

## ANALYSIS OF CREEP BEHAVIOR OF POLYETHYLEN MATERIAL USED IN PLASTIC PIPE MANUFACTURING

**Semih SEZER\***

*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

**Geliş/Received: 09.03.2004 Kabul/Accepted: 02.09.2004**

---

### ABSTRACT

Plastic pipe usage and production have become widespread with developments in technology and plastic materials. Accordingly, plastic pipes are of vital importance in terms of engineering problems. The behavior of pipes is dependent on the behaviour of their constituents. In general, physical properties of plastic materials can change by the time since they have viscoelastic properties. In this study, experimental studies have been performed to characterize viscoelastic properties of polyethylene material, mostly used in plastic pipe production. Due to the importance of creep behaviour, creep experiments have realized. Creep experiments are also simulated 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 these data.

**Keywords:** Creep, viscoelasticity, finite element analysis, polyethylene

### PLASTİK BORU ÜRETİMİNDE KULLANILAN POLİETİLEN MALZEMENİN SÜNME DAVRANIŞLARININ ANALİZİ

#### ÖZET

Plastik malzemelerde ve teknolojiye meydana gelen gelişmelerle birlikte plastik boru kullanımı ve üretimi giderek yaygınlaşmaktadır. Mühendislik problemleri açısından plastik boruların önemi de artmaktadır. Boruların davranışları üretildiği malzemenin davranışlarına bağlıdır. Plastik malzemeler genelde viskoelastik özelliklere sahip olduğu için fiziksel özellikleri zamana bağlıdır. Bu çalışmada, plastik boru üretiminde çok kullanılan polietilen malzemenin viskoelastik özelliklerini karakterize edebilmek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sünme davranışlarının öneminden dolayı sünme deneyleri gerçekleştirildi. Sünme deneyleri sonlu eleman analiz programı ANSYS yardımı ile de teyit edildi. Sünme deneylerinin gerçekleştirildiği numunelerin sonlu eleman modeli sınır şartlarını da içerecek şekilde programlandı. Sünme analizini gerçekleştirebilmek için ANSYS'e girilmesi gereken sabitler deney sonuçlarına bağlı olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Sünme, viskoelastisite, sonlu eleman analizi, polietilen

---

## 1. GİRİŞ

Plastik üretim teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak plastik malzemelerin kullanım alanları da genişlemektedir. Yoğunluklarının düşük olması, kimyasal maddelere ve korozyona dayanıklı

---

\* e-mail: sezer@yildiz.edu.tr , Tel: (0212) 259 7070/2510

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 kullanım alanlarına göre statik ve dinamik yüklemelere maruz kalabilirler. Bu yükleme durumlarında, boru malzemelerinin göstereceği davranışlar borunun davranışlarını belirleyecektir[1-3].

Bu çalışmada plastik boru üretiminde yaygın olarak kullanılan ve viskoelastik özelliklere sahip yüksek yoğunluklu bir polietilen (HDPE) olan PE100 malzemenin sünme davranışları üzerinde durulmuştur.

## 2. POLİETİLEN MALZEMENİN ZAMANA BAĞLI CEVABI

Metallerle plastikler arasındaki en önemli fark, malzemenin tanımlanmasında kullanılacak özelliklerin seçilmesidir. Metallerde malzemenin tasarım ve tanımlanmasında elastisite modülü, kayma gerilmesi dayanımı 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.

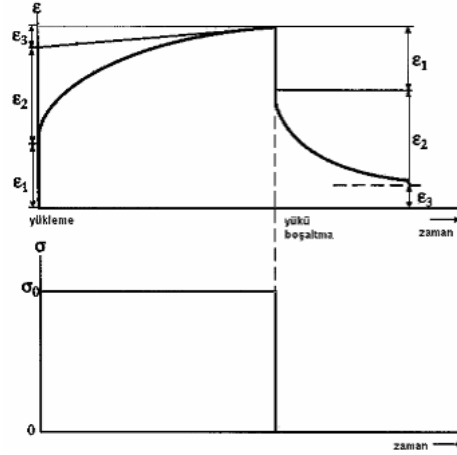
Plastiklerde durum farklıdır. Birim şekil değiştirme-gerilme ilişkisi, yükleme zamanına bağlıdır ve yük altında malzemede sünme oluşur. Bu özellik, çeliğin yüksek sıcaklıklarda gösterdiği özelliklere benzetilebilir. Sıcaklığın artmasıyla sünme miktarı da artar [4]. Oda sıcaklıklarında, polietilen viskoelastik 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 uygulanırsa, 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 bozunma şartlarında ve yüksek sıcaklıklarda, viskoelastik davranışları lineerliklerini kaybeder [2-4].

