

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMERİK MALZEMELERİN TEK VE ÇOK EKSENLİ ÇEVİRİMSEL
YÜKLEMELERDEKİ DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

KEREM ASMAZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ÖZGEN ÜMİT ÇOLAK**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMERİK MALZEMELERİN TEK VE ÇOK EKSENLİ ÇEVİRİMSEL
YÜKLEMELERDEKİ DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

Kerem ASMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 04.10.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur GÜVEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halit TÜRKMEN

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Halil ÖZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat MAKARACI

Kocaeli Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışması polimerik malzemelerin tek ve çok eksenli çevrimsel yükleme hallerinde mekanik davranışlarının “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile modellenmesi üzerinedir.

Bu çalışmanın ortaya konmasında benden yardımlarını, desteğini, sabrını ve bilgisini esirgemeyen çok değerli hocam Prof.Dr. Özgen Ümit Çolak’a, tez ilerleme süresince değerli katkıları olan tez izleme jüri üyelerim Prof.Dr. Uğur Güven ve Prof.Dr. Halit Türkmen hocalarıma, Yıldız Teknik Üniversitesindeki mesai arkadaşlarıma ve daima yanımda olan annem ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

Ekim, 2013

Kerem ASMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Deneyisel Çalışmaları İçeren Literatür Özeti	1
1.1.2 Modelleme Çalışmalarını İçeren Literatür Özeti.....	6
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Orjinal Katkı	10
BÖLÜM 2	
POLİMERİK MALZEMELER	11
2.1 Polimerik Malzemeler	11
2.2 Moleküller Arası Düzen	14
2.2.1 Amorf Polimerler.....	15
2.2.2 Kristalin Polimerler.....	16
2.3 Polimerlerin Gerilme-Gerinim Eğrileri.....	17
2.4 Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE).....	19
2.5 Gerinim Toplanması (Ratcheting)	22
2.5.1 Gerinim Toplanması Oranı.....	22
2.5.2 Gerinim Aralığı	27
2.5.3 Gerinim Enerji Yoğunluğu.....	28

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA	33
3.1. Tek Eksenli Yüklemede Deneysel Sonuçlar	36
3.2. İki Eksenli Yüklemede Deneysel Sonuçlar	38

BÖLÜM 4

POLİMERİK MALZEME MODELLERİ	41
4.1. Lineer Viskoelastisite	41
4.2. Lineer Olmayan Viskoelastisite	45
4.2.1. Moleküler Yaklaşım	46
4.2.2. Reolojik Yaklaşım	46
4.2.2.1 Katlı İntegral Gösterimi	47
4.2.2.2 Tek Katlı İntegral Gösterimi	47
4.2.3. Mühendislik Yaklaşımı	49
4.3. Viskoplastik Teoriler	49
4.3.1. Overstress Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (VBO)	50

BÖLÜM 5

KİNEMATİK PEKLEŞME	56
5.1 Bauschinger Etkisi	56
5.2 Kinematik Pekleşme Modelleri	58
5.2.1 Klasik Kinematik Pekleşme Kuralı (Prager)	58
5.2.2 Armstrong ve Frederick Kinematik Pekleşme Kuralı	59
5.2.3 Burlet ve Cailletaud Kinematik Pekleşme Kuralı	59
5.2.4 Ohno ve Wang Kinematik Pekleşme Kuralı	59
5.2.5 Chaboche Kinematik Pekleşme Kuralı	60

BÖLÜM 6

UHMWPE’NİN TEK VE İKİ EKSENLİ ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞININ MODELLEMESİ	61
6.1 Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisinde Malzeme Parametrelerinin Gerinim Toplanması Davranışına Etkisinin Araştırılması	62
6.2 Kinematik Pekleşmenin Gerinim Toplanmasına Etkisi	70
6.3 Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (VBO) ile Tek Eksenli Çevrimsel Yükleme Davranışının Modellenmesi	76
6.4 İki Eksenli Yükleme	81
6.5 “Overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile İki Eksenli Çevrimsel Yükleme Davranışının Modellenmesi	86
6.6 Tanjant Modülünün Gerinim Toplanmasına Etkisi	94

BÖLÜM 7

SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	109



SİMGE LİSTESİ

A	İzotropik gerilme
A_0	İzotropik gerilmenin başlangıç hızı
A_c	İzotropik gerilmenin değişim hızı
A_f	İzotropik gerilmenin son hızı
D	“ Drag” gerilmesi
$E_{t-\tau}$	Gevşeme modülü
E	Elastisite modülü
E_T	Tanjant modülü
$\dot{e}$	Deviatorik gerinim hız tensörü
$\dot{e}^{el}$	Deviatorik elastik gerinim hız tensörü
$\dot{e}^{in}$	Deviatorik elastik olmayan gerinim hız tensörü
F	Akış fonksiyonu
G	Denge gerilmesi tensörü
g	Deviatorik denge gerilmesi tensörü
$\dot{g}$	Deviatorik denge gerilmesi hız tensörü
$h_{\lambda,t}$	Birleştirilmiş fonksiyon
ΔH	Aktivasyon enerjisi
ΔW^d	Dağılmış gerinim enerji yoğunluğu
ΔW^e	Elastik gerinim enerji yoğunluğu
$J_{t-\tau}$	Sürünme komplians fonksiyonu
K	Kinematik gerilmesi tensörü
k	Deviatorik kinematik gerilmesi tensörü
$\dot{k}$	Deviatorik kinematik gerilmesi hız tensörü
n	Polimerizasyon derecesi
N	Çevrim sayısı
o	“Overstress”
R	Boltzman sabiti
$R_{m_{gerilme}}$	Gerilme oranı

$\mathbf{s}$	Deviatorik cauchy gerilme tensörü
$\dot{\mathbf{s}}$	Deviatorik cauchy gerilme hız tensörü
T	Sıcaklık
V	Aktivasyon hacmi
η	Viskozite katsayısı
$\dot{\mathcal{E}}^{el}$	Elastik gerinim hızı
$\dot{\mathcal{E}}^{in}$	Elastik olmayan gerinim hızı
$\mathcal{E}_{\max}$	Maksimum gerinim
$\mathcal{E}_{\min}$	Minimum gerinim
$\mathcal{E}_m$	Ortalama gerinim
$\mathcal{E}_r$	Gerinim toplanması oranı
$\mathcal{E}_{xa}$	Eksenel gerinim genliği
$\mathcal{E}_{xm}$	Eksenel ortalama gerinim
$\mathcal{E}_\theta$	Teğetsel gerinim
$\mathcal{E}_{\theta m}$	Teğetsel ortalama gerinim
Γ	“Overstress” invaryantı
λ	Uzama
ν	Poisson oranı
ψ	Şekil fonksiyonu
σ	Cauchy gerilme tensörü
σ_a	Gerilme genliği
σ_m	Ortalama gerilme
σ_n	Elastik kompians
σ_0	Sünme testindeki gerilme
σ_{xa}	Eksenel gerilme genliği
σ_{xm}	Eksenel ortalama gerilme
σ_θ	Teğetsel gerilme
$\sigma_{\theta m}$	Teğetsel ortalama gerilme
τ	Zaman artışı

KISALTMA LİSTESİ

CA	Selülöz Asetat
EP	Epoksi
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
PA	Poliamid (nylon)
PC	Polikarbonat
PCTFE	Poliklorotrifloretilen
PE	Poletilen
PET	Polietilen tereftalat
PF	Fenolformaldehit
PMMA	Polimetilmetakrilat
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafloroetilen - Teflon
PU	Poliüretan
PVC	Polivinilklorür
DVRT	Diferansiyel değişimli relüktans transdüser
UHMWPE	Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen
VBO	“Overstress” kavramına dayanan viskoplastisi teorisi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Polimerlerin ağ yapısı [3]	11
Şekil 2. 2 Etilenden adım adım polimer elde edilmesi [1]	12
Şekil 2. 3 Moleküller arası kuvvetler (4)	13
Şekil 2. 4 Molekül zincirlerinin yapıları; (a) Lineer, (b) Ağ,	14
Şekil 2. 5 Fringed Micelle modeli [4]	16
Şekil 2. 6 Katlanmış zincir (Chain-folded) modeli [6]	17
Şekil 2. 7 Polimer malzemelerin tipik gerilme-gerinim eğrileri [4]	17
Şekil 2. 8 İki amorf malzemenin gerilme-gerinim eğrisi: Polivinilklorür (PVC), Selülöz Asetat (CA) [4]	18
Şekil 2. 9 İki kristalin malzemenin gerilme-gerinim eğrisi: Polytetrafluoroethylene (PCTFE), Polychlorotrifluoroethylene (PTFE) [4]	19
Şekil 2. 10 Polistrenin gerilme-gerinim eğrisi [4]	19
Şekil 2. 11 UHMWPE'nin elektron mikroskobundan alınan görüntüsü [16]	20
Şekil 2. 12 UHMWPE'de kristal ve amorf bölgeleri gösteren şematik diyagramlar [16]	21
Şekil 2. 13 Gerilme-gerinim eğrisi [17]	23
Şekil 2. 14 $\% \varepsilon_{xm}$ - Çevrim sayısı eğrisi [18]	23
Şekil 2. 15 Gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [18]	24
Şekil 2. 16 Gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [19]	25
Şekil 2. 17 $\sigma_a = 23,60$ MPa iken gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [19]	26
Şekil 2. 18 $\sigma_m = 36,70$ MPa iken gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [19]	26
Şekil 2. 19 $R_m \text{gerilme} = 1$ için gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [19]	27
Şekil 2. 20 $\sigma_a = 23,60$ MPa iken gerinim miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [19]	28
Şekil 2. 21 Gerilme-gerinim eğrisi [19]	29
Şekil 2. 22 $\sigma_m = 36,70$ MPa için $\Delta Wd(kJm^3)$ - Çevrim sayısı eğrisi [19]	30
Şekil 2. 23 $\sigma_m = 36,70$ MPa için $\Delta We(kJm^3)$ - Çevrim sayısı eğrisi [19]	30
Şekil 2. 24 Çevrimsel plastisitenin dört olası durumu [19]	31
Şekil 2. 25 Gerinim toplanması-yorulma test sonuçları [20]	32

Şekil 3. 1	Numune ve çenelerin tasarımı ve boyutlandırması.....	35
Şekil 3. 2	Tek eksenli yükleme geçmişi.....	36
Şekil 3. 3	(a) Gerilme-gerinim eğrisi, (b) Ortalama gerinim-çevrim sayısı eğrisi	37
Şekil 3. 4	İki eksenli yükleme geçmişi	38
Şekil 3. 5	Sabit iç basınçta ve tekrarlı eksenel gerinimde UHMWPE'nin iki eksenli yükleme altında yanıtları	40
Şekil 4. 1	(a) Maxwell modeli, (b) Kelvin-Voigt Modeli, (c) Standart Lineer Katı Modeli.....	43
Şekil 4. 2	Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt modeli	44
Şekil 4. 3	Genelleştirilmiş Maxwell modeli.....	45
Şekil 4. 4	Modifiye edilmiş Standart Lineer Katı Model	51
Şekil 4. 5	"Overstress" modelin durum değişkenlerinin gelişimi	55
Şekil 5. 1	Bauschinger etkisi.....	56
Şekil 5. 2	Lineer kinematik pekleşmenin şematik gösterimi a) Deviatorik düzlemde	57
Şekil 6. 1	C_2 parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi	64
Şekil 6. 2	λ parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi	65
Şekil 6. 3	α parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi	66
Şekil 6. 4	m parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi	67
Şekil 6. 5	Elastisite modülünün gerilme-gerinim eğrisine etkisi	68
Şekil 6. 6	Tanjant modülünün gerilme-gerinim eğrisine etkisi	69
Şekil 6. 7	Gerilme-gerinim eğrisi [17]	70
Şekil 6. 8	Tek eksenli çevrimsel yükleme için VBO modeli gerilme- gerinim eğrisi	72
Şekil 6. 9	Tek eksenli çevrimsel yükleme için VBO modeli gerilme- gerinim eğrisi	73
Şekil 6. 10	Tek eksenli çevrimsel yükleme için VBO modeli $\% \varepsilon_{xm}$ - N eğrisi	74
Şekil 6. 11	$\% \varepsilon_{xa}$ - N eğrisi.....	75
Şekil 6. 12	$\% \varepsilon_{xm}$ - N eğrisi	76
Şekil 6. 13	a) UHMWPE' nin tek eksenli çevrimsel yüklemelerde ki davranışının VBO ile modellenmesi b) Karşılaştırma	78
Şekil 6. 14	$\% \varepsilon_{xm}$ - Çevrim sayısı ilişkisi.....	79
Şekil 6. 15	$\% \varepsilon_{xm}$ - Çevrim sayısı ilişkisi.....	79
Şekil 6. 16	$\% \varepsilon_{xa}$ - Çevrim sayısı ilişkisi.....	80
Şekil 6. 17	$\% \varepsilon_{xa}$ - Çevrim Sayısı ilişkisi.	80
Şekil 6. 18	İki eksenli yükleme geçmişi.....	81
Şekil 6. 19	İnce cidarlı basınçlı kap	82
Şekil 6. 20	% Eksenel gerinim - % Teğetsel gerinim eğrisi.....	87
Şekil 6. 21	% Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı.....	87
Şekil 6. 22	% Teğetsel Gerinim Genliği - Çevrim Sayısı.....	88
Şekil 6. 23	Teğetsel Gerilme 9.13 MPa iken a) Eksenel Gerilme - % Eksenel Gerinim Eğrisi b) % Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi c) Eksenel Gerilme - Çevrim Sayısı Eğrisi d) % Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı e) % Teğetsel Gerinim Genliği - Çevrim Sayısı.....	90
Şekil 6. 24	Eksenel Gerilme - % Eksenel Gerinim Eğrisi.....	92
Şekil 6. 25	% Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi.....	92
Şekil 6. 26	% Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi.....	93
Şekil 6. 27	% Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı.....	93

Şekil 6. 28	% Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı.....	96
Şekil 6. 29	% Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi.....	97
Şekil 6. 30	% Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı.....	97



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Polimerik malzemelerin mekanik özellikleri [33]	18
Çizelge 2. 2 UHMWPE'nin fiziksel özellikleri [45]	21
Çizelge 6. 1 Malzeme parametre tablosu (Tek eksenli)	63
Çizelge 6. 2 Prager kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (Tek eksenli).....	71
Çizelge 6. 3 Chaboche kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (Tek eksenli)	73
Çizelge 6. 4 Chaboche kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (Tek eksenli)	77
Çizelge 6. 5 Klasik kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (İki Eksenli)	86
Çizelge 6. 6 Chaboche kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (İki Eksenli)	91
Çizelge 6. 7 Tanjant modülü malzeme parametreleri.....	95

**POLİMERİK MALZEMELERİN TEK VE ÇOK EKSENLİ ÇEVİRİMSSEL
YÜKLEMELERDEKİ DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

Kerem ASMAZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK

Bu doktora tez çalışmasında amaç, sadece monotonik yükleme değil, aynı zamanda çevrimsel yüklemelere maruz polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesidir. Malzeme modeli olarak “overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) kullanılmıştır. Modellemede kullanılan malzeme, özellikle biyomekanik alanında (protez uygulamalarında) yaygın kullanılan, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) dir. UHMWPE, çevrimsel yüklemeye maruz kalça ve diz protez malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. UHMWPE’nin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve malzeme davranışların modellenmesi protez tasarımında çok önemlidir. Bu çalışmada, çevrimsel yüklemeye maruz kalan polimerik malzemelerde, hasara neden olduğu gözlemlenen gerinim toplanması (ratcheting) incelenmiştir. Mevcut VBO modelinin, gerinim toplanmasını tam olarak modelleyemediğinin belirlenmesi üzerine, viskoplastisite teorisi modifiye edilmiştir. Modelleme sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Polimerik malzeme, viskoelastisite, viskoplastisite, kinematik pekleşme, gerinim toplanması, UHMWPE

ABSTRACT

MODELING THE BEHAVIOUR OF POLYMERIC MATERIALS UNDER UNIAXIAL AND MULTIAXIAL CYCLIC LOADINGS

Kerem ASMAZ

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK

The aim of this PhD thesis is to model the mechanical behaviours of polymeric materials subjected to not only monotonic loadings, but also cyclic loadings. Viscoplasticity theory (VBO) based on the concept of overstress is used as the material model. The material used in the modeling, especially commonly used in the field of biomechanics (prosthesis applications), is ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE). UHMWPE has been widely used as knee and hip prosthesis material under the cyclic loading. Defining the mechanical properties and modeling the material behaviours of UHMWPE are very important in design of prosthesis. In this study, the ratcheting observed the cause of failure in polymeric material under the cyclic loading is investigated. Observing that the present VBO model cannot model the ratcheting perfectly, theory of viscoplasticity was modified. Numerical results were compared with experimental results.

Keywords: Polimeric materials, viscoelasticity, viscoplasticity, kinematic hardening, ratcheting, UHMWPE

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1.1 Literatür Özeti

1.1.1 Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Özeti

Literatürde, gerinim toplaması ile ilgili, metal ve polimerik malzemeler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Metal malzemeler ile ilgili çalışmalar, polimerik malzemelere göre daha eskiye dayanır. Polimerik malzemelerin gerinim toplanma davranışı ile ilgili az sayıda çalışma vardır. Literatür taramasında önce metal malzemeler, sonra polimerik malzemeler ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar verilecektir.

Ruggles ve Krempl [1], ön yükleme yapılmamış, 304 tipi paslanmaz çelik; oda sıcaklığında, 550 °C, 600 °C ve 650 °C'de, tek eksenli yüklemeye maruz bırakılarak gerinim toplanması davranışını araştırmışlardır. İki tip yükleme durumu için deney yaptılar. İlk yükleme durumunda, gerinim toplanmasında maksimum gerilme seviyesi çekme testinde gerinimdeki gerilmeye eşittir. İkinci tip yükleme durumunda, gevşemeden (relaxation) 35 dakika sonra %1 gerinimdeki gerilme değerine eşittir. İlk yükleme durumunda, gerinim toplanması oda sıcaklığında oluşmuş, yüksek sıcaklıkta yapılan testlerde gerinim toplanması oluşmamıştır. Yükleme hızının azalması ile gerinim toplanması miktarı artmıştır. İkinci tip yükleme durumunda, oda sıcaklığında yükleme hızı ile gerinim toplanması arasında ilişki gözlemlenmemiştir. Bu durum, gevşeme boyunca overstress teorisine dayanan viskoplastisite modelinin viskoz parçasının gerilmeye katkısı ile açıklanır. Kısa süreli elastik olmayan deformasyonun

eksikliği, yüksek sıcaklıkta hızdan bağımsızdır. Bunun sebebi, muhtemelen, *yaşlanma gerinmesidir* (aging strain).

FBR santral elemanlarında, yapı elemanı olarak 316FR paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Malzeme yüksek sıcaklığa ve çevrimsel yüklemeye maruz kalır. Bu elemanların tasarımında, sürünme ve yorulma hasarı hesaba katılmalıdır. 316FR paslanmaz çeliği kullanılarak, yorulma ve sürünme-yorulma testleri yapılmış, gerinim toplanmasının yorulma ve sürünme-yorulma üzerindeki etkisi açıkça görülmüştür. Basınç yönünde, hasar süresinde gerinim toplanmasında azalma olmamasına rağmen, çekme yönündeki gerinim toplanması küçük gerinim aralığında büyük uzama için hasar süresinin azaldığı görülmüştür [2].

Gao ve arkadaşları [3], yüksek sıcaklıklarda (300°C , 600°C , 700°C) SS304 paslanmaz çeliği tek eksenli çevrimsel yükleme durumu için, gerinim toplanmasını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Yüksek sıcaklıklar için yapılan deneyler, çevrim sayısı arttıkça malzemenin pekleştiğini göstermektedir. Malzemenin mekanik davranışı, gerinim hızı ($\dot{\epsilon}$) ve yükleme geçmişine bağlıdır. Ortam sıcaklığının artmasıyla, malzemenin yükleme geçmişine etkisi azalmaktadır. Gerinim toplanma miktarı ve yükleme hızı artması ile, ortalama gerilme ve gerilme genliğinin orantılı olarak arttığı görülmüştür. Viskoplastik bünye modeline sıcaklık terimi eklediler. SS304 paslanmaz çeliğinin tek eksenli yüklemede gerinim toplanmasının sayısal simülasyonu yapılmış ve yüksek sıcaklıklarda deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının yakın olduğu görülmüştür.

Yung-Chuan Chiou [4], bu çalışmada 304 paslanmaz çeliğinin çevrimsel yüklemedeki deformasyonunu ve yorulma ömrünü deneysel olarak araştırmıştır. Gerinim genliğini hesaba kattıkları çalışmada 304 paslanmaz çeliği için çevrimsel yükleme için gerilme eğrileri elde etmişlerdir. Çalışmada kullanılan istatistiksel analiz sonuçları ortaya çıkan yorulma ömrü sonuçlarından elde edilen hasar parametresi, SWT (Smith-Watson-Topper) modelinden elde edilen hasar parametresinden daha doğru sonuçlar vermiştir.

Xia ve arkadaşları [5], ASTM A516'ya göre 70 kalite çeliği, gerilme kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz kaldığında yorulma testleri yaparak detaylı sonuçlar sunmuştur.

Farklı ön yükleme prosedürleri kullanılarak malzemenin yorulma ömrü üzerindeki gerinim toplanması etkisi ile ortalama gerilmenin etkisi ayrılmıştır. Enerji tabanlı tahmini ömür kriteri genişletilerek içine ortalama gerilmeyi ve gerinim toplanmasının etkilerinin ikisi birden katılmıştır. Bu test sonuçları ile teorik tahminler arasında karşılaştırma yapıldığında sonuçlar yakın çıkmıştır.

Kang ve arkadaşları [6], oda sıcaklığında 25CDV4.11 çeliği ve SS304 paslanmaz çeliğinin, gerinim toplanması ve hasar davranışını, tek eksenli çevrimsel testler ile çevrimsel gerinim toplanması karakteristiğini deneysel olarak araştırmışlardır. Malzemelerin çevrimsel pekleşme - yumuşama özellikleri tek eksenli çevrimsel gerinim altında gözlemlenir ve sonra malzemelerin gerinim toplanması ve hasar davranışları çevrimsel gerilme etkisi için detaylı incelemişlerdir. Asimetrik çevrimsel gerilmeye maruz kalan malzemelerin gerinim toplanması ve hasar davranışı, gerilme genliğinin ortalama gerilme üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Malzemelerin gerinim toplanması ve hasar davranışları, çevrimsel yumuşama - pekleşme özelliklerini ve çevrimsel yüklemde gerilme değerine fazlasıyla bağımlılığı içerir. Deneysel sonuçlar malzemenin çevrimsel gerilme altında hasar davranışını anlamak için yararlıdır.

X.Chen ve arkadaşları [7] , 63Sn-37Pb lehim alaşımı ile bir dizi çok eksenli gerinim toplanması deneyi yapmıştır. Gerinim toplanması oranı her yükleme adımında sabit tutulmuş, sabit eksenel gerilme ve çevrimsel kayma gerinim hızı deneylerle gösterilmiştir.

Kang ve arkadaşları [8], farklı kristal yapılarıdaki metallerin tek eksenli gerinim toplanması davranışını oda sıcaklığında gerilme kontrollü olarak sıfır olmayan ortalama gerilmelerde çevrimsel basma testleri yapmışlardır. Test edilen metal malzemeler 316L paslanmaz çeliği, saf bakır, saf alüminyum ve 0.02 karbonlu çeliktir. Bu testlerde tek eksenli gerinim toplanmasının, ortalama gerilme, gerilme genliği ve yükleme hızına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Dislokasyon hareketlerindeki değişim farklı gerinim toplanması davranışlarına sebep olduğu görülmüştür.

Shashwat ve Somnath [9] yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin çevrimsel yüklemde gerinim toplanması için kristal plastisiteye dayanan sonlu elemanlar modeli hazırlamışlar ve yorulma ömür testleri yapmışlardır. Mikroyapıda gerinim

toplanmasında çekirdekdeki önemli çatlaklar tahmin edilebilmiştir. Toplam ömür mikroyapıdaki sünek kırılmanın büyümesi ile kısıtlanmıştır ve buradaki simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Kang ve arkadaşları [10] SS304 paslanmaz çeliği tek eksenli gerinim kontrollü tekrarlı yüklemeye mazru bırakılarak, gerinim genliği, ortalama gerinim, sıcaklık ve yükleme geçmişini deneysel olarak araştırmışlardır. Aynı gerilme seviyesinde çok eksenli gerinim toplanmasının tek eksenli gerinim toplanmasından daha az olduğu ve bunun büyük ölçüde ortam sıcaklığına bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Chen ve arkadaşları [11] S45C çeliği için farklı durumlarda yüklemeye maruz bırakarak deney yapmışlardır. Bunlar nonproportional eksenel-burulma yüklemelerdir. Kinematik pekleşme kuralını düzenleyip yeni bir model önermişlerdir. Bunun sonucunda çok eksenli gerinim toplanması davranışını, yüksek sayıda tekrar için deneysel sonuçlarla doğrulanmışlardır.

Tao ve Xia [12], epoxy reçinenin gerinim toplanması davranışını ve yorulma ömrüne etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Yapılan bütün yorulma testlerinde epoxy reçine gerilme kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz kalmıştır. Bütün testler sırasında gerilme-gerinim verileri temassız şekil değişimi ölçen kontrol sistemi ile kayıt edilmiştir. Testlerde gerinim toplanması miktarının gelişimi, gerinim aralığı ve gerinim enerjisi yoğunluğu çeşitli ortalama gerilmeler ve gerilme genliklerinde yapılan testlerdeki gerilme-gerinim verisinden elde edilmiştir. Testler sonucu gerinim toplanması miktarı ve yükleme hızı ile ortalama gerilme ve gerilme genliği arasında bağlantı ortaya çıkmıştır. Testlerin yorulma süreleri ile epoxy reçinenin gerinim kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz kaldığındaki test sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan epoxy reçinenin gerinim toplanması davranışını yorulma ömrüne etkisi açık değildir. Yükleme yapılmadan çevrim bir süre devam ettikten sonra yapılan yorulma testleri ile epoxy reçinenin mekanik özellikleri deneysel olarak gözlemlenmiştir. Polimerlerin gerinim toplanması davranışını tam olarak anlamak için birçok araştırma gereklidir. İlaveten polimer malzemelerin yorulma ömrüne gerinim toplanmasının etkisi bildiğimiz kadarıyla yayınlanmamıştır. Bu aşağıdaki iki faktörle ilgili olabilir. İlki, geleneksel şekil değişim ölçen ekstensometre gibi cihazların yumuşak malzemeler için numune

yüzeyinde oluşan aşınmanın yorulmayı hızlandırmasından dolayı yorulma testlerine uygun olmamasıdır. Bu yüzden polimer malzemelerin yorulma testlerinde şekil değişim gelişmesinin hassas ölçümü zordur. İkincisi, gerinim toplanmasının etkisi genellikle ortalama gerilme etkisiyle birleşmiştir. Bu iki etkinin ayrılması deneysel stratejik tasarımı zorlaştırmaktadır.

Chen ve Hui [13], basınç altındaki PTFE malzemesi için gerilme-gerinim ve gerinim toplanması davranışı cevabının yükleme hızına bağımlılığını incelemiştir. PTFE'nin mekanik özellikleri düşüktür, termal yayılması yüksektir ve sürünmede deformasyonu yüksektir. PTFE'nin gerinim toplanması davranışındaki yükleme hızının etkileri ortalama gerilme ve gerileme genliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışma göstermiştir ki PTFE hıza bağımlı bir malzemedir ancak yükleme hızı 40 N/s den daha yüksek olduğunda yükleme hızına bağımlılık ortadan kalkar. Yükleme hızı azaldığı kadar gerinim toplanması da artar. Ortalama gerilme arttırılarak yapılan testlerde gerinim toplanması miktarı ve yükleme hızı aynı oranda artar.

Chen ve Hui [13] PTFE'yi basmaya zorladıkları zaman gerilme-gerinim karakteristiği ve gerinim toplanması davranışı yükleme hızına bağlı olduğunu görmüşlerdir. PTFE'nin gerinim toplanması davranışında ortalama gerilme ve gerilme genliğine yükleme hızının etkisini araştırmışlardır.

Zhang and Chen [14] PTFE ile çok eksenli gerinim toplanması testleri yapmışlardır. Silindirik numune sabit eksenel gerilme ve gerinim kontrollü tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Eksenel gerilmenin kesme şekil değişim hızına ve miktarına PTFE'nin gerinim toplanması davranışının yükleme geçmişine etkisini araştırmışlardır. Gerinim birikimi miktarı arttıkça sabit eksenel gerilme ve kesme şekil değişim miktarı artar veya kesme şekil değişim hızı azaldığını göstermişlerdir.

Liu vd [15], Polymethyl methacrylate (PMMA)'nın gerinim toplanmasının gelişimi farklı sıcaklıklarda ve gerilmelerde deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada polimerlerin termal aktivasyon işlemi boyunca plastik deformasyonları tanımlamıştır. Model ile PMMA'nın deneysel gerinim toplanması verileri karşılaştırılmıştır.

1.1.2 Modelleme Çalışmalarını İçeren Literatür Özeti

Hassan ve arkadaşları [16], boru hatlarındaki sistemlerin sismik veya diğer çevrimsel yüklere maruz kaldığında oluşan gerinim toplanmasını araştırmışlardır. Bu durum yorulma ömrünü azaltarak boru hatlarında arızaya neden olur buna gerinim toplanması yorulması da denir. Boru hatlarında ve sistemlerde kullanılan ticari sonlu elemanlar kodları gerinim toplanması cevabı için yeterli değildir. Bunun nedenleri bünye denklemlerinin yetersizliği ve mevcut analiz kodlarının eksikliğidir. Bu eksikliğin üstesinden gelmek için geliştirilmiş bir plastisite modeli Armstrong Frederick kinematik pekleşme kuralı ve Drucker-Palgen plastik modülü denkleminde oluşan malzeme modeli ANSYS kodunun içine katılmıştır.

Bari ve Hassan [17], gerinim toplanmasının modellemek için yaptıkları araştırmalarda tek eksenli ve iki eksenli gerinim toplanması cevaplarını yanıtlamak için Chaboche, Ohno-Wang, McDowell, Jiang-Sehitoglu, Voyiadjis-Basuroychowdhury ve AbdelKarim-Ohno tarafından geliştirilen modelleri incelemişlerdir. Akma yüzeyinde plastik yükleme boyunca şekil değişmediği varsayıldığından, gerinim toplanmasının tek eksenli yüklemde modellenmesinde plastisite modülü önemlidir. Tek eksenli cevaplardan kinematik pekleşme kuralının bütün parametreleri belirlenmiş ve buradan plastisite modülü hesaplanmış ve daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. Çok eksenli yüklemde gerinim toplanması yanıtlarında kinematik pekleşme kurallarının önemi büyüktür. Bu birçok araştırmacıyı kinematik pekleşme kuralı içine çok eksenli yüklemeye ilgili terimleri ve parametreleri dahil etmeye motive etmiştir. Bu çalışmada pekleşme kuralları düzenlenmeye çalışılmış ve gerinim toplanması yanıtlarını modellemek için modelin içine dahil edilerek geliştirilmiştir. Düzenlenmiş kinematik pekleşme kuralında Chaboche ve Delobelle vd modelleri kullanılmıştır.

Çolak'ın çalışmasında [18] orantısız olmayan yükleme ve simetrik olmayan gerilme kontrollü yüklemeye maruz kalan CS1026 karbon çeliğinin gerinim toplanması davranışı, "overstress" kavramına dayanan viskoplastisite teorisi kullanılarak modellenmiştir. Tek ve çok eksenli orantısız olmayan yüklemde CS1026 karbon çeliğinin davranışları kinematik pekleşme kuralları, klasik kinematik pekleşme, Armstrong-Frederick tarafından sunulan kinematik pekleşme Burlet-Cailletau

kinematik pekleşme kuralı ve bunun düzenlenmiş halidir. İncelenen yükleme koşulları, ortalama gerilme sıfır olmadığında çok eksenli gerilme kontrollü yükleme içerir ve sabit basınç altındaki kalın cidarlı silindirik test numunesinin eksenel gerilme kontrollünü içerir.

Sayısal sonuçlar Hassan ve arkadaşları [19], [20]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. İnce cidarlı tüp, tek eksenli gerilme kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz kaldığında ortalama gerilmenin sıfırdan farklı olduğu durumda ve eksenel gerilim kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz kaldığında sabit basınçta overstress kavramına dayanan viskoplastisite teorisi kullanılarak modellenmiştir. CS1026 karbon çeliğinin gerilim toplanması davranışının tek eksenli ve çok eksenli non-proportional yüklemelerde Armstrong-frederick ve Burlet Cailletaud kinematik pekleşme kuralları gerilim toplanmasının modellenmesine etkisi araştırılmıştır. Basitleştirilmiş VBO model tek eksenli yüklemelerde gerilim toplanması için iyi sonuç vermiştir.

Firat [21] tipik mühendislik metallerinin çok-eksenli çevrimsel dinamik yüklemeler altında deformasyonlarının benzetimine yönelik literatürde önerilen bünye modellerini incelemiştir. Diğer çalışmasında [22] ise iç bünye değişkenleri termodinamik kuramına dayanan gözlemsel bünye modellerinden, Lineer Olmayan Kinematik Pekleşme (LOKP) plastisite modellerini incelemiştir. Üç farklı lineer olmayan kinematik pekleşme modeli kullanılarak eksenel gerilimler hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarla ölçülen gerilimlerle modelle hesaplanan gerilimlerin niteliksel ve niceliksel olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

A. Fatemi ve arkadaşları [23], çalışmasında yorulma hasarının birikimi kavramının yaklaşık 80 yıl önce Palmgren'in yapmış olduğu çalışmaya dayandığını ve bu konunun öneminin son yıllarda arttığı anlatılmaktadır. Sürdürülen araştırmalarla birçok hasar modeli geliştirilmiştir. Çalışmasında bu birikimli hasar teorilerini incelemiştir.

Chen ve Jiao [24], farklı çok eksenli yüklemeler altında Ohno wang kinematik pekleşme kuralına çok eksenli parametre ekleyerek kinematik pekleşme kuralı geliştirerek geçerli ve uygulanabilir gerilim toplanması sağlamışlardır. Modifiye model 1Cr18Ni9Ti paslanmaz çeliğinin gerilme-gerilim davranışı uygun bir doğrulukta öngörmüştür.

Chen ve arkadaşları [25] S45C çeliği için eksenel-burulma yüklemeleri altında dört tip bünye denklemi ile gerinim toplanması davranışını tahmin etmişlerdir. Bu dört model Ohno-Wang, Mc-Dowell, Jiang Sehitoglu ve Abdul Karim-Ohno kinematik pekleşme modelleridir. Ohno-Wang Kinematik pekleşme kuralının modifikasyonu ile gerinim toplanmasını tahmin etmek için yeni bir model önermişlerdir. Yeni modifiye Ohno-Wang modeli ilave edilen parametreler çalışmada anlatılmıştır.

Avanzi'ye [26] göre ileri plastisite modellerinin tahmini UHMWPE'nin tekrarlı yüklemelerde gerilme-gerinim davranışını tahmin edilmesini sağlamaktadır. Malzeme simetrik olmayan tekrarlı yük altında test edilmiştir. Sabit durum şartı bir kaç yüz tekrardan sonra gerinim yumuşaması ve gerilme-gerinim histerisizi gözlemlenmiştir.

Krzypow and Rimnac [27] tek eksenli çekme/basma tekrarlı yüklemesi için UHMWPE'nin gerilme-gerinim davranışını araştırmışlardır. Bergström ve arkadaşları [28], monotonik ve tekrarlı yüklemelerde UHMWPE'nin davranışını farklı malzeme modelleri için modellemişlerdir.

Avanzi [29], UHMWPE'nin tek eksenli tekrarlı şekil değişiminde farklı gerinim kontrollü testlerle mekanik yanıtlarına etkisini araştırmıştır. Oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda tekrarlı yükleme davranışını incelenmiştir. Sadece monotonik yüklemelerde Ramberg-Osgood pekleşme kuralı kullanılarak modellenmiştir.

Yapılan literatür taramasında gerinim toplanması davranışını ile ilgili polimerik malzemelerin üzerine yapılan çalışmaların az sayıda olduğu görülmüştür. Literatürde mevcut modellerin hiçbirisi gerinim toplanması davranışını modelleyememektedir. Bu çalışmada tek ve iki eksenli yükleme halleri için gerinim toplanması davranışını modellenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu doktora tez çalışmasında, polimerik malzemelerin çevrimsel yükleme halindeki mekanik davranışlarının modellenmesi için viskoelastik-viskoplastik model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada malzeme modeli olarak “overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında kullanılan malzeme özellikle biyomekanik alanında (protez uygulamaları) yaygın kullanıma sahip olan çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) dir.

Literatürdeki polimerik malzemeler ile ilgili çalışmaların çoğunluğu monotonik yüklemeler ile ilgilidir. Monotonik yükleme altındaki davranışların modellenmesi konusunda bile zorluklar mevcuttur. Bu çalışmada çevrimsel yükleme altındaki davranışlar modellenmiştir. Tek eksenli gerinim kontrollü çevrimsel yüklemelerde pekleşme veya yumuşama gözlemlenirken, gerilme kontrollü çevrimsel yüklemelerde gerinim toplanması (ratcheting) gözlemlenmektedir. Gerinim toplanması; ince cidarlı basınçlı tüplerde, boru hatlarında, çevrimsel yüklemeye maruz elemanlarda (protez, çeşitli makine elemanları) hasara neden olmaktadır. Bu parçaların servis şartları altında gerilmelerinin ve deformasyonlarının doğru tahmini, parçaların tasarımı ve analizi için önemlidir. Çünkü çalışma sırasında çevrim sayısının artmasıyla gerinim birikimi artar, bu ise malzemenin yorulma ömrünün azalmasına sebep olur.

Bu tez çalışması, giriş bölümü dahil yedi bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümler: İkinci bölümde, polimerik malzemeler ve UHMWPE hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, doktora yürütücüsü Prof.Dr. Özgen Ümit Çolak'ın Tübitak 1001 projesi kapsamında North Carolina Üniversitesi'nde Prof.Dr. Tasnim Hassan ile yaptığı çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmalarda, UHMWPE'nin tek ve çok eksenli yüklemelerdeki davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, polimerik malzeme davranışını açıklamak için kullanılan genel malzeme modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) tanıtılmıştır.

Beşinci bölümde kinematik pekleşme kurallarından bahsedilerek gerinim toplanmasına etkisi açıklanmıştır.

Altıncı bölümde, polimerik malzemelerin çevrimsel yüklemelerdeki gerinim toplanması davranışının modellenmesi ile ilgili sonuçlar verilmiştir. Modelleme sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise tez çalışmasının sonuçları verilmiştir.

1.3 Orjinal Katkı

Çevrimsel yüklemeye maruz kalan elemanlarda (protez ve çeşitli makine elemanları) hasara neden olan gerinim toplanmasının modellenmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. UHMWPE'nin tek ve çok eksenli çevrimsel yükleme şartlarındaki mekanik davranışları, "overstress"e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile modellenmiştir. VBO modelinin mevcut hali, tek ve çok eksenli gerilme kontrollü çevrimsel yüklemelerde ortaya çıkan ve hasara neden olan gerinim toplanması (ratcheting) olayını tam olarak tanımlayamadığından, VBO modeli modifiye edilmiştir. Yapılan literatür taramasında, literatürde yer alan mevcut modellerin gerinim toplanması olayını yeterince modelleyemediği görülmüştür. Özellikle çevrimsel yüklemeye maruz kalan kalça ve diz protezlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi açısından bu çalışma önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışmayla farklı yükleme şartlarında, gerinim toplanmasının modellenmesi için gereken malzeme modeli geliştirilmiştir.

POLİMERİK MALZEMELER

2.1 Polimerik Malzemeler

Polimerler, aynı ve farklı çok sayıda atomik grupların kimyasal bağlarla az veya çok düzenli bir biçimde bağlanarak oluşturduğu uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. 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 [30], [31].

