

139784

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLASTİK BORU ÜRETİMİNDE KULLANILAN
POLİETİLEN MALZEMENİN STATİK-DİNAMİK
DAVRANIŞLARININ ANALİZİ VE VİSKOELASTİK
MODELENMESİ**

139784

Makine Yük. Müh. Semih SEZER

**F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 24 Aralık 2003
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Faris KAYA (YTÜ)
: Prof. Necati TAHRALI (YTÜ)
: Prof. Dr. Tuncer TOPRAK (İTÜ)
: Prof. Dr. Saim AKYÜZ (İTÜ)
: Prof. Dr. Ertuğrul TAÇGIN (MÜ)

İSTANBUL, 2003

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 HDPE Üretimi ve Sınıflandırılması	1
1.2 HDPE'nin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	2
1.3 HDPE'nin Zamana Bağlı Cevabı	2
1.4 Viskoelastik Bir Cismin Mekanik Modellemesi	4
1.4.1 Lineer Viskoelastisitenin Temel Denklemleri	5
1.5 Birim Şekil Değiştirme ve Zaman Arasındaki İlişki	6
1.6 Konu İle İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	7
1.6.1 Plastik Malzemelerin Özellikleri ve Davranışları	7
1.6.2 Plastik Malzemelerin Zamana Bağlı Cevabı	8
1.6.3 Plastik Boruların Tasarım Kriterleri	10
1.6.4 Profilli Polietilen Borular	11
1.6.5 Plastik Malzemelerin Dinamik Davranışları	12
1.7 Tezin Amacı ve Kapsamı	13
2. HDPE MALZEMENİN MATEMATİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI	15
2.1 Giriş	15
2.1.1 Maxwell Modeli	15
2.1.2 Kelvin Modeli	17
2.2 Sünme Deneyleri	19
2.2.1 Deney Numunelerinin Oluşturulması	19
2.2.2 PE100 Malzemenin Kopma Gerilmesinin Hesaplanması	20
2.3 Sünme Deney Düzeneği	21
2.4 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	26
2.5 Viskoelastik Burgers Modelinin Oluşturulması	28
2.5.1 Burgers Modelindeki Sabitlerin Belirlenmesi	32
2.6 Burgers Modelinden Elde Edilen Sonuçlar	37
3. ANSYS PROGRAMI İLE HDPE MALZEMENİN SÜNME ANALİZİ	39
3.1 Giriş	39

3.2	HDPE Malzeme İçin Sünme Analizi Sabitlerinin Belirlenmesi.....	40
3.3	Deney Numunesinin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	50
3.3.1	SOLID45 Elemanının Özellikleri.....	51
3.4	Sınır Şartlarının Uygulanması	52
3.5	Sünme Analizi Sonuçları	52
4.	DİNAMİK DENEYLER	54
4.1	Giriş	54
4.2	Karesel Gerilme Oluşturan Dinamik Deneyler	54
4.2.1	Deney Düzeneği	55
4.2.2	Deney Sonuçları	57
4.3	Sinüzoidal Gerilme Oluşturan Dinamik Deneyler.....	61
4.3.1	Deney Düzeneği	61
4.3.1.1	Deney Düzeneğinin Çalışma Sistemi	64
4.3.2	Yay Seçimi	64
4.3.3	Deney Sonuçları	66
4.3.3.1	Birinci Deney.....	66
4.3.3.2	İkinci Deney	67
4.3.3.3	Üçüncü Deney	71
4.3.3.4	Dördüncü Deney	73
5.	DİNAMİK MODELLEME	75
5.1	Giriş	75
5.2	Karesel Gerilme Oluşturan Sistem İçin Matematik Model	75
5.2.1	Matematik Modelin Çözümü.....	76
5.2.2	Blok Diyagramının Oluşturulması.....	76
5.2.3	Matematik Model Sonuçları	77
5.3	Sinüzoidal Gerilme Durumu İçin Matematik Model.....	81
5.3.1	Blok Diyagramının Oluşturulması.....	81
5.3.2	Matematik Model Sonuçları	82
6.	SONUÇLAR.....	89
6.1	Giriş	89
6.2	HDPE Malzemenin Matematik Modelinin Oluşturulması	89
6.3	ANSYS Programı ile HDPE Malzemenin Sünme Analizi	89
6.4	Statik Durumlar İçin Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması	90
6.5	Dinamik Modelleme	93
6.6	Öneriler	107
	KAYNAKLAR.....	108
	ÖZGEÇMİŞ.....	112

SİMGE LİSTESİ

a_0	Boyutsuz sabit
A	Yay teli kesit alanı
t	Zaman
d_{tel}	Yay tel çapı
$d_{sarım}$	Yay sarım çapı
e	Doğal logaritmik taban(2,718)
E	Elastisite modülü
F	Yay kuvveti
$F_{ön}$	Yay ön gerilme kuvveti
$f(t)$	Sünme fonksiyonu
$g(t)$	Gevşeme fonksiyonu
G	Yay çeliğinin elastiklik modülü
k	Yay katsayısı
m	Boyutsuz sabit
n	Boyutsuz sabit
n	Yay sarım sayısı
Q	Aktivasyon enerjisi
R	Boltzman sabiti
S	Boru halka rijitliği
T	Sıcaklık
x	Yay uzama miktarı
α	Boyutsuz sabit
ε_i	Birim şekil değiştirme
ε_c	Sünme birim şekil değiştirmesi
ε_e	Elastik birim şekil değiştirme
ε_t	Toplam birim şekil değiştirme
η	Viskozite
σ	Gerilme
τ	Viskoelastik malzemenin geçmiş zamanı

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
HDPE	High Density Polethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
ICI	Imperial Chemical Industries
ISO	International Standart Organization
LDPE	Low Density Polethylene (Düşük Yoğunluklu Polietilen)
MDPE	Middle Density Polethylene (Orta Yoğunluklu Polietilen)
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PVC	Polivinilklorür
UV	Ultraviole



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Plastik numuneye sabit σ_0 gerilmesi uygulanmasıyla oluşan birim şekil değiştirme- zaman grafiği	3
Şekil 1.2 (a) İdeal elastik cismin mekanik modeli, (b) Viskoz cismin mekanik modeli	4
Şekil 1.3 Elastik gecikmeli birim şekil değiştirmeye sahip cismin mekanik modeli	5
Şekil 1.4 İdeal elastik ve viskoelastik bir malzeme için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı	7
Şekil 2.1 Maxwell modeli.....	15
Şekil 2.2 Kelvin modeli.....	17
Şekil 2.3 a) Sünme deneyi numunesi, b) Sünme deneyi numunesi boyutları	20
Şekil 2.4 PE100 malzemenin çekme deneyi grafiği	21
Şekil 2.5 11,021 MPa'lık gerilme oluşturan sistem	22
Şekil 2.6 11,021 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği	22
Şekil 2.7 7,376 MPa'lık gerilme oluşturan sistem	23
Şekil 2.8 7,376 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği	23
Şekil 2.9 3,732 MPa'lık gerilme oluşturan sistem	24
Şekil 2.10 3,732 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği	24
Şekil 2.11 1,757 MPa'lık gerilme oluşturan sistem	25
Şekil 2.12 1,757 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği	25
Şekil 2.13 Sünme uzaması-gerilme eğrileri.....	27
Şekil 2.14 Burgers modeli	28
Şekil 2.15 1,757 MPa için En Küçük Kareler Metoduyla a ve b sabitlerinin bulunması.....	33
Şekil 2.16 3,732 MPa için En Küçük Kareler Metoduyla a ve b sabitlerinin bulunması.....	34
Şekil 2.17 7,376 MPa için En Küçük Kareler Metoduyla a ve b sabitlerinin bulunması.....	34
Şekil 3.1 11,021 MPa (1598,405 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması.....	43
Şekil 3.2 7,376 MPa (1069,761 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması.....	44
Şekil 3.3 3,732 MPa (541,262 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması.....	45
Şekil 3.4 1,757 MPa (254,822 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması.....	46
Şekil 3.5 m sabitinin en küçük kareler yöntemiyle belirlenmesi.....	48
Şekil 3.6 ANSYS'de oluşturulan numunenin boyutları	50
Şekil 3.7 Deney numunenin sonlu eleman modeli	51
Şekil 3.8 SOLID45 elemanının geometrisi ve düğüm noktalarının yerleri.....	51
Şekil 3.9 Sonlu eleman modeline sınır şartlarının uygulanması	52
Şekil 4.1 Viskoelastik bir malzemeye belirli bir süre gerilme uygulanıp kaldırılması sonucu oluşan uzama-zaman grafiği	54
Şekil 4.2 1,757 MPa karesel gerilme oluşturan deney düzeneği.....	55
Şekil 4.3 3,732 MPa karesel gerilme oluşturan deney düzeneği.....	56
Şekil 4.4 7,376 MPa karesel gerilme oluşturan deney düzeneği.....	56
Şekil 4.5 Maksimum 1,757 MPa'lık gerilme oluşturan dinamik sistemin gerilme-zaman grafiki.....	58
Şekil 4.6 Maksimum 1,757 MPa'lık gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği.....	58
Şekil 4.7 Maksimum 3,732 MPa'lık gerilme oluşturan dinamik sistemin gerilme-zaman grafiki.....	59
Şekil 4.8 Maksimum 3,732 MPa'lık gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği.....	59

Şekil 4.9 Maksimum 7,376 MPa'lık gerilme oluşturan dinamik sistemin gerilme-zaman grafiği.....	
Şekil 4.10 Maksimum 7,376 MPa'lık gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği.....	60
Şekil 4.11 Değişik açılardan deney düzeneği.....	63
Şekil 4.12 Redüktöre takılan diskin boyutları	63
Şekil 4.13 Birinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi.....	68
Şekil 4.14 Birinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	68
Şekil 4.15 İkinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi	70
Şekil 4.16 İkinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	70
Şekil 4.17 Üçüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi .	72
Şekil 4.18 Üçüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	72
Şekil 4.19 Dördüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi74	
Şekil 4.20 Dördüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	74
Şekil 5.1 Karesel gerilme durumu için SIMULINK'de oluşturulan blok diyagram	76
Şekil 5.2 1,757 MPa'lık karesel dinamik yükleme.....	78
Şekil 5.3 1,757 MPa karesel dinamik gerilme altında numunenin uzama-zaman grafiği	78
Şekil 5.4 3,732 MPa'lık karesel dinamik yükleme.....	79
Şekil 5.5 3,732 MPa karesel dinamik gerilme altında numunenin uzama-zaman grafiği	79
Şekil 5.6 7,376 MPa'lık karesel dinamik yükleme.....	80
Şekil 5.7 7,376 MPa dinamik gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği	80
Şekil 5.8 Sinüzoidal gerilme durumu için SIMULINK'de oluşturulan blok diyagram	81
Şekil 5.9 Birinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi.....	83
Şekil 5.10 Birinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	83
Şekil 5.11 İkinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi	84
Şekil 5.12 İkinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama..	84
Şekil 5.13 Üçüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi .	85
Şekil 5.14 Üçüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	85
Şekil 5.15 Dördüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi	86
Şekil 5.16 Dördüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	86
Şekil 5.17 Birinci deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi	87
Şekil 5.18 İkinci deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi	87
Şekil 5.19 Üçüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi	88
Şekil 5.20 Dördüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi....	88
Şekil 6.1 1,757 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	91
Şekil 6.2 3,732 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	91
Şekil 6.3 7,376 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	92
Şekil 6.4 11,021 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	92
Şekil 6.5 1,757 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(deneysel)	95
Şekil 6.6 1,757 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(analitik)	95
Şekil 6.7 3,732 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(deneysel)	97
Şekil 6.8 3,732 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(analitik)	97
Şekil 6.9 7,376 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(deneysel)	99
Şekil 6.10 7,376 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(analitik)	99
Şekil 6.11 Birinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	101
Şekil 6.12 Birinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	101
Şekil 6.13 İkinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	102
Şekil 6.14 İkinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	102
Şekil 6.15 Üçüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	104
Şekil 6.16 Üçüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	104
Şekil 6.17 Dördüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama	105
Şekil 6.18 Dördüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama	105

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Farklı gerilmeler altındaki uzama-zaman değerleri.....	26
Çizelge 2.2 Farklı gerilmeler altındaki sünme uzaması-zaman değerleri	27
Çizelge 2.3 Farklı gerilmeler için Burgers modelinden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri	38
Çizelge 2.4 Farklı gerilmeler için Burgers modelinden elde edilen uzama değerleri	38
Çizelge 3.1 Farklı gerilmeler altında oluşan birim şekil değiştirme-zaman değerleri.....	41
Çizelge 3.2 11,021 MPa (1598,405 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları.....	42
Çizelge 3.3 7,376 MPa (1069,761 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları.....	43
Çizelge 3.4 3,732 MPa (541,262 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları.....	44
Çizelge 3.5 1,757 MPa (254,822 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları.....	45
Çizelge 3.6 m sabitinin bulunması için gerekli $\log A$ ve $\log \sigma$ değerleri.....	48
Çizelge 3.7 ANSYS programından elde edilen sünme analizi değerleri.....	53
Çizelge 6.1 1,757 MPa gerilme altında deneysel ve dinamik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	96
Çizelge 6.2 3,732 MPa gerilme altında deneysel ve dinamik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	98
Çizelge 6.3 7,376 MPa gerilme altında deneysel ve dinamik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	100
Çizelge 6.4 Sinüzoidal birinci deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması	103
Çizelge 6.5 Sinüzoidal ikinci deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	103
Çizelge 6.6 Sinüzoidal üçüncü deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması	106
Çizelge 6.7 Sinüzoidal dördüncü deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	106

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması esnasında, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocam **Prof. Dr. Faris KAYA**'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım boyunca değerli görüşlerinden yararlandığım; **Prof. Necati TAHRALI**, **Prof. Dr. Tuncer TOPRAK**, **Prof. Dr. Saim AKYÜZ** ve **Prof. Dr. İsmail TEKE**'ye, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen **DİZAYN Teknik A.Ş.** yetkililerine, özel olarak **eşime** ve **oğluma** teşekkürlerimi borç bilirim.

İstanbul
Eylül, 2003

Semih SEZER
Makina Yüksek Mühendisi



ÖZET

Plastik boru üretimi ve kullanımı, plastik malzemelerinde ve üretim teknolojilerinde meydana gelen gelişmelerle birlikte giderek yaygınlaşmaktadır. Buna bağlı olarak mühendislik problemleri açısından plastik boruların önemi de artmaktadır. Plastik borular kullanım alanlarına göre statik ve dinamik yüklemelere maruz kalabilirler. Bu yükleme durumlarında boruların göstereceği davranışlar boru malzemesinin göstereceği davranışlara bağlıdır. Plastik malzemeler genelde viskoelastik özelliklere sahip oldukları için fiziksel özelliklerinde zamanla değişimler meydana gelir. Bu değişimlerin matematik modelinin oluşturulması değişik yükleme durumlarında boru davranışlarının belirlenebilmesi için önemlidir. Yapılan literatür araştırmasında bu konudaki çalışmaların yetersiz olduğu görülmüştür.

Uygulamaya yönelik bir çalışma yapabilmek için plastik boru üretiminde yaygın olarak kullanılan ve viskoelastik özelliklere sahip HDPE malzemenin statik ve dinamik yük durumları için malzeme davranışlarının matematik modellenmesi amaçlanmıştır. HDPE'nin fiziksel özelliklerinin zamana bağlı değişiminin matematik modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle modellemeye esas oluşturan yaklaşımlardan bahsedilmiştir. Her modelin farklı bir karakteri vardır. HDPE'nin karakterinin hangi modele benzerlik gösterdiğini tespit edebilmek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sabit gerilme altında zamana bağlı oluşan şekil değiştirmeler önemli olduğu için hazırlanan numuneler üzerinde sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sünme deneylerini gerçekleştirebilmek için çekme deneylerinde kullanılan cihaz üzerinde bazı düzenlemeler yapılmış ve dört farklı gerilme durumu için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre malzemenin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölge tespit edilmiş ve bu bölgedeki davranışlarının Burgers modeli ile benzerlik gösterdiği anlaşılmıştır. Burgers modelindeki malzemeye ait sabitler, deneysel veriler yardımıyla analitik olarak hesaplanmıştır.

Sünme deneyleri bilgisayar ortamında nümerik olarak sonlu eleman analiz programı ANSYS yardımıyla da teyit edilmiştir. Deney numunesinin sonlu eleman modeli sınır şartlarını da içerecek şekilde programlanmıştır. ANSYS ile sünme analizinin yapılabilmesi için programa girilmesi gerekli HDPE'ne ait sabitler, deney verileri yardımıyla hesaplanmış ve bu değerlere bağlı olarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Plastik boruların dinamik davranışlarının incelenmesi oldukça önemli ve güncel bir konudur. Dinamik model oluşturulmadan önce yine HDPE'nin dinamik yükleme durumlarındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Hazırlanan deney numuneleri üzerinde karesel ve sinüzoidal gerilme oluşturan iki farklı deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzenekleri statik deneylerin gerçekleştirildiği cihaza monte edilmiştir. Farklı gerilme durumları için dinamik yüklemeli deneyler gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler elde edilmiştir.

Karesel ve sinüzoidal yükleme durumları için dinamik modelin kurulmasında öncelikle, statik durumlar için oluşturulan Burgers modelinin genel bünye denklemi elde edilmiştir. Bu denklemdeki diferansiyel denklemin çözülmesinde MATLAB programının altında çalışan SIMULINK programı kullanılmıştır. Matematik model blok diyagramı şeklinde oluşturulmuş ve istenilen parametrelerdeki değişikliklerin etkisi kolayca görülmüştür.

Her iki yük durumu için deneysel, nümerik ve analitik sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların birbirleriyle genelde uyumlu olduğu görülmüştür. Burgers modeli, plastik borularda yaygın olarak kullanılan HDPE'nin, fiziksel özelliklerinin zamanla değişiminin modelleme yaklaşımında kullanılması hem statik hem de dinamik durumlar için doğru sayılabilecek sonuçlar vermiştir.

Anahtar kelimeler: Burgers modeli, sünme, viskoelastisite, sonlu eleman, modelleme

ABSTRACT

Plastic pipe usage and production have become widespread with development in technology and plastic materials. Accordingly, plastic pipes are of vital importance in terms of engineering problems. Based on the area of usage, plastic pipes are affected by static and dynamic loads. In these cases, the behaviour of pipes are dependent upon the behaviour of its constituents. In general, physical properties of plastic materials can change by the time since they have viscoelastic properties. Under various loading conditions, identifying the pipe behaviours is very important in order to obtain the mathematical model of these changes. So far, studies on plastic pipe behaviours have not been carried out in detail.

The purpose of this thesis is to find mathematical model of behaviours for HDPE material, mostly used in plastic pipe production, under static and dynamic loading conditions. The essential mathematical approaches are firstly given so as to obtain the proposed mathematical model of viscoelastic material behaviours. Each model given in literature have different characteristics. Experimental studies have been performed to characterize HDPE. Due to the importance of creep behaviour, creep experiments have realized. Tensile machine is modified to perform creep experiments for four stress conditions. Linear viscoelastic region of HDPE is approximately identified according to results obtained from experimental studies. It is shown that the behaviours of HDPE in linear viscoelastic region are similar that of Burgers model. The constants of the material belong to Burgers model are calculated analytically with the aid of experimental data.

Creep experiments are simulated as well in ANSYS, based on finite element analysis. Finite element model of specimen is programmed including boundary conditions. The input data of ANSYS, the constants of the HDPE material are stemmed from experiment results and the analysis is performed based on this data.

Examination of dynamic behaviours of plastic pipes is recently quite popular and vital. The behaviour of HDPE under dynamic loadings is studied experimentally before dynamic model development. Two different loading as squared and sinusoidal variation of stresses are applied on the prepared experiment samples.

Dynamical model for square and sinusoidal stress conditions is found with the aid of Burgers model differential equations, which are solved by using MATLAB-SIMULINK.

Experimental, numerical and analytical results are given comparatively and it is shown that all results are approximately closed to each other. Burgers model has shown to be a reasonably good approach to develop mathematical modelling for HDPE materials widely used in pipe productions. Consequently, the proposed model can be used in the applications which show linear viscoelastic behaviour.

Keywords: Burgers model, creep, viscoelasticity, finite element, modelling

1. GİRİŞ

Plastik üretim teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak plastik malzemelerin kullanım alanları da genişlemektedir. Yoğunluklarının düşük olması, kimyasal maddelere ve korozyona dayanıklı olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri plastiklerin birçok alanda kullanımlarını yaygınlaştırmaktadır.

Son yıllarda üretimin giderek yaygınlaştığı alanlardan birisi de plastik boru sektörü olmuştur. Plastik, birçok alanda kullanımı olan bir malzeme olmasına karşın, boru üretiminde kullanımı diğer ticari malzemelerle karşılaştırıldığında son yıllara kadar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu yüzden üreticiler, geçmişteki tecrübeler yerine, plastik boruların özelliklerine ait özel bilgilere ihtiyaç duymaktadırlar.

Plastik borular metal veya beton borularla karşılaştırıldığında avantajlarından bazıları şunlardır.

- Basit ve çabuk döşenir.
- İyi kaynak özelliklerine sahiptir, dolayısıyla ek yerleri sızdırmazdır.
- Hafif, sağlam ve esnektir.
- Çatlama ve darbe mukavemeti yüksektir.
- Kimyasal direnci yüksektir, korozyondan etkilenmez, çürümez, aşınmaz.
- İç yüzeyi pürüzsüzdür, projelendirilirken kullanılan boru çapı minimize edilir.
- Toprak hareketlerinden ve depremden etkilenmez.
- Dayanım ömrü 50 yıldır.

Plastik boru üretiminde polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC) gibi değişik malzemeler kullanılmaktadır ve her biri farklı özelliklere sahiptir. Bu çalışmada plastik boru üretiminde yaygın olarak kullanılan HDPE (High Density Polyethylene-Yüksek Yoğunluklu Polietilen) malzeme özellikleri üzerinde duruldu.

1.1 HDPE Üretimi ve Sınıflandırılması

Polietilen, plastiklerin poliolefin grubundadır ve olefinler olarak bilinen düz zincirli hidrokarbonların polimerizasyonu ile elde edilirler. Polietilen ilk olarak 1930'larda İngiltere'de Imperial Chemical Industries (ICI) da üretilmiştir. Yüksek basınç polietileni ya da düşük yoğunluklu polietilen olarak bilinen ICI polietileni, etilen monomerinden yüksek basınç reaktöründe üretilmiştir. Daha sonraları üretim teknolojileri yenilenerek etilen polimerlerinin farklı özellikleri geliştirilmiştir.

Polietilen üretim esnasında oksitlenmeyi engelleyici ve renklendirici (genellikle siyah) ile karıştırılarak UV ışınlarına karşı dayanıklı hale getirilir. Uzun süre UV ışınına maruz kalan polimerler özelliklerini kaybeder.

PE yoğunluğuna göre üç sınıfa ayrılmaktadır. LDPE (Low Density Polyethylene-Düşük Yoğunluklu Polietilen), MDPE (Middle Density Polyethylene-Orta Yoğunluklu Polietilen), HDPE (High Density Polyethylene- Yüksek Yoğunluklu Polietilen).

1.2 HDPE'nin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Polietilen boruların davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için polietilenin fiziksel ve mekanik özellikleri bilinmelidir.

HDPE'nin fiziksel özellikleri üç parametrenin etkileşimine bağlıdır; yoğunluk, moleküler ağırlık ve moleküler ağırlık dağılımı. Yoğunluğu 941-965 [kg/m³] aralığındadır. Yoğunluğun artmasıyla çekme gerilmesi, rijitlik, yumuşama sıcaklığı ve kimyasal dayanıklılık değerleri artar. Düşük sıcaklık darbe dayanımı, birim şekil değiştirme, geçirgenlik ve kayma gerilmesi dayanımı ise yoğunluğun artmasıyla azalır.

Moleküler ağırlığı 50000g/mol-250000g/mol aralığındadır. Moleküler ağırlık artarken çekme gerilmesi, birim şekil değiştirme, kayma gerilmesi dayanımı ve yumuşama viskozitesi artar. Yumuşama viskozitesi artınca malzemeyi işlemek daha zor olur.

Plastik malzemelerin mekanik özellikleri sadece malzeme cinsine göre değil aynı zamanda malzemenin durumuna göre de değişir. Kristal polimer bir yapıya sahip olan HDPE'nin özellikleri katılaştırılması sırasındaki şartlara da bağlıdır. Malzemeye eklenen toz ya da fiber gibi katkı maddeleri mekanik özellikleri etkiler (Hashash, 1991).

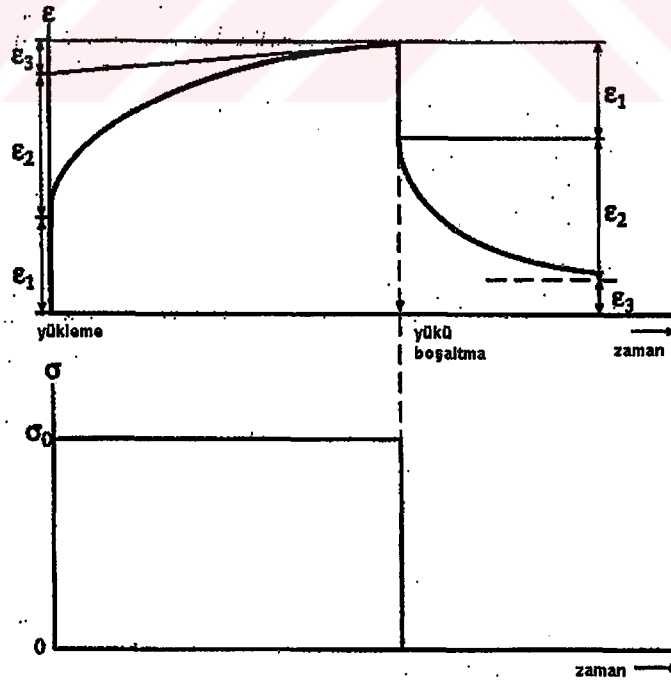
1.3 HDPE'nin Zamana Bağlı Cevabı

Metallerle plastikler arasındaki en önemli fark, malzemenin tanımlanmasında kullanılacak özelliklerin seçilmesidir. Metallerde malzemenin tasarım ve tanımlanmasında, elastisite modülü, kayma gerilmesi gibi özellikler kullanılabilir. Gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki ilişki belirli gerilme seviyelerine kadar lineerdir (Hooke kanununun geçerli olduğu bölge) ve yük kaldırılınca başlangıçtaki şekillerine dönerler.

Plastiklerde durum biraz farklıdır. Birim şekil değiştirme - gerilme ilişkisi, yükleme zamanına bağımlıdır ve yük altında malzemedeki sünme oluşur. Bu özellik, çeliğin yüksek sıcaklıklarda gösterdiği özelliklere benzetilebilir. Sıcaklığın artmasıyla sünme miktarı da artar.

HDPE viskoelastik bir malzemedir. Viskoelastik malzeme gerilmeye maruz kaldığında, sanki viskoz bir sıvıyla elastik bir katının kombinasyonuymuş gibi davranır. Viskoz bileşen uzama ve gerilme arasında bir damper gibi davranır. Örneğin plastik malzemeye sürekli bir yük uygulandığında, ani artışlı bir deformasyon görülür ve artış hızı giderek azalır. Lineer viskoelastik teoride; yük, deformasyon ve zaman parametreleri lineer diferansiyel bir denklemle birbirine bağlıdır. Gerilme ve uzama tek sabitle birbirine bağlıdır. Bu sabit ise, uygulanan gerilmenin genliğinden ve verilen sıcaklıktaki uzamadan bağımsız, uygulama süresine bağlıdır. Yüksek gerilme seviyesinde, büyük uzama şartlarında ve yüksek sıcaklıklarda, malzeme viskoelastik davranışları lineerliklerini kaybeder.

Şekil 1.1’de plastik bir numuneye yük uygulanmasıyla oluşan birim şekil değiştirme-zaman ve uygulanan gerilme-zaman eğrileri görülmektedir. Şekilde üç farklı birim şekil değiştirme bölgesi görülmektedir. İlk önce oluşan ε_1 Hooke kanununa uygun elastik birim şekil değiştirmedir. ε_2 gecikmiş elastik birim şekil değiştirmedir (birinci sünme olarak da adlandırılır). Zamanla kademeli olarak ilk haline döner. Son olarak viskoz birim şekil değiştirme ε_3 (ikincil sünme) oluşur ve hiçbir zaman ilk haline dönemez. Birim şekil değiştirme ve zaman arasındaki bu ilişki viskoelastik malzemelerde görülür. Her gerilme değeri birim şekil değiştirme ve zaman arasında yeni bir ilişki meydana getirir. ε_1 , ε_2 ve ε_3 arasında farklı gerilme seviyelerindeki oran sabit ise malzeme lineer viskoelastiktir.



Şekil 1.1 Plastik numuneye sabit σ_0 gerilmesi uygulanmasıyla oluşan birim şekil değiştirme-zaman grafiği

1.4 Viskoelastik Bir Cismin Mekanik Modellemesi

Birim şekil değiştirme, zaman ve gerilme arasındaki ilişki viskoelastik malzemelerde daha karmaşıktır. Bu ilişkiyi daha basit olarak açıklayabilmek için, değişik mekanik modeller kullanılmaktadır.

Yay, uygulanan gerilmeyle orantılı uzama veren ideal lineer elastik elemanı gösterir. Buradaki ilişki, gerilmeyle birim şekil değiştirme arasındaki yükleme zamanından bağımsız ilişkiyi gösterir. Hooke kanununa göre;

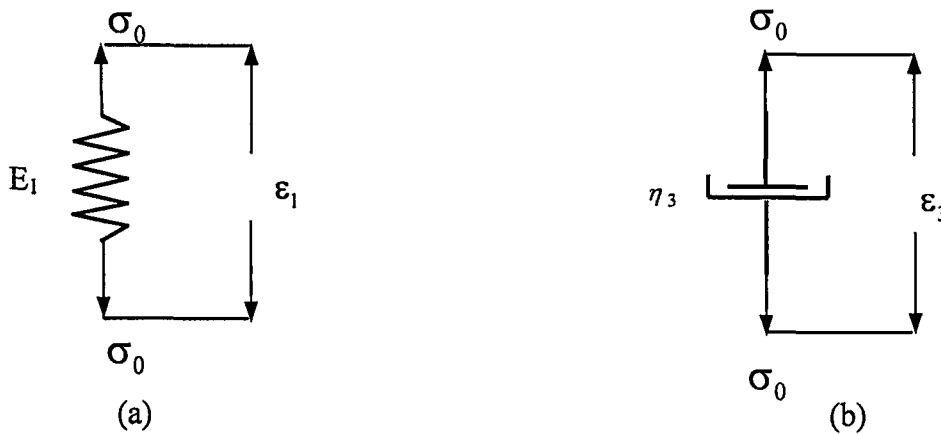
$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (1.1)$$

olarak bulunur. Plastik malzemelerde, bu birim şekil değiştirme molekül zincirinin elastik birim şekil değiştirmesi olarak anlaşılabilir.

İdeal lineer viskoz eleman, sönüm elemanıdır. Uygulanan çekme kuvvetiyle orantılı olarak hareket eder. Eğer σ_0 gerilme, ε_3 birim şekil değiştirme, η_3 viskozite ise t yükleme zamanından sonra sönüm elemanının uçları arasındaki birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_0}{\eta_3} t \quad (1.2)$$

olarak bulunur. Sönüm elemanının birim şekil değiştirmesi plastik malzemedeki molekül zincirlerinin arasındaki kaymaya benzerdir.



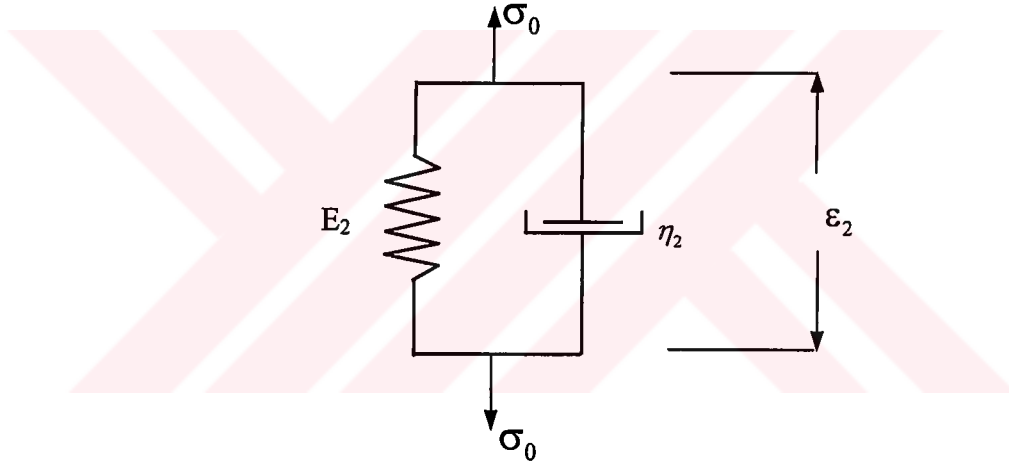
Şekil 1.2 (a) İdeal elastik cismin mekanik modeli, (b) Viskoz cismin mekanik modeli

Gecikmeli elastik birim şekil değiştirme, elastik ve viskoz elemanların paralel bağlanmış haldeki mekanik modeliyle gösterilebilir. Böylece ;

haldeki mekanik modeliyle gösterilebilir. Böylece ;

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - \exp \left[-\frac{E_2 t}{\eta_2} \right] \right) \quad (1.3)$$

olarak bulunur. Yüklemenin kalktığı durumda, yay eleman orijinal haline dönmek ister fakat bu sönüm elemanı tarafından engellenir. Yeni pozisyonunda kalır ve orijinal pozisyonuna yay kuvvetinin etkisiyle kademeli olarak döner. Teorik olarak orijinal şekline dönebilmesi için, sonsuz uzun zaman gereklidir. Birim şekil değiştirmenin elastik kısmındaki bu gecikme, moleküllerdeki elastik birim şekil değiştirme ve moleküller arasındaki tutma kuvvetinin aşılmasıyla elektrostatik viskoz direncinde meydana gelen artışıdır (Janson, 1995).



Şekil 1.3 Elastik gecikmeli birim şekil değiştirmeye sahip cismin mekanik modeli

1.4.1 Lineer Viskoelastisitenin Temel Denklemleri

Zamanla mekanik özellikleri değişmeyen doğrusal (lineer) viskoelastik malzemelerde gerilme geçmişi bilindiğinde, eksenel yüklemde birim şekil değiştirmenin zamanla değişimi (Findley vd., 1976, Akyüz vd., 2001);

$$\varepsilon(t) = \sigma(0)f(t) + \int_0^t f(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau \quad (1.4)$$

dir. Birim şekil değiştirme geçmişi bilindiğinde ise, gerilmenin zamanla değişimi;

olur. Burada $f(t)$ ve $g(t)$ sünme ve gevşeme fonksiyonlarıdır. Gerilme ve birim şekil değiştirmenin başlangıcı $t=0$ olarak alınmıştır. $\sigma(0), \varepsilon(0)$; $t=0$ anındaki değerlerdir.

(1.4) ve (1.5) denklemlerinin Laplace dönüşümleri alınır;

$$\hat{\varepsilon}(s) = \sigma(0) \hat{f}(s) + \left[s \hat{\sigma}(s) \hat{f}(s) - \sigma(0) \hat{f}(s) \right] = s \hat{\sigma}(s) \hat{f}(s) \quad (1.6)$$

ve

$$\hat{\sigma}(s) = s \hat{\varepsilon}(s) \hat{g}(s) \quad (1.7)$$

olarak bulunur. Herhangi bir $u(t)$ fonksiyonu için Laplace-Carson dönüşümü;

$$u^*(s) = s \hat{u}(s)$$

olarak hesaplanır. (1.6) ve (1.7) denklemlerinden s karmaşık değişkenine bağlı olarak;

$$\varepsilon^*(s) = f^*(s) \sigma^*(s) \quad (1.8)$$

$$\sigma^*(s) = g^*(s) \varepsilon^*(s) \quad (1.9)$$

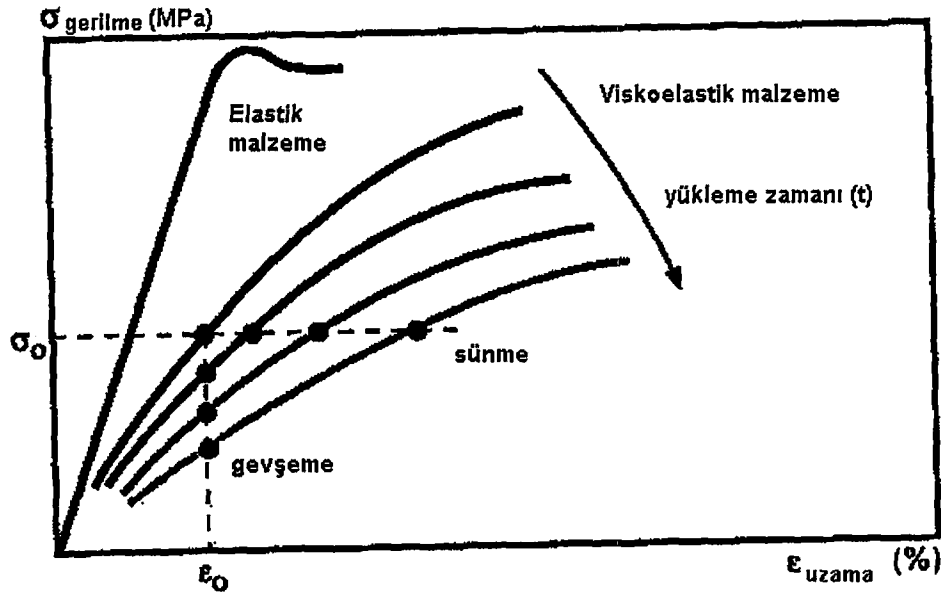
$$f^*(s) \cdot g^*(s) = 1 \quad (1.10)$$

bağıntıları elde edilir. (1.8) ve (1.9) bağıntılarının, Hooke denklemlerinin formunda olduğu görülmektedir. Buna lineer elastisite ile lineer viskoelastisite arasındaki karşılıklı ilişki denmektedir. Böylece Laplace-Carson dönüşümleri ile (1.4) ve (1.5) denklemleri adi iki cebirsel denklem haline gelmiş olur.

1.5 Birim Şekil Değiştirme ve Zaman Arasındaki İlişki

Sünme olayı Şekil 1.4'deki eğrilerle daha iyi anlaşılabilir. Eğrilerde viskoelastik malzemeler için gerilme ve zorlama arasındaki zamana bağlı ilişki de görülmektedir.

Tasarım mühendisleri için, gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki ilişkinin, gerilme seviyesine, yükleme zamanına ve sıcaklığa ne kadar bağımlı olduğunun bilinmesi gereklidir.



Şekil 1.4 İdeal elastik ve viskoelastik bir malzeme için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

Elastik bir malzeme için, σ gerilmesi ve ε birim şekil değiştirmesi arasındaki oran Hooke kanununa göre elastisite modülü olarak bilinen sabit bir E ile tanımlanabilir. Şekil 1.4'ten de görüldüğü gibi $E = \sigma / \varepsilon$ oranı akma noktasına kadar sabittir.

Viskoelastik malzemelerde ise E sabit değildir. Yüklenme zamanı t ve σ gerilmesine bağlıdır. Bu durumda E artık elastisite modülü değildir ve genellikle sünme modülü diye adlandırılır.

E modülündeki zamanla azalma, malzemenin zayıflamasının, yumuşamasının ya da dayanımının azalması değildir. Viskoelastik malzemenin yük uygulandığında sünme ya da gevşemenin tanımından oluşan bir durumdur.

1.6 Konu İle İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

1.6.1 Plastik Malzemelerin Özellikleri ve Davranışları

Moore ve Booker (1985), çevresel basınca maruz, gömülü esnek silindirlerin davranışları için basitleştirilmiş bir teori geliştirmişlerdir. Bu teoriyle silindirlerin basınç altındaki cevaplarının doğru bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca teori silindirin çökme problemine ait parametrik çözümler elde edilmesinde de kullanılmıştır.

Hashash (1991) tarafından yapılan çalışmada, HDPE'nin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan, yoğunluğu ve ağırlığı belirleme testi, esneklik testi, çekme testi, basınç testi, basınç altındaki deformasyon testi ve gerilme gevşemesi testleri standartlarından

bahsedilmiştir.

Selig vd. (1994), dairesel basınca maruz gömülü plastik borular için yeni bir test metodu geliştirmişler. Bu teknik, istenilen çaptaki ve istenilen basınç seviyesindeki borulara test uygulama imkanı getirmiştir. Testler sonucu, profilli plastik boruların çaplarında kısalmalar olduğu görülmüştür. Ayrıca bu test basınca maruz plastik boruların, profil tasarımı limitlerinin belirlenmesine temel oluşturmuştur.

Moore (1994), profilli borulardaki yerel uzamaları incelemiş ve nümerik model sonuçlarını test etmek için deneysel ölçümler yapmıştır. Nümerik sonuçlar sonlu eleman yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma sırasında, profilli çelik ve HDPE borular kullanılmış ve borulara paralel plak test yöntemiyle yük uygulanmıştır. Elastik ve viskoelastik model için hesaplamalar yapılarak deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

McGrath vd.,(1994), HDPE borunun halka eğilmedeki rijitliğini incelemişler. Halka eğilme testi, plastik boruların sabit deformasyonda tutulması ve sonra geçici yüklere maruz bırakılarak davranışlarının incelenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Testler sonucu kısa süreli modülün, uzun süreli gevşeme modülünden daha büyük olduğu ve zamanla azalmadığını göstermiştir. Ayrıca kısa süreli yük artışlarının boru üzerinde yeni bir yük gibi davranabileceği ve rijitlik cevabının kısa süreli modülle ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

Moore ve Hu (1995b) çevresel basınca maruz, profilli HDPE borular için üç boyutlu bir sonlu eleman analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Bu analizle, profilli HDPE boruların çevresel basınç altındaki performans limitlerinin incelenmesi ve borunun herhangi bir bölgesindeki eksenel eğilmelerin hesaplanabilmesi sağlanmıştır

Nikolov ve Doghri (2000), HDPE'nin mikro yapısının malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemişler ve mikro yapıların viskoelastik modelini üç elemanlı model ile yapmışlardır.

1.6.2 Plastik Malzemelerin Zamana Bağlı Cevabı

Sonlu eleman analiz programı ANSYS yardımıyla, sabit gerilme altında malzeme üzerinde zamanla oluşan sünme analizi gerçekleştirilebilir.

Chua (1986) toprak-boru sisteminin zamana bağlı davranışları için yeni ve oldukça doğru sonuçlar veren bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem ile zamana bağlı deformasyonları ve büyük çaplı, herhangi bir genişlikteki kanala gömülü esnek boruların, birim şekil değiştirme seviyelerini sayısal olarak çözebilmiştir. CANDE sonlu eleman programıyla, geliştirilen

TAMPIPE programına veri tabanı oluşturulmuş ve analizden elde edilen sonuçların doğru olduğu görülmüştür. Bu çalışma zamana bağlı toprak-boru ilişkisine oldukça doğru bir yaklaşım getirmiştir.

Chua ve Lyton (1987) lineer olmayan malzemeler için elastik çözümler kullanarak zamana bağlı bir analiz metodu geliştirmişlerdir.

Petroff (1990) bütün boru malzemelerinin gerilme gevşemesi ve sünmeye maruz olduğunu ve toprak-boru etkileşiminin zamana bağlı davranışlarını belirleyeceğini belirtmiştir.

Schroch (1990) esnek boru-toprak ilişkisi üzerinde bir çalışma yapmıştır. Son yıllara kadar laboratuarlarda esnek boru-toprak ilişkisi genellikle çelik borular için yapılırken bu çalışmaların plastik borulara kaydığını ve sonlu eleman analiz programları geliştirilerek değişik modeller oluşturulduğunu vurgulamıştır. Boruların uzun süreli davranışlarını incelerken gerekli bazı parametrelerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için açıklamalar yapmış ve yöntemleri karşılaştırmıştır.

Tullis vd. (1990) profilli HDPE borular üzerinde hidrolik silindirlerle basınç deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucu halka deformasyonun öncelikli olarak borunun yan taraflarındaki toprağın sıkıştırılabilirliğine bağlı olduğu görülmüştür. Eğer toprak yükü ve borunun durumu sabit tutulursa, HDPE boru üzerinde zamanla bir gevşeme olduğu da görülmüştür. Eğer borunun yataklaması iyi yapılmışsa, boru duvarlarında gerilme gevşemesi oluşsa bile boru kesitinin sabit kaldığı ve toprağın yükleri taşıdığı görülmüştür. Ayrıca astarlı ve astarsız profilli boruların farklı topraklardaki halka deformasyonları karşılaştırılmış ve astarlı boruların daha dayanıklı olduğuna karar verilmiştir.

Moore ve Zhang (1997) HDPE'nin lineer olmayan mekanik cevabı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Büyük uzama seviyelerinde HDPE'nin lineer olmayan özellikler gösterdiğini ve lineer viskoelastik model davranışların incelenmesi için yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. HDPE'nin lineer olmayan davranışlarını incelemek için ince duvarlı HDPE bir borunun bir kısmı kesilerek çıkarılmış ve üzerinde testler yapılmıştır. Deneysel olarak tek eksenli basınç altında, lineer olmayan, zamana bağlı cevap elde edilmeye çalışılmıştır. Deneyler sonucunda malzemenin viskoplastik ve lineer olmayan viskoelastik modelleri çıkarılmıştır.

Johnson (1999) viskoelastik malzemelerin modellenmesinde kullanılan klasik modeller; Voight, Kelvin-Voight ve standart lineer katı modelleri ayrıntılı olarak incelemiş ve şekil değiştirme esaslı sonlu eleman formülasyonunu üç model için de ayrı ayrı sunmuştur.

Mano vd. (2001) sünme olayının viskoelastik davranışlar gösteren plastik malzemeler için önemli bir fiziksel özellik olduğunu vurgulamışlar ve farklı sıcaklıklarda deneyler yaparak sıcaklığın sünme davranışına etkisini incelemişlerdir.

1.6.3 Plastik Boruların Tasarım Kriterleri

Kienow ve Prevost (1989), esnek bir borunun çökme eşiğindeki boru-toprak rijitlik oranını incelemişlerdir. Bu çalışma için birkaç farklı düşük rijitlikli boru toprağa gömülmüş ve üzerlerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Prevost (1990) esnek boruların tasarımı için geliştirilen prosedürlerin bir karşılaştırmasını yapmıştır.

Hoch vd. (1990), toprak altındaki drenaj borularının maruz kaldığı yapısal yüklere, kimyasal maddelere ve sıcaklığa uzun süreli periyotlarla dayanabilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bunun için borunun uygun şekilde toprak içinde yataklanması gerektiğini ve bu durum için ATV'nin ürettiği standartlardan bahsetmişlerdir.

