \epsilon_z = 0 \end{array}$$

Düzlem Gerilme (Plane Stress)

$$\begin{array}{ll} \sigma_x \neq 0 & \epsilon_x \neq 0 \\ \sigma_y \neq 0 & \epsilon_y \neq 0 \\ \sigma_z = 0 & \epsilon_z \neq 0 \end{array}$$

Düzlem şekil değişimi ve düzlem gerilme durumlarında uygulanan gerilme ve şekil değişimlerinin bir özelliği olarak, düzlem şekil değişimi malzemenin içine yani kütleline uygulanmaktadır, halbuki düzlem gerilme serbest yüzeylere dik gerilmelerin sıfır olması sebebiyle ancak malzemenin yüzeyine uygulanmaktadır.

Kalınlığı fazla olan malzemelerde düzlemsel deformasyona uğrayan bölgeler fazla olacaktır. Bu halde çatlak ucundaki gerilmelerin yüzeye gidildikçe azalacağı ve tam yüzeyde ise sıfır olacağı kabul edilmektedir. Dolayısıyla kalınlık yönündeki deformasyonun sıfır olduğu belirlenmiş ve bu durumda malzemede kırılma olayının "Gevrek kırılma şeklinde" oluşacağı gözlenmiştir. Tüm bu halleri içeren duruma "Düzlem deformasyon hali" adı verilmektedir.

Kalınlığı ince numunelerde ise çatlak civarındaki plastik bölge düzlem gerilme halinin ağır basması sebebiyle daha büyüyecek ve kırılma plastik deformasyon yüzünden engellenecektir. İnce levhaların düzlemsel yüklenmelerinde kalınlık istikametindeki gerilmelerin ihmal edilecek kadar küçük olduğuda kabul edilmektedir. Malzemedeki kırılma olayının ise "Plastik deformasyon sonucu" olacağı, gözlemlerle tesbit edilmiştir. Bu açıklamaları içeren durumda "Düzlem gerilme hali" adı verilir. (6)

4.4.1.2. ELASTO - PLASTİK KIRILMA MEKANİĞİ YAKLAŞIMI

Lineer- elastik kırılma mekaniği ifadelerinde, plastik deformasyonun meydana gelmediği kabul edilmiştir. Oysa X ışını difraksiyonu ile yapılan incelemelerde çatlak ucunda plastik deformasyonun meydana geldiği gösterilmiştir. Çatlak ucunda meydana gelen plastik bölge küçük ise, lineer-elastik kırılma ifadeleri geçerli olacaktır. Fakat plastik bölge büyük ise çatlak ucundaki gerilme değeri değişecektir. Çatlağın kararlı bir şekilde yayılmasının son bulduğu, kararsız bir şekilde yayılmaya başladığı denge durumu hesabında, bu bölgenin dikkate alınması zorunluluğu vardır.

Plastik bölgenin oluşumu, akma ile gerçekleşeceğinden en genel iki akma kriteri ;

- 1- Tresca' nın ileri sürdüğü, maksimum kayma değeri kritik bir değere eriştiği zaman akma başlar.
- 2- Von Mises' in ileri sürdüğü, hacim başına kayman deformasyon enerjisi kritik bir değere ulaştığı zaman akma başlayacaktır.

Tresca' nın fikri, pratiğe uygulanması çok daha kolay olmasına karşılık, Von Mises' in ileri sürdüğü kriter deneysel gözlemlerle daha iyi uyum halindedir.

Düzlem - gerilme ve düzlem - deformasyon şartlarının bir arada olması, gerçek malzemelerde karışık kırılma olarak adlandırılır. Bu durumu anlayabilmek için iki küçük dörtgen düşünelim. Bunlardan A elementi çatlağın önünde kenara yakın, diğeri çatlağın önünde orta kısma yakın olsun (Şekil 4.7). A ve B' yi içeren malzeme yüklendiğinde, A elemanı 45° lik kayma düzlemleri boyunca Tresca ve Von Mises kriterlerine göre akmaya çalışarak, büyük plastik bölge oluştururken, B elemanı üç eksenli gerilme altında kalarak kolay kolay büyük plastik bölge oluşturmayacaktır. Bunun için daha büyük gerilmelere ihtiyaç duyulacaktır. Sonuç olarak A' da

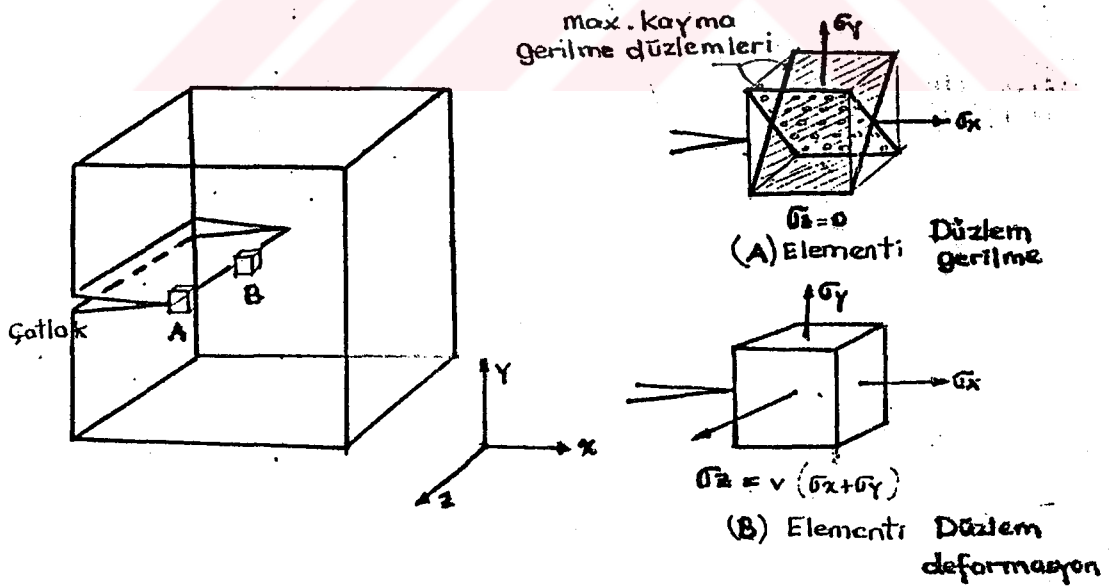
büyük plastik deformasyon, B' de daha küçük plastik deformasyon görülecektir. B elemanının olduğu yerde gevrek kırılma, A elemanının olduğu yere doğru sünek kırılmadan oluşan bileşik kırılma durumu ortaya çıkar.

Plaka kalınlığına göre, çatlak ucundaki plastik bölgenin değişimi Şekil 4.8 de gösterilmiştir.

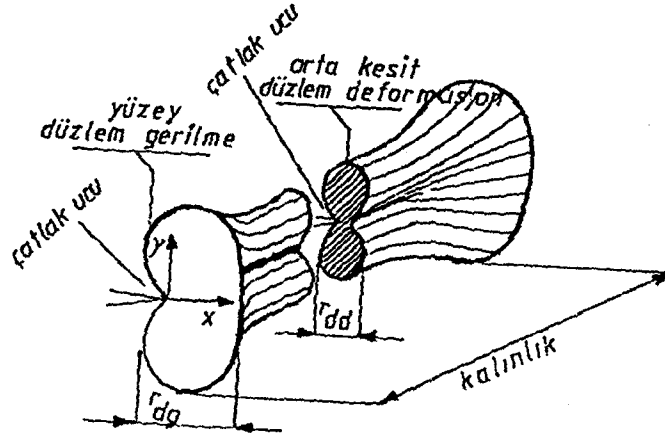
Plastik bölge uzunluğu, çatlak boyuna ilave edilmelidir. O zaman etkili olacak çatlak boyu ;

$$2 \cdot a_{et} = 2 \cdot (a + r_{pl}) \quad (4.35)$$

olur. r_{pl} : plastik bölge uzunluğudur.



Şekil 4.7 : Çatlak ucunun iç ve kenar tarafındaki düzlem-deformasyon ve düzlem-gerilme elemanları



Şekil 4.8 : Kalın plaka içinde çatlak ucundaki plastik bölge değişimi

Bu bölge dışındaki gerilim ve deformasyonlar için Lineer - Elastik kırılma mekaniği bağıntıları kullanılır. Şekil 4.8 de görülen plastik bölge uzunlukları ;

Düzlem - gerilme hali

$$r_{dg} = \frac{K^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_a^2} \quad (4.36)$$

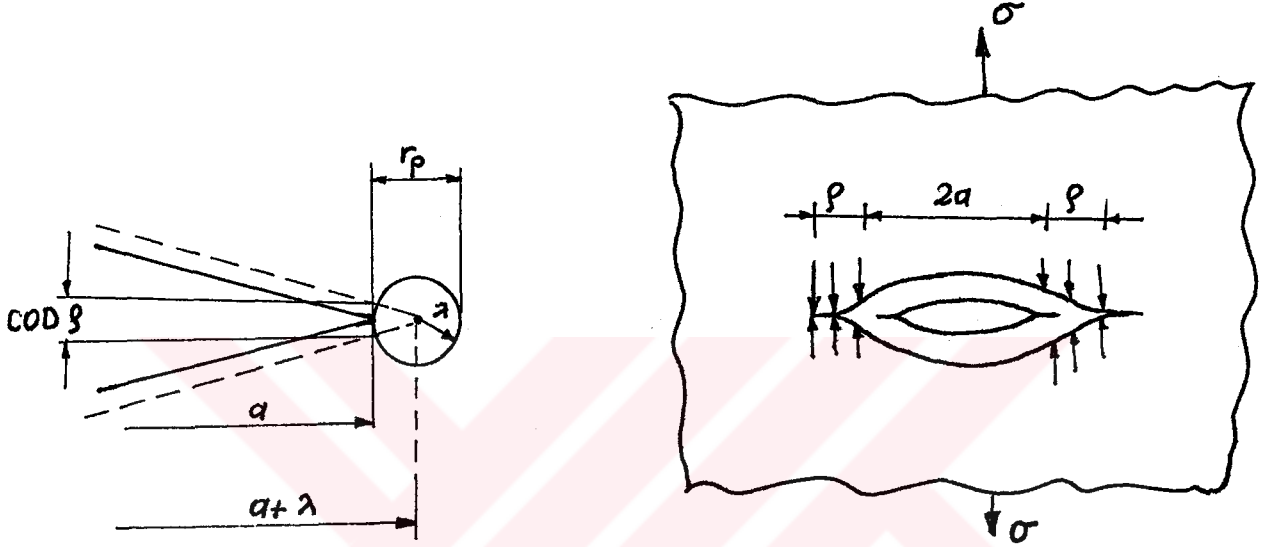
Düzlem - deformasyon hali

$$r_{dd} = (1 - 2 \cdot \nu)^2 \cdot \frac{K^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_a^2} \quad (4.37)$$

şeklinde ifade edilirler.

Çatlak ucunda oluşan plastik bölge modelleri Şekil 4.9 da görülmektedir. Bu modeller, kırılma tokluğunun bir ölçüsü kabul edilen COD değerinin analitik hesaplanmasında esas alınır. Bu modeller şunlardır :

a) Irwin' in plastik bölge modelinde yarıçapı (λ) olan plastik bölge merkezine kadar uzanan hayali bir çatlakı esas alarak plastik bölgeyi düzeltmeyi amaçlamış ve böylece çatlak uzunluğunu ($a + \lambda$) olarak kabul etmiştir.



Şekil 4.9 : a) Irwin' in plastik bölge düzeltmesi b) Dugdale çatlakı ve plastik bölgeler

b) Dugdale tarafından amaçlanıp Barenblatt tarafından gerçekleştirilen plastik bölge modelinde ise, çatlakın plastik bölge içerisinden doğrusal yayıldığı, çatlak uzunluğunda $2a$ ' dan $(2a + 2r_{pl})$ olduğu kabul edilmiştir.

Her iki plastik bölge yaklaşımı ile elde edilen COD sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmektedir.

Bir stain-gauge düzeni ile çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi (V) ölçülebilirse, bu değer (δ) COD ile ilişkisi düşünülebilir. Sonsuz ince bir plaka, içinde $2a$ uzunluğunda bir çatlak içersin. Düzgün çekme gerilmesi uygulayarak, çatlak ucundaki kütleme miktarı aşağıdaki denklemle Hahn tarafından formüle edilmiştir.

$$\delta = \frac{8 \cdot \sigma_0 \cdot a}{\pi \cdot E} \cdot \ln \left[\text{Sec} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot \sigma_0} \right) \right] \quad (4.38)$$

$$\delta = \frac{8 \cdot \sigma_0 \cdot a}{\pi \cdot E} \cdot \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot \sigma_0} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot \sigma_0} \right)^4 + \frac{1}{45} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot \sigma_0} \right)^6 + \dots \right] \quad (4.39)$$

şeklinde $\ln(\sec)$ terimini açıp sonucunu ilave etmekle,

$$\delta = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E \cdot \sigma_0} \quad (4.40)$$

elde edilir. Deformasyon enerji bırakma hızı ;

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (4.41)$$

şeklinde idi. Her iki tarafı (σ_0) ' a bölünürse,

$$\frac{G}{\sigma_0} = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E \cdot \sigma_0} \quad (4.42)$$

olur. Buradan denklem (4.40) a göre,

$$\frac{G}{\sigma_0} = \delta \quad (4.43)$$

elde edilir veya,

$$G = \sigma_0 \cdot \delta \quad (4.44)$$

elde edilir.

Kararsız çatlak yayılması (δ) COD' un kritik bir değerinde olacağından kırılma gerilmesi ;

$$\sigma_k = \left(\frac{E \cdot G}{\pi \cdot a} \right)^{1/2} \quad (4.45)$$

dir.

$$\sigma_k = \left(\frac{E \cdot \sigma_0 \cdot \delta_c}{\pi \cdot a} \right)^{1/2} \quad (4.46)$$

dir. Bu ise,

$$\sigma_k = \left(\frac{E \cdot \gamma_p}{a \cdot \pi} \right)^{1/2} \quad (4.47)$$

denklemleri ile kıyaslandığında,

$$\gamma_p = \sigma_0 \cdot \delta_c \quad (4.48)$$

$$G = \sigma_0 \cdot \delta \quad (4.49)$$

denkleminde

$$\delta_c = 2 \cdot \rho \cdot \epsilon_f \quad (4.50)$$

değeri konulursa,

$$G = \sigma_0 \cdot 2 \epsilon_f \quad (4.51)$$

olur. Bu ifadede çatlak ucu yarıçapı (ρ) nun fazla büyüdüğünde, çatlak kararsız bir şekilde yayılmak için daha fazla enerji yutulacağını, yani $G \gg R$ olduğunu gösterir. Bu ifadenin tek eksiği içinde malzemenin mikro yapısını gösteren ifadenin bulunmasıdır. (5, 6)

4.4.2. KIRILMA TOKLUĞU ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Kırılma mekaniği ile ilgili temel esaslar önceki bölümlerde verilmeye çalışıldı. Malzemedeki zorlanma karşısında çatlakların oluşumu, büyümesi ve yayılmasının incelenmesi ve yapılan deneysel çalışmalarla birlikte bir takım sonuçlara varılır. Bulunan değerler değişik sıcaklıklar için farklı olabilmektedir. Bu durumda belli bir sıcaklık değeri için bulunan diğer değerleri içinde esas kabul edilir. Şekil değişimi sıcaklıktan başka deformasyon hızı ile de ilgilidir. Ayrıca kırılma mekaniğinin incelenmesinde tüm araştırmacılar malzemenin mikro yapısı ile ilgili bağıntılarla birlikte kırılma olayını açıklamaya çalışmaktadırlar.

Burada K_{IC} , COD ve J integrali kırılma tokluğu ölçüm yöntemleri verilmiştir.

K_{IC} , çatlakların kararsız yayıldığı kritik denge noktasındaki (Mod I çatlak açılmasında) çatlak açılma durumuna göre kritik tokluk değerini ölçmektedir. K_{IC} nin tesbitinde çatlak yorulmasının da dikkate alınması gerektiği tecrübeler ile belirlenmiştir. K_{IC} yöntemi ileride anlatılacağı şekilde bugün de kullanılır ve geçerlidir.

K_{IC} yalnızca yüksek mukavemetli malzemelerde çok iyi sonuç verdiği halde, düşük ve orta mukavemetli malzemelerden, ancak çok düşük sıcaklık çok kalınlıklı numuneler ve çok yüksek deformasyon hızlarının uygulanması halinde geçerli sonuçlar alınabilmektedir. Bilindiği üzere bu tür malzemelerin çatlakları önünde küçük veya büyük plastik bölge oluşmaktadır. K_{IC} tayininde numune boyut sınırlaması olduğundan kırılma tokluğu tayini için plastik bölgenin çatlak ucunda oluşturduğu kütleşme miktarına da (δ) diyoruz. Çatlak profili, malzeme ve yükleme durumuna bağlı olarak değişme göstereceğinden (δ)'nin kritik değerini deneysel olarak elde etmek zordur. Şekil 4.14 de görüldüğü gibi çatlak ucu açılma miktarı (V) ile kütleşme miktarı (δ) arasındaki ilişki bulunarak kritik COD (δ_c) hesaplamasına gidilir.

Çatlak ucunda büyük plastik bölge olması halinde kırılma tokluğunun ölçülmesi büyük zorluklar gösterdiğinden COD yöntemine alternatif olarak J integrali metodu geliştirilmiştir.

Kırılma olayı sonucu Elastisite modülü (E) ve Akma gerilmesi (σ_a) ve maksimum gerilme (σ_{max})'ın bilinmesi ile malzemenin yapısı hakkında bize gerekli bilgiler verilmiş olacaktır. Lineer - Elastik Kırılma Mekaniğinde E/σ_a değeri kırılma olayında geçerli bir kriter olarak belirlenmiştir. (6)

4.4.2.1. K_{IC} YÖNTEMİ

Bu konuda dünyada yaygın olarak kullanılan ASTM / E 399 - 83 ve BS 5447 olmak üzere iki standart vardır. Her ikisi de küçük ayrıntılar dışında birbirinin aynıdır. Standart, düzlem-deformasyon durumunda Mod-I türü için kırılma tokluğunun bulunmasını içerdiğinden, bu parametre K_{IC} olarak gösterilmiştir. (22)

Kırılma tokluğu değerinin tayin metodlarından en önemlisi, Kuvvet-çatlak açılma eğrisidir. Bu deney için birkaç numune tipi kullanılmasına karşılık, en önemli iki tanesi ;

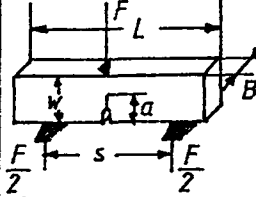
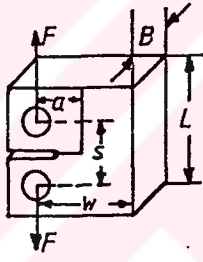
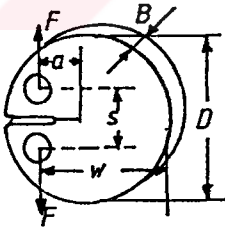
- a) C-T (Compact - Tension) numunesi
- b) Üç noktadan eğme numunesidir.

Amaç ; Çatlağın kararsız yayıldığı kritik noktadaki (Mod I) yüklemesinde çatlak açılma durumuna göre, kritik tokluğu ölçmektir.

Kuvvet-çatlak açılması (P - V) eğrisinin çiziminde (V) değeri ölçme sistemi, strain-gauge Wheatstone Köprü devresinden ibarettir. Yay çeliği üzerindeki strain-gauge' ler çatlak açılırken sinyal vereceklerdir. (5)

Test makinasında bahsedilen testin yapılması, numunelerin relatif çatlak açılması (V) ile tatbik olan yük (P) arasındaki ilişkinin otografik olarak çizdirilmesidir.

4.4.2.1.1. NUMUNE FORMU VE BOYUT SINIRLAMASI

Tip	Gösterim	Ölçüm.	Numune formu	Boyut sınırları.
3-Nokta Eğme Numune-si	3PB	Çatlağın diğer tarafından kuvvet tatbikiyle		$a \geq 2,5$ $B \geq 2,5$ $w \geq 5,0$ $s = 4w$ $L = 4,2w$
Compact Tension Numune-si.	CT	Kare form da dairelerden dışa kuvvet tatbiki.		$a \geq 2,5$ $B \geq 2,5$ $w \geq 5,0$ $w = 2B$ $L = 2,4B$ $s = 1,1B$
Round Compact Tension Numune-si.	RCT	Daire form da dairelerden dışa kuvvet tatbiki.		$a \geq 2,5$ $B \geq 2,5$ $w \geq 5,0$ $s = 0,4D$ $D = 2,4B$ $w = 0,75D$

Şekil 4.10 : Numune formları

Şekil 4.10 u incelediğimizde Kırılma mekaniğine uyarlanabilecek, uygun sonuçları verecek numune formlarını görebiliriz. K_{IC} , düzlem-deformasyon halinde geçerli olacağından plastik bölge burada yeteri kadar küçük ve etkisizdir. (6)

Standardı kapsamında kalınlığı 6,5 mm ve daha büyük (Tablo 4.1) olan bir tarafı çentikli üç noktalı eğme, tek parçalı çekme, C şekilli çekme ve Disk şekilli çekme deney parçaları bulunmaktadır. Anılan deney parçaları türleri ve boyutlandırılmaları Şekil 4.10 da gösterilmiştir.

Düzlem - deformasyon koşullarının sağlanması ve deney sonunda elde edilen sonuçların geçerli olabilmesi için deney parçası kalınlığı (B) ve toplam çatlak boyu (a),

$$a, B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a} \right)^2 \quad (4.52)$$

koşulunu sağlamalıdır. Bu koşulun sağlanması için deney parçası boyutları malzemenin "Akma dayanımı / Elastiklik modülü" oranına göre önceden uygun olarak seçilebilir. Oranlar Tablo 4.1 deki gibidir.

Tablo 4.1 : Akma dayanımı / Elastiklik modülü oranına göre uygun parça boyutları (26)

σ_a/E	Önerilen en az a, B (mm)
0,0050 - 0,0057	75
0,0057 - 0,0062	63
0,0062 - 0,0065	50
0,0065 - 0,0068	44
0,0068 - 0,0071	38
0,0071 - 0,0075	32
0,0075 - 0,0080	25
0,0080 - 0,0085	20
0,0085 - 0,0100	12,5
0,0100 -	6,5

Numunelerin, yorulma çatlakları dışındaki çatlak uzunluğu olarak bilinen ifadesinin (M)

3 PB (Üç noktadan eğme) numunesinde ;

$$0,45.W \leq M \leq 0,55.W \quad (4.53)$$

CT (Compact-tension) ve RCT (Round Compact-tension) numunelerinde ise ;

$$0,45.W \leq M \leq 0,65.W \quad (4.54)$$

sınırları içinde hazırlanmaları gerekir.

Ayrıca tüm deney parçaları için ;

$$B = 0,5.W \quad (4.55)$$

koşulu oluşacak şekilde boyutlandırma yapılmalıdır.

Standardın bu kesin koşullarına karşın, isteğe bağlı boyut seçimi ;

Eğme numuneleri için ;

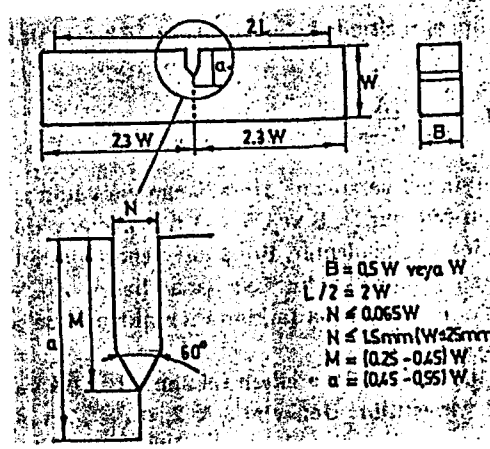
$$1 \leq W / B \leq 4 \quad (4.56)$$

Tek parçalı C ve Disk şekilli çekme numuneleri için ;

$$2 \leq W / B \leq 4 \quad (4.57)$$

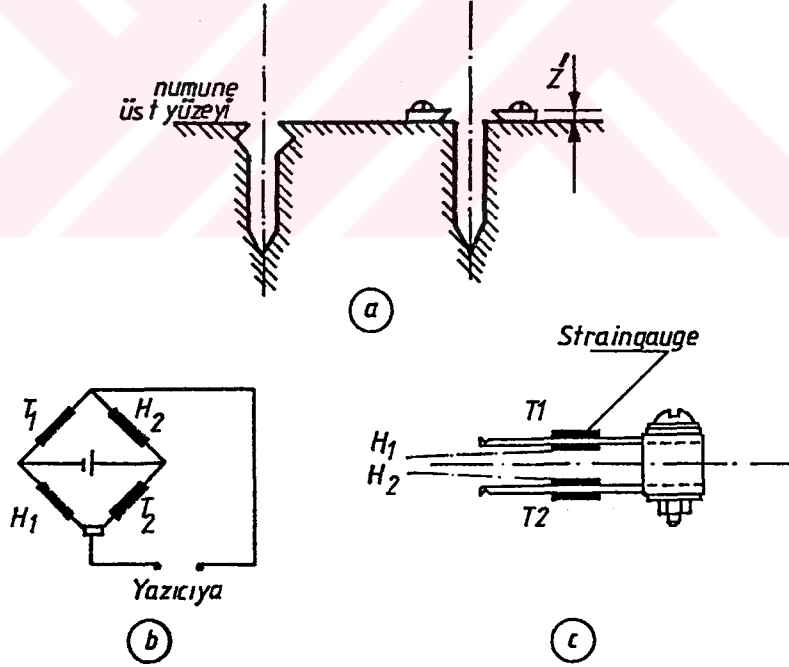
olacak şekilde de yapılabilir. Ancak bu tür boyutlandırmada diğer boyutların oranı değişmelidir.

Ön yorulma çatlaklarının boyu, tüm çatlak boyunun %5' inden yada sayısal olarak 1,25 mm' den küçük olmamalıdır. Çatlakların başladığı makina çentiğinin yarıçapı da 0,08 mm' den küçük olmalıdır. (22)



Şekil 4.11 : ASTM / E 399 Standardına göre K_{1C} deney parçası boyutları

4.4.2.1.2. ÇATLAK AÇIKLIĞI ÖLÇÜMÜ



Şekil 4.12 : Çatlak açıklığı ölçüm düzeni

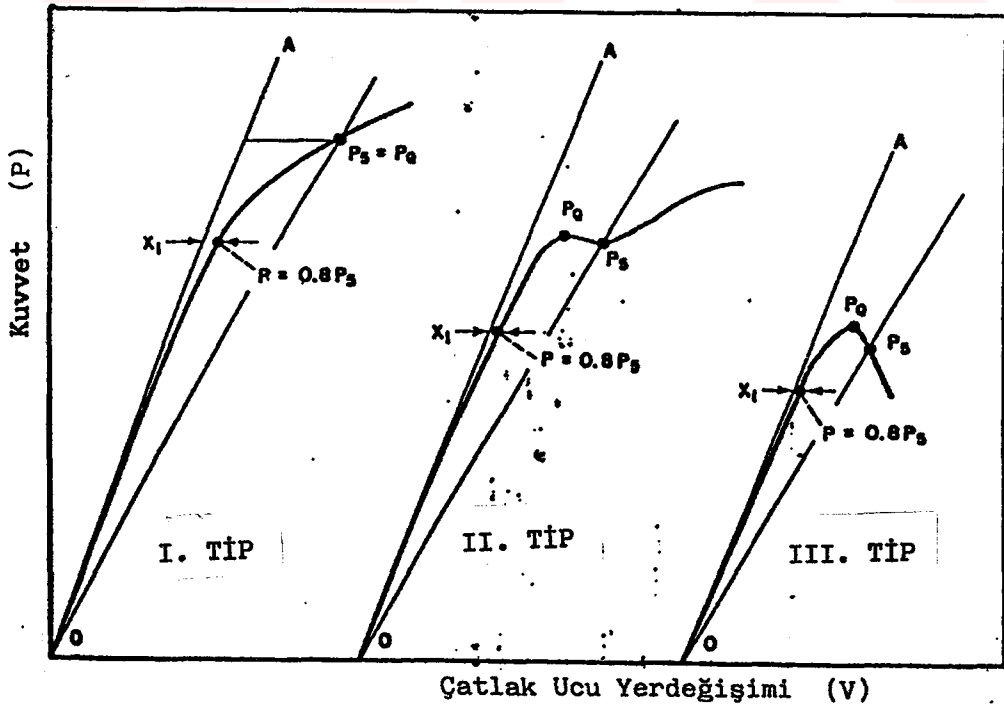
- Numunede hazırlanmış özel formlar
- Wheatstone köprü devresi
- Klip-gauge

Çatlak açıklığı ölçümü Şekil 4.12 de görülen düzeneğe yardımıyla gerçekleştirilir. (c) ile verilen şekilde çatlak açılma değerini ölçebileceğimiz (Klip-gauge) adı verilen düzeneği görmekteyiz. Burada bir gövdeye tutturulmuş iki adet karşılıklı yerleştirilen yay çeliği ve bunların üzerlerine sinyalleri iletebileceğimiz, T_1 , T_2 , H_1 , H_2 ile gösterilip şekildeki gibi yaylı iki dil üzerine yerleştirilen dört adet strain-gauge ve Şekil 4.12 (b) de bu strain-gauge'lerin sinyallerini iletebileceğimiz şekilde hazırlanmış Wheatstone köprü devresi ile Şekil 4.12(a) da Klip-gauge'nin uçlarına uygun şekilde, uçları tutabilecek şekilde numune üst yüzeyinde hazırlanmış özel yerler görünmektedir. (Z') numune üst yüzeyine yay çeliğini tutacak şekilde tesbit edilen çentikli parçanın yüksekliğidir. (6)

Çatlak açılmasında oluşan sinyallerin yazıcıya aktarılması ile sonuç alınmış olacaktır.

4.4.2.1.3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kullanılan numunelerin cinslerine göre değişik eğriler elde edilir. Yükleme ile çatlak açıklığı P - V değerlerinin eğrileri bir xy yazıcısından alınır. Buradan %2 çatlak büyümesine karşılık gelen nokta eğri üzerinde işaretlenir. Deneyler sonucu elde edilen eğrinin lineer kısmının eğiminden yaklaşık %5 daha düşük eğime sahip doğrunun P - V eğrisini kestiği nokta, bu kritik noktayı, bu noktada elde edilen değer kritik kuvveti (P_5) yani kararsız çatlak büyümesinin başladığı kuvveti göstereceği tesbit edilmiştir. Olayı Şekil 4.13 de görmek mümkündür. (6)



Şekil 4.13 : Değişik yapıdaki numunelere ait P - V eğrileri (22)

Şekil 4.13 de verilen eğrilerden görüldüğü gibi ;

a) daki I. Tip eğri daha ziyade sünek malzemelere aittir. Kritik yük, Şekil deki P_Q yüküdür. Şayet $0,8.P_3$ noktasındaki (x_1) mesafesi (x_5) mesafesinin $(1/4)$ 'ünden fazla ise, K_{IC} elsesi için malzeme çol sünek bir malzemedir (gevrek malzeme grubu içinde). $(1/4)$ 'ü aşmıyor ise, kritik yük (P_Q) alınarak K_{IC} hesaplanır. Kararsız çatlak yayılmasının durdurulduğu yükü bu eğri vermez.

b) daki II. Tip eğri, önce maksimum bir yük sonra ani bir düşüş gösterir. Ani düşme kararsız çatlak başlangıcını simgeler. Fakat sonra tekrar eğrinin artması, kararsız çatlak yayılmasının plastik deformasyonla engellenmesi durumunu simgeler. Aşırı süneklilik olup olmadığı, bu eğriye de uygulanır. Buradaki kritik yük (P_Q)'dur. Bu tip eğriye sahip malzemeler (a)'daki I. Tip eğriye sahip malzemelerden daha gevreklerdir.

c) daki III. Tip eğri, gevrek metallere aittir. $x_1 \ll x_5$ olduğundan $0,8.P_3$, kararsız çatlak yayıldığı bölgeye düştüğünden kritik yük olarak (P_Q) alınır.

Kritik yük (P_Q), çatlak uzunluğu (a), numune kalınlığı (B), numune genişliği (W) olarak alındığında, her iki tip numune için kritik yüke karşılık gelen tokluk değerlerini içeren formüller aşağıdaki gibidir ; (5)

- Eğme numuneleri için ; (26)

$$K_Q = \frac{P_Q.S}{B.W^{3/2}} \left[2,9 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 4,6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 21,8 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 37,6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 38,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right]$$

(4.58)

- Compact - tension numuneleri için ; (26)

$$K_Q = \frac{P_Q.S}{B.W^{1/2}} \left[29,6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 185,5 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 657,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 1017 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 638,9 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right]$$

(4.59)

Bu formüllerde ;

- P_Q : Kritik yük (Kp)
 B : Numune kalınlığı (mm)
 S : Mesnetler arası uzaklık (mm)
 W : Numune yüksekliği (mm)
 a : Toplam çatlak uzunluğu (mm)

Bu formüllerde yük (Kp), boyutlar (mm) alınırsa K_Q ' nun birimi $K_Q = Kp / mm^{3/2}$ olur.

P_Q , P_3 , $0,8.P_3$, x_5 , x_1 değerlerinin belirlenmesi ile ;

K_{IC} ,

1-) Kritik kuvvet değeri P_Q tesbit edilir.

I. Tip eğride, $P_Q = P_3$

II. Tip eğride, $P_Q = P_Q$

III. Tip eğride, $P_Q = P_{max}$

2-) $x_1 \leq 0,25.x_5$ olduğu isbat edilmelidir.

3-) Hangi numune kullanılıyorsa Denklem (4.58) veya Denklem (4.59)' dan K_Q hesaplanmalı.

4-) Bölüm 4.4.2.1.1 ' deki Denklem (4.52)' den ;

$$a, B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a} \right)^2$$

değerleri kontrol edilmelidir.

5-) Yukarıda anlatılan 2 ve 4. maddeler sağlanıyorsa, K_Q değeri çatlak mukavemeti için geçerli bir değer olarak,

$$K_{IC} = K_Q$$

şeklinde (Kritik tokluk değeri) belirlenecektir.

