

**UÇUCU KÜL VE BENTONİT KARIŞIMININ ATIK DEPOLAMA
SAHALARINDA
TABAN VE/VEYA ÜST KAPLAMA MALZEMESİ OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yüksel YILMAZ

93646

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
(İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Nisan 2000

ANKARA

Yüksel YILMAZ tarafından hazırlanan UÇUCU KÜL VE BENTONİT KARIŞIMININ ATIK DEPOLAMA SAHALARINDA TABAN VE/VEYA ÜST KAPLAMA MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

2.2208h
Doç. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Yıldız YASTI

Y. Yastı

Üye : Doç. Dr. M. Mollamahmutoğlu

2.2208h

Üye : Doç. Dr. Kamil Kayabali

K. Kayabali

Üye :

Üye :

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

B. Atsoy

**UÇUCU KÜL VE BENTONİT KARIŞIMININ
ATIK DEPOLAMA SAHALARINDA
TABAN VE/VEYA ÜST KAPLAMA MALZEMESİ OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Yüksel YILMAZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2000**

ÖZET

Bu deneysel çalışmada; Çatalağzı uçucu kültü, bağlayıcı malzeme olarak toz bentonit ile, %10, %20 ve %30 (kuru kütle bentonit/kuru kütle Çatalağzı uçucu kültü) oranlarında karıştırılarak, düşük permeabiliteli malzeme elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, hazırlanan karışımlar, optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılarak, elde edilen malzemelerin permeabiliteleri, rijit çeperli ve esnek çeperli permeametre düzeneklerinde tespit edilmiştir. Düzenli katı atık depolama sahalarında, süzülmesi muhtemel sıvıların, permeabiliteye etkisini gözlemlemek amacıyla, seyreltik bazik (%20'lik NaOH) ve seyreltik asidik (%20'lik HCl) sıvıların permeabiliteye olan etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, uzun vadede permeabilite değişimleri gözlenmiş, permeabilitenin zamanla arttığı tespit edilmiştir.

Uygun permeabiliteli bir malzeme olması durumunda, gerekli bazı geoteknik parametrelerin dizayn amaçlı tespiti için, indirekt çekme (yarmada çekme) deneyleri, konsolidasyonsuz drenajsız (UU), konsolidasyonlu drenajsız (CU)

üç eksenli basınç deneyleri, odeometre deneyleri yürütülmüş ve ani çökme potansiyelleri araştırılmıştır.

Deneyler sonucunda, %20'lik bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımının, atık depolama sahalarında, taşıma gücü ve tasman açısından sorun teşkil etmeyecek şekilde, düşük permeabiliteli taban ve/veya üst kaplama malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. %20'lik bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımının, taban ve/veya üst kaplama malzemesi olarak kullanılması durumunda, uzun vadede permeabilitenin arttığını gözardı etmeyerek, tasarım yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Bilim Kodu : 6240100

Anahtar Kelimeler : uçucu kül, bentonit, permeabilite, düzenli
katı atık depolama, kaplama

Sayfa Adedi : 131

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

**AN INVESTIGATION ON THE UTILIZATION OF
FLY ASH AND BENTONITE MIXTURE
AS A BOTTOM AND/OR UPPER LINER MATERIAL
AT WASTE DISPOSAL AREAS
(M.Sc. Thesis)**

Yüksel YILMAZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

April 2000

ABSTRACT

In this study, Çatalağzı fly ash was mixed with bentonite, as binding material, at 10, 20 and 30 percentages (dry weight bentonite/dry weight Çatalağzı fly ash) to obtain less permeable liner material. For this purpose, the prepared mixtures were compacted at optimum water content and maximum dry density, and the permeabilities of which were determined using both rigid wall permeameter and flexible wall permeameter. In addition, to see the effect of possible leachates from waste disposal areas (landfill) on the permeability, the experiments were conducted with basic (20% solution of NaOH) and acidic (20% solution of HCl) chemical liquids as well. In this context, it was observed that the long term permeabilities continuously changed and increased with the elapse of time.

Furthermore, in case of finding a suitable mixture, additional laboratory tests such as indirect tensile tests, unconsolidated undrained (UU), consolidated undrained (CU) triaxial tests, consolidation tests were also conducted, and

collapse potentials were also investigated to provide necessary geotechnical parameter for design.

Finally, it was concluded that, %20 bentonite-Çatalağzı fly ash mixture may be used as a bottom and/or upper liner be used at waste disposal areas. If %20 bentonite-Çatalağzı fly ash mixture was used as a bottom and/or upper liner at waste disposal areas. The long term increasing trend of the permeability should be taken into account in the design.



Science Code : 6240100

Key Words : fly ash, bentonite, permeability, landfill, liner

Page Number : 131

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, hocam Doç. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU'na, yine kıymetli bilgilerinden istifade ettiğim Prof. Dr. Yıldız Wasti ve Doç. Dr. Kamil KAYABALI'ya, ayrıca laboratuvar çalışmalarımda, yardımlarını esirgemiyen inşaat mühendisi uzman Aydın GÖKÇE ve laborant Aziz ASMA'ya, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Dr.Gülşen YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
 1. GİRİŞ	 1
 2. UÇUCU KÜLLER	 5
2.1. Uçucu Küllerin Mühendislik Özellikleri	6
2.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması	7
2.1.2. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri	8
2.1.3. Uçucu küllerin kompaksiyon özellikleri	8
2.1.4. Uçucu küllerin mukavemet parametreleri	9
2.1.5. Uçucu küllerin permeabilite özellikleri	10
2.1.6. Uçucu küllerinin çözünürlüğü	11
 3. UÇUCU KÜLLERİN NEDEN OLDUĞU ÇEVRE SORUNLARI	12
 4. UÇUCU KÜLLERİN KULLANIM ALANLARI	14
4.1. Uçucu Külün Zemin İyileştirilmesinde Kullanımı	16
 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULARIN YORUMU	18
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	20
5.1.1. Deneylerde kullanılan uçucu kül	20
5.1.2. Deneylerde kullanılan toz bentonit	23

5.2. Bağlayıcı Madde Kullanım Oranları	24
5.3. Standart Proctor Deneyleri	25
5.4. Laboratuvar Permeabilite Deneyleri	27
5.4.1 Düşen seviyeli permeabilite deneyleri	28
5.4.2 Sabit seviyeli permeabilite deneyleri	35
5.5. İndirekt Çekme (Yarmada Çekme) Deneyleri	40
5.6. Tek Eksenli Basınç Deneyleri	43
5.7. Konsolidasyonsuz Drenajsız (UU) Üç Eksenli Basınç Deneyleri	44
5.8. Konsolidasyonlu Drenajsız (CU) Üç Eksenli Basınç Deneyleri	47
5.9. Konsolidasyon Deneyleri	47
5.9.1 Konsolidasyon deneylerinden permeabilite tayini	48
5.10. Yük–Oturma İlişkisinde Doygunluk Etkisi	50
5.11. Ani Çökme Potansiyeli	50
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1.	Yürütülen laboratuvar deneyleri19
Çizelge 5.2.	Çatalağzı uçucu külünün elementel kompozisyonu (Bayat, 1998)22
Çizelge 5.3.	Çatalağzı uçucu külü süzüntü suyunun elementel kompozisyonu (Bayat, 1998)23
Çizelge 5.4.	Toz bentonitin mühendislik özellikleri (Kayabalı,1996)24
Çizelge 5.5.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, maksimum kuru yoğunlukları ile optimum su muhtevaları arasındaki ilişki25
Çizelge 5.6.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, rijit çeperli permeametre deney düzeneğinden elde edilen permeabiliteleri29
Çizelge 5.7.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, rijit çeperli permeabilite deney düzeneğinden elde edilen permeabilite değerleri31

Çizelge 5.8.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, rijit çeperli permeametre deney düzeneğinden elde edilen permeabilite değerleri	33
Çizelge 5.9.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, esnek çeperli permeabilite düzeneğinden elde edilen permeabilite değerleri	38
Çizelge 5.10.	Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının kırılma anındaki maksimum çekme gerilmeleri ve çekme deformasyonları	42
Çizelge 5.11.	Çatalağzı uçucu külü numunelerinin, zamanla değişen su muhtevaları ve kırılma anındaki tek eksenli basınç dayanımları	44
Çizelge 5.12.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının konsolidasyonlu drenajsız (CU) efektif mukavemet parametreleri	47
Çizelge 5.13.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının sıkışma indeksleri	48
Çizelge 5.14.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının yük-permeabilite ilişkisi	49
Çizelge 5.15.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının ani çökme potansiyelleri	54

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1.	Çatalağzı uçucu külünün granülometrik eğrisi21
Şekil 5.2.	Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının kuru yoğunluk - su muhtevası ilişkisi26
Şekil 5.3.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi30
Şekil 5.4.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi32
Şekil 5.5.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi34
Şekil 5.6.	Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi36
Şekil 5.7.	Esnek çeperli permeametre düzeneği37
Şekil 5.8.	Karışımındaki bentonit oranı ile permeabilite değişimi39
Şekil 5.9.	Çatalağzı uçucu külü numunelerinin tek eksenli basınçdayanımının zamana göre değişimi45

Şekil 5.10.	Çatalağzı uçucu külü numunelerinin su muhtevalarının zamana göre değişimi	46
Şekil 5.11.	Suya doymun ve kuru Çatalağzı uçucu külü numunelerinin yük-oturma ilişkileri	51
Şekil 5.12.	400kN/m ² gerilme altında suya boğulan numunelerin, karışımındaki bentonit oranı ile ani çökme potansiyelleri arasındaki ilişki	52
Şekil 5.13.	Ani çökmeye maruz kalan bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının yük-oturma ilişkileri	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
ρ_d	Kuru Yoğunluk, Mg/m^3
$\rho_{d(max)}$	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m^3
γ_w	Suyun yoğunluğu ($10kN/m^3$)
A	Numune kesit alanı (mm^2)
c	Kohezyon, kN/m^2
C_c	Sıkışma indeksi
D	Deney numunesinin çapı, mm
e	Boşluk oranı
$f_{yç}$	Numunenin yarmada çekme mukavemeti, kN/m^2
G_s	Spesifik gravite (Bağıl Yoğunluk)
k	Permeabilite, cm/s
L	Deney numunesinin boyu, mm
$\emptyset$	İçsel sürtünme açısı (Derece)
P	Geri besleme basıncı (kN/m^2)
P_k	Kırılma anındaki maksimum yük, kN
q	Akım oranı, $\Delta Q/\Delta t$ (mm^3/s)
Q	Kümülatif akım (mm^3)
$q_{u(max)}$	Tek eksenli maksimum basınç dayanımı, kN/m^2
q_u	Tek eksenli basınç dayanımı, kN/m^2
t	Zaman (saniye)
w_{opt}	Optimum su muhtevası, %
σ	Toplam gerilme, kN/m^2

τ	Kayma gerilmesi, kN/m ²
ε	Birim deformasyon, mm/mm

Kısaltmalar

D.S.İ.	Devlet Su İşleri
E.E.İ.	Elektrik İşleri Etüd İdaresi
M.T.A.	Maden Tetkik ve Arama



1. GİRİŞ

Düşük kalorili, yüksek kül oranlı, linyit kömürü ve düşük kaliteli, bitümlü kömür yakarak, enerji üreten termik santrallarda, enerji üretiminin yanısıra, bir yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu küller, çevre kirliliğine neden olmaktadır. Uçucu küllerin depolama sorunları ve neden olduğu çevre sorunları, enerji üretimine paralel olarak artmaktadır. Uçucu küllerin endüstriyel atık olarak geri kazanılmaya elverişli malzeme niteliği taşıması, çeşitli alanlarda değerlendirilme olanaklarının araştırılmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada; Çatalağzı uçucu külünün bentonit ile çeşitli oranlarda karışımını sağlayarak, kentsel atık depolama sahalarında, taban ve/veya üst kaplama tabakası olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çatalağzı uçucu külünün bu şekilde değerlendirilmesiyle, hem uçucu külün depolama sorunları azaltılmış olacak, hem de düzenli depolama alanlarında, yukarıda bahsedilen şekilde değerlendirilmesi sağlanmış olacaktır.

Düzenli Depolama Alanları;

Katı atıkların yok edilmesinde geçerli olan yöntemlerden biri, katı atıkların düzenli çöp alanlarında depolanması ve alan dolunca kapatılarak ıslah edilmesidir. Düzenli depolama, katı atıkların ortadan kaldırılması için kullanılan güvenilir yöntemlerden birisidir. Yıldız vd. (1995), düzenli depolama; sisteminin teşkilinde kullanılan teknolojinin, basit ve ekonomik olması nedeniyle, tüm dünyada yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Şu anda, düzenli depolama en ucuz katı atık bertaraf yöntemidir. Bu yöntem; çöplerin uygun bir alanda, bulundukları ortamdan tamamen yalıtılmaları ve üzerlerinin örtülmesi temeline dayanır. Uluatam vd. (1995); Sezer vd. (1997), evsel katı atıklar, özellikle büyük şehirlerde, halk sağlığı ve çevre açısından

önemli bir problem haline gelmiştir. 1991 tarih ve 20814 sayılı resmi gazetede bu sorunun boyutları karşısında, katı atıkların kontrolünü düzenleyen bir yönetmelik yayınlanmıştır. Bu yönetmelikle, katı atıkların üretiminden tüketilmesine kadar geçen aşamalarda (depolanması, taşınması, uzaklaştırılması) dikkat edilmesi gereken pek çok konu belirlenmiş, depo yerlerinin ve tesislerinin belirli özellikleri sağlaması şartları getirilmiş, fakat anılan yönetmelikte, söz konusu killerin sadece geçirimsizlik özelliği dikkate alınmıştır. Edil (1995), sadece sızıntı akımına bakarak bir şilteyi değerlendirmenin doğru olmadığı, çünkü önemli olan yer altı suyuna ne kadar suyun sızdığı değil, ne kadar kirli madde kütlesinin taşındığıdır. Kütle iletimi, her ne kadar sızıntı debisine bağlıysa da, çözülmemiş maddelerin difüzyonuna ve şiltenin katı fazı tarafından emilmesine (absorpsiyon) da bağlıdır.

Tez Konusunun Amacı ve Kapsamı;

Yüksek lisans tezi kapsamında; tek başına kullanıldığında permeabilitesi yüksek olan Çatalağzı uçucu külünü, bentonit ile çeşitli oranlarda karıştırarak, kentsel atık depolama alanlarında kullanılan kil şilteler için gerekli, minimum hidrolik geçirimsizlik değeri olan 1×10^{-7} cm/s değerini sağlayacak malzeme elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, planlanan ve gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır:

- a) Çatalağzı uçucu külü üzerinde tanımlama ve sınıflandırma deneyleri (dane boyutu analizi, özgül ağırlık, Atterberg limitleri tayini) gerçekleştirilmiştir.
- b) Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımları (ağırlıkça kuru kütle bentonit/ kuru kütle Çatalağzı uçucu külü) üzerinde standart Proctor deneyleri gerçekleştirilerek, karışımların maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevaları elde edilmiştir.

c) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde, rijit çeperli permeametre düzeneğinde, düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılarak, karışımların hidrolik iletkenlikleri elde edilmiştir. Atık depolama alanlarından süzülmesi muhtemel kimyasal sıvıların permeabiliteye etkisini gözlemek amacıyla, karışımlardan permean sıvı olarak damıtık su ve ayrıca %20'lik seyreltik kimyasal sıvılar; NaOH (bazık), HCl (asidik) süzerek elde edilen permeabiliteler karşılaştırılmıştır.

d) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde, üç eksenli deney düzeneği kullanılarak, esnek çeperli permeametre düzeneğinden, sabit seviyeli permeabilite deneyleri yaparak karışımların permeabiliteleri elde edilmiştir. Rijit çeperli permeametre düzeneğinden ve esnek çeperli permeametre düzeneğinden elde edilen permeabilite sonuçları karşılaştırılmıştır.

e) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde, indirekt çekme (yarmada çekme) deneyleri yürütülerek, kırılma anındaki maksimum çekme dayanımları ve maksimum çekme deformasyonları elde edilmiştir.

f) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin, zamana bağlı serbest basınç mukavemetleri, kür ortamında ve kürsüz ortamda ayrı ayrı elde edilip, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

g) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin, üç eksenli deney düzeneğini kullanarak, konsolidasyonsuz drenajsız (UU) mukavemet parametreleri elde edilmiştir.

h) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevalarında hazırlanan numunelerin, üç eksenli deney düzeneğini kullanarak, konsolidasyonlu drenajsız (CU) mukavemet parametreleri elde edilmiştir.

ı) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevalarında hazırlanan numuneler üzerinde, konsolidasyon deneyleri gerçekleştirerek, karışımların e-logP ilişkileri, permeabilite-yük ilişkileri elde edilmiştir.

- i) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevalarında hazırlanan numunelerinin yük-oturma ilişkileri (hem kuru hem yaş olarak) elde edilip sonuçlar karşılaştırılarak, doygunluk etkisi araştırılmıştır.
- j) Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevalarında hazırlanan numuneler üzerinde, konsolidasyon deneyleri gerçekleştirerek, karışımların ani çökme potansiyelleri ve yük-oturma ilişkileri araştırılmıştır.



2. UÇUCU KÜLLER

Termik santrallarda, elektrik enerjisi üretebilmek amacıyla, yakıt olarak büyük miktarda, öğütülmüş toz kömür kullanılmaktadır. Öğütülmüş kömürün kullanılması ile de yakma sistemine bağlı olarak, değişik atık malzemeler elde edilmektedir. Modern termik santrallarda en önemli atık malzeme, yanmadan dolayı baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları, elektrofilitrelerde (elektrostatik yöntemlerle) ve siklonlarda yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. Böylece hava kirliliği de önlenmiş olmaktadır. Bu şekilde elde edilen çok ince küle uçucu kül (fly ash) denmektedir. Uçucu kül $1-150\mu$ çapında, tipik küresel şekillerdir (E.I.E., 1982). Uçucu kül partikülleri 3μ çapından daha küçük ve genelde küresel taneciklerden oluşur (Wyatt, 1980). Uçucu kül partikülleri; gevşek veya çok sıkı yüzeylere sahip çok değişik dane boyutlarında küresel taneciklerden oluşur (White and Case, 1990). Uçucu kül partikülleri, çoğu içi boş, camsal, içi boşluklu veya dolu küresel tanecikler ile süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden meydana gelir. Uçucu kül partiküllerinin içinin boş ve yüzeyinin aktif olması, absorpsiyon özelliği göstermesini sağlar (Bayat, 1998).

Eliot, kömür bünyesindeki birçok inorganik maddenin, yanma işlemi sonrasında, uçucu küle dönüştüğünü ve kömürün, yakılmadan önceki kompozisyonu ile yakıldıktan sonra oluşan uçucu kül kompozisyonunun aynı olduğunu, en önemli farklılığın, uçucu külü oluşturan partiküllerin 1400°C - 1700°C de kömürün yanmasıyla oluştuğunu ortaya koymuştur. Yakma esnasında ve sonrasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu, uçucu kül; heterojen yapıda katı taneler, küresel taneler, yanmamış katı taneler ve az miktarda yanmış karbon içermektedir (Bayat, 1998).

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürdeki minerallerin tipine ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Birçok uçucu külün, %85'den daha büyük bir kısmı SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO ve SO_3 ün yer aldığı kimyasal bileşenlerden teşekkül etmektedir. Bu kimyasal bileşim ile yaklaşık 2300 yıldan bu yana hidrolik bağlayıcı (çimento) olarak kullanılan ve adını İtalya'daki Pozzuoli kasabasından puzzolan olarak alan, volkanik küllere çok benzemektedir. O bakımdan, uçucu kül, yapay puzolan olarak elde edilen en modern malzeme olarak bilinmektedir (E.İ.E., 1982).

Uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özellikleri, santral'de yanan kömürün bileşimi, yapısı, yanma teknikleri ve yanma koşulları ile kül tutma koşullarından büyük ölçüde etkilenmektedir. Uçucu küller, bu faktörlere bağlı olarak, her termik santral için, hatta aynı santral için bile farklılıklar gösterir. Ancak, genel olarak uçucu kül, çimentodan daha koyu renkte çok ufak taneli, elle dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir. Herhangi bir uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri, diğer faktörlerle birlikte yakılan kömürün cinsine bağlıdır ve termik santralda kullanılan kömürün türü de kömür yatağının jeolojik konumuna bağlıdır (Bayat, 1998).

2.1. Uçucu Küllerin Mühendislik Özellikleri

Uçucu kül, silt boyutlu, doğal zeminlere nazaran düşük spesifik graviteli (2.30-2.55 aralığında), plastik olmayan, uniform bir malzemedir. İndeks ve mühendislik özellikleri genelde oldukça dar bir aralıkta değişir. Proctor sıklığındaki optimum su muhtevası, silt ve siltli killere nazaran daha geniş bir aralıktadır (DiGioia and Nuzzo, 1972; Gray and Lin, 1972; Gutt and Nixon 1979). Dane dağılımındaki geniş aralığa rağmen, uçucu küller, küresel şekillerinden dolayı, küçük yüzey alanlarına sahiptirler (Uysal, 1987).

