

**HİBRİT KOMPOZİTLERİN
KIRILMA TOKLUĞUNUN
BELİRLENMESİ**

**BU TEZ BAP KOORDİNASYON BİRİMİ
TARAFINDAN DESTEKLENMİŞTİR.
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

ŞAZİYE ARASAN

DANIŞMAN

DOÇ. DR. MEHMET AKTAŞ

**Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
ŞUBAT 2014**

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HİBRİT KOMPOZİTLERİN
KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞAZİYE ARASAN

ŞUBAT 2014

UŞAK

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HİBRİT KOMPOZİTLERİN
KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞAZİYE ARASAN

UŞAK 2014

KABUL VE ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ danışmanlığında Şaziye ARASAN tarafından hazırlanan “**HİBRİT KOMPOZİTLERİN KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ**” adlı bu tezin Yüksek Lisans / Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ

Danışman, Makine Mühendisliği ABD

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet ŞENEL

Jüri üyesi Makine Mühendisliği ABD, Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Halit GÜN

Jüri üyesi Makine Mühendisliği ABD, Uşak Üniversitesi

Tarih: 10/02/2014

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şaziye ARASAN

**HİBRİT KOMPOZİTLERİN
KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Şaziye ARASAN

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2014**

ÖZET

Fiber takviyeli kompozit malzemeler metalik malzemelere kıyasla daha üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle son yıllarda hava, deniz ve kara taşıtlarında metalik malzemelere alternatif olarak kullanılmışlardır. Üretim, montaj veya çalışma sırasında malzeme bünyesinde meydana gelen çatlaklar kırılma tokluğunu ve malzemenin direncini olumsuz etkilemektedir.

Bu çalışmada; tek kenar çatlağına (TKÇ), merkezi çatlağına (MÇ) ve çift kenar çatlağına (ÇKÇ) sahip dokuma cam/epoksi, dokuma karbon/epoksi ve dokuma cam-karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, sekiz tabakalı dokuma cam/epoksi (C₈), dokuma karbon/epoksi (K₈) tabakalı kompozitler ile dokuma cam-karbon/epoksi (C₂K₄C₂), dokuma karbon-cam/epoksi (K₂C₄K₂) hibrit kompozitler ısı ve zaman kontrollü hidrolik preste 105°C sıcaklık ve 8MPa basınçta el yatırma yöntemi ile 100 dakika preslenerek üretilmiştir.

Çatlak boyunun kırılma tokluğına etkisini incelemek için 25x150mm² boyutlarındaki numunelere üç farklı boyda (4, 6 ve 8mm) çatlak açılmıştır. Çatlak yönünün kırılma tokluğına etkisini belirlemek için ise numunelere dört farklı açıda (0°, 30°, 45° ve 60°) çatlak açılmıştır. Farklı konum, farklı boy ve farklı çatlak açılarında kesilen numuneler 1mm/dak çekme hızında çekme testine tabi tutulmuştur.

Nümerik analiz için ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Nümerik analiz için gerekli olan mekanik özellikler ASTM standartlarına göre belirlenmiş ve J-integral metodu kullanılarak tabakalı kompozit numunelerin kırılma toklukları hesaplanmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin birbirleriyle uyduğu gözlemlenmiştir.

Bu yüksek lisans tezi Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Bilim Kodu : 625.03.00

Anahtar Kelimeler : Kırılma mekaniği, Dokuma cam/epoksi, Dokuma karbon/epoksi, Hibrit kompozitler, Sonlu elemanlar metodu, ANSYS

Sayfa Adedi : 87

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ

**DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS
OF HYBRID COMPOSITE**

(M. Sc. Thesis)

Şaziye ARASAN

**UŞAK UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

February 2014

ABSTRACT

Fiber reinforced composite materials, have superior mechanical properties compared to metallic materials. In the recent years, they have been used in air, sea and land vehicles as an alternative to metallic materials due to their properties. Cracks that become during production, montage and working period effect fracture toughness and material resistance negatively.

In this study; the fracture behavior of woven glass/epoxy, woven carbon/epoxy and woven glass-carbon/epoxy laminated composites which have single edge crack (TKÇ), central crack (MÇ) and double edge crack (ÇKÇ), were investigated. For this purpose, eight layered woven glass/epoxy (C₈), woven carbon/epoxy (K₈) layered composites with woven glass-carbon/epoxy (C₂K₄C₂), woven carbon-glass/epoxy (K₂C₄K₂) hybrid composites were produced by hand lay-up method for 100 min. in hydraulic press regulating temperature and time control under conditions 105°C and 8MPa.

For determination of crack length effect on the fracture toughness, cracks in 3 different dimensions (4, 6 and 8mm) were opened on the samples in 25x150 mm² dimensions. To determine the crack direction effect on the fracture toughness, cracks in 4 different angles (0°, 30°, 45° and 60°) were opened on the samples. Cutted

samples in different locations, different lengths and different crack orientations were tested in tensile test instrument with 1mm/min tensile speed.

ANSYS finite elements package programme was used for the numerical analysis. Mechanical properties that are necessary for the numerical analysis were determined according to ASTM and fracture toughness of the composite samples was calculated by the J-integral method. According to tests and numerical analysis studies, it was observed that the results of the fracture toughness matched each other.

This master degree thesis has been supported by Uşak University Scientific Research Projects Coordination Unit.

Science Code : 625.03.00

Keywords : Fracture mechanics, Woven glass/epoxy, Woven carbon/epoxy, Hybrid composites, Finite elements method, ANSYS

Number of Page : 87

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mehmet AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yardımını ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile yolumu aydınlatan sayın hocam Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tezime yapmış olduğu katkı ve desteklerinden dolayı sayın Doç. Dr. Mehmet ŞENEL ve Doç. Dr. Halit GÜN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deneyleler sırasındaki özverili yardımları için Arş. Gör. H. Ersen BALCIOĞLU ve Arş. Gör. Önder YEŞİL hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca tezin her aşamasında yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Narin KARABULUT'a teşekkürlerimi sunarım.

2012/TP018 numaralı projeme mali desteklerinden dolayı Uşak Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne, proje işlemleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Hacer SAĞLAM ve Erol TOSUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın bazı aşamalarında teknik desteklerinden dolayı Uşak Seramik A.Ş. ve Uşak Pull-Tech FRP fabrikasına teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında kıymet biçilmez desteklerinden dolayı aileme çok teşekkür ederim.

Şaziye ARASAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
TABLolar LİSTESİ	xvi
BİRİNCİ BÖLÜM: GİRİŞ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı.....	6
1.3 Destekleyenler.....	7
İKİNCİ BÖLÜM: KOMPOZİT MALZEMELER	8
2.1 Giriş.....	8
2.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri.....	8
2.2.1 Kompozit Malzemelerin Olumlu Yanları.....	8
2.2.2 Kompozit Malzemelerin Olumsuz Yanları.....	8
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
2.3.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	9
2.3.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	11
2.3.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	11
2.3.4 Hibrit Kompozit Malzemeler.....	11
2.4 Matris Malzemeler.....	12
2.4.1 Epoksi Reçineler.....	13
2.4.2 Polyester Reçineler.....	13
2.4.3 Vinilester Reçineler.....	14
2.5 Fiber Malzemeleri.....	14
2.5.1 Cam Fiberler.....	15
2.5.2 Karbon Fiberler.....	16
2.6 Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	16
2.6.1 Islak Kalıplama.....	16
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: KIRILMA MEKANİĞİ	19
3.1 Giriş.....	19
3.2 Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM).....	21
3.2.1 Kırılma Modları.....	22
3.2.2 Çatlak Ucundaki Gerilme Ve Yer Değiştirme Bileşenleri.....	24
3.3 Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM).....	27
3.3.1 J-İntegral Metodu.....	27
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM: DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
4.1 Giriş.....	29
4.2 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	30
4.2.1 Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	31
4.2.2 Basma Özelliklerinin Belirlenmesi.....	32
4.2.3 Kayma Özelliklerinin Belirlenmesi.....	33
4.3 Kırılma Tokluklarının Belirlenmesi.....	35
4.3.1 Kırılma Tokluğu Test Numunelerinin Hazırlanması.....	35

BEŞİNCİ BÖLÜM: KIRILMA TOKLUĞUNUN ANSYS 12 İLE BELİRLENMESİ	39
5.1 Giriş.....	39
5.2 Analiz Tipinin Belirlenmesi	40
5.3 Geometrik Modelin Oluşturulması.....	40
5.3.1 Anahtar Noktaların (Keypoint) Oluşturulması	40
5.3.2 Anahtar Noktalar İle Doğruların Oluşturulması	41
5.3.3 Doğrulardan Alan Oluşturulması.....	41
5.4 Eleman Tipinin Atanması.....	41
5.4.1 Numune Kalınlıklarının Girilmesi.....	42
5.4.2 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	43
5.5 Elemanlara Ayırma (Meshing) İşlemi	43
5.5.1 Mesh Ayarlarının Yapılması.....	43
5.5.2 Çatlak Çevresinde Üçgen Elemanların Tanımlanması	44
5.5.3 Meshleme İşlemi.....	45
5.6 Sınır Şartlarının Girilmesi	45
5.7 Yayılı Yükün Uygulanması.....	46
5.8 Analizin Çözümü.....	47
5.9 J-İntegralinin Hesaplanması	47
5.10 J-İntegrali Değerinin Görülmesi.....	50
ALTINCI BÖLÜM: SONUÇ VE TARTIŞMA	54
6.1 Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	54
6.1.1 Çatlak Açısı Sabitken Çatlak Boyu Değişiminin Kırılma Tokluğuna Etkisi.....	54
6.1.1.1 Tek Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler.....	54
6.1.1.2 Merkezinde Çatlak Bulunan Numuneler	57
6.1.1.3 Çift Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler.....	59
6.1.2 Çatlak Boyu Sabitken Çatlak Açısının Değişiminin Kırılma Tokluğuna Etkisi.....	61
6.1.2.1 Tek Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler.....	61
6.1.2.2 Merkezinde Çatlak Bulunan Numuneler	63
6.1.2.3 Çift Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler.....	64
6.1.3 Farklı Çatlak Konumlarına Sahip Kompozitlerin Kırılma Tokluklarının Karşılaştırılması	66
6.2 Çatlak İlerleyişi Ve Hasar Şekilleri	73
6.3 Deneysel Ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması	73
6.4 Sonuçlar.....	84
KAYNAKLAR	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [22].....	10
Şekil 2.2. Çeşitli fiber dokuma örnekleri [24]	15
Şekil 2.3. El yatırma yönteminin şematik gösterimi [22]	17
Şekil 3.1. Metalik malzemelerde (a) sünek ve (b) gevrek kırılma yüzeyleri [27]	20
Şekil 3.2. LEKM gerilme-şekil değiştirme eğrisi [26].....	22
Şekil 3.3. Kırılma modları [27]	22
Şekil 3.4. İki eksenli çekme gerilmeleri altındaki numunelerin (a) düzlem gerilme ve (b) düzlem şekil değiştirme şartları [26]	23
Şekil 3.5. Çatlak ucu gerilme dağılımı [28]	24
Şekil 3.6. Çatlak etrafındaki J-integral tanımı	28
Şekil 4.1. Tabakalı kompozitlerde koordinat sistemi [29]	31
Şekil 4.2. Çekme testi numunelerinin (a) fiber yönündeki (E_1 , ν_{12} ve X_C) ve (b) fibere dik yöndeki (E_2 ve Y_C) geometri ve fiber yönlenmesi [30]	31
Şekil 4.3. Basma test numunelerinin (a) fiber yönündeki (X_B) ve (b) fibere dik yöndeki (Y_B) geometri ve fiber yönlenmesi [30].....	33
Şekil 4.4. 45° fiber yönündeki kayma modülünün geometri ve yönlenmesi [30].....	34
Şekil 4.5. (a) Merkezi çatlak (MÇ) (b) Tek kenar çatlağı (TKÇ) (c) Çift kenar çatlağının (ÇKÇ) şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.6. Dokuma tipi kompozit numunelerinin tipik yük-uzama grafiği	36
Şekil 5.1. Anahtar noktaların tayini	40
Şekil 5.2. Anahtar noktaların tanımlanması	41
Şekil 5.3. Eleman tipinin belirlenmesi	42
Şekil 5.4. Numunelere kalınlık verilmesi.....	42
Şekil 5.5. Malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	43
Şekil 5.6 Mesh ayarı.....	44
Şekil 5.7. Çatlak ucunun yoğunlaştırılması [37].....	44
Şekil 5.8. Mesh edilmiş model.....	45
Şekil 5.9. Sınır şartlarının uygulanması	46
Şekil 5.10. Yükün uygulanması	46
Şekil 5.11. Çatlak ucundaki açılma.....	47
Şekil 5.12. J-integral hesabı için yörünge tayini	48
Şekil 5.13. Yörünge ismi belirleme	48
Şekil 5.14. Alt programın ANSYS paket programına okutulması.....	50
Şekil 5.15. J-integral (JINT) değerinin okunması.....	50
Şekil 6.1. 0° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	55
Şekil 6.2. 30° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	55
Şekil 6.3. 45° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	56
Şekil 6.4. 60° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	57

Şekil 6.5. 0° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	57
Şekil 6.6. 30° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	58
Şekil 6.7. 45° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	58
Şekil 6.8. 60° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	59
Şekil 6.9. 0° çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	60
Şekil 6.10. 45° çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi	60
Şekil 6.11. 4mm'lik tek kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	61
Şekil 6.12. 6mm'lik tek kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	62
Şekil 6.13. 8mm'lik tek kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	62
Şekil 6.14. 4mm'lik merkezi çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	63
Şekil 6.15. 6mm'lik merkezi çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	64
Şekil 6.16. 8mm'lik merkezi çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	64
Şekil 6.17. 4mm'lik çift kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	65
Şekil 6.18. 6mm'lik çift kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	65
Şekil 6.19. 8mm'lik çift kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi	66
Şekil 6.20. 0° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	67
Şekil 6.21. 30° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	67
Şekil 6.22. 45° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	68
Şekil 6.23. 60° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	68
Şekil 6.24. 0° açı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	69
Şekil 6.25. 30° açı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	69
Şekil 6.26. 45° açı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	70
Şekil 6.27. 60° açı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	71
Şekil 6.28. 0° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	71

Şekil 6.29. 30° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	72
Şekil 6.30. 45° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	72
Şekil 6.31. 60° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi	73

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Polimer matris malzemelerin mekanik özellikleri [23]	14
Tablo 4.1. Kompozit plakaların kalınlık ve fiber hacim oranları	30
Tablo 4.2. Mekanik test numunelerinin geometrileri [29]	30
Tablo 4.3. Çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler	32
Tablo 4.4. Basma testleri sonucunda elde edilen basma dayanımları	33
Tablo 4.5. Tabakalı kompozitlerde elde edilen kayma modülleri	34
Tablo 4.6. Dokuma tipi C ₈ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	37
Tablo 4.7. Dokuma tipi C ₂ K ₄ C ₂ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	37
Tablo 4.8. Dokuma tipi K ₂ C ₄ K ₂ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	38
Tablo 4.9. Dokuma tipi K ₈ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	38
Tablo 5.1. Kompozit numunelerin mekanik özellikleri	39
Tablo 5.2. Dokuma tipi C ₈ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	51
Tablo 5.3. Dokuma tipi C ₂ K ₄ C ₂ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	52
Tablo 5.4. Dokuma tipi K ₂ C ₄ K ₂ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	52
Tablo 5.5. Dokuma tipi K ₈ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm ^{3/2}) değerleri	53
Tablo 6.1. C ₈ kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri	76
Tablo 6.2. C ₂ K ₄ C ₂ hibrit kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri	77
Tablo 6.3. K ₂ C ₄ K ₂ hibrit kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri	78
Tablo 6.4. K ₈ kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri	79
Tablo 6.5. C ₈ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm ^{3/2})	80
Tablo 6.6. C ₂ K ₄ C ₂ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm ^{3/2}) ..	81
Tablo 6.7. K ₂ C ₄ K ₂ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm ^{3/2}) ..	82
Tablo 6.8. K ₈ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm ^{3/2})	83

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Giriş

Malzemeler metal, seramik ve plastik olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu malzemelerin yeterli olmadığı durumlarda bir malzemeye ihtiyaç daha ihtiyaç duyulur. İstenen özellikleri karşılamak amacıyla metal, seramik ve plastik malzemelerin en az ikisinin fiziksel olarak birleştirilmesi neticesinde oluşan bu yeni malzemeye kompozit malzeme denir.

Kompozit malzemelerin yüksek mukavemet, yüksek ısı direnç ve hafiflik gibi özelliklere sahip olması onların geniş kullanım alanı bulmalarını sağlamıştır. Ancak üretim veya kullanım sırasında kompozit malzemeler hasara uğrayabilmekte ve hasar ilerleyerek malzemenin iş göremez hale gelmesine sebep olabilmektedir. Bu hasarlardan biri de malzemede çatlak oluşumu ve buna bağlı olarak meydana gelen kırılmadır. Mekanik olarak zorlanan yapılarda tehlikeli bir durum olan kırılma, can ve mal kaybıyla sonuçlanan hasarlara sebep olabilir. Yapılardaki güvenliği arttırmak amacıyla kırılma konusu ile ilgili yapılan çalışmalar son zamanlarda artmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı aşağıda ifade edilmiştir.

Sorucu [1] farklı uzunluklardaki çatlaklara sahip cam/epoksi kompozit levhaların kırılma tokluklarını üç nokta eğme (SENB) ve tek çentik kenarlı çekme deney (SENT) numunelerini kullanarak deneysel olarak belirlemiştir. Bu çalışmanın sonucunda, numunelere açılan ön çatlakların boyu arttıkça malzemenin kaldırabileceği yük miktarının azaldığı, çatlak ağzında gerilmelerin biriktiği ve kırılmanın buradan başladığı gözlemlenmiştir.

Çolak [2] el yatırma yöntemiyle üretilen cam/epoksi kompozitlerin yüzeylerine farklı açılarda çatlaklar açmıştır. Bu kompozit numunelerin aksenal yük altında kırılma davranışını incelemiştir. Çatlak boylarına ve çatlak açalarına bağlı olarak

kırılma tokluğunun değişimini incelemiştir. Başlangıç çatlak derinliği ve kompliyans metotlarını kullanarak elde ettiği değerleri tablolar halinde vermiştir.

Canan [3] açılı yüzey çatlağına sahip 8 tabakalı cam/epoksi kompozit numunelerinin çekme yükü altındaki davranışlarını incelemiştir. Kompozit numunelere farklı konum ve açılarda yarı eliptik yüzey çatlağı açılmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Çatlak ilerleme ve kırılma tokluğu davranışları incelemiştir.

Özben ve Arslan [4], çelik malzemenin geometrik konfigürasyonuna ve cismin yükleme durumuna bağlı olarak değişen gerilme şiddet faktörünü incelemiştir. Bu çalışmalarında, tek kenarında çatlak bulunan dikdörtgen plakanın gerilme yığılma faktörünü teorik ve nümerik olarak hesaplamışlardır. Farklı boy ($a=1.00, 1.25$ ve 1.5mm) ve farklı açılardaki çatlaklara sahip plakalar için gerilme yığılma faktörlerini sayısal ve nümerik olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda plakalarda bulunan süreksizliklerin çatlak ilerlemesine ve yorulmasına neden olduğunu, bunun da dayanımı olumsuz etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Ekrem [5] merkezine farklı açılarda çatlak açılmış cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemenin, sabit yük altındaki kırılma ve hasar davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada çatlak ilerlemesi, çatlak ağzı açılma miktarı, çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü ve kırılma tokluğu incelenmiştir.

Şimşir [6] çelik tel takviyeli lamel grafitli dökme demirin kırılma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada farklı hacim oranlarına sahip lamel grafitli dökme demirin kırılma toklukları ve bükme mukavemetleri kompliyans ve J-integral metotları kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda çelik tel takviyeli kompozit malzemelerin hem kırılma toklukları hem de bükme mukavemetlerinin takviyesiz lamel grafitli dökme demire nazaran daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, takviye hacim oranı arttıkça kırılma tokluğu ve bükme mukavemetlerinin arttığı saptanmıştır.

Aytekin [7] hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip 4140, 8620, 1040 ve 1050 yapı çeliklerine farklı ısıl işlemler yaparak kırılma tokluklarını incelemiştir. Bu çeliklerin ısıl işlem neticesinde mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve kırılma tokluklarının artırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, ASTM-E399 standardına göre çatlak ucu açınım (COD) ve J-integral yöntemleri ile kırılma toklukları incelenmiştir. Çalışma sonucunda su verme ve farklı sıcaklıklarda temperleme işlemlerinden sonra mukavemetin arttığı gözlemlenmiştir.

Arıkan [8] çelik tel takviyeli cam/polyester kompozit numunelerinin gerilme şiddet faktörü J-integral, başlangıç çentik derinliği ve kompliyans metotları kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda ağırlıkça %4,5 oranında takviye sonucu eğilme dayanımı, eğilme elastisite modülü ve kırılma tokluğunda önemli derecede artış olduğu gözlemlenmiştir.

Atmaca [9] Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM) yaklaşımı ile gerilme şiddet faktörünü (GŞF) ve Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM) yaklaşımı ile J-integral parametrelerini hesaplamıştır. Karışık mod (Mixed mode) için yapılan bu çalışmada GŞF ve J-integral değerleri ampirik formüller ile elde edilmiştir.

Stamenkovic [10] J-integral metodunu kullanarak izotropik ve ortotropik malzemelerin kırılma tokluğunu ve çatlak ilerlemesini ANSYS paket programı ile incelemiştir. İzotropik ve ortotropik malzemelerin çatlak ucu etrafındaki iki yörüngede kırılma tokluğunu hesaplamış ve bu iki malzeme için kırılma tokluk değerlerini kıyaslamıştır.

Atmaca ve arkadaşları [11] J-integral yörüngesinin şeklinin ve yörüngeler üzerindeki düğüm noktası sayılarının J-integral değerine etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen uygun yörünge şekli ve düğüm sayıları ile kirişin üç noktadan eğilmesi durumundaki kırılma tokluğunu belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçları ANSYS ve literatürdeki değerler ile karşılaştırmışlardır.

Tortoç [12] PVC ve yüzey balsa çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozitlerin kırılma tokluklarını nümerik olarak incelemiştir. Shivakumar'ın deneysel olarak bulduğu kırılma tokluk değerlerini referans almıştır. ANSYS sonlu elemanlar paket programını kullanarak bu kırılma tokluklarını elde etmeye çalışmıştır. Bu çalışma sonucunda kırılma tokluğunun yüzey malzemesinden bağımsız olduğu ve çekirdek malzemesinin yoğunluğuyla doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

Özben ve arkadaşları [13], farklı boyutlarda ve farklı açılarda eliptik deliğe sahip çelik plakaların gerilme yoğunluğunu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Çalışma sonunda gerilme yoğunluğunun, küçük eğim açılarında ($\theta=0^\circ$ ve 15°) elipsin küçük yarıçap bölgesinde ve plaka kenarlarında nerdeyse aynı olduğunu, ancak eğim büyüdükçe ($\theta=30^\circ$, 45° ve 90°) küçük yarıçap bölgesinde arttığını, plaka kenarında ise azaldığını gözlemlenmiştir.

Phan [14] merkezinde çatlak bulunan ve çelik malzemedan imal edilmiş numunelerin kırılma tokluk değerlerini ANSYS paket programını ve gerilme şiddet faktörünü kullanarak hesaplamıştır. ANSYS paket programından elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin analitik olarak hesaplanan kırılma tokluğu değerlerinden yaklaşık %0,44 farklı olduğunu gözlemlenmiştir.

Kaman [15] dokuma tipi cam kumaş ve epoksi reçineden üretilmiş tabakalı kompozit levhaların kırılma tokluğunu deneysel ve nümerik olarak araştırmıştır. Bu çalışmada farklı tabaka dizilimlerine sahip kompozitlere çift konsol kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) testi uygulanmıştır. Deneysel ve sayısal tabakalar arası kritik kırılma tokluğu arasında oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Zor [16] kemik kırıklarında kullanılan kemik çimentosunun ara yüzeyinde oluşan çatlakların kırılma tokluklarını incelemiştir. Deneysel ve nümerik olarak bulduğu sonuçları karşılaştırılmıştır.

Özdemir [17] ANSYS ve Abaqus sonlu elemanlar programlarını kullanarak seramik malzemelerin kırılma tokluklarını belirlemiştir. Nümerik sonuçlar deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilerle ANSYS yazılımının güvenilirliği ve kırılma mekaniği analizleri için uygunluğu açıkça görülmüştür.

