

128909

T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK TEL TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN
KIRILMA DAVRANIŞI**

HÜSEYİN ARIKAN

DOKTORA TEZİ
MAKİNA ANABİLİM DALI

Bu tez 25 /10 /2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.



Prof.Dr. Ahmet AVCI
(Danışman)

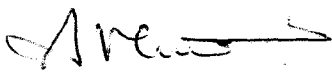
128905



Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU
(Üye)



Prof.Dr Refika KURBANLI
(Üye)



Doç.Dr. Ahmet AKDEMİR
(Üye)



Doç.Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
(Üye)

ÖZET

Doktora Tezi

ÇELİK TEL TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN KIRILMA DAVRANIŞI

Hüseyin ARIKAN

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2002- 75 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Prof. Dr. Refika KURBANLI

Doç. Dr. Ahmet AKDEMİR

Doç. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Bu çalışmada, çelik fiber takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışları araştırıldı. Çelik fiber, kum ve reçinenin birleştirilmesi ile oluşturulan polimer kompozit, kırıntı numuneler halinde üretildi. Eğilme modülü, eğilme dayanımı, kritik gerilme şiddet faktörleri bulundu. Kritik gerilme şiddet faktörü, başlangıç çentik derinliği, J-integral ve kompiyans metotları gibi birkaç metot kullanılarak hesaplandı. Bu metotlardan elde edilen kritik gerilme şiddet faktörü değerleri karşılaştırıldı.

UZUNLUK NO: 15/11/2002
KIRILMA DENEYİ

Anahtar Kelimeler: Polimer kompozit, kritik gerilme şiddet faktörü, J-integral, kompiyans.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

FRACTURE BEHAVIOUR OF STEEL WIRE REINFORCED POLYMER COMPOSITES

Hüseyin ARIKAN

Selcuk University

Graduate school of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2002-75 Pages

In this thesis, fracture behaviour of particle-filled steel wire reinforced polymer composite has been investigated. The polymer composite that formed by combining steel fiber, sand and resin system has been produced as beam samples. The flexural modulus, flexural strength, and critical crack tip opening displacement of these samples have been found. The critical stress intensity factors (K_{IC}) were determined by using several methods such as initial notch depth method, J-integral method and compliance method. The values of K_{IC} obtained from these methods were compared.

Keywords: Polymer composite, critical stress intensity factor, J-integral, compliance.



TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın tamamlanmasında her tŒrlŒ desteği esirgemeyen tez danıőmanım Sayın Prof .Dr. Ahmet Avcı' ya minnet ve Őukranlarımı sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında bilgilerinden ve tecrŒbelerinden faydalandığım Doç. Dr. Ahmet Akdemir' e, tezimin her safhasında, her tŒrlŒ desteği esirgemeyen Cihanbeyli Meslek YŒksekokulu MŒdŒrŒ Doç. Dr. Necmettin Tarakçıoğlu' na ve Őęr. GŒr. Ahmet Samancı' ya, malzemeleri test ederken cihazlarından faydalanma imkanı sağlayan S.Œ. Teknik Bilimler Meslek YŒksekokulu MŒdŒrŒ Prof. Dr. HŒseyin ŐętŒ' e, bilgisayar programları ile ilgili yardımlarını esirgemeyen Őęr. GŒr. Oğuzkaan Akçakaya' ya, ayrıca, atŒlyede her tŒrlŒ yardımda bulunan tekniker Mustafa PekgŒgŒl ve diğer atŒlye teknisyen ve teknikerlerine, polyester reçine temininde yardımcı olan Cam Elyaf A.Ő. yetkililerine teŐekkŒrŒ bir borç bilirim.

KISALTMALAR VE SEMBOLLER

GŞF	: Gerilme şiddet faktörü
LEKM	: Lineer elastik kırılma mekaniği
CMOD	: Çatlak ağzı açılma miktarı (Crack Mouth Opening Displacement)
CTOD	: Çatlak ucu açılma miktarı (Crack Tip Opening Displacement)
δ	: Deplasman
K_{IC}	: Mod I'e göre kritik gerilme şiddet faktörü
J_{IC}	: Mod I'e göre kritik J-integrali
σ	: Nominal Gerilme
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
C	: Kompliyans
a	: Çentik derinliği
W	: Malzeme genişliği
a / W	: Çentik oranı
P	: Yük
B	: Malzemenin kalınlığı
S	: Mesnetler arası mesafe

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	iv
İÇİNDEKİLER	v
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	8
3.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler	9
3.2. Tabakalı Kompozitler	10
3.3. Partikül Katkılı Kompozitler	11
3.3.1 Polimer Kompozitler	11
3.3.1.1 Polimer Kompozitlerin Özellikleri, Tipleri ve Kullanımı	12
4. KIRILMA MEKANİĞİ	15
4.1.Giriş	15
4.2. Lineer Elastik Kırılma Mekanîği	16
4.3. Elastik-Plastik Kırılma Mekanîği	19
4.3.1. Çatlak Ucu Açılma Miktarı (CTOD) Metodu	20
4.4. Kırılma Tokluğu Test Metotları	21
4.4.1. Giriş	21
4.4.2. Başlangıç Çentik Derinliği Metodu	24
4.4.3. Kompliyans Metodu	26
4.4.4. J-İntegral Metodu	27
4.5. Eğilme Elastisite Modülü (E_e) ve Eğilme Dayanımı (σ_e)	29

5. DENEYSSEL ÇALIŞMA	31
5.1. Malzemenin Tanıtımı	31
5.2. Numunenin Hazırlanışı	33
5.3 Deney Setinin Tanıtımı ve Deneyin Yapılışı	35
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	37
6.1 Takviye Oranı ile Kuvvet-Deplasman Eğrilerinin Değişimi	38
6.2 Kritik Gerilme Şiddet Faktörlerinin Bulunması	43
6.2.1. Başlangıç Çentik Derinliği Metodu	43
6.2.2 J-integral Metodu	44
6.2.3. Kompliyans Metodu	49
6.2.4. Metotların Karşılaştırılması	53
6.3. Kritik Çatlak Ucu Açılma Miktarı (CTOD _C) Değerlerinin Bulunması	54
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
8. KAYNAKLAR	59
9. EKLER	65
EK-1 Deney esnasında, eğme test cihazından alınan yük, çatlak ağzı açılma miktarı (CMOD) ve deplasman değerlerini veren tablo	65
EK-2 Eğme cihazından alınan dataların bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan Q-Basic Programı	73

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, insanların ihtiyaçları teknolojinin gelişimi ile paralel olarak artmakta ve hatta teknolojik gelişmelere zemin hazırlamaktadır. Bu ihtiyaçlardan biri de sanayiinin temel girdisi olan malzeme üretimidir. Malzeme bilimindeki gelişme hızla devam etmektedir. Ancak yeryüzünde sınırlı sayıda bulunan ana malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri nedeniyle teknolojinin gelişmesine ayak uyduramayıp, zaman zaman yeterli olmadığı dönemler olmuştur. Uzay araçlarının yapımına geçildiği asrımızda, çağın yenilikleri ve bilimin gelişmesi paralelinde günün ihtiyaçlarını karşılayabilecek, mevcut malzemelere göre gerek ekonomik, gerekse teknik yönden daha uygun malzemeler üretme yoluna gidilmiştir. Dolayısıyla hem ekonomik, hem daha mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece değişik özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmeleri suretiyle elde edilen kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır.

Kompozit malzemeler, kendilerini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini gösterecek tarzda, genellikle matriks adı verilen ana faz ile takviyelendirici tali fazlardan oluşurlar. Fazla ağırlık istenmeyen, ancak yüksek mukavemet gerektiren yerlerde çelik ve benzeri metallerin yerlerini alırlar.

Partikül katkılı polimer kompozitler, kum, çakıl gibi dolgu maddeleri ile polimer olarak polyster yada epoksi reçine ile birleşerek şekillenirler. Hızlı sertleşme, yüksek mukavemet özellikleri ile çok yönlü formülasyon ve proses özellikleri, çok çeşitli uygulamalarda polimer kompozitlerin kullanılmasını sağlamıştır. Bir yapı ve tamir malzemesi olarak kullanılan ve sürekli gevrek bir

yapıya sahip olan polimer kompozit, sınır servis şartları altında yüksek gerilmelere direnebilmelidir. Dolayısıyla polimer kompozitin kırılma özelliklerinin bilinmesi verimli şekilde kullanılmasına yardımcı olması açısından önem arz etmektedir. Son yıllarda, polimerlerin kırılma davranışlarını karakterize edebilmek için, kritik gerilme şiddet faktörü (K_{IC}), kritik J-integral ve çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD) gibi birkaç farklı yaklaşım kullanılmıştır.

Takım tezgahı gövdelerinde, dökme demir günümüze kadar kullanılmış ve hala da kullanılmaktadır. Ancak son zamanlarda daha ucuz, imalatı daha basit ve daha elverişli alternatif malzemeler aramaya ihtiyaç duyulmuş ve partikül katkı polimer kompozitler bu alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin titreşim genliği, gürültü ve ses yutmaları ayrıca, mükemmel sönümlemeli yüksek rijitlikleri kullanım isteklerini artırmaktadır.

Bu çalışmada, partikül katkı çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışları incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Vipulanandan ve Dharmarajan, takviyesiz polyester ve epoksi polimer kompozitin kırılma davranışları incelenmiş ve netice olarak polimer kompozitlerin çentik hassasiyetli malzemeler olduğu ve epoksi polimer kompozitin kırılma davranışının polyester polimer kompozitten daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Epoksi polimer kompozit ve polyester polimer kompozitin K_{IC} ve J_{IC} değerleri, polimerin oranı ve polimer kompozitin mukavemeti ile ilgili olduğu sonucuna varmışlardır (Vipulanandan ve Dharmarajan 1985).

Partikül katkı polimer kompozit, polimerize edilmiş monomer ile kum gibi mineral katkı maddelerinin birleştirilmesi ile şekillendirilir. Yüksek mukavemet özelliği, hızlı hazırlanma prosesi ve değişik formülasyonu ile polimer kompozit, bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Vipulanandan ve Dharmarajan, epoksi polimer kompozitin kırılma davranışının sıcaklıkla değişimini incelemişler ve kritik gerilme şiddet faktörlerini başlangıç çentik derinliği ve J-integral metot ile bulmuşlardır (Vipulanandan ve Dharmarajan 1987).

Vipulanandan ve Dharmarajan, epoksi harcın, kritik gerilme şiddet faktörü (GŞF) 'nü bulurken başlangıç çentik derinliği metodu, çatlak ağzı açılma miktarı (crack mouth opening displacement, CMOD) metodu ve kompliyans metotları kullanmışlar ve çimento esaslı polimer kompozit sistemlerin, kırılma davranışını karakterize etmek için aynı zamanda kritik çatlak ucu açılma miktarı (critic crack tip

opening displacement, $CTOD_C$) ve J_{IC} değerlerini alternatif yaklaşım olarak kullanmışlardır (Vipulanandan ve Dharmarajan 1988).

Manoharan ve Lewandawski, epoksi polimer kompozitin, Mod I kırılma davranışını karakterize etmek için tek kenar çentikli numuneler kullanmışlar ve dört noktadan eğme testi yapmışlardır. Sıcaklığın (22 -120 °C arasında) kırılma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Metal–matriks kompozitleri açılma ve yırtılma moduna (Mod I ve Mod III) göre incelemişler ve kritik GŞF'lerini mukayese etmişlerdir (Manoharan ve Lewandawski 1990).

David, polimer betonun geliştirilmesi ve en son gelişmeleri incelemiş ve polimer betonun suya ve kimyasal maddelere karşı direnç istenen ve hafif olması gereken yerlerde kullanıldığı ayrıca bina yapımı, merdiven, döşeme ve boru hatları, izolatörler elektrikle haberleşme, kablo hatları vs. yapımında geniş bir kullanım alanı olduğunu, araştırmalar sonucu bulmuştur (David 1986).

Ohama, polimer betonda takım tezgahları gövdelerinin dinamik ve statik davranışları hakkında çalışma yapmış ve tezgah rijitliği ve titreşimlerin sönümlenmesinde polimer betonun dökme demire nazaran daha üstün olduğunu savunmuştur. (Ohama 1986).

Bir tür kompozit olan betonun kırılma davranışları üzerinde çalışmışlar ve kırılma tokluğunu, çatlak ağzı açılma miktarı (CMOD) metoduna göre hesaplamışlardır (Jeno ve Shah 1985).

Velazco ve Shah (1980), fiber takviyeli beton kirişlerin kırılma davranışlarını araştırmışlar ve kritik gerilme şiddet faktörü (GŞF) n, J-integral, CMOD ve kompliyans metotları ile hesaplamışlardır.

Kompozit formülasyonlarında yüksek oranda kum katkısının kullanılması, polimer kompozit sistemini ekonomik kılmaktadır. Yapı ve tamir malzemesi olarak

kullanılan ve gevrekliği değişmeyen polimer kompozit, kullanım şartlarında son derece yüksek mukavemete direnmelidir (Christian ve Frank 1999).

Polimer kompozitin verimli bir şekilde kullanılması için, kırılma parametrelerinin bilinmesi önemlidir. Son yıllarda polimerlerin kırılma davranışı ve geometrilerini karakterize etmek için, kritik gerilme şiddet faktörü (GŞF), kırılma enerjisi (G), kritik J –integral (J_{IC}) ve kritik çatlak ucu açılma miktarı ($CTOD_c$) gibi birkaç farklı yaklaşım kullanılmıştır (Shah ve ark. 1999).

Polimer kompozitin mod I' e göre kırılma davranışı, dört noktadan eğme (four point bending, 4-PB) testi uygulanarak tek kenar çentikli eğme numunelerinde (single notch edge bending, SENB) atlak ağzı açılma miktarı metodu kullanılarak izlenmiştir (Prokopski ve Langier 2000).

Son yıllarda anayol ve köprü ayaklarının konstrüksiyon ve rehabilitasyonunda artan bir biçimde polimer kompozitler kullanılmaktadır. Yakın gelecekte dünya çapında beton alt yapı sistemini mukavemetlendirmek, tamir etmek ve rehabilite etmek için uygun teknolojinin geliştirilmesi ihtiyaı kritik olacaktır. Bu durum, depremler, mekanik yükler ve çevresel etkiler sebebiyle yorulmanın bir sonucu olarak, yer altı yapıları otoyollar, demir yolları, köprülerdeki bir çok yapısal hatalar nedeniyledir. Böyle bir tamir için en yaygın metotlardan birisi, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin kullanımıdır (Christian ve Frank 1999).

Polimer ve imento esaslı kompozitlerin kırılma özelliklerinin karakterize edilmesinde, lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) parametreleri kullanılmaktadır (David 1986).

Çimento esaslı malzemeler için LEKM' nin kullanımı, çatlak ucundaki küçük ldeki plastik bölgeyi analogi etmek için çatlak proses bölgesi ve çatlak uzantıları ele alınarak değerlendirilir. Ancak düzlem şekil değişimi kırılma tokluğu testi (K_{IC}) için American Society Testing Materials, (ASTM- E399) standardı çok büyük

numuneler gerektirmektedir. Bu sınırlara rağmen hala K_{IC} değerlerinin hesaplanmasında LEKM geniş bir biçimde kullanılmaktadır (Velazco, Visalvanich ve Shah 1980).

Pahalı ölçüm aletlerinden yardım almaksızın çimento sistemlerinden çatlak uzamasını direkt olarak ölçmek nadiren mümkün olmaktadır. (Srivatsan, Lam ve Krause 1998).

Askeri uygulamalardaki kullanım için yapısal malzemeler dizayn edildiğinden genellikle statik yüklere karşı mükemmel mekanik özellikler ve tokluk istenir. Ancak benzer yaklaşım dinamik yükler için düşünülmez. Dinamik yükler altındaki malzeme tokluğu onların performansı üzerindeki yer sınırlarının değişmesi ile bilinir. Fiber-glass kompozitler, maden taşıyan gemilerde yapı malzemesi geçerli ve önemli bir biçimde kullanılır. Uygulamada bu gemiler balistik ve deniz altı şokunda kaynaklanan darbe yüklerine maruz kalabilir. Böylece cam elyaf takviyeli polimer (glass reinforced polymer, GRP) kompozitlerin, dinamik yükler için çalışılmasına ihtiyaç vardır (Shah, Simpson ve Gellert 1999).

Çelik fiber takviyeli, çimento esaslı betonun kırılma tokluğu araştırılmış ve değişik fiber oranları için betonun kırılma toklukları bulunmuş ve fiber takviyesinin kırılma davranışına etkileri araştırılmıştır (Taylor, Lydon ve Barr, 1997).

Takviyeli polimer kompozit konusunda ilk çalışma kırılmış elyaf takviyeli polimer kompozitler üzerinde olmuş ve bu kompozit malzemenin mekanik ve kırılma özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca ideal polyester ve elyaf oranı araştırılmış ve ağırlıkça % 16.5 polyester ve ağırlıkça %1.5 kırılmış elyaf oranındaki malzemenin optimum özelliğe sahip malzeme olduğu tespit edilmiştir (Arıkan 1993).

Bu çalışmada, ağırlıkça % 16.5 oranında polyester, ağırlıkça % 1.5, % 3 ve % 4.5 oranlarında çelik tel takviyesi ve geri kalan kısmı kumdan olan polimer

kompozit üretilmiştir. Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek ve kırılma davranışını tanımlayan kritik gerilme şiddet faktörü ve kritik çatlak ucu açılma miktarı gibi parametrelerin bulunması amacıyla, malzemelere üç noktadan eğme testi uygulanmıştır. Kritik gerilme şiddet faktörü, başlangıç çentik derinliği, J-integral ve kompliyans metotları ile hesaplanarak, karşılaştırma yapılmıştır.



3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, fiziksel olarak birbirinden farklı ve mekanik olarak birbirinden ayrılabilen iki veya daha fazla bileşenden meydana gelir. Birbirinden farklı bu iki bileşen matriks malzeme ve matriks içinde dağıtılmış olan takviye malzemesidir. Bu bileşenler birbiri içinde çözünmezler. Birleşme genellikle fizikseldir. Yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip elyafı, kimyasal dirençli plastik matriks malzemedan üretilen kompozitin mukavemet ve rijitliği elyafa, kimyasal direnci ise plastiğe yakın olur.

Kompozit malzemelerin özellikleri, içerisindeki katkı maddeleri aracılığı ile geliştirilirler. Bu özellikler şunlardır;

- Mukavemet
- Rijitlik
- Korozyon direnci
- Yırtılma direnci
- Estetik
- Hafiflik
- Termal izolasyon
- Akustik izolasyon

Genel olarak yukarıdaki özelliklerden hepsi aynı anda görülmezler fakat ihtiyaca göre düzenlenebilirler.

Kompozitler bileşenleri açısından çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Bileşen türü ve yapısal açıdan başlıca üç gruba ayrılabilir.