Prevost ve Kienow (1991) esnek boruların yapısal tasarımındaki kriterleri inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada esnek boruların (düşük rijitlikli) kullanımındaki artışa dikkat çekilerek bunların tasarımında kullanılacak prosedürün dikkatlice seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Birkaç esnek boru modeli incelenerek; dış yükler, basınç etkisi, eksenel etki, çökme gibi konular gözden geçirilmiş ve boru malzemesi ile toprağın bazı özelliklerinin önemi vurgulanmıştır. Deneyler sonucu tasarım hesaplamalarında toprak tasarımının şekil değiştirmeyi önleyecek şekilde olması, uzun süreli çalışmalarda şekil değiştirmenin %5'le sınırlanması, w/S oranının 40'ı aşmaması gerektiği (w: boru üzerindeki basınç, S: uzun süreli boru rijitliği $SE_{LD}^3 > 1500 \text{ N/m}^2$) kararına varmışlardır.

Hashash (1991) hazırladığı doktora tezinde basınçsız, toprağa gömülü HDPE boruların tasarım ve analizinde kullanılacak temel bilgileri belirtmiştir. Tez altı önemli bölümden oluşmuştur. İlk bölümde HDPE malzeme ve boru performansıyla ilgili önceki bilgiler değerlendirmiştir. İkinci bölümde kullanılan tasarım yöntemleri değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde, boru analizinde kullanılan metodlar değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde HDPE boru üzerinde yapılan laboratuvar testleri değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde toprağa gömülü HDPE bir boru üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır ve altıncı bölümde toprağa gömülü borunun analitik modellemesi yapılmıştır. Sonuç olarak boruların incelenmesinde yeni ve gelişmiş bir analiz yöntemi ortaya koyulmuştur.

Chunduru vd. (1995), polietilen boruların çökme davranışlarını incelemişlerdir. Boru cidarındaki çökmelerin kısa süreli dış yüklerden, toprakta oluşan ani basınç artışı ya da iç basınçtaki ani düşmeden oluşabileceğini belirtmişlerdir. Değişik araştırmacılar tarafından kullanılan çökme formülleri açıklanmış ve deneysel çalışmalarla geliştirilen kısa süreli dış yük altında oluşabilecek kritik çökme basıncının tahmini için geliştirilen basitleştirilmiş bir metod sunulmuştur. Bu metotta duvar kalınlığı, çap, standart boyut oranı ve gerilmeler göz önüne alınmıştır.

1.6.4 Profilli Polietilen Borular

Hurd (1986); (1987), Ohio eyaletinde toprağa gömülü profilli PE boruların performanslarını incelemiştir. Araştırmalar sonucu; a) Daha büyük esneklik ve daha ince duvarlı 12-15 inç profilli PE boruların çevresel ve eksenel yönlerdeki eğilme gerilmelerine daha duyarlı olduğu görülmüştür. Bu yüzden daha küçük çaplı boruların 18-24 inç profilli PE borulara göre daha düşük dayanımı olduğu belirtilmiştir. b) Boru yerleştirildikten 2-4 yıl sonra şekil değiştirmede herhangi bir artış görülmemiştir. c) Gömülme derinliği az ve ağır trafik yüküne maruz profilli PE boruların yapısal performansında herhangi bir azalma görülmediği vurgulanmıştır.

Katona (1988) çalışmasında 30 inç kadar çapa sahip profilli PE borular için maksimum gömme derinliğinin hesaplanmasını incelemiştir. Tasarım kriterleri olarak AASHTO'nun önerdiği itme gerilmesi, düzgün şekil değiştirme, esnek uzama ve çökme parametrelerini kullanmıştır. Tasarım hesaplamalarında kısa ve uzun dönem PE özellikleri ile toprak tipi ve sıkıştırılma oranları da göz önüne alınmıştır. Tasarım çözümleri CANDE programı ve laboratuvar sonuçlarıyla karşılaştırılarak belirtilmiştir. Çalışmalar sonucu iç çap, dış çap ve profilli kesit alanı bilinerek oluşturulan grafik ve tablolardan, toprak özellikleriyle birlikte bir borunun elli yıllık süre için kabul edilebilir gömme derinliğinin belirlenmesi sağlanmıştır.

Adams vd. (1989) yük altındaki PE borunun performansını incelemek için bir deney tesisatı oluşturmuşlar ve deneyler yapmışlardır. Deney yapılan borular, profilli ve destek amacıyla kesitler arasına çelik tel yerleştirilmiş borulardan seçilmiştir.

Moore (1995a) toprağa gömülü, profilli PE boruların üç boyutlu gerilme cevabını incelemiştir. PE borunun tasarımı için toprakla kemerleşme, zamana bağlı cevap, çekme kopması ilişkilerinin açıklanması gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışma çevresel gerilmelerin çoğunlukla basma gerilmesi olduğunu ve iki boyutlu analiz kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermiştir. Borunun iç tarafında oluşan eksenel çekme gerilmesinin üç boyutlu analizle bulunamayacağını söylemiştir. Bu gerilmelerin orta alt bölgesinde en büyük

olduğu ve toprağa gömülü profil PE borular için önemli bir performans limiti olabileceğini bildirmiştir.

Moser (1998), profil HDPE gömülü boruların yapısal performansı ve boru geometrisinin etkisi üzerinde bir araştırma yapmıştır. Profil parametrelerinin yapısal performansa etkisini ve performans limitini belirleyebilmek için çökme oluşana kadar borulara yükleme yapılmıştır. Profil parametrelerini; destek yüksekliği ve aralığı, duvar kalınlığı, birim uzunluk duvar alanı, mesnetlenmemiş profil kesit uzunluğu ve rijitlik olarak belirlemiştir. Profil boru tasarımında mümkün olduğunca çok malzemenin tarafsız eksen takımından uzakta yani iç veya dış duvarda ya da destekleyici üzerinde yerleştirilmesi gerektiğini ve böylece borunun kesit modülü artırılarak kullanılan malzemenin minimize edilmesi gerektiğini önemle vurgulamıştır. Testler sonucu elde edilen verilerde profil kesitinin belirli bir noktaya kadar bir birim gibi davrandığı görülmüştür. Büyük toprak yüklerinde profil kesitlerinde çökmelerin ortaya çıkabileceğini tespit etmiş. Bu yüzden güvenilir bir tasarım için iç ve dış duvarlar yada destek elemanlar arasında yeterli malzemenin bulunması gerektiğini söylemiştir. Performans limitlerinin daha çok eğilme ile ilgili olduğunu tespit etmiştir. Profil borular için bölgesel yada genel çökmenin en düşük performans limiti olduğunu ve birim uzunluk kesit alanı ve bütün duvar bileşenlerinin bölgesel çökmeye dayanabilmesi gerektiğini söylemiştir.

1.6.5 Plastik Malzemelerin Dinamik Davranışları

Jo vd. (1997) farklı özelliklere sahip HDPE malzemelerin yorulma dayanımlarını deneysel olarak incelemişler ve malzemenin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği sınırların dışındaki uzamalarda dayanımın daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Haupt vd. (2000) polimer malzemelerin küçük kayma uzamaları testleriyle dinamik davranışlarının modellenmesi için viskoelastik modellerden farklı olarak bazı denklemler ve parametreler geliştirmişlerdir.

Khan ve Zhang (2001), modellemesini önceden yaptıkları polimer bir malzeme üzerinde sinüzoidal yükleme durumuna benzeyen ama gerilmenin her yeni yüklemede daha da arttığı bir durum için deneysel ve teorik çalışma yapmışlardır. Malzemenin modellemesini viskoelastik modellerden katı cisim modeli ile yapmışlardır.

1.7 Tezin Amacı ve Kapsamı

Plastik boru üretimi ve kullanımı, plastik malzemelerde ve üretim teknolojilerinde meydana gelen gelişmelerle birlikte giderek yaygınlaşmaktadır. Buna bağlı olarak mühendislik problemleri açısından plastik boruların önemi de artmaktadır. Plastik borular kullanım alanlarına göre statik ve dinamik yüklemelere maruz kalabilirler. Bu yükleme durumlarında, boru malzemelerinin göstereceği davranışlar borunun davranışlarını belirleyecektir. Plastik boru malzemelerinin, özellikle dinamik yükleme durumundaki davranışlarının incelenmesi güncel ve önemli bir konudur. Plastik malzemeler genelde viskoelastik özelliklere sahip oldukları için fiziksel özelliklerinde zamanla değişimler meydana gelir. Bu değişimlerin matematik modelinin oluşturulması, değişik yükleme durumlarında boru davranışlarının belirlenebilmesi, minimum malzeme kullanarak yeterli dayanıma sahip ürünün tasarlanması (optimizasyon) gibi konular için de önemlidir.

Yapılan literatür araştırmasında bu konudaki çalışmaların çoğunda fiziksel özelliklerin zamana bağlı değişimi, deneysel sonuçlardan elde edilen verilerle genelleme yaklaşımıyla çözülmüştür. Bu durum yapılacak her yeni çalışma için öncelikle deneysel çalışma yapılmasını gerektirmektedir. Matematik model kurulmadan yapılacak yeni çalışmalar, hem doğru sonuçların elde edilmesini zorlaştırmakta, hem de zaman kaybına sebep olmaktadır.

Herhangi bir plastik malzemenin fiziksel özelliklerinin zamana bağlı değişiminin matematik modelini oluşturabilmek için literatürde bulunan viskoelastik modellerden biri kullanılabilir. Malzemenin viskoelastik davranışlarına en uygun modeli tespit edebilmek ve modeldeki malzemeye has sabitleri belirleyebilmek için öncelikle deneysel çalışmaların yapılması gereklidir. Deneysel çalışmalar sünme ya da gevşeme durumu için farklılık gösterir. Bu çalışmada şekil değiştirmeler önemli olduğu için sünme ile ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir. Sünme deneylerinde deney boyunca numune üzerinde gerilmenin sabit kalacağı bir düzenek tasarlanmalıdır. Deneyin başlangıcında uygulanan yük ile numunede ani şekil değiştirmeler oluşacağı için hassas cihazlarla ölçüm yapılması önemlidir. Farklı gerilme durumları için numuneler üzerinde oluşan uzama-zaman eğrilerinin karakteristiği en uygun viskoelastik modelin seçilmesine temel oluşturur.

Bu tezde plastik borularla ilgili uygulamalara yönelik çalışmalara esas olmak üzere plastik boru üretiminde yaygın olarak kullanılan ve viskoelastik özelliklere sahip HDPE malzemelerin statik ve dinamik yükleme durumlarındaki davranışlarının matematik modellenmesi amaçlanmıştır.

Bölüm 1’de HDPE’nin viskoelastik davranışlarına en uygun matematik modeli tespit edebilmek için öncelikli olarak malzemenin statik durumlardaki sünme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çekme deneylerinde kullanılan cihaz sünme deneylerine elverişli hale getirilmiştir. HDPE borudan oluşturulan deney numuneleri dört farklı gerilmeye belirli sürelerde maruz bırakılmıştır. Her farklı gerilme durumu için uzama-zaman eğrisi elde edilmiştir. Her deney birden fazla tekrarlanıp ortalaması alınarak en doğru sonucun elde edilmesi sağlanmıştır. Deneylerden elde edilen verilere göre HDPE’nin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölge tespit edilmiştir(0-8 MPa). Bu bölgedeki deneylerin uzama-zaman karakterinin viskoelastik Burgers modeliyle benzer olduğu görülmüştür. Burgers modelindeki malzemeye ait sabitler deney sonuçları değerlendirilerek hesaplanmıştır. Sonlu eleman analiz programı ANSYS ile de sünme analizi gerçekleştirilebilmektedir. Bölüm 2’de ANSYS ile sünme analizi gerçekleştirebilmek için gerekli matematik modeldeki parametreler deney sonuçlarına göre hesaplanmıştır. ANSYS programı ile deney numunesinin sonlu eleman modeli sınır şartlarını da içerecek şekilde programlanmış ve sünme analizi nümerik olarak gerçekleştirilmiştir.

HDPE’nin dinamik yükleme durumundaki davranışlarının modellenmesi, boruların dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenebilmesi için önemli görülmüştür. Bu konuda literatürde yeterli bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu amaçla Bölüm 4’te numuneler üzerinde farklı gerilme durumları için karesel ve sinüzoidal yükleme durumu oluşturan deney düzenekleri tasarlanmıştır. Karesel gerilme durumunda numunenin belirli sürelerle yüklü ve yüksüz kalması, numuneye asılan ağırlığın hidrolik bir krika ile kaldırılıp indirilmesiyle sağlanmıştır. Sinüzoidal gerilme oluşturan düzende ise numuneler üzerinde gerilme oluşumu, özel olarak tasarlanan düşük devirli bir redüktöre bağlanan yaylar ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzenekleri statik deneylerin gerçekleştirildiği cihaza monte edilmiş ve cihaz üzerinden deneysel veriler elde edilmiştir. Bölüm 5’te statik durumlar için elde edilen viskoelastik Burgers modelinin genel bünye denkleminde matematik modele geçilmiştir. Matematik modeldeki diferansiyel denklemin çözülmesinde MATLAB programının altında çalışan SIMULINK programı kullanılmıştır. Matematik model bir blok diyagramı şeklinde oluşturulmuş ve istenilen parametrelerdeki değişikliğin etkisi kolayca görülmüştür. Bölüm 6’da elde edilen deneysel, nümerik ve analitik sonuçlar karşılaştırılmış, irdelenmiş ve her iki durum için de sonuçların iyi sayılabilecek bir yaklaşıklıkla uyum içinde olduğu görülmüştür. Plastik boru üretiminde kullanılan HDPE malzemenin lineer viskoelastik davranışlar göstereceği her türlü uygulamada bu model iyi sayılabilecek bir yaklaşık yöntem olarak kabul edilebilir.

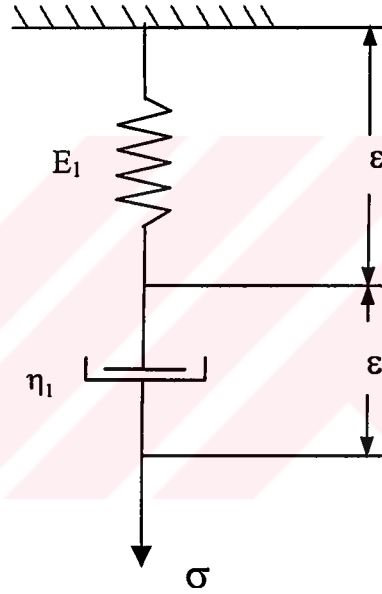
2. HDPE MALZEMENİN MATEMATİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

2.1 Giriş

Viskoelastik özellik gösteren malzemelerin sünme davranışlarının matematiksel olarak modellenmesinde, temel olarak Maxwell ve Kelvin modelleri göz önüne alınmaktadır (Findley vd., 1976; Akyüz, 2000). Bu iki modelin değişik kombinasyonları denenerek, istenilen sünme davranışına matematiksel olarak yaklaşım sağlanabilir.

2.1.1 Maxwell Modeli

Maxwell modeli lineer yay ve sönüm elemanının seri bağlanmasıyla oluşan iki elemanlı bir modeldir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Maxwell modeli

İki eleman seri bağlandığı için toplam birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.1)$$

denklemleri kullanılabilir. Bu denkleme Laplace dönüşümü uygulanırsa (2.1) denklemleri;

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}_1 + \hat{\varepsilon}_2 \quad (2.2)$$

formunu alır. Modeldeki elemanların birim şekil değiştirmesi sırayla ele alınmalıdır. Yay elemanının birim şekil değiştirmesi Hooke kanununa göre;

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\hat{\varepsilon}_1 = \frac{\hat{\sigma}}{E_1}$$

formunu alır. Sönüm elemanının birim şekil değiştirmesinin türevi;

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\sigma}{\eta_1}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa ;

$$s \cdot \hat{\varepsilon}_2 = \frac{\hat{\sigma}}{\eta_1} \Rightarrow \hat{\varepsilon}_2 = \frac{\hat{\sigma}}{\eta_1 \cdot s}$$

formunu alır

Bu ifadeler (2.2) denkleminde yerine konulursa;

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}}{E} + \frac{\hat{\sigma}}{\eta_1 \cdot s} \quad (2.3)$$

denklemini elde edilir. Denklem düzenlenirse;

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\sigma} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{\eta_1 \cdot s} \right)$$

olarak bulunur. Bu denkleme Laplace-Carson dönüşümü uygulanırsa;

$$\varepsilon^* = \sigma^* \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{\eta_1 \cdot s} \right) \quad (2.4)$$

formunu alır. Sönme ifadesine ulaşmak için denklem düzenlenirse;

$$f^* = \frac{\varepsilon^*}{\sigma^*} = \frac{1}{E} + \frac{1}{\eta_1 \cdot s}$$

denkleminde ulaşılır. Tekrar Laplace formuna dönüşüm yapılırsa;

$$\hat{f} = \frac{1}{E.s} + \frac{1}{\eta_1.s^2}$$

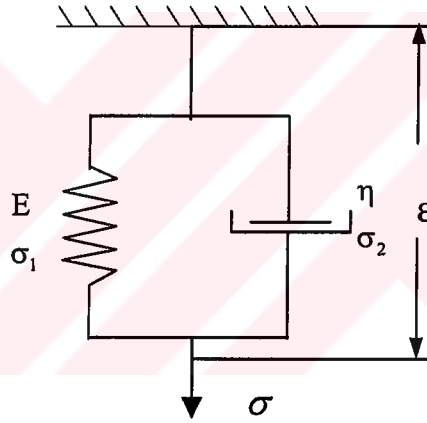
formunu alır ve ters Laplace dönüşümü alınarak;

$$f(t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta_1} \quad (2.5)$$

Maxwell modeli için sünme denkleminde ulaşılır.

2.1.2 Kelvin Modeli

Kelvin modeli lineer yay ve sönüm elemanının paralel bağlanmasıyla oluşan iki elemanlı bir modeldir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Kelvin modeli

Modele uygulanan σ gerilmesi paralel kollarda σ_1 ve σ_2 olarak ikiye ayrılır, elemanların birim şekil değiştirmeleri ise eşittir. Bu durumda;

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.6)$$

olur. Bu denkleme Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 \quad (2.7)$$

formunu alır. Yay elemanındaki birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{E}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}_1}{E}$$

formunu alır. Sönüm elemanının birim şekil değiştirmesinin türevi;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_2}{\eta}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$s.\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}_2}{\eta} \Rightarrow \hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}_2}{\eta s}$$

formunu alır. Yay ve sönüm elemanının birim şekil değiştirmeleri belirlendikten sonra (2.7) denklemini düzenlenirse;

$$E.\hat{\varepsilon} + \eta.\hat{\varepsilon}.s = \hat{\sigma}$$

$$\hat{\varepsilon}(E + \eta.s) = \hat{\sigma}$$

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}}{E + \eta.s}$$

olarak bulunur. Bu denkleme Laplace-Carson dönüşümü uygulanırsa;

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma^*}{E + \eta s} \quad (2.8)$$

formunu alır. Sünme ifadesine ulaşmak için denklem düzenlenirse;

$$f^* = \frac{\varepsilon^*}{\sigma^*} = \frac{1}{E + \eta s} = \frac{1}{\eta \left(\frac{E}{\eta} + s \right)}$$

denklemine ulaşılır. Ters Laplace-Carson dönüşümü yapılırsa;

$$\hat{f} = \frac{1}{\eta s \left(\frac{E}{\eta} + s \right)} = \frac{1}{E} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{E}{\eta}} \right)$$

formunu alır ve ters Laplace dönüşümü yapılarak;

$$f(t) = \frac{1}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \quad (2.9)$$

Kelvin modeli için sünme denkleminde ulaşılır.

Böylece Kelvin ve Maxwell modellerinin sünme denklemleri elde edilmiştir.

2.2 Sünme Deneyleri

Sünme bir malzemenin sabit gerilmeye maruz kaldığında deformasyonunun zamana bağlı olarak devam etmesidir. Bir malzemenin sünme karakteristiğini belirleyebilmek için öncelikli olarak oluşturulan numuneler sabit sıcaklıkta, farklı büyüklüklerde gerilmelere maruz bırakılır. Her farklı gerilme için numune üzerinde zamanla oluşan uzamalar ölçülür ve uzama-zaman eğrileri elde edilir. Eğriler analiz edilerek malzemeye ait en uygun viskoelastik model ve bu modele ait sünme sabitleri elde edilebilir.

Bu çalışmada HDPE'nin sünme karakteristiğinin belirlenebilmesi için gerekli sünme deneyleri yapıldı. Deneylerden elde edilen değerler, HDPE'nin sünme karakteristiğine en uygun viskoelastik modelin analitik olarak tespit edilmesinde ve sonlu eleman analiz programı ANSYS ile sünme analizi gerçekleştirilmesinde kullanıldı.

2.2.1 Deney Numunelerinin Oluşturulması

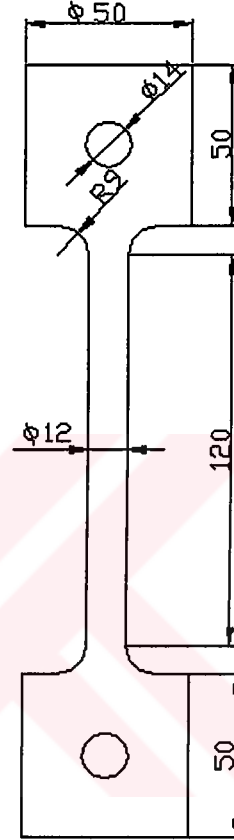
Numunelerin oluşturulmasında ilk adım olarak, PE100 olarak adlandırılan yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden üretilmiş 850 mm çapında, 50 mm et kalınlığındaki bir borudan yaklaşık 300 mm uzunluğunda bir parça kesildi ve bu parçada daha küçük parçalara ayrıldı. Daha sonra bu parçalar torna tezgahında işlenerek Şekil 2.3'te görülen çekme çubuğu şeklindeki deney numunesinden 20 adet üretildi. Deney numunelerinin boyutları, uzamaların daha hassas ölçülebilmesi için çekme deneylerinde kullanılan standart numunelere göre daha büyük yapıldı.

2.2.2 PE100 Malzemenin Kopma Gerilmesinin Hesaplanması

Kopma gerilmesinin hesaplanabilmesi için hazırlanan bir numuneye çekme testi uygulandı. Çekme deneyi sonucu oluşan gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 2.4'te görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi kopma gerilmesi yaklaşık olarak 23 MPa olarak bulundu.

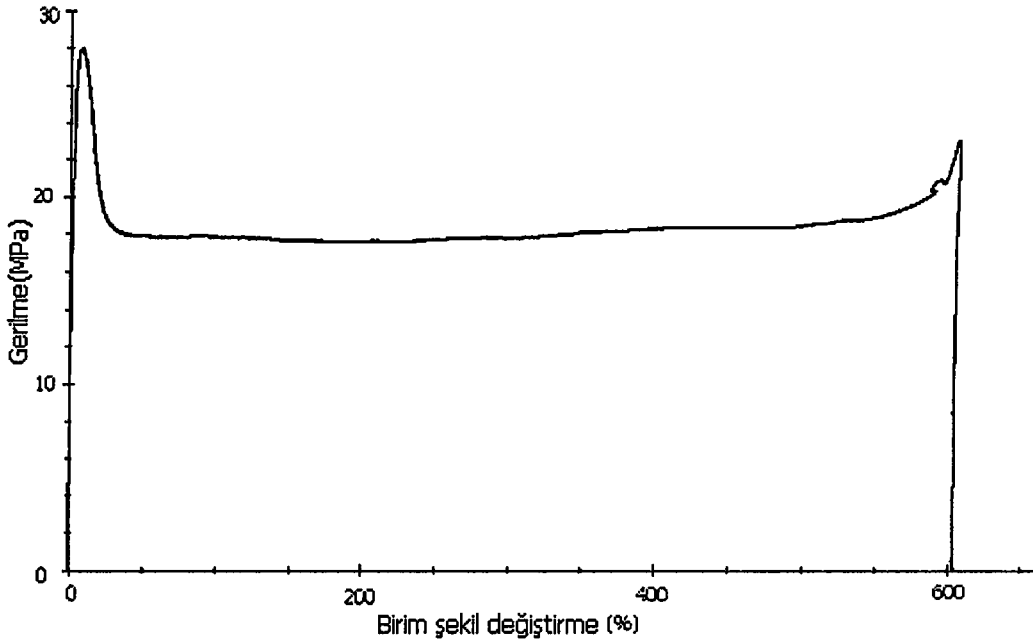


(a)



(b)

Şekil 2.3 a) Sünme deneyi numunesi, b) Sünme deneyi numunesi boyutları



Şekil 2.4 PE100 malzemenin çekme deneyi grafiği

2.3 Sünme Deney Düzenegi

Çekme deneylerinde kullanılan ve üst çenesi sabit alt çenesi hareketli olan Zwick 1455 markalı çekme deneyi cihazı, sünme deneylerini gerçekleştirmeye uygun hale getirildi. Bu cihaz üzerinde çubuğun uzamasını mikrometre hassasiyetle ölçmeye yarayan bir ekstensometre ve her saniye çubukta meydana gelen uzamayı RS232 portundan bilgisayara aktarabilen bir program bulunmaktadır. Böylece oldukça hassas bir şekilde uzama-zaman grafikleri elde edilebilmiştir. Plastik malzemelerde sabit yük altında en büyük yer değiştirme yirmi dört saat içinde görüldüğü ve standartlarda bu şekilde belirtildiği için(ISO 9969) sünme deney süreleri yaklaşık olarak yirmi dört saat sürmüştür.

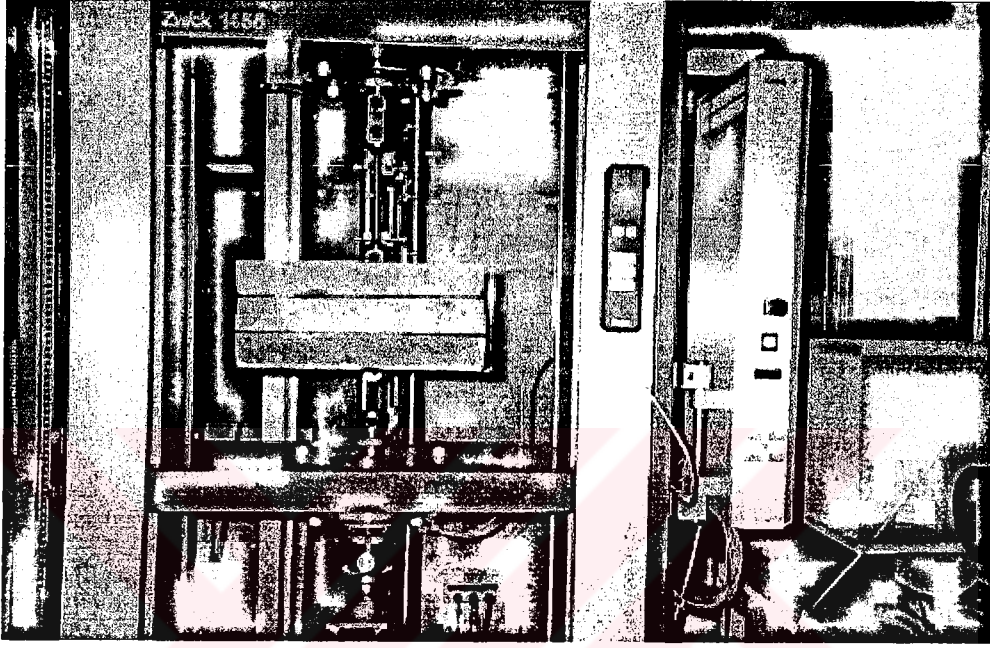
İlk olarak deney numunelerinden birisine, üzerinde PE100 malzemenin kopma gerilmesinin yaklaşık yarısı; 11,021 MPa gerilme oluşturan 127 kg'lık bir kütle asıldı. Şekil 2.5'te bu düzenek görülmektedir. Şekil 2.6'daki grafikte ise 11,021 MPa gerilme altında numunede meydana gelen uzama-zaman grafiği görülmektedir.

İkinci olarak numuneye üzerinde yaklaşık 7,376 MPa gerilme oluşturan 85 kg'lık bir kütle asıldı. Şekil 2.7'de bu düzenek görülmektedir. Şekil 2.8'deki grafikte 7,376 MPa gerilme altında numunede meydana gelen uzama-zaman grafiği görülmektedir.

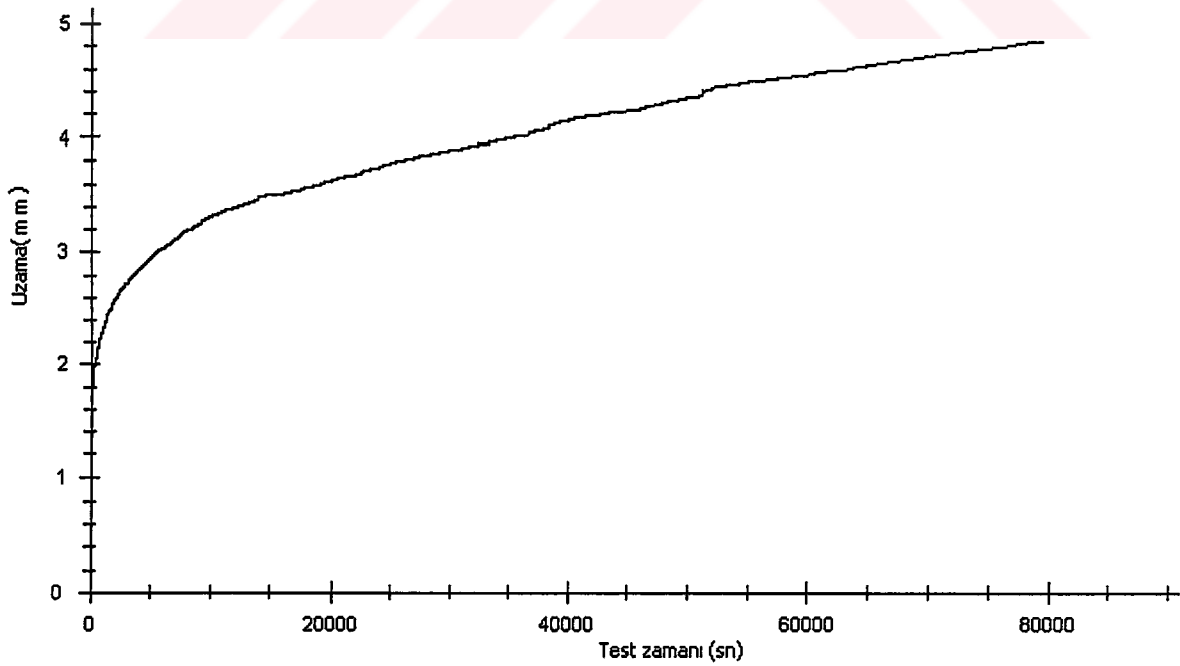
Üçüncü olarak numuneye üzerinde yaklaşık 3,732 MPa gerilme oluşturan 42 kg'lık bir kütle

asıldı. Şekil 2.9’de bu düzenek görülmektedir. Şekil 2.10’daki grafikte 3,732 MPa gerilme altında numunede meydana gelen uzama-zaman grafiği görülmektedir.

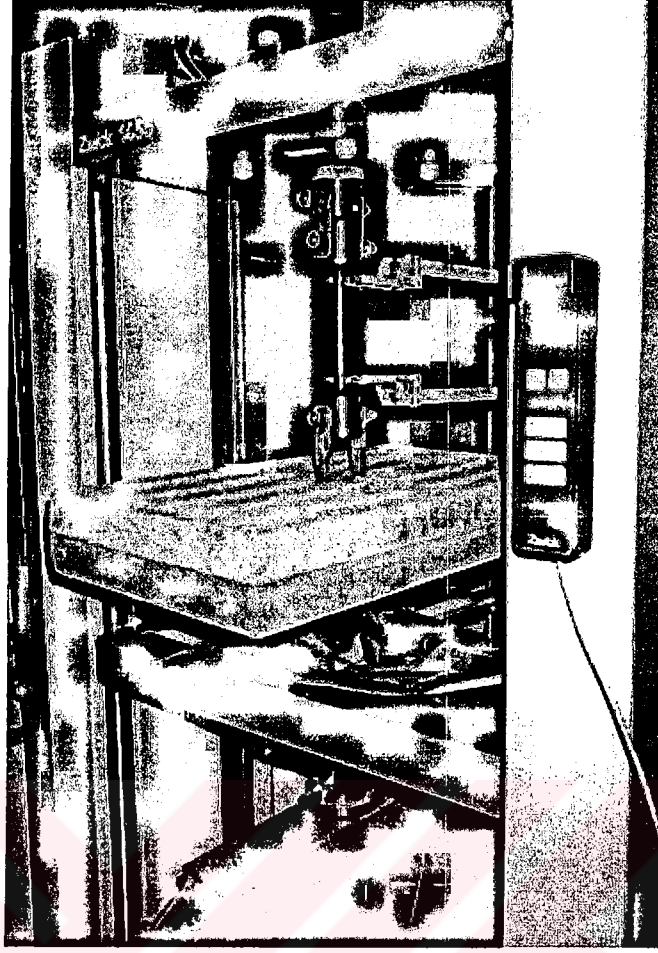
Dördüncü olarak numuneye üzerinde yaklaşık 1,757 MPa gerilme oluşturan 20 kg’lık bir kütle asıldı. Şekil 2.11’de ise bu düzenek görülmektedir. Şekil 2.12’deki grafikte 1,757 MPa gerilme altında numunede meydana gelen uzama-zaman grafiği görülmektedir.



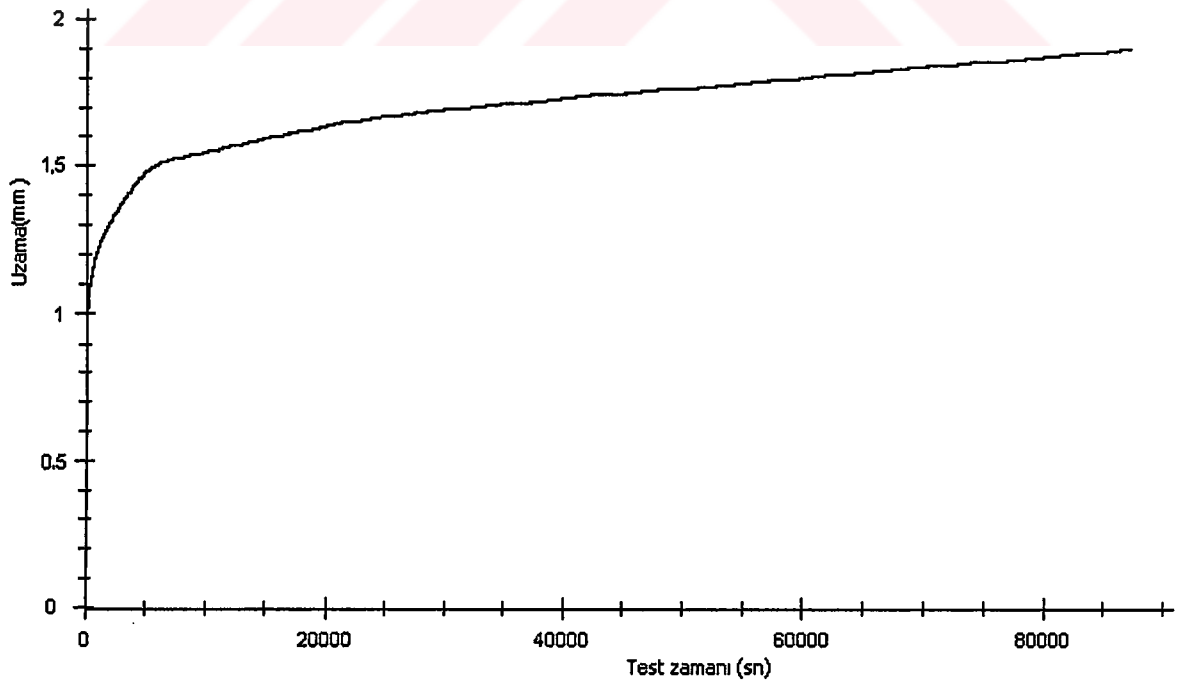
Şekil 2.5 11,021 MPa’lık gerilme oluşturan sistem



Şekil 2.6 11,021 MPa’lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği



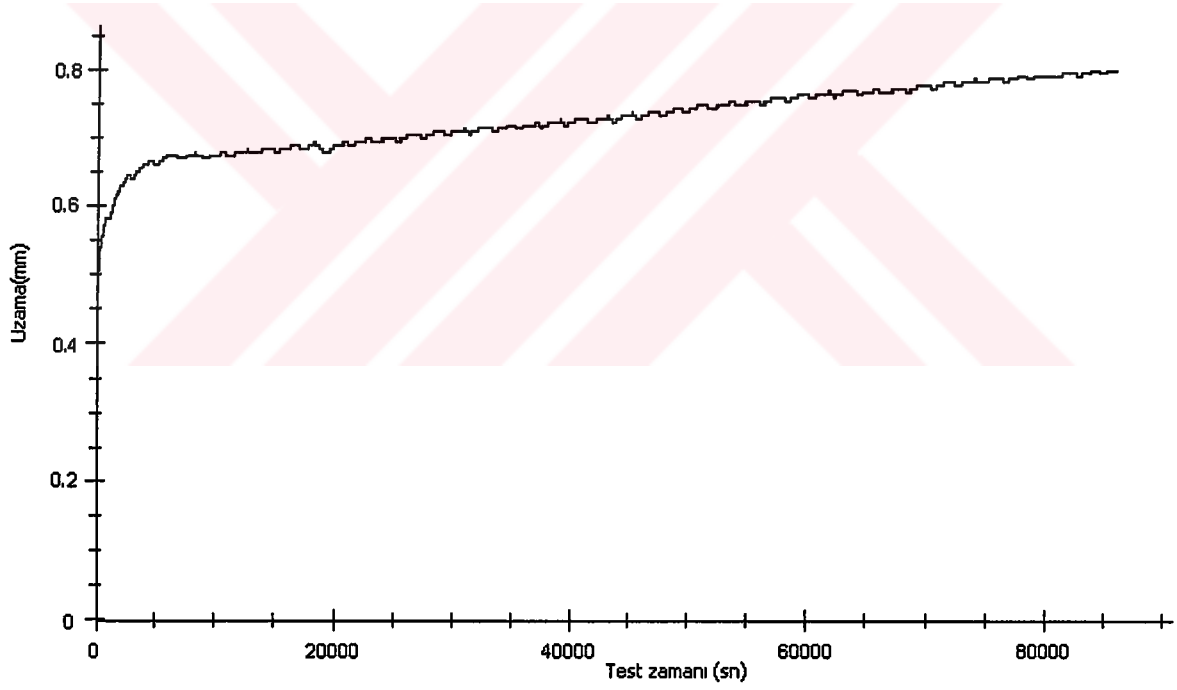
Şekil 2.7 7,376 MPa'lık gerilme oluşturan sistem



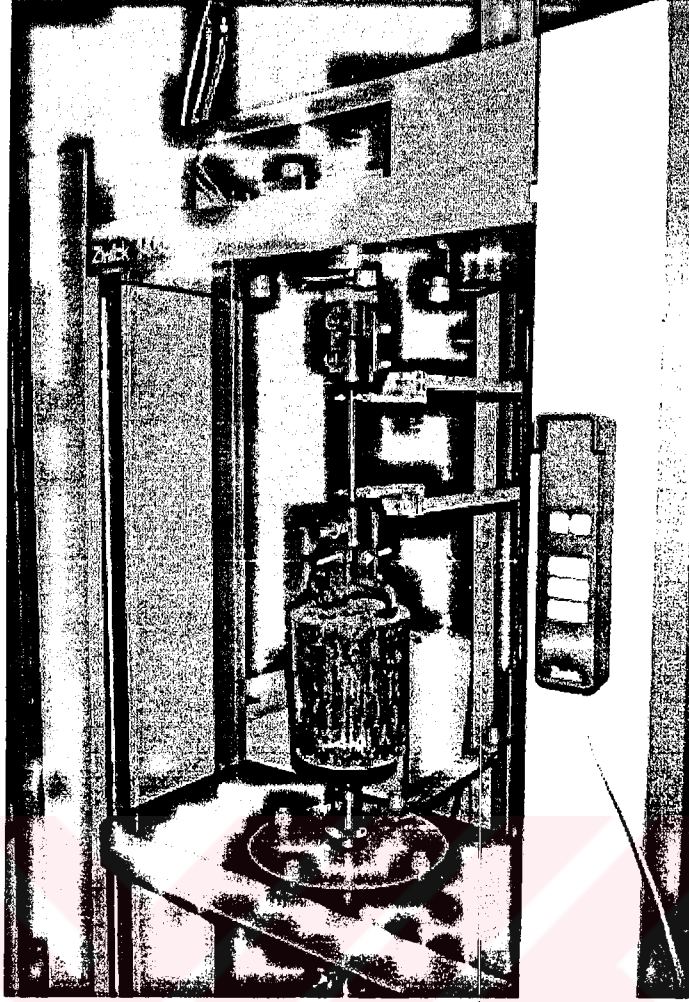
Şekil 2.8 7,376 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği



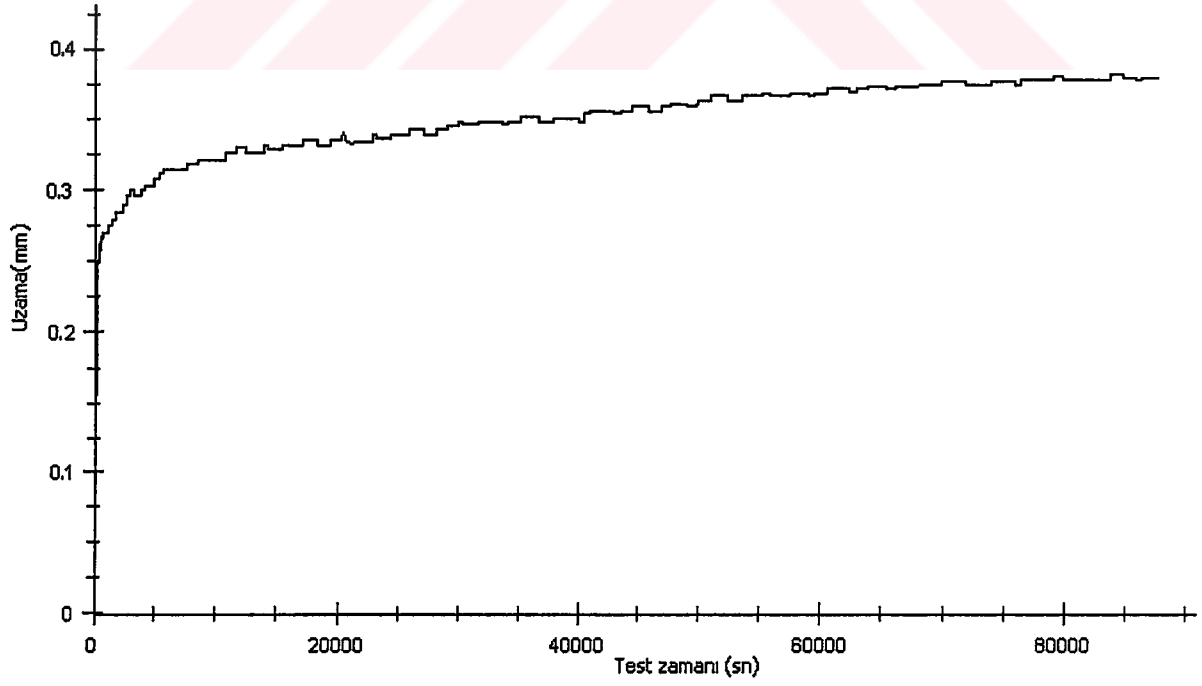
Şekil 2.9 3,732 MPa'lık gerilme oluşturan sistem



Şekil 2.10 3.732 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği



Şekil 2.11 1,757 MPa'lık gerilme oluşturan sistem



Şekil 2.12 1,757 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği

Şekil 2.6, Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 12’de grafik olarak gösterilen, farklı gerilmeler altındaki uzama-zaman değerlerinin daha kolay irdelenebilmesi için Çizelge 1.1 oluşturuldu.

Çizelge 2.1 Farklı gerilmeler altındaki uzama-zaman değerleri

Zaman(sn)	11,021 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	7,376 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	3,732 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	1,757 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)
100	1,580	1,060	0,535	0,250
1000	2,300	1,210	0,580	0,272
2000	2,565	1,305	0,620	0,283
5000	2,945	1,475	0,660	0,300
10000	3,310	1,545	0,675	0,315
20000	3,620	1,635	0,690	0,330
30000	3,880	1,695	0,710	0,343
40000	4,145	1,735	0,725	0,353
50000	4,335	1,770	0,745	0,362
60000	4,540	1,805	0,765	0,370
70000	4,720	1,845	0,780	0,377
80000	4,850	1,885	0,800	0,383

2.4 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

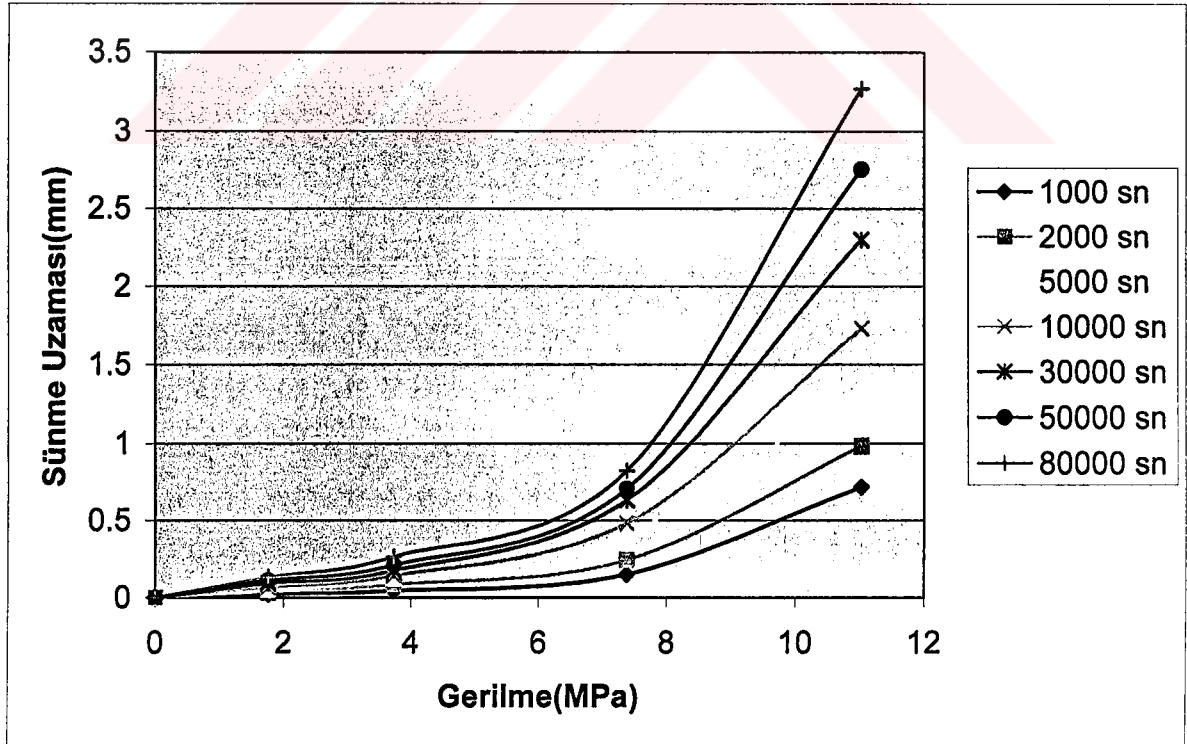
Deney sonuçlarının irdelenerek, HDPE malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölgenin yaklaşık olarak belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla Çizelge 2.1’deki değerlerden faydalanarak, zamana bağlı sünme uzaması değerlerinin hesaplanması gerekir.