Bayat (1998), Türkiye uçucu küllerinin spesifik yüzey alanlarının 940-3420 cm²/gr aralığında, Gutt and Nixon (1979), İngiltere uçucu küllerinin spesifik yüzey alanlarının 2600-5950 cm²/gr aralığında, Gray and Lin (1972), Pensilvanya uçucu küllerinin spesifik yüzey alanlarının 2620-3050 cm²/gr aralığında değiştiğini ortaya koymuşlardır. Bayat (1998), Türkiye uçucu küllerinin yoğunluklarının 0.88-1.44 gr/cm³ aralığında, özgül ağırlıklarının 1.83-2.99 aralığında değiştiğini ortaya koymuştur. Doğal yoğunlukların farklılık göstermesinin nedenleri, ortalama çeper kalınlığına, boşluk hacmine ve partikül çaplarının formasyonuna bağlıdır. Aynı uçucu külün özgül ağırlığı, inceliği ve kireç-etki mukavemeti; 20µm dane çapından küçük partiküllerden hazırlanan numunelerinde en yüksek değerine ulaşırken, 75-150µm dane çapı aralığındaki partiküllerden hazırlanan numunelerinde en düşük seviyede olmaktadır. Uçucu kül içinde 75µm dane çapından büyük partiküllerin miktarı arttıkça, uçucu külün fiziksel karakteristikleri olumsuz etkilenmektedir (Ranganath et al., 1998). İçi boş küresel taneciklerin öğütülmesiyle uçucu külün özgül ağırlığı artar (Paya et al., 1996).

2.1.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Bir çok ülke standartları, uçucu kül ile ilgili kesin bir sınıflandırma yapmamakla birlikte, ASTM'nin C618 sayılı standardına göre, uçucu küller kimyasal kompozisyonları ve üretildikleri kömür cinsine göre, iki genel sınıfa ayrılmaktadır. $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \leq \%70$ olduğu zaman "F" sınıfı, $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq \%50$ olduğu zaman "C" sınıfı uçucu kül olarak kabul edilirler. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürden, C sınıfı uçucu küller linyitli veya bitüm miktarı düşük kömürden elde edilir. ASTM C618 standardına göre, bazı C sınıfı uçucu küllerde, CaO miktarı %10'dan fazladır. Bu tip uçucu küller "yüksek kireçli uçucu küller" olarak da tanımlanır. Taş kömürü yakan termik santrallerde, üretilen düşük kalsiyumlu uçucu küller, bu davranışı

sergilemezler. ASTM'nin uçucu küllerin betonda kullanımı ile ilgili olarak, sırasıyla C ve F tipi olarak sınıflandırılan bu küllere ait standardı vardır. Uçucu küller, bu standardı sağlamasa bile, yakılan kömürü belirtmek üzere (yüksek kalsiyumlu veya düşük kalsiyumlu) C veya F tipi olarak da adlandırılırlar (Erdoğan, 1993).

2.1.2. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri

Puzolan, yalnız başına kullanıldığında, bağlayıcı olmayan, kireç veya çimento ile karıştırıldığında, su ile reaksiyona girerek bağlayıcı madde olma özelliği kazanan, aktif silis içeren doğal veya yapay maddedir. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, 1930'lu yılların başında ABD'de farkedilmiş ve takip eden yıllarda bu malzeme, özellikle kütle beton elde edilmesinde kullanılmıştır. Çoğu uçucu kül puzolaniktir ve uçucu küllerin puzolanik etkinliği uçucu kül partiküllerinin öğütülmesiyle veya iri daneli partiküllerin ayıklanmasıyla artar, bu durum özgül yüzey alanının artmasıyla açıklanabilir (Indraratna et al., 1991; Bell, 1993).

Uçucu külün silika ve kireç içeriğine bağlı olarak puzolanik etkinliği, bünyedeki serbest kireç miktarının artırılmasıyla artar (Sivapullaiah et al., 1995). Bünyesinde fazla miktarda kireç bulunduran uçucu küllere, kireç eklenmesi puzolanik etkinliği olumsuz yönde etkiler (Gray and Lin, 1972).

2.1.3. Uçucu küllerin kompaksiyon özellikleri

Uçucu külün ıslak sıkıştırılması, toz kontrolünün üstünde, F tipi küller için, serilme sırasında görünen kohezyon oluşmasıyla, dayanımın artmasını sağlar. Sıkışma ve dayanım, sıkıştırma su muhtevassından aşırı derecede etkilenmez. C tipi uçucu külün sertleşme özelliğinden dolayı, arazide sıkıştırmanın su ile

karıřtırdıktan sonra sűratle gerçekleřtirilmesi (veya sertleřmeyi geciktirici katkı maddesi kullanılması) sıkıřtırma enerjisi ve su muhtevasının sıkı kontrolu gerekmektedir (Wasti, 1990). Uçucu kűller űzerinde farklı sıkıřtırma yűntemleri (standart Proctor, modifiye Proctor ve titreřimli tokmak) yakın sonuçlar vermiřtir (Uysal, 1987).

DiGioia and Nuzzo (1972), uçucu kűl numuneleri űzerinde yaptığı deneylerde, sıkıřtırılmıř uçucu kűl numunelerinin içsel sűrtűnme açısıyla, kuru yoęunluęu arasında bir korelasyon bulunmadığı, fakat dane daęılımı, űzgűl aęırlık, doęunluk derecesi ve kompaksiyon metodlarının mukavemet parametreleri űzerinde etkili olduęunu ortaya koymuřtur.

Bros and Parylak, Polonya uçucu kűlleri űzerinde yaptığı çalıřmalarda bűnyede ince daneli partikűllerin artmasıyla optimum su muhtevasının arttığını ve maksimum kuru yoęunluęun azaldığını ortaya koymuřlardır (Uysal, 1987).

Uçucu kűller, her ne kadar granűle formasyon sergilese de, konsolidasyon karakteristięi açısından killer gibi davranırlar. Fakat, tasmanlar kum ve silt gibi, kile nazaran çok daha hızlı oluřur (DiGioia and Nuzzo, 1972).

2.1.4. Uçucu kűllerin mukavemet parametreleri

Dűřűk kalsiyumlu veya F tipi, kuru veya suya doęun uçucu kűller, kohezyonsuz zeminler gibi davranır ($c' = 0$) ve tipik deęerlerinin sıklığına baęlı olarak $30^\circ < \phi' < 35^\circ$ arasında deęiřmesi beklenir. Uçucu kűller, suya doęun olmadığı zaman, suyun yűzeyssel geriliminden dolayı gűrűnen kohezyon oluřur ve serbest basıncı deneyi uygulanabilir. Yűksek kalsiyumlu

veya C tipi ıslak küllerde, kendi kendine zamana bağlı sertleşme olduğu için, kohezyon ve serbest basınç dayanımında önemli artış gözlenir (Wasti, 1990).

Uçucu külün, puzolanik özelliğinden dolayı, tek eksenli basınç dayanımı zamanla mukavemet kazanır (DiGioia and Nuzzo, 1972; Gray and Lin, 1972; Joshi et al., 1975). Uçucu küller 2-3 hafta kür süresinde maksimum mukavemete ulaşır ve eğer uygun şartlarda sıkıştırılıp korunursa, bir çok zeminden daha yüksek taşıma gücü verir (Indraratna et al., 1991).

2.1.5. Uçucu küllerin permeabilite özellikleri

Uçucu kül partiküllerinin 1-150 μ çapında, tipik küresel şekillerden oluşan bu ince yapısı permeabilite, infiltrasyon oranı gibi, birçok fiziksel parametreyi yansıtır. Örneğin, uçucu külün permeabilitesi çok düşüktür. Uçucu kül yığınlarının, yatay hidrolik iletkenliği, düşey hidrolik iletkenliğinden daha yüksektir. Bu durum, iz elementlerin ve tuzun, uçucu kül bünyesinden süzülme süresini uzatacağından, uçucu küllerin yeraltı suyunu kirletmesi sınırlı kalacaktır. Uçucu külün düşük permeabilitesinin, suyun zemin yüzeyinden süzülürken, hidrolik basınç oluşturmasıyla, dolgu yapılarının stabilitesinin bozulmasına neden olduğunu ortaya koymuştur (Bayat, 1998).

Uçucu külün özelliklerine ve miktarına bağlı olarak, yeterli sıkıştırma ile ABD şartnamelerinde sağlanması istenen 1×10^{-7} cm/s'den daha düşük permeabiliteler elde edilmektedir. Uçucu kül karışımlarının, ıslanma/kuruma ve donma/çözülme dayanımı, inorganik sıvıların geçirimsizliğini olumsuz etkilemesi ve çevre açısından kimyasal etkileşim gibi özelliklerinin de olumlu olduğu tespit edilmiştir (Wasti, 1990). Uçucu külün, uzun vadede permeabilitesi uçucu kül partiküllerinin gradasyonunun yanı sıra, kompaksiyon enerjisi, mineral türü, yanmamış karbon miktarı ve puzolanik davranışlarına da bağlıdır (Indraratna et al., 1991). Uçucu kül üzerinde yapılan

permeabilite deneylerinde, bünyede bulunan az miktardaki ağır metallerin bünyeden süzülmediği görülmüştür (Edil et al., 1992).

2.1.6. Uçucu küllerinin çözünürlüğü

Uçucu küllerin depolanması ve uçucu küllerden faydalanılması durumlarında, uçucu kül ile çevre ilişkilerini çok iyi anlamak için, uçucu külle ilgili birçok kimyasal bileşenin çözünürlük karakteristikleri bilinmelidir. Dreesen et al. (1977), genelde uçucu kül partikülleri, yüzeylerinde bulunan molibden, flor, selenyum, arsenik ve kalminyum gibi elementler, asidik ortamda kolayca partikül yüzeylerinden ayrılma eğilimi göstermektedirler. İyonik olmayan maddeler oluşturabilmeye müsait elementler; örneğin, bor, molibden, flor, selenyum, krom ve vanadyum nispeten alkali ortamda çözünebilir olmakla beraber, daha yüksek metalik özellik sergileyen katyonlar, çökelme eğilimindedir. Uçucu kül, genellikle, %2 ila %5 arasında suda çözünür. Çözelti kalsiyum ve sülfat nedeniyle alkali reaksiyon verir. Mg, Na, K, ve SiO_3 iyonları, suda çok az çözünürler. İyi bir uçucu külde, suda çözünen madde miktarı düşüktür (Bayat, 1998).

3. UÇUCU KÜLLERİN NEDEN OLDUĞU ÇEVRE SORUNLARI

Çevre kirliliğini önlemek amacıyla, termik santrallarda üretilen külün santral dışına, genellikle santraldan oldukça uzak bir yere bantla taşınması ve atılması gerekmektedir. Elektrofilitrelerde yakalanan ve uzaklaştırılması gereken uçucu küllerin neden olduğu çevresel sorunlar, uçucu kül depolama ortamının atmosfer, zemin, yeraltı ve yüzey sularıyla olan temaslarıyla ortaya çıkmaktadır.

Uçucu küller, depolama alanının coğrafik konumuna ve iklim koşullarına bağlı olarak, hava kirliliğine neden olabilirler. Uçucu kül partiküllerinin, hava sirkülasyonu ile atmosfere yayılması ve buradan rüzgarlarla taşınıp çevre zemin yüzeyine dağılması; dolaylı yoldan zemin kirlenmesine, uçucu kül ile kirlenen zemin yüzeyinin yağmur suları ile temasıyla; yüzeysel suların daha düşük mecralara akarken yüzeysel kirlenmeye, zemin bünyesinden sızması nedeniyle de yeraltı sularının kirlenmesine neden olur ve kirlenmenin kapsamı uçucu kül depolama alanının çok daha dışına taşınmış olur.

Depolama sahalarına boşaltılan uçucu küller, atmosferik nem dolayısıyla sızmaya maruz kalır. Atmosferik emisyon ve nemlenmiş uçucu kül sistemlerinin sızıntı suyu kompozisyonları ile zemin ve yüzey sularının, uçucu küllerden kaynaklanan kirlenme potansiyelleri, kolaylıkla incelenebilmektedir (Bayat, 1998).

Uçucu kül, depolama sahalarında, uygun koşullarda, yüzeysel sularla taşınabileceği gibi, sızma yoluyla da yeraltı suyuna karışabilir. Su, uçucu kül bünyesinden sızarken, uçucu kül bünyesindeki bazı maddeleri çözerek, çözünmüş maddeleri yeraltı suyuna taşır. Su kirlenmesi, genel olarak, su kalitesinin düşmesi ve suyun kimyasal özelliklerinin değişmesi ile anlaşılır. Su

kirliliği aynı zamanda, zemin kirliliğini gösterir. Su kirliliğinde önemli olan suyun toksik madde, inorganik madde ve ağır metal içeriğidir. Uluatam vd., (1995), sızıntı sularının su kaynaklarını kirlletme potansiyelleri, aşırı eğimli arazilerde, bol yağışlı bölgelerde ve aşırı geçirgen topraklarda büyük ölçüde artar.

Uçucu küllerin rüzgar veya hava, bazan da yüzeysel sular vasıtasıyla zemin yüzeylerine dağılması, zeminin kimyasal ve fiziksel parametrelerinin değişmesine neden olur. Bu atıkların taşıdığı ağır metaller ve toksik maddeler sonucunda, zeminde bitkilerin büyümesi ve gelişmesine engel olan ağır metal ve toksik madde konsantrasyonunu arttırırlar. Uçucu külün zemine katılmasıyla, zeminin pH değeri, zemin tuzluluğu, çözülebilir kalsiyum, magnezyum, sodyum, sülfür ve bor miktarı artmakta, su bazlı çözünebilir fosforun konsantrasyonunun azaldığını ortaya koymuştur. Yüksek kalsiyumlu uçucu külün, zemin içinde kullanılması, depolama alanı civarındaki bitkilerin kök gelişimini yavaşlatır (Bayat, 1998).

4. UÇUCU KÜLLERİN KULLANIM ALANLARI

Kömür yakarak, elektrik enerjisi üreten termik santrallerin bacalarındaki elektrofilitreler yardımı ile tutulan uçucu küllerin puzolanik özelliklerinden dolayı, inşaat mühendisliğinde değişik amaçlarla kullanımı son yıllarda giderek artmaktadır. Termik santral atığı olan ve puzolanik özellikleri bulunan uçucu külün, inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi, hem çevre sorunlarını azaltmakta hem de bu malzemenin yerine geçtiği doğal malzeme kaybını ve enerji tüketimini de azaltmaktadır. Endüstriyel atık maddeler içerisinde miktar olarak en yüksek orana sahip olan uçucu külün, yine bu tür maddeler arasında en çok kullanıma sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın, Türkiye’de ise; kullanım alanlarının hemen hepsi bilinmesine rağmen ve uçucu kül üretiminde dünyada onuncu sırada yer almamıza rağmen, uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanılması üretim miktarının çok çok altındadır. Bu durum, ülkemizde büyük ölçüde kullanıcının termik santrale olan uzaklığından, yani nakliyeden ve ayrıca, termik santrallerde paketlenme ve yükleme-boşaltma gibi tesis olmayışından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllerin değerlendirilmesine yönelik bilimsel çalışmaların, bu hususların iyileşmesi halinde, uygulamaya yansması her yönden olumlu katkılar sağlayacaktır (Baykal vd., 1993).

Uçucu külün, çeşitli alanlarda değerlendirilmesi amacıyla, yapılan araştırmalar, bir takım gelişmeler sağlamıştır. Özellikle demir çelik sanayii ve termik santrallerin kurulması ile, yan ürün olarak elde edilen cüruf ve uçucu küllerin, yüksek silisli maddeler olmaları nedeniyle, puzolanik özelliğe sahip olup olmadıkları araştırılmıştır. 1862’de Eugene Longer, kireçle bazik-granüle yüksek fırın cürufunu karıştırarak, bir hidrolik bağlayıcı elde etmiştir. İlk cürufllu çimento, 1880 yılında Almanya’da yapılmış ve bazik-granüle yüksek fırın cürufunun, iyi bir yapay puzolan olduğu ortaya konmuştur. Uçucu kül

üzerinde yapılan araştırmalar, son 25 yılda büyük yoğunluk kazanmıştır. Önceleri, daha ziyade uçucu külün genel yapısı ve özellikleri ile kullanım olanaklarına yönelen bu çalışmalar, zamanla laboratuvar ve arazide gerçekleştirilen analizlerle geliştirilmiş, sonuçta uçucu külün inşaat alanında (özellikle yol yapımında) kullanılmasının termik santrallarda büyük mertebede atık madde olarak oluşan uçucu külün, uzaklaştırılması sorununa çözüm getireceği açıklığa kavuşmuştur. Bu ilk çalışmaların sonucunda, uçucu külün özellikle yol yapımında, zemin stabilizasyonunda ayrıca, dolgu ve enjeksiyon işlemlerinde kullanılması öngörülmüştür (D.S.İ., 1977).

Literatürde geöen, uçucu külün kullanılmaya öalışıldığı hemen hemen tüm alanlar aşağıda sıralanmıştır (DiGioia and Nuzzo, 1972; Gray and Lin, 1972; D.S.İ., 1977; Theis and Richter, 1979; E.İ.E., 1982; Leonards and Bailey, 1982; Uysal, 1987; Savran, 1988; Toth et al., 1988; Hoffman et al., 1990; Indraratna et al., 1991; Ghodrati et al., 1995; Sims et al., 1995; Bayat, 1998).

- Çimento ve beton yapımında kullanımı
- hafif agrega yapımında kullanımı
- karayolları yapımında kullanımı
- dolgu malzemesi olarak kullanımı
- yumuşak killerin stabilizasyonunda kullanımı
- stabilizasyon amaçlı alt ve temel malzemesi olarak kullanımı
- gaz beton yapımında kullanımı
- tuğla üretiminde kullanımı
- atık suların arıtımında absorban olarak kullanımı
- içindeki bazı nadir metallerin (demir, magnezyum, alüminyum, titanyum vb.) elde edilmesinde kullanımı
- taşkın önlenmesinde kullanımı
- döküm kumu olarak kullanımı

- duvar harçlarında kullanımı
- metal yüzeylerin püskürtme ile temizlenmesinde kullanımı
- yalıtım malzemesi olarak akustik ve termik yalıtım bloklarında kullanımı
- dolgu malzemesi (çatı malzemeleri, postisit, sabun, kağıt) olarak kullanımı
- lastik, plastik, suni gübre sanayiinde kullanımı
- kömür madenlerinde yangın ve çökme önleyici olarak kullanımı
- asfalt yol yüzeylerinde kaymayı önleyici olarak kullanımı
- karlanma ve buzlanma kontrolünde kullanımı
- emülsiyon üretiminde kullanımı
- petrol kuyuları sondajlarında kullanımı
- seramik sanayiinde kullanımı
- tarımda toprak ıslahı ve yapay gübre yapımında kullanımı
- kurak bölgelerde zeminin su tutma kapasitesini arttırmada kullanımı
- uçucu külden sızdırılan sulardan metal elde edilmesi veya faydalı elementlerin eldesinde kullanımı
- atık depolama alanlarında geçirimsiz tabaka olarak kullanımı

4.1. Uçucu Külün Zemin İyileştirilmesinde Kullanımı

Wasti (1990), uçucu küllerin geoteknik özelliklerini (indeks, kompaksiyon, kayma mukavemeti ve kompressibilite vb.) incelemiş, uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kullanılarak, değerlendirilebileceği sonucuna varmıştır. Peindl et al. (1992a); Peindl et al. (1992b), statik ve dinamik yükleme koşulları altında uçucu külün en az, sıkıştırılmış zemin kadar hatta daha iyi sonuç verdiğini, kür şartlarında, ağır trafik yükleri altında minimum oturma yaptığı ve bakım onarım işlerini azalttığını ortaya koymuştur. Indraratna et al. (1991), kompaksiyon eğrilerinde, geniş su muhtevası aralığında kuru yoğunluğun çok az değişmesinin, uçucu küle, geleneksel araçlarla uygulamalarda dolgu

malzemesi olarak kullanılma avantajı sağladığını ortaya koymuştur. Gangadhara et al. (1998), uçucu kül ve agrega karışımlarının, uçucu külün termal karakteristiği (resistivite) bakımından, stabil dolgu malzemesi olarak kullanılmaya elverişli olduğunu ortaya koymuştur.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULARIN YORUMU

Atık depolama alanlarında, sızıntı suyu kirliliğini önlemek amacıyla, taban kaplama malzemesi olarak, genellikle düşük permeabiliteli doğal kil kullanılır. Edil et al. (1992), kaplama olarak kullanılacak malzemenin uygunluğu; permeabilite, durabilite ve aşınmaya karşı direnir, arazi koşullarında serilme ve sıkıştırılma kabiliyeti, sızıntı suyuna karşı düşük permeabilitesini ve mukavemetini uzun süre koruma, bünyeden süzölen zararlı kimyasallara karşı permeabilitesini koruyabilmesi ve zararlı kimyasalların bünyeden süzölmesine izin vermemesine bağıdır. Daniel and Benson'a (1990) göre, kentsel, endüstriyel ve tehlikeli atık depolama alanlarında, taban kaplama kalınlığının en az birkaç dm. ile 1m. arasında ve hidrolik iletkenliğinin de 1×10^{-7} cm/s' den küçük olması tercih edilir.