Kaman [18] kenar çatlakına sahip fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin gerilme şiddet faktörünü deneysel ve nümerik olarak araştırmıştır. Deneysel yaklaşımda, yük-yer değiştirme grafikleri çekme yükü altında elde edilmiş, böylece deneysel gerilme şiddet faktörü hasar yükünün belirlenmesi ile bulunmuştur. Nümerik çalışmada ise çatlaklı kompozit levhalar ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak modellenmiştir.

Şimşir [19], düşük ve orta karbonlu çelikleri kullanarak elde ettiği çelik/çelik lamine kompozitlerin kırılma davranışlarını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Deneysel olarak kırılma tokluğunu kısmi yük boşalma yöntemi ile belirlemiştir. Deneysel çalışma sonucunda kırılma tokluğunun orta karbonlu çeliğin oranı ile arttığını gözlemlemiştir. Nümerik olarak ise MARC sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Yaptığı deneysel ve nümerik sonuçların yakınsadığını gözlemlemiştir.

Kaman [20] tek kenarında çatlak bulunan farklı fiber oryantasyonlarına sahip karbon/epoksi kompozit levhanın kırılma tokluğunu deneysel olarak belirlemiştir. ANSYS sonlu elemanlar paket programını kullanarak bulduğu değerleri deneysel olarak bulduğu sonuçlarla karşılaştırmıştır. Çekme sırasında oryantasyon açısına bağlı olarak malzemenin kırılırken izlediği doğrultuyu incelemiş ve kırılmanın fiber oryantasyonuna bağlı olarak ilerlediğini gözlemlemiştir.

Taş ve Polat [21] EPKM yaklaşımıyla boru çeliklerinin kırılma tokluklarını J-integral metodunu kullanarak incelemişlerdir. Üç nokta eğme numunelerini kullanarak elde ettiği kırılma tokluğu ile çentik darbe tokluğu arasında bir bağıntı elde etmiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, farklı çatlak boylarına, farklı çatlak açlarına ve farklı çatlak konumlarına sahip 8 tabakalı dokuma cam/epoksi (C₈), dokuma karbon/epoksi (K₈) tabakalı kompozit plakaların ve dokuma cam-karbon/epoksi (C₂K₄C₂), dokuma karbon-cam/epoksi (K₂C₄K₂) hibrit kompozit plakaların kırılma tokluklarını deneysel ve nümerik olarak incelemektir.

Çatlak boyunun (a) kırılma tokluğuna etkisini incelemek için 25x150mm² boyutlarındaki numunelere üç farklı boyda (a=4, 6 ve 8mm) çatlak açılmıştır. Çatlak yönünün kırılma tokluğuna etkisini belirlemek için ise numunelere dört farklı açıda ($\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) çatlak açılmıştır. Farklı konum, farklı boyut ve farklı çatlak açılarında kesilen numuneler 1mm/dak çekme hızında çekme testine tabi tutulmuştur.

Deneysel olarak elde edilen sonuçları doğrulamak için ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. ANSYS sonlu elemanlar analizi için gerekli olan mekanik özellikler ASTM standartlarına göre belirlenmiştir. ANSYS sonlu elemanlar paket programında J-integral metodu kullanılarak kompozit numunelerin kırılma toklukları belirlenmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin birbirleriyle uyduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. **Bölüm 1**'de literatür özeti ve çalışmanın amacından bahsedilmiştir. **Bölüm 2**'de kompozit malzemeler ve kompozit malzeme üretim yöntemleri anlatılmıştır. **Bölüm 3**'de kırılma mekaniğinin lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) yaklaşımları hakkında bilgi verilmiştir. **Bölüm 4**'te mekanik özelliklerin belirlenmesi ve kırılma tokluk deneylerinden bahsedilmiştir. **Bölüm 5**'te deneysel olarak bulunan kırılma tokluk değerlerinin ANSYS sonlu elemanlar paket programındaki nümerik analizinden bahsedilmiş ve sonuçları tablolar halinde verilmiştir. **Bölüm 6**'da ise deneysel ve nümerik olarak bulunan sonuçlar grafik olarak verilmiş ve tüm malzemelerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

1.3 Destekleyenler

Bu tez Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2012/TP018 proje numarası ile desteklenmiştir. Dokuma cam kumaşlar Emsal Boya Kimya Poliester San. Dış Ticaret Ltd. Şti. tarafından, dokuma karbon kumaşlar ise Spinteks Tekstil İnşaat San. Ve Tic. Şti. tarafından temin edilmiştir. Kırılma tokluğu deney numuneleri Uşak Seramik Fabrikasında bulunan su jeti ile kesilmiştir. Tabakalı ve hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma tokluklarını belirlemek için Uşak Pull-Tech FRP Mekanik Test Laboratuvarında bulunan U-Test marka universal çekme-basma test cihazı kullanılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Giriş

Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla malzemenin istenen özellikleri elde etmek amacıyla belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilmesiyle meydana gelirler. Cam fiber takviyeli polyster levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, otomobil lastikleri ve metal-seramik karışımı sermentler kompozit malzemelere örnek olarak verilebilirler.

Kompozit malzemeler, genellikle matris ve fiberden oluşur. Fiber, kompozit malzemenin mukavemetini ve yük taşıma kabiliyetini sağlar. Matris ise plastik deformasyona geçişte çatlak ilerlemesini önleyici bir rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Ayrıca matris, fiberleri bir arada tutarak yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktadır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

2.2.1 Kompozit Malzemelerin Olumlu Yanları

Kompozit malzemelerin oldukça fazla olumlu yanları olmasına karşın en temel avantajları yüksek mukavemet, hafiflik, ısıya dayanıklılık, kolay şekillendirilebilme ve titreşim sönümlemesidir. Bir kompozit yapıda bu özelliklerin tümünün bir arada olması mümkün değildir.

2.2.2 Kompozit Malzemelerin Olumsuz Yanları

Kompozit malzemeler bünyelerinde yer alan fiber ve matrisin özelliklerine göre özellik kazanmakta veya kaybetmektedirler. Örneğin, kompozit malzemenin içerisindeki matrisin yüksek sıcaklıklara dayanmaması kompozit malzemenin de

yüksek sıcaklıklara dayanmaması anlamına gelmektedir. Kompozit malzemelerin içerisinde, üretim nedeniyle oluşan hava zerrecikleri onların yorulma dayanımlarını olumsuz etkilemektedir. Kompozit malzemeler fiberin yönüne bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir. Özellikle tabakalı kompozit malzemelerde kesme, çekme ve basma gibi yüklemelerde tabakalar arasında ayrılma ve delaminasyon olabilmektedir. Kompozit malzemelerin tamiri metalik malzemelere göre daha zor olup kompozit malzemelerde tespit edilemeyen hasarlar oluşabilmektedir.

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

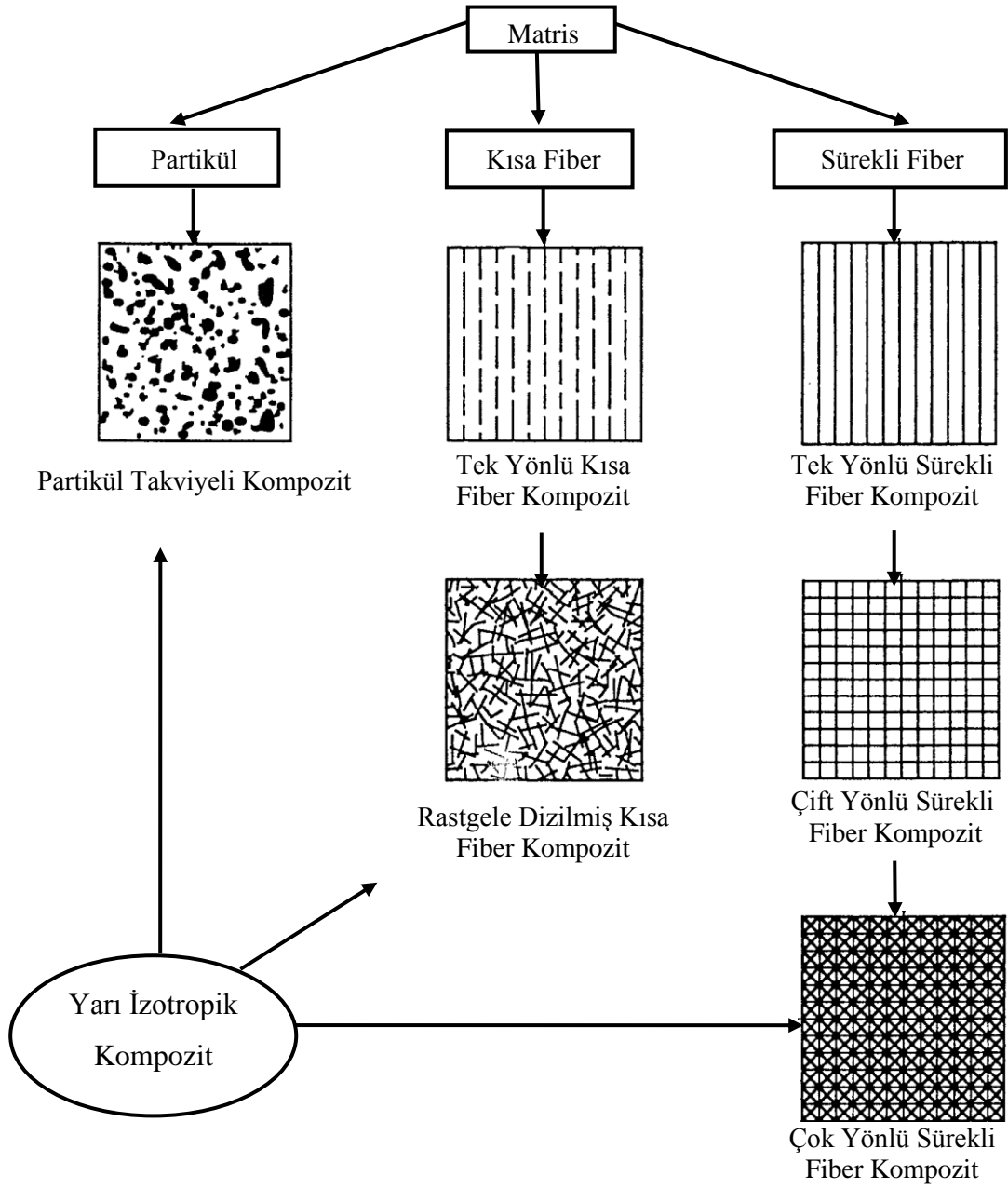
Kompozit malzemeler kendisini oluşturan matris ve fiber fazlarının tipine, geometrisine ve fiber oryantasyonuna bağlı olarak üç genel kategoriye ayrılır (Şekil 2.1).

2.3.1 *Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler*

Fiber takviyeli kompozitler, ince fiberlerin matris içinde yer almasıyla meydana gelirler. Fiberlerin matris içindeki yerleşimi kompozit yapının dayanımını etkiler. Uzun fiberlerin matris içinde birbirlerine paralel yerleştirilmeleri ile fiber doğrultusunda yüksek dayanım sağlanırken, fibere dik doğrultuda oldukça düşük dayanım elde edilir. Çift yönde yerleştirilmiş fiberlerde iki yönde de dayanım sağlanabilir. Matris içerisinde homojen dağılmış kısa fiberler ile izotropik bir yapı oluşturulabilir.

Fiberlerin mukavemeti ve fiber oryantasyonu (dizilimi) kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca fiberlerin uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından fiberlere iletilen yük miktarı artmaktadır.

Fiber ile matris arasındaki bağ kompozit malzemenin dayanımını önemli ölçüde etkiler. Matris fiber ara yüzeyinde boşluk varsa fiberlerle matrisin teması azalacak ve kompozitin dayanımı olumsuz etkilenecektir.



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [22]

- **Sürekli veya kısa fiberli kompozitler:** Bu tip kompozitler takviye elemanı olarak bünyelerinde kısa veya kırılmış fiber bulundururlar. Kısa fiberler çaplarına oranla oldukça uzundur. Kısa fiberler matris içinde tek yönde bulunabilecekleri gibi, geliş güzel yerleşmiş de olabilirler. Bu tür kompozitler öncelikle anizotropik veya ortotropik yapı eğiliminde olup yarı izotropik yapıda da olabilirler [22].

- **Sürekli fiber kompozitler:** Bu tür kompozitler sürekli fiber içermektedirler. Mukavemetleri ve rijitlikleri oldukça yüksektir. Sürekli fiberler tek yönde yerleşebilecekleri gibi birbirlerine dik iki ana yönde ve farklı yönlerde yerleşebilirler [22].

2.3.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilir. İzotrop yapılardır. Yapının sertliği parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir [1].

2.3.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

En eski ve yaygın kullanım alanına sahip olan tabakalı kompozitler, ısıya ve neme dayanıklı yapılardır. Farklı yönlerdeki fiber dizilimleri ile yüksek dayanım elde edilebilir. Tabakalı kompozit malzemeler metallere kıyasla hafif ve dayanıklı olmaları sebebi ile tercih edilirler. Bu özelliklerinden dolayı özellikle uçak ve otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Tabakalı kompozitlerin üretiminde haddeleme, presleme, ekstrüzyon, sıcak lehim gibi yöntemler kullanılmaktadır.

2.3.4 Hibrit Kompozit Malzemeler

Yeni tip kompozit malzemelerin gelişmesi için kullanılan hibrit kompozit malzemeler iki veya daha fazla fiber çeşidinin bir arada uygulanması ile elde edilen kompozit malzemelerdir. Grafit basma dayanımı yüksek pahalı bir fiberdir. Kevlar ise basma dayanımı düşük, tokluğu yüksek ve ucuz bir fiberdir. Bu iki fiberi kullanarak elde edilen hibrid kompozit malzemenin tokluğu grafitte göre daha iyi olup maliyeti daha düşük ve basma dayanımı ise kevlarlara göre daha yüksektir.

Hibrit kompozitler;

- i. İki ya da daha fazla tabaka içeren kompozit malzemelerde her bir tabakada farklı fiberler kullanılarak,
- ii. İki ya da daha fazla fiberin aynı tabakada yer almasıyla,
- iii. Metal ve polimer matrisli tabakalar gibi farklı kompozit yapılar kullanılarak meydana gelebilirler.

2.4 Matris Malzemeler

Kompozit malzemelerin bir bileşeni olan matrislerin; fiberleri bir arada tutmak, üretim ve kullanım sırasında oluşan hasarlara karşı kompoziti korumak ve yükü fiberlere dağıtmak gibi görevleri vardır. Fiberlere kıyasla daha düşük mekanik özelliklere sahip olsa da matris kompozit malzemenin ısıl direnç, ısıl genleşme katsayısı, yorulma dayanımı, basma dayanımı gibi birçok mekanik özelliğini etkiler.

Matrisler önce düşük viskoziteli olup daha sonra fiberleri uygun şekilde çevreleyebilmek için katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan fiberlerin fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrislerin mekanik özelliklerinin rolü büyüktür. Örneğin matrisler olmaksızın bir fiber demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç fiber tarafından taşınacaktır. Matrislerin varlığı ise yükün tüm fiberlere eşit olarak dağılımını sağlayacaktır [1].

Matrislerin kesme mukavemeti ve matris ile fiber arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise fiber ya da matriste oluşacak bir çatlak yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, fiberler boşluktaki bir fiber demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise fiber veya matriste başlayan bir çatlak fiber doğrultusunda ilerler. Bu durumdaki kompozitler sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler [1].

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri genel itibariyle metaller, seramikler ve polimerlerdir. Polimer esaslı matris malzemelerin en çok kullanılanları ise epoksi, polyester, vinilester, fenolik ve silikon reçinelerdir. Yüksek mukavemet gerektirmeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinedir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçine kullanılmaktadır [1].

2.4.1 Epoksi Reçineler

Genellikle iki bileşenli olan epoksiler sıvı halde olup belli bir süre sonra sıvı halden katı hale geçer. Epoksi reçine yapıştırma, koruyucu kaplama ve taşıyıcı malzeme olarak kullanılabilir. Epoksi reçine, yüksek aşınma direncine, yüksek ve düşük sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine, fiberlerle yüksek bağ kurabilme gibi özelliklere sahiptir. Uçucu olmayan ve kimyasal direnci yüksek olan epoksi reçine, nem, ısı ve çarpmalara karşı dayanıklı olup esnek bir yapıya sahiptir. Yüksek viskoziteye sahip olmamaları ve pahalı olmaları epoksi reçinelerin dezavantajlarını oluştururlar.

Cam veya karbon fiber ile kullanıldıklarında elde edilen kompozit malzemenin dayanımı oldukça yüksektir. Bu sebeple özellikle uzay, havacılık ve denizcilik gibi sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmuştur.

2.4.2 Polyester Reçineler

Polyester reçineler soğuk ve rutubete duyarlı, koyu kıvamlı ve zor akan, neredeyse renksiz sıvılardır. İki bileşenli bir reçine olup, sertleşmesi için MEEK gibi sertleştirici maddelere ihtiyaç duyulur. Polyester reçinelerin sertleşme süreleri içlerine eklenen sertleştirici katalizörlerin karışım oranına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Eğer oda sıcaklığında sertleştirme yapılırsa kobalt gibi hızlandırıcı ek maddelere ihtiyaç duyulur.

2.4.3 Vinilester Reçineler

Vinilester reçineler polyester reçinelere benzerler. Fiber ve matris arasında kuvvetli bir bağ kurarlar. Korozif ortamlarda kullanıma uygundur. Vinilester reçineler yüksek kimyasal dayanıma ve mekanik özelliklere sahiptir. Vinilester reçinelerin asitlere, bazlara ve suya karşı direnci yüksektir.

Epoksi, polyester ve vinilester reçinelerin maksimum çekme dayanımı ve elastisite modülleri karşılaştırıldığında (Tablo 2.1) her iki özelliğin epoksi reçinelerde daha yüksek polyester reçinelerde ise daha düşük olduğu görülebilir.

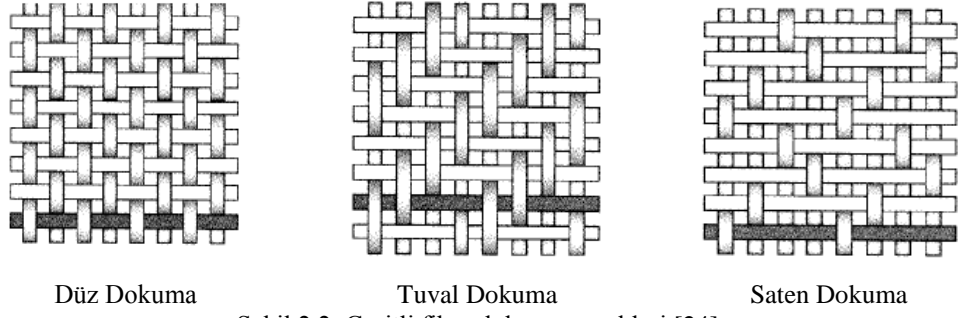
Tablo 2.1. Polimer matris malzemelerin mekanik özellikleri [23]

	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
Epoksi	90-110	3,5-7,0
Polyester	45-90	2,5-4,0
Vinilester	90	4,0

2.5 Fiber Malzemeleri

Fiberler kompozit malzeme üretiminde matris içinde yükü asıl taşıyan ve dayanımı sağlayan takviye elemanlarıdır. Fiberler hafif olmalarının yanı sıra yüksek elastisite modülü ve yüksek sertliğe sahip olup kimyasal korozyona karşı dirençlidirler.

Günümüzde kompozit malzeme üretiminde çeşitli boyut ve şekillerde kullanılan birçok fiber tipi vardır. Fiberler yönlendikleri doğrultuda yüksek mukavemete sahiptirler. Bu nedenle kompozit malzemelerin her iki yönde de mukavemetlerini arttırmak için fiberler kumaş halinde dokunurlar. Kullanım amacına göre bu fiberler şekil 2.2'deki gibi farklı şekillerde dokunabilirler.



Şekil 2.2. Çeşitli fiber dokuma örnekleri [24]

Fiberler kompozit malzemelerde mekanik özelliği doğrudan ve önemli derecede etkiler. Bu sebeple kullanım yerine göre fiber seçimi yapmak önemlidir.

Fiberlerin oryantasyon dizilimleri daha fazla yükü karşılayabilmek için önemlidir. Fiberler iki ya da daha fazla yönde yönelmişse bu yönlerdeki yüklemelerde dayanım daha iyi olacaktır.

Fiberler uzun ya da kısa olabilir. Uzun ve sürekli fiberlerin imalatı, kısa fiberlerin imalatı ile kıyaslandığında imalatlarının daha kolay ve daha stabil olduğu görülür. Ancak kısa fiberler imalat sürelerinin düşük olması, maliyetlerinin az olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilirler.

2.5.1 Cam Fiberler

Cam fiberler, kompozit malzemelerin üretiminde en çok kullanılan malzemelerdir. Uygun mekanik özellikleri ve ucuz olmasından dolayı kompozit üretiminde önemli bir yer tutmaktadırlar.

Cam fiberler, üretim aşamasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar. Cam lifi üretiminde kullanılan camın cinsi, işlem sıcaklığı, camın viskozitesi, çekme hızı, üretim yöntemleri gibi etkenlere bağlı olarak farklı tür ve çaplarda cam lifleri üretilmektedir [1].

Cam fiberlerin A camı, C camı ve E camı gibi çeşitleri mevcuttur. A camı; pencere ve şişelerde en çok kullanılan cam fiber çeşididir. C camı; yüksek kimyasal direnç gösterir ve depolama tankları gibi yerlerde kullanılır. E camı ise takviye elemanlarının üretiminde en çok kullanılan cam türü olup düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı gibi özelliklere sahiptir [1].

2.5.2 Karbon Fiberler

Karbon fiberler, hafiflikleri, çekme dayanımının ve elastisite modülünün yüksek olması gibi özelliklerinden dolayı en çok kullanılan fiberlerden biridir. Özellikle uzay ve havacılık sektörlerindeki ihtiyacı karşılamak için gerekli olan dayanım ve mekanik özellikler karbon fiberde mevcuttur.

Karbon fiberlerin pahalı olması ve basma dayanımlarının düşük olması gibi dezavantajlarının yanında yüksek çekme dayanımı, hafiflik, yüksek ısı iletkenliği, düşük ısı genleşme katsayısı gibi özelliklere sahiptirler.

2.6 Polimer esaslı kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

2.6.1 Islak Kalıplama

Islak kalıplama tek yüzü düzgün, küçük çapta üretim için uygundur. Genellikle cam takviyeli plastik (CTP) kalıp kullanılır. Kalıp yüzeyi ile temas eden CTP yüzeyi düzgün, diğer yüzey pürüzlü olur. Genellikle 2-10mm arasındaki kalınlıklar için bu yöntem kullanılır. Büyük boyutlu parçalarda kalınlık daha fazla olabilir, ancak 2mm'nin altında kalıplama tavsiye edilmez [25].

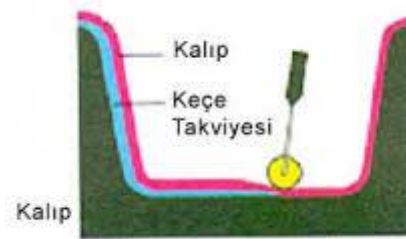
Genellikle tekne, oto kaportası, cephe kaplama elemanları, depo ve tank gibi ürünlerin yapımında kullanılan bu kalıplama yöntemi el yatırma ve püskürtme yöntemi gibi iki teknikte yapılır.

Kalıp hazırlama ve jelkot uygulaması her iki teknik içinde aynıdır. Kalıp, öncelikle silikonsuz kalıp ayırıcısı (vaks) ile parlatılır ve ardından jelkot uygulanır.

Jelkot uygulaması fırça ile veya püskürtme ile yapılabilir. Toplam jelkot kalınlığı 0,3-0,6mm (400-500gr/mm²) civarında olmalıdır [25].

a. El yatırma yöntemi

En basit üretim yöntemlerinden biridir. Genellikle keçe veya dokuma biçimli fiberler, daha önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilir (Şekil 2.3) ve daha sonra matrisi oluşturan reçine fırça gibi basit el aletleriyle fiberin üzerine sürülür. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir. Böylece tabakalı kompozit üretilmiş olur. Bu yöntemde en uygun reçineler; polyester ve epoksidir. Tutuşmayı engellemek, hafiflik elde etmek, görünümü güzelleştirmek gibi nedenlerden dolayı reçineye değişik dolgu maddeleri katılmaktadır. Reçinelerin kalıp yüzeyine yapışmaması için polivinil alkol (PVA), silikon, madeni yağlar ve vaks gibi kalıp ayırıcılar kullanılır [22].