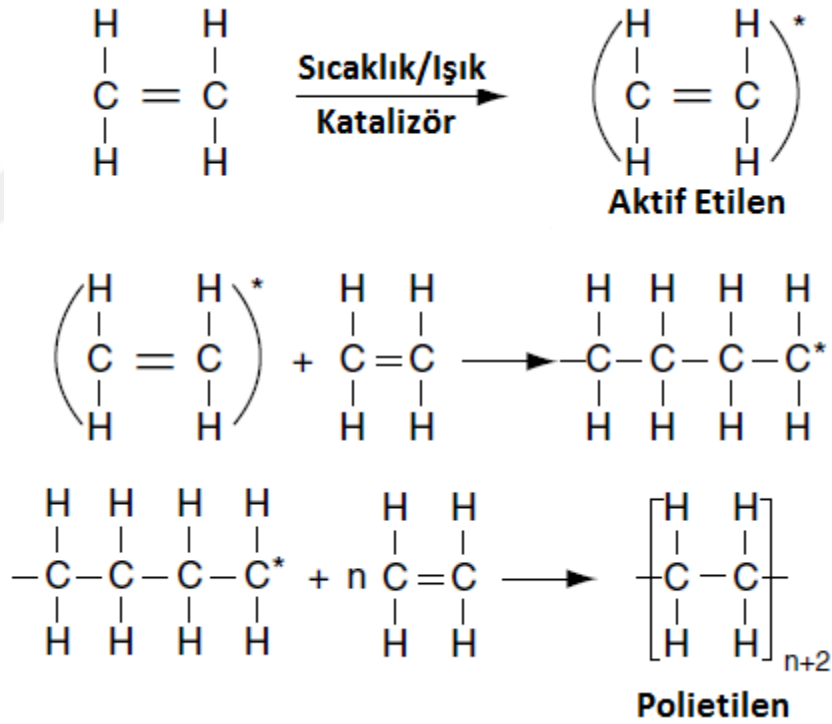
Karbon atomlarının birbirleri ile olan bağı, makromolekül zincirinin omurgasını (backbone) meydana getirir, diğer atomlar ise (hidrojen, oksijen...) bu omurgaya dizilirler. Uygulamada, makromoleküllerin tek bir zincir olarak değil çok sayıda makromolekül birbiri içinde karışmış şekilde üretilebilirler. Bu iç içe geçmiş karmaşık yapı spagettiye benzetilebilir ve Şekil 2.1’de gösterilmiştir [32].



Şekil 2. 1 Polimerlerin ağ yapısı [32]

Polimer kelimesi latineden türetilmiştir; “poly” çok anlamındadır, “meros” ise parça anlamındadır. Polimerler çok sayıda tekrarlanan “mer” veya monomer denilen basit birimlerden oluşur. “Mer” kelimesi de Latince’den türetilmiş, tek anlamındadır [30], [33].

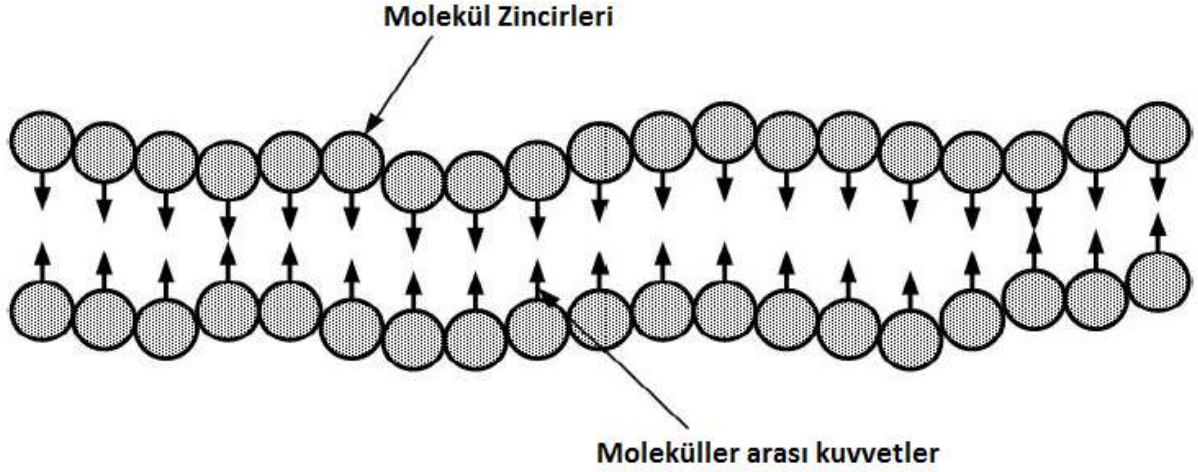
Monomer moleküllerinin polimer moleküllerine dönüştürülmesi işlemine polimerizasyon denir. Bir monomerin polimerizasyonu ile bu monomeri çok sayıda içeren polimer oluşur. Örneğin monomer molekülü olan etilen ısı, ışık veya kimyasal maddeler etkisi ile birbirlerine zincirler şeklinde bağlanması sonucunda, etilenle hemen hemen aynı kimyasal özellikler sahip, çok daha yüksek molekül ağırlıklı polietilen elde edilmiş olur. Şekil 2.2’de etilen monomerinden polietilen polimerinin elde edilmesi adım adım şematik olarak gösterilmiştir. n polimerizasyon derecesidir ve bir polimer zincirindeki monomerin tekrarlanma sayısını gösterir [30].



Şekil 2. 2 Etilenden adım adım polimer elde edilmesi [30]

Polimerik malzemelerdeki bağ kuvvetleri, sadece molekül içerisindeki atomlar arasında değil aynı zamanda komşu moleküller arasında da vardır. Komşu moleküller arasındaki bağların temelini hidrojen (kovalent) ve van der Waals bağları oluşturur. Bu bağlar

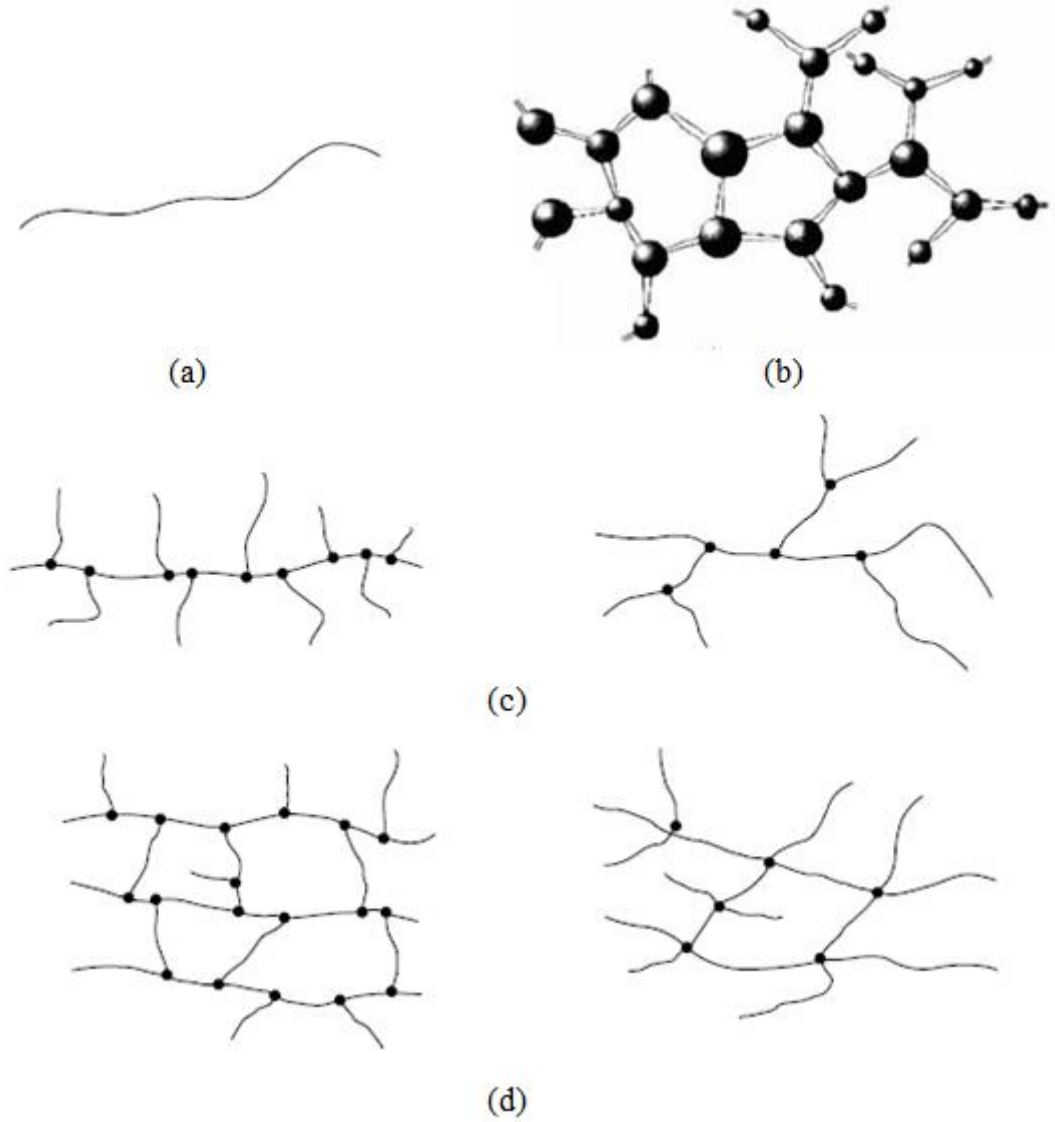
moleküllerin birbirine göre hareket etmesini engelleyerek yüke karşı direnç oluştururlar. Polimerik malzemelerin mukavemet değerlerinin büyük kısmını makromoleküller arasındaki bu bağlar oluşturur. Bununla birlikte moleküller arası kuvvetler kovalent bağlardaki kuvvetler kadar büyük değildir. Yüke maruz kaldığında, ilk olarak moleküller arasındaki bağlar kopar. Şekil 2.3’de moleküller arası kuvvetler görülmektedir [33].



Şekil 2. 3 Moleküller arası kuvvetler [33]

Polimer moleküllerinin yapısal şekline bağlı olarak polimerler; lineer, dallı ve çapraz bağlı zincir yapıları şeklinde sınıflandırılabilir. Şematik gösterimleri Şekil 2.4’de verilmiştir. Lineer yapıdaki polimerler tek bir zincirin birbirine düz bir halde bağlanmasıyla oluşmaktadır. Lineer bağlı polimerlere örnek olarak polietilen (PE), polivinilklorür (PVC), polistiren (PS), polimetilmetakrilat (PMMA), poliamid (nylon) (PA) verilebilir. (Şekil 2.4 a). Ağ yapısındaki polimerler “mer” parçaları üç adet aktif kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır Bunların yüksek çapraz bağlı oldukları da söylenebilir. Epoksi (EP), poliüretan (PU) ve fenolformaldehit (PF) çapraz bağlı gruptandır. (Şekil 2.4 b). Dallı yapıda ise omurga zincirin çeşitli yerlerinde yan dallar vardır. Yan dallar ile zincir yoğunlaşması azalır bu durum polimer yoğunluğunun düşmesine neden olmaktadır. Dallı yapıdaki polimerlere örnek olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) verilebilir. (Şekil 2.4 c). Çapraz bağlı polimerlerde ise lineer zincirler belirli bölgelerde birbirine

kovalent bağlarla bağlanarak elde edilir. Kauçuk çapraz bağlı polimerdir (Şekil 2.4 d) [30], [34], [35].



Şekil 2. 4 Molekül zincirlerinin yapıları; (a) Lineer, (b) Ağ, (c) Dallı, (d) Çapraz bağlı ([30], [35])

2.2 Moleküller Arası Düzen

Polimerler katı, sıvı veya gaz çözeltileri halinde bulunabilirler. Bütün bu durumlarda farklı yapılar gösterirler. Yapıda polimerlerin makro yapısını belirleyen morfolojisi de önemlidir. Katı haldeki moleküllerde üç temel moleküller arası düzen vardır.

2.2.1 Amorf Polimerler

Çok miktarda dallanmış molekül zincirlerine veya uzun yan zincirlere sahip polimerlerin düzgün olmayan yapılarından dolayı belli bir hacime sıkışarak dizilebilmeleri zordur. Bu tip polimerlere amorf denir. Amorf polimerlerin molekül zincirleri genellikle yün yumağı karmaşık bir yapıda dizilmiştir ve spagetti demetine benzemektedir. Amorf polimerlerin mikroyapısı, katı faz deformasyon işlemi olarak ta bilinen haddeleme, çekme gibi üretim işlemlerini kapsamaktadır. Üretimleri sırasında sıcaklık ve basınç kadar malzemenin deformasyon durumu da değişkenlik gösterir [34].

Burada amorf polimerler ile ilgili bir literatür taraması yapılmıştır.

Brown ve Ward [36] polietilen terephtalete (PET), Arruda ve arkadaşları [37] ise polikarbonat (PC) ve polimetilmetakrilat (PMMA) üzerindeki başlangıç anizotropisinin etkisini araştırmışlar.

Capaldi [38] mekanik ön işlemler, örneğin su verme, yavaş soğutma gibi işlemlerden dolayı mekanik özelliklerde gözle görülen değişim olduğunu görmüştür.

Caddell ve Woodliff [39] yöne bağlı akma davranışını, hem başlangıç izotropisi için hem de ön şekil değiştirmeli amorf polimerler için araştırdılar. Çalışmalarında, başlangıçta izotropik malzemenin basma akma gerilmesinin uzama (extent) akma gerilmesinden yüksek olduğu, fakat çekme testindeki ön şekil değiştirmeli malzemelerin akma gerilmesinin gözle görülür olarak basma akma gerilmesinden daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Hassan vd [40] ve Stachurski [41], amorf polimerlerin deformasyon mekanizması hakkında bilgi edinmek amacıyla PMMA deneyleri yaparak plastik deformasyon gelişimini mikroyapı karakteristikliği açısından incelemişlerdir.

Capaldi vd [38] ve Lyulin vd [42], plastik deformasyon üzerindeki mikro yapının etkisini görmek için moleküler dinamik simülasyonları oluşturmuşlardır.

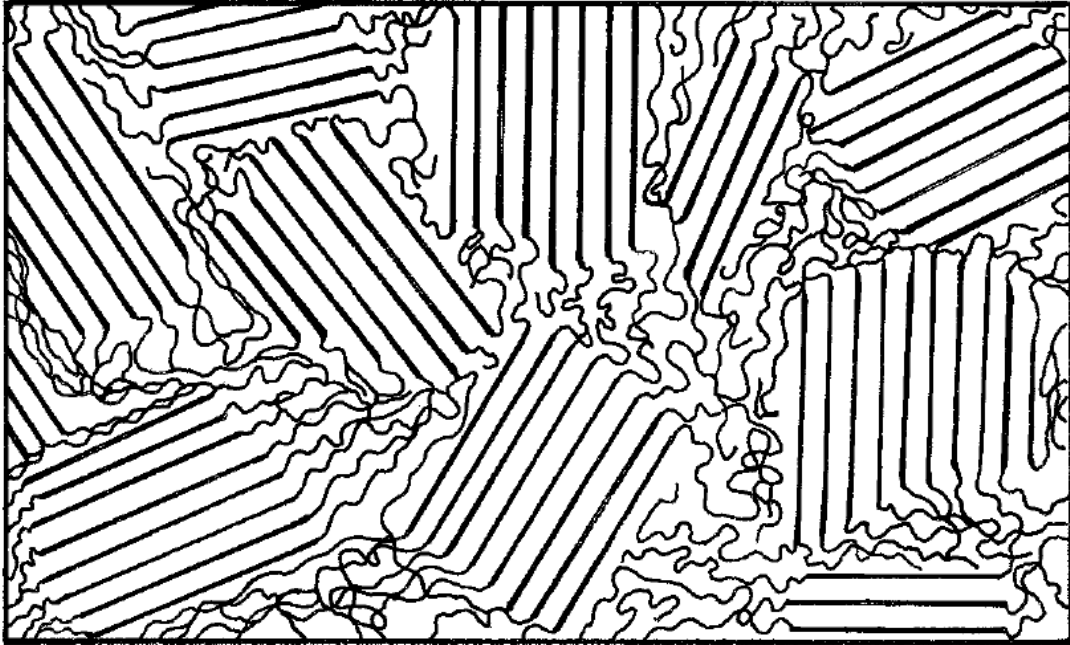
Heterojenlik sonucunda polimer malzemedeki mikroskobik kayma bantlarının yer aldığı bölgesel deformasyon oluşur. Bununla birlikte PMMA ve PS için kayma bantlarındaki şekil değişimini incelemek için basma testleri uygulanmıştır. Kayma bantlarının büyümesinin, ilk olarak amorf polimerlerinin içindeki plastik deformasyona bağlı

olduğunu, makroskopik kayma bantlarındaki plastik deformasyon sonrası makroskopik gerilmenin gözle görülür bir düşüş gösterdiğini belirtmişlerdir [43], [44].

2.2.2 Kristalin Polimerler

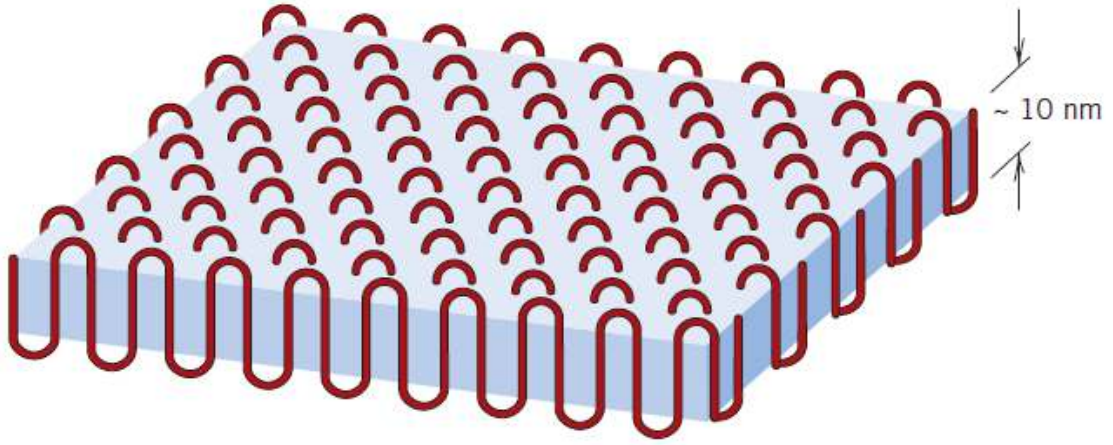
Kristalin polimerlerde atomlar belirli noktalara yerleşmiş ve hareketsiz bir düzen içine girmişlerdir. Polimerlerin kristallenebilme özelliğine bağlı olarak bu birim elemanlar daha büyük olabilir çeşitli biçimlerde yapısal şekiller oluşturmak üzere bir araya gelirler, bu polimerin morfolojisini belirler [31].

Polimerler katı halde iken genellikle tamamı kristal yapı yerine amorf ve kristal karışımı bir yapı gösterirler. Bu durum *kristalin polimerlerin* çeşitli parametrelere bağlı olarak belli bir kristallik yüzdesine sahip olduğunu gösterir. Morfolojik yapıyı açıklamak için çeşitli modeller vardır. “Fringed Micelle” modelinde polimer zincirlerinin belli segmentleri makroskopik yapı içinde belli noktalarda bir araya gelerek *kristalin* bölgeler oluştururlar (Şekil 2.5).



Şekil 2. 5 Fringed Micelle modeli [33]

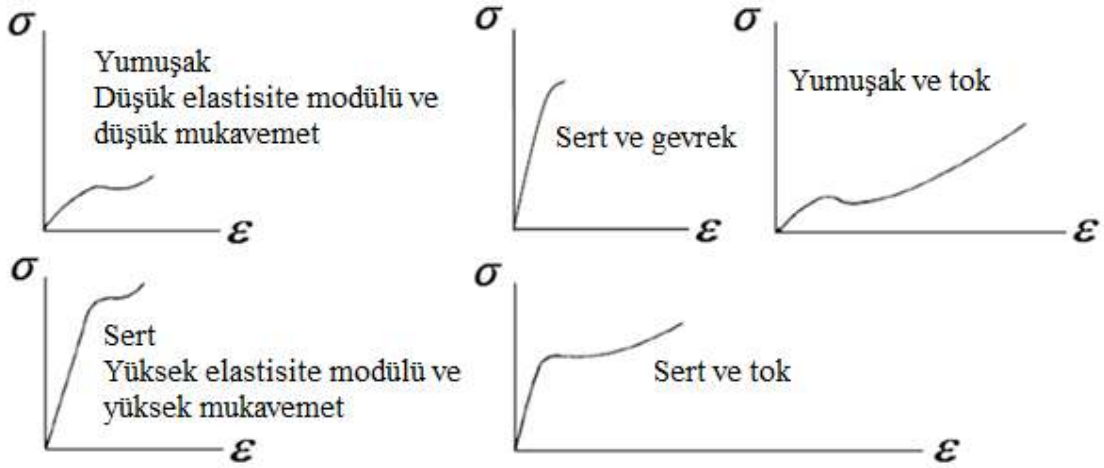
“Katlanmış zincir modeli”nde polimer zincirinin belli bölümlerde zincir katmanlar yaparak üç boyutlu “lameler” bir düzen içinde kristallenme oluştururlar (Şekil 2.6).



Şekil 2. 6 Katlanmış zincir (Chain-folded) modeli [35]

2.3 Polimerlerin Gerilme-Gerinim Eğrileri

Gerilme-gerinim eğrilerine bakarak polimerik malzemelerin özellikleriyle ilgili birçok bilgi edilebilir. Şekil 2.7’de polimerik malzemelerin tipik gerilme-gerinim eğrileri gösterilmiştir.



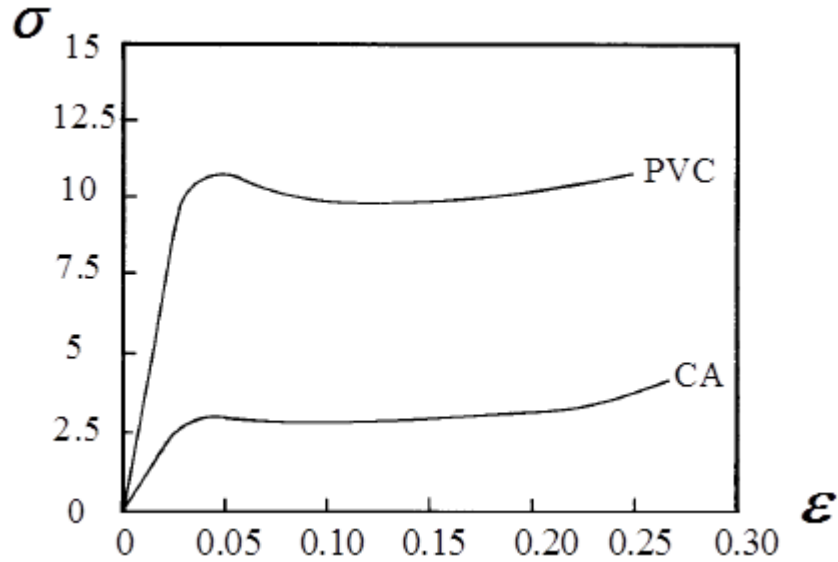
Şekil 2. 7 Polimer malzemelerin tipik gerilme-gerinim eğrileri [33]

Şekil 2.7’de verilen polimerik malzemelerin mekanik özellikleri çizelge 2.1’de verilmiştir [33].

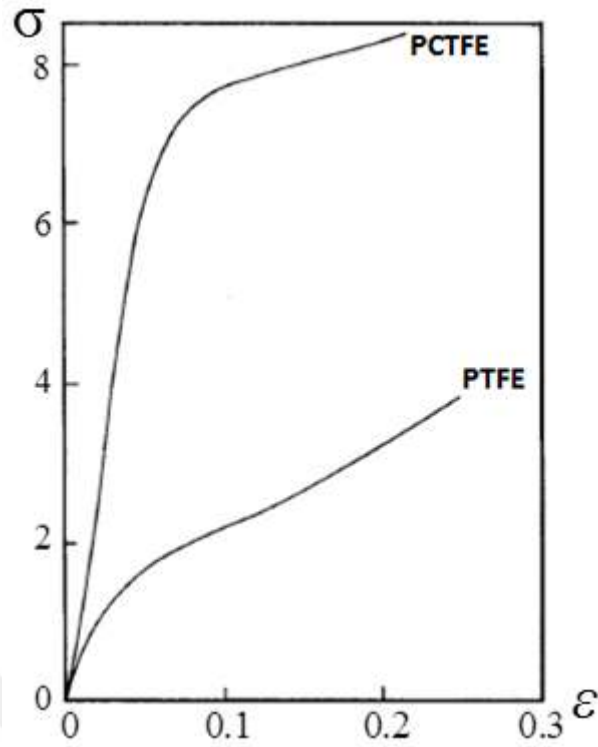
Çizelge 2. 1 Polimerik malzemelerin mekanik özellikleri [33]

Polimerik Malzemenin Gerilme-Gerinim Davranışı	Elastisite Modülü	Akma Gerilmesi	Kopma Mukavemeti	Kopma Uzaması
Yumuşak - düşük elastisite modülü ve düşük mukavemet	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
Sert ve gevrek	Yüksek	Yok	Yüksek	Düşük
Sert - yüksek elastisite modülü ve yüksek mukavemet	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Yumuşak ve tok	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek
Sert ve tok	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

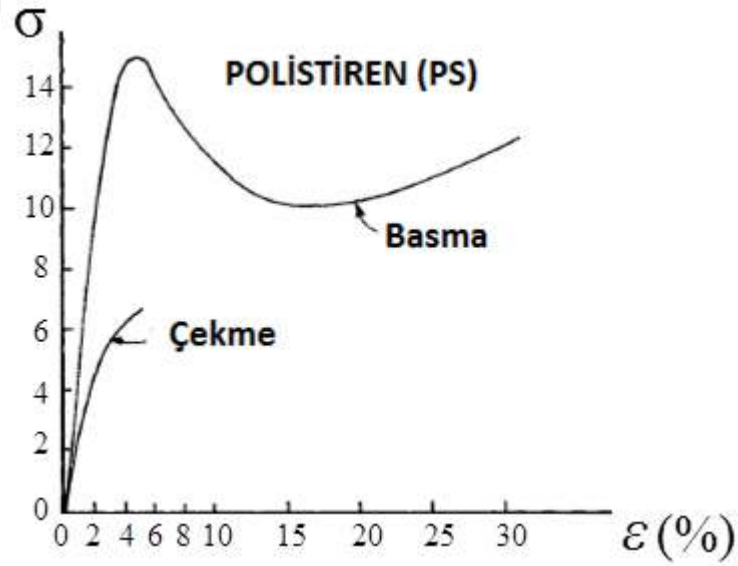
Şekil 2.8 ve 2.9 daki grafiklerde basma testindeki gerilme-gerinim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 2.8’de iki amorf malzemenin, Şekil 2.9’da ise iki kristalin polimerin gerilme-gerinim eğrileri görülmektedir. Şekil 2.10’da ise polistirenin çekme-basma etkisi için gerilme-gerinim davranışı gösterilmiştir.



Şekil 2. 8 İki amorf malzemenin gerilme-gerinim eğrisi: Polivinil klorür (PVC), Selülöz Asetat (CA) [33]



Şekil 2. 9 İki kristalin malzemenin gerilme-gerinim eğrisi: Polytetrafluoroethylene (PCTFE), Polychlorotrifluoroethylene (PTFE) [33]



Şekil 2. 10 Polistrenin gerilme-gerinim eğrisi [33]

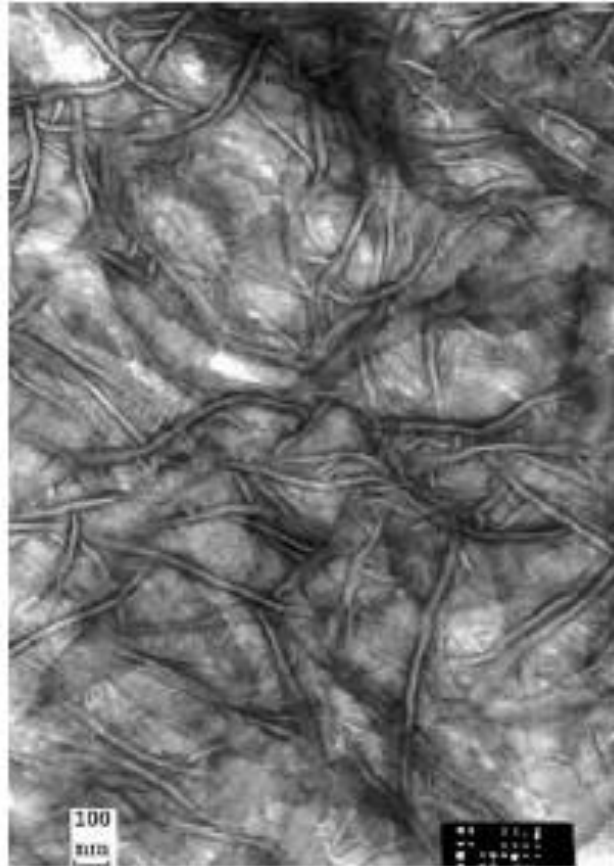
2.4 Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)

UHMWPE, yoğunluğu 0.930–0.935 g/cm³ arasında değişen ve molekül ağırlığı 2.106–6.106 g/mol arasında olan bir polietilen grubudur. Yüksek molekül ağırlıklarının anlamı

polimer zincirlerinin kristal yapı içinde çok sıkı bir biçimde yerleştiğidir. Polimer, çok serttir ve termoplastik malzemeler arasında en yüksek darbe direncine sahip malzemedir. Uzun zincirler, moleküller arası etkileşimi kuvvetlendirerek yükün polimer iskeletine daha etkin bir şekilde transfer edilmesine olanak verir. Bu durum, herhangi bir darbe dayanımı yüksek bir termoplastiğe kıyasla daha dayanıklı ve sert bir yapı sağlar. UHMWPE çok uzun zincirli polietilendir. Üretimde, genellikle *metallocene* katalizörler kullanılır.

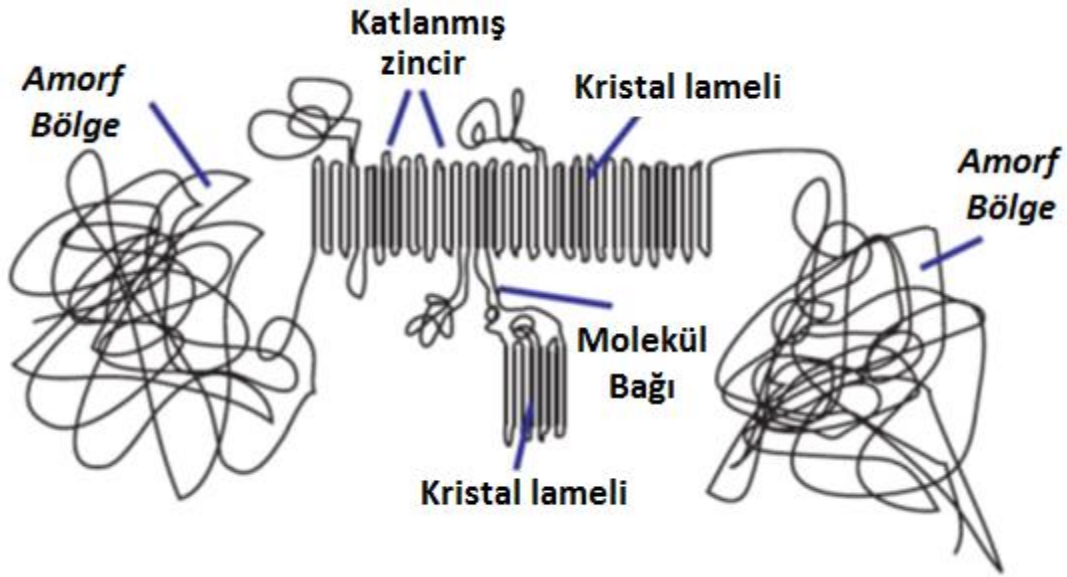
Bazıları özellikleri; çok yüksek darbe dayanımı, yüksek aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, yüksek kimyasal dayanım, su ve iklim koşullarına dayanım, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, titreşim sönümleme ve sessiz çalışma, çok iyi elektriksel yalıtım, metal ve ağaç işleme tezgahlarında kolay işlenebilme, çok düşük özgül ağırlığından dolayı ekonomik olması, insan sağlığına zararsız olması sayılabilir.

Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin, amorf ve kristal bölgelerinin görülmesi için Şekil 2.11’de elektron mikroskobuyla 16000 kat büyütülmüş şekli görülmektedir.



Şekil 2. 11 UHMWPE’nin elektron mikroskobundan alınan görüntüsü [45]

UHMWPE'nin morfolojik özelliklerin tümü, Şekil 2.12 'de şematik olarak gösterilmiştir [45].



Şekil 2. 12 UHMWPE'de kristal ve amorf bölgeleri gösteren şematik diyagramlar [45]

Çizelge 2.2'de UHMWPE'nin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir [45].

Çizelge 2. 2 UHMWPE'nin fiziksel özellikleri [45]

Mekanik Özellikler	UHMWPE
Molekül Ağırlığı (10^6 g/mol)	2-6
Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	125-138
Poisson Oranı	0.46
Özgül Ağırlık	0.932-0.945
Çekmede Elastisite Modülü (GPa)	0.8-1.6
Çekme Akma Dayanımı (MPa)	21-28
Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	39-48
Kopma Uzaması (%)	250-525
Çentikli İzod Darbe Dayanımı	> 1070
Kristalinite Derecesi (%)	39-75

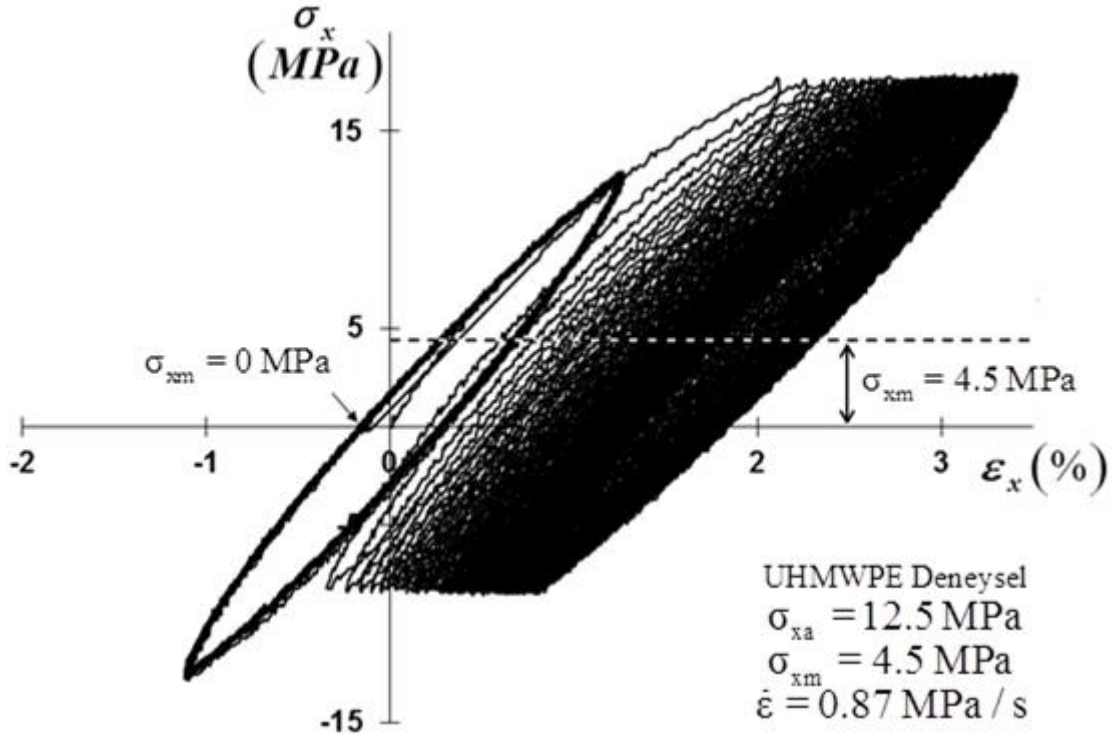
2.5 Gerinim Toplanması (Ratcheting)

Gerilme kontrollü çevrimsel yüklemeye maruz malzemelerde, ortalama gerilmenin sıfırdan farklı olduğu durumlarda ortaya çıkan gerinimdeki artış, gerinim toplanması (ratcheting) olarak adlandırılır. Gerinim toplanması tek eksenli, iki eksenli ve üç eksenli gerilme durumunda hem metalik hem de polimerik malzemelerde gözlemlenir.

2.5.1 Gerinim Toplanması Oranı

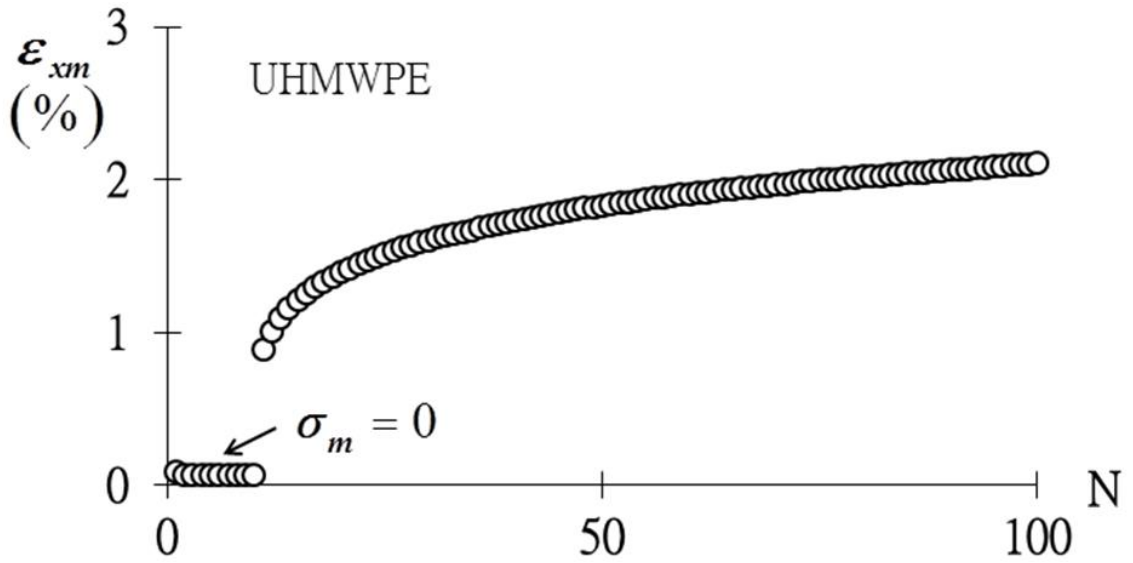
Her bir çevrimdeki maksimum ve minimum gerinim ($\epsilon_{\max}, \epsilon_{\min}$) değerleri dikkate alındığında *gerinim toplanması oranı*, $\epsilon_r = \frac{1}{2}(\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min})$ şeklinde tanımlanır. Gerilme kontrollü simetrik çevrimsel yükleme yapıldığında, ortalama gerilme (σ_m) sıfır olur. Bu durumda yani ortalama gerilme sıfır olduğunda, gerinim toplanması meydana gelmez ($\epsilon_r = 0$). Malzeme iç yapısında meydana gelen değişimler nedeniyle, yalnızca yumuşama (softening) veya pekleşme (hardening) olur. Simetrik olmayan gerilme kontrollü çevrimsel yüklemelerde ortalama gerilme sıfıra eşit olmadığında ($\sigma_m \neq 0$) gerinim toplanması meydana gelir. *Gerinim toplanması oranına, ortalama gerinim* de denilebilir ($\epsilon_r = \epsilon_m$).

Şekil 2.13 ve 2.14’de, Hassan ve ark. (2011) tarafından UHMWPE’nin gerinim ve gerilme kontrollü, tek eksenli çekme etkisi altında davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmaların sonuçları görülmektedir [46]. Çevrimsel çekme deneyleri, gerilme kontrollü olarak 10 çevrim tam değişken yükleme, ardından aynı numune kullanılarak 4.5 MPa’lık ortalama gerilme değerinde yine gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.13 de görüldüğü gibi, ilk 10 çevrimde ortalama gerilme sıfır olduğunda (tam değişken yüklemede) çevrim sayısı (N) artsa da gerinim toplanmasının olmadığı görülmektedir. Yükleme şekli genel değişken olduğunda gerinim toplanması gözlemlenmiştir. Malzemedan malzemeye, yükleme şekline bağlı olarak ilk çevrimlerde gerinimdeki artış fazla olurken çevrim sayısı arttıkça saturasyon (saturation) meydana gelir.



