

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMERİK MALZEMELERİN VİSKOELASTİK-
VİSKOPLASTİK DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ
ve MODELLENMESİ**

Makine Yük. Müh. Necmi DÜŞÜNCELİ

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 29/05/2007

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özgen Ü. ÇOLAK (Y.T.Ü.)

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. C. Erdem İMRAK (İ.T.Ü.)
:Yrd. Doç. Dr. Şebnem ÖZÜPEK (B.Ü.)
:Prof. Dr. Uğur GÜVEN (Y.T.Ü.)
: Doç. Dr. Haydar LİVATYALI (İ.T.Ü.)**

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. POLİMERİK MALZEMELER ve DEFORMASYON MEKANİZMALARI	5
2.1 Polimerik Malzemelerin Deformasyon Morfolojisi	5
2.1.1 Polimer Kristalleşmesi	9
2.2 Yarıkristal Polimerlerin Deformasyonu	11
2.2.1 Elastik Deformasyon Mekanizması	12
2.2.2 Viskoplastik Deformasyon Mekanizması	14
2.3 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)	15
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	19
3.1 Genel Esaslar	19
3.2 Literatürde Yapılmış Olan Deneysel Çalışmalar	22
3.3 Deney Prosedürü	26
3.3.1 Ekstrüde Numune ile Yüksek Gerinim Seviyesinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları	28
3.3.2 İmalat Yöntemlerinin Mekanik Özellikler Üzerinde Etkisi	29
3.3.3 Ekstrüde Numune ve Basınçta Kalıplanmış Numuneler ile Yapılan Deneyler	31
3.3.3.1 Ekstrüde ve Basınçta Kalıplanmış Numuneler ile Yapılan Deneylerin Sonuçları	32
4. MODELLEME ÇALIŞMALARI	53
4.1 Literatürde Yapılmış Olan Modelleme Çalışmaları	53
4.2 Polimerik Malzeme Davranışını Modelleme Yaklaşımları	57
4.2.1 Lineer Viskoelastisite	57
4.2.2 Lineer Olmayan Viskoelastisite	59
4.2.2.1 Moleküler Yaklaşım	59
4.2.2.2 Katlı İntegral Gösterimi	60
4.2.2.3 Tek Katlı İntegral Gösterimi	60
4.2.2.4 Mühendislik Yaklaşımı	62

4.2.3	Viskoplastik Teoriler	62
4.3	“Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (VBO Model)	63
4.3.1	YYPE’nin Mekanik Davranışının VBO Model ile Modellenmesi.....	68
4.4	YYPE’nin Mekanik Davranışının FVBO ve Boyce Modelleri ile Modellenmesi	77
4.4.1	Boyce Modeli	77
4.4.2	Sonlu Deformasyon Seviyesinde “Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (FVBO).....	83
4.4.3	FVBO ve Boyce Modelleri Simülasyon Sonuçları.....	85
5.	KRİSTALLİK ORANININ MEKANİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN VBO MODELİ İLE MODELLENMESİ	91
5.1	Kristallik Oranını İçeren Modifiye VBO Modeli	93
5.2	Kristallik Oranının Mekanik Davranış Üzerindeki Etkisinin Modellenmesine Yönelik Modifiye VBO Simülasyon Sonuçları.....	97
6.	VBO MODELİNİN MALZEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ.....	105
6.1	Malzeme Modellerinin Parametre Tahmini.....	105
6.2	Optimizasyon ve Genetik Algoritma (GA)	108
6.2.1	Ana Hatlarıyla Genetik Algoritma.....	109
6.3	MATLAB® Genetik Algoritma ve Doğrudan Arama Aracı.....	111
6.4	VBO Model Parametrelerinin GA Uygulaması ile Bulunması	112
7.	SONUÇLAR.....	117
8.	ÖNERİLER ve GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR	124
	KAYNAKLAR.....	126
	EKLER	134
	Ek 1 Deney cihazı görüntüleri	135
	Ek 2 Genetik Algoritma MATLAB dosyaları	137
	ÖZGEÇMİŞ.....	139

SİMGE LİSTESİ

$\mathbf{A}$	İzotropik gerilme
$\mathbf{C}^e$	Elastiklik tensörü
D	“Drag” gerilmesi
$\tilde{\mathbf{D}}^F$	Moleküler gevşeme hızı
$\tilde{\mathbf{D}}^P$	Moleküler plastik hız
$\mathbf{d}$	Deformasyon hız tensörü
$\mathbf{d}^e$	Elastik deformasyon hız tensörü
$\mathbf{d}^{in}$	Elastik olmayan deformasyon hız tensörü
$E(t - \tau)$	Gevşeme modülü
E	Elastiklik modülü
$\bar{E}_t$	Ortalama tanjant modülü
E_t	Tanjant modülü
$\dot{\mathbf{e}}$	Deviatorik gerinim hız tensörü
$\dot{\mathbf{e}}^{el}$	Deviatorik elastik gerinim hız tensörü
$\mathbf{e}^{in}$	Deviatorik elastik olmayan gerinim hız tensörü
$F[\]$	Akış fonksiyonu
$\mathbf{F}$	Deformasyon gradyan tensörü
$\mathbf{F}^e$	Elastik deformasyon gradyan tensorü
$\mathbf{F}^P$	Plastik deformasyon gradyan tensorü
$\mathbf{F}^F$	Gevşeme deformasyon gradyan tensörü
$\mathbf{F}^N$	Ağ deformasyon gradyan tensörü
$\mathbf{G}$	Denge gerilmesi tensörü
$\mathbf{g}$	Deviatorik denge gerilmesi tensörü
$\dot{\mathbf{g}}$	Deviatorik denge gerilmesi hız tensörü
$\overset{\circ}{\mathbf{g}}$	Objektif denge gerilmesi hızı
G	Elastik kayma modülü
ΔG	Akışa karşı enerji engeli
G_n	Elastik komplians
ΔH	Aktivasyon enerjisi
$J(t - \tau)$	Sünme komplians fonksiyonu
$\mathbf{K}$	Kinematik gerilme tensörü
$\mathbf{k}$	Deviatorik kinematik gerilme tensörü
$\dot{\mathbf{k}}$	Deviatorik kinematik gerilme hız tensörü
$\overset{\circ}{\mathbf{k}}$	Objektif kinematik gerilme hızı
k	Boltzman sabiti
$\mathbf{L}$	Hız gradyan tensörü
$\mathbf{L}^e$	Elastik hız gradyan tensörü
$\tilde{\mathbf{L}}^P$	Plastik hız gradyan tensörü
L	Langevin Fonksiyon
L^{-1}	Ters Langevin Fonksiyon
$\mathbf{N}$	Normalize edilmiş deviatorik gerilme
N	Düzenlemeler arasındaki “rigid links” sayısı

n	Zincir yoğunluğu
$\mathbf{o}$	“Overstress”
Q	Isı
R	Üniversal gaz sabiti
$\mathbf{R}^e$	Elastik rotasyon tensörü
$\mathbf{R}^p$	Plastik rotasyon tensörü.
$\mathbf{s}$	Deviatorik Cauchy gerilme tensörü (VBO modeli)
$\dot{\mathbf{s}}$	Deviatorik Cauchy gerilme hız tensörü
o	
$\mathbf{s}$	Objektif Cauchy gerilme hız tensörü
s	Kesme direnci
$\mathbf{T}$	Deviatorik Cauchy gerilme tensörü (Boyce modeli)
$\mathbf{T}'$	Cauchy gerilme tensörü
T	Sıcaklık
V	Aktivasyon hacmi
$\mathbf{V}^p$	Plastik sol uzama
$\tilde{\mathbf{W}}^p$	Plastik dönme tensörü
η	Viskozite katsayısı
$\dot{\epsilon}^{el}$	Elastik gerinim hızı
$\dot{\epsilon}^{in}$	Elastik olmayan gerinim hızı
ϕ	Kristallik oranı
Γ	“Overstress” invaryantı
$\dot{\gamma}^F$	Gevşeme hızı
$\dot{\gamma}_{OA}$	Ön üstel faktör
$\dot{\gamma}^p$	Plastik gerinim hızı
λ	Uzama (Genişleme oranı)
$\bar{\lambda}_N$	Zincir uzaması
ν	Poisson oranı
$\mathbf{\Omega}$	Simetrik dönme tensor
ψ	Geçiş fonksiyonu
σ	Cauchy gerilme tensörü
$\sigma(t)$	Zamana bağlı gerilme
τ_n	Gecikme zamanı
θ	Mutlak sıcaklık

KISALTMA LİSTESİ

AYPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
FVBO	Finite Viscoplasticity Theory Based on Overstress
GA	Genetik Algoritma
IPP	İzotatik Polipropilen
ISO	International Standards Organisation
PE	Polietilen
PEEK	Polieterketon
PEI	Polietermid
PET	Polietilentereftalat
PMMA	Polimetilmetakrilat (Akrilik)
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafloroetilen (teflon)
PVC	Polivinilinklorür
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
VBO	Viscoplasticity Theory Based on Overstress

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 a) Monomer molekülünün gösterimi b) Makromolekül (William ve Callister 2003).	5
Şekil 2.2 Polimerlerin ağ (Spagetti) yapısı	6
Şekil 2.3 Metan bağı (William ve Callister 2003)	6
Şekil 2.4 Makromoleküler arasındaki kuvvetler	7
Şekil 2.5 Zincir düzenlemesi (William ve Callister 2003)	7
Şekil 2.6 Molekül zincirlerinin yapıları. a) Lineer b) Dallı c) Çapraz bağlı d) Ağ (William ve Callister 2003)	8
Şekil 2.7 Literatürdeki kristal modelleri; a) Herbir zincirin bir çok amorf ve kristal bölgelerden geçtiği model, b) katlanmış zincir (Chain folded) modeli, c)“Fringed-Micelle” model (Corradini vd. 2006)	9
Şekil 2.8 Fringed-Micelle modeli (William ve Callister 2003)	10
Şekil 2.9 Katlanmış zincir (Chain-folded) modeli (William ve Callister 2003)	10
Şekil 2.10 PE tek kristalinin elektromikroskop görüntüsü (William ve Callister 2003)	11
Şekil 2.11 Küresel kristal (Spherulite)’in şematik gösterimi (William ve Callister 2003)	12
Şekil 2.12 Yarıkristal polimerlerin kristalizasyondan önce ve sonra moleküler yapısı (Seguela 2005).	13
Şekil 2.13 Viskoplastik deformasyon mekanizması (William ve Callister 2003)	14
Şekil 2.14 YYPE’nin akma noktalarındaki deformasyon mekanizmaları (Bernard 2004)	17
Şekil 2.15 YYPE’nin hasar deformasyon mekanizmaları (Hong 2006)	18
Şekil 3.1 Polimerik malzemelerin tipik gerilme-gerinim eğrisi.	19
Şekil 3.2 Polimerlerde zincir kayması	20
Şekil 3.3 Malzeme türlerine göre gerilme-gerinim eğrileri (Shah 1984)	22
Şekil 3.4 Boru parçasından deney numunesinin çıkarılması	27
Şekil 3.5 Deney numunesi boyutları ISO 6259-3 tip 2	27
Şekil 3.6 YYPE’nin 246, 24.6 ve 2.46 mm/dk gerinim hızında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrisi karşılaştırması.	28
Şekil 3.7 YYPE’nin 246, 24.6 ve 2.46 mm/dk gerinim hızlarında geniş uzama aralığında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması	29
Şekil 3.8 Lineer olmayan malzeme davranışı tipleri. a) Lineer olmayan elastik b) Plastik c) Viskoelastik d) Viskoplastik (Khan 2003)	34
Şekil 3.9 Ekstrüde YYPE’nin 1.e-3 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde tek eksenli çekme (yükleme ve boşaltma) deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi ..	35
Şekil 3.10 Ekstrüde YYPE’nin 1.e-4 1/s gerinim hızında tek eksenli %5 gerinim seviyesinde yüklem-boşaltma deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi	35
Şekil 3.11 Basınçta kalıplanmış YYPE’nin 1.e-3 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde tek eksenli çekme (yükleme ve boşaltma) deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi	36
Şekil 3.12 Basınçta kalıplanmış YYPE’nin 1.e-4 1/s gerinim hızında tek eksenli %5 gerinim seviyesinde yüklem-boşaltma deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi.	36
Şekil 3.13 a) YYPE’nin ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile tek eksenli çekme (yüklem ve boşaltma) gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. a) 1.e-3 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde. b) 1.e-4 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde. c) 1.e-5 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde. d) 1.e-4 1/s gerinim hızında %5 gerinim seviyesinde	37
Şekil 3.14 Ekstrüde YYPE’nin 1.e-4 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinden boşaltma sonrası sıfır gerilme seviyesinde toparlanma deneyleri ve ortalama gerinim-zaman eğrisi	39
Şekil 3.15 Ekstrüde YYPE’nin boşaltma sonrası sıfır gerilme seviyesinde toparlanma deneyleri gerinimdeki azalma-zaman eğrileri karşılaştırması. a) 1.e-3 ve 1.e-4	

1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde, b) 1.e-4 1/s gerinim hızında %5, %15 gerinim seviyesinde	40
Şekil 3.16 a) Ekstrüde YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 8 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme ve boşaltma deneyleri. b) Ortalama gerilme-gerinim eğrisi.....	42
Şekil 3.17 a) Ekstrüde YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında 8-12-18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri. a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması.....	43
Şekil 3.18 a. Basınçta kalıplanmış YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında 8-12-18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b. 8-12-18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması.....	43
Şekil 3.19 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 8 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması	44
Şekil 3.20 a) YYPE'nin Ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 12 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması	44
Şekil 3.21 a) YYPE'nin Ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması	45
Şekil 3.22 Ekstrüde YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %10, %25 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi	47
Şekil 3.23 Ekstrüde YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %10 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri ve ortalama gerilme-zaman eğrisi.....	48
Şekil 3.24 Ekstrüde YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %25 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri ve ortalama gerilme-zaman eğrisi.....	48
Şekil 3.25 Ekstrüde YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %2, %5, %10 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması.	49
Şekil 3.26 Basınçta kalıplanmış YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %2, %5, %10 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması	49
Şekil 3.27 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile 1.e-4 1/s gerinim hızında tek eksenli yükleme sonrasında %2, %17 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri. b) %2 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması. c) %17 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması	50
Şekil 3.28 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %5, %20 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) %5 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması. c) %20 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması	51
Şekil 3.29 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile 1.e-4 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %10, %25 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe	

gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) %10 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması..	52
Şekil 4.1 Temel modeller; a) Maxwell modeli, b) Voigt modeli, c) Standart Lineer Katı model	58
Şekil 4.2 Modifiye edilmiş Standart Lineer Katı Model	63
Şekil 4.3 “Overstress” modelin durum değişkenlerinin gelişimi	68
Şekil 4.4 YYPE’nin tek eksenli basma yüklemesi ve boşaltması gerilme-gerinim eğrileri. a) 1.e-1 1/s gerinim hızı. b) =1.e-2 1/s gerinim hızı.	69
Şekil 4.5 YYPE’nin tek eksenli basma 1.e-3 gerinim hızında modifiye VBO ile modellemesi a) C=1 olması durumu b) C’nin değişken olması durumu c) Modifiye VBO modelindeki “C” parametresinin değişken olması durumunda gerinim hızına bağlı olarak değişimi.	71
Şekil 4.6 YYPE’nin tek eksenli basma yüklemesi ve boşaltması gerilme-gerinim eğrileri. a) 1.e-3 1/s gerinim hızı. B) 1.e-4 1/s gerinim hızı. C) 1.e-5 1/s gerinim hızı.	72
Şekil 4.7 YYPE’nin tek eksenli gerilme hızı altında basma yüklemesi ve boşaltması gerilme-gerinim eğrisi. a) 26 N/s gerilme hızı. b) 3 N/s gerilme hızı. c). YYPE’nin 1.e-4 1/s gerinim hızında tek eksenli çevrimsel yükleme ve boşaltma gerilme-gerinim eğrisi	73
Şekil 4.8 a) Katlamalı sünme deneyinin VBO ile modelleme sonuçları. a-b: 10 N/s gerilme hızı; b-c: 980 s sünme; c-d: 1 N/s gerilme hızı; d-e: 1000 s. sünme; e-f: 100 N/s yükleme; ve f-g: 240 s. sünme. b) Üç gerilme seviyesinde sünme deneyi modelleme sonuçları. c) “C=1” olması durumunda VBO modelin cevabı.....	74
Şekil 4.9 a) Katlamalı gevşeme deneyinin VBO ile modelleme sonuçları. a-b: 1.e-4 1/s gerinim hızı; b-c: 450 s gevşeme; c-d: 1.e-2 1/s gerinim hızı; d-e: 1.e-3 /s gerinim hızı; ve e-f: 125 s. gevşeme. b) İki gevşeme deneyi modelleme sonuçları. c) “C=1” olması durumunda VBO modelin cevabı.	76
Şekil 4.10 PET’in temel gerilme-gerinim davranışının gelişimi (Boyce vd. 2000).....	78
Şekil 4.11 a) Boyce Modelinin genel gösterimi. b) Molekülerarası direncin elastik-viskoplastik davranışı ile ağ direncinin zamana ve sıcaklığa bağımlılığını gösteren model. c) Ağ direncinin ağ oryantasyon prosesi ve moleküler gevşeme prosesini içerecek şekilde gösterimi.	79
Şekil 4.12 a) YYPE’nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında yükleme-boşaltma deney sonuçları ve FVBO model simülasyonları. b) 1. e-4 /s.gerinim hızında 600 s. süreyle 8 MPa., 12 MPa. ve 18 MPa.gerilme seviyesinde sünme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri. c) 8 MPa., 12 MPa. ve 18 MPa.gerilme seviyesinde sünme deneyleri ve FVBO model tahmin sonuçları.....	87
Şekil 4.13 a)YYPE’ nin 1. e-4 /s.gerinim hızında 600 s. süreyle %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyesinde gevşeme deneyi gerilme-gerinim eğrileri. c) 1.e-4 1/s gerinim hızında %2, %5 ve %10 gerinim seviyesinde gevşeme deneyi gerilme-zaman eğrileri. c) YYPE’nin 1. e-4 1/s.gerinim hızında 600 s. süreyle %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyesinde gevşeme modülü- zaman eğrileri ve FVBO model tahmin sonuçları.....	89
Şekil 4.14 a) YYPE’nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında yükleme-boşaltma deney sonuçları ve Boyce vd.(2000) model simülasyonları. b) YYPE’ nin 1. e-4 /s.gerinim hızında 600 s. süreyle %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyesinde gevşeme modülü- zaman eğrileri ve Boyce vd. (2000) model tahminleri sonuçları.....	90
Şekil 5.1 Seri bağlı modifiye SLS	96
Şekil 5.2 Paralel bağlı modifiye SLS	97
Şekil 5.3 Seri bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelin kristallik oranına bağlı olarak yükleme-boşaltma simülasyonları gerilme-gerinim eğrileri.....	98
Şekil 5.4 Seri bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak	

sünme simülasyonları, gerinimdeki değişim-zaman eğrileri.	99
Şekil 5.5 Seri bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak gevşeme simülasyonları, gerilmedeki azalma-zaman grafiği.	100
Şekil 5.6 Paralel bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak yükleme-boşaltma simülasyonları, gerilme-gerinim eğrileri.	101
Şekil 5.7 Paralel bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak sünme simülasyonları, gerinimdeki değişim-zaman eğrileri.	102
Şekil 5.8 Paralel bağlı durumda modifiye VBO modelinin kristallik oranına bağlı olarak gevşeme simülasyonları, gerilmedeki azalma-zaman grafiği.	103
Şekil 5.9 Paralel bağlı durumda modifiye VBO modelinin kristallik oranına bağlı olarak gevşeme simülasyonları, gevşeme modülü-zaman grafiği.	103
Şekil 6.1 Genel genetik algoritma akış diyagramı.	111
Şekil 6.2 VBO model GA uygulaması program akış diyagramı.	112
Şekil 6.3 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri ile simülasyon sonuçlarının YYPE'nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında yükleme-boşaltma gerçek gerilme-gerçek gerinim deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması.	113
Şekil 6.4 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri kullanılarak sünme simülasyon sonuçları ile sünme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması. Gerilme seviyeleri 8, 12 ve 18 MPa, süre 600 saniye.	114
Şekil 6.5 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri kullanılarak gevşeme simülasyon sonuçları ile gevşeme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması. Gerinim seviyeleri %2, %4.8 ve %9.5, süre 600 saniye.	115
Şekil 6.6 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri kullanılarak gevşeme modülü simülasyon sonuçları ile gevşeme modülü deneysel sonuçlarının karşılaştırılması. Gerinim seviyeleri %2, %4.8 ve %9.5, süre 600 saniye.	116

ÇİZELGE LİSTESİ

Tablo 3.1 Polimerik malzeme mekanik özellikleri (Shah 1984)	21
Tablo 3.2 Ekstrüde numunenin büyük gerinim seviyesinde mukavemet değerleri.....	29
Table 3.3 Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numunelerin mukavemet değerleri	38
Table 3.4 Tüm gerinim hızlarında viskoelastik toparlanma miktarları	38
Table 3.5 Değişik gerilme seviyelerinde viskoelastik toparlanma miktarları.	38
Table 3.6 Ekstrüde YYPE'nin sıfır gerilme seviyesinde toparlanma oranları.	40
Tablo 3.7 Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numunelerle yapılan sünme deney sonuçları.....	45
Table 3.8 Gevşeme deneylerinde değişik gerinim seviyelerinde gerilmede azalış yüzdeleri ..	52
Tablo 4.1 Malzeme sabitleri	69
Table 4.2 FVBO model için malzeme sabitleri	85
Tablo 4.3 Boyce vd. (2000) modeli için malzeme sabitleri.....	85
Table 5.1 Kristal faz için malzeme sabitleri	97
Tablo 5.2 Amorf faz için malzeme sabitleri	98
Table 6.1 VBO model için GA ile belirlenen malzeme sabitleri.....	113

ÖNSÖZ

Polimerik malzeme mekaniği üzerine ortaya konan bu çalışmada, bir doktora tezi hazırlamış olmanın yanı sıra Türkçe kaynak eksikliği bulunan polimer yapısı, viskoelastisite, viskoplastisite konuları hakkında en azından temel kavramları tanıtarak, araştırmacıların ileriye dönük çalışmalarında bir fikir edinebilmeleri amacını gözönünde bulundurdum. Çalışmanın bu amaca da hizmet etmesi beni ziyadesiyle mutlu edecektir.

Bu çalışmanın ortaya konulmasında; “insanlara balık ikram etmek yerine balık tutmayı öğretmek” felsefesiyle bilgi, destek ve ilgisini büyük bir sabırla hiç bir zaman esirgemeyen Yıldız’ın yıldızı saygıdeğer Doç.Dr Özgen Ümit ÇOLAK hocama, tezin ilerlemesi süresince önerileri ile desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli tez izleme jürileri Doç.Dr. Erdem İMRAK ve Yrd. Doç. Dr. Şebnem ÖZÜPEK hocalarıma, tez savunma sınavıma katılımları ve önerileriyle onurlandıran Prof. Dr. Uğur GÜVEN ve Doç. Dr. Haydar LİVATYALI hocalarıma, deneysel çalışmanın başlangıcından sonuna kadar fabrikasının mevcut imkanları ile destek veren ülkemizin değerli sanayicisi FIRAT Kauçuk ve Plastik A.Ş. yönetim kurulu başkanı Dr. Nevzat DEMİR’e, pazarlama müdürü İsmail YILDIRIM’a ve kalite kontrol laboratuvarı çalışanlarına, basınçta kalıplanmış numunelerin hazırlanmasını sağlayan PETKİM Petrokimya Holding A.Ş. teknik servisler müdür yardımcısı Dr. Sevim OKUMUŞ’a, deney cihazında deneylerin gerçekleştirilmesine yardımcı olan TÜBİTAK UME Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı şefi Dr. Bülent AYDEMİR’e, Yıldız Teknik Üniveristesi’ndeki mesai arkadaşlarıma ve son olarak etrafın bütün ayaza kesmişliğine rağmen çok uzaklardaki bir mum alevinin sıcaklığında yüreğini ısıtmayı başaran kendime, özellikle kendime çok ama çok teşekkür ederim. Bütün bunların ötesinde, öyle ya da böyle, her halükarda ruhumda izler bırakan, bütün diğer insanlara selam olsun.

ÖZET

Polimerik malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasından dolayı, çok sayıda çalışma bu malzemelerin mekanik davranışının belirlenmesi ve modellenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) boru üretim endüstrisinin ana hammaddesini teşkil etmektedir. YYPE'nin mekanik davranışı üzerine çok sayıda deneysel çalışma ve modelleme çalışması olmasına rağmen imalat yöntemlerinin etkisini araştıran çalışma sayısı çok azdır.

Bu tez çalışması, YYPE'nin mekanik davranışını, belirlemek ve modellemek amacı ile deneysel ve modelleme olmak üzere iki temel kısımdan meydana gelmektedir. Deneysel çalışma kısmında, YYPE'nin imalat yöntemine bağlı mekanik davranışını incelemek üzere ekstrüde boru ve basınçta kalıplanmış levhadan elde edilen numuneler ile, üç farklı gerinim hızında çekme (yükleme ve boşaltma), elastik, viskoelastik ve viskoplastik davranış sınırlarına denk gelen gerilme (gerinim) seviyelerinde sünme (sürünme, creep) ve gevşeme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Modelleme kısmında, YYPE'nin tek eksenli monotonik yüklenme şartlarında yüklenme-boşaltma, çevrimsel yüklenme, katlamalı sünme ve gevşeme davranışları “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile modellenmiştir. Daha sonra, ekstrüde numune deney sonuçları sonlu deformasyon seviyesinde model davranışını incelemek üzere hem sonlu VBO (FVBO) hem de Boyce vd. (2000) modeli ile modellenmiştir. Her iki modelin simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından, FVBO modelin modelleme kabiliyetinin oldukça başarılı olduğu, Boyce vd. (2000) modelinin ise yetersiz noktalarının bulunduğu görülmüştür.

Modelleme çalışmasının ikinci kısmında, VBO model, kristallik oranına bağlı olarak değişen yarıkristal polimerik malzeme davranışını modellemek üzere modifiye edilmiştir. Bu modifikasyonda kompozit malzeme varsayımına dayanarak amorf ve kristal fazlar iki farklı malzeme gibi düşünülmüştür, VBO modeli paralel ve seri bağlanmış türde iki farklı analog modelle ifade edilmiştir. Bu iki tür modifiye VBO modeli kullanılarak değişik kristallik oranlarında yüklenme-boşaltma, sünme ve gevşeme simülasyonları yapılmıştır. Paralel bağlı durumda modifiye VBO kristallik oranına bağlı yüklenme-boşaltma, sünme ve gevşeme davranışlarını açıklamakta başarılı olmuştur. Çalışmanın son kısmında, VBO model içeriğindeki malzeme parametreleri Genetik Algoritma (GA) prensibine dayanan optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Bu optimizasyon yöntemi malzeme parametrelerinin daha sağlıklı, daha güvenilir ve daha hızlı belirlenmesini sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Polimerik malzeme, viskoelastisite, viskoplastisite, modelleme, çekme, sünme, gevşeme deneyleri.

ABSTRACT

Due to the increased use of polymeric materials, much research has focused on understanding their viscoelastic and viscoplastic behaviors and modeling their mechanical behavior under different loading conditions. High density polyethylene (HDPE) has been widely used in the piping industry as a raw material. Even though there are large numbers of experimental and analytical investigations on HDPE, a few of them have examined the effects of manufacturing techniques on the small and finite deformations.

This study is constituted over two main parts: experimental and modeling in order to understand the deformation mechanisms and mechanical behavior of HDPE. In the part of experimental study, the mechanical behaviors of HDPE associated with manufacture methods are investigated. The nonlinear mechanical behavior of HDPE is investigated using samples obtained from extruded HDPE pipe and compression molded sheet. Extruded and compression molded specimens are constituted the same raw materials. Extensive experimental work has been performed to characterize the nonlinear time dependent response of the material. The tensile loading-unloading behaviors with three different strain rates are investigated. In addition, creep and relaxation behavior of HDPE at the beginning of elastic, viscoelastic and viscoplastic regions are investigated.

In the part of modeling, the viscoelastic and viscoplastic behaviors of HDPE under uniaxial monotonic, cyclic loading, multiple creep and relaxation are modeled using the modified viscoplasticity theory based on overstress (VBO). The visco-elastic modeling capabilities of the modified VBO are investigated by simulating the behavior of semicrystalline HDPE under uniaxial compression tests at different strain rates. Afterwards, the experimental results of extruded HDPE have been simulated using the finite viscoplasticity theory based on overstress (FVBO) model. In addition, the macro-mechanical model containing microstructural variables which is introduced by Boyce et al. (2000) is used to simulate the aforementioned behavior of HDPE. The simulation results of these two models are compared to the experimental data. Comparing overstress model and Boyce model in levels of finite and small deformation, reveals that FVBO is capable of modeling all investigated viscous behaviors: rate dependency, creep, relaxation. However, the model introduced by Boyce can model only loading behavior, but not unloading and creep and relaxation behavior. Boyce et al. (2000) model is capable of modeling large deformation, however, the response of the model at small deformation is not good enough.

In the second part of modeling study, VBO model is extended to account for crystallinity rate (ϕ) on mechanical behavior of semicrystalline polymers. The modifications on VBO are done considering the semicrystalline polymeric material as a composite material since it consists of amorphous and crystalline phases. Amorphous and crystalline phase resistances are arranged in two different analog models: amorphous stiffness and flow are in parallel and series with crystalline phase. Apart from many existing work in the literature, not only uniaxial loading are modeled but also creep and relaxation behaviors are simulated. It is shown that when amorphous and crystalline phase resistances acting in parallel are considered in the model, creep, relaxation and uniaxial loading and unloading behaviors can be simulated well using the modified VBO.

In the final part of the investigation, the material parameters of VBO model are optimized optimization method based on genetic algorithms. With this optimisation method, parameters are obtained more accurately and a relatively fast way.

Keywords: Polimeric materials, viscoelasticity, viscoplasticity, modelling, axial tension, creep, relaxation experiments.

1. GİRİŞ

Son yıllarda polimerik malzemeler ile yapılan konstrüksiyonların sayısı giderek artmaktadır. Polimerik malzemelerin sahip olduğu hafiflik, korozyona dayanıklılık, işleme kolaylığı, ekonomiklik vb. özellikleri mühendislik uygulamalarının bir çok sahasında hızla metal konstrüksiyonların yerine geçmelerini kolaylaştırmaktadır. Polimerik malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasına rağmen, mekanik özelliklerinin tarifi metallerde olduğu gibi henüz tam olarak ortaya konulamamıştır. Bunun nedeni polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini; malzemenin kimyasal, fiziksel özellikleri ve sıcaklık gibi birçok parametrenin çarpıcı bir şekilde değiştirmesidir. Ayrıca polimerik malzemeler, viskoelastik ve viskoplastik davranış özelliği gösterdiğinden dolayı hem bir viskoz sıvı gibi akma hem de katı gibi rijit davranış sergilemektedir. Bu durum, lineer olmayan özellikler de işin içine girince karmaşık bir davranışın ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Mekanik davranışlarının belirlenmesindeki en büyük zorluk da bu nedenlerden kaynaklanmaktadır. Öte yandan metallerde gerilme ile gerinim arasındaki oranı, sabit bir katsayı olan elastiklik modülü ile ilişkilendirmek mümkündür. Polimerik malzemelerde ise elastiklik modülü zamana bağlı olarak değişmektedir. Başta elastiklik modülü olmak üzere diğer bazı özelliklerin zamana bağlı olarak değişmesi modelleme çalışmalarını güçleştirmektedir.

Polimerik malzeme türlerinden biri olan polietilen (PE) değişik yoğunluklarda üretilmekte ve sanayinin bir çok sahasında yaygın olarak kullanılanların başında gelmektedir. PE'nin yüksek yoğunluklu türü olan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) özellikle yer altı ve bina içi tesisat borusu üretiminde yaygın olarak kullanılan polimerik malzemelerdendir. Bu amaçlarla kullanımından dolayı işletme süresinde daha ziyade basınç ve buna bağlı olarak sünme (sürünme, creep) ve gevşeme (relaxation) tesirlerine maruz kalmaktadır. Genel olarak polimerik malzemelerin mekanik davranışını belirlemek üzerine yapılan çalışmalar, deneysel çalışmalar ve bunlara dayanan matematik modellemelerden meydana gelmektedir.

Bu tez çalışmasında özelde YYPE'nin, genelde ise geniş bir kullanım alanına sahip yarıkristal polimerik (semi-crystalline polymer) malzemelerin mekanik davranışını açıklamaya yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmalar deneysel ve modelleme olmak üzere iki temel üzerine kurulmuştur. Deneysel çalışmalar, polimerik malzemelerin deformasyon davranışı üzerinde içyapı değişkenlerinin dolayısıyla imalat yöntemlerinin etkisini ve deformasyon türleri sınırlarını araştırmak üzere gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ekstrüzyon boru ve basınçta kalıplanmış levhalardan deney numuneleri elde edilerek, imalat yönteminin deformasyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler, ekstrüde ile basınçta kalıplanmış

YYPE numunelerde deformasyon davranışı farklılığının viskoplastik akıştan sonra meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca ekstrüde YYPE numune, basınçta kalıplanmış YYPE numuneye göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Maksimum yükleme seviyesi sonrası sıfır gerilmeye kadar boşaltma esnasındaki viskoelastik toparlanma miktarı açısından, basınçta kalıplanmış YYPE ekstrüde YYPE'ye göre daha yüksek oranlara sahiptir. Her iki tip numune viskoz etkileri işaret eden sünme ve gevşeme açısından karşılaştırıldığında; sünmede yüksek gerilme seviyeleri haricinde yaklaşık aynı oranlarda gerinim artışı gözlemlenmiştir. Gevşemede ise bütün gerinim seviyelerinde aynı oranlarda gerinim azalması meydana gelmiştir. Karşılaştırması yapılan iki tür imalat yönteminin viskoz etkiler üzerinde güçlü bir etkisi yoktur.

Yarıkristal polimerik (semi-crystalline polymer) malzemelerin iki fazlı yapıya sahip olmasından dolayı deformasyon davranışının modellenmesinde zorluklar yaşanmaktadır. Modelleme çalışması kısmında yarıkristal polimerik malzemelerin henüz ifade edilemeyen yükleme sonrası boşaltma, çevrimsel yükleme ve kristallik oranına (crystallinity rate) bağlı olarak değişen deformasyon davranışlarının matematiksel olarak ifade edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlarla “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) kullanılmıştır. VBO modeli ile YYPE'nin yükleme-boşaltma şartlarındaki hız bağımlılığı, çevrimsel yükleme, sünme ve gevşeme davranışları tek bir malzeme parametresi seti ile modellenebilmiştir. Özellikle boşaltma ve çevrimsel yükleme ile diğer deformasyon davranışlarının hepsinin bir arada tek bir malzeme parametresiyle modellenebilmesi VBO modelinin başarı göstergesinin güçlü bir kanıtıdır. Diğer yandan deformasyon davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip kristallik oranın modellenebilmesi için VBO üzerinde yapılan modifikasyon ile kristallik oranına bağlı deformasyon davranışının hız bağımlılığı, sünme ve gevşeme açısından modellenebilmesi literatürdeki önemli bir eksikliği gidermiştir.

Çalışmada kullanılan VBO modeli başta olmak üzere viskoplastisite teorileri bünyelerinde çok sayıda malzeme parametreleri barındırır. Bu parametrelerin bazılarının fiziksel olarak anlamı bile olmayabilir. Bütün bunlar malzeme parametresi belirlenmesini güçleştirmektedir. Literatürde malzeme parametresi belirlenmesine yönelik sistematik bir yaklaşım henüz ortaya konulmamıştır. Yaygın olarak malzeme parametresi belirlenmesi mevcut bulunan deneysel verilerden faydalanan deneme-yanılma yoluyla gerçekleştirilir. Bu nedenlerle malzeme parametresi belirlenmesi işlemini sistematik bir temele oturtmak, kolay ve daha güvenilir kılmak amacı ile Genetik Algoritma (GA) prensibine dayanan bir optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan bu optimizasyon yaklaşımı ile VBO modele ait onüç adet malzeme

parametresi üç farklı gerinim hızındaki deneysel yükleme-boşaltma eğrilerinden faydalanarak hesaplanmıştır. Bu malzeme parametreleri kullanılarak sünme ve gevşeme simülasyonları deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu açıdan GA optimizasyon yöntemi malzeme parametresi belirlenmesinde başarılı olmuştur ve genel amaca uygun olarak diğer viskoplastik modeller içinde kolaylıklar sağlayabilir.

Yukardaki amaçları detaylı olarak açıklamak üzere bu tez çalışması, giriş bölümü dahil yedi adet bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümler kısaca açıklanacak olursa:

İkinci bölümde, polimerik malzemelerin mikroyapı özellikleri hakkında detaylı bir bilgi verilerek deformasyon mekanizmaları ile iç yapı ilişkisi hakkında bilgiler sunulmuştur. Bu bölümdeki bilgiler polimerik malzemeler için verilmesinde rağmen daha çok yarıkristal polimerler üzerine odaklanmıştır. Tez çalışmasının genelinde yarıkristal polimerik malzeme olan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) üzerinde inceleme yapılmasından dolayı bu yol tercih edilmiştir.

Üçüncü bölümde, yarıkristal polimerik malzeme davranışının genel özelliklerini tespit etmek, davranışını açıklamak ve model geliştirmek için YYPE hammaddesinden iki farklı imalat yöntemiyle elde edilen numuneler ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Numuneler ekstrüzyon ve basınçta kalıplanmış yöntemleri ile oluşturulmuştur. Farklı imalat yöntemlerinin malzemenin bütün davranışı üzerindeki etkisini araştırmak üzere, hız bağımlılığı için yükleme-boşaltma, yük altındaki davranışı için sünme ve gevşeme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile malzemenin viskoelastik-viskoplastik davranış sınırlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Dördüncü bölümde, polimerik malzeme davranışını açıklamak üzere kullanılan genel malzeme modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra oldukça güçlü modelleme kabiliyeti olan “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) tanıtılarak, YYPE’nin hız hassasiyeti, çevrimsel yükleme, sünme ve gevşeme davranışlarının modellenmesi için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün son kısmında VBO modelin sonlu deformasyon seviyesindeki modelleme kabiliyeti literatürde geniş kullanım alanına sahip Boyce vd. (2000) modeli ile karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, yarıkristal polimerik malzemelerin mekanik davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olan kristallik oranı-mekanik davranış ilişkisinin matematiksel olarak modellenmesi araştırılmıştır. Yarıkristal polimerik malzemeler amorf ve kristal fazlardan meydana gelmektedir. Bu malzemenin toplam davranışı her iki fazın etkileşimi şeklinde

gerçekleşmektedir. Bu etkiyi modellemek üzere VBO modelinin temelini teşkil eden Standart Lineer Katı (SLS) Model her iki fazı esas alarak, paralel ve seri bağlanmak suretiyle iki farklı model ortaya konulmuştur. Modifiye edilen VBO model ile kristallik etkisine bağlı malzeme davranışı açıklanmıştır. Literatürdeki malzeme modelleri yarıkristal polimerik malzemelerin davranışını modellerken sadece bir ya da iki deney durumunu dikkate alırken, modifiye edilen VBO model yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme davranışlarını kristallik oranına bağlı olarak çok başarılı bir şekilde modelleyebilmektedir.

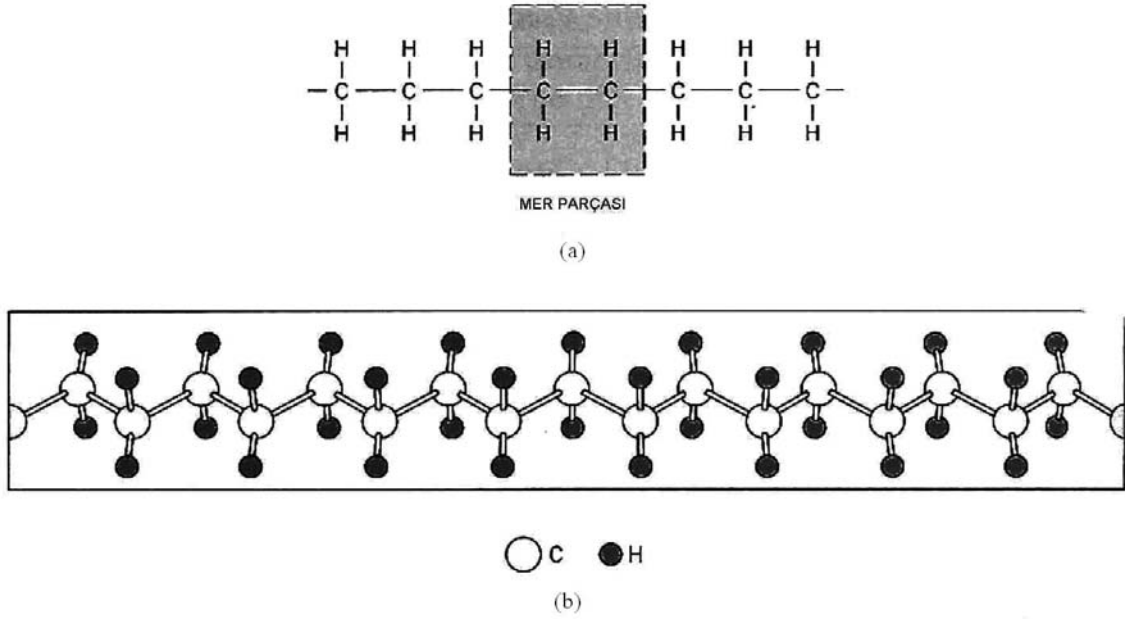
Altıncı bölümde, elastik olmayan malzeme davranışını açıklamak için geliştirilmiş olan viskoplastik malzeme modellerinin içeriğinde bulunan malzeme parametrelerinin belirlenmesine yönelik Genetik Algoritma (GA) prensibine dayanan bir parametre optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. GA prensibine dayanan parametre optimizasyon yöntemi ile VBO model içeriğindeki onüç adet malzeme parametresi YYPE'nin yükleme-boşaltma deneysel sonuçları kullanılarak tesbit edilmiştir. GA optimizasyon yöntemi ile belirlenen bu parametreler kullanılarak, sünme ve gevşeme davranışları modellenerek, simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Yedinci ve son bölümde ise tez çalışmasının sonuçları verilmiştir.

2. POLİMERİK MALZEMELER ve DEFORMASYON MEKANİZMALARI

2.1 Polimerik Malzemelerin Deformasyon Morfolojisi

Polimerik malzemeler genel olarak karbon ve hidrojen atomlarının bileşiminden meydana gelen organik maddelerdir. Polimerik malzemelerin üretimi esas olarak hampetrolün çeşitli kimyasal süreçlerden geçirilmesine dayanır. Polimerler makromolekül adı verilen uzun molekül zincirlerinden oluşur. Hidrojen ve karbon atomlarının belirli formlarda bir araya gelmesiyle “mer” parçaları oluşur, makromoleküller ise çok sayıda monomer molekülünün birleşmesinden meydana gelir. Şekil 2.1 a ve b’de gösterildiği gibi monomer molekülleri polimerizasyon işlemi ile uzun zincirler oluşturacak şekilde birbirlerine bağlanırlar. Sonuç olarak polimer adı verilen makromolekül meydana getirilmiş olur (William ve Callister 2003).



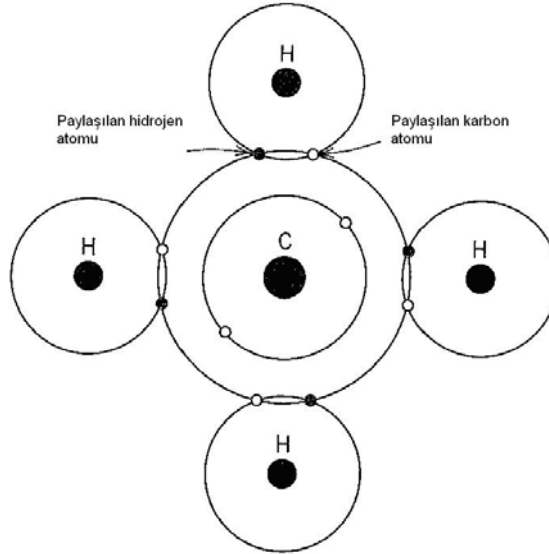
Şekil 2.1 a) Monomer molekülünün gösterimi b) Makromolekül (William ve Callister 2003)

Karbon atomlarının birbirleri ile olan bağı makromolekül zincirinin omurgasını (backbone) meydana getirir, diğer atomlar ise (hidrojen, oksijen...) bu omurgaya dizilirler. Uygulamada makromoleküllerin bir tek zincir olarak üretimi mümkün değildir. Çok sayıda makromolekül birbiri içinde karışmış şekilde üretilir. Bu iç içe geçmiş karmaşık durum Şekil 2.2’de gösterildiği gibidir, bu yapı spagettiye benzetilebilir. Herbiri birbirinden bağımsız olmasına rağmen birbirleriyle de ilişkili makromolekül yumağı polimerik malzeme olarak adlandırılır (Fried 2003).



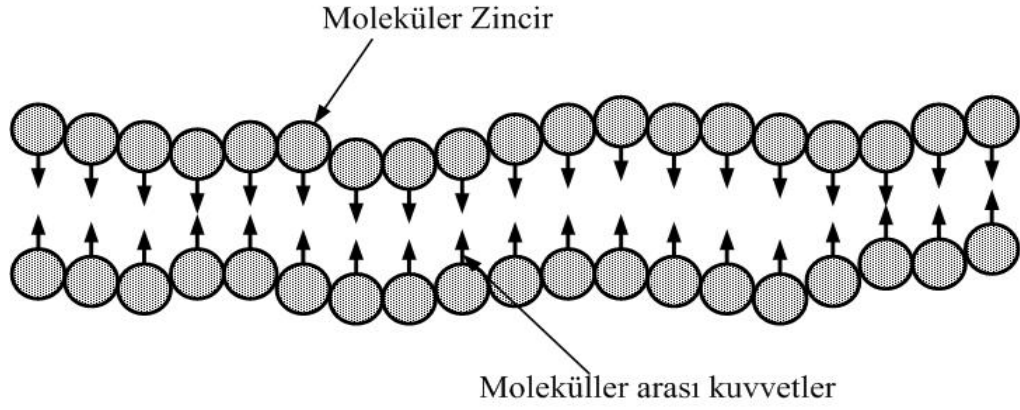
Şekil 2.2 Polimerlerin ağ (Spagetti) yapısı

Makromolekülleri oluşturan monomer atomları birbirine kovalent bağ ile bağlanmışlardır. Monomer içinde bulunan her bir karbon atomu kovalent bağa dört elektronu ile katılır. Şekil 2.3’de şematik olarak CH_4 (metan) bağı gösterilmiştir.



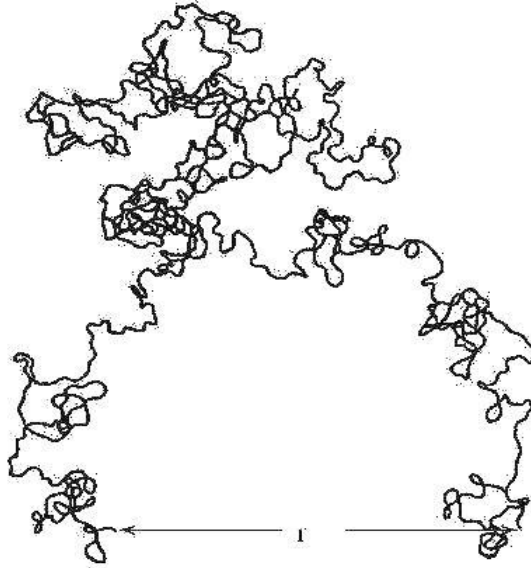
Şekil 2.3 Metan bağı (William ve Callister 2003)

Polimerik malzemelerdeki bağ kuvvetleri sadece molekül içerisindeki atomlar arasında değil aynı zamanda komşu moleküller arasında da mevcuttur. Komşu moleküller arasındaki bağların temelini hidrojen (kovalent) ve van der Waals bağları oluşturur. Bu bağlar moleküllerin birbirine göre hareket etmesini engelleyerek yüke karşı direnç oluştururlar. Polimerik malzemelerin mukavemet değerlerinin büyük kısmını makromoleküller arasındaki bu bağlar oluşturur. Şekil 2.4’ de makromolekül bağları görülmektedir (Temiz 2002).



Şekil 2.4 Makromoleküler arasındaki kuvvetler

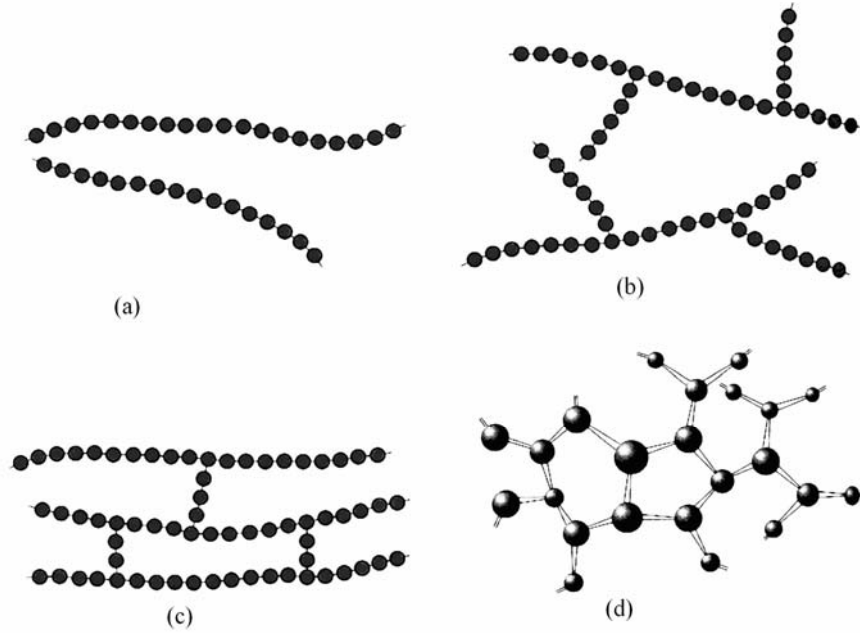
Polimer zincir molekülleri tamamiyle düz olarak dizilmezler, omurga atomlarında bükülme, kıvrılma şeklinde zigzag zincir düzenlemeleri de vardır. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi zincir başlangıcı ile sonu arasındaki mesafe olan “ r ” toplam zincir uzunluğundan oldukça küçüktür (William ve Callister 2003).



Şekil 2.5 Zincir düzenlemesi (William ve Callister 2003)

Polimerler Şekil.2.6’da gösterildiği gibi birbiri içerisinde dallanmış, bükülmüş ve içe içe geçmiş molekül zincirlerinden meydana gelir. Bu şekildeki düzensiz dolanmalar ve moleküler düzenlemeler polimerlerin mekanik davranışı üzerinde temel etkenleri oluşturur. Uygulanan gerilme ya da sıcaklığa karşı zincir segmentlerinin rotasyonel cevapları mekanik ve ısı özellikleri ortaya çıkarır. Polimer zincirlerinin rotasyonel esnekliği ayrıca mer yapısına ve kimyasına bağlıdır.

Polimerlerin fiziksel özelliklerini etkileyen bir diğer etken de molekül zincirlerinin yapısıdır. Zincirlerdeki dallanma şekli ve sayısı molekülerarası çekim kuvveti üzerinde etkilidir. Başlıca molekül yapıları lineer, dallanmış, çapraz bağlı ve ağ şeklindedir (Şekil 2.6).

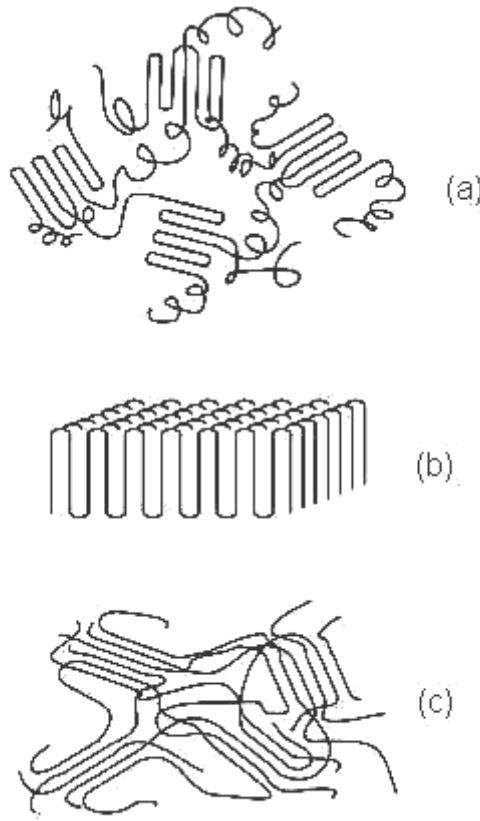


Şekil 2.6 Molekül zincirlerinin yapıları. a) Lineer b) Dallı c) Çapraz bağlı d) Ağ (William ve Callister 2003)

Lineer yapıdaki polimerler tek bir zincirin birbirine düz bir halde bağlanmasıyla oluşur. Lineer polimer zincirlerinin birbirleri ile bağlantısını van der Waals ve hidrojen bağları sağlar. PE, polivinilklorür (PVC), polistiren (PS) , naylon lineer yapıdadır (Şekil 2.6 a). Dallanmış yapıda ise omurga zincirin çeşitli yerlerinde yan dallar mevcuttur. Yan dallar ile zincir yoğunlaşması azalmakta bu da polimer yoğunluğunun düşmesine neden olmaktadır (Şekil 2.6 b). Çapraz bağlı polimerlerde ise lineer zincirler belirli bölgelerde birbirine kovalent bağlarla bağlanırlar. Bu kovalent bağlar ek atomlar ya da moleküller katılarak oluşturulur. Kauçuk genel olarak çapraz bağlıdır (Şekil 2.6 c). Ağ yapısında “mer” parçaları üç adet aktif kovalent bağlarla birbirine bağlanmıştır. Bir bakıma yüksek çapraz bağlı olarakta düşünülebilir. Bu tip polimerlerin mekanik ve ısı özellikleri oldukça farklıdır. Epoksi, fenol formaldehit bu gruptandır (Şekil 2.6 d) (William ve Callister 2003).