Şekil 2.3. El yatırma yönteminin şematik gösterimi [22]

Fiber reçine oranı %30'lara varan kompozit üretimi yapılabilir, daha fazla fiber hacim oranı için prepregler kullanılır. Prepregler polimer reçine ile doyurulmuş sürekli fiberden oluşan ve kısmen kurutulmuş kompozitlerdir. Prepregler özellikle uçak ve uzay sanayisinde kullanılırlar, maliyetleri yüksek olduğundan az sayıda parçanın üretimine uygundur. El yatırma yönteminin imalat aşamaları aşağıdaki gibidir.

- ✓ Kalıp silindikten sonra birinci kalıp ayırıcı olarak vaks sürülür.
- ✓ Süngerle ikinci kalıp ayırıcı olarak PVA sürülür.
- ✓ Fırçayla viskozitesi yüksek jelkot sürülür.
- ✓ Takviye elemanı olarak kullanılacak fiber hazırlanır.

- ✓ Reçine hazırlanarak dolgu maddeleri katılır.
- ✓ Jelkot üzerine fırça ile reçine sürüldükten sonra keçe veya kumaş şeklindeki fiber yerleştirilir ve fırça darbeleriyle reçine emdirilir.
- ✓ Rulo ile hava kabarcıkları çıkarılır.
- ✓ İstenilen kalınlığa ulaşmaya kadar tüm bu işlemler tekrarlanarak sertleştirilmeye bırakılır ve mamul kalıptan çıkarılır [22].

b. Püskürtme yöntemi

Yöntem olarak el yatırma yöntemine benzemektedir. El yatırma yönteminin biraz daha makineleşmiş halidir. Daha fazla ürün elde etmek için kullanılır. El yatırma yönteminde olduğu gibi kalıp hazırlanır, üzerine vaks sürülür, ikinci kat olarak PVA kuruyan vaksın üzerine sürülür. Üretilecek malzemeye göre hazırlanan reçine, hızlandırıcı, sertleştirici ve fiber karışımı özel tabancalar yardımı ile kalıp üzerine püskürtülür. Püskürtme sırasında tabanca, fiberleri istenen boylarda keserek reçine ile birlikte kalıbın üzerine püskürtür. Püskürtme işlemi yüzeye dik olarak yapılmalı ve böylece malzeme israfı önlenmelidir. Tabanca ile malzeme püskürtme işleminde önemli olan malzeme kalınlığının homojen olması ve hava kabarcığı oluşmasının engellenmesidir. Eğer daha kalın malzemeler elde edilmek isteniyorsa hava kabarcıkları rulolar yardımıyla çıkarıldıktan sonra ikinci katın atılması gerekir [25].

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

KIRILMA MEKANİĞİ

3.1 Giriş

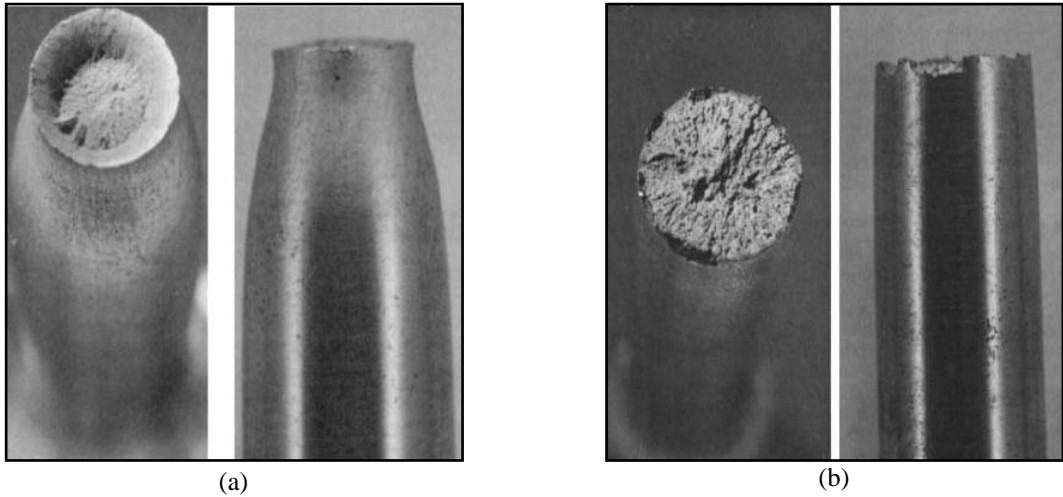
Kırılma, katı bir cismin gerilme altında iki ya da daha fazla parçaya ayrılması olayıdır. Kırılma; çatlak oluşması, çatlağın ilerlemesi ve malzemenin tamamen yük taşıma kabiliyetini kaybetmesidir.

Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki kusurlar iki tip hasar için de çok önemlidir, fakat aralarında önemli farklar vardır. Akmayla oluşan hasarda önemli olan kusurlar, kristal kafes düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen kusurlardır. Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan kusurlar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel bir plastik deformasyon değil, kusurlarla bağıntılı olan yerel gerilme-şekil değiştirme alanları söz konusudur. Örneğin malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları gibi [3].

Kırılma; sünek ve gevrek kırılma olarak iki grupta incelenir. Sünek kırılma da çatlak oluşması ve ilerlemesi sırasında önemli ölçüde kalıcı şekil değişimi meydana gelir ve çatlak yavaş ilerler. Kırılma yüzeyi şekil 3.1a'da görüldüğü gibi mat ve liflidir. Gevrek kırılmada ise kalıcı şekil değişimi çok az olmakta ve çatlak hızlı ilerlemektedir. Kırılma yüzeyi şekil 3.1b'deki gibi parlak ve taneli bir görünümdeydir. Gevrek kırılma önceden fark edilemediği için en tehlikeli olan kırılma tipidir ve felaketlerle sonuçlanan hasarlara sebep olabilir.

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir. Kırılma mekaniğinin amacı ise, çatlaklar, çentikler ve delikler gibi gerilme yoğunluğunu artıran hataları inceleyerek gerçek problemlere çözüm aramaktır [3].

Kırılma mekaniği kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk analizi Griffith tarafından camlardaki çatlak ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüş olup gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olduğunu ve bu enerjinin de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjiye eşit olduğunu ifade etmiştir [3].



Şekil 3.1. Metalik malzemelerde (a) sünek ve (b) gevrek kırılma yüzeyleri [27]

Genel olarak, malzemenin genişliği ve çatlak ucundaki ölçüleri plastik bölgeye göre yeterince büyükse, büyüme başlangıcındaki gerilme şiddet faktörü (K) değeri sabittir ve bu onun minimum değeridir. Bu tanım düzlem şekil değiştirme tokluk faktörü olarak adlandırılır ve malzemenin K_I değeridir. K_I özellikle malzeme seçiminde önemli bir faktördür çünkü tokluğun diğer ölçülerinden farklı olarak malzemenin şeklinden bağımsızdır [3].

Daha sonra Irwin G ile sembolize edilen bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorblanan toplam enerjidir. G , şekil değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır ve kritik bir değere ulaştığında kırılma başlar. Bu değere kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı (G_C) denir [3].

Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Irwin gerilme şiddet faktörü

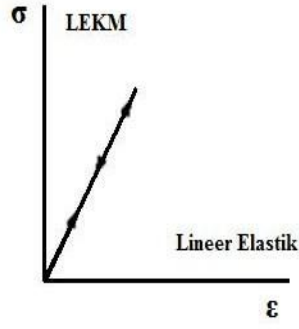
(G_{SF}) diye bilinen yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlak yeri ve çatlak oryantasyonuna bağlıdır. Buna göre çatlak ağzında gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü veya yoğunluğu (K_C) ortaya çıkmış olur [3].

Şekil değiştirme enerji boşalma miktarı (G) ve düzlem şekil değiştirme tokluk faktörü (K) Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturmuştur. Çünkü tüm malzemeler için, çatlak ucundaki ve yakınındaki gerilme dağılımı her zaman aynıdır. Dolayısıyla K_C 'nin bilinmesiyle belirli şartlar altında malzemede hangi kusurlara izin verilebileceği saptanabilir. Bu yaklaşımla malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir [3].

LEKM; çatlak ağzında sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olup çatlak ağzında önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. EPKM yaklaşımında kırılma tokluğu, J-integral, R-eğrisi veya çatlak ağzı açılma miktarı (CTOD) cinsinden ifade edilebilir [3].

3.2 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)

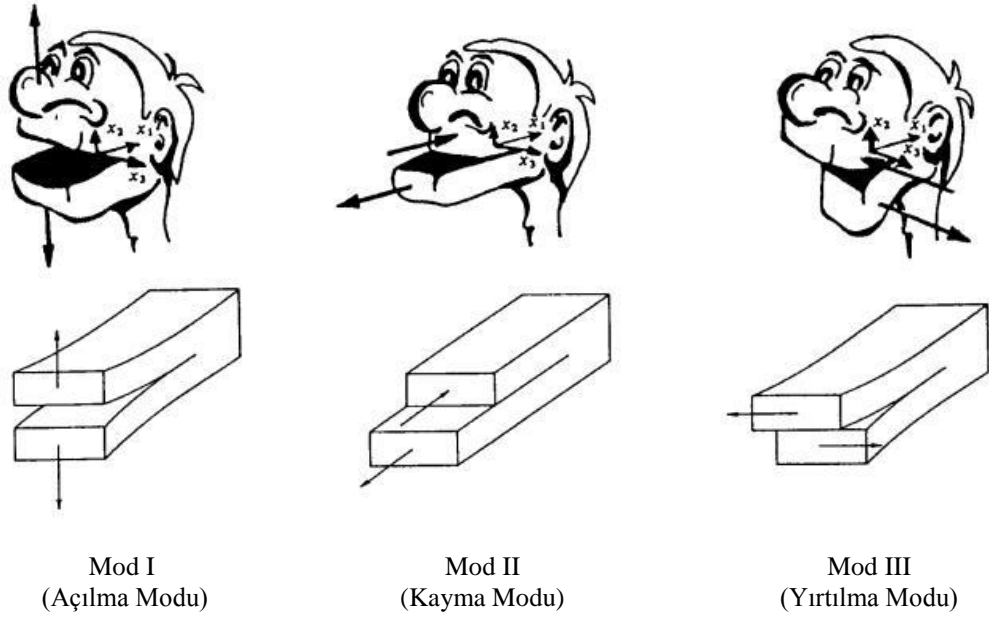
Lineer elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) malzeme izotropik ve lineer elastik kabul edilir (Şekil 3.2). Malzeme özellikleri, young modülü ve Poisson oranı olarak iki bağımsız elastik sabite sahiptir. LEKM yaklaşımında çatlak ucundaki gerilme alanı elastisite teorisi dikkate alınarak hesaplanır [26].



Şekil 3.2. LEKM gerilme-şekil değiştirme eğrisi [26]

3.2.1 Kırılma Modları

Elastik cisimlerde çatlakın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür (Şekil 3.3) [3].



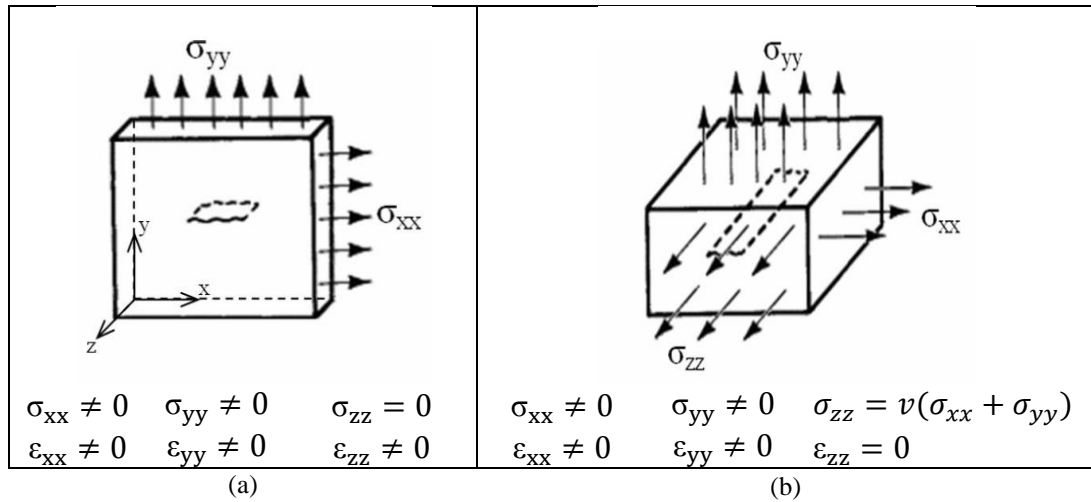
Şekil 3.3. Kırılma modları [27]

Açılma modunda (Mod I) iki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve dik olarak ayrılır. Kayma modunda (Mod II) çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. Yırtılma modunda ise (Mod III) çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak ucundaki bir doğru ile paralel yönde kayarlar. Bu kırılma modlarından biri ya da farklı kombinasyonları

bir arada olabilir. Bu şekilde oluşan kırılma modlarına karışık mod denir. LEKM’de çoğu formüller şekil 3.4’deki düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme şartları göz önüne alınarak elde edilir [3,28].

- **Düzlem gerilme durumu:** Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince bir numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z yönünde yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_{zz} = 0$), çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur (Şekil 3.4a).

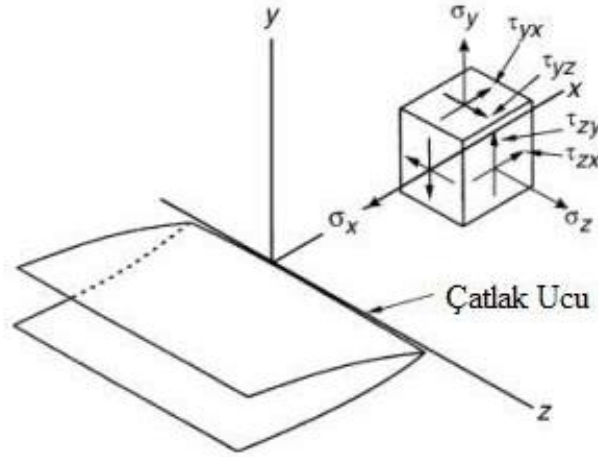
- **Düzlem şekil değiştirme durumu:** Kalın numunelerde numune yüzeylerinde düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. z yönünde numunenin içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak şekil değiştirme x ve y düzlemlerinde iki boyuttadır ($\epsilon_{zz} = 0$). Bu durumda da düzlem şekil değiştirme hali söz konusudur (Şekil 3.4b) [3].



Şekil 3.4. İki eksenli çekme gerilmeleri altındaki numunelerin (a) düzlem gerilme ve (b) düzlem şekil değiştirme şartları [26]

3.2.2 Çatlak Ucundaki Gerilme Ve Yer Değiştirme Bileşenleri

İzotropik ve lineer elastik malzemeler için çatlak ucundaki gerilme (Şekil 3.5) ve yer değiştirme bileşenleri tüm kırılma modları için aşağıdaki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3.5. Çatlak ucu gerilme dağılımı [28]

Mod I için gerilmeler [27];

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} 0 & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & \text{(Düzlem Şekil Değişirme)} \end{cases}$$

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

Mod I için yer değiştirmeler [27];

$$\begin{aligned}
 u_x &= \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 u_y &= \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 u_z &= \begin{cases} -\frac{\nu z}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ 0 & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme)} \end{cases} \quad (3.2) \\
 \kappa &= \begin{cases} \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ 3 - 4\nu & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme)} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Mod II için gerilmeler [27];

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{zz} &= \begin{cases} 0 & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme)} \end{cases} \\
 \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Mod II için yer değiştirmeler [27];

$$\begin{aligned}
 u_x &= \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\kappa + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 u_y &= \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\kappa - 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 u_z &= \begin{cases} -\frac{\nu z}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ 0 & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme)} \end{cases} \quad (3.4) \\
 \kappa &= \begin{cases} \frac{3-\nu}{1+\nu} & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ 3-4\nu & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme)} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Mod III için gerilmeler [27];

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= 0 \\
 \sigma_{yy} &= 0 \\
 \tau_{xy} &= 0 \\
 \sigma_{zz} &= 0 \\
 \tau_{xz} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}
 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Mod III için yer değiştirmeler [27];

$$\begin{aligned}
 u_x &= 0 \\
 u_y &= 0 \\
 u_z &= \frac{K_{III}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2}
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3 Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM)

LEKM sadece çatlak ucu etrafında küçük bir bölge ile sınırlandırılan lineer olmayan bir malzemenin şekil değişiminde geçerlidir. Pek çok malzemenin kırılma davranışını LEKM ile modellemek imkansızdır ve alternatif kırılma metotları gerekmektedir [3].

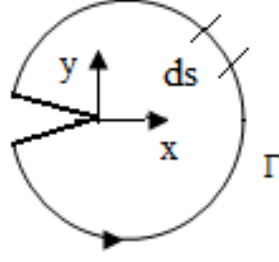
EPKM zamana bağlı lineer davranış göstermeyen malzemelerde kullanılır. Elastik-plastik davranışı karakterize eden parametreler çatlak ucu açılma miktarı (COD) ve J-integrali metodudur [5].

3.3.1 J-İntegral Metodu

Çatlak merkezinden çıkarılan enerji olarak tanımlanan J-integral ilk olarak Rice tarafından ortaya atılmıştır. Enerjinin korunumu ilkesine dayanarak belli bir sayıda J-integral yörüngesi iki boyutlu olarak tanımlanır. Bu kapalı yörüngelerin iki boyutlu integralleri denklem (3.7)'deki gibidir [11].

$$J = \oint_{\Gamma} \left(w dy - t \frac{\partial u}{\partial x} d\Gamma \right) \quad (3.7)$$
$$w = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

Burada; w; şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu, Γ ; şekil 3.6'da gösterildiği gibi saatin tersi yönünde kapalı bir yörüngeyi, t; çatlak çevresindeki yörünge üzerinde dışa doğru çekme vektörünü u; deplasman vektörünü ve $d\Gamma$; Γ yörüngesi üzerindeki yay elemanını göstermektedir [11].



Şekil 3.6. Çatlak etrafındaki J-integral tanımı

Farklı çatlak boylarına sahip yüklenmiş iki özdeş elemanın, potansiyel enerji farkı olarak tanımlanması durumunda J-integralin formülasyonu denklem (3.8)'deki gibi olmaktadır [11].

$$J = \frac{\partial U_0}{\partial a} = G = \frac{K^2}{E'} \quad (3.8)$$

$$E' = \begin{cases} E & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ \frac{E}{1 - \nu^2} & \text{(Düzlem Şekil Değişirme)} \end{cases}$$

Burada; U; potansiyel enerji farkını, a; çatlak uzunluğunu, G; şekil değiştirme enerjisi boşalma oranını ve K; gerilme şiddet faktörünü ifade etmektedir [11].

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Giriş

Bu bölüm; çalışmanın deneysel kısmını oluşturmakta olup üç alt bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümde ASTM standartlarına göre kesilmiş test numunelerinin fiber, fibere dik ve fibere 45° yöndeki mekanik özelliklerinin belirlenmesinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde 25x150mm² boyutlarında kesilen numunelerin farklı çatlak boyu, farklı çatlak açısı ve farklı çatlak konumu için kırılma tokluklarının belirlenmesi anlatılmıştır. Son bölümde ise deneysel olarak bulunan maksimum gerilmeler ve kırılma toklukları tablolar halinde sunulmuştur.

Deneysel çalışmada kullanılan fiber takviyeli tabakalı kompozit levhalarda, takviye elemanı olarak dokuma cam ve dokuma karbon kumaşlar ile matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Dokuma cam ve dokuma karbon kumaşlar 200gr/m² ağırlığındadır. Matris malzemesi DTE 1100 epoksi ve DST 1105 sertleştirici olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Tabakalı kompozitlerin her bir metrekaresi için 800gr reçine kullanılmış olup reçine ağırlıkça %74 epoksi ve %26 sertleştiriciden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar için 8 tabakalı cam/epoksi (C₈), cam-karbon/epoksi (C₂K₄C₂), karbon-cam/epoksi (K₂C₄K₂) ve karbon/epoksi (K₈) olmak üzere toplamda dört farklı kompozit dizilimine sahip plakalar üretilmiştir.

El yatırma yöntemi ile hazırlanan dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit plakalar Uşak Üniversitesi Kompozit Üretim Laboratuvarında bulunan ısı ve zaman kontrollü hidrolik preste 105°C sıcaklık ve 8MPa basınç altında 100 dakika preslenerek üretilmiştir. Kompozit plakalarda ısıl çarpılma olmaması için plakalar aynı basınç altında oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.

Üretim sonunda dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit plakaların kalınlıkları ve fiber hacim oranları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kompozit plakaların kalınlık ve fiber hacim oranları

	C_8	$C_2K_4C_2$	$K_2C_4K_2$	K_8
Kalınlık (mm)	1,66	1,73	1,68	1,66
Fiber hacim oranı (% Ağırlık)	53	59	58	69

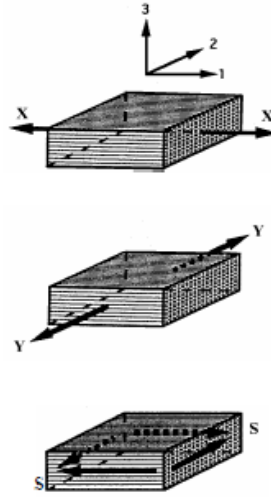
4.2 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Dokuma tipi C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 tabaka dizilimlerine sahip kompozit numunelerin 1mm/dak. çekme hızında mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM standartları kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan ASTM standartları Tablo 4.2’de verilmiş ve bu standartlara göre numuneler kesilmiştir. İlgili standartlara göre belirlenen mekanik özellikler, bu tabaka dizilimlerine sahip kompozit numunelerin kırılma tokluklarının nümerik olarak hesaplanabilmesi için gereklidir.

Tablo 4.2. Mekanik test numunelerinin geometrileri [29]

Mekanik Özellikler	Sembol	Geometri	Test Metodu
Fiber yönündeki elastisite modülü (MPa)	E_1		ASTM 3039-76
Poisson Oranı	ν_{12}		
Fiber yönündeki çekme dayanımı (MPa)	X_C		ASTM 3039-76
Fibere dik yöndeki elastisite modülü (MPa)	E_2		
Fibere dik yöndeki çekme dayanımı (MPa)	Y_C		ASTM 3519-76
Kayma modülü (MPa)	G_{12}		
Fiber yönündeki basma dayanımı (MPa)	X_B		ASTM 3410-87
Fibere dik yöndeki basma dayanımı (MPa)	Y_B		

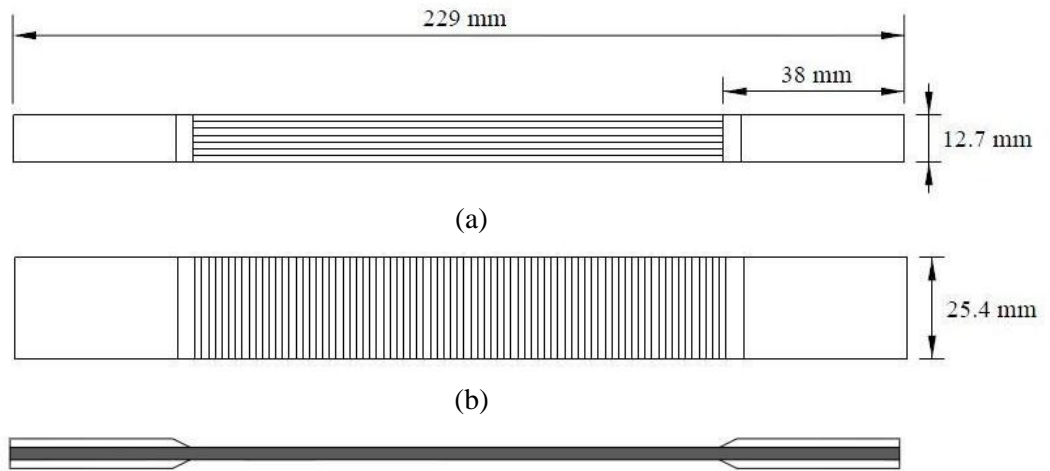
Mekanik özelliklerin belirlenmesinde şekil 4.1'deki koordinat sistemi dikkate alınmıştır. Fiber yönü 1, fibere dik 2 ve düzlem dışı yön 3 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tabakalı kompozitlerde koordinat sistemi [29]

4.2.1 Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi

Dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin E₁, E₂, ν₁₂, X_Ç ve Y_Ç özellikleri ASTM 3039-76 standardına göre belirlenmiştir. Şekil 4.2a'daki gibi fiber yönünde 12,7mm genişliğinde ve 229mm uzunluğunda kesilen numunelerden E₁, ν₁₂ ve X_Ç belirlenir. Şekil 4.2b'deki gibi fibere dik yönde 25,4mm genişliğinde ve 229mm uzunluğunda kesilen numunelerden ise E₂ ve Y_Ç belirlenir.