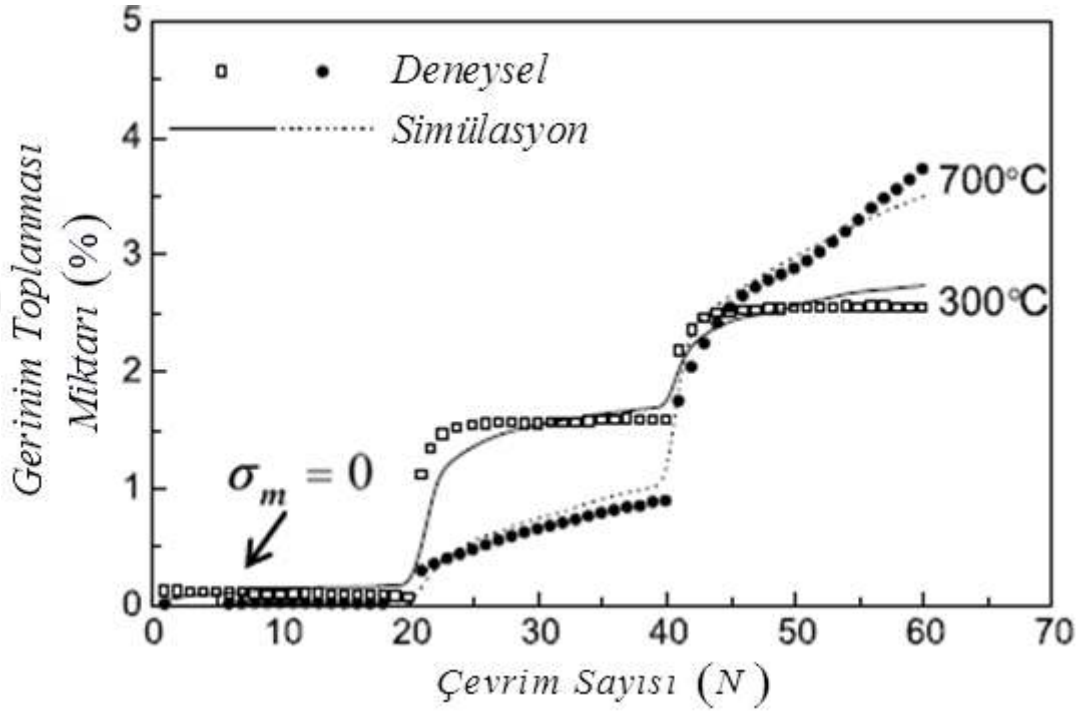
Şekil 2. 13 Gerilme-gerinim eğrisi [46]

Ortalama gerinimin (ε_{xm}) çevrim sayısı (N) ile değişimi Şekil 2.14’de verilmiştir. İlk 10 çevrimde tam değişken yükleme olduğu ve gerinim toplanmasının olmadığı görülmektedir. Ardından ortalama gerilme sıfırdan farklı olduğunda ($\sigma_m \neq 0$) eksenel gerinim çevrim sayısı ile artması ile gerinim toplanması oluşmaktadır.



Şekil 2. 14 % ε_{xm} - Çevrim sayısı eğrisi [3]

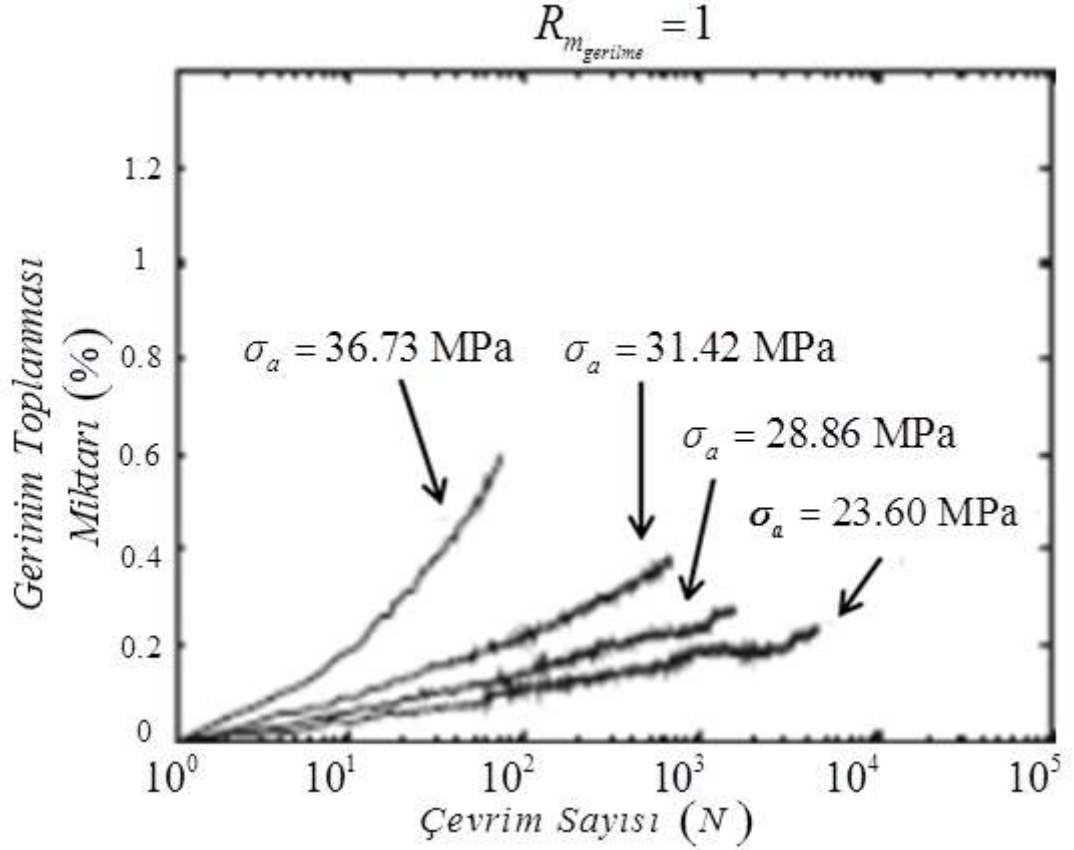
Şekil 2.15’de Gao ve ark. (2003) tarafından SS304 paslanmaz çeliğinin, gerilme kontrollü tek eksenli çevrimsel yükleme altında, yüksek sıcaklıktaki gerinim toplanması davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmaların sonuçları görülmektedir [3].



Şekil 2. 15 Gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [3]

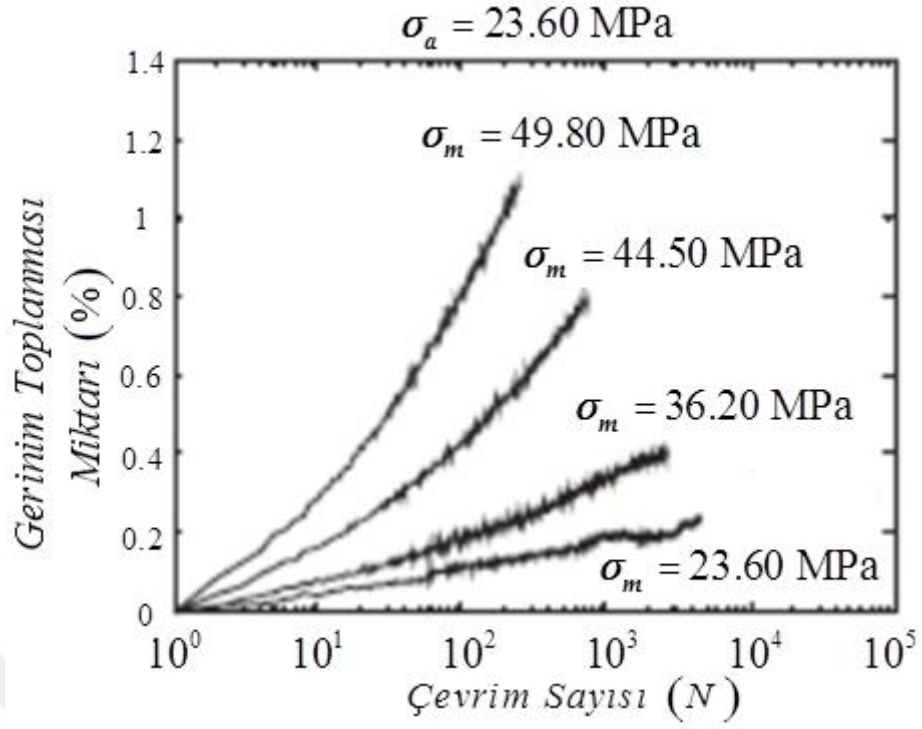
İlk 20 çevrimde tam değişken yükleme yapılmış ortalama gerilme sıfır olduğunda gerinim toplanması oluşmamıştır. Devamında yükleme şeklinin genel değişken olmasıyla gerinim toplanması oluşmaktadır.

Gerilme oranı $R_{m_{gerilme}} = \sigma_m / \sigma_a$ denklemi ile tanımlanmıştır. Gerinim birikimi testleri, farklı ortalama genliklerinde (σ_a ; 23.60 MPa, 28.86 MPa, 31.42 MPa, 36.73 MPa), ancak aynı gerilme oranında yapılmıştır. Testlerdeki gerilme oranı 1'e eşit alınmıştır ($R_{m_{gerilme}} = 1$). Bu durumda ortalama gerilme (σ_m), gerilme genliğine (σ_a) eşittir. Şekil 2.16'dan görüldüğü gibi yüksek gerilme genliğine sahip numune daha az sayıda çevrimde daha yüksek gerinim toplanması miktarına ulaşır. [12]

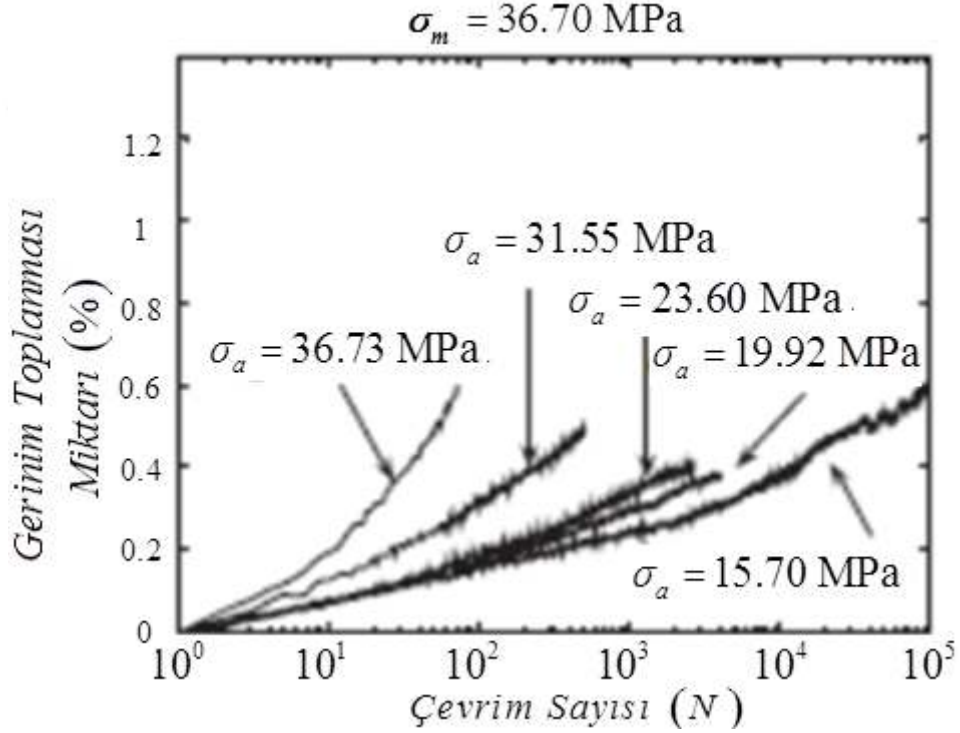


Şekil 2. 16 Gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [12]

Sabit gerilme genliğinde ($\sigma_a=23.60$ MPa), farklı ortalama gerilmelerde (σ_m ; 23.60 MPa, 36.20 MPa, 44.50 MPa, 49.80 MPa), gerinim hızı (ratcheting strain rate) ile ortalama gerilmenin artışı Şekil 2.17'de görülmektedir. Sabit ortalama gerilmede ($\sigma_m=36.70$ MPa), farklı gerilme genliklerinde (σ_a ; 15.70 MPa, 19.92 MPa, 23.60 MPa, 31.55 MPa, 36.73 MPa) yapılan deneylerin sonuçları Şekil 2.18'de görülmektedir. Burada gerinim hızının (ratcheting strain rate) artışı ile gerilme genliğinin artışı gözlemlenebilir [12].



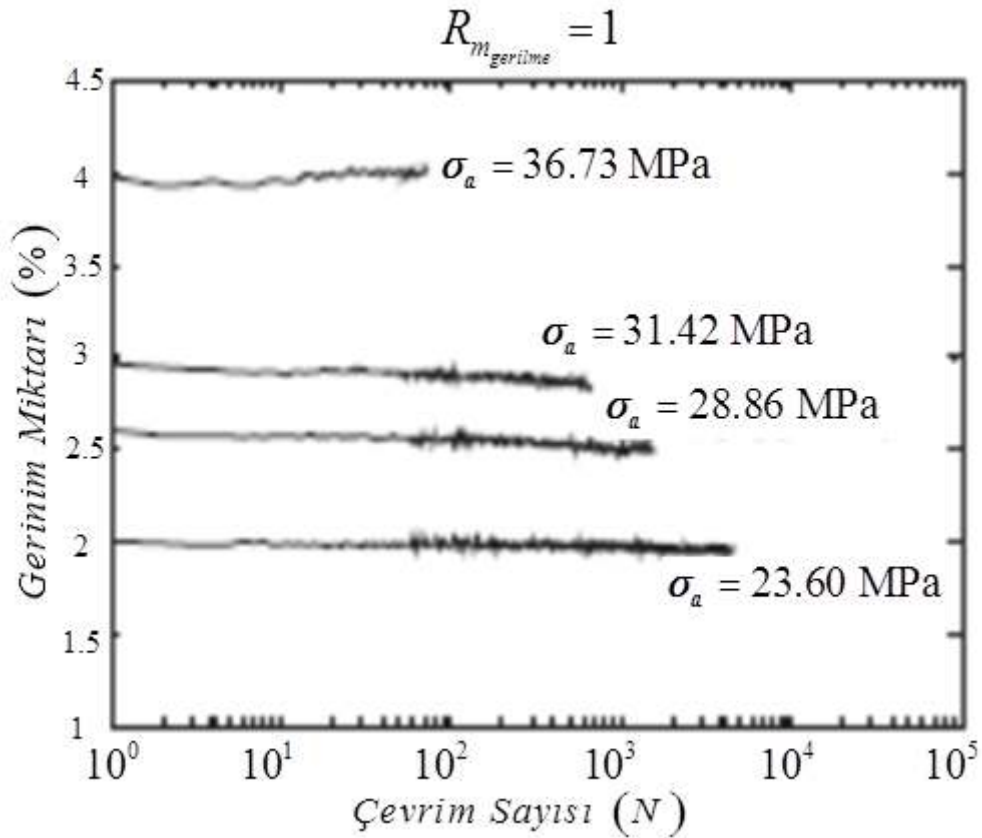
Şekil 2. 17 $\sigma_a = 23,60$ MPa iken gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [12]



Şekil 2. 18 $\sigma_m = 36,70$ MPa iken gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [12]

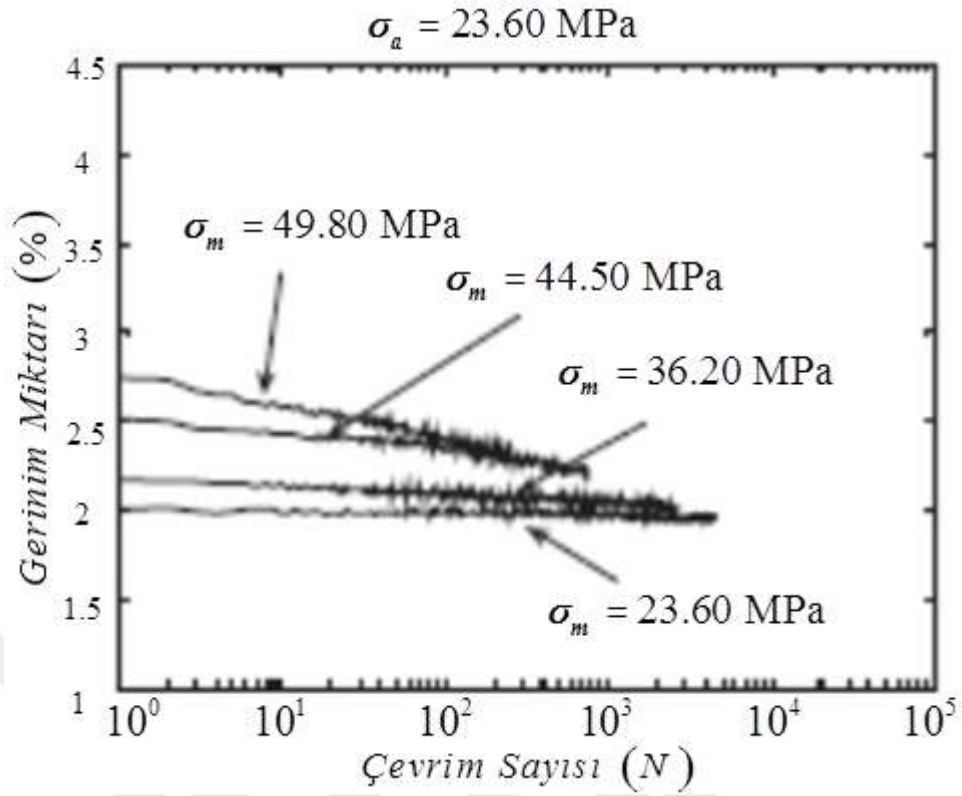
2.5.2 Gerinim Aralığı

Çevrimsel yüklemede, gerilme kontrollü yüklemede gerilme genliğinin büyümesi ile gerinimin aralığı (strain range) artar. Gerinimin aralığının değişimi, farklı gerilme genliklerinde, aynı ortalama gerilme oranı için deney sonuçları Şekil 2.19’da görülmektedir [12].



Şekil 2. 19 $R_{m_{gerilme}} = 1$ için gerinim toplanması miktarı (%) - Çevrim sayısı eğrisi [12]

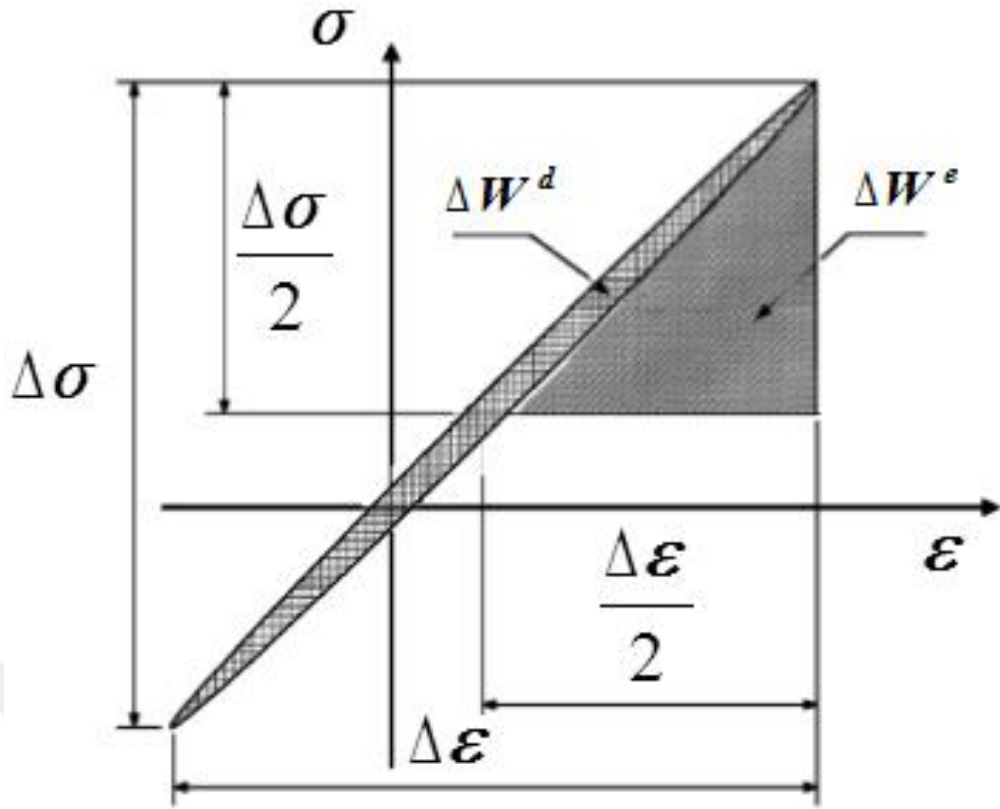
Sabit gerilme genliği, farklı ortalama gerilmeler için deneylerden elde edilen gerinim aralığının değişimi Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Burada çevrim sayısının artması ile gerinim aralığının azaldığı gözlemlenebilir [12].



Şekil 2. $20 \sigma_a = 23,60$ MPa iken gerinim miktarı (%)- Çevrim sayısı eğrisi [12]

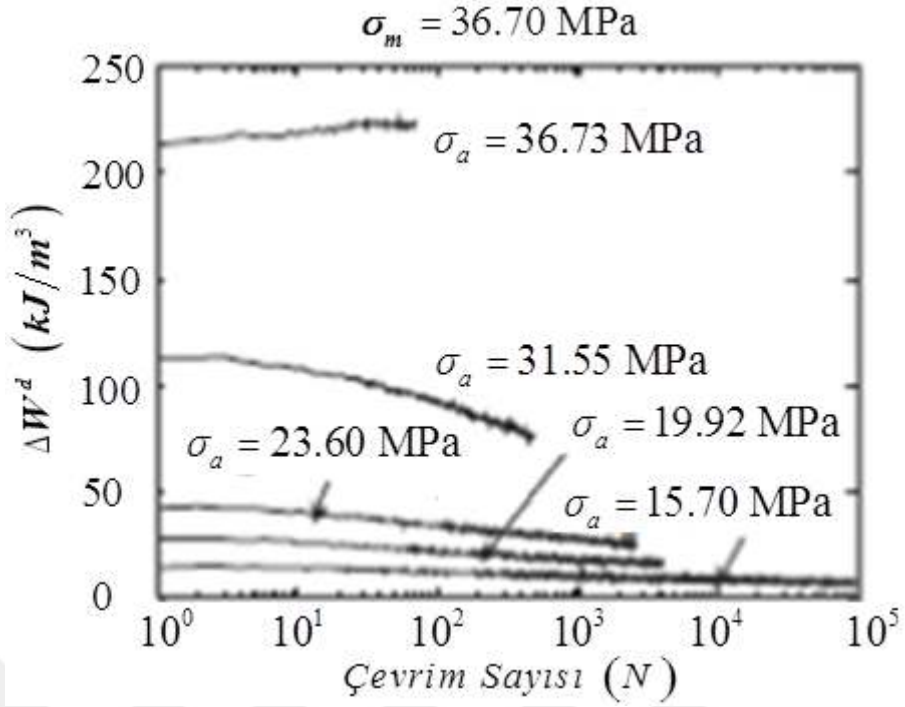
2.5.3 Gerinim Enerji Yoğunluğu

İki tip gerinim enerji yoğunluğu vardır. Bunlar *dağılmış gerinim enerji yoğunluğu* (dissipated strain energy density) ΔW^d ve *elastik gerinim genliği enerji yoğunluğu* (elastic strain energy density amplitude) ΔW^e 'dir. Gerinim enerji yoğunluğu elemanlarını hesaplamak için Şekil 2.21'de şematik olarak bir *gerilme-gerinim* eğrisi verilmiş ve üzerinde gerinim enerji yoğunluğu elemanları gösterilmiştir. Gerilme-gerinim verilerinden elde edilen alanların integrasyonu ile gerinim enerji yoğunlukları hesaplanmıştır [12].

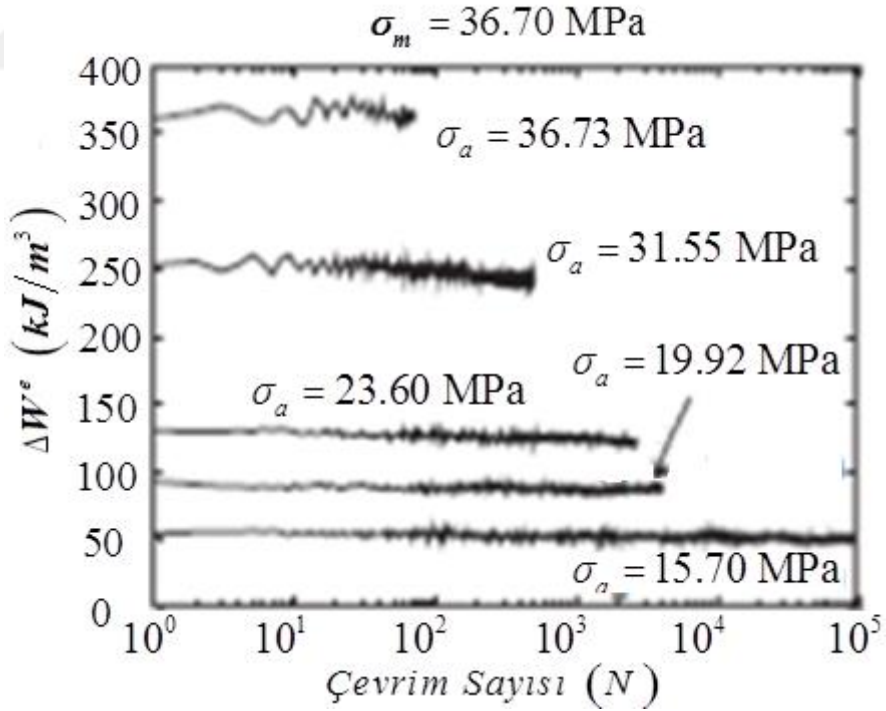


Şekil 2. 21 Gerilme-gerinim eğrisi [12]

Şekil 2.22’de sabit ortalama gerilmede dağılmış gerinim enerji yoğunluğunun (ΔW^d) ve Şekil 2.23’de de elastik gerinim genliği enerji yoğunluğunun (ΔW^e) değişimleri gösterilmiştir. En yüksek gerilme genliği dışında diğer gerilme genliklerinde, çevrim sayısı arttıkça dağılmış gerinim enerji yoğunluğunun azalmasına rağmen, çevrim boyunca elastik gerinim genliği enerji yoğunluğunun aynı seviyede kaldığı görülmektedir [12].

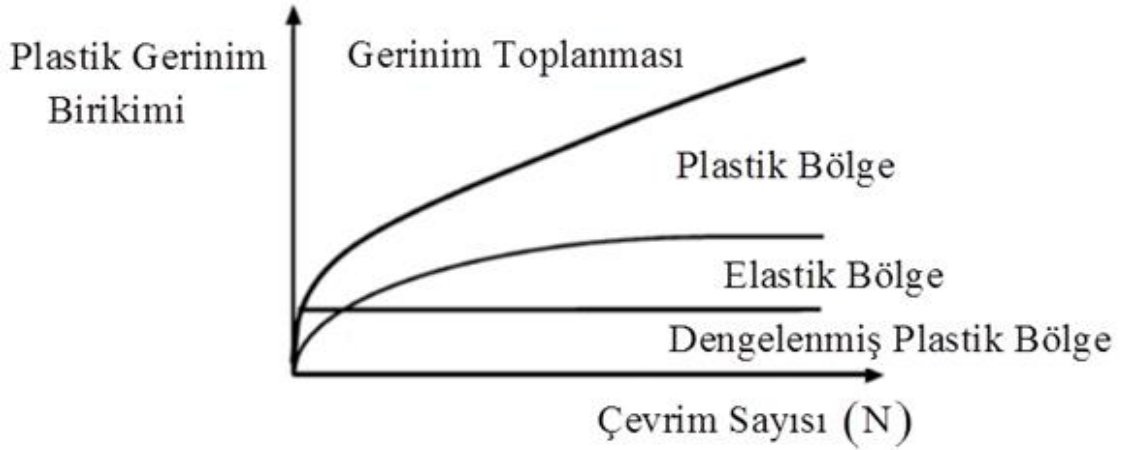


Şekil 2. 22 $\sigma_m = 36,70 \text{ MPa}$ için $\Delta W^d \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ - Çevrim sayısı eğrisi [12]



Şekil 2. 23 $\sigma_m = 36,70 \text{ MPa}$ için $\Delta W^e \text{ (kJ/m}^3\text{)}$ - Çevrim sayısı eğrisi [12]

Çevrim sayısının artmasıyla gerinim birikimi artar, bu ise malzemenin yorulma ömrünün azalmasına sebep olur. Bu nedenle, polimerik malzemelerin çevrimsel yüklemelerdeki davranışının modellenmesinde, yorulma ömrü önemli bir parametredir. Gerinim toplanmasında, izotropik/kinematik pekleşme ve ortalama gerilme etkisi yorulma hasarı ile bağlantılı olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.24’de tekrarlı yüklemelerde deformasyon sonuçları şematik olarak görülmektedir [12].

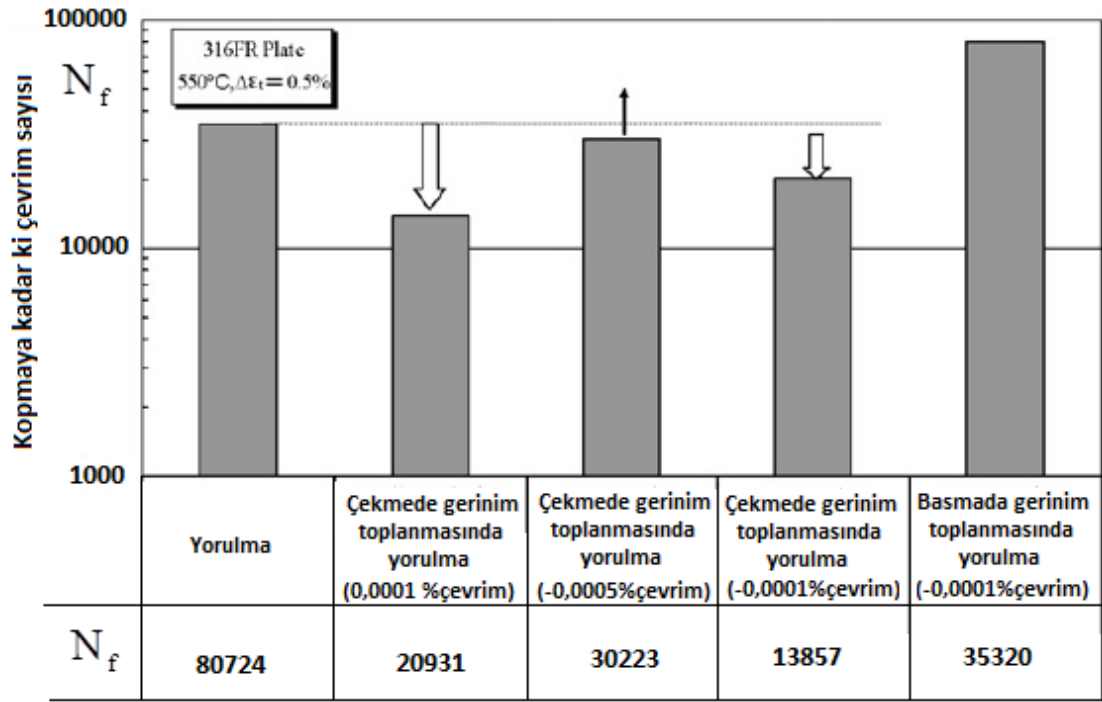


Şekil 2. 24 Çevrimsel plastisitenin dört olası durumu [12]

Gerinim toplanması; ince cidarlı basınçlı tüplerde, boru hatlarında, çevrimsel yüklemeye maruz elemanlarda (protez, çeşitli makine elemanları) hasara neden olan bir parametredir. Bu elemanların servis şartları altında gerilmelerinin ve deformasyonlarının doğru tahmini, parçaların tasarımı ve analizi için önemlidir.

Çevrim sayısının artmasıyla gerinim birikimi artar, bu ise malzemenin yorulma ömrünün azalmasına sebep olur [2], [47], [48], [49]. Bu nedenle, polimerik malzemelerin çevrimsel yüklemelerdeki davranışının modellenmesinde, yorulma ömrü önemli bir parametredir.

Şekil 2.25’de hasar süreleri karşılaştırıldığında, gerinim toplanması-yorulma ve çekme gerinim toplanması - yorulma testleri sonuçlarının, aynı gerinim aralığında oldukları görülmüştür [2].



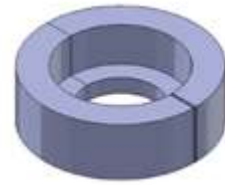
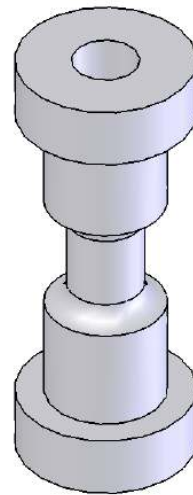
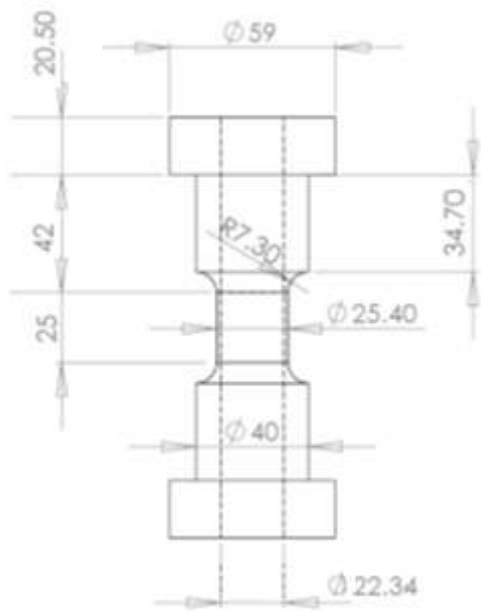
Şekil 2. 25 Gerinim toplanması-yorulma test sonuçları [2]

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada kullanılan deneysel veriler, doktora yürütücüsü Prof.Dr. Özgen Ümit Çolak'ın Tübitak 1001 projesi kapsamında North Carolina Üniversitesi'nde Prof.Dr. Tasnim Hassan ile yaptığı çalışmalarda elde edilmiş, detayları aşağıda verilmiştir.

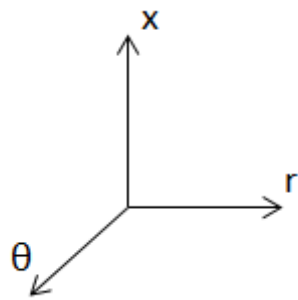
Servo hidrolik test makinesi kullanılarak, gerinim ve gerilme kontrollü yükleme yapılmıştır. Şekil 3.1a ve 3.1b de görülen tüp şeklindeki deney numuneleri UHMWPE çubuğundan yapılmıştır. Deneysel çalışmada, tüp şeklinde deney numunesinin kullanılmasının sebebi, iki eksenli yükleme durumu için gereken iç basınç ve eksenel tekrar içindir. Büyük çekme deformasyonu altında polimer numunelerin çenelerden kaymasını engellemek için polimer numuneler, Şekil 3.1 a ve 3.1b de ki gibi sıkma bileziği ile birlikte tasarlanmıştır.

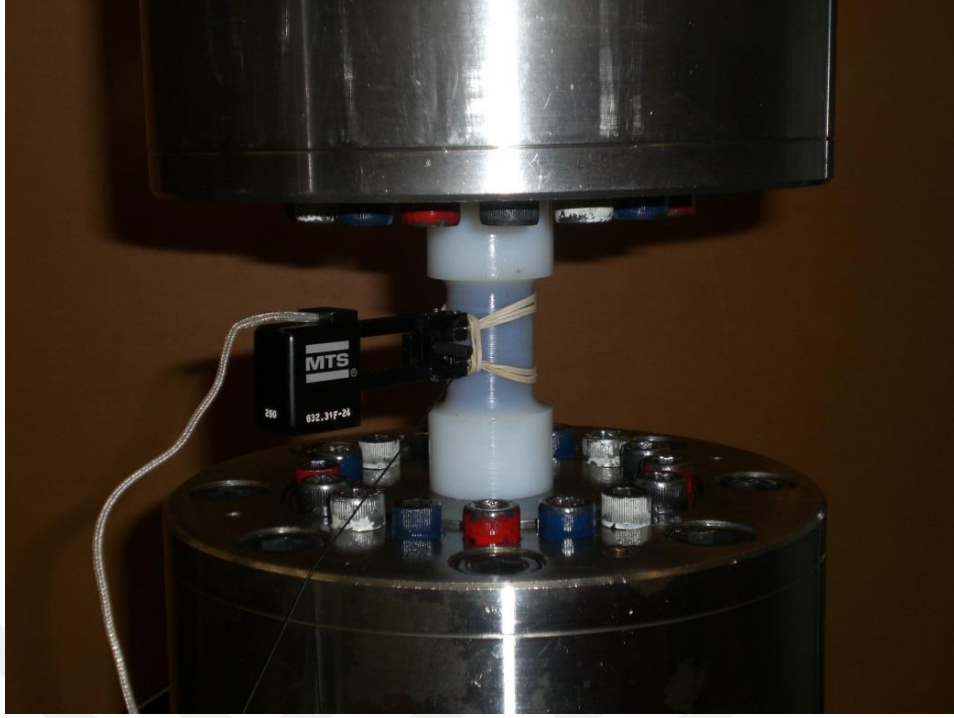


(a)

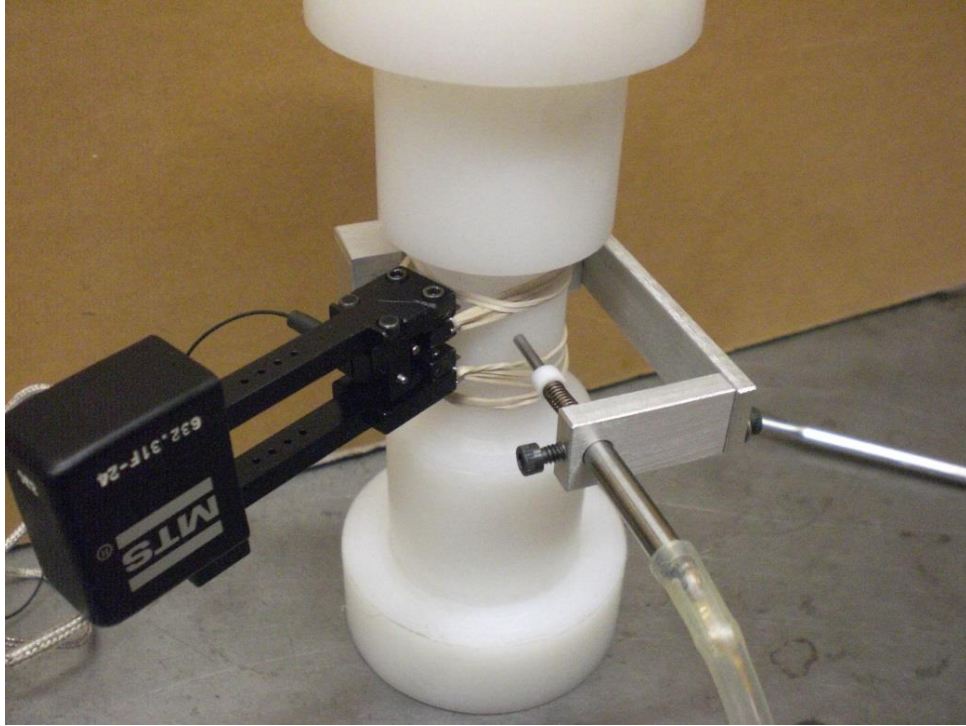
(b)

(c)





(d)



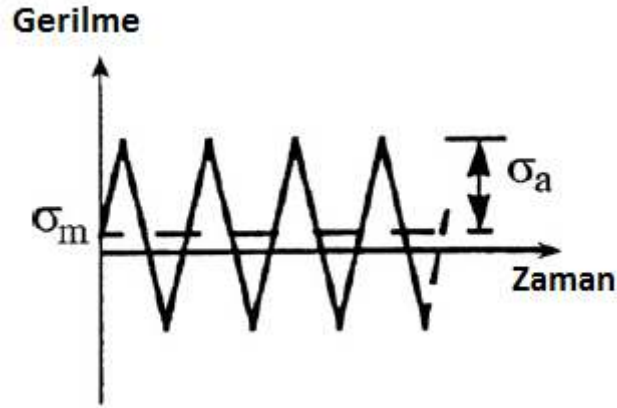
(e)

Şekil 3. 1 Numune ve çenelerin tasarımı ve boyutlandırması

(a) Numunenin iki boyutlu ölçülendirilmesi, (b) Numunenin üç boyutlu gösterimi, (c) Numuneyi sabitlemekte kullanılan uç birleştirici (bilezik), (d) Test cihazına deney numunesi bağlanmış ve eksenel gerinim ekstensometre ile kaydederken görülmektedir, (e) Test cihazına deney numunesi bağlanmış ve çap değişimi DVRT ile kaydedilirken görülmektedir.

