

55580

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK EKSENLİ GERİLME ALTINDA BETONUN SÜNMESİ VE HASARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. BÜLENT TANIRCAN

55588

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Mayıs 1996

Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Haziran 1996

Tez Danışmanı : Prof. Dr. SAİM AKYÜZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. HULUSİ ÖZKUL

Prof. Dr. MEHMET ALİ TAŞDEMİR

F.C. YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
DOKÜMAN YAYIN MENKUL HAKLARI

HAZİRAN 1996

ÖNSÖZ

Bu çalışmam sırasında yardımlarını, değerli görüşlerini esirgemeyen tez yöneticisi hocam Prof. Dr. Saim Akyüz'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalara yardım eden İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanları ile Araş. Gör. Yılmaz Akkaya'ya ve Araş. Gör. Selçuk Öğüt'e teşekkür ederim.

Maddi ve manevi katkılarını her zaman yanımda gördüğüm aileme de bu vesile ile teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
NOTASYON LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam	3
BÖLÜM 2. SÜNME VE HASAR	5
2.1. Sünme	5
2.1.1. Betonda Deformasyon Türleri	7
2.1.2. Sünme-Rötre İlişkisi	8
2.1.3. Sünme Poisson Oranı	9
2.1.4. Sünmeye Etki Eden Faktörler	9
2.1.5. Sünme Mekanizması	15
2.2. Nonlineer Sünme	17
2.3. Hasar Mekanizması	20
2.3.1. Giriş	20
2.3.2. Hasar Değişkenleri	21
2.3.3. İzotropik Hasar	22
2.3.4. Hasarın Ölçülmesi	23
2.3.5. Sünme Hasar Yasaları	24
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
3.1. Malzemeler	26
3.1.1. Çimento	26
3.1.2. Su	27
3.1.3. Agrega	27
3.2. Taze Beton Deneyleri	28
3.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri	29
3.3.1. Basınç Deneyi	29
3.3.2. Sünme Deneyi	30
3.3.3. Ultrases Deneyi	32
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI	33
4.1. Basınç Deneyi Sonuçları	33
4.2. Sünme Deneyi Sonuçları	38
4.3. Ultrases Deneyi Sonuçları	60
SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	71

NOTASYON LİSTESİ

ε_{sh} : serbest rötre deformasyonu

ε_{bc} : temel sünme deformasyonu

ε_{dc} : kuruma sünmesi deformasyonu

ε_{cr} : sünme deformasyonu

ε_{tot} : toplam deformasyon

C-S-H : kalsiyum silikat hidrat

σ : gerilme

R : betonun mukavemeti

ν : poisson oranı

ϕ : özgül sünme

ε : zamana bağlı deformasyon

ε_0 : zamandan bağımsız deformasyon

D : hasar

\dot{D} : hasar hızı

φ : sünme fonksiyonları

t : zaman

\tilde{v} : sünme numunelerindeki ultrases hızı

v : şahit numunelerin ultrases hızı

R_k : korelasyon katsayısı

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Şekil 2.1 Sünmede genel deformasyon-zaman eğrisi.	5
Şekil 2.2 Yük boşaltıldığında oluşan tipik sünme eğrisi.	6
Şekil 2.3 Eşzamanlı yükleme ve kuruma halinde sünme.	7
Şekil 2.4 $t=0$ da uygulanan gerilme için sünme karşılığı.	17
Şekil 2.5 $t=t_1$ de uygulanan gerilme için sünme karşılığı.	18
Şekil 2.6 $t=t_2$ de uygulanan gerilme için sünme karşılığı.	18
Şekil 3.1 Prizmalarda pimlerin yapıştırılması.	30
Şekil 4.1 Numune1 $\sigma-\varepsilon$ eğrisi.	34
Şekil 4.2 Numune2 $\sigma-\varepsilon$ eğrisi.	35
Şekil 4.3 Numune1 $\sigma-v$ eğrisi.	36
Şekil 4.4 numune2 $\sigma-v$ eğrisi.	37
Şekil 4.5 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=67$).	42
Şekil 4.6 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=50$).	43
Şekil 4.7 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=40$).	44
Şekil 4.8 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=30$).	45
Şekil 4.9 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=67$).	46
Şekil 4.10 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=50$).	47
Şekil 4.11 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=40$).	48
Şekil 4.12 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=30$).	49
Şekil 4.13 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=0$).	50
Şekil 4.14 Düşey şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=67$).	51
Şekil 4.15 Düşey şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=50$).	52
Şekil 4.16 Düşey şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=40$).	53
Şekil 4.17 Düşey şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=30$).	54
Şekil 4.18 Yatay şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=67$).	55
Şekil 4.19 Yatay şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=50$).	56

Şekil 4.20 Yatay şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=40\%$)	57
Şekil 4.21 Yatay şekil değiştirme log doğrusu ($\sigma/R=30\%$)	58
Şekil 4.22 $M(\sigma/R)$ değişimi	63
Şekil 4.23 $m(\sigma/R)$ değişimi	64
Şekil 4.24 Normalize edilmemiş ultrases hızları	65
Şekil 4.25 Normalize edilmiş ultrases hızları	66
Şekil 4.26 Hasarın zamanla değişimi	67



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Tablo 2.1 Betonda deformasyonların sınıflandırılması.	7
Tablo 3.1 Çimentonun fiziksel özellikleri.	26
Tablo 3.2 Çimentonun mekanik özellikleri.	26
Tablo 3.3 Agreganın elek analizi sonuçları.	27
Tablo 3.4 Agreganın birim ve özgül ağırlıkları.	27
Tablo 3.5 Taze beton deney sonuçları ve bileşenlerin gerçek miktarı.	29
Tablo 4.1 14 günlük basınç mukavemetleri.	33
Tablo 4.2 28 günlük basınç mukavemetleri.	33
Tablo 4.3 Sünme deneyinde kullanılan gerilmeler.	38

ÖZET

Sünme, sabit gerilme altında malzemelerde zamanla sürekli oluşan şekil değiştirme olarak tanımlanır. Yapılarda kullanılan birçok malzeme sünme olayını gösterir. Beton, oda sıcaklığında ve yüksek olmayan gerilmeler altında sünme yapabilen bir malzemedir. Yapı sistemlerinde gerilmenin yanında şekil değiştirmenin de sınırlı olması gerekir. Sünme sonunda meydana gelen deformasyonlar, gerilme yayılımı değişmesine yol açar. Bu nedenle zamanın da bir değişken olarak hesaba katılması zorunludur.

Sünme sonucu meydana gelen değişiklikler mekanik özellikleri zayıflatarak hasara neden olur. Bu hasarın derecesinin önceden tahmin edilebilmesi için hasar olayı mekanik terimler cinsinden ifade edilmelidir. Bu sayede analitik ve hesaplamalı tekniklerle çeşitli mühendislik problemleri formüle edilebilir.

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan katkıli portland çimentosuyla üretilmiş betonların, değişik gerilme düzeylerinde sünme nedeniyle uğradığı hasar incelenmiştir.

DeneySEL çalışmalarda su/çimento oranı ve çimento dozajı sabit tutulmuştur. Numunelere 14 günlük silindir basınç mukavemetinin %67, %50, %40 ve %30'u oranında gerilme uygulanmıştır. Ayrıca, üzerinde yük bulunmayan şahit numuneler de incelenmiştir.

σ/R nin küçük değerlerinde de nonlineer sünme ortaya çıkmaktadır. Gerilmenin artmasıyla hasar ve hasar hızı artmaktadır. Hasarın hasar hızına etkisi, gerilmenin hasar hızına etkisinden önemlidir. σ/R nin artmasıyla sünme numunelerinin kırılma zamanı azalmaktadır.

SUMMARY

CREEP AND DAMAGE OF CONCRETE UNDER UNIAXIAL STRESS

To be able to calculate the deformation and deflection of structural members, we have to know the relation between stress and strain. In common with most structural materials, concrete behaves nearly elastically when load is first applied. However, under sustained loading, concrete exhibits creep, i.e. the strain increases with time under a constant stress, even at very low stresses and under normal environmental conditions of temperature and humidity.

In concretes subjected to a stress below about 60 or 70 percent of the short-term strength there is no creep rupture.

The importance of creep in structural concrete lies mainly in the fact that the creep deformation is of the same order of magnitude as the elastic deformation. There are also other effects of creep. Creep of concrete increases the deflection of reinforced concrete beams, and in some cases may be a critical consideration in design.

Creep is a slow continuous deformation of a material under constant stress. However, creep in general may be described in terms of three different stages. The first stage in which creep occurs at a decreasing rate is called primary creep; the second, called the secondary stage, proceeds at a nearly constant rate; and the third or tertiary stage occurs at an increasing rate and terminates in fracture.

When a specimen is unloaded, the instantaneous recovery is approximately the same as the instantaneous strain on first application of the load, but creep recovery, although it occurs more rapidly than creep, is by no means complete: a considerable portion of the total creep is irreversible.

Creep is substantially increased when the concrete is simultaneously drying, i.e. creep and shrinkage are interdependent. This leads to the definitions of creep strains. Free shrinkage is defined as the shrinkage of the unloaded concrete in drying condition, and basic creep as the creep of similar specimen under load but no drying, i.e. sealed so that there is no moisture movement to or from the surrounding environment. The total strain is that measured on the concrete whilst simultaneously shrinking and creeping. If the free shrinkage and the basic creep are added together, their sum is less than the total strain. The excess deformation is called drying creep. Total creep strain is the sum of basic creep and drying creep.

When subjected to compression, concrete contracts longitudinally and expands laterally. The ratio of the lateral strain to the longitudinal strain is known as poisson's ratio, and within the normal working range of loading may be taken to have a value of 0,2.

Apart from the increase in creep with simultaneous shrinkage, the following factors have a significant effect on creep:

- The level of applied stress; for any given concrete and loading conditions, the creep is found to increase approximately linearly with the applied stress up to stress/strength ratios of about 0,4 to 0,6. It is therefore often useful to define the specific creep as the creep strain per unit stress in the region. At higher stress levels increased creep is observed.

- An increase in strength usually leads to a reduction in creep.

- Creep increases with increasing water/cement ratio.

- The rate of creep decreases as the concrete ages.

- Creep decreases as cement hydration proceeds, so that concrete kept continuously wet creeps less than that cured in air.

- Increasing temperature, increases the creep significantly.

- A reduced moisture content before loading, reduces creep. In fact, completely dried concrete has very small, perhaps zero, creep.

- Generally the type of cement is not of great importance, except that creep is related to the stress/strength ratio for the concrete, and strength development is related to cement type.

- Admixtures that increase drying shrinkage also increase creep. Admixtures proposed for use should be tested to evaluate their influence on creep.

- Aggregates act as a restraint to reduce the potential deformations of the paste. The aggregate content and modulus of elasticity are the most important parameters affecting creep of concrete. Aggregate size, grading, and surface texture have little influence.

- Increasing size, decreases the creep.

Creep process is occurring within the cement paste, and the moisture content and movement have a significant effect on its magnitude. The applied stress causes changes in the internal stresses and strain energy within the cement paste, resulting in

an upset to the thermodynamic equilibrium; moisture than moves down the induced free energy gradient; implying a movement from smaller to larger pores, which can occur at several levels:

1. In capillary water as a rapid and reversible pressure drop;
2. In adsorbed water moving more gradually from zones of hindered adsorption - this movement should be reversible;
3. In interlayer water in diffusing very slowly out of the gel pores. Some extra bonding may then develop between the solid layers, and so this process may not be completely recoverable.

Stress concentrations arise throughout the cement paste structure because of its heterogeneous nature, and consolidation to a more stable state without loss of strength occurs at these points by either:

1. Viscous flow, with adjacent particles sliding past each other; or
2. Local bond breakage, closely followed by reconnection nearby after some movement.

Cement paste and concrete contain defects and cracks before loading, and propagation of these and the formation of new cracks will contribute to the creep strains, particularly at higher levels of stress. This is the most likely explanation of the non-linearity of creep strain with stress at high stress levels.

Some mathematical models are capable of describing the main features of creep behaviour of viscoelastic materials with good accuracy both in the early stage and over a wide time span. For materials whose creep response may be described by a separable time-independent and time-dependent strain the following expression has often be found to yield a good description of creep,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + bt^n \quad (1)$$

ε is the strain, t the time, n a constant independent of stress, ε_0 is the time-independent strain, and b is the coefficient of the time-dependent term. ε_0 and b are functions of stress. Rearranging (1) and taking logarithms yields

$$\log(\varepsilon - \varepsilon_0) = \log b + n \log t \quad (2)$$

If $\log(\varepsilon - \varepsilon_0)$ is plotted versus $\log t$, it gives a straight line of slope n and intercept b . 'n' is independent of stress and state of stress.

Creep functions (φ) for non-linear creep were obtained. If stress/strength ratio is 0,25 the behaviour of concrete is found non-linear. Time-deformation functions were found by:

$$\varepsilon_1(t) = \sigma_1 \varphi_1(t) + \sigma_1^2 \varphi_2(t) + \sigma_1^3 \varphi_3(t) + \sigma_1^4 \varphi_4(t)$$

$$\varepsilon_2(t) = \sigma_2 \varphi_1(t) + \sigma_2^2 \varphi_2(t) + \sigma_2^3 \varphi_3(t) + \sigma_2^4 \varphi_4(t)$$

$$\varepsilon_3(t) = \sigma_3 \varphi_1(t) + \sigma_3^2 \varphi_2(t) + \sigma_3^3 \varphi_3(t) + \sigma_3^4 \varphi_4(t)$$

$$\varepsilon_4(t) = \sigma_4 \varphi_1(t) + \sigma_4^2 \varphi_2(t) + \sigma_4^3 \varphi_3(t) + \sigma_4^4 \varphi_4(t)$$

Engineering materials are subjected to unfavorable mechanical and environmental conditions. It is essential to formulate the damage phenomenon in terms of mechanics when designing reliable structures. Then it is possible to analyse various engineering problems using analytical and computational techniques.

In general a theoretical description of damage can be rather complicated. The experiments in this field are difficult. Experimental data, as a rule, are scarce. Determination of functions and constants, which play a role in the complex variants of the theory, from available experimental data is often practically impossible.

A measurement of the speed or propagation time of plain waves in a specimen of damaged material leads to the determination of the elasticity modulus E of the damaged material and of the damage by

$$D = 1 - \tilde{E}/E \quad (3)$$

Expressed in terms of the velocity of longitudinal waves V_L and transverse waves V_T

$$\tilde{E} = \rho \tilde{V}_T^2 \frac{3\tilde{V}_L^2 - 4\tilde{V}_T^2}{\tilde{V}_L^2 - \tilde{V}_T^2} \quad (4)$$

In the framework of the isotropic damage hypothesis (constant Poisson's coefficient) and neglecting the variation in ρ , we have:

$$\tilde{V}_L^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{and} \quad \tilde{V}_T^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

and we obtain:

$$D = 1 - \tilde{V}_L^2 / V_L^2 \quad (6)$$

According to Kachanov's creep damage law:

$$\dot{D} = \left[\frac{\sigma}{A_0(1-D)} \right]^r \quad (7)$$

A_0 and r are the two characteristic creep damage coefficients for the material. Introducing an extra coefficient k :

$$\dot{D} = (\sigma/A)^r (1-D)^k \quad (8)$$

In general and in this work k is found larger than r . The damage rate is influenced more strongly by the degree of damage than the global mechanical behaviour is.

This study is presented in five chapters. In the first chapter general information about the theme, and related literature are given. In the second chapter, basic approach of damage mechanics and creep damage are given. In the third chapter experimental work and the materials that are used in the concrete mixture are given. The test results obtained from hardened concrete are given in the fourth chapter. The conclusions obtained from this work are the subject of the fifth chapter.

Prismatic specimens of 10x10x50 cm. were used for creep tests.

In the experiments, grading curve of aggregate mixture was kept constant and regulated to be near the B-16 curve. The maximum aggregate size was also kept constant and chosen to be 19,1 mm. The cement content of the mix was 300 kg/m³. The water/cement ratio was 0,65.

Four different stress levels are applied to specimens. $\sigma/R=0,67$; 0,50 ; 0,40 ; 0,30. One specimen is not loaded. Two specimens are used for each stress level. Longitudinal and lateral creep strains are measured from the specimens. Strain-time functions were obtained. In addition, non-linear creep functions were obtained.

Using ultrasonic dynamic method, damage of specimens were obtained. Damage rate was found according to (8) with regression analysis.

The time to rupture (t_c) was found for every stress levels.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş :

Beton, birbirinden çok farklı karakteristiklere sahip iki fazın biraraya gelmesiyle oluşur. Bu iki fazdan biri kum ve çakıldan oluşan agrega, diğeri agrega tanelerini birbirine bağlayan bağlayıcı madde veya çimento hamurudur. Agrega tanelerini gelişmesini tamamlamış katı cisim olarak kabul etmek mümkündür. Bunlar yük altında ani ve sonlu deformasyon yapmak suretiyle sünme olayını göstermez. Sünme çimento hamuru fazında olur.

Muhtelif fazlardan oluşan çimento hamurunun katı kısmını hidrasyon yapmış ve yapmamış çimento meydana getirir. Hidrasyon yapmış çimento, düzgün bir şekilde kristalleşmemiş ve kolloidal boyutlara sahip çimento jeli denilen elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanlar şeritler, levhalar ve çok ince tüpler şeklindedir. Bunların kalınlıkları 30 \AA mertebesindedir. Jel elemanları birbirleriyle birleşerek aralarında muhtelif tür boşluklar bırakırlar. Boyutları 0.1 mikron-1.5 cm. arasındaki boşluklar kılcal boşluklar, 1000 \AA - 16 \AA arasındaki boşluklar jel boşlukları olarak adlandırılır. Ayrıca levha şeklindeki elemanlar arasında boyutları 16 \AA - 6 \AA arasında olan çok küçük boşluklar vardır.

Katı fazın dışında sıvı faz olarak su ve gaz faz olarak hava bulunmaktadır. Su, boşluklar içinde yer almasına göre adlandırılır. Kılcal boşluklardaki suya kılcal su, jel boşluklardaki suya jel suyu, elemanlar arasında sıkışmış suya da zeolitik su denilir.

Kılcal suyun buharlaşarak çimento hamurunu terketmesi rötre olayını meydana getirir. Jel suyu, Van der Waals kuvvetleri tarafından tesbit edilen adsorbe sudur. Çimento hamurunun mukavemet ve rijitliğine adsorbe suyun katkısı vardır. Adsorbe suyun kalınlığı ortamın rutubet derecesiyle birlikte artar. Rutubet %100 ise

jel 5 sıra su molekülü tesbit edebilir. Kalınlık bu durumda maksimum olup $13A^0$ değerini almaktadır. Rutubet derecesi %51'e düşerse adsorbe su 2 sıra molekülden ibaret olur. Rutubet derecesi %12'ye düşerse adsorbe su tek sıra molekülden oluşur.

Rutubet derecesinin yüksek olması halinde çok küçük boyuttaki boşlukların jel elemanları suyu bir tabaka halinde tesbit edemezler. Bu durum jel hamuru içinde bir şişme veya ayrışma basıncı meydana getirir. Bu durum iç yapıda bir takım gerilmelerin oluşmasına yol açar [1].

Genel olarak herhangi bir cisme bir kuvvet uygulanıp bunun uygulanmasına devam edilmesi halinde, iki türlü deformasyon meydana gelmektedir : Ani deformasyon ve ani deformasyon meydana geldikten sonra başlayan ve zamanla birlikte oluşan geciken deformasyondur. Bu geciken deformasyona sünme adı verilir. Sabit bir yükün devamlı etkisi altında bulunan bir cismin herhangi bir anda yapmış olduğu toplam deformasyon, ani deformasyon ile sünmenin toplamına eşittir.

Yapılarda kullanılan birçok malzeme sünme olayını gösterir. Genel olarak metaller ve çelik ancak yüksek sıcaklıkta sünme yaparlar. Doğal taşların ve kayaların sünme yapabilmesi için büyük gerilmelere ihtiyaç vardır. Beton, plastik maddeler ve ahşap oda sıcaklığında ve yüksek olmayan gerilmeler altında sünme yapabilen cisimlerdir.

Sünme sonunda meydana gelen deformasyon cisim için bazı gerilmelerin doğmasına veya gerilme yayılış değişmesine yol açar. Cisim, malzemenin mukavemetinden küçük olmak üzere, oldukça büyük bir gerilmenin etkisi altında devamlı bir şekilde bulunursa, sünmenin büyük değerler almasının bir sonucu olarak mukavemetini kaybedebilir. Buradan cisimlerde sünme mukavemeti olarak adlandırılan bir karakteristiğin varlığı ortaya çıkar. Cismi devamlı olarak etkileyen gerilme sünme karakteristiğinden küçük ise kırılma tehlikesi yoktur. Gerilmenin bu karakteristikten büyük olması halinde cismin sünme etkisiyle mukavemetini kaybetmesi beklenmelidir.

Cismin sünme sonucu fazla deformasyon yapması ve bunun gözle farkedilir bir durum alması, yapının sağlamlık ifade eden görünüşünün bozulmasına neden olur. Sünme yapan bir malzemede, bu malzemenin bağlı bulunduğu cismin aynı deformasyonu yapamaması sonucu önemli çatlaklar meydana gelebilir. Bu çatlaklar yapının stabilitesi üzerine olumsuz bir etki yapabilir. Böyle bir etki olmasa dahi bunlar yapının estetik bakımdan görünüşünü önemli şekilde bozarlar [1].

1.2. Amaç ve Kapsam :

Bu çalışmanın amacı, değişik gerilme düzeylerinde yüklenmiş beton numunelerinin sünmesinin ve sünme nedeniyle uğradığı hasarın incelenmesidir.

Birinci bölümde betonun ve çimento hamurunun yapısı, sünme olayının tanımı ve sünmenin zararlı etkileri kısaca açıklanmıştır.

İkinci bölümde sünme ve hasar konuları incelenmiştir. Sünmede genel deformasyon-zaman eğrisi, yük boşaltıldığında oluşan tipik sünme eğrisi ve eşzamanlı yükleme ve kuruma halinde sünme konuları açıklanmıştır. Betondaki deformasyonların sınıflandırılması, sünme-rötre ilişkisi ve sünme poisson oranı konuları açıklanmıştır. Sünmeye etki eden faktörler, sünme teorileri, mikroçatlakların sünmeye katkısı konuları açıklanmıştır. Betonun tek eksenli gerilme altında nonlineer viskoelastik davranışı kısaca belirtildikten sonra, nonlineer sünme halinde zaman fonksiyonları ve kullanılmaları açıklanmıştır. Hasarın tanımı yapıldıktan sonra hasar değişkenleri ve izotropik hasar konularında açıklamalar yapılmıştır. Hasarın ölçülmesinde kullanılan ultrasonik dinamik metot açıklanmıştır. Sünme hasar yasaları ayrıca açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde deneylerde kullanılan malzemeler ve özellikleri, taze ve sertleşmiş beton deneylerinin yapılmaları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde basınç deneyi sonuçları, sünme deneyi sonuçları ve deneylerle ilgili sonuçların grafikleri verilmiştir.

Betonun nonlinear sünme davranışı kabulüne göre şekil değiştirme-zaman fonksiyonları elde edilmiştir. Değişik yüklemelerle ilgili şekil değiştirmeler bulunduktan sonra, sünme fonksiyonlarının elde edilmesi için lineer denklem takımı çözümüne gidilmiştir. Sünme fonksiyonları, yükleme doğrultusundaki ve buna dik enine doğrultudaki şekil değiştirmeler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. σ/R nin küçük değerleri için nonlinear ve lineer davranış kabulleri karşılaştırılmıştır.