Sünme uzaması değeri, toplam uzama değerinden elastik uzama değeri çıkarılarak elde edilir. Her bir gerilme için elastik uzama değeri, Çizelge 2.1’deki değerlerden yüzüncü saniyedeki uzama değerine karşılık gelen değerdir. Başka bir deyişle elastik uzamanın meydana gelmesi ortalama olarak 100 saniye sürmektedir. Herhangi bir zamandaki uzama değerinden yüzüncü saniyedeki uzama değeri çıkarılarak o zamandaki sünme uzaması değerine ulaşılabilir. Çizelge 2.2 bu yöntemle oluşturuldu.

Çizelge 2.2 Farklı gerilmeler altındaki sünme uzaması-zaman değerleri

Zaman(sn)	11,021 MPa gerilme altında oluşan sünme uzaması(mm)	7,376 MPa gerilme altında oluşan sünme uzaması(mm)	3,732 MPa gerilme altında oluşan sünme uzaması(mm)	1,757 MPa gerilme altında oluşan sünme uzaması(mm)
0	0	0	0	0
1000	0.720	0.150	0.045	0.022
2000	0.985	0.245	0.085	0.033
5000	1.365	0.415	0.125	0.050
10000	1.730	0.485	0.140	0.065
20000	2.040	0.575	0.155	0.080
30000	2.300	0.635	0.175	0.093
40000	2.565	0.675	0.190	0.103
50000	2.755	0.710	0.210	0.112
60000	2.960	0.745	0.230	0.120
70000	3.140	0.785	0.245	0.127
80000	3.270	0.825	0.265	0.133

Malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölgeyi tespit edebilmek için Çizelge 2.2'deki değerler ile sünme uzaması-gerilme grafiği farklı zamanlar için oluşturuldu ve Şekil 2.13'teki grafik elde edildi.

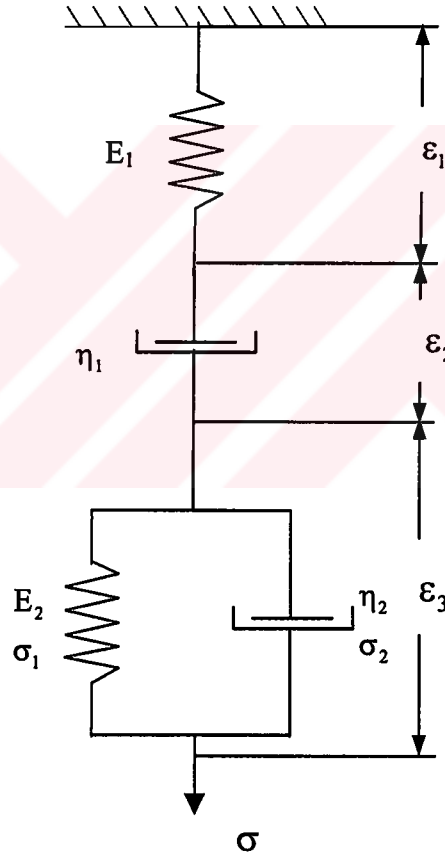


Şekil 2.13 Sünme uzaması-gerilme eğrileri

Grafikten görüldüğü gibi 6-8 MPa gerilme aralığından sonra eğrilerdeki lineerlik bozuluyor. Bu aralıkta yapılan deneylerden 7.376 MPa'lık gerilme oluşturan değerler mevcut olduğu için 0-8 MPa arasındaki bölge lineer viskoelastik kabul edildi.

2.5 Viskoelastik Burgers Modelinin Oluşturulması

Yapılan deneysel çalışmalar HDPE(High Density Polyethylene) malzemenin sünme davranışlarının Burgers modeliyle benzer formlarda olduğunu göstermiştir. Burgers modeli, Maxwell modeli ile Kelvin modelinin seri bağlanmasıyla oluşan bir modeldir (Şekil 2.14). Gabriel vd. (2001), Marynowski vd. (2002) ve Al-Khoury vd. (2002) yaptıkları çalışmalarda Burgers modeli kullanmışlardır. Burgers modelinin matematiksel denklemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.14 Burgers modeli

Şekildeki modelin toplam birim şekil değiştirmesi, elemanların her birinin birim şekil değiştirmelerinin toplamına eşittir;

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.10)$$

Toplam birim şekil değiştirmeyi veren denkleme Laplace dönüşümü uygulanırsa (2.10) denklemi;

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}_1 + \hat{\varepsilon}_2 + \hat{\varepsilon}_3 \quad (2.11)$$

formunu alır. Denklemin açılabilmesi için modeldeki elemanların her birinin birim şekil değiştirmesi sırayla ele alınmalıdır. Birinci yay modelinin birim şekil değiştirmesi aynı zamanda elastik birim şekil değiştirmeyi de vermektedir. Hooke kanununa göre yay elemanının birim şekil değiştirmesi;

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\hat{\varepsilon}_1 = \frac{\hat{\sigma}}{E_1}$$

formunu alır. Birinci sönüm elemanının birim şekil değiştirmesinin türevi;

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\sigma}{\eta_1}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa ;

$$s.\hat{\varepsilon}_2 = \frac{\hat{\sigma}}{\eta_1} \Rightarrow \hat{\varepsilon}_2 = \frac{\hat{\sigma}}{\eta_1.s}$$

formunu alır.

Modele uygulanan σ gerilmesi paralel kollarda σ_1 ve σ_2 olarak ikiye ayrılır. Bu durumda;

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.12)$$

olur. Bu denkleme Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2$$

formunu alır. İkinci yay elemanındaki birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_1}{E_2}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\hat{\varepsilon}_3 = \frac{\hat{\sigma}_1}{E_2}$$

formunu alır. İkinci sönüm elemanının birim şekil değiştirmesinin türevi;

$$\dot{\varepsilon}_3 = \frac{\sigma_2}{\eta_2}$$

formundadır. Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$s \cdot \hat{\varepsilon}_3 = \frac{\hat{\sigma}_2}{\eta_2} \Rightarrow \hat{\varepsilon}_3 = \frac{\hat{\sigma}_2}{\eta_2 \cdot s}$$

formunu alır. İkinci yay ve sönüm elemanının birim şekil değiştirmeleri belirlendikten sonra denklemler düzenlenirse;

$$E_2 \cdot \hat{\varepsilon}_3 + \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_3 = \hat{\sigma}$$

$$\hat{\varepsilon}_3 (E_2 + \eta_2 \cdot s) = \hat{\sigma}$$

$$\hat{\varepsilon}_3 = \frac{\hat{\sigma}}{E_2 + \eta_2 \cdot s}$$

olarak bulunur.

Bütün elemanlar için birim şekil değiştirmeler bulunduğundan sonra (2.11) denklemi;

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}}{E_1} + \frac{\hat{\sigma}}{s \cdot \eta_1} + \frac{\hat{\sigma}}{E_2 + \eta_2 \cdot s} \quad (2.13)$$

formunu alır. Paydalar eşitlenerek denklem açılırsa;

$$\begin{aligned}
\hat{\varepsilon}.E_1.s\eta_1.(E_2 + \eta_2.s) &= \hat{\sigma}.s\eta_1.(E_2 + \eta_2.s) + \hat{\sigma}.E_1.(E_2 + \eta_2.s) + \hat{\sigma}.E_1.s\eta_1 \\
\hat{\varepsilon}.E_1.E_2.s\eta_1 + \hat{\varepsilon}.E_1.s^2\eta_1\eta_2 &= \hat{\sigma}.s\eta_1.E_2 + \hat{\sigma}.s^2\eta_1\eta_2 + \hat{\sigma}.E_1.E_2 + \hat{\sigma}.E_1.\eta_2.s + \hat{\sigma}.E_1.s\eta_1 \\
\hat{\varepsilon}s.E_1.E_2\eta_1 + \hat{\varepsilon}s^2.E_1.\eta_1\eta_2 &= \hat{\sigma}.E_1.E_2 + \hat{\sigma}s(\eta_1.E_2 + E_1.\eta_2 + E_1.\eta_1) + \hat{\sigma}s^2\eta_1\eta_2
\end{aligned} \tag{2.14}$$

(2.14) denklemi elde edilir bu denklemin ters Laplace dönüşümü alınır;

$$E_1E_2\eta_1.\dot{\varepsilon} + E_1\eta_1\eta_2.\ddot{\varepsilon} = E_1E_2.\dot{\sigma} + (\eta_1E_2 + E_1\eta_2 + E_1\eta_1).\dot{\sigma} + \eta_1\eta_2.\ddot{\sigma} \tag{2.15}$$

Burgers modelinin diferansiyel bünye denklemi elde edilir. Benzer yolla malzemenin sünme fonksiyonları da bulunur.

(4) denkleminde, $\hat{\varepsilon}.s = \varepsilon^*$ ve $\hat{\sigma}.s = \sigma^*$ (Laplace-Carson dönüşümü) alınarak denklem tekrar düzenlenirse;

$$E_1E_2\eta_1.\varepsilon^* + E_1\eta_1\eta_2s.\varepsilon^* = E_1E_2.\frac{\sigma^*}{s} + (\eta_1E_2 + E_1\eta_2 + E_1\eta_1).\sigma^* + \eta_1\eta_2s.\sigma^*$$

denklemi elde edilir. Denklem sadeleştirilirse;

$$\varepsilon^*(E_1E_2\eta_1 + E_1\eta_1\eta_2) = \sigma^*\left(\frac{E_1E_2}{s} + \eta_1E_2 + E_1\eta_2 + E_1\eta_1 + \eta_1\eta_2s\right)$$

olarak bulunur. Buradan;

$$f^* = \frac{\varepsilon^*}{\sigma^*} = \frac{E_1E_2 + s(\eta_1E_2 + E_1\eta_2 + E_1\eta_1) + \eta_1\eta_2s^2}{(E_1E_2\eta_1 + E_1\eta_1\eta_2s)s}$$

$$\hat{f} = \frac{E_1E_2 + s(\eta_1E_2 + E_1\eta_2 + E_1\eta_1) + \eta_1\eta_2s^2}{s^2\left(s + \frac{E_2}{\eta_2}\right)E_1\eta_1\eta_2}$$

$$\hat{f} = \frac{E_1E_2}{s^2\left(s + \frac{E_2}{\eta_2}\right)E_1\eta_1\eta_2} + \frac{\eta_1E_2 + E_1\eta_2 + E_1\eta_1}{E_1\eta_1\eta_2} \frac{1}{s\left(s + \frac{E_2}{\eta_2}\right)} + \frac{\eta_1\eta_2}{E_1\eta_1\eta_2} \frac{1}{\left(s + \frac{E_2}{\eta_2}\right)} \tag{2.16}$$

denklemi elde edilir. (2.16) denkleminin ters Laplace dönüşümünün alınmasıyla;

$$f(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{t}{\eta_1} - \frac{1}{E_2} e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \quad (2.17)$$

Burgers modeli için sünme denklemi elde edilir.

2.5.1 Burgers Modelindeki Sabitlerin Belirlenmesi

Sünme deneyleri sonucu elde edilen Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12'deki $\varepsilon - t$ eğrilerinin matematiksel modellerini çıkarabilmek için ilk adım olarak (2.17) denklemindeki Burgers modelinin sünme modeli :

$$f(t) = A + B + Ct - Be^{\alpha t} \quad (2.18)$$

şeklinde kabul edildi.

Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12'deki $\varepsilon - t$ eğrilerinden elde edilen datalar, "Table Curve 2D" isimli, verilen datalara göre en küçük kareler metoduyla eğri uydurma programına girildi ve A, B, C ve α sabitleri bulundu.

A Sabitinin Bulunması:

A sabiti malzemenin başlangıçtaki elastiklik modülü E_1 'in tersine, yani $1/E_1$ 'e eşittir ve σ_0 ile çarpılırsa deney numunesinin elastik birim şekil değiştirme miktarını belirler.

$$A = 1/E_1 = 1/8 \times 10^8 = 1,25 \times 10^{-9}$$

olarak bulundu.

B ve C Sabitlerinin Bulunması:

Burgers modelinde; sabit yükleme altında, zamana bağlı oluşan birim şekil değiştirme-zaman ($\varepsilon - t$) grafiği çizildiğinde, grafiğin eğik asimptotunun ;

$$\sigma_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{t}{\eta_1} \right) = \varepsilon(t) \quad (2.19)$$

(9) denkleminde elde edilen asimptot olduğu görülür. Yaklaşık olarak $t=10000$ saniyeden sonra $\varepsilon - t$ grafiğinin bu eğik asimptota paralellik gösterdiği Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12'den anlaşılmaktadır.

(2.19) denklemi numunenin başlangıç boyu ile çarpılarak, Çizelge 2.1’de gösterilen $t=10000$ - 80000 sn. zaman aralığındaki uzama değerlerine eşitlendiğinde;

$$y = a + bx$$

formunda bir doğru oluşturduğu görülür. Burada;

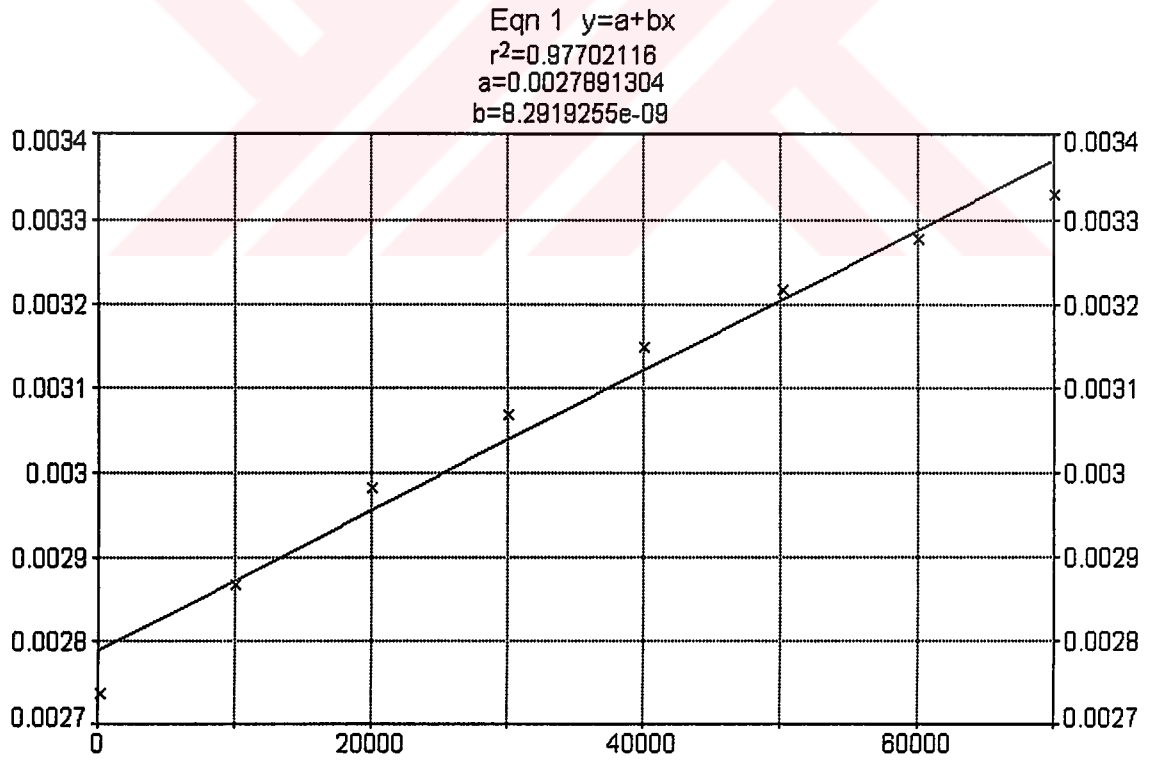
$$a = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)$$

$$b = \frac{\sigma_0}{\eta_1}$$

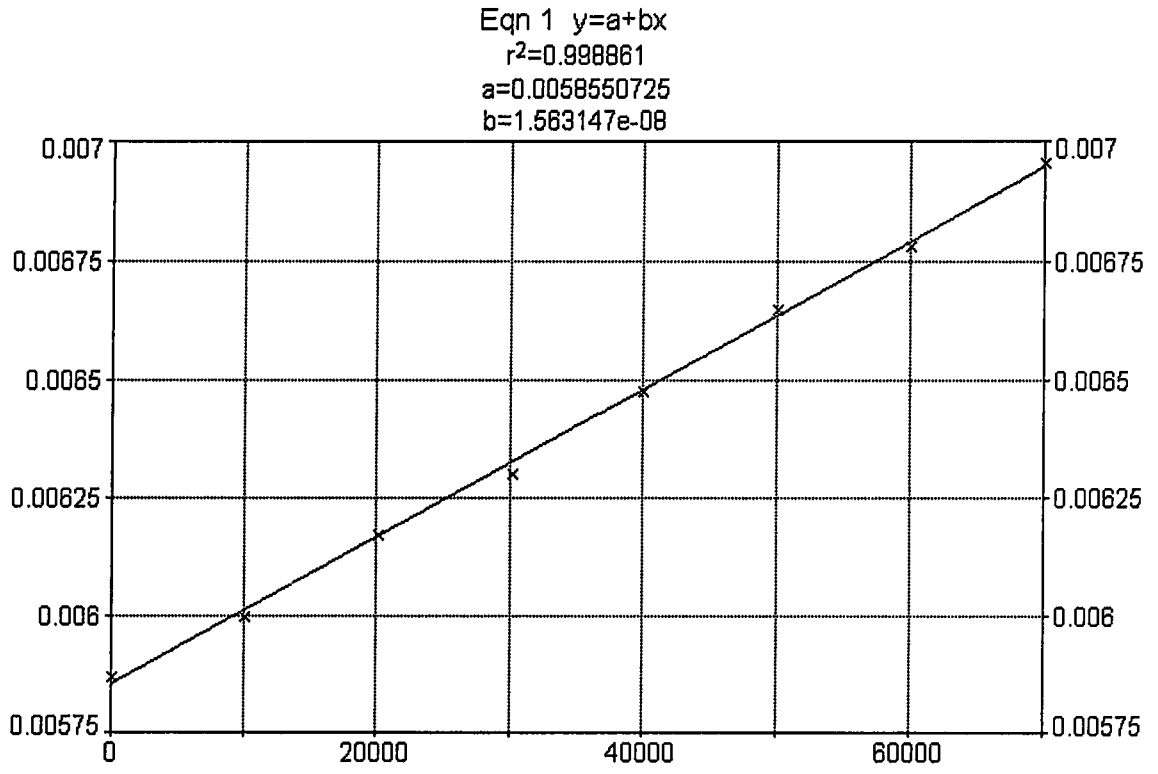
$$x = t$$

$$y = \varepsilon(t)$$

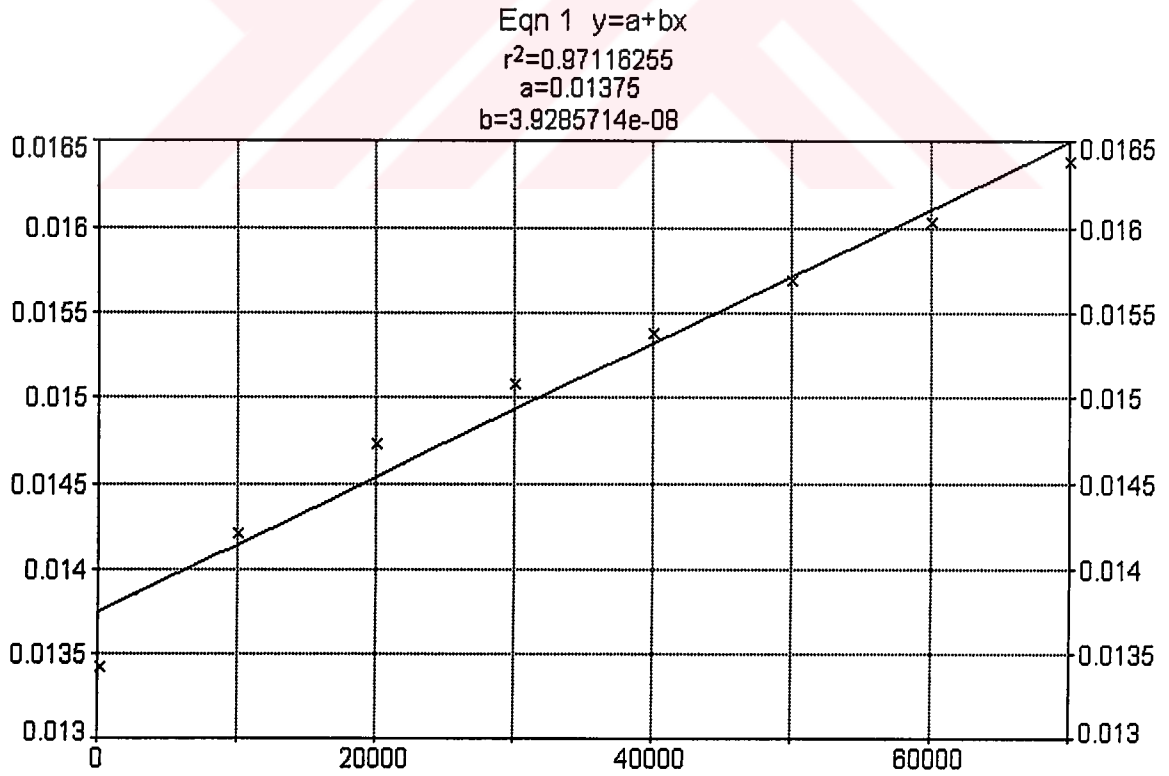
olduğu anlaşılmaktadır. 1,757 MPa, 3,732 MPa ve 7,376 MPa için 10000-80000 sn. arasındaki datalar Table Curve programında girildiğinde aşağıdaki grafikler elde edildi.



Şekil 2.15 1,757 MPa için En Küçük Kareler Metoduyla a ve b sabitlerinin bulunması



Şekil 2.16 3,732 MPa için En Küçük Kareler Metoduyla a ve b sabitlerinin bulunması



Şekil 2.17 7,376 MPa için En Küçük Kareler Metoduyla a ve b sabitlerinin bulunması

Şekil 2.15'deki grafikten 1,757 MPa için yaklaşık olarak;

$$a=0,00279$$

$$b=8,292 \times 10^{-9}$$

Şekil 2.16'deki grafikten 3,732 MPa için yaklaşık olarak;

$$a= 0,00585$$

$$b=1,563 \times 10^{-8}$$

Şekil 2.17'deki grafikten 7,376 MPa için yaklaşık olarak;

$$a= 0,01375$$

$$b=3,93 \times 10^{-8}$$

olarak bulundu. Bu değerlere bağlı olarak ve $1/E_1$ daha önceden hesaplandığı için, E_2 ve η_1 değerleri:

1,757 MPa için;

$$E_2=2959,158 \times 10^6 \Rightarrow B = \frac{1}{E_2} = 3,379 \times 10^{-10}$$

$$\eta_1=21189097,92 \times 10^7 \Rightarrow C = \frac{1}{\eta_1} = 4,72 \times 10^{-15}$$

3,732 MPa için;

$$E_2=3149,367 \times 10^6 \Rightarrow B = \frac{1}{E_2} = 6,142 \times 10^{-10}$$

$$\eta_1=18768447,8 \times 10^7 \Rightarrow C = \frac{1}{\eta_1} = 5,33 \times 10^{-15}$$

7,376 MPa için;

$$E_2 = 1628,256 \times 10^6 \Rightarrow B = \frac{1}{E_2} = 3,175 \times 10^{-10}$$

$$\eta_1 = 23877159,31 \times 10^7 \Rightarrow C = \frac{1}{\eta_1} = 4,19 \times 10^{-15}$$

olarak bulundu.

Üç farklı değer için bulunan değerlerin ortalaması alınarak;

$$\underline{E_2 = 2578,927 \times 10^6}$$

$$\underline{\eta_1 = 212782350,24 \times 10^6}$$

olarak hesaplandı.

α Sabitinin Bulunması:

Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12’de görüldüğü gibi grafiğin $t=10000$ sn’ye kadar olan bölümündeki eğrilik (2.18) denklemindeki $Be^{\alpha t}$ ’ye bağlıdır. Yukarıda hesaplanan A, B, C sabitleri ve üç farklı zaman için (1000 sn, 2000 sn ve 5000 sn) $f(t)$ değerleri (2.18) denkleminde yerine konularak her bir gerilme için üç α değeri hesaplandı. $\alpha = E_2 / \eta_2$ olduğundan ortalamaları alınarak;

1,757 MPa için;

$$\alpha = -2,6 \times 10^{-4} \Rightarrow \eta_2 = 11804330$$

3,732 MPa için;

$$\alpha = -3,5 \times 10^{-4} \Rightarrow \eta_2 = 10256628$$

7,376 MPa için;

$$\alpha = -3,1 \times 10^{-4} \Rightarrow \eta_2 = 5321764$$

olarak hesaplandı. α değerlerinin ortalamaları alınarak;

$$\underline{\alpha = 3,067 \times 10^{-4}}$$

$$\underline{\eta_2 = 8408630,584}$$

olarak hesaplandı.

Böylece (2.18) denklemindeki tüm sabitler hesaplanmış oldu. Bu sabitler yerlerine yerleştirildiğinde;

$$f(t) = \frac{1}{800 \times 10^6} + \frac{1}{2578,927 \times 10^6} + \frac{t}{212782350,24 \times 10^6} - \frac{1}{2578,927 \times 10^6} e^{-3,067 \times 10^{-4} t} \quad (2.20)$$

denklemini elde edildi. Bu denklem, gerilme ifadesi ile çarpıldığında belirli bir zamandaki birim şekil değiştirme ifadesini verir ($\varepsilon(t) = \sigma \cdot f(t)$).

2.6 Burgers Modelinden Elde Edilen Sonuçlar

Lineer viskoelastik bölgedeki üç farklı gerilme değeri için, oluşturulan Burgers modelinden elde edilen birim şekil değiştirme-zaman değerleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Birim şekil değiştirme değeri, numunedeki uzama miktarının numunenin başlangıçtaki boyuna bölünmesiyle elde edilir. Birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir, numunenin başlangıçtaki boyuda bilinmektedir (115 mm). Bu iki değer çarpılarak, numuneler üzerinde farklı gerilmeler altında oluşan uzama miktarları Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Farklı gerilmeler için Burgers modelinden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri

Zaman(sn)	7,376 MPa gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme	3,732 MPa gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme	1,757 MPa gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme
0	0.009217	0.004652	0.002174
1000	0.010007	0.005052	0.002362
2000	0.010598	0.005351	0.002502
5000	0.011634	0.005875	0.002749
10000	0.012291	0.006207	0.002906
20000	0.012765	0.006447	0.003018
30000	0.013117	0.006625	0.003102
40000	0.013464	0.006801	0.003185
50000	0.013811	0.006976	0.003268
60000	0.014157	0.007152	0.003350
70000	0.014504	0.007327	0.003433
80000	0.014851	0.007502	0.003515

Çizelge 2.4 Farklı gerilmeler için Burgers modelinden elde edilen uzama değerleri

Zaman(sn)	7,376 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	3,732 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	1,757 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)
0	1.060	0.535	0.250
1000	1.151	0.581	0.272
2000	1.219	0.615	0.288
5000	1.338	0.675	0.316
10000	1.413	0.714	0.334
20000	1.468	0.741	0.347
30000	1.508	0.762	0.357
40000	1.548	0.782	0.366
50000	1.588	0.802	0.376
60000	1.628	0.822	0.385
70000	1.668	0.842	0.395
80000	1.708	0.862	0.404

3. ANSYS PROGRAMI İLE HDPE MALZEMENİN SÜNME ANALİZİ

3.1 Giriş

Plastik esaslı malzemeler, yüke maruz kaldıklarında zamana bağlı olarak deformasyona uğrarlar. Sünme deformasyonu birçok plastik malzemede oda sıcaklığında bile önemlidir ve sıcaklıktaki küçük artışlarla hızlanan bir etki gösterir. Bu yüzden plastik esaslı malzemelerle tasarım yaparken sünme olayı dikkatle ele alınmalıdır. Kullanılan analiz metodları ile sünmeye maruz parçaların ömrünün yeterli olup olmayacağının tespit edilmesi gereklidir. Plastiklerle yapılan birçok pratik uygulamalarda, sünme deformasyonunu önceden tahmin edebilen metodların, kompleks yükleme durumlarında da doğru sonuç vermesi gereklidir (Trantina, 1986)

Plastik parçaların tasarımında en önemli durum aşırı sünme deformasyonudur. Sünme etkisine maruz plastik parçaların deformasyonunu bulabilmek için, öncelikle çekme etkisinde oluşan sünme birim şekil değiştirmesinin bulunması gereklidir. Sabit gerilme altında oluşan bu deformasyon üç ana parametreye bağlıdır. Zaman, gerilme ve sıcaklık. (Trantina, 1986; Dougherty, 1995)

$$\varepsilon_c = f(t, \sigma, T) \quad (3.1)$$

Bu yaklaşım;

$$\varepsilon_c = f_1(t)f_2(\sigma)f_3(T) \quad (3.2)$$

şeklinde de yazılabilir.

Sabit yük altında ve zamana bağlı sünme ile ilgili değişik fonksiyonlar çıkartılabilir. Bu fonksiyonların çoğunluğu t^n şeklinde oluşturulur. $f_2(\sigma)$ fonksiyonu da birçok farklı şekilde seçilebilir. En genel kullanım hali ise gerilme analizine uygulanmasının kolaylığından dolayı güç kanunu formülasyonudur. Sıcaklığa bağımlılık en genel olarak $\exp(-Q/RT)$ formundadır. Burada Q aktivasyon enerjisi, R Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Böylece sünme birim şekil değiştirmesi fonksiyonu;

$$\varepsilon_c = a_0 t^n \sigma^m e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (3.3)$$

formunu alır. ANSYS sonlu elemanlar programı da sünme analizi yaparken matematiksel işlemlerini bu denkleme bağlı olarak yapmaktadır. Formüldeki;

t 'nin birimi [saat]

σ 'nın birimi [psi]

T 'nin birimi [Rankine]

olarak girilmelidir. a_0 ve ε_c boyutsuzdur.

Bu bölümde sünme deney numunelerinin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve gerekli sınır şartları oluşturularak HDPE malzemenin yaklaşık yirmi dört saatlik sünme analizi nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. ANSYS'de kullanılacak sabitler, sünme deneyleri sonuçlarına göre belirlenmiştir. Sabitlerin hesaplanmasında tüm deney verileri kullanılmıştır.

3.2 HDPE Malzeme İçin Sünme Analizi Sabitlerinin Belirlenmesi

Sünme birim şekil değiştirmesi fonksiyonunu veren (3.3) denklemindeki a_0, n, m ve Q/R sabitleri malzemenin cinsine göre değişmektedir. Çizelge 2.2'de gösterilen değerler zamana bağlı sünme uzaması değerleri idi. Sünme analizi yapabilmek için zamana bağlı sünme birim şekil değiştirmesi değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değerler;

$$\text{Toplam uzama} = \text{Toplam birim şekil değiştirme} * \text{Deney numunesinin ilk boyu} \quad (\Delta l = \varepsilon_t * l)$$

$$\text{Toplam birim şekil değiştirme} = \text{Elastik birim şekil değiştirme} + \text{Sünme birim şekil değiştirmesi} \quad (\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_c)$$

$$\text{Elastik birim şekil değiştirme} = \text{Numuneye uygulanan gerilme} / \text{Başlangıç elastiklik modülü}$$

$$(\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E})$$

formülasyonlarına göre hesaplandı. Zamana bağlı sünme birim şekil değiştirmesi değerleri Çizelge 3.1'de gösterildi.

Çizelge 3.1 Farklı gerilmeler altında oluşan birim şekil değiştirme-zaman değerleri

Zaman(sn)	11,021 MPa (1598,405 psi) gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme	7,376 MPa (1069,761 psi) gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme	3,732 MPa (541,262 psi) gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme	1,757 MPa (254,022 psi) gerilme altında oluşan birim şekil değiştirme
0	0	0	0	0
1000	0.006261	0.001304	0.000391	0.000191
2000	0.008565	0.00213	0.000739	0.000287
5000	0.01187	0.003609	0.001087	0.000435
10000	0.015043	0.004217	0.001217	0.000565
20000	0.017739	0.005	0.001348	0.000696
30000	0.02	0.005522	0.001522	0.000809
40000	0.022304	0.00587	0.001652	0.000896
50000	0.023957	0.006174	0.001826	0.000974
60000	0.025739	0.006478	0.002	0.001043
70000	0.027304	0.006826	0.00213	0.001104
80000	0.028435	0.007174	0.002304	0.001157

n sabitinin bulunması :

(3.3) denklemindeki gerilme ve sıcaklık terimleri sabit alınarak a_0 sabitiyle birleştirilirse, denklem ;

$$\varepsilon_c = A t^n \quad (3.4)$$

formunu alır. Bu durumda;

$$A = a_0 \sigma^m e^{\frac{Q}{RT}} \quad (3.5)$$

olur. (3.4) denkleminin logaritması alınır;

$$\log \varepsilon_c = \log A + n \log t \quad (3.6)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem ;

$$y = a + bx$$

formunda kabul edilirse;

$$y = \log \varepsilon_c$$

$$a = \log A$$

$$x = \log t$$

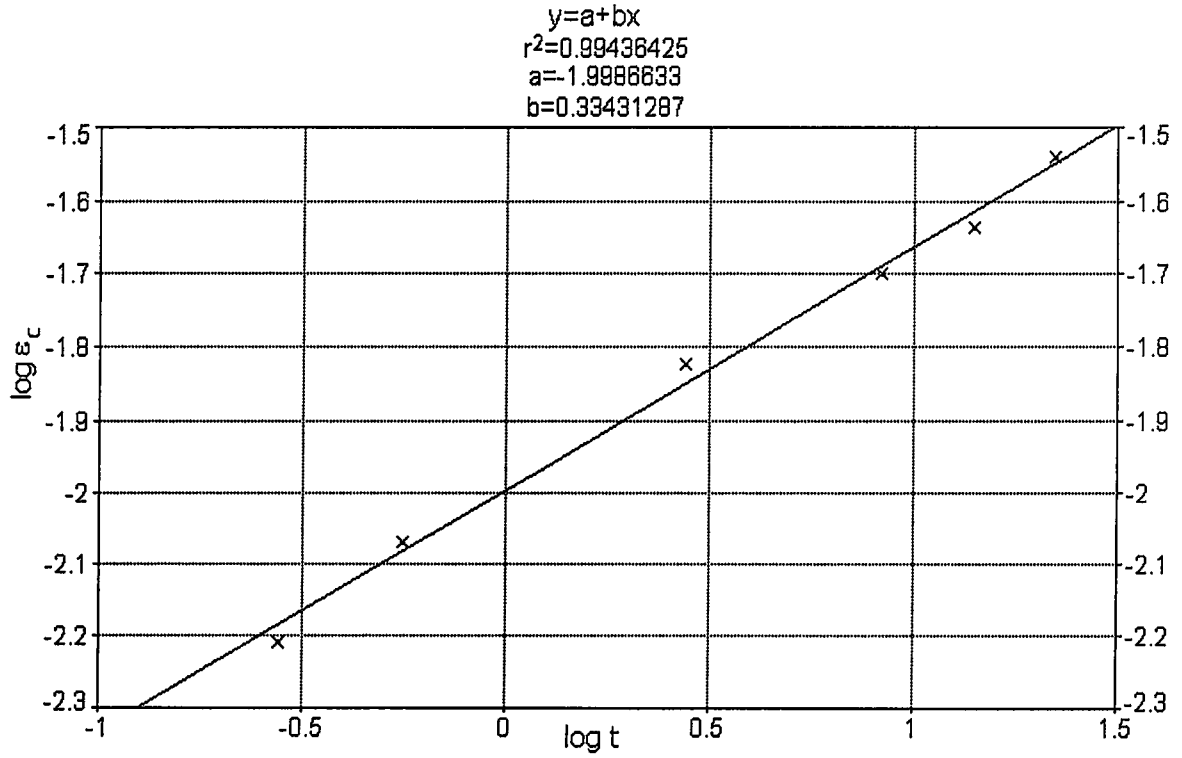
$$b = n$$

olduğu görülmektedir. (3.6) denklemindeki her farklı gerilme için, altı farklı zamandaki sünme birim şekil değiştirme değerleri, logaritmaları alınarak tablo haline getirildi ve bu değerler Table Curve programına girilerek her farklı gerilme için bir n değeri bulundu. Table Curve programı bu işlemi en küçük kareler yöntemiyle yapmaktadır.

11,021 MPa (1598,405 psi) için;

Çizelge 3.2 11,021 MPa (1598,405 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları

t (saat)	ε_c	$\log t$	$\log \varepsilon_c$
0,277(1000 sn)	0.006261	-0.557	-2.206
0,555(2000 sn)	0.008565	-0.256	-2.069
2,777(10000 sn)	0.015043	0.444	-1.824
8,333(30000 sn)	0.02	0.921	-1.7
13,888(50000 sn)	0.023957	1.143	-1.636
22,222(80000 sn)	0.028435	1.347	-1.54



Şekil 3.1 11,021 MPa (1598,405 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması

Şekil 3.1'deki grafikten 11,021 MPa (1598,405 psi) için;

$$a = -1,999$$

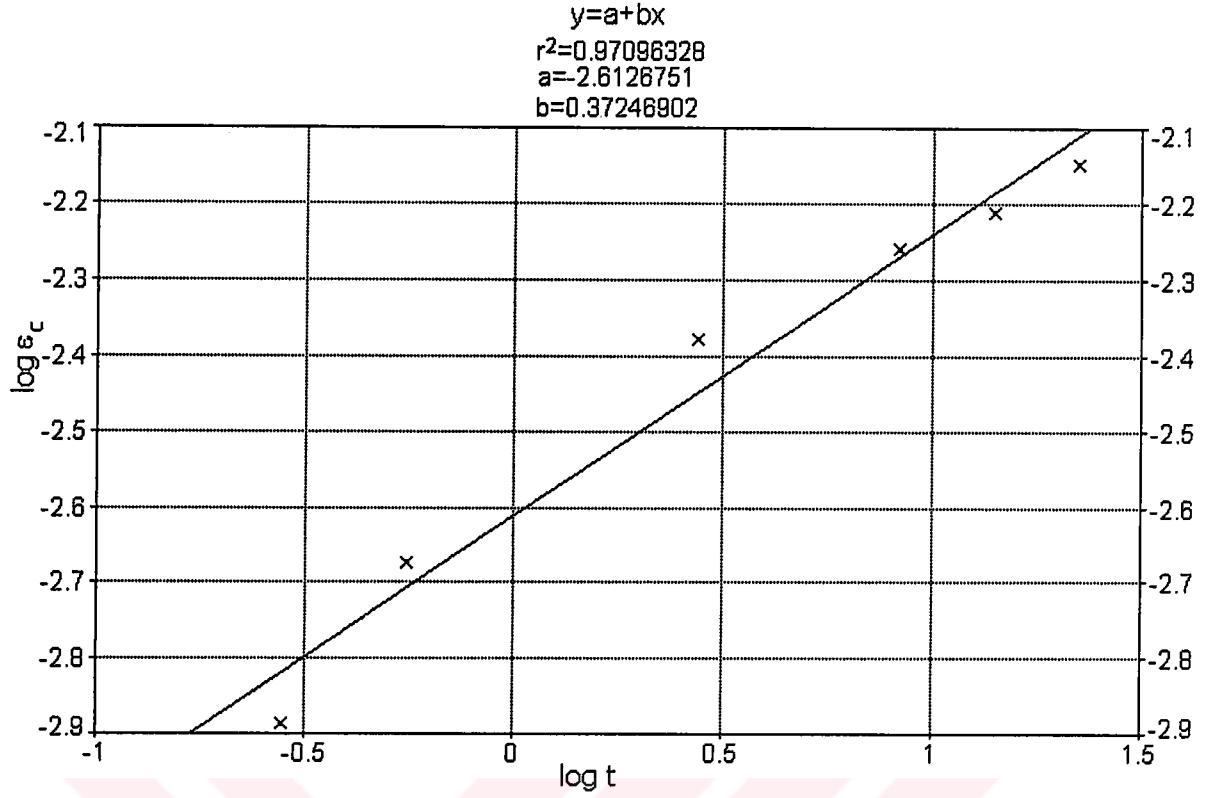
$$b = 0,334$$

olarak elde edildi.

7,376 MPa (1069,761 psi) için;

Çizelge 3.3 7,376 MPa (1069,761 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları

t (saat)	ε_c	$\log t$	$\log \varepsilon_c$
0,277(1000 sn)	0,001304	-0,557	-2,885
0,555(2000 sn)	0,00213	-0,256	-2,672
2,777(10000 sn)	0,003609	0,444	-2,375
8,333(30000 sn)	0,004217	0,921	-2,258
13,888(50000 sn)	0,005522	1,143	-2,209
22,222(80000 sn)	0,006174	1,347	-2,144



Şekil 3.2 7,376 MPa (1069,761 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması

Şekil 3.2'deki grafikten 7,376 MPa (1069,761 psi) için;

$$a = -2,613$$

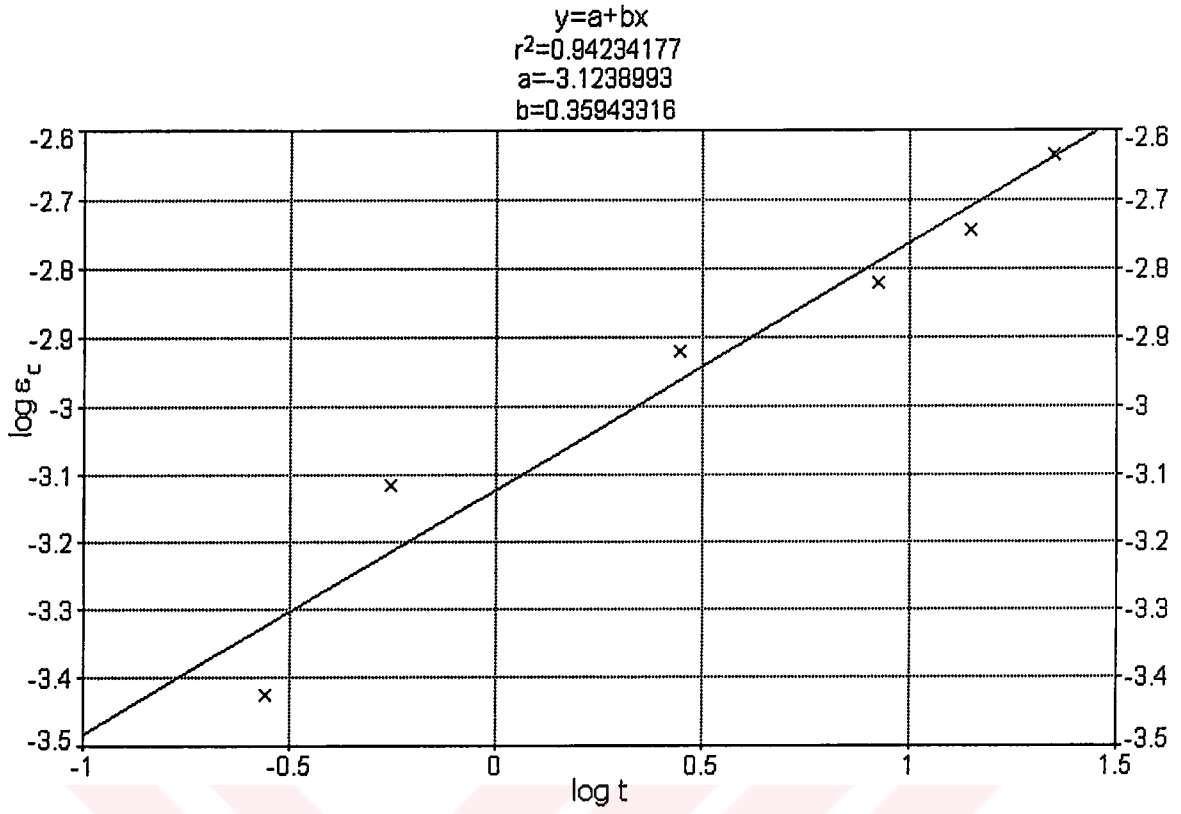
$$b = 0,372$$

olarak elde edildi.

3,732 MPa (541,262 psi) için;

Çizelge 3.4 3,732 MPa (541,262 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları

t (saat)	ϵ_c	$\log t$	$\log \epsilon_c$
0,277(1000 sn)	0.000391	-0.557	-3.422
0,555(2000 sn)	0.000739	-0.256	-3.114
2,777(10000 sn)	0.001217	0.444	-2.919
8,333(30000 sn)	0.001522	0.921	-2.821
13,888(50000 sn)	0.001826	1.143	-2.742
22,222(80000 sn)	0.002304	1.347	-2.632



Şekil 3.3 3,732 MPa (541,262 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması

Şekil 3.3'deki grafikten 3,732 MPa (541,262 psi) için;

$$a = -3,124$$

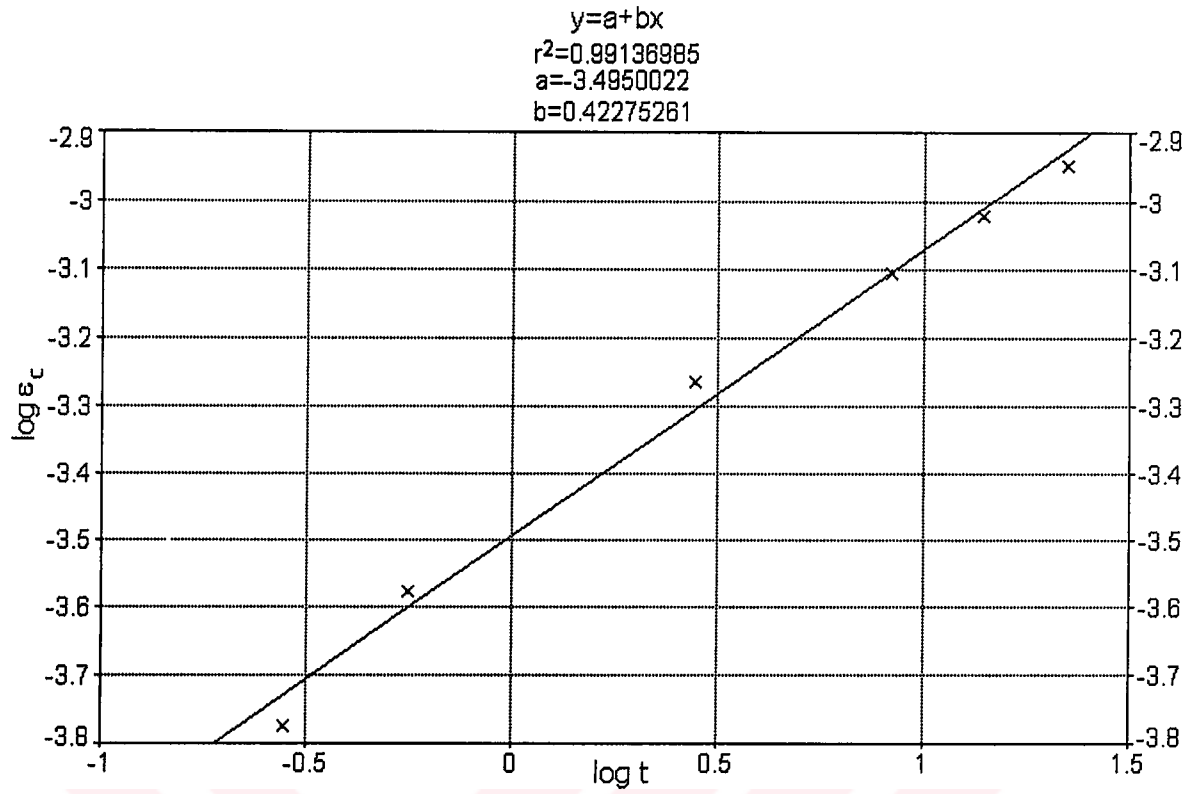
$$b = 0,359$$

olarak elde edildi.