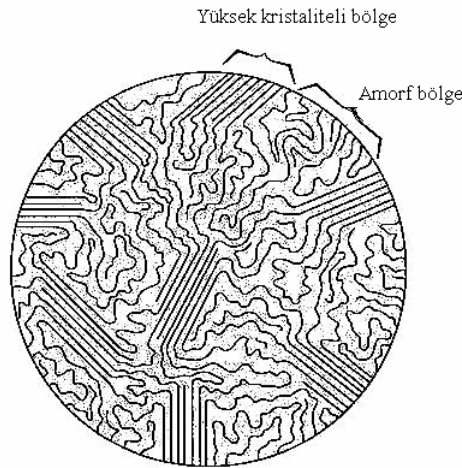
2.1.1 Polimer Kristalleşmesi

Makromoleküllerde çok az bir dallanma varsa, zincirler sıkı bir halde belli bir hacme sıkıştırılabilirler. Bu durumdaki zincirlerin bazı bölgeleri düzenli ve lineer, bazı bölgeleri ise dallanmış ve dağınık yapı gösterecektir. Moleküllerin birbiri üzerine katlandığı düzenli bölge: kristal bölgesi olarak adlandırılır. Üç boyutlu düzenlemeleri (gösterimleri) polimer kristallerini tam olarak ifade etmemektedir sadece yapıyı anlamaya yöneliktir. Gerçekte ise; a) Polimerlerin makromolekülleri uniform değildir. Moleküler ağırlık dağılımı düzgün değildir farklılık gösterir. b) Yapısal, grupsal ve biçimsel düzensizlikler polimer zincirleri boyunca mevcuttur. c) Kristallerin boyutları oldukça küçüktür, nanometre seviyelerindedir (Corradini vd. 2006).



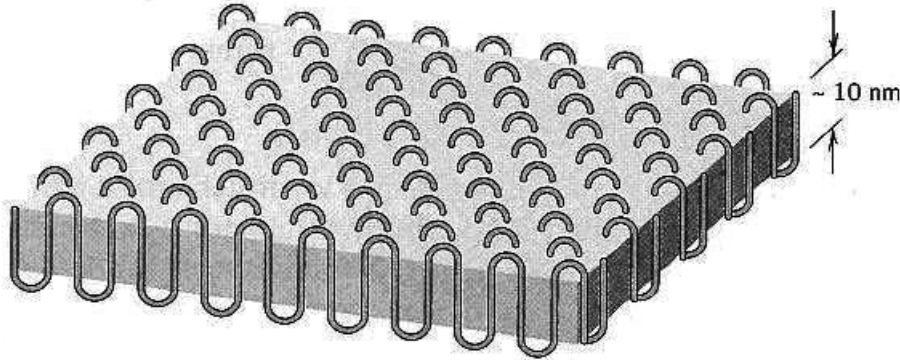
Şekil 2.7 Literatürdeki kristal modelleri; a) Herbir zincirin bir çok amorf ve kristal bölgelerden geçtiği model, b) katlanmış zincir (Chain folded) modeli, c)“Fringed-Micelle” model (Corradini vd. 2006)

Yukarıda belirtildiği gibi polimer kristallerinin moleküler düzenlenmelerini açıklamaya yönelik olarak geliştirilen modeller (Şekil 2.7) yapıyı bire bir olarak temsil etmezler bir takım detaylar göz ardı edilmiştir. Literatürde kristal yapıyı açıklamaya yönelik modellerden ikisi yaygın kullanılır. Bunlardan birincisi “Fringed-Micelle”dir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bu model, yarıkristal polimerlerin (semi-crystalline polymer) amorf faz içerisine rastgele olarak gömülmüş küçük kristal bölgelerden meydana geldiğini öngörmektedir. Herhangi bir zincir molekülü amorf faz içine gömülerek bir çok kristalden geçebilir.



Şekil 2.8 Fringed-Micelle modeli (William ve Callister 2003)

Diğer model ise katlanmış zincir (chain-folded) model’dir (Şekil 2.9). Bu modelde ise amorf ve kristal bölgeler lameler yapıda katmanlar şeklinde meydana gelmektedir. Amorf ve kristal lameller birbirine bağ molekülleri (tie molecule) ile bağlanmaktadır.

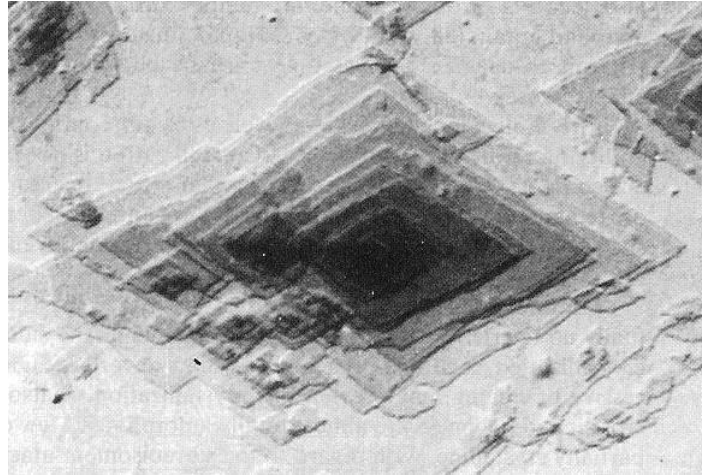


Şekil 2.9 Katlanmış zincir (Chain-folded) modeli (William ve Callister 2003)

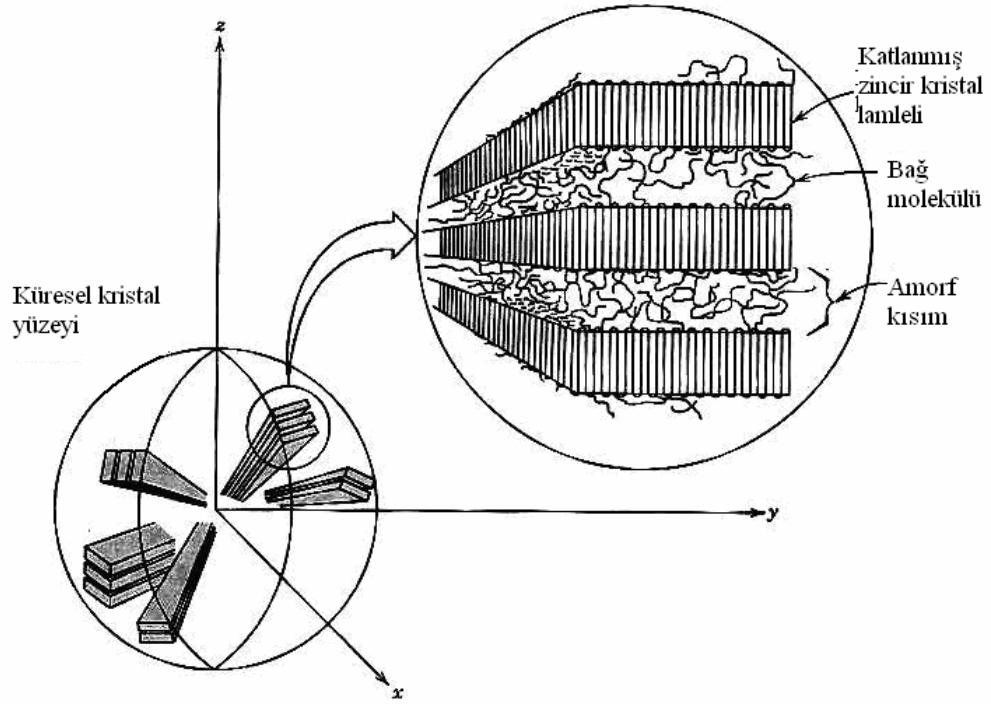
Polimerik malzemenin toplam hacmi içerisinde kristal fazın miktarı kristalleşme oranı (derecesi) olarak isimlendirilir. Kristalleşme, moleküllerin ikincil bağlarının uzunluklarını etkilediğinden dolayı mekanik özellikler üzerinde direkt bir etkiye sahiptir. Kristal bölge moleküler zincir içinde sıralı ve paralel düzenleme şeklinde birbirine yakın paketlenmiş haldedir. Birbirine komşu zincir segmentleri arasında ikincil bağlar mevcuttur. İkincil bağlar amorf bölge içerisinde daha az bulunur. Bu nedenlerle yarıkristalin polimerlerin çekme modülü kristal oranı ile artış gösterir (William ve Callister 2003).

2.2 Yarıkristal Polimerlerin Deformasyonu

Yarıkristal polimerler hacimsel formda Şekil 2.10'da gösterildiği gibi küresel kristal (spherulite) yapıya sahiptir. Herbir küresel kristal (spherulite) birbirinden bağımsız katlanmış zincir (chain-folded) lameli ve komşu amorf fazdan meydana gelir. Katlanmış zincir lamelleri birbirine bağlayan bağ (tie) molekülleri amorf faz içerisinde geçerek yapının bir bütün halinde hareket etmesini sağlar. Şekil 2.11'de modelin detaylı gösterimi yapılmıştır.



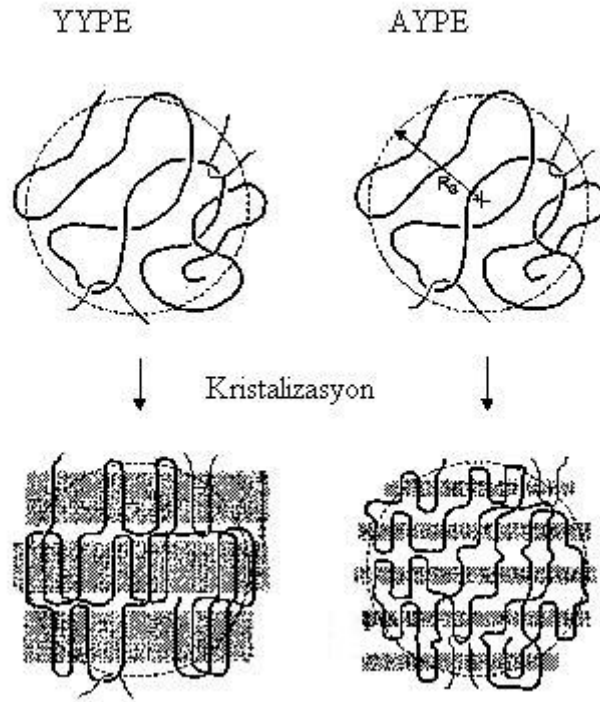
Şekil 2.10 PE tek kristalinin elektromikroskop görüntüsü (William ve Callister 2003)



Şekil 2.11 Küresel kristal (Spherulite)'in şematik gösterimi (William ve Callister 2003)

2.2.1 Elastik Deformasyon Mekanizması

Yarıkristal polimerlerin mekanik özellikleri kristaller arasındaki moleküler bağlar aracılığı ile sağlanır. Zincir düzenlemeleri ve bağ molekülleri mekanik özellikler üzerinde etkili iki temel etkidir. Eğer moleküler bağlar kovalent bağlardan oluşmuyorsa kristaller zayıf van der Waals veya hidrojen bağlarıyla birarada tutulur. Zayıf van der Waals bağları kolay bir şekilde kaymalara ve ayrışmalara müsaade eder. YYPE ve düşük yoğunluklu polietilen (AYPE)'nin kristalizasyondan önce ve sonra moleküler yapı değişimi Şekil 2.12'de gösterilmiştir (Seguela 2005).



Şekil 2.12 Yarıkristal polimerlerin kristalizasyondan önce ve sonra moleküler yapısı (Seguela 2005).

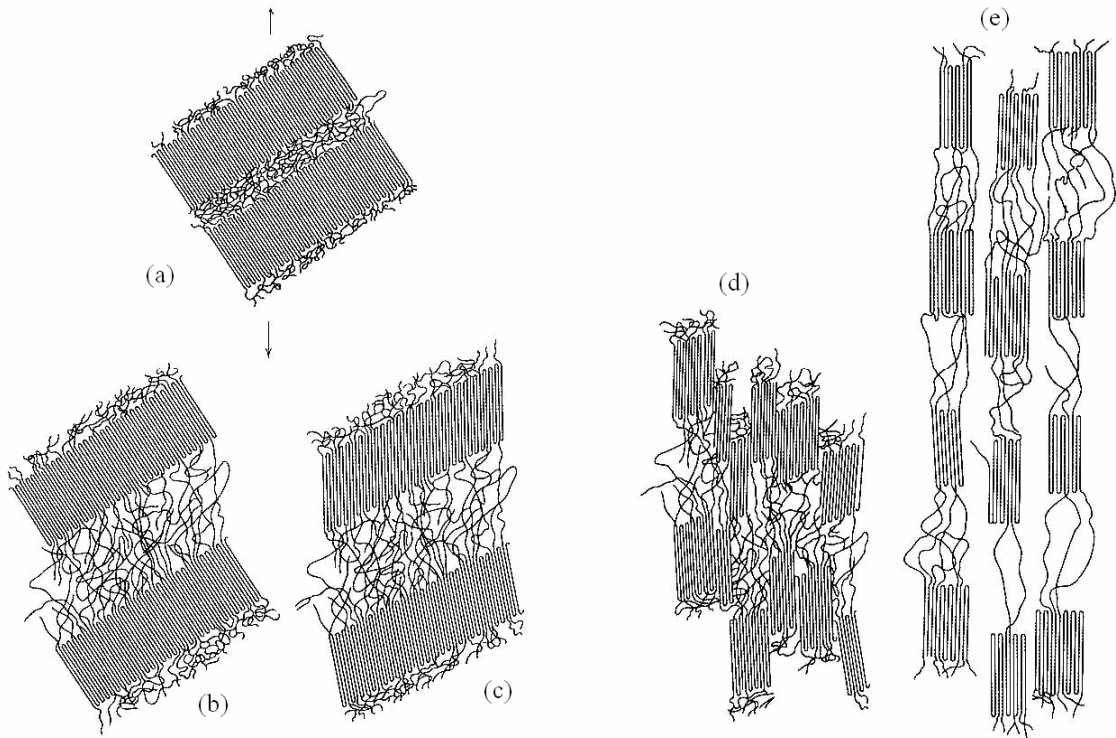
Yarıkristal polimerlerin büyük deformasyon çekmeleri (drawing), amorf faz içerisinde kristal fazın çekme yönünde oryantasyonuna neden olmaktadır, moleküler yapının yeniden düzenlenmesini, diğer bir ifade ile pekleşmeyi (deformasyon sertleşmesini, strain hardening) doğurmaktadır. Diğer taraftan küçük gerinim seviyelerinde (akma noktası altında) polimer morfolojisinde belirgin bir değişme gözlenmemektedir (Seguela 2005).

Yarıkristal polimerlerdeki elastik deformasyon mekanizması zincir moleküllerinin kararlı düzendeki halinden uzamaya zorlanmasıyla ilgilidir. Uygulanan gerilmeye malzemenin göstermiş olduğu tepki, zincirlerdeki güçlü kovalent bağların uzama ve bükülmesiyle meydana gelir ayrıca komşu moleküller arasında çok zayıf ikincil dirençler veya van der Waals bağlarının da etkileri vardır. Elastik davranış üzerindeki en önemli etki şüphesiz ki elastiklik modülüdür. Yarıkristal polimerler iki farklı fazdan meydana geldiğinden dolayı elastiklik modülü kompozit malzeme gibi düşünülerek, iki fazın çeşitli kombinasyonda bileşiminden hesaplanabilir (William ve Callister 2003).

2.2.2 Viskoplastik Deformasyon Mekanizması

Yarıkristal polimerlerin viskoplastik deformasyon mekanizması lameller ve komşu iki lamel arasındaki amorf fazın uygulanan gerilmeye gösterdiği cevaptan meydana gelir. viskoplastik şekil değiştirme (Şekil 2.13) iç içe geçmiş bir çok mekanizmadan meydana gelir. Deformasyondan önce iki komşu katlanmış zincir (chain-folded) lameli ve lameller arasındaki amorf faz Şekil 2.13 a'daki gibidir. Deformasyonun başlangıç aşamasında amorf fazdaki zincirlerin her biri yüklemeye yönünde kayar. Bu durum lameller ve lameller şeridinin birbirine ters yönde kaymasına, bağ (tie) zincirlerinin amorf faz içerisinde uzamasına neden olur (Şekil 2.13 b ve c).

Deformasyonun ikinci aşamasında lamellerin eğilmesi meydana gelir bu yüzden zincir katlanması (chain-folded) lamelleri çekme yönünde düzenlenir (Şekil 2.13 d). Son aşamada bloklar ve bağ zincirleri çekme yönünde yeniden düzenlenirler (Şekil 2.13 e) . Bu nedenle belirli miktardaki çekme deformasyonuna maruz kalan yarıkristal polimerler yüksek oryantasyona sahip yapıya dönüşürler (William ve Callister 2003).



Şekil 2.13 Viskoplastik deformasyon mekanizması (William ve Callister 2003)

2.3 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)

Polietilen ilk olarak 1930'lu yıllarda sentez edildi. Daha sonra çeşitli proses metodları ve kristal sistemleri kullanılarak değişik uygulamalara yönelik polietilen türleri geliştirilmiştir. PE' nin ilk uygulamaları askeri amaçlı olmuştur. Yeraltı borularının kaplanması ve radar yalıtımı gibi bir çok sahada askeri amaçlı kullanımı II. Dünya savaşında önemli bir avantaj sağlamıştır. PE'nin en yaygın sınıflandırma biçimi yoğunluğa göre yapılanıdır. Yoğunluk olarak dört ana grupta toplanır (Ezdeşir vd. 1999).

- I. 0.91-0.9250 g/cm³ Düşük Yoğunluklu Polietilen (AYPE)
- II. 0.926-0.940 g/cm³ Orta Yoğunluklu Polietilen (OYPE)
- III. 0.941-0.959 g/cm³ Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)
- IV. 0.96 ve üzeri g/cm³ Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (ÇYAPE)

YYPE yüksek kristalleşmeye sahip termoplastiktir. -80 °C ile 80 °C arası sıcaklıklarda kullanılabilir. YYPE'nin mikroyapısında amorf ve kristal olmak üzere iki faz bulunur. Bu her iki faz malzemenin makroskobik cevabını belirlemede önemli rol oynar. Oda sıcaklığında kauçuk gibi olan amorf faz, herhangi bir ayrılma olmaksızın kristal fazın belli miktarlarda hareket etmesine ve değişmesine müsaade eder. Bu deformasyon biçimi plastik olarak isimlendirilir, büyük miktarda toparlanabilir olan bu davranış moleküler zincirde herhangi bir kopma meydana gelmeden oluşur. Bu özellik yarıkristal polimerlerin yüksek tokluğa sahip olmasını sağlar (Shepherd vd. 2006).

Eriyik halindeki malzemenin katılaşması sırasında sıvının moleküler düzensizliğinden dolayı kristal durum gelişir. Kristalleşme süreci soğutma hızına bağlı olarak değişir. YYPE'nin yavaş soğutulması durumundaki kristallik oranı hızlı soğutulmasına göre daha yüksektir. Bu nedenle soğutma süreci malzemenin başlangıçtaki özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur. Ekstrüzyon ya da enjeksiyon kalıplama sürecinde polimer eriyiğinin akışı değişik oryantasyonlara neden olur bu da değişik yönlenmelere ya da anizotropik etkiye neden olduğu için mekanik özelliklerde büyük farklılıklar ortaya çıkarır. Moleküler oryantasyon; katılığın, mukavemetin, tokluğun ve çatlak direncinin artışına neden olur.

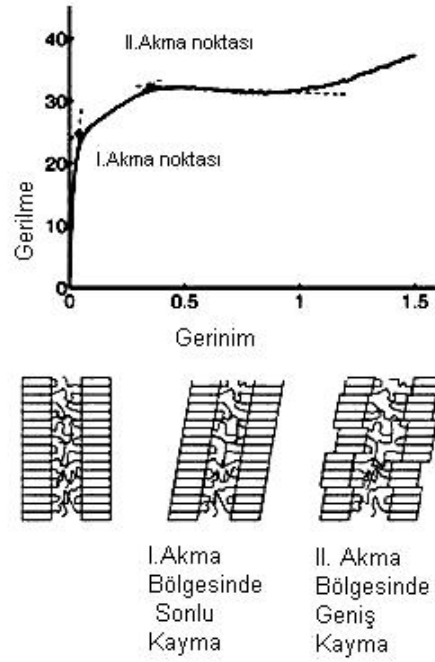
Yarıkristal polimerlerin mikroyapısı oldukça karmaşıktır. YYPE'nin fiziksel özellikleri birbiriyle ilişkili üç temel değişkene bağlıdır; yoğunluk, moleküler ağırlık ve moleküler ağırlık dağılımı. Çekme mukavemeti, katılık, yumuşama sıcaklığı ve kimyasal direnç yoğunlukla artar. Düşük sıcaklıktaki çarpma mukavemeti, uzama, geçirgenlik ve gerilme çatlak direnci yoğunluğun artmasıyla azalır. Bir çok ticari YYPE granül 50000 ile 250000

(g/mol) moleküler ağırlığı arasında değişmektedir. Moleküler ağırlığı arttırarak çekme mukavemeti (akma ve kopma), uzama, tokluk, gerilme çatlak direnci, sünme direnci, kimyasal direnci, geçirimsizliği iyileştirilir. YYPE geniş ve dar aralığa kadar değişik moleküler ağırlık dağılımında elde edilebilir. Dar aralıkta olması durumunda; düşük sıcaklık etkisi, tokluk, gerilme çatlak direnci ve yumuşama sıcaklığı artar. Geniş moleküler dağılımında düşük erime viskozitesi, yüksek enjeksiyon ve sünme direnci kazanılır. Çekme mukavemeti ve uzama özelliği moleküler ağırlık dağılımından etkilenmez (Bartczak 2005).

Yarıkristal polimerlerin özellikleri, sadece kimyasal özelliklerine değil maruz kaldığı ısı işlemlere göre morfolojik ve kristalleşme yapısına bağlı olarak da değişir. Bu nedenle üretim prosesi şartları nihai ürün özellikleri üzerinde son derece etkilidir (Zhang 1997).

Hiss vd. (1999) yaptıkları bir dizi histerisiz deneyleri ile şu sonuçlara varmışlardır a) Boşaltma esnasında YYPE'nin toparlanma davranışı kristallik oranının azalmasıyla artmaktadır. b) Gerinimin toparlanabilir parçası iç sürtünmeyle ("internal friction" ya da "internal viscosity") ilişkilidir. c) İç sürtünme kristallik oranı ve çekme hızıyla artmaktadır. d) Amorf faz kısımdaki zincir düzeni uçlara veya sabitlemeye sahiptir (hem mevcut düzenlemeler tarafından hem de komşu kristalde ki "anchoring"ler tarafından). Bunlar ağı ayarlar ve deformasyon süresince uzama oluşturur.

Akma noktasının deformasyon mekanizması sonlu zincir kaymasıyla ilişkilidir (Şekil 2.14). Birinci akma noktasında sonlu zincir kayması kombine bir şekilde lameller içerisinde ki transformasyonun martenzitik tipiyle birlikte oluşur. İkinci akma noktasında ise lameller parçalardaki büyük zincir kayma proseslerinin sonucudur (Bernard 2004).

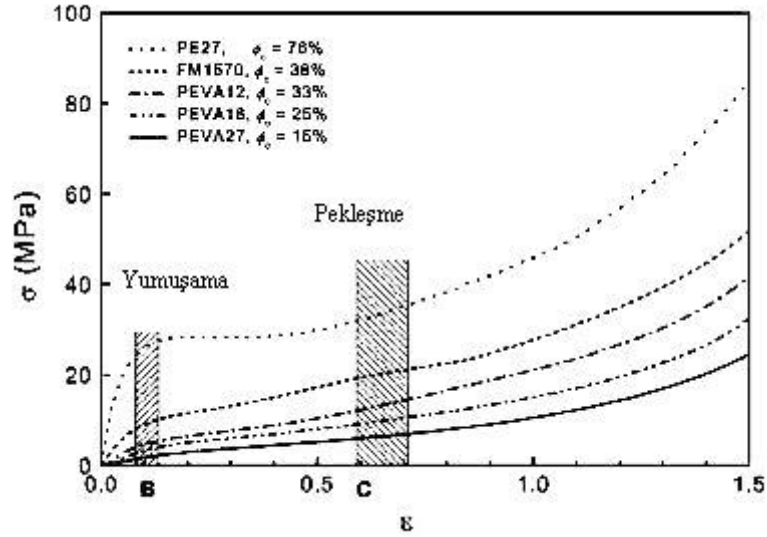


Şekil 2.14 YYPE'nin akma noktalarındaki deformasyon mekanizmaları (Bernard 2004)

Yarıkristal polimerlerin uygulanan gerilmeye karşı cevabında üç farklı mekanizmanın katkısı bulunur; bunlar a) Amorf fazı meydana getiren zincirlerin ağ içerisinde gerilmesinden meydana gelen kuvvetler. b) Kristal iskeletleri tarafından iletilen kuvvetler. c) Viskoziteden meydana gelen kuvvetler. Çekme deformasyonu kristal iskeletlerinin yapısından ve tekstüre değişiminden etkilenir. Bunların oryantasyonel dağılımı ve çiftlerinin değişimi farklılıklar yaratır. Kristal bloklar kayabilir ve tamamiyle tahrip olabilir, fibril yapı içerisinde dönüşebilir. Bu yapısal değişimler uygulanan yük kaldırıldığında kısmi olarak toparlanabilir ve toparlanamaz parçalardan oluşur. Yarıkristal polimerlerin elastikliği amorf fazdaki zincir ağından ve kristal blok çiftlerinin iskeletlerinden meydana gelir. Kristal iskelet uzama ve bükülme yapabilir ve bu katkılar ayrı ayrı değerlendirilerek elde edilebilir (Dasari ve Misra 2003, Hong vd. 2004).

Şekil 2.15 tipik PE ve çeşitli kopolimerlerin değişik kristallik oranlarında gerilme-gerinim diyagramlarını göstermektedir. Bütün eğriler gerilme seviyesi farklılığı dışında aynı aşamalara sahiptir. Gerilme-gerinim eğrisinin başlangıç parçası kristallik oranı ile değişmektedir ve kristal iskeleti ile ilişkilidir. Gerilme-gerinim eğrisinin son parçası ise ağdaki düzenlemelerle ilgilidir. x ekseninde B noktasında deformasyon, kristal iskeletin plastik deformasyonu sonucu kristal blokların kayması şeklindedir. C noktası kristal blokların bozulup fibril yapının oluştuğu kritik gerinim seviyesini temsil eder. PE malzeme

için B ve C noktasının gerinim seviyesi yaklaşık $\varepsilon_B \sim 0,1$, $\varepsilon_C \sim 0,6$ değerindedir. Kritik gerinim seviyesi çekme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Çekme uzaması süresince oluşan gerilme değeri üç değişik durumun etkisinden meydana gelir. 1) Kristal blok iskeletleri tarafından taşınan kuvvetler, 2) Amorf ağdaki gerilmeler tarafından çıkarılan kuvvetler, 3) Viskoz kuvvetler; kristal bloklar arasındaki kaymalar, polimerik zincirler arasındaki kaymalar veya moleküler parçaların rotasyonundan meydana gelir (Hong 2006).



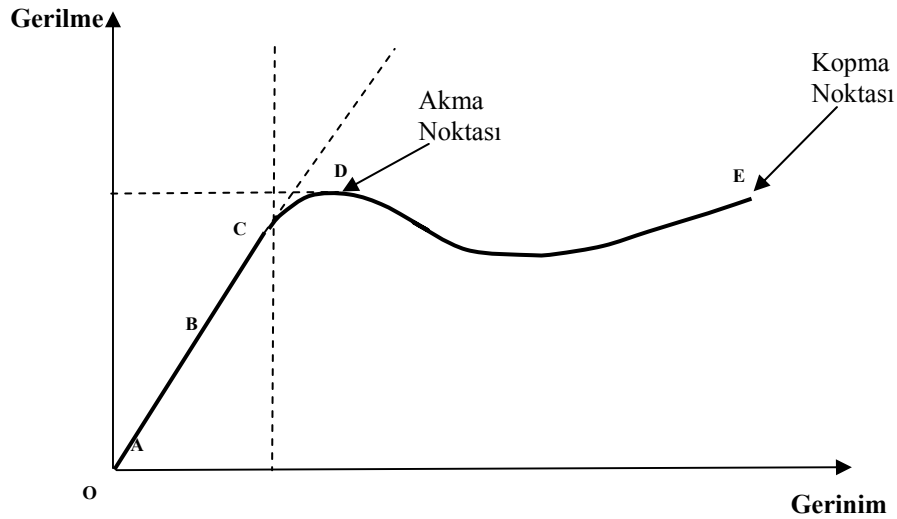
Şekil 2.15 YYPE'nin hasar deformasyon mekanizmaları (Hong 2006)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Genel Esaslar

İnsanların daha konforlu, rahat ve emniyetli yaşamasını amaç edinen mühendislik bilimi üretime yönelik çözümler sunmak ve gerçekleştirmek üzere çalışır. Çalışmaları nihai sonuca dönüştüren üretici, yüksek üretim hızı ve düşük maliyet istemektedir. Değişen ihtiyaç parametreleri ile kullanılan malzemelerde de değişiklik yapılması gerekmektedir. İsteklerin zamana göre değişmesi test yapmayı gerektirmektedir. Test yapmaktan amaç; a) Dizayn kriterleri belirlemek, b) Güvenirlik sınırlarını belirlemek, c) Emniyet, d) Üretim uygunluğunu korumak, e) Kalite kontrol, f) Standart ve spesifik şartları bir noktada buluşturmak, g) Üretim süreçlerinin denetlenmesi ı) Değerlendirmeleri eşleştirmek i) Yeni malzeme türleri için bir temel oluşturmak.

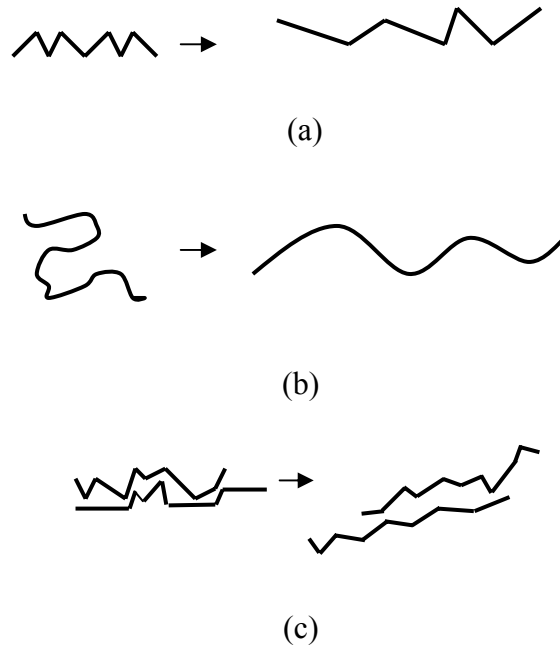
Son yıllarda polimerik malzemeler bir çok üretim sahasında maliyeti düşürücü, yüksek üretim hızı ve otomasyona müsait olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Polimerik malzemelerin özellikle mekanik özelliklerinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu amaçla yapılacak olan testlerdeki hatalar; testin temellendirilmesi (test şartlarının oluşturulması), testi gerçekleştiren kişi ve test numunesinden kaynaklanmaktadır (Tanaka 2000).



Şekil 3.1 Polimerik malzemelerin tipik gerilme-gerinim eğrisi.

Mekanik özelliklerin başlıcaları; çekme mukavemeti, elastiklik modülü, uzama ve çarpma mukavemetidir. Şekil 3.1’de tipik bir polimerik malzeme davranışına ait gerilme-gerinim eğrisi gösterilmiştir, bu eğri kısaca açıklanacak olursa:

A-C noktaları arasındaki doğru gerilme-gerinimin lineer olarak artış gösterdiği bölgedir. Hook Kanunu bu bölgede geçerlidir. C noktası gerilme ile gerinimin lineer artış gösterdiği son noktadır normalde bu noktanın tam olarak tespiti güçtür ve sapmalar olur. Oransal limitin altında polimerik malzemelerin davranışı elastiktir ve kuvvetli bir toparlanma davranışı sergilenir. B noktasına kadar olan deformasyon mekanizması oldukça küçük seviyelerdedir ve polimer molekül atomları ile atomların kendi içerisindeki bağların uzama ve kıvrılmalarıyla alakalıdır (Şekil 3.2 a.). Bu deformasyon anlık gelişir, toparlanabilirdir ve moleküllerin konumu birbirine göre değişmez. C noktasının ötesinde ise Şekil 3.2 b’de gösterildiği gibi molekül zincirlerinin açılarak daha da düzleştiği bir durum meydana gelir. Akma noktasının ilerisinde ise toparlanamaz deformasyon türü olan ve Şekil 3.2 c’deki gibi zincirlerde birbirine göre kaymalar meydana gelir (Shah 1984, Brown 1999).



Şekil 3.2 Polimerlerde zincir kayması

Genel anlamda polimerik malzemelerin deformasyon mekanizması yukarıda anlatılan aşamaların birbiri içerisine geçmiş şekilde eş zamanlı oluşumuyla meydana gelir asla belli bir sırayı takip etmez karşılıklı etkileşimi içeren bir süreçtir. Atomlararası bağlarda meydana gelen uzama ve bükülmeler ani gerçekleşen bir süreçtir. Fakat molekül zincirlerinin açılıp düzleşmesi yavaş işleyen bir süreç olup belli bir zaman sonrasında gelişir. Moleküllerin birbirine göre kayma etkisi ise bu deformasyon aşamalarından en yavaş olanıdır.

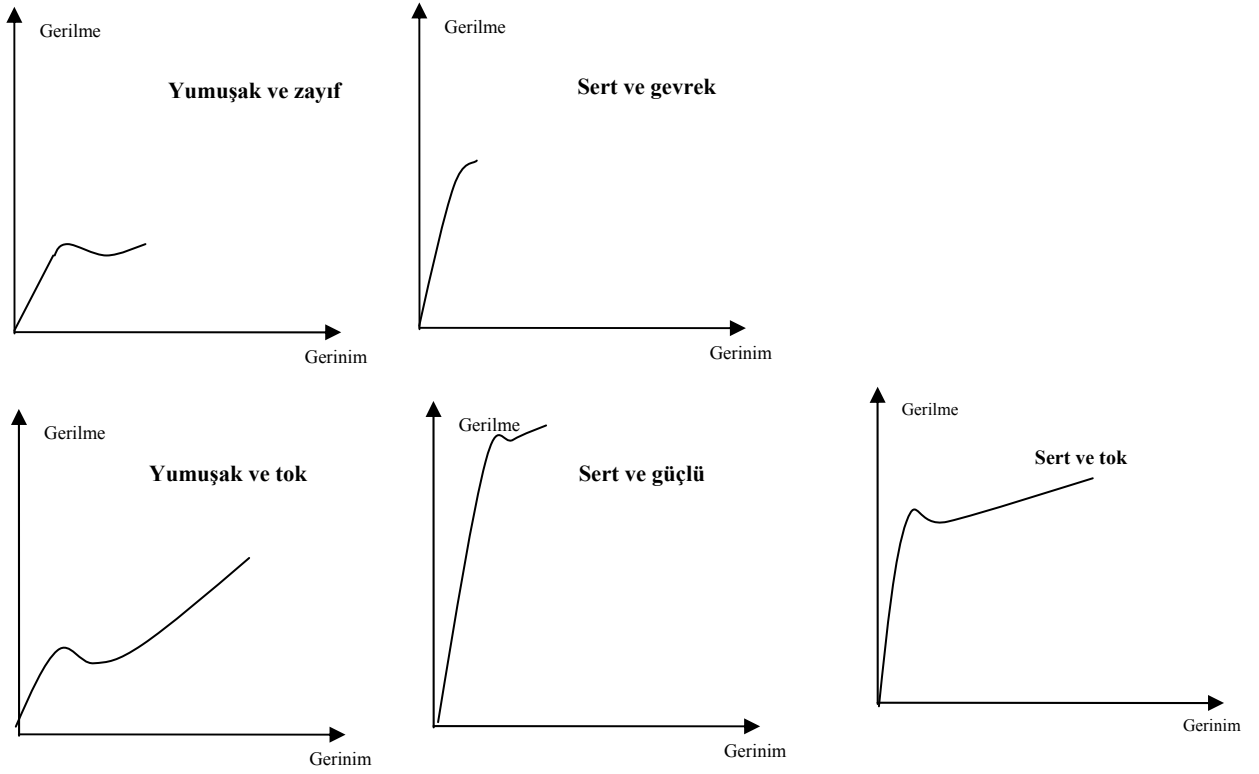
Polimerik malzemelerin deformasyon süreci içerisinde gelişen bu üç aşama mekanik benzeşim olarak en iyi şekilde yay-sönüm elemanı ile benzeşim metodu vasıtasıyla açıklanabilir. Yay elemanı elastik davranışı açıklamak üzere alınır genelde lineer olarak seçilir. Burada yayın uzaması, deformasyon mekanizmasındaki bükülmeleri ve atomlararası uzamayı açıklar. Sönüm elemanı ise moleküler arası kaymayı açıklar.

Polimerik malzemeler mekanik olarak genel anlamda yumuşaklık, gevreklik, sertlik ve tokluk açısından sınıflandırılmaya tabi tutulurlar (Şekil 3.3). Bu eğrilerin (Şekil 3.3) altındaki alanın ölçüsü malzemenin tokluğunu verir. Yumuşak ve zayıf malzeme düşük elastiklik modülü, düşük akma gerilmesi ve ılımlı kopma uzamasına sahiptir. Bu tip polimerik malzemeye en iyi örnek politetrafloroetilen (PTFE) dir. Yumuşak ve tok malzeme düşük elastiklik modülü, düşük akma gerilmesi fakat oldukça yüksek kopma uzaması ve kopma gerilmesi değerine sahiptir. Bu tip malzemeye en iyi örnek PE'dir (Shah 1984).

Sert ve gevrek malzeme yüksek elastiklik modülü ve düşük kopma uzaması değerine sahiptir. Kopma öncesi akma meydana gelmeyebilir. Fenolik bu malzemeye bir örnektir. Sert ve kuvvetli malzeme yüksek elastik modülü, yüksek akma gerilmesi, yüksek kopma gerilmesi ve düşük kopma uzamasına sahiptir. Asetal bu tip malzemeye bir örnektir. Şekil 3.3'de verilen polimerik malzeme türleri ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.1 Polimerik malzeme mekanik özellikleri (Shah 1984)

Polimer Özelliği	Elastik Modülü	Akma Gerilmesi	Kopma Mukavemeti	Kopma Uzaması
Yumuşak ve zayıf	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
Yumuşak ve tok	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek
Sert ve gevrek	Yüksek	Yok	Orta	Düşük
Sert ve güçlü	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Sert ve tok	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek



Şekil 3.3 Malzeme türlerine göre gerilme-gerinim eğrileri (Shah 1984)

3.2 Literatürde Yapılmış Olan Deneysel Çalışmalar

Polimerik malzemeler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sanayide geniş kullanım alanı olan malzemelerin çekme, basma, çekme sünmesi, basma sünmesi, gevşeme ve toparlanma deneylerini içermektedir. Kitagawa ve Takagi (1990), Kitagawa ve Nishida (1992), Kitagawa ve Onoda (1992), Lai ve Bakker (1995), Winwman (1995), Hasan ve Boyce (1995), Zhang ve Moore (1997a), Zhang ve Moore (1997b), Takashi ve Mori (1997), Boyce ve Parks (1988), Krempl (1998), Boyce ve Socrate (1999), Drozdov (1999), Krempl ve Ho (1999), Drozdov (2000), Beijer ve Spoormaker (2000), Nikolov ve Doghri (2000), Krempl ve Khan (2002), Sweeney ve Collins (2002), van Melick ve Govaert (2003), Dasari ve Misra (2003), Drozdov ve Gupta (2003), Drozdov ve Christiansen (2003), Drozdov ve Yuan (2003), Li ve Garmestani (2003), Capaldi ve Boyce (2004), Khan ve Zahng (2001) polimerik malzemelerin çekme, basma, sünme, gevşeme ve toparlanma davranışlarını deneysel olarak kombinasyonlarıyla birlikte incelemişlerdir. Son yıllarda yapılan bu deneysel çalışmalardan aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Kitagawa vd. (1992), PE gibi kristal polimerlerin lineer olmayan davranışlarını tanımlamak üzere klasik deneylerin dışında daha özel deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli yükleme bağımlılıklarına göre yapılan testler; çekme, burulma, doğrusal yükleme yoluyla çekme-burulma, toplama işareti şeklindeki yükleme yoluyla çekme+burulma, dairesel yükleme yoluyla çekme+burulma ve çeşitli çevrimsel yüklemeler şeklinde yapmıştır. Bunlardan çıkan sonuçta PE'nin hidrostatik basınca hassas olmadığı görülmüş bu da von Misses gerilme kriterlerinin uygulanabileceğini göstermiştir.

Lai ve Bakker (1995), oda sıcaklığında değişik gerilme seviyelerinde YYPE numune ile kısa ve uzun dönem çekme sünmesi deneylerini yapmıştır. Bu çalışmada YYPE'nin sünme davranışındaki yaşlanma etkisini araştırmak için bir seri sünme deneyleri değişik fiziksel yaşlanma zamanlarında yapılmıştır. Bu deneylerden YYPE'nin lineer olmayan bir gerilme-gerinim davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yaşlandırma etkilerinin uzun dönem sünme davranışı üzerinde oldukça etkili olduğunu fakat düşük gerilme seviyelerinde göz ardı edilebileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmalardan uzun dönem sünme deneyi sonuçları modellenirken denklemlere mutlaka yaşlandırma etki katsayısının da dahil edilmesi gerektiği sonucu çıkmıştır.

Zhang ve Moore (1997 a, b), YYPE'nin lineer olmayan davranışını açıklamak üzere değişik şartlarda ekstrüde borudan çıkarılmış numuneyi deneye tabi tutmuştur. Bu deneyler sabit çekme hızı, sünme, gevşeme, sabit hızda yükleme, yüklemenin ani değiştirilmesi, sünme+toparlanma, çevrimsel yükleme ve bunların birleşiminden oluşan değişik yükleme şartlarında yapılmıştır. Test numunesinin kalıcı uzaması ve bunun yükleme geçmişine bağımlılığı araştırılmıştır. Testlerde numuneler gerilme uygulanmasının başlangıcında doğrusal olarak uzamışlar fakat daha sonra lineer olmayan özellik göstermişlerdir.

Boyce ve Socrate (1999), polietilenterefat (PET)'in cam geçiş sıcaklığı üzerindeki deformasyon davranışını incelemek amacı ile bir dizi basma deneyini farklı şekil değiştirme hızlarında ve sıcaklıklarda gerçekleştirmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar PET'in gerilme-gerinim eğrilerinin dört farklı bölgeden meydana geldiğini göstermektedir. Bu bölgeler; 1. elastiklik modülünün yaklaşık olarak sabit olduğu ve gerilme ile gerinimin lineer arttığı bölge, 2. Akmanın meydana geldiği bölge, 3. Gerinimdeki artışa rağmen gerilmenin daha az arttığı pekleşme bölgesi, 4. Geniş uzama seviyesinde gerilme ile gerinimin dik bir şekilde arttığı bölgedir. Yapılan çalışmalardan PET'in deformasyon davranışının gerinim hızı ve sıcaklık bağımlılığına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Drozдов ve Yuan (2003), oda sıcaklığında AYPE numuneyle sabit hızda tek eksenli çekme testi, çekme gevşeme testi, çekme sünme testi olmak üzere üç farklı deney gerçekleştirmiştir. Mekanik testlerde numune ısıl iyileştirmeye maruz bırakılmamıştır. Yaşlanma etkisini en aza indirmek için numune kalıplandıktan en az bir gün sonra deneye tabi tutulmuştur. Numunelerde boyun verme gözlemlenmemiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarında 1. gerilme–gerinim eğrilerinin güçlü lineer olmayan özelliğe sahip olduğu 2. şekil değiştirme hızı bağımlılığı gözlemlenmiştir.

Lii vd. (2003), AYPE ve YYPE numunelerle tek eksenli çekme testi yaparak, iç yapıdaki tekstüre değişimini incelemiştir. Tekstüre değişimini değişik gevşeme zaman aralıklarında da inceleyerek, gevşeme sürecinde hem YYPE hem de AYPE numunenin büyük tekstüre değişimine uğradığını gözlemlemiştir. Gevşeme testlerindeki gevşeme hızındaki farklılığın malzeme içindeki artık gerilme seviyesinden kaynaklanmakta olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca karşılaştırmalı olarak gevşeme testlerinde AYPE’nin YYPE’den daha kısa sürede gevşeme gerçekleştirdiğini ortaya çıkarmışlardır. Bu farklılığı tekstüre oluşumuna bağlamaktadırlar.

Dasari ve Misra (2003), YYPE, polipropilen (PP) ve izotaktik polipropilen (IPP)’nin çekme hızı hassasiyeti ile boyun verme mekanizması ve hasar sürecinde iç yapıda meydana gelen değişimlerini incelemiştir. Bu inceleme için değişik şekil değiştirme hızlarında bir dizi çekme deneyi gerçekleştirmişlerdir. PE’de görünen makroskobik boyun verme davranışı oluşmadan önce mikroskobik seviyede lokalize boyun verme davranışının meydana geldiğini ileri sürmüşlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçlarını; “1) Logaritmik gerçek gerilme ve gerinim değerlerine göre çizilen eğrilerin eğimi olan şekil değiştirme hızı hassasiyet indeksi (m); deformasyon prosesinin doğasını belirleyici bir göstergedir. Şekil değiştirme hızı hassasiyet indeksi farklı polimer malzemelerin deformasyon direncinin karşılaştırılmasına yardımcı olur. Yüksek “m” değerleri boyun verme direncinin göstergesi ve plastik deformasyona yüksek hassasiyeti gösterir. 2) YYPE’nin deformasyon direnci PP ve IPP den daha yüksektir. 3) YYPE’nin düşük gerinim rejimlerinde deformasyonu kama ve sırt oluşumuyla karakterize edilir ki bunlar gerinim artışıyla artar. Yüksek gerinim rejimlerinde deformasyon çatlaklar ve sırt ilerlemeleri ile oluşur. Burada sırt oluşumu baskın deformasyon tarzıdır. YYPE’nin hasar tarzını; düşük şekil değiştirme hızlarında uzun fibrilasyon şeklinde, yüksek şekil değiştirme hızlarında çatlak+yırtılma şeklindedir” diyerek açıklamışlardır.

Melick vd. (2003), çalışmalarında PS numune üzerinde tek eksenli çekme, çekme sünmesi, toparlanma testleri sonuçlarına mekanik yaşlandırmanın ve gençleştirmenin etkilerini araştırmışlardır. PS deney çubuğunu yuvarlatılarak ilk şekillendirmeye tabi tutmuş, müteakiben mekanik gençleştirmeden sonra çeşitli yaşlanma zamanlarında tek eksenli çekme testine maruz bırakmıştır. Uygulama gerilmesinin yenilenmesi durumundaki kinetik değişimleri incelemiş ve uzama yumuşamasını da göz önüne alarak sünme davranışları araştırmışlardır.

Görüldüğü gibi literatürdeki mevcut çalışmalar herhangi bir polimerik malzemenin, genellikle tek eksenli gerilme (çekme veya basma) etkisi altında mekanik özelliklerinin tesbiti ve sünme, gevşeme, toparlanma gibi davranışların belirlenmesi şeklindedir. Çoğu çalışmada yukarıda belirtilen davranışlardan biri veya birkaçı belirli bir malzeme için yapılmıştır. Literatürde hem imalat yöntemlerinin dolayısıyla mikroyapı farklılıklarının özelliklere etkisi hem de viskoz etkiler olarak bilinen sünme, gevşeme, toparlanma ve yükleme-boşaltma gibi davranışların belirlenmesine yönelik çalışmalar yer almamaktadır.

Sonuç olarak deneysel çalışmalar malzemelerin deformasyon davranışını belirlemeye yarayan temel test usülleri ve bunların birleşik şekilleri kullanılarak ortaya konulmuştur. Yukarıdaki yapılan çalışmalardan da görüleceği gibi ve özellikle polimerik malzemelerin doğası gereği uygulanan testlerin sonuçları; sıcaklık, şekil değiştirme hızı, deneye tabi tutulan numunenin üretim şekli, çıkarılan numunenin maruz kaldığı ısı işlem ya da yaşlandırma etkileri gibi nedenlerden dolayı değişik mekanik davranışlar ortaya çıkmaktadır. Deneylerin çeşitli türlerde ve şartlarda yapılması, numunelerin değişik imal usüllerine göre gerçekleştirilmesi, matematiksel modeller için malzeme parametreleri elde etme amacını içermektedir.

Bu çalışmada, yarıkristal polimerik malzeme olan YYPE'nin mekanik davranışı üzerinde üretim yöntemlerinin etkisini incelemek üzere aynı deney prosedürleri iki farklı üretim yönteminden elde edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri ekstrüde borudan ve basınçta kalıplanmış levhadan kalıpta kesilerek oluşturulmuştur. Hız hassasiyetini belirlemek üzere, yükleme-boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme seviyesi malzemenin visloelastik-viskoplastik davranış ve tam viskoplastik davranış meydana geldiği sınırlarda aynı hız seviyesinde iki farklı gerinim seviyesinde yapılarak, malzemenin mekanik davranışının karakteristik sınırlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Aynı şekilde sünme ve gevşeme deneylerinde gerilme (gerinim) seviyeleri malzeme davranışının karakteristik sınırlarını belirlemek üzere seçilmiştir. Seçilen gerilme ya da gerinim test

seviyeleri viskoelastik, viskoelastik-viskoplastik, viskoplastik davranış sınırlarını belirlemeye yöneliktir. Literatürde imalat yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisi karşılaştırmalı olarak detaylı bir şekilde ele alınmamıştır. Bu çalışmada imalat yöntemlerinin etkisi araştırılacaktır.

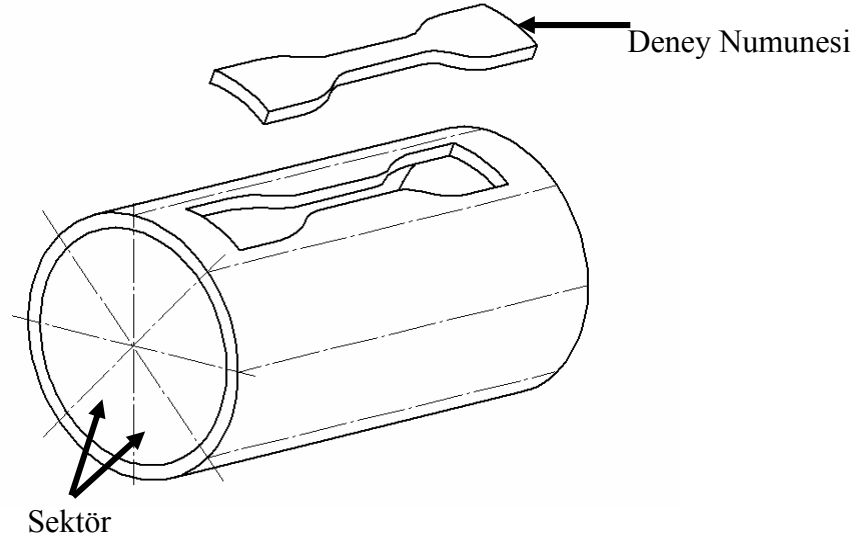
3.3 Deney Prosedürü

Çekme deneyi numuneleri, FIRAT Kauçuk ve Plastik A.Ş. tarafından üretilen ekstrüde PE100 (YYPE) 160 mm çapındaki doğalgaz borusundan 150 mm boyunda parçalar alarak ve daha sonra bu parçalardan kalıpta keserek çıkarmak suretiyle oluşturulmuştur. Numuneler borudan çıkarılma işleminden en az 15 saat sonrasında deneye tabi tutulmuştur. Her yükleme koşulunda en az üç adet deney yapılarak, sonuçların ortalaması alınmıştır. Çekme deneyi numunelerinin oluşturulmasında polimerik boruların kısa süreli çekme deformasyonunu özelliklerini belirlemek üzere yayımlanan ISO 6259-1 ve termoplastik borulardan polielefin boru için ISO 6259-3 standartları temel alınmıştır. Deneylerde bu standartlara göre gerçekleştirilmiştir. ISO 6259 standartları temel olarak polimerik malzemelerin çekme özelliklerini belirlemek üzere ortaya konan ISO 527 standartlarını içerir ve borular için uyarlama şeklindedir. Mamül borudan çekme numunesi çıkarılması, 63 mm den büyük dış çapa sahip borunun 150 mm'lik bir kısmı kullanılarak yapılır. 150 mm boyundaki bu kısımdan numunelerin çıkarılması için boru çevresi boyunca eşit mesafede sektör (borunun bölünerek levha haline getirilmesi) kesilerek oluşturulmuştur. Numuneler boru et kalınlığı 12 mm den küçük veya eşitse kalıpta kesilerek çıkarılacağı gibi frezede işlenerek çıkarılabilir fakat 12 mm den büyük et kalınlıklarında sadece frezede işlenerek çıkarılabilir. Numuneler boru et kalınlığı 5 mm olduğundan dolayı ISO 6259-3 standartında belirtilen ve Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilen tip 2'ye uygun olarak kalıpta kesilmek suretiyle çıkarılmıştır. Numune çıkarılırken, kalıp boru iç yüzeyine konularak üzerine basınç uygulanmıştır.