Şekil 4.2. Çekme testi numunelerinin (a) fiber yönündeki (E₁, ν₁₂ ve X_Ç) ve (b) fibere dik yöndeki (E₂ ve Y_Ç) geometri ve fiber yönlenmesi [30]

Çekme özelliklerinin belirlenmesi için numuneler UTEST üniversal çekme cihazında ve 1mm/dak. çekme hızında kopana kadar çekilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için indikatör ve mekanik ekstansiyometre kullanılmıştır. Kompozit numunelere bağlanan ekstansiyometreler numunelerin çekme esnasındaki uzama miktarlarını belirleyerek indikatöre yansıtır. Bilgisayardan okunan yük-uzama miktarlarına bağlı olarak E_1 ve E_2 belirlenir. X_C ve Y_C ise maksimum yüklerin numunelerin kesit alanına bölümü ile elde edilmiştir. Her bir seriden beşer numune teste tabi tutulmuş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Tablo 4.3'deki değerler elde edilmiştir.

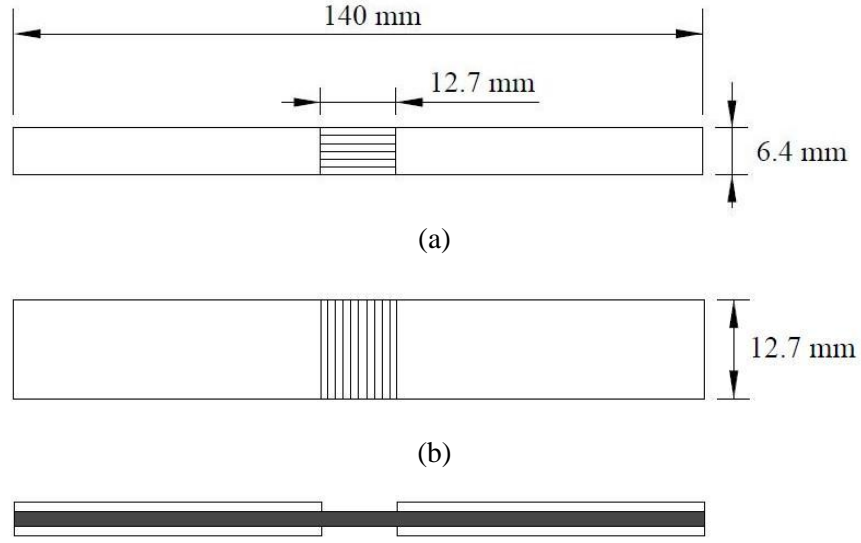
Tablo 4.3'deki verilere göre fiber yönünde ve fibere dik yönde en düşük ve sırasıyla C_8 ve K_8 tabaka dizilimine sahip numunelerde çıkmıştır. Hibrit tabakalı kompozitlerde ise en yüksek elastisite modülleri ve çekme dayanımları dokuma karbonların dış kısmında yer aldığı $K_2C_4K_2$ yapıda elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler

	C_8	$C_2K_4C_2$	$K_2C_4K_2$	K_8
E_1 (MPa)	33419	49853	51510	66629
E_2 (MPa)	32569	47926	50723	61733
X_C (MPa)	426,11	451,84	472,19	612,29
Y_C (MPa)	304,70	432,21	463,20	518,31

4.2.2 Basma Özelliklerinin Belirlenmesi

Dokuma tipi C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 tabaka dizilimine sahip kompozit numunelerin fiber yönündeki (X_B) ve fibere dik yöndeki (Y_B) basma dayanımları ASTM 3410-87 standardına göre belirlenmiştir. Şekil 4.3a'daki gibi fiber yönünde 6,4mm genişliğinde ve 140mm uzunluğunda kesilen numunelerden X_B belirlenmiştir. Şekil 4.3b'deki gibi fibere dik yönde 12,7mm genişliğinde ve 140mm uzunluğunda kesilen numunelerden ise Y_B belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Basma test numunelerinin (a) fiber yönündeki (X_B) ve (b) fibere dik yöndeki (Y_B) geometri ve fiber yönlenmesi [30]

Basma testlerinde, test cihazının çenelerinin küçük olması ve bası sırasında burkulmanın önlenmesi için standarda göre 140mm kesilmesi gereken numuneler 70mm uzunluğunda kesilmiştir. Basıya maruz kalan numunelerin, maksimum yük değerlerinin kesit alanlarına bölümü ile X_B ve Y_B hesaplanmıştır. Her bir seriden beşer numune test edilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Tablo 4.4'deki değerler elde edilmiştir. Tablo 4.4'deki verilere göre fiber yönünde ve fibere dik yönde en düşük ve en yüksek basma dayanımları sırasıyla C_8 ve K_8 numunelerinde çıkmıştır. Fiber yönünde ve fibere dik yöndeki basma dayanımları dış kısmı dokuma camdan üretilmiş hibrit kompozitlerde daha düşük çıkmıştır.

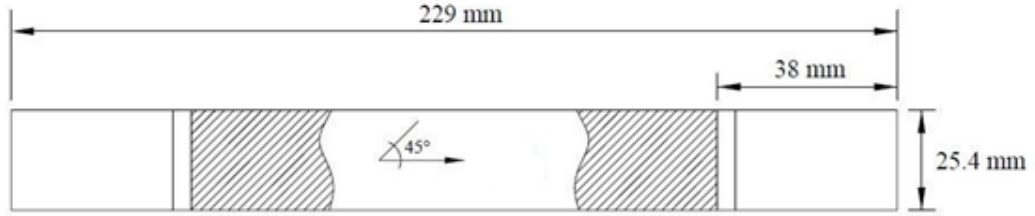
Tablo 4.4. Basma testleri sonucunda elde edilen basma dayanımları

	C_8	$C_2K_4C_2$	$K_2C_4K_2$	K_8
X_B (MPa)	166,83	172,87	179,26	185,25
Y_B (MPa)	151,54	163,80	167,52	169,55

4.2.3 Kayma Modüllerinin Belirlenmesi

Kayma modülünün (G_{12}) belirlenmesi için öncelikle 45° fiber yönüne sahip numunelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi gereklidir. Bunun için kompozit numuneler ASTM 3519-76 standardına göre 45° yönünde 25,4mm genişlik ve

229mm uzunluğunda kesilmiştir. Şekil 4.4'deki gibi kesilen numuneler 1mm/dak. çekme hızında çekme testine maruz bırakılmıştır. E_1 ve E_2 elastisite modüllerinin belirlenmesi sırasındaki işlemler uygulanarak E_{45} belirlenmiştir.



Şekil 4.4. 45° fiber yönündeki kayma modülünün geometri ve yönlenmesi[30]

G_{12} , denklem (4.1) kullanılarak E_1 , E_2 , E_{45} ve ν_{12} değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Denklem (4.1)'de, E_1 fiber yönündeki, E_2 fibere dik yöndeki, E_X fiberin 45° yönündeki elastisite modülünü ve ν_{12} ise Poisson oranını ifade eder. $\nu_{12}=0.3$ kabul edilerek G_{12} hesaplanmıştır [30].

$$G_{12} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_X} + \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right)} \quad (4.1)$$

C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 tabaka dizilimine sahip kompozitlerin kayma modülleri Tablo 4.5'de verilmiştir. Bu verilere göre en düşük ve en yüksek kayma modülleri sırasıyla C_8 ve K_8 numunelerinde elde edilmiştir. Hibrit tabakalı yapılarda ise en yüksek kayma modülü dokuma karbonların dış kısmında yer aldığı $K_2C_4K_2$ diziliminde elde edilmiştir.

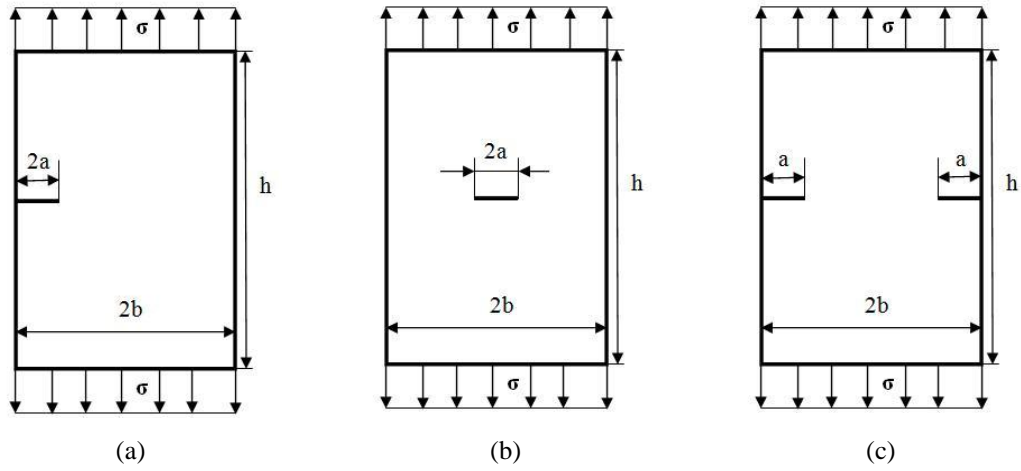
Tablo 4.5. Tabakalı kompozitlerde elde edilen kayma modülleri

	C_8	$C_2K_4C_2$	$K_2C_4K_2$	K_8
G_{12} (MPa)	2756	2943	3013	3274

4.3 Kırılma tokluklarının belirlenmesi

4.3.1 Kırılma Tokluğu Test Numunelerinin Hazırlanması

Dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numuneler Uşak Seramik Fabrikasında bulunan su jeti ile 25x150mm² boyutlarında kesilmiştir. Bu numunelere farklı konumlarda (tek kenar, çift kenar ve merkezi), farklı boylarda (4, 6 ve 8mm) ve farklı açılarda (0°, 30°, 45° ve 60°) çatlaklar açılmıştır (Şekil 4.5).

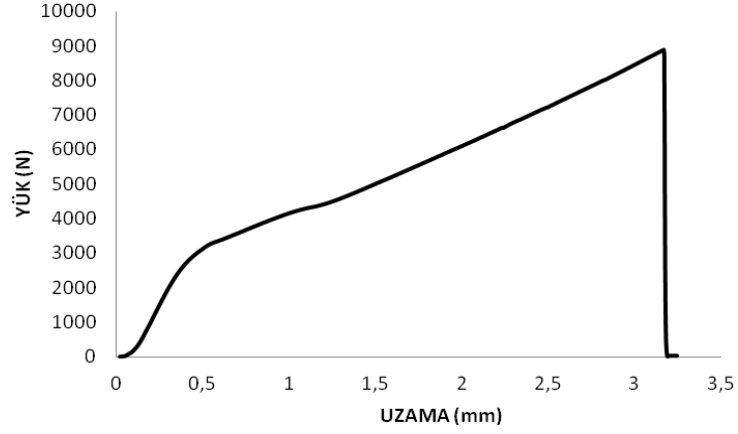


Şekil 4.5. (a) Merkezi çatlak (MÇ) (b) Tek kenar çatlak (TKÇ) ve (c) Çift kenar çatlak (ÇKÇ) şematik gösterimi

Kırılma tokluk deneyleri Pull-Tech FRP firması Mekanik Test Laboratuvarında 50kN kapasiteli UTEST universal çekme test cihazında 1mm/dak. çekme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için her bir seriden beşer numuneye çekme testi uygulanmış ve bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır.

Kırılma tokluk deneyleri sonucunda numunelerin yük-uzama grafikleri Şekil 4.6'daki gibi çizilerek çatlaklı numunelerin dayanabileceği maksimum yük değerleri belirlenmiştir. Bu yüke bağlı olarak malzemenin açılma modu için (Mod I) kırılma tokluğu değerleri denklem 4.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/b) \quad (4.2)$$



Şekil 4.6. Dokuma tipi kompozit numunelerin tipik yük-uzama grafiği

Burada a ; çatlak boyutunu, σ ; çekme deneyinde elde edilen maksimum yük değerinin numune kesit alanına oranını, $f(a/b)$ ise çatlak boyu ve numune genişliğine bağlı geometrik faktörü ifade eder. Geometrik faktör $f(a/b)$; tek kenar çatlakına sahip numune (TKÇ) için denklem (4.3), merkezi çatlakına sahip numune (MÇ) için denklem (4.4) ve çift kenar çatlakına sahip numune (ÇKÇ) için ise denklem (4.5) kullanılarak belirlenmiştir [31].

Tek kenar çatlakına sahip numune (TKÇ) için;

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1,122 - 0,231\left(\frac{a}{b}\right) + 10,55\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 21,71\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 30,832\left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (4.3)$$

Merkezi çatlakına sahip numune (MÇ) için;

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1 + 0,128\left(\frac{a}{b}\right) - 0,288\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1,525\left(\frac{a}{b}\right)^3 \quad (4.4)$$

Çift kenar çatlakına sahip numune (ÇKÇ) için;

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1,12 + 0,203\left(\frac{a}{b}\right) - 1,197\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1,93\left(\frac{a}{b}\right)^3 \quad (4.5)$$

Hesaplama da gerilme yığılma faktörünün kritik değeri (K_C) kırılma tokluğu (K_I) olarak alınmıştır [15,18,20].

Dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin maksimum yük değeri ve geometrik faktöre bağlı olarak hesaplanan kırılma tokluğu değerleri Tablo 4.6-4.9 arasında sırasıyla verilmiştir.

Tablo 4.6. Dokuma tipi C₈ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		σ	K _I	σ	K _I	σ	K _I
0	4	208,73	1084,75	243,09	955,25	243,27	1052,66
	6	172,14	1240,37	223,22	1066,80	224,99	1158,24
	8	126,80	1234,96	178,72	1000,27	180,03	1055,03
30	4	226,80	1051,76	252,67	919,99	-	-
	6	191,16	1194,03	203,69	897,00	-	-
	8	153,51	1251,06	184,99	944,96	-	-
45	4	230,75	923,84	257,31	842,89	272,99	994,93
	6	204,64	1069,00	223,87	882,70	233,66	1014,20
	8	157,91	1037,74	193,05	875,73	199,60	982,44
60	4	293,80	940,59	298,30	817,71	-	-
	6	232,90	936,50	246,38	809,68	-	-
	8	189,13	918,12	223,97	841,35	-	-

Tablo 4.7. Dokuma tipi C₂K₄C₂ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		σ	K _I	σ	K _I	σ	K _I
0	4	241,54	1255,27	283,01	1112,14	289,45	1252,48
	6	192,03	1383,69	234,47	1120,57	241,25	1241,95
	8	135,84	1324,13	214,00	1197,72	195,70	1146,90
30	4	247,97	1149,95	304,98	1110,48	-	-
	6	198,31	1238,95	260,60	1147,62	-	-
	8	172,09	1402,51	227,16	1160,40	-	-
45	4	271,61	1074,64	308,52	1010,61	331,34	1207,58
	6	246,52	1287,80	282,38	1113,39	288,11	1250,51
	8	174,17	1144,60	237,76	1078,58	244,03	1201,11
60	4	342,57	1096,72	316,26	866,92	-	-
	6	309,92	1246,20	310,31	1019,77	-	-
	8	212,05	1029,41	283,11	1063,51	-	-

Tablo 4.8. Dokuma tipi K₂C₄K₂ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		σ	K _I	σ	K _I	σ	K _I
0	4	260,75	1355,12	298,87	1174,47	321,78	392,35
	6	192,39	1386,31	256,53	1226,00	259,20	1334,38
	8	153,87	1499,84	228,54	1279,11	233,55	1368,70
30	4	270,14	1252,73	313,28	1140,70	-	-
	6	218,09	1362,25	258,55	1138,57	-	-
	8	167,61	1366,02	212,09	1083,39	-	-
45	4	287,66	1151,70	321,05	1051,67	347,47	1266,38
	6	247,85	1294,75	291,53	1149,45	303,34	1316,61
	8	196,53	1291,53	238,10	1080,12	278,37	1370,13
60	4	326,13	1044,09	359,61	985,76	-	-
	6	292,84	1177,51	314,15	1032,40	-	-
	8	223,12	1083,17	287,15	1078,70	-	-

Tablo 4.9. Dokuma tipi K₈ kompozit numunelerin maksimum yük (MPa) ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		σ	K _I	σ	K _I	σ	K _I
0	4	302,90	1574,18	306,95	1206,20	343,28	1485,39
	6	206,28	1486,39	274,96	1314,08	300,50	1546,96
	8	142,36	1387,62	250,06	1399,56	255,98	1500,15
30	4	342,99	1590,58	347,94	1266,88	-	-
	6	234,53	1464,94	306,00	1347,55	-	-
	8	174,81	1424,63	261,90	1337,85	-	-
45	4	380,77	1524,51	365,37	1196,84	443,68	1617,01
	6	277,04	1447,25	334,14	1317,48	349,44	1516,70
	8	217,32	1428,15	291,77	1323,58	310,06	1526,13
60	4	406,27	1300,64	378,25	1036,86	-	-
	6	260,60	1047,89	366,28	1204,05	-	-
	8	236,71	1149,12	321,90	1209,22	-	-

BEŞİNCİ BÖLÜM

KIRILMA TOKLUĞUNUN ANSYS 12 İLE BELİRLENMESİ

5.1 Giriş

Hibrit tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi için kullanılan deneysel numuneler ortotropik özelliğe sahiptir. ANSYS 12 sonlu elemanlar programında nümerik analiz için gerekli olan bu özellikler Bölüm 4'te deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kompozit numunelerin mekanik özellikleri

Özellik	C ₈	C ₂ K ₄ C ₂	K ₂ C ₄ K ₂	K ₈
E ₁ (MPa)	39419	49853	51510	66629
E ₂ (MPa)	38569	47926	50723	61733
E ₃ (MPa)	23142	28756	30434	37040
G ₁₂ (MPa)	2756	2943	3013	3274
G ₁₃ = G ₂₃ (MPa)	1654	1766	1808	1964
ν_{12}	0,3	0,3	0,3	0,3
$\nu_{13} = \nu_{23}$	0,18	0,18	0,18	0,18

Burada E₃, G₁₃, G₂₃, ν_{12} , ν_{13} ve ν_{23} değerleri deneysel olarak belirlenememiştir. ν_{12} , 12 düzlemindeki Poisson's oranı olup literatürdeki çalışmalara bakılarak 0,3 olarak kabul edilmiştir. E₃, G₁₃, G₂₃, ν_{13} ve ν_{23} değerleri ise denklem 5.1'e göre teorik olarak hesaplanmıştır [32-36].

$$\begin{aligned} E_3 &= 0,6 E_2 \\ G_{13} = G_{23} &= 0,6 G_{12} \\ \nu_{13} = \nu_{23} &= 0,6 \nu_{12} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Tabakalı kompozit malzemelerin kırılma toklukları ANSYS 12 sonlu elemanlar programı kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

5.2 Analiz Tipinin Belirlenmesi

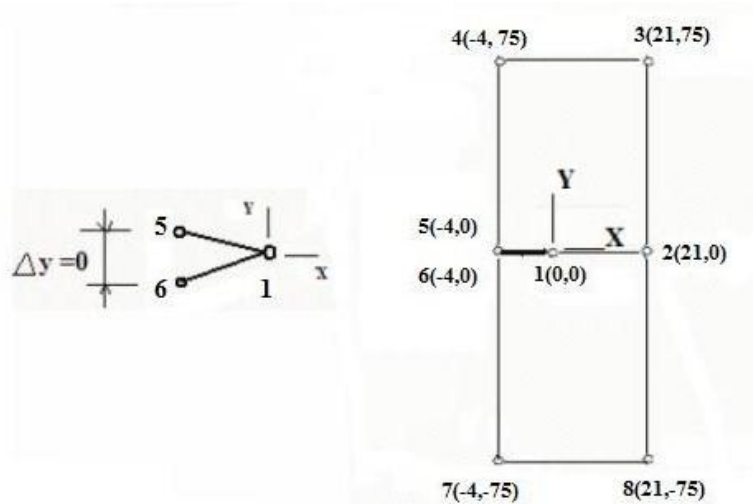
Problemimiz sadece gerilmelerle ilgili olduğu için içi Structural aktifleştirilir.

→ Main Menu > Preferences > Structural > Ok

5.3 Geometrik Modelin Oluşturulması

Geometrik model oluşturmadaki en temel yöntem noktalardan doğrular, doğrulardan alanlar oluşturmaktır. K ve J değerlerini belirlemek için eksen takımını çatlak ucuna yerleştireceğiz. Aksi takdirde K ve J hesabında çatlak ucunda lokal bir eksen tanımlamamız ve aktif hale getirmemiz gerekecek. Bu lokal eksenlerin yönleri uygun seçilmediği takdirde analizlerde problemler çıkabilmektedir. Bu gibi problemlerle karşılaşmamak için global eksen takımımızı çatlak ucuna yerleştirmek büyük bir kolaylık sağlar. X ekseninin çatlak açılma doğrultusunda olması gerekir (Şekil 5.1) [37].

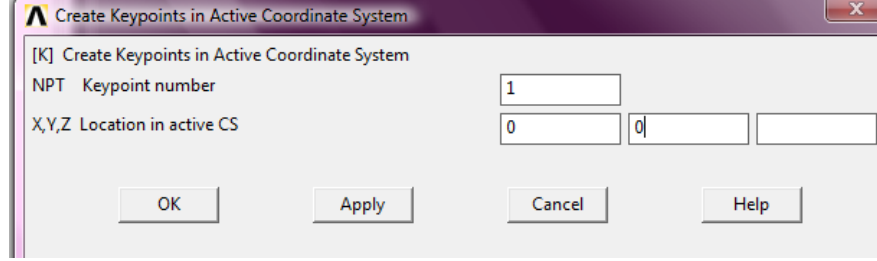
5.3.1 Anahtar Noktaların (Keypoint) Oluşturulması



Şekil 5.1. Anahtar noktaların tayini

→ Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS:
komutları girildiğinde şekil 5.2'deki gibi açılan pencereye şekil 5.1'de gösterilen anahtar noktalar girilerek iki boyutlu nümerik model oluşturulur. Burada dikkat

edilmesi gereken 5 ve 6 numaralı anahtar noktalarıdır. Aynı noktaya iki ayrı anahtar nokta atayarak çatlak oluşması için ilk adım atılmış olur.



Şekil 5.2. Anahtar noktaların tanımlanması

5.3.2 Anahtar Noktalar İle Doğruların Oluşturulması

Noktalardan çizgiler oluşturulurken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta çatlak bölgesinde iki ayrı doğru meydana getirmektir. 1-5 ve 1-6 noktalarını bir araya getirerek iki ayrı doğru elde edilmiş olur.

→ Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Straight Line

5.3.3 Doğrulardan Alan Oluşturulması

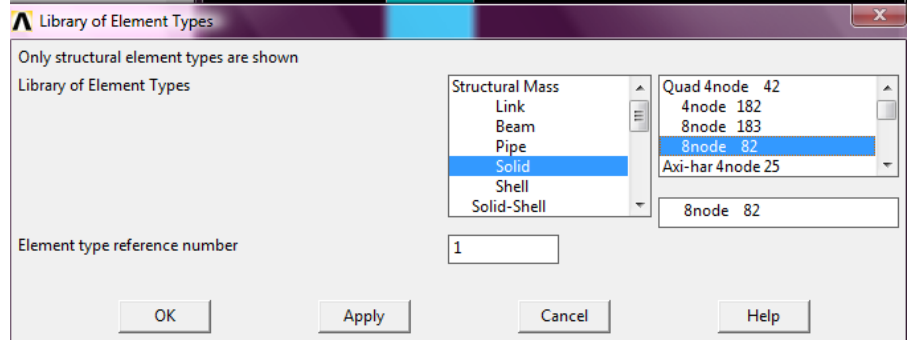
Alan oluştururken çatlak bölgesinde oluşturulan iki ayrı doğrudan biri (1-5) üstteki diğeri (1-6) alttaki alana ait olmalıdır.

→ Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines

5.4 Eleman Tipinin Atanması

Bu çalışmada malzeme tipi olarak Plane 82 kullanılmıştır (Şekil 5.3).

→ Main Menu > Preprocessor > Add/Edit/Delete > Add > Solid > 8Node 82 > Ok



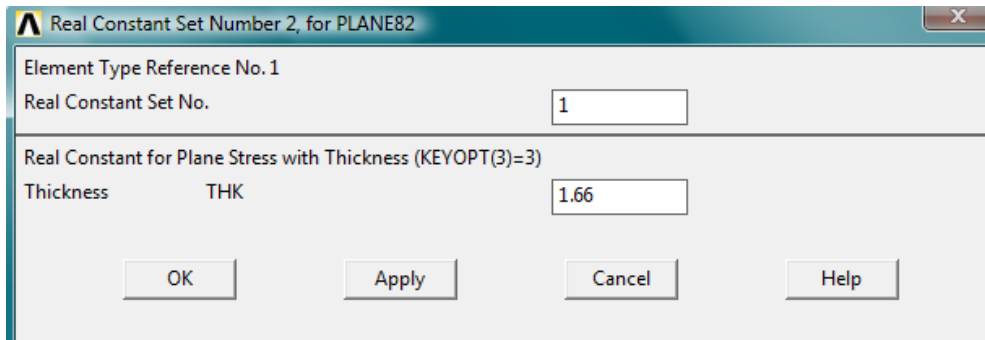
Şekil 5.3. Eleman tipinin belirlenmesi

Bu seçimin ardından “Option” seçeneği tıklanarak açılan sekmede “Element behavior” kısmında “Plane strs w/thk” seçilerek kalınlığın ihmal edilmeyeceği belirtilir.

5.4.1 Numune Kalınlıklarının Girilmesi

- Main Menu > Preprocessor > Element Type > Option > Plane strs w/thk > Ok
- Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Plane82 > Set number1 > THK =1.66

Böylece şekil 5.4’deki açılan sekmede THK kısmına 1.66 yazılarak kalınlık değeri 1.66mm girilmiş olur.



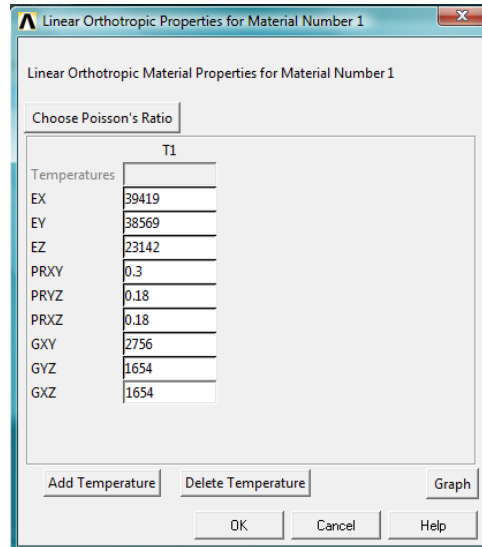
Şekil 5.4. Numunelere kalınlık verilmesi

5.4.2 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Bu çalışmamızda kullanılan yalnız cam (C₈), yalnız karbon (K₈) ve hibrit (C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂) kompozit yapılar lineer elastik davranış gösterip ortotropik özelliklere sahiptir.

→ Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Orthotropic

Açılan sekmede ilgili yerlere Tablo 5.1'deki değerler yazılarak malzeme özellikleri tanımlanmış olur. Şekil 5.5'te örnek olması açısından dokuma tipi cam/epoksi (C₈) tabakalı kompozit yapı için mekanik özellikler tanımlanmıştır. Diğer yapıların (K₈, C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂) analizinde de aynı yöntem kullanılmıştır.



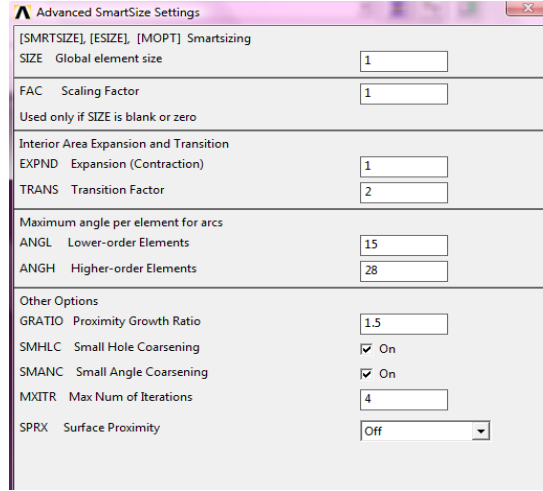
Şekil 5.5. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

5.5 Elemanlara Ayırma (Meshing) İşlemi

5.5.1 Mesh Ayarlarının Yapılması

Öncelikle mesh ayarı yapmak gerekir. Şekil 5.6'da açılan sekmede SIZE bölümüne 1 yazılarak eleman büyüklük ayarı yapılmış olur.

→ Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > Smart Size > Adv
Opts > SIZE:1 > Ok

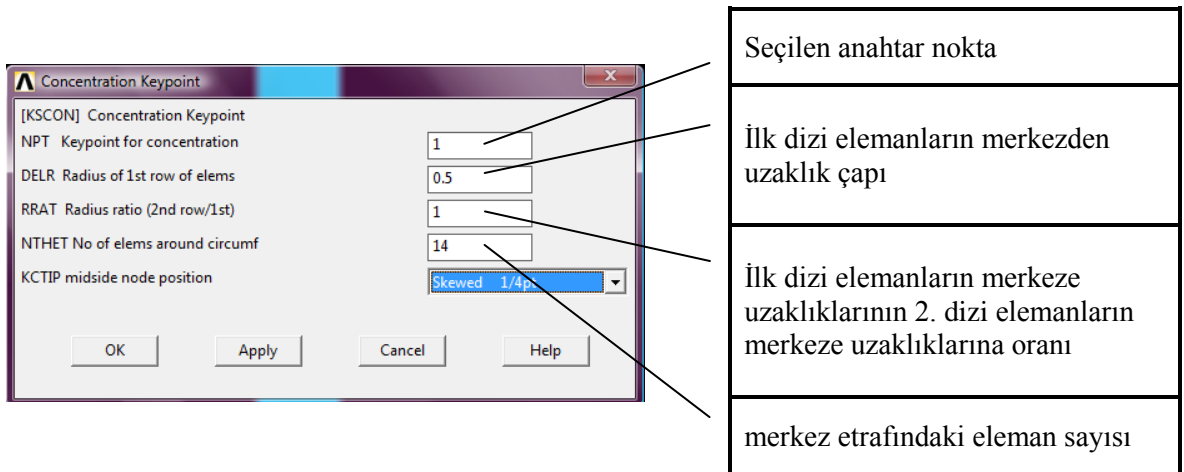


Şekil 5.6. Mesh ayarı

5.5.2 Çatlak Çevresinde Üçgen Elemanların Tanımlanması

Kırılma mekaniği için sonlu elemanlar modelinde çatlak etrafında elemanların çevre boyunca üçgen elemanlar olması gerekir. Bunun için şekil 5.1’de görülen çatlak ucundaki 1 numaralı noktada bu özellik aşağıdaki gibi tanımlanır (Şekil 5.7).

→ Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > Concentrat KPs >
Create:1 > Ok



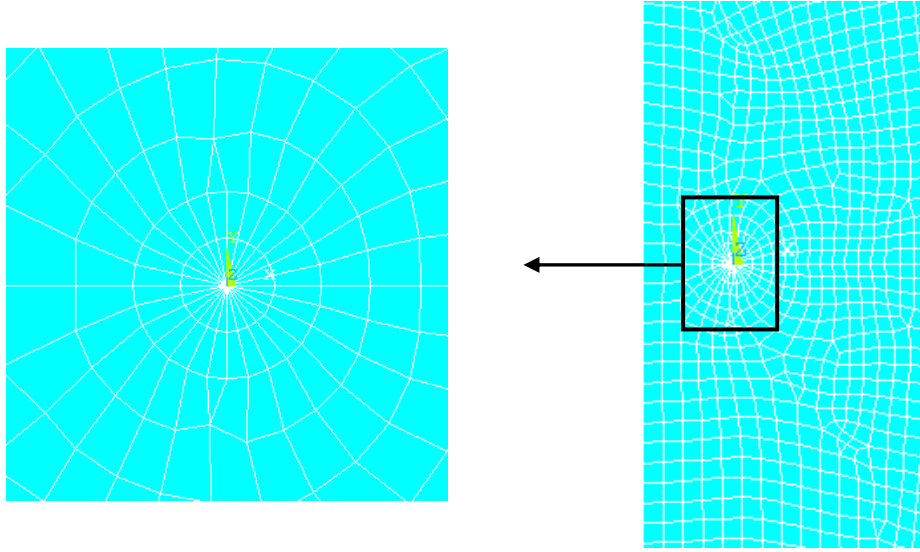
Şekil 5.7. Çatlak ucunun yoğunlaştırılması [37]

Şekil 5.7’de NTHET olarak tanımlanan kısma çatlak çevresine atanacak olan eleman sayısı yazılır. Analizimizde merkezi ve çift kenar çatlak için 7 eleman, tek kenar çatlak için ise 14 eleman atanarak çözümlenmeler yapılmıştır. KCTIP olarak tanımlanan kısımda ise skewed ¼ pt seçmemizin sebebi merkez nokta etrafındaki ilk 4 sıra geometrisinde simetriyi bozmamaktır. Eğer Not skewed ½ pt seçilirse 2. sıra elemanlardan sonra geometriyi bozarak üçgen elemanlardan dörtgen elemanlara geçiş sağlanır [37].

5.5.3 Meshleme İşlemi

→ Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free > Pick All

Şekil 5.8’de meshleme işlemi tamamlanmış modelde çatlak çevresinde elemanlar yoğunlaşmıştır.

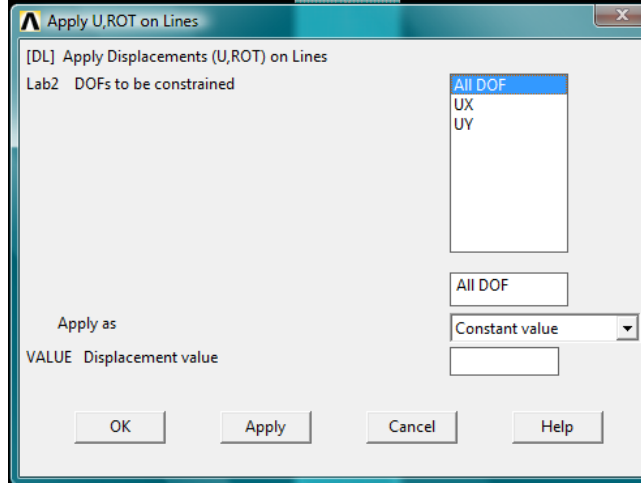


Şekil 5.8. Mesh edilmiş model

5.6 Sınır Şartlarının Girilmesi

Kırılma tokluğunu belirlemek için çekme deney numuneleri kullanılmıştır. Çekme deney numunelerinin bir ucu ankastre sınır şartlarına sahip iken diğer ucu yüklenmektedir. Bundan dolayı en alttaki çizgi tıklanır ve açılan menüde (Şekil 5.9) ALLDOF seçilerek modelimizin alt kısmının sabitlenmesi yapılır.

→Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement
> On Lines

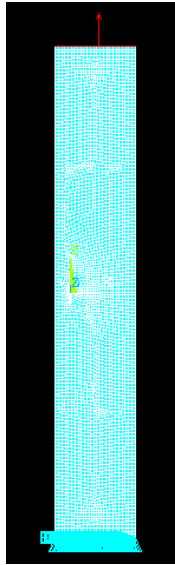


Şekil 5.9. Sınır şartlarının uygulanması

5.7 Yayılı Yükün Uygulanması

Deneysel sonuçta bulunan maksimum gerilmeler modelimizin en üst çizgisine uygulanır (Şekil 5.10).

→ Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Lines

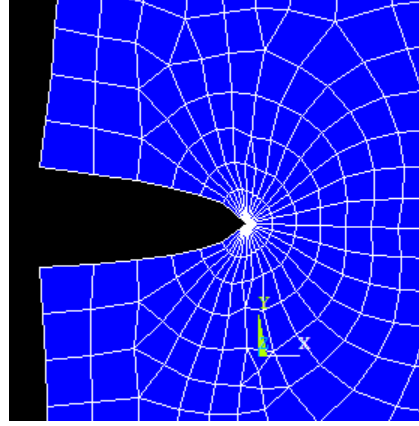


Şekil 5.10. Yükün uygulanması

5.8 Analizin Çözümü

Yükleme ve sınır şartları girildikten sonra kırılma tokluğu analizine geçilir. Bunun için aşağıdaki komutlar girilerek çözüm yaptırılır. Çözüm sonrası çatlak ucundaki açılma şekil 5.11'deki gibi olacaktır.

→ Main Menu > Solution > Solve > Current LS



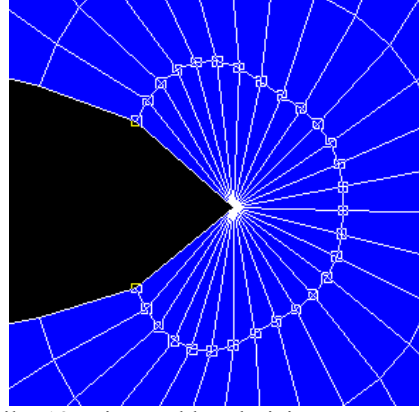
Şekil 5.11. Çatlak ucundaki açılma

5.9 J-İntegralinin Hesaplanması

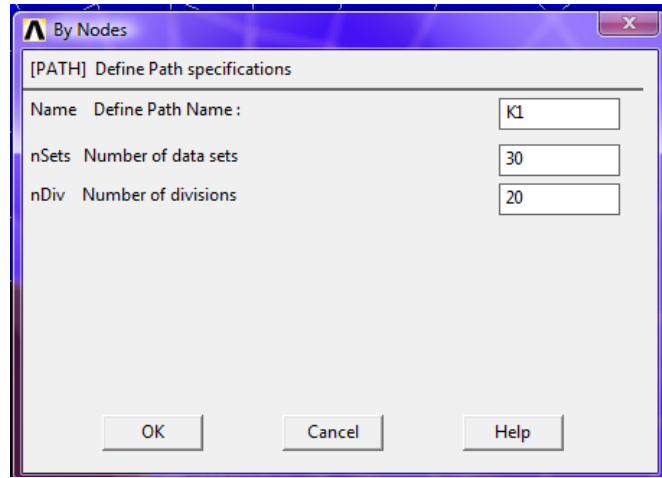
Çatlak açılması sırasında açığa çıkan mekanik enerji değeri olan J-integrali değerini hesaplariken çatlak ucunda dairesel bir yörünge tayin etmek gerekir. Bunun için;

→ Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes komutları girilir.

Çatlak ucuna en yakın yörünge üzerindeki tüm düğüm noktaları (Şekil 5.12) saat ibreleri tersi yönünde sırasıyla işaretlenir. Bu düğümler ANSYS Output Windows'ta görülür. Düğüm belirtilirken hata yapıldığı takdirde yörünge sırası kayar ve doğru sonuçlar elde edilemez. Yörünge tayini bittikten sonra şekil 5.13'de açılan sekmede yörüngeye isim verilir.



Şekil 5.12. J-integral hesabı için yörünge tayini



Şekil 5.13. Yörünge ismi belirleme

ANSYS Output Windows penceresine kaydedilen düğüm noktaları aşağıda belirtilen alt programda 5. satırdaki LPATH, n1, n2, ..., nn! kısmına şekil 5.14'deki gibi yazılır. Daha sonra bu alt program ANSYS'e aşağıdaki komut ile okutulur.

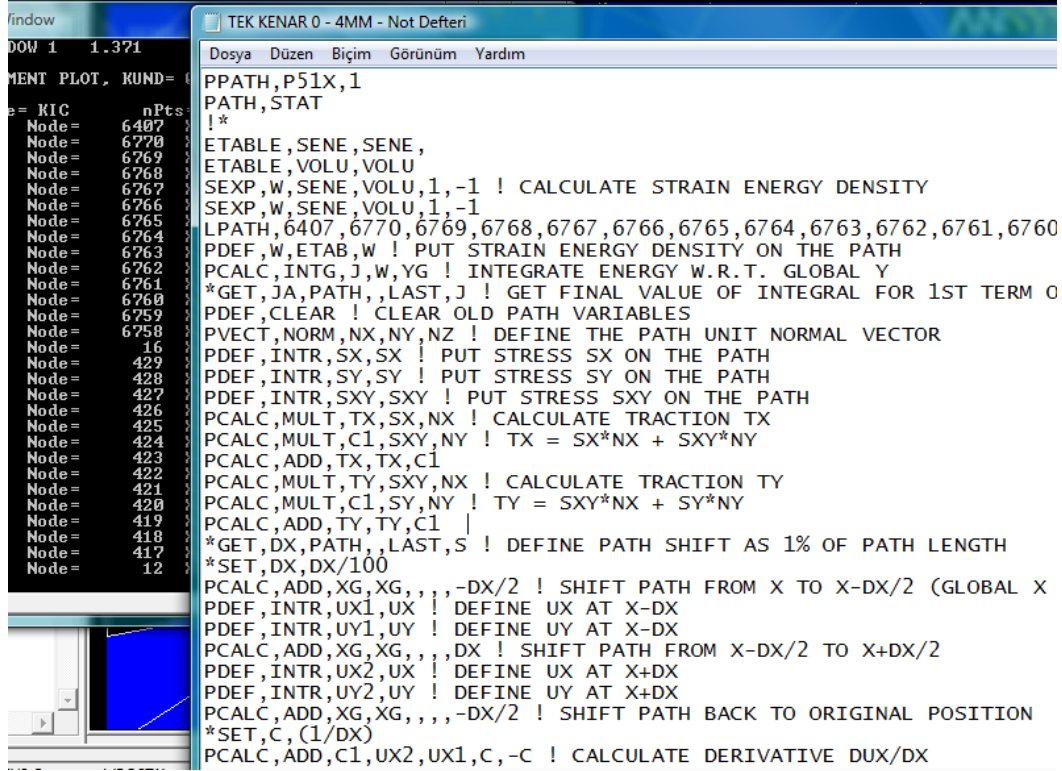
```
ETABLE,SENE,SENE,
ETABLE,VOLU,VOLU
SEXP,W,SENE,VOLU,1,-1 ! CALCULATE STRAIN ENERGY DENSITY
SEXP,W,SENE,VOLU,1,-1
LPATH,6407,6770,6769,6768,6767,6766,6765,6764,6763,6762,6761,6760,6759,6758,16,42
9,428,427,426,425,424,423,422,421,420,419,418,417,12
PDEF,W,ETAB,W ! PUT STRAIN ENERGY DENSITY ON THE PATH
PCALC,INTG,J,W,YG ! INTEGRATE ENERGY W.R.T. GLOBAL Y
*GET,JA,PATH,,LAST,J ! GET FINAL VALUE OF INTEGRAL FOR 1ST TERM OF J
PDEF,CLEAR ! CLEAR OLD PATH VARIABLES
```



```

PVECT,NORM,NX,NY,NZ ! DEFINE THE PATH UNIT NORMAL VECTOR
PDEF,INTR,SX,SX ! PUT STRESS SX ON THE PATH
PDEF,INTR,SY,SY ! PUT STRESS SY ON THE PATH
PDEF,INTR,SXY,SXY ! PUT STRESS SXY ON THE PATH
PCALC,MULT,TX,SX,NX ! CALCULATE TRACTION TX
PCALC,MULT,C1,SXY,NY ! TX = SX*NX + SXY*NY
PCALC,ADD,TX,TX,C1
PCALC,MULT,TY,SXY,NX ! CALCULATE TRACTION TY
PCALC,MULT,C1,SY,NY ! TY = SXY*NX + SY*NY
PCALC,ADD,TY,TY,C1
*GET,DX,PATH,,LAST,S ! DEFINE PATH SHIFT AS 1% OF PATH LENGTH
*SET,DX,DX/100
PCALC,ADD,XG,XG,,,-DX/2 ! SHIFT PATH FROM X TO X-DX/2 (GLOBAL X DIR.)
PDEF,INTR,UX1,UX ! DEFINE UX AT X-DX
PDEF,INTR,UY1,UY ! DEFINE UY AT X-DX
PCALC,ADD,XG,XG,,,+DX ! SHIFT PATH FROM X-DX/2 TO X+DX/2
PDEF,INTR,UX2,UX ! DEFINE UX AT X+DX
PDEF,INTR,UY2,UY ! DEFINE UY AT X+DX
PCALC,ADD,XG,XG,,,-DX/2 ! SHIFT PATH BACK TO ORIGINAL POSITION
*SET,C,(1/DX)
PCALC,ADD,C1,UX2,UX1,C,-C ! CALCULATE DERIVATIVE DUX/DX
PCALC,ADD,C2,UY2,UY1,C,-C ! CALCULATE DERIVATIVE DUY/DX
PCALC,MULT,C1,TX,C1 ! DEFINE INTEGRAND
PCALC,MULT,C2,TY,C2 ! = TX*DUX/DX + TY*DUY/DX
PCALC,ADD,C1,C1,C2
PCALC,INTG,J,C1,S ! FORM SECOND INTEGRAL (W.R.T. PATH LENGTH S)
*GET,JB,PATH,,LAST,J ! GET FINAL VALUE OF INTEGRAL FOR 2ND TERM OF J
*SET,JINT,JA-JB ! FOR FULL MODELS
PDEF,CLEAR ! CLEAR PATH VARIABLES
*END [37]

```



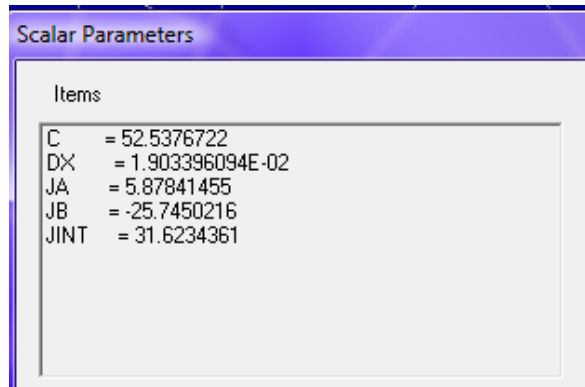
Şekil 5.14. Alt programın ANSYS paket programına okutulması

→ Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set

5.10 J-İntegral Değerinin Görülmesi

→ Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters

komutu ile şekil 5.15’de görüldüğü gibi J-integral (JINT) değeri okunur.



Şekil 5.15. J-integral (JINT) değerinin okunması

LEKM’de J-integral değeri ile gerilme yığılma faktörü (K) arasında denklem (5.2)’deki bağıntı geçerlidir. Analiz sırasında malzemelerin kalınlıkları ihmal edilirse düzlem gerilme, malzeme kalınlıkları çözüme dahil edilirse düzlem şekil değiştirme durumu geçerlidir. Bu çalışmada kalınlıklarda çözüme dahil edildiği için düzlem şekil değiştirme durumundaki denklem kullanılarak kırılma toklukları hesaplanmıştır [37]. Hesaplama açılma modu (Mod I) için gerilme yığılma faktörünün kritik değeri (K_C) kırılma tokluğu olarak alınmıştır [15,18,20]. Nümerik analiz sonucunda elde edilen J-integral değerlerine bağlı olarak kırılma toklukları düzlem şekil değiştirme durumu için denklem 5.2’ye göre belirlenmiştir.

$$K_I = \begin{cases} \sqrt{JE} & \text{(Düzlem Gerilme)} \\ \sqrt{\frac{JE}{1-\nu^2}} & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme)} \end{cases} \quad (5.2)$$

Dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluğu değerleri Tablo 5.2-5.5’te sırasıyla verilmiştir.