Şekil 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  $\epsilon_1$  Hooke kanununa uygun elastik birim şekil değiştirmedir.  $\epsilon_2$  gecikmiş elastik birim şekil değiştirmedir (birinci sünme olarak da adlandırılır). Zamanla kademeli olarak ilk haline döner. Son olarak viskoz birim şekil değiştirme  $\epsilon_3$  (ikincil sünme) oluşur ve hiçbir zaman ilk haline dönemez. Birim şekil değiştirme ve zaman arasındaki ilişki viskoelastik malzemelerde görülür. Her gerilme değeri birim şekil değiştirme ve zaman arasında yeni bir ilişki meydana getirir.  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  ve  $\epsilon_3$  arasında farklı gerilme seviyelerindeki oran sabit ise malzeme lineer viskoelastiktir [3].

## 3. PE100 POLİETİLENİNİN SÜNME DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

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 malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölge tespit edilebilir [1].

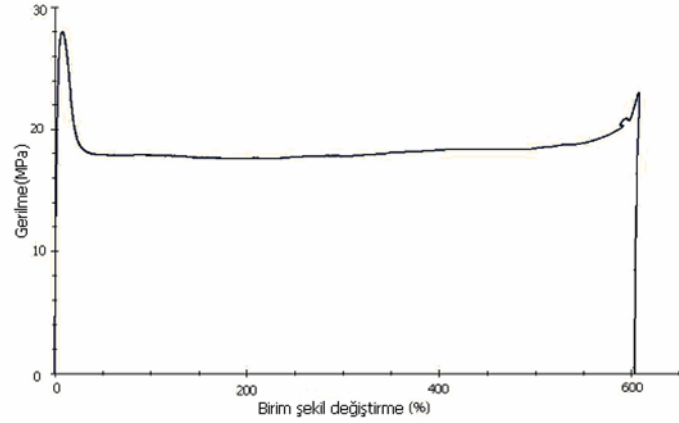
## Analysis of Creep Behavior of Polyethylen Material...



Şekil 1. Plastik numuneye sabit  $\sigma_0$  gerilmesi uygulanmasıyla oluşan birim şekil değiştirme-zaman grafiği

Bu çalışmada HDPE'nin sünme karakteristiğinin belirlenebilmesi için gerekli sünme deneyleri yapıldı. Deneylerden elde edilen veriler, sonlu eleman analiz programı ANSYS ile sünme analizinin gerçekleştirilmesinde de kullanıldı.

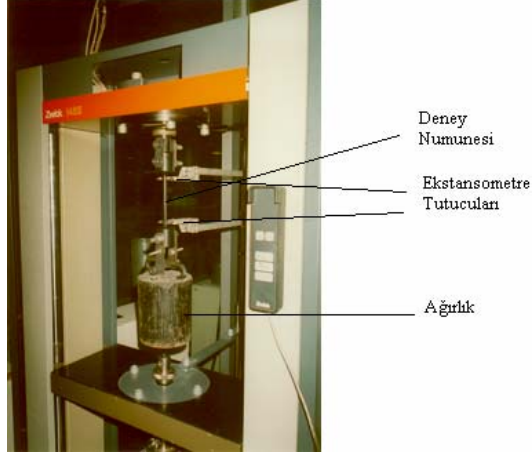
Öncelikle PE100 malzemenin kopma gerilmesini ve sünme karakterini belirleyebilmek amacıyla deney numuneleri ASTM D638 ve ISO 9969 standartlarına göre hazırlandı. Deney numuneleri üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucu kopma gerilmesi yaklaşık olarak 23 MPa olarak bulundu (Şekil 2).