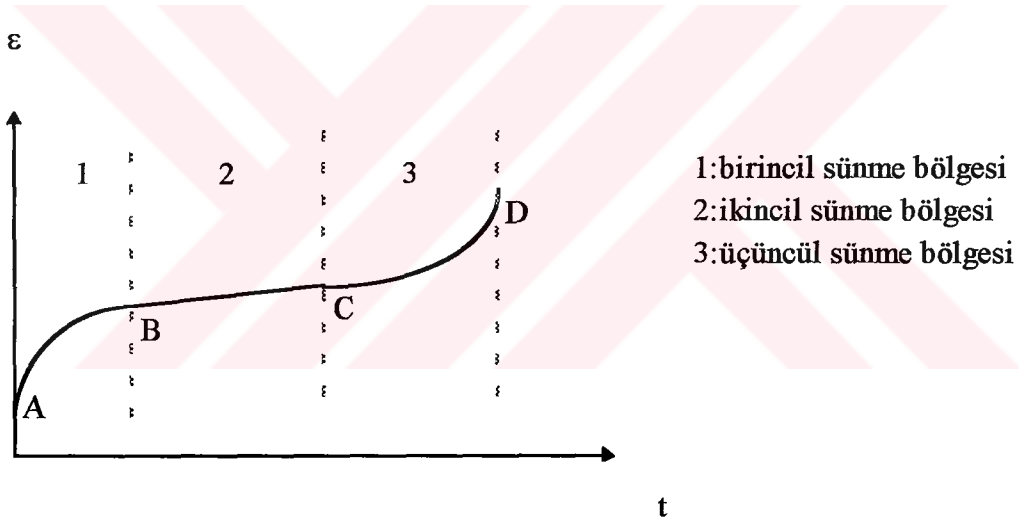
Normalize edilmiş ultrases hızlarının zamanla değişimi her bir gerilme için belirlendikten sonra, sünme nedeniyle oluşan hasarın zamanla değişimi bulunmuştur. Buradan hareketle hasar hızının belirlenebilmesi için , hasarın zamanla değişimi eğrileri üzerinde regresyon analizi yapılmıştır. Kırılma zamanları (t_c), kullanılan her gerilme/mukavemet oranı için elde edilmiştir.

Son bölümde bu çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

BÖLÜM 2. SÜNME VE HASAR

2.1. Sünme :

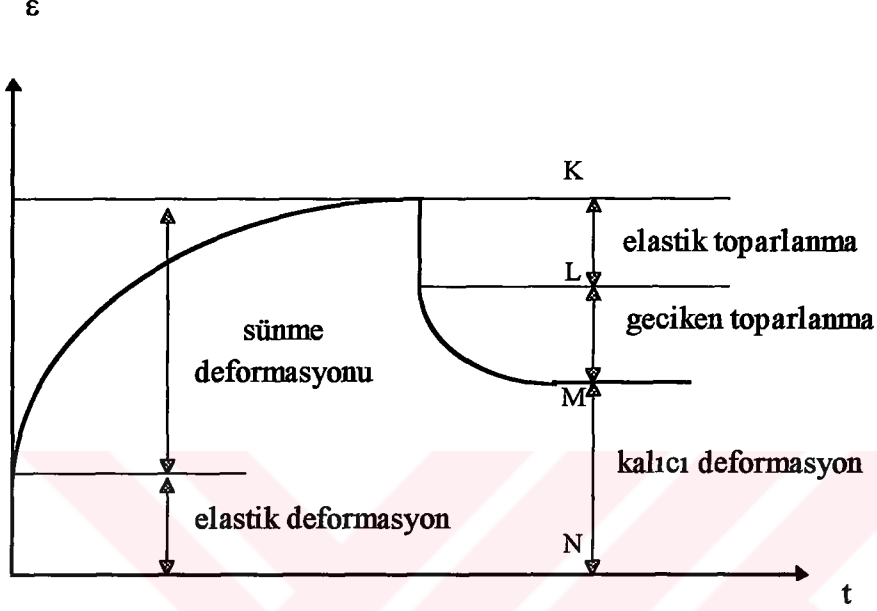
En genel halde sünme etkisindeki bir malzemenin deformasyon-zaman eğrisi şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sünmede genel deformasyon-zaman eğrisi.

Zamanın 0 olduğu anda şekil değiştirme elastiktir, fakat elastik olmayan bir bileşen içerebilir. Daha sonra sünmenin üç aşaması vardır. Birincil sünme aşamasında sünme hızı zamanla azalır. İkincil sünmeyi gösteren eğrinin BC kısmını bir doğru olarak kabul etmek mümkündür. Bu bölgede deformasyon hızı sabit bir değer alır. Burada cisim belirli bir hızla akan sıvıya benzediğinden bu tür sünmeye viskoz sünme veya sabit hızlı sünme denir. Üçüncül sünme gerilmede bir artış olup olmasına bağlı olarak oluşur veya oluşmaz. Örneğin betonda yüksek gerilmelerde

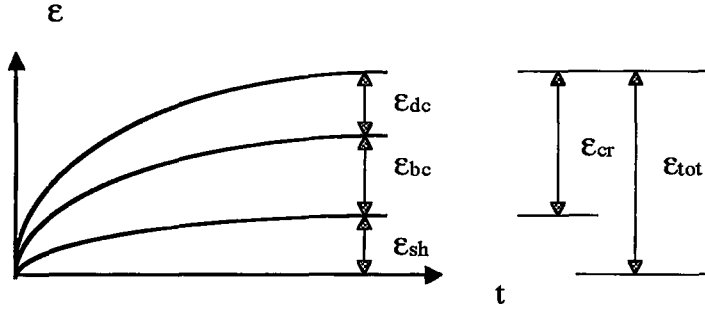
mikroçatlamamanın artışından dolayı ortaya çıkabilir [2]. Bir numunenin yükü boşaltıldığında oluşan tipik bir sünme eğrisi şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Yük boşaltıldığında oluşan tipik sünme eğrisi

Yük boşaltıldığında oluşan elastik toparlanma, yükün ilk uygulandığı anda oluşan elastik şekil değiştirme ile yaklaşık olarak aynıdır. Sünme toparlanması (geciken toparlanma) sünmeden daha hızlı meydana gelir fakat sünmenin önemli bir kısmı kalıcı şekil değiştirme olarak kalır.

Tipik servis koşulları altında beton hem yük, hem de kuruma etkisi altındadır. Bu durumda beton, yükmeden önce kurutulmuş betonlara göre daha fazla sünme yapar. Betonun eşzamanlı yükleme ve kuruma etkileri altındaki davranışı Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Eşzamanlı yükleme ve kuruma halinde sünme.

ϵ_{sh} : serbest rötre (numune yükü boşaltılmış fakat aynı kuruma koşullarına maruz).

ϵ_{bc} : temel sünme (numune yüklü fakat kuruma yokken saptanan).

ϵ_{dc} : kuruma sünmesi.

ϵ_{cr} : sünme deformasyonu.

ϵ_{tot} : toplam deformasyon.

Eğer serbest rötre ve temel sünme toplanırsa toplamaları eşzamanlı yükleme ve kurumadan elde edilen toplam deformasyondan daha azdır. Fazla olan bu deformasyon kuruma sünmesi olarak adlandırılır. Toplam sünme deformasyonu, temel sünme ve kuruma sünmesinin toplamıdır [3].

2.1.1. Betonda Deformasyon Türleri :

Betondaki deformasyonlar çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Hansen betonun deformasyonunu aşağıdaki şekilde sınıflandırmıştır [4]:

Tablo 2.1 Betondaki deformasyonların sınıflandırılması

Deformasyon	Ani	Zamana bağlı
kalıcı	plastik	viskoz
kalıcı olmayan	ani elastik	geciken elastik

Sünme viskoz deformasyondan ileri gelmektedir. Şekil 2.2’de gerilmenin kaldırılmasıyla betonun deformasyonu KL kadar azalmaktadır. Bu, ani elastik deformasyondur. LM geciken elastik deformasyondur. MN ise toplam kalıcı deformasyonu göstermektedir. Bunun bir kısmı plastik, bir kısmı viskoz deformasyondur. Viskoz deformasyon cisimlerde gerilmenin plastik limit denilen belirli bir değeri aşması halinde meydana gelir. Böyle bir limitin bulunmaması ise cismin akışkan olduğunu gösterir. Betonlarda pratik bakımdan bu plastik limit 0’dır. Bu durum sünme olayında betonun bir akışkan gibi düşünülebileceğini ve bir viskozite katsayısının söz konusu olabileceğini gösterir. Viskoz deformasyonda deformasyon hızı zamana bağlı değildir. Betonda sünme olayında deformasyon hızı genellikle zamanla azaldığından bu şart yerine gelmemektedir. Yalnız gerilme uygulandıktan belirgin bir süre geçtikten sonra, deformasyon hızındaki azalma zamanla önemini kaybetmekte, başka bir deyişle, beton gittikçe viskoz deformasyon karakterine uygun deformasyon yapmaktadır. Bu durumdan dolayı ve deney sonuçları uygunluk gösterdiğinden, betonların sünme halinde viskoz deformasyon yaptıkları kabul edilir [1].

2.1.2. Sünme-Rötre İlişkisi :

Sünme ve rötre arasında benzerlikler olduğu için birbirleriyle ilişkide olan olaylardır. Deformasyon-zaman eğrileri çok benzerdir. Deneysel parametreler rötredekine benzer şekilde sünmeyi de etkiler. Şekil değiştirme büyüklükleri benzerdir. Her ikisi de önemli miktarda kalıcı şekil değiştirmeye sahiptir. Rötre gibi sünme de bir çimento hamuru özelliğidir ve betondaki agrega engelleyici gibi çalışır. Fakat sünme ve rötrenin oldukça değişik mekanizmayla oluştuğunu gösteren deliller vardır. Sünmenin kaynağının C-S-H nin gerilmeye verdiği karşılığa ait olduğuna inanılır [3].

2.1.3. Sünme Poisson Oranı :

Betona üniform basınç gerilmesi uygulandığında, gerilme doğrultusunda ani bir kısalma meydana gelirken buna dik doğrultuda yanıl deformasyon meydana gelir. Yanıl deformasyonun boyuna deformasyona oranı, poisson oranı (ν) denilen malzemenin önemli karakteristiklerinden birini verir. Gerilmenin uygulanmasına devam edilmesi halinde yanıl deformasyon zamanla birlikte artar. Poisson oranını saptamak için yapılan deneylerde çok farklı sonuçlar elde edilmiştir :

- ν , 0 veya sıfıra çok yakın
- ν , 0.05 civarında
- ν , elastik deformasyon halindeki değerlerini almaktadır.

Bu farklılığın nedeni, ölçme metotlarındaki farklılıklar ve yanıl sünme deformasyonunun rötreden önemli derecede etkilenmesidir. Yanıl deformasyon ve rötreye ters yönde gelişen olaylardır. Poisson oranının küçük değerler alması rötrenin yanıl deformasyonu azaltması ile açıklanabilir [1].

2.1.4. Sünmeye Etki Eden Faktörler :

Uygulanan Gerilme :

Genel olarak beton mukavemetinin yaklaşık %50'sine karşı gelen gerilmelere kadar sünme deformasyonunun uygulanan gerilmeyle lineer ilişkide olduğu varsayılır [3]. Sünmeyi etkileyen gerilmenin mutlak değeri değil σ/R oranının değeridir. σ/R oranının aynı olması halinde beton mukavemetinin sünme üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. σ/R oranını sabit tutmak suretiyle, mukavemeti değişik betonlar aynı miktar nihai sünme yaparlar. Değişik tip çimentolarla üretilen ve değişik bakım koşulları altında tutulan betonlarda da sünme σ/R ile orantılı olarak devam etmektedir. Çimento tipinin ve bakım koşullarının etkileri σ/R faktörünün etkisi yanında önemsiz kalmaktadır [2].

Genellikle kullanılan gerilme düzeylerinde sünme-gerilme ilişkisi yaklaşık olarak lineerdir. Bu nedenle, bu bölgede pratik bir görüş olarak özgül sünme kavramı kullanılabilir :

$$\text{özgül sünme } (\phi) = \varepsilon_{cr} / \sigma \quad (2.1)$$

Özgül sünme, değişik gerilme düzeylerinde yüklenmiş beton numunelerinin sünmelerinin karşılaştırılmasında yararlıdır [3].

Yaklaşık $\sigma/R > 0.5$ olduğunda iki durum ortaya çıkar. Birincisi, gerilmenin sünme mukavemetinden küçük olması halidir. Bu durumda beton fazla miktarda sünme yapmasına rağmen mukavemetini kaybetmez. İkincisi, betonun sünme mukavemetini aşan büyük gerilmelere maruz kalmasıdır. Bu tür gerilmeler, beton basınç mukavemetinden küçük olmasına rağmen, belirli bir süre sonra kırılmaya sebep olur [1].

$\sigma/R > 0.5$ durumunda mikroçatlaklar sünmeye katkıda bulunur ve sünme-gerilme ilişkisi nonlineer hale gelir[5].

Su/Çimento Oranı, Mukavemet :

Sünme verilerinin yorumlanmasındaki güçlüklerden dolayı, su/çimento oranının sünmeye etkisiyle ilgili birbiriyle uyumsuz veriler vardır. Çünkü, bir parametreyi diğerlerinden bağımsız olarak değiştirmek mümkün değildir. Su/çimento oranındaki bir değişme, çimento dozajında ve beton mukavemetinde bir değişme anlamına gelir. Eğer bu faktörler ayrı ayrı düşünülürse, özgül sünme w/c oranının artmasıyla artar. Bu yüzden, özgül sünmenin, beton basınç mukavemetinin bir fonksiyonu olması beklenir. Çünkü basınç mukavemeti w/c oranının değişmesinden çok etkilenir. Nihai özgül sünme ve beton basınç mukavemeti arasında ters bir ilişki vardır [3],[6].

Betonun Yaşı :

Belirli bir σ gerilmesi uygulandığında betonun yaşı ne kadar küçük ise meydana gelen sünme, özellikle nihai sünme, o kadar büyük değerler alır. Beton yaşı küçük iken çimento hamuru, hidrasyon olayının yavaş bir şekilde gelişmesinden dolayı büyük rijitliğe sahip olmadığından, deformasyona karşı koyma özelliği gelişmiş durumda değildir. Yaşı küçük betonlarda σ/R oranı, σ sabit olmak üzere, yaşı daha ilerlemiş betonlara göre daha büyüktür. Sünme σ/R oranıyla arttığından, yükleme yapıldığı andaki betonun yaşının artmasıyla sünme azalır. Beton yaşının sünmeye olan etkisi, beton yaşının belirli bir değerine kadar devam eder. Bu değer geçilince etki önemini kaybeder. Etki ve etkisizlik bölgelerini birbirinden ayıran betonun yaşı, betonun tutulduğu ortamın rutubet derecesi arttıkça azalır. Su içinde tutulan betonlarda bu iki bölgeyi ayıran beton yaşı 28 gün olarak saptanmıştır [1],[7].

Boyut :

Kesit boyutlarının artması iki bakımdan beton içindeki suyun hareketini etkiler. Birincisi, dış ortamın rutubet derecesinin etkisiyle meydana gelen buharlaşma ve bunun sebep olduğu su hareketi, boyut arttıkça azalmaktadır. Boyutun büyümesiyle, kesit ortasına doğru gidildikçe buharlaşmada belirgin bir azalma meydana gelmektedir. İkincisi, boyutun artmasıyla, suyun dolaşımı esnasında daha çok engellerle karşılaşmasıdır. Bu iki tür etkileme, boyut artmasıyla suyun beton içindeki hareketinin azalmasından dolayı sünmenin daha küçük değerler almasına yol açmaktadır.

Su içinde saklanan betonlarda, sünme numune boyutuna bağlı değildir. Bunu, su içinde tutulan betonların içindeki rutubet dağılımının homojen olmasıyla açıklamak mümkündür.

Boyutun sünme üzerindeki etkisi rötrede olduğu gibi V/S karakteristiği ile belirtilebilir. Burada V elemanın hacmi, S ise bu hacme ait yüzey alanlarının

toplamıdır. Yapılarda genellikle prizmatik çubuklar kullanıldığından eleman boyutunun büyük olması halinde bu oran F/M şeklindedir. Burada F elemanın kesit alanı, M ise bu alana ait çevrenin toplam uzunluğudur. F/M yerine 2F/M alınırsa, bu, kesitin ortalama çapını gösterir. Kesit, boyutun V/S veya 2F/M oranı ile birlikte artmaktadır. V/S oranının veya 2F/M ortalama çapının küçülmesi halinde sünme değerinde belirgin bir artış olur. V/S oranının 15 cm. den büyük olması halinde boyutun sünme üzerinde etkisi yoktur. Bazı araştırmacılar V/S nin kritik değeri olarak 22.5 cm. bulmuştur. Kritik değer olarak 15 cm. alındığında, kare kesitli bir elemanda kesit boyutunun 60 cm. den büyük olması halinde boyut etkisi kaybolmaktadır. Döşeme ve perde gibi kesit boyutlarından birinin diğerinin yanında büyük olması halinde V/S oranı $d/2$ 'ye eşittir. (d perde veya döşeme kalınlığı). Bu elemanlarda kalınlığın 30 cm. den büyük olması halinde boyut etkisi ortadan kalkar [1].

Çimento Bileşimi :

Rötredekine benzer şekilde sünme ve portland çimentosu bileşenleri arasında bir takım ilişkiler vardır. C_3A bileşenindeki artış veya etkili C_3S bileşenindeki düşüş sünmeyi artırır [3]. Aynı koşullar altında yapılan deneylerde, en az sünme alüminli çimento kullanıldığında elde edilmektedir. Bunu, portland tipi çimentolar izlemektedir. Puzolanlı portland çimentoları ise daha fazla sünme yapma eğilimindedir. Uçucu küllü çimentolarda, çimentonun yerini alan kül miktarı %25 ' i geçmedikçe sünmede bir artış meydana gelmemektedir. Kül miktarının %25 ' i geçmesi halinde sünmede artma başlamaktadır [1].

Katkı Maddeleri :

Genel olarak kuruma rötresini arttıran katkıların sünmeyi de arttırdığı ifade edilir. Kalsiyum klorid yaygın bir örnektir. Buna su düşürücü ve priz geciktirici katkıları da dahil edilebilir. Bununla birlikte, karışımdaki değişiklikler ile su düşürücülerin kullanımı birbirlerine eşlik ederek (daha az su/çimento oranı veya daha az çimento dozajı) sünmedeki muhtelif artışların dengelenebileceği belirtilmiştir. Kullanım için önerilen katkıların sünmeye etkilerinin test edilmesi gerekir [3].

Agrega :

Agregalar ancak yüksek gerilmeler altında ve betona nazaran çok az sünme yaparlar. Bununla birlikte, agregalar beton içinde daha küçük gerilmelerin etkisi altındadır. Bu yüzden beton içindeki agregaların sünme yapmadığı söylenebilir. Agregalar çimentonun sünmesini frenleyerek betonun sünmesini etkilemektedir. Agreganın elastisite modülü ve agreganın bileşeni en önemli parametrelerdir. Agreganın elastisite modülünün büyük olması halinde, agreganın deformasyona daha fazla karşı koyabilmesi nedeniyle frenleme etkisi büyük olacak ve böyle bir agregayı kullanarak üretilen beton daha az sünme yapacaktır. Agreganın porozitesinin artması elastisite modülünü azaltır. Porozitesi büyük olan agregaları kullanarak üretilen betonlar fazla sünme yapma eğilimindedir [1]. Agreganın boyutu, granülometrisi ve yüzey yapısının etkileri azdır [3].

Kür Koşulları :

Yüklemede beton nemli kürünün süresi sünme büyüklüğünü etkiler. Daha kısa kür sürelerinde çimento hamurunun porozitesi daha yüksek ve hidrasyon derecesi daha azdır. Bununla birlikte, porozite ve dayanıklılık zamanla belirgin bir şekilde değişmediğinde yaş etkisi daha olgun betonlarda da devam eder. Bu yüzden gerilmeye karşı dayanıklılığı arttıran C-S-H arasındaki bağdaki değişimlerin neden olduğu yaşlanma etkisi vardır. Bazı araştırmacılar beton hızla hidrate olurken yüklendiği zaman bir olgunlaşma bileşeninin oluştuğunu ileri sürmüşlerdir. Kürdeki bir sıcaklık artışı temel ve kuruma sünmesini azaltır. Azalma miktarı sıcaklığa ve sıcaklığın süresine bağlıdır. Oldukça küçük periyotlardaki yükseltilmiş sıcaklıklar bile sünmede önemli azalmalara neden olur. Gözlenen azalmalar öncelikle sünmenin kalıcı bileşenlerinde oluşur ve büyüklükçe benzer koşullar altındaki kuruma rötresi için gözlenen değerlere benzer. Bu gözlemler, yükseltilmiş sıcaklıkların C-S-H'nin yaşlanma sürecini arttırdığı varsayımı ile açıklanabilir [3].

Sıcaklık :

Sıcaklığın artırılması sünmeyi önemli ölçüde artırır. Deney sonuçlarına göre başlangıçta sünme sıcaklık ile birlikte artış gösterir. Bu artış 70-80 °C ' ye kadar devam ettikten sonra bir maksimumdan geçer ve sıcaklığın daha yükselmesiyle azalmaya başlar. 105 °C dolaylarında bir minimuma ulaşır. Bundan sonra sünme sıcaklıkla devamlı artış halindedir [1].

Sünme 70-80 °C 'ye kadar yaklaşık lineer artar. 70-80 °C üzerinde ilişkide belirsizlik vardır. Bazı araştırmalar 70-80 °C 'de yukarıda açıklandığı gibi bir maksimum bildirirken bazıları da lineer devam eden değişim bildirmiştir. Bu çatışan verilerin nedeni ve maksimum oranın varlığı açık değildir. Bunun zaman ve sıcaklık gibi değişik önyüklemelerin bir sonucu olabileceği önerilmiştir [3],[8].

Nem :

Kuru havada yani rutubeti düşük ortamda tutulan betonlar, rutubeti yüksek ortamda tutulan betonlardan daha fazla sünme yapar. Havanın rutubetinin artması, sünmenin küçük değerler almasına yol açmaktadır [9].

Sünmeyi etkileyen bir diğer faktör, gerilme uygulandığı vakit betonda bulunan bağlı olmayan suyun miktarıdır. Bu suyun fazla miktarda olması halinde beton fazla rötre ve sünme yapmaya elverişli bir durumdadır. Tamamen kurutulmuş betonlarda pratik bakımdan sünme meydana gelmemektedir. Beton yüklenmeden önce rutubetli bir ortamda tutulması halinde içinde bulunan su miktarında belirgin bir azalma olmaz. Böyle bir beton yükleme yapıldıktan sonra rutubeti düşük olan bir ortama götürülürse, buharlaşmaya elverişli bir ortamın bulunmasıyla beton içindeki suyun hareketi kolaylaşacağından fazla sünme yapmaya başlar.

Yüzleri tıkalı betonlarda suyun buharlaşma olanağı önemli derecede azalmış olduğundan ve bu durumda beton içindeki havanın sıkışması nedeniyle su hareketi bir hayli kısıtlandığından sünmede belirgin azalmalar meydana gelir.

Rüzgarlı bir ortamda kalan betonların, içindeki su hareketinin fazla olması nedeniyle, sünmesinin büyük değerler alması beklenir.

Tamamen kurutulmuş beton suya doyurulacak şekilde ıslatılacak olursa tekrar sünme yapmaya başlar. Islatılan betonlarda çimentonun hidratasyon olayının tekrar başlamasıyla ince çatlaklar oluşur. Bu çatlakların meydana gelmesi betonun mukavemetini düşürdüğü gibi sünme yoluyla kırılmayı da büyük ölçüde kolaylaştırır. Yangın etkisine maruz kalmış betonların ıslatılmasında bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [1].

2.1.5. Sünme Mekanizması :

Sünme Teorileri :

Betonlarda sünme olayının nasıl gerçekleştiğini açıklayan birçok teori ileri sürülmüştür. Betonun sünmesinde birçok parametre işe karıştığından hiçbir teori betonun sünmesini tam olarak açıklamamaktadır. Sünme teorileri içinde en geçerli olanı su sızıntısı teorisidir.