Tablo 5.2. Dokuma tipi C₈ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		J	K _I	J	K _I	J	K _I
0	4	23,96	1007,82	20,19	925,11	20,28	971,88
	6	31,83	1161,46	26,57	1012,31	25,04	1079,83
	8	30,19	1131,13	19,62	911,92	20,85	985,51
30	4	21,84	962,01	17,61	863,85	-	-
	6	29,34	1115,09	16,62	839,29	-	-
	8	30,66	1139,89	18,63	888,53	-	-
45	4	17,07	850,55	15,94	821,92	18,16	919,57
	6	22,70	980,93	17,31	856,64	19,30	948,16
	8	21,53	955,25	16,47	835,50	18,73	934,10
60	4	18,05	874,75	15,18	802,90	-	-
	6	18,01	873,78	15,05	798,75	-	-
	8	17,22	854,36	14,54	784,91	-	-

Tablo 5.3. Dokuma tipi C₂K₄C₂ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		J	K _I	J	K _I	J	K _I
0	4	27,07	1194,09	20,10	1028,85	24,14	1182,01
	6	31,49	1287,77	23,11	1052,41	22,49	1140,84
	8	27,43	1201,86	23,83	1120,25	20,78	1096,90
30	4	22,18	1080,87	22,08	1078,25	-	-
	6	26,75	1186,98	23,42	1110,60	-	-
	8	30,61	1269,72	24,18	1128,36	-	-
45	4	20,06	1027,93	16,04	918,97	23,22	1159,31
	6	26,76	1187,13	19,64	1017,01	25,51	1215,04
	8	21,19	1056,39	18,94	998,72	24,34	1186,93
60	4	20,91	1049,46	12,93	825,16	-	-
	6	27,19	1196,46	17,80	968,33	-	-
	8	18,45	985,71	21,32	1059,52	-	-

Tablo 5.4. Dokuma tipi K₂C₄K₂ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		J	K _I	J	K _I	J	K _I
0	4	30,22	1297,89	22,33	1115,57	28,52	1321,79
	6	30,27	1298,94	24,20	1107,82	25,16	1241,32
	8	33,70	1370,50	26,02	1204,26	28,31	1316,85
30	4	25,24	1186,15	22,41	1117,75	-	-
	6	30,99	1314,32	22,18	1112,02	-	-
	8	27,84	1245,69	20,28	1063,17	-	-
45	4	21,56	1096,34	16,71	965,06	24,63	1228,30
	6	25,93	1202,11	21,44	1093,11	27,27	1292,53
	8	25,85	1200,29	18,28	1009,43	30,55	1367,92
60	4	18,18	1006,67	16,62	962,43	-	-
	6	23,29	1139,36	17,38	984,31	-	-
	8	19,59	1044,93	19,68	1047,29	-	-

Tablo 5.5. Dokuma tipi K₈ kompozit numunelerin nümerik analiz sonucu elde edilen J-integral ve kırılma tokluk (MPa.mm^{3/2}) değerleri

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI		MERKEZİ ÇATLAK		ÇİFT KENAR ÇATLAĞI	
		J	K _I	J	K _I	J	K _I
0	4	31,25	1456,08	20,11	1167,87	27,53	1432,49
	6	30,75	1444,38	23,73	1210,30	29,95	1494,17
	8	25,47	1314,56	26,57	1342,64	28,92	1468,21
30	4	36,09	1564,75	23,94	1274,31	-	-
	6	31,66	1465,55	26,91	1351,21	-	-
	8	26,87	1350,02	26,78	1347,82	-	-
45	4	34,72	1534,65	18,73	1127,14	34,98	1614,72
	6	31,75	1467,50	22,91	1246,67	31,55	1533,71
	8	31,15	1453,74	23,78	1270,10	33,05	1569,60
60	4	24,21	1281,48	14,10	977,85	-	-
	6	19,10	1138,35	18,80	1129,44	-	-
	8	18,92	1132,98	21,32	1202,50	-	-

ALTINCI BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMA

6.1 Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

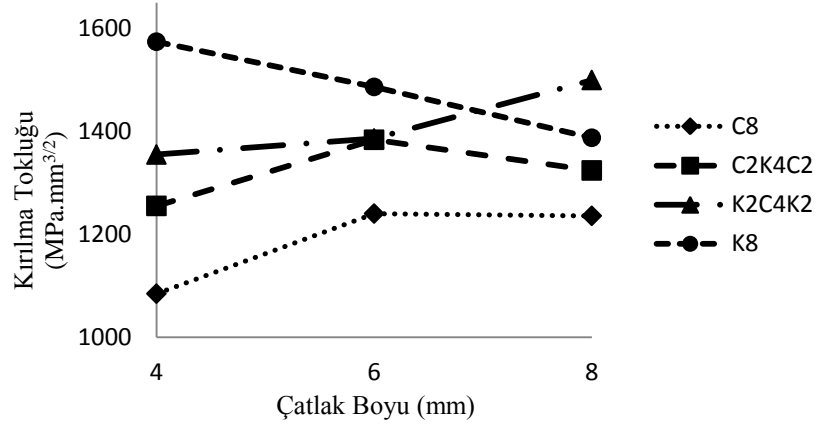
Çekme testi sonucunda üniversal çekme-basma test cihazından elde edilen verilere göre her bir numune için yük-uzama grafikleri çizilerek maksimum kuvvetler belirlenmiştir. Çekme testi her bir seriden beşer numuneye uygulanmış ve yük değerlerinin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Farklı tabaka dizilimlerine sahip (C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8) kompozit numunelerin kırılma tokluk değerleri çatlakın konumu ve maksimum yük değeri göz önüne alınarak denklem (4.2)'ye göre hesaplanmıştır.

6.1.1 Çatlak Açısı Sabitken Çatlak Boyu Değişiminin Kırılma Tokluğuna Etkisi

6.1.1.1 Tek Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler

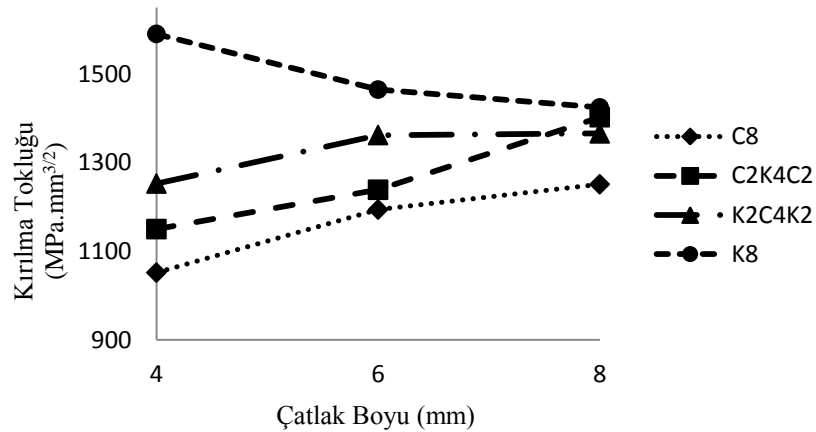
Şekil 6.1'de tek kenarında 0° açılı çatlak bulunan dokuma tipi cam (C_8) ve dokuma tipi karbon (K_8) tabakalı kompozit numuneler ile dış kısmı dokuma tipi cam iç kısmı dokuma tipi karbon ($C_2K_4C_2$) ve dış kısmı dokuma tipi karbon iç kısmı dokuma tipi cam ($K_2C_4K_2$) kumaşlardan oluşan hibrit kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenarında 0° açılı ve 4mm boyunda çatlak bulunan numunelerde en yüksek ve en düşük kırılma tokluğu sırasıyla dokuma tipi karbon (K_8) ve dokuma tipi cam kumaşlardan (C_8) oluşan kompozit yapılarda ortaya çıkmıştır. Aynı durum tek kenarında 0° açılı ve 6mm boyunda çatlak bulunan numunelerde de meydana gelmiştir. Tek kenarında 0° açılı ve 8mm boyunda çatlak bulunan kompozit numunelerde ise en düşük kırılma tokluğu dokuma tipi cam kumaşlardan oluşan (C_8) numunelerde oluşurken en yüksek kırılma tokluğu dış kısmı karbon iç kısmı cam kumaşlardan oluşan hibrit kompozit yapıda ($K_2C_4K_2$) elde edilmiştir. Genel olarak kırılma tokluğunun en düşük değerden en yüksek değere sıralanışı C_8 , $C_2K_4C_2$,

$K_2C_4K_2$ ve K_8 şeklindedir. Kırılma tokluğu çatlak boyu artarken (K_8 yapısı hariç), 6mm çatlak boyundan sonra ($K_2C_4K_2$ hibrit yapısı hariç) azalmaktadır.



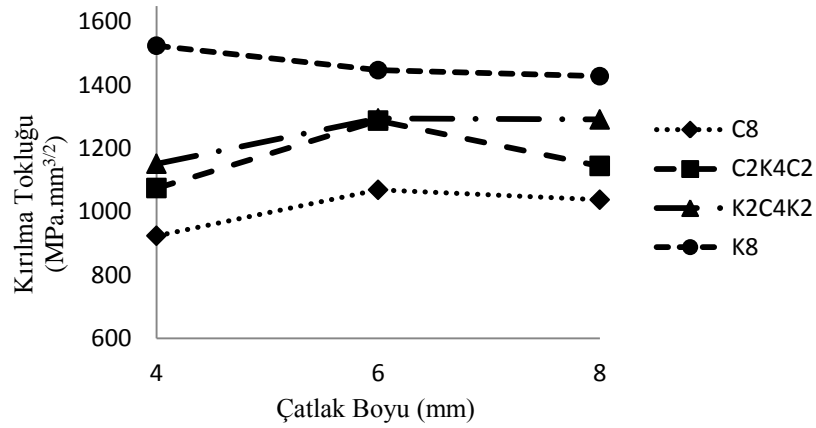
Şekil 6.1. 0° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

Şekil 6.2’de tek kenarında 30° açılı çatlak bulunan C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; K_8 numunelerinin kırılma toklukları çatlak boyu arttıkça azalmaktadır ve diğer kompozit numunelerin kırılma tokluklarından daha yüksektir. Kırılma tokluğu değerleri C_8 yapısının her çatlak boyu için en düşük değerdedir. C_8 , $C_2K_4C_2$ ve $K_2C_4K_2$ numunelerinde ise çatlak boyu arttıkça kırılma tokluğunun arttığı gözlenmiştir. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğunun en düşük değerden en yüksek değere doğru sıralanışı C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 şeklindedir.



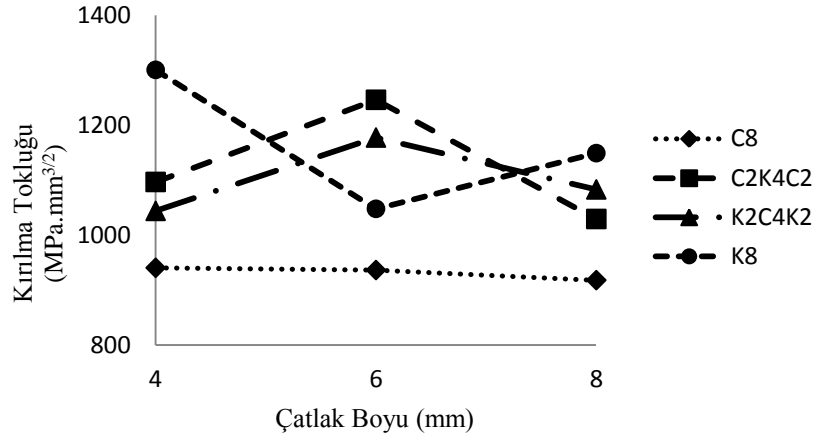
Şekil 6.2. 30° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

Şekil 6.3’de tek kenarında 45° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; K₈ numunelerinde kırılma tokluğu çatlak boyu arttıkça azalmakta olup her çatlak boyu için en yüksek değerdedir. C₈ ve C₂K₄C₂ numunelerinde kırılma tokluğu 4mm’lik çatlaktan 6mm’lik çatlığa doğru artmakta ancak 6mm’den sonra azalmaktadır. K₂C₄K₂ numunelerinde kırılma tokluğu çatlak boyu arttıkça artmaktadır. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğunun en düşük değerden en yüksek değere doğru sıralanışı C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ şeklindedir.



Şekil 6.3. 45° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

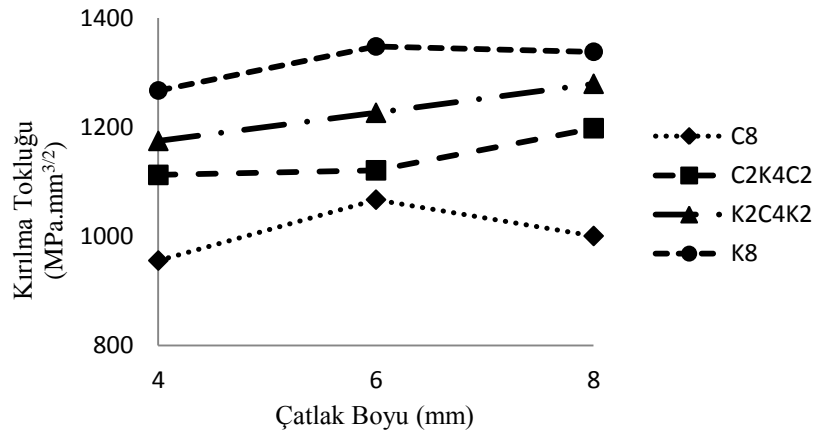
Şekil 6.4’de tek kenarında 60° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ numunelerinin kırılma tokluk değerleri çatlak boyu arttıkça çok fazla değişmemesine rağmen azalmaktadır. C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ numunelerinde kırılma tokluğu 4mm’lik çatlaktan 6mm’lik çatlığa doğru artmakta ancak 6mm’den sonra azalmaktadır. K₈ numunelerinde ise kırılma tokluğu 4mm’lik çatlaktan 6mm’lik çatlığa doğru azalmakta ancak 6mm’den sonra artmaktadır.



Şekil 6.4. 60° tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

6.1.1.2 Merkezinde Çatlak Bulunan Numuneler

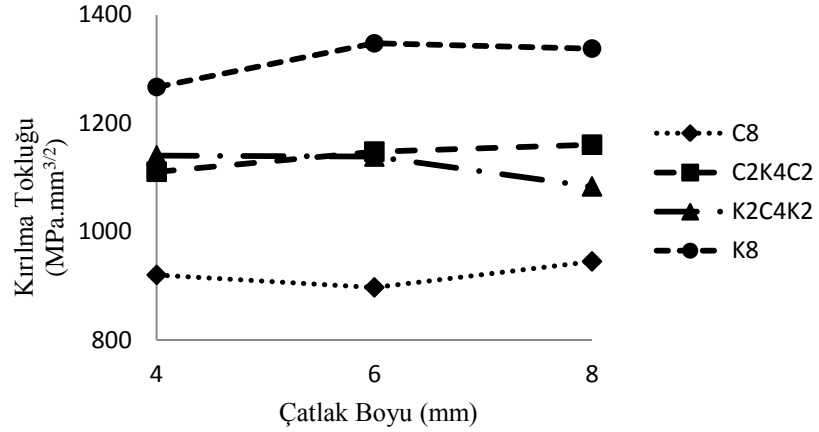
Şekil 6.5’de merkezinde 0° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ ve K₈ numunelerinde kırılma tokluğu, 4mm’lik çatlaktan 6mm’lik çatlığa doğru artmakta ancak 6mm’den sonra azalmaktadır. C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ hibrit kompozit numunelerinde ise kırılma tokluğu çatlak boyu arttıkça artmaktadır. En yüksek kırılma tokluğu değerleri K₈ numunelerinden, en düşük kırılma tokluğu değerleri ise C₈ numunelerinden elde edilmiştir.



Şekil 6.5. 0° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

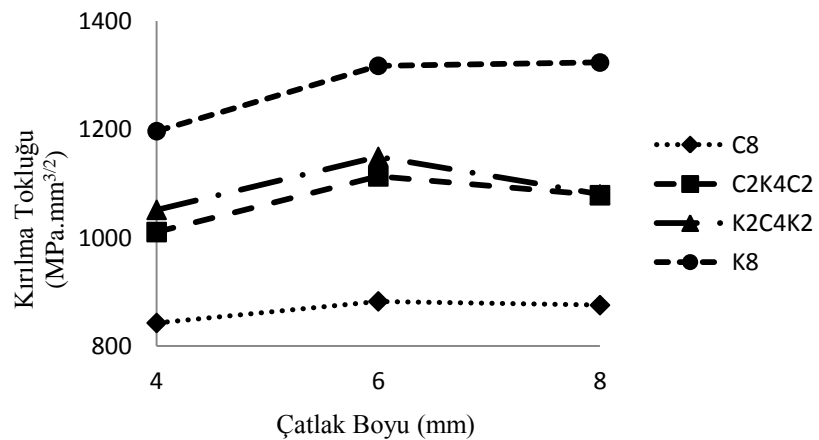
Şekil 6.6’da merkezinde 30° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ numunelerinde kırılma tokluğu, 4mm’lik

çatlaktan 6mm'lik çatlağa doğru azalmakta ancak 6mm'den sonra artmaktadır. $C_2K_4C_2$ ve K_8 numunelerinde ise kırılma tokluğu 4mm'lik çatlaktan 6mm'lik çatlağa doğru artmakta 6mm'den sonra önemli bir değişiklik olmamaktadır. $K_2C_4K_2$ numunelerinde ise kırılma tokluğu çatlak boyu arttıkça azalmaktadır. En yüksek kırılma tokluğu değerleri K_8 numunelerinden, en düşük kırılma tokluğu değerleri ise C_8 numunelerinden elde edilmiştir.



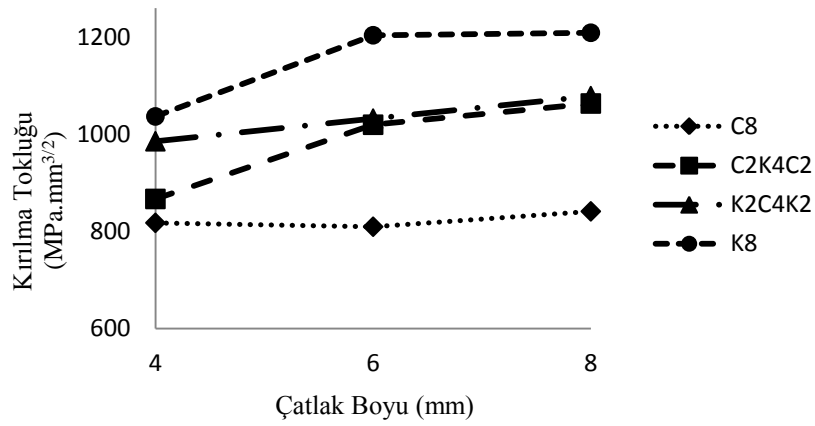
Şekil 6.6. 30° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

Şekil 6.7'de merkezinde 45° açılı çatlak bulunan C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tüm numunelerde kırılma tokluğu 4mm'lik çatlaktan 6mm'lik çatlağa doğru artmaktadır. 6mm'den sonra ise C_8 ve K_8 numunelerinin kırılma tokluklarında önemli bir değişiklik olmazken $C_2K_4C_2$ ve $K_2C_4K_2$ hibrit kompozit numunelerinin kırılma toklukları azalmaktadır.



Şekil 6.7. 45° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

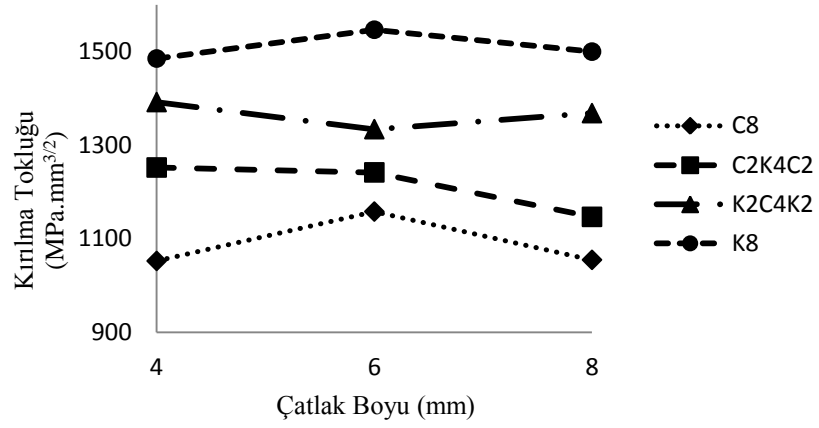
Şekil 6.8’de merkezinde 60° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenarında 60° açılı çatlak bulunduran C₈ numunelerinin kırılma toklukları çatlak boyu arttıkça çok fazla değişiklik göstermemektedir. C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerinde 4mm çatlak boyundan 6mm çatlak boyuna kırılma tokluğunun arttığı ancak 6mm çatlak boyundan sonra ciddi bir değişikliğin olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 6.8. 60° merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

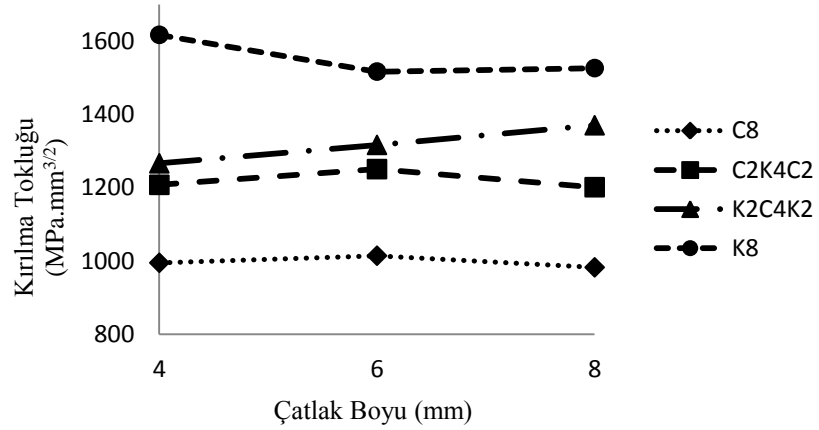
6.1.1.3 Çift Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler

Şekil 6.9’da çift kenarında 0° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ ve K₈ numunelerinde kırılma tokluğu 4mm’lik çatlaktan 6mm’lik çatlığa doğru artmakta ancak 6mm’den sonra azalmaktadır. K₂C₄K₂ numunelerinde 4mm’den 6mm’ye kadar kırılma toklukları azalmakta, 6mm’den sonra ise artmaktadır. C₂K₄C₂ numunelerinde ise çatlak boyu arttıkça kırılma tokluğu azalmaktadır. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğunun çatlak boyundan bağımsız olarak en düşük değerden en yüksek değere doğru sıralanışı C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ şeklindedir.



Şekil 6.9. 0° çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

Şekil 6.10'da çift kenarında 45° açılı çatlak bulunan C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ ve C₂K₄C₂ numunelerinde kırılma tokluğu 4mm'lik çatlaktan 6mm'lik çatlığa doğru artmakta ancak 6mm'den sonra azalmaktadır. K₂C₄K₂ numunelerinde çatlak boyu arttıkça kırılma tokluğu değeri artmaktadır. K₈ numunelerinde ise kırılma tokluğu 4mm'lik çatlaktan 6mm'lik çatlığa doğru azalmakta, 6mm'den sonra önemli bir değişiklik olmamaktadır.

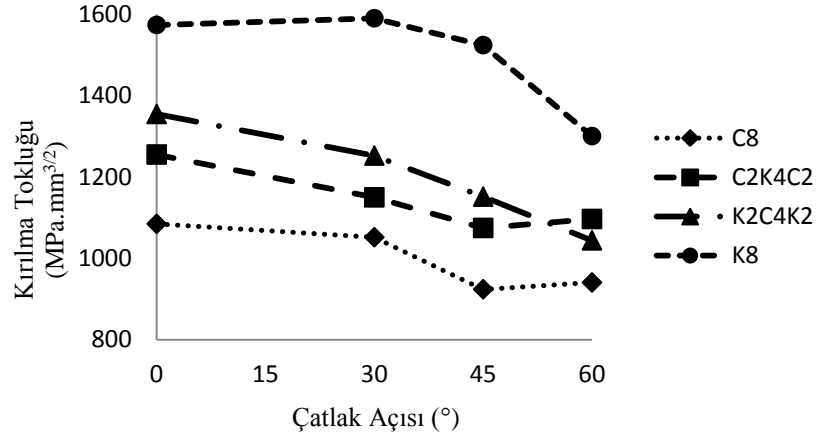


Şekil 6.10. 45° çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının çatlak boyuna göre değişimi

6.1.2 Çatlak Boyu Sabitken Çatlak Açısının Değişiminin Kırılma Tokluğuna Etkisi

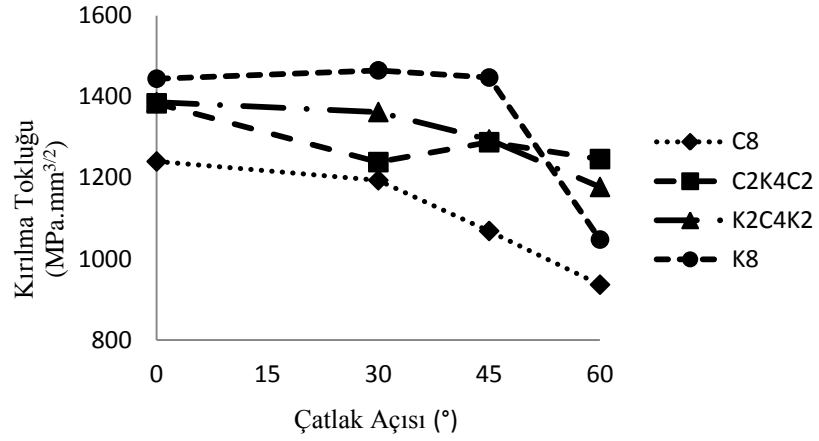
6.1.2.1 Tek Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler

Şekil 6.11'de 4mm'lik tek kenar çatlağına sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; çatlak açısı artarken genel olarak kırılma tokluğunun azaldığı gözlenmektedir. Kırılma tokluğu en fazla olan K₈, en düşük olan ise C₈ numuneleridir. Hibrit yapılarda ise her açı değeri için (60° hariç) K₂C₄K₂ numunelerinin kırılma toklukları, C₂K₄C₂ numunelerinden daha yüksek çıkmıştır.