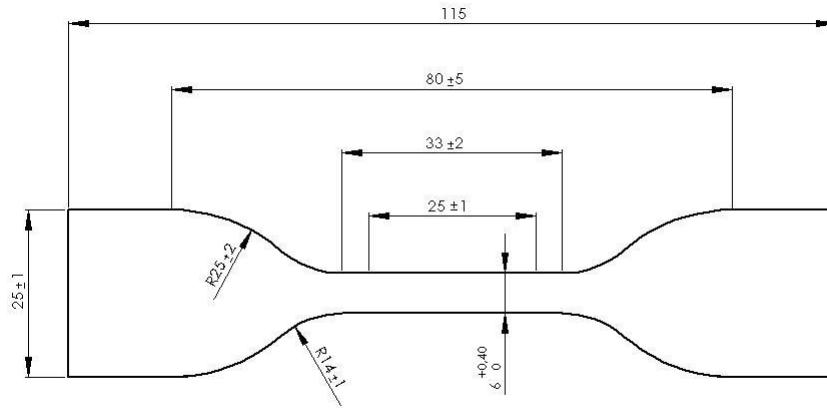
Deneysel çalışmanın birinci kısmında oluşturulan numuneler yüksek gerinim seviyesinde ve kopma davranışını gözlemlemeye yönelik olarak, FIRAT Kauçuk ve Plastik A.Ş. bünyesinde bulunan TESTOMETRIC M350 CLX marka çekme deney cihazı ile deneye tabi tutulmuştur. Cihazın yükleme hücresi kapasitesi 10 kN'dur. Ölçmeler cihaz üzerinde bulunan dijital ekstansometre ile gerçekleştirilmektedir. Deney cihazı 0.01-999.99 mm/dk gerinim hızı seviyeleri arasında ayarlanabilmektedir. Yapılan ölçümler deney cihazına bağlı bilgisayarda mevcut bulunan bir program (WinTest) vasıtası ile grafiksel olarak alınmaktadır.

Deneysel çalışmanın ikinci kısmında, ekstrüde borudan ve basınçta kalıplanmış levhadan oluşturulan numuneler sonlu gerinim seviyesinde yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme

davranışını belirlemeye yönelik olarak, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) bünyesinde bulunan ZWICK/ROELL Z250 Tip BZ250/SN517 seri no: 156275/2002 marka çekme deney cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yükleme hücresi kapasitesi 0.5-10-250 kN seviyelerinde değiştirilebilmektedir, deneylerde 10 kN'luk yükleme hücresi kullanılmıştır. Yükleme hücresi hassasiyeti EN ISO 7500-1 göre 0.5 Class'tır (%0.5). Uzunluklar ise Zwick B06608 tipi seri no: 156279/2002 ölçme mesafesi 740 mm ve EN 10002 T4 1 Class (%1) hassasiyetli ekstansometre ile ölçülmüştür. Cihaz üzerinde gerçekleştirilen deneyler "TestXpert" isimli bilgisayar programı ile değerlendirilmiş ayrıca yapılan deneylerin ortalaması da aynı program ile hesaplanmıştır. Deney cihazının görüntüleri Ek 1'de verilmiştir.



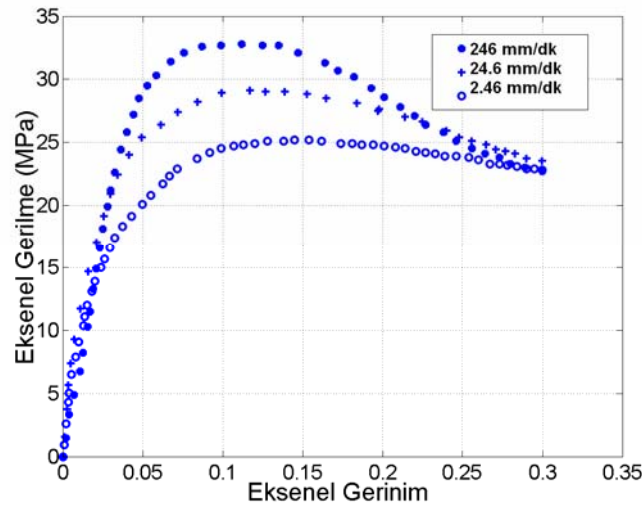
Şekil 3.4 Boru parçasından deney numunesinin çıkarılması



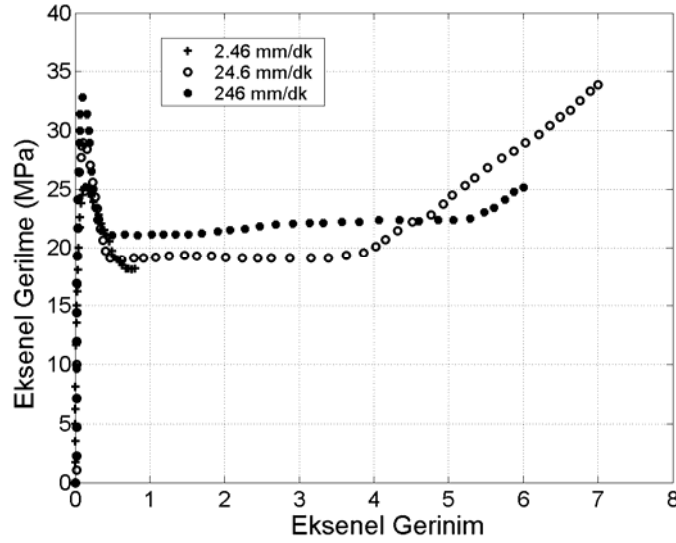
Şekil 3.5 Deney numunesi boyutları ISO 6259-3 tip 2

3.3.1 Ekstrüde Numune ile Yüksek Gerinim Seviyesinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları

Ekstrüde borudan çıkarılmış olan deney numuneleri 246 mm/dk, 24.6 mm/dk ve 2.46 mm/dk gerinim hızı seviyelerinde çekme deneyine tabi tutulmuştur. Her bir gerinim hızı seviyesinde beşer adet deney yapılmıştır ve bu eğrilerin ortalaması alınarak sonuç grafikleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.6-Şekil 3.7). Deneysel sonuçların karşılaştırılmasında her bir çekme hızı grafiğinde yüksek hıza bağımlı davranış ortaya çıkmıştır. Fakat malzemenin deformasyon esnasında takip ettiği aşamalar bir bütünlük arz etmektedir. Yük altında yüksek yoğunluklu polietilenin deformasyon aşamaları; 1) Çok küçük gerinim seviyelerinde gerilme ile gerinimin orantısız arttığı lineer bölge. 2) Gerilme ile gerinim arasındaki ilişkinin lineer olmayan viskoelastik bölge (Birinci akma noktası). Numune üzerindeki deformasyon homojendir. 3) Viskoplastik değişimin ve boyun vermenin meydana geldiği ikinci akma noktasından sonraki bölge. Homojen olmayan deformasyonun başladığı bölge. 4) Malzeme bünyesindeki molekül zincirlerinin yeniden düzenlendiği ve artan gerinime karşılık gerilmede hızlı bir düşüşün yaşandığı gerilme yumuşaması bölgesi. 5) Artan gerinime karşılık gerilme seviyesinin neredeyse sabit kaldığı bölge (Cold drawing). 6) Moleküler zincir düzenlemelerinin son bulduğu ve gerinimle gerilmenin çarpıcı bir şekilde arttığı (gerinim pekleşmesi) ve kopmanın meydana geldiği bölge. Şekil 3.6 ve 3.7’de verilen deney sonuçlarından elde edilen mukavemet değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.6 YYPE'nin 246, 24.6 ve 2.46 mm/dk gerinim hızında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrisi karşılaştırması.



Şekil 3.7 YYPE'nin 246, 24.6 ve 2.46 mm/dk gerinim hızlarında geniş uzama aralığında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması

Tablo 3.2 Ekstrüde numunenin büyük gerinim seviyesinde mukavemet değerleri

Çekme Hızı (mm/dk)	Elastiklik Modülü (MPa)	I. Akma Değeri (MPa)	II. Akma Değeri (MPa)	Kopma Değeri (MPa)
246	675	24	32	33
24.6	1370	9	29	35
2.46	1180	8	24	-

3.3.2 İmalat Yöntemlerinin Mekanik Özellikler Üzerinde Etkisi

Polimerik malzeme ile mamül madde üretim yöntemleri genel olarak ekstrüde ve kalıplama şeklinde gerçekleştirilir. Üretim yönteminin seçiminde mamül maddenin boyutları, hammaddenin özellikleri, ekonomiklik ve işleme kolaylıkları gibi faktörler etkili olur. Polimerik malzemeler üretim yöntemi ve proses şartlarından dolayı farklı türde yapılara sahip olabilir, sonuçta nihai ürün aynı hammaddeden üretilmişse olsa proses şartlarından dolayı farklı mekanik özelliklere sahip olabilir. Bu çalışmada, üretim yönteminin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretim yöntemlerinin mekanik davranışlar üzerindeki etkisini gözlemlemek üzere aynı türdeki YYPE granül malzemeden ekstrüde boru ve basınçlı kalıplama üretim yöntemleriyle numuneler elde edilmiştir. Bu nedenle genel polimerik malzeme üretim yöntemleri hakkında aşağıda kısaca bilgi verilecektir.

Ekstrüzyon yöntemi, termoplastik malzemelerden sonsuz veya belirli uzunlukta mamül madde üretim yöntemlerindendir. Bu yöntem ile boru, tüp, tellerin kaplanması, kaplanmış kablolar, sürekli levhalar ve sürekli filmlerin üretimi yapılır. Ekstrüzyon yöntemleri üretim şekline göre şişirme film, levha ekstrüzyon, döküm film, kablo ve tel kaplama, fiber ekstrüzyon olarak çeşitlere ayrılır. Ekstrüzyon işleminde genel olarak; kuru granül malzeme huni tabir edilen bölgeden boşaltılır. Ekstrüder huniyle besleme boğazı vasıtasıyla irtibatlıdır ve buradan geçen malzeme ısıtma işlemine tabi tutulur. Geniş ve sürekli dönen vidalar içerisinde ısınan reçine ısıtma odası sonunda bulunan kalıba doğru itilir. Kalıp içerisinden çıkan akışkanlaştırılmış reçine kalıp şeklini alarak bir konveyer sistemiyle makine dışında iletirilir. Bu taşıma sürecinde mamül ürün su ya da hava ile soğutulur.

Kalıplama işlemi, kapalı bir kalıp içerisinde nihai ürün ya da yarımamül oluşturmak üzere kullanılır. Kalıplama türleri; granül türüne, mamül maddenin şekline göre değişir. Kalıplama türlerinin başlıcaları; enjeksiyon, şişirme, transfer ve basınçlı kalıplamadır. Basınçlı kalıplama daha ziyade termosetlerin kalıplanmasında kullanılmakla beraber termoplastikler içinde kullanılır. Basınçlı kalıplamada ön karışım granül ya da ön şekil verilmiş polimerik malzeme, ısıtılıp-soğutulabilen alt ve üst kalıp arasına bırakılıp daha sonra basınç altında preslenir. Kalıp ilk önce ısıtılıp basınç uygulanır daha sonrada soğutma işlemi yapılır (Brown 1999).

Ekstrüde boru numune ile ilgili deney detayları yukarıda anlatılmıştır. Bu kısımda basınçta kalıplanmış numunelerinin elde edilme şartları hakkında bilgiler sunulacaktır. PETKİM Petrokimya Holding bünyesinde bulunan basınçlı kalıplama cihazında 2 mm kalınlığında YYPE levhalar üretilmiş daha sonra ISO 527 şartlarına göre bu levhalardan kalıpta kesme süretiyle numuneler elde edilmiştir. Ekstrüde boru numuneler ile basınçlı kalıplanmış numuneleri aynı boyutlardadır (Şekil 3.5). Kullanılan basınçlı kalıplama cihazının özellikleri:

Sıcak pres (SHINTO marka, tip:SFA-37) koşulları; Sıcaklık: 190 ± 3 °C, Basınç: 40 kg/cm^2 , Ön ısıtma süresi: 6 dakika, Birincil basınç bekleme süresi:1 saniye, Gaz boşaltma süresi:1 saniye, İkincil basınç süresi: 4 dakika, Degazlaşma sayıcı: 3.

Soğuk pres (SHINTO marka, tip:SFA-37) koşulları; Sıcaklık: 27 ± 3 °C, Basınç: 150 kg/cm^2 , Soğutma süresi: 5 dakika.

Kullanılan hammadde özellikleri; Erime akış indeksi (MFI): 0.32 g/10 min , Yoğunluk: 0.954 g/cm^3 ve Total XS10B ticari isimli granül malzeme kullanılmıştır.

3.3.3 Ekstrüde Numune ve Basınçta Kalıplanmış Numuneler ile Yapılan Deneyler

Bir polimerik malzemenin davranışını tam olarak tanımlayabilmek için o malzemenin farklı yükleme hallerinde toparlanma, boşaltma, sünme, gevşeme ve şekil değiştirme hızına bağımlılığının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneyler beş ana başlık altında toplanmıştır.

Şekil Değiştirme Hızının Yükleme ve Boşaltma Davranışlarına Etkisi

Şekil değiştirme hızının deformasyona etkisini gözlemlemek üzere $1.e-3$, $1.e-4$ ve $1.e-5$ 1/s gerinim hızlarında %15 gerinim seviyesine kadar çekme deneyleri ve aynı gerinim hızlarında sıfır gerilmeye kadar boşaltma deneyleri. Gerinim seviyesinin etkisi; viskoelastik-viskoplastik sınırlardaki yükleme ve boşaltma davranışını gözlemlemek üzere; $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %5 gerinim seviyesine kadar yükleme bu seviyeden sonra boşaltma deneyleri.

Toparlanma Deneyleri

Deformasyona maruz kalan ekstrüde numune üzerinde yükün kaldırılmasından sonraki kalıcı deformasyon miktarını belirlemek üzere $1.e-3$ 1/s hızında yüklenmiş ve boşaltılmış numuneler sıfır gerilmede 3000 saniye, $1.e-4$ 1/s hızında yüklenmiş ve boşaltılmış numuneler sıfır gerilmede 3000 saniye süreli toparlanma deneyleri. Yine ekstrüde numune üzerinde $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %5 gerinim seviyesine kadar yükleme bu seviyeden sonra boşaltma sonrası sıfır gerilmede 3000 saniye toparlanma deneyleri.

Gevşeme Deneyleri

Gevşeme davranışına gerinim seviyesinin etkisini belirlemek üzere $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %2, %5, %10 gerinim seviyelerinde 600 s gevşeme sonrasında tekrar yükleme %17, %20, %25 gerinim seviyelerine ulaşıldığında tekrar 600 s gevşeme ve gevşeme sonrasında boşaltma deneyleri.

Sünme Deneyleri

Sünme davranışına gerilme seviyesinin etkisini belirlemek üzere $1.e-4$ 1/s gerinim hızında 8 MPa, 12 MPa, 18 MPa gerilme seviyelerine kadar yükleme, sonrasında 600 s sünme ve sünmeden sonra boşaltma deneyleri.

3.3.3.1 Ekstrüde ve Basınçta Kalıplanmış Numuneler ile Yapılan Deneylerin Sonuçları *Yükleme-Boşaltma Deneylerinin Sonuçları*

Yükleme ve boşaltma deneyleri bir malzemenin deformasyon mekanizmaları ve mukavemet değerleri hakkında önemli bilgiler elde edilmesine yardımcı olur. Hız bağımlılığı ve mukavemet değerleri yükleme deneyleri ile belirlenir. Deformasyon davranış türü ise yükleme-boşaltma deneyleri ile belirlenir. Eğer bir malzemenin yükleme ve boşaltma deneyleri aynı eğri üzerinde ve boşaltma sonrası başlangıç noktasına dönülüyor ise elastik davranış söz konusudur. Yükleme ve boşaltma deneyleri farklı eğri çizmekle birlikte boşaltma sonrası sıfır gerilme seviyesinde toparlanma gözlemlenmiyorsa plastik davranıştan bahsedilir. Yükleme ve boşaltma deneyleri farklı eğriler çiziyor ve sıfır gerilmede başlangıç noktasına dönüyorsa viskoelastik, sıfır gerilmede başlangıç noktasına dönmüyor fakat kısmen toparlanıyorsa viskoplastik davranıştan söz edilir. Yükleme-boşaltma deneyleri sayesinde malzeme davranışının bu dört tür davranıştan hangisini içerdiğine karar verilir. (Şekil 3.8)

Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler “quasi-statik” şartları içeren hızlarda yükleme ve yine aynı hızlarda boşaltma deneylerine tabi tutulmuşlardır. “Quasi-statik” yükleme hızlarındaki deney şartları sünme davranışı içinde bir fikir verebilir. Bu deneyler en az üç kere tekrarlandıktan sonra her üç deney setinin ortalaması alınarak malzeme davranışını işaret eden gerilme-gerinim eğrileri çizilmiştir. Ekstrüde numune için yapılan üç adet deney seti sonuçları ve ortalamaları örnek olarak Şekil 3.9 ve 3.10’da verilmiştir. Yine aynı şekilde basınçta kalıplanmış numune için tekrarlanan üç deney seti ve ortalaması Şekil 3.11 ve 3.12’de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi gerçekleştirilen deneylerin herbirinin uyumlu değerlerde olması gözönünde bulundurulmuştur. Şekil 3.13 a, b, c’de sırasıyla $1.e-3$, $1.e-4$ ve $1.e-5$ 1/s gerinim hızlarında ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numune ile gerçekleştirilen %15 gerinim seviyesine kadar yükleme-boşaltma deneyleri sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu eğrilerden YYPE’nin her iki tür imalat yönteminde de güçlü gerinim hızı bağımlına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numune yükleme eğrileri gerilme-gerinim ilişkisi açısından %0.5 gerinim seviyesine kadar eşit oranda ve hızdan bağımsızdır. Bu bölge lineer viskoelastik davranış işaret etmektedir. Polimerik malzemelerin viskoelastik davranışının o malzemeyi oluşturan karbon ve hidrojen atomları arasındaki kovalent bağların ve bağ moleküllerinin esnekliğinden ileri geldiği düşünülürse, aynı hammaddeye sahip fakat farklı imalat yönteminde üretilmiş YYPE’nin benzer davranış vermesi beklenen bir sonuçtur. Lai ve Bakker (1995) bu sınırın %0.3-0.4 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Bu sınırın ötesinde her iki tür numune eğrilerinde ayrılmanın başladığı %2-%4

gerinim seviyeleri arasında lineer olmayan viskoelastik davranış gözlemlenmiştir. %4 gerinim seviyesinin ötesinde viskoplastik akış meydana gelmekte, viskoelastik davranıştan viskoplastik davranışa geçiş esnasında gerilme seviyesinde herhangi bir ani artış olmaksızın tedrici olarak artma söz konusudur, eğrilerden görüldüğü gibi bütün hızlarda pik yapmadan akma meydana gelmektedir. %9 gerinim seviyesi civarında gerilme yumuşaması (strain softening) oluşmaktadır. %15 seviyesinden itibaren yapılan boşaltma deneylerinde, lineer olmayan davranış gözlemlenmiştir ve boşaltma sonrası viskoelastik toparlanma miktarı çekme hızı ile ters orantılı olarak artmaktadır. Bu durum iç viskoziteyle ilişkili olup, iç viskozite artan çekme hızıyla artmaktadır (Düşünceli ve Çolak 2007a).

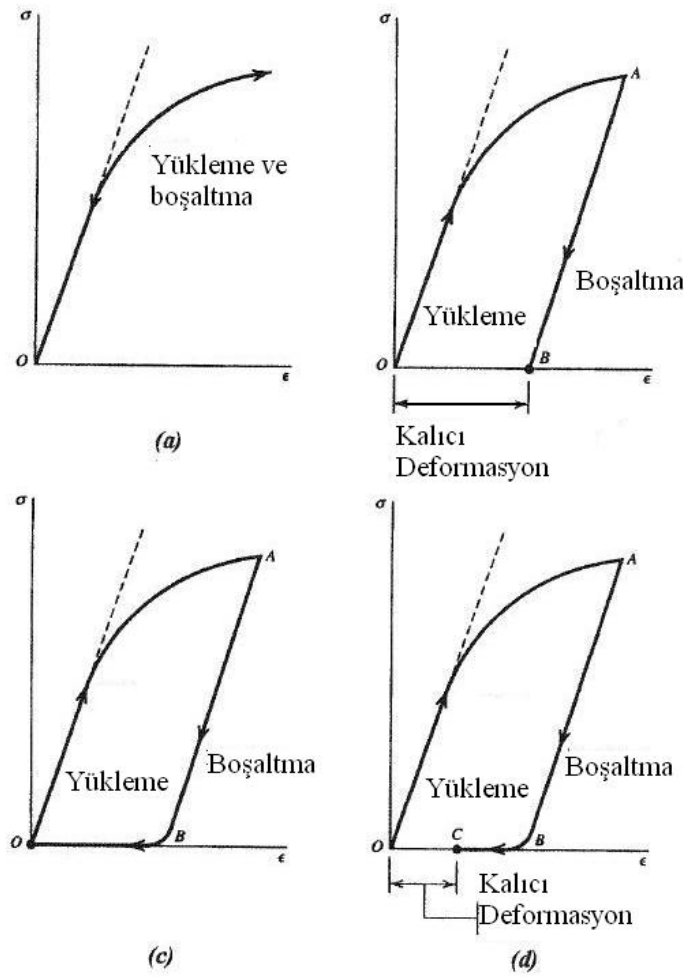
Her iki tür numune üzerinde yapılan deneylerde de gerinim hızı bağımlılığı ve lineer olmayan davranış gözlemlenmiştir. %6 gerinim seviyesi ötesinde tanjant modülü birbirine eşit ve her bir gerinim hızında viskoplastik akış meydana geldikten sonra gerilme seviyeleri arasındaki fark eşit miktarda kalmaktadır. Çekme hızı ve üretim yöntemlerinin mukavemet değerleri üzerinde etkisi; artan hızla arttığı ve ekstrüde numunenin basınçta kalıplanmış numuneden daha mukavim olduğu şeklinde görülmüştür. Tablo 3.3’de her iki tür numunenin mukavemet değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Ekstrüde numune ve basınçta kalıplanmış numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda lineer viskoelastik bölge ve boşaltma davranışını aynı özelliklerde olduğu gözlemlenmiştir. Davranıştaki farklılık, lineer olmayan viskoelastik ve viskoplastik davranışta gözlemlenmektedir. Basınçta kalıplanmış numunelerin maksimum gerilme seviyesi ekstrüde numuneye göre her bir gerinim hızında yaklaşık 3 MPa değerinde düşüktür. Bu farklılık kristallik oranı ve ekstrüde işlemi esnasında polimer zincirlerinin yönlenmesinden ileri gelmektedir.

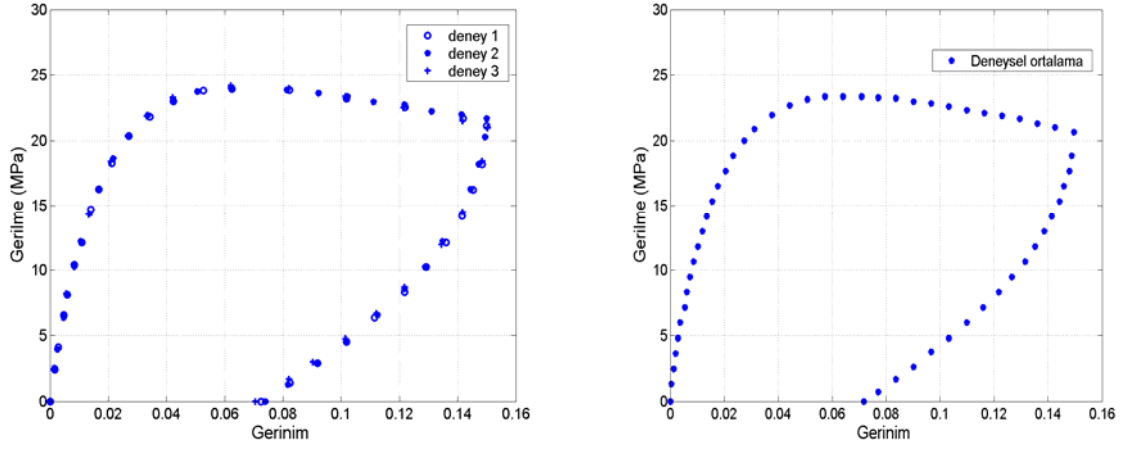
Gerinim seviyesine göre davranışın gelişimini gözlemlemek üzere $1 \cdot 10^{-4}$ 1/s gerinim hızında %5 gerinim seviyesinde yapılan deneylerde malzeme davranışının lineer viskoelastik ve lineer olmayan viskoelastik davranış da içine alarak viskoplastik davranış başlangıcına dayandığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.13 d). Her iki tür numune sonuçları karşılaştırıldığında lineer olmayan viskoelastik davranış gelişiminden itibaren eğriler birbirinden ayrılmakta ve ekstrüde numunenin mukavemet değerleri basınçta kalıplanmış numuneden daha yüksek değerler göstermektedir. Her iki tür numune %5 gerinim seviyesine yükleme sonrasında ulaştığı maksimum gerilme seviyesi arasında 2.7 MPa farklılık bulunmaktadır. Düşük gerinim seviyesinde imalat yönteminin etkisi mukavemet açısından ortaya çıkmamaktadır (Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE için). Bu durum malzeme üzerinde üretim yöntemi esnasında

oluşan kristalleşme ve yönlenme gibi farklılıkların viskoplastik deformasyon mekanizmalarında ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır.

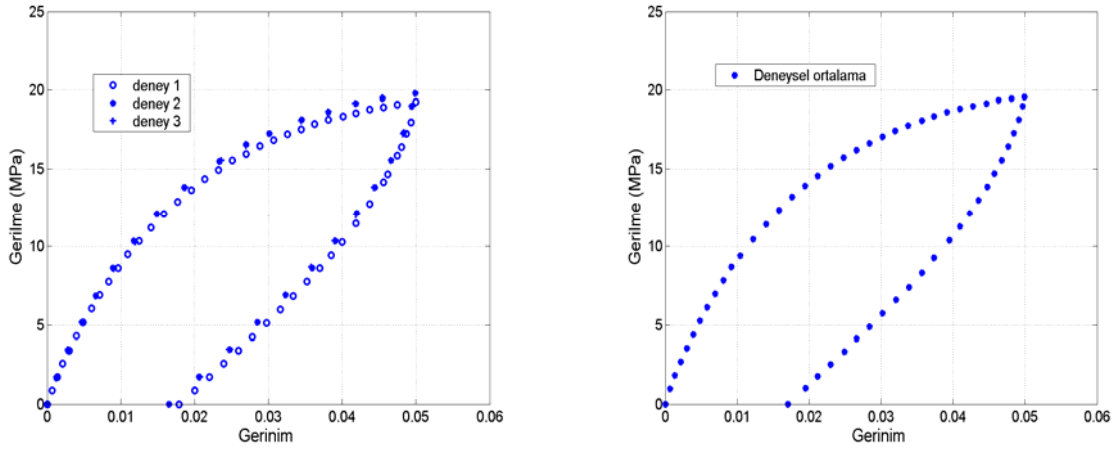
1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 gerinim hızlarında boşaltma sonrasında sıfır gerilmeye erişildiğinde meydana gelen viskoelastik toparlanma miktarı artan hız ile azalmaktadır (Tablo 3.4). Bu durum malzemenin kristallik oranı ve iç viskozitesi ile ilişkilidir. Gerinim hızı arttıkça malzeme iç viskozitesi artar (Seguela 2005). 1.e-4 1/s çekme hızında %5 ve %15 gerinim seviyelerinde yükleme-boşaltma deneylerinde gerinim seviyesi arttıkça boşaltma davranışında lineer olmayan özellikler artmaktadır. Gerinim seviyesi açısından boşaltma sonunda viskoelastik toparlanma miktarları karşılaştırıldığında, gerinim seviyesi ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Viskoplastik deformasyon esnasında kristal bloklarında ayrışma ve yeniden düzenlemeler meydana geldiğinden malzeme davranışı bu şekilde ortaya çıkmaktadır (Tablo 3.5).



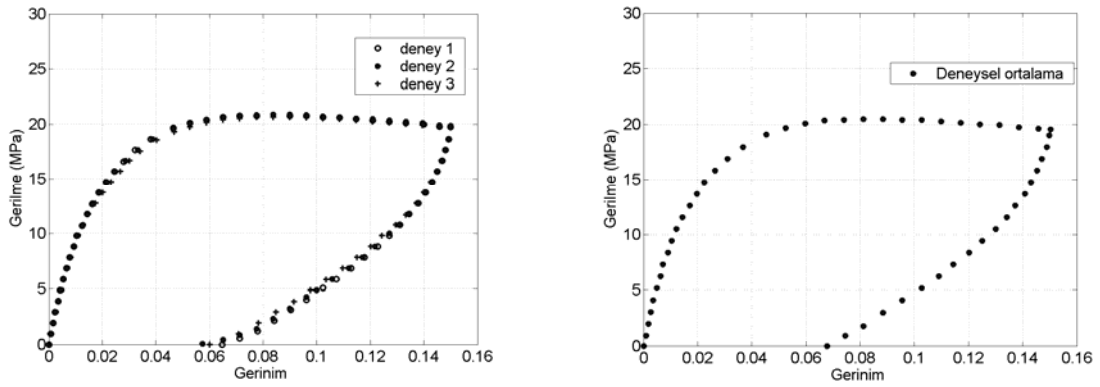
Şekil 3.8 Lineer olmayan malzeme davranışı tipleri. a) Lineer olmayan elastik b) Plastik c) Viskoelastik d) Viskoplastik (Khan 2003)



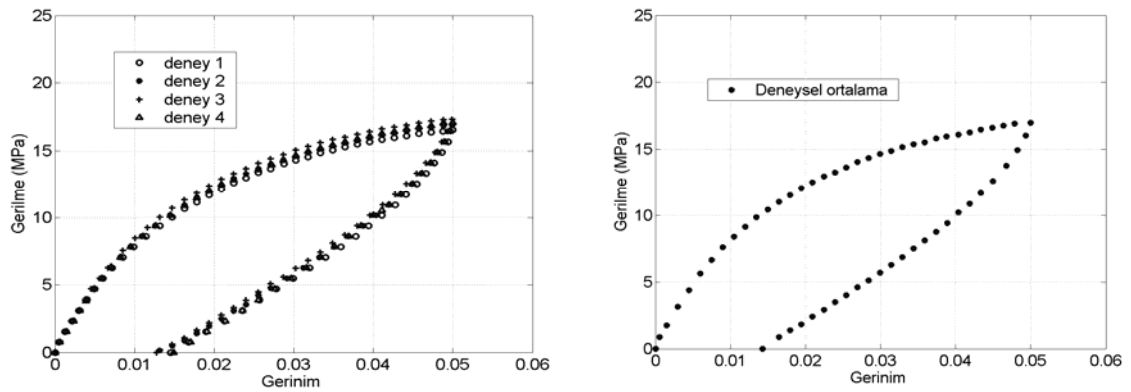
Şekil 3.9 Ekstrüde YYPE'nin 10^{-3} 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde tek eksenli çekme (yükleme ve boşaltma) deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi



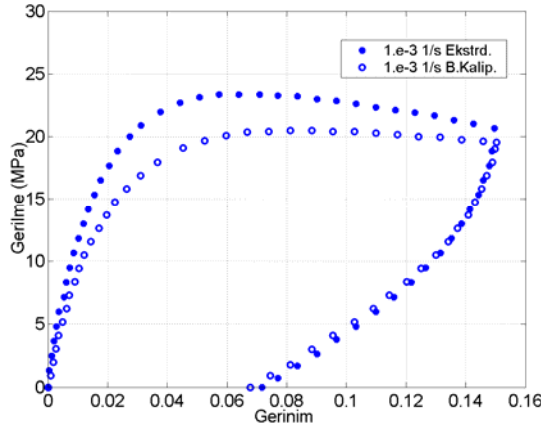
Şekil 3.10 Ekstrüde YYPE'nin 10^{-4} 1/s gerinim hızında tek eksenli %5 gerinim seviyesinde yüklem-boşaltma deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi



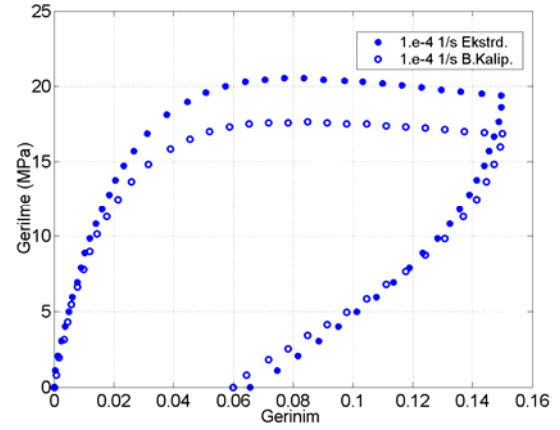
Şekil 3.11 Basıncıta kalıplanmış YYPE'nin $1.e-3$ 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde tek eksenli çekme (yüklem ve boşaltma) deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi



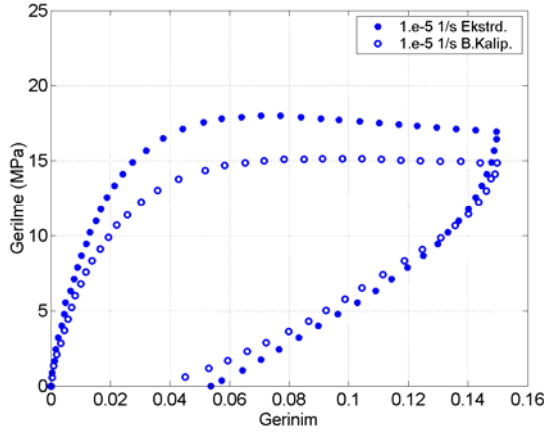
Şekil 3.12 Basıncıta kalıplanmış YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında tek eksenli %5 gerinim seviyesinde yüklem-boşaltma deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi



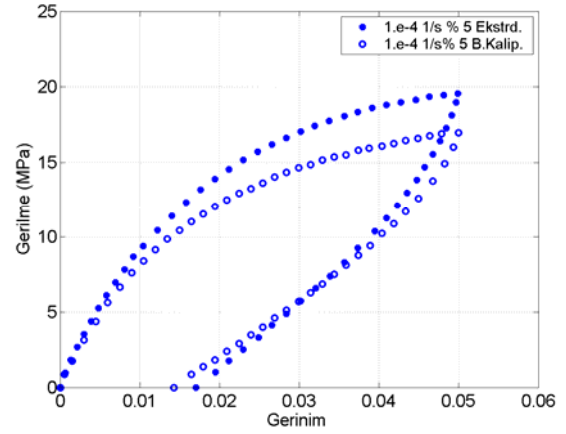
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.13 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile tek eksenli çekme (yükleme ve boşaltma) gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. a) $1.e-3$ 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde. b) $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde. c) $1.e-5$ 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde. d) $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %5 gerinim seviyesinde

Table 3.3 Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numunelerin mukavemet değerleri

Gerinim hızı (1/s)	Numune türü	Tanjant Modülü (MPa)	Sekant Modülü 1% gerinimde (MPa)	Sekant Modülü 2% gerinimde (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)
1.e-3	Ekstrüde	1106	1174	868	8.34	23.41
	B. Kalıp.	1099	917	699	8.02	20.54
1.e-4	Ekstrüde	750	878	681	7.40	20.66
	B. Kalıp.	745	797	593	6.61	17.56
1.e-5	Ekstrüde	730	855	644	5.55	18.00
	B. Kalıp.	729	667	501	5.18	15.14

Table 3.4 Tüm gerinim hızlarında viskoelastik toparlanma miktarları

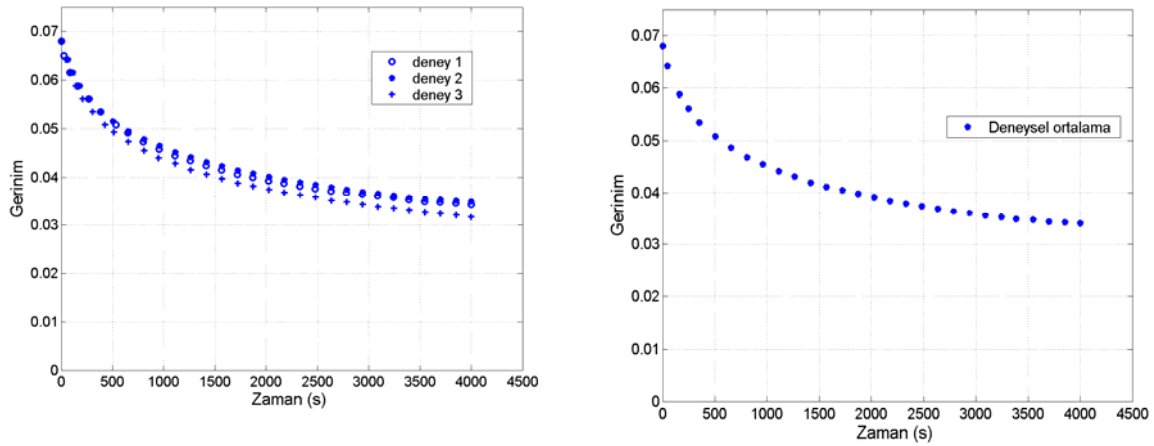
Gerinim Hızı (1/s)	Ekstrüde Numune (%)	Basınçta Kalıplanmış Numune (%)
1.e-3	52.18	54.86
1.e-4	56.2	60.11
1.e-5	64.2	73.88

Table 3.5 Değişik gerilme seviyelerinde viskoelastik toparlanma miktarları.

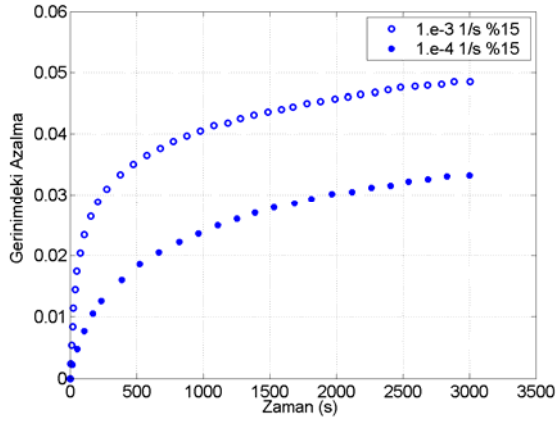
Gerinim Seviyesi (%)	Ekstrüde Numune (%)	Basınçta Kalıplanmış Numune (%)
5	65.9	71.4
15	56.2	60.11

Toparlanma Deneylerinin Sonuçları

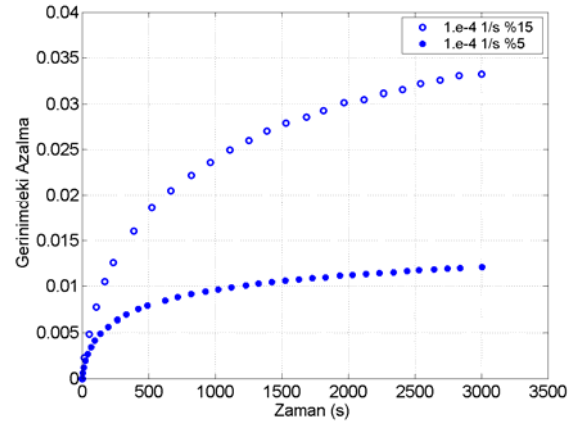
Şekil 3.8’de gösterildiği ve daha evvel de bahsedildiği gibi yükleme ve boşaltma sonrası toparlanma miktarları malzemenin davranış türü üzerinde önemli göstergelerden biridir. Ekstrüde YYPE’nin toparlanma davranışını gözlemlemek üzere sıfır gerilmede 3000 saniye süreli toparlanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.13 a’de deneylerin eğrileri, Şekil 3.13 b’de ise bunların ortalamaları örnek olarak gösterilmiştir. Herbir durum için üçer adet deney gerçekleştirilmiş ve bunların ortalamaları alınmıştır. Ekstrüde YYPE’nin boşaltma sonrasında sıfır gerilmede $1.e-3$ ve $1.e-4$ 1/s gerinim hızlarında % 15 gerinim seviyesinde gerçekleştirilen toparlanma deneyleri sonucunda (Şekil 3.14 a) artan gerinim hızı ile toparlanma geriniminin arttığı görülmüştür (Tablo 3.6). Aynı şartlarda $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %5 gerinim seviyesinde boşaltma sonrasında gerçekleştirilen toparlanma deneyi (Şekil 3.14 b) gerinim seviyesi açısından % 15 gerinim seviyesi ile karşılaştırıldığında, düşük gerinim seviyesinde daha yüksek toparlanma miktarı meydana gelmiştir (Tablo 3.6). Toparlanma miktarı azalan gerinim seviyesi ile artmaktadır (Düşünceli ve Çolak 2007a).



Şekil 3.14 Ekstrüde YYPE’nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinden boşaltma sonrası sıfır gerilme seviyesinde toparlanma deneyleri ve ortalama gerinim-zaman eğrisi



(a)



(b)

Şekil 3.15 Ekstrüde YYPE'nin boşaltma sonrası sıfır gerilme seviyesinde toparlanma deneyleri gerinimdeki azalma-zaman eğrileri karşılaştırması. a) 1.e-3 ve 1.e-4 1/s gerinim hızında %15 gerinim seviyesinde, b) 1.e-4 1/s gerinim hızında %5, %15 gerinim seviyesinde

Table 3.6 Ekstrüde YYPE'nin sıfır gerilme seviyesinde toparlanma oranları.

Gerinim Seviyesi	1.e-4 1/s Gerinim Hızı	1.e-3 1 /s Gerinim Hızı
%	1/s	1/s
15	48.8	66
5	66.8	

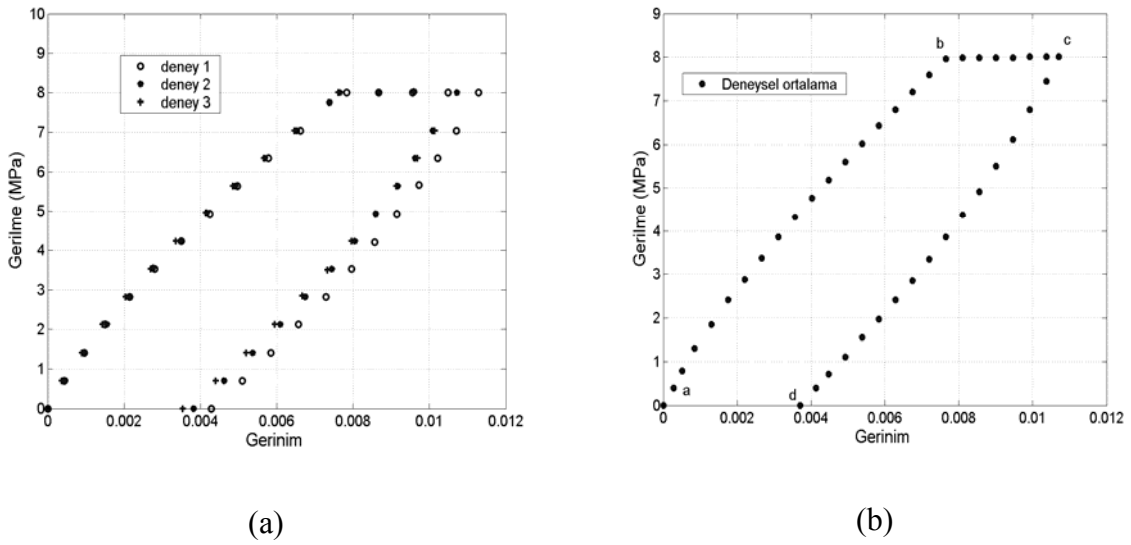
Sünme Deneylerinin Sonuçları

Sünme sabit bir gerilme altında malzemenin zaman içerisinde şekil değiştirmesi olarak tanımlanır. Bir sünme eğrisi üç ayrı safhadan meydana gelir. Birincil sünme bölgesinde malzeme deformasyona karşı güçlü bir direnç gösterir. İkincil bölgede ise sünme hızı sabittir ve bu bölgeye kararlı sünme ismi de verilir. Üçüncül sünmede ise numune aşırı şekilde uzayıp kopar. Düşük gerilme seviyesinde birincil sünme ve gerilme seviyesi yükseldikçe ikincil üçüncül sünmeler meydana gelir. Sıcaklık gerinim seviyesinin değişimindeki bir diğer etkidir. Belirli bir gerilme ve zaman seviyesinde sıcaklık yükseldikçe gerinimde artacaktır. Logaritmik skalada çizilmiş olan uzun süreli sünme eğrileri pratik mühendislik uygulamaları için oldukça faydalıdır. Bu tip uzun zaman eğrilerinin oluşturulmasında, kısa süreler için elde edilmiş sünme eğrileri uzun sürelerle enterpolasyon yapılır. Sünme eğrisinin herhangi bir noktasındaki gerilme-gerinim oranı sünme modülü olarak isimlendirilir. Sünme modüllerinin

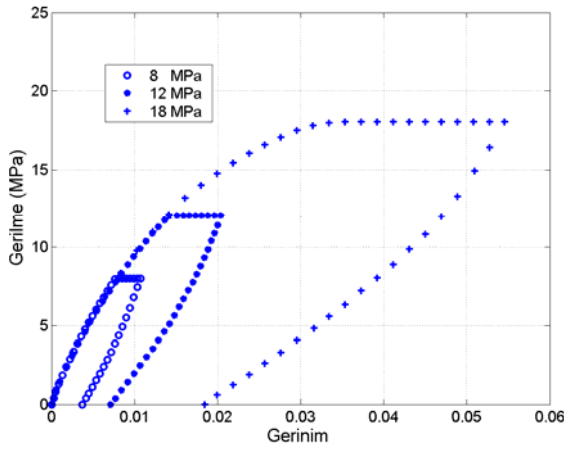
deneysel olarak tespit edilmesi özellikle ticari sonlu elemanlar bilgisayar çözüm programlarında malzeme modellerinin parametrelerinin belirlenmesinde önemlidir. Metalik malzemelerde yüksek sıcaklıklarda meydana gelen sünme, polimerik malzemede oda sıcaklığında görülür. Ayrıca sünme polimerik malzemeler için viskoelastik davranışının çatısı hakkında fikir edinmek ve nihai ürünün yükleme kapasitesini belirlemek açısından son derece hayati öneme sahiptir. Bu nedenlerden polimerik malzemelerin sünme davranışlarının belirlenmesi ve modellenmesi kaçınılmazdır.

Şekil 3.15 a’da ekstrüde numune üzerinde gerçekleştirilen 8 MPa seviyesindeki üç adet sünme deneyi eğrileri ve Şekil 3.15 b’de ise bunların ortalamaları verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere $1.e-4$ 1/s gerinim hızında 8 MPa gerilme seviyesine kadar yükleme ve bu yükte 600 saniye bekletme daha sonrasında sıfır gerilemeye kadar boşaltma deneylerinden meydana gelmektedir. Çalışmadaki bütün sünme deneylerinin prosedürü bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Aynı gerilme seviyelerinde sünme deneyleri hem ekstrüde hem de basınçlı kalıplanmış numune üzerinde gerçekleştirilmiştir Şekil 3.17 a ve Şekil 3.18 a’da sırasıyla ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile gerçekleştirilen sünme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden ve Şekil 17 b ve Şekil 18 b’de görüldüğü üzere gerilme seviyesi arttıkça sünmedeki gerinim miktarı artmaktadır. 8 ve 12 MPa seviyelerinde 600 saniye süreyle her iki tür numune ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda birincil sünme gözlemlenmiştir (Şekil 3.17 b ve 3.18 b). Düşük gerilme seviyelerinde YYPE’nin sünme deformasyon davranışı lineer olmayan viskoelastik davranış şartlarında gerçekleşmektedir. Yükleme-boşaltma deneylerinin yorumunda belirtildiği gibi her iki tür numunenin düşük gerinim seviyesindeki yükleme cevapları birbirine benzerdi. Sünme deneylerinde de bu gerinimlere denk gelen her iki yükleme seviyesindeki (8 ve 12 MPa) gerinim artışı yaklaşık aynı oranlarda gerçekleşmektedir (Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Tablo 3.7). Şekil 17 b ve Şekil 18 b’de görüldüğü üzere 18 MPa seviyesindeki sünme deneyleri sonuçları gerinim artışı seviyesi açısından ve sünme türü açısından diğer iki seviyedeki sünmelerden farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar özellikle basınçta kalıplanmış numune sünme deneyinin ikincil sünme özelliği göstermesi ayrıca her iki tür numunenin gerinim artışı oranının diğer sünme seviyelerinden yüksek olmasıdır (Tablo 3.7). Şekil 3.20’de 18 MPa seviyesinde 600 saniye süreli sünme deneyleri sonuçları ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi basınçta kalıplanmış numune sünme deneyindeki gerinim artışı ekstrüde numuneye göre daha yüksek orandadır (Tablo 3.7). Ayrıca 18 MPa seviyesinde sünme davranışı lineer olmayan viskoplastik davranışa doğru kaymaktadır. Bu durum basınçta kalıplanmış numune

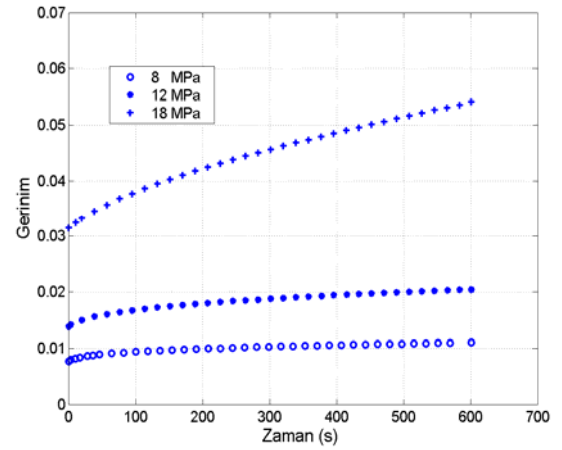
sonuçlarında daha belirgindir. Malzeme maksimum mukavemet değerlerine (kristal lamelleri ayrışıp ya da yeniden düzenlenerek viskoplastik akış meydana gelmekte) yakın yükleme seviyelerinde gerçekleştirilen sünme deneyleri viskoplastik özellik göstermektedir. Sonuç olarak 8 MPa gerilme seviyesi yaklaşık olarak lineer viskoelastik limit sonuna, 12 MPa seviyesi lineer olmayan viskoelastik limit sonuna ve 18 MPa seviyesi viskoplastik akış kısmına denk gelmektedir. Deney sonuçları lineer olmayan bir davranış ortaya koymuş ve artan gerilme seviyesi ile gerinim miktarı artmaktadır. Her iki tür numune için sünme deneyi eğrileri gelişim (trend) olarak birbirine benzer sonuçlar vermektedir. Sünme deneyleri gerinim seviyesindeki artış bakımından karşılaştırıldığında, basınçta kalıplanmış numuneler ile ekstrüde numuneler düşük gerilme seviyesinde aynı düzeyde artış göstermektedir. Gerinim seviyesindeki artış sonuçları arasındaki fark yüksek gerilme seviyelerinde (18 MPa gibi) daha belirginleşmektedir. Her iki numune için sünme deneylerindeki gerinim artışı farklılığı kristallik oranı ve imalat yöntemi esnasında morfolojik yönlenmelerden kaynaklanmaktadır (Düşünceli ve Çolak 2007a).