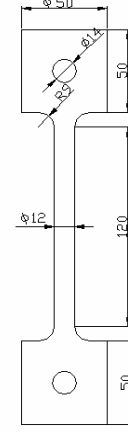
Şekil 2. PE100 malzemenin çekme deneyi grafiği

Kopma gerilmesinin altında dört gerilme durumu için sünme deneyleri gerçekleştirildi (1,757 MPa, 3,732 MPa, 7,376 MPa ve 11,021 MPa). Çekme deneylerinde kullanılan Zwick 1455 markalı cihaz, sünme deneylerine elverişli hale getirildi (Şekil 3). Deney numunelerin boyutları Şekil 4'teki gibi oluşturuldu. Numuneler üzerinde gerilme oluşturabilmek için dört farklı ağırlık asıldı. Her farklı gerilme durumu için uzama-zaman eğrileri elde edildi. Uzamalar, Zwick 1455

cihazının uzama ölçeri(ekstansometre) yardımıyla numuneler üzerinden ölçüldü. Deneyler sırasında ekstansometre tutucu çeneleri arasındaki mesafe 115 mm olarak ayarlandı. Bu uzunluk aynı zamanda numunelerin de başlangıç boyu olarak alındı. Plastik malzemelerde sabit yük altında en büyük yer değiştirme yirmi dört saat içinde görüldüğü ve standartlarda da bu şekilde belirtildiği için (ISO 9969) sünme deney süreleri yaklaşık olarak yirmi dört saat sürmüştür. Deneyler oda sıcaklığı  $20^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir.

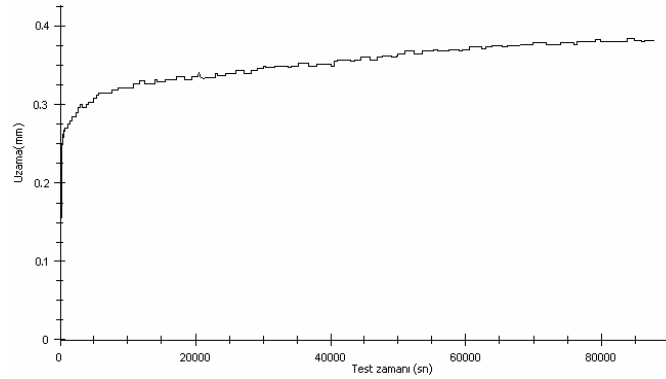


Şekil 3. Sünme deneyi düzeneği



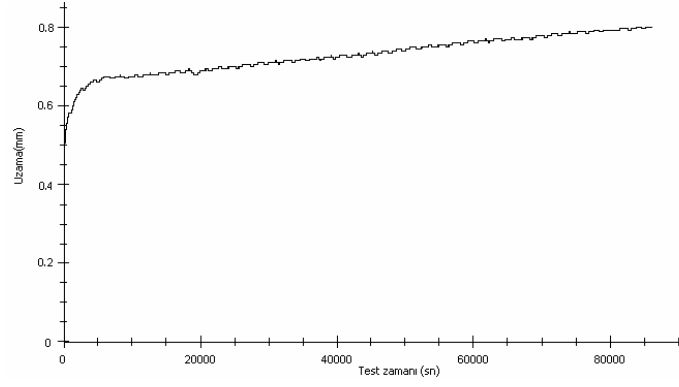
Şekil 4. Deney numunesinin boyutları

Şekil 5'te 1,757 MPa, Şekil 6'da 3,732 MPa, Şekil 7'de 7,376 MPa ve Şekil 8'de 11,021 MPa gerilme altında oluşan uzama-zaman eğrileri görülmektedir.

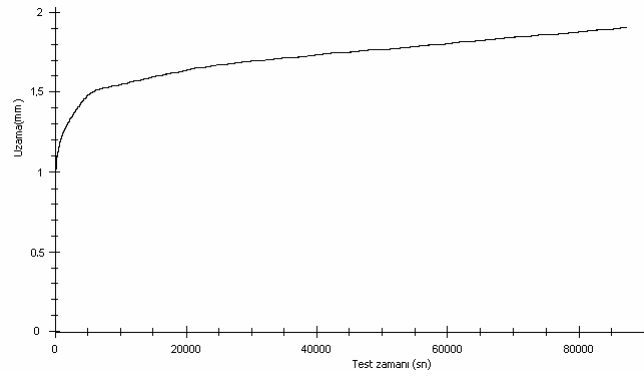


Şekil 5. 1,757 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği

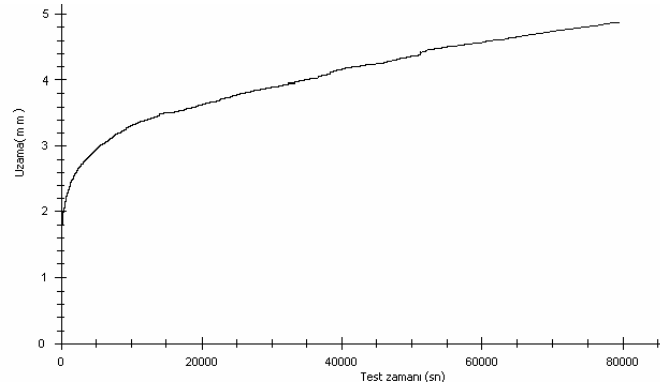
*Analysis of Creep Behavior of Polyethylen Material...*