3.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

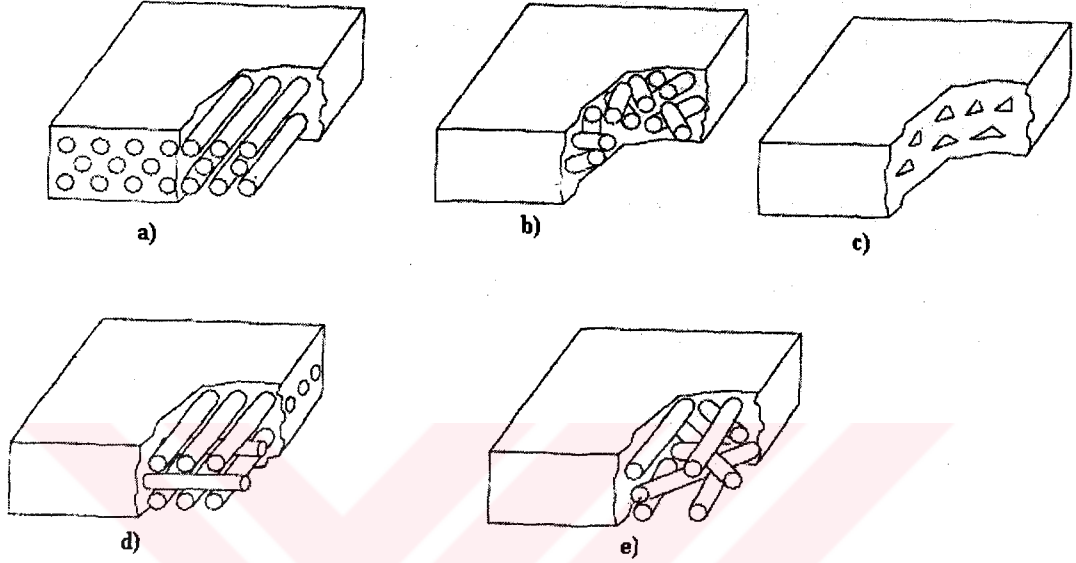
Takviye malzemesi elyaf halindedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri, fiber/matriks karışım oranlarını değiştirmek ve her birin fazın sahip olduğu nitelikleri düzenlemek suretiyle ayarlanabilir. Özellikleri ve sahip olduğu nitelikleri yönler göre değişen malzemelere, anizotropik malzemedir. Malzemenin anizotropik olmasının en önemli neticelerinden birisi, malzeme davranışlarını izah edebilmek için gerekli olan parametre sayısının artmasıdır. Mesela, izotropik malzemelerin elastik davranışının izah edilebilmesi için yalnızca iki sabit parametre gerekirken, genel anizotropik malzeme için 21 ve ortotropik malzeme için 9 sabit parametrenin bulunması gereklidir. Elyafli kompozitler yumuşak ve sünek matriks içine sert dayanıklı elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Elyafli kompozitler şekil 3.1'de görüldüğü gibi, tek yönlü sürekli elyafli, kırılmış elyafli, ortagonal elyafli, çapraz dizilmiş sürekli elyafli ve rasgele dizilmiş sürekli elyafli olmak üzere beş sınıfa ayrılırlar (Şahin, 2000).

Fiber takviyeli polimer kompozitin eğilme elastisite modülü ve eğilme dayanımı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.1)$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3.2)$$

Burada; E_c , E_f ve E_m , sırasıyla kompozitin, fiberin ve matriksin eğilme elastisite modülü, σ_c , σ_f ve σ_m , sırasıyla kompozitin, fiberin ve matriksin eğilme dayanımı, V_f , fiberin hacimsel oranı, V_m ise matriksin hacimsel oranıdır.



Şekil 3.1 a) Tek yönlü sürekli elyaflar b) Kırılmış elyaflar c) ortogonal elyaflar d) çapraz dizilmiş sürekli elyaflar e) rasgele dizilmiş sürekli elyaflar

3.2. Tabakalı Kompozitler

Bu tür malzemede en az iki adet olan farklı fazlar tabakalara şeklinde kompozitin yapısı içinde yer almaktadır. Genelde bu fazlardan biri kompozit özelliklerini kazandıran sürekli faz diğeri ise sürekli fazı oluşturan tabakaları bir arada tutan bağlayıcı fazdır. Organik veya inorganik malzemeler tabakalar halindedir. Teflon ve kauçuk kaplı metalik levhalar örnek olarak sayılabilir.

3.3. Partikül Katkılı Kompozitler

Bir matris içinde milimetre üzerindeki boyutlarda tanelerin yer aldığı bir kompozit malzeme türüdür. Örnek olarak, bir tür polimer kompozit olan polimer beton yada çimento esaslı beton verilebilir.

3.3.1 Polimer Kompozitler

Yukarıda da tarif edildiği gibi, çeşitli tanelerin bir bağlayıcı ile bağlanarak bir arada tutulmasıyla elde edilen malzemeye genel sınıflandırmada partikül katkı kompozit denmektedir. Bağlayıcı olarak termoset matriks kullanılıyorsa polimer kompozit olarak adlandırılmaktadır. Polimer kompozitleri oluşturan, taneler kum, bağlayıcı olarak da reçine kullanılıyorsa bu tür polimer kompozitlere de polimer beton ismi verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan polimer kompozit ifadesi, polimer betonu ifade etmektedir.

Polimer kompozitler formülasyona bağlı olarak tek bir özelliğe sahip olurlar.

Bunlar;

- Ortam sıcaklığında hızlı sertleşme
- Yüksek çekme, eğme ve basma mukavemeti
- Çoğu yüzeylere iyi bir yapışma
- Aşındırıcı çözeltilere veya suya karşı düşük bir geçirgenlik
- İyi bir kimyasal direnç

Polimer kompozit bileşenleri aşağıda kısaca izah edilmiştir.

a. Monomerler için sertleştiriciler: Monomerler için sertleştirici tipleri, benzoil peroksit (BPO), loril ve metil etil keton peroksit (MEK) dir.

b. Monomerler için hızlandırıcılar: Bunlar tertiyerdimetilanilin şeklinde bulunurlar. Hafif çilek renginde sıvılardır. Monomerler içinde hızlı dağılırlar.

c. Kumlar: Monomer sistemlerine bağlı olarak kullanılan bütün kumlar, esas olarak silisyum, kuartz, granit, kireç taşı ve diğer yüksek kaliteli malzemelerden meydana gelmelidir. Kumlar, genelde kurutulmalıdır. Kir, asfalt ve diğer organik malzemelerden arıtılmalıdır. Kumlar üzerindeki nem çoğu monomer sistemleri ve epoksi reçinelerin bağlanma kuvvetini azaltırlar. Başka bir şekilde belirtilmedikçe kumların yüzey nemi bulunmamalıdır. Bazı sistemlerde nem miktarı %3 'e kadar olabilir. Belli ölçüdeki nem miktarı %1'den daha az olmalıdır (David 1986).

3.3.1.1 Polimer Kompozitlerin zellikleri, Tipleri ve Kullanımı

Polimer kompozit, suya ve kimyasal maddelere direnci istenen ve hafif olması gereken yerlerde imento kompozitine göre üstün mukavemeti olması nedeniyle kullanılmaktadır. Bina yapımı, merdiven, boru hatları, izolatörler, elektrik ve haberleşme, kablo hatları vs. yapımında geniş bir kullanım alanı bulmuştur.

Polimer kompozit, ilk olarak taşlama tezgah gövdesi yapımında uygulanmıştır. Daha sonra yüksek hızlı freze ve hassas delik delme tezgahı bu malzemeden yapılmıştır.

Polimer kompozit yüksek doldurma maddeli suni bir malzemedir. Normal imento kompozitinde kum, su ve çimentodan oluşan bağlayıcı madde ile birleşir. Bir kısım su birleşir, geri kalan ise uçar ve gözenek bırakır. Suni reçine kompozit; bağlayıcı madde, ilave madde ve dolgu maddesinden oluşur. Bağlayıcı madde olarak suni reçine, ilave madde (agrega) olarak silikat türü maddeler, dolgu maddesi ise kalsiyum karbonat vs. gibi maddeler kullanılır. Polimer kompozitin özellikleri, bağlayıcı tip ve özellikleri ile agregaların özelliklerine bağlıdır (Ohama 1984).

İlave madde olarak kullanılan kum taşı, karataş, granit ve kuartzdan en az plastik şekil değişimine sahip olması nedeniyle kuartz diğerlerine tercih

edilmektedir. Bağlayıcı madde olarak polyester reçine, metakrilik reaksiyon reçinesi ve epoksi reçine kullanılmaktadır. Pratikte epoksi reçineli polimer kompozit olan taşlama tezgahı gövdesi ve metakrilik reçineli polimer kompozit olan düşey metal bant testere tezgahı sütunu, seri üretimi yapılmaktadır.

Polimer kompozitin mukavemeti, ilave maddelerin nemini artırmasıyla önemli derecede azalır. Bu maddelerin taneleri ateşle kurutulur. Plastik şekil vermede uzun süreli davranış tane büyüklüğünün artmasıyla kötüleşmektedir. Küçük tanelerin bulunduğu polimer kompozit fazla miktarda reçine gerektirmekte, bu ise polimer kompozitin mukavemet özellikleri ve sürünme mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir.

Mekanik ve termik özellikler yanında plastik şekil değişimi ve dinlendirme önemli olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, epoksi reçine kompozit ve polyester reçine kompozit de daha yüksek şekil değişimi elde edilirken akrilik reçine kompozitin sürünme mukavemetine uygun olduğu yani daha az şekil değişimi elde edildiği görülmüştür. Aynı sürünme mukavemetini 50 °C sıcaklığa kadar gösteren epoksi reçinelerde vardır. İlave maddenin iyice sarılması için suni reçine düşük viskoziteye sahip olmalıdır . Tablo 3.1' de polimer kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Polimer kompozitten yapılmış yüksek hızlı taşlama tezgah gövdelerinde, polimer kompozitten yapılan tezgah gövdelerine nazaran da düşük frekanslar elde edilmiştir. Polimer kompozitten tezgahın özel bir avantajı, tezgahın çalışma alanı içerisindeki kritik rezonansların bulunmaması olmuştur (Shulz 1984).

Demir ile kompozit teşkil metakrilik reçine kompozitte, saf polimer kompozitten konstrüksiyona göre sürünme mukavemetinde bir yükselme, çelik konstrüksiyona göre ise sönümleme (absorbsiyon) ve rijitlikte bir artma elde edilmiştir. 3420 kg ağırlığındaki taşlama tezgahında 2100 kg polimer kompozit

kullanılmasıyla altı kat daha yüksek sönümlenme ve kızak yollarında daha yüksek rijitlik elde edilmiştir. Polimer kompozit doldurulmadan önce titreşim 10 μm , doldurduktan sonra 1 μm kadar azalmıştır. Aynı zamanda tabi frekanslar 115 Hz'den 195' Hz'e, 150 Hz'den 232 Hz'e yükselmiştir (Acherkan 1973, Neumann ve ark.1983).

Tablo 3.1 . Partikül katkılı polimer kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzemenin fiziksel özellikleri	Epoksi kompozit	Polyester kompozit
Yoğunluk (kg/dm^3)	2.02	1.98
Eğilme elastisite modülü (GPa)	4-7	2.5-4.5
Eğilme dayanımı (MPa)	12-25	5-15

4. KIRILMA MEKANİĞİ

4.1. Giriş

Kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu artırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerinin incelenmesidir. Makine ve konstrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilir. Malzemelerin üretimi sırasında da çeşitli nedenlerden dolayı kılcal çatlaklar bulunabilir. Bu çatlaklar civarında gerilme konsantrasyonu oluşur ve kırılmaya sebep olur. Gerilme konsantrasyonu sebebiyle meydana gelen çatlaklar, kullanılan malzemenin akma gerilmesinden daha düşük gerilmelerde de olabilir. Yapısında kılcal çatlaklar ve plastik deformasyona uğrayan iri boşluk ihtiva eden malzemeler genellikle gevrek kırılma gösterirler (Kayalı 1983).

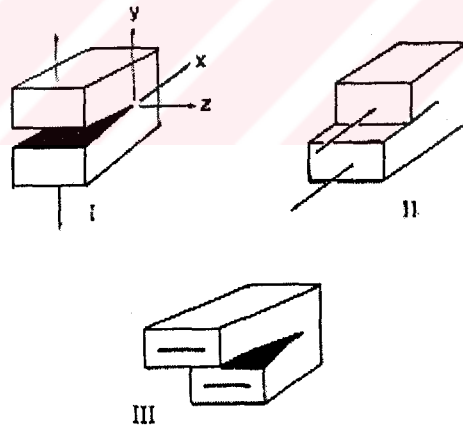
Metalik malzemelerin öncelikle gevrek kırılma karakterini inceleyen teoriler ve deneyler geliştirilmiştir. Bir konstrüksiyon mühendisi veya kırılma ile yakından ilgilenen araştırmacılar için bu deneyler yeterli olmamaktadır. Kırılma mekaniği analizi ile hem malzemenin hasar nedeni anlaşılabilir, hem de imalat ve kullanılma sırasında herhangi bir çatlağın teşekkülü önlenebilir.

Kırılma mekaniğinde kırılma ile ilgili parametreler kırılma tokluğu (Fracture toughness) veya gerilme şiddet faktörü (GŞF) dür. Gerilme şiddet faktörü, "K" sembolü ile ifade edilir. Gerilme şiddet faktörü K, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır.

Bir malzemenin kırılma tokluğu malzemede çatlak mevcutken yük taşıyabilme kapasitesi veya plastik olarak deforme olabilmesi diye tanımlanabilir. Malzeme tokluğu, düzlem gerilme şartlarında (K_C), düzlem deformasyon şartlarında (K_{IC}) kritik gerilme şiddet faktörü ile ifade edilebilir. Bu davranışlar, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinde (LEKM) geçerlidir. Elastik-Plastik davranışlar için tokluk, J -integral, R-eğrisi ve çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD) cinsinden ifade edilir.

4.2. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağlı hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 4.1' de üç tip davranış görülmektedir.



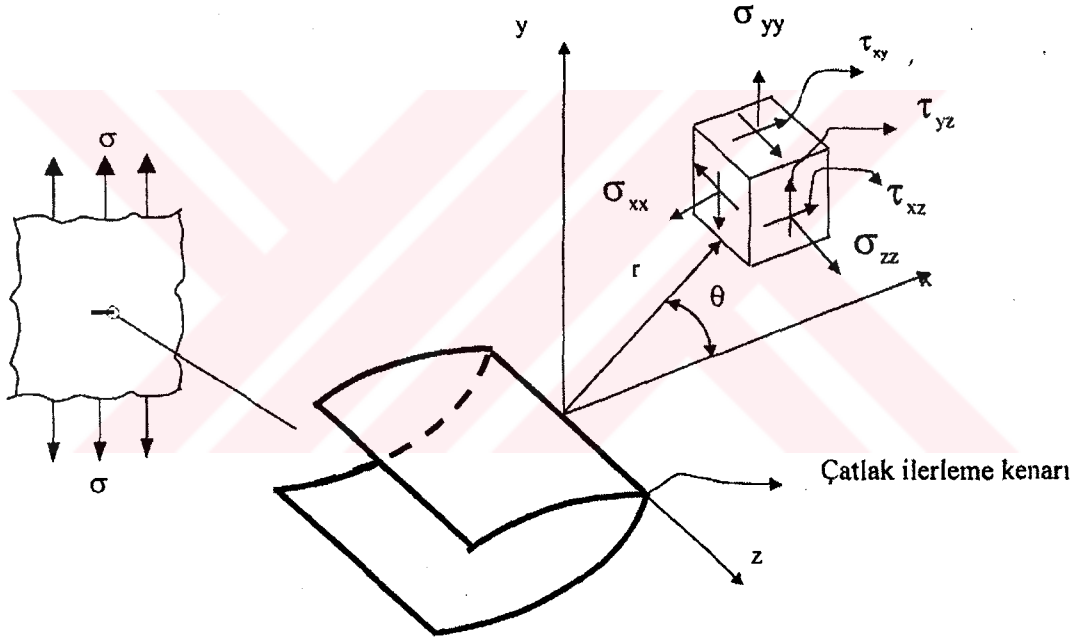
Şekil 4.1 Çatlak ilerleme modları I.açılma modu, II.kayma modu, III.yırtılma modu

Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar

İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur (Irwin 1957). Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörleri her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{xy} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{yz} \sqrt{\pi a} \quad (4.1)$$

Burada, K_I , K_{II} ve K_{III} sırasıyla mod I, mod II ve mod III'e göre gerilme şiddet faktörleridir. Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi şekil 4.2'deki gibidir.



Şekil 4.2 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 4.2'deki gibidir;

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(2\nu^* \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

Şekil 4.2'deki gibi açılan çatlığın, r mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada ν : poisson oranı, σ_{xx} : eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy} : y eksenindeki gerilme değeri ve σ_{zz} : z eksenindeki gerilme değeridir. K_I : mod I için gerilme şiddet faktörünü E: Elastisite modülü, θ : r' nin x eksenine yaptığı açıdır. u, v, w sırası ile x, y, z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.

$$u = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1+\nu) \left[(2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1+\nu) \left[(2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E} \quad (\text{Düzlem gerilme hali için } 0 \text{ dır}) \quad (4.3)$$

$$\nu^* = \nu, \quad k = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \quad (\text{Düzlem gerilme hali için})$$

$$\nu = 0, \quad k = 3 - 4\nu \quad (\text{Düzlem deformasyon hali için})$$

Mod II durumu için gerilmeler ;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (4.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

Deplasmanlar denklem 4.5'deki gibi bulunur;

$$\begin{aligned}
 U_x &= \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 U_y &= \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$w = 0$$

Mod III durumu için gerilmeler ve deplasmanlar;

$$\begin{aligned}
 \tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_{yz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0 \\
 u &= v = 0 \\
 w &= \frac{K_{III}}{E} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2}
 \end{aligned}$$

4.3. Elastik-Plastik Kırılma Mekanikliği

Çoğu malzemelerde, lineer elastik kırılma mekanikliği ile kırılma davranışlarını izah etmek hemen hemen imkansız olup, alternatif bir kırılma modeli gereklidir. Elastik-plastik kırılma mekanikliği, lineer olmayan davranış (plastik deformasyon gibi) gösteren malzemeler için uygulanır. Elastik-plastik davranışı karakterize eden parametrelerden biri çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD), diğeri ise J-integraldir. CTOD ve J-integralin kritik değeri, boyuttan

bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ucu plastik davranışını verir (Anderson 1991).

4.3.1. Çatlak Ucu Açılma Miktarı (CTOD) Metodu

Wells, bir çok çelik yapılarıdaki kırılma tokluğu değerini ölçmeye teşebbüs ettiğinde, bu malzemelerin lineer elastik kırılma mekaniği tarafından karakterize edilemeyecek kadar tok olduğunu bulmuştur. Yüksek tokluk arzulanır bir durum olmasına rağmen, kırılma mekaniği teorisi bir çok önemli malzemeye uygulanamamıştır. Wells, çatlak yüzeyini incelerken; başlangıçta çatlağın keskin daha sonra, plastik deformasyon ile köreltiğini ve çatlaktaki körelmenin, kırılma tokluğu ile orantılı olarak arttığını fark etmiştir. Bu gözlem, kırılma tokluğu ölçüsü olarak, çatlak ucu açılmasının kullanılmasının öne sürülmesine yol açmıştır. Bugün bu parametre “çatlak ucu açılma miktarı”, (crack tip opening displacement, CTOD) olarak bilinmektedir ve kırılmanın bir parametresi olarak kullanılmaktadır (Anderson 1991).

