

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİTETRAFLUOROETİLEN MALZEMEDE DARBE
KIRILMA TOKLUĞUNUNUN ESAS KIRILMA İŞİ
METODUYLA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Makine Müh. Mustafa ARMAĞAN

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Danışman: Doç.Dr. A. Armağan ARICI

KOCAELİ, 2011

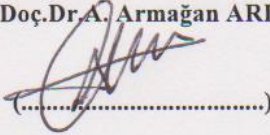
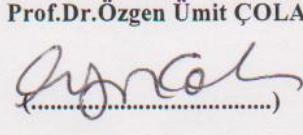
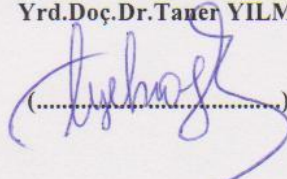
KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİTETRAFLUOROETİLEN MALZEMEDE DARBE
KIRILMA TOKLUĞUNUNUN ESAS KIRILMA İŞİ
METODUYLA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Müh. Mustafa ARMAĞAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 8 Temmuz 2011

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç.Dr.A. Armağan ARICI	Prof.Dr.Özgen Ümit ÇOLAK	Yrd.Doç.Dr.Taner YILMAZ
 (.....)	 (.....)	 (.....)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Üstün fiziksel, termal ve elektriksel özellikleri ile mühendislik malzemeleri içerisinde ayrı bir yere sahip olan politetrafluoroetilen (PTFE) günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir. PTFE'ye farklı dolgu maddelerinin eklenmesi ile kazandırılan yeni özellikler, spesifik ihtiyaçlara yön verilebilmesini sağlamaktadır.

PTFE'nin geniş sıcaklık aralığında kullanılabilmesi, sürtünme katsayısının da oldukça düşük olması ile sanayide, mühendislik yapılarında ve makine parçalarında seçimi tercih konusudur. Ani yükler, yüksek gerilmeler gibi malzemeyi zorlayabilen çevresel etkiler altında malzemenin güvenli bir şekilde çalışabilmesi, ihtiyaçlara cevap verebilmesi amacıyla malzemenin kırılma davranışı belirlenmelidir. Kırılma davranışının belirlenmesi amacıyla geliştirilen klasik kırılma mekaniği metalsel malzemeler için başarılı sonuçlar verse de aynı durum polimerik malzemeler için geçerli olamamaktadır. Bu nedenle polimerik malzemelerin kırılma davranışını incelemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler içinde son yıllarda kullanım oranı oldukça artan esas kırılma işi metodu (EWF) ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada politetrafluoroetilenin (PTFE), saf ve farklı dolgu maddeleri ile farklı sıcaklıklarda malzemenin dinamik yükler altında kırılma davranışını incelemek amacıyla darbe esas kırılma işi (EWF) metodu uygulanmıştır.

Deneylerde kullanılan tescilli markası Eفالon-PTFE malzemelerinin temin edilmesini sağlayan Polimer ve Kimya Sanayii A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde çalışmalarım sırasında vermiş oldukları destek nedeniyle teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans öğrenimim süresince ve bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, her konuda yol gösteren, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen, titizliği ve bilgi birikimi ile örnek aldığım, danışmanım, Sn. Doç.Dr.Aziz Armağan ARICI hocama teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere getiren annem Müzeyyen ARMAĞAN ve babam Faruk ARMAĞAN'a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER.....	ix
ÖZET.....	xii
İNGİLİZCE ÖZET	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Plastik Malzemeler.....	4
2.1.1. Politetrafluoroetilen (PTFE).....	7
2.1.1.1. Eفالon politetrafluoroetilen (PTFE) özellikleri ve kullanım alanları	10
2.2. Kırılma Mekaniği	13
2.2.1. Giriş.....	13
2.2.2. Lineer elastik kırılma mekaniği	17
2.2.2.1. Enerji dengesi yaklaşımı	18
2.2.2.2. Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı.....	22
2.2.3. Elasto-plastik kırılma mekaniği	28
2.2.4. Kırılma tokluğu deneyleri	32
2.2.4.1. Çatlak ucu açılma miktarı metodu (CTOD).....	33
2.2.4.2. J-integrali metodu.....	34
2.2.5. Esas kırılma işi metodu (EWF)	37
2.2.5.1. Giriş.....	37
2.2.5.2. EWF yönteminin teorisi	40
2.2.5.3. Esas kırılma işi değerinin COD yöntemiyle hesaplanması	53
2.2.5.4. J-integrali metodu ile EWF metodu arasındaki ilişkisi.....	54
2.3. Literatür Araştırması	55
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	66
3.1. Kullanılan Malzeme	66
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	67
3.3. Deney Numunelerinin Kodlanması.....	68
3.4. Charpy Darbe Testi	69
3.5. Görsel İnceleme	72
3.5.1. Makro inceleme.....	72
3.5.2. Fraktografik inceleme	72
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	74
4.1. 6 mm Kalınlığındaki Saf-PTFE Malzemesinin 23°C'deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemiyle İncelenmesi	75
4.2. 6 mm Kalınlığındaki %40 Katkı Oranında Bronz-PTFE Malzemesinin 23°C'deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemiyle İncelenmesi	78
4.3. 6 mm Kalınlığındaki %25 Katkı Oranında Karbon-PTFE Malzemesinin 23°C'deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemiyle İncelenmesi	81

4.4. 3,5 mm Kalınlığındaki %25 Katkı Oranında Cam Elyaf-PTFE Malzemesinin 23°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemiyle İncelenmesi	84
4.5. 6 mm Kalınlığındaki %25 katkı oranında Karbon-PTFE Malzemesinin 150°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemiyle İncelenmesi	87
4.6. 6 mm Kalınlığındaki Saf-PTFE Malzemesinin 150°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemiyle İncelenmesi	90
4.7. Farklı Koşullar Altında Araştırılan PTFE Malzemesinin Esas Kırılma İşi Parametrelerinin Karşılaştırılması.....	93
4.8. Kırılma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Altında İncelenmesi	98
4.9. Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobuyla (TEM) İncelenmesi	103
4.9.1. 23°C ‘de 6 mm kalınlığına sahip saf-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi.....	103
4.9.2. 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip saf-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi.....	105
4.9.3. 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı bronz-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi	108
4.9.4. 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi	110
4.9.5. 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi	112
4.9.6. 23°C’de 3.5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı cam elyaf-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi	114
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	116
5.1. Sonuçlar	116
5.2. Öneriler	117
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Tetrafluoroetilen monomerinin polimerizasyonu ile PTFE oluşumu	7
Şekil 2.2: PTFE'nin karbon ve fluor atomları ile oluşturduğu yapı.....	8
Şekil 2.3: PTFE için sıcaklık-basınç faz diyagramı ve II. fazda kristal yapısı	10
Şekil 2.4: Saf PTFE ile üretilmiş olan parçalar	11
Şekil 2.5: Karbon alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar	11
Şekil 2.6: Cam elyaf alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar	12
Şekil 2.7: Bronz alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar.....	12
Şekil 2.8: F kuvveti etkisi altındaki levhanın v kadar uzaması.....	19
Şekil 2.9: Bir levhanın gerilme altında çatlak oluşumu	21
Şekil 2.10: Yükleme (Kuvvet) altında çatlak ilerleme modları; Mod I(Açılma veya çekme modu), Mod II (Kayma modu), Mod III (Yırtılma veya makaslama modu) ..	22
Şekil 2.11: Çatlak ucunda bir noktada gerilme	23
Şekil 2.12: Sonsuz levhanın merkezinde bulunan 2a uzunluğundaki çatlak	24
Şekil 2.13: Çatlak ucunda oluşan elastik gerilme alanı.....	24
Şekil 2.14: Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikroçatlama ve sır çatlağı sonucu oluşan deformasyon	29
Şekil 2.15: Çatlak ucu plastik bölgenin ifade edilmesi	30
Şekil 2.16: Düzlem genleme ve düzlem gerilme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin şekli	31
Şekil 2.17: Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi	32
Şekil 2.18: Çatlak ucu açılma miktarı	33
Şekil 2.19: J-İntegral kontrolü	35
Şekil 2.20: J _{IC} 'yi elde etmek için test prosedürü	36
Şekil 2.21: Çatlak ucu deformasyon bölgesi, (a) gevrek malzeme, (b) sünek malzeme	39
Şekil 2.22: Kırılma bölgesinin şematik olarak gösterilmesi, iç kırılma proses bölgesi (IFPZ) ve dış plastik deformasyon bölgesi (OPDZ)	41
Şekil 2.23: Test geometrisi ve uygulanan yükün kaydedilmesi; çift taraftan çentik açılmış (DENT) çekme numunesi (a), kırılma için yük-deplasman eğrisi (b) gösterimi	42
Şekil 2.24: w_e ve w_f değerlerinin $w_f - L$ doğrusuna göre bulunması	44
Şekil 2.25: Çekme testi ile oluşan proses bölgesi ve plastik bölgenin oluşumu	45
Şekil 2.26: Numunenin çentiksiz kısmının uzunluğunun gerilme durumuna etkisi ..	47
Şekil 2.27: Enerjinin kısımlara ayrılması (a) başlatma işi, (b) akmanın ani olarak başlaması durumu (akma işi), (c) akmanın zamana bağlı olarak gerçekleşmesi (akma işi).....	48
Şekil 2.28: Esas kırılma işi değerlerinin bulunması (w_e , $w_{e,y}$, $w_{e,n}$).....	49
Şekil 2.29: Iosipescu testinin şematik olarak gösterimi	50
Şekil 2.30: Mod III (Yırtılma) yükleme altında düzlem dışı kırılma tokluğunun bulunmasında kullanılan pantolon tipi test numunesi	51
Şekil 2.31: Kristalin faz bölgelerinin basınç ve sıcaklığa göre değişimi	55
Şekil 2.32: Çekme test numuneleri ve takozun pres yönü	56

Şekil 2.33: Kırılma tokluğu değerlerinin (J_{IC}) farklı koşullar altında gösterimi	56
Şekil 2.34: TEM mikroskopik resmi ile kırılma yüzeyi morfolojisi	57
Şekil 2.35: PTFE'nin gözlenen kırılma mekanizmalarının şematik olarak gösterimi; (a) sır çatlağı oluşumu, (b) mikroboşlukların birleşimi, (c) liflerin hizalanması (sünek).....	58
Şekil 2.36: Kırılma tokluğu ile sıcaklık arasındaki ilişkinin farklı kristalinlik oranlarında gösterimi	59
Şekil 2.37: Farklı katkı oranlarına sahip poliamid test numunelerinin darbe yükü ile hızı arasındaki ilişkisi.....	61
Şekil 2.38: Spesifik esas kırılma işi ile spesifik plastik deformasyon işinin bulunması	62
Şekil 2.39: Sadece spesifik esas kırılma işinin bulunması durumu	62
Şekil 2.40: Kuvvet-zaman eğrilerinin numunelerin farklı çentiksiz uzunlukları ile karşılaştırılması	63
Şekil 2.41: Spesifik esas kırılma işi ile spesifik plastik deformasyon işinin bulunması	64
Şekil 2.42: Malzemedeki katkı oranlarının değişmesi ile gevrek-sünek geçişi	65
Şekil 3.1: Deneylede kullanılan Charpy darbe numunelerinin boyutları.....	67
Şekil 3.2: Charpy çentik darbe testi	70
Şekil 3.3: Ceast 6545 enstrumante edilmiş çentik darbe cihazı	71
Şekil 3.4: JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobu (TEM)	73
Şekil 4.1: 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri	76
Şekil 4.2: 23 °C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	77
Şekil 4.3: 23 °C'de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri.....	80
Şekil 4.4: 23 °C'de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	81
Şekil 4.5: 23 °C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri.....	83
Şekil 4.6: 23 °C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	84
Şekil 4.7: 23 °C'de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri.....	86
Şekil 4.8: 23 °C'de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	87
Şekil 4.9: 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri.....	89
Şekil 4.10: 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	90
Şekil 4.11: 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri	92
Şekil 4.12: 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	93

Şekil 4.13: Tüm spesifik esas kırılma işi değerlerinin gösterimi	94
Şekil 4.14: Numune kalınlığının malzemenin kırılma tokluğuna etkisi	94
Şekil 4.15: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip malzemenin spesifik esas kırılma işi değerlerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 4.16: 23°C ve 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin spesifik esas kırılma işi değerlerinin karşılaştırılması	96
Şekil 4.17: 23°C ve 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin spesifik esas kırılma işi değerlerinin karşılaştırılması.....	97
Şekil 4.18: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu bölgesi	98
Şekil 4.19: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi	99
Şekil 4.20: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin çentik ucu bölgesi	99
Şekil 4.21: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin kırılma yüzeyi	100
Şekil 4.22: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu bölgesi	100
Şekil 4.23: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi	101
Şekil 4.24: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu bölgesi	101
Şekil 4.25: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi	102
Şekil 4.26: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu bölgesi	102
Şekil 4.27: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi	103
Şekil 4.28: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi.	104
Şekil 4.29: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi	104
Şekil 4.30: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi	105
Şekil 4.31: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi	106
Şekil 4.32: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi	107
Şekil 4.33: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi	107
Şekil 4.34: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi	108
Şekil 4.35: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi	109
Şekil 4.36: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi	109
Şekil 4.37: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi	110
Şekil 4.38: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi	111
Şekil 4.39: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi	111

Şekil 4.40: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi	112
Şekil 4.41: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi	113
Şekil 4.42: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi	113
Şekil 4.43: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi	114
Şekil 4.44: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf -PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi	115
Şekil 4.45: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi	115

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Eفالon PTFE malzemesinin bazı teknik özellikleri	13
Tablo 2.2: OPDZ geometrisinin β (şekil faktörü) ile ilişkisinin belirlenmesi.....	46
Tablo 3.1: Deneyde kullanılan malzemelerin mekanik ve termal özellikleri	66
Tablo 3.2: Deney numunelerinin kodlanması yöntemi	68
Tablo 4.1: Saf-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri.....	75
Tablo 4.2: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri	78
Tablo 4.3: %40 katkı oranlı Bronz-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri.....	79
Tablo 4.4: 23 °C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri	81
Tablo 4.5: %25 katkı oranlı Karbon-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri.....	82
Tablo 4.6: 23 °C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri	84
Tablo 4.7: %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri	85
Tablo 4.8: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri	87
Tablo 4.9: %25 katkı oranlı Karbon-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri.....	88
Tablo 4.10: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri	90
Tablo 4.11: Saf -PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri.....	91
Tablo 4.12: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri	93

SİMGELER

σ	: Gerilme (MPa)
σ_y	: Akma gerilmesi (MPa)
σ_n	: Maksimum net kesit gerilmesi (MPa)
σ_{zz}	: Eksenel gerilme bileşimi (MPa)
τ	: Kayma gerilmesi (MPa)
ϵ	: Gerinim (genleme) (mm/mm)
E	: Elastisite modülü (GPa)
U	: Enerji (kJ)
G	: Enerji boşalma miktarı (kJ/m ²)
G _{IC}	: Kritik enerji boşalma miktarı (kJ/m ²)
K	: Gerilme şiddeti faktörü (MPa√m)
K _{IC}	: Kritik gerilme şiddeti faktörü (MPa√m)
K _I	: Mod I gerilme şiddeti faktörü (MPa√m)
K _{II}	: Mod II gerilme şiddeti faktörü (MPa√m)
K _{III}	: Mod III gerilme şiddeti faktörü (MPa√m)
C	: Komplians (mm/N)
R	: Çatlak ilerleme direnci (kJ/m ²)
ν	: Poisson oranı (mm/mm)
θ	: Yüzey çatlağı parametrik açısı (°)
r	: Çatlağa olan mesafe (mm)
a	: Çatlak derinliği (mm)
u	: x yönündeki yer değiştirme (mm)
v	: y yönündeki yer değiştirme (mm)
w	: z yönündeki yer değiştirme (mm)
δ	: Çatlak açılma mesafesi
W _f	: Toplam kırılma işi (kJ)
W _e	: Esas kırılma işi (kJ)
W _p	: Plastik deformasyon işi (kJ)
W _{Tf}	: Yırtılma için toplam kırılma işi (kJ)
W _{Te}	: Yırtılma için esas kırılma işi (kJ)
W _{Tp}	: Yırtılma için plastik deformasyon işi (kJ)
w _f	: Spesifik toplam kırılma işi (kJ/m ²)
w _e	: Spesifik esas kırılma işi (kJ/m ²)
w _p	: Spesifik plastik deformasyon işi (kJ/m ²)
w _y	: Akma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m ²)
w _{nt}	: Boyun verme- yırtılma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m ²)
w _{Tf}	: Yırtılma için spesifik toplam kırılma işi (kJ/m ²)
w _{Te}	: Yırtılma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m ²)
w _{Tp}	: Yırtılma için spesifik plastik deformasyon işi (kJ/m ²)
W _I	: Tersinmez başlatma prosesinin akmayla kapsanması işi (kJ)
W _{II}	: Çatlak yayılması ve uzatılmış boyun vermenin plastik bölgesi işi (kJ)

β	: Plastik deformasyon bölgesi şekil faktörü
β_y	: Akma için plastik deformasyon bölgesi şekil faktörü
β_{nt}	: Boyun verme-yırtılma için plastik deformasyon bölgesi şekil faktörü
β_{w_p}	: Spesifik plastik deformasyon işi (kJ/m^2)
β_{w_y}	: Akma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m^2)
$\beta_{w_{nt}}$: Boyun verme-yırtılma için plastik deformasyon işi (kJ/m^2)
α''	: Yırtılma kırılması için plastik bölge şekil faktörü
L	: Çentiksiz bölgenin uzunluğu (ligament length, mm)
V_p	: Plastik deformasyon bölgesinin hacmi (mm^3)
r_p	: Çatlak ucu plastik bölgenin yarıçapı (mm)
W	: Numune genişliği (mm)
B	: Numune kalınlığı (mm)
h_b	: Plastik deformasyon bölgesinin yüksekliği (mm)
P_{max}	: Yük-uzama eğrisindeki maksimum yük (N)
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
μ	: Kayma modülü
Δa	: Çatlak ilerleme mesafesi (mm)

Kısaltmalar

ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
ASTM	: American Society for Testing Materials
COD	: Crack opening displacement (çatlak açılma mesafesi)
CTOD	: Crack tip opening displacement (çatlak ucu açılma mesafesi)
DENT	: Double edge notched tension (çift kenarından çentikli çekme)
EPKM	: Elasto plastik kırılma mekaniği
EWf	: Essential work of fracture (esas kırılma işi)
GŞF	: Gerilme şiddeti faktörü
HDPE	: High density polyethylene
IFPZ	: Inner fracture process zone (iç kırılma proses zonu)
ISO	: International Organization for Standardization
JIC	: J Integral Control (J İntegrali kontrolü)
LEKM	: Lineer elastik kırılma mekaniği
MMT	: Montmorillonite
OPDZ	: Outer fracture process zone (dış kırılma proses bölgesi)
PA	: Polyamide
PA 6,6	: Polyamide 6,6
PBT	: Polybutylene-terephthalate
PE	: Polyethylene
PEO	: Polyethylene octene
PP	: Polipropilen
PS	: Polystyrene

PTFE : Polytetrafluoroethylene
PVC : Polyvinylchloride
SEBS : Styrene ethylene butylene styrene
SEN-B: Single edge notched bend (tek kenarından çentikli eğme)
SENT : Single edge notched tension (tek kenarından çentikli çekme)
SPAN : Açıklık (numunenin test cihazına sabitlendiği aralık mesafesi)
TEM : Taramalı elektron mikroskobu

POLİTETRAFLUOROETİLEN MALZEMEDE DARBE KIRILMA TOKLUĞUNUNUN ESAS KIRILMA İŞİ METODUYLA İNCELENMESİ

Mustafa ARMAĞAN

Anahtar Kelimeler: Politetrafluoroetilen, Darbe yükü, Kırılma davranışı, Esas kırılma işi metodu.

Özet: Bu çalışmada, politetrafluoroetilenin (PTFE) dinamik yükler altında kırılma davranışı, darbe esas kırılma işi (essential work of fracture-EWF) metoduyla incelenmiştir. PTFE'ye katılan farklı dolgu malzemeleri (bronz, cam elyaf, karbon) ile PTFE'nin farklı numune kalınlıkları ve PTFE'nin farklı sıcaklıklarda kırılma davranışı incelenmiştir.

EWF parametrelerinin saptanabilmesi için farklı çentik uzunluklarına sahip tek kenarından çentikli darbe test numuneleri kullanılmıştır. Yüksek darbe hızında numunelere Charpy darbe testi uygulanmıştır. Darbe testi sonucu elde edilen veriler kullanılarak malzemenin esas kırılma işi parametreleri hesaplanmış ve sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Darbe testi ile hasara uğratılan numunelerin kırılma yüzeyleri Optik Mikroskop ile gösterilmiştir. Darbe numunelerinin kırılma yüzeyleri Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ile gösterilmiş ve incelenmiştir.

**IMPACT FRACTURE TOUGHNESS OF
POLYTETRAFLUOROETHYLENE MATERIAL INVESTIGATION OF
ESSENTIAL WORK OF FRACTURE METHOD**

Mustafa ARMAĞAN

Keywords: Polytetrafluoroethylene, Impact load, Fracture behaviour, Essential work of fracture method.

Abstract: In this study, polytetrafluoroethylene (PTFE) fracture behaviour under dynamic loads, fracture behaviour of PTFE was investigated using EWF method. Different filling materials created of PTFE blends (bronze, glass fiber, carbon) specimens with different thickness and different temperatures on fracture behaviour were investigated.

Single edge notched impact test specimens with various ligament lengths were used to determine the EWF parameters. High impact velocity by specimens Charpy impact test were applied. EWF parameters were evaluated by using impact test results and represented graphically.

After impact tests, the fracture cross sections of specimens were showed by Optical Microscope, the fracture cross sections of specimens were showed and investigated by Scanning Electron Microscope (SEM).

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Plastiğin temel yapısını oluşturan polimerler küçük ve basit kimyasal birimlerin tekrarlanması ile meydana gelmiş uzun moleküllerdir. Polimerlerin üretim ve mühendislikteki kullanım alanları oldukça geniştir. Plastikler viskoelastik malzemeler olup yük altında ve çevre şartlarında özellikleri çok değişir. Metallerde olduğu gibi sadece özellik tablolarına bakarak ürün dizayn etmenin imkanı yoktur. İç gerilmeler, üretim metotları, teknoloji, parametreler, monomer ve hammadde seçimi, temizlik gibi birçok faktör, plastiklerin kullanım yerlerinde performanslarını etkiler.

Polimerlerin mühendislik malzemesi olarak kullanılabilir olması ile malzemenin hasar mekanizmalarının belirlenmesi gerekmektedir. Hasar mekanizmasının açıklanabilmesi kırılma mekaniği bilimi ile olmaktadır. Gevrek malzemelerin kırılma davranışlarının belirlenmesinde kırılma mekaniğinin klasik yaklaşımı ile geçerli sonuçlar elde edilebilmektedir. Sünek malzemeler için aynı durum söz konusu değildir. Bu durumun ortaya çıkmasındaki ana etmen, sünek malzemelerde çatlak ucu ve çevresinde önemli oranda plastik deformasyon oluşması ve bu deformasyonun klasik kırılma mekaniği yaklaşımında hesaba katılamaması sonucu kırılmanın karakterize edilememesidir.

Sünek malzemelerin kırılma davranışlarını açıklamak için, çatlak ucu açılma miktarı (CTOD), J-İntegrali metodu ve esas kırılma işi (EWF) metodu kullanılmaktadır. Deneysel açıdan kolay uygulanabilir olduğu için esas kırılma işi metodu (EWF), sünek malzemelerin, özellikle polimerlerin kırılma davranışını açıklamak üzere son yıllarda çok geniş bir biçimde uygulanmaya başlamıştır [1].

Mühendislik malzemelerinden olan politetrafluoroetilen (PTFE) , karbon ve flor atomlarında oluşan molekül yapısından dolayı, başka hiçbir malzemede bir arada bulunmayan üstün özelliklere sahiptir. Bu özellikler; mühendislik malzemelerinde bütün katılar içinde en düşük sürtünme katsayısı, sanayide kullanılan tamamına yakın bütün kimyasallara dayanım, en geniş sıcaklık aralığında sürekli kullanılabilme, yapışmazlık, yanmama, yüksek elektriksel izolasyon, hava şartları ve nemden

etkilenmemedir. PTFE' nin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla, malzemeye bazı dolgu maddeleri (karbon, bronz, cam elyaf, alümina, vb.) polimerizasyon sırasında katılarak PTFE alaşımları elde edilmektedir. PTFE'nin kullanım alanlarının oldukça geniş olması ve endüstride kullanım alanlarına bağlı olarak çeşitli fiziksel dış etkilere maruz kalması ile malzemelerde kırılma olayı görülmektedir. PTFE'nin kırılma davranışının incelenmesi, mühendislik yapılarının dizaynı ve güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada politetrafluoroetilen (PTFE) malzemesinin kırılma davranışı incelenmiştir. Darbe yükü altında malzemenin kırılma davranışını incelemek için esas kırılma işi metodu (EWF) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılmış olan PTFE malzemesi, saf ve belli oranda karbon, bronz, cam elyaf dolgu maddeleri içerecek şekilde hazırlanmıştır. Kırılmanın ani yüklemeye altındaki davranışını incelemek için darbe test numuneleri esas kırılma işi metoduna uygun olarak hazırlanmıştır. Darbe test numuneleri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında kırılmış, bulunan test sonuçları esas kırılma işi metodu parametrelerine dönüştürülerek grafiksel olarak gösterilmiştir.

Bölüm 2'de polimer malzemelerin genel özelliklerine değinilmiştir. Çalışmada kullanılan PTFE malzemesinin genel yapısı, özellikleri, kullanım alanları gibi konulara değinilmiştir. Kırılma mekaniği teorisi ile kırılma davranışının belirlenebilmesi amacıyla geliştirilen yöntemler ele alınmıştır. Esas kırılma işinin teorisi, uygulanabilirliği ve geçerliliği hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada kullanılan malzemenin dinamik koşullar altında kırılma davranışı ve darbe esas kırılma işi ile ilgili bugüne kadar yapılan bazı çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3'te deneyde kullanılan PTFE malzemesinin özellikleri, deney numunelerinin hazırlanması ve kodlanması, Charpy darbe testi ile genel bilgiler verilerek deney parametrelerin belirlenmesi ile ilgili bilgi verilmiştir.

Bölüm 4'te PTFE malzemesinin farklı katkı (dolgu) maddeleri, farklı numune kalınlıkları ve farklı sıcaklıklardaki kırılma davranışı ayrı başlıklarda incelenmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar esas kırılma işi parametrelerine dönüştürülmüştür. Bulunan parametreler grafiksel olarak gösterilmiştir. Farklı malzeme (katkı

malzemeleri), geometri, sıcaklık parametrelerinde kırılma davranışına olan etkisi esas kırılma işi metodu yaklaşımı ile yorumlanmıştır. Hasara uğratılan yüzeyler (kırılma yüzeyleri) optik mikroskop ile gösterilmiş, taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile kırılma yüzeyleri analiz edilmiş, farklı parametrelerin kırılma etkisine olan etkileri gösterilen resimler aracılığı ile anlatılmıştır.

Bölüm 5'te deney bulgularından çıkarılan sonuçlar açıklanmış ve çalışmanın geliştirilmesi için ileride yapılacak araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER

2.1. Plastik Malzemeler

Plastik sanayinin, nitroselülozun ticari üretimi ile (1868) başladığı kabul edilir. Bu ise yaklaşık 140 yıl öncesi demektir. Nitroselülozu takiben, tarihsel süreçte ikinci sentetik plastik olan fenol-formaldehit esaslı polimerler gelir. Bunların üretimleri ise bu tarihten yaklaşık 40 yıl sonra gerçekleşmiştir. Bu ve bunları izleyen diğer plastik malzemelerin temel yapı taşları ve ham maddeleri olan polimerler, 19. Yüzyılın ikinci yarısındaki bazı deney çalışmaları sonunda ve birçoğu tesadüfen ortaya çıkmıştır.

Temel olarak doğada, üç farklı malzeme olduğunu ve bunların yaygın olarak kullanıldığını biliyoruz. Malzemeler metalik, seramik ve organik (polimer) olmak üzere 3 ana grupta nitelendirilir. Bu üç temel malzeme türünün şu temel farklı özellikleri vardır: metaller elektrik ve ısıyı iyi iletirler, parlaktırlar, genellikle serttirler, elektron vererek tepkimeye girerler, yoğunlukları 1g/cm^3 'den yüksektir. Polimerler elektrik ve ısıyı iyi iletmezler, genellikle saydam veya donuk görünümde dirler, yoğunlukları yaklaşık 1g/cm^3 civarındadır. Özelliklerdeki bu farklılıklar nedeni ile farklı uygulamalar için metaller veya polimerler tercih edilir. Tarihsel gelişimi içinde polimer malzemeler hep metalik olanlara rakip olarak düşünülmüş olup, polimer malzemelerin üretim ve kullanımları devamlı olarak artmış ve 1980 yılında hacimce toplam polimer malzeme üretimi dünya metalik malzeme üretim miktarını geçmiştir.

Günümüzde, geliştirilmiş polimer malzemeler, pek çok metal malzeme yerine tercihen kullanılır hale gelmiştir ve geleceğe ilişkin tahminler, bu 'yerine kullanılabilirliğin' daha da büyük bir hızla devam edeceğini göstermektedir. Bugün artık pek çok istenilen özelliğin polimer malzemelere kazandırılması olasıdır [2].

Polimer maddelerin yıllık tüketimi tüm dünya ülkeleri için 150 milyon ton/yıl'dan fazladır. Ülkemizde tüketim yaklaşık olarak bu miktarın yüzde biri kadardır. Çok

eski tarihlerde kullanılan polimerik malzemelerin başında selüloz, nişasta, doğal kauçuk vb. gibi açığa doğru polimerler gelir. Doğal polimerler, işlenme zorluğu ve bazı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin yetersizliğinden dolayı yerlerini yarı sentetik ve daha sonra sentetik polimerlere terk etmişlerdir. İlk polimer malzemesi 1863'de S. Hyatt tarafından keşfedilen selüloiddir. Yarı sentetik bir polimer olan selüloid pamuk selülozundan elde edilmiştir. Ancak modern plastik endüstrisi L. Baekeland tarafından bakalit sanayii çağında üretilmesiyle 1989'da başlar. Fenol formaldehit reçinesi olan bakalit telefon ahizeleri gibi plastik ürünlerin yapımında kullanılmıştır. 1924'e kadar polimer yapılarının "Koloid agregat" halinde bulunan küçük moleküllerinden oluştuğu sanılırdı. H. Staudinger yaptığı büyük çapta incelemelerin sonucu olarak, plastiklerin zincir şeklinde makromoleküllerden oluştuğunu ve bu moleküllerin birbiriyle kovalent bağlanan küçük ünitelerden meydana geldiğini göstermiştir. Bahsedilen fikre dayanarak, polimer sanayi hızla gelişmiş ve 1927'de selüloz asetat ve polivinil klorür, 1928'de polimetilmetakrilat 1929'da üre-formaldehit reçineleri elde edilmiştir. Bunları daha sonra 1932'de polietilen, 1934'de naylon, poliakrilonitril, stiren-akrilonitril ve polivinil asetat, 1937'de poliüretan, 1939'da teflon ticareti adıyla tanınan poli(tetrafluoroetilen) 1941'de polietilentereftalat, ve orlon ticari adıyla tanınan poliakrilonitril fiber takip etmiştir.

Organik ve seramik malzemeler, metal dışı mühendislik malzemeleridir. Organik malzemeler, polimer olarak bilinen plastikler, elastomerler ve fiberlerdir. Polimerlerde doğal ve sentetik olarak iki gruba ayrılabilir. Sentetik polimerler genellikle, çok sayıda tekrarlanan, monomer veya kısaca 'mer' denilen yapılardan oluşur. Bunların adlandırılmasında çok sayıda anlamına gelen 'poli' sözcüğü ile 'mer' sözcüğü birleştirilir.

Plastikler monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen, yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir polimer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleriyle birleşerek; tekrarlanan yapılardan oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makromolekül meydana getirmektedir. Böylece çeşitli monomerler veya monomer kombinasyonu kullanılarak çeşitli tipte plastikler elde edilmektedir.

Kimyasal bakımdan plastikler, herhangi bir polimer gibi başka elementlerin atomlarıyla bağlanmış C atomlarından meydana gelir. Plastikleri imal etmek için bilinen 110'dan fazla elementten sadece 8 tanesi kullanılmaktadır. Bunlar karbon (C), hidrojen (H), azot (N), oksijen (O), flor (F), silisyum (Si), kükürt (S) ve klor (Cl) dur. Bu elementlerin çeşitli yöntemlere göre birleştirilmesi makromolekül adını taşıyan çok büyük ve kompleks molekülleri meydana getirmektedir.

Monomerler başka monomerlerle her iki tarafında bulunan birer serbest bağ ile birleşirler. Bu tip monomerler bifonksiyonel denilir. Bunun yanı sıra her iki tarafında birden daha fazla bağ bulunan ve polifonksiyonel adını taşıyan monomerler de vardır. Monomerlerden oluşan molekülün (zincirin) şekli büyük ölçüde monomerlerin fonksiyon sayısına bağlıdır. Üç boyutlu çapraz bağlı (uzay ağı) yapı şeklinde polifonksiyonel monomerlerde oluşur. Lineer veya zincir şeklindeki moleküller düz lineer veya dallanmış lineer olabilirler.

Bilimsel olarak termoplastik ve termoset plastikler arasında ayırım esasen moleküllerin şekline göre yapılır. Bu bakımdan termoplastikler lineer moleküllere, termosetler ise üç boyutlu çapraz bağlı moleküllere sahip malzemelerdir.

Termoplastikler ısı ve basınç altında yumuşamayan, akan; bu durumda herhangi bir şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşebilen plastiklerdir. Bu malzemeler ısıtıldıkları zaman kalıplanabilme ve soğutulduklarında sertleşme yeteneğine sahiptirler. Termoset malzemelerde olduğu gibi kalıplama sırasında kimyasal bir değişikliğe uğramazlar. Kimyasal yapısı değişmez, sadece fiziksel değişikliğe uğrarlar. Bu sebeple bu malzemeler toz haline getirilip tekrar öğütülüp ısıtılabilir ve kalıplanabilir. Tipik parça üretimi yöntemleri enjeksiyon, sürekli şekillendirmede ekstrüzyon kullanılır.

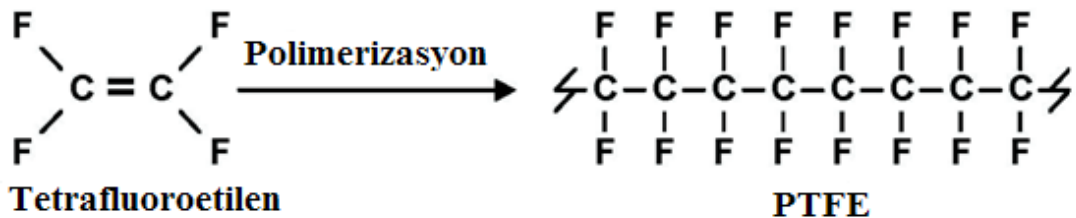
Genelde polimerler reaktör denilen tesiste polimerizasyon yolu ile elde edilir. Çoğunlukla yoğunlaşma polimerizasyonu ile elde edilen termoplastiklerin polimerizasyon işlemi reaktörde tamamen bitmiş olur. Bu işlemin sonucu olarak yan zincir veya gruplar ihtiva eden uzun zincir molekülleri meydana gelir.

Termoplastikler grubunu oluşturan bazı polimerler; polietilen (PE), polipropilen (PP), poliamitler (PA), polivinilklorürler (PVC), politetrafluoroetilen (PTFE).

Kullanma esasına göre ikinci tür ise termosetlerdir. Bunlar çapraz bağlı, dolayısıyla çözülmez ve erimez polimerlerdir. Bir kez şekillendirildikten sonra tekrar çözmek veya eritmekle şekillendirilemezler. Termosetler polikondanzasyon reaksiyonu ile üretilirler. Polimer sistemini oluşturan polimer zincirlerindeki bağlar, ısıtmaya karşı bir sınır değere kadar direnebilirler. Belli yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında bağlar kopabilir ve termoset malzeme bozunarak tersinmez şekilde tepkime verir. Termosetlere örnek olarak; alkit reçineleri, amino reçineleri, epoksiler, fenolikler ve poliesterlerdir [3].

2.1.1. Politetrafluoroetilen (PTFE)

PTFE Roy Plunkett tarafından 1938 yılında bulunmuş olup, ticari olarak piyasaya sürülmesi 1946 yılını bulmuştur [4]. PTFE kristalli polimer olup, termoplastik malzeme grubundandır. Daha çok teflon olarak bilinen PTFE, düz zincirli ve yüksek molekül ağırlığına sahip bir polimerdir [5]. Mühendislik malzemelerinde bütün katılar içinde en düşük sürtünme katsayısı, sanayide kullanılan tamamında yakın bütün kimyasallara dayanım, en geniş sıcaklık aralığında sürekli kullanabilme, yapışmazlık, yanmama, yüksek elektriksel izolasyon, hava şartları ve nemden etkilenmeme gibi özellikleri nedeniyle önemli bir polimerdir [6]. Tetrafluoroetilen monomerinin polimerizasyonu politetrafluoroetilen polimerini Şekil 2.1'de gösterildiği gibi verir.

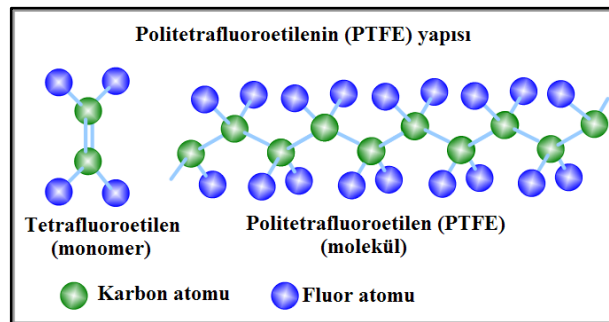


Şekil 2.1: Tetrafluoroetilen monomerinin polimerizasyonu ile PTFE oluşumu [7]

Beyaz yarı saydam katı polimerler 10^6 - 10^7 düzeyinde yüksek molekül ağırlığına sahiptir ve 380°C 'de 1-10 GPa.s düzeyinde viskoziteye sahiptir. Yüksek termal kararlılığı kuvvetli C-F bağından kaynaklanır ve bu özellik PTFE'yi yüksek sıcaklık polimeri yapar.

PTFE kimyasal olarak iki farklı tipte sonuçlanan polimerizasyonla elde edilir. Süspansiyon polimerizasyonunda granüllü reçine elde edilirken, emülsiyon polimerizasyonunda ince toz veya PTFE dispersiyon olarak anılan pıhtılaşmış dispersiyon üretilir. Kimyasal olarak tepkimeye girmeme isteği ve yüksek molekül ağırlığından dolayı PTFE eriyiği akışkan değildir ve bilinen geleneksel tekniklerle üretimi yapılamaz. Süspansiyon polimerizasyonu ile üretilen ve daha çok granüllü PTFE polimeri olarak tanımlanan PTFE polimeri genellikle modifiye edilmiş toz metalürjisi yolu ile elde edilir. Emülsiyon polimerizasyon ürünü PTFE'nin davranışı granüllü PTFE'den tamamen farklıdır. Pıhtılaşmış dispersiyon soğuk ekstrüzyon metoduyla işlenir. Emülsiyon polimerizasyonu ile yapılmış PTFE dispersiyonu genellikle lateks işleme tekniği ile üretilir [5].

PTFE zincirinin iskeletini oluşturan C-C bağları ve C-F bağları oldukça kuvvetlidir. Bu yapı Şekil 2.2'de gösterilmiştir. C-F bağları iki fluor atomu ile tek karbon atomunun redüksiyonu ile oluşmakta dayanımı yaklaşık olarak 504 kJ/mol 'dür. C-C bağları PTFE'ye yüksek termal stabilite etkisi kazandırarak 327°C 'de erimeye başlar. Fluor atomları zincir üzerindeki karbon atomları üzerinde koruyucu bir kalkan oluşturur. Karbon zincir iskeletine bağlı atomların durumu koruma kalkanının tipini belirler. Koruma kalkanı ana zincirin korunmasını sağlamakla birlikte sürtünme katsayısı ve yapışmazlığı sağlayan yüzey enerjisini düşürür [4].

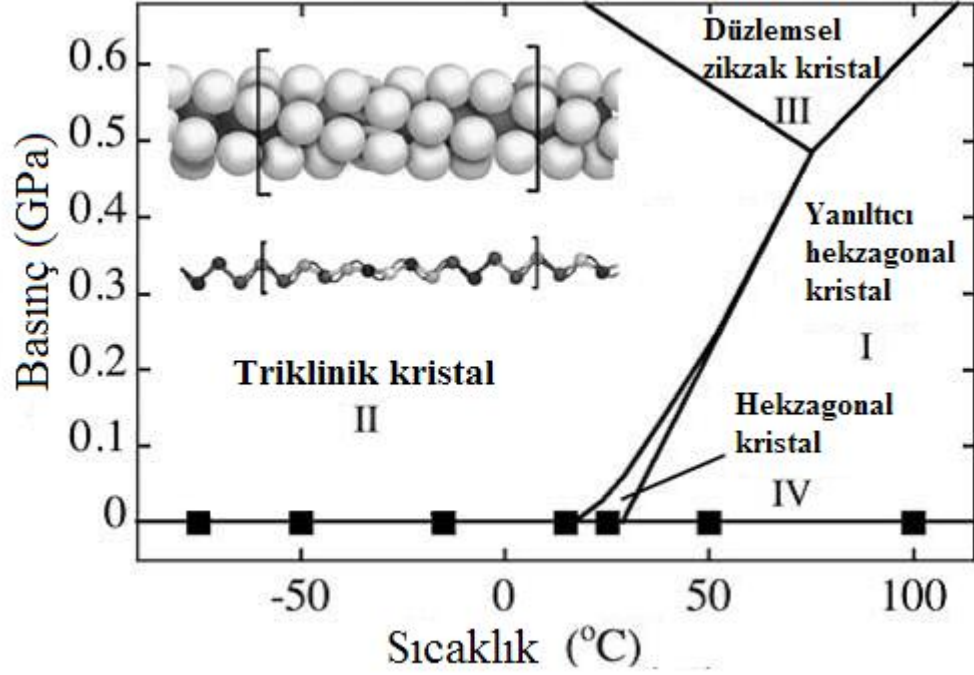


Şekil 2.2: PTFE'nin karbon ve fluor atomları ile oluşturduğu yapı [8]

PTFE atomları ile sağlanan yüksek kristalite ve spesifik etkileşimin olmaması malzemeye oda sıcaklığında solvent (çözücü) ile çözünmemesi özelliği kazandırır. Böylece PTFE'nin kimyasal dayanımının iyi olduğu ve malzemenin geniş çalışma sıcaklığı arasında sanayide kullanılan belirli asit ve bazlara karşı dayanıklılığı ortaya çıkmaktadır [4].

Kristallenme sıcaklığının üzerinde PTFE oldukça şeffaf, kristallenme sıcaklığının altında ise beyaz ve bulanık bir görünümündedir. 342°C'de PTFE beyaz kristal yapıdan neredeyse tamamen saydam bir amorf jel yapıya dönüşür. Termal diferansiyel analizine göre saf polimerin ilk erimeye başladığı an tersinmezdir ve bundan sonraki yeni erime 327°C'de meydana gelir. Bu erime genellikle erime noktası olarak adlandırılır. Erime %30 oranında hacim artışı ile olur. 380°C'de polimerin vizkozitesi 10 GPa.s olduğundan eriğin biçimi kararludur.

