

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLENİN
HİDROTERMAL YAŞLANDIRMA ETKİSİ ALTINDAKİ
KIRILMA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS

Makina Müh. Sinan YILMAZ

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Taner YILMAZ

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLENİN
HİDROTERMAL YAŞLANDIRMA ETKİSİ ALTINDAKİ
KIRILMA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS

Makina Müh. Sinan YILMAZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 7 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 28 Mayıs 2010

Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr.Taner YILMAZ


(.....)

Üye

Yrd.Doç.Dr.A. Armağan ARICI


(.....)

Üye

Doç.Dr.Ö. Ümit ÇOLAK


(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Sahip olduğu üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler nedeniyle çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzeme günümüzde, tekstilden otomotive, ziraatten biyomedikale kadar birçok sektörde yaygın biçimde kullanılmakta, kullanım alanları da gün geçtikçe artmaktadır.

Diğer polimer malzemeler gibi çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzeme de doğası gereği, servis süresi boyunca ortam şartlarından etkilenmekte ve yaşlanma sonucu üstün mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini kaybetmektedir. Özellikle hidrotermal ortam etkisindeki malzemede yaşlanmanın etkileri daha hızlı ve hissedilir olmaktadır. Bu nedenle bu malzemenin hidrotermal yaşlandırma etkisiyle kırılma davranışında meydana gelen değişimler, incelenmesi gereken önemli bir konudur. Ancak plastiklerin kırılma davranışı metaller ve diğer malzemelerden farklıdır ve bu kırılma olayını, klasik kırılma mekaniği terimleri ile açıklamak mümkün değildir. Bu nedenle son yıllarda popülaritesi giderek artmakta olan bir yöntem olarak esas kırılma işi metodu, polimer malzemelerin kırılma davranışını inceleme konusunda ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemenin hidrotermal yaşlandırma etkisi altındaki kırılma davranışını incelemek üzere esas kırılma işi metodu uygulanmıştır.

Yüksek lisans öğrenimime başlamamda vesile olan değerli hocam Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e, deneyler ve deney sonrası çalışmalarım esnasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Arş. Gör. Onur ÇOBAN ve Arş. Gör. M. Özgür BORA'ya teşekkür ederim. Ayrıca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

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

Tez konusunun belirlenmesi ve deneysel çalışmaların yürütülmesi süresince çalışmaya müdahil olan, görüşleri ve direkt katkılarıyla bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan değerli hocam, Yrd. Doç. Dr. A. Armağan ARICI'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bilgi birikimi ve enerjisiyle motive eden, her konuda yol gösteren, titizliğiyle örnek olan ve hiçbir konuda yardımını esirgemeyen, danışmanım, Yrd. Doç. Dr. Taner YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER.....	viii
ÖZET	x
İNGİLİZCE ÖZET.....	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1.1. Termosetler	7
2.1.2. Termoplastikler	8
2.1.2.1. Polietilen (PE) ve çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE).....	9
2.2. Kırılma Mekaniği.....	11
2.2.1. Giriş.....	11
2.2.2. Lineer elastik kırılma mekaniği	14
2.2.3. Elasto-plastik kırılma mekaniği	22
2.2.4. Elasto-plastik kırılma tokluğu deneyleri	24
2.2.4.1 Çatlak ucu açılma miktarı metodu (COD)	25
2.2.4.2. J-integral metodu.....	25
2.2.5. Esas kırılma işi metodu (EWF)	28
2.2.5.1. Giriş.....	28
2.2.5.2. EWF yönteminin teorisi	30
2.2.5.3. Esas kırılma işi değerinin COD yöntemiyle hesaplanması.....	36
2.2.5.4. J-integral metodu ile EWF metodu arasındaki ilişki.....	36
2.2.5.5. Düzlem dışı kırılma durumu (yırılma) için EWF metodu.....	38
2.3. Literatür Çalışması	40
BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM	44
3.1. Kullanılan Malzeme	44
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	44
3.3. Deney Numunelerinin Kodlanması.....	46
3.3. Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi	47
3.4. Çekme Testi	47
3.5. Görsel İnceleme	49
3.5.1. Makro inceleme.....	49
3.5.2. Fraktografik inceleme	49
3.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi.....	50
BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
4.1. Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Malzemenin (ÇYMAPE) Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi	53
4.1. Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Malzemenin (ÇYMAPE) Hidrotermal Yaşlandırma Etkisi Altındaki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi	63
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90

5.1. Sonuçlar	90
5.2. neriler	91
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Polietilenin kimyasal yapısı	9
Şekil 2.2: F kuvveti etkisi altındaki levha	16
Şekil 2.3: Çatlak ilerleme modları; I- Açılma modu, II-Kayma modu, III-Yırtılma modu	18
Şekil 2.4: Çatlak ağzı gerilme dağılımı	20
Şekil 2.5: Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikro çatlama ve craze (sır çatlağı) sonucu oluşan deformasyon	22
Şekil 2.6: Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölge	23
Şekil 2.7: Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi	24
Şekil 2.8: Çatlak ucu açılma miktarı	25
Şekil 2.9: J-integral kontrolü	26
Şekil 2.10: J_{IC} 'yi elde etmek için test prosedürü	28
Şekil 2.11: Çatlak ucu deformasyon bölgesi, (a) gevrek malzeme, (b) sünek malzeme	29
Şekil 2.12: Çift kenardan çentikli çekme numunesi (DENT) için iç kırılma proses bölgesi (IFPZ) ve dış plastik deformasyon bölgesi (OPDZ)	31
Şekil 2.13: EWF yönetiminde kullanılan çift kenardan çentikli (DENT) ve tek kenardan çentikli (SENT) deney numuneleri	32
Şekil 2.14: Spesifik kırılma işi w_f 'nin L ile değişimi	33
Şekil 2.15: Yük uzama eğrisinde kırılma işi parametrelerinin gösterimi (DENT numune)	35
Şekil 2.16: Düzlem dışı kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan pantolon tipi deney numunesi	38
Şekil 3.1: Deneylerde kullanılan SENT numunelerin boyutları	45
Şekil 3.2: Deney numunelerinin kodlanması	46
Şekil 3.3: Instron 4411 universal elektromekanik test cihazı	48
Şekil 3.4: JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobu	50
Şekil 3.5: Mettler Toledo DSC1 analiz cihazı	50
Şekil 4.1: Bazı ilk hal numunelerine ait yük-uzama eğrileri	55
Şekil 4.2: Tüm ilk hal numuneleri için yük-uzama eğrileri	56
Şekil 4.3: İlk hal numunelerinde spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi	57
Şekil 4.4: İlk hal numunelerinde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi	58
Şekil 4.5: İlk hal numunelerinde boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi	59
Şekil 4.6: İlk hal numunelerinde spesifik kırılma işi parametrelerinin L boyu ile değişimi	60
Şekil 4.7: İlk hal numunelerinde kopma uzamasının L boyu ile değişimi	61
Şekil 4.8: İlk hal numunelerinde net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimi ..	62

Şekil 4.9: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış bazı numunelere ait yük-uzama eğrileri.....	64
Şekil 4.10: İlk hal ve 90. gün numunelerine ait yük-uzama eğrileri.....	64
Şekil 4.11: $L= 5$ mm olan bazı numunelerde hidrotermal yaşlandırmanın yük-uzama eğrilerine etkisi	65
Şekil 4.12: $L= 20$ mm olan bazı numunelerde hidrotermal yaşlandırmanın yük-uzama eğrilerine etkisi	66
Şekil 4.13: Hidrotermal ortamda kalan numunelerde % ağırlık artışının zamanla değişimi	67
Şekil 4.14: Soldan sağa doğru sırasıyla 0, 7, 60 ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerin çekme testi esnasında çekilmiş fotoğrafları	67
Şekil 4.15: İlk hal ve 90. gün numunelerine ait fotoğraflar	68
Şekil 4.16: $L= 5$ mm olan numunelere hidrotermal yaşlandırma sürecinin fiziksel etkisi	69
Şekil 4.17: $L= 20$ mm olan numunelere hidrotermal yaşlandırma sürecinin fiziksel etkisi	70
Şekil 4.18: İlk hal numunesinin kırılma yüzeyinin genel görünümü.....	71
Şekil 4.19: 15 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü.....	71
Şekil 4.20: 30 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü.....	71
Şekil 4.21: 60 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü.....	72
Şekil 4.22: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü.....	72
Şekil 4.23: İlk hal numunesinin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı	73
Şekil 4.24: 15 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı.....	73
Şekil 4.25: 30 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı.....	74
Şekil 4.26: 60 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı.....	74
Şekil 4.27: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı.....	75
Şekil 4.28: 60 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oluşan geçiş bölgesinin TEM fotoğrafı..	75
Şekil 4.29: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oluşan geçiş bölgesinin genel görünümü	76
Şekil 4.30: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oluşan geçiş bölgesinin TEM fotoğrafı..	76
Şekil 4.31: Farklı sürelerde yaşlandırmaya maruz kalmış numunelere ait DSC grafiği	77

Şekil 4.32: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde spesifik toplam kırılma işinin L boyu ile değişimi	78
Şekil 4.33: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi.....	79
Şekil 4.34: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi.....	79
Şekil 4.35: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde spesifik kırılma işi parametrelerinin L boyu ile değişimi.....	80
Şekil 4.36: İlk hal numunelerinde ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi..	81
Şekil 4.37: İlk hal numunelerinde ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi	81
Şekil 4.38: İlk hal numunelerinde ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi	82
Şekil 4.39: Spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi	83
Şekil 4.40: Akma için spesifik kırılma işi değerinin L ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi	84
Şekil 4.41: Boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi	84
Şekil 4.42: Hidrotermal yaşlandırma sürecinin spesifik esas kırılma işi parametrelerine etkisi	85
Şekil 4.43: Hidrotermal yaşlandırma sürecinin spesifik plastik deformasyon işi parametrelerine etkisi	86
Şekil 4.44: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde kopma uzamasının L boyu ile değişimi	87
Şekil 4.45: İlk hal ve 90. gün numunelerinde kopma uzamasının L boyu ile değişimi	87
Şekil 4.46: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimi.....	88
Şekil 4.47: Net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi	89

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	8
Tablo 2.2: Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	9
Tablo 2.3: ÇYMAPE malzemenin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri.....	11
Tablo 3.1: Deneyde kullanılan ÇYMAPE malzemenin mekanik özellikleri.....	44
Tablo 3.2: Hidrotermal yaşlandırma süresi ve farklı L uzunlukları için numune sayısı	45
Tablo 4.1: Yaşlandırma öncesi numunelere ait çekme testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri	53
Tablo 4.2: ÇYMAPE malzemenin yaşlandırma öncesi esas kırılma işi parametreleri	61
Tablo 4.3: DSC analizi ile elde edilen erime entalpisi değerleri ve Denklem 3.1'den elde edilen göreceli kristalleşme derecesi	77

SİMGELER

- σ : Gerilme (MPa)
 σ_y : Akma gerilmesi (MPa)
 σ_n : Maksimum net kesit gerilmesi (MPa)
 σ_{zz} : Eksenel gerilme bileşeni (MPa)
 τ : Kayma gerilmesi (MPa)
 ϵ : Gerinim (genleme) (mm/mm)
 E : Elastisite modülü (GPa)
 U : Enerji (kJ)
 G : Enerji boşalma miktarı (kJ/m²)
 G_{IC} : Kritik enerji boşalma miktarı (kJ/m²)
 K : Gerilme şiddeti faktörü (MPa \sqrt{m})
 K_{IC} : Kritik gerilme şiddeti faktörü (MPa \sqrt{m})
 K_I : Mod I gerilme şiddeti faktörü (MPa \sqrt{m})
 K_{II} : Mod II gerilme şiddeti faktörü (MPa \sqrt{m})
 K_{III} : Mod III gerilme şiddeti faktörü (MPa \sqrt{m})
 C : Komplians (mm/N)
 R : Çatlak ilerleme direnci (kJ/m²)
 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 (mm)
 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/m²)
 w_e : Spesifik esas kırılma işi (kJ/m²)
 w_p : Spesifik plastik deformasyon işi (kJ/m²)
 w_y : Akma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m²)
 w_{nt} : Boyun verme-yırtılma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m²)
 w_{Tf} : Yırtılma için spesifik toplam kırılma işi (kJ/m²)
 w_{Te} : Yırtılma için spesifik esas kırılma işi (kJ/m²)
 w_{Tp} : Yırtılma için spesifik plastik deformasyon işi (kJ/m²)
 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
 α'' : Yırtılma kırılması için plastik bölge şekil faktörü
L : Çentiksiz bölgenin uzunluğu (ligament length) (mm)
 L_g : Çentiksiz bölgenin gerçek uzunluğu (mm)
 V_p : Plastik deformasyon bölgesinin hacmi (mm³)
 r_p : Çatlak ucu plastik bölgenin yarıçapı (mm)
W : Numune genişliği (mm)
B : Numune kalınlığı (mm)
m : Plastik sınırlandırma faktörü
 e_b : Kopma uzaması (mm)
 h_b : Plastik deformasyon bölgesinin yüksekliği (mm)
 P_{max} : Yük-uzama eğrisindeki maksimum yük (N)
 T_g : Camsı geçiş sıcaklığı (°C)

Kısaltmalar

- COD : Crack opening displacement
CTOD : Crack tip opening displacement (çatlak ucu açılma mesafesi)
ÇYMAPE : Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen
DENT : Double edge notched tension (çift kenardan çentikli çekme)
DSC : Differential scanning calorimetry
DYPE : Düşük yoğunluklu polietilen
EPKM : Elasto plastik kırılma mekaniği
EWF : Essential work of fracture (esas kırılma işi)
GŞF : Gerilme şiddeti faktörü
IFPZ : Inner fracture process zone (iç kırılma proses bölgesi)
ISO : International Organization for Standardization
JIC : J Integral Control (J integral kontrolü)
LEKM : Lineer elastik kırılma mekaniği
OPDZ : Outer fracture process zone (dış kırılma proses bölgesi)
OYPE : Orta yoğunluklu polietilen
PA : Polyamide
PE : Polyethylene
PS : Polystyrene
PTFE : Polytetrafluoroethylene (Teflon)
PVC : Polyvinylchloride
SENT : Single edge notched tension (tek kenardan çentikli çekme)
TEM : Taramalı elektron mikroskobu
UHMWPE : Ultra high molecular weight polyethylene
YYPE : Yüksek yoğunluklu polietilen

ÇOK YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLENİN HİDROTERMAL YAŞLANDIRMA ETKİSİ ALTINDAKİ KIRILMA DAVRANIŞI

Sinan YILMAZ

Anahtar Kelimeler: Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen, Hidrotermal yaşlandırma, Kırılma davranışı, Esas kırılma işi metodu.

Özet: Bu çalışmada, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemenin (ÇYMAPE) hidrotermal yaşlandırma öncesi ve hidrotermal yaşlandırma etkisi altındaki kırılma davranışı, esas kırılma işi (essential work of fracture-EWF) metoduyla incelenmiştir.

EWF parametrelerinin saptanması için farklı çentik uzunluklarına sahip tek kenardan çentikli (single edge notched tension-SENT) deney numuneleri kullanılmıştır. Sabit deformasyon hızında numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testi sonucu elde edilen veriler kullanılarak malzemenin esas kırılma işi parametreleri hesaplanmış ve sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Çekme testi ile hasara uğratılan SENT numunelerin kırılma yüzeyleri, Taramalı Elektron Mikroskopunda (TEM) incelenmiştir.

Hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerin erime sıcaklığı değerleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre çalışmalarıyla ölçülmüş ve malzemenin ısıl özelliklerinde meydana gelen değişimler tespit edilmiştir.

Hidrotermal yaşlandırmanın ÇYMAPE malzemenin kırılma davranışına etkisini incelemek üzere, farklı çentik uzunluklarına sahip SENT tipi deney numuneleri hidrotermal ortama maruz bırakılmış ve sonuçlar EWF parametreleri yardımıyla açıklanmıştır.

FRACTURE BEHAVIOR OF HYDROTHERMALLY AGED ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE

Sinan YILMAZ

Keywords: Ultra high molecular weight polyethylene, Hydrothermal aging, Fracture behavior, Essential work of fracture.

Abstract: In this study, the toughness of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) before and after hydrothermal aging was investigated by the essential work of fracture (EWF) method.

Single edge notched tension (SENT) specimens with various ligament lengths were used to determine the EWF parameters. Tensile tests were performed at constant deformation speed. EWF parameters were evaluated by using tensile test results and represented graphically.

After tensile tests, the fracture cross sections of SENT specimens were investigated by Scanning Electron Microscope (SEM).

Melting temperature values of hydrothermally aged samples were measured by Differential Scanning Calorimetry studies and variations of material's thermal properties were determined.

SENT type specimens were exposed to hydrothermal environment in order to determine the effect of hydrothermal aging on UHMWPE and the results were explained by the EWF parameters.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bir malzemenin mühendislik malzemesi olarak kullanılıyor olması için bu malzemenin hasar mekanizmalarının çok iyi bilinmesi gerekir. Bu nedenle polietilen malzemenin kırılma davranışının incelenmesi, bu malzemedeki yapılan mühendislik yapılarının güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Gerek düşük maliyeti, gerekse kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle polietilen malzeme birçok alanda mühendislik malzemesi olarak tercih edilmektedir. Özellikle kompozitlerde matris malzemesi, otomobil gövde panelleri, mutfak eşyaları, ambalaj malzemeleri, havacılık-uzay sanayi ve tıpta biyomedikal malzeme olarak polietilen, yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

Polimer malzemeler endüstrideki kullanım koşullarına bağlı olarak çeşitli dış etkilere maruz kalmaktadırlar. Malzemenin kullanıldığı çevrenin şartlarına bağlı olarak bu malzemeler dış ortamlarla etkileşime girmekte ve bunun sonucu olarak çeşitli kimyasal ve fiziksel değişimlere maruz kalmaktadırlar. Polimer malzemelerin su veya çeşitli sıvılarla uzun süreli etkileşimleri sonucunda malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri değişime uğrar. Bu olaya genel olarak yaşlanma (ageing-aging) denilir. Birçok yaşlanma türü olmakla birlikte bunlardan en önemlisi hidrotermal yaşlanmadır ve malzeme özelliklerinin hidrotermal yaşlandırma etkisiyle değişimi, bilinmesi gereken bir mühendislik olayıdır.

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, elemanın yapısal bütünlüğü için mühendis, çatlak veya çatlakların nasıl ve ne zaman daha da büyüyeceğini, ilerleyebileceğini ve parçanın bu şekilde hasara uğrayacağını bilmelidir. Bu soruları cevaplamaya yardımcı olan teknoloji Kırılma Mekaniğidir [1].

Gevrek malzemelerin kırılma davranışlarının açıklanmasında kırılma mekaniğinin klasik yaklaşımı çok başarılı sonuçlar elde etmiş olsa da sünek malzemeler için aynı durum söz konusu değildir. Zira sünek malzemelerde çatlak ucunda önemli derecede plastik deformasyon oluşmakta ve bunun sonucu olarak klasik kırılma mekaniği denklemleri kırılmayı karakterize etmekte yetersiz kalmaktadır.

Sünek malzemelerin kırılma davranışlarını açıklamak için, çatlak ucu açılma miktarı metodu (CTOD), J-integrali metodu ve esas kırılma işi metodu (EWF) 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 başlanmıştır.

Bu çalışmada çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemenin (ÇYMAPE) kırılma davranışı incelenmiştir. Malzemenin kırılma davranışını incelemek için esas kırılma işi metodu (EWF) benimsenmiştir. Esas kırılma işi metoduna uygun olarak hazırlanmış olan deney numuneleri sabit hızda eksenel çekme yükü ile kırılmış, bulunan deney sonuçları esas kırılma işi metodu parametrelerine dönüştürülerek grafiksel olarak gösterilmiştir. Ayrıca kırılma davranışının hidrotermal yaşlandırma ile değişimi de incelenmiş bulunan sonuçlar yaşlandırma öncesi ve sonrası kırılma davranışını karakterize etmek için grafiksel olarak sunulmuştur.

Bölüm 2’de polimer malzemelerin özellikleri, sınıflandırılması, kullanım alanları gibi genel konulara değinilmiştir. Kırılma olayının anlaşılması için kullanılan yöntemler ve deneylerin açıklandığı kırılma mekaniğinden de yine bu bölümde bahsedilmiştir. Esas kırılma işi metodunun uygulanabilirliği ve geçerliliği ve bu konuda bugüne kadar yapılan bazı çalışmalarla ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’te deneyde kullanılan ÇYMAPE malzemenin özellikleri, deney numunelerinin hazırlanması, deney parametrelerinin belirlenmesi ve hidrotermal yaşlandırma ile ilgili bilgi verilmiştir.

Bölüm 4, hidrotermal yaşlandırma öncesi ve yaşlandırma sonrası kırılma davranışını incelemek üzere iki alt başlığa ayrılmıştır. Deneylelerden edilen sonuçlar esas kırılma işi metodu parametrelerine dönüştürülerek grafiksel olarak sunulmuş ve esas kırılma işi metodu yaklaşımıyla yorumlanmıştır.

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

BÖLÜM 2. GENEL KISIMLAR

2.1. Plastik Malzemeler

Plastik sanayi'nin, nitroselülozun ticari üretimi ile (1868) başladığı kabul edilir. Bu ise yaklaşık 130 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 gerçekleştirilmiştir. 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. Bunlar polimer, metal ve seramik malzemeler olarak sıralanabilir. Bu üç temel malzeme türünün şu temel farklı özellikleri vardır: metaller elektrik ve ısıyı iyi iletirler, parlaktırlar, genellikle serttirler, elektron vererek tepkimeye girerler, yoğunlukları 1 g/cm^3 'den yüksektir. Polimerler elektrik ve ısıyı iyi iletmezler, genellikle saydam veya donuk görünümlüdürler, yoğunlukları yaklaşık 1 g/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 (plastik yılı).

Günümüzde, geliştirilmiş polimer malzemeler, pek çok metal malzeme yerine tercihen kullanılabilir 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].

19. yy sonlarında J. Hyatt tarafından keşfedilen yarı sentetik bir polimer olan selüloitten itibaren önemini giderek arttıran plastikler günümüzde sadece mutfak donatımı ve oyuncaklarda kullanım alanı bulmamış, birçok alanda metallere ve seramiklerle rekabet edebilen önemli mühendislik malzemeleri haline gelmiştir.

Sağlamlık, hafiflik, kolay şekillendirilebilme ve ucuzluk özelliklerine sahip olan plastikler sanayide tesis kurma, gıda, parça imalatı, ulaşım, sağlık, kablo yalıtımı, şişe ve boru imalatı, tekstil gibi birçok teknolojik alanda kullanılmaktadır.

Günümüzde büyük oranda petrol endüstrisine dayalı olan plastik sektöründe hızlı bir gelişme yaşanmakta ve yeni plastik türleri kullanıma sunulmaktadır. Ayrıca; grafit, cam ve karbon elyafları ile karıştırılması neticesi elde edilen yeni ürünler, plastiklerin gelişiminde önemli bir aşama olmuştur. Bu tür malzemelerin mekanik özellikleri metallere yaklaşımıştır. Özellikleri geliştirilen plastik malzeme çeşitleri taşıdıkları avantajlar nedeniyle diğer mühendislik malzemelerine tercih edilerek, gelecekte de insan yaşamına önemli katkılarda bulunacaktır [3].

Plastik malzeme molekülleri karbonun az miktarda metal olmayan malzemelerle yaptıkları bileşiklerdir. Bu maddeler genellikle oda sıcaklığında gaz halindedir.

Propan (C_3H_8) gibi tanınmış hidrokarbon bileşikleri sabit büyüklükte olan moleküllere sahiptir. Bunların tersine plastik malzemeler büyük zincir veya ağ moleküllerinden meydana gelirler. Farklı genişleme şekillerine sahip olduklarından sadece ortalama bir molekül kütlesi (molekül ağırlığı) belirlenebilir.

Plastik malzemeler yüksek moleküler bileşiklerdir; polimerler olarak da adlandırılırlar. Zincir veya ağ şeklindeki moleküllerine makro moleküller denir. Makro moleküller monomer denilen tek moleküllerden oluşurlar. Makro moleküller kimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana gelirler.

Birçok çeşidi olan plastiklerin hangi gruptan olduğunu anlamak çok defa zor bir iştir. Aynı plastik çeşitli formlarda şekillendirilmiş olabilir. Aynı tür bir plastik, farklı ticari adlar alabilir. Bununla beraber çok çeşitli ad ve şekilleri bulunan plastikler,

termal özellikleri bakımından Termoplastikler ve Termoset plastikler olarak iki ana grupta toplanabilirler.

Plastik malzemelerin özellikleri metallerinkiyle karşılaştırılırsa, büyük farklar görülür. Metal atomları tamamlanmamış bir elektron kabuğuna (dış kabuk) sahip olduklarından, kimyasal maddelere karşı dayanıksızdırlar. Plastik malzemeler ise kimyasal bileşikler olarak moleküler yapıdadır ve molekülleri doymuştur. Atomları ise kimyasal bağlar ile soy gaz karakterine sahip olmuşlardır. Bu nedenle birçok kimyasal maddeye karşı dayanıklıdırlar.

Plastik malzemelerin değişik olan bağ ve yapı türü, fiziksel davranışının metalik malzemelere göre tamamen farklı olması sonucunu doğurur [4].

Polimer zincirlerinden oluşan bir kütle (polimer madde) ısı şeklinde enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde artışlar meydana gelir. Başlangıçta polimer zincirinin küçük parçalarında oluşan bu hareketlilik, ısı arttıkça giderek büyük parçaları kapsar ve tümüne yayılır. Bu konumda polimer zincirleri birbiri üzerinden kaymaya başlayacak ve katı polimer, eriyerek akacaktır. Polimerleri şekillendirirken; polimer malzemenin belli sıcaklık değerlerinde sıvı hale geçmesi olayından yararlanır. Böylece karışım, daha sonra ters işlemle (sıcaklığın azaltılması ile) soğutulup katılaştırılmakta ve plastik parça kalıptan çıkartılarak kullanıma sokulabilmektedir. Bazı plastiklerde istenildiğinde bu katı plastik, tekrar ısıtılıp eritilebilir-soğutulup katılaştırılabilir ve tamamen fiziksel ve tersinir olan bu dönüşüm tekrarlanabilir. Bu tür plastiklere; (Latince ısı ile şekillendirilebilen anlamına gelmek üzere) "termoplastik" adı verilmektedir. Çok yaygın kullanılan polimerlerin hemen hepsi (PE, PVC, PS gibi) termoplastiktir.

Bunun yanı sıra, ısı ile farklı bir davranış gösteren ikinci grup polimer ailesi de bulunmaktadır. Isı ile bir kez şekil verildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozunan bu grup "termoset" polimerlerdir ve bunlar ısıtıldıklarında yumuşamaz ve erimezler. Isının yükselmesine karşın ilk katı konumlarını korurlar. Ancak polimer sistemini oluşturan polimer zincirlerindeki bağlar, ısıtmaya karşı bir sınır değere kadar direnebilir. Belli bir yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında bağlar kopabilir ve

termoset malzeme bozunarak tersinmez şekilde tepkime verir. Yani termoset plastikler, klasik yöntemle (ısıtılıp soğutularak) şekillendirilemezler. Bunlar, özel olarak şekillendirilecekleri kalıpta tepkimeye sokulup termoset malzeme üretimi sağlanabilir. Bazı özel uygulamalarda (elektrik prizleri ve malzemeleri gibi) termoset malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Isıtılarak yumuşatılıp ergitilemeyen bu tür polimer maddelere fenol-formaldehit veya üre-formaldehit polimerleri (fenolik polimerler) ve çapraz bağlı polietilen örnek olarak verilebilir. Fenolik polimerler, genellikle, başlangıçta, lineer ve akışkan bir kademede elde edilirler ve daha sonra, kimyasal maddeler, ışınma, sıcaklık ve/veya basıncın etkisiyle çapraz bağlanarak sertleştirilip, son kullanım şekillerine sokulurlar.

Polimerlerin ticari ve teknik bakımından önemli olmasının sebepleri şöyle sıralanır;

- Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluğa sahip olmasının yanı sıra, dayanım/yoğunluk oranının iyi olması,
- Yüksek korozyon direnci ve düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
- Polimerleri üretmek için daha az enerjiye gerek duyulması,
- Polimerlerin yaygın şekilde kompozit malzemelerde kullanılmasıdır.

Polimerlerin bu avantajlarına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır. Bunları da şöyle özetleyebiliriz;

- Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahip olmaları,
- Düşük elastik modüle sahip olmaları,
- Sınırlı yükleme şartlarına sahip olmalarıdır [2].

2.1.1. Termosetler

Termosetler, küçük monomer moleküllerinin kimyasal reaksiyonlarla birbirine bağlı, uzun polimer moleküller haline gelmesi ile ortaya çıkarlar. Bu reaksiyonların gerçekleşebilmesi için katalizörlere, iyileştirme malzemelerine, ısıya ve mikrodalga gibi dış etkenlere ihtiyaç vardır.

Kovalent bağların üç boyutlu olarak örgü şeklinde ortaya çıkması ile termoset malzemeler oldukça katıdırlar. Verilen şekil kalıcıdır. Bu nedenle kimyasal reaksiyon

işlemi geri dönüşsüzdür. Bundan dolayı yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmaları bile yumuşamayı sağlayamaz. Termoset reçineler kırılğandır. Takviye malzemesi olarak nadiren kullanılırlar. İyi sünme direncine sahiptirler. Sıcaklık artıkça mukavemeti ve elastisite modülü azalır. Kimyasal dirençleri oldukça iyi malzemelerdir. Tablo 2.1’de bazı termoset reçinelerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1: Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [2]

Malzeme Özellikleri	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluğu (g/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastik Modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme Dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma Uzaması (%)	3-6	42	1,5-2,0
Isıl İletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme (1/°C)	45-65	55-100	68

2.1.2. Termoplastikler

Termoplastik reçineler, oda sıcaklığında katı haldedirler (Tablo 2.2). Bunlarda çizgisel molekül zincirleri birbirine zayıf metallar arasında Van der Waals bağları ile bağlanırlar. Rijit bir yapıya sahip değildirler. Isıtılırsa yumuşar ve erirler. Soğutulunca yeniden sertleşirler. Sıcaklık artıkça viskoziteleri düşer. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termoset’e göre daha zordur. Birçok cinsleri olmasına rağmen en yaygın olarak kullanılanları şunlardır;

- Polietilen (PE),
- Polipropilen,
- Selülozidler,
- Naylonlar (Poliamitler) (PA),
- Polikarbonatlar,
- Polivinilklorürler (PVC),
- Akrolinitrin-butadin-strin (ABS),
- Teflon (PTFE: politetrafloretilen),
- Termoplastik Polyesterler.

Tablo 2.2: Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [2]

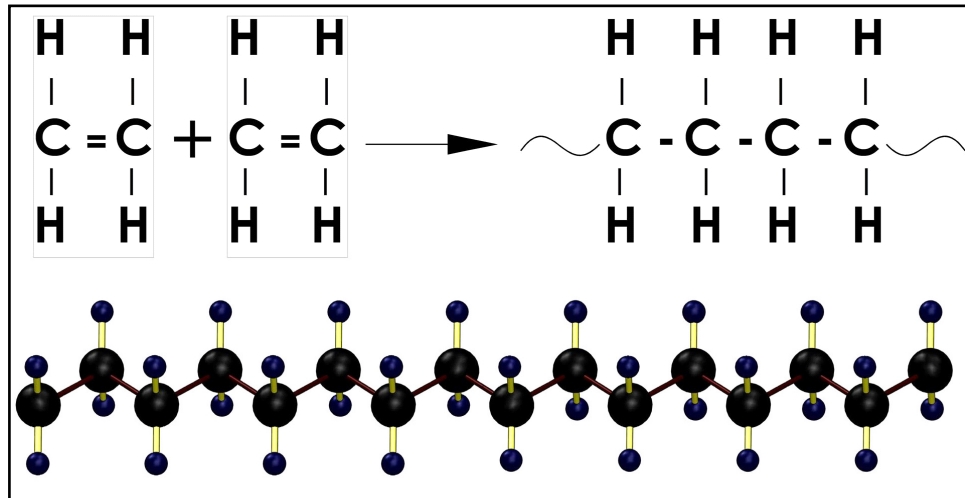
Malzeme Özellikleri	Akrilik	ABS	PTFE	PA
Yoğunluğu (g/cm ³)	1,2	1,6	2,2	1,14
Elastik Modülü (MPa)	2800	2100	425	700
Çekme Dayanımı (MPa)	55	50	20	70
Kopma Uzaması (%)	5	10-30	100-300	-
Ergime Derecesi (°C)	200	-	327	260

Termoplastik reçineler, termoset reçinelere göre daha ucuzdurlar. Bu nedenle daha caziptirler. Sünme dirençleri (rezistansları) termosetlere göre oldukça düşüktür. Yapısal uygulamalarda bundan dolayı ciddi bir endişe taşırlar.