Şekil 3.16 a) Ekstrüde YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 8 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme ve boşaltma deneyleri. b) Ortalama gerilme-gerinim eğrisi

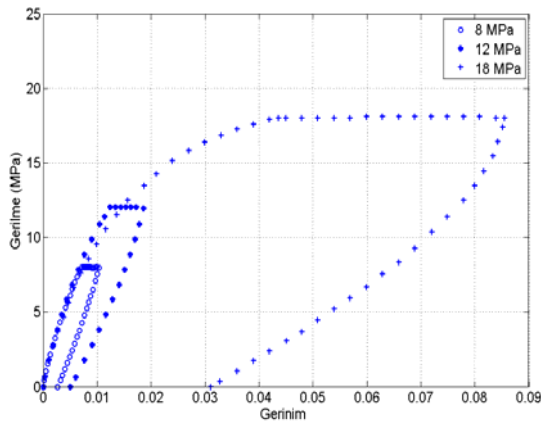


(a)

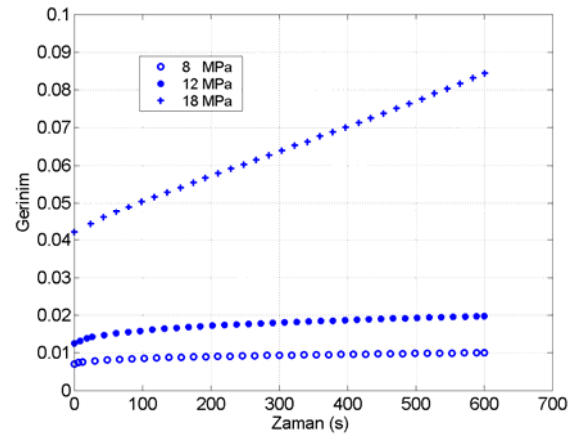


(b)

Şekil 3.17 a) Ekstrüde YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında 8-12-18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri. a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması

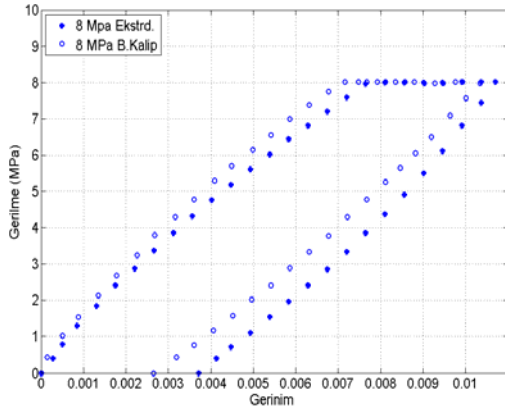


(a)

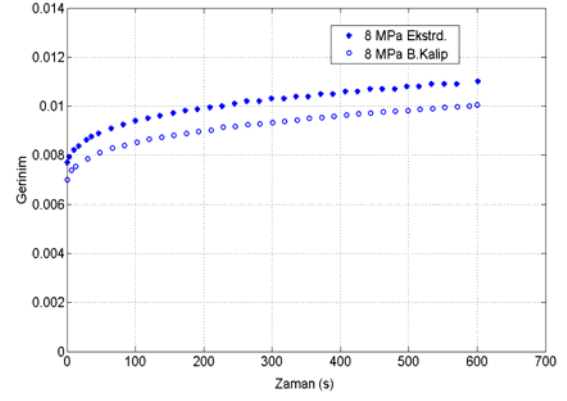


(b)

Şekil 3.18 a. Basıncıta kalıplanmış YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında 8-12-18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b. 8-12-18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması

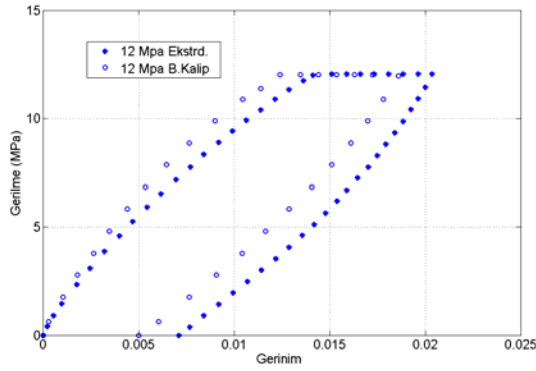


(a)

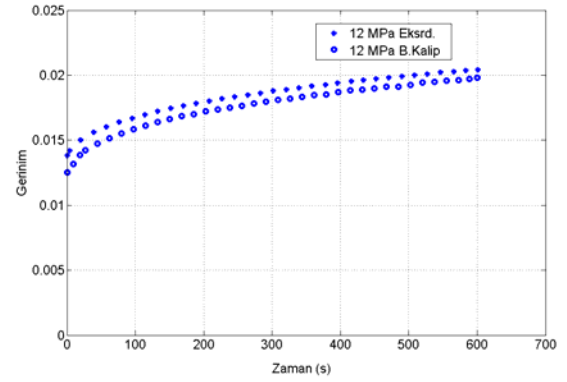


(b)

Şekil 3.19 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 8 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması

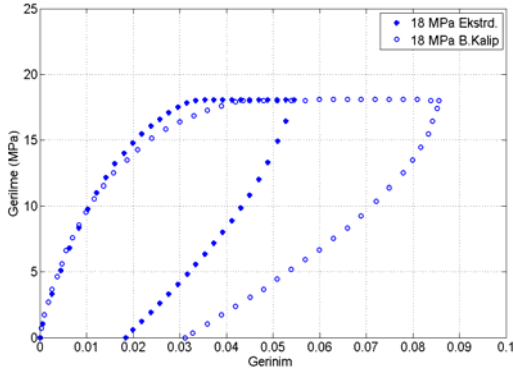


(a)

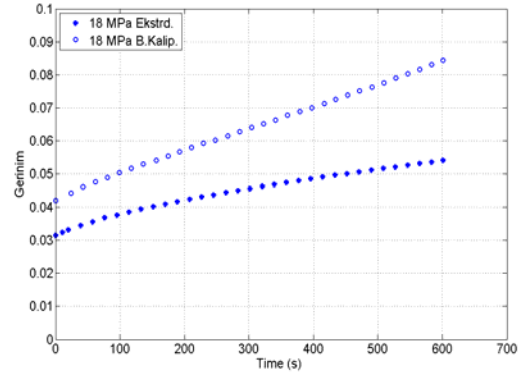


(b)

Şekil 3.20 a) YYPE'nin Ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 12 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması



(a)



(b)

Şekil 3.21 a) YYPE'nin Ekstrüde ve basınçlı kalıplanmış numuneler ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrası 18 MPa gerilme seviyesinde 600 s sünme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerinim-zaman eğrileri karşılaştırması

Tablo 3.7 Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numunelerle yapılan sünme deney sonuçları

Gerilme Seviyesi (MPa)	(Ekstrüde Numune) Gerinim Artışı (%)	(Basınçta Kalıplanmış Numune) Gerinim Artışı (%)
8	42.8	43.6
12	46.9	57.6
18	71.6	100

Gevşeme Deneylerinin Sonuçları

Polimerik malzemelerde oda sıcaklığında zamanla gerilme seviyesinde bir düşüş meydana gelir. Sabit gerinim seviyesinde gerilmedeki azalışa gevşeme ismi verilir. Gerilme gevşemesi başlangıç seviyesinde hızlı bir düşüş sergilerken zaman aralığı arttıkça denge durumuna erişir. Sıcaklık yükseldikçe gerilme gevşemesi süresi azalır, daha kısa sürede daha çok gerilme gevşemesi meydana gelir. Gevşeme deneylerinin göstergesi olarak pratik uygulamalara yönelik gevşeme modülleri kullanılır. Gevşeme modülü, gevşeme datalarından herhangi bir noktadaki gerilmenin sabit gerinim seviyesine bölünmesiyle bulunur. Gevşeme modülleri sonlu elemanlar yöntemi tabanlı ticari bilgisayar programlarındaki viskoelastik modellerin çözümüne dair malzeme parametrelerini meydana getirir. Gevşeme ile ilgili pratik örnekler ise; plastik şişe kapakları ya da boru bağlantı parçalarında vidalı elmanların sıkma gerilmesinin zamanla azalmasıdır.

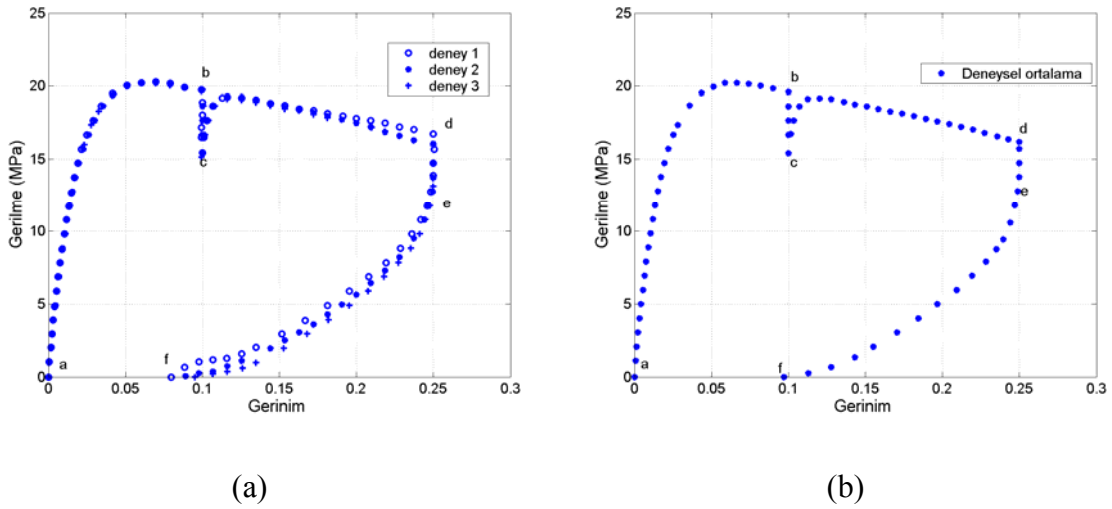
Gevşeme deneyleri ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numunelere için aynı gerinim seviyelerinde olmak üzere iki farklı gerinimde katlamalı olarak 600 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22 a'da ekstrüde numune ile sırasıyla %10 ve % 25 gerinim seviyelerinde 600 saniye süreli gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir. Burada üç adet deney gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.22 b'de bu eğrilerin ortalaması gösterilmektedir. Diğer yandan bu gerilme-gerinim eğrilerinde görülen gevşeme deneylerinin zamanla gerilmedeki azalış miktarlarını gösteren üçer adet gerilme-zaman eğrileri Şekil 3.23 a ve Şekil 3.24 a'da gösterilmektedir. Şekil 3.23 b ve 3.24 b'de bu deney setlerinin ortalamaları görülmektedir. Diğer gevşeme deneyleri olan $1.e-4$ 1/s çekme hızında %2-%17, %5-%20 gerinim seviyelerinde katlamalı gevşeme deneyleri her iki tür numune için bu prosedür kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.25 a ve Şekil 3.26 a'da sırasıyla ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile gerçekleştirilen gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden ve Şekil 25 b ve Şekil 26 b'de görüldüğü üzere gerinim seviyesi arttıkça gevşemedeki gerilme düşüşü miktarı azalmaktadır. Ayrıca bu eğrilerden görüleceği gibi gevşeme davranışı lineer olmayan özellik göstermektedir ve viskoplastik akış meydana geldiğinde (%5 ve %10 gerinim seviyesi) gevşeme davranışı gerinim seviyesinden bağımsız olmaktadır.

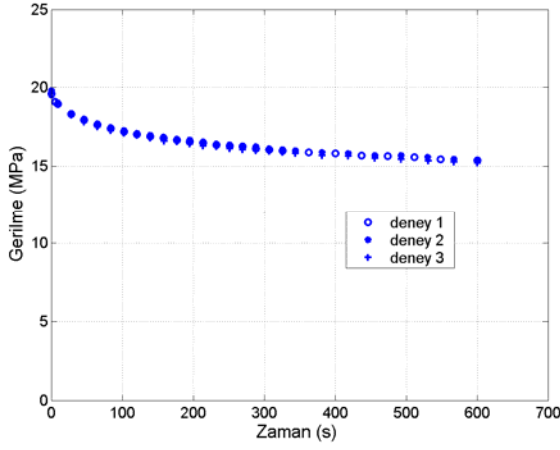
Şekil 3.27'de %2-%17 gerinim seviyelerinde ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numune gevşeme deneylerinin karşılaştırmalı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.27 a'daki gerilme-gerinim eğrileri daha önce yükleme-boşaltma eğrilerinde işaret edilen sonuçlarla benzer özellikler göstermektedir. Her iki tür numune için farklılık mukavemet değerleri dışında aynı şekilde gelişmektedir. %2 ve % 17 gerinim seviyelerindeki gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.27 b ve 3.28 b'de gösterilmektedir. Bu eğriler incelendiğinde gevşeme deneylerinde gerilmedeki azalma miktarları her iki tür numune için eşit değerlerdedir.

Şekil 3.29'da %5-%20 gerinim seviyelerindeki ve Şekil 3.30'da ise %10-%25 gerinim seviyelerinde gevşeme deneyleri sonuçları gösterilmektedir. Bu her iki gevşeme deneyi sonuçları yukarıda anlatılan %2-%17 gerinim seviyelerindeki gevşeme deneyleri ile benzer özelliklere sahiptir. Ayrıca bu iki gerinim seviyesindeki gevşeme deneyleri viskoplastik akış kısmına denk geldiğinden başlangıç gerilme seviyeleri de dahil tamamiyle aynı özelliklere sahiptir. %5-%20 ve %10-%25 gerinim seviyelerinde imalat yönteminin ve gerinim seviyesinin gevşeme davranışı üzerinde herhangi bir etkisi meydana gelmemektedir (Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile).

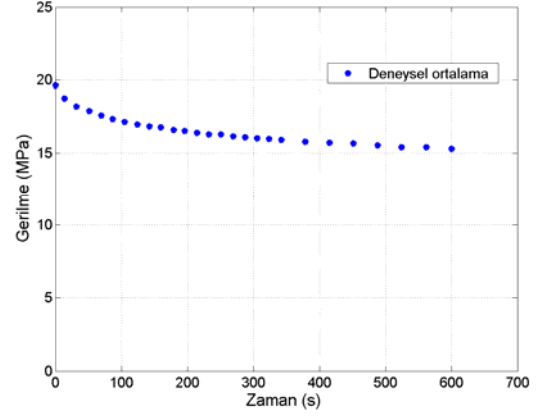
%2-17, %5-20 ve %10-25 olacak şekilde 600 saniye ile gerçekleştirilen gevşeme deneyleri sırasıyla malzemenin lineer viskoelastik limit sonu, lineer olmayan viskoelastik davranış bölgesi ve viskoplastik davranış bölgelerindeki farklılıkları gözlemlemek üzere gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numune ile gerçekleştirilen gevşeme deneylerinde gerilme azalması %2 gerinim seviyesinde diğer gerinim seviyelerine göre başlangıçta daha hızlı ve lineer olmayan bir şekilde gerçekleşmektedir. Basınçta kalıplanmış numune ile gerçekleştirilen gevşeme deneyleri gerilme seviyesi ve bitiş noktası hariç genel davranış aşamaları olarak ekstrüde numune ile gerçekleştirilen deney sonuçları ile benzer sonuçlar vermiştir. Her iki numune türünün aynı gerinim seviyesinde yüzde olarak gerilme düşüşü yaklaşık eşit miktarlarda gerçekleşmiştir (Tablo 3.8). Her iki tür numune ile yapılan gevşeme deneyi sonuçlarında viskoplastik akış bölgesinde gerilme seviyesindeki düşüşün (gevşeme oranı) gerinim seviyesinden bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle ikincil gevşeme gerinimi seviyesinde daha açık olarak görülmektedir (Düşünceli ve Çolak 2007a).



Şekil 3.22 Ekstrüde YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %10, %25 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri ve ortalama gerilme-gerinim eğrisi

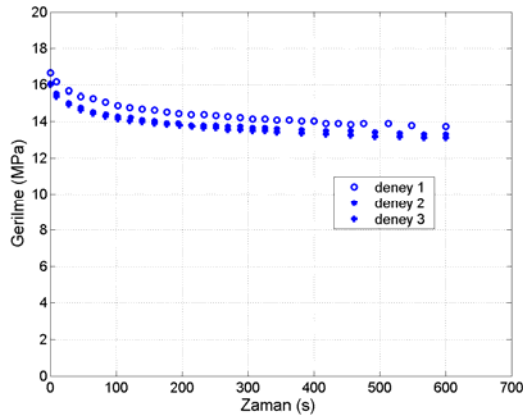


(a)

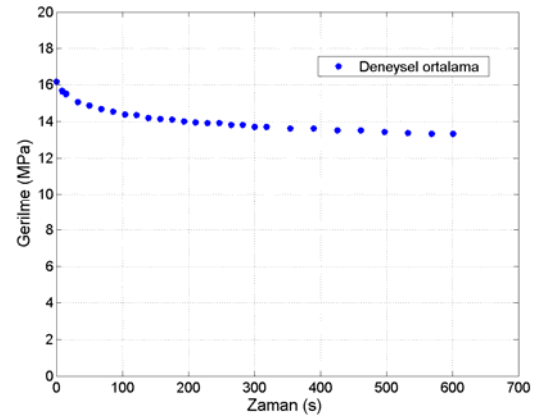


(b)

Şekil 3.23 Ekstrüde YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %10 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri ve ortalama gerilme-zaman eğrisi

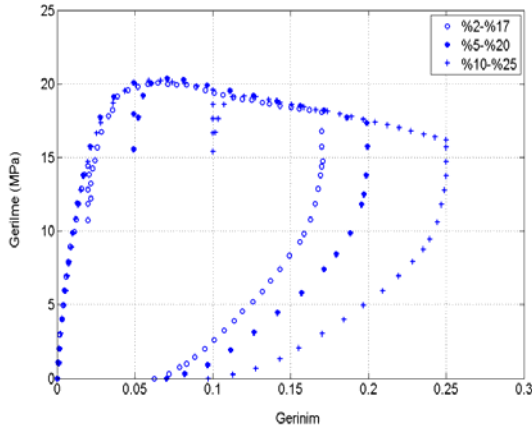


(a)

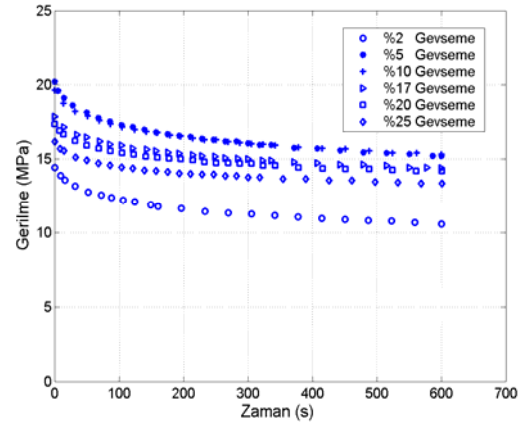


(b)

Şekil 3.24 Ekstrüde YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %25 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri ve ortalama gerilme-zaman eğrisi

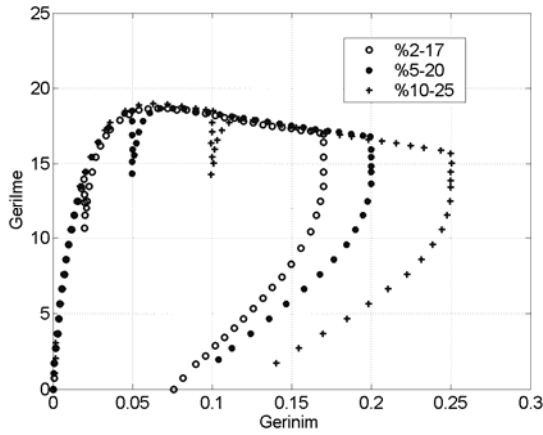


(a)

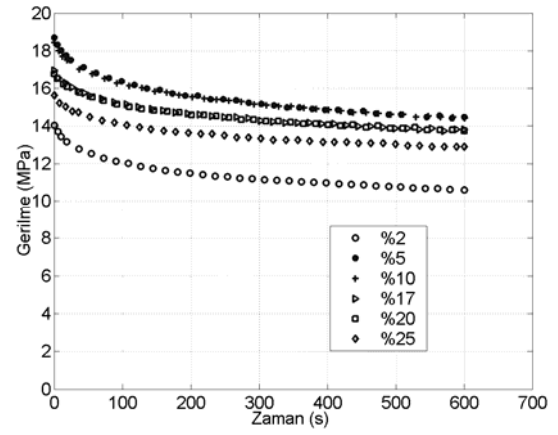


(b)

Şekil 3.25 Ekstüde YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %2, %5, %10 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması.

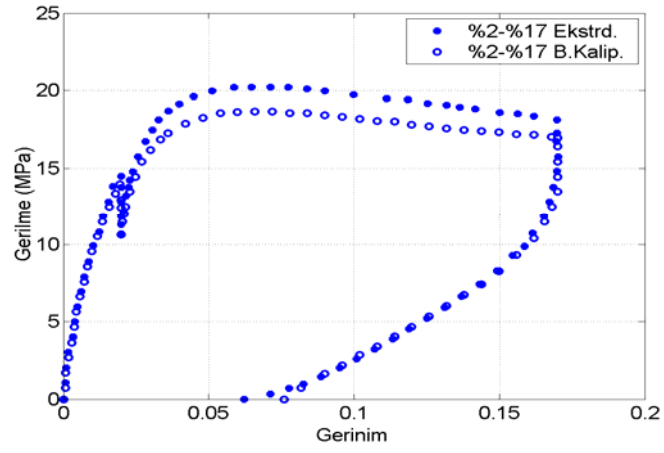


(a)

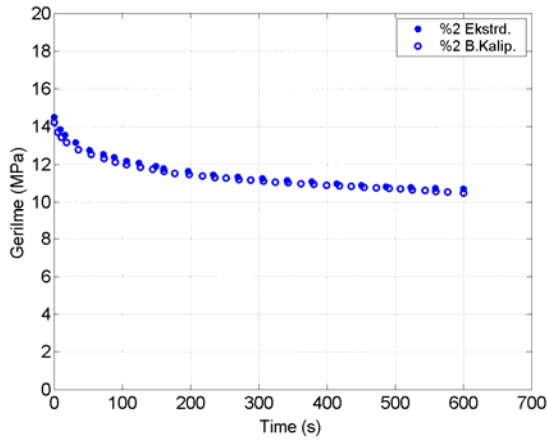


(b)

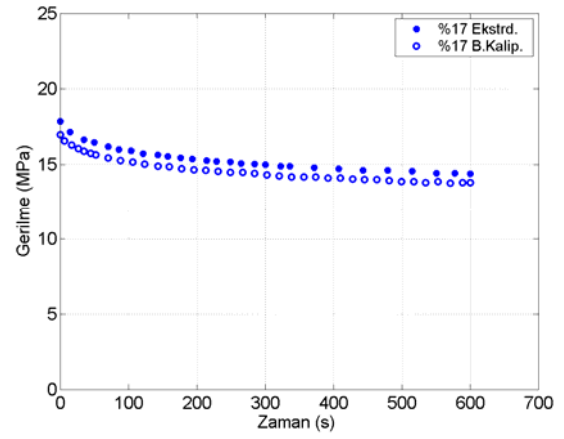
Şekil 3.26 Basıncıta kalıplanmış YYPE'nin $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %2, %5, %10 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri a) Gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) Gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması



(a)

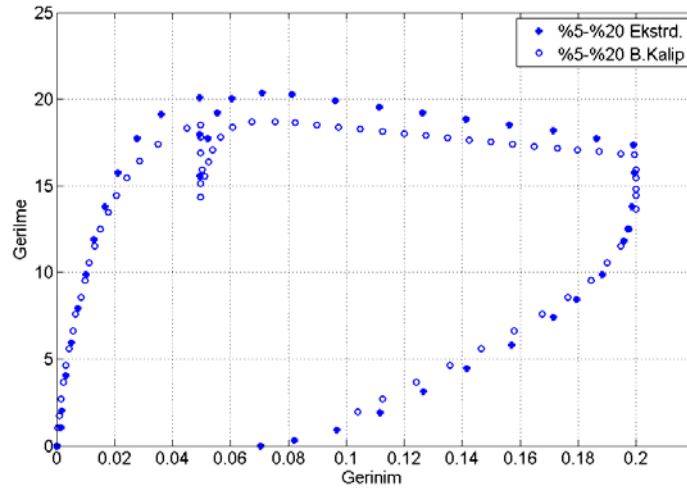


(b)

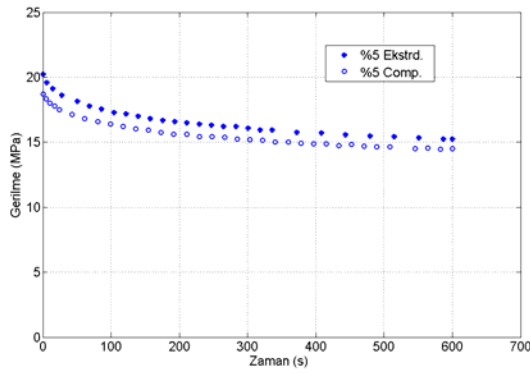


(c)

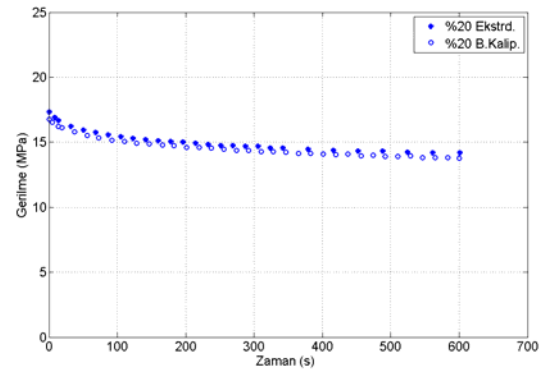
Şekil 3.27 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında tek eksenli yükleme sonrasında %2, %17 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri. b) %2 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması. c) %17 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması



(a)

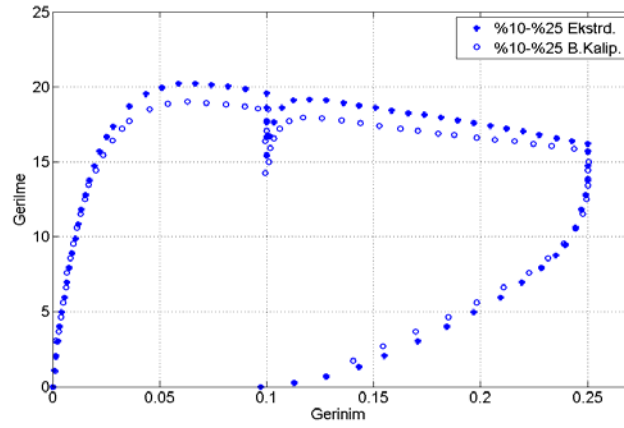


(b)

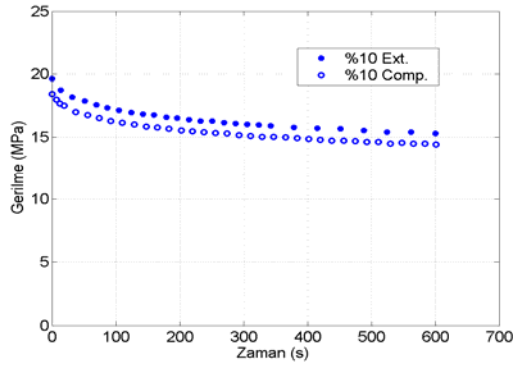


(c)

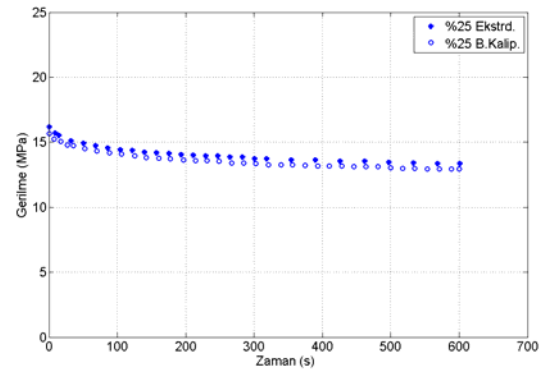
Şekil 3.28 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %5, %20 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) %5 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması. c) %20 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.29 a) YYPE'nin ekstrüde ve basınçta kalıplanmış numuneler ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yükleme sonrasında %10, %25 gerinim seviyelerinde 600 s peşpeşe gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırması. b) %10 gerinim seviyesinde 600 s gevşeme deneyleri gerilme-zaman eğrileri karşılaştırması.

Table 3.8 Gevşeme deneylerinde değişik gerinim seviyelerinde gerilmede azalış yüzdeleri

Gerinim Seviyesi (%)	Ekstrüde Numune (%)	Basınçta Kalıplanmış Numune (%)
2	26.40	26
17	18.20	18.4
5	22.50	22.20
20	18.18	18.07
10	22.08	22.10
25	17.46	17.50

4. MODELLEME ÇALIŞMALARI

4.1 Literatürde Yapılmış Olan Modelleme Çalışmaları

Polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi yapılırken göz önünde bulundurulması gereken özellikler;

- 1) Malzeme davranışı lineer değildir.
- 2) Boşaltma eğrileri lineer değildir.
- 3) Hidrostatik basınç akma davranışını etkiler.
- 4) Sıfır gerilmeye toparlanma belirgindir.
- 5) Elastik bölgede sünme ve gevşeme gözlemlenir.

Yukardaki özellikler polimerik malzeme ile metalik malzeme mekanik davranışları arasındaki en belirgin farklılıklardır (Çolak 2005). Literatürde polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi makro ve mikroyapısal olarak yapılmaktadır. Mikroyapısal modelleme üzerine yapılan çalışmaların başlıcaları; Hasan ve Boyce (1995), Arruda ve Boyce (1993), Boyce vd. (2000), Nikolov ve Doghri (2000), Sweenwy ve Collins (2002), Ahzi ve Makardi (2002), Drozdov ve Yuan (2003), van Dommelen vd. (2003-2004), Bedoui vd. (2004) ve Capaldi ve Boyce (2004)'dır.

Hasan-ve Boyce (1995), camsı polimerler için mikroyapısal deformasyon tarzını açıklamaya yönelik bir model oluşturmuştur. Lineer olmayan viskoelastik ve viskoplastik modellemeyi içeren çalışmayı, malzemenin termomekanik geçmiş etkilerini de dikkate alarak yapmıştır. Modellemeye tek eksenli basma yüklemesi ve basma sünmesi deneyleri temel teşkil etmektedir. Modellemede fiziksel yaşlanma ve gerinim yumuşaması etkileri de dikkate alınmıştır. Modelin viskoelastik deformasyondan viskoplastik akışa geçişi açıklayabileceği görülmüştür. Model ayrıca sıcaklık, hız, termal geçmiş bağıllığı ve gerinim gevşemesini açıklamıştır.

Boyce vd. (2000), PET'in cam geçiş sıcaklığı üzerindeki mekanik davranışını modellemiştir. Modellemede moleküler düzenleme prosesi ile moleküler gevşeme arasındaki ilişki, çekme hızı ve sıcaklık etkileri dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışmaya farklı şekil değiştirme hızları ve cam geçiş sıcaklığının üzerindeki farklı sıcaklıklarda yapılan tek eksenli basma deneyleri temel teşkil etmiştir. Modelde moleküller arası direnç ve molekül ağ arasındaki direnç birbirine paralel elektrik benzeşim devresi ile ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında modelin; başlangıç akma bölgesinde, gerinim sertleşmesi bölgesinde, sonlu deformasyonlarda hız ve sıcaklık bağımlılığını çok iyi açıkladığı, boşaltmayı

açıklayamadığı görülmüştür.

Nikolov ve Doghri (2000), çalışmasında PE'deki kristal lamelleri ve birleştiği amorf tabakaları tıpkı bir kompozit malzeme gibi düşünerek mikro seviyede modellemiştir. Amorf kısım için viskoelastik modelleme üç elemanlı elektrik benzeşim ile yapılmıştır. Kristal kısım modellenmesi ise akmadaki viskoplastik davranış dahil edilerek yapılmıştır. Ayrıca yarı-kristal polimerler için iyi bir tanımlama olan “overstress” teori kullanılmıştır. YYPE için akma gerilmesi ve elastiklik modülü arasındaki ilişki oluşturulan modelle izah edilmiştir.

Sweeney vd. (2002), sonlu deformasyonlarda PE için viskoelastik-viskoplastik mikroyapısal model geliştirmiştir. Burada daha önce yapılan çalışmalar ışığında 150 °C de PP nin boyun verme ve sonlu deformasyon davranışını açıklayan teori PE için uygulanmıştır. Modelleme iki kısımdan oluşmuştur; 1. Polimer zincirlerinin ağındaki elastik model, 2. Gerilme hızına bağlı gerilmenin viskoz ve plastik modeli. Yapılan çalışma sonlu elemanlar yöntemiyle çözülerek geniş gerinim seviyesinde değişik şekil değiştirme hızlarında deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Ahzi vd. (2003), çalışmasında sonlu deformasyonlar için PET'in mekanik davranışını belirlemek üzere bir mikro model ortaya koymuştur. Amorf ve kristal bölgeleri iki farklı yapı gibi düşünüp elektrik benzeşim devresi kurarak modellemiştir. Kristalizasyon oranı izotermal olayları ifade eden Avrami eşitliğine dayanan yaklaşımla bulunmuştur. Burada ki modelde Boyce vd. (2000) modelinden faydalanarak ağ düzenlemesini içeren ağ direnci ile birlikte gevşeme prosesi ifade edilmiştir. Onlardan farklı olarak gerinim yönlendirme kristalizasyonu yapılmıştır. Oluşturulan modelin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Drozdo ve Yuan (2003), AYPE numune ile oda sıcaklığında yapılan sabit şekil değiştirme hızında çekme, gevşeme ve sünme testi sonuçlarını kullanarak bir mikro modelleme çalışması yapmıştır. Model yarıkristal polimerler için küçük gerinimlerde zamana bağlı viskoelastik-viskoplastik davranış açıklamaya yöneliktir. Viskoelastik modelleme için, termal aktif prosesler mevcut olmasından dolayı Eyring Denklemi kullanılmıştır. Oluşturulan modelle geleneksel “quasi-statik” testlerdeki yarıkristal polimerlerin zamana bağlı davranışları izah edilerek, onlardan farklı beş güvenilir malzeme parametresi elde etmiştir. Viskoplastik modelleme ise düzensiz ağ ile referans pozisyonlarındaki bağların kaymasının etkileri dikkate alınarak yapılmıştır.

Capaldi vd. (2004), çalışmasında PE'nin basma deneyi verilerinden yararlanarak sistemin akması ve deformasyon ile dihedral açı boyunca polimer zincirlerinin hareketliliği arasındaki ilişkiyi açıklamıştır. Hesaplamalar aktivasyon hacmi değişikliklerini ifade eden Eyring denkleminde faydalanılarak yapılmıştır. Aktif deformasyonun malzeme üzerinde artan geçiş dinamiklerinden dolayı moleküler yapının yeniden düzenlenmesine izin verdiğini söylemişlerdir.

Makroyapısal modelleme çalışmalarının başlıcaları; Kitagawa ve Takagi (1990), Kitagawa vd. (1989), Lai ve Bakker (1995), Krempl ve Bordonaro (1995), Bardenhagen (1997), Zhang ve Moore (1997a ve b), Krempl (1998), Bonner vd.(1999), Drozdov (1999), Khan ve Zhang (2001), Ariyama ve Kaneko (1995), Beijer ve Spoormaker (2000), Nitta ve Ishiburo (2002), Krempl ve Ho (2000), Ho ve Krempl, (2002), Krempl (2001), Drozdov (2000), Drozdov (2003), Çolak (2004a), Çolak (2004b), Trantina (1986), Krempl ve Bordonaro (1997), Joseph (2005) tarafından yapılan çalışmalardır.

Kitagawa vd. (1990), PE için sonlu uzamalarda tek yönlü basma ve burulma deneyi sonuçlarına göre bir viskoelastik model oluşturmuştur. Viskoelastik modellemeyi aslında metallerin plastisitesine dayanan “overstress” teori ile gerçekleştirmiştir. “Overstress” modelin plastisiteye dayanmasına rağmen üç boyutlu lineer elastiklik için oldukça uyumlu olduğu görülmüştür şeklinde sonuçlara varmıştır.

Lai ve Bakker (1995), YYPE'nin zamana bağlı davranışını açıklamak üzere bir boyutlu viskoelastik-viskoplastik integral model oluşturmuştur. Viskoelastik deformasyon Schapery termodinamik teorisine göre yapılmıştır. Plastik deformasyonun yükleme geçmişine göre toplanabilir olduğu kabul edilmiştir. Yoğun yükleme şartları gözönüne alınarak plastik deformasyondaki zaman etkisi modellemenin içine dahil edilmiştir. Model sünme, toparlanma, iki adımlı sünme ve sabit hızlı yükleme ve boşaltmada iyi cevaplar vermiştir. Model yükleme geçmişi bağımlılığını da çok iyi açıklamıştır.

Bardenhagen vd. (1997), çekme hızı bağımlılığı, gerilme gevşemesi ve sünme davranışlarını makro seviyede viskoplastik olarak modellemiştir. Modellemeyi bir boyutlu yay ve sönüm elemanı kullanarak (elektrik benzeşim metodu) yapmıştır. Polimerik malzemeler için izotermal ve sonlu deformasyonlarda üç boyutlu viskoplastik modellemenin temelini teşkil edecek bir çalışma amaçlamıştır. Matematiksel modellemede integral formülasyonlar oldukça genel ve çok sayıda belirlenmesi gereken malzeme parametresi içerdiğinde daha az katsayı ve kısaltılabilir özelliği olan diferansiyel formlar kullanmıştır. Modelinin PMMA için uygun

sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Zhang ve Moore (1997), YYPE için sünme deneyi verilerinden faydalanılarak lineer olmayan viskoelastik model (altı Kelvin elemanından oluşan yay sistemi) oluşturmuştur. İkinci bir modeli, metallerin tek eksenli viskoplastik davranışını karakterize eden Bodner viskoplastik modelinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Modelin malzeme fonksiyonları sabit şekil değiştirme hızı testlerinden elde edilmiştir. Model sonuçları boşaltma durumu hariç yükleme, katlamalı sünme ve katlamalı gevşeme deneysel sonuçlarıyla uyumluluk göstermiştir.

Bonner vd. (1999),  çeşit izotropik PE malzemenin akma noktalarından hareketle seri bağlı yay-sönüm elemanına paralel bir yay bağlayarak (elektrik benzeşim devresi) viskoelastik modelleme yapmıştır. Modelleme sünme deneyi sonuçları üzerine oluşturulmuştur. Tavlanmış malzeme davranışını açıklamada Eyring modelinin uygun sonuçlar verdiği grlmştir. Ayrıca sünme davranışını açıklamak için Wilding-Ward modelinin Fotheringham-Cherry modelinden daha iyi olduğu anlaşılmıştır.

Krempl ve Ho (2000), oda sıcaklığında Nylon 66, PEI (polietermid) ve PEEK (polieterketon) zerinde yapılan deneylerden hareketle sünme, gevşeme ve çevrimsel yükleme gibi hız bağımlı davranışlarının “overstress” modeli ile modellenebileceğini göstermiştir. Burada “overstress”e dayanan viskoplastisite teori katı polimer davranışını modellemek için uyarlanmıştır. Kitagawa vd. (1990) ve Ariyama ve Kaneko (1995) tarafından monotonik yükleme şartları için uygulanan “overstress” modeli çevrimsel yükleme ve boşaltma durumları için incelemişlerdir. Ortaya çıkan sonuçlardan “overstress” teorisinin katı polimer davranışını çok iyi modelleyebileceği grlmştir.

Ho ve Krempl (2002), viskoplastisiteye dayanan overstress modeli bir büyültme faktörü tanıtarak geliştirmiştir. Böylece PMMA nın hıza bağlı yumuşama ve pekleşme davranışını büyültme fonksiyonunun artışı ve azalışı boyunca modellemiştir.

olak (2005), oda sıcaklığında PPO için değişik yükleme şartlarında elde edilen tek eksenli yükleme-boşaltma, katlamalı sünme ve sıfır gerilmedeki toparlanma deneyi sonuçlarını “overstress” modele uyarlayarak açıklamaya çalışmıştır. Geliştirilen model PPO’nun lineer olmayan hız hassasiyeti, lineer olmayan boşaltma davranışları ve toparlanma test sonuçlarıyla uyumlu özellik göstermiştir. Ayrıca olak (2004b), PPO nun sünme ve gevşeme deneyi sonuçlarını “overstress” modelden faydalanarak modellemiştir. Oluşturulan model malzemenin viskoelastik bölgedeki gevşeme davranışını testlerle uyumlu bir şekilde açıklamıştır.

Sonuçta modelleme çalışmaları makroyapısal ve mikroyapısal açıdan iki şekilde yapılmaktadır: Makro modeller genel olarak elastik ve viskoz yapıyı tariflemek için elektrik benzeşim devresi kurarak ve viskoplastisite teorileri ile yapılır. Bu yaklaşımın temeli Kelvin, Maxwell ve standart lineer katı modellemelerine dayanır. Mikro modeller ise malzeme iç yapısına dair parametreler içeren matematiksel ifadeler ile malzeme yapısını tıpkı bir kompozit malzemede olduğu gibi iki farklı elemandan meydana gelmiş gibi kabul ederek çözüme yönelik yaklaşımlar sunar.

4.2 Polimerik Malzeme Davranışını Modelleme Yaklaşımları

4.2.1 Lineer Viskoelastisite

Polimerik malzemelerin mekanik davranışını incelemek üzere ortaya konan ilk modeller lineer viskoelastisiteye dayanır. Lineer viskoelastisitenin temeli ise Boltzman süperpozisyon teoremine dayanır. Bu teoride numunedeki sünme, bütün yükleme geçmişinin fonksiyonudur, her bir yükleme adımı toplam deformasyona birbirinden bağımsız katkı yapar ve denklem (4.1), (4.2)'deki gibi toplam deformasyon her bir adımdaki deformasyonların toplamıdır.

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t J(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4.1)$$

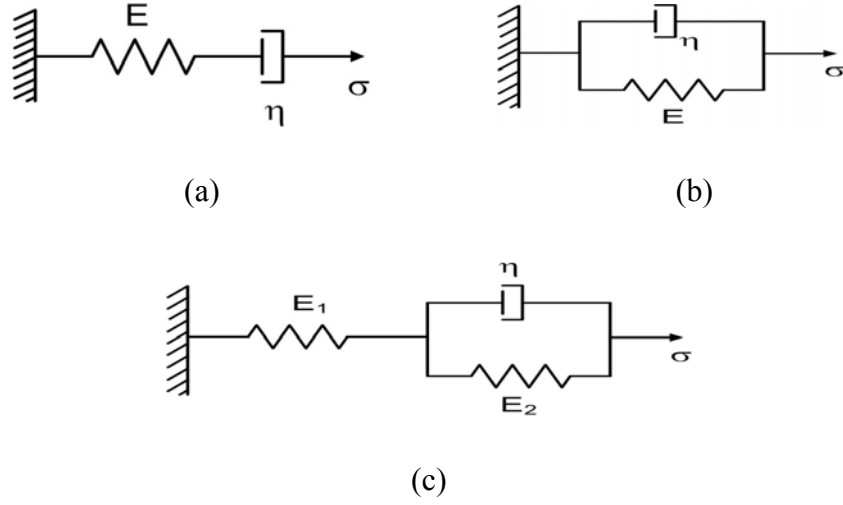
burada $J(t-\tau)$ sünme komplians fonksiyonu. Bu ifade gevşeme için yazılacak olursa;

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4.2)$$

$E(t-\tau)$: Gevşeme modülü, τ : Zaman artışı.

Viskoelastik davranışı açıklamaya yönelik olarak; elastik katı davranışını açıklayan Hook kanunu ve viskoz sıvı davranışını açıklayan Newton kanunu göz önüne alınır. Hook kanununda gerilme-şekil değişimi sabit bir katsayı olan elastiklik modülü ile orantılı, Newton kanunun da ise gerilme-şekil değişim hızı sabit bir katsayı olan viskozite ile orantılı lineer bir ilişki içerisindedir. Lineer viskoelastisite basit olarak “Hookean” yay ve “Newtonian” sönüm elemanından meydana gelir. Yay ve sönüm elemanlarının birbirlerine değişik formlarda bağlanmasıyla farklı modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin başlıcaları: birbirine paralel bağlanmış yay ve sönüm elemanından meydana gelen “Voigt (Kelvin)”, birbirine seri olarak bağlanmış yay ve sönüm elemanından meydana gelen “Maxwell”, “Voigt” modeline seri bağlanmış yay elemanı ile meydana gelen Standart Lineer Katı Modeldir (Şekil 4.1) (Phan

ve Thien, 2002).



Şekil 4.1 Temel modeller; a) Maxwell modeli, b) Voigt modeli, c) Standart Lineer Katı model

Yay ve sönüm elemanlarından meydana gelen modellerin matematiksel ifadelerini temsil eden diferansiyel denklemlerin çözülmesiyle aşağıdaki eşitlikler bulunur.

- Hook kanunu:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.3)$$

- Newton akış kanunu:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.4)$$

- Maxwell modeli:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (4.5)$$

- Voigt modeli:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.6)$$

- Standart lineer katı model:

$$\sigma(E_1 + E_2) + \eta \frac{d\sigma}{dt} = E_1 E_2 \varepsilon + E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.7)$$

Yukarıda tanımlanan modeller polimerik malzemelerin mekanik davranışını açıklamakta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme modelleri tek başına yeterli olmamakta sadece belirli yükleme şartlarına uygun sonuçlar vermektedir. Mesela; “Voigt” model de bulunan viskoz damper ani gerinim değişimlerine karşı engel oluşturduğundan gevşeme için uygun sonuçlar vermemektedir. “Maxwell” model bu olumsuzluğu gidermesine rağmen sünme için uygun sonuçları vermemektedir. Standart lineer katı model Voigt modele göre gevşeme için daha iyi sonuçlar vermektedir.

Ayrıca “Maxwell” ya da “Voigt” modellerin bileşimlerinden oluşan komplike modeller ortaya konulmuştur. Bu tip modeller pratik uygulamaya yönelik sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlerde kolaylıklar sağlamaktadır. Mesela birden fazla Voigt modelin seri olarak bağlanması ile “Genelleştirilmiş Voigt” modeli sünme cevabını açıklamaya yönelik olarak geliştirilmiştir. Bu modelin matematiksel ifadesi;

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \sum_{n=1}^n G_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \right] \quad (4.8)$$

dir. σ_0 : sünme testindeki gerilme, G_n : elastik komplians, τ_n : n’inci Voigt elemanın gecikme zamanı (Ward ve Hadley 1993, Wineman ve Rajagopal 2000, Zhang 1996)

4.2.2 Lineer Olmayan Viskoelastisite

Lineer viskoelastisitede sünme kompliansı ve gevşeme modülü sadece zamana göre tanımlanmaktadır. Oysa bu özellikler gerilme ve gerinim ile de sıkı bir bağımlılık içerisinde değişim göstermektedir. Bu durum lineer olmayan viskoelastik modellerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Lineer viskoelastisite limiti birçok polimer için %1’in altındadır. Lineer davranış limiti sıcaklığa bağlıdır ve yükselen sıcaklıkla birlikte düşüş gösterir. Camsı geçiş sıcaklığının altında çok düşük seviyelere inmektedir. Lineer olmayan davranış deneysel sonuçların yorumlanmasında belirsizliklere ve zorluklara neden olmakta malzemedeki değişimi açıklayabilmek için ekstra deneyler yapılmasını gerektirmektedir.

Polimer malzemelerin lineer olmayan davranışını açıklamak üzere çok sayıda teori geliştirilmiştir. Bu teoriler başlıca üç ana sınıflandırmaya tabi tutulur: a) Moleküler Yaklaşım, b) Reolojik Yaklaşım, c) Mühendislik Yaklaşım (Ward 1993).

4.2.2.1 Moleküler Yaklaşım

Polimerik malzemeler, karbon ve hidrojen atomunu içeren monomer moleküllerinden meydana gelir. Makromolekülleri oluşturan monomer atomları kovalent bağlarla birbirine bağlıdır. Polimerik malzemedeki bir diğer kuvvet ise birbirine komşu moleküller arasındaki

çekim kuvvetidir ki bu özellik moleküllerin birbirine göre hareket etmesini engelleyerek yüke karşı direnç oluştururlar. Mukavemeti iç yapıdaki bu bağ kuvvetlerinin sağlamasından dolayı moleküler yaklaşıma dair modeller geliştirilmiştir. Lineer olmayan viskoelastisitede moleküler yaklaşım ilk olarak Eyring tarafından geliştirilen ve uygulama gerilmesinden bağımsız termal aktivasyon enerjisine dayandırılmıştır. Bu yaklaşımda deformasyonun moleküler seviyede segmental ve moleküler yan grupların lokalize hareketlerinin sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir (Hasan ve Boyce 1995, Zhang1997, van Dommelen vd. 2003). Şekil değiştirme hızı denklem (4.9)'da verilmiştir.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(-\frac{\Delta H - \sigma V}{RT}\right) \quad (4.9)$$

$\dot{\varepsilon}_0$: Üstel faktor(sabit), ΔH : Aktivasyon enerjisi, R : Boltzman sabiti, V :Aktivasyon hacmi

4.2.2.2 Katlı İntegral Gösterimi

Lineer viskoelastisiteye lineer olmayan değişkenlerin katılması sonucunda Boltzman superpozisyon teoremi aşağıdaki hali alır.

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t J_1(t-\tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t J_2(t-\tau_1, t-\tau_2) \frac{d\sigma}{d\tau_1} \frac{d\sigma}{d\tau_2} d\tau_1 d\tau_2 + \dots \quad (4.10)$$

Bu fonksiyon da birinci terim Boltzman superpozisyon teoremi ile aynıdır, diğerleride düzeltme terimidir. Buradaki denklemin çözümü çok sayıda malzeme parametresi içermekte ve deney sayısını artırmaktadır.

4.2.2.3 Tek Katlı İntegral Gösterimi

Reolojik yaklaşımın bir diğer gösterimide tek katlı integral yöntemidir. Bu gösterim bazı özel polimerik malzemeler için oldukça kullanışlı ve basit olarak lineer olmayan viskoelastisiteyi ifade eder. Boltzman superpozisyon teoreminin modifiye edilmesi esasına dayanır.

Modifiye Süperpozisyon Teoremi

Bu teorem lineer viskoelastik teoreminin denklemlerine ilave katkılar yapılmasıyla oluşturulur. Leaderman, fiber üzerinde yaptığı sünme ve toparlanma davranışının zaman ve gerilmeye bağlı parçalardan oluştuğunu tespit ederek aşağıdaki ifadeyi oluşturmuştur.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + \int_{-\infty}^t J(t-\tau) \frac{df(\sigma)}{d\tau} d\tau \quad (4.11)$$

$f(\sigma)$: Deneysel gerilme fonksiyonu.

Bu denklem modifiye edilmiş superpozisyon teoremi olarak bilinir ve fiberin sünme-toparlanma davranışını oldukça iyi açıklamaktadır. Fakat diğer polimerik malzeme türleri için uygun değildir. Çünkü bir çok polimerik malzemelerin sünme ile toparlanma eğrileri birbiri ile çakışmamaktadır (Ward 1993).

BKZ Teori

Bir çok kauçuğun elastik davranışı genişleme oranının (λ) fonksiyonu şeklinde gelişmektedir. Bernstein, Kearsley ve Zapas bu bağımlılıktan hareketle polimerik malzemelerin gevşeme davranışını açıklamaya yönelik aşağıdaki teoriyi ortaya koymuşlardır.

$$\sigma(t) = \int_0^t \left[\frac{\lambda^2(t)}{\lambda^2(\tau)} - \frac{\lambda(\tau)}{\lambda(t)} \right] h \left(\frac{\lambda(\tau)}{\lambda(t)}, t - \tau \right) d\tau \quad (4.12)$$

$h(\lambda, t)$: Birleştirilmiş fonksiyon ve λ : Genişleme oranı.

BKZ teori gevşeme cevaplarını oldukça uyumlu açıklamaktadır. Sabit gerinim hızlarında ve katlamalı gevşeme deneyleri için yetersiz kalmaktadır (Ward 1993-Lai 1995).

Schapery Termodinamik Teorisi

Termodinamik esasa dayanan bu teori termomekanikle ilgili lineer viskoelastisite için geliştirilmiştir. Daha sonra lineer olmayan davranış için geliştirilerek aşağıdaki hali almıştır.

$$\varepsilon(t) = g_0 J_0 \sigma(t) + g_1 \int_0^t \Delta J(\psi(t) - \psi(\tau)) \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \quad (4.13)$$

$$\sigma(t) = h_e E_e \varepsilon(t) + h_1 \int_0^t \Delta E(\rho(t) - \rho(\tau)) \frac{d(h_2 \varepsilon)}{d\tau} d\tau \quad (4.14)$$

Gerilme azalma zamanı Gerinim azalma zamanı

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{ds}{a_\sigma}, a_\sigma > 0 \quad \rho(t) = \int_0^t \frac{ds}{a_\varepsilon}, a_\varepsilon > 0 \quad (4.15)$$

g_0, g_1, g_2, a_σ gerilme fonksiyonu ve $h_0, h_1, h_2, a_\varepsilon$ gerinim fonksiyonudur. $h_e E_e \varepsilon(t)$ küçük bir zaman sonra gerinimdeki denge gerilmesidir. ΔJ lineer geçiş sünme kompliansı ve ΔE gerilme gevşeme modülüdür. Schapery teori azalan zamanda zaman-sıcaklık ilişkisini açıklar. Gevşeme sürecine diğer etkiler olan nem ve fiziksel yaşlanmayı göz ardı etmektedir. Bu teori

malzeme parametrelerinin belirlenmesinde veri adedi azaltmaya yönelik imkanlar sunar (Lai 1995).