CTOD değerini tespit etmek için tek kenar çentikli eğme (single edge notch bending, SENB) numunesi tercih edilir. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi CTOD değeri, çatlak ağzı açılma miktarı (CMOD) V_p ’nin tespiti ile bulunur. V_p ise çatlak ağzı açılma miktarı (CMOD) dır. Çatlak ucu açılma miktarı δ ile ifade edilir. Şekil 4.6’da V_p ’nin clip-gage ile ölçümü gösterilmektedir.

δ ile clip-gage deplasmanı arasındaki bağıntı;

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} \quad (4.7)$$

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{0.4(W-a)V_p}{0.4W + 0.6a + z} \quad (4.8)$$

ifadeleri ile bulunur (ASTM E-1290 1993).

Burada; K , başlangıç çentik derinliği metodu ile bulunan kırılma tokluğu değeri, ν poisson oranı, W malzeme genişliği, a başlangıç çentik derinliği, V_p çatlak ağzı açılma miktarı (CMOD) dır.

Temelde CTOD' nin kritik değeri ölçülerek, düzlem gerilme hali için müsaade edilebilir maksimum çatlak uzunluğu bulunabilir. Düzlem şekil değişimi halinde ise bazı sonlu eleman çözümleri kullanılabilir olmasına rağmen tam olarak analitik çözüm yapılamaz.

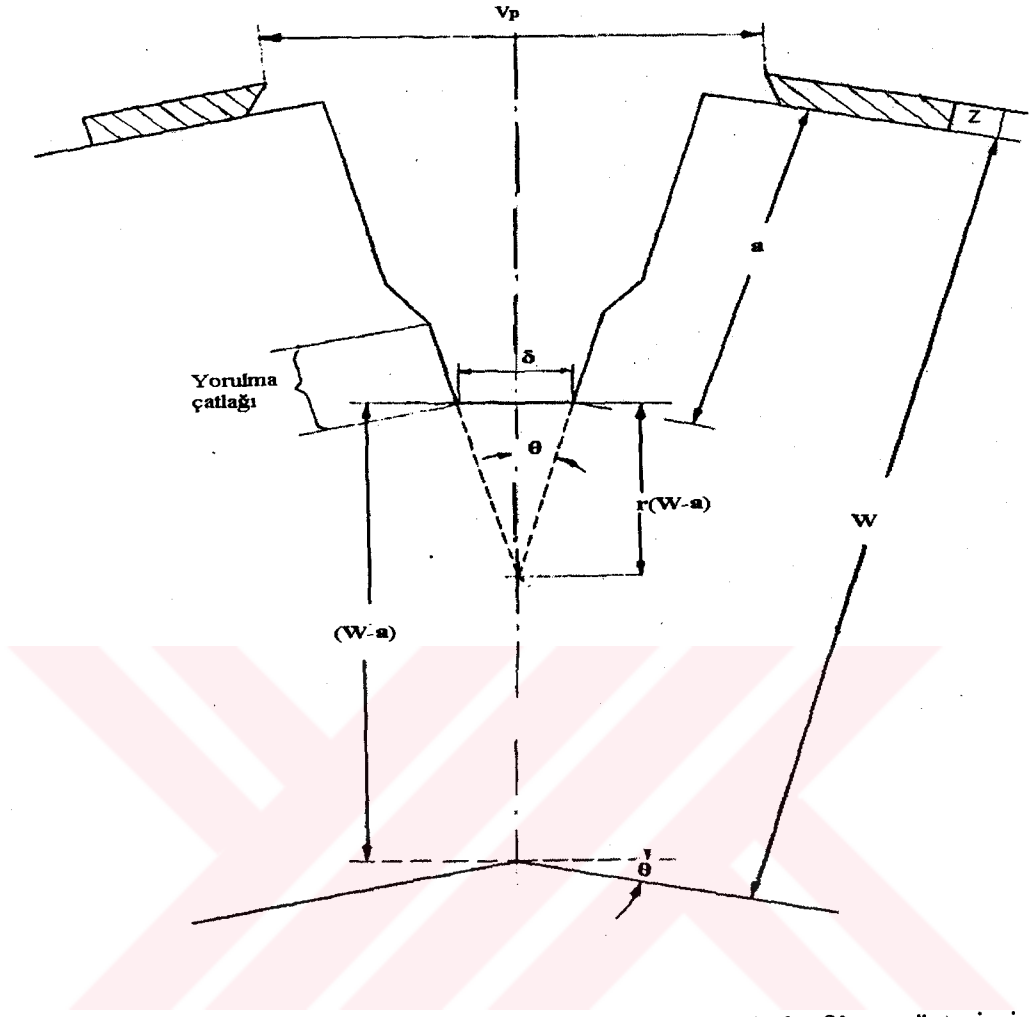
4.4. Kırılma Tokluğu Test Metotları

4.4.1. Giriş

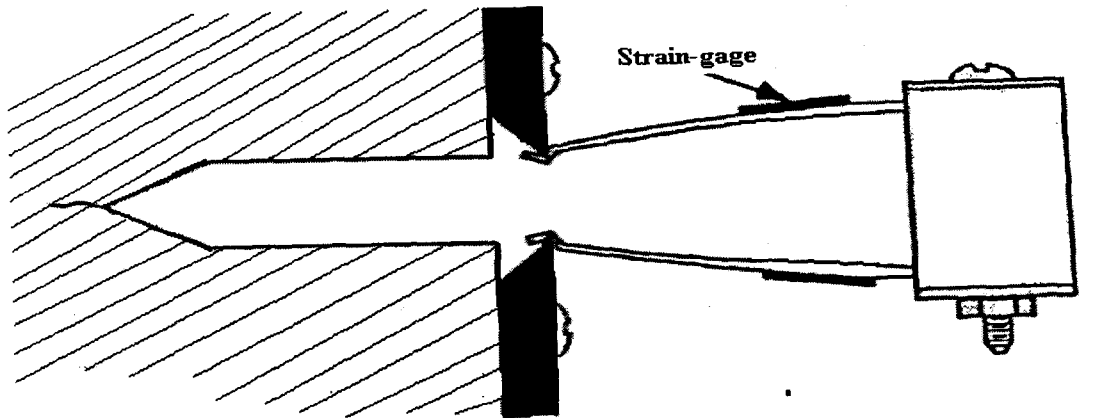
Bir kırılma tokluğu testi, çatlak büyümesine karşı bir malzemenin direncini ölçer. Böyle bir test hem tek bir kırılma tokluğu değeri ve hem de direnç eğrisini tanımlayabilir ki, bunlar çatlak büyümesine karşı çizilen kırılma tokluğu (fracture toughness, K), J -integral (J), veya çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD) gibi tokluk parametreleridir. Tek bir tokluk değeri genellikle klivaj kırılmasına maruz bir testi tarif etmek için yeterlidir. Çünkü bu kırılma mekanizması, tipik bir şekilde kararsızdır.

Bir malzeme lineer elastik davranış gösterdiğinde, malzemenin plastik bölgesi malzeme boyutları ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Dolayısıyla gerilme şiddet faktörü K_{IC} , kırılma parametresi olarak bir yaklaşım olabilir (Anderson 1991).

K_{IC} için standart test metotları geliştirilmiştir. Bunlardan biri “ American Society for Testing and Materials “(ASTM E-399 1990), diğeri ise “ British standart Institutions “ (BS 5447 1974) dir.



Şekil 4.5 Tek kenar çatlaklı eğme (SENB) numunesinde, δ 'nin gösterimi



Şekil 4.6 V_p değerinin clip-gage ile ölçümü

ASTM E399 standardı dört numune biçimini öngörür. Bunlar kompakt (compact), tek kenar çatlaklı eğme (single edge notched bending, SENB), yay formunda (arc-shaped) ve disk formunda (disc-shaped) numuneleridir. Bu çalışmada, tek kenar çentikli eğme numune şekli kullanılmıştır. Numunelerde genellikle kalınlık B, genişlik W, olarak gösterilmektedir. Ön çatlak oluşturulan numunelerde çatlak derinliği a ve çatlağın numune genişliğine oranı a/W ile ifade edilir. Böylece numune dizaynında a, B ve a/W değerleri göz önüne alınır.

Çoğu mekanik testlerde (kırılma tokluğu ve diğerleri) deneyin sıhhatini, deney standardındaki prosedür kadar deneyi yapan da etkiler ve bu hatalardan dolayı sık sık geçersiz sonuçlar alınabilir. Eğer kırılmada plastik bölge çok büyükse, geçerli K_{IC} değerini elde etmek imkansızdır.

ASTM E-399 çok dikkatli ölçü gereksinimlerinden dolayı numune boyutlarını tespit etmede doğru bir yaklaşım tavsiye eder. K_{IC} testi için numune ölçüleri aşağıdaki şartı sağladığı takdirde geçerlidir.

$$B, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Burada gerekli numune ölçülerini hesaplamak için kullanıcı, tahmini K_{IC} değerini kullanmak zorundadır. Bu tahmini yaparken benzer numunelerin K_{IC} değerlerinden yararlanabilir.

ASTM E-399'a göre yorulma ön çatlağı süresince, bir çevrimde gerilme şiddet faktörünün maksimum değeri K_{max} , $0.8 K_{IC}$ 'den daha büyük olmamalıdır. Çatlak son ölçüye ulaşırken K_{max} , $0.6 K_{IC}$ 'den de daha az olmamalıdır. Yorulma değeri daima K_{IC} 'den daha az olmalıdır. Bu çalışmada, malzeme ön çatlaklı olduğundan dolayı yorulma çatlağı oluşturulmasına gerek kalmamıştır.

Bir ön çatlaklı test numunesinde çatlağı ilerletmek için yükleme yapıldığında yük ve deplasman gözlenir. Şekil 4.4'de gösterildiği gibi üç tip yük-deplasman eğrisi

vardır. Kritik yük P_Q , eğri tipine bağlı olarak birkaç şekilde tanımlanır. Tip I'de P_5 yükünü elde etmek için %5 'lik sekant eğrisi çizilmelidir. Buradaki kritik yük $P_Q = P_5$ dir. Tip II'de kararsız çatlak ilerlemesi söz konusudur. Buradaki kritik yük ise şekildeki gibidir. Tip III' de ise kritik yük maksimum yük ile aynıdır.

Çatlak uzunluğu çatlak yüzeyinden ölçülmelidir. İlk önce kritik yük ve çatlak uzunluğu hesaplanır ve kırılma tokluğu K_Q , aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.3)$$

Burada $f\left(\frac{a}{W}\right)$, çentik oranının boyutsal bir fonksiyonudur. Üç noktadan eğme testi ve $S/W = 4$ için ASTM standardında aşağıdaki şekilde verilmiştir. Burada S, mesnetler arası mesafe, W, malzeme genişliğidir (Brown ve Srawley 1966).

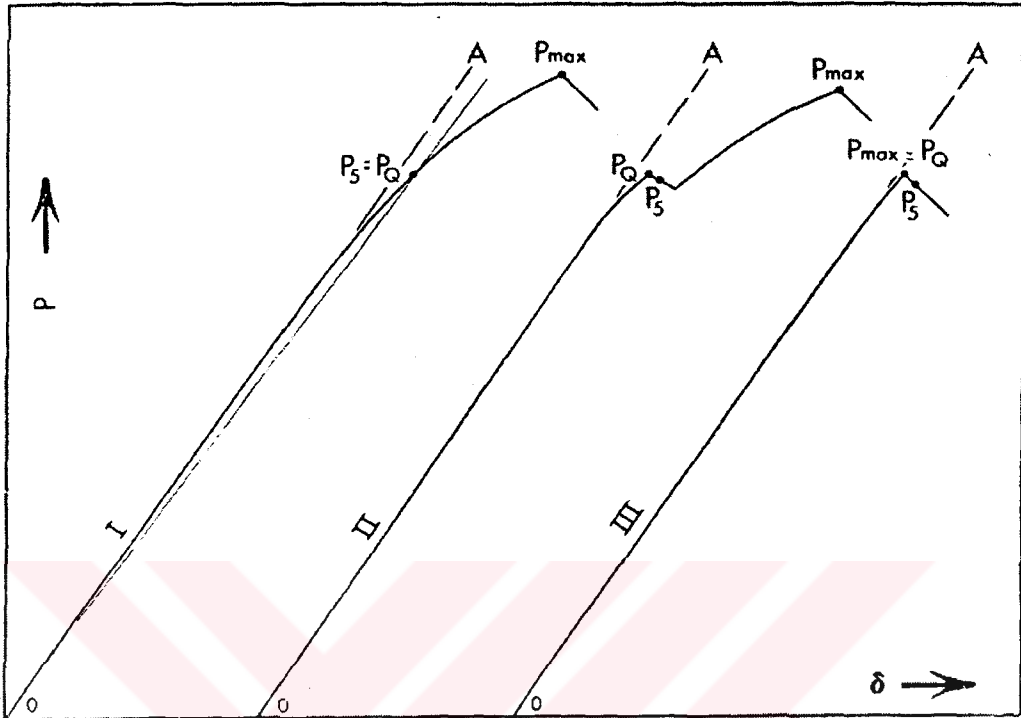
$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{W}\right) + 14.53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.80\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (4.4)$$

Diğer numune tipleri için de ayrıca $f\left(\frac{a}{W}\right)$ değerleri, ASTM standartlarında mevcuttur.

4.4.2. Başlangıç Çentik Derinliği Metodu

Lineer elastik kırılma mekaniğinde, malzeme çok gevrek olduğundan çatlak ilerleme miktarı net gözlenmektedir. Dolayısıyla böyle bir malzemenin kritik gerilme şiddet faktörünü tespiti ve farklı çentik derinliklerindeki kırılma davranışının incelenebilmesi için bu metot kullanılmaktadır. ASTM E-399 tavsiyesine göre,

geçerli bir K_1 değeri için kritik yük Şekil 4.4'de verilen yük deplasman eğrilerinden hangisine uygunsa ona göre seçilir.



Şekil 4.4 Tipik yük-deplasman grafiği

Bu çalışmada elde edilen grafikler genellikle Tip I' e benzemektedir. Dolayısıyla burada kritik yük olarak P_5 alınması gerekir ancak maksimum yük alındığı takdirde K_{IC} değeri çok az yüksek çıkacağından, P_{max} değeri kullanılabilir (Vipulanandan ve Dharmarajan 1985). Mod I'e göre gerilme şiddet faktörü K_1 , aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$K_1 = \sigma \sqrt{a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.5)$$

Burada σ , net gerilme, a başlangıç çentik derinliği, $f(a/W)$ geometri faktörüdür ve denklem 4.4'de verilmiştir. σ ise üç noktadan eğme testi için, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma = \frac{3PS}{2BW^2} \quad (4.6)$$

Burada, P kritik yük, S mesnetler arası mesafe (üç noktadan eğme testi için), B malzeme kalınlığı ve W malzeme genişliğidir. K_{IC} değeri kiriş kalınlığı ve a/W değerinden bağımsızdır.

4.4.3. Kompliyans Metodu

Kompliyans tekniği, gevrek kırılma gösteren malzemelerde, gerçek çatlak uzunluğunun değerlendirilmesi için kullanılabilir ve doğru bir metottur (Dharmarajan ve Vipulanandan 1988). Kompliyans (C) bir malzemenin yük-deplasman yada yük- çatlak ağzı açılma miktarı (CMOD) eğrilerinin eğimlerinin tersidir.

Bu metot ile K_{IC} değeri bulunurken kompliyansın öncelikle bulunması gerekir. Kompliyans, yük – CMOD grafiğinden yararlanılarak şu şekilde bulunur (Duggan ve Proctor 1979).

$$C = \frac{d(CMOD)}{dP} \quad (4.9)$$

Bu formülden bulunan kompliyans değerleri ile çentik boyutu grafiği oluşturulur. Bu grafiğin eğimi kullanılarak aşağıdaki formülden K_{IC} değeri hesaplanır.

$$K_{IC}^2 = \frac{PE}{2B(1-\nu^2)} \frac{dC}{d(a/W)} \quad (4.10)$$

4.4.4. J-İntegral Metodu

Çatlak ucunda büyük plastik bölge oluşumu dolayısıyla kırılma tokluğunun ölçülmesi oldukça zordur. Bu problemi yenme amacıyla J-integral metodu geliştirilmiştir (Aksoy 1984).

İçerisinde $2a$ uzunluğunda çatlak bulunan ideal gevrek bir malzemede, zorlama karşısında çatlak büyürse enerji boşalma miktarı ;

$$G_{IC} = \frac{1}{B} \frac{d(-W + U_{el})}{d(2a)} \quad (4.11)$$

olur. Burada B , malzeme kalınlığı, W cismi zorlayan P kuvvetinin yaptığı iş, U_{el} , P kuvvetinin etkisiyle cisimde oluşan elastik enerjidir. Rice tarafından geliştirilen J-integral eğrisi içindeki enerji durumu (Rice 1968);

$$J = \int (Wdy - T)(\partial u / \partial x) dx \quad (4.12)$$

dir. Burada T , kırılma vektörünü ifade etmektedir. 4.12'deki denklem ister lineer elastik, isterse de elastik plastik davranış olsun her iki durumda da geçerlidir.

Malzeme lineer elastik davranış gösterirse J-integral enerji boşalma miktarına eşit olur.

Elastik-plastik davranışta J-integral aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$G_{IC} = \frac{1}{B} \frac{dU}{d(2a)} \quad (4.13)$$

Burada, U enerji değişimidir. J-integrali belli bir kritik değere ulaşınca (J_C ve J_{IC}) stabil olmayan çatlak büyümesi başlar. J-integralinin deneysel olarak tespit edilmesi için üç metod vardır.

- Değişik başlangıç çentik dibi numune tekniği (Bucci ve ark. 1971)
- Derin entikli numune tekniği (Begley ve Landes 1971)
- entikliye karşı çentiksiz numune tekniği (Rice ve ark. 1973)

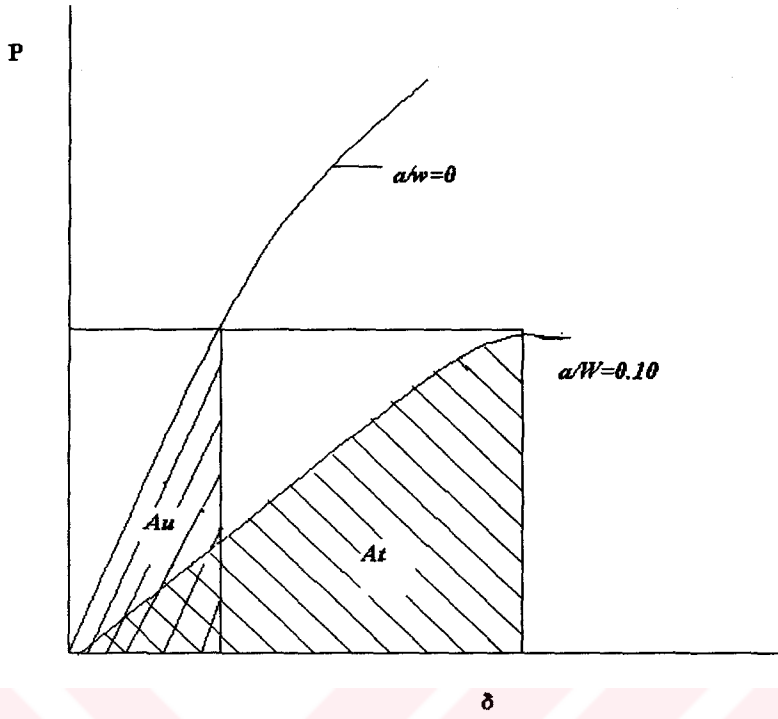
Mindess ve arkadaşları, polimer kompozitlerde iyi sonuç verdiği düşüncesiyle üçüncü metodu kullanarak, numunenin maksimum yükte kritik J-integralini hesaplamışlardır (Mindess ve ark. 1985).