Düşük permeabiliteye sahip killerin bulunmadığı yerlerde, bağlayıcı malzeme olarak, toz bentoniti, kum ile karıştırmak suretiyle, düşük permeabiliteli malzeme elde edilmiştir (Chapuis, 1990; Edil et al., 1992; Kenney et al., 1992). Az geçirimli doğal zeminlerin yokluğunda, sıkıştırılmış kum-bentonit karışımları, atık depolama alanlarında, taban kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Kenney et al. (1992), kum, yük taşıyan kafes sistemini oluşturarak makro düzeyde stabilizeyi sağlarken, bentonit, kum partikülleri arasındaki boşlukları doldurarak geçirimsiz bariyer oluşturur.

Bu deneysel çalışmada; Çatalağızı uçucu külü, kum gibi granüle bir malzeme olduğundan, bağlayıcı malzeme olarak toz bentonit kullanarak, karışımlar hazırlayıp, düşük permeabiliteli malzeme elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, hazırlanan karışımlar, optimum su içeriğı ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılarak, elde edilen malzemenin, atık depolama sahalarında

düşük permeabiliteli taban ve/veya üst kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Ayrıca uygun permeabiliteli bir malzeme elde edilmesi durumunda, bazı geoteknik parametrelerin tespiti için, çeşitli laboratuvar deneyleri yürütülmüştür (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Yürütülen laboratuvar deneyleri

Deney Adı	Ağırlıkça Bentonit Oranı, % ⁽¹⁾			
	0	10	20	30
Sınıflandırma Deneyleri	X			
Standart Proctor Deneyi ⁽²⁾	X	X	X	X
Rijit Çeperli Permeabilite Deneyi (Permean sıvı damıtık su)	X	X		X
Rijit Çeperli Permeabilite Deneyi (Permean sıvı, %20'lik NaOH)	X			X
Rijit Çeperli Permeabilite Deneyi (Permean sıvı, %20'lik HCl)	X			X
Esnek Çeperli Permeabilite Deneyi	X	X	X	X
İndirekt Çekme Deneyi	X	X	X	X
Tek Eksenli Basınç Deneyi	X			
Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)	X			
Üç Eksenli Basınç Deneyi (CU)	X	X	X	X
Konsolidasyon Deneyi	X	X	X	X
Ani Çökme Deneyi	X			X

(1) Ağırlıkça kuru kütle bentonit / kuru kütle Çatalağzı uçucu külü.

(2) Ayrıca %5, %15, ve %25' lik karışımlarda da standart Proctor deneyleri yapılmıştır.

5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bentonitin (Sodyum montmorilonit) bünyesinde bulunan Na iyonlarının Ca iyonları ile değişimi, toz bentonitin şişme kabiliyetini ve performansını etkileyen en önemli fiziko-kimyasal problemdir (Alther, 1987; Chapius, 1990). Bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak kullanılacak toz bentonitin şişme kabiliyetinin olumsuz şekilde etkilenmemesi amacıyla, bünyesinde en az miktarda Ca bulunduran düşük kireç oranlı, F tipi Çatalağzı uçucu külü ve bentonit birlikte kullanılmıştır.

5.1.1. Deneylerde kullanılan uçucu kül

Çatalağzı uçucu külü, elle dokunulduğunda; pürüzlü, açık kahverengi renkli, plastik olmayan, spesifik gravitesi, $G_s=2.12$ olan bir malzemedir. Yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda elde edilen granülometrik eğri Şekil 5.1'de gösterilmiştir. (Şekil 5.1) incelendiğinde, Çatalağzı uçucu külünün dane dağılımının; ağırlıkça %70'i silt, %30'u kum bölgesinde kalmaktadır. Bayat (1998), Çatalağzı uçucu külünün, düzensiz ve genelde gelişigüzel formasyonda, mükemmel şekilli bağımsız küreciklerden oluştuğunu ve spesifik yüzey alanının $0.139 \text{ m}^2/\text{g}$ olduğunu tespit etmiştir. Bayat (1998), tarafından yürütülen deneylerde; Çatalağzı uçucu külünün elementel kompozisyonu (Çizelge 5.2) ve çatalağzı uçucu külünden sızdırılan süzüntü suyunun elementel kompozisyonları Çizelge 5.3'de verilmiştir. (Çizelge 5.2) incelendiğinde, Çatalağzı uçucu külünün bünyesindeki CaO miktarının ağırlıkça % 0,2 olduğu, ağırlıkça ağır metal içeriğinin de %15 düzeylerinde olduğu görülecektir.

Çizelge 5.2. Çatalağzı uçucu külünün elementel kompozisyonu (Bayat, 1998)

Element oksit	Ağırlıkça, (%)
SiO ₂	47,60
Al ₂ O ₃	24,31
Fe ₂ O ₃	4,48
CaO	0,20
MgO	1,00
K ₂ O	3,50
Na ₂ O	0,58
TiO ₂	1,50
SO ₃	0,57
Cd	0,04
Pb	1,185
Zn	1,383
Cu	0,988
Cr	1,383
Ni	1,185
Mn	7,90
Kızdırma kaybı (LOI)	1,87

(Çizelge 5.3) incelendiğinde, Çatalağzı uçucu külünün bünyesinde bulunan birçok ağır metalin, uçucu külden sızdırılan süzüntü suyunda bulunmadığı görülecektir. Ağır metaller, Çatalağzı uçucu külü bünyesinde ağırlıkça yaklaşık %15 düzeylerinde bulunurken, süzüntü suyunda %2 düzeyinde bulunmaktadır. Çatalağzı uçucu külünün kaplama malzemesi olarak kullanılması durumunda, yeraltı suyunu kirletme potansiyeli oldukça sınırlı olacaktır.

Çizelge 5.3. Çatalağzı uçucu külü süzüntü suyunun elementel kompozisyonu
(Bayat, 1998)

Element	Çözeltideki toplam konsantrasyonu (ppm) ⁽¹⁾
Si	0,7
Al	—
Fe	—
Ca	30,0
Mg	2,4
K	1,0
Na	4,0
Ti	—
Cd	—
Pb	0,2
Zn	1,9
Cu	—
Co	—
Ni	—
Mn	—

(1) 200ml damıtık suda 1gr uçucu külün 2 saat bekletilmesine tekabül eden konsantrasyon

5.1.2. Deneylerde kullanılan toz bentonit

Çatalağzı uçucu külüyle bağlayıcı olarak karıştırılarak kullanılan toz bentonitin (Karakaya ticari toz bentoniti) mühendislik özellikleri, Çizelge 5.4’de verilmiştir (Kayabalı, 1996). Bu özelliklere ek olarak, deneylerde kullanılan toz bentonitin mineral içeriği XRD analiz sonuçlarına göre; %71 smektit, %25 feldspar, %5 kuvars ve %2 mikadır (Buluş, 1998).

Çizelge 5.4. Toz bentonitin mühendislik özellikleri (Kayabalı,1996)

Parametre	Büyüklik
Doğal yoğunluk	0,87 Mg/m ³
Kuru yoğunluk	0,8 Mg/m ³
Su içeriği	%8
Özgül ağırlık	2,25
Likit limit	%320
Plastik limit	%50
Boşluk oranı	1,89
Porozite	%65
Katyon değişme kapasitesi	55-60 meq / 100g

Çatalağzı uçucu külü bünyesinde bulunan Ca ve toz bentonitin (Sodyum montmorilonit) bünyesinde bulunan Na iyonlarının değişimi, toz bentonitin şişme kabiliyetini ve performansını etkileyecektir.

5.2. Bağlayıcı Madde Kullanım Oranları

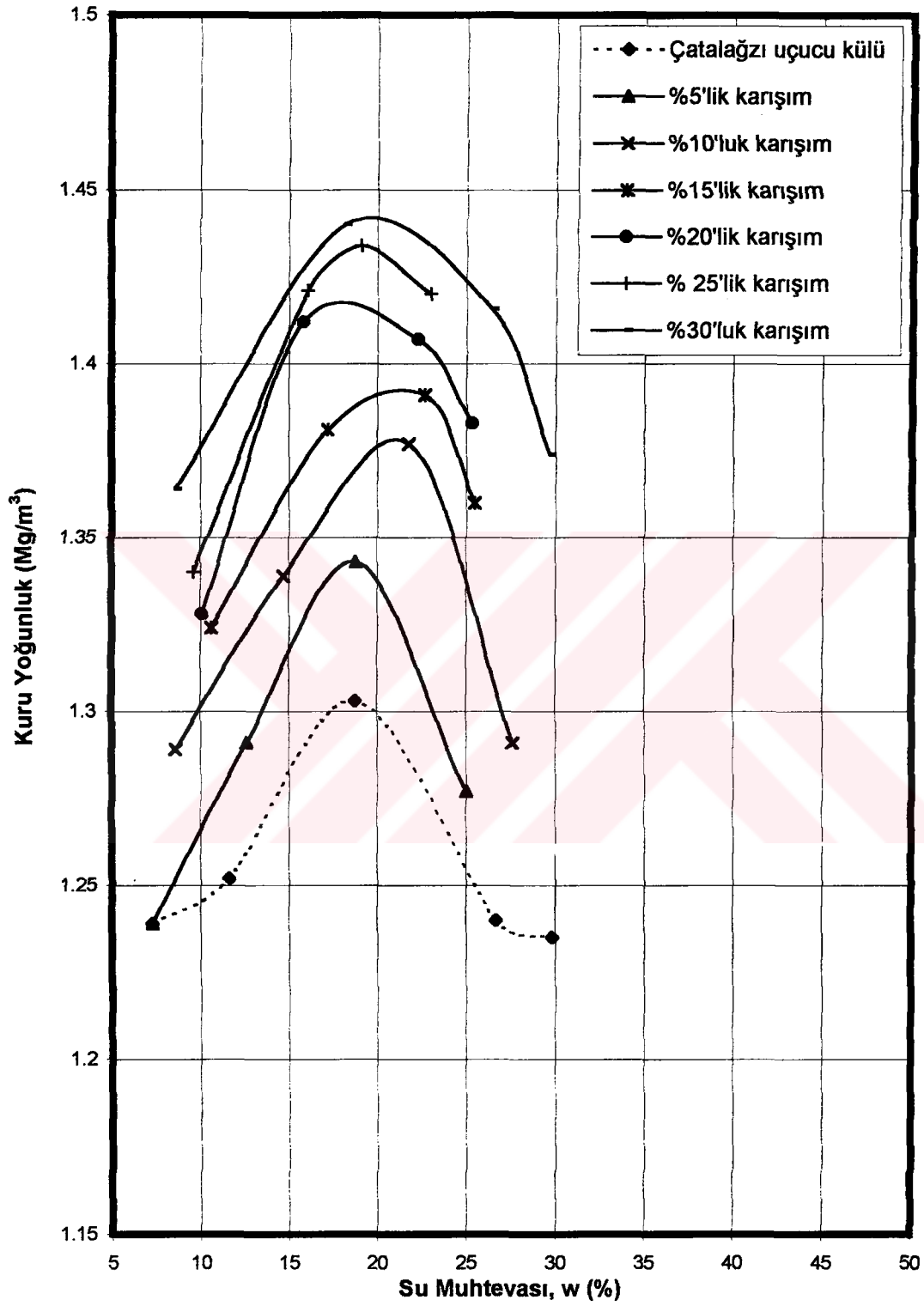
Çatalağzı uçucu külü ve bentonit, ağırlıkça; bentonit kuru kütle/Çatalağzı uçucu külü kuru kütle (B/ÇUK) olarak, %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30'luk karışımlar şeklinde hazırlanmıştır. Bentonitin düşük permeabiliteye sahip olması ve su ile temas ettiğinde, hacminin büyümesi özelliği nedeniyle, bulunduğu ortamdaki gözenekleri doldurur. Dolayısıyla, hazırlanan karışımlarda, ağırlıkça bentonit oranı arttıkça (bulunduğu ortamda daha çok gözenek dolduracağından) daha düşük permeabiliteli malzemeler elde edilecektir.

5.3. Standart Proctor Deneyleri

Katkısız Çatalağzı uçucu külü ve %5, %10, %15, %20, %25 ve %30'luk bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımları üzerinde, standart Proctor deneyleri gerçekleştirilerek, karışımların su içeriği ve kuru yoğunlukları arasındaki ilişki elde edilmiştir (Şekil 5.2). Karışımların optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukları Çizelge 5.5'de verilmiştir. (Çizelge 5.5) ve/veya (Şekil 5.2) incelendiğinde, karışımların maksimum kuru yoğunlukları, karışımdaki bentonit oranının artmasıyla bir artış sergilemekte, optimum su muhtevaları %18.8-%21.0 aralığında değişmektedir.

Çizelge 5.5. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, maksimum kuru yoğunlukları ile optimum su muhtevaları arasındaki ilişki

Proktor Numunesi	$\rho_{\max}$ (Mg/m ³)	w _{opt} (%)
Saf Uçucu Kül	1,31	18,5
%5' lik Karışım	1,34	18,5
%10' luk Karışım	1,38	20,5
%15' lik Karışım	1,39	21,0
%20' lik Karışım	1,42	18,0
%25' lik Karışım	1,43	19,5
%30' luk Karışım	1,44	19,5



Şekil 5.2. Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının kuru yoğunluk su muhtevası ilişkisi

5.4. Laboratuvar Permeabilite Deneyleri

Laboratuvar permeabilite deneyleri, rijit çeperli ve esnek çeperli permeametre düzeneklerinde yürütülmüştür. İki metodun da avantajları ve dezavantajları vardır (Olson and Daniel, 1981; Zimmie et al., 1981; Daniel et al., 1985).

Esnek çeperli permeametre düzeneği, 3-7 gün içinde sonuç verir, efektif gerilmelerin ve numunelerin tamamen doygunluğunun ($S_r=1$) kontrolü, geri besleme basıncı ile sağlanır (Black and Lee, 1973). Esnek çeperli permeametre düzeneğinde, permeametre çeperi ile zeminin bir arada hacim değiştirmesi sağlanır. Ayrıca uygulanan efektif basınç, oluşacak boşluk ve çatlakları kapatarak zemin dokusunun zararlı bir biçimde bozulmasına engel olur (Foreman and Daniel, 1986; Broderick and Daniel, 1990).

Rijit çeperli permeametre düzeneğinden elde edilen permeabilite sonuçları; yatay sızma kontrolü yapılarak, bentonitin tamamen hidratasyonu için ve numunelerin tamamen doyurulmaları için gerekli zaman (2-4 hafta) beklenerek yürütülürse, elde edilen permeabilite sonuçları, esnek çeperli permeametre düzeneğinden elde edilen permeabilite sonuçlarına yakın sonuçlar verir. Rijit çeperli permeametre düzeneğinde, düzenli akım elde edilmesi tamamen doygunluğu ($S_r=1$) ifade etmez, karışım tamamen doygun olmadığında bünyedeki hava boşlukları süzüntü akımını bloke edeceğinden daha düşük permeabilite sonuçları elde edilecektir. Permeabilite sonuçlarının doğruluğu doygunluk derecesine bağlıdır (Chapius, 1990).

5.4.1 Düşen seviyeli permeabilite deneyleri

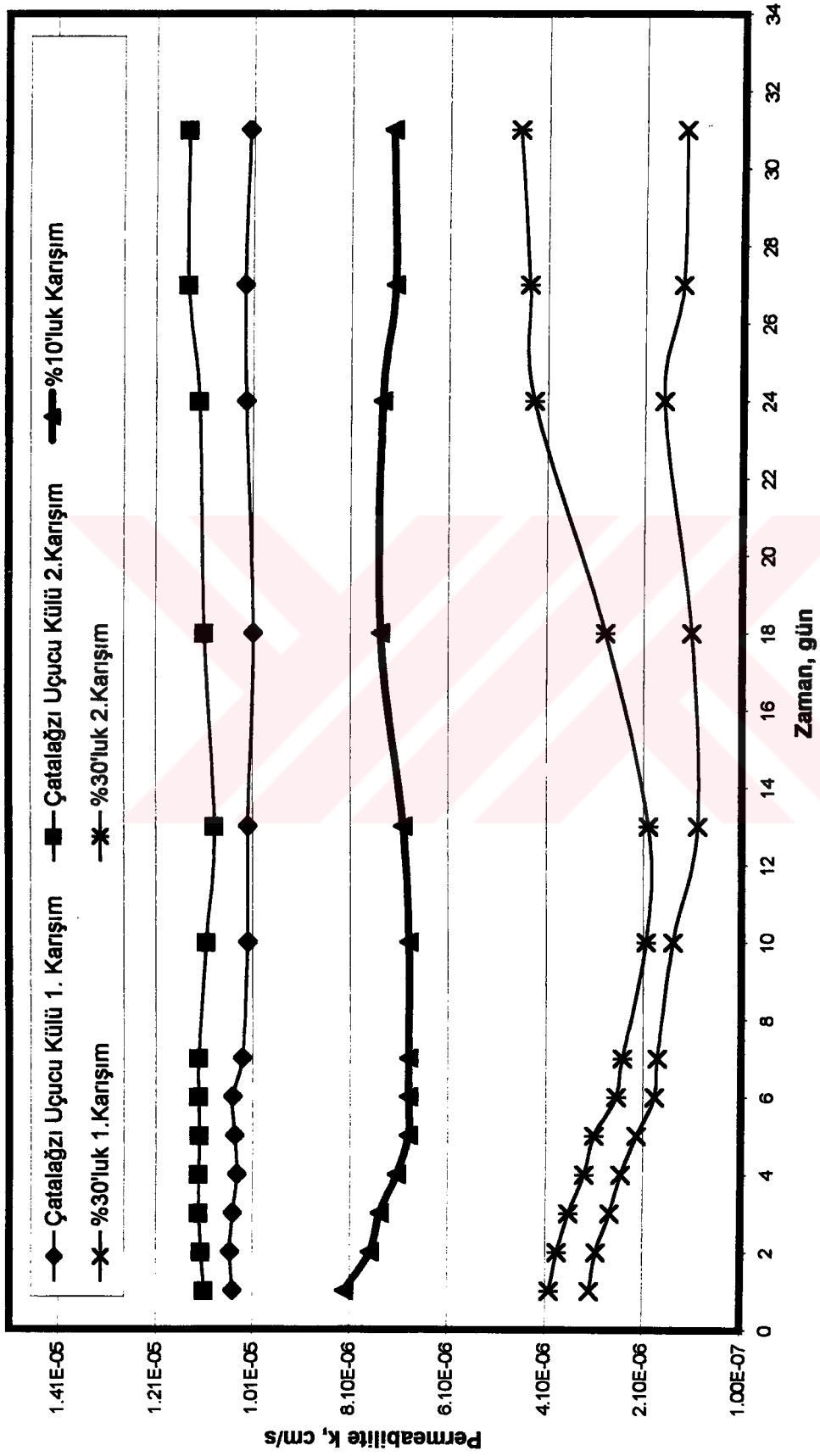
Rijit çeperli permeametre kalıbında, optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan; Çatalağzı uçucu külü; saf, %10, %30'luk bentonitli karışımların permeabiliteleri, düşen seviyeli permeabilite metoduyla, damıtık su kullanılarak değişik zaman aralıklarında, 31 gün boyunca elde edilmiştir (Çizelge 5.6). (Çizelge 5.6) ve/veya (Şekil 5.3) incelendiğinde, deney boyunca, karışımların permeabilitelerinin, zamana bağlı olarak değiştiği görülecektir. Bu durum, düşü ölçümlerinin elde edildiği zaman aralıklarında; karışımların değişik doygunluk oranlarında olmasından ($S_r < 100\%$) veya bentonit partiküllerinin tamamen hidrasyon yapmamasından kaynaklanmaktadır. Zira numuneler, tam doymadan bile, düzenli akım elde edilebilmekte ve bu durumda, elde edilen hidrolik iletkenlikler yanıltıcı olmaktadır. Bu nedenle, deneyi bir ay boyunca yürüterek, karışımların nihai permeabilite değerlerine ($S_r = 100\%$) ulaşmaları sağlanmıştır. Deneyin başlangıcından 31.gün itibariyle, karışımların, nihai permeabiliteleri, saf Çatalağzı uçucu külü için, ortalama 1.0×10^{-5} cm/s, %10'luk karışım için 7.3×10^{-6} cm/s ve %30'luk karışım için ortalama 3.0×10^{-6} cm/s olarak elde edilmiştir. Atık alanlarında, zararlı sıvı geçişini engelleyici kaplama olarak serilip sıkıştırılması durumunda bentonit-Çatalağzı uçucu külü tabakalarının hidrolik iletkenliğinin değişik kimyasal sıvıların penetrasyonu ile değişip değişmeyeceğinin bilinmesi, katı ve sıvı atık düzenli depolama projelerinin, uzun vadeli performansı bakımından önemlidir. Broderick and Daniel (1990), asit ve bazlar zemin kütlesindeki mineraller veya diğer katı maddelerin erimesine yol açarak permeabilitenin artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Zeminin, kimyasal sıvıların etkisine karşı direnci dokunun sıklığı ölçüsünde artmaktadır. Kenney et al. (1992), aşırı şişebilen bentonitin bulunduğu karışımlardan, kuvvetli solisyonların süzdürülmesi, permeabiliteyi çok az arttırmaktadır.

Çizelge 5.6. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, rijit çeperli permeametre deney düzeneğinden elde edilen permeabiliteleri

Permeabilite Ölçüm Zamanı	Ağırlıkça Bentonit Oranı				
	Çatalağzı uçucu külü 1. karışım	Çatalağzı uçucu külü 2. karışım	%10'luk karışım	%30'luk 1. karışım	%30'luk 2. karışım
	k (cm/s)	k (cm/s)	K (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)
1.GÜN	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$
2.GÜN	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,7 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$3,9 \times 10^{-6}$
3.GÜN	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$
4.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,1 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$
5.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$
6.GÜN	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-6}$
7.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
10.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$
13.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$
18.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
24.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$
27.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$
31.GÜN	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,3 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-6}$

Not: Permean sıvı olarak saf su kullanılmıştır.