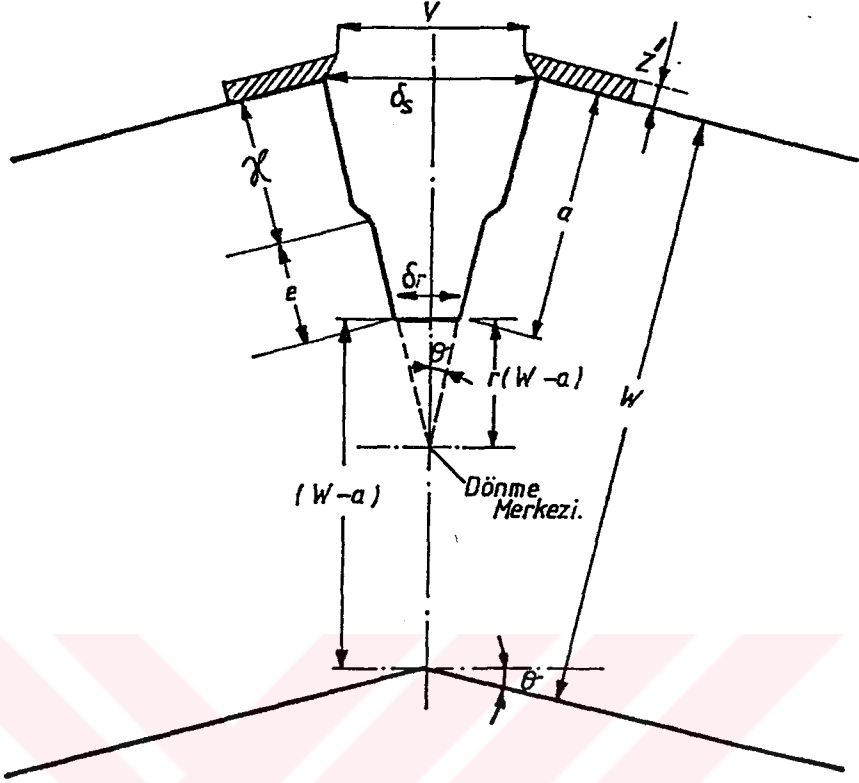
6-) Yukarıda anlatılan 2 veya 4. maddelerden birisi, veya ikisi birden sağlanamaz ise, çatlak mukavemeti için belirlenen (K_Q) değeri kesinlikle geçersizdir. Bu durumda (B) kalınlığı daha fazla olan numuneler ile yeni denemeler yapılması gerekecektir.

Malzemelerin sünek olması durumunda geçerli K_{IC} eldesi için çok büyük boyutlu numuneler gerektiğinden, bu durum hem pratik değil, hem de ekonomik açıdan büyük zorluklar çıkartmaktadır. Bu zorlukların aşılması için yeni metodlar geliştirilmiştir. (6, 26)

4.4.2.2. KRİTİK ÇATLAK AÇIKLIĞI (Crack Opening Displacement COD)

K_{IC} yalnızca yüksek mukavemetli malzemelerde çok iyi netice verdiği halde, düşük ve orta mukavemetli malzemeler, ancak çok düşük sıcaklık, çok kalın kesitli numuneler ve de çok yüksek deformasyon hızlarının uygulanması hallerinde geçerli sonuçlar alınabilmektedir. Bu tür malzemelerin çatlağı önünde küçük veya büyük plastik bölge oluşmaktadır. K_{IC} tayininde numune boyutu sınırlaması olduğundan, kırılma tokluğu tayini için plastik bölgenin çatlak ucunda meydana getirdiği kütleşme miktarı (δ) düşünülmüştür. (Bak Bölüm 4.4.1.2)

Çatlak profili, malzeme ve yükleme durumuna bağlı olarak değişme göstereceğinden (δ)'nin kritik değerini deneysel olarak elde etmek zordur. Bunun için Şekil 4.14' de görüldüğü gibi çatlak ucu açılma miktarı (V) ile kütleşme miktarı (δ) arasındaki ilişki bulunarak kritik COD (δ_c) hesaplamasına gidilir.



δ_r Çatlak ucu açılması

δ_s Yüzeydeki çatlak açılması

Şekil 4.14. (V) ile (δ) arasındaki ilişki

Şekil 4.14 de görüldüğü gibi çatlak ucunun bir dönme merkezi etrafında açıldığı farzedilmiştir. Gerçekte bu dönme merkezi, yükleme durumu ve malzeme cinsine göre değişebilir.

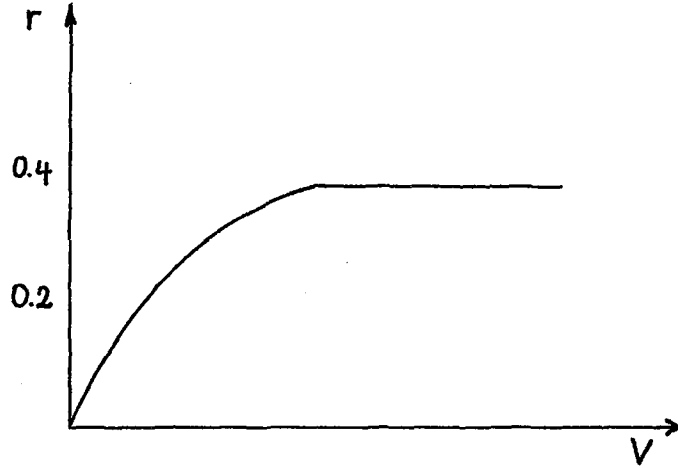
Basit geometrik bağıntıdan ;

$$\frac{\delta}{V} = \frac{r.(W-a)}{r.(W-a)+a+Z'} \quad (4.60)$$

yazılır. Buradan ;

$$\delta = \frac{V}{1 + \left[\frac{a+Z'}{r.(W-a)} \right]} \quad (4.61)$$

olur. Dönme faktörü (r), test parçasından meydana gelen plastiklik ile ilgili olarak Şekil 4.15 de görüldüğü gibi değişir. Ortalama $r \cong 0,33$ alınırken, aşırı plastiklik durumunda $r \cong 0,40$ alınır.



Şekil 4.15 : Dönme faktörü (r) ile (V) nin değişimi

Test parçaları sınırlı bir plastik deformasyondan sonra kırılacaklarından, yukarıdaki formüllerin BS 5762, 1979 standardında en son kullanım formülleri verilmiştir . Buna göre ;

$$\delta_c = K^2 \cdot \frac{(1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_0 \cdot E} + \frac{0,4 \cdot (W - a) \cdot V_p}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a + Z'} \quad (4.62)$$

Bu formülde ;

$$K = \frac{Y \cdot P}{B \cdot W^{1/2}} \quad (4.63)$$

değerindedir ve P kuvveti simgeler.

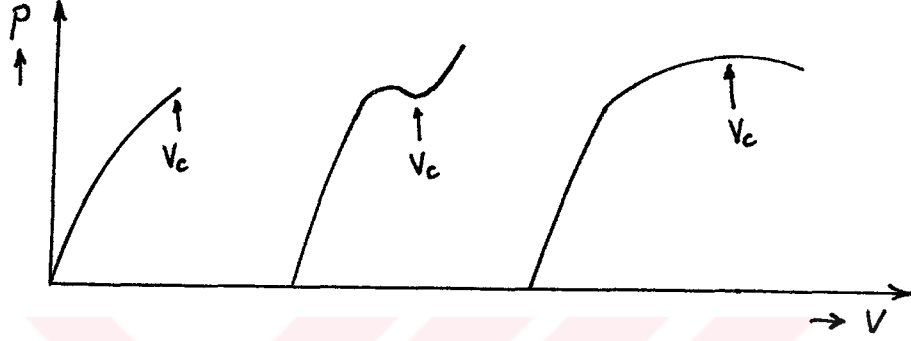
$$V_p = (V_i, V_c, V_u, V_m)$$

çatlak ucu açılma miktarlarının plastik bileşenleridir.

$$Y = 0,15 < \frac{a}{W} < 0,7 \quad (4.64)$$

arasındaki üç noktadan eğme numuneleri için tablo halinde verilen komplians katsayı değerleridir.

B = numune kalınlığı



Şekil 4.16 : COD ölçümünde değişik (P - V) eğri tipleri

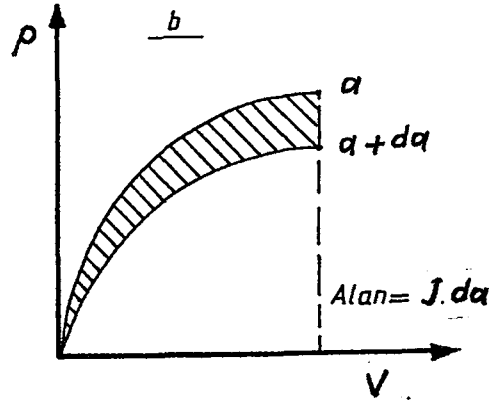
COD eldesi için çizdirilen P - V eğrilerinde (V_c) kritik yer değişim değerinin tayininde zorluklar görülür. Şekil 4.16 da verilen üç değişik tip eğriden (a)' da az bir plastik deformasyondan sonra çatlak hızla kararsız bir şekilde yayılışı ve (V_c) noktası görülmektedir. (b)' de ise, (V) büyümesine karşılık gelen (P) yükü sabit kalmaktadır. Böyle bir durumda alınacak (V_c) noktası görülmektedir. (c)' de ise, fazla plastik deformasyon durumu gösterilmektedir.

Robinson ve Tetelman adlı araştırmacılar $B = 25 \delta_c$ olduğunu göstermişlerdir. Bu sınırlılık K_{IC} testindeki sınırlılıktan çok daha düşüktür. Dolayısıyla daha küçük numuneler kullanarak çatlak ucundaki kütleşme miktarı (δ_c) kritik COD' un değeri, kırılma tokluğunun değerlendirilmesinde kullanılır. (5, 6, 22)

4.4.2.3. J - İNTEGRALİ

Çatlak ucunda büyük plastik bölge oluşması halinde, kırılma tokluğunun ölçülmesi büyük zorluklar gösterdiğinden, COD metoduna alternatif olarak J - İntegrali metodu geliştirilmiştir.

Rice, analitik olarak çatlak ucundaki kapalı eğri boyunca integralin yola bağlı olmadığını göstermiştir (5). Bu durum J-İntegralinin tıpkı K ve G gibi bir malzeme sabiti, karakteristiği olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.17 : J- İntegralinin fiziksel açıklanması

J-İntegrali Şekil 4.17 de görüldüğü gibi çatlakın (a) uzunluğundan (a + da) uzunluğuna büyüyerek erişmesi halinde, iki uzunluk arasındaki mekanik enerjinin çatlak boyuna göre değişiminin farkını verir. Yani J-İntegrali G enerji bırakma hızı ile ilgilidir. Küçük miktarlardaki plastik deformasyon durumları için ;

$$J = G \quad (4.65)$$

yazılabilir. Kritik değerleri ise ,

$$J_{IC} = G_{IC} \quad (4.66)$$

Büyük miktarda plastik deformasyon olduğu zaman ;

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (4.67)$$

Kritik-J (J_{IC}), parametresini tanımlamak için iki yaklaşım ileri sürülmüştür.

1-) Begley ve Landes' in çok numune yaklaşımı,

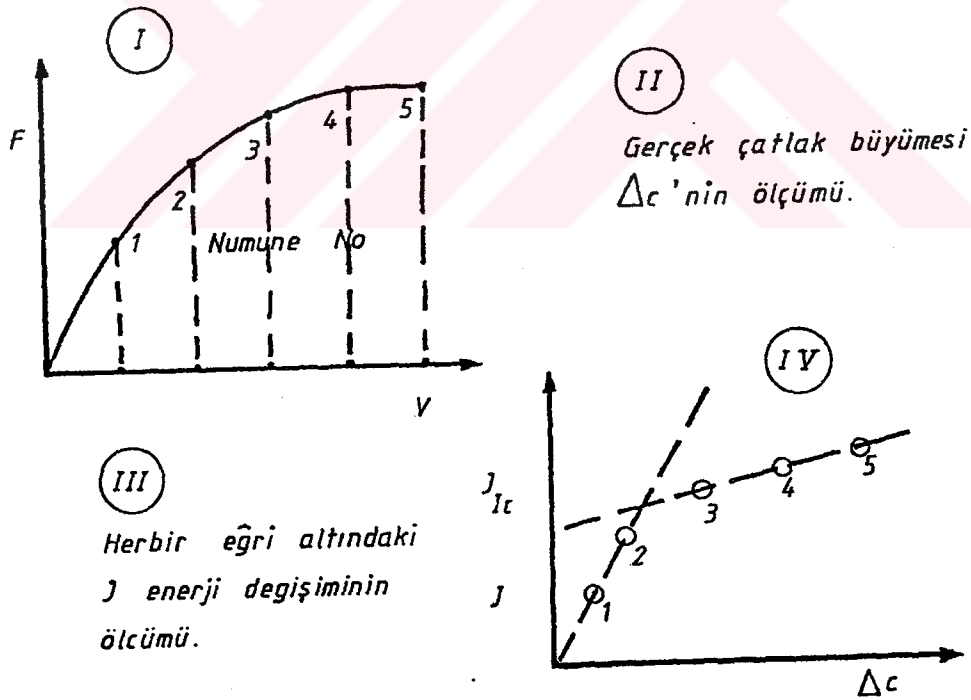
2-) Paris' in tek numune yaklaşımı

Çok numune yaklaşımı ile (J_{IC}) kritik-J bulunmasının ana hatları Şekil 4.18 de görülmektedir. Begley ve Landes, böyle bir diyagramın iki yaklaşık lineer eğriye sahip olduğunu, birinci lineer eğrinin gerçek çatlak büyümesinden önce çatlak kövrüştürmeye uğraştığını, ikinci eğrinin ise çatlakın kendi büyümesine ortak olan eğri olduğunu göstermişlerdir. Bu iki lineer eğrinin kesistikleri yerdeki değer, kritik-J (J_{IC}) değeridir. Bu değerden (K_{IC}) değeri hesaplanır.

Bu testin numune boyutu ile ilgili sınırlamanın ;

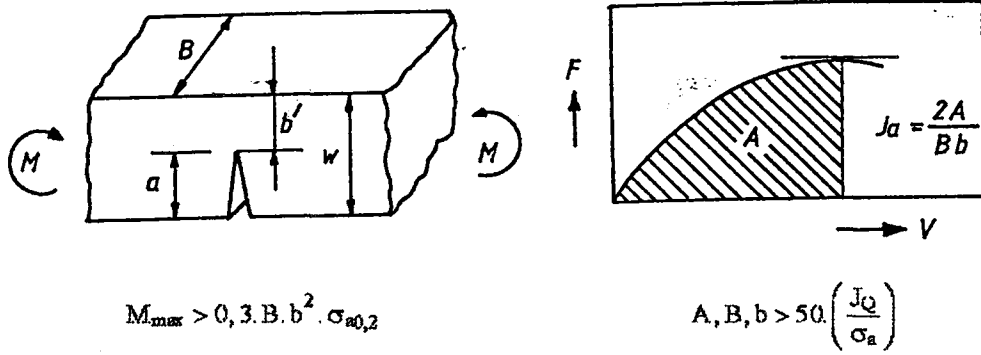
$$W - a = 50 \cdot \left(\frac{J_{IC}}{\sigma_a} \right) \quad (4.68)$$

olduğu tecrübelerden bulunmuştur.(5)



Şekil 4.18 : Çok numune yaklaşımıyla kritik-J (J_{IC}) nin bulunması

Paris' in tek numune yaklaşımı ise Şekil 4.19 da gösterilmiştir.



$$J_{IC} = J_Q$$

Şekil 4.19 : Tek numune yaklaşımıyla (J_{IC})'nin bulunması

Tek numune yaklaşımıyla kritik-J (J_{IC}) değerini bulurken, Şekil ?? deki gibi boyutlandırılmış numunede P - V eğrisinde görülen maksimum yüke karşılık gelen çatlak başlangıç noktasına kadar absorbe edilen enerji kullanımından istifade edilir. Şekil ?? deki ifadeleri tekrar yazarsak ;

Eğer ,

$$M_{max} > 0,3 \cdot B \cdot b^2 \cdot \sigma_{a0,2} \quad (4.69)$$

ise ,

$$A, B, b > 50 \cdot \left(\frac{J_Q}{\sigma_a} \right) \quad (4.70)$$

O zaman

$$J_{IC} = J_Q \quad (4.71)$$

olur. Yukarıdaki ifadelerde ;

$\sigma_{a0,2}$ = %0,2 ye tekabül eden akma gerilmesi

σ_{kop} = Kopma mukavemeti

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{a0,2} + \sigma_{kop}) \quad (4.72)$$

ifadesini simgelerler.

Paris' in tek numune yaklaşımında kullanılan numunelerin henüz standardı geliştirilmemiştir. Çalışmalar devam etmektedir.

J - İntegrali üzerindeki kuşular, kritik-J (J_{IC})' nin hassas olarak bulunup bulunmadığı ve gevrek malzemelerde G_{IC} ile J_{IC} arasındaki geliştirilen bağıntılara duyulan tereddütler üzerinedir. (5, 6, 22)

BÖLÜM 5

KOMPOZİT MALZEMELERDE KIRILMA VE TOKLUK

5.1. GİRİŞ

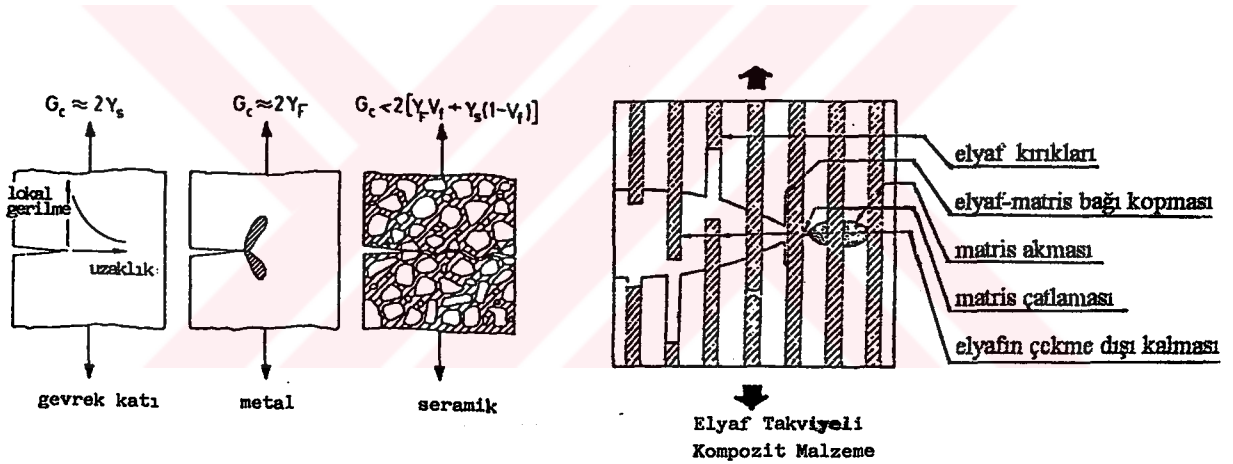
Tipik mühendislik malzemesi olan takviyeli plastikler (kompozitler) karbon ve cam gibi kırılğan elyaflar ile, epoksi veya reçine gibi polimerlerin karışımından oluşurlar. Kompozit malzemelerin en önemli özelliği, yapım tarzları ve heterojen yapılarına rağmen tokluklarının son derece yüksek olmasıdır. Kompozit malzeme yük altındayken, yapı içerisinde bulunan çatlak bütün yapıya dağılarak mikro yapı seviyesinde hasara neden olur. Kompozit malzeme tamamen kırılmadan önce, yapı iyice zayıflamış durumdadır. Kompozit yapıdaki bozulma, homojen malzemelerdeki çatlaklardan daha karmaşık özelliğe sahip bir çatlağın ilerlemesi sonucu oluşur. Doyasıyla kompozit malzemelerdeki kırılma olayı, homojen malzemelerden daha karmaşık bir şekilde meydana gelmektedir. Çatlağın ilerlemesi, mikro seviyede fiber ve matris, makro seviyede çok katlı tabakalar arasındaki yüzeylerin varlığı ile engellenir. Bu yüzden bir kompozitin kırılması, sadece elyaf ve zayıf matrisin yük taşıma ölçüsüne (mukavemetine) bağlı olmayıp, aynı zamanda bu karmaşık ara yüzeylerin varlığına da bağlıdır. Aynı zamanda, elyaf takviyeli kompozitlerin kırılmasının karmaşık oluşu, mikro yapının homojen ve izotrop olmamasıdır. Mikro yapıdaki olayların karmaşık olmasına rağmen, kompozit malzemedeki deformasyon yüksek tokluk seviyelerinde meydana gelir. Kompozit malzemelerin yapısındaki karmaşıklıklar, kırılma mekaniği işlemlerinin kullanımını zorlaştırmaktadır.

Kompozit malzemelerdeki çatlak ilerlemesi ve tokluk tayiniyle ilgili, bir çok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Fakat hala kompozitlerdeki çatlağın ilerlemesi veya geciktirilmesi ile ilgili sonuçlar üzerinde tam bir anlaşma sağlanamamıştır. Bu anlaşmazlığın sebebi ; kompozit yapılardaki büyük değişikliklerden olabilir. Değişik yollarla bulunmuş kompozitlerin tokluğu, lif ve matris malzemelerin özelliklerinin yanında bu elemanların birleştirilme tarzına da bağlıdır. Bundan dolayı kompozitlerin tokluğunun önceden tespit edilmesi zordur. Bu bilgilerin ışığında, en yüksek tokluğa ve en yüksek mukavemete sahip bir kompozitin tasarımı henüz mümkün olmamıştır. En iyi tokluğun elde edilmesi için ; reçinenin, elyafın ve en uygun birleştirme yönteminin seçilmesi gerekir.

Bütün malzemelerde olduğu gibi kompozitlerde de, yüksek çekme ve kesme dayanımı istenir. Fakat bu özellikler yüksek tokluk gereksinimi ile bağdaşmaz. Bunun için esas amaç bu mekanik özellikler üzerinde, en uygun (optimal) yapıyı veren kompoziti oluşturmaktır.

Çatlağın ilerlemesinde elyafın ve matrisin etkileri farklı olmaktadır. Teorik olarak verilen bu etkiler, elyaf / matris arayüzeyine sahip gerçek kompozitlerdeki çatlak ilerlemesine göre farklıdır. Ara yüzeylerin varlığının yanı sıra, reçinenin bazı bölgelerde zengin bazı bölgelerde fakir bulunması (yapı süreksizliği) çatlak ilerlemesinin farklı oluşunun bir diğer sebebidir.

5.2. ÇATLAK UCU İLERLEMESİ



Şekil 5.1 : Farklı türden katılarda, çatlak mekanizmalarının şematik örnekleri

Şekil 5.1' de bazı katılarda çatlak mekanizmaları arasındaki farklılıklar şematik olarak gösterilmiştir. Griffith ve Orwan' a göre kırılma işi, yaklaşık olarak iki yeni yüzey oluşturma işidir.

$$G \cong 2 \cdot \gamma_f \quad (5.1)$$

Metaller, plastikler ve bunların gevrek tiplerinde bile kırılma enerjisi çatlak ucunda bulunan plastik deformasyon bölgesini aşmak için kullanılır. Diğer taraftan, bu enerji bir metal için dislokasyon hareketleri ve ufak çatlakların şekillenmesi için harcanır. Çatlak ucundaki plastik bölge çok önemli olduğundan, buraya *proses bölgesi* adı verilmiştir. Gevrek bir malzeme olan çok kristalli bir seramikte, bu bölge tane sınırlarında oluşan çatlaklarda görülür. Bunun için

gevrek malzemelerde (5.1) nolu eşitlik tam olarak kabul edilmez. Çünkü bu durumda kırılma işinin, iki yeni yüzey oluşturma işinden daha fazla olması gerekir. Bu durumda;

$$G \gg 2 \cdot \gamma_s \quad (5.2)$$

Pratikte ise Griffith tarafından ileri sürülen ve γ_f ile sembolize edilen "Kırılma İş" ifadesi kullanılır.

$$G \cong 2 \cdot \gamma_f \quad (5.3)$$

Kompozit malzemelerde bulunan lifler çatlak ilerlemesi ile karşılaşılır. Bu durumda liflerin etkisi matrisle olan bağın güçlü olmasına bağlıdır. Örneğin lif / matris bağı güçlü ise çatlak, lif ve matrisin her ikisini birden ayırmadan doğrusal karakter izleyerek ilerleyecektir. Bu durumda da kompozitin tokluğu düşük olacaktır. (Tokluk çatlak ilerleme hızı ile alakalıdır). Dolayısıyla, yaklaşık olarak ayrı ayrı elemanların tokluklarının toplamına eşit olur.

$$G \cong 2 \cdot [(\gamma_F)_f \cdot V_f + (\gamma_F)_m \cdot (1 - V_f)] \quad (5.4)$$

Burada $(\gamma_F)_f$ lifin kırılma işi, $(\gamma_F)_m$ matrisin kırılma işidir.

Eğer lif / matris sınırı zayıf ise, çatlağın ilerlemesi çok karmaşık olacaktır. Bu durumda bir çok ayrı ayrı hasar mekanizmaları kompozitin kırılma işinde etkili olacaktır. Bu durumda ;

$$G \gg \gg 2 \cdot [(\gamma_F)_f \cdot V_f + (\gamma_F)_m \cdot (1 - V_f)] \quad (5.5)$$

Yukarıda sözü edilen bu ifadelerin hepsi kompoziti oluşturan malzemeler ve onların birleştirilme tarzı ile ilgilidir.

5.3. KOMPOZİTLERDE ÇATLAK YAYILMASI

5.3.1. MATRİSİN ETKİLERİ

Pratikte kullanılan lifli kompozitlerdeki mevcut lif oranı %10 -70 arasında değişir. Kısa lifli veya çok düşük hacimde liflerle takviye edilmiş kompozitlerde, çatlak ilerlemesi ve toklukla ilgili ifadeler az veya çok belirlidir. Fakat yüksek hacimde lif bulunduran kompozitlerde, çatlak ilerlemesi ve etkileri tam olarak belirli olmayabilir. Bununla birlikte matrisin üç önemli etkisi vardır ;

a) Matrisin efektif (etkili) tokluğu, matris içinde yüksek oranda bulunan gevrek liflerin varlığı ile azalır.

b) Efektif tokluğu düşük olan matrisin ise matris içinde düşük oranlarda bulunan lif parçacıkları ile artırılabilir.

c) Bir matrisin düşük olan tokluğu, komşu tabakalardaki çatlakın yavaşlamasına neden olan liflerin varlığı ile yükseltilebilir. Kırılgan bir plastiğin tokluğu çatlak ilerleme hızına bağlıdır. Çatlak hızı ise çatlak yüzeyindeki pürüzlülüğe bağlı olarak değişir. Pürüzlülük arttığında çatlak yavaşlayacak, dolayısıyla tokluk artacaktır.

5.3.2. ELYAF ETKİLERİ

Ön gerilmeli betonda kullanılan çelik teller, lastik tekerlekleri güçlendirmek için kullanılan tekstil lifler gibi belirli tip lifler, tokluğu yüksek malzemeler olarak sınıflandırılabilirler. Çünkü kopmadan önce büyük bir plastik deformasyon özelliği gösterirler. Lifli malzemeler de benzer şekil değiştirme mekanizmalarına sahiptir. Şekil değiştirme sırasında plastik bölgeler oluşur. Fakat yukarıda sayılan lifler, cam ve karbon gibi gevrek liflerden farklı olarak, deformasyon sırasında büyük boyutlarda yüzey hasarları gösterirler.

Elyaf demetleri büyük kırılma enerjisine sahiptir. Bu kırılma enerjisinin büyük bir bölümü, demeti kapsayan kompozite aktarılabilir. Buna karşılık, yüksek çekme ve şekil değiştirme enerjisine sahip bor, karbon ve cam gibi lifler $10 - 100 \text{ J/m}^2$ gibi çok düşük kırılma enerjisine sahiptirler. Bu düşük kırılma enerjileri her bir lifin farklı zamanlarda (çok ağızlı kırılma) kırılmasına rağmen, kompozitin kırılma enerjisini belirlemede doğrudan faydası olamamaktadır. Fakat çok ağızlı çatlak oluşumu, hasarın dağılmasına sebep olur ve kompozit içindeki çatlak yolları karmaşık hale gelir. Bu durumda kompozitte yüksek bir kırılma işi oluşur.

5.3.3 ELYAF / MATRİS BİLEŞİMİNİN ETKİSİ

$G = 100 \text{ J/m}^2$ lik bir kırılma enerjisine sahip, gevrek (kırılgan) bir polyester veya epoksi reçine ile $G = 10 \text{ J/m}^2$ lik kırılma enerjisine sahip kırılğan bir cam elyafını ele alalım. Bu elemanların birleşiminden oluşan bir kompozitin kırılma enerjisi 10^5 J/m^2 ye ulaşabilmektedir. Kırılma enerjisinin bu kadar büyük olmasını, metal matris / metal fiber bileşiminde olduğu gibi basit açıklamak mümkün değildir. Bu durumu basit bileşimin ötesinde aramak gerekir. Matris ve lifin toklukları, sırasıyla plastik deformasyon bölgesinin büyüklüklerine bağlı olduğu söylenebilirse, ve de o plastik deformasyon bölgesi bozulmadan kompozite şekil verilebildiği kanıtlanırsa, o zaman denklem (5.6) daki gibi kompozitin kırılma enerjisinin, bu elemanların elemanların kırılma enerjilerinin toplamına eşit olduğu söylenebilir. Bu nedenle kompozitin kırılma enerjisinin ne kadar büyük olduğu önceden tahmin edilebilir. Cooper ve Kelly'ye göre (1967) ; "Kompozit içersindeki fiber hacim oranı (V_f) yükseldikçe, matrisin, kompozitin kırılma enerjisine yaptığı katkı aşırı derecede azalmaktadır". (çünkü matris malzemenin plastik deformasyonu azalmıştır). Bu iki bilim adamı bu durumu ; Matris malzemenin hacmindeki azalmanın matrisdeki plastik deformasyon bölgesini de azalttığı ve matrisin kırılma enerjisinin bu sebeple son derece düşük olduğu, şeklinde açıklamaktadırlar. Fakat, matris malzeme, plastik deformasyon bölgesinin küçük olmasından dolayı, büyümek için bir plastik zorlama yapar. Bu plastik zorlama, G' nin etkili değerini azaltan üç eksenliliğin doğmasına neden olur. $\sigma(u)$, çekme mukavemeti, $\epsilon(u)$ hata strainleri, d lif çapı, G_m ; Matrisin kırılma enerjisi, G_f ; Fiberin kırılma enerjisi ise kompozitin toplam kırılma enerjisi bu iki enerjinin toplamı olur.

$$G_c = G_m + G_f \quad (5.6)$$

Sınırlı plastik deformasyon gözönüne alındığında, elyaf hacmi (V_f) ve elyaf çapının değişimi, plastik iş (gerilme - strain) ifadesini değiştirecektir. Yükleme sırasında hem matris, hem de fiber büyük lokal deformasyonlara maruz kalabilir ve ayrılmalar olabilir. Bu ayrılmalar, ara yüzeydeki üç eksenliliğin bir kısmını azaltır. Bu ayrılma hatası, lokal (bölgesel) olarak aynı parçaların çekilmesi sonucu (daha yüksek tokluklu) plane-stress (düzlem-gerilme) şartlarından ziyade, plane-strain (düzlem-şekil değiştirme) şartlarını doğurur (Şekil 5.1) .

Şimdi ise, metal matris ve metal lifle oluşan bir kompoziti düşünelim. Sünek bir metal matrisin içinde kuvvetli bağa sahip metal telin oluşturduğu bir kompozitteki hata doğuracak strain, aynı fakat izoleli bir telle oluşmuş kompozittekinden çok daha yüksektir. Çünkü kuvvetli lif / matris bağlantısı lifdeki lokal boğumlaşma başlangıcını geciktirir . Gömülü metal liflerde

genellikle çok boğum oluşur. Kompozitin tokluğuna tellerin katkısı, tamamen plastik işin artması yönünde olacaktır.

5.4. KOMPOZİTLERE KIRILMA MEKANİĞİNİN UYGULANIŞI

5.4.1. ÇENTİKLİ KOMPOZİTLERİN MUKAVEMETİ VE ÇENTİK HASSASİYETİ

Delik ve çentikler ihtiva eden kompozitlerin mukavemetini modelleştirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Çentikli bir kompozitin mukavemeti, öncelikle deliğin ve çentiğin boyutuna bağlıdır. Kompozit içersindeki çentiğin, mukavemete nasıl etkiğini açıklamak için çentiğin ucundaki sonlu gerilim dağılımından yararlanır. Kompozit malzemede hata, çentikden belli bir mesafeye dağılmış gerilmenin, katmanın çentiksiz çeki gerilmesine ulaştığı anda oluşacağı farzedilir. Whitney ve Nuismer adlı araştırmacılar 1974' de iki parametrelili bir model kullanarak, büyük gerilmelerin, büyük bir delikten ziyade küçük bir deliğin kenarına yakın olarak bulunduğunu, yaptıkları araştırmalar sonucu tesbit ettiler.

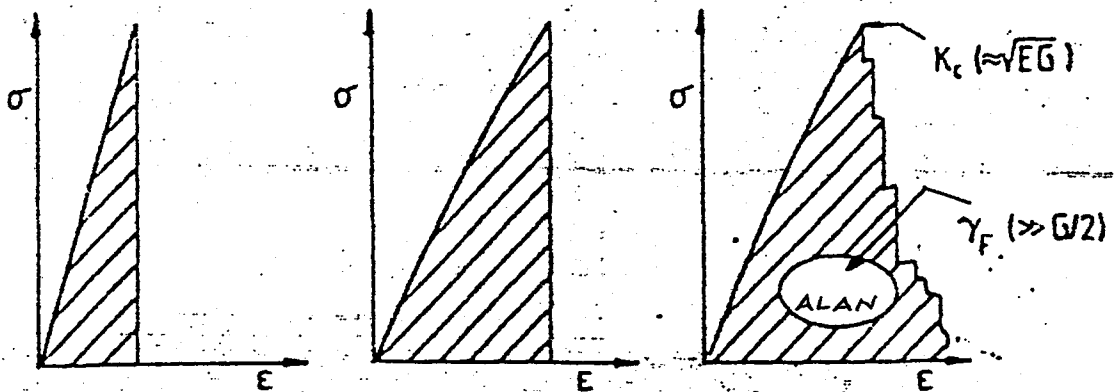
Potter' e göre (1978), aşırı gerilme sonucu oluşan ve bir çatlağın etrafındaki hasar bölgesinde şekillenmiş mikro çatlaklar, kırılmaya neden olmaz. Belki de gerilim azaltıcı olarak bile hareket edebilirler. Öyleyse, kompozit, lineer-elastik gerilim yığılmasıyla gösterilen gerilmeden daha yüksek bir gerilmede kırılır. Ayrıca, çekme ile doğan kırılma, eksenel katmanlar arasındaki iç liflerin kopmasıyla oluşur. Kopmaya neden olan iç liflerdeki bu gerilme, matris ve lif / matris arası bağın mukavemetiyle ilgilidir. Diğer bir bakış açısıyla, kompozit malzeme içindeki hasara neden olan çatlakların büyüklüğü de etkilidir. Büyük boyuttaki çatlaklar eksenel katmanlardaki lif kırılma sürecini başlatırlar. Küçük çatlaklar ise bu ardışık lifli kırılma sürecini başlatamazlar. Fakat küçük hasarlı bölgeler oluştururlar. Çatlak geometrisinin değişimi ve küçük hasarlı bölgelerin birleşimi ile büyük çatlaklar oluşur.