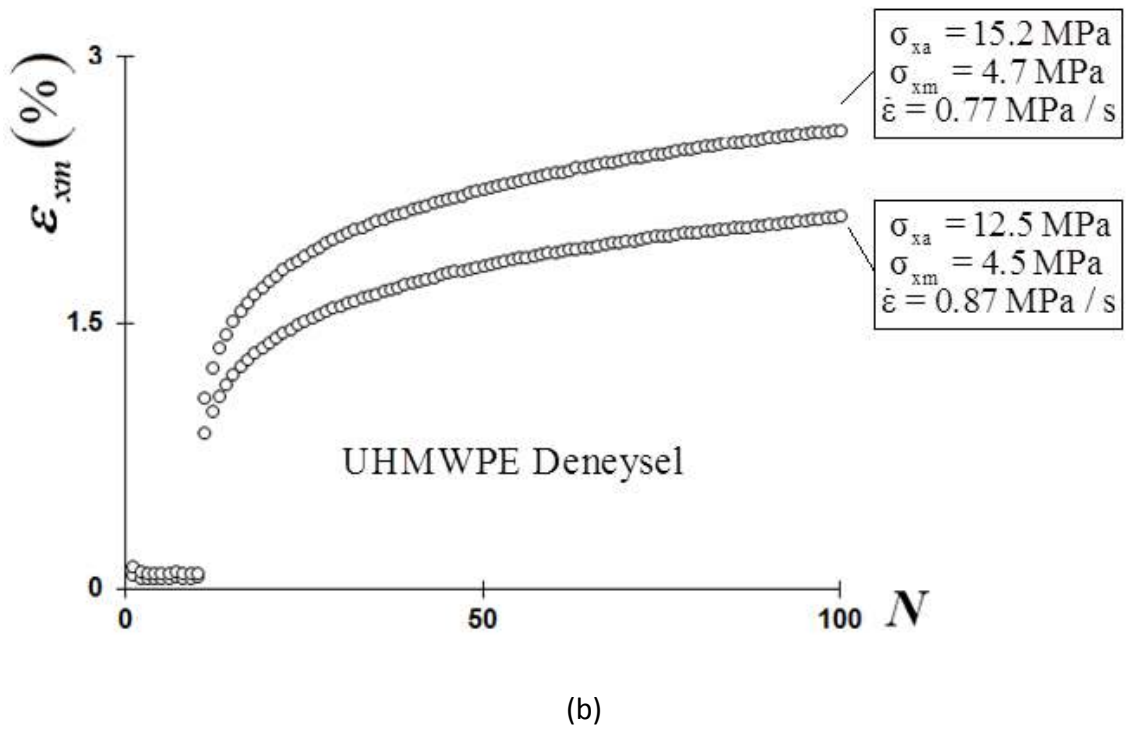
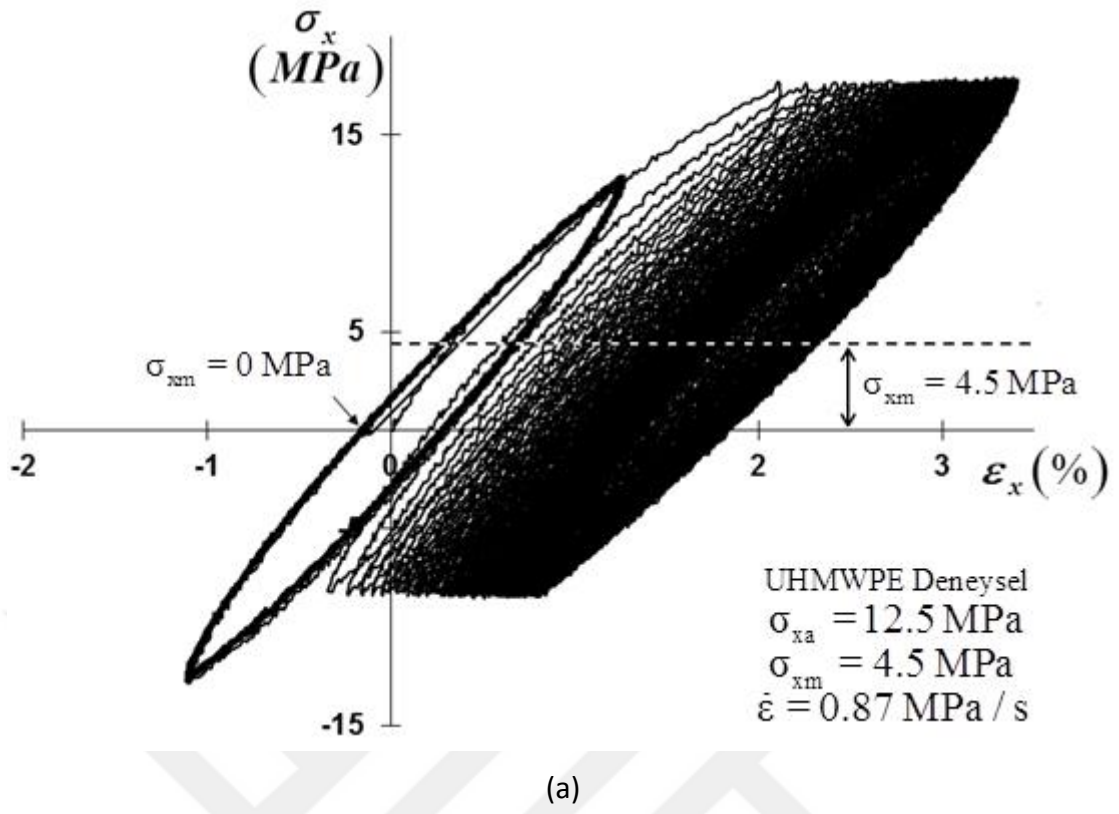
3.1. Tek Eksenli Yüklemede Deneysel Sonuçlar

Çalışmada tek ve iki eksenli tekrarlı yükleme altında UHMWPE malzemesinin gerinim toplanma davranışı için bir dizi test yapılmıştır. Tek eksenli yükleme için yükleme geçmişi Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3. 2 Tek eksenli yükleme geçmişi

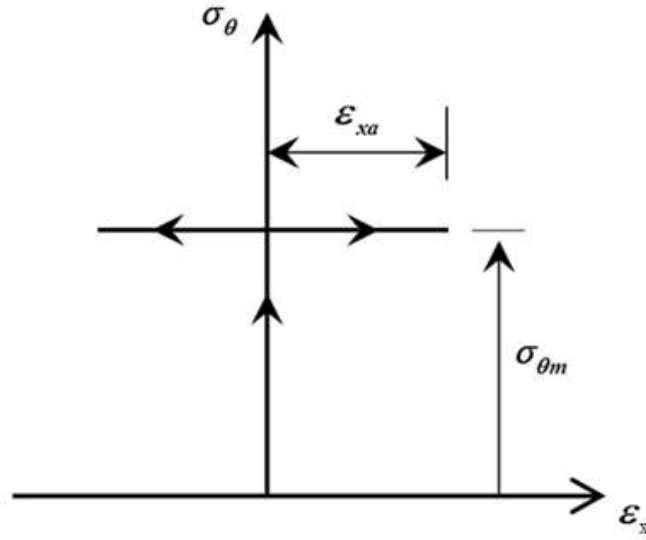
Tek eksenli deneysel sonuçlar Şekil 3.3 a ve b’de gösterilmektedir. Burada tek eksenli yüklemede gerinim toplanması sonuçları görülmektedir. İlk 10 çevrimde ortalama gerilme sıfır iken sonraki 90 çevrimde ortalama gerilme 4.5 MPa’dır. Şekil 3.3a’ya bakıldığında ilk 10 çevrimde ortalama gerilme sıfır olduğunda gerinim toplanması oluşmamıştır. Ortalama gerilme sıfırdan farklı olduğunda ($\sigma_m = 4.5$ MPa) gerinim toplanması olmaktadır. Şekil 3.3b’de eksenel gerinim - çevrim sayısı eğrisi verilmiştir. Burada sabit ortalama gerilmede iki farklı gerilme genliğinin (σ_a ; 12.5 MPa ve 15.2 MPa) çevrim sayısı ile değişimi gözlemlenmektedir.



Şekil 3. 3 (a) Gerilme-gerinim eğrisi, (b) Ortalama gerinim-çevrim sayısı eğrisi

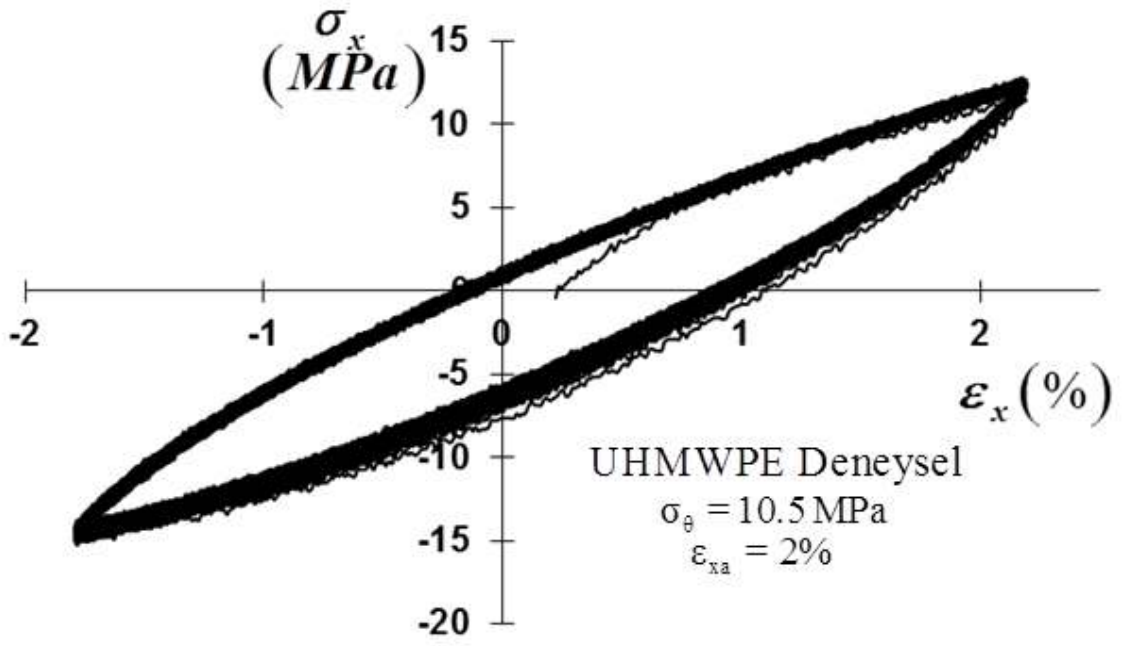
3.2. İki Eksenli Yüklemede Deneysel Sonuçlar

İki eksenli yüklemede, tüp şeklinde numuneye ilk olarak sabit iç basınç uygulanır, ardından simetrik eksenel gerinim kontrollü tekrarlanan yükleme yapılır. Bu yükleme geçmişi Şekil 3.4 de görülmektedir.

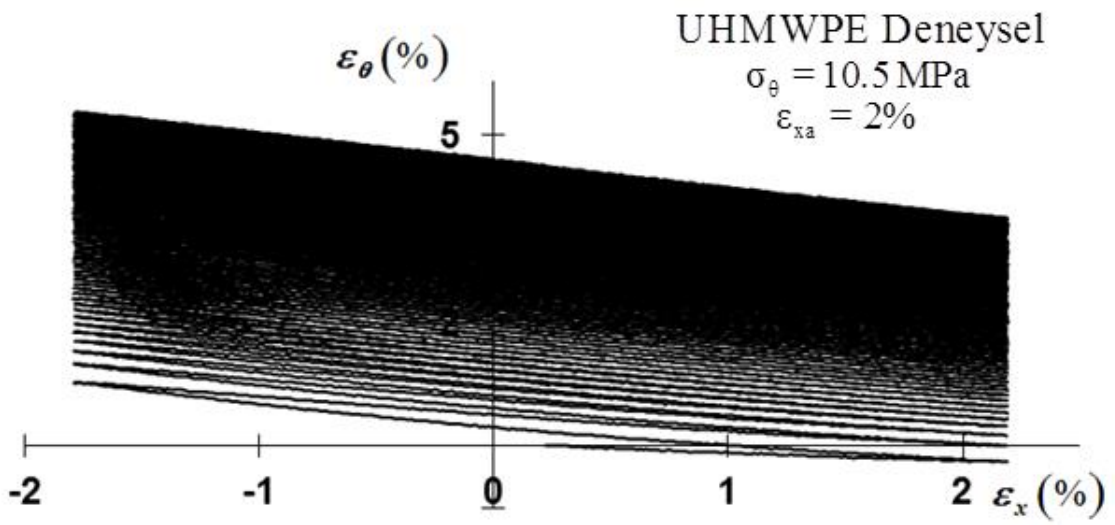


Şekil 3. 4 İki eksenli yükleme geçmişi

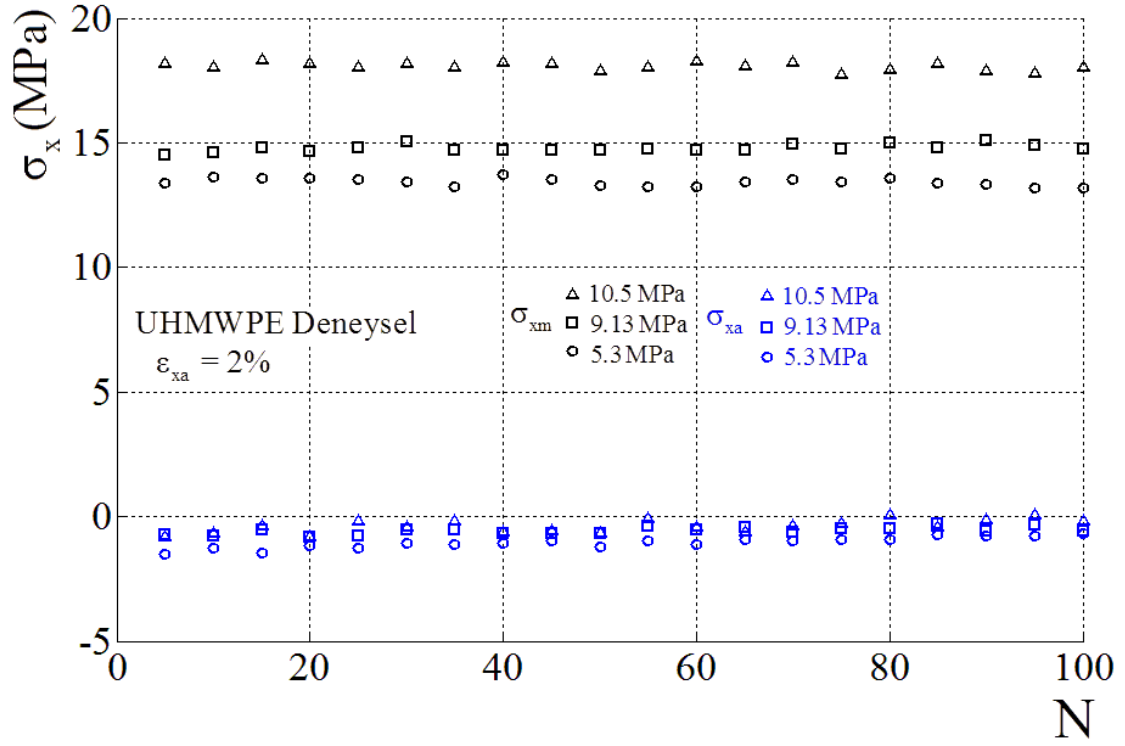
Teğetsel gerinimi ölçmek için Şekil 3.1e de gösterilen diferansiyel değişimli relüktans transdüser (Differential Variable Reluctance Transducer-DVRT) ile kaydedilirken görülmektedir. Bu şekilde çap değişimi ve teğetsel gerinimin hesaplanabilmiştir. Şekil 3.5a'da gösterilen eksenel histerisiz cevabı tek eksenli gerinim kontrollü yanıtlarına benzediği kabul edilmektedir. Gerinim toplanması, teğetsel gerinim-eksenel gerinim eğrisinde Şekil 3.5b de görülmektedir. Bu teğetsel gerinimin sebep olduğu gerinim toplanması tüp şeklindeki numunenin çapını kademeli olarak artırır. Gerinim toplanmasının, teğetsel gerinim oranının iç basınç seviyesinin etkisi Şekil 3.5c-d'de görülmektedir. Eksenel histerisiz döngülerinin artması ile sabit genlikte teğetsel gerilme ve eksenel histerisiz döngüsü hesaba katıldığında yaklaşık teğetsel gerilmenin her seviyesindeki artış Şekil 3.5c de görülmektedir. Teğetsel gerinimin, gerinim toplanması oranının sabit teğetsel gerilmede arttığı Şekil 3.3d'de gözlenmektedir. Teğetsel gerinim toplanması oranı sonuçlarının tek eksenli gerinim toplanması geçişlerine benzerliği Şekil 3.3b ve 3.5d'nin karşılaştırılmasında görülmektedir.



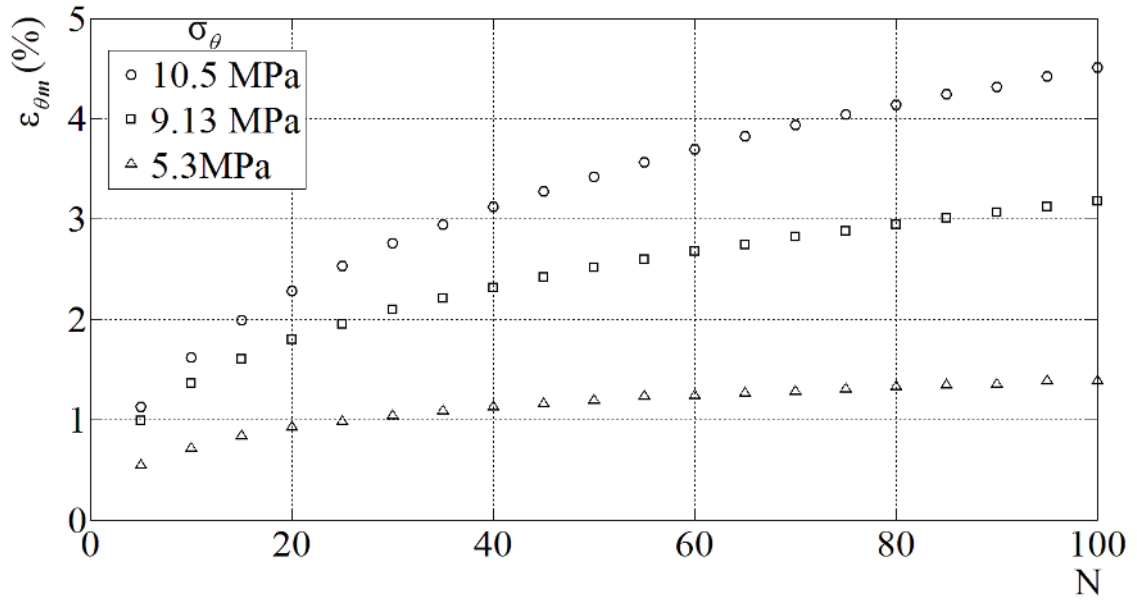
(a) Histerisiz döngü yanıtları



(b) Teğetsel gerinim toplanması



(c) Eksenel gerilme (σ_x) - Çevrim sayısı eğrisi (N)



(d) Teğetsel ortalama gerinim ($\varepsilon_{\theta m}$) - Çevrim sayısı eğrisi (N)

Şekil 3. 5 Sabit iç basınçta ve tekrarlı eksenel gerinimde UHMWPE'nin iki eksenli yükleme altında yanıtları

Yukarıda verilen deneysel çalışma sonuçları, tezde yapılan modelleme çalışmaları sonuçlarıyla karşılaştırmak için kullanılmıştır.

POLİMERİK MALZEME MODELLERİ

Bu bölümde polimerik malzemelerin mekanik davranışlarını açıklamaya yönelik olarak geliştirilen viskoelastik ve viskoplastik modelleme çalışmaları hakkında genel bir bilgi verilecektir.

4.1. Lineer Viskoelastisite

Polimerik malzemelerin en belirleyici özelliklerinden bir tanesi de viskoelastik mekanik davranış göstermesidir. Polimer moleküllerinin mekanik davranışı, deformasyon uygulama hızı, deformasyon süresi, viskoelastik özellikleri doğrudan etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte polimerik malzemelerin mekanik davranışını incelemek üzere ortaya konulan ilk modeller lineer viskoelastisiteye dayanır. Lineer viskoelastisitenin temeli *Boltzman süperpozisyon teoremine* bağlıdır. Bu teoreme göre malzemede meydana gelecek sünme (sürünme, creep) , bütün yükleme geçmişinin fonksiyonudur, her bir yükleme adımı, toplam deformasyona birbirinden bağımsız katkı yapar ve 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 fonksiyonudur. Bu ifade gevşeme için yazılacak olursa;

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

burada $E(t-\tau)$, gevşeme modülü, τ ise zaman artışıdır.

Buraya literatürde viskoelastik teorem açıklanırken; elastik davranış için Hooke kanunu, viskoz sıvı davranışı için Newton kanunu göz önüne alınabilmektedir. Hooke kanununda, gerilme-gerinim eğrisinin lineer olarak değiştiği bölgenin eğiminden elde edilen elastisite modülü, Newton kanunun da ise gerilme-şekil değişim hızı sabit bir katsayı olan viskozite ile orantılı lineer bir ilişki içerisindedir. (Denklem 4.3 ve 4.4).

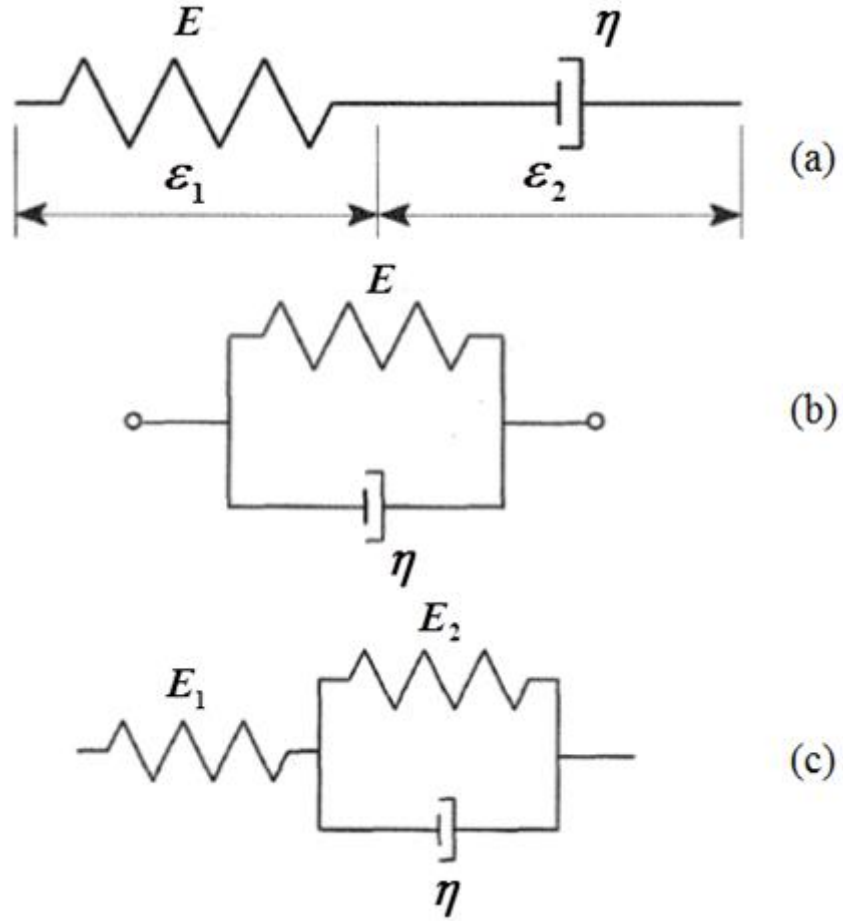
- Hook Kanunu

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

- Newton Akış Kanunu

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

Lineer viskoelastikte de çeşitli modeller kullanılmaktadır. Bunlar birbirine paralel bağlanmış yay ve sönüm elemanından meydana gelen “Voigt (Kelvin) modeli”, birbirine seri olarak bağlanmış yay ve sönüm elemanından meydana gelen “Maxwell modeli” ve “Voigt modeli”ne seri bağlanmış yay elemanı ile meydana gelen Standart Lineer Katı modelidir [50], [51].



Şekil 4. 1 (a) Maxwell modeli, (b) Kelvin-Voigt Modeli, (c) Standart Lineer Katı Modeli

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

Burada tanımlanan modeller, polimerik malzemelerin mekanik davranışını açıklamakta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme modelleri tek başına yeterli değildir, sadece belirli yükleme şartlarına uygun sonuçlar vermektedir.

- Maxwell Model

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

- Kelvin-Voigt Model

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

- Standart Lineer Katı Model

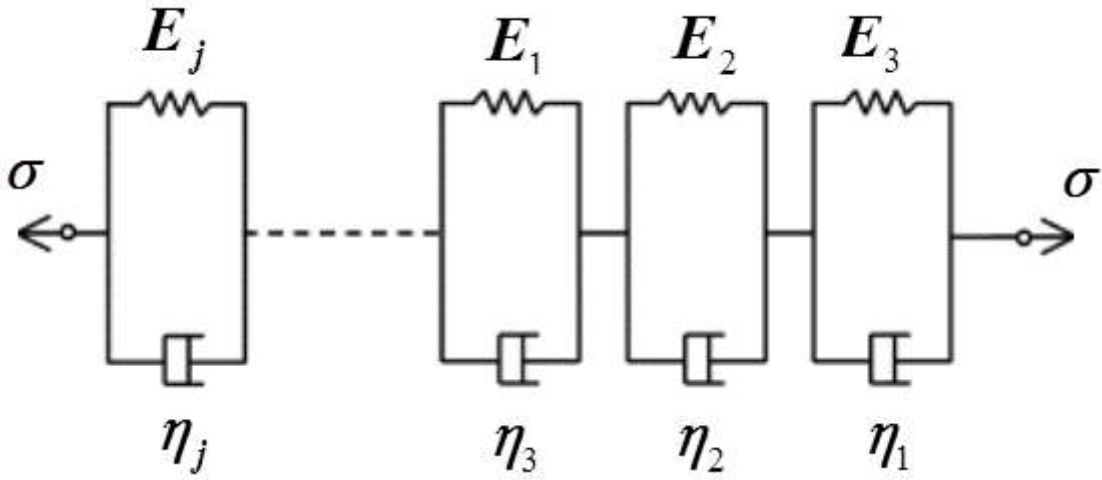
$$\sigma(E_1 + E_2) + \eta \frac{d\sigma}{dt} = E_1 E_2 \varepsilon + E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.7)$$

- Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt Modeli

Birden fazla Kelvin-Voigt modelin seri olarak bağlanması ile Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt" modeli sünme cevabını açıklamaya yönelik olarak geliştirilmiştir (Şekil 4.2). Bu modelin matematiksel ifadesi;

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

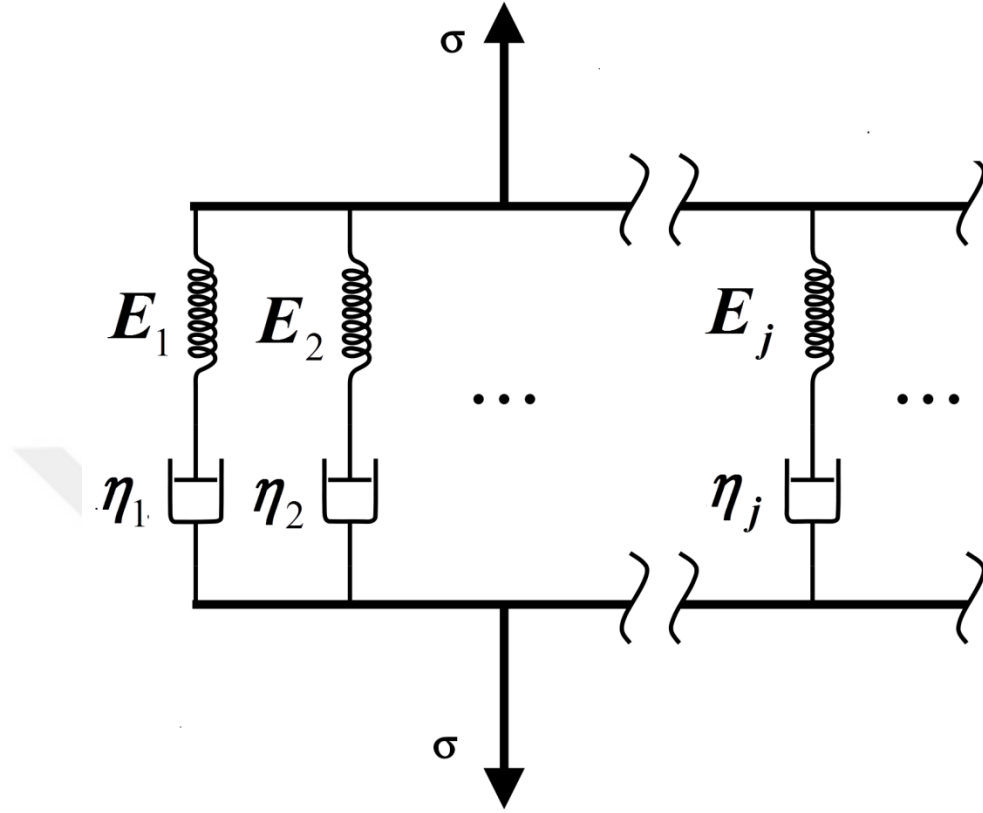
burada σ_0 Sünme testindeki gerilme, σ_n Elastik komplians, $\tau_n = \frac{\eta}{E}$ n.Voigt elemanın gecikme zamanıdır [51], [52], [53], [54].



Şekil 4. 2 Genelleştirilmiş Kelvin-Voigt modeli

- Genelleştirilmiş Maxwell Modeli

Birden fazla Maxwell modelinin paralel bağlanmasıyla elde edilir (Şekil 4.3).



Şekil 4. 3 Genelleştirilmiş Maxwell modeli

4.2. Lineer Olmayan Viskoelastisite

Lineer viskoelastisitede, sünme kompliansı ve gevşeme modülü, sadece zamana göre tanımlanmaktadır. Ancak bu özellikler gerilme ve gerinim ile de ilişkili olarak değişim göstermektedir. Bu durum nonlinear viskoelastik modellerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Lineer viskoelastisite limiti, birçok polimer için %1'in altındadır. Lineer davranış limiti, sıcaklığın artması ile birlikte düşüş gösterir. Camsı geçiş sıcaklığının altında lineer davranış limiti çok düşük seviyelere inmektedir. Lineer olmayan davranışa sahip malzemenin mekanik davranışlarını deneysel sonuçlarla yorumlamak zordur. Malzemedeki değişimi açıklamak için daha fazla sayıda deney yapmak gerekmektedir. Polimerik malzemelerin nonlinear davranışını açıklamak üzere çok sayıda teori geliştirilmiştir. Bu teoriler başlıca üç ana sınıflandırmaya tabi tutulur: a) Moleküler Yaklaşım, b) Reolojik Yaklaşım, c) Mühendislik Yaklaşım [51] , [52].

4.2.1. Moleküler Yaklaşım

Polimerik malzemelerin içyapısı, karbon ve hidrojen atomu içeren monomer moleküllerden meydana gelmektedir. Monomerler birbirlerine kuvvetli bir bağ olan kovalent bağ ile bağlanmışlardır. Bu bağ kuvvetinin dışında, monomerler arasında yüksek çekim kuvveti vardır. Bu çekim kuvveti sayesinde moleküllerin hareketleri kısıtlanarak, malzemenin dayanımı artar. Mukavemeti içyapıdaki bu bağ kuvvetlerinin sağlamasından dolayı moleküler yaklaşıma dair modeller geliştirilmiştir. Lineer olmayan viskoelastisitede moleküler yaklaşım, uygulama gerilmesinden bağımsız termal aktivasyon enerjisine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda deformasyonun moleküler seviyede segmental ve moleküler yan grupların lokalize hareketlerinin sonucunda meydana gelmektedir [51], [55], [56], [57].

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

burada $\dot{\epsilon}_0$:Üstel faktör (sabit), ΔH :Aktivasyon enerjisi, R :Boltzman Sabiti, T :Mutlak sıcaklık, V :Aktivasyon hacmidir.

4.2.2. Reolojik Yaklaşım

Reolojik yaklaşımda, yay elemanının elastisite modülü gerilme ile sönüm elemanının viskozitesine bağlıdır. Malzemenin lineer olmayan davranışını açıklamak için, viskoelastik modeller, çok fazla malzeme parametresi içerir. Dolayısıyla bu durum parametrelerin hesabı ile ortaya çıkan matematiksel formülasyonların anlaşılabilirliğini oldukça güçleştirmektedir. Bu problemin ortadan kaldırılabilmesi için viskoelastik modellerde, malzeme parametrelerinin azaltılması gerekmektedir. Parametrelerin azaltılması malzeme fonksiyonlarının basitleştirilmesini gerektirir bu da bir çok kısıtlamaya ve sonuçların hatalı olmasına sebep olur. Bu yüzden bu yaklaşım türü basit yüklemeler için kullanılmaktadır [51], [52]. Reolojik yaklaşım, katlı ve tek katlı integral şeklinde gösterimleri verilmiştir.

4.2.2.1 Katlı İntegral Gösterimi

Katlı integral gösterimi ile lineer viskoelastisiteye nonlinear değişkenlerin katılması sonucunda Boltzman superpozisyon teoreminin 4.10 denklemindeki halini alır.

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

4.10 denkleminde ki birinci terim Boltzman superpozisyon teoremi ile aynıdır, diğer terimler düzeltme terimleridir.

4.2.2.2 Tek Katlı İntegral Gösterimi

Reolojik yaklaşımın gösterimlerinden biri de tek katlı integral yöntemidir. Bu yöntem belirli polimer malzemeler için oldukça kullanışlıdır ve basit olarak nonlinear viskoelastisiteyi ifade eder. Boltzman superpozisyon teoreminin modifiye edilmesine dayanır.

Tek katlı integral gösteriminde kullanılan teoremler aşağıda verilmiştir.

- **Modifiye Süperpozisyon Teoremi**

Bu teorem lineer viskoelastik teori denklemlerine, ek terimler ilave edilerek oluşturulmaktadır. Leaderman [58], fiber üzerinde yaptığı çalışmalarda *sünme* ve *toparlanma* davranışının zamana ve gerilmeye bağlı parçalardan oluştuğunu görerek denklem 4.11'i yazmıştır.

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

Burada, $f(\sigma)$ deneysel gerilme fonksiyonudur. Bu denklem modifiye edilmiş superpozisyon teoremidir. Yalnızca fiberin sünme ve toparlanma davranışını oldukça iyi açıklamaktadır. Fakat teorem diğer polimerik malzeme türleri için uygun değildir çünkü bu malzemelerin sünme ve toparlanma davranışını açıklayamamaktadır [51], [52].

- **BKZ Teoremi**

Polimerik malzemelerin gevşeme davranışlarını incelemek amacıyla birçok teorem ortaya atılmıştır. Bu teoremlerden biri BKZ teoremidir. Birçok kauçuğun elastik davranışı, *genleşme oranının* (λ) fonksiyonu şeklindedir. Bernstein, Kearsley ve Zapas [59] polimerik malzemelerin gevşeme davranışını açıklamaya yönelik aşağıdaki ifadeyi ortaya koymuşlardır;

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

Burada; $h(\lambda, t)$ birleştirilmiş fonksiyon ve λ genişleme oranıdır. BKZ teorisinin gevşeme cevapları oldukça doğru olmasına rağmen, sabit gerinim hızlarında ve katlamalı gevşeme deneyleri için yetersiz kalmaktadır [51], [52], [60].

- **Schapery Termodinamik Teori**

Schapery termodinamik teorisi, lineer viskoelastisite için geliştirilmiş daha sonra lineer olmayan davranış için geliştirilerek, denklem 4.13 ve 4.14'te ki hali almıştır;

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

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

Burada $\psi(t)$ ve $\rho(t)$ sırasıyla, gerilme ve gerinim azalma zamanını temsil etmektedir. Bunlar;

$$\text{Gerilme azalma zamanı} \quad \psi(t) = \int_0^t \frac{ds}{a_\sigma}, a_\sigma > 0 \quad (4.15)$$

$$\text{Gerinim azalma zamanı} \quad \rho(t) = \int_0^t \frac{ds}{a_\varepsilon}, a_\varepsilon > 0 \quad (4.16)$$

şeklinde tarif edilir.

Ayrıca g_0, g_1, g_2, a_σ gerilme fonksiyonları ve $h_0, h_1, h_2, a_\varepsilon$ gerinim fonksiyonlarıdır. $h_e E_e \varepsilon(t)$ küçük bir zaman sonra gerinimdeki denge gerilmesidir. ΔJ lineer geçiş sünme kompliansı ve ΔE gerilme gevşeme modülüdür. Schapery teorisi, gevşeme

sürecine etkiyen nem ve fiziksel yaşlanma gibi diğer etkileri ihmal etmektedir. Schapery teorisi malzeme parametrelerinin belirlenmesinde veri sayısının azaltılmasını sağlar [51], [58].

4.2.3. Mühendislik Yaklaşımı

Mühendislik yaklaşımı doğru ve basit çözümler sunan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda mevcut deneysel sonuçlar özel durumlar için belli aralıklarda genişletilerek bu aralıktaki değerlerin tahmin edilmesine dayalıdır. Sünme ya da gevşeme deneyleri gibi deneysel verilerin çeşitli numerik yöntemlerle eğri uydurma şeklinde düzenlenerek istenilen sonuçların bulunması bu yönetime örnektir [51], [52].

4.3. 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 dayanmaktadır.

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

Bu yaklaşımın plastik ve sünme deformasyonunun, ayrı ayrı değilde birbiri içerisine geçmiş şekilde geliştiği üzerinden hareketle birleştirilmiş durum teorisine dayanan viskoplastik teoriler ortaya konmuştur.

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{vpl} \quad (4.18)$$

Birleştirilmiş viskoplastik teoriler, çözüme yönelik olarak belirgin bir akma yüzeyini esas almaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda ve bazı malzeme türleri için akma yüzeyinin belirlenmesi oldukça zordur. 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 edilip 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 [54], [61]

Polimerlerin mikroyapısal modellemesi üzerine yapılan başlıca çalışmalar olarak Nikolov ve Doghri, Sweenwy ve arkadaşları ile Van Dommelen ve arkadaşlarının çalışmaları sayılabilir [62], [63], [57]. Mikroyapısal modelleme için geliştirilen bu

yaklaşımlar ilk olarak amorf polimerlerin mekanik davranışını açıklamak için geliştirmiştir. Amorf polimerler mikroskobik olarak izotrop veya temsili birim eleman üzerinde analizi yapılarak incelenebilir. Bu şekilde oluşturan model, deformasyon mekanizmasının fiziği ile ilgilidir. Plastik deformasyon malzeme içeriğini bozar ve amorf polimerlerde yerel değişiklikler meydana getirdiği için, deformasyon işlemi ısı açığa çıkarır. Amorf polimerler için kullanılan bu yaklaşım, yarı kristalin polimerler için tek bir içeriğe ait birim eleman oluşturmaları zor olduğundan, kullanılmalarına rağmen yeni modellerle ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

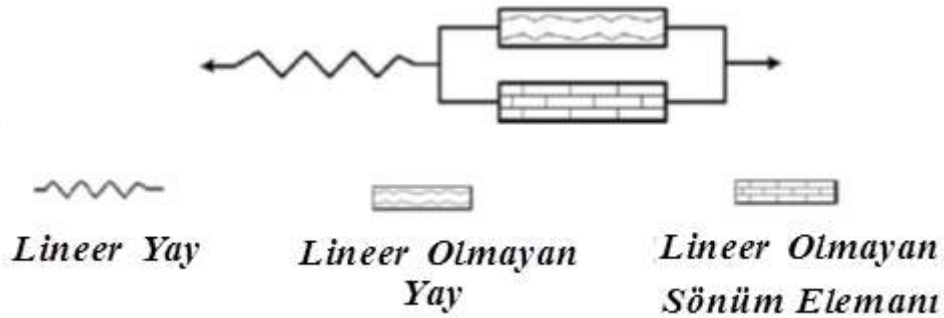
Makroyapısal modelleme çalışmalarının başlıcaları Lai ve Bakker [64], Krempl ve Bordonaro [65], Bardenhagen ve diğerleri [66], Zhang ve Moor [56], Krempl [67], Krempl ve Khan [68], Drozdov ve Christian [69], Çolak [70], [71] tarafından yapılan çalışmalardır. Makroyapısal modeller enerji denklemlerine ve viskoplastisite teorilerine dayanmaktadır. Viskoplastisite teorisine dayanan modeller polimerik malzeme davranışını belirlemede oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Yüksek sıcaklıkta metallerin mekanik davranışı gerinim hızına bağlıdır. Sıcaklık ve gerinim hızı ilişkisi, akma noktasının belirlenmesini güçleştirir. Bu yüzden Bodnor ve Partom, Krieg, Miller, Krempl akma yüzeysiz teori üzerinde çalışmışlardır. Bu yaklaşımın ana temeli; sünme gerilimi ve plastik gerinimini birleştirerek bir arada ifade etmişler ve hıza bağımlı inelastik gerinimi iyileştirmişlerdir. Toplam gerinimin elastik ve viskoplastik kısımlardan meydana geldiğini ve toplanabilir olduğunu varsaymışlardır [51].