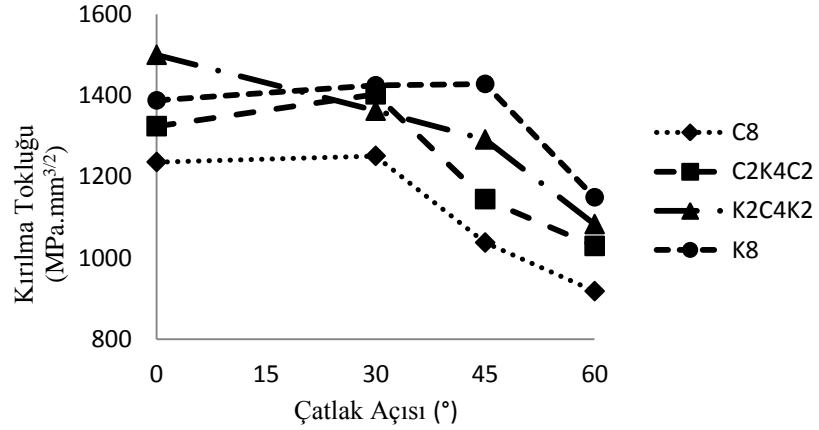
Şekil 6.11. 4mm'lik tek kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

Şekil 6.12'de 6mm'lik tek kenar çatlağına sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerinde çatlak açısı artarken genel olarak kırılma tokluğunun azaldığı gözlenmektedir. C₂K₄C₂ numunelerinde ise 30°'ye kadar kırılma tokluğu azalmakta, 30°'den 45°'ye kadar artmakta ve 45°'den sonra yine azalmaktadır. 0°-45° aralığında en yüksek kırılma tokluğu değerinden en düşük kırılma tokluğu değerine doğru sıralanış K₈, K₂C₄K₂, C₂K₄C₂ ve C₈ şeklindedir. 60° için ise bu sıralanış C₂K₄C₂, K₂C₄K₂, K₈ ve C₈ şeklindedir.



Şekil 6.12. 6mm'lik tek kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

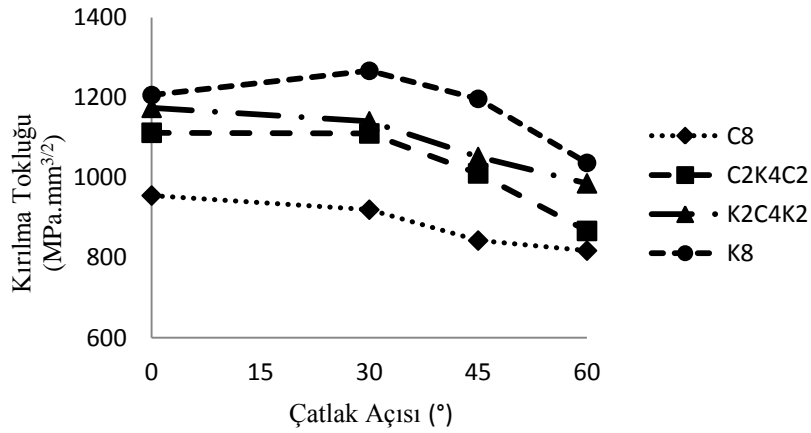
Şekil 6.13'de 8mm'lik tek kenar çatlaklına sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ numunelerinde 30°'ye kadar kırılma tokluğu önemli bir değişiklik göstermezken 30°'den sonra azalmaktadır. K₂C₄K₂ numunelerinde çatlak açısı arttıkça kırılma tokluğu azalmaktadır. K₈ numunelerinde 45°'ye kadar kırılma tokluğu artarken 45°'den sonra azalmaktadır. C₂K₄C₂ hibrit yapılarında ise 30°'ye kadar kırılma tokluğu artarken bu değerden sonra azalmaktadır.



Şekil 6.13. 8mm'lik tek kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

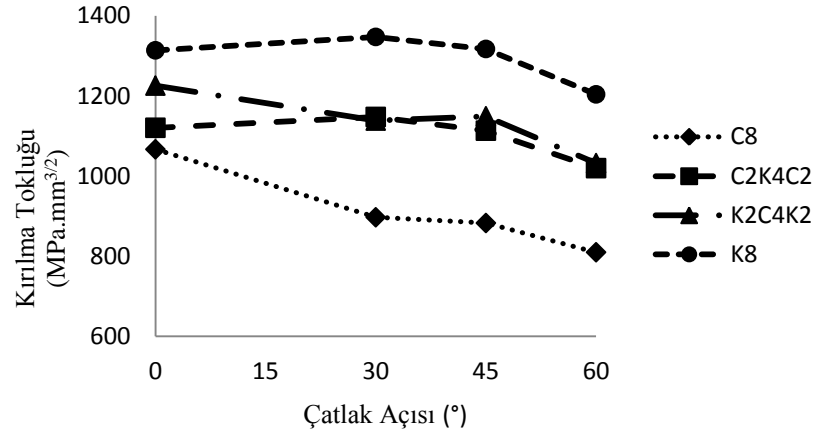
6.1.2.2 Merkezinde Çatlak Bulunan Numuneler

Şekil 6.14'de 4mm'lik merkezi çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈, C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ numunelerinde çatlak açısı artarken kırılma tokluğunun azaldığı gözlenmektedir. K₈ numunelerinde ise 30°'ye kadar kırılma tokluğu artmakta, 30°'den sonra azalmaktadır. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğunun çatlak açısından bağımsız olarak en düşük değerden en yüksek değere doğru sıralanışı C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ şeklindedir.



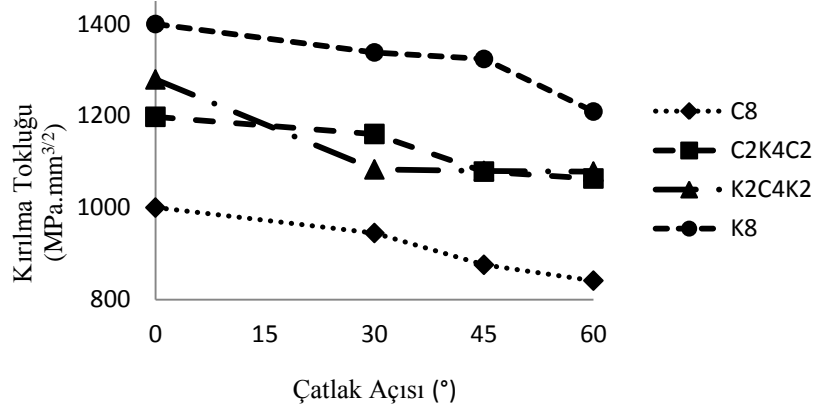
Şekil 6.14. 4mm'lik merkezi çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

Şekil 6.15'de 6mm'lik merkezi çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈ ve K₂C₄K₂ numunelerinde çatlak açısı artarken kırılma tokluğu azalmaktadır. C₂K₄C₂ ve K₈ numunelerinde ise 30°'ye kadar kırılma tokluğunda önemli bir değişiklik olmazken 30°'den sonra azalmaktadır. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğunun en düşük değerleri C₈, en yüksek değerleri ise K₈ numunelerinden elde edilmiştir. Ayrıca; 30°-60° aralığında her iki hibrit yapının kırılma tokluk değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 6.15. 6mm'lik merkezi çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

Şekil 6.16'da 8mm'lik merkezi çatlakla sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈, C₂K₄C₂ ve K₈ numunelerinde çatlak açısı artarken kırılma tokluğu azalmaktadır. K₂C₄K₂ numunelerinde ise 30°'ye kadar kırılma tokluğu azalmakta, 30°'den sonra çok fazla bir değişiklik olmamaktadır. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğunun en düşük değerleri C₈ numunelerinden, en yüksek değerleri ise K₈ numunelerinden elde edilmiştir.

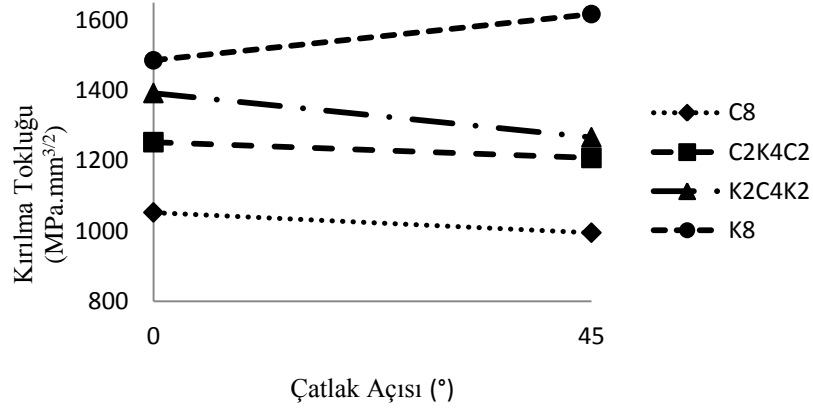


Şekil 6.16. 8mm'lik merkezi çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

6.1.2.3 Çift Kenarında Çatlak Bulunan Numuneler

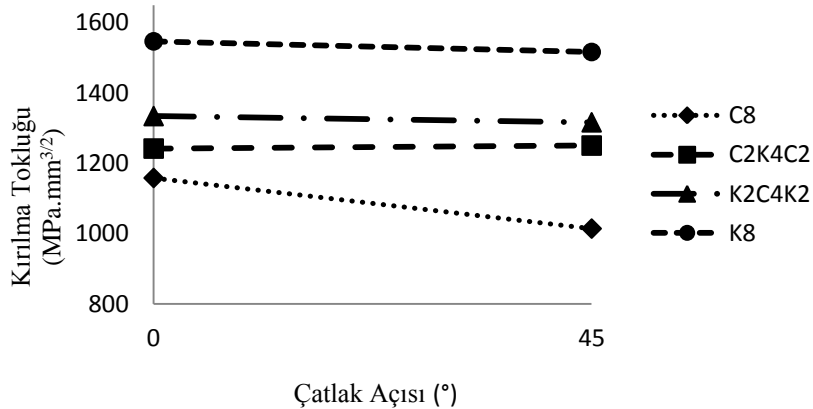
Şekil 6.17'de 4mm'lik çift kenar çatlaklarına sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir.

Grafiğe göre; C_8 , $C_2K_4C_2$ ve $K_2C_4K_2$ numunelerinde çatlak açısı 0° 'den 45° 'ye doğru kırılma tokluğu azalmakta, K_8 numunelerinde ise artmaktadır. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğu değerlerinin en yüksekten en düşüğe doğru sıralanışı K_8 , $K_2C_4K_2$, $C_2K_4C_2$ ve C_8 şeklindedir.



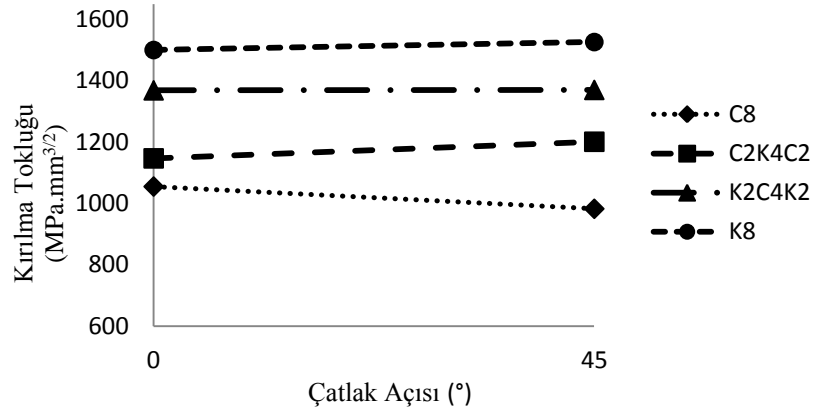
Şekil 6.17. 4mm'lik çift kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

Şekil 6.18'de 6mm'lik çift kenar çatlaklına sahip C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; $C_2K_4C_2$ ve $K_2C_4K_2$ hibrit numunelerinde çatlak açısı 0° 'den 45° 'ye doğru kırılma tokluklarında önemli bir değişiklik olmazken, C_8 ve K_8 numunelerinde kırılma tokluğu azalmaktadır. En yüksek kırılma tokluğu değerleri K_8 numunelerinde, en düşük kırılma tokluğu değerleri ise C_8 numunelerinde meydana gelmiştir. Hibrit yapılarda ise $K_2C_4K_2$ numunelerinde kırılma tokluğu değerleri $C_2K_4C_2$ numunelerinden daha yüksektir.



Şekil 6.18. 6mm'lik çift kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

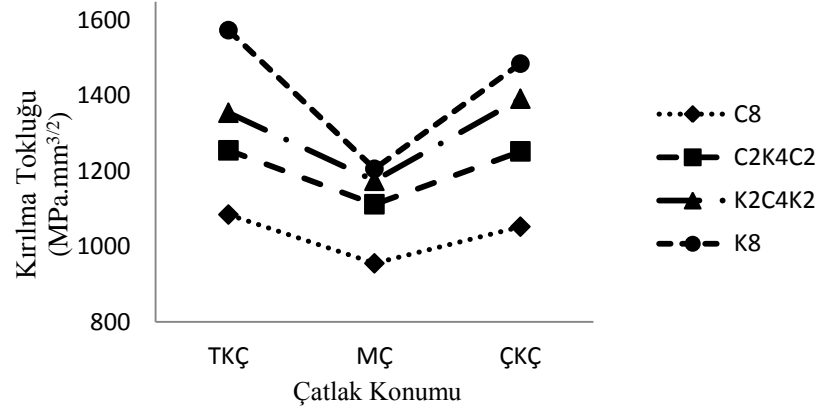
Şekil 6.19’da 8mm’lik çift kenar çatlakına sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerinde çatlak açısı 0°’den 45°’ye doğru artarken kırılma tokluklarında önemli bir değişikliğin olmadığı C₈ numunelerinde ise kırılma tokluğunun azaldığı gözlenmiştir. Genel olarak bakıldığında kırılma tokluğu değerlerinin en düşük olduğu yapı C₈, en yüksek olduğu yapı ise K₈ yapılarıdır.



Şekil 6.19. 8mm’lik çift kenar çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak açısına bağlı olarak değişimi

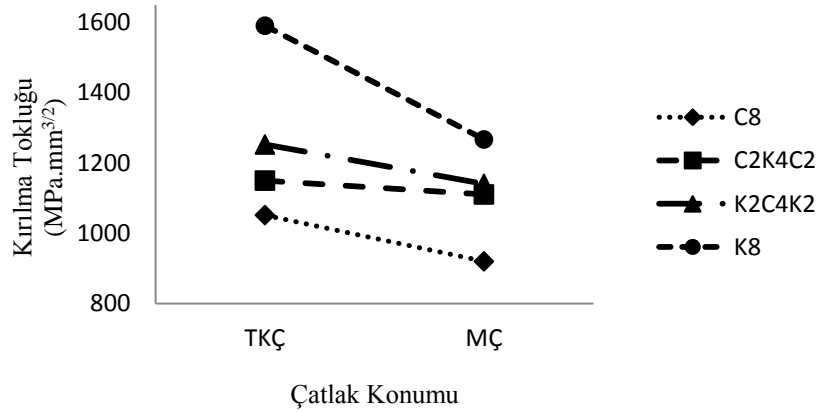
6.1.3 Farklı Çatlak Konumlarına Sahip Kompozitlerin Kırılma Tokluklarının Karşılaştırılması

Şekil 6.20’de 0° açı ve 4mm boyunda çatlakına sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları, tek kenar ve çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. C₈ ve K₈ yapısına sahip, tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür. C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ hibrit yapısındaki tek kenar çatlaklı hibrit numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı hibrit numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. En yüksek kırılma tokluğu değerinden en düşük kırılma tokluğu değerine doğru sıralanışı çatlak konumunda da çatlak açısı ve çatlak boyunda olduğu gibi K₈, K₂C₄K₂, C₂K₄C₂ ve C₈ şeklindedir.



Şekil 6.20. 0° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

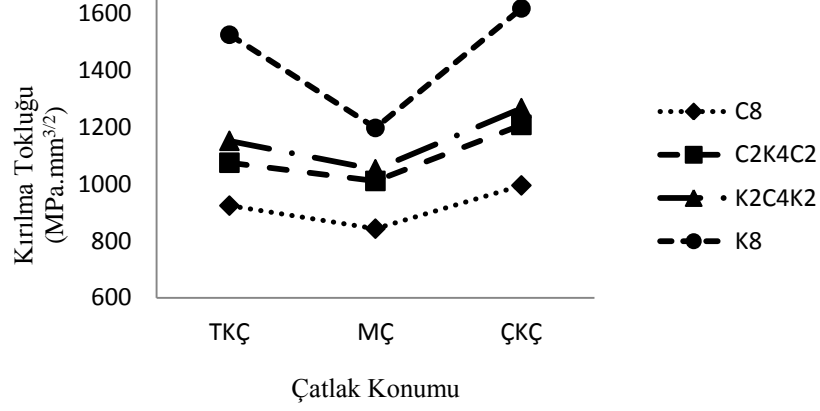
Şekil 6.21’de 30° açı ve 4mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, merkezi çatlaklı hibrit kompozit numunelerin kırılma toklukları birbirine yakın değerlerde çıkmıştır.



Şekil 6.21. 30° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

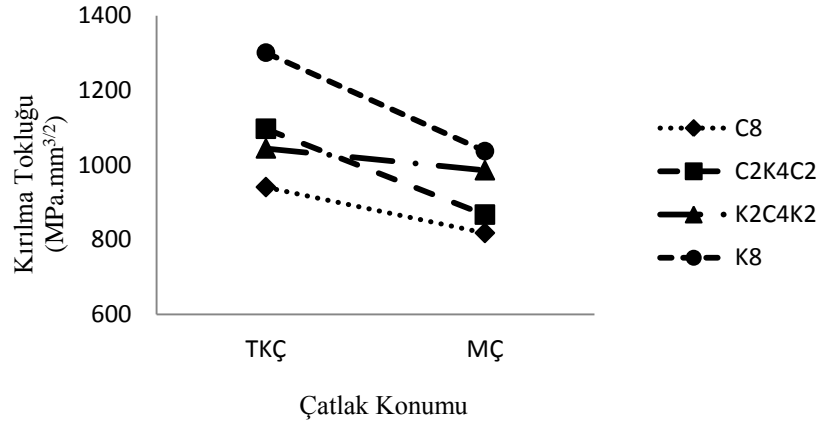
Şekil 6.22’de 45° açı ve 4mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları, tek kenar ve çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. Çift kenar çatlaklı

numunelerin kırılma toklukları ise tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür.



Şekil 6.22. 45° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

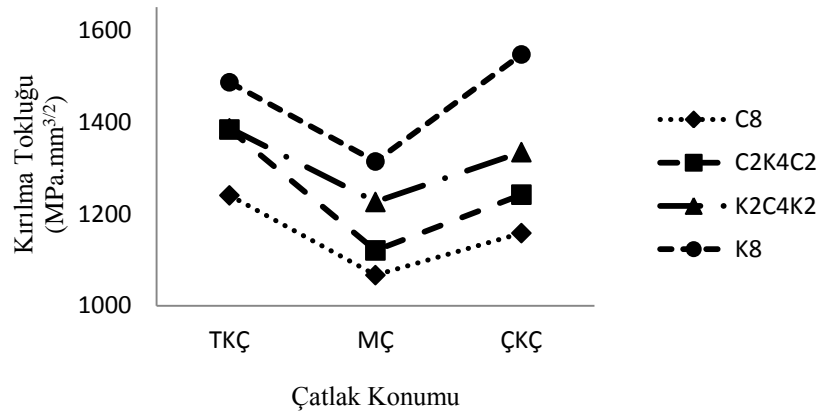
Şekil 6.23’de 60° açı ve 4mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyük olduğu gözlenmiştir. Merkezi çatlak için kırılma tokluklarının en büyük değerden en küçük değere doğru sıralanışı K₈, K₂C₄K₂, C₂K₄C₂ ve C₈ şeklinde iken tek kenar çatlaklı numuneler için K₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve C₈ şeklindedir.



Şekil 6.23. 60° açı ve 4mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

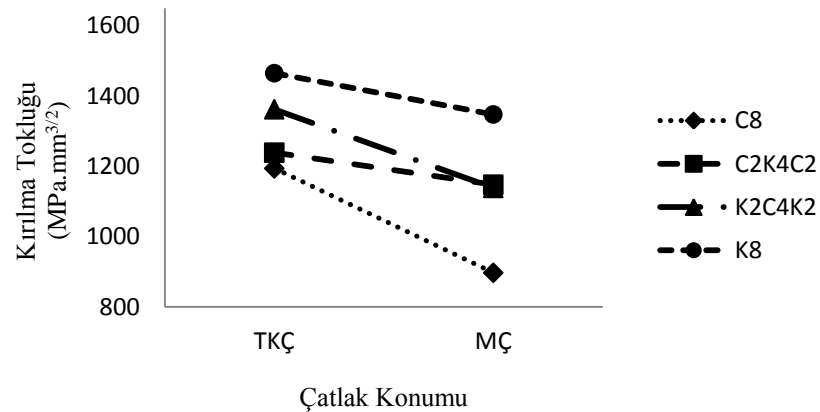
Şekil 6.24’de 0° açı ve 6mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği

verilmiştir. Grafiğe göre; merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları, tek kenar ve çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. Tek kenar çatlaklı $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 numunelerin, kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür. Tek kenar çatlaklı K_8 numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. Ayrıca, tek kenar çatlaklı hibrit numunelerin kırılma tokluk değerleri hemen hemen aynı çıkmıştır.



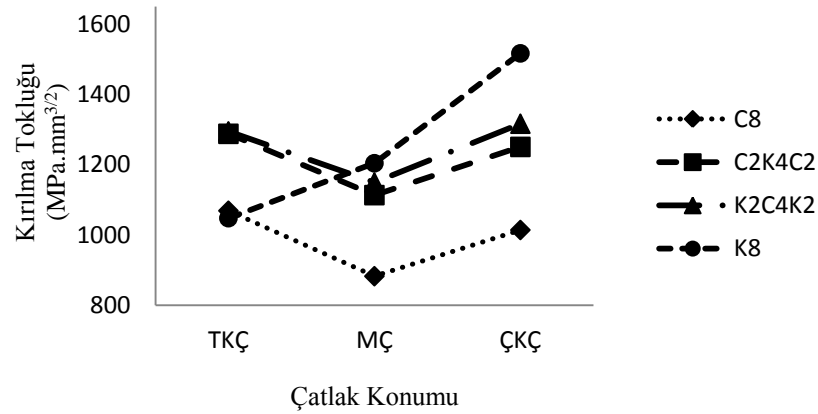
Şekil 6.24. 0° açılı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.25’de 30° açılı ve 6mm boyunda çatlaklı C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, merkezi çatlaklı hibrit yapıların kırılma toklukları yaklaşık aynı çıkmıştır.