Higrometrik veya rutubet bakımından dengede bulunan betona bir basınç kuvveti uygulanınca, çimento hamuruna isabet eden kuvvet, jel elemanları ile adsorbe su tarafından karşılanır. Bu basınç kuvveti altında beton ani deformasyon yapar ve hacminde azalma olur. Bu hacim azalması jel boşluklarının hacimlerinin azalmasına yol açar. Boşluklardaki su buharı miktarı aynı kalırken hacim azalması, rutubet miktarının artması demektir. Bozulan rutubet dengesinin tekrar kurulabilmesi için su, özellikle adsorbe su, sızıntı yolu ile rutubeti daha düşük bölgelere yönelir. Adsorbe su daha ziyade kılcal su ile irtibat halindedir. Rutubet dengesinin bozulması sonucu hareket eden su difüzyon yolu ile kılcal suya karışır. Adsorbe suyun bulunduğu

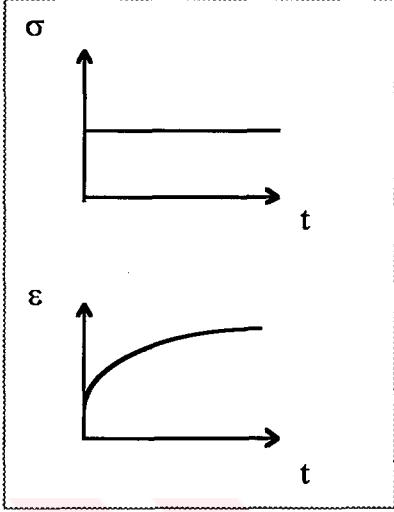
yerden ayrılması iki önemli sonuç doğurur. Birincisi, taşıyıcı su kalınlığının azalması, yani çimento jelini etkileyen gerilmenin artması. ikincisi, ayrışma basıncının azalması ve iç yapıda çekme gerilmelerinin daha küçük değerler almasıdır. Her iki sonuç çimento jelinin zamanla sünme deformasyonu yapmasına neden olur. Özetle su sızıntısı teorisine göre sünme, jel ortamı arasında kuvvet uygulanması sonucunda kaybolan rutubet dengesinin bir gecikmeyle tekrar kurulmasından ileri gelmektedir.

Çimento jelinin tesbit ettiği adsorbe su en son değerini aldıktan sonra da betonun sünmesinin 20, 30 sene gibi uzun süreler devam etmesinde, su sızıntısından farklı mekanizmalar da rol oynar. Bunlardan biri zeolitik suyun ortamın rutubetine ve uygulanan gerilmeye bağlı olarak hareket etmesidir. Zeolitik suyun kristaller arasındaki tabakadan ayrılması elemanları birbirine yaklaştırarak deformasyonu artırır. Tabaka kalınlığının az olması bu hareketi güçleştirir ve suyun uzaklaşması çok düşük hızla olur. Sünme uzun süre devam eder. Diğer bir mekanizma, Van Der Waals kuvvetlerinin çok küçük değerler alması sonunda kristal elemanlarının birbiri üzerinde yavaş bir şekilde hareket etmesi ve kaymasıdır. Meydana gelen viskoz deformasyon sünmenin kaybolmayan kısmını oluşturur. Son durumlarını aldıktan sonra elemanlar iyonik ve kovalan bağlarla birbirleriyle birleşirler [1],[10],[11].

Mikroçatlakların Sünmeye Katkısı :

Beton ve çimento hamuru yüklemeye önce kusurlar ve çatlaklar içerir. Bu çatlakların yayılması ve yeni çatlaklar oluşması özellikle yüksek gerilme düzeylerinde sünmeye katkıda bulunur. Bu, yüksek gerilme düzeylerinde sünme şekil değiştirmesinin nonlinear olmasının en muhtemel açıklamasıdır. Kuruyan betonda nem kaybından dolayı oluşan gerilmeler çatlamaı artırır [12]. Meyers, toplam sünme deformasyonunun %10-25 ' inin mikroçatlaklar nedeniyle meydana geldiğini belirtmektedir. Bununla birlikte, limit gerilmelere ulaşıldığında mikroçatlakların sünme olayındaki etkisi daha büyüktür [13].

2.2. Nonlinear Sünme :

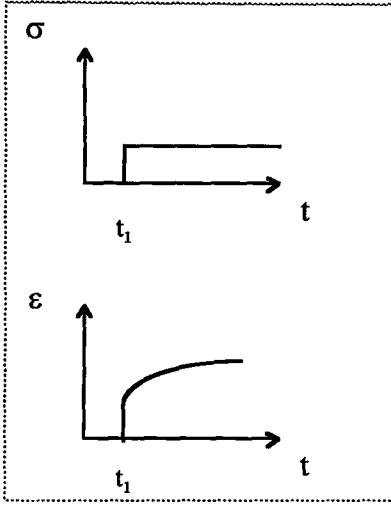


Şekil 2.4 t=0 da uygulanan sabit gerilme için sünme karşılığı

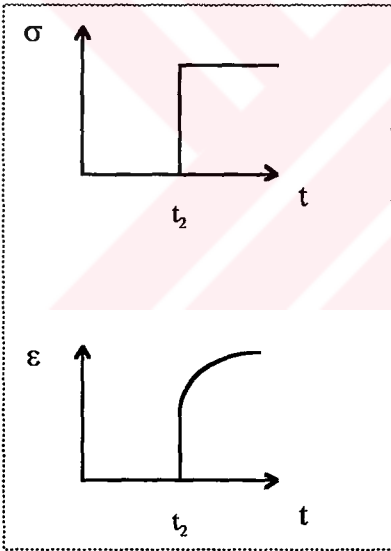
Nonlinear viskoelastik bir malzemeye t=0 anında sabit bir gerilme uygulanırsa (Şekil 2.4), σ sabit gerilmesi nedeniyle oluşan zamana bağlı şekil değiştirme aşağıdaki polinom şeklinde gösterilebilir :

$$\varepsilon(t) = \sigma\varphi_1(t) + \sigma^2\varphi_2(t) + \sigma^3\varphi_3(t) + \dots \quad (2.2)$$

(2.2) de $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ zamana bağlı malzeme fonksiyonlarıdır. (2.2) ye daha fazla terimler ilave ederek nonlinear davranış kabulündeki doğruluk artırılabilir. Plastikler için ilk üç terimin yeterli olduğu deneylerle gösterilmiştir.



Şekil 2.5 $t=t_1$ de uygulanan sabit gerilme için sünme karşılığı



Şekil 2.6 $t=t_2$ de uygulanan sabit gerilme için sünme karşılığı

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 da gösterilen $t=t_1$ ve $t=t_2$ anlarında sırasıyla σ_1 ve σ_2 gerilmelerinin uygulanması durumlarında ise oluşan zamana bağlı şekil değiştirmeler (2.2) ye göre aşağıdaki şekilde hesaplanabilir :

$$\varepsilon_1(t) = \sigma_1 \varphi_1(t-t_1) + \sigma_1^2 \varphi_2(t-t_1) + \sigma_1^3 \varphi_3(t-t_1) + \dots \quad t > t_1 \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_1(t) = 0 \quad t < t_1 \quad (2.3a)$$

$$\varepsilon_2(t) = \sigma_2 \varphi_1(t-t_2) + \sigma_2^2 \varphi_2(t-t_2) + \sigma_2^3 \varphi_3(t-t_2) + \dots \quad t > t_2 \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_2(t) = 0 \quad t < t_2 \quad (2.4a)$$

(2.3) ve (2.4) deki $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ zamana bağılı fonksiyonları, (2.2) deki $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ zamana bağılı fonksiyonlarıyla ; t yerine sırasıyla $(t-t_1)$ ve $(t-t_2)$ konulması şartıyla aynıdır. Bir başka deyişle, malzemenin gerilmeye verdiği yanıt her zaman için aynıdır. Bu kabul, birçok mühendislik malzemesi için kısa zaman aralıklarında kabul edilebilir. Fakat birçok istisnalar vardır. Portland çimentosuyla üretilen betonlar, gerilmelere, değişik kür koşullarından sonra değişik şekilde cevap verirler. Bu çeşit malzemelere yaşanan malzemeler adı verilir.

Sünme-zaman eğrisi $t=0$ anında sonlu bir sünme hızı ile başlar ve bir süre sonra asimptotik olarak sabit bir şekil değiştirmeye veya sabit bir sünme hızına ulaşır. Bu koşullardan hiçbiri birçok viskoelastik malzemenin gerçek davranışını kesin olarak açıklamaz. Birçok plastik malzeme, beton, ahşap ve bazı metaller başlangıçta çok büyük bir sünme hızı gösterirler. Ayrıca küçük bir şekil değiştirme bölgesi içinde sünme hızı devamlı bir şekilde azalır.

Bazı matematik modeller, viskoelastik malzemelerin sünme davranışının ana özelliklerini, hem sünmenin ilk dönemlerinde, hem de daha geniş zaman aralıklarında, kesin olarak açıklamakta iyi sonuçlar verir. Malzemelerin sünme davranışı, zamandan bağımsız ve zamana bağımlı iki şekil değiştirme ile açıklanabilir ve viskoelastik malzemelerin sabit gerilmede sünmesi için aşağıdaki ifadenin iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + bt^n \quad (2.5)$$

Burada ε şekil değiştirme, t zaman, n gerilmeden bağımsız bir sabit, ε_0 zamandan bağımsız şekil değiştirme, b zamana bağılı terimin katsayısıdır. (2.5) formülü düzenlenerek ve logaritma alınarak,

$$\log(\varepsilon - \varepsilon_0) = \log b + n \log t \quad (2.6)$$

bulunur. Bu bir doğru denklemdir ve $\log(\varepsilon - \varepsilon_0)$ ile $\log t$ birlikte çizildiğinde, n doğrunun eğimi ve $\log b$ katsayıdır. n gerilmeden ve gerilme durumundan bağımsızdır [14].

2.3. Hasar Mekanikliği :

2.3.1. Giriş :

İstenmeyen mekanik şartlara ve çevre koşullarına maruz kalan modern mühendislik malzemeleri, gittikçe artan mikroyapısal değişiklikler sebebiyle mukavemet kayıplarına uğramaktadır. Bu değişiklikler mekanik özellikleri zayıflattığından 'Hasar' terimi kullanılmaktadır.

Güvenilir yapılar dizayn edilirken hasar derecesini tahmin etmek için, hasar olayının mekanik terimler cinsinden formüle edilmesi gerekmektedir. Böylece analitik ve hesaplamalı teknikler kullanılarak, çeşitli mühendislik problemlerini analiz etmek mümkün olur.

Genel olarak hasarın teorik bir tanımını yapmak zordur. Bu zorluk, bu alanda yapılan deneylerin zorluğundan kaynaklanmaktadır (özellikle çok eksenli gerilme ve düzensiz yükleme altında). Bu yüzden deneysel veriler beklenmedik şekilde olabilir. Deneysel verilerden elde edilen, teorinin karmaşık değişkenlerinde yer alan fonksiyonların ve sabitlerin tesbit edilmesi pratik açıdan mümkün değildir.

Hasar mekanikliğinin problemleri genelde mühendislik problemleridir. Bu yüzden bu konuda çok fazla matematiksel formülasyondan kaçınılır.

2.3.2. Hasar Değişkenleri :

Hasar olayı genelde ‘geri çevrilmez’ tiptedir. Hasar arttıkça entropi artar. Hasar elastik deformasyon, elastik-plastik deformasyon altında ve sünme durumunda hızlanır. Verilen bir noktada sıcaklık sabit alarak kolaylık sağlanabilir.

Mikroyapısal değişikliklerin tanımlanabilmesi için esas hasar görmemiş durumun termodinamik (gözlenebilir) parametrelerine (elastik, plastik vb.) ek olarak, bazı iç değişkenler de (gizli parametreler) düşünülmelidir.

Hasarı tarif eden bir dizi parametre ‘D’ olarak simgelenen matematiksel bir büyüklükle karakterize edilir. Eğer $D=0$ ise malzeme hasar görmemiş demektir. Çünkü yeniden iyiye dönme hali yoktur ve D gittikçe artan bir büyüklüktür. En basit durumda D skaler bir fonksiyondur. Daha karmaşık durumlarda vektörel olarak alınır.

Hasar parametrelerinin seçimi kural olarak basit bir seçim değildir. Fiziksel mikroyapısal analizle veya deneysel verilerin doğrudan genelleştirilmesiyle tesbit edilebilir.

Uygulamalardan elde edilen sonuca göre, D’ nin fonksiyonlarının yeterince basit olması ve çok açık mekanik bir duyarlılığa sahip olması gerekir. Kural olarak hasarın doğrudan ölçülmesi mümkün değildir. Fakat hasar, malzeme özelliklerinin (elastik, elektrik, akustik...) gözlenmesiyle yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

Hasar değişkeni olarak malzemedeki ‘çatlak ve boşlukların yüzey yoğunluğu’ kabul edilir. Ancak farklı kusur tipleri ve bunların dağılımı için farklı matematiksel hasar tarifleri kullanılabilir. Genelde hasar, malzemenin elastik özelliklerine etki eder ve hasar ilerledikçe malzeme anizotrop hale gelir.

2.3.3. İzotropik Hasar :

Cismin belirli bir kesitini ele alalım. Hasarsız bölgenin ilk alanına A_0 diyelim. Hasar sonucu malzemenin bir bölümü kaybedilir. Kaybedilen alanı A ile gösterelim. Böylece A_0-A değeri, bölgenin alanının etkili, gerçek değeri olarak tanımlanabilir.

İzotropik hasar durumunda çatlaklar ve boşluklar tüm yönlere eşit olarak yayılmıştır. Hasar değişkeni skaler olarak kabul edilirse D şu şekilde tanımlanabilir [15].

$$D = A / A_0 \quad (2.7)$$

Bu pozitif artan bir fonksiyondur. Bazen şu fonksiyonu kullanmak daha uygun olur ;

$$\psi = 1-D = \frac{A_0-A}{A_0} \quad (2.8)$$

Bu fonksiyona 'devamlılık' fonksiyonu denir ve pozitif azalan bir fonksiyondur.

Hasar görmemiş malzemede $D=0$, $\psi=1$ dir. Tam hasar görmüş durumda ise $D=1$, $\psi=0$ dır.

Gerçek gerilme σ_a 'yı tek eksenli durumda tanımlarsak ;

$$\sigma_a = \frac{P}{A_0-A} = \frac{P}{A_0(1-D)} = \frac{P}{A_0\psi} = \frac{\sigma}{\psi}$$

Burada σ , nominal gerilme ; σ_a , kesitin hasarsız alanına gelen gerilmedir. Böylece ;

$$\psi = \sigma(t) / \sigma_a(t) \quad (2.9)$$

elde edilir. Deneylelerden ψ 'nın şu şekilde olduğu görülmüştür.

$$\psi(t) = 1 - at^b \quad (2.9a)$$

Cismin şekil değiştirmesine sadece gerçek gerilmenin sebep olduğu kabul edilir. Aynı zamanda hasar büyüme hızının da gerçek gerilmeye bağlı olduğu kabul edilmiştir [15].

Tek eksenli durumda, hasar denkleminin basit bir şeklini düşünürsek ;

$$\frac{d\psi}{dt} = -A (\sigma/\psi)^n \quad (2.10)$$

Burada A ve n, malzeme sabitleridir. Hasarsız malzeme için t=0 da $\psi=1$ ' dir. Tamamen hasara uğrayan malzemelerde ise $\psi=0$ ' dır.

2.3.4. Hasarın Ölçülmesi :

Ultrasonik Dinamik Metot :

Hasarı direkt olarak ölçmek mümkün değildir. Hasarın nicel değeri, olayı temsil etmesi için seçilen değişkenlerin tanımlanmasına bağlıdır.

Ultrasonik dalgaların yayılması ile hasar ölçülebilir. Düzlemsel dalgaların hasara uğramış bir numune içindeki yayılma hızının veya zamanının ölçülmesi, hasara uğramış malzemenin elastisite modülünü verir (\tilde{E}). Bu durumda hasar ;

$$D = 1 - (\tilde{E} / E) \quad \text{dir.} \quad (2.11)$$

E, boyuna ve enine dalgaların hızı cinsinden ifade edilebilir ;

$$\tilde{E} = \rho \tilde{V}_T^2 \frac{3\tilde{V}_L^2 - 4\tilde{V}_T^2}{\tilde{V}_L^2 - \tilde{V}_T^2} \quad (2.12)$$

İzotropik hasar hipotezinden (sabit poisson katsayısı) ve ρ 'daki değişimleri ihmal ederek ;

$$V_L^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{ve} \quad \tilde{V}_L^2 = \frac{\tilde{E}}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

elde edilir. Sonuç olarak ;

$$D = 1 - \tilde{V}_L^2 / V_L^2 \quad (2.13)$$

2.3.5. Sünme Hasar Yasaları :

Kachanov ' un Sünme Hasar Yasası :

Bu yasa, gevrek viskoplastik hasar ile ilgilidir.

$$\dot{D} = \left[\frac{\sigma}{A_0(1-D)} \right]^r \quad (2.14)$$

Burada A_0 ve r karakteristik sünme hasar katsayılarıdır. σ gerilme, D hasar, \dot{D} hasar hızıdır. Bu ifade birincil ve ikincil sünme için çok küçük değerler alır.

Kırılma zamanı t_c , sünmenin kritik bir değere ($D=D_c$) eşit olması halinde diferansiyel denklemin çözümü ile elde edilir. $D=0$ ve $t=0$ başlangıç koşullarıyla ;

$$t_c = \frac{1-(1-D_c)^{r+1}}{r+1} \left(\sigma / A_0 \right)^{-r} \quad (2.15)$$

r ' nin olağan değerleri için $(1-Dc)^{r+1}$, 1 olarak alınabilir ve diferansiyel denklemi 0 ile D arasında integre ederek hasar değeri basit bir ifade şeklinde gösterilebilir ;

$$D = 1 - (1-t/t_c)^{1/(r+1)}$$

$$t_c = \frac{1}{r+1} (\sigma/A_0)^r \quad (2.16)$$

Gerilme ve kırılma zamanı arasındaki ilişki deneysel olarak ta doğrulanabilir. A_0 ve r sıcaklığa çok bağlıdır.

Kachanov ' un yasası Rabotnov tarafından fazladan bir k katsayısı ile aşağıdaki şekilde önerilmiştir.

$$\dot{D} = (\sigma/A)^r (1-D)^{-k} \quad (2.17)$$

' k ' katsayısı genel olarak r ' den daha etkilidir. Bu; sünme nedeniyle oluşan hasarın hasar hızına etkisinin, gerilmenin hasar hızına etkisinden daha önemli olduğunu gösterir [16].

(2.11) in integrasyonu sabit gerilme için aşağıdaki sonuçları verir :

$t=0$ da $D=0$, $t=t_c$ de $D=1$ dir. Buradan :

$$D = 1 - (1-t/t_c)^{1/(k+1)} \quad \text{ve} \quad t_c = ((1/(k+1)).(\sigma/A)^r) \quad (2.18)$$

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzemeler :

3.1.1. Çimento :

Beton numunelerin üretiminde Akçimento Fabrikası'nın ürünü olan KPÇ 32,5 çimentosu kullanılmıştır. Çimento kullanılmadan önce TS 24'e göre fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve sonuçların TS 19'da belirtilen KPÇ 32,5 standardına uygunluğu tespit edilmiştir. TS 24'e göre bulunan fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Çimentonun fiziksel özellikleri :

Blaine özgül alanı m ² /kg	380
90 µm elek üstünde kalan %	1,6
200 µm elek üstünde kalan %	0,2
özgül ağırlık kg/m ³	3020
normal kıvam suyu %	29
priz başlangıcı	2 saat 55 dakika
priz sonu	4 saat

Tablo 3.2 Çimentonun mekanik özellikleri :

yaş	basınç muk. (N/mm ²)	eğilme muk. (N/mm ²)
7 gün	25,3	5,5
28 gün	41,8	7,3

3.1.2. Su :

Deneysel çalışmalarda İstanbul şehir suyu kullanılmıştır.

3.1.3. Agrega :

Agregalar üzerinde TS 3530'a göre elek analizi yapılmıştır. Deneyleerde kullanılmak üzere en büyük agrega tane çapı 19,1 mm. seçilmiştir. Kullanılan kumun, kırmataş1'in ve kırmataş2'nin granülometrik bileşimleri ile özgül ve birim ağırlıkları aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.3 Agreganın elek analizi sonuçları :

elek(mm)	19,1	16	8	4	2	1	0,5	0,25
kum	100	100	99	98	94	92	86	14
kt 1	100	99	68	11	-	-	-	-
kt 2	100	74	3	-	-	-	-	-
karışım	100	91	56	38	33	32	30	5

Tablo 3.4 Agreganın birim ve özgül ağırlıkları :

malzemeler	birim ağırlık (kg/m ³)	özgül ağırlık (kg/m ³)
kum	1480	2620
kırmataş1	1440	2690
kırmataş2	1460	2690

Birim ağırlık tayini TS3529'a göre, özgül ağırlık tayini TS 3526'ya göre yapılmıştır. Kum üzerinde TS 3673'e göre yapılan organik madde tayini deneyinde çözelti rengi açık sarı olarak tespit edilmiştir. TS 3527'ye göre yapılan ince madde tayini deneyinde ise kumdaki ince madde oranı %2 olarak bulunmuştur.

3.2. Taze Beton Deneyleri :

Çimento dozajı 300 kg. ve su/çimento oranı 0,65 seçilmiştir. Kıvam için akıcı kıvama yakın plastik kıvam hedeflenmiştir. Mutlak hacim olarak kum:0,35m³, kt1:0,30m³, kt2:0,35m³ olarak belirlenmiştir. 6 adet 15x30 cm. silindir için gerekli olan 35 dm³ beton üretiminde kullanılacak malzeme hazırlanmıştır. Malzeme 50 lt. lik betonyere konup yeterli karıştırma sağlandıktan sonra su azar azar konularak istenilen kıvam elde edilmeye çalışılmıştır. Kıvam çökme konisi ve vebe aygıtı ile incelenmiştir. Ayrıca taze birim ağırlık deneyi yapılmış ve 1m³ betonun gerçek bileşimi hesaplanarak Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

TS 2871'e göre alt çapı 20 cm., üst çapı 10 cm. ve yüksekliği 30 cm. olan kesik çökme konisi 3 kademede doldurulmuş, her tabaka 25 kez şişlenmiştir. Koni sarsılmadan kaldırılarak betonun çökme miktarı ölçülmüştür.

Özel bir vibrasyon masası üzerine bir silindir kap ve kabın içine bir Abrams konisi yerleştirilmiş ve koni çökme deneyindeki esaslara göre doldurulmuştur. Koni kalıp çekildikten sonra serbest kalan betonun üzerine plastik bir disk yerleştirilmiş ve kılavuzlanmıştır. Vibrasyon masası çalıştırılarak betonun yayılıp iyice yerleşmesi, diskin tam oturması ile gözlenmiş ve bu işlem için geçen süre saniye olarak kronometreden okunmuştur (VeBe derecesi).

İç hacmi 8 dm³ olan standart birim ağırlık kabına 3 kademede doldurulan taze beton üzerinde yapılmıştır.

Tablo 3.5 Taze beton deney sonuçları ve bileşenlerin gerçek miktarı :

çökme (cm)	11,5
VeBe derecesi (sn)	2,5
taze birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	2380
çimento (kg/m ³)	299
su (dm ³ /m ³)	221,26
kum (kg/m ³)	639,86
kırmataş1 (kg/m ³)	562,12
kırmataş2 (kg/m ³)	657,8
hava (%)	0

3.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri :

3.3.1. Basınç Deneyi :

Basınç deneyi, çapı 15 cm., yüksekliği 30 cm. olan beton silindirler üzerinde yapılmıştır. Bu işlem için 6 adet silindir kullanılmıştır. Taze beton deneyleri kısmında açıklandığı gibi üretilen beton silindir numuneleri dökümden 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 1 gün süreyle suda bekletilmiştir. 1 gün sonra sudan çıkarılan numuneler, deneylerin yapılacağı güne kadar 20 ± 2 °C ve %50 bağıl nemde bekletilmiştir. 6 adet silindirden 3 tanesi dökümü takip eden 14. günde, diğer 3 tanesi ise 28. günde basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numunelere deney tarihinden 1 hafta önce başlık yapılmıştır.