4.3.1. Overstress Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (VBO)

“Overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) başlangıçta metallerin mekanik davranışını açıklamak için Krempl [72] tarafından geliştirilmiştir. Bordonaro ve Krempl (1992) katı polimerik malzemelerin mekanik davranışının, metalik malzemelerin davranışına benzer olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan deneysel çalışmalarla metalik ve polimerik malzemeler arasındaki farklılıklar ve benzerlikler belirlenmiştir. Bu farklılıklardan en önemlileri sıfır gerilmede, *toparlanma* (recovery) ve *boşaltma* (unloading) davranışlarıdır. Sıfır gerilmede toparlanma, polimerik malzemede geniş bir gerinim aralığında gerçekleşirken, metalik malzemelerde daha dar bir aralıkta gerçekleşmektedir. Boşaltma davranışı, polimerik malzemelerde konkav bir eğri

verirken, metallerde nerdeyse düz bir doğrudur. Benzerlikler ise lineer olmayan hız hassasiyeti, sürünme ve gevşemedir. Metalik malzemelerin mekanik davranışını açıklamak için kullanılan VBO model, metaller ile polimerler arasındaki farklılıklar ve benzerlikler dikkate alınarak, polimerik malzemelerin mekanik davranışını açıklamak için kullanılmaya başlanmıştır. “Overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi, polimerik malzemeler için bünye denklemi Çolak [70] ve Çolak-Düşünceli [73] tarafından geliştirilerek yeni özellikler eklenmiş ve buna polimerler için **“overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi** (VBOP) denilmiştir.

VBO model, reolojik yaklaşıma dayanan standart lineer katı (SLS) modeli temel alır. (Şekil 4.4). SLS modelin (standard linear solid model) 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. 4 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 oluşturur. Matematiksel olarak SLS modelin ifadesi denklem 4.7’deki gibidir, bu ifade denklem 4.19’da “overstress” formatına getirilerek VBO model için temel alınır.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E_1} + \frac{\sigma - aE_2\epsilon}{a\eta} \quad (4.19)$$

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 yüklemde gerilme cevabı seride bulunan iki yay tarafından verilir ve sönüm elemanın hiçbir etkisi olmaz. Gerinim hızı sıfıra yaklaşırken cevap $\sigma = aE_2\epsilon$ dir.

Bu ifade deki $aE_2\epsilon$ denge gerilmesi olarak adlandırılır ve $\sigma - aE_2\epsilon$ ifadesi “overstress”dir.

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

$$1 - \frac{d\sigma / d\epsilon}{E_1} = \frac{\sigma - aE_2\epsilon}{a\eta\dot{\epsilon}} \quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu eşitlik gerinim hızını sonsuza götürür. Bu değer dışındaki bütün gerinim hızları sonsuz hızlı ve yavaş cevaplar arasındadır. Sabit gerinim hızı ile yüklemde modelin cevabı, geniş zaman sürecindeki denge gerilme-gerinim eğrisinin eğimine eşittir. Bu denklem (4.19)’un her iki tarafından $aE_2\dot{\epsilon}/E_1$ ifadesinin çıkarılmasıyla elde edilir.

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

Bu denklem sabit gerinim hızında sabit “overstress” için bir çözüm sağlar. Sonuç olarak denklem (4.21)’in sağ tarafındaki ilk terimi sıfıra eşit olur ve bu denklemin son hali,

$$\dot{\epsilon} \left(1 - \frac{aE_2}{E_1} \right) = \frac{\{\sigma - aE_2\epsilon\}}{a\eta} \quad (4.22)$$

şeklinde bulunur. { } ifadesi asimtotik çözümü göstermektedir. Denklemin bu halinde “overstress” sabit ve gerinim hızıyla lineer ilişkilidir. Bu ifade denklem (4.20) yerine konularak hesaplandığında

$$\left\{ \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right\} = aE_2 \quad (4.23)$$

şeklinde bulunur. Gerilme hızının sıfır olduğu durumda denklem (4.20) *sünme* için aşağıdaki sonucu verir.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma_0 - aE_2\epsilon}{a\eta} \quad (4.24)$$

Gerinim hızının sıfır olduğu durum için denklem (4.21) *gevşeme* için aşağıdaki sonucu verir.

$$\dot{\sigma} = -E_1 \frac{\sigma - aE_2\epsilon_0}{a\eta} \quad (4.25)$$

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 (4.26)'da ki hale gelir.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{in} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - g)}{Ek[\Gamma, A]} \quad (4.26)$$

Toplam şekil değişim hızı, elastik şekil değişim hızı ile viskoplastik şekil değişim hızının toplamıdır. Bünye denklemi deviatorik formda denklem 4.27'da gösterilmiştir.

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{e}}^{el} + \dot{\mathbf{e}}^{vp} = \frac{1+\nu}{CE} \dot{\mathbf{s}} + \frac{3}{2} F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{\mathbf{s} - \mathbf{g}}{\Gamma} \right) \quad (4.27)$$

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

$$\mathbf{o} = \mathbf{s} - \mathbf{g} \quad (4.28)$$

Γ , "oversterss" invaryantı simgeler ve gerilme boyutundadır.

$$\Gamma^2 = \frac{3}{2} ((\mathbf{s} - \mathbf{g}) : (\mathbf{s} - \mathbf{g})) \quad (4.29)$$

VBO ile VBOP arasındaki başlıca fark C parametresidir. $C = I - \lambda (|\mathbf{G} - \mathbf{K}|/A)^\alpha$, burada λ ve α model parametreleridir. $\mathbf{G}$ ve $\mathbf{K}$ ise durum değişkenleridir, sırasıyla denge ve

kinematik gerilme olarak adlandırılır. Metaller için C lineer boşaltma davranışını temsil etmektedir.

$F\left[\frac{\Gamma}{D}\right]$ akış fonksiyonundaki artıştır, (1/zaman) boyutundadır ve pozitif değerdedir ($F[0]=0$). Akış fonksiyonu lineer olmayan hız bağımlılığını belirler ve matematiksel ifadesi;

$$F\left[\frac{\Gamma}{D}\right] = B\left(\frac{\Gamma}{D}\right)^m \quad (4.30)$$

B üniversal sabit ve D “drag stress” dir. “Drag stress”, gerilme - gerinim eğrilerinin birbirlerine yaklaşma uzaklaşma karakteristiklerini verir. Katı polimerde bu davranış gözlenmez bu yüzden D sabit tutulur.

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;

$$\dot{\mathbf{g}} = \psi \frac{\dot{\mathbf{s}}}{E} + \psi F\left[\frac{\Gamma}{D}\right] \left(\frac{\mathbf{s} - \mathbf{g}}{\Gamma} - \frac{\mathbf{g} - \mathbf{k}}{A} \right) + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{\mathbf{k}} \quad (4.31)$$

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

$$\psi = \psi_1 + \left(\frac{C_2 - \psi_1}{\exp C_3 |\boldsymbol{\epsilon}^{in}|} \right) \quad (4.32)$$

$$\psi_1 = C_1 \left(1 + C_4 \left(\frac{|G|}{A + |K| + \xi \Gamma^\zeta} \right) \right) \quad (4.33)$$

C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , ξ ve ζ malzeme sabitleridir, gerilme - gerinim eğrilerinin elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş yanıtları kullanılarak belirlenmiştir.

Burada A izotropik gerilmedir, bu gerilme hıza bağımlı bir gerilme olup pekleşme ve yumuşama davranışını modeller. İzotropik gerilmenin başlangıç değeri A_0 'dır. İzotropik gerilme ile ilgili denklemler, denklem 4.34 ve 4.35 ile gösterilmektedir.

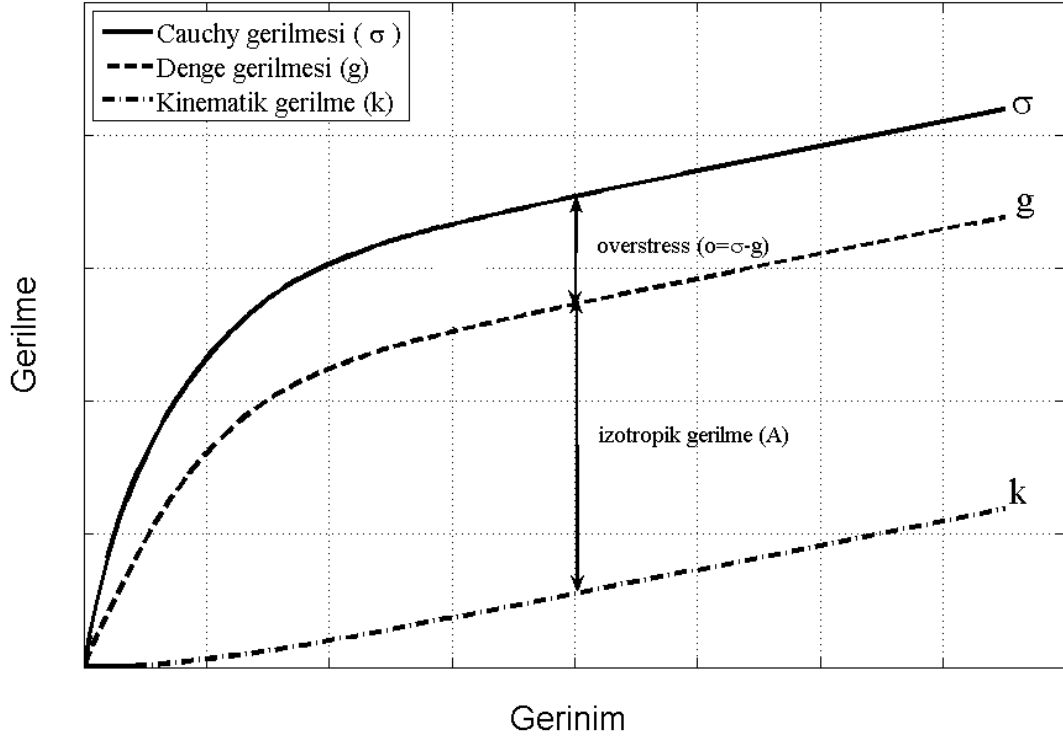
$$\dot{A} = A_c (A_f - A) \dot{p} \quad (4.34)$$

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\mathbf{e}}^{vp} : \dot{\mathbf{e}}^{vp}} \quad (4.35)$$

k , kinematik gerilmenin deviatorik parçasıdır. Monotonik yükleme altında gerinim pekleşmesi, *kinematik pekleşme* kullanılarak denklem 4.36’da temsil edilmektedir.

$$\dot{\mathbf{k}} = \bar{E}_T \dot{\mathbf{e}}^{in} \quad (4.36)$$

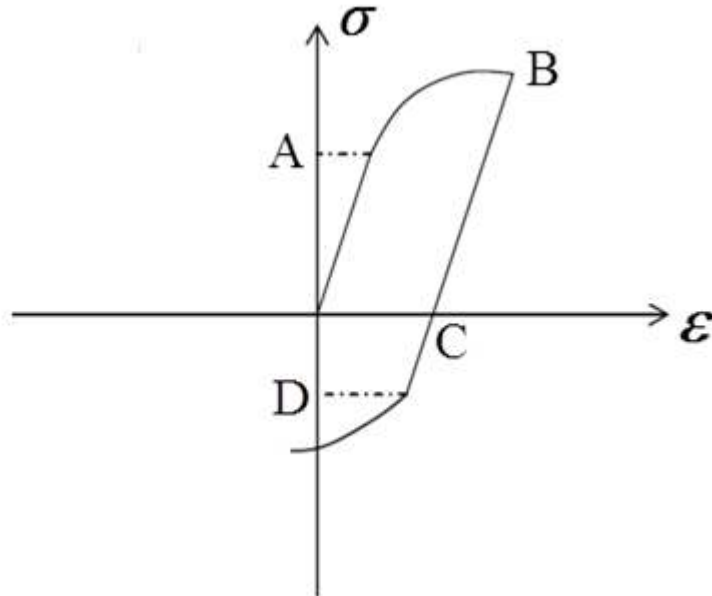
$\bar{E}_T = E_T / (1 - E_T / E)$ ’dir ve burada E_T tanjant modülüdür. Herhangi bir yükleme durumunda VBO modelinin içerdiği durum değişkenlerinin gelişimi Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4. 5 “Overstress” modelin durum değişkenlerinin gelişimi

KİNEMATİK PEKLEŞME**5.1 Bauschinger Etkisi**

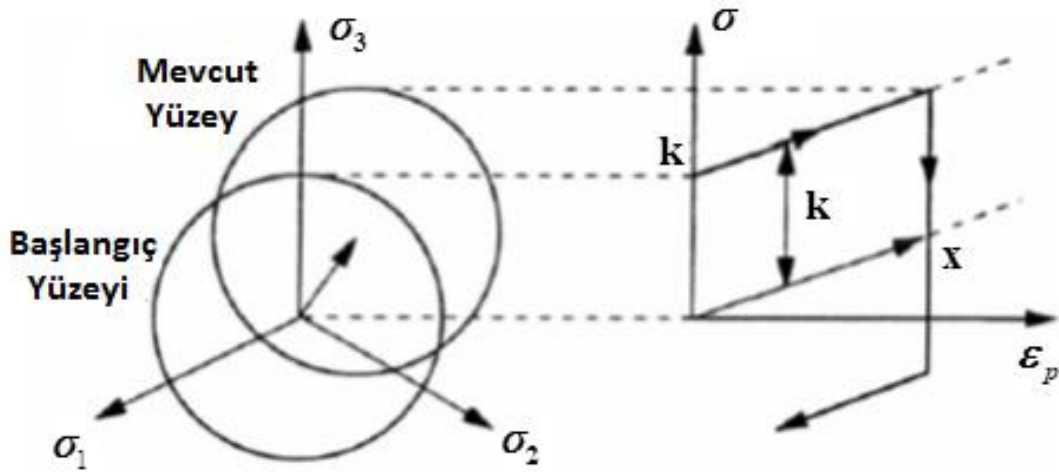
Plastik bölgede çekme veya basma şeklinde yüklenmiş bir deney numunesini göz önüne alalım. Yük kaldırıldıktan sonra numune ters yönde akma gerçekleşinceye kadar tekrar yüklenirse; yeniden yüklemede (ters yönde uygulanan yükleme) ortaya çıkan akma gerilmesi orijinal yönde yapılan yüklemede ortaya çıkan akma gerilmesinden daha düşük olacaktır. Bu olay ilk olarak Bauschinger tarafından gözlemlendiği için “Bauschinger etkisi” olarak adlandırılmıştır ve Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1 Bauschinger etkisi

Başlangıçta çekmeye zorlanan malzemede akma, A noktasında meydana gelmektedir. Plastik alanda B noktasında yük boşaltıldığında, geriye dönüş OA doğrusuna paralel BC doğrusu boyunca olur. Malzeme bu kez basmaya zorlanırsa akma D noktasında meydana gelir. D noktasının verdiği akma sınırı değeri B noktasındaki değerden daha düşüktür.

Bauschinger etkisi çok kristalli malzemelerde gözlemlenebildiği gibi tek kristalli malzemelerde de gözlenebilen bir etkidir. Bu etki, bir önceki yüklemenin sebep olduğu dislokasyon alanlarının anizotropisi ile açıklanabilmektedir. Bu etkinin varlığı plastik deformasyon modelini oldukça karmaşık hale getirdiğinden genellikle daha basitleştirilmiş bir model olan **kinematik pekleşme modeli** kullanılmaktadır. Bu modele göre; ters yönde yapılan yükleme esnasında akma gerilmesindeki azalma miktarı, orijinal yönde akma gerilmesinden itibaren yapılan yükleme esnasındaki gerilme artımına eşittir. Şekil 5.2’de **lineer pekleşmenin** gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 5. 2 Lineer kinematik pekleşmenin şematik gösterimi a) Deviatorik düzlemde
b) Gerilme – Gerinim Yanıtı.

5.2 Kinematik Pekleşme Modelleri

Yapılan literatür taramasında kinematik gerilmenin, gerinim toplanması üzerine en fazla etki eden faktör olduğu görülmüştür. Bu konuda birçok çalışma yapılarak kinematik pekleşme kuralları önerilmiştir. Bunlardan bazıları, Prager [74], Ziegler [75], Armstrong ve Frederick [76], Mroz [77], Phillips [78], [79], [80], Dafalia ve Popov [81], Chaboche [82], [83], [84], Kaneko [85], [86], Tseng ve Lee [87], Burlet ve Cailletaud [88], Voyiadjis ve Siyakumar [89], [90], Ohno ve Wang [91], [92], Xia ve Ellyin [93], [94], Delobelle [95], McDowell [96], Jiang ve Sehitoglu [97], [98], Voyiadjis ve Basuroychowdhury [99], Abdel-Karim ve Ohno [100], Kang [101], Chen ve Jiao [102], Abdel-Karim [103] kinematik pekleşme kurallarıdır.

Çalışmalarda kinematik pekleşme kurallarını düzenlenmeyi deneyerek gerinim toplanması yanıtlarını modellediklerinde gerinim toplanması yanıtlarında kinematik pekleşme kurallarının öneminin büyük olduğu görülmüştür. Bu durum birçok araştırmacıyı kinematik pekleşme kuralı içine yükleme durumuyla ilgili terimleri ve parametreleri dahil etmeye motive etmiştir.

5.2.1 Klasik Kinematik Pekleşme Kuralı (Prager)

İlk kinematik pekleşme kuralı Prager tarafından önerilmiştir. Denklem 5.1'de $\dot{k}$ kinematik gerilmenin deviatorik parçasıdır. E_T tanjant modülü ve $\dot{e}^{in}$ inelastik gerinim hızıdır. Prager'ın kinematik pekleşme kuralına **klasik kinematik pekleşme kuralı** da denir ve bu isim yaygın olarak kullanılmaktadır. Klasik kinematik pekleşme kuralında basma yönünde yapılan yükleme esnasında akma gerilmesindeki azalma miktarı, çekme yönünde yapılan akma gerilmesinden itibaren yapılan yükleme esnasındaki gerilme artımına eşit olarak alınmaktadır. Bu yüzden bu kural gerinim toplanmasını modelleyememektedir. Klasik kinematik pekleşme kuralı denklem 5.1 ile

$$\dot{k} = \bar{E}_T \dot{e}^{in} \quad (5.1)$$

ifade edilmektedir [74].

5.2.2 Armstrong ve Frederick Kinematik Pekleşme Kuralı

Armstrong ve Frederick kinematik pekleşme kuralında, Klasik kinematik pekleşme kuralına *dinamik toparlanma* terimini içeren yeni bir parametre eklenmiştir. Geliştirilen bu model denklem 5.2’de verilmektedir.

$$\dot{\mathbf{k}} = E_T \dot{\mathbf{e}}^{in} - D \mathbf{k} \dot{\mathbf{p}} \quad (5.2)$$

Burada D malzeme parametresidir. $\dot{\mathbf{p}}$ ise, inelastik gerinim hızının skaler çarpımıdır ve

$$\dot{\mathbf{p}} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\mathbf{e}}^{in} : \dot{\mathbf{e}}^{in})} \quad \text{şeklinde gösterilmektedir [76].}$$

5.2.3 Burlet ve Cailletaud Kinematik Pekleşme Kuralı

Klasik kinematik pekleşme kuralı ile Armstrong ve Frederick kinematik pekleşme kuralı ile ilgili literatürde birçok çalışmada kullanılmıştır. Bunlardan biri, Burlet ve Cailletaud kinematik pekleşme kuralıdır. Armstrong ve Frederick kinematik pekleşme kuralındaki *dinamik toparlanma* terimine akış yönünü belirten n parametresini eklemiştir. Akış yönü $n = \dot{\mathbf{e}}^{in} / \dot{\mathbf{p}}$ olarak verilmiştir. Burada D malzeme parametresidir. Geliştirilen bu model denklem 5.3’de görülmektedir [88].

$$\dot{\mathbf{k}} = \bar{E}_T \dot{\mathbf{e}}^{in} - D(\mathbf{k}; n) \dot{\mathbf{e}}^{in} \quad (5.3)$$

5.2.4 Ohno ve Wang Kinematik Pekleşme Kuralı

Ohno ve Wang tarafından geliştirilmiş gerinim toplanması davranışını modellemek üzere geliştirilmiş olan pekleşme kuralı birkaç nonlineer kinematik pekleşme kuralının süperpoze edilmesiyle olur. Ohno and Wang tarafından formüle edilen kinematik pekleşme kuralında ki *dinamik toparlanma* terimi pekleşme değeri kritik bir değere ulaştığında aktif olmaktadır. Bu eşik değerindeki *dinamik toparlanma* terimi tek eksenli yükleme koşullarında gerinim toplanması davranışını tanımlasa da çok eksenli yükleme koşullarında gerinim toplanması davranışını modelleyememektedir. Kinematik gerilme M sayıda kısmı içermektedir ve bu M sayıda parçanın toplamı kinematik gerilmeye eşit olmaktadır. Kinematik gerilmenin M sayıda kısımda olması gerinim toplanması davranışını geliştirse de malzeme sabitlerinin sayısı artmaktadır. Ohno ve Wang modelinde Heaviside birim adım fonksiyonu bir üstelle değiştirilerek bir miktar nonlineerlik elde edilmiştir. *Dinamik toparlanma* teriminin tek eksenli yükleme altında

histerisiz döngüsünü oluşturarak gerinim toplanmasına sebep olur. Bu sayısal değer m_i tek eksenli gerinim toplanması yanıtları ile belirlenir. Ayrıca modelde $\dot{\mathbf{p}}$ yerine $\left\langle d\boldsymbol{\varepsilon}^p : \frac{\boldsymbol{\alpha}_i}{f(\boldsymbol{\alpha}_i)} \right\rangle$ terimi yazılmıştır. Bu şekilde çok eksenli yüklemdeki bazı etkiler modele katılmıştır bu yüzden modelin çok eksenli gerinim toplanmasının modellemesi iyileşmiştir. Ayrıca bu durum tek eksenli gerinim toplanmasının modellemesini de etkilememektedir. Birkaç nonlinear kinematik pekleşme kuralının süperpoze edilmesiyle Ohno ve Wang tarafından modelin gerinim toplanması davranışını iyileştirmek için denklem 5.4 yazılmıştır [91], [92].

$$\dot{\mathbf{k}} = \sum_{i=1}^4 \dot{\mathbf{k}}_i = \frac{2}{3} C_{k_i} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{in} - \nu \mathbf{k}_i \left\langle \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{in} \cdot \frac{\bar{\mathbf{k}}_i}{f(\mathbf{k}_i)} \right\rangle \left(\frac{f(\mathbf{k}_i)}{C_{k_i}/\gamma_i} \right)^{m_i} \quad (5.4)$$

5.2.5 Chaboche Kinematik Pekleşme Kuralı

Chaboche lineer olmayan kinematik pekleşme kuralını ayırmış formda yazmak için denklemi 4 kısma ayırmıştır. İlk üç kısım Armstrong ve Frederick kinematik pekleşme kuralının aynısıdır. Dördüncü kısım kinematik pekleşme kuralındaki dinamik toparlanma terimi içine Heaviside birim adım fonksiyonu katılmıştır, bu fonksiyon ile pekleşme değeri kritik bir değere ulaştığında aktif olmakta bu değer altında kalırsa aktif değildir. Eşik değeri dışında kaldığında dördüncü kısım Armstrong ve Frederick gibi çalışmaktadır. Chaboche Kinematik Pekleşme Kuralı denklem 5.5, 5.6 ve 5.7 ile

$$\dot{\mathbf{k}} = \sum_{i=1}^4 \dot{\mathbf{k}}_i \quad (5.5)$$

$$\dot{\mathbf{k}}_i = \frac{2}{3} C_{k_i} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{in} - \gamma_i \mathbf{k}_i \dot{\mathbf{p}} \quad i=1,2,3 \quad (5.6)$$

$$\dot{\mathbf{k}}_i = \frac{2}{3} C_{k_i} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{in} - \gamma_i \mathbf{k}_i \left(1 - \frac{\bar{\mathbf{k}}_i}{f(\mathbf{k}_i)} \right) \dot{\mathbf{p}} \quad i=4 \quad (5.7)$$

ifade edilmektedir [82], [83], [84].

Burada $f(\mathbf{k}_i) = \sqrt{\frac{3}{2} (\mathbf{k}_i : \mathbf{k}_i)}$ 'dir.

UHMWPE’NİN TEK VE İKİ EKSENLİ ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞININ MODELLEMESİ

Bu tez çalışmasında tek ve iki eksenli yüklemeye maruz kalan UHMWPE malzemesinin VBO ile modellenmesi yapılmıştır. Doktora yürütücüsü Prof.Dr. Özgen Ümit Çolak’ın Tübitak 1001 projesi kapsamında North Carolina Üniversitesi’nde Prof.Dr. Tasnim Hassan ile yaptıkları deneysel çalışma sonuçları, modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler servo hidrolik test makinesi kullanılarak UHMWPE malzemesinden tüp şeklinde hazırlanmış deney numuneleri ile gerinim ve gerilme kontrollü yükleme altında tek ve iki eksenli çevrimsel testler şeklinde yapılmıştır. UHMWPE malzemesinin çevrimsel yüklemeler altındaki davranışını simule etmek için VBO modelinin içerdiği diferansiyel denklemler, DGEAR adlı diferansiyel çözücü program yardımıyla çözülmüştür. VBO modelindeki bünye denklemlerini içeren bir altprogram (subroutine) yazılarak DGEAR programı ile birlikte çalıştırılarak gerinim toplanması davranışı modellenmiştir.

6.1 Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisinde Malzeme Parametrelerinin Gerinim Toplanması Davranışına Etkisinin Araştırılması

UHMWPE malzemesinin mekanik davranışını matematiksel olarak ifade etmek üzere “overstress”’e dayanan viskoplastisite teorisi ile geliştirilmiş malzeme modeli çok sayıda malzeme parametresi içerir. Parametre belirlenirken herhangi bir parametredeki değişimin, modelin bütün davranışı üzerindeki etkisinin bilinmesi önemlidir. Değişen parametre, modelin bütün davranışı üzerinde çok büyük bir farklılığa sebep olabilir. 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 içerisinde bulundurur. Birleştirilmiş viskoplastisite teorisine dayanan VBO modeldeki malzeme parametreleri aşağıda sıralanmıştır:

B : Universal sabit, D : Drag Stress, m : Pekleşme Üsteli, E :Elastisite Modülü, E_T :Tanjant Modülü, A_c , A_0 , A_f , λ ve α model parametreleridir. C_1, C_2, C_3, C_4, ξ ve ζ malzeme sabitleridir, gerilme - gerinim eğrilerinin elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş yanıtları kullanılarak belirlenmiştir. Burada A izotropik gerilmedir, bu gerilme hıza bağlı bir gerilme olup pekleşme (hardening) ve yumuşama (softening) davranışını modeller. A_c : İzotropik gerilmenin değişim hızı, A_0 : İzotropik gerilmenin başlangıç hızı, A_f : İzotropik gerilmenin son hızıdır.

UHMWPE, 12.5 MPa gerilme genliğinde ve ortalama gerilme 4.5 MPa iken 90 çevrim gerilme kontrollü olarak tek eksenli çevrimsel yüklemde yapılan deneylerle [46] karşılaştırmak için overstress’e dayanan viskoplastisite teorisiyle aynı yükleme durumu modellenmiştir. (Şekil 2.13) Bu bölümde yukarıda saydığımız malzeme parametreleri değiştirilerek bu parametrelerin gerilme-gerinim eğrisini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu yüklem durumu incelenirken kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Malzeme parametre tablosu (Tek eksenli)

Akış fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	Parametre C
$B = 1 \text{ s}^{-1}$	$E = 7000 \text{ MPa}$	$C_1 = 20 \text{ MPa}$	$\lambda = 0.8$
$D = 85 \text{ MPa}$	$E_T = 220 \text{ MPa}$	$C_2 = 2300 \text{ MPa}$	$\alpha = 0.01$
$m = 2$	İzotropik Gerilme,A	$C_3 = 20$	
	$A_c = 1$	$C_4 = 8$	
	$A_0 = 19 \text{ MPa}, A_f = 20 \text{ MPa},$	$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}, \zeta=2$	

Çizelge 6.1’de verilen overstress’e dayanan viskoplastite teorisinde kullanılan malzeme parametrelerinin tümü, ayrı ayrı değiştirilerek elde edilen gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde gerinim toplanması açısından en önemli olanlar $C_2, \lambda, \alpha, m, E, E_T$ olarak belirlenmiştir. Şekil 6.1 ile Şekil 6.6 arasında sadece gerinim toplanması açısından önemli olan $C_2, \lambda, \alpha, m, E, E_T$ parametreleri için gerilme-gerinim eğrileri verilmiş diğer parametrelerin etkisi olmadığı için modelleme sonuçlarına bu çalışmada yer verilmemiştir.

Şekil fonksiyonu (ψ), C_1, C_2, C_3, C_4, ξ ve ζ parametrelerini içermektedir. Şekil

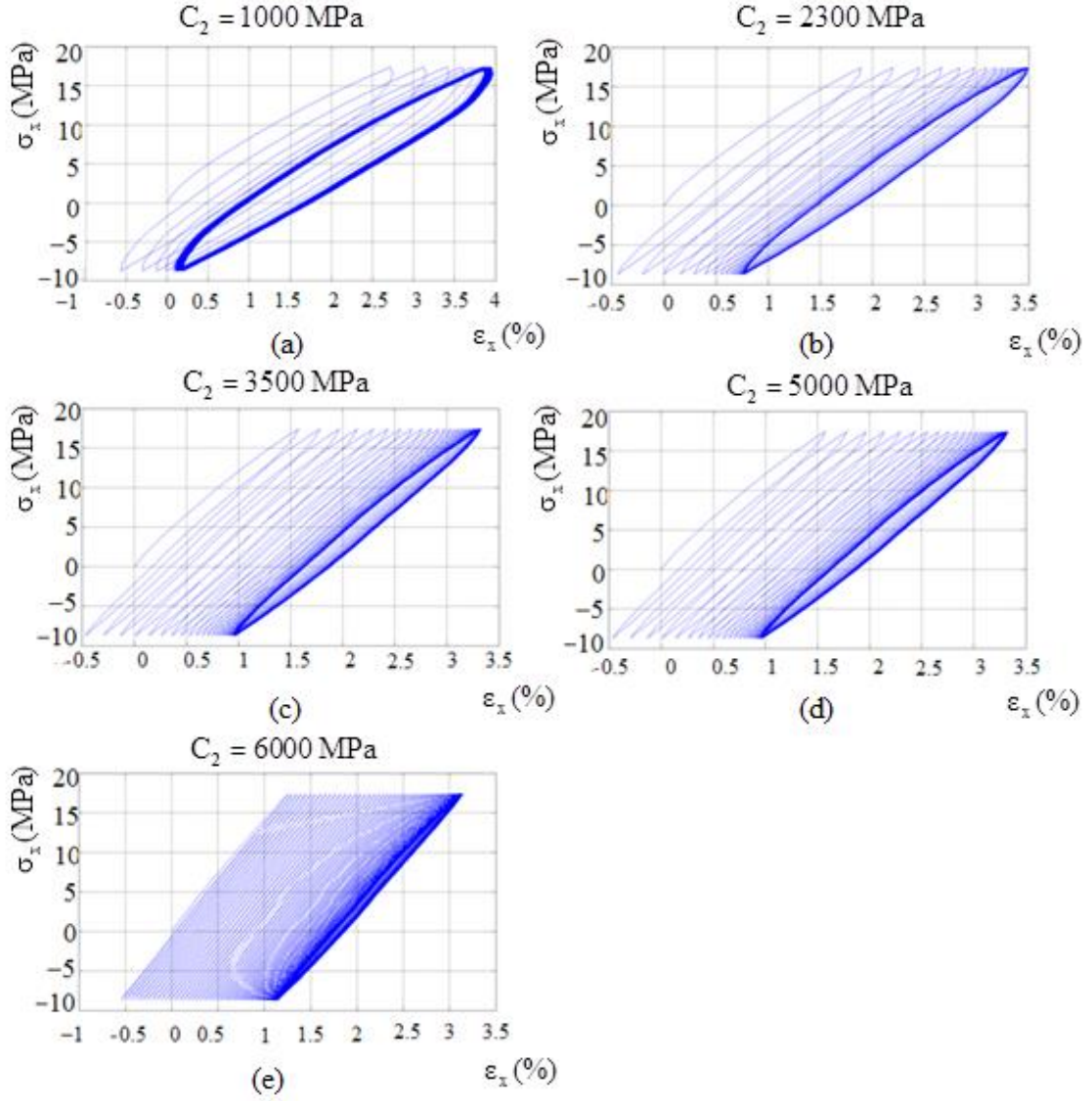
$$\text{fonksiyonunun } \psi = \psi_1 + \left(\frac{C_2 - \psi_1}{\exp C_3 |\epsilon^m|} \right),$$

$$\psi_1 = C_1 \left(1 + C_4 \left(\frac{|G|}{A + |K| + \xi \Gamma^\zeta} \right) \right) \text{ denklemleri ile matematiksel ifadesi}$$

verilmiştir. Şekil fonksiyonu gerilme - gerinim eğrilerinde elastik bölgeden viskoplastik bölgeye geçişi etkilemektedir.

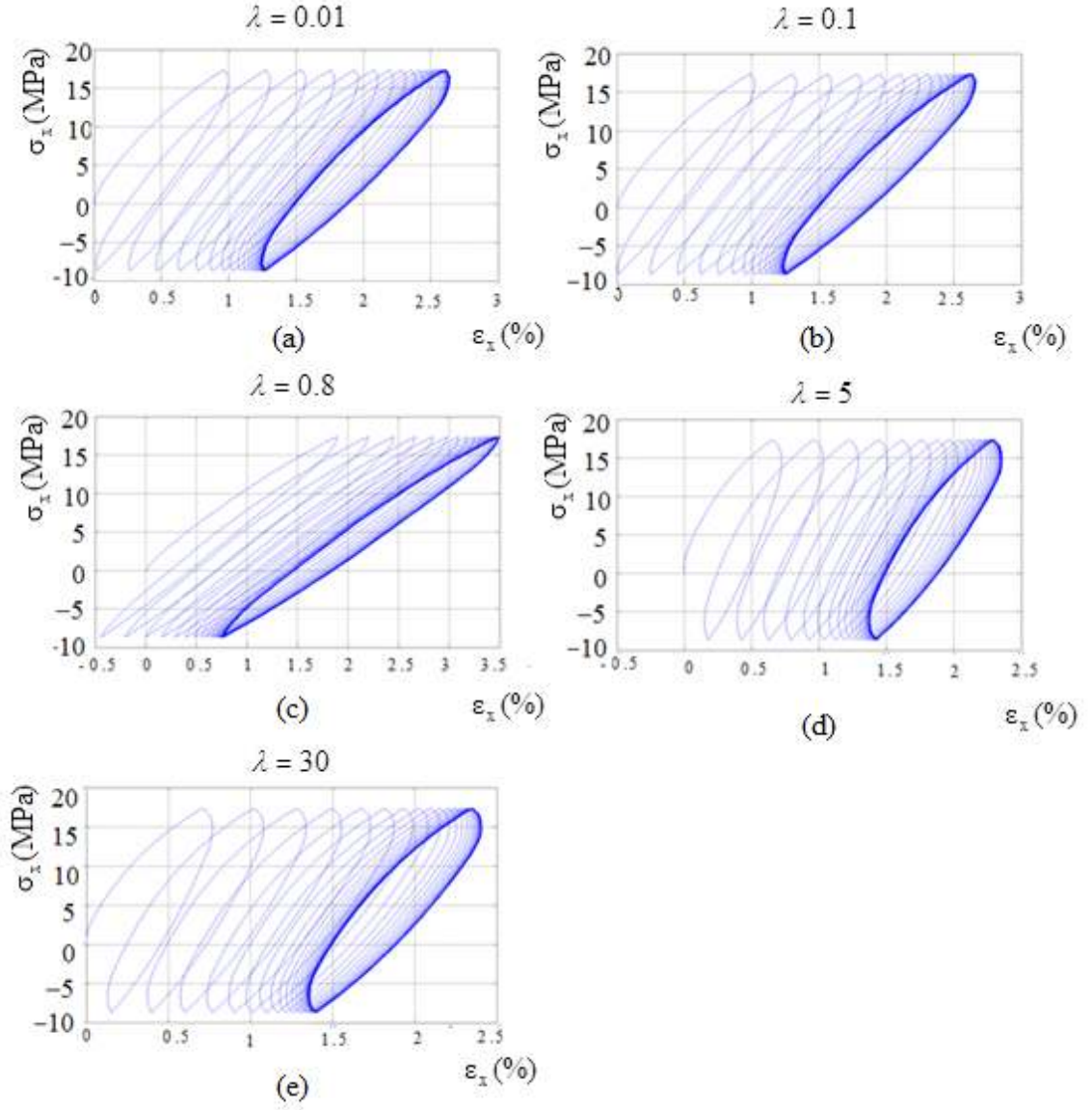
C_2 parametresi 1000 MPa, 2300 MPa, 3500 Mpa, 5000 MPa, 6000 MPa olarak alınmıştır. Şekil 6.1’de belirtilen C_2 parametre değerleri için elde edilen gerilme-gerinim eğrileri görülmektedir.

C_2 'nin artması gerinim toplanması miktarında önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Ancak **saturasyon** için geçen çevrim sayısında değişikliğe neden olmuştur. C_2 'nin artması ile saturasyon için geçen çevrim sayısı artmıştır.



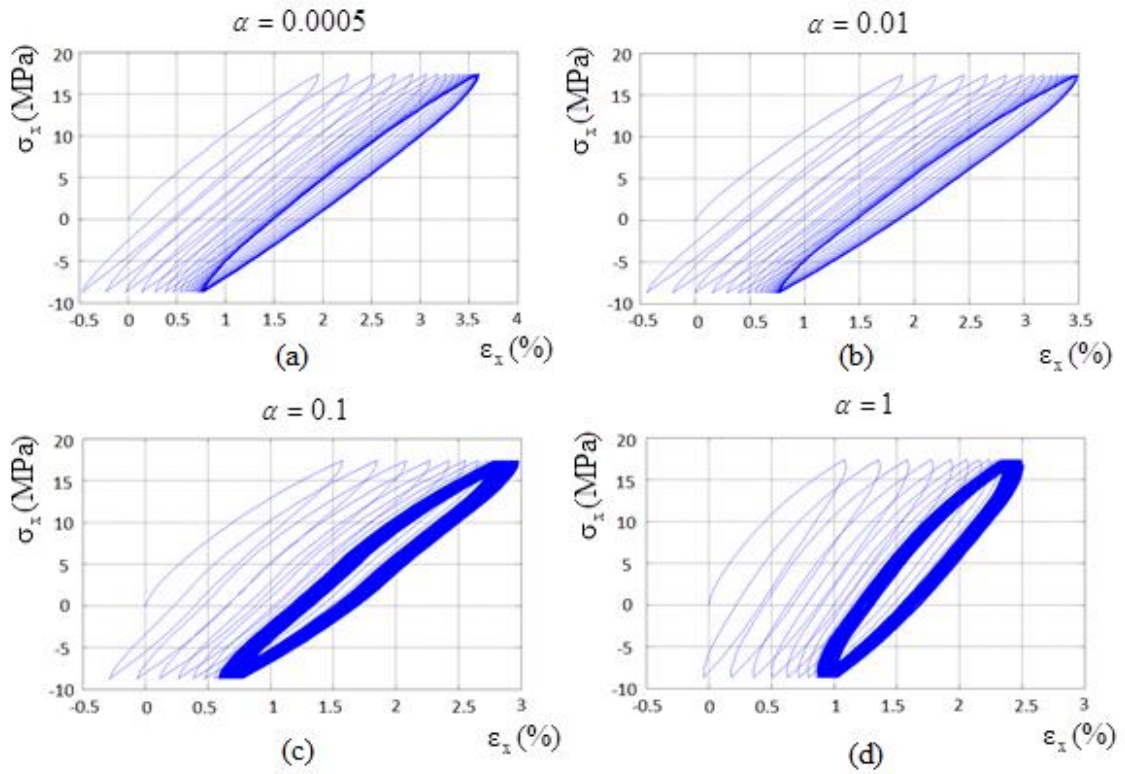
Şekil 6. 1 C_2 parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi

Lineer olmayan boşaltma davranışını modellenmesini sağlayan $C = 1 - \lambda |\mathbf{G} - \mathbf{K}| / A^\alpha$ fonksiyonunda yer alan λ malzeme parametresindeki değişim Şekil 6.2’de incelenmiştir. λ 0.01, 0.1, 0.8, 5, 30 olarak alınmıştır.