Termoplastikler, neme karşı da oldukça iyi direnç gösterirler. Düşük yoğunluk, düşük iletkenlik, ışık geçirmezlik, düşük ısı iletim özellikleri termoplastiklerin çekiciliklerini arttıran önemli nedenlerdendir [2].

2.1.2.1. Polietilen (PE) ve çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE)

Polietilen, etilenden, etilenin polimerizasyonu sonucu elde edilen, (C₂H₄)_n genel formülüyle gösterilen, termoplastik bir polimerdir. Polietilen malzemenin kimyasal yapısı Şekil 2.1’de gösterilmiştir [5].



Şekil 2.1: Polietilenin kimyasal yapısı [6]

Polietilen ilk olarak 1930'lu yıllarda sentez edildi. Daha sonra çeşitli proses metotları ve kristal sistemleri kullanılarak değişik uygulamalara yönelik polietilen türleri geliştirilmiştir. PE'nin ilk uygulamaları askeri amaçlı olmuştur. Yeraltı boruların kaplanması ve radar yalıtımı gibi birçok sahada askeri amaçlı kullanımı II. Dünya savaşında önemli bir avantaj sağlamıştır. PE'nin en yaygın sınıflandırma biçimi yoğunluğa göre yapılanıdır. Yoğunluğuna göre dört ana grupta toplanır [7];

- 0,910 – 0,925 g/cm³ Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE)
- 0,926 – 0,940 g/cm³ Orta Yoğunluklu Polietilen (OYPE)
- 0,941 – 0,959 g/cm³ Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)
- 0,960 ve üzeri g/cm³ Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (ÇYMAPE).

Son yıllarda, endüstride polimer ve polimer kompozitlerin kullanımı hızla artmaktadır. Makine tasarımında polimer esaslı malzemeler, hafif olmaları, kimyasallara dayanıklı olmaları, kolay işlenebilmeleri ve geri kazanılabilmeleri gibi özelliklerinden dolayı metallere göre daha çok tercih edilmektedir. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE), aşınma ve sürtünme uygulamalarında en çok tercih edilen termoplastik polimerlerden birisidir. ÇYMAPE (ultra high molecular weight polyethylene-UHMWPE), yüksek tokluk, iyi kimyasal direnç, yüksek aşınma ve darbe direnci, düşük sürtünme katsayısı ve düşük su absorbe etme gibi özelliklere sahiptir [8].

Düşük basınçta üretilen ÇYMAPE, konvansiyonel polietilen gibi metilen (CH₂) moleküllerinden oluşuyor olsa da konvansiyonel polietilene göre çok farklı ve üstün özellikleri vardır. Özellikle üstün tribolojik özelliklere (düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, kendi kendini yağlama kabiliyeti) sahiptir. Bunun yanında yüksek kimyasal kararlılığa sahip olması ve biyo uyumlu olması nedeniyle 1962 yılından itibaren yapay kalça ve diz protezi yapımında kullanılmaya başlanmıştır. 1988 yılından bu yana da kalça protezinde oynar eklem elemanı olarak kullanılan tek malzemedir. Özellikle son 10 yıldır çapraz bağlı ve ısı işlem görmüş ÇYMAPE malzemenin kalça ve diz protezlerinde kullanımı artarak devam etmektedir. Ayrıca mükemmel korozyon direnci, su geçirmezlik özelliği, adezyon direnci ve kendi kendini yağlama özelliği sayesinde tekstil endüstrisinde, taşımacılıkta, zirai

alanlarda, gıda sektöründe ve kağıt sanayinde bazı makinelerin bazı parçaları için vazgeçilmez bir malzemedir. Mühendislik malzemeleri içerisinde en yüksek şok direncine sahip olan malzemedir.

ÇYMAPE malzemenin tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ışınlama ile çapraz bağ oluşturma, iyon implantasyon ve kimyasal yapıya bazı modifiye edici maddelerin eklenmesi yöntemleri kullanılır [9-13].

ÇYMAPE malzemeye ait bazı genel özellikler Tablo 2.3'te görülmektedir.

Tablo 2.3: ÇYMAPE malzemenin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri [14]

ÖZELLİK	BİRİMİ	DEĞERİ	ÖZELLİK	BİRİMİ	DEĞERİ
Yoğunluk	gr/cm ³	0,94	Sürtünme Katsayısı	-	0,1-0,15
Molekül Ağırlığı	gr/mol	> 4.000.000	Sertlik	Shore D	60-80
Su Emme	%	0.01	Erime Noktası	°C	130-138
Çekme Dayanımı	MPa	25	Min. Kullanım Sıcaklığı	°C	-269
Kopma Uzaması	%	>300	Maks. Kullanım Sıcaklığı	°C	90
Çentikli Darbe Dayanımı	kJ/m ²	kırılmaz	Lineer Uzama Katsayısı	°C ⁻¹	2x10 ⁻⁴
Charpy Çentikli Darbe Dayanımı	kJ/m ²	>210	Dielektrik Dayanımı	KV/cm	900

2.2. Kırılma Mekanikliği

2.2.1. Giriş

Malzemelerin kırılma davranışı, insanoğlunun 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 kalabilmesi, ilk mimarların ve mühendislerin başarılarının birer ölçüsüdür. Hala ayakta kalabilen tarihi yapılar hiç şüphesiz ki başarılı dizaynların birer örnekleridirler. Romalıların yaptıkları köprüleri test etmek için, tasarımcıyı köprünün altında bırakıp, üzerinden top arabaları geçirdikleri bilinmektedir.

Makine parçaları, yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları ve diğer karmaşık ve pek de anlaşılamayan nedenlerden dolayı kırılabilirler. Aynı hatanın tekrarı istenmiyorsa hasarın nedeninin anlaşılması çok önemlidir [1].

Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı, bir çatlakın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir. Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki hatalar iki tip hasar için de çok önemlidir, fakat aralarında önemli farklar vardır. Akmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar, kristal kafesi düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır. Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağıntılı olan yerel gerilme-şekil değiştirme alanları söz konusudur (malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları gibi). Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılma, önceden uyardıktan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından dolayı, istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

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

Kırılma mekaniği hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk analizi Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür, gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe

enerjisinde bir azalma olur ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjidir.

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 tokluk 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.

Daha sonra Irwin, G ile sembolize edilen bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için absorbe edilen toplam enerjidir. G , şekil değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır. Ayrıca çatlak ağzında şekil değiştirme enerji boşalma miktarı dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Buna da kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı G_c denir.

Yine Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü (G_{SF}) diye tanımlanan ve K ile sembolize edilen yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K , çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır. Buna göre, çatlak ağzında gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında, kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü (veya yoğunluğu), K_c ortaya çıkmıştır.

G ve K 'nin eşdeğerliliği Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturmuştur. Çünkü tüm malzemeler için, bir çatlak ağzının etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman aynıdır. Dolayısıyla K_c 'nin bilinmesiyle gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca bu yaklaşımla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma, çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir. LEKM, çatlak ağzında sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ağzında önemli

ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elasto-Plastik Kırılma Mekanikği (EPKM) devreye girer. Elasto-plastik kırılma mekanikği yaklaşımında ise tokluk, J-integral, R-eğrisi veya çatlak ağzı açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD) cinsinden ifade edilir [15].

2.2.2. Lineer elastik kırılma mekanikği

Malzeme içinde mikro çatlak ve benzeri kusurlar doğal olarak mevcut olmaktadır. Kırılma mekanikğinin incelenmesinde kullanılan ve malzemedeki tüm davranışların elastik sınırlar içinde kalması prensibinden hareketle geliştirilen analitik ifadelerin bütününe Lineer Elastik Kırılma Mekanikği (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 şekilde hesaplanabilir:

- Yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşmış ise,
- Çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşmış ise,

Bu iki metodun uygulanmasında iki yaklaşım söz konusudur;

- Enerji dengesi yaklaşımı
- Gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı.

Kırılma çok karmaşık bir proses olup bu kavram altında, mikro ve makro boşlukların veya çatlakların oluşumunu ve gelişimini, dislokasyon mekanizmasını, kayma bantlarını malzemenin 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 biri de Enerji Teorisi'dir.

Basit çekme durumunda cismin birim hacminde depolanan elastik enerji;

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

şeklindedir.

İçinde çatlak bulunan bir sistemin bir F kuvveti etkisi altında tutulması durumunda sistemin toplam enerji dengesi şu şekilde yazılacaktır;

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

Buradaki U_e = Dış enerji, U_s = Gerinme enerjisi, U_k = Kinetik enerji ve U_d = Kaybolan enerji (kırılma enerjisi) olarak tanımlanır.

Statik veya yarı statik durumda $U_k=0$ alınabileceğinden birim genişliğinde bir levhada bulunan çatlağın ilerlemesi durumunda:

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

yazılabilir. Burada G değerine "enerjisi boşalma miktarı" (energy release rate) veya "çatlak ilerleme enerjisi" denir. Ayrıca $R = \partial U_d / \partial a$ değeri de çatlak ilerleme direnci olarak bilinir. Kırılma mekaniğinde G değeri çatlağın 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 2.2'deki gibi genişliği B olan bir levhaya bir F kuvveti uygulandığında kuvvetin uygulandığı nokta v kadar yer değiştirecektir. Bu durumda çatlak ∂a kadar uzama gösterdiğinde kuvvetin uygulama noktası dv kadar yer değiştirecektir. Böylece dış kuvvetler tarafından yapılan iş $U_e = F \cdot dv$ olacaktır. Denklem 2.4 birim genişliğinde bir levha için yazılmıştı. B genişliğindeki bir levhada çatlağın ilerlemesi durumunda Denklem 2.5'e göre G değeri hesaplanır.

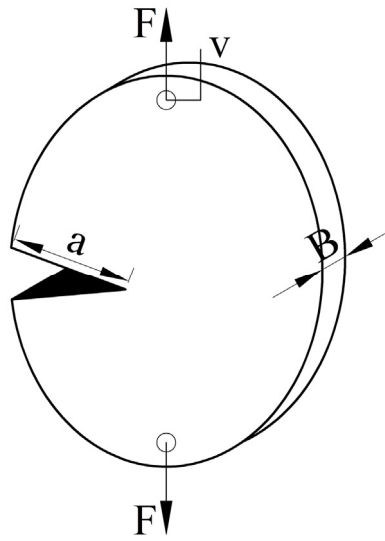
$$G = \frac{\partial}{\partial a} (U_e - U_s) = \frac{1}{B} \left(F \frac{\partial v}{\partial a} - \frac{\partial U_s}{\partial a} \right) \quad (2.5)$$

Şekil 2.2'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

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

dir. Burada C 'ye levhanın kompliansı denir.



Şekil 2.2: F kuvveti etkisi altındaki levha [16]

Böylece bir elastik plakanın şekil değişimi enerjisi;

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

şeklinde yazılır.

Denklem 2.5 ve Denklem 2.6'dan;

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

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 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,

Griffith, gerilme analizinden yararlanarak kuvvet altında tutulan birim kalınlığındaki bir levhada a uzunluğu kadar bir çatlak oluşması durumunda sistemde meydana gelen elastik enerji değişikliğini:

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

şeklindedir (düzlem gerilmeye). Düzlem genlemede E yerine $E/(1-\nu^2)$ yazılabileceğinden;

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

bağıntısı ile ifade edilmiştir (düzlem genlemede).

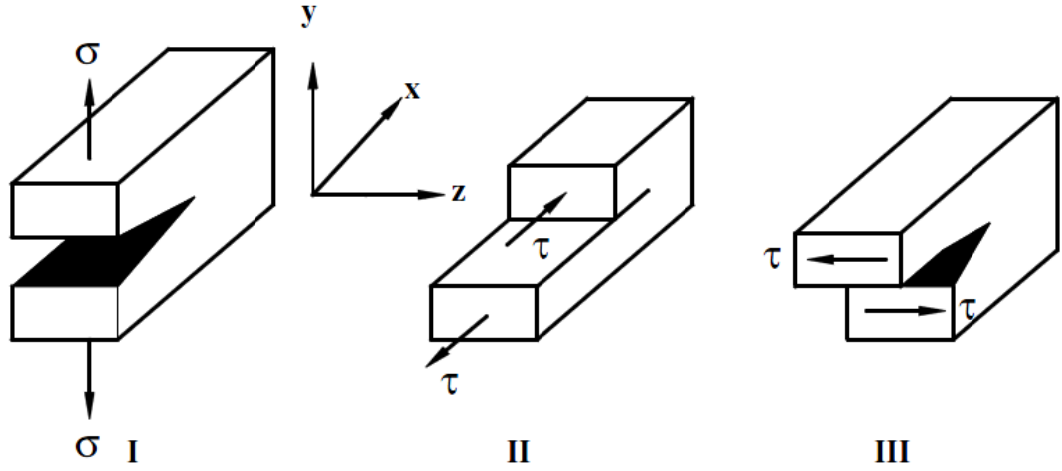
Benzer şekilde bir levha içinde bulunan ve levhaya etki eden σ gerilmesi altında gerilmeye dik durumunda $2a$ uzunluğundaki çatlak oluşumunda elastik enerjideki azalma;

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

şeklindedir. Çatlak ilerlemesi durumundaki kritik gerilme ise;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (2.12)$$

şeklindedir [1].



Şekil 2.3: Çatlak ilerleme modları; I- Açılma modu, II-Kayma modu, III-Yırtılma modu [15]

Elastik cisimlerde çatlakın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 2.3'te üç tip davranış görülmektedir.

Mod I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar. İzotropik malzemelerde çatlak ağzı civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur (Irwin 1957). K , elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve GŞF olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K 'nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme yoğunluk faktörü;

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/W) \quad (2.13)$$

şeklinde verilir. Burada $f(a/W)$, numunenin ve çatlakın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir. Çatlak ağzındaki GŞF, sonsuz genişlikteki bir numunede, her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a}, \quad (2.14)$$

burada, K_I , K_{II} ve K_{III} sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre GŞF dir. Mod I çatlak ağzı gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 2.4' deki gibidir. Çatlak ağzındaki gerilmeler Denklem 2.15' deki gibidir;

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

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

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

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

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (2.15)$$

Şekil 2.4'deki gibi açılan çatlağın, r mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada ν : poisson oranı, σ_{xx} : x eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy} : y eksenindeki gerilme değeri ve σ_{zz} : z eksenindeki gerilme değeridir. K_I : Mod I için gerilme şiddet faktörü, E : Elastisite modülü ve θ : r 'nin x eksenine yaptığı açıdır. u , v , w ise sırası ile x , y , z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.

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

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

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E}$$

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

$$\nu^* = 0, \quad K = 3-4\nu \quad (\text{Düzlem genleme hali için}) \quad (2.16)$$

şeklinde bulunur.

Mod II durumu için gerilmeler;

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

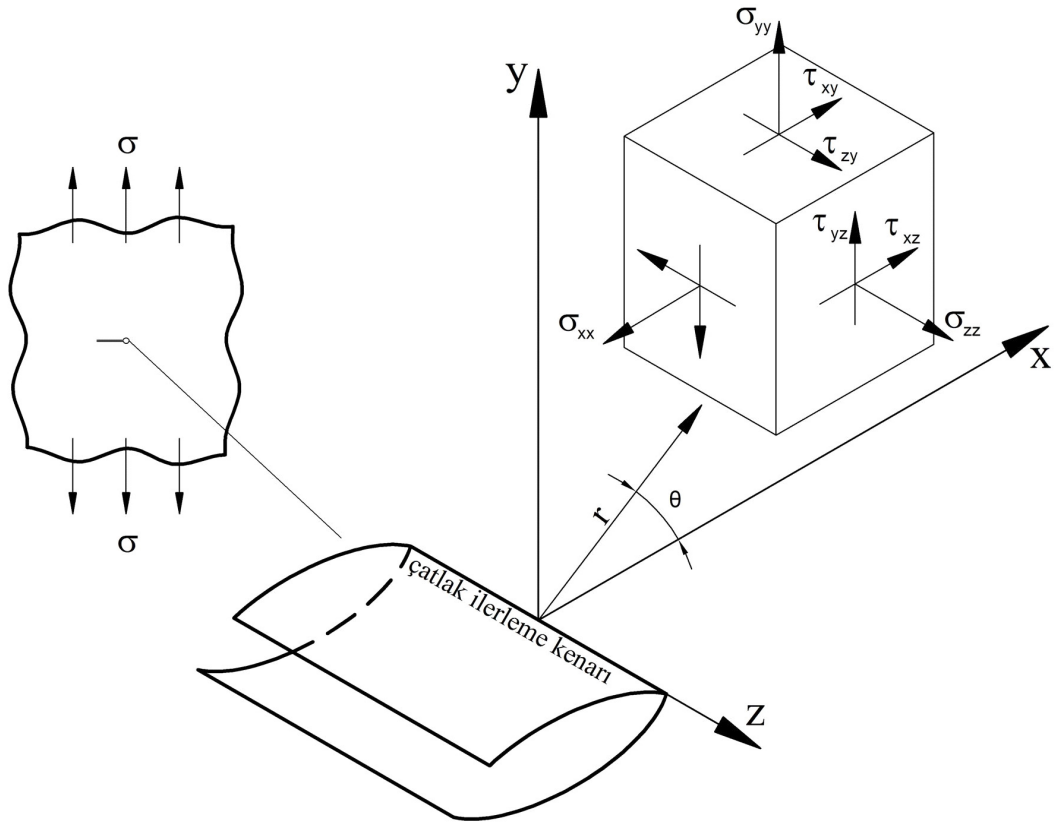
$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{3/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

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

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

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

(2.17)



Şekil 2.4: Çatlak ağızı gerilme dağılımı [15]

Deplasmanlar Denklem 2.18'deki gibi bulunur;

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} [2 - 2\nu \cos^2 \frac{\theta}{2}] \\
 v &= \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 w &= 0
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Mod III durumu için gerilme ve deplasmanlar;

$$\begin{aligned}
 \tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^2} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_{yz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^2} \cos \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0 \\
 u &= v = 0 \\
 w &= \frac{K_{III}}{E} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

bulunur [15].

G ile K arasındaki ilişki de şu şekildedir;

$$\begin{aligned}
 K^2 &= EG \text{ (Düzlem gerilme)} \\
 K^2 &= \frac{EG}{1-\nu^2} \text{ (Düzlem genleme)}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Üç eksenli düzlem genleme ve düzlem dışı genleme için genel durumda;

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} (1 - \nu^2) + \frac{1 + \nu}{E} K_{III}^2 \tag{2.21}$$

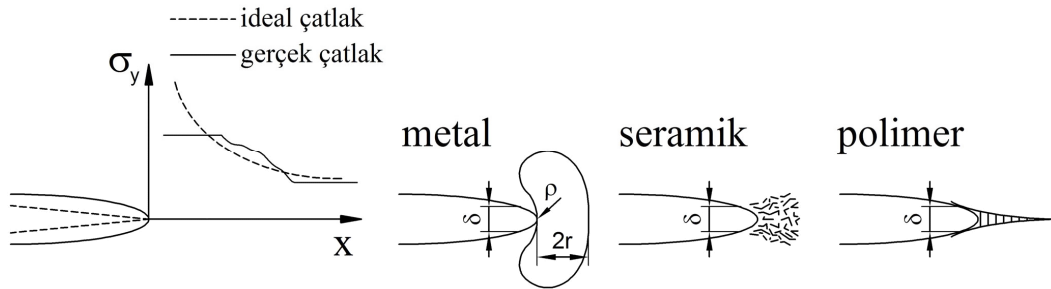
Düzlem gerilme durumu (Mod I ve Mod III) [1];

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} \tag{2.22}$$

2.2.3. Elasto-plastik kırılma mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği daha ziyade "gevrek" malzemelere uygulanır. Tipik kullanım alanları cam, sert çelik, mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır, hatta sünek-gevrek sıcaklığının altındaki düşük karbonlu çelikler bu şekilde analiz edilebilirler.

Teorik olarak çatlak ucunda oluşan gerilmenin sonsuz değerine karşılık pratikte malzemelerde çatlak ucunda gerilmeler sonsuz olamaz. Çekme deneylerinden de hatırlanacağı üzere bu gerilme en fazla akma gerilmesi veya çekme gerilmesi kadar olacaktır. Uygulanan gerilme çok fazla değil ise, yani çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme malzemenin akma mukavemetini aşmıyor ise, malzeme çatlağın varlığına müsaade edebilir. Metalik malzemeler gibi sünek malzemelerde çatlağın etrafında geniş plastik deformasyona maruz kalmış bölgeler oluşur. İşte malzemenin plastik deformasyona uğradığı bu bölgeye çatlak ucu plastik bölge denir. Keskin çatlak uçlarında oluşan aşırı deformasyona maruz kalmış bu 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) denir.



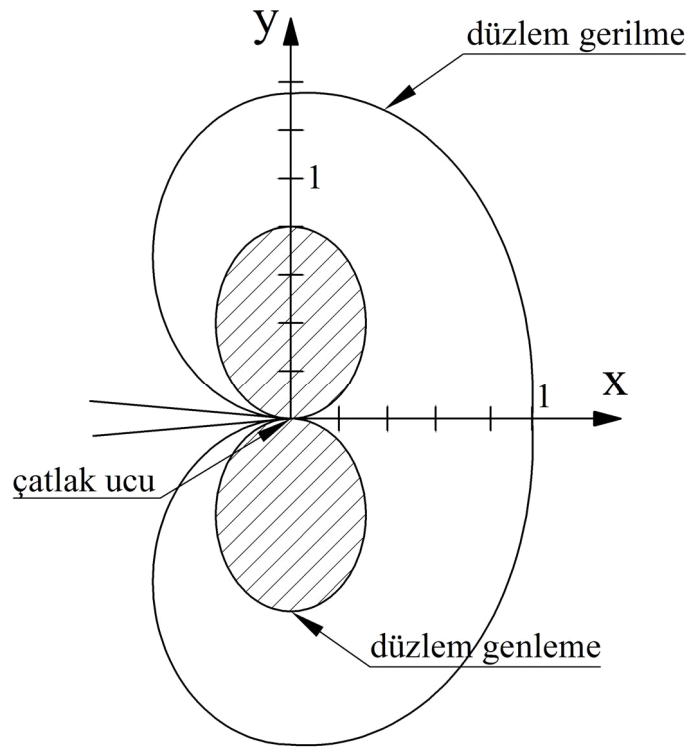
Şekil 2.5: Malzemelerde çatlak ucunda plastisite, mikro çatlama ve craze (sır çatlağı) sonucu oluşan deformasyon [1]

Çatlak ucunda oluşan sonsuz gerilme için çatlak ucunda farklı malzemeler farklı tavır sergileyeceklerdir (Şekil 2.5). Polimerin bir kısmında çatlak ucunda boşluklar ve bu boşluklar arasında çekilmiş lifler oluşacaktır. Bu bölgeye sır çatlağı bölgesi denir. Seramik gibi gevrek malzemelerde ise bu bölgede küçük boyutta ve farklı yönlerde küçük çatlakların yoğun olduğu bir proses bölgesi meydana gelir.

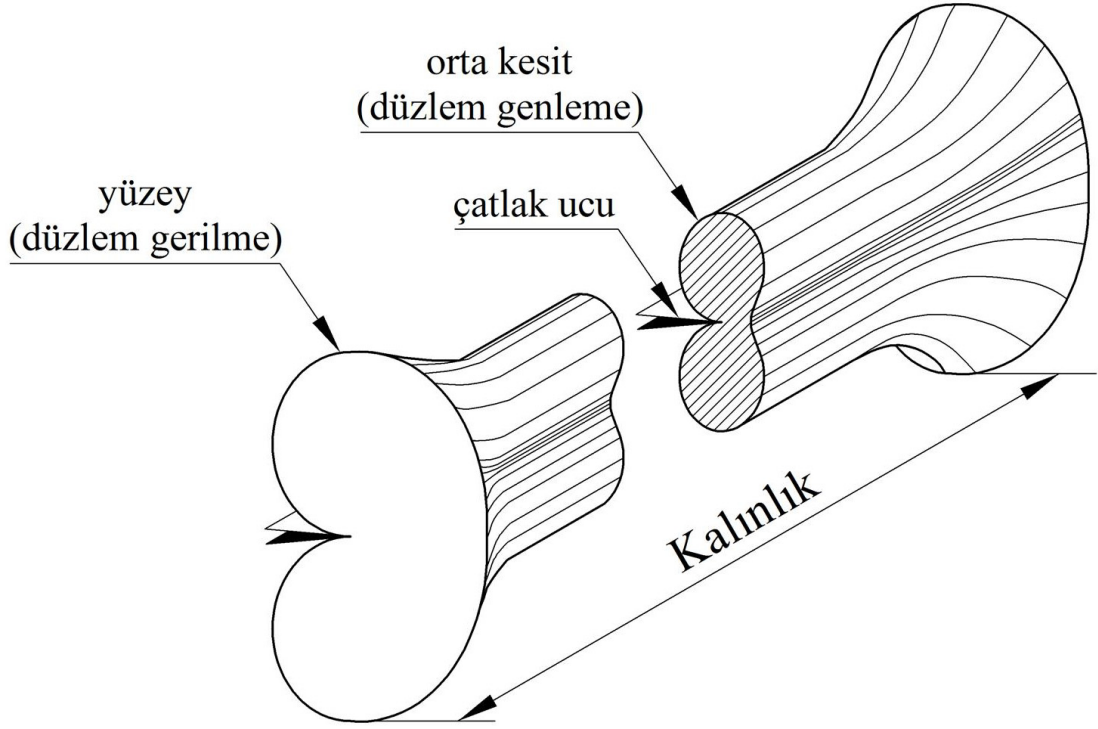
Bu üç durumda da çatlak ucu aşırı bir deformasyona maruz kalır ve yakın bölgelerde ayrılmalar oluşur. Teorik olarak çatlak ucunda olması gereken yüksek gerilme daha geniş bir alana yayılır yeniden bir dağılım gösterir.

Çatlak ucundaki gerilme değerlerinin çok yüksek olması dolayısıyla pratikte malzemelerde bu yüksek gerilme değerlerine ulaşamaz. Çünkü malzemede akma gerilmesi bu değerlerin çok altındadır. Bu yüzden bilhassa sünek malzemelerde çok daha belirgin olan çatlak ucu gerilmelerinin malzemenin akma dayanımını aştığı yerlerde plastik şekil değişimine uğramış bir bölge oluşur. Bu bölgeye çatlak ucu plastik bölge denir ve r_p ile gösterilir (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7) [1].

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z=0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur.



Şekil 2.6: Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölge [16]



Şekil 2.7: Düzlem gerilme ve düzlem genleme durumlarında çatlak ucu plastik bölgenin kalınlık boyunca değişimi [16]

Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z eksenini boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\epsilon_z=0$). Bu durumda da düzlem genleme hali söz konusudur [15].

2.2.4. Elasto-plastik kırılma tokluğu deneyleri

Elasto-plastik kırılma mekaniğinde kırılma tokluğunu tespit etmede kullanılan en önemli iki metot, Çatlak Ucu Açılması (Crack Opening Displacement-COD) ve J-İntegral metodudur [1].

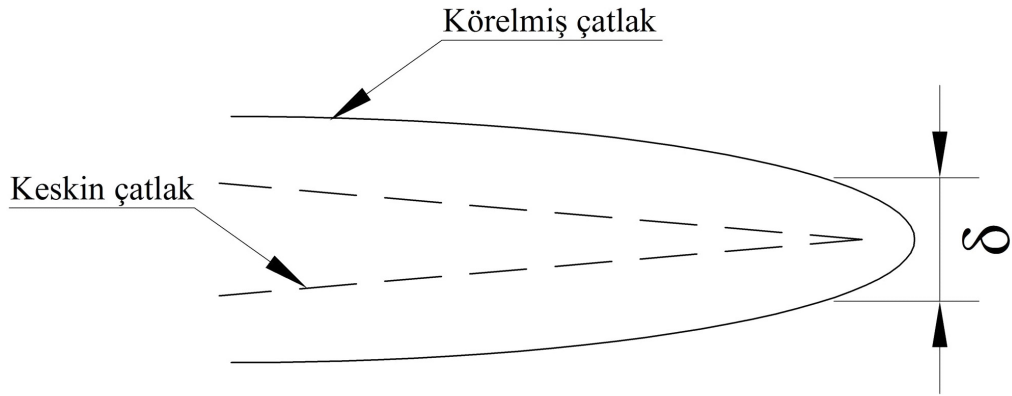
Deneysel zorlukları nedeniyle sünek malzemelerin kırılma davranışının incelenmesinde J-integrali metodu yerini EWF metoduna bırakmıştır.

2.2.4.1 Çatlak ucu açılma miktarı metodu (COD)

Yapısal çeliklerin K_{Ic} değerlerini ölçmeye çalışan Wells bu malzemelerin LEKM ile karakterize edilemeyecek kadar tok olduğunu görür. Yüksek tokluk tasarımcılar tarafından istenmektedir fakat deneysel sonuçlarla elde edilen kırılma mekaniği teorisi bu malzeme grubuna uygulanamamaktadır. Kırılan test numunelerine bakıldığında, çatlak yüzeyinin kırılma öncesinde hareket ettiğini plastik deformasyonun keskin çatlağı körelttiğini Şekil 2.8’de görebiliriz. Bu gözlem sonucunda Wells çatlak ucu açılma miktarının kırılma tokluğunun ölçütü olduğu sonucuna varmıştır. Bu parametre COD olarak bilinmektedir [2].

Çatlak ucu açılma mesafesi değeri şu şekilde hesaplanır [1];

$$CTOD=2v=\delta=\frac{4 K_I^2}{\pi E \sigma_y}=1,27 \frac{K_I^2}{E \sigma_y} \quad (2.23)$$



Şekil 2.8: Çatlak ucu açılma miktarı [2]

2.2.4.2. J-integral metodu

Bu metot plastik şekil değişimi gösteren malzemelerde kırılma tokluğunu tespit etmek amacıyla COD tekniğine alternatif olarak geliştirilen bir metottur. Bu metodun esası, iki boyutlu çatlak problemlerinde çatlak ucunu çeviren bölgede gerinme enerji yoğunluğu ve iş terimleri seçilecek çatlak yönünde bağımsız kabul

edilmesidir. Birbirinden çok az farklı çatlak uzunluklarına sahip numunelere ait yük-uzama diyagramlarının kıyaslanması için esasını teşkil eder.

Şekil 2.9'u göz önüne alarak düz çizgi entegrali J gerek elastik gerekse elasto-plastik davranışlar için aşağıdaki gibidir;

$$J = \int_p w dy - T \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \quad (2.24)$$

Burada;

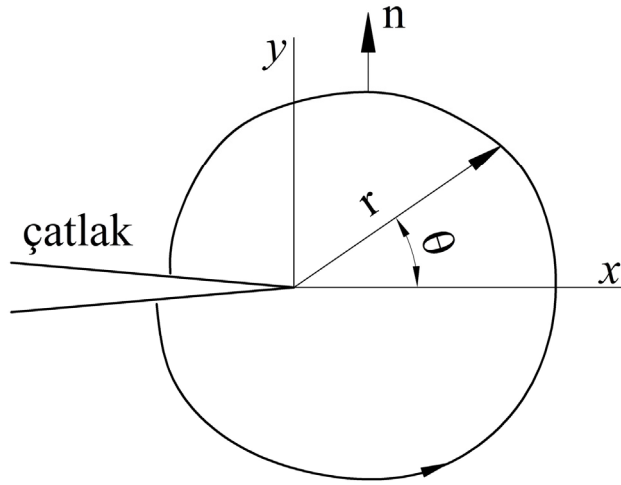
p ; çatlak sararı herhangi bir yön,

w ; gerinme enerjisi yoğunluğu,

T ; p boyunca n normali doğrultusunda oluşan çekme vektörü,

u ; şekil değışimi vektörü,

ds ; ark boyudur.