**Şekil 6.** 3,732 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği



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



**Şekil 8.** 11,021 MPa'lık gerilme altında 24 saatlik uzama-zaman grafiği

### 3.1. Deneysel Sonuçlarının İrdelenmesi

Deneysel sonuçlarının irdelenerek PE100 malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölgenin yaklaşık olarak belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla Çizelge 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 1'deki değerlerden yüzüncü saniyedeki uzama değerine karşılık gelen değerdir. Şekil 1'deki grafik incelendiğinde plastik bir malzemeye yükleme uygulandığında önce elastik şekil değiştirmenin olduğu görülmektedir. Malzemenin lifli molekül yapısından dolayı, 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[1,2].

Malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği bölgeyi tespit edebilmek için farklı zaman dilimlerindeki sünme uzaması-gerilme grafikleri birleştirilerek Şekil 9'daki grafik elde edildi.

**Çizelge 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)
0	0	0	0	0
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

Şekil 8'deki grafik incelendiğinde, 0-8 MPa gerilme aralığından sonra eğrilerdeki doğrusallığın bozulduğu görüldü. Dolayısıyla PE100 malzemenin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölge yaklaşık olarak, 0-8 MPa gerilme aralığındaki bölge kabul edildi [1].

### 4. SÜNME DENEYLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZİ

Sünme deney sonuçlarını bilgisayar ortamında teyit edebilmek amacıyla sonlu eleman analizi gerçekleştirildi. Bu amaçla sünme analizlerine elverişli ANSYS 8.0 programı kullanıldı.

Plastik parçaların dizaynında 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 [5,6].

$$\varepsilon_c = f(t, \sigma, T) \quad (1)$$

Bu yaklaşım;

*Analysis of Creep Behavior of Polyethylen Material...*

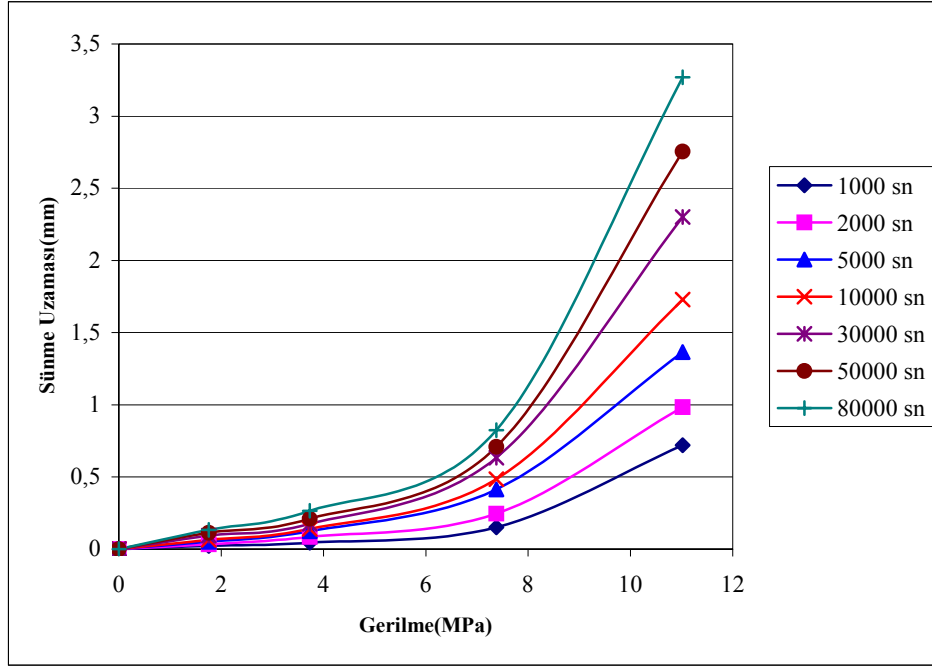
$$\varepsilon_c = f_1(t)f_2(\sigma)f_3(T)$$

(2)

şeklinde de yazılabilir.

