

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞINA KRİSTALİN TE
DERECESİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Esra ÖZYURT

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Program : İMALAT

MAYIS 2003

**PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞINA KRİSTALİN TE
DERECESİNİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mih. Esra ÖZYURT
(503991136)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Mayıs 2003**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İ. Barlas ERYÜREK
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Selma AKKURT
Prof. Dr. Lütfi ÖVEÇOĞLU**

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Çalışmaları msüresi nce değerli yardımlarını esirge meyen sayı n hoca m **Prof. Dr. İ. Barlas ERYÜREK** e teşekkürü bir borç biliri m

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde bana destek olan araştırma görevlisi arkadaşları m **Erhan ARSLAN, Dilek BAYRAK, Tolga YASA, Canan Gamze GÜLERYÜZ ve Enre ÖZLÜ** ye ve bana her zaman güvenen, yaptığı m her işte sonuna kadar destekleyen anne ve babam **Hatice ve Ahmet ÖZYURT** a şükranları m sunarım

Mayıs, 2003

Esra ÖZYURT

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. PLASTİK MALZEMELERE GENEL BAKIŞ	2
2.1. Plastiklerin Sınıflandırılması	4
2.2. Amorf ve Kristalin Plastiklerin Yapısal Özellikleri	6
2.3. Plastiklerin Kristalinite Derecesini Etkileyen Faktörler	9
2.4. Plastiklerin Genel Mekanik Özellikleri	13
2.4.1. Amorf ve Kısmikristalin Plastiklerin Mekanik Özellikleri	16
3. PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞI	20
3.1. Plastiklerde Yorulma Sırasındaki Deformasyon Mekanizmaları	22
3.2. Deneysel Çalışma	30
3.3. Plastiklerin Yorulmasında Çekirdeklenme Safhasına Kristalinite Derecesinin Etkisi	33
3.3.1. Çentiksiz Numunelerin Gerilme Kontrollü Deneyleri	35
3.3.2. Histeretik Isınmadan Dolayı Meydana Gelen Yorulma Hasarı	37
3.3.3. Çentiksiz Numunelerin Deformasyon Kontrollü Deneyleri	50
3.4. Plastiklerin Yorulmasında Çatlak İlerleme Safhasına Kristalinite Derecesinin Etkisi	53
3.4.1. Yorulma Çatlağı İlerleme Hızına Deney Frekansının Etkisi	60
3.4.2. Yorulma Çatlağı İlerleme Hızına Deney Sıcaklığının Etkisi	63
3.4.3. Yorulma Çatlağı İlerleme Hızına Molekül Ağırlığının Etkisi	65
3.4.4. Yorulma Çatlağı İlerleme Hızına Çapraz Bağlı Yapının Etkisi	68
3.5. Yorulma Çatlağı İlerleme Mekanizmaları	69
3.5.1. Yorulma Çizgileri (Striations)	70
3.5.2. Süreksiz İlerleme Bantları	73
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	75
KAYNAKLAR	79
EK A	81
ÖZGEÇMİŞ	82

KI SALT MALAR

ABS	: Akril onitril-büt adien-stiren terpoli meri
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
HIPS	: Yüksek darbe polistireni
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	: Lineer düşük yoğunluklu polietilen
PA	: Poliasetal
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PMMA	: Poli metil metakrilat
PP	: Poli propilen
PPO	: Polifenilenoksit
PS	: Polistiren
PSF	: Polisülfon
PTFE	: Politetrafloretilen
PVC	: Poli vinil klorür
PVDF	: Poli vinilidenflorid
SAN	: Stiren-akrilonitril kopolimeri

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Plastiklerin imalatında kullanılan monomerler	4
Tablo 3.1. Belirli kristalin ve amorf polimerler için Δ ve m değerleri	55
Tablo 3.2. Akrilik Levhaların Molekül Ağırlığına Bağlı Olarak Yorulma Ömürleri.....	66
Tablo 3.3. Farklı Plastiklerden Levhaların Molekül Ağırlığına Bağlı Olarak Yorulma Ömürleri.....	66
Tablo A.1. Bazı Plastik Malzemelerin Kimyasal Yapısı, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Amorf ve kısmi kristalin polimerlerin zincir yapısı.....	7
Şekil 2.2 : Kristalin polimerlerin sferulit yapısı.....	7
Şekil 2.3 : Polietilenin sferulit yapısı.....	8
Şekil 2.4 : Farklı polietilen (PE) tiplerinin moleküler yapıları.....	10
Şekil 2.5 : Poli propilenin (PP) izotaktik, syndiotaktik ve ataktik yapıları....	11
Şekil 2.6 : Üç tip polietilene ait çekme gerilme-şekil değişimi eğrileri.....	12
Şekil 2.7 : Sıcaklığa bağlı olarak polimerlerin özgül hacmi.....	14
Şekil 2.8 : Elastik malzemenin ve viskoelastik malzemenin şekil değiştirilmesi.....	15
Şekil 2.9 : Gerilme gevşeme eğrisi.....	15
Şekil 2.10 : Ağırlıklı gevrek ve Beğrili sünek plastik malzemelerin içi n gerilme-şekil değişimi davranışı.....	16
Şekil 2.11 : Poli metil metakrilat (PMMA) 'nın gerilme-biri mşekil değişimi davranışına sıcaklığın etkisi.....	17
Şekil 2.12 : Amorf ve kısmi kristalin plastiklerde elastik modülün sıcaklıkla değişimi.....	18
Şekil 2.13 : Kısmi kristalin bir plastiğin gerilme-biri mşekil değişimi di yagramı.....	19
Şekil 3.1 : Poli karbonat (PC) filtre kabında yorulma hasarının çekirdeklenme ve çatlak ilerlemesi (yorulma çizgileri).....	21
Şekil 3.2 : Elastiklerin yorulma davranışı: Hasarı meydana getiren gerilme genliği (σ) ve tekrar sayısı (N) arasındaki ilişki	21
Şekil 3.3 : Yorulma çatlaklarının başlanması ve ilerlemesi için gerekli olan tekrar sayısı ve gerilme genliği arasındaki ilişkiyi gösteren yorulma eğrileri.....	22
Şekil 3.4 : Mikroboşluklar ve fibril köprülerini içeren bir craze'in şematik gösterilişi ve craze yapısında mikroboşlukların birleşmesiyle çatlağın ilerlemesi.....	23
Şekil 3.5 : Polifenilenoksit'te (PPO) birbirine bağlı mikroboşluklar ve çekme yönünde dizilmiş fibrilleri gösteren craze yapısı. ve uygulanan gerilme eksenine paralel yönde craze yapısının gelişmesi.....	24
Şekil 3.6 : Bir çatlak ucundaki craze yapısında fibrillerin kırılmasıyla çatlağın ilerlemesi.....	25
Şekil 3.7 : Gerilme eksenine göre craze (→) ve kayma bantlarının (×) yönlenmesi.....	26
Şekil 3.8 : Kristalin lameller arasındaki bağlantı molekül zincirleri.....	27
Şekil 3.9 : Kristalin polimerlerin deformasyon mekanizması.....	28
Şekil 3.10 : Kısmi kristalin plastiklerde kristalin zincirlerin kayması.....	28
Şekil 3.11 : Çekme sırasında sferulitlerde meydana gelen deformasyon.....	29
Şekil 3.12 : Kısmi kristalin plastiklerin deformasyon mekanizması.....	30
Şekil 3.13 : Deneyde zamanla craze yapısının oluşumu.....	32

Şekil 3.14	: Polikarbonat numunede craze yapısı.....	33
Şekil 3.15	: Gerilme kontrollü deney ile ilgili gerilme değişkenleri.....	34
Şekil 3.16	: Deformasyon kontrollü deney ile ilgili birim şekil değişimi değişkenleri.....	35
Şekil 3.17	: Brçok mühendislik plastiklerinin gerilme- tekrar sayısı (S-N) eğrileri.....	35
Şekil 3.18	: Tekrarlı yüklemelere maruz kalan plastiklerde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki faz farkı ve histeresiz eğrisi.....	37
Şekil 3.19	: Viskoelastik malzemelerde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki faz açısı.....	38
Şekil 3.20	: PTFE’de sıcaklığa bağlı olarak kayıp kompliansındaki değişimleri.....	41
Şekil 3.21	: Gerilme kontrollü yorulma deneyi uygulanan politetraflorütilen’in S-N eğrisi ve sıcaklık artışına gerilme genliğinin ($\Delta\sigma$) etkisi.....	42
Şekil 3.22	: Politetraflorütilen’de deney frekansının yorulma ömrüne etkisi.....	43
Şekil 3.23	: Poliasetal’in gerilme kontrollü yorulma deneyinde 5 Hz frekansta eksenel yüklemeye sonucu meydana gelen sıcaklık artışı.....	45
Şekil 3.24	: Mekanik hasar ile ısı hasarı arasındaki farkları gösteren, poliasetale (PA) ait S-N eğrisi.....	46
Şekil 3.25	: Deney frekansının ve numunenin yüzey/hacim oranının ($\beta \text{ mm}^{-1}$) bir fonksiyonu olarak mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesi.....	47
Şekil 3.26	: Poli metil metakrilat’ta (PMMA) mekanik ve ısı hasarları.....	47
Şekil 3.27	: PTFE’de kristalinite derecesinin artmasıyla yorulma ömründe meydana gelen artış (deney frekansı 30 Hz).....	50
Şekil 3.28	: Tekrarlı deformasyonların etkisi altında malzemenin yumuşaması ve sertleşmesi.....	51
Şekil 3.29	: Tekrarlı yüklemelerde histeresiz eğrileri (a) ideal elastik malzeme (b) elastik ve plastik deformasyonlara uğrayan malzeme.....	52
Şekil 3.30	: 298° K’de tekrarlı çekme ve monotonik gerilme-deformasyon eğrileri.....	53
Şekil 3.31	: Tekrar sayısı ve çatlak uzunluğu arasındaki ilişki.....	54
Şekil 3.32	: Çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü aralığı ile değişimi.....	56
Şekil 3.33	: Brçok amorf ve kısmi kristalin plastiklerin yorulma çatlak ilerleme davranışı.....	57
Şekil 3.34	: Kısmi kristalin Nyl on 66 ve Amorf Nyl on (Amidel)’de yorulma çatlak ilerleme hızlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 3.35	: Nor malize edilmiş gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak kristalin plastiklerin ve metallerin çatlak ilerleme hızlarının kıyaslanması.....	59
Şekil 3.36	: Çatlak ucunda crazing deformasyon mekanizması ile çatlak ilerlemesi.....	60
Şekil 3.37	: PVC ve PS’de çatlak ilerleme hızına deney frekansının etkisi....	62
Şekil 3.38	: PMMA’da yorulma çatlak ilerleme hızına deney sıcaklığının etkisi.....	64

Şekil 3.39	: Polistiren (PS)'de yorulma çatlakları ile ilgili deney sıcaklığının etkisi.....	64
Şekil 3.40	: Amorf polistireni (PS) yorulma ömrüne molekül ağırlığının etkisi.....	65
Şekil 3.41	: Molekül ağırlığının artması ile yorulma çatlakları ile ilgili direncinde meydana gelen artış.....	67
Şekil 3.42	: PMMA ve PVC'nin molekül ağırlıklarının bir fonksiyonu olarak yorulma çatlakları ile ilgili hızlarının, sabit bir $\Delta K = 0.6 \text{ MPa m}^{1/2}$ değerinde ve 10 Hz deney frekansında değişimi.....	68
Şekil 3.43	: (a) Polistiren (PS), çapraz bağlı polistiren (CLPS), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) ve yüksek darbe polistireni (HIPS)'nin yorulma çatlakları ile ilgili davranışları (b) Farklı miktarlarda çapraz bağlı katkılar içeren PMMA'nın yorulma çatlakları ile ilgili davranışları.....	69
Şekil 3.44	: Epoksi, polistiren (PS) ve polikarbonat'ın (PC) makroskopik yorulma çatlakları ile ilgili hızlarının (da/dN) ve hasar düştükten sonra kırılma yüzeyinde gözlenen ince yorulma çizgileri arasındaki mesafenin mikroskopik ölçümünün gerilme şiddet faktörü ΔK ya göre çizimi.....	72
Şekil 3.45	: PSF ve PMMA'nın makroskopik yorulma çatlakları ile ilgili hızlarının (da/dN) ve hasar düştükten sonra kırılma yüzeyinde gözlenen ince yorulma çizgileri arasındaki mesafenin mikroskopik ölçümünün gerilme şiddet faktörü ΔK ya göre çizimi.....	73
Şekil 3.46	: Amorf plastiklerde yorulma kırılma yüzey işaretleri.....	74
Şekil 3.47	: PVC'de çatlak ucunda süreksiz çatlak ile ilgili süreci.....	74

SEMBOL LİSTESİ

a	: Çatlak uzunluğu
A_m	: Mlzemeye bağı sabit
A_B	: Sabitler
A	: Nümune yüzey alanı
C_p	: Özgöl ısı
d	: Nümune çapı
D	: Mlzemenin sönmeme (damping) kapasitesi
dA/dN	: Yorulma çatlama ilerleme hızı
E	: Elastik modül
E_d	: Dinamik elastik modül
$\dot{E}$	: Bri mzaandaki enerji kaybı
f	: Titreşim frekansı (tekrar sayısı/sn)
F	: Kuvvet (N)
J''	: Kayıp kompliansı
k	: Isı iletim katsayısı
K_v	: Kristalinite derecesi
M	: Molekül ağırlığı
$\bar{M}_x$	: Ortalama molekül ağırlığı
N	: Tekrar sayısı
N_c	: Çatlama çekirdeklenmesi için gerekli olan tekrar sayısı
N_p	: Çatlama numunenin kırılmasına sebep olacak bir kritik uzunluğa ulaşması için gereken tekrar sayısı
N_T	: Toplam yorulma ömrü
R	: Gerilme oranı, Bri mşekil değişimi oranı
T_g	: Cam geçiş sıcaklığı
T_h	: Homolog sıcaklık
T_m	: Erime sıcaklığı
V	: Nümune hacmi
W	: Nümunenin genişliği
Y	: Nümunenin geometrisine ve çatlama açılma moduna bağlı sabit
ΔK	: Gerilme-şiddet faktörü aralığı
$\dot{\epsilon}$	: Şekil değiştirme hızı
ϵ_a	: Bri mşekil değişimi genliği
ϵ_m	: Ortalama bri mşekil değişimi
ρ	: Kısmi kristalin polimerin yoğunluğu
ρ_a	: Tamamen amorf polimerin yoğunluğu
ρ_c	: Kristalin fazın yoğunluğu
ρ_k	: Tamamen kristalin polimerin yoğunluğu
ρ_v	: Kristalinite derecesi belirlenecek polimerin yoğunluğu
α	: Mekani k/ısısal hasar geçiş gerilmesi

σ_a	: Gerilme genliği
σ_B	: Çekme gerilmesi
σ_m	: Ortalama gerilme
$\sigma_{max} , \sigma_{min}$	: Maksimum ve minimum gerilmeler
ω_a	: Amorf fazın ağırlığı
ω_c	: Kristalin fazın ağırlığı

PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞINA KRİSTALİN TE DERECESİNİN ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, plastiklerin zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında meydana gelen yorulma hasarına kristalinite derecesinin etkisi, çekirdeklenme ve çatlak ilerleme safhaları için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu inceleme sırasında literatürdeki deney sonuçlarından yararlanılarak amorf ve kristalin plastiklerin yorulma davranışları kıyaslanmış, gözlenen farklılıkların sebepleri üzerinde durulmuştur. Kristalin ve amorf plastiklerde görülen farklı deformasyon mekanizmalarının, yorulma hasarının çekirdeklenme ve çatlak ilerlemesi safhalarını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle amorf plastiklerin yorulma hasarında etkili olan ve crazing olarak adlandırılan deformasyon mekanizması, polistiren bir numune de deneysel olarak gözlenmiştir.

Plastiklerin yorulma hasarı, gerilme genliği ve frekansa (veya deformasyon hızı) bağlı olarak ısı yorulma hasarı ve mekanik yorulma hasarı olmak üzere iki temel mekanizmaya sahiptir. Bu çalışmada; plastik malzemelerde belirli bir gerilme genliğinde, düşük frekanslarda ve zamanla değişen yüklerin etkisi altında mekanik yorulma hasarının meydana geldiği tespit edilmiştir. İncelemenin ilk aşamasında amorf plastiklerde düşük frekanslarda yorulma hasarının çekirdeklenme ve çatlak ilerlemesi safhalarının kristalin yapıya göre daha hızlı bir şekilde meydana geldiği belirlenmiş ve bunun sebebinin amorf plastiklerde çekme gerilmesinin etkisi altında oluşan craze yapısı olduğu tespit edilmiştir.

İncelemenin ikinci aşamasında ise, yüksek frekanslardaki tekrarlı yükleme koşullarında, plastiklerde düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle meydana gelen ısı yorulma hasarı incelenmiştir. Amorf plastiklerde ısı yorulma hasarının kristalin plastiklerden daha erken olduğu tespit edilmiş ve sebebi incelenmiştir. Çentiksiz amorf ve kristalin numunelerde yüksek frekanslarda tekrarlı yükleme koşullarında yapıda genel bir ısınma meydana gelirken, yapısında önceden bir çentik içeren numunelerde ise çatlak ucunda yerel bir ısınmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Sonuçta plastiklerin yorulma hasarında malzemede meydana gelen genel ısınma çekirdeklenme safhasında yorulma ömrünü kısaltan bir faktördür. Çatlak ilerleme safhasında ise yerel ısınma, çatlak ucunu kütleştirerek çatlak ilerlemesinin yavaşlamasına sebep olduğu için yorulma ömrünü arttıran bir faktördür.

THE EFFECT OF THE DEGREE OF CRYSTALLINITY ON THE FATIGUE BEHAVIOUR OF PLASTICS

SUMMARY

In this study, the effect of degree of crystallinity to the fatigue failure of plastics under cyclic application of stress or strain has been investigated for both crack initiation and crack propagation stages separately. During this investigation the fatigue behaviour of amorphous and crystalline plastics have been compared by using the experimental results in the literature. The reasons of the differences in their fatigue behaviour have also been investigated. The result obtained from the study is that different deformation mechanisms of crystalline and amorphous plastics effect the stages of crack initiation and crack propagation in a considerable way. Thus effective deformation mechanism in the fatigue failure of amorphous plastics called as crazing has been observed with a polystyrene sample experimentally.

The fatigue failure of plastics have two main mechanisms as thermal fatigue failure and mechanical fatigue failure according to stress amplitude and frequency (or strain rate). In this study, it has been determined that mechanical fatigue failure of plastic materials occurs under cyclic application of stress or strain at low and high frequencies in the particular stress amplitude. At the first stage of this investigation, it has been determined that crack initiation and propagation stages occurred more rapidly than crystalline plastics in amorphous plastics at low frequencies under cyclic application of stress or strain. The reason of this situation is the generation of the craze structure consisting of microvoids and fibrils when amorphous plastics are subjected to the tensile stress.

At the second stage of this investigation, thermal fatigue failure in plastics because of their low thermal conductivity under cyclic loading conditions at high frequencies is examined. It has been determined that thermal fatigue failure in amorphous plastics takes place earlier than crystalline plastics and the reasons of the investigation have also been investigated. Also it is determined that at unnotched amorphous and crystalline samples under cyclic loading at high frequencies general heating occurs and at notched samples local heating occurs at the tip of the crack. As a result in the fatigue failure of plastics, general heating is a factor for decreasing the fatigue life. Since local heating causes to decrease the crack propagation rate by blunting the crack tip in the stage of crack propagation and this is a factor for increasing the fatigue life.

1 GİRİŞ

Günümüzde plastik malzemeler büyük bir gelişme göstererek metallerle eşit oranda kullanılmaya başlanmış hatta bazı uygulamalarda metallerin yerini almıştır. Bunun en önemli sebepleri; plastiklerin ucuz, kolay işlenebilir, hafif olması, yüksek kimyasal ve korozyon dirençlerine, yüksek ısı ve elektriksel özelliklere ve yeterli mekanik özelliklere sahip olmasıdır.

Yorulma (fatigue) zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında malzemenin hasara uğraması olarak tanımlanır. Uygulamada statik zorlanmalara ender olarak rastlanır. Metal ve plastik parçalara genellikle büyüklüğü ve yönü sürekli değişen kuvvetler etki ederler. Plastiklerin günümüzde gittikçe artan oranda hareketli parçalarda kullanılması sonucu, tasarımların zamanla değişen yüklemelere maruz kalan plastiklerin ömürleri hakkındaki bilgilere ihtiyaçları artmaktadır. Buna rağmen plastikler hakkındaki yorulma bilgileri metaller kadar gelişmemiştir.

Bu çalışmada, plastiklerin kristalinite derecesine bağlı olarak yorulma hasarının hem çekirdeklenme hem de ilerleme safhalarında meydana gelen farklılıklar ve sebepleri incelenmiştir. Plastik malzemeler zincirlerin birbirine göre tertiplenme şekline göre amorf ve kristalin olmak üzere iki yapıya sahiptir. Pratikte %100 kristalin bir plastik malzeme elde etmek oldukça zordur ve genellikle yapısındaki kristalin fazın yüzdesine bağlı olarak kısmi kristalin plastik malzemeler mevcuttur. Literatürde oldukça sınırlı miktarda mevcut olan bilgilerden ve deneysel sonuçlardan yararlanılarak çeşitli amorf ve kısmi kristalin plastiklerin yorulma dirençleri karşılaştırılarak gözlenen farklılıkların sebepleri üzerinde durulmuştur.

Kısmi kristalin ve amorf plastikler farklı deformasyon mekanizmalarına sahiptir ve bu malzemelerin yorulma hasarında deformasyon türü büyük öneme sahiptir. Bu nedenle amorf ve kısmi kristalin plastiklerin deformasyon özellikleri ayrı ayrı incelenerek yorulma hasarına etkisi yorumlanmış ve deneysel çalışmada amorf plastiklerin yorulma davranışında etkili bir deformasyon mekanizması olan craze yapısı, polistiren malzemeye uygulanan çekme gerilmesinin etkisi altında sürünme deneyinde gözlenmiştir.

2 PLASTİK MALZEMELERE GENEL BAKIŞ

Plastikler en son ortaya çıkan malzeme grubu olmasına rağmen günlük hayatımıza en fazla giren malzemelerden birisidir. Kısa sürede yaygınlaşmalarının ve ekonomik önekmazanmalarının nedeni olarak plastiklerin özelliklerinin ve çeşitliliğinin çok geniş bir aralıkta değişmesi gösterilebilir. Çok çeşitli ve diğer birçok malzeme grubundan daha farklı özelliklere sahip plastiklerin ana özellikleri aşağıdaki gibidir;

- 1- Özgül ağırlıkları düşüktür.
- 2- Çok çeşitli mekanik özelliklere sahiptirler.
- 3- Kolay şekil verilebilir ve kolay işlenebilirler.
- 4- Katkı maddeleri ile özellikleri değiştirilebilir.
- 5- Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür.
- 6- Genellikle saydamdır.
- 7- Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır.
- 8- Ucuz bir şekilde üretilirler.

Bu özellikleri incelendiğinde;

1. Metallerden ve seramiklerden daha hafif olan plastiklerin özgül ağırlıkları $0,8 \text{ g/cm}^3$ ile $2,2 \text{ g/cm}^3$ arasında değişir. Bu hafifliklerine karşın yüksek mekanik mukavemete sahip plastikler, en çok tercih edilen hafif malzeme sınıfı haline gelmiştir.
2. Plastikler çok çeşitli mekanik özelliklere sahiptirler. Çekme mukavemetleri ve elastiklik modülleri metallerden düşük olmasına rağmen geniş sınırlar dahilindedir. Bununla beraber camfiber takviyeli plastiklerin bu özellikleri bilinen en hafif metallerden olan alüminyum ile yarışır hale gelmiştir. Hatta günümüzde çeşitli dolgu maddeleri kullanılarak bazı metallerden daha yüksek mekanik mukavemete sahip plastik malzemeler bile ortaya çıkarılmıştır.
3. Plastikler çok kolay işlenirler. İşleme sıcaklıklarının 400°C nin altında (genelde 120°C ile 320°C arası) olması işlenmeleri için gerekli enerji

niktarının da düşük olmasını sağlar. Aynı zamanda plastikler, yüksek miktarlarda üretimi mümkün kılan verimli otomasyon tekniklerine uygun oldukları gibi pahalı ve zaman alıcı son işlemler gerektirmedi için çok komplike parçaları üretmeye de uygun malzemelerdir.

4. Plastiklerini iç ve dış özellikleri, katkı maddeleriyle kolaylıkla değiştirilebilir. Bu katkı maddeleri örneğin, plastik malzemenin elastik modülü ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini değiştiren genellikle cam veya karbon fiber gibi takviye edici dolgu malzemeleri, malzemenin boyanmasını sağlayan renk pigmentleri, bazı plastiklere çalışma özelliklerini ve mekanik özelliklerini değiştirmek üzere katılan yumuşatıcılarıdır.
5. Plastiklerin elektrik ve ısı iletkenlikleri düşüktür. Isı iletkenliklerinin metallerin ısı iletkenliklerinden neredeyse 300 kat daha düşük olması, plastikleri önemli ısı yalıtıcı malzemeler haline getirmiştir.
6. Bazı plastiklerin saydam görünümüne sahip olmaları onları gözlük camı, kompakt disk ve optik disk üretimine uygun kılmaktadır. Bu malzemeler camdan çok daha rahat işlenebilir olmalarının yanında optik ve mekanik yapıları açısından da oldukça gelişmiş özelliklere sahiptirler.
7. Plastikler kimyasal maddelere karşı da yüksek dirence sahiptirler. Atomik yapıları temelinde metallerden farklı olan plastikler korozyondan da metaller kadar etkilenmezler. Bu özellikleri sayesinde çeşitli ev aletleri, akaryakıtı karşı dirençli otomobil parçaları veya gıda ve kozmetik sanayiinde ambalajlama amacıyla kullanılırlar.
8. Plastikleri hammaddeler olarak üretmek, düşük miktarlarda enerji gerektirdiği için ucuz olmaktadır.

Plastiklerin çoğu, kütle üretimine uygun tekniklerle oldukça karmaşık şekillere sokulabilir. Plastiklerin dayanımları metaller kadar yüksek olmadığından gerilmeler altında önemli derecede boyutsal değişimler görülür. Sıcaklık duyarlılıkları metallerden çok daha yüksektir.

Plastik adının sebebi, bu malzemelerin kalıpla şekillendirilebilir olmasıdır. Daha genel bir tanımda polimerik malzemeler olmalarıdır. Bu tanımda çok malzeme içindeki atom düzenini yansıtmaktadır. Polimerik bir malzeme belirli bir düzenle birleşmiş

küçük atomik ünitelerden meydana gelir. ‘‘Mer’’ veya ‘‘monomer’’ adı verilen çok sayıdaki bu küçük üniteler, belirli bir düzenle birleşerek polimer olarak adlandırılan çok büyük moleküller meydana getirirler. Tablo 2.1’de plastiklerin imalatında kullanılan monomerler gösterilmektedir.

Genel olarak tanımlarsak, plastikler normal sıcaklıkta genellikle katı halde bulunan, basınç ve sıcaklıkla mekanik ve kimyasal yolla şekillendirilebilen ve kalıplanabilen polimerik maddelerdir. Plastikler polimerlerden oluşurlar ve bu polimerler de farklı kimyasal yapıda olduklarından plastiklerde fiziksel farklılıklar görülmektedir [1].

Tablo 2.1 Plastiklerin imalatında kullanılan monomerler [2]

Monomer	Polimer	Monomer	Polimer	Monomer	Polimer
Etilen	Poli-etilen	Propilen	Polipropilen	Vinil klorür	Polivinil klorür
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$		$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$		$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right)_n$	
Stiren	Polistiren	Tetrafluor-etilen	Politetrafluoretilen	Metil akrilat	Polimetil-akrilat
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$		$\begin{array}{c} \text{F} & \text{F} \\ & \\ \text{C} = & \text{C} \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} - & \text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right)_n$		$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{COOCH}_3 \end{array} \rightarrow \left(\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{COOCH}_3 \end{array} \right)_n$	

2.1 Plastiklerin Sınıflandırılması [2]

Plastikler işleme yöntemlerine göre termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır;

Termoplastikler ısı ve basınç altında yumuşayan akan, bu durumda herhangi bir şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşebilen (katı halini alan) plastiklerdir. Ayrıca tekrar ısıtıldığında tekrar yumuşayabilen, şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşebilen malzemelerdir. Bu şekillendirme sırasında hiçbir kimyasal değişimliğe uğramazlar. Genelde polimerler reaktör denilen tesiste polimerizasyon yoluyla elde edilirler. Çoğunlukla yoğunlaşma polimerizasyonu ile elde edilen termoplastiklerin polimerizasyon işlemi reaktörde tamamlanır bitmiş olur. Bu işlemin sonucu olarak yan zincir veya gruplar içeren uzun zincir molekülleri meydana gelir. Termoplastik

grubunu oluşturan en önemli plastikler; akrilikler, naylon, selülozikler polistiren (PS), polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC), polikarbonat (PC) ve polisülfon (PSF)'dir.

Termosetler, ısı işlemiyle bir defa istenilen şekli alabilen plastiklerdir, tekrar ısıtılma ile şekillenemezler. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler ve genellikle çapraz bağlı bir yapıya sahiptirler. Bu plastiklerde polimerizasyon işlemi, malzemenin yapısını oluşturan monomerlerin bir araya getirildiği reaktörde başlar ve kalıplama işlemi sırasında biter. Termoset grubunu oluşturan en önemli plastikler; fenolik, polyeşter, epoksi ve poliüretandır.

Bilimsel olarak termoplastik ve termoset plastikler arasında ayrıntı olarak moleküllerin şekline göre yapılır. Bu bakımdan termoplastikler lineer moleküllere, termosetler ise üç boyutlu çapraz bağlı moleküllere sahip malzemelerdir. Lineer moleküllerde zinciri oluşturan ünitelerin arasında çok kuvvetli kovalent bağlar bulunmaktadır. Bu bağlar esasen zincirin mukavemetini sağlamaktadır. Molekül zincirleri arasında ise sadece zincirleri birbirine yakıntutan zayıf Van Der Waals kuvvetleri bulunmaktadır. Bu moleküller arası kuvvet zincirlerin birbirine göre hareketlerini engelleyen ısıya karşı duyarlı bir kuvvettir ve plastik ısıtıldığında daha zayıf, soğutulduğunda daha kuvvetli olur. Dolayısıyla lineer molekül zincirlerinden oluşan bir termoplastik ısıtıldığında moleküller arası kuvvetler zayıflar, molekül zincirleri birbirine göre hareket bakımından serbest hale gelir ve malzeme kalıpta kolaylıkla istenilen şekil verilebilir. Malzeme soğutulduğunda moleküller arası kuvvetler büyür ve molekül zincirlerini verilen yeni şekilde dondurur. Tekrar ısıtıldığında moleküller arası kuvvetlerin zayıflaması sonucu molekül zincirleri birbirine göre serbest hale gelir ve malzeme başka bir şekil verilebilir. Ancak çok ısı verilirse molekül zincirleri kopar ve malzeme özelliklerinde bir yıpranma meydana gelir.

Termoset plastiklerde ise iki kademede meydana gelen polimerizasyon sonucu molekül zincirleri arasında çapraz bağ meydana gelir. Böylece termoplastik malzemenin aksine molekül zincirleri arasında kuvvetli kovalent bağlar oluşur ve tüm yapı tek bir molekül halini alır. Molekül zincirleri arasında oluşan çapraz bağlar ancak çok yüksek sıcaklıklarda kopabilirler, bu kopma aynı zamanda malzemenin yıpranmasına neden olan zincirlerin kopması anlamına da gelmektedir. Bu nedenle

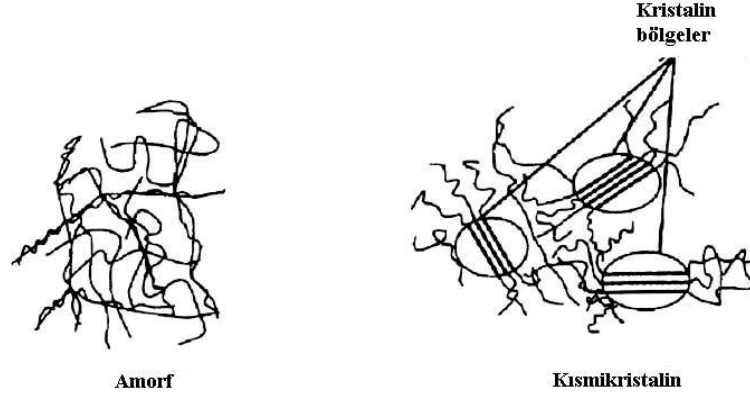
ter moset plastikler kalıpta bir kere şekillendirdikten sonra ısıtılıp yumuşatılabilir ve tekrar şekillendirilebilir. Genellikle ter moset plastikler yüksek sıcaklığa dayanıklı ve oldukça büyük bir boyut kararlılığına sahip malzemelerdir.