1,757 MPa (254,822 psi) için;

Çizelge 3.5 1,757 MPa (254,822 psi) gerilme altındaki birim şekil değiştirme-zaman değerlerinin logaritmaları

t (saat)	ε_c	$\log t$	$\log \varepsilon_c$
0,277(1000 sn)	0.000191	-0.557	-3.772
0,555(2000 sn)	0.000287	-0.256	-3.577
2,777(10000 sn)	0.000565	0.444	-3.265
8,333(30000 sn)	0.000809	0.921	-3.104
13,888(50000 sn)	0.000974	1.143	-3.021
22,222(80000 sn)	0.001157	1.347	-2.945



Şekil 3.4 1,757 MPa (254,822 psi) için en küçük kareler yöntemiyle a ve b sabitinin bulunması

Şekil 3.4'deki grafikten 1,757 MPa (254,822 psi) için;

$$a = -3,495$$

$$b = 0,423$$

olarak elde edildi.

Dört farklı gerilme için bulunan b sabitlerinin ortalaması alınarak, ki bu değer bize n değerini verir;

$$\underline{n = 0,372}$$

olarak elde edildi.

m sabitinin bulunması :

(3.5) denklemindeki sıcaklık terimi sabit alınarak a_0 sabitiyle birleştirilirse, denklem ;

$$A = B \cdot \sigma^m \quad (3.7)$$

formunu alır. Bu durumda;

$$B = a_0 e^{\frac{Q}{RT}} \quad (3.8)$$

olur. (3.7) denkleminin logaritması alınır;

$$\log A = \log B + m \log \sigma \quad (3.9)$$

denklemini elde edilir.

Bu denklem de n 'nin bulunması işleminde olduğu gibi ;

$$y = a + bx$$

formunda kabul edilirse;

$$y = \log A$$

$$a = \log B$$

$$x = \log \sigma$$

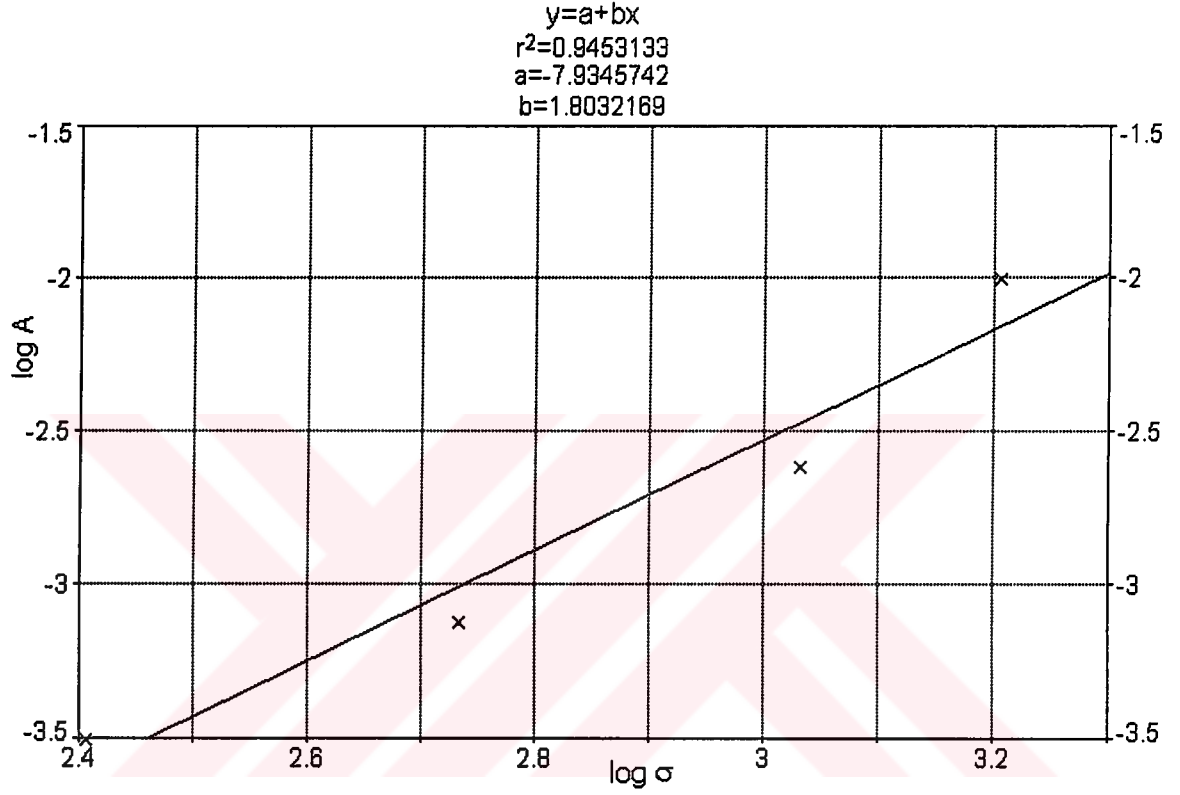
$$b = m$$

olduğu görülmektedir.

Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'ten her farklı gerilme için elde edilen a değerleri, (3.5) denklemindeki A değerinin logaritmasını ($\log A$) göstermektedir. Dört farklı $\log A$ ile σ değerlerinin logaritmaları alınarak Çizelge 3.6 elde edildi. a ve b değerlerini belirleyebilmek için $\log A$ ve $\log \sigma$ değerlerine bağlı olarak Table Curve programı yardımıyla en küçük kareler yöntemiyle bir grafik çizilerek Şekil 3.5 elde edildi.

Çizelge 3.6 m sabitinin bulunması için gerekli $\log A$ ve $\log \sigma$ değerleri

$\log A$	σ (psi)	$\log \sigma$
-3.495	254.822 (1,757MPa)	2.406237
-3.124	541.262(3,732MPa)	2.733407
-2.613	1069.761(7,376MPa)	3.029287
-1.999	1598.405(11,021MPa)	3.203687

Şekil 3.5 m sabitinin en küçük kareler yöntemiyle belirlenmesi

b sabiti aynı zamanda m sabitinin değerine eşittir, böylece

$m=1,803$

olarak elde edildi.

O/R ve a_0 sabitlerinin bulunması :

Şekil 3.5'teki grafikten elde edilen a değeri (3.8) denkleminin logaritmasını vermektedir. Bu durumda;

$$a = \log a_0 \cdot e^{\frac{-Q}{RT}} = -7,934$$

olur, bu denklemden;

$$a_0 \cdot e^{\frac{-Q}{RT}} = 10^{-7,934} = 1,164 \times 10^{-8}$$

olarak elde edildi.

ANSYS programında sünme denklemlerindeki sıcaklık ifadeleri yerine mutlak sıcaklık ifadelerinin yerleştirilmesi gereklidir. Deneyler 20 °C'de yapıldığı için denklemdaki T ifadesi yerine bu sıcaklığın Fahrenheit derecedeki karşılığı (68 °F), bu sıcaklıktaki mutlak sıcaklık ifadesi 460° ile toplanarak ;

$$T = 68 + 460 = 528^{\circ}$$

olarak elde edildi.

20 °C sıcaklıktaki ;

$$a_0 \cdot e^{\frac{-Q}{RT}} = 1,164 \times 10^{-8}$$

eşitliğini sağlayacak en uygun a_0 ve Q/R değerleri deneme yanılma yöntemiyle;

$$\underline{a_0 = 0,0158}$$

$$\underline{Q/R = 7479}$$

olarak tespit edildi.

Elde edilen tüm sabitler (3.3) denkleminde yerlerine koyularak;

$$\varepsilon_c = 0,0158 \cdot t^{0,372} \sigma^{1,803} e^{\frac{-7479}{T}} \quad (3.10)$$

denklemini elde edildi. ANSYS programı sünme analizi yaparken bu denkleminin zamana göre türevine bağlı olarak analiz yaptığı için (3.10) denkleminin zamana göre türevi alınarak;

$$\frac{\Delta \varepsilon_c}{\Delta t} = 0,00588 \cdot t^{-0,628} \sigma^{1,803} e^{\frac{-7479}{T}} \quad (3.11)$$

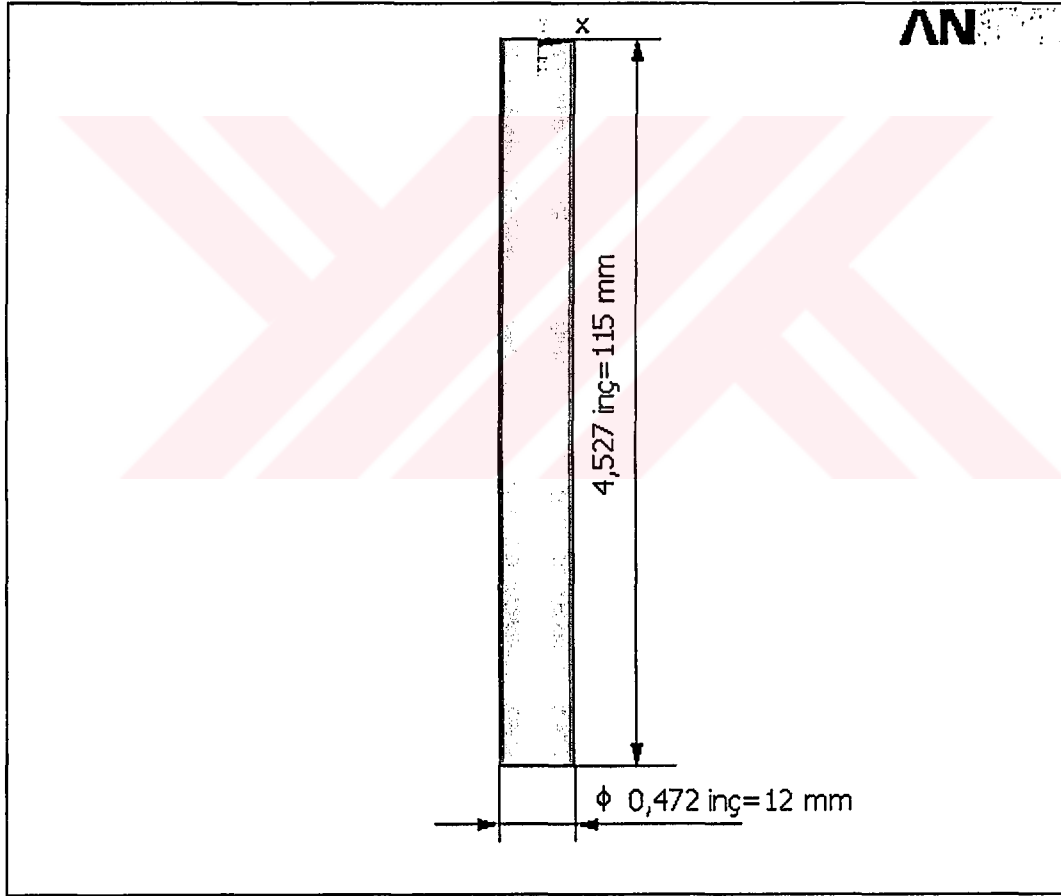
denklemini elde edildi. Denklemden elde edilen sabitler ANSYS programında sünme analizi

için gerekli malzeme özellikleri bölümüne girildi.

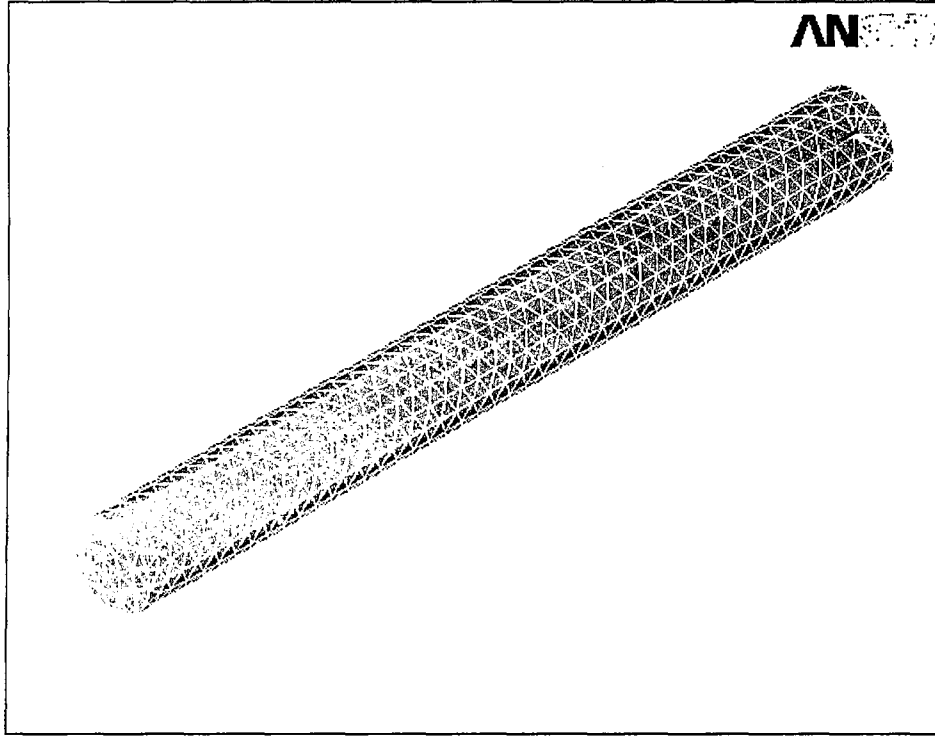
3.3 Deney Numunesinin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Deney esnasında uzamayı ölçen uzunluk ölçenin(ekstensometre) çeneleri arasındaki mesafe 115 mm olarak ölçülmüştür. Bundan dolayı Şekil 2.3'teki numunenin 12 mm çap ve 115 mm uzunluktaki çekme gerilmesine maruz kalan ince kesitli bölgesi göz önüne alındı. Bu boyutlar formülasyondaki birim uygunluğu için inç olarak girilmiştir. ANSYS'de oluşturulan şeklin boyutları Şekil 3.6'da görülmektedir.

Numunenin şekli oluşturulduktan sonra, sonlu eleman yöntemiyle sünme analizi yapabilmek için ANSYS'in içinde yer alan SOLID45 elemanı ile numunenin ağ örgüsü oluşturuldu (Şekil 3.7).



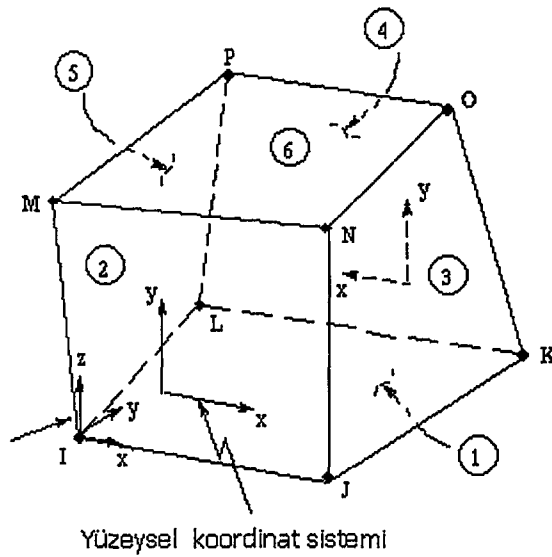
Şekil 3.6 ANSYS'de oluşturulan numunenin boyutları



Şekil 3.7 Deney numunenin sonlu eleman modeli

3.3.1 SOLID45 Elemanının Özellikleri

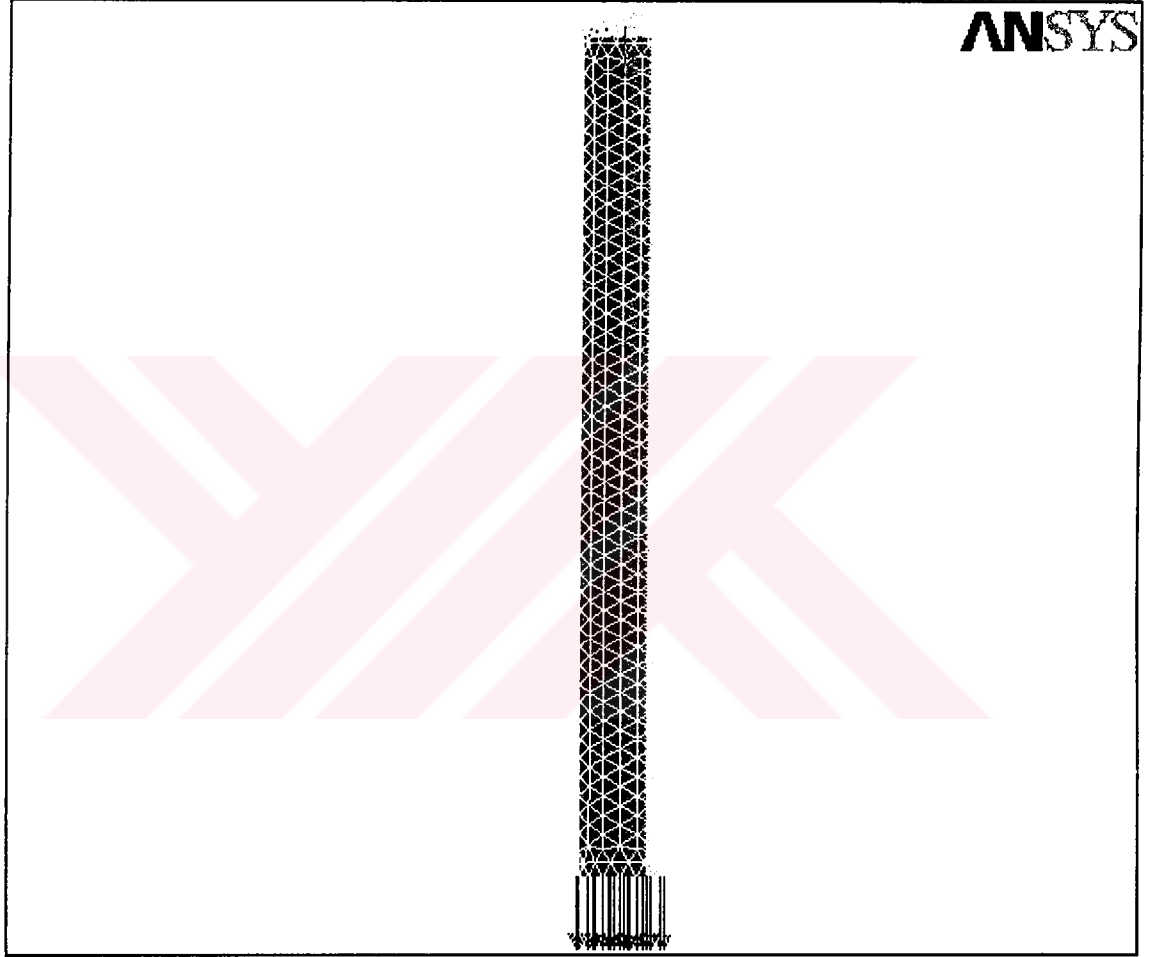
SOLID45, ANSYS programında 3 boyutlu katı cisimlerin modellenmesinde kullanılan bir elemandır. Eleman, herbiri x, y ve z yönünde 3 serbestlik derecesine sahip 8 düğüm noktasından oluşmaktadır. Şekil 3.8'de elemanın geometrisi ve düğüm noktalarının yerleri görülmektedir.



Şekil 3.8 SOLID45 elemanının geometrisi ve düğüm noktalarının yerleri

3.4 Sınır Şartlarının Uygulanması

Deneyisel çalışmalarda numunenin bir ucu cihazın üst çenesine bağlanarak sabitlenmiş ve alt ucuna da farklı ağırlıklar asılarak çekme gerilmesi oluşturulmuştur. Benzer şekilde modelin sınır şartları da belirlendi. Sonlu eleman modeli oluşturulan numune üst tarafındaki düğüm noktalarından x, y ve z yönünde sabitlendi. Alt tarafındaki düğüm noktalarından ise çekme gerilmesi oluşturan kuvvet uygulandı. Her farklı ağırlık için farklı bir kuvvet uygulandı. Şekil 3.9’da bu sistem görülmektedir.



Şekil 3.9 Sonlu eleman modeline sınır şartlarının uygulanması

3.5 Sünme Analizi Sonuçları

ANSYS programı ile sünme analizini gerçekleştirebilmek için elde edilen malzeme sabitleri programa girilerek numunenin sonlu eleman modeli kuruldu. Gerekli sınır şartları uygulandıktan sonra deneyisel çalışmaların yapıldığı dört farklı gerilme için 24'er saatlik sünme analizleri gerçekleştirildi. Analizler sonucu her bir gerilme için ANSYS'den elde

edilen sonuçlar Çizelge 3.7’de gösterildi.

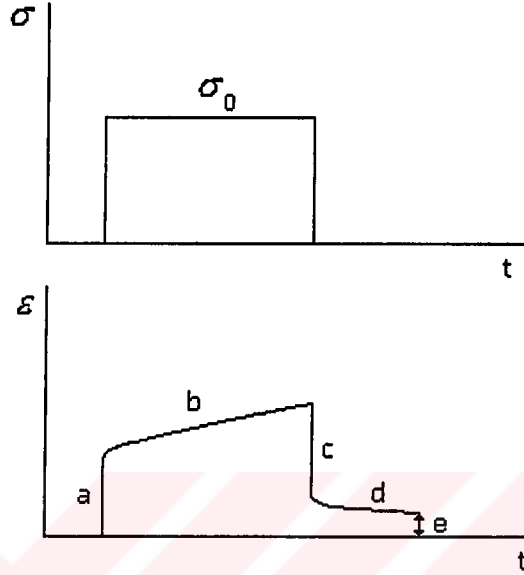
Çizelge 3.7 ANSYS programından elde edilen sünme analizi değerleri

Zaman(sn)	11,021 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	7,376 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	3,732 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)	1,757 MPa gerilme altında oluşan uzama(mm)
100	1,580	1,060	0,535	0,250
1000	1,686	1,130	0,570	0,266
2000	1,849	1,201	0,590	0,272
5000	2,092	1,321	0,623	0,282
10000	2,332	1,438	0,658	0,290
20000	2,634	1,583	0,698	0,302
30000	2,850	1,690	0,731	0,310
40000	3,020	1,772	0,756	0,315
50000	3,165	1,844	0,777	0,320
60000	3,302	1,905	0,795	0,325
70000	3,408	1,960	0,810	0,329
80000	3,513	2,011	0,825	0,333

4. DİNAMİK DENEYLER

4.1 Giriş

Viskoelastik özelliklere sahip bir malzeme belirli bir zaman yüklemeye maruz kaldıktan sonra yükleme kaldırılırsa malzeme üzerinde Şekil 4.1'deki gibi bir uzama-zaman grafiği oluşur.



Şekil 4.1 Viskoelastik bir malzemeye belirli bir süre gerilme uygulanıp kaldırılması sonucu oluşan uzama-zaman grafiği

$\epsilon - t$ grafiği incelendiğinde yükleme başladıktan sonra numunede önce ani bir elastik şekil değiştirme (a), sonra gerilme sabit olduğu halde oluşan sünme uzaması (b), yükün kalkmasıyla oluşan ani bir geri dönüş (c), sonra sünmenin tersi şeklinde oluşan gecikmiş geri dönüş (d) ve sonuçta oluşan kalıcı uzama (e), bölgeleri görülmektedir. Bu davranış viskoelastik bir malzemenin karakteristiğini göstermektedir (Findley vd. 1976).

Bu bölümde numuneler üzerinde karesel ve sinüzoidal gerilme oluşturmak için tasarlanan dinamik deney düzenekleri ve deneylerden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

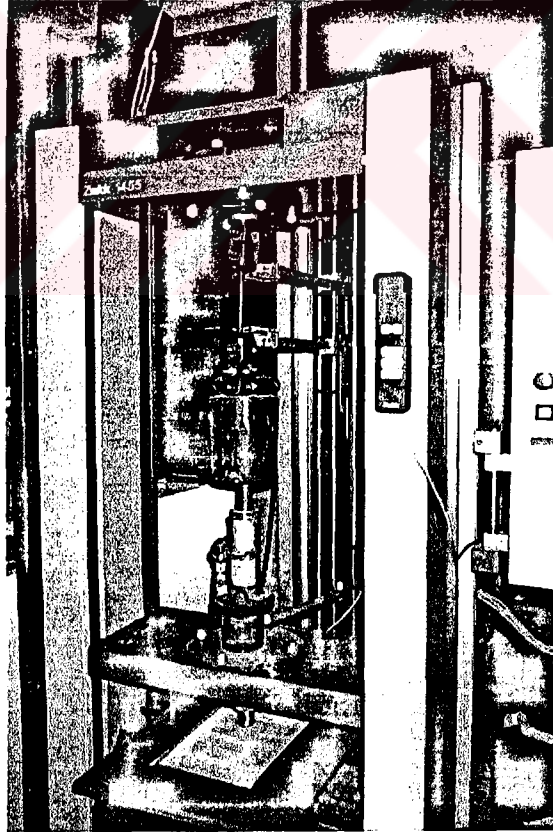
4.2 Karesel Gerilme Oluşturan Dinamik Deneyler

Numune üzerinde karesel gerilme oluşturabilmek için numuneyi belirli süre aralıklarla yüklü ve yüksüz bırakacak bir sistem tasarlandı ve numune üzerinde oluşan uzama-zaman eğrileri elde edildi.

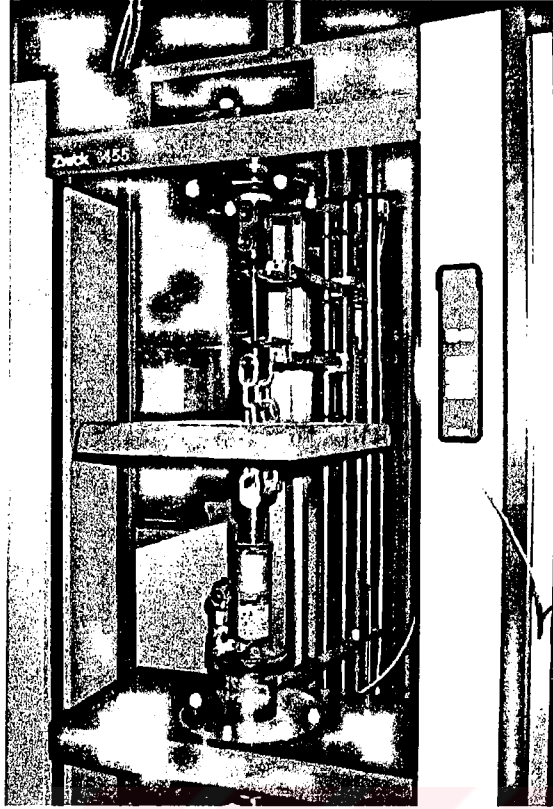
Statik deneyler sonucu lineer viskoelastik davranış gösteren bölge tespit edilmiş ve bu bölgede üç farklı gerilme durumu için deneyler yapılmıştı (1,757 MPa, 3,732 MPa ve 7,376 MPa). Karesel gerilme oluşturan deneyler için de bu üç gerilme durumu esas alındı.

4.2.1 Deney Düzenegi

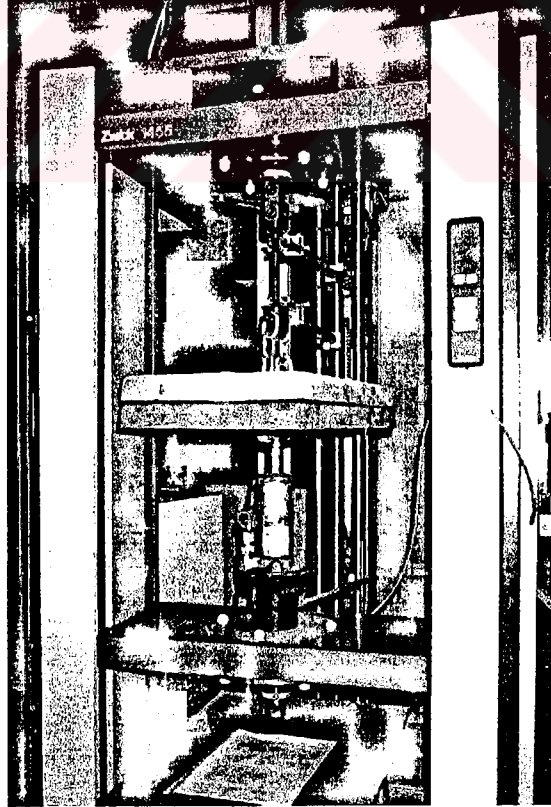
Karesel gerilme oluşturan deneyler sırasında kullanılan numunelerin boyutları statik deneylerde kullanılan ve Şekil 2.3'te gösterilen boyutlarla aynı seçildi. Statik deney düzeneginden farklı olarak dinamik deney düzeneginde ağırlıklar numuneye zincir ile bağlandı ve numune üzerinde çekme gerilmesi oluşturmak için asılan ağırlıkların altına bir hidrolik kriko yerleştirildi (Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4). Kriko boşta iken ağırlık, numuneye çekme gerilmesi uyguladı. Kriko ile ağırlık yukarı kaldırıldığında ise herhangi bir yükleme olmadığı için numune yüksüz kaldı. Bu hareket sıra ile 10'ar dakikada bir (600 sn) tekrar edildi ve numunenin 10 dakika yüklü 10 dakika yüksüz kalması sağlandı. Üç farklı gerilme için yaklaşık 20000 saniye bu hareket tekrarlandı ve numunelerin üzerinde oluşan uzama-zaman grafikleri elde edildi.



Şekil 4.2 1,757 MPa karesel gerilme oluşturan deney düzenegi



Şekil 4.3 3,732 MPa karesel gerilme oluşturan deney düzeneği



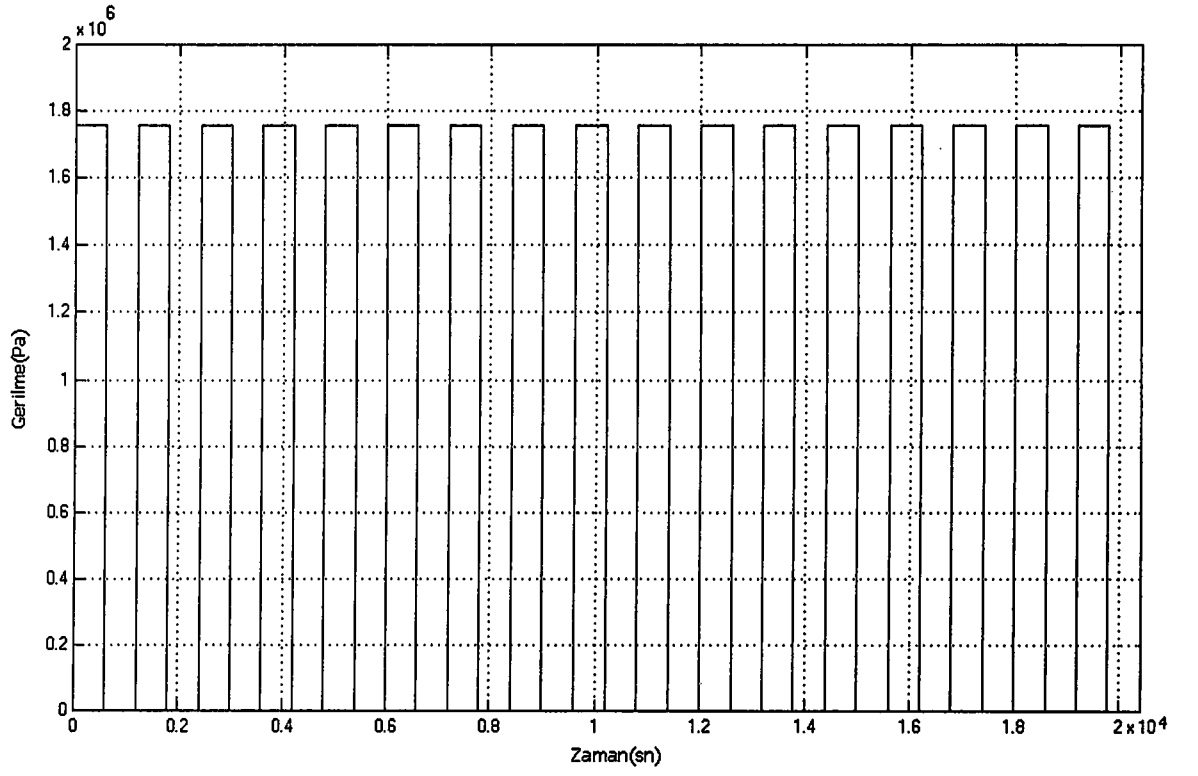
Şekil 4.4 7,376 MPa karesel gerilme oluşturan deney düzeneği

4.2.2 Deney Sonuçları

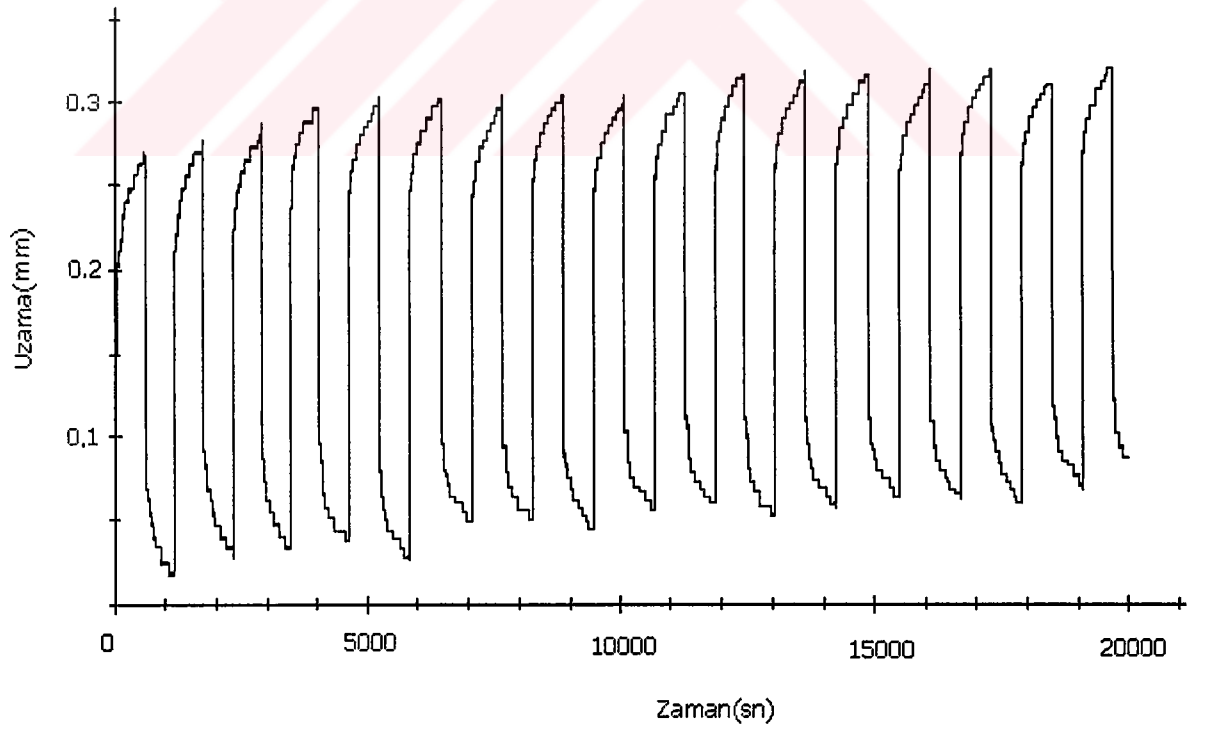
Numune üzerinde zamana bağlı olarak oluşan farklı gerilme durumları için gerilme-zaman grafikleri Şekil 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de bu gerilmeler altında oluşan uzama-zaman grafikleri Şekil 4.6, Şekil 4.8 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

Uzama-zaman grafikleri incelendiğinde, deneysel hatalardan dolayı bazı küçük sapmalar meydana gelmiş olsa da, viskoelastik malzeme davranışları gözlenmiştir. Numune yüke maruz kaldığı bölümlerde önce ani elastik uzama, sonra sünme uzaması gerçekleştirmiştir. Yüken kaldırıldığı bölümlerde ise önce ani bir geri dönüş, sonra gecikmiş bir geri dönüş gerçekleştirmiştir. Geri dönüş sonucu, kalıcı bir uzama da gerçekleştiği için numune başlangıçtaki boyundan daha uzun bir boya sahip olmuştur. Yükleme devam ettikçe kalıcı uzamalardan dolayı yüklü ve yüksüz durumlarda giderek artan uzama durumu ortaya çıkmıştır.

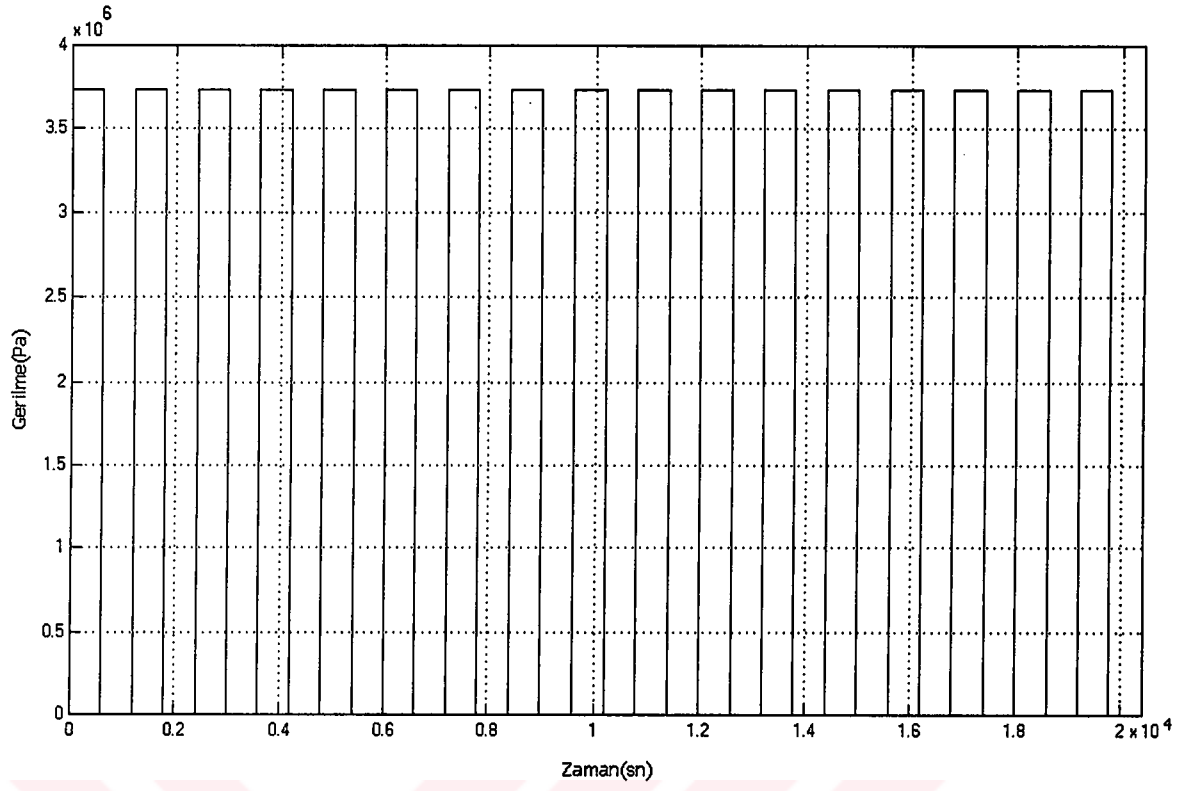




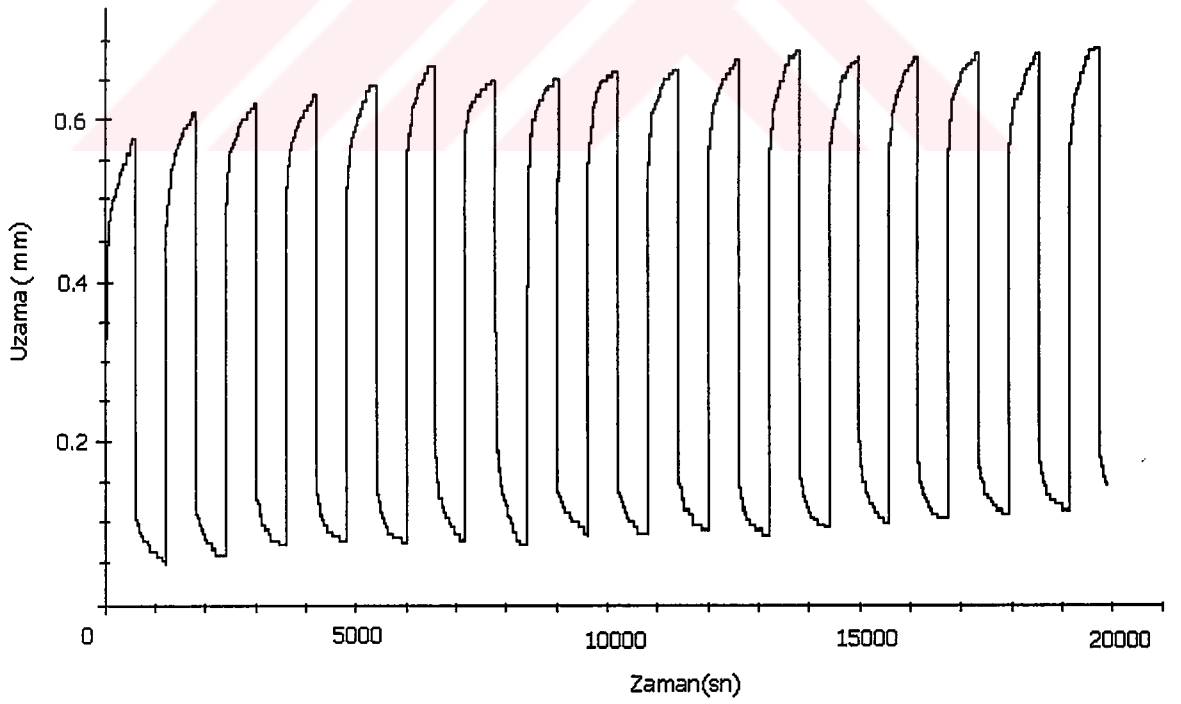
Şekil 4.5 Maksimum 1,757 MPa'lık gerilme oluşturan dinamik sistemin gerilme-zaman grafiği



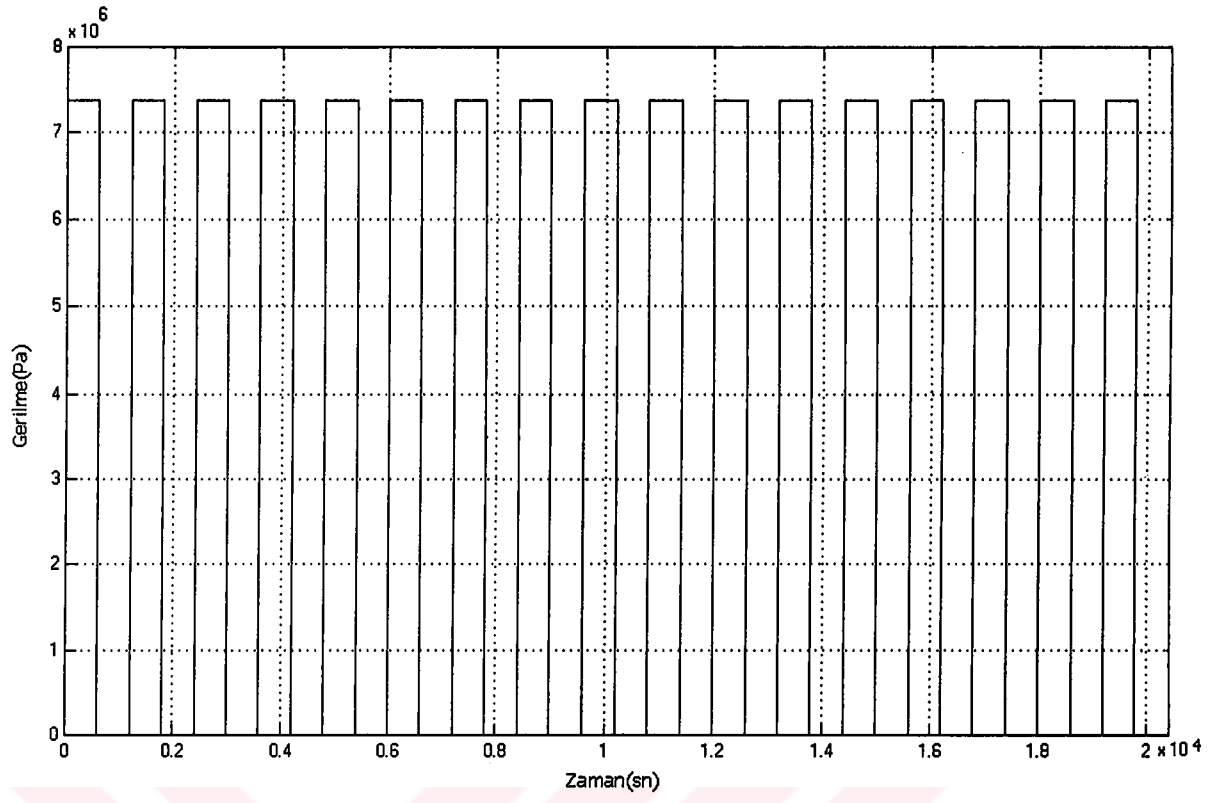
Şekil 4.6 Maksimum 1,757 MPa'lık gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği



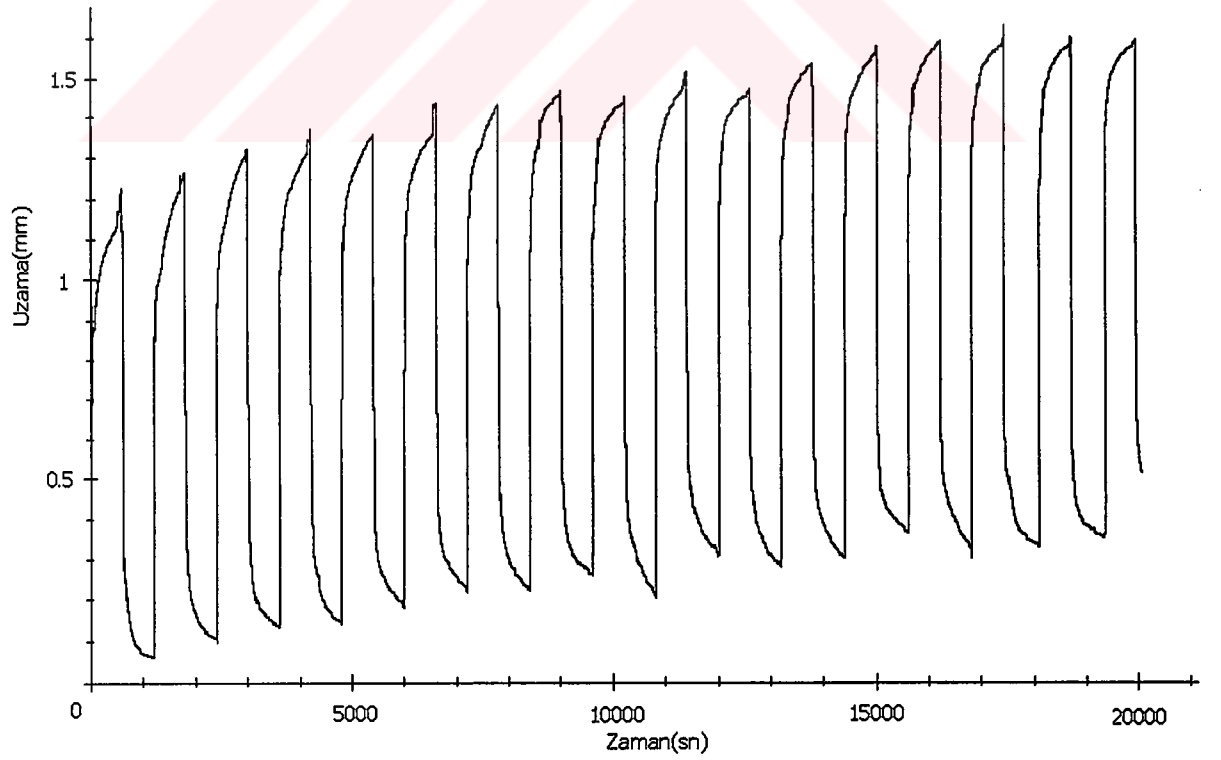
Şekil 4.7 Maksimum 3,732 MPa'lık gerilme oluşturan dinamik sistemin gerilme-zaman grafiği



Şekil 4.8 Maksimum 3,732 MPa'lık gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği



Şekil 4.9 Maksimum 7,376 MPa'lık gerilme oluşturan dinamik sistemin gerilme-zaman grafiği



Şekil 4.10 Maksimum 7,376 MPa'lık gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği

4.3 Sinüzoidal Gerilme Oluşturan Dinamik Deneyler

Numuneler üzerinde sinüzoidal gerilme etkisi oluşturabilmek için redüktör ve yaylardan oluşan bir düzenek tasarlandı. Numune üzerinde gerilme etkisi, yayın uzayıp kısılmasıyla sağlandı. Farklı gerilmeler oluşturabilmek için dört farklı yay seçildi.