14. günde deneye tabi tutulan 3 silindirden 2 sine düşey ve yatay şekil değiştirmeleri ölçmek maksadıyla deformasyon çerçevesi takılmıştır. Düşey şekil değiştirmeleri ölçmek için çift çerçeveli ve komparatörlü düzen kullanılmıştır. Sabit yükleme hızıyla yüklenen numuneler için her 2 tonda bir komparatörden düşey şekil değiştirmeler okunmuş ve bu işlem numuneler dayanımını yitirene kadar sürdürülmüştür. Sonuçta gerime-düşey şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Yatay şekil değiştirmeler, düşey şekil değiştirmelerle aynı anda ölçülmüştür. Bu işlem için

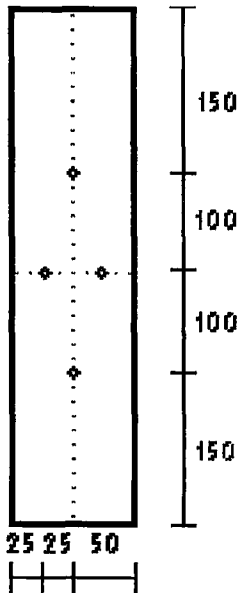
yatay çerçeve numunelere takılmış ve özel aletiyle yatay şekil değiştirmeler belirlenmiştir.

28. günde deneye tabi tutulan 3 silindir, sabit yükleme hızıyla basınç makinasında yüklenmiş ve üretilen betonun 28 günlük basınç mukavemeti bulunmuştur.

3.3.2. Sünme Deneyi :

Sünme deneyi, 10x10x50 cm. beton prizmalar üzerinde yapılmıştır. Tablo 3.5 ' te belirtilen bileşenlerin gerçek miktarı kullanılarak 9 adet prizma çelik kalıplara dökülmüştür. Dökümden 1 gün sonra kalıplar sökülmiş ve prizmalar 1 gün süreyle suda bekletilmiştir. Daha sonra havuzdan çıkarılan numuneler, deneylerin başlayacağı 14. güne kadar 20 ± 2 °C de ve %50 bağıl nemde tutulmuştur. Deneylerin başlamasından 1 gün önce 9 prizmanın 3'er yüzüne şekil 3.1'de gösterildiği gibi metal pimler yapıştırılmıştır. 9 adet numune 0'dan 8'e kadar numaralandırılmış ve 3 yüze A, B, C isimleri verilmiştir.

Numunelere uygulanacak yükler, silindirler üzerinde yapılan 14. gün basınç deneyi sonuçlarına göre belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Prizmalarda pimlerin yapıştırılması (sayılar mm. cinsindedir).

Yüklerin uygulanmasında çelik yaylı sünme çerçevelerinden yararlanılmıştır. İki çelik tabla arasına, bir çelik yay ile prizma beton numunesi seri halinde yerleştirilmiştir. Yükün büyük değerleri için iki çelik yaylı sistem kullanılmıştır. Aletin üst tarafındaki vidaların sıkıştırılmasıyla yayım uzunluğu (yüksekliği) azaltılmakta ve bu suretle beton üzerine istenen kuvvet uygulanmaktadır. Sünme ve rötreden dolayı numunelerin boyu kısalmaktadır ve bu kısılmadan dolayı zamanla yaylarda gevşeme meydana gelir. Bu yüzden numunelere uygulanan kuvvet zamanla azalmaya başlayacaktır. Yük uygulandıktan sonraki ilk dönemlerde sünme hızı yüksek olduğundan yayların üzerindeki kuvvetin azalması fazladır. Bu durumu ortadan kaldırmak için muhtelif zamanlarda vidalar gereği kadar sıkıştırılarak yay yüksekliğinin deneyin başındaki değeri alması sağlanmıştır.

Sünme okumaları numunelerin 3 yüzünde yapılmıştır. Şekil 3.1 ' deki Y düşey doğrultusundaki ve X yatay doğrultusundaki pimler için iki ayrı tip ölçme aleti (demek) kullanılmıştır.

Okumalar yükün uygulanmasını takip eden ilk dönemde her gün, daha sonraki dönemlerde deformasyon eğrilerinin gidişatına göre daha seyrek olmak üzere yapılmıştır. Aşağıda sözü geçen etalon okumaları ile sıcaklık değişimlerinin etkisi ortadan kalkmış olmaktadır.

Bir adet numune yüklenmeden okumalara tabi tutulmuştur. Bu numune üzerinde okunan değerler rötrenin etkisini vermektedir.

Y doğrultusundaki pimler için kullanılan demek, direkt olarak şekil değiştirmeyi vermektedir. Okunan değerlerden etalon okumaları çıkarılarak, yük altında betonun yaptığı toplam düşey deformasyon bulunmuştur.

X doğrultusundaki pimler için kullanılan demekte, okunan değerlerden etalon okumaları çıkarılarak boy değişimi bulunmuştur. Boy değişimi ilk boya bölünerek, yük altında betonun yaptığı toplam yatay deformasyon bulunmuştur.

3.3.3. Ultrases Deneyi :

Beton numunelerde ultrases hızı, prizma numunelerin karşılıklı iki yüzü arasında yapılmıştır. Okumalar Y düşey ekseni üzerinde üç noktada yapılmış ve üç okumanın ortalaması alınmıştır. Okuma yapılan noktalar, düşey eksenle yatay eksenin kesiştiği nokta ve bu noktanın 5'er cm. üstündeki ve altındaki noktalardır. Probların konulacağı karşılıklı yüzeylere gres yağı sürülmüştür. Ses alıcı ve verici proplarla sesin numune boyunca geçiş süresi mikrosaniye cinsinden ölçülmüştür. Numune içinden geçen sesin hızı, $V = L / t_u$ [km/sn] olarak bulunmuştur. L numune boyu [km] , t_u numune içinden ultrases geçiş süresidir [sn].



BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

4.1. Basınç Deneyi Sonuçları :

14. günde basınç deneyine tabi tutulan 3 silindir için bulunan mukavemetler Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 14 günlük basınç mukavemetleri

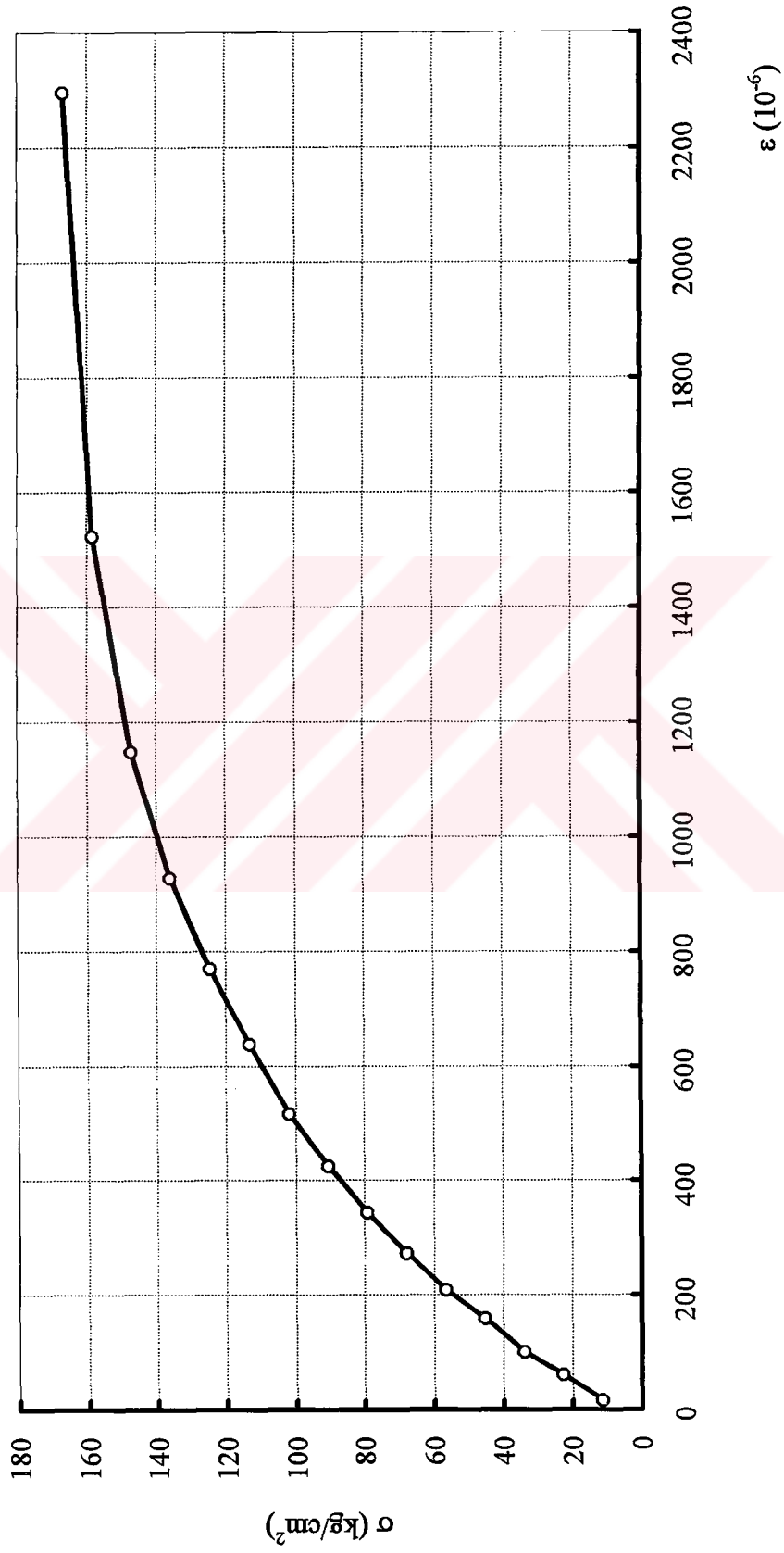
numune	1	2	3	ortalama
mukavemet (kg/cm ²)	167	163	162	164

14. günde yapılan basınç deneyinde 1. ve 2. numuneler için saptanan gerilme-şekil değiştirme eğrileri şekil 4.1 ve şekil 4.2 'de gösterilmiştir. Ayrıca 1. ve 2. numuneler için poisson oranları, yatay şekil değiştirmelerin düşey şekil değiştirmelere oranı şeklinde hesaplanmış ve poisson oranı-gerilme eğrileri şekil 4.3 ve şekil 4.4 'te gösterilmiştir.

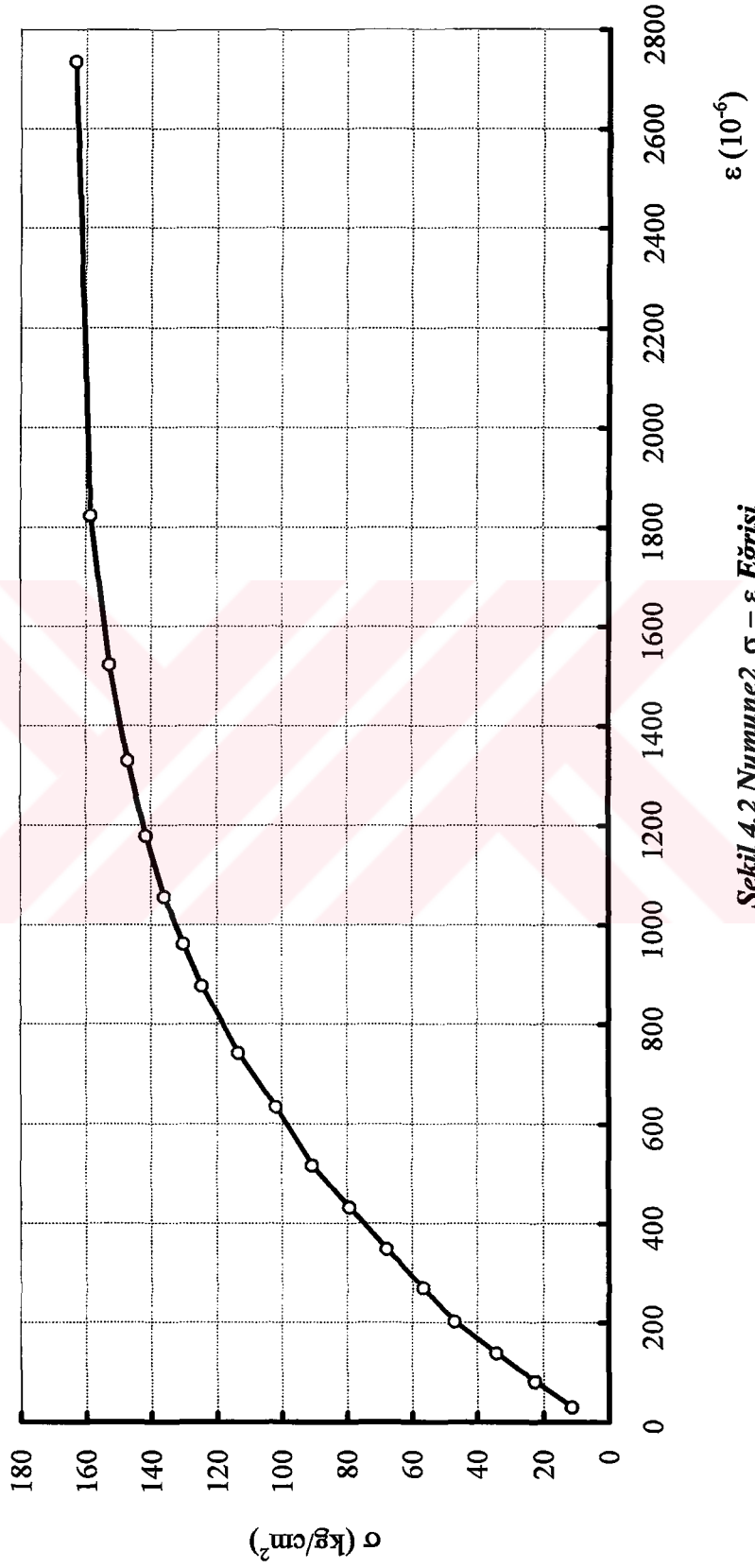
28. günde yapılan basınç deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 4.2 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 28 günlük basınç mukavemetleri

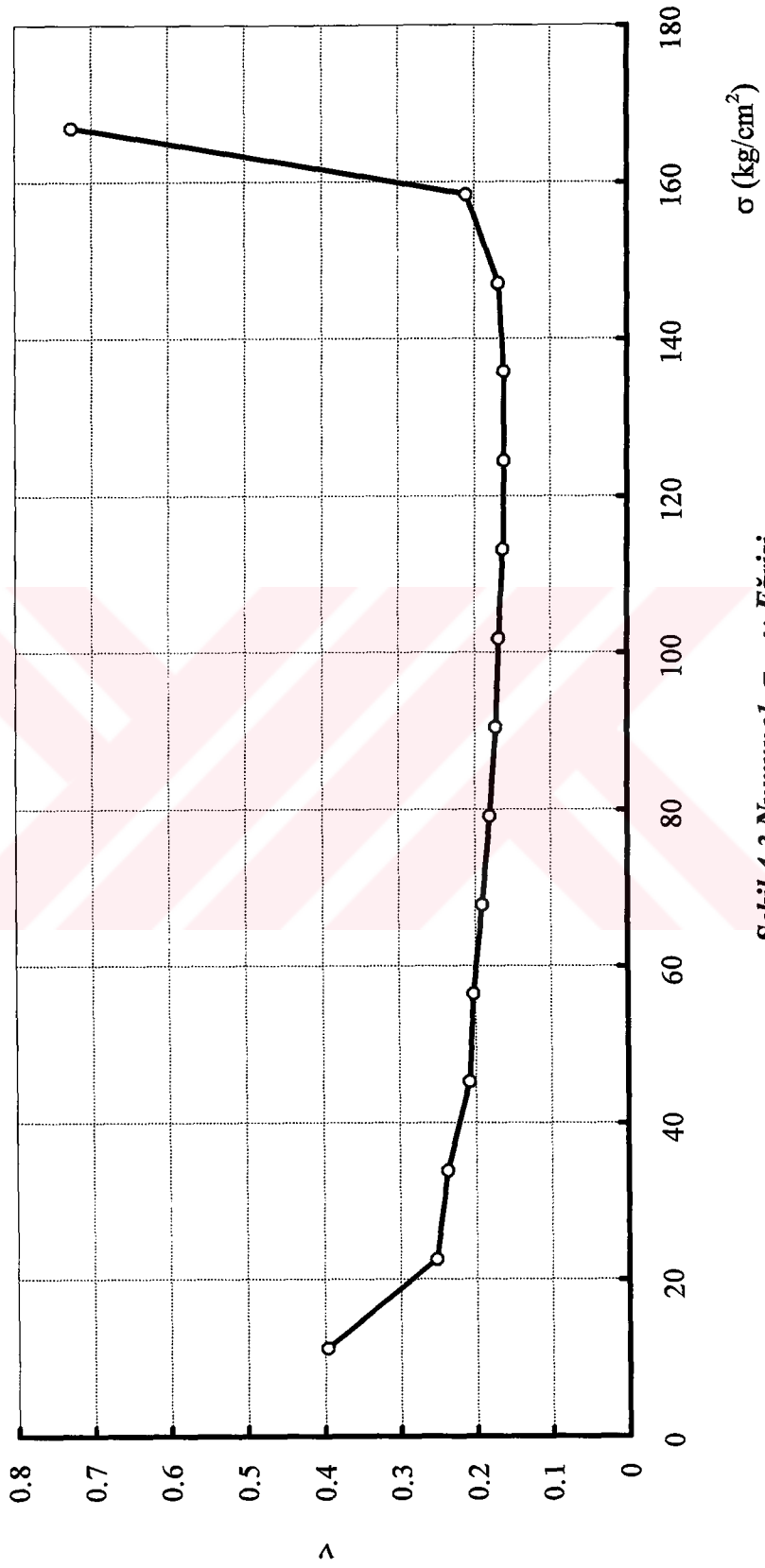
numune	1	2	3	ortalama
mukavemet (kg/cm ²)	164	185	208	186



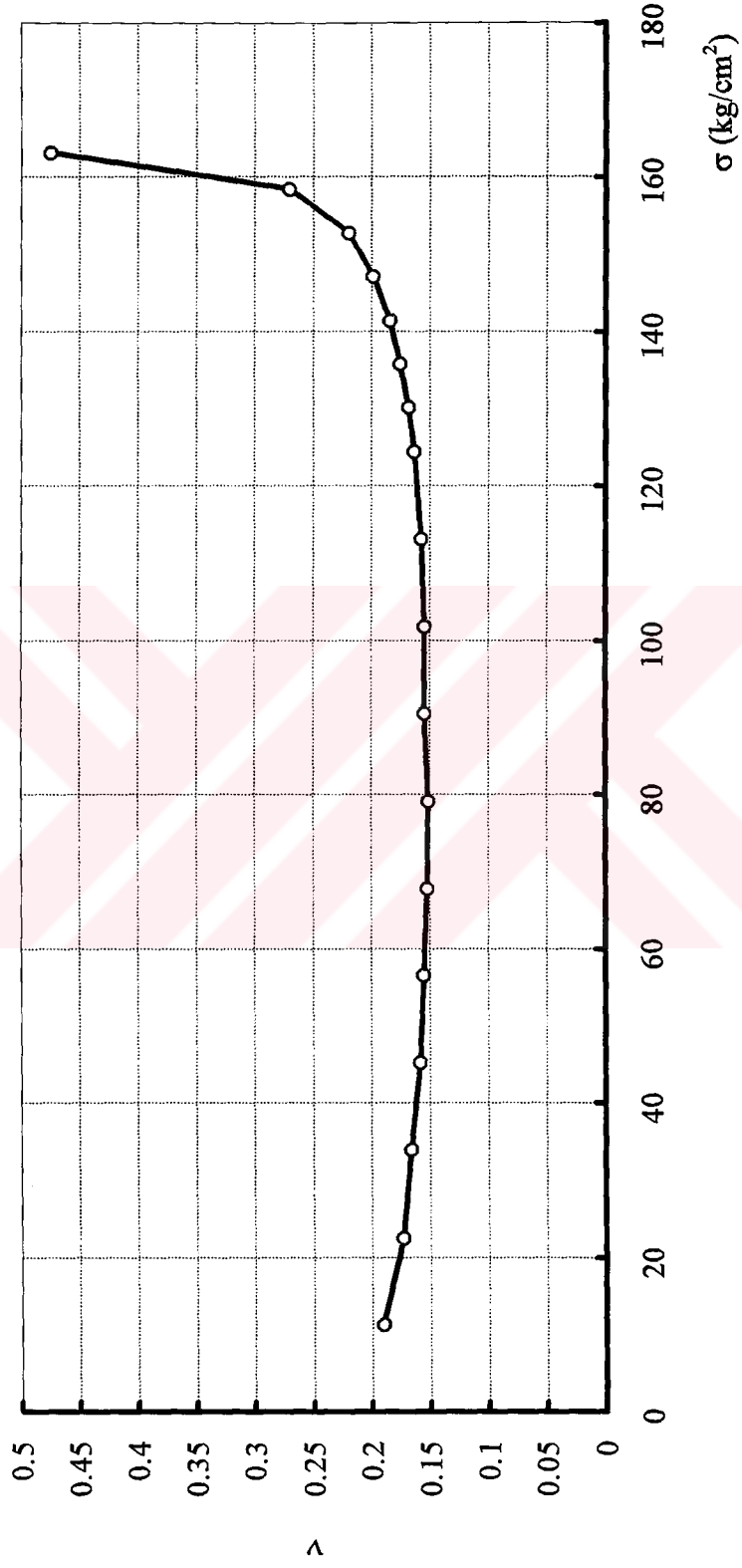
Şekil 4.1 Numune1 $\sigma - \epsilon$ Eğrisi



Şekil 4.2 Numune2 $\sigma - \epsilon$ Eğrisi



Şekil 4.3 Numune1 $\sigma - \nu$ Eğrisi



Şekil 4.4 Numune2 $\sigma - \nu$ Eğrisi

4.2. Sünme Deneyi Sonuçları :

Numuneler üzerindeki yükler, 14. gün silindir basınç deneyi sonuçlarına göre uygulanmıştır. Her bir gerilme için iki numune kullanılmıştır. Kullanılan gerilmeler ve gerilme/mukavemet (σ/R) değerleri Tablo 4.3 'te gösterilmiştir. $R=163,9 \text{ kg/cm}^2$ dir.

Tablo 4.3 Sünme deneyinde kullanılan gerilmeler

	$\sigma \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	σ / R
σ_1	110	%67
σ_2	82	%50
σ_3	66	%40
σ_4	49	%30
σ_0	0	%0

Yatay şekil değiştirmeler için, numuneler üzerinden okunan toplam yatay şekil değiştirmelerden, yüksüz numunenin temsil ettiği rötre değerleri çıkarılarak net yatay sünme şekil değiştirmeleri bulunmuştur. Sonuçlar, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 'de gösterilmiştir. Sonuçlar bulunurken her gerilme için kullanılan iki numunenin ortalaması alınmıştır.

Düşey sünme şekil değiştirmeleri için, numuneler üzerinden okunan toplam düşey şekil değiştirmelerden, yüksüz numunenin temsil ettiği rötre değerleri çıkarılarak net düşey sünme şekil değiştirmeleri bulunmuştur. Sonuçlar, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 'te gösterilmiştir. Sonuçlar bulunurken her gerilme için kullanılan iki numunenin ortalaması alınmıştır.

Düşey sünme şekil değiştirmeleri için, (2.6) formülünde belirtildiği gibi $\log(\epsilon - \epsilon_0) = \log b + n \log t$ doğruları çizilmiş ve sonuçlar Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 'de gösterilmiştir. 'n' doğrunun eğimi ve $\log b$ katsayıları bulunarak (2.5) formülünde belirtilen $\epsilon = \epsilon_0 + bt^n$ şekil değiştirme-zaman fonksiyonları bulunmuştur.