Atık depolama alanlarından süzulebilecek sıvının, kaplama malzemesinin permeabilitesi üstündeki etkisini gözlemlemek amacıyla, karışımlardan permean sıvı olarak; seyreltik asidik (%20'lik HCl) ve seyreltik bazik (%20'lik NaOH) süzdürülerek, karışımların nihai permeabilitelerindeki değişiklikler, elde edilmiştir (Çizelge 5.7).



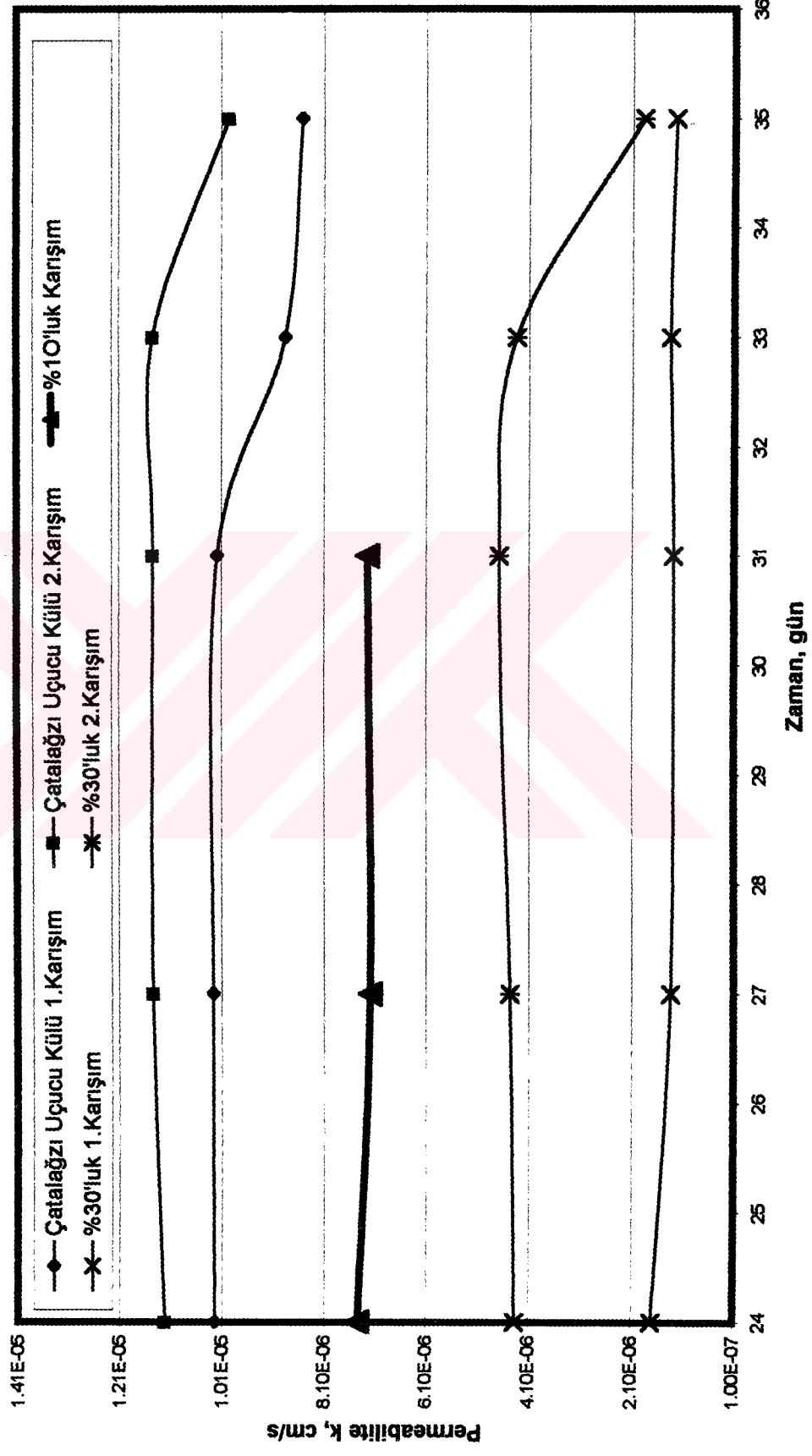
Şekil 5.3. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi

Çizelge 5.7. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, rijit çeperli permeabilite deney düzeneğinden elde edilen permeabilite değerleri.

Permeabilite Ölçüm Zamanı	Ağırlıkça Bentonit Oranı			
	Bünyeden süzdürülen Permean sıvı (%20'lik NaOH)		Bünyeden süzdürülen Permean sıvı (%20'lik HCl)	
	Çatalağzı uçucu külü 1. Karışım	%30'luk 1. Karışım	Çatalağzı uçucu külü 2. Karışım	%30'luk 2. Karışım
	k (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)	k (cm/s)
32.GÜN ⁽¹⁾	-----	-----	-----	-----
33.GÜN	$8,9 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$
35.GÜN	$8,5 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$

(1) Kimyasal sıvılar kullanılmadan önce, düşü ölçüm borusundan damıtık su tahliye edildiği için, düşü ölçümü yapılmamıştır.

(Çizelge 5.7) ve/veya (Şekil 5.4) incelendiğinde, karışımlardan kimyasal sıvıların süzülmesi ile elde edilen permeabilitelerin, karışımların nihai permeabilitelerinden (31. gün itibari ile) daha düşük olduğu görülecektir. Karışımlardan süzülen kimyasal sıvıların, karışımların bünyesinde kalıcı etkide bulunup bulunmadıklarını öğrenmek amacıyla, karışımlardan permean sıvı olarak tekrar damıtık su süzdürülmüştür. Elde edilen permeabilite değerleri (Çizelge 5.8). (Çizelge 5.8) ve/veya (Şekil 5.5) incelendiğinde, karışımların permeabilitelerinin, karışımlardan kimyasal sıvılar süzülerek edilen permeabilitelerden, daha yüksek olduğu görülmektedir. Kimyasal sıvılardan sonra, tekrar damıtık su kullanarak elde edilen permeabilitelerin, kimyasal sıvı kullanılmadan önce elde edilen nihai permeabilite değerlerinden daha yüksek olduğu görülecektir.



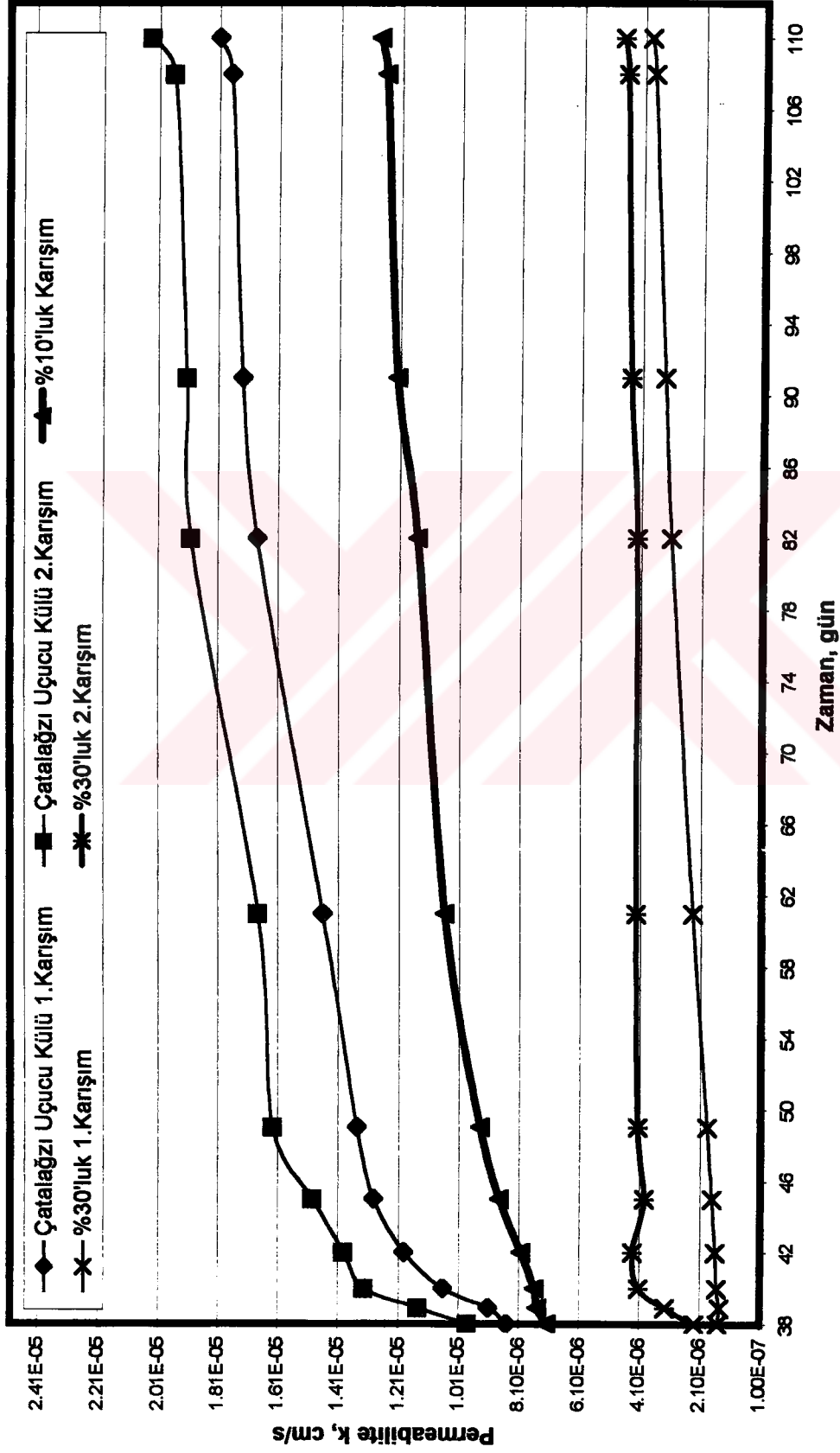
Şekil 5.4. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi

Çizelge 5.8. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, rijit çeperli permeametre deney düzeneğinden elde edilen permeabilite değerleri

Permeabilite Ölçüm Zamanı	Ağırlıkça Bentonit Oranı				
	Çatalağzı uçucu külü 1. karışım	Çatalağzı uçucu külü 2. karışım	%10'luk karışım	%30'luk 1. karışım	%30'luk 2. karışım
	k (cm/s)	K (cm/s)	k (cm/s)	K (cm/s)	k (cm/s)
	-----	-----	-----	-----	-----
36-37.GÜN ⁽¹⁾	-----	-----	-----	-----	-----
38.GÜN	$8,5 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$
39.GÜN	$9,1 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$
40.GÜN	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$
42.GÜN	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$8,0 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$
45.GÜN	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$8,8 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$
49.GÜN	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$9,4 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-6}$
61.GÜN	$1,5 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-6}$
82.GÜN	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-6}$
91.GÜN	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$
108.GÜN	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-6}$
110.GÜN	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$

(1) Tekrar kullanılan damıtık suyun permeabiliteye etkisini gözlemlemek amacıyla, karışımların bünyesindeki kimyasal sıvıların, bünyeden temizlenmesi için düzenli su çıkışı sağlanmış, fakat ölçüm alınmamıştır.

Kimyasal sıvıların etkisini anlamak amacıyla %10'luk karışımdan kimyasal sıvı süzülmemiş ve %10'luk karışımın permeabilitesinde ki değişim (31gün-110gün zaman aralığında) gözlenmiştir. Genel olarak, asidik kimyasalların, karışımların bünyesinden süzülürken permeabiliteyi, bazik kimyasallardan



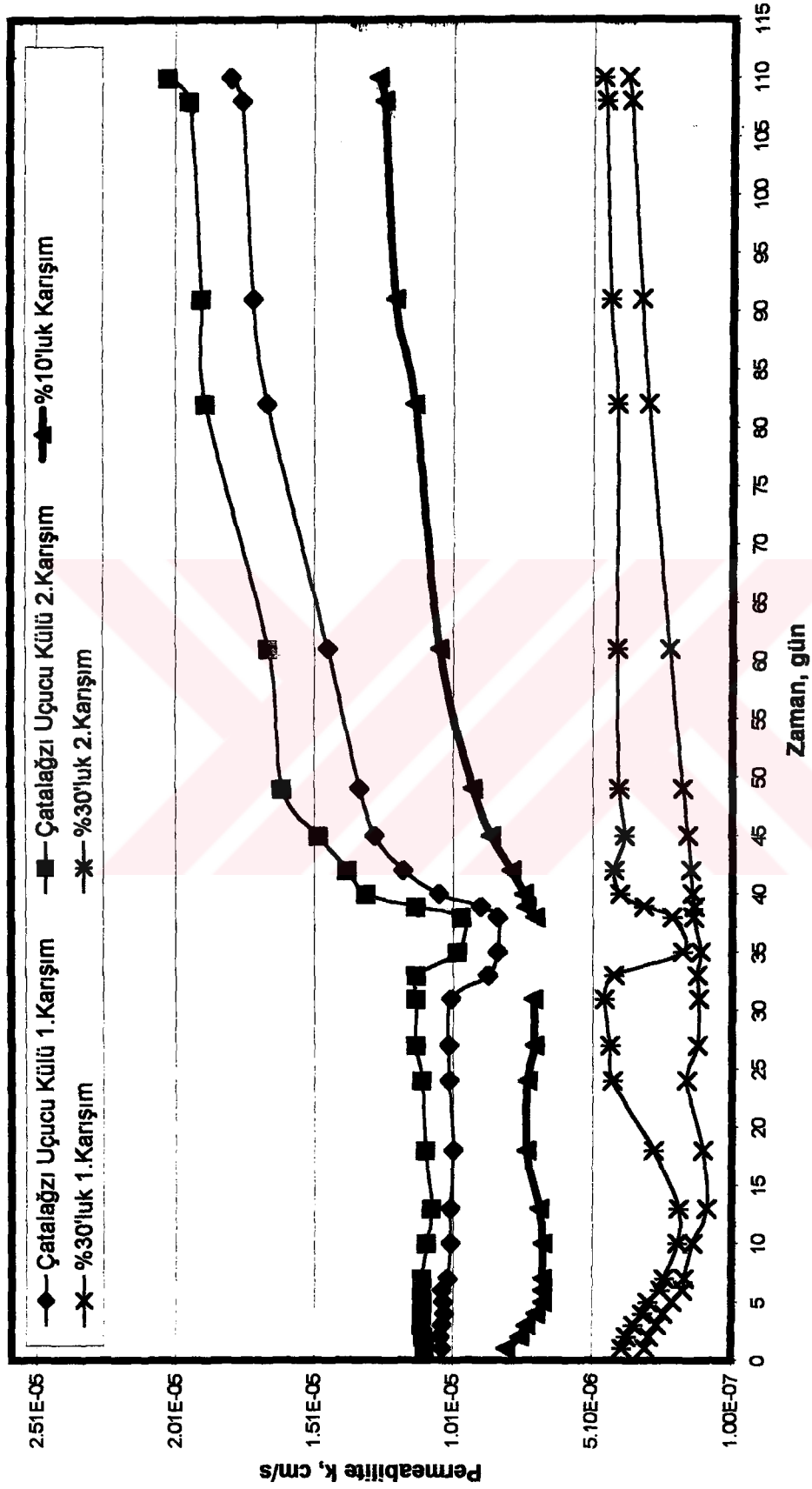
Şekil 5.5. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi

daha çok etkilediğini söyleyebiliriz. Deney verilerinden, kimyasal sıvıların permeabiliteyi ani olarak değil ama uzun vadede artarak, bünyede kalıcı bozukluklar yaptığını söyleyebiliriz. Karışımların, 0-31 gün aralığında elde edilen permeabilite değerleri ve ardından 32-35 gün aralığında, kimyasal sıvılar kullanılarak elde edilen permeabilite değerleri ve 36-110 gün aralığında tekrar damıtık su kullanılarak elde edilen permeabilitelerin zamanla değişimi, Şekil 5.6'da özet olarak gösterilmiştir.

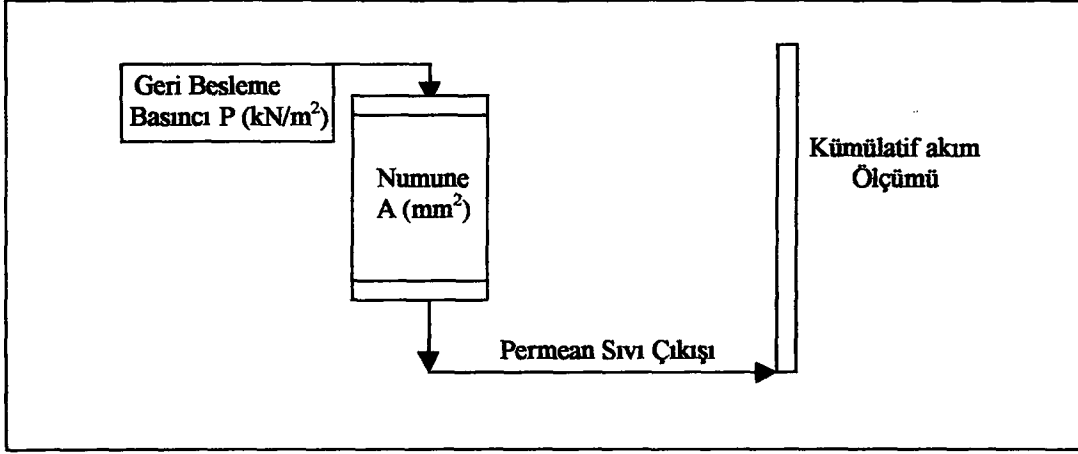
Rijit çeperli permeametre kalıbında, düşen seviyeli permeabilite metoduyla, elde edilen permeabilite sonuçlarından; %30'luk bentonit-uçucu kül karışımının bile, atık depolama alanlarında taban kaplama malzemesi olarak kullanılabilme şartını sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Chapius'a (1990) göre, sabit çeperli permeametre düzeneği, esnek çeperli permeametre düzeneğine nazaran daha yüksek hidrolik geçirimsilik değeri verir. Permeabilite sonuçlarının tutarlılığını test etmek amacıyla, Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımları üzerinde, gözlem ve deney şartlarının çok daha kontrollü olduğu, üç eksenli deney düzeneği kullanılarak, esnek çeperli permeabilite deneyleri yürütülmüştür.