PTFE polimerinde erime noktasıyla birlikte bir geçiş noktası olan 19°C sıcaklığı çok önemlidir, çünkü bu sıcaklık değişim noktası malzemenin özelliklerini belirleyici role sahiptir. Atmosferik basınç şartları altında 3 faz belirlenmiştir. 19°C'deki geçiş sıcaklığı çok önemli olmakla birlikte 30°C sıcaklığı da önemlidir. 19°C üzerinde triklirik kristal yapı aradaki mesafeler değişmek suretiyle hegzagonal kristal birim yapıya geçiş yapmaktadır. 180°C dönen 13 CF₂ grubu, 19°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda atomlar arasındaki mesafeler değişerek, 180°C dönen 15 CF₂ grubuna dönüşür. Bu dönüşümle beraber kristal yapıda farklılıklar belirlenir. 30°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapıdaki düzensizlik artmaktadır. Basınç sıcaklık faz diyagramı ile kristal yapısının triklirik şekli Şekil 2.3'te gösterilmiştir. 30°C ile 50°C arasında farklı basınçlar altında 4 kristal fazı da görülebilmektedir. 1. Dereceden faz geçişi 30°C olmaktadır. Hekzagonal birim yapı kaybolmak suretiyle, çubuk şeklinde paketlenmiş hegzagonal yapı tutulur. 19°C'nin altında 3 boyutlu mükemmel bir dizi olmakla birlikte 19°C ile 30°C arasında zincir kısımlar düzenli değildir. 30°C üzerinde ise tercih edilen kristolografik yön kaybolur ve molekülün kısımları gelişigüzel olarak eksenlerin üzerinde salınmaya başlar [5,9].



Şekil 2.3: PTFE için sıcaklık-basınç faz diyagramı ve II. fazda kristal yapısı [9]

2.1.1.1. Eفالon politetrafluoroetilenin (PTFE) özellikleri ve kullanım alanları

Politetrafluoroetilen, Teflon (DuPont), Fluon (ICI), Hostafion (Hoechst), Algotlon (Montecatini) ticari isimleri ile tanınan bir fluoropolimerdir. Bu tezde yapılan deneylerde Polikim A.Ş.'nin tescilli markası olan Eفالon PTFE'si kullanılmıştır. Teknolojik olarak üretiminin zorluğu ve yatırım maliyetinin diğer plastiklere göre çok yüksek olmasından dolayı PTFE hammaddesi dünyada çok az firma tarafından üretilmektedir. Eفالon PTFE'nin fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla, malzemeye bazı dolgu maddeleri (karbon, bronz, cam elyaf, alümina, vb.) eklenerek Eفالon PTFE alaşımları imal edilmektedir.

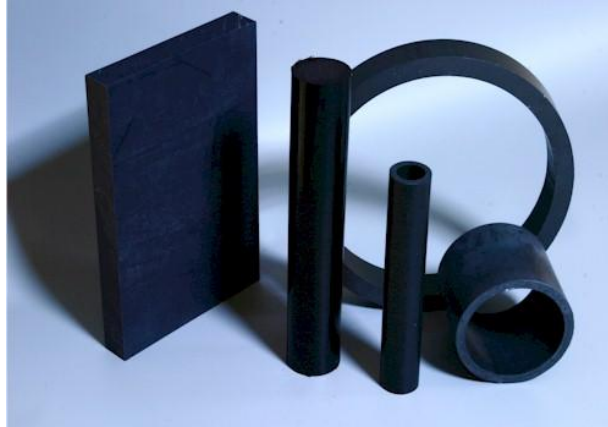
İçinde dolgu maddesi içermeyen saf PTFE ile mükemmel kimyasal dayanım, çok geniş kullanma sıcaklığı aralığı, en düşük sürtünme katsayısı, kesinlikle yapışmama, üstün elektriksel izolasyon, yüksek ısı izolasyonu, yanmazlık, nem ve ortam şartlarına tam dayanım sağlanır. Saf PTFE ile üretilmiş olan parçalar Şekil 2.4'te gösterilmiştir [6].

PTFE'nin alaşımlanması ile mekanik özelliklerin iyileşmeler; soğuk akış ve sürünme özelliklerindeki dayanım artışı, termal iletkenlik ve termal boyutsal kararlılık artışı, yüzey sertliği artışı, elektriksel iletkenlik artışı ile nitelendirilebilir [5].



Şekil 2.4: Saf PTFE ile üretilmiş olan parçalar [6]

Alaşım malzemelerinden karbon katkısı %25 ve %35 olacak şekilde dolgulandırılan PTFE'nin termal genişmesi daha az, aşınma dayanımı yüksek, yük altında deformasyonu daha azdır. Sulu ortamlar için idealdir. Isı iletkenliği yüksektir. Karbon alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Karbon alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar [6]

Alaşım malzemelerinden Cam elyaf katkısı %15 ve %25 olacak şekilde dolgulandırılan PTFE'nin termal genişmesi daha az, aşınma dayanımı yüksek, yük altında deformasyonu daha azdır. Asitlere ve oksidasyona dayanımı yüksektir. Elektriksel izolasyon özelliği yüksektir. Cam elyaf alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Cam elyaf alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar [6]

Alaşım malzemelerinden bronz katkısı %40 ve %60 olacak şekilde dolgulandırılan PTFE'nin ısı iletkenliği daha iyi, termal genişmesi daha az, aşınma dayanımı daha yüksek ve yük altında deformasyonu daha azdır. Mekanik olarak işlenmesi kolaydır. Bronz alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Bronz alaşımlı PTFE ile üretilmiş olan parçalar [6]

Efalon PTFE'nin bazı teknik özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir. PTFE kimyasal maddelere ve aşınmaya karşı dayanım ve geniş sıcaklık aralığında kullanılabilmesi nedeniyle çok değerli bir malzemedir. Bazı belli başlı kullanım alanları;

- Conta, keçe, O-ring, V-ring,
- Salmastra ve benzeri sızdırmazlık malzemeleri,
- Burç, yatak ve segmanlar,
- Elektrik izolatörleri,

Kayar mesnetler,
 Konveyör bantları,
 Korozif malzeme aktarımı için kılıflı boru, vana ve bağlantı parçaları,
 Yapışmayan yüzey uygulamaları,
 Kimyasal dayanım gerektiren laboratuvar malzemeleridir [6].

Tablo 2.1: Eفالon PTFE malzemesinin bazı teknik özellikleri [6]

Özellikler	Birim	Saf	Cam Elyafı (%25)
Özgül Ağırlık, 23°C	gr/cm ²	2,1 - 2,2	2,2-2,3
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı Kopmada	Kg/cm ²	140 - 380	150 - 240
Kopma Uzaması, 23°C	%	200 - 400	200 - 270
Basma Dayanımı, 23°C	Kg/cm ²	45 - 50	65 -70
Darbe Dayanımı (İzod, çentikli)	Kj/m ²	15,5-16,5	12 -15
Sertlik	Shore D	54 - 60	64 -68
Fiziksel Özellikler			
Sürtünme Katsayısı, Statik		0,04	0,07
Sürtünme Katsayısı, Dinamik		0,06	0,09
Termal Özellikler			
Özgül Isı	Kcal/kg.°C	0,23 - 0,25	...
Isı İletkenliği, 30°C	Cal/cm.sn.°C	5,5 - 6	10-11
Genleşme Katsayısı			
25°C - 100°C	°C ⁻¹	12,5 - 16	7 - 11,5
25°C - 200°C	°C ⁻¹	15 - 19	7,5 - 14
25°C - 300°C	°C ⁻¹	21,5 - 25	8,5 - 18
Çalışma Sıcaklığı, Minimum	°C	-260	-260
Çalışma Sıcaklığı, Maksimum	°C	270	270
Elektriksel Özellikler			
Dielektriksel Dayanımı, 0.1 mm	Kv/mm	40 - 80	13 - 16
Dielektrik Sabiti, 50 Hz		2 - 2,1	2,5 - 2,8
Hacimsel Direnç, 23°C	Ohm-cm	>10*18	>10*13
Yüzeysel Direnç, 23°C, %50 Bağıl Nem	Ohm	>10*16	>10*15
Dielektriksel Kayıp Faktörü, 23°C, 50 Hz		0.00005	0.0007

2.2. Kırılma Mekanikği

2.2.1. Giriş

Malzemelerin kırılma davranışı, insanoglunun var olduğu günden itibaren hayatın kalitesini de etkilemiştir. İlk insanlar, taştan aletler yapmak üzere gevrek kırılmayı kullanmışlardır. Mısırlıların ve Romalıların yaptığı pek çok yapının hala ayakta kalabilmeleri, ilk mimarların ve mühendislerin başarılarının birer ölçüsüdür. Hala ayakta kalabilen tarihi yapılar hiç şüphesiz ki başarılı dizaynların birer örnekleridirler. Romalılar yaptıkları her bir köprüyü, tasarımcıyı köprünün altında bırakıp üzerinden top arabalarını geçirerek test etmişlerdir.

Makine parçaları yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları ve diğer karmaşık ve pek de anlaşılamayan nedenlerden dolayı kırılabilir. Aynı hatanın tekrarı istenmiyorsa hasarın nedeninin anlaşılması oldukça önemlidir.

Hemen hemen tüm mühendislik malzemeleri mikroskobik boyutlarda olsalar bile çatlak içerirler. Servis koşullarında bu çatlaklar ilerleyerek birbirleri ile birleşirler ve gözle görünür bir hal alırlar. Bu şartlar altında bu elemanın yapısal bütünlüğü için mühendis çatlağın nasıl oluştuğunu veya çatlakların nasıl ve ne zaman daha da büyüyeceğini, ilerleyebileceğini ve parçanın bu şekilde hasara uğrayacağını bilmelidir. Bu soruları cevaplamaya yardımcı olan bilim dalı Kırılma Mekaniğidir [10].

Irwin 1983'te kırılma mekaniğinin tanımlanmasına katkıda bulunmuş, malzemelerin kırılmasının uygulamalı mekaniğin kanunları ile kullanılan malzemelerin makroskobik özelliklerine bağlı olarak açıklanacağını, kırılma mekaniğinin ise gerilme analize bağlı olarak kırılma direnci, uygulanacak yük ve hata içeren unsurların yapısal geometrisine bağlı olarak ortaya koyan nitel bir yaklaşım olacağını ifade etmiştir.

Mühendislik yapılarında çatlak veya boşluk bulunabilmektedir, bu yapıların emniyetli bir şekilde çalışmasının sağlanabilmesi kırılma mekaniğini ile sağlanmaktadır. Emniyetli yapıların oluşturulması ile insan hayatı korunmuş olup oluşabilecek maliyetlerin azaltılması sağlanmaktadır.

Kırılma, malzemenin gerilme altında iki veya daha çok parçaya ayrılması ya da yük taşıma kapasitesinin sıfır olması durumu olarak tanımlanmaktadır. Malzemenin kırılma davranışı malzemenin türüne, uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma olayının oluşumunda çatlağın başlaması ve çatlağın ilerlemesi şeklinde iki ana safhada gerçekleşmektedir. Kırılma mekaniğinde kırılma olayı makroskobik açıdan; sünek kırılma, gevrek kırılma, sürünme kırılması ve yorulma kırılması şeklinde 4 çeşit olarak ele alınmaktadır. Sünek kırılmada, çatlağın oluşması ve ilerlemesi sürecinde çatlağın etrafında büyük oranda plastik deformasyonun görüldüğü kırılma türüdür. Çatlağın ilerlemesi yavaş ve kararlı olmaktadır. Çatlağın oluşması ve ilerlemesinde önemli miktarda enerji absorpsiyonu gerçekleşir bunun için büyük enerjiler gerekmektedir. Kırılma yüzeyleri mat ve lifli

bir görünümde olmaktadır. Gevrek kırılmada, oluşan çatlak büyük bir hızla ilerler ve plastik deformasyon önemsiz sayılabilecek düzeyde oluşur. Çatlak ilerlemesi bir kerede olur ve çatlağın kuvvete dik yönde ilerlemesi ile kırılma yüzeyi düz ve pürüzsüz olmaktadır. Gevrek kırılmada ayrılma kırılması ve klivaj kırılması ile ortaya çıkmaktadır. Ayrılma kırılması düşük sıcaklıkta taneler arası çatlak ilerlemesi olarak ortaya çıkarken klivaj kırılması kristalimsi malzemelerde gevrekliğin çatlaklar ile oluşabilmesidir. Malzemeleri gevrekliği şeklinde bir genellemeye gitmek zaman zaman hatalara düşülmesine sebebiyet vermektedir bu tür ayırımdan ziyade üç boyutlu gerilme durumları, yüksek genleme hızları ve düşük sıcaklık şartlarının malzemeyi gevrekleştirdiği bilinmelidir. Sürünme kırılması, sabit gerilme veya sabit yük altında, yüksek sıcaklıklarda görülen sürünme deformasyonu sonucunda malzemenin kırılmasıdır. Sürünme kırılması yüksek sıcaklıkta plastik deformasyonu oluşturduğu için görünüş olarak sünek kırılmaya benzemektedir. Yorulma kırılması, yüklemenin belirli bir tekrardan sonra malzemede oluşan gerilme yığılmalarının bulunduğu yerlerde çatlağın başlayarak, tekrarlı yükün etkisiyle çatlağın ilerleyip malzemenin ani olarak kırılmasıdır. Yorulma ile oluşan çatlak ilerlemesi mikroskobik çatlakların tekrarlı yük altında birleşmesiyle gerçekleşmektedir. Makroskobik açıdan kırılma yüzeyleri düz ve pürüzsüz görülmektedir.

Kırılma mekaniği, hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. 1920 yılında Griffith malzemelerin teorik mukavemetleri ile deneysel değerlerden elde edilen mukavemetlerin arasındaki farkı açıklamaya çalışmıştır. Griffith'in geliştirmiş olduğu modele göre malzemelerde değişik doğrultularda ve çeşitli boyutlarda mikroçatlaklar bulunmaktadır. Gerilme anında bu mikroçatlakların ucunda yüksek gerilmeler oluşur, yüksek gerilemelerin varlığı ile mikroçatlakların ilerleyip birleşmeleri ile malzemelerin hasara uğramasını sağlamaktadır. Griffith'in tanımlamış olduğu mikroçatlak kavramı ile kırılmayla ilgili bir problemin ilk başarılı analizini sağlamış bulunmaktadır. Griffith analizinde camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlemiş, sistemin toplam enerjisindeki azalmayla önceden var olan bir çatlağın ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir. Griffith'in oluşturduğu enerji dengesi yaklaşımına göre gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde azalma olur ve bu enerji yeni çatlak yüzeylerinin oluşmasını

sağlar. Griffith böyle gevrek malzemelerin teorik mukavemetlerinin tahminini sağlamış olup kırılma mukavemetiyle hata boyutu arasındaki ilişkiyi bulmuştur.

Griffith yaklaşımı, 1944 yılında Zener ve Hollomon tarafından metalik malzemelerin gevrek kırılmasında kullanılmıştır.

Griffith'in bağıntısının gerçeğe yakın değerler vermesi cam ve benzeri gevrek malzemelerde çalışılmasıyla geçerlidir. Metalik ve türevi olan malzemelerde deformasyon oluşumu olmakta bu durum kırılma öncesi ve sırasında oluşmaktadır. Bu nedenle Griffith'in tanımladığı serbest kalan enerjinin tümüyle yüzey oluşturmakta kalmayacağı serbest kalan enerjinin bir bölümünün kalıcı şekil değişimi için kullanılacağı bilinmektedir. Bu nedenle kalıcı şekil değişimi Griffith'in bağıntısında kullanılan malzemeye özgü sabit bir değer olarak kullanılamaz. Metalik malzemelerin kırılma mekaniği esasları Griffith'in modelinden yola çıkılarak Irwin tarafından geliştirilmiştir.

Genel olarak, malzemenin genişliği ve çatlak civarındaki düzlem ölçüleri plastik bölgeye göre yeterince büyükse, büyüme başlangıcındaki K değeri sabittir ve bu onun minimum değeridir. Bu tanım düzlem şekil değiştirme faktörü olarak adlandırılır ve malzemenin K_1 değeridir. K_1 özellikle malzeme seçiminde önemli bir faktördür çünkü tokluğun diğer ölçülerinden farklı olarak malzemenin şeklinden bağımsızdır [11].

Irwin, Griffith'in enerji dengesini irdelemiş olup G ile sembolize edilen bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G, birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorbe edilen toplam enerjidir. G, şekil değiştirme için enerji boşalma miktarı olarak ta ifade edilebilir.

1950'lerin ortalarında Irwin'in enerji yaklaşımıyla gerilme yoğunluğu yaklaşımı arasında denklik olduğunu bulması, kırılma mekaniği açısından önemli bir gelişmedir. Çatlak ucundaki gerilme şiddeti ile uygulanan gerilme ve elemanın geometrisi arasındaki bağıntının değeri bulunabilmiş, K, olarak sembolize edilip gerilme şiddeti faktörü olarak adlandırılmıştır. Buna göre çatlak ucunda, kritik bir gerilme dağılımına erişildiğinde kırılma olmaktadır. Böylece kritik gerilme şiddeti (yoğunluğu) faktörü K_C veya enerji terimiyle G_C , kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı değerleri olarak adlandırılan malzeme özellikleri ortaya çıkmıştır.

G ile K'nın eşdeğerliliğın bilinmesiyle Lineer Elastik Kırılma Mekaniğı (LEKM)'nin ortaya çıkması sağlanmıştır. Bilinen tüm malzemelerde, çatlak ağzının çevresinde ve yakınında gerilme dağılımı durumu her zaman aynıdır. Standart numuneler ile yaptığımız deneylerde K_C değerinin bulunmasıyla mevcut yapılarda ve belirlenen şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceğı belirlenebilir. Bu yaklaşımda yapılan deneyler ile malzemede yorulma davranışı, çatlak ilerleme hızı ve şekli ya da gerilmeli korozyon çatlama davranışı belli bir ölçüde tahmin edilebilmektedir.

LEKM, çatlak ağzında sınırlı (yok sayılabilecek ölçüde) plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olmaktadır. Polimerler gibi sünek malzemelerde çatlak ağzında önemli ölçüde plastik deformasyon görölmektedir. Bu tür durumlarda plastik deformasyonun kırılma üzerine etkisi alınması amacıyla 1961 yılında Wells'in çatlak ağzı açılma miktarı (COD) üzerine yaptığı çalışmalar ile Elasto-Plastik Kırılma Mekaniğı (EPKM) devreye girmektedir [11].

2.2.2. Lineer elastik kırılma mekaniğı

Malzeme içinde mikroçatlak ve benzeri kusurlar doğal olarak mevcut olmaktadır. Kırılma mekaniğinin incelenmesinde kullanılan ve malzemedeki tüm davranışların elastik sınırla içerisinde kalması prensibinden hareketle geliştirilen analitik ifadelerin bütününe Lineer Elastik Kırılma Mekaniğı (LEKM) denir. Bu metodun temel prensibi çatlak ucunda oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan gerilmeye, çatlağın uzunluğuna ve yönüne bağılı olarak ifade edilmesidir. Buna göre; bir çatlağın ilerleyebilmesi iki farklı şekilde hesaplanabilir:

Yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşmış ise,

Çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşmış ise,

Bu iki metodun uygulanmasına iki yaklaşım söz konusudur:

Enerji dengesi yaklaşımı,

Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı.

2.2.2.1. Enerji dengesi yaklaşımı

Kırılma çok karmaşık bir proses olup bu kavram altında, mikro ve makro boşlukların veya çatlakların oluşumu ve gelişimi, dislokasyon mekanizması, kayma bantları, malzeme geometrisi gibi konuların bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Kırılma olayını ortaya koymada bütün bu mekanizmaları bir arada değerlendiren kesinleştirilmiş genel bir teori olmamakla beraber malzemelerde kırılma olaylarını anlamada ve açıklamada kullanılan önerilmiş pek çok teori vardır. Bunlardan birisi de Enerji Teorisi'dir.

Basit çekme durumunda uygulanan gerilmenin cismin birim hacminde depolanan elastik enerjisi;

$$U_0 = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (2.1)$$

şeklindedir.

İçinde çatlak bulunan bir sistemin bir F kuvveti etkisi altında tutulması durumunda sistemin toplam enerji dengesi Denklem 2.2'de gösterilmiştir;

$$U_e = U_s + U_k + U_d \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de U_e = Dış enerji, U_s = Genleme enerjisi, U_k = Kinetik enerji U_d = Kaybolan enerjisini (Kırılma enerjisi) ifade etmektedir.

Statik veya yarı statik durumda $U_k = 0$ alınabileceğinden birim genişliğinde bir levhada çatlakın ilerlemesi durumunda;

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{dU_d}{da} = G \quad (2.3)$$

yazılabilir. Burada G değerine sistemde enerji salıverme miktarı veya çatlak ilerleme enerjisi denir. Ayrıca $R = \partial U_d / \partial a$ değeri de çatlak ilerleme direnci olarak bilinir. Kırılma mekaniğinde G değeri çatlakın birim alanı kadar ilerlemesi sonucu harcanan enerji olmak üzere $2\gamma = G$ yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \gamma \frac{\partial A}{\partial a} \quad (2.4)$$

burada ∂A , çatlağın ∂a kadar ilerlemesi sonucu oluşan çatlak yüzeylerinin alanıdır. Şekil 2.8'deki gibi genişliği B olan bir levha bir F kuvveti etkisi altında kuvvetin uygulandığı nokta v kadar yer değiştirecektir. Bu durumda çatlak da kadar uzama gösterdiğinde kuvvetin uygulama noktası dv kadar yer değiştirecektir. Böylece dış kuvvetler tarafından yapılan iş $U_e = F.dv$ olacaktır. Denklem 2.4 birim genişliğinde bir levha için yazılmıştır. B genişliğindeki bir levhada çatlağın ilerlemesi durumunda çatlak ilerleme enerjisi (G) Denklem 2.5'te gösterilmektedir.

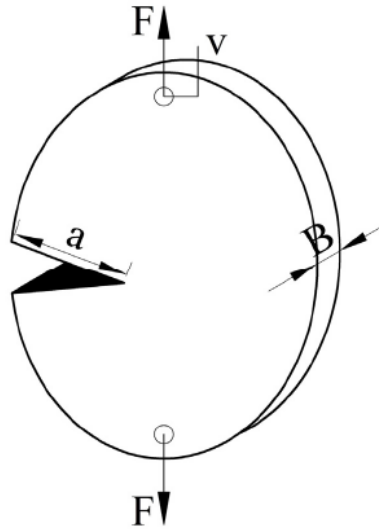
$$G = \frac{\partial}{\partial a}(U_e - U_s) = \frac{1}{B} \left(F \frac{\partial v}{\partial a} - \frac{\partial U_s}{\partial a} \right) \quad (2.5)$$

Şekil 2.8'deki gibi yük altında bulunan bir sistemde çatlak ilerlemediği sürece meydana gelen v uzaması uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır. Komplians olarak da bilinen bu ilişkiyi şu şekilde ifade etmek mümkündür;

Kuvvet= Rijitlik x Deplasman

$$F = k.v = \frac{1}{c}v \text{ veya } v = C.F \quad (2.6)$$

Burada C' ye levhanın kompliansı denir.



Şekil 2.8: F kuvveti etkisi altındaki levhanın v kadar uzaması [10]

Böylece bir elastik plakanın şekil değişim enerjisi;

$$U_s = \frac{1}{2} Fv = \frac{1}{2} CF^2 \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Denklem 2.5 ve 2.6'dan;

$$G = \frac{1}{B} \left(F^2 \frac{\partial C}{\partial a} + CF \frac{\partial F}{\partial a} - \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial c}{\partial a} - CF \frac{\partial F}{\partial a} \right) = \frac{F^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (2.8)$$

Böylece çatlak boyuna bağlı olarak C değeri elde edildiğinde bu noktaların oluşturduğu eğrinin eğimi ($\partial C/\partial a$) hesaplanarak G_c değeri hesaplanmış olur. Burada verilen enerji boşalma miktarı (G) kritik bir değere ulaştığı zaman çatlak hareket etmeye başlar. Bu G_c değerinin birimi kJ/m^2 'dir.

Dolayısıyla kuvvet altında çatlağın davranışı şu şekilde ifade edilebilir;

$G=R$ ise kararlı çatlak ilerlemesi var,

$G<R$ ise çatlak ilerlemesi yok,

$G>R$ ise kararsız çatlak ilerlemesi var [10].

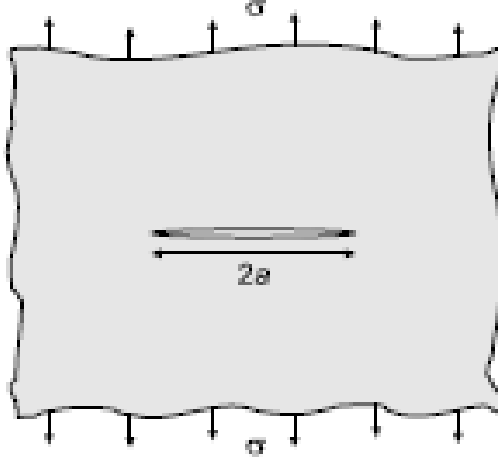
Griffith'in çatlak ilerlemesi için ileri sürdüğü bu enerji yaklaşımı tüm gevrek malzemeler için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu tür malzemelerin kırılmasına elastik kırılma denir. Ancak görünüşte gevrek olarak kırılan kristalin malzemelerde de çoğunlukla kırılma yüzeyi civarında bir miktar yerel plastik deformasyon oluşur. Bu tür malzemelerde sadece yeni çatlak yüzeyleri oluşması için gerekli enerjiyi değil, aynı zamanda çatlak etrafında oluşacak plastik şekil değiştirme enerjisini de göz önüne almak gerekmektedir. Irwin ve Orowan'ın elastik yüzey enerjisinin yanısıra plastik deformasyon enerjisinin de göz önüne almaları sonucu Griffith teorisinin gerçek malzeme davranışlarına daha iyi uyduğu görülmüştür [11].

Griffith'in gerilme analizinin tatbikiyle kuvvet altında tutulan birim kalınlığındaki bir levhada a uzunluğu kadar bir çatlak oluşması durumunda sistemde meydana gelen elastik enerji değişikliği, düzlem gerilmede;

$$\frac{\partial U_d}{\partial a} = G = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (2.9)$$

şeklinde olup, E yerine $E/(1-\nu^2)$ yazılabileceğinden, düzlem genleme bağıntısı (Denklem 2.10) ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial U_d}{\partial a} = G = (1-\nu^2) \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (2.10)$$



Şekil 2.9: Bir levhanın gerilme altında çatlak oluşumu [12]

Benzer şekilde Şekil 2.9’da gösterilen bir levha içinde bulunan ve levhaya etki eden σ gerilmesi altında gerilmeye dik durumunda $2a$ uzunluğunda çatlak oluşumunda elastik enerjideki azalma;

$$U_d = \frac{\pi^2 a^2 \sigma^2}{E} \quad (2.11)$$

şeklindedir. $2a$ uzunluğundaki çatlağın oluşmasında iki yüzey meydana gelecektir [10].

Elastik yüzey enerjisinin değişimi (U_s), malzemenin elastik yüzey enerjisi (γ_s) ile çatlağın yeni yüzey alanının çarpımına eşittir.

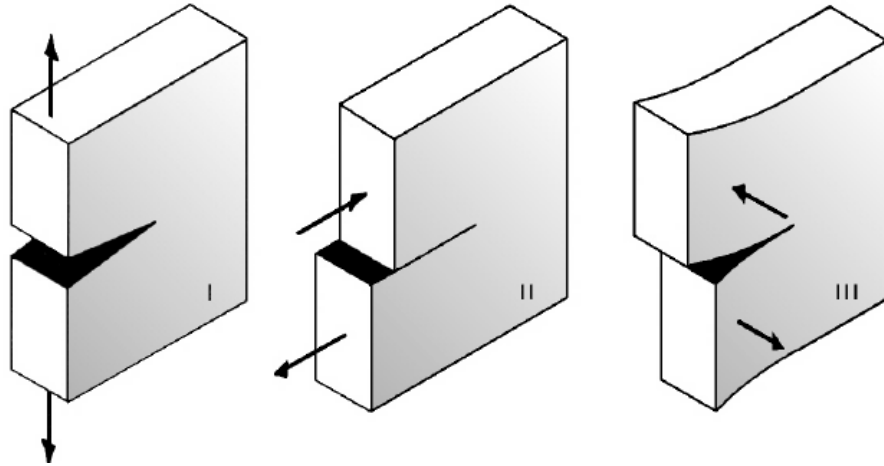
$$U_s = 2(2a)\gamma_s \quad (2.12)$$

Çatlak ilerlemesi durumundaki kritik gerilme;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (2.13)$$

şeklindedir. Bu denklem gösteriyor ki, ideal gevrek malzemelerde çatlak ilerlemesi, uygulanan gerilmeye çatlak boyunun kareköküne ve ayrıca malzeme özelliklerine bağlıdır. E ve γ_s , malzeme özellikleri olduğunu göre eşitliğin karşı tarafına göndereceğimiz çatlak boyunun karekökü olan çarpımın kritik bir değere ($\sigma\sqrt{a}$) ulaşmasıyla çatlak ilerlemesi olmaktadır [11].

2.2.2.2. Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı



Şekil 2.10: Yükleme (Kuvvet) altında çatlak ilerleme modları; Mod I (Açılma veya çekme modu), Mod II (Kayma modu), Mod III (Yırtılma veya makaslama modu) [12]

Malzemelerde bulunan çatlakların yükleme koşulları altında çatlakların ilerlemesi üç şekilde olmaktadır. Bu üç şekil Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesi, yükleme durumuna bağlı olarak, bu modlardan sadece birisiyle verilen türde olabileceği gibi farklı modların bir birleşimi şeklinde de olabilir. Çatlağın gerilme analizinin yapılabilmesi için bu modların bilinmesi gerekmektedir.

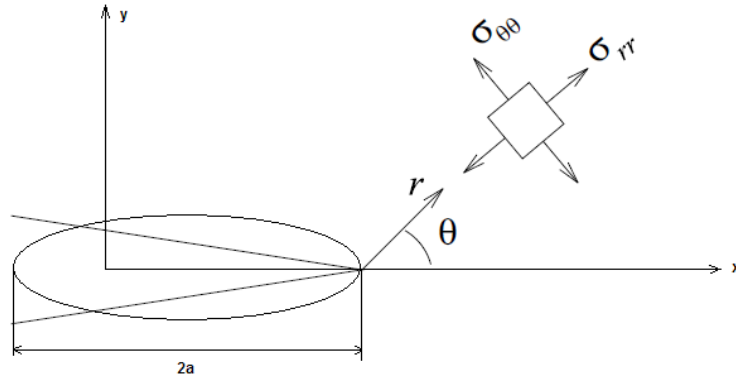
Çatlak ilerlemesinde en çok görülen ve en fazla deformasyona uğratan çatlak ilerleme türü Mod I'dir. Uygulanan yük çatlak yüzeyine dik yönde etki (y eksen yönünde) etmekte olup oluşan kırılma yüzeyleri birbirine zıt (Açılma hareketi etkisi) yönde ayrılmaktadır. Mod II'de uygulanan yük çatlak yüzeyine paralel yönde (x eksen yönünde) etkimekte olup oluşan kırılma yüzeyleri birbirine paralel yönde (Kayma hareketi etkisi) ayrılmaktadır. Mod III'te uygulanan yük çatlak yüzeyine x-y ve x-z düzlemleri yönünde simetrik olarak etki etmekte olup kırılma yüzeyleri z eksen doğrultusunda çatlağın dik kenarına paralel şekilde (Yırtılma hareketi etkisi)

ayrılmaktadır. Çatlak ucu elastik alanının büyüklüğünün tanımlanmasında ‘K’ şeklinde ifade edilen gerilme şiddeti faktörü (GŞF) söz konusudur. Lineer elastik kırılma davranışının bulunduğu bir ortamda K, malzemelerde çatlak ilerleyişi ile kırılma davranışı arasındaki ilişkiyi ele alır.

Irwin, bir çatlak civarındaki gerilmelerin Şekil 2.11’de gösterildiği gibi;

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + \dots \quad (2.14)$$

şeklinde verilebileceğini göstermiştir. Burada r ve θ çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatlarını göstermektedir.



Şekil 2.11: Çatlak ucunda bir noktada gerilme

Boyutsal analizler, K’nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğa da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk çatlak boyudur ve gerilme şiddeti faktörü (GŞF) Denklem 2.15’de gösterilmiştir.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (2.15)$$

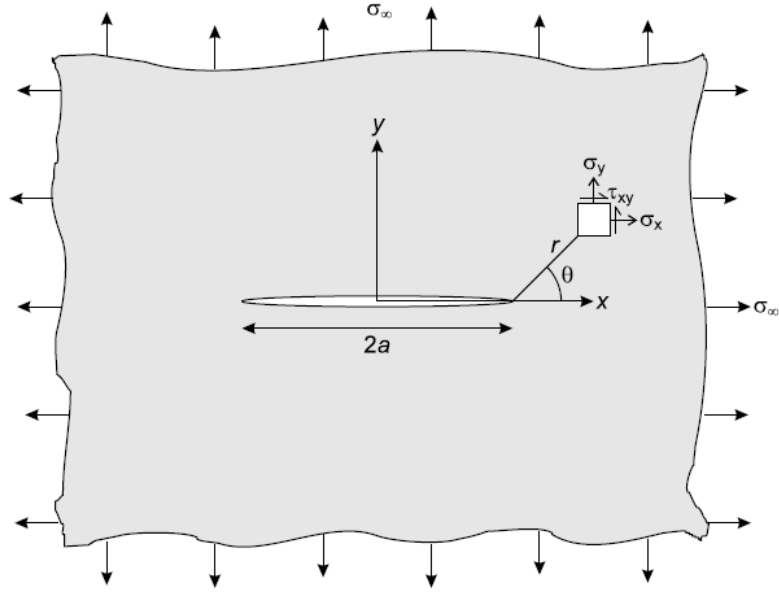
Burada $f(a/w)$, numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir [11].

Şekil 2.12.’teki gibi sonsuz uzunluktaki bir levhanın merkezinde bulunan $2a$ uzunluğunda sonsuz keskinlikte bir çatlağın iki ekseninde sonsuz gerilmeye, ideal geometri için çatlak ağzındaki gerilme şiddeti faktörü (GŞF);

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a}, \quad (2.16)$$

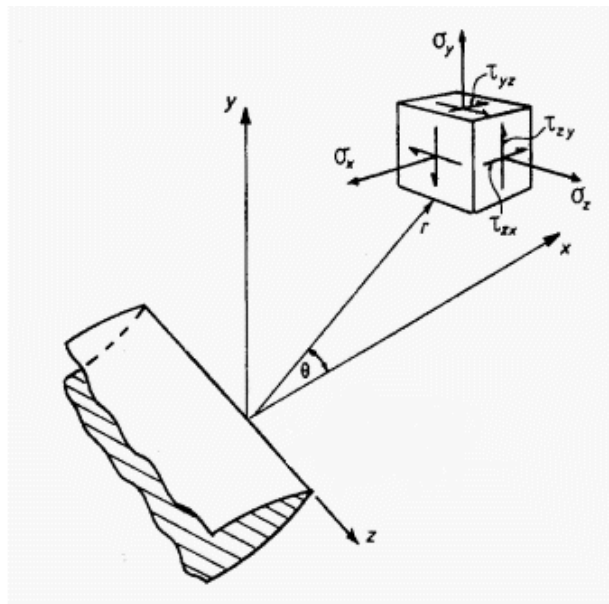
her üç mod durumu için bu şekilde olmaktadır.

K'nın kesin çözümü kararlı çözülebilmesine bağlıdır. Homojen malzemelerde çatlak modları genellikle ayrılmamıştır [13].



Şekil 2.12: Sonsuz levhanın merkezinde bulunan $2a$ uzunluğundaki çatlak [12]

Irwin'in geliştirmiş olduğu gerilme şiddeti faktörü (GŞF), bir levhada Mod I çatlak ilerlemesi tipinde sonsuz keskinlikte çatlak ucunda oluşan elastik gerilme alanı şekli Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Çatlak ucunda oluşan elastik gerilme alanı [14]

Çatlak ucunda oluşan gerilme alanının her üç mod türünde de gerilme şiddeti faktörü değerinin bilinmesiyle çatlak ucundaki gerilmeler bulunabilmektedir.

Şekil 2.13'te Mod I çatlak ilerlemesi türünde r ve θ değerleri için çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatındaki gerilmeler aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır;

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.17)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.18)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.19)$$

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.20)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.21)$$

Denklemlerdeki semboller; ν :poisson oranını, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$: x, y, z yönündeki asal gerilmeleri, E :Elastisite modülünü, θ r'nin x eksenini ile yaptığı açığı, K_I Mod I için gerilme şiddeti faktörünü temsil etmektedir.

$$u = \frac{K_I}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.22)$$

$$v = \frac{K_I}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.23)$$

$$w = 0$$

Gerilmenin etkisiyle malzemede oluşan şekil değişimleri (deplasmanlar) x yönünde u, y yönünde v, z yönünde w olarak ifade edilmektedir. Mod I çatlak ilerlemesi olduğu için z yönündeki deplasman 0'dır. μ kayma modülünü ifade etmektedir. Ayrıca κ değerleri düzlem genleme ve düzlem gerilme için farklılık göstermektedir.

Düzlem genleme durumunda;

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (2.24)$$

Düzlem gerilme durumunda;

$$\kappa = \frac{(3 - \nu)}{(1 + \nu)} \quad (2.25)$$

kullanılır.

Kalınlıkları az olan ince levhalar gibi malzemeler gerilmeye maruz kaldığında x ve y ekseninde gerilme oluşurken z ekseninde gerilme yoktur, gerilmelerin iki eksenli olması düzlem gerilmeyi ifade etmektedir. Kalın malzemelerde şekil değişimi x-y düzleminde olmaktadır bunun sebebi malzeme yüzeyindeki üç eksenli şekil değişiminin malzemenin içinde sağlanamamasıdır, z ekseninde deformasyonun engellenmesi sonucunda düzlem genleme oluşmaktadır.

Mod II çatlak ilerlemesi türünde r ve θ değerleri için çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatındaki gerilmeler aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır;

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.26)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.27)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.28)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.29)$$

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

Mod II çatlak ilerleme türünde çatlak ucunda oluşan deplasman alanı;

$$u = \frac{K_{II}}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\kappa + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.30)$$

$$v = -\frac{K_{II}}{2\mu} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.31)$$

$$w = 0$$

bulunmaktadır.

Mod III çatlak ilerlemesi türünde r ve θ değerleri için çatlak ucuna göre bir noktanın koordinatındaki gerilmeler ve çatlak ucunda oluşan deplasman alanı aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır;

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.32)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2.33)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0$$

$$w = \frac{K_{III}}{\mu} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.34)$$

$$u = v = 0 \quad [10,12,15].$$

Gerilme şiddeti faktörü (K_I, K_{II}, K_{III}) seçilecek olan malzemenin tasarlanan geometrisinde belirli bir gerilme değerinde sabit olmaktadır, bu durumun olması gerilme şiddeti faktörü değerinin malzeme için karakterize edilebilecek bir değer olmayacağını doğurmaktadır. Çatlak ucunda oluşan tüm gerilme ve genleme büyüklüklerinin gerilme şiddeti faktörü ile tespit edilebilmesi kritik gerilme şiddeti faktörünün (K_{IC}) bulunabilmesini sağlamıştır. Kritik gerilme şiddeti faktörü, gerilme ve genleme altında çatlak ilerlemesini oluşturan kritik değerde ölçülebilen gerilme yoğunluk miktarıdır. Pratikte bu değer Kırılma tokluğu olarak ta adlandırılmaktadır. Bu kırılma tokluğu değeri seçilecek olan malzemenin bir özelliği olmuş olup kullanılan hesaplama yöntemine bağlı olarak sabit bir değerdir.

Lineer elastik kırılma mekaniğinde ele alınan iki yaklaşım arasında bir ilişki kurulduğunda, Δa kadar çatlak ilerlemesi durumunda gerilme enerjisindeki (elastik enerji) serbest bırakılma (enerji değişimi) durumu üzerinde durulur. K ve G değerleri arasındaki ilişki (Lineer elastik malzemelerde) Denklem 2.35' de gösterilmiştir;

$$K^2 = EG \text{ (Düzlem gerilme)}, \quad K^2 = \frac{EG}{1-\nu^2} \text{ (Düzlem genleme)} \quad (2.35)$$

K_I, K_{II}, K_{III} değerleri arasında ilişki kurulduğunda;

$$\psi = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2G} \quad (2.36)$$

$$E' = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} \right\} \text{ (düzlem genleme)}, \quad (2.37)$$

$$E' = \{E\} \text{ (düzlem gerilme)},$$

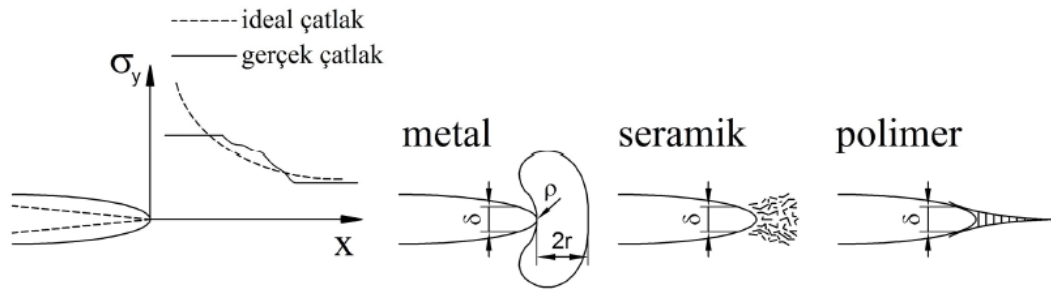
şeklindedir. ψ ,Kayma modülü olup E' değeri düzlem gerilme ve düzlem gerilme durumuna göre değişmektedir.

2.2.3. Elasto-plastik kırılma mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM), kırılma bölgesinde lineer olmayan düşük etkilere (Plastisite) nazaran daha çok çatlak boyutunun etkisi altındaki durumlarda kırılma davranışının belirlenebilmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Diğer bir deyişle çatlak ilerlemesini ve kırılmayı, büyük oranda elastik koşullarda incelemek için geliştirilmiştir. Bu koşullar ancak yüksek mukavemetli metalik malzemelerde (alüminyum alaşımları gibi) cam ve seramik gibi çok gevrek malzemelerde görülebilir. Gelişen dünyada malzemelerin çeşitliliği artmasıyla LEKM ile incelenemeyecek kadar büyük ölçüde plastisiteye sahip malzemeleri incelemek için Elasto-plastik kırılma mekaniği (EPKM) geliştirilmiştir.

Teorik olarak çatlak ucunda oluşan gerilmenin sonsuz değerine karşılık pratikte malzemelerde çatlak ucunda gerilmeler sonsuz olamaz. Uygulanan gerilme çok fazla değil ise, yani çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme malzemenin akma mukavemetini aşmıyor ise, malzeme çatlağın varlığına müsaade edebilir. Sünek

malzeme grubunda olan metalik malzemelerde, çatlağın etrafında geniş plastik deformasyona maruz kalmış bölgeler oluşmaktadır. İşte malzemenin plastik deformasyona uğradığı bu bölgeye çatlak ucu plastik bölge denilmektedir. Keskin çatlak uçlarında oluşan aşırı deformasyona uğratılmış bölgede çatlak ucu artık körelmiş ve keskinliği azalmıştır. Bu bölgede gerilme artık sonsuz olmayacak ve çatlak ucu kapalı kalmayıp δ kadar açılacaktır. Bu δ değerine çatlak ucu açılma mesafesi (CTOD) denilmektedir.