**Çizelge 2.** Farklı gerilmeler altındaki gerçek sünme birim şekil değiştirmesi-zaman değerleri

Zaman(sn)	11,021 MPa gerilme altında oluşan sünme birim şekil değişimi	7,376 MPa gerilme altında oluşan sünme birim şekil değişimi	3,732 MPa gerilme altında oluşan sünme birim şekil değişimi	1,757 MPa gerilme altında oluşan sünme birim şekil değişimi
0	0	0	0	0
1000	0.006241	0.001303	0.000391	0.000191
2000	0.008529	0.002128	0.000739	0.000287
5000	0.0118	0.003602	0.001086	0.000435
10000	0.014931	0.004209	0.001217	0.000565
20000	0.017584	0.004988	0.001347	0.000695
30000	0.019803	0.005507	0.001521	0.000808
40000	0.022059	0.005852	0.001651	0.000895
50000	0.023674	0.006155	0.001824	0.000973
60000	0.025413	0.006457	0.001998	0.001043
70000	0.026938	0.006803	0.002128	0.001104
80000	0.028038	0.007148	0.002302	0.001156



**Şekil 9.** Sünme uzaması-gerilme eğrileri

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 kullanılma hali ise gerilme analizine uygulanmasının kolaylığından dolayı güç kanunu formülasyonudur. Sıcaklığa bağımlılık en genel olarak  $\exp(-Q/RT)$  şeklindedir. Burada Q aktivasyon enerjisi, R Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Böylece sünme birim şekil değiştirmesi fonksiyonu;

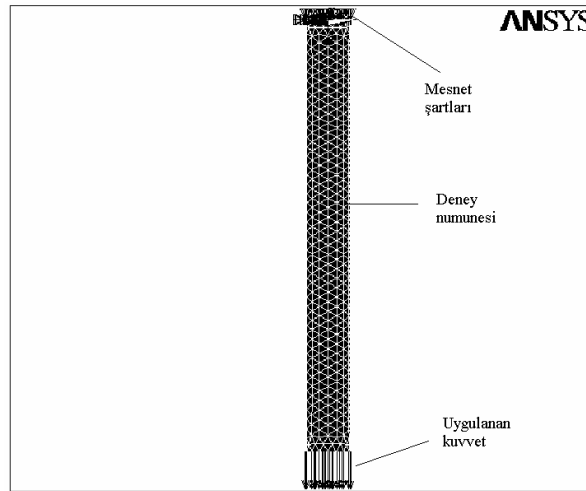
$$\varepsilon_c = a_0 t^n \sigma^m e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (3)$$

şeklini alır [5,6]. ANSYS programı da sünme analizi yaparken matematiksel işlemlerini bu denkleme bağlı olarak yapmaktadır.  $a_0, n, m$  ve  $Q/R$  malzemenin cinsine bağlı sabitlerdir. Bu sabitler malzeme ile ilgili özelliklerin girildiği bölümden, sünme (creep) modeli seçilerek programa girilir. PE100 malzeme için bu sabitler hesaplanırken daha önce yapılan sünme deneyleri gözönüne alındı. Deneyler sırasında elde edilen Çizelge 1'deki uzama değerleri, numunenin başlangıçtaki boyuna bölünerek mühendislik birim şekil değiştirmesi değeri ( $\varepsilon_{müh}$ ) elde edildi. Gerçek birim şekil değiştirme değerleri;  $\varepsilon_{gerçek} = \ln(1 + \varepsilon_{müh})$  formülasyonuna göre hesaplandı, elde edilen değerler Çizelge 2'de görülmektedir. İki farklı durum gözönüne alındı. Birinci durumda; sünme deneylerinin yapıldığı dört gerilme durumunun sonuçları göz önüne alındı. İkinci durumda ise malzemenin lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölgedeki üç gerilme durumunun sonuçları göz önüne alındı. Her gerilme durumu için ayrı ayrı hesaplanan sabitlerin ortalaması, Table Curve programında en küçük kareler yöntemiyle;

Birinci durum için;  $a_0 = 0.0158$ ,  $n = 0.372$ ,  $m = 1.803$  ve  $Q/R = 7479$