Plastik malzemeler, molekül zincirlerinin birbirlerine göre diziliş şekline göre amorf ve kristalin olmak üzere iki yapıya sahiptir. Amorf ve kristalin yapılar plastiklerin fiziksel yapısını meydana getirmektedir. Molekül zincirlerinin dizilişi rastgele ise plastik malzeme amorf (şekilsiz) olarak adlandırılır. Amorf malzemelere katkı maddeleri katıldığı sürece şeffaf görünürler. Bazı bölgelerinde düzgün dizilmiş veya katlanmış molekül zincirlerine sahip plastiklere kısmi kristalin plastikler denilmektedir. Bunlara katkı maddeleri katılmasa bile şeffaf görünmezler [1].

2.2 Amorf ve Kristalin Plastiklerin Yapısal Özellikleri

Amorf yapıda molekül zincirleri birbirine göre gelişigüzel karışık bir şekilde bulunurlar. Amorf yapıya sahip olan plastiklerin çoğunda çekme zorlanmalarının etkisi altında, molekül zincirleri çekme yönünde bir yönelme gösterirler. Bu olaya yönelme özelliği denilmektedir ve bu özelliğe sahip amorf yapılar daha yüksek çekme mukavemetine sahiptirler.

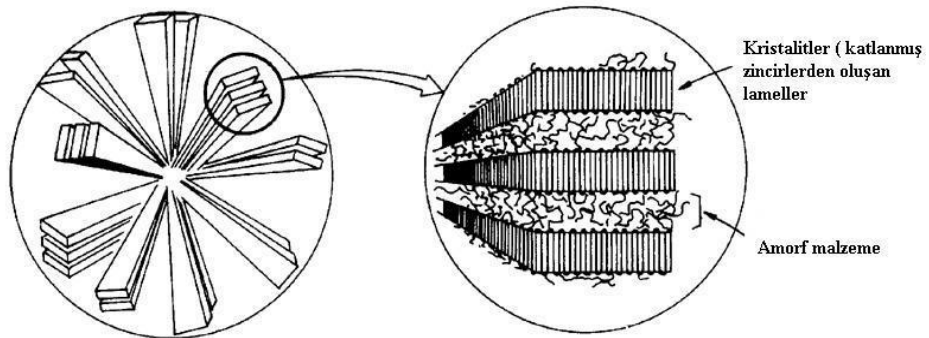
Kristalin yapıda molekül zincirleri birbirine göre üç boyutlu bir düzeni andıran düzenli bir şekilde bulunurlar. Kristalin yapının oluşması, molekül zincirlerinin şekline (lineer, dallanmış ve çapraz bağlı), molekül zincirleri arasındaki kuvvetlere ve stereodüzene bağlıdır. Soğutma yoluyla eriyik durumundan katı duruma geçildiğinde lineer zincirler birbirine daha çok yaklaşabilirler ve dolayısıyla kristalin bir düzen oluşturabilirler. Bu nedenle lineer molekül zincirlerine sahip plastikler oldukça büyük bir kristalleşme kabiliyeti gösterirler. Dallanmış zincirler birbirine çok yaklaşırlar ve dolayısıyla kolay bir şekilde kristalin halini alamazlar. Bunlar genellikle amorf bir yapı oluştururlar. Aynı şekilde çapraz bağlı molekül zincirleri (ter mosetler) amorf bir yapı meydana getirirler. Şekil 2.1’de amorf ve kristalin polimerlerin moleküler yapısı gösterilmektedir [1].



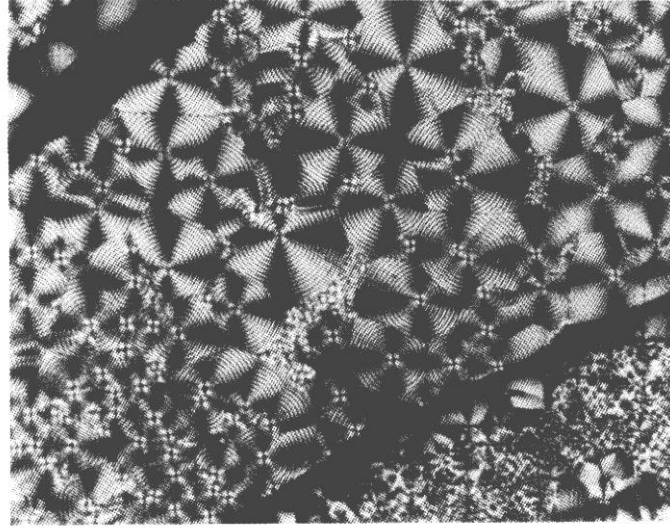
Şekil 2.1 Amorf ve kısmikristalin polimerlerin zincir yapısı [1]

Poli merlerin kristalin yapıları üzerine X-ışını ve elektron mikroskobu gibi teknikler kullanılarak yapılan incelemeler poli merlerin kristalin halinin diğer katı malzemelerin ve özellikle metallerin kristal yapılarından farklı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu fark poli merlerde kristalin kısmın tüm malzeme yapısında bulunmadığından ileri gelmektedir.

Mikroyapı olarak, kristalin poli merlerin dairesel simetriye ve merkezden çembere doğru lamellere sahip sferulit denilen bir iç yapıya sahip olduğu görülmüştür. Sferulitler kristalin poli merlere saydam özelliği verirler, buna karşın amorf poli merler genelde saydamdırlar. Kristalitlerin büyümesi sırasında sferulitlerin etrafında bir takım şekil değişimleri, gerilmeler ve bu gerilmelerin meydana getirdiği bir takım hatalar ve boşluklar meydana gelmektedir. Bu nedenle sferulitlerarası sınırlar oldukça zayıf bir bölge oluşturmaktadırlar. Zorlanma sırasında malzemenin kopmasına neden olan çatlağın oluşması genellikle bu bölgede meydana gelir. Şekil 2.2’de kristalin poli merdeki sferulit yapısı ve Şekil 2.3’te polietilendeki sferulit yapısı gösterilmektedir [19].



Şekil 2.2 Kristalin poli merlerin sferulit yapısı [19]



Şekil 2.3 Poli etilenin sferulit yapısı [19]

Poli merlerin kristalin yapısı genelde tek fazlı bir yapı olmayıp amorf ve kristalin olmak üzere çok fazlı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle buna kısmi kristalin yapı demek daha doğru olur. Kısmi kristalin yapının özellikleri amorf yapının özelliklerinden oldukça farklıdır. Kısmi kristalin yapı daha rijid olmakla beraber, daha yüksek ve daha keskin bir erime sıcaklığına, daha büyük çekme, sürünme, ısı mukavemetine ve daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Ancak yüksek erime sıcaklığından dolayı teknolojisi daha zordur. Ayrıca kalıpla daha büyük bir şekil değiştirme gösterir. Camlifleri veya başka katkı maddeleri ile ve edildiğinde, kristalin yapının özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir.

Amorf yapı daha yumuşak ve tok, erime sıcaklığı, çekme mukavemeti ve yoğunluğu daha düşüktür. Amorf poli merlerin teknolojileri daha kolaydır. Ancak kalıp içerisinde kristalin yapılar gibi kolay akmazlar. Ayrıca katkı maddelerinin ilavesi özelliklerini pek değiştirmez. Örneğin izotaktik kristalin polistirenin erime noktası 230°C iken, aynı molekül ağırlığına sahip amorf polistirenin erime sıcaklığı 90°C dir. Aynı şekilde kristalin bir yapı meydana getiren lineer poli etilenin erime noktası 135°C ve yoğunluğu $0,940$ ila $0,965\text{ g/cm}^3$, amorf bir yapı oluşturan dallanmış poli etilenin erime noktası 115°C ve yoğunluğu $0,910$ ila $0,930\text{ g/cm}^3$ ’dür. Ayrıca çentik duyarlılığı amorf malzemeler için daha kritiktir. Amorf yapılarda küçük çatlakların kendilerini durdurabilecek hiçbir şey olmadığından büyümeleri kolaydır. Kısmi kristalin malzemelerde, kristal alanlar çatlağın yayılmasına engel olurlar [3].

2.3 Hâstîklerin Kristalinite Derecesini Etkileyen Faktörler

Bir kısmî kristalin plastikte amorf ve kristalin fazların herbirinin özellikleri aynı kalmakla birlikte fazların birbirlerine göre miktarları değişebilmektedir. Bu da malzemenin bütün özelliklerini ve özellikle de mekanik özelliklerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Kısmî kristalin plastiklerin özellikleri yapıda mevcut olan kristalin fazının yüzdesine bağlıdır. Bu yüzde kristalinite derecesi (K_V) olarak ifade edilmektedir.

$$K_V = \frac{\rho_v - \rho_a}{\rho_k - \rho_a} \times 100 \quad (2.1)$$

Bu denklemde ρ_v , ρ_a ve ρ_k sırasıyla; kristalinite derecesi belirlenecek polimerin yoğunluğu, tamamen amorf polimerin yoğunluğu ve tamamen kristalin polimerin yoğunluğunu temsil etmektedir.

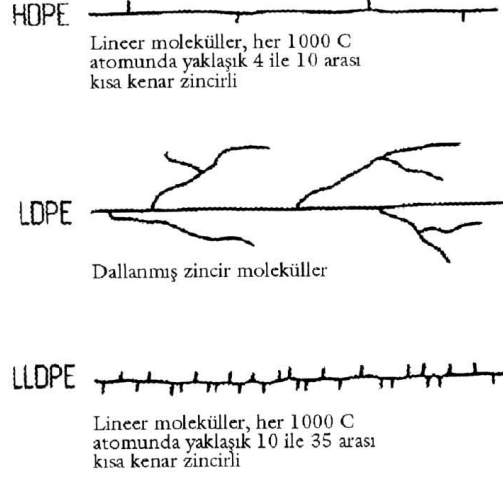
Polimer zincirleri kristalin bölgelerde amorf bölgelerden daha sıkı bir şekilde paketlenmiş için kristalitler daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle düşük yoğunluklu polietilen LDPE ($0,92 \text{ g/cm}^3$) %43 kristalinite derecesine ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ($0,97 \text{ g/cm}^3$) ise %76 kristalinite derecesine sahiptir. Yoğunluk aslında kristalinite derecesinin bir ölçüsüdür. Çünkü bir kısmî kristalin polimerde kristalin ve amorf kısımların hacimleri, toplam hacmi meydana getirdiği için yoğunluk ve kristalinite derecesi birbiriyle bağlantılıdır ve aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir [3].

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\omega_c}{\rho_c} + \frac{\omega_a}{\rho_a} \quad (2.2)$$

Bu denklemde ω_c ve ω_a sırasıyla; kristalin ve amorf fazın ağırlığını temsil etmektedir. ρ_c , ρ_a ve ρ ise sırasıyla; kristalin fazın yoğunluğu, amorf fazın yoğunluğu ve kısmî kristalin polimerin yoğunluğunu temsil etmektedir.

Polietilende kristalinite derecesindeki farklılıklar polimerizasyon esnasında meydana gelen dallanmadan dolayı oldukça artmaktadır. Dallanmış zincirler birbirlerine çok yaklaşamazlar bu sebeple kolay bir şekilde kristalin halini alamazlar ve düşük kristalinite derecesi oluştururlar. Örneğin LLDPE (lineer düşük yoğunluklu polietilen) aynı yoğunluklu LDPE (düşük yoğunluklu polietilen)'den daha kısa

dallanmış zincir yapısına sahip olduğu için daha dayanıklı ve daha sert bir yapı gösterir. Şekil 2.4'te farklı polietilen (PE) tiplerinin moleküler zincir yapıları gösterilmektedir [1].



Şekil 2.4 Farklı polietilen (PE) tiplerinin moleküler yapıları [1]

Polimerlerin kristalinite derecesi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır;

a) Polimerin ana zincirine bağlı yan grupların boyutu ve düzeni: Eğer yan gruplar küçük hacimli ve polimer zinciri boyunca düzenli bir şekilde yerleşmiş olursa, birbirlerinin hareketini engelleyecek ve polimer zincirleri daha sıkı bir paket oluşturabilecektir böylece kristalinite derecesi daha yüksek olabilir. Buna karşın zincir yapısında büyük hacimli yan gruplar varsa ve zincire rastgele bağlanmış ise, bu tür gruplar zincirin rijitliğini artırmakla beraber kristalleşmeyi zorlaştırır. Bunun nedeni, zincir bükülebilirliğinin azalması sonucu zincirlerin belirli bir düzene girmelerini zorlaştırmasıdır.

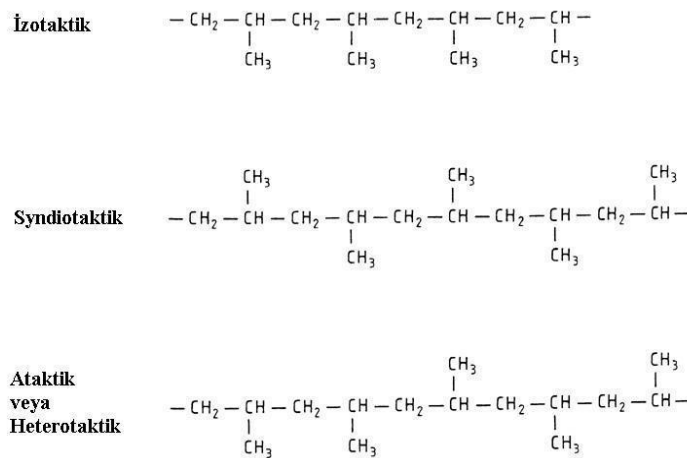
b) Soğutma hızı: Kristalin yapı genellikle polimer eriyiğinin soğutulması ile elde edilir. Erişmiş haldeki polimerin hızlı soğutulmasında kristalleşme önemli bir şekilde azalır ve kristalleşme hızı oldukça düşük olan bazı polimerlerde tamamen amorf bir yapı meydana getirebilir.

c) Molekül zincirleri arasındaki kuvvetli bağlar: Molekül zincirleri arasındaki bağlar kuvvetli olursa, kristalin yapının meydana gelmesi kolaylaşır. Zincirler arasında Van der Waals ve hidrojen bağları bulunabilir. Van der Waals bağları zayıf, hidrojen bağları ise daha kuvvetli bağlardır. Bu bakımdan zincirler arasında hidrojen bağlarının bulunması kristalleşme olayını kolaylaştırır. Buna bağlı olarak

monomerlerde polar grupların (- Cl, - CN veya - OH) bulunması zincirler arası bağları kuvvetlendirmekte ve kristalin yapının oluşmasını sağlamaktadır. Bu polimerlerin kristalinite derecesi yüksek olur.

d) Kristalinite derecesi kopolimerizasyonla kontrol edilebilir nedir: Kopolimer iki değişik monomerin polimerizasyonu ile elde edilen polimerik malzemelerdir ve bu işlemde kopolimerizasyon olarak adlandırılır. Örneğin SAN (stiren ve akrilonitril kopolimeri). Kopolimerizasyon genellikle molekül zincirinin simetrisini bozmakta ve dolayısıyla kristalleşme kabiliyetini azaltmaktadır. Bu şekilde daha esnek bir malzeme meydana gelmektedir.

e) Plastiklerin stereodüzen olarak adlandırılan fiziksel yapısı: Polimerlerin bu yapısı konmuş zincirler dikkate alınmaksızın tek bir molekül zinciri içerisinde atomların dizilişini içermektedir. Stereodüzen bakımından izotaktik ve syndiotaktik konfigürasyonlarda yan gruplar ana zincirin her iki tarafında düzenli bir şekilde bulunmaktadır ve bu nedenle malzemenin mekanik özelliklerini iyileştiren kristalin bir yapı meydana getirirler. Ataktik konfigürasyonda ise yan gruplar ana zincire gelişigüzel bir yerleşme gösterirler ve düzensiz bir yapı olduğu için kristalin yapının meydana gelmesini engeller. Düzensiz ataktik yapıdaki plastikler amorf yapıya sahiptir ve yumuşaktır. Stereodüzendeki plastikler örneğin polipropilenler sert plastiklerdir. Genel anlamda lineer, izotaktik ve syndiotaktik zincirleri simetrik; dallanmış, çapraz bağlı ve ataktik zincirleri simetrik olmayan zincirler olarak kabul edersek, simetrik zincirler kristalin yapı, simetrik olmayan zincirler ise amorf bir yapı meydana getirirler. Şekil 2.5’de polipropilenin izotaktik, syndiotaktik ve ataktik yapıları gösterilmektedir.



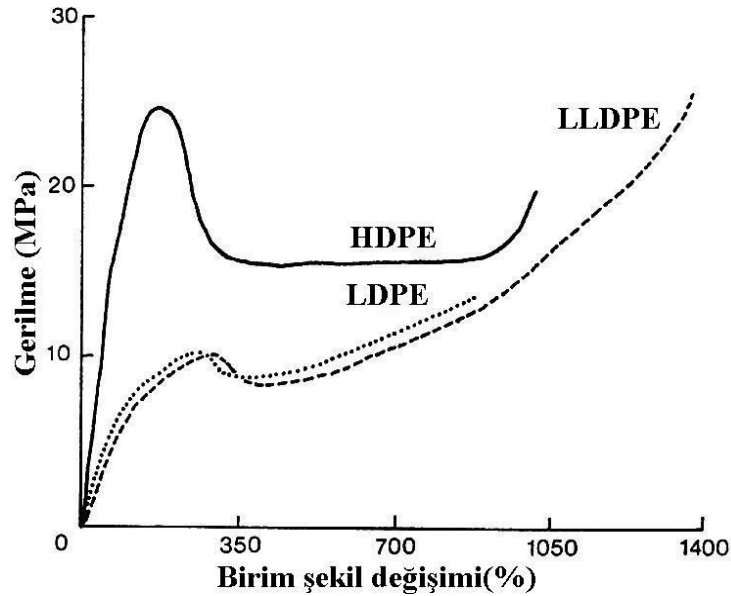
Şekil 2.5 Polipropilenin (PP) izotaktik, syndiotaktik ve ataktik yapıları [3]

f) Molekül ağırlığı: Düşük molekül ağırlığına sahip zincirler (kısa) daha hareketli oldukları için daha çabuk ve daha geniş bir kristalleşme gösterirler.

Kristalinite derecesi arttıkça polimer daha rijit, daha sert, daha dayanıklı ve daha zor deform edilebilir olacaktır. Ayrıca molekül ağırlığı düştükçe kristalinite derecesi yükselir. Çünkü molekül ağırlığı düşük olan zincirler daha hareketli oldukları için daha çabuk ve daha geniş çapta bir kristalleşme gösterirler. Kristalinite derecesinin artması ile malzemenin erime sıcaklığı da artar.

Kristalinite derecesi, bir polimerin herhangi bir uygulamada seçilmesinde incelenmesi gereken temel bir özelliğidir. Birçok polimerler belirli bir kristalinite aralığında elde edilebilmektedir ve böylece malzeme özelliklerinin geniş ölçüde seçimine imkan sağlar.

Daha önce de bahsedildiği gibi kristalinite derecesi malzemenin mekanik özelliklerini önemli şekilde etkilemektedir. Örneğin bir polimerde kristalinite derecesi arttıkça, moleküller arasındaki yüksek bağ kuvvetleri ve kristalin bölgelerin hareketi için yüksek direnç olması sebebiyle çekme dayanımı artmaktadır. Şekil 2.6'da farklı kristalinite derecesine sahip polietilen numunelerinin çekme gerilmesi ve deformasyon arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Üç tip polietilene ait çekme gerilmesi-şekil değişimi eğrileri [3]

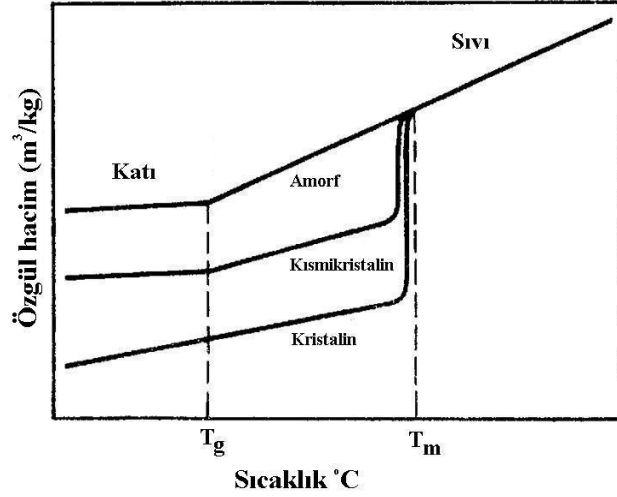
Akma dayanımı kristalinite derecesi tarafından belirlenebilmektedir. LDPE (Alçak yoğunluklu Polietilen) ve LLDPE'nin (Lineer alçak yoğunluklu polietilen) akma

gerilmeleri benzerdir. Fakat HDPE'nin (Yüksek yoğunluklu polietilen) daha yüksektir. Akımdan sonra deformasyon davranışı polimer zincirinin şekline ve amorf fazın içeriğine bağlıdır. Daha yüksek kristalinite derecesine rağmen, HDPE'nin yapısında uzun dallanmış zincirlerin bulunması nedeniyle hasara uğramasında LDPE'den daha yüksek şekil değişimi gösterir. LLDPE'nin yapısındaki lineerlik ve daha fazla amorf içeriği LLDPE'nin çok yüksek uzama göstermesine sebep olmaktadır (%400) [3].

2.4 Plastiklerin Genel Mekanik Özellikleri

Genellikle plastik malzemelerin mekanik özellikleri, dış kuvvetlerin etkisiyle meydana gelen uzama, akma, kopma vb. deformasyonları içermektedir. Plastik malzemelerin en önemli özelliği, bu deformasyonların sıcaklık ve zamana bağlı olmasıdır. Plastiklerin mekanik davranışlarını incelerken dikkate alınması gereken bazı noktalar mevcuttur;

Birinci nokta, plastiklerin mekanik davranışları malzemenin yapısına ve fiziksel haline bağlıdır. Bilindiği gibi plastikler yapı bakımından amorf ve kısmi kristalin olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Fiziksel hal bakımından amorf plastikler T_g caansı duruma geçiş sıcaklığına bağlı olarak $T < T_g$ 'de katı (caansı) halde $T > T_g$ 'de lastik gibi ve viskoz akışkan halinde bulunabilirler. Sıcaklık molekül zincirlerini oluşturan ünitelerin dönme hareketini etkilemektedir. Sıcaklığın artması ile bu hareket hızlanır, molekül zincirleri arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar ve zincirler birbirine göre daha bağımsız hale gelir. Sıcaklığın azalması ile ünitelerin dönme hareketi yavaşlar ve belirli bir sıcaklıkta durur. Bu sıcaklığa caansı duruma geçiş sıcaklığı (T_g) denilmektedir. Caansı halden erimiş hale geçiş plastiklerin yapısına bağlıdır ve plastiklerin ergimesi, malzemenin özgül hacminin ani değişimine sebep olur. Bu bakımdan amorf, kısmi kristalin ve kristalin plastiklerin özgül hacminin sıcaklıkla değişimi Şekil 2.7 de gösterilmektedir [5].



Şekil 2 7 Sıcaklığa bağlı olarak polimerlerin özgül hacmi [5]

Plastik malzemelerin çoğu tamkristalin değil de kısmikristalin halindedir. Dolayısıyla bu malzemeler hem T_g ca nısı duruma geçiş hem T_m erime sıcaklığına sahiptir. Kristalinite derecesine bağlı olarak bu eğri tam amorf veya tamkristalin eğrilere yakın olabilir. Burada da T_g sıcaklığı zincir ünitelerinin harekete geçmesi ve malzemenin ca nısı halden viskoz hale geçmesi; T_m sıcaklığı da kristalin yapının bozulması ve sıvı hale geçmesi anlamını taşır.

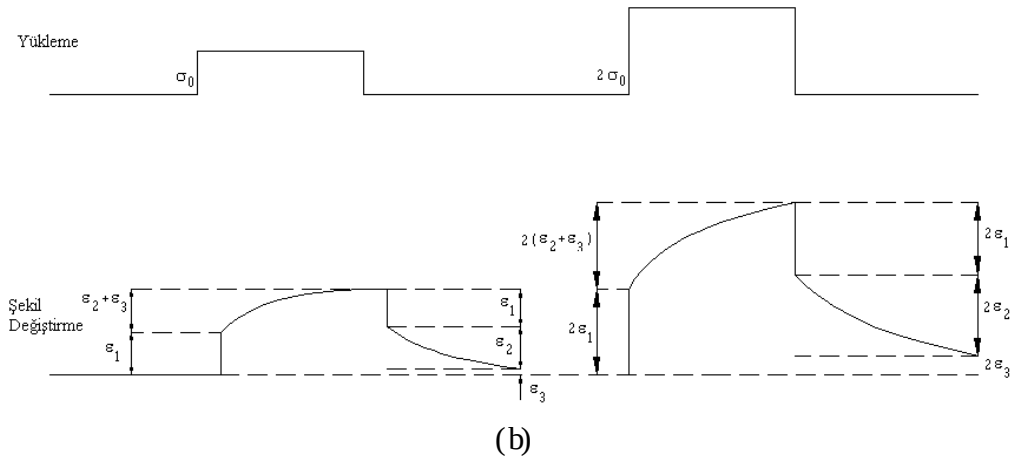
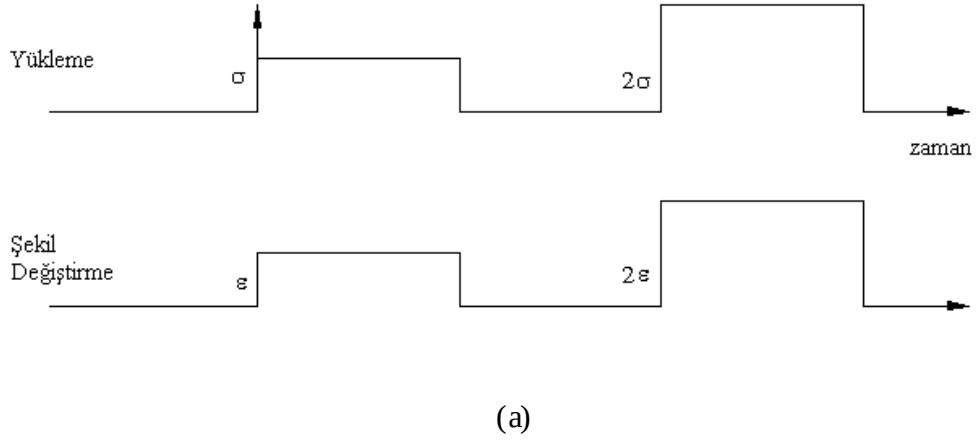
İkinci önemli nokta plastiklerde meydana gelen şekil değiştirmeler σ gerilmelerin yanı sıra sıcaklık (T) ve şekil değiştirme hızına ($\dot{\epsilon}$) bağlıdır.

$$\epsilon = (\sigma, T, \dot{\epsilon}) \quad (2.3)$$

Üçüncü bir nokta da, plastiklerin en belirgin özellikleri olan aynı anda hem elastik hem viskoz anlamına gelen viskoelastik bir davranış göstermeleridir. Viskoelastik davranış, sürünme ve gevşeme olmak üzere iki şekilde meydana gelmektedir. Buna göre sürünme sabit bir gerilmenin etkisi altında malzemenin sürekli olarak şekil değiştirmesi; gevşeme ise belirli bir şekil değiştirme halinde bulunan malzemede gerilmelerin sürekli olarak azalması olarak ifade edilmektedir.

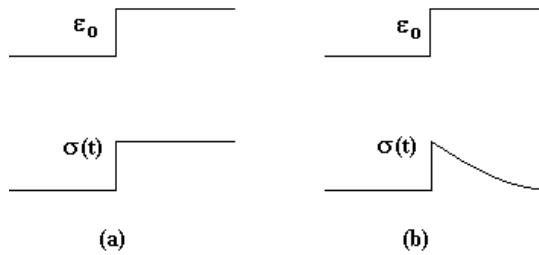
Sürünme olayı Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Elastik bir malzemeye σ gerilmesi uygulanırsa, aniden bir ϵ elastik şekil değiştirme meydana gelir. Gerilmenin kaldırılması ile şekil değiştirme aniden kaybolur (Şekil 2.8a). Viskoelastik davranış gösteren bir malzemeye σ gerilmesi uygulandığında, önce ϵ_1 ani bir elastik şekil değiştirme ve daha sonra yavaşça seyreden ϵ_2 ve ϵ_3 şekil değiştirmeleri meydana

gelir. Burada ε_2 gecikmeli elastik şekil değiştirmeye ε_3 ise viskoz şekil değiştirmeye karşılık gelmektedir. Yük kaldırıldığında ε_1 aniden, ε_2 zamanla kaybolan şekil değiştirmelerdir. ε_3 ise malzemenin yapısında kalan şekil değiştirmedir (Şekil 2.8b).



Şekil 2.8 a) Elastik malzemenin şekil değiştirmesi b) viskoelastik malzemenin şekil değiştirmesi [6]

Gevşemede malzemenin davranışı Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Şekil 2.9'a'da sabit bir ε_0 şekil değiştirmede tutulan elastik bir malzemede σ sabit kalmakta ve Şekil 2.9 b'de görüldüğü gibi viskoelastik bir malzemede zamanla azalmaktadır [2].

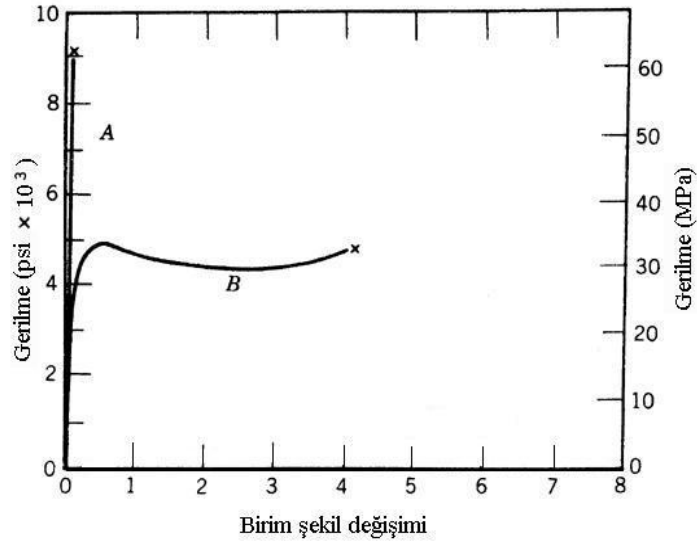


Şekil 2.9 Gerilme gevşemesi [6]

Özetlemek gerekirse, plastiklerin mekanik özelliklerinin incelenmesinde üzerinde durulması gereken bu üç temel nokta; aynı zamanda malzemenin molekül ağırlığına (zincir uzunluğuna), molekül zincirlerinin lineer, dallanmış veya çapraz bağlı olmasına ve molekül zincirlerinin stereodüzenine (izotaktik, syndiotaktik, ataktik) bağlıdır.

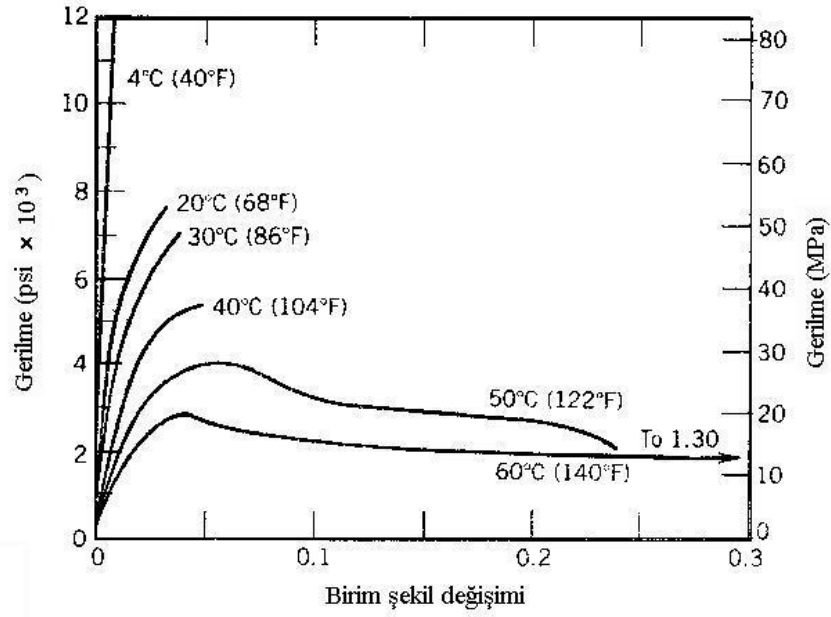
2.4.1 Amorf ve Kısmi kristalin Elastiklerin Mekanik Özellikleri

Şekil 2.10’da genel olarak plastik malzemelerin farklı gerilme-birim şekil değişimi davranışları gösterilmektedir. Bu diyagramda A eğrisinde gevrek bir plastik malzemenin gerilme-birim şekil değişimi davranışı gösterilmektedir. B eğrisinde ise plastik malzemenin davranışı birçok metaliğe malzemenin davranışına benzetilmektedir. Başlangıçta deformasyon elastiktir ve bunu akma ve plastik deformasyon takip etmektedir.