Çatlak ilerlemeye başladığında potansiyel değişme olur. Şekil 4.8'de çentikli ve çentiksiz malzemenin yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir. J-integralin tesbitinde şu yol izlenir (Ziegeldorf 1983, Velazco ve ark. 1980); çentikli malzemenin yük –yer değiştirme eğrisi ($P-\delta$) altında kalan alan (A_t), aynı yükle yüklenmiş çentiksiz malzemenin $P-\delta$ grafiği altındaki alan (A_u) ıkarılır.. Buradan elde edilen değer aşağıdaki formüle konularak kritik J-integral (J_{IC}) değeri bulunur.

$$J_{IC} = \frac{2(A_t - A_u)}{d(b - a)} \quad (4.14)$$

buradan elde edilen J_{IC} , aşağıda yerine konular ve K_{IC} değeri hesaplanır (Vipulanandan ve Dharamarajan 1987, 1988)

$$K_{IC}^2 = \frac{EJ_{IC}}{1 - \nu^2} \quad (4.15)$$



Şekil 4.8 Çentikli ve çentiksiz numunenin kuvvet-deplasman grafiği

4.5. Eğilme Elastisite Modülü (E_e) ve Eğilme Dayanımı (σ_e)

Eğilme dayanımı, üç noktadan eğme testine tabi tutulmuş bir numunede, eğme kuvveti cinsinden ifade edilecek olursa;

$$\sigma_e = \frac{3PS}{2BW^2} \quad \text{ve} \quad \varepsilon = \frac{6\delta W}{L^2} \quad (4.17)$$

Burada, P uygulanan maksimum kuvvet, S, mesnetler arası mesafe, B, malzeme kalınlığı, W, malzeme genişliği, ε ise eğilme miktarına bağlı olarak elde edilen birim şekil değiştirmedir.

Eğilme elastisite modülü ise denklem 4.17'den hareketle Hook kanunundan yararlanarak, yine üç noktadan eğme testine tabi tutulmuş dikdörtgen kesitli bir malzeme için şu şekilde bulunur;

$$E_e = \frac{PS^3}{4BW^3\delta} \quad (4.18)$$

Burada, δ , eğilme miktarını (sehim) ifade etmektedir (Kayalı, Ensari, Dikeç 1983).

Eğilme elastisite modülü, yük ve deplasmanın bir fonksiyonudur. Denklem 4.18'deki yük ve deplasmanın haricindeki değerler boyut ile ilgili olduğundan sabit olarak alınabilir ve k katsayısı ile ifade edilecek olursa;

$$k = \frac{S^3}{4BW^3} \quad (4.19)$$

$$E = k \frac{P}{\delta} \quad (4.20)$$

elde edilir. Burada $\frac{P}{\delta}$, yük-deplasman grafiğinin doğrusal kısmının eğimi, k ise tamamen numune boyutlarına bağlı geometrik bir faktördür.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Malzemenin Tanıtımı

Bu çalışmada, çelik tel takviyeli polimer kompozit kullanılmıştır. Polimer kompozit yüksek doldurma maddeli suni bir malzemedir. Polimer kompozit, bağlayıcı madde, ilave madde ve ihtiyaca göre takviye malzemesinden oluşur. Bağlayıcı madde olarak özellikleri Tablo 5.1' de verilen CE 70 N4 ortoftalik polyester reçine (Cam Elyaf A.Ş), ilave madde olarak Tablo 5.2 ' de tane boyutu dağılımı ve Tablo 5.3'de kimyasal özellikleri verilen yıkanmış maça kumu kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak, akma gerilmesi 200 MPa olan galvaniz kaplı çelik tel kullanılmıştır. Polyester reçine, ağırlıkça %16.5'da sabit tutulmuştur. Ağırlıkça çelik tel oranı ise sırasıyla %1.5, %3 ve %4.5 olarak kullanıldı ve geri kalan kısmı için dolgu maddesi olarak kum kullanıldı.

0.7 mm çapında çelik tel, ağırlıkça % 1.5 oranında, 1.0 mm çapında çelik tel ağırlıkça % 3 oranında ve 1.2 mm çapındaki çelik tel ise % 4.5 oranında kullanılmıştır. Takviyeli tüm numunelerdeki çelik tellerin dizilişi 3x5 sıra şeklindedir. Şekil 5.1'de çelik tel takviyeli numunenin şematik resmi görülmektedir. Ayrıca takviyesiz olarak da malzeme üretilmiştir. ASTM E-399 standartlarına göre, tek kenar çentikli eğme (single edge notch bending, SENB) numunesi olarak üretilen numune, 25x50x250 mm boyutlarında imal edilmiştir.

Deneyin sıhhati için her bir numuneden üçer tane üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Malzeme parametresi olarak sırası ile, takviyesiz, ağırlıkça % 1.5, %3

ve %4.5 çelik fiber takviyeli olmak üzere 4 çeşit, çentiksiz, $a/W = 0.1, 0.2, 0.3$ ve 0.4 çentik oranlarında 5 çeşit ve her bir numuneden 3'er adet olmak üzere, 60 adet üretilmiştir.

Tablo 5.1. CE 70 N4 ortoftalik polyster reçinenin fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikleri	değerleri
Yoğunluk (kg/dm ³)	1,256
Çekme modülü (GPa)	3,5
Çekme mukavemeti (MPa)	55
Basma mukavemeti (MPa)	140

Tablo 5.2 Kumun tane boyut dağılımı

Tane boyutu (mm)	% Ağırlık oranı
2.500	0.00
1.600	0.00
1.000	0.20
0.630	2.60
0.400	3.80
0.315	3.80
0.200	9.60
0.160	10.50
0.100	25.80
0.063	35.40
0.050	4.4

Tablo 5.3 Kumun kimyasal analizi

Kimyasal bileşim	% Ağırlık oranı
Silisyum oksit (SiO ₂)	97.14
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	1.12
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	0.15
Kalsiyum oksit (CaO)	0.11
Magnezyum oksit (MgO)	0.30
Sodyum oksit (NaO)	0.04
Kil	0.14
Diğer	1.00

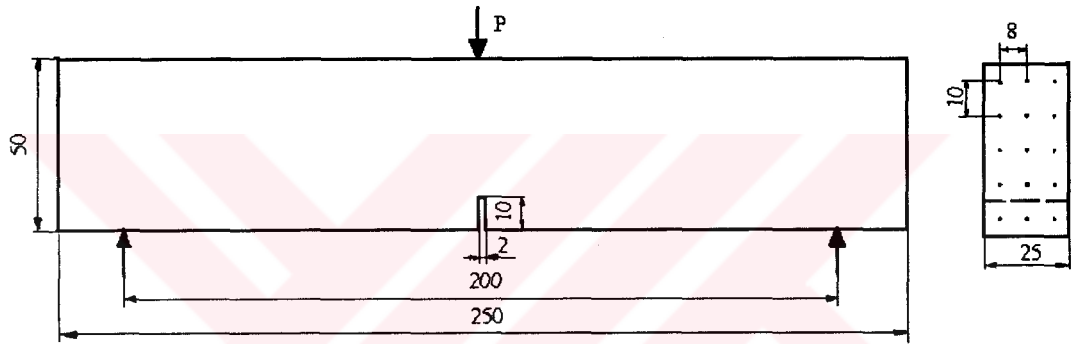
5.2. Numunenin Hazırlanışı

%1.5 çelik fiber takviyeli polimer kompozit numunenin bileşimi, ağırlıkça % 16.5 ortoftalik polyester reçine, %80.5 maça kumu, ağırlıkça % 1 MEK (Metil Etil Ketonperoksit) katalizör, ağırlıkça %0.5 kobalt naftanat hızlandırıcı ve fiber olarak, ağırlıkça %1.5 çelik tel takviyesinden oluşmaktadır. Diğer numunelerde ise sadece çelik fiber oranı sırası ile ağırlıkça %3 ve %4.5 olarak değiştirilmiştir. İşlem sırası; öncelikle kompozitin üretileceği kalıp, 350x220x33 mm boyutlarında imal edilmiş ve daha sonra 25x50x250 mm boyutlarında kesilmiştir. Bir kalıptan dört adet aynı özellikte numune elde edilmektedir. Kalıpta malzemenin temas ettiği yüzeylere kalıp ayırıcı olarak alüminyum folyo konulmuştur. Numune çıkarıldığında alüminyum folyo malzemenin alt yüzeyine yapışmaktadır. Bu ise test esnasında çatlağın başlaması ve ilerlemesini gözlememize yardımcı olmaktadır.

Çelik teller önceden kalıba yerleştirilmiş ve döküme hazır hale getirilmiştir. Maça kumu elekten geçirilerek ve ağırlıkça hangi oran kullanılacaksa, o miktarda

kum ayarlanmıştır. Ağırlıkça % 16.5 polyester reçine, ağırlıkça % 1 katalizör ve ağırlıkça %0.5 hızlandırıcı maça kumunun üzerine dökülerek, polyester reçine, katalizör, hızlandırıcı ve maça kumu, karışım homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Karışım, kalıba döküldükten sonra iyice basınç yapılarak kalıplanmıştır.

Malzeme, sertleşmesi için kalıpta bir gün bekletilmiş ve daha sonra kalıptan çıkarılmıştır. Böylece Şekil 5.1’de boyutları verilen malzeme, üç noktadan eğme testine hazır hale gelmiştir.



Şekil 5.1 Çelik tel takviyeli numunenin şematik resmi

Çentikli eğme testi yapılacak numunelere, 2 mm kalınlığındaki elmas testere kullanılarak sırasıyla 5,10,15 ve 20 mm derinliğinde çentikler açıldı. Numunelerin çentik uçları cerrah bıçağı ile keskinleştirilmiştir.

5.3 Deney Setinin Tanıtımı ve Deneyin Yapılışı

Deneyde, Şekil 5.3’de görülen LLOYD INSTRUMENTS T50 K model çekme cihazı kullanılmıştır. Cihaz çekme ve basma durumlarında uygulanan yük ve deplasmanı dijital olarak üzerinde göstermektedir. Cihazdaki bu değerler, bilgisayara takılan data transfer kartı ve Q Basic’de yazılan ve Ek 2’de verilen bir program yardımıyla bilgisayar ortamına (Microsoft Excel’e) aktarılmıştır. Ayrıca clip-gage

cihazı, çatlak ağız açılma miktarını, strain-gage cihazı osiloskopa iletmekte ve oradan da aynı program yardımıyla Excel ortamına aktarılmaktadır.

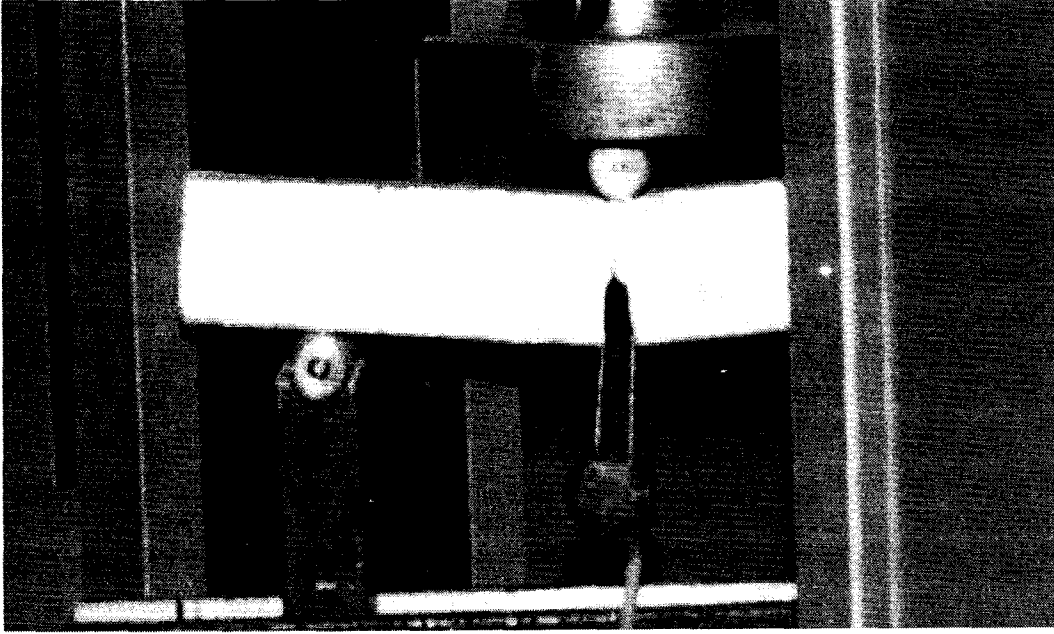
Cihazın uygulanan yük değerleri kalibrasyon ringi ile, deplasman değerleri komparatör ile ve clip-gage cihazı da mikrometre ile kalibre edildi.

Şekil 5.4'de görülen clip-gage kullanılarak CMOD değerleri ölçülmüştür. Test numunesine üç noktadan eğme uygulayabilmek için şekil 5.4 deki aparat dizayn edilmiştir. Çentikli bir numune, üç noktadan eğme testine tabi tutulduğunda aynı anda yük, deplasman ve çatlak ağız açılma miktarları (CMOD) okunabilmektedir.

Deneyle, oda sıcaklığında ve 1mm/dk sabit ilerleme hızında yapılmıştır.



Şekil 5.3 Deney setinin fotoğrafı

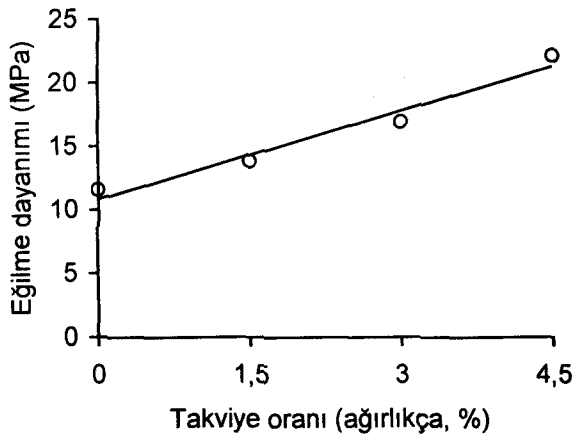


Şekil 5.4 Clip-gage ile çatlak ağız açılma miktarı (CMOD) ölçümü

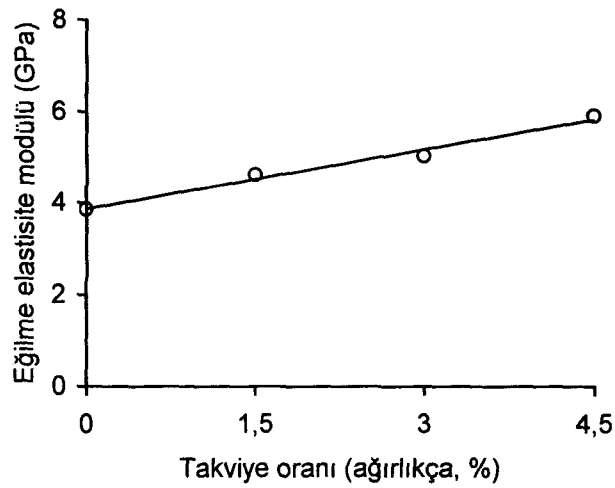
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çelik tel takviyeli polimer kompozitin mekanik özelliklerinin bulunması için ağırlıkça %1.5, %3 ve %4.5 oranlarında çelik tel takviyesi kullanılmıştır. Her tip numunenin mekanik özelliklerini belirlemek için, oda sıcaklığında, çentiksiz üç noktadan eğme testi uygulandı. Yine her bir takviye oranı için farklı çentik derinliklerinde üç noktadan eğme testleri yapılmıştır. Her bir deney üç kez tekrarlanarak, her üç test sonucunun ortalamaları alınmıştır.

Numunelerin eğilme dayanımları ve eğilme elastisite modülleri, denklem 4.17 ve 4.18 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi eğilme dayanımı, takviye oranının artışı ile lineer olarak artış göstermiştir. Maksimum eğilme dayanımı, %4.5 takviye oranında elde edilmiştir.



Şekil 6.1 Çelik tel takviye oranı ile eğilme dayanımının değişimi



Şekil 6.2 Çelik tel takviye oranı ile eğilme elastisite modülünün değişimi

Takviye oranının artışı ile eğilme elastisite modülü lineer olarak artış göstermektedir. Eğilme elastisite modülü maksimum değere %4.5 takviye oranında ulaşmaktadır. Çelik tel takviye oranları ağırlıkça %1.5, %3 ve %4.5 artması, eğilme elastisite modülünde sırasıyla, takviyesiz malzemeye göre %16, %31 ve % 48 artış sağlamıştır. Daha önce yapılan çalışmada, kırılmış elyaf ile takviyelendirilmiş polimer kompozitte takviye oranının ağırlıkça %1 kırılmış elyaftan %1.5'a artmasıyla, eğilme dayanımında % 29.6 ve eğilme elastisite modülünde % 33 artış olduğu gözlenmiştir (Arıkan, 1993).