4.3.1 Deney Düzeneği

Polietilen malzemenin zamana bağlı dinamik yükleme karakterini daha iyi tespit edebilmek için numuneye uygulanacak sinüzoidal kuvvetin periyodunun mümkün olduğunca büyük olması gereklidir. Bu amaçla deney düzeneğinin kurulması aşamasında ilk olarak 0.35 devir/dakika'lık bir redüktör alındı.

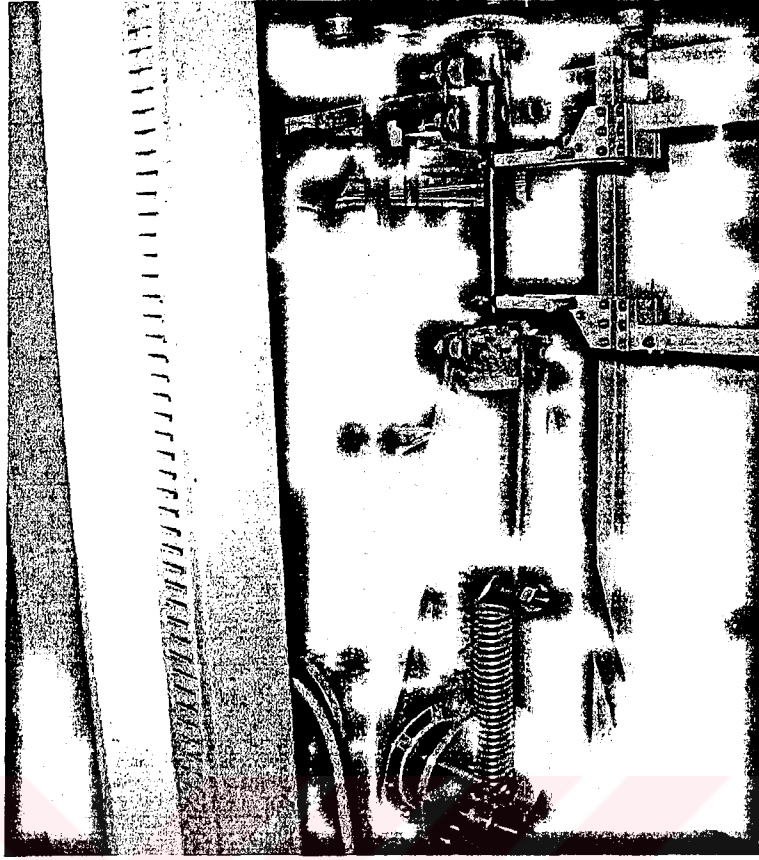
Dinamik yüklemeye maruz kalacak ve gerilme-uzama değerlerinin ölçüleceği numuneler daha önceki deneylerde de kullanılan numuneler ile aynı boyutlarda seçildi (Şekil 2.3).

Redüktörün miline geçecek dairesel bir disk tasarlandı. Diskin belirlenen noktalarına delikler açıldı (Şekil 4.12). Disk dönerken delik merkezlerinin oluşturduğu çemberlerin çapı kadar yayın uzaması, dolayısıyla numuneye istenilen kuvvetin uygulanması sağlandı.

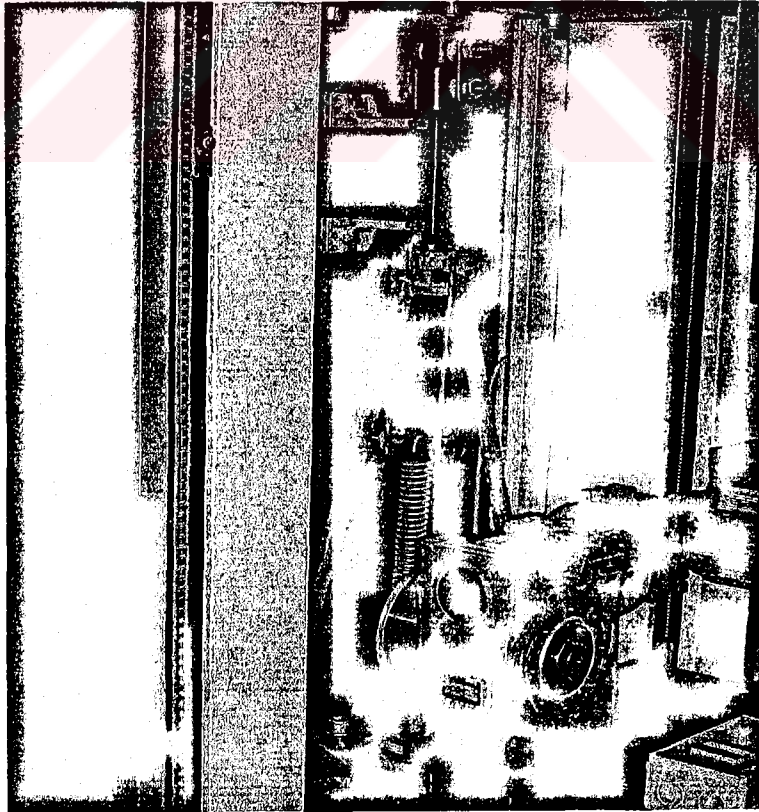
Numunelere kuvvetin sinüzoidal olarak etkimesi numune ile redüktör mili üzerindeki diskin arasına yerleştirilen yay sistemi ile sağlandı. Yayın üst ucu aparatlar yardımıyla numunenin alt ucuna, yayın alt ucu da aparatlar yardımıyla diske monte edildi.

Deney düzeneği redüktör ile birlikte bir levhaya vidalarla sabitlendi. Düzenek levha ile birlikte daha önceki deneylerin yapıldığı ve Bölüm 2.3'te bahsedilen Zwick marka çekme cihazının alt tablasına sabitlendi. Deney sırasında numune üzerinde oluşan zamana bağlı uzamalar cihazın ekstensometreleri yardımıyla bilgisayara aktarıldı.

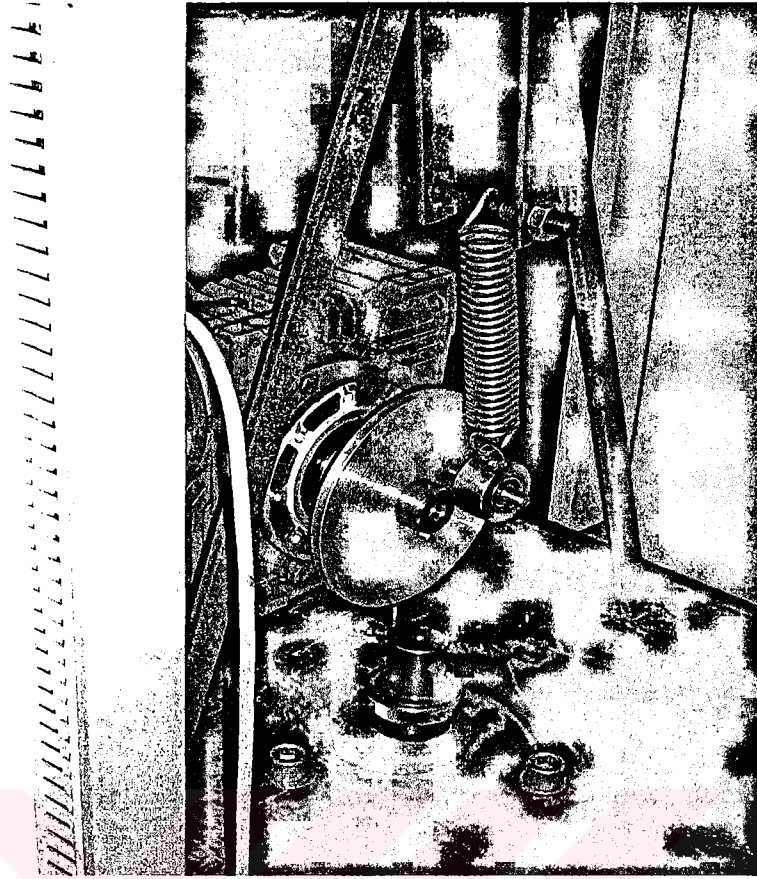
Deney esnasında numunenin sağa-sola hareket etmemesi sadece düşey yönde hareket etmesi için numunenin alt ucuna kendi çapından 2 mm daha büyük çelik bir halka geçirildi ve halka alttaki levhaya çubuklarla kaynak edildi. Böylece deney düzeneği tamamlanmış oldu. Şekil 4.11 (a), (b) ve (c)'de değişik açılardan deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.11 (a)

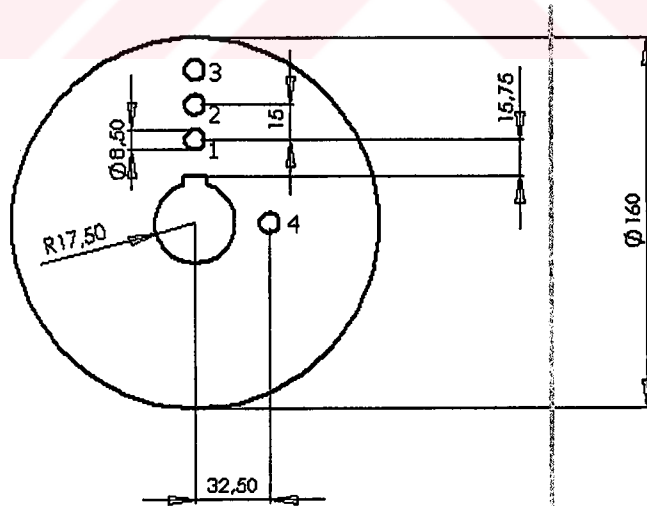


Şekil 4.11 (b)



Şekil 4.11 (c)

Şekil 4.11 Değişik açılardan deney düzeneği



Şekil 4.12 Redüktöre takılan diskin boyutları

4.3.1.1 Deney Düzenekinin Çalışma Sistemi

Redüktör çalıştırıldığında, disk dönmeye başlar. Yayın bağlandığı delik düşey olarak en üst konumda iken numuneye ön gerilme miktarı kadar bir gerilme etki eder. Diskin dönmesiyle yaydaki uzama miktarı, dolayısıyla numuneye etki eden gerilme kuvveti artmaya başlar. Delik en alt konuma geldiğinde ise numuneye maksimum gerilme kuvveti etkimiş olur. Sonra disk dönmeye devam etmesiyle delik en üst konuma gelene kadar numune üzerindeki gerilme azalır. Bu şekilde istenilen süre deneye devam edilir. Numune üzerinde sinusoidal şekilde gerilmenin değişimiyle oluşan uzamalar, numuneye bağlı olan ekstensometreler yardımıyla bilgisayara aktarılır.

4.3.2 Yay Seçimi

Yay katsayısının belirlenebilmesi için tel çapı, sarım sayısı ve sarım çapının belirlenmesi gerekir(Tahralı vd., 2000). Deneylerde kullanılan yaylar çekme yayı olduğu için belirli bir öngerilme kuvveti uygulanmadan uzama meydana gelmemiştir. Her bir yay için ne kadar öngerilme kuvveti gerektiği deneysel olarak bulunmuştur.

$$k = \frac{G \cdot d_{tel}^4}{8 \cdot n \cdot d_{sarım}^3} \quad (4.1)$$

Yay katsayısı (4.1) formülüyle hesaplanır.

k = Yay katsayısı [N/mm]

G = Yay çeliğinin kayma modülü [80000 N/mm²]

d_{tel} = Tel çapı [mm]

$d_{sarım}$ = Sarım çapı [mm]

n = Sarım sayısı

Deneylerde dört farklı yay kullanılmıştır.

Birinci yayın değerleri:

$d_{tel} = 4 \text{ mm}$

$d_{sarım} = 32.3 \text{ mm}$

$n = 25$

$$k = \frac{80000 \cdot d_{tel}^4}{8 \cdot n \cdot d_{sarım}^3} = \frac{80000 \cdot 4^4}{8 \cdot 25 \cdot 32,3^3} = 3,038 \text{ N / mm}$$

Birinci yayın öngerilmesi yaklaşık olarak 180,5 N olarak bulundu.

İkinci yayın değerleri;

$$d_{tel} = 3 \text{ mm}$$

$$d_{sarım} = 20 \text{ mm}$$

$$n = 22$$

$$k = \frac{80000 \cdot d_{tel}^4}{8 \cdot n \cdot d_{sarım}^3} = \frac{80000 \cdot 3^4}{8 \cdot 24 \cdot 20^3} = 4,218 \text{ N / mm}$$

İkinci yayın öngerilmesi yaklaşık olarak 169,6 N olarak bulundu.

Üçüncü yayın değerleri;

$$d_{tel} = 6 \text{ mm}$$

$$d_{sarım} = 37 \text{ mm}$$

$$n = 18$$

$$k = \frac{80000 \cdot d_{tel}^4}{8 \cdot n \cdot d_{sarım}^3} = \frac{80000 \cdot 6^4}{8 \cdot 18 \cdot 37^3} = 14,214 \text{ N / mm}$$

Üçüncü yayın öngerilmesi yaklaşık olarak 520 N olarak bulundu.

Dördüncü yayın değerleri;

$$d_{tel} = 4 \text{ mm}$$

$$d_{sarım} = 33,8 \text{ mm}$$

$$n = 25$$

$$k = \frac{80000 \cdot d_{tel}^4}{8 \cdot n \cdot d_{sarım}^3} = \frac{80000 \cdot 4^4}{8 \cdot 25 \cdot 32,3^3} = 2,651 \text{ N / mm}$$

Dördüncü yayın öngerilmesi yaklaşık olarak 60,6 N olarak bulundu.

4.3.3 Deney Sonuçları

Deneyler sırasında yayın özelliğini kaybetmemesi için en fazla uzamadan önceki boyu kadar uzamaya zorlanması gereklidir. Bu özelliğe dikkat edilerek dört farklı deney gerçekleştirildi. Ayrıca yayların öngerilme kuvvetleri de dikkate alındı.

Yayın uzamasıyla oluşan yay kuvveti;

$$F = F_{\text{ön}} + k.x \quad (4.2)$$

denklemlerle hesaplandı (Akkurt ve Kent, 1986).

Birinci ve ikinci deneyde numuneler 10000 saniye gerilmeye maruz bırakıldı. 5000 saniyelik periyotta uzamanın karakteri belli olduğu için üçüncü ve dördüncü deneyde numuneler 5000 saniye gerilmeye maruz bırakıldı.

4.3.3.1 Birinci Deney

İlk deneyde birinci yay kullanıldı. Yay diskin en alt deliğine (1) takıldı ve numuneye ön gerilme kuvvetiyle birlikte 15 mm'lik yay uzaması verildi. Böylece oluşan minimum ve maksimum yay kuvvetleri (4.2) denkleminde göre;

Minimum yay kuvveti;

$$F = 180,5 + 3,038.15 = 226,07 \text{ N}$$

Maksimum yay kuvveti;

$$F = 180,5 + 3,038.(15 + 72,5) = 446,325 \text{ N}$$

olarak elde edildi. Bu kuvvetler altında numune üzerinde oluşan minimum ve maksimum gerilmeler ise;

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.3)$$

denklemlerle elde edildi.

Minumum gerilme;

$$\sigma = \frac{226,07}{\pi \cdot 12^2 / 4} = 1,999 \text{ MPa}$$

Maksimum gerilme;

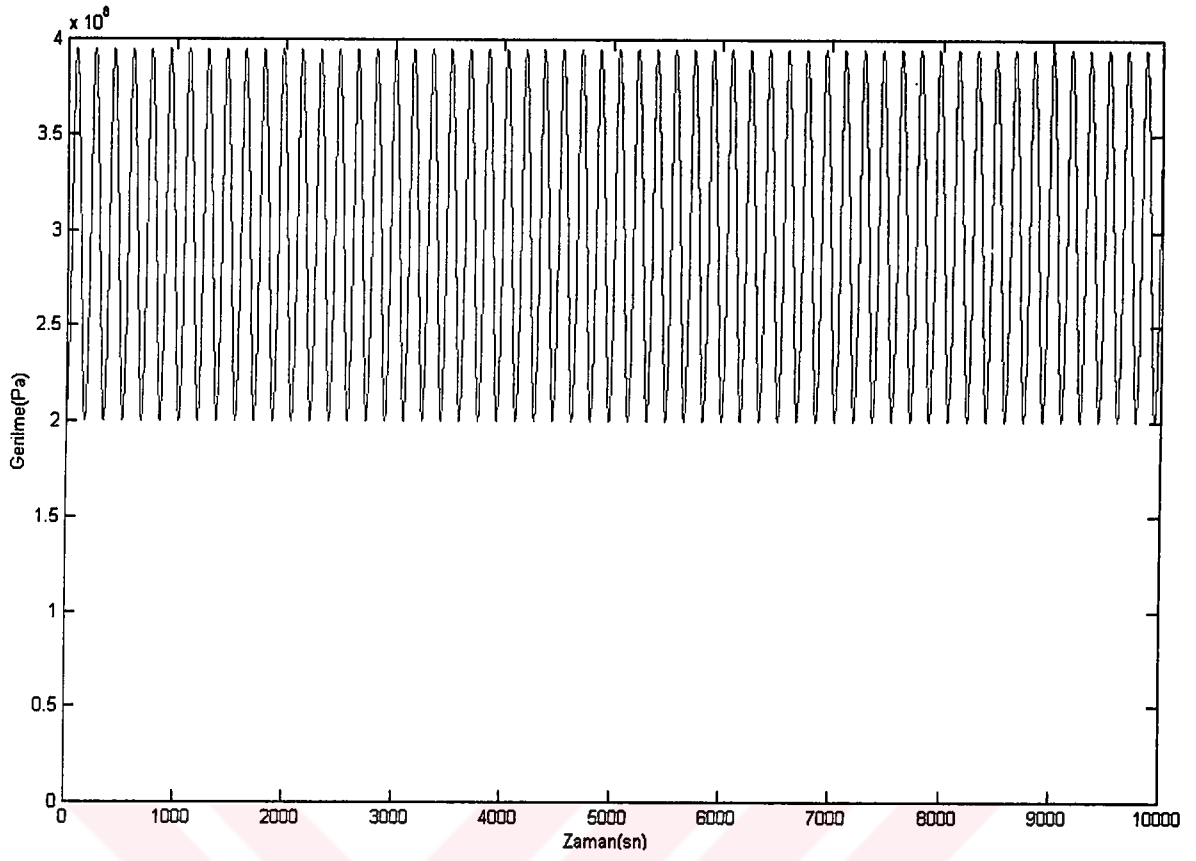
$$\sigma = \frac{446,325}{\pi \cdot 12^2 / 4} = 3.948 \text{ MPa}$$

olarak bulundu.

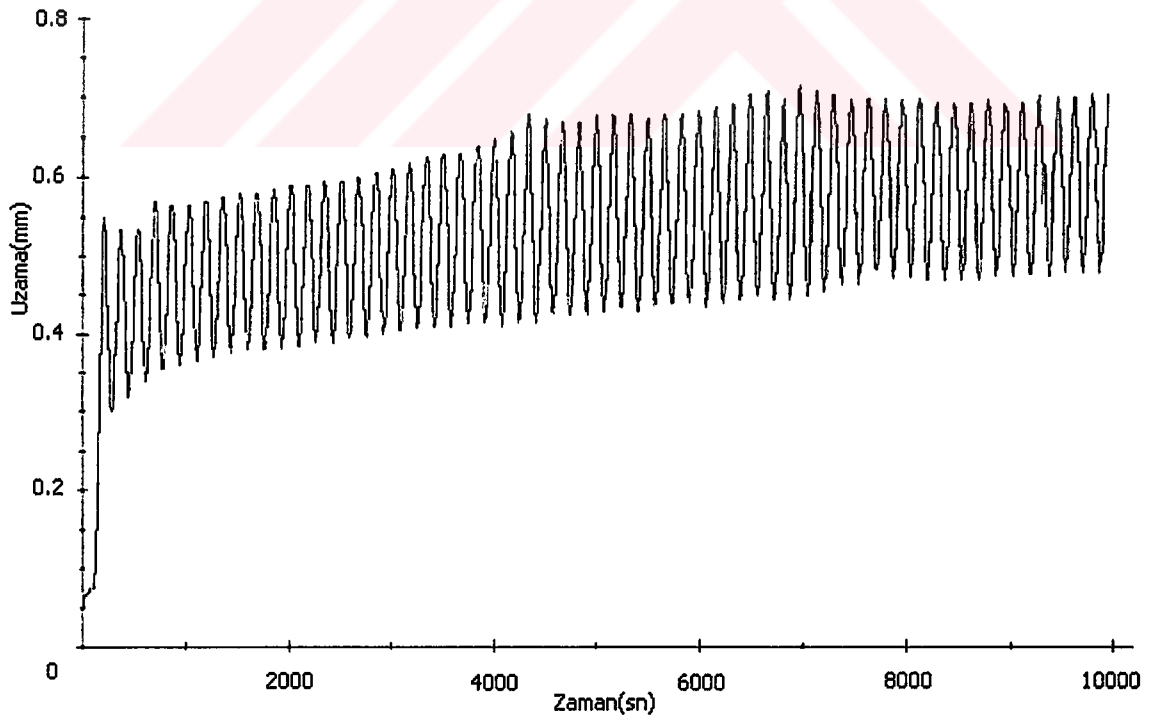
Gerilmelerin zamana bağlı olarak değişimi ve buna bağlı olarak numune üzerinde zamanla oluşan uzamalar Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterildi.

4.3.3.2 İkinci Deney

İkinci deneyde üçüncü yay kullanıldı. Yay diskin diğerlerinden ayrı olan deliğine (4) takıldı ve numuneye ön gerilme kuvvetiyle birlikte 5 mm'lik yay uzaması verildi. Böylece oluşan minumum ve maksimum yay kuvvetleri (4.2) denklemine göre;



Şekil 4.13 Birinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



Şekil 4.14 Birinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama

Minumum yay kuvveti;

$$F = 169,6 + 4,218.5 = 190,69 \text{ N}$$

Maksimum yay kuvveti;

$$F = 169,6 + 4,218.(5 + 65) = 464,86 \text{ N}$$

olarak elde edildi. Bu kuvvetler altında numune üzerinde oluşan minumum ve maksimum gerilmeler ise (4.3) denklemiyle elde edildi;

Minumum gerilme;

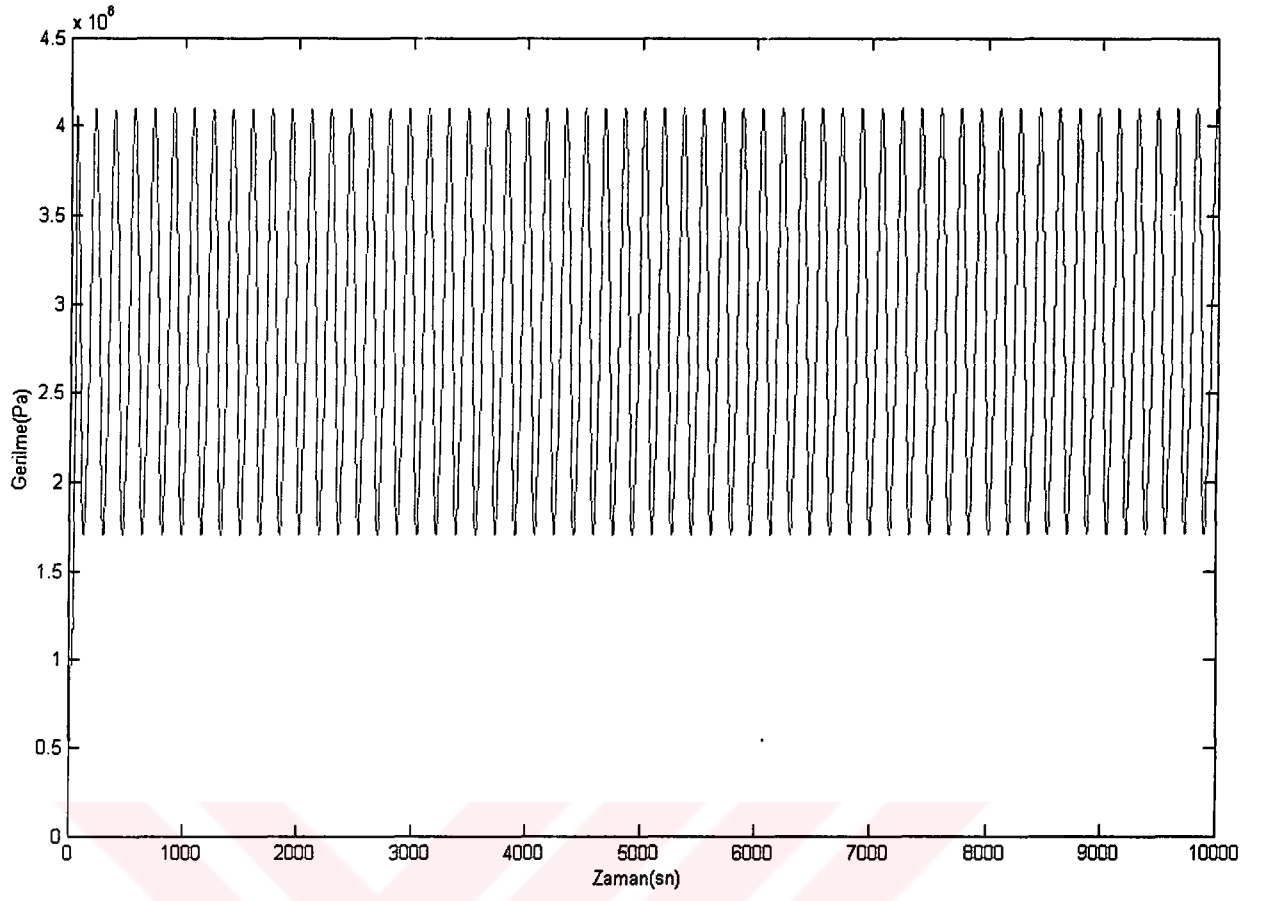
$$\sigma = \frac{190,69}{\pi.12^2 / 4} = 1,687 \text{ MPa}$$

Maksimum gerilme;

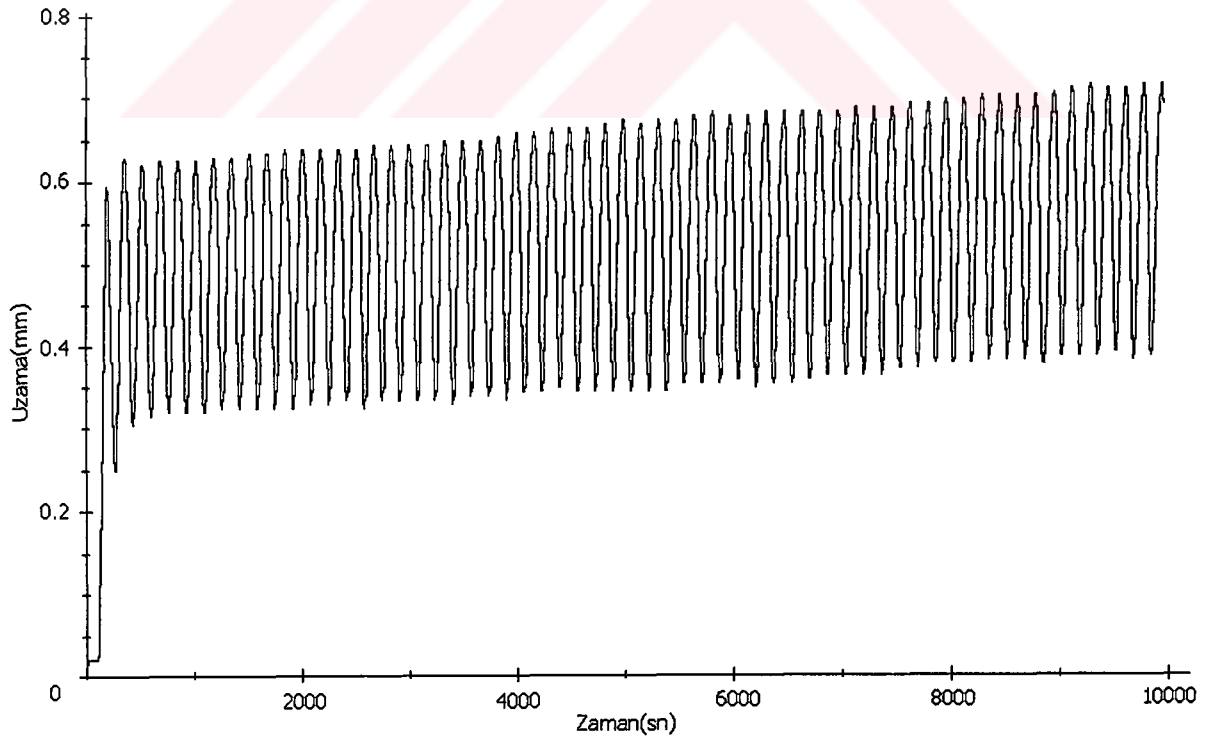
$$\sigma = \frac{464,86}{\pi.12^2 / 4} = 4,112 \text{ MPa}$$

olarak bulundu.

Gerilmelerin zamana bağlı olarak değişimi ve buna bağlı olarak numune üzerinde zamanla oluşan uzamalar Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterildi.



Şekil 4.15 İkinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



Şekil 4.16 İkinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama

4.3.3.3 Üçüncü Deney

Üçüncü deneyde ikinci yay kullanıldı. Yay diskin en alt deliğine (1) takıldı ve numuneye ön gerilme kuvvetiyle birlikte 11 mm'lik yay uzaması verildi. Böylece oluşan minumum ve maksimum yay kuvvetleri (4.2) denklemine göre;

Minumum yay kuvveti;

$$F = 520 + 14,214.11 = 676,354 \text{ N}$$

Maksimum yay kuvveti;

$$F = 520 + 14,214.(11 + 72,5) = 1706,869 \text{ N}$$

olarak elde edildi. Bu kuvvetler altında numune üzerinde oluşan minumum ve maksimum gerilmeler (4.3) denklemine göre;

Minumum gerilme;

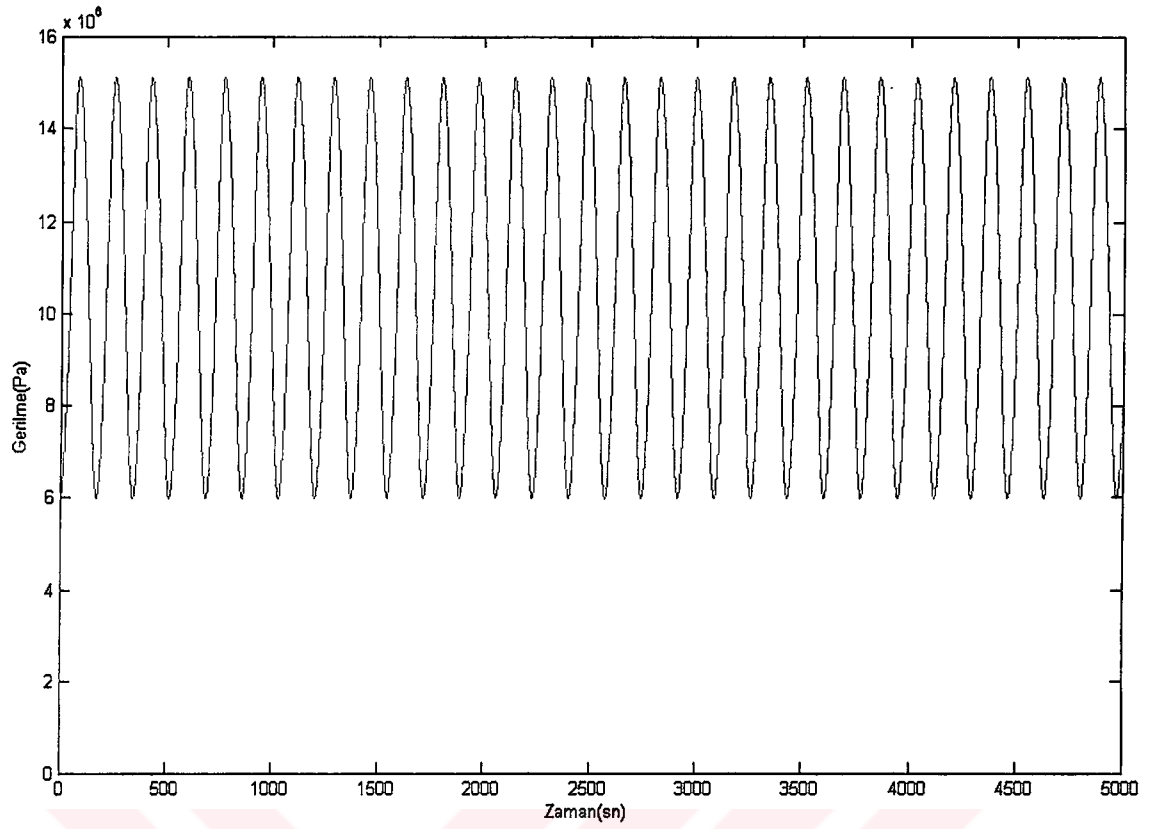
$$\sigma = \frac{676,354}{\pi.12^2 / 4} = 5,983 \text{ MPa}$$

Maksimum gerilme;

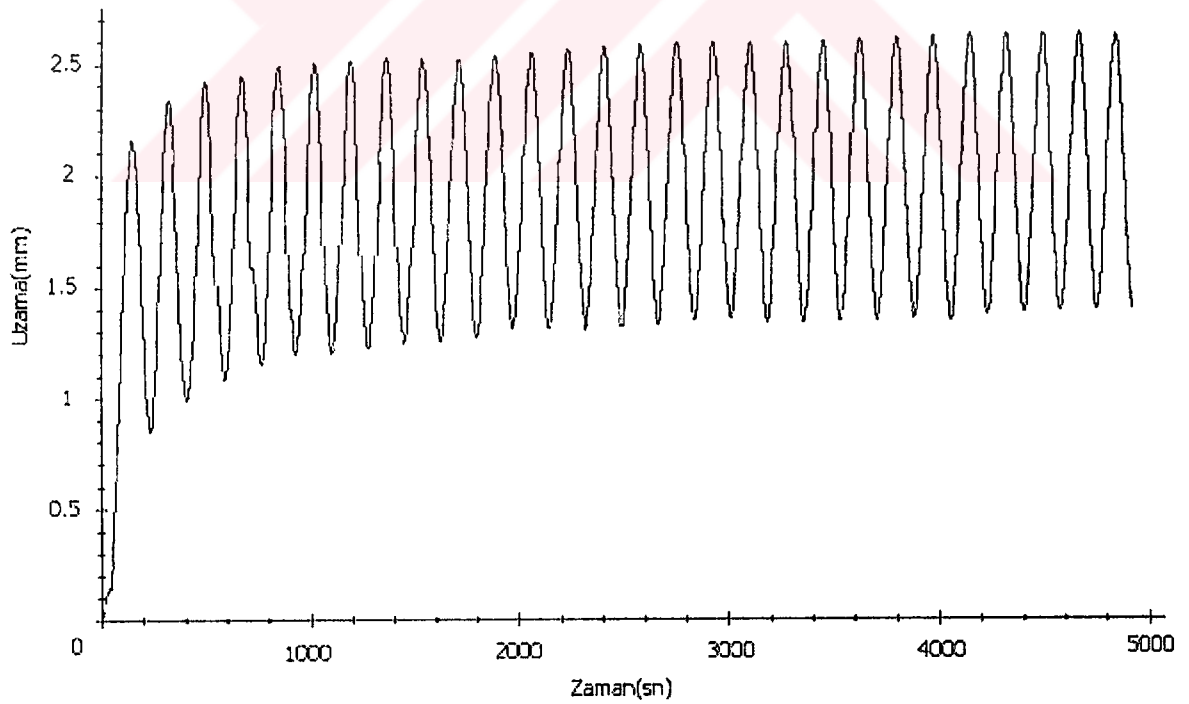
$$\sigma = \frac{1681,334}{\pi.12^2 / 4} = 15,099 \text{ MPa}$$

olarak elde edildi.

Gerilmelerin zamana bağlı olarak değişimi ve buna bağlı olarak numune üzerinde zamanla oluşan uzamalar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterildi.



Şekil 4.17 Üçüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



Şekil 4.18 Üçüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama

$$F = 60,6 + 2,651 \cdot (7 + 102,5) = 350,884 \text{ N}$$

olarak elde edildi. Bu kuvvetler altında numune üzerinde oluşan minimum ve maksimum gerilmeler (4.3) denklemine göre;

Minimum gerilme;

$$\sigma = \frac{79,157}{\pi \cdot 12^2 / 4} = 0,700 \text{ MPa}$$

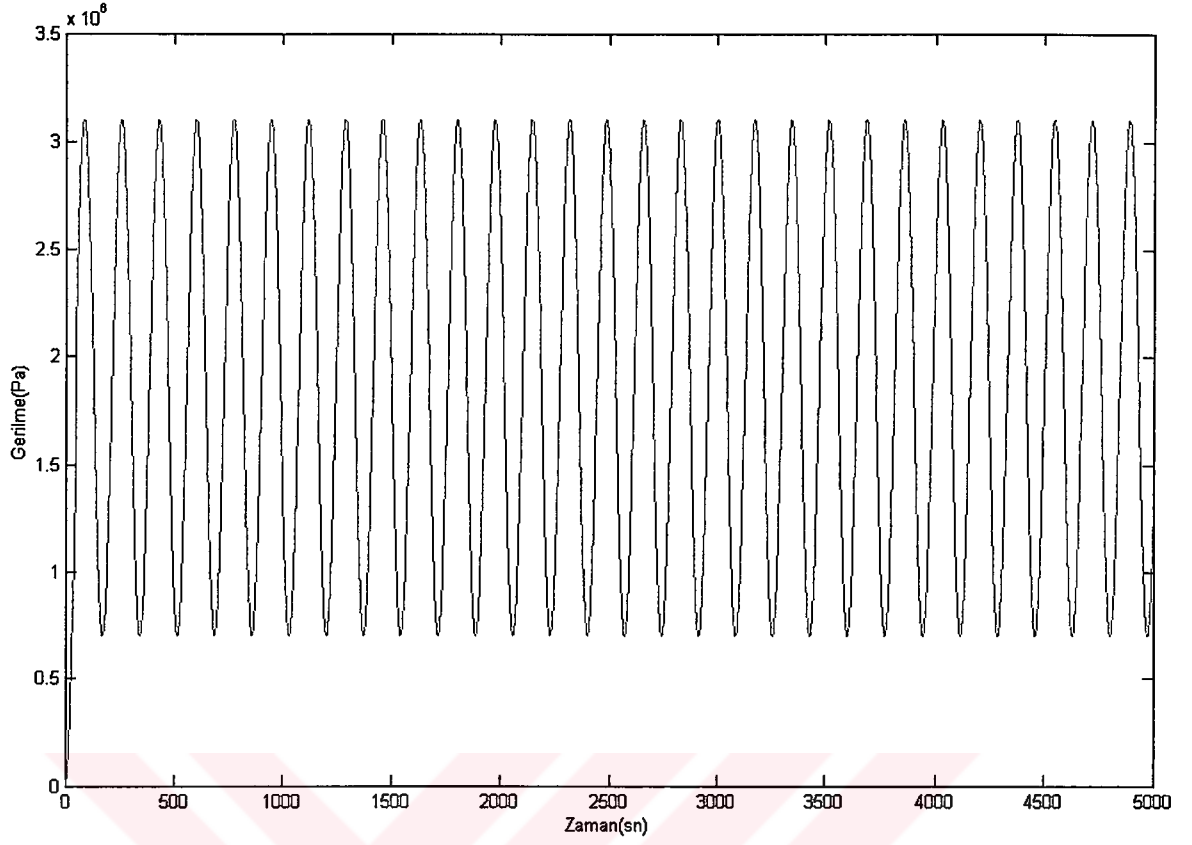
Maksimum gerilme;

$$\sigma = \frac{350,884}{\pi \cdot 12^2 / 4} = 3,104 \text{ MPa}$$

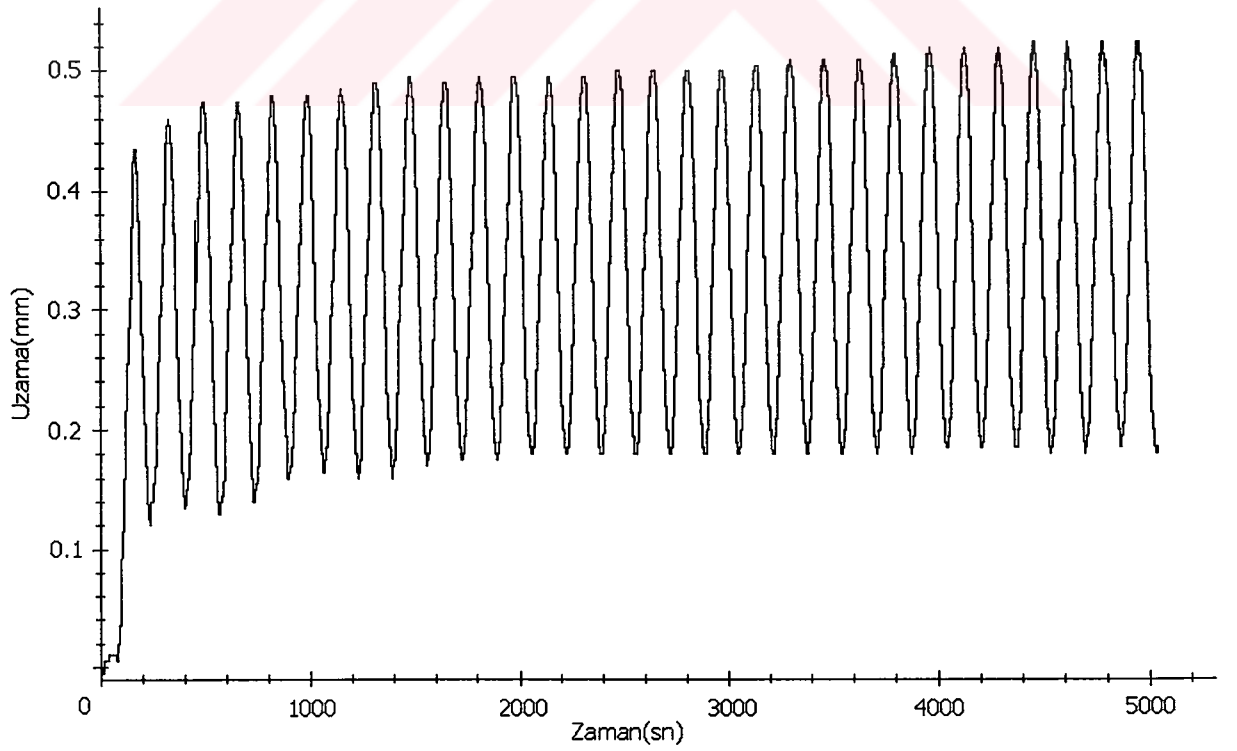
olarak elde edildi.

Gerilmelerin zamana bağlı olarak değişimi ve buna bağlı olarak numune üzerinde zamanla oluşan uzamalar Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterildi.





Şekil 4.19 Dördüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



Şekil 4.20 Dördüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama

5. DİNAMİK MODELLEME

5.1 Giriş

Statik durumlar için oluşturulan Burgers modelinden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarından elde edilen sonuçların birbirini yakınsadığı görülmüştü. Bu bölümde ise aynı sabitler kullanılarak, dinamik bir model oluşturuldu. Oluşturulan model SIMULINK programı yardımıyla blok diyagram haline getirildi ve böylece işlem kolaylığı sağlandı. Model ile karesel ve sinüzoidal yüklemeler simule edilerek zamana bağlı deformasyonlar incelendi. Her iki durum için farklı blok diyagram tasarlandı.