5.4.2. Sabit seviyeli permeabilite deneyleri

Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukda sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü, saf, %10, %20 ve %30'luk karışımların permeabiliteleri, üç eksenli deney düzeneğinde (Şekil 5.7), değişik çevre basınçları altında, konsolidasyona maruz bırakılarak, değişik geri besleme basınçları altında numuneler tam doyurularak ($S_r=100\%$) elde edilmiştir. Permeabilite deneyine tabi tutulan numunelerin, değişik geri besleme basınçları altında, tamamen doyurulmasından ($S_r=100\%$) sonra, farklı zaman aralıklarında, kümülatif akım ölçümleri yapılarak, permean sıvının düzenli olarak çıkışı gözlenip, kümülatif



Şekil 5.6. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabilitelerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 5.7. Esnek çeperli permeametre düzeneği

akımın zamana bağlı değişimi elde edilmiştir. (Ek 1-3) saf uçucu külün, değişik geri besleme basınçları altında, düşü-zaman ilişkisini, (Ek 4) %10'luk bentonit katkılı uçucu kül numunelerinin, (Ek 5-7) %20'lik bentonit katkılı uçucu kül numunelerinin ve (Ek 8-11) %30'luk bentonit katkılı uçucu külün, kümülatif akım-zaman ilişkisini vermektedir. Karışımların permeabilitelerinin karışımdaki bentonit oranı ile değişimi Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Kümülatif akım-zaman ilişkileri kullanılarak, karışımların nihai hidrolik iletkenlikleri, aşağıda gösterildiği gibi elde edilmiştir:

$$q = k \times i \times A = k \times \frac{\Delta h}{\Delta l} \times A \quad (5.1)$$

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (5.2)$$

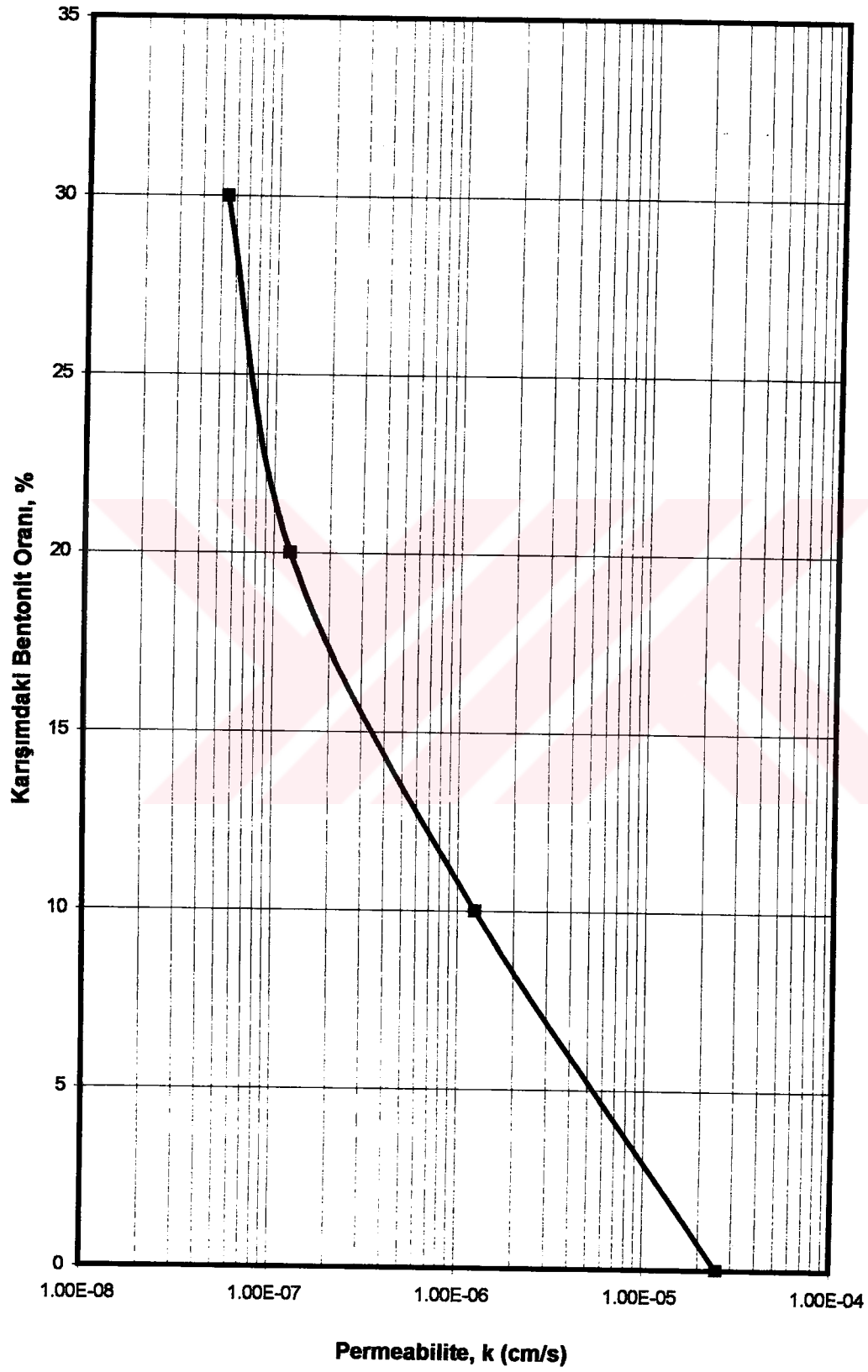
$$\Delta h = \frac{P}{\gamma_w} \left(\frac{kN/m^2}{kN/m^3} \right) \quad (5.3)$$

$$k = \frac{q \times \Delta l}{A \times \Delta h} \quad (5.4)$$

- γ_w : suyun birim hacim ağırlığı (10kN/m^3)
 P : geri besleme basıncı (kN/m^2)
 A : numunenin kesit alanı (mm^2)
 k : numunenin permeabilitesi (cm/s)
 Q : kümülatif akım (mm^3)
 t : zaman (saniye)
 q : akım oranı = $\Delta Q / \Delta t$ (mm^3/s)

Çizelge 5.9. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, esnek çeperli permeabilite düzeneğinden elde edilen permeabilite değerleri

Ağırlıkça Bentonit Oranı	Geri Besleme Basıncı, P (kN/m^2)	$\Delta h = P/l_0$	$q = \Delta Q / \Delta t$ (mm^3/s)	Permeabilite, k (cm/s)	k_{avr} (cm/s)
%0	20	2	6,761	$2,50 \times 10^{-5}$	$2,52 \times 10^{-5}$
	50	5	18,585	$2,74 \times 10^{-5}$	
	80	8	25,044	$2,31 \times 10^{-5}$	
%10	90	9	1,5127	$1,24 \times 10^{-6}$	$1,24 \times 10^{-6}$
%20	10	1	0,0203	$1,50 \times 10^{-7}$	$1,23 \times 10^{-7}$
	20	2	0,0281	$1,04 \times 10^{-7}$	
	80	8	0,1246	$1,15 \times 10^{-7}$	
%30	20	2	0,0244	$9,01 \times 10^{-8}$	$5,40 \times 10^{-8}$
	60	6	0,0574	$7,06 \times 10^{-8}$	
	80	8	0,0130	$1,20 \times 10^{-8}$	
	10	10	0,0587	$4,33 \times 10^{-8}$	



Şekil 5.8. Karışımındaki bentonit oranı ile permeabilite değişimi

(Çizelge 5.9) incelendiği zaman, %10'luk karışımın permeabilitesi, $(1,24 \times 10^{-6} \text{ cm/s})$, saf uçucu külün permeabilitesinin $(2,52 \times 10^{-5} \text{ cm/s})$ 1/20 katı, %20'lik karışımın permeabilitesi, $(1,23 \times 10^{-7} \text{ cm/s})$ saf uçucu külün permeabilitesinin 1/205 katı, %30'luk karışımın permeabilitesi $(5,4 \times 10^{-8} \text{ cm/s})$, saf uçucu külün permeabilitesinin 1/467 katı olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlardan, %20'lik karışımın permeabilitesinin $(1,23 \times 10^{-7} \text{ cm/s})$ atık depolama sahalarının taban kaplamasının minimum hidrolik geçirimsizlik katsayısı olan $(1,00 \times 10^{-7} \text{ cm/s})$ şartını sağladığı görülmektedir.

5.5. İndirekt Çekme (Yarmada Çekme) Deneyleri

Zemin çekme deneyleri, basınç deneylerinden daha zordur. Zeminlerin çekme dayanımı ve çekme deformasyonlarını test etmek amacıyla, direkt çekme deneyi, kiriş deneyi, çift zımbalama deneyi ve indirekt çekme (yarmada çekme) deneyleri yürütülür. İndirekt çekme (yarmada çekme) deneyi; numune hazırlanması ve deney boyunca saklanması kolaylığı, deneyin basit yükleme araçları ile yürütülebilir olması, deney sonuçlarında sapmanın çok az olması, kırılma malzemelerde uygun deney koşullarında çok iyi eksenel mukavemet vermesi gibi avantajlarından dolayı, bu deneyler içerisinde yürütülmesi en kolay olan ve verileri en güvenilir olanıdır (Krishnayya et al., 1974). Permeabilite kriteri açısından gerekli şartı sağlayan karışımların, yapısal işlevini bozmadan (bünnyede maksimum çekme deformasyonları oluşmadan) taşıyabileceği üst yükü belirlemek amacıyla, yukarıda sözü edilen avantajlarından dolayı, optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının, çekme dayanımları ve çekme deformasyonları indirekt çekme (yarmada çekme) deneyleri yürütülerek elde edilmiştir. Laboratuvar deneyler, 1.2mm/dak. hızında yürütülerek, çekme çatlaklarını oluşturan maksimum yük ve

maksimum çekme deformasyonları aşağıdaki formülle hesaplanıp (TS 699, 1987) Çizelge 5.10'da gösterilmiştir.

$$f_{y\epsilon} = \frac{2 \times P_k}{\pi \times D \times L} \quad (5.5)$$

- L : deney numunesinin boyu, mm
D : deney numunesinin çapı, mm
P_k : kırılma anındaki maksimum yük, kN
f_{yε} : numunenin yarmada çekme mukavemeti, kN/m²

Geomembranlar oldukça yüksek çekme deformasyonları (%5-%20) sergilerken, derlenen mevcut veriler, sıkıştırılmış zemin tabakalarının çatlama sızın %(0,1-1,0) çekme deformasyonu sergilediklerini göstermektedir (Daniel, 1995). (Çizelge 5.10) incelendiği zaman, Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının kırılma anındaki maksimum çekme deformasyonlarının (ε) da %1 düzeyinde olduğu görülecektir. Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının, çekme gerilmesi ve çekme deformasyonları arasındaki ilişki (Ek 12-15) de gösterilmiştir.

Geçmişte yapılan deneyler sonucunda; genelde yüksek plastisiteli zeminlerin düşük plastisiteli zeminlere nazaran daha esnek olduğu, zeminlerin çok düşük çekme dayanımına sahip olduğu, yükleme hızının veya süresinin sıkıştırılmış zeminlerin çekme karakteristikleri üzerinde oldukça fazla etkili olduğu, kırılma anındaki çekme gerilmelerinin ve çekme deformasyonlarının azaltılmasının yükleme hızını düşürerek yani test süresini artırarak sağlandığı ortaya konmuştur (Krishnayya et al., 1974; Indraratna et al., 1991; Daniel, 1995). Optimum su muhtevassından daha fazla su muhtevassında sıkıştırılan

numunelerde, çekme dayanımı artmakta iken, optimum su muhtevassından daha az su muhtevassında sıkıştırılan numunelerde, çekme deformasyonları

Çizelge 5.10. Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının kırılma anındaki maksimum çekme gerilmeleri ve çekme deformasyonları

Numune	P_k (kN)	$f_{yç}$ (kN/m ²)	ϵ (%)
Çatalağzı uçucu külü 1. Numune	0,041	10,89	0,996
Çatalağzı uçucu külü 2. Numune	0,04	9,14	0,996
Çatalağzı uçucu külü 3. Numune	0,03	7,78	0,995
%10'luk karışım 1. numune	0,11	29,17	0,995
%10'luk karışım 2. numune	0,10	25,67	0,994
%10'luk karışım 3. numune	0,10	26,06	0,996
%20'lik karışım 1. numune	0,13	33,45	0,991
%20'lik karışım 2. numune	0,16	42,78	0,994
%20'lik karışım 3. numune	0,13	33,45	0,989
%30'luk karışım 1. numune	0,33	85,56	0,986
%30'luk karışım 2. numune	0,23	59,89	0,995
%30'luk karışım 3. numune	0,34	88,29	0,991

artmaktadır (Indraratna et al., 1991). Sıkıştırma enerjisinin fazla olmasıyla veya optimum su muhtevassından daha az su muhtevassında sıkıştırılması durumunda, çekme çatlağı riski artmaktadır (Daniel, 1995).

5.6. Tek Eksenli Basınç Deneyleri

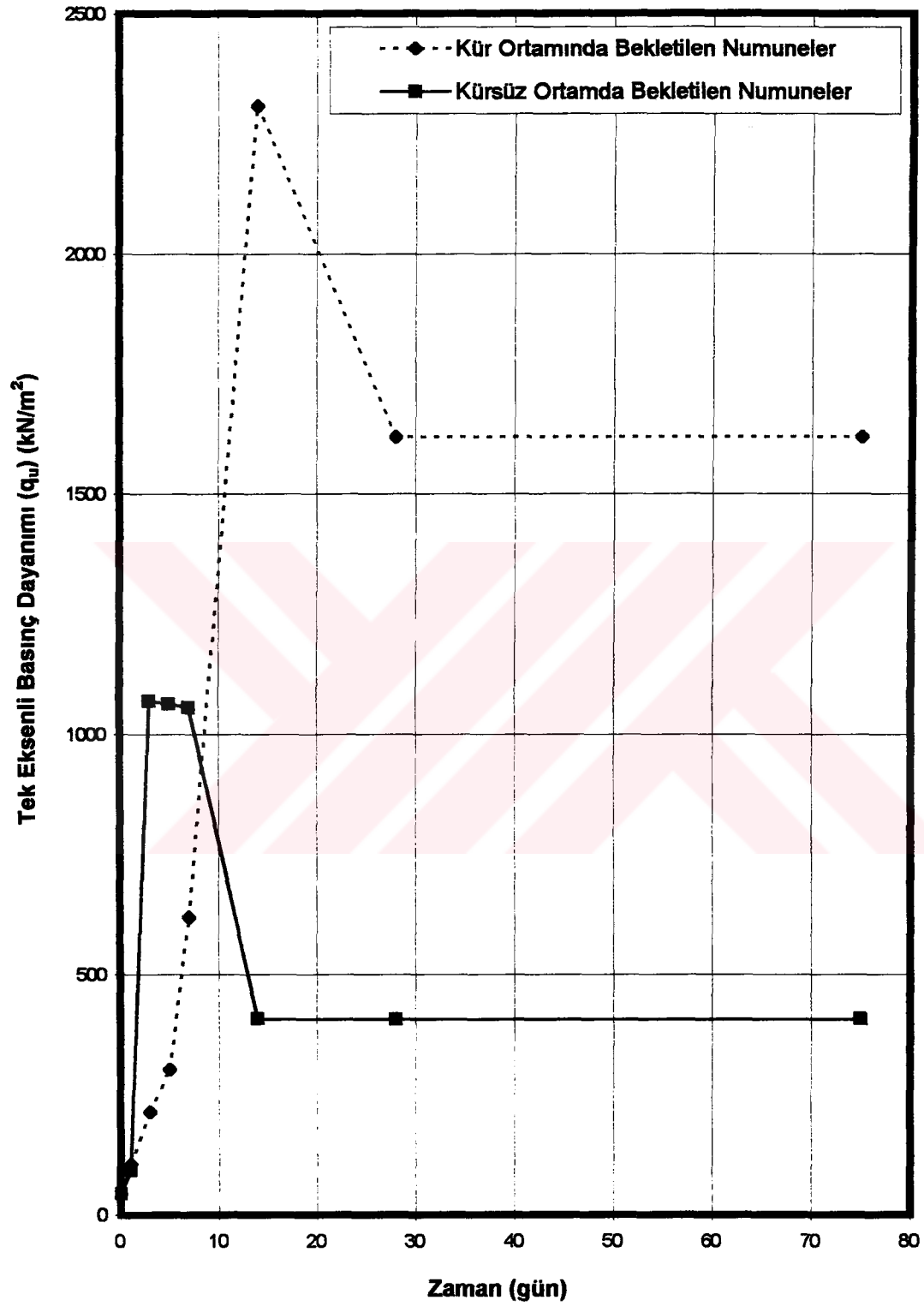
Çatalağzı uçucu külünün, maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevasında hazırlanan numuneleri, kür ortamında ve açık ortamda (kürsüz ortam) bekletilmiş. Kür ortamında ve kürsüz ortamda bekletilen numunelerin, tek eksenli basınç dayanımının, zamanla değişimini gözlemek amacıyla, numuneler; hemen sonra, 1, 3, 5, 7, 14, 28 ve 75. gün sonlarında 1.2mm/dak. yükleme hızında tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır. Kür ortamında ve kürsüz ortamda bekletilen numunelerin serbest basınç dayanımı-birim deformasyon ilişkileri (Ek 16-23) de gösterilmiştir. Kür ortamında ve kürsüz ortamda bekletilen numunelerin, kırılma anındaki tek eksenli basınç dayanımının zamanla değişimi, Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Kür ortamında ve kürsüz ortamda bekletilen numunelerin zamana bağlı su muhtevası kaybı ilişkisi Şekil 5.10'da gösterilmiştir. (Çizelge 5.11) kürde bekletilen ve kürsüz ortamda bekletilen uçucu kül numunelerinin, zamanla değişen kırılma anındaki tek eksenli basınç dayanımları ve su muhtevaları verilmiştir. Çizelge 5.11 dikkatle incelenirse, kür ortamındaki numunelerin, tek eksenli basınç dayanımları, 14.gün itibariyle en yüksek değerine ulaşırken (ilk günkü dayanımının 50 katına), daha uzun süreli kür sonrasında, tek eksenli basınç dayanımı azalmaktadır. Indraratna (1991), 2-3 haftalık kür süresinde tek eksenli basınç dayanımı en yüksek değerine ulaşırken, daha uzun süreli kürde tek eksenli basınç dayanımı azalmaktadır. Açık hava ortamında bekletilen numuneler, bünyedeki su kaybının oranına bağlı olarak, birkaç gün içinde su muhtevası %1 seviyelerine düştüğü sırada, en yüksek tek eksenli basınç dayanımına ulaşmaktadır (ilk günkü dayanımının 25 katına). Kür ortamındaki numunelerin, maksimum tek eksenli basınç dayanımı, açık havada bekletilen numunelerin maksimum tek eksenli basınç dayanımından daha büyüktür. Kür süresi, kuru yoğunluk ve tek eksenli basınç dayanımları arasında herhangi bir korelasyon yoktur (Leonards and Bailey, 1982).

Çizelge 5.11. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin, zamanla değişen su muhtevaları ve kırılma anındaki tek eksenli basınç dayanımları

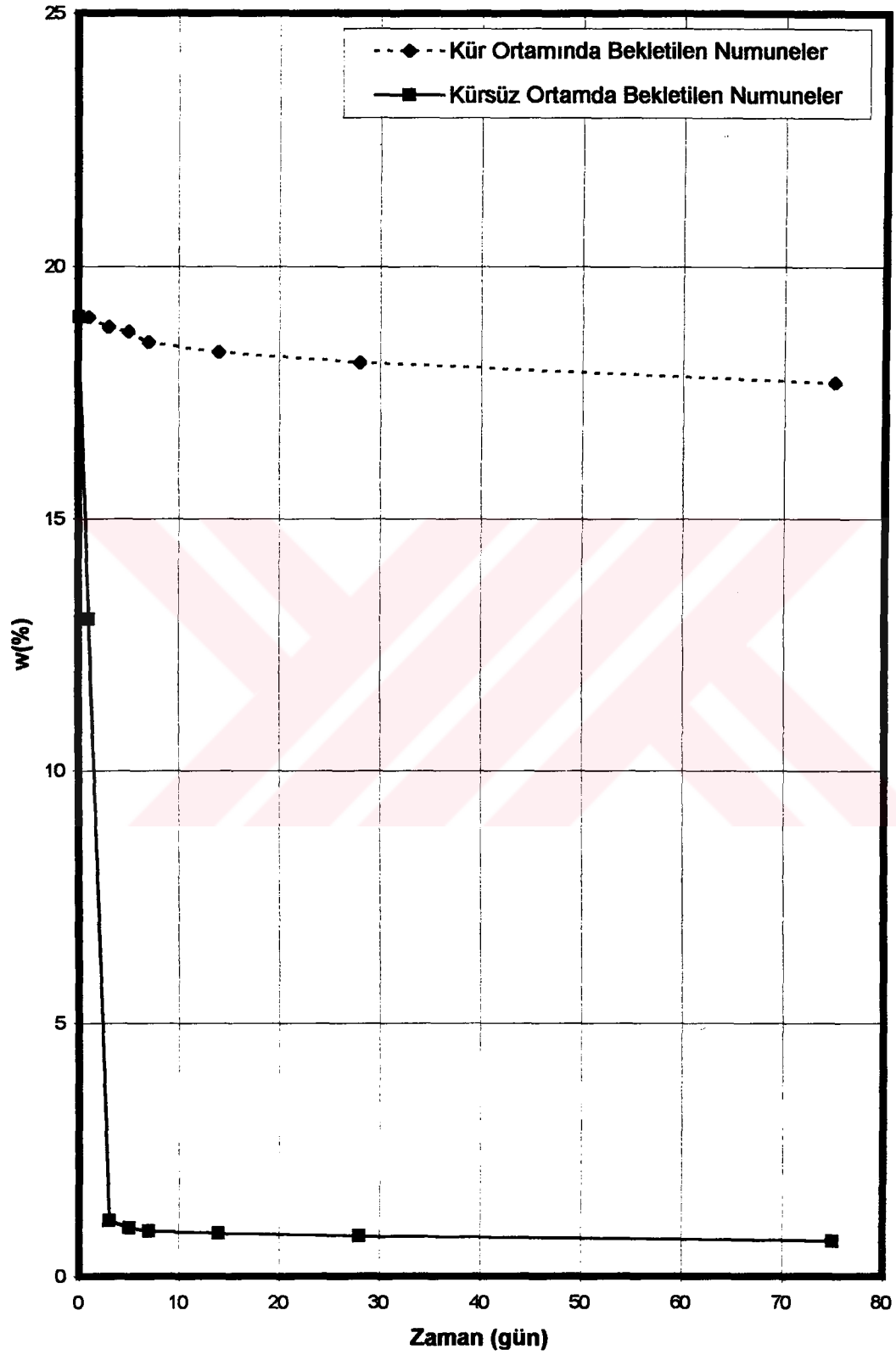
Deney Zamanı	Kür ortamında bekletilen numuneler		Kürsüz ortamda bekletilen numuneler	
	su muhtevası, w (%)	$q_{u(max)}$ (kN/m ²)	su muhtevası, w (%)	$q_{u(max)}$ (kN/m ²)
0.gün	19,0	45	19,0	45
1.gün	19,0	105	13,0	93
3.gün	18,8	214	1,10	1069
5.gün	18,7	302	0,96	1063
7.gün	18,5	619	0,90	1055
14.gün	18,3	2308	0,85	408
28.gün	18,1	1618	0,80	407
75.gün	17,7	1618	0,70	408

5.7. Konsolidasyonsuz Drenajsız (UU) Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Çatalağzı uçucu külünün (saf), optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan numuneleri üzerinde; 1.4mm/dak. yükleme hızında yürütülen, konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üçeksenli deneylerinden, içsel sürtünme açısı $\phi_u = 31^\circ$ ve kohezyon $c_u = 27 \text{ kN/m}^2$ olarak elde edilmiş, kırılma zarfı Ek 24'de gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin tek eksenli basınç dayanımının zamana göre değişimi



Şekil 5.10. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin su muhtevalarının zamana göre değişimi

5.8. Konsolidasyonlu Drenajsız (CU) Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Çatalağzı uçucu külü; saf, %10, %20 ve %30'luk karışımların, optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan numuneleri üzerinde, 0.2mm/dak. yükleme hızında, konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli deneyleri yürütülmüştür. Karışımların, efektif mukavemet parametreleri; Çizelge 5.12'de, kırılma zarfları (Ek 25-28) de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının konsolidasyonlu drenajsız (CU) efektif mukavemet parametreleri

Numune	Efektif mukavemet Parametreleri	
	c' (kN/m ²)	Φ'
Saf Uçucu Kül	36	33°
%10' luk karışım	35	42°
%20' lik karışım	53	42°
%30' luk karışım	54	42°

(Çizelge 5.12) incelendiğinde, içsel sürtünme açısının ve kohezyonun bentonit oranı ile bir miktar arttığı gözlenir. Leonards and Bailey (1982), uçucu kül üzerinde yürüttüğü konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli deneylerinde, içsel sürtünme açısını $\Phi'=43^\circ$ kohezyonu $c'=100$ kN/m² olarak elde etmiştir.