Şekil 2.10 A eğrisi gevrek ve B eğrisi sünek plastik malzemeler için gerilme-şekil değişimi davranışı [5]

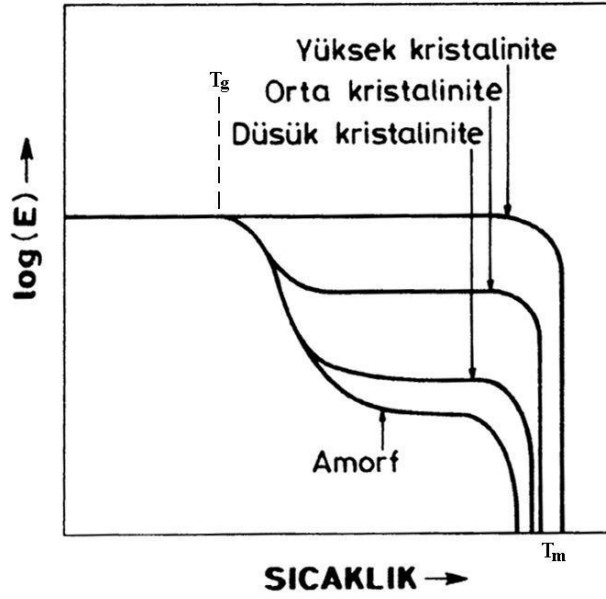
Daha önce bahsedildiği gibi plastiklerin mekanik özellikleri, sıcaklık değişimlerine oldukça duyarlıdır. Şekil 2.11’de farklı sıcaklıklarda (4 ila 60° C arasında) amorf polimetakrilat (PMMA)’nın gerilme-birim şekil değişimi davranışı gösterilmektedir. Sıcaklığın artmasıyla elastik modül ve çekme dayanımının düştüğü ve sünekliğin arttığı gözlenmiştir. 4° C da malzeme tamamen gevrek, 50 ve 60° C da ise önemli derecede plastik deformasyon göstermektedir.



Şekil 2 11 Poli metil met akrilat (PMMA) 'nın gerilme-birim şekil değişimi davranışına sıcaklığın etkisi [5]

Amorf plastiklerin camı duruma geçiş sıcaklığı (T_g), 40 °C ila 150 °C arasında değişmektedir. Genel olarak T_g 'nin çok altında malzeme gevrek bir davranış gösterir ve kopma yaklaşık %10 şekil değiştirmelerde meydana gelir. Cam geçiş sıcaklığına yaklaştıkça akma meydana gelir ve plastik malzeme sünek bir malzeme gibi davranır. T_g 'nin üstünde plastik malzeme lastik gibi davranış gösterir ve çok büyük şekil değiştirmeler meydana gelir.

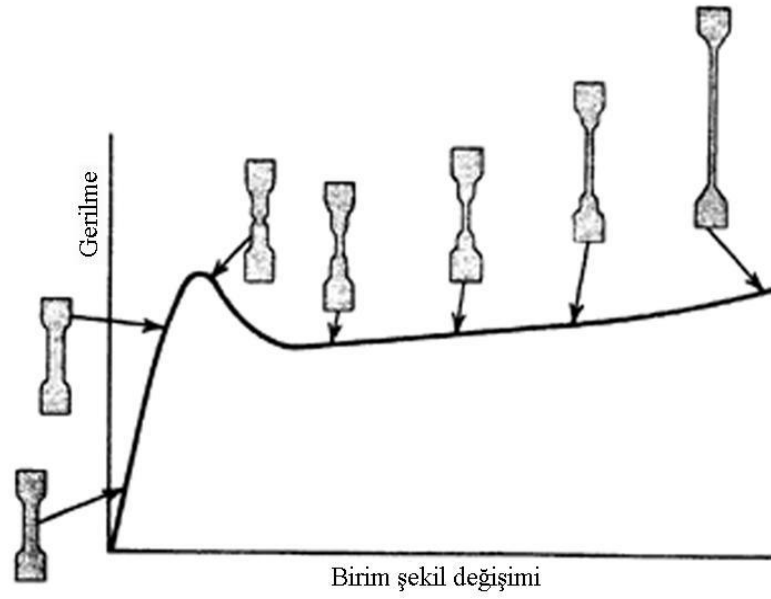
Plastiklerde ideal elastik cisimlerde olduğu gibi gerilme ile şekil değişimi arasında linear bir ilişki söz konusu değildir. Plastiklerde elastik bölgede çok yavaş gevşeme şeklinde bir viskoelastik davranış görülmektedir. Şekil 2 12'de amorf ve kısmi kristalin plastiklerde elastik modülün sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi amorf plastiklerde cam geçiş sıcaklığının altında elastik modülün değeri (E) daha yüksektir. Cam geçiş sıcaklığından sonra E de hızlı bir düşme görülür. Sıcaklığın daha fazla artmasıyla (polimer sıvı hale geçtiğinde) elastik modül hızla sıfıra düşer. Yüksek kristalinite gösteren plastiklerde ise elastik modül, erime sıcaklığına kadar sabit kalır ve bu sıcaklıkta hızla azalarak sıfır olur. Kısmi kristalin plastiklerde ise cam geçiş sıcaklığı civarında kristalinite derecesine bağlı olarak elastik modülde önce düşme olur daha sonra sabit bir değer gözlenir ve ergime sıcaklığında elastik modül hızla sıfıra düşer.



Şekil 2.12 Amorf ve kısmi kristalin plastiklerde elastik modülün sıcaklıkla değişimi [5]

Kısmi kristalin plastiklerde camı duruma geçiş sıcaklığında elastik modülün değeri, amorf polimerlerde olduğu gibi büyük bir düşüş göstermemektedir. Dolayısıyla malzeme rijitliğinden fazla kaybetmemektedir. Bunun nedeni yapının kristalin kısmında bulunan molekül zincirleri arasındaki kuvvetlere bağlıdır. Bu bölgede amorf yapıda zincir üniteleri harekete geçmekte, ancak bu hareket zincirin tüm uzunluğunda değil sadece amorf kısma ait zincir ünitelerinde meydana gelmektedir. Başka bir deyişle bu bölgede yapının değişimi kristalin kısımdan tarafından kontrol edilmektedir. Ergime sıcaklığı bölgesinde kristalin yapı tamamen kaybolur ve malzeme sıvı halini alır.

Kısmi kristalin plastiklerde, çekme gerilmelerinin etkisi altında akma noktasının üzerinde deney çubuğunda boyun oluşumu meydana gelmektedir. Daha sonra boyun deney çubuğunun tüm uzunluğu boyunca yayılmakta ve belirli bir noktada kopma meydana gelmektedir. Plastik malzemede boyun oluşumu ile birlikte yeniden kristalleşme denilen bir yapı değişikliği meydana gelmekte ve bu yapı değişikliği orjinal kristalin fazın çekme yönüne yönelmiş yeni bir kristalin faza dönüşmesi şeklinde olmaktadır. Kristalinite derecesi yüksek olan plastiklerde çubuğun kopması için daha büyük gerilmelerin uygulanması gerekmektedir. Kısmi kristalin plastiklere ait gerilme-gerilme (σ-ε) diyagramı Şekil 2.13’de gösterilmektedir.



Şekil 2 13 Kısmi kristalin bir plastiğin gerilme-birim şekil değişimi diyagramı [5]

Kısmi kristalin ve amorf plastiklerin mekanik özellikleri birbirine benzerdir. Fakat kısmi kristalin plastiklerin gerilme-birim şekil değişimi doğrusu daha dik olması dolayısıyla elastik modül daha büyüktür ve kısmi kristalin plastikler elastik bölgede daha küçük şekil değişimi gösterirler.

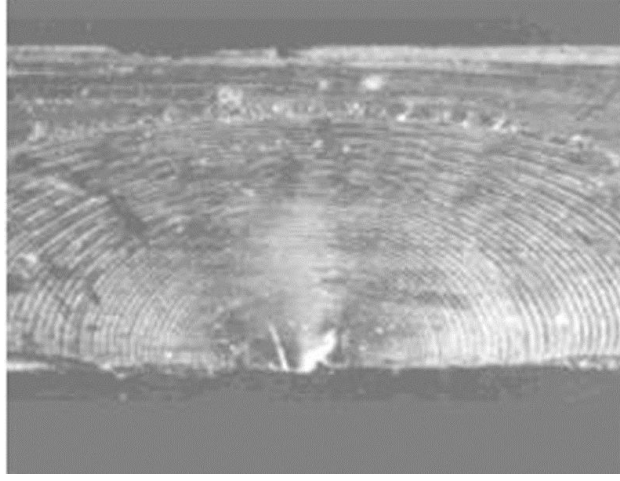
3 PLASTİKLERİN YORULMA DAVRANIŞI

Zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında malzemede meydana gelen ve yorulma olarak adlandırılan hasar, metallerde kırılma olayının temel sebeplerinden biri olarak bilinmektedir. Metaller için yorulma süreci genellikle yapısal mikroçatlaklardan çatlağın başlaması yani çekirdeklenmesi ve ilerlemesi şeklinde kolaylıkla anlaşılabilir. Yorulma, hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhalarında yerel plastik şekil değiştirmeler sonucu meydana gelmektedir. Tekrarlı (çevrimsel) yük, çatlağın o kadar çok büyümesine neden olur ki, kesitin geri kalan kısmı yüke dayanamaz hale gelir. Bu aşamada tek bir tekrarda malzemede ani çatlak ilerlemesi meydana gelir ve malzeme zoraki kırılma ile kırılır. Metallerde yorulma hasarları daima gevrekler ve ciddi hasarlar oluşturur [22]. Plastiklerde yorulma hasarı, gerilme genliği ve frekansa bağlı olarak mekanik yorulma ve ısıl yorulma olmak üzere iki yapıda meydana gelmektedir. Mekanik yorulma hasarı, metallerde olduğu gibi gevrek kopma şeklinde olup, uygulanan tekrarlı gerilmelerin etkisi altında yüzey pürüzlülüğünden çatlağın başlaması ve ilerlemesi sonucu meydana gelmektedir. Bu durumda eğer plastik malzeme kristalin yapıya sahip ise, çatlağın başlaması ve ilerlemesi kristal düzlemlerinin kayması yoluyla meydana gelir. Amorf plastiklerde ise çatlağın başlaması ve ilerlemesi crazing olarak adlandırılan ve daha sonra ayrıntılı bir şekilde incelenecek olan deformasyon mekanizması ile gerçekleşir [19].

Plastiklerin ısıl yorulma hasarı ise, metallerin yorulması ile aralarında önemli bir farkı oluşturmaktadır. Bunun sebebi, plastiklerin viskoelastik özelliklerinden dolayı yüksek sönümleme (damping) kabiliyetine ve düşük ısı iletkenliğine sahip olmaları nedeniyle, yüksek deformasyon hızlarında (yüksek frekanslarda) malzemenin bünyesinde biriken ısının, sıcaklık artışına ve beraberinde bir yumuşamaya sebep olmasıdır. Bu olay histeretik ısınma olarak adlandırılmaktadır. Poli merin kristalinite derecesindeki değişimler, tekrarlı gerilmelerin etkisi altında meydana gelen histeretik ısınmanın derecesini ve dolayısıyla malzemenin yumuşama derecesini ve hızını önemli bir şekilde etkilemektedir [2].

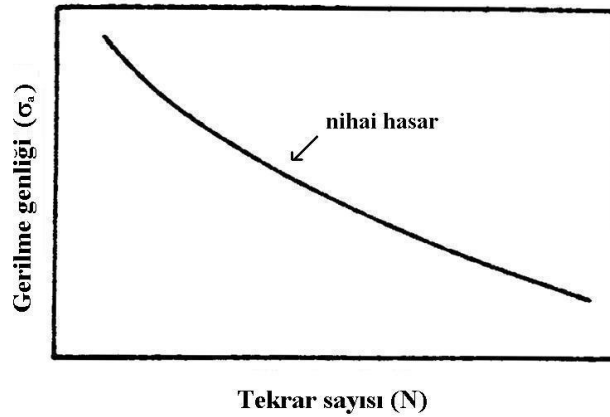
Tüm malzemelerin yapısında çok küçük boşluklar, yüzey pürüzlülüğü, tane sınırı gibi malzemede süreksizlik oluşturan birtakım mikroskobik hatalar mevcuttur. Yük

altında bu hatalarda yerel gerilme yığılmaları meydana gelir ve bu gerilme yığılmaları yorulma çatlağının başlıca kaynağıdır. Şekil 3.1, yüzeydeki bir kusurdan çekirdeklenip ilerleyen bir çatlağın yorulma kırılmasını göstermektedir.



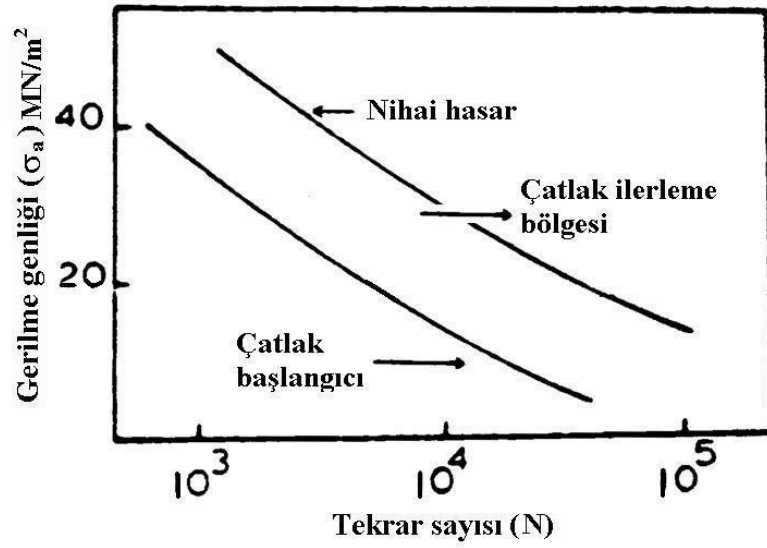
Şekil 3.1 Polikarbonat (PQ filtre kabında yorulma hasarının çekirdeklenme ve çatlak ilerlemesi (yorulma çizgileri) [7]

Zamanla değişen gerilme veya şekil değişiminin etkisi altında, plastik parçaların yüke dayanıklılığında azalma ve sonuçta meydana gelen kırılma yorulma olarak bilinmektedir. Sürekli esneyerek çalışan parçalar yorulur ve çatlar ve kırılır. Statik ve zamanla değişen zorlamaları kıyaslırsak, zamanla değişen yükler altında malzemeler, sürekli uygulanan yüklerin etkisindeki malzemelerden daha düşük yüklenme seviyesinde hasara uğramaktadır. Şekil 3.2 de plastiklerde yorulma hasarında tekrarlı gerilme genliğinin yorulma ömrüne (N) etkisi şematik olarak gösterilmiştir ve malzeme yorulma sınırının (endurance limit) altında gerilmelere maruz kaldığında herhangi bir hasar gözlenmemektedir [9].



Şekil 3.2 Plastiklerin yorulma davranışı: Hasarı meydana getiren gerilme genliği (σ_a) ve tekrar sayısı (N) arasındaki ilişki [9]

Şekil 3.2 deki S-N eğrisi plastik malzemelere ait nihai hasar eğrisini temsil etmektedir ve N değeri parçanın kırılmasına kadar geçen toplam tekrar sayısıdır. Bu nedenle çatlak başlangıcı ve ilerlemesi safhaları arasında bir ayırım yapmak mümkün değildir. Eğer numunenin yüzeyinde bir başlangıç çatlak olarak kabul edilebilecek bir çentik veya yüzey kusuru mevcut ise, numunenin ömrü doğrudan çatlak ilerleme safhasında geçer. Oysa ki çentiksiz düz numunelerde yorulma ömrünün çoğu özellikle yorulma sınırı na yakın genlik gerilmesi değerlerinde çatlak çekirdeklenme safhasında geçmektedir (Şekil 3.3).



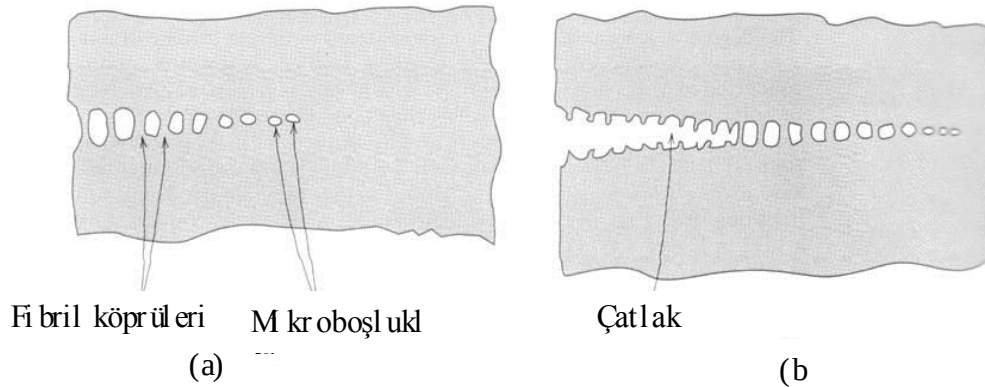
Şekil 3.3 Yorulma çatlaklarının başlangıcı ve ilerlemesi için gerekli olan tekrar sayısı ve gerilme genliği arasındaki ilişkiyi gösteren yorulma eğrileri [9]

3.1 Hastelerde Yorulma Sırasındaki Deformasyon Mekanizmaları

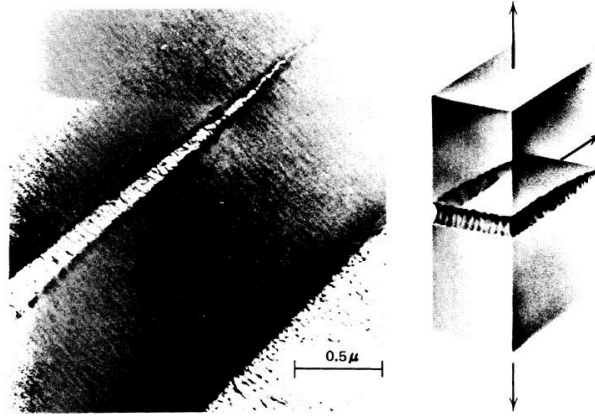
Yorulma hasarı hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhalarında plastik şekil değiştirme sonucu meydana gelmektedir. Metalik malzemelerdeki baskın yorulma deformasyon türü, tekrarlı gerilmelerin etkisi altında dislokasyonların kristal kayma düzlemleri boyunca ilerlemesi ile oluşur. Tekrarlı yüklemeler altında plastik malzemelerde meydana gelen geri dönüşümsüz deformasyonlar ise; kılcal akma (crazing), kayma akması (shear yielding) ve kayma bantları oluşumu, moleküler zincirlerin dönmesi veya oryantasyonlarındaki diğer değişiklikler veya bu mekanizmaların birlikte etkileri olabilir. Plastiklerin yorulmasında crazing (kılcal akma) ve kayma akması en çok bilinen iki deformasyon türüdür ve bu olaylar bir plastik malzeme kırılma öncesi meydana gelmektedir. Crazing (kılcal akma) ve kayma akması olaylarının her ikisinde de malzeme yerel bir plastik deformasyon

meydana gelir ve her ikisi de kırılma da önemli bir role sahiptir. Örneğin çatlaklar genellikle craze ve kayma bantları boyunca ilerlemektedir. İki deformasyon türü arasındaki temel farklılık, crazing olayı çekme gerilmesinin etkisi altında hacmin artması ile meydana gelir ve bir genişleme prosesi dir. Düzenli yapıya sahip kristalin plastiklerde kayma sırasındaki sabit hacim koşulu craze içeren malzemede geçerli değildir. Craze oluşumu çekme gerilmelerini etkisiyle hızlanır basma gerilmelerini etkisiyle yavaşlar. Ayrıca kılcalakma (crazing) yapıda moleküler oryantasyon kadar kaviteasyonu da içermektedir.

Craze yapısında, küçük mikroböşlukler ve bu mikroböşlukler arasında fibril köprüleri bulunur. Mikroböşlukler arasındaki molekül zincirlerinin çekme yönünde yönelmesiyle oluşan fibril köprüleri, yeterli bir çekme gerilme seviyesinde uzar ve kırılır. Bu sayede mikroböşluklerin büyümesine ve birleşmesine sebep olur ve mikroböşluklerin birleşmesiyle de çatlakilerler. Şekil 3.4(a) mikroböşlukler ve fibril köprülerini içeren craze yapısını ve (b) craze yapısında mikroböşluklerin birleşmesiyle çatlakın ilerlemesini göstermektedir. Örneğin amorf polikarbonatta gerilme kontrollü deney koşullarında 25 ve 30 MPa gerilme genliklerinde yorulan numunelerde 25000 tekrar sayısında craze oluşumu meydana gelmiştir. Daha yüksek gerilmenin uygulanması sonucu daha yüksek yoğunluğa sahip craze'ler meydana gelmiştir ve numunenin geri kalanı gözle görülür bir şekilde homojen olarak gözlenmiştir [12]. Şekil 3.5'te polifenilenoksit'te craze yapısının meydana gelişini gösterilmektedir.



Şekil 3.4 (a) Mikroböşlukler ve fibril köprülerini içeren bir craze'in şematik gösterilişi (b) craze yapısında mikroböşluklerin birleşmesiyle çatlakın ilerlemesi [5]



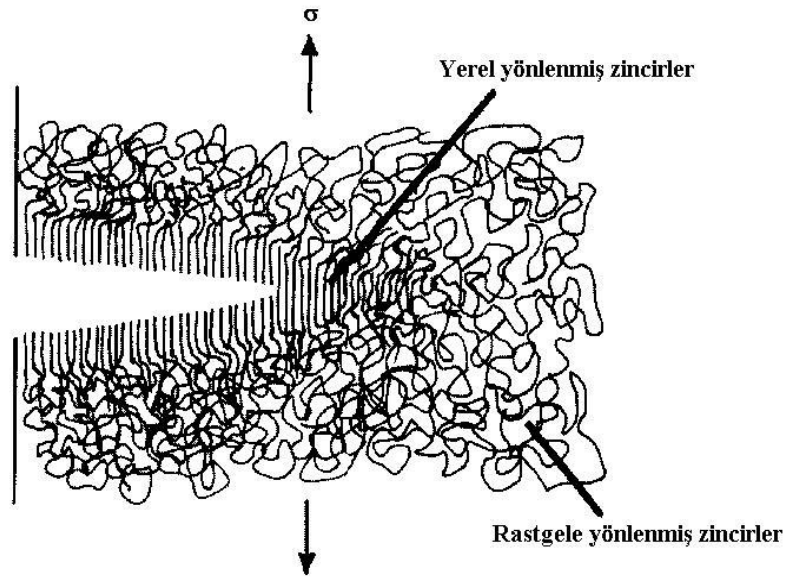
Şekil 3.5 (a) Polifenilenoksit'te (PPO) birbirine bağlı mikroböşluklar ve çekme yönünde dizilmiş fibrilleri gösteren craze yapısı. (b) uygulanan gerilme eksenine paralel yönde craze yapısının gelişmesi [8]

Craze; camısı polimerlerde (amorf) örneğin polistiren (PS), polimetilmetakrilat (PMMA), polistülfon (PSF) 'de katı halde meydana gelmektedir. Bu polimer katılar düşük sıcaklıklarda çekme gerilmesine maruz kaldıklarında, seramiklerdeki yüzey yarıklarına benzeyen craze olarak adlandırılan çatlak benzeri oluşumlar görülmektedir. Craze yapısı boyunca malzeme sürekliliği vardır oysa çatlamış bir katıdaki çatlakın yüzeyleri birbirlerinden tamamen ayrılır. Craze'ler daima maksimum aksenal gerilmeye dik olacak şekilde yönelirler oysaki kırılgan bir katıdaki çatlak rastgele oluşabilmektedir. Amorf bir polimerde örneğin polistirende camgeçiş sıcaklığının (T_g) altında craze yapısının oluşumu, kaynamasından daha az enerji gerektirir ve polimer çekme gerilmelerinin etkisi altında gevrek bir kırılma tarafından hasara uğramaktadır. Çentiksiz amorf polimerlerde tekrarlı yüklerin etkisi altında yapıda yerel olarak birçok bölgede histeretik bir ısınmanın meydana geldiği durumda, malzemede yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesi ve ilerlemesi, craze yapısının çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi ile meydana gelmektedir. Bu durumda çekirdeklenme kristalin yapıya göre daha kolay ve çatlak ilerleme hızı daha yüksektir [21].

Genelde craze yapısı polimerde yüksek gerilme konsantrasyonlarının bulunduğu bir noktada, çekme gerilmesinin yapıda mikroböşluklara sebep olmasıyla oluşmaktadır. Crazing olarak adlandırılan plastik deformasyon türü, polimerin akma noktasına yaklaşılmadan önce ve kaynaması deformasyonuna sebep olan gerilmeden daha düşük gerilme seviyelerinde meydana gelmektedir [19].

Craze yapısı, yüksek oranda yönelmiş molekül zincirlerinden oluşan fibrilleri içermektedir. Craze içeren bir yapının yoğunluğu matris yoğunluğunun yalnızca

% 40 ila %60'ı kadardır ve moleköl zincirlerinden oluşan fibriller maksimum çekme gerilmesi nin yönü boyunca yönlendirler. Kısaca craze yapısı ndaki mikroböş lukler tek eksenli çekme gerilmesine dik olacak şekilde yönlendirken, craze yapısı ndaki fibriller çekme eksenine paralel olacak şekilde dizilirler. Ayrıca craze'in kalınlığı 5 µm veya daha azdır. Craze yapısı çatlak olma ması na rağmen kırılma ya sebep olan çatlaklar bu yapı içerisinde başlayabil mektedir. Craze içeren mikroböş luklu bir yapıda, boş lukların arasında yönlendirilmiş moleköl zincirlerinden oluşan fibrillerin kırılmasıyla çatlak ilerler. Şekil 3.6'da bir çatlak ucunda craze yapısı nda fibrillerin kırılmasıyla çatlak ilerlemesi gösteril mektedir.

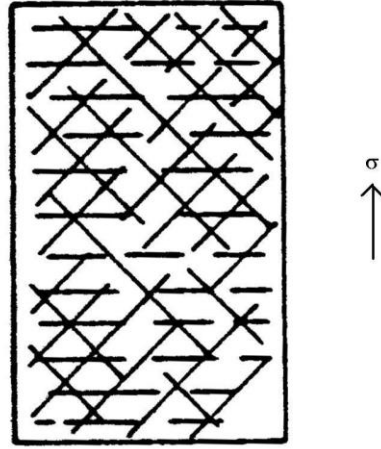


Şekil 3.6 Bir çatlak ucundaki craze yapısı nda fibrillerin kırılmasıyla çatlak ın ilerlemesi [8]

Craze yapısı nın oluşumu, amorf plastiklerde yaygın olarak gözlenen deformasyon türüdür ve kırılmanın meydana gelmesi nin temel sebebidir. Bu anlamda plastiklerdeki bir çatlak ın önündeki craze bölgesi, sünek bir metalik malzeme deki bir çatlak ın önündeki plastik bölgeye benzer mektedir.

Amorf (ca nısı) plastiklerde kayma akması olarak adlandırılan ikinci bir deformasyon türü daha gözlen mektedir. Çekme veya basma gerilmelerinin etkisi altında plastik deformasyon, kayma bantlarının oluşumu ile başlar. Kayma bantı oluşumuna hassas plastiklerde akmanın başlangıcı kayma bantlarının başlaması ile uyumludur. Kayma bantlarının yönleri maksimum kayma gerilmesi düzleminin yönüne çok yakındır. Kayma akması nın sonucu olarak, kayma bantlarının kesişmesi nde büyük gerilme yığılmaları meydana gel mektedir. Dış yüklerin etkisi altında bu gerilmeler büyür ve

belirli bir kritik gerilme değeri ne eriştiğinde yapıda bir çatlak meydana gelir. Esnek ana zincir bağlantılarına sahip sünek camı polimerlerde kayma akması baskın deformasyon modudur ve sonuçta meydana gelen hasar sünektir. Örneğin yüksek akrilonitril içeriğine sahip akrilonitril-bütadien-stiren terpolimeri (ABS), kırılmadan önce kayma akması deformasyonu gösterir [8]. Genellikle gerilme eksenine yaklaşık 38° ve 45° arasında bir açıda gelişen kayma bandlarında moleküller, bandın kendi eksenine ve gerilme eksenine arasında bir açıda yüksek oranda yönelme gösterirler. Şekil 3.7’de uygulanan gerilme eksenine göre craze ve kayma bandlarının yönelmesi gösterilmektedir.

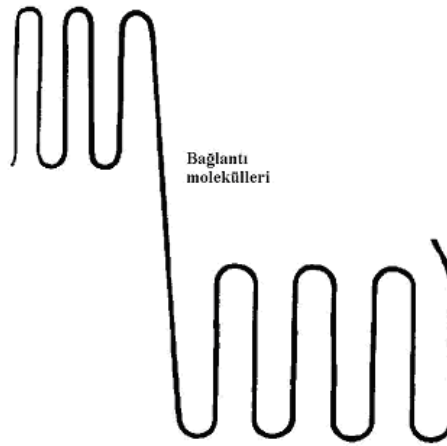


Şekil 3.7 Gerilme eksenine göre craze (→) ve kayma bandlarının (×) yönelmesi [9]

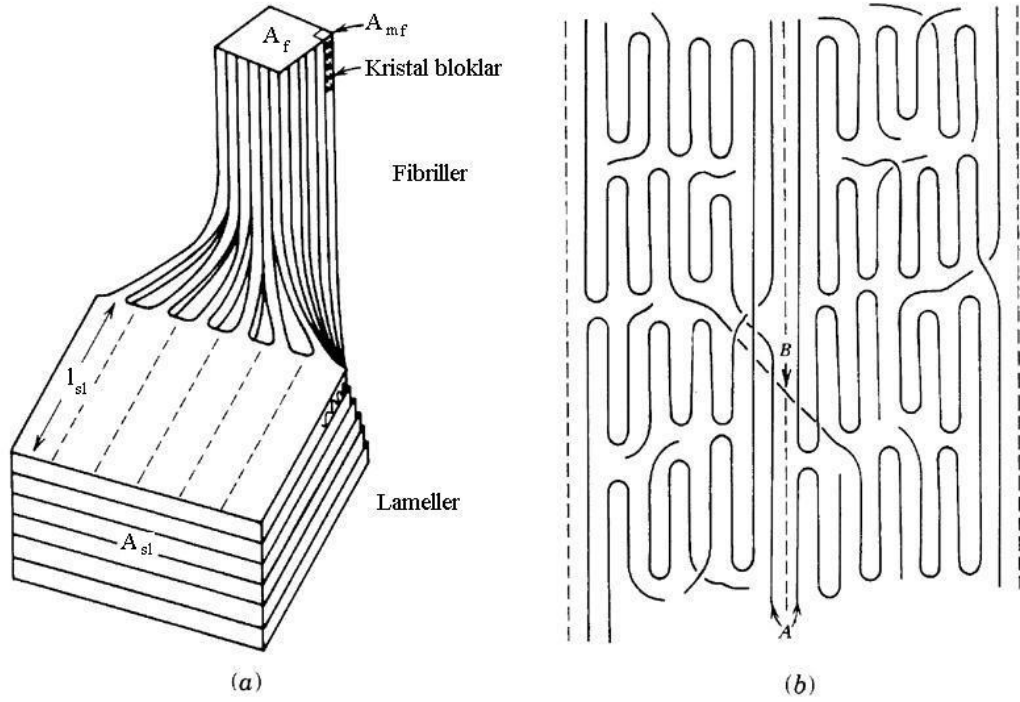
Crazing kayma akması ile kıyaslandığında yapıyı daha hızlı hasara uğratan bir deformasyon türüdür. Örneğin ataktik polistirenin gevrek kırılmasından önce crazing olayı meydana gelmektedir. Polimerde ataktik düzende, yan gruplar gelişigüzel bir yerleşme gösterirler. Ataktik tertiplenme düzensiz olduğundan kristalin bir yapının meydana gelmesini engellemektedir.

Örneğin akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) ve polipropilenoksit karıştırılarak ABS’de craze yapısının oluşumu ile meydana gelen gevrek kırılma eğilimini engellemek mümkündür. Aslında yaklaşık %50-%50 konsantrasyon ABS’de craze yapısının oluşumunu tamamen engeller ve yerine geniş ölçüde kayma akması meydana gelir. Polipropilenoksit miktarı arttıkça oluşan kayma bandları tarafından daha fazla craze yapısının oluşumu engellenir. %30 ABS (%70 polipropilenoksit) içeriğinde sadece kayma bandları görülür [8].