5.4.2. KIRILMA MEKANİĞİ YAKLAŞIMI

Kırılma Mekanikği makro açıdan homojen ve izotropik olan metaller ve alaşımlarının kırılma tokluğunu saptamak için faydalı bir bilim dalı olarak kabul edilir. Kompozitlerde ise ciddi bir şüphe vardır. Bunun sebebi ise, kompozitlerdeki heterojenlik ve anizotropinin ilave karmaşıklığı ve bu karmaşıklığın kırılma mekaniğinin pratik uygulamalarına etkisidir. Örneğin şu sorular sorulabilir;

- 1-) Kompozitin tokluğunu karakterize etmek için metallerde kullanılan test işlemini (Kritik gerilim şiddeti) kullanmak uygun mudur ?
- 2-) Kırılma Mekanîği' nin temel denklemleri, heterojen ve anizotropik bir durum olduğu zaman değiştirilebilir mi ?
- 3-) Çatlağın yayılması, başlangıçtaki çatlak geometrisi, yükleme ve malzemeye göre hangi büyüklüğe kadar kontrol edilebilir ?
- 4-) Kompozitin özelliğini önceden verecek uygun teknikler geliştirmek için, ne gibi teorik ve deneysel araştırmalara ihtiyaç vardır ?

Farklı kompozit tipleri için birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Fakat Kırılma Mekanîği' nin faydalı yada faydasız bir model olup olmadığı konusunda net bir açıklık yoktur. Belli kompozit tipleri için, Lineer-Elastik Kırılma Mekanîği ile net işlemler yapılabilir. Şekil 5.2' de gösterildiği gibi çeşitli kompozitler farklı farklı gerilme-şekil değiştirme davranışı gösterebilirler.



lineer
(tok değil)

lineer değil
(daha tok)

maksimum yük ve belirli bir
deformasyona maruz kaldıktan sonra
kompozit malzemenin sağlamlığı

Şekil 5.2 : Kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin, gevreklik/tokluk davranışı ile değişimi

Mühendislik malzemelerinde arzu edilmeyen dayanıksız yada lineer yapılar, Kırılma Mekanikliği' nin uygulamasına tamamen uygundur. Mühendislik sahasında kullandığımız malzemelerin kırılmasında, çatlak büyümesine karşı direnci gösteren G_c yada K_c , veya toplam kırılma işini gösteren γ_F gibi çok önemli parametreleri kullanırız.

Tabaka ayrılmasıyla (delamination) doğan çatlak yayılması, kompozitlerdeki en basit çatlama modudur denilebilir. Basit çatlak büyümesinden dolayı Lineer-Elastik Kırılma Mekanikliği tarafından başarılı bir modellenmesi yapılabilir. Diğer yandan, yapısında çatlak ihtiva eden tek yönlü elyaf takviyeli bir CTP çubuğunda numune hacminin büyük kısmını reçine (matris) oluşturur. Bu nedenle, elyaf takviyeli bir CTP' nin benzer modellerle kırılma davranışının incelenmesi de karmaşık olur. *Katmanların değişik yönlerde düzenlenmesi, kırılma davranışında da değişikliklere neden olabilir.* [11]

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

6.1. GİRİŞ

Önceki bölümlerde, kompozit malzemeler ve genel özellikleri, kullanım alanları, üretim yöntemleri, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelendi. Bölüm 4' de genel kırılma mekaniği teorileri, Bölüm 5' de ise kompozitlerde kırılma olayı ve tokluk incelenmiştir.

Bu bölümde ise, önceki 5 bölümde anlatılan esaslara uygun olarak hazırlanan düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyaf ile takviyeli kompozit numunelerin üzerinde (K_{IC}) kırılma tokluğu deneyleri yapılmış ve yapılan deneylerde elde edilen eğrilerin değerlendirilmesiyle, bulunan sonuçlar verilmiştir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler genelde gevrek malzemeler olarak nitelendirilebildiğinden, literatürlerde de belirtildiği gibi bu tip kompozitler için Lineer-Elastik Kırılma Mekaniği esasları kullanılmış ve iyi sonuçlar alınmıştır. Ayrıca yine gevrek malzemeler için uygun olan (K_{IC}) test yönteminin elyaf takviyeli kompozitler için uygun olduğu belirtilmiştir.

Bu sebeple deneysel çalışmalarda Lineer-Elastik Kırılma Mekaniği parametreleri ve (K_{IC}) test yöntemi kullanılmıştır.

6.2. SEÇİLEN MATRİS MALZEME VE TAKVİYE ELEMANI

Deneyler için Matris malzeme olarak Polyester reçinesi seçilmiştir. Polyesterin seçilme sebebi : tasarımda en fazla bu reçinenin kullanılması, kolay temin edilebilmesi, piyasada sık kullanılması, mekanik özelliklerinin oldukça iyi olması, diğer reçinelere göre fiyat bakımından ekonomik olması gibi sebebler sayılabilir. Ayrıca polyester reçinesinin avantajları ve bazı dezavantajları Bölüm 3.5.1.1.1' de verilmiştir.

Tablo 6.1 : Kullanılan polyesterin mekanik özellikleri

Polyester Reçine (Neoxil RP 325)	
Çekme dayanımı (MPa)	45 - 48
Elastiklik modülü (GPa)	3 - 3,8
Uzama (%)	1,4
Eğilme dayanımı (MPa)	85 - 95
Deformasyon sıcaklığı (C°)	70 - 80
Özgül ağırlık (gr / cm ³)	1,09 - 1,12
Jelleşme süresi (dak)	8
Sertlik (Barcol)	45

Takviye elemanı olarak ise düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyaf kullanılmıştır. Bu tip takviye elemanının kullanılma sebebi ise : tasarımda ve piyasada oldukça fazla kullanım alanı bulması, kolay temin edilebilmesi, mekanik özelliklerinin iyi olması, el yatırma yöntemine uygun olması gibi sebebler sayılabilir.

Tablo 6.2 : Kullanılan keçe elyafın özellikleri

Cam (keçe) elyaf, (EK 300)	
Özgül ağırlık (gr / cm ³)	2,104
Çekme dayanımı (N / mm ²)	3000
Elastiklik modülü (N / mm ²)	70000
Lif çapı (µm)	9,5 - 11,5
Elyaf boyu (mm)	50 ± 2
Nem (%)	Max 0,5
Elyaf dökülmesi (%)	2,2
1.Bağlayıcı türü	Krom-silan
2.Bağlayıcı türü	Toz bağlayıcı

Literatürlerde düzlemsel rasgele dağılımlı keçenin özgül ağırlığı 2,54 - 2,6 gr / cm³ olarak verilmiştir. Fakat Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Kimya Laboratuvar' ında hassas olarak yapılan deneylerde düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyafın özgül ağırlığı 2,104 gr / cm³ olarak bulunmuştur. Daha hassas ve gerçekçi testler yapabilmek için elyafın yoğunluğu 2,104 gr / cm³ olarak alınmıştır.

6.3. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

6.3.1. KALIBIN HAZIRLANMASI

Malzeme dökümü için kullanılacak kalıp tamamen camdan hazırlanmıştır. Cam kalıp kullanılmasının sebebi, numunelerin yüzeylerinin düzgün olarak elde edilmesidir.

4 mm kalınlığındaki 110 x 60 cm ve 50 x 30 cm boyutlarındaki iki cam altlık kesildi. 1,25 mm kalınlığındaki ve 25 mm yüksekliğindeki camlar altlığa yapıştırılarak silikon ve cam macunu yardımıyla sızdırmazlık sağlandı. Bu şekilde yanyana olmak üzere 30 adet 100 x 200 x 25 mm boyutlarında kalıplar elde edildi.

6.3.2. KEÇE ELYAFLARIN HAZIRLANMASI

Tabaka halinde alınan keçe elyaflar kalıba yerleştirilmek üzere 200 x 100 mm boyutlarında 550 adet kesilerek hazırlandı. Şekil 6.1



Şekil 6.1 : Kesilen elyaf numuneleri

6.3.3. KOMPOZİT NUMUNELER İÇİN HESAPLAMALAR

Elyaflar için hesaplamalar ;

$$\text{Toplam kalıp hacmi } (V_T) = 20 \times 10 \times 2,5 = 500 \text{ cm}^3$$

$$\text{Tek bir elyaf keçenin ağırlığı } (G_0) \cong 8,4 \text{ gr}$$

$$\text{Elyafın özgül ağırlığı } (\rho_0) = 2,104 \text{ gr / cm}^3$$

Tek bir elyaf keçenin hacmi ise ;

$$V_{e1} = \frac{G_e}{\rho_e}$$

$$V_{e1} = \frac{8,4}{2,104}$$

$$V_{e1} \cong 4 \text{ cm}^3$$

olarak bulunur.

Tek bir elyaf keçenin toplam kalıp hacmi içerisindeki yüzde oranı ise ;

$$\frac{500}{100} = \frac{4}{V_{e1}}$$

oranından hesaplanarak,

$$V_{e1} = \% 0,8$$

olarak bulunur.

Kalıp içerisindeki toplam elyaf hacim oranının $V_e = \%24$ olması için toplam elyaf adedi ;

$$E_{T0,24} = \frac{24}{0,8} = 30 \text{ adet bulunur.}$$

Kalıp içerisindeki toplam elyaf hacim oranının $V_e = \%20$ olması için toplam elyaf adedi ;

$$E_{T0,20} = \frac{20}{0,8} = 25 \text{ adet bulunur.}$$

Kalıp içerisindeki toplam elyaf hacim oranının $V_e = \%16$ olması için toplam elyaf adedi ;

$$E_{T0,16} = \frac{16}{0,8} = 20 \quad \text{adet bulunur.}$$

Kalıp içerisindeki toplam elyaf hacim oranının $V_e = \%12$ olması için toplam elyaf adedi ;

$$E_{T0,12} = \frac{12}{0,8} = 15 \quad \text{adet bulunur.}$$

Kalıp içerisindeki toplam elyaf hacim oranının $V_e = \%8$ olması için toplam elyaf adedi ;

$$E_{T0,08} = \frac{8}{0,8} = 10 \quad \text{adet bulunur.}$$

Kalıp içerisindeki toplam elyaf hacim oranının $V_e = \%4$ olması için toplam elyaf adedi ;

$$E_{T0,04} = \frac{4}{0,8} = 5 \quad \text{adet bulunur.}$$

Polyester için hesaplama ;

Kalıp içerisindeki polyester katları için hesaplama aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Tek bir elyaf keçenin ortalama kalınlığı $\cong 0,7$ mm' dir.

Tek bir elyaf keçenin polyester emme hacmi $= (10 \times 20 \times 0,07) - 4 = 10 \text{ cm}^3$

$V_e = \%24$ Elyaf hacmi için hesaplama ;

Toplam elyafların kalınlığı $= 30 \times 0,7 = 21$ mm

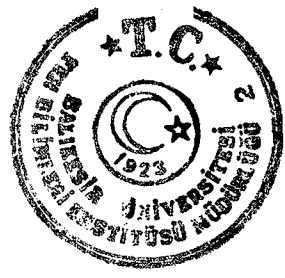
Toplam polyester kalınlığı $= 25 - 21 = 4$ mm

Tek kat polyesterin kalınlığı $= 4 / 31 = 0,129$ mm

Tek kat polyesterin hacmi $= 10 \times 20 \times 0,0129 = 2,58 \text{ cm}^3$ olmalıdır.

$V_e = \%20$ Elyaf hacmi için hesaplama ;

Toplam elyafların kalınlığı $= 25 \times 0,7 = 17,5$ mm



Toplam polyester kalınlığı = $25 - 17,5 = 7,5$ mm

Tek kat polyesterin kalınlığı = $7,5 / 26 = 0,288$ mm

Tek kat polyesterin hacmi = $10 \times 20 \times 0,0288 = 5,76$ cm³ olmalıdır.

$V_e = \%16$ Elyaf hacmi için hesaplama ;

Toplam elyafların kalınlığı = $20 \times 0,7 = 14$ mm

Toplam polyester kalınlığı = $25 - 14 = 11$ mm

Tek kat polyesterin kalınlığı = $11 / 21 = 0,523$ mm

Tek kat polyesterin hacmi = $10 \times 20 \times 0,0523 = 10,46$ cm³ olmalıdır.

$V_e = \%12$ Elyaf hacmi için hesaplama ;

Toplam elyafların kalınlığı = $15 \times 0,7 = 10,5$ mm

Toplam polyester kalınlığı = $25 - 10,5 = 14,5$ mm

Tek kat polyesterin kalınlığı = $14,5 / 16 = 0,906$ mm

Tek kat polyesterin hacmi = $10 \times 20 \times 0,0906 = 18,12$ cm³ olmalıdır.

$V_e = \%8$ Elyaf hacmi için hesaplama ;

Toplam elyafların kalınlığı = $10 \times 0,7 = 7$ mm

Toplam polyester kalınlığı = $25 - 7 = 18$ mm

Tek kat polyesterin kalınlığı = $18 / 11 = 1,636$ mm

Tek kat polyesterin hacmi = $10 \times 20 \times 0,1636 = 32,72$ cm³ olmalıdır.

$V_e = \%4$ Elyaf hacmi için hesaplama ;

Toplam elyafların kalınlığı = $5 \times 0,7 = 3,5$ mm

Toplam polyester kalınlığı = $25 - 3,5 = 21,5$ mm

Tek kat polyesterin kalınlığı = $21,5 / 6 = 3,583$ mm

Tek kat polyesterin hacmi = $10 \times 20 \times 0,3583 = 71,66$ cm³ olmalıdır.

Tablo 6.3 : Elyaf lar ve polyester katları için hesaplanan değerler

Elyaf Yüzdesi	Kalıpdaki elyaf adedi	Elyaf lar arasındaki polyester katlarının hacmi (cm ³)	Tek bir elyaf keçerinin polyester emme hacmi (cm ³)
%24	30	2,58	10
%20	25	5,76	10
%16	20	10,46	10
%12	15	18,12	10
%8	10	32,72	10
%4	5	71,66	10

6.3.4. KOMPOZİT MALZEMENİN EL YATIRMASI YÖNTEMİYLE DÖKÜM AŞAMASI

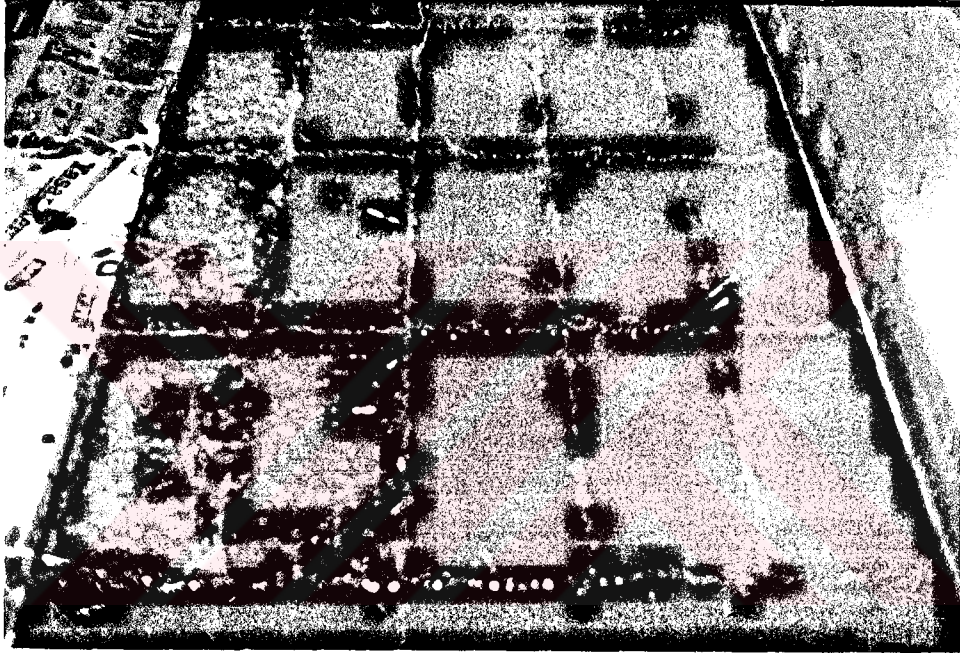
Deneylerde kullanılacak kompozit malzemenin el yatırması yöntemiyle hazırlanma aşamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- 1-) Kalıplara önce bir kat PVA kalıp ayırıcı sürüldü ve kuruması beklenildi.
- 2-) Tablo 6.3 de görülen hacimde ve yükseklikte matris katları oluşturmak için ; ölçülü tüp yardımıyla tabloda belirtilen oranlarda polyester hazırlandı.
- 3-) 1 Lt polyestere 50 ml hızlandırıcı ve 20 ml kobaltnaftanat sertleştirici olmak üzere 2. adımda hazırlanan polyesterle karışım hazırlandı.
- 4-) Hazırlanan karışımlar cam kalıplara ilk kat olarak yayıldı ve karışımın kalıpta kendini toparlaması için yaklaşık 30 - 50 dakika beklendi.
- 5-) Kendini toparlayan bu karışım üzerine elyaf takviyesi yapabilmek amacıyla 3. adımda anlatıldığı şekilde tekrar karışım hazırlandı.
- 6-) 5. adımda hazırlanan karışımın bir kısmı kalıba yeniden yayılarak üzerine önceden hazırlanan elyaf takviyesi yapıldı. Hazırlanan karışımla elyaf iyice ıslatıldı. Hava kabarcığı kalmaması için fırça ile hafif darbeler yaparak karışım elyafa yedirildi ve ıslanan elyafın kendini toparlaması için yaklaşık 15 - 30 dakika beklenildi.

7-) Elyaf lar üzerine dökülmek ve polyester katını oluşturmak için 3. ve 4. adımlar tekrarlandı.

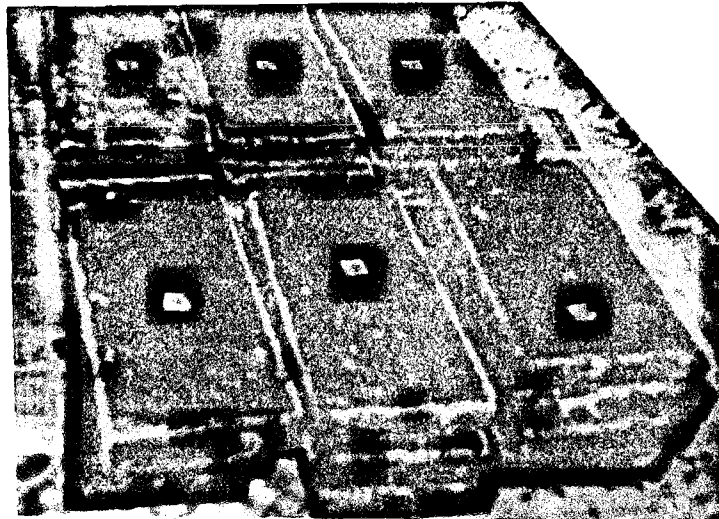
8-) 5. ve 6. adımlardaki işlemler tekrarlanarak elyaf takviyesi yapıldı.

Numuneler istenen kalınlığa gelinceye kadar bu işlemler sırasıyla tekrarlandı. Numunelerin kalıp içindeki bitmiş halleri Şekil 6.2 de görülmektedir.



Şekil 6.2 : Numunelerin kalıp içindeki bitmiş halleri

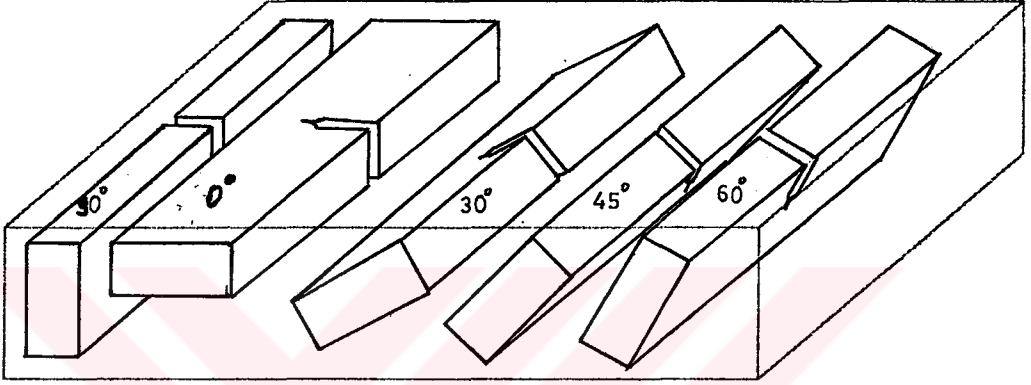
Kalıplama işlemi biten bu numuneler kalıplardan çıkarılarak kenarları düzeltildi. Kalıplardan çıkartılıp kenarları düzeltilen numuneler Şekil 6.3 de görülmektedir.



Şekil 6.3 : Kalıplardan çıkarılan numuneler

6.3.5. NUMUNELERİN KESİMİ

Numuneler Şekil 6.4 de görülen tarzda 0, 30, 45, 60, 90 derece yönlerinde kesilerek Vals freze tezgahında işlendi. İşlenen numuneler 20 x 84 x 10 mm boyutlarına getirildi.



Şekil 6.4 : Kompozit plakaların farklı yönlerde kesim biçimleri

Yine Vals freze tezgahında 1mm kalınlıkta silindirik testere yardımıyla bütün numunelere (standartta öngörülen tarzda 1,25 mm geçmeyecek tarzda) yarıklar açıldı.

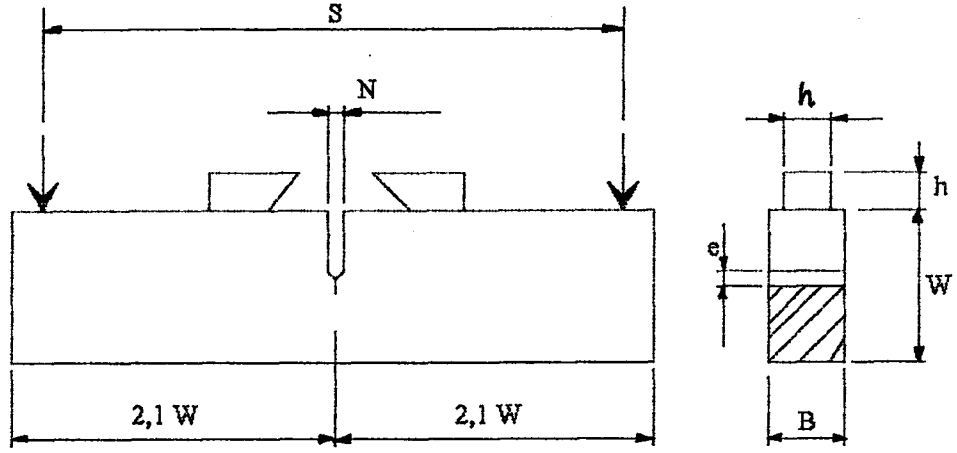
6.3.6 ÖN YORULMA ÇATLAĞININ AÇILMASI

Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen deneyimlere ve literatürden elde edilen bilgilere göre ;

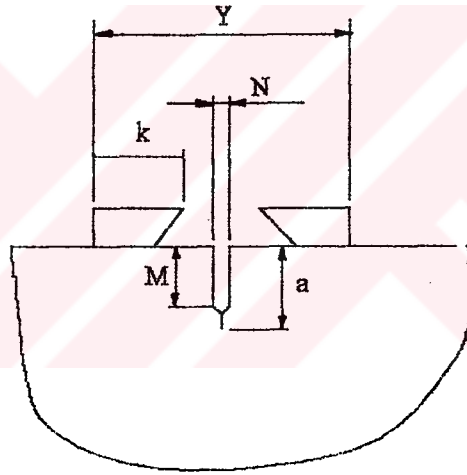
Ön yorulma çatlağının açılmasında polyester matrisin durdurucu etki yapmaktadır. Yüksek çevrim oranlarında bile doğrusal ilerleme başarı ile gerçekleştirilememiştir (21). Bilinen yöntemlerle ön yorulma çatlağı açılırken, çatlak istenen boyutuna gelmeden istenmeyen dallanmalar olmaktadır.

Yorulma çatlağının açılmasındaki bu zorluklar göz önüne alınarak, istenen boyutta bilenen çelik testere ile standarda uygun ön yorulma çatlağı sağlıklı bir şekilde açılmıştır.

Ön yorulma çatlağı açılan numuneler üzerine daha önceden hazırlanan ve Klip-gauge' nin uçlarının yerleştirileceği çeneler yapıştirildi.



(a)



(b)

S	=	80 mm
a	=	10 mm
B	=	10 mm
W	=	20 mm
N	=	1,1 mm
M	=	9 mm
e	=	1 mm
k	=	25 mm
Y	=	62 mm
h	=	7 mm

Ölçüler boyut sınırlamalarına uygundur.

Şekil 6.5 : K1C Numuneleri için belirlenen kesin ölçüler

Şekil 6.6 da tamamen bitmiş numunelerin toplu halleri görülmektedir.



Şekil 6.6 : Tamamen bitmiş durumundaki numuneler

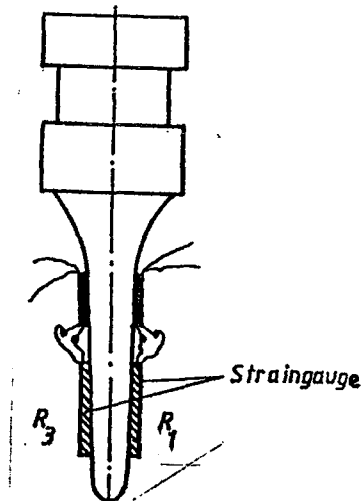
6.4 TEST EKİPMANLARI

Deneysel çalışmada kullandığımız test ekipmanları ;

2 adet kuvvet ölçer, çentik ucu açılmasını ölçer Clip-gauge, numune eğme aparatı, xy yazıcı recorder, amplifikatör ve deneylerin yapıldığı test makinasından oluşmaktadır.

6.4.1. KUVVET ÖLÇER

Elde edilen sinyallerin iyi algılanabilmesi için straingauge' lerin üzerine yapıştırıldığı yüzeylerin kalınlığı 2 mm olan bir kuvvet ölçer hazırlanmıştır.



Şekil 6.7 : Deneyde kullanılan kuvvet ölçerin şematik gösterilişi

Kuvvet ölçümü için direnci 120Ω ' luk, gauge faktörü 2,07 olan strain gauge' ler ile bir köprü devresi kurulmuştur.

Wheatstone köprü devresi II. kuralına göre dengelenmemiş durumdaki köprü devresinde, zıt kollardaki dirençler, değişimlerinin toplamı kadar çıkış verirler. Dirençler basma kuvveti etkisinde kaldıklarında ;

$$(-\delta_{R_1} \pm \delta_{R_{1t}}) + (-\delta_{R_3} \pm \delta_{R_{3t}}) = -\delta_{R_1} - \delta_{R_3} \pm \delta_{R_{1t}} \pm \delta_{R_{3t}} \quad (6.1)$$

şeklinde yazılır. Burada, (R_1) , (R_3) dirençler ve (R_{1t}) ile (R_{3t}) aynı dirençlerin sıcaklıktan etkilendikleri zamanki değerlerini göstermektedir. (+ sıcaklık artışı veya - sıcaklık düşmesi durumunda)

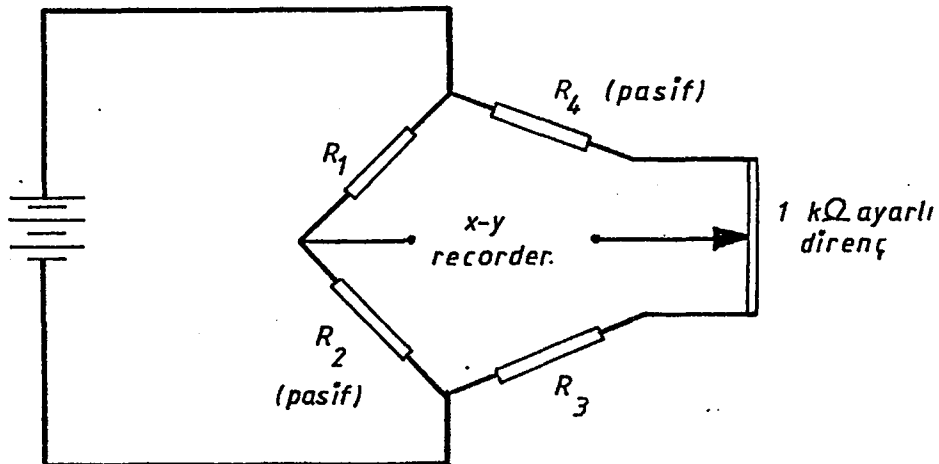
Kullanılan dirençler eşit olduğunda $(R_1 = R_3)$ en son denklem (6.1)' in sonucu,

$$-2.\delta_R \pm 2.\delta_{R_t} \quad (6.2)$$

olur. Dirençler basma kuvvetlerine maruz kaldıklarından zıt yönde çıkış verirler. Fakat sıcaklık kompenzasyonu sağlanmış olmaz. Bu nedenle pasif direnç kullanarak köprü devresindeki dirençlerin sıcaklıktan etkilenmemesi sağlanmış olur. Pasif direnç kullanılıncaya denklem sonucu, Wheatstone köprü devresi I. kuralına göre yazılırsa,

$$(-2.\delta_R \pm 2.\delta_{R_t}) - (\pm \delta_{R_t} \pm \delta_{R_t}) = -2.\delta_R \quad (6.3)$$

olur. xy recorder' inde kalem ayarı sağlamak için Wheatstone devresine $1 k\Omega$ ' luk ayarlı direnç konulmuştur.(Şekil 6.8)



Şekil 6.8 : Kuvvet ölçerinin Wheatstone köprü devresi

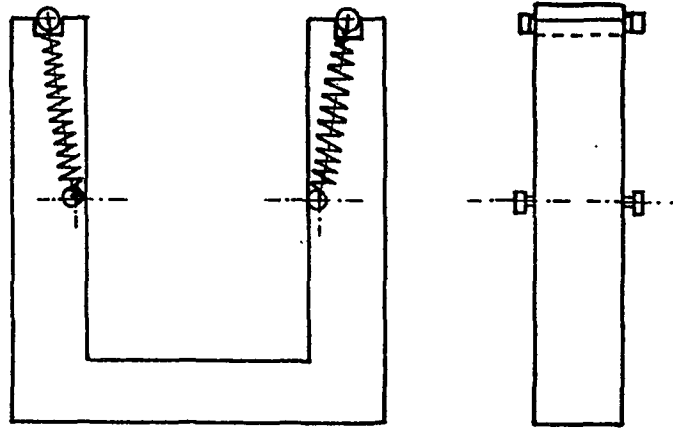
6.4.2. ÇENTİK UCU AÇILMASINI ÖLÇER (Clip-gauge)

Çatlak açıklığı (V) nin ölçümü için, Bölüm 4.4.2.1.2' de (çatlak açıklığı ölçüm düzeninde) yapılan tüm açıklamalar ile Şekil 4.12 a, b, c' de verilen düzenek aynen kullanılır.

Burada straingauge' lerin tespit edildiği parçalar yay çeliğinden 0,5 mm kalınlık, 20 mm genişlik ve 40 mm uzunluğunda 2 adet parça ile bir gövdeye ve bu çelik parçaların üzerine dirençleri 120 Ω ve gauge faktörü 2,07 olan 4 adet straingauge, Şekil 4.12 c' deki gibi tesbit edilmişlerdir. Clip-gauge' deki yay uçları çakı tarafından tutulacak şekilde yuvarlatılmıştır. Clip-gauge' nin sinyallerini alabileceğimiz Wheatstone köprü devre şeması ise Şekil 4.12 b' de olduğu gibidir.

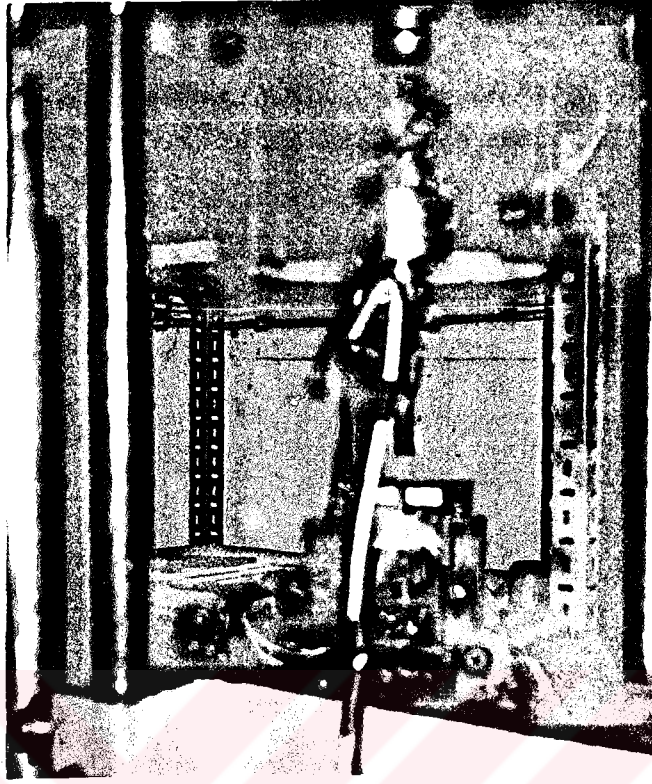
6.4.3. NUMUNE EĞME APARATI

Hazırlanan test numunelerinin üzerinde kırılmasını sağlayacak aparatın boyutları BS 5762 standardındaki esaslara uyularak aşağıdaki şekilde olduğu gibi yapılmıştır.



Şekil 6.9 : Numune eğme aparatı

Numune eğme aparatı, clip-gauge ve kuvvet ölçerin numuneyi kırmaya hazır haldeki durumları aşağıdaki şekilde verilmiştir.