Şekil 2.9: J-integral kontrolü [17]

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

$$W = \int_p \sigma d\varepsilon \quad (2.25)$$

Çatlağın en uç noktası söz konusu olduğunda J değeri;

$$J = \int_P w dy \quad (2.26)$$

ile verilir. J değeri en geniş anlamıyla şu şekilde ifade edilir;

$$J = \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} \quad (2.27)$$

Burada B malzeme genişliği, U ise yapılan iş veya gerinme enerjisidir. Bu değer bir enerji absorpsiyonu olmakla birlikte LEKM'de olduğu gibi aslında $G=J$ dir. Bu testten sağlıklı sonuç elde edebilmek için Denklem 2.28 sağlanmalıdır.

$$B \geq 25 J_{IC} / \sigma_y \quad (2.28)$$

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

$$J = \frac{U}{B(w-a)} \quad (2.29)$$

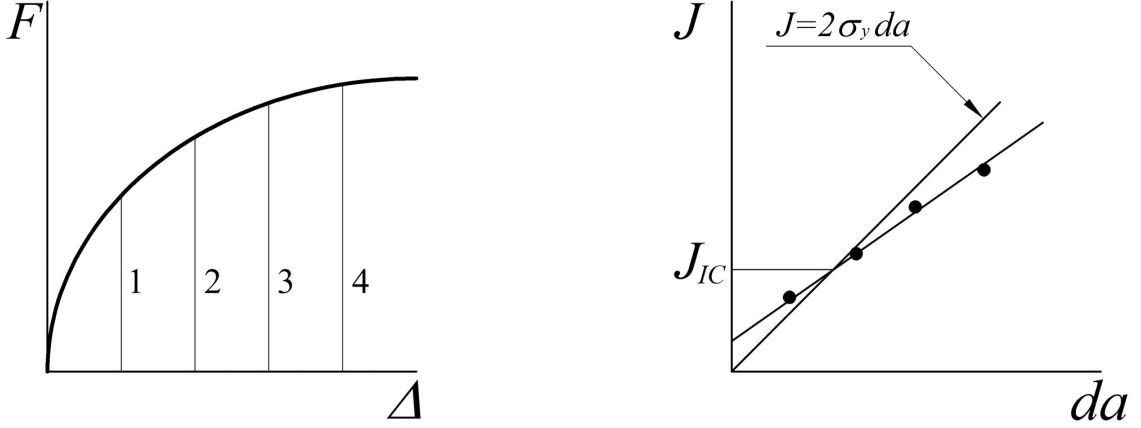
bağıntısı kullanılarak J hesaplanır. Burada U yük uzama diyagramı altındaki toplam enerji, w numunenin genişliği, a çatlak uzunluğudur [1].

ASTM standartlarına göre sünek metaller için j-integral metodunda çoklu ve tek numune kullanılarak J - R eğrileri çizdirilebilir (ASTM E 1820). Polimer malzemeler için durum biraz farklıdır zira ASTM standartlarınca polimer malzemeler için yalnızca bir numune kullanılarak deney yapılamaz (ASTM D6068). Tek numune ile çizilen eğriler güvenilir değildir [18].

Bu testin yapılışında şu sıra takip edilir;

- Numuneyi belli bir uzama değerine kadar yükle,
- Yükü boşalt ve çatlağın ilerleme uzunluğunu ölç,
- Her bir numuneyi çok düşük sıcaklıklara kadar (-150°C) soğut ve çatlak ilerlemesini ölç,
- Yukarıdaki denklemi kullanarak J değerini hesapla,

- J ve çatlak ilerleme miktarı (da) arasındaki ilişkiyi çiz, Şekil 2.10.
- $J = 2\sigma_y da$ doğrusunu orijinden geçecek şekilde çiz, Şekil 2.10.
- Bu doğru ile deneysel noktalardan geçen doğrunun kesiştiği nokta J_{IC} 'yi verir [1].



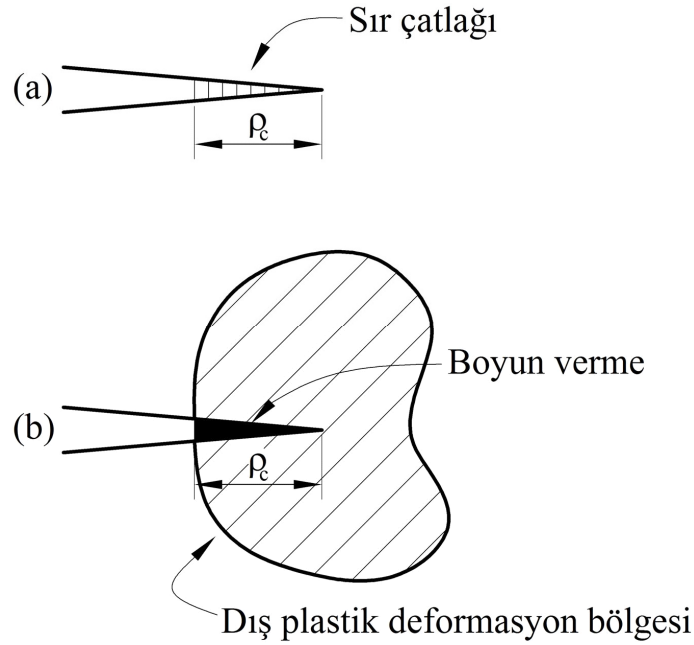
Şekil 2.10: J_{IC} 'yi elde etmek için test prosedürü [1]

2.2.5. Esas kırılma işi metodu (EWF)

2.2.5.1. Giriş

Günümüzde gevrek malzemelerin kırılmasında ortaya çıkan mekanizmalar çok iyi yerleşmiş ve kabul edilmiş olsa da çatlak ucunda önemli derecede plastik akış meydana gelen sünek malzemelerle ilgili tanımlar ve kavramlar yeteri kadar gelişmemiştir. Gevrek malzemelerde kırılma sürecinde meydana gelen çatlak veya çentik ucu plastik deformasyon bölgesi numune boyutlarına nazaran çok küçüktür (Şekil 2.11) ve bu bölge kırılma süreciyle doğrudan ilişkilidir. Gevrek malzemeler, malzemenin akma gerilmesinin altındaki bir gerilme değerinde belirgin bir akma davranışı göstermeksizin hasara uğrarlar. Bu tip malzemelerin deformasyon ve kırılma mekanizmaları Hooke Kanunu'na uygun olarak gerçekleşir. İşte bu tip malzemelerde kırılma davranışlarını açıklamak için lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımıyla (LEKM) kritik gerilme şiddeti faktörü (K_{Ic}) ve kritik enerji salıverme oranı (G_{Ic}) gibi basit kırılma mekaniği parametreleri yeterli olmaktadır.

Sünek malzemelerin kırılmasında ortaya çıkan mekanizmalar gevrek malzemelere nazaran daha karmaşıktır. Sünek malzemeler kırılmadan önce çatlak veya çentik ucunda gevrek malzemelere nazaran çok daha büyük bir plastik deformasyon bölgesi oluşur (Şekil 2.11). Plastik deformasyon olayının büyük bölümü kırılma prosesiyle doğrudan ilişkili değildir ve bu plastik deformasyon numune geometrisi ve yükleme konfigürasyonuna bağlı olarak değişir. Bunun sonucu olarak enerji dağılımı çatlak ucundaki küçük bir bölgede değil de çok daha büyük bir bölgede yoğunlaşır. Bu nedenle LEKM parametreleri olan K_{Ic} ve G_{Ic} , sünek malzemelerin kırılma davranışlarının karakterize etmek için kullanılamazlar.



Şekil 2.11: Çatlak ucu deformasyon bölgesi, (a) gevrek malzeme, (b) sünek malzeme [1]

Sünek malzemelerin kırılma davranışlarını açıklamak için J-integrali ve esas kırılma işi (essential work of fracture-EWF) metodu kullanılır. Ancak son yıllarda deneysel açıdan daha basit olması nedeniyle EWF metodu çok daha yaygın bir biçimde kullanılmıştır.

1968 yılında Broberg'in ve 1977'de Cottorell ve Reddel'in yaptığı çalışmaları temel alan esas kırılma işi metodu, ilk kez 1979 yılında Mai ve Cottorell tarafından polimer malzemelere uygulanmıştır. EWF yaklaşımında çatlak ucundaki elastik olmayan

bölge, kırılma prosesinin gerçekleştiği iç bölge ve plastik deformasyonun meydana geldiği dış bölge olmak üzere iki farklı bölgenin toplamı olarak ele alınır. 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. Bu yöntem düzlem gerilme halinde metaller ve polimerler gibi birçok malzemenin kırılma davranışını incelemek için uygulanmış, sünek malzemelerin kırılma tokluğunun saptanması konusunda yöntemin uygulanabilir olduğu görülmüştür [19-22].

2.2.5.2. EWF yönteminin teorisi

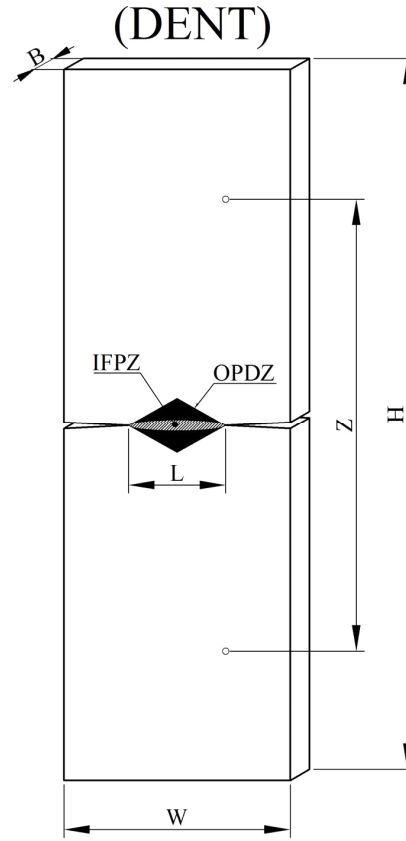
Deney numunelerinin kırılmadan önce belirgin bir akma davranışı göstereceğini ve çatlakın kararlı (yavaş) bir şekilde ilerleyeceğini öngören bu yöntem, ilk olarak Broberg tarafından matematiksel olarak açıklanmıştır. Spesifik esas kırılma işi olarak adlandırılan ve w_e terimiyle ifade edilen büyüklük, malzemenin kırılma tokluğudur ve verilen bir kalınlık için malzeme sabitidir.

EWF yaklaşımı, toplam kırılma işinin (W_f) iki farklı enerjinin toplamı olduğunu kabul eder. Buna göre;

$$W_f = W_e + W_p \quad (2.30)$$

eşitliği yazılır.

Buradaki ilk terim olan W_e 'ye esas kırılma işi (essential work of fracture) denir. W_e enerjisinin, kırılmanın meydana geldiği iç kırılma proses bölgesi (inner fracture process zone-IFPZ) tarafından absorbe edildiği kabul edilir (Şekil 2.12). Yani W_e saf çatlak ilerleme direncinin bir ölçüsüdür ve kırılma tokluğu olarak ele alınır. İkinci terim olan W_p 'ye plastik deformasyon işi veya esas olmayan kırılma işi (non-essential work of fracture) denir. Bu enerji dış plastik deformasyon bölgesi (outer plastic deformation zone-OPDZ) tarafından absorbe edilir ve bu bölgedeki plastik deformasyon mekanizmalarını harekete geçirmek için harcanır.



Şekil 2.12: Çift kenardan çentikli çekme numunesi (DENT) için iç kırılma proses bölgesi (IFPZ) ve dış plastik deformasyon bölgesi (OPDZ) [19]

W_e 'nin yüzey enerjisiyle ve W_p 'nin de plastik deformasyon bölgesinin hacmiyle ilişkili olduğu kabulü yapılarak;

$$w_f = \frac{W_f}{L.B} = w_e + \frac{w_p V_p(L,B)}{L.B} \quad (2.31)$$

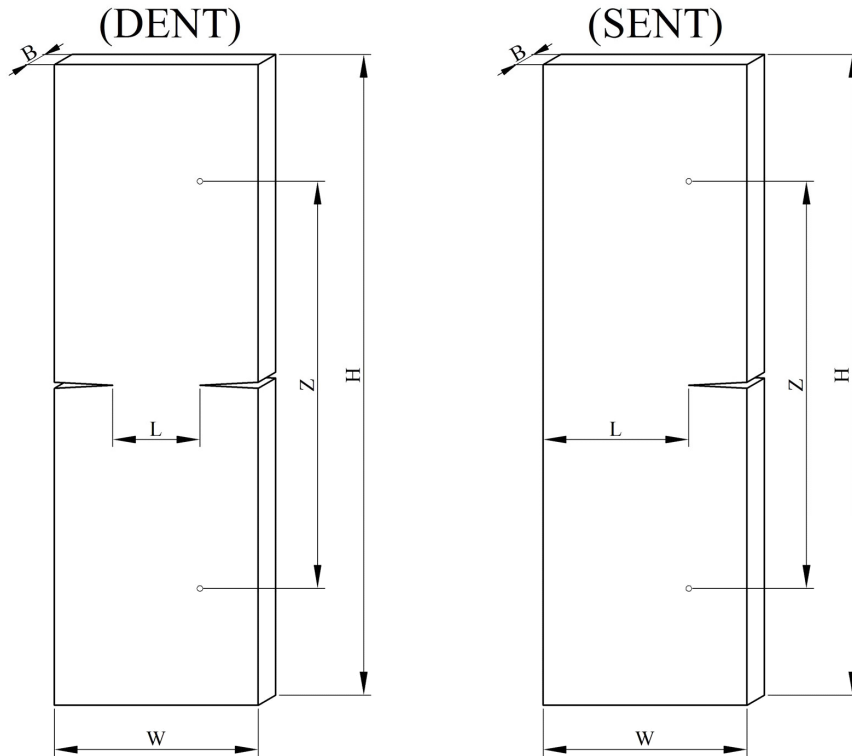
eşitliği yazılır. Burada $w_e = W_e/(L.B)$, $w_p = W_p/(B.L^2)$ ve $V(L,B)$ de plastik deformasyon bölgesinin hacmidir. Plastik deformasyon bölgesinin hacminin $B.L^2$ ve orantı sabiti olan β (buradaki β değeri çentiksiz kısmın uzunluğundan bağımsızdır) ile orantılı olduğu kabul edilirse;

$$w_f = w_e + \beta w_p L \quad (2.32)$$

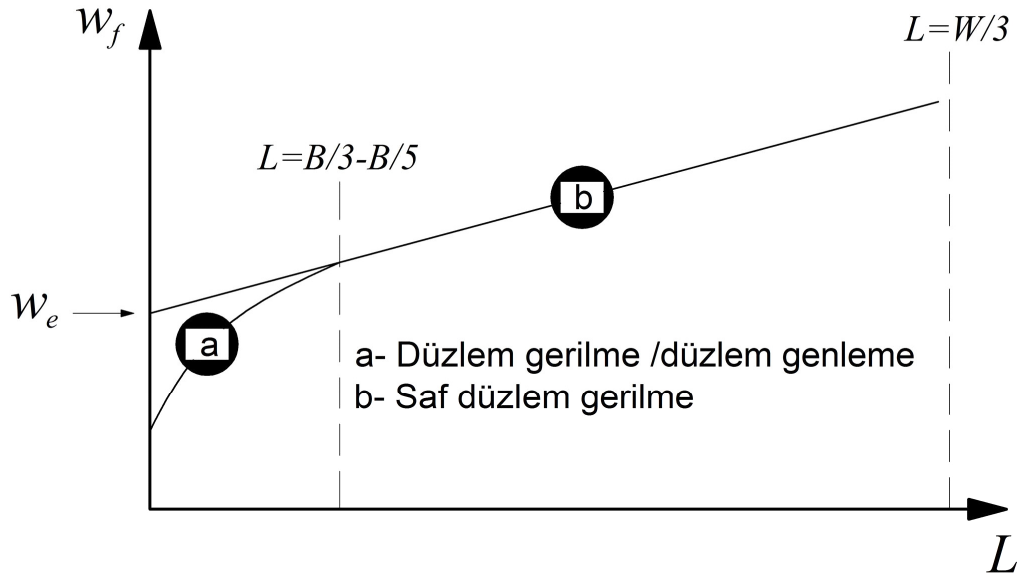
Buradaki w_e değeri spesifik esas kırılma işidir (specific essential work of fracture) ve w_p de spesifik plastik deformasyon (specific non-essential work of fracture) işidir [19].

Sünek deney numuneleri için toplam kırılma işi bir malzeme sabiti olamamakla birlikte birim alanda harcanan iş olarak tanımlanan spesifik esas kırılma işi (w_e) bir malzeme sabitidir. Sünek ince metal numuneler için sabit kalınlıkta w_e malzeme sabitidir ve numune geometrisinden bağımsızdır [20].

Denklem 2.32 incelendiğinde w_f ile L (kırılmanın meydana geldiği düzlemdeki çentiksiz kısmın uzunluğudur-ligament length) arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Farklı çentik uzunluklarına sahip (farklı L uzunlukları) numunelere çekme testi uygulamak suretiyle w_e değeri bulunabilir. Bu iş için çift kenardan çentikli çekme (double edge notched tension-DENT) ve tek kenardan çentikli çekme (single edge notched tension-SENT) numuneleri çok yaygın olarak kullanılır. Ancak DENT numuneler simetrik olduğundan deney esnasında numunede çarpılma (özellikle ince ve uzun SENT deney numunelerinde çarpılma problemi görülür) problemi yaşanmaz ve bu yüzden EWF yönetiminde ekseriye DENT numuneler tercih edilir. Şekil 2.13’de DENT ve SENT numuneler görülmektedir.



Şekil 2.13: EWF yönetiminde kullanılan çift kenardan çentikli (DENT) ve tek kenardan çentikli (SENT) deney numuneleri [23]



Şekil 2.14: Spesifik kırılma işi w_f 'nin L ile değişimi [23]

Yük-uzama eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile toplam kırılma işi (W_f) değeri bulunur ve buradan spesifik toplam kırılma işi (w_f) değeri hesaplanır. Daha sonra bu değerler yardımıyla $w_f - L$ grafiği çizilir ve doğrunun y eksenini kestiği nokta w_e değerini verir (Şekil 2.14). Spesifik plastik 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_p 'nin tam olarak hesaplanabilmesi için, plastik deformasyon bölgesi şekil faktörü olan β 'nin biliniyor olması gerekir. Örneğin Şekil 2.12'deki elmas şeklindeki plastik deformasyon bölgesinin hacmi V_p , yüksekliği h ve şekil faktörü β ise;

$$V_p(L, B) = \frac{1}{2} B \cdot L \cdot h = \beta \cdot B \cdot L^2 \quad (2.33)$$

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.

Daha önceki çalışmalar göstermiştir ki w_f ile L arasındaki lineer ilişkinin sağlanabilmesi için numune geometrisinin bazı ön şartları sağlıyor olması gerekir. Denklem 2.32'yi dikkatle incelediğimizde, kırılma bölgesinin çevreleyen OPDZ'nin

büyükliğünün L boyutu tarafından sınırlandırıldığını (kontrol edildiği) görebiliriz ve Denklem 2.33'e bakarak OPDZ'nin hacminin BL^2 ile orantılı olduğunu görebiliriz. Bu oran aşağıda sıralanan bazı boyutsal sınırlamaları zorunlu kılmaktadır;

- Eğer numune genişliği olan W 'ye nazaran L değeri yeteri kadar küçük olmazsa OPDZ'nin büyüklüğü numunenin yan yüzeyleri tarafından sınırlandırılır. Daha önceki çalışmalar göstermiştir ki çentiksiz bölgede (L uzunluğu boyunca) plastik deformasyon oluşması için $L \leq W/3$ olması gerekir.

- Eğer çatlak ilerlemeye başlamadan önce L uzunluğu boyunca akma meydana gelirse OPDZ'nin büyüklüğü L tarafından sınırlandırılmamış olur. Çatlak ilerlemeden önce tam olarak akmanın sağlanabilmesi için $L \leq 2r_p$ olmalıdır. Buradaki r_p değeri çatlak ucu plastik bölgenin yarıçapıdır.

- Eğer L değeri numune genişliği olan B 'ye göre yeterince büyük değilse, çentiksiz bölgedeki (L uzunluğu boyunca) gerilme durumu düzlem gerilme yerine düzlem genleme-düzlem gerilme (karışık mod) halini alır (küçük L değerleri için). Sonuç olarak w_e ve w_p 'nin değeri L 'ye bağımlı hale gelir ve Şekil 2.14'de gösterilmiş olan non-lineerlik durumu ortaya çıkar. L 'nin küçülmesi ile plastik deformasyon bölgesinin büyüklüğü sınırlandırıldığı için bu non-lineerlik ortaya çıkar. Bu karışık modlu gerilme halini önlemek için kalınlık sınırlaması olarak $L \geq 3B-5B$ değeri tavsiye edilmekte ve deneylerde ölçüt olarak göz önünde bulundurulmaktadır.

Yukarıda sıralanmış olan tüm bu ön şartlar dikkate alınarak L 'nin en uygun değeri;

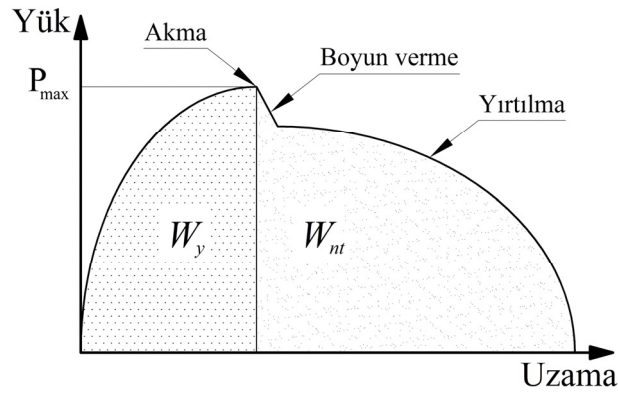
$$3B-5B \leq L \leq \min(2r_p, W/3) \quad (2.34)$$

şeklinde yazılır.

Plastik bölgenin büyüklüğü olan r_p aşağıdaki LEKM denklemi yardımıyla hesaplanır;

$$2r_p = \frac{1}{\pi} \frac{E w_e}{\sigma_y^2} \quad (2.35)$$

Gerilme halinin L 'ye bağımlı olup olmadığını görmek için maksimum net kesit gerilmesi $\sigma_n = P_{max}/(L.B)$ (buradaki P_{max} yük uzama eğrisindeki maksimum yük değeridir) ile L 'nin değişimi grafiği çizilir. Plastisite teorisine göre eğer 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 denir. Bu değer SENT numuneler için 1 ve DENT numuneler için 1,15'dir. Gerilme halinin saf düzlem gerilmeden saf düzlem genlemeye geçtiği durumda $m=3$ değerini alır ayrıca m 'nin değeri L ile ters orantılıdır.



Şekil 2.15: Yük uzama eğrisinde kırılma işi parametrelerinin gösterimi (DENT numune) [19]

Bazı malzemeler DENT numunelerden hazırlanmış deney numuneleri ile yapılan kırılma testleri sonucunda Şekil 2.15'de gösterildiği gibi yük-uzama eğrilerinde ani yük düşüşü özelliği gösterirler. Bu yük düşüşü esas alınarak spesifik esas kırılma işi terimini, akma için spesifik kırılma işi (w_y) ve boyun verme-yırtılma için spesifik esas kırılma işi (w_{nt}) olmak üzere iki bileşene ayırmak mümkündür. Böylece;

$$w_f = w_e + \beta w_p L = w_y + w_{nt} \quad (2.36)$$

şeklinde yazılabilir. Bu terimleri daha da açarak;

$$w_y = w_{e,y} + \beta_y w_{p,y} L \quad (2.37)$$

$$w_{nt} = w_{e,nt} + \beta_{nt} w_{p,nt} L \quad (2.38)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $w_{e,y}$ ve $w_{e,nt}$ sırasıyla akma için spesifik esas kırılma işi ve boyun verme-yırtılma için spesifik esas kırılma işi olarak adlandırılırlar. Diğer

terimler $\beta_y w_{p,y}$ ve $\beta_{nt} w_{p,nt}$ ise sırasıyla, akma için spesifik plastik deformasyon işi ve boyun verme-yırtılma için spesifik plastik deformasyon işi olarak adlandırılır [19].

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;

$$W_f = \frac{2}{3} P_{max} e_b \quad (2.39)$$

eşitliği yazılabilir. Maksimum yük için;

$$P_{max} = mB\sigma_y L \quad (2.40)$$

yazılır. Denklem 2.39 ve Denklem 2.40'dan;

$$w_f = \frac{2}{3} m\sigma_y e_b \quad (2.41)$$

$$e_b = \frac{3}{2m\sigma_y} (w_e + \beta w_p L) \quad (2.42)$$

eşitlikleri yazılır. $L=0$ 'daki e_b değeri kritik çatlak açılma mesafesi olan e_0 değerini verir ve buradan da aşağıdaki eşitlik yazılır [19].

$$w_e = \frac{2}{3} m\sigma_y e_0 \quad (2.43)$$

2.2.5.4. J-integral metodu ile EWF metodu arasındaki ilişki

J-integrali metodunda J kontrollü çatlak büyümesi durumları için Denklem 2.44 ve Denklem 2.45 sağlanmalıdır.

$$\frac{L\sigma_y}{J_R} \gg 1 \quad (2.44)$$

$$\frac{L}{J_R} \frac{dJ}{da} \gg 1 \quad (2.45)$$

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

$$J_R = J_C + \frac{dJ}{da} \Delta a \quad (2.46)$$

Küçük çatlak büyümeleri için J_R ayrıca enerji eşitliğinden;

$$J_R = \frac{dU}{da} \quad (2.47)$$

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

$$w_f [(W_f)/(L.B)] = J_C + \frac{dJL}{da} \frac{1}{4} \quad (2.48)$$

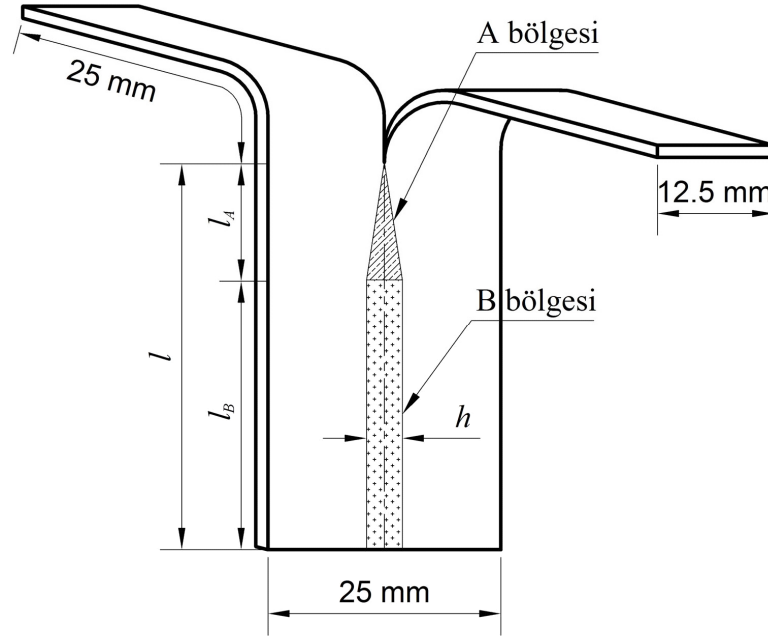
$$w_f [(W_f)/(L.B)] = J_C + \frac{dJL}{da} \frac{1}{2} \quad (2.49)$$

Denklem 2.32, 2.48 ve 2.49 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 gerektiği 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 2.48 ve 2.49'dan elde edilen dJ/da değerleri farklıdır [20].

2.2.5.5. Düzlem dışı kırılma durumu (yırılma) için EWF metodu

Çok ince deney numunelerinin yırılma dayanımı (düzlem dışı kırılma tokluğu), 1953 yılında kauçuk malzemenin kırılma tokluğunu saptamak üzere, Thomas ve Rivlin tarafından geliştirilen yöntem ile saptanabilir. İnce malzemelerin düzlem dışı kırılma tokluğunu saptamak için pantolon tipi (trousers) deney numuneleri kullanılır. Bu tip deney numunesi ilk kez 1984 yılında Mai ve Cotterell tarafından sünek metal malzemenin EWF yöntemiyle kırılma dayanımının saptanmasında kullanıldı [24].



Şekil 2.16: Düzlem dışı kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan pantolon tipi deney numunesi [25]

Sünek polimerik filmlerin yırılma kırılmasının incelenmesinde kullanılan pantolon tipi numunelerde 2 farklı bölge tanımlanmaktadır (Şekil 2.16). İlk bölge başlangıç çatlakına bitişiktir ve dış plastik bölgenin yüksekliği (h) yırılma ile birlikte artar. Bu bölgeye A bölgesi denir. Yırılma olayı l_A kadar bir mesafe ilerledikten sonra OPDZ'nin yüksekliği sabit kalır (h_B) ve ilerleyen yırılma olayı boyunca değişmez. Bu sabit dış plastik bölge yüksekliğine sahip bölgeye B bölgesi denir. Mod III türü kırılmada “çatlak ilerlemesi” yerine “yırılma bölgesi uzunluğu” tabiri kullanılır.

A bölgesinde çatlak ilerledikçe plastik bölgenin yüksekliği de artar. Bu bölgedeki toplam kırılma işi;

$$W_{Tf} = W_{Te} + W_{Tp} = w_{Te}l_a t + w_{Tp}S_{pa}t \quad (2.50)$$

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;

$$S_{pa} = \alpha'' l_a^2 \quad (2.51)$$

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

$$\alpha'' = \frac{\pi h_B}{4l_a} \quad (2.52)$$

Denklem 2.50 ve 2.51 düzenlenirse;

$$W_{Tf} = w_{Te}l_a t + \alpha w_{Tp}l_a^2 t \Rightarrow w_{Tf} = \frac{W_{Tf}}{l_a t} = w_{Te} + \alpha w_{Tp}l_a \quad (2.53)$$

yazılır.

Denklem 2.53'den 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;

$$W_{Tf}^B = W_{Te}^B + W_{Tp}^B = w_{Te}^B l_B t + w_{Tp}^B S_{pB} t \quad (2.54)$$

yazılır. Buradaki l_B , B bölgesindeki bağ uzunluğudur (Şekil 2.16) ve $S_{pB} = h_B l_B$, B bölgesindeki plastik bölgenin alanıdır.

Denklem 2.54 düzenlenirse;

$$w_{Tf}^B = \frac{W_{Tf}^B}{l_B t} = w_{Te}^B + w_{Tp}^B h_B \quad (2.55)$$

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

$$w_{Tf}^B = \frac{2P_B}{t} \quad (2.56)$$

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 2.55 ve Denklem 2.56 kullanılarak hesaplanabilir [25].

2.3. Literatür Çalışması

Kolay şekillendirilmesi, kolay üretilmesi ve geri dönüştürülebiliyor olması nedeniyle termoplastik polimer malzemeler son yıllarda yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu malzemelerin kalitesi, kullanım ortamı ve süresine bağlı olarak değişime uğramaktadır. Yaşlanma neticesinde özelliklerin kötüleşmesi, ürünün kullanım amacına uygunluğunu da sınırlandırmaktadır. Bu nedenle özellikle çevresel etkilere karşı hassas olan termoplastik polimerlerin stabilizasyonu, çözülmesi gereken önemli bir mühendislik problemidir. Polimer malzemelerde yaşlanmanın ilk belirtisi, mekanik özelliklerde büyük bir azalma yaşanmaksızın dış görünüşte meydana gelen değişimdir. Yaşlanma sürecinin devamında, başta kırılma tokluğu olmak üzere mekanik özelliklerde kötüleşme meydana gelir [26].

Birçok polimer suyu absorbe etmektedir. Nem absorpsiyonunun polimerlerin özelliklerinin değişimine neden olduğu bilinmektedir. Polimer malzeme tarafından absorbe edilen su malzemenin camsı geçiş sıcaklığını (T_g) düşürmekte ve malzemede plastikleşme etkisi yapmaktadır. Sıcaklık arttıkça malzemenin absorbe ettiği su

miktarı da artar. Özellikle malzemede bulunan mikro çatlaklara giren su şişme etkisi yaratarak artık gerilmelere neden olur [27, 28].

Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığının (T_g) ölçülmesi oldukça önemlidir çünkü bu sıcaklık kritik servis sıcaklıklarını, dizayn parametrelerini ve uygulama alanlarını belirlemektedir. Hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılan malzemenin T_g 'si azaldığından malzemenin servis sıcaklığında değişim meydana gelmektedir. Bu değişim su-polimer etkileşimi nedeniyle plastikleşmeye neden olmaktadır.