Kristalin yapıdaki plastikler ise, katı halde kompleks bir proses tarafından deforme olurlar. Önce kristalin bölgeler deform olur ve bu esnada yapılarındaki enerjiyi dışarı yayarlar ve ardından kristalin bölgeler yeniden organize olurlar ve oldukça güçlü bir kristalin yapıyı tekrar oluştururlar. Sferulitlerdeki plastik deformasyonun ilk aşamasından sonra yapı bozulmaya başlar. Uygulanan gerilme yönünde yönelmiş lamel paketleri, kristaller arasındaki amorf bölgeleri tarafından ayrılır. Kristaller daha küçük bloklar oluştururlar fakat katlanmış zincir yapısı bozulmaz. Plastik deformasyonun bu aşaması devam ettiğinde bu küçük kristal blokları kendileri uzun mikrofibriller oluşturarak çekme yönünde birbirlerine bağlı olarak dizilirler. Çok sayıda birbirine bağlı kristal blokları, aynı lamel den koptukları için orijinal lameldeki katlanmış zincirler tarafından oluşturulan çok sayıda bağlantı molekül zincirleri (tie molecules) ile birbirlerine bağlı kalırlar. Her bir fibril içerisindeki kristal bloklarının oryantasyonu ve bu kristal bloklar arasında bağlantıyı sağlayan çok sayıda uzamış bağlantı molekül zincirlerinin bulunması, polimerin sertliğinin ve dayanımının hızla artmasına sebep olmaktadır. Mikrofibilli yapının deformasyonu, her bir mikrofibrilin yüksek dayanımı nedeniyle çok zordur. Kristalin plastiklerin deformasyonu sırasında mikrofibriller bir diğeri üzerine kaymakta ve bunun sonucu olarak kristal blokları arasındaki bağlantıyı sağlayan molekül zincirleri daha fazla uzamaktadır. Şekil 3.8’de kristalin lameller arasındaki bağlantı molekül zincirleri gösterilmektedir. Kristal bloklardan oluşan mikrofibrillerin birbirleri üzerinde kaymaları oldukça zordur. Şekil 3.9’da kristalin polimerlerin deformasyon mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Kristalin lameller arasındaki bağlantı molekül zincirleri [8]



Şekil 3.9 Kristalin polimerlerin deformasyon mekanizması (a) birbirine paralel olarak üst üste dizilmiş bir lamel yapısının yan yana dizilmiş mikrofibriller hali ne dönüşüm mekanizması, (b) yönl enmiş kristal bloklar [8]

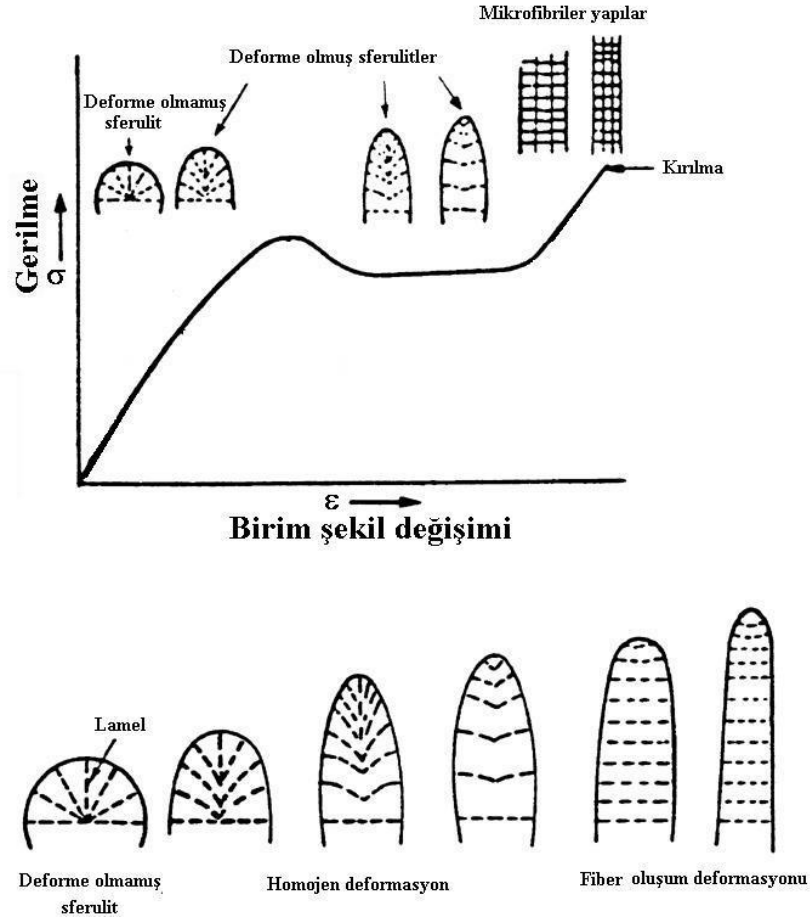
Örneğin kısmikristalin bir polimerde kristalin kısımdaki kaymalar, zincir doğrultusunda veya dik yönde olabilir nektedir. Şekil 3.10' da zincir doğrultusundaki kaymalar gösteril nektedir. Burada moleküller, zincir eksen i doğrultusunda birbiri üzerinde kaymakta ve tüm kristalin kısmın orjinal yapısı bozul madan uygulanan geril menin yönüne göre yönl en nektedir.



Şekil 3.10 Kısmikristalin plastiklerde kristalin zincirlerin kayması [2]

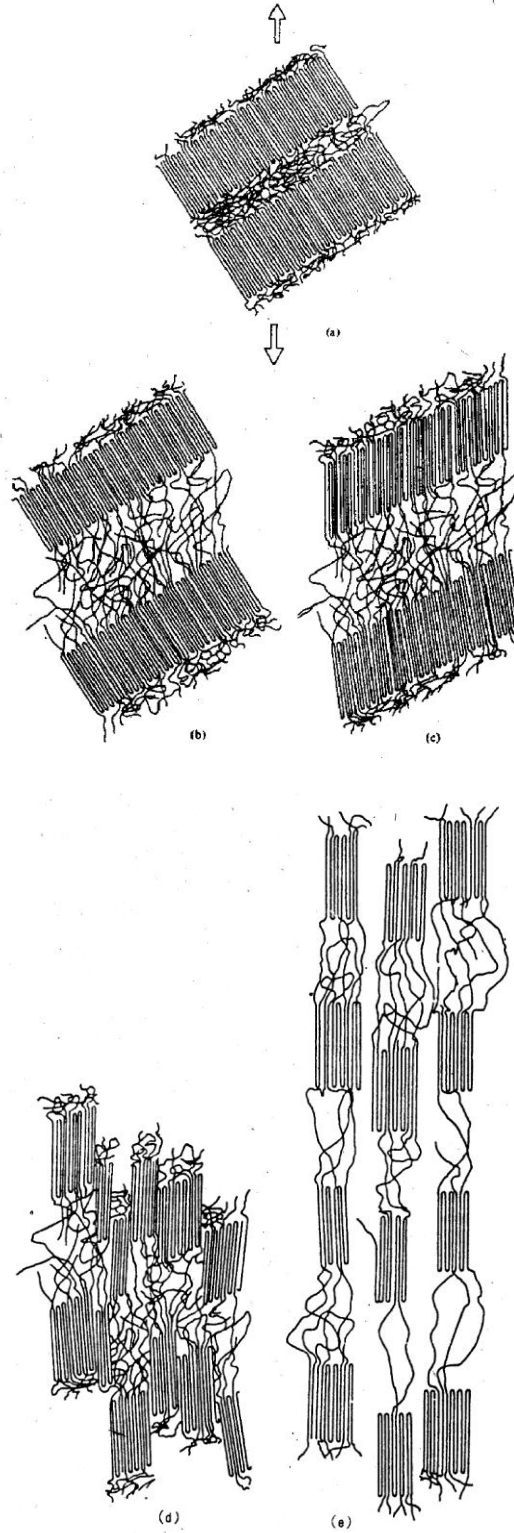
Kısmikristalin plastiklerin şekil değıştir neleri sırasında, uygulanan geril nelerin etkisi altında sferulit yapısı bozul madan çekme yönüne doğru uzamaktadır. Daha sonra büyük şekil değıştir nelerin etkisi altında sferulitik mikroyapı bozul makt a ve

lifli bir yapı meydana gelmektedir. Şekil 3.11’de çekme sırasında sferulitlerde meydana gelen deformasyon gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Çekme sırasında sferulitlerde meydana gelen deformasyon [9]

Şekil 3.12 ‘de görüldüğü gibi kısmi kristalin plastiklerde başlangıçta tüm şekil değiştirme a morf kısmında gerçekleşir ve kristalin kısmında hiçbir hareket görülmez. Daha sonra uygulanan gerilmelerin artması ile kristalin kısmında kaymalar başlanmakta, a morf bölgeler bu kaymalar arazini vermekte ve yapı bozulmadan kristalin kısmı uygulanan gerilme doğrultusunda yönelmektedir. Sferulitler açısından şekil değiştirme yapısını incelersek, sferulitler uygulanan gerilme yönünde yapısı bozulmadan uzamaya başlanmaktadır. Daha büyük şekil değiştirmelerin etkisi altında sferulitik mikroyapı bozulur. Kristalin kısmında blok şeklinde parçalar oluşmakta ve bu bloklar çekme gerilmesi yönünde dizilerek fibriller şeklinde lifli bir yapı oluşturmaktadır ve bu lifli yapı yüksek dayanıma sahiptir.



Şekil 3.12 Kısmi kristalin plastiklerin deformasyon mekanizması [5]

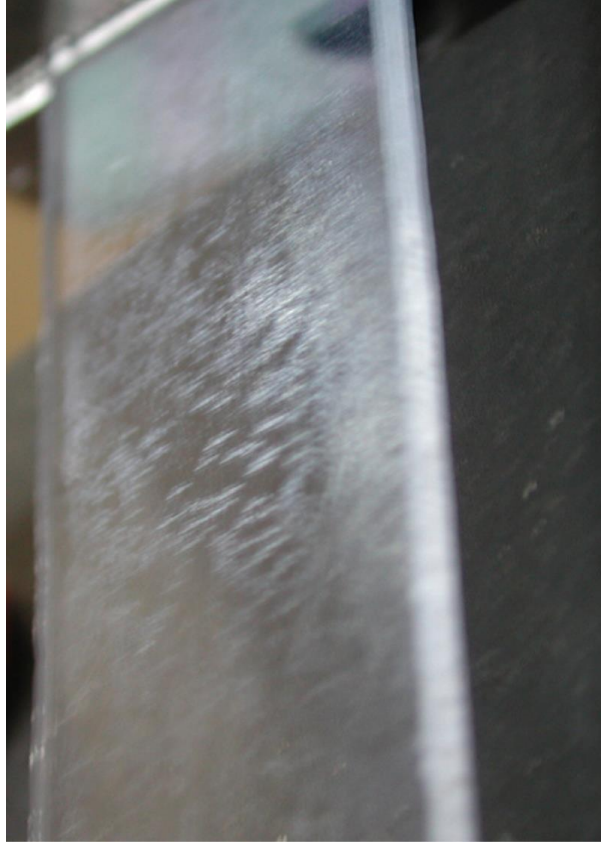
3.2 Deneysel Çalışma

Amorf plastiklerde çekme gerilmesinin etkisi altında meydana gelen craze yapısını gözlemlemek için, amorf yapıya sahip bir polistiren deney numunesi kullanılmıştır.

Öncelikle yatay çekme makinasında çentikli ve çentiksiz olmak üzere birçok PS numuneye çekme deneyi uygulanmış fakat bu numunelerde kırılmadan önce çıplak gözle veya mikroskopla herhangi bir craze oluşumu gözlenmemiştir. Daha sonra çekme de sürünme deneyi uygulanarak craze yapısı gözlenmeye çalışılmıştır. Önce yatay çekme makinasında çentiksiz polistiren numuneye çekme yönünde uygulanan yük gittikçe artırılarak, numunenin 60 kg çekme yükünde kırıldığı gözlenmiştir. Daha sonra aynı boyutlarda ve aynı özellikte başka bir çentiksiz polistiren numuneye sürünme deneyi uygulanmış ve 30 kg yükte bir saatlik süre sonunda yapıda çıplak gözle görülebilir bir şekilde craze oluşumu gözlenmiştir. Polistiren numunelerle yapılan deneyde zaman içerisinde elde edilen sonuçlar Şekil 3.13 a, b ve c de gösterilmektedir.



(a)



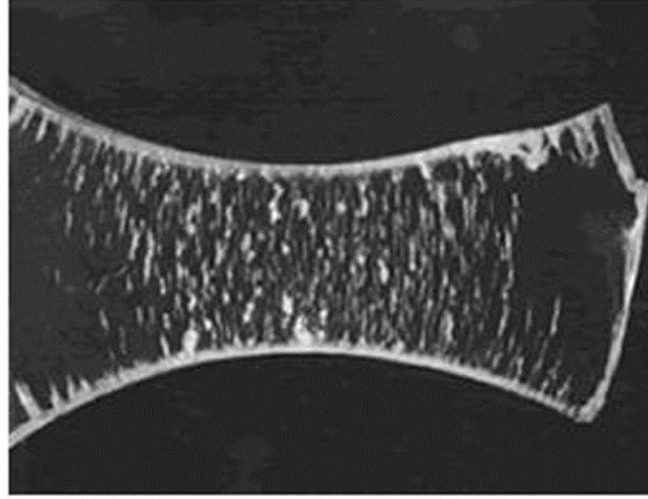
(b)



(c)

Şekil 3 13 (a, b, c) Deneyde zamanla craze yapısının oluşumu

Literatürde polikarbonat numunelere uygulanan uzun süreli sürünme deneylerinde gözlenen craze yapısı ile deneysel çalışmada PS numunede kısa süreli sürünme deneyinde gözlenen craze yapısı kıyaslanmıştır [7]. Şekil 3.14’de polikarbonatın uzun süreli çekmede sürünme deneyinde gözlenen craze yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Polikarbonat numunede craze yapısı [7]

Literatürde stirenik polimerlerde [polistiren (PS), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS), stiren-akrilonitril kopolimeri (SAN)] freon buharında üç nokta eğme deneyinde, hava ortamından daha kolay bir şekilde büyük ölçüde craze oluşumu gözlenmiştir [14]. Amorf bir polimer olan polivinil klorür (PVC)’de de oda sıcaklığında, hava ortamında ve yoğunlaşmış doğal gaz buharında yapılan çekmede sürünme deneylerinde yapıda craze oluşumu gözlenmiştir [23].

3.3 Elastiklerin Yorulmasında Çekirdeklenme Safhasına Kristallinite Derecesinin Etkisi

Malzemelerin yorulma ömrünün, çatlağın hem çekirdeklenme hem de ilerleme safhalarında tekrar sayısına bağlı olarak yorumlandığı daha önce açıklanmıştır. Hasarı meydana getiren toplam tekrar sayısı aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

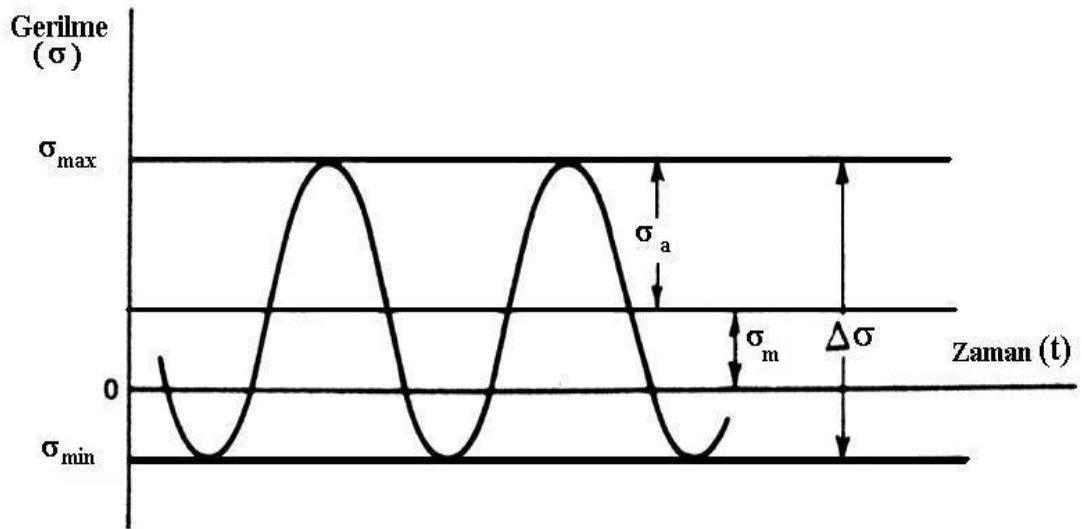
$$N_T = N_i + N_p \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde sırasıyla; N_T toplam yorulma ömrünü, N_i çatlağın çekirdeklenmesi için gerekli olan tekrar sayısını ve N_p çatlağın numunenin kırılmasına sebep olacak bir kritik uzunluğa ulaşması için gereken tekrar sayısını tensilektir.

Parlatılmış bir numunenin yorulma deneyinde yorulma sınırına üstten yakın gerilme değerlerinde çekirdeklenme safhası için gerekli olan tekrar sayısı fazla olmaktadır ve numunenin yorulma hasarında, yorulma ömrünün %90'ı çekirdeklenme safhasında geçmektedir. Buna karşın yapısında üretilmesi esnasında oluşmuş veya kullanımdan kaynaklanan bir kusur içeren bir parçanın yorulma ömrünün neredeyse %100'ü çatlak ilerleme safhasında geçmektedir.

Uygulamada kullanılan birçok plastik parçalar ya belirli bir deformasyon veya belirli bir gerilme aralığında çalışma koşullarına sahiptir. Belirli bir malzemenin yorulma davranışı, gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü koşullarda incelenebilmektedir.

Plastiklerin yorulmasında hasarın çekirdeklenme safhasının incelenebilmesi için çentiksiz numunelere hem gerilme kontrollü ve hem de deformasyon kontrollü deneyler uygulanabilmektedir. Şekil 3.15'de gerilme kontrollü Şekil 3.16'da ise deformasyon kontrollü deneylerle ilgili değişkenler gösterilmektedir.



$\sigma_{max}, \sigma_{min}$ = maksimum ve minimum gerilmeler

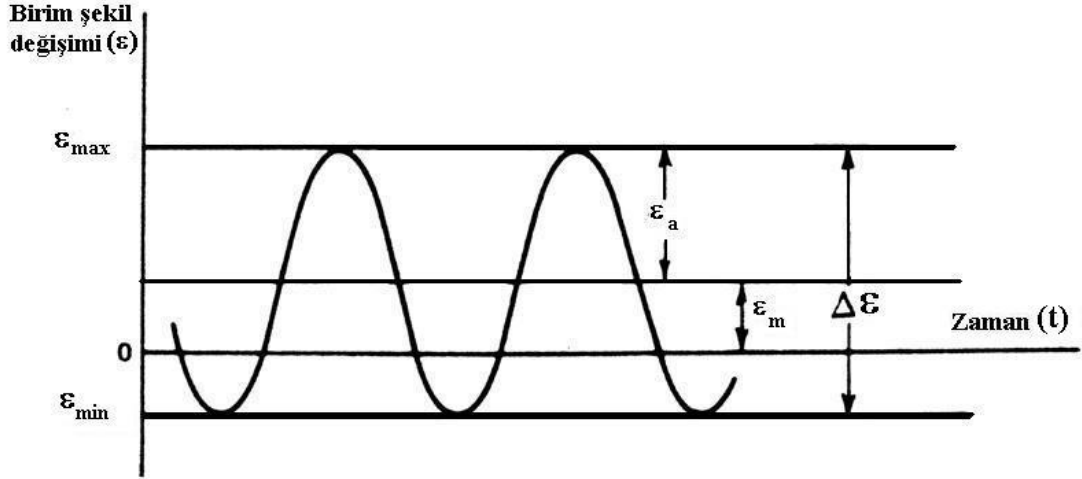
$\Delta\sigma$: gerilme aralığı $= \sigma_{max} - \sigma_{min}$

σ_a : gerilme genliği $= (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$

σ_m : ortalama gerilme $= (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$

R : gerilme oranı $= \sigma_{min}/\sigma_{max}$

Şekil 3.15 Gerilme kontrollü deney ile ilgili gerilme değişkenleri [9]



$$\Delta \varepsilon : \text{biri mşekil değişi m aralığı} = \varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{min}}$$

$$\varepsilon_a : \text{biri mşekil değişi m genliği} = (\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{min}})/2$$

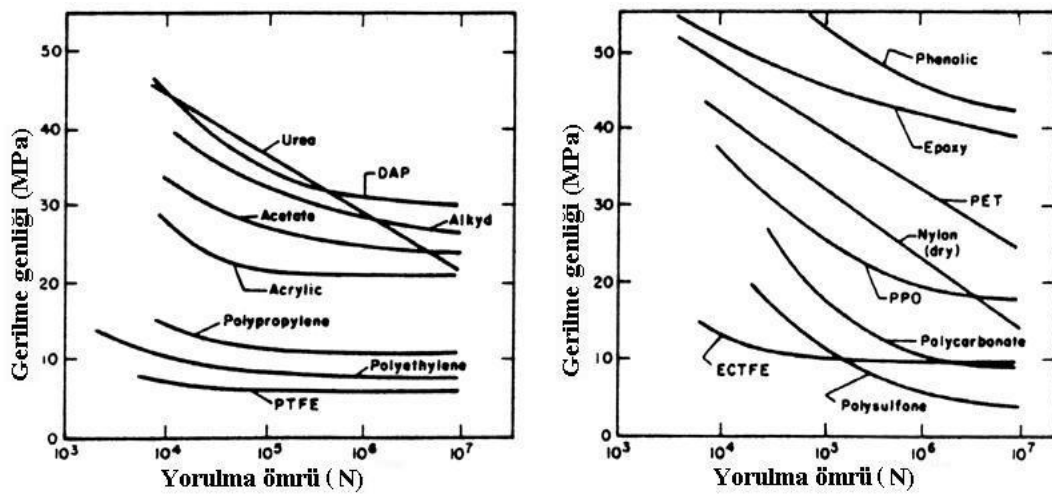
$$\varepsilon_m : \text{ortalama biri mşekil değişi m} = (\varepsilon_{\text{max}} + \varepsilon_{\text{min}})/2$$

$$R : \text{biri mşekil değişi m oranı} = \varepsilon_{\text{min}}/\varepsilon_{\text{max}}$$

Şekil 3.16 Deformasyon kontrollü deney ile ilgili biri mşekil değişi m değişkenleri [9]

3.3.1 Çenti ksiz Numunelerin Çeril me Kontrollü Deneyleri

Plastik ve metal endüstrisinde çoğu malzemenin yorulma verileri, gerilme genliğinin bir fonksiyonu olarak tekrarlı ömür ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 3.17’de birçok mühendislik plastiklerinde gerilme genliği ile tekrar sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler verilmiştir. S-N diyagramları olarak isimlendirilen bu eğriler önemli bilgileri sağlamaktadır. Öncelikle herhangi bir malzemenin yorulma ömrü, gerilme genliğinin azalması ile artmaktadır.



Şekil 3.17 Birçok mühendislik plastiklerinin gerilme genliği - tekrar sayısı (S-N) eğrileri [9]

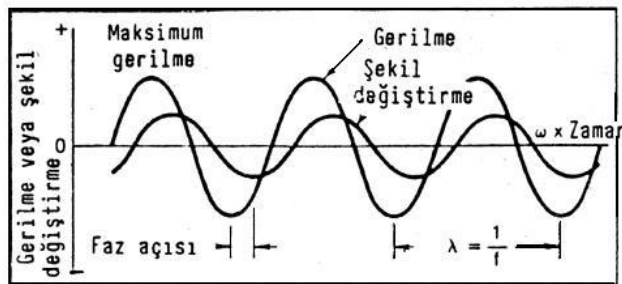
Yorulma deneylerinde genellikle uygulanan tekrarlı gerilmelerin etkisi altında malzeme, 10^6 tekrar sayısına kadar hasara uğramadığı takdirde sonsuz ömüre sahip olarak kabul edilmektedir. Başka bir deyişle sürekli azalan bir yorulma eğrisine sahip olup bir yorulma sınırı göstermezler. Bu diyagramlarda 10^7 sınır değeri olarak kabul edilmiştir. Belirli bir gerilme seviyesinin altında, bazı malzemelerin 10^7 den daha az tekrar sayılarında da hasara uğradığı gözlenmiştir. Yani sonlu ömüre sahip olup, bir yorulma sınırı gösterirler. Şekil 3.17 de görüldüğü gibi metallerde olduğu gibi plastiklerde de yorulma sınırına sahip olan ve olmayan yorulma eğrileri mevcuttur. Örneğin Nylon'da uygulanan gerilme genliği ve tekrar sayısı arasında lineer bir ilişki vardır. Tekrar sayısı arttıkça malzemeyi kopmasına neden olan gerilme genliği azalmaktadır. Politetrafloretillen (PTFE), polietilen (PE) ve polipropilen (PP)'de ise başlangıçta tekrar sayısı arttıkça gerilme genliği seviyesi düşmekte fakat belirli bir tekrar sayısından sonra gerilme genliği seviyesi sabit kalmaktadır. Bu tekrar sayısına karşılık gelen gerilme genliği, yorulma sınırı olarak tanımlanmaktadır. S-N eğrilerinden elde edilen bir diğer bilgi de, malzemenin yapısında önceden varolan bir çentiğin yorulma ömrünü azaltmasıdır. Bu gözlemler ışığında yorulma hasarı çekirdeklenme, çatlak ilerlemesi ve nihai hasar olmak üzere üç safhaya ayrılmaktadır.

Laboratuvarda bu bilgileri oluşturmak için birçok farklı yükleme metodları ve numune yapıları geliştirilmiştir. Yükler; döner eğilme, zıt yönlü eğilme, zıt yönlü burulma veya dalgalı aksenal yükleme şeklinde uygulanabilmektedir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar; gerilme şiddeti ve türü, parçanın şekli, ortamın ve parçanın sıcaklığı, ısı iletim koşulları, frekans ve ortam koşullarını kapsayan tüm dizayn faktörleri ile karşılaştırıldığında bu dizaynın uygulanması ile ilgili fikirler vermektedir. Bilinmesi gereken önemli nokta, numunenin hasarı iki farklı mekanizmanın birisi tarafından meydana gelmektedir. Birinde numune yüzeyinde bir yüzey pürüzlülüğünden çatlağın çekirdeklenmesi ve bu çatlağın bütün numune kesiti boyunca ilerlemesi ile parça hasara uğrayabilmektedir. Böyle bir numunenin yorulma ömrü, numunenin hasarından önce dayanabildiği yük tekrar sayısı ile tanımlanmaktadır. Diğerinde ise, numune ısıal yumuşamanın meydana gelmesiyle hasara uğramaktadır. Bunun sebebi bazı numuneler her bir yükleme tekrarı esnasında oluşan histeretik enerji birikiminin bir sonucu olarak aşırı ısınabilmektedir. Bu enerji,

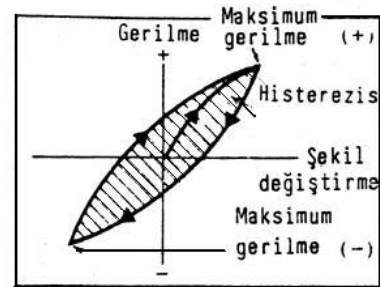
ısı şeklinde geniş bir oranda yayıldığı için, her yükleme tekrarında numune sıcaklık artışı meydana gelir ve bu nedenle elastik modülün düştüğü gözlenmiştir [9].

3.3.2 Histeretik Isınmadan Dolay Meydana Gelen Yorulma Hasarı

Mühendislik plastiklerinde yorulma davranışının önemli bir karakteri histeretik ısınmadır. Herhangi bir malzemenin plastik deformasyonu esnasında yapılan işin çoğu ısıya dönüşmektedir. Metallerde bu olay çok önemli değildir. Çünkü metaller iyi iletkenler ve aşırı yüksek deformasyon hızları hariç, oluşan ısı oldukça çabuk bir şekilde çevreye yayılır. Böylece metalde etkin bir sıcaklık artışı oluşmaz. Buna karşılık ısı iletkenliği düşük olan plastiklerde, belirli deney koşullarında histeretik ısınmadan kaynaklanan ısıl yorulma hasarlarının oluşmasında, uygulanan gerilme genliği, deney frekansı, numune boyutları, numunenin ve malzemenin ısı iletim özellikleri, ortam sıcaklığı ve malzeme özellikleri önemli bir role sahiptir. Isıl hasarın temel sebebi şudur; Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da görüldüğü gibi plastiklerin viskoelastik özelliklerinden dolayı gerilme ile şekil değişimi arasındaki faz farkının (0° - 90° faz açısı) sonucu olarak, şekil değişimleri gerilmelerin gerisinde kalmaktadır ve gerilme ile şekil değişimi arasında bir histeresiz eğrisi elde edilmektedir. Eğrinin sınırladığı alan bir tekrarda biriken enerji kaybını yani histeretik enerjiyi temsil etmektedir. Bu enerjinin çoğu ısı olarak yayılır ve eğer malzeme iyi bir ısı iletkenliğe sahip değilse çoğu plastiklerde olduğu gibi sıcaklıkta bir artış meydana gelmektedir. Histeretik ısınma ve sonuçta meydana gelen yumuşama (ısıl yumuşama), çoğu yalıtkanlarda yüksek deformasyon hızlarında (yüksek frekanslarda) önemli olabilir. Bazı durumlarda sıcaklık artışı, malzemenin viskoz akış veya erime yoluyla hasara uğrayacağı yeterli bir yüksek değere çıkabilmektedir. Oda sıcaklığı bile plastikler için oldukça yüksek bir sıcaklıktır. Böylece numune herhangi bir yükü taşıyamaz hale gelecektir. Böyle bir hasar numunenin iki parçaya ayrılmasını gerektirir.

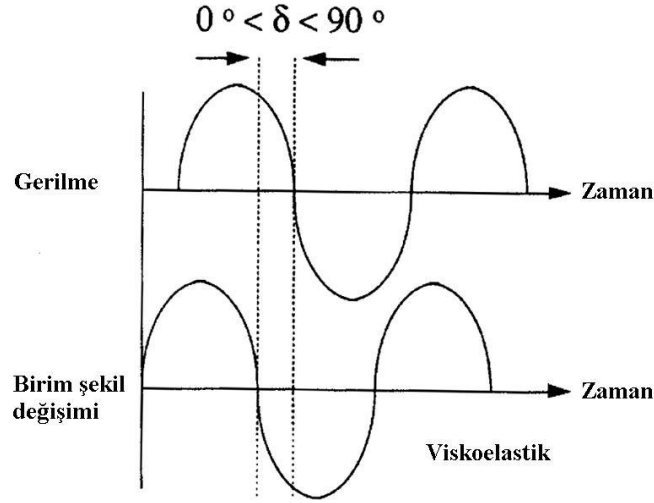


(a)



(b)

Şekil 3.18 Tekrarlı yüklemelere maruz kalan plastiklerde (a) gerilme ve şekil değiştirme arasındaki faz farkı (b) histeresiz eğrisi [2]



Şekil 3.19 Viskoelastik malzemelerde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki faz açısı [13]

Sıcaklık etkilerini, homolog sıcaklık ($T_h = T/T_{eri ne}$) kullanarak incelemek mümkündür. Çoğu malzemelerde ısı olarak aktive edilmiş olaylar $T_h > 0.4-0.5$ değerlerinde etkin olmaktadır. Eri me sıcaklığı $300^\circ C = 573 K$ olan bir termoplastiği incelediğimizde, oda sıcaklığını $300 K$ alarak bu polimer için $T_h = 300/573 = 0.52$ olarak buluruz. Böylece ortam sıcaklığının üzerinde sıcaklıkta küçük bir artış olması bile, böyle bir polimerde önemli derecede ısıl yorulmanın meydana gelmesini sağlayacaktır. Özellikle termoplastikler yaygın bir şekilde düşük ısıl iletkenlik ve lineer olmayan viskozite özelliklerine sahiptir. Yorulma esnasında ısıl yumuşamanın derecesi uygulanan gerilmenin frekansına, şiddetine ve polimerin viskoelastik özelliklerine bağlıdır. Sıcaklıkta farkedilebilir bir artışın meydana gelmesi yüksek gerilme genliklerinde ve yüksek frekanslarda mümkündür. Bu da oda sıcaklığında $10 Hz$ 'den daha büyük frekanslarda yorulma ömrünün azaldığını göstermektedir. Çünkü özellikle yüksek frekanslarda birim zamandaki histeresiz eğrilerinin sayısı arttığından ısı birikimi hızı artar bu nedenle de daha yüksek bir histeretik ısına meydana gelir. Bu olay, özellikle ısı iletim katsayısı düşük olan malzemelerde ısı iletimine fırsat vermeden çok hızlı bir şekilde gerçekleşir [16].

Isıl yumuşama, yorulma hasarının çekirdeklenme evresinde gözlenen bir olaydır. Çentiksiz bir deney numunesine (parlatılmış düz bir numune) yüksek frekansta zamanla değişen gerilmeler uygulandığında plastiklerin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle numunenin yapısında birçok noktada yerel histeretik ısına bölgelelerinin

oluşmasıyla birlikte sıcaklık artışı meydana geldiği belirlenmiştir. Numunedeki bir yüzey pürüzlülüğü veya iç yapısındaki herhangi bir zayıf noktada yerel gerilmeyiğilmaları olduğu için, uygulanan tekrarlı gerilmeden bu bölge daha fazla etkilenmekte ve bu noktada daha fazla bir histeretik ısınma oluşumu ile birlikte daha fazla yumuşama meydana gelmektedir. Çatlak bu noktadan çekirdeklenmekte ve oluşan çatlakın ucuna sürekli ısı pompalanmaktadır. Yapıda geniş ölçekte bir ısınma meydana geldiği için numune küçük tekrar sayılarında hasara uğramaktadır. Ayrıca bu numunede yorulma ömrünün çoğu çekirdeklenme safhasında geçmektedir.