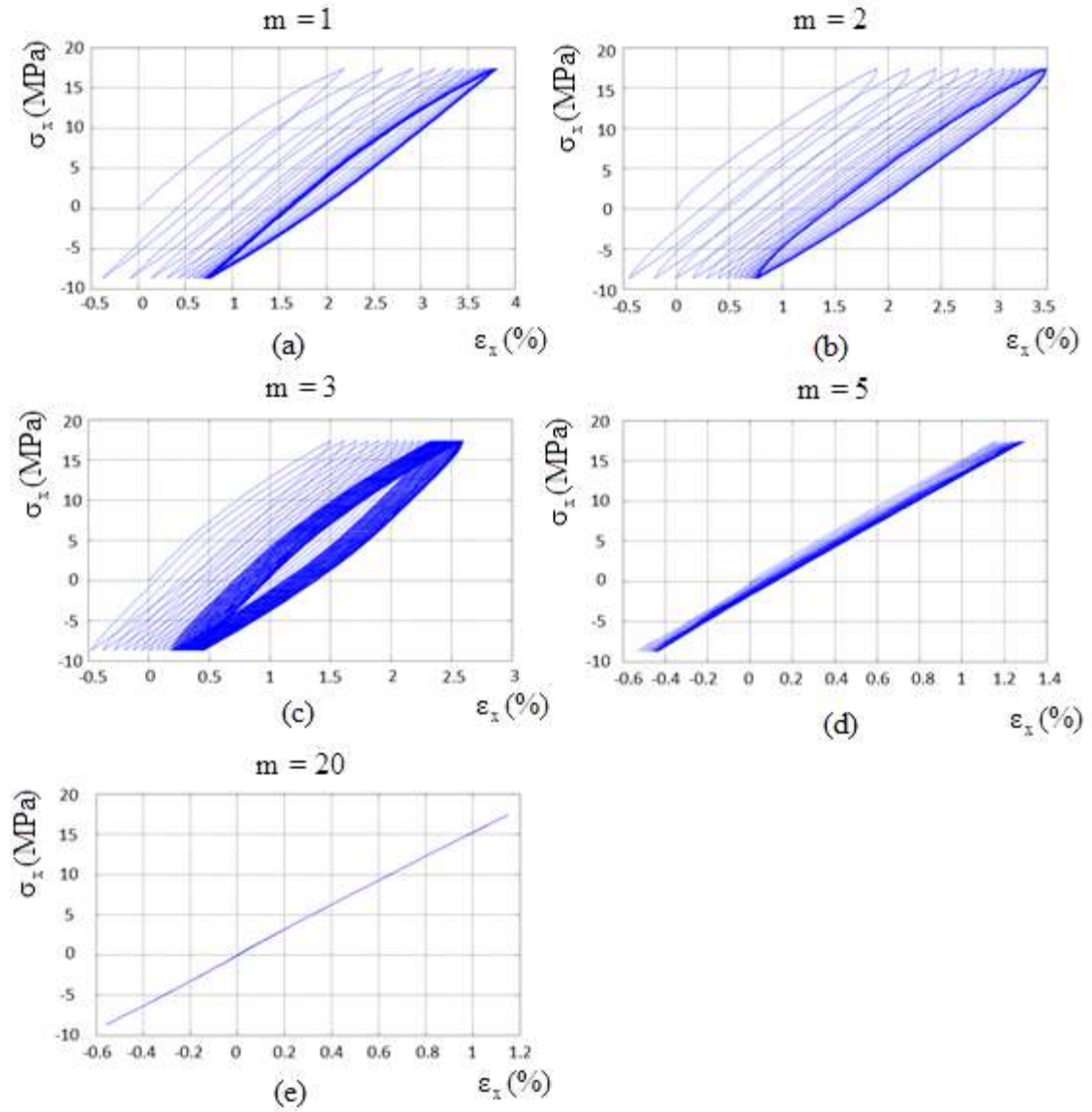
Şekil 6. 2 λ parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi

α malzeme parametresi lineer olmayan boşaltma davranışını modellenmesini sağlayan $C = 1 - \lambda(|\mathbf{G} - \mathbf{K}|/A)^\alpha$ fonksiyonunda yer almaktadır. Şekil 6.3’de α malzeme parametresindeki değişimi incelemek için gerilme-gerinim eğrileri görülmektedir. α 0.0005, 0.01, 0.1, 1 olarak alınmıştır. $\alpha = 0.01$ iken deneysel gerilme – gerinim eğrisine (Şekil 3.3a) en yakın olmaktadır. α ’nın artması ile saturasyon hızlı olmuş ve gerinim toplanması miktarı azalmıştır.



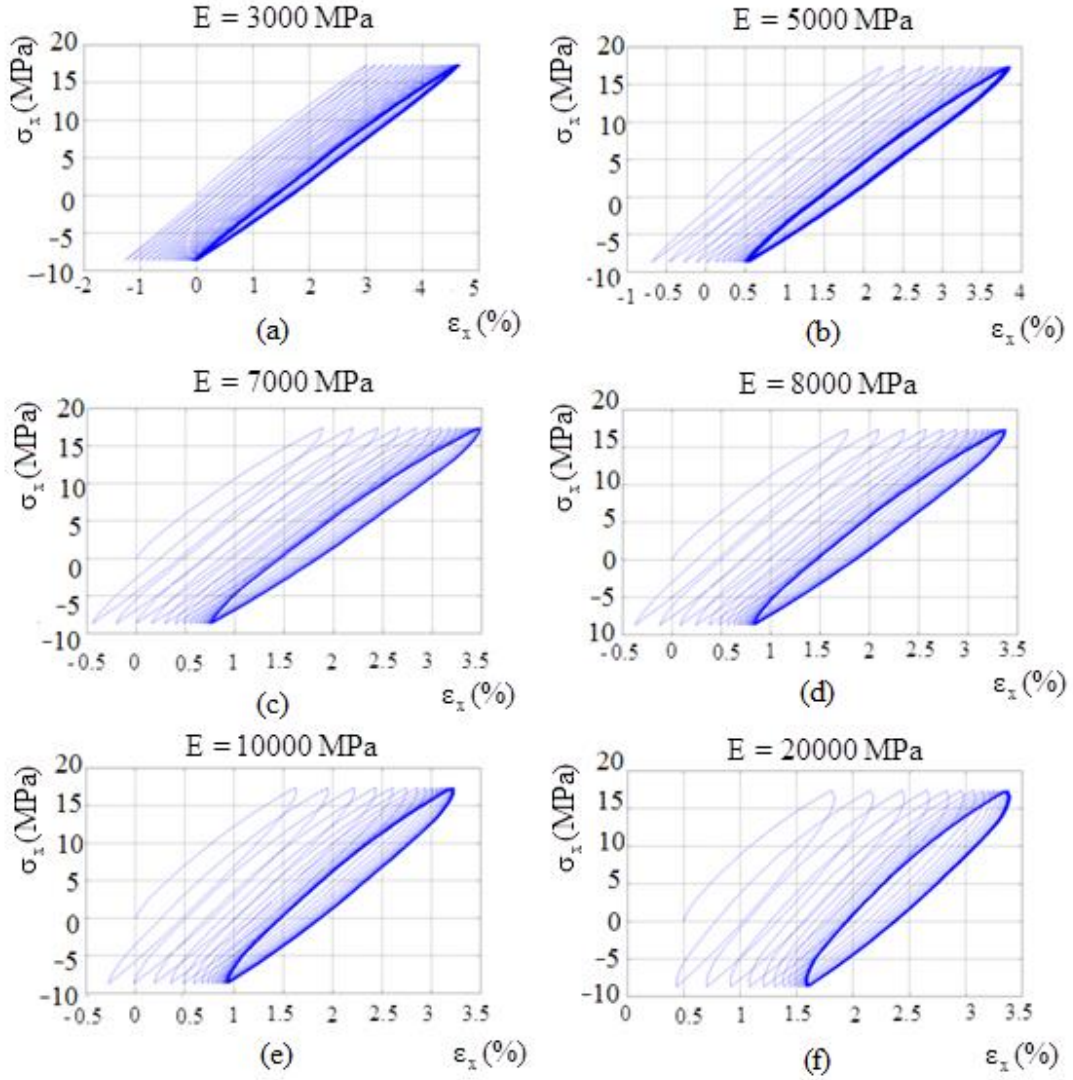
Şekil 6. 3 α parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi

Lineer olmayan hız bağımlılığını belirleyen akış fonksiyonunda $F\left[\frac{\Gamma}{D}\right] = B\left(\frac{\Gamma}{D}\right)^m$ yer alan m malzeme parametresindeki Şekil 6.4'de m malzeme parametresindeki değişimin etkisini incelemek için gerilme-gerinim eğrileri görülmektedir.



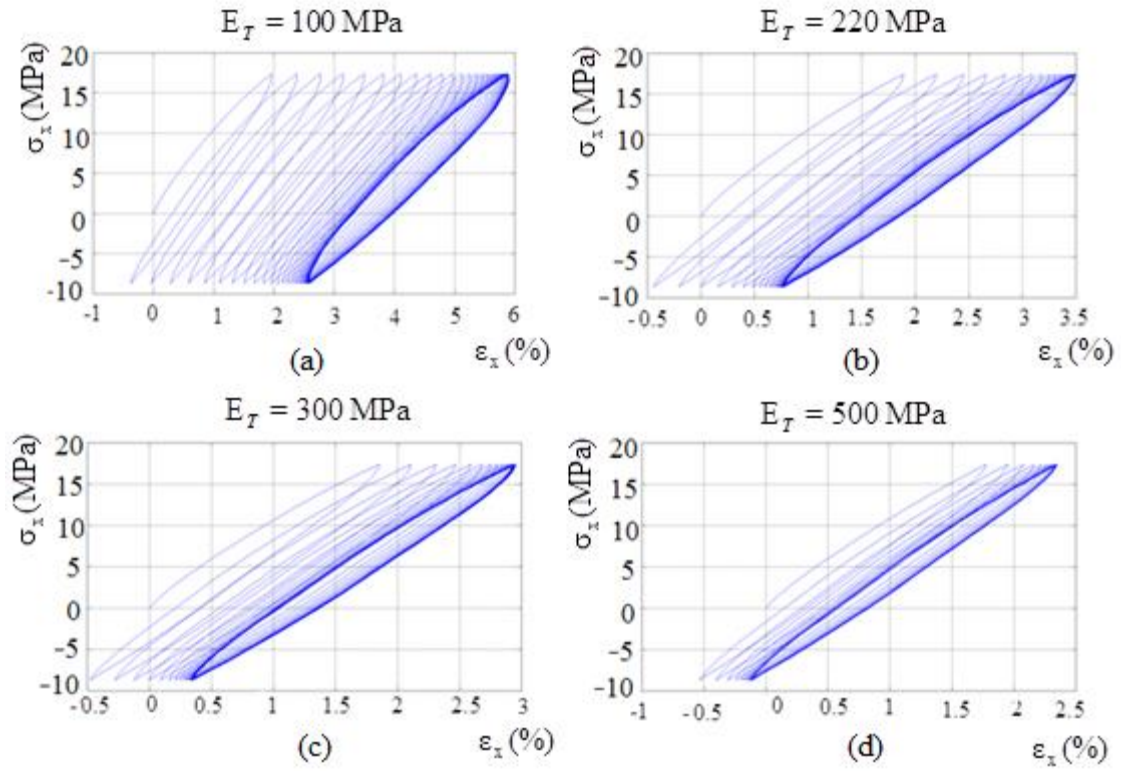
Şekil 6. 4 m parametresinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi

Şekil 6.5’de elastisite modülü malzeme parametresindeki değişim incelenmiştir. Elastisite modülü olarak 3000, 5000, 7000, 8000, 10000, 20000 MPa alınmıştır. Elastisite modülünü arttırmak saturasyonun hızlı olmasını sağlamıştır.



Şekil 6. 5 Elastisite modülünün gerilme-gerinim eğrisine etkisi

Tanjant modülü 100, 220, 300, 500 MPa olarak alınmıştır. Şekil 6.6'da E_T tanjant modülü için elde edilen gerilme-gerinim eğrileri görülmektedir. E_T tanjant modülü arttıkça gerinim toplanması miktarı azalmıştır.

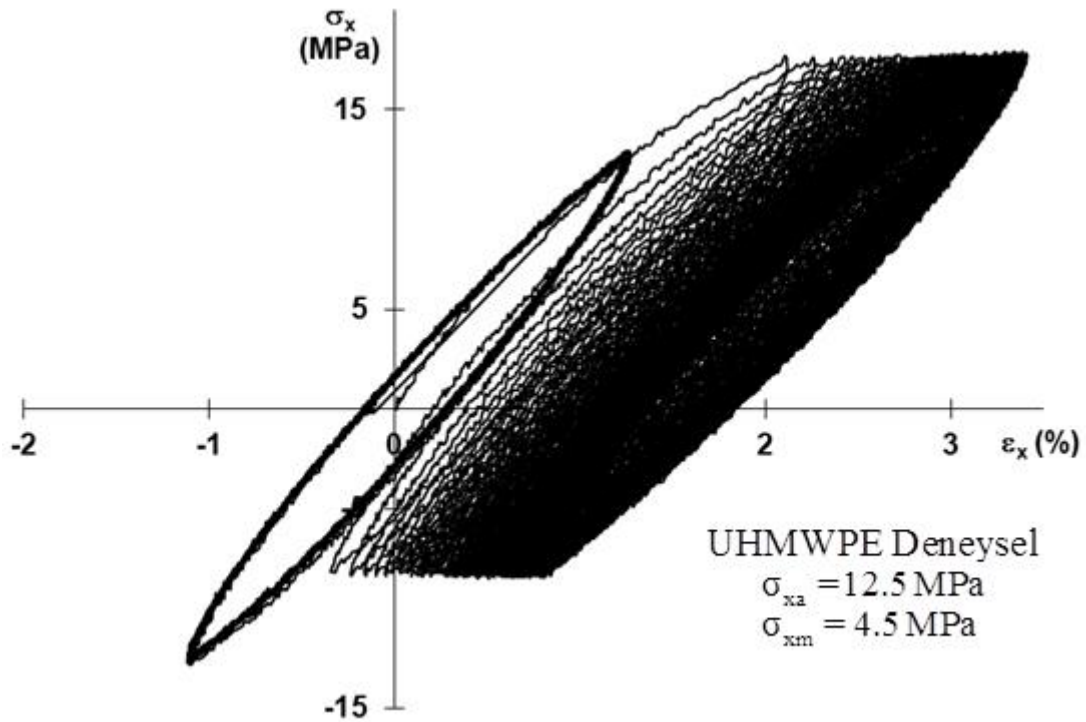


Şekil 6. 6 Tanjant modülünün gerilme-gerinim eğrisine etkisi

6.2 Kinematik Pekleşmenin Gerinim Toplanmasına Etkisi

Literatürde gerinim toplanması ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ([24], [25], [102], [103], [104]) diğer durum değişkenlerine (denge gerilmesi, izotropik gerilme ve drag stress) göre kinematik gerilmenin gerinim toplanmasına etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. VBO modelinin mevcut halindeki yükleme koşullarında durum değişkenlerinden biri olan kinematik gerilme için Prager modeli kullanılır. İlk olarak, VBO modelinin mevcut halinin, UHMWPE nin gerilme kontrollü tek eksenli çevrimsel yükleme halinde ortaya çıkan gerinim toplanmasını ne ölçüde modellediği araştırılmıştır.

Hassan T. ve ark. [46] yapmış olduğu çalışmada sabit gerilme genliğinde UHMWPE, 12.5 MPa ve 15 MPa gerilme genliğinde (10 çevrim) tam değişken yüklemeye maruz bırakıldıktan sonra aynı gerilme genliğinde ortalama gerilme 4.5 MPa'a çıkarılarak gerilme kontrollü deneylere devam edilmiştir. İkinci aşamada çevrim sayısı 90'dır. Deneysel sonuç Şekil 6.7'de verilmiştir. Görüldüğü gibi tam değişken yükleme halinde malzemede gerinim toplanması meydana gelmezken, ortalama gerilme artırıldığında eksenel doğrultuda gerinim toplanması gözlemlenmiştir. Belli bir çevrimden sonra saturasyon görülmüştür.



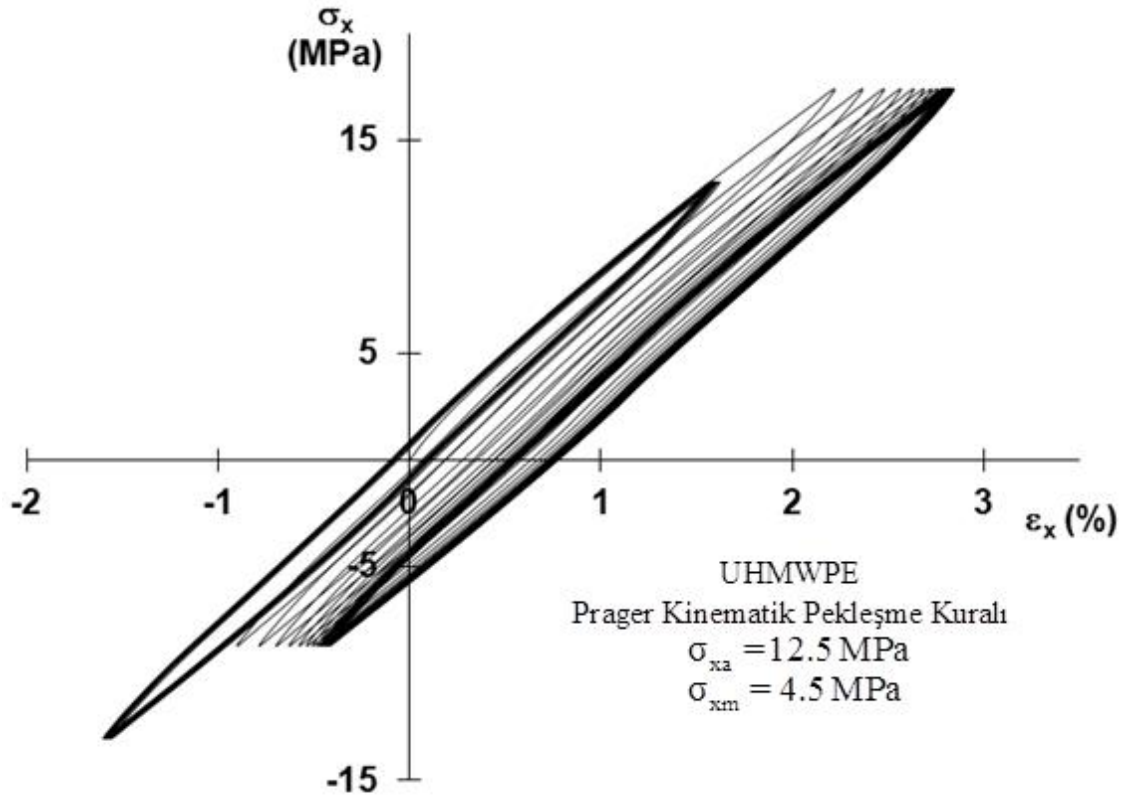
Şekil 6. 7 Gerilme - gerinim eğrisi [46]

Mevcut modelin modelleme kapasitesinin araştırılması için yukarıda bahsedilen deneysel çalışmadaki yükleme koşulları VBO modeli ile modellenmiştir. Bu modellemede kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6. 2 Prager kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (Tek eksenli)

Akış fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	Parametre C
$B = 1 \text{ s}^{-1}$	$E = 7000 \text{ MPa}$ $E_T = 500 \text{ MPa}$	$C_1 = 20 \text{ MPa}$ $C_2 = 2300 \text{ MPa}$ $C_3 = 20 \text{ MPa}$ $C_4 = 8 \text{ MPa}$	$\lambda = 0.87$
$D = 85 \text{ MPa}$	İzotropik Gerilme, A	$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}$ $\zeta = 2$	$\alpha = 0.01$
$m = 2$	$A_c = 1$ $A_0 = 24 \text{ MPa}$ $A_f = 26 \text{ MPa}$		

Prager kinematik pekleşme kanunu kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarının sonuçları Şekil 6.8’de verilmiştir. Şekil 6.7’de deneysel olarak elde edilen 100.çevrim sonunda gerinim miktarı %3.5 iken, modelleme sonucunda $\varepsilon = \% 3$ olarak elde edilmiştir.



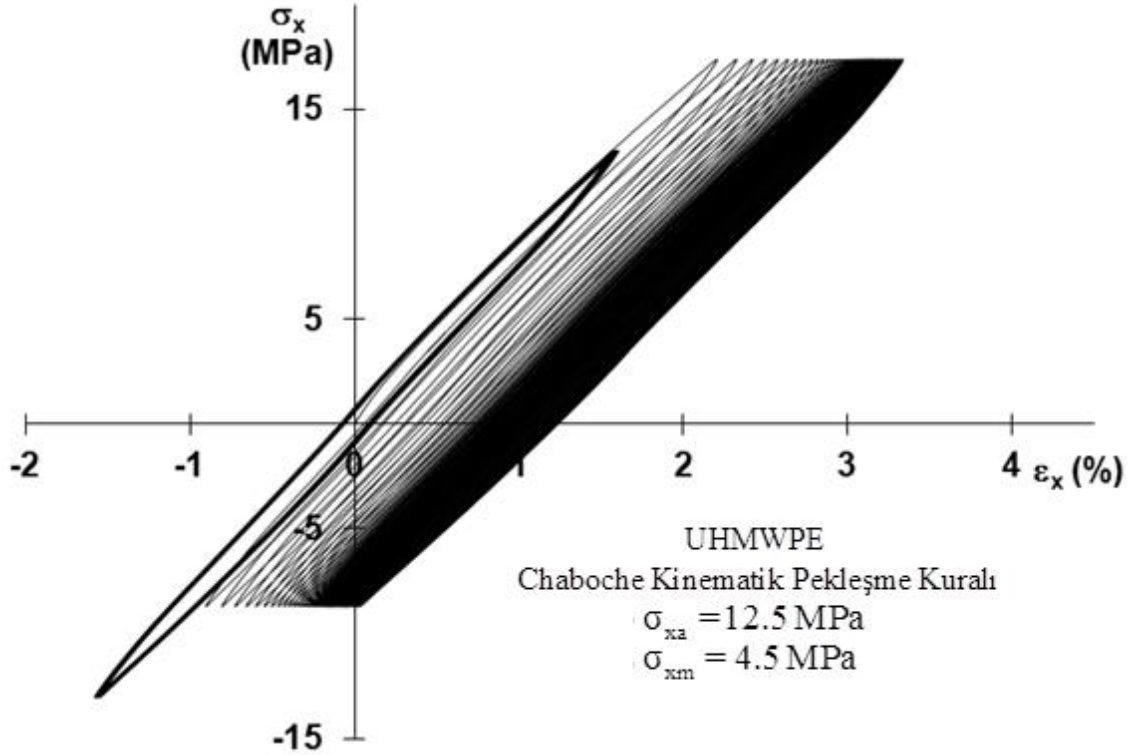
Şekil 6. 8 Tek eksenli çevrimsel yükleme için VBO modeli gerilme- gerinim eğrisi

Prager modelinin gerinim toplanmasını modellemede yetersizliğinin belirlenmesi üzerine, yaygın kullanılan Chaboche Kinematik pekleşme kanunu, kinematik gerilme olarak VBO modeline dahil edilmiştir.

Şekil 6.7’de gösterilen deneysel çalışma [46], Chaboche Kinematik pekleşme kanunu kullanılarak Çizelge 6.3’deki malzeme parametreleri ile “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi ile modellenmiştir. Şekil 6.9’da Chaboche Kinematik pekleşme kanunu ile VBO modelin gerilme – gerinim eğrisi verilmiştir. Bununla beraber, Şekil 6.9’da gösterilen model sonuçları bu çalışmada gerinim toplanması davranışını daha iyi açıklaması için bölüm 6.3’te iyileştirilecektir.

Çizelge 6. 3 Chaboche kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (Tek eksenli)

Akış fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	Parametre C	Kinematik Pekleşme
$B = 1 \text{ s}^{-1}$	$E = 7000 \text{ MPa}$	$C_1 = 20 \text{ MPa}$ $C_2 = 2300 \text{ MPa}$ $C_3 = 20 \text{ MPa}$ $C_4 = 8 \text{ MPa}$	$\lambda = 0.87$	$C_{k1} = 300 \text{ MPa}$ $C_{k2} = 300 \text{ MPa}$ $C_{k3} = 20 \text{ MPa}$ $C_{k4} = 1 \text{ MPa}$
$D = 85 \text{ MPa}$	İzotropik Gerilme, A	$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}$ $\zeta = 2$	$\alpha = 0.01$	$\gamma_1 = 0.5$ $\gamma_2 = 50$ $\gamma_3 = 0.5$ $\gamma_4 = 18.5$
$m = 2$	$A_c = 1$ $A_0 = 24 \text{ MPa}$ $A_f = 26 \text{ MPa}$			$\bar{k}_i = 5$

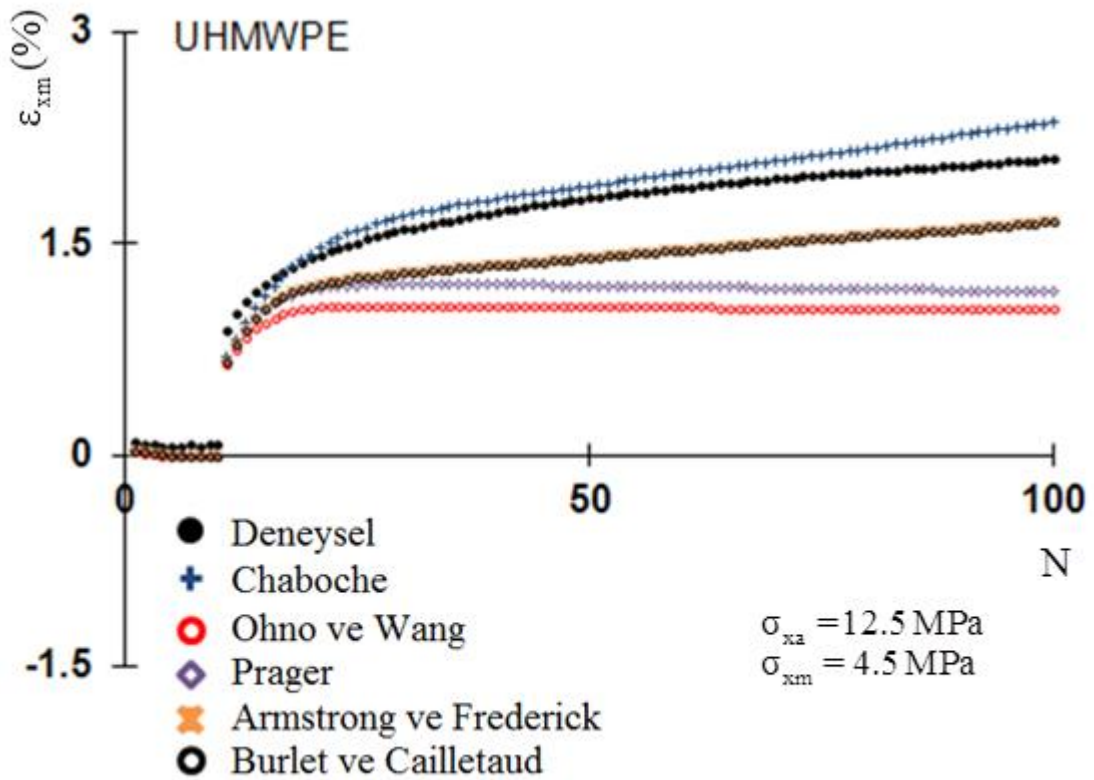


Şekil 6. 9 Tek eksenli çevrimsel yükleme için VBO modeli gerilme- gerinim eğrisi

Literatür araştırması ve Şekil 6.8 ve 6.9'da verilen sonuçlar dikkate alındığında, kinematik pekleşme kanunlarının malzemenin gerinim toplanması davranışını modellenmesinde önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Bu nedenle literatürde mevcut 5 kinematik pekleşme kanunu (Prager, Armstrong - Frederick, Burlet - Cailletaud, Ohno - Wang ve Chaboche kinematik pekleşme kanunları) kullanılarak, Şekil 6.7'de sonuçları verilen durum, VBO modeli ile modellenmiştir.

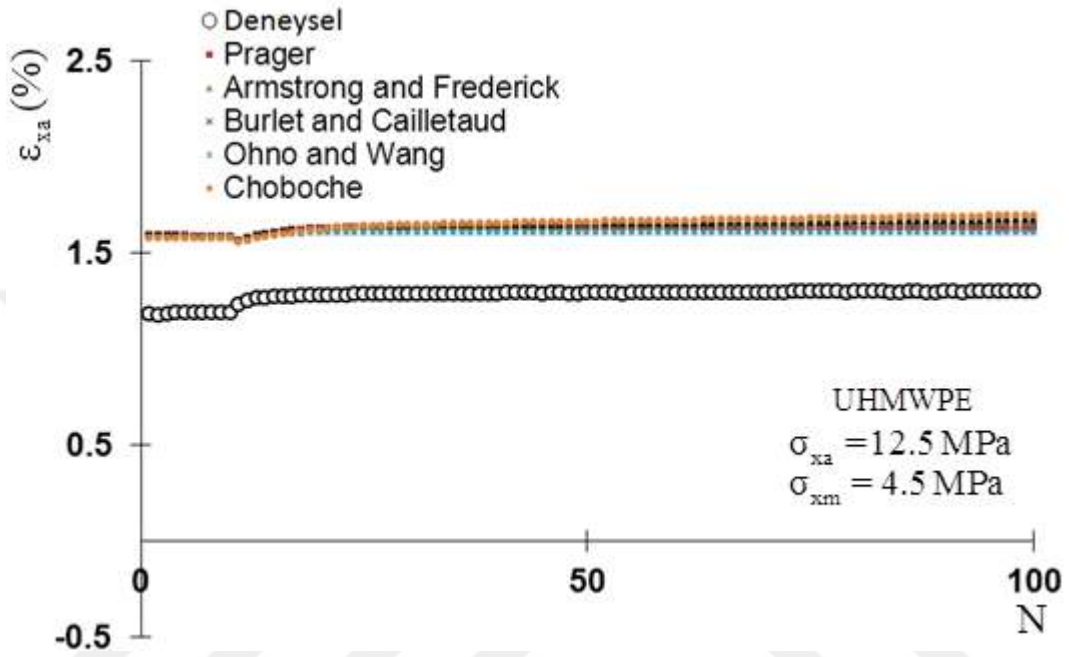
Bu kinematik pekleşme kanunlarının detayları bölüm 5'de verilmiştir. Her bir kinematik pekleşme kanunu kullanılarak yapılan modelleme sonuçları, ortalama gerinim – çevrim sayısı eğrisi ($\% \varepsilon_{xm}$ - N) eğrisi olarak Şekil 6.10'da verilmiştir.

Bu modelleme için kullanılan malzeme parametreleri $D=0.5$, $v=2$, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de listelenmiştir.



Şekil 6. 10 Tek eksenli çevrimsel yükleme için VBO modeli $\% \varepsilon_{xm}$ - N eğrisi

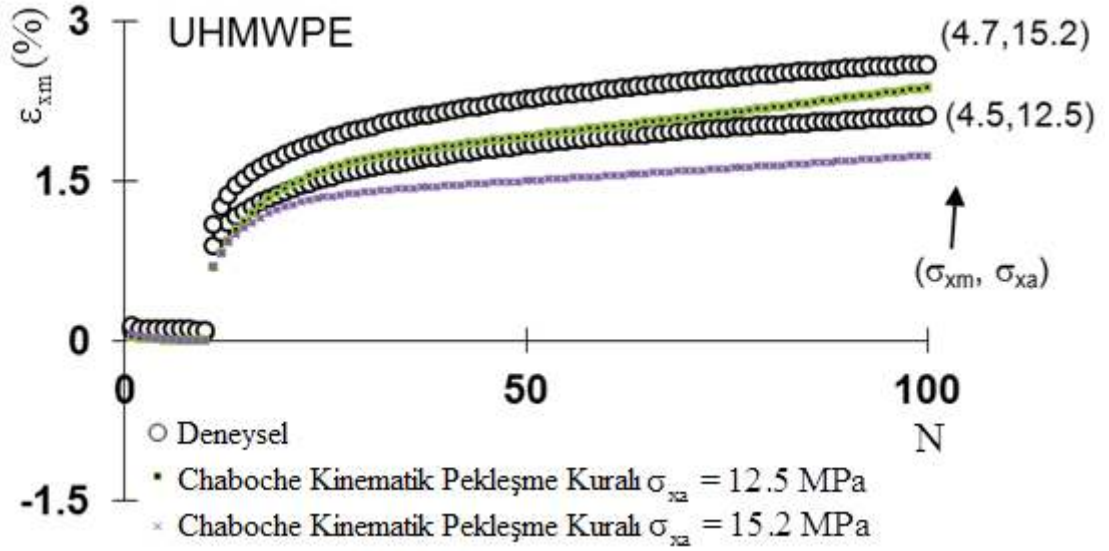
Şekil 6.11’de ki eğride beş kinematik pekleşme kanunu kullanılarak yapılan modelleme sonuçları gerinim genliği – çevrim sayısı eğrisi olarak Şekil 6.11’de verilmiştir. $\% \varepsilon_{xa}$ - N eğrisinde gösterilen kinematik pekleşme kanunları ile yapılan VBO modellerde gerinim genliğinin değişimi deneysel sonuca paralel ve aynı eğrileri vermiştir.



Şekil 6.11 $\% \varepsilon_{xa}$ - N eğrisi

Şekil 6.12’de ki eğride Chaboche kinematik pekleşme kanunu kullanılan VBO model için ortalama gerinim – çevrim sayısı eğrisi, 12.5 MPa ve 15.2 MPa gerilme genliği için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması görülmektedir. (Modellemede kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.)

Gerilme genliği 12.5 MPa ve 15.2 MPa olarak alındığında deneysel sonuçlarla uyumludur. Şekil 6.11’deki $\% \varepsilon_{xm}$ - Çevrim sayısı eğrisi UHMWPE’nin tek eksenli çevrimsel yükleme için gerinim toplanması davranışının modellenmesinde Chaboche kinematik pekleşme kuralının VBo model ile kullanımının iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 6. 12 % ε_{xm} - N eğrisi

6.3 “Overstress” Kavramına Dayanan Viskoplastisite Teorisi (VBO) ile Tek Eksenli Çevrimsel Yükleme Davranışının Modellenmesi

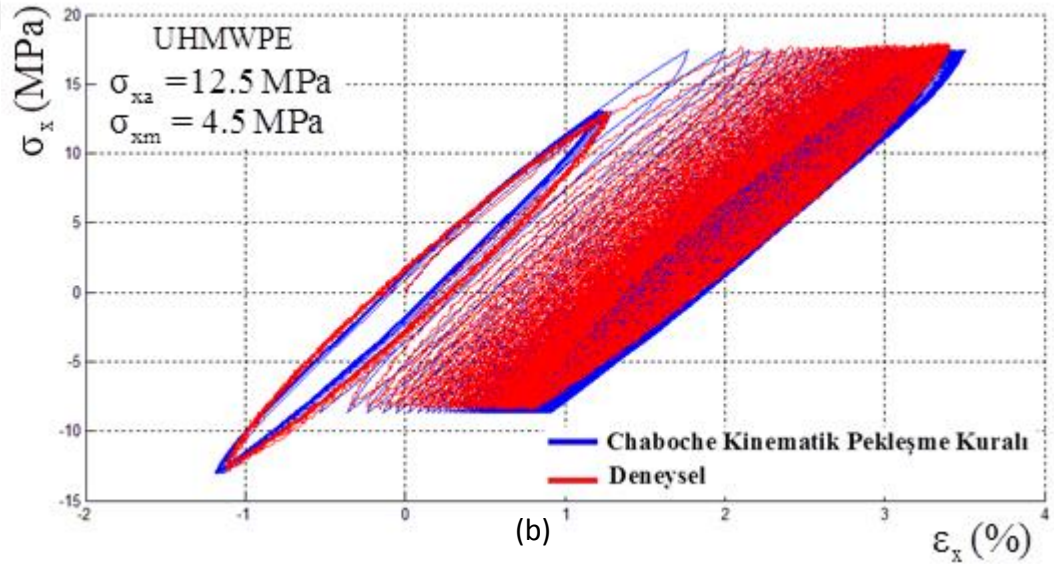
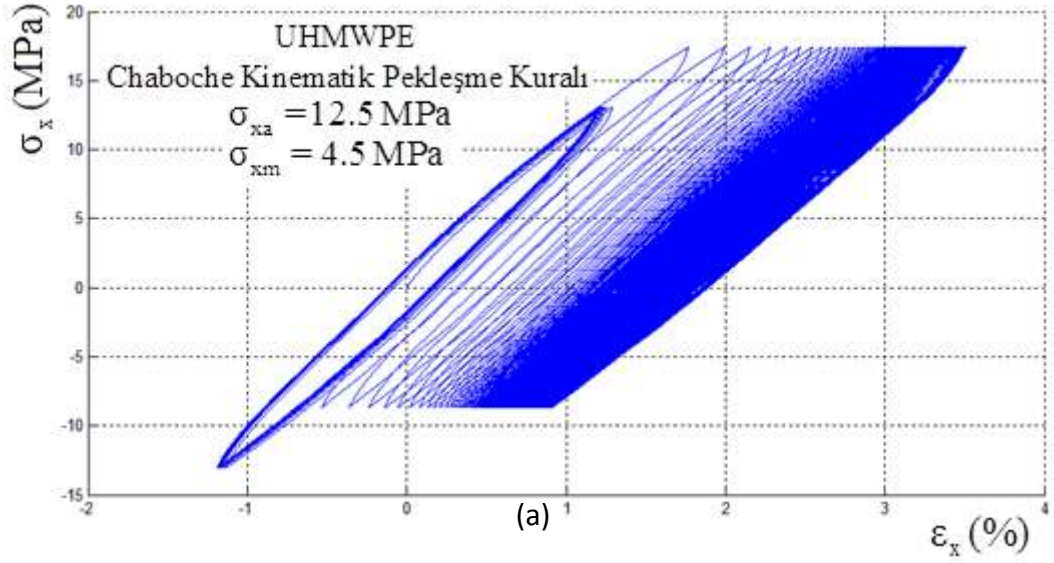
UHMWPE malzemesinin **Chaboche kinematik pekleşme kanunu** kullanılarak, tek eksenli çevrimsel yükleme ile gerinim toplanması davranışının, diğer kinematik pekleşme kurallarından daha iyi modellediği bölüm 6.2’de açıklanmıştır. Bu bölümde Chaboche kinematik pekleşme kanunu kullanılarak tek eksenli çevrimsel yükleme şartlarında “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile, malzeme parametreleri değiştirilerek gerinim toplanması sonuçları iyileştirilmiştir. Burada kullanılan parametreler Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6. 4 Chaboche kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (Tek eksenli)

Akış fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	Parametre C	Kinematik Pekleşme
$B = 1 \text{ s}^{-1}$	$E = 7000 \text{ MPa}$	$C_1 = 20 \text{ MPa}$ $C_2 = 2300 \text{ MPa}$ $C_3 = 20 \text{ MPa}$ $C_4 = 8 \text{ MPa}$	$\lambda = 0.8$	$C_{k1} = 220 \text{ MPa}$ $C_{k2} = 300 \text{ MPa}$ $C_{k3} = 20 \text{ MPa}$ $C_{k4} = 1 \text{ MPa}$
$D = 85 \text{ MPa}$	İzotropik Gerilme, A	$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}$ $\zeta = 2$	$\alpha = 0.01$	$\gamma_1 = 0.5$ $\gamma_2 = 50$ $\gamma_3 = 0.5$ $\gamma_4 = 18.5$
$m = 2$	$A_c = 1$ $A_0 = 14 \text{ MPa}$ $A_f = 28 \text{ MPa}$			$\bar{k}_i = 5$

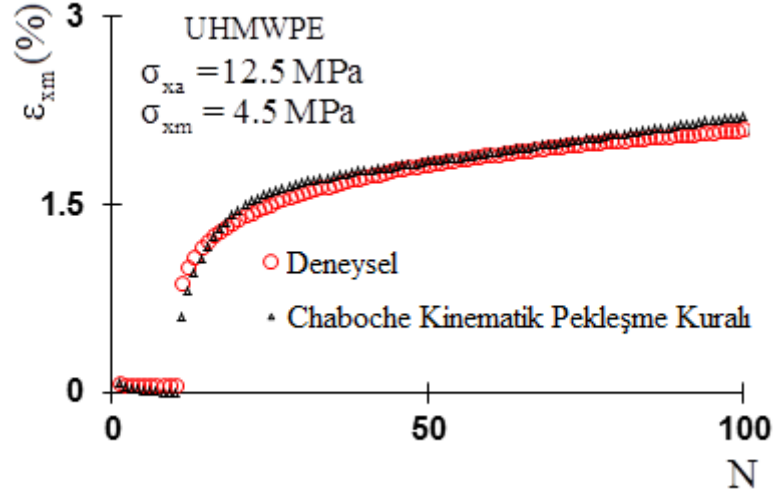
UHMWPE, 12.5 MPa gerilme genliğinde (10 çevrim), tam değişken yüklemeye maruz bırakıldıktan sonra aynı gerilme genliğinde ortalama gerilme 4.5 MPa'a çıkarılarak (90 çevrim), gerilme kontrollü yükleme yapılmıştır. Bu durum Chaboche kinematik pekleşme kuralı "overstress"e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) modeli içine katılmış Şekil 6.13a'da elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 6.7'de ki deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 6.13b'de verilmiştir.