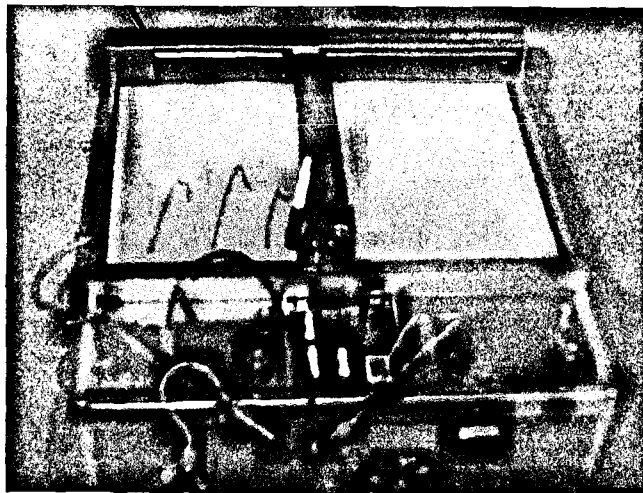


Şekil 6.10 : 2 mm' lik kuvvet ölçer ile ölçüme hazır düzenek

6.4.4. AMPLİFİKATÖR, XY RECORDER VE TEST MAKİNASI

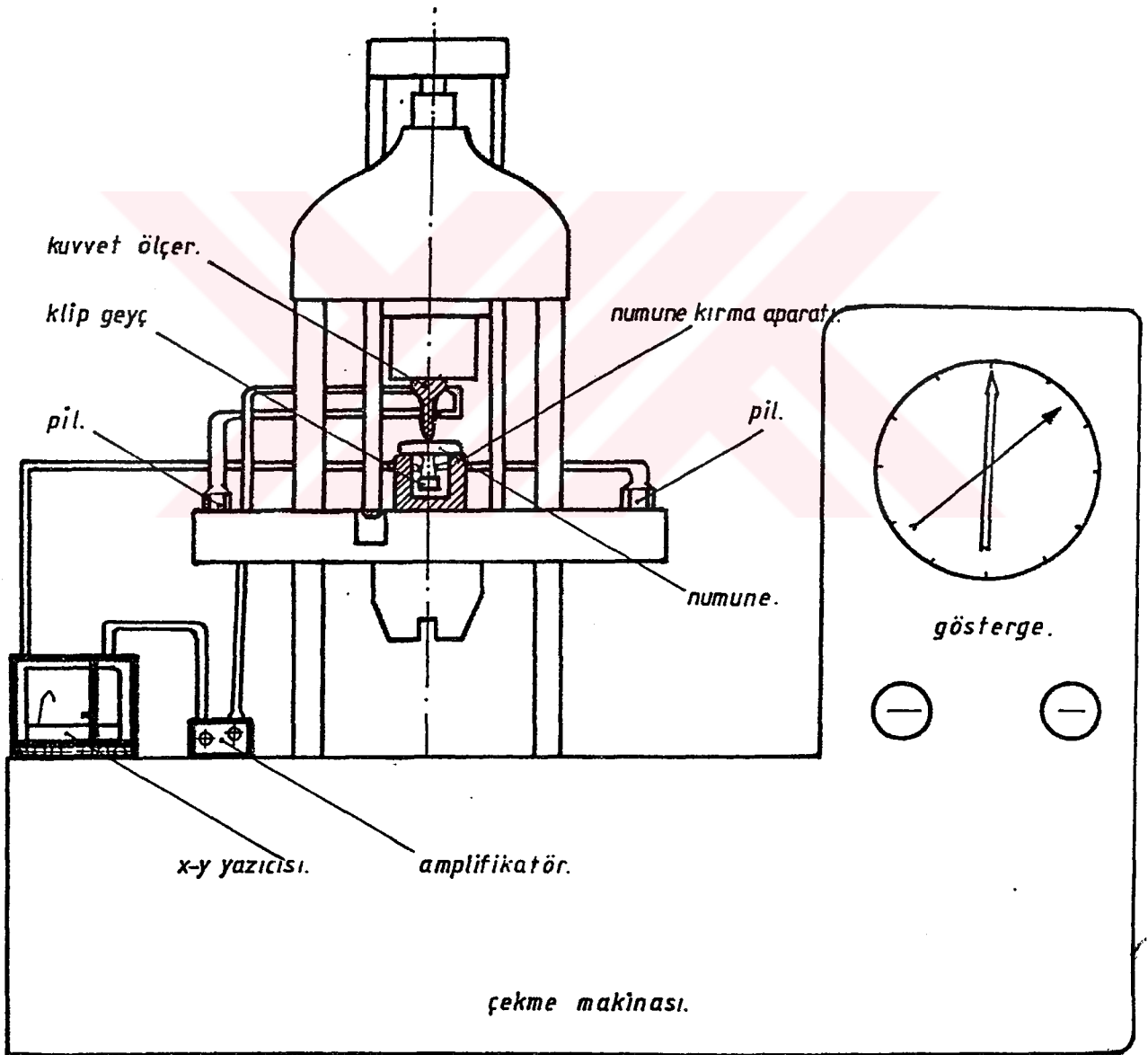
Test esnasında kuvvet ölçerdeki zayıf sinyalleri kuvvetlendirmek amacıyla 2000 keze kadar büyütme yapabilen bir amplifikatör kullanılmıştır. Test öncesi amplifikatör sıfır ayarı yapılmıştır.

Kuvvet-çatlak ucu yer değişim eğrisi ise RW-11T Rikadenki marka xy recorderi ile kaydedilmiştir. Yazıcı aşağıdaki şekilde görülmektedir.

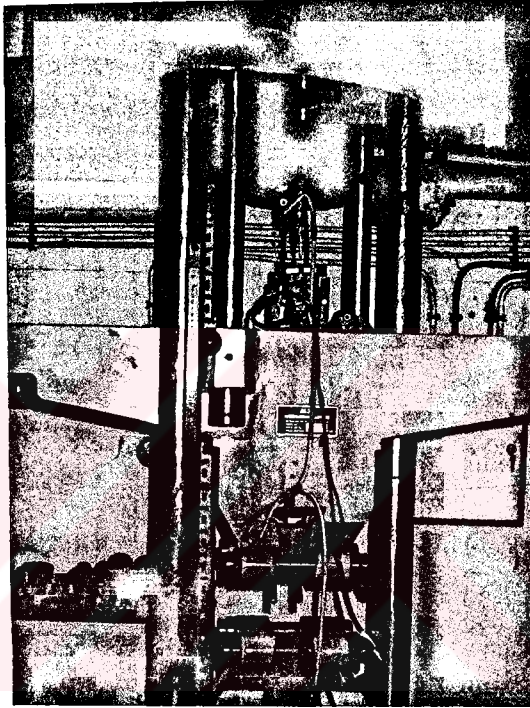


Şekil 6.11 : xy recorder

Test makinesi, Alşa marka, 20 ton çekme yapabilen bir cihazdır. Deney standının şematik gösterimi ve resmi Şekil 6.12 ve 6.13' de verilmiştir.



Şekil 6.12 : Deney standının şematik gösterimi



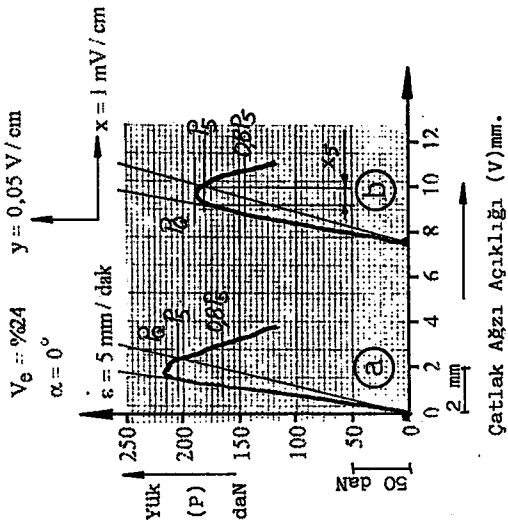
Şekil 6.13 : Deney standı

6.5. ALINAN (P - V) EĞRİLERİ

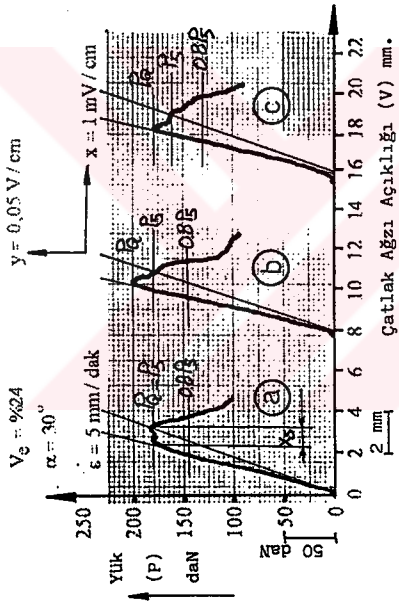
Hazırlanan elyaf takviyeli kompozit malzemelerden ortalama 3' er adet numune (3 PB, 3 noktadan eğme numunesi şeklinde) kırılma tokluğu ölçüm yöntemlerine göre, olması gereken boyut sınırlamalarına uygun olarak hazırlanmıştır.

Bölüm 6.3.7' de anlatılan ve şekilleri verilen test ekipmanları ile hazırlanan deney standının kullanılması sonucu (numuneye kuvvet ölçerin baskı yapması ile oluşan sinyaller ve bu anda çatlak yüzeylerinin ayrılışını numunedeki çenelere tesbit edilmiş olan Clip-gauge'nin uçların açılması ile oluşan sinyaller ile birlikte, recorder' dan alınmasıyla) deneysel çalışmayı gerçekleştirmiş oluruz.

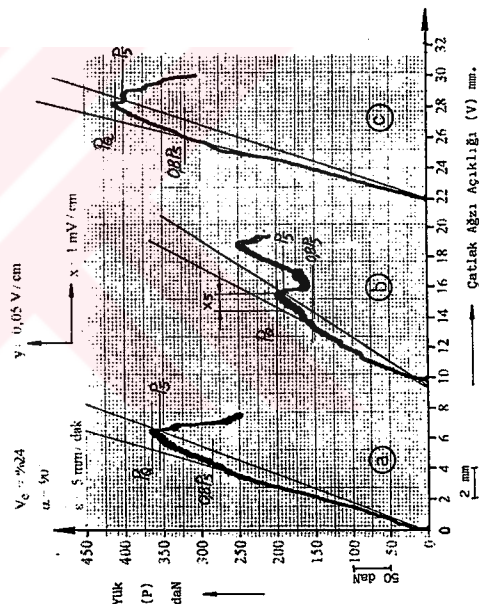
Numunelerin tümü deney esnasında kırılmıştır. Elyaf hacmine, elyaf yönüne, yükleme hızına (deformasyon hızı) bağlı olarak elde edilen bütün (P - V) eğrileri Şekil 6.14 - 6.103' de görülmektedir. Saf polyesterin 3 farklı yükleme hızı altındaki (P - V) eğrileri Şekil 6.104 de görülmektedir.



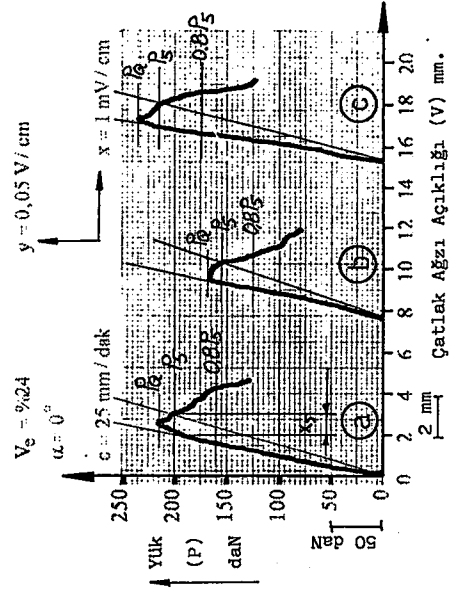
Şekil 6.14: Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



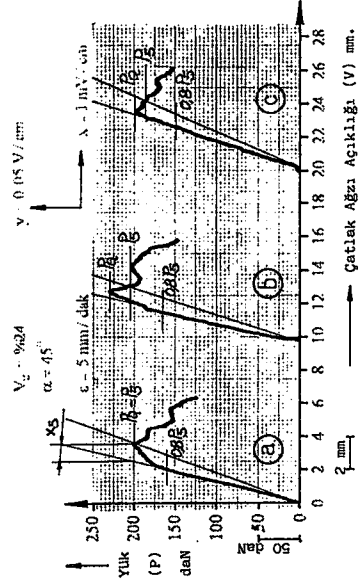
Şekil 6.15: Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



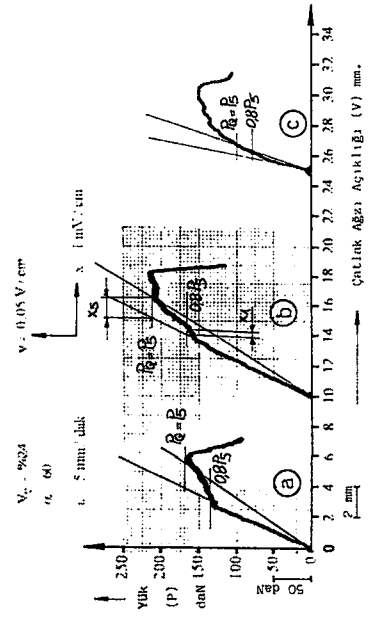
Şekil 6.16: Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 50^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



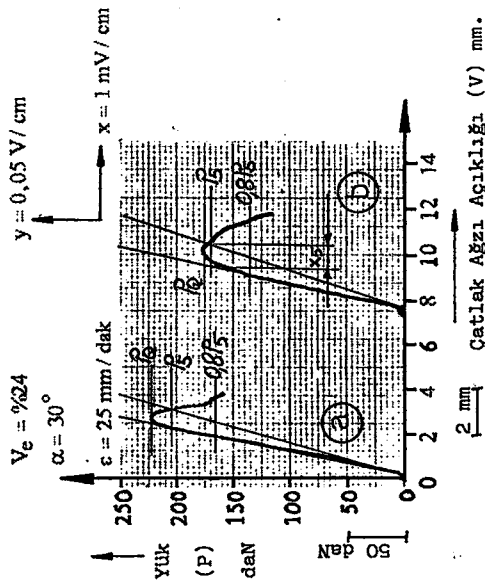
Şekil 6.17: Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



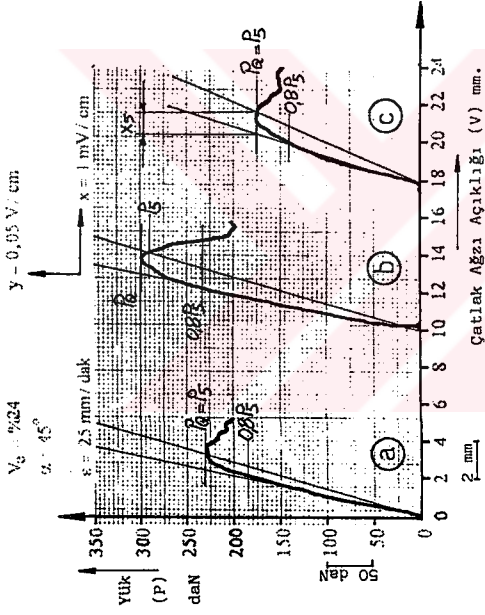
Şekil 6.18: Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



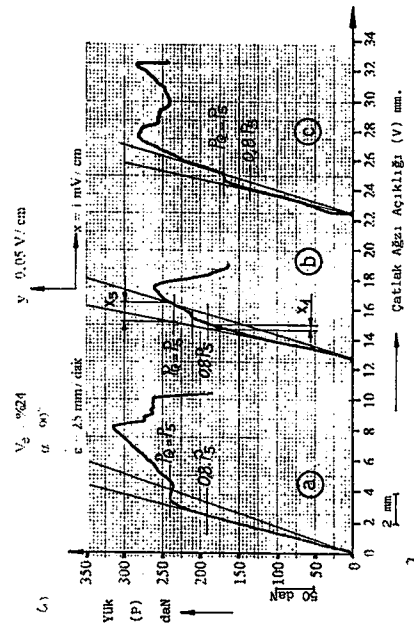
Şekil 6.19: Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



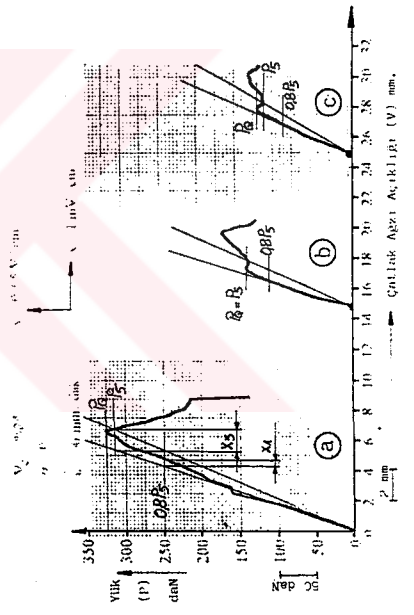
Şekil 6.20 Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



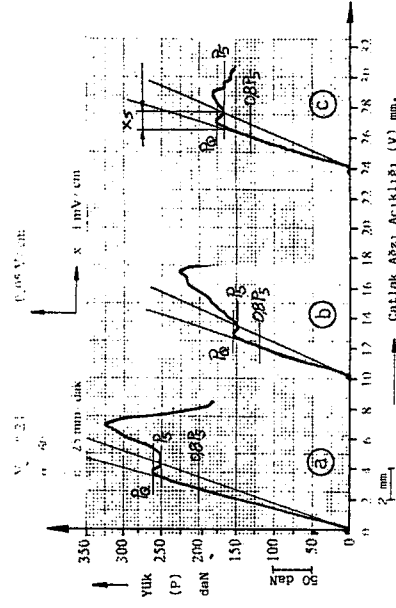
Şekil 6.21 Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



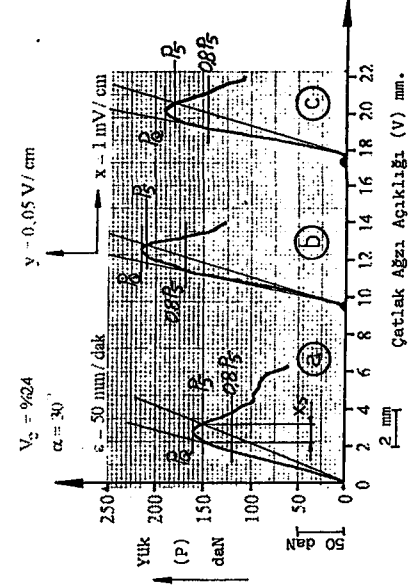
Şekil 6.23 Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



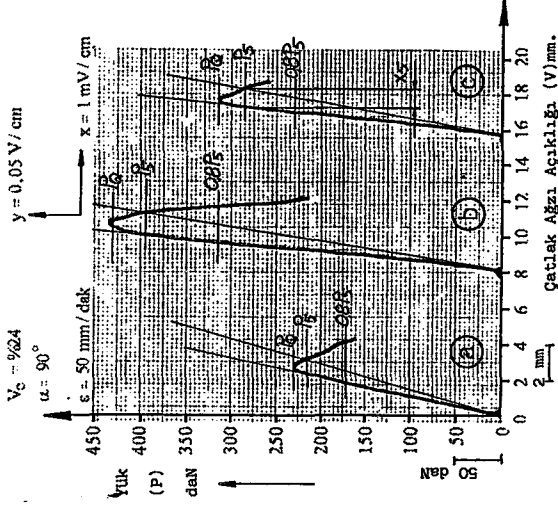
Şekil 6.24 Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



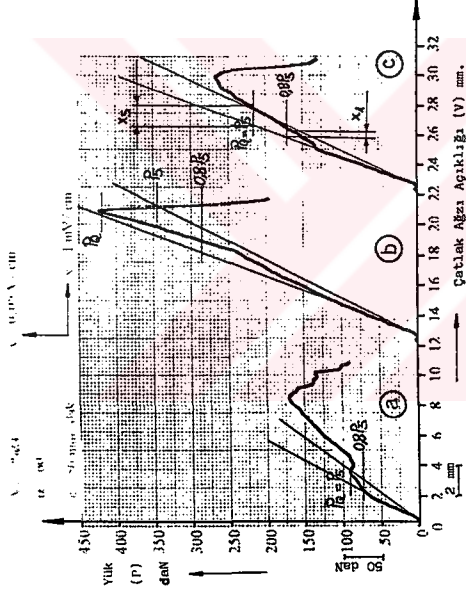
Şekil 6.22 Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



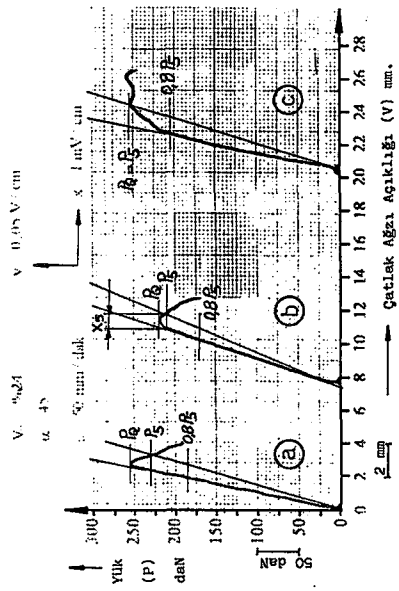
Şekil 6.25 Elyaf hacmi $V_e = \%24$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



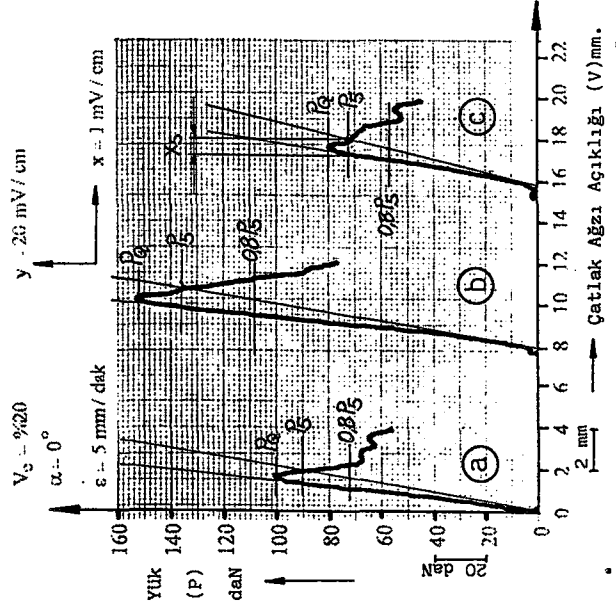
Şekil 6.24 Elyaf hacmi $V_c = \%24$, eilyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



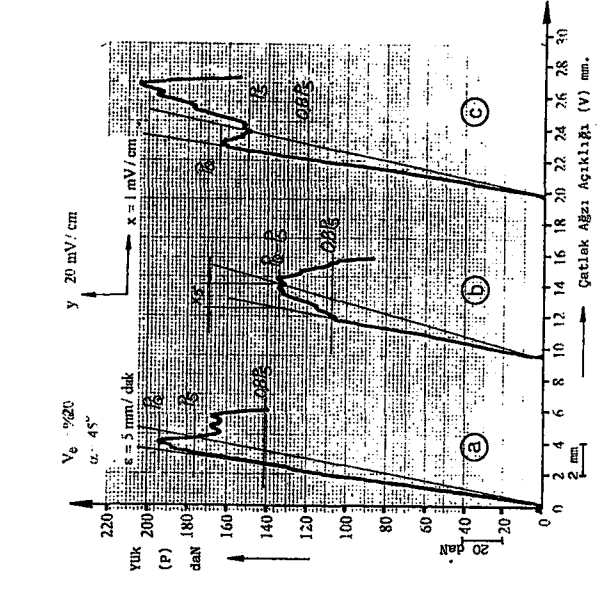
Şekil 6.27 Elyaf hacmi $V_c = \%24$, eilyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



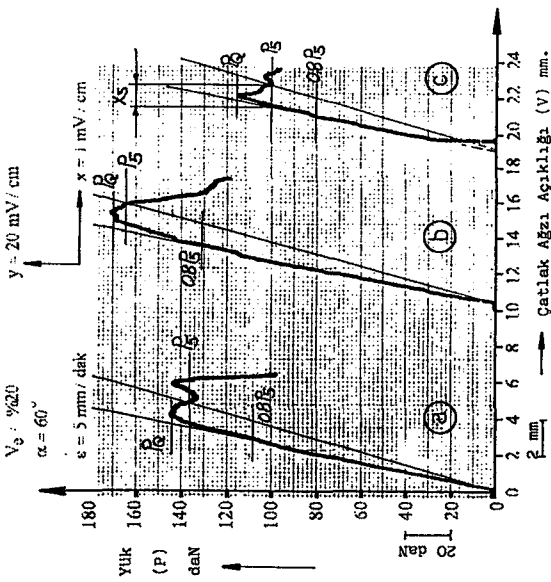
Şekil 6.26 Elyaf hacmi $V_c = \%24$, eilyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



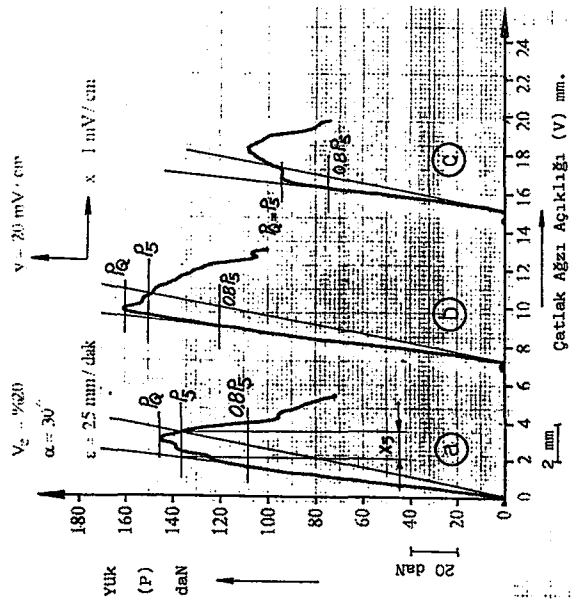
Şekil 6.29 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, eilyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



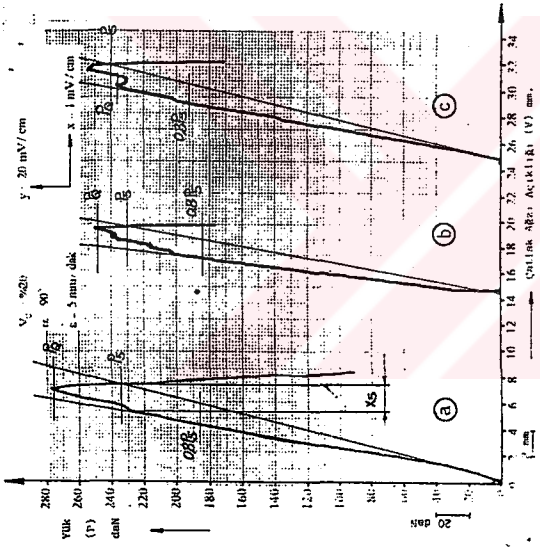
Şekil 6.31 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, eilyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



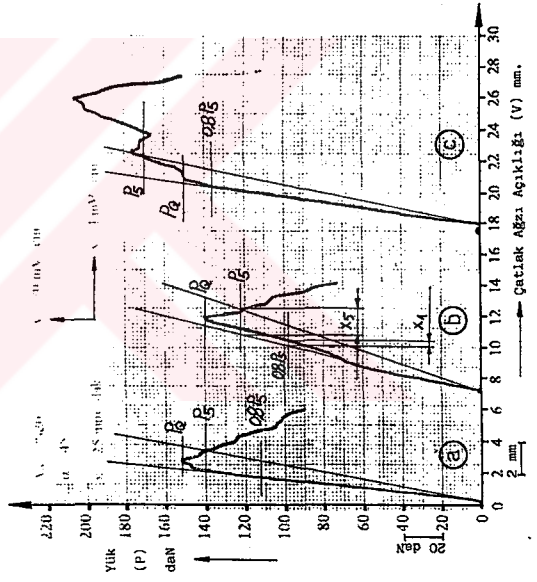
Şekil 6.32 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



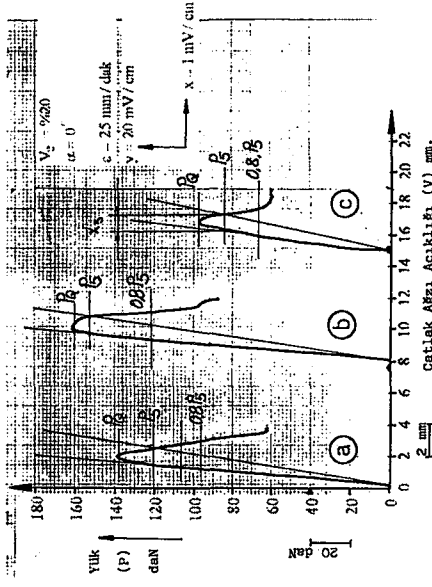
Şekil 6.35 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 2.5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



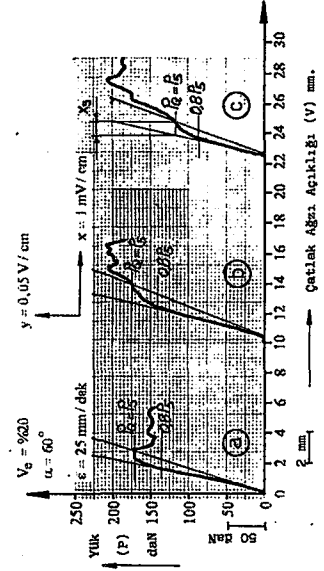
Şekil 6.33 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



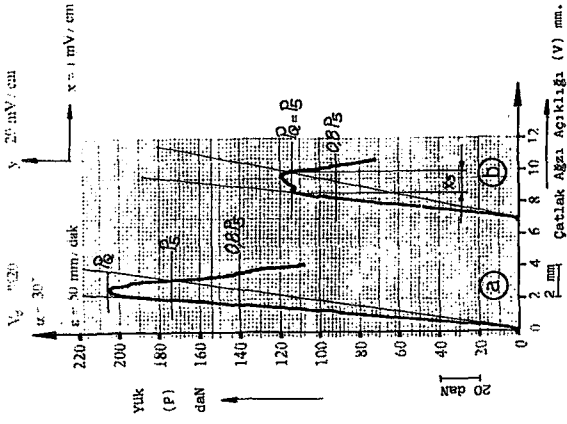
Şekil 6.36 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 2.5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



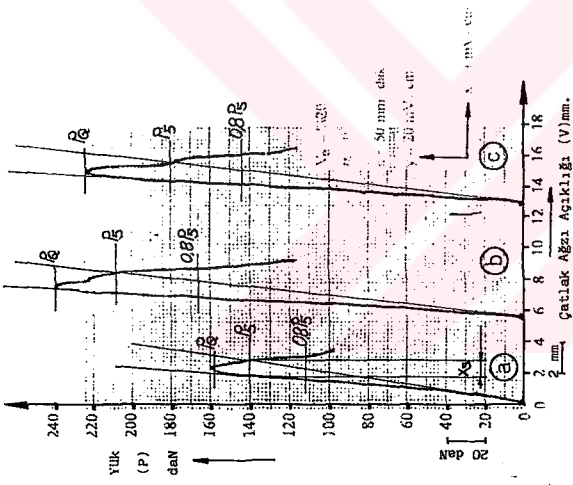
Şekil 6.34 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



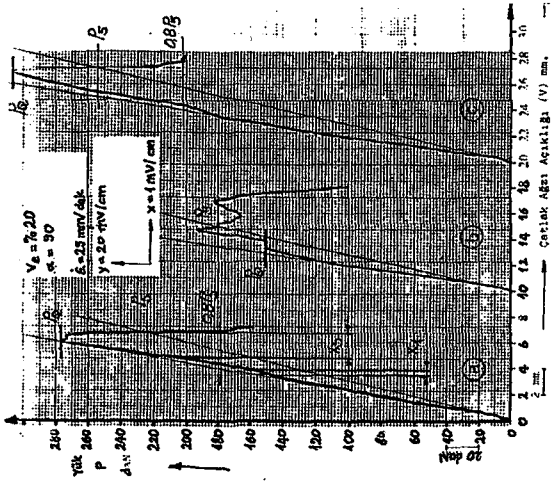
Şekil 6.37 Elyaf hacmi $V_c = \%20$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



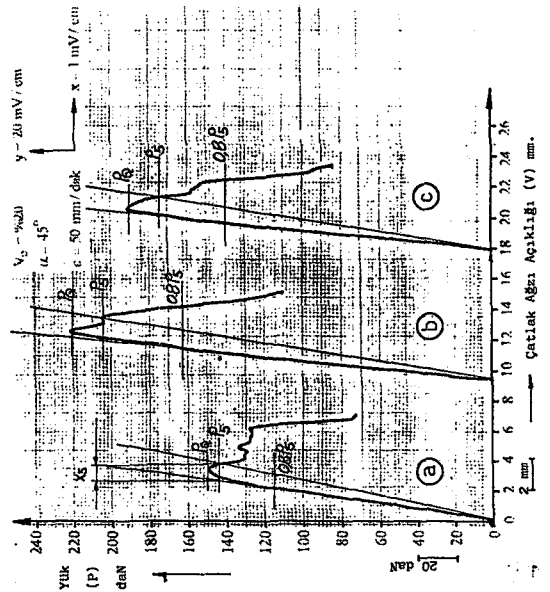
Şekil 6.40 Elyaf hacmi $V_e = 20$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



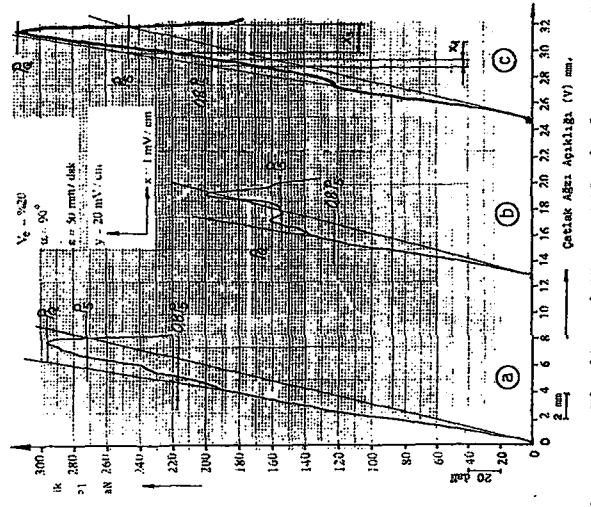
Şekil 6.39 Elyaf hacmi $V_e = 20$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



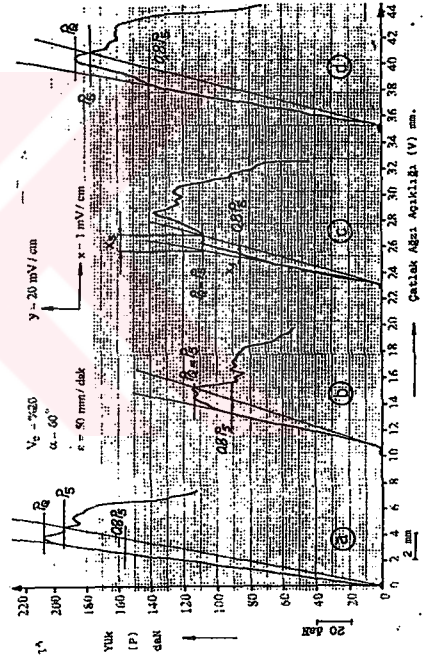
Şekil 6.38 Elyaf hacmi $V_e = 20$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



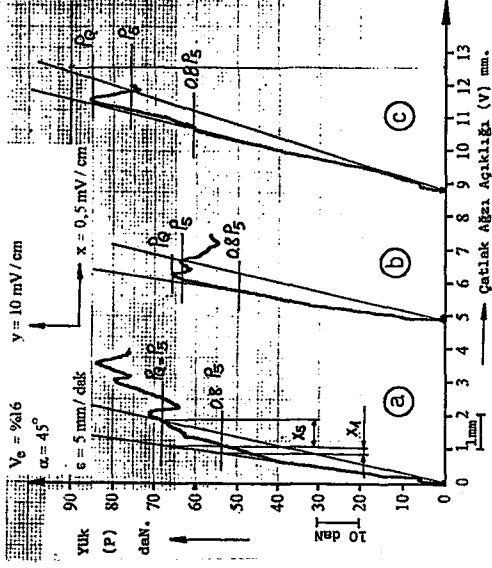
Şekil 6.41 Elyaf hacmi $V_e = 20$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