Histeretik ısınmanın derecesi, numunenin boyutlarının da bir fonksiyonudur. Isıl hasarlar numunenin yüzey alanı/hacim oranındaki bir artış ile engellenir. İnce bir numunede oluşan ısının daha büyük bir oranı çevreye yayılarak kaybedilecektir. Diğer taraftan kalın bir numune, daha büyük miktarda ısıyı yapısında tutacak ve böylece aynı malzemeden ince bir numuneye göre yorulma sınırı daha düşük olacaktır [8].

Her bir tekrarlı yüklemde meydana gelen sıcaklık artışı ve ısı oluşum hızını belirlemek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Gerilme kontrollü deneylerde ısı oluşum hızı (H) aşağıdaki denklemlle elde edilmektedir.

$$H \propto \frac{DF^2}{E_d} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki denklemlde; D malzemenin sönümleme (damping) kapasitesini, F kuvveti (N) ve E_d dinamik elastik modülü ($Pa=N/m^2$) temsil etmektedir. Görüldüğü gibi malzemenin sönümleme kapasitesi yüksek ise, tekrarlı yük altında yapısında daha fazla bir ısı birikimi oluşur. Çünkü sönümleme kapasitesi yüksek olan malzemeni iç sürtünmeleri fazla olduğu için, her yük tekrarlanmasında uygulanan mekanik enerjinin daha fazlası ısı enerjisine çevrilecektir. Sönümleme kabiliyeti sayesinde malzeme, uygulanan tekrarlı gerilmeler nedeniyle meydana gelen titreşimleri yapısındaki iç sürtünmelerle sönümlemektedir.

Malzemenin viskoelastik hali, dinamik elastik modül ve kayıp kompliansı ile ilişkilidir. Yapılan deneylerde dinamik elastik modülün azalmasıyla ısınmanın arttığı görülmüştür. Bazı polimerler titreşimleri ve şokları absorbe etmek amacıyla kullanılmaktadır. Böyle uygulamalarda dinamik elastik modül, titreşimi bir mekanik yükün etkisi altında plastik malzemenin performansını belirlemek için kullanılmaktadır ve aşağıdaki denklemlle ifade edilmektedir.

$$E_d = Cf^2 \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde; C numunenin geometrisine bağlı sabiti, I atalet momentini (kgm^2) ve f titreşim frekansı (tekrar sayısı/sn) temsil etmektedir.

Nümunedeki sıcaklık artışı (ΔT) aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır.

$$\Delta T \propto \frac{\sigma^2 f d^2 D}{E_d k} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemde; σ gerilme genliği (Nm^2), f frekansı (tekrar sayısı/sn), D malzemenin sönümleme (damping) kapasitesi, E_d dinamik elastik modülü ($\text{Pa} = \text{Nm}^2$) ve k ısı iletim katsayısını (WmK) temsil etmektedir. Bu denklemde yine nümunedeki sıcaklık artışı, dinamik modülde bir düşüş ve sönümleme kapasitesinde bir artışla meydana gelmektedir. Plastikler düşük ısı iletkenliğe sahip olduklarından her yük tekrarlanmasında oluşan ısı nın büyük bir kısmı dışarıya iletilmemektedir. Bunun sonucu olarak her yük tekrarıda yapıda daha fazla ısı birikmektedir. Tekrarlı yükleme koşulları altında birim zamanda meydana gelen enerji kaybı, deney frekansı, malzemenin kayıp kompliansı, ve uygulanan gerilmenin karesi ile değişmektedir ve aşağıdaki denkleme ifade edilmektedir.

$$\dot{E} = \pi f J''(f, T) \sigma^2 \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemde; $\dot{E}$ birim zamandaki enerji kaybını, f frekansı, J'' kayıp kompliansını ve σ maksimum gerilmeyi temsil etmektedir. Malzemeye uygulanan her yük tekrarıda yapıda meydana gelen ısı, yani histeresinin büyüklüğü uygulanan gerilmeye, frekansa ve malzemenin kayıp kompliansına (J'') bağlıdır.

Bu bağlamda bir yük tekrarıda kaybolan enerji aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

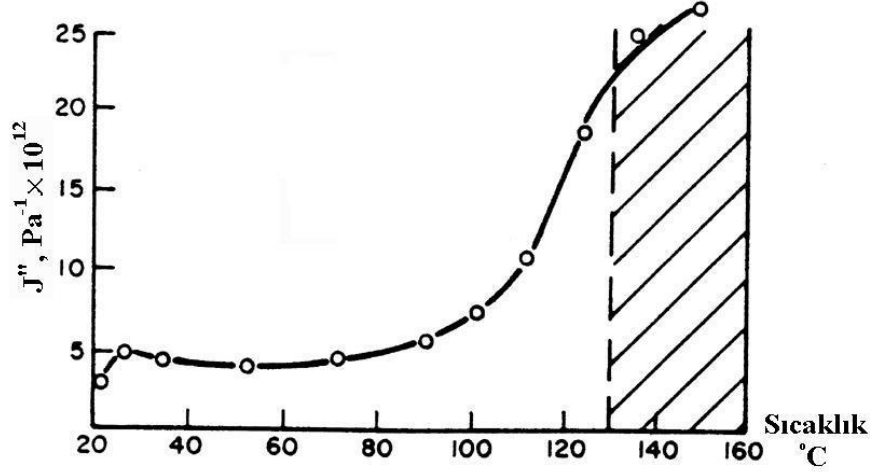
$$\Delta E = \pi \sigma^2 J''(f, T) \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemde; σ yine maksimum gerilmeyi ve J'' kayıp kompliansını temsil etmektedir. Çevreye yayılan (malzemedan dışarıya iletilen) ısı kayıpları ihmal edilerek, denklem 3.5 birim zamandaki sıcaklık artışını göstermek için denklem 3.7ye indirgenebilir.

$$\Delta T = \frac{\pi f J''(f, T) \sigma^2}{\rho C_p} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemde; σ yine maksimum gerilmeyi, J'' kayıp kompliansını, ρ yoğunluk ve C_p özgül ısıyı temsil etmektedir. Bu denklem histeretik ısı ile ilgili temel değişkenleri belirlemek için faydalıdır. Örneğin gerilme seviyesinin artmasıyla sıcaklıkta hızlı bir artış görülür. Numunenin sıcaklığının artması ile elastik modülün düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca denklem 3.7'de birim zamandaki sıcaklık artışı frekansla orantılı olduğu için, bir numunenin yorulma ömrü frekansın artması ile azalmaktadır.

Kayıp kompliansı, frekansın ve malzeme sıcaklığının bir fonksiyonudur. Bu değişkenlerdeki artış ile kayıp kompliansı artmaktadır. Ayrıca kayıp kompliansı (J''), düşük sıcaklıklarda küçük değişimler gösterirken, camgeçiş sıcaklığı civarında hızlı bir artış göstermektedir. Şekil 3.20'de tekrarlı yüklenmelere maruz kalan politetrafloroetilen (PTFE)'de sıcaklığa bağlı olarak kayıp kompliansında meydana gelen değişimler gösterilmektedir.

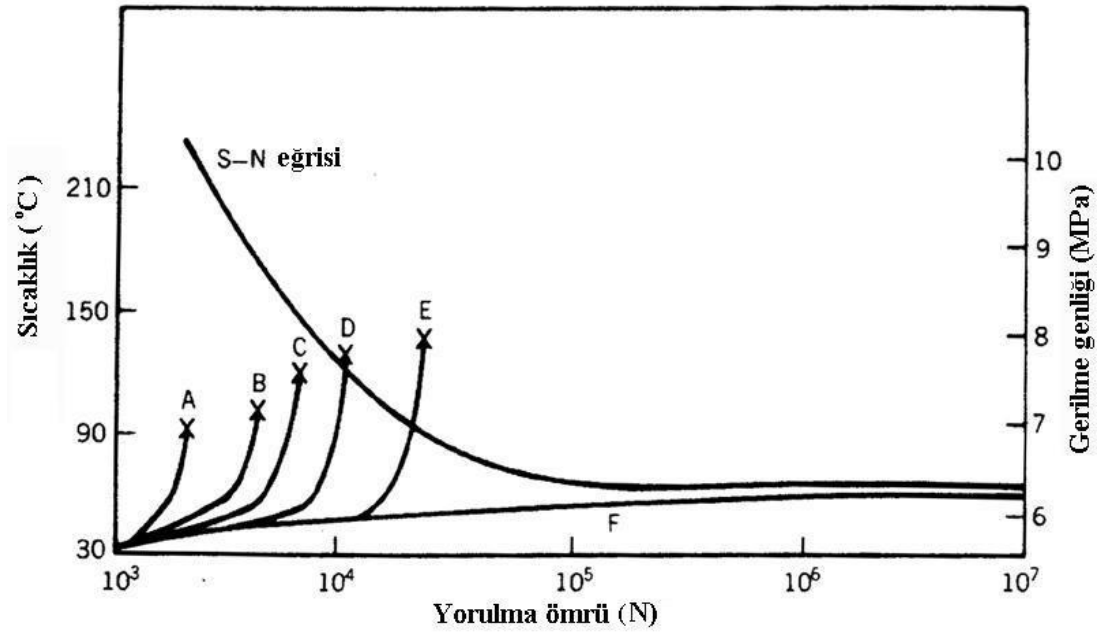


Şekil 3.20 PTFE'de sıcaklığa bağlı olarak kayıp kompliansındaki değişimler [9]

Sonuç olarak yorulmanın ilk aşamalarında numunedeki sıcaklık artışının az olması beklenebilir. Fakat hasarın oluşmasına yaklaştıkça numunedeki sıcaklık artışı çok daha büyükmektedir. Böylece ısıl hasar yorulma ömrünün en fazla son aşamalarıyla ilişkili bir dayı tanımlanmaktadır.

Yukarıdaki denklemler özellikle histeretik ısınma ile ilgili temel değişkenleri belirlemek için faydalıdır. Örneğin oda sıcaklığında uygulanan gerilme kontrollü bir

deneyde 30 Hz frekansta tekrarlı gerilmelere maruz kalan çentiksiz bir politetraflöretilen (PTFE) numunesinin yorulma davranışını belirlemek için bu değişkenler kullanılmıştır. Şekil 3.21 yüksek kristalinite derecesine sahip olan PTFE de gerilme kontrollü deney koşulları altında çeşitli gerilme genliği seviyelerine karşılık gelen sıcaklık artışı eğrilerini ve ısı yorulmaya ait S-N eğrilerini göstermektedir. Bu koşullar altında bu malzeme için yorulma sınırı ($\Delta\sigma_L$) 6.5 Mpa'dır [9].



	Gerilme genliği (MPa)	N Tekrar sayısı	T (°C)
A	10.3	2×10^3	100
B	9.0	4×10^3	115
C	8.3	6.1×10^3	125
D	7.6	9.5×10^3	130
E	6.9	1.9×10^4	141
F	6.3	10^7	60

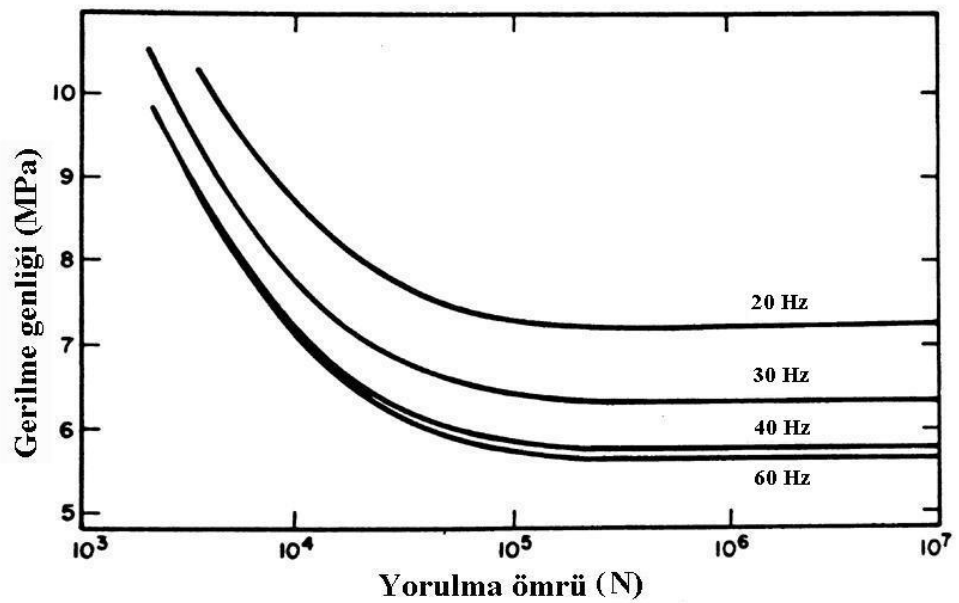
Şekil 3.21 Gerilme kontrollü yorulma deneyi uygulanan politetraflöretilen'in S-N eğrisi ve sıcaklık artışı na gerilme genliğinin etkisi [9]

Yorulma sınırının (6.5 Mpa) üzerindeki bütün gerilme genliği seviyeleri ($\Delta\sigma > \Delta\sigma_L$) için A B C D E sıcaklık artışı eğrilerinde gösterildiği gibi, plastik malzeme erime

noktasına kadar ısınmaktadır. 30 Hz frekansta yüksek gerilme uygulanan numunede daha hızlı bir sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Malzemede, çevreye yayılan ısıdan daha büyük miktarda ısı oluşumu gerçekleşmiştir. Şekil 3.21'deki diyagramda görüldüğü gibi yüksek gerilme genliğinde yapılan deneyde (A eğrisi) malzemede sıcaklık hızla artmakta ve malzeme kısa bir sürede kopmaktadır. Gerilmelerin azalması ile malzemede sıcaklık daha yavaş büyümekte (B, C, D, E eğrileri) ve kopma daha uzun bir süreden sonra meydana gelmektedir. Belirli bir gerilmede (F eğrisi) sıcaklık çok yavaş artmakta ve kopma meydana gelmemektedir. F eğrisi yorulma sınırının altındaki gerilme genliği seviyesine ($\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$) karşılık gelmektedir. Yorulma sınırından daha düşük gerilme genliği uygulandığında ısı yumuşamaya sebep olacak kadar yeterli yükseklikte sıcaklık artışı meydana gelmemiştir. Bu gerilmede oluşan ısı dışarıya iletilen ısı ile eşit olmaktadır. Bu numuneler 10^7 tekrardan sonra hasara uğramıştır [9].

Her bir tekrarlı yüklemde plastik malzemede meydana gelen sıcaklık artışı dolayısıyla yorulma ömrü, birçok değişken tarafından etkilenmektedir;

a) Numunenin yapısındaki sıcaklık artışı frekansla orantılı olduğu için, bir numunenin yorulma ömrü frekansın artmasıyla düşmektedir. Bunun sebebi yüksek frekanslarda malzemede kısa zamanda fazla miktarda ısı birikimi meydana gelmekte ve malzemenin daha kısa sürede hasara uğramasına neden olmaktadır. Şekil 3.22'de PTFE'de deney frekansının yorulma ömrüne etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.22 Politetrafloretlen'de deney frekansının yorulma ömrüne etkisi [9]

b) Numunenin ısı iletim özellikleri ve yüzey alanı/hacim oranı, yapısındaki sıcaklık artışını etkilemekte ve bu değişkenlerin artmasıyla plastik malzemelerin yorulma ömrü artmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi her bir tekrarlı yüklemeye meydana gelen sıcaklık artışı, çevreye yayılan ısı miktarına bağlıdır. Politetrafloroetilen (PTFE), polipropilen (PP) ve polimetil metakrilat (PMMA)‘da numunenin kalınlığının azalması ile yorulma sınırının arttığı gözlenmiştir.

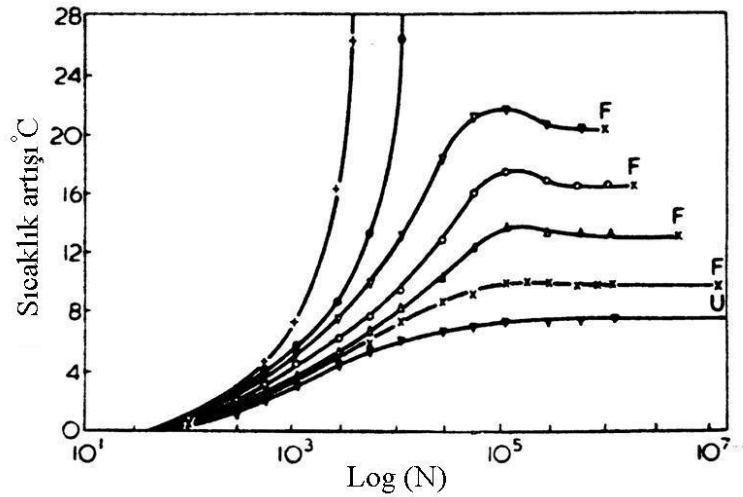
c) Yükleme tipi de yine plastik malzemenin yapısındaki sıcaklık artışını ve yorulma ömrünü etkileyen diğer bir değişkendir. Tekrarlı eğmeye maruz kalan bir numunenin yorulma ömrü, tek eksenli yüklemeye maruz kalan bir numunenin yorulma ömründen daha büyük olmaktadır. Tek eksenli tekrarlı yüklemeye numunenin bütün kesit alanı maksimum gerilmeye maruz kalır. Buna karşın eğme numunesinde sadece en dıştaki fiberler maksimum yüklemeye maruz kalır ve ısınsa sadece bu yüzeyde meydana gelir. Eksenel yüklenen numunenin ise ölçüm alanının birçok noktasında yerel ısınma meydana gelmektedir.

d) Belirli katkı maddelerinin (molibden disülfid, iodyene ve potasyum iodyide) ve antioksidantların kristalin polimerlerin yorulma ömrünü olumlu etkilediği gözlenmiştir. Bu katkı maddelerinin, kristalin polimerlerde merkezden çevreye doğru yayılan lameller şeklindeki sferulit yapısının oluşumunu arttırdığı gözlenmiştir. Kristalin polimerlerdeki daha düzenli ve üniform bir sferulit yapısının da, gerilme kontrollü deney koşulları altında numunede meydana gelen sıcaklık artışını ve histeretik ısınma miktarını azalttığı gözlenmiştir.

e) Deney ortamının, plastik malzemenin yapısındaki sıcaklık artışını ve yorulma ömrünü etkilediği belirlenmiştir. Çentiksiz numunelerin izotermal deneylerinde, örneğin cam katkılı polipropilen ile yapılan bir çalışmada; bu malzemenin izotermal (sabit sıcaklık) deney koşulları altında, izotermal olmayan (numune sıcaklığının serbest bir şekilde artmasına izin verilen) koşullar ile kıyaslandığında yorulma ömründe 20 ila 100 kat bir artış gözlenmiştir. Epoksi ve polyeşter reçinelerin yorulma çalışmaları, sirkülasyonlu (hareket halindeki) suya daldırılmış ve deney esnasında havada soğutulan numunelerin yorulma ömründe bir artış görülmüştür. Suyu daldırılmış tekrarlı yüklenen numuneden ısının uzaklaşması su sayesinde olmaktadır. Bu bağlamda, poliamidin yorulma deneyi esnasında su, petrol eter ve alkol ortamlarının faydalı etkisi, bu maddelerin deney numunesinin yüzeyinde buharlaşması sonucu deney numunesinin soğuması ile gözlenmiştir. Deneyler

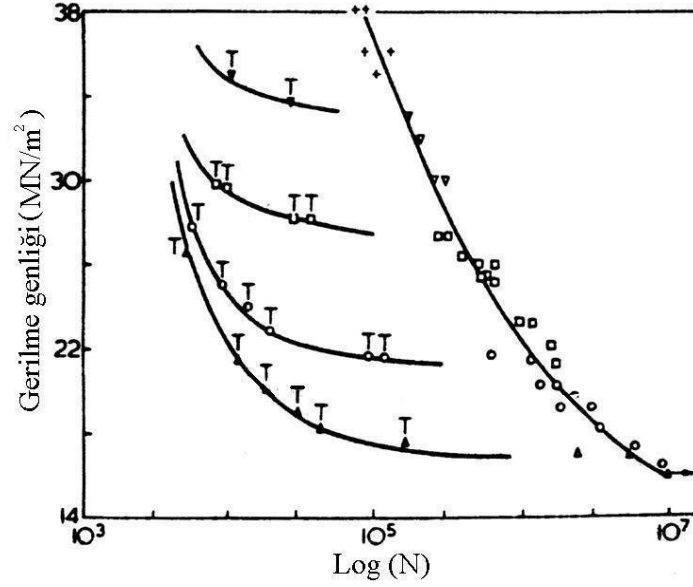
gliserin ve yağ gibi buharlaşmayan ortamlarda yapıldığında yorulma ömrünün arttığı gözlenmiştir [9].

Belirli bir frekansta ısı hasara sebep olan gerilme seviyesinin altında bir seviyede tekrarlı yüklenen plastik bir malzeme meydana gelen hasarı incelediğimizde; bu gerilme seviyesi örneğin amorf bir plastiğin cam geçiş sıcaklığının (T_g) altında veya kristalin yapıdaki plastiklerin erime sıcaklığının (T_e) altında bir sıcaklık değerine karşılık gelen bir gerilme seviyesidir. Bu durumda numunenin hasarı, yorulma çatlağının başlaması ve ilerlemesini içeren bir mekanik işlem tarafından meydana gelmektedir. Plastik bir parça, ısı hasara maruz kalmayacak şekilde dizayn edildiğinde mekanik bir yorulma kırılmasının meydana gelme olasılığı da engellenmiş olur. Şekil 3.23 gerilme seviyesinin bir fonksiyonu olarak poliasetalde (PA) aksel tekrarlı yüklemesinde meydana gelen sıcaklık artışı göstermektedir. Şekil 3.21 'deki sonuçlar ile kıyaslandığında gerilme seviyesinin artmasıyla numunenin sıcaklığının artmasına doğru bir eğili olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 3.23 Poliasetal'in gerilme kontrollü yorulma deneyinde 5 Hz frekansta aksel yüklemeye sonucu meydana gelen sıcaklık artışı. ∇ 15 Mpa, $\times$ 16 Mpa, Δ 17.4 Mpa, $\circ$ 19.7 Mpa, ∇ 21.6 Mpa, $\bullet$ 22.4 Mpa, $+$ 27.8 Mpa, F = kırılma, U = yorulma sınırının altında yük uygulandığında kırılmadığı hal [9]

Şekil 3.24' de görüldüğü gibi bazı numuneler mekanik prosesler tarafından diğerleri de histeretik ısınmadan dolayı yumuşama ile hasara uğramıştır. Sağdaki eğri, 0.167' den 10 Hz' e kadar olan frekanslarda tekrarlı yüklenen birçok poliasetal numunelerde meydana gelen mekanik hasarlara karşılık gelmektedir. Farklı frekanslarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar aynı eğri üzerinde bulunmaktadır ve mekanik hasarların frekansa duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın ısı hasarları önemli bir şekilde deney frekansına bağlıdır.

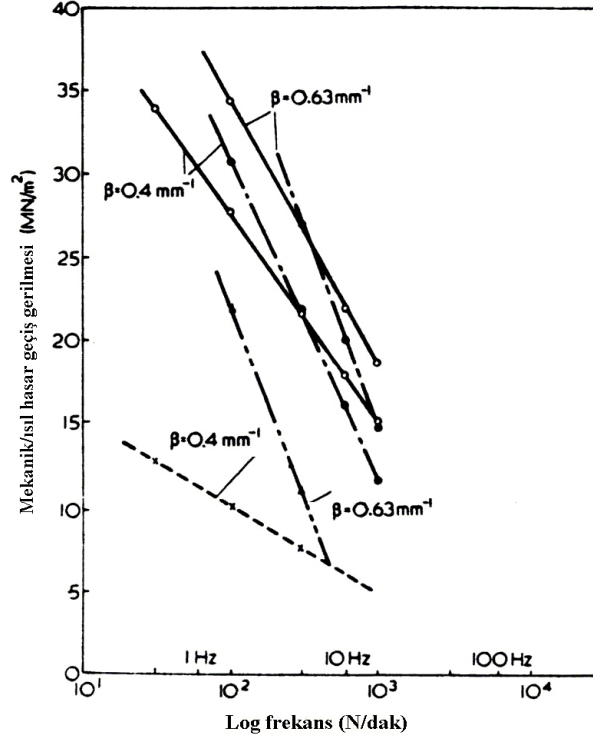


Şekil 3.24 Mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesi "change over stress level" teriminde tanımlanmıştır. Bu gerilme seviyesi deney frekansına, ortalama gerilmeye, numunenin yüzey alanı/hacim oranına bağlı olarak bulunmuştur. Mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesi ve deney frekansı arasındaki ilişki Şekil 3.25'de görülmektedir ve aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır.

Mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesi "change over stress level" teriminde tanımlanmıştır. Bu gerilme seviyesi deney frekansına, ortalama gerilmeye, numunenin yüzey alanı/hacim oranına bağlı olarak bulunmuştur. Mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesi ve deney frekansı arasındaki ilişki Şekil 3.25'de görülmektedir ve aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır.

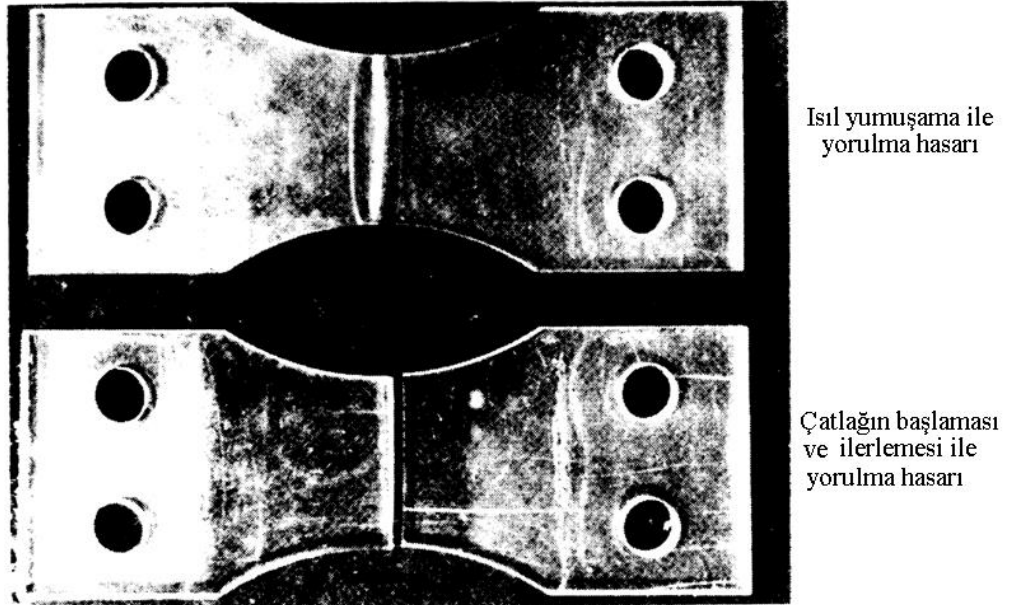
$$\sigma_c = [A V]^{1/2} \{ C_1 - C_2 \log_{10} f \} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemde; σ_c mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesini, A numunenin yüzey alanını, V numunenin hacmini ve f frekansı temsil etmektedir. Bu bağlamda, yüksek frekanslı yükleme koşulları altında ısı hasarının ve düşük frekanslı yükleme koşulları altında mekanik hasarın tahmin edilebilmesi mümkün olmaktadır. Frekansın azalması ve yüzey alanı/hacim oranının artması ile polimerin yapısındaki sıcaklık artışı azalacağından, bu koşullarda polimere tekrarlı yüklemenin uygulanması durumunda yorulma ömrü artmaktadır. Polimerin yüzey alanı/hacim oranı arttıkça, numune yüzeyinden daha fazla ısıyı dışarı yayabileceğinden daha geç ısı hasara uğrayacaktır. Düşük frekanslarda mekanik hasardan ısı hasara geçiş için numuneye daha fazla gerilme uygulanması gerekmektedir. Şekil 3.25'de görüldüğü gibi farklı yüzey alanı/hacim oranına sahip olan polimere aynı frekansta tekrarlı gerilme uygulandığında, yüzey alanı/hacim oranı yüksek olan polimer diğeri ne göre daha yüksek gerilmelerde ısı hasara uğramaktadır.



Şekil 3.25 Deney frekansının ve numunenin yüzey/hacim oranının ($\beta \text{ mm}^{-1}$) bir fonksiyonu olarak mekanik hasardan ısı hasara geçiş gerilmesi. oasetal ; • PMMA ; × PP [11]

Şekil 3.26'da polimetilmetakrilat'ta (PMMA) tekrarlı gerilmelerin etkisi altında mekanik prosesler tarafından meydana gelen yorulma hasarı ve histeretik ısınma sonucu meydana gelen ısı yumuşama hasarı gösterilmektedir.



Şekil 3.26 Poli metil met akrilat'ta (PMMA) mekanik ve ısı hasarları [8]

Malzemede önceden varolan çentik, yorulma ömrü üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Çentik veya boşluklarda gerilme konsantrasyonları içeren bir numune, tek eksenli gerilme uygulanan çentiksiz bir numuneden daha kolaylıkla hasara uğramaktadır.

PMMA ve PVC de yapıda genel bir histeretik ısınma oluşmadığı yani ısıl hasar meydana gelmediği sürece, yorulma hasarının polimerin yapısında bulunan kusurlardan çatlağın çekirdeklenmesi ve ilerlemesi ile meydana geldiği incelenmiştir. Isıl hasardaki belirli bir seviyede histeretik enerji birikimine karşın mekanik hasar, yorulma çatlağının ilerlemesi ile belirlenmektedir. Çentikli numunelerin yorulma çatlağı ilerleme deneylerinde ısıl hasar hiç gözlenmemiştir. Çünkü çentikli numunelere tekrarlı gerilme uygulandığında yüksek frekanslarda sadece çatlak ucunda yerel bir ısınma meydana gelir. Kesit alana uygulanan gerilme ve deformasyon aralığı çentiksiz numunenin yorulma sınırının altında olduğunda ısı oluşumu meydana gelmez ve sonuçta ısıl hasar oluşmaz (Şekil 3.22 ve 3.24). Ayrıca ısıl hasarlar hiçbir zaman kırılma yüzeyi oluşturmazlar [9].

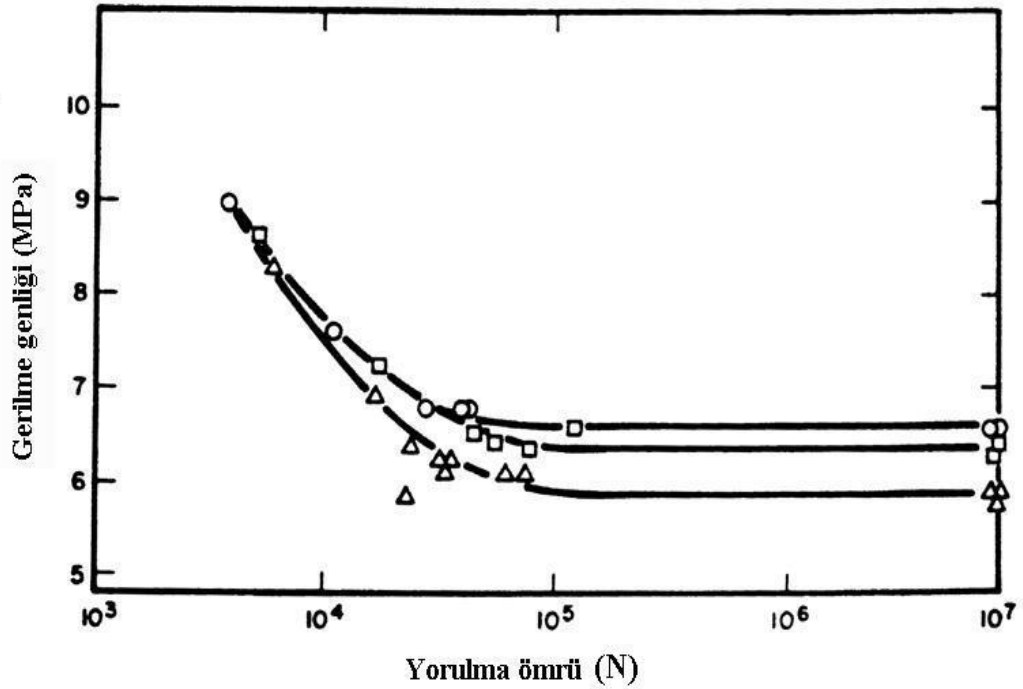
Amorf ve kristalin polimerlerin ısıl hasar mekanizmasını kıyasladığımızda; amorf polimerler, kristalin polimerlerden daha erken ısıl hasara uğramaktadır. Bu durumu ki temel sebepten kaynaklanmaktadır. Birinci sebep, amorf ve kısmi kristalin plastiklerinin ısıl özelliklerinin ve yumuşama davranışının kıyaslanmasında önemli bir kriter olan camgeçiş sıcaklığı (T_g)'dır. Amorf polimerler camgeçiş sıcaklığının (T_g) altında tamamen katı haldedir ve bu sıcaklığın üzerinde viskoz hale geçmektedir. Kristalin polimerler ise ergime sıcaklığının (T_e) altında katı haldedir ergime sıcaklığının üzerinde sıvı haline geçmektedir. Amorf polimerlerde camgeçiş sıcaklığının altında karmaşık zincirlerin dönme hareketi tamamen durur, malzeme sert bir yapıdadır ve kırılma gevrekidir. Camgeçiş sıcaklığının üzerinde zincirlerin hareketi başlar ve malzeme viskoz (yumuşak) bir hal almaktadır. Viskoz akış ısıl olarak aktive edilmiş bir prosestir ve sıcaklık arttıkça artan moleküler hareketlerle meydana gelir. Viskoz akış polimerik ağ yapısının yerel olarak kopmasını ve tekrar oluşmasını içermektedir. Bunun için gerekli olan ısıl enerji camgeçiş sıcaklığının (T_g) üzerinde mevcuttur. Camgeçiş sıcaklığının altında, ısıl enerji bağların kopması ve tekrar oluşması için çok düşüktür ve malzeme kolay akamaz. Kristalin polimerlerde zincirler birbirine göre sıkı paketlenmiş durumda oldukları için molekül

içinde dönme hareketi yoktur ve bu nedenle malzeme serttir. Poli merin kristalinite derecesi arttıkça sertliği ve dayanım artar. Kısa zincir molekülleri daha kolay kristalleşebildikleri için daha sert bir yapı oluştururlar. Kristalin poli merlerde ergime sıcaklığına yaklaştıkça kristalin düzen bozulmaya ve zincir üniteleri dönmeye başlamakta ve sonuçta malzemede bir yumuşama meydana gelmektedir. Ergime sıcaklığında kristalin düzen bozulur ve malzeme sıvı halini alır.