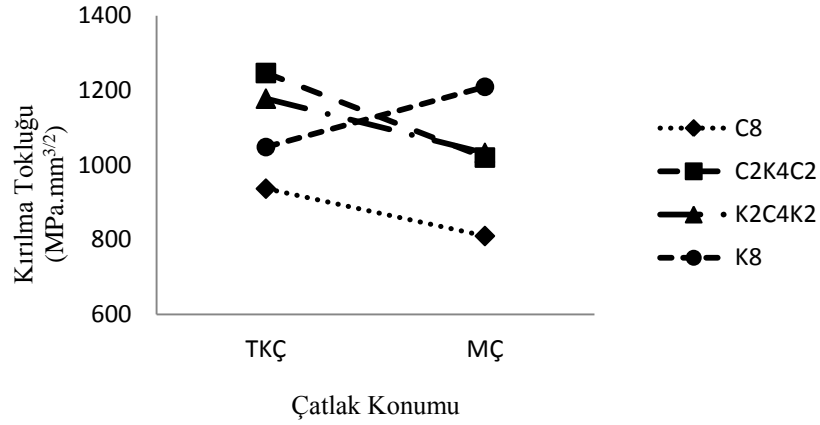
Şekil 6.25. 30° açılı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.26'da 45° açı ve 6mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; C₈, C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları, tek kenar ve çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür ve tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür. Tek kenar çatlaklı K₈ numunelerin kırılma toklukları, çift kenar ve merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçük olup merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür.



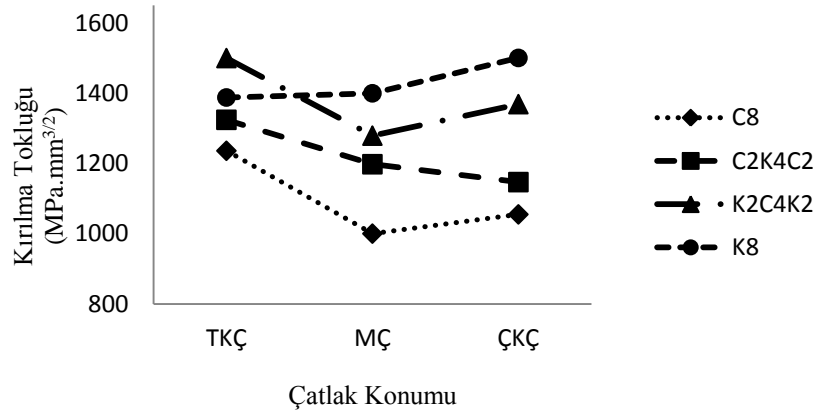
Şekil 6.26. 45° açı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.27'de 60° açı ve 6mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenar çatlaklı C₈, C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ numunelerin kırılma toklukları merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür. Merkezi çatlaklı K₈ numunelerinde ise kırılma toklukları tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür.



Şekil 6.27. 60° açı ve 6mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

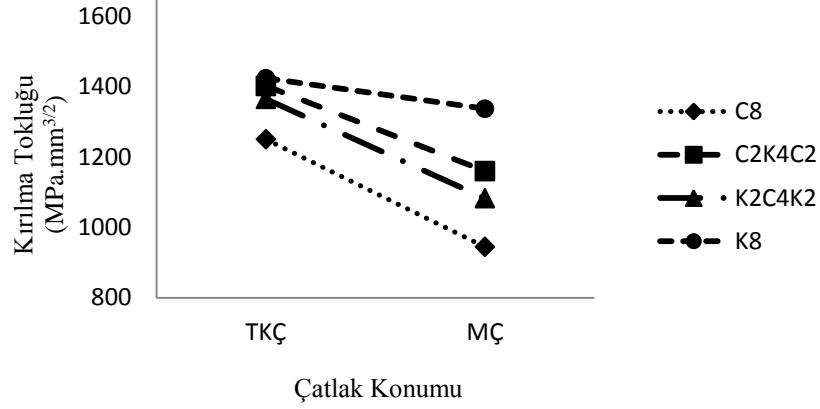
Şekil 6.28’de 0° açı ve 8mm boyunda çatlağa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; merkezi çatlaklı C₈, C₂K₄C₂ ve K₂C₄K₂ numunelerin kırılma toklukları, tek kenar ve çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. Tek kenar çatlaklı K₈ numunelerinin kırılma toklukları ise çift kenar ve merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçük olup merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür.



Şekil 6.28. 0° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

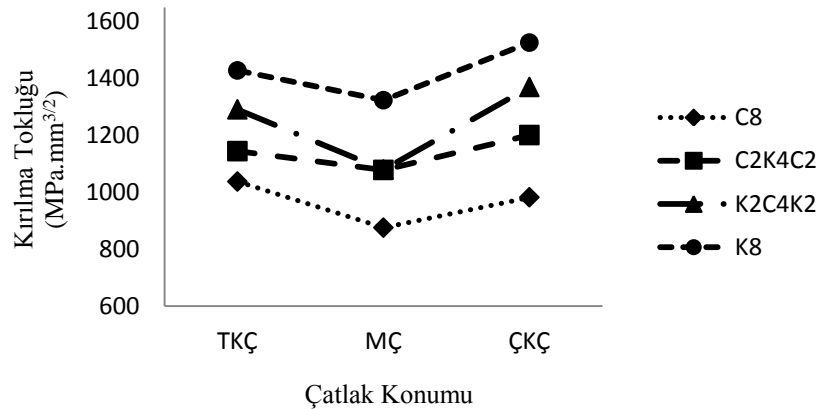
Şekil 6.29’da 30° açı ve 8mm boyunda çatlağa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği

verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarının merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyük olduğu gözlenmiştir.



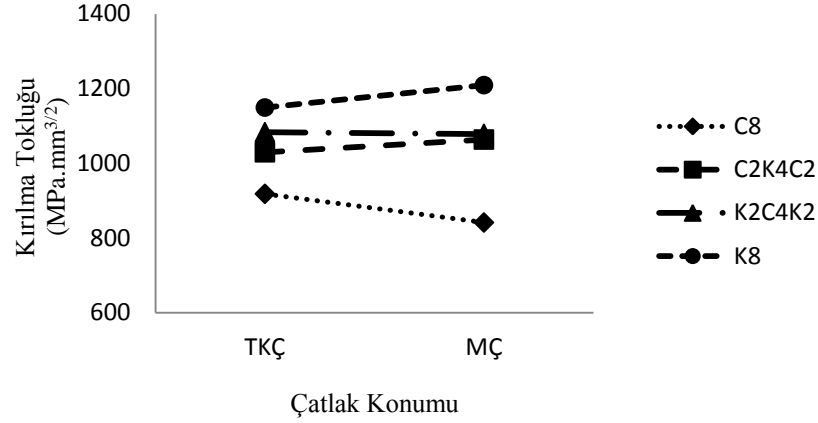
Şekil 6.29. 30° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.30'da 45° açı ve 8mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; merkezi çatlaklı numunelerin kırılma toklukları, tek kenar ve çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. Tek kenar çatlaklı C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin kırılma toklukları çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçüktür. Tek kenar çatlaklı K₈ numunelerin kırılma toklukları ise çift kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından büyüktür. Ayrıca merkezi çatlaklı hibrit yapıların kırılma toklukları yaklaşık aynı çıkmıştır.



Şekil 6.30. 45° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

Şekil 6.31’de 60° açı ve 8mm boyunda çatlığa sahip C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin çatlak konumuna bağlı olarak kırılma tokluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe göre; tek kenar çatlaklı C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ numunelerin kırılma tokluklarının merkezi çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçük olduğu gözlenmektedir. Merkezi çatlaklı C₈ numunelerinde ise kırılma tokluklarının tek kenar çatlaklı numunelerin kırılma tokluklarından küçük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.31. 60° açı ve 8mm çatlaklı kompozit numunelerin kırılma tokluklarının çatlak konumuna bağlı olarak değişimi

6.2 Çatlak İlerleyişi ve Hasar Şekilleri

Dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri (açılma modu için) sonrası hasar şekilleri Tablo 6.1-6.4’de verilmiştir. Tablolara bakıldığında tek kenar çatlaklı ve merkezi çatlığa sahip kompozit numunelerde hasarın çatlak ucundan başlayarak doğrusal bir şekilde kenara doğru ilerlediği görülebilir. Çift kenar çatlaklı ise hasar çatlak ucundan başlayarak doğrusal bir şekilde merkeze doğru ilerlemektedir.

6.3 Deneysel ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

Dokuma tipi C₈, C₂K₄C₂, K₂C₄K₂ ve K₈ kompozit numuneler için deneysel ve nümerik olarak bulunan kırılma tokluk değerleri ile bu değerler arasındaki sapmalar % hata olarak Tablo 6.5-6.8’de verilmiştir.

Tablo 6.5'te sadece dokuma tipi cam kumaşlardan oluşan (C_8) yapılarda, en büyük kırılma tokluk değeri ($1251,06\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) tek kenarında 30° açı olan ve 8mm çatlak boyuna sahip numunede, en küçük kırılma tokluk değeri ($809,68\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) ise merkezinde 60° açı olan ve 6mm çatlak boyuna sahip numunede elde edilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlardaki en büyük ve en küçük sapma değerleri sırasıyla %8,89 (30° , TKÇ ve 8mm'lik numunede) ve %1,35 (60° , MÇ ve 6mm'lik numunede) olarak elde edilmiştir.











Tablo 6.6'da dış kısmı dokuma tipi cam iç kısmı dokuma tipi karbon kumaşlardan oluşan ($C_2K_4C_2$) hibrit yapılarda, en büyük kırılma tokluk değeri ($1402,51\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) tek kenarında 30° açı olan ve 8mm çatlak boyuna sahip numunede, en küçük kırılma tokluk değeri ($866,92\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) ise merkezinde 60° açı olan ve 4mm çatlak boyuna sahip numunede elde edilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlardaki en büyük ve en küçük sapma değerleri sırasıyla %9,47 (30° , TKÇ ve 8mm'lik numunede) ve %0,37 (60° , MÇ ve 8mm'lik numunede) olarak elde edilmiştir.

Tablo 6.7'de dış kısmı dokuma tipi karbon iç kısmı dokuma tipi cam kumaşlardan oluşan ($K_2C_4K_2$) hibrit yapılarda, en büyük kırılma tokluk değeri ($1499,84\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) tek kenarında 0° açı olan ve 8mm çatlak boyuna sahip numunede, en küçük kırılma tokluk değeri ($985,76\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) ise merkezinde 60° açı olan ve 4mm çatlak boyuna sahip numunede elde edilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlardaki en büyük ve en küçük sapma değerleri sırasıyla %9,64 (0° , MÇ ve 6mm'lik numunede) ve %0,16 (45° , ÇKÇ ve 8mm'lik numunede) olarak elde edilmiştir.



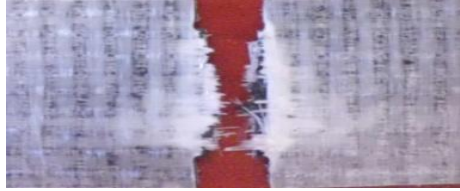
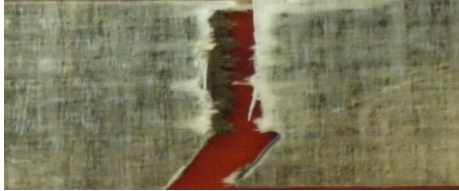






Tablo 6.8'de sadece dokuma tipi karbon kumaşlardan oluşan (K_8) yapılarda, en büyük kırılma tokluk değeri ($1617,01\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) çift kenarında 45° açı olan ve 4mm çatlak boyuna sahip numunede, en küçük kırılma tokluk değeri ($1036,86\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$) ise merkezinde 60° açı olan ve 4mm çatlak boyuna sahip numunede elde edilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlardaki en büyük ve en küçük sapma değerleri sırasıyla

%8,63 (60°, TKÇ ve 6mm'lik numunede) ve %0,04 (30°, TKÇ ve 6mm'lik numunede) olarak elde edilmiştir.








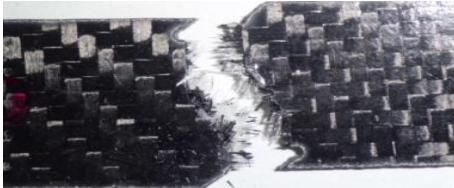


Tablo 6.1. C₈ kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri

	TEK KENAR ÇATLAĞI	MERKEZİ ÇATLAK	ÇİFT KENAR ÇATLAĞI
0°			
30°			
45°			
60°			











Tablo 6.2. C₂K₄C₂ hibrit kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri

	TEK KENAR ÇATLAĞI	MERKEZİ ÇATLAK	ÇİFT KENAR ÇATLAĞI
0°			
30°			
45°			
60°			

Tablo 6.3. $K_2C_4K_2$ hibrit kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri

	TEK KENAR ÇATLAĞI	MERKEZİ ÇATLAK	ÇİFT KENAR ÇATLAĞI
0°			
30°			
45°			
60°			

Tablo 6.4. K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluk deneyleri sonrası hasar şekilleri

	TEK KENAR ÇATLAĞI	MERKEZİ ÇATLAK	ÇİFT KENAR ÇATLAĞI
0°			
30°			
45°			
60°			

Tablo 6.5. C₈ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm^{3/2})

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI			MERKEZİ ÇATLAK			ÇİFT KENAR ÇATLAĞI		
		Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)
0	4	1084,75	1007,82	7,09	955,25	925,11	3,16	1052,66	971,88	7,67
	6	1240,37	1161,46	6,36	1066,80	1012,31	5,11	1158,24	1079,83	6,77
	8	1235,96	1131,13	8,48	1000,27	911,92	8,83	1055,03	985,51	6,59
30	4	1051,76	962,01	8,53	919,99	863,85	6,10	-	-	-
	6	1194,03	1115,09	6,61	897,00	839,29	6,43	-	-	-
	8	1251,06	1139,89	8,89	944,96	888,53	5,97	-	-	-
45	4	923,84	850,55	7,93	842,89	821,92	2,49	994,93	919,57	7,58
	6	1069,00	980,93	8,24	882,70	856,64	2,95	1014,20	948,16	6,51
	8	1037,74	955,25	7,95	875,73	835,50	4,59	982,44	934,10	4,92
60	4	940,59	874,75	7,00	817,71	802,90	1,91	-	-	-
	6	936,50	873,78	6,70	809,68	798,75	1,35	-	-	-
	8	918,12	854,36	6,95	841,35	784,91	6,71	-	-	-

Tablo 6.6. C₂K₄C₂ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm^{3/2})

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI			MERKEZİ ÇATLAK			ÇİFT KENAR ÇATLAĞI		
		Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)
0	4	1255,27	1194,09	4,87	1112,14	1028,85	7,49	1252,48	1182,01	5,63
	6	1383,69	1287,77	6,93	1120,57	1052,41	6,08	1241,95	1140,84	8,14
	8	1324,13	1201,86	9,23	1197,72	1120,25	6,47	1146,90	1096,90	4,38
30	4	1149,95	1080,87	6,01	1110,48	1078,25	2,90	-	-	-
	6	1238,95	1186,98	4,18	1147,62	1110,60	3,23	-	-	-
	8	1402,51	1269,72	9,47	1160,40	1128,36	2,76	-	-	-
45	4	1074,64	1027,93	4,35	1010,61	918,97	9,07	1207,58	1159,31	4,00
	6	1287,80	1187,13	7,82	1113,39	1017,01	8,66	1250,51	1215,04	2,84
	8	1144,60	1056,39	7,71	1078,58	998,72	7,40	1201,11	1186,93	1,18
60	4	1096,72	1049,46	4,31	866,92	825,16	4,82	-	-	-
	6	1246,20	1196,46	3,97	1019,77	968,33	5,04	-	-	-
	8	1029,41	985,71	4,24	1063,51	1059,52	0,37	-	-	-

Tablo 6.7. K₂C₄K₂ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm^{3/2})

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI			MERKEZİ ÇATLAK			ÇİFT KENAR ÇATLAĞI		
		Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)
0	4	1355,12	1297,89	4,22	1174,47	1115,57	5,02	1392,35	1321,79	5,07
	6	1386,31	1298,94	6,30	1226,00	1107,82	9,64	1334,38	1241,32	6,97
	8	1499,84	1370,50	8,62	1279,11	1204,26	5,85	1368,70	1316,85	3,79
30	4	1252,73	1186,15	5,32	1140,70	1117,75	2,01	-	-	-
	6	1362,25	1314,32	3,52	1138,57	1112,02	2,33	-	-	-
	8	1366,02	1245,69	8,81	1083,39	1063,17	1,87	-	-	-
45	4	1151,70	1096,34	4,81	1051,67	965,06	8,23	1266,38	1228,30	3,01
	6	1294,75	1202,11	7,16	1149,45	1093,11	4,90	1316,61	1292,53	1,83
	8	1291,53	1200,29	7,06	1080,12	1009,43	6,54	1370,13	1367,92	0,16
60	4	1044,09	1006,67	3,58	985,76	962,43	2,37	-	-	-
	6	1177,51	1139,36	3,24	1032,40	984,31	4,66	-	-	-
	8	1083,17	1044,93	3,53	1078,70	1047,29	2,91	-	-	-

Tablo 6.8. K₈ kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri (MPa.mm^{3/2})

Çatlak Açısı (°)	Çatlak Boyu (mm)	TEK KENAR ÇATLAĞI			MERKEZİ ÇATLAK			ÇİFT KENAR ÇATLAĞI		
		Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)	Deneysel	Nümerik	Hata (%)
0	4	1574,18	1456,08	7,50	1206,20	1167,87	3,17	1485,39	1432,49	3,56
	6	1486,39	1444,38	2,83	1314,08	1210,30	7,90	1546,96	1494,17	3,41
	8	1387,62	1314,56	5,27	1399,56	1342,64	4,07	1500,15	1468,21	2,13
30	4	1590,58	1564,58	1,62	1266,88	1274,31	0,59	-	-	-
	6	1464,94	1465,55	0,04	1347,55	1351,21	0,22	-	-	-
	8	1424,63	1350,02	5,24	1337,85	1347,82	0,75	-	-	-
45	4	1524,51	1534,65	0,67	1196,84	1127,14	5,82	1617,01	1614,72	0,14
	6	1447,25	1467,50	1,40	1317,48	1246,67	5,37	1516,70	1533,71	1,12
	8	1428,15	1453,74	1,79	1323,58	1270,10	4,04	1526,13	1569,60	2,85
60	4	1300,64	1281,48	1,47	1036,86	977,85	5,59	-	-	-
	6	1047,89	1138,35	8,63	1204,86	1129,44	6,19	-	-	-
	8	1149,12	1132,98	1,40	1209,22	1202,50	0,56	-	-	-

6.4 Sonuçlar

Bu çalışmada sekiz tabakalı sadece dokuma tipi cam (C_8), sadece dokuma tipi karbon (K_8), dış kısmı dokuma tipi cam iç kısmı dokuma tipi karbon ($C_2K_4C_2$) ve dış kısmı dokuma tipi karbon iç kısmı dokuma tipi cam ($K_2C_4K_2$) hibrit kompozit yapıların açılma modu için kırılma tokluk değerleri çatlak açısına (0° , 30° , 45° ve 60°), çatlak boyuna (4, 6 ve 8mm) ve çatlak konumuna (tek kenar çatlaklı, merkezi çatlaklı ve çift kenar çatlaklı) bağlı olarak deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

- En yüksek kırılma tokluğu değerleri sadece dokuma tipi karbon kumaşlardan oluşan (K_8) kompozit numunelerden elde edilmiştir.
- En düşük kırılma tokluğu değerleri sadece dokuma tipi karbon kumaşlardan oluşan (C_8) kompozit numunelerden elde edilmiştir.
- Çatlak açısı arttika kırılma tokluğunda azalma gözlenmiştir.
- Kırılma tokluk değerleri en küçük değerden en büyük değere doğru sırasıyla C_8 , $C_2K_4C_2$, $K_2C_4K_2$ ve K_8 dizilimine sahip yapılarda elde edilmiştir.
- Çatlak boyu arttika malzemenin dayanabileceği yük miktarı azalmaktadır.
- Çatlak açısı arttika malzeme daha fazla yüke dayanabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Sorucu A. Ortotropik malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2007.
2. Çolak FM. Üzerinde açılı çatlak bulunan cam-kumaş/epoksi kompozitlerde çatlak açısının kırılma davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2006.
3. Canan F. Açılı yüzey çatlaklı cam epoksi kompozit levhaların kırılma davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2007.
4. Özben T, Arslan VG. Farklı çatlak boyuna sahip plakada gerilme yoğunluğunun nümerik ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, Mühendislik Dergisi, 2010, Cilt:1, sayı:1, 61-69.
5. Ekrem M. Cam kumaş takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2006.
6. Şimşir M. Çelik tel takviyeli lamel grafitli dökme demirin kırılma davranışının incelenmesi, Proceedings of 8th International Fracture Conference, Sivas, 2007, 700-709.
7. Aytekin H. Yapı çeliklerinin kırılma tokluğu üzerine bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2005.
8. Arıkan H. Çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2002.
9. Atmaca N. Analysis of fracture mechanics via finite elements and artificial intelligence, Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye, 2007.
10. Stamenkovic D. Determination of fracture mechanics parameters using FEM and J-integral approach, Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, İtalya, 2006, 25-29.
11. Atmaca N, Erkiğ A, Çevik A, Güzelbey İH. Açılma modu problemlerinde J-integral değerlerine etki eden parametreler ile yörüngesi arasındaki ilişki, XVI. Ulusal Mekanik Kongresi, Kayseri, 2009, 239-248.
12. Tortoç A. Balsa/PVC sandviç yapılarda kırılma tokluğu etkisinin nümerik çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2009.
13. Özben TT, Arslan N, Özbay M. İki eksenli yüklenmiş ve ortasında eliptik delik bulunan plakanın delik geometrisine ve eğimine göre gerilme yoğunluğu

faktörünün hesaplanması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2011, 26(3): 523-531.

14. http://www.southalabama.edu/engineering/mechanical/phan/ANSYS_LEFM01.pdf
15. Kaman MO. Dokuma cam fiber/epoksi kompozitlerde tabakalar arası kırılma tokluğunun araştırılması, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 2010, 149-159.
16. Zor M. Kemik çimentosu kemik yapısının kırılma mekaniği açısından incelenmesi, DEU Fen ve Mühendislik Dergisi, 1999, 1(1)
17. Özdemir A. Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2006.
18. Kaman MO. Stress intensity factor analysis of antisymmetrically carbon/epoxy laminated composite plates with different orientations, Turkish Journal of Science & Technology, 2011, 6(2): 61-74.
19. Şimşir M. Investigation of fracture behavior of steel/steel laminates, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.
20. Kaman MO. Effect of fiber orientation on fracture toughness of laminated composite plates, Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(13):2521-2534.
21. Taş Z, Polat A. Boru çeliklerinin kırılma tokluğunun J-integral yöntemiyle belirlenmesi, CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 2007, 7:71-84.
22. Aktaş M. Düzlem dışı düzgün yayılı yüke maruz kompozit levhada elasto-plastik gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2003.
23. Hollaway LC, Head PR. Advanced polymer composite materials and their components, Elsevier Science & Technology Books, 2001.
24. Karcı A. Uçak yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2009.
25. Sakin R. Düzlemsel rastgele dağılımlı keçe elyafla takviyeli kompozit malzemede kırılma tokluğunun elyaf hacmi, elyaf yönelmesi ve deformasyon hızı ile değişiminin saptanması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 1995.
26. Alkılıçgil Ç. Development of a new method for mode I fracture toughness test on disc type rock specimen, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, Türkiye, 2006.

27. Wang CH. Introduction to Fracture Mechanics, Department of Defence, Australia, 1996.
28. Liu AF. Deformation and fracture mechanisms and static strength of metals, Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction, ASM International, United States of America, 2005.
29. Okutan B. Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2001.
30. Aktaş M. Temperature effect on impact behavior of laminated composite plates, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2007.
31. Tada H, Paris PC, Irwin GR. The stress analysis of cracks handbook, 3rd edition, New York, 2002.
32. Balcıoğlu HE, Aktaş M. An investigation on lateral buckling of laminated composites with delaminations, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2013, 20:367-375.
33. Aktaş M. Buckling behavior of carbon/epoxy laminated composite plates under biaxial loading, Advanced Composite Letters, 2009, 18(3):85-93.
34. Tercan M, Aktaş M. Buckling behavior of 1x1 rib knitting laminated plates with cutouts, Composite Structures, 2009, 89:245-252.
35. Karakuzu R, Taylak N, İçten BM, Aktaş M. Effects of geometric parameters on failure behavior in laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes, Composite Structures, 2008, 85:1-9.
36. Karakuzu R, Çalışkan CR, Aktaş M, İçten BM. Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin-loaded holes, Composite Structures, 2008, 82:225-234.
37. <http://web.deu.edu.tr/ansys/ornek/2Dkirilmamekanigi-tum%20malzemeler%20icin-5haziran2007.pdf>