6.1. Takviye Oranı ile Kuvvet-Deplasman Eğrilerinin Değişimi

Ağırlıkça %1.5, %3 ve %4.5 çelik tel takviye oranlarındaki çentiksiz numunelerin, yük-deplasman eğrileri Şekil 6.3 'de görülmektedir. Bütün eğrilerde başlangıçta yaklaşık 0.5 mm deplasmana kadar eğri lineer olarak devam etmekte daha yukarıda ise lineerlik bozulmaktadır. Çelik tel takviye oranı arttıkça, kompozit sistemin yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Daha önceki çalışmalarda ideal

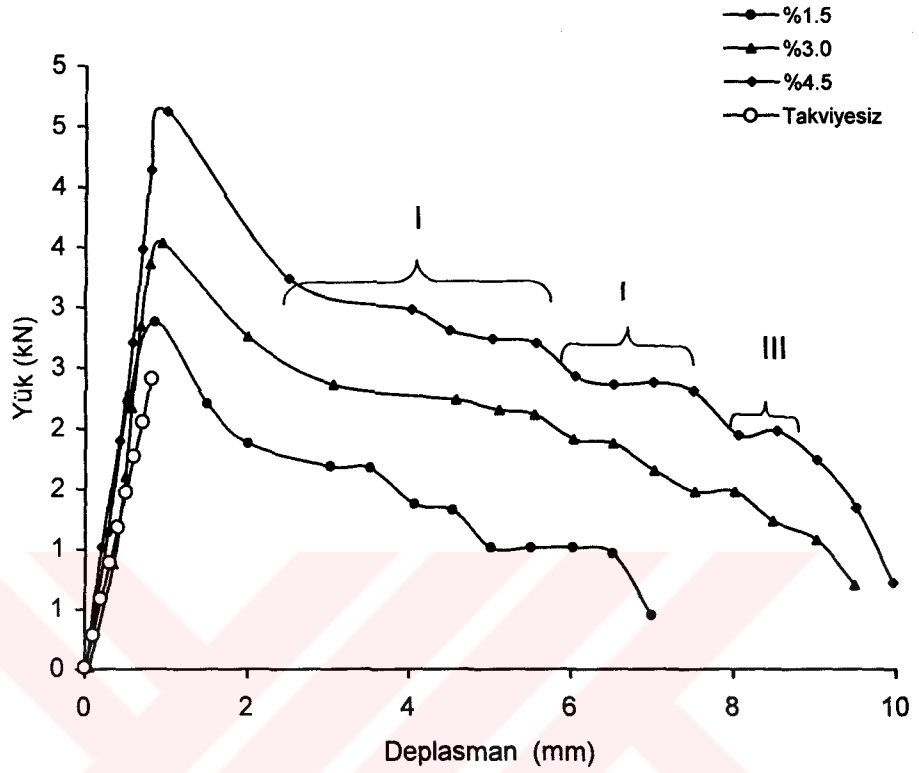
polyester oranı ağırlıkça %16.5 olduğu tespit edildiğinden, bu çalışmada, bütün polimer kompozit sistemde polyester oranı %16.5'da sabit tutulmuştur (Arıkan 1993).

Çentiksiz eğme testi, malzemenin eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin tespiti için kullanılmaktadır. Şekil 6.3'de, takviyesiz numunenin, yük maksimum değere ulaştığı anda aniden kırıldığı görülmektedir.

Şekil 6.3'de, %4.5 çelik tel takviye oranında; yük maksimum değere ulaştıktan sonra matriks çatlaması nedeniyle yük aniden düşmektedir. Matrikste ki çatlak kararsız bir şekilde ve doğrusal olarak başa kadar ilerlemektedir. Buradaki matriks çatlaması, malzemenin enerji yutmasına ve dolayısıyla da kırılma tokluğuna etki etmektedir. Ancak yutulan bu enerji ihmal edilecek oranda azdır. Yine ilk çatlak oluşumu esnasında matriks ile elyaf ara yüzey çatlaması da meydana gelmektedir. Buradaki enerji miktarı da, yukarıdaki matriks çatlaması esnasında oluşan enerji gibi küçüktür.

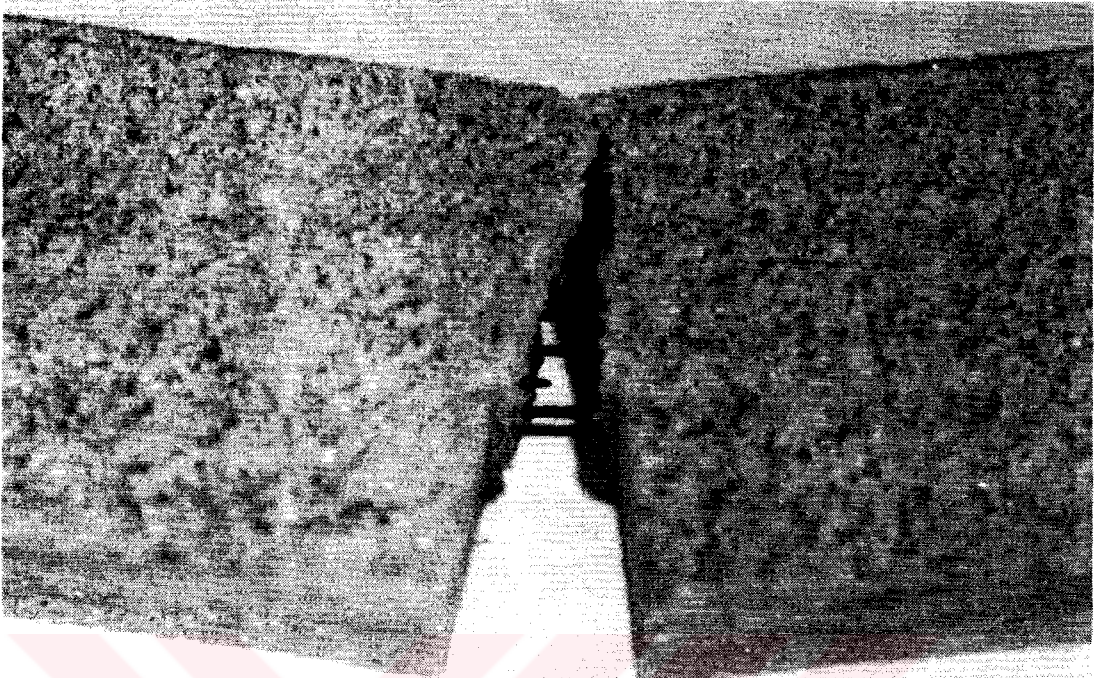
Çelik tel takviyeli polimer kompozitte kırılma tokluğuna etki eden en önemli iki faktörden birincisi elyaf sıyrılması (fiber pull-out), ikicisi ise köprü etkisi (bridge-effect) yapmasıdır. Teller uzama yaparak yada uzama yapmadan köprü etkisi gösterirler.

Şekil 6.3' de, kararsız çatlak ilerlemesinden kaynaklanan ani düşüşten sonraki I nolu bölgede, en alt sıradaki telin sıyrılması ve uzama göstermesi nedeniyle, kuvvet hemen hemen sabit kalarak deplasman artmıştır. II nolu bölgedeki düzlük, I nolu bölgeye nazaran daha küçük, III nolu bölgede ise en küçük düzlük oluşmuştur. Bunun sebebi, en alt sıradaki telde en fazla sıyrılma olduğundan uzama en büyük, orta sıradaki telde daha az ve en üst sıradaki telde en küçük uzama söz konusudur. %1.5 ve %3 takviyeli malzemelerde de benzer karakteristik davranış görülmektedir.



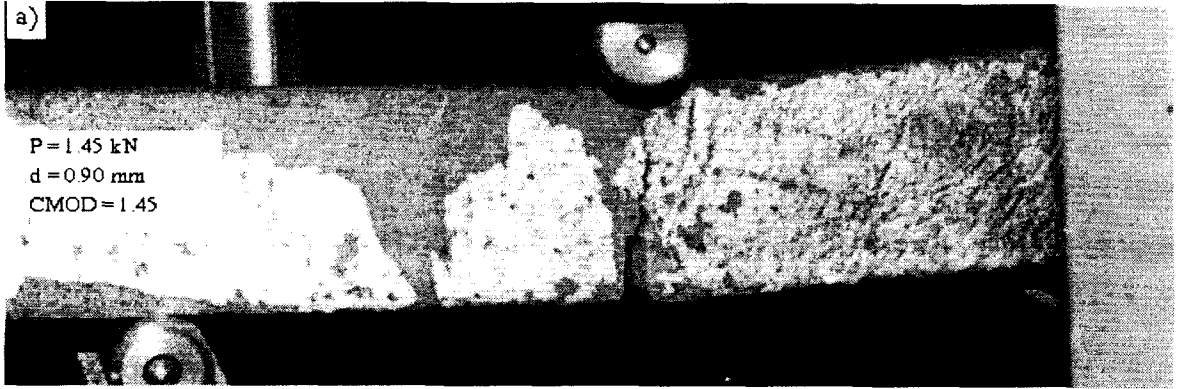
Şekil 6.3 Çentiksiz numunelerin yük-deplasman değişimi

Şekil 6.4'de 0.4 çentik oranında ve ağırlıkça %4.5 çelik tel takviyeli numune görülmektedir. En alt sıradaki teller çentik açılırken kesildiğinden iki sıra tel takviyesi vardır. Orta sıradaki tellerden sadece bir tanesinde, önce sıyrılma daha sonra kopma görülmüş, diğerlerinde ise sadece sıyrılma ve uzama gözlenmiştir.



Şekil 6.4 % 4.5 çelik tel takviyeli numunde elyaf sıyrılması

Şekil 6.5’de %4.5 çelik tel takviyeli ve $a = 20$ mm çentik derinliğindeki PC’ de kuvvetin maksimum değere ulaştığı andan, malzemenin tamamen hasara uğradığı ana kadar çatlağın ve malzemenin davranışı görülmektedir. Fotoğraftan da görüldüğü üzere takviyeli malzemede de, takviyesizde olduğu gibi çatlak doğrusal ve kararsız ilerlemektedir. Ancak malzeme maksimum yük de tamamen hasara uğramamaktadır. Çatlak yüzeyi makro yapıda incelendiğinde; Şekil 6.5.a) ’da yük maksimum değere ulaşmış ve çatlak başa kadar ilerlemiştir. Şekil 6.5.b) ’de ise tellerde sıyrılma başladığından yükte çok az bir azalma oluşmuştur. Şekil 6.5.c) ve Şekil 6.5.d) ’de ise tellerde sıyrılma ve uzama arttığından yükün kademeli olarak (Şekil 6.4’deki I, II ve III bölgelerindeki düzlükler) düşmesine sebep olmuştur. Şekil 6.4’de tellerdeki sıyrılma net olarak görülmektedir.



Şekil 6.5 % 4.5 çelik tel takviyeli ve $a = 20 \text{ mm}$ çentik derinliğindeki numunenin eğme testi esnasındaki çatlak büyüme davranışı

6.2. Kritik Gerilme Şiddet Faktörlerinin Bulunması

Kritik gerilme şiddet faktörlerini (K_{IC}), hesaplamak için başlangıç çentik derinliği, J-integral ve kompliyans gibi metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada lineer elastik kırılma ve elastik-plastik kırılma parametreleri, ASTM-E399'a göre üç noktadan eğme testi yapılarak bulunmuştur.

6.2.1. Başlangıç Çentik Derinliği Metodu

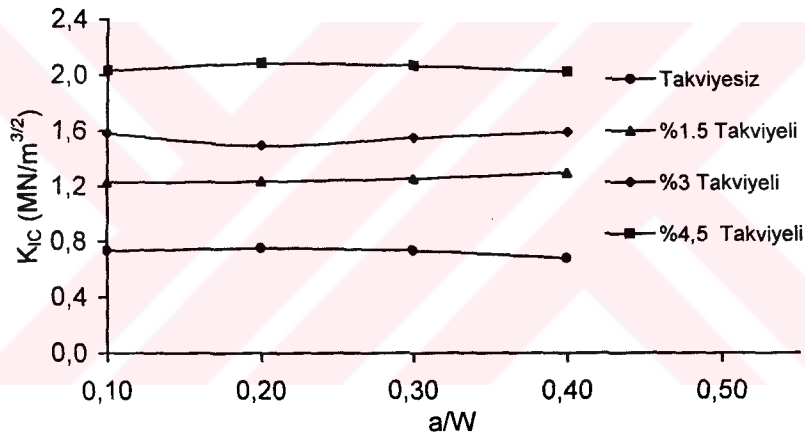
Takviyesiz polimer kompozit tamamen lineer elastik davranış gösterdiğinden dolayı ilk yüklemde, yük maksimum değere ulaştığı anda aniden kırılma görülmektedir. Ancak çelik tel takviyeli malzemeler, çelik tellerin köprü etkisinden dolayı, çelik tellerde plastik deformasyon oluşmaktadır. Dolayısıyla çelik tel takviyeli malzemelerde elastik-plastik kırılma söz konusudur. Fakat matrikste çatlak kararsız olarak ilerlediğinden dolayı farklı çentik derinliklerinde aynı tip ve özellikte numuneler test edilmiş ve başlangıç çentik derinliği metodu kullanılmıştır.

Bu metoda göre K_{IC} değerleri, denklem 4.5 kullanılarak bulunmuştur. Şekil 6.6' da çentik oranının değişmesi ile kritik gerilme şiddet faktörünün değişmediği görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda benzer malzemelerde, kritik gerilme şiddet faktörünün çentik oranı ile değişmediğini göstermişlerdir (Arıkan 1993).

Tablo 6.1'de, başlangıç çentik derinliği metoduna göre hesaplanan K_{IC} değerleri verilmiştir. K_{IC} ' de, takviyesiz malzemeye göre ; % 1.5 takviye oranında %67, %3 takviye oranında ise, 1.5 takviye oranına göre %29 'luk ve % 4.5 takviye oranında ise %3 'e göre %28.4' lük artış gözlenmiştir. Burada çarpıcı olan nokta; malzemede, takviyesiz numuneden takviyeli numuneye geçişte önemli ölçüde bir tokluk değeri kazanmasıdır.

Tablo 6.1 Başlangıç çentik derinliği metoduna göre K_{IC} ($MN/m^{3/2}$) değerleri

a/W	Çelik tel takviye oranı (% ağırlıkça)			
	0%	%1.5	%3	%4.5
0.1	0.734	1.226	1.582	2.032
0.2	0.749	1.233	1.433	2.083
0.3	0.735	1.254	1.546	2.065
0.4	0.697	1.297	1.590	2.022

Şekil 6.6. BÇD metoduna göre hesaplanmış K_{IC} değerleri

6.2.2 J-integral Metodu

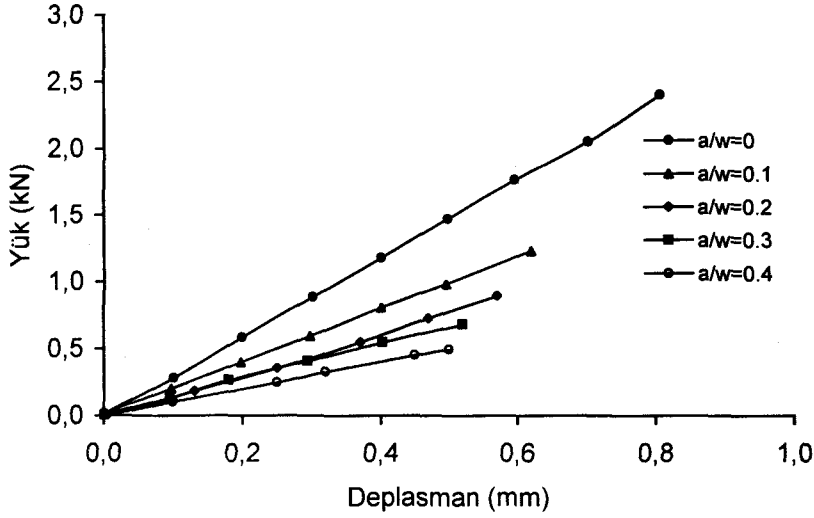
Takviyesiz malzemede lineer elastik kırılma, çelik tel takviyeli malzemede ise elastik-plastik kırılma olduğu bölüm 6.2.1'de bahsedilmiştir. Çelik tel takviyeli malzemede tellerden dolayı, çatlak ucunda plastik bir bölge oluşmaktadır. Bu bölgedeki enerjinin ve kırılma tokluğunun tanımlanması için J-integral metodu kullanılmıştır. Aynı zamanda diğer kırılma tokluğu hesaplama metotları ile mukayese ederek uygun metodun bulunması amacıyla da J-integral metot kullanılmıştır.

Bu metoda göre K_{IC} değerlerinin bulunabilmesi için bölüm 4.4.4'de belirtildiği üzere numunelerin çentikli ve çentiksiz yük-deplasman eğrilerinden yararlanılmaktadır. Şekil 6.7'den Şekil 6.10'a kadar olan grafikler numunelerin K_{IC} 'lerinin bulunmasında kullanılmıştır. Grafiklerden yararlanılarak bulunan K_{IC} değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir. K_{IC} 'de, takviyesiz malzemeye göre ; % 1.5 takviye oranında % 58.4, %3 takviye oranında ise 1.5 takviye oranına göre % 22 'lik, % 4.5 takviye oranında ise %3' e göre %38.5' luk artış gözlenmiştir.

Tablo 6.2 J-integral metoduna göre K_{IC} ($MN/m^{3/2}$) değerleri

a/W	Çelik tel takviye oranı (% ağırlıkça)			
	%0	%1.5	%3	%4.5
0.1	0.755	1.196	1.459	2.021
0.2	0.741	1.294	1.515	2.109
0.3	0.770	1.246	1.496	1.999
0.4	0.661	1.171	1.430	1.986

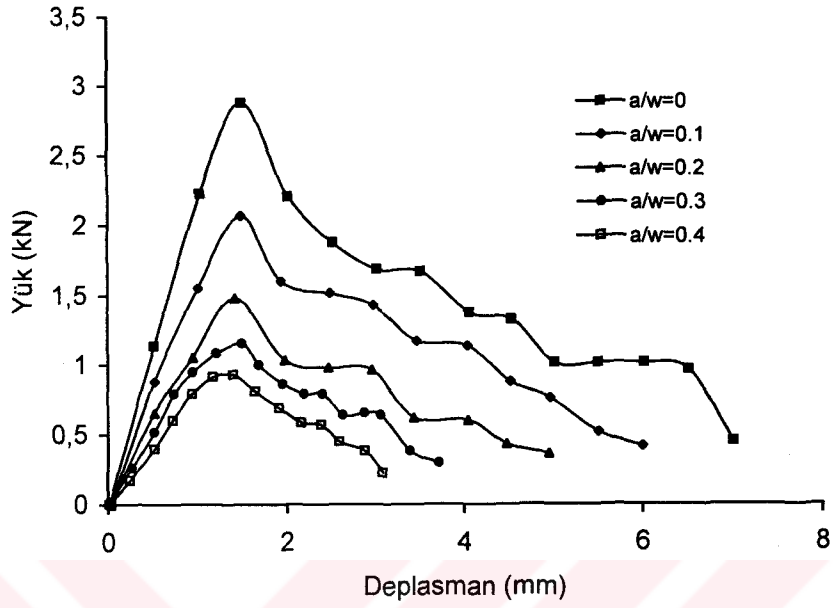
Şekil 6.7'de takviyesiz polimer kompozitin farklı a/W oranlarındaki yük-deplasman grafiği görülmektedir. Şekil 6.7'den görüldüğü gibi, tüm numunelerde yük-deplasman lineer olarak artmış ve maksimumum değere ulaştıklarında aniden kırılma gözlenmiştir. Maksimum yük değerlerinde, çentik derinliğinin artmasıyla daha küçük deplasman değerlerinde kırılma söz konusu olmaktadır.