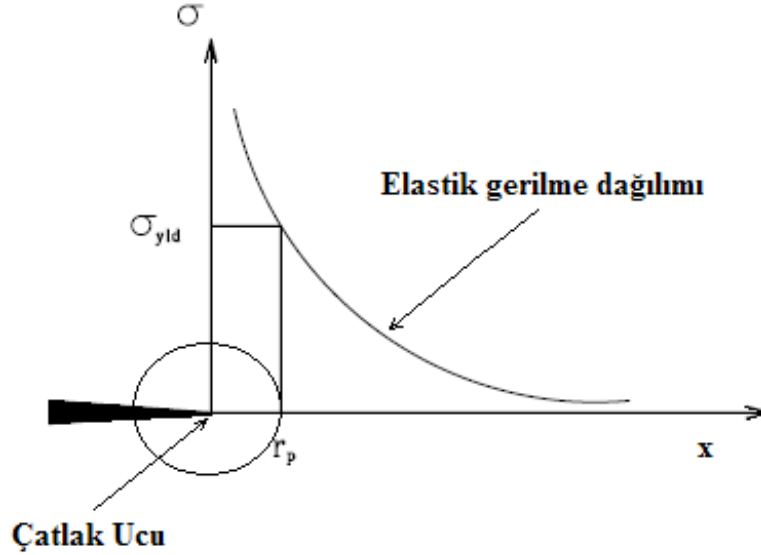


Şekil 2.14: Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikroçatlama ve sır çatlağı sonucu oluşan deformasyon [10]

Çatlak ucunda oluşan sonsuz gerilmeye karşılık çatlak ucunda farklı malzemeler farklı tavır sergileyeceklerdir. Şekil 2.14'te görüldüğü gibi polimerlerin bir kısmında çatlak ucunda boşluklar ve boşluklar arasında çekilmiş lifler oluşacaktır. Bu bölgeye sır çatlağı bölgesi denilmektedir. Seramik gibi gevrek malzemelerde ise bu bölgede küçük boyutta ve farklı yönlerde küçük çatlakların yoğun olduğu bir proses bölgesi meydana gelmektedir. Bu üç durumda da çatlak ucu aşırı bir deformasyona maruz kalır ve yakın bölgelerde ayrılmalar oluşmaktadır. Teorik olarak çatlak ucunda olması gereken yüksek gerilme daha geniş bir alana yayılarak yeniden bir dağılım göstermektedir [10].

Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımında iki ekseninde yüklenmiş ve ortasında $2a$ uzunluğunda çatlak içeren sonsuz bir levhanın elastik gerilme denklemlerini içermektedir. Bu denklemler, bütün gerilmelerin $r = 0$ 'da (çatlak ucu) sonsuza gittiğini göstermektedir. Gerçek anlamda malzemeler bir akma gerilmesi sahiptirler ve çatlak ucu yakınlarındaki teorik çok yüksek gerilmeler malzemelerin akma gerilmelerinin üzerine çıkmaktadırlar. Bu durum özellikle sünek malzemelerde görülmektedir. Buradan gerçek malzemelerin akma gerilmelerinin üzerinde plastik

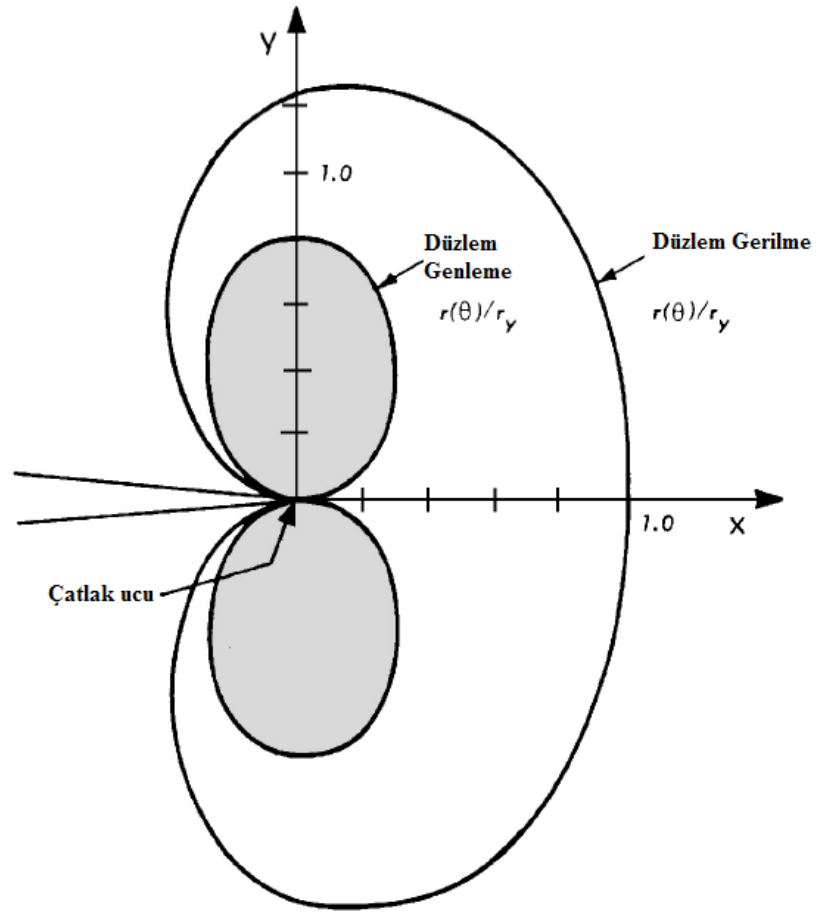
olarak deforme olmaları nedeniyle, çatlak ucunu çevreleyen plastik bölgelerin var olması demektir. Bu plastik deformasyona uğramış bölgeye çatlak ucu plastik bölge denir ve r_p olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.15: Çatlak ucu plastik bölgenin ifade edilmesi

Şekil 2.15'te de gösterildiği gibi plastik bölge dairesel olarak kabul edilmiş ve plastik bölgenin boyutu x - eksenini boyunca etkimektedir. Gerçekte durum çok daha karışık olmaktadır. Plastik bölgenin boyutu ve şekli, belirlenen akma durumuna, malzemenin şekil değiştirme özelliklerine ve kalınlığına bağlı olmaktadır.

Plastik bölgenin şekli gerilme eşitlikleri akma kriterlerinin de yerine konularak bulunabilir. Von Mises akma kriterini ele alındığı takdirde asal gerilmeler cinsinden akmanın oluşmasında, düzlem gerilme ve düzlem genleme için çatlak ucu plastik bölgenin şekli, Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

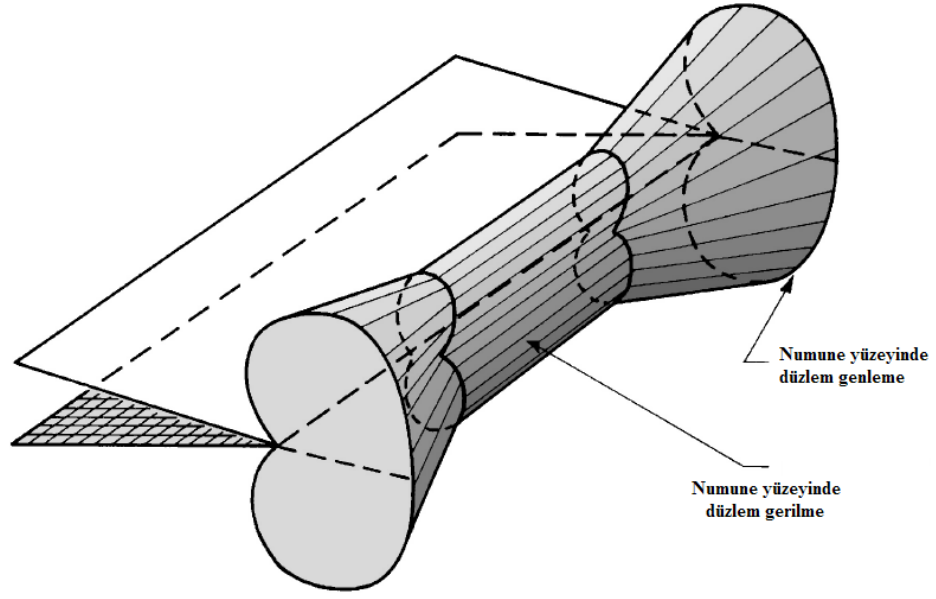


Şekil 2.16: Düzlem genleme ve düzlem gerilme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin şekli [12]

Belirli bir kalınlıktaki levha için gerilme durumu dağılımının hesaplanması mümkün değildir. Ancak düzlem gerilmenin veya düzel şekil değiştirmenin üstün olup olmadığını tahmin etmek için kurallar vardır;

Düzlem gerilme plastik bölgesinin hesaplanmış boyu, levha kalınlığı kadarsa tümüyle düzlem gerilme durumu beklenir,

Levhanın yüzeyinde mevcut düzlem gerilme plastik bölgesinin hesaplanmış boyu levha kalınlığının 1/10'undan fazla değilse, düzlem şekil değiştirmenin baskın olması beklenir, bu durum Şekil 2.17'de gösterilmiştir [11-13,15].



Şekil 2.17: Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi [12]

2.2.4. Kırılma tokluğu deneyleri

Kırılma tokluğu deneylerinin yapılması malzemelerin kırılma davranışlarının belirlenebilmesinde önemlidir. Bu önem kırılmaya karşı direncin kritik gerilme şiddeti faktörünün (K_{IC}) tespitinde kullanılmaktadır. Kırılma tokluğu deneylerinde yüklemenin türü ve malzemenin karakteristik davranışı bu deneylerin farklı açılardan gelişmesini ve kullanılmasını sağlamıştır. Ana hatlarıyla bu deneyler; yüklemenin türüne göre statik veya dinamik kırılma tokluğu deneyleri, malzemenin sünek veya gevrek oluşuna göre Lineer elastik ve Elasto-Plastik kırılma tokluğu deneyleri olarak ayrılmaktadır.

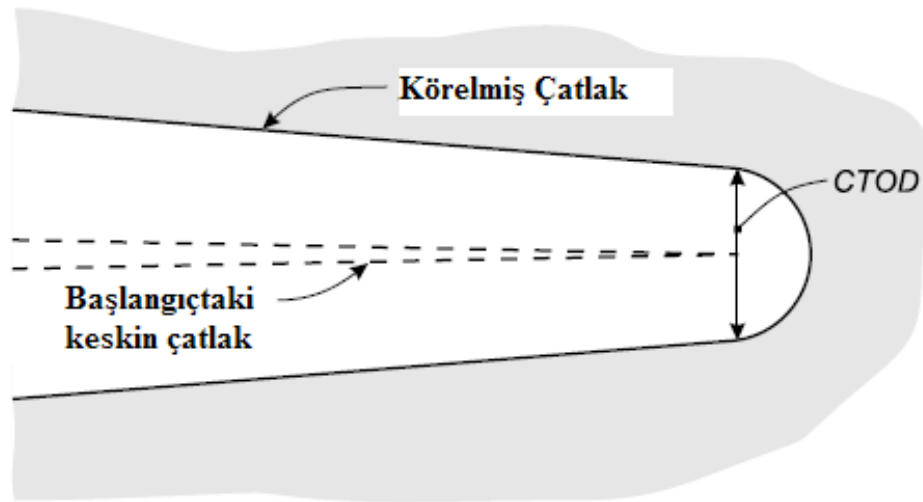
Bu tezde yüklemenin türü olan dinamik yükleme ve araştırılan malzemenin sünek davranış göstermesi, dinamik kırılma tokluğu deneyleri ve Elasto-Plastik kırılma tokluğu deneyleri ele alınmasını sağlamıştır. Elasto-Plastik kırılma mekaniğinde kırılma tokluğunu tespit etmede kullanılan en önemli iki metot, Çatlak ucu açılması (CTOD) ve J-İntegrali metodudur. J-İntegral metodundaki deneysel zorluk nedeniyle yerini EWF metoduna bırakmıştır. Dinamik kırılma tokluğu deneylerinde en önemli metot darbe testi metodudur.

2.2.4.1. Çatlak ucu açılma miktarı metodu (CTOD)

Çatlak ucundaki gerilmeler her zaman malzemelerin akma gerilmesini aşar ve plastik deformasyon oluşmaktadır. Sünek malzemelerin varlığı K_{IC} 'nin bulunabilmesinde kalın numunelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Wells yapısal çeliklerin kritik gerilme şiddeti faktörünü incelemiş olup malzemenin mevcut tokluğunun LEKM ile incelenemeyeceğini fark etmiştir. Bunun üzerine 1961 yılında Wells tarafından çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) yaklaşımı ortaya konmuştur. Irwin'ın dairesel plastik bölge analizi yardımıyla Dugdale tarafından yaklaşım geliştirilmiştir. 1966 yılında Burdekin ve Stone, Dugdale analizi yardımıyla CTOD yaklaşımını geliştirmişlerdir [12].

Çatlak ucundaki gerilmeler her zaman malzemenin akma gerilmesini aşmakta ve plastik deformasyon oluşmaktadır. Wells, çatlak ucundaki gerilmenin her zaman bir kritik değere ulaştığını öne sürmüştür. Böylece kırılmayı kontrol eden, çatlak ucu bölgesindeki plastik şekil değiştirmedir denebilir.

Şekil 2.18'de gösterilen bir çatlağın ucu plastik şekil değiştirmenin bir ölçüsü olup, çatlak ucunun (çatlağa çok yakın olan kısmı) y eksenini yönündeki çatlağın yer değiştirme miktarı bir malzeme için karakteristik kritik bir değer olup çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) olarak tanımlanır. Bu açılma miktarı δ şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.18: Çatlak ucu açılma miktarı [12]

Şekil 2.18’de gösterildiği gibi, çatlağın tam ucunda, çatlak ucu açılmasının sıfır olduğu görülmektedir. Plastik deformasyon olduğu durumlarda, çatlak yüzeyinin kırılma öncesinde hareket ederek plastik deformasyonun keskin çatlağı körelttiği görülmektedir.

Irwin’ın dairesel plastik bölge analizi çözümü ile çatlak açılma mesafesi Denklem 2.38’de gösterilmiştir;

$$CTOD = \frac{4 K_I^2}{\pi E \sigma_y} \quad (2.38)$$

Dudgale çözümü ile çatlak açılma mesafesi Denklem 2.39’da gösterilmiştir;

$$CTOD = \frac{K_I^2}{E \sigma_y} \quad (2.39)$$

Burdekin ve Stone’un çatlak açılma mesafesi denklemi, Denklem 2.40’da gösterilmiştir;

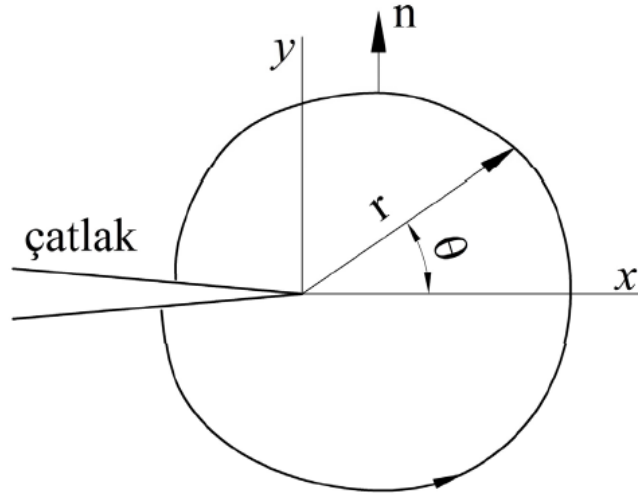
$$CTOD = \frac{8a\sigma_y}{\pi E} \ln \sec \left[\frac{\pi\sigma}{2\sigma_y} \right] \quad (2.40)$$

Dudgale çözümünü kullanan Kanninen’in (1984) çatlak açılma mesafesi Denklem 2.41’de gösterilmiştir [11,15];

$$CTOD = \frac{K_I^2}{E \sigma_y} \left[1 + \frac{\pi^2 \sigma^2}{24 \sigma_y} + \dots \right] \quad (2.41)$$

2.2.4.2. J-integrali metodu

Bu metot plastik şekil değişimi gösteren malzemelerde kırılma tokluğunu tespit etmek amacıyla CTOD tekniğine alternatif olarak geliştirilen metottur. Bu metodun esası, iki boyutlu çatlak problemlerinde çatlak ucunu çeviren bölgede genleme enerji yoğunluğu ve iş terimleri seçilecek çatlak yönünde bağımsız kabul edilmesidir. Bu metot da birbirinden çok az farklı çatlak uzunluklarına sahip numunelere ait yük-uzama diyagramlarının kıyaslanmasını için esasını teşkil eder.



Şekil 2.19: J-İntegral Kontrolü [10]

Şekil 2.19'da göz önüne alınarak düz çizgi integrali J gerek elastik gerekse elasto-plastik davranışlar için aşağıdaki gibidir;

$$J = \int_p w dy - T \left(\frac{du}{dx} \right) ds \quad (2.42)$$

Burada;

p: çatlak saran herhangi bir yön

w: genleme enerjisi yoğunluğu

T: p boyunca n normali doğrultusunda oluşan çekme vektörü

u: şekil değişimi vektörü

ds: ark boyu olarak ifade edilmektedir.

Burada W birim hacmin yaptığı iş olup elastik alandaki gerilme enerjisi yoğunluğu olarak da tarif edilebilir ve şu bağıntı ile verilir.

$$W = \int_p \sigma d\varepsilon \quad (2.43)$$

Çatlağın en uç noktası söz konusu olduğunda J değeri;

$$J = \int_p W dy \quad (2.44)$$

ile verilir. J, en geniş anlamı ile şu şekilde ifade edilir;

$$J = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2.45)$$

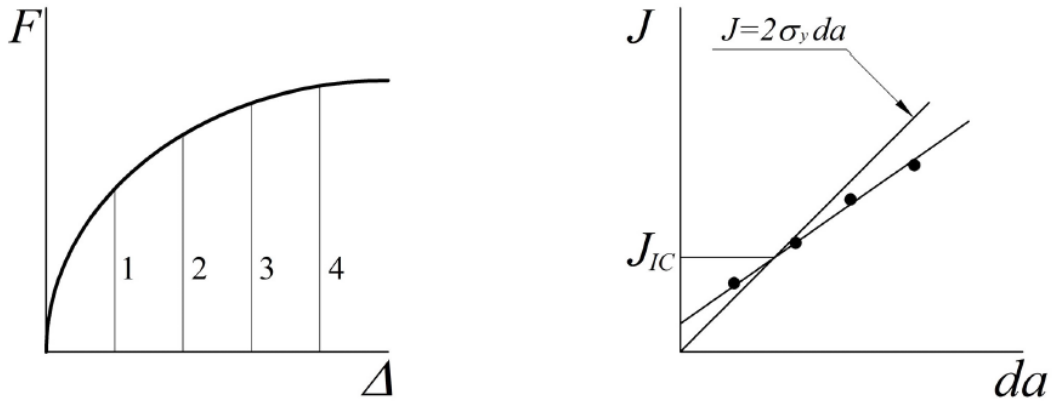
Denklem 2.46'daki B malzeme genişliği, U yapılan iş veya genleme enerjisidir. Bu değer bir enerji absorpsiyonu olmakla birlikte LEKM'de olduğu gibi aslında $G=J$ 'dir.

Bu testten sağlıklı sonuçlar elde edilebilmesi için $B \geq 25J_{IC} / \sigma_y$ 'yi sağlamalıdır.

J_{IC} 'yi elde etmek için en yaygın kullanılan test yöntemi kompakt çekme deneyi veya üç nokta eğme deneyidir. Bu deneylerden;

$$J = \frac{U}{B(w-a)} \quad (2.46)$$

Bağıntısı kullanılarak J hesaplanır. Burada U yük uzama diyagramı altındaki toplam enerji, w numunenin genişliği, a çatlak uzunluğudur. Çatlak ilerleyişi sırasında yeni oluşan çatlak yüzeylerine hiçbir gerilme etkimez. Dolayısıyla J, çatlak ilerleyişinin başlangıcına kadar geçerlidir.



Şekil 2.20: J_{IC} 'yi elde etmek için test prosedürü [10]

Bu testin yapılışında şu sıra takip edilir;

Numuneyi belli bir uzama değerine kadar yüklenir,

Yük boşaltılır ve çatlağın ilerleme uzunluğu (ac) ölçülür,

Her bir numuneyi çok düşük sıcaklıklarda (-150) soğutulur ve çatlak ilerlemesi ölçülür,

J denklemini kullanarak değer hesaplanır,

(J) ve çatlak ilerleme miktarı (da) arasındaki ilişki grafik olarak çizilir (şekil 2.20),

$J = 2\sigma_y$ da doğrusunu orijinden geçecek şekilde çizilir (şekil 2.20)

Bu doğru ile deneysel noktalardan geçen doğrunun kesiştiği nokta J_{IC} 'yi vermektedir [10,12].

2.2.5. Esas kırılma işi metodu (EWF)

2.2.5.1. Giriş

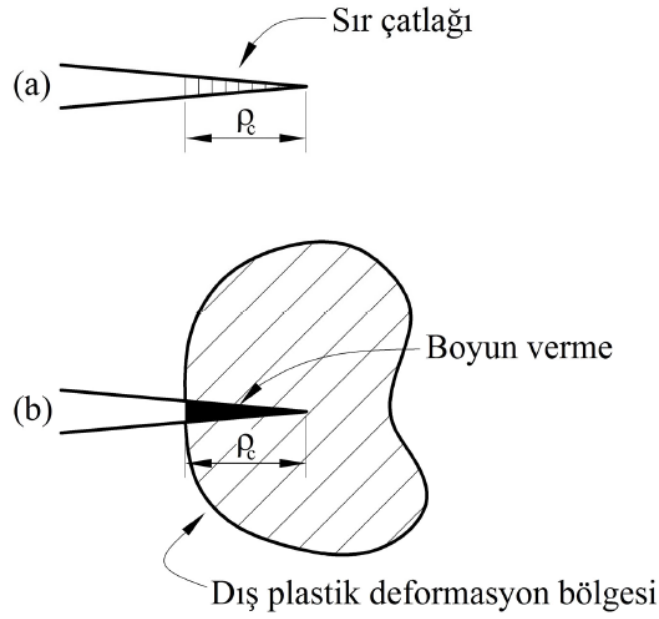
Mühendislik uygulamalarının büyük bir kısmında kullanılan çelikler ve alüminyum alaşımları gibi metalik malzemeler yerlerini polimerler, seramikler ve kompozit malzemelere bırakmaktadır. Düşük maliyet, kolay üretilebilirlik ve yüksek mukavemet gibi iyileştirmelerin bu malzemeler ile yakalanabilmesi bu geçişi hızlandırmaktadır. Özellikle polimerler ve kompozit malzemelerin günlük hayatta kullanımı oldukça geniş alanlara yayılmıştır.

Malzemelerin tokluk değerleri kilit öneme sahip olup bu değerler çeşitli standart test yöntemleri ile belirlenmiştir. Testlerin uygulanması ile bulunan tokluk verileri polimerler için genellikle karşılaştırılması amaçlanmış, numune hazırlanması ve test koşulları süreçleri çok büyük oranda aynı formda kalmış nadir durumlarda farklı durumların karşılaştırılmasına gidilmiştir.

Günümüzde gevrek malzemelerin kırılması olayında ortaya çıkan mekanizmalar belirlenmiş olup kırılma davranışları kabul edilmiştir. Sünek malzemelerde ise bu mekanizmaların belirlenmesi ve davranışların kabul edilebilmesi gevrek malzemelere nazaran yeterli olmayıp, belirlenecek olan tanım ve kavramlar yeteri kadar

gelişmemiştir. Sünek malzemelerin kırılması olayında çatlak ucunda önemli derecede plastik akış görülmektedir. Bu yüzden sünek malzemeler kırılmadan önce aşırı deformasyona uğrarlar. Gevrek malzemelerde ise kırılma olayında meydana gelen çatlak veya çentik ucu plastik deformasyon bölgesi numune boyutlarına nazaran çok düşük olup kırılma süreci bu bölge ile yakın ilişkilidir. Diğer bir deyişle gevrek malzemelerin akma gerilmesi değerlerinin altındaki bir değerde hasara uğrarlar (kırılma olayı) ve sünek malzemeler gibi belirgin bir akma davranışı göstermezler.

Kırılma mekaniğinin amacı, tatbiki yük altında malzeme çatlağının davranışını belirlemek ve tokluğun ölçülmesinde farklı metotları önererek alternatif yaklaşımların tatbiki ile en doğru sonucu bulabilmeye çalışmaktır. Bununla ilgili yaklaşımlar lineer elastik (düzlem genleme koşulları), elastik-plastik ve akma sınırı sonrası kırılma mekaniği (düzlem gerilme koşulları) olarak gruplandırılmaktadır. Gevrek malzemelerin deformasyon ve kırılma mekanizmaları Hooke Kanunu'na uygun olarak gerçekleşmektedir. Buradan da lineer elastik kırılma mekaniğinin (LEKM) gevrek sistemlerde uygulanabilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Lineer elastik kırılma mekaniği ile kritik gerilme şiddeti faktörü (K_{IC}) ve kritik enerji salıverme miktarı (G_{IC}) gibi tokluk değerleri, gevrek malzemelerin kırılma davranışlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Sünek malzemelerin kırılması olayında meydana gelen mekanizmalar gevrek malzemelere göre daha karışık olmaktadır. Sünek malzemeler kırılma olayı oluşmadan önce çatlak veya çentik ucunda büyük plastik deformasyonlar görülmektedir (Şekil 2.21). Burada plastik deformasyon büyük oranda kırılma işlemi ile doğrudan bağlantılı olmayıp, sünekliği kontrol eden genleme oranı, sıcaklık, moleküler yapı ile numunenin geometrisi ile değişmektedir. Plastik deformasyon bölgesinin geniş bir bölgeye yayılmış olması tatbiki yükün etkisinde oluşan enerjinin çatlak veya çentik ucunda yoğunlaşmayıp numune geometrisine yayılmaktadır. Enerjinin daha geniş bir bölgede yoğunlaşması lineer elastik kırılma mekaniği parametrelerinin (K_{IC} ve G_{IC}) kırılma davranışlarının belirlenmesinde kullanılamamaktadır.



Şekil 2.21: Çatlak ucu deformasyon bölgesi, (a) gevrek malzeme, (b) sünek malzeme [1]

Tokluğa özgü malzemenin belirlenebilmesi için kırılma mekaniği uyarlanmış olup malzemelerin karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu durumu uygulanabilmesi için yapıtokluk ilişkileri bilinebilmesi gerekmektedir ve malzemelerin geliştirilmesi ileri sürülmelidir. Polimerlerde gevrek kırılmaya yakın olan termosetler ve termoset matrisli kompozit malzemelerin kırılma davranışları ile ilgili lineer elastik kırılma mekaniği ile genel bir fikir verebilse de daha sünek olan termoplastik malzemelerde test sonuçları büyük farklılıklar göstereceği için bu yöntem uygulanamaz.

Sünek malzemelerin kırılma davranışlarının (kırılma toklukları) belirlenmesinde en çok J-İntegral, çatlak ucu açılması mesafesi (CTOD), esas kırılma işi (EWF) metotları kullanılmaktadır. J-İntegral yaklaşımının başarılı olabilmesi test edilen polimerin sünekliliğinin fazla olmamasına bağlıdır. CTOD yaklaşımının başarılı olabilmesi çatlak ilerlemesinden öncesine bağlı olmakta olup bununla birlikte polimerlerden dolayı nadiren enstrümantasyon problemleri yaşanmaktadır. Bu iki yöntemdeki (J-İntegral ve CTOD) kısıtlamaların ve deneysel zorlukların yaşanması nedeniyle sünek malzemelerin kırılma davranışlarının belirlenmesinde, deneysel açıdan bu iki yöntemin uygulanmasından daha kolay bir yöntem olan esas kırılma işi (essential work of fracture-EWF) metodu tercih edilmektedir. Günümüzde yüksek süneklığe sahip polimerlerin tokluk değerlerinin belirlenmesinde esas kırılma işi

(EWF) yaklaşımı kabul kazanmıştır. EWF metodunun J-İntegral yöntemine bir üstünlüğü de, kırılma yüzeyi (esas bölüm) ile kırılma bölgesi olarak ifade edilen hacim ile ilgili (esas olmayan bölüm) net bir ayırım yapılabilmesidir.

EWF yaklaşımı 1968 yılında Broberg'in birleştirilmiş teorisi olan 'Kırılma mekaniğinin bazı teorilerinin eleştirisel incelenmesi' adındaki çalışması sonucu ortaya çıkmıştır. Broberg'e göre stabil çatlak büyümesi, malzemenin bağımsız bir iç bölgesinde giderek artan bir iş girişi nedeniyle komşu bölgelere bu işin dağıtılması şeklinde artan etkilerin filtrelenmesi olarak ifade etmiştir. 1977'de Cottorel ve Reddel'in çalışmaları ile geliştirmiş olduğu EWF konsepti ilk kez 1979 yılında Mai ve Cottorel tarafından polimer malzemeler için uygulanmıştır. Daha sonra gösterildiği üzere EWF metodu ile düzlem gerilme halinde ince ve sünek olan metaller ve polimerler gibi çoğu malzemenin kırılma davranışı incelenmiş olup, sünek malzemelerin kırılma tokluğunun belirlenmesinde yöntemin uygulanmasının uygunluğu kabul edilmiştir.

EWF yaklaşımının belirlenmesinde çatlak ucundaki elastik olmayan bölge, kırılma olayının gerçekleştiği iç bölge ve plastik deformasyonun meydana geldiği dış bölge olmak üzere iki farklı bölgenin toplamı olarak ele alınmaktadır. Aynı şekilde kırılma için harcanan iş, iç proses bölgesinde boyun verme ve yırtılma için harcanan iş, dış plastik bölgede de çeşitli deformasyon mekanizmaları için harcanan iş olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Bunlardan ilkinde esas kırılma işi (essential work of fracture) diğerine ise plastik deformasyon işi veya esas olmayan kırılma işi (non-essential work of fracture) denir.

2.2.5.2. EWF yönteminin teorisi

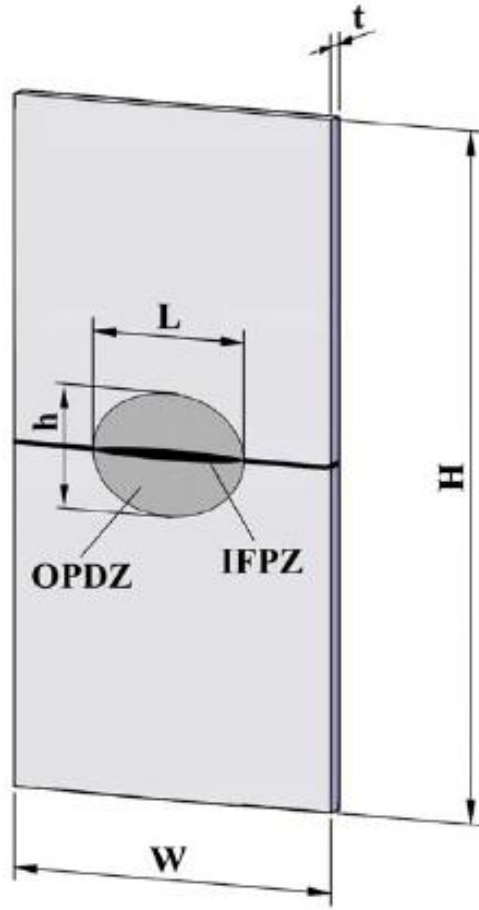
EWF yaklaşımında önceden de ifade edildiği gibi, toplam kırılma işi (W_f) iki bileşene ayrılmıştır. Bu iki bileşenin (iki farklı enerji) toplanması;

$$W_f = W_e + W_p \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

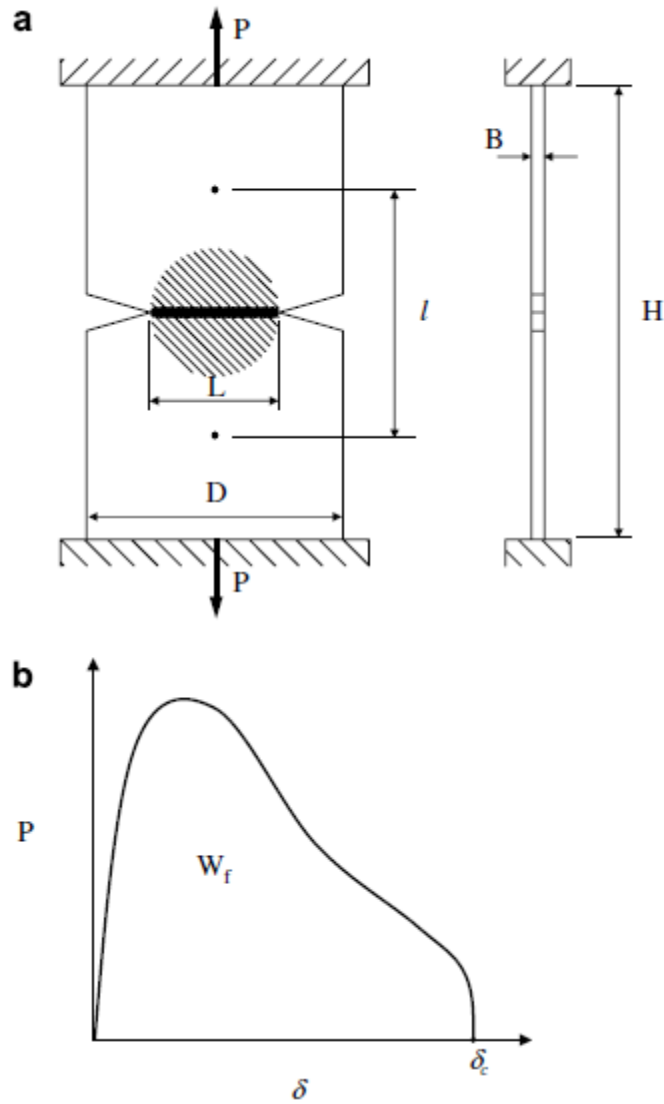
Burada ilk terim olan W_e esas kırılma işi (essential work of fracture) olarak adlandırılır. W_e enerjisinin, kırılmanın meydana geldiği iç kırılma proses bölgesi

(inner fracture process zone-IFPZ) tarafından absorbe edildiği kabul edilmekte olup yeni yüzey yaratılmaktadır. Kırılmanın burada olması, çatlak ilerleme direncinin bir ölçüsü olduğu anlaşılmakta olup ve bu ölçünün kırılma tokluğu olarak ifade edilmektedir. İkinci terim olan W_p plastik deformasyon işi veya esas olmayan kırılma işi (non-essential work of fracture) olarak adlandırılır. W_p enerjisi dış plastik deformasyon bölgesi tarafından (outer plastic deformation zone-OPDZ) absorbe edildiği kabul edilmekte olup, plastik deformasyonların oluşması bu enerji ile olmaktadır. İki tarafından çentik açılmış test numunesinin kırılmasında W_e ve W_p 'nin etkisi (IFPZ ve OPDZ) Şekil 2.22'de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.22: Kırılma bölgesinin şematik olarak gösterilmesi, iç kırılma proses bölgesi (IFPZ) ve dış plastik deformasyon bölgesi (OPDZ) [16]

Esas kırılma işinde bir tane yüzey alanı yaratıldığı farz edilmektedir. Bu düşünce ile en çok kullanılan, çift tarafından çentik açılmış çekme test numunesi geometrisi Şekil 2.22 ve Şekil 2.23.a'da gösterilmiştir. Test numunesi çekme yükü altında, L (kırılmanın meydana geldiği düzlemdeki çentiksiz kısmın uzunluğu-ligament length) uzunluğuna bağlı olarak akmanın meydana gelmesi, sünek çatlağın P yükü altında kopmasının gerçekleşmesi ile birlikte, P yüküne bağlı olan deplasmanın (δ) eğrisi Şekil 2.23.b'de gösterilmiştir.



Şekil 2.23: Test geometrisi ve uygulanan yükün kaydedilmesi; çift tarafından çentik açılmış (DENT) çekme numunesi (a), kırılma için yük-deplasman eğrisi (b) gösterimi [17]

Toplam kırılma işi (W_f), yük-deplasman eğrisinin (Şekil 2.23.b) altında kalan alanın hesaplanması ile bulunmaktadır.

$$W_f = \int_0^{\delta_c} P d\delta \quad (2.48)$$

EWf yönteminde toplam kırılma işinin (W_f), W_e ve W_p şeklinde iki bileşenden oluştuğunu önceden bahsedilmişti. W_e 'nin yüzey enerjisi ile kabul edildiğini ve W_p 'nin plastik deformasyon bölgesiyle bölgesinin hacmiyle ilişkili olduğunu da kabul edilmesiyle;

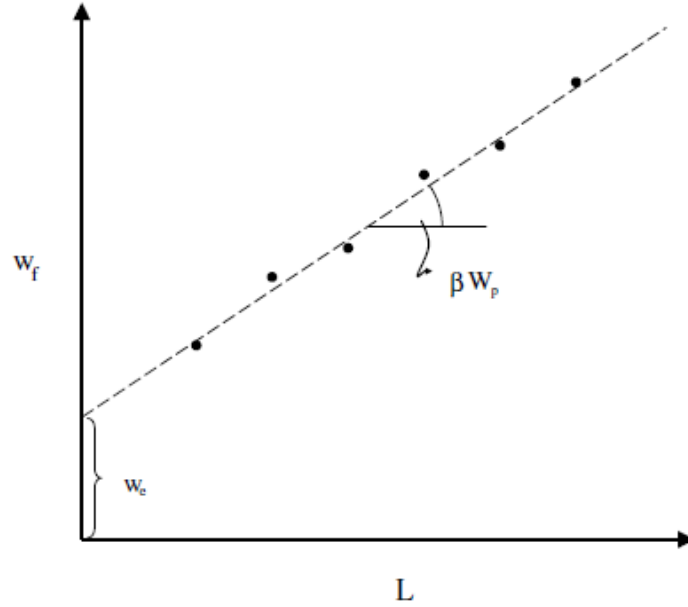
$$w_f = \frac{W_f}{L.B} = w_e + \frac{w_p V_p(L, B)}{L.B} \quad (2.49)$$

eşitliği yazılmaktadır. Burada $w_e = W_e / (L.B)$ (yırılma şeklinde görülebilen kırılma yüzeyi gibi), $w_p = W_p / (B.L^2)$ (plastik iş) ve $V(L, B)$ plastik deformasyon bölgesinin hacmini temsil etmektedir. Plastik deformasyon bölgesinin hacminin $B.L^2$ ve orantı sabiti olan β (şekil faktörü) ile orantılı olduğu kabul edilirse;

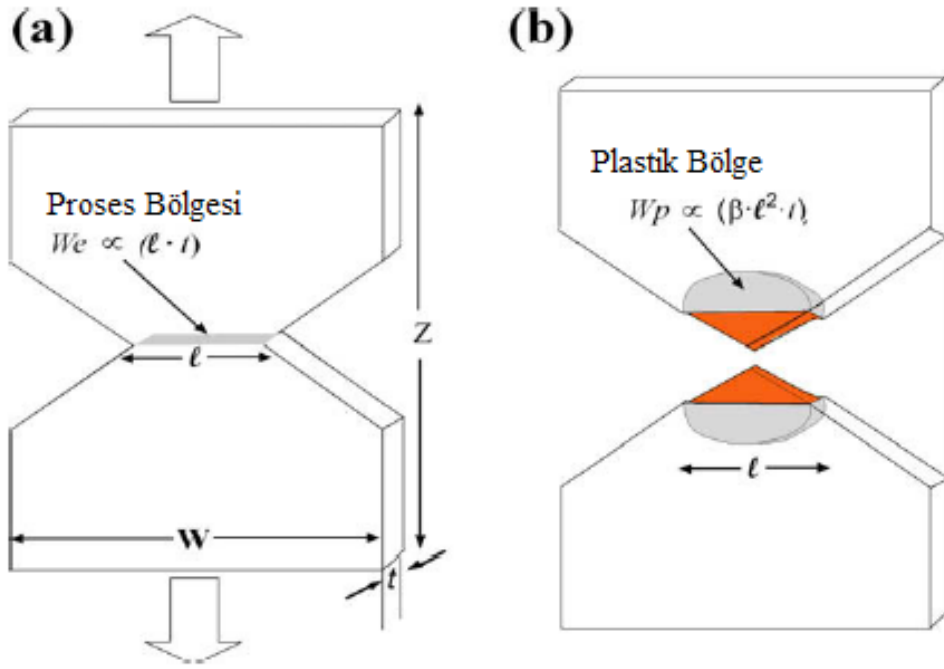
$$w_f = w_e + \beta w_p L \quad (2.50)$$

Denklem 2.50'de ifade edilen, w_e spesifik esas kırılma işi (specific essential work of fracture), w_p 'de spesifik plastik deformasyon işi (specific plastic deformation work) olarak ifade edilmektedir. Mai'nin yapmış olduğu çalışma sonucunda sünek malzemelerden oluşturulan deney numunelerinin toplam kırılma işinin herhangi bir malzemeye özgü sabit bir değer olamayacağını ifade etmiştir. Birim alanda harcanan iş olarak tanımladığımız spesifik esas kırılma işi (w_e) bir malzeme sabiti olarak kabul edilmiştir. Bulunan w_e değerinin sabit olarak kabul edilmesi, kırılma davranışın bulunmasında numune geometrisinden bağımsız olarak bulunduğunu ortaya çıkarmaktadır [17].

Denklem 2.50' de görüldüğü üzere, w_f ile L arasında (ligament length) arasında lineer bir ilişki vardır. Test numunelerine farklı uzunluklarda çentikler açılarak (farklı L boyları sağlanmış olur) çekme testine tabi tutulur. Yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanının bulunmasıyla toplam kırılma işi (W_f) değerleri bulunur. Bulunan bu değer Denklem 2.50'de yerine konularak spesifik toplam kırılma işi (w_f) değerleri hesaplanır. Açılan çentiğe karşılık gelen L değerinin x eksenini kestiği nokta ile bulunan w_f değerinin y eksenini kestiği nokta (L 'nin fonksiyonu olacak şekilde) karşılaştırılır. Bu karşılaştırma işlemi farklı L uzunluklardaki her test numunesi için yapılmalıdır. Farklı noktaların karşılaştırılarak oluşturulan noktalar kümesine lineer regresyon analizi yapılır. Bu analizin sonucunda oluşturulan doğrunun y eksenini kestiği nokta spesifik esas kırılma işi (w_e) değeri olup numunenin mevcut kalınlığındaki test malzemesi için kırılma tokluğunun sabit bir değeridir. Spesifik deformasyon işi olan βw_p değeri $w_f - L$ doğrusunun eğimidir. Bir malzeme için süneklik arttıkça bu değer artar veya tersi olarak, bir malzemenin gevrekliği arttıkça $w_f - L$ doğrusunun eğimi azalır. w_e ve w_f değerlerinin $w_f - L$ doğrusuna göre bulunması Şekil 2.24'te gösterilmiştir [17].



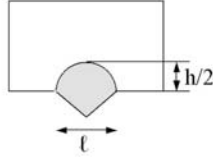
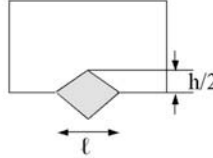
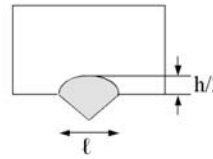
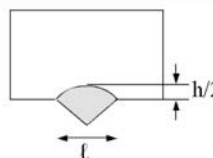
Şekil 2.24: w_e ve w_f değerlerinin $w_f - L$ doğrusuna göre bulunması [17]



Şekil 2.25: Çekme testi ile oluşan proses bölgesi ve plastik bölgenin oluşumu [18]

Spesifik plastik deformasyon işinin (w_p) tam olarak hesaplanabilmesi (Şekil 2.25), plastik deformasyon bölgesinin şekil faktörü olan β değerinin bilinebilmesine bağlıdır. β değeri malzemeye bağımlı bir faktördür. Kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle belirlenen deformasyon bölgesinin geometrik şekline göre β değeri bulunmaktadır. Bu değerlerin bulunması Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Tabloda h değeri plastik bölgenin yüksekliği olup, l değeri plastik bölgenin şekline (Dairesel, Elmas, Eliptik, Parabolik) göre ölçülmektedir. Parabolik OPDZ şeklinin bulunması halinde formülasyondaki k değeri elmas ve eliptik şeklinin yakınlığına göre sırasıyla 2 ve 1.27 değerleri almaktadır [18].