Polimerlerin hidrotermal çevreye maruz kalması malzemenin camsı geçiş sıcaklığının azalmasına neden olduğu gibi aynı zamanda plastikleşmeye sebebiyet vererek özellikle dayanımın azalmasına neden olur. Bunun nedeni, malzemenin plastikleşmesi, kimyasal ve mekanik olarak degradasyona uğramasıdır. Plastikleşme malzemenin modülünü azaltır. Mekanik degradasyon ise absorbe edilen su moleküllerinin malzemede şişkinlik yaratması ve bunun sonucunda yapıda zorlanmaların ortaya çıkması şeklinde tanımlanabilir. Polimerlerde hidrotermal çevrimlerden dolayı meydana gelen degradasyonun derecesini ve yapısını belirlemek, kullanım alanlarını daha da genişletmek için daha fazla araştırmanın yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Nemin ve ısı çevrimlerin aynı anda yarattığı etki hidrotermal yaşlandırma olarak adlandırılır.

Polimerlerin yapısında var olan nem polimerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde önemli ölçüde değişime neden olmaktadır. Polimerin nem absorbe etmesi plastikleşme etkisi yaratarak T_g sıcaklığını düşürmektedir. Yüksek sıcaklıklarda neme maruz kalınması, karmaşık polimer zincirlerinde boşlukların oluşmasını, zincirlerin genişmesini ve polimerde mikro çatlakların meydana gelmesini sağlamaktadır.

Polimer malzemelerin nemi absorbe etmesi sıcaklık, nem ile temasta olan yüzey alanı ve nemin yayılma gücü gibi faktörlere bağlıdır. Nem absorpsiyonu polimer zincirlerini bir arada tutan bağların hidrolizine ve ayrıca mikro çatlakların ve mikro boşlukların oluşmasına neden olur. Hidrotermal yaşlandırmada termal çevrim sayısı su absorpsiyonunu hızlandıran etki yaratmaktadır. Nem penetrasyonu, temel

mekanizma olan difüzyon (yayılma) tarafından kontrol edilmektedir. Mikro çatlakların ve mikro boşlukların sayısında meydana gelen artış polimer yapının su almasını kolaylaştırmakta ve suyun bu bölgelerde depolanmasına neden olmaktadır.

Su moleküllerinin polimerin yapısına olan difüzyonu sonrasında malzemede genişleme veya şişme etkisi meydana gelir bu nedenle polimer zincirleri birbirinden uzaklaşmak zorunda kalır. Zincirlerin ayrılmasındaki artış, moleküller arasındaki bağ kuvvetlerini zayıflatmakta ve bunun sonucu olarak malzemenin dayanımı ve elastisite modülü azalmaktadır [28].

Polimer malzemelerin yaşlanması sonucunda özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemek üzere kırılma mekaniği kavramlarından faydalanılır. Bu iş için seçilecek uygun kırılma mekaniği metodu ile numune geometrisi ve türünden etkilenmeyen bir malzeme parametresinin (kırılma tokluğunun) elde edilmesi gerekir. Sünek kırılma davranışı sergiledikleri için, özellikle polimer malzemelerin kırılma tokluğunu saptamak üzere, EWF yöntemi yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

Yeni bir yöntem olmasına rağmen EWF yöntemi ile ilgili olarak son yıllarda çok sayıda çalışma yayımlanmıştır. Çünkü bu yöntem diğer elasto-plastik kırılma mekaniği deney yöntemlerine nazaran uygulanabilirlik açısından daha basit bir yöntemdir. Yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde polimer malzemeler ve DENT tipi deney numuneleri kullanılmıştır [19-25].

Konuyla ilgili yapılan bir çalışmada, uPVC malzemedan hazırlanmış olan DENT ve SENT tipi numunelerin kırılma tokluğuna test sıcaklığının, numune geometrisinin, numune boyutlarının ve yükleme hızının etkisi EWF yöntemiyle incelenmiştir. Diğer test parametrelerinden etkilenmemekle birlikte, malzemenin kırılma tokluğu değerinin SENT numuneler için DENT numunelerden %25 daha büyük olacak şekilde numune geometrisinden etkilendiği saptanmıştır. Boyun verme ve yırtılma için spesifik esas kırılma işi ($w_{e,nt}$) değerinin, akma için esas kırılma işi değerinden ($w_{e,y}$) her zaman daha büyük olduğu saptanmıştır. $w_{e,y}$ değerinin numune geometrisinden bağımsız olduğu (doğal tokluk) görülmüş ancak $w_{e,nt}$ değerinin

SENT numunelerde DENT numunelerden daha büyük olduğu saptanmıştır. Spesifik plastik deformasyon işi (βw_p) değerinin, plastik bölge şekil faktöründen dolayı özellikle numune geometrisinin değişimine çok hassas olduğu görülmüştür. Net kesit gerilmesi değeri için öngörülen teorik değer sağlanamadığı, $\sigma_n=0,78\sigma_y$ olarak bulunmuştur [19].

Yapılan bir diğer önemli çalışmada ise polietilen tereftalat malzemenin DENT tipi deney numunelerinin higrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrası kırılma tokluğu değeri (farklı test sıcaklıkları için) EWF yöntemiyle incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak, ilk hal numunelerinde akma için spesifik esas kırılma işi ($w_{e,y}$) değerinin sıcaklıktan etkilenmediği görülmüş ve bu terimin malzemenin doğal tokluğu (inherent toughness) olduğu (kırılma parametrelerinden etkilenmediği için) ifade edilmiştir. Boyun verme spesifik kırılma işi ($w_{e,nt}$) değerinin sıcaklıkla arttığı ancak spesifik plastik deformasyon işinin (βw_p) değişmediği görülmüştür. Bunun nedeninin viskoplastisiteden kaynaklanan süneklik artışı olduğu sonucuna varılmıştır. Higrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılan malzeme için spesifik kırılma işi terimlerinin ($w_e, w_{e,y}, w_{e,nt}$) sıcaklıkla azaldığı belli bir sıcaklık değerinden sonra ise sabit kaldığı görülmüştür. Spesifik plastik deformasyon işi parametrelerinin ($\beta w_p, \beta_y w_{p,y}, \beta_{nt} w_{p,nt}$) higrotermal yaşlandırma işleminden etkilenmediği görülmüş, bunun nedeninin ise malzemeye nüfuz eden suyun plastikleştirici etkisi olduğu ifade edilmiştir [26].

EWF yöntemi ile malzemelerin kırılma tokluğunun saptanması için yapılan literatür çalışmalarının bir çoğundan farklı olarak, bu çalışmada SENT tipi deney numuneleri kullanılmıştır. ÇYMAPE malzemenin hidrotermal ortam etkisiyle kırılma tokluğundaki değişimi incelemek üzere, farklı çentik boylarına sahip numuneler, belirli sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Yaşlandırma işleminin ÇYMAPE malzemenin termal, mikro yapı ve EWF parametrelerindeki değişimlere etkileri incelenmiştir. Hidrotermal yaşlandırmanın termal etkilerini incelemek üzere DSC analizi ve kırılma yüzeylerindeki etkilerini incelemek üzere fraktografik inceleme yapılmıştır. Malzemenin kırılma tokluğu EWF parametreleriyle ifade edilmiştir.

BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzeme

Deneyleerde 5 mm kalınlığında çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) malzeme kullanılmıştır. Malzemenin çekme deneyi (type 1B EN ISO 527) sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneyde kullanılan ÇYMAPE malzemenin mekanik özellikleri

BÜYÜKLÜK	BİRİMİ	DEĞERİ
Elastisite Modülü	MPa	1240,78
Akma Dayanımı	MPa	24,46
Akma Kuvveti	N	4281,8
%10 Genleme İçin Çekme Gerilmesi	MPa	23,27

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

ÇYMAPE malzemenin esas kırılma işi yaklaşımı ile kırılma tokluğunu hesaplamak için tek kenardan çentikli çekme numunesi (SENT) seçilmiştir.

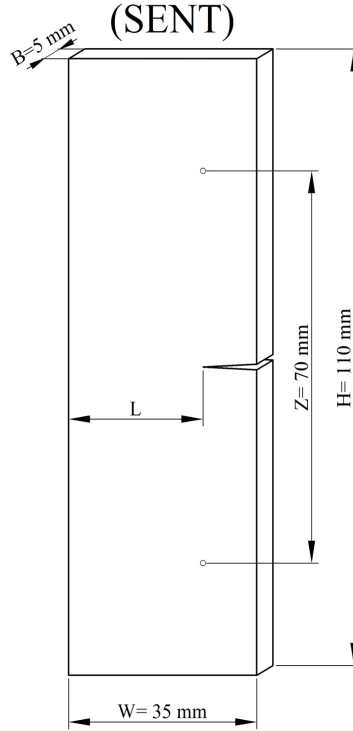
Malzemenin kırılma tokluğunun esas kırılma işi yaklaşımına uygun olarak bulunabilmesi için spesifik kırılma işi (w_f) değerinin çentiksiz bölgenin uzunluğu (L -ligament length) ile değişiminin grafiksel olarak gösterilmesi gerekir. Bu amaçla farklı L uzunluklarına sahip numunelere çekme testi uygulanmıştır.

Deneyde kullanılacak olan numuneler, 5 mm kalınlıktaki ÇYMAPE levhadan, tüm numunelerin kesme doğrultuları aynı olacak şekilde, önce giyotin makasta, daha sonra da marangoz tezgâhında Şekil 3.1’deki ölçülerde kesilmiştir.

Tablo 3.2: Hidrotermal yaşlandırma süresi ve farklı L uzunlukları için numune sayısı

Yaşlandırma Süresi (Gün)	Farklı L Uzunlukları İçin Numune Sayısı (Ad.)							Toplam Numune Sayısı (Ad.)
	$L=3$ (mm)	$L=5$ (mm)	$L=7$ (mm)	$L=10$ (mm)	$L=15$ (mm)	$L=20$ (mm)	$L=25$ (mm)	
0	3	3	3	3	3	3	3	21
1	0	3	0	0	0	3	0	6
3	0	3	0	0	0	3	0	6
7	0	3	0	0	0	3	0	6
15	0	3	0	0	0	3	0	6
30	0	3	0	0	0	3	0	6
60	0	3	0	0	0	3	0	6
90	3	3	3	3	3	3	3	21

Genel Toplam = 78 Adet



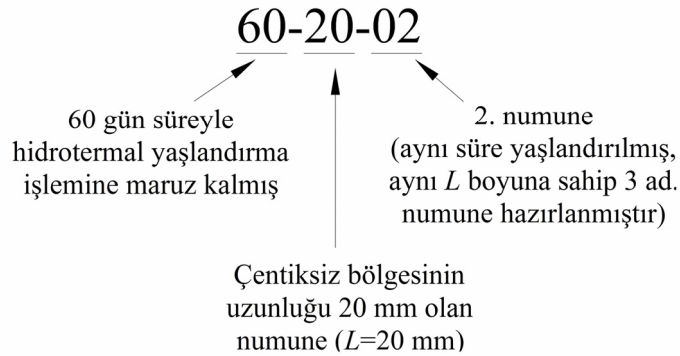
Şekil 3.1: Deneylerde kullanılan SENT numunelerin boyutları

Hidrotermal yaşlandırma öncesi ve hidrotermal yaşlandırma işleminin farklı evreleri için farklı L uzunlukları belirlenmiştir. Her bir L uzunluğu için 3 adet numune hazırlanmıştır. Bu farklı L uzunluklarına sahip numunelerde çentik oluşturmak için demir testeresi kullanılmış daha sonra keskin çentik ucu elde etmek maksadıyla maket bıçağı kullanılmıştır. Deneyde kullanılan numunelere ait L uzunlukları Tablo 3.2’de verilmiştir.

3.3. Deney Numunelerinin Kodlanması

ÇYMAPE malzemenin esas kırılma işi yaklaşımı ile kırılma tokluğunu saptamak, ayrıca hidrotermal yaşlandırma sürecinin malzemenin kırılma davranışına etkisini incelemek üzere farklı L uzunluklarına sahip numuneler sistematik olarak hazırlanmış ve kodlanmıştır. Numunelerin kodlanması prosedürü, hidrotermal yaşlandırma süresi, çentiksiz bölgenin uzunluğu (L) ve numune numarası kriter alınarak hazırlanmıştır. Her bir numuneye öncelikle yaşlandırma sürecini, daha sonra L uzunluğunu ve son olarak ta numune numarasını belirtecek şekilde bir kodlama sistemi kurgulanmıştır.

Örneğin; 30-5-02 kodlu numunenin ne anlam ifade ettiğini açıklamak gerekirse; buradaki ilk sayı numunenin 30 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kaldığını, ikinci rakam numunenin çentiksiz bölgesinin uzunluğunun 5 mm olduğunu ($L= 5$ mm), son sayı ise bu numunenin 30 gün süreyle sıcak suda bekletilen ve $L= 5$ mm olan ikinci numune olduğunu ifade etmektedir. Şekil 3.2’de bu durum şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Deney numunelerinin kodlanması

Kodlama işleminin anlaşılır ve pratik olması önemli bir konudur. Kodlamanın doğru bir şekilde yapılması, sadece deney numunelerinin sınıflandırılarak deney sürecinin hızlanmasını sağlamakla kalmayıp, ayrıca deneyler sonucunda elde edilen bulguların doğru bir şekilde kaydedilmesini de kolaylaştırmaktadır. Bu mantıktan hareketle, bu çalışmada kullanılan 78 adet deney numunesi yukarıda açıklandığı şekilde kodlanmıştır.

3.3. Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi

ÇYMAPE malzemenin esas kırılma işi yöntemi ile incelenen kırılma davranışına hidrotermal yaşlandırmanın etkisini incelemek üzere, EWF yöntemine uygun olarak hazırlanmış SENT tipi deney numunelerine, hidrotermal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Hidrotermal yaşlandırma sürecinin zamanla malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemek üzere deney numuneleri 1, 3, 7, 15, 30, 60 ve 90 gün süreyle 80°C sıcaklıktaki suda bekletilmiştir. Yaşlandırma sürecinin her evresi için deney numunelerine $L= 5$ mm ve $L= 20$ mm olmak üzere iki farklı L uzunluğu (numunenin çentiksiz bölgesinin uzunluğu) belirlenmiştir. Her bir L boyu için 3'er adet deney numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca malzemenin su absorpsiyonunu ölçmek üzere 3, 5, 7, 10, 15, 20 ve 25 mm L boylarına sahip 2'şer adet numune ayrıca sıcak suda bekletilmiş ve ağırlıkları hassas terazi ile periyodik olarak ölçülmüştür. Ağırlık ölçümü yapılan numuneler haricindeki tüm numuneler, kırılma davranışları incelenmek üzere çekme testine tabi tutulmuştur.

3.4. Çekme Testi

Verilen bir malzeme için gerilme ile genleme arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram malzemenin önemli bir özelliğidir. Bu diyagramları elde etmek için genellikle numune üzerinde çekme testleri yapılır. Çekme testi, mühendislikte en yaygın kullanılan malzeme testlerinden birisidir. Bu testten, malzemenin kalitesi ve özellikleri hakkında oldukça ayrıntılı ve yararlı bilgiler elde edilir. Genelde silindirik bir numune iki ucundan çeneler arasına yerleştirilir ve parça çekilerek koparılır. Her malzemenin kendine özgü bir gerilme genleme eğrisi vardır [29].

Çekme testi sonucu malzemenin, çekme dayanımı, akma dayanımı, elastisite modülü kopmadaki yüzde uzaması, üniform uzama yüzdesi, kopmadaki kesit daralma yüzdesi değerleri elde edilir [30].

Esas kırılma işi yaklaşımı için çekme testi sonuçlarından elde edilen yük-uzama eğrilerinin önemi büyüktür. Yöntemin uygulanabilirliği ve sonuçların güvenilirliği açısından, farklı L boylarına sahip numunelere çekme testi uygulanarak elde edilen yük-uzama eğrilerinin, geometrik olarak benzer olması gerekir. Esas kırılma işi metodunun uygulanabilirliği için en önemli şart budur [31].

ÇYMAPE malzemenin esas kırılma işi yaklaşımıyla kırılma davranışını incelemek üzere INSTRON 4411 (Şekil 3.3) universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyleri atmosferi kontrol edilen bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı 21 ± 3 °C'dir.



Şekil 3.3: Instron 4411 universal elektromekanik test cihazı [27]

DeneYler EN ISO 527 (type 1B) standartlarına uygun olarak yapılmıştır [32]. Çekme testleri 2 mm/dak sabit hızda gerçekleştirilmiştir [19]. DeneY numunesi olarak tek kenardan çentikli çekme numuneleri kullanılmıştır. Yaşlandırma öncesi ve yaşlandırma sürecinin belli safhaları için farklı *L* uzunluklarına sahip numuneler kullanılmıştır. Yaşlandırma öncesi deneY numuneleri 3 gün süreyle +5°C'de fırında bekletilmek suretiyle nem alma işlemine tabi tutulmuştur.

Bu deneYler sonucunda elde edilen yük-uzama eğrileri kullanılarak malzemenin esas kırılma işi parametreleri hesaplanmıştır. DeneYler sonucunda elde edilen yük uzama eğrilerindeki maksimum gerilme değeri akma gerilmesi olarak alınmıştır [19].

3.5. Görsel İnceleme

3.5.1. Makro inceleme

Çekme testi ile hasara uğratılan numunelerde hidrotermal yaşlandırmanın fiziksel etkisini incelemek üzere kopma yüzeylerinin çıplak gözle analizi yapıldı. Çatlak ilerlemeden önce kırılma bölgesinin tam olarak hasara uğradığının göstergesi olan gerilme beyazlanması (stress-whitened zone) olayı gözle incelendi [33]. Hidrotermal yaşlandırma işlemi öncesi ve sonrası numunelere ait kırılma bölgesi fotoğrafları yüksek çözünürlüklü dijital kamera ile çekildi ve yorumlandı.

3.5.2. Fraktografik inceleme

Hidrotermal yaşlandırmanın ÇYMAPE malzemenin kırılma davranışına etkisi, çekme testi sonucu hasara uğratılan numunelerdeki kırılma yüzeylerinde de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan numunelerin kırılma yüzeylerinin, JEOL JSM-6060 tipi taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elektron Mikroskobisi Laboratuvarı'nda, 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 [34]

3.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi

Malzemenin ısıl özelliklerinde (kristalleşme derecesi ve erime sıcaklığında) meydana gelen değişimleri belirlemek için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) gibi çok önemli malzeme özellikleri elde edilmektedir.



Şekil 3.5: Mettler Toledo DSC1 analiz cihazı [35]

Çekme testinde hasara uğratılan numunelerden alınan uygun miktardaki (43 ila 73 mg) ÇYMAPE malzeme, 17,5 dakika süreyle 25 °C'den 200 °C' ye kadar ısıtılmış ve erime entalpisi değerleri hesaplanmıştır. DSC analizi 0, 15, 30, 60 ve 90 gün süreyle yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır.

DSC analizi Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Polimer ve Kauçuk Teknolojisi Laboratuvar'ında Mettler Toledo DSC1 marka analiz cihazında (Şekil 3.5) yapılmıştır.

DSC analizi ile elde edilen erime entalpisi değeri ile malzemenin göreceli kristalleşme derecesi Denklem 3.1 yardımı ile saptanabilir [36].

$$\eta = \left[\frac{\Delta H_{f,i} - \Delta H_{f,0}}{\Delta H_{f,0}} \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

Burada; $\Delta H_{f,i}$ hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunenin erime entalpisi (ısıl füzyon), $\Delta H_{f,0}$ ise ilk hal numunesinin erime entalpisi değeridir.

BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzeme (ultra high molecular weight polyethylene) endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu malzemenin kırılma davranışının bilinmesi, işletme şartlarındaki zorlanma koşullarına ve çevresel şartlara uygun malzeme seçimi konusunda çok önemli bir kıstas olmaktadır. Ancak doğası gereği polietilen malzeme normal şartlar altında sünek bir malzemedir ve klasik kırılma mekaniği yaklaşımı ile bu malzemenin kırılma davranışının tam olarak açıklanabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle çok yüksek yoğunluklu polietilen malzemenin kırılma davranışını karakterize etmek için esas kırılma işi metodu (essential work of fracture) kullanılmıştır. Bu amaçla, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemenin hidrotermal yaşlandırma etkisi altındaki ve yaşlandırmadan önceki kırılma davranışını incelemek üzere esas kırılma işi metoduna özgün olarak hazırlanmış numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen bulgular hidrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrası malzemenin kırılma davranışının esas kırılma işi metoduna uygunluğunu saptamak amacıyla grafiksel olarak gösterilmiştir.

Üretici firmadan temin edilen çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemedan hazırlanmış olan tek taraftan çentikli çekme numuneleri (SENT), Instron 4411 universal çekme testi cihazında sabit hızda çekilerek hasara uğratılmıştır. Yaşlandırma öncesi ve sonrası numunelere ait yük-uzama eğrileri çizilmiş ve sonuçlar esas kırılma işi yaklaşımı ile yorumlanmıştır. Esas kırılma işi yaklaşımı parametreleri olan spesifik esas kırılma işi ve spesifik plastik deformasyon işi (spesifik esas olmayan kırılma işi) grafikleri yaşlandırma öncesi ve sonrası numuneler için hazırlanmış ve sunulmuştur. Yaşlandırmanın etkisini incelemek için yaşlandırma öncesi ve sonrası numunelere ait yük-uzama eğrileri aynı grafikte üst üste çizilen eğrilerle gösterilmiştir. Gerilme halinin (düzlem gerilme veya düzlem genleme) çentiksiz bölgenin uzunluğu olan L ile değişimini incelemek amacıyla σ_n-L grafikleri çizilmiştir.

4.1. Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Malzemenin (ÇYMAPE) Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

Farklı L uzunluklarına sahip numunelerin çekme testi sonucu elde edilen mukavemet değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Yaşlandırma öncesi numunelere ait çekme testi parametreleri ve gerçek L uzunluğu değerleri

Numune Kodu	Çekme Kuvveti [P_{max}] (N)	Kopma Uzaması [e_b] (mm)	Akma Enerjisi [W_y] (J)	Kırılma Enerjisi [W_f] (J)	Gerçek L Uzunluğu [L_g] (mm)
0-3-01	341,5	8,6	0,55	1,92	2,30
0-3-02	466,8	10,8	1,02	3,50	3,96
0-3-03	417,9	9,6	0,78	2,61	3,12
0-5-01	625,2	14,0	1,70	5,84	4,75
0-5-02	594,1	13,1	1,49	5,12	5,04
0-5-03	673,6	14,7	1,93	6,53	5,43
0-7-01	814,2	16,5	2,85	9,30	6,66
0-7-02	809,1	17,5	2,82	9,37	7,17
0-7-03	878,7	17,7	3,17	10,33	6,95
0-10-01	1009,0	19,9	3,87	13,30	9,23
0-10-02	1163,0	21,9	5,46	16,86	10,03
0-10-03	1191,0	23,4	5,33	17,54	10,54
0-15-01	1508,0	27,9	8,44	27,76	14,44
0-15-02	1565,0	28,3	9,05	29,24	14,89
0-15-03	1543,0	27,9	8,75	28,60	14,63
0-20-01	1920,0	33,5	12,39	42,53	19,36
0-20-02	1888,0	32,5	12,04	40,94	18,90
0-20-03	2087,0	36,5	14,64	49,86	20,53
0-25-01	2451,0	40,9	17,49	66,31	23,94
0-25-02	2475,0	40,8	17,50	68,00	24,41
0-25-03	–	–	–	–	–

Tablo 4.1'den görüldüğü üzere ÇYMAPE malzemenin esas kırılma işi metoduyla hidrotermal yaşlandırma öncesi kırılma davranışını karakterize etmek için 7 farklı L boyu seçilmiş ve her bir L boyu için 3'er adet numune kullanılmıştır. 0-25-03 kodlu numune ise deney tertibatındaki bir sorun nedeniyle standarda uygun olarak çekilememiştir.

Tablo 4.1'deki gerçek L uzunluğu değerleri optik mikroskopla ölçülmüş, diğer değerler ise çekme testinden elde edilmiştir. Görüldüğü gibi teorik L uzunlukları ile gerçek L (L_g) uzunlukları arasında çok büyük fark bulunmamaktadır.

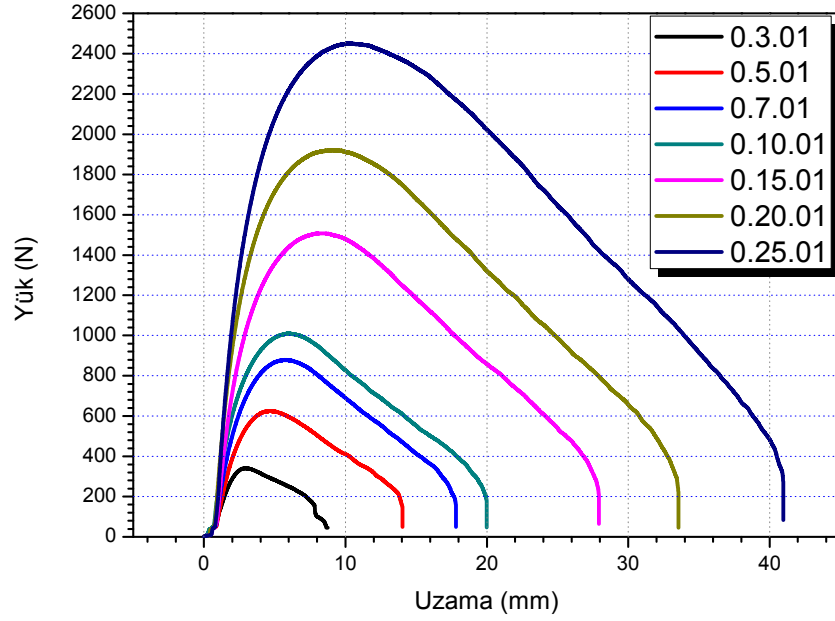
Maksimum yük (P_{max}) değeri, yük uzama eğrisindeki maksimum yük değerini ifade etmektedir ve maksimum net kesit gerilmesi (σ_n) değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Net kesit gerilmesi değeri, maksimum yük değerinin kırılma yüzeyi kesit alanına bölünmesi ile elde edilir. L boyu arttıkça P_{max} değeri de artmaktadır (Tablo 4.1).

Kopma uzaması e_b ile ifade edilen malzemenin kopma anındaki uzama miktarıdır ve Denklem 2.42'de görüldüğü üzere L ile arasında lineer bir ilişki vardır. L boyu arttıkça e_b değeri de artmaktadır (Tablo 4.1).

Akma enerjisi (W_y) ve kopma enerjisi (W_f), sırasıyla malzemenin akması ve kopması için gereken enerji miktarıdır. W_y , yük uzama eğrisinde maksimum yüke kadar olan bölgenin alanıdır ve W_f , yük uzama eğrisinin altında kalan toplam alandır [18]. W_f 'ye kırılma işi (work of fracture) denir. EWF yaklaşımına göre bu enerji, malzemenin kırılması için harcanan esas enerji (esas kırılma işi- W_e) ve çentik ucunda plastik deformasyon mekanizmalarını harekete geçirmek için harcanan enerji (plastik deformasyon işi veya esas olmayan kırılma işi- W_p) olmak üzere iki bileşene ayrılır (Denklem 2.30). L boyu arttıkça W_f ve W_y değeri de artmaktadır (Tablo 4.1).

Bir malzemenin kırılma davranışının açıklanmasında EWF metodunun uygulanabilir olduğunun en önemli göstergesi farklı L uzunluklarına sahip numunelerin yük-uzama eğrilerinin geometrik olarak benzer olmasıdır. Her bir deney numunesi için çekme testleri yapıldı ve veriler bilgisayar ortamında çizilerek grafiksel sonuçlar elde edildi.

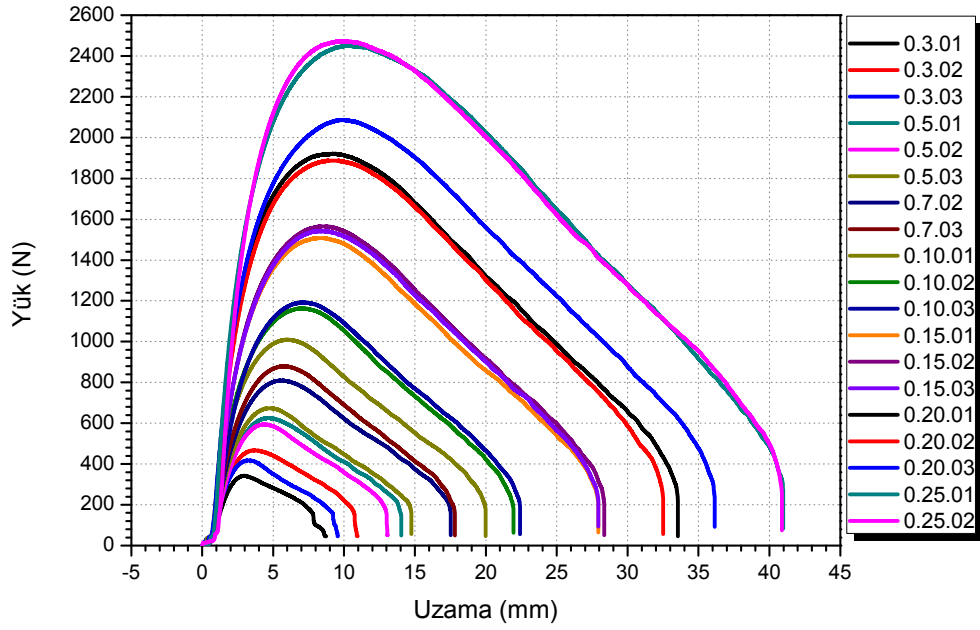
Şekil 4.1’de hidrotermal yaşlandırma işlemi uygulanmadan çekme testi yapılmış bazı numunelere ait yük-uzama eğrileri ve Şekil 4.2’de ise hidrotermal yaşlandırma öncesi çekme testi uygulanmış olan tüm numunelere ait yük-uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.1: Bazı ilk hal numunelerine ait yük-uzama eğrileri

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den görüldüğü üzere hidrotermal yaşlandırma öncesi durum için farklı L uzunluğuna sahip numunelere ait yük-uzama 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 [23,37].

Literatür araştırmasından elde edilen bilgiler ışığında söylenebilir ki EWF yaklaşımı için en önemli kriterlerden birisi de yük-uzama eğrilerinde maksimum yükten sonra meydana gelen yük düşüşünün görülmesidir [38-43]. Zira bu yük düşüşü, çatlak ilerlemeden önce numunenin çentiksiz bölgesinde (L uzunluğu boyunca) akma meydana geldiğinin göstergesidir ve bu gözleme dayanarak kırılma işi terimini akma için gereken iş ve boyun verme-yırtılma için gereken iş (Denklem 2.37 ve Denklem 2.38) olmak üzere iki kısımda incelemek mümkün olmaktadır. Ancak Şekil 4.1 ve 4.2’de böyle bir yük düşüşü görülmemektedir.

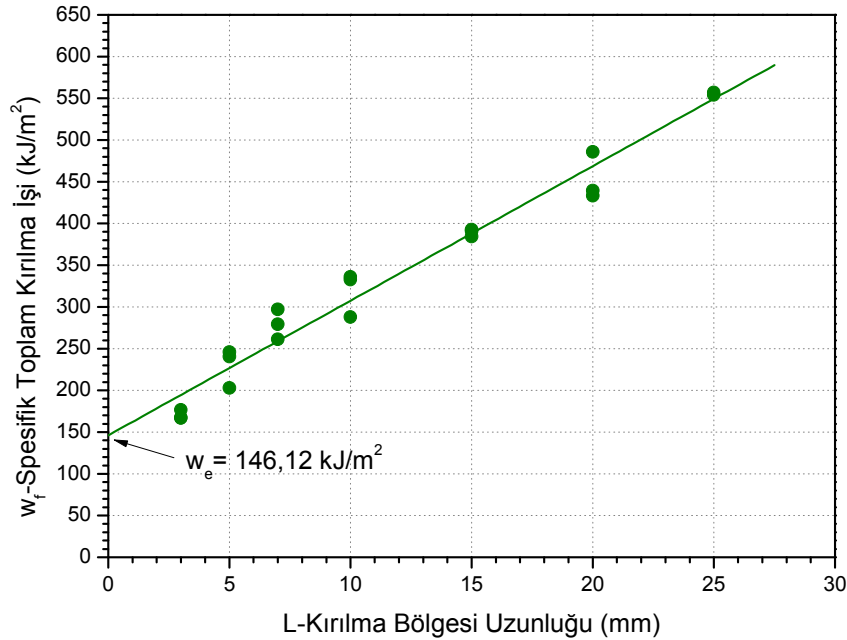


Şekil 4.2: Tüm ilk hal numuneleri için yük-uzama eğrileri

Her ne kadar yük-uzama eğrilerinde belirgin bir yük düşüşü olması istense de belli malzemeler ve belli deney parametreleri için belirgin yük düşüşü elde etmek mümkün değildir [31, 33, 44, 45]. Örneğin yapılan bir çalışmada [26] aynı malzemede higrotermal yaşlandırmanın etkisiyle yük-uzama eğrilerindeki ani yük düşüşünün kaybolduğu, başka bir çalışmada [32] ise fiziksel yaşlandırmanın etkisiyle malzemede ani yük düşüşü bölgesinin oluşmadığı görülmüştür. Ancak bu çalışmadaki yük uzama eğrilerinin ani yük düşüşü göstermemesinin nedeni farklıdır; daha önce yapılan bazı çalışmalar, deneylerde SENT tipi numune kullanılması durumunda yük-uzama eğrilerinde ani yük düşüşü bölgesinin oluşmadığını göstermiştir. Yani çatlak ilerlemeden önce kırılma bölgesinde tam olarak akma olayının meydana gelip gelmediğini yük uzama eğrilerine bakarak anlamak imkânsızdır. SENT numunelere ait yük-uzama eğrilerinde ani yük düşüşü olmaması esas kırılma işi metodunun uygulanamayacağı anlamına gelmemektedir ancak SENT ve DENT tipi numuneler kullanılarak elde edilen spesifik kırılma işi parametrelerinde farklılıklar olduğu da bilinen bir gerçektir [19, 20].