Şekil 6.7 Takviyesiz polimer kompozitin yük-deplasman değişimi

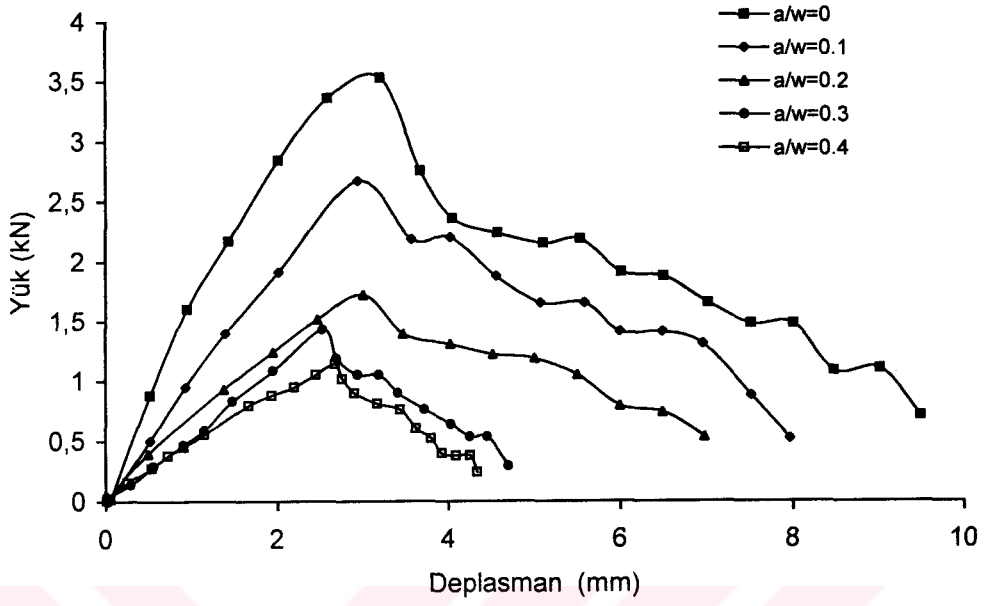
Şekil 6.8'de %1.5 takviyeli polimer kompozitin yük-deplasman grafiği görülmektedir. Burada çentiksiz ve çentikli numunelerin hepsinde, yük maksimum değere ulaşıncaya kadar yaklaşık olarak lineer davranmaktadır. 0.1, 0.2 çentik oranlarındaki ve çentiksiz numunelerin maksimum yükteki deplasman miktarları birbirlerine çok yakındır. Aynı şekilde 0.3 ve 0.4 çentik oranlarından deplasman miktarları için de aynı durum söz konusudur. Maksimum deplasman çentiksiz numunede, minimum deplasman ise 0.3 çentik oranındaki numunede gözlenmiştir. Oysa ki minimum deplasmanın 0.4 olması beklenir. Bunun nedeni olarak 0.3 çentik oranındaki numunede tel sıyrılması fazla olması düşünülebilir.

Şekil 6.9'da ağırlıkça %3 çelik tel takviye oranındaki numunenin, farklı çentik oranlarındaki yük-deplasman eğrileri görülmektedir. Çentiksiz, 0.1 ve 0.2 çentik oranlarındaki numunelerde, üç sıra tel mevcut olduğundan ve elyaf sıyrılmasından dolayı üç adet düzlük vardır. Oysaki $a/W = 0.3$ ve 0.4 çentik oranlarında, en alt sıradaki teller çentik açılırken kesildiğinden dolayı iki sıra düzlük söz konusudur.

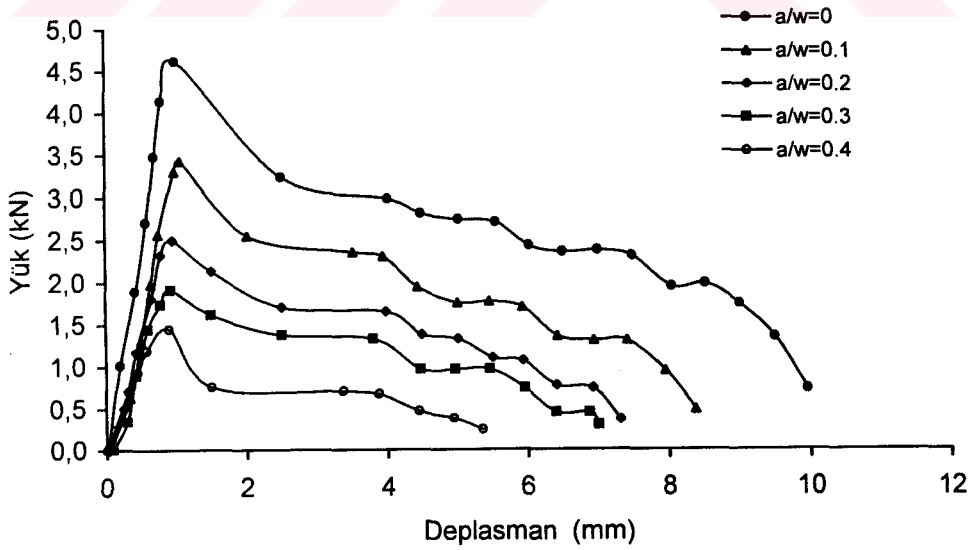


Şekil 6.8 % 1.5 çelik tel takviyeli polimer kompozitin yük-deplasman değişimi

Şekil 6.10'da ağırlıkça % 4.5 çelik tel takviye oranında ve değişik a/W oranlarındaki numunelerin yük-deplasman grafiği görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9' da ki malzemeler ile hemen hemen benzer davranış göstermektedirler.



Şekil 6.9 %3 Çelik tel takviyeli Polimer kompozitin yük-deplasman değişimi



Şekil 6.10 %4.5 Çelik tel takviyeli polimer kompozitin yük-deplasman değişimi

6.2.3. Kompliyan Metodu

Elastik-plastik kırılma mekaniğinde kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılan metotlardan biride kompliyan metodudur. Kırılma tokluğunun hesaplanmasında bu metodun kullanılmasındaki amaç, J-integral metodunda olduğu gibi çelik tel takviyeli malzemenin elastik-plastik davranış göstermesi ve aynı zamanda metotlar arası karşılaştırma yapılarak, en uygun metodu yada hangi metotların kullanılabilir olduğunun bulunmasıdır.

Kompliyan metotta, başlangıç çentiği açılan malzeme yükleme-boşaltma yapılarak her boşaltma esnasındaki kompliyanstaki değişim ile o andaki çatlak derinliği ölçülerek, kompliyan-çentik oranı grafiği oluşturulur. Bu grafiğin eğimi kullanılarak K_{IC} değeri hesaplanır. Ancak çelik tel takviyeli polimer kompozit her ne kadar elastik-plastik davransa da çatlak ilk maksimum yükte başa kadar gitmektedir. Plastik davranışı oluşturan ise tamamen çelik tellerdir. Dolayısı ile bu metotta normalde bir numune ile kırılma tokluğu bulunurken, malzemenin bu özelliğinden dolayı farklı başlangıç derinliklerinde numuneler kullanılarak kompliyanlar hesaplanarak, kırılma tokluğuna geçiş yapılmıştır.

Şekil 6.11'da takviyesiz numunenin yük-CMOD (çatlak ağzı açılma miktarı) eğrisi görülmektedir. Çatlak ağzı açılma miktarı maksimum yüke kadar olan kısmında lineer olarak davranmaktadır. $a/W = 0.3$ ve 0.4 çentik oranlarındaki numunelerin eğimi birbirlerine yakındır. Oysa ki $a/W = 0.4$ çentik oranında eğimin daha az olması gerekmektedir. Bunun sebebi ise çatlak bölgesinde çelik tellerin köprü görevi yapmış olması düşünülebilir. Yük ile CMOD değerleri lineer olarak artmaktadır.

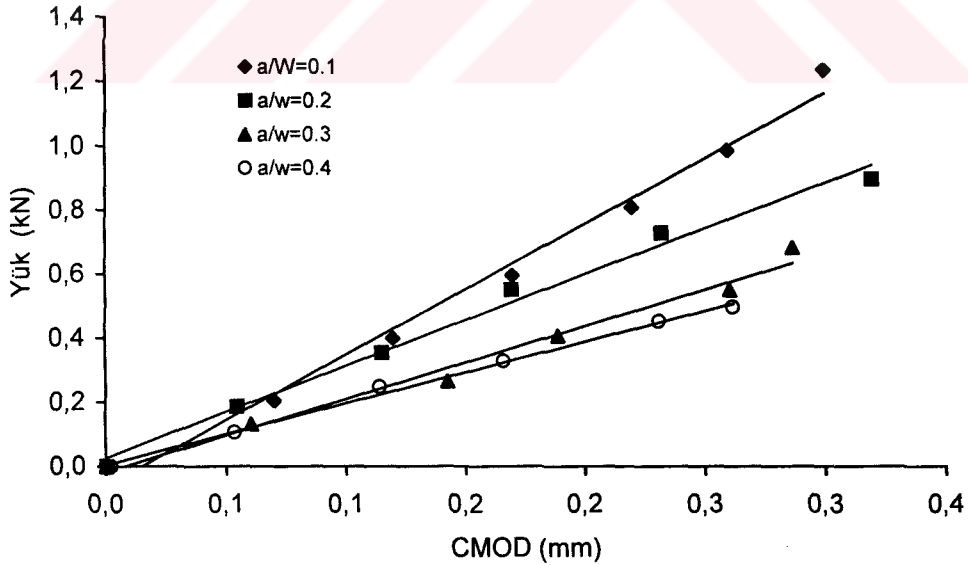
Şekil 6.11'deki her bir çentik oranına karşılık gelen kompliyan değerleri, Şekil 6.11'deki her bir eğrinin eğiminin tersi alınarak bulunmuştur. Eğri uydurma metodu ile grafiğin ikinci dereceden fonksiyonu bulunarak denklem 4.10'dan kritik gerilme şiddet faktörleri hesaplanmıştır. %3 ve %4.5 çelik tel takviyeli polimer

kompozitlerin kompliyans metoduna göre kritik gerilme şiddet faktörleri aynı şekilde hesaplanmıştır.

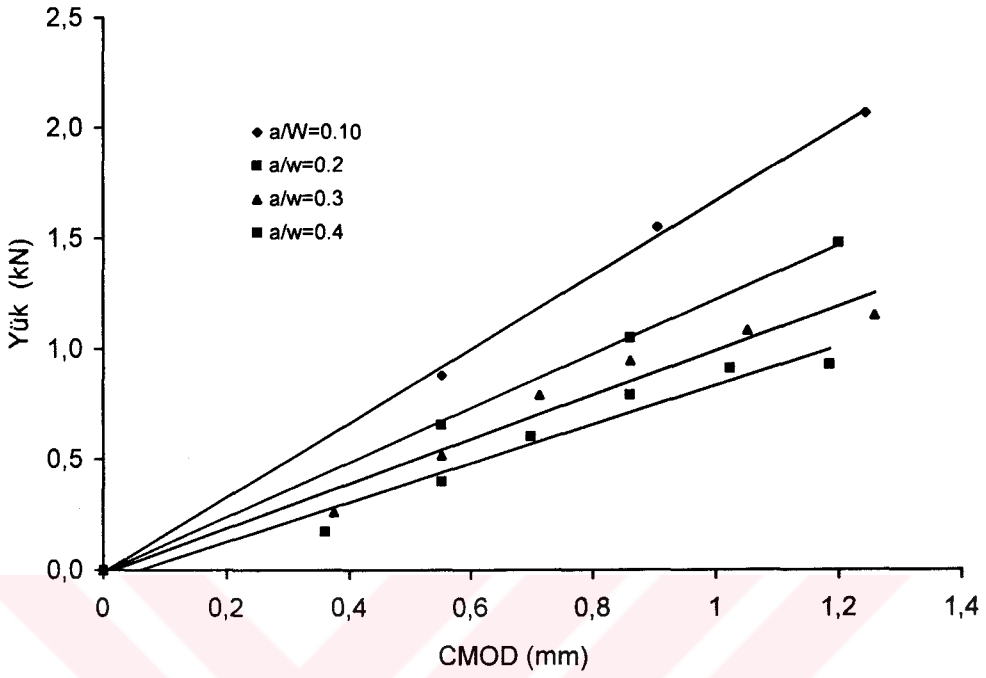
Şekil 6.12'de, ağırlıkça % 1.5 çelik tel takviyeli numunenin yük-CMOD eğrileri görülmektedir. Takviyesiz numunenin yük-CMOD değişimi ile benzer karakter göstermektedir.

Şekil 6.13'de, ağırlıkça % 3 çelik tel takviyeli numunenin yük-CMOD eğrileri görülmektedir. Yük-CMOD değişimi, % 1.5 takviyeli numune ile benzer davranış göstermektedir.

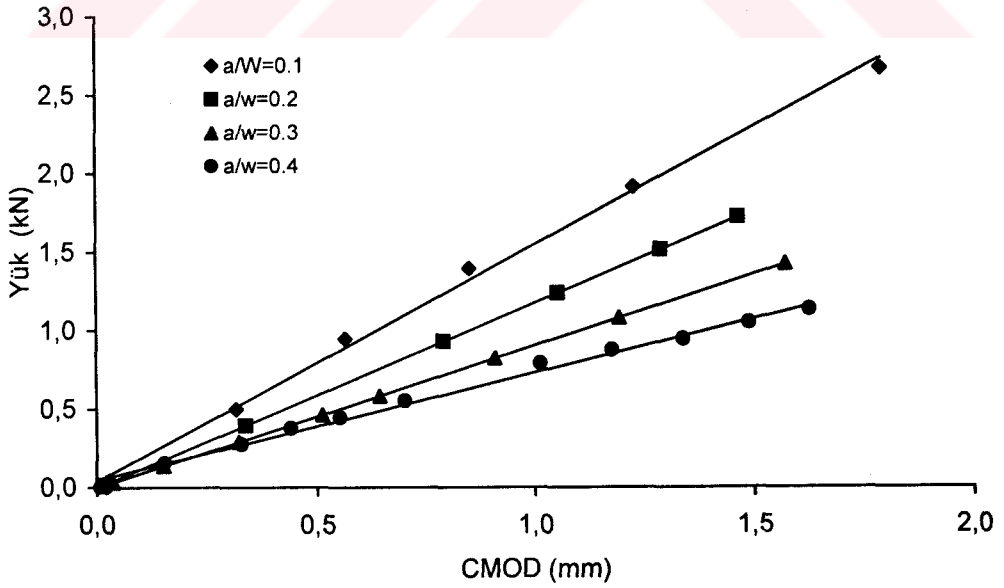
Şekil 6.14'de, ağırlıkça % 4.5 çelik tel takviyeli numunenin yük-CMOD eğrileri görülmektedir. Bu numunede de, diğer takviyeli numuneler ile yük-CMOD değişimi açısından benzerlik görülmektedir.



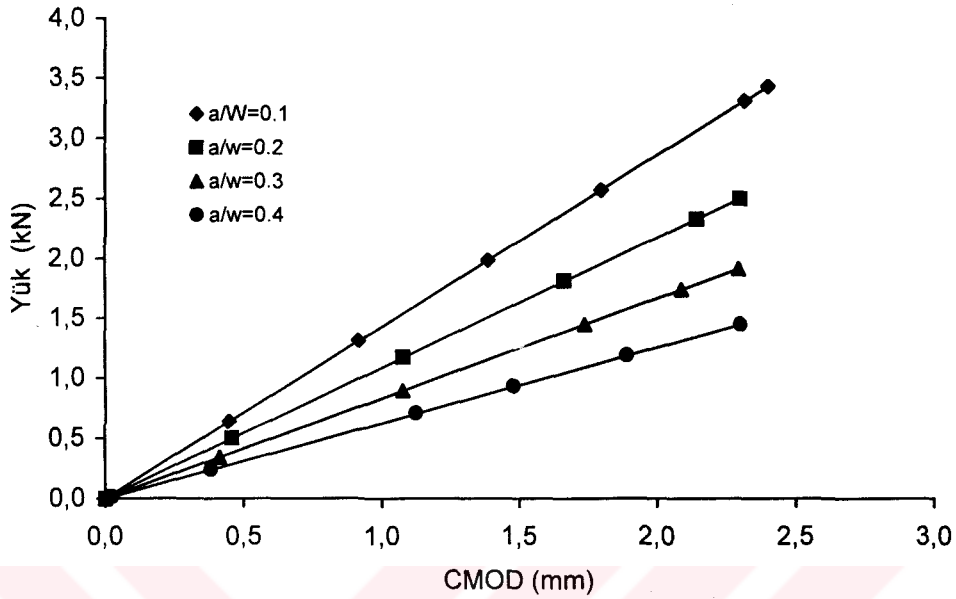
Şekil 6.11 Takviyesiz polimer kompozitin yük-CMOD değişimi



Şekil 6.12 %1.5 Takviyeli Polimer kompozitin Yük-CMOD değişimi

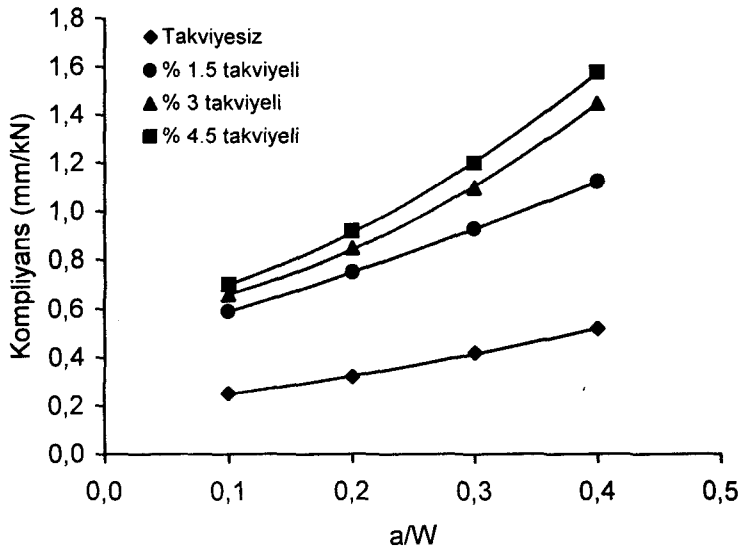


Şekil 6.13 %3 Takviyeli polimer kompozitin kompliyans-çentik oranı değişimi



Şekil 6.14 %4.5 Takviyeli polimer kompozitin kompiyans-çentik oranı değişimi

Bu grafiklerdeki her bir çentik oranındaki eğrinin, eğimlerinin tersi kompiyans değerlerini vermektedir. Buradan elde edilen kompiyans değerleri ile çentik oranı değişimleri Şekil 6.15’de verilmiştir. Grafikte kompiyans değerleri takviyesiz malzemeden, takviyelilere geçişte büyük bir fark görülmektedir. Bunun nedeni takviyesiz malzemenin tamamen lineer elastik davranmasından kaynaklanmaktadır. Kompiyans eğrilerinin türevi denklem 4.10’da yerine konularak K_{IC} değerleri hesaplanarak tablo 6.3’de verilmiştir. K_{IC} ’de, takviyesiz malzemeye göre ; % 1.5 takviye oranında % 108, %3 takviye oranında ise 1.5 takviye oranına göre % 16 ‘lık, % 4.5 takviye oranında ise %3’ e göre %35.4’ lük artış gözlenmiştir.