5.9. Konsolidasyon Deneyleri

Çatalağzı uçucu külü, %10, %20, %30'luk karışımların, optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan numuneleri üzerinde yürütülen konsolidasyon deneylerinden elde edilen boşluk oranı-logP ilişkileri

(Ek 29-32) de gösterilmiştir. Karışımların sıkışma indeksleri Çizelge 5.13’de verilmiştir.

Numunelerin Sıkışma İndeksi, $0.009 < C_c < 0.019$ değerleri arasında değişmektedir. Uysal, (1987) tarafından Çatalağzı uçucu külü üzerinde yürütülen konsolidasyon deneylerinde, sıkışma İndeksinin $0.04 < C_c < 0.05$ aralığında değiştiğini ortaya koymuştur.

Çizelge 5.13. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının sıkışma İndeksleri

Numune	C_c Sıkışma İndeksi
Saf Numune	0.014-0.016
%10’ luk Numune	0.009-0.010
%20’ lik Numune	0.012-0.014
%30’ luk Numune	0.019-0.020

5.9.1. Konsolidasyon deneylerinden permeabilite tayini

Çatalağzı uçucu külü, %10, %20, %30’luk karışımların, optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan numuneleri üzerinde, yürütülen konsolidasyon deneylerinden elde edilen, yük-karekök t ilişkileri (Ek 33-56) da, permeabilite-yük ilişkileri (Ek 57-60) da, karışımların her yükleme kademesindeki permeabiliteleri ile karışımdaki bentonit oranı arasındaki ilişki (Ek 61-66) da gösterilmiştir. Ayrıca, karışımların her yük kademesindeki permeabiliteleri Çizelge 5.14’ de verilmiştir. (Ek 57-60) incelendiği zaman, aynı karışımların üzerindeki yük arttıkça, karışımın permeabilitesinin azaldığı, (Ek 61-66) incelendiği zaman aynı yükler altında,

Çizelge 5.14 Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının yük-permeabilite ilişkisi

Numune	Permeabilite, k (cm/s)					
	Konsolidasyon Yükü					
	100 kN/m ²	200 kN/m ²	500 kN/m ²	1000 kN/m ²	2000 kN/m ²	4000 kN/m ²
Çatalağzı Uçucu külü 1. Numune	$7,91 \times 10^{-6}$	$5,76 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$5,96 \times 10^{-7}$	$4,87 \times 10^{-7}$	$5,04 \times 10^{-8}$
Çatalağzı Uçucu külü 1. Numune	$7,62 \times 10^{-6}$	$4,39 \times 10^{-6}$	$1,72 \times 10^{-6}$	$5,62 \times 10^{-7}$	$4,03 \times 10^{-7}$	$6,10 \times 10^{-8}$
%10'luk karışım 1. Numune	$5,03 \times 10^{-6}$	$3,06 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-6}$	$3,49 \times 10^{-7}$	$2,54 \times 10^{-7}$	$2,89 \times 10^{-8}$
%10'luk karışım 1. Numune	$6,44 \times 10^{-6}$	$3,14 \times 10^{-6}$	$7,20 \times 10^{-7}$	$4,14 \times 10^{-7}$	$2,24 \times 10^{-7}$	$4,93 \times 10^{-8}$
%20'lik karışım 1. Numune	$3,15 \times 10^{-6}$	$2,27 \times 10^{-6}$	$4,72 \times 10^{-7}$	$2,13 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-7}$	$1,76 \times 10^{-8}$
%20'lik karışım 1. Numune	$3,64 \times 10^{-6}$	$2,44 \times 10^{-6}$	$4,80 \times 10^{-7}$	$2,50 \times 10^{-7}$	$4,19 \times 10^{-8}$	$3,64 \times 10^{-8}$
%30'luk karışım 1. Numune	$1,96 \times 10^{-6}$	$1,54 \times 10^{-6}$	$1,79 \times 10^{-7}$	$1,20 \times 10^{-7}$	$3,40 \times 10^{-8}$	$1,08 \times 10^{-8}$
%30'luk karışım 1. Numune	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-6}$	$2,20 \times 10^{-7}$	$1,60 \times 10^{-7}$	$3,10 \times 10^{-8}$	$1,46 \times 10^{-8}$

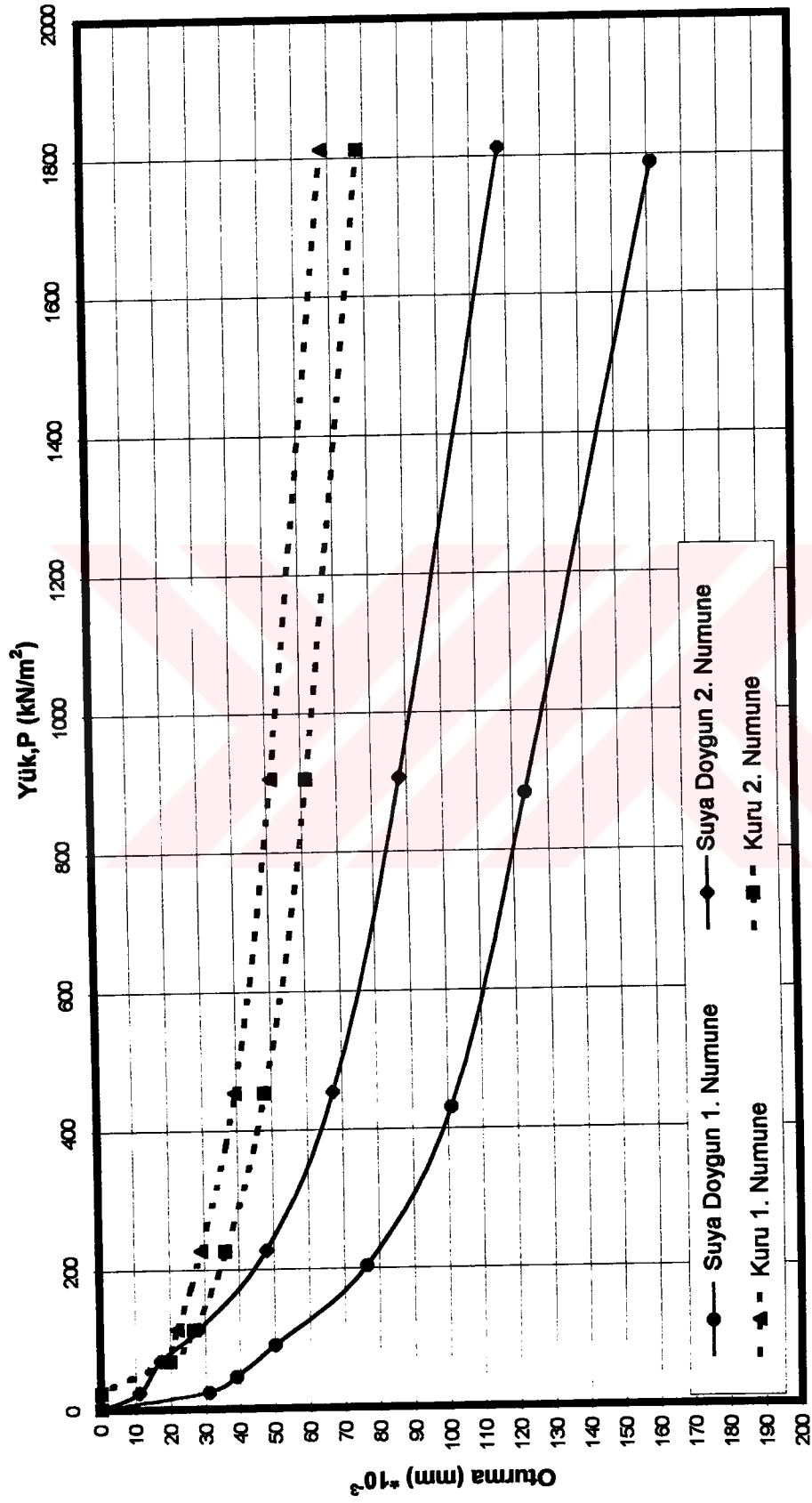
karışımdaki bentonit oranının artması ile permeabilitenin azaldığı görülecektir. Çizelge 5.14 incelendiği zaman, konsolidasyon deneyinden elde edilen permeabilitelerin, esnek çeperli ve rijit çeperli permeametre düzeneklerinden elde edilen permeabilitelerden daha düşük olduğu görülecektir.

5.10. Yük–Oturma İlişkisinde Doygunluk Etkisi

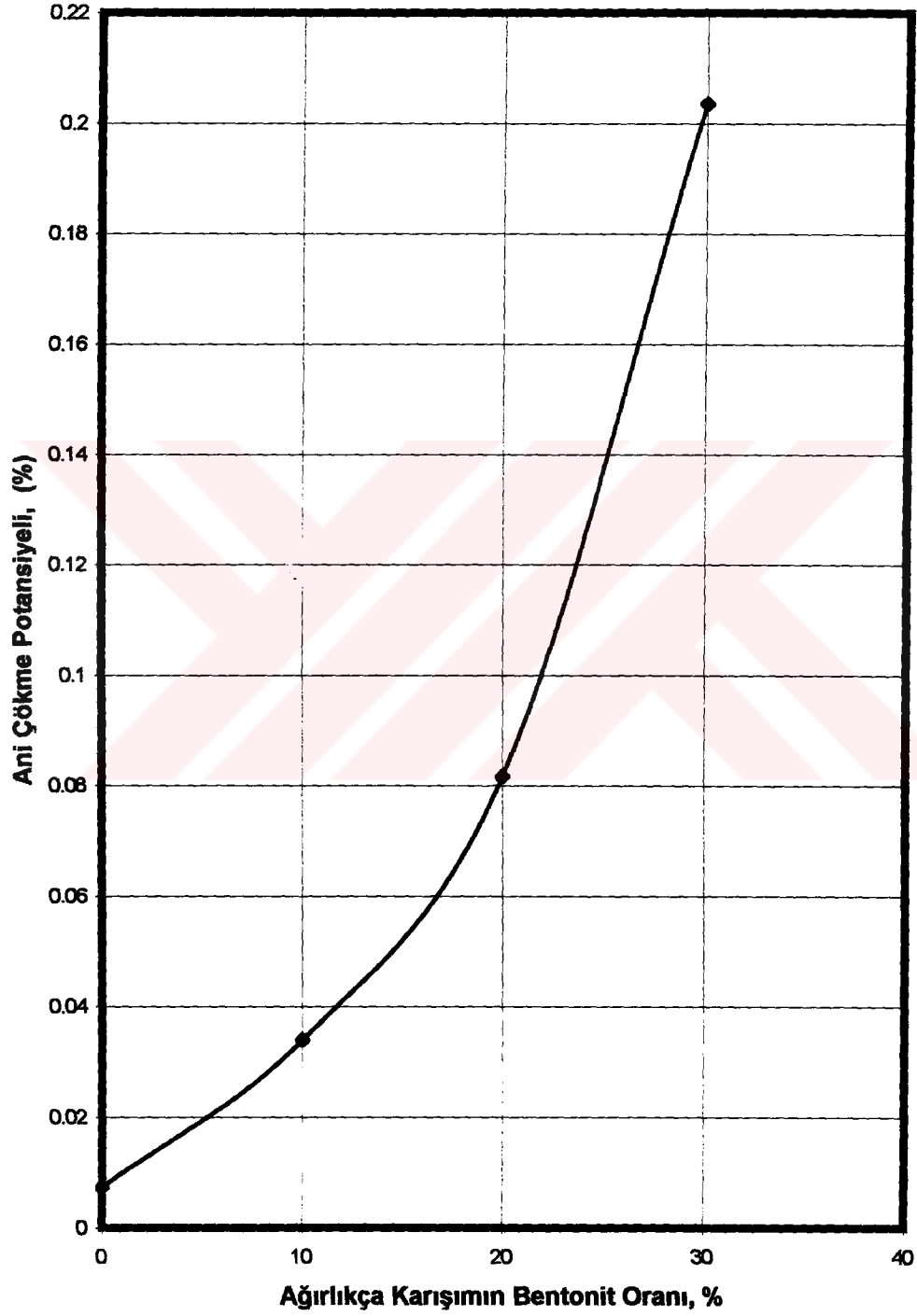
Karışımların, optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan numuneleri, suya boğulmadan ve suya boğularak ayrı ayrı konsolidasyona tabi tutulması ile elde edilen yük oturma ilişkisi, Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Şekil 5.11 incelendiği zaman, suya doyurulan numunelerin, suya doyurulmayan numunelerden daha fazla oturma yaptığı görülmektedir.

5.11. Ani Çökme (Collapse) Potansiyeli

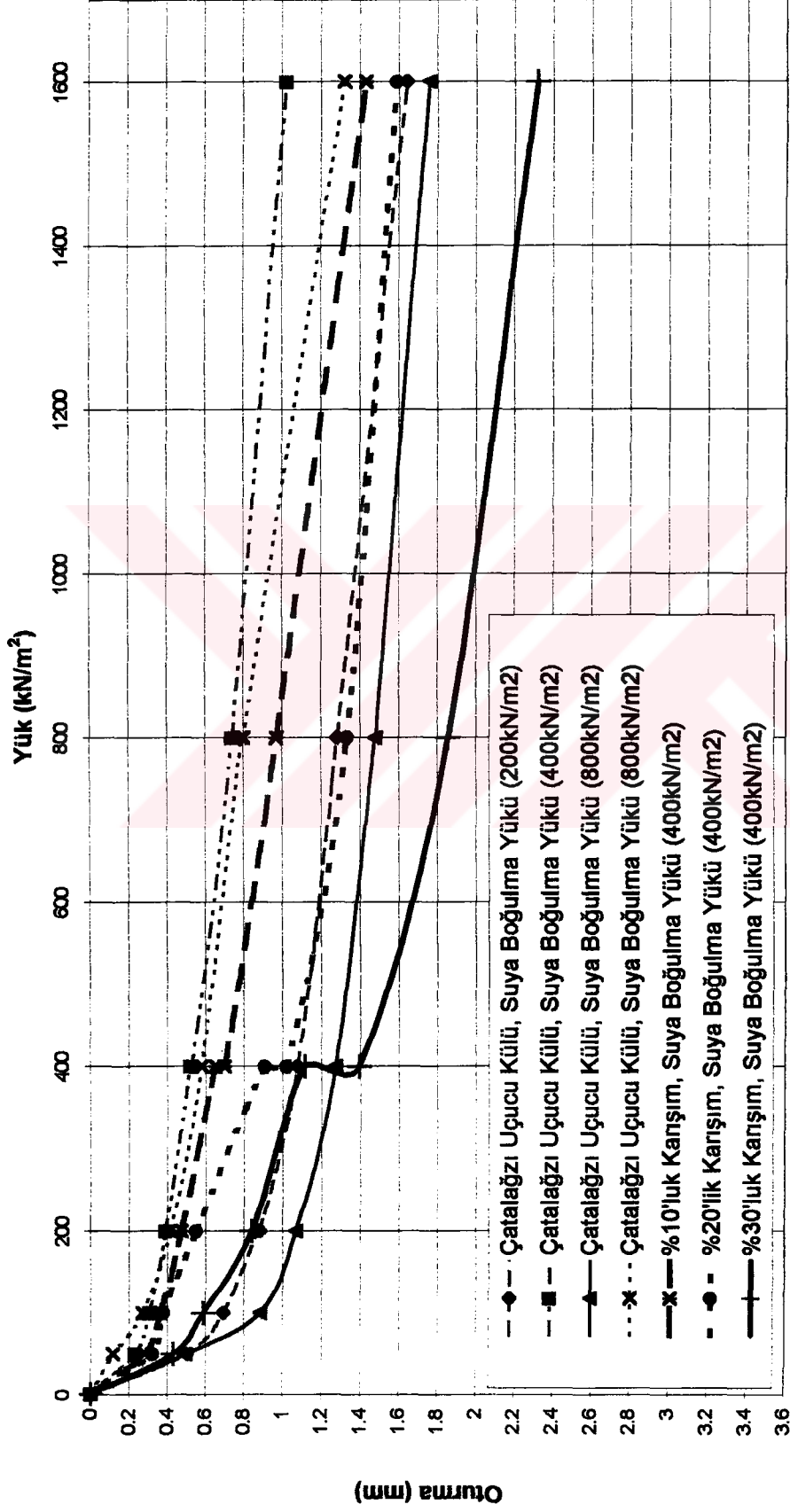
Üst yük altında karakteristik oturmasını yapan zeminlerin, suya boğulması durumunda, bazı zeminler ani olarak çöker. Bu durum, üst yapı stabilitesinin bozulmasına neden olur. Bu davranışı segileyen zeminlere, ani çökme potansiyeli olan zemin denir. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin, normal şartlarda oturmaları üst yük ile sağlanırken, numuneler değişik yükler altında iken, suya boğularak ani çökme potansiyelleri elde edilmiştir (Çizelge 5.15). Çizelge 5.15 incelendiği zaman, 400kN/m^2 lik yük altında suya boğulan numunenin, en yüksek ani çökme potansiyeli değerini verdiği gözlenecektir. En yüksek ani çökme potansiyelinin olduğu yük, en kritik yük olduğundan, Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının ani çökme potansiyelleri 400kN/m^2 lik üst yük altında iken gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.15). Çizelge 5.15 incelendiği zaman, saf uçucu külün ani çökme potansiyeli %0,01, %10’luk karışımın ani çökme potansiyeli %0,03, %20’lik karışımın ani çökme



Şekil 5.11. Suya doygun ve kuru Çatalağzı uçucu kumlu numunelerinin yük-oturma ilişkileri



Şekil 5.12. 400kN/m^2 gerilme altında suya boğulan numunelerin, karışımdaki bentonit oranı ile ani çökme potansiyelleri arasındaki ilişki



Şekil 5.13. Ani çökmeye maruz kalan bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının yük-oturma ilişkileri

potansiyeli %0,08 ve %30'luk karışımın ani çökme potansiyeli %0,2 olarak elde edildiği görülecektir. Karışımındaki bentonit oranı ile ani çökme potansiyeli arasındaki ilişki, Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.12 incelendiği zaman, karışımlarda, ağırlıkça bentonit oranı arttıkça, ani çökme potansiyelinin arttığı görülecektir. Karakteristik oturmalarını yaparken, değişik yükler altında ani çökmeye maruz bırakılan Çatalağzı uçucu külü ve bentonit karışımlarının, yük-oturma ilişkileri Şekil 5.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.15. Bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının ani çökme potansiyelleri

Numune	Suya boğulma yükü (kN/m ²)	Δe	e_o	Ani Çökme Potansiyeli, % $\Delta e/(1+e_o)$
Çatalağzı uçucu külü	200	0,01	0,3576	0,00737
Çatalağzı uçucu külü	400	0,02	0,3382	0,01495
Çatalağzı uçucu külü	800	0,01	0,4218	0,00703
Çatalağzı uçucu külü	800	0,02	0,4218	0,01407
%10'luk karışım	400	0,046	0,3576	0,03388
%20'luk karışım	400	0,1108	0,3576	0,08161
%30'luk karışım	400	0,28	0,375	0,20364

Indraratna'a (1991) göre, %5'den daha düşük çökme potansiyellerinde, ani çökme potansiyeli problemi yoktur. Tüm numunelerin ani çökme potansiyeli, ani çökme potansiyeli üst sınırı olan %5 değerinin altında kaldığı için, saf Çatalağzı uçucu külünün ve bentonit ile karışımlarının çökme problemi olmadığı söylenebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmanın önemli bulguları aşağıdaki gibidir;

- 1.) Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü; saf, %20 ve %30'luk bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabiliteleri tespit edilmiş, karışımdaki bentonit oranının artması ile permeabilitenin azaldığı, %20'lik karışımın, atık depolama sahalarının taban ve/veya üst kaplama tabakasının, minimum hidrolik geçirimsizlik değeri olan (1×10^{-7} cm/s), şartını sağladığı tespit edilmiştir.
- 2.) Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü; saf, %10, %30'luk bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının permeabiliteleri, seyreltik asidik ve bazik kimyasal sıvılar (%20'lik HCl ve %20'lik NaOH) altında test edilmiş, kimyasal sıvıların permeabiliteyi zamanla 2-3 kat arttırdığı tespit edilmiştir.
- 3.) Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukda sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü; saf, %10, %20 ve %30'luk bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, çekme dayanımları indirekt çekme (yarmada çekme) deneyi ile elde edilmiş, çekme deformasyonlarının, sıkıştırılmış killer gibi %1 civarında olduğu tespit edilmiştir.
- 4.) Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukda sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü; saf, %10, %20 ve %30'luk bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, drenajlı ve drenajsız kayma mukavemet parametreleri elde edilmiştir. %20'lik karışımın efektif kayma mukavemet parametreleri $c' = 53 \text{ kN/m}^2$, $\Phi' = 42^\circ$ olarak elde edilmiştir.