Tablo 2.2: OPDZ geometrisinin β (şekil faktörü) ile ilişkisinin belirlenmesi [18]

DEFORMASYON BÖLGESİNİN GEOMETRİK ŞEKLİ	β değeri
Dairesel 	$\beta = \frac{\pi}{4}$
Elmas 	$\beta = \frac{\pi \cdot h}{2 \cdot l}$
Eliptik 	$\beta = \frac{\pi \cdot h}{4 \cdot l}$
Parabolik 	$\beta = \frac{h}{k \cdot l}$

Denklem 2.50'de gördüğümüz üzere, kırılma bölgesini çevreleyen OPDZ 'nin büyüklüğünün L boyutu tarafından sınırlandırıldığı (kontrol edildiğini) görebiliriz. Örneğin elmas şeklindeki plastik deformasyon bölgesinin hacmi V_p , yüksekliği h ve şekil faktörü β olan OPDZ bölgesi;

$$V_p(L, B) = \frac{1}{2} B \cdot L \cdot h = \beta \cdot B \cdot L^2 \quad (2.51)$$

eşitliği yazılır. Bu eşitlikten görülebileceği gibi plastik deformasyon bölgesinin yüksekliği olan h ile çentiksiz bölgenin uzunluğu olan L arasında lineer bir ilişki vardır ve bu doğrunun eğimi 2β 'dir [1].

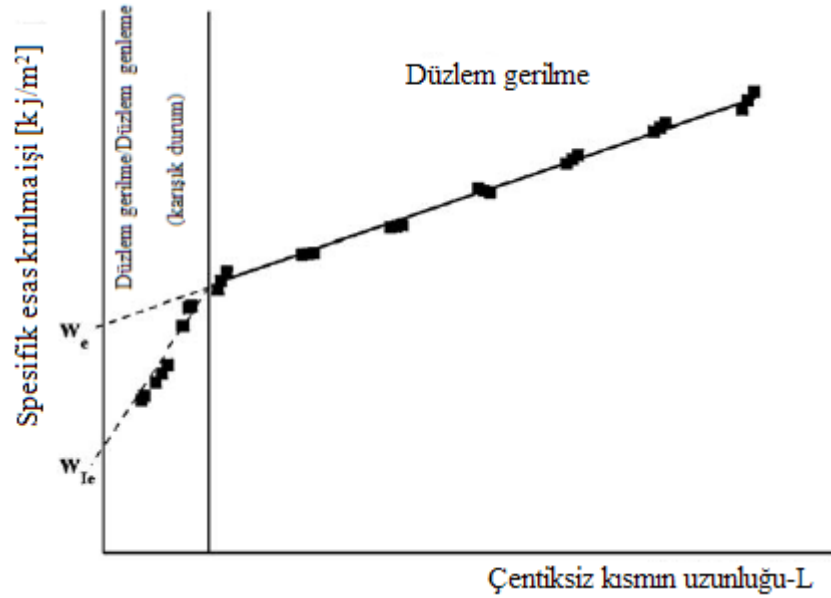
Daha önceki çalışmalar göstermiştir ki $w_f - L$ arasındaki lineer ilişkinin sağlanabilmesi için numune geometrisinin bazı ön şartları sağlıyor olması gerekir. Denklem 2.51'e bakarak OPDZ'nin hacminin βL^2 ile orantılı olduğunu görebiliriz. Bu oran aşağıda sıralanan bazı boyutsal sınırlamaları zorunlu kılmaktadır, L'nin en uygun değeri;

$$3B - 5B \leq L \leq \min(2r_p, W/3) \quad (2.52)$$

şeklinde olmaktadır. Plastik bölgenin büyüklüğü olan r_p aşağıdaki LEKM denklemi yardımıyla hesaplanır;

$$2r_p = \frac{1}{\pi} \frac{E W_e}{\sigma_y^2} \quad (2.53)$$

Test numunesinin çentiksiz kısmın uzunluğuna (L) bağlı olarak değişen düzlem gerilme ve düzel genleme durumuna göre spesifik esas kırılma işinin bulunması Şekil 2.26'da gösterilmiştir [16].

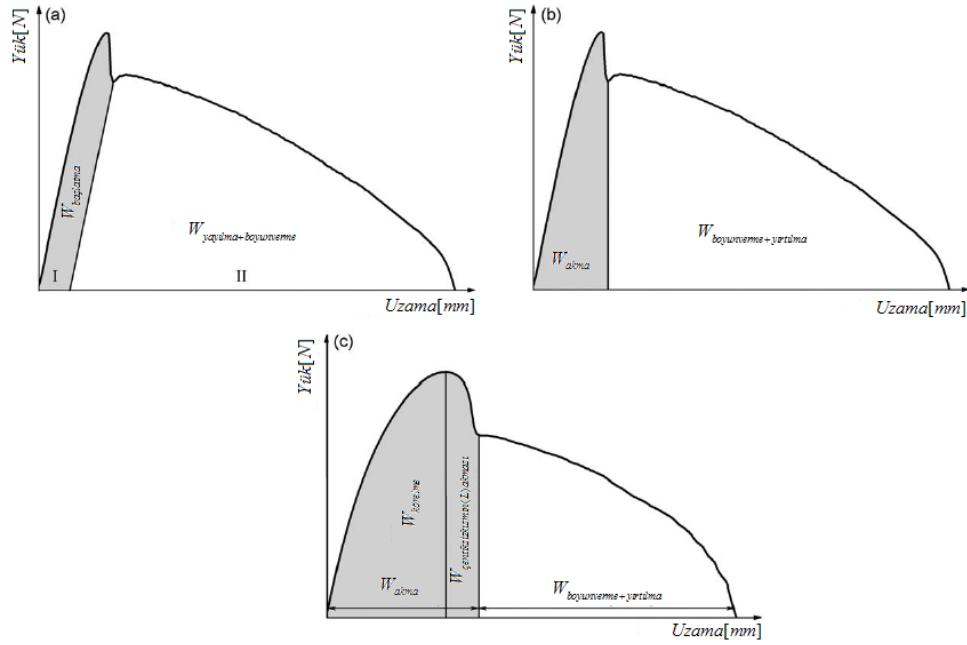


Şekil 2.26: Numunenin çentiksiz kısmının uzunluğunun gerilme durumuna etkisi [16]

Verilerin doğruluğunun kontrol edilmesi ve gerilme halinin L 'ye bağımlı olup olmadığını görmek için numunenin L uzunluğuna göre maksimum net kesit gerilmesi $\sigma_n = P_{\max} / (L.B)$ (bağıntıdaki P_{\max} değeri çekme testindeki yük-deplasman eğrisi altındaki maksimum okunan yük değeridir) ile L 'nin değişim grafiği çizilmektedir. Plastisite teorisine göre σ_y değeri malzemenin akma gerilmesi ise o halde saf düzlem gerilme durumunda $\sigma_n = m\sigma_y$ yazılır. Burada m değerine plastik sınırlandırma faktörü olarak adlandırılır ve bu değer L ile ters orantılıdır. Bu değer tek tarafından çentik açılmış test numunesi (SENT) '1', çift tarafından çentik açılmış test numunesi

(DENT) için bu değer ‘1,15’ alınmaktadır. Gerilme halinin saf düzlem gerilmeden saf düzlem genleme ya da karışık moda geçtiği durumda $m=3$ değeri alınmaktadır.

Her ne kadar EWF yaklaşımında enerji belli kısımlara ayrılrsa da (esas kırılma işi ve esas olmayan kırılma işinin ayrı olarak ifade edilmesi) daha fazla enerji temelli ayırt edici kriterler tanımlanmıştır. Mai ve Cotterell tarafından çatlak başlamasıyla (gözle görülebilecek şekilde gözlenen) ilgili bileşenlerin tanımlanması yapılmış, böylece numunenin elastiksel depolanması (akma noktası öncesi) dikkate alınmıştır. Yük-uzama (deplasman) eğrisine göre L boyunun etkisiyle akmanın başladığı yerde yükün düşmesi görülmektedir, bu bölge kısımlara ayrılarak elastik enerji bölgesinin ihmal edilmesi önerilmektedir. Sözü edilen bu iki kısım EWF yaklaşımında kabul edilmiş tarif edilen bölgeler Şekil 2.27’de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.27: Enerjinin kısımlara ayrılması (a) başlatma işi, (b) akmanın ani olarak başlaması durumu (akma işi), (c) akmanın zamana bağlı olarak gerçekleşmesi (akma işi) [16]

Yük-uzama (deplasman) eğrilerinin bölgelere ayrılmasında farklılık göstermesi elastiksel depolanmış enerjinin etkisi görülmektedir. Elastik katkının, ardı sıra gelen kırılma süreci esnasında bırakıldığı varsayılan ‘Başlatma İş’ düşüncesine göre enerjinin iki kısma ayrılması matematiksel olarak Denklem 2.54’de gösterilmektedir. Burada W_f (kırılma için toplam iş) iki bileşene ayrılır; W_1 , tersinmez başlatma

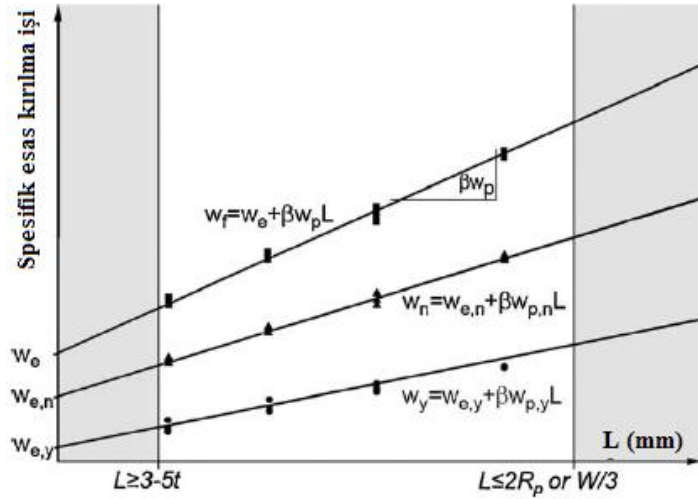
prosesinin akmayla kapsanması işidir. W_{II} , çatlak yayılması ve uzatılmış boyun vermenin plastik bölgedeki işidir.

$$W_f = W_{f,I} + W_{f,II} = (w_{e,I} + \beta w_{p,I} \cdot L) + (w_{e,II} + \beta w_{p,II} \cdot L) \quad (2.54)$$

‘Akma işi’ olarak adlandırılan enerjinin kısımlara ayrılması Denklem 2.55’de gösterilmiştir,

$$w_e = W_{f,y} + W_{f,n} = (w_{e,y} + \beta w_{p,y} \cdot L) + (w_{e,n} + \beta w_{p,n} \cdot L) \quad (2.55)$$

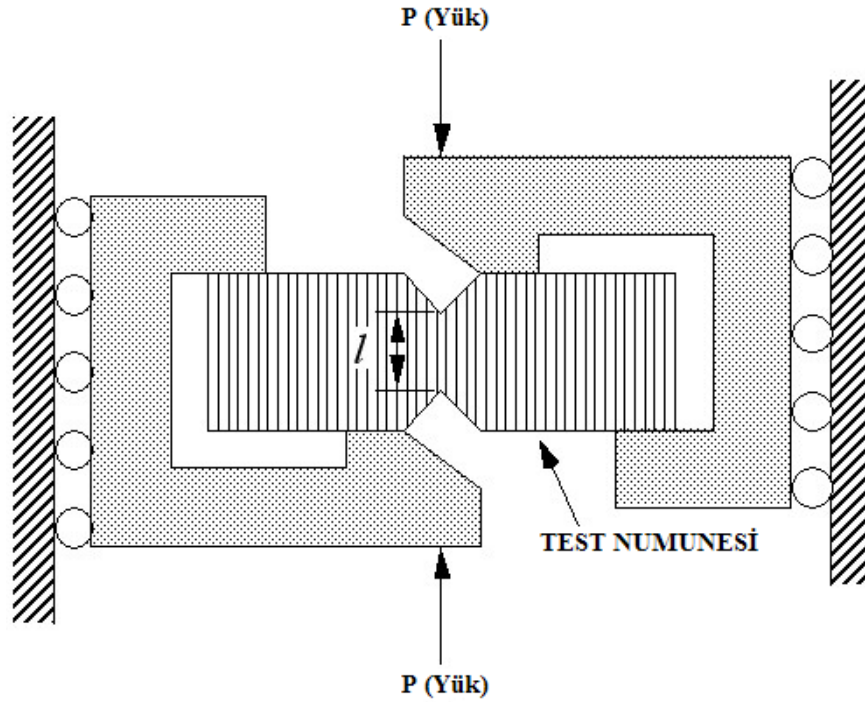
Denklemden görüldüğü üzere yük düşüşü esas alınarak spesifik esas kırılma işi terimini, akma için spesifik esas kırılma işi $w_{e,y}$ ve boyun verme-yırtılma için spesifik esas kırılma işi $w_{e,n}$ olarak ifade edilmektedir. $\beta w_{p,y}$ ve $\beta w_{p,n}$ ise sırasıyla, akma için spesifik esas kırılma işi ve boyun verme-yırtılma için spesifik plastik deformasyon işi olarak ifade edilmektedir. Spesifik esas kırılma işlerinin çentiksiz kısmının uzunluğuna (L) göre çizilen eğrilerin gösterimi Şekil 2.28’de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.28: Esas kırılma işleri değerlerinin bulunması (w_e , $w_{e,y}$, $w_{e,n}$) [16]

EFW metodunda yükleme altında çatlak ilerleme modlarına göre farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. EFW yaklaşımında malzemenin kırılma davranışı çoğunlukla Mod I (Açılma veya çekme modu) yükleme türüne göre belirlenmektedir. Bu yükleme türünde verilen denklemler geçerli olup yüklemenin statik (düşük genleme hızı,

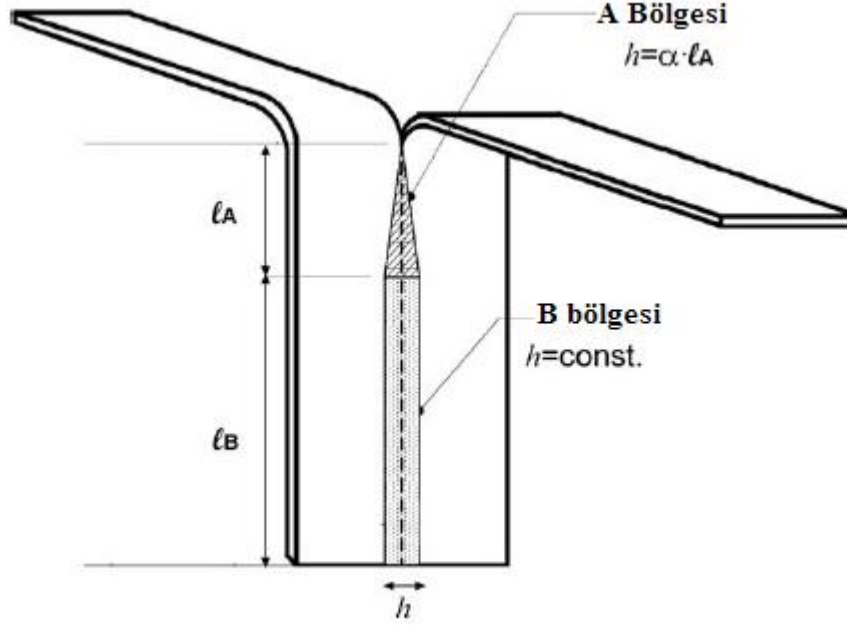
düşük yükleme frekansı) veya dinamik (yüksek genleme hızı, yüksek yükleme frekansı) olmasına yapılacak olan test ile malzemenin kırılma davranışı belirlenebilmektedir. Dinamik yük altında uygulanan EWF testlerinin koşulları (uygun malzemeleri kapsayarak) statik yük altında uygulanmasına göre belirgin şekilde farklıdır. EWF metodunda Mod II (Kayma modu) yükleme türüne göre uygulanabilmesi Kwon ve Jar tarafından kontrol edilmiştir. Bu yükleme türüne göre EWF yönteminin uygulanabilmesi Iosipescu test takımı (Şekil 2.29) ile kenarından çentik açılmış test numunesine kesme kuvveti (kayma modu) ile olmaktadır. Test numunesinin şekli, her iki kenarına simetrik olarak açılan V-şeklindeki oluk ve çentik ucunun numunenin yüzeyi boyunca bulunmasına dayanır. Uygulanan yük kayma yönüne paralel olacak şekilde olmaktadır. EWF yaklaşımı ile kırılma davranışının tayininde kesme yükü ile belirlenen kesme esas kırılma işi daha çok gevrek termoset ve sünek termoplastik malzemelerde başarılı sonuçlar alınmaktadır [16].



Şekil 2.29: Iosipescu testinin şematik olarak gösterimi [19]

EWF metoduna göre Mod III (Yırtılma) yükleme türünde kırılma davranışının bulunması Thomas ve Rivlin tarafından geliştirilen yöntem ile saptanmıştır. Yöntemde ince malzemelerin düzlem dışı kırılma tokluğunu saptamak için pantolon

tipi deney numuneleri kullanılmaktadır. Bu tip deney numunesinin sünek malzemeler için kullanılması Mai ve Cotterell tarafından gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.30: Mod III (Yırtılma) yüklemeye altınđa düzlem dışı kırılma tokluğunun bulunmasında kullanılan pantolon tipi test numunesi [18]

Sünek polimerik filmlerin yırtılma kırılmasının incelenmesinde kullanılan pantolon tipi numunelerde 2 farklı bölge tanımlanmaktadır (Şekil 2.30). İlk bölge başlangıç çatlakına bitişiktir ve dış plastik bölgenin yüksekliği (h) yırtılma ile birlikte artar. Bu bölgeye A bölgesi denir. Yırtılma olayı l_A kadar bir mesafe ilerledikten sonra OPDZ'nin yüksekliği sabit kalır (h_b) ve ilerleyen yırtılma olayı boyunca değişmez. Bu sabit dış plastik bölge yüksekliğine sahip bölgeye B bölgesi denir. A bölgesinde çatlak ilerledikçe plastik bölgenin yüksekliği de artmaktadır. Bu bölgedeki toplam kırılma işi;

$$W_{Tf} = W_{Te} + W_{Tp} = w_{Te} l_a t + w_{Tp} S_{pa} t \quad (2.56)$$

yazılır. Burada T notasyonu hasarın yırtılma kırılması olduğunu simgelemektedir.

Denklemdaki l_A değeri A bölgesindeki yırtılma bölgesi uzunluğudur ve $0 < l_a < l_A$ şeklindedir. A bölgesindeki dış plastik bölgenin alanı S_{pa} ile ifade edilir. Eğer h değeri yaklaşık olarak $h \approx \alpha'' l_a$ ise S_{pa} şu şekilde yazılabilir;

$$S_{pa} = \alpha'' l_a^2 \quad (2.57)$$

Buradaki α'' değeri plastik bölge şekil faktörüdür ve şu şekilde hesaplanır;

$$\alpha'' = \frac{\pi h_B}{4 l_a} \quad (2.58)$$

Denklem 2.56 ve Denklem 2.57 düzenlenirse;

$$W_{Tf} = w_{Te} l_a t + \alpha w_{Tp} l_a^2 t \Rightarrow w_{Tf} = \frac{W_{Tf}}{l_a t} = w_{Te} + \alpha w_{Tp} l_a \quad (2.59)$$

yazılır.

Denklem 2.59'dan görülebileceği gibi eğer l_a değeri l_A değerinden küçükse spesifik kırılma işi değeri $(w_{Te}) w_{Tf} - l_a$ doğrusunun y eksenini kestiği noktadır. Yırtılma türü kırılma (Mod III) ile açılma türü kırılma durumunda esas kırılma işi denklemleri benzerlik göstermektedir.

B bölgesi modelinde ise dış plastik deformasyon bölgesinin (OPDZ) yüksekliği (h_B) sabit kalmaktadır. B bölgesindeki toplam yırtılma kırılması işi;

$$w_{Tf}^B = w_{Te}^B + w_{Tp}^B = w_{Te}^B l_B t + w_{Tp}^B S_{pBt} \quad (2.60a)$$

yazılır. Buradaki l_B , B bölgesindeki bağ uzunluğudur (Şekil 2.30) ve $S_{pB} = h_B l_B$, B bölgesindeki plastik bölgenin alanıdır. Denklem 2.60a düzenlenirse;

$$w_{Tf}^B = \frac{W_{Tf}^B}{l_B t} = w_{Te}^B + w_{Tp}^B h_B \quad (2.60b)$$

Bazı polimerler için h_B değeri çok küçük olmaktadır ve alternatif hesaplama yapmak için;

$$w_{Tf}^B = \frac{2P_B}{t} \quad (2.61)$$

yazılabilir. Buradaki P_B değeri B bölgesindeki sabit yük değeridir. Mademki h_B değeri direk olarak numunelerden ölçüm yapılarak bulunabiliyor ve w_{Tp}^B değeri A bölgesi modelindeki doğrunun eğiminden hesaplanabiliyor, öyleyse pantolon tipi numunelerde yırtılma için spesifik esas kırılma işi (w_{Te}^B) değeri Denklem 2.60 ve Denklem 2.61 kullanılarak hesaplanabilir [1,16,18].

2.2.5.3. Esas kırılma işi değerinin COD yöntemiyle hesaplanması

Spesifik esas kırılma işi olan w_e değeri, COD yöntemiyle hesaplanabilir. Yük-uzama eğrisinin yaklaşık olarak parabolik olduğu ve W_f değerinin P_{\max} ve e_b ile ilişkili olduğu kabul edilerek;

$$W_f = \frac{2}{3} P_{\max} e_b \quad (2.62)$$

eşitliği yazılabilir. Maksimum yük için;

$$P_{\max} = mB\sigma_y L \quad (2.63)$$

yazılır. Denklem 2.62 ve Denklem 2.63'den;

$$w_f = \frac{2}{3} m\sigma_y e_b \quad (2.64)$$

$$e_b = \frac{3}{2m\sigma_y} (w_e + \beta w_p L) \quad (2.65)$$

eşitlikleri yazılır. $L = 0$ 'da ki e_b değeri kritik çatlak açılma mesafesi olan e_0 değerini verir ve buradan da aşağıdaki eşitlik yazılır [1].

$$w_e = \frac{2}{3} m\sigma_y e_0 \quad (2.66)$$

2.2.5.4. J-integral metodu ile EWF metodu arasındaki ilişki

J-integrali metodunda J kontrollü çatlak büyümesi durumları için Denklem 2.67 ve Denklem 2.68 sağlanmalıdır.

$$\frac{L\sigma_y}{J_R} \gg 1 \quad (2.67)$$

$$\frac{L}{J_R} \frac{dJ}{da} \gg 1 \quad (2.68)$$

Çatlak ilerleme direnci J_R eğrisi, yaklaşık çatlak büyümesinin doğrusal fonksiyonudur ve şu denklemlerle verilir;

$$J_R = J_C + \frac{dJ}{da} \Delta_a \quad (2.69)$$

Küçük çatlak büyümeleri için J_R ayrıca enerji eşitliğinden;

$$J_R = \frac{dU}{da} \quad (2.70)$$

yazılır. Burada dU potansiyel enerji salıverme oranı, da ise çatlak büyümesidir.

$$w_f \left[W_f / (L.B) \right] = J_C + \frac{dJ}{da} \frac{L}{4} \quad (2.71)$$

$$w_f \left[W_f / (L.B) \right] = J_C + \frac{dJ}{da} \frac{L}{2} \quad (2.72)$$

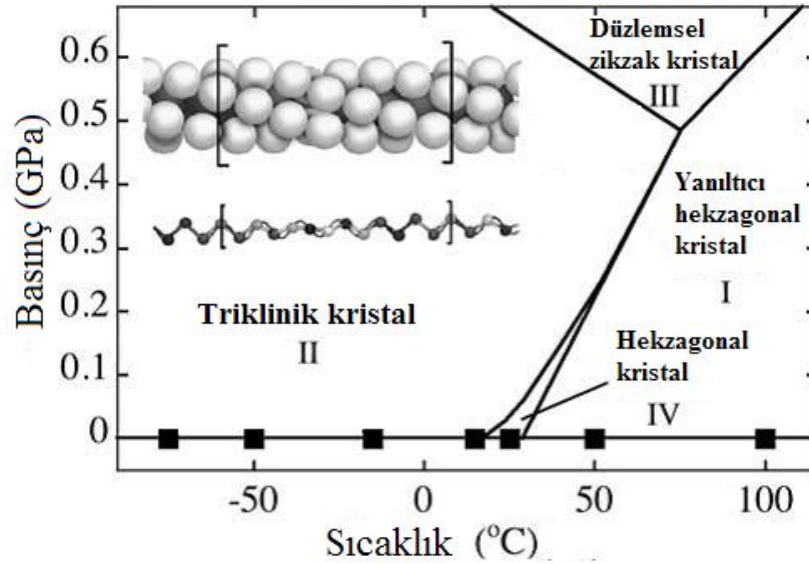
Denklem 2.50, 2.71 ve 2.72, karşılaştırıldığında DENT numuneler için dJ/da değeri 4'ün katı ve SENT numuneler için 2'nin katı olarak ortaya çıkmaktadır. Görüldüğü gibi bu karşılaştırmadan J_C ve w_e 'nin aynı olması gerektirdiği takdirde aynı çıkmadığı anlaşılmaktadır. βw_p değeri dJ/da ile tanımlanabilirken bu terimlerin sadece kalınlığa bağlı olan malzeme özellikleri olmadıkları bilinmektedir.

Çatlak ilerleme direnci eğrisi (R eğrileri) kavramı; kırılma prosesi bölgesi küçük olan ve kırılma tokluğu değerinin küçük bir çatlak ilerleme değerinden sonra maksimuma ulaştığı yüksek mukavemetli malzemelerde uygulanan, çatlak ilerlemesine bağlı bir

malzeme özelliğidir. Eğer genel akma olayı çatlak başlamadan önce olursa sünek malzemelerde dış plastik bölgenin şekli geometriye bağlıdır. Bu şartlar altında çatlak ilerleme direnci eğrisinin (R eğrisi) numune geometrisinden bağımsız olacağı düşünülemez. Eğer kırılma prosesi bölgesi büyükse kırılma malzemelerde bile çatlak ilerleme eğrisi geometriye bağlı olarak değişir. Bu nedenle Denklem 2.71 ve denklem 2.72'den elde edilen dJ / da değerleri farklıdır [1].

2.3. Literatür Araştırması

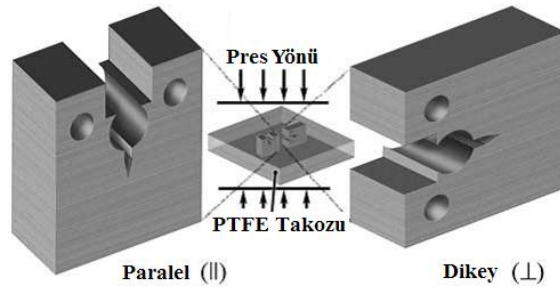
PTFE, yarı-kristal polimer olup çok düşük sürtünme katsayısı, korozyona karşı direnç, mükemmel elektriksel yalıtım özellikleriyle mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. PTFE malzemesi ile üretilen uzay araçlarının bileşenleri, cerrahi implantlar, motor sızdırmazlık parçaları, tehlikeli kimyasal bariyerleri gibi hasara duyarlı mühendislik uygulamalarında çatlak ilerleme mekanizmasının belirlenmesi için literatürde sınırlı kapsamda incelemeye gidilmiştir. PTFE, kompleks kristalin faz davranışı gösterir, 4 fazdan oluşan karakteristik bölgeleri Şekil 2.31'de gösterilmiştir [9].



Şekil 2.31: Kristalin faz bölgelerinin basınç ve sıcaklığa göre değişimi [9]

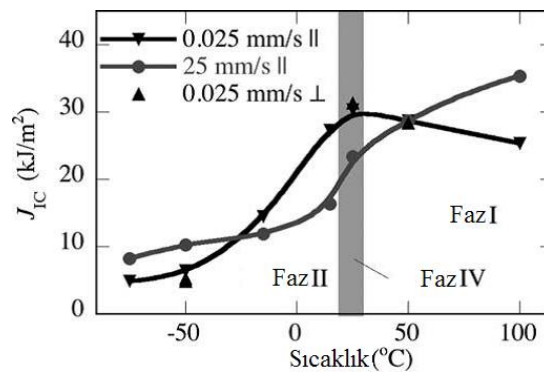
3 kristalin yapının (I, II ve III fazları) atmosferik basınç altında gözlenen faz değişimleri 19°C ve 30°C'de meydana gelmektedir. Brown ve Dattelbaum'un yaptığı çalışmada PTFE polimerinin kristal fazlarının kırılma ve mikroyapısı değişimi üzerine etkileri incelenmiştir. J-İntegral kırılma tokluğu bulunurken farklı sıcaklıklar

ve farklı yükleme değerlerinde tek numune normalizasyon tekniği uygulanmıştır. Çatlak yayılmasının bulunmasında gevrek – sünek geçişinde çatlak yayılması davranışıyla ilgili farklı iki oda sıcaklığında faz geçişi incelenmiştir. Kırılma tokluğunun artmasının sonuçlarının gösteriminde başlangıçtaki stabil fibril formasyonu çatlak yüzeyiyle yan yana bağlanmış ve plastik deformasyon artmıştır. Fibril çizimlerinin stabilitesi öncelikle sıcaklık ile kararlı olup kristalin faz yükleme hızı ve mikroyapı anizotropisine bağlıdır. Deneylerde kullanılan takozlar basınç altında sinterlenmiş 36°C/saat ile 300°C 'de sabit olarak 6 saat ve 36°C/saat ile 357°C tutulmuş sonradan oda sıcaklığına (36°C) soğutulmuştur. Test numuneleri Şekil 2.32'de görüldüğü üzere dikey ve paralel olacak şekilde 2 türde hazırlanmıştır. Numunelerin çatlak açılması ve şekli çekme testine uygun olarak hazırlanmıştır. COD gauge ile yük doğrusunun yer değiştirmesi ölçülmüştür [9].



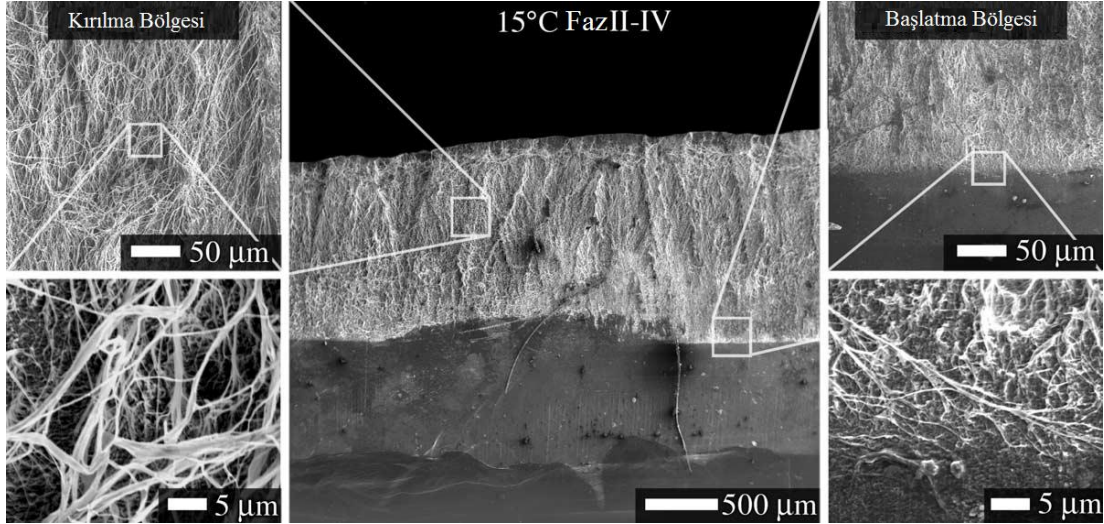
Şekil 2.32: Çekme test numuneleri ve takozun pres yönü [9]

Çalışmada PTFE numuneleri test edilmiş sıcaklık fonksiyonu, hız ve yönlenmeye bağlı olarak incelenmiştir. Farklı hızlardaki statik yükler altında sıcaklığa bağlı olarak dikey ve paralel test numunelerinin J-İntegral kırılma tokluğu değerleri (J_{IC}) Şekil 2.33'de gösterilmiştir.



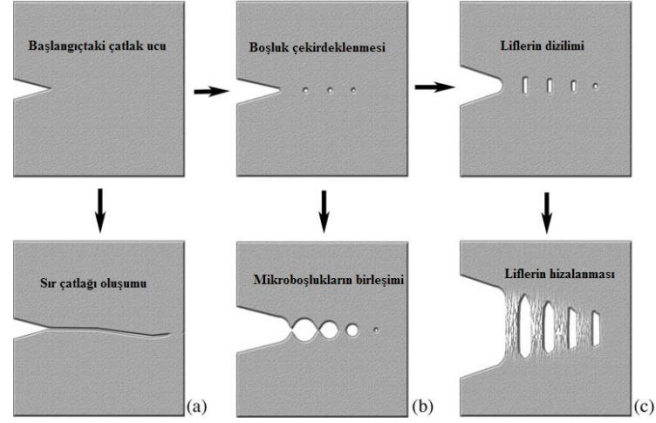
Şekil 2.33: Kırılma tokluğu değerlerinin (J_{IC}) farklı koşullar altında gösterimi [9]

PTFE için kırılma mekanizmasının değişiminde kristalin faz geçişi kırılma düzlemlerinin morfolojisi TEM (Taramalı elektron mikroskopyu) ile incelenmiştir. Çalışmada iki büyük mekanizma gözlenmiş, ilk görülen mekanizma gevrek kırılmanın cleavage (sır çatlağı) kırılma yüzeyi ve mikroboşlukların birleşmesiyle nominal bölgesel deformasyonlardır. İkinci görülen mekanizma, sünek hasarla birlikte belirgin sınırlanmış deformasyon fibrillerin (liflerin) formudur (biçimidir). Farklı sıcaklıklarda yapılan testlerin kırılma yüzeyleri morfolojileri, hasar ve başlama bölgeleri TEM görüntüleri ile çalışmada incelenmiştir. 15°C’de II ve IV faz geçişi kırılma yüzeyleri morfolojileri, hasar ve başlama bölgeleri Şekil 2.34’te gösterilmiştir. Liflerin biçiminde görülen yüklenme hızı ve yöneline bağlı olarak kuvvetli bağımlılık gösterir [9].



Şekil 2.34: TEM mikroskobik resmi ile kırılma yüzeyi morfolojisi [9]

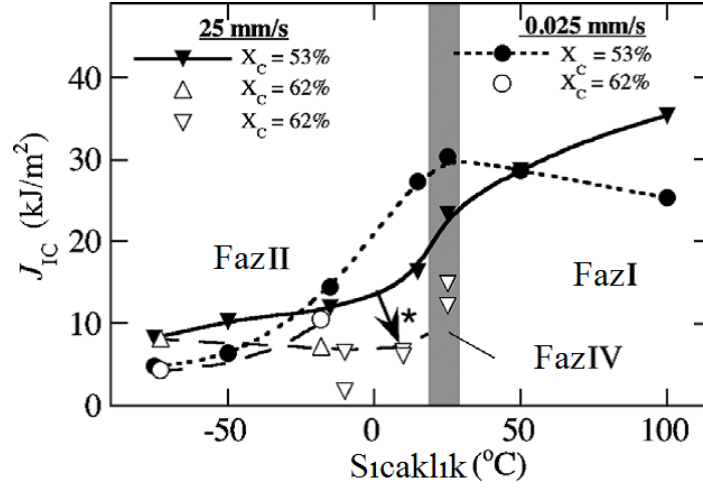
Wecker’in PTFE kristalin bölgenin faza bağlı tek eksenli yük altında kırılma mekanizmaları Şekil 2.35’de gösterilmiştir. PTFE’nin faz geçiş sıcaklıklarının değişimi ile kırılmada ana değişkeni oluşturmaktadır. Gevrek kırılmanın görüldüğü düşük sıcaklık veya yüksek genleme oranlarında sır çatlağının oluşumuyla klivaj kırılması görülmektedir. Bir başka gevrek kırılma durumunda başlangıç boşluklarının çekirdeklenmesi ile mikroboşluklar birleşerek kırılma olmaktadır. Düşük genleme hızlarında ve malzemenin uygun sıcaklık değerlerinde görülen sünek kırılma liflerin diziliminin oluşmasıyla liflerin hizalanması süreci sonrasında kırılma gerçekteşmektedir [9].



Şekil 2.35: PTFE’de gözlenen kırılma mekanizmalarının şematik olarak gösterimi; (a) sır çatlak oluşumu, (b) mikroboşlukların birleşimi, (c) liflerin hizalanması (sünek) [9]

Brown ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada PTFE’nin kırılma tokluğu farklı sıcaklıklarda ölçülmüş, çeşitli yüzde kristal oranlarında sistematik olarak hasar mekanizması sorgulanmıştır. Mod I çatlak ilerleme türünde, 19°C altında gevrek-kırılma geçişi olmuş sünek-kırılma ile birlikte lif oluşumu faz II-IV dönüşümünde olmuştur, 30 °C’de büyük ölçekli plastik deformasyonun görülmesi faz I ile faz IV-I geçiş sıcaklığında olmuştur. %53 ile %62 kristal oranı karşılaştırılmış düşük genleme davranışında nominal değişiklik olmuş bu durum dinamik mekanik analizle kontrol edilmiştir. Ancak liflerin oluşumu ve J_{IC} artışı kristalliğin artmasıyla sınırlanmıştır [20].

Joyce’un yapmış olduğu çalışmada %53 ve %62 kristalin oranında PTFE’nin kırılma davranışı incelenmiş ve karşılaştırmaya gidilmiştir. Bu iki oran arasında, sıcaklık ile J -İntegral kırılma tokluğu ilişkisi Şekil 2.36’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere atmosfer koşulları altında kırılma tokluğu yükleme hızının etkisiyle fazlara göre (sıcaklık etkisi) değişiklik göstermiş ayrıca yükleme hızı ile kristalinlik oranı kırılma tokluğunu da etkilemiştir. Farklı parametrelerin çokluğu ile davranış çeşitliliği gösterilmiş olup Faz IV’te kırılma tokluğu değeri ani bir şekilde artmıştır. Sıcaklığın arttırılmasıyla değişen fazın etkisinde kırılma tokluğu bir süre daha artma eğilimi göstermiş olup sıcaklığın daha da arttırılmasıyla bu trend azalma eğilimi göstermiştir. Faz geçiş sıcaklığı olan 19 °C’de %53 kristalinliğe sahip PTFE daha yüksek kırılma tokluğu göstermiştir [21].



Şekil 2.36: Kırılma tokluğu ile sıcaklık arasındaki ilişkinin farklı kristalinlik oranlarında gösterimi [21]

Bir başka çalışmada PTFE tozları yarı-mamul haline getirilirken preform basınç parametresi değiştirilerek mekanik özelliklerin değiştirilebilirliği araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin incelenmesinde çekme ve basma testleri uygulanmış, preform basıncın artması ile genel olarak mekanik özelliklerde iyileşmeye gidildiği görülmüştür [5].

Bir başka çalışmada PTFE çekme testi ile mekanik özellikleri araştırılmış, değerlerin bulunmasında genleme hızı, sıcaklık ve kristaliteye bağlı olduğu görülmüştür. Değişik genleme hızı, sıcaklık ve kristalite oranlarında çekme testleri uygulanmıştır. Deneylerde iki ayrı PTFE malzemesi kullanılmış, bu malzemelerin davranışları bütün durumlarda benzer trend göstermiştir. Gerçek ve mühendislik gerilmeleri ile gerçek ve mühendislik genlemeleri arasındaki farklar incelenmiştir. Değişik gerilme ve basınç altında Poisson oranları da bulunmuştur. Çekme etkisi ile oluşan hasar yüzeyleri TEM aracılığı ile incelenmiş, sıcaklığın etkisinde faz değişimleri gösterilmiştir [22].

EFW testinde kullanılan darbe test numunesi, 1993 yılında Wu ve arkadaşlarının kullanmış oldukları tek tarafından çentikli eğilme (SEN-B) test numunesidir. Wu ve arkadaşları, elastik kırılmanın (w_e) kritik enerji salıverme hızına eşit olduğunu ispatlayarak lineer elastik kırılma mekaniğine uygun olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumun etkisiyle başlayan tokluğun bulunmasında uygulanan EFW testinin, dinamik koşullar altında uygun olup olmadığı konusunda tartışmalara başlandı. Yapılan ilk çalışmalarda bazı polimerlerde $w_f - L$ eğrileri negatif eğri olarak

bulunmuş, çekme testini de göz önünde bulunduran Vu-Khanh darbe kırılması durumu için polimer malzemelerde EWF testinin karakterize edilebilmesi uygunluğunun tartışılması gerektiğini ifade etmiştir. Bernal ve Fronti'nin yaptığı çalışmada da $w_f - L$ eğrisi ve βw_p değeri negatif olarak çıkmıştır. Bununla birlikte negatif değerlerin ortaya çıkması genellikle ön şartların ihlal edilmesiyle oluştuğu görülmüştür. Bu problemlerin oluşması, kırılmanın sünek şekilde başlayarak kırılmalığa dönüşmesi ve numunenin tam olarak kırılmaması durumudur.

Vu-Khanh, sünek polimerlerin kırılma enerjisinin çatlak uzamasıyla birlikte doğrusal olarak değiştiğini varsayan yeni bir model geliştirmiştir. Her ne kadar bu model bazı durumlarda benimsense de Mai bu modeli eleştirmiş bu temel varsayımın geçerli olmadığını ve Vu-Khanh modelinin EWF ile konsept olarak eşdeğer olduğunu ifade etmiştir.

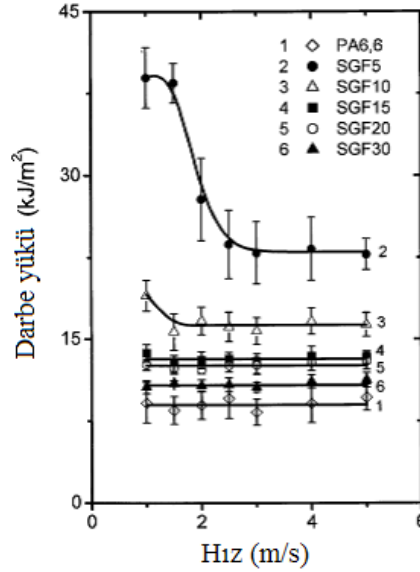
Paul ve arkadaşları farklı bir terminolojiyi tanımlamış buna göre numuneye darbe yükünden önce statik ön akma uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında problemler görülmüş, numuneye uygulanan ön statik yükleme ile akmanın olması sonucunda malzeme yapısında değişme görülmüş ve çatlak ucu körelmiştir.

Karger-Kocsis ve Ferrer-Balas'in yapmış olduğu çalışmada amorf kopolyesterde gerilme darbe koşulları altında bile sünekliliğin başarısız olduğunu göstermiştir. Bu durumun ortaya çıkmasıyla DENT numuneleri analiz edilmiş, analize göre plastik bölge oluşmadığı görülmüş ve düzlem genleme w_c değeri tahmini olarak belirlenmiştir.

Araştırmacıların yapmış oldukları farklı çalışmalarda da görüldüğü üzere EWF'nin dinamik (darbe) yük koşulları altında genel bir sonuca ulaşamadığı durumu ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı geçerlilik kriterleri kontrol edilmemiş ve çoğu çalışmada test koşullarında (deformasyon hızı, sıcaklık) çeşitliliğe gidilmemiştir. EWF yönteminde dinamik koşullar altında daha çok çalışma yapılması gerektiği vurgulanmış bununla birlikte malzemeye ait olan etkiler (morfoloji, plastikleşme, yaşlanma, vb.) ve test ile ilgili parametreler (sıcaklık, deformasyon hızı) ile ilgili EWF karakterizasyonuna gidilmesi gerektiği vurgulanmıştır [16].

Tjong, Xu ve Mai'nin yapmış olduğu çalışmada Poliamid 6,6 (PA) hibrid kompozit malzemesine belli oranlarda kısa cam elyaf takviyesi ve belli oranlarda SEBS-g-MA

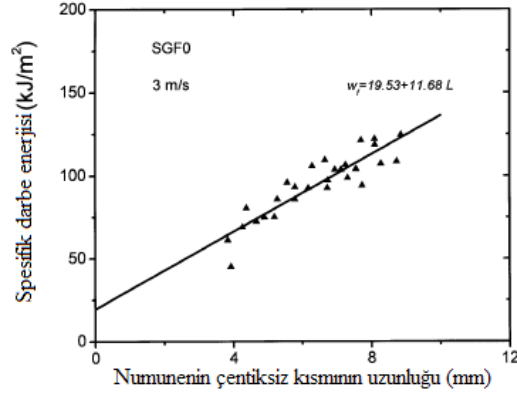
elastomeri katkısı ile darbe kırılma tokluğu EWF metoduyla incelenmiştir. Darbe yükünün uygulanmasında çeşitli hızlarda ($1-5 \text{ ms}^{-1}$) uygulanan ağırlık düşmeli Charpy testinde tek tarafından çentik açılmış darbe test numuneleri kullanılmıştır. Kullanılan farklı oranlara sahip malzemeler için darbe EWF'nin başarılı biçimde karakterize edilebilmesi 3 ms^{-1} darbe hızında gerçekleşmiş olup bu durum Şekil 2.37'de gösterilmiştir [23].