4.2.2.4 Mühendislik Yaklaşımı

Mühendislik yaklaşımı doğru ve basit çözümler sunan bir yaklaşımdır. Mevcut bulunan bir kaç adet başlangıç deneysel sonuçları özel durumlar için belli aralıklarda genişletilerek tahmini değerler bulmaya dayanır. Bu gösterimde sünme ya da gevşeme deneyleri gibi deneysel dataların çeşitli nümerik yöntemlerle düzenlenmesi yapılarak istenilen sonuçlar bulunur (Ward 1993).

4.2.3 Viskoplastik Teoriler

Katıların viskoplastik deformasyonunu açıklamaya yönelik ilk çalışmalar klasik plastisite ve klasik sünme metodlarından faydalanılarak; elastik, plastik ve sünme gerinimlerinin birbirinden bağımsız, toplanabilir olduğu varsayımına dayandırılmıştır.

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^S \quad (4.16)$$

Daha sonra bu yaklaşım plastik ve sünme deformasyonunun ayrı ayrı değilde birbiri içerisine geçmiş şekilde geliştiği üzerinden hareketle birleştirilmiş durum teorisine dayanan viskoplastik teoriler ortaya konmuştur.

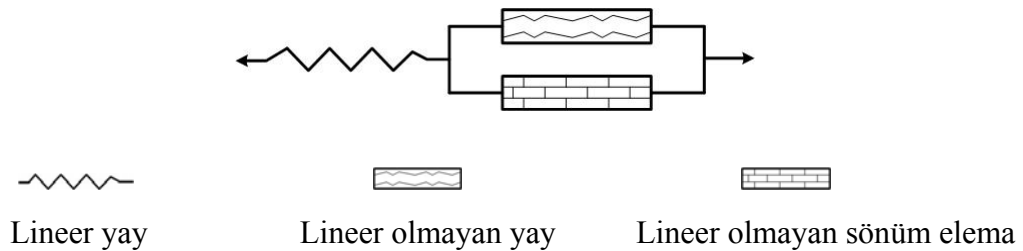
$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{vp} \quad (4.17)$$

Birleştirilmiş viskoplastik teoriler çözüme yönelik olarak belirgin bir akma yüzeyini esas alır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda ve bazı malzeme türleri için akma yüzeyinin tarifi, belirlenmesi pratik açıdan bir kısım zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle başta Bodner, Krempl, Miller olmak üzere bir kısım araştırmacılar akma yüzeysiz birleştirilmiş viskoplastisite teorileri geliştirmişlerdir. Bu viskoplastik teorilerde plastik ve sünme deformasyonu bir arada ifade edilerek toplam deformasyonun elastik ve plastik deformasyonlardan meydana geldiği ayrıca belirgin bir akma yüzeyi bulunmadığı kabul edilmiştir. Bu teoriler iki yaklaşım üzerinde toplanır; a) Durum değişkenleri yaklaşımı, b) Overstress yaklaşımı (Krempl 1998, Zhang 1996).

4.3 “Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (VBO Model)

“Overstress”e kavramına dayanan viskoplastisite (VBO) modeli aslında metallerin mekanik davranışını açıklamaya yönelik olarak geliştirilmiştir. Bordonaro ve Krempl (1992); Nylon66, PEEK ve PEI gibi katı polimerik malzemelerin mekanik davranışının metalik malzemelerinin davranışına benzer olduğu sonucunu çıkarmışlardır. Bu sonuçtan hareketle VBO modeli polimerik malzemelerin mekanik davranışını açıklamak üzere kullanmışlardır. Doğal olarak metalik ve polimerik malzemeler arasında bir kısım farklılıklarda mevcuttur. Bu farklılıkların başlıcaları; sıfır gerilmede toparlanma, polimerik malzemede geniş bir gerinim aralığında gerçekleşirken, metalik malzemelerde daha dar bir aralıktadır, boşaltma davranışı polimerik malzemelerde konkav bir eğri verirken metallerde neredeyse düz bir doğrudur. Deneysel sonuçlar ışığında görülen benzerlikler; lineer olmayan hız hassasiyeti, kısa dönem sünmesi ve plastik akış otuştığında meydana gelen gevşemedir. Bütün bu sonuçlar ışığında viskoplastisiteye dayanan VBO modelin polimerik malzeme davranışını modelleyebileceği sonucuna varılmıştır.

VBO modeli PE'nin mekanik davranışını açıklamaya yönelik olarak ilk kullananların başında Kitagawa (1990) gelmektedir. Yapılan çalışmalarda VBO modelin, monotonik yüklemde şekil değişim hızı hassasiyetini, sünme ve gevşeme için açıklayabildiğini fakat çevrimsel yükleme ve boşaltma için açıklayamadığını görmüşlerdir. Bu çalışmalarda kullanılan VBO'nun ilk formatında denge gerilmesi sadece gerinimin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamadan dolayı denge gerilmesi yükleme ve boşaltmada aynı eğri üzerinden gitmekte, histerisiz göstermemektedir. VBO model, reolojik yaklaşıma dayanan standart lineer katı (SLS) modelini temel alır (Şekil 4.2). SLS modelin hızlı ve yavaş cevaplarını içerir. VBO model, SLS modelin birçok özelliğini içinde barındırır. Bunlar lineer olmama, yükleme hassaslığı ve kısmi toparlanmadır. Bu özellikler VBO modelinde viskozite fonksiyonu (F) tarafından kontrol edilir. Bu fonksiyon sayesinde denge gerilmesi histerisiz yaparak farklı lineer olmayan yükleme ve boşaltma eğrileri elde edilir.



Şekil 4.2 Modifiye edilmiş Standart Lineer Katı Model

En basit lineer viskoelastik katı; sünme, gevşeme ve hız hassasiyetine bağlı yükleme gösterir ve bu malzeme standart lineer katı olarak bilinir. Standart lineer katı SLS modeli, VBO modelin temelini oluştur. Matematiksel olarak SLS modelin ifadesi denklem (4.7)'deki gibidir, bu ifade “overstress” formatına getirilerek VBO model için temel alınır.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E_1} + \frac{\sigma - aE_2\varepsilon}{a\eta} \quad (4.18)$$

Sembol üzerindeki nokta zamana bağlı değişimi gösterir. ε , σ Cauchy (gerçek) gerinim ve gerilme, E_1 , E_2 yay modüllerini, η viskozite fonksiyonu; *gerilme x zaman* boyutundadır.

$a = \frac{E_1}{E_1 + E_2}$ olmak üzere aE_2 ifadesi iki yayın efektif modülü olarak isimlendirilir.

Son derece yavaş yüklemede gerilme cevabı seride bulunan iki yay tarafından verilir ve sönüm elemanın hiçbir etkisi olmaz. Şekil değiştirme hızı sıfıra yaklaşırken cevap $\sigma = aE_2\varepsilon$ dir. Bu ifade deki $aE_2\varepsilon$ denge gerilmesi olarak adlandırılır ve $\sigma - aE_2\varepsilon =$ “overstress” tir.

Son derece hızlı şekil değişim hızı için SLS'in cevabı ön kısımdaki yay ve seri koldaki sönüm elemanınca verilir (sönüm elemanı rijittir). Matematiksel olarak;

$$1 - \frac{d\sigma/d\varepsilon}{E_1} = \frac{\sigma - aE_2\varepsilon}{a\eta\dot{\varepsilon}} \quad (4.19)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu eşitlik şekil değiştirme hızını sonsuza götürür. Bu değer dışındaki bütün şekil değişim hızları sonsuz hızlı ve yavaş cevaplar arasındadır. Sabit şekil değişim hızı ile yüklemede modelin cevabı, geniş zaman sürecindeki denge gerilme-gerinim eğrisinin eğimine eşittir. Bu denklem (4.18)'in her iki tarafından $a\frac{E_2\dot{\varepsilon}}{E_1}$ ifadesinin çıkarılmasıyla bulunur.

$$\dot{\varepsilon} \left(1 - \frac{aE_2}{E_1} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma - aE_2\varepsilon}{E_1} \right) + \left(\frac{\sigma - aE_2\varepsilon}{a\eta} \right) \quad (4.20)$$

Bu denklem sabit gerinim hızında sabit “overstress” için bir çözüm sağlar. Sonuç olarak denklem (4.20)'nin sağ tarafındaki ilk terimi sıfıra eşit olur ve bu denklemin son hali,

$$\dot{\varepsilon} \left(1 - \frac{aE_2}{E_1} \right) = \frac{\{\sigma - aE_2\varepsilon\}}{a\eta} \quad (4.21)$$

şeklinde bulunur. $\{\}$ ifadesi asimtotik çözümü işaret eder. Denklemin bu halinde “overstress” sabit ve gerinim hızıyla lineer ilişkilidir. Bu ifade denklem (4.19) yerine sayılarak uzun dönem çözümü hesaplanarak,

$$\left\{ \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right\} = aE_2 \quad (4.22)$$

şeklinde bulunur. Gerilme hızının sıfır olduğu durumda denklem (4.19) sünme için aşağıdaki sonucu verir.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 - aE_2\varepsilon}{a\eta} \quad (4.23)$$

Gerinim hızının sıfır olduğu durum için denklem (4.19) gevşeme için aşağıdaki sonucu verir.

$$\dot{\sigma} = -E_1 \frac{\sigma - aE_2\varepsilon_0}{a\eta} \quad (4.24)$$

şeklidedir. Alt indis “0” sabit değerleri gösterir. Sünme ve gevşeme hızları gerilme ile denge gerilmesi arasındaki farktır ve “overstress” olarak adlandırılır. Bu değer çekme gerilmesinde pozitif değerdedir. Gerinim hızı elastik ve plastik gerinim hızlarının toplamı şeklinde denklem (4.24)’de ki hale gelir.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{in} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - g)}{Ek[\Gamma, A]} \quad (4.25)$$

k viskozite fonksiyonudur ve $\Gamma=|(\sigma-g)|$ ifadesine bağlıdır, buradan viskozite ile “overstress”’in direkt ilişkili olduğu görülür. Son derece düşük hızlı yüklemde $\sigma=g$ olacak şekilde bir cevap alınır bundan dolayı “overstress” plastik şekil değişim hızına bağlıdır. VBO lineer olmayan hız hassaslığını tanımlar. Yukarıdaki denklem akış kanunu ile bir çok benzerlikler gösterir. Bunlardan biri sabit şekil değişim hızında uzun dönem çözümün bulunmasıdır. A, izotropik gerilme (hızdan bağımsız gerilme) olarak adlandırılır ve VBO’nun bir diğer durum değişkenidir. Bu gerilmenin görevi çevrimsel yumuşamayı veya pekleşmeyi modellemektir. SLS’de denge gerilmesinin gelişimi lineer, tersine çevrilebilir ve hızdan bağımsızdır. VBO’da ise denge gerilmesinin gelişimi lineer olmayan, hızdan bağımsız ve histeriktir. VBO eğrileri bu nedenle yükleme ve boşaltmada farklı eğriler ortaya koyarlar. VBO’nun ilk versiyonları sadece gerinimle ilişkiliydi ve bu durum yükleme-boşaltma eğrilerinin aynı eğriyi takip etmesine yol açmaktaydı. Daha sonra gerinime bağıllık ortadan

kaldırılarak yükleme ve boşaltma durumlarının farklı eğriler çizmesi sağlanmıştır (Krempf 1998, Ho ve Krempf 2000).

VBO, akma yüzeyinin ve yükleme-boşaltmanın bulunmadığı hıza bağımlı birleştirilmiş durum değişkenleri teorisine dayanır. Bu teori üç durum değişkenini ikisi tensörel biri skaler olmak üzere içerir. Tensörel durum değişkenleri; denge gerilmesi (G) ve kinematik gerilme (F), skaler değişken ise izotropik gerilmedir. Denge gerilmesi, elastik olmayan deformasyon sonrası gerilmeye bağlı olarak gelişir. Bu malzeme içindeki hatalarla ilişkilidir. Kinematik gerilme ise, “Bauschinger” etkisini (çekme ve basma arasındaki gerilme farkı) modeller ve maksimum gerilim artışıdaki tanjant modülünü ayarlar. Bu klasik plastisite teorisindeki “back stress”e benzer. İzotropik gerilme pekleşme ve yumuşamayı modeller ve gerilmenin hızdan bağımsız bileşenidir. Toplam şekil değiştirme hızı elastik ve inelastik şekil değiştirme hızlarının toplamı şeklindedir (Krempf 1996-Çolak 2004a, 2005).

Sıkıştırılmaz malzeme ve izotropik yapı durumunda küçük deformasyon seviyeleri için modifiye edilmiş VBO modelin akış kanunu denklem (4.26)’daki gibidir.

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{e}}^{el} + \dot{\mathbf{e}}^{in} = \frac{1+\nu}{CE} \dot{\mathbf{s}} + \frac{3}{2} F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{\mathbf{s} - \mathbf{g}}{\Gamma} \right) \quad (4.26)$$

$\mathbf{s}$ ve $\mathbf{g}$ sırasıyla Cauchy gerilme tensörünün ve denge gerilmesinin deviatorik kısmıdır. E, Elastiklik modülü ve ν , Poisson oranıdır. Değişkenler üzerindeki nokta işareti zamana göre türevini işaret etmektedir. Kare parantezler fonksiyonu göstermektedir. Plastik şekil değiştirme hızı “overstress”in fonksiyonudur ve “overstress” denge gerilmesi ile Cauchy gerilmesi arasındaki farktır.

$$\mathbf{o} = \mathbf{s} - \mathbf{g} \quad (4.27)$$

Γ , “overstress” invaryantı simgeler ve gerilme boyutundadır.

$$\Gamma^2 = \frac{3}{2} ((\mathbf{s} - \mathbf{g}) : (\mathbf{s} - \mathbf{g})) \quad (4.28)$$

$F[]$ akış fonksiyonundaki artıştır, 1/zaman boyutundadır ve pozitif değerdedir ($F[0]=0$). Akış fonksiyonu lineer olmayan hız bağımlılığını belirler ve matematiksel ifadesi;

$$F[] = B \left(\frac{\Gamma}{D} \right)^m \quad (4.29)$$

B üniversal sabit ve D “drag stress” dir. Denge gerilmesi nonlinear, hızdan bağımsız ve histeriktir. Denge gerilmesi ifadesi içinde elastik ve plastik olmak üzere iki adet pekleşme terimi, bunları takip eden toparlanma terimi ayrıca kinematik gerilme hızının etkisini içerir. Matematiksel olarak;

$$\dot{\mathbf{g}} = \psi \frac{\dot{\mathbf{s}}}{E} + \psi F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{\mathbf{s} - \mathbf{g}}{\Gamma} - \frac{\mathbf{g} - \mathbf{k}}{\mathbf{A}} \right) + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{\mathbf{k}} \quad (4.30)$$

şekil fonksiyonu olan ψ elastik bölgeden plastik bölgeye geçişte ki bölgeyi modellemeye yarar. Matematiksel ifadesi;

$$\psi = \psi_1 + \left(\frac{C_2 - \psi_1}{\exp(C_3 |\boldsymbol{\epsilon}^{\text{in}}|)} \right)$$

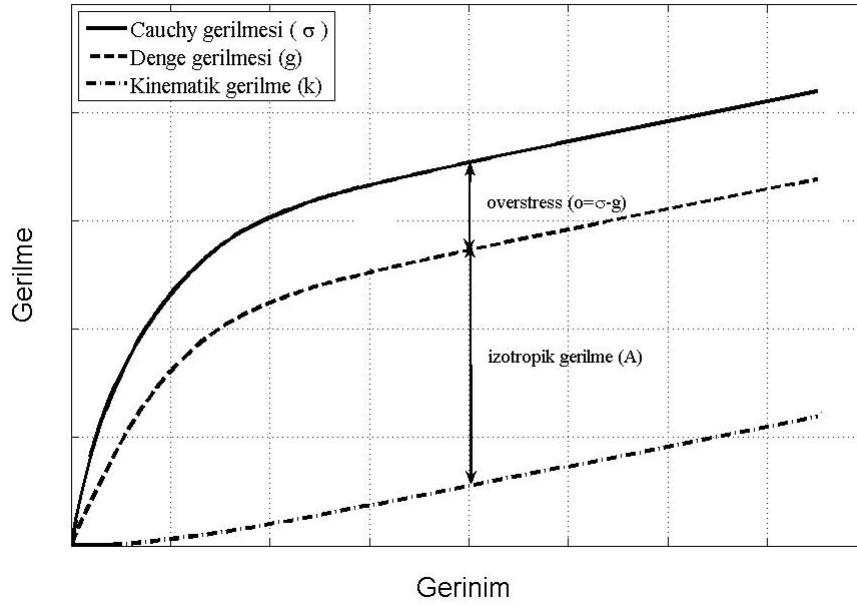
$$\psi_1 = C_1 \left(1 + C_4 \left(\frac{|\mathbf{G}|}{\mathbf{A} + |\mathbf{K}| + \xi \Gamma} \right) \right) \quad (4.31)$$

C_1, C_2, C_3, C_4, ξ ve ζ malzeme sabitleridir. Kinematik gerilmenin gelişim denklemi ise;

$$\dot{\mathbf{k}} = \frac{|\boldsymbol{\sigma}|}{\Gamma + |\mathbf{G}|} \bar{E}_t \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\text{in}} \quad (4.32)$$

$\bar{E}_t = E_t / (1 - (E_t/E))$ ’dir ve burada E_t , tanjant modülüdür.

Herhangi bir yükleme durumunda VBO modelinin içerdiği durum değişkenlerinin gelişimi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 “Overstress” modelin durum değişkenlerinin gelişimi

4.3.1 YYPE’nin Mekanik Davranışının VBO Model ile Modellenmesi

Yapılan literatür taramasında mevcut modellerin polimerik malzemelerin davranışını tanımlamakta yetersiz kaldığı noktalar olduğu görülmüştür. Modelleme çalışmasının ilk adımı, Çolak (2005) çalışmasındaki modifiye edilmiş “overstress” (VBO) model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. VBO esas olarak metalik malzemelerin mekanik davranışlarını tanımlamak üzere geliştirilmiş bir model olup “quasi-elastik” ve viskoplastik davranış gösteren malzemeler için kullanılan bir modeldir.

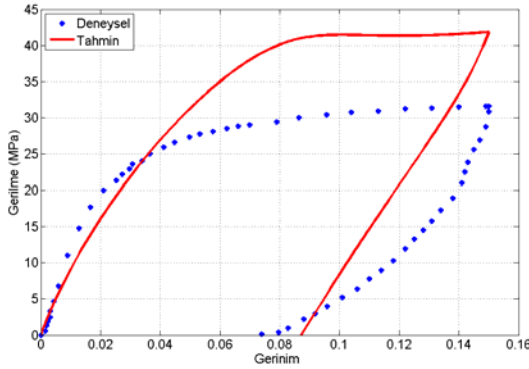
VBO modelinin mevcut hali esas alınarak YYPE’nin tek eksenli basma gerilmesi etkisi altındaki davranışının modellenmesi yoluna gidilmiştir. Tez çalışmasının ilk aşamasında deneysel çalışmaya ait alt yapının kurulu olmamasından dolayı kendi deneysel sonuçlarımız mevcut değildi. Bu nedenle ve zaman kazanmak açısından modellemeye yönelik deney verileri, Zhang ve Moore (1997a,b) çalışmasından alınmıştır. Bu çalışmadaki deneysel veriler YYPE’nin tek eksenli basma test sonuçlarını içermektedir.

Modifiye edilmiş VBO model ile YYPE’nin tek eksenli basma mekanik davranışını modellemek üzere simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon içeriği 1.e-1, 1.e-2, 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında tek eksenli monotonik basma yükleme-boşaltma, 1.e-4 1/s gerinim hızında çevrimsel yükleme, 26 ve 3 N/s gerilme hızında yükleme-boşaltma, katlamalı yükleme-sünme ve katlamalı yükleme-gevşeme şartlarından oluşmaktadır. VBO

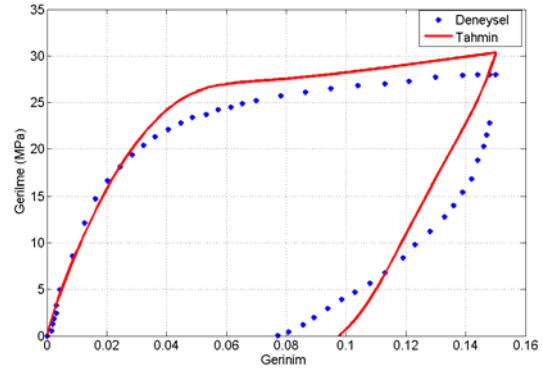
içeriğindeki malzeme parametreleri $1.e-4$ 1/s gerinim hızında Zhang ve Moore (1997a) tarafından yapılan deneysel datalardan belirlenmiştir (Tablo 4.1). Bu malzeme parametreleri kullanılarak, diğer test şartlarına ait VBO model tahminleri hesaplatılmıştır. Deneysel datalar ve simülasyon sonuçları basma gerilmesi olmasına rağmen pozitif çizilmiştir. VBO modelin “stiff” diferansiyel denklemlerinin hesaplamaları, FORTRAN programlama dilinde yazılan “dgear” nümerik yöntemi ile çözüm arayan kodlar ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve aşağıda gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.1 Malzeme sabitleri

Modüller	C	Şekil Fonksiyonu	İzotropik Gerilme	Akış Fonksiyonu
E=1600 MPa E _t =48 MPa	$\lambda=0.65$ $\alpha=0.25$	C ₁ =40 MPa C ₂ =800 MPa C ₃ =25 C ₄ =5 $\xi=1 \text{ MPa}^{-1}$	A=11 MPa	B=1 1/s D=50 MPa m=3.7



(a)



(b)

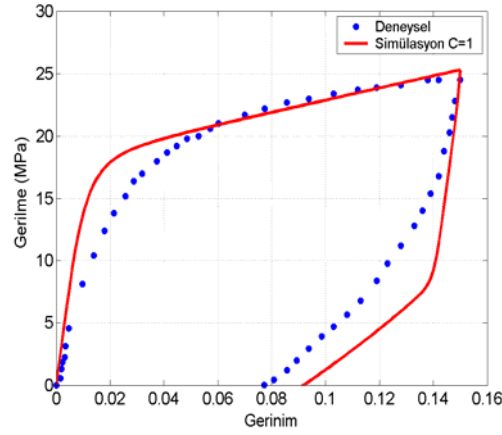
Şekil 4.4 YYPE’nin tek eksenli basma yüklemesi ve boşaltması gerilme-gerinim eğrileri. a) $1.e-1$ 1/s gerinim hızı. b) $1.e-2$ 1/s gerinim hızı.

$1.e-1$ ve $1.e-2$ /s gerinim hızı değerlerinde bulunan model tahmin sonuçları, deneysel verilerle uyumsuz sonuçlar vermiştir. Bu gerinim hızları dinamik yükleme şartlarını içerdiğinden, “overstress” modelinin cevabı deneysel sonuçlarla farklılıklar göstermektedir (Şekil 4.4 a ve b). Ancak “quasi-statik” yükleme koşullarında yapılan model tahminlerinin sonuçları,

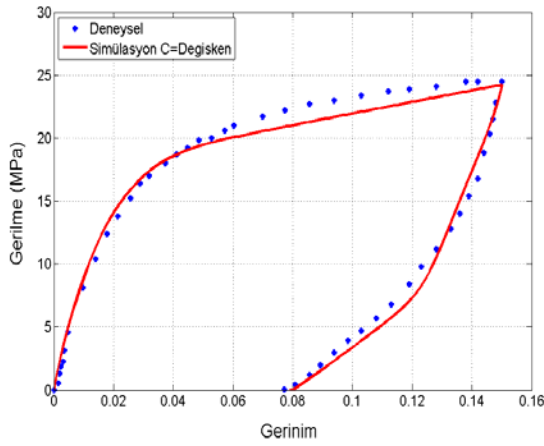
deneysel sonuçlarıyla uyumluk göstermiştir ve VBO modeli YYPE'nin tek eksenli basma gerilmesi etkisi altındaki davranışını (yükleme ve boşaltma), hız bağımlılığını modelleyebilmektedir. Polimerik malzemelerin modellenmesi esnasında özellikle lineer olmayan boşaltma davranışını zorluklar çıkarmaktadır. Modifiye VBO ile ilgili yapılan çalışmada (Çolak 2005) amorf bir malzeme olan PPO'nun boşaltma davranışı modellenmiştir. Bu çalışmada VBO modelin yarıkristal polimerik malzemenin boşaltma davranışını modelleyip, modelleyemeyeceği test edilmiştir. Bu davranış, verilerin alındığı Zhang ve Moore (1997 a, b) çalışmasında modellenememiştir ve literatürdeki polimerik malzeme modellerinin bir çoğu boşaltma davranışını modelleyebilmekten uzaktır. Polimerik malzemelerden yapılmış makina parçaları ve elemanları (dişli çark, kaymalı yatak, çeşitli burçlar gibi.) çalışmaları esnasında sadece monotonik yüklemeler etkisi altında kalmayıp, çevrimsel (periyodik) yükler etkisi altında da kalmaktadır (Millerde tam değişken gerilme veya dişlilerde sınır değişken gerilme gibi). Dolayısıyla gerilme analizlerinin yapılabilmesi için malzemenin hem yükleme hem de boşaltma ve hatta tam değişken bir yüklemeye söz konusu ise çevrimsel yüklemeye davranışları bilinmelidir.

Literatürdeki modelleme çalışmalarına bakıldığında mevcut modellerin özellikle polimerik malzemelerin boşaltma davranışını tanımlayamadığı görülmüştür. Çeşitli ticari sonlu elemanlar yazılımlarında kullanılan modeller bile polimerik malzemelerin davranışını tam olarak tanımlayamamaktadır (Genelleştirilmiş Vogit , genelleştirilmiş Maxwell ve Eight Chain modelleri gibi).

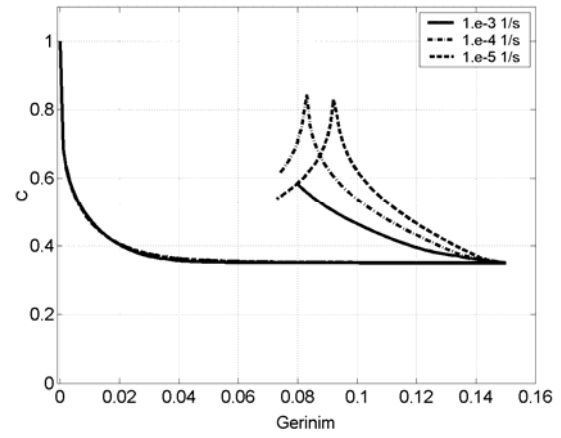
Polimerik malzemeler ile metalik malzemelerin mekanik davranışları arasındaki en büyük farklardan biri boşaltma davranışdır. Boşaltma davranışı metalik malzemelerde lineer, polimerik malzemelerde ise lineer olmayan bir davranış gösterir. Bu farklılığı modellemek üzere $C=1-\lambda (|\mathbf{G}-\mathbf{K}|/A)^\alpha$ şeklinde bir değişken tanımlanmış olup, bu değişken tam elastik olmayan akış bölgesinde $C[0] = 1$ 'dir. Burada λ ve α malzeme parametreleridir (Çolak 2005, Çolak ve Düşünceli 2006). Tanımlanan C katsayısı akış kanununda elastik şekil değiştirme hızı bileşenine bir çarpan olarak dahil edilmiştir. C parametresi hıza bağımlı ve viskoplastik akış bölgesinde sabittir. Şekil 4.5 a,b ve c'de bu parametrenin boşaltma davranışı üzerine etkisi gösterilmiştir.



(a)



(b)

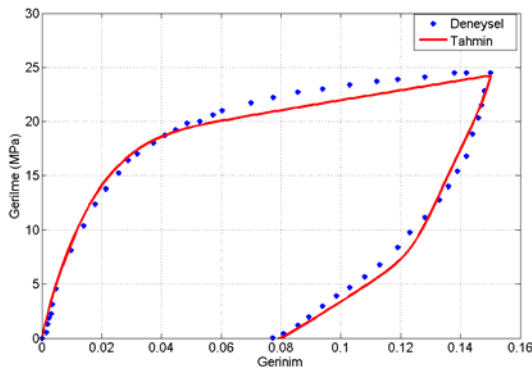


(c)

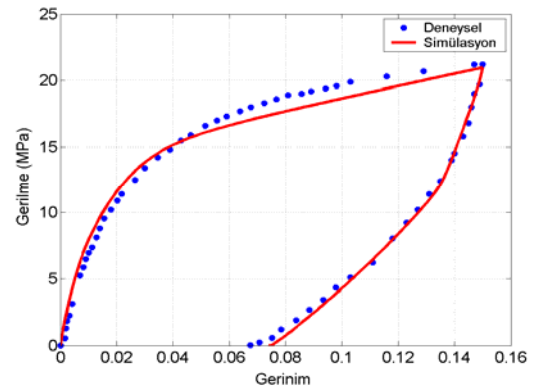
Şekil 4.5 YYPE'nin tek eksenli basma 1.e-3 gerinim hızında modifiye VBO ile modellemesi a) $C=1$ olması durumu b) C 'nin değişken olması durumu c) Modifiye VBO modelindeki " C " parametresinin değişken olması durumunda gerinim hızına bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.6 b VBO modelin 1.e-4 1/s gerinim hızında simülasyon sonuçlarını göstermektedir, malzeme parametreleri bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Şekil 4.6 a ve c sırasıyla tek eksenli basmada 1.e-3 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında VBO modelin tahmin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.7 a ve b sırasıyla 26 N/s , 3 N/s gerilme hızlarında VBO modelin tahmin sonuçlarını göstermektedir. Malzemeler deneye tabi tutulurken gerinim bağımlılığı ve gerilme bağımlılığına göre ayrı ayrı değerlendirilir. Gerinim hızı bağımlılığında, birim zamanda gerinim değeri belli bir miktarda artırılır. Gerilme hızı bağımlılığında ise birim zamanda gerilme (yük) belli miktarda artırılır. ve Şekil 4.7 c, 1.e-4 1/s gerinim hızında çevrimsel yükleme şartlarında VBO modelin tahmin sonuçları göstermektedir. VBO model

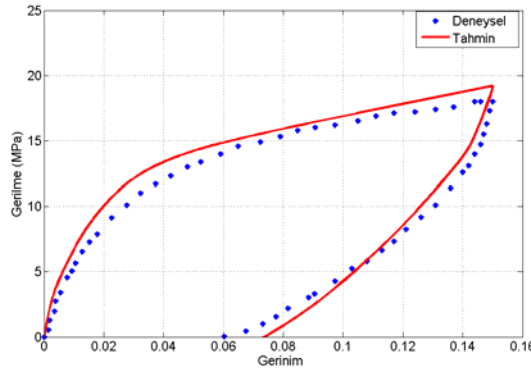
çevrimsel yükleme davranışını da modellemekte başarılı olmuştur. Sonuçta YYPE'nin yükleme-boşaltma davranışlarını bütün şartlar altında VBO model oldukça uyumlu bir şekilde açıklayabilmektedir. Dolayısıyla “overstress” modeli monotonik basma şartları için yükleme ve boşaltma davranışını gerinim ve gerilme hızı bağımlılığında ve çevrimsel yükleme şartlarında oldukça iyi açıklamaktadır. VBO modelin yarıkristal bir malzeme olan YYPE için gösterdiği bu özellik diğer yarıkristal polimerik malzemelerin modellenebilmesinde de kolaylıklar sağlayacaktır. Özellikle biyomekanik uygulamaların ağırlıklı malzemelerinden biri ve yarıkristal polimer olan çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin (ÇYMAPE) davranışını açıklamaktadır kullanılabilmektedir.



(a)

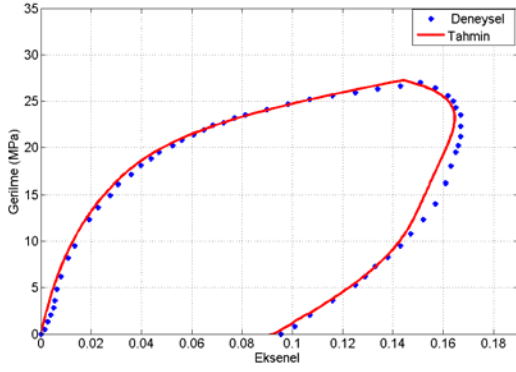


(b)

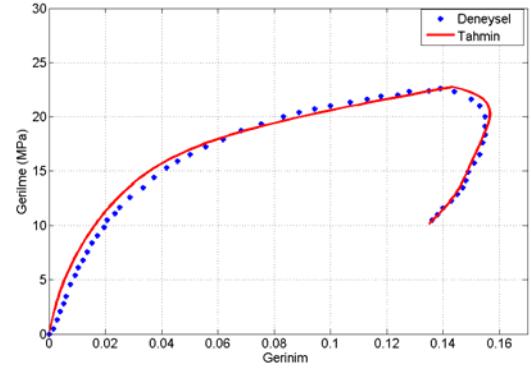


(c)

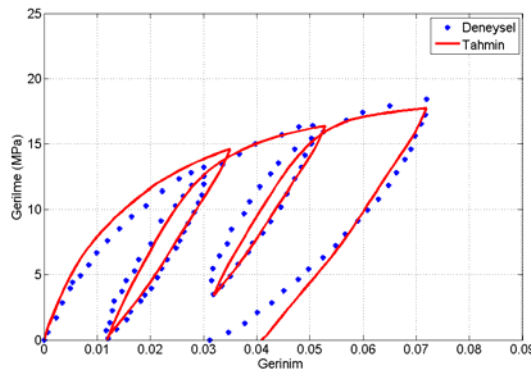
Şekil 4.6 YYPE'nin tek eksenli basma yüklemesi ve boşaltması gerilme-gerinim eğrileri. a) 1.e-3 1/s gerinim hızı. B) 1.e-4 1/s gerinim hızı. C) 1.e-5 1/s gerinim hızı.



(a)



(b)

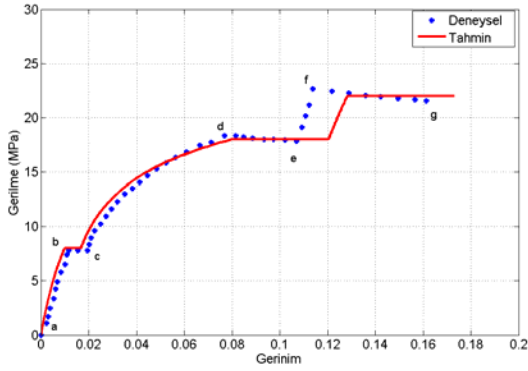


(c)

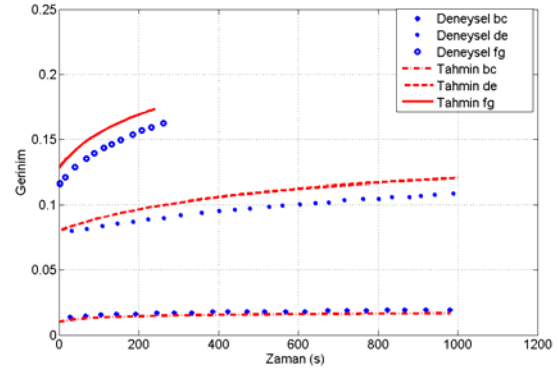
Şekil 4.7 YYPE'nin tek eksenli gerilme hızı altında basma yüklemesi ve boşaltması gerilme-gerilim eğrisi. a) 26 N/s gerilme hızı. b) 3 N/s gerilme hızı. c). YYPE'nin 1.e-4 1/s gerilim hızında tek eksenli çevrimsel yükleme ve boşaltma gerilme-gerilim eğrisi

Çalışmanın ikinci kısmında VBO modelin sünme ve gevşeme davranışlarını modelleyebilme kabiliyetini araştırmak üzere Zhang ve Moore (1997 a) çalışmasından alınan YYPE' nin katlamalı sünme ve gevşeme deneysel verileri ile karşılaştırma yapılmıştır. Pratik uygulamalarda malzemeler çok değişken yüklere maruz kalırlar, etkisi altında kaldıkları yükler sürekli aynı tipte değildir. Bu nedenle katlamalı deneyler numune üzerine her adımda farklı bir yükleme şartı uygulanarak pratikteki cevapları hakkında fikir edinmeye yönelik olarak gerçekleştirilir. Bu nedenle Zhang ve Moore (1997 a) çalışmasında katlamalı sünme testi gerçekleştirmek üzere YYPE numune ilk önce 10 N/s gerilme hızında 7.8 MPa seviyesine kadar yüklenilmiş ve bu gerilmede 980 saniye süreyle sünme deneyine tabi tutulmuş. Bu sünme deneyinden hemen sonra 1 N/s gerilme hızında 18 MPa gerilme seviyesine kadar yeniden yüklenerek, bu gerilme seviyesinde 1000 saniye süreyle sünme

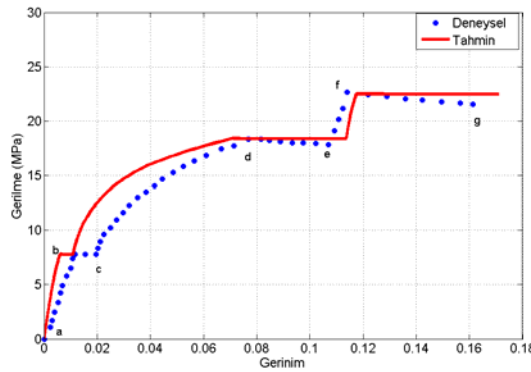
deneyi gerçekleştirilmiş. Son olarak sünme deneyinden sonra numune tekrar 100 N/s gerilme hızında 22 MPa seviyesine kadar yüklenerek, bu gerilme seviyesinde 240 saniye sünme deneyi gerçekleştirilerek deney tamamlanmıştır (Şekil 4.8 a). Bir önceki kısımda gerilme hızına bağlı yükleme-boşaltma davranışını modellemekte başarılı olan VBO model, gerilme hızına bağlı yükleme ve sünme deneylerini içeren YYPE'nin katlamalı sünme davranışını modellemekte de başarılı olmuştur. VBO modeli katlamalı sünme gerilme-gerinim eğrisinden ve gerinim-zaman eğrilerinden görüleceği üzere yüksek gerilme seviyesi haricinde sünme davranışını açıklayabilmektedir (Şekil 4.8 a ve b). Şekil 4.8 c'de VBO model içeriğinde lineer olmayan boşaltma hassasiyeti parametresinin "C=1" olması halindeki gerilme-gerinim eğrisi verilmiştir, bu sonuç C parametresinin etkisini göstermektedir.



(a)



(b)

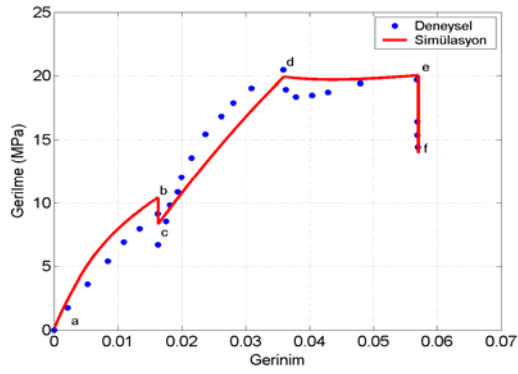


(c)

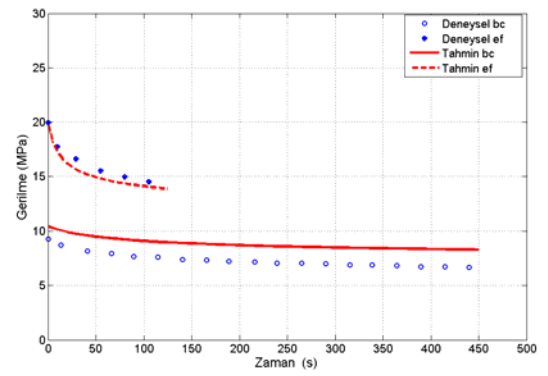
Şekil 4.8 a) Katlamalı sünme deneyinin VBO ile modelleme sonuçları. a-b: 10 N/s gerilme hızı; b-c: 980 s sünme; c-d: 1 N/s gerilme hızı; d-e: 1000 s. sünme; e-f: 100 N/s yükleme; ve f-g: 240 s. sünme. b) Üç gerilme seviyesinde sünme deneyi modelleme sonuçları. c) "C=1" olması durumunda VBO modelin cevabı.

Şekil 4.9 a’da Zhang ve Moore (1997 a) tarafından gerçekleştirilen katlamalı gevşeme deney sonuçları ve VBO model tahminleri verilmiştir. Bu katlamalı gevşeme deneyi, $1.e-4$ 1/s gerinim hızında 0.016 gerinim seviyesine kadar yükleme ve bu gerinim seviyesinde 450 saniye süreyle gevşeme sonrasında $1.e-2$ 1/s gerinim hızında 0.036 gerinim seviyesine kadar yükleme, bu gerinim seviyesinde yükleme hızını $1.e-3$ 1/s değerine düşürülerek 0.057 gerinim seviyesine kadar yükleme ve son olarak 0.057 gerinim seviyesinde 125 saniye süreyle gevşeme testlerinden meydana gelmektedir. Şekil 4.9 b’deki VBO model gevşeme sonuçlarından, modelin gevşeme davranışını modelleyebildiği ama Şekil 4.9 a’da ki gerilme-gerinim eğrisinde görüleceği üzere ve yükleme-boşaltma tahminlerinde de belirtildiği gibi VBO model dinamik yükleme şartlarına giren $1.e-2$ 1/s gerinim hızında sağlıklı sonuçlar verememektedir. Bu durum katlamalı gevşeme tahminleri için olumsuzluk yaratmıştır. Ayrıca Şekil 4.9 c “C=1” olması durumundaki tahmin sonuçlarını göstermektedir, burada da görüldüğü üzere lineer olmayan boşaltma hassasiyeti katsayısı “C”, VBO modelin modelleme kabiliyetini önemli derecede iyileştirmektedir. Sonuç olarak değişik yükleme hızlarında sünme ve gevşeme şartlarındaki mekanik davranışı VBO modelin başarılı bir şekilde modelleyebileceği görülmüştür

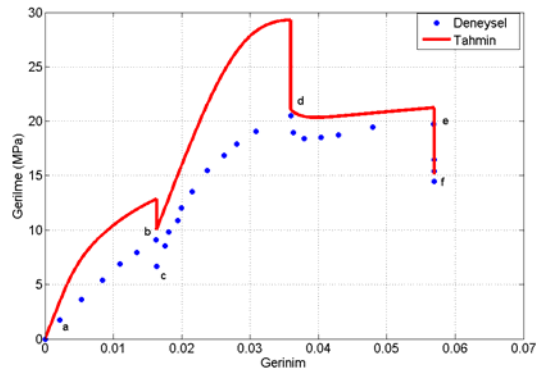
Tüm modelleme çalışmalarında (Şekil değiştirme hızı hassasiyeti, sünme ve gevşeme) $1.e-4$ 1/s şekil değiştirme hızında yapılan basma deneyi sonuçları kullanılarak VBO modeli için gereken malzeme parametreleri belirlenmiş ve bu parametreler diğer tüm simülasyonlarda kullanılmıştır. Bundan dolayı simülasyon sonuçları Şekil 4.6 a, c, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da tahmin olarak belirtilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9 a) Katlamalı gevşeme deneyinin VBO ile modelleme sonuçları. a-b: $1.e-4$ 1/s gerinim hızı; b-c: 450 s gevşeme; c-d: $1.e-2$ 1/s gerinim hızı; d-e: $1.e-3$ /s gerinim hızı; ve e-f: 125 s. gevşeme. b) İki gevşeme deneyi modelleme sonuçları. c) “C=1” olması durumunda VBO modelin cevabı.

4.4 YYPE'nin Mekanik Davranışının FVBO ve Boyce Modelleri ile Modellenmesi

Literatürde polimerik malzeme mekanik davranışını açıklamaya yönelik olarak bir çok model küçük ve sonlu deformasyon seviyelerinde ortaya konulmuştur. Bu modeller malzemenin tek başına ya da bir arada olmak üzere; yükleme-boşaltma, gevşeme, sünme katlamalı gevşeme ve katlamalı sünme davranışını açıklamak üzere geliştirilmişlerdir. Polimerik malzeme davranışını zamana bağımlı ve yüksek derece de lineer olmayan özellikler göstermiş olmasından dolayı modelleme çalışmaları oldukça güçleşmektedir. Ayrıca küçük ve sonlu gerinim seviyelerinde davranışın özellikleri farklılaşmaktadır. Bu nedenle bir çok yaklaşım geliştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Gerinim seviyesi bakımından polimerik malzeme modelleri iki kategoride incelenebilir; küçük ve sonlu deformasyon seviyesindeki davranışı açıklamaya yönelik modeller şeklinde.

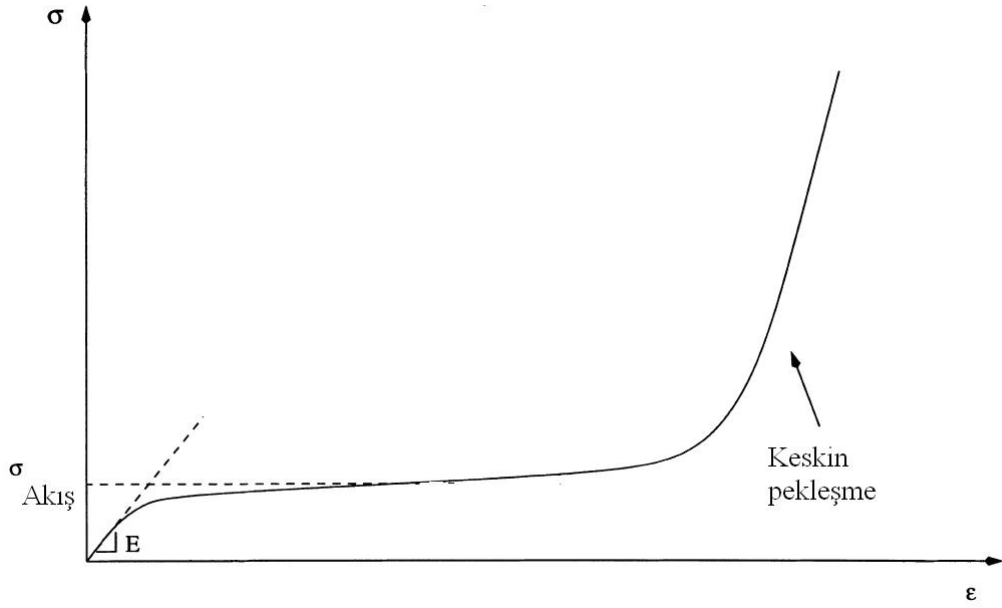
Daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi model geliştirmek için bir diğer yaklaşımda mekanik davranışı açıklamaya yönelik matematik ifadelerin, malzeme iç yapısıyla ilişkilendirilip ilişkilendirilmemesine göre; mikro ve makro seviyedeki modeller olarak da ayrıca bir sınıflandırılmaya tabi tutulmasıdır.

Çalışmanın bu kısmında VBO modelin sonlu deformasyon seviyesinde polimerik malzeme davranışını modelleme kabiliyeti incelenerek, daha sonra literatürde özellikle kauçuk davranışını açıklamaya yönelik olarak geliştirilen sekiz-zincir modelinin (Arruda ve Boyce 1993) temeline dayanan polimerik malzeme (camsı ve yarıkristal) davranışını modellemek için de modifiye edilen, bünyesinde iç yapı değişkenlerinin de bulunduran makroyapısal Boyce vd. (2000) modelinin karşılaştırması yapılacaktır. Daha sonra her iki modelin sonuçları ekstrüde numune ile yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

4.4.1 Boyce Modeli

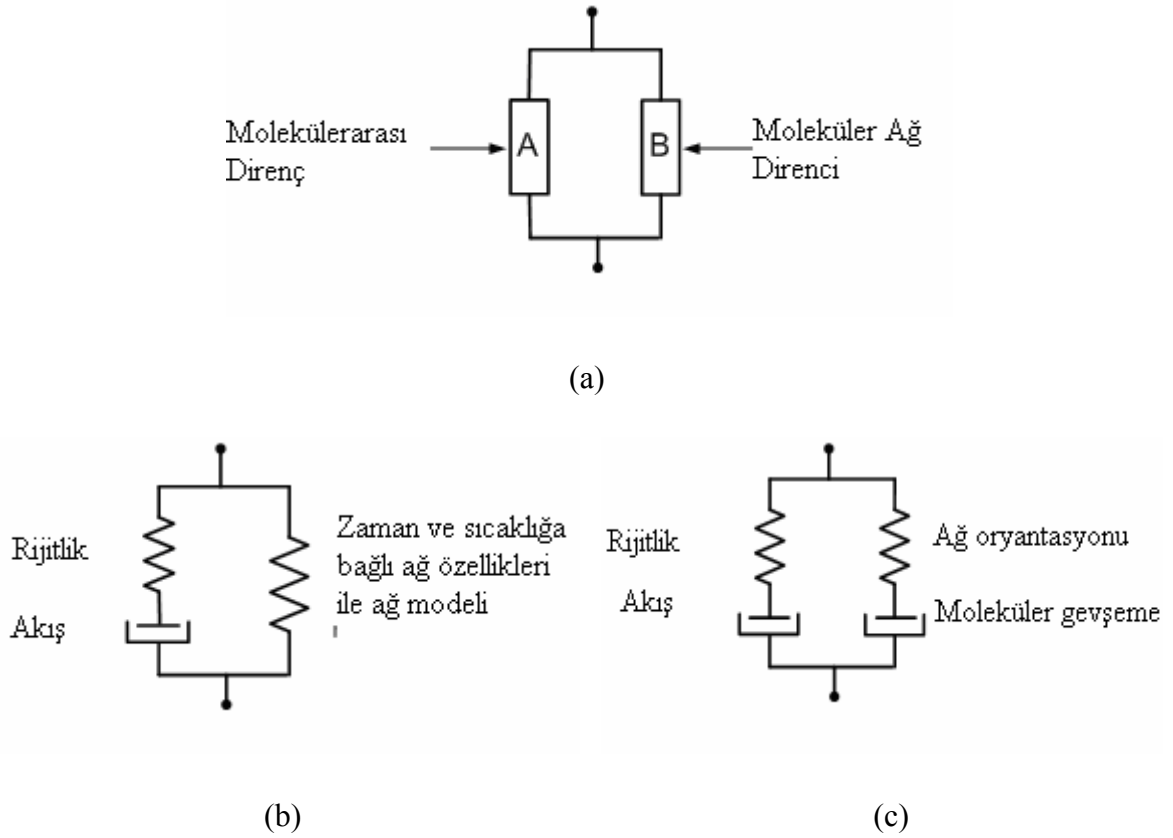
PET'in sonlu deformasyon seviyesindeki yükleme-boşaltma davranışını açıklamaya yönelik olarak geliştirilen bu model, temelde sekiz zincir modeline dayanır (Arruda ve Boyce 1993). PET'in gerilme-gerinim davranışı Şekil 4.10'da şematik olarak gösterildiği gibidir. Mekanik davranış deformasyona karşı iki temel direnci yenecek şekilde oluşur; a) Gerinim yönlenmesi kristalizasyonu tarafından arttırılan deformasyona karşı oluşan moleküler arası direnç. Bu dirençin hıza bağımlılığı, sıcaklığa göre daha zayıftır. Başlangıç rijitliği üç boyutlu lineer elastik yay elemanı ile ve hıza-sıcaklığa bağımlı gelişen akış (flow) termal aktive proses ile modellenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda molekülerarası direnç düşük ve akış gerilmesi, camsı

duruma göre daha düşüktür. b) Moleküler oryantasyondan dolayı gelişen anizotropik direnç.



Şekil 4.10 PET'in temel gerilme-gerinim davranışının gelişimi (Boyce vd. 2000)

Şekil 4.11 a'daki A direnci, gerinim yönlenme kristalizasyonuna bağlı olarak artış göstermekle birlikte, hız ve sıcaklıkla bağımlı gelişen başlangıç akışında rijit (stiff) bir cevap verir. B direnci ise moleküler düzenlemeden dolayı izotropik olmayan pekleşme/rijitlik (anizotropik strain hardening/stiffening) davranışının bir sonucudur. “Gerinim pekleşmesi/rijitlik”, davranışı gerinim hızı ve sıcaklığa sıkı bir bağımlılık gösterir. Pekleşme davranışı makromoleküler ağın oryantasyonu nedeniyle gelişir. Bu davranışın ortaya çıkmasında gerinim yönlendirme kristalizasyonun etkisi yoktur. Pekleşme davranışını modellemek üzere kauçuk elastisitesi (sekiz zincir modeli) modelinden faydalanılmıştır. Normalde kauçuk elastisitesi modelinde pekleşme davranışının hız ve sıcaklık bağımlılığı yoktur, bu nedenle hız ve sıcaklık bağımlılığını tanımlamak üzere moleküler gevşemeninde katkısını içerecek bazı terimler modelin içerisine katılmıştır.



Şekil 4.11 a) Boyce Modelinin genel gösterimi. b) Molekülerarası direncin elastik-viskoplastik davranışı ile ağ direncinin zamana ve sıcaklığa bağlılığını gösteren model. c) Ağ direncinin ağ oryantasyon prosesi ve moleküler gevşeme prosesi içerecek şekilde gösterimi.

Şekil 4.11 b'ye bağlı olarak çarpım ayrıştırması deformasyon kriterlerine göre modelin matematik bağıntıları aşağıdaki gibi ifade edilir. A ve B dirençleri birbirine paralel olduğundan dolayı her iki koldaki deformasyon gradyan tensörleri birbirine eşittir.