Şekil 6.15 Kompliyan çentik oranı değişimi

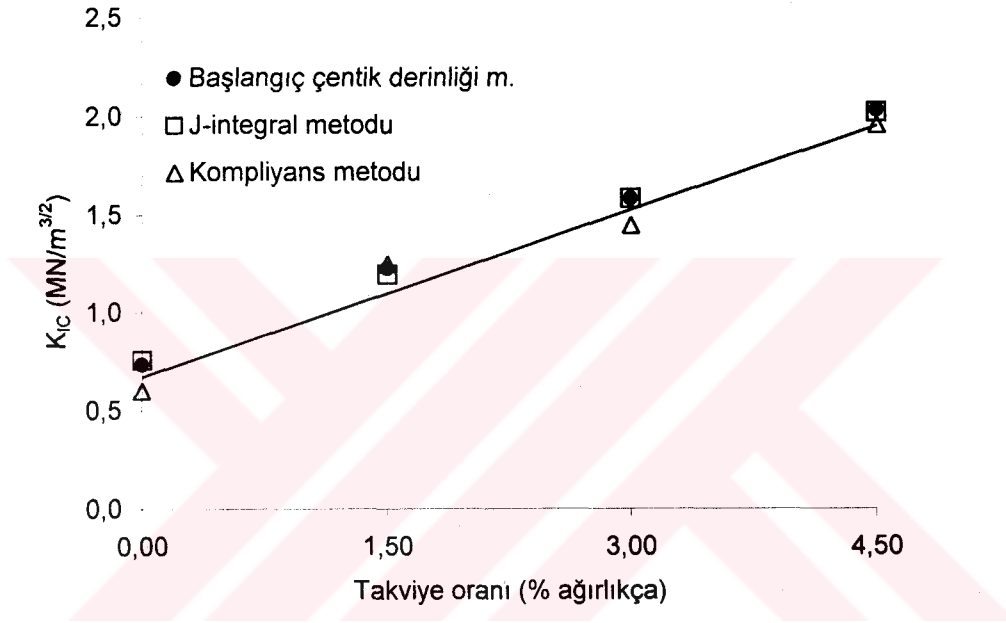
Tablo 6.3 Kompliyan metoduna göre K_{IC} ($MN/m^{3/2}$) değerleri

a/W	Çelik tel takviye oranı (ağırlıkça)			
	0%	%1.5	%3	%4.5
0.1	0.599	1.249	1.446	1.958
0.2	0.564	1.113	1.451	2.023
0.3	0.532	1.034	1.543	2.029
0.4	0.490	0.967	1.550	1.970

6.2.4. Metotların Karşılaştırılması

Yukarıda, kritik gerilme şiddet faktörleri, başlangıç çentik derinliği, J-integral, kompliyan metodlarına göre hesaplanmıştır. Şekil 6.15' de, 0.10 çentik oranındaki polimer kompozitlerin, farklı metotlara göre hesaplanmış K_{IC} değerlerinin, çelik tel takviye oranları ile değişimi gösterilmektedir.

Grafikte, ağırlıkça %4.5 çelik tel takviyeli ve % 1.5 çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin K_{IC} değerleri hemen hemen çakışmış, takviyesiz ile % 3 takviyeli polimer kompozitte ise ihmal edilecek kadar küçük fark gözlenmiştir. Grafikten de açıkça görüldüğü üzere metotlar birbirleri ile önemli ölçüde uyum göstermektedirler. Dolayısı ile bu metotlar kırılma tokluğu testi için uygundur diyebiliriz. Ayrıca takviye oranının artmasıyla K_{IC} değerleri de yaklaşık lineer olarak artmaktadır.



Şekil 6.16. $a/w=0.10$ çentik oranındaki takviyeli kompozitin, takviye oranı ile K_{IC} 'nin değişimi

6.3. Kritik Çatlak Ucu Açılma Miktarı (CTOD) Değerlerinin Bulunması

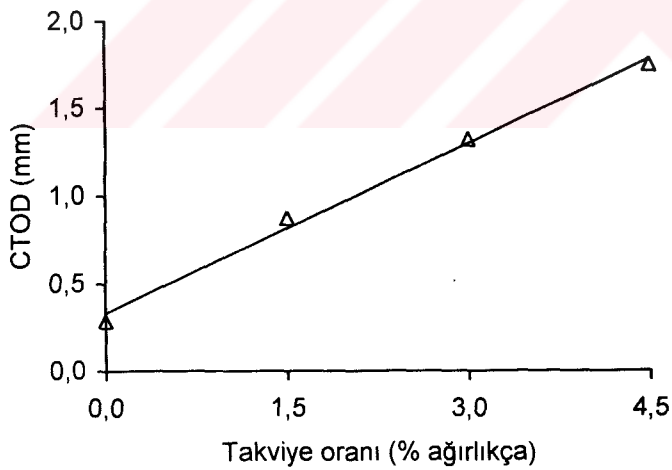
Bilindiği üzere kırılma parametrelerinden biri de kritik çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) dır. Test esnasında çatlak ucu açılma miktarının ölçülmesi oldukça zor olduğundan dolayı, CTOD değeri, denklem 4.18'den hesaplanabilir.

Takviyesiz, %1.5, %3 ve % 4.5 çelik tel takviyeli numuneler için kritik CTOD değerleri Tablo 6.4'de verilmiştir.

Tablo 6.4 Kritik çatlak ucu açılma miktarları (mm)

a/W	Çelik tel takviye oranı (ağırlıkça)			
	0%	%1.5	%3	%4.5
0.1	0.36	1.10	1.58	2.02
0.2	0.29	0.87	1.32	1.75
0.3	0.24	0.75	0.94	1.40
0.4	0.19	0.58	0.80	1.26

Şekil 6.17'de $a/W = 0.2$ çentik oranındaki numunenin, çelik tel takviye oranı ile CTOD değerlerinin değişimi görülmektedir. Takviye oranının artışıyla CTOD değerleri lineer olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 6.17 $a/W = 0.20$ çentik oranındaki numunelerin, çelik tel takviyesi ile CTOD değerlerinin değişimi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik tel takviyesinin polimer kompozitlerin kırılma davranışına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada; ağırlıkça % 1.5, % 3 ve % 4.5 oranlarında tel takviyeli ve takviyesiz polimer kompozitte, ağırlıkça %16.5 polyester kullanılmıştır. Ayrıca takviyesiz polimer kompozitte Bölüm 6' da ifade edildiği gibi daha önce yapılan çalışmalarda ideal polyester oranı %16.5 tespit edildiğinden bu çalışmada polyester oranı sabit tutulmuştur. Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için ASTM E399 standartlarına göre üretilen çentiksiz üç noktadan eğme testi uygulanmış ve eğilme elastisite modülü ve eğilme dayanımları bulunmuştur. Yine malzemelerin kırılma parametresi olan kritik gerilme şiddet faktörünü (K_{IC}) tespit edebilmek için ASTM E399 standartlarına göre tek kenar çentikli eğme testi yapılmış ve başlangıç çentik derinliği, J-integral ve kompliyans gibi farklı metotlar kullanılarak K_{IC} değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneylerden şu sonuçlar elde edilmiştir;

1. Takviyesiz malzemeye göre; eğilme dayanımı değerinde, % 1.5, %3 ve %4.5 takviyeli malzemede sırasıyla % 19, % 46 ve % 57' lik artış elde edilmiştir. Daha önce yapılan kırılmış cam-elyaf takviyeli polimer kompozit numuneye göre de % 29.6 lık artış söz konusudur (Arıkan, 1993).

2. Takviyesiz malzemeye göre; eğilme elastisite modülü değerinde, % 1.5, %3 ve %4.5 takviyeli malzemede sırasıyla % 16, % 31 ve % 48' lik artış elde

edilmiştir. Daha önce yapılan kırılmış cam-elyaf takviyeli polimer kompozit numuneye göre de % 33.5 lik artış söz konusudur (Arıkan, 1993).

3. Başlangıç çentik derinliği metodu uygulanan deney sonuçlarından; ağırlıkça % 1.5, %3 ve %4.5 takviyeli malzemelerde, takviyesiz malzemeye göre; kırılma tokluğu değerinde, sırasıyla % 67, %115 ve %175' lik artış elde edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmada ağırlıkça %1.5 kırılmış cam-elyaf takviyeli polimer kompozit numuneye göre de % 59.3 lük artış söz konusudur (Arıkan, 1993).

4. Ağırlıkça %4.5 çelik tel takviyeli ve $a/W = 0.4$ çentik oranındaki polimer kompozitlerin kırılma tokluğu tespiti için kullanılan başlangıç çentik derinliği metodu ile J-integral metodu arasında % 1.7, başlangıç çentik derinliği ile kompiyans metot arasında % 2.5, J-integral ile kompiyans metot arasında % 0.8'lik fark olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu metotlar kırılma tokluğu testi için uygundur.

5. Başlangıç çentik derinliği metoduna göre; $a/W = 0.1, 0.2, 0.3$ ve 0.4 çentik oranlarında test edilen numunelerde, hesaplanan kritik gerilme şiddet faktörleri arasında sırasıyla, %2, %0.1 ve % 5 lik fark vardır. Bu farklar ihmal edilecek kadar küçük olduğundan, kritik gerilme şiddet faktörü, çentik oranına göre değişmemektedir

6. Ağırlıkça % 4.5 çelik tel takviyeli polimer kompozit numunesinde, eğilme dayanımı, eğilme elastisite modülü ve kritik gerilme şiddet faktörlerinin maksimum değerlere ulaşmıştır.

Ağırlıkça % 4.5 oranında yapılan takviye neticesinde, eğilme dayanımında % 57, eğilme elastisite modülünde %53, kırılma tokluğu değerinde % 64'lük önemli

artış elde edilmiştir. Köprü kolon ve kirişleri, vb. yerlerde tamir malzemesi olarak kullanılan polimer kompozitler, bu sayede, daha yüksek mukavemet, daha yüksek tokluk ve rijitliğe sahip olacaktır.



8. KAYNAKLAR

Anderson, T.L., 1991, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, CRC Press, Boston.

Arkayın, H., 1984, CTP Teknolojisi, Cam Elyaf San. A.Ş., İstanbul.

Akdemir, A., 1992, Yüzey Çatlaklı Cam Takviyeli Plastiklerde Gerilmeli Korozyon, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Arıkan, H., 1993, Polimer Kompozitlerde Katkı Maddelerinin Kırılma Davranışlarına Etkisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Acherkan, N., 1973, Machine Tool Design, Mir Publisher, Moskova.

Aksoy, T., 1984, Kırılma Mekaniği, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, s. 20-24.

Brown, W.F., Srawley, J.E., 1966, ASTM, STP 410, PA.

Bucci, R.C., Paris, P.C., Landes, J.D., Rice, J.R., 1971, ASTM, STP 514, PA.

Begley, J.A., Landes, J.D., 1971, ASTM, STP 514, PA.

- Christian W., Frank, H., 2000, Influence of Aggregate Structure on Mode-III Interface Fracture Between Concrete and CFRP, *Applied Composite Materials*, 182-193.
- David, W.F., 1986, Guide for The Use of Polymers in Concrete, *ACI Journal Committee Report*, 548.1R, 1986, pp. 789-829.
- Dharmarajan, N., Vipulanandan., C., 1988, Critical Stress Intensity Factor of Epoxy Mortar, *Polymer Engineering and Science*, 28(18):1182-1191.
- Ersoy, H. Y., 2001, *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayınları, İstanbul.
- Irwin, G.R., 1957, Analysis of Stress and Strain Near the End of Crack Traversing a Plate, *Transaction ASME, J Applications Mechanics*, pp.24.
- Jones, M.R., 1975, Mechanics of Composite Materials, *Institute of Technology Southern Methodist University*, Dallas.
- Jeno, Y.S., Shah S.P., 1985, Fracture Toughness Criterion for Concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1055-1069).
- Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., 1983, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Matbaası, İstanbul, s. 91-94.

- Khan, M.Z.S., Simpson, G., Gellert, E.P., 2000, Resistant of Glass-Fibre Reinforced Polymer Composites to Increasing Compressive Strain Rates and Loading rates, *Composites A*, 31:57-67.
- Kurtz, S., Balaguru, P., 2000, Postcrack Creep of Polymeric Fiber-Reinforced Concrete in Flexure, *Cement and Concrete Research*, 30:183-190.
- Liebowitz, H., Jones, D.L., 1973, On The Test Methods for Nonlinear Fracture Mechanics, Proc., 10th. Annual Meeting, Society of Engineer Science, Raleigh, NC.
- Manoharan, M., Lewandowski, J., 1990, Combined Mode I-Mode III Fracture of A Particulate Reinforced Metal-Matrix composite, Cleveland, pp. 831-841.
- Mindess, S., Banthia, N., Yan., C., 1987, The Fracture Toughness of Concrete Under Impact Loading, *Cement and Concrete Research*, 17:231-241.
- Mu, B., Li, Z., Peng, J., 2000, Short Fiber-Reinforced Cementitious Extruded Plates with High Percentage of Slag and Different Fibers, *Cement and Concrete Research*, 30:1277-1282.
- Neumann, M., Osten-Sacken, E. N. D., 1983, Wotema On The Endurance Limit of Acrylic Concrete and Its Effect on the Construction, *Concretework-Fertigail-Technic.*, 581-585.
- Ohama, Y., 1984, Recent Research and Development of Concrete Polymer Composites in Japan, *Polymer In Concrete TH*, Darmstadt.

- Rice, J.R., 1968, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches And Cracks, pp. 375-386.
- Ramana, V.P.V., Kant, T., Morton, S.E., Dutta, P.K., Mukherjee, A., Desai, Y.M., 2000, Behavior of CFRPC Strengthened Reinforced Concrete Beams with Varying Degrees of Strengthening, *Composites B*, 31:461-470.
- Rice, J.R., Paris, P.C., Merkle, J.G., 1973, ASTM, STP536, PA.
- Schulz, H., 1984, Statical and Dynamical Behaviour of Mechanics Tool Frames Mode of Polymer Concrete, Fourth Int. Congress, Darmstadt, Sept, pp. 19-21.
- Sih, G.C., Paris, P.C., Irwin, G.R., 1965, On Cracks in Rectilinearly Anisotropic Bodies, *Int. J. of Fracture Mechanics*, V.1 (3), pp. 189-203.
- Shah, R.C., ASTM, STP 560, 1974, V.2, pp.29-52.
- Segre, N., Joeekes, I., 2000, Use of Tire Rubber Particles as Addition to Paste, *Cement and Concrete Research*, 30:1421-1425.
- Sebe., G., Cetin, N.S., Hill, C.A.S., Hughes, M., 2000, RTM Hemp Fibre-Reinforced Polyester Composites, *Applied Composite Materials*, 7:341-349.

- Srivatsan, T.S., Lam, P.C., Krause, J., 1999, The Impact Toughness Characteristics of Steel Wire-Reinforced Polymer Composites, *Materials Letters*, 39:324-328.
- Şahin, Y., 2000, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi kitabevi, Ankara.
- Tada, H., Paris, P.C., Irwin, G.R., 1973, *The Stress Analysis of Cracks of Handbook*, Del., Research Corporation, Hellertown, PA.
- Taylor, M., Lydon, F.D., Barr, B. I. G., 1997, Toughness Measurements on Steel Fiber-Reinforced High Strength Concrete, 19: 329-340.
- Ueda, Y., Ikeda, k., Tao, T., Aoki, M., 1983, *Engineering Fracture Mechanics*, 18: 1131-1158.
- Velazco, G., Visalvanich, K., Shah, S.P., 2000, Effect of Water/Cement Ratio and Silica Fume Addition on the Fracture Toughness and Morphology of Fractured Surfaces of Gravel Concretes, *Cement and Concrete Research*, 30:1427-1433.
- Velazco, G., Visalvanich, K., Shah, S.P., 1980, Fracture Behaviour and Analysis of Fiber Reinforced Concrete Beams, *Cement and Concrete Research*, 10:41-51.
- Vipulanandan., Dharmarajan, N., 1987, *Fracture of Concrete and Rock*, pp. 668-678.
- Vipulanandan, C., Dharmarajan, N., 1989, Fracture Properties of Particle Filled Polymer Composites, *Journal of Composite Materials*, 23:846-861.

- Vipulanandan, C., Dharmarajan, N., 1988, Effect of Temperature on the Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete, *Cement and Concrete Research*, 18(2): 265-276.
- Vipulanandan, C., Dharmarajan, N., 1987, Flexural Behaviour of Polyester Polymer Concrete, *Cement and Concrete Research*, 17:219-230.
- Wittmoser, A., 1984, Composite Material of Cast Iron and Cast Polymer Concrete for Constructural Elements in Machine Engineering, *Polymer In Concrete*, Fourth Int. Congress, 19-21 Sept, pp. 151-155.
- Ziegeldorf, Z., 1983, *Fracture Mechanics of Concrete*, Elsevier Science Publishers, pp.371-409.