Şekil 2.37: Farklı katkı oranlarına sahip poliamid test numunelerinin darbe yükü ile hızı arasındaki ilişkisi [23]

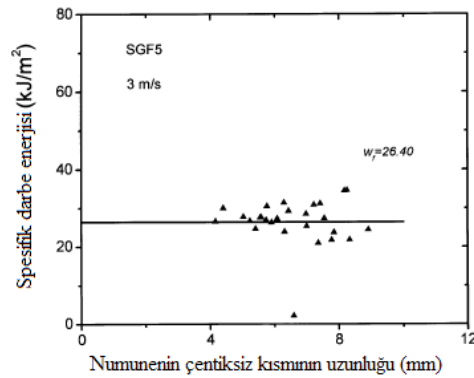
Tek tarafından çentik açılmış darbe test numunesinin boyutları $100 \times 13 \times 3,2$ mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelere farklı uzunluklarda testere ile ilk çentik boyu verilmiş sonraki aşamada jilet ile çentik keskinleştirilmiştir. Span aralığı (numunenin test cihazına sabitlendiği aralık mesafesi) 60 mm olarak ayarlanmıştır. Genel yöntem olan Charpy ve Izod'un darbe numunelerinde sadece tek uzunlukta çentik açılmaktadır ve çentik yeterince keskin olmamaktadır. Bu nedenle sünek polimer numuneleri tecrübelerde görüldüğü üzere sık sık kırılmama ya da test esnasında kırılma olmama durumu ile karşılaşılmaktadır. Bu olumsuzlukların yaşanması EWF metodunu cazip hale getirmiş, darbe kırılma tokluğunun belirlenmesinde test numunesine açılan keskin çentikler ve çentiksiz kısım uzunluğu (ligament length) farklı olan test numuneleri çeşitlendirilmeye gidilerek yöntem başarılı olarak uygulanmıştır. İçinde cam elyaf takviyesi içermeyen test numuneleri

ile yapılan deneyde spesifik esas kırılma işi ile spesifik plastik deformasyon işi Şekil 2.38’de gösterildiği üzere bulunmuştur.



Şekil 2.38: Spesifik esas kırılma işi ile spesifik plastik deformasyon işinin bulunması [23]

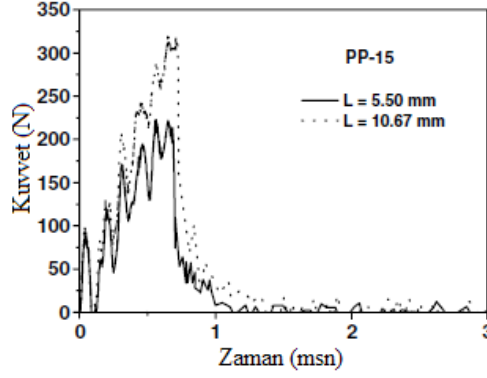
Şekil 2.38’de bulunan lineer regresyon eğrisinin eğimi pozitif olacak şekilde bulunmuştur. Eğrinin bu şekilde olmasıyla gerilme beyazlaması açık bir biçimde gözlenmiştir. Aynı çalışmada Şekil 2.39’da gösterildiği üzere %5 cam elyaf takviyesi içeren numunelerin testinde lineer regresyon eğrisinin değeri 0 çıkmıştır. Buradan spesifik plastik işinin olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle kırılma enerjisinin tamamının iç kırılma proses bölgesinde harcandığı anlaşılmıştır [23].



Şekil 2.39: Sadece spesifik esas kırılma işinin bulunması durumu [23]

Bao ve Tjong’un yapmış olduğu çalışmada, Polipropilen’in (PP) Org-MMT (organo-montmorillonite) nanokompozitiyle SEBS-g-MA (maleated styrene–ethylene–butylene–styrene) elastomerinin farklı oranlarda hazırlanmasıyla elde edilmiş olan malzemelerin darbe esas kırılma işi metodu incelenmiştir. Çalışmada test numunesi boyutları 70x15x3.2 mm olarak hazırlanmış ve span mesafesi 50 mm olarak

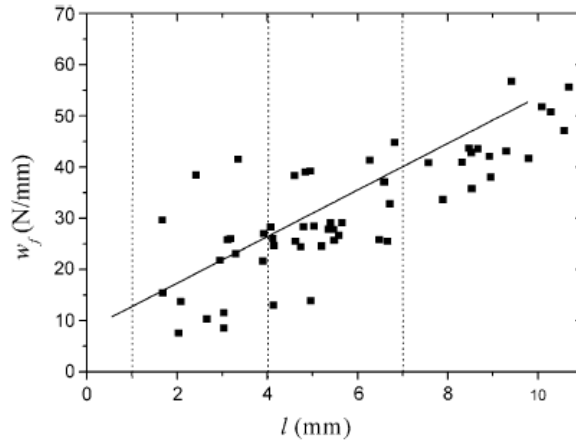
alınmıştır. Oda sıcaklığında ağırlık düşmeli sistemde $1,8 \text{ ms}^{-1}$ darbe hızında testler yapılmıştır. Toplam spesifik kırılma işinin bulunmasında kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alan ile bulunmuş olup farklı çentiksiz uzunluğa sahip darbe numuneleri ile testler uygulanmıştır. Kuvvet- zaman eğrilerinin farklı çentiksiz uzunluğuna sahip darbe test numuneleri ile karşılaştırılması Şekil 2.40'da gösterilmiştir [24].



Şekil 2.40: Kuvvet- zaman eğrilerinin farklı çentiksiz uzunluğu ile karşılaştırılması [24]

Aynı çalışmada saf PP numunelerin testinde lineer regresyon eğrisinin değeri 0 bulunmuş, kırılma enerjisinin tamamının iç kırılma proses bölgesinde harcandığı anlaşılmış ve kırılmanın gevrek olduğu ifade edilmiştir [24].

Başka bir çalışmada, darbe kırılma tokluğu EWF yöntemiyle bulunmuş, numunenin optimum çentiksiz kısmının uzunluğu istatistiksel analiz ile bulunmuştur. ABS (Akrilonitril bütadien stiren) ve PP (Polipropilen) darbe numunelerinde, kalınlık ABS için 4 mm, PP için 5mm olarak hazırlanmış, darbe hızı PP için $1,8 \text{ ms}^{-1}$, ABS için $3,5 \text{ ms}^{-1}$ olup oda sıcaklığında testler uygulanmıştır. EWF yönteminde darbe test numunelerinin sayısı hakkında kesin bir mutabakat sağlanamamakla beraber bu sayı 20 olarak önerilmiştir. PP için spesifik esas kırılma işi ile esas olmayan plastik işin bulunması şekil 2.41'de gösterilmiştir [25].

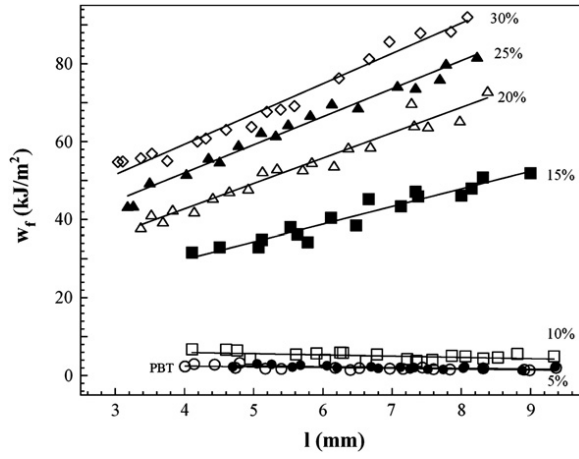


Şekil 2.41: Spesifik esas kırılma işi ile spesifik plastik deformasyon işinin bulunması [25]

Tjong ve Bao'nun yapmış olduğu başka bir çalışmada, yüksek yoğunluklu Polietilenin (HDPE) Org-MMT (organo-montmorillonite) nanokompozitiyle SEBS-g-MA (maleated styrene-ethylene-butylene-styrene) elastomerinin farklı oranlarda hazırlanmasıyla elde edilmiş olan malzemelerin kırılma tokluğu incelenmiştir. Çalışmada çekme ve darbe yükü altında her iki kırılma davranışı EWF metoduyla incelenmiştir. Darbe test numunesinin boyutları 70x15x3,2 mm belirlenmiştir. Span mesafesi 50 mm belirlenmiş darbe hızı 1,8 ms⁻¹ olarak ayarlanmıştır. Deney sonuçları önceki çalışmalar ile paralellik göstermiş olup SEBS-g-MA elastomer oranının artmasıyla darbe spesifik esas kırılma işinin arttığı görülmüştür [26].

Başka bir çalışmada ise, yüksek tokluğa sahip polimerik malzemelerin kırılma enerjilerinin belirlenmesinde esas kırılma işi yöntemi kullanılmıştır. Aşırı tok malzemelerin test sırasında tam kırılmaması veya çatlak yayılmasının akmadan önce oluşması EWF yönteminde bazı sorunları getirmiştir. Yapılan çalışmada bu iki sorunun aşılması amacıyla yöntemde modifikasyona gidilmiştir. Çekme cihazıyla darbe numunelerinin çentik bölgesinde ön akma gerçekleştirilmiş ve sonrasında darbe testi yapılmıştır. Tam veya kısmen kırılmayan numunelerin darbe testinde bulunan kırılma enerjileri göreceli olarak incelenmiştir. Kırılan, ön akmalı, kırılmayan darbe numuneleri ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmada PBT (polybutylene-terephthalate) ve mPEO (maleinized polyethylene-octene) malzemesi karışımları belli oranlarda hazırlanmış ve yüksek darbe hızında Izod testi ile EWF parametreleri bulunmuştur. Malzemedeki katkı oranlarındaki artışın etkisiyle esas kırılma işi parametreleri de artmış bulunmaktadır [27].

Yapılan başka bir çalışmada, PBT (polybutylene-terephthalate) ve mPEO (maleinized polyethylene-octene) malzemesi karışımlarının gevrek-sünek geçişinin karakterize edilmesi amacıyla esas kırılma işi (EWF) yöntemi kullanılmıştır. Katkı oranlarının artırılması ile malzeme içinde gömülü partiküllerin uzaklığının kırılma davranışı etkileri karakterize edilmiştir. Şekil 2.42’de spesifik esas kırılma işi eğrilerinin katkı oranlarınca gevrek-sünek geçişi gösterilmiştir.



Şekil 2.42: Malzemedeki katkı oranlarının değişmesi ile gevrek-sünek geçişi [28]

Şekil 2.42’de görüldüğü üzere mPEO’nun %5 ve %10 katkı oranlarında malzeme gevrek bölgede olup spesifik esas kırılma işi değerleri az miktarda artmıştır. Eğrinin sifıra yakın olması plastik deformasyon işi değerlerinin her iki katkı oranında 0 olduğunu göstermiştir. mPEO katkı oranlarının artmasıyla malzeme sünek bölgeye geçmiş spesifik esas kırılma işi ve plastik deformasyon işi değerleri artmıştır [28].

BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzeme

Deneyleerde tescilli markası Efaion olan PTFE malzemesi Polikim firmasından levhalar şeklinde temin edilmiştir. Deneyleerde, 6 mm kalınlıklarına sahip Saf-PTFE, %25 katkı oranlı Karbon-PTFE, %40 katkı oranlı Bronz-PTFE ve 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE kullanılmıştır. Saf ve %25 Karbon katkı oranlı PTFE'nin sıcaklık etkisini incelemek amacıyla numunelerin sıcaklığı 23°C ve 150°C olmak üzere deneyleer yapılmıştır. Deneyleerin yorumlanabilmesi amacıyla PTFE malzemesinin mekanik ve termal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneyleerde kullanılan malzemelerin mekanik ve termal özellikleri [6]

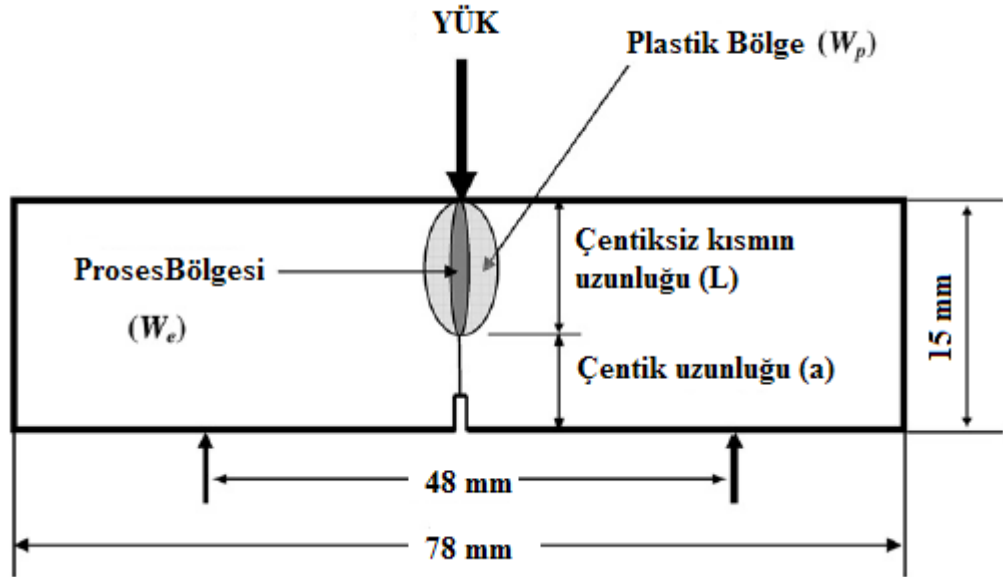
Özellikler	Birim	Saf	Cam Elyafı (%25)	Karbonlu (%25)	Bronzlu (%40)
Özgül Ağırlık, 23°C	gr/cm ²	2,1 - 2,2	2.2-2.3	2.05-2.15	3.05-3.15
Mekanik Özellikler					
Çekme Dayanımı Kopmada	Kg/cm ²	140 - 380	150 - 240	110 - 210	150 - 280
Kopma Uzunluğu, 23°C	%	200 - 400	200 - 270	70 - 110	120 - 280
Basma Dayanımı, 23°C	Kg/cm ²	45 - 50	65 - 70	85 - 110	100 - 105
Darbe Dayanımı (İzod, çentikli)	Kj/m ²	15,5 - 16,5	12 - 15	8,5 - 9	11 - 12
Sertlik	Shore D	54 - 60	64 - 68	65 - 68	64 - 68
Termal Özellikler					
Özgül Isı	Kcal/kg.°C	0,23 - 0,25
Isı İletkenliği, 30°C	Cal/cm.sn.°C	5,5 - 6	10 - 11	15 - 17	17 - 20
Genleşme Katsayısı					
25°C - 100°C	°C ⁻¹	12,5 - 16	7 - 11,5	9,5 - 10	8 - 9,5
25°C - 200°C	°C ⁻¹	15 - 19	7,5 - 14	11 - 12	9,5 - 11
25°C - 300°C	°C ⁻¹	21,5 - 25	8,5 - 18	13 - 15	12,5 - 13,5
Çalışma Sıcaklığı, Minimum	°C	-260	-260	-260	-260
Çalışma Sıcaklığı, Maksimum	°C	270	270	270	270

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Saf PTFE ve katkılı PTFE malzemelerinin dinamik yük altında kırılma tokluklarının bulunmasında test numunesi olarak tek kenarından çentikli darbe (ISO 179-1) test numuneleri kullanılmıştır.

Malzemenin kırılma tokluğunun esas kırılma işi (EWF) yaklaşımına uygun olarak bulunabilmesi için, spesifik esas kırılma işi (w_f) değeri ile numunenin çentiksiz bölgesinin uzunluğu (L-ligament length) arasındaki değişim grafiksel olarak gösterilmelidir. Bu amaçla farklı L uzunluklarına sahip test numuneleri hazırlanmış, Charpy darbe testi ile w_f -L arasındaki değişimler gösterilmiştir.

Deneyde kullanılmış olan numuneler, 3,5 mm ve 6 mm kalınlığındaki levhalardan, (PTFE'nin üretim yöntemi ile malzemede yönlenme oluşmaması) ISO 179-1'de belirlenen boyutlara göre kesilmiş, freze tezgahında 2 mm uzunluğunda ilk çentiği açılmış, istenilen L uzunluklarında falçata ile keskin çentik açılmıştır. Numunenin ana boyutları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Deneylerde kullanılan Charpy darbe numunelerinin boyutları

Oda sıcaklığında (23°C); 3,5 mm kalınlığındaki Cam Elyaf-PTFE numunesi 21 adet, 6 mm kalınlığındaki Saf-PTFE numunesi 16 adet, 6 mm kalınlığındaki Bronz-PTFE numunesi 18 adet, 6 mm kalınlığındaki Karbon-PTFE numunesi 22 adet hazırlanmıştır. Yüksek sıcaklıkta (150 °C); 6 mm kalınlığındaki Saf-PTFE numunesi

19 adet, 6 mm kalınlığındaki Karbon-PTFE numunesi 20 adet hazırlanmıştır. Farklı L boylarıyla hazırlanan test numuneleri 3mm ile 13 mm arasında olması hedeflenerek çentikler açılmıştır. Toplam 116 numune hazırlanmış, 23°C ve 150°C’de testler yapılmıştır.

3.3. Deney Numunelerinin Kodlanması

Farklı kalınlık, farklı katkı malzemelerini muhteva eden ve farklı sıcaklıklar için hazırlanan darbe test numuneleri farklı L uzunluklarına göre çentikleri açılmıştır. Bu numuneler sistematik olarak hazırlanmış ve kodlanmıştır. Numunenin kodlanmasında, malzemenin katkı çeşidi ve kalınlık-sıcaklığa göre numaralandırmaya gidilecek bir yöntem belirlenmiştir. Tablo 3.2’de deney numunelerinin kodlandırılma şekli gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Deney numunelerinin kodlanması yöntemi

23°C için hazırlanmış test numuneleri	İlk Kod	Numunenin Sayısı
3,5 mm kalınlığında Cam-PTFE	C	01 - 21 arası
6 mm kalınlığında Saf-PTFE	S	01 - 16 arası
6 mm kalınlığında Karbon-PTFE	K	01 - 22 arası
6 mm kalınlığında Bronz-PTFE	B	01 - 18 arası
150°C için hazırlanmış test numuneleri		
6 mm kalınlığında Saf-PTFE	S2	01 - 19 arası
6 mm kalınlığında Karbon-PTFE	K2	01 - 22 arası

Numaralandırmanın daha iyi anlaşılması için çeşitli örnekler verilmek istenirse;

C11 : 23°C için 3,5 mm kalınlığındaki 11 No’lu Cam Elyaf -PTFE darbe numunesi

K01 : 23°C için 6 mm kalınlığındaki 1 No’lu Karbon-PTFE darbe numunesi

B13 : 23°C için 6 mm kalınlığındaki 13 No’lu Bronz-PTFE darbe numunesi

S205 : 150°C için 6 mm kalınlığındaki 05 No’lu Saf-PTFE darbe numunesi

şeklindedir.

Kodlama işleminin planlamasında ana hedef anlaşılabilirlik ve pratiklidir. Kodlamanın doğru bir şekilde yapılması ile deney numuneleri sınıflandırılarak deney süreci hızlı ve hata riskini minimize edilmektedir. Deney numunelerinin sayısının fazla olması

ile deneylerden elde edilen verilerin fazla olacağı görülmektedir. Doğru kodlamanın bir avantajı da verilerin kaydedilmesi, tasnifi ve değerlendirmesinde sürecinde kolaylık sağlanmaktadır. Tablo 3.2’de gösterilen şekilde 116 adet darbe deney numuneleri kodlanmıştır.

3.4. Charpy Darbe Testi

Plastik bir malzemenin elastik bölgede kırılmaya karşı göstereceği direncin belirlenmesi ile darbe mukavemeti bulunmuş olmaktadır. Kullanılan malzeme, her an dışarıdan gelebilecek bir şok darbesine belli derecede dayanım gösterir. Şok darbesinin ortaya çıkan enerjinin malzeme tarafından soğrulması çok kısa sürede olur. Kimi polimerler (camsı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının çok çok üzerinde olan amorf polimerler gibi) gelen şok enerjisini büyük hacme yayamazlar ve düşük çarpma direnci gösterirler.

Şekil 3.2’de gösterildiği üzere belli bir yükseklikten serbest düşmeye bırakılan sarkacın maksimum enerjide numuneyi kırması sağlanır. Sarkacın enerjisinin bir kısmı numuneyi kırmada harcanır. Artan enerji ise sarkacın belli bir yüksekliğe çıkmasını sağlar. Sarkacın ilk bırakıldığı yükseklik ile numuneyi kırıp çıktığı yüksekliğin farkının potansiyel enerjisi bizim o numunenin çentik darbe direncini vermektedir. Numune cihaza yatay olarak yerleştirilir. Sarkacın darbesinin numune üzerinde açılan çentiğe gelmesine dikkat edilerek testler uygulanmıştır [3].

Charpy deneyinin kontrol eden mekanizmalar;

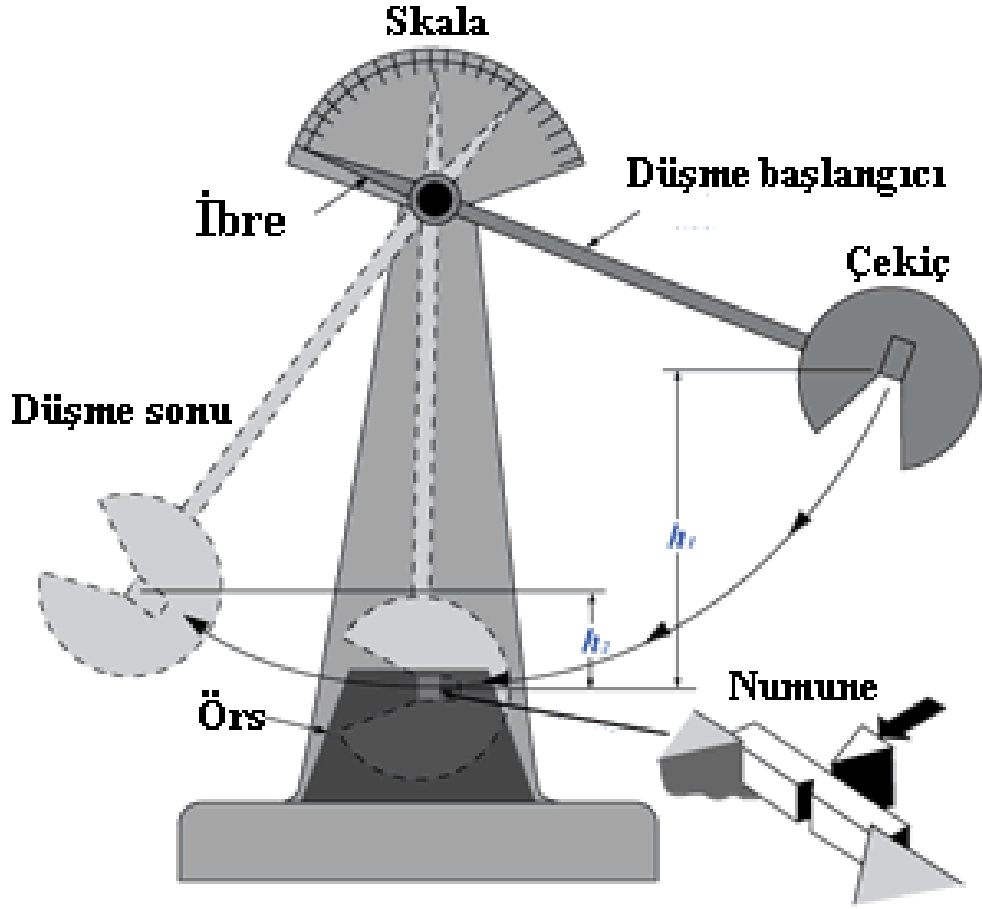
numunede çatlak başlatma direnci,

numune boyunca başlatılan çatlağı ilerletme direnci,

numuneyi plastik olarak deforme etmede harcanan enerji,

kırılan parçaları hareket ettirmede harcanan enerji,

test makinasında hareketli parçaların sürtünmesinde ve test aparatının titreşiminde harcanan enerji şeklindedir.



Şekil 3.2: Charpy çentik darbe testi

Test esnasında numunede oluşan kuvvet-zaman değişimini tespit etmek üzere çentik darbe deneyinde çekicinin enstrumentasyonuna gidilmiştir. Çekicinin ucuna yerleştirilen kuvvet ölçer veya strain gauge (uzama ölçer) ile test anında kuvvetin zamana bağlı olarak değişimi kaydedilir.

Esas kırılma işi yaklaşımı için darbe testi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinin önemi büyüktür. Yöntemin uygulanabilirliği ve sonuçların güvenilirliği açısından, farklı L boylarına sahip numunelere darbe testi uygulanarak elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinin, geometrik olarak benzer olması gerekir. Esas kırılma işi metodunun uygulanabilirliği için en önemli şart budur.

PTFE malzemesinin esas kırılma işi yaklaşımıyla kırılma davranışının incelemek üzere Şekil 3.3'te gösterilen CEAST 6545 modeli enstrumente edilmiş çentik darbe cihazı kullanılmıştır. Darbe testi atmosferi kontrol edilen bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı 23 ± 1 °C'dir.



Şekil 3.3: Ceast 6545 enstramente edilmiş çentik darbe cihazı

Deneyle ISO 179-2 test standardına göre yapılmıştır. Enstramente darbe cihazında çekicinin bırakılma açısı 150° , enerjisi 7,26 J olarak ayarlanmış, darbe hızı 3,5 m/s ve test süresi 16 milisaniye olarak belirlenmiştir. Kuvvet-zaman eğrisinin belirlenmesi, 2000 datanın birleştirilmesiyle sağlanmıştır. Elde edilen eğrilerin altında kalan tüm alan hesaplanmış bulunan bu değerler kullanılarak malzemenin esas kırılma işi parametreleri hesaplanmıştır.

Deneysel numunesi olarak tek kenarından çentik açılmış darbe numuneleri kullanılmıştır. Farklı kalınlık, farklı katkı malzemelerini muhteva eden ve farklı sıcaklıklar için farklı L uzunluklarına sahip numuneler kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık numunelerinin hazırlanmasında 150°C sıcaklığındaki fırında 45 dakika bekletilmiş, teker teker fırından alınan numuneler bekletilmeden testleri yapılmıştır.

3.5. Görsel İnceleme

3.5.1 Makro inceleme

Darbe testi ile hasara uğratılan numunelerde kırılmanın türü, katkı maddelerinin ve malzememin sıcaklığının etkilerini incelemek üzere kopma yüzeyleri çıplak gözle analizi yapıldı. Numunelerin gerçek L değerlerinin bilinmesi için optik mikroskop altında kırılma yüzeyleri incelendi ve ölçümü yapıldı.

3.5.2. Fraktografik inceleme

Polimerlerin mikro yapılarının incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılır. Bu şekilde polimerlerin morfolojileri çekilen fotoğraflarla tanımlanmaya çalışılır. ~500.000x'e kadar büyütme yapılabilir. Numune incelenmeden önce, numunelerin vakum altında altın, karbon, vb. uygun malzemeler ile kaplanması işlemi yapılır.

Farklı kalınlık, farklı katkı malzemelerini muhteva eden ve farklı sıcaklıklar için PTFE malzemelerinin kırılma davranışlarının etkileri, darbe testi sonucu hasara uğratılan numunelerdeki kırılma yüzeylerinde de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kırılmanın başladığı yerlerin ve kırılmanın olduğu yerler ayrıca incelenmiştir. PTFE'nin yarı kristal yapısının sıcaklığa göre değişmesi incelenmiştir. Bu amaçla numunelerin kırılma yüzeyleri altın ile kaplanmış, JEOL JSM-6060 tipi taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elektron Mikroskobisi Laboratuvar'ında, değişik büyütme oranlarında fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 3.4'te kırılma yüzeylerinin incelenmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu görülmektedir.



Şekil 3.4: JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobu (TEM)

BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

PTFE (Politetrafluoroetilen), karbon ve fluor atomlarından oluşan molekül yapısından dolayı, başka hiçbir malzemede bulunmayan üstün özelliklere sahiptir. Sanayide kullanılan bütün kimyasal maddelere dayanıklıdır. -260°C ile +270°C arasında kullanılan mühendislik malzemesidir. Bu malzemenin istenilen fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla, malzemeye bazı dolgu maddeleri (karbon, bronz, cam elyaf) eklenerek PTFE alaşımları imal edilmektedir. PTFE'nin kırılma davranışının bilinmesiyle işletme şartlarındaki zorlanma koşulları ve çevresel şartlara uygun olup olunmadığı hakkında yorum yapılabilir, tasarlanan yapıda çıkması muhtemel problemlerin önüne geçilmesi sağlanır. PTFE sünek bir malzemedir, dolayısıyla PTFE malzemesinin dinamik yükler altında kırılma davranışının klasik kırılma mekaniği ile tam olarak açıklanabilmesi mümkün değildir. Bunun üzerine kırılma davranışının belirlenmesinde alternatif metotlar geliştirilmiştir. Yöntemsel olarak kolaylığı ve literatürdeki başarılilik oranı nedeniyle bu yöntemler içinde esas kırılma işi metodunu ön plana çıkmıştır. Bu amaçla PTFE malzemesinin farklı kalınlık (boyutsal), farklı katkı (dolgu etkisi) ve farklı sıcaklık (kristalinlik etkisi) etkilerinin dinamik (darbe yükü) etkiler altında kırılma davranışları esas kırılma işi yöntemi (EWF) ile bulunmuştur.

EWF yöntemi için uygun olarak hazırlanmış tek kenarından çentikli darbe numuneleri Charpy darbe testi ile hasara uğratılmıştır. Deneylelerden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri çizilmiş ve sonuçlar esas kırılma işi ile yorumlanmıştır. Esas kırılma işi parametreleri olan spesifik esas kırılma işi ve spesifik plastik deformasyon işi (spesifik olmayan esas kırılma işi) grafikleri tüm numuneler için hazırlanmış ve sunulmuştur. Numunelerin kırılan yüzeyleri TEM görüntüleri eklenmiş ve incelenmiştir.

4.1. 6 mm Kalınlığındaki Saf-PTFE Malzemesinin 23°C'deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

Farklı L değerlerine sahip numunelerin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanının hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Saf-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

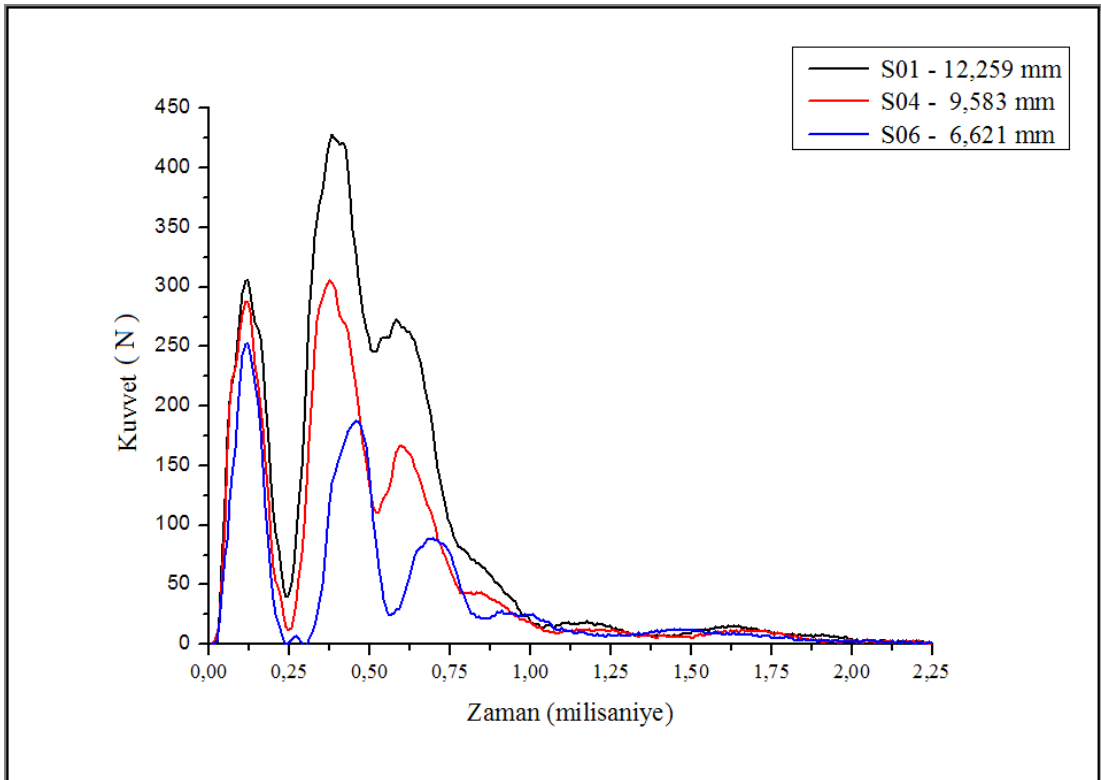
Numunenin Kodu	L ölçülen (mm)	Hesaplanan Enerji (J)
S01	12,259	0,731
S02	12,200	0,721
S03	11,711	0,668
S04	9,583	0,548
S05	9,126	0,526
S06	6,621	0,322
S07	7,997	0,434
S08	9,939	0,591
S09	5,270	0,266
S10	7,430	0,401
S11	11,702	0,648
S12	4,695	0,238
S13	3,215	0,163
S14	3,989	0,203
S15	12,161	0,726
S16	7,512	0,411

Tablo 4.1'de görüldüğu üzere 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE malzemesinin esas kırılma işi metoduyla kırılma davranışını karakterize edebilmek için, darbe numuneleri 13 mm ile 3mm arasında olacak şekilde 16 farklı L (çentiksiz kısmın uzunluğu) uzunluğu tasarlanmış ve çentikleri açılmış, darbe testi sonrası optik mikroskop ile kırılan yüzeylerin gerçek L boyları ölçülmüştür.

Enstrümanede edilmiş Charpy darbe cihazından alınan kuvvet-zaman ($F-t$) eğrileri ile bu eğriler altında kalan alanlar hesaplanarak numunelerin kırılma enerjileri bulunmuştur. Bu enerjilere W_f kırılma işi (work of fracture) denir, L boyu arttıķça enerjilerde artma eğilimi gösterir. EWF yaklaşımına göre bu enerji, malzemenin kırılması için harcanan enerji (esas kırılma işi- W_e), çentik ucunda ve yakın çevresinde plastik deformasyon mekanizmalarını harekete geçirmek için harcanan

enerji (plastik deformasyon işi, esas olmayana kırılma işi- W_p) olmak üzere iki bileşene ayrılır. Bu iki bileşenin ayrılabilmesi EWF yönteminin avantajını oluşturmaktadır.

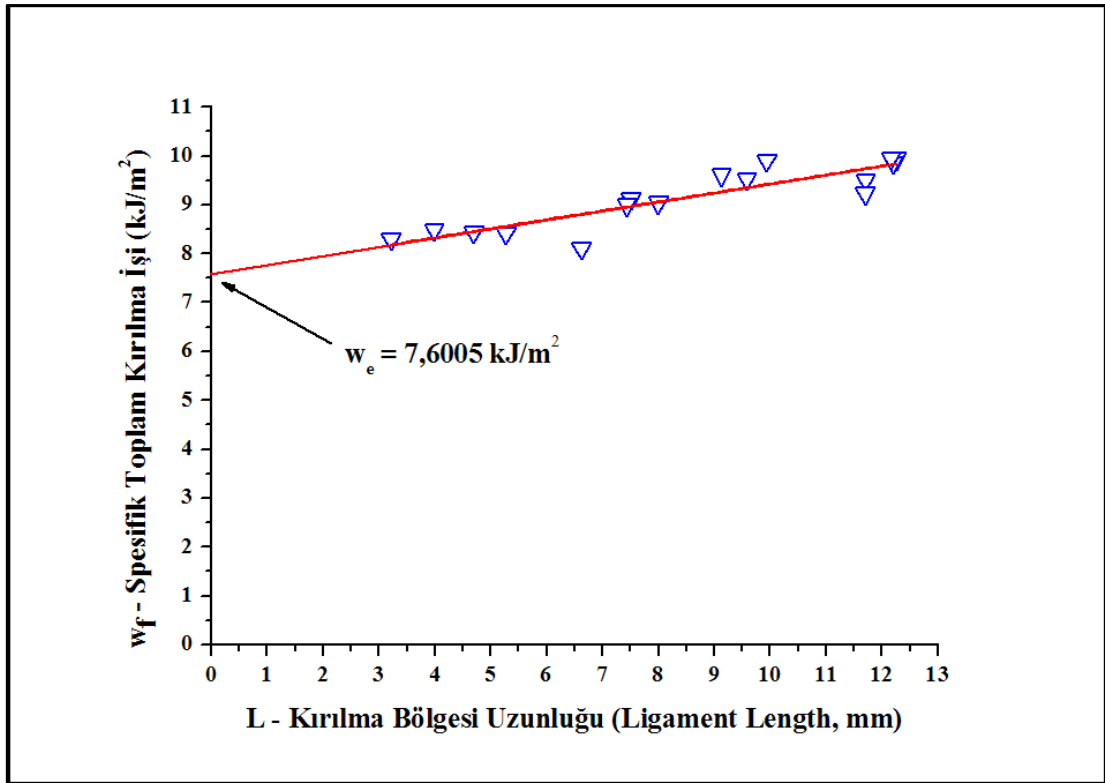
Bir malzemenin kırılma davranışının açıklanmasında EWF metodunun uygulanabilir olduğunun en önemli göstergesi farklı L uzunluklarına sahip darbe numunelerinin kuvvet-zaman eğrilerinin geometrik olarak benzer olması gerekir. Her bir deney numunesi için darbe testi yapıldı ve toplanan datalar bilgisayar ortamında çizilerek grafiksel sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.1’de 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE malzemesi numunelerinin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman grafiklerinden bazıları verilmiştir.



Şekil 4.1: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin bazı kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE için farklı L uzunluğuna sahip numunelere ait kuvvet-zaman eğrileri geometrik olarak benzerdir ve bu durum çatlak oluşumunun farklı L uzunlukları için aynı gerilme durumunda meydana geldiğinin kanıtıdır ve bu gerilmenin türü düzlem gerilmedir.

Kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alan malzemenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerjidir ve bu değer numunenin çentiksiz bölgesinin alanına bölünmesiyle edilen değere spesifik toplam kırılma işi (w_f) denir. . Denklem 2.50 bir doğru denklemdir ve buna göre spesifik toplam kırılma işinin L ile değişimi, eğimi βw_p olan bir doğrudur ve bu doğrunun w_f eksenini kestiği nokta spesifik esas kırılma işini (w_e) verir. Şekil 4.1'deki ve diğer bulunan eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.50 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Optik mikroskop ile ölçülen L değerleri ile hesaplanan toplam kırılma işi değerleri lineer regresyon analizi yapılmış ve bulunan grafik Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Şekil 4.2 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.50'yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir. Regresyon analizi ile oluşturulan doğrunun w_f eksenini kestiği nokta spesifik esas kırılma işi (w_e) değerini vermektedir. Bulunmuş olan w_e değeri 6 mm kalınlık için malzeme sabitidir. Spesifik esas kırılma işi değeri malzemenin kırılma tokluğu ölçüsü olup malzemenin kırılma davranışı olarak ifade edilmektedir.

Şekil 4.2'deki regresyon analizi ile oluşturulan doğrunun eğimi spesifik plastik deformasyon işi (esas olmayan spesifik kırılma işi) değerini vermektedir. βw_p olarak tanımlanan spesifik plastik deformasyon işi çentik ucundaki plastik deformasyonlar için harcanan enerjiyi ifade etmektedir. Spesifik esas kırılma işi belli bir kalınlıkta belli bir malzemeye özgü bir malzeme sabiti olmasına rağmen spesifik plastik deformasyon işi malzemeyi karakterize etmek için bir sabit değer değildir. Bu değer kırılma olayında sünekliğin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Test edilen bir malzemenin EWF ile bulunan $w_f L$ doğrusunun eğimi (βw_p), malzemenin sünekliliğinin artması ile birlikte artar, malzemenin gevrekliği arttıkça değeri (βw_p) sifıra yaklaşır.

Tablo 4.2'de 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE malzemesine ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.50 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir.

Tablo 4.2: 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri	Spesifik Esas Kırılma işi (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İş (kJ/m ²)
		7,6005

4.2. 6 mm Kalınlığındaki %40 Katkı Oranında Bronz-PTFE Malzemesinin 23°C'deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

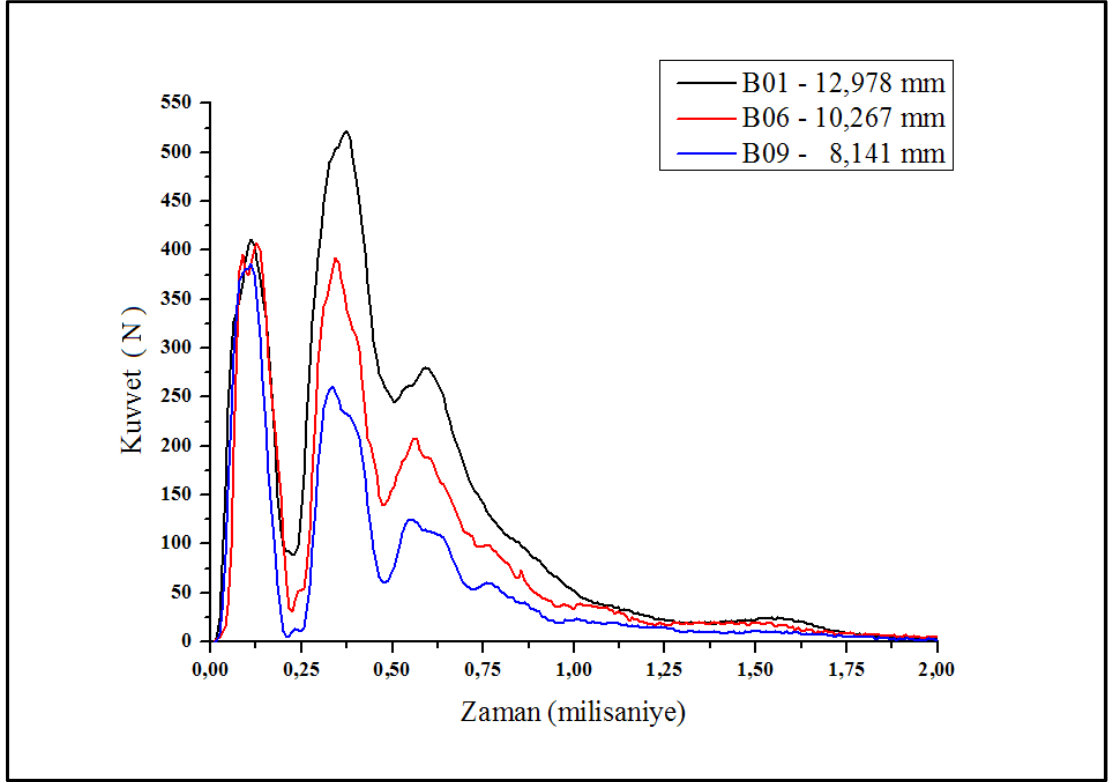
Farklı L değerlerine sahip numunelerin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanının hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: %40 katkı oranlı Bronz-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

Numunenin Kodu	L ölçülen (mm)	Hesaplanan Enerji (J)
B01	12,978	0,929
B02	11,778	0,938
B03	11,386	0,849
B04	11,442	0,779
B05	9,856	0,607
B06	10,267	0,732
B07	8,218	0,586
B08	8,993	0,545
B09	8,141	0,448
B10	7,742	0,451
B11	6,633	0,381
B12	7,374	0,455
B13	6,301	0,386
B14	5,615	0,359
B15	5,200	0,271
B16	5,045	0,275
B17	4,278	0,183
B18	3,084	0,117

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE malzemesinin esas kırılma işi metoduyla kırılma davranışını karakterize edebilmek için, darbe numuneleri 13 mm ile 3mm arasında olacak şekilde 18 farklı *L* uzunluğu tasarlanmış ve çentikleri açılmış, darbe testi sonrası optik mikroskop ile kırılan yüzeylerin gerçek *L* uzunlukları ölçülmüştür.