Şekil 6.13'de Chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılarak "overstress"e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile elde edilen gerilme-gerinim eğrileri gerinim toplanması davranışının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu bu modelin tek eksenli gerinim toplanmasını çok iyi modelleyebildiğini göstermektedir.

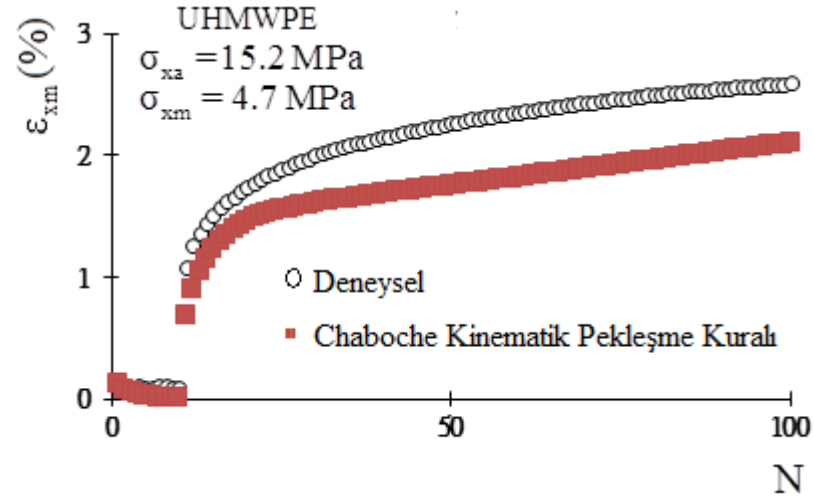


Şekil 6. 13 a) UHMWPE' nin tek eksenli çevrimsel yüklemelerde ki davranışının VBO ile modellenmesi b) Karşılaştırma

İki farklı gerilme genliği ($\sigma_{xa} = 12.5 \text{ MPa}$ ve 15.2 MPa) için VBO modelleme deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmış, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de ortalama gerinim – çevrim sayısı eğrileri verilmiştir. Her iki modellemelerde de kinematik pekleşme kanunu olarak Chaboche kinematik pekleşme kanunu kullanılmıştır.



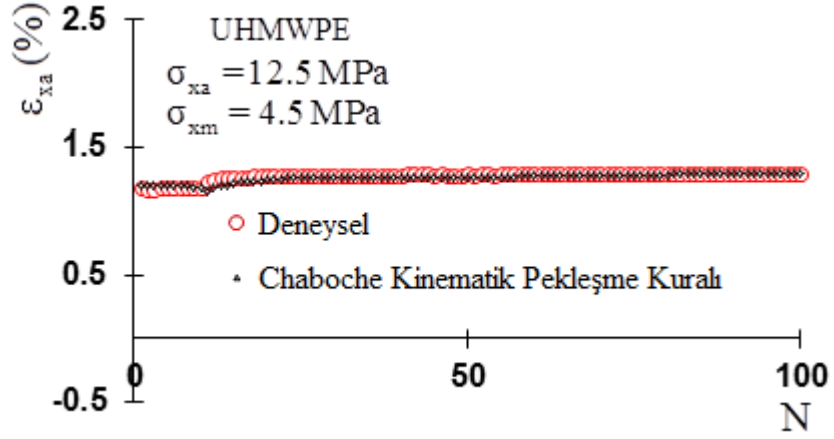
Şekil 6. 14 $\% \varepsilon_{xm}$ - Çevrim sayısı ilişkisi.



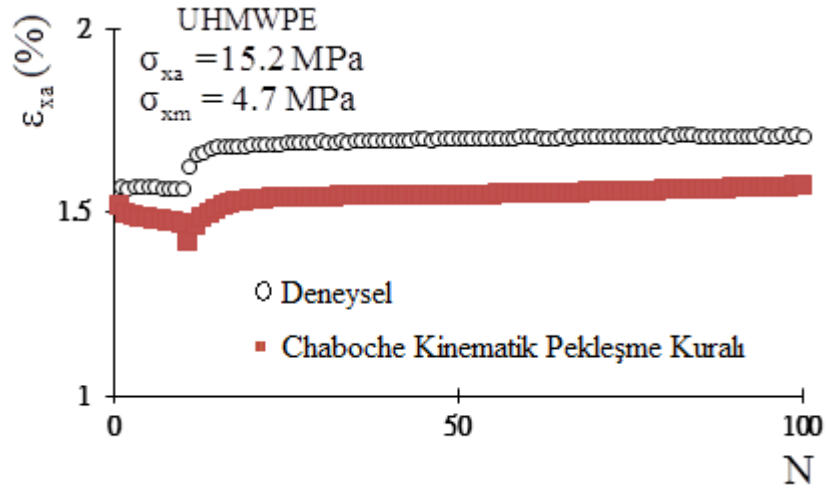
Şekil 6. 15 $\% \varepsilon_{xm}$ - Çevrim sayısı ilişkisi.

Şekil 6.14 ve 6.15 % Ortalama gerinim– çevrim sayısı değişimi gösteren eğrilerde iki gerilme genliği için yapılan VBO model ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak eğrilerin uyumundan Chaboche kinematik pekleşme kuralının iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

İki farklı ortalama gerilme genliği ($\sigma_{xa}=12.5$ Mpa ve 15.2 Mpa) için VBO modelleme deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de gerinim genliği – çevrim sayısı eğrileri verilmiştir.



Şekil 6. 16 % ε_{xa} - Çevrim sayısı ilişkisi.



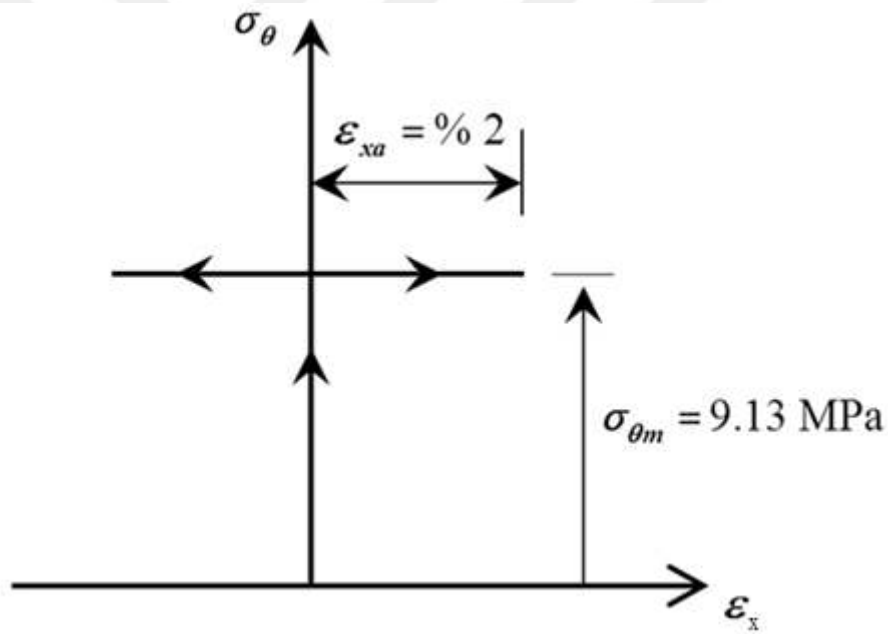
Şekil 6. 17 % ε_{xa} - Çevrim Sayısı ilişkisi.

Bölüm 6.3’de Chaboche kinematik pekleşme kuralı yapılan modelleme tek eksenli çevrimsel yüklem hali için UHMWPE’nin gerinim toplanması davranışını açıklayan uygun bir modellemedir.

6.4 İki Eksenli Yükleme

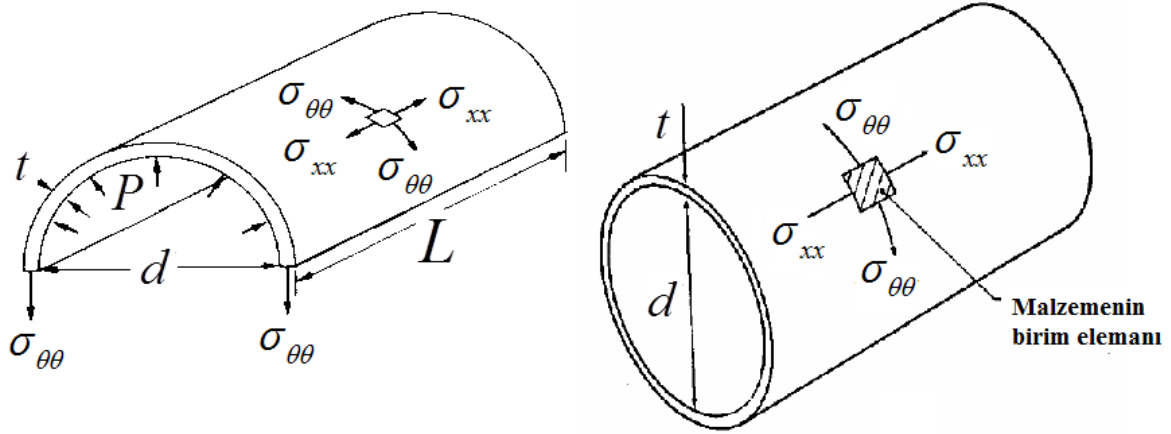
İki eksenli deneyler, tüp şeklinde UHMWPE numunesi için, sabit teğetsel gerilme boyunca sabit iç basınçta ve sonrasında ise simetrik eksenel gerinim kontrollü tekrarlanan yükleme altında yapılmaktadır. Sabit teğetsel gerilme yüzünden oluşan malzemenin gerinim toplanması teğetsel yön boyunca eksenel gerinimin ilerlemesi şeklindedir. Bu teğetsel gerinimin sebep olduğu gerinim toplanması tüp şeklindeki numunenin çapını kademeli olarak arttırır.

İki eksenli çevrimsel yüklemedeki eksenel histerisiz yanıtı tek eksenli gerinim kontrollü yanıtlarına benzediği kabul edilmektedir. UHMWPE numunesi ile 9.13 MPa sabit teğetsel gerilmede gerinim kontrollü $\epsilon_{xa} = \% 2$ çevrimsel yüklemede 100 çevrim tekrarlanarak deney yapılmıştır (Şekil 6.18).



Şekil 6. 18 İki eksenli yükleme geçmişi

Bu çalışmada ele alınan iki eksenli gerilme durumunu ifade eden Şekil 6.19'da gösterilen; uçları kapalı, ince cidarlı, iç basınca zorlanan bir kaptaki $\sigma_{\theta\theta}$ teğetsel ve σ_{xx} eksenel gerilmelerin, kalınlık boyunca (radyal yönde) değişmedikleri kabul edilir. İlave olarak, diğer gerilme bileşenleri olan teğetsel ve eksenel gerilmelerin yanında radyal gerilmelerin çok küçük olması nedeniyle radyal gerilmeler ihmal edilmiştir.



Şekil 6. 19 İnce cidarlı basınçlı kap

Uçları kapalı, ince cidarlı, iç basınca zorlanan bir kaptaki en dış yüzeydeki gerilme hali denklem 6.1'de gösterilmiştir. $\sigma_{rr} = 0$, $\sigma_{xx} \neq 0$, $\sigma_{\theta\theta} = 0$

VBO modelinin iki eksenli gerilme hali için;

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Elastik gerinim elemanları denklem 6.2, 6.3 ve 6.4'de verilmiştir.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu\sigma_{\theta\theta}) \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{xx}) = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{xx}) \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta\theta} - \nu\sigma_{xx}), \quad (\varepsilon_{xr} = \varepsilon_{x\theta} = \varepsilon_{r\theta} = 0) \quad (6.4)$$

En genel halde elastik gerinime ait tensör ifadesi denklem 6.5'de verilmiştir. Şekil ve basınç değişiminin simetrisinden dolayı kayma gerilmeleri sıfır olacaktır.

$(\sigma_{xr} = \sigma_{x\theta} = \sigma_{r\theta} = 0)$. Buna bağlı olarak kayma gerinimleri de sıfırdır

$(\varepsilon_{xr} = \varepsilon_{x\theta} = \varepsilon_{r\theta} = 0)$.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Değişkenler üzerindeki nokta işareti zamana göre türevini işaret etmektedir. Plastik gerinim hızı “overstress”in fonksiyonudur ve “overstress” denge gerilmesi ile Cauchy gerilmesi arasındaki farktır (Denklem 6.6). Overstress’e ait tensör ifadesi denklem 6.7’de verilmiştir.

$$o_{ij} = \sigma_{ij} - g_{ij} \quad (6.6)$$

$$o = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - g_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

İnelastik gerinim hızının ifadesi denklem 6.8’de verilmiştir. Tensör şeklindeki inelastik gerinim hızının ifadesi ise denklem 6.9’da gösterilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{in} = \frac{1+\eta}{E} o_{ij} - \frac{\eta}{E} \delta_{ij} o_{kk} \quad (6.8)$$

$$\dot{\varepsilon}^{in} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{in} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{rr}^{in} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\theta\theta}^{in} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

İnelastik gerinim hızının ifadesi açık yazılımı denklem 6.10’da verilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}^{in} = \frac{1+\eta}{E} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - g_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta} \end{bmatrix} - \frac{\eta}{E} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\sigma_{xx} - g_{xx} + \sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.10)$$

Elastik gerinim elemanları denklem 6.11 - 6.18’de verilmiştir.

$$\dot{\epsilon}_{xx}^{in} = \frac{1+\eta}{E}(\sigma_{xx} - g_{xx}) - \frac{\eta}{E}(\sigma_{xx} - g_{xx} + \sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.11)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx}^{in} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - g_{xx}) + \frac{\eta}{E}(\sigma_{xx} - g_{xx}) - \frac{\eta}{E}(\sigma_{xx} - g_{xx}) - \frac{\eta}{E}(\sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.12)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx}^{in} = \frac{1}{E}(o_{xx} - \eta o_{\theta\theta}) \quad (6.13)$$

$$\dot{\epsilon}_{rr}^{in} = -\frac{\eta}{E}(\sigma_{xx} - g_{xx} + \sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.14)$$

$$\dot{\epsilon}_{rr}^{in} = -\frac{\eta}{E}(o_{xx} + o_{\theta\theta}) \quad (6.15)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta}^{in} = \frac{1+\eta}{E}o_{\theta\theta} - \frac{\eta}{E}(o_{xx} + o_{\theta\theta}) \quad (6.16)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta}^{in} = \frac{o_{\theta\theta}}{E} + \frac{\eta}{E}o_{\theta\theta} - \frac{\eta}{E}o_{xx} - \frac{\eta}{E}o_{\theta\theta} \quad (6.17)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta\theta}^{in} = \frac{1}{E}(o_{\theta\theta} - \eta o_{xx}) \quad (6.18)$$

Γ , “overstress” invariantı simgeler ve gerilme boyutundadır (Denklem 6.19).

$$\Gamma = \sqrt{\frac{3}{2}o:o} \quad (6.19)$$

Deviatorik overstress elemanları ve deviatorik overstress denklem 6.20 – 6.24’de verilmektedir.

$$od_{xx} = \frac{2}{3}(\sigma_{xx} - g_{xx}) - \frac{1}{3}(\sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.20)$$

$$od_{rr} = \frac{2}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{\theta\theta}) + \frac{1}{3}(g_{xx} + g_{\theta\theta}) \quad (6.21)$$

$$od_{rr} = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} - g_{xx}) + \frac{1}{3}(\sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.22)$$

$$od_{\theta\theta} = -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} - g_{xx}) + \frac{2}{3}(\sigma_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}) \quad (6.23)$$

$$oo = o:o = od_{xx}^2 + od_{rr}^2 + od_{\theta\theta}^2 \quad (6.24)$$

Denklem 6.25 ve 6.26’da verilen Cauchy gerilme tensörünün deviatorik kısmıdır ve s ile gösterilmektedir.

$$s = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix} - \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{\theta\theta}) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

$$s = \begin{bmatrix} \left(\frac{2}{3}\sigma_{xx} - \frac{1}{3}\sigma_{\theta\theta} \right) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{\theta\theta}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma_{xx} + \frac{2}{3}\sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Denklem 6.27 – 6.29’da verilen denge gerilmesinin deviatorik kısmıdır ve g ile gösterilmektedir. 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.

$$g = \begin{bmatrix} \left(\frac{2}{3}g_{xx} - \frac{1}{3}g_{\theta\theta} \right) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}(g_{xx} + g_{\theta\theta}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}g_{xx} + \frac{2}{3}g_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

$$\dot{g}_{xx} = \psi \frac{\dot{s}_{xx}}{E} + \psi F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{s_{xx} - g_{xx}}{\Gamma} - \frac{g_{xx} - k_{xx}}{A} \right) + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{k}_{xx} \quad (6.28)$$

$$\dot{g}_{\theta\theta} = \psi \frac{\dot{s}_{\theta\theta}}{E} + \psi F \left[\frac{\Gamma}{D} \right] \left(\frac{s_{\theta\theta} - g_{\theta\theta}}{\Gamma} - \frac{g_{\theta\theta} - k_{\theta\theta}}{A} \right) + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{k}_{\theta\theta} \quad (6.29)$$

6.5 “Overstress” kavramına dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile İki Eksenli Çevrimsel Yükleme Davranışının Modellenmesi

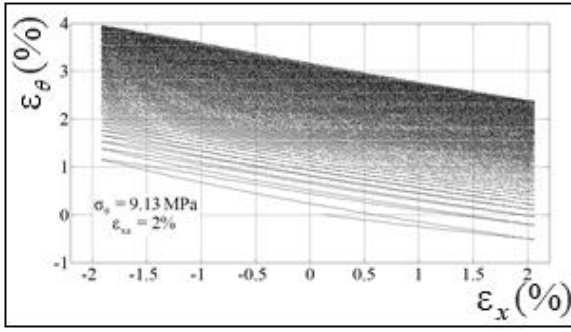
Çizelge 6.5’de malzeme parametreleri listesi verilmiştir.

Çizelge 6. 5 Klasik kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (İki Eksenli)

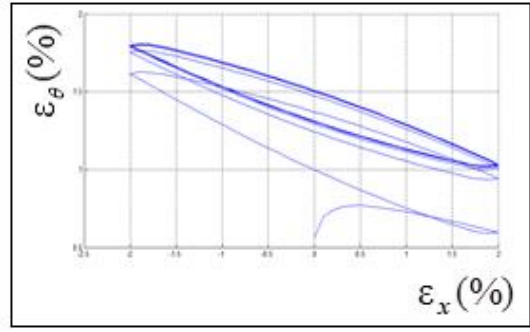
Akış fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	Parametre C
$B = 1 \text{ s}^{-1}$	$E = 1850 \text{ MPa}$ $E_T = 920 \text{ MPa}$	$C_1 = 50 \text{ MPa}$ $C_2 = 1000 \text{ MPa}$ $C_3 = 20$ $C_4 = 0.8$	$\lambda = 0.87$
$D = 50 \text{ MPa}$	İzotropik Gerilme, A	$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}, \zeta = 2$	$\alpha = 0.001$
$m = 2$	$A_c = 1$ $A_0 = 14 \text{ MPa}$ $A_f = 28 \text{ MPa}$		

Sabit 9.13 MPa teğetsel gerilme nedeniyle oluşan malzemenin gerinim toplanması davranışı için elde edilen, teğetsel gerinim- eksenel gerinim eğrisi Şekil 6.20 de görülmektedir. Şekil 6.20a’da ki eğri deneysel olarak elde edilmiştir, Şekil 6.20b’de ki eğri ise “overstress”e dayanan viskoplastisite teorisi (VBO) ile modellenmiştir. Burada kullanılan kinematik pekleşme kuralı klasik kinematik pekleşme kuralıdır.

Şekil 6.20’de ki % Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi, ince cidarlı basınçlı numunede teğetsel gerinin sebep olduğu gerinim toplanmasının numunenin çapını kademeli olarak artmasını göstermektedir.



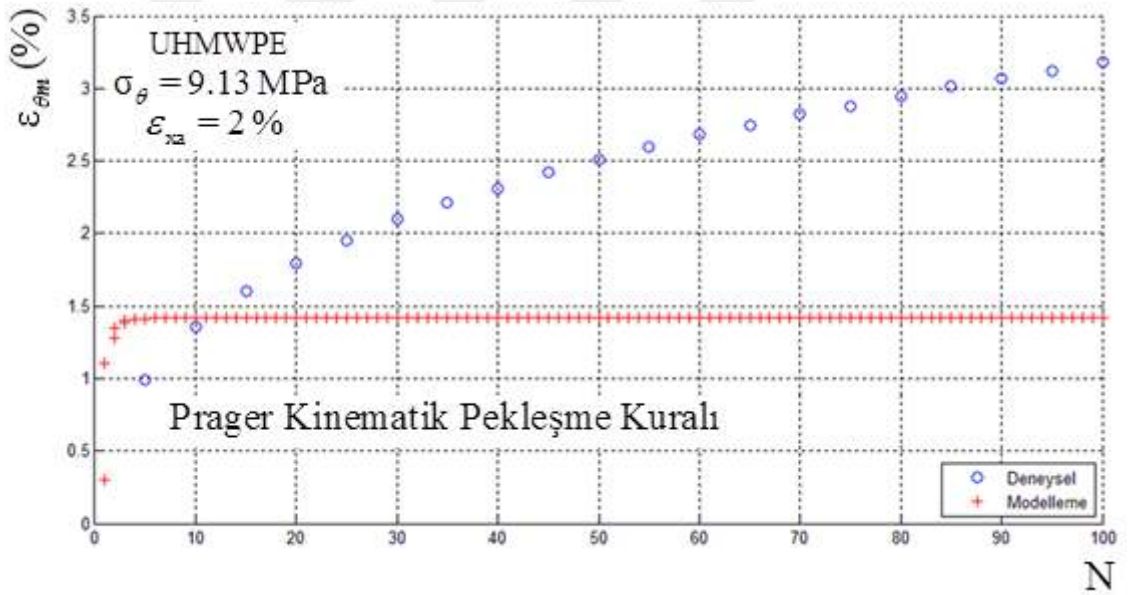
(a)Deneysel



(b)Modelleme

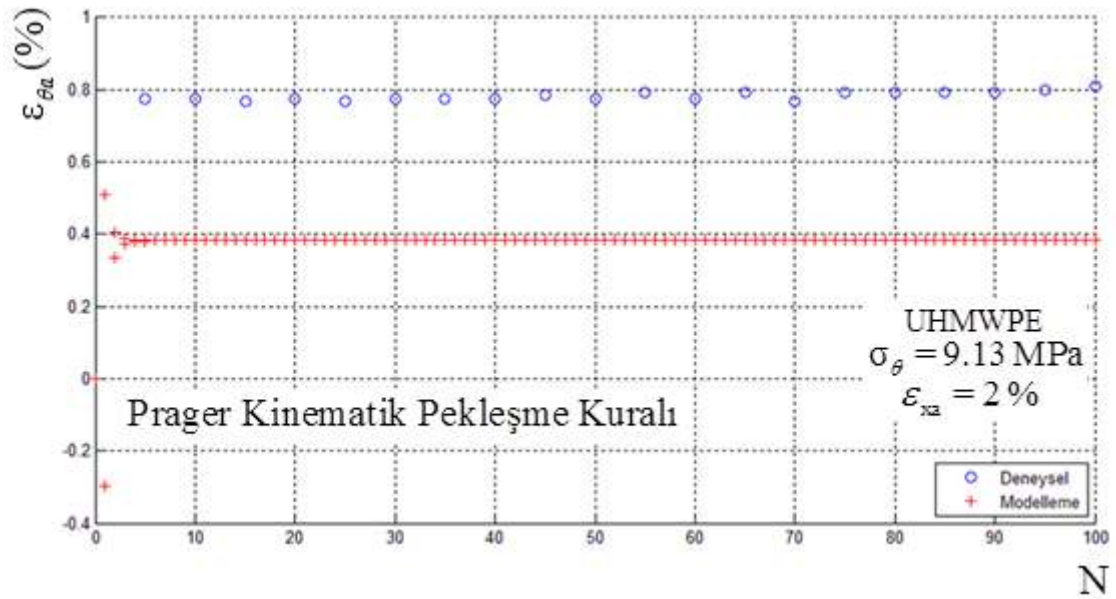
Şekil 6. 20 % Eksenel gerinim - % Teğetsel gerinim eğrisi

Şekil 6.21’de 9.13 MPa sabit teğetsel gerilmede, teğetsel ortalama gerinimin çevrim sayısı ile değişim eğrisi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. 21 % Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı

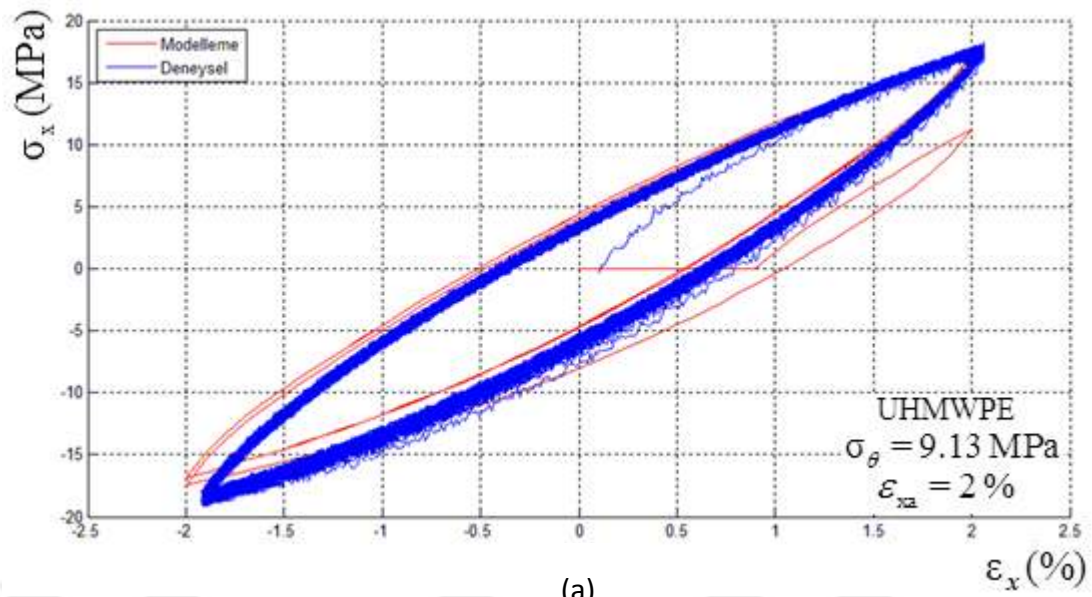
Şekil 6.22’de 9.13 MPa sabit teğetsel gerilmede, teğetsel gerinim genliğinin çevrim sayısı ile değişim eğrisi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



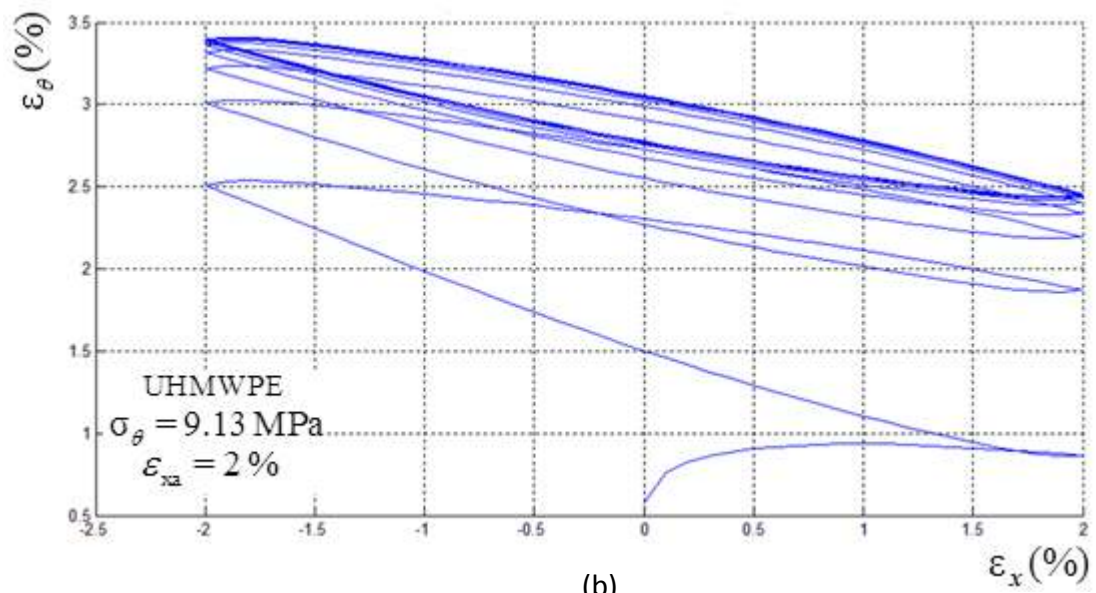
Şekil 6. 22 % Teğetsel Gerinim Genliği - Çevrim Sayısı

Eğrilerin deneysel sonuçlara yakın olmadığı görülmekte olup modelin teğetsel yöndeki şekil değişimini yani çaptaki değişimi iyi tanımlayamadığı görülmüştür.

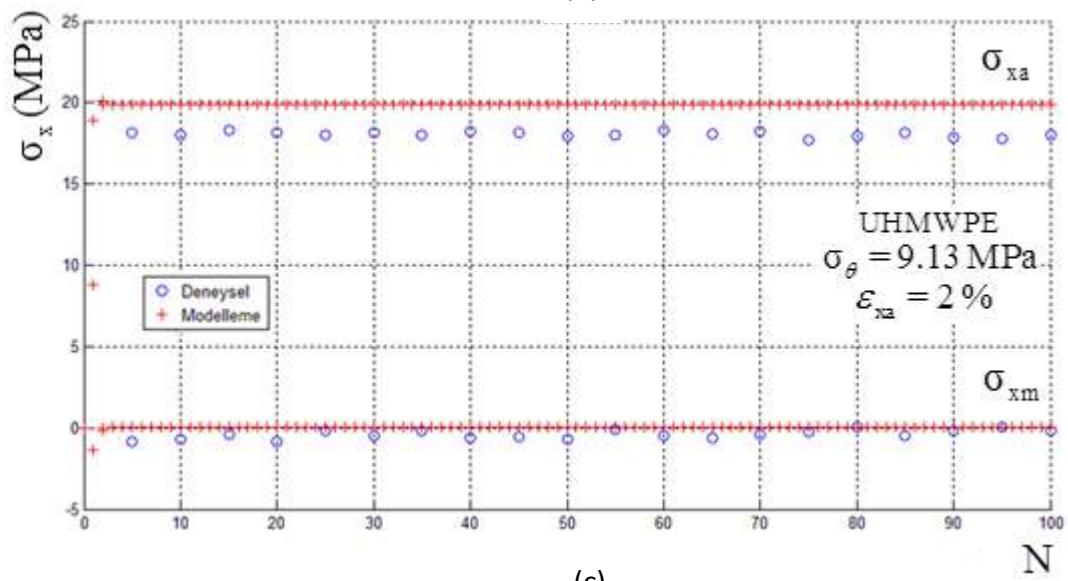
Çizelge 6.5’deki malzeme parametreleri ve klasik kinematik pekleşme kuralı kullanılarak yapılan iki eksenli yüklemenin modellenmesi sonucunda elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı görülmüştür. parametrelerden tanjant modülü ($E_T = 360 \text{ MPa}$) değiştirilerek sonuçlara etkisi incelenmiştir (Şekil 6.23).



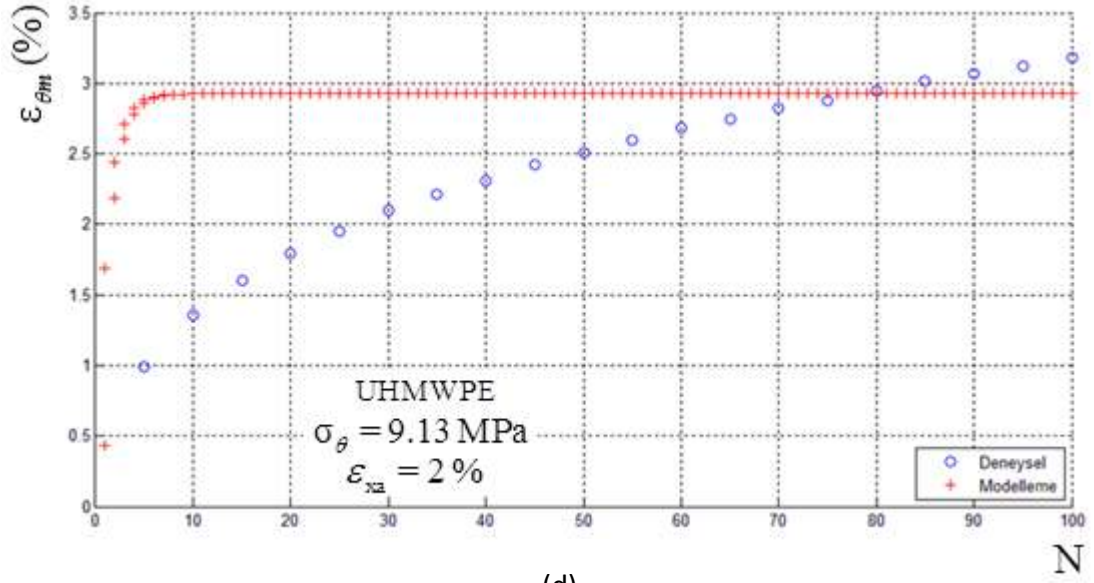
(a)



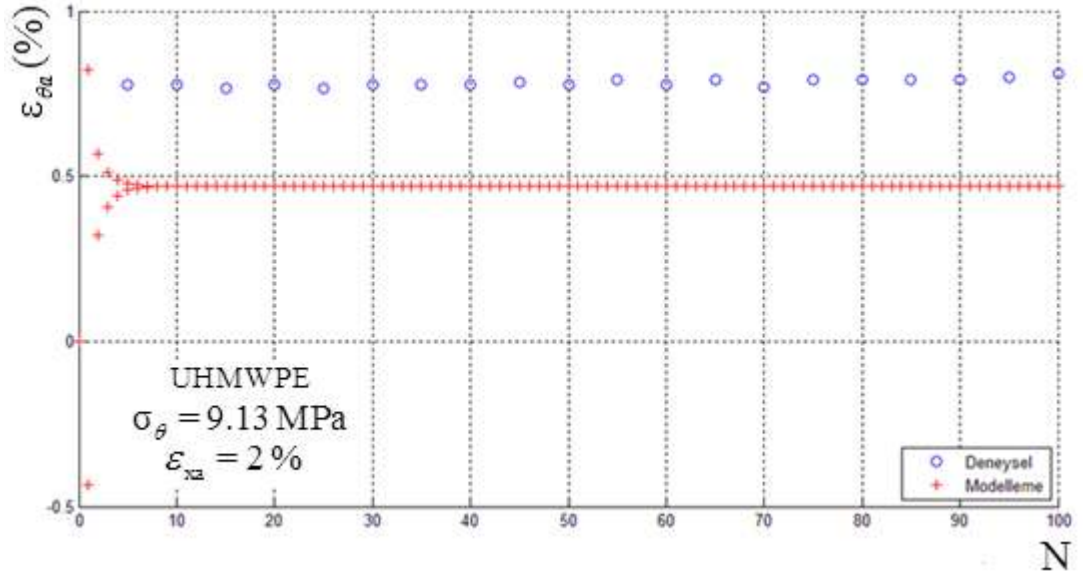
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6. 23 Teğetsel Gerilme 9.13 MPa iken a) Eksenel Gerilme - % Eksenel Gerinim Eğrisi b) % Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi c) Eksenel Gerilme - Çevrim Sayısı Eğrisi d) % Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı e) % Teğetsel Gerinim Genliği - Çevrim Sayısı

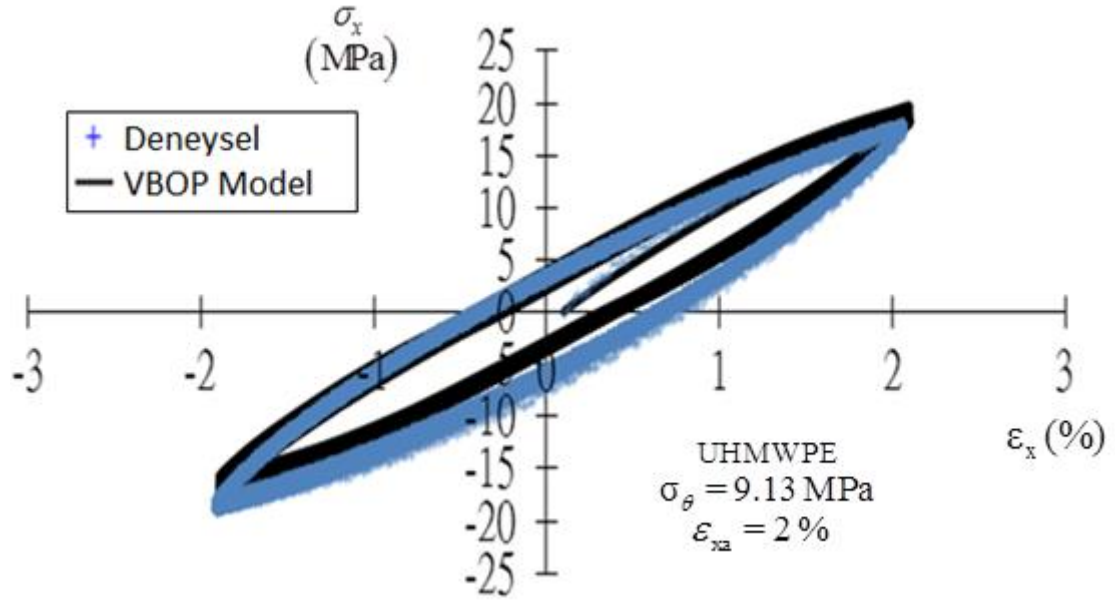
Tanjant modülü değiştirilerek yapılan modelleme (Şekil 6.23) ile elde edilen toplam gerinim miktarı deneysel çalışma sonucu bulunan değere eşit olsada gerinim toplanması davranışını modellemek için yetersiz kalmıştır.

Tek eksenli yükleme halinin modellenmesinde Chaboche kinematik pekleşme kuralının iyi sonuçlar verdiği Bölüm 6.2’de belirtilmişti. İki eksenli gerilme halinde de Chaboche kinematik pekleşme modeli kullanılmış ve sonuçlar Şekil 6.25 ve 6.26’da verilmiştir. Kullanılan malzeme parametreleri çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6. 6 Chaboche kinematik pekleşme kuralı için malzeme parametreleri (iki Eksenli)

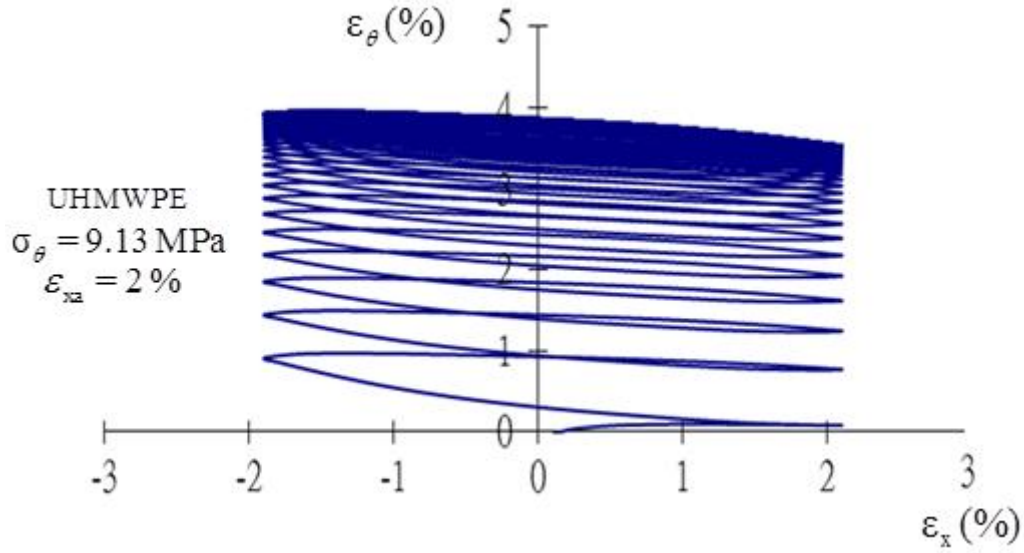
Akış fonksiyonu	Modüller	Şekil Fonksiyonu	Parametre C	Kinematik Pekleşme
$B = 1 \text{ s}^{-1}$	$E = 1200 \text{ MPa}$	$C_1 = 50 \text{ MPa}$ $C_2 = 1000 \text{ MPa}$ $C_3 = 20$ $C_4 = 0.8$	$\lambda = 0.87$	$C_{k1} = 220 \text{ MPa}$ $C_{k2} = 300 \text{ MPa}$ $C_{k3} = 20 \text{ MPa}$ $C_{k4} = 1 \text{ MPa}$
$D = 50 \text{ MPa}$	İzotropik Gerilme, A	$\xi = 1 \text{ MPa}^{-1}$ $\zeta = 2$	$\alpha = 0.05$	$\gamma_1 = 0.5$ $\gamma_2 = 50$ $\gamma_3 = 0.5$ $\gamma_4 = 1.5$
$m = 2$	$A_c = 1$ $A_0 = 14 \text{ MPa}$ $A_f = 28 \text{ MPa}$			$\bar{k}_i = 5$

Şekil 6.24’de gösterilen gerinim kontrollü iki eksenli çevrimsel yüklemedeki eksenel gerilme-gerinim eğrisi ile 9.13 MPa’lık sabit teğetsel gerilme için Chaboche kinematik pekleşme kuralı, VBO modelinde kullanıldığında, 100 çevrim sonra elde edilen simülasyon sonucu ile deneysel sonuç karşılaştırılmıştır.