Bu çalışmada, malzemenin maksimum yükten sonra tam olarak akmaya uğradığı kabul edilmiş ve bu kabule göre hesaplamalar yapılmıştır.

Yük-uzama eğrisinin altında kalan alan malzemenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerjidir ve bu değerin numunenin çentiksiz bölgesinin alanına bölünmesiyle elde edilen değere spesifik toplam kırılma işi (w_f) denir. Denklem 2.32 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 işi değerini verir. Dolayısıyla Şekil 4.2'deki eğriler dikkate alınarak toplam kırılma işi değerleri bilgisayar ortamında hesaplanmış ve Denklem 2.31 kullanılarak spesifik toplam kırılma işi değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler ile de Şekil 4.3'deki grafik elde edilmiştir.

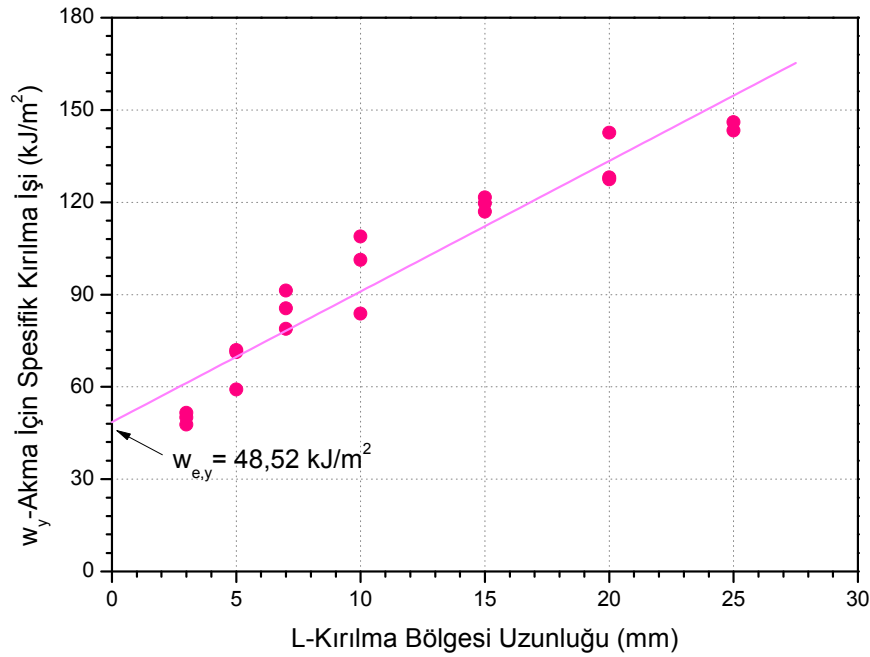


Şekil 4.3: İlk hal numunelerinde spesifik toplam kırılma işinin numunenin çentiksiz kısmının uzunluğu ile değişimi

Şekil 4.3 incelendiğinde bulunan değerlerin Denklem 2.32'yi desteklediğini ve spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişiminin lineer olduğu görülmektedir. EWF'nin uygulanabilirliği açısından bu şekil çok önemlidir ve sonuçların lineer çıkması EWF yönteminin başarısını göstermektedir. Doğrunun w_f eksenini kestiği nokta spesifik esas kırılma işi değerini (w_e) verir ve bu değer belirli bir kalınlık için malzeme sabitidir. Spesifik esas kırılma işi değeri malzemenin kırılma tokluğunun ölçüsüdür ve ne kadar büyükse malzemenin kırılması da o kadar zordur denilebilir [19].

Şekil 4.3'deki doğrunun eğimi spesifik plastik deformasyon işi (esas olmayan spesifik kırılma işi-non essential specific work of fracture) yani βw_p değerini verir. Spesifik esas kırılma işi bir malzeme sabiti olmasına karşın, spesifik plastik deformasyon işi malzeme sabiti değildir ve malzemenin sünekliğinin bir ölçüsüdür. Verilen bir malzeme için w_f-L doğrusunun eğimi yani βw_p değeri malzemenin sünekliğiyle birlikte artar veya bir başka deyişle malzemenin gevrekliği arttıkça βw_p değeri sıfıra yaklaşır.

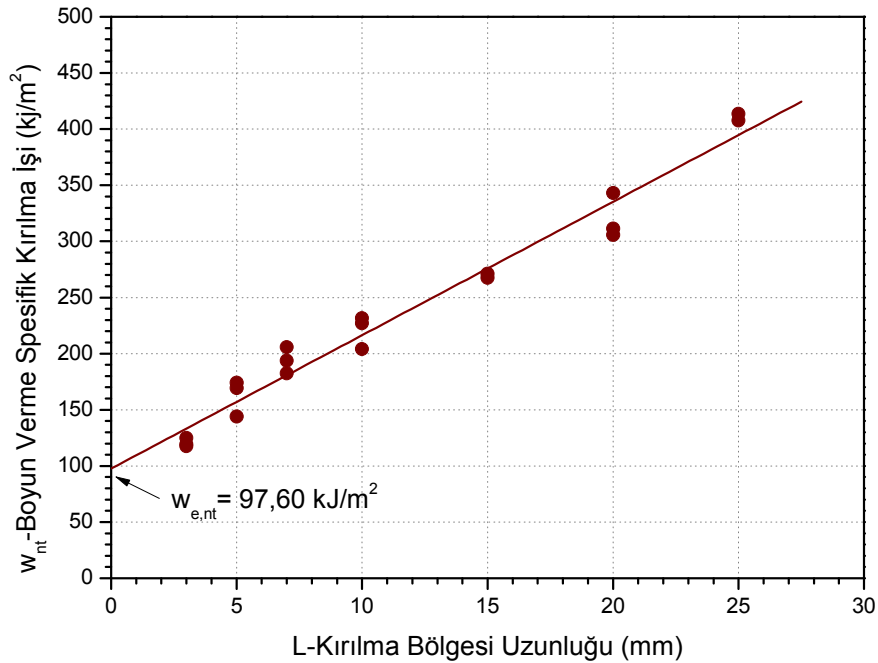
Yük-uzama eğrilerinde ani yük düşüşü bölgesi, yani çatlak ilerlemeye başlamadan önce tam olarak akma meydana geldiğinin somut bir kanıtı olmamasına rağmen maksimum gerilme akma gerilmesi olarak kabul edilerek yük-uzama eğrilerinde maksimum yüke kadar olan bölgenin altında kalan alan hesaplanarak akma için gereken kırılma işi değeri bulunmuştur. Bu değer, çentiksiz bölgenin alanına oranı akma için spesifik kırılma işi (w_y) değerini verir (Denklem 2.36). Denklem 2.37'ye göre akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi lineerdir ve bu doğrunun w_y eksenini kestiği nokta akma için spesifik esas kırılma işi ($w_{e,y}$) değerini verir. Şekil 4.4'de akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.4: İlk hal numunelerinde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi

Şekil 4.4 incelendiğinde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile lineer olarak değiştiği görülmektedir bu sonuç ta Denklem 2.37'yi doğrulamaktadır. Akma için spesifik esas kırılma işi değeri ($w_{e,y}$), Şekil 4.4'deki doğrunun w_y eksenini kestiği noktadır. Akma için spesifik esas kırılma işi değeri test sıcaklığı, yükleme hızı ve numune genişliği gibi test parametrelerinden etkilenmez (veya çok az etkilenir), bu nedenle bu değer malzemenin doğal tokluğu (inherent toughness) olarak adlandırılır [26,32]. w_y - L doğrusunun eğimi $\beta_y w_{p,y}$ değerini verir.

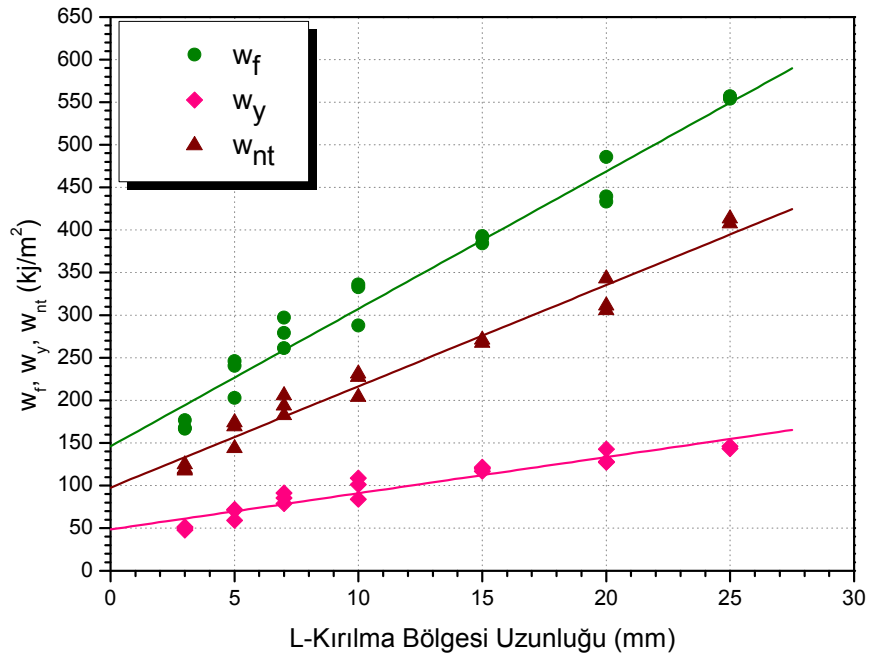
Malzemenin kırılması için gereken spesifik iş değerinin Denklem 2.36'da gösterildiği üzere iki bileşeni vardır. Bu bileşenlerden birisi, Şekil 4.4'de grafiksel olarak verilmiş olmakla birlikte diğer bileşen ise Denklem 2.38 yardımıyla hesaplanır. Bu değer malzemenin akmaya uğradıktan sonra, kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerjinin birim alana düşen miktarı olarak ifade edilebilir. Malzemede akma meydana geldikten sonra boyun verme ve daha sonra da yırtılma mekanizmaları devreye girer. Bu değer, yük-uzama eğrisinin maksimum yük noktasından sonraki kısmının altında kalan alanın toplam kırılma yüzeyi alanına bölünmesi ile hesaplanır. Şekil 4.5'de boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi teriminin L uzunluğu ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.5: İlk hal numunelerinde boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi

Denklem 2.38 incelendiğinde malzemenin boyun vermesi için gereken spesifik kırılma iş değerinin L uzunluğu ile lineer olarak değiştiği ve elde edilecek olan doğrunun (bu doğrunun eğimi $\beta_{nt} w_{p,nt}$ 'dir) w_{nt} eksenini kestiği noktanın boyun verme ve yırtılma için spesifik esas kırılma işi terimini ($w_{e,nt}$) vereceği sonucuna ulaşılır. Şekil 4.5'den görüleceği gibi bu sonuç deneysel olarak muntazam bir biçimde ortaya konmuştur ve EWF'nin geçerliliği açıkça görülmektedir.

Malzemeyi kırmak için gereken spesifik iş terimleri Şekil 4.6'da aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Denklem 2.36'da ifade edildiği üzere spesifik toplam kırılma işi, akma için spesifik kırılma işi ve boyun verme-yırtılma için spesifik kırılma işi değerlerinin toplamıdır ve bu sonuç Şekil 4.6'da açıkça görülmektedir.



Şekil 4.6: İlk hal numunelerinde spesifik kırılma işi parametrelerinin L boyu ile değişimi

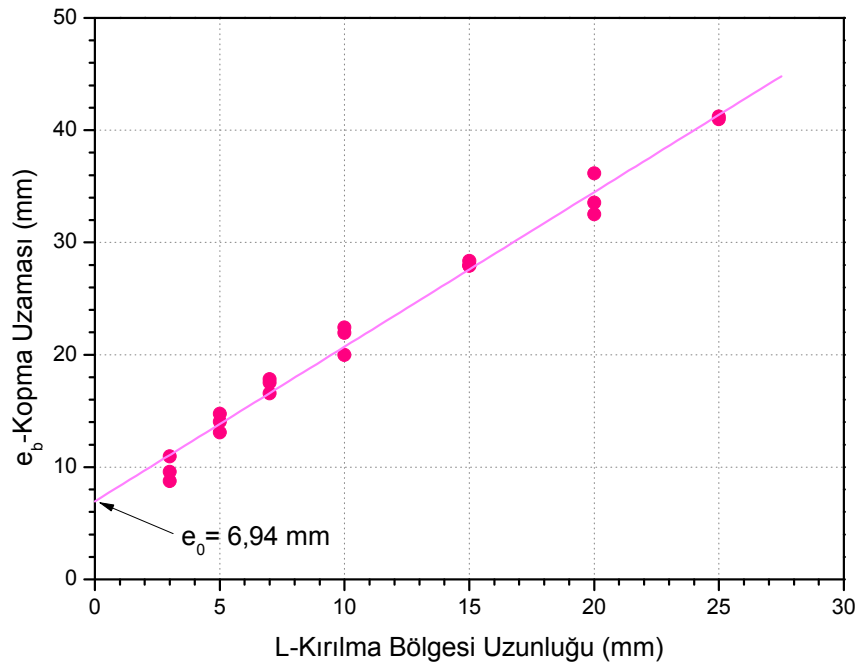
Şekil 4.6 incelendiğinde malzemedeki akma meydana gelmesi için gereken spesifik kırılma işi değeri, malzemenin boyun vermesi ve yırtılması için gereken spesifik kırılma işi değerinden her zaman (L 'nin tüm değerleri için) daha küçüktür. Daha önce yapılan çalışmalarla kıyaslandığında, elde edilen verilerin doğru sonucu verdiği görülmektedir. Bu durum ayrıca yöntemin doğru bir şekilde uygulandığının göstergesidir [19].

Tablo 4.2’de ÇYMAPE malzemeye ait esas kırılma işi parametreleri verilmiştir. Bu değerler Denklem 2.32, Denklem 2.37 ve Denklem 2.38 kullanılarak çizilen grafiklerden elde edilmiştir (Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6).

Tablo 4.2: ÇYMAPE malzemenin yaşlandırma öncesi esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri		Akma İçin EWF Parametreleri		Boyun Verme & Yırtılma İçin EWF Parametreleri	
Spesifik Esas Kırılma İşİ [w_e] (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşİ [βw_p] (kJ/m ²)	Spesifik Esas Kırılma İşİ [$w_{e,y}$] (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşİ [$\beta_y w_{p,y}$] (kJ/m ²)	Spesifik Esas Kırılma İşİ [$w_{e,nt}$] (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşİ [$\beta_{nt} w_{p,nt}$] (kJ/m ²)
146,12	16,12	48,52	4,24	97,60	11,88

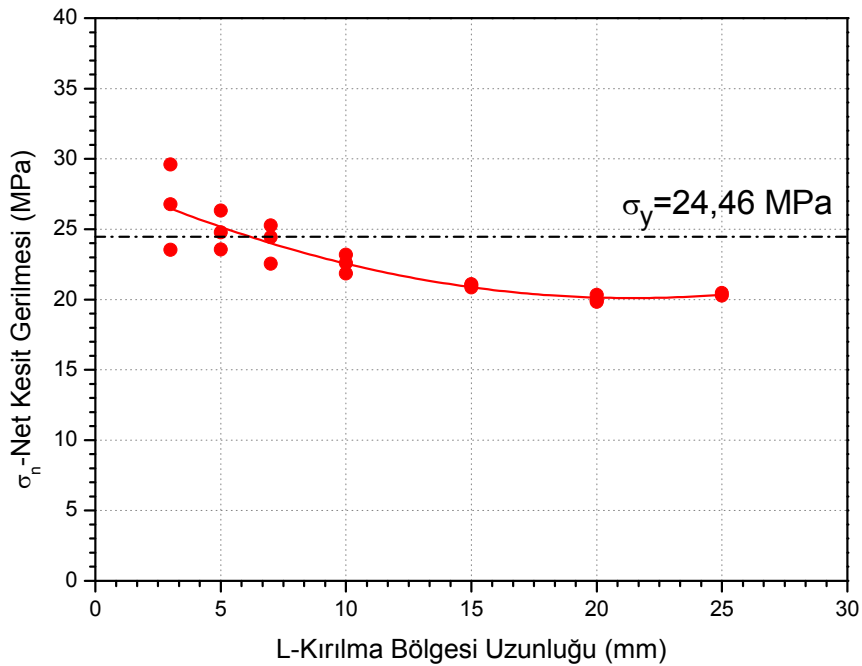
Denklem 2.42 incelendiğinde kopma uzaması ile çentiksiz bölgenin uzunluğu arasında linear bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu düşünceden hareketle Şekil 4.7’deki grafik çizilmiştir [22].



Şekil 4.7: İlk hal numunelerinde kopma uzamasının L boyu ile değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde Denklem 2.42'den çıkan sonucun yani kırılma uzamasının L ile lineer olarak değişmesinin deneysel olarak ispatlandığı görülmektedir. Bu gözlem de EWF'nin uygulanabilirliğinin ve sonuçların doğruluğunun ifadesidir.

Çünkü EWF metodunun en önemli kriterlerinden birisi çentik ucu plastik bölgenin serbest olarak büyümesi yani gerilme durumunun düzlem gerilme olmasıdır. Plastik deformasyon bölgesinin numune geometrisi tarafından sınırlandırılıp sınırlandırmadığını anlamak için kullanılan en iyi yöntem de net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimini incelemektir [46]. Buna göre düzlem gerilme şartının sağlanabilmesi için, malzemeye uygulanan en büyük gerilme değerinin DENT numuneler için $1.15\sigma_y$, SENT numuneler için ise bu değer, malzemenin akma gerilmesi yani σ_y değerinin altında olması gerekir [19]. Şekil 4.8'de net kesit gerilmesi değerinin L ile değişimi grafiği görülmektedir.



Şekil 4.8: İlk hal numunelerinde net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimi

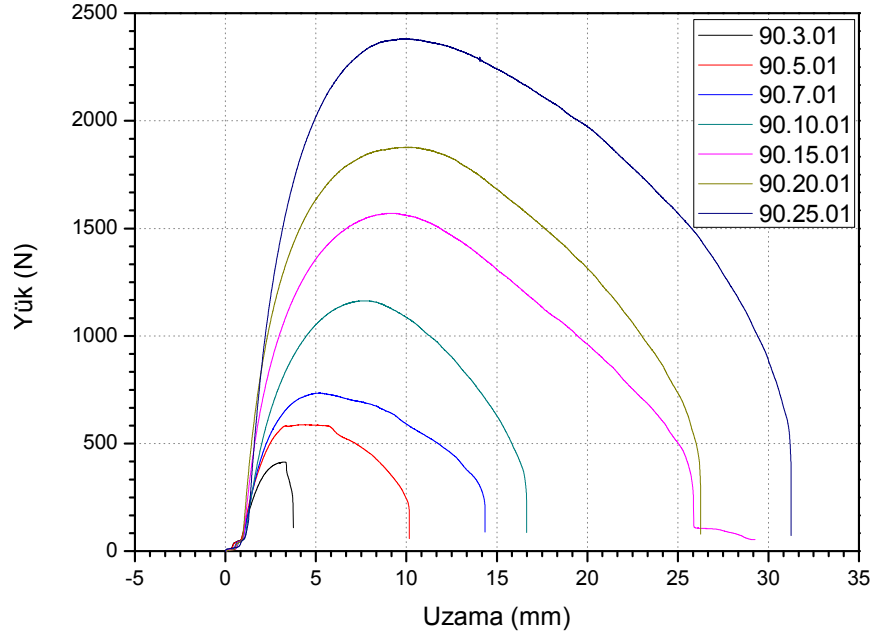
Şekil 4.8 incelendiğinde net kesit gerilmesi değerinin L 'nin belli bir değer altına inmesi ile birlikte artmaya başladığı görülmektedir. Yani $L \leq 7$ mm için gerilme durumu düzlem gerilmeden düzlem genlemeye geçmektedir. $L = 10$ mm sonra ise neredeyse sabit kalmaktadır, bu da beklenen bir durumdur.

ÇYMAPE malzemenin hidrotermal yaşlandırma öncesi kırılma davranışının EWF'ye uygunluğunu incelemek gerekirse, Şekil 4.8'deki grafik hariç diğer tüm veriler yöntemin uygun olduğunu işaret etmektedir. Şekil 4.8'de ise L 'nin değerinin belli bir değerden küçük olması durumunda gerilme durumunun düzlem gerilmeden düzlem genlemeye geçtiğini yani karışık modlu yükleme halinin söz konusu olduğu görülmektedir. Bu durum da Denklem 2.34 de verilmiş olan minimum sınır şartının tam olarak geçerli olduğunu göstermektedir. Malzeme kalınlığı $B= 5$ mm olduğu için Denklem 2.34 dikkate alındığında L 'nin minimum 15 mm olması gerektiği sonucu çıkmaktadır ve bu sonuç Şekil 4.8'deki grafikteki veriler tarafından desteklenmektedir. Denklem 2.34'de L 'nin maksimum değeri için verilen sınır şartlar dikkate alındığında $L \leq W/3= 11,6$ mm olması gerekmektedir ancak bu çalışmadaki hiçbir grafikte $L \geq 11,6$ mm olması durumunda problem görülmemiştir. L 'nin üst sınırı olan $2r_p$ değeri Denklem 2.35 kullanılarak 96,3 mm olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi $W/3$ değeri ile arasında çok büyük bir fark bulunmaktadır, yani L 'nin üst sınırı için ön şart olarak Denklem 2.34'ü referans almak mümkün değildir ve bu durum daha önce yapılan bazı çalışmalarda da görülmüştür [19].

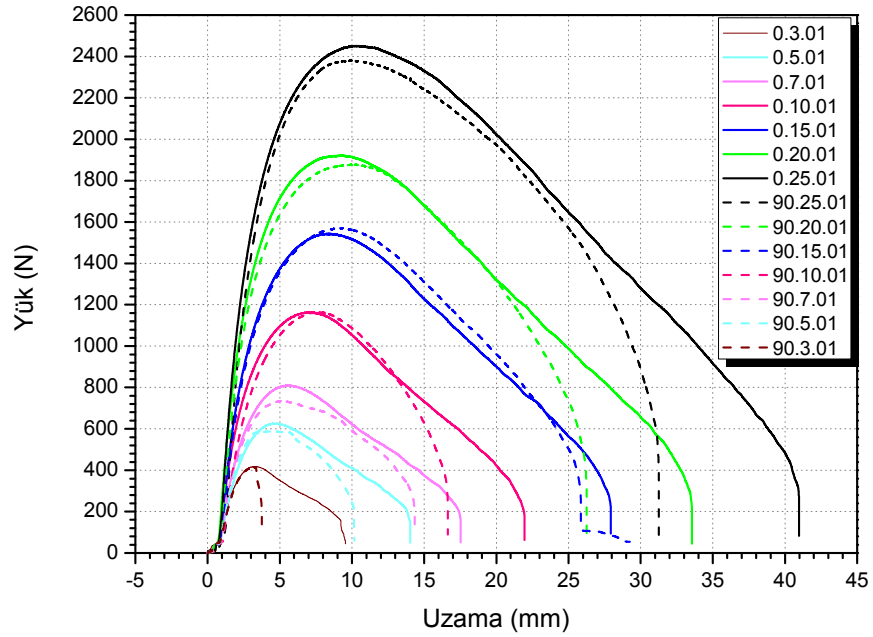
4.1. Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Malzemenin (ÇYMAPE) Hidrotermal Yaşlandırma Etkisi Altındaki Kırılma Davranışının EWF Yöntemi ile İncelenmesi

Şekil 4.8'de 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış farklı L uzunluğuna sahip numunelere ait yük-uzama eğrileri görülmektedir. Hidrotermal yaşlandırma öncesi numunelerde olduğu gibi 90. gün numunelerinde de yük uzama eğrilerinin geometrik benzerliğinden bahsetmek mümkündür. $L= 3$ mm olan numune hariç diğer tüm L uzunlukları için yük-uzama eğrileri hemen hemen aynıdır. Şekil 4.9'a bakarak 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerin göreceli olarak sünek kırılma sergiledikleri söylenebilir. $L= 3$ mm olan numunede maksimum yük değerinden sonra çok keskin olmasa da ani yük düşüşü bölgesi dikkat çekmektedir.

Şekil 4.10 da ise hidrotermal yaşlandırma öncesi ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelere ait yük-uzama eğrileri görülmektedir.



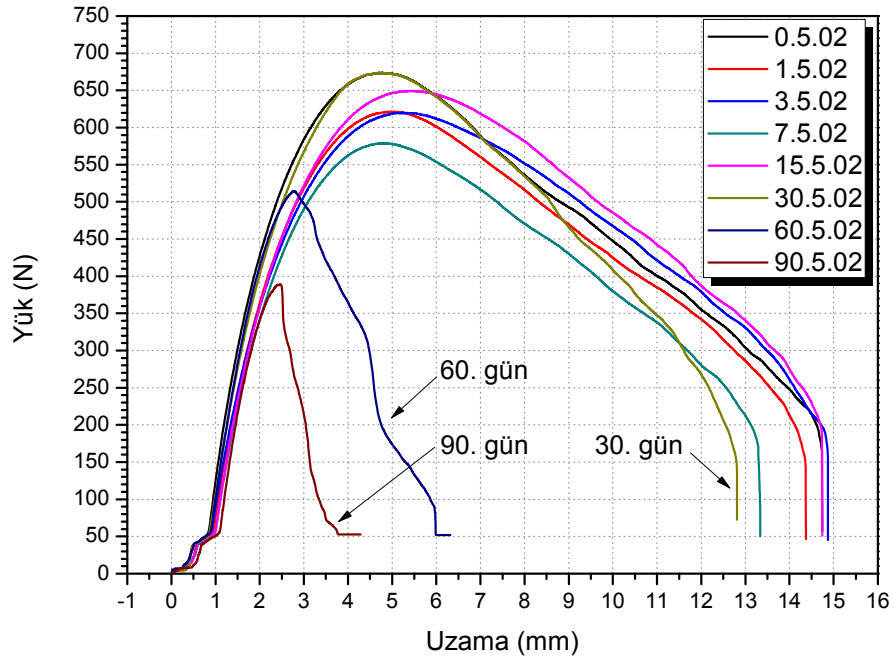
Şekil 4.9: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış bazı numunelere ait yük-uzama eğrileri



Şekil 4.10: İlk hal ve 90. gün numunelerine ait yük-uzama eğrileri

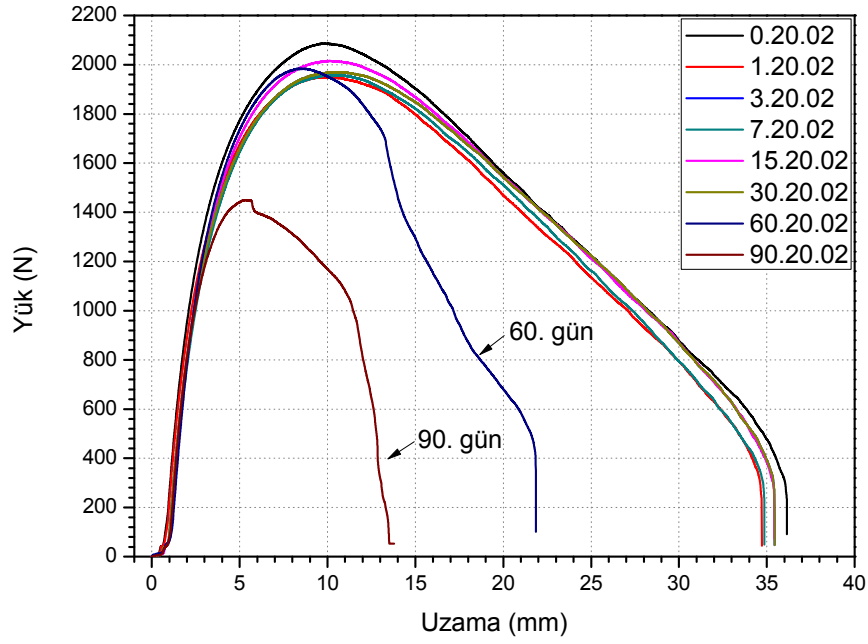
Şekil 4.10 hidrotermal yaşlandırmanın farklı L uzunluklarına sahip SENT tipi numunelerin yük-uzama eğrilerine etkisini çok belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu şekil dikkatle incelendiğinde, malzemenin kırılması için gereken

maksimum yük değerinin, hidrotermal yaşlandırma süreci ile büyük bir değişim göstermediği (hatta $L=15$ ve $L=10$ mm için neredeyse hiç değişmemiş) fakat maksimum yükten sonraki kırılma davranışının belirgin olarak değiştiği sonucunu çıkarmak mümkündür. Çentik ucunda gerilme beyazlanması oluşumu dikkate alınarak, maksimum yük değerine kadar malzemenin tam olarak akmaya maruz kaldığı gerçeğinden hareketle, hidrotermal yaşlandırma etkisi sonucunda malzemenin boyun vermesi ve yırtılması için gereken enerjinin belirgin biçimde azaldığı söylenebilir. Ayrıca 90.gün numunelerinin yük uzama eğrilerine bakarak (Şekil 4.10), malzemenin kopma uzamasının da önemli ölçüde azalmış olduğunu görmek mümkündür.



Şekil 4.11: $L= 5$ mm olan bazı numunelerde hidrotermal yaşlandırmanın yük-uzama eğrilerine etkisi

Hidrotermal yaşlandırma sürecinin ÇYMAPE malzemenin yapılmış SENT numunelere etkisini göstermesi bakımından Şekil 4.11 çok önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 4.11'deki yük-uzama eğrileri $L= 5$ mm olan numunelere aittir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere 60-5-02 (60. gün numunesi) ve 90-05-02 (90. gün numunesi) kodlu numunelere ait yük uzama eğrileri diğerlerinden çok farklıdır ve malzemenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerji hidrotermal yaşlandırma sürecinin 30. gününden sonra hızla azalmaktadır.

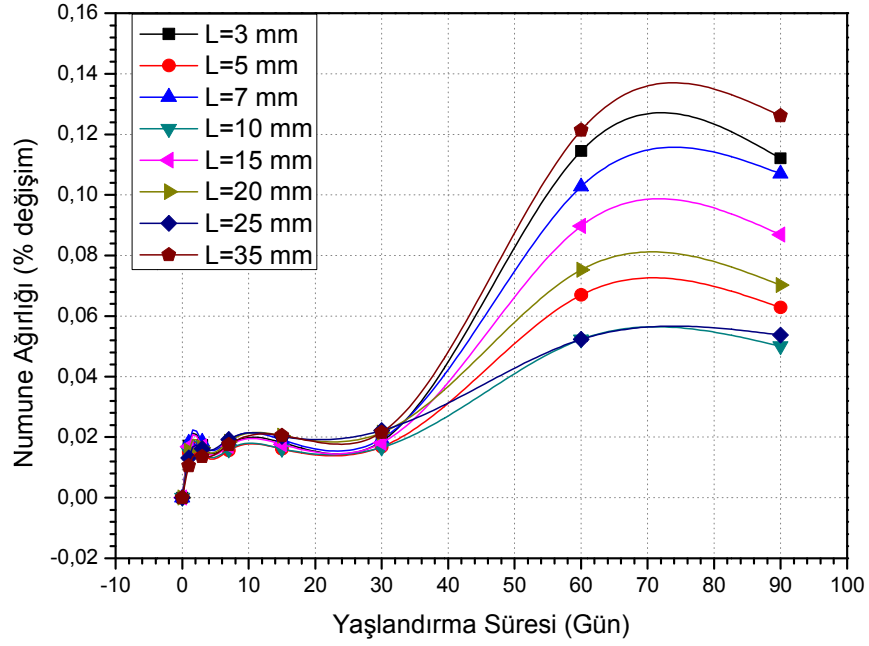


Şekil 4.12: $L = 20$ mm olan bazı numunelerde hidrotermal yaşlandırmanın yük-uzama eğrilerine etkisi

Şekil 4.12’de de $L = 20$ mm olan numunelerin yük-uzama eğrilerine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi görülmektedir. Şekil 4.11’de olduğu gibi burada da yaşlandırma sürecinin 60. gününden itibaren yük-uzama eğrileri belirgin bir değişiklik göstermekte ve malzemenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerji büyük oranda azalmaktadır.