İkinci durum için;  $a_0 = 0.171$ ,  $n = 0.384$ ,  $m = 1.411$  ve  $Q/R = 7479$

olarak elde edildi [1]. Elde edilen bu sabitler ANSYS programında gerekli olan bölümlere girildi. Sünme deneylerinin gerçekleştirildiği numunelerin benzer sınır şartları ve sonlu eleman ağ örgüsü Şekil 9'daki gibi oluşturuldu. Ağ örgüsü (mesh) üç boyutlu, simetrik SOLID45 elemanı ile gerçekleştirildi. Yakınsama (mesh tuning) yapılarak 5781 adet eleman seçildi. Numune boyutları, deneyler esnasında uzamaların ölçüldüğü numune boyutlarında seçildi (115 mm). Her iki durum için farklı gerilmeler altındaki, üç boyutlu sünme analizleri gerçekleştirildi.

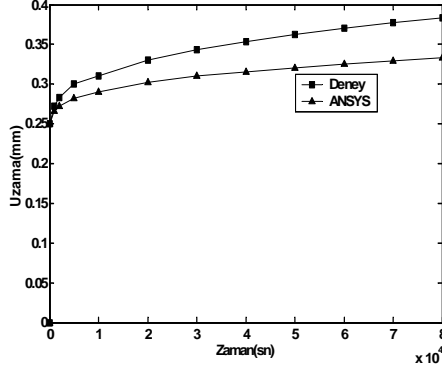


Şekil 10. Deney numunesinin sonlu eleman modeli

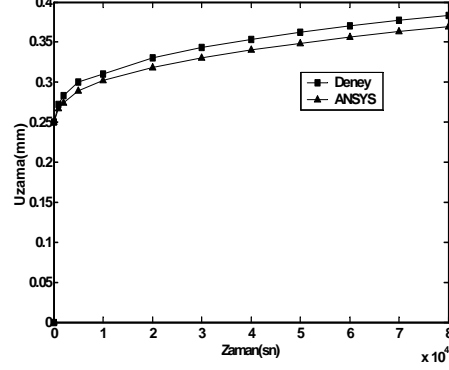


## 5. SONUÇLAR

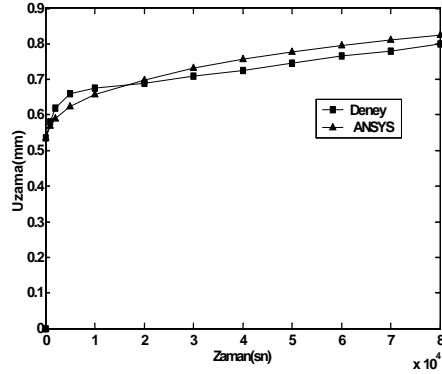
Sünme deneylerinden ve ANSYS programından her iki durum için (lineer viskoelastik bölgedeki üç ve lineer olmayan bölgeyi de içeren dört gerilme durumu) elde edilen yaklaşık yirmi dört saatlik uzama zaman-grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir. Uzama değerleri kuvvetin uygulandığı düğüm noktalarından (node) okunmuştur.



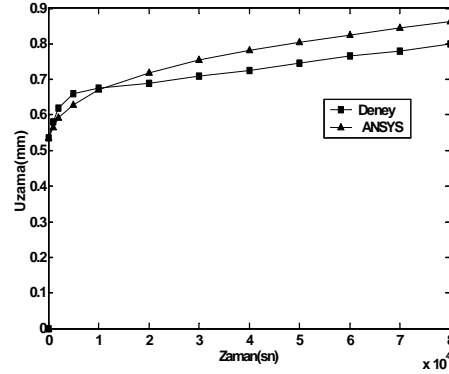
Şekil 11-a) 1,757 MPa gerilme altında deney ve dört gerilme durumu için ANSYS değerleri



Şekil 12-a) 1,757 MPa gerilme altında deney ve üç gerilme durumu için ANSYS değerleri

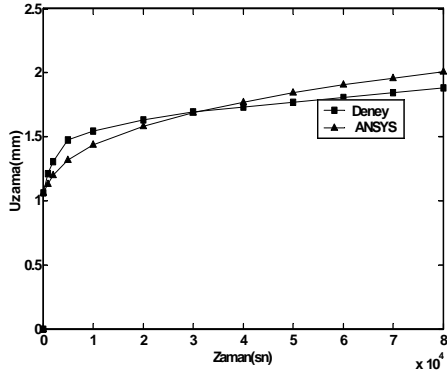


Şekil 11-b) 3,732 MPa gerilme altında deney ve dört gerilme durumu için ANSYS değerleri