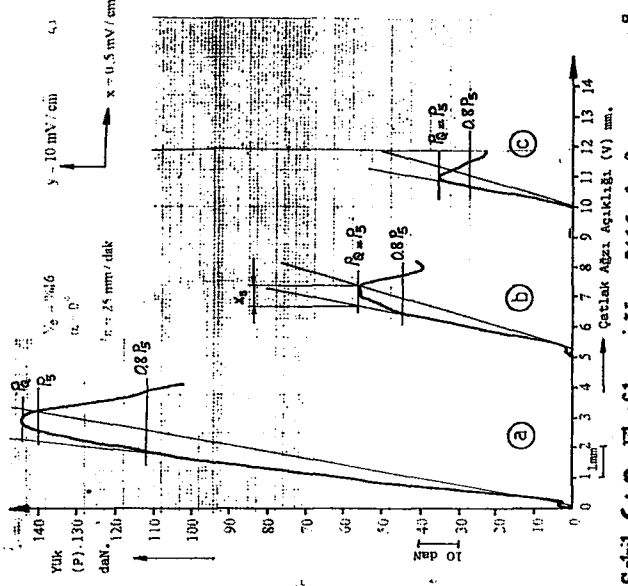
Şekil 6.43 Elyaf hacmi $V_e = 20$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



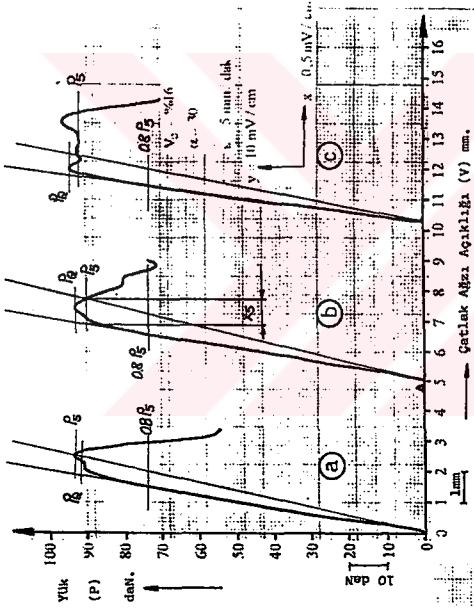
Şekil 6.42 Elyaf hacmi $V_e = 20$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



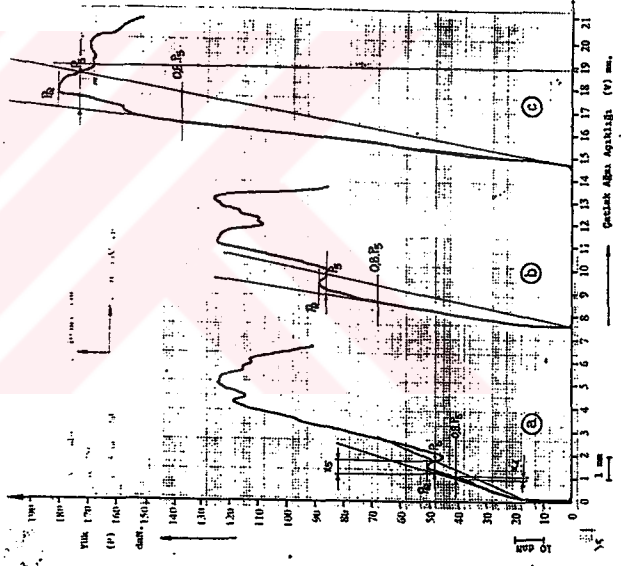
Şekil 6.46 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitün (P-V) eğrisi



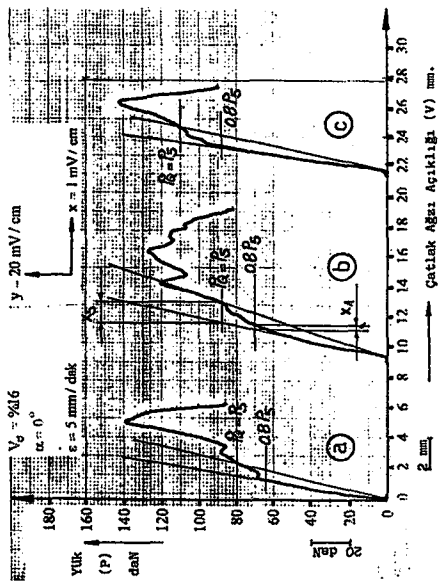
Şekil 6.49 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25$ mm/dak olan kompozitün (P-V) eğrisi



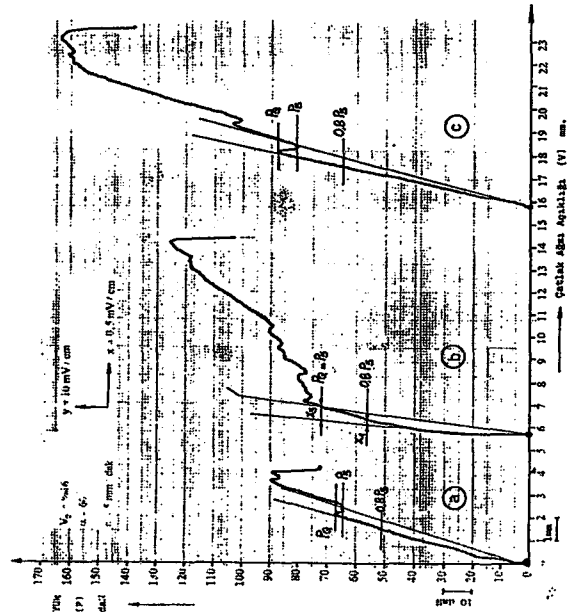
Şekil 6.45 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitün (P-V) eğrisi



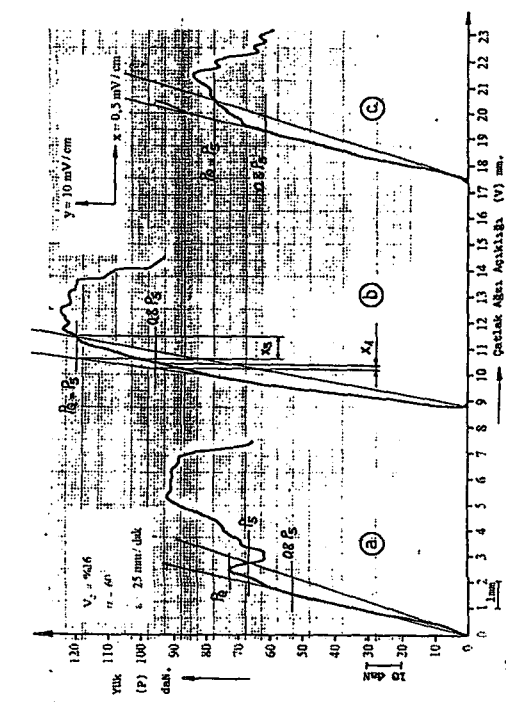
Şekil 6.48 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitün (P-V) eğrisi



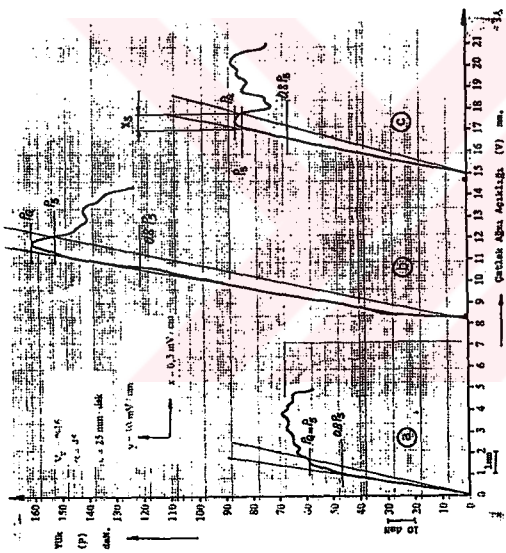
Şekil 6.44 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitün (P-V) eğrisi



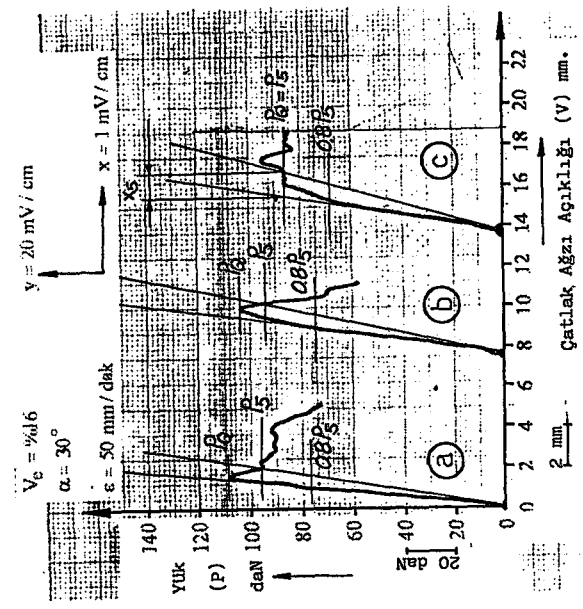
Şekil 6.47 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitün (P-V) eğrisi



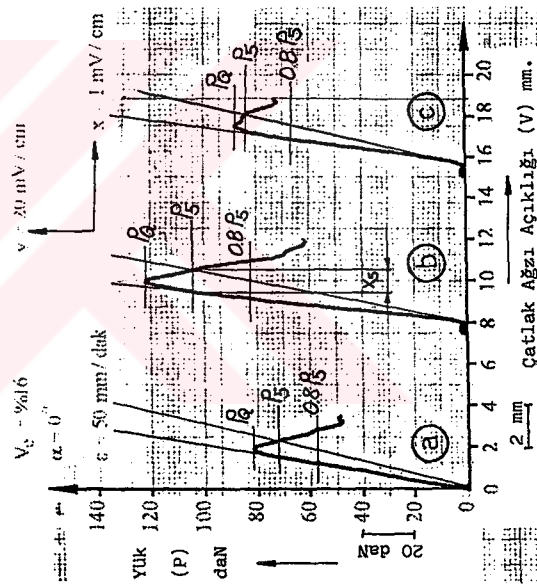
Şekil 6.52 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



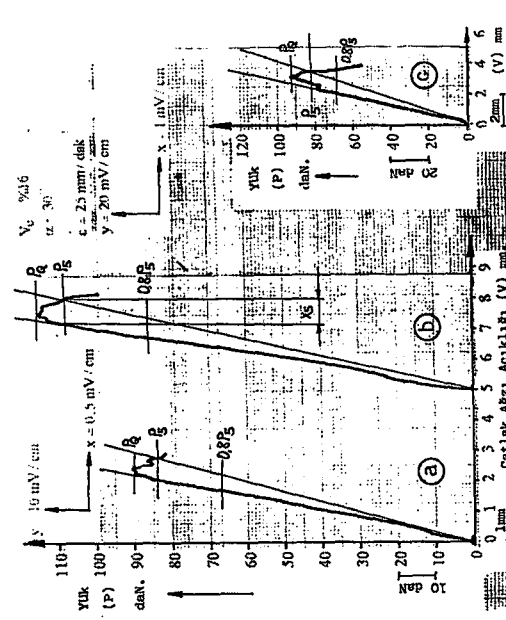
Şekil 6.51 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



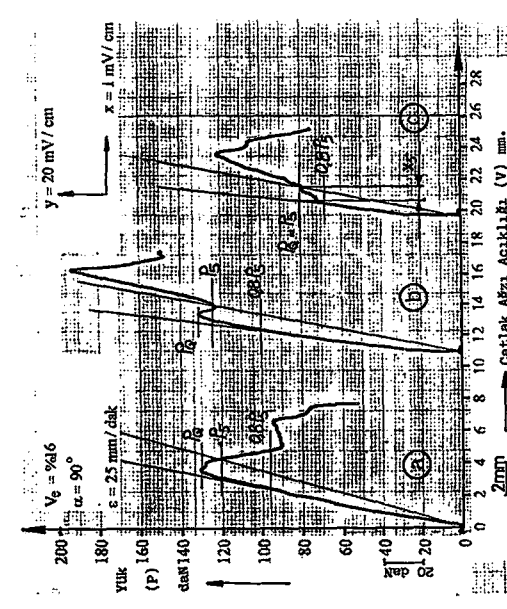
Şekil 6.55 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



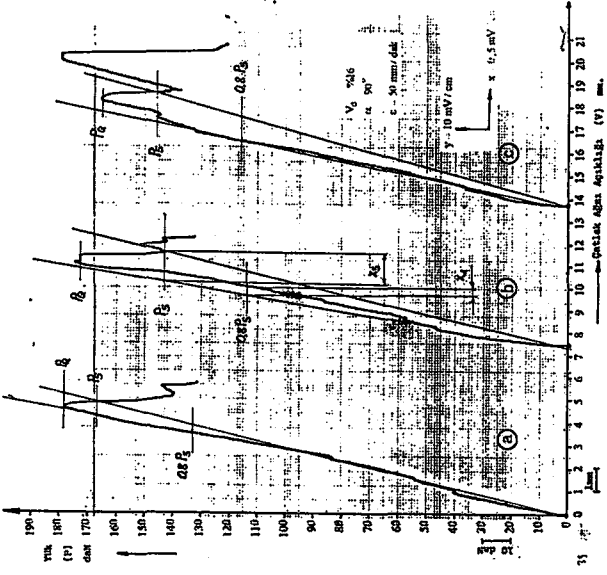
Şekil 6.54 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



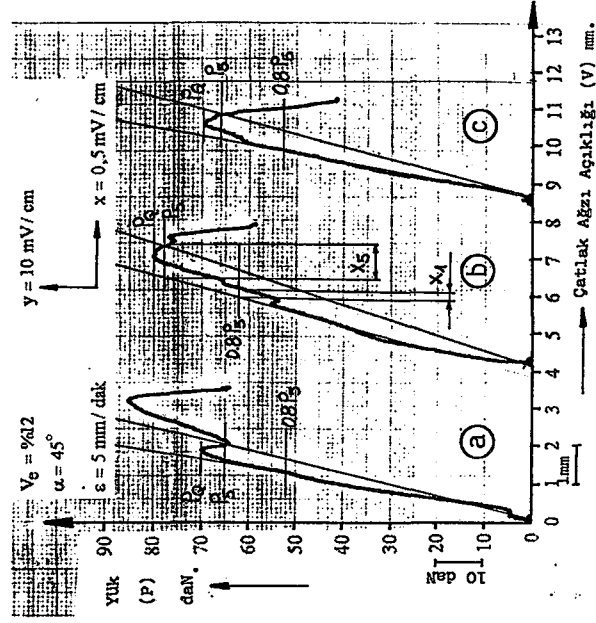
Şekil 6.50 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



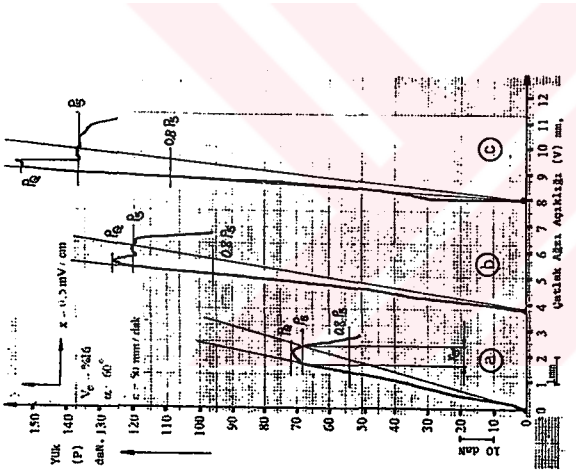
Şekil 6.53 Elyaf hacmi $V_c = \%16$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



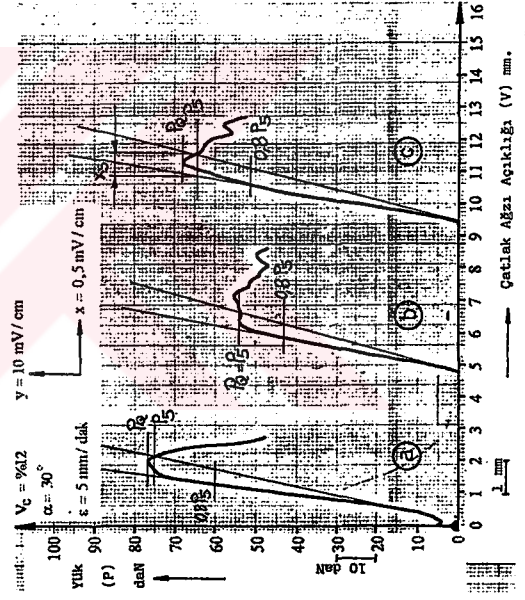
Şekil 6.58 Elyaf hacmi $V_e = \%16$, eilyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



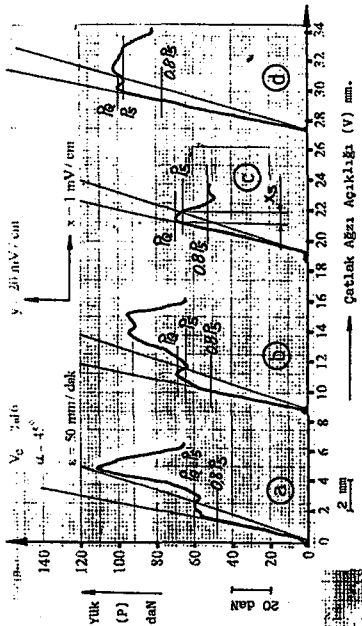
Şekil 6.61 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, eilyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



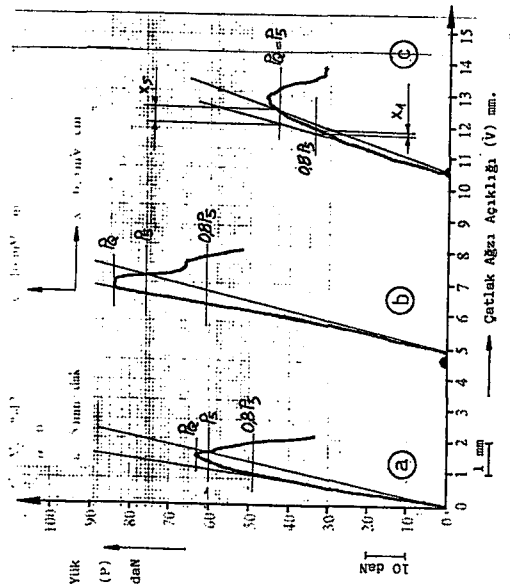
Şekil 6.57 Elyaf hacmi $V_e = \%16$, eilyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



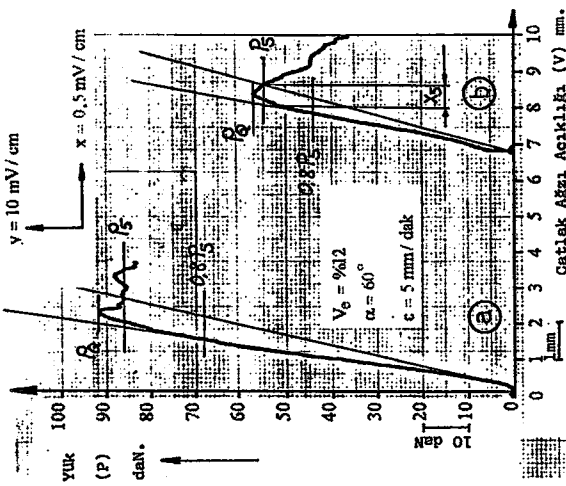
Şekil 6.60 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, eilyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



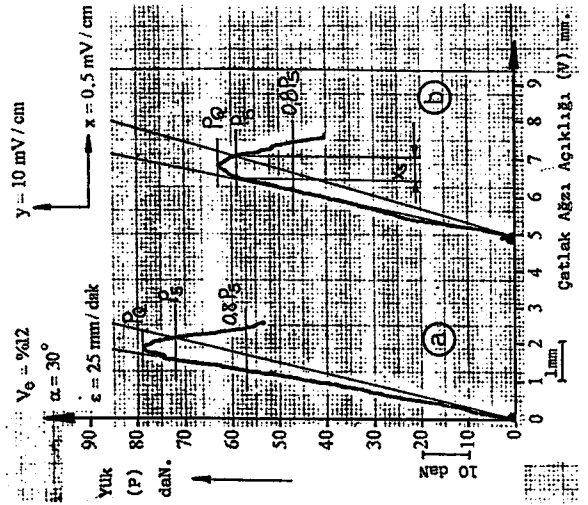
Şekil 6.56 Elyaf hacmi $V_e = \%16$, eilyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



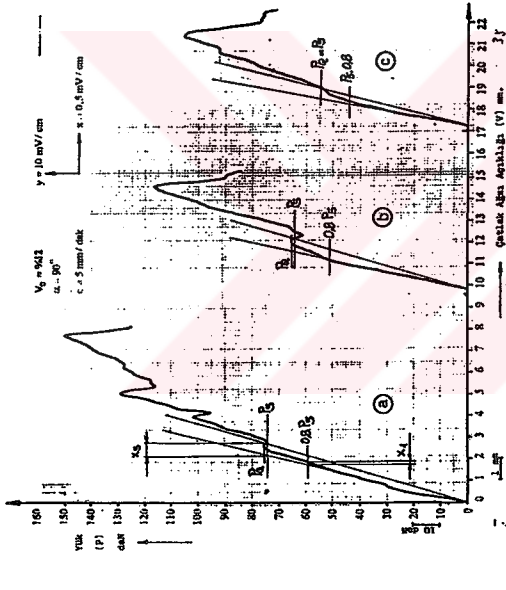
Şekil 6.59 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, eilyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitlerin (P-V) eğrisi



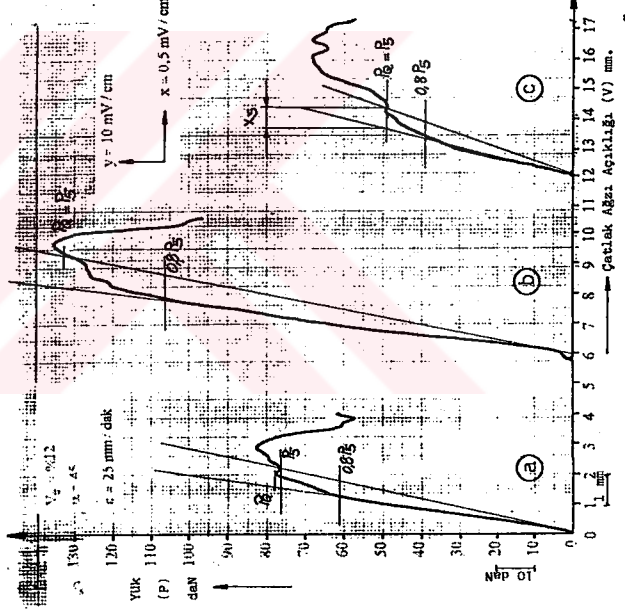
Şekil 6-62 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



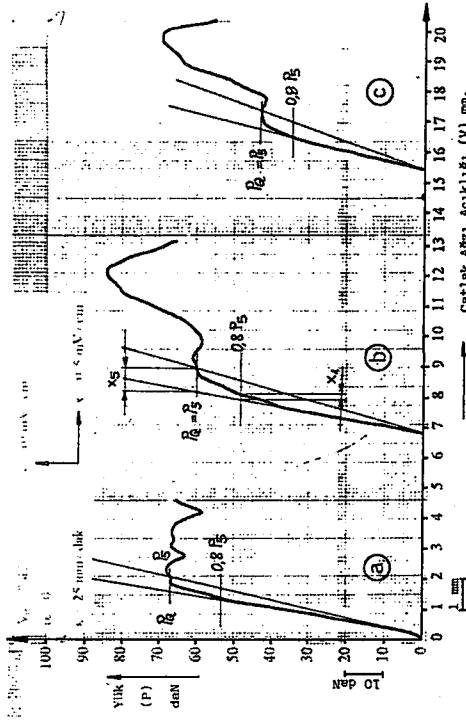
Şekil 6-65 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



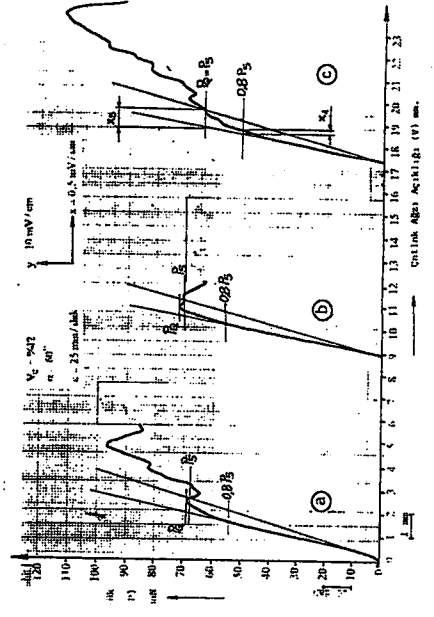
Şekil 6-63 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



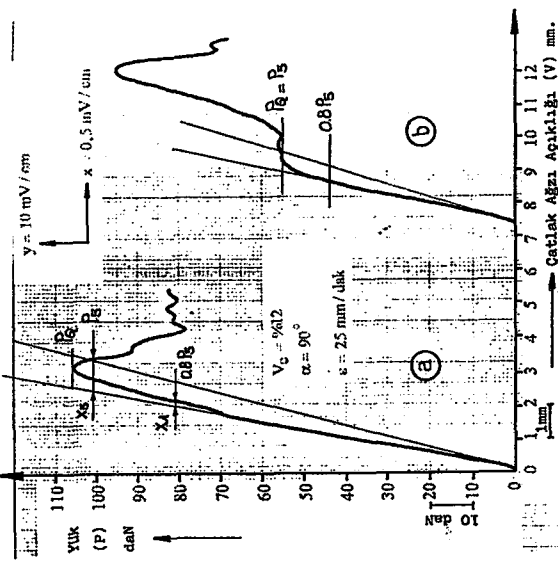
Şekil 6-66 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



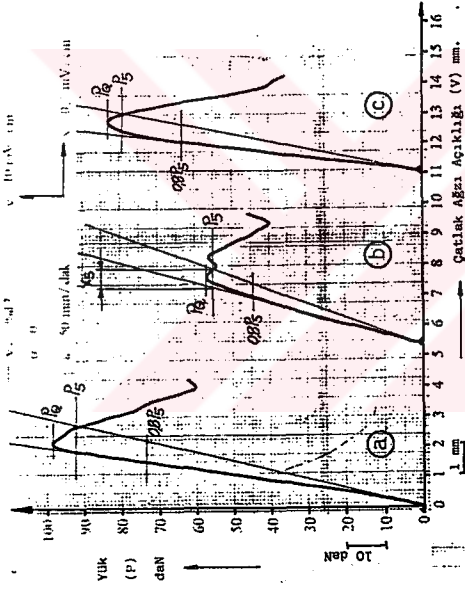
Şekil 6-64 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



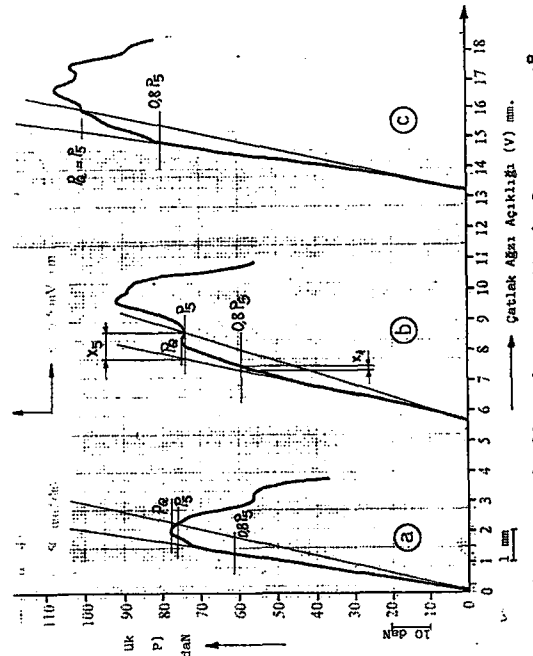
Şekil 6-67 Elyaf hacmi $V_e = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



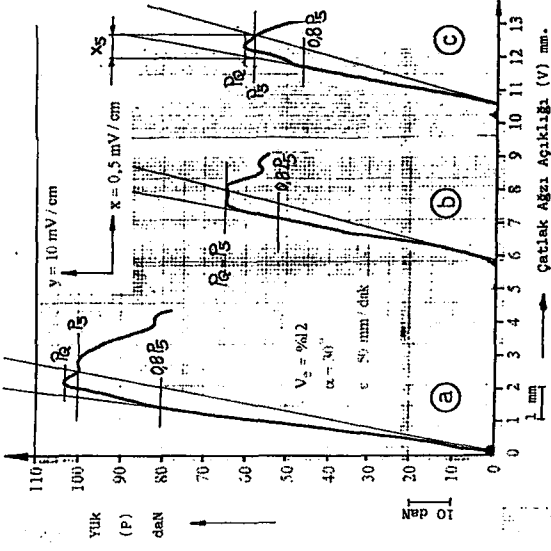
Şekil 6.68 Elyaf hacmi $V_c = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



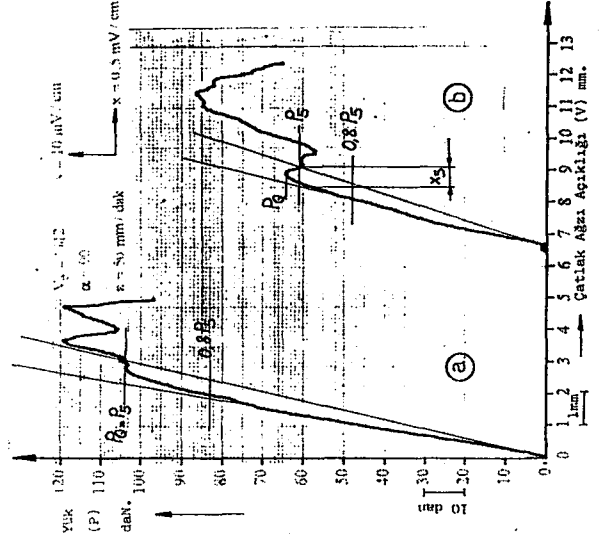
Şekil 6.69 Elyaf hacmi $V_c = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



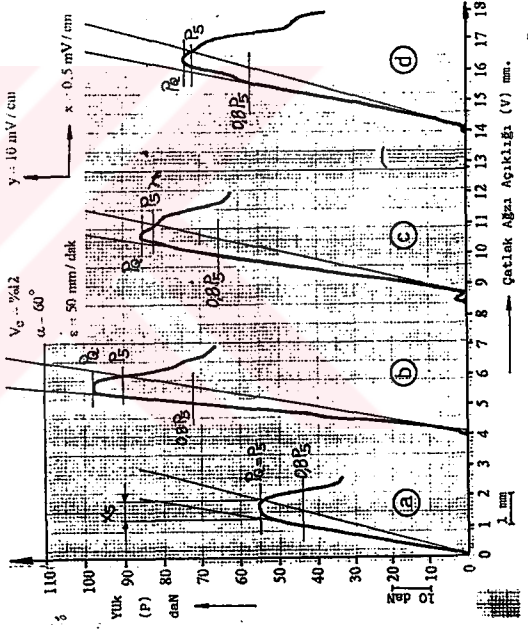
Şekil 6.71 Elyaf hacmi $V_c = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



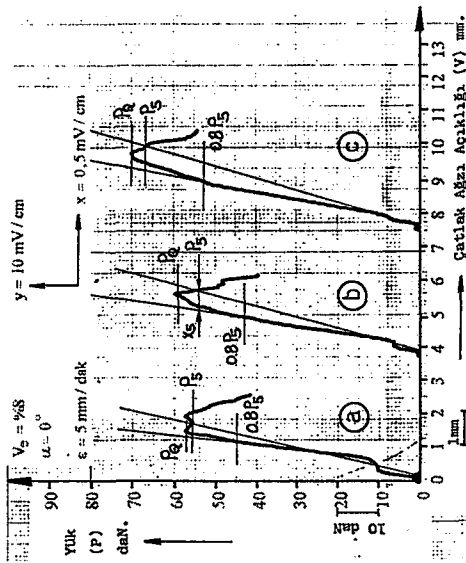
Şekil 6.70 Elyaf hacmi $V_c = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



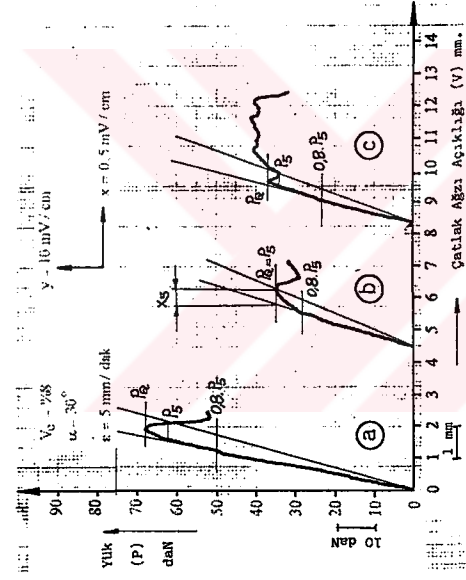
Şekil 6.72 Elyaf hacmi $V_c = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



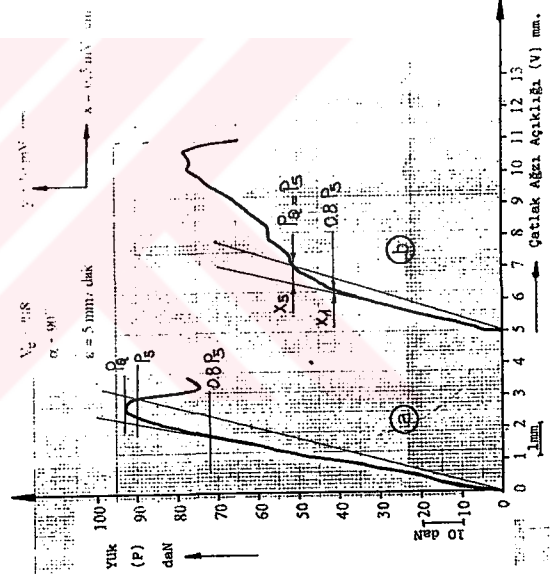
Şekil 6.72 Elyaf hacmi $V_c = \%12$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



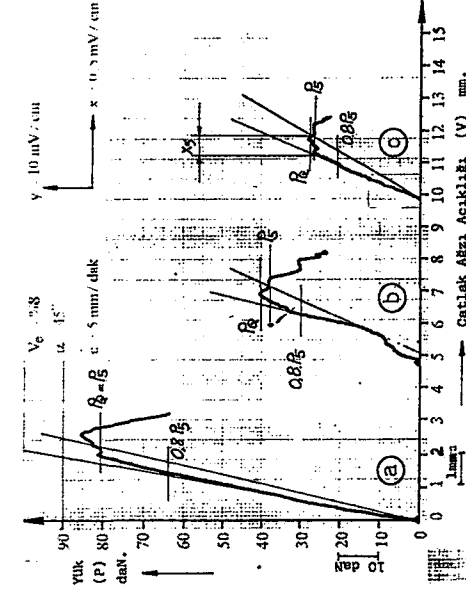
Şekil 6.74 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