5.) Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü, %10, %20 ve %30'luk bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımlarının, konsolidasyon deneyleri yürütülmüş, karışımların sıkışma indekslerinin $0.009 < C_c < 0.019$ aralığında, %20'lik karışımın ise sıkışma indeksi (C_c) değerinin, 0.012-0.014 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen permeabiliteler esnek çeperli ve rijit çeperli permeametre düzeneklerinden elde edilen permeabilitelerden daha düşüktür.

6.) Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta sıkıştırılan Çatalağzı uçucu külü; saf, %10, %20 ve %30'luk bentonit-çatalağzı uçucu külü karışımlarının, ani çökme potansiyelleri, % (0,007-0,2) aralığında, %20'lik karışımın ani çökme potansiyelinin ise % 0,082 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, ani çökme potansiyeli üst sınırı olan, %5 değerinden daha düşük olduğundan, karışımların ani çökme potansiyelleri yoktur denebilir.

Dolayısıyla, %20'lik bentonit-Çatalağzı uçucu külü karışımının atık depolama sahalarında taban kaplama malzemesi olarak gerekli kriterleri sağladığı ancak, kimyasal sıvılar altında permeabilite değerlerinde artma eğilimi gösterdiği tesbit edilmiştir. Bu durum, ekonomik anlamda işletilebilir yeraltı suyunun ve tarımsal alanların bulunduğu bölgelerde tasarımda göz ardı edilmemelidir. %20'lik karışımın üst kaplama malzemesi olarak kriterleri sağladığı görülmektedir.

ÖNERİ: Deponi alanlarında gerek üst kaplama ve gerekse taban malzemesi olarak kullanılabilecek karışımların, gerçek arazi şartlarını temsil edecek şekilde uzun vadeli model çalışmalarına ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- Alther, G.R., 1987, The Qualifications of Bentonite as a Soil Sealant, **Engineering Geology**, Amsterdam, Vol.23, 177-191.
- Bayat, O., 1998, Characterization of Turkish Fly Ashes, **Fuel**, Vol.77, 1059-1066.
- Baykal, G., Özturan, T., Savaş, M., Ramadan, K., 1993, Uçucu Külün İnşaat Mühendisliğinde Bazı Kullanım Olanakları, **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu**, TMMMOB İnşaat Müh. Odası Ankara Şubesi, 18-19 Kasım, 89-102.
- Bell, F.G., 1993, An examination of the Use of lime and Pulverised Fly Ash to Stabilize Clay Materials, **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, Vol.XXX, 469-479
- Black, D.K., and Lee, K.L., 1973, Saturating Laboratory Samples by Back-Pressure, **ASCE, Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, Vol.99, 75-93.
- Broderick, G.P., and Daniel, D.E., 1990, Stabilizing Compacted Clay Against Chemical Attack, **ASCE, Geotechnical Engineering Division**, Vol.116, 1549-1567.
- Buluş, G., 1998, Değişik Bağlayıcı Maddeler ile İyileştirilmiş Kömür Külünün Mühendislik Malzemesi olarak Kullanılabilirliği, **Yüksek Lisans Tezi**, A.Ü., Ankara.

- Chapuis, R. P., 1990, Sand-Bentonit Liners: Predicting Permeability from Laboratory Test, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.27, 47-57.
- Daniel, D. E. and Benson, C. H., 1990, Water Content Density Criteria for Compacted Soil Liners, **ASCE, Geotechnical Engineering Division**, Vol.116, 1811-1830.
- Daniel, D.E., 1995, Pollution Prevention in Landfills Using Engineered Final Covers, **Waste Disposal By Landfill-GREEN'93**, Sarsby (ed.), 73-92.
- DiGioia, A.M. and Nuzzo, W.C., 1972, Fly Ash as Structural Fill, **ASCE, Journal of Power Division**, Vol.98, 72-92.
- Dreesen, D. R., Gladney, E. S., Owens, J. W., Perkins, B. L., Wienke, C. L. and Wagen, L. E., 1977, Comparison of Levels of Trace Elements from Fly Ash and Levels Found in Effluent Waters From a Coal-Fired Power Plant, **Environmental Science and Technology**, Vol.11, 1017-1019.
- D.S.İ., 1977, Termik Santral Uçucu Küllerinin Hafif Malzeme Yapımında Kullanılma Olanaklarının Araştırılması, **D.S.İ., Ankara**, 47.
- Edil, T.B., Sandstrom, L.K., and Berthouex, P.M., 1992, Interaction of Inorganic Leachate with Compacted Pozzolanic Fly Ash, **ASCE, Journal Of Geotechnical Engineering**, Vol.118, 1410-1430.
- Edil, T.B., 1995, Katı Atık Depolamasında Kirlетici Maddelerin Tecrit Sistemleri, **Türkiye İnşaat Mühendisliği XIII.Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Milli Kütüphane 20-21-22, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Aralık, Ankara, 585-610.

E.İ.E, 1982, Türkiye Uçucu Külleeri ve Kullanılma Olanakları, **E.İ.E.**,
Ankara, 28.

Erdoğan, T. Y., 1993, Yüksek Basıncılı Uçucu Küllerin Beton Basıncı
Dayanımları, **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması
Sempozyumu**, TMMOB İnşaat Müh. Odası Ankara Şubesi, 18-19
Kasım, 79-87.

Foreman, D.E., and Daniel, D.E., 1986, Permeation of Compacted Clay with
Organic-Chemicals, **ASCE, Geotechnical Engineering Division**, Vol.
112, 669-681

Gangadhara Rao, M.V.B.B., Kolay, P.K., and Sigh, D.N., 1998, Thermal
Characteristics of a Class F Fly Ash, **Cement and Concrete Research**,
Vol.28, 841-846.

Ghodratı, M., Sims, J.T., Vasilas, B.L., and 1995, Evaluation of Fly Ash as a
Soil Amendment for the Atlantic Coastal Plain: I Soil Hyraulic
Properties and Elemental Leaching, **Water, Air, and Soil Pollution**
Vol.81, 349-361.

Gray, D.H., and Lin, Y.K., 1972, Engineering Properties of Compacted Fly
Ash, **ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation
Engineerin Division**, Vol.98, 361-380

Gutt, W., and Nixon, P.J., 1979, Use Of Waste Materials in the Construction
Industry, Analysis of RILEM Symposium by Correspondance,
Materials and Structures, V.12, 264-273.

Hoffman, R.V., Elceman, G.A., Long, Y.T., et al., 1990, Mechanisim of Chlorination of Aromatic Compounds Adsorbed on the Surface of Fly Ash from Municipal Incinerators, **Environmental Science and Technology**, Vol.24, 1635-1641.

Indraratna, B., Nutalaya, P., Koo, K.S., and Kuganenthira, N., 1991, Engineering Behaviour of a Low Carbon, Pozzolanic Fly Ash and its Potential as a Construction Fill, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.28, 542-555.

Joshi, R.C., Duncan, D.M., and McMaster, H.M., 1975, New and Conventional Uses of Fly Ash, **Transportation Engineering Journal**, Vol.101, 791-806.

Kayabali, K., 1996, Engineering Aspects of a Novel Landfill Liner Material: Bentonite Amended Natural Zeolite, **Engineering Geology**, Vol.46, 105-114.

Kenney , T.C., Van Veen, W.A., Swallow, M.A., and, Sungaila, M.A., 1992, Hyraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixtures, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.29, 364-374.

Krishnayya, A.V.G., Eisenstein, Z., and Morgenstern, N.R., 1974, Behaviour of Compacted Soil in Tension, **ASCE, Geotechnical Engineering Division**, Vol.100, 1051-1061.

Leonards, G.A., and Bailey, B., 1982, Pulverized Coal Ash as Structural Fill, **ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division**, Vol.108, 517-531.

- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Peris-Mora, E., Gonzalez-Lopez, 1996, Mechanical Treatment of Fly Ashes Part II: Particle Morphologies in Ground Fly Ashes (GFA) and Workability of GFA-Cement Mortars, **Cement and Concrete Research**, Vol.26, 225-235.
- Peindl, R.D., Janardharam, R., and Burns, F., 1992a, Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill, Part I: Static Loading, **ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division**, Vol.118, 449-463.
- Peindl, R.D., Janardharam, R., and Burns, F., 1992b, Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill, Part II: Dynamic Loading, **ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division**, Vol.118, 464-474.
- Ranganath, R.V., Bhattacharjee, B., and Krishnamoorthy, S., 1998, Influence of Size Fraction of Poned Ash on its Pozolonic Activity, **Cement and Concrete Research**, Vol.28, 749-761.
- Savran, K.Z., 1988, Stabilization of Cohesive Soils with fly Ashes, **Yüksek Lisans Tezi**, O.D.T.Ü., Ankara.
- Sezer, G.A., Türkmenoğlu, A.G., Göktürk, E.H., Volkan, M., 1997, Bazı Kirletici Katyonların Ankara Çevresi Killeri Tarafından Tutulma Davranışlarının İncelenmesi, **VIII Ulusal Kil Sempozyumu**, 24-27Eylül DPÜ, Kütahya, 521-528
- Sims, J.T., Vasilas, B.L., and ghodrati, M., 1995, Evaluation of Fly Ash as a Soil Amendment for the Atlantic Coastal Plain: II Soil Chemical Properties And Crop Growth, **Water, Air, and Soil Pollution** Vol.81, 363-372.

- Sivapullaiah, P.V., Prashanth, J.P., and Sridharan, A., 1995, Optimization of Lime Content for Fly Ash, **ASCE, Journal of Testing and Evaluation**, Vol.23, 222-227.
- Theis, T.L., and Richter, R.O., 1979, Chemical Specification of Heavy Metals in Power Plant Ash Pond Leachate, **Environmental Science and Technology**, Vol.13, 219-224.
- Toth, P.S., Chan, H.T., and Crag, C.B., 1988, Coal Ash as Structural Fill, with Special Reference to Ontario Experience, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol.25, 694-704.
- TS 699, 1987, Türk Standartları, Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metodları, Türkiye Standartları Enstitüsü, 37-40.
- Uluatam, S.S., Özkan, M.Y., ve Wasti, Y., 1995, Düzenli Katı Atık Depolanması ve Eski Alanların Düzenlenmesi ile İlgili Bir İnceleme, **Türkiye İnşaat Mühendisliği XIII.Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Milli Kütüphane 20-21-22, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Aralık, Ankara, 625-636.
- Uysal, F., 1987, Geotechnical Properties of the Fly Ashes Produced in Two Thermal Plants in Turkey, **Yüksek Lisans Tezi**, O.D.T.Ü., Ankara.
- Wasti, Y., 1990, Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanım Olanakları, **İMO, Teknik Dergi**, Cilt.1, Ankara, 177-178.
- White, S.C. and Case, E.D., 1990, Characterization of Fly Ash From Coal-Fired Power Plants, **Journal of Materials Science**, 25, 5215-5219.

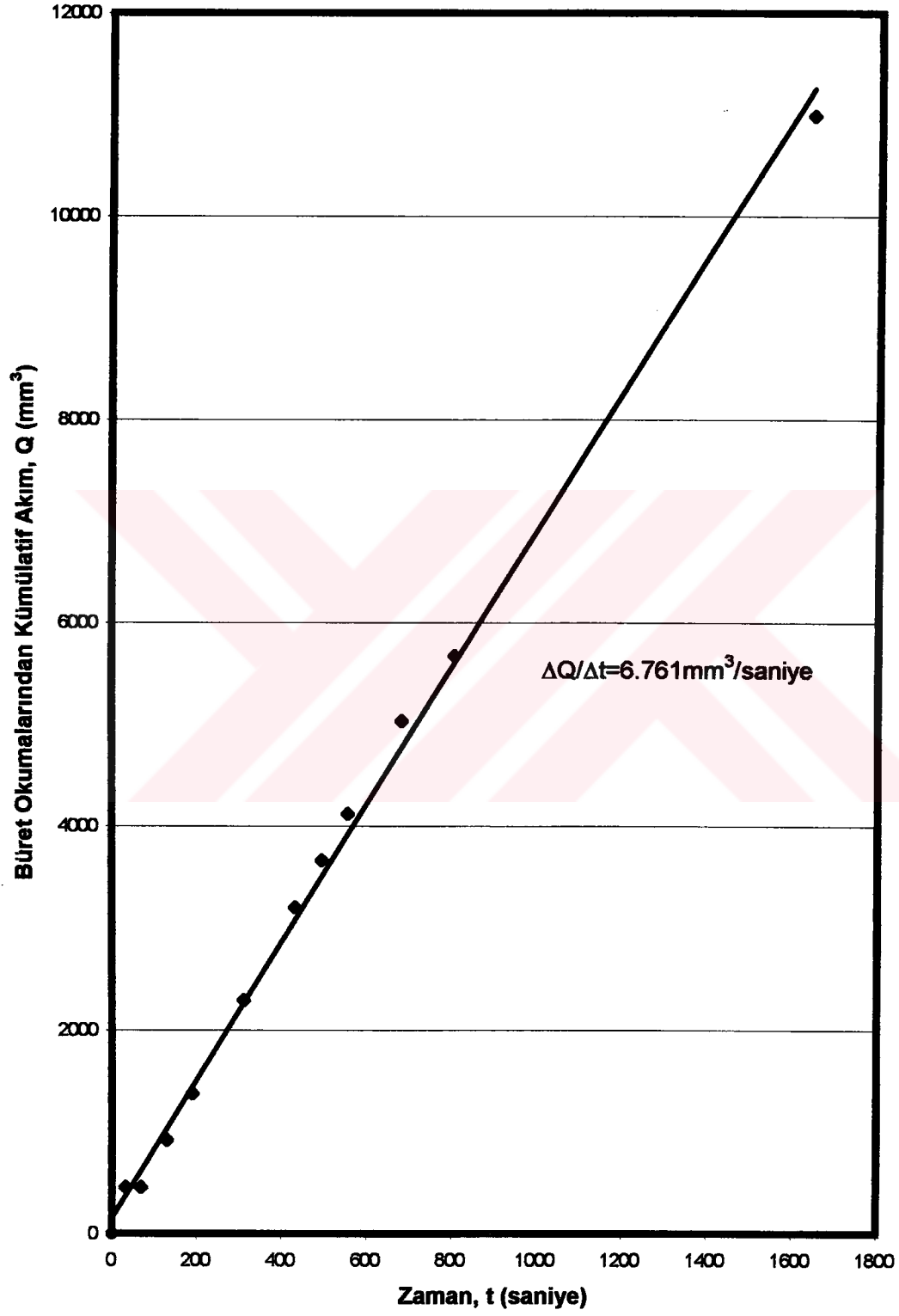
Wyatt, P.J., 1980, Some Chemical, Physical, and Optical Properties of Fly Ash Particles, **Applied Optics**, Vol.19, 975-983.

Yıldız, M., Mollamahmutoğlu, M., ve Acar, M.H., 1995, Düzenli Katı Atık Depolanması ve Eski Alanların Düzenlenmesi ile İlgili Bir İnceleme, **Türkiye İnşaat Mühendisliği XIII.Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Milli Kütüphane 20-21-22, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Aralık, Ankara, 611-624.