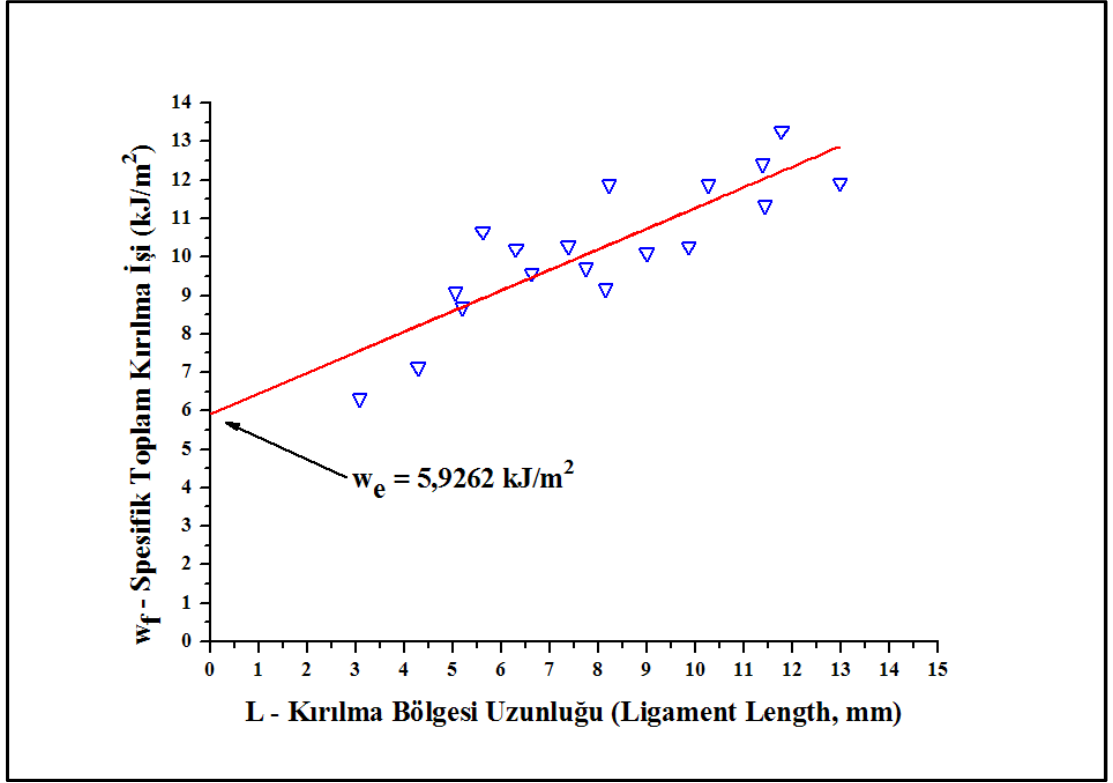
Şekil 4.3'te 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE malzemesi numunelerinin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman grafiklerinden bazıları verilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere farklı *L* uzunluğuna sahip numunelere ait kuvvet-zaman eğrileri geometrik olarak benzerdir ve yapılan testlerin başarılı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.3: 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.3'teki ve diğer bulunan eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.50 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Optik mikroskop ile ölçülen L değerleri ile hesaplanan toplam kırılma işi değerleri lineer regresyon analizi yapılmış ve bulunan grafik Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.50'yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4'te 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE malzemesine ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.50 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere malzemeye bronz katkısı sonucunda spesifik esas kırılma işi değeri azalırken, spesifik plastik deformasyon işi artmıştır. Bronz katkısının kırılma tokluğunu azalttığı literatürde görülmektedir [6]. Bu sonucun varlığı EWF sonucunun doğruluğu bir kez daha göstermiştir.



Şekil 4.4: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Tablo 4.4: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz -PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri	Spesifik Esas Kırılma işi (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi (kJ/m ²)
	5,9262	0,5353

4.3. 6 mm Kalınlığındaki %25 Katkı Oranında Karbon-PTFE Malzemesinin 23°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

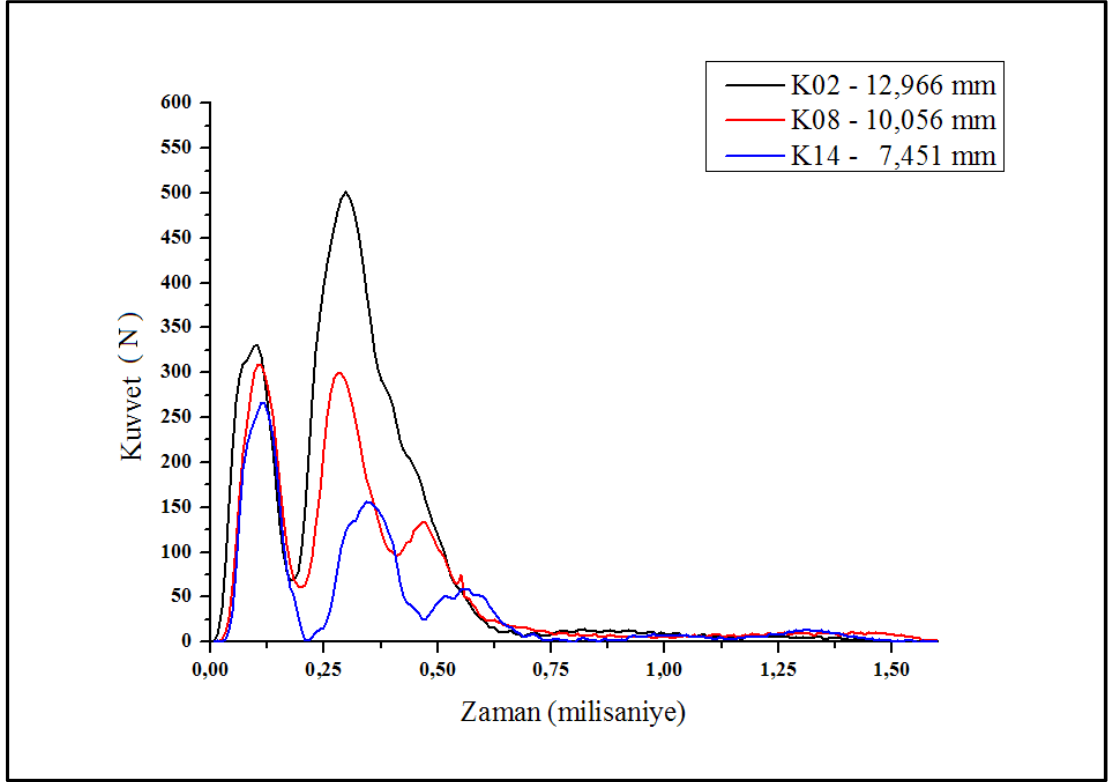
Farklı L değerlerine sahip numunelerin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanının hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5: %25 katkı oranlı Karbon-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

Numunenin Kodu	L ölçülen (mm)	Hesaplanan Enerji (J)
K01	12,928	0,513
K02	12,966	0,514
K03	12,820	0,507
K04	11,588	0,409
K05	10,837	0,430
K06	11,051	0,403
K07	11,025	0,447
K08	10,056	0,345
K09	8,824	0,266
K10	9,806	0,362
K11	8,006	0,275
K12	8,520	0,289
K13	6,986	0,235
K14	7,451	0,219
K15	6,174	0,200
K16	6,432	0,205
K17	5,594	0,187
K18	4,830	0,163
K19	3,609	0,110
K20	3,855	0,130
K21	2,669	0,087
K22	1,928	X

Tablo 4.5’de görüldüğü üzere 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE malzemesinin esas kırılma işi metoduyla kırılma davranışını karakterize edebilmek için, darbe numuneleri 13 mm ile 3 mm arasında olacak şekilde 22 farklı L uzunluğu tasarlanmış ve çentikleri açılmış, darbe testi sonrası optik mikroskop ile kırılan yüzeylerin gerçek L boyları ölçülmüştür. K22 numunesi test aparatından kaynaklanan problem nedeniyle testi geçersiz sayılmıştır.

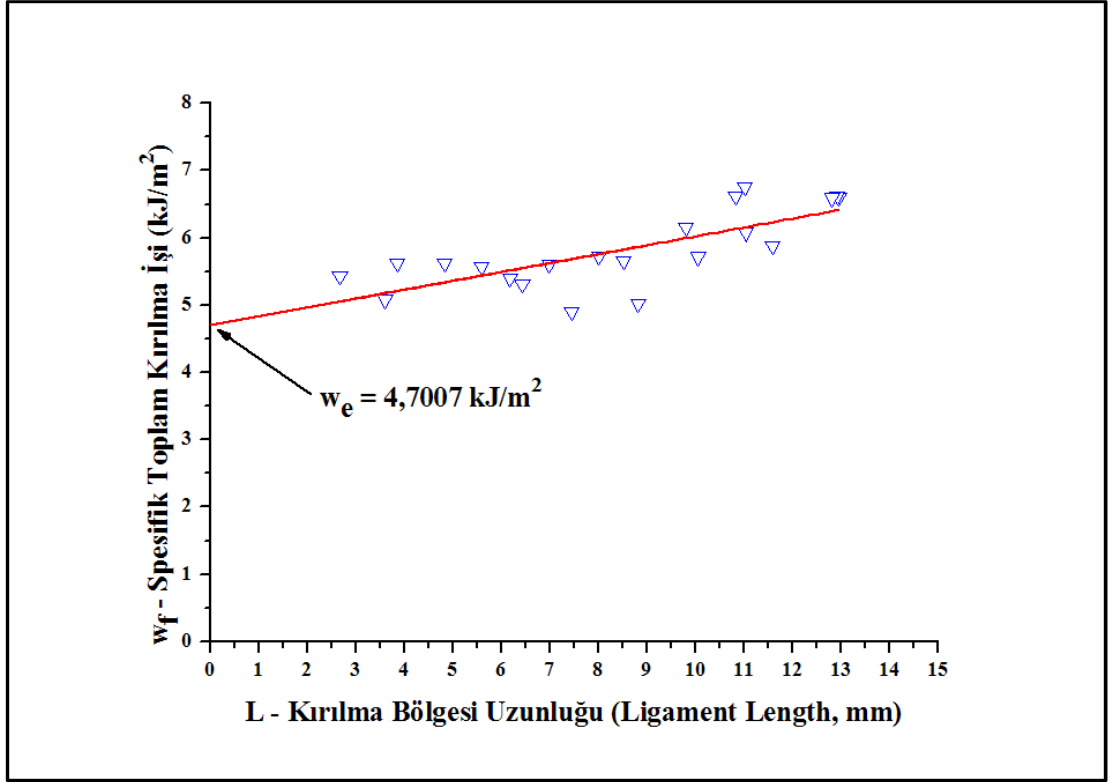
Şekil 4.5’de 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE malzemesi numunelerinin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman grafiklerinden bazıları verilmiştir. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere farklı L uzunluğuna sahip numunelere ait kuvvet-zaman eğrileri geometrik olarak benzerdir ve yapılan testlerin başarılı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.5: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin bazı kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.5’deki ve diğer bulunan eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.50 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Optik mikroskop ile ölçülen L değerleri ile hesaplanan toplam kırılma işi değerleri lineer regresyon analizi yapılmış ve bulunan grafik Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.50’yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6’da 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE malzemesine ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.50 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere malzemeye karbon katkısı sonucunda spesifik esas kırılma işi değeri azalırken, spesifik plastik deformasyon işi de azalmıştır. Karbon katkısının kırılma tokluğu değerini en aza indirdiği bulunmuştur, bu durum literatürde de görülmektedir [6]. Bu sonucun varlığı EWF sonucunun doğruluğu bir kez daha göstermiştir.



Şekil 4.6: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Tablo 4.6: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri	Spesifik Esas Kırılma işi (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi (kJ/m ²)
	4,7007	0,1320

4.4. 3,5 mm Kalınlığındaki %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE Malzemesinin 23°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

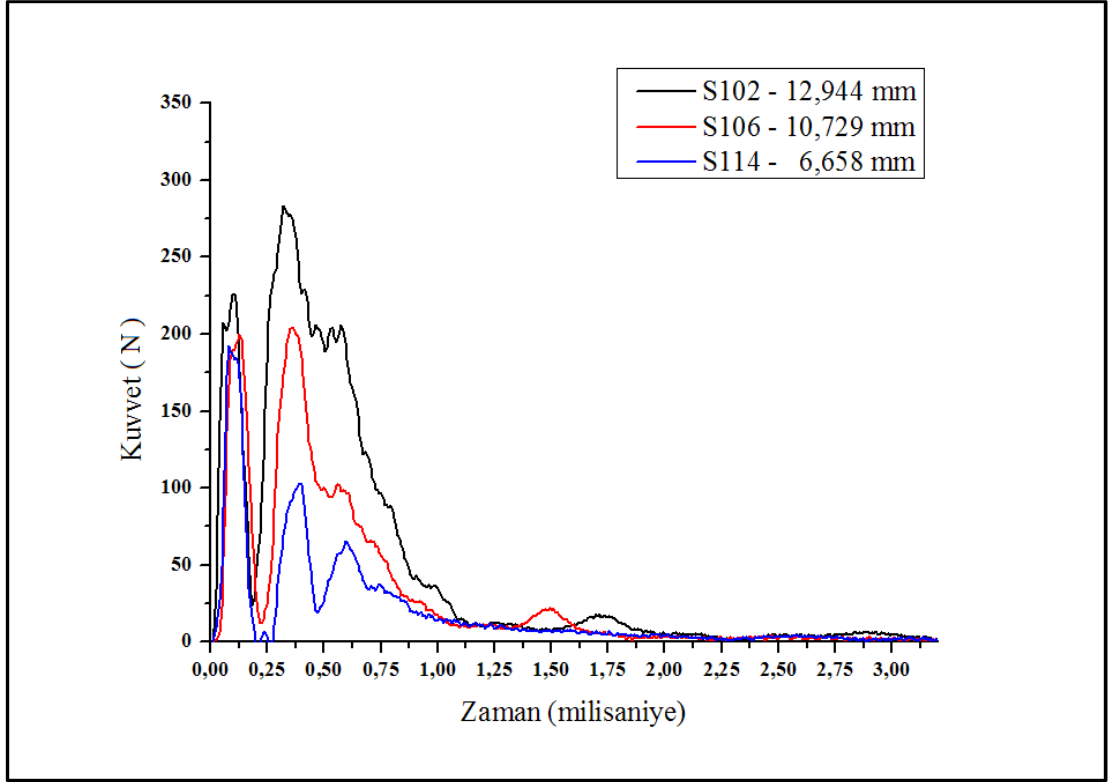
Farklı L değerlerine sahip numunelerin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanının hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7: Cam Elyaf-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

Numunenin Kodu	L ölçülen (mm)	Hesaplanan Enerji (J)
C01	12,756	0,475
C02	12,944	0,582
C03	11,542	0,452
C04	12,521	0,494
C05	11,418	0,466
C06	10,729	0,360
C07	9,874	0,369
C08	10,328	0,414
C09	9,036	0,301
C10	9,189	0,346
C11	8,197	0,308
C12	7,753	0,277
C13	7,488	0,281
C14	6,658	0,219
C15	5,544	0,198
C16	5,647	0,203
C17	5,190	0,177
C18	4,857	0,174
C19	4,660	0,152
C20	4,139	0,126
C21	3,655	0,111

Tablo 4.7’de görüldüğü üzere 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip Cam Elyaf-PTFE malzemesinin esas kırılma işi metoduyla kırılma davranışını karakterize edebilmek için, darbe numuneleri 13 mm ile 3 mm arasında olacak şekilde 21 farklı L uzunluğu tasarlanmış ve çentikleri açılmış, darbe testi sonrası optik mikroskop ile kırılan yüzeylerin gerçek L boyları ölçülmüştür.

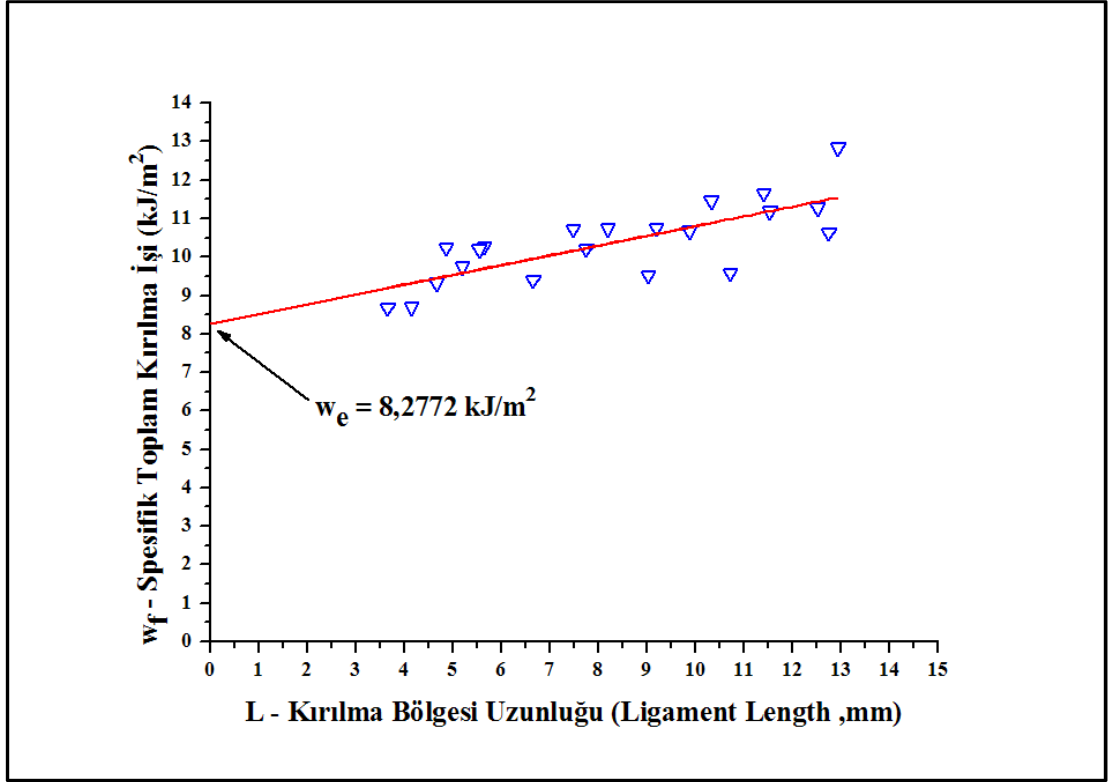
Şekil 4.9’da 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip Cam Elyaf-PTFE malzemesi numunelerinin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman grafiklerinden bazıları verilmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü üzere farklı L uzunluğuna sahip numunelere ait kuvvet-zaman eğrileri geometrik olarak benzerdir ve yapılan testlerin başarılı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.7: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip % 25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin bazı kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.7’deki ve diğer bulunan eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.50 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Optik mikroskop ile ölçülen L değerleri ile hesaplanan toplam kırılma işi değerleri lineer regresyon analizi yapılmış ve bulunan grafik Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.50’yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir.

Tablo 4.8’de 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip Cam Elyaf-PTFE malzemesine ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.50 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir.



Şekil 4.8: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip % 25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Tablo 4.8: 23°C’de 3,5 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri	Spesifik Esas Kırılma işi (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi (kJ/m ²)
		8,2772

4.5. 6 mm Kalınlığındaki %25 Katkı Oranında Karbon-PTFE Malzemesinin 150°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

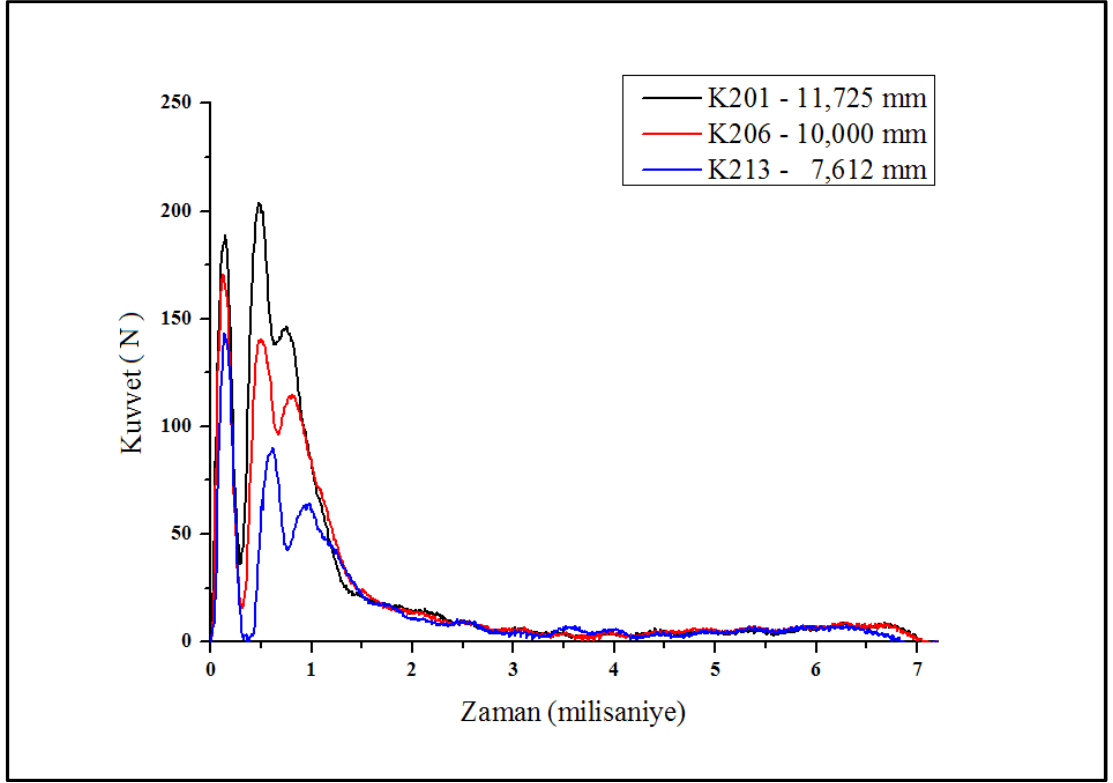
Farklı L değerlerine sahip numunelerin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanının hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9: %25 katkı oranlı Karbon-PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

Numunenin Kodu	L ölçülen (mm)	Hesaplanan Enerji (J)
K201	11,725	0,671
K202	11,523	0,593
K203	11,508	0,732
K204	10,931	0,629
K205	10,900	0,590
K206	10,000	0,581
K207	9,452	0,532
K208	9,409	0,512
K209	8,543	0,465
K210	8,518	0,447
K211	7,997	0,427
K212	7,841	0,496
K213	7,612	0,359
K214	7,297	0,398
K215	6,294	0,372
K216	6,018	0,329
K217	5,983	0,303
K218	5,925	0,363
K219	4,872	0,235
K220	4,458	0,229

Tablo 4.9’da görüldüğü üzere 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE malzemesinin esas kırılma işi metoduyla kırılma davranışını karakterize edebilmek için, darbe numuneleri 13 mm ile 4 mm arasında olacak şekilde 20 farklı *L* uzunluğu tasarlanmış ve çentikleri açılmış, darbe testi sonrası optik mikroskop ile kırılan yüzeylerin gerçek *L* boyları ölçülmüştür.

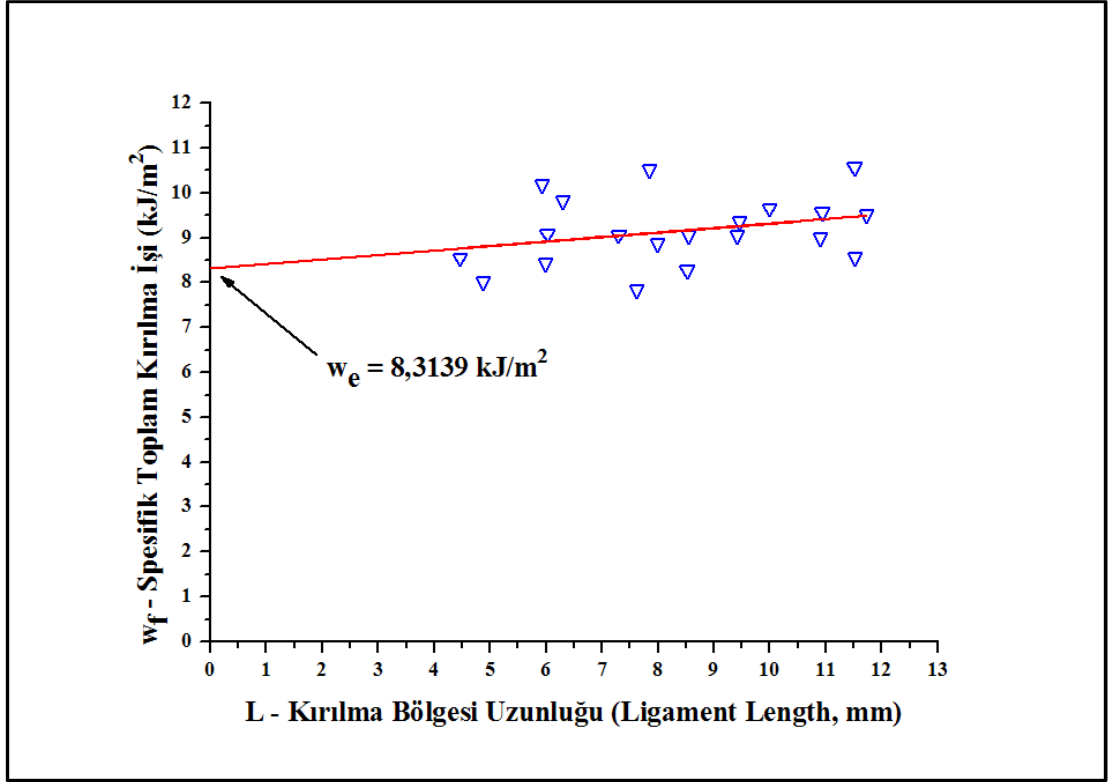
Şekil 4.9’da 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE malzemesi numunelerinin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman grafiklerinden bazıları verilmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü üzere farklı *L* uzunluğuna sahip numunelere ait kuvvet-zaman eğrileri geometrik olarak benzerdir ve yapılan testlerin başarılı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.9: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin bazı kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.9’daki ve diğer bulunan eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.50 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Optik mikroskop ile ölçülen L değerleri ile hesaplanan toplam kırılma işi değerleri lineer regresyon analizi yapılmış ve bulunan grafik Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.50’yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir.

Tablo 4.10’da 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE malzemesine ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.50 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere numunenin sıcaklığının artması sonucunda spesifik esas kırılma işi değeri artarken, spesifik plastik deformasyon işi de azalmıştır. Bu sonucun varlığı EWF sonucunun doğruluğu bir kez daha göstermiştir.



Şekil 4.10: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Tablo 4.10: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri	Spesifik Esas Kırılma işi (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi (kJ/m ²)
		8,3139

4.6. 6 mm Kalınlığındaki Saf-PTFE Malzemesinin 150°C’deki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

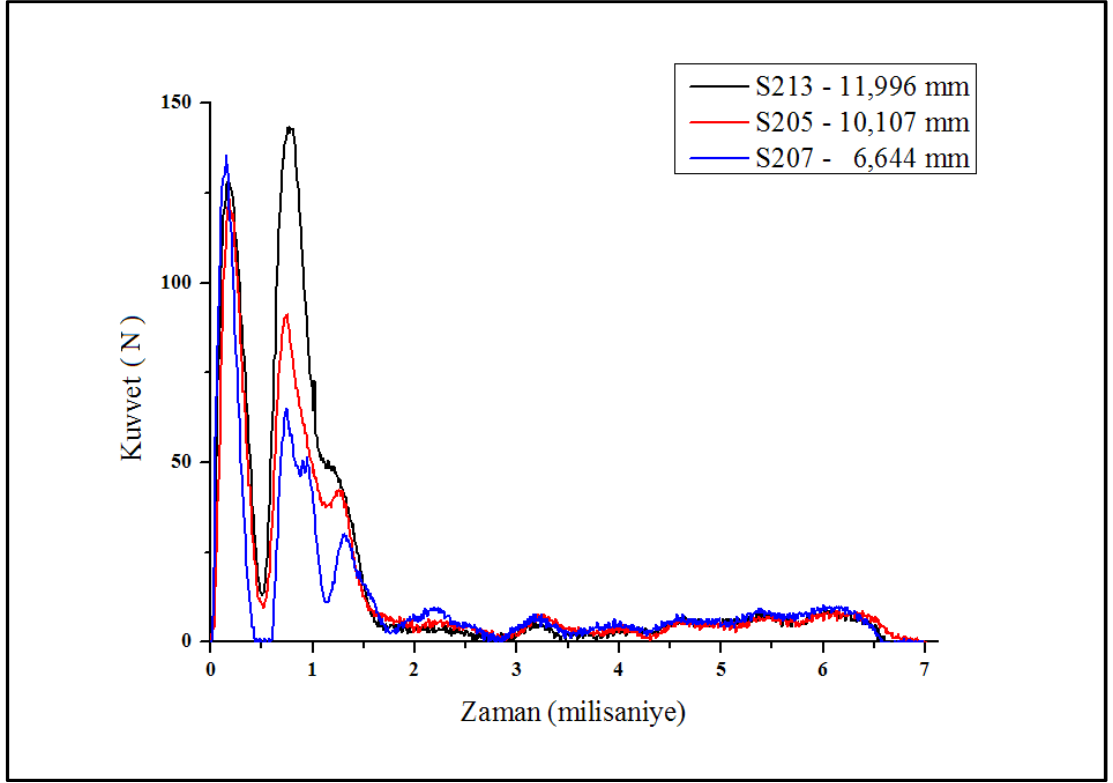
Farklı L değerlerine sahip numunelerin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman eğrilerinin altında kalan alanının hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11: Saf -PTFE numunelerine ait darbe testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

Numunenin Kodu	L ölçülen (mm)	Hesaplanan Enerji (J)
S201	11,948	0,460
S202	10,612	0,420
S203	8,804	0,340
S204	8,103	0,355
S205	10,107	0,375
S206	8,380	0,372
S207	6,644	0,241
S208	5,762	0,219
S209	4,849	0,190
S210	4,077	0,178
S211	3,344	X
S212	9,140	0,383
S213	11,996	0,464
S214	6,700	0,294
S215	6,951	0,322
S216	9,348	0,398
S217	10,030	0,414
S218	4,052	0,181
S219	6,073	0,212

Tablo 4.11’de görüldüğü üzere 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE malzemesinin esas kırılma işi metoduyla kırılma davranışını karakterize edebilmek için, darbe numuneleri 12 mm ile 3 mm arasında olacak şekilde 19 farklı *L* uzunluğu tasarlanmış ve çentikleri açılmış, darbe testi sonrası optik mikroskop ile kırılan yüzeylerin gerçek *L* boyları ölçülmüştür. S211 numunesi test aparatından kaynaklanan sorun nedeniyle geçersiz sayılmıştır.

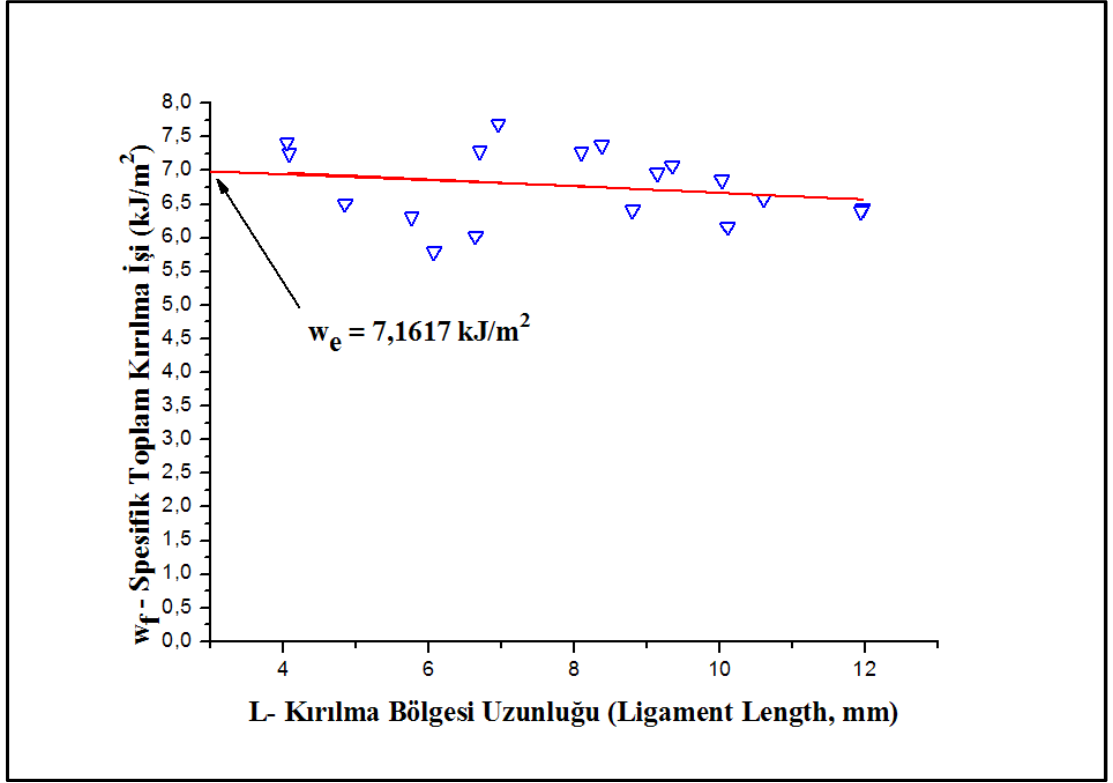
Şekil 4.11’de 150°C’de 6 mm Saf-PTFE malzemesi numunelerinin darbe testi ile bulunan kuvvet-zaman grafiklerinden bazıları verilmiştir. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere farklı *L* uzunluğuna sahip numunelere ait kuvvet-zaman eğrileri geometrik olarak benzerdir ve yapılan testlerin başarılı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.11: 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin bazı kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.11'deki ve diğer bulunan eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.50 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Optik mikroskop ile ölçülen L değerleri ile hesaplanan toplam kırılma işi değerleri lineer regresyon analizi yapılmış ve bulunan grafik Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.50'yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir.

Tablo 4.12'de 150°C'de 6 mm kalınlığına Saf-PTFE malzemesine ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.50 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere numunenin sıcaklığının artması sonucunda spesifik esas kırılma işi değeri azalmış, spesifik plastik deformasyon işi değeri ~ 0 bulunmuştur. Bu durumun anlamı kırılma enerjisinin tamamının iç kırılma proses bölgesinde (IFPZ) harcandığı anlamını taşımaktadır. Bu durumun benzerliği literatürde de görülmektedir [23,28-36].



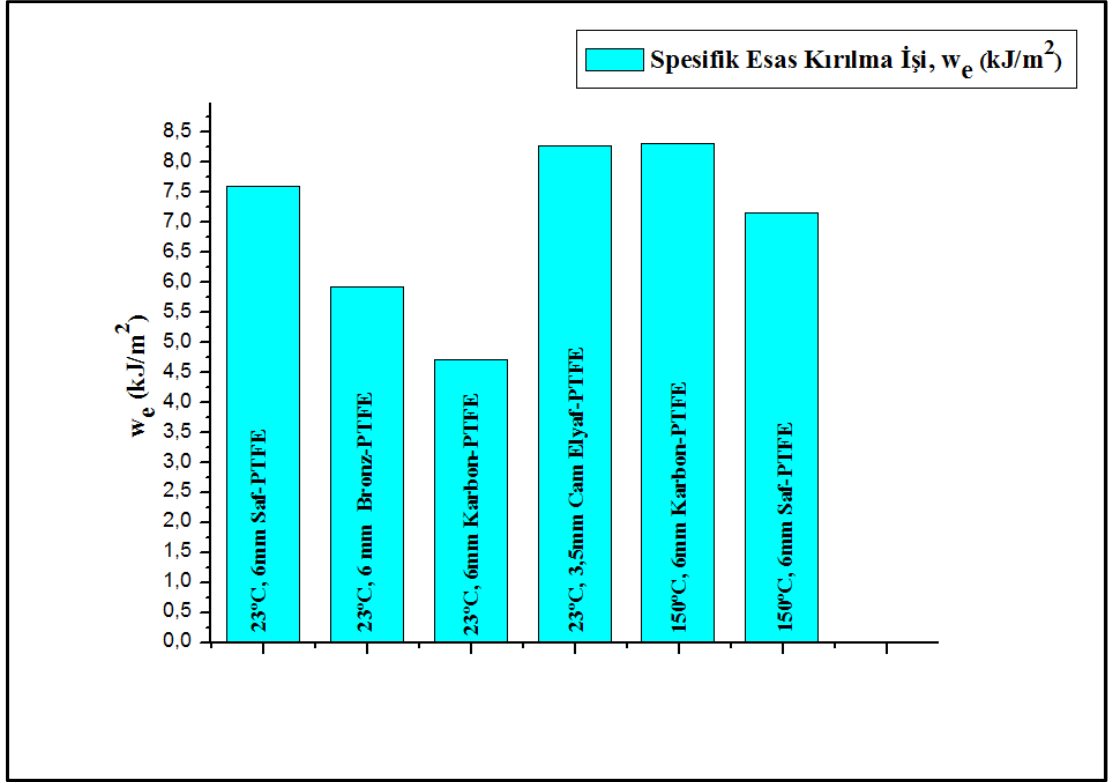
Şekil 4.12: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Tablo 4.12: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri	Spesifik Esas Kırılma işi (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi (kJ/m ²)
		7,1617

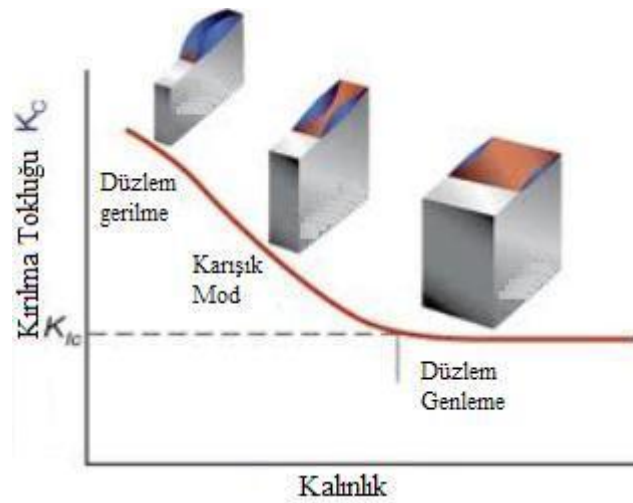
4.7. Farklı Koşullar Altında Araştırılan PTFE Malzemesinin Esas Kırılma İşi Parametrelerinin Karşılaştırılması

EWF yönteminde spesifik esas kırılma işi (w_e) değeri malzemenin bulunduğu şartlar altında (numune geometrisi, yükleme hızı, sıcaklık vb.) karakteristik özelliğini vermektedir. Spesifik plastik deformasyon işi karakteristik bir özellik olmayıp test koşulları altında değişebilen bir özelliktir. Çalışmada PTFE malzemesinin farklı fiziksel koşullar altında davranışı incelenmiştir. Şekil 4.13’de farklı fiziksel koşulların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla bulunan tüm spesifik esas kırılma işi değerleri çubuk grafiği şeklinde verilmiştir.



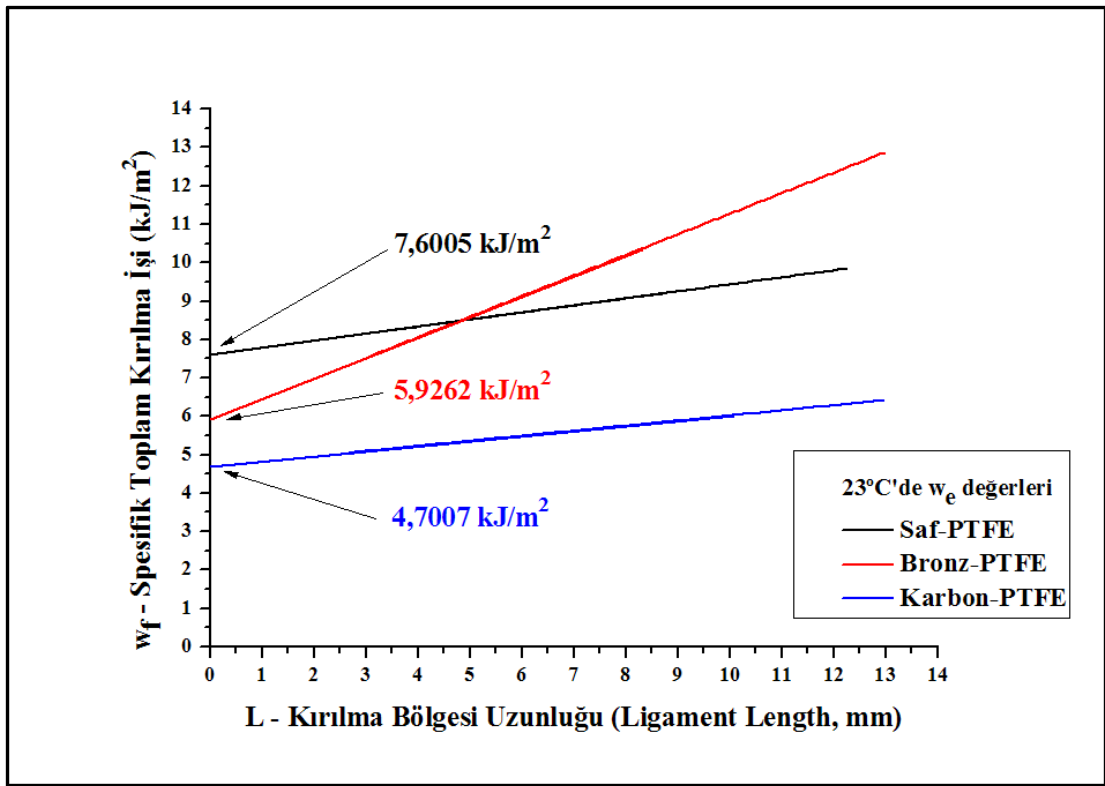
Şekil 4.13: Tüm spesifik esas kırılma işi değerlerinin gösterimi

23°C'deki numunelerin testlerinde, spesifik esas kırılma işi değeri (w_e) en fazla 3,5 mm kalınlığına sahip%25 katkı oranlı Cam-Elyaf-PTFE malzemelerinin testinde bulunmuştur. Numune kalınlığı arttıkça düzlem gerilme durumundan düzlem genleme durumuna geçiş olmaktadır. Elasto-plastik kırılma mekaniğinde numune kalınlığının malzemenin kırılma tokluğuna etkisi Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Numune kalınlığının malzemenin kırılma tokluğuna etkisi [37]

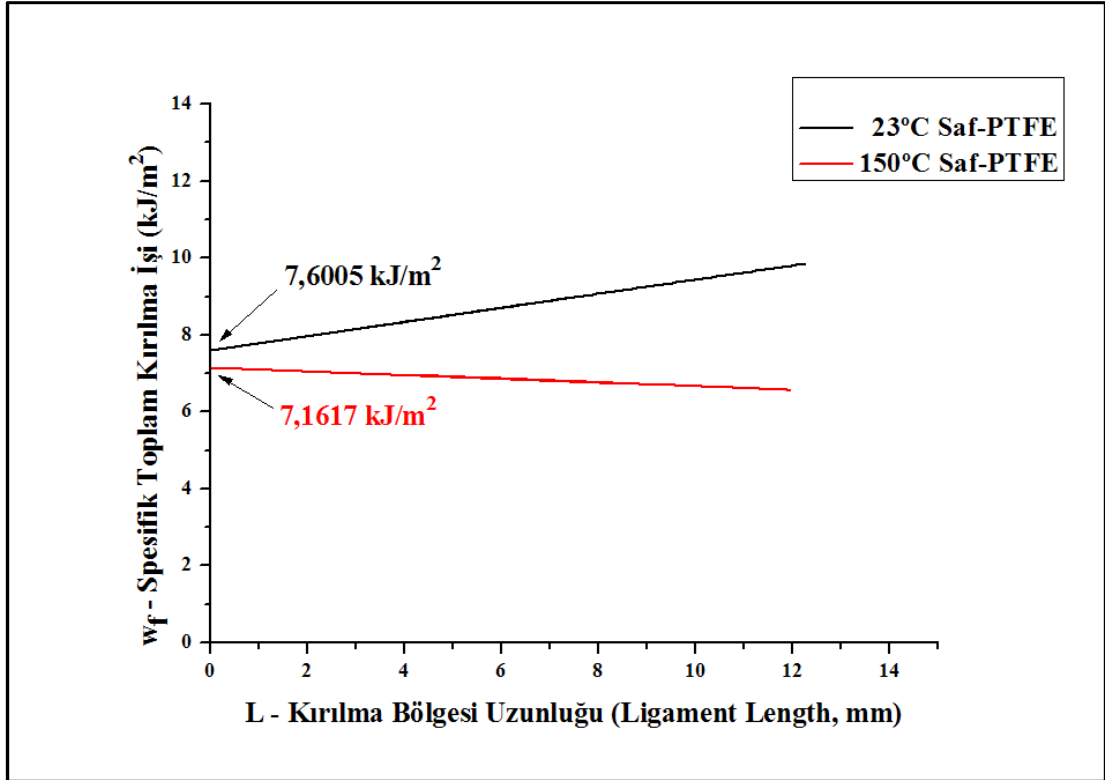
Şekil 4.14’de görüldüğü üzere numunenin kalınlığı arttıkça kırılma tokluğu düşmektedir. 6 mm Saf-PTFE malzemesinin spesifik esas kırılma işi değeri (kırılma tokluğu) $7,6005 \text{ kJ/m}^2$ bulunmuş, 3,5 mm %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE malzemesinde ise spesifik esas kırılma işi değeri (kırılma tokluğu) $8,2772 \text{ kJ/m}^2$ bulunmuştur. Saf-PTFE’ye nispeten malzemeye katılan cam elyaf katkısının kırılma tokluğunu düşürmesine rağmen numune geometrisindeki değişim (kalınlığın azalması) ile bu değer artmıştır. Malzemeye ait farklı kalınlıklardaki bu sonuçlar elosto-plastik kırılma mekaniğini desteklemektedir. Benzer EWF çalışmalarında numunelerin kalınlığının azalmasıyla spesifik esas kırılma işi değerleri artmıştır.