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_B = \mathbf{F} \quad (4.33)$$

(4.33) ifadesinden hareketle her iki direnç için matematiksel ifadeler ayrı ayrı aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

A Direnci (Elastik Direnç)

Molekülerarası direnç, başlangıç rijitliğini ve bunu takip eden akışı modellemek üzere; yay ve buna seri bağlanmış viskoz elemandan meydana gelmektedir. Yay elemanı moleküllerin çevresindeki van der Waals etkileşiminden dolayı meydana gelen rijit elastik cevabı temsil eder. Gerilme seviyesi, kritik bir seviyeye eriştikten sonra moleküler zincir segmentlerindeki

dönmele karşı duran enerji engelini yener ve akış meydana gelir. Bu dirençteki deformasyon gradyan tensörü elastik ve plastik deformasyon gradyan tensörlerinin çarpımı şeklinde gösterilir (Boyce vd. 1988).

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_A^e \mathbf{F}_A^p \quad (4.34)$$

burada $\mathbf{F}_A^e$ ve $\mathbf{F}_A^p$ sırasıyla elastik ve plastik deformasyon gradyan tensörleridir. Bu tensörler uzama ve dönme çarpımı şeklinde aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{F}_A^e = \mathbf{V}_A^e \mathbf{R}_A^e \quad (4.35)$$

$$\mathbf{F}_A^p = \mathbf{V}_A^p \mathbf{R}_A^p \quad (4.36)$$

burada $\mathbf{V}_A^e, \mathbf{V}_A^p$ ve $\mathbf{R}_A^e, \mathbf{R}_A^p$ sırasıyla elastik, plastik sol uzama (left stretch) ve dönme (rotation) tensörleri. A direncinin hız gradyan tensörü, $\mathbf{L}_A$,

$$\mathbf{L}_A = \dot{\mathbf{F}}_A \mathbf{F}_A^{-1} \quad (4.37)$$

dir. Bu ifade elastik ve plastik bileşenlerle birlikte gösterilirse

$$\mathbf{L}_A = \dot{\mathbf{F}}_A^e \mathbf{F}_A^{e-1} + \mathbf{F}_A^e \mathbf{F}_A^p \mathbf{F}_A^{p-1} \mathbf{F}_A^{e-1} = \mathbf{L}_A^e + \tilde{\mathbf{L}}_A^p \quad (4.38)$$

$$\tilde{\mathbf{L}}_A^p = \tilde{\mathbf{D}}_A^p + \tilde{\mathbf{W}}_A^p \quad (4.39)$$

$\tilde{\mathbf{W}}_A^p = 0$ dir. $\tilde{\mathbf{D}}_A^p = \dot{\gamma}_A^p \mathbf{N}_A$ dir ve $\mathbf{N}_A$ normalize deviatorik gerilmedir;

$$\mathbf{N}_A = \frac{1}{\sqrt{2}\tau_A} \mathbf{T}'_A \quad (4.40)$$

$\tau_A = \left[\frac{1}{2} \mathbf{T}'_A \mathbf{T}'_A \right]^{1/2}$ ve $\mathbf{T}'_A$ Cauchy gerilmesinin deviatorik kısmıdır. Deformasyon gradyan tensörünün çarpım ayrıştırmalı kullanımı hiperelastik kanunları gerektirir. A direnci ile elastik davranışı modellemek üzere Hencky Gerinim bağıntısı ($[\ln \mathbf{V}_A^e]$) kullanılır ve Cauchy gerilmesi aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{T}_A = \frac{1}{J_A} \mathbf{C}^e [\ln \mathbf{V}_A^e] \quad (4.41)$$

$\mathbf{C}^e$, dördüncü dereceden elastiklik tensörü ve $J_A = \det \mathbf{F}_A^e$ 'dir. Termal aktif bir proses olarak plastik gerinim hızı

$$\dot{\gamma}_A^p = \dot{\gamma}_{OA} \exp \left[-\frac{\Delta G(1 - \tau_A / s)}{k\theta} \right] \quad (4.42)$$

burada sırasıyla $\dot{\gamma}_{OA}$ ön üstel faktör, ΔG akışa karşı enerji engeli, s kesme direnci ve bu değer $0.15G^4$ şeklinde alınabilir ve burada G elastik kayma modülü, k Boltzmann sabiti ve θ mutlak sıcaklıktır.

B direnci (Network direnç)

Ağ elemanındaki deformasyon hareketi iki mekanizma üzerine kuruludur: a) Moleküler ağ altında yatan uzama/dönme, b) Moleküler gevşeme. Bu iki süreç analog modelde birbirine seri, yay (ağ oryantasyon yayı) ve viskoz eleman (moleküler gevşeme) ile temsil edilir. B direncinin deformasyon gradyanı, ağ oryantasyonu ve gevşeme gradyanlarının çarpımından meydana gelir.

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{F}_B^N \mathbf{F}_B^F \quad (4.43)$$

A direncinde yapılan işlemlere benzer olarak tensörel ayrıştırmalar gerçekleştirilir ise;

$$\mathbf{L}_B = \dot{\mathbf{F}}_B \mathbf{F}_B^{-1} \quad (4.44)$$

$$\mathbf{L}_B = \dot{\mathbf{F}}_B^N \mathbf{F}_B^{N-1} + \mathbf{F}_B^N \dot{\mathbf{F}}_B^F \mathbf{F}_B^{F-1} \mathbf{F}_B^{N-1} = \mathbf{L}_B^N + \tilde{\mathbf{L}}_B^F \quad (4.45)$$

(4.45)'deki $\mathbf{L}_B^N$ ve $\tilde{\mathbf{L}}_B^F$ sırasıyla ağ ve akış hız gradyan tensörleridir. Hız gradyan tensörünün akış kısmı $\tilde{\mathbf{L}}_B^F$ deformasyon hızı ve dönme tensörlerinden meydana gelir.

$$\tilde{\mathbf{L}}_B^F = \tilde{\mathbf{D}}_B^F + \tilde{\mathbf{W}}_B^F \quad (4.46)$$

Tek eksenli yükleme durumunda dönme tensörü $\tilde{\mathbf{W}}_B^F = 0$ 'dır ve moleküler gevşeme deformasyon hız tensörünün akış kısmı ile tarif edilir. $\tilde{\mathbf{D}}_B^F$ moleküler gevşeme hızı;

$$\tilde{\mathbf{D}}_B^F = \dot{\gamma}_B^F \mathbf{N}_B \quad (4.47)$$

burada $\tau_B = \left[\frac{1}{2} \mathbf{T}_B' \mathbf{T}_B \right]^{1/2}$ olmak üzere, normalize deviatorik gerilme $\mathbf{N}_B = \frac{1}{\sqrt{2}\tau_B} \mathbf{T}_B'$ 'dir.

Gevşeme hızı ise aşağıdaki gibidir:

$$\dot{\gamma}_B^F = C \left(\frac{1}{\lambda_F - 1} \right) \tau_B \quad (4.48)$$

burada $\lambda_F = \left[\frac{1}{3} \text{tr}(\mathbf{F}_B^F \mathbf{F}_B^{FT}) \right]^{1/2}$ 'dir ve gevşeme prosesi üzerinde sıcaklık bağımlılığını

tanımlamak üzere belirlenen sabit olan, $C = D \exp \left\{ -\frac{Q}{RT} \right\}$ şeklindedir. D malzeme sabiti, Q

ısı, R üniversal gaz sabiti ve T sıcaklıktır (Bergstrom ve Boyce 1998, Boyce vd. 2000). Sekiz zincir (Arruda-Boyce eight-chain rubber-elasticity) model dikkate alınarak ağ direncinden dolayı meydana gelen gerilme hesaplanmıştır. “Non-Gaussian” zincire dayanan, sekiz-zincir model Langevin fonksiyon üzerinde çalışır. Ağda ki herbir zincirin uzaması,

$\bar{\lambda}_N = \left[\frac{1}{3} \text{tr}(\bar{\mathbf{B}}^N) \right]^{1/2}$, $\bar{\mathbf{B}}^N = \bar{\mathbf{F}}_B^N \bar{\mathbf{F}}_B^{NT}$ ve $\bar{\mathbf{F}}_B^N = (J_B)^{-1/3} \mathbf{F}_B^N$, $J_B = \det \mathbf{F}_B^N$ 'dir. B direncindeki

gerilme, Boyce vd. (2000) göre:

$$\mathbf{T}_B = \frac{1}{J_B} \frac{nk\theta}{3} \frac{\sqrt{N}}{\bar{\lambda}_N} L^{-1} \left[\frac{\bar{\lambda}_N}{\sqrt{N}} \right] \left[\bar{\mathbf{B}}^N - (\bar{\lambda}_N)^2 \mathbf{I} \right] \quad (4.49)$$

burada n zincir yoğunluğu ve N düzenlemeler arasındaki “rigid links” sayısıdır. L^{-1} Ters Langevin Fonksiyon ve Langevin fonksiyon $L(\beta) = \coth(\beta) - (1/\beta)$ 'dir (Spathis 1997).

Sonuç olarak toplam gerilme her iki direncin üzerinde oluşan gerilmelerin toplamıdır.

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_A + \mathbf{T}_B \quad (4.50)$$

4.4.2 Sonlu Deformasyon Seviyesinde “Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (FVBO)

Sonlu deformasyon seviyesinde ki VBO, adi objektif hız türevleri kullanılarak ifade edilir. Sonlu deformasyon teorisinde iki yaklaşım vardır. Birinci yaklaşım, Boyce vd. (2000) modelinde olduğu gibi çarpım ayrıştırmalı deformasyon gradyan tensördür. Bu yaklaşımda toplam deformasyonun, elastik ve plastik deformasyon gradyan tensörlerinin çarpımından meydana geldiği düşünülür. Çarpım ayrıştırmalı gradyan tensörünün kullanımı, hiperelastik denklemler ile hesaplamalar yapmayı gerektirir. Hiperelastik kanunda, elastik davranışı modellemek üzere değişik gerilme ve gerinim ilişkisi tanımlanmıştır. Bunların başlıcaları Hencky ve Almansi gerinim ölçümleridir. Deformasyon tensörleri açısından bir diğer yaklaşım, deformasyon hız tensörünün (**D**, rate of deformation tensor) elastik ve plastik kısımlarının toplamı şeklindedir. Toplam ayrıştırmalı deformasyon hız tensörünün (**D**) kullanımı, hipoelastik denklemler ile hesaplama yapmayı gerektirir. VBO modelin içeriğinde, deformasyon hız tensörünün (**D**) eklemeli ayrıştırması kullanılır. Geniş deformasyon seviyelerinde davranışı tanımlamak üzere objektif hızlar kullanılır. Bu nedenle geniş deformasyon seviyelerine geçişte, teori içindeki bütün durum değişkenleri objektif hale getirilmelidir (Çolak 2004b, Reinhardt ve Dubey 1996, Hoger 1986).

VBO’nun sonlu deformasyon teorisi;

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}^e + \mathbf{d}^in = \frac{1+\nu^o}{CE} \mathbf{s} + \frac{3}{2} F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{\mathbf{s} - \mathbf{g}}{\Gamma} \right) \quad (4.51)$$

burada sırasıyla **s** ve **d**, Cauchy gerilme tensörünün (σ) deviatorik kısmı ve deformasyon hız tensörünün (**D**) deviatorik kısmı, **g** denge gerilmesinin (**G**) deviatorik kısmı. E Elastiklik modülü, ν elastik Poisson oranı. C lineer olmayan boşaltmayı tanımlamak üzere geliştirilen parametre. $C = 1 - \lambda \left(\|\mathbf{G} - \mathbf{K}\| / A \right)^\alpha$ ve $C[0] = 1$. C’nin davranışı hıza bağımlı, λ ve α parametreleri ile ayarlanabilir (Colak 2005). $F[]$ pozitif 1/ zaman boyutlu akış fonksiyonu ve $F[0] = 0$.

Akış fonksiyonu lineer olmayan hız bağımlılığını gerçekleştirir. $F[] = B \left[\frac{\Gamma}{D} \right]^m$ ifadesi ile verilir ve B üniversal sabit ve D “drag” gerilmesi, bu çalışmada sabittir. Γ “overstress” invaryantıdır ve gerilme boyutundadır (Cauchy ve denge gerilmesi arasındaki farktır).

$$\Gamma^2 = \frac{3}{2} (\mathbf{s} - \mathbf{g}) : (\mathbf{s} - \mathbf{g}) \quad (4.52)$$

Denklem (4.51)'de ki üstel işaret 'o' objektif hızı işaret eder. Bir $\mathbf{A}$ tensörünün "co-rotational" objektif hızı;

$$\overset{\circ}{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{A}\boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\Omega}\mathbf{A} \quad (4.53)$$

burada $\overset{\circ}{\mathbf{A}}$, $\mathbf{A}$ 'nın objektif hızı ve $\boldsymbol{\Omega}$ simetrik "dönme" tensör. Tek eksenli yüklemde $\overset{\circ}{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{A}}$ 'dir. Böylece sonlu deformasyon teorisi, küçük deformasyon teorisinin sonuçlarını verir (Çolak, 2003, Kolymbas vd. 2003).

Malzemeler üzerinde yapılan deneylerden çıkarılan sonuçlarda: gevşeme ve sünme durduğu anda dengeye erişilmiştir. Bu durum malzeme içerisindeki yapısal kusurlardan ileri gelmektedir. Teorideki denge gerilmesi malzeme içerisindeki yapısal kusurları model içerisine katmak için dahil edilmiştir. Başlangıçta Cauchy ve denge gerilmesi iç içe geçmiş haldedir. Daha sonra plastik bölgeye erişmekle birlikte birbirlerinden ayrılırlar. Denge gerilmesi, elastik olmayan deformasyonun gelişimine bir tepki olarak ortaya çıkar. Cauchy ve denge gerilmesi arasındaki fark "overstress"tir. $\mathbf{o} = \mathbf{s} - \mathbf{g}$ ve teori bu kavrama dayanır,

$$\overset{\circ}{\mathbf{g}} = \frac{\psi}{E} \overset{\circ}{\mathbf{s}} + \psi F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{\mathbf{s} - \mathbf{g}}{\Gamma} - \frac{\mathbf{g} - \mathbf{k}}{A} \right) + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \overset{\circ}{\mathbf{k}} \quad (4.54)$$

Burada A izotropik gerilmedir, bu gerilme hıza bağımlı bir gerilme olup pekleşme (hardening) ve yumuşama (softening) davranışını modeller. $\mathbf{k}$, kinematik gerilmenin deviatorik parçası. ψ şekil fonksiyonu olup başlangıç "quasi elastik" bölgeden viskoplastik bölgeye geçişi modeller. Gelişim denklemi aşağıdaki gibidir;

$$\psi = \psi_1 + \left(\frac{C_2 - \psi_1}{\exp(C_3 \|\boldsymbol{\varepsilon}^{in}\|)} \right)$$

$$\psi_1 = C_1 \left(1 + C_4 \left(\frac{|\mathbf{G}|}{A + |\mathbf{K}| + \xi \Gamma^2} \right) \right) \quad (4.55)$$

burada C_1 , C_2 , C_3 , C_4 ve ξ malzeme sabitleridir.

Deformasyon süresince, dislokasyonların birbirleri ve tane sınırları ile ilişkisi sonucu malzeme içinde pekleşme meydana gelir. Diğer yandan dislokasyonlar, karşılıklı burgers vektörleri çakışırında birbirlerini yok ederler, böylece toparlanma meydana gelir. Bu davranışı modellemek için, denge gerilmesinin gelişim denklemi içerisine pekleşme terimi (ilk iki terim) ve üçüncü terim olan dinamik toparlanma terimi dahil edilmiştir. Kinematik gerilmenin gelişim denklemi;

$$\dot{\mathbf{k}} = \frac{|\boldsymbol{\sigma}|}{\Gamma + |\mathbf{G}|} \bar{E}_t \mathbf{d}^{\text{in}} \quad (4.56)$$

burada $\bar{E}_t = E_t / (1 - E_t / E)$ ve E_t maksimum viskoplastik gerinimdeki tanjant modülüdür.

4.4.3 FVBO ve Boyce Modelleri Simülasyon Sonuçları

Oda sıcaklığında YYPE'nin tek eksenli çekmede hız bağımlılığı, sünme ve gevşeme davranışı, VBO modelin modelleme kabiliyetini sonlu deformasyonlar seviyesinde incelemek üzere Boyce vd. (2000) modeli ile karşılaştırmalı olarak modellenmiştir. FVBO ve Boyce vd. (2000) modeline ait malzeme parametreleri YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızındaki yükleme-boşaltma deneysel sonuçlarından belirlenmiştir (Tablo 4.2 ve 4.3).

Table 4.2 FVBO model için malzeme sabitleri

Akış Fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	C parametresi
$B = 3 \text{ 1/s}$	$E = 2300 \text{ MPa}$	$C_1 = 140 \text{ MPa}$	$\lambda = 0.65$
$D = 95 \text{ MPa}$	$E_t = 13 \text{ MPa}$	$C_2 = 1520 \text{ MPa}$	$\alpha = 0.25$
$m = 2.9$		$C_3 = 65$	$A = 17.3 \text{ MPa}$
		$C_4 = 2$	
		$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}$	

Tablo 4.3 Boyce vd. (2000) modeli için malzeme sabitleri

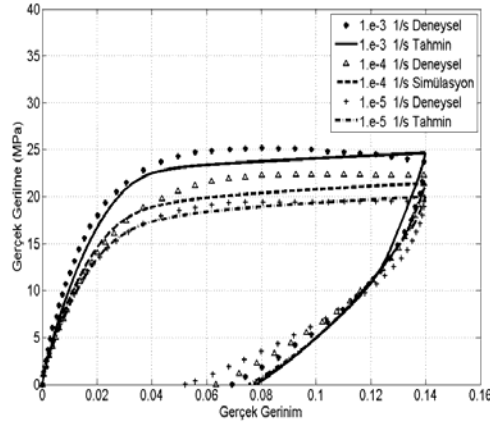
Moleküllerarası akış direnci	Modüller	Pekleşme/katılma oryantasyonu
$\dot{\gamma}_{OA} = 13.10^{24} \text{ s}^{-1}$	$E = 2300 \text{ MPa}$	$C_R = nk\theta = 10.10^6 \text{ Pa}$
$\Delta G = 257.10^{-21} \text{ J}$	$\nu = 0.49$	$N = 30$
		$C = 6.10^{-8} (\text{Pa s}^{-1})$

Her iki model için belirlenen malzeme parametreleri ile $1.e-3$ ve $1.e-5$ 1/s gerinim hızları için tahmin sonuçları hesaplanmıştır (Şekil 4.12 a ve 4.14 a). Sonlu deformasyon seviyesindeki davranışı açıklamak üzere geliştirilen FVBO model ve Boyce vd. (2000) modeli başta deformasyon tensörlerinin ifade edilmesi olmak üzere temelde büyük farklılıklar içermektedir. FVBO model ilk kullanım alanı olarak metalik malzeme davranışını açıklamak üzere ortaya konulmuştur. Bu nedenle modelin gelişim denklemleri metalik malzeme deformasyon mekanizmalarının iç yapı değişimleriyle ilişkili olarak tarif edilmiştir. Boyce vd. (2000) çalışmasında ele alınan model ise gerilme cevabı açısından iki kısımdan meydana gelmektedir; modelin birinci kısımdaki gerilme-gerinim ilişkisi lineer elastisiteye dayanan Hencky gerinim ölçümünü içermektedir. Gerilmenin ikinci kısmı ise kauçuğun yük altında davranışını tanımlamak üzere ortaya konan (Arruda ve Boyce 1993) sekiz zincir teorisine dayanan hiperelastik malzeme denklemleriyle ifade edilmektedir. Bir kısım malzeme parametreleri ile birlikte ters Langevin fonksiyonun gelişimine bağımlı bu ifade, ters Langevin fonksiyonun gelişim trendinin güçlü etkisi altındadır. Bu nedenle gerilmenin ikinci kısmının etkisi, gerinim seviyesinin belli bir limiti altında görülmemektedir yani çok geniş deformasyon seviyesinde model yeterli sonuçlar vermesine karşın sonlu ve küçük deformasyon seviyelerinde yetersiz kalmaktadır. Diğer yandan Boyce vd. (2000) modeli elastik bölgedeki davranışı açıklayabilmektedir fakat elastik bölgeden (viskoelastik) viskoplastik bölgeye geçişi ve boşaltma davranışını açıklayamamaktadır. Boyce vd. (2000) modeli viskoelastik bölgede lineer davranış sergilememektedir, dolayısıyla lineer olmayan viskoelastik davranış modelleyememektedir. Sonuç olarak lineer olmayan viskoelastik ve viskoplastik özellikler gösteren YYPE'nin yükleme-boşaltma mekanik davranışını modellemede, Boyce vd. (2000) modelinin gelişim denklemleri temelinin farklılığından dolayı hız bağımlılığı açısından yetersizdir (Şekil 4.14 a).

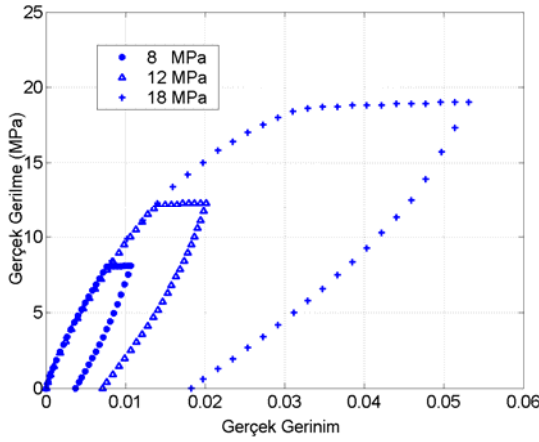
FVBO makroskobik bir model ve orijin olarak metalik malzeme davranışını modellemek üzere ortaya konmasına rağmen sonlu deformasyon seviyelerinde de polimerik malzeme davranışını yükleme-boşaltma şartlarında hız bağımlılığı açısından oldukça iyi modelleyebilmektedir (Şekil 4.12 a).

Şekil 4.12 b YYPE'nin 8, 12 ve 18 MPa gerilme seviyelerdeki sünme gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri verilmiştir. YYPE'nin 8, 12 ve 18 MPa gerilme seviyelerdeki sünme davranışını modellemek için FVBO $1.e-4$ 1/s gerinim hızında belirlenen malzeme parametreleri ile simüle edilmiş ve tahmin sonuçlar Şekil 4.12 c'de gösterilmiştir. FVBO model ile her üç gerilme seviyesinde sünme davranışı oldukça iyi modellenmiştir. Diğer

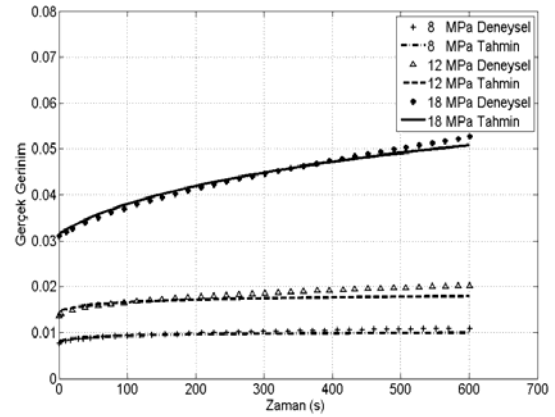
yandan Boyce modeli içerisinde (4.41) ve (4.49)'de görüldüğü gibi gerilme ifadeleri türevsizdir, gerilmenin zamana bağımlı olarak tanımlanmamasından dolayı sünme durumu için model simülasyonu yapılamamaktadır (Düşünceli ve Çolak 2007b).



(a)



(b)



(c)

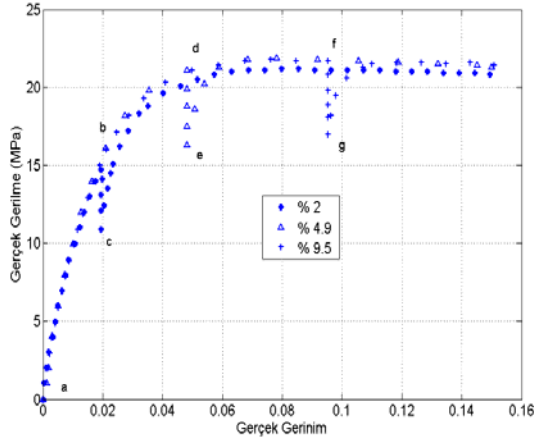
Şekil 4.12 a) YYPE'nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında yükleme-boşaltma deney sonuçları ve FVBO model simülasyonları. b) 1. e-4 /s.gerinim hızında 600 s. süreyle 8 MPa., 12 MPa. ve 18 MPa.gerilme seviyesinde sünme deneyleri gerilme-gerinim eğrileri. c) 8 MPa., 12 MPa. ve 18 MPa.gerilme seviyesinde sünme deneyleri ve FVBO model tahmin sonuçları.

Malzeme davranışının en önemli özelliklerinden biri olan sabit gerinim seviyesinde zamanla gerilmedeki azalışı ifade eden gevşeme deneyleri YYPE için 1.e-4 yükleme hızında %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu gevşeme deneyi sonuçları her iki model ile ayrı ayrı simüle edilmiştir. Gevşeme deneyleri esnasındaki gerilme azalması her üç

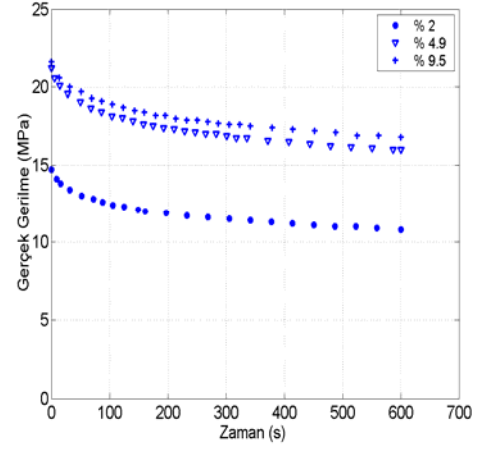
gerinim seviyesinde birbirine yakın olduğu için gerilme-zaman grafiği (Şekil 4.13 b), gevşeme modülü-zaman grafiğine dönüştürülmüştür (Şekil 4.13 c). Bir diğer açıdan gevşeme modülleri değişimi, sonlu elemanlar metoduna ait ticari bilgisayar programlarında kullanılan Prony serilerinin açılımına dayanan modellerin katsayılarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır. FVBO ve Boyce vd. (2000) modellerinin %2, %4.9, %9.5 gerinim seviyesinde 600 saniye süreli gevşeme tahmin sonuçları, gevşeme modülü değişimine dönüştürülerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.13 c ve Şekil 4.14 b). FVBO modelinin gevşeme modülü değişimi tahminleri deneysel sonuçlarla uyumluluk göstermiştir. Öte yandan Boyce (2000) modelinin yükleme-boşaltma davranışını açıklamakta yetersiz kaldığı noktalar bulunmasından dolayı gevşeme tahminlerinin gerilme başlangıç seviyeleri, deneysel sonuçlarla aynı noktadan başlayamamıştır. Bu nedenle gevşeme modülü değişimi davranışı Boyce (2000) model tahminleri ile deneysel sonuçlar uyumlu çıkmamıştır. Boyce (2000) modelinin yükleme-boşaltma tahminleri deneysel sonuçlara uyumlu olsaydı, gevşeme sonuçları daha iyi olabilirdi (Bergstrom vd. 2002).

Geniş gerinim seviyesinde, gevşeme esnasındaki gerilme düşümü gerinim seviyesinden bağımsızdır (Khan 2003). Bu davranış, “overstress” modelindeki temel kavramın, Cauchy ve denge gerilmesi arasındaki fark olmasından dolayı FVBO model tarafından oldukça iyi açıklanmaktadır. VBO modelde gevşeme ve sünme davranışı, Cauchy gerilmesinin denge gerilmesine eşit olduğu esnada durur. Diğer yandan VBO asimtotik çözüme eriştiği zaman, σ ve G arasındaki fark sabit olacaktır. Bu gibi özellikler gevşeme deneylerinin kolayca modellenmesine imkan verecektir.

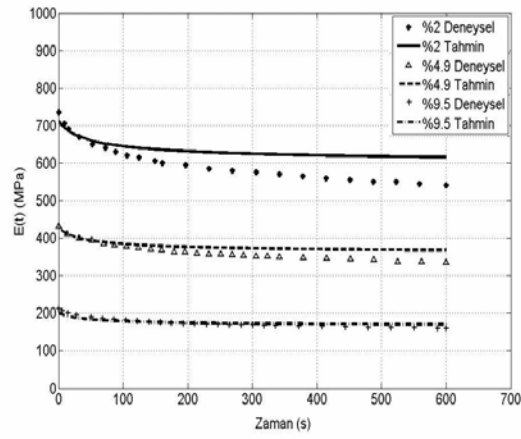
Sonuç olarak VBO ve Boyce vd. (2000) model sonuçlarının karşılaştırılmasından, VBO modelin Boyce modele göre küçük ve sonlu deformasyon seviyesinde oldukça iyi modelleme kabiliyeti olduğu görülmüştür.



(a)

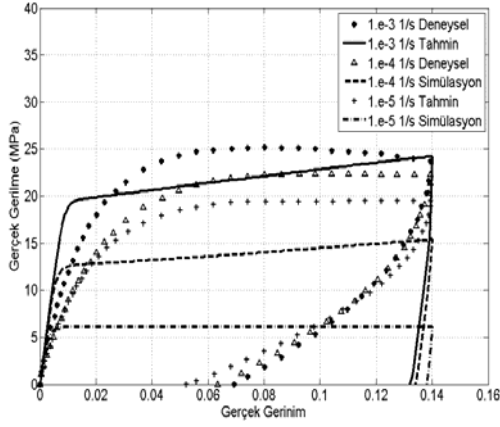


(b)

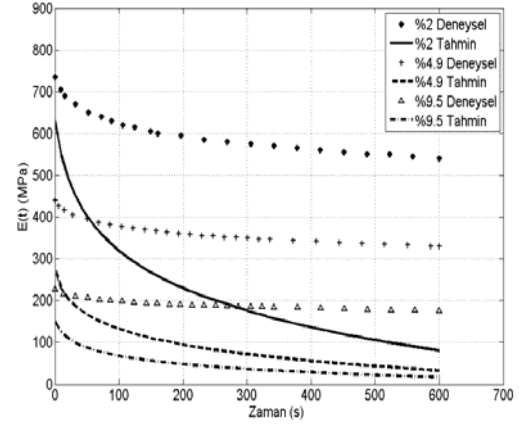


(c)

Şekil 4.13 a)YYPE' nin 1. e-4 /s.gerinim hızında 600 s. süreyle %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyesinde gevşeme deneyi gerilme-gerinim eğrileri. c) 1.e-4 1/s gerinim hızında %2, %5 ve %10 gerinim seviyesinde gevşeme deneyi gerilme-zaman eğrileri. c) YYPE'nin 1. e-4 1/s.gerinim hızında 600 s. süreyle %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyesinde gevşeme modülü-zaman eğrileri ve FVBO model tahmin sonuçları.



(a)



(b)

Şekil 4.14 a) YYPE'nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında yükleme-boşaltma deney sonuçları ve Boyce vd.(2000) model simülasyonları. b) YYPE' nin 1. e-4 /s.gerinim hızında 600 s. süreyle %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyesinde gevşeme modülü- zaman eğrileri ve Boyce vd. (2000) model tahminleri sonuçları.

5. KRİSTALLİK ORANININ MEKANİK DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN VBO MODELİ İLE MODELLENMESİ

Bölüm 2’de polimerik malzemelerin iç yapısı ve özellikle yarıkristal polimerlerin fazları hakkında detaylı bilgi verilmişti. Bu bilgilerde, polimerik malzemelerin kristalleşme süreci ve kristal yapının deformasyon aşamaları üzerindeki etkileri detaylı olarak. Yarıkristal polimerlerin iç yapısı, amorf ve kristal fazlardan meydana gelmektedir. Bu iki ayrı faz birbirlerine bağ zincirleri ile bağlanarak bir bütün yapı meydana getirirler. Bu komplike yapıdan dolayı yarıkristal polimerlerin deformasyon davranışlarının açıklanması güçleşmektedir. Literatürde yarıkristal polimerlerin deformasyon davranışlarını açıklamaya yönelik malzeme modelleri oldukça kısıtlı sayıdadır. Bu durum amorf ve kristal fazların malzeme yapısı içerisinde düzensiz bir şekilde dağılmasından ve lineer olmayan özellikler göstermesinden kaynaklanmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi kristallik oranı termoplastik polimerlerin mekanik özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Mesela; PE’nin kristallik oranı %30 dan %60’a yükseltirirse modül değeri 10 katına kadar varan değerlerde artabilir. Polimerlerin kristalize olma süreci birbirine komşu zincirlerin ince bir tabaka halinde yeniden düzenlenerek, birbirleri üzerinde katlanmasıdır. Bu ince tabakalar, amorf tabaka içerisinde geçen bağ zincirleri ile birbirlerine bağlanırlar. Her bir yapının birbirine ilişkili bu hali küresel kristal (spherulites) olarak bilinir. Polimerlerin kristalize olmasını ve kristalize oranını bir çok yapısal unsur etkiler. Polimerlerin stereokimyası tamamiyle mükemmel olmadığından dolayı (zincirler dallanma gibi bir kısım kusurlar barındırırlar) % 100 kristalize olamazlar (Bartczak 2005). Ayrıca tam lineer polimerler de kristalize olmazlar. Yüksek orandaki kristalleşme demek daha güçlü van der Waals bağları demektir. Polimerik malzemelerin kristalize olmasını etkileyen başlıca unsurlar aşağıdaki gibidir (Guo vd. 1999).

- a) Zincir yapısı: Zincirlerin kompleks yapısı kristalize olma sürecini olumsuz etkiler. Az dallanmış PE yüksek oranlarda kolayca kristalize olabilirken, geniş yan gruplar ve dallanmalara sahip kompleks yapı polimerlerin kristalize olması daha zordur.
- b) Soğuma hızı: Kristalize olma süreci zincirlerin birbiri üzerinde katlanması ile ilişkilidir dolayısıyla soğutma esnasında bu işlem için belli bir süreye ihtiyaç vardır, bu da ancak düşük hızda soğutma işlemi ile gerçekleştirilir. Sonuç olarak bu nedenlerden dolayı düşük soğutma hızlarında yüksek kristallik oranı, yüksek soğutma hızında düşük kristallik oranı elde edilir.

- c) Tavlama işlemi: Erime sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklıkta polimerik malzeme üzerinde yapılacak bir ısıtım işlemi zincirlerin yeniden düzenlenerek kristalize olmasına yol açar. Böylece yeniden bir kristalize olma sürecine girilerek kristallik oranı artırılmış olur.
- d) Polimerizasyon derecesi: Toplam molekül ağırlığının yapıyı oluşturan bir tek merin molekül ağırlığına bölünerek elde edilen değer, lineer bir polimerin ortalama uzunluğudur ve polimerizasyon derecesi olarak tarif edilir. Uzun zincir yapılarının kristalize olması zordur. Bu nedenle polimerizasyon derecesi yükseldikçe kristallik oranı düşer.
- e) Ön deformasyon (Predeformation): Cam geçiş sıcaklığı ile erime sıcaklığı arasında bir sıcaklık değerinde, polimer malzeme üzerinde düşük seviyede uygulanacak olan bir deformasyon zincirlerin yeniden düzenlenmesine neden olacağı ve düzleştireceği için zincirler birbirlerine doğru yaklaşır, bu da yeniden kristalleşme sürecini başlatır.

Bedoui (2006), küçük deformasyon seviyesinde PP, PE ve PET'in Elastiklik modüllerinin kristallik oranı ile ilişkisini ortaya koymak üzere mikromekanik bir model ortaya koymuşlardır. Kristallik oranı elastiklik modülü ilişkisini PP ve PET için deneylerle tespit etmişler, PE'nin ilişkisini Solvay datalarından almışlardır. PE'nin kristalleşme ilişkisi kısaca %46 seviyesinde $E=230$ MPa, %72 seviyesinde $E=1300$ MPa seviyesine yükselmektedir. Kompozit malzeme varsayımından hareket ile her iki fazı ayrı ayrı ve kristal fazın değişik yönelmelerini dikkate alarak modelleme çalışması yapmışlardır. Modellemede paralel (Upper) ve seri (Lower) şartların her ikisinde dikkate alınmıştır.

Oshmyan (2004), akma noktasının altında düşük gerinim seviyelerinde PP ve LDPE için yükleme-boşaltma davranışını modellemek ve kristalizasyon oryantasyonundan dolayı meydana gelen gerinim pekleşmesi-plastik azalma etkilerini incelemiştir. Modelde her iki fazın birbirine paralel ve seri olarak bağlı olması varsayımından hareket edilmiştir.

Nikolov (2000-2006), mikroyapısal modeller ile küçük ve geniş deformasyon seviyesinde YYPE'nin tekstrüde ve morfoloji değişimini incelemiştir. Modelde kompozit malzeme varsayımından hareketle birbirine seri bağlamak suretiyle, kristallik oranını deformasyon tensörüne dahil etmişlerdir. Ortaya konan modeller ile YYPE'nin küçük deformasyon seviyesinde değişik kristallik oranında yükleme davranışını, geniş deformasyon seviyesinde çekme, basma ve kayma durumları için gerilme-gerinim eğrilerinde ve tekstrüde değişiminde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Doyle (2000), elastiklik modülünü tespit etmek üzere amprik bir bağıntı geliştirmek üzerinde çalışmıştır. Bu denklemde her iki fazın birbirine paralel ve seri bağlanması durumu bir arada ifade edilerek komplike bir ifade elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, elastiklik modülü-kristallik oranı arasındaki ilişki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak uyumlu olduğu görülmüştür.

van Dommelen (2002), YYPE'nin tekstrüde gelişimini ve elasto-viskoplastik davranışını incelemek üzere kompozit malzeme varsayımına dayanarak sonlu deformasyon seviyesinde mikroyapıya dair model geliştirmiştir. Daha önce geliştirilen kompozit malzeme varsayım teorilerini bir arada kullanarak hibrit bir model geliştirmiştir. Böylece YYPE'nin kristallik oranına bağlı olarak değişen yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme davranışlarını hipotetik malzeme üzerinde incelemiştir.

Makardi (2004), Ahzi (2003) çalışmasındaki modellere “self-consistent” modeli ekleyerek geniş deformasyon seviyesinde PET'in kristalizasyon sürecini ve mekanik davranışın incelemişlerdir. Ahzi (2003), moleküler arası direnci paralel (upper bound) ve seri (lower bound) modelleri kullanarak ifade etmiştir. Molekülerarası gevşeme prosesinin direnci, amorf ve kristal fazların ayrı ayrı etkilerinden meydana geldiği varsayılmıştır. Her iki fazın mekanik davranış üzerine etkisi, birbirine seri olarak bağlanmış yay-sönüm elemanı ile temsil edilmiştir. Bu yay-sönüm elemanları her iki faz için birbirine seri ya da paralel bağlanması durumu için ayrı ayrı incelenmiştir. Her iki modelin cevapları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Paralel (upper bound) modelde, her iki elemandaki deformasyon miktarları birbirine eşittir. Dolayısıyla toplam gerilme, kristal ve amorf fazın cevaplarının kristallik oranına bağlı olarak toplamından meydana gelecektir. Seri (lower bound) model de ise amorf ve kristal fazı temsil eden yay-sönüm elemanı çifti birbirine seri olarak bağlanmıştır. Bu sistem üzerindeki gerilme değeri, herbir eleman çiftinde birbirine eşittir ve deformasyon miktarı ise her bir fazdan ileri gelen deformasyonun kristallik oranı ile de ilişkilendirilerek toplamından meydana gelir.

5.1 Kristallik Oranını İçeren Modifiye VBO Modeli

VBO modeli polimerik malzeme davranışını açıklamak açısından, SLS modeli temel aldığı 4.3 numaralı başlık altında belirtilmiştir. SLS modeli “overstress” formatına uygun hale getirilerek VBO modeli ifade edecek şekle dönüştürülür. SLS modeldeki yaylar ve sönüm elemanı lineerdir. VBO modelde Kelvin elemanın yayı lineer değildir, bu yayın özellikleri değiştirilerek histerisizi modellemesi sağlanır. Sönüm elemanı ise lineer olmayan hale

dönüştürülerek, “overstress”’e bağımlı hale getirilir. Bu değişiklik viskozite ya da akış fonksiyonu tarafından kontrol edilen lineer olmayan hız bağımlılığını modelleyebilmek için yapılır (Krempf 1998). Çalışmanın bu kısmında, yarıkristal polimerlerin kristallik oranına (ϕ) bağlı olarak mekanik cevaplarının değişimini modellemek üzere VBO modeli, Ahzi (2003) çalışmasını temel alarak modifiye edilmiştir. VBO model üzerindeki modifikasyon amorf ve kristal fazları ayrı ayrı malzemeler gibi düşünerek, kompozit malzeme varsayımı ile yapılmıştır. Amorf ve kristal fazların herbiri için ayrı ayrı SLS gösterimleri yapılmıştır (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Daha sonra kristallik oranına bağlı olarak değişen mekanik cevabı araştırmak üzere, amorf ve kristal fazları ifade eden SLS modelleri birbirine seri ve paralel olacak şekilde bağlanmıştır, böylece kristallik oranının mekanik davranış üzerindeki etkisini açıklamaya yönelik iki ayrı model geliştirilmiştir. Bu modifiye VBO modelleri amorf ve kristal fazlar için belirlenen malzeme parametreleri (Tablo 5.1 ve 5.2) ile çözülerek, simülasyonlar yapılmıştır

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak sadece yükleme (çekme veya basma hali) durumu için model cevabı araştırılmamış aynı zamanda sünme ve gevşeme cevapları da araştırılmıştır.

Geliştirilen modelin tasarımda veya imalatda kullanılabilmesi için farklı yükleme hallerini niteliksel olarak modelleyebilmelidir. Bu nedenlerle, model yükleme-boşaltma (Çekme hali) sünme ve gevşeme cevapları araştırılmıştır.

VBO (SLS) Modelin Seri Bağlanması Durumu

Kristallik oranının deformasyon davranışı üzerine etkisini modellemek üzere kristal ve amorf fazları temsil eden modifiye SLS gösterimlerinin seri bağlanması durumu Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Seri bağlanması durumunda herbir kısım üzerine etki eden gerilme birbirine eşittir. VBO model için bu durum deviatorik Cauchy gerilmelerinin eşit olmasını doğurur ve (5.1)’de ifade edildiği gibidir. Denklem formülasyonlarındaki alt indis “k” kristal fazı, “a” amorf fazı işaret eder.

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_k = \mathbf{s}_a \quad (5.1)$$

Malzemeye uygulanan gerilmeye karşılık meydana gelen gerinim, her bir fazın hacimsel miktarı ile orantılı şekilde toplamından meydana gelir. Bu durum (5.2)’de ifade edilmiştir ve (ϕ) kristallik yüzdesini ifade eder.

$$\dot{\mathbf{e}} = \phi \dot{\mathbf{e}}_k + (1 - \phi) \dot{\mathbf{e}}_a \quad (5.2)$$

Toplam gerinim hızı ifadesi VBO model gelişim denkleminde uygun olarak yazılırsa (5.3)'teki bağıntı elde edilir. Bu ifadede amorf ve kristal fazın elastiklik modülü farklı alınmasına karşın “C” parametresi her iki faz için eşit kabul edilmiştir, istenirse bu parametre de her iki faz için farklı değerlerde alınabilir.

$$\dot{\epsilon} = \phi \left(\frac{1+\nu}{CE_k} \dot{s}_k + F_k \left(\frac{s_k - g_k}{\Gamma_k} \right) \right) + (1-\phi) \left(\frac{1+\nu}{CE_a} \dot{s}_a + F_a \left(\frac{s_a - g_a}{\Gamma_a} \right) \right) \quad (5.3)$$

Her iki faz üzerine etkiyen gerilmenin eşit olduğundan hareketle elastiklik modülü ve Poisson oranını içeren denklemlerin birinci kısmı, bileşke modülü şeklinde ifade edilebilir ((5.4)). Alt indis “bil” bileşke modülünü işaret etmektedir ve E_{bil} ile gösterilmiştir.

$$E_{bil} = \phi \left(\frac{1+\nu}{CE_k} \right) + (1-\phi) \left(\frac{1+\nu}{CE_a} \right) \quad (5.4)$$

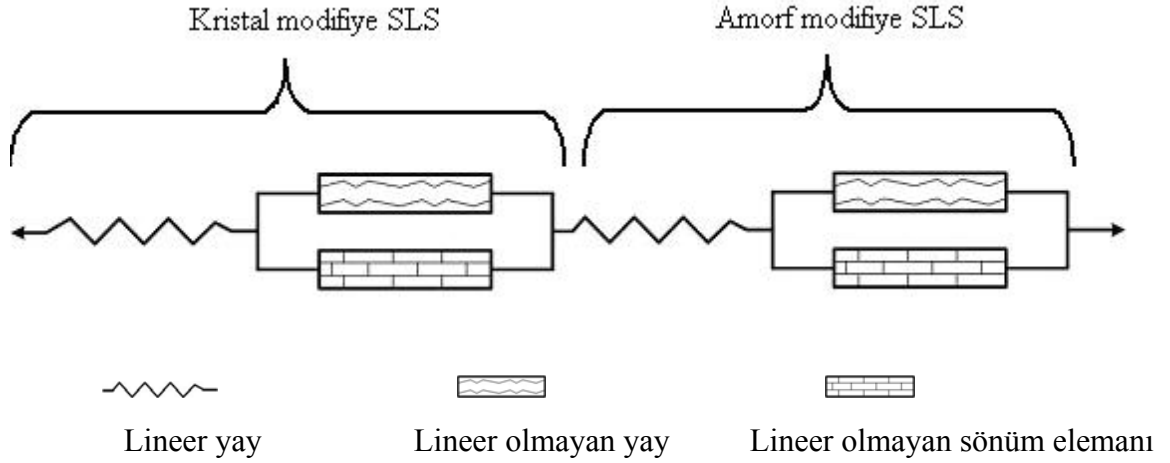
Gerilmelerin eşit düzeyde etkidiğinden hareketle aynı işlem akış fonksiyonu içinde gerçekleştirilerek, tek bir akış fonksiyonu tanımlanabilir. Bileşke akış fonksiyonu (5.5)'de verilmiştir.

$$F_{bil} = \phi(F_k) + (1-\phi)(F_a) \quad (5.5)$$

Bileşke modülü ve akış fonksiyonlarının tanımı ile gerinim hızı ifadesi (5.6)'da gösterilen basitleştirilmiş hale gelir.

$$\dot{\epsilon} = \dot{s} E_{bil} + \left(\frac{s - g}{\Gamma} \right) F_{bil} \quad (5.6)$$

“Overstress” invariantı (Γ), direkt olarak gerilme ile ilişkili ve herbir faz üzerine etki eden gerilmeler birbirine eşit olduğundan, $\Gamma = \Gamma_k = \Gamma_a$ olacaktır.



Şekil 5.1 Seri bağlı modifiye SLS

VBO (SLS) Modelin Paralel Bağlanması Durumu

Polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı deformasyon davranışını açıklamak üzere ikinci bir modifiye VBO modeli Şekil 5.2’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Bu gösterimde amorf ve kristal fazları temsil eden modifiye SLS modeller birbirine paralel bağlanmıştır. Her iki fazın birbirine paralel bağlanması durumunda deformasyon miktarları birbirine eşit olur. Bu durumda gerinim hızı (5.7)’deki gibidir. Alt indis “k” kristal fazı, “a” ise amorf fazı işaret etmektedir.

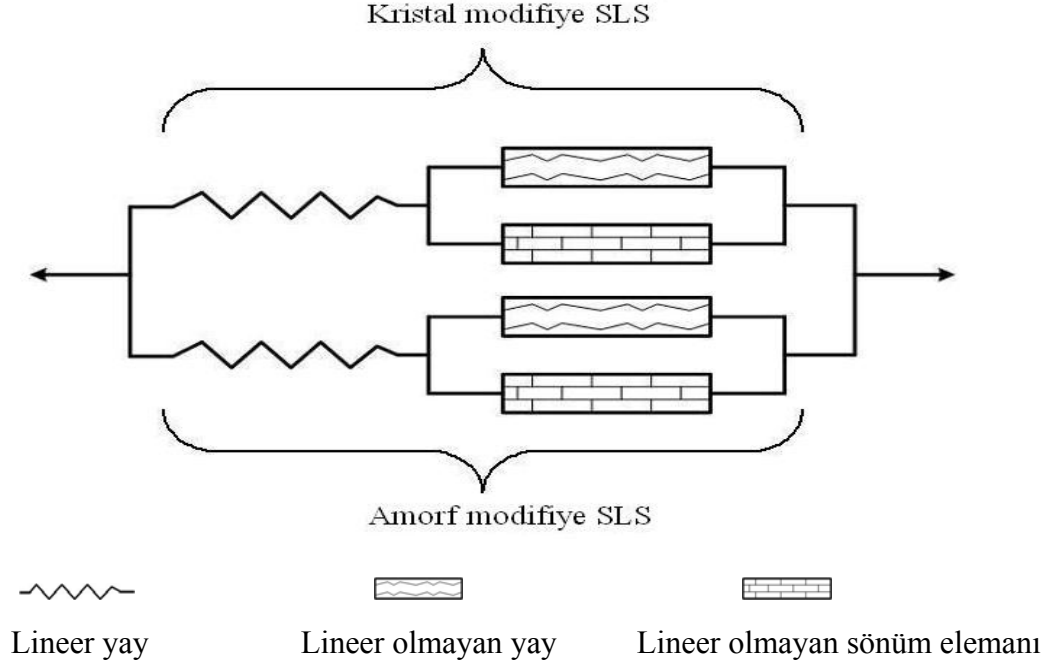
$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_k = \dot{\epsilon}_a \quad (5.7)$$

Bu durumda VBO modelin gelişim denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{1+\nu}{CE_k} \dot{s}_k + F_k \left(\frac{s_k - g_k}{\Gamma_k} \right) \right) = \left(\frac{1+\nu}{CE_a} \dot{s}_a + F_a \left(\frac{s_a - g_a}{\Gamma_a} \right) \right) \quad (5.8)$$

Model üzerindeki toplam gerilme, her iki fazın hacimsel yüzdelerine bağlı olarak toplamından meydana gelir. (ϕ) kristallik oranını işaret etmektedir.

$$s = \phi s_k + (1 - \phi) s_a \quad (5.9)$$



Şekil 5.2 Paralel bağlı modifiye SLS

5.2 Kristallik Oranının Mekanik Davranış Üzerindeki Etkisinin Modellenmesine Yönelik Modifiye VBO Simülasyon Sonuçları

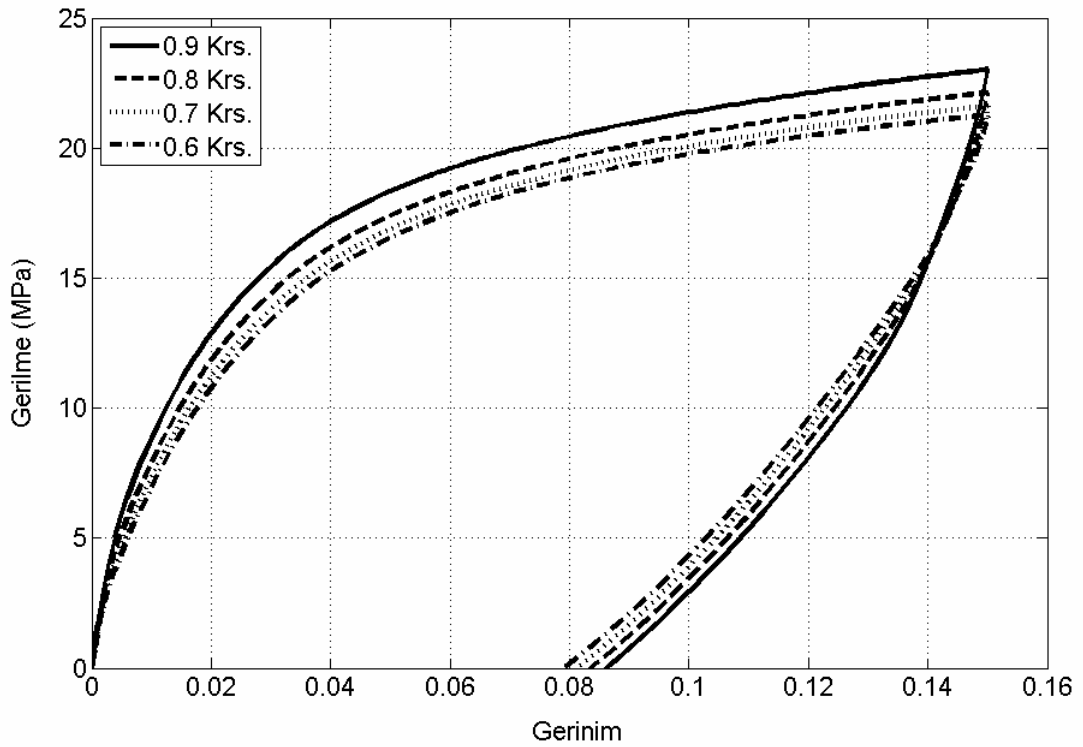
VBO model ile kristallik oranına bağlı olarak değişen mekanik özelliklerin açıklanmasına yönelik olarak, modelin temeli paralel ve seri bağlanmak suretiyle simülasyonlar yapılmıştır (Şekil 5.3-5.9). Literatürde deneysel veri bulunamadığı için simülasyonlar hipotetik malzeme için yapılmıştır. Dolayısıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilen malzeme parametreleri herhangi bir deneysel sonuca göre belirlenmiştir. Seri bağlı durumundaki modifiye VBO model, hipotetik malzeme sabitleri ile $1.e-3$ 1/s gerinim hızında %90-%60 kristallik oranı seviyeleri arasında yükleme-boşaltma simülasyonlarına tabi tutulmuştur. Simülasyon sonuçları, yarıkristal polimerik malzemelerin beklenen davranışlarına uygun değerler vermiştir. Kristallik oranının artışıyla malzemenin mukavemet değerleri artmıştır (Şekil 5.3).