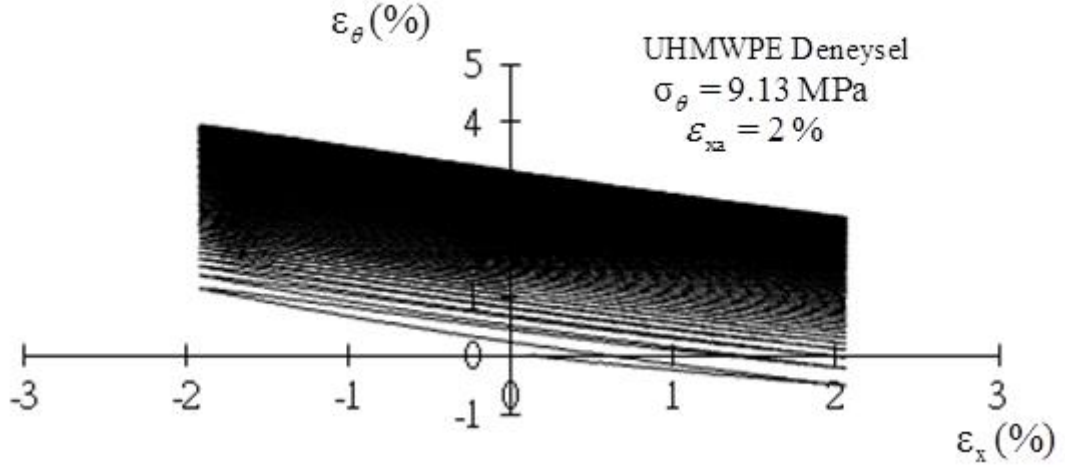


Şekil 6. 24 Eksenel Gerilme - % Eksenel Gerinim Eğrisi

Sabit teğetsel gerilme (9.13MPa) için Chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılarak teğetsel gerinin eksenel gerinim ile değişim ile ilgili modelleme sonucu Şekil 6.25’de deneysel çalışmanın sonucuda Şekil 6.26’da verilmiştir.



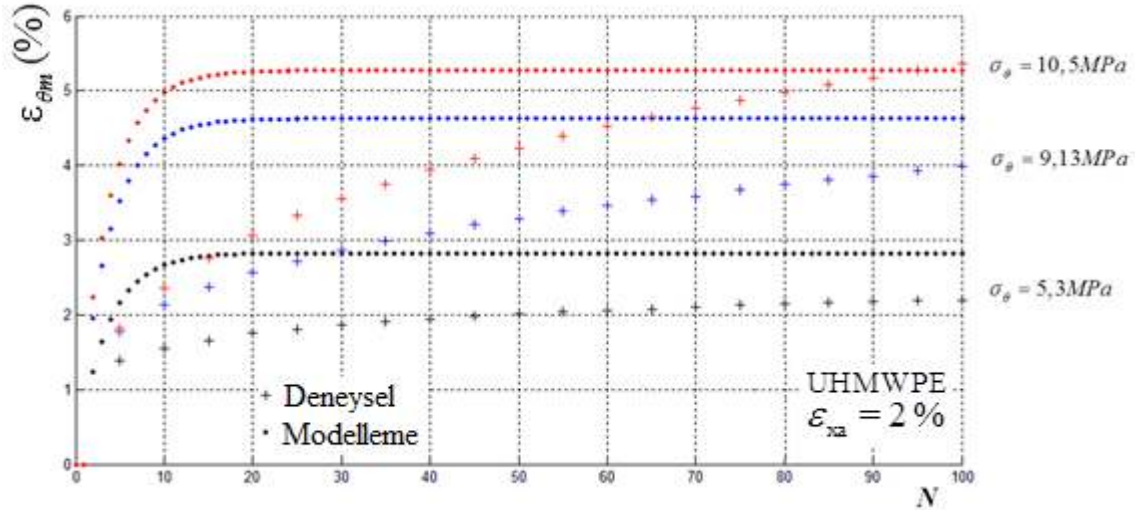
Şekil 6. 25 % Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi



Şekil 6. 26 % Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi

Şekil 6.24-25-26'ya bakıldığında Chaboche Kinematik Pekleşme kanunu kullanılan VBO model deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış gerilme – gerinim eğrisinin deneysel çalışma sonucu elde edilen eğrilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Gerinim toplanması miktarı deneysel sonuçlar ve modelleme için yakın olsada, Şekil 6.27'e bakıldığında çevrim sayısının artmasıyla oluşması gereken çap değişiminin deneysel sonuçlarla uymadığı görülmektedir.

Şekil 6.27 'de ki eğride 3 farklı sabit teğetsel gerilme için teğetsel gerinim - çevrim sayısı değişimi görülmektedir.



Şekil 6. 27 % Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı

6.6 Tanjant Modülünün Gerinim Toplanmasına Etkisi

Literatür araştırmasında ve 6.bölümdeki modelleme çalışmalarda gerinim toplaması davranışının modellenmesinde kinematik pekleşmenin önemli olduğu görülmüştür. Kinematik pekleşme kurallarının tamamında tanjant modülü kullanılmıştır. Bölüm 5’de ki kinematik pekleşme kurallarında tüm denklemlerin içinde tanjant modülü olduğu görülmektedir.

Bu bölümde tanjant modülünün gerinim toplanması davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışmada kinematik pekleşme kuralı olarak modifiye edilmiş Chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılmıştır [17], [83].

Burada denklem 5.5 – 5.7’de verilen Chaboche kinematik pekleşme kuralı modifiye edilip yerine denklem 6.30 – 6.32’de verilen modifiye edilmiş Chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılmıştır.

$$\dot{k} = \sum_{i=1}^4 \dot{k}_i \quad (6.30)$$

$$\dot{k} = \frac{2}{3} C_{k_i} \dot{e}^{in} - \gamma_i \{ \delta' k_i + (1 - \delta') (k_i \cdot n) n \} \dot{p} \quad i = 1, 2, 3 \quad (6.31)$$

$$\dot{k} = \frac{2}{3} C_{k_i} \dot{e}^{in} - \gamma_i \{ \delta' k_i + (1 - \delta') (k_i \cdot n) n \} \left\langle 1 - \frac{\bar{k}_i}{k(f_i)} \right\rangle \dot{p} \quad i = 4 \quad (6.32)$$

Burada, δ' Delobelle parametresidir. $\delta' = 1$ olduğunda, kinematik pekleşme kuralı denklem 5.5 – 5.7’de verilen Chaboche kinematik pekleşme kuralını verir. $\delta' = 0$ olduğunda ise kural, Burlet ve Cailletaud kinematik pekleşme kuralına dönüşür. Burada n , kayma yüzeyinin normalidir, geçerli gerilme noktasındaki akma yüzeyinin normali

n' ’dir ve $n = \frac{\dot{e}^{in}}{\dot{p}}$ şeklindedir.

Denklem 6.30 – 6.32’de verilen modifiye edilmiş Chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılarak yapılan VBO model ile iki eksenli çevrimsel yükleme için modelleme yapılmıştır. VBO modelde tanjant modülü, sabit ve değişken olarak kullanılmıştır.

Değişken tanjant modülü için kullanılan denklemler 6.33 ve 6.34’de verilmiştir. Deneme yanılma yoluyla bulunan değişken tanjant modülündeki malzeme parametreleri Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

$$C_{k_i} = \frac{C_{k_0_i} \left(1 + \mu_i e^{(a_i \dot{\epsilon}_{eff}^{in})} \right)^{b_i}}{2} \quad (6.33)$$

$$C_{k_i} = \frac{C_{k_0_i} \left(e^{(a_i \dot{\epsilon}_{eff}^{in})} \right)^{b_i C_{k_0_i}}}{\beta_i} \quad (6.34)$$

Burada C_{k_0} tanjant modülüdür. a , b ve β malzeme parametreleridir. $\dot{\epsilon}_{eff}^{in}$, efektif inelastik gerinimdir ve denklem 6.35’de verilmiştir.

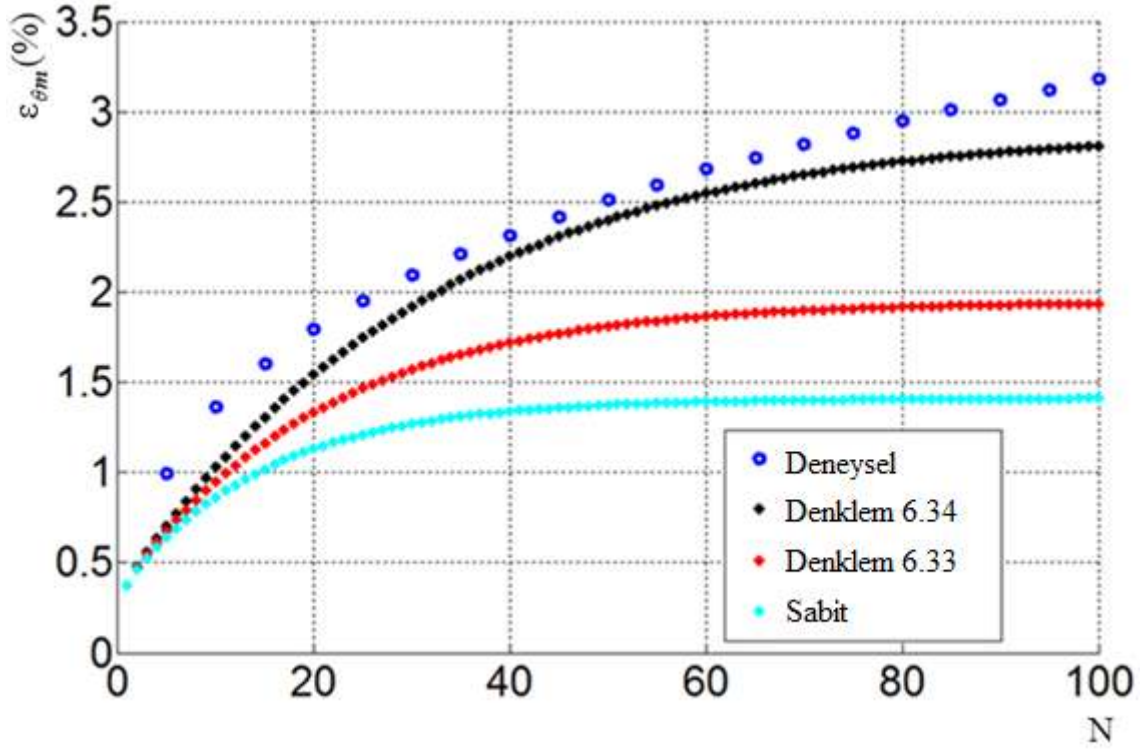
$$\dot{\epsilon}_{eff}^{in} = \sqrt{\frac{2}{3} (\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{rr}^2 + \epsilon_{\theta\theta}^2)} \quad (6.35)$$

Çizelge 6. 7 Tanjant modülü malzeme parametreleri

i	$C_{k_0} (MPa)$	a	b	β
1	250	0,3	0,3	40
2	600	0,8	0,3	40
3	20	0,5	5	40
4	1	0,8	0,5	40

Modifiye edimiş chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılarak sabit ve değişken tanjant modülü için iki eksenli çevrimsel yükleme için VBO ile modelleme yapılmıştır.

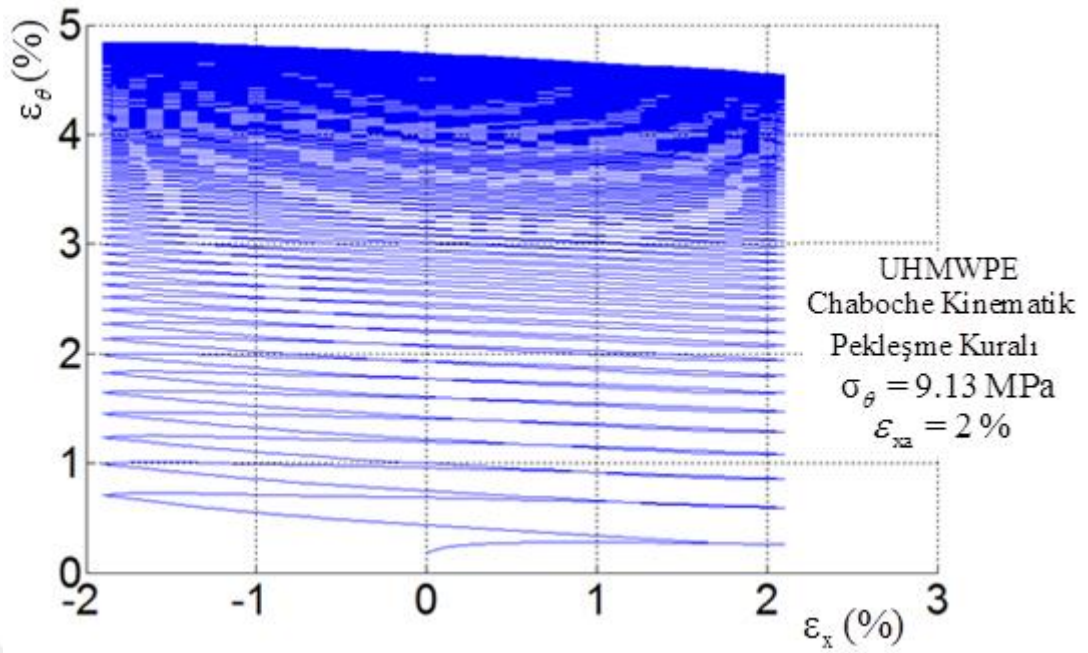
Şekil 6.28’de teğetsel ortalama gerinim – çevrim sayısı ile değişim eğrisi verilmiştir. Eğride deneysel sonuçlarla satı tanjant modülü ile yapılan modelleme değişken tanjant modülü ile yapılan modellemeler karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. 28 % Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı

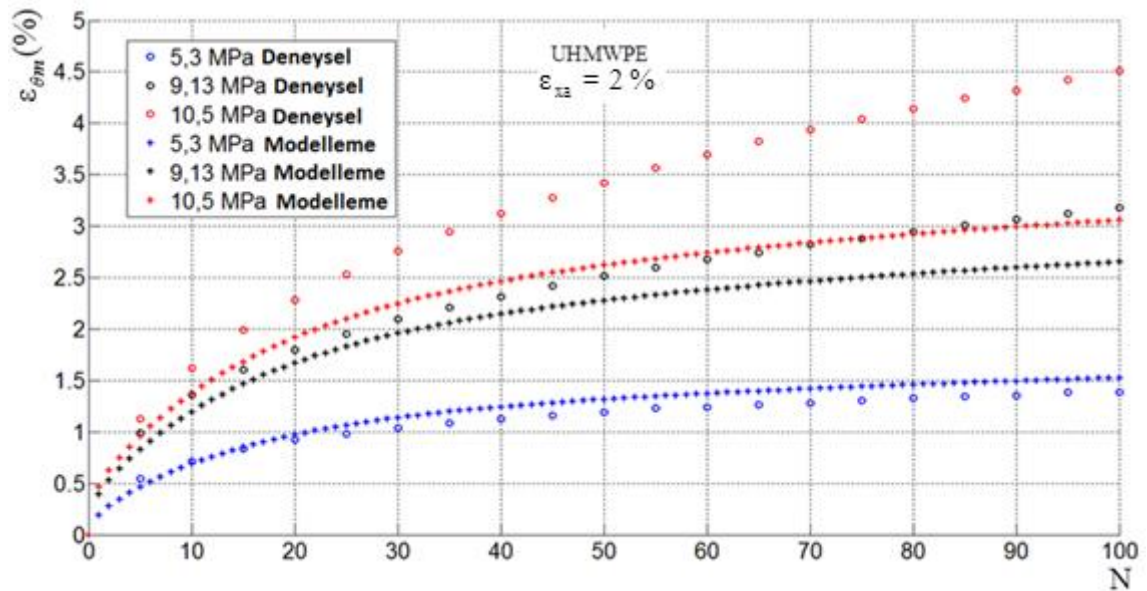
Şekil 6.28’de deneysel sonuçlara en yakın sonuç, denklem 6.34 ile alınmıştır. Bu sonuç değişken tanjant modülünün kullanıldığı modellemede deneysel sonuçlardaki gibi artan çevrim sayısı ile teğetsel gerinim değişim hızının azaldığı ve deneyde kullanılan numunenin çapındaki artışı modelinde sağladığını göstermektedir.

Şekil 6.29’da değişken tanjant modülü denklemi 6.34 ile Modifiye edimiş chaboche kinematik pekleşme kuralı ile 9.13 MPa sabit teğetsel gerilmeye, gerinim kontrollü olarak yapılan iki eksenli çevrimsel yükleme VBO ile modellenmiştir.



Şekil 6. 29 % Eksenel Gerinim - % Teğetsel Gerinim Eğrisi

Sabit teğetsel gerilmede (5.3 MPa, 9.13 MPa and 10.5 MPa) Chaboche kinematik pekleşme kuralı, değişken tanjant modülü ile kullanılarak gerinim toplanmasının modelleme sonuçları ile deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 6.30'de görülmektedir.



Şekil 6. 30 % Teğetsel Ortalama Gerinim - Çevrim Sayısı

UHMWPE'nin 5.3 ,9.13, 10.5 MPa sabit teğetsel gerilmede ve 100 çevrim sonunda VBO model kullanarak iki eksenli gerinim toplanması davranışı modellenmiştir. Simülasyonlar farklı teğetsel gerilmeler için tekrarlanmıştır.

Chaboche kinematik pekleşme kuralı VBO modelinin içine katılarak tanımlanan değişken tanjant modülünün kullanımı, gerinim toplanması olayının modellenmesini sağlamıştır. Deneysel sonuçlarla daha uyumlu, modelleme sonuçları elde edilmiştir. Yapılan bu modifikasyonlar, simülasyon sonuçlarını iyileştirmiştir.



BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu doktora tez çalışmasında polimerik malzemelerin çevrimsel yükleme halindeki mekanik davranışlarının belirlenmesi için, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) ile çalışılmıştır. UHMWPE biyomekanik alanında yaygın şekilde diz ve kalça protezlerinde kullanılmaktadır. Literatürde çevrimsel yüklemeye maruz kalan birçok malzeme için deneysel çalışmalar olmasına rağmen, bunların çoğu metalik malzemeler ile ilgilidir. Polimerik malzemeler için yapılan çalışma sayısı azdır ve mevcut çalışmalar ise, sadece monotonik yükleme altındaki davranışların modellenmesi ile ilgilidir.

Literatürdeki mevcut modeller, polimerik malzemelerin mekanik davranışlarını tanımlamada yetersiz kalmaktadır.

Gerinim kontrollü çevrimsel yüklemelerde pekleşme veya yumuşama gözlemlenirken, gerilme kontrollü çevrimsel yüklemelerde gerinim toplanması (ratcheting) gözlemlenmektedir.

Modellemede kullanılan birleştirilmiş viskoplastik teoriler, malzemelerin lineer olmayan mekanik davranışlarını açıklamaya yönelik olarak geliştirilmiş, yüksek modelleme kabiliyetine sahip olup bünyesinde değişik sayılarda malzeme parametreleri içermektedir.

VBO modelinin mevcut hali; tek ve çok eksenli, gerilme kontrollü, çevrimsel yüklemelerde ortaya çıkan ve hasara neden olan gerinim toplanması (ratcheting) olayını net olarak tanımlayamadığı ortaya konulduktan sonra VBO modeli modifiye edilmiştir.

Tek eksenli çevrimsel yüklemde ilk 10 çevrimde tam değişken yüklemde, malzemede gerinim toplanması meydana gelmezken, genel değişken yüklemde eksenel doğrultuda gerinim toplanması gözlemlenmiştir. Tek eksenli çevrimsel yükleme davranışını modellemesinde kullanılan VBO model için bünye denklemleri yazılmıştır. Kinematik gerilmenin gerinim toplanması davranışı üzerindeki etkisi önemlidir. Bu yüzden VBO model içindeki kinematik gerilme denklemi, çeşitli kinematik pekleşme kuralları (Prager, Armstrong - Frederick, Burlet - Cailletaud, Ohno - Wang ve Chaboche kinematik pekleşme kanunları) kullanılarak, yeniden yazılarak model modifiye edilmiştir. Bu kinematik pekleşme kurallarından Chaboche kinematik pekleşme kuralı ile yapılan modellemede tek eksenli çevrimsel yüklemde UHMWPE'nin mekanik davranışı modellenmiştir. Deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

İki eksenli yükleme; sabit teğetsel gerilme, sabit iç basınçta ve sonrasında ise simetrik eksenel gerinim kontrollü tekrarlanan yükleme altında yapıldığında gerinim toplanması oluşmaktadır. İki eksenli çevrimsel yükleme davranışını modellemesinde kullanılan VBO model için Chaboche kinematik pekleşme kuralı kullanılarak bünye denklemleri yazılmıştır. Chaboche kinematik pekleşme kanununun kullanımı, iki eksenli çevrimsel yüklemeleri modellemede yeterli olmadığının belirlenmesi üzerine, değişken tanjant modülü kullanılarak modelleme yapılmıştır. Yapılan modifikasyonlar sonucunda simülasyon ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Ruggles, M.B. ve Krempl, E., (1989). "The Influence of Test Temperature on the Ratchetting Behavior of Type 304 Stainless Steel", Journal of Engineering Materials and Technology, 111: 378-383.
- [2] Date, S., Ishikawa. H., Otani.T. ve Takahashi. Y., (2008). "Effect of ratcheting deformation on fatigue and creep-fatigue life of 316FR stainless steel", Nuclear Engineering and Design, 238: 336-346.
- [3] Gao, Q., Kang, G.Z. ve Yang. X.J., (2003). "Uniaxial ratcheting of SS304 stainless steel at high temperatures: visco-plastic constitutive model", Theoretical and applied fracture mechanics, 40: 105-111.
- [4] Chiou. Y.C., (2010). "Experimental study of deformation behavior and fatigue life of AISI 304 stainless steel under an asymmetric cyclic loading", Journal of Marine Science and Technology, 18(1): 1,122-129.
- [5] Xia, Z., Kujawski, D. ve Ellyin, F.,(1995). "Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel", International Journal Fatigue, 18(5): 335-341.
- [6] Kang, G.Z., Li, Y.G., Zhang, J., Sun, Y.F. ve Gao, Q., (2005). "Uniaxial ratcheting and failure behaviors of two steels", Theoretical and applied fracture mechanics, 43: 199-209.
- [7] Chen, G., Chen, X. ve Niu, C.D., (2006). "Uniaxial ratcheting behavior of 63Sn37Pb solder with loading histories and stress rates", Materials Science and Engineering A, 421: 238–244.
- [8] Kang, G., Liu, Y., Dong, Y. ve Gao,Q., (2011). "Uniaxial Ratcheting Behaviors of Metals with Different Crystal Structures or Values of Fault Energy: Macroscopic Experiments", Journal of Materials Science & Technology, 27(5): 453-459.
- [9] Sinha, S. ve Ghosh, S., (2006). "Modeling cyclic ratcheting based fatigue life of HSLA steels using crystal plasticity FEM simulations and experiments", International Journal Fatigue, (28): 1690-1704.

- [10] Kang, G., Gao, Q., Cai, L. ve Sun, Y., (2002). "Experimental study on uniaxial and nonproportionally multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel", *Nuclear Engineering and Design*, 216: 13-26.
- [11] Chen, X., Jiao, R., Kim, K.S., (2003). "Simulation of ratcheting strain to a high number of cycles under biaxial loading" *International Journal of Solids and Structures*, 40: 7449–7461.
- [12] Tao, G., ve Xia, Z., (2007). "Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life", *Polymer Testing*, 6: 451-460.
- [13] Chen, X. ve Hui, S., (2005). "Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression", *Polymer Testing*, 24: 829-833.
- [14] Zhang, Z. ve Chen, X., (2009). "Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature", *Polymer Testing*, 28: 288–295.
- [15] Liu, W., Gao, Z. ve Yue, Z., (2008). "Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue tests of PMMA", *Materials Science and Engineering A*, 492: 102-109.
- [16] Hassan, T., Zhu, Y. ve Matzen, V.C., (1998). "Improved ratcheting analysis of piping components", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75: 643-652.
- [17] Bari, S. ve Hassan, T., (2002). "An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation", *International Journal of Plasticity*, 18: 873-894.
- [18] Çolak Ö.Ü., (2008). "Kinematic hardening rules for modeling uniaxial and multiaxial ratcheting", *Materials and Design*, 29: 1575-1581.
- [19] Hassan, T., Kyriakides, S., (1992). "Ratcheting in cyclic plasticity, part I: uniaxial behavior", *International Journal of Plasticity*, 8: 91–116.
- [20] Hassan, T., Corona, E., Kyriakides, S., (1992). "Ratcheting in cyclic plasticity, part II: multiaxial behavior", *International Journal of Plasticity*, 8: 117–46.
- [21] Fırat, M., (2004). "Çevrimsel malzeme deformasyonlarının modellenmesi-Bölüm I: Plastisite bünye modelleri", *Makine Tasarımı ve İmalat Dergisi*, 6(1): 1-11.
- [22] Fırat, M., (2004). "Deformasyonlarının modellemesi-Bölüm II: LOKP bünye denklemleri", *Makine Tasarımı ve İmalat Dergisi*, 6(1): 12-22.
- [23] Fatemi, A., ve Vang, L., (1998). "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials", *International Journal Fatigue*, 20(1): 9-34.
- [24] Chen, X. ve Jiao, R., (2004). "Modified kinematic hardening rule for multiaxial ratcheting prediction", *International Journal of Plasticity*, 20: 871–898.
- [25] Chen, X., Jiao, R. ve Kim, K.S., (2005). "On the Ohno–Wang kinematic hardening rules for multiaxial ratcheting modeling of medium carbon steel", *International Journal of Plasticity*, 21: 161–184.

- [26] Avanzini, A., (2008). "Mechanical characterization and finite element modelling of cyclic stress-strain behaviour of ultra high molecular weight polyethylene", *Materials and Design*, 29: 330–343.
- [27] Krzyppow, D.J. ve Rimnac C.M., (2000). "Cyclic steady state stress-strain behavior of UHMWPE", *Biomaterials*, 21: 2081-2087.
- [28] Bergstöm 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.
- [29] Avanzini, A., (2011). "Effect of cyclic strain on the mechanical behavior of virgin ultra-high molecular weight polyethylene", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4: 1242 – 1256.
- [30] Manas, C. ve Salil, K.R., (2006). *Plastic Technology Handbook*, Fourth Edition, CRC Press., New York.
- [31] Seyfettin, E. ve Sennur, D. (2009). *Polimer Mühendisliği Ders Notları*.
- [32] Fried, R. J., (2003). *Polymer Science & Technology*, Second Edition.
- [33] Robert, O. E., (2000). *Polymer Science and Technology*, CRC Press., New York.
- [34] Vedat, T., (2006). *Plastik Malzemelerle Konstrüksiyon Ders Notları*.
- [35] William, D. ve Callister J., (2003). "Materials Science and Engineering", John Wiley & Sons, New York.
- [36] Brown, N. ve Ward, I.M., (1968). "Deformation bands in oriented PET", *Philosophical Magazine*, 17: 961-981.
- [37] Arruda, E.M. ve Boyce M.C., Quintus-Bosz, H, (1993). "Effects of initial anisotropy on the finite strain deformation behavior of glassy polymers", *International Journal of Plasticity*, 9: 783-811.
- [38] Capaldi F.M. Boyce M.C., ve Rutledge, G.C., (2004). "Molecular response of glassy polymer to active deformation" *Polymer*, 45: 1391-1399.
- [39] Caddell, R.M. ve Woodliff, A.R., (1977). "Macroscopic yielding of oriented polymers" *J.Materials Sciences*, 12: 2028-2036.
- [40] Hassan, A., Boyce M.C., Li, X.S ve Berko, S.J., (1993). "An investigation of the yield and post yield behavior and corresponding structure of poly(methyl metahacrylate)", *Journal of Polymer Science*, 31: 185-197.
- [41] Stachurski, A.C., (2003). "Strength and deformation of rigid polymer: the stress-strain curve in amorphous PMMA", *Polymer*, 44: 6067-6076.
- [42] Lyulin, A.V. Li,J., Mulder, T., Vorselaars, B., ve Michels, M.A.J., (2006). "Atomistic simulation of bulk mechanics and local dynamics amorphous polymers", *Macromol, Symp*, 237: 108-118.
- [43] Tomita.Y. ve Uchida, M., (2003). "Characterization of micro to macroscopic deformation behavior of amorphous polymer with heterogenous dsitribution of microstructures", *International Journal of Mechanical Sciences*, 32(23): 3423-3434.

- [44] Bowden, P.B. ve Raha, S., (1970). "The formation of micro shear bands in polystyrene and polymethylmethacrylate", *Philosophical Magazine*, 22: 463-482.
- [45] Steven, M.K., (2004). *UHMWPE Handbook*.
- [46] T.Hassan, Çolak Ö.Ü., and P. M. Clayton, (2011). "Uniaxial strain and stress-controlled cyclic responses of UHMWPE: Experiments and model simulations", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 133: 02010-1 - 02010-9.
- [47] Coffin, L.F., (1970). "The deformation and fracture of ductile metals under superposed cyclic and monotonic strain ASTM STP467", 53-76.
- [48] Isobe, N., Sukekawa, M., Nakayama, Y., Ohtani, T., Date, S., Takahashi, Y., Kasahara, N., Nakamura, K, Shinbamoto, H., Nagashima, H., Inoue, K., (2005). "Design criteria for ratcheting fatigue of 316FR steel under fast reactor conditions", *SMiRT18-F02-5*.
- [49] Namaizama, J., Ueno, K., Asada, Y.,(1993). "Life prediction technique for ratcheting fatigue", *ASME PVP*, 26.
- [50] Phan N. ve Thien., (2002). *Understanding Viscoelasticity*, Springer, Heidelberg.
- [51] Düşünceli. N., (2007). *Polimerik malzemelerin viskoelastik- viskoplastik davranışlarının belirlenmesi ve modellenmesi*, Doktora, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [52] Ward, I.M. ve Hadley, D.W., (1993). *Mechanical Properties of Solid Polymers*, John Wiley & Sons.
- [53] Wineman, A. ve Rajagopal, K. (2000). *Mechanical Response of Polymers*, Cambridge University press.
- [54] Zhang, C. (1996), *Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene Gravity Flow Pipes*, Ph.D. Thesis, The University of Western Ontario , Ontario.
- [55] Zhang, C. ve Moore I.D., (1997). "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part I: Experimental Investigation and Model Evaluation", *Polymer Engineering and Science* 37(2): 404-413.
- [56] Zhang, C. ve Moore, I.D., (1997). "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part II: Uniaxial Constitutive Modeling," *Polymer Engineering and Science*, 37(2): 413-420.
- [57] 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(3): 519- 541.
- [58] H. Leaderman, (1943). "Elastic and Creep Properties of Filamentous Materials and Other High Polymers", *The Textile Foundation*, Washington,D. C.

- [59] B. Bernstein, E. A. Kearsley, and L. J. Zapas, (1963). "A study of stress relaxation with finite strain", Trans. Soc. Rheology VII, 391- 410.
- [60] Lai J., (1995). Non-linear Time-dependent Deformation Behavior of High Density Polyethylene, Phd. Thesis, Delft University Press.
- [61] Krempl, E. (1998). Creep-Plasticity Interaction, Lecture Notes, CISM 187, Udine Italy.
- [62] Nikolov, S. ve Doghri, I. (2000). "A micro/macro constitutive model for the small deformation behavior of polyethylene", Polymer, 41: 1883-1891.
- [63] 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.
- [64] Lai, J. ve Bakker, A. (1995). "An Integral Constitutive Equation for Nonlinear Plasto- Viscoelastic Behavior of high-density polyethylene", Polymer, 36: 93-99.
- [65] Krempl E. and Bordonaro C., (1995). "A state variable model for high strength polymers", Polymer Engineering and Science", 35: 310-316,
- [66] Bardenhagen S., Stout M., and Gray G., (1997). "Three dimensional, finite deformation, viscoplastic constitutive models for polymeric materials", Mechanics of Materials, 25: 235-253,
- [67] Krempl E., (1998). "Some general properties of solid polymer inelastic deformation behavior and their application to a class of clock models", The Society of Rheology, 713-725.
- [68] Krempl E., ve Khan., (2003). "Rate (time) dependent deformation behavior: an overview of some properties of metals and solid polymers", International Journal of Plasticity, 19: 1069-1095,
- [69] Drozdov A.D. ve Christiansen J.D.C., (2003). "Modelling the viscoplastic response of polyethylene in uniaxial loading-unloading tests", Mechanics Research Communications, 30(5): 431-442.
- [70] Çolak Ö.Ü., (2005). "Modeling deformation behavior of polymers with viscoplasticity theory based on overstress", International Journal of Plasticity, (21): 145-160,
- [71] Çolak Ö.Ü., (2004). "Modeling Creep and Relaxation Behaviors of Polyphenylene Oxide Using a Viscoplasticity Theory", Proceedings of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium, 837-844, Ürgüp,
- [72] Çolak Ö.Ü., (2008). "Kinematic hardening rules for modeling uniaxial and multiaxial ratcheting", Materials and Design (29): 1575-1581.
- [73] Çolak Ö.Ü. ve Dusunceli N., (2006). "Modeling viscoelastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE)", Journal of Engineering Materials and Technology, (128): 572-78.

- [74] Prager, W., (1949). "Recent developments in the mathematical theory of plasticity", J. Appl. Phys. 20 (3), 235–241.
- [75] Ziegler, H., (1959). "A Modification of Prager's Hardening Rule", Quart. Applied Math., 17, 55.
- [76] Armstrong, P.J. ve Frederick, C.O. (1966). "A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect", CEGB Report RD/B/N731, Berkeley Nuclear Laboratories, Berkeley, UK.
- [77] Mroz, Z., (1967). "On the Description of Anisotropic Workhardening", J. Mech. Phys. Solids, 15, 163.
- [78] Phillips, A., ve Tang, J.L., (1979). "The effect of loading path on the yield surface at elevated temperatures", International Journal of Solids and Structures, 8:463,474.
- [79] Phillips, A. and Lee, C.W., (1979). "Yield Surfaces and Loading Surfaces: Experiments and Recommendations", International Journal of Solids and Structures, 15(9): 715-729.
- [80] Phillips, A. and Lu, W.Y., (1984). "An experimental investigation of yield surfaces of pure aluminum with stress-controlled and strain-controlled path of loading", Journal of Engineering materials and technology, Trans ASME, 106: 349-354.
- [81] Dafalias, Y.F., Popov, E.P., (1976). "Plastic internal variables formalism of cyclic plasticity", ASME J. Appl. Mech, 43: 645–650.
- [82] Chaboche, J.L., Dang-Wan, K., Cordier, G., (1979). "Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel", In: SMIRT-5, Division L, Berlin.
- [83] Chaboche, J.L., (1991). "On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects", International Journal of Plasticity 7,661-678.
- [84] Chaboche, J.L., (1994). "Modeling of ratcheting: evaluation of various approaches", European J. Mech. A/Solids, 13: 501–518.
- [85] Kaneko, K., (1981). "Proposition of new translation in kinematic hardening", Bulletin of the JSME, 24: 9-14.
- [86] Kaneko, K., (1984). "Development of a new practical plastic constitutive model for anisotropic metals after various preloading", Bulletin of the JSME, 27: 2687-2693.
- [87] Tseng, N.T., Lee, G.C., (1983). "Simple plasticity model of the two surface type", ASCE Journal of Engineering Mechanics, 109:795-810.
- [88] Burlet, H., Cailletaud, G., (1986). "Numerical techniques for cyclic plasticity at variable temperature", Eng. Comput, 3: 143-153.

- [89] Voyiadjis G.Z, Sivakumar S.M. ve Cailletaud, G., (1991). "A robust kinematic hardening rule for cyclic plasticity with ratcheting effects, part I: Theoretical formulation", *Acta Mechanica*, 90: 105-123.
- [90] Voyiadjis G.Z, Sivakumar S.M. ve Cailletaud, G., (1991). "A robust kinematic hardening rule for cyclic plasticity with ratcheting effects, part II: Application of nonproportional loading cases", *Acta Mechanica*, 107:117-136.
- [91] Ohno, N. ve Wang, J., (1993). "Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part I: formulation and basic features for ratcheting behavior", *International Journal of Plasticity*, 9: 375–90.
- [92] Ohno, N. ve Wang, J., (1993). "Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part II: application to experiments of ratcheting behavior", *International Journal of Plasticity*, 9: 391–403.
- [93] Xia, Z. ve Ellyin, F., (1994). "Biaxial ratcheting under strain or stress-controlled axial cycling with constant hoop stress", *Journal of Applied Mechanics*, 61: 422-428.
- [94] Xia, Z. ve Ellyin, F., (1997). "A constitutive model with capability to simulate complex multiaxial ratcheting behaviour of materials", *International Journal of Plasticity*, 13: 127-142.
- [95] Delobelle, P., Robinet, P., ve Boucher, L., (1995). "Experimental study and phenomenological modelization of ratchet under uniaxial and biaxial loading on an austenitic steel", *International Journal of Plasticity* 11(4): 295– 330.
- [96] McDowell, D.L., (1995). "Stress state dependence of cyclic ratcheting behavior of two rail steels", *International Journal of Plasticity* 11: 397-421.
- [97] Jiang, Y., Sehitoglu, H., (1996). "Modeling of cyclic ratchetting plasticity, part I: development of constitutive relations", *ASME J. Appl. Mech.* 63: 720–725.
- [98] Jiang, Y., Sehitoglu, H., (1996). "Modeling of cyclic ratchetting plasticity, part II: comparison of model simulations with experiments", *ASME J. Appl. Mech.* 63: 726-733.
- [99] Voyiadjis, G.Z., Basuroy Chowdhury, I.N., (1998). "A plasticity model for multiaxial cyclic loading and ratchetting", *Acta Mech.* 126: 19–35.
- [100] AbdelKarim, M., Ohno, N., (2000). "Kinematic hardening model suitable for ratcheting with steady-state", *International Journal of Plasticity*, 16: 225–240.
- [101] Kang, G., (2004). "A visco plastic constitutive model for ratchetting of cyclically stable materials and its finite element implementation", *Mech. Mater.*, 36 (4): 299–312.
- [102] Chen, X., Jiao, R., (2004). "Modified kinematic hardening rule for multiaxial ratcheting prediction", *International Journal of Plasticity*, 20: 871–898.
- [103] Abdel-Karim, M., (2009). "Modified kinematic hardening rules for simulations of ratchetting", *International Journal of Plasticity*, 25: 1560-1587.

- [104] Krempl, E., (1987). "Models of viscoplasticity-some comments on equilibrium (back) stress and drag stress", *Acta Mechanica*, 69: 25-42.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Kerem ASMAZ
Doğum Tarihi ve Yeri :06.09.1978 - İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :asmaz@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2006
Lisans	Makine Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2002
Lise	Matematik	Maltepe Küçükyalı Kadir Has Lisesi	1994

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Uluslararası Hakemli Dergilerdeki Makaleler

1. Asmaz, K., Çolak Ö.Ü. ve Hassan, T., “Biaxial Ratcheting Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene: Experiments and Constitutive Modeling”, Journal of Testing and Evaluation” Hakemlerde
2. Çolak Ö.Ü., Asmaz, K. ve Hassan, T., (2012). “Mechanical Characterization and Modeling of Cyclic Behavior of Ultra, Advanced Materials Research”, 445: 877-882,

Uluslararası Bildiriler

1. Çolak Ö.Ü., Asmaz, K. ve Hassan, T., (2012). “Biaxial Ratcheting Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE): Experiments and Modeling”, 14th International Materials Symposium,
2. Çolak Ö.Ü., Asmaz, K. ve Hassan, T., (2011). “Mechanical Characterization and Modeling of Cyclic Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)”, 14th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies,

Ulusal Bildiriler

1. Asmaz, K. ve Altan, E., (2007). “Görüntü İşleme ile İki Boyutlu Cisimlerden Grafik Modeller İçin Veri Eldesi”, 15.Yıl Mühendislik Mimarlık Sempozyumu, 193-201,
2. Asmaz, K., (2007). “Çelik Saçlarda Mekanik Özelliklerin Şekillendirmeye Etkisi”, IV. Demir Çelik Konferansı, 1(0): 193-201.