Amorf ve kristalin poli merlerin viskoz ve sıvı hale geçtikleri sıcaklıkları incelediğimizde, zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında malzemede meydana gelen ısı birikimi nedeniyle amorf poli merler kristalin poli merlere göre daha erken yumuşamaya başlayacak ve dolayısıyla daha erken ısı hasara uğrayacaktır. Çünkü amorf poli merler cam geçiş sıcaklığında viskoz hale ve T_m in üzerinde sıvı hale geçerken, kristalin poli merler çok daha yüksek bir sıcaklıkta, ergime sıcaklıklarında sıvı hale geçmektedir. Kısmikristalin poli merlerde kristalinite derecesi arttıkça ergime sıcaklığı yükselmektedir ve malzeme daha geç yumuşamaya başlamaktadır. Böylece %100 amorf ve %100 kristalin poli merlerin özelliklerini düşündüğümüzde, kısmikristalin poli merin yapısı kristalinite derecesine bağlı olarak hangisine daha yakın ise onun özellikleri yorulma davranışında etkili olmaktadır.

Diğer sebep ise, kristalin poli merlerin düzenli yapısının, amorf poli merlerle kıyaslandığında daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahip olmasıdır. Örneğin %80 kristalinite derecesine sahip olan yüksek yoğunluklu polietilen'in (HDPE) ısı iletkenliği 0.50 W/mK iken, %55 kristalinite derecesine sahip düşük yoğunluklu polietilen'in ısı iletkenliği 0.33 W/mK değerindedir [3]. Böylece kristalinite derecesi yüksek olan poli merin yüksek ısı iletkenliği nedeniyle yapısında histeretik ısının birikmesi ve malzemenin yumuşaması kristalinite derecesi düşük olan kısmikristalin ve amorf poli merlere göre daha zordur. Sonuç olarak kristalinite derecesi yüksek olan poli merlerin yorulma hasarında, histeretik ısınmayla meydana gelen ısı hasarının oluşması amorf poli merlerden daha zordur.

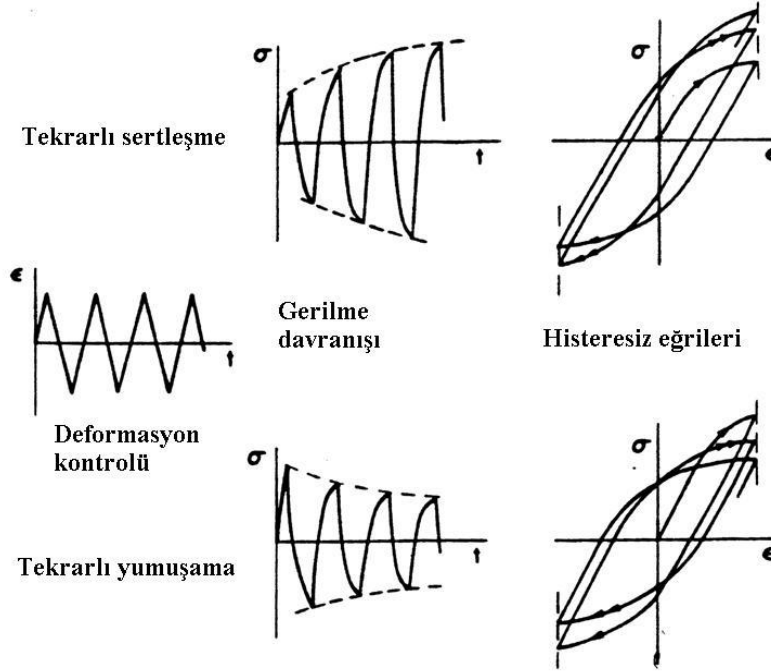
Poli merlerin kristalinite derecesi soğuma hızı ile önemli bir şekilde değiştiği için, hızlı soğutulmuş numunelerin yapısında histeretik ısınma eğilimi fazla olan amorf bölgeler daha fazla olacağından, bu numunelerin yorulma direnci düşük olacaktır. Şekil 3.27'de farklı kristalinite derecelerine sahip PTFE numunelerinin yorulma ömürleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 3.27 PTFE’de kristalinite derecesinin artmasıyla yorulma ömründe meydana gelen artış (deney frekansı 30 Hz). Δ düşük kristalinite, hava üflenmesi ile soğutulmuş □ orta derecede kristalinite, 33.3 °C’de soğutulmuş; ○ yüksek kristalinite, 5,6 °C’de soğutulmuş [9]

3.3.3 Çentiksiz Numunelerin Deformasyon Kontrollü Deneyleri

Mühendislik plastiklerinin yorulma davranışını belirlemek için bazı deneyler sabit deformasyon genliğinde, tekrarlı çekme ve basma yükleme koşulları altında yapılmaktadır. Bu deneyler esnasında histeresiz eğrilerinin yüksekliği artar veya azalır. Deformasyon kontrollü yorulma deneylerinde Şekil 3.28’de görüldüğü gibi histeresiz eğrilerinin yüksekliğinin artması tekrarlı gerilmelerin etkisi altında malzemede meydana gelen deformasyon sertleşmesini, histeresiz eğrilerinin yüksekliğinin azalması ise tekrarlı deformasyon yumuşamasını yansıtmaktadır. Metallerde, malzemenin özelliklerinde meydana gelen her iki değişimde gözlenmektedir ve genel bir kural olarak tekrarlı gerilmelerin etkisi altında yumuşak malzemeler sertleşirken, sert malzemeler yumuşama gösterirler. Kristalin, amorf ve kompozit polimerlerde ise sadece tekrarlı deformasyon yumuşaması meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 3.28 Tekrarlı deformasyonların etkisi altında malzemenin yumuşaması ve sertleşmesi [9]

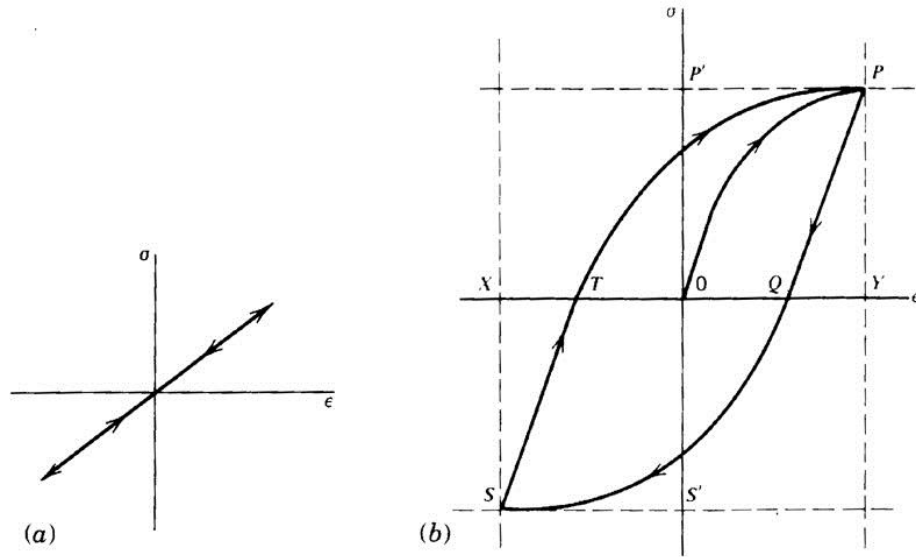
Bir tekrarlı yükleme esnasında deformasyon ve gerilmenin değişimi izlenerek malzemenin mekanik davranışı belirlenebilmektedir. Örneğin uygulanan yüklerin etkisi altında sadece elastik deformasyon gösteren malzemenin histeretik eğrisi Şekil 3.29 a’da görülmektedir ve elastik deformasyonlar geri dönüşümlü olduğu için malzemenin gerilme-deformasyon davranışı aynı hat üzerindedir. Uygulanan tekrarlı yüklerin etkisi altında elastik-homojen plastik akışı birlikte içeren malzeme Şekil 3.29 b’de gösterilene benzer bir histeretik eğri sergilemektedir. Bu eğri hem elastik hem de plastik deformasyonları yansıtmaktadır. Histeretik eğri içerisindeki alan malzemedeki plastik deformasyon işinin bir ölçüsüdür. Bu işin bir kısmı malzemedeki plastik akış esnasında polimer zincirlerinin yeniden düzenlenmesi için harcanır. Geri kalanı ise ısıya dönüşür. Şekil 3.29 b’de histeresiz eğrisindeki elastik deformasyon aralığı aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir.

$$\Delta \epsilon_e = XT + QY = \frac{\Delta \sigma}{E} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemden; $\Delta \epsilon_e$ elastik deformasyon aralığını, $\Delta \sigma$ gerilme aralığını ve E elastik modülü temsil etmektedir. Plastik deformasyon aralığı TQ ya eşittir veya toplam deformasyon aralığından elastik deformasyon aralığını çıkartılması na eşittir.

$$\Delta \epsilon_p = TQ = \Delta \epsilon_T - \frac{\Delta \sigma}{E} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki denklemlerde; $\Delta \epsilon_p$ plastik deformasyon aralığı, $\Delta \epsilon_T$ toplam deformasyon aralığını temsil etmektedir. Malzemede plastik deformasyon miktarı sıfır olduğunda histeretik eğri Şekil 3.29 a'daki gibidir. Sonuç olarak elastik deformasyon toplam deformasyona yaklaşır. Yorulma hasarları sadece tekrarlı plastik deformasyonlar oluştuğunda meydana gelecektir [8].

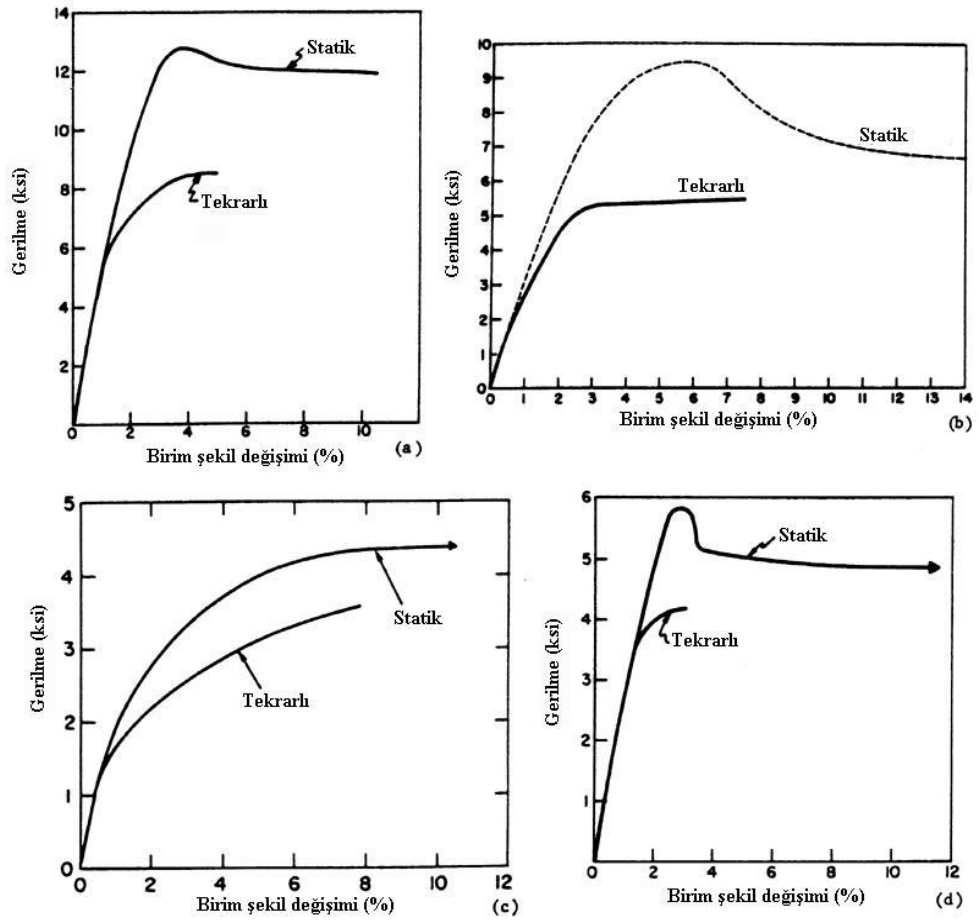


Şekil 3.29 Tekrarlı yüklemelerde histeresiz eğrileri (a) ideal elastik malzeme (b) elastik ve plastik deformasyonlara uğrayan malzeme [8]

Histeresiz eğrisinin şeklindeki değişiklikler tekrarlı deformasyon kontrolü altında malzemenin davranışını yansıtmaktadır. Tekrarlı yüklerin uygulanmasıyla kararlı hale ulaşana kadar malzemenin davranışı değişmektedir. Malzeme uygulanan gerilmelere daha fazla veya daha az dirençli olmaktadır. Malzemenin bu davranışları tekrarlı deformasyon yumuşaması veya deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılmaktadır.

X ve Y deformasyon sınırları içerisinde tekrarlı deformasyon koşulları altında, sertleşme oluştuğunda histeresiz eğrisi P'nin üzerine ve S'nin altına genişler. Buna karşın yumuşama meydana geldiğinde histeresiz eğrisi P'nin altına ve S'nin üzerine doğru kayarak daralır. Malzemeye belirli bir süre tekrarlı gerilmelerin uygulanmasından sonra (genellikle 100 tekrar sayısından daha az) histeresiz eğrileri sabit bir yapı oluşturur ve malzeme kararlı bir hale ulaşır.

Bir polimerin tekrarlı gerilmeler altında deformasyon davranışı statik yüklerin etkisi altındaki deformasyon davranışından oldukça farklıdır. Şekil 3.30'da birçok polimer için tekrarlı ve statik (monotonik) gerilme-birim şekil değişimi eğrileri karşılaştırılmaktadır ve polimerlerle ilgili iki önemli özellik belirlenmiştir. Birincisi bütün polimerik malzemeler; mikristalin, amorf ve kompozitler (iki fazlı) zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında deformasyon yumuşaması gösterirler. İkincisi naylon, polikarbonat ve akrilonitril-bütadien-stiren terpolimeri (ABS)'de statik (monotonik) yükleme koşulları altında gözlenen akma noktası, zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında kararlı halde gözlenmemektedir. Dışarı mühendisleri malzemedeki bu değişiklikleri özellikle dikkate almalıdır [9].



Şekil 3.30 298°K'de tekrarlı çekme ve monotonic gerilme-deformasyon eğrileri. (a) Naylon 6,6, (b) Polikarbonat, (c) Polipropilen, (d) ABS [9]

3.4 Plastiklerin Yorulmasında Çatlak İlerleme Safhasına Kristalinite Derecesinin Etkisi

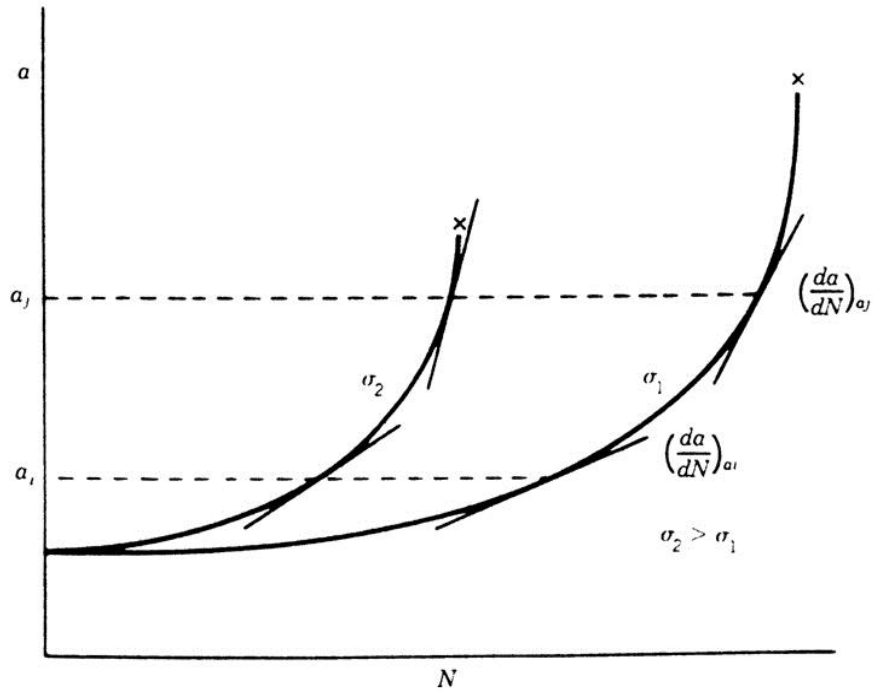
Mühendislik plastiklerinin yorulma çatlak ilerleme hızı, metallerde olduğu gibi polimerin gerilme şiddet faktörü aralığının (ΔK) büyüklüğüne kuvvetli bir şekilde

bağıdır. Bunun yanı sıra molekül ağırlığı, yapıdaki çapraz bağlanma derecesi, kristalinite derecesi, ısı özellikler gibi malzeme değişkenleri polimerin yorulma çatlak ilerleme davranışını etkilemektedir.

Yorulma çatlak ilerlemesi davranışı, toplam yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak çentikli bir numunenin çatlak uzunluğundaki değişimin ölçülmesiyle belirlenmektedir. Yorulma çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme seviyesi ve çatlak uzunluğundaki bir artış ile artmaktadır. Buna karşın komponentin yorulma ömrü azalmaktadır.

$$\frac{da}{dN} \propto f(\sigma, a) \quad (3.11)$$

Şekil 3.31’de yük tekrar sayısının artmasıyla çatlak uzunluğunda meydana gelen artış arasındaki ilişki görülmektedir ve her yük tekrarına karşılık gelen yorulma çatlak ilerleme hızı eğri den tespit edilir.



Şekil 3.31 Tekrar sayısı ve çatlak uzunluğu arasındaki ilişki [11]

Polimerin yapısı ve bileşimi dikkate alınmaksızın deney yapılan bütün polimerler için çatlak ucundaki log gerilme şiddet faktörü aralığı (ΔK) ve log (da/dN) arasında lineer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Metalik ve polimerik katıların yorulma çatlak ilerleme hızı Paris-Erdoğan bağıntısı ile tanımlanmıştır ve kendisi gerilme ve

çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olan gerilme şiddet faktörü (ΔK), yorulma çatlaklarının ilerleme davranışını kontrol eden temel faktör olarak belirlenmiştir [10].

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^m \quad (3.12a)$$

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log[A (\Delta K)^m] \quad (3.12b)$$

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log \Delta K + \log A \quad (3.12c)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (3.13)$$

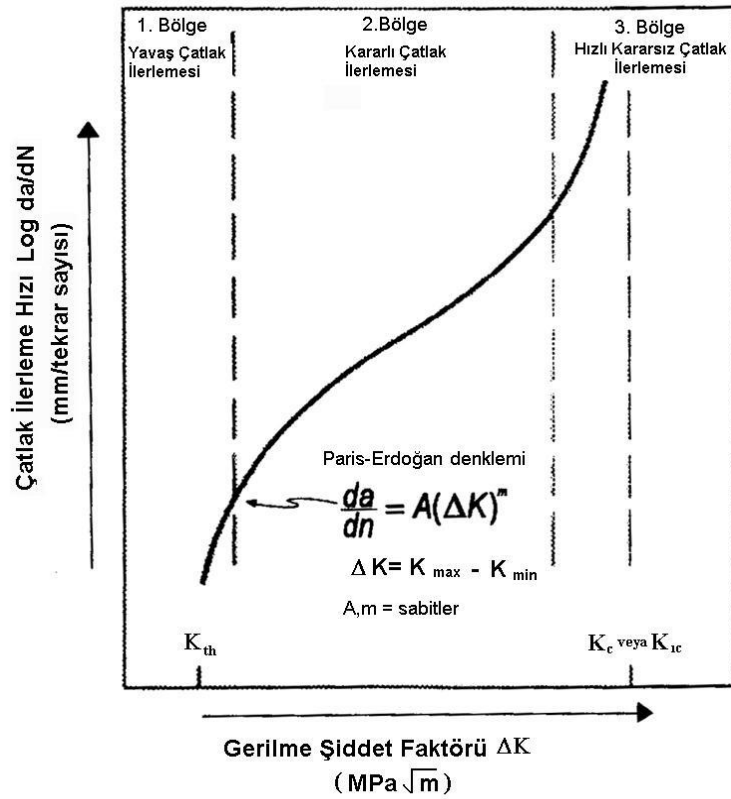
Yukarıdaki denklemlerde; da/dN yorulma çatlak ilerleme hızını, ΔK gerilme şiddet faktörü aralığını ve A malzemeyle ilgili sabitleri temsil etmektedir. Ayrıca K_{max} ve K_{min} sırasıyla, maksimum ve minimum gerilme şiddet faktörü değerlerini temsil etmektedir. A ve m değerleri sıcaklığın, gerilme oranının ve ortamın bir fonksiyonudur.

1.1.1 Tablo 3.1. Belirli kristalin ve amorf polimerler için A ve m değerleri [15]

Malzeme	A	m
PC	$8,432 \times 10^{-7}$	3,691
PVC	$5,757 \times 10^{-6}$	2,172
PPO	$1,295 \times 10^{-7}$	4,479
Naylon 66	$5,170 \times 10^{-9}$	4,310
PMMA	$6,021 \times 10^{-7}$	6,757
PS	$2,804 \times 10^{-5}$	2,975
PSF	$4,953 \times 10^{-8}$	6,757

Bir çatlak ucunun çevresindeki gerilme alanı, K gerilme şiddet faktörü olarak adlandırılan tek bir parametre olarak bulunmuştur ve çatlak geometrisinin ve çatlakın bulunduğu alanda etkili olan nominal gerilmenin bir fonksiyonudur. Böylece yapısında herhangi bir yüzey pürüzlülüğü veya çentik bulunan bir parçada, çatlak uç bölgesindeki gerilme şiddet faktörü, uygulanan gerilme seviyesi ve çatlak uzunluğu ile belirlenebilmektedir. Yorulma zamanla değişen yükleme sonucu meydana gelen bir hasar türü olduğu için, numuneye uygulanan maksimum ve minimum gerilmeler mevcuttur. Buna bağlı olarak K_{max} ve K_{min} değerleri arasındaki

fark gerilme şiddet faktörü aralığı (ΔK) olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.32’de çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü aralığı ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.32 Çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü aralığı ile değişimi [4]

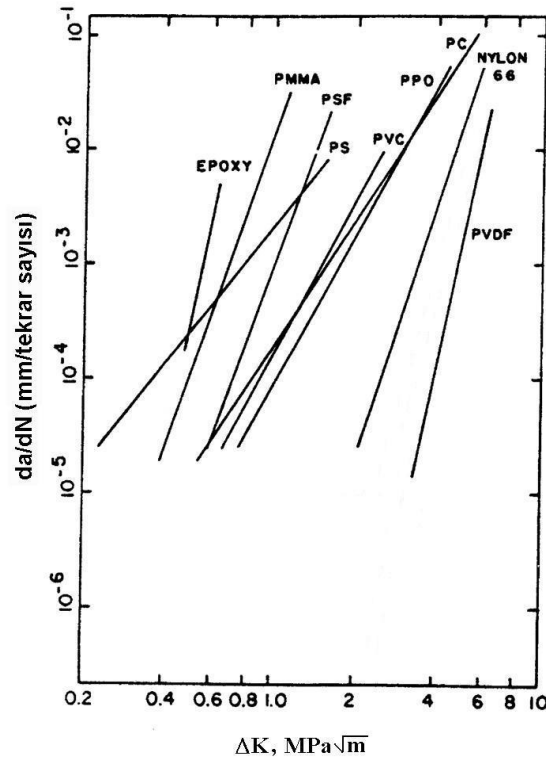
Şekil 3.32’deki diyagramda görüldüğü gibi plastik malzemelerde yorulma çatlaklarının ilerleme davranışı metallerde olduğu gibi üç bölgeye ayrılmaktadır. Yavaş çatlak ilerlemesi, kararlı çatlak ilerlemesi ve hızlı kararsız çatlak ilerlemesi. Malzemenin yorulma direncini açıklamak için eğrinin kararlı çatlak ilerlemesi (lineer) kısmı kullanılır. Lineer bölgenin eğimindeki bir düşüş, yorulma direncinin arttığını ve aynı gerilme şiddet faktörü seviyesinde çatlak ilerleme hızının azaldığını göstermektedir. Çatlak ilerleme hızını artırmak için malzemeye daha yüksek tekrarlı gerilme uygulanması gerekir [4, 18].

Belirli bir numune için gerilme şiddet faktörü biliniyor ise, bu durumda hasara sebep olan maksimum gerilme şiddet faktörünü belirlemek mümkündür. Bu kritik değer K_c malzemenin kırılma tokluğu olarak tanımlanır. Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü bu kritik değere eşit olana kadar, plastik bir parçanın veya deney numunesinin genişliği boyunca yorulma çatlakları kararlı bir şekilde ilerler. Yorulma çatlakları ilerleme deneylerinin çoğunluğu sinüzoidal çekme yükleri altında yapılır.

Tekrarlı olarak uygulanan yükün frekansı, gerilme genliği ve ortalama gerilme seviyesi, temel değişkenleri temsil etmektedir.

Yorulma deneyleri histeretikisınmayınıni muma indirmek için düşük frekanslarda yapıldığı sürece, kısmikristalin plastiklerin yorulma direnci hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhalarında amorf plastiklerden daha yüksektir. Yorulma yüklemesine maruz kalan mühendislik plastiklerinde çatlak ilerleme davranışlarını belirlemek için 10 Hz frekanslarda yapılan deneylerde, farklı moleküler yapıya sahip plastiklerin davranışları arasındaki farklılıklar gözlenmiştir. Naylon 66 gibi kristalin yapıya sahip plastiklerden polimetilmetakrilat (PMMA) ve polikarbonat (PC) gibi amorf (camı) yapıdaki plastiklere kadar birçok plastik malzemelere uygulanan deneylerde, belirli bir ΔK seviyesinde bu malzemelerin çatlak ilerleme hızları arasında 30 veya 40 kat şiddette farklılıklar gözlenmiştir [9].

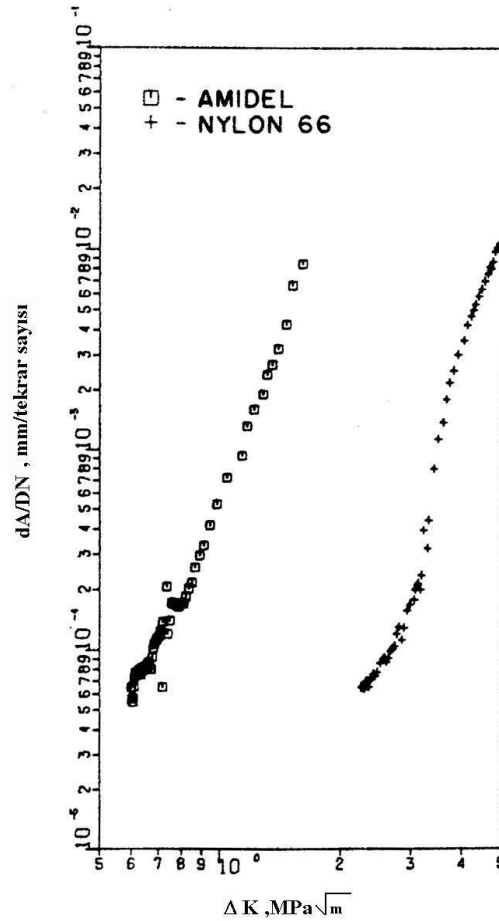
Kristalinite derecesi yüksek olan plastikler, yorulma çatlaklarının ilerlemesine daha fazla direnç gösterirler. Yapılan birçok deney sonucunda, belirli bir ΔK seviyesinde en düşük yorulma çatlak ilerleme hızları Naylon 66'da elde edilmiştir. Şekil 3.33'de birçok plastiğe ait yorulma çatlak ilerleme hızı ile ilgili deneysel veriler gösterilmektedir.



Şekil 3.33 Birçok amorf ve kısmikristalin plastiklerin yorulma çatlak ilerleme davranışları (10 Hz) [9]

Şekil 3.33’de görüldüğü gibi kısmi kristalin (% 50 kristalin) yapıya sahip Naylon 66’nın ve polivinilidenflorid (PVDF)’nin yorulma çatlak ilerleme direnci, amorf PMMA ve polistiren (PS) ile kıyaslandığında çok yüksektir. Bu iki kristalin polimer ile ulaşılabilen maksimum gerilme şiddet seviyesi cansı (amorf) PMMA ve PS malzemelerle ulaşılabilen gerilme şiddet seviyesinden çok daha büyüktür. Buradan şöyle bir sonuca varılmaktadır; önceden yapısında yüzey pürüzlülüğü veya çentik içeren PS ve Naylon 66 numuneleri eğer aynı gerilme değişimlerine maruz kalırsa, kristalin yapıdaki Naylon 66 numunesinde çok daha büyük tekrar sayılarında hasar meydana gelecektir.

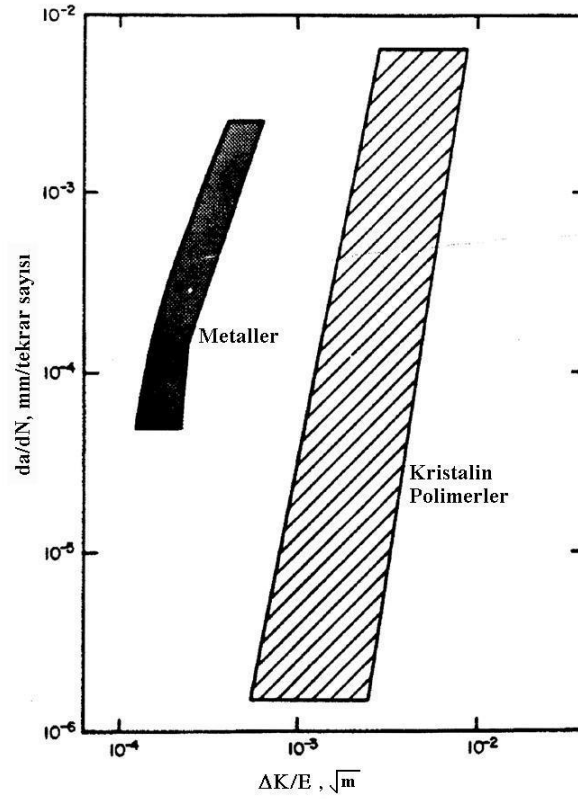
Şekil 3.34 plastiklerde yorulma çatlak ilerleme hızına kristalinite derecesinin etkisini daha belirgin bir şekilde göstermektedir. Amorf polyanidin (Anidel) yorulma çatlak ilerleme hızı, kristalin Naylon 66’dan yaklaşık üç kat daha büyüktür. Yüksek yoğunluklu polietilende kristalinite derecesi %47’den %55’e çıktığında, yorulma çatlak ilerleme hızının dört kat azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.34 Kısım kristalin Naylon 66 (+) ve Amorf Naylon (Anidel □)'de yorulma çatlak ilerleme hızlarının karşılaştırılması [9]

Ayrıca çeşitli polimerik ve metalik malzemelerle yapılan deneyler sonucunda $\Delta K/E$ (malzemelerin elastik modülü ile normalize edilmiş ΔK değerleri) ile da/dN (çatlak ilerleme hızı) arasında Şekil 3.35’de görüldüğü gibi bir diyagram elde edilmiştir.