Sonuçlar aşağıdaki gibidir.

$$\sigma/R = \%67 \text{ için } \varepsilon_1(t) = (856,5 + 1300,2 t^{0,20}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R = \%50 \text{ için } \varepsilon_2(t) = (468 + 529,4 t^{0,24}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R = \%40 \text{ için } \varepsilon_3(t) = (306,5 + 348,1 t^{0,29}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R = \%30 \text{ için } \varepsilon_4(t) = (223,5 + 309 t^{0,27}) \times 10^{-6}$$

'n' katsayıları gerilmeden bağımsızdır. 'n' katsayısındaki bu dağılma betonun heterojen yapısından ve deney hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle 'n' katsayılarının ortalaması alınmış ve buna göre yeniden düzenlenen ifadeler aşağıda gösterilmiştir.

$$\sigma/R = \%67 \text{ için } \varepsilon_1(t) = (856,5 + 1300,2 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R = \%50 \text{ için } \varepsilon_2(t) = (468 + 529,4 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R = \%40 \text{ için } \varepsilon_3(t) = (306,5 + 348,1 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R = \%30 \text{ için } \varepsilon_4(t) = (223,5 + 309 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

Bu durumda değişik yüklemelerle ilgili şekil değiştirmeler ,

$$\varepsilon_1(t) = \sigma_1 \varphi_1(t) + \sigma_1^2 \varphi_2(t) + \sigma_1^3 \varphi_3(t) + \sigma_1^4 \varphi_4(t)$$

$$\varepsilon_2(t) = \sigma_2 \varphi_1(t) + \sigma_2^2 \varphi_2(t) + \sigma_2^3 \varphi_3(t) + \sigma_2^4 \varphi_4(t)$$

$$\varepsilon_3(t) = \sigma_3 \varphi_1(t) + \sigma_3^2 \varphi_2(t) + \sigma_3^3 \varphi_3(t) + \sigma_3^4 \varphi_4(t)$$

$$\varepsilon_4(t) = \sigma_4 \varphi_1(t) + \sigma_4^2 \varphi_2(t) + \sigma_4^3 \varphi_3(t) + \sigma_4^4 \varphi_4(t)$$

olarak elde edilir.

Sünme fonksiyonlarının elde edilmesi için lineer denklem takımı çözümüne gidilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_1^2 & \sigma_1^3 & \sigma_1^4 \\ \sigma_2 & \sigma_2^2 & \sigma_2^3 & \sigma_2^4 \\ \sigma_3 & \sigma_3^2 & \sigma_3^3 & \sigma_3^4 \\ \sigma_4 & \sigma_4^2 & \sigma_4^3 & \sigma_4^4 \end{bmatrix} = A \text{ olarak gösterilirse ;}$$

$$A \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} \text{ dir. Buradan ;}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix} \text{ şeklinde bulunmuş olur.}$$

Elde edilen sünme fonksiyonları aşağıda gösterilmiştir.

$$\varphi_1(t) = (15,8 + 27,1 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

$$\varphi_2(t) = (0,48 + 0,76 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

$$\varphi_3(t) = (0,00628 + 0,00777 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

$$\varphi_4(t) = (0,023424 + 0,01942 t^{0,25}) \times 10^{-9}$$

Enine sünme şekil değiştirmeleri için de (2.6) formülüne göre Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 çizilerek enine şekil değiştirme-zaman fonksiyonları bulunmuştur :

$$\sigma/R=\%67 \text{ için } \varepsilon_{1e} = (75+83,7 t^{0,24}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R=\%50 \text{ için } \varepsilon_{2e} = (56+64,6 t^{0,17}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R=\%40 \text{ için } \varepsilon_{3e} = (13+22,4 t^{0,16}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R=\%30 \text{ için } \varepsilon_{4e} = (5+10,5 t^{0,29}) \times 10^{-6}$$

Yukarıda açıklanan nedenle 'n' katsayılarının ortalaması alınarak ;

$$\sigma/R=\%67 \text{ için } \varepsilon_{1e} = (75+83,7 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R=\%50 \text{ için } \varepsilon_{2e} = (56+64,6 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R=\%40 \text{ için } \varepsilon_{3e} = (13+22,4 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

$$\sigma/R=\%30 \text{ için } \varepsilon_{4e} = (5+10,5 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

elde edilir.

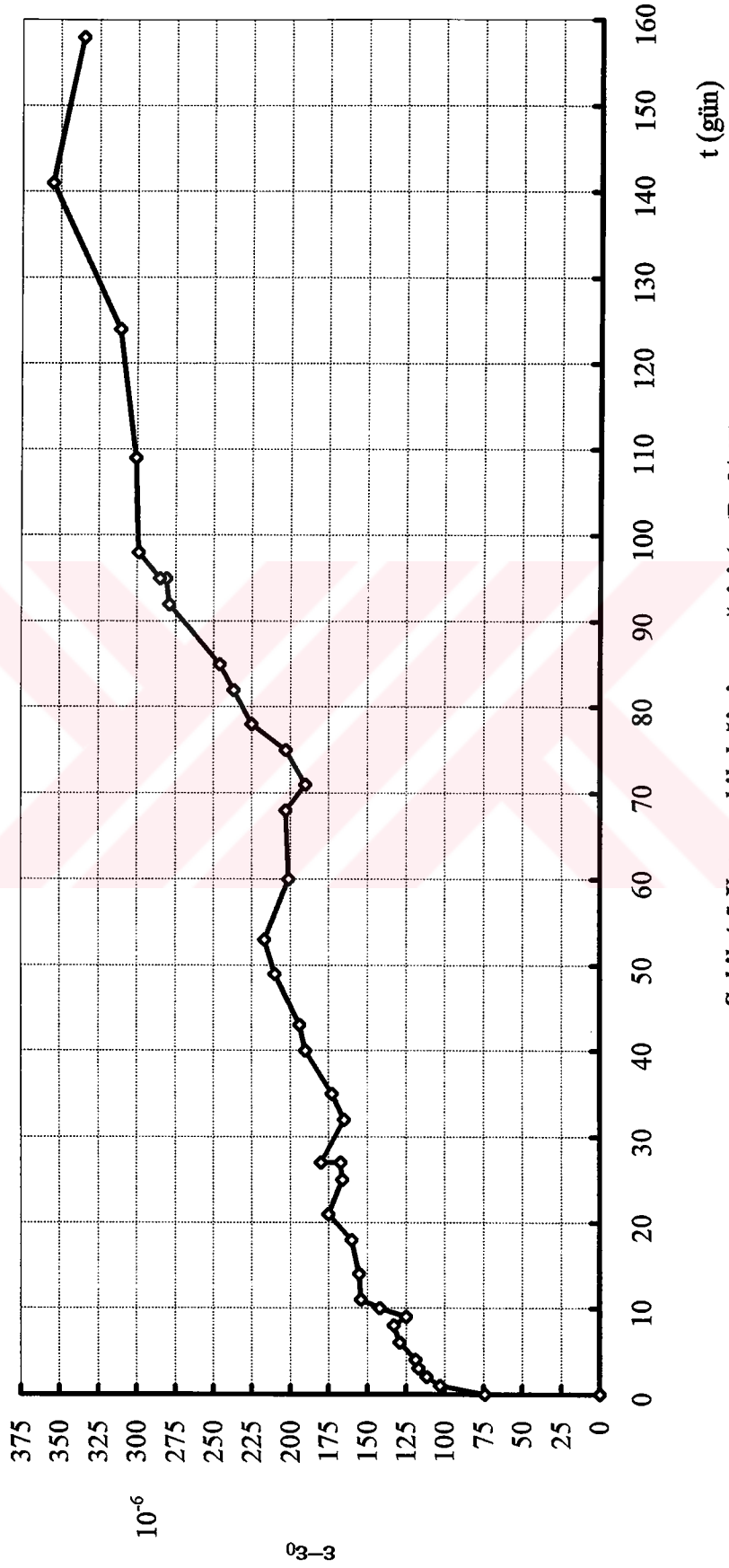
Enine doğultu için elde edilen sünme fonksiyonları aşağıda gösterilmiştir :

$$\varphi_{1e} = (8.2067+7.097 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

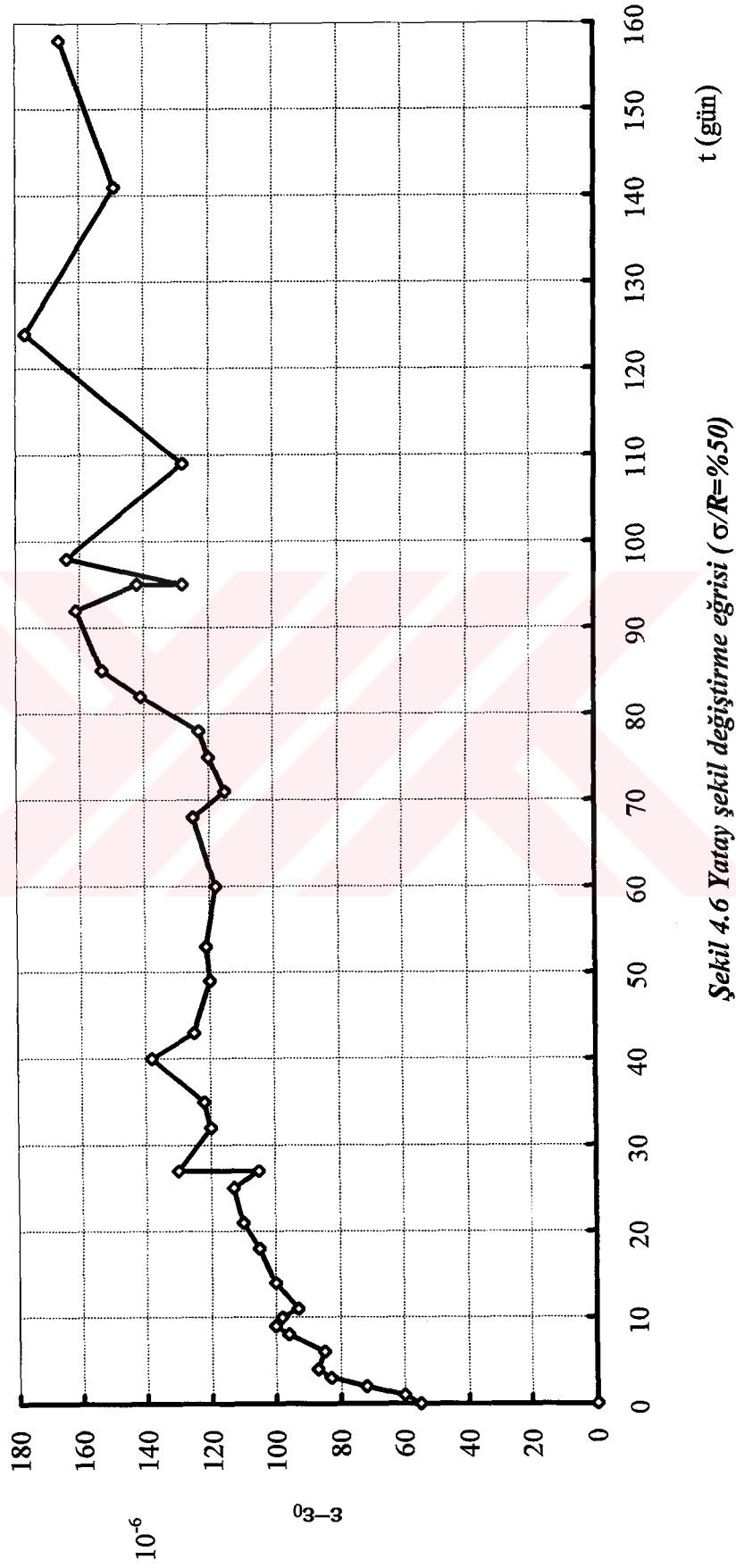
$$\varphi_{2e} = (0.3669+0.3162 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

$$\varphi_{3e} = (0.0052+0.0046 t^{0,22}) \times 10^{-6}$$

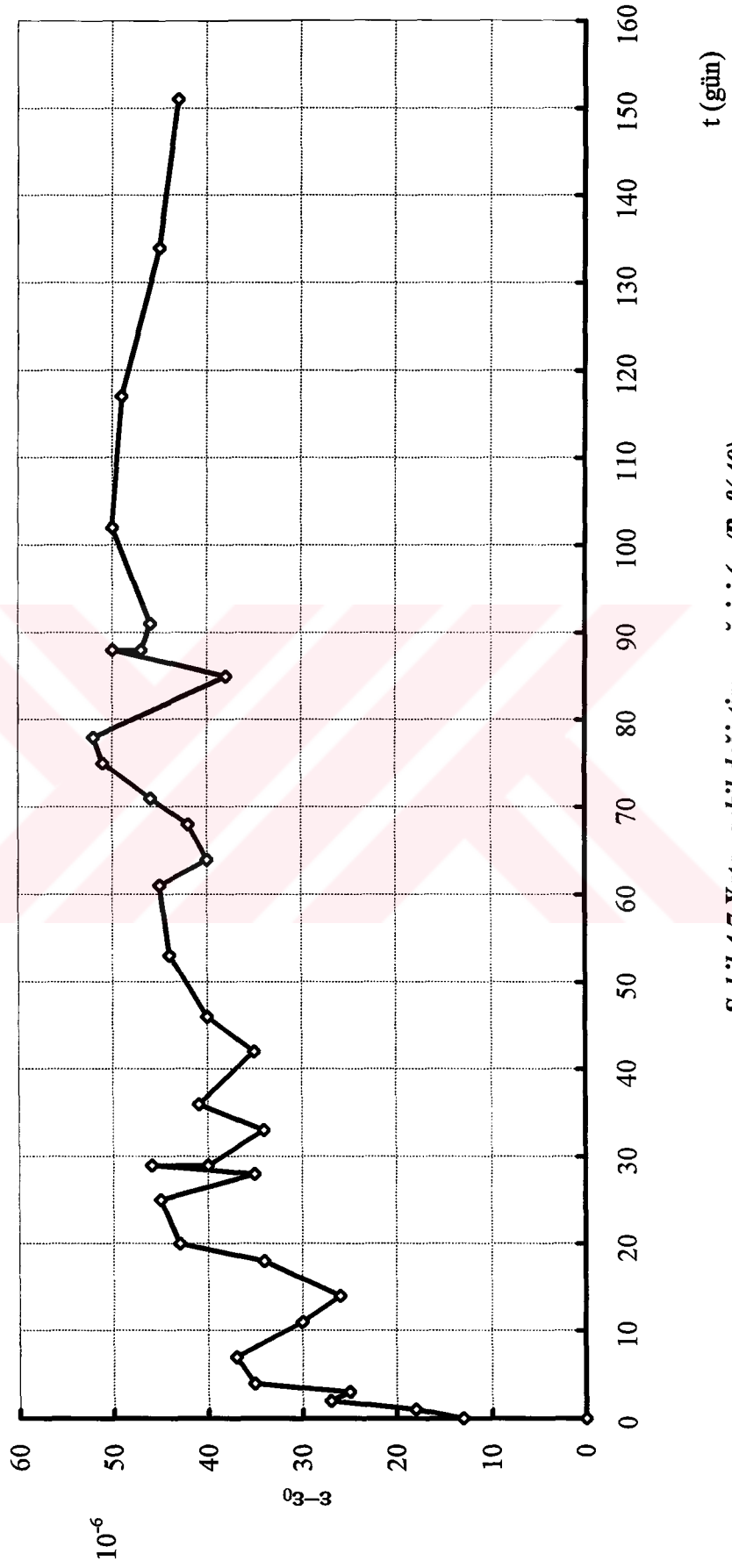
$$\varphi_{4e} = (0.0229+0.0203 t^{0,22}) \times 10^{-9}$$



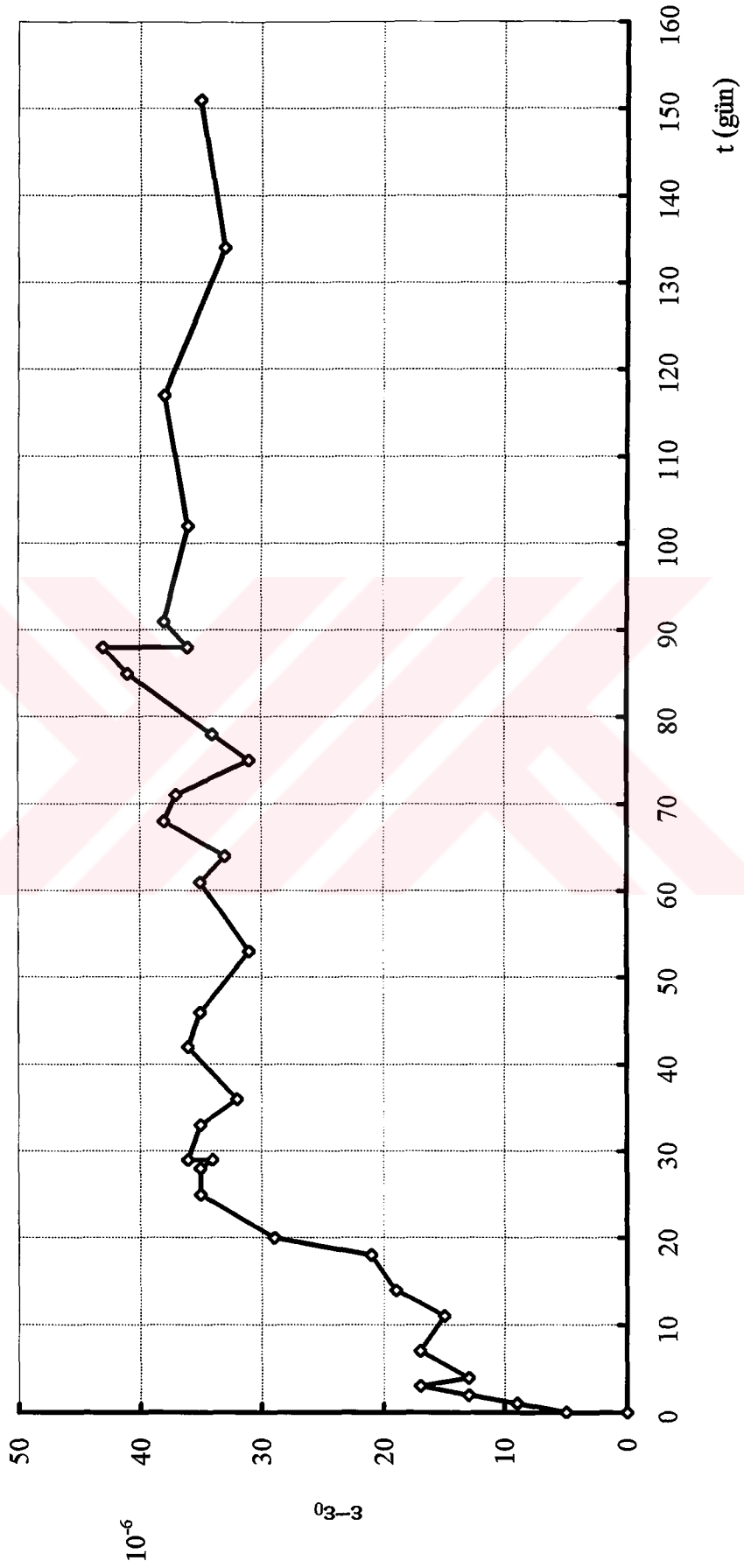
Şekil 4.5 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R = \%67$)



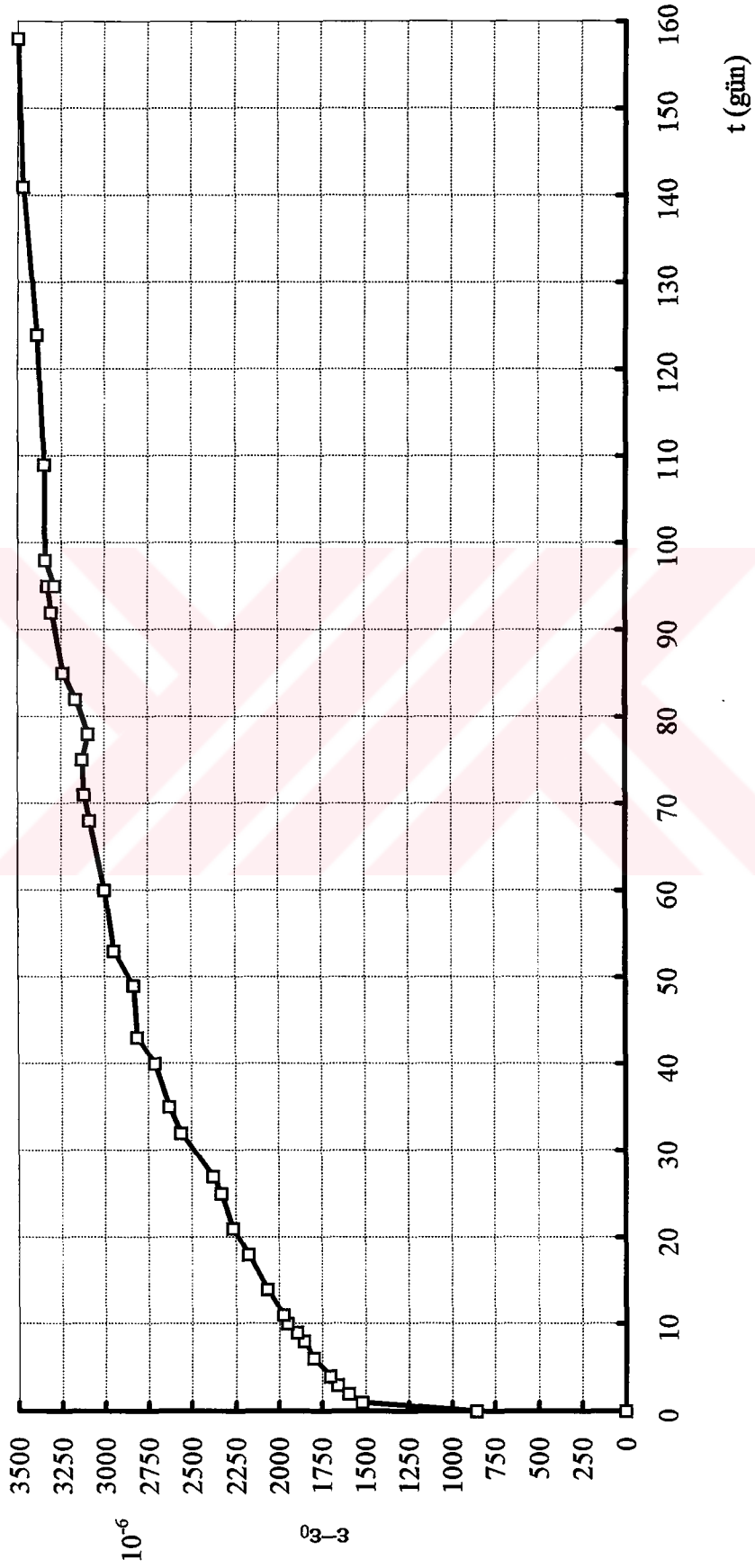
Şekil 4.6 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=\%50$)



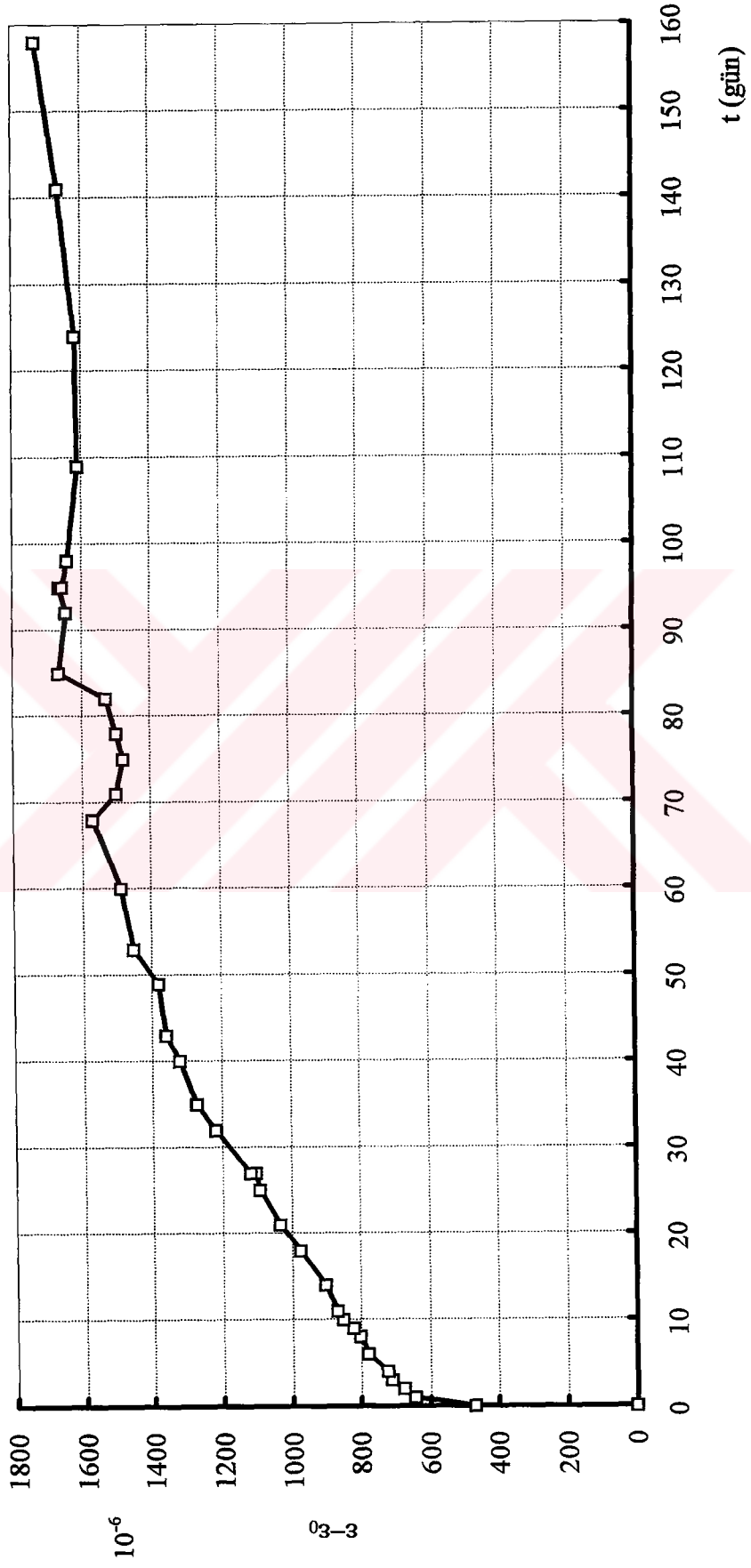
Şekil 4.7 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=40$)