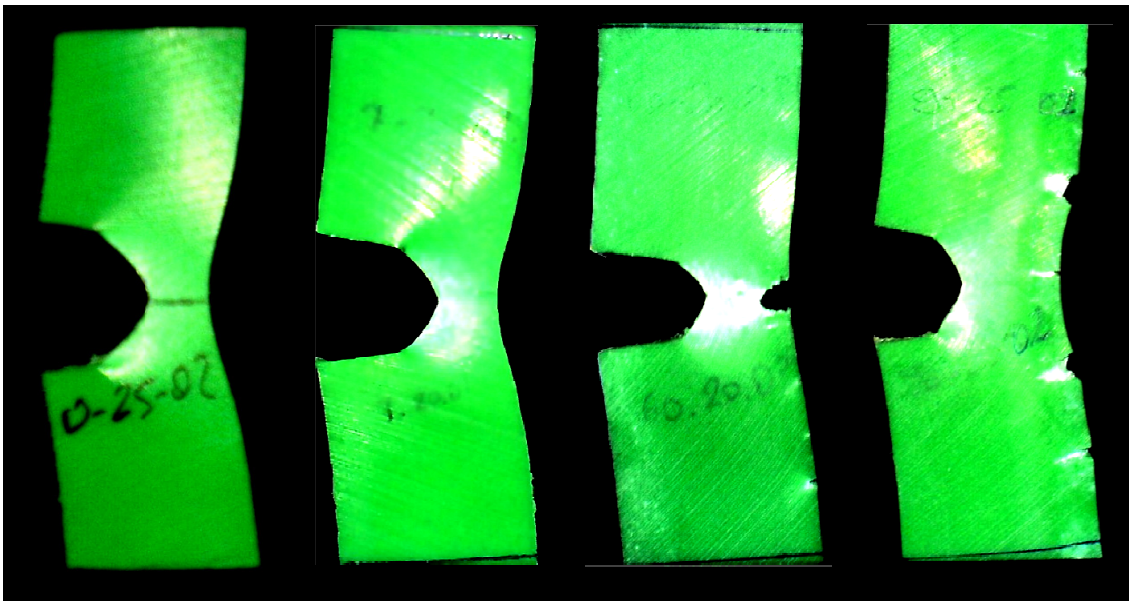
Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de göze çarpan en şaşırtıcı özellik ise 60. günden önceki yaşlandırma sürecinin neredeyse malzemenin kırılma davranışına hiç etki etmemiş olmasıdır.

Yaşlandırmanın etkisiyle malzemenin yük-uzama eğrilerindeki değişimin nedeni 80°C suda bekletilen numunelerin su absorbe etmesidir. Ancak yük-uzama eğrilerinin işaret ettiği gibi bu absorpsiyon olayı özellikle 60. günden sonra etkinlik kazanmıştır. Hidrotermal etki nedeniyle yük-uzama eğrilerinde meydana gelen bu değişimi açıklamak için malzemenin su absorbe etme sürecini de incelemek gerekir. Şekil 4.13’te 80°C sıcaklıktaki hidrotermal ortamda bekletilen ÇYMAPE malzemenin yapılmış SENT numunelerinde % ağırlık artışının zamanla değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.13: Hidrotermal ortamda kalan numunelerde % ağırlık artışının zamanla değişimi

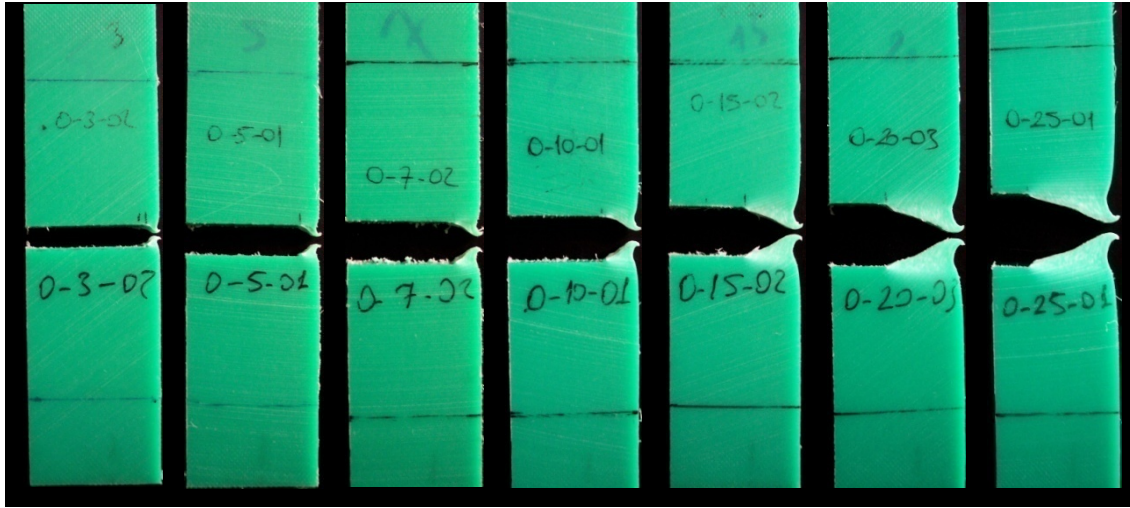
Açıkça görüldüğü üzere Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'teki veriler birbirlerini destekler niteliktedirler. Şekil 4.13'teki grafik incelendiğinde hidrotermal yaşlandırma sürecinin 30. gününden itibaren tüm L uzunlukları için absorbe edilen su miktarında belirgin bir artış olmuştur ve absorpsiyonun plastikleştirici etkisi ve kalıntı gerilmelerin sonucu olarak malzemenin yük-uzama eğrilerindeki değişim meydana gelmiştir.



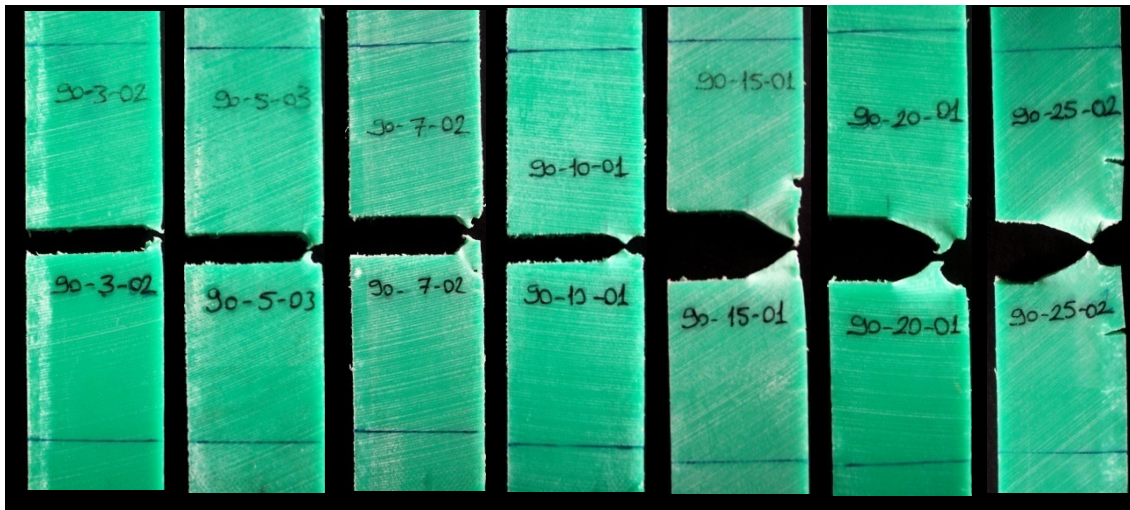
Şekil 4.14: Soldan sağa doğru sırasıyla 0, 7, 60 ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerin çekme testi esnasında çekilmiş fotoğrafları

Su absorpsiyonunun etkisi fiziksel olarak da kendini belli etmiş olup, deneyler sırasında malzemenin yüzeyinde yaşlanma belirtileri gözlenmiştir. 60. güne kadar olan numunelerde çatlak ilerlemesi durumu çentikli bölgede başlamasına rağmen 60. gün numunelerinden itibaren çatlak ilerlemesi yer yer çentikli kısımdan değil, malzemenin çentiksiz kısmından başlamıştır. Bunun nedeni, kesilerek hazırlanmış olan numunelerin kenarlarında oluşan boşluklara suyun nüfuz etmesidir. Şekil 4.14'de sırasıyla 0, 7, 60 ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerin çekme testi esnasında çekilmiş fotoğrafları görülmektedir.

İlk Hal Numuneleri (Hidrotermal Yaşlandırma Öncesi)

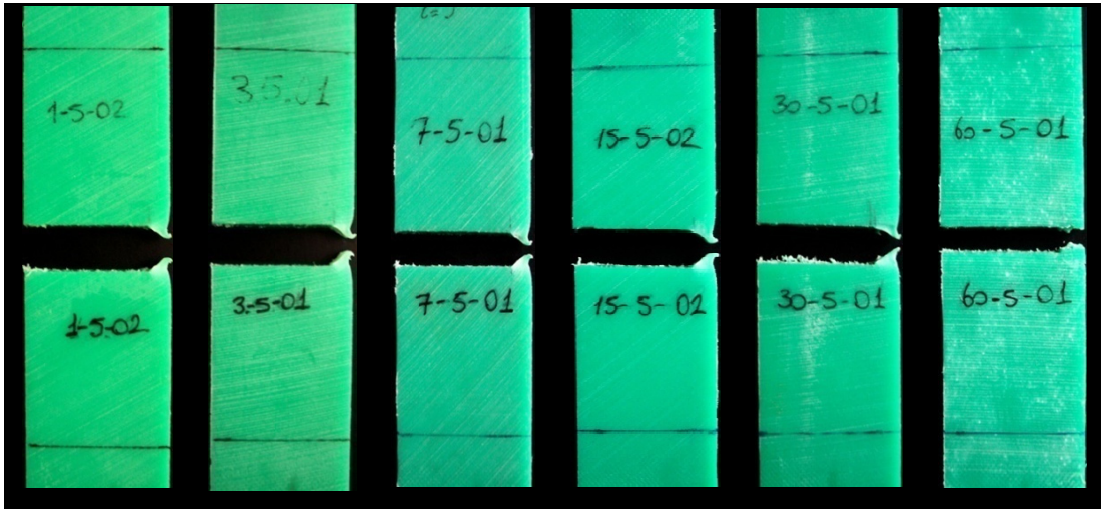


90 . Gün Numuneleri (Hidrotermal Yaşlandırma Sonrası)



Şekil 4.15: İlk hal ve 90. gün numunelerine ait fotoğraflar

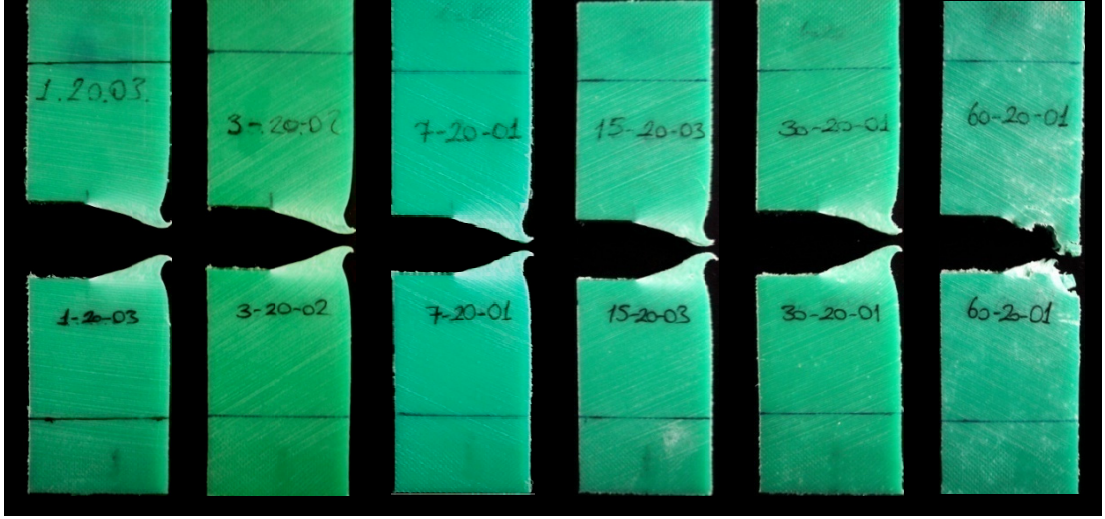
90. gün sonunda hidrotermal yaşlandırmanın fiziksel etkisi Şekil 4.15'deki fotoğraflarda görülmektedir. 90. gün numuneleri ile ilk hal numuneleri incelendiğinde ilk göze çarpan yaşlanma belirtisi numunelerdeki renk değişimidir. 90. gün numunelerindeki beyazlık ve oksit tabakası dikkate değer bir etkidir. Şekil 4.15'i daha detaylı incelediğimizde karşımıza çıkan bir diğer önemli etki de çentik ucundaki plastik deformasyon bölgesindeki değişimdir. İlk hal numunelerinde plastik deformasyon bölgesinin şekli geometrik olarak tüm numunelerde aynı kalmaya devam etmiş ve L boyu büyüdükçe artmıştır. Ayrıca ilk hal numunelerinin tümünde çentik ucundaki plastik deformasyon bölgesinin tamamının rengi beyazdır ve bu durum gerilme beyazlanması (stress-whitened zone) olarak bilinmektedir. Gerilme beyazlanması malzemede akma olduğunun göstergesidir. Ancak 90. gün numunelerinde çentik ucu plastik bölgenin ne şekli ne de büyüklüğü açısından bir benzerlik bulmak mümkün değildir. Bununla birlikte bazı numunelerdeki çatlak başlangıcı çentik ucundan değil çentiksiz kenardan başlamıştır.



Şekil 4.16: $L= 5$ mm olan numunelere hidrotermal yaşlandırma sürecinin fiziksel etkisi

Şekil 4.16'da $L= 5$ mm olan numunelerin hidrotermal yaşlandırmanın etkisiyle fiziksel olarak değişimi görülmektedir. Şekil 4.16'ya bakılarak 60. güne kadar hidrotermal yaşlandırmanın malzemenin kırılma davranışına önemli bir etkide bulunmadığını söylemek mümkündür çünkü 30. güne kadar olan tüm numunelerdeki çatlak ucu plastik deformasyon bölgesinin şekli ve büyüklüğü hemen hemen aynıdır. Ancak 60. gün numunesi dikkatle incelendiğinde hem numunenin renginde hem de

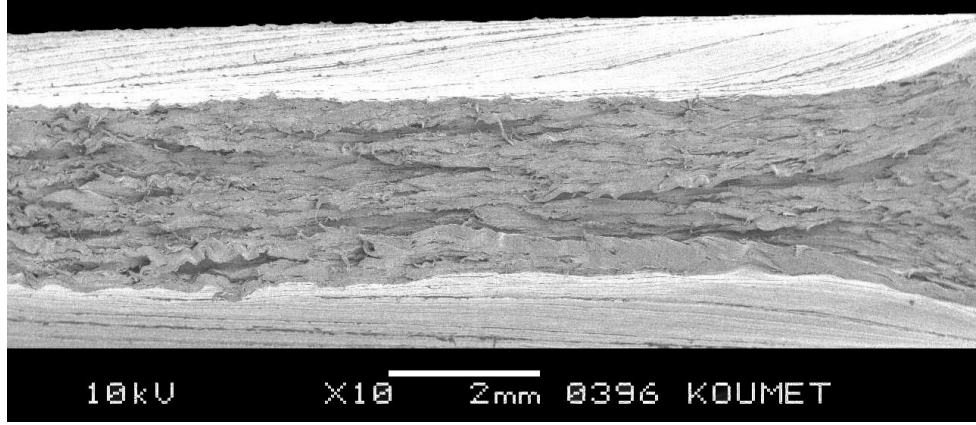
çatlak ucu plastik deformasyon bölgesinin şeklinde ve büyüklüğünde belirgin bir değişim olduğunu söylemek mümkündür. Bu durum da Şekil 4.13’de grafiksel olarak gösterilmiş olan su absorpsiyonunun fiziksel yansımasıdır.



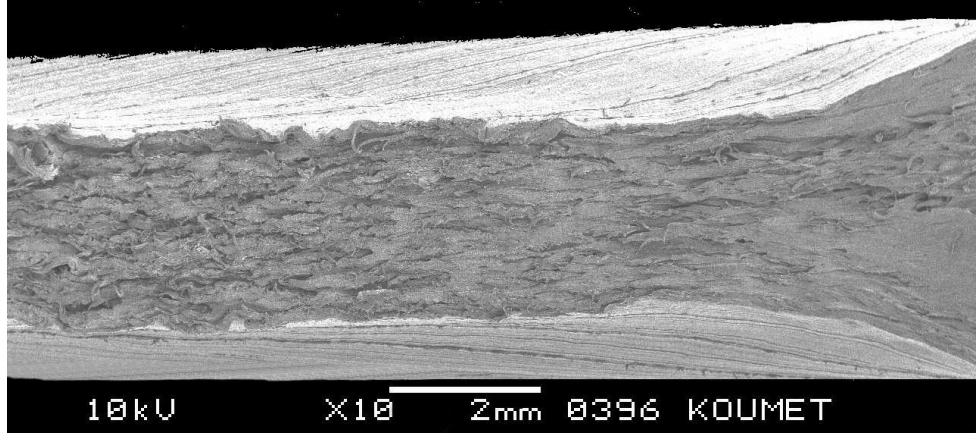
Şekil 4.17: $L= 20$ mm olan numunelere hidrotermal yaşlandırma sürecinin fiziksel etkisi

Şekil 4.17’de $L= 20$ mm olan numunelerin hidrotermal yaşlandırmanın etkisiyle fiziksel olarak değişimi görülmektedir. Bu şekil incelendiğinde Şekil 16’dakinden farklı olarak 60. gün numunelerine kadar olan tüm numunelerde plastik deformasyon bölgesinin belirgin bir biçimde beyaz renkte olduğu görülmektedir. Bu da malzemenin akmaya uğradığının göstergesidir. 60. gün numunesine bakıldığında ise kırılma bölgesinde neredeyse hiç plastik deformasyon olmadığını ve malzeme kesitinde kırılmanın gevrek olacak şekilde gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Bu da suyun malzemedeki yaşlandırıcı etkisinin sonucudur.

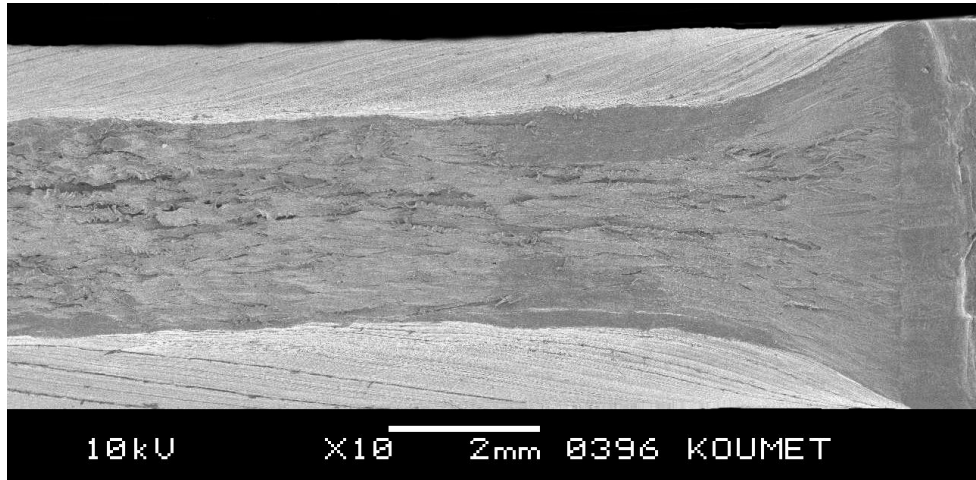
Numunelerin kırılma yüzeylerindeki hidrotermal etkinin incelenmesi amacıyla yaşlandırma yapılmamış, 15, 30, 60 ve 90 gün süreyle yaşlandırılmış numunelere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sırasıyla Şekil 4.18,19,20,21 ve 22’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, hidrotermal etkiyle EWF parametrelerinde ve makro fotoğraflarda meydana gelen değişimin, kırılma yüzeylerindekiyle paralel olduğu görülmektedir.



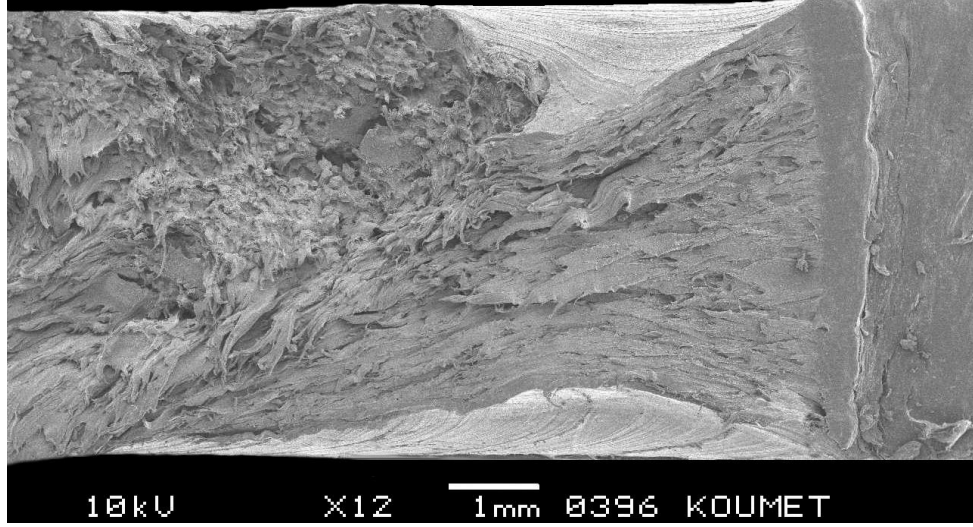
Şekil 4.18: İlk hal numunesinin kırılma yüzeyinin genel görünümü



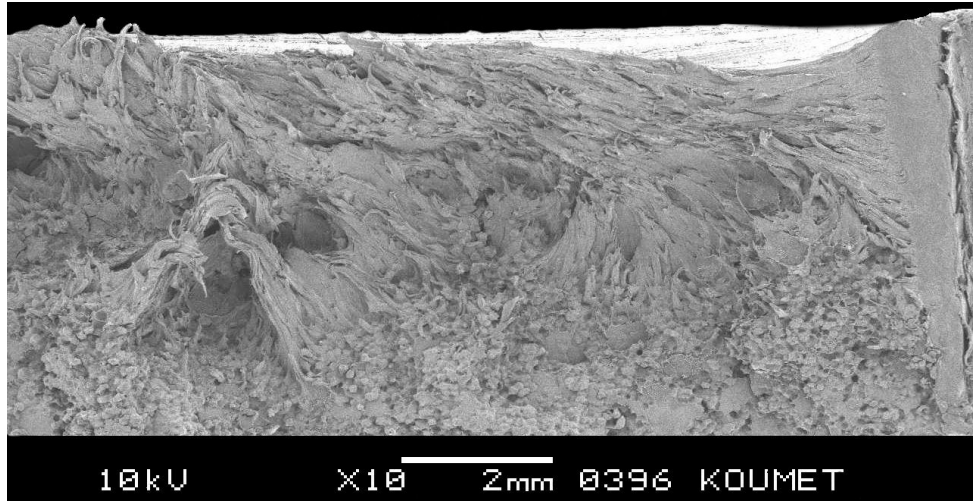
Şekil 4.19: 15 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü



Şekil 4.20: 30 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü



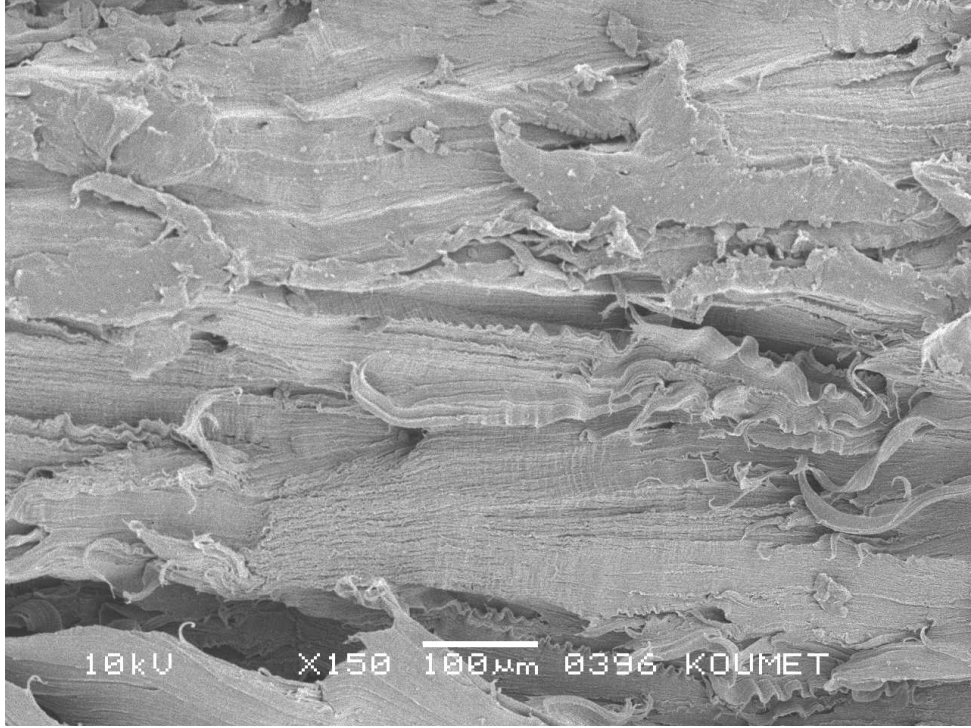
Şekil 4.21: 60 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü



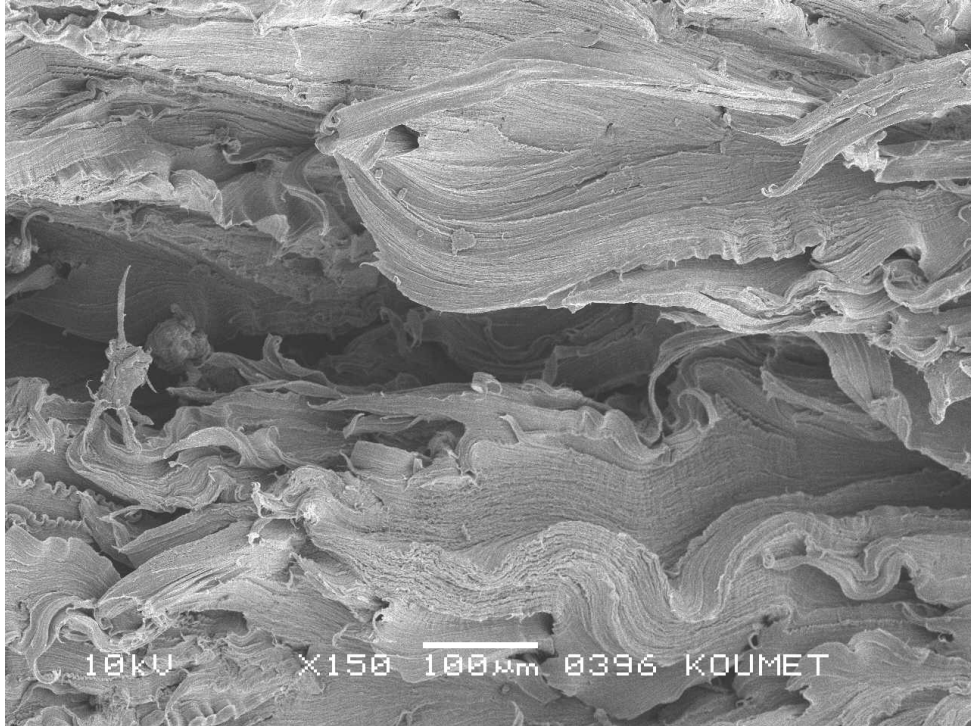
Şekil 4.22: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin genel görünümü

60. gün itibariyle kırılma yüzeylerindeki hidrotermal etki açıkça görülmektedir. Yaşlandırma süresi 60 günden az olan numuneler incelendiğinde, kırılma yüzeylerinin üniform olduğu ve malzemede enine kesit daralması (boyun verme) davranışının belirgin olduğu söylenebilir. 60. gün numunesinde ise tam bir geçiş durumu söz konusudur, kısmi boyun verme ve bölgesel sünek kırılma gözlenmektedir. Kesit üniform değildir.

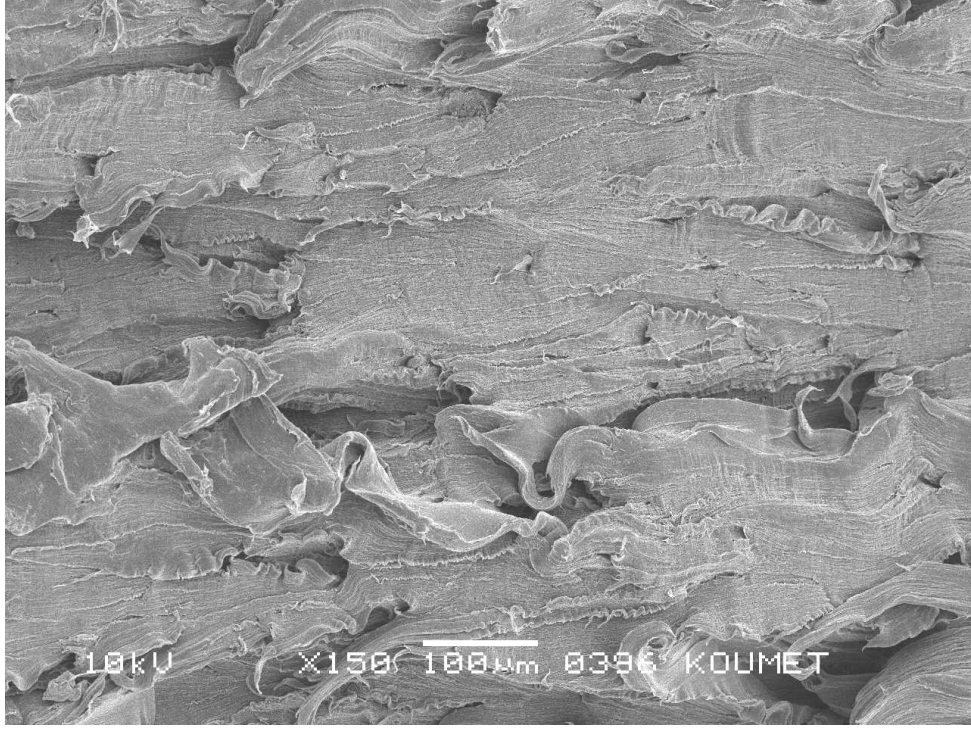
Kırılma yüzeylerinin daha net görülmesi için Şekil 4.23, 24, 25, 26 ve 27’de 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafları verilmiştir.