Table 5.1 Kristal faz için malzeme sabitleri

Akış Fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	C parametresi
$B= 1 \quad 1/s$	$E= 3200 \text{ MPa}$	$C_1= 140 \text{ MPa}$	$\lambda=0.79$
$D= 80 \text{ MPa}$	$E_t= 13 \text{ MPa}$	$C_2= 1000 \text{ MPa}$	$\alpha=0.15$
$m= 2.9$		$C_3= 65$	$A=17.3 \text{ MPa}$
		$C_4= 2 \quad \xi=1 \text{ MPa}^{-1}$	

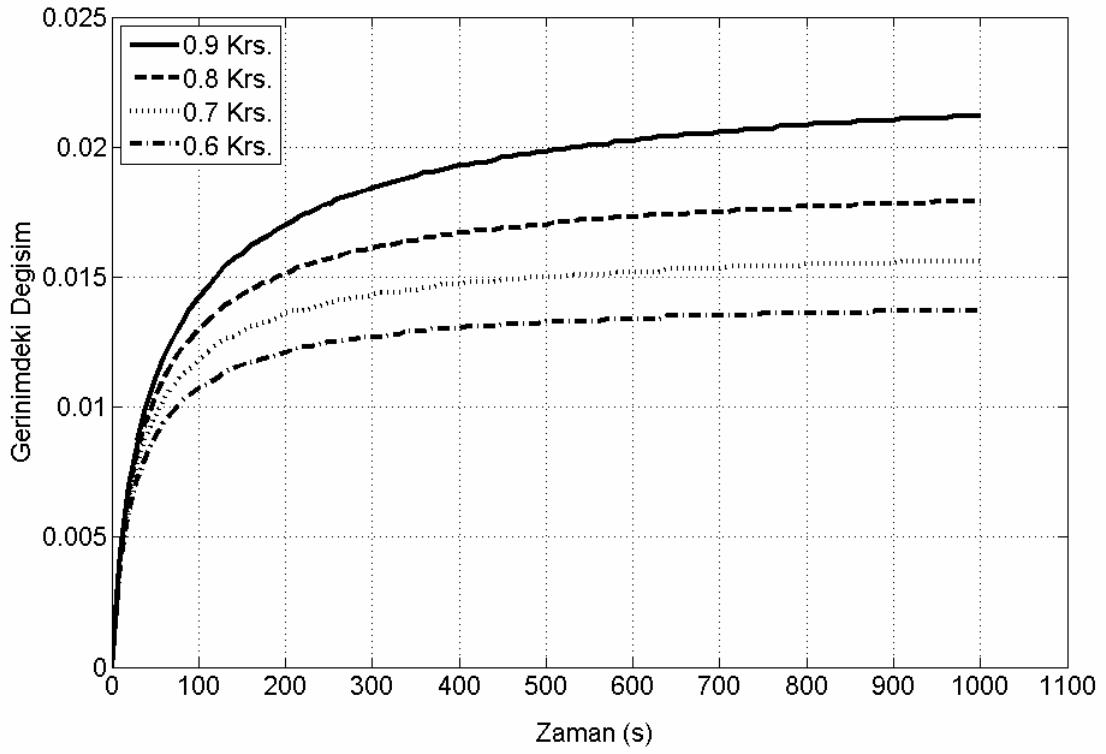
Tablo 5.2 Amorf faz için malzeme sabitleri

Akış Fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	C parametresi
$B=1 \quad 1/s$	$E=1500 \text{ MPa}$	$C_1=140 \text{ MPa}$	$\lambda=0.65$
$D=60 \text{ MPa}$	$E_t=13 \text{ MPa}$	$C_2=1000 \text{ MPa}$	$\alpha=0.25$
$m=2$		$C_3=65$	$A=17.3 \text{ MPa}$
		$C_4=2 \quad \xi=1 \text{ MPa}^{-1}$	



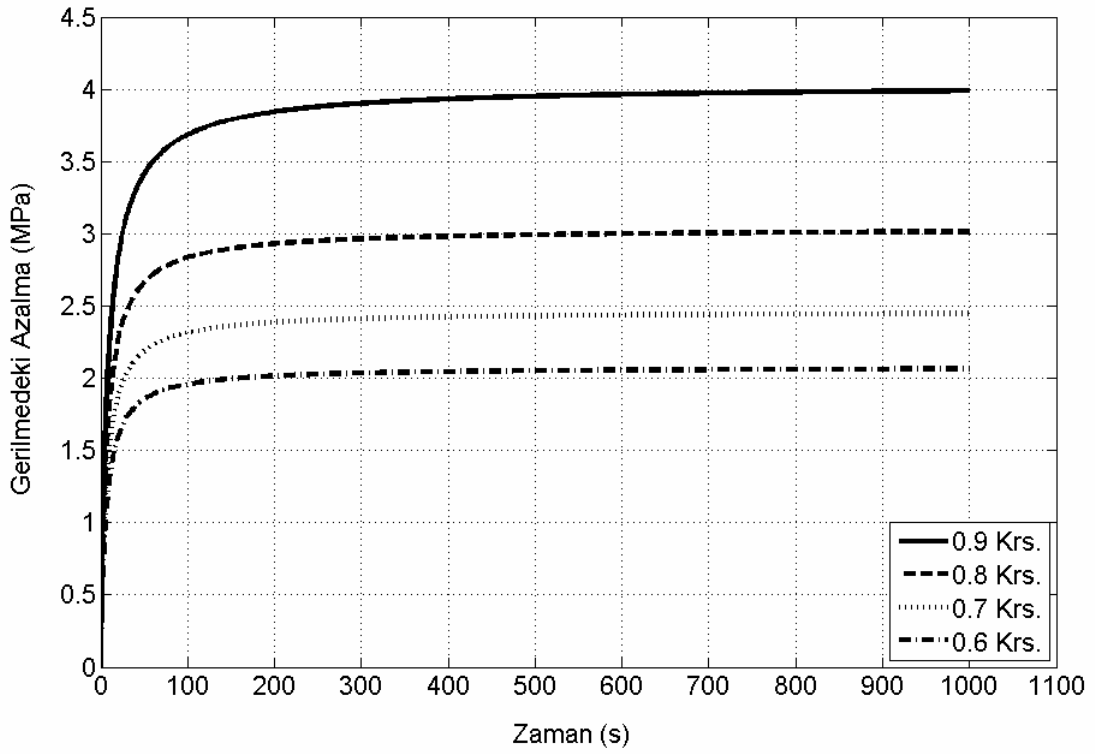
Şekil 5.3 Seri bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelin kristallik oranına bağlı olarak yükleme-boşaltma simülasyonları gerilme-gerinim eğrileri.

$1.e-3 \text{ 1/s}$ gerinim hızında yükleme ve 13.5 MPa gerilme seviyesinde 1000 saniye süreyle %60-90 kristallik oranı seviyelerinde gerçekleştirilen sünme deneyi simülasyonları, yarıkristal polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı sünme davranışını uygun çıkmamıştır (Şekil 5.4). Kristallik oranının artışıyla sünme gerinimi artmıştır oysa beklenen durum bunun tam tersidir.



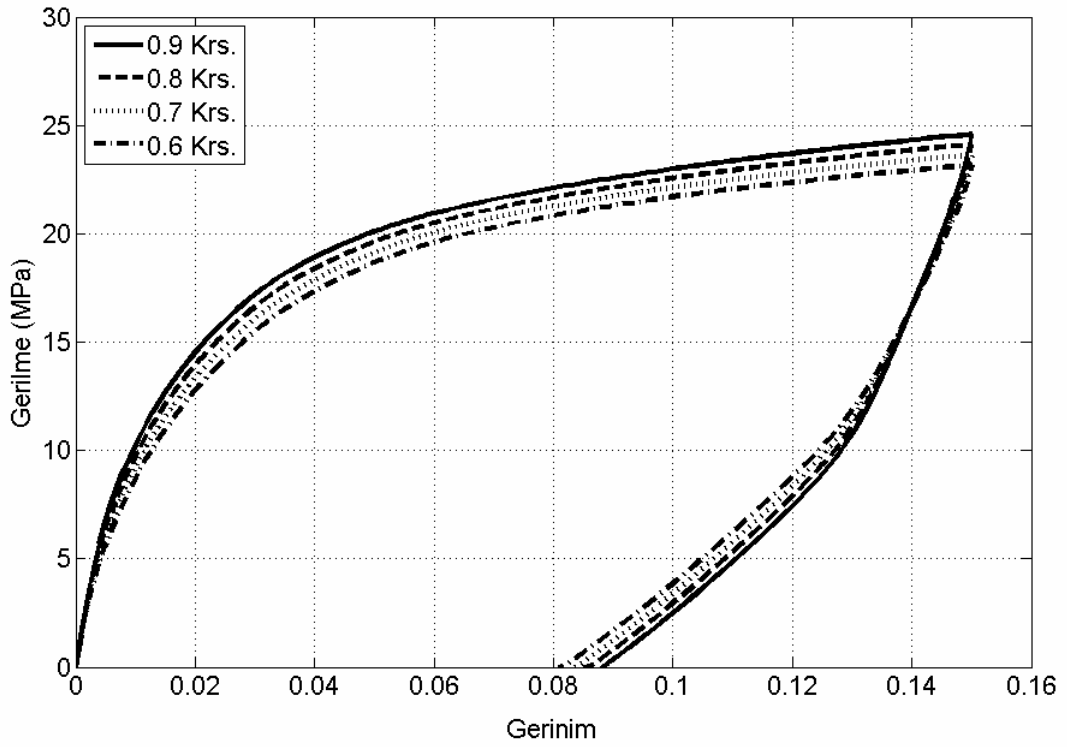
Şekil 5.4 Seri bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak sünme simülasyonları, gerinindeki değişim-zaman eğrileri.

Son olarak seri bağlı modifiye VBO model hipotetik malzeme için $1.e-3$ 1/s gerinim hızında %3 gerinim seviyesinde 1000 saniye süreyle %60-90 kristallik oranlarında gevşeme simülasyonlarına tabi tutulmuştur. Gevşeme simülasyon sonuçları, yarıkristal polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı gevşeme davranışına uygun sonuçlar vermiştir. Artan kristallik oranı ile gerilme azalması seviyesi artmaktadır (Şekil 5.5).



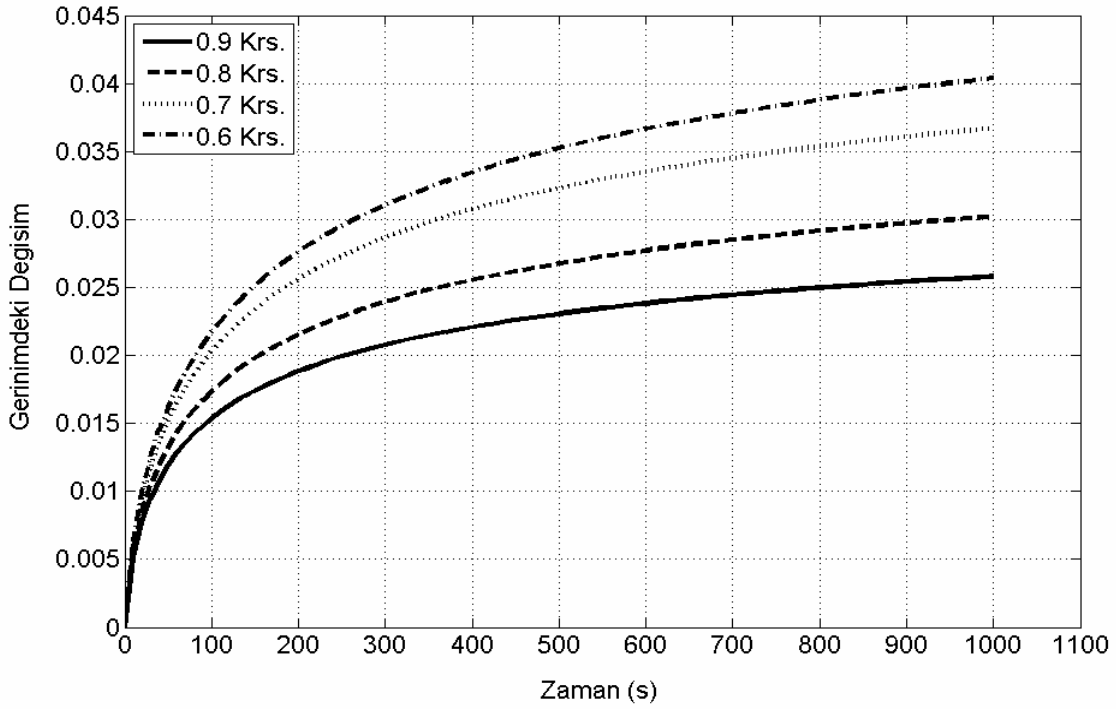
Şekil 5.5 Seri bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak gevşeme simülasyonları, gerilmadaki azalma-zaman grafiği.

Paralel durumdaki modifiye VBO model, hipotetik malzeme için $1.e-3$ 1/s gerinim hızında %60-90 kristallik oranı seviyelerinde yükleme-boşaltma simülasyonlarına tabi tutulmuştur. Simülasyon sonuçları, yarıkristal polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı davranışına uygun çıkmıştır. Artan kristallik oranı ile mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yarıkristal polimerlerin artan kristallik oranı ile akma, kopma gerilmelerinin arttığı gözönünde bulundurulursa, hipotetikal malzeme ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, paralel durum için modifiye VBO modelin, yarıkristal polimerik malzemelerin yükleme-boşaltma davranışını açıklayabilecek kapasitede olduğunu göstermektedir (Şekil 5.6)



Şekil 5.6 Paralel bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak yükleme-boşaltma simülasyonları, gerilme-gerinim eğrileri.

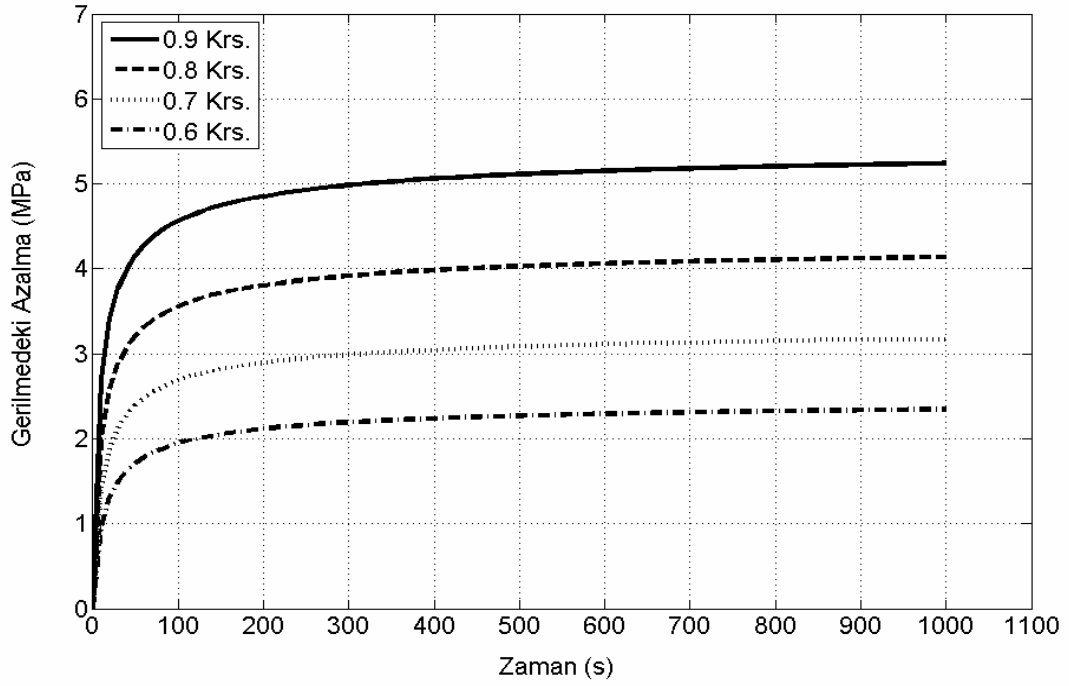
Diğer yandan paralel durumda kristallik oranının sünme davranışı üzerindeki etkilerini modellemek üzere $1.e-3$ 1/s gerinim hızında 13.5 MPa gerilme seviyesinde 1000 saniye süreyle %60-90 kristallik oranlarında yapılan simülasyon sonuçları, artan kristallik oranı ile sünmedeki gerinim artışının azaldığı göstermiştir (Şekil 5.7). Sun (2005), yarıkristal polimerik malzemelerden biri olan PTFE üzerinde çeşitli sıcaklıklarda gaz altında tavlama işlemi yaparak, değişik kristallik oranlarında numuneler elde etmiştir. Farklı sıcaklıklarda ısıtılma işlemi tabi tutularak farklı kristallik oranlarında elde edilmiş numuneler ile değişik gerilme seviyelerinde sünme deneyleri gerçekleştirmiştir. Sünme deneyi sonuçlarından, ısıtılma işlemi ile artan çapraz bağın, kristallik oranını arttırdığı bunun ise sünmedeki gerinim artışının azalmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Kristallik oranının etkisini açıklamaya yönelik modifiye VBO ile gerçekleştirilen sünme simülasyonlarında, hipotetik malzeme üzerinde benzer sünme davranışı sonuçları elde edilmiştir. Bu açıdan bakıldığında paralel durumda modifiye VBO yarıkristal polimerik malzemelerin sünme davranışını modelleyebilecek kabiliyettedir.



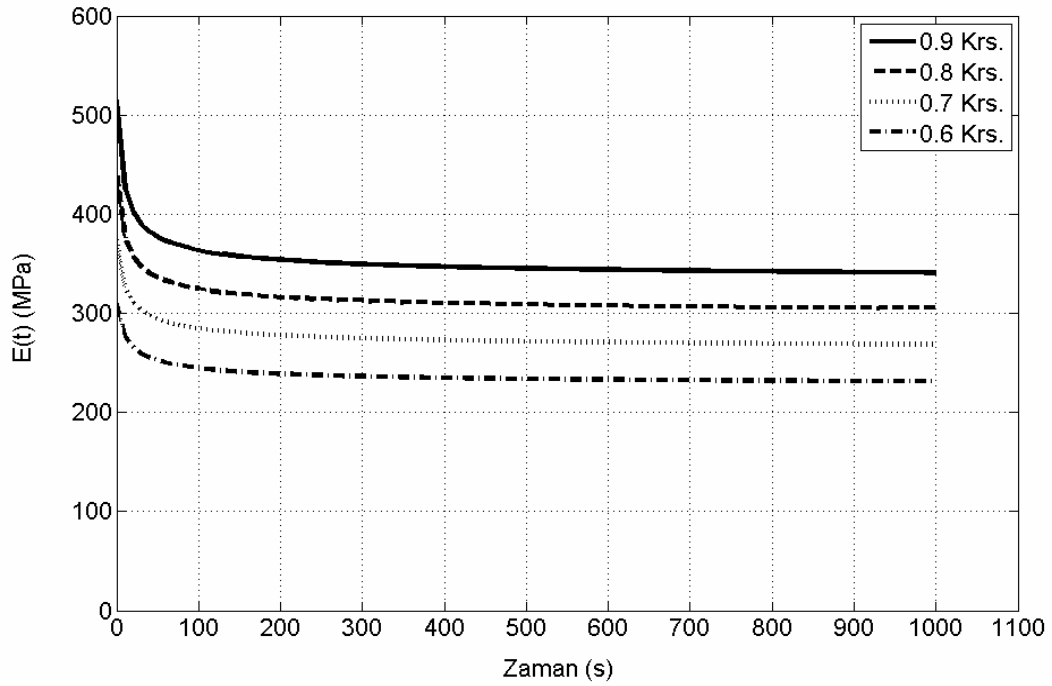
Şekil 5.7 Paralel bağlı durumda modifiye VBO (SLS) modelinin kristallik oranına bağlı olarak sünme simülasyonları, gerinimdeki değişim-zaman eğrileri.

Polimerik malzeme davranışının en önemli özelliklerinden biri olan gevşeme davranışı, kristallik oranının etkisini açıklamaya yönelik paralel modifiye VBO model ile hipotetik malzeme üzerinde kristallik oranına bağlı olarak simüle edilmiştir. Gevşeme simülasyonları $1 \cdot 10^{-3}$ 1/s gerinim hızında %3 gerinim seviyesinde 1000 saniye süreyle %60-90 kristallik oranlarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8). Gevşeme simülasyon sonuçları artan kristallik oranı ile gerilme azalması seviyesinin arttığı şeklinde gözlemlenmiştir. Daha sonra gerilme seviyesindeki azalışa bağlı gevşeme simülasyon sonuçları, gevşeme modülü-zaman değişimi skalasına dönüştürülmüştür (Şekil 5.9). Olasz ve Gudmunson (2006) tarafından yapılan deney sonuçlarının ışığı altında simülasyon sonuçlarımızı yorumlayabilmek için bu dönüştürme işlemi yapılmıştır. Gevşeme modülünün zamanla değişimini gösteren simülasyon eğrilerinde, artan kristallik oranı ile gevşeme modülünün arttığı şeklinde bir ilişki gözlemlenmiştir. Olasz ve Gudmunson (2006), çapraz bağlı PE (XLPE) malzemenin çekmede gevşeme davranışını yoğunluk, kristallik bağımlılığına göre değişik sıcaklıklarda incelemiştir. Sabit sıcaklıkta değişik kristallik oranlarında gerçekleştirilen gevşeme deneyleri sonucunda, gevşeme modülünün artan kristallik oranı ile arttığını gözlemlemiştir. Bu açıdan paralel bağlı durumda modifiye VBO'da benzer sonucu vermiştir, dolayısıyla yarıkristal polimerik malzemelerin, kristallik oranına bağlı gevşeme davranışını modelleme kabiliyetine sahip olduğu

gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8 Paralel bağlı durumda modifiye VBO modelinin kristallik oranına bağlı olarak gevşeme simülasyonları, gerilmedeki azalma-zaman grafiği.



Şekil 5.9 Paralel bağlı durumda modifiye VBO modelinin kristallik oranına bağlı olarak gevşeme simülasyonları, gevşeme modülü-zaman grafiği.

Sonuç olarak yarıkristal polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı mekanik davranışlarını açıklamaya yönelik paralel VBO modeli, kristallik oranı-hız bağımlılığı, kristallik oranı-sünmedeki gerinim artışı ve kristallik oranı-gevşeme modülü ilişkilerini açıklayabilecek kabiliyettedir.

6. VBO MODELİNİN MALZEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYON YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

6.1 Malzeme Modellerinin Parametre Tahmini

Bir malzemenin mekanik davranışını matematiksel olarak ifade etmek üzere kullanılan modeller pek çok sayıda malzeme parametresi içerir. Malzemenin davranışını tam bir şekilde açıklamak, malzeme parametrelerinin optimum seviyede sağlıklı olarak belirlenmesi ile mümkündür. Malzeme modeli geliştirmesi ve uygulaması çalışmalarında en önemli çıkmazlardan biri malzeme parametrelerinin belirlenmesidir. Günümüzde malzeme modelleri pratik uygulamalı bilgisayar programlarının (ANSYS ve ABAQUS gibi) dataalarını teşkil etmektedir. Malzeme davranışı açıklamak için kullanılan uygun bir malzeme modeli en az sayıda malzeme parametresi içermelidir. Elbetteki model içerisindeki malzeme parametresi sayısını arttırmak suretiyle bir malzemenin her türlü davranışını açıklamak mümkündür, fakat malzeme parametresi sayısı arttıkça modelin uygulanabilirliği, pratikliği ve esnekliği önemli ölçüde azalır ki bu durum modeli teorik bir yaklaşımdan öteye götürmez. Aslında ideal model geliştirme çabalarının temel amacı Hook kanununa benzemeye çalışmaktır yani iki ilişkiyi en az malzeme parametresiyle mümkün olduğunca yaklaşık olarak açıklayabilmektir. Elastik olmayan malzeme davranışı yüksek lineer olmayan ve güçlü zaman bağımlılığına sahiptir. Elastik olmayan malzeme davranışını açıklamak üzere ortaya konan viskoplastik modeller oldukça komplekstir ve model içerisindeki malzeme parametrelerinin hepsinin fiziksel anlamını açık olarak ifade etmek mümkün olmayabilir. Viskoplastisite modellerindeki bu iki olumsuzluk, içeriklerinde bulunan malzeme parametrelerinin belirlenmesinde güçlükler ortaya çıkarmaktadır ayrıca literatürde malzeme parametrelerinin belirlenmesi üzerine henüz kesin bir temel yöntem geliştirilememiştir.

Parametre belirlenmesindeki bir diğer unsur ise herhangi bir parametredeki değişimin modelin bütün davranışı üzerindeki etkisinin bilinmesidir. Mesela küçük derecede bir değişime maruz kalan bir parametre modelin bütün davranışı üzerinde çok büyük bir değişime neden olabilir. Bu açıdan malzeme modeli içerisinde bulunan parametrelerin hassasiyeti farklı derecede olabilir ve parametre hassasiyeti ayrıca incelenmelidir.

Malzeme parametresi belirlenmesi için mutlaka bir test sonucu veya karşılaştırmalı bir durum gereklidir. Malzeme özelliklerini belirlemek üzere geliştirilen modeller gerinim hız kontrollü ya da gerilme hız kontrollü olarak uygulanır. Test sonuçları ile karşılaştırma ve daha sonrasındaki model tahminleri, modelin uygunluk, güvenilirlik, kesinlik ve uygulanabilirlik

ölçüsünü verir. Uygun bir malzeme modeli, simülasyonu yapılan malzemenin önemli özelliklerini ortaya çıkarabilir. Mevcut birleştirilmiş viskoplastik modeller çok yönlüdür, kinematik pekleşme, çevrimsel pekleşme, yumuşama gibi malzeme özelliklerini birebir karşılayan ifadeleri içerisinde bulundurulur. Malzeme parametrelerinin simülasyon ve tahminler üzerindeki etkileri farklı farklıdır. Mesela statik toparlanma terimi, hızlı monotonik gerilme-gerinim simülasyonu üzerinde etki etmeyebilirken, düşük gerinim hızında yüksek bir etkiye sahip olabilir (Maciucescu 2002). Uygun malzeme parametrelerine ulaşmaksızın, herhangi bir modelin tüm kapasitesinin ortaya konması mümkün olmayabilir. Model simülasyonları ve tahminlerinin deneysel verilerle eşleşme derecesi, modelin modelleme kabiliyeti ile malzeme parametrelerinin sağlıklı belirlenmesine bağlıdır.

Malzeme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan optimizasyon prosedürü, nümerik sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki sapmayı bazı ölçme yöntemleri vasıtasıyla minimize edilmesi prensibine dayanır. Literatürde birçok parametre optimizasyon metodu kullanılmaktadır. Kunkel ve Kollman (1997) Fossom (1997), Mahnken ve Stien (1996), Schwertel ve Schinke (1996), Senseny ve Fassom (1995), Miller ve Hertmann (1989) bu tip çalışmalar üzerine yoğunlaşmış araştırmacıların bazılarıdır. Malzeme parametresi belirlenmesine yönelik optimizasyon çalışmaları iki grupta incelenebilir. Belirleyici (deterministik) ve tahmini (stokastik) yöntem. Her iki yöntemin uygulanması esnasında bir başlangıç parametre seti gereklidir.

Belirleyici stratejide, parametre seti belirsiz eleman içermeyen kesin bir matematik prosedür ile belirlenir ve gelişme bir optimum değere doğru ilerler. Bu yöntemin avantajı sınırları belirli durumlarda iyi bir kesişme sağlıyor olmasıdır. Dezavantajı ise lokal ve global optimum ile ayırt etme kabiliyetinin sınırlı olmasıdır. Tahmini yöntemde belirsiz sayısal türetmeler ile malzeme parametreleri türetilir. Bu yöntemin avantajı global optimuma doğru iyi bir çakışmanın sağlanmasıdır.

Bruhns ve Anding (1999), sonlu kareler kriterine dayanan sayısal yöntemlerle bir viskoplastisite modelinin eş zamanlı (simültane) olarak malzeme parametrelerini belirlemek için bir optimizasyon prosedürü uygulamışlardır. Optimizasyon yöntemini hem skolastik hem de deterministik yaklaşımı gözönünde bulundurarak gerçekleştirmişlerdir. Skolastik yaklaşıma yönelik optimizasyon yönteminde gelişim (evulation) stratejisini kullanmışlardır. Parametre belirlenmesi hem yükleme hem de çevrimsel yükleme şartları için ayrı ayrı uygulamışlardır. Skolastik ve deterministik optimizasyon yöntemlerinin kombine bir şekilde kullanılması kısa sürede optimum bedel fonksiyonuna (cost function) ulaşılmasını

sağlamaktadır.

Horth vd. (2004), Bodner ve Partom (1975) modeli içerisindeki malzeme parametrelerini belirlemek için bir optimizasyon prosedürü uygulamışlardır. Malzeme parametrelerini çeşitli hızlardaki çekme yüklemesi, gevşeme, sünme ve çevrimsel çekme-basma deneysel sonuçları için belirlemişlerdir. Uygulanan optimizasyon prosedürü Runge-Kutta ve Explicit Euler sayısal yöntemlerini kullanılarak oluşturulmuştur. Optimizasyon işlemi esnasındaki hesaplama zamanını “step-size” kontrol uygulamasını kullanarak kısaltılmıştır.

Johansson vd. (2006), çevrimsel yükleme ve geniş deformasyonda çeliğin gerilme-gerinim eğrilerinden faydalanarak kullanmış oldukları modelin malzeme parametrelerini bulmayı amaçlamışlardır. Malzeme parametrelerinin belirlenmesine yönelik optimizasyon prosedürü, Nelder-Mead Simplex ve Han-Powell nümerik algortimalarının kombinasyonunu kullanarak oluşturmuşlardır.

Kajberg ve Wikman (2006), malzeme parametresi belirlemek için ters (inverse) problemin çözümünden faydalanmışlardır. Ters (inverse) modelleme ile Jhonson-Cook malzeme modeline ait parametre tahminlerini yapmışlardır. Dinamik deney sonuçlarını modellemek üzere gerekli malzeme parametrelerini belirlemek için sonlu karaler farkına dayanan ikinci bir optimizasyon prosedürü daha kullanmışlardır.

Hartmann vd. (2006), malzeme parametresi belirleme prosedürünü, direk arama (direct search) metodunu kullanarak sonlu elemanlar programı olan Abaqus vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Bu prosedür homojen ve homojen olmayan sınır elemanları problemlerine uygulanabilir. Bu çalışmada bir sonlu gerinim viskoplastisite modeli ile lineer olmayan izotropik ve kinematik pekleşme terimlerine ait parametreler tek eksenli çekme deneyi datalarının modellenmesi için belirlenmiştir.

Seibert vd. (2000), sabit çekme hızı, gevşeme, sünme çevrimsel test sonuçlarından bir fark fonksiyon (distance function) tanımlayarak, simulasyon sonuçları arasındaki farklılığın minimize edilmesi temeline dayanan, bir malzeme parametresi belirleme prosedürü ortaya koymuşlardır. Chan, Bodner ve Lindholno (1988) modelinin malzeme parametrelerini tek eksenli durum için araştırmışlardır. Ölçülen veri ile elastik olmayan modelin tahminleri arasındaki fark minimize edilmiştir.

Kunkel ve Kollman (1997), SRR 99 kristal alaşımasının sabit gerinim hızı, gevşeme ve sünme test sonuçlarını “Overstress” model ile modellemek için malzeme parametrelerini belirlemek üzere bir optimizasyon prosedürü geliştirmişlerdir. Malzeme parametrelerinin bulunması, lineer olmayan minimizasyon problemlerinin çözülmesi prensibine dayanmaktadır. Optimizasyon prosedüründe deterministik yaklaşım kullanılmış ve malzeme parametrelerinin hepsi birden aynı anda hesaplanmıştır.

Birleştirilmiş viskoplastisite teorisine dayanan VBO model, bu çalışmada kullanılan haliyle onüç adet malzeme parametresi içerir. Genel olarak modelleme çalışmasında ilk aşamada modelin cevapları, malzemenin deneysel sonuçlarının biri göz önüne alınarak, malzeme parametrelerinin deneme-yanılma yöntemi ile belirlenerek karşılaştırılır. Malzeme parametrelerinin seçilen deneysel sonuçla model cevabını üst üste karşılaştıracak şekilde belirlenmesinden (simüle edilmesi) sonra, belirlenen malzeme parametreleri değiştirilmeksizin diğer durumları içeren deney sonuçları için model tahminleri belirlenir. Model tahminlerinin uygun olmaması durumunda tekrar simülasyon adımına geçilerek yeniden malzeme parametreleri belirlenmesi işlemine devam edilir. Bu süreç model tahminlerinin en uygun şartlarda bütün deney sonuçlarını açıklayana kadar devam ettirilir. Literatürde kullanılan viskoplastisite modellerinin malzeme parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak henüz tam bir oturmuş kriter mevcut değildir. Bu bölümdeki çalışmada VBO modelinin malzeme parametreleri, Genetik Algoritma (GA) prensibine dayanan optimizasyon prosedürü ile YYPE’nin farklı hızlardaki yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme deneyleri için simültane olarak belirlenmiştir.

6.2 Optimizasyon ve Genetik Algoritma (GA)

Çözümler veya tercihler arasından en iyisini seçme prosedürüne optimizasyon adı verilir. Optimize edilen bir niceliğin; neye, kime ya da hangi kritere göre iyi olduğu optimizasyon ölçütü (optimization criterion) kavramıyla açıklanır. Bir tercihin ya da çözümün, optimizasyon ölçütüne göre iyilik derecesini gösteren skalere başarıım göstergesi (performance index) adı verilir. Optimizasyonunun başarı göstergesi, skaler bir niceliğe göre belirleniyorsa parametre optimizasyonu, fonksiyonel bir niceliğe göre belirleniyorsa fonksiyon optimizasyonundan bahsedilir. Bir parametre optimizasyonunda kullanılan prosedür, amaç fonksiyonunun (objective function) ekstremum yapan değerlerini hesaplamak üzere gerçekleştirilir. Burada hesaplanan değerler, parametrelerin optimal değeridir. Hesaplama prosedürü ise parametrelerin optimizasyonu adını alır. Bir parametre

optimizasyonunda, amaç fonksiyonunun maksimum ekstremumu hesaplanıyorsa değer fonksiyonundan (merit function), eğer amaç fonksiyonunun minimum ekstremumu hesaplanıyorsa bedel fonksiyonundan (cost function) bahsedilir. Bir fonksiyonun maksimum arama problemi ile minimum arama problemi arasındaki fark birbirine dönüştürülecek derecede ılımlı olmalıdır. Bir parametre optimizasyonunda, parametre değerleri hiçbir kısıtlama olmadan seçilebiliyorsa kısıtsız optimizasyon, eğer belirli kısıt denklemlerine bağlı olarak seçilebiliyorsa kısıtlı optimizasyon adını alır (Turhan 2003, Chong ve Zak 2001, Gen ve Cheng 2000).

GA doğadaki evrim mekanizmasını temel alarak doğal seçime dayanan kısıtlanmış ve kısıtlanmamış optimizasyon problemlerini çözmeye yarayan bir tekniktir. Charles Darwin tarafından ortaya atılan doğal seçim kavramı (evrim), sistemde güçlülerin hayatta kalması (en iyinin hayatta kalması) olarak ifade edilebilir (Goldberg, 1989).

GA, klasik türeve dayanan optimizasyonlarda iki açıdan farklıdır. Klasik algoritmalarda, her bir iterasyonda tek bir nokta üreterek noktalar zinciri ile optimum çözüme ulaşılırken, genetik algoritmalarda her bir iterasyonda noktaların bir popülasyonu üretilerek, popülasyondaki en iyi noktayla optimum çözüme yaklaşılr. Bir diğer farklılık ise, klasik algoritmalarda belirleyici (deterministik) hesaplama yapılırken, genetik algoritmada sezgisel (skolastik ya da rastgele) hesaplama yöntemleri kullanılır. GA, klasik optimizasyon türlerinin çözümsüz kaldığı çok geniş bir sahada kullanılır. Bunlar; biyolojik sistemler (sinir sistemi haberleşmesi, protein yapılarının tahmini gibi.), matematiksel ifadelerin çözümü, bilgisayar bilimlerinde, mühendislik sistemlerinde (kontrol sistemleri, parametre belirlenmesi gibi.), tasarım (topoloji optimizasyonu, üretim hücreleri dizaynı, kirlilik kontrolü gibi.), sinir ağı tasarımı, ekonomi ve finans, yapay hayat (artificial life), haberleşme ağları, tahmin (hava, deprem, at yarışı vb.), suç şüphelilerinin tespiti, müzik besteleme, kombinatoriyal optimizasyon (kutu paketleme, sıralama ve çizelgeleme, steiner ağacı, ulaştırma vb.)'dur (Gen ve Cheng 2000, Filiz 2005).

6.2.1 Ana Hatlarıyla Genetik Algoritma

GA prensindeki temel terimlerin başlıcaları aşağıdaki gibidir.

Uygunluk Fonksiyonu (Fitness Function): Optimize etmek istediğimiz fonksiyondur, standart optimizasyon algoritmalarında objektif fonksiyon olarak bilinir.

Bireyler (Individuals): Uygunluk fonksiyonunun uygulanacağı herhangi bir noktadır. Bir birey için uygunluk fonksiyonunun değeri skordur.

Popülasyon ve Kuşak (Populations-Generations): Popülasyon, bireylerin dizilişidir. Herbir iterasyonda genetik algoritma yeni popülasyon üretmek üzere, mevcut popülasyonlar üzerinde seri hesaplamalar gerçekleştirir. Her bir adımda üretilen popülasyon yeni kuşak olarak isimlendirilir.

Çeşitlilik: Bir popülasyondaki bireyler arasındaki ortalama farklılığı işaret eder. Bir popülasyonda ortalama farklılık genişse yüksek çeşitlilik eğer dar ise düşük çeşitlilik vardır.

Uygunluk değeri ve en uygunluk değeri: Birey için uygunluk fonksiyonunun almış olduğu değer, bireyin uygunluk değeridir. Bir popülasyonda herhangi bir birey için en küçük uygunluk değeri, popülasyonun en iyi uygunluk değeridir.

Ebeveyn ve çocuklar: Yeni kuşağı yaratmak için mevcut popülasyondan seçilen bireyler, ebeveynlerdir. Üretilmiş olan kuşaktaki bireyler ise çocuklardır.

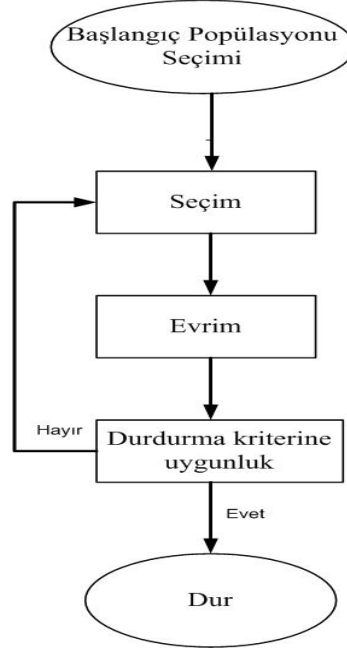
GA'nın işleyiş tarzı ise aşağıdaki gibidir.

1. Rastgele yaratılan başlangıç popülasyonu ile algoritmanın başlatılması.
2. Algoritmanın yeni popülasyon zincirlerini yaratması mevcut popülasyondaki bireyler ile yapılır. Yeni popülasyonu oluşturmak üzere aşağıdaki işlem adımları gerçekleştirilir.
 - A) Uygunluk: Uygunluk değerlerinin hesaplanarak, mevcut popülasyondaki her bir üyenin hesaplanması.
 - B) Birey olarak adlandırılan üyelerin, en iyi değerlere dayanarak seçilmesi
 - C) Düşük uygunluğa sahip mevcut popülasyondaki bazı bireylerin seçilmesi. Seçilmiş olan bu bireylere elit ismi verilir. Bu elitler bir sonraki popülasyona geçerler.
 - D) Bireylerden çocuk üretilmesi. Üretim, mutasyon olarak adlandırılan belirsiz değişkenle yapılabileceği gibi, bireylerin bir kısmının kombine edilmesi çaprazlama ile de yapılabilir.
 - E) Sonraki popülasyonu şekillendirmek için mevcut popülasyonun çocuklar ile değiştirilmesi.
3. Durdurma kriterine ulaşıncaya algoritma durur. Başlıca durdurma kriterleri; kuşak sayısına ulaşıldığında durdurma, kuşak değerine ulaşıldığında durdurma, algoritma çalışma süresinin belli bir çalışma süresine ulaştığında durdurma, uygunluk fonksiyonu değeri belli bir uygunluk değerine ulaştığında durdurma, belli bir sayıdaki kuşakta hesaplamalar ilerlerken uygunluk fonksiyonunda herhangi bir iyileşme görülmemesi halinde (stall generation) durdurma, algoritma belli bir süre çalışmasına rağmen uygunluk fonksiyonunda herhangi bir

iyileşme görülmemesi durumunda (stall time limit) durdurma şeklindedir.

4. Aksi takdirde ikinci adım tekrarlanır.

Yukarıdaki algorithmadan da anlaşılacağı üzere GA oldukça genel prensiplerle çalışır. GA'nın işleyişi Şekil 6.1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Genel genetik algoritma akış diyagramı

6.3 MATLAB® Genetik Algoritma ve Doğrudan Arama Aracı

Genetik algoritma ve Doğrudan arama aracı, (Genetic algorithm and Direct search toolbox) Optimizasyon aracı (Optimization toolbox) ve MATLAB® sayısal hesaplama ortamının gelişmiş fonksiyonlarının toplandığı bir uygulamadır. Genetik algoritma ve Direk arama aracı, optimizasyon problemlerini çözmek için şu yöntemleri kullanır,

- Genetik algoritma (Genetic algorithm)
- Doğrudan arama (Direct search)
- Tavlama benzetimi (Simulated annealing)

Bu algoritmalar standart optimizasyon aracının kapsamı dışında kalan alanlarda optimizasyon problemlerinin farklı bir şekilde çözülmesini sağlar. Genetik algoritma ve doğrudan arama aracının kapasitesini kendi M-dosyanızı yazarak, diğer araçlar ile birleştirerek ve MATLAB veya Simulink® kullanarak geliştirilebilir.

6.4 VBO Model Parametrelerinin GA Uygulaması ile Bulunması

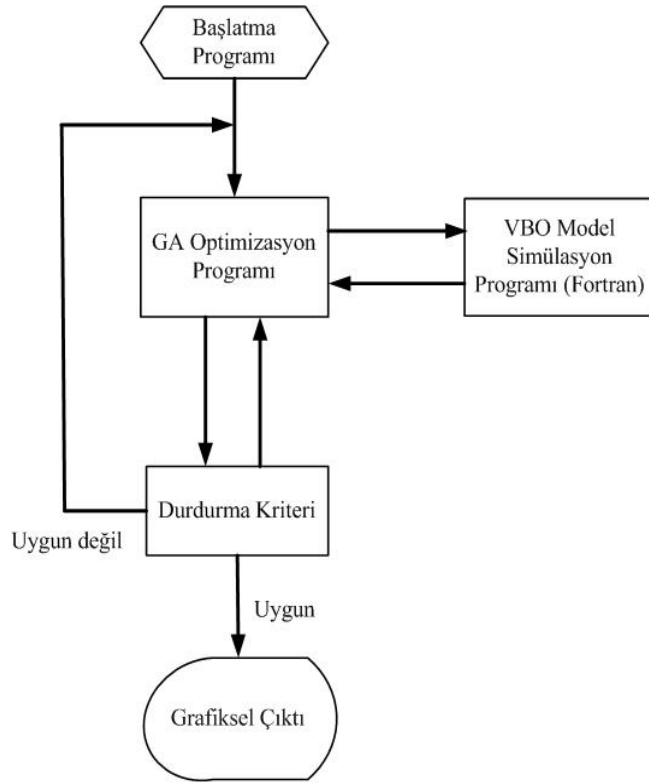
VBO modelin malzeme parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak, üç adet MATLAB M-File dosyası oluşturulmuştur. Bu M-file dosyaları kısaca şöyledir:

Başlatma M-file dosyası: Bu program ile ilk önce genetik algortimaya dayanan optimizasyonu prosedürünü gerçekleştirmek üzere oluşturulan M-file dosyasının çalıştırılmasını sağlar. GA tarafından belirlenen parametre seti bir *.txt uzantılı dosyaya yazdırılır ve VBO modelin “stiff” diferansiyel denklemlerini çözmek üzere oluşturulan Fortran dilinde yazılmış bilgisayar kod programı çalıştırır.

Uygunluk kriterlerinin değerlendirildiği program: Bu programda uygunluk değeri arasındaki farka bakılarak hesaplanır.

Grafik çıktıları programı: Eğer model cevapları ve deneysel sonuçlar verilen durdurma kriterini sağladığında grafiksel yazılım programı çalışarak, sonuçlar görsel olarak alınır.

VBO modelin malzeme parametrelerini bulmaya yönelik GA uygulaması program akış diyagramı Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Bu akış diyagramından da görüleceği gibi programlar birbiri ile iki yönlü ilişki içinde çalışmaktadır. MATLAB programları Ek 2’de verilmiştir.

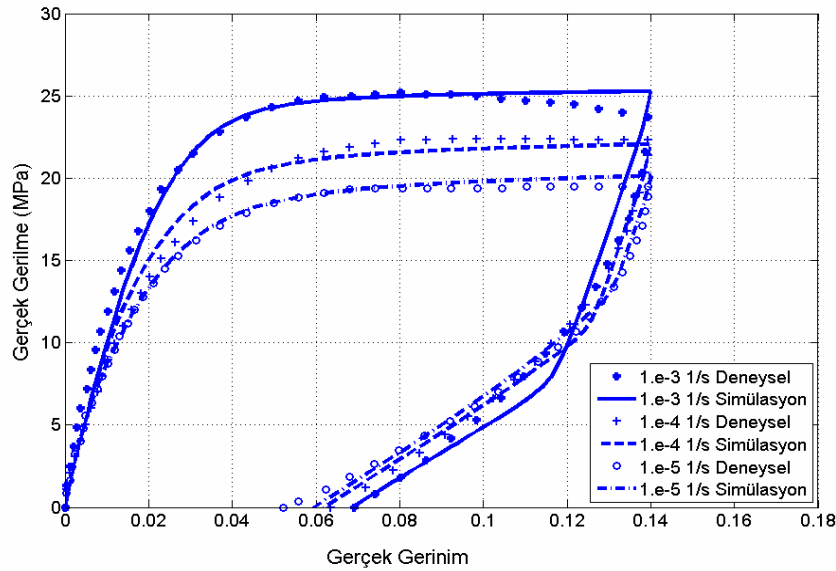


Şekil 6.2 VBO model GA uygulaması program akış diyagramı.

VBO model malzeme parametrelerinin belirlenmesinde uygunluk fonksiyonunu kriterleri olarak YYPE'nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızı değerlerindeki yükleme-boşaltma deneysel değerleri ile simülasyon değerleri arasındaki fark kullanılmıştır. Bu üç farklı hızda yükleme-boşaltma eğrilerini en iyi açıklayacak malzeme parametreleri (Tablo 6.1) GA optimizasyon prosedürü ile belirlendikten sonra, bu veriler ile VBO modelin sünme ve gevşeme tahminlerini araştırmak üzere YYPE'nin 1.e-4 1/s gerinim hızında 8, 12 ve 18 MPa gerilme seviyelerinde sünme, %2, %4.9 ve %9.5 gerinim seviyelerinde gevşeme deneysel sonuçları kullanılmıştır. Yükleme-boşaltma simülasyon sonuçları Şekil 6.3'de verilmiştir. Deneysel veriler ile simülasyon sonuçları hemen hemen çakışmaktadır.

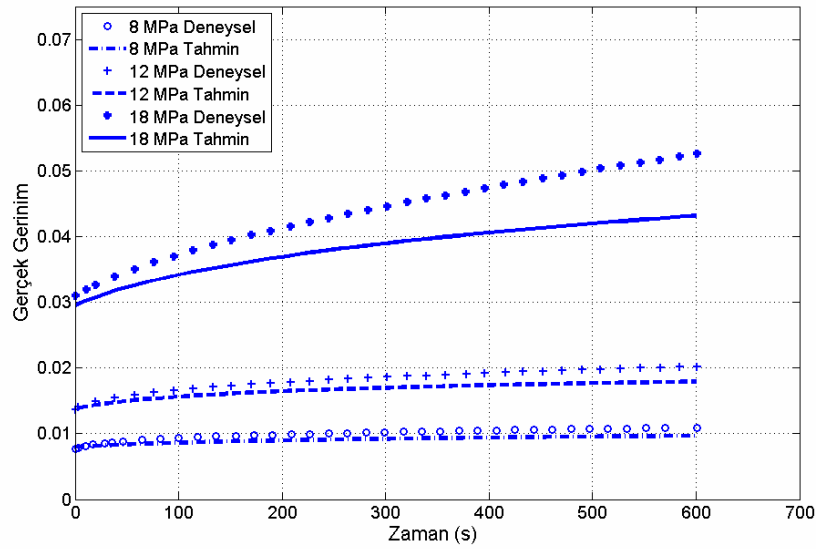
Table 6.1 VBO model için GA ile belirlenen malzeme sabitleri

Akış Fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	C parametresi
$B= 4.4531 \text{ 1/s}$	$E= 1603.1563 \text{ MPa}$	$C_1= 65.0313 \text{ MPa}$	$\lambda= 0.5500$
$D= 43.9375 \text{ MPa}$	$E_t= 1.0000 \text{ MPa}$	$C_2= 950.0000 \text{ MPa}$	$\alpha= 0.1961$
$m= 5.0003$		$C_3= 40.0000$	$A= 17.3322 \text{ MPa}$
		$C_4=2.0977 \text{ } \xi=1\text{MPa}^{-1}$	



Şekil 6.3 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri ile simülasyon sonuçlarının YYPE'nin 1.e-3, 1.e-4 ve 1.e-5 1/s gerinim hızlarında yükleme-boşaltma gerçek gerilme-gerçek gerinim deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması.

VBO modelin sünme durumu için Şekil 6.4’de gösterildiği gibi yüksek gerilme seviyesi haricinde oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Yüksek gerilme (18 MPa) seviyesindeki hassasiyet eksikliği, Şekil 6.3’de görüldüğü üzere $1.e-4$ 1/s hızında yükleme esnasında VBO model simülasyon sonucunun viskoelastik davranıştan viskoplastik davranışa geçiş bölgesinde deneysel sonuçlarla tam çakışmamasından ileri gelmektedir. Malzeme parametresi belirlenmesi prosedüründe güçlü hesaplama özelliğine sahip bilgisayarlar kullanılarak daha hassas hesaplamalar yapılabilir ve böylece bu olumsuzlukta ortadan kaldırılabilir.

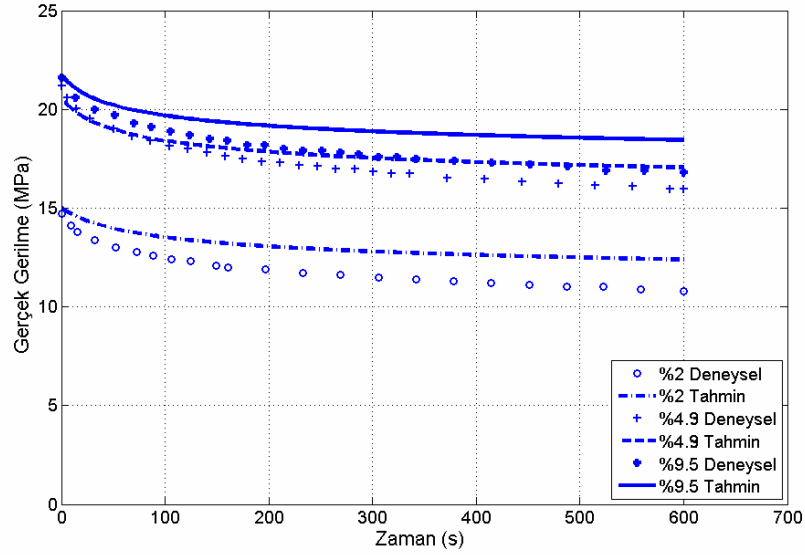


Şekil 6.4 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri kullanılarak sünme simülasyon sonuçları ile sünme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması. Gerilme seviyeleri 8, 12 ve 18 MPa, süre 600 saniye.