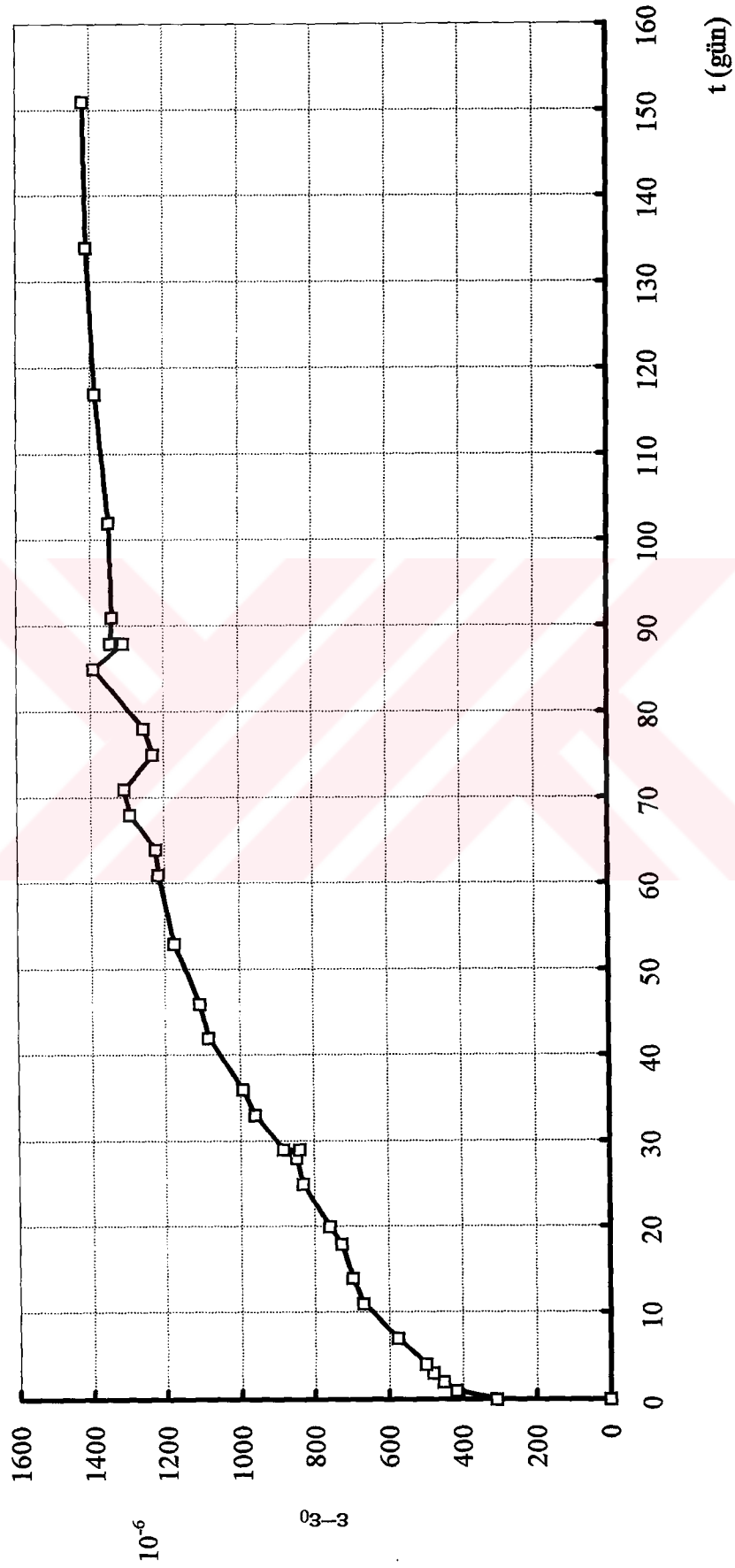
Şekil 4.8 Yatay şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=30$)



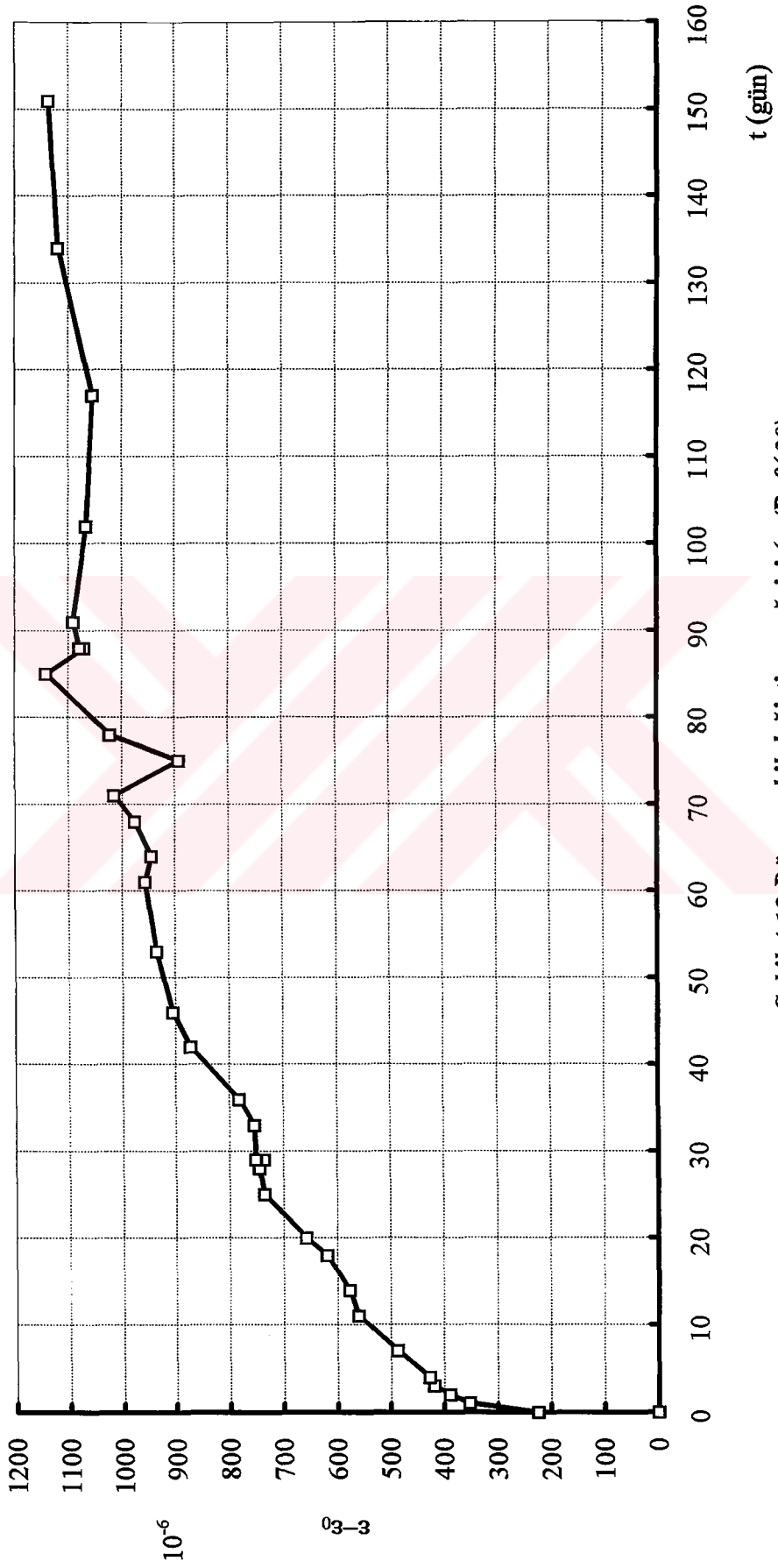
Şekil 4.9 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R= \%67$)



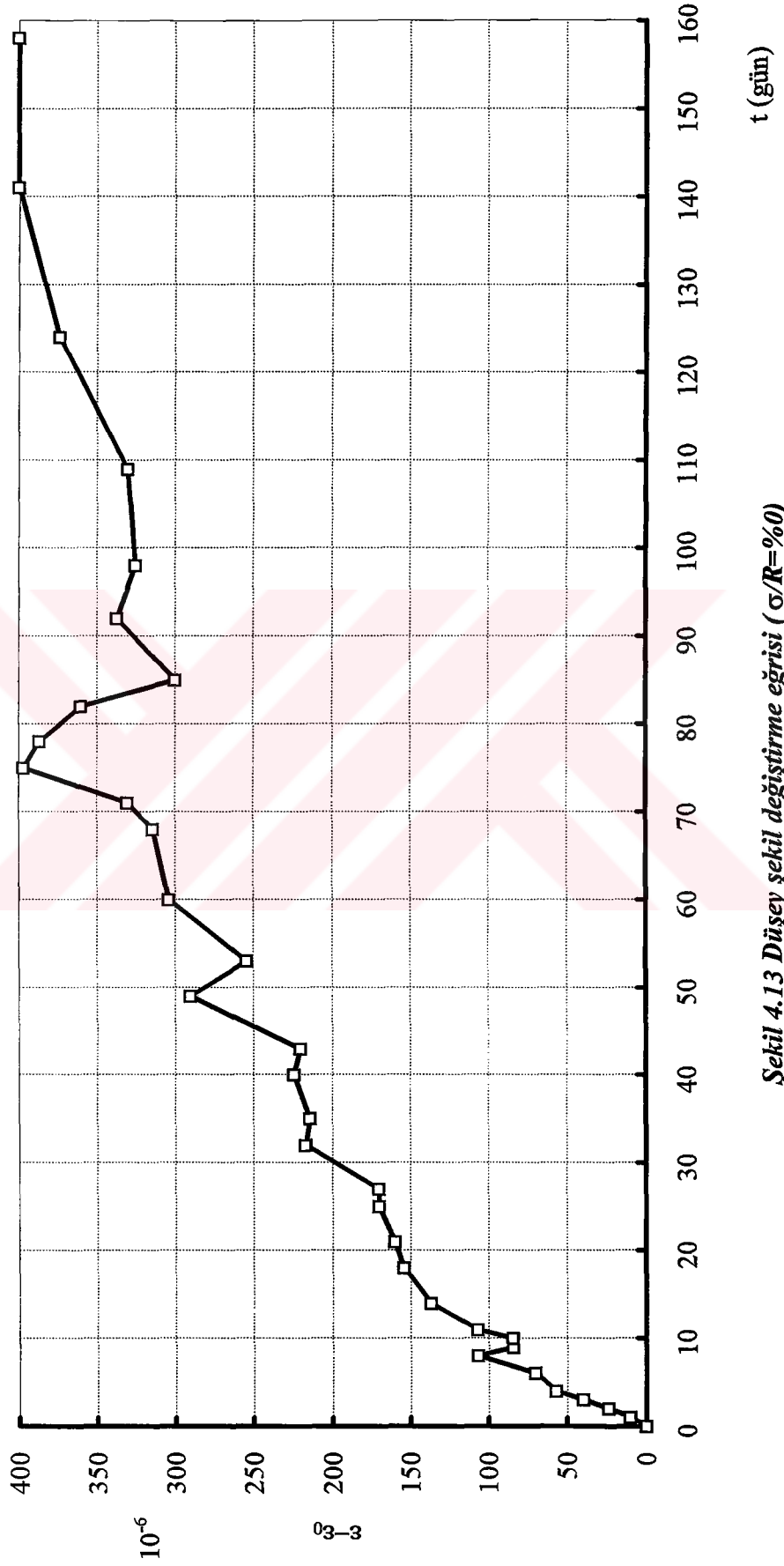
Şekil 4.10 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=\%50$)



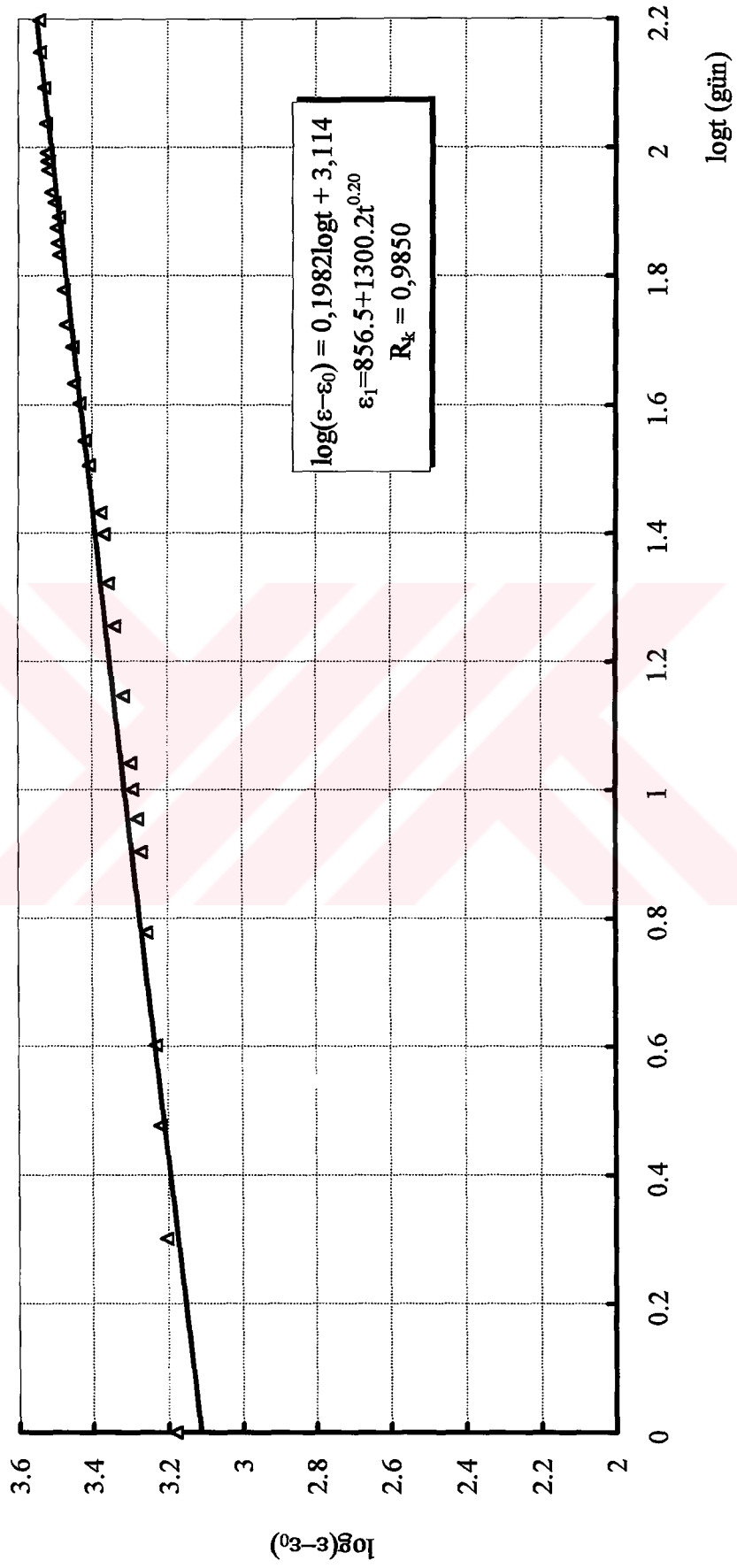
Şekil 4.11 Düşey şekil değişirme eğrisi ($\sigma/R=40$)



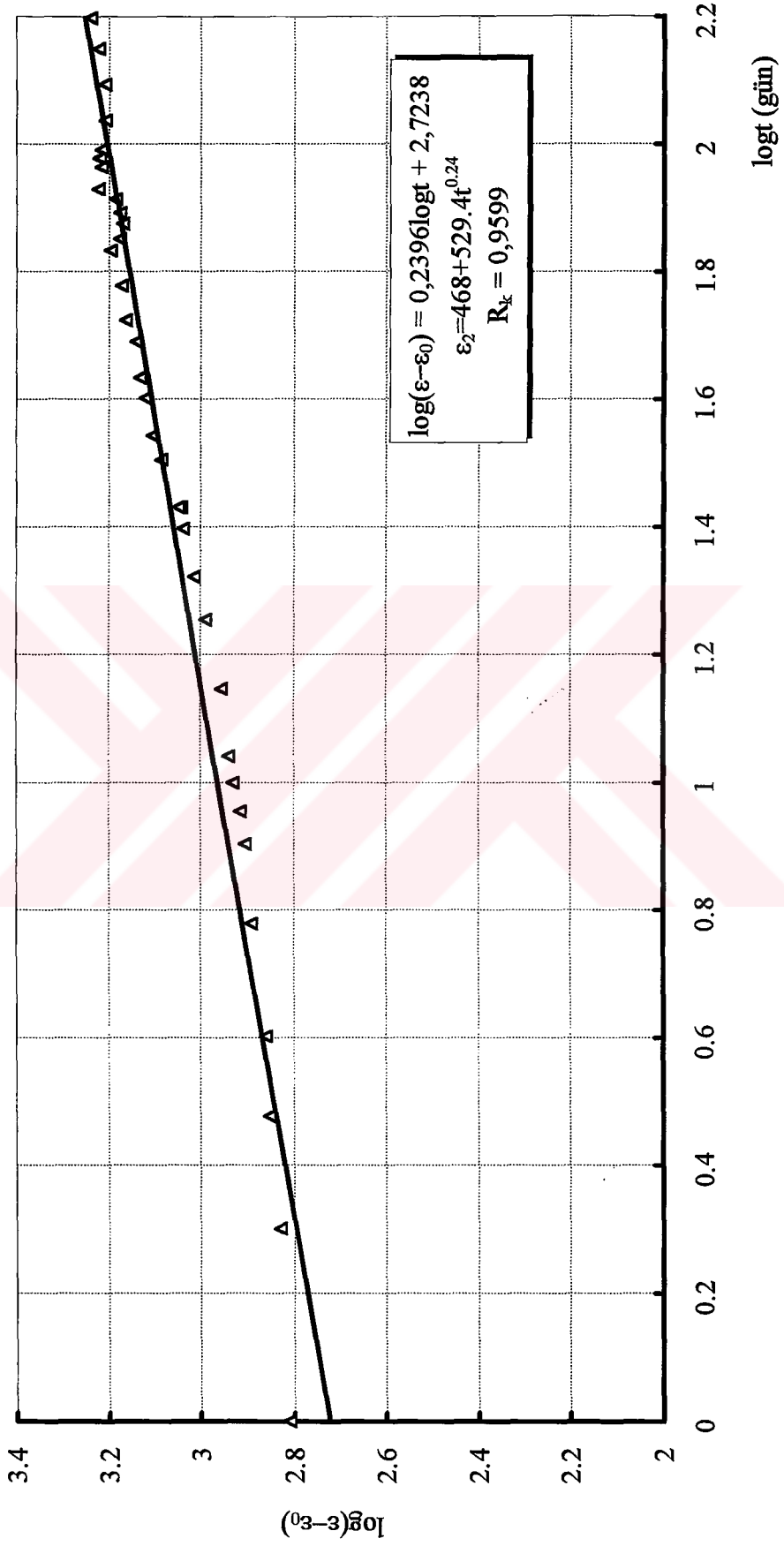
Şekil 4.12 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R = \%30$)



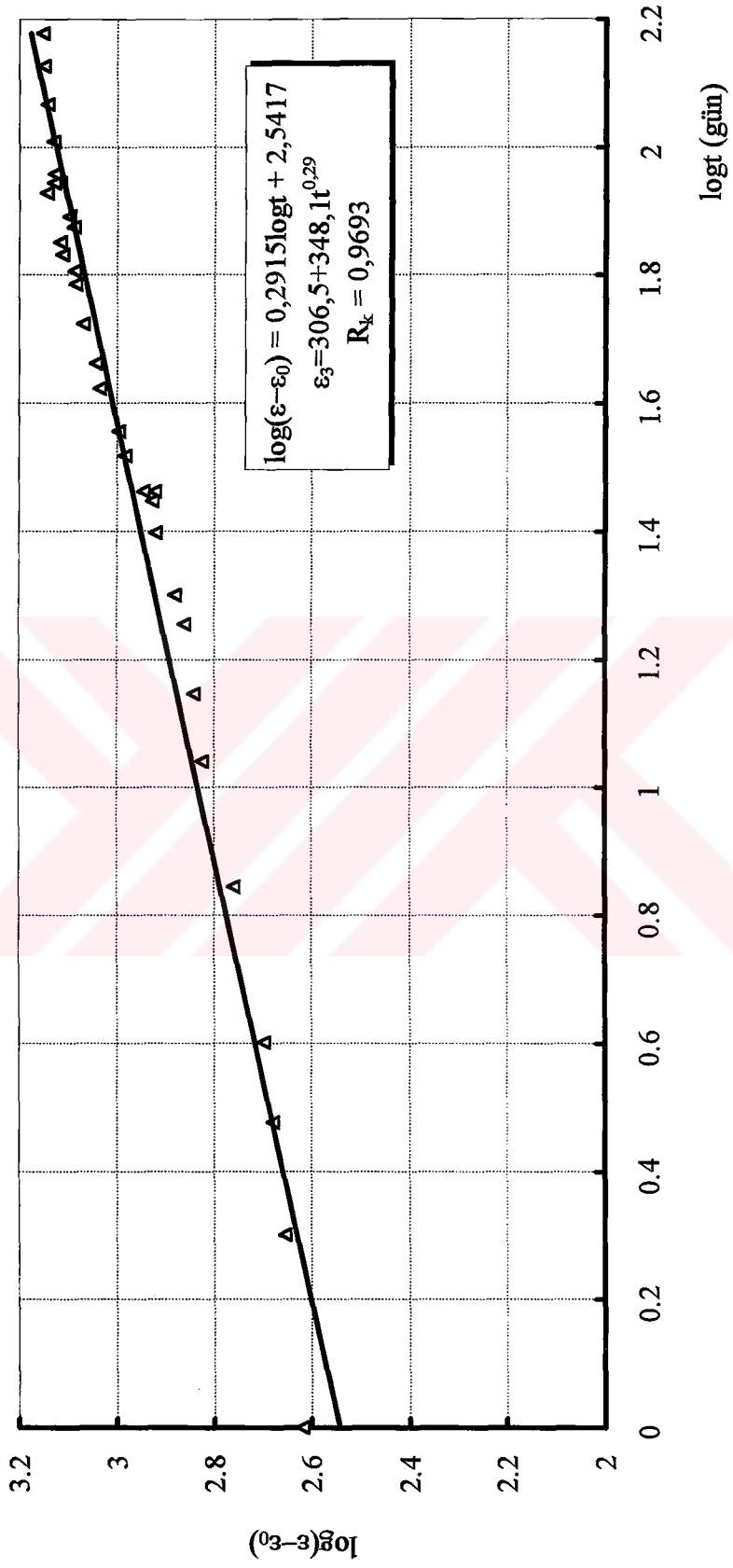
Şekil 4.13 Düşey şekil değiştirme eğrisi ($\sigma/R=0$)