Buna göre kristalin polimerlerin yorulma çatlak ilerleme hızının metal alaşımlarından daha düşük olduğu sonucuna varılmaktadır [10].

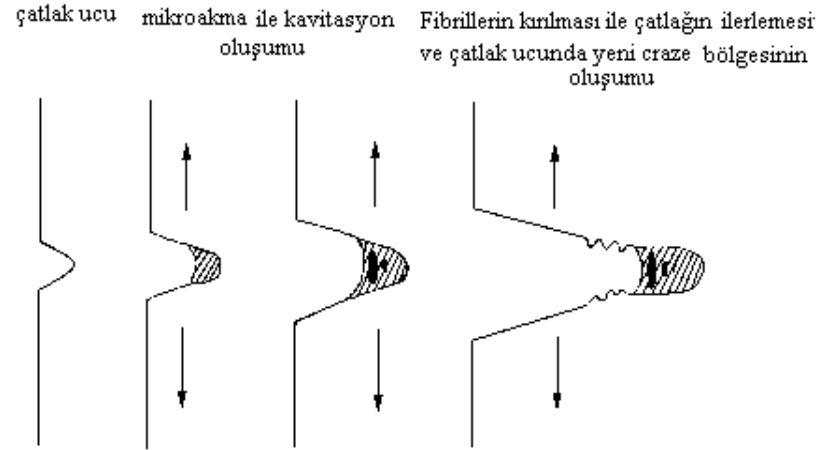


Şekil 3.35 Normalize edilmiş gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak kristalin plastiklerin ve metallerin çatlak ilerleme hızlarının kayması [10]

Kristalin ve amorf plastiklerde yorulma çatlaklarının ilerlemesinde gözlenen farklılıklar, çatlak ucu bölgesinde farklı plastik deformasyonlarla çatlak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi, kristalin yapıdaki plastiklerde çatlak, kristal düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması ile meydana gelen deformasyonla ilerlemektedir. Kristalin plastiklerin deformasyonu sırasında oluşan mikrofibrillerin yüksek dayanım nedeniyle bu yapıda çatlak ilerlemesi büyük kuvvetler gerektirmektedir. Bu nedenle çatlak ilerleme hızı amorf plastiklere göre daha yavaş olarak belirlenmektedir. Kristalinite derecesi yüksek olan plastiklerde, kristalin fazın yüksek dayanım nedeniyle zamanla değişen gerilmelerin etkisi altında çatlak ilerlemesi amorf plastiklerden daha yavaştır.

Amorf plastiklerde ise örneğin PS ve PMMA'da katı halde çekme gerilmelerinin etkisi altında crazing olarak adlandırılan bir deformasyon mekanizması ile çatlak ilerlemektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi craze yapısı mikroboşluklar ve

bunların arasında moleköl zincirlerinden oluşan fibril köprülerini içermektedir. Craze yapısı tek eksenli çekme gerilmesine normal yapacak şekilde ilerlerken, mikroböşluklar arasındaki fibriller çekme eksenine göre yönlendirilir. Malzemeye uygulanan tekrarlı gerilmelerin etkisi altında çatlak ucunda, çatlak benzeri görünümdeki kılcal craze yapısı meydana gelir. Yük altında yapı içerisindeki fibrillerin kırılmasıyla mikroböşluklar birleşerek çatlak ilerlemektedir. Bu yapıda önemli bir nokta söz konusudur. Malzemeye uygulanan çok sayıda tekrarlı yüklenmeden sonra çatlak ucu bir kerede craze bölgesi içerisinde ilerleyerek craze yapısının uç kısmına ulaşmaktadır. Tekrarlı yüklenmenin devam etmesiyle çatlak ucunda yeni bir craze bölgesi oluşur ve yine birçok tekrar sayısından sonra çatlak bir anda bu craze bölgesi içinde ilerleyerek bu bölgenin sonuna kadar ulaşmaktadır. Tekrarlı yük uygulandığı sürece çatlak bu proses ile ilerlemektedir. Böylece amorf plastiklerde craze oluşumu ile meydana gelen plastik deformasyon mekanizmasında tekrarlı yükler altında çatlak ilerleme hızı yüksektir [9]. Şekil 3.36'da çatlak ucunda yerel crazing plastik deformasyon mekanizması ile çatlağın ilerlemesi gösterilmektedir.



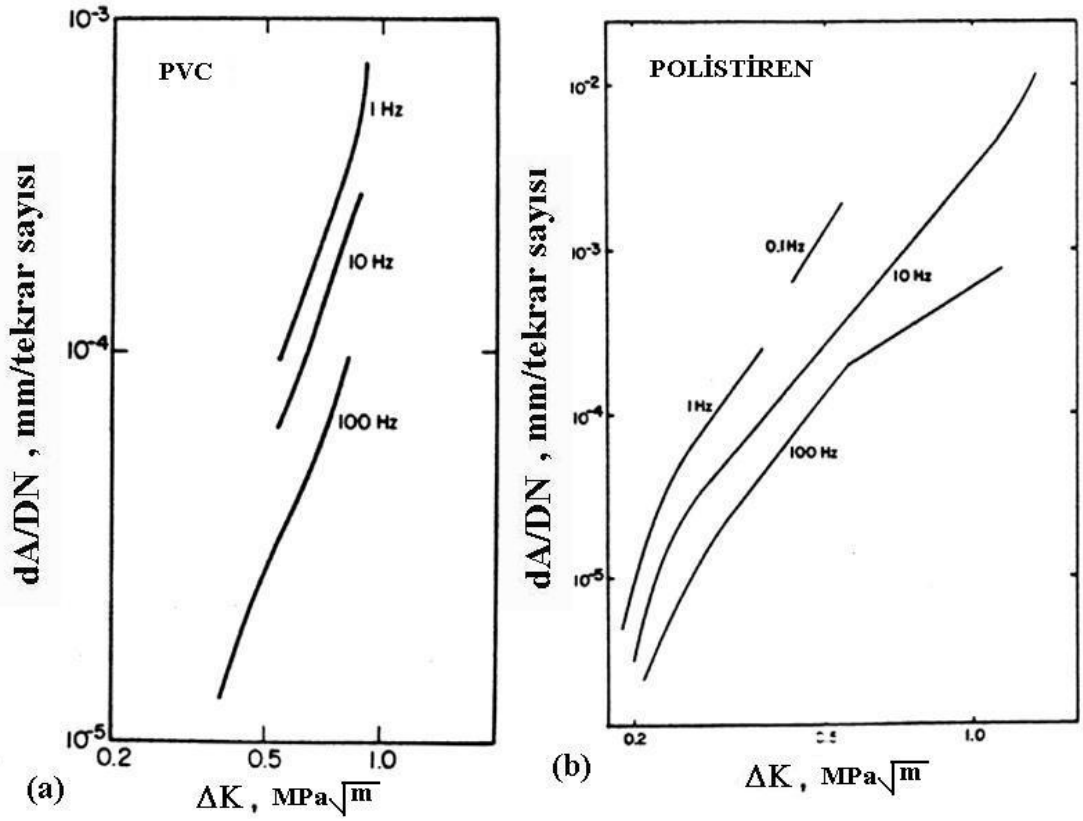
Şekil 3.36 Çatlak ucunda crazing deformasyon mekanizması ile çatlağın ilerlemesi [18]

3.4.1 Yorulma Çatlağı İlerleme Hızı na Deney Frekansı nın Etkisi

Poli merlerin yorulma davranışı yükleme frekansına önemli bir şekilde bağlıdır. Yüksek frekanslarda ve yüksek gerilme genliğinde çentikli deney numunesine tekrarlı gerilmeler uygulandığında çatlak ucunda ısı üretimi çok yüksektir ve bu bölgede yerel bir ısınma meydana gelerek, maksimum sıcaklık artışı

çatlak ucunda meydana gelir. Malzemenin diğer kısımları daha düşük tekrarlı gerilmelerin etkisine maruz kalır ve ortamsıcaklığındadır. Yani çatlak ucuna göre soğuk bölgelerdir. Çünkü tekrarlı gerilmelerin etkisi altında meydana gelen ısının tamamı çatlak ucundan absorbe edilmiştir. Elbette çatlak ucundan malzemenin diğer kısımlarına doğru bir ısı iletimi mevcuttur fakat plastiklerin ısı iletkenliği düşük olduğu için ve yüksek frekanslarda çatlak ucunda çok fazla miktarda ısının üretilmesi nedeniyle çatlak ucunda önemli derecede yerel ısınma meydana gelmektedir. Burada tekrarlı yüklerin etkisi altında çentiksiz numunelerde histeretik bir ısınma sonucu çatlakın çekirdeklenme safhasında olduğu gibi kümülatif bir etki söz konusu değildir. Yorulmada kararlı çatlak ilerlemesi mevcuttur. Yani malzemeye tekrarlı yük uygulandığı sürece çatlak ilerlemekte ve yüklenme durduğunda çatlak ilerlemesi durmaktadır. Uygulanan tekrarlı yüklerin etkisi altında, her tekrarlı yüklenmede çatlak ucunda yeni bir ısınma bölgesi meydana gelmektedir. Örneğin bir tekrarda çatlak ucunda ısınma meydana gelerek çatlak buradan ilerler. İkinci tekrarlı yüklenmede çatlakın daha önceki ilerlemesinde oluşan uç bölgesinde ısınma meydana gelir ve çatlak bu bölgeden ilerlemeye devam eder. Örneğin PVC (Polivinilklorür), PMMA (Polimetilmetakrilat) ve PC (Poli karbonat)'ın yorulma deneylerinde çatlak ucunun sıcaklığında 20 K'nin üzerinde maksimum bir sıcaklık artışı gözlenmiştir. Sıcaklıktaki önemli bir artış ile çatlakın uç bölgesinde akma prosesleri artmaktadır. Bu durum çatlak ucunun eğrilik yarıçapında bir artışa sebep olur. Böylece çatlak ucu kütleşir. Çatlak ucunun eğrilik yarıçapında meydana gelen artış, efektif ΔK değerini düşürür. Böylece çatlakın uç bölgesi, malzemeye uygulanan tekrarlı gerilmelerden daha az etkilenmekte ve çatlak ucundaki efektif ΔK 'ın düşmesi ile yorulma çatlak ilerleme hızı düşmektedir.

Çentikli PS (Polistiren), PMMA (Polimetilmetakrilat), PVC (polivinilklorür) ve PPO (polifenilenoksit) numuneleri ile (0,1-100 Hz) frekans aralığında yapılan deneylerde, frekansın artmasıyla çatlak ilerleme hızının azaldığı gözlenmiştir. Şekil 3.37'de polivinilklorür (PVC) ve polistiren (PS) numunelerinde çatlak ilerleme hızına, uygulanan tekrarlı gerilmenin frekansının etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.37 PVC ve PS'de çatlak ilerleme hızına deney frekansının etkisi [9]

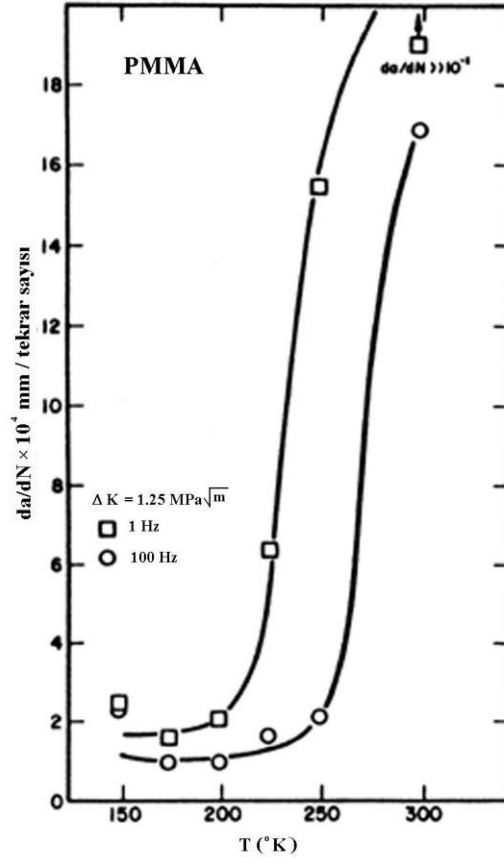
Çentikli bir numuneye düşük frekanslarda zamanla değişen gerilmeler uygulandığında yine çatlak ucundaki ısı üretimi sebebiyle belirli bir ısınma meydana gelir. Fakat oluşan ısı, polimerin düşük ısı iletkenliği ne rağmen yayılarak çatlak ucunda yerel bir ısınma meydana gelmesini önler. Düşük frekanslarda amorf polimerlerde çatlak ucunun ilerlemesi crazing olarak adlandırılan deformasyon mekanizmasıyla gerçekleşmektedir ve çatlak ilerleme hızı yüksektir. Kristalin polimerlerde ise çatlak ucu, herhangi bir ısınma olmaksızın katı halde kristal düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması ile meydana gelen deformasyon mekanizmasıyla ilerlemektedir. Bu mekanizmada önce lamellerden oluşan kristal düzlemleri daha küçük kristal blokları haline parçalanır. Daha sonra bu küçük kristal blokları kendileri uzun mikrofibriller oluşturarak uygulanan çekme gerilmesi yönünde birbirlerine bağlı olarak dizilirler. Bu mikrofibrilli yapının deformasyonunda, her bir mikrofibrilin yüksek dayanım nedeniyle kristal bloklarından oluşan mikrofibrillerin birbirleri üzerinde kaymaları oldukça zordur. Bu nedenle kristalin polimerlerin çatlak ilerleme hızları amorf polimere göre daha düşüktür ve yorulmaya daha fazla direnç gösterirler. [9]

3.4.2 Yorulma Çatlak İlerleme Hızına Deney Sıcaklığının Etkisi

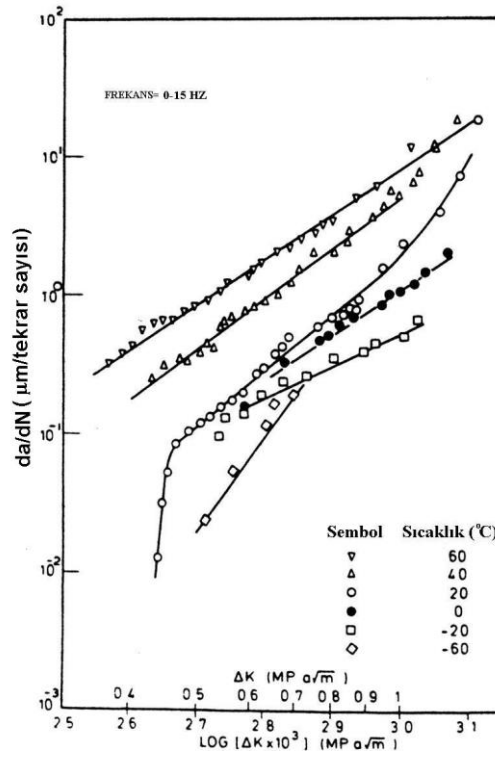
Yorulma özellikleri sıcaklığa oldukça duyarlıdır. Fakat sıcaklığa bağlılık polimerler arasında önemli derecede değişir. Birçok plastik malzemelere yapılan yorulma deneylerinde genellikle deney sıcaklığındaki artışın (dış ısınma nedeniyle), çatlak ilerleme hızı (da/dN)'i arttırarak malzemelerin yorulma ömründe azalmaya yol açtığı gözlenmiştir. Bu davranışı gösteren plastikler arasında akrilonitril-bütadien-stiren (ABS), polimetilmetakrilat (PMMA), polistiren (PS), polisülfon (PSF) ve polivinilklorür (PVC) yer almaktadır [17].

Örneğin PMMA ile 22°C (295 K) ile -125°C (148 K) aralığında yapılan yorulma deneyinde, belirli bir ΔK seviyesinde sıcaklığın artmasıyla yorulma çatlak ilerleme hızının arttığı gözlenmiştir. Deneyler 1 Hz ve 100 Hz frekanslarda ayrı ayrı yapılmış ve 100 Hz frekansta yapılan deneylerde diğerine göre çatlak ilerleme hızının sıcaklığın artmasıyla daha az arttığı gözlenmiştir [9]. Buradan şöyle bir sonuca varmamız mümkündür; amorf yapıya sahip PMMA'da düşük frekanslarda çatlak ucunda ısınma olmaksızın çatlak ilerlemesi crazing deformasyon mekanizmasıyla meydana gelmektedir ve bu mekanizma ile çatlak ilerleme hızı yüksektir. Deney sıcaklığının artması sonucu meydana gelen dış ısınma, düşük frekanslarda çatlak ucunda önemli bir ısı üretimine sebep olmamaktadır. Yüksek frekanslarda ise çatlak ucunda büyük miktarda yerel bir histeretik ısınma zaten meydana geleceğinden deney sıcaklığının artması bu olayı hızlandıracaktır ve çatlak ucunun eğrilik yarıçapının artmasıyla başka bir deyişle çatlak ucunun kütleşmesiyle yorulma çatlak ilerleme hızı düşecektir. Şekil 3.38'de PMMA'da yorulma çatlak ilerleme hızına deney sıcaklığının etkisi gösterilmektedir.

Polistiren (PS)'de 0,15 Hz frekansta yapılan deneylerde deney sıcaklığındaki artışın yorulma çatlak ilerleme hızına benzer bir etkisine rastlanmıştır. Şekil 3.39'da görüldüğü gibi deney sıcaklığının 60°C den -60°C ye düşürülmesiyle polistiren numunenin yorulma çatlak ilerleme hızında 20 kat bir düşüş meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 3.38 PMMA’da yorulma çatlak ilerleme hızına deney sıcaklığının etkisi [9]



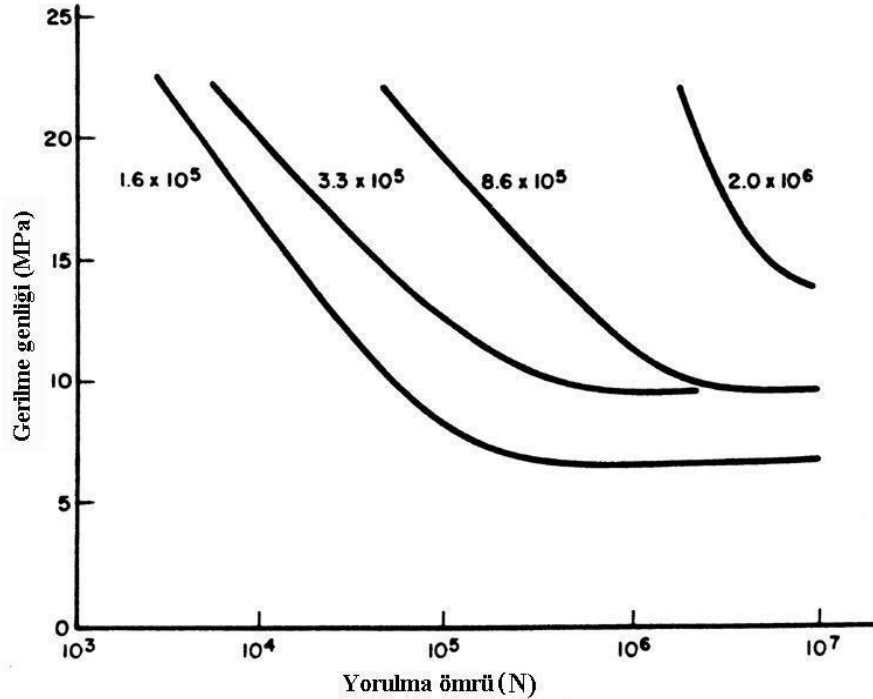
Şekil 3.39 Polistiren (PS)’de yorulma çatlak ilerleme hızına deney sıcaklığının etkisi [9]

3.4.3 Yorulma Çatlağı İlerleme Hızı na Molekül Ağırlığının Etkisi

Molekül ağırlığı, polimerlerin önemli bir özelliğidir fakat metaller ve seramiklerde genellikle ihmal edilir. Molekül ağırlığı polimerlerin ısı ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Birçok polimerin ortalama molekül ağırlığı düşük olduğunda ($< 10^4$ - 10^5) çekme dayanımı çok düşük veya ihmal edilebilir olmaktadır. Molekül ağırlığı ve çekme dayanımı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$\sigma_B = A B \bar{M}_x \quad (3.15)$$

Yukarıdaki denklemde; σ_B çekme gerilmesi, $\bar{M}_x$ ortalama molekül ağırlığı, A B sabitleri temsil etmektedir. Yorulma çatlağının başlaması ve ilerlemesi güçlü bir şekilde molekül ağırlığına bağlıdır. Şekil 3.40’da görüldüğü gibi amorf polistirenin çentiksiz numunelerinde, molekül ağırlığının artmasıyla yorulma ömürlerinin arttığı gözlenmiştir ve dolayısıyla tekrarlı gerilmelerin etkisi altında yorulma hasarına direnç artmaktadır. Kristalin yapıya sahip yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)’de de molekül ağırlığının artması ile yorulma ömrünün arttığı gözlenmiştir. Ayrıca polietilenteraftalat (PTFE), polipropilen (PP) ve asetal reçinede de molekül ağırlığının artmasıyla yorulma çatlağının ilerleme direncinin arttığı gözlenmiştir [11].



Şekil 3.40 Amorf polistirenin (PS) yorulma ömrüne molekül ağırlığının etkisi [9]

Tablo 3.2 Akrilik Levhaların Molekül Ağırlığına Bağlı Olarak Yorulma Ömürleri [11]

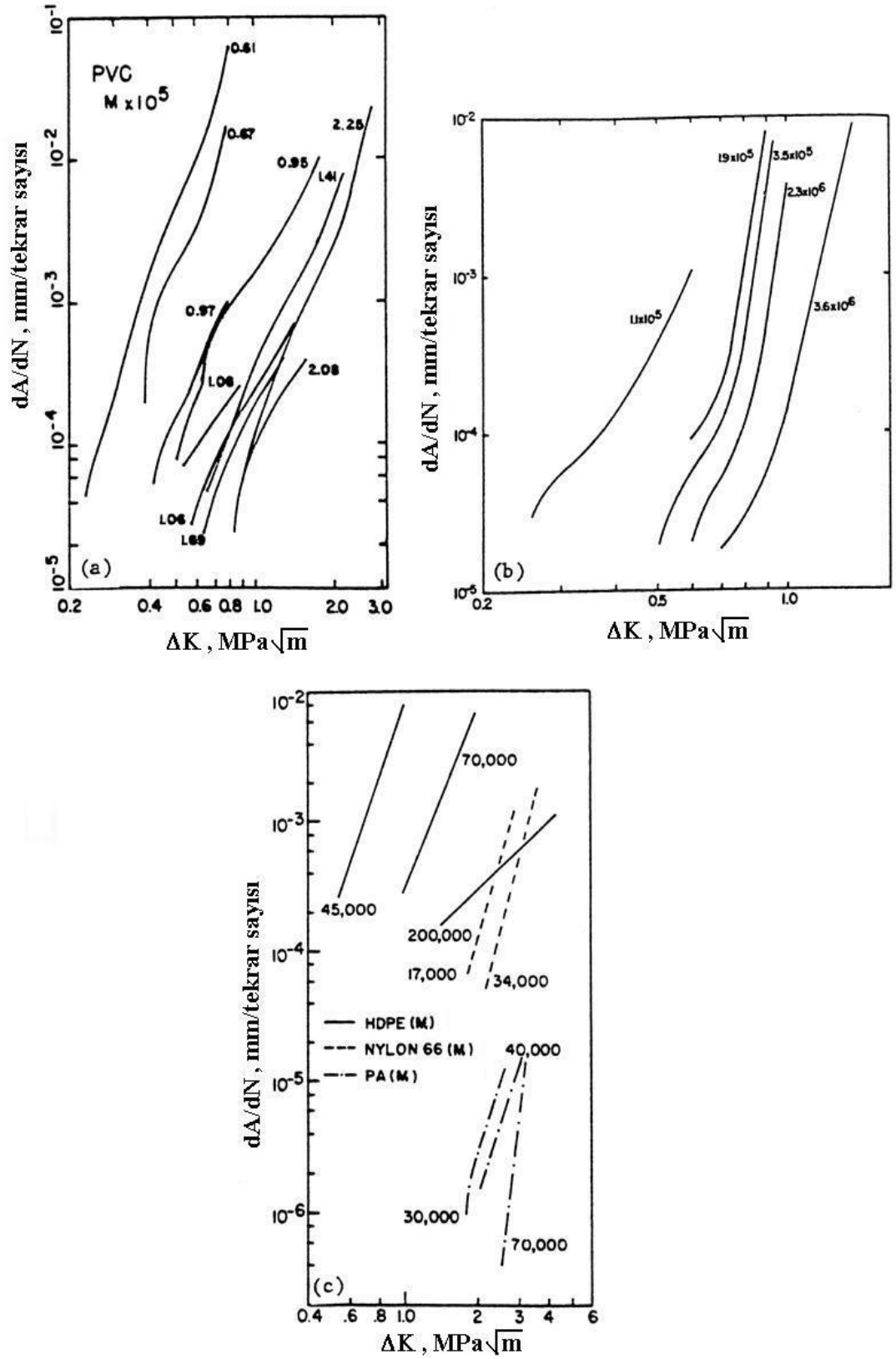
Molekül ağırlığı	Çatlak uzunluğu (cm)	Yorulma ömrü (tekrar sayısı)
$1,1 \times 10^5$	2,5	0
$1,9 \times 10^5$	3,45	2.300
$3,5 \times 10^5$	4,16	6.400
$2,3 \times 10^6$	4,16	39.800
$4,8 \times 10^6$	8,2	268.300

Tablo 3.3 Farklı Plastiklerden Levhaların Molekül Ağırlığına Bağlı Olarak Yorulma Ömürleri [11]

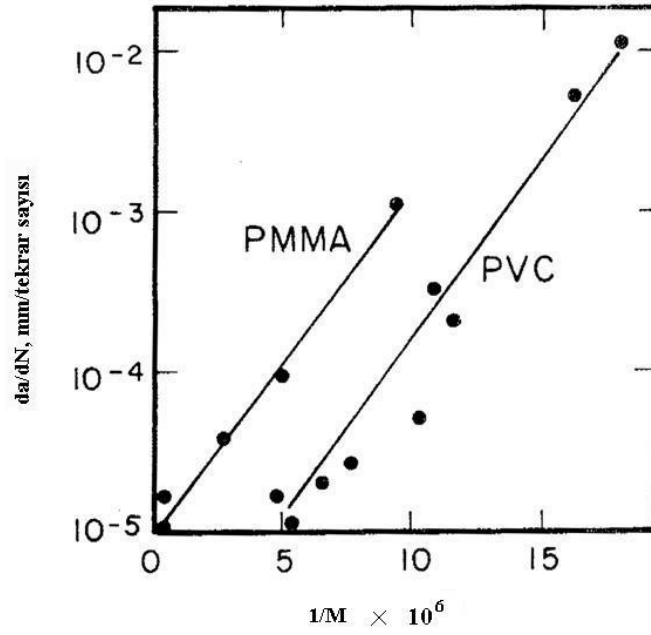
Malzeme	1.2 Molekül ağırlığı	Çatlak uzunluğu (cm)	Yorulma ömrü (tekrar sayısı)
Polistiren	$2,7 \times 10^5$	7,25	20.200
Akrilik	$4,8 \times 10^6$	8,2	266.700
PVC	$2,25 \times 10^5$	24,6	402.500
Polikarbonat	$4,8 \times 10^4$	39,8	1.031.000

Şekil 3.41’de görüldüğü gibi PVC, PA, Naylon 66, PMMA ve PE’de yine molekül ağırlığının artmasıyla yorulma çatlak ilerleme direncinde benzer bir gelişme gözlenmiştir. Her birinde molekül ağırlığının artması ile yorulma çatlak ilerleme hızında sürekli bir düşüş belirlenmiştir.

Şekil 3.42’de PMMA ve PVC için çatlak ilerleme hızının (da/dN), M molekül ağırlığı olmak üzere 1/ M ile değişimi gösterilmektedir. Sabit bir ΔK değeri için 1/ M değerindeki artış, çatlak ilerleme hızında da artışa sebep olmaktadır. Hertzberg ve Manson tarafından yalnızca belli bir boyuttan daha büyük moleküllerin çatlak ilerlemesini engelleme kapasitesine sahip bir ağ yapısı oluşturabileceği düşünülmüş ve polimer ağlarının yorulma zorlanması ile dolaştığını iddia edilmiştir. Yüksek molekül ağırlıklarında, yönelme sertleşmesi olduğu gibi ağların çözülme olasılığının da düşmesi ile yorulma çatlak ilerlemesine karşı dayanımlıdır. Amorf ve kristalin polimerlerin yorulma hasarında çatlak ilerlemesine molekül ağırlığının etkisini ayrı ayrı yorumlamak mümkün değildir. Fakat genellikle kısmikristalin polimerlerin çatlak ilerleme hızının (da/dN) molekül ağırlığına duyarlılığının amorf polimerlerden daha az olduğu belirlenmiştir [9].



Şekil 3.41 Molekül ağırlığının artması ile yorulma çatlak ilerleme direncinde meydana gelen artış. (a) PVC ($M \times 10^5$), (b) PMMA (M), (c) HDPE (— , M , Nylon 66 (--- , M), PA (..... , M) [9]



Şekil 3.42 PMMA ve PVC'nin molekül ağırlıklarının bir fonksiyonu olarak yorulma çatlak ilerleme hızlarının, sabit bir $\Delta K = 0,6 \text{ MPa m}^{1/2}$ değeri nde ve 10 Hz deney frekansında değişimi [21]

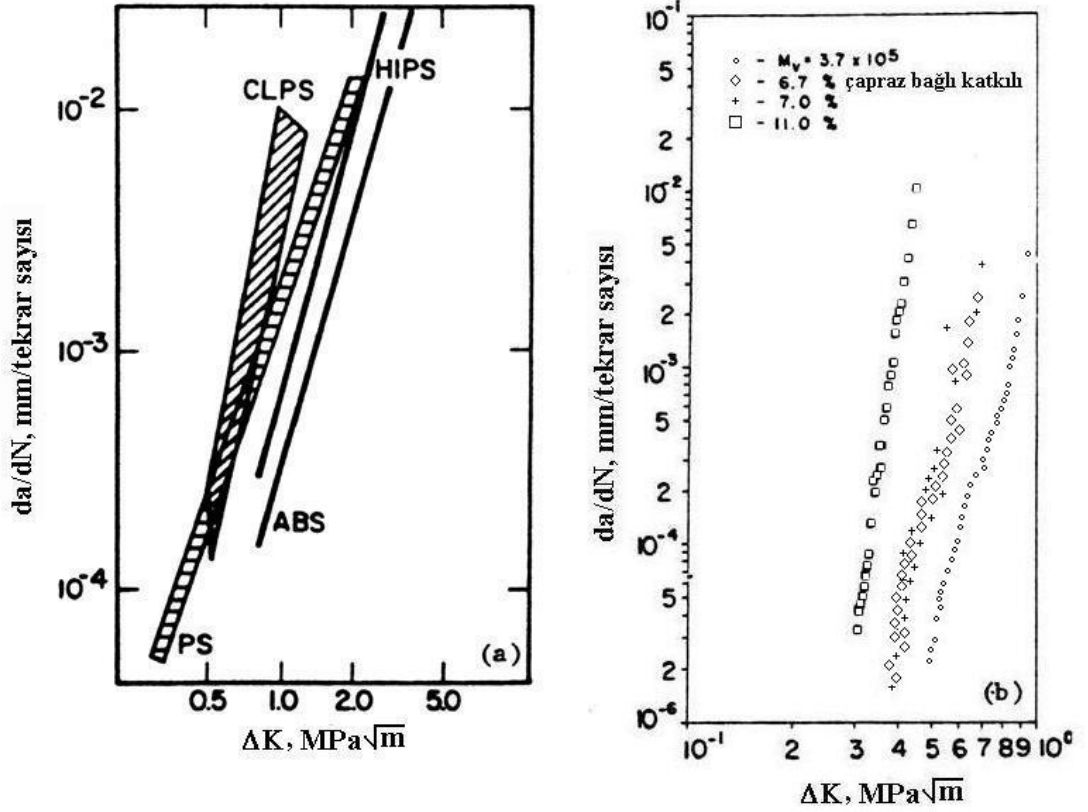
3.4.4 Yorulma Çatlak İlerleme Hızı na Çapraz Bağlı Yapının Etkisi

Çapraz bağlı (termoset) polimerler yüksek dayanımları ve düşük yoğunlukları nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Molekül zincirlerinin çapraz bağlanması üç boyutlu bir ağ yapısını meydana getirir. Aynı zamanda çapraz bağlı molekül zincirleri amorf bir yapı meydana getirmektedir. Tekrarlı gerilmelerin etkisi altında çapraz bağlı polimerler ile yapılan deneyler sonucunda, bu polimerlerde belirli bir gerilme şiddet faktörü (ΔK) seviyesinde çok yüksek çatlak ilerleme hızı gözlenmiştir. Şekil 3.43 (a)'da birkaç stirenik polimerin (b)'de ise farklı miktarlarda çapraz bağlı molekül yapısına sahip katkıları içeren PMMA'nın yorulma çatlak ilerleme davranışı gösterilmektedir. Belirli bir gerilme şiddet faktörü seviyesinde çapraz bağlı polistiren en yüksek çatlak ilerleme hızını göstermektedir.

Sertleştirilmiş stirenik polimerler, çoğunlukla zamanla değişen deformasyona ve eğilmeye maruz kalan uygulamalarda kullanılmaktadır. Stirenik polimerler amorf yapılarından dolayı, yorulmaya naylon ve asetal gibi kısmi kristalin polimerlerden daha hassastır. Lastik ve akrilonitril ilavesi ile stirenik polimerlerin yorulma direnci aşağıdaki gibi değişmektedir.

ABS > HPS > PS

Düşük yorulma dayanımlarından dolayı PS ve HPS plastik parçalarının zamanla değişen eğme yüklemesine veya yüksek gerilme genliği değişimlerine maruz kaldığı uygulamalarda kullanımdan kaçınılmalıdır [20].



Şekil 3.43 (a) Polistiren (PS), çapraz bağlı polistiren (CLPS), akrilonitril-bütadienstiren (ABS) ve yüksek darbe polistireni (HPS)'nin yorulma çatlak ilerleme davranışları (b) Farklı miktarlarda çapraz bağlı katkılar içeren PMMA'nın yorulma çatlak ilerleme davranışı: $\circ$, $M_v = 3,7 \times 10^5$ katkısız; $\diamond$, ağırlıkça %6,7; $+$ ağırlıkça %7; $\square$ ağırlıkça %11 çapraz bağlı katkılı [9]

3.5 Yorulma Çatlak İlerleme Mekanizmaları

Plastik malzemelerin hasar analizinde, kırılma yüzeylerinde gözlenen mikroskopik işaretler, yorulma çatlak ilerleme proseslerinin belirlenmesinde önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu işaretler sayesinde her bir tekrarlı yüklemenin sonucu olarak çatlak ucunun hangi mekanizmalar ile ilerlediğini belirlemek mümkündür. Yorulma hasarından sonra plastiklerin yüzeyinde görülen iki farklı yapıda kırılma işaretleri mevcuttur. Bu işaretler; ince yorulma çizgileri (striations) ve süreksiz ilerleme

bandlarıdır. Plastik malzemenin kırılma yüzeyinde ince yorulma çizgilerinin varlığı, çatlak ucunda histeretik bir ısınmanın meydana gelmesiyle çatlak ilerlediğini göstermektedir. Kırılma yüzeyinde süresiz ilerleme bandlarının varlığı ise, çatlak ucunun crazing deformasyon mekanizmasıyla ilerlediğini göstermektedir. Çatlak ucu crazing deformasyon mekanizmasıyla ilerlediğinde çatlak ilerleme hızı yüksektir. Buna karşın çatlak ucunda histeretik ısınmanın meydana gelmesiyle çatlak ilerleme mekanizmasında, çatlak ilerleme hızı düşüktür.

3.5.1 İnce Yorulma Çizgileri (Striations)

Belirli yükleme koşulları altında birçok plastik malzemenin kırılma yüzeylerinde metallerde olduğu gibi ince yorulma çizgileri (striations) görülür. Tekrarlı yüklemeyle maruz kalan bir malzemenin kırılma yüzeyinde oluşan birbirine paralel ince yorulma çizgileri (striation), her yük tekrarı sonunda çatlak ucunun ilerleme davranışını göstermektedir. İki yorulma çizgisi arasındaki boşluk, bir yük tekrarıyla çatlak ilerlediği mesafeye karşılık gelmektedir. Birçok metal alaşımları ile yapılan deneyler sonucunda, bu yorulma çizgileri arasındaki mesafenin çatlak ucundaki gerilmenin şiddeti ile değiştiği tespit edilmiştir ve yorulma çizgileri arası mesafe ile gerilme-şiddet faktörü arasında aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\text{Yorulma çizgileri arası boşluk} \approx 6 (\Delta K E)^2 \quad (3.16)$$

Yukarıdaki denklemden, ΔK gerilme-şiddet faktörü aralığını ve E elastisite modülünü temsil etmektedir. Denklemden görüldüğü gibi plastiklerde yorulma çizgileri arasındaki mesafe ΔK 'nın karesi ile değişmektedir. Metallerde ise makroskobik çatlak ilerleme hızı ΔK 'nın 2,5 - 7 veya daha fazla kuvveti ile değişmektedir.

Gerilme şiddet faktörü, gerilmenin (σ) ve çatlak uzunluğunun (a) bir fonksiyonu olduğu için, kırılma yüzeyi üzerinde yorulma çizgileri arası mesafenin ölçüldüğü herhangi bir bölgede etkili olan gerilme seviyesi aşağıdaki denklemden hesaplanabilmektedir.

$$\Delta K = Y \Delta \sigma a^{1/2} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde; $\Delta\sigma$ uygulanan gerilme aralığı ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$), a çatlak uzunluğunu ve Y numunenin geometrisine bağlı sabiti ifade etmektedir ve kendisi aynı zamanda numunenin genişliğinin (W) ve çatlak uzunluğunun (a) bir fonksiyonudur.

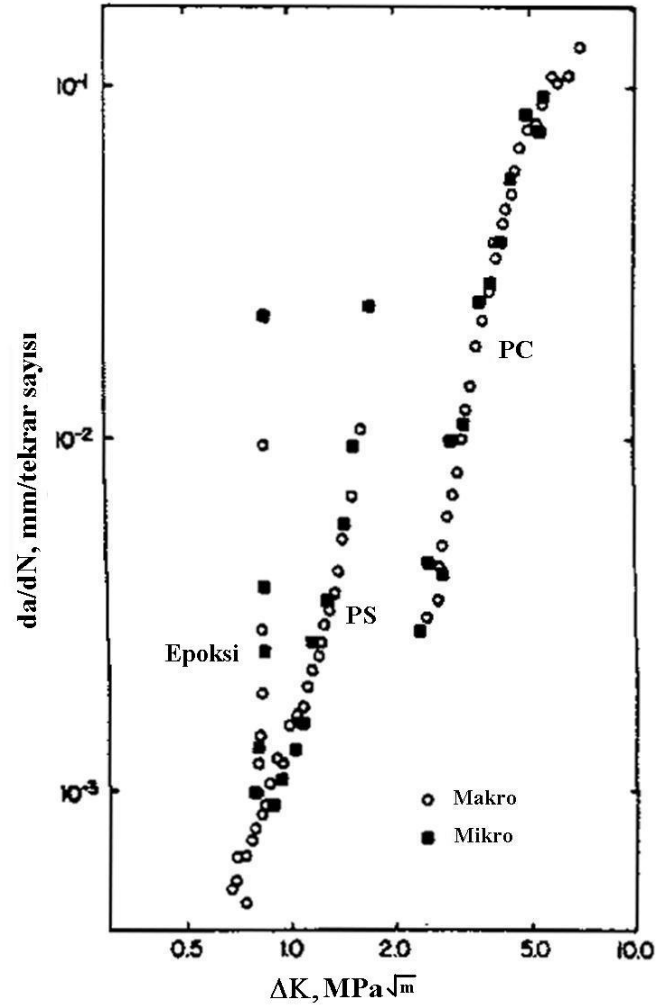
Bir plastik malzemenin kırılma yüzeyinde yorulma çizgileri mevcut ise, bu malzemede çatlakların ilerlemesi, çatlak ucunda oluşan histeretik ısınnma nedeniyle meydana gelmiştir ve yavaş çatlak ilerlemesi söz konusudur.

Çentikli plastik malzemeden bir deney numunesinde, yüksek frekanslı tekrarlı gerilmelerin etkisi altında malzemede çatlak ucunda çok yüksek bir ısı üretimi nedeniyle yerel bir ısınma meydana gelmektedir. Çatlak ucunda sıcaklığın artmasıyla bu bölgede viskoz bir akış meydana gelir. Böylece çatlak ucunun eğrilik çapında bir artış meydana gelerek çatlak ucu kütleşir. Çatlak uç bölgesinin çapında meydana gelen artış efektif gerilme şiddet faktörü (ΔK) değerini düşürmektedir. Böylece malzemeye uygulanan tekrarlı gerilmeden çatlak ucu bölgesi daha az etkilenecektir ve malzemede yorulma çatlak ilerleme hızı düşecektir.

İnce yorulma çizgilerinin oluşumunun yapısı ve mekanizmaları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. PMMA, PC ve PE’de yorulma çizgileri oluşumu çatlak ucu kütleşmesi modeli olarak tanımlanmıştır. Yüksek frekansta tekrarlı gerilmenin uygulandığı sürece çatlak ucunda oluşan yerel histeretik ısınma nedeniyle çatlak ucunun kütleştiği ve tekrarlı gerilmenin uygulanmadığı veya düşük frekanslarda uygulandığı süre içerisinde çatlak ucunun keskin olduğu gözlenmiştir.

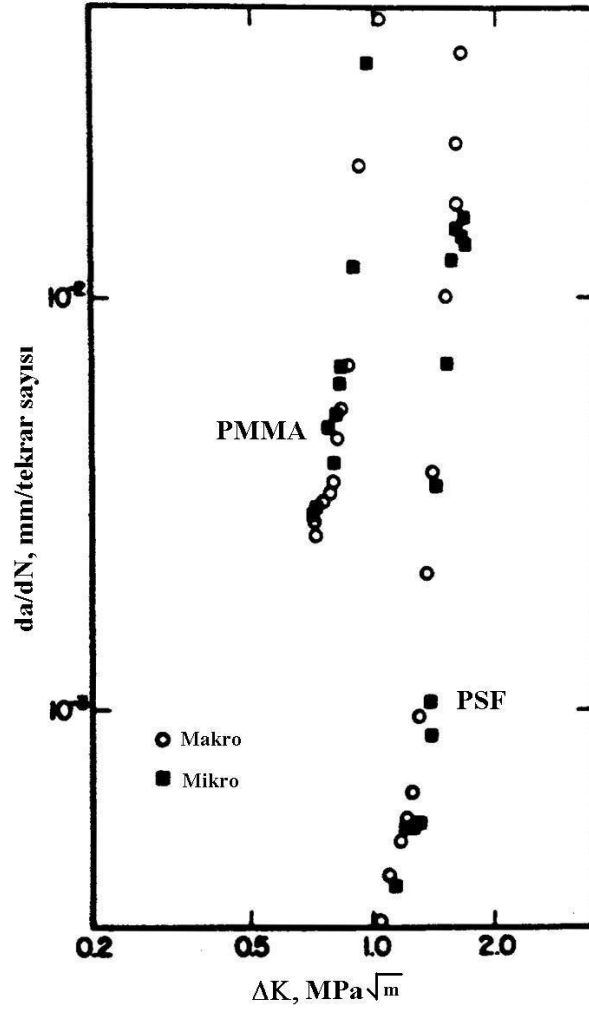
PMMA ve PC gibi ticari mühendislik plastiklerinde ve kauçukta yorulma kırılma yüzeyleri bir optik mikroskop yardımıyla incelenmiş ve ince yorulma çizgilerinin varlığı gözlenmiştir. Ayrıca çatlak uzunluğunun artması ile iki yorulma çizgisi arasındaki boşluğun arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç aynı zamanda daha önce bahsedildiği gibi gerilme şiddet faktörünün (ΔK) artması ile çizgiler arası boşluğun artma eğilimi göstermesi ile uyumludur. Yapılan incelemeler sonucunda PMMA ve kauçukta çizgiler arası mesafenin ΔK ’nın ikinci kuvvetinden daha büyük bir değeriyle arttığı belirlenmiştir. Şekil 3.44’de epoksi reçine, PC ve PS’de ve Şekil 3.45’de PMMA, PSF’de makroskobik çatlak ilerleme hızı ve hasar oluşuktan sonra

mikroskobik olarak ince yorulma çizgileri arasındaki mesafelerin ölçülerinin kıyaslanması gösterilmektedir. Her durumda ince yorulma çizgileri arasındaki mesafe ve makroskobik çatlak ilerleme hızı arasında bire-bir ilişki olduğu ortaya çıkmaktadır. Buradan şöyle bir sonuca varılmaktadır; ince yorulma çizgilerinin gözleendiği ΔK bölgesinde, bu çizgiler her yük tekrarı esnasında yorulma çatlaklarının ilerleme mikromekanizmasını ve çatlakın ilerleme hızının belirlenmesini temsil etmektedir.



Şekil 3.44 Epoksi, polistiren (PS) ve polikarbonat'ın (PC) makroskobik yorulma çatlak ilerleme hızlarının (da/dN) ve hasar oluştuktan sonra kırılma yüzeyinde gözlenen ince yorulma çizgileri arasındaki mesafenin mikroskobik ölçümünün gerilme şiddet faktörü ΔK 'ya göre çizimi [9]

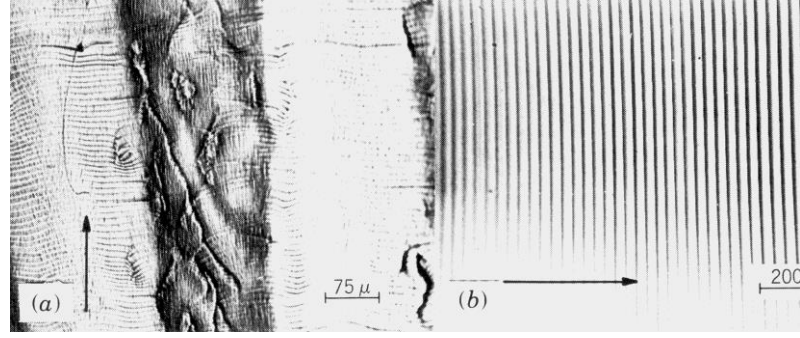
Naylon, PE ve PVDF'de de ilerleyen çatlak ucuna paralel yorulma çizgileri gözlenmiştir. Naylon 66 ve LDPE (düşük yoğunluklu polietilen)'de kırılmaya yakın ΔK seviyelerinde, yorulma çizgileri arasındaki mesafe ve makroskobik çatlak ilerleme hızı arasında birebir ilişki bulunmuştur [9].



Şekil 3.45 PSF ve PMMA'nın makroskopik yorulma çatlakları ilerleme hızlarını (da/dN) ve hasar oluşuktan sonra kırılma yüzeyinde gözlenen ince yorulma çizgileri arasındaki mesafenin mikroskopik ölçümünün gerilme şiddet faktörü ΔK 'ya göre çizimi [9]

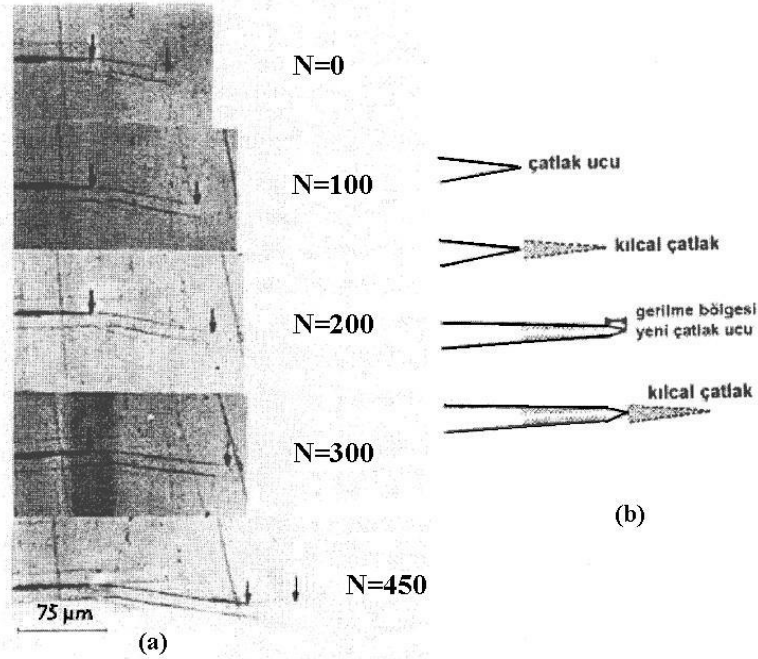
3.5.2 Süreksiz İlerleme Bandları

Belirli deney koşulları altında bazı plastiklerde yorulma çatlakları, çok sayıda yükleme tekrarı sonucu numune boyunca süreksiz artışlar göstererek ilerlemiştir. Bu gözlemler sonucunda bir ikinci tip yorulma çizgileri öncelikle PVC ve PC'de belirlenmiştir. Fakat bunlar tek bir yük tekrarı sonucu çatlak nelerlenesindeki artışa karşılık gelmektedir. Bu bandlar, birkaç yüz yükleme tekrarıdan sonra çatlak ilerlenesinde meydana gelen artışı yansıtmaktadır. Örneğin PVC'de süreksiz ilerleme bandları yüz yükleme tekrarıdan sonra yorulma çatlaklarının ilerlenesine karşılık gelmektedir. Şekil 3.46'da amorf plastiklerin kırılma yüzeyinde görülen yorulma çizgileri ve süreksiz yorulma çatlakları ilerleme bandları gösterilmektedir.



Şekil 3.46 Amorf plastiklerde yorulma kırılması yüzey işaretleri a) İnce yorulma çizgileri (striations) b) süreksiz ilerleme bantları Oklar çatlak ilerleme yönünü göstermektedir [8].

Kırılma yüzeyinde süreksiz ilerleme bantlarının gözlenmesi, çatlak ucunda crazing deformasyonu mekanizmasıyla çatlak ilerlediğini yansıtmaktadır. Çatlak ucundaki craze bölgesinin sürekli olarak tekrarlı yüklemeye büyüyüğü belirlenmiştir. Belirli bir yük tekrarıdan sonra çatlak birdenbire bütün craze boyunca bu bölgenin sonuna kadar ilerler. Çatlak ucu 300 yük tekrarıdan daha fazlasına kadar sabit kalır. Çatlak ucunda sürekli craze büyümesi ve süreksiz çatlak ilerlemesini içeren mekanizma Şekil 3.47'deki gibidir.



Şekil 3.47 PVC'de çatlak ucunda süreksiz çatlak ilerlemesi prosesi [9]

4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Amorf ve kristalin yapıdaki plastiklerin genel anlamda yorulma dirençlerini kıyasladığımızda, amorf plastiklerin yorulma direncinin kristalin plastiklerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kısmi kristalin plastiklerin yorulma direnci kendi içinde kristalinite derecesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle yorulma dirençlerinin kıyaslanması da amorf ve kristalin yapı esas olarak alınmıştır. Yorulma hasarının çekirdeklenme ve çatlak ilerlemesi safhalarını ayrı ayrı incelediğimizde, amorf plastiklerde çekirdeklenmenin kristalin yapıdaki plastiklerden daha kolay ve çatlak ilerlemesinin daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

Plastiklerin yorulma hasarında yüklenme frekansı veya deformasyon hızı büyük bir öneme sahiptir. Düşük frekanslarda yorulma hasarı, çatlağın bir yüzey pürüzlülüğü veya iç yapıdaki bir kusurdan çekirdeklenerek ilerlemesi şeklinde gerçekleşmektedir. Öncelikle yorulma hasarının çekirdeklenme safhasının incelenebilmesi için çentiksiz amorf ve kristalin plastiklere yorulma deneyi uygulandığında düşük frekanslarda, yapıda histeretik bir ısınma meydana gelmesinin katı halde amorf plastiklerde çekirdeklenmenin daha önce başladığı tespit edilmiştir. Bunun en önemli sebebi, amorf plastiklerde katı halde çekme gerilmelerinin etkisi altında craze yapısının oluşmasıdır. Craze yapısı mikroböşlukler ve bu boşluklerin arasında malzeme sürekliliğinin devam ettiği çekme yönünde uzamış molekül zincirlerinden oluşan fibrillerden meydana gelmektedir. Kılcal çatlak olarak adlandırılan craze yapısı bir çatlak değildir fakat amorf plastiklerde çekirdeklenme craze yapısında kristalin plastiklerden daha hızlı bir şekilde meydana gelmektedir [9].

Çentiksiz kristalin plastiklerde çekirdeklenme kristal düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması yoluyla meydana gelmektedir. Kristalin plastikler, katı halde karmaşık bir mekanizma ile deforme olurlar. Önce kristalin bölgeler deforme olur ve bu esnada yapılarındaki enerjiyi dışarı yayarlar ve ardından kristalin bölgeler yeniden organize olurlar ve oldukça güçlü bir kristalin yapıyı tekrar oluştururlar. Bu deformasyon mekanizmasında önce lamellerden oluşan kristal düzlemleri daha küçük kristal blokları haline parçalanır. Daha sonra bu küçük kristal blokları kendileri uzun

mikro fibriller oluşturarak uygulanan çekme gerilmesi yönünde birbirlerine bağlı olarak dizilirler. Bu mikrofibrilli yapının deformasyonunda, herbir mikrofibrilin yüksek dayanım nedeniyle kristal bloklarından oluşan mikrofibrillerin birbirleri üzerinde kaymaları oldukça zordur [8]. Bu nedenle kristalin plastiklerde çekirdeklenme amorf plastiklerden daha zordur.

Kısmi kristalin plastiklerde başlangıçta tüm Şekil değiştirme ler amorf kısmında meydana gelir ve kristalin kısmında hiçbir hareket görülmez. Daha sonra uygulanan gerilmelerin büyümesi ile kristalin kısmında kaymalar başlamakta, amorf bölge ler bu kaymalara izin vermede ve kristalin yapıda gözlenen deformasyon mekanizması meydana gelmektedir.

Yüksek frekanslarda çentiksiz amorf ve kristalin plastiklere zamanla değişen gerilmeler uygulandığında plastiklerin düşük ısı l iletkenliği nedeniyle malzemenin yapısında birçok noktada histeretik bir ısınmanın meydana gelmesi yle büyük ölçüde bir sıcaklık artışı görülür [9]. Numunede gerilme yığılmaları içeren bir yüzey pürüzlülüğü veya iç yapıdaki herhangi bir kusur, uygulanan zamanla değişen gerilmelerden daha fazla etkilenir. Bu noktada daha fazla bir histeretik ısınmanın oluşmasıyla yumuşama meydana gelmede ve çekirdeklenme bu noktada gerçekleşmektedir. Malzemenin yapısında birçok noktada yerel ısınma meydana geldiği için ısınmanın kümlatif bir etkisi söz konusudur ve malzeme küçük tekrar sayılarında hasara uğramaktadır. Amorf plastiklerin yapısında histeretik ısınma dolayısıyla yumuşama, kristalin plastiklerden daha önce meydana gelmede ve daha önce ısı l hasar oluşmaktadır. Bunun sebebi amorf plastikler cam geçiş sıcaklığında viskoz hale ve ergime sıcaklığının (T_m) üzerinde sıvı hale geçerken, kristalin plastikler çok daha yüksek bir sıcaklıkta ergime sıcaklıklarında sıvı hale geçmektedir. Amorf plastiklerde cam geçiş sıcaklığının (T_g) üzerinde zincirlerin hareketi başlar ve malzeme viskoz (yumuşak) bir hal almaktadır. Kristalin plastikler ise ergime sıcaklığına kadar katı halde bulunmakta ancak ısınmadan dolayı malzemenin yapısında meydana gelen sıcaklık artışı ergime sıcaklığına ulaştığında sıvı hale geçmektedir [5].

Diğer bir etken, kristalin plastiklerin düzenli yapısı, amorf plastiklerle kıyaslandığında daha yüksek bir ısı l iletkenliğe sahiptir [3]. Bu nedenle kristalin plastiklerde histeretik ısınmanın meydana gelmesi yle ısı l hasarın oluşması amorf

plastiklerden çok daha zordur. Kısmi kristalin plastikler kristalinite derecesi ne bağlı olarak, amorf veya kristalin yapının davranışlarını gösterirler.

Yorulma hasarının çatlakilerleme safhasının ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi için çentikli amorf ve kristalin plastiklere düşük ve yüksek frekanslarda yapılan yorulma deneylerinde, çatlakilerlemesinin farklı davranışları belirlenmiştir. Öncelikle çentikli numunelere düşük frekanslarda yapılan deneylerde amorf plastiklerde çatlakilerlemesinin kristalin plastiklerden çok daha hızlı olduğu belirlenmiştir. Bunun başlıca sebebi çatlak ucunda zamanla değişen yüklerin etkisi altında crazing olarak adlandırılan bir deformasyon mekanizması ile çatlağın ilerlemesidir. Daha öncede bahsedildiği gibi craze yapısı, mikroböşlukler ve bu boşluklerin arasında çekme yönünde uzamış molekül zincirlerinden oluşmaktadır. Malzemeye zamanla değişen yükler uygulandığında yapıdaki fibriller kırılmaya başlar ve fibrillerin kırılmasıyla mikroböşlukler birleşerek çatlak ilerler. Çatlağın bu mekanizma ile ilerlemesini irdelersek, malzemeye çok sayıda tekrarlı yük uygulanmasından sonra çatlak ucu bir kerede craze bölgesi içerisinde ilerleyerek craze yapısının uç kısmına ulaşmaktadır. Tekrarlı yüklemenin devam etmesiyle çatlak ucunda yeni bir craze bölgesi oluşur ve yine birçok tekrar sayısından sonra çatlak bir anda bu craze bölgesi içinde ilerleyerek bu bölgenin sonuna kadar ulaşmaktadır. Tekrarlı yük uygulandığı sürece çatlak bu proses ile ilerlemektedir [9].

Çentikli kristalin plastiklerde düşük frekanslarda yapılan yorulma deneylerinde, çatlak kristal düzlemlerinin birbiri üzerinde kaymasıyla ilerlemektedir ve bu kayma deformasyonu kristalin yapının yüksek dayanım nedeniyle büyük kuvvetler gerektirmektedir. Bu nedenle çatlak ilerleme hızı yavaştır.

Çentikli numunelere yüksek frekanslarda zamanla değişen yüklerin uygulanması sonucu amorf ve kristalin plastiklerin her ikisinde de çatlak ucunda gerilme yığılmalarından dolayı çok yüksek bir ısı üretimi oluşur ve bu bölgede yerel bir ısınma meydana gelir. Başka bir deyişle oluşan ısı nınta nı m çatlak ucu tarafından absorbe edilir. Görüldüğü gibi çatlak ilerleme safhasında çekirdeklenme safhasında olduğu gibi histeretik ısınmanın kümülatif bir etkisi söz konusu değildir. Çatlak ucundan dışarıya ısı iletimini elbette mevcuttur fakat plastiklerin ısı iletkenliği düşük olduğu için çatlak ucunda önemli derecede ısınma meydana gelmektedir. Bu durumda çatlak ucu kütleşerek çatlağın eğrilik yarıçapı artmaktadır. Çatlak ucunun eğrilik yarıçapında meydana gelen artış, efektif gerilme şiddet faktörü aralığı (ΔK) değerini

düşürür. Böylece çatlakın uç bölgesi, malzemeye uygulanan tekrarlı gerilmelerden daha az etkilenmekte ve çatlak ucundaki efektif ΔK ın düşmesi ile yorulma çatlak ilerleme hızı düşmektedir [11].

Örneğin çentikli polivinilklorür (PVC), polimetilmetakrilat (PMMA) ve polikarbonat (PC)'nin yüksek frekanslarda yorulma deneylerinde çatlak ucunun sıcaklığında 20 K'nin üzerinde maksimum bir sıcaklık artışı gözlenmiştir. Ayrıca çentikli PS (Polistiren), PMMA (Polimetilmetakrilat), PVC (polivinilklorür) ve PPO (polifenilenoksit) numuneleri ile (0,1-100 Hz) frekans aralığında yapılan deneylerde, frekansın artmasıyla çatlak ilerleme hızının azaldığı gözlenmiştir [9].

Plastiklerin yüksek frekanslarda yükleme koşulları altındaki yorulma davranışında malzemede meydana gelen genel ısınma (büyük ölçekte ısınma) çekirdeklenme evresinde yorulma ömrünü kısaltan bir faktör olarak belirlenmiştir. Çatlak ilerleme evresinde ise yerel ısınma, çatlak ucunu kütleştirerek çatlak ilerlemesinin yavaşlamasına sebep olduğu için yorulma ömrünü artıran bir faktör olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın devamında, farklı kristalinite derecesine sahip plastiklere yorulma deneyleri uygulanarak elde edilen sonuçlar ile teoride varılan sonuçlar kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akyüz, Ö F,** 1999. Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş, Pagay, İstanbul
- [2] **Akkurt, S,** 1991. Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [3] **Arthur, W B, Barry H and Batchelor, J,** 1999. Physics of Plastics, Processing Properties and Materials Engineering. Hanser Publishers Munich Vienna New York Barcelona
- [4] **Brick, R M, Pense, A W and Gordon, R B,** 1988. Engineered Materials Handbook, 2. Engineering Plastics, reference book- ASM International
- [5] **Callister, W D,** 2000. Materials Science and Engineering Fifth edition, Wiley, New York
- [6] **Ferry, J W,** 1980. Viscoelastic Properties of Polymers, New York
- [7] **Hermanson, N J, Crittenden, P. A, Novak, L R and Woods, R A,** 1998. *Medical Plastics*, Ed, R C Portnoy, PDL, Norwich, NY
- [8] **Hertzberg, R W,** 1996. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, Fourth Edition
- [9] **Hertzberg, R W, Manson, J. A,** 1980. Fatigue of Engineering Plastics, Academic Press New York
- [10] **Hertzberg, R W, Skibo, MD and Manson, J.A** 1978. Fatigue crack propagation in polyacetal, *Journal of Materials Science*, **13**, 1038-1044
- [11] **Hertzberg, R W, Manson, John A,** 1985. Polymer Encyclopedia, Vol 7, New York (NY)
- [12] **Hristov, H A, Yee, Albert F, Gdley, David W and Li, Xiaowei,** 1995. Influence of cyclic fatigue on the mechanical properties of amorphous polycarbonate, *Polymer* **36** No: 4, 759-765
- [13] **Jones, D S,** 1999. Dynamic mechanical analysis of polymeric systems of pharmaceutical and biomedical significance, *International Journal of Pharmaceutics*, **179**, 167-178
- [14] **Kilwon C, Mn S. L and Chan E. P,** 1998. The effect of Freon vapour on fracture behaviour of styrene-acrylonitrile copolymer- I. Gaze initiation behaviour, *Polymer*, **36**, No. 6-7, 1357-1361
- [15] **Krishna machari, S. L,** 1993. Applied Stress Analysis of Plastics: a mechanical engineering approach, New York
- [16] **Myers, M A, Chawla, K K,** 1999. Mechanical Behaviour of Materials, John Wiley & Sons, Inc., New York

- [17] **Miller, E**, 1996. Introduction to Plastics and Composites: mechanical properties and engineering applications, M Dekker, New York
- [18] **Met, A, Aclan, H, (Case Western)**, 1988. Fatigue Failure, Engineered Materials Handbook, 2, Engineering Plastics, reference book- ASM International
- [19] **Rande, E, Diaz- Calleja, R, Prolongo G. M, Masegosa, R M, Salom C,** 2000. Polymer Viscoelasticity, Marcel Dekker Inc, New York
- [20] **Scheirs, J**, 2000. Compositional and Failure Analysis of Polymers : a practical approach, Wiley, Chichester
- [21] **Sezer, M**, 1999. Süreksiz Cam Elyaf Takviyeli Polipropilenin Yorulma Davranışı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [22] **Swanson, R S**, 1965. Plastic Technology: basic materials and process, Bloomington: McKnight & McKnight
- [23] **Wiles, J. L S**, 1980. Surface crazing in PVC and other polymers, *Polymer*, **21**, 684

EK A

Tablo A1 Bazı Elastik Malzemelerin Kimyasal Yapısı, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

	T _g (°C)	T _m (°C)	Yoğunluk (kg/ m ³)	Çekme Dayanım (MPa)	Çekme de Kopma Uzaması (%)	Isıl İletkenlik (W/mK)
Poli propilen (PP) $\left[\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{CH}_2 \end{array} \right]_n$	-10	176	900-910	25-40	100-1000	0.24
Polistiren (PS) $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_n$	100	-	1040-1060	45-65	%1-3	0.12
Poli etilen (PE) $\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	-120	115-138	914-960	8-35	100-1200	0.25-0.6
Politetraflorütilen (PTFE) $\left[-\text{CF}_2-\text{CF}_2- \right]_n$	-120	327	2100-2200	20-35	350-550	0.19
Poli metil metakrilat (PMMA) $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\ \\ \text{C}-\text{O}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_n$	105	-	1170-1200	-	-	-
Poli vinil klorür (PVC) $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{Cl} \end{array} \right]_n$	87	212	1350-1450	30-70	10-300	0.16
Akril nitril-bütadien- stiren (ABS)	71-112	-	1020-1060	30-60	15-30	0.13
Stiren-akril nitril (SAN)	-	-	1060-1080	65-85	2-5	0.13
Poli amid (Naylon) 66	57	265	1130-1150	52.4	150	0.24
Polisülfon (PSF)	-	-	1240	70-100	25-80	0.25
Polikarbonat (PC)	-	149	1100-1250	56-66	100	0.14

ÖZGEÇMİŞ

Esra Özyurt, 1978 yılında İstanbul’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 1994 yılında girdiği İ. T. Ü. Kimya- Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden 1999 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İmalat Programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.