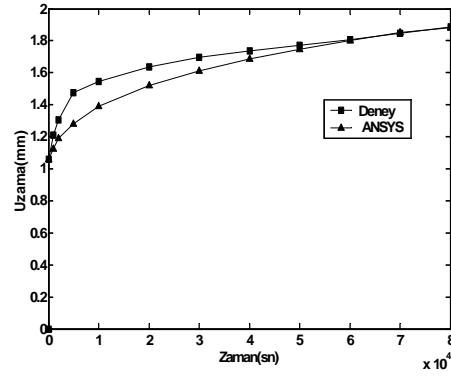


Şekil 12-b) 3,732 MPa gerilme altında deney ve üç gerilme durumu için ANSYS değerleri

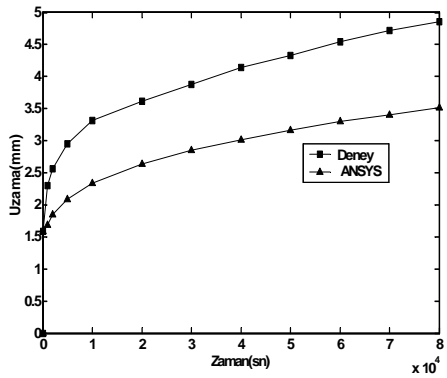
Grafikler incelendiğinde, PE100 malzemenin sadece lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölgedeki üç gerilme durumu (ikinci durum) göz önüne alınarak elde edilen ANSYS sonuçları, deney sonuçlarıyla daha uyumlu sonuçlar vermiştir. Birinci durum da ise lineer bölgenin dışındaki 11,021 MPa gerilmenin etkisi de göz önüne alındığı için lineer bölgedeki (1,757 MPa, 3,732 MPa ve 7,376 MPa) sonuçlarda da bazı ufak sapmalar görülmüştür. Lineer bölgenin dışındaki gerilme durumunda (11,021 MPa) oluşan büyük sapma Şekil 11-d'de görülmektedir. Şekil 11'deki sonuçlar, sadece lineer viskoelastik bölgedeki sonuçlar göz önüne alındığında daha doğru analiz sonuçları alınabileceğini göstermek için verilmiştir. Malzemenin lineer viskoelastik davranışlar göstereceği kompleks yapıli uygulamalarda, ANSYS programı işlem ve zaman açısından büyük kolaylıklar sağlayabilir.



Şekil 11-c) 7,376 MPa gerilme altında deney ve dört gerilme durumu için ANSYS değerleri



Şekil 12-c) 7,376 MPa gerilme altında deney ve üç gerilme durumu için ANSYS değerleri



Şekil 11-d) 11,021 MPa gerilme altında deney ve dört gerilme durumu için ANSYS değerleri

## 6. TEŞEKKÜR

Bu makalenin hazırlanmasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Faris KAYA ve Prof. Dr. Saim AKYÜZ'e, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesine yardımcı olan DİZAYN Teknik A.Ş. yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR

- [1] Sezer, S., "Plastik Boru Üretiminde Kullanılan Polietilen Malzemenin Statik-Dinamik Davranışlarının Analizi ve Viskoelastik Modellenmesi", Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.T.Ü, 2003.
- [2] Hashash, N. M. A., "Design and Analysis of Deeply Buried Polyethylene Drainage Pipes", Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, The University of Massachusetts at Amherst, USA, 1991.
- [3] Janson, L. E., "Plastic Pipes for Water Supply and Sewage Disposal", Borealis, Stockholm, 1995, 5-22.
- [4] Findley, W. N., Lai, J. S. and Onaran, K., "Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials", Dover Publications, Inc., Newyork, 1976, 7-51.

*Analysis of Creep Behavior of Polyethylen Material...*

- [5] Dougherty, D. J., "Thermoplastic Creep Analysis Using Resin Manufacturer's Creep Modulus Data for Thermoplastic Joints", International Ansys Symposium, 359-370, 1995.
- [6] Trantina, G. G., "Creep Analysis of Polymer Structures", Polymer Engineering and Science, 26(11), n11, 776-780, 1986.