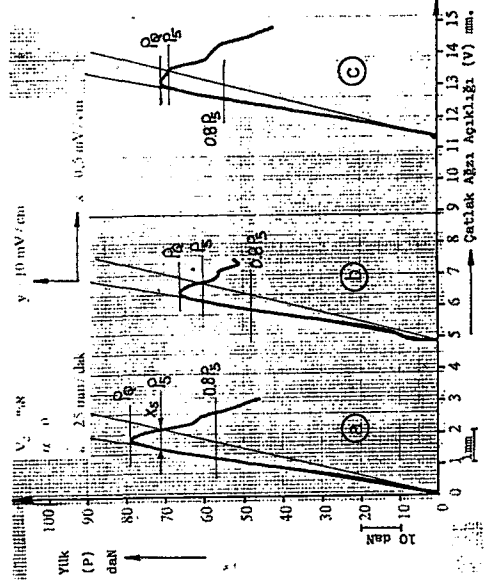
Şekil 6.75 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



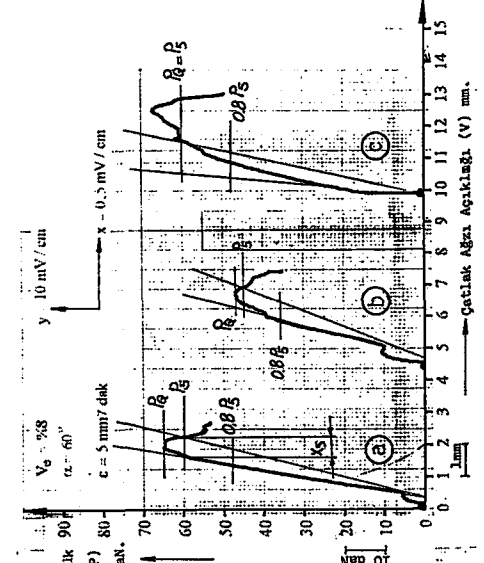
Şekil 6.78 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



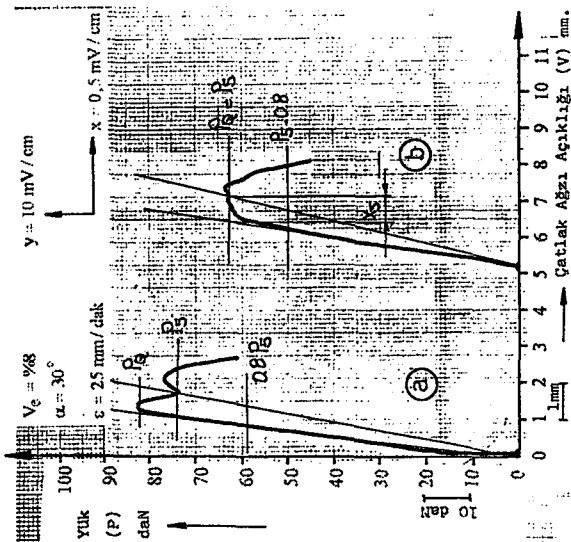
Şekil 6.76 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



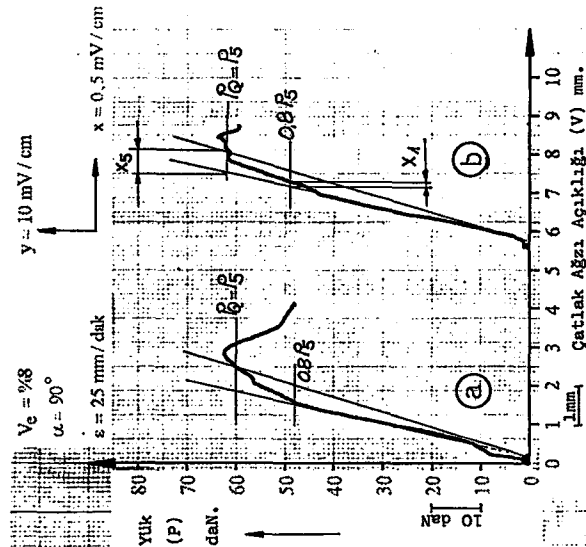
Şekil 6.79 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



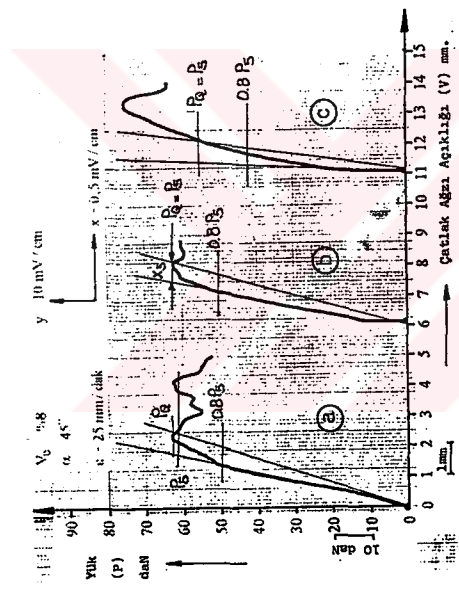
Şekil 6.77 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



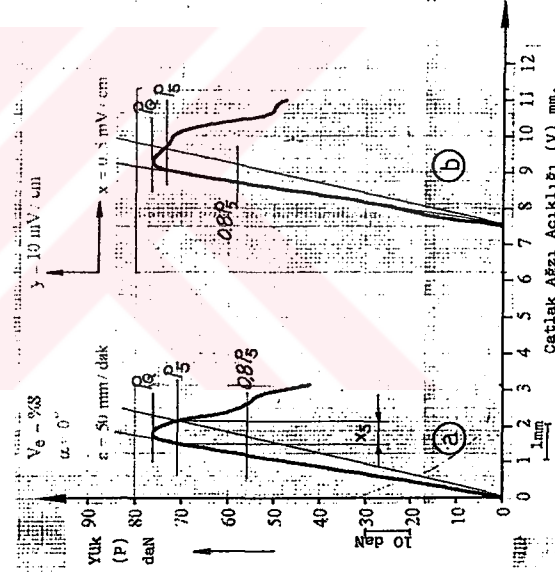
Şekil 6.80 Elyaf hacmi $V_c = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi.



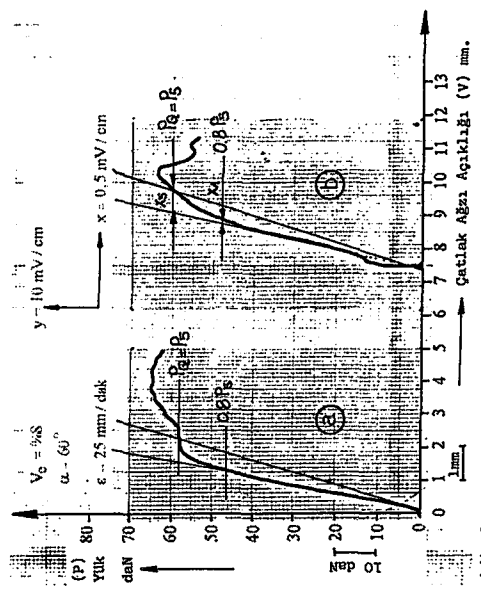
Şekil 6.83 Elyaf hacmi $V_c = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi.



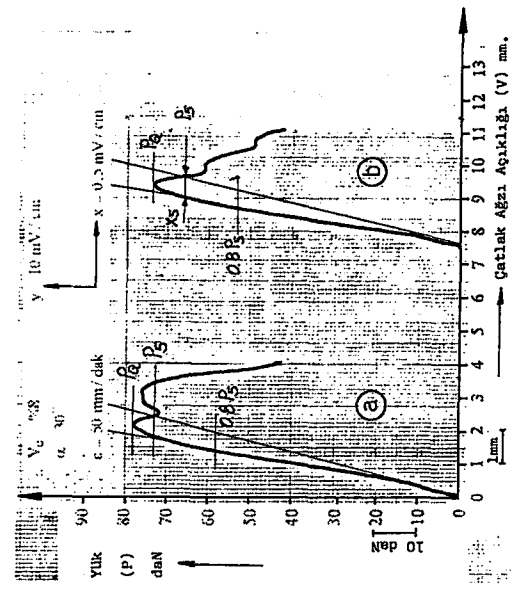
Şekil 6.81 Elyaf hacmi $V_c = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi.



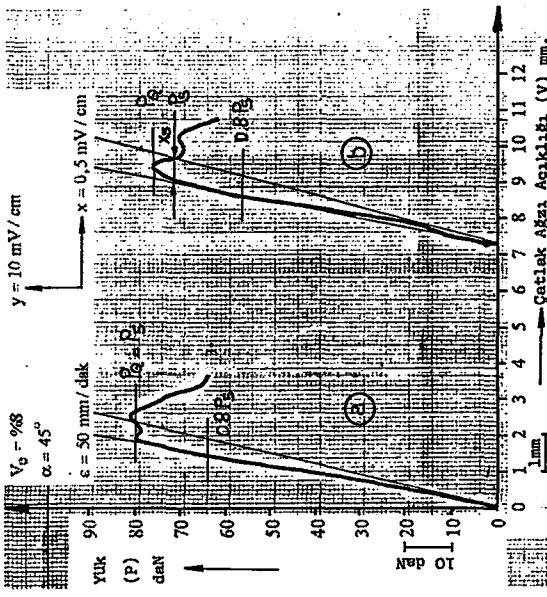
Şekil 6.84 Elyaf hacmi $V_c = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi.



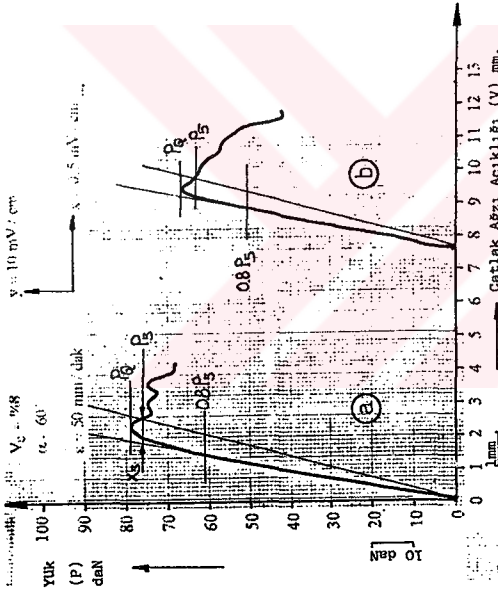
Şekil 6.82 Elyaf hacmi $V_c = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi.



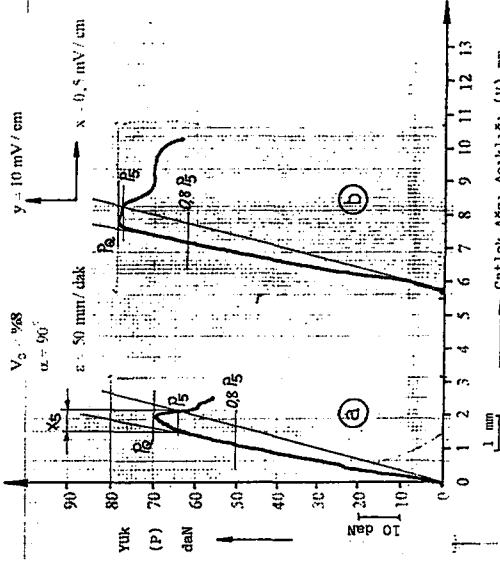
Şekil 6.85 Elyaf hacmi $V_c = \%8$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi.



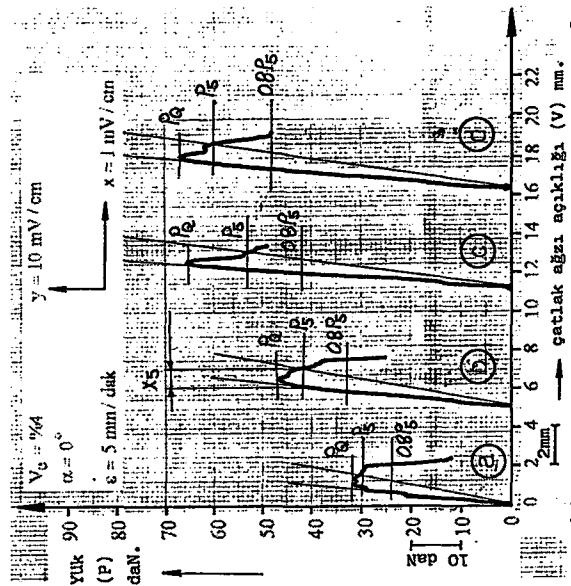
Şekil 6.86 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, eilyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



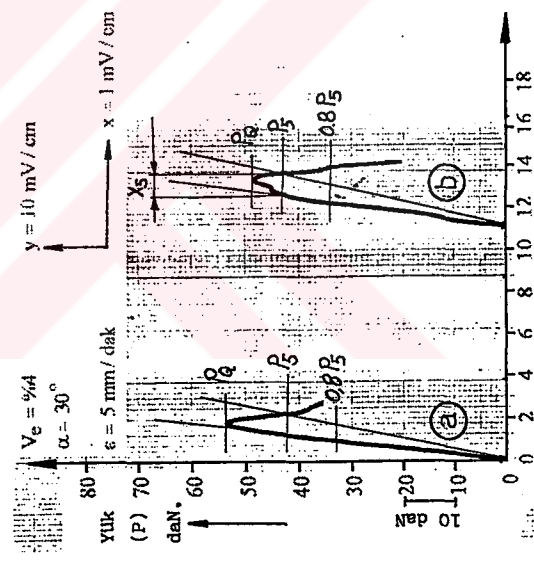
Şekil 6.87 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, eilyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



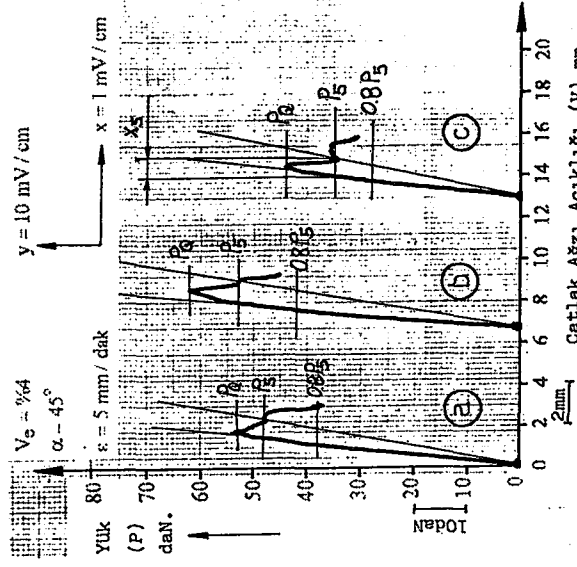
Şekil 6.88 Elyaf hacmi $V_e = \%8$, eilyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



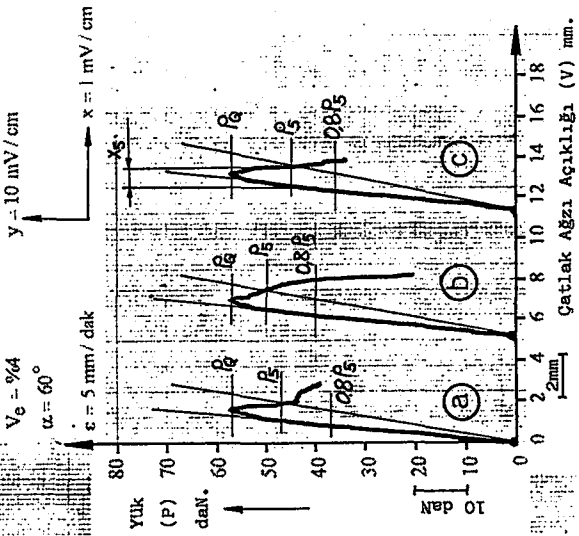
Şekil 6.89 Elyaf hacmi $V_e = \%4$, eilyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



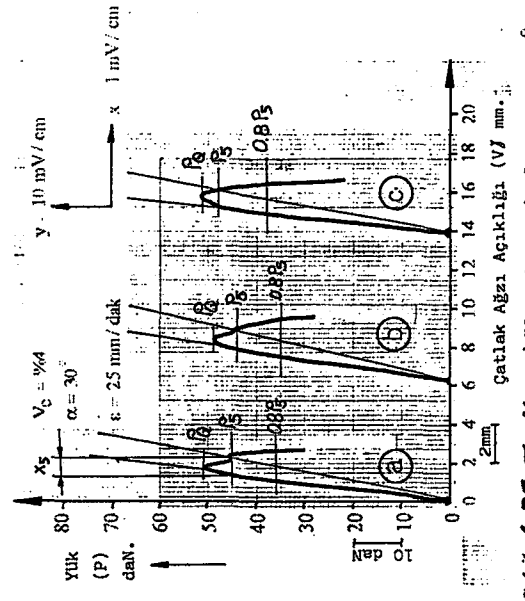
Şekil 6.90 Elyaf hacmi $V_e = \%4$, eilyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



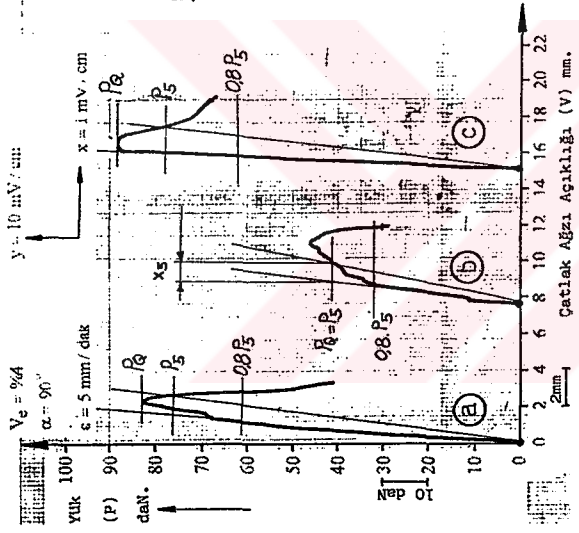
Şekil 6.91 Elyaf hacmi $V_e = \%4$, eilyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 5$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



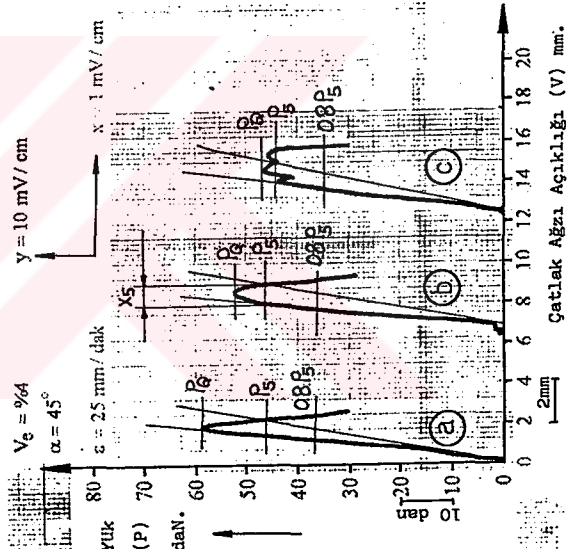
Şekil 6.92 Elyaf hacmi $V_c = \%4$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5 \text{ mm/dak}$ olan kompozitin (P-V) eğrisi.



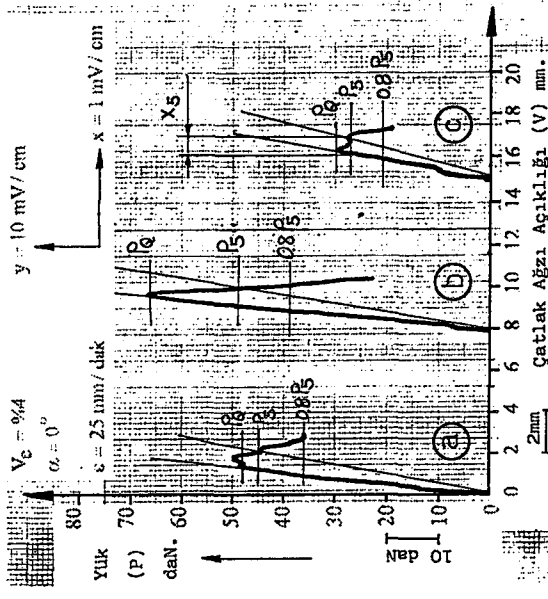
Şekil 6.95 Elyaf hacmi $V_c = \%4$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25 \text{ mm/dak}$ olan kompozitin (P-V) eğrisi.



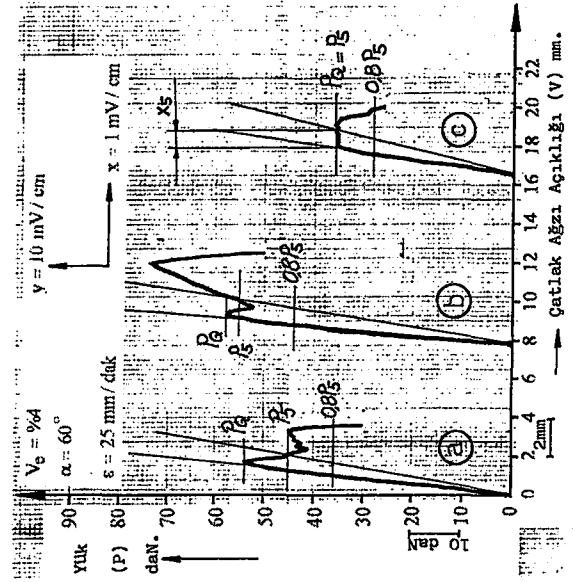
Şekil 6.93 Elyaf hacmi $V_c = \%4$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 5 \text{ mm/dak}$ olan kompozitin (P-V) eğrisi.



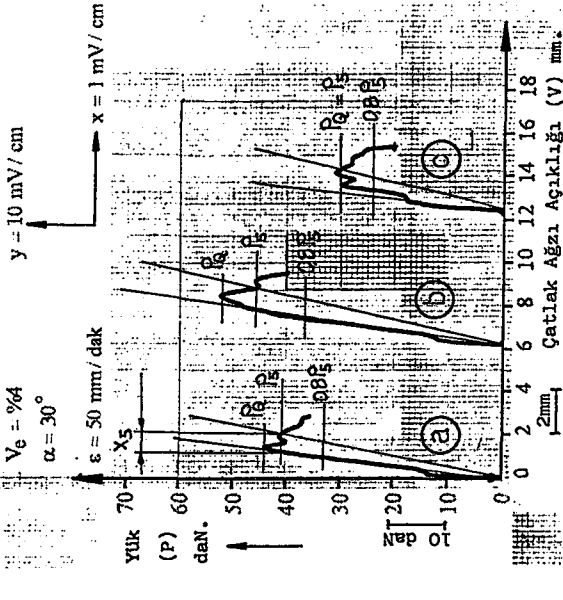
Şekil 6.96 Elyaf hacmi $V_c = \%4$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25 \text{ mm/dak}$ olan kompozitin (P-V) eğrisi.



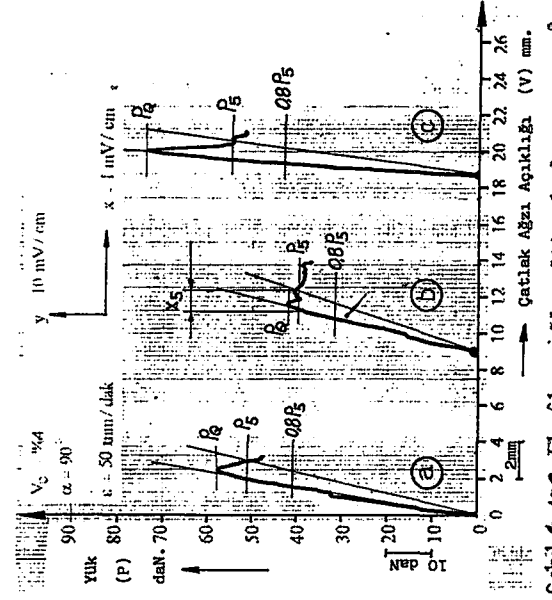
Şekil 6.94 Elyaf hacmi $V_c = \%4$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25 \text{ mm/dak}$ olan kompozitin (P-V) eğrisi.



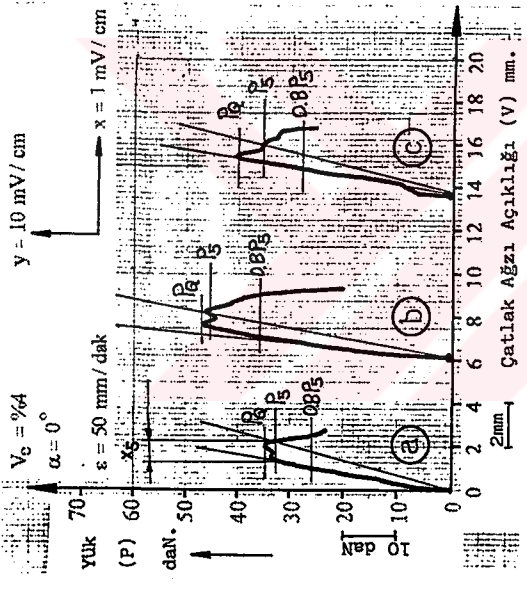
Şekil 6.97 Elyaf hacmi $V_c = \%4$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\varepsilon = 25 \text{ mm/dak}$ olan kompozitin (P-V) eğrisi.



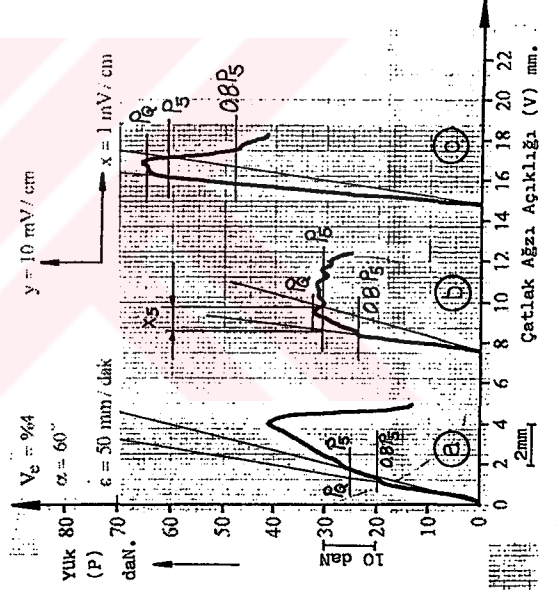
Şekil 6.100 Elyaf hacmi $V_e = 44$, elyaf yönü $\alpha = 30^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



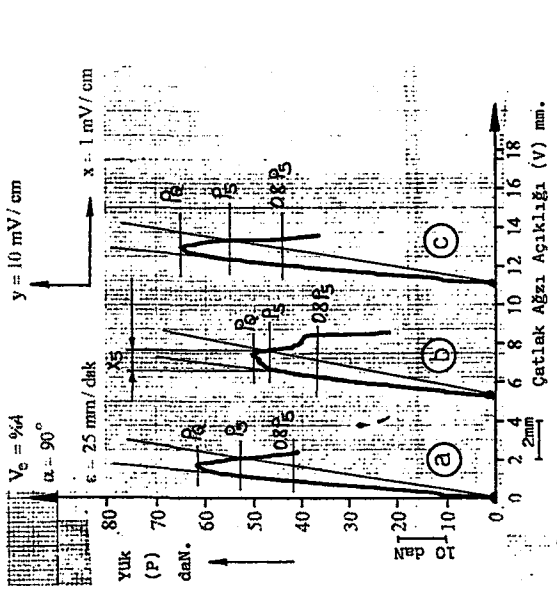
Şekil 6.103 Elyaf hacmi $V_e = 44$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



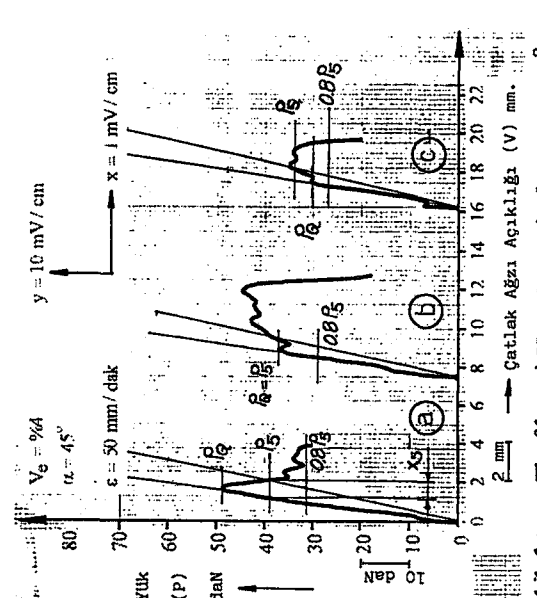
Şekil 6.99 Elyaf hacmi $V_e = 44$, elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



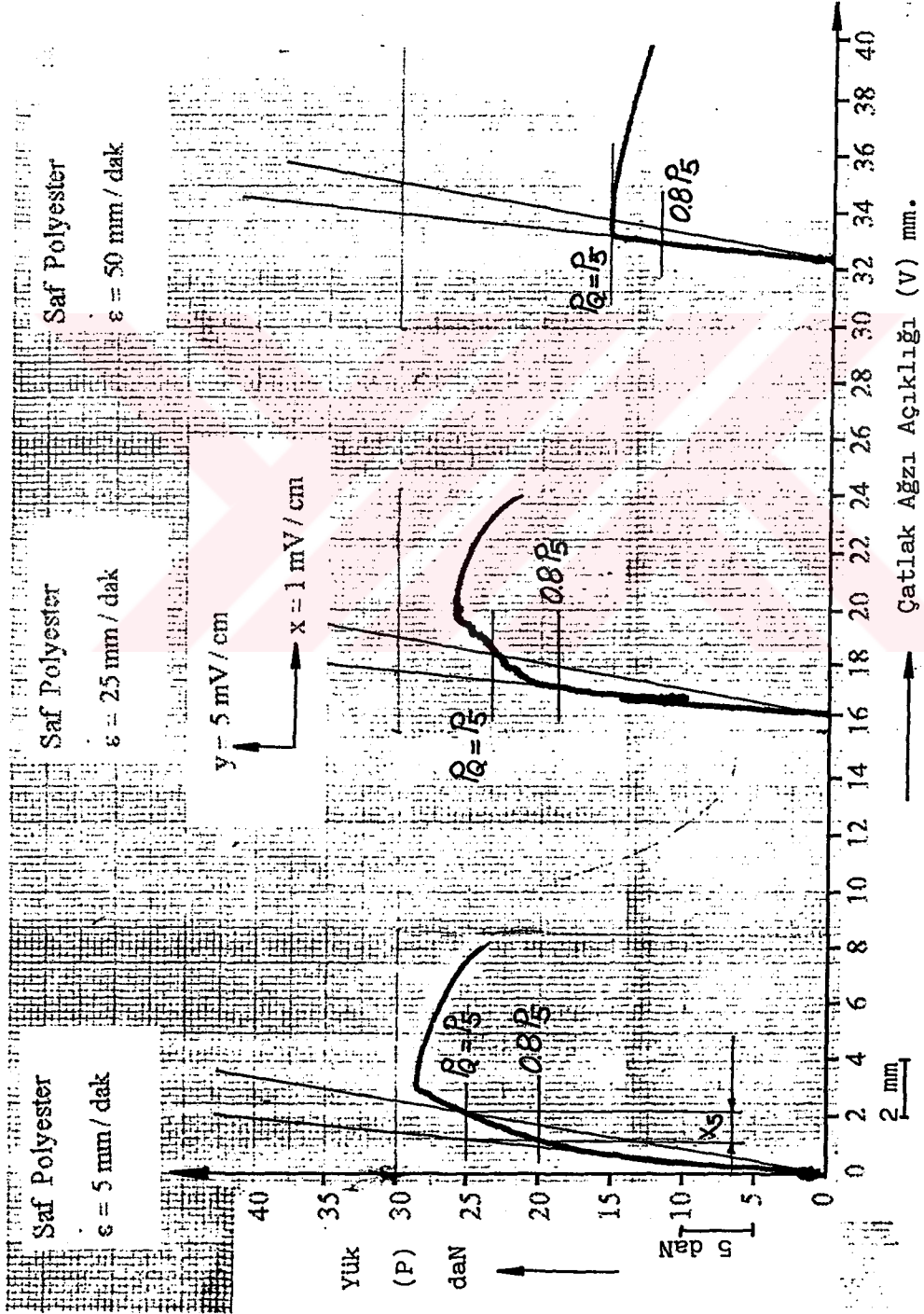
Şekil 6.102 Elyaf hacmi $V_e = 44$, elyaf yönü $\alpha = 60^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



Şekil 6.98 Elyaf hacmi $V_e = 44$, elyaf yönü $\alpha = 90^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 25$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



Şekil 6.101 Elyaf hacmi $V_e = 44$, elyaf yönü $\alpha = 45^\circ$ ve yüklenme hızı $\epsilon = 50$ mm/dak olan kompozitin (P-V) eğrisi



Şekil 6.10.4 Saf Polyesterin üç farklı yüklenme hızı ($\epsilon = 5 \text{ mm/dak}$, $\epsilon = 25 \text{ mm/dak}$, $\epsilon = 50 \text{ mm/dak}$) altındaki (P-V) eğrileri

6.6. HESAPLAMALAR

6.6.1 Numunelerin İçerdikleri Elyaf Oranlarına Göre Kopma Gerilmeleri ;

Düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyaf ile takviyeli kompozit malzemeler gevrek tutum gösterdiklerinden, bu tür malzemelerin akma dayanımı yerine kopma geriliminden söz etmek daha doğru olacaktır (12, 15). Bu sebeble numunelerin içerdikleri elyaf oranlarına göre kopma dayanımları aşağıda hesaplanmıştır.

Bölüm 3.6.1.6 da verildiği üzere elyaf takviyeli kompozitin kopma dayanımı Denklem 3.47 ye göre ,

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Bölüm 6.2 da verildiği gibi kullanılan polyster reçinesi ve elyafın mekanik özellikleri

$$\sigma_m = 4,8 \text{ Kp / mm}^2$$

$$\sigma_e = 300 \text{ Kp / mm}^2$$

olarak alınmıştır.

Örnek olarak %24 Elyaf içeren kompozitin kopma dayanımı ;

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e) = 300 \cdot 0,24 + 4,8 \cdot (1 - 0,24) = 75,648 \text{ Kp / mm}^2$$

olarak hesaplanır. Diğer elyaf oranları için hesaplanan kopma dayanımı değerleri Tablo 6.4 de verilmiştir.

Tablo 6.4 : Elyaf oranlarına göre, Kompozitlerin kopma dayanımı

Elyaf Oranları (V_e)	Kopma Dayanımı (K_p / mm^2)
%24	75,64
%20	63,84
%16	52,03
%12	40,22
%8	28,41
%4	16,60
%0 (saf polyester)	4,8

6.6.2. Elde Edilen Eğrilerden Bulunan Sonuçlar ve K_{IC} Hesaplamaları ;

Bölüm 4.4.2.1.3' deki eğri tipleri incelendiğinde (Şekil 4.13) II ve III nolu eğrilerin kompozit malzemelerden hazırlanan numuneler ile elde ettiğimiz eğrilere uygun olduğunu görürüz.

Bu eğri tipleri hakkındaki açıklamalar dikkate alınarak, Şekil 6.14 - 6.104' deki alınan eğrilerin her biri için eğrinin lineer kısmının eğiminden %5 daha düşük eğimli doğru çizilip, gerekli olan büyüklükler, Tablo 6.5 - 6.11' de olduğu gibi tesbit edilmiştir.