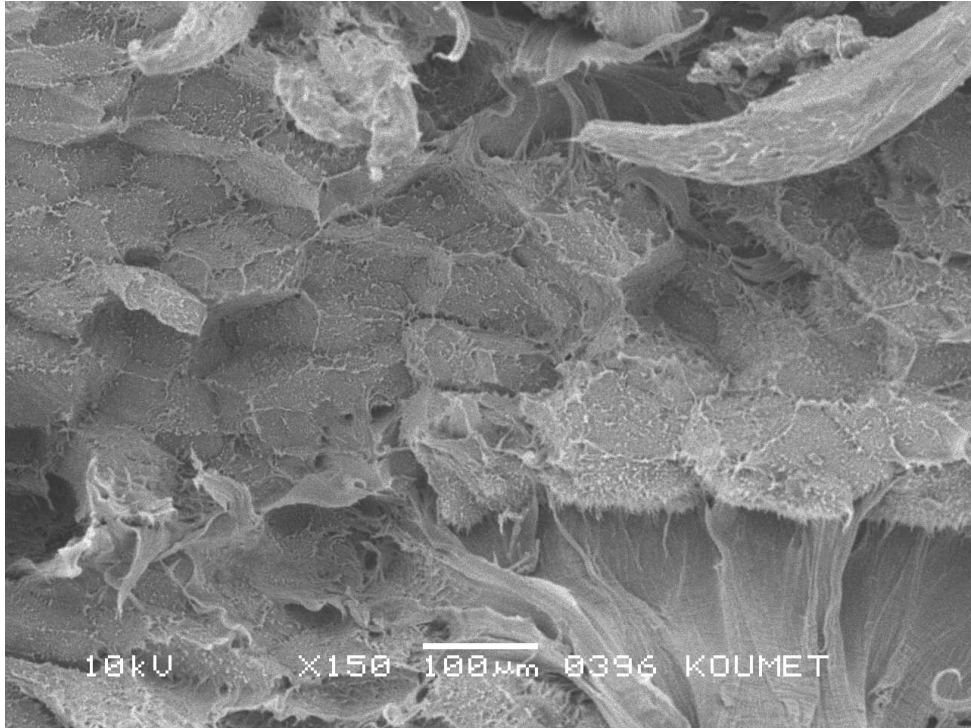
Şekil 4.23: İlk hal numunesinin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı



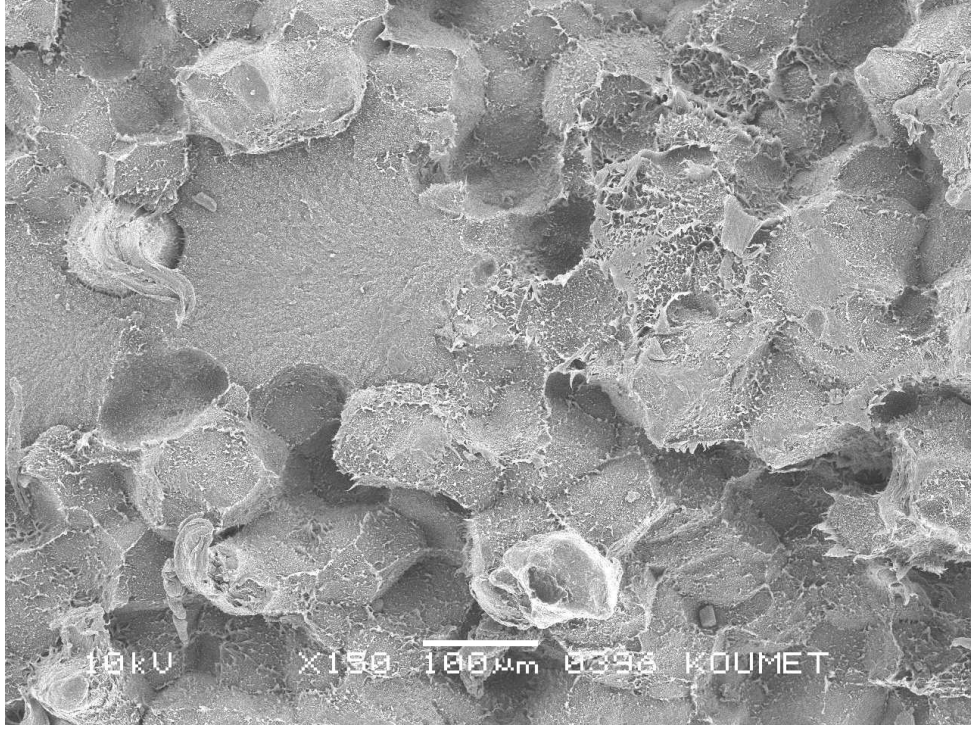
Şekil 4.24: 15 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı



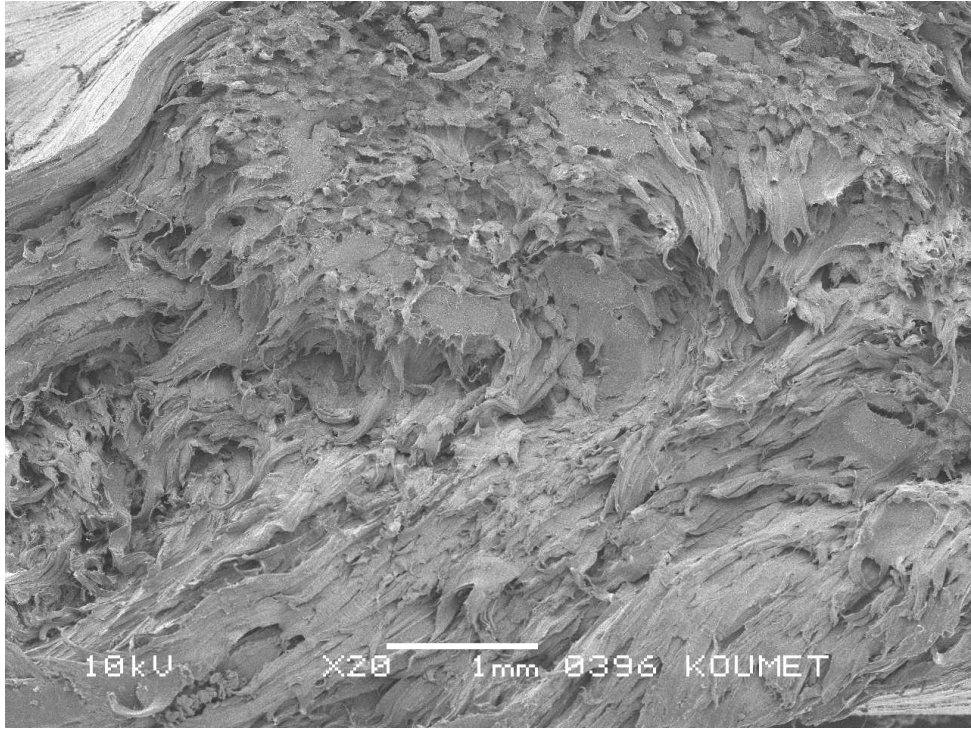
Şekil 4.25: 30 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı



Şekil 4.26: 60 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı



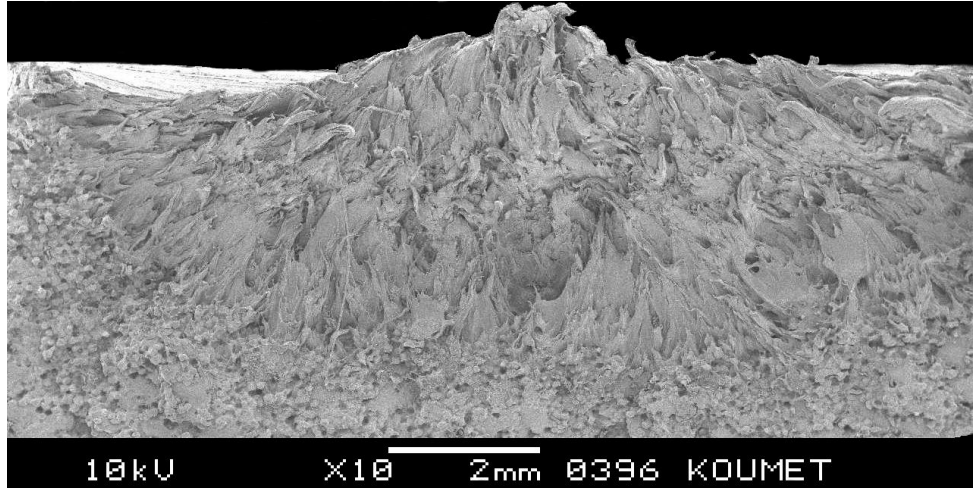
Şekil 4.27: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinin 150 büyütme ile çekilmiş TEM fotoğrafı



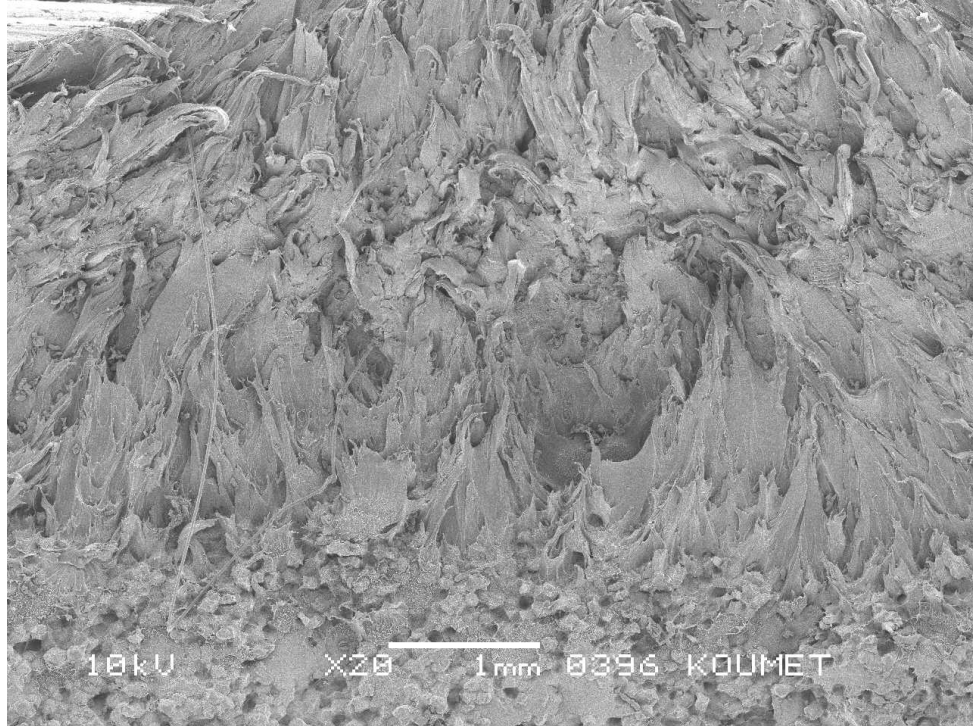
Şekil 4.28: 60 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oluşan geçiş bölgesinin TEM fotoğrafı

Malzemeye absorbe olan suyun etkisiyle 60. gün numunelerinin kırılma yüzeylerinde, sünek kırılmadan gevrek kırılmaya doğru bir geçiş bölgesi meydana gelmiştir (Şekil 4.28).

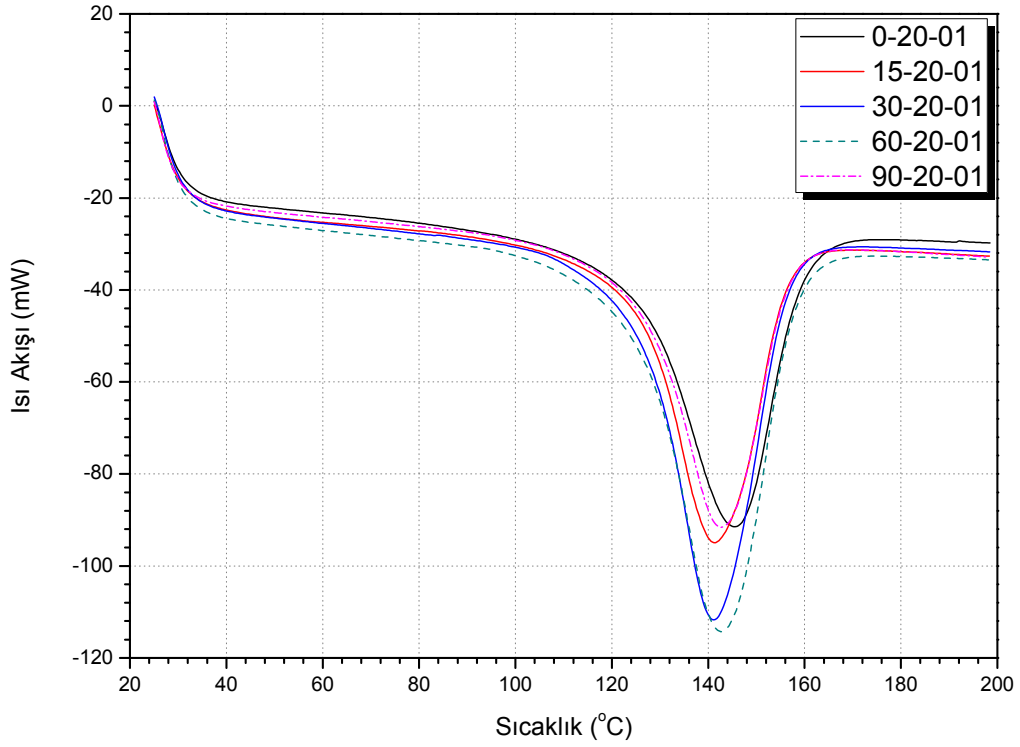
Hidrotermal yaşlandırmanın etkisiyle kırılma yüzeylerinde meydana gelen değişim 90. gün numunelerinde çok daha belirgindir (Şekil 4.29 ve Şekil 4.30).



Şekil 4.29: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oluşan geçiş bölgesinin genel görünümü



Şekil 4.30: 90 gün süreyle hidrotermal yaşandırmaya maruz bırakılmış numunenin kırılma yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oluşan geçiş bölgesinin TEM fotoğrafı



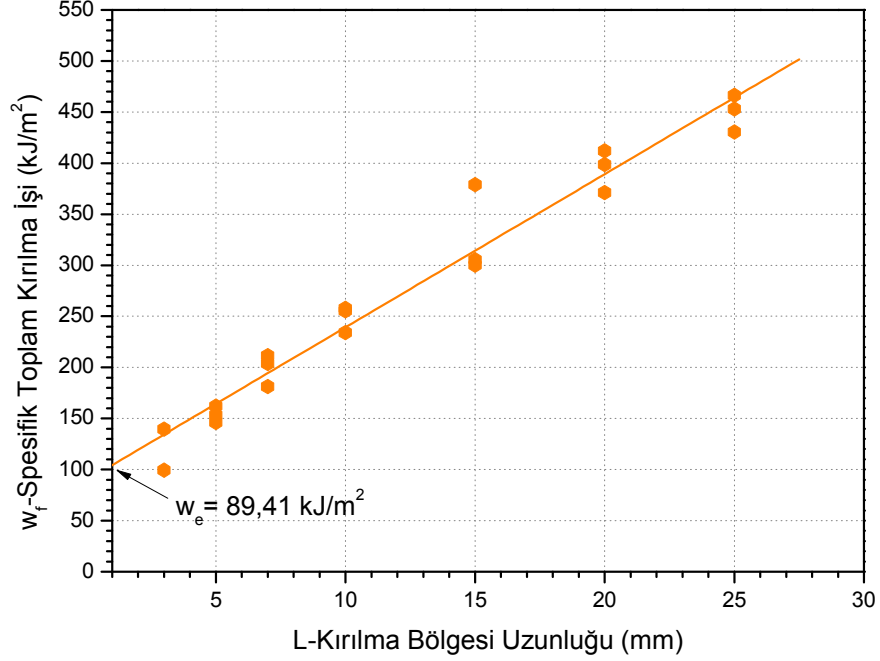
Şekil 4.31: Farklı sürelerde yaşlandırmaya maruz kalmış numunelere ait DSC grafiği

Tablo 4.3: DSC analizi ile elde edilen erime entalpisi değerleri ve Denklem 3.1'den elde edilen göreceli kristalleşme derecesi

Numune Kodu	Erime Entalpisi (J/g)	Göreceli Kristalleşme Derecesi (%)
0-20-01	150,68	0
15-20-01	152,45	1,17
30-20-01	152,69	1,34
60-20-01	157,65	4,62
90-20-01	157,45	4,50

Hidrotermal yaşlandırma etkisiyle malzemenin ısıl davranışında meydana gelen değişimi incelemek amacıyla yaşlandırma öncesi, 15, 30, 60 ve 90. gün numunelerine diferansiyel taramalı kalorimetre analizi (DSC) yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde hidrotermal yaşlandırma süresinin artması ile birlikte erime entalpisi değerlerinin bir miktar arttığı görülmektedir. Malzemenin göreceli kristalleşme derecesi değeri Denklem 3.1'den

elde edilmiştir. DSC analizi ile elde edilen erime entalpisi değerleri ve Denklem 3,1'den elde edilen kristalleşme derecesi değerleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

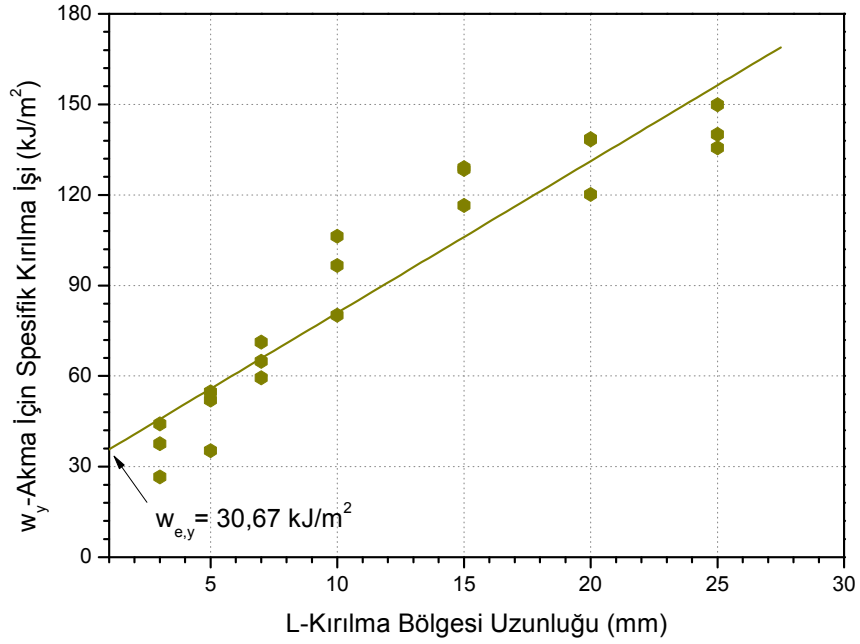


Şekil 4.32: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde spesifik toplam kırılma işinin L boyu ile değişimi

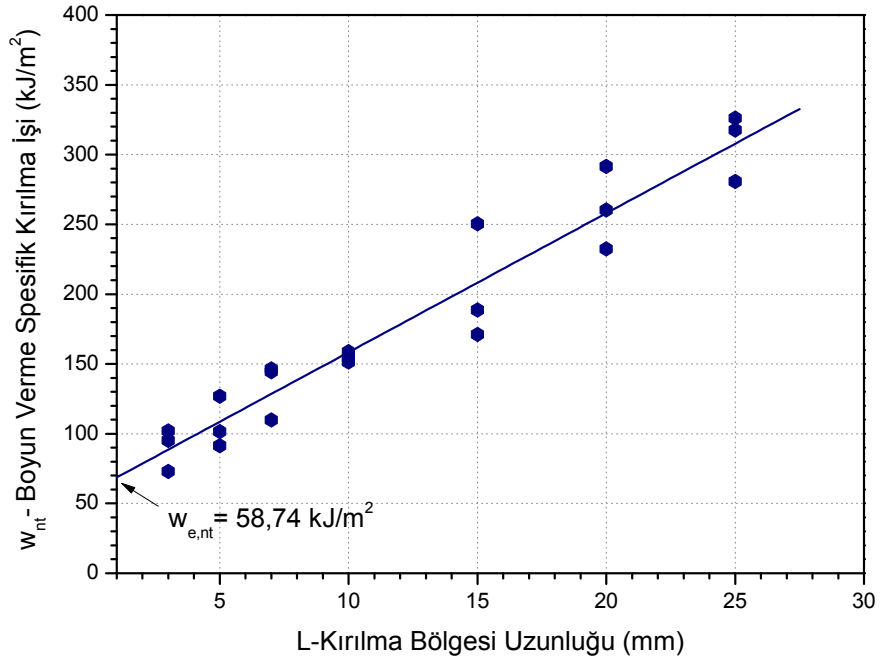
Yük-uzama eğrilerindeki değişimin ve malzemenin fiziksel görünüşündeki farklılığın EWF yaklaşımı ile açıklanması için deneylerden elde edilen yük-uzama eğrilerindeki veriler kullanılarak esas kırılma işi parametrelerinin hesaplanması gerekir. Bunun için öncelikle Denklem 2.32 dikkate alınarak 90. gün numuneleri için malzemenin spesifik toplam kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi grafiği çizilmiştir. Görüldüğü gibi Şekil 4.32'deki sonuçlar neredeyse yaşlandırma öncesi numuneler için çizilen grafiklerdeki kadar lineer çıkmış ve EWF'nin 90. gün numuneleri için uygulanabilir olduğu kanaatine varılmıştır. Yaşlandırma öncesi numunelerde olduğu gibi w_f - L doğrusunun w_f eksenini kestiği nokta bulunarak malzemenin spesifik esas kırılma işi değeri (w_e) saptanmıştır.

Şekil 4.33'de hidrotermal yaşlandırmanın 90. gününde akma için spesifik kırılma işi teriminin L uzunluğu ile değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.33'deki sonuçlar Denklem 2.37'deki lineerlik şartını sağlamaktadır. Görüldüğü gibi w_y - L doğrusunun w_y eksenini kestiği nokta malzemenin akma için spesifik esas kırılma işi terimini vermektedir.

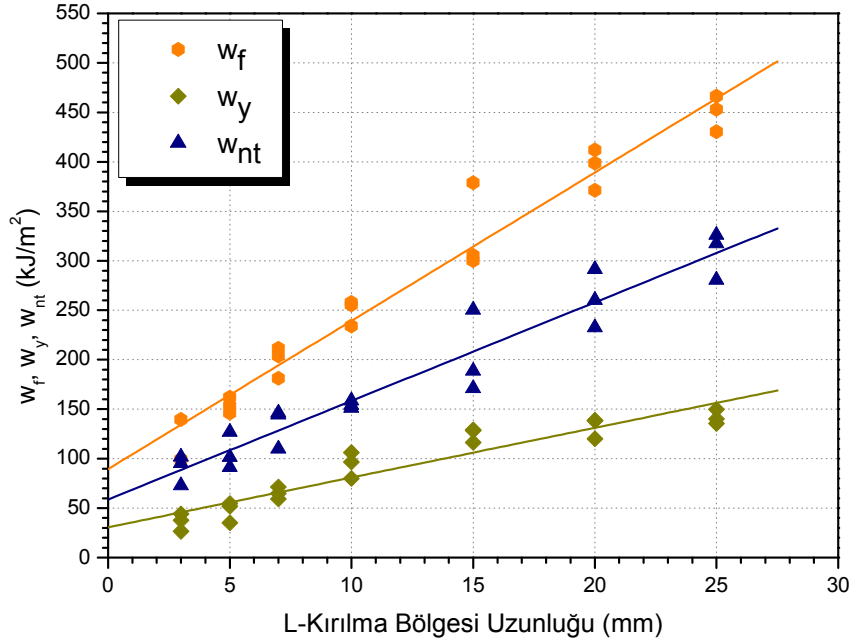


Şekil 4.33: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi



Şekil 4.34: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi

Şekil 4.34'te ise 90. gün numuneleri için spesifik boyun verme ve kırılma işinin L ile değişimi görülmektedir. Bu grafikteki sonuçlar da Denklem 2.38'deki lineerlik şartını sağlamaktadır.

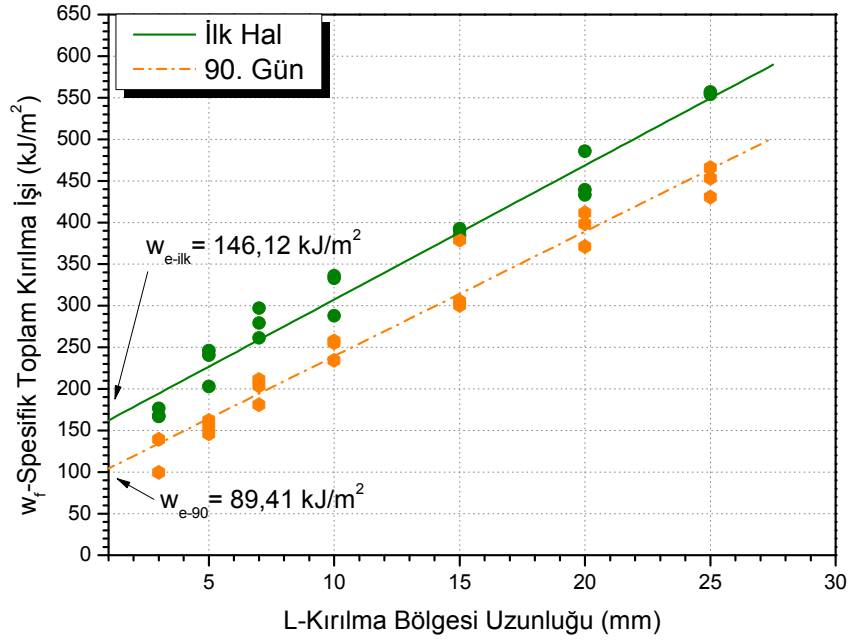


Şekil 4.35: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde spesifik kırılma işi parametrelerinin L boyu ile değişimi

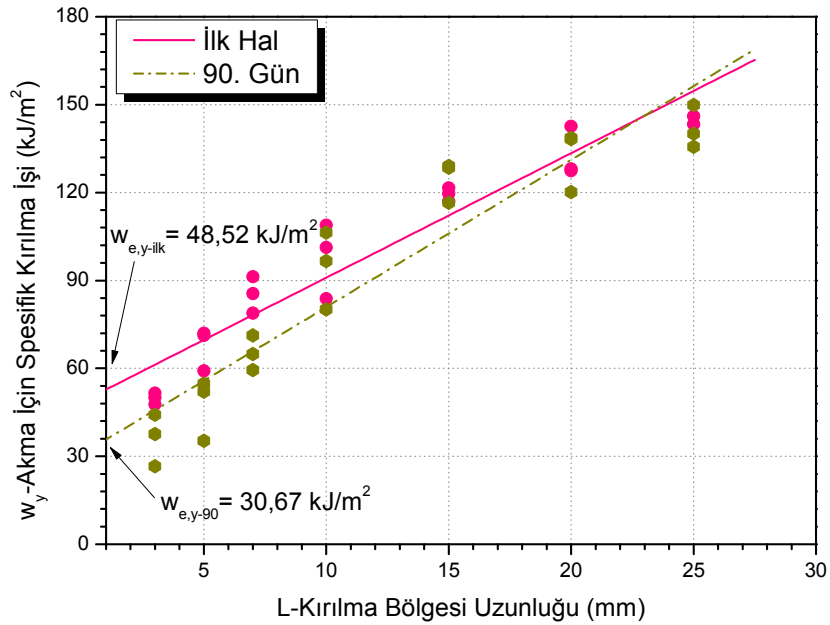
Şekil 4.35'de 90. gün numunelerine ait spesifik kırılma işi parametreleri aynı grafikte gösterilmiştir. Yaşlandırma öncesi numunelerdekine benzer bir şekilde L 'nin tüm değerleri için akma için spesifik kırılma işi değeri boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinden küçük çıkmıştır.

İlk hal numuneleri ile 90. gün numuneleri için hidrotermal yaşlandırmanın spesifik kırılma işi parametrelerine etkisi Şekil 4.36'te verilmiştir. Görüldüğü gibi 90. günün sonunda spesifik esas kırılma işi değerinde belirgin bir düşüş olmuştur yani malzemenin kırılma tokluğu (çatlak ilerleme direnci) değeri azalmıştır. Bu sonuç yük-uzama eğrilerindeki farklılaşmayı ve numunelerdeki fiziksel değişimi desteklemektedir. Yani 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelere uygulanan EWF metodu geçerlidir denilebilir.

Şekil 4.36’da dikkat çeken en önemli nokta, hidrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrası için çizilen w_y-L eğrilerinin eğimidir (iki doğrunun eğimi nerdeyse aynıdır). Yani malzemenin plastik deformasyon işi (βw_p) değerinde önemli bir değişiklik olmamıştır.



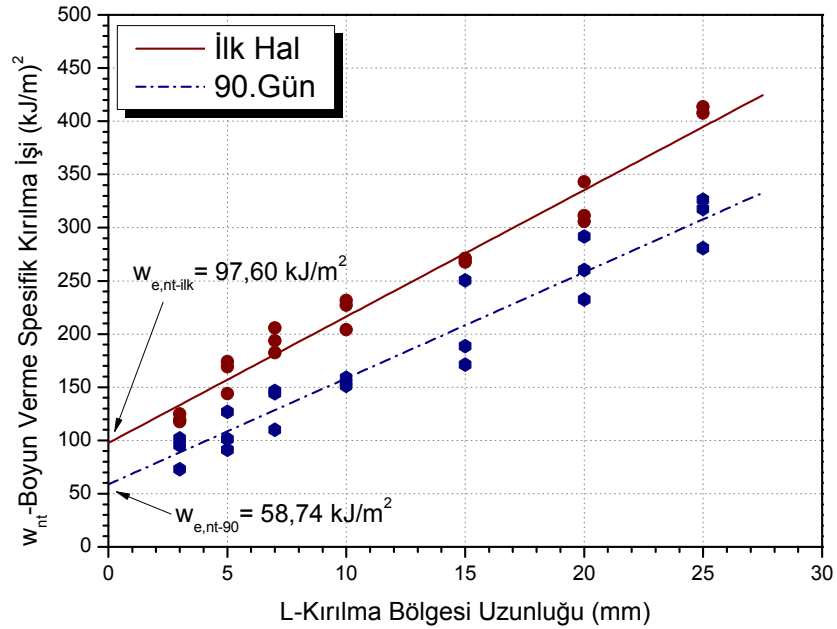
Şekil 4.36: İlk hal numunelerinde ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi



Şekil 4.37: İlk hal numunelerinde ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde akma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi

Şekil 4.37’de ilk hal ve 90. gün için akmadaki spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekiller dikkatle incelendiğinde göze çarpan ilk fark iki doğrunun eğimleridir. 90. gün numunelerine ait doğrunun eğiminin daha büyük olduğu görülmektedir. Yani $\beta_y w_{p,y}$ değeri 90. gün numuneleri için ilk duruma göre daha büyük çıkmıştır. Grafikteki bir diğer farklılık ta doğal olarak doğruların w_y eksenini kestiği nokta yani akma için spesifik esas kırılma işi değerinin 90. gün numuneleri için daha küçük olmasıdır. Bu önemli bir değişimdir, zira $w_{e,y}$ değeri malzemenin doğal tokluğu olarak adlandırılır ve daha önce yapılan çalışmalarda bu değer deney parametrelerinden etkilenmediği ortaya çıkmıştır [26,32]. Ancak buradaki durum farklıdır, $w_{e,y}$ değeri hidrotermal yaşlandırma etkisi ile azalmıştır.

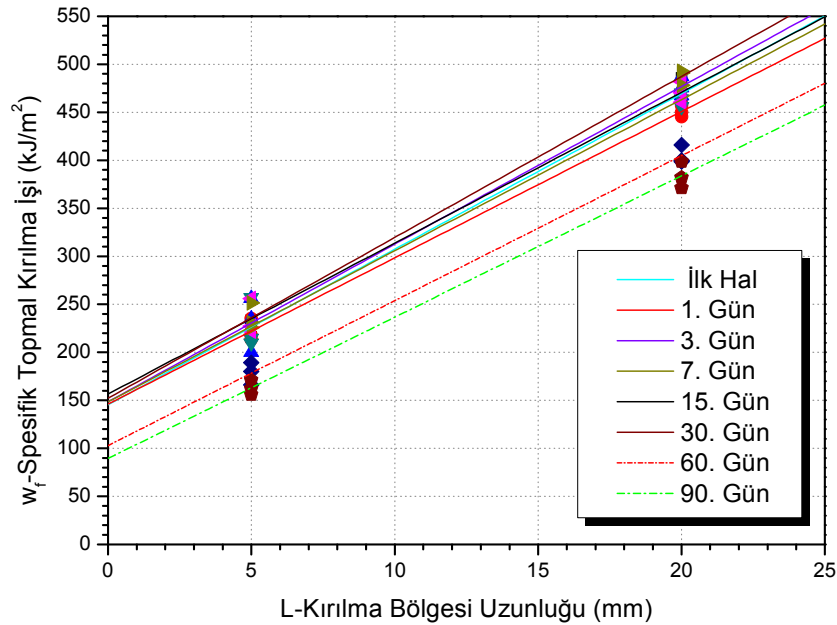
Şekil 4.38’de ise ilk hal ve 90. gün için boyun vermede ve yırtılmada spesifik kırılma işi teriminin L boyu ile değişimi görülmektedir. Burada durum Şekil 4.37’dekinden farklıdır ve 90. gün için doğrunun eğimi daha düşük bir değerdir. Yani $\beta_{nt} w_{p,nt}$ değeri hidrotermal yaşlandırma etkisiyle azalmıştır. Boyun verme ve yırtılma için spesifik esas kırılma işi de 90. gün için daha düşük bir değerdedir.