9. EKLER**EK 1**

**DENEY ESNASINDA EĞME TEST CİHAZINDAN ALINAN YÜK
ÇATLAK AĞZI AÇILMA MİKTARI VE DEPLASMAN**

DEĞERLERİNİ VEREN TABLO

Tablo 9.1 Takviyesiz Polimer Kompozitlerin Yük(P), Deplasman(δ) ve Çatlak Ağzı Açılma Miktarı(CMOD) Değerleri

δ (mm)	a/w=0.10			a/w=0.2			a/w=0.3			a/w=0.4		
	P (kN)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)
0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,03
0,10	0,28	0,12	0,20	0,10	0,05	0,19	0,10	0,06	0,13	0,09	0,05	0,11
0,20	0,59	0,23	0,40	0,20	0,12	0,35	0,20	0,14	0,27	0,20	0,11	0,25
0,30	0,89	0,34	0,60	0,30	0,17	0,55	0,29	0,19	0,41	0,29	0,17	0,33
0,40	1,18	0,47	0,81	0,40	0,23	0,73	0,40	0,26	0,55	0,40	0,23	0,45
0,50	1,48	0,57	0,99	0,52	0,32	0,90	0,52	0,29	0,68	0,45	0,26	0,50
0,60	1,77	0,71	1,24									
0,70	2,06											
0,81	2,41											

Tablo 9.2 Ağırlıkça %1.5 Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yük(P), Deplasman(δ) ve Çatlak Ağzı Açılma Miktarı(CMOD) Değerleri

δ (mm)	a/w=0.10			a/w=0.2			a/w=0.3			a/w=0.4		
	P (kN)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)
0,02	0,00	0,21	0,00	0,04	0,21	0,00	0,02	0,19	0,00	0,04	0,21	0,02
0,28	1,14	0,55	0,88	0,35	0,55	0,66	0,10	0,38	0,26	0,25	0,36	0,17
0,52	2,22	0,90	1,55	0,50	0,86	1,05	0,20	0,55	0,52	0,52	0,55	0,40
0,85	2,88	1,24	2,07	0,74	1,20	1,48	0,30	0,71	0,79	0,72	0,70	0,60
1,50	2,21	1,57	1,60	1,98	1,60	1,00	0,40	0,86	0,95	0,95	0,86	0,79
2,00	1,88	1,96	1,52	1,32	1,13	0,59	0,48	1,05	1,09	1,18	1,02	0,91
3,02	1,69	2,32	1,43	0,89	0,82	0,28	0,72	1,26	1,16	1,40	1,18	0,93
3,52	1,67	1,80	1,02	0,42	0,48	0,00	1,00	1,39	1,00	1,65	1,36	0,81
4,07	1,38	1,29	0,62	0,64	0,64	0,31	1,50	1,58	0,86	1,91	1,55	0,69
4,54	1,33	0,86	0,29	1,22	1,05	0,72	2,20	1,76	0,79	2,16	1,73	0,59
5,01	1,02	0,52	0,03	1,98	1,60	1,03	1,72	1,41	0,60	1,75	1,43	0,45
5,51	1,02	0,71	0,36	2,47	1,60	0,98	1,36	1,15	0,46	1,28	1,10	0,29
6,02	1,02	1,01	0,64	2,96	1,95	0,85	0,89	0,82	0,27	0,89	0,82	0,17
6,51	0,97	1,38	0,98	3,43	2,30	0,62	0,46	0,51	0,08	0,46	0,51	0,03
7,00	0,45	1,77	1,21	2,98	2,64	0,52	0,28	0,38	0,01	0,81	0,76	0,24

Tablo 9.2' nin devamı

a/W=0		a/w=0.10			a/w=0.2			a/w=0.3			a/w=0.4		
δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)
		2,98	2,32	1,43	2,49	2,32	0,38	0,62	0,63	0,23	1,28	1,10	0,36
		2,98	2,32	1,43	2,04	1,96	0,26	1,04	0,93	0,41	1,73	1,42	0,50
		1,61	2,67	0,35	1,77	1,64	0,31	2,20	1,23	0,79	2,16	1,73	0,59
		1,07	2,35	0,10	2,14	1,38	0,43	2,41	1,55	0,79	2,16	1,73	0,59
		0,79	1,82	0,00	2,57	1,05	0,55	2,63	1,76	0,64	2,39	1,89	0,57
		1,22	1,33	0,26	3,06	1,24	0,66	2,20	1,76	0,50	2,59	2,04	0,45
		1,77	0,95	0,53	3,43	1,45	0,62	1,60	1,91	0,33	1,94	1,57	0,29
		2,28	0,74	0,76	3,43	1,71	0,62	1,18	2,07	0,19	1,32	1,13	0,16
		2,92	1,05	1,03	4,05	2,02	0,60	0,65	1,76	0,01	0,74	0,71	0,02
		3,47	1,45	1,17	4,48	2,38	0,43	0,99	1,33	0,18	1,05	0,93	0,14
		3,47	1,82	1,17	4,03	2,64	0,35	1,37	1,02	0,32	1,57	1,30	0,26
		4,05	2,27	1,14	3,56	2,64	0,28	1,78	0,65	0,44	2,20	1,76	0,41
		4,52	2,67	0,88	3,10	3,08	0,21	2,29	0,89	0,58	2,59	2,04	0,45
		4,97	2,67	0,76	2,69	3,39	0,14	2,63	1,16	0,64	2,59	2,04	0,45
		4,13	3,08	0,57	2,35	3,07	0,09	2,63	1,46	0,66	2,88	2,24	0,38
		3,39	3,42	0,41	1,98	2,73	0,02	2,88	1,82	0,64			
		2,72	3,74	0,26	2,30	2,41	0,14	3,40	2,07	0,38			
		2,02	3,14	0,05	2,65	2,11	0,24	2,94	2,07	0,28			
		2,49	2,61	0,31	3,08	1,86	0,29	2,43	2,24	0,20			
		2,90	2,13	0,43	3,56	1,60	0,36	2,01	2,38	0,11			
		3,49	1,63	0,60	4,01	1,83	0,45	1,58	2,62	0,01			
		4,01	1,96	0,69	4,48	2,08	0,43	2,00	2,28	0,16			
		4,97	2,26	0,76	4,48	2,39	0,43	2,45	1,92	0,24			
		4,97	2,69	0,76	4,95	2,73	0,36	2,93	1,62	0,31			
		5,51	3,05	0,52				3,39	1,32	0,38			
		6,00	3,74	0,41				3,39	1,62	0,38			
								3,72	1,94	0,29			

Tablo 9.3 Ağırlıkça % 3 Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yük(P), Deplasman(d) ve Çatlak Açığı Miktarı(CMOD) Değerleri

a/W=0			a/W=0.10			a/W=0.2			a/W=0.3			a/W=0.4		
δ (mm)	P (kN)	CMOD(mm)	δ (mm)	P (kN)	CMOD(mm)	δ (mm)	P (kN)	CMOD(mm)	δ (mm)	P (kN)	CMOD(mm)	δ (mm)	P (kN)	CMOD(mm)
0,06	0,02	0,02	0,04	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00
0,35	0,88	0,32	0,19	0,50	0,30	0,18	0,40	0,30	0,08	0,14	0,07	0,09	0,15	0,16
0,49	1,60	0,57	0,28	0,95	0,75	0,36	0,93	0,75	0,15	0,29	0,26	0,14	0,33	0,28
0,57	2,17	0,85	0,40	1,40	1,03	0,48	1,24	1,03	0,25	0,47	0,44	0,18	0,44	0,38
0,68	2,85	1,23	0,53	1,91	1,28	0,57	1,52	1,28	0,30	0,59	0,58	0,20	0,55	0,45
0,79	3,36	1,79	0,92	2,67	1,52	0,80	1,72	1,52	0,42	0,83	0,81	0,24	0,70	0,55
0,94	3,53	2,16	2,00	1,88	2,11	2,50	1,40	2,11	0,50	1,09	1,10	0,34	1,02	0,79
2,00	2,76	1,70	2,80	1,67	1,80	2,96	1,17	1,80	0,78	1,46	1,46	0,40	1,18	0,88
3,05	2,36	1,29	2,12	1,22	1,23	2,02	0,72	1,23	1,50	1,20	1,64	0,45	1,34	0,95
4,58	2,24	0,79	1,30	0,64	0,74	1,22	0,33	0,74	2,50	1,05	1,79	0,55	1,49	1,05
5,12	2,16	0,29	0,48	0,02	0,38	0,62	0,02	0,38	2,94	1,05	1,79	0,76	1,63	1,14
5,55	2,12	0,45	0,74	0,40	0,67	1,09	0,47	0,67	2,26	0,79	1,38	0,90	1,68	1,02
6,02	1,91	0,88	1,40	0,97	1,18	1,94	0,90	1,18	1,61	0,50	0,98	1,20	1,76	0,90
6,51	1,88	1,37	2,00	1,53	1,75	2,88	1,35	1,75	0,99	0,24	0,60	3,17	1,93	0,81
7,02	1,66	1,76	3,00	1,70	2,11	3,47	1,35	2,11	0,50	0,00	0,30	2,49	1,52	0,59
7,52	1,48	2,18	4,00	1,68	2,11	4,03	1,31	2,11	0,97	0,38	0,59	1,83	1,12	0,40
8,01	1,48	2,18	4,50	1,50	2,45	4,52	1,22	2,45	1,57	0,62	0,95	1,24	0,75	0,22
8,48	1,24	2,45	4,44	1,35	2,75	5,01	1,19	2,75	2,22	0,88	1,35	0,60	0,37	0,02
9,02	1,08	2,78	3,64	1,00	3,05	4,32	1,00	3,05	2,94	1,05	1,79	1,28	0,78	0,31
9,49	0,71	3,09	2,74	0,59	2,63	3,39	0,72	2,63	3,72	0,76	1,94	1,98	1,20	0,52
		2,70	2,10	0,31	2,07	2,63	0,52	2,07	3,31	0,62	2,08	2,65	1,62	0,72
		2,21	1,55	0,02	1,60	1,89	0,26	1,60	2,72	0,48	2,26	3,17	1,93	0,81
		1,67	1,87	0,33	1,15	1,40	0,05	1,15	2,12	0,31	2,02	3,17	1,93	0,81
		1,28	2,26	0,57	0,85	2,18	0,50	0,85	1,11	0,05	1,65	3,43	2,09	0,76
		0,94	3,00	0,90	1,33	3,13	0,81	1,33	1,44	0,21	1,29	3,62	2,20	0,62
		1,14	3,74	1,26	1,90	4,30	1,10	1,90	2,20	0,47	0,68	2,74	1,67	0,41
		1,38	4,56	1,50	2,61	5,01	1,17	2,61	2,92	0,88	0,88	1,91	1,17	0,21
		1,83	5,08	1,50	3,05	5,01	1,19	3,05	3,37	0,76	1,34	1,20	0,73	0,02
		2,28	5,59	1,45	3,05	5,51	1,05	3,05	3,72	0,76	1,78	1,57	0,95	0,17

Tablo 9.4 Ağırlıkça %4.5 Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yük(P), Deplasman(d) ve Çatlak Ağzı Açılma Miktarı(CMOD) Değerleri

δ (mm)	a/w=0.10			a/w=0.2			a/w=0.3			a/w=0.4		
	P(kN)	CMOD(mm)	P(kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P(kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P(kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P(kN)
0,02	0,00	0,01	0,02	0,04	0,02	0,00	0,09	0,03	0,00	0,04	0,02	0,02
0,20	1,02	0,24	0,64	0,25	0,23	0,50	0,25	0,23	0,35	0,12	0,23	0,24
0,42	1,90	0,57	1,31	0,42	0,57	1,17	0,42	0,56	0,90	0,32	0,57	0,71
0,58	2,71	0,85	1,98	0,65	0,84	1,81	0,60	0,88	1,45	0,45	0,81	0,93
0,70	3,48	1,14	2,57	0,78	1,14	2,33	0,78	1,13	1,74	0,58	1,11	1,19
0,80	4,14	1,43	3,31	0,95	1,47	2,50	0,92	1,36	1,91	0,90	1,45	1,45
1,00	4,62	1,47	3,43	1,50	1,69	2,14	1,50	1,66	1,62	2,50	1,61	0,76
2,50	3,24	1,68	2,55	3,47	1,93	1,71	3,43	1,91	1,38	2,35	1,30	0,57
4,03	2,98	1,42	2,10	2,43	1,35	1,14	2,57	1,43	1,00	1,91	1,06	0,43
4,50	2,81	1,11	1,53	1,55	0,86	0,66	1,81	1,01	0,64	1,44	0,80	0,29
5,03	2,74	0,80	1,09	0,74	0,41	0,19	1,20	0,66	0,33	0,89	0,49	0,12
5,57	2,71	0,49	0,57	0,42	0,23	0,02	0,50	0,28	0,00	0,48	0,27	0,00
6,04	2,43	0,17	0,02	0,68	0,38	0,36	1,11	0,62	0,43	0,89	0,49	0,28
6,51	2,36	0,29	0,38	1,44	0,80	0,74	1,96	1,09	0,83	1,55	0,86	0,47
7,00	2,38	0,53	0,85	2,35	1,30	1,24	2,69	1,50	1,19	2,06	1,14	0,60
7,50	2,31	0,77	1,26	3,49	1,94	1,71	3,45	1,92	1,38	2,59	1,44	0,74
8,05	1,95	1,06	1,78	3,99	1,94	1,71	3,45	1,92	1,38	2,92	1,62	0,76
8,52	1,98	1,41	2,33	4,50	2,22	1,66	3,97	2,20	1,33	2,92	1,62	0,76
9,02	1,74	1,68	2,55	3,58	2,50	1,38	4,48	2,49	0,97	3,37	1,87	0,71
9,51	1,35	1,68	2,55	2,69	1,99	1,00	3,82	2,12	0,79	3,88	2,16	0,67
9,96	0,72	1,95	2,36	2,04	1,50	0,64	2,67	1,49	0,47	4,46	2,48	0,47
		2,19	2,31	1,32	1,13	0,36	1,94	1,08	0,22	3,54	1,96	0,31
		2,47	1,95	1,96	0,73	0,03	1,34	0,74	0,02	2,78	1,54	0,21
		2,18	1,66	2,69	1,09	0,45	2,02	1,12	0,36	1,69	0,94	0,02
		1,71	1,22	3,54	1,50	0,79	3,06	1,70	0,67	2,24	1,25	0,22
		1,28	0,85	4,50	1,96	1,12	4,07	2,26	0,97	3,13	1,74	0,35
		0,88	0,45	4,50	2,50	1,40	4,48	2,49	0,97	3,93	2,18	0,45
		0,48	0,02	5,01	2,50	1,38	4,48	2,49	0,97	4,46	2,48	0,47
		0,76	0,43	5,51	2,79	1,33	4,97	2,76	0,97	4,46	2,48	0,47

□

Tablo 9.4' ün Devamı

$a/w=0$		$a/w=0.10$			$a/w=0.2$			$a/w=0.3$			$a/w=0.4$		
δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P (kN)
		3,99	1,06	0,78	5,94	3,06	1,10	5,47	3,04	0,97	4,95	2,75	0,38
		4,44	1,41	1,12	4,99	3,30	1,07	5,96	3,31	0,74	5,36	2,98	0,24
		4,44	1,88	1,55	3,82	2,77	0,83	6,41	3,56	0,45			
		5,01	2,22	1,88	2,98	2,12	0,50	5,26	2,92	0,28			
		4,32	2,47	1,95	2,22	1,66	0,26	4,17	2,32	0,10			
		3,41	2,47	1,95	2,78	1,23	0,02	3,74	2,08	0,02			
		2,57	2,79	1,76	3,80	1,54	0,33	4,66	2,59	0,29			
		1,75	2,40	1,45	4,99	2,11	0,62	5,81	3,23	0,47			
		1,30	1,90	1,02	5,94	2,77	0,97	6,41	3,56	0,45			
		1,69	1,43	0,64	5,94	3,30	1,07	6,41	3,56	0,45			
		2,18	0,97	0,24	6,41	3,30	1,07	6,88	3,82	0,45			
		2,76	0,72	0,02	5,51	3,56	0,78	7,00	3,89	0,29			
		3,58	0,94	0,35	4,64	3,06	0,55						
		4,40	1,21	0,55	3,93	2,58	0,35						
		5,01	1,53	0,85	3,21	2,18	0,19						
		5,01	1,99	1,21	3,93	1,78	0,00						
		5,47	2,44	1,62	4,99	2,18	0,31						
		5,94	2,79	1,76	6,00	2,77	0,55						
		6,43	2,79	1,76	6,41	3,33	0,78						
		5,22	3,04	1,78	6,41	3,56	0,78						
		3,82	3,30	1,71	6,92	3,56	0,78						
		3,13	3,57	1,35	7,31	3,85	0,74						
		2,30	2,90	0,97		4,06	0,36						
		3,02	2,12	0,55									
		3,93	1,74	0,31									
		4,60	1,28	0,03									
		5,44	1,68	0,41									
		6,43	2,18	0,85									

□

Tablo 9.4' ün Devamı

a/W=0		a/W=0.10		a/W=0.2		a/W=0.3		a/W=0.4	
δ (mm)	P(kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P(kN)	δ (mm)	CMOD(mm)	P(kN)	δ (mm)	CMOD(mm)
		6,43	2,56	1,05					
		6,94	3,02	1,26					
		7,41	3,57	1,36					
		7,95	3,57	1,36					
		8,38	3,86	1,31					
		7,41	4,12	1,31					
		7,95	4,42	0,95					
		8,38	4,66	0,48					

EK 2

**EĞME CİHAZINDAN ALINAN DATALARIN BİLGİSAYAR ORTAMINA
AKTARILMASINI SAĞLAYAN QBASIC PROGRAMI**

```

CLS
SAY = 0
PORT% = 632

L1:
LOCATE 10, 20: PRINT "YÜKLEMEK İÇİN BİR TUFA BASIN"
IF INKEY$ = "" THEN GOTO L1
REM IF INKEY$ = "G" OR INKEY$ = "g" THEN GOTO GR
CLS
LOCATE 25, 20: PRINT "DURDURMAK İÇİN (Q) TUFANA BASIN"
OPEN "EXTEN.TXT" FOR OUTPUT AS #1
OPEN "LOAD.TXT" FOR OUTPUT AS #2
OPEN "STRAIN.TXT" FOR OUTPUT AS #3

L:
GOSUB GETCH8
S% = S% + 1
DEGER1A% = DEGER1A% + DEGER1%
IF S% = 5 THEN D1 = DEGER1% / 45
IF S% = 5 THEN PRINT #1, USING "###.#"; D1

GOSUB GETCH9
DEGER2A% = DEGER2A% + DEGER2%
IF S% = 5 THEN D2 = DEGER2% / 90
IF S% = 5 THEN PRINT #2, USING "##.##"; D2

GOSUB GETCH10
DEGER3A% = DEGER3A% + DEGER3%
IF S% = 5 THEN D3 = DEGER3% / 700
IF S% = 5 THEN PRINT #3, USING "##.##"; D3

IF S% = 5 THEN DEGER1A% = 0
IF S% = 5 THEN DEGER2A% = 0
IF S% = 5 THEN DEGER3A% = 0
IF S% = 5 THEN S% = 0

IF INKEY$ = "Q" OR INKEY$ = "q" THEN GOTO E
IF S% = 0 THEN SAY = SAY + 1
LOCATE 11, 20: PRINT "YÜKLENEN DEGER SAYISI= "; SAY
LOCATE 12, 20: PRINT " S= "; S%
LOCATE 13, 20: PRINT " EXTENTION= "; : PRINT USING "###.#"; I
LOCATE 14, 20: PRINT " LOADCELL = "; : PRINT USING "##.##"; I
LOCATE 15, 20: PRINT " STRAIN = "; : PRINT USING "##.##"; I
GOTO L

```

```

GETCH8:
OUT PORT% + 3, 0
OUT PORT%, 8
FOR I = 1 TO 5: A% = INP(PORT% + 4): NEXT I
FOR I = 1 TO 9: A% = INP(PORT% + 5): NEXT I
H% = INP(PORT% + 2)
L% = INP(PORT% + 1)
DEGER1% = (H% - 16 * (INT(H% / 16))) * 256 + L%
RETURN

```

```

GETCH9:
OUT PORT% + 3, 0
OUT PORT %, 9
FOR I = 1 TO 5: A% = INP(PORT% + 4): NEXT I
FOR I = 1 TO 9: A% = INP(PORT% + 5): NEXT I
H% = INP(PORT% + 2)
L% = INP(PORT% + 1)
DEGER2% = (H% - 16 * (INT(H% / 16))) * 256 + L%
RETURN

```

```

GETCH10:
OUT PORT% + 3, 0
OUT PORT%, 10
FOR I = 1 TO 5: A% = INP(PORT% + 4): NEXT I
FOR I = 1 TO 9: A% = INP(PORT% + 5): NEXT I
H% = INP(PORT% + 2)
L% = INP(PORT% + 1)
DEGER3% = (H% - 16 * (INT(H% / 16))) * 256 + L%
RETURN

```

```

GR:
CLS
SCREEN 12
CLOSE #1
CLOSE #2
CLOSE #3
OPEN "A.DGR" FOR INPUT AS #1
DO
INPUT #1, X
INPUT #2, Y
A% = X * 10
B% = Y * 10
Z% = Z% + 1
PSET (Z%, A%), 10
PSET (Z%, B% + 50), 11
PSET (A%, B% + 100), 12
LOOP UNTIL (EOF(1))

```

```

E:
CLOSE #1
CLOSE #2
CLOSE #3
REM LOCATE 10, 20: PRINT "YÜKLEME TAMAMLANDI"
END

```