Tablo 6.5 : %24 Elyaf içeren numuneler için büyüklükler

Elyaf yünürlüğü (%)	P_{max} (daN)			P_Q (daN)			P_5 (daN)			$0,8 \cdot P_5$ (daN)			X_5 (mm)			X_1 (mm)			$K_Q = K_{IC}$ (Kp/mm ^{3/2})			Yüklenme Hızı $\frac{mm}{dak}$
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
0	215	190	-	215	190	-	205	180	164	144	144	-	0,875	0,75	-	0	0	-	51,15	45,20	-	5
	215	170	235	215	170	235	200	155	160	124	172	1	1	1,25	0	0	0	51,15	40,44	55,91	25	
	325	140	120	325	140	120	315	140	252	112	88	1,5	1	0,80	0,375	0	0	77,32	33,3	28,55	50	
30	180	200	180	180	200	180	180	180	144	144	128	1	1	1	0	0	0	42,82	47,58	42,82	5	
	225	175	-	223	175	-	205	170	164	136	-	0,75	1	-	0	0	-	53,05	41,63	-	25	
	160	215	190	160	215	190	150	210	120	168	144	1	1	1	0	0	0	38,06	51,15	45,20	50	
45	200	230	200	200	230	200	200	205	160	164	148	1	0,75	1	0	0	0	47,58	54,72	47,58	5	
	230	300	175	230	300	175	230	290	194	232	140	0,875	1,25	1,125	0,125	0	0	54,72	71,37	41,63	25	
	255	230	255	255	220	255	230	210	194	168	204	0,937	0,875	1,25	0	0	0	60,66	52,3	60,66	50	
60	170	215	100	170	215	100	170	215	136	172	80	1,625	1,375	0,75	1	0,312	0,187	40,44	51,15	23,79	5	
	260	155	175	260	155	175	250	150	200	120	132	0,875	0,75	1,125	0	0	0	61,85	36,87	41,63	25	
	90	420	215	90	420	215	90	345	72	276	172	1	2,125	1,5	0	0,5	0,375	21,41	99,92	51,15	50	
90	365	200	410	365	200	410	355	190	294	152	320	1,375	1,125	1,5	0,25	0	0	86,83	47,58	97,54	5	
	240	235	170	240	235	170	240	235	192	188	136	1	1,25	0,625	0	0,25	0	57,10	55,91	40,44	25	
	230	430	315	230	430	315	215	395	172	316	228	0,75	1	1	0	0	0	54,72	102,3	74,94	50	

Tablo 6.6. : %20 Elyaf içeren numuneler için büyüklükler

Elyaf yünlere (%)	P_{max} (dan)			P_Q (dan)			P_5 (dan)			0,8 P_5 (dan)			X_5 (mm)			X_1 (mm)			$K_Q = K_{IC}$ (Kp/mm ^{3/2})			Yüklemeye Hız E mm/dak
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
0	100	152	80	100	152	80	90	136	72	72	108,8	57,6	0,625	1	0,75	0	0	0	23,79	36,16	19,03	5
	138	160	98	138	160	98	120	152	84	96	121,6	67,2	1	1,125	1	0	0	32,83	38,06	23,31	25	
	158	240	224	158	240	224	140	208	180	112	116,4	144	1	1,375	1,25	0	0	37,59	57,10	53,29	50	
30	154	102	-	154	102	-	142	94	-	113,6	75,2	-	1,25	1,125	-	0	0	36,63	24,2	-	5	
	146	160	104	146	160	94	136	150	94	108,8	120	75,2	1,5	1,375	0,75	0	0	34,73	38,06	22,36	25	
	206	114	-	206	114	-	174	92	-	139,	73,6	-	1,25	1,375	-	0	0	49,01	27,1	-	50	
45	194	134	164	194	134	164	176	134	150	140,8	107,2	120	1,125	1,5	1,25	0	0	46,15	31,88	39,01	5	
	152	140	165	152	140	150	140	122	170	112	97,6	136	1,375	1,75	1,25	0	0,375	36,16	33,3	35,68	25	
	150	220	190	150	220	190	144	204	174	115,2	163,2	139,2	1,25	1,25	1,25	0	0	35,68	52,3	45,20	50	
60	144	170	116	144	170	116	136	164	100	108,8	131,2	80	1,375	1,625	1,25	0	0	34,26	40,44	27,59	5	
	170	175	115	170	175	115	170	175	115	136	140	92	0,875	1,25	0,875	0	0,125	40,44	41,63	27,36	25	
	206	114	108	206	114	108	194	114	108	155,2	91,2	86,4	1,375	1,375	1,125	0	0,25	49,01	27,1	25,69	50	
90	276	248	252	276	248	236	234	230	240	187,2	184	192	2	1,875	1,75	0	0	65,66	59,00	56,14	5	
	276	150	306	276	150	306	224	180	254	179,2	144	203,2	2	1,5	2,25	0,375	0,25	65,66	35,68	72,80	25	
	296	160	314	296	160	314	272	154	246	217,6	123,2	196,8	2,25	1,5	2,25	0,5	0,5	70,42	38,06	74,70	50	

Tablo 6.7 : %16 Flyaf içeren numuneler için büyüklükler

Ebuaf yonleri (α)	P _{max} (dan)			P _Q (dan)			P ₅ (dan)			0,8 P ₅ (dan)			X ₅ (mm)			X ₁ (mm)			K _Q - K _{IC} (Kp/ mm ^{3/2})			Yüklenme Hızı E mm/dak
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
0	88	84	110	80	84	110	80	84	110	64	67,2	88	0,75	1,5	1	0	0,375	0	19,23	19,98	26,17	5
	144	57	36	144	57	36	140	57	36	112	45,6	288	1	0,75	0,375	0	0	34,26	13,56	8,56	25	
	82	122	88	82	122	88	72	104	84	57,6	83,2	67,2	0,75	1	0,75	0	0	19,50	29,02	20,93	50	
30	92	93	94	92	93	94	94	90	92	75,2	72	73,6	0,625	0,875	0,625	0	0	21,88	22,1	22,36	5	
	90	116	92	90	116	92	84	108	82	67,2	85,6	65,6	0,75	0,875	1,125	0	0	21,41	27,59	21,88	25	
	110	104	94	110	104	86	96	94	86	76,8	75,2	68,8	0,625	0,875	1,125	0	0,125	26,17	24,74	20,46	50	
45	70	66	85	68	66	85	68	63	76	54,4	50,4	60,8	0,812	0,687	0,75	0,187	0	16,17	15,70	20,22	5	
	63	161	85	59	161	86	59	152	83	47,2	121,6	66,4	0,5	0,875	0,75	0	0,125	14,03	38,3	20,46	25	
	60	68	70	60	68	70	60	64	66	48	52	52,8	1	1	0,75	0	0	14,27	16,17	16,65	50	
60	67	77	83	67	72	88	65	72	81	52	57,6	64,8	0,375	0,625	0,5	0	0,15	15,94	17,13	20,93	5	
	73	123	84	73	120	78	67	120	78	53,6	96	62,4	0,75	0,875	0,75	0	0,187	17,36	28,55	18,55	25	
	72	126	154	72	126	154	68	120	137	54,4	96	109,6	0,687	0,75	0,875	0	0	17,13	29,97	36,63	50	
90	51	90	181	51	90	181	48	86	173	38,4	68,8	138,4	0,625	0,875	1,625	0,125	0	12,13	21,41	43,06	5	
	130	130	80	130	130	80	120	124	80	96	99,2	64	1,25	1,25	0,75	0	0	30,92	30,9	19,03	25	
	178	172	165	178	172	165	167	143	146	133,6	114,4	116,8	0,625	1,31	1,312	0	0,31	42,34	40,92	39,25	50	

Tablo 6.8 : %12 Elyaf iğeren numuneler için büyüklükler

Elyaf yönürlüğü (α)	P _{max} (dan)			P _Q (dan)			P ₅ (dan)			0,8 P ₅ (dan)			X ₅ (mm)			X ₁ (mm)			K _Q = K _{TC} (Kp/ mm ^{3/2})			Yüklenme Hızı E mm/dak
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
0	63	84	47	63	84	43	60	76	43	48	60,8	34,4	0,5	0,625	0,5	0	0	0	14,98	19,98	10,23	5
	67	61	43	67	60	43	67	60	43	53,6	48	34,4	0,5	0,75	0,625	0	0,187	0	15,94	14,27	10,23	25
	98	57	83	98	57	83	92	55	79	73,6	44	63,2	0,875	0,625	0,75	0	0	0	23,31	13,56	19,74	50
30	77	54	68	77	54	68	75	54	64	60	43,2	51,2	0,625	0,5	0,625	0	0	0	18,31	12,84	16,17	5
	79	63	-	79	63	-	72	59	-	57,6	47,2	-	0,625	0,625	-	0	0	-	18,79	14,98	-	25
	103	65	60	103	65	60	100	65	58	80	52	46,4	0,75	0,5	0,625	0	0	0	24,50	15,46	14,27	50
45	70	80	70	70	80	70	65	78	66	52	62,4	52,8	0,5	0,875	0,687	0	0,187	0	16,65	19,03	16,65	5
	83	13,5	49	78	133	49	76	133	49	60,8	106,4	39,2	0,625	1	0,625	0	0	0	18,55	31,64	11,65	25
	78	75	107	78	75	100	76	74	100	60,8	59,2	80	0,687	0,875	0,75	0	0,125	0	18,55	17,84	23,79	50
60	92	57	-	92	57	-	86	55	-	68,8	44	-	0,75	0,625	-	0	0	-	21,88	13,56	-	5
	69	72	70	69	72	64	68	70	64	54,4	56	51,2	0,625	0,625	0,75	0	0	0,187	16,41	17,13	15,22	25
	55	98	85	55	98	85	55	90	82	44	72	65,6	0,625	0,75	0,625	0	0	0	13,08	23,3	20,22	50
90	75	65	55	75	65	55	74	64	55	59,2	51,2	44	0,562	0,625	0,5	0,125	0	0,125	17,84	15,46	13,08	5
	106	55	-	106	55	-	101	55	-	80,8	44	-	1	0,625	-	0	0	-	25,21	13,08	-	25
	114	64	-	104	64	-	104	61	-	83,2	48,8	-	0,75	0,625	-	0,125	0	-	24,74	15,2	-	50

Tablo 6.9 : %8 Elyaf içeren numuneler için büyüklükler

Elyaf ynmleri (%)	P _{max} (dan)			P _Q (dan)			P ₅ (dan)			0,8 P ₅ (dan)			X ₅ (mm)			X ₁ (mm)			K _Q = K _{1C} (Kp/ mm ^{3/2})			Yaklaşık Hız E mm/dak
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
0	57	59	70	57	59	70	56	54	67	44,8	43,2	53,6	0,375	0,625	0,75	0	0	0	13,56	14,03	16,65	5
	79	66	70	79	66	70	71	60	68	56,8	48	54,4	0,625	0,625	0,562	0	0	0	18,79	15,70	16,65	25
	76	76	-	76	76	-	71	73	-	56,8	58,4	-	0,625	0,625	-	0	0	-	18,08	18,08	-	50
30	68	35	40	68	35	37	62	35	34	49,6	28	27,2	0,625	0,437	0,437	0	0	0	16,17	8,32	8,8	5
	82	63	-	82	63	-	74	63	-	59,2	50,4	-	0,625	0,75	-	0	0	-	19,5	14,98	-	25
	78	74	-	78	74	-	73	66	-	58,4	52,3	-	0,687	0,687	-	0	0	-	18,55	17,60	-	50
45	85	40	28	80	40	28	80	38	27	64	30,4	21,6	0,562	0,625	0,625	0,125	0	0	19,03	9,51	6,66	5
	63	63	60	63	63	55	62	63	55	49,6	50,4	44	0,75	0,625	0,75	0	0	0	14,98	14,98	13,08	25
	81	77	-	81	77	-	81	72	-	64,8	57,6	-	0,562	0,625	-	0	0	-	19,27	18,31	-	50
60	65	47	66	65	47	60	60	45	60	48	36	48	0,625	0,75	0,125	0	0	0,28	15,46	11,18	14,27	5
	63	64	-	58	60	-	58	60	-	46,4	48	-	0,75	0,625	-	0	0,125	-	13,79	14,27	-	25
	79	67	-	79	67	-	76	63	-	60,8	50,4	-	0,75	0,625	-	0	0	-	18,79	15,94	-	50
90	93	56	-	93	51	-	90	51	-	72	40,3	-	0,812	0,625	-	0	0,125	-	22,12	12,1	-	5
	63	63	-	60	62	-	60	62	-	48	49,6	-	0,625	0,562	-	0	0,125	-	14,27	14,75	-	25
	70	79	-	70	79	-	64	78	-	51,2	62,4	-	0,625	0,687	-	0	0	-	16,65	18,79	-	50

Tablo 6.10 : %4 Elyaf iğeren minimumları için büyüklükler

Elyaf yönleri (α)	P_{max} (dan)			P_Q (dan)			P_5 (dan)			0,8 P_5 (dan)			X_5 (mm)			X_1 (mm)			$K_Q = K_{IG}$ (Kp/mm ^{3/2})			Yüklemeye Hız ϵ mm/dak
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
0	32	47	65	32	47	65	30	42	53	24	33,6	42,4	0,75	1	1	0	0	0	7,61	11,18	15,46	5
	50	66	30	50	66	30	45	49	27	36	39,2	21,6	0,875	0,875	0,875	0	0	0	11,89	15,70	7,13	25
	35	47	40	35	47	40	33	46	35	26,4	36,3	28	1	1	0,75	0	0	0	8,32	11,18	9,51	50
30	54	49	-	54	49	-	42	43	-	33,6	34,4	-	0,875	1	-	0	0	0	12,84	11,65	-	5
	51	49	51	51	49	51	45	44	48	36	35,2	38,4	1	1	0,875	0	0	0	12,13	11,65	12,13	25
	44	52	30	44	52	30	41	46	30	32,8	36,3	24	0,875	1	1	0	0	0,25	10,46	12,3	7,13	50
45	53	62	44	53	62	44	48	53	35	38,4	42,4	28	0,875	1,125	0,875	0	0	0	12,60	14,75	10,46	5
	59	52	47	59	52	47	46	46	44	36,8	36,3	35,2	0,875	1	1	0	0	0	14,03	12,3	11,18	25
	49	40	35	49	37	35	39	37	34	29,6	29,6	27,2	0,875	0,625	0,625	0	0	0	11,65	8,80	8,32	50
60	57	57	57	57	57	57	47	50	45	37,6	40	36	0,875	1	1	0	0	0	13,56	13,56	13,56	5
	54	58	36	54	58	36	45	55	36	36	44	28,8	0,875	1	0,875	0	0	0	12,84	13,79	8,56	25
	40	33	65	40	33	65	25	31	61	20	24,3	48,8	0,5	1,125	1	0,125	0	0	5,94	7,85	15,46	50
90	83	45	89	83	41	89	76	41	78	60,8	32,8	62,4	1	1,125	1,375	0	0	0	19,74	9,75	21,17	5
	62	50	65	62	50	65	53	47	55	42,4	37,6	44	1	1	1	0	0	0	14,75	11,89	15,46	25
	58	42	74	58	42	74	51	40	55	40,8	32	44	1	1	1	0	0	0	13,79	9,96	17,60	50

Tablo 6.11: Saf polyester numuneler için büyüklükler

Yükleme Hızı ($\dot{\epsilon}$) mm/dak	P_{max}	P_Q	P_3	$0,8 \cdot P_3$	X_3	X_1	K_{IC} ($Kp/mm^{3/2}$)
5	28	25	25	20	1	0,2	5,947
25	22	23,5	23,5	18,8	1	0	5,591
50	15,5	15,5	15,5	12,4	0,625	0	3,687

Tablo 6.12: %24 Elyaf içeren numuneler için bulunan K_{IC} değerleri

Elyaf Yönleri (α)	K_{IC} ($kp/mm^{3/2}$)	Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)
0°	48,17	5
	49,16	25
	46,39	50
30°	44,40	5
	47,34	25
	44,80	50
45°	47,58	5
	55,90	25
	57,88	50
60°	38,46	5
	46,78	25
	57,49	50
90°	77,31	5
	51,15	25
	77,32	50

Tablo 6.13: %20 Elyaf içeren numuneler için bulunan K_{IC} değerleri

Elyaf Yönleri (α)	K_{IC} ($kp/mm^{3/2}$)	Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)
0°	26,32	5
	31,40	25
	49,32	50
30°	30,44	5
	31,97	25
	38,06	50
45°	39,01	5
	35,04	25
	44,40	50
60°	34,09	5
	36,47	25
	36,51	50
90°	60,26	5
	58,04	25
	61,06	50

* Kırılma tokluğu değerleri yapılan deneylerin ortalaması olarak alınmıştır.

Tablo 6.14: %16 Elyaf içeren numuneler için bulunan K_{IC} değerleri

Elyaf Yönleri (α)	K_{IC} ($kp/mm^{3/2}$)	Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)
0°	21,72	5
	18,79	25
	23,15	50
30°	22,12	5
	23,62	25
	23,79	50
45°	17,36	5
	24,26	25
	17,72	50
60°	18,00	5
	21,48	25
	27,91	50
90°	25,45	5
	26,95	25
	40,83	50

Tablo 6.15: %12 Elyaf içeren numuneler için bulunan K_{IC} değerleri

Elyaf Yönleri (α)	* K_{IC} ($kp/mm^{3/2}$)	Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)
0°	15,06	5
	13,48	25
	18,87	50
30°	15,77	5
	16,88	25
	18,07	50
45°	17,44	5
	20,61	25
	20,06	50
60°	17,72	5
	16,25	25
	18,55	50
90°	15,46	5
	19,24	25
	19,98	50

* Kırılma tokluğu değerleri yapılan deneylerin ortalaması olarak alınmıştır.

Tablo 6.16: %8 Elyaf içeren numuneler için bulunan K_{IC} değerleri

Elyaf Yönleri (α)	* K_{IC} ($kp/mm^{3/2}$)	Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)
0°	14,74	5
	17,04	25
	18,08	50
30°	11,09	5
	17,24	25
	18,08	50
45°	11,73	5
	14,34	25
	18,79	50
60°	13,63	5
	14,03	25
	17,36	50
90°	17,13	5
	14,51	25
	17,72	50

Tablo 6.17: %4 Elyaf içeren numuneler için bulunan K_{IC} değerleri

Elyaf Yönleri (α)	* K_{IC} ($kp/mm^{3/2}$)	Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)
0°	12,54	5
	11,57	25
	9,67	50
30°	12,24	5
	11,77	25
	9,89	50
45°	12,60	5
	12,52	25
	9,19	50
60°	13,56	5
	11,73	25
	9,75	50
90°	16,88	5
	14,03	25
	13,80	50

* Kırılma tokluğu değerleri yapılan deneylerin ortalaması olarak alınmıştır.

Tablo 6.18: Saf Polyesterin üç farklı yükleme hızındaki K_{IC} değerleri

Yükleme Hızı $\dot{\epsilon}$ (mm/dak)	K_{IC} ($\text{kp}/\text{mm}^{3/2}$)
5	5,947
25	5,591
50	3,687

Tablo 6.5 - 6.11 de verilenlere göre, Bölüm 4.4.2.1.3' ün son kısmında K_{IC} hesabı için maddeler halinde verilen yöntemi aynen uygularsak ,

Elyaf oram $V_e = \%24$, Elyaf yönü $\alpha = 0^\circ$ ve yükleme hızı $\dot{\epsilon} = 5$ mm/dak olarak seçilen (a) numunesi için hesap yapacak olursak ;

1-) Eğri tipimiz (Şekil 6.14' e göre) III nolu tip olarak görülmektedir. Bu durumda , $P_Q = P_{max}$ olacaktır.

2-) Standarda göre elde edilen eğrilerden ;

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1,1$$

koşulu $P_Q = P_{max}$ dolayısıyla sağlanmaktadır. ($P_Q = 215$ Kp, $P_{max} = 215$ Kp)

Diğer karşılaştırmalar Tablo 6.5 - 6.11' de görülmektedir.

3-) $x_5 = 0,875$ mm, $x_1 = 0$ olarak bulunduğundan ;

$$x_5 \leq 0,25 \cdot x_1$$

koşulu sağlanmaktadır. Diğer karşılaştırmalar Tablo 6.5 - 6.11' de görülmektedir.

Bölüm 4.4.2.1.3' de verilen üç noktadan eğme numuneleri için denklem (4.58)' e göre ;

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \cdot \left[2,9 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4,6 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21,8 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37,6 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38,7 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$

Formüldeki bütün numune boyutları Şekil 6.62 da verilmiştir. Buna göre K_Q hesabı yapıldığında ;

$$K_Q = 51,15 \text{ Kp/mm}^{3/2} \text{ olarak hesaplanır.}$$

4-) K_Q değerinin, σ_a ve çatlak boyu ile numune kalınlığı arasındaki bağıntıyı veren ifade (denklem 4.52) ile karşılaştırma yapılırsa, (Bölüm 6.3.9.1' de %24 elyaf içeren numune için Kopma dayanımı $\sigma_k = 75,64 \text{ Kp/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır)

$$2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a} \right)^2 = 2,5 \cdot \left(\frac{51,15}{75,64} \right)^2 = 1,143$$

olarak bulunur. Dolayısıyla

$$10 \geq 1,143$$

olduğuna göre,

$$a, B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a} \right)^2$$

şartıda sağlanmış olur.

Diğer elyaf oranlarına karşılık elde edilen numuneler için numune boyutlarının K_{IC} ve σ_K 'ya göre karşılaştırılması Tablo 6.19' da verilmiştir. Tablo 6.19' da, elde edilen maksimum K_{IC} 'lere göre hesap yapıldığı için ara değerlerin karşılaştırılmasına gerek kalmamıştır. Tablo 6.19' daki değerlere bakılırsa numune boyutlarının istenen değerden büyük olduğu görülecektir. Bu da geçerli deneyler yapıldığının kanıtıdır.

Tablo 6.19 : Numune boyutlarının K_{IC} ve σ_K 'ya göre karşılaştırılması

Elyaf Hacmi V_e	Maksimum Kırılma tokluğu $K_{IC_{max}}$ ($\text{Kp/mm}^{3/2}$)	σ_K (Kp/mm^2)	a, B (mm)	$2,5 \cdot \left[\frac{K_{IC}}{\sigma_K} \right]^2$
%24	102,3	75,64	10	4,572
%20	74,70	63,84	10	3,422
%16	43,06	52,03	10	1,712
%12	25,21	40,22	10	0,982
%8	22,12	28,41	10	1,515
%4	21,17	16,60	10	4,065
%0	5,947	4,8	10	3,837

%24, %20, %16, %12, %8, ve %4 elyaf içeren numunelerin, elyaf yönlerine ve yükleme hızlarına göre hesaplanan K_{IC} değerleri Tablo 6.12 - 6.17' de verilmiştir. Saf polysterin yükleme hızına göre değişen K_{IC} değerleri Tablo 6.18' de gösterilmiştir.

Tablo 6.20' de ise; son olarak bütün numuneler için elde edilen K_{IC} değerlerinin ortalama olarak gösterildiği özet tablo verilmiştir. Bu tabloda elyaf hacimlerine, elyaf yönlerine ve yükleme hızlarına göre K_{IC} ' lerin nasıl değiştiği net biçimde görünmektedir.

Şekil 6.105 - 6.109' de K_{IC} ' nin Elyaf Hacimleri ile değişimi görülmektedir.

Şekil 6.110 - 6.114' de K_{IC} ' nin Yükleme hızları ile değişimi görülmektedir.

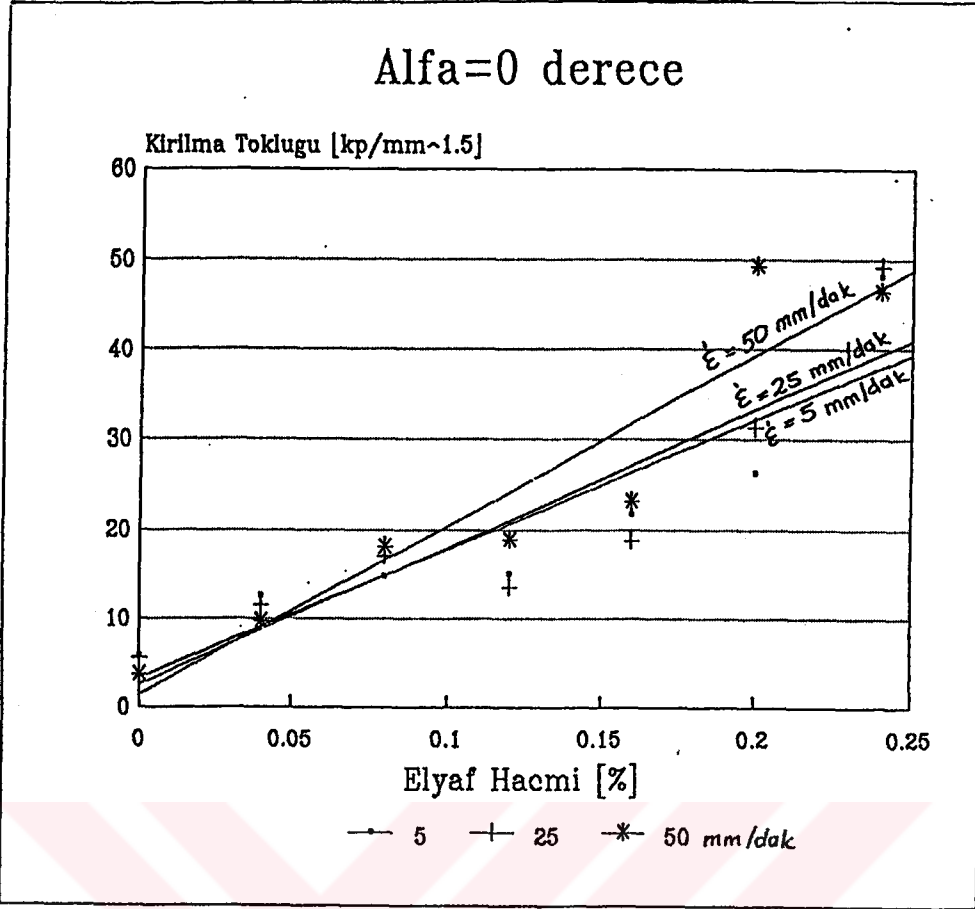
Şekil 6.115 - 6.117' de K_{IC} ' nin Elyaf yönleri ile değişimi görülmektedir.

Tablo 6.20 : Farklı elyaf hacim oranları, açılar ve yükleme hızları için hazırlanan numunelerden elde edilen tokluk değerleri

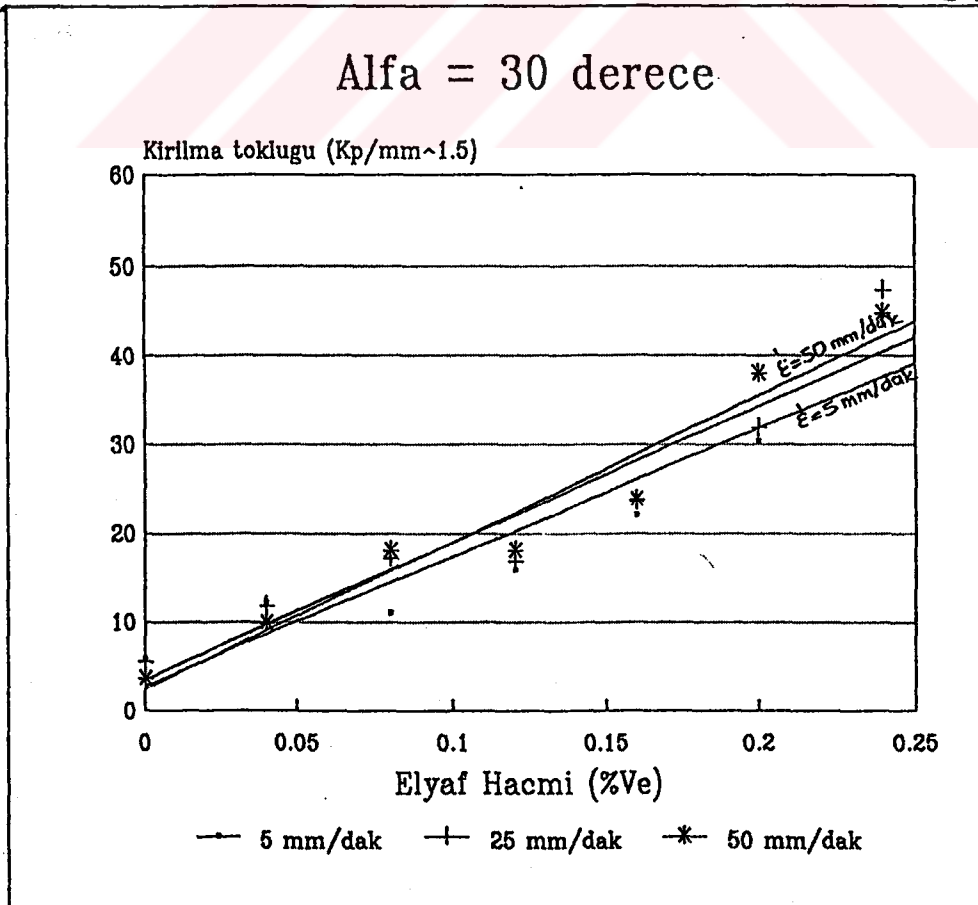
ELYAF HACMİ (V _e)	ELYAF YÖNLERİ (α)					YÜKLEME HIZI (ε) (mm/dak)
	0°	30°	45°	60°	90°	
%24	48,17	44,4	47,58	38,46	77,31	5
	49,16	47,34	55,90	46,78	51,15	25
	46,39	44,80	57,88	57,49	77,32	50
%20	26,32	30,44	39,01	34,09	60,26	5
	31,40	31,97	35,04	36,47	58,04	25
	49,32	38,06	44,40	36,51	61,06	50
%16	21,72	22,12	17,36	18,00	25,45	5
	18,79	23,62	24,26	21,48	26,95	25
	23,15	23,79	17,72	27,91	40,83	50
%12	15,06	15,77	17,44	17,72	15,46	5
	13,48	16,88	20,61	16,25	19,24	25
	18,87	18,07	20,06	18,55	19,98	50
%8	14,74	11,09	11,73	13,63	17,13	5
	17,04	17,24	14,34	14,03	14,51	25
	18,08	18,08	18,79	17,36	17,72	50
%4	12,54	12,24	12,60	13,56	16,88	5
	11,57	11,77	12,52	11,73	14,03	25
	9,67	9,89	9,19	9,75	13,80	50
%0	5,947					5
	5,591					25
	3,687					50

* Kırılma tokluğu değerleri yapılan deneylerin ortalaması olarak alınmıştır.