5.2 Karesel Gerilme Oluşturan Sistem İçin Matematik Model

Numune üzerinde karesel gerilme oluşturan sistemin matematik modelinin kurulmasında dördüncü bölümde çıkarılışı gösterilen (2.15) nolu Burgers modelinin genel bünye denklemi göz önüne alındı.

$$E_1 E_2 \eta_1 \dot{\varepsilon} + E_1 \eta_1 \eta_2 \ddot{\varepsilon} = E_1 E_2 \dot{\sigma} + (\eta_1 E_2 + E_1 \eta_2 + E_1 \eta_1) \dot{\sigma} + \eta_1 \eta_2 \ddot{\sigma}$$

Denklemdaki E_1, E_2, η_1 ve η_2 sabitleri ;

$$E_1 = 800 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

$$E_2 = 2578,927 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

$$\eta_1 = 212782350,24 \times 10^6 \text{ [Pa.s]}$$

$$\eta_2 = 8,40863 \times 10^{12} \text{ [Pa.s]}$$

olarak bulunmuştu. Sabitler (2.15) nolu genel bünye denkleminde yerlerine konularak;

$$4,595 \times 10^{32} \dot{\varepsilon} + 1,134 \times 10^{36} \ddot{\varepsilon} = 2,154 \times 10^{18} \dot{\sigma} + 7,503 \times 10^{23} \dot{\sigma} + 1,417 \times 10^{27} \ddot{\sigma} \quad (5.1)$$

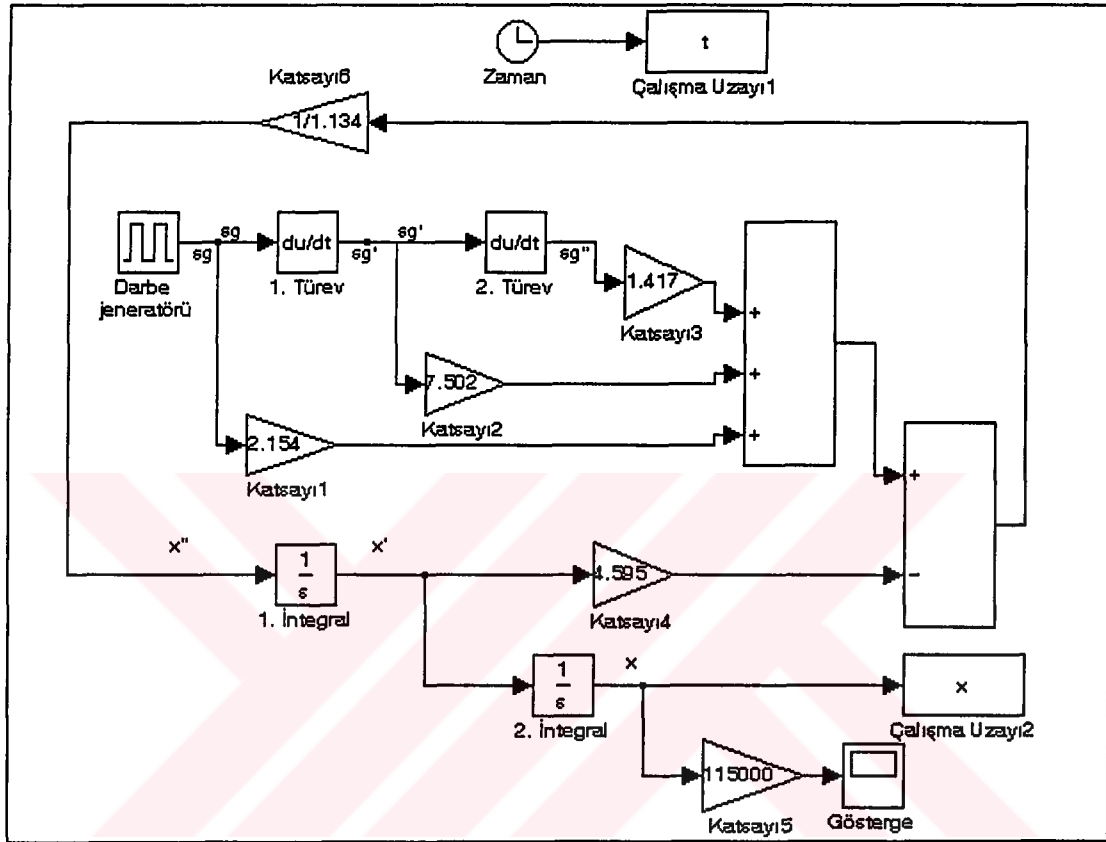
ikinci dereceden sabit katsayılı bir diferansiyel denklem elde edildi. Bu denklemin çözümü için birkaç yöntem arasında yapılan denemeler sonucu en yaklaşık çözüm MATLAB programının altında çalışan SIMULINK programıyla elde edildi. SIMULINK programı, sistem elemanlarının oluşturduğu blok diyagramı ile çözüm gerçekleştirebilmektedir.

5.2.1 Matematik Modelin Çözümü

SIMULINK ile çözüm yapabilmek için (4.1) denklemindeki $\ddot{\varepsilon}$ terimi yalnız bırakılarak;

$$\ddot{\varepsilon} = (2,154 \times 10^{18} \sigma + 7,503 \times 10^{23} \dot{\sigma} + 1,417 \times 10^{27} \ddot{\sigma} - 4,595 \times 10^{32} \dot{\varepsilon}) / 1,134 \times 10^{36} \quad (5.2)$$

denklemini elde edildi. Elde edilen denklem, blok diyagram şeklinde oluşturuldu (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Karesel gerilme durumu için SIMULINK’de oluşturulan blok diyagram

Denklemin SIMULINK yardımıyla çözümü, işlem kalabalığının ve çözüm zamanının azalması bakımından büyük kolaylık sağlamıştır.

5.2.2 Blok Diyagramının Oluşturulması

Zamana bağlı bir işlem yapılacağı için blok diyagramın üzerine bir zaman sayacı yerleştirildi ve simülasyon parametrelerinden 20000 saniye olarak çözümün yapılacağı aralık belirlendi.

Darbe jeneratörü yardımıyla, nümune üzerine etki eden gerilmenin büyüklüğü , periyodu ve etkime süresi girildi. Deneyler sırasında, 1200 saniyelik bir periyot ve 600 saniyelik etkime süresi gerçekleştirildiği için bu değerler aynen aktarıldı ve üç farklı gerilme değeri için

işlemler tekrarlandı.

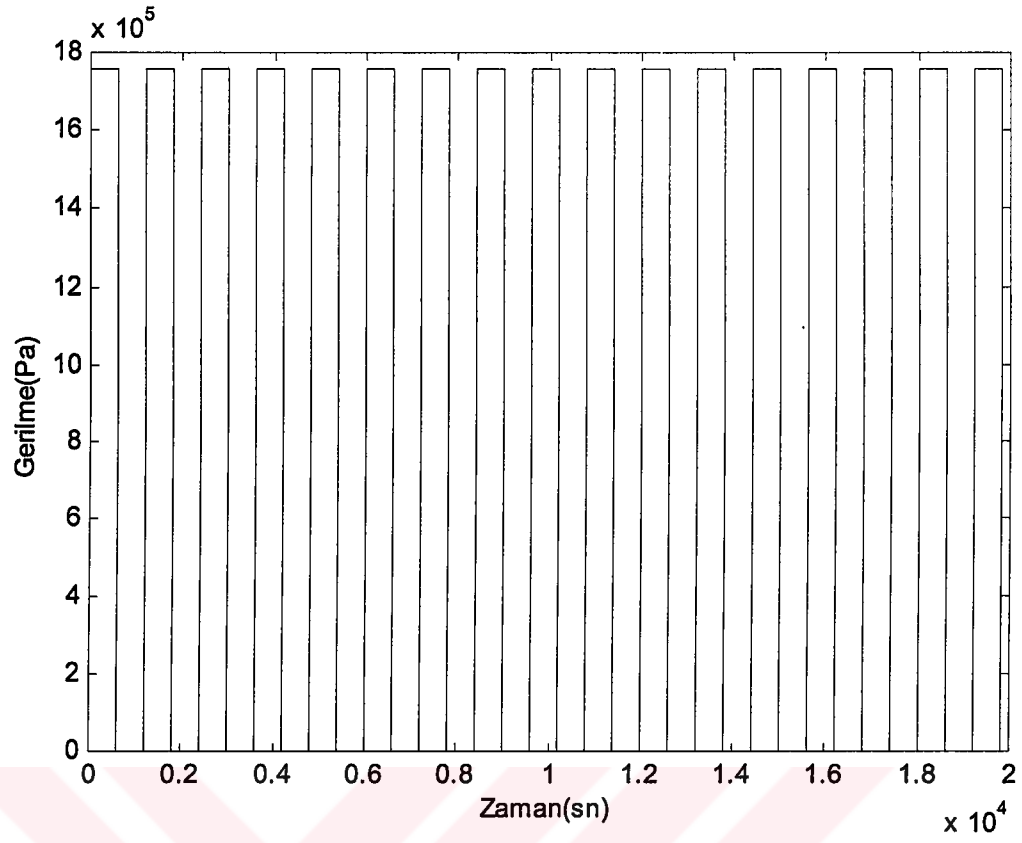
(5.2) denkleminde görüldüğü üzere gerilmenin kendi değeri, 1. türevi ve 2. türevi belirli katsayılarla çarpılarak denkleme etki ediyor. Bu yüzden darbe jeneratöründen alınan sinyalin kendisi katsayı1, 1. türevi katsayı2 ve 2. türevi katsayı3 ile çarpılarak 1. toplama kutusuna gönderildi.

Birim şekil değiştirme ifadesinin 2. türevi yalnız bırakılmıştı, 1. integral ile 1. türevine, 2. integral ile birim şekil değiştirme ifadesinin asıl değerine ulaşıldı. Birim şekil değiştirmenin 1. türev değeri katsayı4 ile çarpılarak elde edilen değer, 1. toplama kutusundan elde edilen değerden çıkarıldı. Bu son değer katsayı6 ile çarpılarak birim şekil değiştirme ifadesinin 2. türevi elde edildi, böylece döngü tamamlanmış oldu.

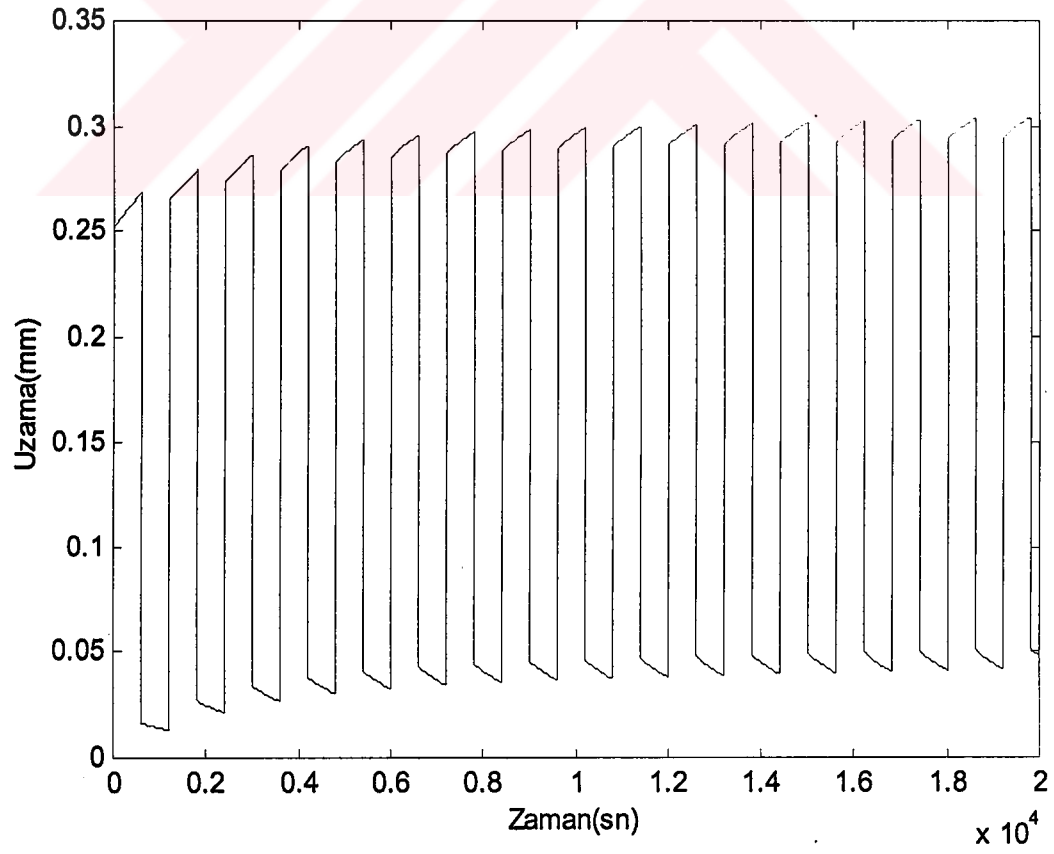
Birim şekil değiştirme değeri katsayı6 ile çarpılarak uygulanan gerilme altındaki uzama-zaman grafiği gösterge kutucuğundan elde edildi.

5.2.3 Matematik Model Sonuçları

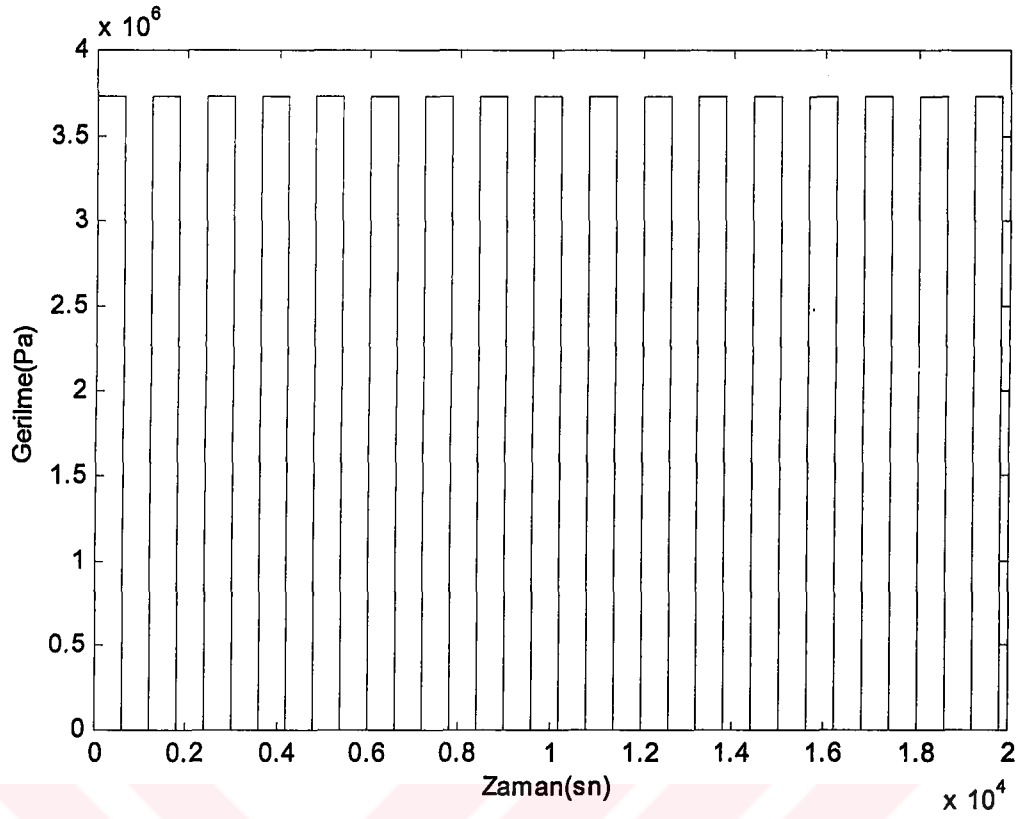
SIMULINK programında oluşturulan blok diyagram yardımıyla 1,757 MPa (Şekil 5.2), 3,732 MPa (Şekil 5.4) ve 7,376 MPa (Şekil 5.6) dinamik gerilme altında, numunede oluşan uzama-zaman grafikleri Şekil 5.3, Şekil 5.5 ve Şekil 5.7’de görülmektedir.



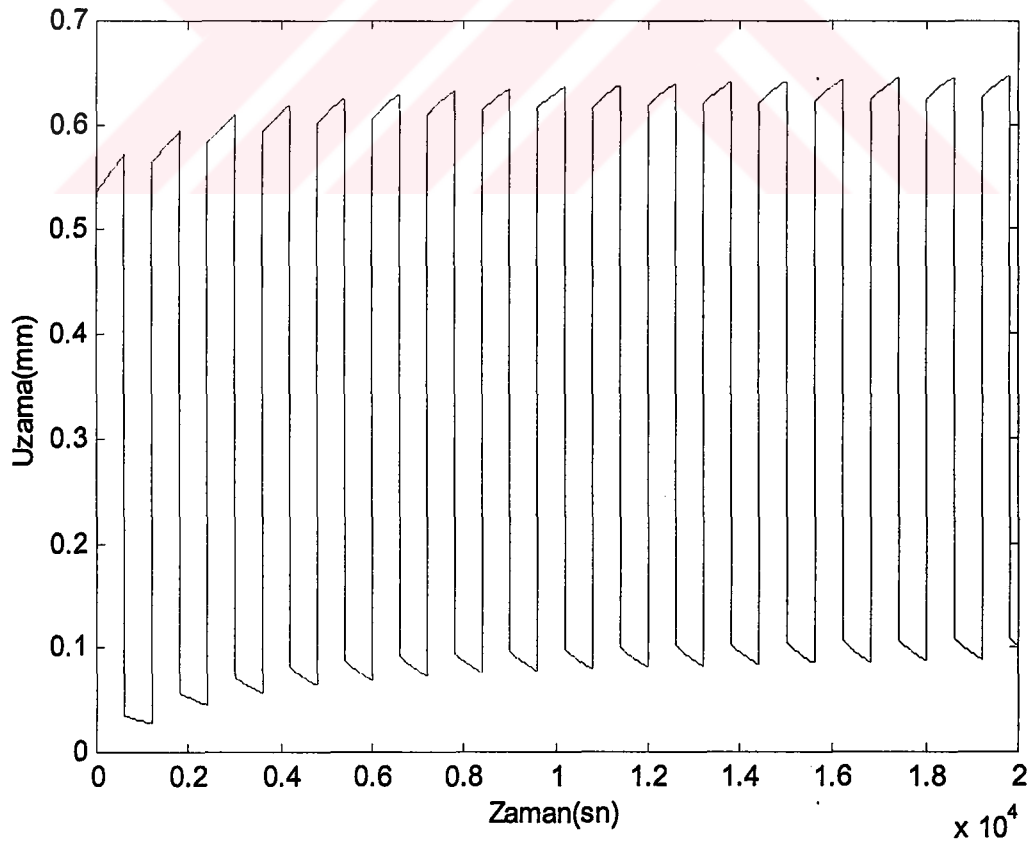
Şekil 5.2: 1,757 MPa'lık karesel dinamik yükleme



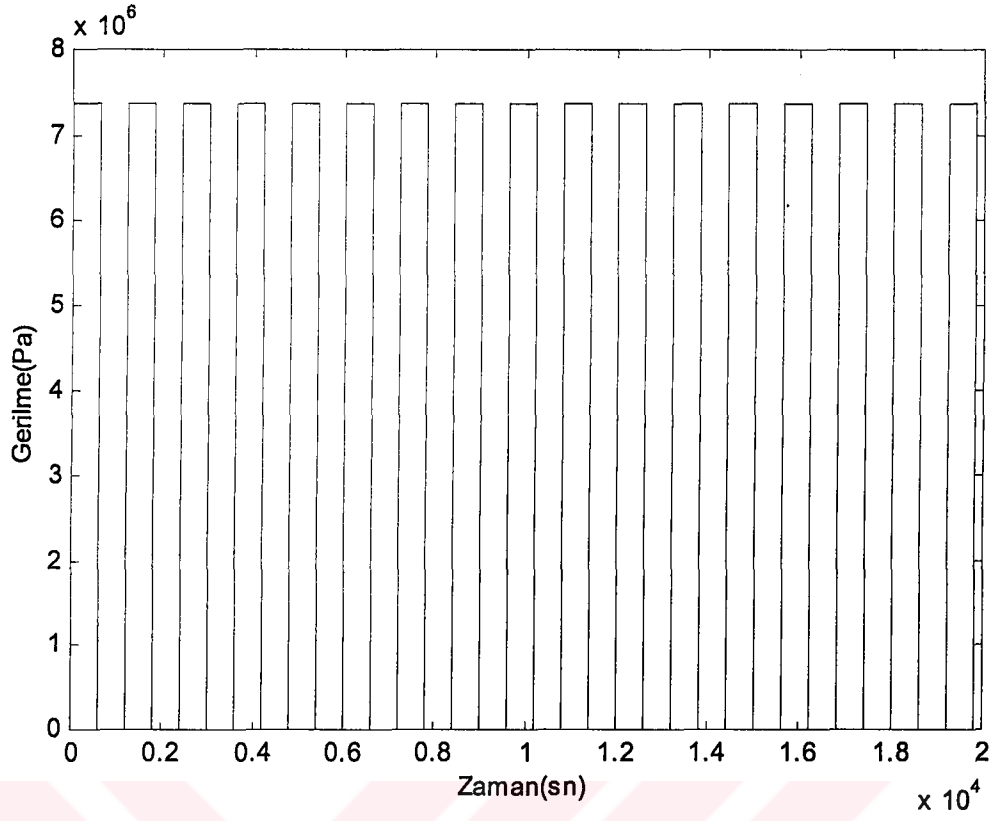
Şekil 5.3: 1,757 MPa karesel dinamik gerilme altında numunenin uzama-zaman grafiği



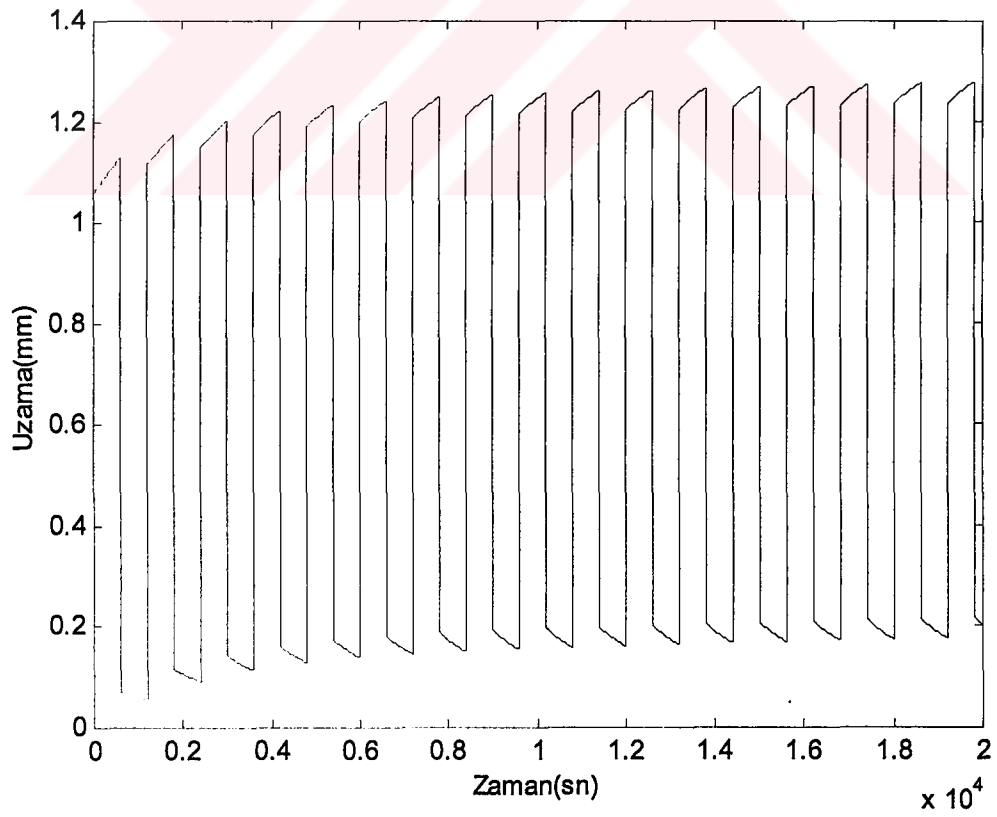
Şekil 5.4: 3,732 MPa'lık karesel dinamik yükleme



Şekil 5.5: 3,732 MPa karesel dinamik gerilme altında numunenin uzama-zaman grafiği



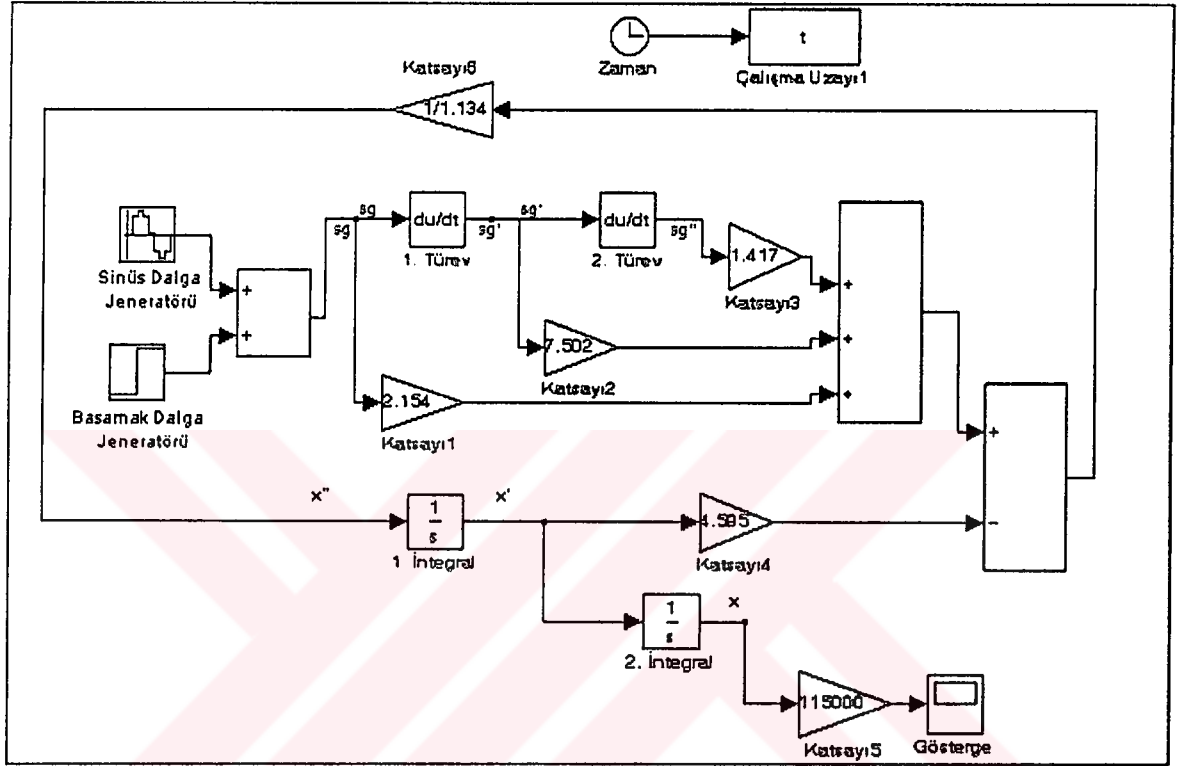
Şekil 5.6: 7,376 MPa'lık karesel dinamik yükleme



Şekil 5.7: 7,376 MPa dinamik gerilme altındaki nümunenin uzama-zaman grafiği

5.3 Sinüzoidal Gerilme Durumu İçin Matematik Model

Numune üzerinde sinüzoidal gerilme oluşturan sistemin matematik modelinin kurulmasında karesel gerilme durumu için oluşturulan dinamik model temel alındı. Statik durumlar için elde edilen ve karesel gerilme durumunda kullanılan Burgers modeli sabitleri bu bölümde de kullanıldı. Modelin kurulmasındaki ve çözülmesindeki ayrıntılar 5.2 bölümünde ayrıntılı şekilde anlatıldığı için bu bölümde tekrar edilmemiştir.



Şekil 5.8 Sinüzoidal gerilme durumu için SIMULINK’de oluşturulan blok diyagram

5.3.1 Blok Diyagramının Oluşturulması

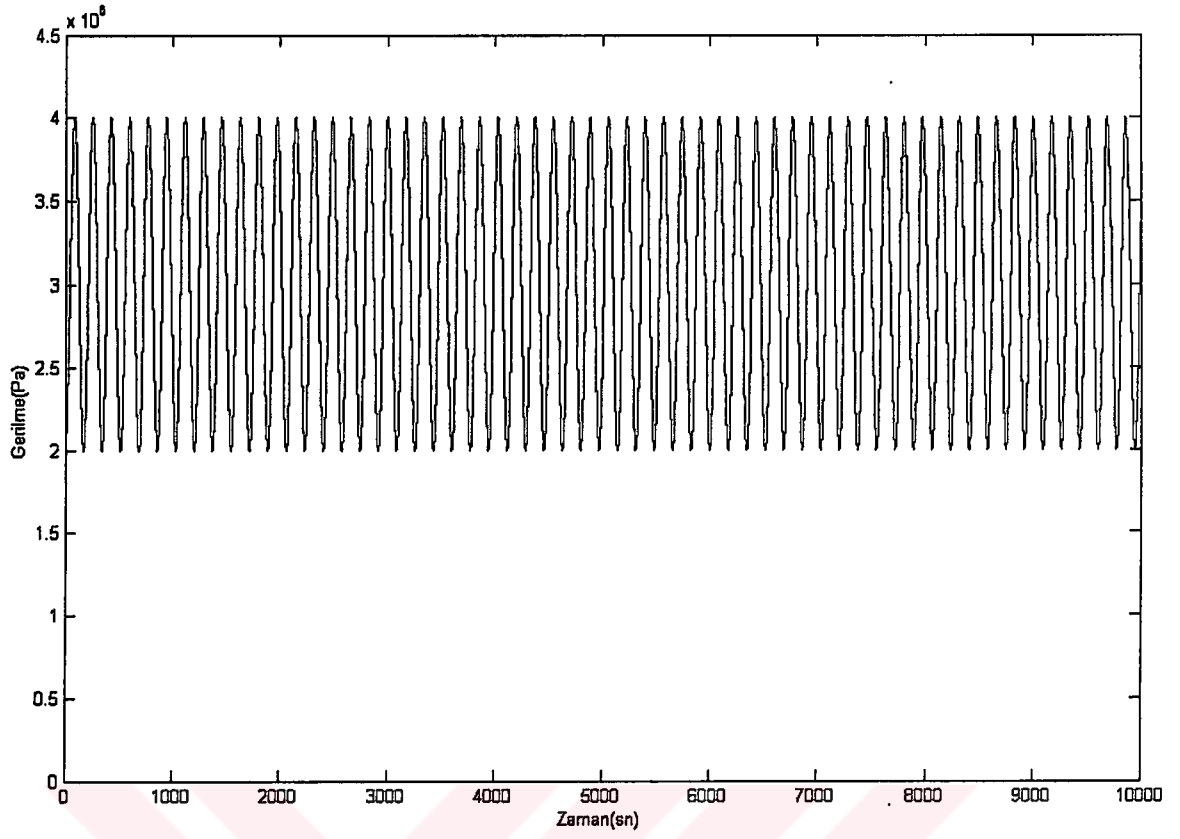
Matematik modeldeki diferansiyel denklemlerinin çözülebilmesi için oluşturulan blok diyagram Şekil 5.8’de görülmektedir. Karesel gerilme durumunda darbe jeneratörü yardımıyla uygulanan gerilme ayarlanmıştı ve ön gerilme mevcut değildi. Sinüzoidal gerilme durumunda ise numuneye ön gerilme uygulandı. Ön gerilme değeri basamak dalga jeneratörü yardımıyla ayarlandı. Numuneye etkiyen sinüzoidal gerilmenin genliği ve frekansı her gerilme durumu için sinüzoidal dalga jeneratöründen ayarlandı. Bu iki jeneratörden elde edilen sinyal bir toplama kutusunda toplanarak, çıkışı sisteme giriş sinyali olarak uygulandı. Bu sinyal numuneye etki eden, ön gerilme ve sinüzoidal gerilmenin toplamına eşittir.

5.3.2 Matematik Model Sonuçları

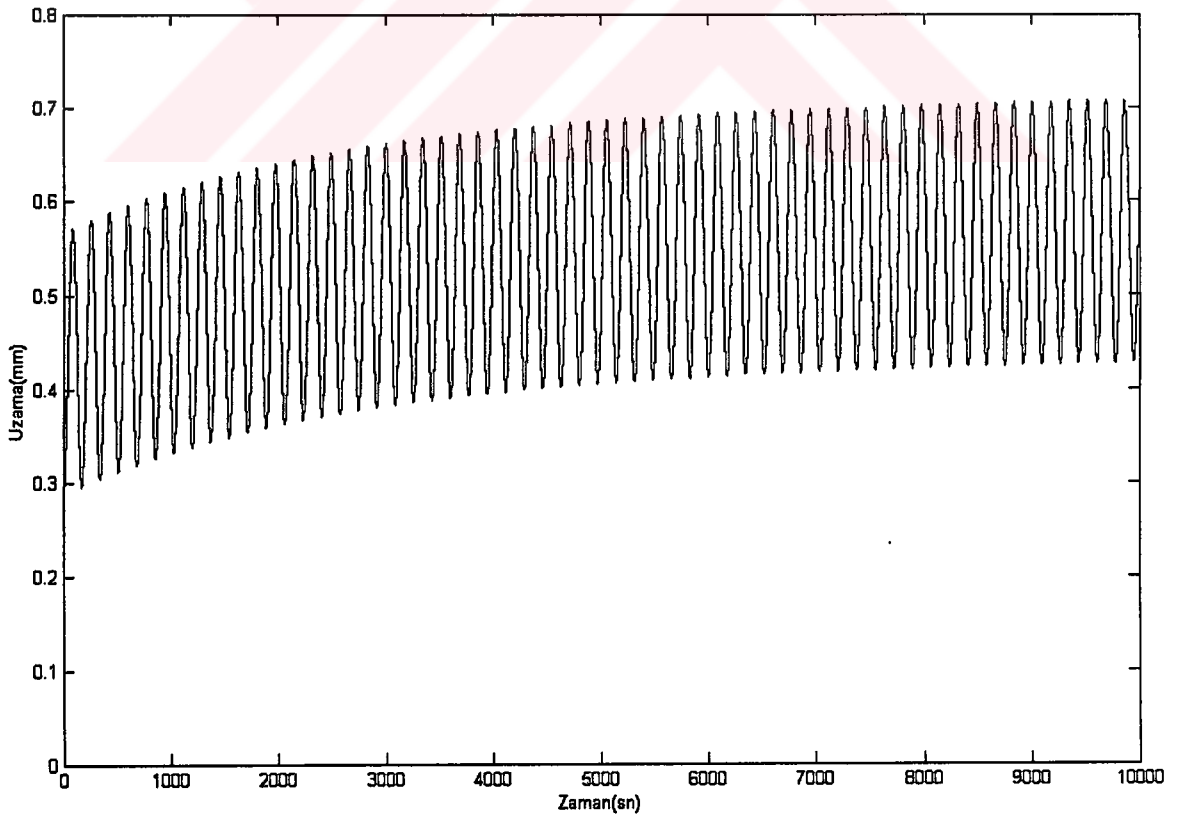
Dört farklı gerilme durumu için gerçekleştirilen deneylerdeki giriş parametreleri oluşturulan modele de giriş olarak uygulandı. Modele giriş olarak uygulanan dört farklı gerilme-zaman değerleri Şekil 5.9, 5.11, 5.13 ve 5.15'te, modelden elde edilen uzama-zaman değerleri Şekil 5.10, 5.12, 5.14 ve 5.16'da gösterildi.

Malzemeye ait histerisiz eğrileri ise dört farklı gerilme durumu için gerilme-uzama eğrileri çizilerek elde edildi (Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20).

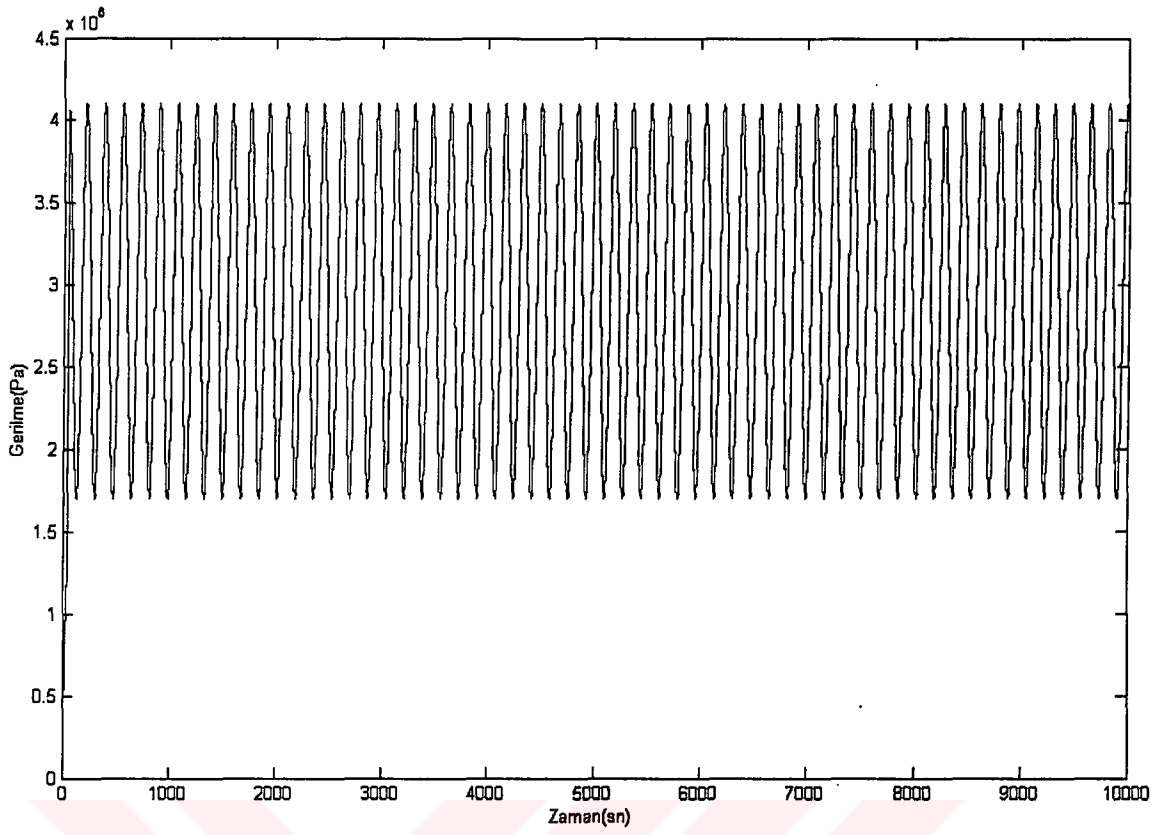




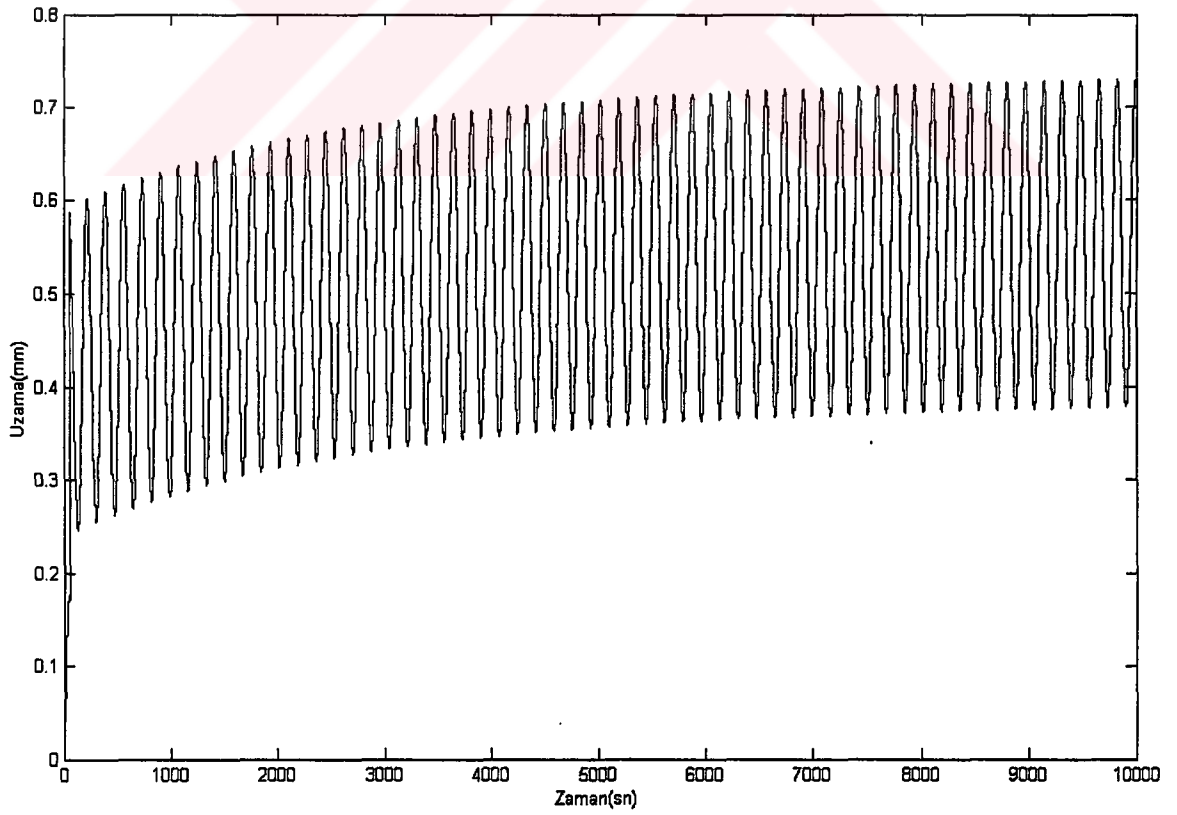
Şekil 5.9 Birinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



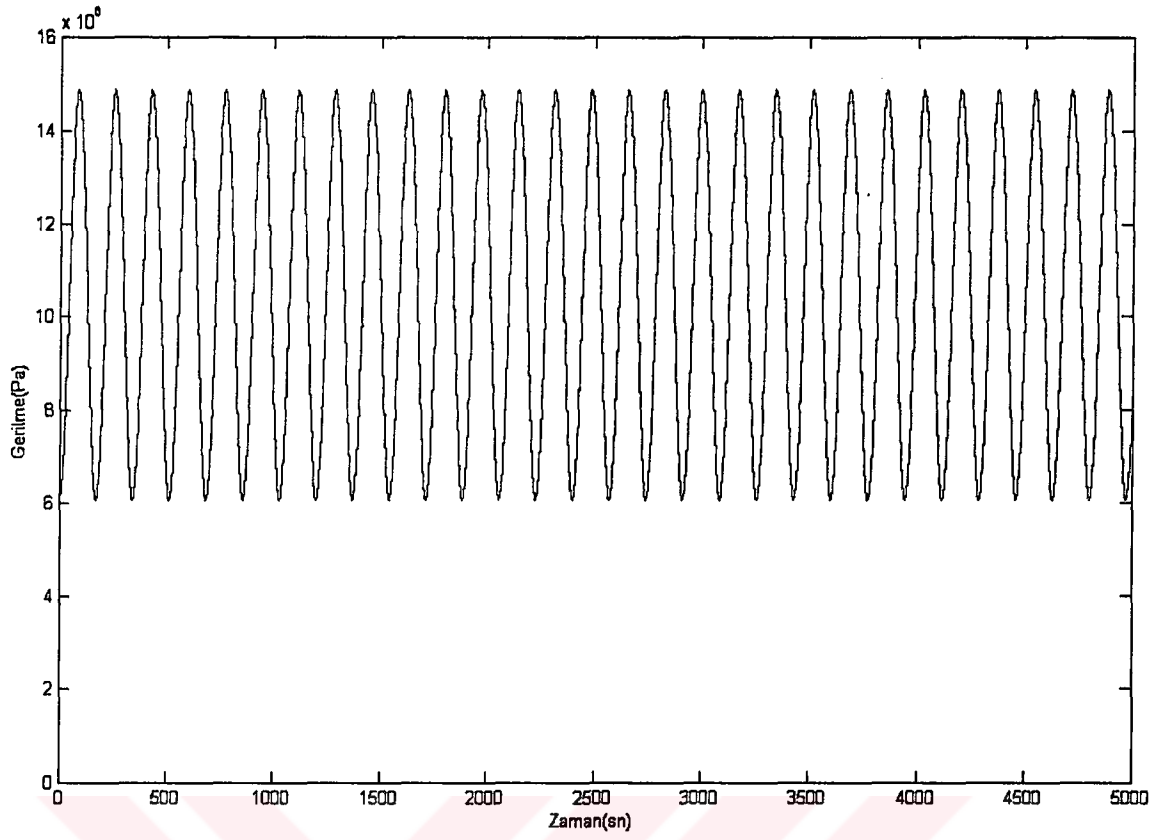
Şekil 5.10 Birinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama



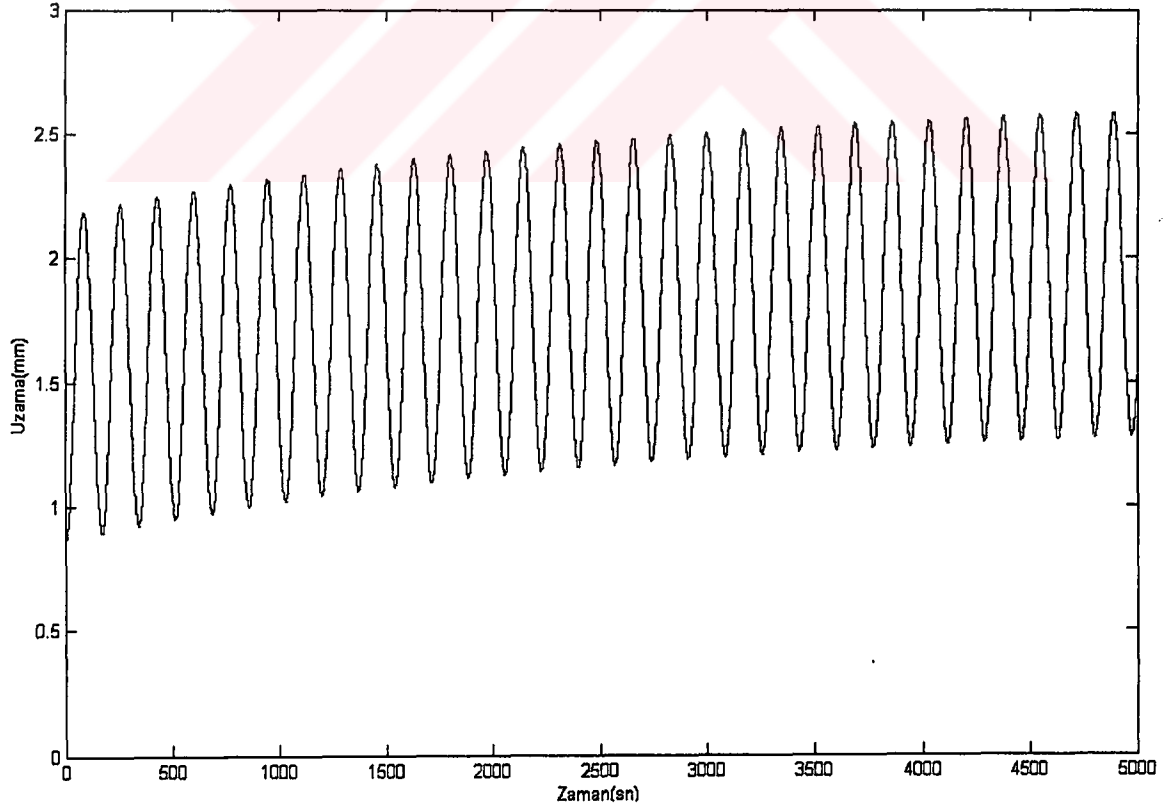
Şekil 5.11 İkinci deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