Şekil 4.15: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip malzemelerin spesifik esas kırılma işi değerlerin karşılaştırılması

Üretici firmanın saf ve farklı katkı oranlarına ait PTFE malzemesinin (ASTM D256) Izod çentikli darbe dayanımı değerleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Verilen bilgilere göre sırasıyla en fazla darbe dayanımı Saf-PTFE, %40 katkı oranlı Bronz-PTFE ve %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’dir. Şekil 4.15’de gösterildiği üzere yapılan çalışmada 23°C’de spesifik esas kırılma işi değeri en fazla Saf-PTFE’de bulunmuştur. Saf-PTFE’den sonra spesifik esas kırılma işi değerleri, Bronz ve

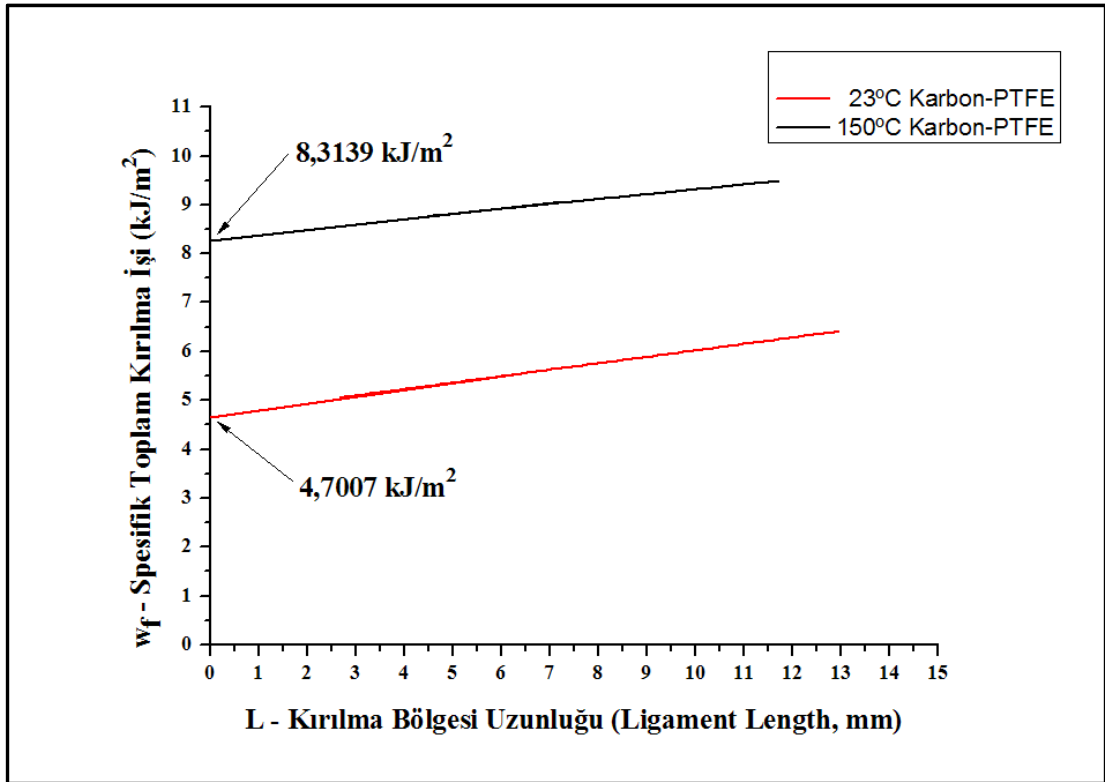
Karbon katkılı PTFE'ler şeklinde azalmıştır. Üretici firma ile çalışmada bulunan kırılma davranışı paralellik göstermiştir. Ayrıca Bronz-PTFE numunelerinde spesifik plastik deformasyon işinin diğer malzemelere göre daha fazla olduğu Şekil 4.15'de görülmektedir. Bunun anlamı dış plastik deformasyon bölgesine kırılma enerjisinin daha fazla harcanmasıdır ve nispeten kırılmanın süneklığe daha yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 4.16: 23 °C ve 150 °C'de 6mm kalınlığa sahip Saf-PTFE'nin spesifik esas kırılma işi değerlerinin karşılaştırılması

PTFE yarı-kristal bir malzeme olup farklı basınç ve farklı sıcaklıklarda 4 farklı kristalin faz yapısı göstermektedir (Şekil 2.3). Atmosfer basıncı koşulları altında 19°C ve 30°C'de kristal faz yapısı değişikliğe uğramaktadır. Deneylerde malzemenin 23°C'deki kristal faz IV yapısı ile 150°C'deki kristal faz I yapısındaki kırılma davranışı incelenmiştir (Şekil 4.16). Faz IV'den faz I' e geçişinde PTFE atomlarının hekzagonal helisel yapısı çözülerek yanılıcı (sahte) hekzagonal kristal yapıya dönüşmektedir. Dinamik uyarlamada düzensizlik oluşarak uzun aralıklı pozisyonel ve oryantasyonel düzen oluşur. Böylece dinamik yük altında kararsız gevrek bir kırılma görülmektedir [9]. Yapılan çalışmalarda J-İntegral yöntemiyle Saf-PTFE

malzemesinin kırılma tokluğunun 30 °C'den sonra sıcaklığın artması ile artış eğilimin bir süre devam ettiği sonrasında sıcaklığın daha da artmasıyla (100 °C'den sonra) azalış eğilimine geçtiği belirtilmiştir [9,21]. Şekil 4.16'da gösterildiği üzere, yapılan çalışmada 23 °C'de kırılma tokluğunun 150 °C'ye göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu durum kristal faz yapısının değişikliği ile ortaya çıkmıştır. Ayrıca spesifik plastik deformasyon işi 150 °C Saf-PTFE'de yaklaşık 0 bulunmuştur. Buradan da malzemeye gelen kırılma enerjisinin tamamının iç kırılma proses bölgesine harcandığı sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.17: 23 °C ve 150 °C'de 6mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin spesifik esas kırılma işi değerlerinin karşılaştırılması

%25 katkı oranına sahip Karbon-PTFE'nin spesifik kırılma işi değeri 23°C'de 4,7007 kJ/m^2 , 150°C'de 8,3139 kJ/m^2 bulunmuştur. Görüldüğü üzere yüksek sıcaklığın karbon katkısı etkisiyle spesifik esas kırılma işi değeri yaklaşık 2 kat artmıştır. Böylece PTFE'nin yüksek sıcaklık altında kırılma tokluğunun karbon katkısı etkisiyle iyileştiği ortaya çıkmıştır (Şekil 4.17).

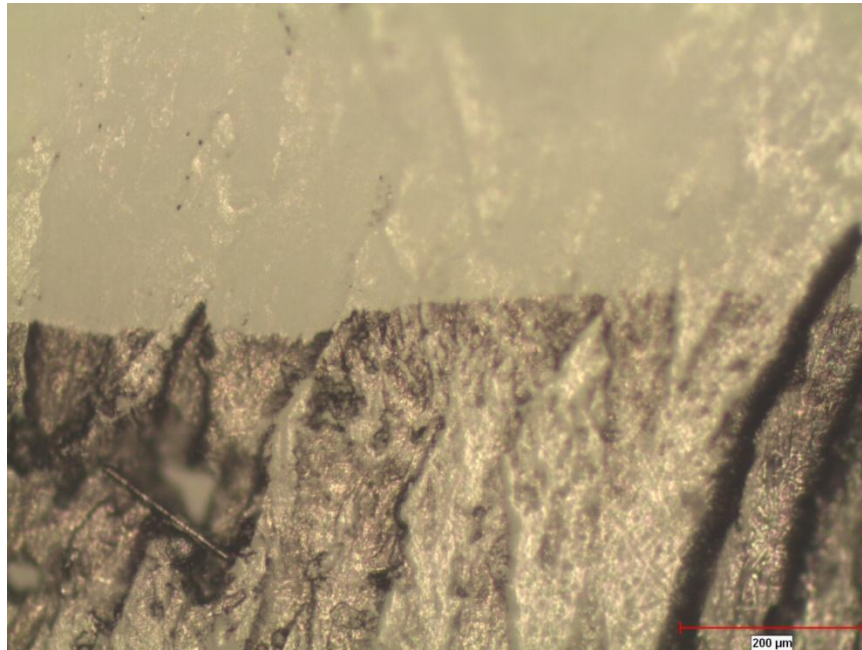
4.8. Kırılma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Altında İncelenmesi

Kırılma yüzeylerinin mikroskopik olarak incelenmesi, malzemeye uygulanan gerilmenin doğrultusu ve büyüklüğü konusunda bilgiler vermektedir. Böylece malzemede hasarın ortaya çıkış mekanizmasının araştırılması ve farklı malzeme sistemlerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

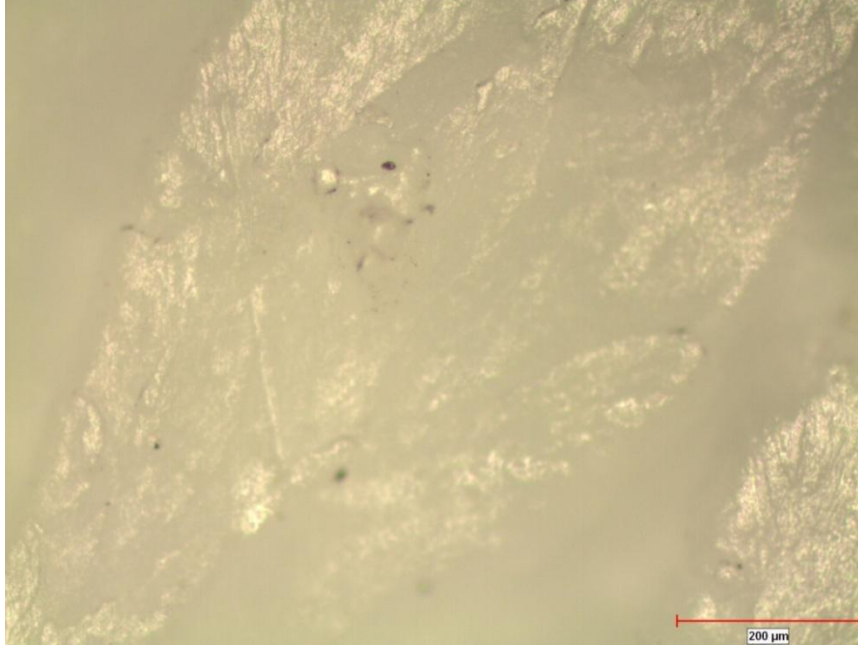
Yapılan çalışmada farklı koşullar altında PTFE malzemesinin kırılma yüzeyleri optik mikroskop altında incelenmiştir. 100x büyütme oranında 200 µm ölçüsünde çentik ucu bölgesi ve kırılma yüzeyi bölgesi resimleri çekilmiştir.

Resimlerde görülen siyah noktalar ve siyah bölgeler (Saf-PTFE'nin numunelerinde) optik mikroskop altında L uzunluğunun hatasız olarak ölçülebilmesi amacıyla boyanmıştır. Mikroboşlukların birleşmesiyle hasara uğrayan malzemenin kırılma yüzeylerinde boşluk görünümüne benzer şekiller ortaya çıkmıştır. Resimlerde bu boşluklar bulanık bölgeler şeklinde görülmüştür.

Şekil 4.18'de ve Şekil 4.19'da 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin çentik ucu bölgesi ile kırılma yüzeyi resimleri gösterilmiştir.



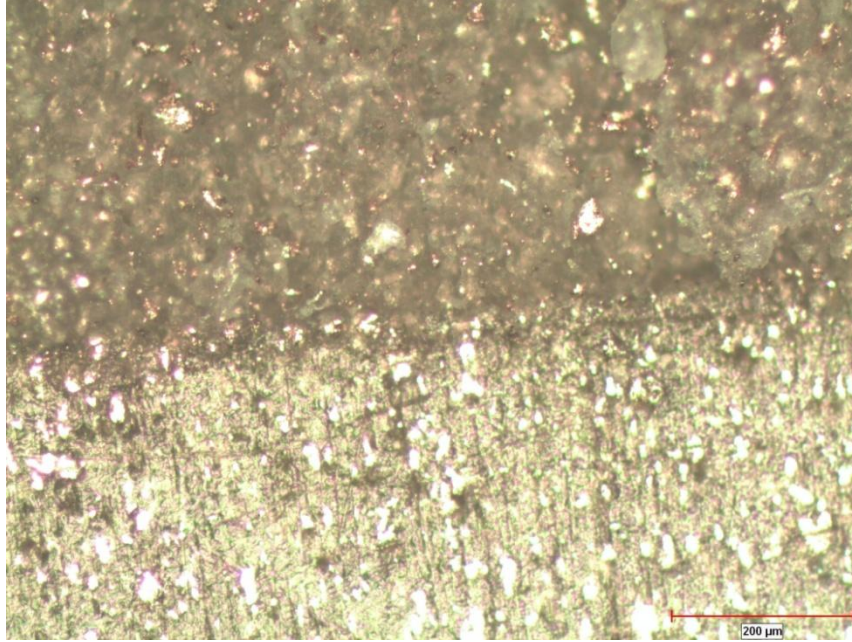
Şekil 4.18: 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE'nin çentik ucu bölgesi



Şekil 4.19: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi

Şekil 4.19’da görüldüğü üzere numune yüzeyinde oluşan boşluklar belli bölgelere toplanmıştır.

Şekil 4.20’de ve Şekil 4.21’de 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin çatlak ucu bölgesi ile kırılma yüzeyi resimleri gösterilmiştir.



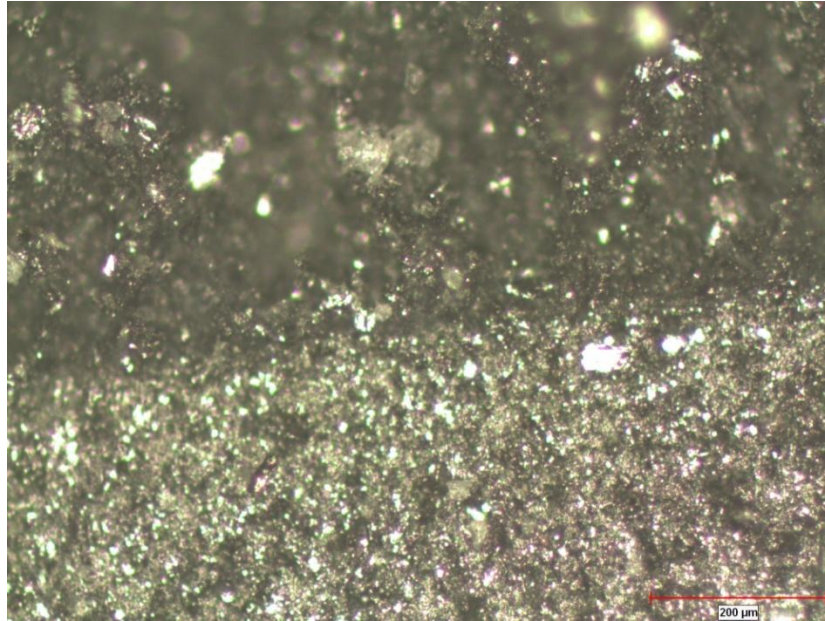
Şekil 4.20: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin çentik ucu bölgesi



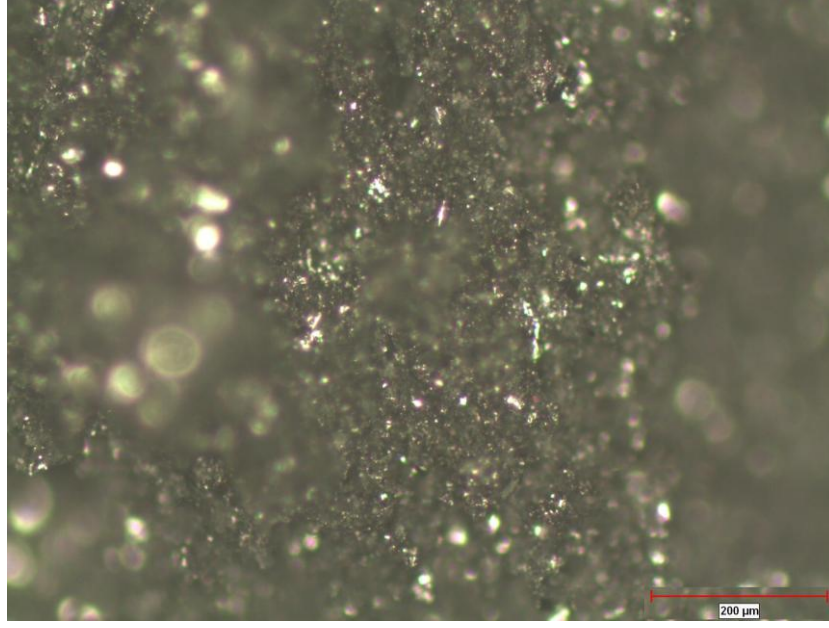
Şekil 4.21: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin kırılma yüzeyi

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere numune yüzeyinde oluşan boşluklar homojene yakın bir biçimde toplanmıştır. Yüzeyde oluşan sıvanma açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.21).

Şekil 4.22’de ve Şekil 4.23’te 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çatlak ucu bölgesi ile kırılma yüzeyi resimleri gösterilmiştir.



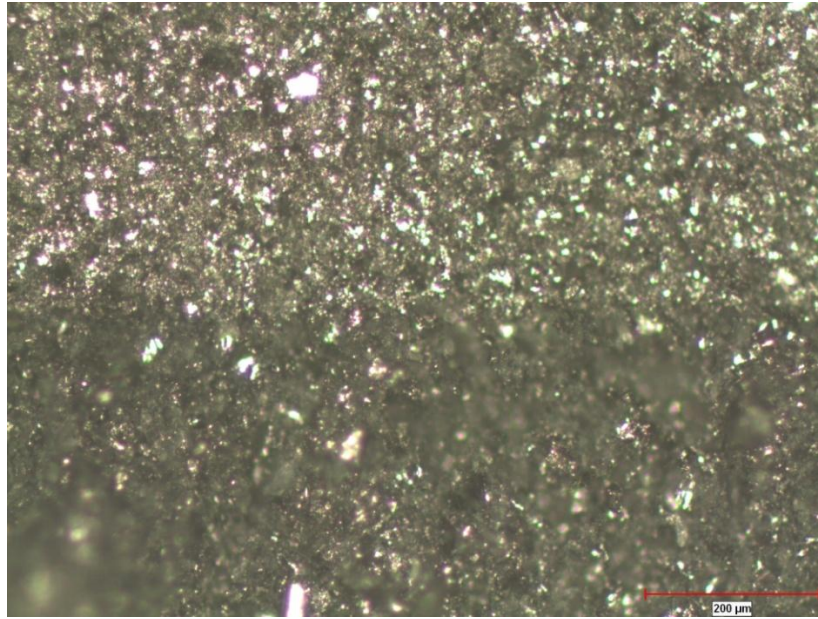
Şekil 4.22: 23°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu bölgesi



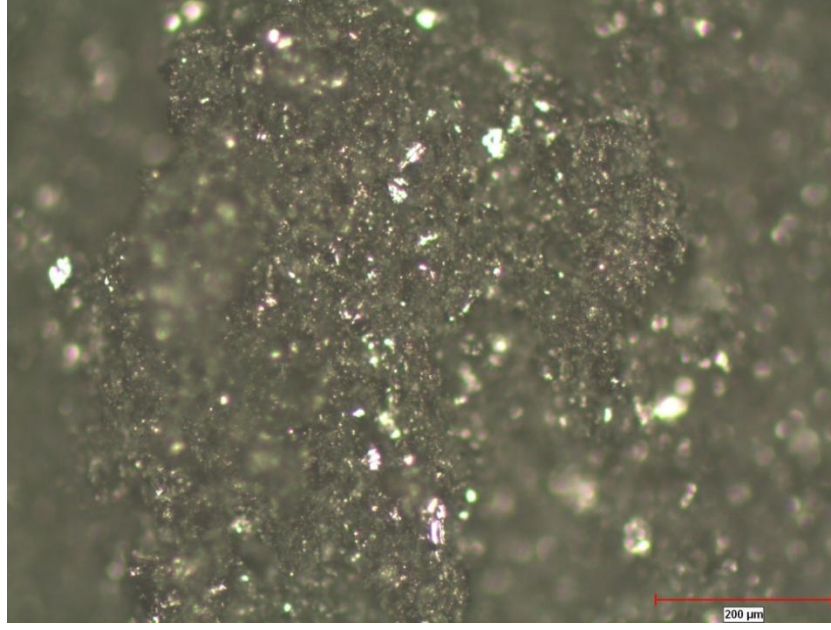
Şekil 4.23: 23°C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin kırılma yüzeyi

Resimlerde görüldüğü üzere bulanık kısımların fazla olduğu görülmüştür. Karbon katkılı PTFE numunelerinin yüzeylerinde boşluklar geniş bir yer kaplamaktadır.

Şekil 4.24'te ve Şekil 4.25'de 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin çatlak ucu bölgesi ile kırılma yüzeyi resimleri gösterilmiştir.

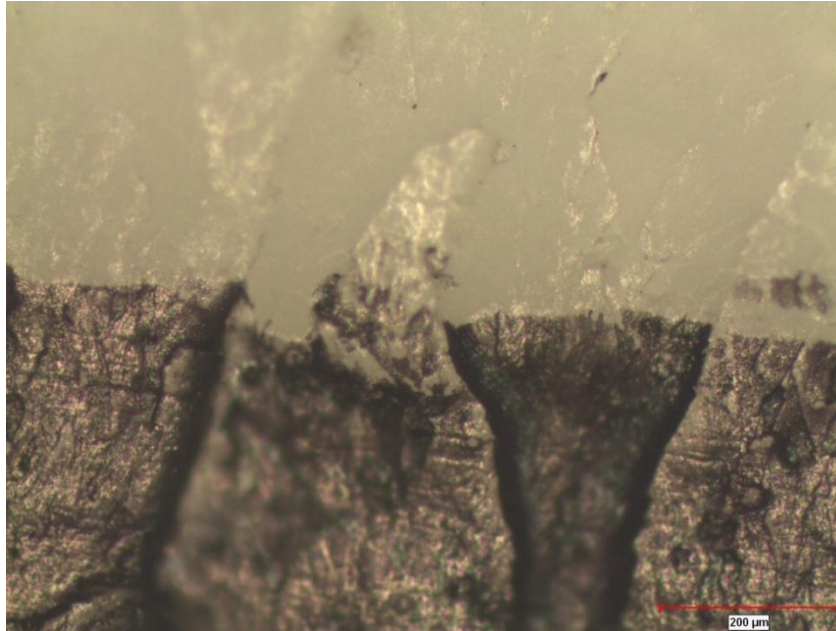


Şekil 4.24: 150°C'de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE'nin çatlak ucu bölgesi

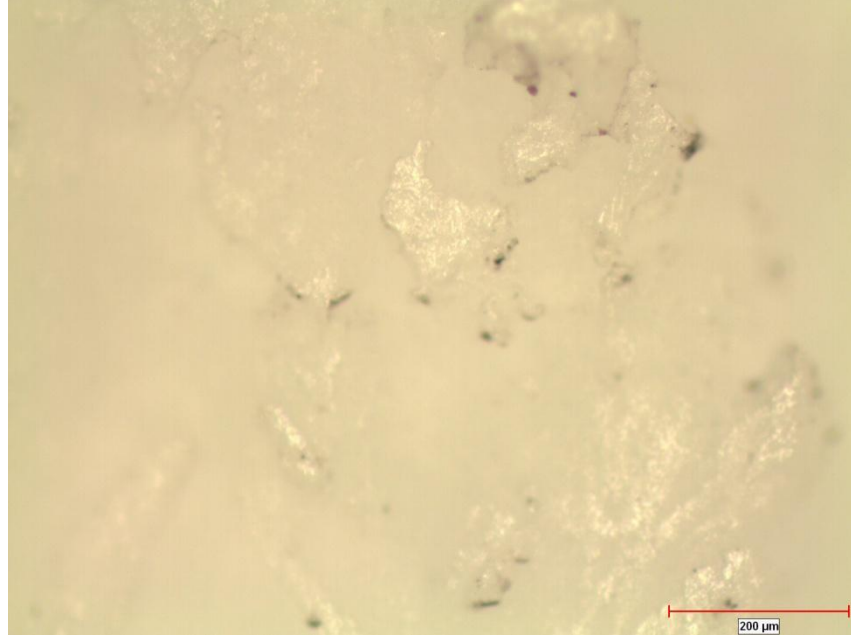


Şekil 4.25: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi

İki farklı sıcaklığa ait karbon katkılı PTFE numuneleri yüzeylerinde kırılma bölgeleri benzerlik göstermektedir. Farklı sıcaklığın etkisi optik mikroskop ile anlaşılammıştır. Şekil 4.26’da ve Şekil 4.27’de 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu bölgesi ile kırılma yüzeyi resimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.26: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu bölgesi



Şekil 4.27: 150°C’de 6 mm kalınlığına sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi

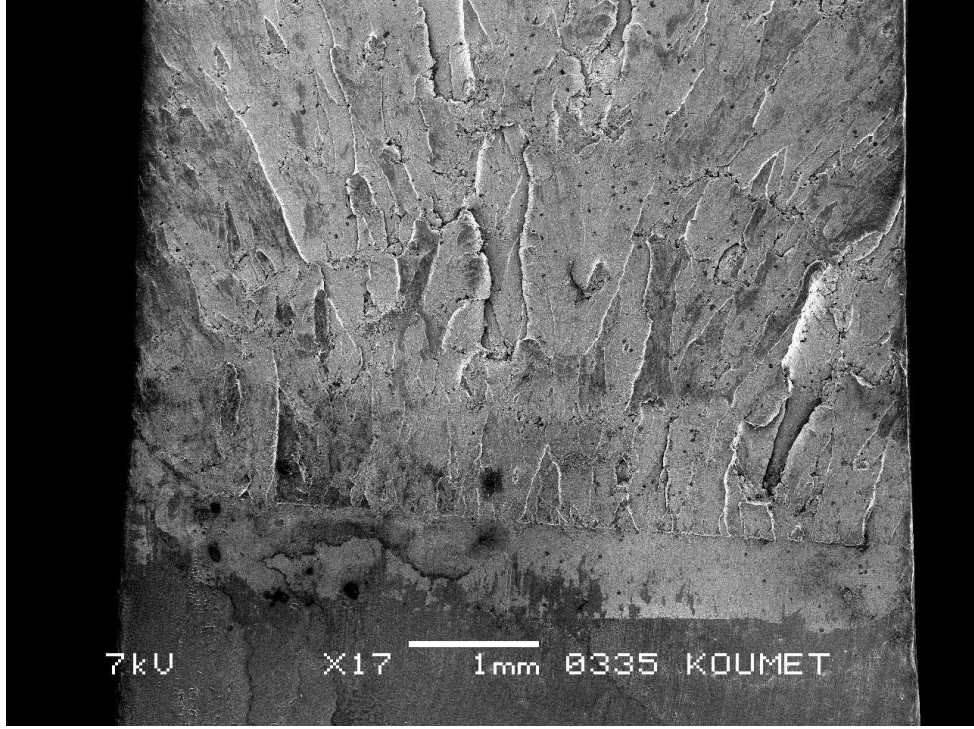
İki farklı sıcaklığa Saf-PTFE numuneleri yüzeylerinde kırılma bölgeleri benzerlik göstermektedir. Farklı sıcaklığın etkisi optik mikroskop ile anlaşılammıştır.

4.9. Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) İle İncelenmesi

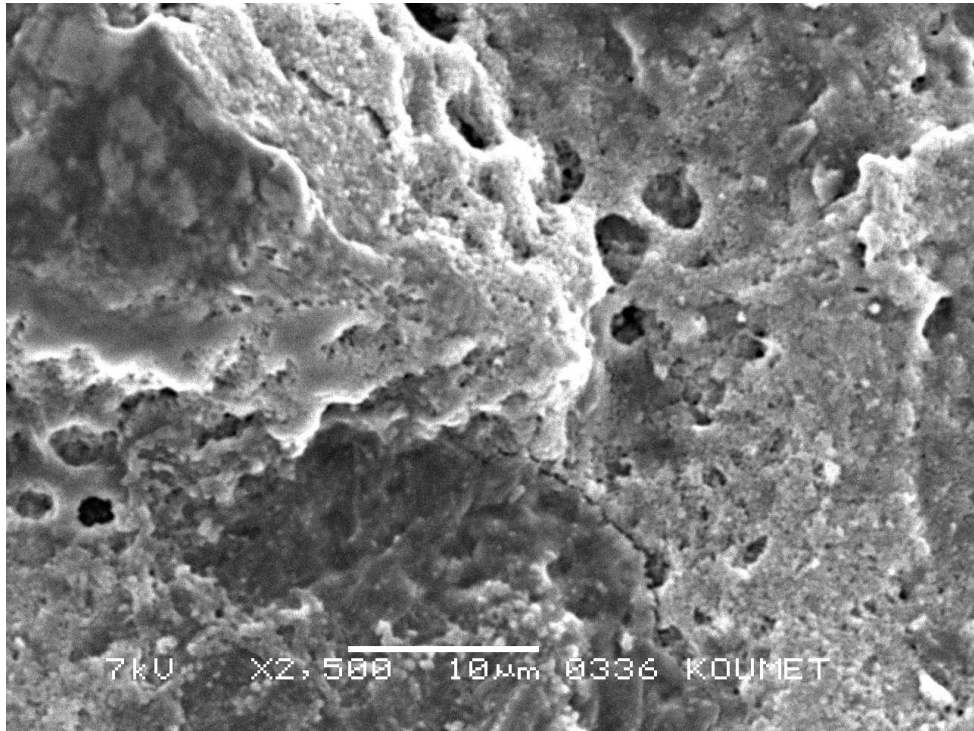
4.9.1. 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip saf-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi

23 °C’de Saf-PTFE malzemesinin atmosferik koşullar altında faz IV yapısında bulunduğu literatürde bilinmektedir [9]. Bu fazda PTFE atomları hegzagonal kristal yapısına sahip olup kırılmanın oluşumunda belirgin bir lokal deformasyon olduğu görülmektedir. Bu durumun kırılmada sünek davranışı arttırdığı gözlemlenmiştir. Bulunan EWF parametreleri de bu davranışı desteklemektedir.

Çentik ucu bölgenin TEM görüntüsü Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Darbe yükü altında çatlak yayılma başlangıcının ve ilerlemesinin yönelim etkisi görülmektedir.



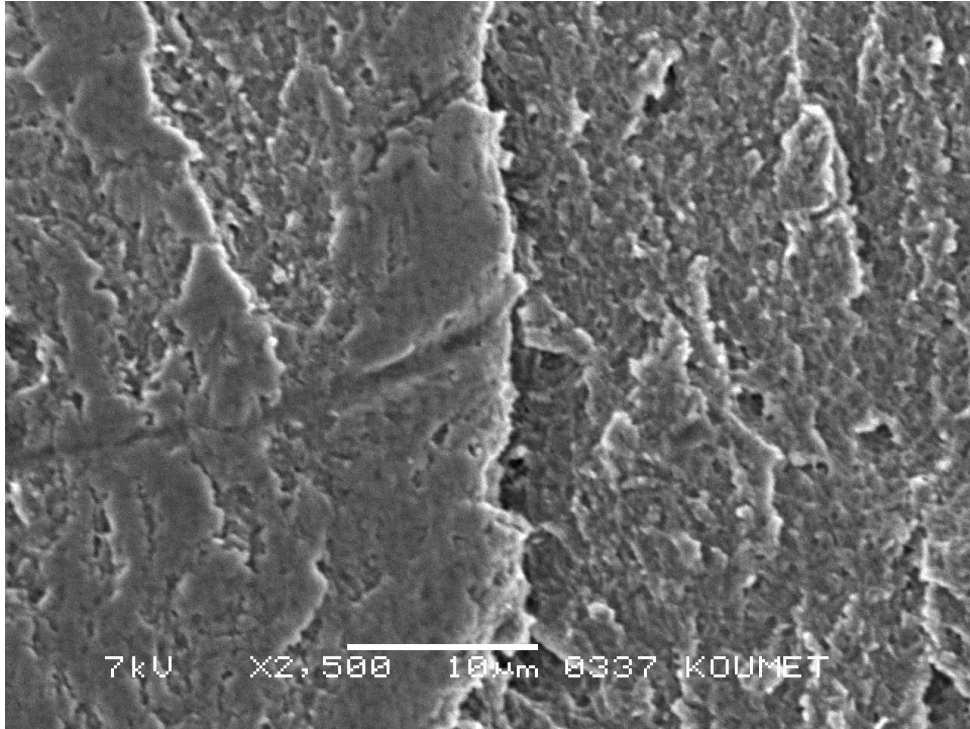
Şekil 4.28: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi
Numunenin çentik ucu bölgesinde, kırılma başlangıcındaki etkiyi Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



Şekil 4.29: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip Saf-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi

Şekil 4.29’da görüldüğü üzere kırılmanın başlangıcında lokal deformasyonun etkisinde mikroboşlukların birleşimi ve sıvanmanın etkisi görülmektedir. Malzemenin yapısı ile kırılma yüzeyi arasında köprü oluşturarak körelme sağlanmakta ve hızlı çatlak yayılmasında direnç göstermektedir. Bu durumun etkisinde malzemenin kırılma tokluğu üzerinde iyileştirici etki sağlamaktadır.

Kırılmanın devam eden bölgesinde çentik ucu bölgesine göre farklılıklar göstermektedir. Dinamik yükün ilk anında malzemenin çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği direncin çatlak ilerlemesi ile değişmektedir. Sıvanmanın, darbe yükünün yönelim etkisinde paralellik gösterdiği Şekil 4.30’da numunenin kırılma yüzeyi ile gösterilmiştir. Yüzeyde mikroboşlukların birleşmesiyle oluşan çatlak ilerlemesi görülmüştür. Topoğrafik yüzey yapısının bu tip davranışı sünekliği desteklemektedir.

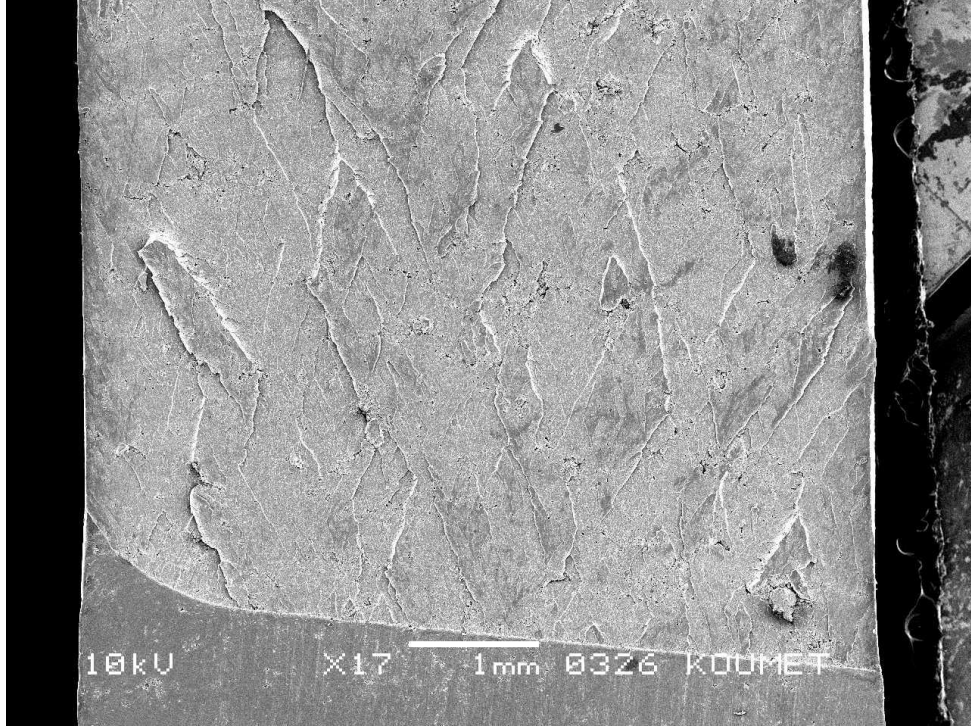


Şekil 4.30: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi

4.9.2. 150°C’de 6 mm kalınlığa sahip saf-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi

150°C’de Saf-PTFE malzemesinin atmosferik koşullar altında faz I yapısında bulunduğu literatürde bilinmektedir [9]. Bu yapıda PTFE atomlarının helisel yapısı çözülerek yanılıcı (sahte) hegzagonal kristal yapısına dönüşmektedir. Bu durumun

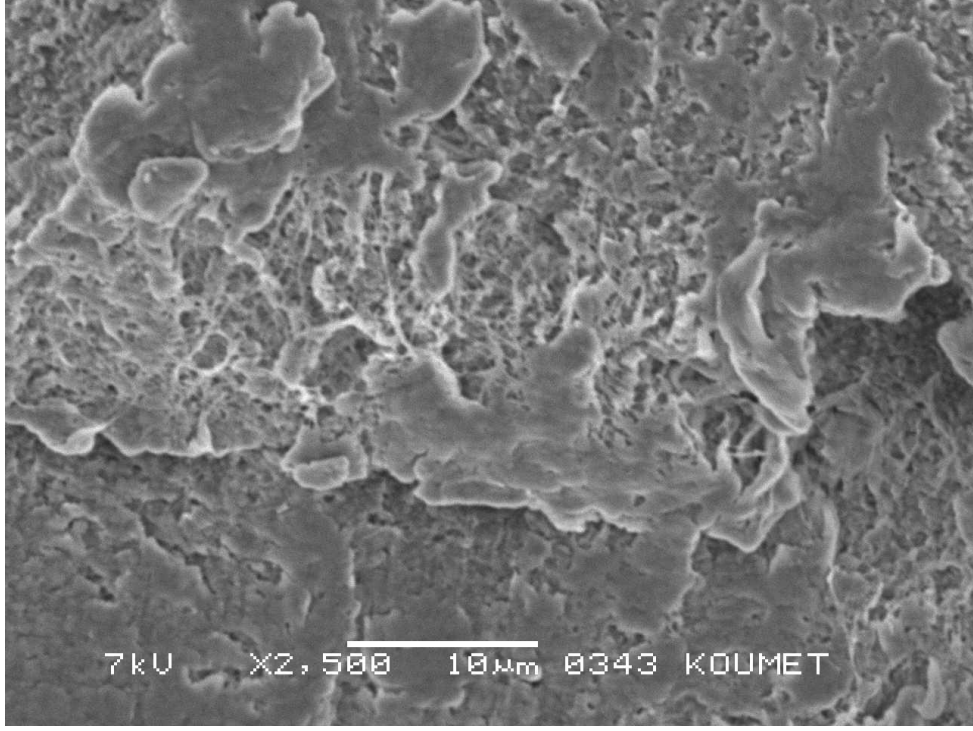
etkisi altında numuneye uygulanan hızlı yüklerde gevrek kırılma görülmüştür. Şekil 4.31’de numunenin çentik ucu bölgesinin TEM resmi gösterilmiştir.



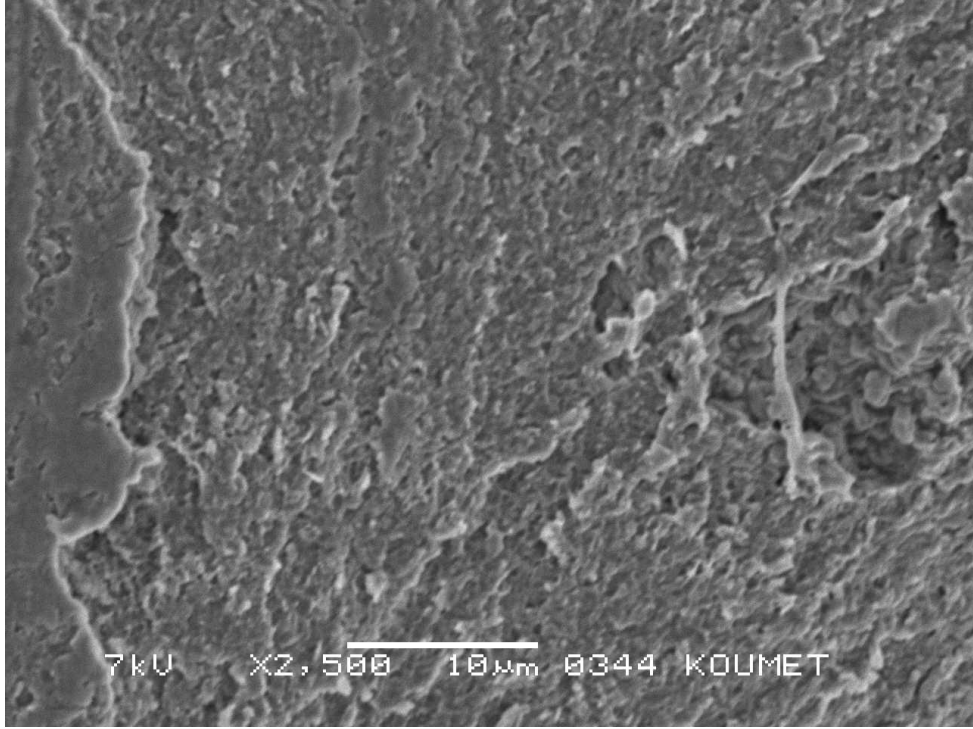
Şekil 4.31: 150°C’de 6 mm kalınlığa sahip Saf-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere darbe yükü altında çatlak yayılma başlangıcının ve ilerlemesinin yönelim etkisi görülmektedir. Kırılmanın lokal deformasyonlar etkisinde mikroboşlukların birleşimi ile çatlakların oluşumu görülmektedir. Kırılma yüzeyinde sıvanmanın etkisi 23°C’de daha belirgin görülmektedir. Yüzey topoğrafik yapısının bu görüntüsü kırılmanın gevrekliğe daha yakın olduğunu göstermektedir. Bu durum EWF parametrelerinde 150°C’deki kırılma davranışında da bulunmuştur.