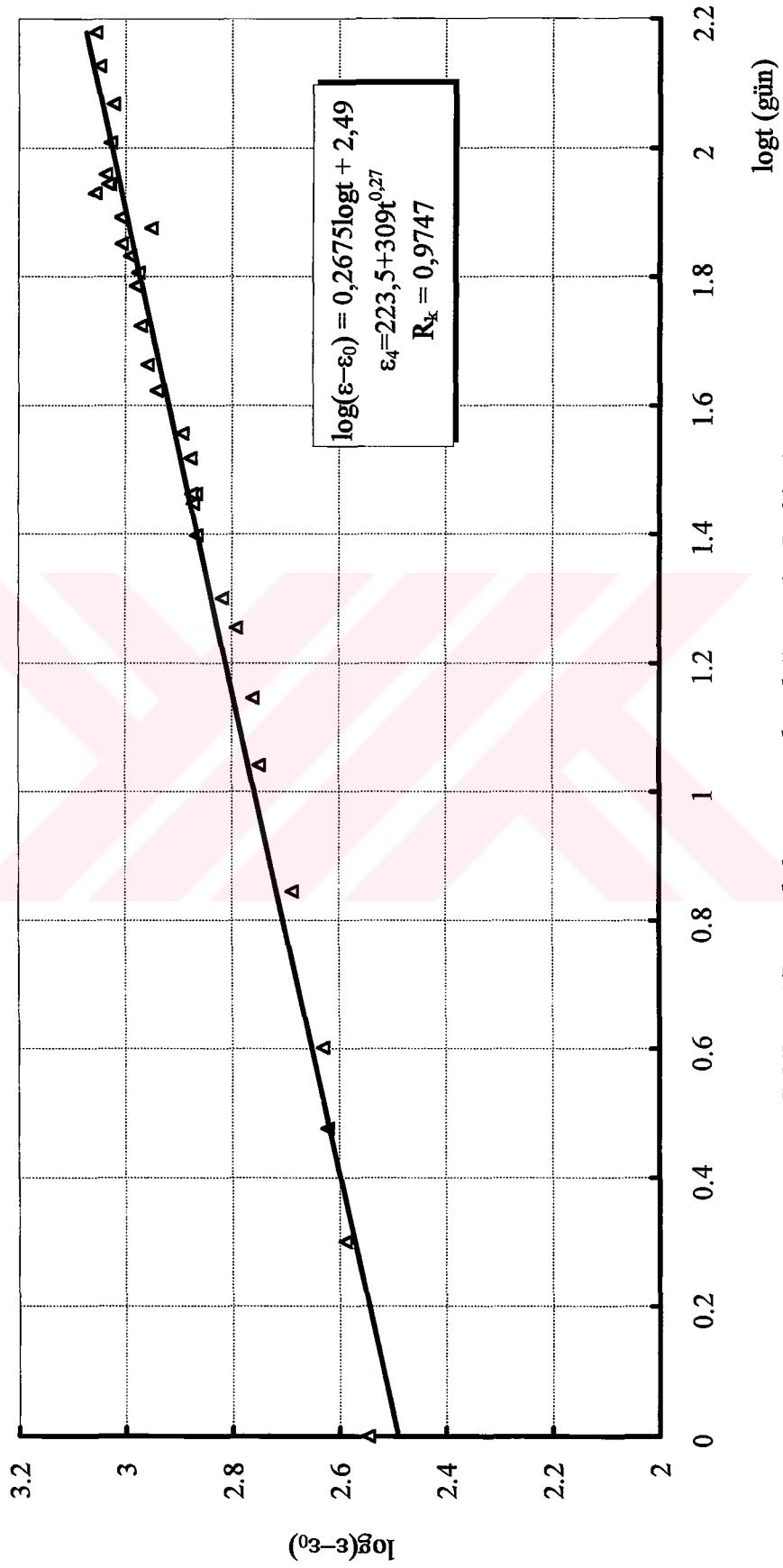
Şekil 4.14 Düşey deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%67$)



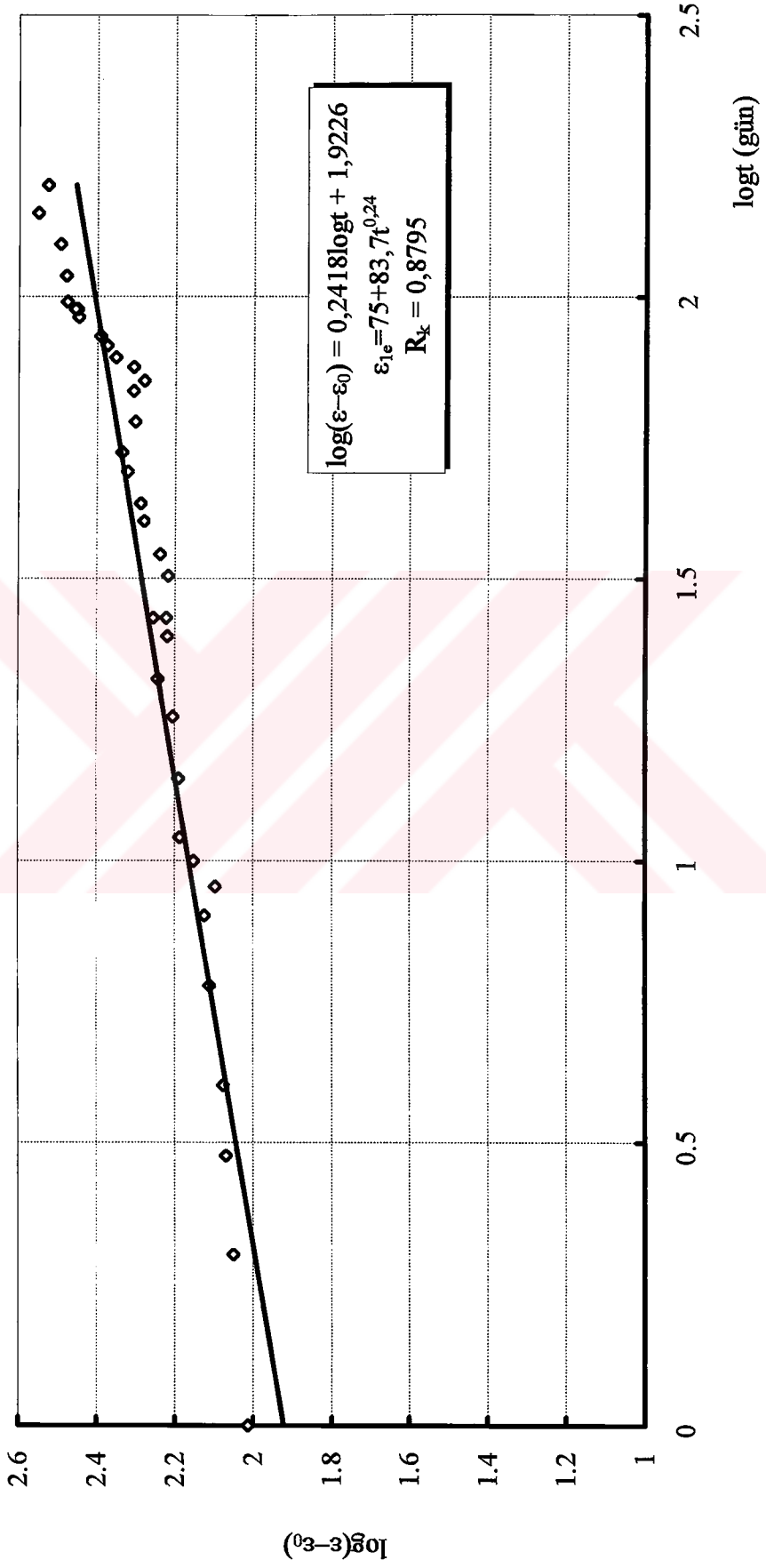
Şekil 4.15 Düşey deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%50$)



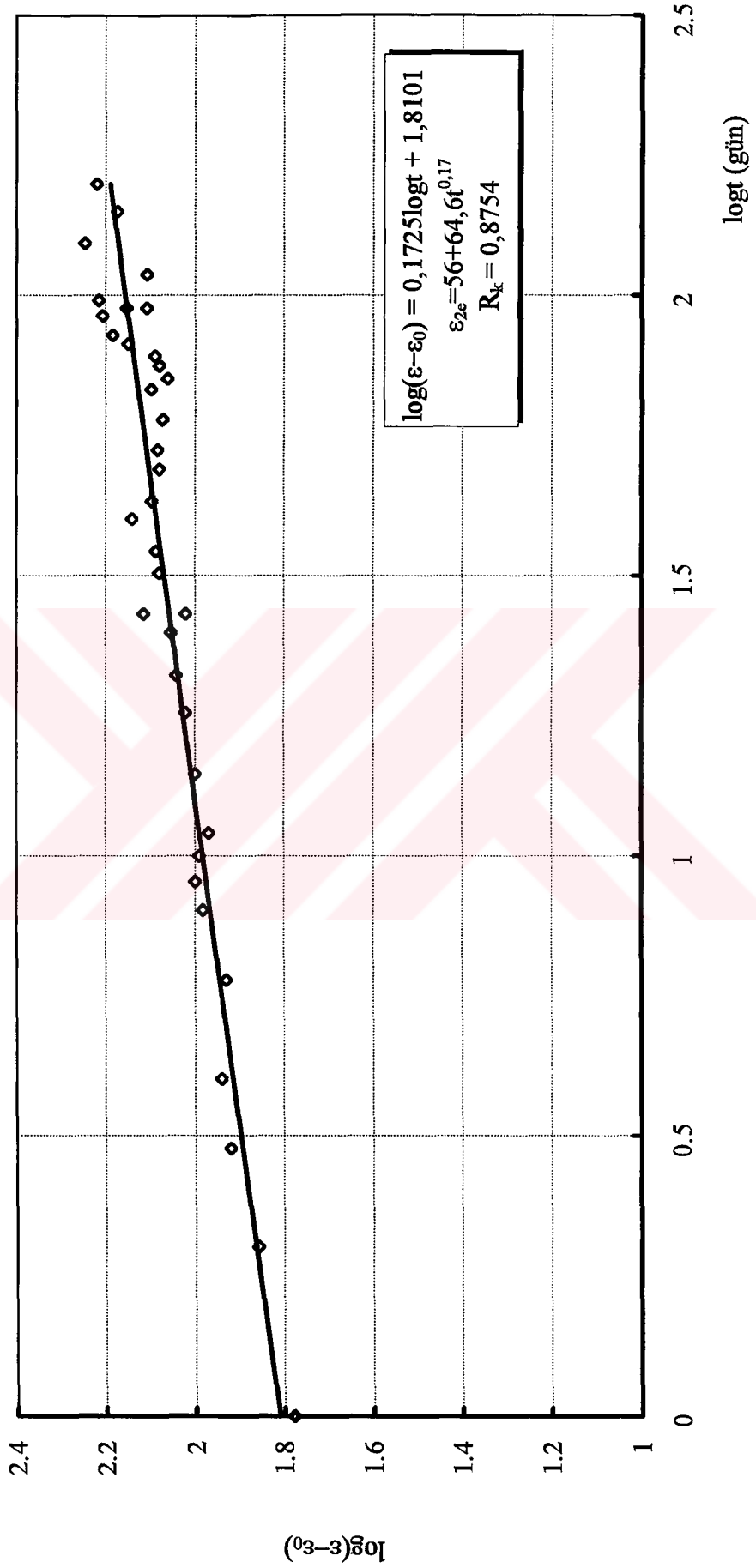
Şekil 4.16 Düşey deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%40$)



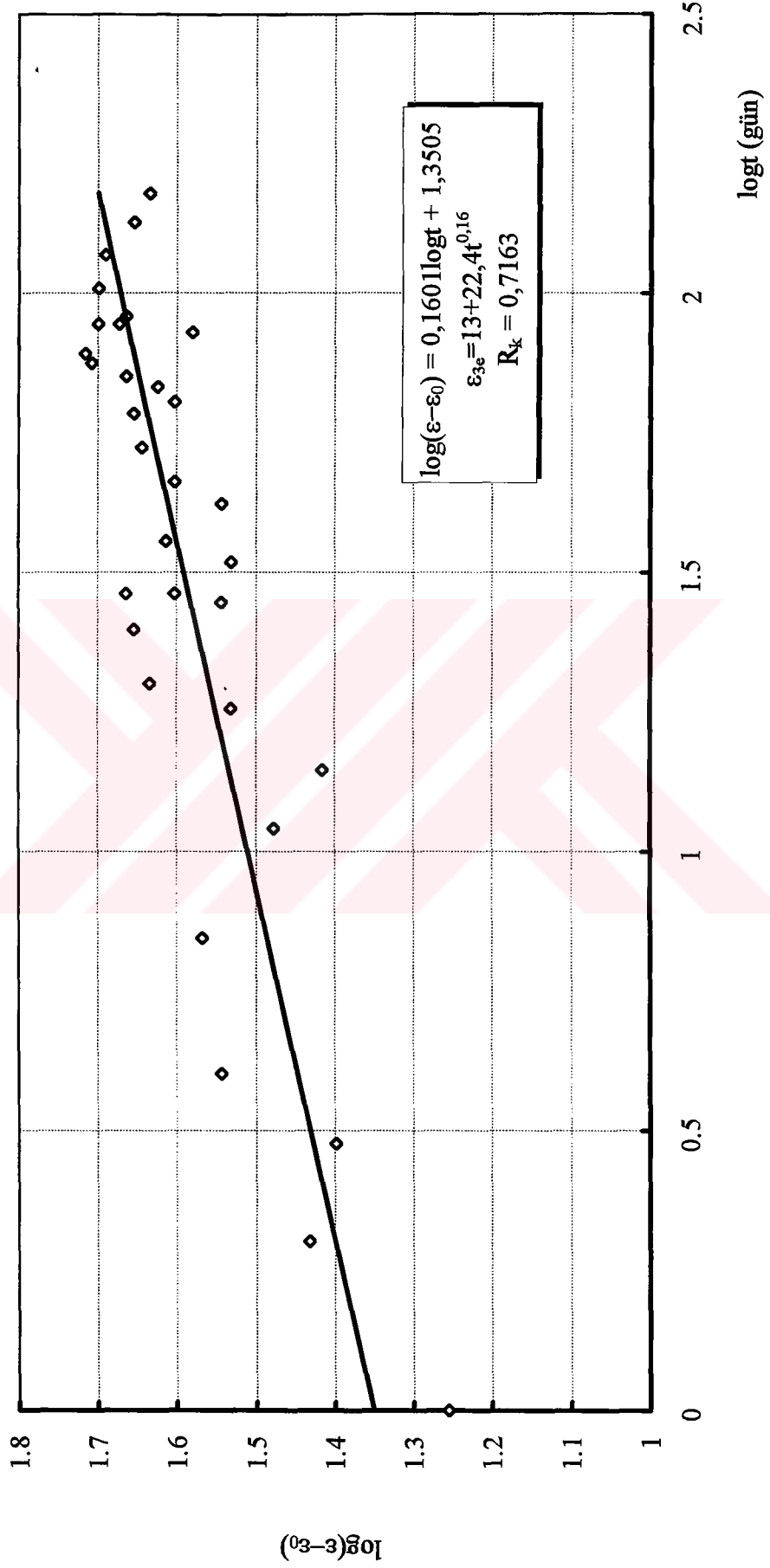
Şekil 4.17 Düşey deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%30$)



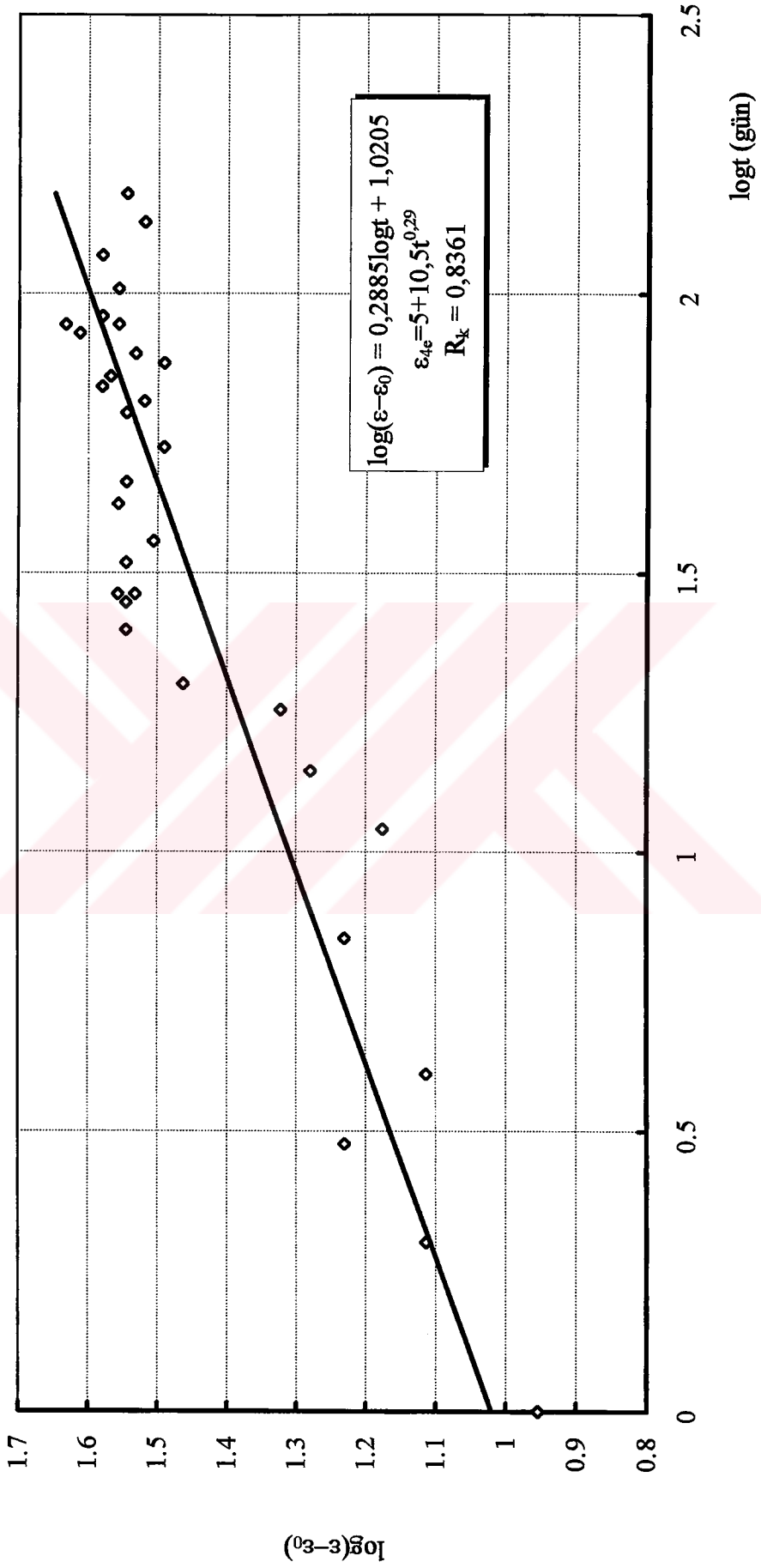
Şekil 4.18 Yatay deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%67$)



Şekil 4.19 Yatay deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%50$)



Şekil 4.20 Yatay deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%40$)



Şekil 4.21 Yatay deformasyon log doğrusu ($\sigma/R = \%30$)

Nonlinear davranış hali için $\sigma/R=0,25$ olması durumunda şekil değiştirme aşağıdaki şekilde elde edilir :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{n1}(t) &= \sigma_1\varphi_1(t) + \sigma_1^2\varphi_2(t) + \sigma_1^3\varphi_3(t) + \sigma_1^4\varphi_4(t) \\ &= (1951,36 + 2975,7 t^{0,25}) \times 10^{-6}\end{aligned}$$

$\sigma/R < 0,30$ yüklemesi için betonun sünme davranışının lineer olduğu varsayımı ile sünme fonksiyonu aşağıdaki şekilde olur :

$$\varphi_0(t) = \varepsilon_4(t) / \sigma_4 = (4,545 + 6,284 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

Buradan hareketle $\sigma/R=0,25$ olması durumunda şekil değiştirmenin değeri ;

$$\varepsilon_{11}(t) = (186,231 + 257,487 t^{0,25}) \times 10^{-6}$$

olarak elde edilir.

$\sigma/R=0,25$ için nonlinear ve lineer davranış kabulleri karşılaştırılarak, davranışı lineer kabul etme halinde yapılan hatanın değeri,

$$\begin{aligned}(\text{hata}) &= [\varepsilon_{n1}(t) - \varepsilon_{11}(t)] / \varepsilon_{n1}(t) \\ &= 0,91\end{aligned}$$

olarak bulunur.

Betonun davranışı, gerilmenin bu düzeyleri için nonlinear olarak bulunmaktadır.

4.3. Ultrases Deneyi Sonuçları :

Her bir numune içinden ultrases geçiş hızları ölçülmüş ve ultrases geçiş hızları ile zaman arasındaki eğriler Şekil 4.24 'de gösterilmiştir. Sonuçlar bulunurken her bir gerilme düzeyi için kullanılan iki numunenin ultrases geçiş hızlarının ortalaması alınmıştır.