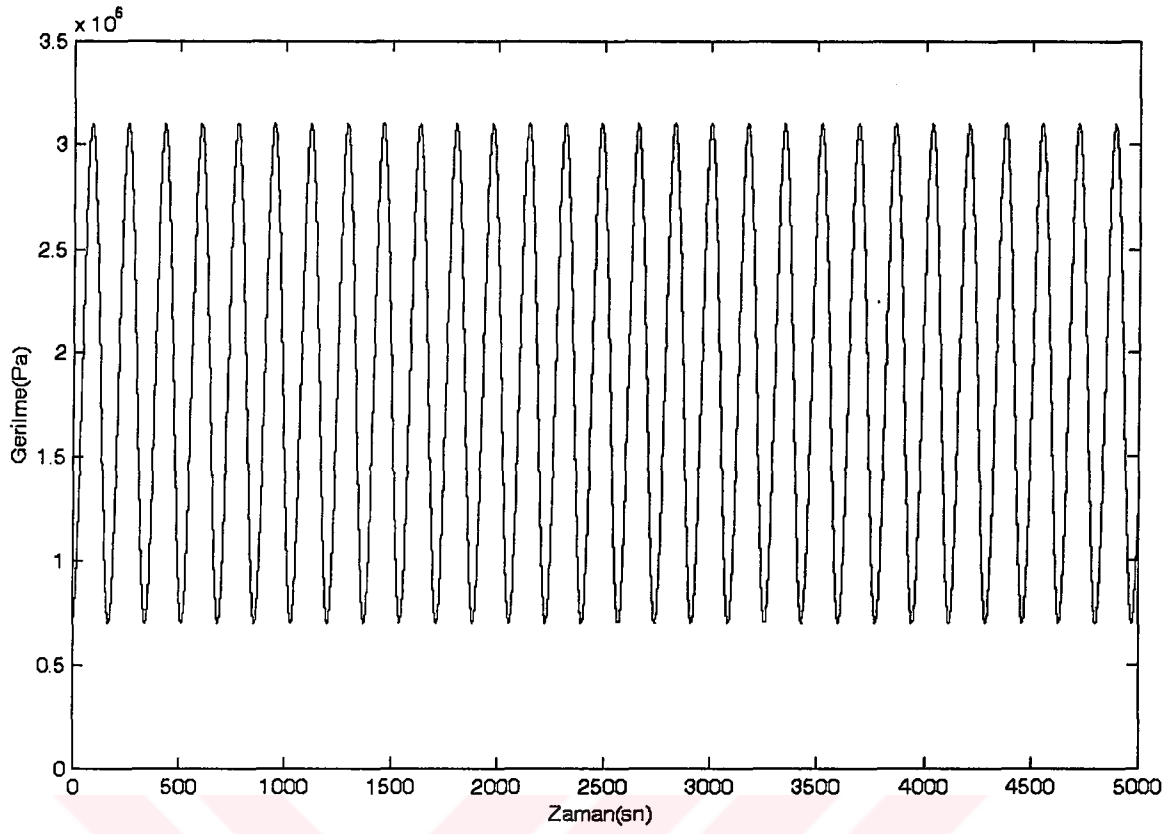
Şekil 5.12 İkinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama



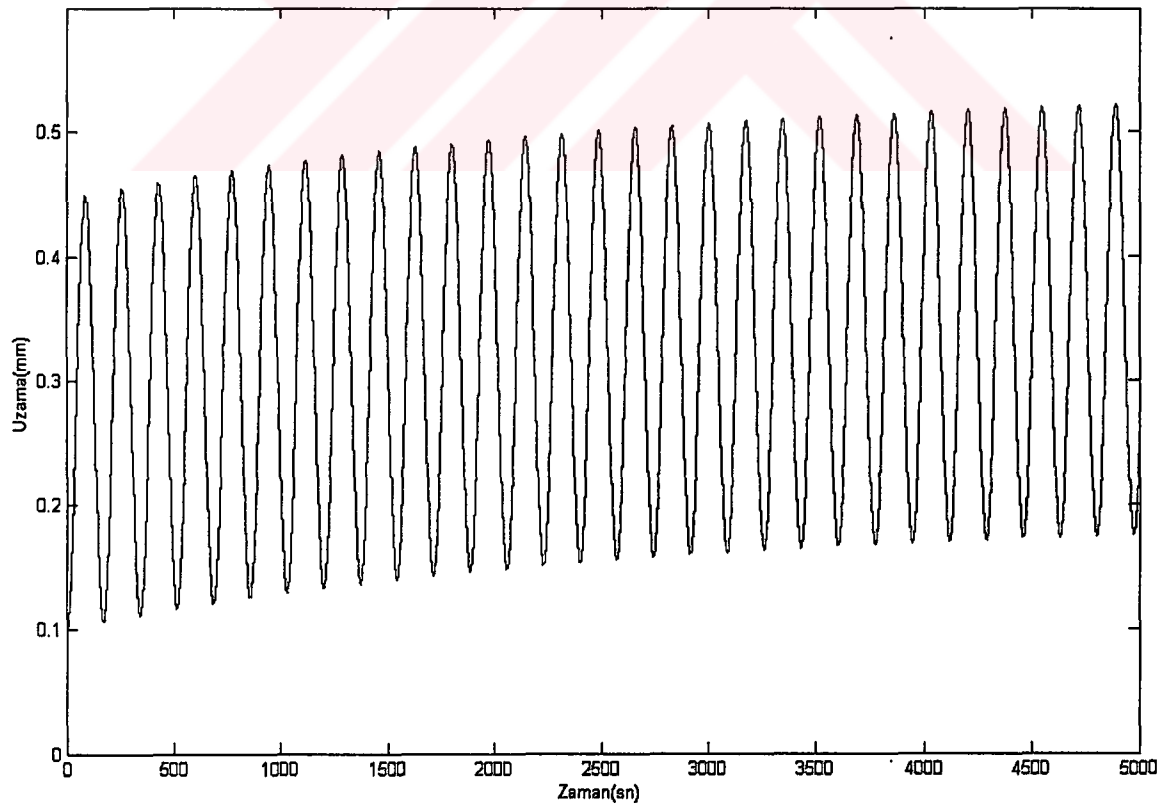
Şekil 5.13 Üçüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



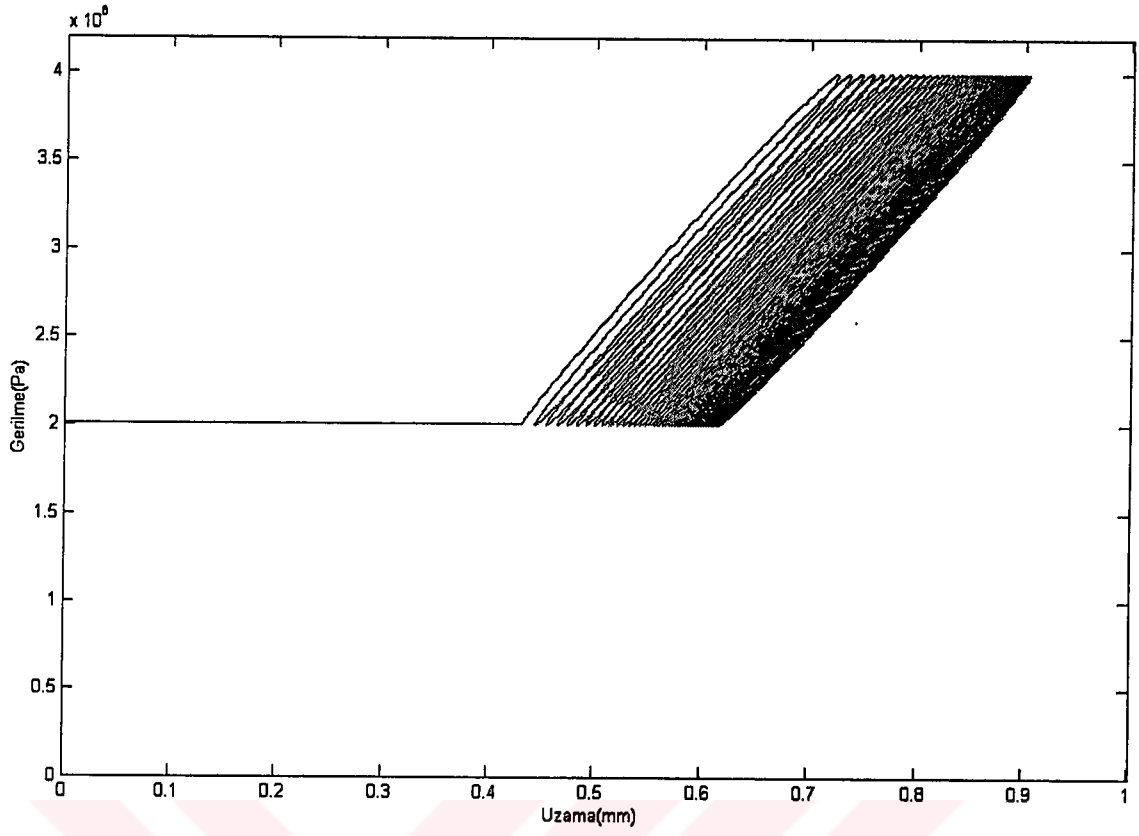
Şekil 5.14 Üçüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama



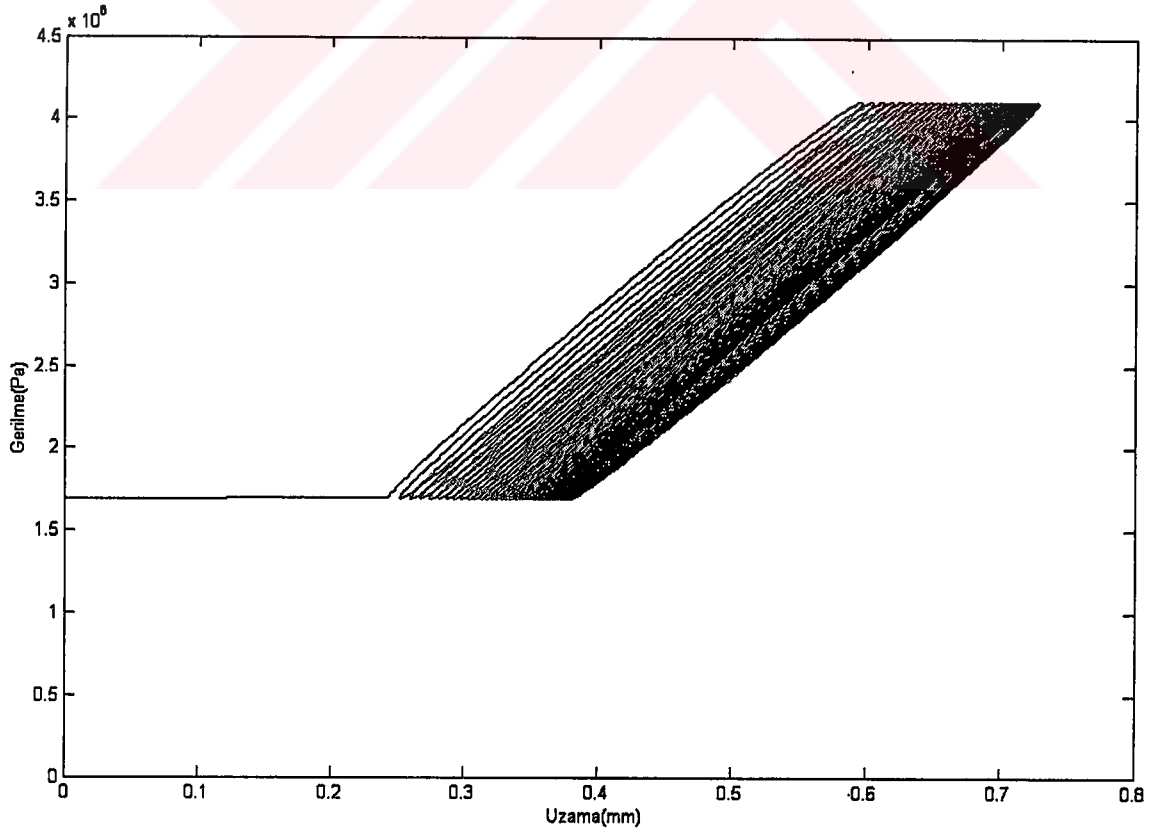
Şekil 5.15 Dördüncü deneyde numuneye etki eden zamana bağlı sinüzoidal gerilme değişimi



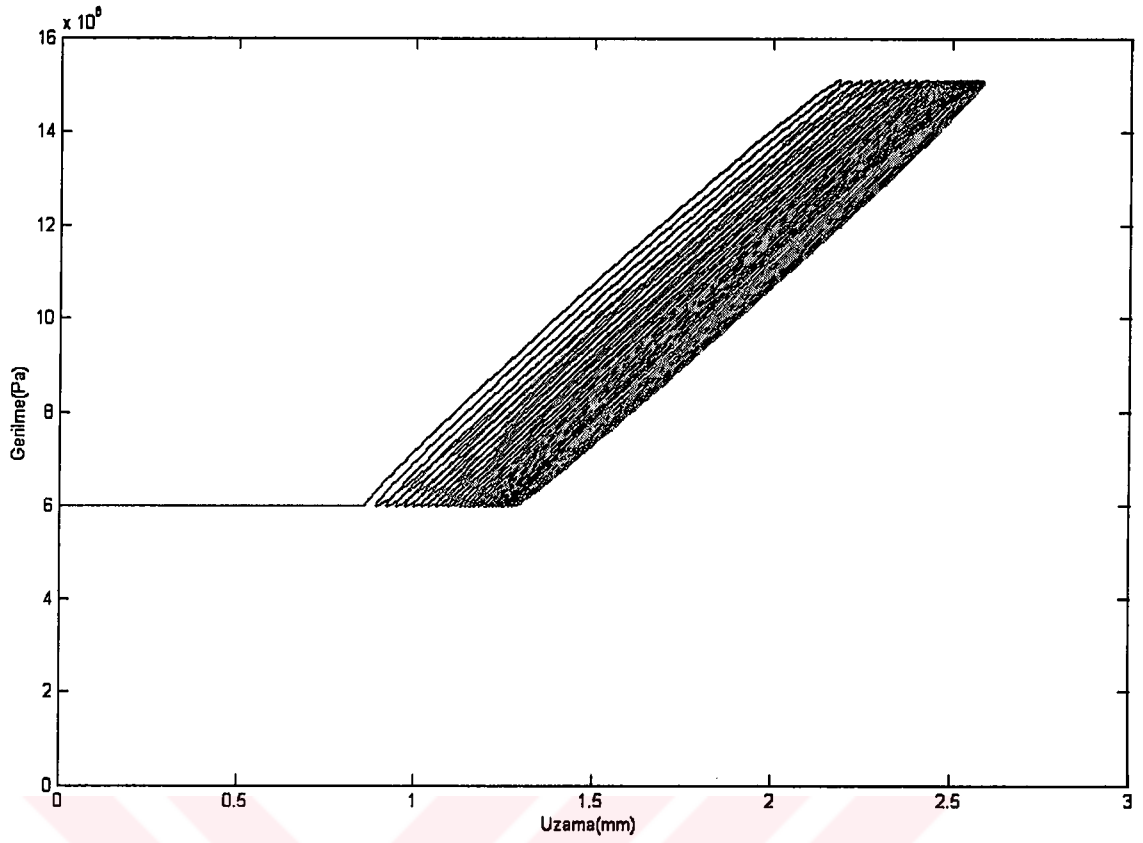
Şekil 5.16 Dördüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama



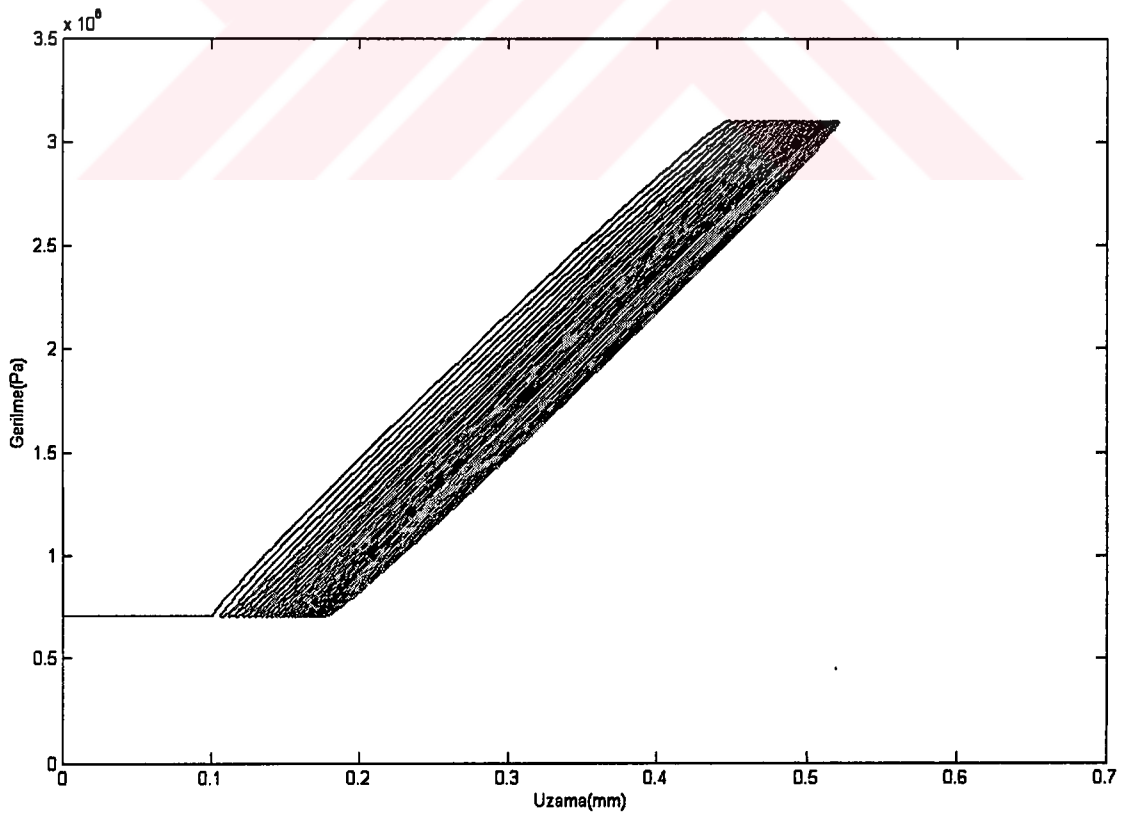
Şekil 5.17 Birinci deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi



Şekil 5.18 İkinci deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi



Şekil 5.19 Üçüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi



Şekil 5.20 Dördüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen histerisiz eğrisi

6. SONUÇLAR

6.1 Giriş

Tez çalışmasının başlangıcında plastik boru üretiminde yaygın olarak kullanılan HDPE malzemenin zamana bağlı statik ve dinamik davranışlarının matematik modelinin oluşturulması hedeflenmişti ve bu hedefe uygun olarak deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar yapıldı.

6.2 HDPE Malzemenin Matematik Modelinin Oluşturulması

HDPE'nin sünme davranışlarına en uygun matematik modelin tespit edilmesine yönelik olarak öncelikle deneysel çalışmalar gerçekleştirildi. Deneyleri gerçekleştirebilmek için HDPE'den üretilmiş bir borudan deney numuneleri oluşturuldu ve bu numuneler üzerinde malzemenin sünme karakteri incelendi. Plastik malzemelerde sabit yük altında en büyük yer değiştirme yirmi dört saat içinde görüldüğü için sünme deneyleri yaklaşık olarak yirmi dört saat sürdü. HDPE malzemenin kopma gerilmesi deneysel olarak yaklaşık 23 MPa bulundu. Bu değerin altında dört farklı gerilme değeri için sünme deneyi gerçekleştirildi (1,757 MPa, 3,732 MPa, 7,376 MPa ve 11,021 MPa). Bu dört deneyden elde edilen gerilme-uzama değerleri Şekil 2.11'de toplanarak malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölge yaklaşık olarak tespit edildi (0-8 MPa).

Deneylerden elde veriler incelendiğinde HDPE'nin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölgedeki sünme karakterinin literatürde bulunan (Flügge, 1967; Findley vd, 1976; Akyüz, 2001) viskoelastik modellerden Burgers modeli ile benzer karakterde olduğu görüldü. Böylece malzemenin modellenmesi için bu model seçildi. Burgers modelindeki malzemeye ait E_1 , E_2 , η_1 ve η_2 sabitleri deney verilerine göre analitik olarak hesaplandı.

6.3 ANSYS Programı ile HDPE Malzemenin Sünme Analizi

Sünme deneyleri bilgisayar ortamında nümerik olarak sonlu eleman analiz programı ANSYS yardımıyla da gerçekleştirildi. Analizi gerçekleştirebilmek için gerekli parametreler deney sonuçlarına göre hesaplandı. Matematik modelin oluşturulmasında sadece lineer bölgedeki deney verileri kullanılmıştı, bu bölümde ise tüm deney verileri kullanıldı. Gerekli sonlu eleman modeli ve sınır şartları oluşturulduktan sonra yirmi dört saatlik sünme analizi gerçekleştirildi.

6.4 Statik Durumlar İçin Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

Deneysel, Burgers modeli ve ANSYS programından dört gerilme durumu için elde edilen uzama-zaman eğrileri Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te mukayeseli olarak görülmektedir.

1,757 MPa için deneysel ve Burgers modelinden birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edildi. ANSYS'den elde edilen sonuçlarda ise ufak bir sapma görüldü(Şekil 6.1). ANSYS ile analiz yapabilmek için gerekli sabitler hesaplanırken tüm gerilme durumları için ayrı ayrı hesaplanan sabitlerin ortalaması alınmıştı. 1,757 MPa için hesaplanan sabit, ortalama değerden biraz farklı olduğu için bu sapma meydana geldi.

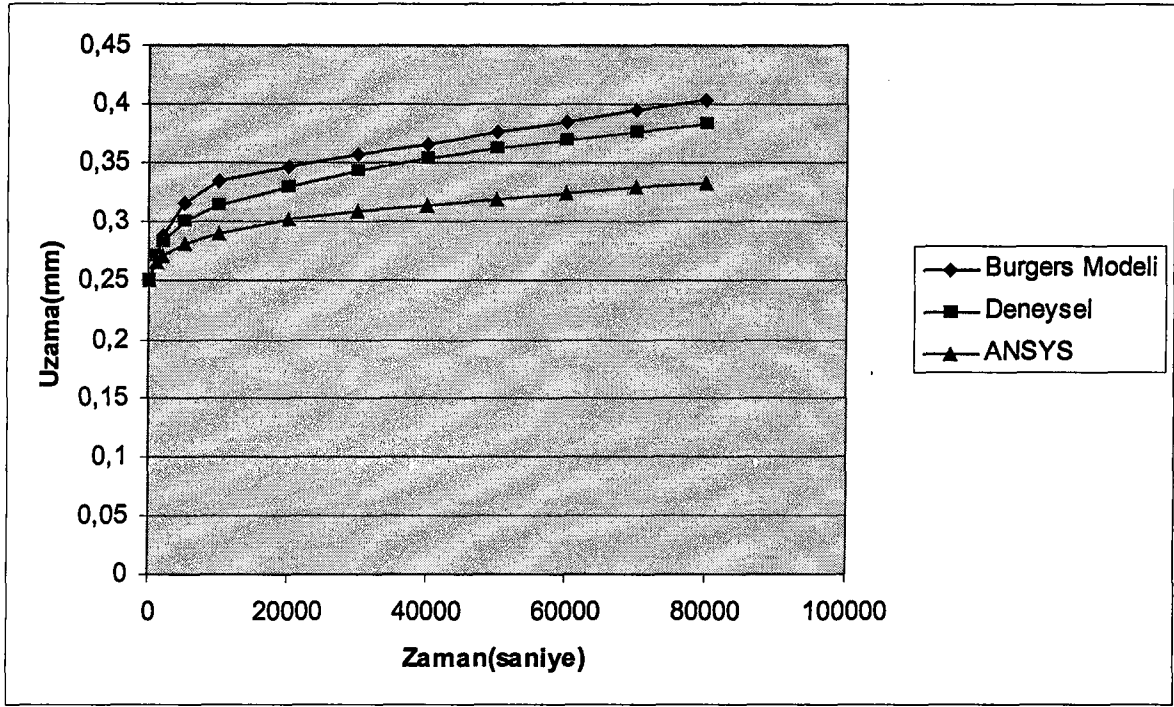
3,732 MPa için üç değerde birbirine oldukça yakın bulundu. En yakın değerler bu gerilme durumu için elde edildi(Şekil 6.2).

7,376 MPa için deney ve ANSYS sonuçları bir birine daha yakın iken, Burgers modelinden elde edilen sonuçlarda biraz sapma görüldü(Şekil 6.3). Burgers modelinden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları arasındaki sapmanın gerilme değerinin yükselmesiyle arttığı söylenebilir.

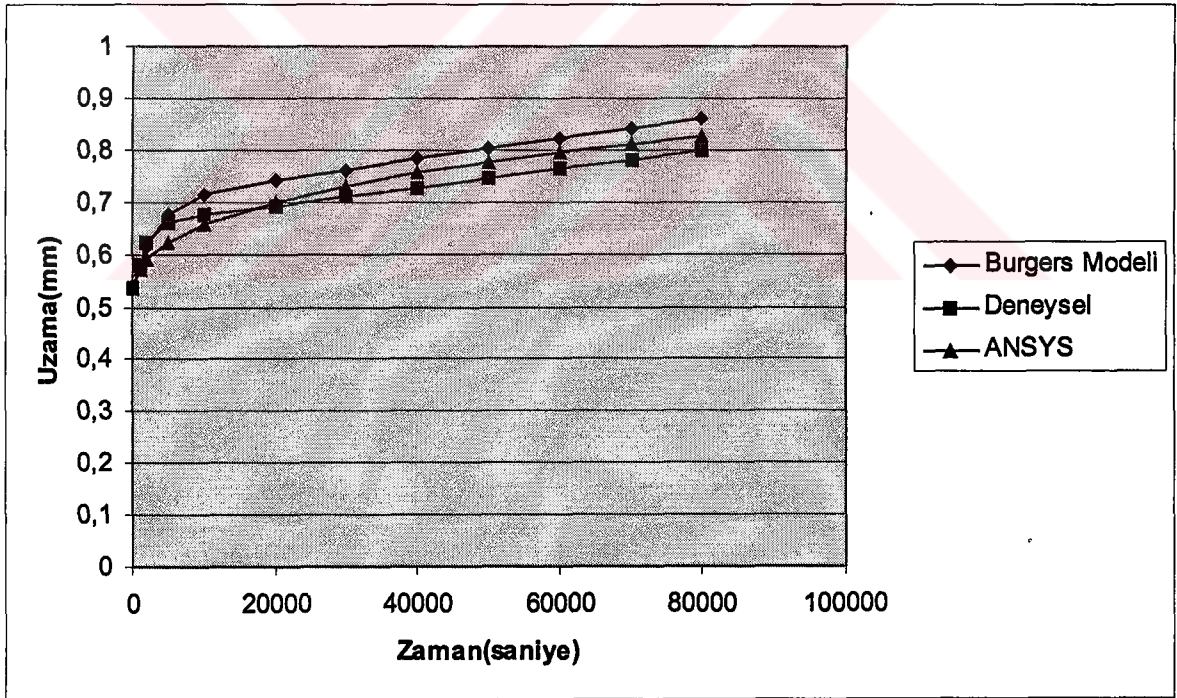
11,021 MPa lineer viskoelastik kabul edilen bölgenin dışında olduğu için üç durum içinde elde edilen sonuçlar arasında büyük fark oluşmaktadır (Şekil 6.4).

Statik durumlar için HDPE'nin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölgedeki üç gerilme durumunda elde edilen sonuçların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görüldü.

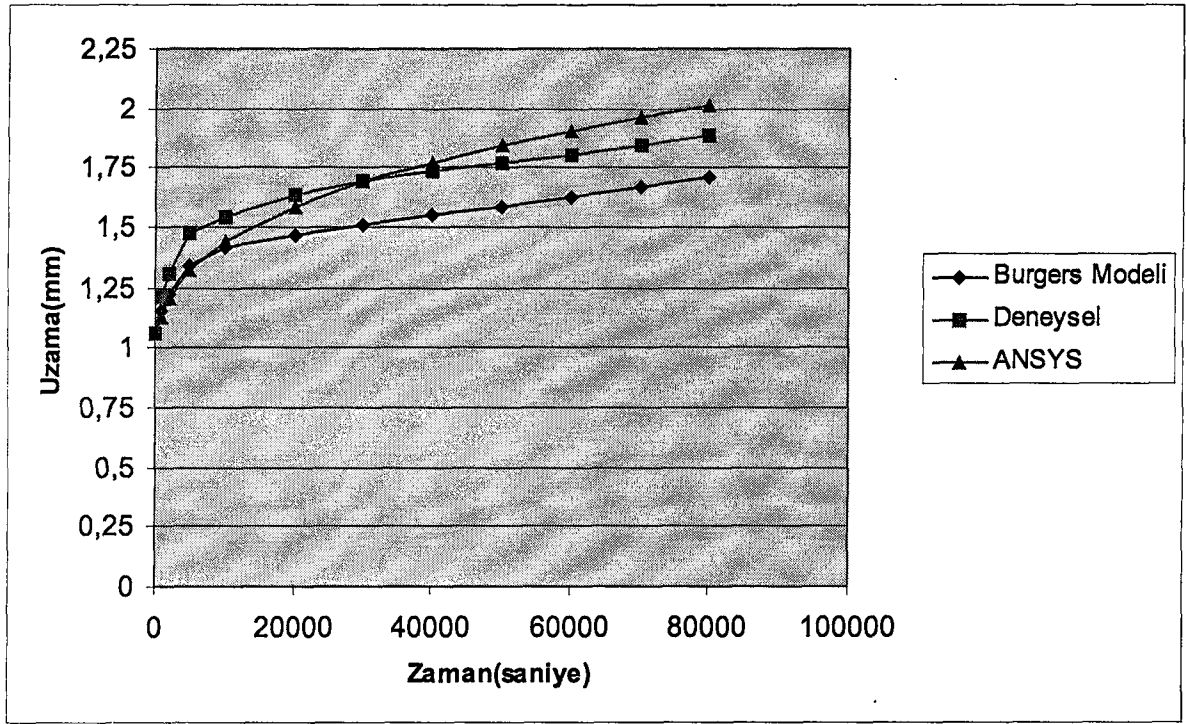
ANSYS programı ile sünme analizinin gerçekleştirilmesi için gerekli sabitler hesaplanırken, malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölgedeki üç gerilme durumu göz önüne alınarak, deney sonuçları ile daha yakın sonuçlar elde edilebilir.



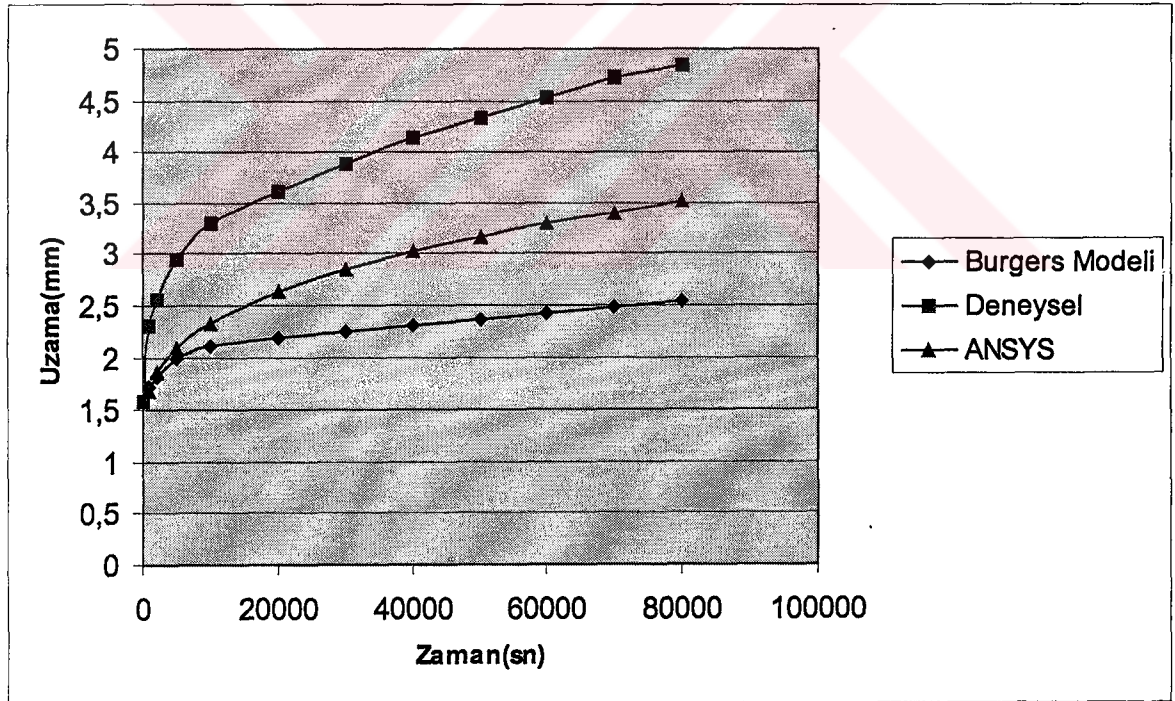
Şekil 6.1: 1,757 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.2: 3,732 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.3: 7,376 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.4: 11,021 MPa için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

6.5 Dinamik Modelleme

HDPE'nin dinamik yüklemeler altındaki davranışları öncelikle deneysel olarak incelendi. Dinamik davranışları incelemek için iki farklı deney düzeneği tasarlandı. İlk deney düzeneğinde kare dalga şeklinde bir yükleme ile numunenin belirli aralıklarla yüklü ve yüksüz kalması sağlandı. Dinamik yüklemeler malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği ve statik yükleme durumunda da kullanılan üç gerilme durumu için gerçekleştirildi. Numunenin uzama-zaman grafikleri elde edildi. Grafikler incelendiğinde numune yüke maruz kaldığında önce ani bir elastik şekil değiştirme sonra zamana bağlı devam eden sünme uzaması görüldü. Yükleme kaldırıldığında ise ilk durumun tam tersi olarak önce ani bir kısalma sonra zamana bağlı bir kısalma ve sonuçta kalıcı bir uzama görüldü. Deneye devam edildikçe sırayla bu durumlar gözlemlendi ve numunede giderek artan kalıcı uzamalar oluştu.

Dinamik davranışların incelenmesinde ikinci olarak, numuneye sinüzoidal yükleme uygulayacak bir deney düzeneği tasarlandı. Numunelere dört farklı gerilme durumu için sinüzoidal yükleme uygulandı ve uzama-zaman grafikleri elde edildi. Sinüzoidal yükleme durumunda numune sürekli yüke maruz kaldığı için kare dalga durumundan biraz farklı sonuçlar elde edildi. Giderek artan kalıcı uzamalar bu yükleme durumunda da görüldü.

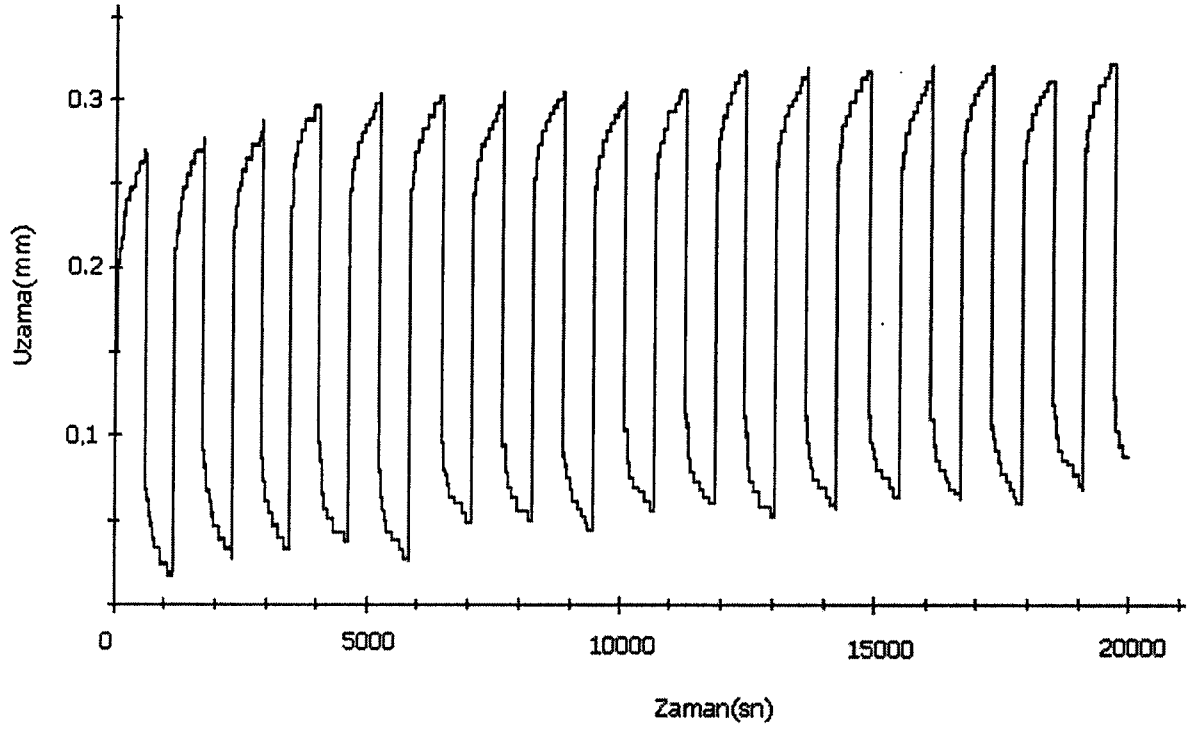
HDPE malzemenin dinamik yük durumundaki davranışlarının inceleneyeceği modelin oluşturulması, literatürde olan eksiklikten ve ilerideki çalışmalara temel oluşturacağından oldukça önemli görüldü. Dinamik davranışların modellenmesi statik durumlar için oluşturulan Burgers modelinin genel bünye denklemi yardımıyla gerçekleştirildi. Bünye denklemindeki diferansiyel denklem SIMULINK programında blok diyagram haline getirilerek çözüldü. Deney sonuçları ile modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında her iki gerilme durumu için de birbirlerine yakın sonuçlar elde edildi ve modelin doğruluğu görülmüş oldu.

Deneylerden ve modelden elde edilen sonuçlar karesel yükleme durumu için grafik olarak; Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10, çizelge olarak; Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3 ile gösterildi. Özellikle 1,757 MPa ve 3,732 MPa için deneylerden ve modelden birbirine yakın sonuçlar elde edildi. 7,376 MPa için ise deney süresinin yarısından sonra elde edilen sonuçlarda sapmalar meydana gelmiştir. Bu durumun deneysel sonuçların ölçülmesindeki hatalardan kaynaklandığı söylenebilir.

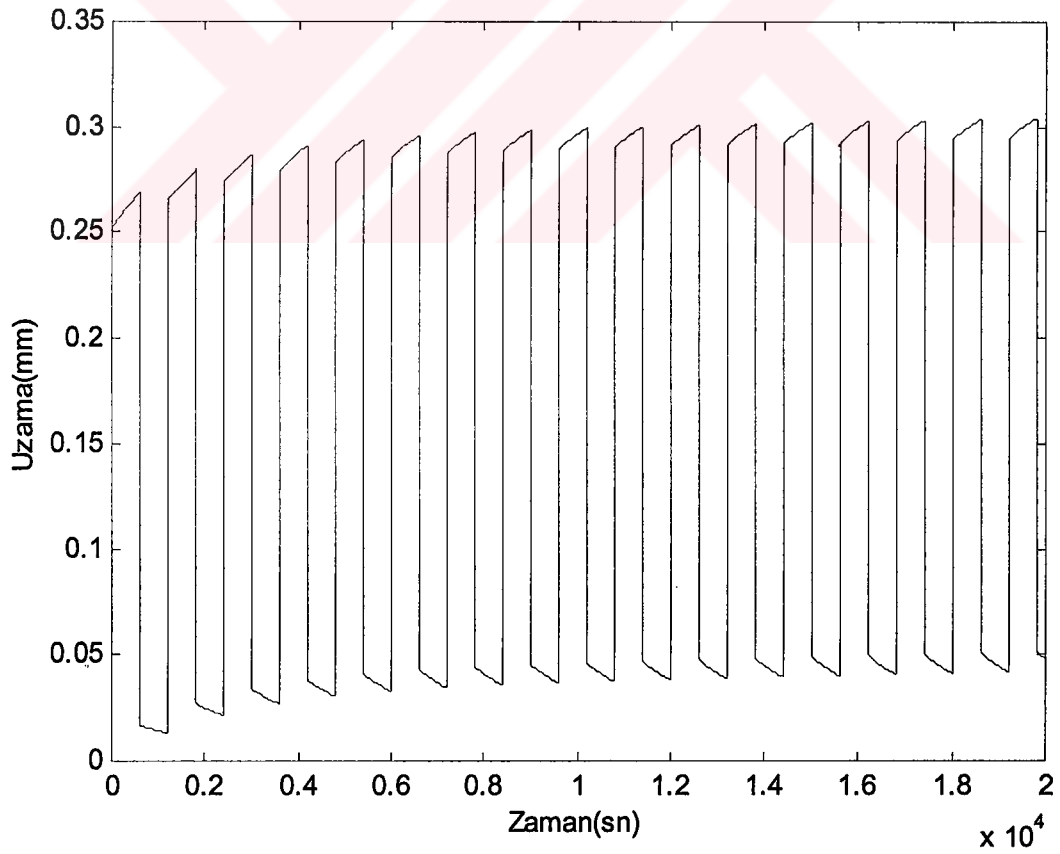
Sinüzoidal gerilme durumu için grafik olarak Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20 ve Şekil 6.21, çizelge olarak Çizelge 6.3, Çizelge 6.4, Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6 ile gösterilmiştir. Üçüncü deney koşullarında kısmen lineer viskoelastik bölgenin dışına çıkıldığı için modelden elde edilen sonuçlarla deney sonuçları arasında küçük sapmalar meydana gelmiştir. Diğer deney koşulları lineer bölgede kaldığı için deneylerden ve modelden elde edilen sonuçlar oldukça yaklaşık bulunmuştur. Özellikle sinüzoidal gerilme durumlarında, karesel gerilme durumlarına göre modelden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sinüzoidal durum için oluşturulan dinamik model ile malzemenin iç sönümünü gösteren gerilme-uzama grafikleri elde edildi. Bu grafikler incelendiğinde gerilme aralığı sabit kalırken kalıcı uzamalardan dolayı meydana gelen durum daha iyi görüldü.

Statik ve dinamik durumlar için deneysel, analitik ve nümerik olarak elde edilen sonuçların birbirini tamamlamasıyla oluşturulan modelin ve izlenen yöntemin doğruluğu görülmüştür. Bu model, HDPE ile benzer ortamlar için gerçekleştirilecek çalışmalarda kullanılabilir. Özellikle oluşturulan modelin dinamik durumlar için de doğru sonuçlar vermesi plastik HDPE boruların dinamik yüklemeler altındaki davranışlarının incelenmesinde kolaylıklar sağlayabilir.