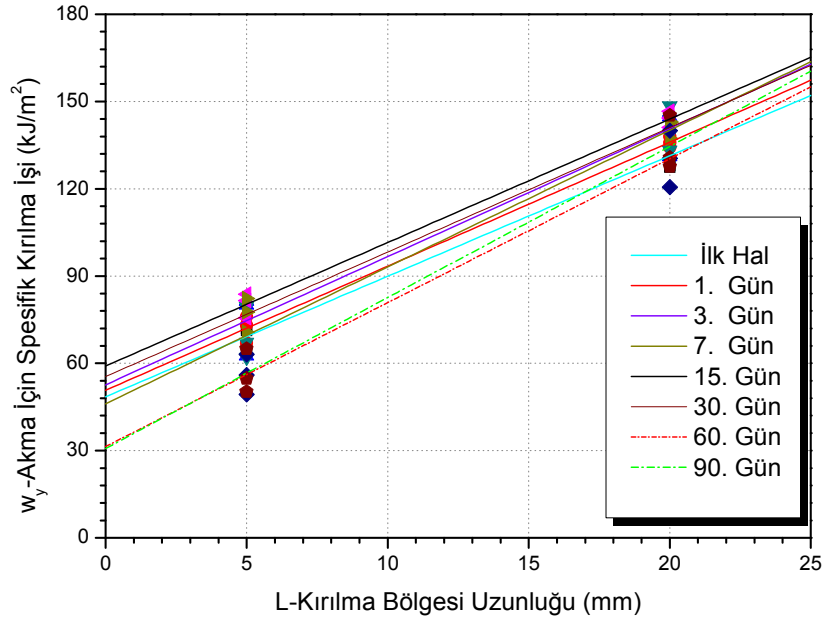
Şekil 4.38: İlk hal numunelerinde ve 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L boyu ile değişimi

Şekillerde verilen grafikler ile ilk hal ve 90. gün numunelerinin karşılaştırılması halinde, spesifik kırılma işi parametrelerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum da hidrotermal yaşlandırmanın sonucudur. Yani malzeme su absorpsiyonu neticesinde daha gevrek bir kırılma davranışı göstermiştir.

Hidrotermal yaşlandırma sürecinin spesifik kırılma işi parametrelerine olan etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41'deki grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde sırasıyla L boyu ile spesifik toplam kırılma işi değeri, akma için spesifik kırılma işi değeri ve boyun verme-yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin hidrotermal yaşlandırma süreci ile değişimi görülmektedir. Bu grafiklerde göze çarpan ilk özellik, 30. güne kadar w_f , w_y ve w_{nt} 'nin L ile değişiminin hidrotermal yaşlandırma sürecinden etkilenmediği ancak 60. günden itibaren sonuçlarda büyük değişiklikler olduğu görülmektedir. Bir diğer önemli özellik olarak 30. günden sonraki doğrular için w_f-L doğrusunun eğiminin hemen hemen hiç değişmediği ancak w_y-L doğrusunun eğiminin arttığı ve $w_{nt}-L$ doğrusunun eğiminin ise azaldığı söylenebilir. Bu eğimler sırasıyla β_{w_p} , $\beta_y w_{p,y}$ ve $\beta_{nt} w_{p,nt}$ 'dir.

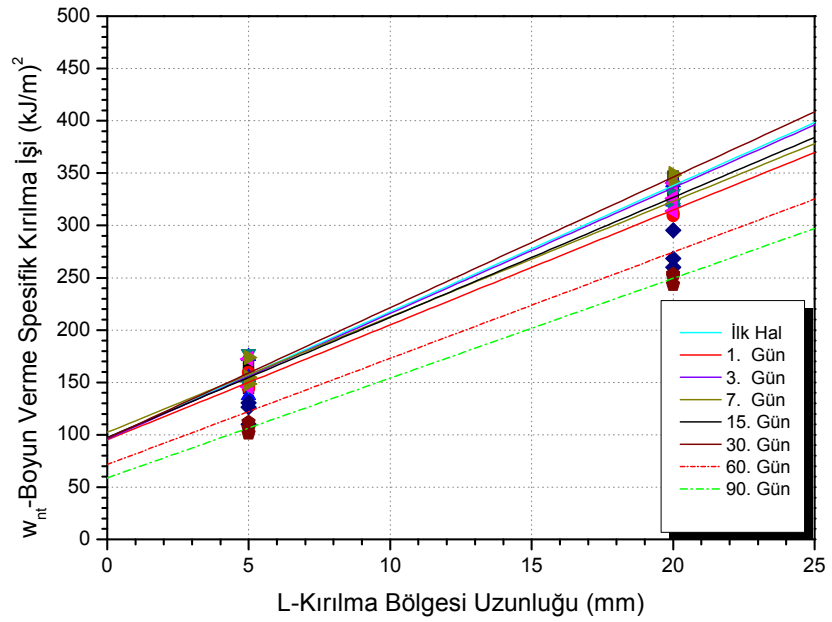


Şekil 4.39: Spesifik toplam kırılma işi değerinin L ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi



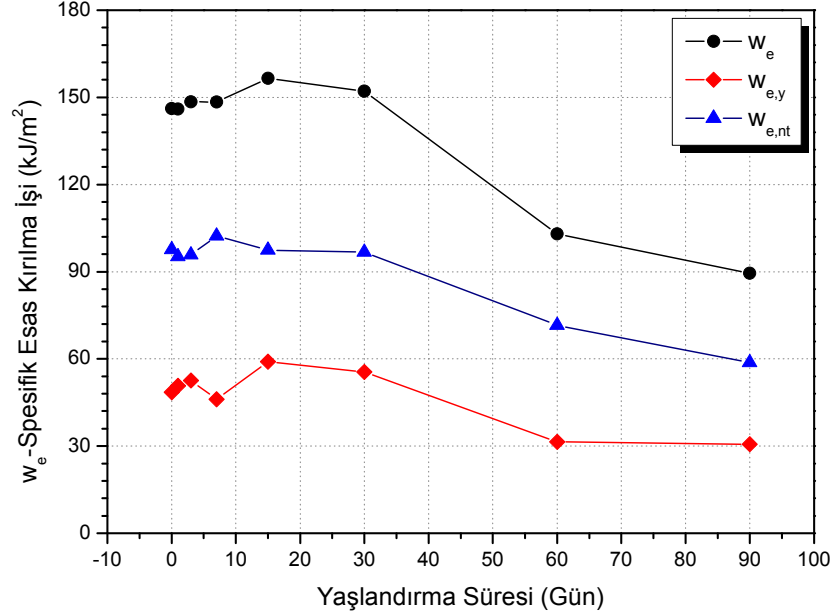
Şekil 4.40: Akma için spesifik kırılma işi değerinin L ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi

Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41'deki grafikler $L= 5$ ve $L= 20$ mm için çizildiğinden sonuçların çok hassas olmadığı vurgulanması gereken bir diğer konudur yine de fikir vermesi açısından önemli oldukları düşünülmektedir.



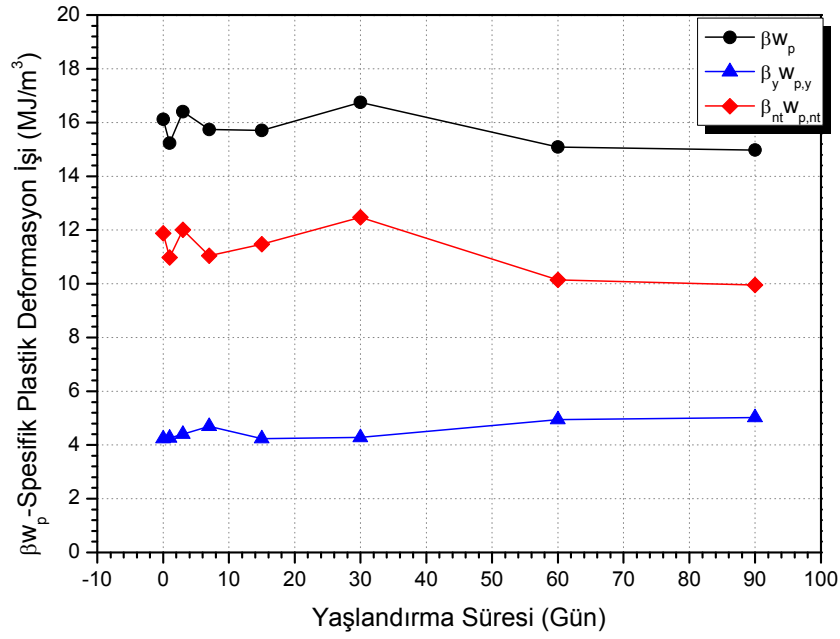
Şekil 4.41: Boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi değerinin L ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi

Hidrotermal yaşlandırma sürecinin spesifik kırılma işi parametrelerine etkisini incelemek açısından bulunan değerler Şekil 4.42'deki grafikte aynı eksen takımında sunulmuştur.



Şekil 4.42: Hidrotermal yaşlandırma sürecinin spesifik esas kırılma işi parametrelerine etkisi

Şekil 4.42 incelendiğinde yük-uzama eğrileri, makro fotoğraflar ve % ağırlık cinsinden su absorpsiyonu grafiklerinin EWF parametrelerini destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Zira 30. güne kadar spesifik kırılma işi parametrelerinde belirgin bir değişim gözlenmiyor olmasına karşın 60. günden itibaren spesifik toplam kırılma işi, akma için spesifik kırılma işi ve boyun verme-yırtılma için spesifik kırılma işi parametrelerinin üçü birden şiddetle azalmış ve 90. günde ise özellikle boyun verme ve kırılma işi dolayısıyla da spesifik toplam kırılma işi değeri düşüş göstermiştir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.42 birlikte ele alındığı zaman, spesifik kırılma işi değerlerindeki düşüşün malzemenin su absorpsiyonu ile direkt olarak ilişkili olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca Şekil 4.40'ta görüldüğü gibi tüm süreç boyunca akma için spesifik kırılma işi değeri boyun verme-yırtılma için spesifik kırılma işi değerinden küçük çıkmıştır bu da EWF'nin başarısı açısından önemli bir kriterdir.



Şekil 4.43: Hidrotermal yaşlandırma sürecinin spesifik plastik deformasyon işi parametrelerine etkisi

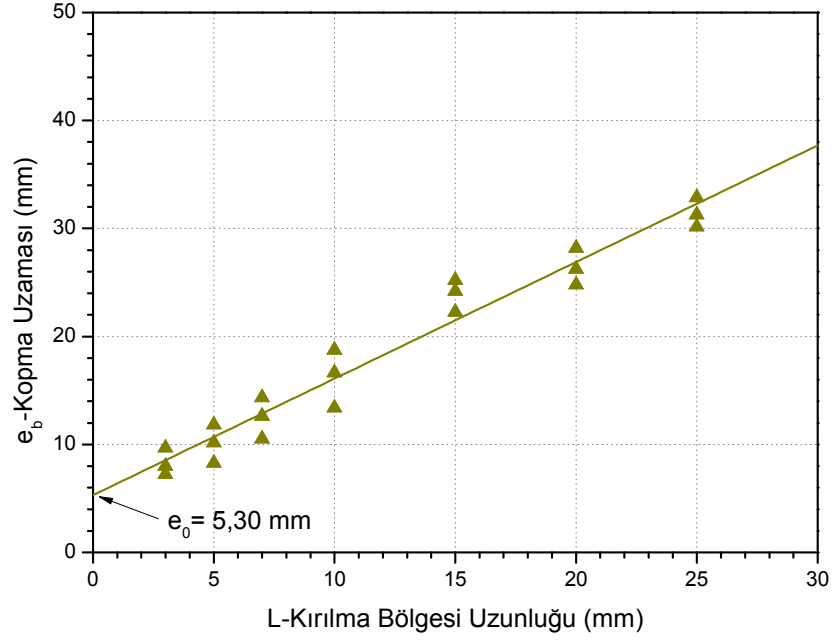
Şekil 4.43’de ise spesifik kırılma işi parametrelerinden farklı olarak, plastik deformasyon işi parametrelerinin tümü, 60. günden sonra düşüş göstermemiş, akma için plastik deformasyon işi parametresi artmıştır. Ancak boyun verme ve yırtılma için spesifik kırılma işi parametresi ise şiddetle düşmüştür.

Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’deki değerler Tablo 4.4’te listelenmiştir. Tablo 4.2’deki değerler ile Tablo 4.4’teki değerler karşılaştırıldığında hidrotermal yaşlandırmanın etkisi sayısal olarak görülmektedir.

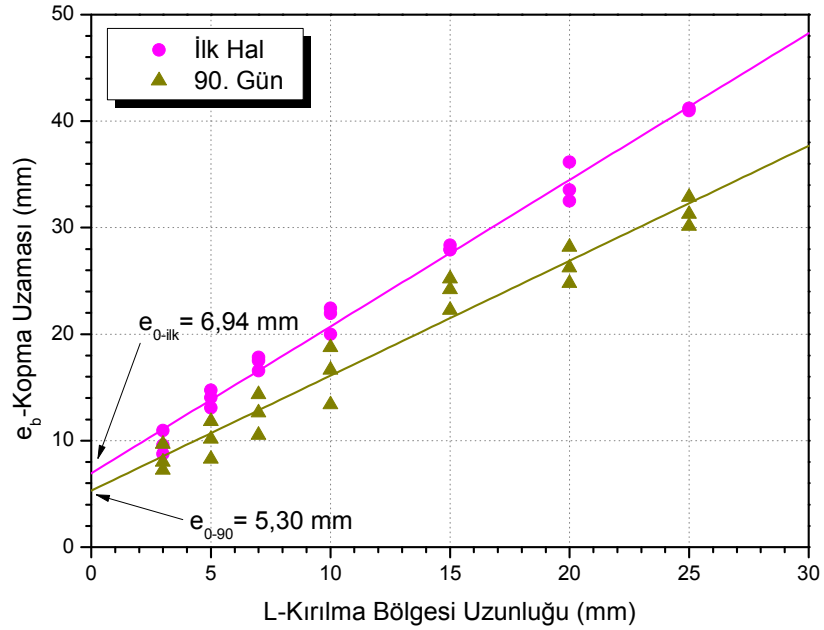
Tablo 4.4: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırma maruz kalmış ÇYMAPE malzemenin esas kırılma işi parametreleri

EWF Parametreleri		Akma İçin EWF Parametreleri		Boyun Verme & Yırtılma İçin EWF Parametreleri	
Spesifik Esas Kırılma İşi $[w_e]$ (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi $[\beta w_p]$ (kJ/m ²)	Spesifik Esas Kırılma İşi $[w_{e,y}]$ (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi $[\beta_y w_{p,y}]$ (kJ/m ²)	Spesifik Esas Kırılma İşi $[w_{e,nt}]$ (kJ/m ²)	Spesifik Plastik Deformasyon İşi $[\beta_{nt} w_{p,nt}]$ (kJ/m ²)
89,41	14,98	30,67	5,02	58,74	9,96

Şekil 4.44'te 90. gün numunelerinde kopma uzamasının L boyu ile değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde, hidrotermal yaşlandırma öncesi numunelerdekine benzer şekilde sonuçların lineer olarak değiştiği görülmektedir.



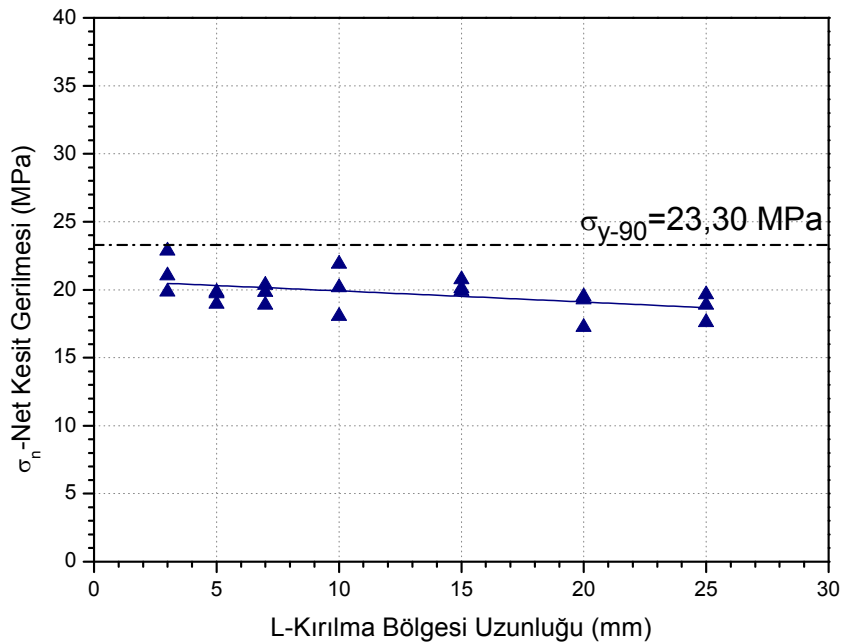
Şekil 4.44: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde kopma uzamasının L boyu ile değişimi



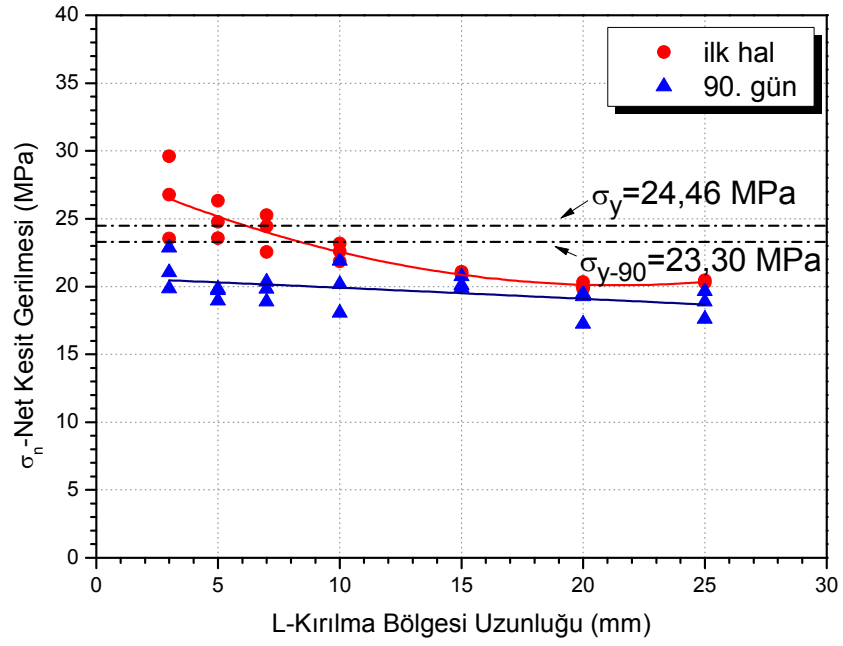
Şekil 4.45: İlk hal ve 90. gün numunelerinde kopma uzamasının L boyu ile değişimi

Şekil 4.45'te ilk hal ve 90. gün numuneleri için kopma uzamasının L ile değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi çatlak açılma mesafesi olan e_0 değeri 90. gün için daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçla 90.gün numunelerinde çatlağın daha kolay ilerlediği anlaşılmıştır.

İlk hal numunelerinde olduğu gibi 90. gün numuneleri için de deneyler sırasındaki yükleme halinin türü bilinmelidir. Yani hidrotermal yaşlandırma sonrası EWF'nin uygunluğunu saptamak için net kesit gerilmesinin L ile değişiminin grafiksel olarak incelenmesi gerekir. Şekil 4.46'da 90. gün numuneleri için maksimum net kesit gerilmesinin L ile değişimi görülmektedir. Şekil 4.46 incelendiğinde maksimum net kesit gerilmesi değerinin L ile değişiminin beklenilenden daha lineer olduğu söylenebilir. Zira yaşlandırma öncesi numunelerde olduğu gibi L 'nin küçük değerleri için maksimum net kesit gerilmesi değerinde belirgin bir artış olmamıştır. Bunun nedeni ise hidrotermal yaşlandırma neticesinde yapıya absorbe edilen sudur. Çünkü suyun varlığı nedeniyle malzeme gevrek kırılma davranışı göstermiş ve bunun sonucu olarak çentik ucunda önemli bir plastik deformasyon bölgesi oluşmamıştır. Çatlak ucu plastik deformasyon bölgesi yeteri kadar büyümediği için de plastik deformasyon bölgesinin çentik boyu tarafından sınırlandırılması söz konusu değildir.



Şekil 4.46: 90 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerde net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimi



Şekil 4.47: Net kesit gerilmesi değerinin L boyu ile değişimine hidrotermal yaşlandırma sürecinin etkisi

Şekil 4.47’de de ilk hal ve 90. gün için net kesit gerilmesi değerinin L uzunluğu ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi $L= 15$ mm’den sonra sonuçlar birbirine çok yakındır.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemenin hidrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrası kırılma davranışları, esas kırılma işi metoduyla incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. İlk hal numuneleri için ÇYMAPE malzemenin spesifik esas kırılma işi (kırılma tokluğu) değeri (w_e) 146,12 kJ/m² ve kritik çatlak ucu açılma mesafesi değeri (e_0) 6,94 mm olarak bulunmuştur.

2. Yük-uzama eğrileri, EWF parametreleri ve numunelerin su absorpsiyonu grafikleri incelendiğinde, yaşlandırma sürecinin 60. günden itibaren malzemeyi etkilediği görülmüştür.

3. Hidrotermal yaşlandırma işleminin 90. gününe ait numuneler için ÇYMAPE malzemenin spesifik esas kırılma işi değeri (w_e) 89,41 kJ/m² ve kritik çatlak ucu açılma mesafesi değeri (e_0) 5,30 mm olarak bulunmuştur.

4. Hidrotermal yaşlandırmanın etkisiyle çatlak ucu plastik deformasyon bölgesi L boyu tarafından sınırlandırılacak kadar gelişmediği için 90. gün numunelerinde ilk hal numunelerinden farklı olarak, L 'nin belli bir alt sınır değeri için maksimum net kesit gerilmesinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Yani 90. gün numunelerinde tüm L değerleri için gerilme halinin düzlem gerilme olduğu görülmüştür.

5. Hidrotermal yaşlandırma sonucunda, malzemeye absorbe edilen suyun etkisiyle, 60. günden itibaren kırılma yüzeylerinde gevrek kırılmadan, sünek kırılmaya geçiş bölgesi meydana gelmiştir.

6. Tüm veriler ışığında, ÇYMAPE malzemenin hidrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrası kırılma davranışını karakterize etmek için EWF yönteminin uygun olduğu görülmüş, sonuçlar tatmin edici bulunmuştur.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada SENT tipi numuneler kullanılmıştır. Yapılacak olan diğer çalışmalar için DENT tipi numuneler kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir veya pantolon tipi numuneler kullanılarak aynı malzemenin düzlem dışı kırılma davranışına hidrotermal yaşlandırmanın etkisi incelenebilir.

Daha büyük L uzunlukları seçilebilir ve L boyunun üst sınırı belirlenebilir. Ayrıca yaşlandırma sürecinin etkisini izlemek için daha fazla sayıda L boyu seçilebilir.

Hidrotermal yaşlandırma süreci uzatılabilir ve farklı numune kalınlıkları için hidrotermal yaşlandırmanın etkisi izlenebilir. Aynı malzeme kullanılarak farklı yaşlandırma ortamlarının kırılma davranışına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yayla, P., “Kırılma mekaniği”, *Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, 1-96, (2005).
- [2] Ekrem, M., “Cam kumaş takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 9-32, (2006).
- [3] Çetinel, H., “Polietilen ve polipropilenin mekanik özelliklerinin incelenmesi”. *7DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 2, Sayı 3, 79-87, (2000).
- [4] Şelale, S., “Polietilen malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 3-4, (2006).
- [5] <http://www.scribd.com/doc/2670117/POLETLEN> (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2010).
- [6] http://neon.mems.cmu.edu/cramb/27-100/lab/S00_lab2/Image1.gif (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2010).
- [7] Düşünceli, N., Çolak, Ö., Ü., “İmalat yöntemlerinin yüksek yoğunluklu polietilen’in (YYPE) tek eksenli çekme davranışı üzerindeki etkisi”, *8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 7-9 Kasım (2007).
- [8] Fındık, F., Ünal, H., Yetgin, S., H., Kurteri, R., “Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMAPE) implant malzemesinin kuru ve sulu ortamlardaki sürtünme ve aşınma davranışları”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük Üniversitesi, Karabük, 13-15 Mayıs (2009).
- [9] Aoike, T., Yokoyama, D., Uehara, H., Yamanobe, T., Komoto, T., “Tribology of ultra-high molecular weight polyethylene disks molded at different temperatures”, *Wear*, 262, 742-748, (2007).
- [10] Premnath, V., Bellare, A., Merril, A., W., Jasty, M., Harris, W., H., “Molecular rearrangements in ultra high molecular weight polyethylene after irradiation and long-term storage in air”, *Polymer*, 40, 2215-2229, (1999).
- [11] Kurtz, S., M., Villarage, M., L., Herr, M., P., Bergström, J., S., Rinnac, C., M., Edidin, A., A., “Thermomechanical behavior of virgin and highly crosslinked ultra high molecular weight polyethylene used in total joint replacements”, *Biomaterials*, 23, 3681-3697, (2002).

- [12] Li, S., “Ultra high molecular weight polyethylene: from charnley to cross-linked”, *W.B. Saunders Company*, (2001).
- [13] Enomoto, I., Katsumura, Y., Kudo, H., Sekiguchi, M., “The role of hydroperoxides as a precursor in the radiation-induced graft polymerization of methyl methacrylate to ultra high molecular weight polyethylene”, *Radiation Physics and Chemistry*, 79, 718-724, (2010).
- [14] <http://www.polikim.com.tr/pdf/ulpolen.pdf> (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2010).
- [15] Canan, F., “Açılı yüzey çatlaklı cam epoksi kompozit malzemelerin kırılma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 16-28, Konya, (2007).
- [16] Broek, D., “Elementary engineering fracture mechanics”, *Martinus Nijhoff Publishers*, 98-117, (1982).
- [17] Broek, D., “The practical use of fracture mechanics”, *Kluwer Academic Publishers*, 114-115, (1988).
- [18] Varadarajon, R., Dapp, E., K., Rimmnac, C., M., “Static fracture resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene using the single specimen normalization method”, *Polymer Testing*, 27, 260-268, (2008).
- [19] Arkhireyeva, A., Hashemi, S., O’brein, M., “Factors affecting work of fracture of uPVC film”, *Journal of Materials Science*, 34, 5961–5974, (1999).
- [20] Mai, Y., W., Cotterell, B., “On the essential work of ductile fracture in polymers”, *International Journal of Fracture*, 32, 105-125, (1986).
- [21] Lacha, R., Schneidera, K., Weidisha, R., Jankea, A., Knollb, K., “Application of the essential work of fracture concept to nanostructured polymer materials”, *European Polymer Journal*, 41, 383–392 (2005)
- [22] Arkhireyeva, A., Hashemi, S., “Effect of temperature on fracture properties of an amorphous poly(ethyleneterephthalate)(PET) film”, *Journal of Materials Science*, 37, 3675–3683, (2002).
- [23] Arkhireyeva, A., Hashemi, S., “Fracture behaviour of polyethylene naphthalate (PEN)”, *Polymer*, 43, 289-300, (2002).
- [24] Bárány, T., Ronkay, F., Karger-Kocsis, J., Czigány, T., “In-plane and out-of-plane fracture toughness of physically aged polyesters as assessed by the essential work of fracture (EWF) method”, *International Journal of Fracture*, 135, 251–265, (2005).
- [25] Wong, j., S., S., Balas, D., F., Li, R., K., Y., Mai, Y., W., Maspoeh, M., L., Sue, H., J., “On tearing of ductile polymer film using the essential work of fracture (EWF) method”, *Acta Materialia*, 51, 4929–4938, (2003).

- [26] Bárány, T., Karger-Kocsis, J., Czigány, T., “Effect of hygrothermal aging on the essential work of fracture response of amorphous poly(ethyleneterephthalate) sheets”, *Polymer Degradation and Stability*, 82, 271–278, (2003).
- [27] Temiz, Ş., Aydın, M., D., Alar, G., Özel, A., “Nemli ortamlara maruz yapısal yapıştırıcıların dayanımı”, *IX. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Bursa, 27-28 Mayıs, (2005).
- [28] Yılmaz, T., “Polimer matrisli kompozitlerin pim ile yük taşıma özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 41, (2006).
- [29] Yayla, P., “Cisimlerin mukavemeti”, *Çağlayan Kitabevi*, 12, (2001).
- [30] Güleç, Ş., Aran, A., “Malzeme bilgisi”, TÜBİTAK MAM, 129-132, (1988).
- [31] Wang, X., L., Li, R., K., Y., Cao, Y., X., Meng, Y., Z., “Essential work of fracture analysis of poly(propylene carbonate) with varying molecular weight”, *Polymer Testing*, 24, 699–703, (2005).
- [32] Karger-Kocsis, J., Bárány, T., Moskala, E., J., “Plane stress fracture toughness of physically aged plasticized PETG as assessed by the essential work of fracture (EWF) method”, *Polymer*, 44, 5691-5699, (2003).
- [33] Özkoç, G., Bayram, G., Bayramlı, E., “Impact essential work of fracture toughness of ABS/polyamide-6 blends compatibilized with olefin based copolymers”, *J Mater Sci*, 43, 2642-2652, (2008).
- [34] <http://www.jeol.cn/images/6380.jpg> (Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2010).
- [35] <http://bimg.instrument.com.cn/show/pic/C10358.jpg> (Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2010).
- [36] Cao, J., Chen, L., “Effect of thermal cycling on carbon fiber-reinforced PPS composites”, *Polymer Composites*, 713-716, (2005).
- [37] Gong, G., Xie, B., H., Yang, W., Li, Z., M., Zhang, W., Q., Yang, M., B., “Essential work of fracture (EWF) analysis for polypropylene grafted with maleic anhydride modified polypropylene/calcium carbonate composites”, *Polymer Testing*, 24, 410-417, (2005).
- [38] Hashemi, S., “Effect of temperature on fracture toughness of an amorphous poly(ether-ether ketone) film using essential work of fracture analysis”, *Polymer Testing*, 22, 589–599, (2003).
- [39] Chen, H., Karger-Kocsis, J., Wu, J., “Effects of molecular structure on the essential work of fracture of amorphous copolyesters at various deformation rates”, *Polymer*, 45, 6375–6382, (2004).

- [40] Bárány, T., Czigány, T., Karger-Kocsis, J., “Essential work of fracture concept in polymers”, *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, 47, 2, 91–102. (2003).
- [41] Poon, W., K., Y., Ching, E., C., Y., Cheng, C., Y., Li, R., K., Y., “Measurement of plane stress essential work of fracture (EWF) for polymer films effects of gripping and notching methodology”, *Polymer Testing*, 20, 395–401, (2001).
- [42] Karger-Kocsis, J., Moskala, E., J., “Molecular dependence of the essential and non-essential work of fracture of amorphous film of poly(ethylene-2,6-naphthalate)(PEN)”, *Polymer*, 41, 6301–6310, (2000).
- [43] Gong, G., Xie, B., H., Yang, W., Li, Z., M., Lai, S., M., Yang, M., B., “Plastic deformation behavior of polypropylene/calcium carbonate composites with and without maleic anhydride grafted polypropylene in corporate using the essential work of fracture method”, *Polymer Testing*, 25, 98–106, (2006).
- [44] Bureau, M., N., Ton-That, M., T., Sarazin, F., P., “Essential work of fracture and failure mechanisms of polypropylene–clay nanocomposites”, *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2360–2374, (2006).
- [45] MasPOCH, M., L1., Hénault, V., Ferrer-Balasa, D., Velasco, J., I., Santana, O., O., “Essential work of fracture on PET films influence of the thickness and the orientation”, *Polymer Testing*, 19, 559–568, (2000).
- [46] Karger-Kocsis, J., Moskala, E., J., Czigány, T., “Thickness dependence of work of fracture parameters of an amorphous copolyester”, *Polymer*, 38, 4587-4593, (1997).

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Kırşehir’de doğdu. İlköğrenimini Tokat ve Konya’da, orta ve lise öğrenimini Kırşehir’de tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans öğrenimine başladı.