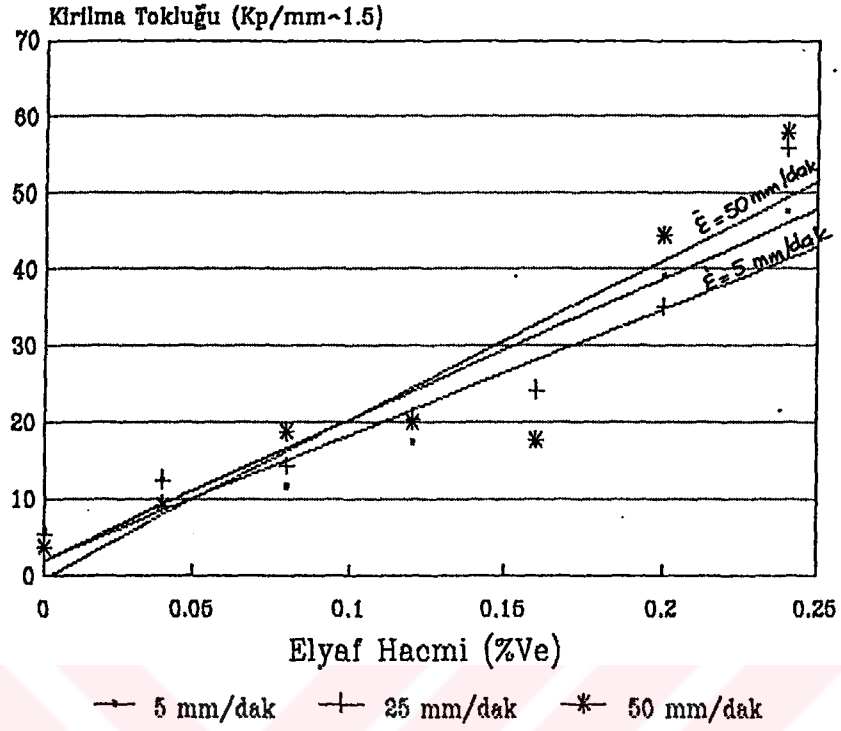
Alfa=0 derece

Şekil 6.105 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 0^\circ$ de elyaf hacmiyle değişimi

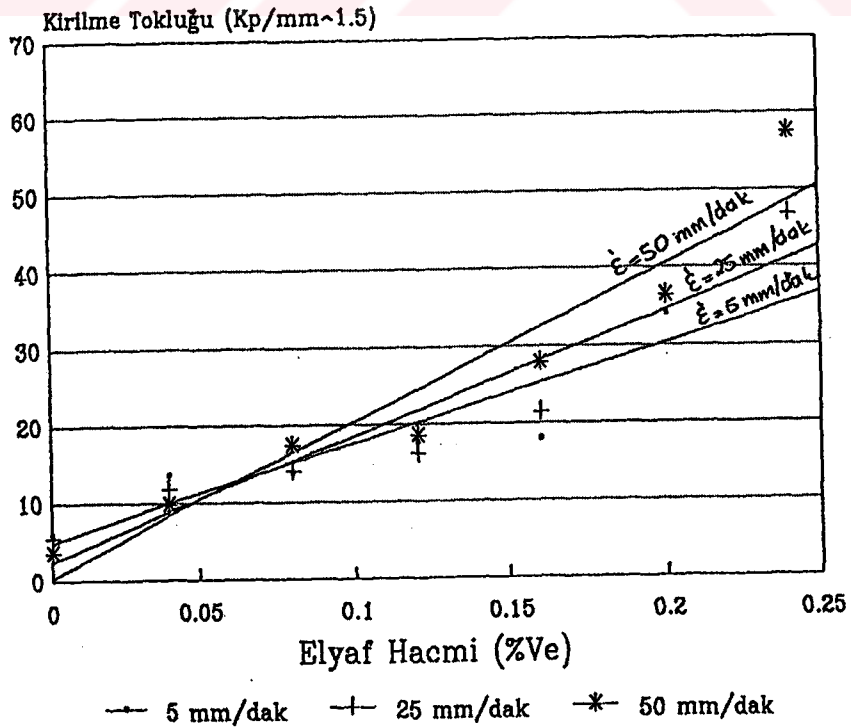
Alfa = 30 derece

Şekil 6.106 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 30^\circ$ de elyaf hacmiyle değişimi

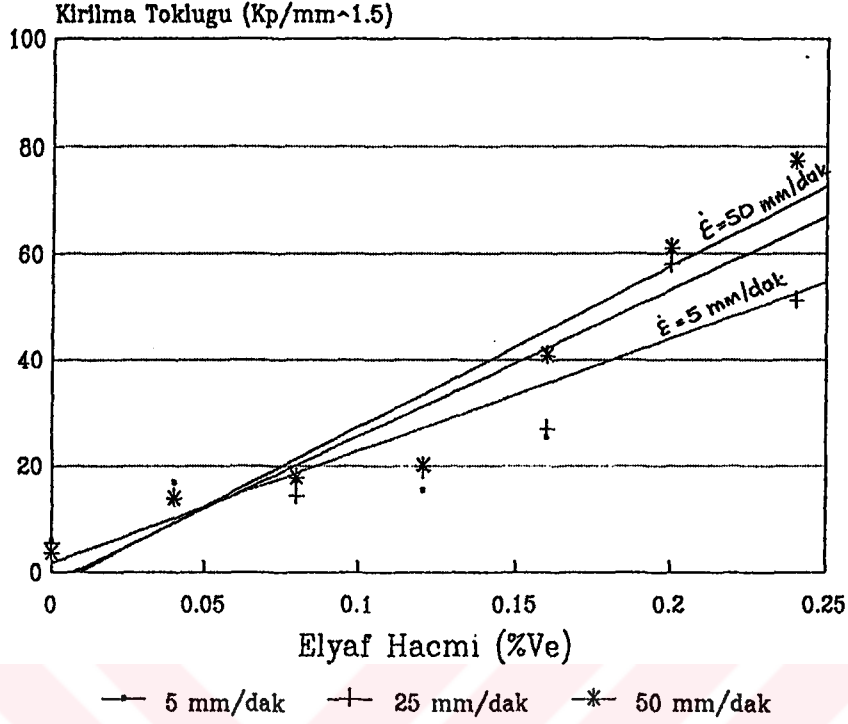
Alfa = 45 derece

Şekil 6.107 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 45^\circ$ de elyaf hacmiyle değişimi

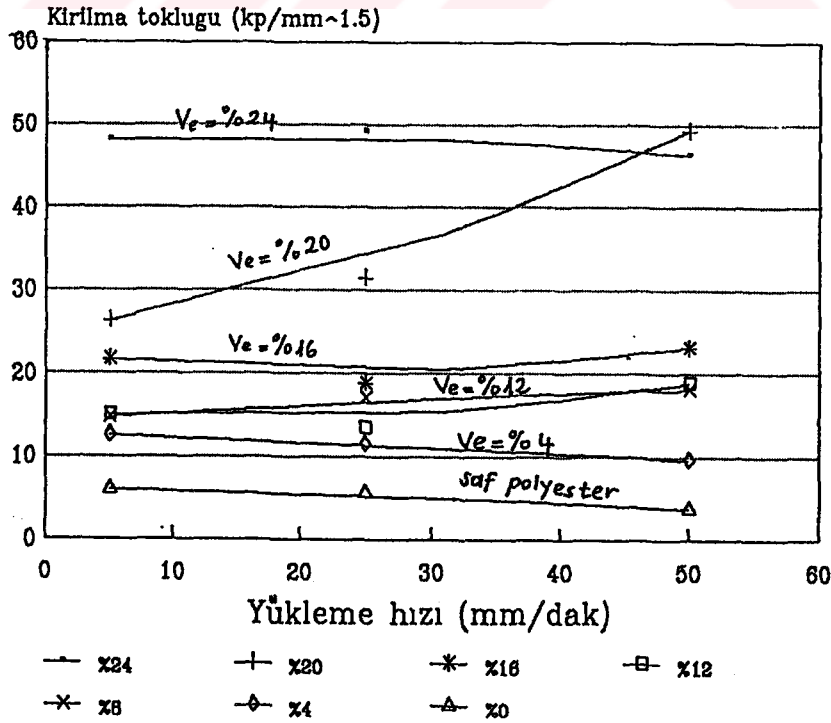
Alfa = 60 derece

Şekil 6.108 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 60^\circ$ de elyaf hacmiyle değişimi

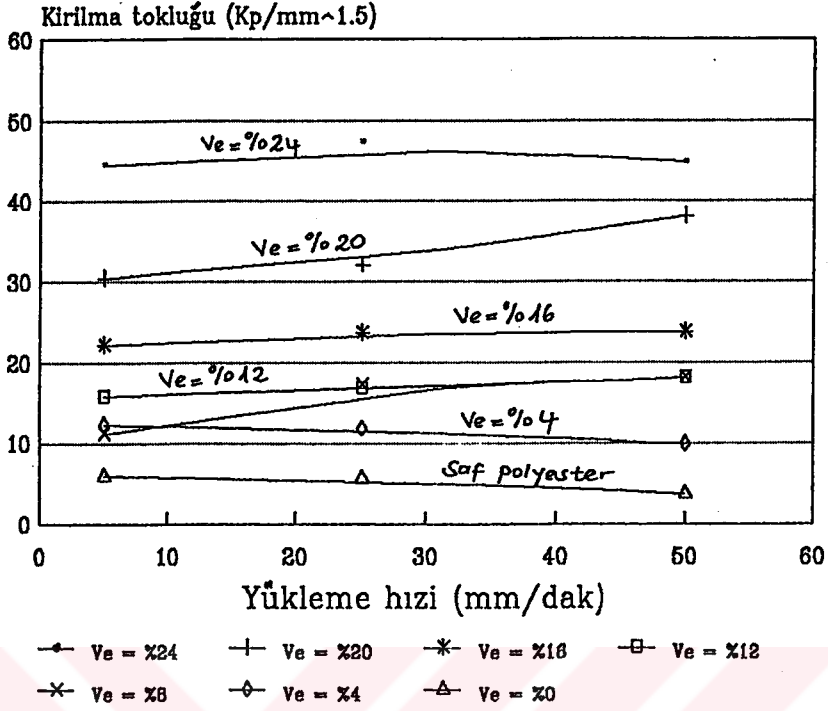
Alfa = 90 derece

Şekil 6.109 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 90^\circ$ de elyaf hacmiyle değişimi

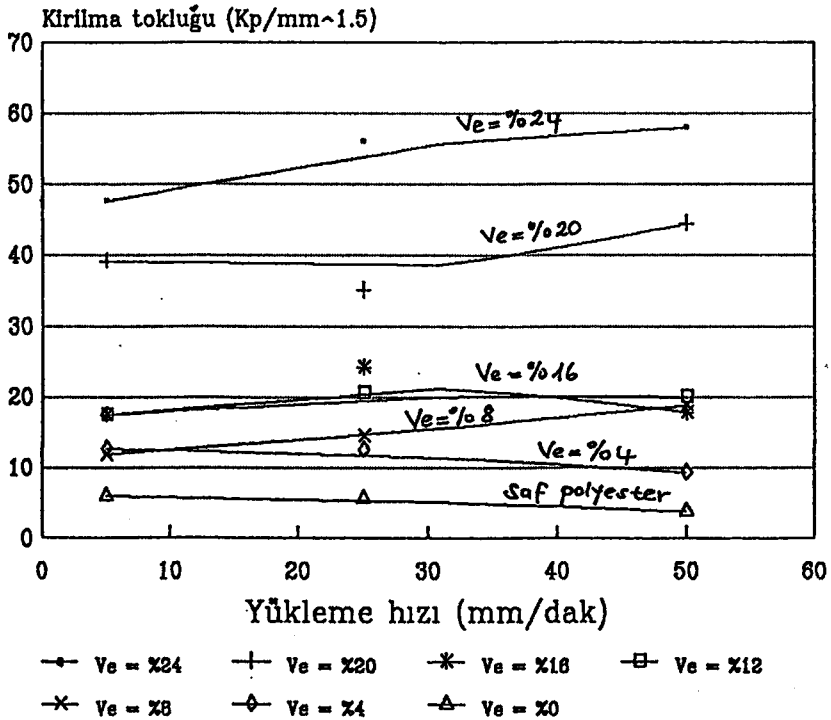
Alfa = 0 derece.

Şekil 6.110 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 0^\circ$ de yüklem hızı ile değişimi

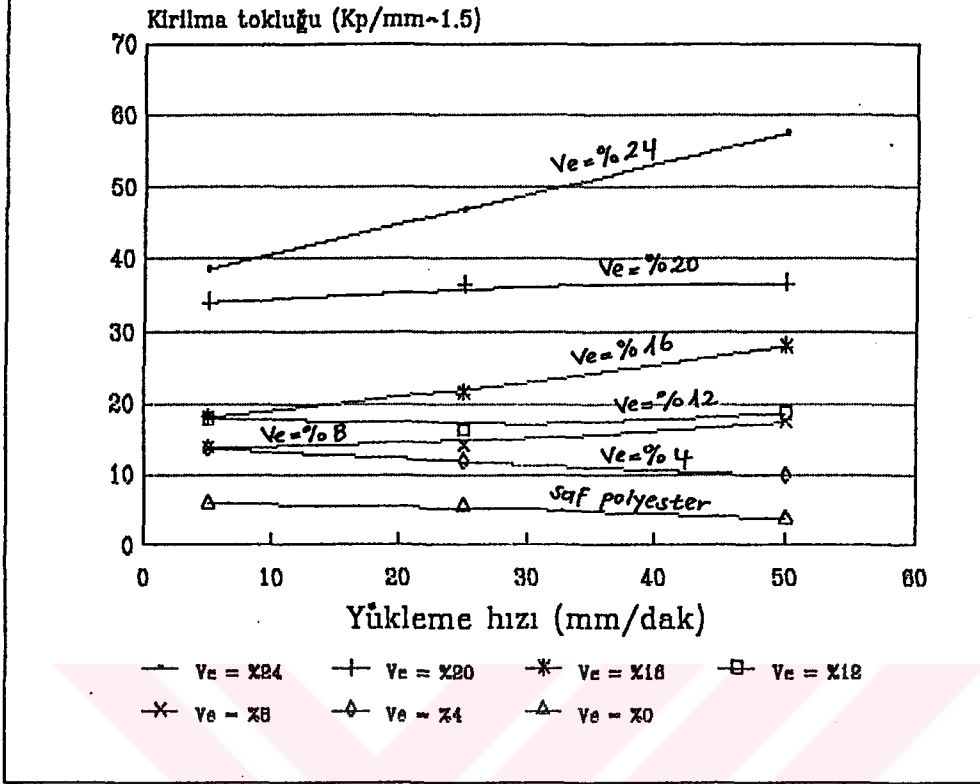
Alfa = 30 derece

Şekil 6.111 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 30^\circ$ de yükleme hızı ile değişimi

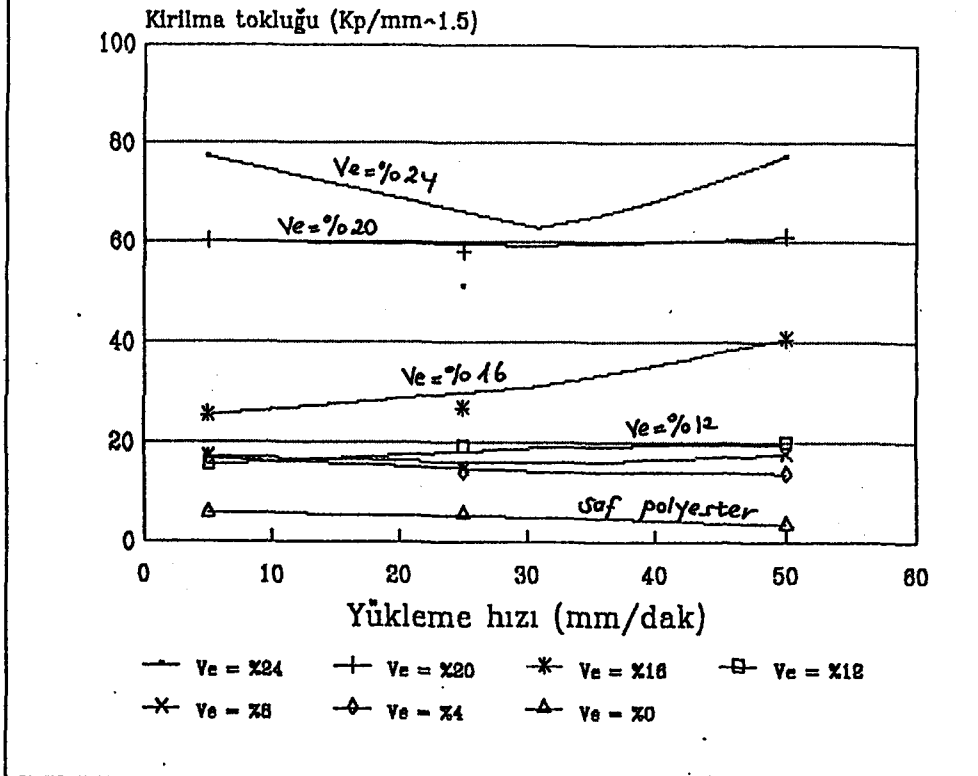
Alfa = 45 derece

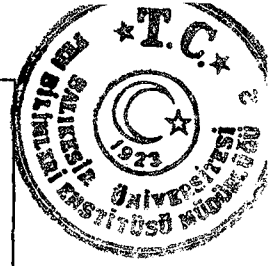
Şekil 6.112 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 45^\circ$ de yükleme hızı ile değişimi

Alfa = 60 derece

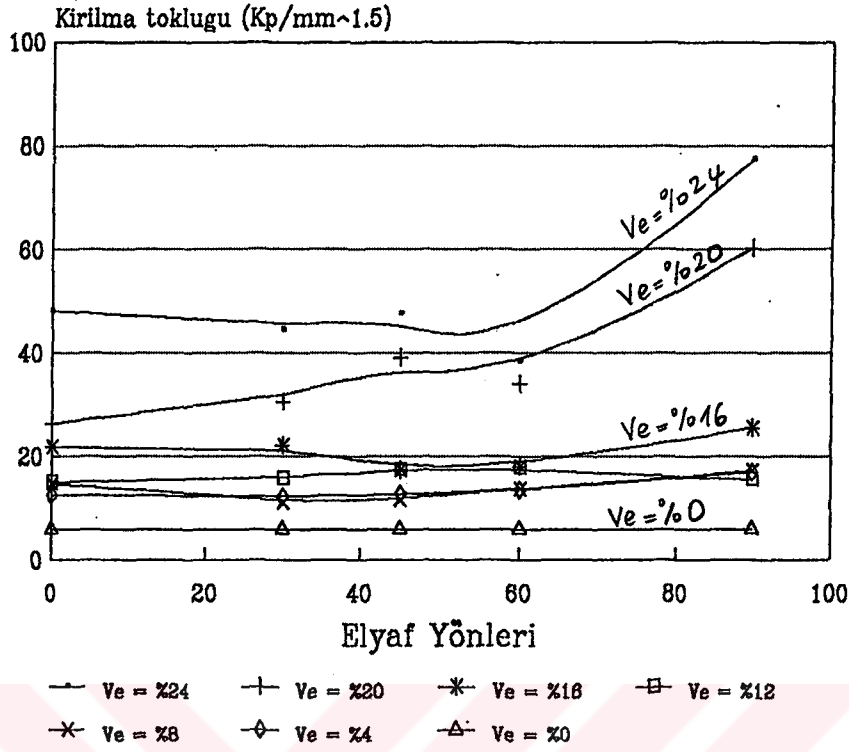
Şekil 6.113 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 60^\circ$ de yükleme hızı ile değişimi

Alfa = 90 derece

Şekil 6.114 : Kırılma tokluğunun, $\alpha = 90^\circ$ de yükleme hızı ile değişimi

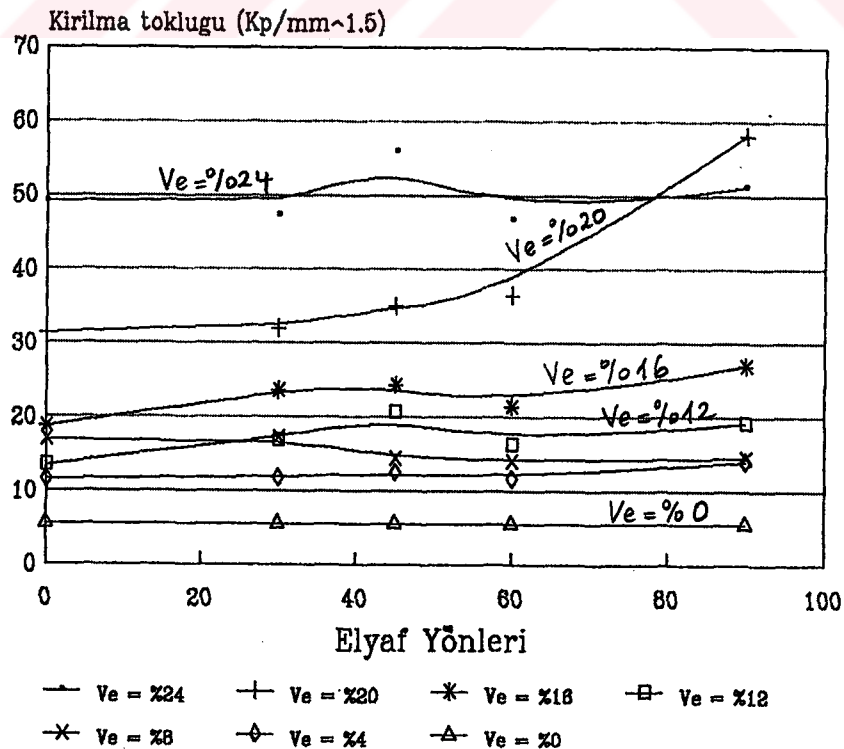


Yükleme hızı = 5 mm/dak

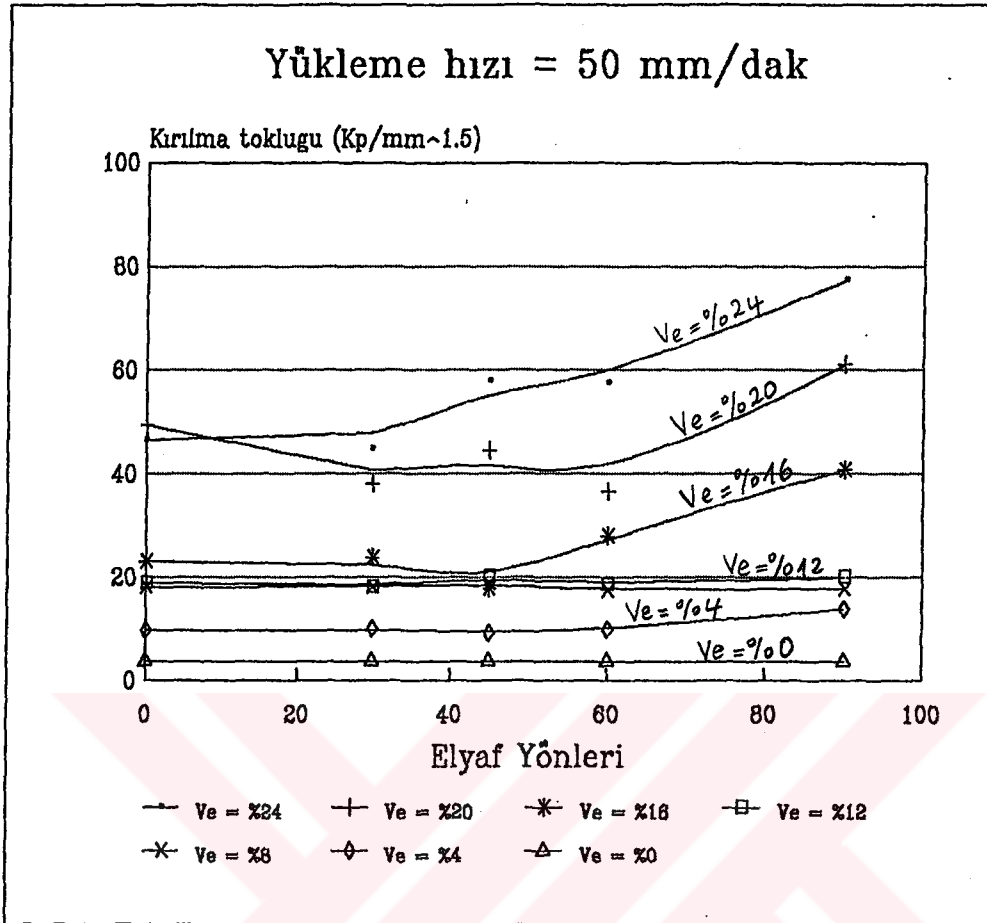


Şekil 6.115 : Kırılma tokluğunun, $\epsilon = 5$ mm/dak da elyaf yönlenmesi ile değişimi

Yükleme hızı = 25 mm/dak



Şekil 6.116 : Kırılma tokluğunun, $\epsilon = 25$ mm/dak da elyaf yönlenmesi ile değişimi



Şekil 6.117 : Kırılma tokluğunun, $\epsilon = 50$ mm/dak da elyaf yönlenmesi ile değişimi

6.7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada hedefimiz, "DÜZLEMSEL RASGELE DAĞILIMLI KEÇE ELYAFT"nın "POLYESTER" reçinesi ile takviyesi sonucunda elde edilen kompozit malzemedeki Kırılma Tokluğu (K_{IC}) değerinin ;

- Yöne bağlı olarak,
- Yükleme hızına bağlı olarak,
- Elyaf hacmine bağlı olarak ve
- Bu üç parametrenin birbiri ile ilişkisinin nasıl değiştiğini,

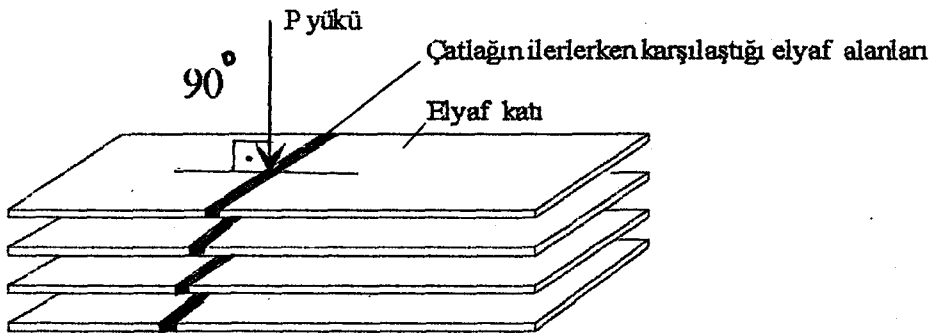
belirlemektir.

A) YÖNE BAĞLI BULUNAN SONUÇLAR

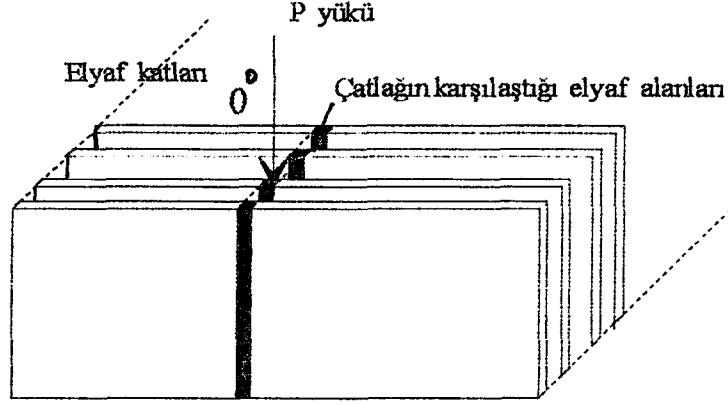
Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ;

1-) Kırılma tokluğu (K_{IC}) değerinin, 0° ve 90° lik lif yönelmelerinden etkilendiği, 90° lik yönelmede en yüksek, 0° lik yönelmede en düşük kırılma tokluğu değerlerinin elde edildiği, ancak bu iki sınır açı değeri arasında kalan diğer yönelmelerle kırılma toklukları arasında bariz bir ilişkinin olmadığı görülmüştür.

0° ile 90° yönelmelerdeki kırılma tokluklarının farklılığı aşağıda çizilen yapı modelleri ile açıklanabilir.



Şekil 6.118 : Çatlağın elyafalara 90° açı yapması halinde karşılaşıcağı elyaf alanları



Şekil 6.119 : Çatlağın elyaf tabakalarına 0° açı yapması halinde karşılaşacağı elyaf alanları

Şekil 6.118 - 6.119' da görüldüğü gibi 90° lik elyaf yönlenmesinde çatlakın tamamı elyaf tabakadan başlamasına karşılık 0° lik yönlenmelerde çatlak elyaf + polyester tabakadan ilerlemektedir.

2-) Yönlenmenin elyaf hacim oranının kritik değerini değiştirdiği görülmüştür. (Bak. Şekil 6.105- 6.109)

3-) Düzlemsel rasgele dağılımı keçe elyafının yönlenmesiyle ilgili bulunan, kırılma tokluğu değerleri daha önceki çalışmalarda bulunan sonuçlarla uyum içerisindedir. (21)

B) YÜKLEME HIZINA BAĞLI BULUNAN SONUÇLAR.

1-) Genel anlamda (K_{IC}) kırılma tokluğu değerinin, yükleme hızı arttıkça arttığı görüldü. (Metalik malzemelerde yükleme hızı arttıkça kırılma tokluğu düşmektedir [14]). Fakat elyaf (lif) hacmi %4 ve altına düştüğünde K_{IC} değerinde yükleme hızına bağlı olarak düşmektedir (Bak Tablo 6.19). Bu elyaf hacmi altındaki yapı metalik malzeme özelliği göstermektedir. Burada ilginç olan durum ; elyaf hacminin belirli bir kritik sınır değerinden (%8 - %0 arasında, örneğin Şekil 6.108' de yaklaşık %6 elyaf oranında) önce K_{IC} değeri azalmakta, bu kritik değerden sonra ise K_{IC} değeri yükleme hızına bağlı olarak artmaktadır.

2-) Net ve açık olarak görülmektedir ki ;

Düşük yükleme hızında (5 mm/dak) K_{IC} değeri düşüktür (Bak. Tablo 6.19). Bunun sebebi ;

Yükleme hızının düşük olması halinde , kuvvet daha az zorlanarak daha uzun zamanda lifleri tek tek kırmakta ve bu şekilde çatlak ilerlemektedir. Liflerin tek tek kırılması için ise aşırı yüke ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu nedenden dolayı kırılma yükü düşük olmakta, dolayısıyla kırılma tokluğu da düşük olmaktadır. Diğer bir sebep ise, düşük yükleme hızlarında çatlağın zayıf arayüzeyi bulması ve buradan ilerlemesi için zaman bulabilmektedir. Zayıf ara yüzeyi yakalayan çatlak buradan ilerleyerek düşük kırma yükünde deforme olmaktadır. Bu nedenle de kırılma tokluğu düşmektedir.

Orta yükleme hızında (25 mm/dak) K_{IC} değeri orta seviyede artmaktadır.(Bak. tablo 6.19)

Yüksek yükleme hızında (50 mm/dak) K_{IC} değeri daha da arttığı görülmüştür (Bak Tablo.6.19) Bunun sebebi ise ;

Çatlağın kısa zamanda çok yüksek kesit zorlanması ile karşı karşıya gelmesi (çatlağın yüksek yükleme hızında lifleri tek tek kırma şansı yoktur. Ani olarak düzlemsel elyaf tabakasını kırıp geçmek zorundadır.) ve çatlağın zayıf arayüzeyi bulup buradan ilerlemesi zorlaşmıştır. Bu sebebler karşısında numunenin kırılma yükü artmakta, dolayısıyla K_{IC} kırılma tokluğu da artmaktadır.

3-) Yükleme hızının *elyaf (lif) hacminin kritik sınır değerini*, lif yönüne göre etkilediği gözlenmiştir. (Bak. Şekil 6.105-6.109). Bahsedilen kritik hacim değerinin altındaki elyaf hacmiyle takviyeli kompozitler metalik malzeme özelliği göstermiştir. (Yükleme hızının artmasıyla K_{IC} değeri düşmüştür).

C) ELYAF HACMİNE BAĞLI BULUNAN SONUÇLAR

1-) Çalışmamızda kullandığımız düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyaf (lif) malzemesi karışımında maksimum %24 elyaf hacmine ulaşılmıştır. Daha fazla elyaf hacmine ulaşılamamasının nedeni ; elyaf / matris arayüzeyi yapışma kabiliyetinin, anılan oranın üzerine çıktığında azalmasıdır.

2-) Elyaf hacmi arttıkça K_{IC} kırılma tokluğu değeri (düzlem-deformasyon kırılma tokluğu) bariz bir şekilde artmaktadır. (Bak. Tablo 6.19, Şekil 6.105 - 6.109)

3-) Elyaf hacminin, yükleme hızı ve elyaf yönlenmesi söz konusu olduğunda, K_{IC} ile ilgili *kritik bir sınır değeri* olduğu gözlenmiştir.

D) YÜKLEME HIZI, ELYAF YÖNÜ VE ELYAF HACMİ İLİŞKİSİNE BAĞLI SONUÇLAR

1-) En yüksek kırılma tokluğu, 90° lif yönlenmesinde, 50 mm/dak yükleme hızında ve %24 elyaf hacminde bulunmuştur. (Bak. Tablo 6.19)

2-) Elyaf hacmi ve yükleme hızının artışı, (K_{IC})'yi arttırırken lif yönlenmesinin çok fazla etkili olmadığı gözlenmiştir. (Bak. Tablo 6.19, Şekil 6.115-6.117)

3-) Kırılma tokluğunun elyaf hacmi ile ilişkisi deformasyon hızına bağlı olarak yorumlandığında *kritik bir sınır değeri* söz konusudur. Bu kritik değer lif yönlenmesinden de etkilenmektedir (Bak Şekil 6.105-6.109). Bu kritik değerın altında, malzeme izotropik bir davranış göstermekte, metalik malzemelerde olduğu gibi K_{IC} değeri düşmektedir.

4-) Bu deneysel çalışmada elde edilen (P - V) eğrilerine ve kırılma tokluğu değerlerine göre, düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyafı takviyeli kompozit malzemesinin gevrek yapıya sahip olduğu, dolayısıyla gevrek metalik malzemeleri için ASTM E 399-74 standardında belirtilen K_{IC} test yöntemlerinin kullanılabilceği görülmüştür.

$$a, B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a} \right)^2$$

ifadesinin doğrulanması gerekmektedir. Deneylerden elde edilen K_{IC} değerleri yukarıdaki ifadede yerine konulduğunda, bu durumun sağlandığı görülmüştür. Burada, bu tür malzemeler için σ_a , σ_{kopma} 'ya eşdeğer alınarak hesaplanmıştır.

5-) Aynı elyaf hacmi, elyaf yönü ve yükleme hızlarından elde edilen eğriler ve buradan hesaplanan K_{IC} değerlerindeki farklılıkların, el yatırma yöntemindeki hatalardan, deney şartlarından, elyaf-matris arayüzeyi bağının bazı yerlerde zayıf bazı yerlerde kuvvetli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- 1-) AKSOY, S
SAYMAN, O. "Kompozit Malzemeler Ders Notları", Ege Üniversitesi Makina Fakültesi, BORNOVA / İZMİR
- 2-) ARAN, A. "Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler", İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, 1990
- 3-) AFACAN, M.
ARAN, A. "Dairesel Delik İçeren Elyaf Takviyeli Karma Levhalarda Uygulanan Gerilme Kırılması", İkinci Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, Trabzon, 1987, Sf 109
- 4-) AY, İ. "Kırılma Mekanikliği Ders Notları", Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, BALIKESİR
- 5-) AY, İ. "Doktora Tezi", Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987
- 6-) ATEŞ, E. "Yüksek Lisans Tezi", Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987
- 7-) AKSOY, Z. "Yüksek Lisans Tezi", Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1986
- 8-) CAM ELYAF SAN. A.Ş. "CTP Teknolojisi", İstanbul, 1984
- 9-) EDWARD, M.WU. "Fracture Mechanics of Anisotropic Plates", Washington University, St.Louis, Missouri, "Composit Material Workshop", Volume 1, 1967, pp-20
- 10-) GARGAR, S.K.
BROUTMAN, L.J. "Effect of Crack Tip Damage on Fracture of Random Fiber Composites", Material Science and Engineering, 21 (1975) 177-183
- 11-) HARRİS, B. "Engineering Composite Material", The Institute of Metals, London, 1986, pp. 59-77
- 12-) HULL, D. "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University Press, Cambridge, 1987
- 13-) IRWIN, G.R. "Fracture Behaviors of Composite Materials", Naval Research Laboratory, Washington D.C., "Composite Materials Workshop", Volume 1, (1967), pp.9
- 14-) KAYALI, S.
ENSARİ, C.
DİKEÇ, F. "Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri", İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Bölümü, 1978, Sf.102

- 15-) KORKMAZ, B. "Yüksek Lisans Tezi", Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987
- 16-) LAUKE, B.
POMPE, W. "Fracture Toughness of Short-Fibre Reinforced Thermoplastics", Composites Science and Engineering , 26 (1986) 37-57
- 17-) PARHIZGAR, S.
ZACHARY, L.W.
SUN, C.T. "Determination of Fracture Toughness of Unidirectionally Fiber-Reinforced Composites", "Fracture of Composite Materials", Proceedings of the second USA-USSR Symposium, held at Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania USA, Marc 9-12, (1981)
- 18-) SIH, G.C.
CHEN. E.P. "Fracture Analysis of Unidirectional Composites", Material Science and Engineering , 1973
- 19-) SLEPETZ, J.M.
CARLSON, L. "Fracture of Composite Compact Tension Specimens", Fracture of Composites, ASTM STP 593, American Society for Testing and Materials, 1975, pp.143-162
- 20-) TSAI, S.W.
HALPIN, J.C. "Composite Material Workshop", Volume 1, Washington University St Louis, Mo,1968, Pagano, Nicholas
- 21-) ÜNAL, A.
KELEŞOĞLU, E. "Farklı Destekli CTP'de Kırılma Tokluğunun Fiber Yönüne Bağlı Olarak Değişimi", Üçüncü Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, İstanbul 1991, Sf.187
- 22-) ÜNAL, A. "Kırılma Mekaniği Parametrelerini Saptama Yöntemleri ", Mühendis ve Makina Dergisi, Sayı 337, Şubat 1988
- 23-) VARDAR, Ö.
ELALDI, F. "Çentik Geometrisinin Cam Elyaf Takviyeli Polyesterin Kırılma Davranışına Etkisi", İkinci Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, Trabzon, 1987
- 24-) YAYLA, P.
UZMAN, İ. "Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Tabaka Ayrılması", Üçüncü Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, Trabzon, 1987, Sf. 109
- 25-) YE, L. "Evaluation of Mode-I Interlaminar Fracture Toughness for Fiber-Reinforced Composite", Composites Science and Technology 0266-3538, 1991
- 26-) Standart Test Methods for "Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", E 399-74 , American Standart Instution, 1974
- 27-) "Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing", BS 5762, British Standarts Instution, 1979

BİOGRAFİ

Raif SAKİN, 1970 yılında Balıkesir' de doğmuştur. İlkokulu Balıkesir Çayırhisar Köyü' nde, Ortaokul ve Lise' yi Balıkesir' de okumuştur. 1987 yılında Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi' nin Makina Mühendisliği Bölümüne girmiş ve 1991 yılında mezun olmuştur. 1991 yılında U.Ü. Balıkesir Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Lisansüstüne girmiştir.

1993 yılında ise Balıkesir Üniversitesi Havran Meslek Yüksekokulu' na öğretim görevlisi olarak girmiştir. Halen öğretim görevlisi olarak aynı Yüksekokulda görevine devam etmektedir ve bekardır.