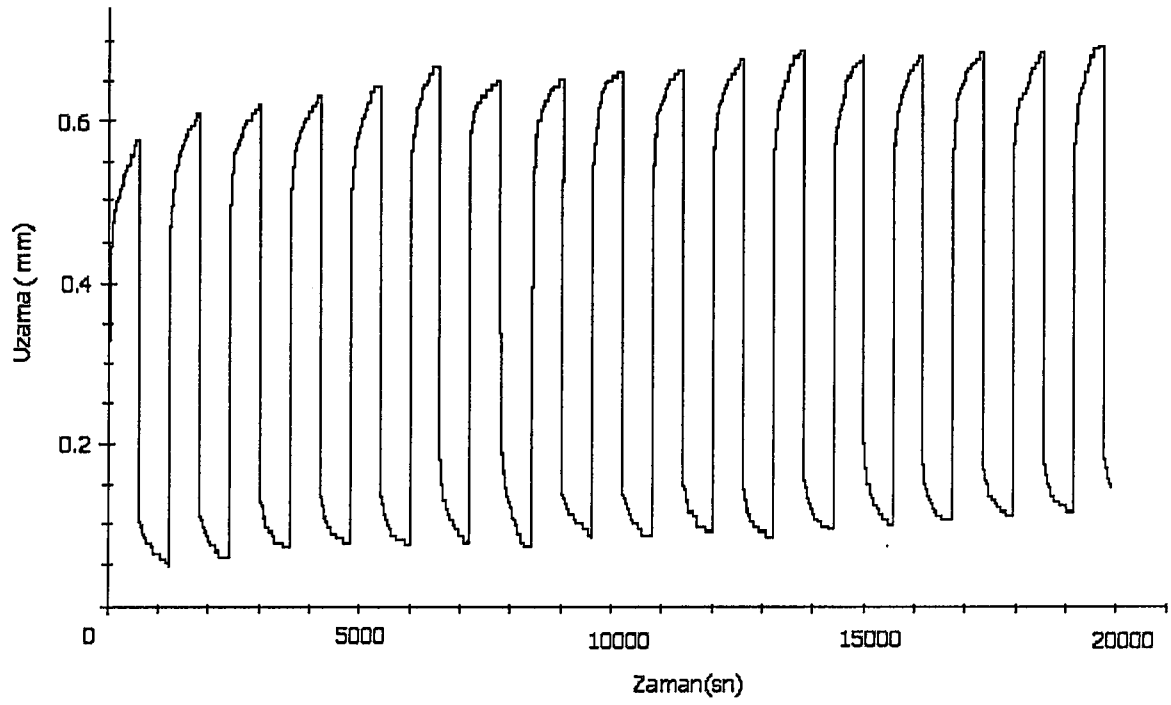
Şekil 6.5: 1,757 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(deneysel)



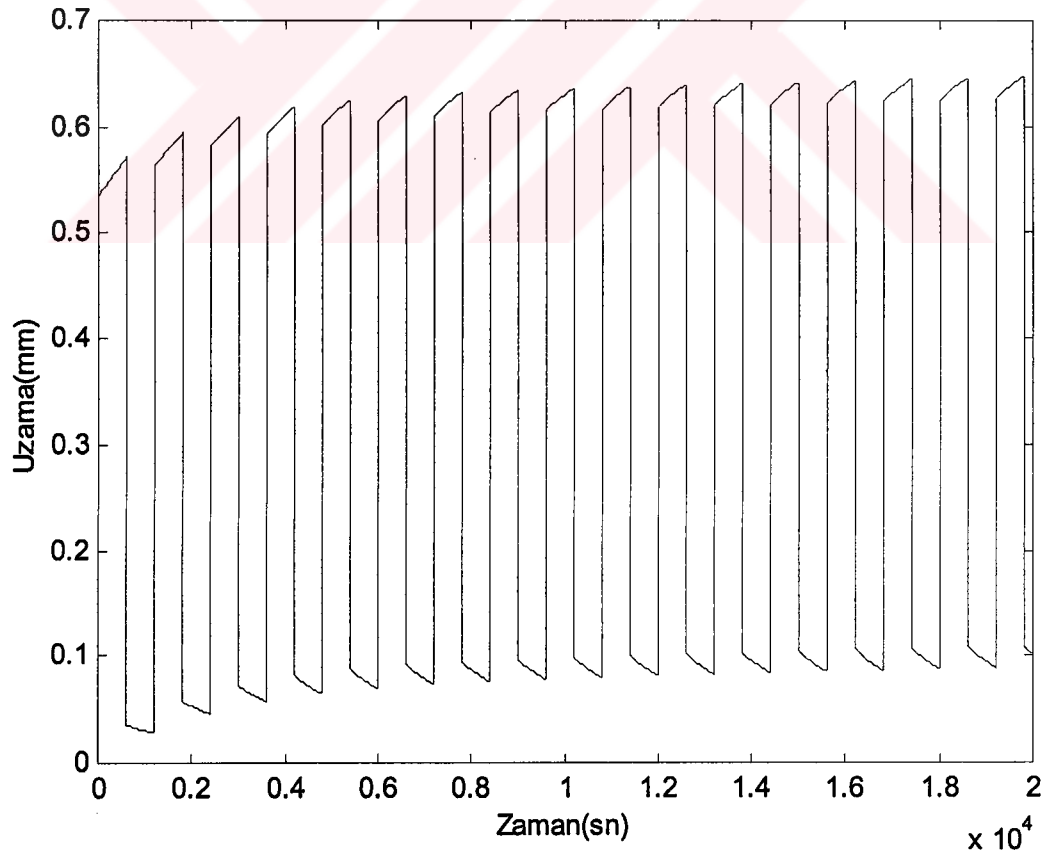
Şekil 6.6 1,757 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(analitik)

Çizelge 6.1 1,757 MPa gerilme altında deneysel ve dinamik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Zaman(saniye)	Deneysel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
600	0,271	0,269
1200	0,018	0,013
1800	0,277	0,280
2400	0,027	0,021
3000	0,287	0,286
3600	0,033	0,027
4200	0,296	0,291
4800	0,037	0,031
5400	0,304	0,294
6000	0,027	0,033
6600	0,304	0,296
7200	0,050	0,035
7800	0,305	0,297
8400	0,050	0,036
9000	0,305	0,298
9600	0,044	0,037
10200	0,305	0,299
10800	0,056	0,038
11400	0,306	0,300
12000	0,060	0,038
12600	0,318	0,301
13200	0,052	0,039
13800	0,320	0,301
14400	0,057	0,040
15000	0,317	0,302
15600	0,063	0,040
16200	0,322	0,302
16800	0,061	0,041
17400	0,322	0,303
18000	0,060	0,041
18600	0,311	0,303
19200	0,067	0,042
19800	0,323	0,304



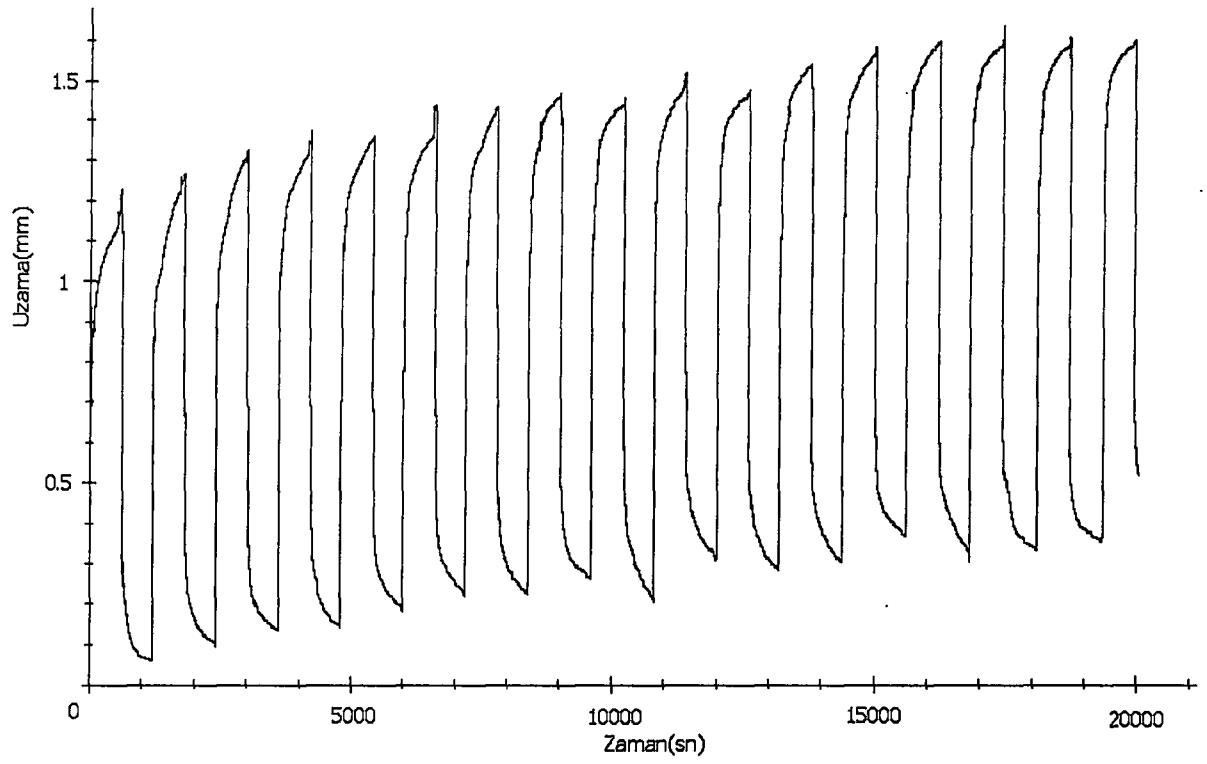
Şekil 6.7: 3,732 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(deneysel)



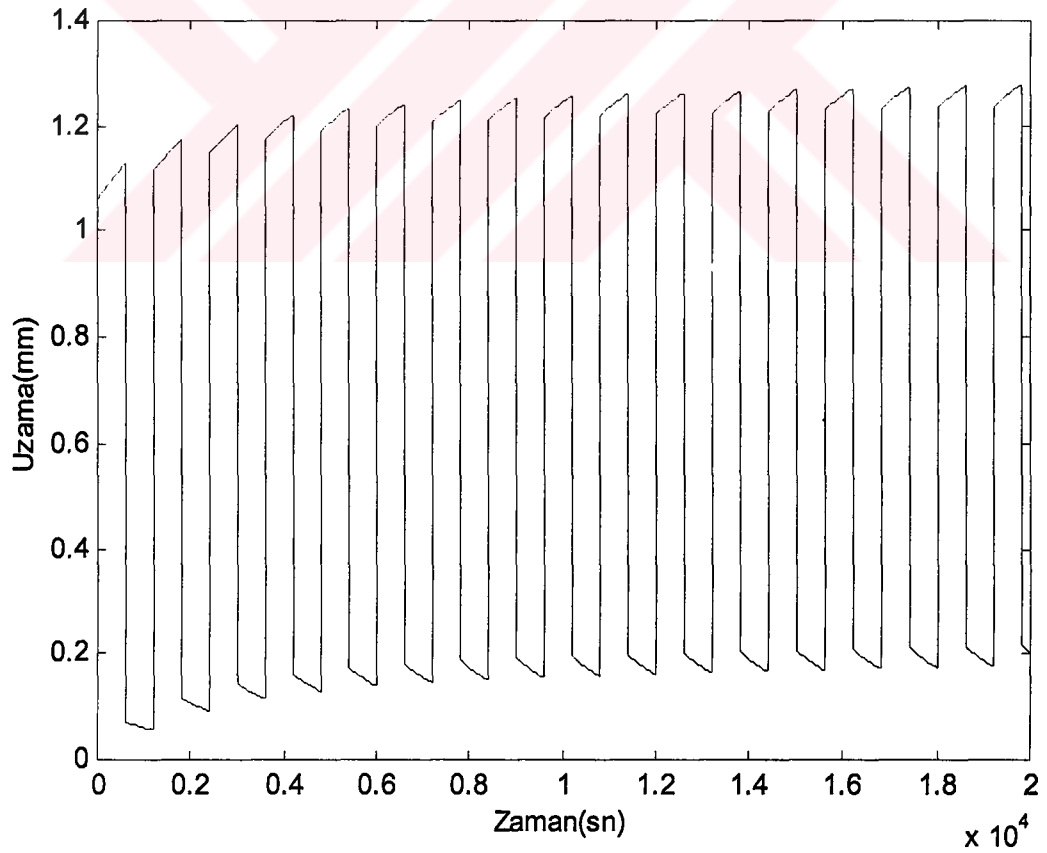
Şekil 6.8: 3,732 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(analitik)

Çizelge 6.2 3,732 MPa gerilme altında deneysel ve dinamik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Zaman (saniye)	Deneysel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
600	0,576	0,572
1200	0,046	0,028
1800	0,609	0,595
2400	0,059	0,046
3000	0,619	0,609
3600	0,072	0,057
4200	0,630	0,618
4800	0,076	0,065
5400	0,641	0,624
6000	0,074	0,070
6600	0,665	0,628
7200	0,074	0,073
7800	0,647	0,631
8400	0,072	0,076
9000	0,650	0,634
9600	0,080	0,078
10200	0,659	0,636
10800	0,084	0,080
11400	0,661	0,637
12000	0,089	0,082
12600	0,673	0,639
13200	0,083	0,083
13800	0,685	0,640
14400	0,093	0,084
15000	0,678	0,641
15600	0,097	0,086
16200	0,678	0,643
16800	0,104	0,087
17400	0,682	0,644
18000	0,108	0,088
18600	0,682	0,645
19200	0,113	0,089
19800	0,691	0,646



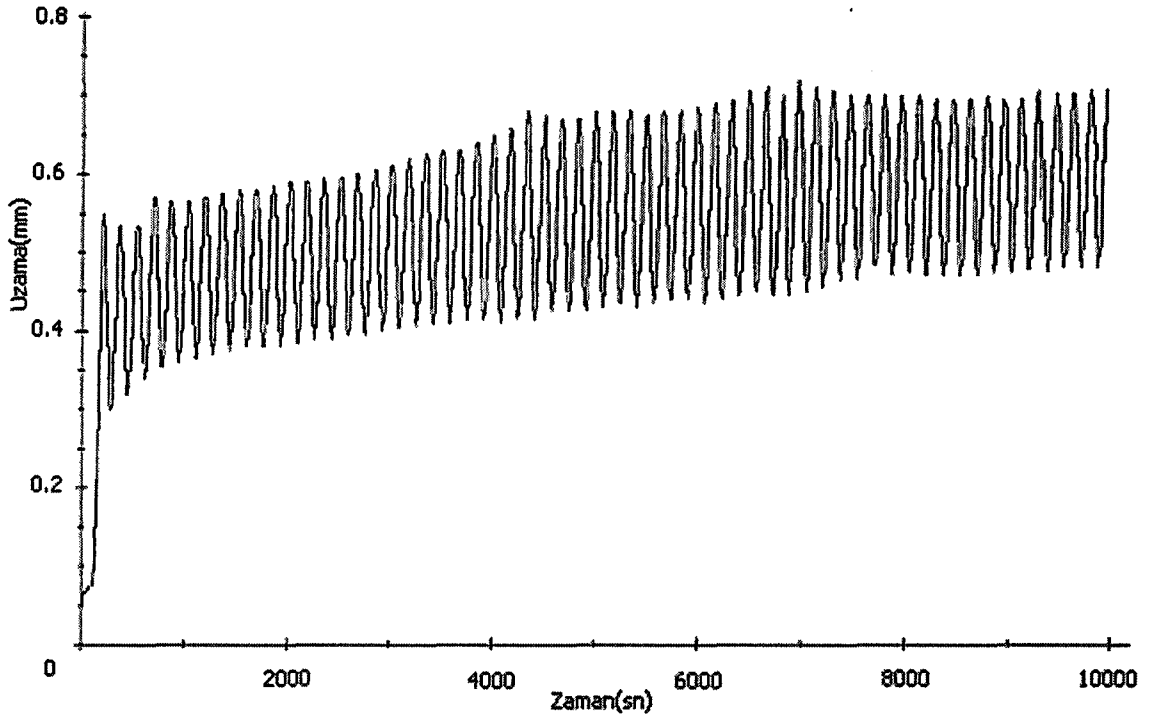
Şekil 6.9: 7,376 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(deneysel)



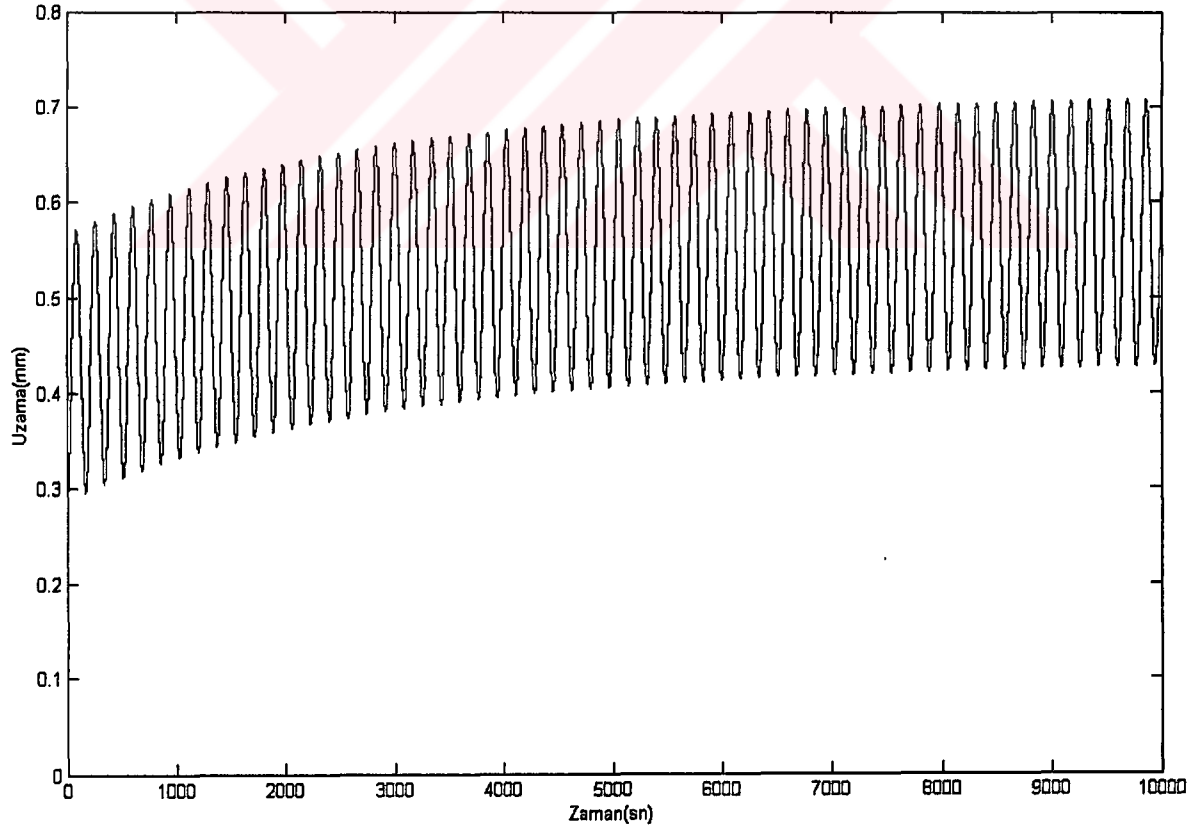
Şekil 6.10: 7,376 MPa'lık karesel gerilme altındaki numunenin uzama-zaman grafiği(analitik)

Çizelge 6.3 7,376 MPa gerilme altında deneysel ve dinamik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

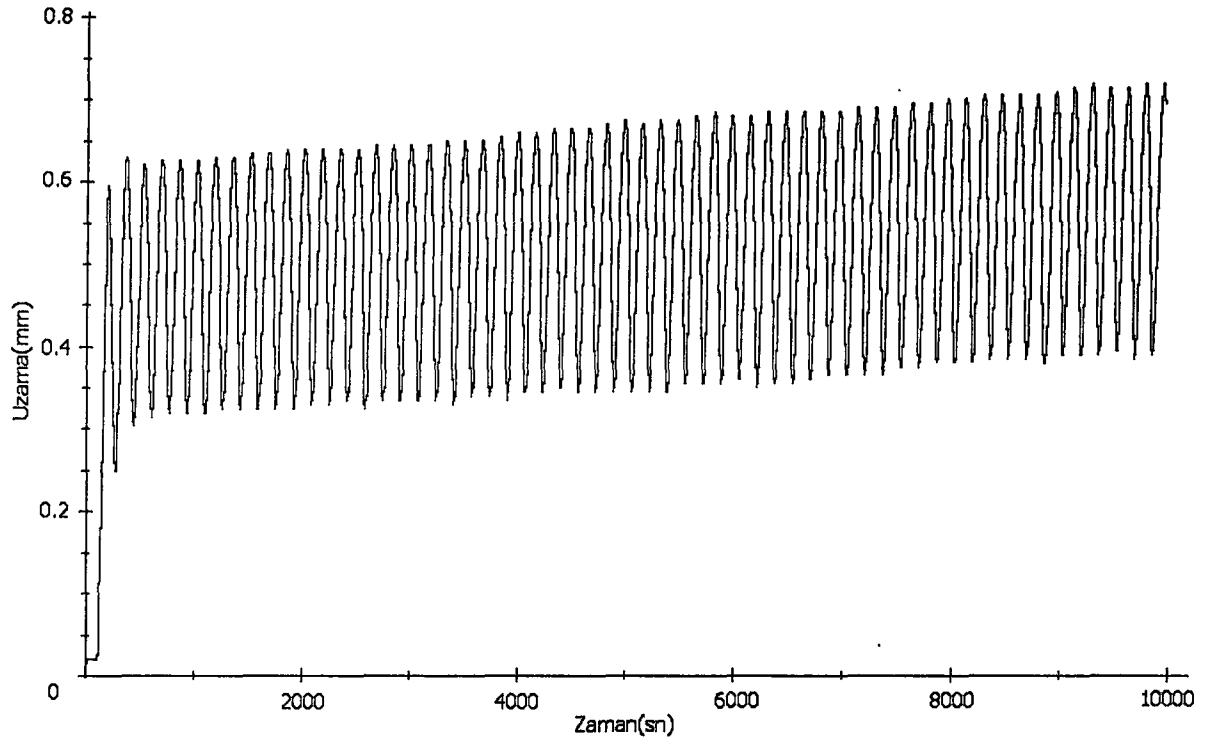
Zaman (saniye)	Deneysel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
600	1.228	1.131
1200	0.62	0.056
1800	1.265	1.175
2400	0.93	0.091
3000	1.324	1.203
3600	0.128	0.113
4200	1.372	1.221
4800	0.138	0.128
5400	1.358	1.233
6000	0.142	0.138
6600	1.431	1.242
7200	0.210	0.145
7800	1.431	1.248
8400	0.210	0.150
9000	1.465	1.253
9600	0.255	0.154
10200	1.451	1.256
10800	0.200	0.158
11400	1.510	1.259
12000	0.300	0.161
12600	1.472	1.262
13200	0.252	0.164
13800	1.534	1.265
14400	0.296	0.166
15000	1.575	1.268
15600	0.359	0.169
16200	1.589	1.271
16800	0.293	0.172
17400	1.625	1.273
18000	0.321	0.174
18600	1.596	1.275
19200	0.341	0.176
19800	1.595	1.277



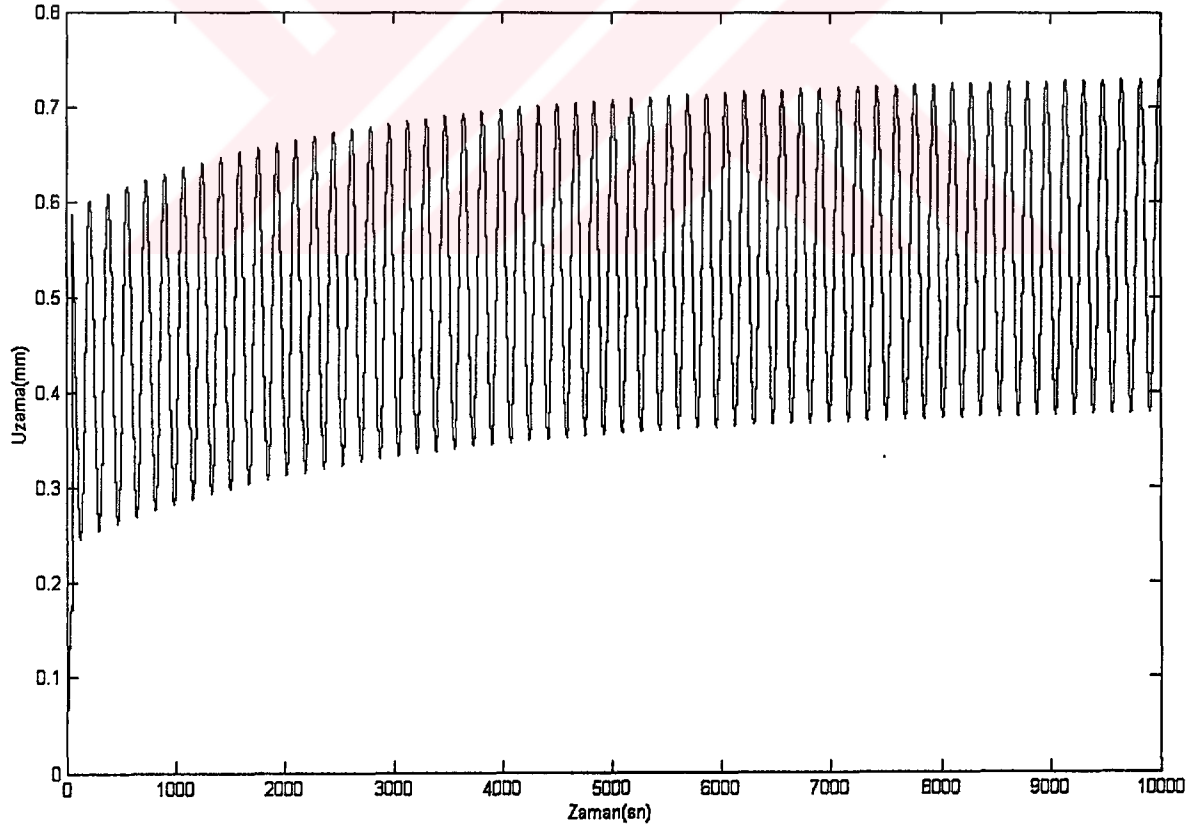
Şekil 6.11 Birinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama



Şekil 6.12 Birinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama



Şekil 6.13 İkinci deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama



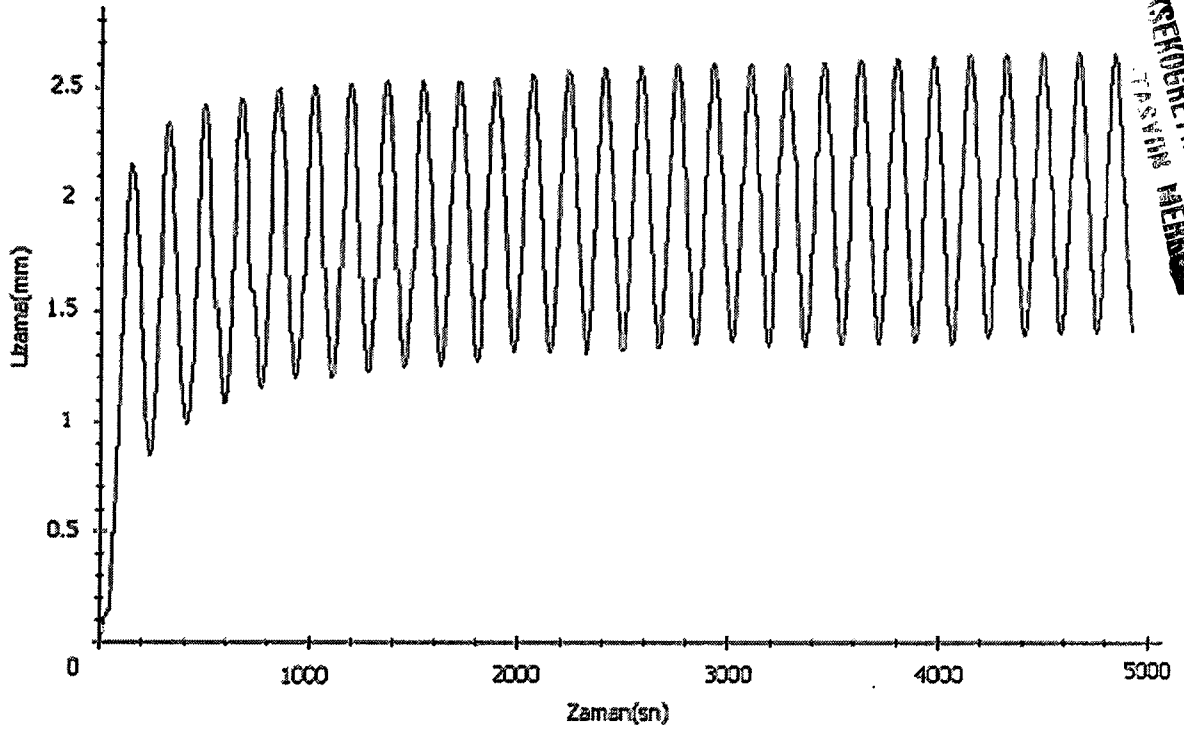
Şekil 6.14 İkinci deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama

Çizelge 6.4 Sinüzoidal birinci deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

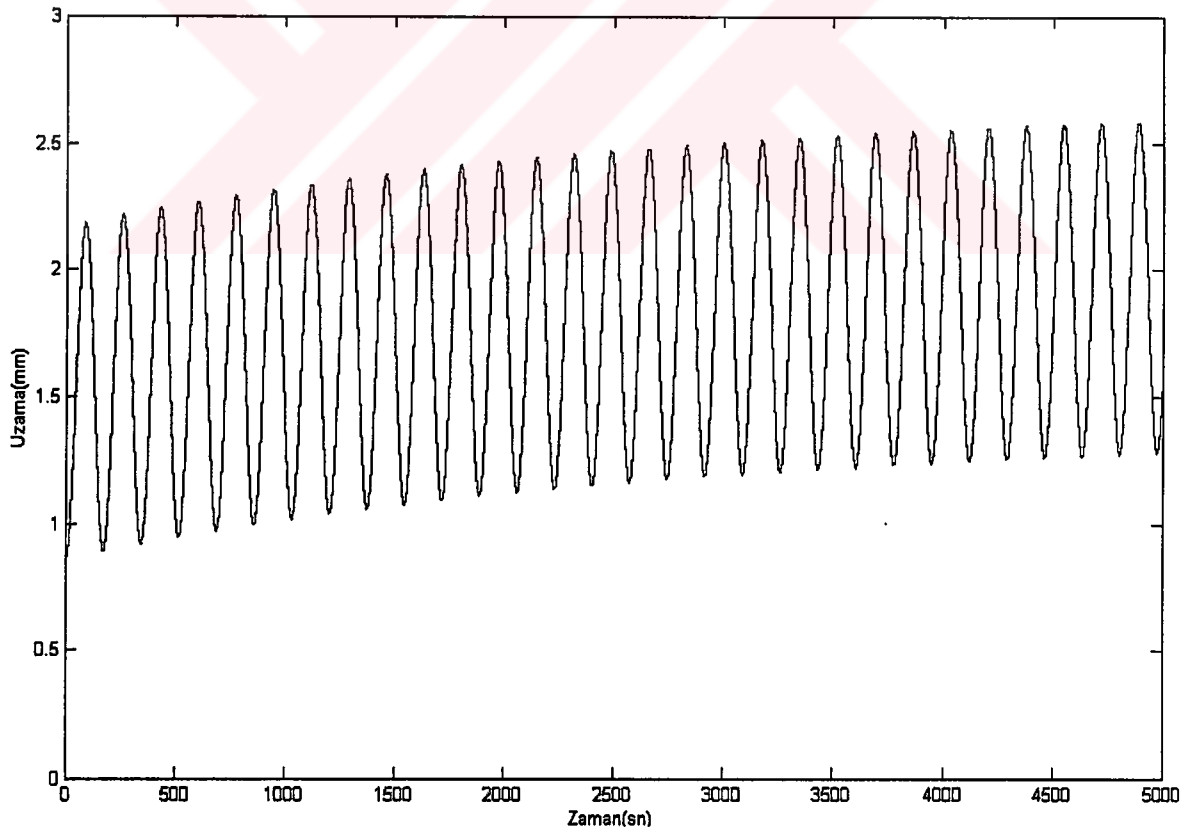
Zaman (saniye)	Deneyisel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
173	0.300	0.296
259	0.535	0.580
774	0.566	0.603
859	0.360	0.326
1631	0.580	0.631
1717	0.380	0.354
2489	0.600	0.652
2574	0.395	0.374
4289	0.415	0.399
5747	0.680	0.691
6176	0.435	0.414
8148	0.705	0.703
8405	0.460	0.424
9863	0.710	0.708

Çizelge 6.5 Sinüzoidal ikinci deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

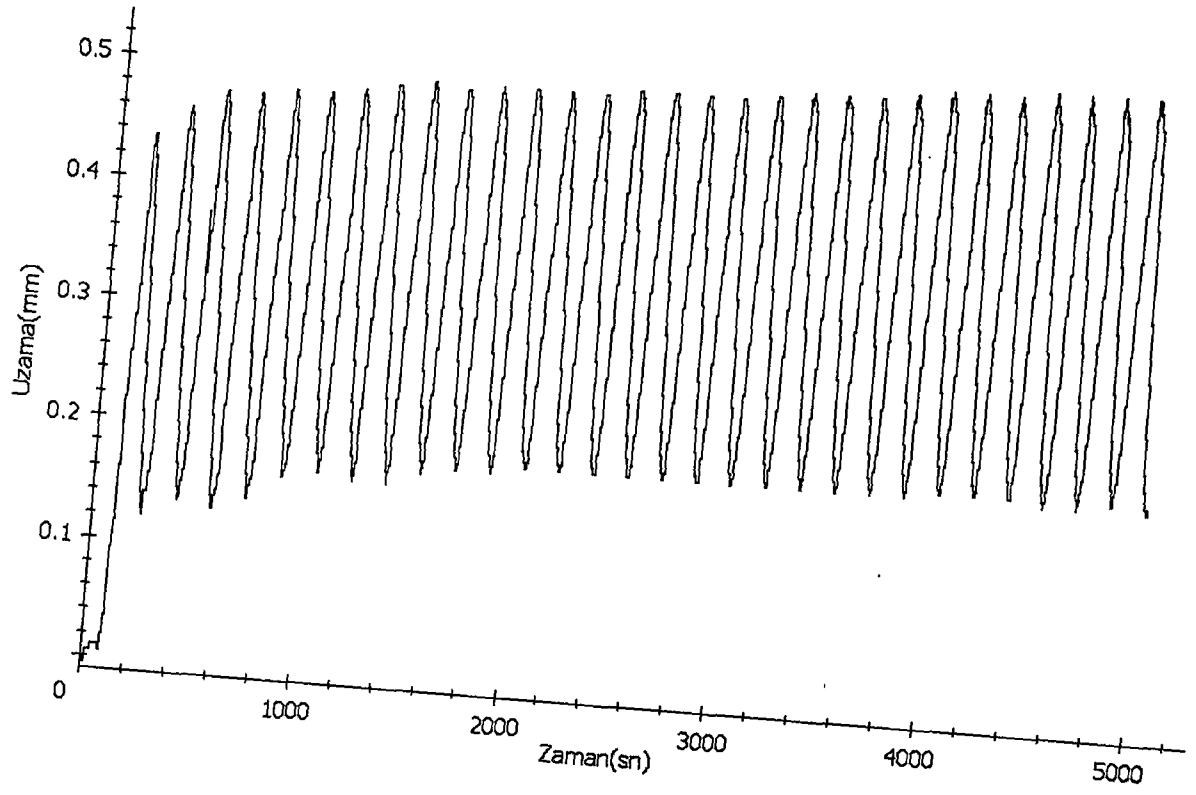
Zaman (saniye)	Deneyisel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
173	0.292	0.251
259	0.595	0.604
774	0.625	0.626
859	0.320	0.280
1631	0.635	0.653
1717	0.325	0.307
2489	0.640	0.673
2574	0.335	0.327
4289	0.350	0.351
5747	0.685	0.712
6176	0.355	0.365
8148	0.705	0.723
8405	0.385	0.375
9863	0.705	0.728



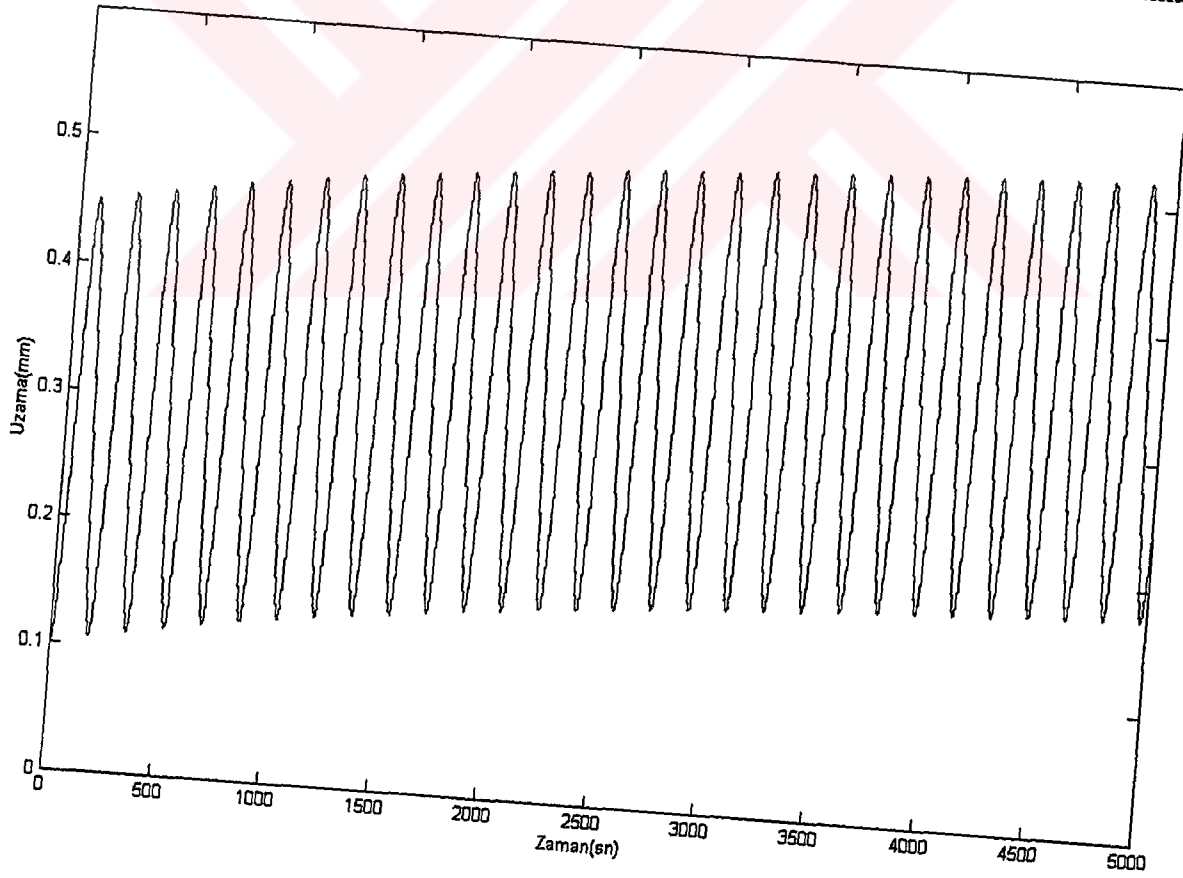
Şekil 6.15 Üçüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama



Şekil 6.16 Üçüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama



Şekil 6.17 Dördüncü deneyde numune üzerinde zamana bağlı oluşan sinüzoidal uzama



Şekil 6.18 Dördüncü deney durumu için matematik modelden elde edilen zamana bağlı uzama

Çizelge 6.6 Sinüzoidal üçüncü deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Zaman (saniye)	Deneyisel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
173	0.860	0.891
259	2.355	2.217
688	1.165	973
774	2.505	2.297
1288	2.525	2.361
1374	1.225	1.060
1631	2.525	2.398
1717	1.280	1.095
2489	2.600	2.471
2574	1.320	1.166
3432	1.350	1.218
4204	2.650	2.563
4289	1.350	1.255
4889	2.660	2.587

Çizelge 6.7 Sinüzoidal dördüncü deney için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Zaman (saniye)	Deneyisel Sonuç (milimetre)	Modelden Elde Edilen Sonuç (milimetre)
173	0.120	0.106
259	0.460	0.454
688	0.140	0.121
774	0.480	0.469
1288	0.490	0.480
1374	0.160	0.136
1631	0.490	0.487
1717	0.175	0.143
2489	0.500	0.500
2574	0.180	0.156
3432	0.180	0.165
4204	0.520	0.517
4289	0.185	0.172
4889	0.525	0.521

6.6 Öneriler

Bu çalışmada boru üretiminde kullanılan HDPE'nin statik ve dinamik yükleme koşullarındaki davranışları lineer viskoelastik olarak modellenmiştir.

Başlangıçta amaçlanan ama literatürde yeterli çalışma olmaması sebebiyle öncelikle HDPE'nin fiziksel özelliklerinin zamana bağlı davranışlarının modellenmesine kayan çalışmanın devamı olarak, minimum malzeme kullanılarak yeterli dayanıma sahip boru üretilmesi (optimizasyon) işleminde elde edilen model temel oluşturabilir.

HDPE boruların dinamik yüklemeler altındaki davranışları elde edilen model temel alınarak incelenebilir.

Yüksek veya düşük sıcaklık durumlarında HDPE malzemenin nasıl davranışlar göstereceği bu çalışmada izlenen yöntemle incelenip matematik modelleri oluşturulabilir.

Polipropilen(PP) ya da polivinilklorür(PVC) gibi değişik plastik malzemeler için benzer yöntemle çalışmalar yapıp gerekli matematik modeller oluşturulabilir.

Yine plastik esaslı ancak metal lifli kompozit malzemelerin boru malzemesi olarak seçilmesi halinde nasıl davranacakları ileride yapılabilecek ilginç bir çalışma konusu olabilir.

KAYNAKLAR

- Adams D. N., Muindi T. ve Selig E. T., (1989), "Polyethylene Pipe Under High Fill", Transportation Research Record, 1231: 88-95.
- Akkurt M., Kent M., (1986), "Makina Elemanları", Birsen Yayınevi, İstanbul
- Akyüz S., (2001), Viskoelastisite Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Akyüz S., Pekmezci B. Y., Karaoğlu T., (2001), "Eskiye Bir Malzeme Olan Betonun Sünme ve Gevşeme Fonksiyonları", XII. Ulusal Mekanik Kongresi, 10-14 Eylül 2001, Konya.
- Al-Khoury R., Scarpas A., Kasbergen C. ve Blaauwendraad J., (2002) "Spectral Element Technique for Efficient Parameter Identification of Layered Media, Part III : Viscoelastic Aspects", International Journal of Nonlinear Mechanics, 39: 2189-2201.
- ANSYS Design and Analysis Program Help File.
- Bonner M., Duckett A. ve Ward I. M., (1999), "The Creep Behaviour of Isotropic Polyethylene", Journal of Materials Science, 34: 1885-1897.
- Christensen R. M., (1971), Theory of Viscoelasticity, Academic Press, Newyork.
- Chua K. M., (1986), Time-Dependent Interaction of Soil and Flexible Pipe, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Texas A&M University, USA.
- Chua K. M. ve Lytton R. L., (1987), "A Method of Time Dependent Analysis Using Elastic Solutions for Nonlinear Materials", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 11: 421-431.
- Chunduru S., Barber M. E. ve Bakeer R. M., (1996), "Buckling Behavior of Polyethylene Liner System", Journal of Materials in Civil Engineering, 8(4): 201-206.
- Claudio J. M., Guillermo A. C., Enrique M. V., Marcelo D. F. ve Lidia M. Q., (2002), "Rheological Study of Linear High Density Polyethylenes Modified with Organic Peroxide, Polymer, 43: 2711-2720.
- Corrugated Polyethylene Pipe Association (CPPA), (2000), Structural Design Method Book, USA.
- Dougherty D. J.,(1995), "Thermoplastic Creep Analysis Using Resin Manufacturer's Creep Modulus Data for Thermoplastic Joints", International Ansys Symposium, 359-370.
- Drozdov A. D., (1998), Mechanics of Viscoelastic Solids, John Wiley&Sons, Newyork.
- Drozdov A. D. ve Yuan Q., (2003), "The Viscoelastic and Viscoplastic Behavior of Low Density Polyethylene", International Journal of Solids and Structures, 40(10): 2321-2342.
- Findley W. N., Lai J. S. ve Onaran K.,(1976), Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials, Dover Publications,Inc., Newyork.
- Flügge W., (1967), Viscoelasticity, Blaisdell Publishing Company, Waltham,Massachusetts
- Hashash N. M. A., (1991), Design and Analysis of Deeply Buried Polyethylene Drainage Pipes, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, The University of Massachusetts at Amherst, USA.
- Haupt P., Lion A. ve Backhaus E., (2000), "On the Dynamic Behaviour of Polymers under

Finite Strains: Constitutive Modelling and Identification of Parameters”, *International Journal of Solids and Structures*, 37: 1147-1161.

Hoch A., Zanzinger H. ve Gartung E., (1990), “Design of Drainage Pipes Below Landfills”, *Pipeline Design and Installation*, 546-556.

Hurd J. O., (1986), “Field Performance of Corrugated Polyethylene Pipe”, *Transportation Research Record*, 1087: 1-6.

Hurd J. O., (1987), “Field Performance of Corrugated Polyethylene Pipe”, *Public Works*, 118(10): 67-69.

Janson L. E., (1995), *Plastic Pipes for Water Supply and Sewage Disposal*, Borealis, Stockholm.

Jo N., Takahara A. ve Kajiyama T., (1997), “Effect of Aggregation Structure on Non-linear Dynamic Viscoelastic Characteristics of Oriented High Density Polyethylenes under Cyclic Fatigue”, 38(20): 5195-5201.

Johnson A. R., (1999), “Modeling Viscoelastic Materials Using Internal Variables”, *The Shock and Vibration Digest*, 31(2), 91-100.

Jung W. Y. ve Aref A. J., (2003), “A Honeycomb and Solid Viscoelastic for Structural Damping Applications”, *Mechanics of Materials*, 35: 833-844.

Katona M. G., (1988), “Allowable Fill Heights for Corrugated Polyethylene Pipe”, *Transportation Research Record*, 1191: 30-38.

Khan A. ve Zhang H., (2001), “Finite Deformation of a Polymer Experiments and Modeling”, *International Journal of Plasticity*, 17: 1167-1188.

Kienow K. K. ve Prevost R. C., (1989), “Pipe/Soil Stiffness Ratio Effect on Flexible Pipe Buckling Threshold”, *Journal of Transportation Engineering*, 115(2): 112-129.

Lai J. ve Bakker A., (1995), “Analysis of the Non-linear Creep of High Density Polyethylene”, *Polymer*, 36: 93-99.

Mano J. F., Sousa R. A., Reis R. L., Cunha A. M. ve Bevis M. J., (2001), “Viscoelastic Behaviour and Time-temperature Correspondence of HDPE with varying Levels of Process-induced Orientation”, *Polymer*, 42: 6187-6198

Marynowski K. ve Kapitaniak T., (2002), “Kelvin-Voight versus Burgers Internal Damping in Modeling of Axially Moving Viscoelastic Web”, *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 37: 1147-1161.

McGrath T. J., Selig E. T. ve DiFrancesco L. C., (1994), “Stiffness of HDPE Pipe in Ring Bending”, *ASTM Buried Plastic Pipe Technology 2nd volume*, pp195-205.

Moore I. D., (1994), “Three-Dimensional Analysis of Flexible Circular Culverts”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(10): 1829-1844.

Moore I. D., (1994), “Local Strain in Corrugated Pipe: Experimental Measurements to Test a Numerical Model”, *Journal of Testing and Evaluation*, 22(2), 132-138.

Moore I. D., (1995a), “Three Dimensional Response of Deeply Buried Profiled Polyethylene Pipe”, *Transportation Research Record*, 1514: 29-36.

- Moore I. D. ve Hu F., (1995b), "Response of Profiled High Density Polyethylene Pipe in Hoop Compression", *Transportation Research Record*, 1514: 49-58.
- Moore I. D. ve Booker J. R., (1985), "Simplified Theory for the Behavior of Buried Flexible Cylinders Under the Influence of Uniform Hoop Compression", *International Journal of Solids and Structures*, 21(9): 929-941.
- Moore I. D., (1989), "Elastic Buckling of Buried Flexible Tubes- A Review of Theory and Experiment", *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(3): 340-358.
- Moore I. D. ve Zhang C., (1997), "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part I: Experimental Investigation and Model Evaluation – Part II: Uniaxial Constitutive Modeling", *Polymer Engineering and Science*, 37(2): 404-420.
- Moser A. P., (1998), "Structural Performance of Buried Profile-Wall High-Density Polyethylene Pipe and Influence of Pipe Wall Geometry", *Transportation Research Record*, 1624: 206-213.
- Nikolov S. ve Doghri I., (2000), "A Micro/Macro Constitutive Model for the Small-deformation Behaviour Polyethylene", *Polymer*, 41:1883-1991.
- Osanaiye G. ve Adewale K. P., (2001), "Creep and Recovery of EPDM Elastomer Using a Modified Sandwich Rheometer", *Polymer Testing*, 20: 363-370.
- Petroff L. J., (1990), "Stress Relaxation Characteristics of the HDPE Pipe Soil System", *Pipeline Design and Installation*, 281-294.
- Prevost R. C. ve Kienow K. K., (1991), "Basics of Flexible Pipe Structural Design", *Journal of Transportation Engineering*, 120(4): 652-670.
- Prevost R. C., (1990), "Flexible Pipe Design Revisited", *Pipeline Design and Installation*, 363-382.
- Reese S. ve Govindjee S., (1998), "A Theory of Finite Viscoelasticity and Numerical Aspects", *International Journal of Solids and Structures*, 35: 3455-3482.
- Schrock B. J., (1990), "Technical Work on Flexible Pipe/Soil Interaction Overview", *Pipeline Design and Installation*, 351-361.
- Selig E. T., DiFrancesco L. C. ve McGrath T. J., (1994), "Laboratory Test of Buried Pipe in Hoop Compression", *ASTM Buried Plastic Pipe Technology 2nd volume*, 119-132.
- Souza A. M. ve Demarquette N. R., (2002), "Influence of Composition on the Linear Viscoelastic Behaviour and Morphology of PP/HDPE Blends", *Polymer*, 43:1313-1321.
- Tahralı N., Kaya F., Yüksek İ. ve Güçlü R., 2000, "Makina Dinamiği", YTÜ Matbaası, İstanbul
- Tameroğlu S.,(1991), *Elastisite Teorisi*, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- Timoshenko S. P. ve Goodier J. N.,(1996), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill.
- Tullis J. P., Watkins R. K. ve Barfuss S. L., (1990), "Innovative New Drainage Pipe", *Pipeline Design and Installation*, 149-159.
- Trantina G. G., (1986), "Creep Analysis of Polymer Structures", *Polymer Engineering and Science*, 26(11), n11: 776-780

Zhu S. J., Weng X. T. ve Chen G., (2003), "Modelling of the Stiffness of Elastic Body", Journal of Sound and Vibration, 262: 1-9.

Zhang C. ve Moore I. D., (1998), "Nonlinear Finite Element Analysis for Thermoplastic Pipes", Transportation Research Record, 1624: 225-230.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	07.08.1972	
Doğum yeri	Eskişehir	
Lise	1986-1990	Eskişehir Yunusemre Teknik Lisesi
Lisans	1990-1995	İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1995-1998	İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Makina Teorisi ve Kontrol Programı
Doktora	1998-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1996-Devam ediyor YTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, Makina Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi