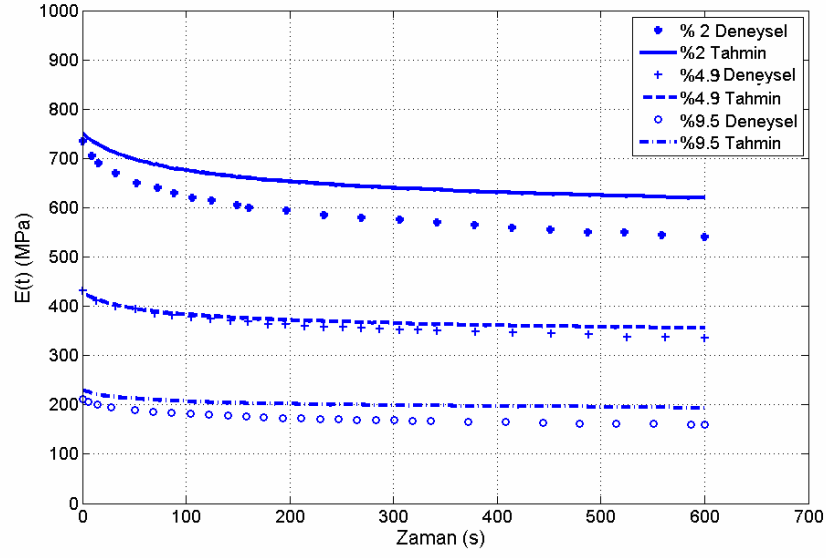
VBO modelin gevşeme ve gevşeme modülü tahminleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Gevşeme deneyleri ve gevşeme simülasyon sonuçları gerilme seviyelerindeki farklılıkların küçük değerlerde olmasından (Şekil 6.3) dolayı model tahminlerini değerlendirmede sağlıklı sonuçlar çıkarabilme imkanı vermeyebilir. Bu nedenle gevşeme deneysel sonuçları gevşeme modülü şekline dönüştürülür, ayrıca pratik uygulamalara yönelik sonlu elemanlar bilgisayar çözüm programlarındaki mevcut modeller Prony serilerinden faydalanarak simülasyon yapmaktadır, Prony serilerindeki denklem katsayıları gevşeme modülü ve sünme kompliansına karşılık gelmektedir. VBO modelin gevşeme modülü tahminleri ve deneysel sonuçlarla karşılaştırması Şekil 6.6’da gösterildiği gibidir, bu sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle %2 gerinim seviyesindeki tahminlerin deneysel sonuçlardan sapması, sünme sonuçları için belirtildiği gibi

malzeme parametresi belirlenme hassasiyetini uygun bilgisayarlar kullanılması ile artırmak üzere giderilebilir. Şekil 6.6'da görüleceği üzere mutlak değerce sapma dışında tahmin sonuçlarının trendi, deneysel sonuçlarla eşlenik şekilde ilerlemektedir.

Sonuç olarak simülasyonlar ve tahminlerden gördüğü üzere GA prensibine dayanan optimizasyon prosedürü VBO model malzeme parametrelerinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar vermiştir. Ortaya konan parametre belirleme prosedürü literatürde kullanılan diğer malzeme modelleri içinde sağlıklı sonuçlar verebilir. GA prensibine dayanan optimizasyon yöntemi ile model malzeme parametreleri daha hassas (onbindebir hassasiyette) daha kısa zamanda, daha güvenilir ve belirli bir temele dayandırılarak belirlenebilir.



Şekil 6.5 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri kullanılarak gevşeme simülasyon sonuçları ile gevşeme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması. Gerilim seviyeleri %2, %4.8 ve %9.5, süre 600 saniye.



Şekil 6.6 VBO modelin GA ile bulunan malzeme parametreleri kullanılarak gevşeme modülü simülasyon sonuçları ile gevşeme modülü deneysel sonuçlarının karşılaştırılması. Gerinim seviyeleri %2, %4.8 ve %9.5, süre 600 saniye.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması yarıkristal polimerik malzemelerin deformasyon davranışını belirlemek üzere yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) malzeme ile çalışılarak oluşturulmuştur. Temelde deneysel ve analitik olmak üzere iki bölümden meydana gelmektedir. Deneysel çalışma bölümünde YYPE'nin deformasyon davranışının belirlenmesinin yanı sıra literatürde incelenmemiş olan imalat yönteminin deformasyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İmalat yöntemi olarak ekstrüzyon ve basınçta kalıplama yöntemleri seçilmiş ve bunların deformasyon davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analitik bölümünde ise YYPE'nin deformasyon davranışını matematiksel olarak ifade etmek üzere modelleme çalışması yürütülmüştür. Modelleme çalışması bölümü iki kısımdan meydana gelmiştir; mevcut modellerin YYPE davranışını açıklamak üzere uygulanması ve mevcut modellerin modifiye edilmesi. Mevcut modelin YYPE davranışına uygulanmasında “overstress”e dayanan viskoplastisite (VBO) teorisi kullanılarak, YYPE'nin davranışlarının hepsinin yanı sıra özellikle literatürde açıklanamamış olan yükleme sonrası boşaltma ve çevrimsel yükleme davranışı modellenmiştir. Ayrıca yine literatürden farklı olarak tek bir model ve malzeme parametresi seti kullanılarak VBO modeli ile yükleme-boşaltma, çevrimsel yükleme, sünme ve gevşeme davranışlarının hepsi birden modellenebilmiştir. Yarıkristal polimerik malzemelerin deformasyon davranışı üzerinde önemli bir etkisi olan içyapı değişkeni kristallik oranının etkisini modelleyebilmek üzere VBO modeli modifiye edilmiştir. Modifiye VBO modeli ile kristallik oranına bağlı yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme davranışlarının hepsi açıklanabilmiştir. Yapılan bu çalışma ile literatürde kristallik oranına bağlı deformasyon davranışının açıklanmasına yönelik önemli bir açılım sağlanmıştır. Viskoplastisite teorisine dayalı malzeme modellerinin bünyesinde bulunan malzeme parametrelerinin tespiti literatürde önemli çıkmazlardan biridir. VBO modeli malzeme parametrelerini belirlemek üzere Genetik Algoritmaya (GA) dayanan optimizasyon yöntemi kullanılarak başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu optimizasyon çalışması ile literatürdeki malzeme modellerinin parametrelerinin belirlenmesine yönelik sistematik bir yaklaşım ortaya konmuştur. Orjinalliği ve bilime olan katkısı ana başlıklar halinde yukardaki gibi olan bu tez çalışmasının sonuçları her iki bölüm için aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Deneysel çalışmanın birinci kısmında geniş gerinim seviyesinde ekstrüde borudan çıkarılan numune ile gerçekleştirilen deney sonuçlarından; YYPE'nin mekanik davranışının lineer viskoelastik-lineer olmayan viskoelastik-viskoplastik davranışlardan meydana geldiği, deformasyon aşamalarının ise sırasıyla, a) Çok küçük

gerinim seviyesinde lineer viskoelastik, b) sonrasında akma noktalarının da içine alan lineer olmayan viskoelastik, c) Akma noktasının ilerisinde maksimum gerilme seviyesine kadar viskoplastik akış e) Gerilme seviyesinin düştüğü ve sabit kaldığı soğuk çekme (cold drawing) d) Kopma öncesi gerilmenin gerinim ile çarpıcı bir şekilde yükseldiği pekleşme (strain hardening) bölgelerinden meydana görülmüştür. Deneyler üç farklı hız seviyesinde gerçekleştirilmiştir ve hız bağımlılığının olduğu, artan gerinim hızı ile akma ve maksimum gerilmelerin arttığı, elastiklik modülünün ise azaldığı tespit edilmiştir.

- Deneysel çalışmanın ikinci kısmını imalat yöntemlerinin YYPE'nin mekanik davranışı üzerindeki etkisini gözlemlemek üzere ekstrüde boru ve basınç altında kalıplanmış levhadan oluşturulan numuneler üzerinde üç farklı hız seviyesinde tek eksenli çekme yüklemesi ve boşaltması testleri gerçekleştirilmiş. YYPE'nin güçlü gerinim hız bağımlılığına sahip olduğu ayrıca lineer olmayan viskoelastik-viskoplastik davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Boşaltma davranışlarının lineer olmayan ve hıza bağımlı geliştiği ayrıca artan gerinim hızı ile elastiklik modülü, akma gerilmesi ve maksimum gerilmelerin arttığı tesbit edilmiştir. Boşaltma esnasındaki viskoelastik toparlanma miktarının artan gerinim hızı seviyesi ile azaldığı gözlemlenmiştir. 1.e-4 1/s gerinim hızında %5 ve %15 gerinim seviyelerinde boşaltma esnasındaki viskoelastik toparlanma miktarının artan gerinim seviyesi ile azaldığı gözlemlenmiştir. Malzeme davranışının geçiş noktalarına denk gelen üç farklı gerilme seviyelerinde gerçekleştirilen sünme deneyleri sonucunda, artan gerilme seviyesi ile gerinim seviyesindeki artışın arttığı, sünme eğrilerinin lineer olmayan özellik gösterdiği ve düşük gerilme seviyelerinde birincil sünmenin, artan gerilme seviyesi ile davranışın ikincil sünmeye doğru ilerlediği görülmüştür. Malzemenin viskoelastik-viskoplastik davranış sınırlarına denk gelen katlamalı gevşeme deneyleri sonucunda gerinim seviyesi artışı ile gerilme düşüşünün azaldığı ve viskoplastik akış oluştuğunda gerilme düşüşünün gerinim seviyesinden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Gevşeme deneyleri gerilme-gerinim eğrilerinden YYPE'nin mekanik davranışının yükleme geçmişinden bağımsız olduğu tespit edilmiştir.
- Ekstrüde numune ve basınçta kalıplanmış numune üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli çekme yükleme-boşaltma test sonuçları karşılaştırıldığında, ekstrüde numune test sonuçlarının elastik modülü, akma gerilmesi ve maksimum gerilme seviyeleri açısından basınçta kalıplanmış numuneye göre daha yüksek değerlere sahiptir. Boşaltma

sonrasındaki viskoelastik toparlanma miktarlarının ise yaklaşık aynı oranlarda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ekstrüzyon işlemi polimer zincirlerinin yeniden yönlenmesine neden olduğundan ve kristallik oranlarının farklılığından dolayı malzeme davranışında bu farklılıklar meydana gelmektedir. Her iki numune için $1.e-4$ 1/s gerinim hızında yaklaşık tam viskoplastik akışın başlangıç noktasına denk gelen %5 gerinim seviyesine kadar yükleme ve boşaltma test sonuçları, lineer viskoelastik davranışın (%1 gerinim seviyesi altında) her iki numune için aynı olduğu, farklılığın bu noktadan sonra lineer olmayan viskoelastik ve viskoplastik davranışlarda meydana geldiği görülmüştür. Boşaltma esnasındaki viskoelastik toparlanmanın yaklaşık aynı değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Her iki tür numunenin $1.e-4$ 1/s gerinim hızlarında %15 ve %5 gerinim seviyelerinde yükleme-boşaltma test sonuçları, boşaltma esnasındaki viskoelastik toparlanma miktarının gerinim seviyesi artışı ile azaldığını göstermiştir.

- Ekstrüde numune ile gerçekleştirilen sıfır gerilmedeki toparlanma deneyleri sonuçları, artan gerinim hızı seviyesi ile toparlanma miktarının arttığını işaret etmiştir. Yine ekstrüde numune ile $1.e-4$ 1/s gerinim hızında %5 ve %15 gerinim seviyelerinde kadar yükleme-boşaltma sonrasında sıfır gerilme seviyesinde toparlanma deney sonuçları, gerinim seviyesi artışıyla toparlanma miktarının azaldığını işaret etmiştir.
- Ekstrüde numune ve basınçta kalıplanmış numune üzerinde gerçekleştirilen sünme deneyleri test sonuçlarından 8 MPa seviyesinde her iki numunenin gerinimdeki artış miktarlarının aynı seviyede olduğu, daha sonrasında ise artan gerilme seviyesi artışı ile basınçta kalıplanmış numune gerinimdeki artış miktarının ekstrüde numuneden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Basınçta kalıplanmış numune sünme deney sonuçları yüksek gerilme seviyesinde (18 MPa) ikincil sünme davranışına geçiş olduğunu işaret etmiştir. Ekstrüde numune ve basınçta kalıplanmış numune katlamalı gevşeme deney sonuçları karşılaştırıldığında, trend, davranış ve gerinim seviyelerindeki gerilmedeki düşüş oranı açısından her iki tip numune için benzer değerler tespit edilmiştir.
- Modelleme çalışmasının birinci kısmını oluşturan tek eksenli basma şartları altında beş farklı gerinim hızında yükleme-boşaltma deneyleri VBO model ile modellenmiştir. Dinamik şartlara giren gerinim hızı seviyeleri haricinde “quasi-statik” şartları içeren gerinim hızlarında ($1.e-3$, $1.e-4$ ve $1.e-5$ 1/s) YYPE’nin gerinim hız bağımlılığı yükleme-boşaltma şartları için modellenmiştir. VBO model YYPE’nin gerilme hızına bağlı basma yükleme-boşaltma davranışını modelleyebilmektedir.

Buradaki en büyük farklılık özellikle lineer olmayan boşaltma davranışının modellenenebilmesidir. Ayrıca bir diğer farklılık $1.e-4$ 1/s gerinim hızında basma çevrimsel yükleme deneyleri VBO model ile modellenenebilmesidir. VBO modelin YYPE'nin sünme ve gevşeme davranışını modelleme kabiliyetini incelemek üzere katlamalı sünme ve gevşeme deneyleri sonuçları VBO model ile modellenmiştir ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yukarda belirtilen deney sonuçlarını (yükleme-boşaltma, çevrimsel yükleme, sünme ve gevşeme) polimerik malzemeler için tek bir model ve tek bir malzeme parametresiyle açıklayabilmek açısından VBO model literatürdeki ender modellerden biridir, bu sonuçlar da VBO modelin güçlü bir modelleme kabiliyeti olduğunu göstermektedir.

- Polimerik malzemelerin mekanik davranışları küçük ve sonlu deformasyon seviyelerinde farklılık göstermektedir. Sonlu deformasyon seviyesindeki VBO (FVBO) modeli ve literatürde geniş kullanım alanına sahip sekiz zincir teorisine (Eight chain model) dayalı özellikle kauçuk malzeme davranışını açıklamada kullanılan temel modellerden biri olan ve makromekanik olmasına rağmen bünyesinde iç yapı değişkenlerine dair parametreler barındıran Boyce vd. (2000) modelinin sonlu deformasyon seviyesinde YYPE'nin mekanik davranışını modelleme kabiliyeti araştırılmıştır. Bu amaçla ekstrüde numune yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme deney sonuçları kullanılmış ve her iki model simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu VBO (FVBO) modeli hız bağımlılığını içeren çekme yüklemesi ve boşaltma, sünme ve gevşeme davranışlarını sonlu deformasyon seviyesinde de oldukça iyi modellemiştir. Özellikle zaman bağlı gevşeme modülü değişimi davranışını modellemede başarılı olmuştur. Zamana bağlı gevşeme modülü değerleri sonlu elemanlar çözümlü bilgisayar programlarının modellemesinde temel parametrelerden biridir. Bu sonuç FVBO modelin, sonlu elemanlar yöntemiyle çözüme yönelik bilgisayar programlar için temel model olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Boyce vd. (2000) modelinin simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarla karşılaştırılmasından yükleme-boşaltma şartlarında elastik bölge haricinde uyumsuzluk gözlemlenmiştir. Esasında Boyce vd. (2000) modeli ters Langevin Fonksiyon'a bağımlı olarak çalışmaktadır ve bu fonksiyonun gelişimi (kendini tam olarak ifade etmesi) ancak çok geniş deformasyon seviyelerinde gerçekleşebilmektedir. Ters Langevin fonksiyonun gelişmemesi nedeniyle modelin ağırlıklı olarak elastik kısmının etkisi ortaya çıkmıştır. Ayrıca Boyce vd. (2000)

modelinin gerilmeye göre türev denkleminin bulunmamasından dolayı sünme için simülasyonlar gerçekleştirilememiştir. Gevşeme için gerçekleştirilen simülasyonlar ise yükleme-boşaltma simülasyonlarından başlangıç noktalarının tam yakalanamasından dolayı uyumsuz çıkmıştır. Eğer başlangıç değerleri tam yakalanabilseydi gevşeme simülasyonları daha sağlıklı olabilirdi.

- Yarıkristal polimerik malzemelerin mekanik özelliklerinin üzerinde güçlü bir etkisi olan kristallik oranının modellenmesi için VBO model modifiye edilmiştir. Yarıkristal polimerik malzemeler, kristal ve amorf fazların bileşiminden meydana gelmektedir. Bu çift fazlı yapı, Ahzi vd. (2003) çalışmasından kompozit malzeme varsayımına dayanarak, VBO modelin açıklayabileceği tarza dönüştürülmüştür. Kristal ve amorf fazlar farklı birer malzeme gibi düşünülerek, VBO modelin temeli olan standart lineer katı (SLS) modeli seri ve paralel bağlanmak suretiyle iki farklı modifiye VBO model elde edilmiştir. Seri bağlı durumda modifiye VBO model değişik kristallik oranında yükleme ve boşaltma simülasyonları gerçekleştirilmiş, bu simülasyon sonuçları artan kristallik oranı ile mukavemet değerlerinin arttığı şeklinde bulunmuştur. Bu sonuç yarıkristal polimerik malzemelerin beklenen davranışlarıyla uyumludur. Seri durumdaki modifiye VBO modelin değişik kristallik oranlarındaki sünme simülasyonlarında artan kristallik oranı ile gerinim artışının arttığı sonuçları elde edilmiştir ki bu sonuç yarıkristal polimerik malzemeler için uygun değildir. Seri bağlı durumda modifiye VBO model gevşeme sonuçları artan kristallik oranı ile artan gerilme azalması şeklinde bulunmuştur. Bu sonuç yarıkristal polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı gevşeme davranışıyla uyumludur. Sonuç olarak seri bağlı durumdaki modifiye VBO yarıkristal polimerik malzemelerin kristallik oranına bağlı yükleme-boşaltma ve gevşeme davranışları için uyumlu, sünme davranışı için uyumsuz sonuçlar vermiştir. Sünme davranışının da modellenenebilmesi amacı ile VBO modeli paralel bağlanarak modifiye edilmiştir. Paralel bağlı modifiye VBO modeli kristallik oranına bağlı olarak yükleme-boşaltma için simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları artan kristallik oranı ile mukavemet değerlerinin arttığı şeklinde bulunmuştur. Daha sonra değişik kristallik oranlarında sünme simülasyonları gerçekleştirilmiş olup, bu simülasyon sonuçları artan kristallik oranı ile gerilme artışında azalma şeklinde çıkmıştır. Paralel bağlı durumda modifiye VBO model gevşeme davranışının açıklanmasına yönelik olarak değişik kristallik oranlarında hesaplanan simülasyon sonuçları, artan kristallik oranı ile gerilme azalmasında artma

şeklinde bulunmuştur. Paralel bağlı durumdaki modifiye VBO modelinin kristallik oranına bağlı yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme simülasyon sonuçları, yarıkristal polimerik malzemelerin beklenen davranışına uygun çıkmıştır. Simülasyonlar literatürde kristallik oranına bağlı kapsamlı deneysel dataların bulunmamasından dolayı hipotetik malzeme üzerinde yapılmıştır. Değerlendirmeler ise literatürdeki bilgilere göre yorumlamalardan çıkarılmıştır. Sonuç olarak özellikle paralel durumda ki modifiye VBO modeli kristal ve amorf fazlar için belirlenecek tek malzeme parametreleriyle, kristallik oranına bağlı olarak yükleme-boşaltma, sünme ve gevşeme davranışlarının hepsini bir arada simüle edecek güçlü bir modelleme kabiliyetine sahiptir.

- Birleştirilmiş viskoplastik teoriler, malzemelerin lineer olmayan mekanik davranışlarını açıklamaya yönelik olarak geliştirilmiş son derece yüksek modelleme kabiliyeti olan modellerdir. Bu modeller bünyesinde değişik sayılarda malzeme parametreleri içerir ve bazı malzeme parametrelerinin fiziksel olarak tarifinin yapılmasında mümkün olmayabilir. Modelleme esnasında deneysel sonuçlarla karşılaştırmalarda en büyük zorluklardan biri de bu malzeme parametrelerinin belirlenmesindeki zorluklardır. Malzeme parametrelerinin belirlenmesi henüz tam bir temel üzerine oturtulamamıştır. Birleştirilmiş viskoplastik teorilerden biri olan VBO model, bu tez çalışmasında kullanılan haliyle onüç adet malzeme parametresine sahiptir. Tahmini yaklaşıma dayanan genetik algoritma (GA) optimizasyon metodu kullanılarak VBO modelin malzeme parametrelerinin belirlenmesi yapılmıştır. Malzeme parametreleri ekstrüde YYPE numune deney sonuçları için belirlenmiştir. Bu amaçla GA optimizasyon prosedürü uygunluk fonksiyonu, üç farklı hızda yükleme-boşaltma deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasındaki fark olarak seçilmiştir. GA optimizasyon prosedürü, MATLAB M-file programı ile VBO model Fortran simülasyon hesaplama programının iç içe çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. GA prensibine dayanan optimizasyon prosedürü ile belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak, VBO model ekstrüde YYPE numune sünme ve gevşeme deneyleri için simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları hem sünme hem de gevşeme deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu incelemelerden GA'ya dayanan optimizasyon yönteminin VBO modelin malzeme parametrelerinin belirlenmesinde daha sağlıklı, daha güvenilir, daha kolay, daha yaklaşık değerlerde ve özellikle belli bir temele

dayandırılarak hesaplama yapma kolaylığı sağladığı görülmüştür. VBO model parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak geliştirilen GA optimizasyon yöntemi, literatürde kullanılan diğer malzeme modellerinin parametrelerinin belirlenmesinde de kullanılabilir.

8. ÖNERİLER ve GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

Polimerik malzeme deformasyon davranışını belirlemek üzere gerçekleştirilen bu tez çalışmasının ana konusu üzerinde eksik kalan ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Genel olarak malzeme davranışının türü yükleme-boşaltma deneyleri ve boşaltma sonrasında sıfır gerilmede toparlanma miktarlarından belirlenir. Yükleme-boşaltma deneyleri daha sık gerinim aralığında (%1-2-3-4-5-6 gibi) gerçekleştirilebilir. Boşaltma deneyleri sonrasında sıfır gerilme seviyesinde stabil duruma erişinceye kadar toparlanma deneyleri gerçekleştirilerek, malzeme üzerinde oluşan kalıcı deformasyon miktarı tam olarak tespit edilebilir. Böylece deformasyon davranışının türleri ve hangi yükleme sınırlarında meydana geldiği tam olarak belirlenebilir.
- Sünme deneyleri polimerik malzeme deformasyon türü ve yük taşıma kabiliyetinin göstergelerinin belirlenmesinde önemli bir deney türüdür. Bu nedenlerle sünme deneyleri özellikle akma noktalarına yakın yükleme seviyelerinde daha sık aralıklarla ve uzun sürelerde gerçekleştirilebilir. Ayrıca sünme deneyi sonrası toparlanma deneyleride gerçekleştirilerek kalıcı deformasyon miktarı ve sünme kopması davranışları incelenebilir. Böylece deformasyon türü, mukavemet değerleri ve modelleme açısından daha sağlıklı sonuçlara varılabilir. Malzeme üzerinde yükleme geçmişi etkisini araştırmak üzere iki veya daha fazla yükleme seviyelerinde katlamalı sünme deneyleri gerçekleştirilebilir.
- Polimerik malzemeler kimyasal yapılarından dolayı oda sıcaklığında kuvvetli gevşeme özelliği gösterirler. Ayrıca gevşeme deneyleri ile belirlenen gevşeme modülleri modellemeye yönelik önemli parametrelerden biridir. Gevşeme davranışını belirlemek üzere daha sık gerinim aralıklarında uzun süreli deneyler gerçekleştirilebilir. Gevşeme deney süreleri özellikle malzeme üzerinde gerilme seviyesinin sabit kaldığı noktalara kadar uzatılarak yapılabilir. Böylece gevşeme davranışı daha açık hale getirilmiş aynı zamanda modelleme çalışmalarında da kolaylıklar sağlanmış olunur. Diğer yandan yükleme geçmişi etkisini araştırmak üzere iki veya daha fazla gerinim seviyesinde gevşeme deneyleride gerçekleştirilebilir.
- Pratik uygulamalarda elbette malzeme tek tür yüklemeye maruz değildir, aynı anda bir çok yükleme türü mevcuttur. Deneyler çok eksenli şekilde (çekme-burulma, basma-burulma vb.) ve tam çevrimsel yüklenerek deformasyon davranışı araştırılabilir.

- Polimerik malzeme deformasyon davranışı üzerinde içyapı değişkenlerinin çok kuvvetli etkisi vardır. Bu içyapı değişkenlerinin biri de kristallik oranıdır. Yarıkristal polimerik malzemeden değişik kristallik oranlarında numuneler üretilerek, bu numuneler ile değişik türde deneyler gerçekleştirilebilir.
- Modellemede kullanılan “overstress”e dayanan viskoplastisite (VBO) teorisi diğer polimerik malzemelerin deformasyon davranışını modellemek üzere kullanılabilir. Ayrıca VBO modeli kullanılarak sonlu elemanlar nümerik çözüm yöntemi ile deformasyon hesapları yapılabilir. VBO modeli içerisindeki malzeme parametreleri azaltılarak, model daha esnek hale getirilebilir. Genetik Algoritmaya (GA) dayanan malzeme parametresi belirleme amaçlı optimizasyon yöntemi literatürdeki diğer malzeme modellerinin parametrelerinin belirlenmesi için de uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Ahzi, S., Makradi, R., Gregory, V. ve Edie, D.D. (2003), "Modeling of deformation behavior and strain-induced crystallization in poly(ethylene terephthalate) above the glass transition temperature", *Mechanics of Materials*, 35:1139-1148.
- Ariyama, T. ve Kaneko K., (1995), "A Constitutive Theory for Polypropylene in Cyclic Deformation", *Polymer Engineering and Science*, 5:1461-1467.
- Arruda, E. ve Boyce, M. C., (1993), "A Three-Dimensional Constitutive Model For The Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, 41 (2):389-412.
- Bardenhagen, S., Stout, M., ve Gray, G. (1997), "Three dimensional, finite deformation, viscoplastic constitutive models for polymeric materials", *Mechanics of Materials*, 25:235-253.
- Bartczak, Z., (2005), "Effect of Chain Entanglements on Plastic Deformation Behavior of Linear Polyethylene", *Macromolecules*, 38:7702-7713.
- Bédoui F., Diani J. ve Régnier (2004), "Micromechanical modeling of elastic properties in polyolefins", *Polymer*, 45:2433-2442.
- Beijer, J.G.J., ve Spoormaker, J.L. (2000), "Modelling of creep behaviour in injection-moulded HDPE", *Polymer*, 41:5443-5449.
- Bergstrom J. S. ve Boyce M. C. (1998), "Constitutive Modeling of The Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, 46 (5): 931-954.
- Bergstrom, J.S. ve Boyce M.C., (2000), "Large Strain Time-Dependent Behavior of Filled Elastomers" *Mechanics of Materials*, 32:627-644.
- Bergstrom, J.S., Kurtz S.M., Rimnac, C.M. ve Edidin A.A., (2002), "Constitutive Modeling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Under Large-Deformation and Cyclic Loading Conditions", *Biomaterials*, 23:2329-2343.
- Bernard, A., Schrauwen, G., Roel P., Janssen, M., Leon Govaert E., ve Meijer, H. E. H., (2004) "Intrinsic Deformation Behavior of Semicrystalline Polymer", *Macromolecules*, 37:6069-6078.
- Bonner, M., Duckett, R.A. ve Ward M.I. (1999), "The creep behavior of isotropic polyethylene", *Journal of Materials Science*, 34:1885-1897.
- Boyce, M. C., Weber G. G. ve Parks D. M., (1988), "On The Kinematics of Finite Strain Plasticity", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, 37 (5):647-665.
- Boyce, M.C., Socrate, S., ve Llana, P.G. (2000), "Constitutive model for the finite deformation stress-strain behavior of poly(ethylene terephthalate) above the glass transition". *Polymer* 41: 2183-2201.
- Bruhns, O.T. ve Anding D.K., (1999), "On the simultaneous estimation of model parameters used in constitutive laws for inelastic material behaviour", *International Journal of Plasticity* 15:1311-1340.
- Brown R., (1999), *Handbook of Polymer Testing : Physical Methods*, Marcel Dekker, New York.

Capaldi, F.M., Boyce, M.C. ve Rutledge, G.C. (2004), "Molecular response of a glassy polymer to active deformation", *Polymer*, 45:1391-1399,.

Chong, E.K.P. ve Zak H.S., (2001), *An Introduction to Optimization*, John Wilwy&Sons, New York.

Chung T.J., (1988), *Continuum Mechanics*, Prentice Hall, New Jersey.

Corradini, P., Auriemma, F. ve Rosa, De C. (2006), "Crystals and Crystallinity in polymeric Materials", *Acc. Chem. Res.*, 39:314-323.

Çolak, Ö.U., Krempl, E. (2003)"Modeling of uniaxial and biaxial ratcheting behavior of 1026 Carbon steel using the simplified Viscoplasticity Theory Based on Overstress (VBO)". *Acta Mechanica* 160:27-44.

Çolak, Ö. U. (2004a),"Modeling of Large Simple Shear Using A Viscoplastic Overstress Model and Classical Plasticity Model with Different Objective Stress Rates," *Acta Mechanica*, 167:171-187.

Çolak, Ü. Ö. (2004b), "Modeling Creep and Relaxation Behaviors of Polyphenylene Oxide Using a Viscoplasticity Theory", *Proceedings of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium*, 837-844, Ürgüp,.

Çolak, Ö.Ü., (2005), "Modeling deformation behavior of polymers with viscoplasticity theory based on overstress", *International Journal of Plasticity*, 21.: 145–160.

Çolak, Ö.Ü. ve Düşünceli N., (2006), "Modeling viscoelastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE)", *Journal Engineering Material and Technology*, 128: 572-578.

Dasari, A. ve Misra, K. (2003), "On the strain rate sensitivity of high density polyethylene and polypropylenes", *Materials Science and Engineering A*, 358:356-371.

Doyle, M. (2000), "On the Effect of Crystallinity on the Elastic Properties of Semicrystalline Polyethylene", *Polymer Engineering And Science*, 40:330-335.

Drozdov, A. D. (1999), "A model for the non-linear viscoelastic response and physical aging in glassy polymers" *Computational and Theoretical Polymer Science*, 9:73-87.

Drozdov, A.D. (2000), "Viscoelastoplasticity of amorphous glassy polymers", *European Polymer Journal*, 36:2063-2074.

Drozdov, A.D. ve Christiansen, J.De C. (2003), "Modelling the viscoplastic response of polyethylene in uniaxial loading–unloading tests", *Mechanics Research Communications*, 30:431-442.

Drozdov, A.D. ve Gupta, R.K. (2003), "Constitutive equations in finite viscoplasticity of semicrystalline polymers", *International Journal of Solids and Structures*, 40:6217-6243,.

Drozdov, A.D. ve Yuan, Q. (2003), "The viscoelastic and viscoplastic behavior of low-density polyethylene", *International Journal of Solids and Structures*, 40:2321-2342.

Düşünceli, N. and Çolak, Ö. Ü. (2007a), "The Effects of Manufacturing Techniques on Viscoelastic and Viscoplastic Behavior of High Density Polyethylene (HDPE)" *Materials and Design*, 10.1016/j.matdes.2007.06.003.

- Düşünceli, N. and Çolak, Ö. Ü. (2007b), “High Density Polyethylene (HDPE): Experiments and Modeling”, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 10.1007/s11043-007-9026-5.
- Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkiran, İ., Yağcı, M.A., Cöbek M ve Bilgiç T. (1999), *Polimerler I*, Pagev Yayınları, İstanbul.
- Fırat Kauçuk Plastik Sanayi A.Ş. Teknik Notları, (2005), Politetilen Boru ve Ek Parçaları Teknik Kataloğu, İstanbul.
- Filiz C., (2005), *Sistematik Konstrüksiyonda Genetik Algoritmaların Kullanılması*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Fried, R. J. (2003), *Polymer Science & Technology*, Second Edition.
- Fossum. A.F., (1997), “Parameter estimation for an internal variable model using nonlinear optimization and analytical/numerical response sensitivities”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 119 (4): 337-345.
- Fossum. A.F., (1998), “Rate data and material model parameter estimation”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 120 (1): 7-12
- Gen, M. ve Cheng R., (2000), *Genetic Algorithms&Engineering Optimization*, John Wilwy&Sons, New York.
- Goldberg D., (1989), *Genetic Algorithms*, Addison Wesley Longman, Boston
- Gosavi A., (2003), *Simulation-Based Optimization*, Kluwer Academic Publisher, Norwell.
- Guo, X., Isayev, I. ve Guo L., (1999), “Crystallinity and Microstructure in Injection Moldings of Isotactic Polypropylenes. Part 1: A New Approach to Modeling and Model Parameters”, *Polymer Engineering and Science*, 39: 2096-2114.
- Harth, T., Schwan, S., Lehn, J. ve Kollmann, F.G., (2004), “Identification of material parameters for inelastic constitutive models: statistical analysis and design of experiments”, *International Journal of Plasticity*, 20:1403-1440.
- Hartmann, S., Gibmeier J. ve Scholtes, B., (2006), “Experiments and Material Parameter Identification Using Finite Elements. Uniaxial Tests and Validation Using Instrumented Indentation Tests”, *Experimental Mechanics*, 46:5–18
- Hasan, O. ve Boyce, M. (1995), “A constitutive model for the nonlinear viscoelastic viscoplastic behavior of glassy polymers”, *Polymer Engineering and Science*, 35:331-344.
- Hiss, R., Hobeika, S., C. Lynn, C., ve Strobl, G. (1999), “Network Stretching, Slip Processes, and Fragmentation of Crystallites during Uniaxial Drawing of Polyethylene and Related Copolymers. A Comparative Study”, *Macromolecules*, 32:4390-4403.
- Ho, K. ve Krempl, E., (2002), “Extension of The Viscoplasticity Theory Based on Overstress (VBO) to Capture Non-standart Rate Dependence in Solids”, *International Journal of Plasticity*, 18:851-872.
- Hoger, A., (1986), “The Material Time Derivative of Logarithmic Strain”, *International Journal Solids Structures*, 22:1019-1032.

- Hong, K., Rastogi, A., ve Strobl, G., (2004) "A Model Treating Tensile Deformation of Semicrystalline Polymers: Quasi-Static Stress-Strain Relationship and Viscous Stress Determined for a Sample of Polyethylene", *Macromolecules*, 37:10165-10173.
- Hong, K. ve Strobl, G., (2006) "Network Stretching during Tensile Drawing of Polyethylene: A Study Using X-ray Scattering and Microscopy", *Macromolecules*, 39:268-273.
- Haupt P. (2002), *Continuum Mechanics and Theory of Materials*, Springer, Heidelberg
- Shackelford J., (2005), *Materials Science For Engineers*, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- International Standard ISO 527-1, 1997.
- International Standard ISO 527-2, 1997.
- International Standard ISO 6259-1, 1997.
- International Standard ISO 6259-3, 1997.
- Johansson, G., Ahlström J. ve Ekh M., (2006), "Parameter identification and modeling of large ratcheting strains in carbon steel", *Computers and Structures* 84:1002–1011.
- Johnson, G., (1984), "A Discussion of Stress Rates in Finite Deformation Problems", *International Journal Solids Structures*, 20:725-737.
- Joseph S.H., (2005), "A Method for Modelling the Nonlinear Viscoelastic Response of Polymers", *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 9: 35-69.
- Kajberg, J. ve Wikman B., (2007), "Viscoplastic parameter estimation by high strain-rate experiments and inverse modelling –Speckle measurements and high-speed photography", *International Journal of Solids and Structures* 44:145–164.
- Khan, A. ve Zhang, H., (2001), "Finite Deformation of A Polymer: Experiments and Modling", *International Journal of Plasticity*, 17:1167-1188.
- Khan A., ve Huang S., (1995), *Continuum Theory of Plasticity*, Jhon Wiley&Sons, New York.
- Khan F., (2003), *The Deformation Behavior of Solid Polymers and Modeling with The Viscoplasticity Theory Bades on Overstress*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy.
- Kitagawa M., Mori T. ve Matsutani T., (1989), "Rate-dependent Nonlinear Constitutive Equation of Polypropylene", *Journal of Polymer Science*, 27: 85-95.
- Kitagawa, M. ve Takagi, H. (1990), "Nonlinear Constitutive Equation for Polyethylene Under Combined Tension and Torsion", *Journal of Polymer Science*, 28:1943-1953.
- Kitagawa, M., Nishida, K. ve Yoneyama, T. (1992), "Cyclic stres-strain curves at finite strains under high pressures in crystalline polymers", *Journal of Materials Science*, 27:13-23.
- Kitagawa, M., Onoda, T. ve Mizutani K. (1992), "Stres-strain behavior at finite strains for various strain paths in polyethylene", *Journal of Materials Science*, 27:13-23.
- Krempl, E. (1996), "A small strain viscoplasticty theory based on overstress," In Krausz, A.S. K.Krausz, editors, *Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation*, Academic Press, San Diego, 281 -318.
- Krempl, E. 1998, *Creep-Plasticity Interaction*, Lecture Notes, CISM No: 187, Udine Italy.

- Krempl, E., (2001), "Relaxation Behavior and Modeling", *International Journal of Plasticity*, 17: 1419-1436.
- Krempl, E. ve Bordonaro C. M., (1997), "Non-proportional Loading of Nylon 66 at Room Temperature", *International Journal of Plasticity*, 14:245-258.
- Krempl, E. ve Bordonaro, C. (1995), "A state variable model for high strength polymers, *Polymer Engineering and Science*", 35:310-316.
- Krempl, E. ve Ho, K. (2000), "An overstress model for solid polymer deformation behavior applied to nylon 66", *Polymers and Composites* 1357:118-137.
- Krempl, E. ve Khan, F. (2003), "Rate (time) dependent deformation behavior: an overview of some properties of metals and solid polymers", *International Journal of Plasticity*, 19:1069-1095.
- Kolymbas, D. ve Herle, I., (2003), "Shear and Objective Stress Rates in Hypoplasticity", *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27:733-744.
- Kunkel, R. ve Kollmann, F.G., (1997), "Identification of constants of a viscoplastic constitutive model for a single crystal alloy", *Acta Mechanica* 124:27-45.
- Lai, J. ve Bakker, A. (1995a), "An Integral Constitutive Equation for Nonlinear Plasto-Viscoelastic Behavior of high-density polyethylene " *Polymer*, 36:93-99.
- Lai, J. ve Bakker, A. (1995), "Analysis of the non-linear creep of high-density polyethylene" *Polymer*, 36:93-99,.
- Li, D.S., Garmestani, H., Alamo, R.G. ve Kalidindi, S.R. (2003), "The role of crystallinity in the crystallographic texture evolution of polyethylenes during tensile deformation", *Polymer*, Volume 44:5355-5367.
- Maciucescu L., (2002), *A Simplified Viscoplasticity Theory Based on Overstress For Low to High Homologous Temperature and Quasi-Static to Dynamic Application*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy.
- Mahnken, R. Ve Stein, E., (1996), "Parameter Identification for Viscoplastic Models Based on Analytical Derivatives of a Least-Squares Functional and Stability Investigations", *International Journal of Plasticity*, 12(4):451-456.
- Makradi, A., S. Ahzi, S., Gregory, R.V. ve D.D. Edie, D.D. (2004), "A two-phase self-consistent model for the deformation and phase transformation behavior of polymers above the glass transition temperature: application to PET", *International Journal of Plasticity*, 21:741-758.
- Mase, G.T. ve Mase G.E., (1999), *Continuum Mechanics for Engineering*, CRC Press, New York.
- Muller D. ve Hartmann G., (1989), "Identification of Materials Parameters for Inelastic Constitutive Models Using Principles of Biologic Evolution", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 111 (3): 299-305.
- Nikolov, S. ve Doghri, I. (2000), "A micro/macro constitutive model for the small-deformation behavior of polyethylene" *Polymer*, 41:1883-1891.

- Nikolov, S., Doghri, I., Pierard, O., Zealouk, L. ve Goldberg, A. (2002), "Multi-scale constitutive modeling of the small deformations of semi-crystalline polymers", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50:2275-2302.
- Nikolov, S., Lebensohn, R.A. ve Raabe D.(2006), "Self-consistent modeling of large plastic deformation, texture and morphology evolution in semi-crystalline polymers", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54:1350–1375.
- Nitta K. ve Ishiburo T., (2002), "Ultimate Tensile Behavior of Linear Polyethylene Solids", *Journal of Polymer Science*, 40, 2018-2026.
- Olasz, L. ve Gudmundson, P.(2006), "Viscoelastic Model of Cross-Linked Polyethylene Including Effects of Temperature and Crystallinity", *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 9:225–246.
- Osmyan, V., S. Patlazhan, S. ve Y. Remond, Y. (2004), "Simulation of small-strain deformations of semi-crystalline polymer: Coupling of structural transformations with stress-strain response", *Journal of Materials Science* 39:3577 – 3586.
- Polak E., (1997), *Optimization*, Springer, Heidelberg
- Phan N. ve Thien, (2002), *Understanding Viscoelasticity*, Springer, Heidelberg.
- Reinhardt, W.D. ve Dubey R.N:, (1996), "Application of Objective Rates in Mechanical Modeling of Solids", *Journal of Applied Mechanics*, 118:692-698.
- Schwertel, J. Ve Schinke, B., (1996), "Automated Evaluation of Materials Parameters of Viscoplastic Constitutive Equations", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118:273-277.
- Seibert, T., Lehn, J., Schwan, S. ve F.G. Kollmann, F.G., (2000), "Identification of material parameters for inelastic constitutive models: Stochastic simulations for the analysis of deviations", *Continuum Mechanics Thermodynamics*, 12: 95–120.
- Senseny, P.E., (1995), "On Testing Requirements for Viscoplastic Constitutive Parameter Estimation", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 117:151-157.
- Senseny, P.E., Brodsky N.S. ve Devries K.L., (1993), "Parameter Evaluation For A Unified Constitutive Model", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 115 (2): 157-162.
- Seguela, R. (2005), "Critical Review of the Molecular Topology of Semicrystalline Polymers: The Origin and Assessment of Intercrystalline Tie Molecules and Chain Entanglements", *Journal of Polymer Science PartB: Polymer. Physics*, 43:1729-1748.
- Shepherd J. E., McDowell D. L. ve Jacob K. I., (2006), "Modeling Morphology Evolution and Mechanical Behavior During Thermo-Mechanical Processing of Semi-crystalline Polymers", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, 54:467-489.
- Spathis G., (1997), "Theory for The Plastic Deformation of Glassy Polymers", *Journal of Materials Science*, 32: 1943-1950.
- Sun, H., Cooke, R. S., Bates, W. D. ve Wynne K. J.(2005), "Supercritical CO₂ processing and annealing of polytetrafluoroethylene (PTFE) and modified PTFE for enhancement of crystallinity and creep resistance", *Polymer*, 46:8872–8882.

Sweeney, J., Collins, T.L.D., Coates, P.D., Unwin, A.P., Duckett, R.A. ve Ward, I.M. (2002), "Application of a large deformation model to unstable tensile stretching of polyethylene", *International Journal of Plasticity*, 18:399-414.

Tanaka, T., (2000), *Experimental methods in polymer science : modern methods in polymer research and technology*, Academic, London.

Temiz, V. (2002), *Plastik Malzemelerle Konstrüksiyon, Ders Notları*, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.

The MathWorks, (2007), "Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User's Guide", 2007

Trantina G. G., (1986), " Creep Analysis of Polymer Structures", *Polymer Engineering and Science*, 26: 776-780.

Turhan, Ö. (2004), *Optimizasyon Yöntemleri, Ders Notları*, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.

van Dommelen, J.A.W., Parks, D.M., Boyce, M.C., Brekelmans, W.A.M. ve Baaijens, F.P.T. (2003), "Micromechanical modeling of the elasto-viscoplastic behavior of semi-crystalline polymers", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51:519-541.

van Dommelen J. A. W., Schrauwen B. A. G., van Breemen, L. C. A. ve Govaert L. E., (2004), "Micromechanical Modeling of the Tensile Behavior of Oriented Polyethylene", *Journal of Polymer Science*, 42: 2983-2994.

Uysal M. ve Uysal A., (1998), *Fortran 90, Beta*, İstanbul.

van Melick, H.G.H., Govaert, L.E., Raas, B., Nauta, W.J. ve Meijer H.E.H. (2003), "Kinetics of ageing and re-embrittlement of mechanically rejuvenated polystyrene", *Polymer*, 44:1171-1179.

Vishu S.1984, *Handbook of plastics testing technology*, John Wiley and Sons, New York.

Yaşar, H., (2001), *Plastikler Dünyası, Makine Mühendisleri Odası Yayını 142/2*, Ankara.

Ward, I.M. ve Hadley, D.W. (1993), *Mechanical Properties of Solid Polymers*, John Wiley & Sons.

William, D. ve Callister, Jr. (2003), *Materials Science and Engineering an Introduction*, John Wiley & Sons, New York.

Wineman, A. ve Rajagopal, K. (2000), *Mechanical Response of Polymers*, Cambridge University press,

Zhang, C. (1996), "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene in Gravity Flow Pipes", Ph.D. Thesis, The University of Western Ontario , Ontario.

Zhang, C. ve Moore I.D., (1997a), "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part I: Experimental Investigation and Model Evaluation", *Polymer Engineering and Science* 37(2): 404-413.

Zhang, C. ve Moore, I.D., (1997b), "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part II: Uniaxial Constitutive Modeling," *Polymer Engineering and Science*, 37(2): 413-420.

INTERNET KAYNAKLARI

<http://www.azom.com/>

<http://www.cem.msu.edu/~reusch/VirtualText/polymers.htm>

http://webpages.charter.net/ericbeaton/powerpt/Chapter_14_15.pdf

<http://www.cmse.ed.ac.uk/MSE3/Topics/MSE2-06/Lecture%20polymers.pdf>

<http://www.engin.brown.edu/courses/En222/Notes/Hyperelast/Hyperelast.htm>

<http://www.eng.uc.edu/~gbeaucag/Classes/Morphology/Chapter2html/Chapter2.html>

<http://www.handsonplastics.com/>

<http://ocw.mit.edu/index.html>

<http://mse280b.mse.uiuc.edu/>

<http://www.mathworks.com/>

<http://www.mate.tue.nl/mate/publications/index.php/4/2005>

<http://www.openchannelfoundation.org/>

<http://www.pslc.ws/mactest/mech.htm#pool>

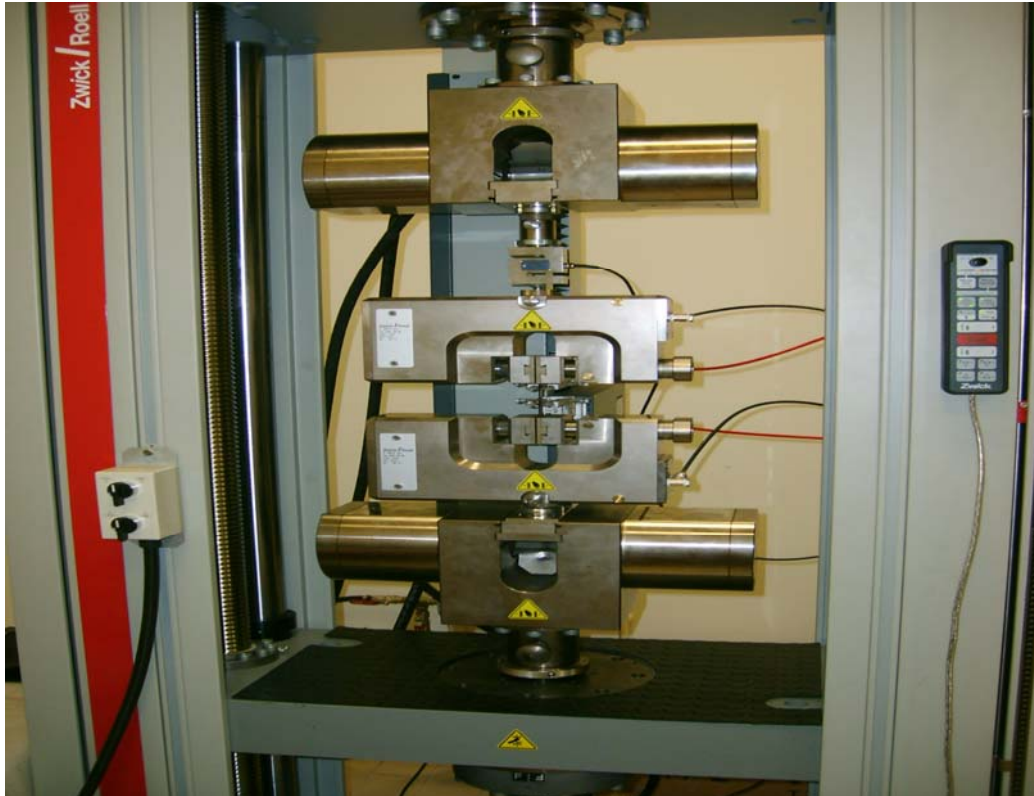
<http://www.scs.uiuc.edu/~chem584/lectures/chem584.polymerintro.pdf>

www.polymerfem.com.

<http://me.queensu.ca/courses/MECH412/>

EKLER

- Ek 1 Deney cihazının görüntüleri.
Ek 2 Genetik Algoritma MATLAB dosyaları

Ek 1 Deney cihazı görüntüleri



Ek 2 Genetik Algoritma MATLAB dosyaları

1. Başlatma Programı:

```
%VBO Opt Start
clear all
%clc
%Load Options
run ga_optimset
rand('state', 100);
randn('state', 100);
%Start GA
[X,FVAL,REASON,OUTPUT,POPULATION,SCORES] =
ga(fitnessFunction,nvars,Aineq,Bineq,Aeq,Beq,LB,UB,nonlconFunction,options)
csvwrite('VBO_const.txt',X);
%Change notation of best individual
sb=[X];
%Write best individual to data.txt
fid=fopen('data.txt','wt');
fprintf(fid, '\ 'rk1, rk2, rk3\ '\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(1),sb(2),sb(3));
fprintf(fid, '\n\ 'c1, c2, c3, c4, psibir, psi\ '\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(4),sb(5),sb(6),sb(7));
fprintf(fid, '\n\ 'E, Et, nu, lamda, alfa, A\ '\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(8),sb(9),1,sb(10),sb(11),sb(12));
fclose(fid);
%Strat VBO model again
!mdfy3.exe
!mdfy4.exe
!mdfy5.exe
```

2. Uygunluk Fonksiyonları Programı

```
%VBO Opt Start
clear all
%clc
%Load Options
run ga_optimset
rand('state', 100)
randn('state', 100)
%Start GA
[X,FVAL,REASON,OUTPUT,POPULATION,SCORES] =
ga(fitnessFunction,nvars,Aineq,Bineq,Aeq,Beq,LB,UB,nonlconFunction,options)
csvwrite('VBO_const.txt',X);
%Change notation of best individual
sb=[X];
%Write best individual to data.txt
fid=fopen('data.txt','wt');
fprintf(fid, '\ 'rk1, rk2, rk3\ '\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(1),sb(2),sb(3));
fprintf(fid, '\n\ 'c1, c2, c3, c4, psibir, psi\ '\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(4),sb(5),sb(6),sb(7));
fprintf(fid, '\n\ 'E, Et, nu, lamda, alfa, A\ '\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(8),sb(9),1,sb(10),sb(11),sb(12));
fclose(fid);
%Strat VBO model again
!mdfy3.exe
!mdfy4.exe
!mdfy5.exe
```

3. Genetik Algoritma Programı

```
%VBO Opt Start
clear all
%clc
%Load Options
run ga_optimset
rand('state', 100);
randn('state', 100);
%Start GA
[X,FVAL,REASON,OUTPUT,POPULATION,SCORES] =
ga(fitnessFunction,nvars,Aineq,Bineq,Aeq,Beq,LB,UB,nonlconFunction,options)
csvwrite('VBO_const.txt',X);
%Change notation of best individual
sb=[X];
%Write best individual to data.txt
fid=fopen('data.txt','wt');
fprintf(fid, '\''rk1, rk2, rk3'\'''\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(1),sb(2),sb(3));
fprintf(fid, '\n\''c1, c2, c3, c4, psibir, psi'\'''\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(4),sb(5),sb(6),sb(7));
fprintf(fid, '\n\''E, Et, nu, lamda, alfa, A'\'''\n');
fprintf(fid, '%12.4f',sb(8),sb(9),1,sb(10),sb(11),sb(12));
fclose(fid);
%Strat VBO model again
!mdfy3.exe
!mdfy4.exe
!mdfy5.exe
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	23.05.1973
Doğum yeri	Yozgat
Lise	Yozgat Lisesi (1987-1990)
Lisans	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (1990-1994)
Yüksek Lisans	Niğde Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü (1998-2000)
Doktora	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2002-2007)

Çalıştığı kurum(lar)

Serbest Mühendislik Hizmetleri- YOZGAT (Ağustos 1994-Nisan 1996)
 Askerlik Hizmeti-Şahnalar/KARS (Nisan 1996-Ağustos 1997)
 Araştırma Görevlisi-Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi
 (Kasım 1997-Şubat 2002)
 Araştırma Görevlisi-Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
 (Şubat 2002-devam ediyor)