Normalize edilmiş (Şekil 4.25) ultrases hızlarının zamanla değişimi aşağıdaki şekilde belirlenmiştir :

$$(1-v)^n = kt \quad v \text{ çözüldüğü zaman ;}$$

$$v = 1 - k^{1/n} t^{1/n} \quad \text{elde edilir.}$$

Burada 'v' ultrases geçiş hızı, t zaman, k ve n katsayılarıdır. k ve n katsayılarını elde etmek için, her iki tarafın logaritması alınarak, $\log(1-v)$ ile $\log t$ arasındaki doğrular çizilmiştir. Bu şekilde bulunan ultrases geçiş hızları ile zaman arasındaki ifadeler her bir gerilme düzeyi için aşağıda gösterilmiştir :

$$\sigma/R=0,67 \text{ için } v_1 = 1 - (0,274 \times 10^{-3}) t^{1,226}$$

$$\sigma/R=0,50 \text{ için } v_2 = 1 - (0,364 \times 10^{-3}) t^{1,118}$$

$$\sigma/R=0,40 \text{ için } v_3 = 1 - (0,312 \times 10^{-3}) t^{1,111}$$

$$\sigma/R=0,30 \text{ için } v_4 = 1 - (0,394 \times 10^{-3}) t^{1,014}$$

$$\sigma/R=0 \text{ için } v_0 = 1 - (0,786 \times 10^{-3}) t^{0,701}$$

Kullanılan her gerilme için kırılma zamanlarının (tc) bulunması amacıyla ultrases hızlarının zamanla değişimi ifadeleri şu şekilde düzenlenmiştir :

$$v = 1 - k^{1/n} t^{1/n} \quad , \quad k^{1/n} = M \quad 1/n=m \text{ alınırsa ;}$$

$$v = 1 - M(\sigma/R) t^{m(\sigma/R)} \quad \text{olur.}$$

$M(\sigma/R)$ ve $m(\sigma/R)$ fonksiyonlarını bulmak için Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 çizilmiştir. Sonuç olarak ;

$$M(\sigma/R) = -0.0008(\sigma/R) + 0.0007$$

$$m(\sigma/R) = 0.78(\sigma/R) + 0.74$$

$D=1$ olduğunda kırılma olduğundan ,

$D=1- v_i^2 / v_0^2$ ifadesinin 1 olması için $v_i = 0$ olmalıdır. Buradan kırılma zamanı şu şekilde elde edilmiş olur :

$$t_c = 1 / M(\sigma/R)^{1/m(\sigma/R)} \text{ olur. Kırılma zamanları ,}$$

$$\sigma/R = 0.67 \text{ için } t_c = 995 \text{ gün}$$

$$\sigma/R = 0.50 \text{ için } t_c = 1311 \text{ gün}$$

$$\sigma/R = 0.40 \text{ için } t_c = 1789 \text{ gün}$$

$$\sigma/R = 0.30 \text{ için } t_c = 1952 \text{ gün}$$

Hasarın zamanla değişimini belirlemek için (2.13) formülü kullanılmış ve sonuçlar Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

Hasar hızının belirlenebilmesi için (2.17) formülü kullanılarak A , r , k katsayıları elde edilmiştir. Bu işlem için (2.17) formülünde her iki tarafın logaritması alınarak ;

$$\log \dot{D} = r \log A + r \log \sigma + k \log(1-D) \text{ elde edilir.}$$

Bu denklemi çözmek için, Şekil 4.26'da bulunmuş olan hasarın zamanla değişimi eğrileri üzerinde, yirmi adet nokta alınarak bu noktalar arasında regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir :

$$A = 144534.4$$

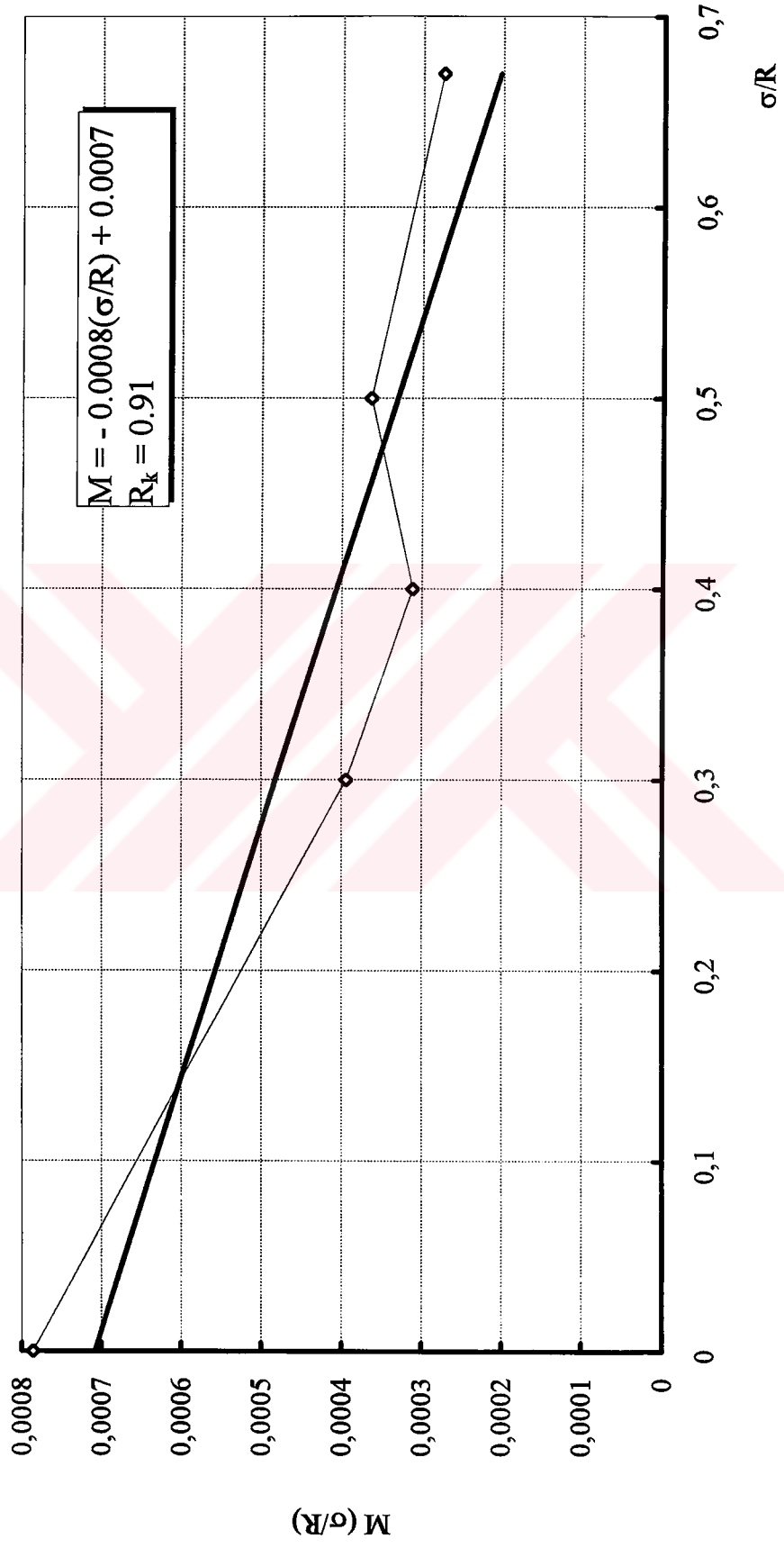
$$r = 0,951108$$

$$k = -2,763375$$

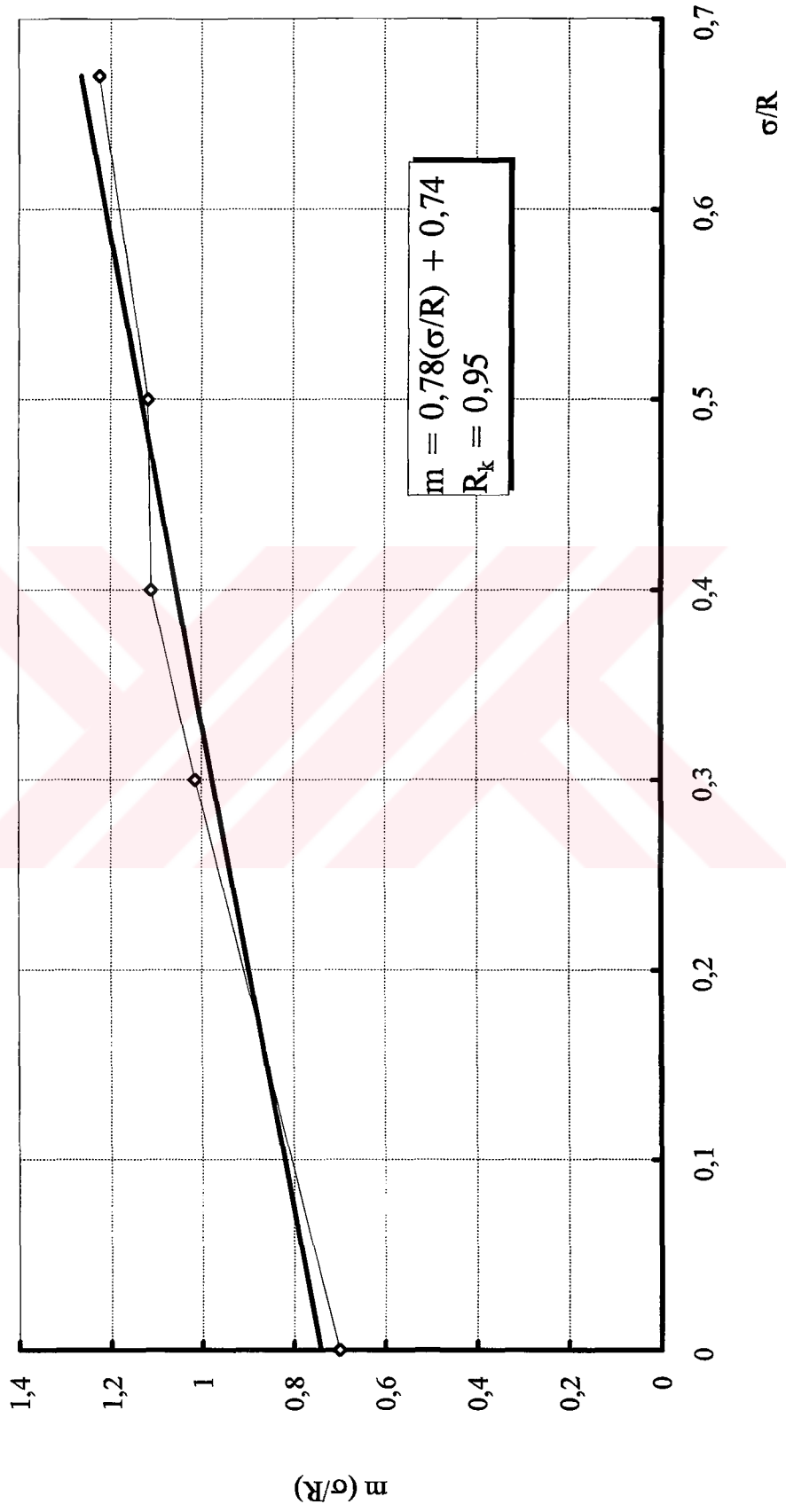
$$\text{Korelasyon katsayısı } (R_k) = 0,966$$

'k' katsayısı r'den daha önemli bir etkiye sahiptir ve hasar hızı üzerinde, gerilmeye göre meydana gelen hasarın daha önemli bir etkisi vardır.

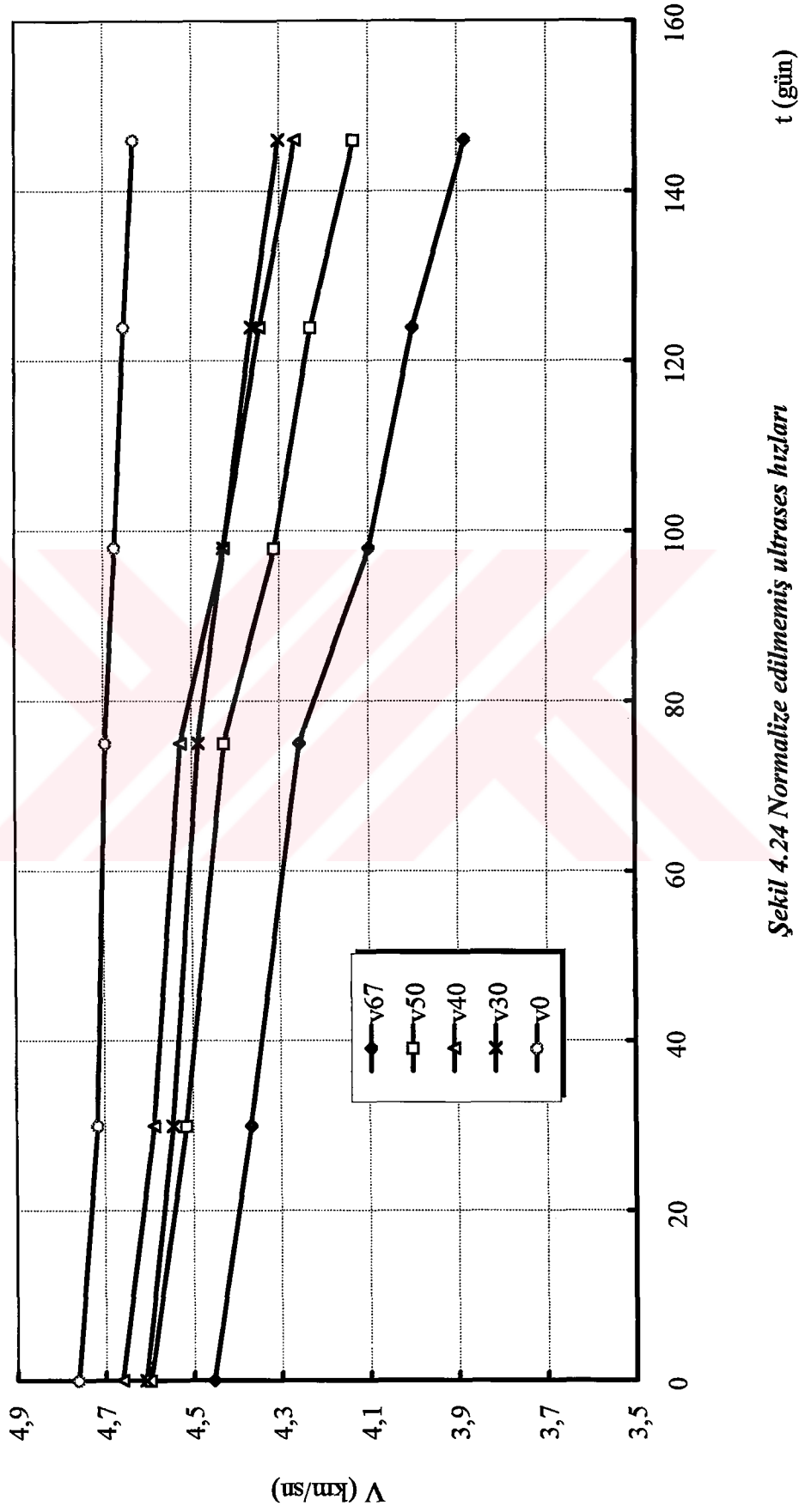




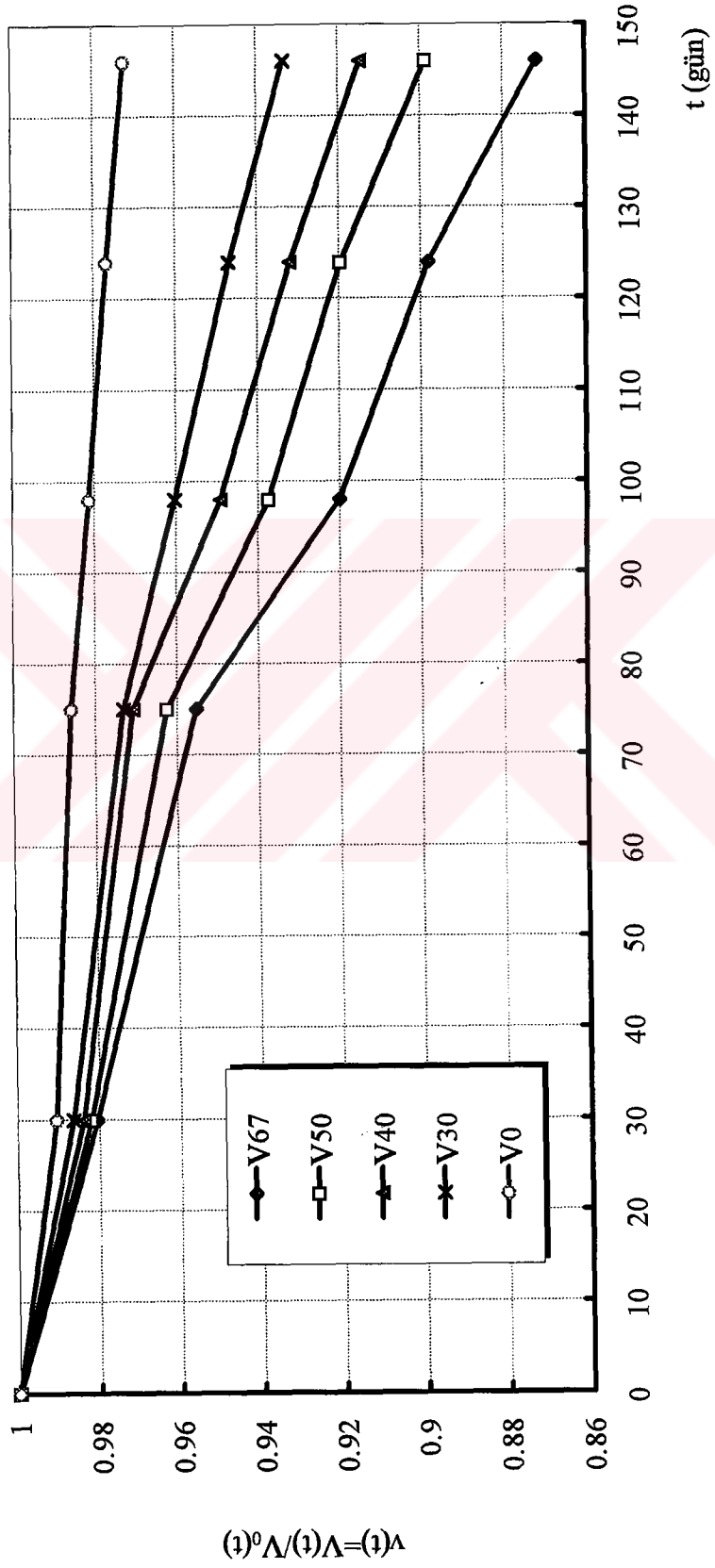
Şekil 4.22 $M(\sigma/R)$ değişimi



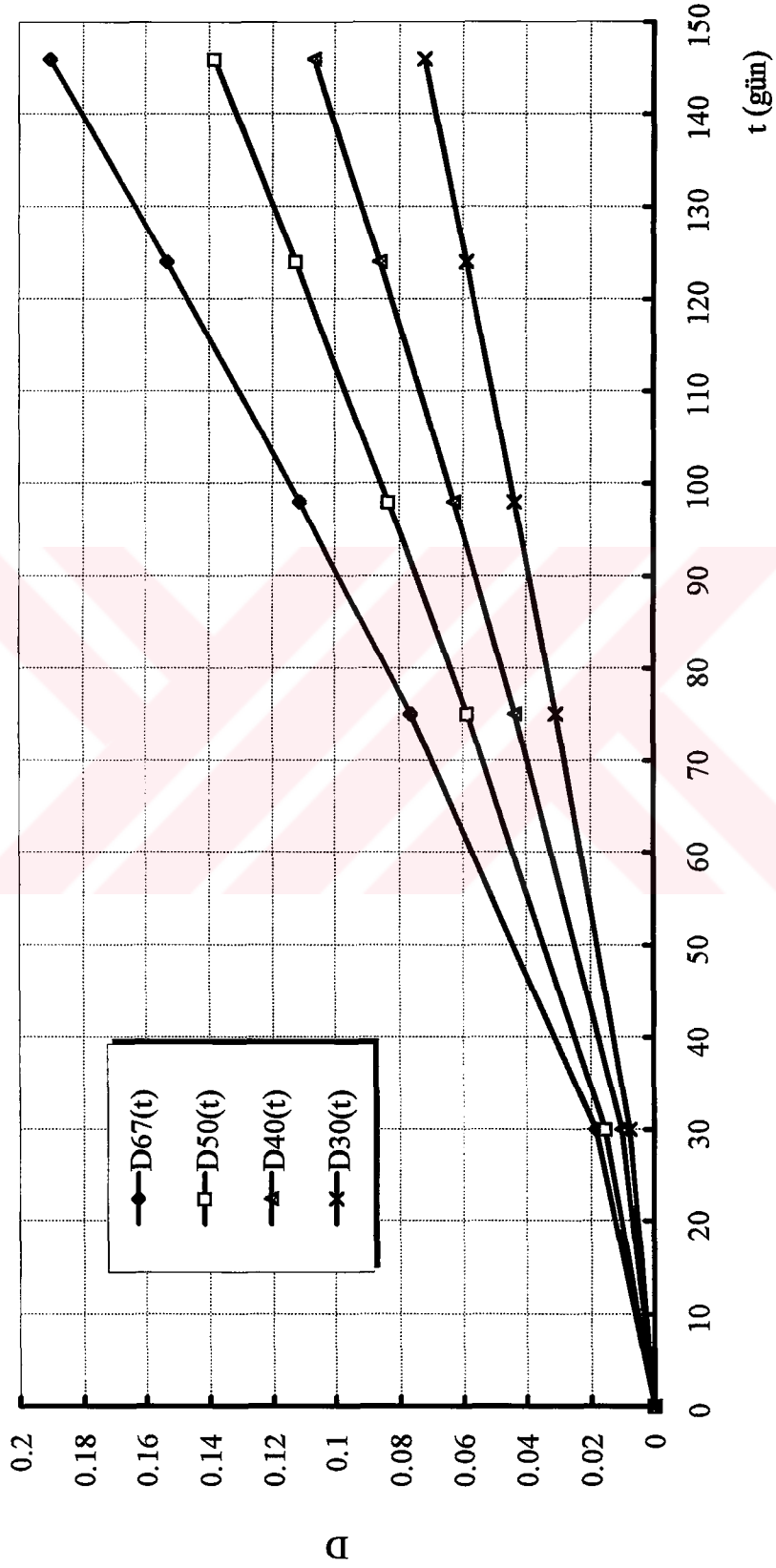
Şekil 4.23 $m(\sigma/R)$ değişimi



Şekil 4.24 Normalize edilmiş ultrases hızları



Şekil 4.25 Normalize edilmiş ultrases hızları



Şekil 4.26 Hasarın zamanla değişimi

SONUÇLAR :

Bu çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Sünme halinde gerilmenin artmasıyla hasar ve hasar hızı artmaktadır.
2. Betonda sünme nedeniyle oluşan hasarın hasar hızına etkisinin, beton üzerinde bulunan gerilmenin hasar hızına etkisinden daha önemli olduğu anlaşılmıştır.
3. σ/R nin küçük değerlerinde de nonlineer sünme ortaya çıkmaktadır.
4. Sünme numunelerinde ölçülen ultrases geçiş hızları zamanla azalmaktadır. σ/R oranının artmasıyla ultrases hızlarındaki azalma artmaktadır. Yüksüz şahit numunelerde ölçülen ultrases hızları da zamanla azalmaktadır. Bu azalma, sünme numunelerindeki azalmaya göre oldukça azdır.
5. Ultrases hızlarının zamanla değişimini gösteren $v = 1 - M t^m$ ifadesindeki M ve m katsayıları ($M=k^{1/n}$, $m=1/n$), σ/R oranıyla yaklaşık lineer değişmektedir.
6. σ/R oranının artmasıyla sünme numunelerinin kırılma zamanı azalmaktadır. Çekme gerilmesi altında betonun kırılma zamanları ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Fakat basınç durumunda sünme hasarı ile ilgili çok az çalışma vardır. Kırılma hiçbir zaman gözlenmemiştir. Fakat, hasarın oluşmayacağını gösteren yada basınç hasarı çekme gerilmesi gibi etkilemeyeceğini gösteren hiç bir delil yoktur.

KAYNAKLAR

- [1] POSTACIOĞLU, B., Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, cilt 1, pp.500-520, İ.T.Ü. Matbaası, Gümüşsuyu, 1981.
- [2] NEVILLE, A.M., Creep of Concrete : Plain, Reinforced and Prestressed, pp.94-95, North-Holland publishing company, Amsterdam, 1970.
- [3] YOUNG, F., Concrete, pp.500-511, Epsom publishing, London, 1988.
- [4] HANSEN, T.C., Creep of Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Royal Institute of Technology, Stockholm, Bulletin No:33, 48pp., 1958.
- [5] NEVILLE, A.M., BROOKS J.J., Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, Harlow, pp.215-226, 1987.
- [6] WAGNER, O., Das Kriechen unbewehrten Betons, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, No:131, pp.74, Berlin, 1958.
- [7] L'HERMITE, R., What do we know about plastic deformation and creep of concrete ? , RILEM Bulletin, No:1, pp. 21-51, Paris, March 1959.
- [8] GEYMAYER, H., Concrete for Nuclear Reactors, Vol.1, sp 34, ACI, Detroit, Mich., pp.565-589, 1972.
- [9] TROXELL, G.E., RAPHAEL, J.M., DAVIS, R.E., Long Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete, Proc.ASTM 58, pp.1101-1120, 1958.
- [10] LEA, F.M., LEE, C.R., Shrinkage and Creep in Concrete, The Society of chemical Industry, London, Symp. on the Shrinkage and Cracking of Cementive Materials, pp. 7-17, May 1946.

- [11] SEED, H.B., Creep and Shrinkage in Reinforced Concrete Structures, Reinforced Concrete Review 1, No.8, pp. 253-267, 1948.
- [12] ILLSTON, J.M., Constructions Materials : Their Nature and Behaviour, pp. 147-153, An Imprint of Chapman & Hall, 1987.
- [13] MEYERS, B.L., Time-Dependent Strains and Microcracking of Plain Concrete, Ph. D. Dissertation, Cornell University, 86 pp., Sept. 1967.
- [14] FINDLEY, W.N., LAI J.S., ONARAN, K., Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials, pp. 190-198, Dover Publications, 1975.
- [15] KACHANOV, L.M., Introduction to Continuum Damage Mechanics, pp. 1-6, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- [16] LEMAITRE, J., CHABOCHE, J.L., Mechanics of Solid Materials, pp. 355-413, Cambridge University Press, 1990.

UNIVERSITY OF
SOUTH ALABAMA
LIBRARY

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Çanakkale Ezine, İzmir ve Kars Sarıkamış'ta tamamladı. 1987 yılında Sarıkamış Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi'nde inşaat mühendisliği eğitimine başladı. 1993 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nce açılan yüksek lisans sınavını kazanarak yapı malzemeleri bölümünde yüksek lisans öğrenimine katıldı.



S.C. YERİNEKÖYÜ
1993