Şekil 4.32’de numunenin çentik ucu bölgesinde kırılma başlangıcındaki etkisi gösterilmiştir. Çentik ucu bölgesinde yönelme etkisi görülmüş olup kırılmaya karşı dirençte azalmaya sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. Yüzeyde sıvanmanın etkisi görülmesine rağmen lokal deformasyonlar ile temsil edilen mikroboşluk birleşimi görülmemektedir. Benzer davranış Şekil 4.33’te gösterilen numunenin kırılma yüzeyi bölgesinde de görülmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında PTFE’nin kristal faz yapılarının değişimi ve düzensizliği etkisinde oluşmuştur.



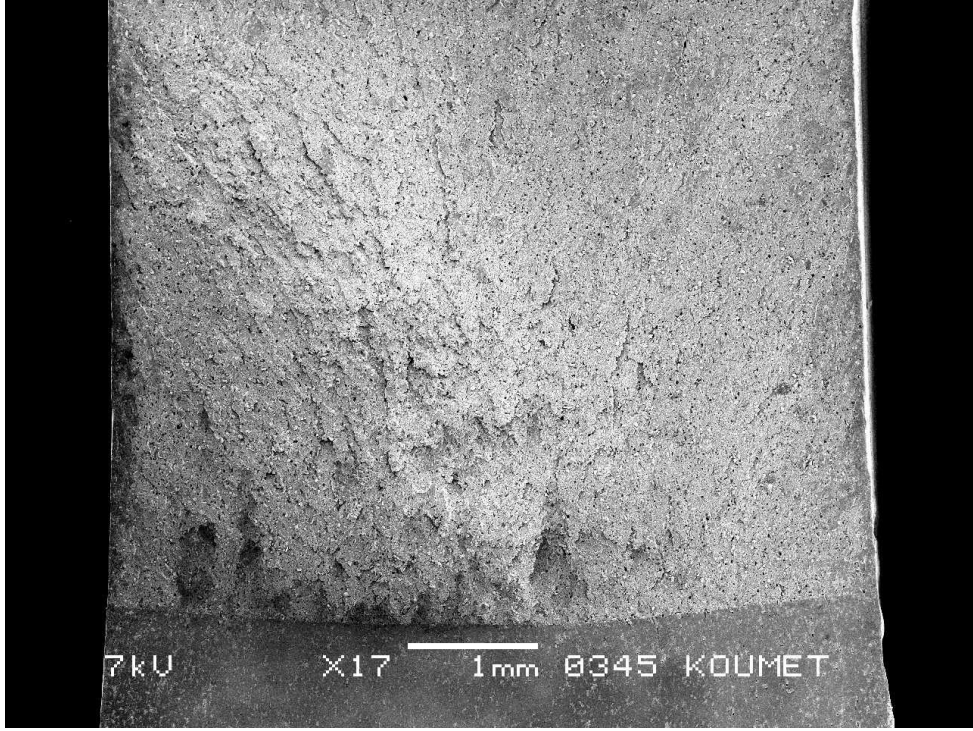
Şekil 4.32: 150°C’de 6 mm kalınlığa sahip Saf-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi



Şekil 4.33: 150 °C’de 6 mm kalınlığa sahip Saf-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi

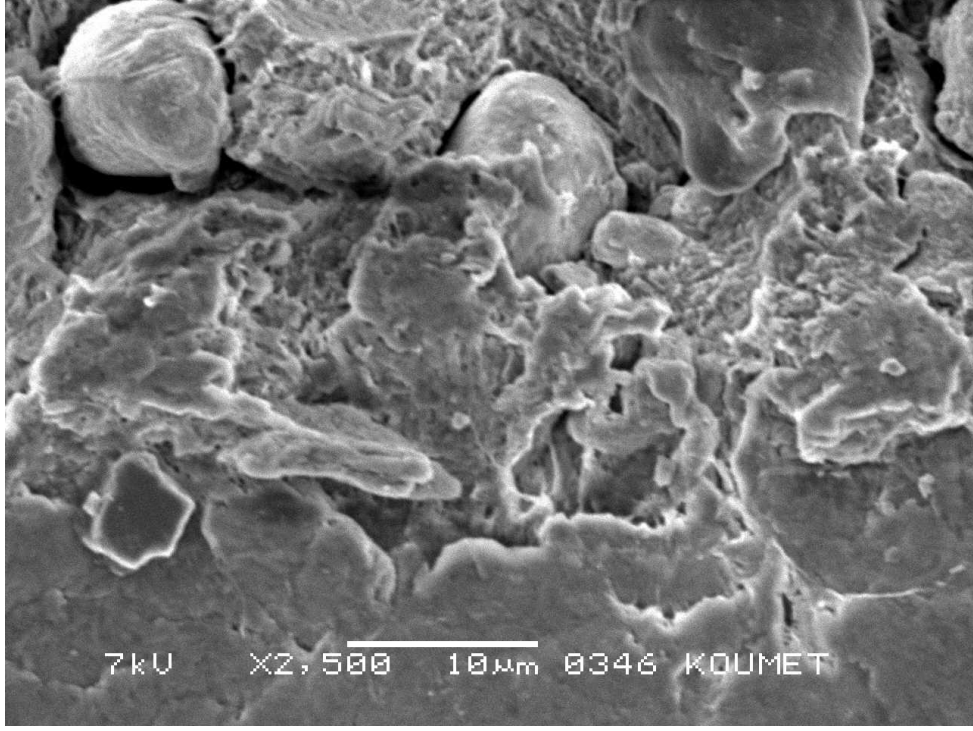
4.9.3. 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %40 katkı oranlı bronz-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi

Şekil 4.34’te kırılmanın çentik ucu bölgesi ile kırılma yüzeyini genel açıdan ele alan TEM görüntüsü gösterilmiştir. Darbe yükü ile yönelim etkisi görülmüş olup, çentiğin uç bölgelerinde lokal deformasyonlar ile yüzeyden geniş kütlelerin koptuğu görülmüştür. Bu durum numunenin kırılan yüzeyinin ilerleyen kısımlarında görülmemiştir.

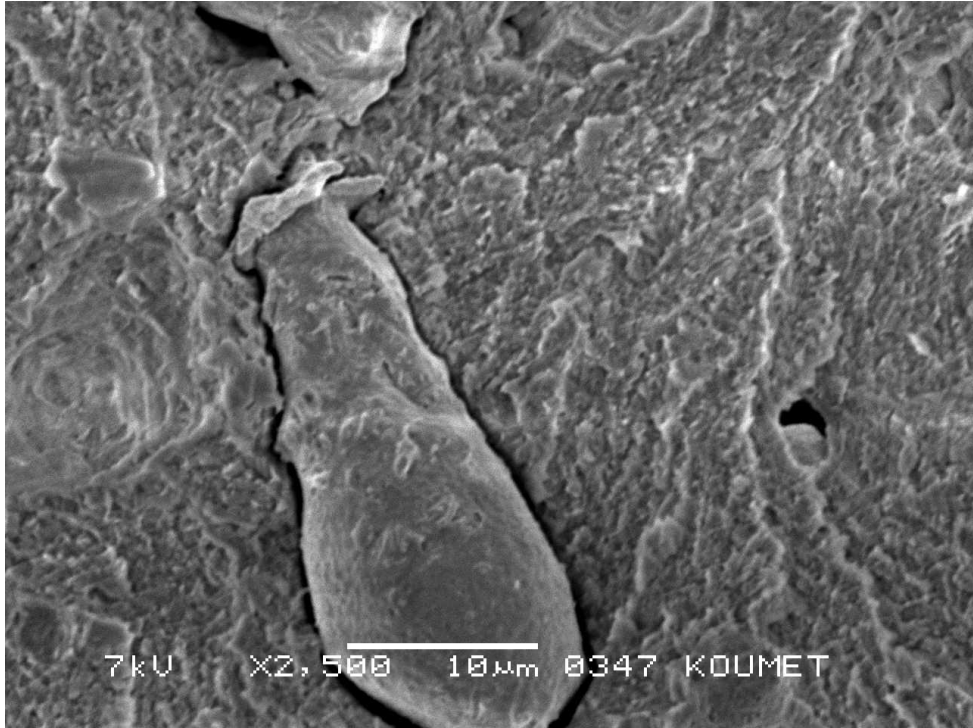


Şekil 4.34: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi

Şekil 4.35’te numunenin kırılma başlangıcı bölgesi gösterilmiştir. Kırılma başlangıcı bölgesinde bronz tanecikleri görülmektedir. Kırılmanın başlangıç bölgesinde sıvanma ile bronz tanecikleri kırılmanın başlangıç bölgesinde matris fazında tutunmasının zayıf olduğu görülmektedir. Numunenin kırılmanın ilerleyen yüzeylerinde sıvanma etkisinin daha az ve bronz taneciklerinin tutunmasının zayıflığı görülmektedir (Şekil 4.36). Bu durumun görülmesi malzemenin kırılmaya karşı direnci azalttığı şeklinde yorumlanmıştır.



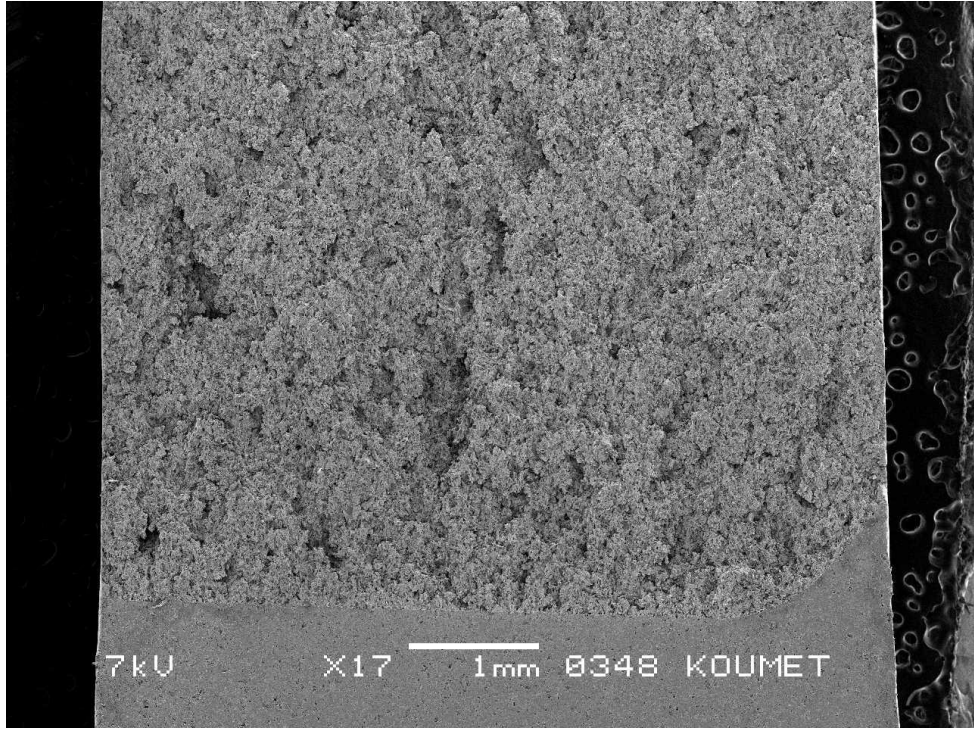
Şekil 4.35: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi



Şekil 4.36: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi

4.9.4. 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi

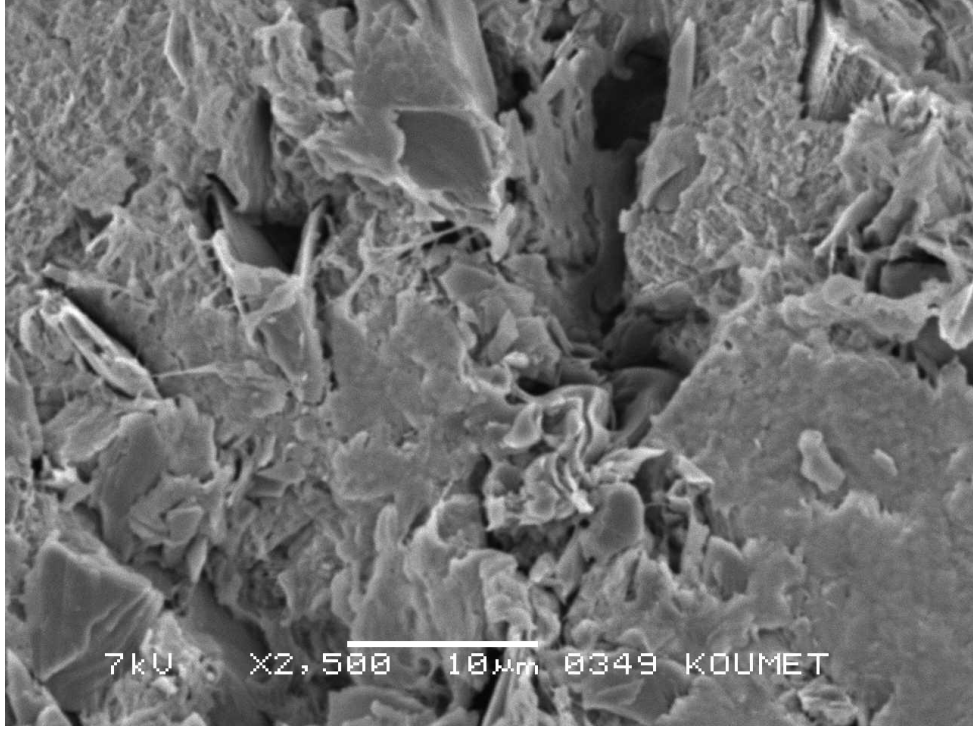
Şekil 4.37’de kırılmanın çentik ucu bölgesi ile kırılma yüzeyini genel açıdan ele alan TEM görüntüsü gösterilmiştir. Darbe yükü ile yönelim etkisi görülmüş olup, numunenin kırılma yüzeyinin genelinde lokal deformasyonlar ile yüzeyden geniş kütlelerin koptuğu görülmüştür.



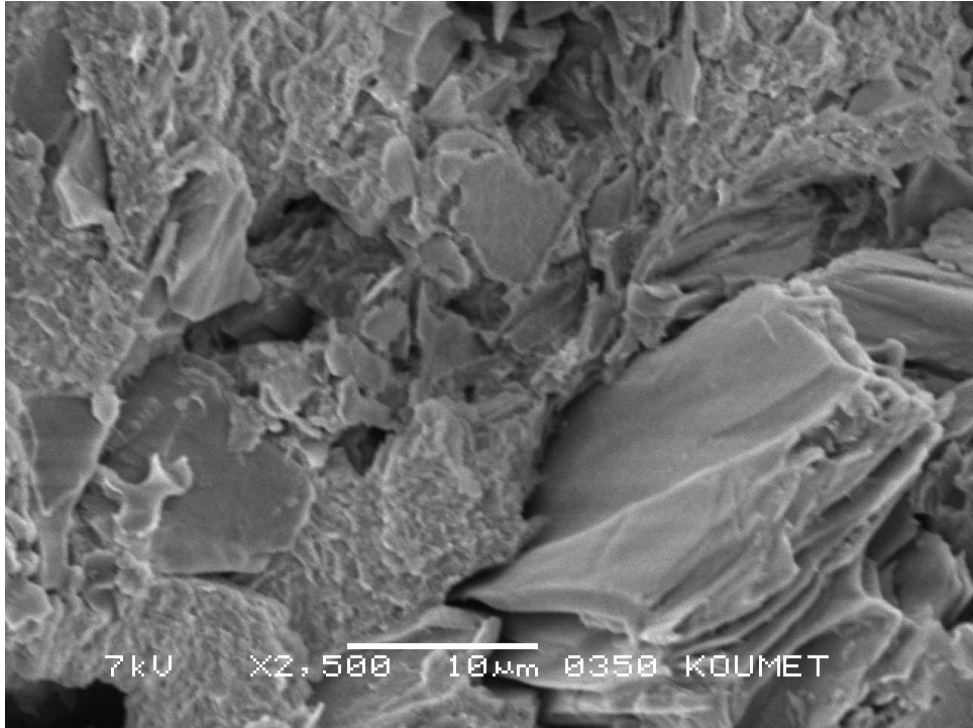
Şekil 4.37: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi

Şekil 4.38’de gösterildiği üzere numunenin kırılma başlangıcı bölgesinde karbon taneciklerinin etkisiyle kırılma yüzeylerinde boşluklar oluşmuştur. Numuneye uygulanan darbe yükü etkisinde yönelme görülmüş olup yönelmenin etkisinde lokal deformasyonlar oluşmuştur.

Şekil 4.39’da yönelme etkisi tam olarak oluşmasa da karbon katkısının etkisiyle kırılma yüzeylerinde de boşluklar oluşmaktadır. 23°C’de malzemeye eklenen karbon katkısının kırılma tokluğunu azalttığı bulunan EWF parametreleri ile gösterilmiştir. Malzeme matrisinde oluşan bu durumun kırılma tokluğu üzerine etkisi paralellik göstermiştir.



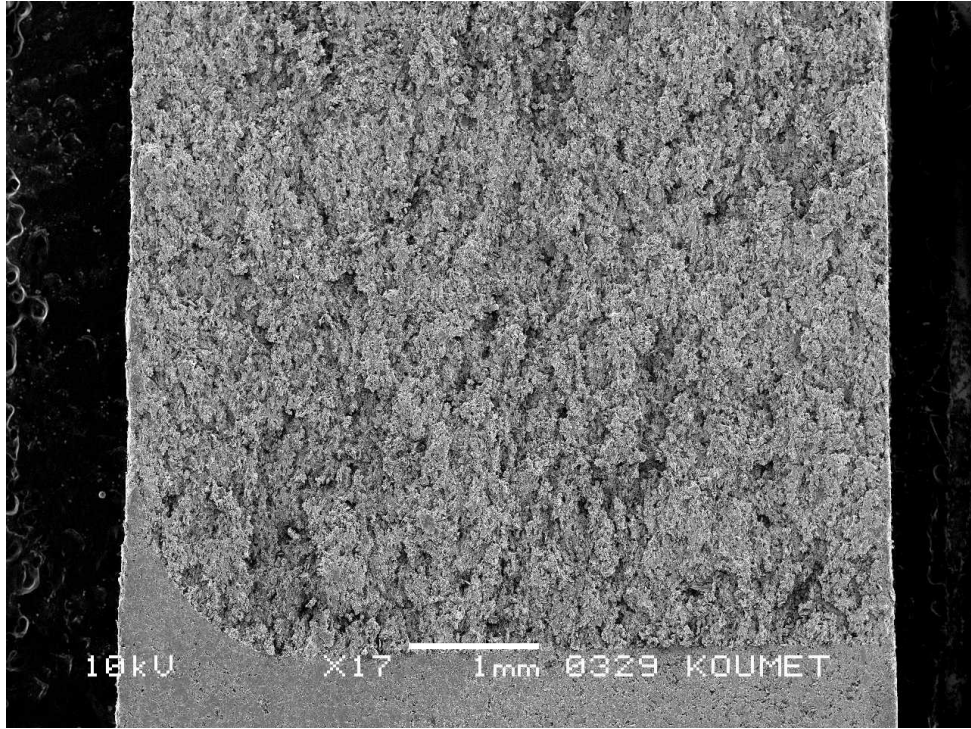
Şekil 4.38: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi



Şekil 4.39: 23°C’de 6 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi

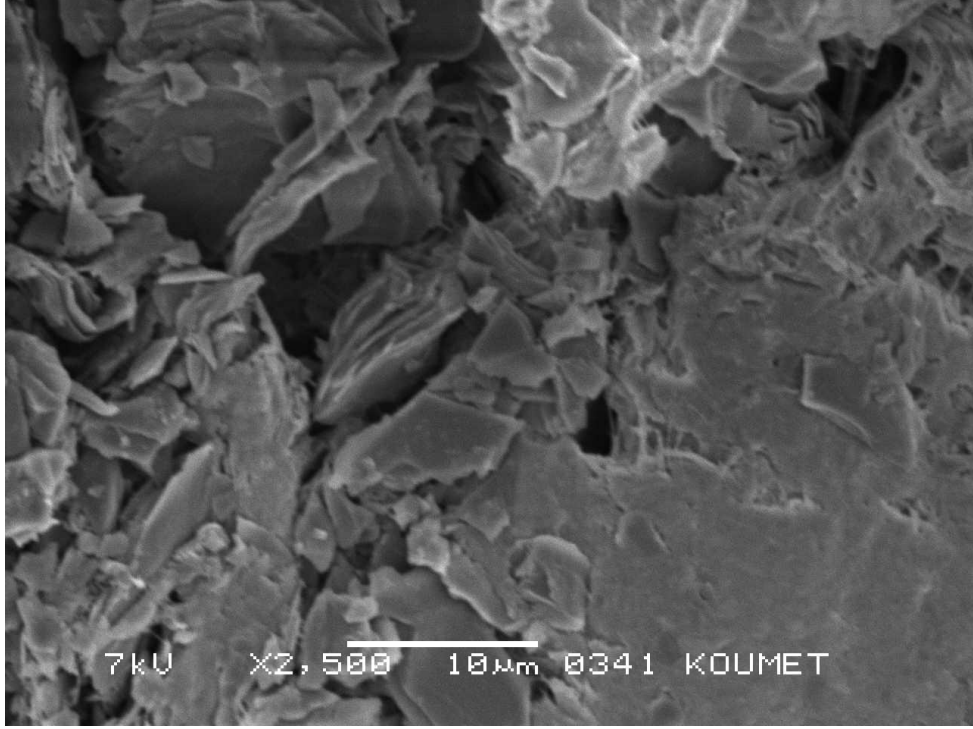
4.9.5. 150°C’de 6 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi

Şekil 4.40’da kırılmanın çentik ucu bölgesi ile kırılma yüzeyini genel açıdan ele alan TEM görüntüsü gösterilmiştir. Darbe yükü ile yönelim etkisi görülmüş olup, numunenin kırılma yüzeyinin genelinde 23 °C’deki numunelere göre lokal deformasyonlar ile yüzeyden geniş kütlelerin daha fazla koptuğu görülmüştür.

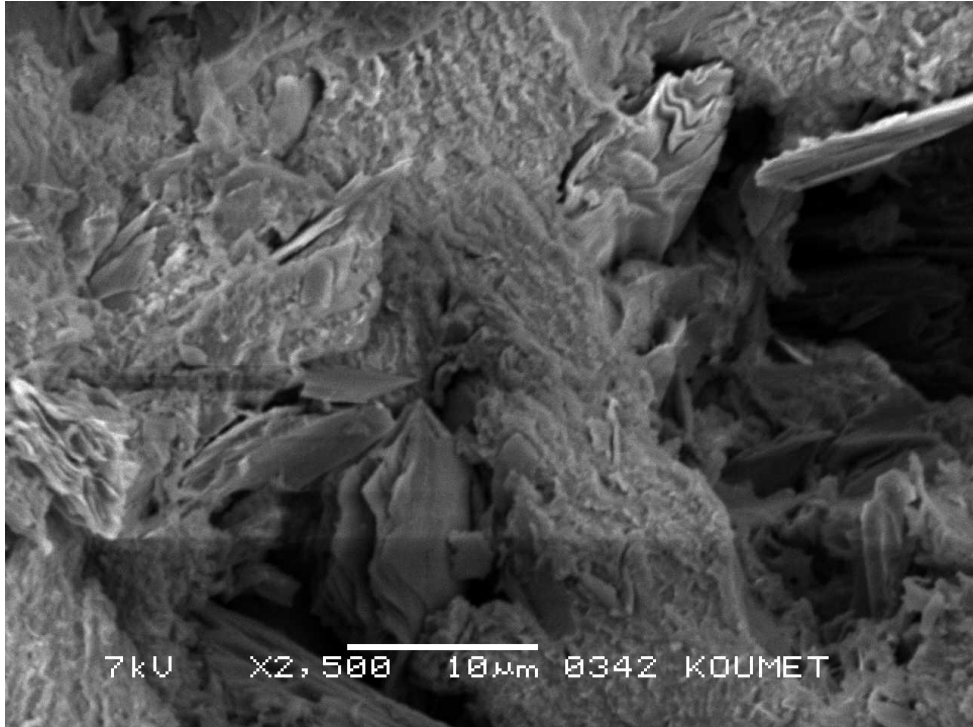


Şekil 4.40: 150°C’de 6 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi

Şekil 4.41’de gösterildiği üzere numunenin kırılma başlangıcı bölgesinde karbon taneciklerinin etkisiyle kırılma yüzeylerinde boşluklar oluşmuştur bu durum 23°C’deki Karbon-PTFE yapısı ile paralellik göstermesine rağmen yüzeylerde oluşan boşlukların hacmi daha fazladır. Benzer durum numunenin kırılma yüzeyinde de görülmüştür (Şekil 4.42). Karbon katkısının farklı sıcaklıklarda kırılma tokluğuna etkisi PTFE’nin değişen faz yapısı ile karbon taneciğinin yüksek sıcaklıklardaki davranışı belirlemektedir. EWF parametrelerine göre karbon katkısının 150°C’de kırılma tokluğunu arttırdığı bulunmuştur, bu durum kırılma yüzeylerinde boşlukların geniş hacimde olması ile desteklendiği sonucunu ortaya çıkarmıştır.



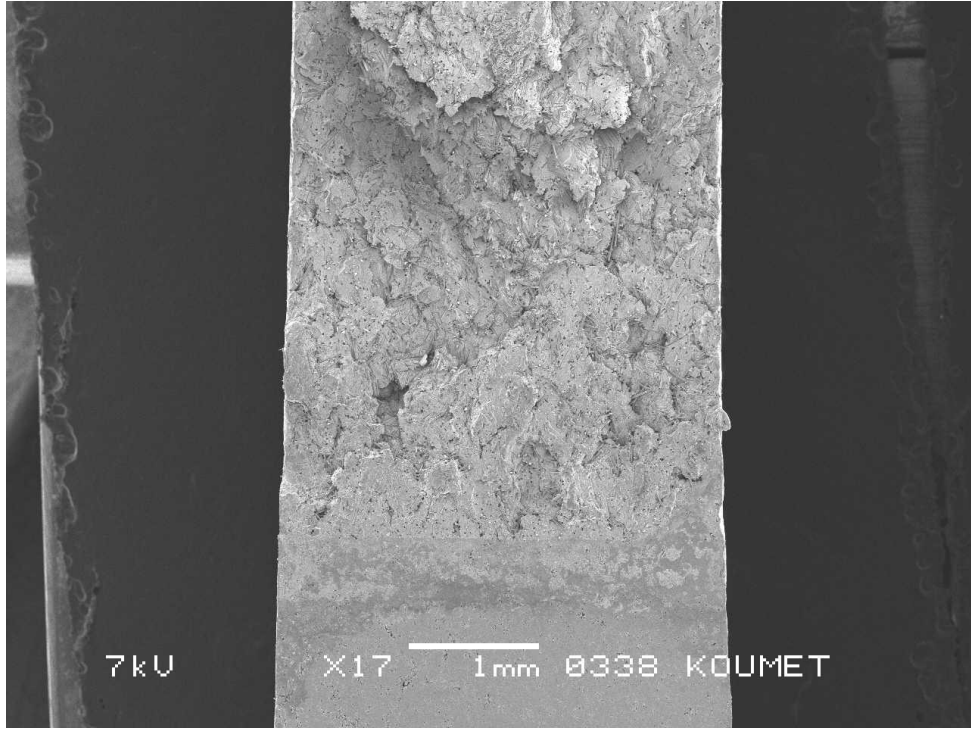
Şekil 4.41: 150°C’de 6 mm kalınlıĝa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi



Şekil 4.42: 150°C’de 6 mm kalınlıĝa sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi

4.9.6. 23°C’de 3,5 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı cam elyaf-PTFE’nin kırılma yüzeyinin TEM ile incelenmesi

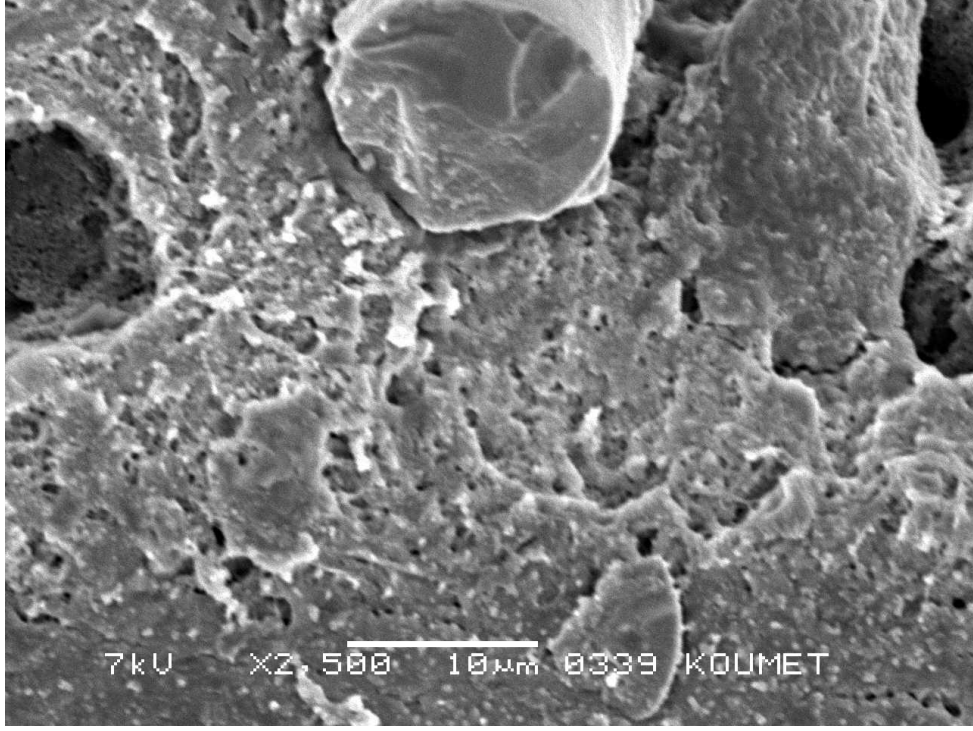
Şekil 4.43’te kırılmanın çentik ucu bölgesi ile kırılma yüzeyini genel açıdan ele alan TEM görüntüsü gösterilmiştir. Darbe yükü ile yönelim etkisi görülmüş olup, numune geometrisinin etkisiyle kırılma yüzeylerinin orta bölgelerinde deformasyonlar daha fazla görülmüştür.



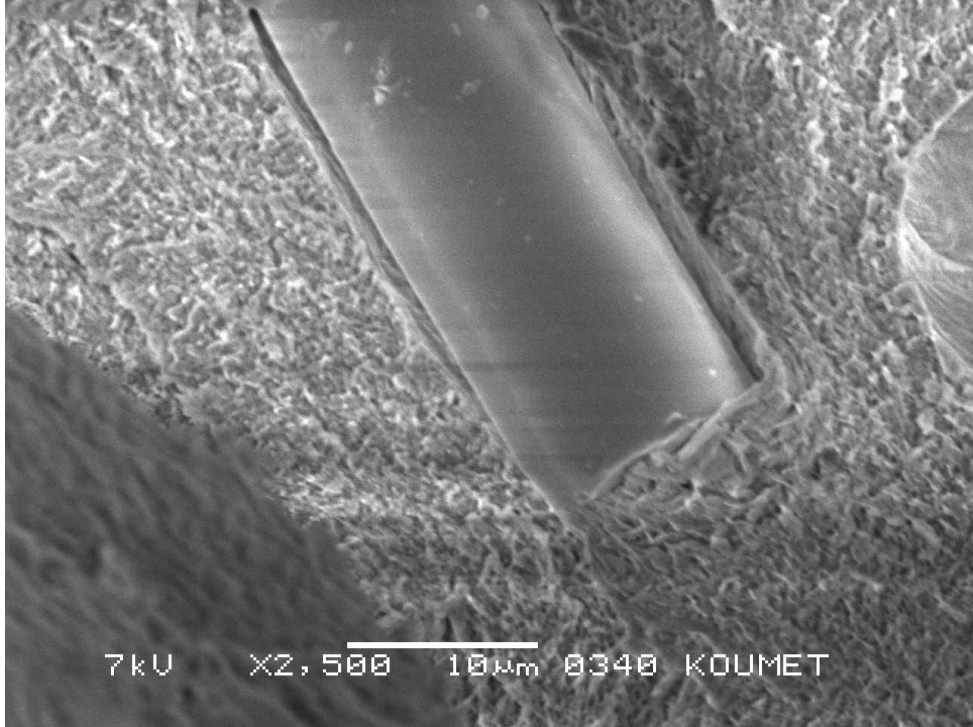
Şekil 4.43: 23°C’de 3,5 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin çentik ucu kırılma bölgesi

Numunenin kırılma başlangıcı bölgesi Şekil 4.44’de gösterilmiştir. Bu bölgeye gelen darbe yükünün etkisiyle cam elyaf taneciklerinin matris içerisinde mikroboşlukların birleşmesiyle oluşan yapıları görülmüştür. Kırılma başlangıcı bölgesinde daha boşluklu bir yapıya sahiptir ve bu durum çatlağın ilerlemesine karşı gösterilen direnci ifade etmektedir.

Numunenin kırılma yüzeyi bölgesi Şekil 4.45’te gösterilmiştir. Bu bölgede kırılmanın başlangıç bölgesine nazaran daha sürekli bir yapı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.44: 23°C’de 3,5 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin kırılma başlangıcı bölgesi



Şekil 4.45: 23°C’de 3,5 mm kalınlığa sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE’nin kırılma yüzeyi bölgesi

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

PTFE malzemesinin farklı katkı malzemeleri, farklı sıcaklık, farklı kalınlık etkilerinin dinamik yükler altında kırılma davranışı, esas kırılma işi metoduyla incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. 23°C’de 6 mm kalınlığında sahip Saf-PTFE numuneleri için spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 7,6005 kJ/m² bulunmuştur. Aynı malzeme ve geometride 150C’de spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 7,1617 kJ/m² bulunmuştur. Malzemenin iki farklı sıcaklığın etkisinde kristal faz yapısındaki değişme kırılma tokluğunun azaldığı gösterilmiştir.
2. 23°C’de 6 mm kalınlığında sahip %40 katkı oranlı Bronz-PTFE numuneleri için spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 5,9262 kJ/m² bulunmuştur.
3. 23°C’de 6 mm kalınlığında sahip %25 katkı oranlı Karbon-PTFE numuneleri için spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 4,7007 kJ/m² bulunmuştur. Aynı malzeme ve geometride 150C’de spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 8,3139 kJ/m² bulunmuştur. PTFE’nin sıcaklık ile değişen kristal yapısının yüksek sıcaklıktaki karbon katkısının etkisiyle kırılma tokluğunun arttığı gösterilmiştir.
4. 23°C’de 3,5 mm kalınlığında sahip %25 katkı oranlı Cam Elyaf-PTFE numuneleri için spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 8,2772 kJ/m² bulunmuştur. Numune geometrisindeki değişimin (numune kalınlığı) etkisiyle, Saf-PTFE’nin 6 mm kalınlığı için bulunan kırılma tokluğu değerinden daha fazla olduğu gösterilmiştir.
5. Tüm veriler ışığında, PTFE malzemesinin tüm kombinasyonlarında dinamik yük altında kırılma davranışını karakterize etmek için darbe EWF yönteminin uygun olduğu görülmüş, sonuçlar tatmin edici bulunmuştur.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada tek tarafından çentik açılmış Charpy darbe numuneleri kullanılmıştır. Yapılacak olan diğer çalışmalar için numuneler Izod darbe testi ile hasar mekanizmaları incelenebilir. Çalışmada darbe hızı 3,5 m/sn olarak uygulanmıştır. Farklı darbe hızlarında kırılma davranışı incelenebilir.

Çalışmada Mod I kırılma türünde dinamik yüklerin etkisi incelenmiştir. Statik veya yarı-statik yükler altında Mod I kırılma türünde EWF parametreleri belirlenebilir. Mod II kırılma türünde Iosipescu testi ve Mod III kırılma türünde yırtılma testi ile EWF parametreleri belirlenebilir.

Darbe deneylerinde deney numuneleri iki farklı kalınlıkta ele alınmıştır (6 mm ve 3,5 mm). Farklı kalınlıklardaki darbe test numuneleri ile düzlem gerilme düzlem genleme geçiş noktaları ve kırılma tokluğuna etkisi incelenebilir.

Deneyleerde kullanılan PTFE malzemesi iki farklı sıcaklıktaki (23°C ve 150°C) kırılma tokluğu etkisi belirlenmiştir. PTFE'nin farklı sıcaklık ve farklı basınçlar altında faz yapısındaki değişmelerin kırılma tokluğuna etkisini belirleyebilmek için deneyler farklı basınç ve farklı sıcaklıklarda yapılabilir.

PTFE'ye katılan farklı dolgu maddelerinin katkı oranlarının değişimi ile kırılma tokluğuna etkisi incelenebilir. Kırılma tokluğunu iyileştirmeye yönelik farklı dolgu maddeleri (elastomerler gibi) belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yılmaz, S., “Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin hidrotermal yaşlandırma etkisi altındaki kırılma davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-43, (2010).
- [2] Ekrem, M., “Cam kumaş takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 9-10, (2006).
- [3] Yıldırım, H., “Plastiklere katılan katkı maddeleri”, *Plastiklere Katılan Katkı Maddeleri Semineri*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, İstanbul, 4-9, (2007).
- [4] Brydson, J.A., “Plastics Materials”, Seventh Edition, *Butterworth Heinemann Publishers*, 363-374, (1999).
- [5] Gül, A., “Yarı mamul politetrafloroetilenin saf ve alaşımlı olarak üretiminde basınç etkisinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2007).
- [6] <http://www.polikim.com.tr/pdf/teflon.pdf> (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2011).
- [7] http://www.coleparmer.ca/techinfo/images/Zeus_Chem_Resistance_img_5.jpg (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2011).
- [8] http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=polytetrafluoroethylene_ptfe_structure.png (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2011).
- [9] Brown, E.N., Dattelbaum, D.M., “The role of crystalline phase on fracture and microstructure evolution of polytetrafluoroethylene (PTFE)”, *Polymer*, 46, 3056-3068, (2005).
- [10] Yayla, P., “Kırılma Mekaniği”, Birinci Baskı, *Çağlayan Kitabevi*, 1-96, (2007).
- [11] Uğuz, A., “Kırılma Mekaniğine Giriş”, Birinci Baskı, *Uludağ Üniversitesi Basımevi*, 1-80, (1996).
- [12] Janssen, M., Zuidema, J., Wanhill, R., “Fracture Mechanics”, Second Edition, *Taylor & Francis e-Library Publishers*, 8-107, (2005).
- [13] O’Dowd, N., “Advanced Fracture Mechanics”, *Imperial College London Department of Mechanical Engineering*, 9-20, (2002).
- [14] http://img.alibaba.com/img/news/10/00/70/90/1256633647053_us_backyard1_1070.jpg (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2011).

- [15] Saouma, V.E., “Lecture Notes in Fracture Mechanics”, *Department of Civil Environmental and Architectural Engineering University of Colorado*, 100-104, (2000).
- [16] Barany, T., Czigany, T., Karger-Kocsis, J., “Application of the essential work of fracture (EWF) concept for polymers, related blends and composites: A review”, *Progress in Polymer Science*, 35, 1257-1287, (2010).
- [17] Williams, J.G., Rink, M., “The standardisation of the EWF test”, *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 1009-1017, (2007).
- [18] Martinez, A.B., Gamez-Perez, J., Sanchez-Soto, M., Velasco, J.I., Santana, O.O., LI Maspocho, M., “The Essential Work of Fracture (EWF) method – Analyzing the Post-Yielding Fracture Mechanics of polymers”, *Engineering Failure Analysis*, 16, 2604-2617, (2009).
- [19] <http://www.composites.northwestern.edu/research/characterization/images/10.36.jpg> (**Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2011**).
- [20] Brown, E.N., Rae, P.J., Orlor, E.B., Gray, G.T., Dattelbaum, D.M., “The effect of crystallinity on the fracture of polytetrafluoroethylene (PTFE)”, *Materials Science and Engineering*, C 26, 1338-1343, (2006).
- [21] Joyce, P.J., “Fracture toughness evaluation of polytetrafluoroethylene”, *Polymer Engineering and Science*, 43, 1702-1714, (2003).
- [22] Rae, P.J., Brown, E.N., “The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in tension”, *Polymer*, 46, 8128-8140, (2005).
- [23] Tjong, S.C., Xu, S.A., Mai, Y.W., “Impact fracture toughness of short glass fiber-reinforced polyamide 6,6 hybrid composites containing elastomer particles using essential work of fracture concept”, *Materials Science and Engineering*, A347, 338-345, (2003).
- [24] Bao, S.P., Tjong, S.C., “Impact essential work of fracture of polypropylene/montmorillonite nanocomposites toughened with SEBS-g-MA elastomer”, *Composites*, A 38, 378-387, (2007).
- [25] Pettarin, V., Frontini, P.M., Eliçabe, G.E., “Optimal ligament lengths in impact fracture toughness estimation by the essential work of fracture method”, *Polymer Testing*, 24, 189-196, (2005).
- [26] Tjong, S.C., Bao, S.P., “Fracture toughness of high density polyethylene/SEBS-g-MA/montmorillonite nanocomposites”, *Composites Science and Technology*, 67, 314-323, (2007).
- [27] Gonzalez, I., Eguiazabal, J.I., Nazabal, J., “On the use of essential work of fracture procedure in the determination of the fracture energy of tough polymeric materials”, *Polymer Testing*, 28, 760-763, (2009).

- [28] Gonzalez, I., Eguiazabal, J.I., Nazabal, J., “Characteristics of the brittle/tough transition of poly(butylene terephthalate)/maleinized poly(ethylene-octene) blends determined by the essential work of fracture procedure”, *Polymer Testing*, 29, 27-32, (2010).
- [29] Wildes, G., Keskkula, H., Paul, D.R., “Fracture characterization of PC/ABS blends: effect of reactive compatibilization, ABS type rubber concentration”, *Polymer*, 40, 7089-7107, (1999).
- [30] Yoo, Y., Shah, R.K., Paul, D.R., “Fracture behaviour of nanocomposites based on poly (ethylene-co-methacrylic acid) ionomers”, *Polymer*, 48, 4867-4873, (2007).
- [31] Zhang, H., Zhang, Z., Yang, J., Friedrich, K., “Temperature dependence of crack initiation fracture toughness of various nanoparticles filled polyamide 66”, *Polymer*, 46, 679-689, (2006).
- [32] Antich, P., Vazquez, A., Mondragon, I., Bernal, C., “Mechanical behaviour of high impact polystyrene reinforced with short sisal sisal fibres”, *Composites*, Part A 37, 139-150, (2006).
- [33] Kudva, R.A., Keskkula, H., Paul, D.R., “Fracture behaviour of nylon 6/ABS blends compatibilized with an imidized acrylic polymer”, *Polymer*, 41, 335-349, (2000).
- [34] Laura, D.M., Keskkula, H., Barlow, J.W., Paul, D.R., “Effect of glass fiber and mealeated ethylene-propylene rubber content on the impact fracture parameters of nylon 6”, *Polymer*, 42, 6161-6172, (2001).
- [35] Laura, D.M., Keskkula, H., Barlow, J.W., Paul, D.R., “Effect of rubber particle size and rubber type on the mechanical properties of glass fiber reinforced, rubber-toughened nylon 6”, *Polymer*, 44, 3347-3361, (2003).
- [36] Pressly, T.G., Keskkula, H., Paul, D.R., “Temperature dependence of the fracture behaviour of nylon 6/ABS blends”, *Polymer*, 42, 3043-3055, (2001).
- [37][http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Graphics /Mechanical/fracture ToughnessX.gif](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Graphics/Mechanical/fracture ToughnessX.gif) (**Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2011**).

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimi, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2005 yılında girdiği Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.