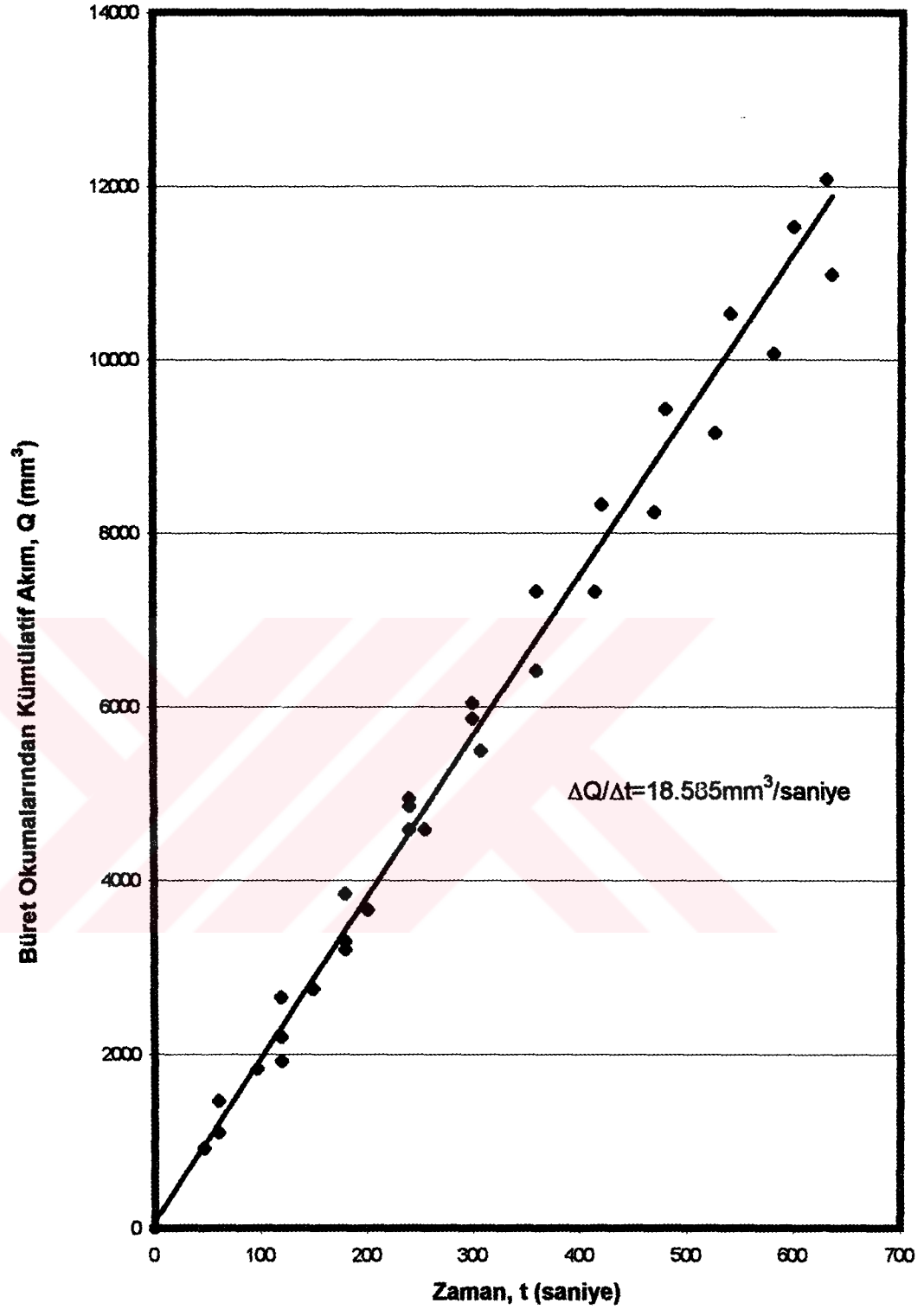




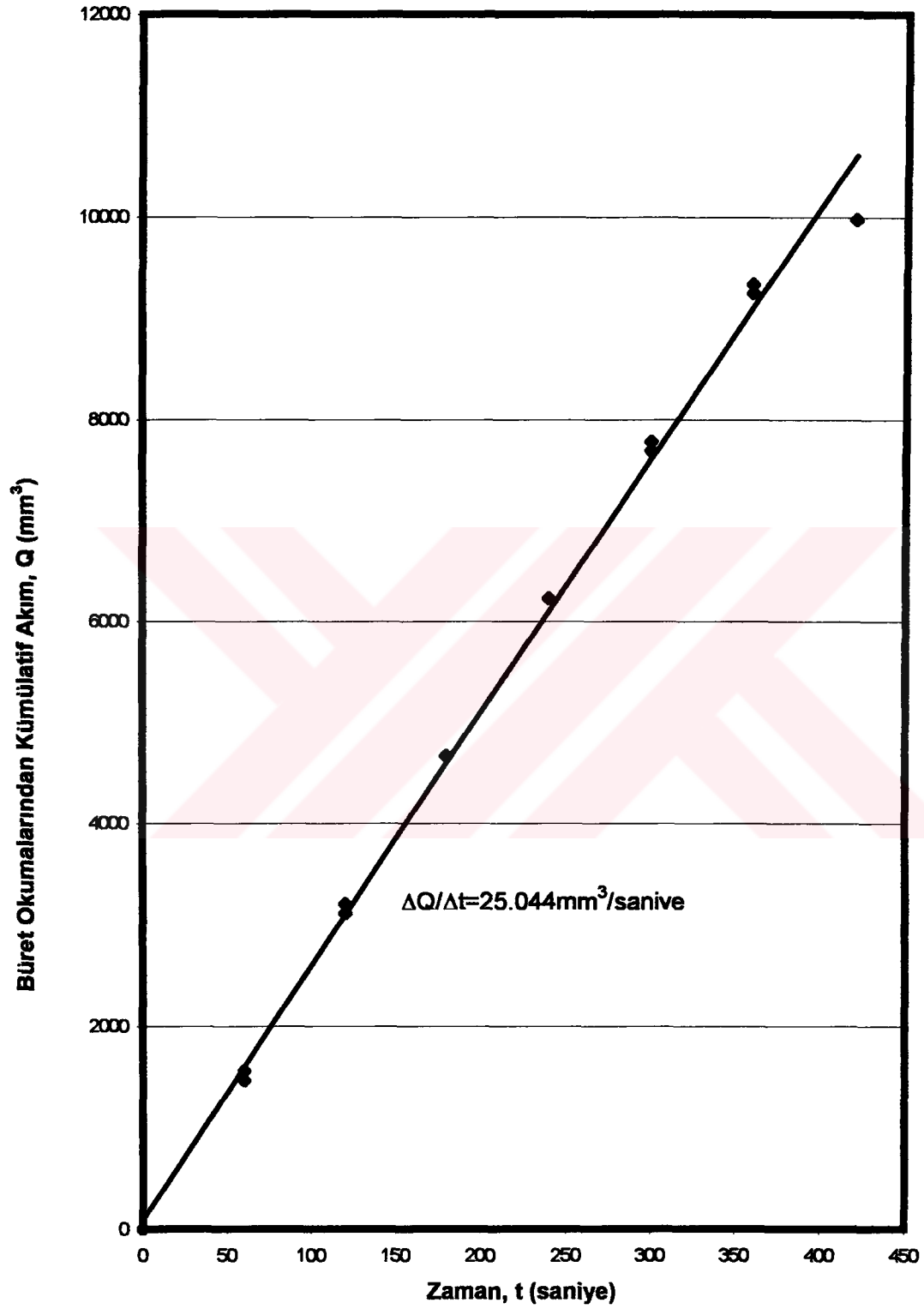
EKLER



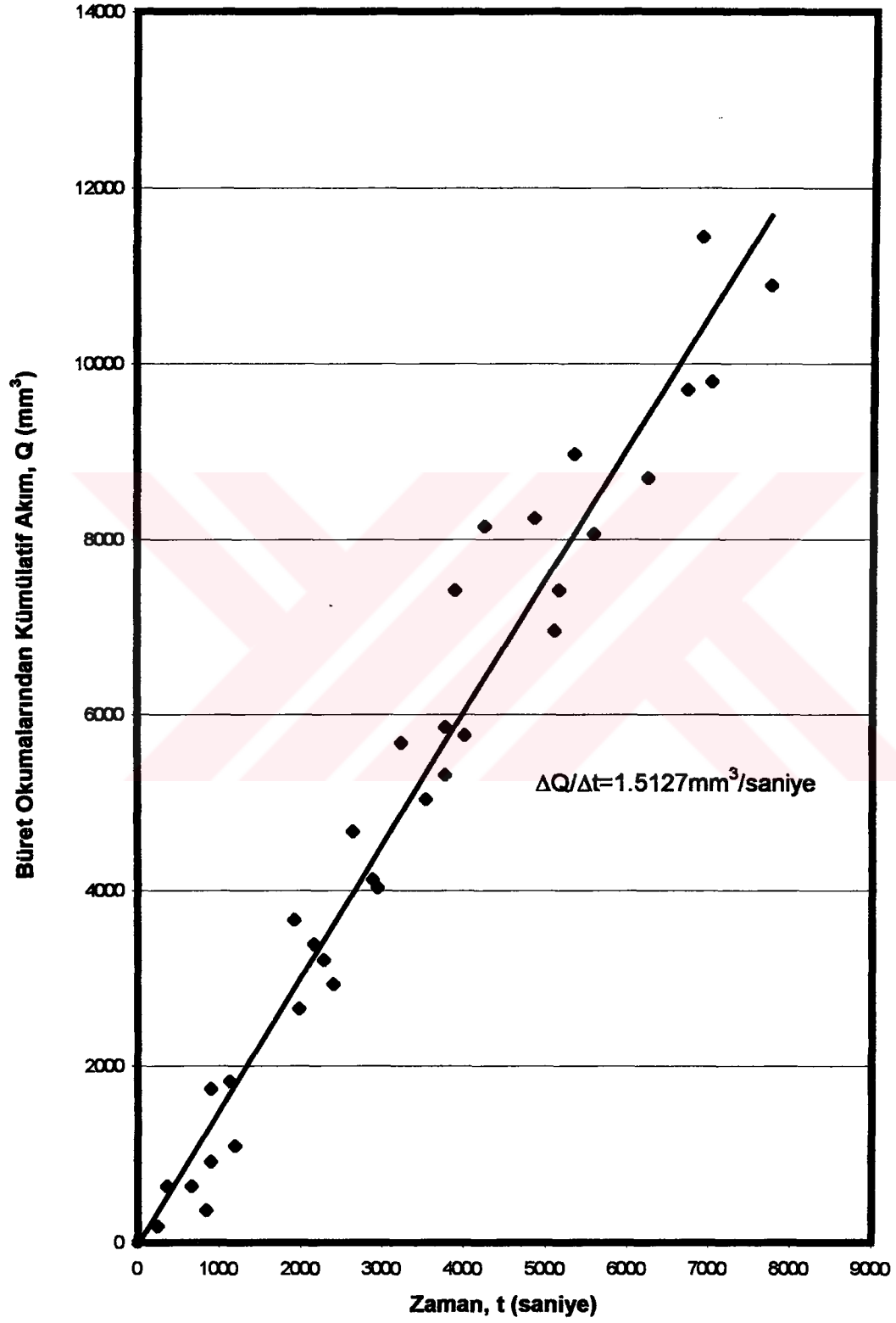
Ek 1. Çatalağzı uçucu külünün 20kN/m^2 lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi



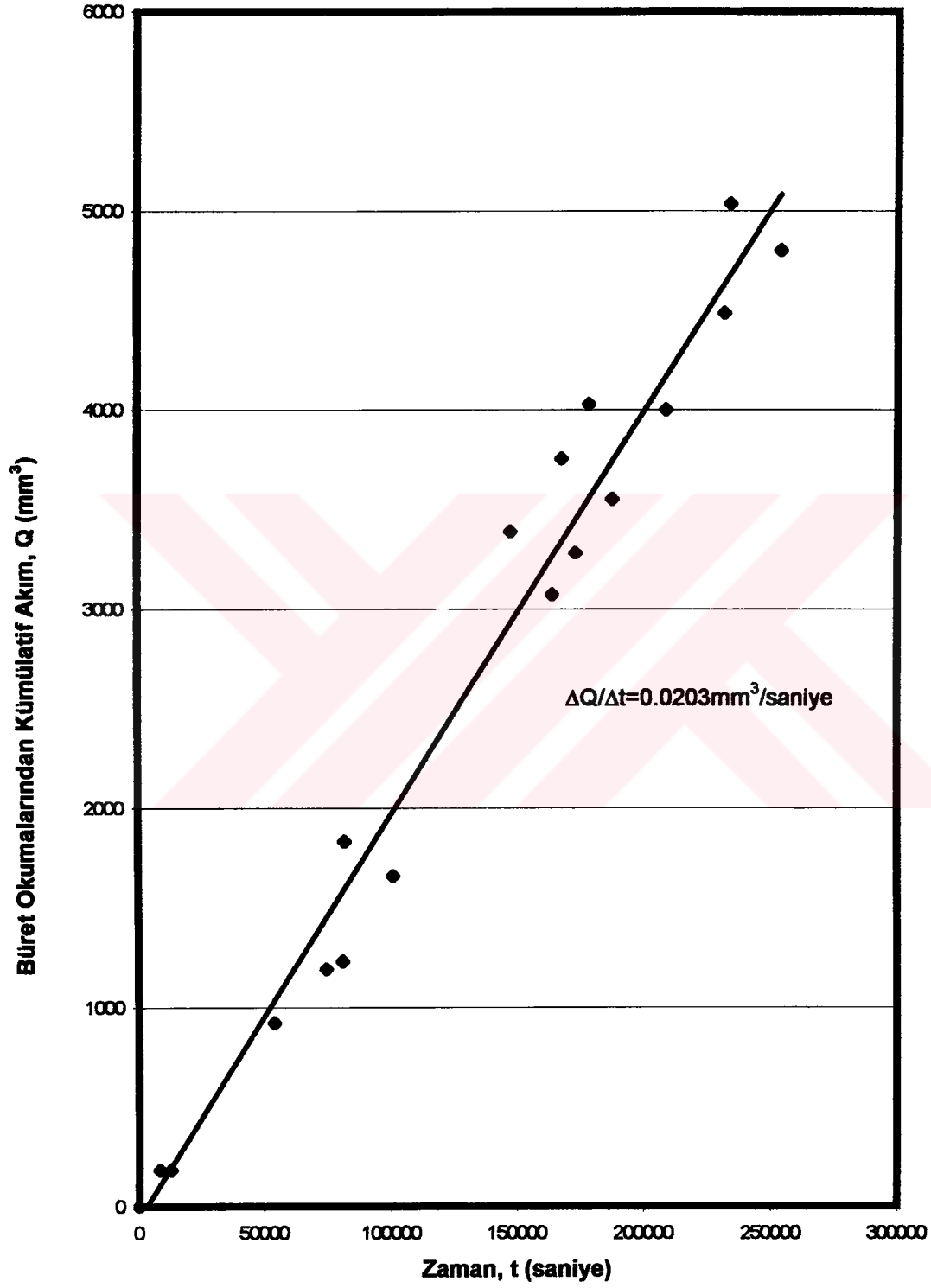
Ek 2. Çatalağızı uçucu külünün 50kN/m² lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi



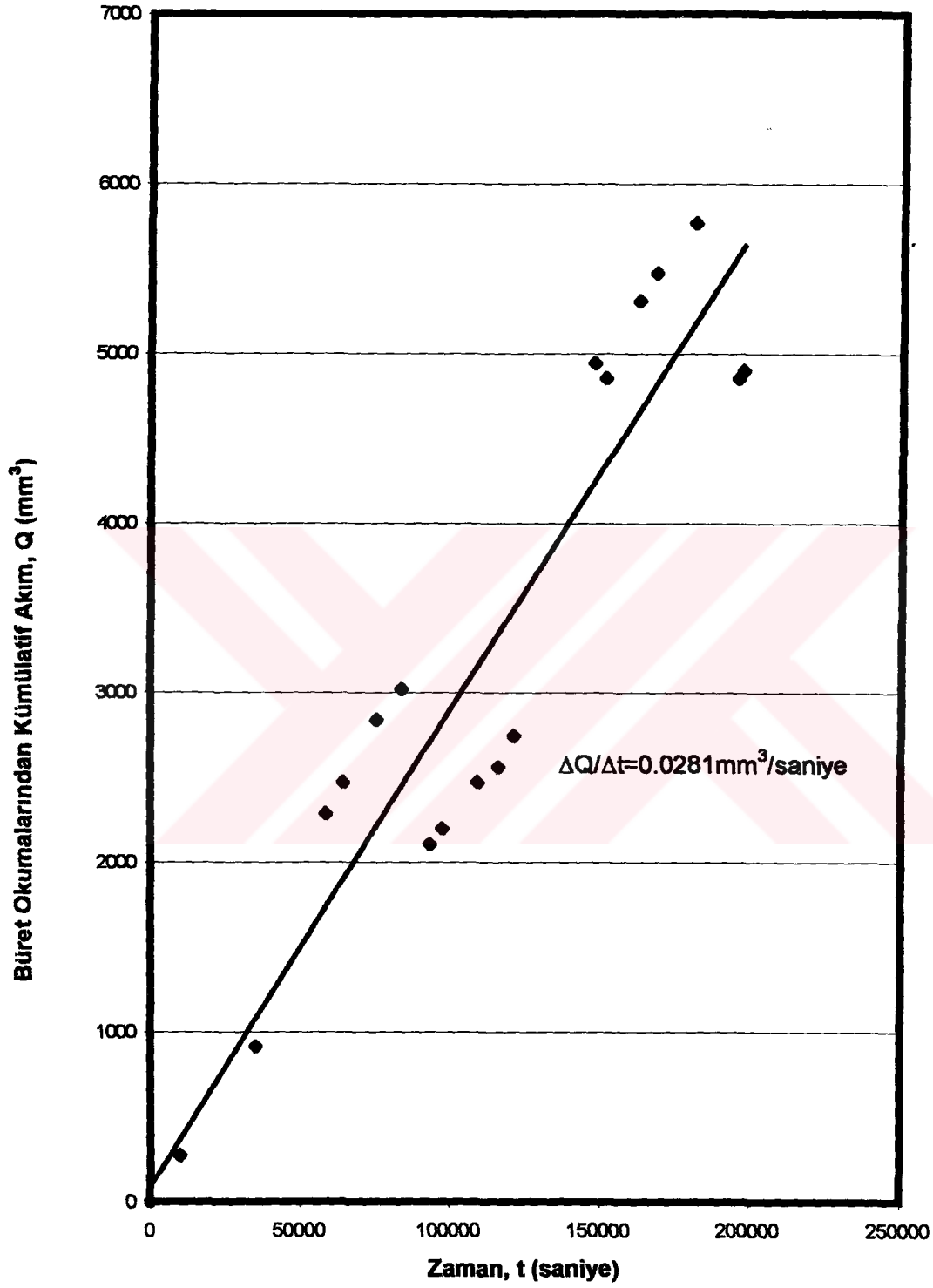
Ek 3. Çatalağzı uçucu külünün 80 kN/m^2 lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi



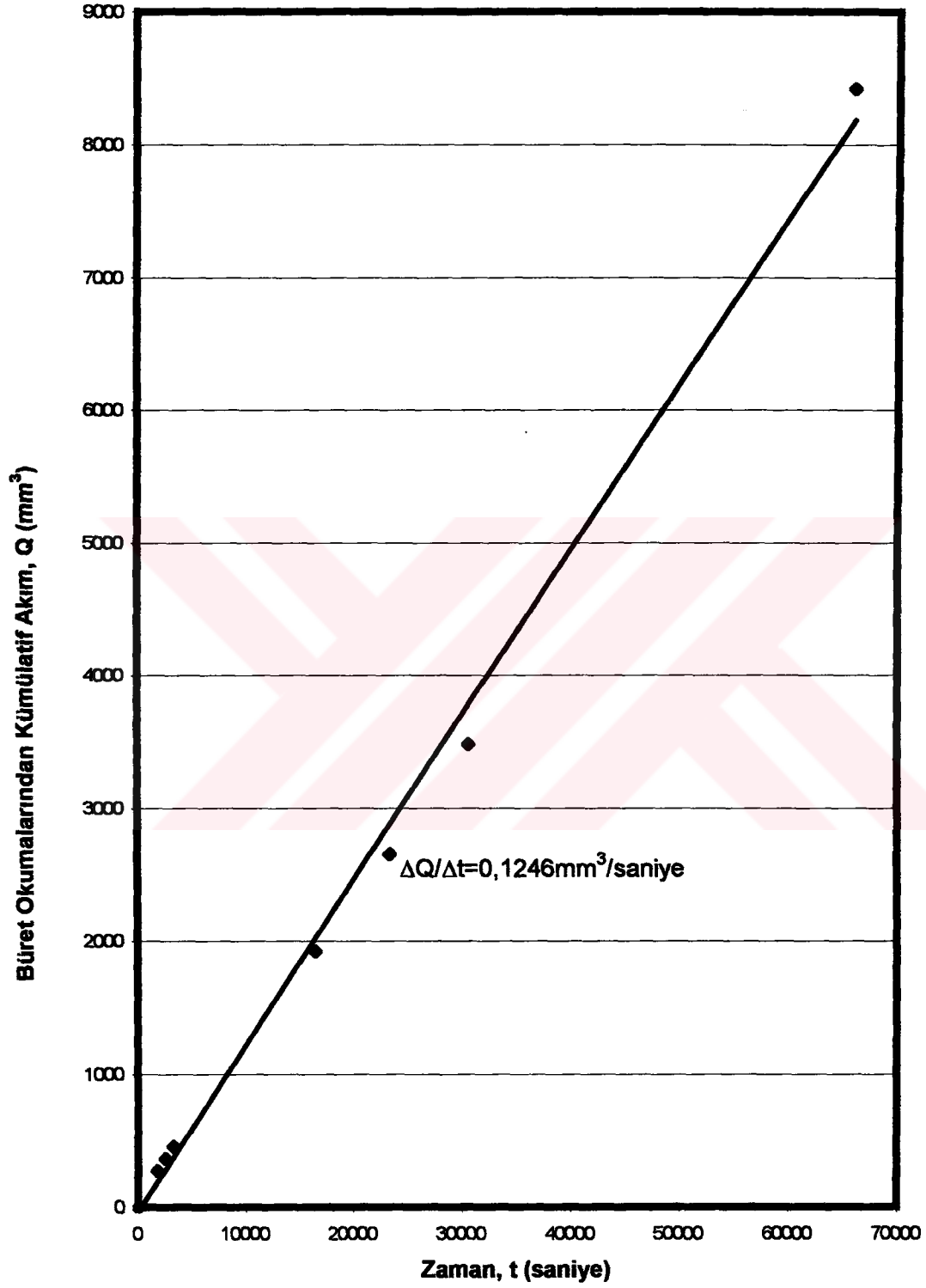
Ek 4. Ağırlıkça %10'luk karışımın 90kN/m² lik geri besleme basıncı altında



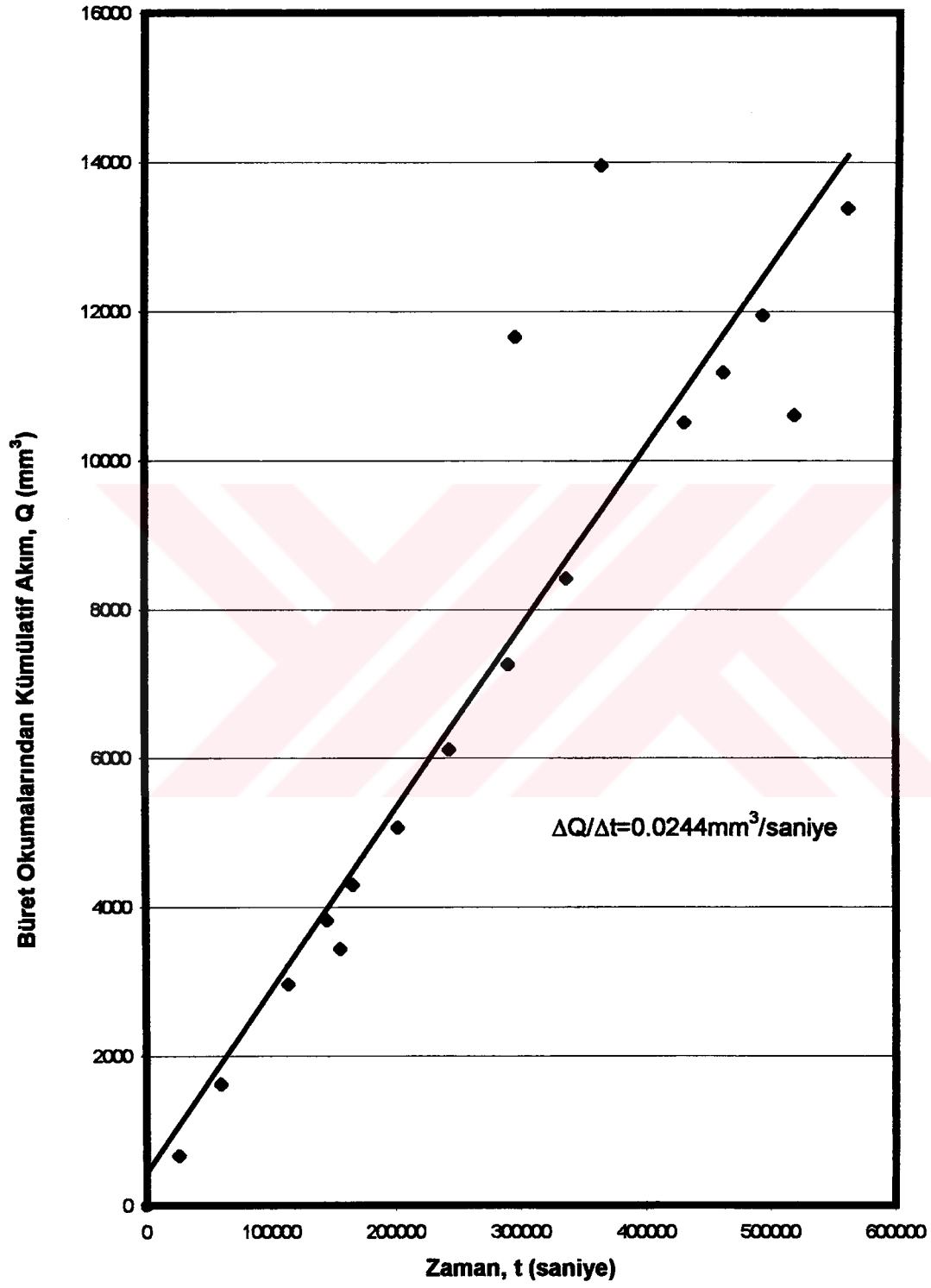
Ek 5. Ağırlıkça %20'lik karışımın 10kN/m² lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi



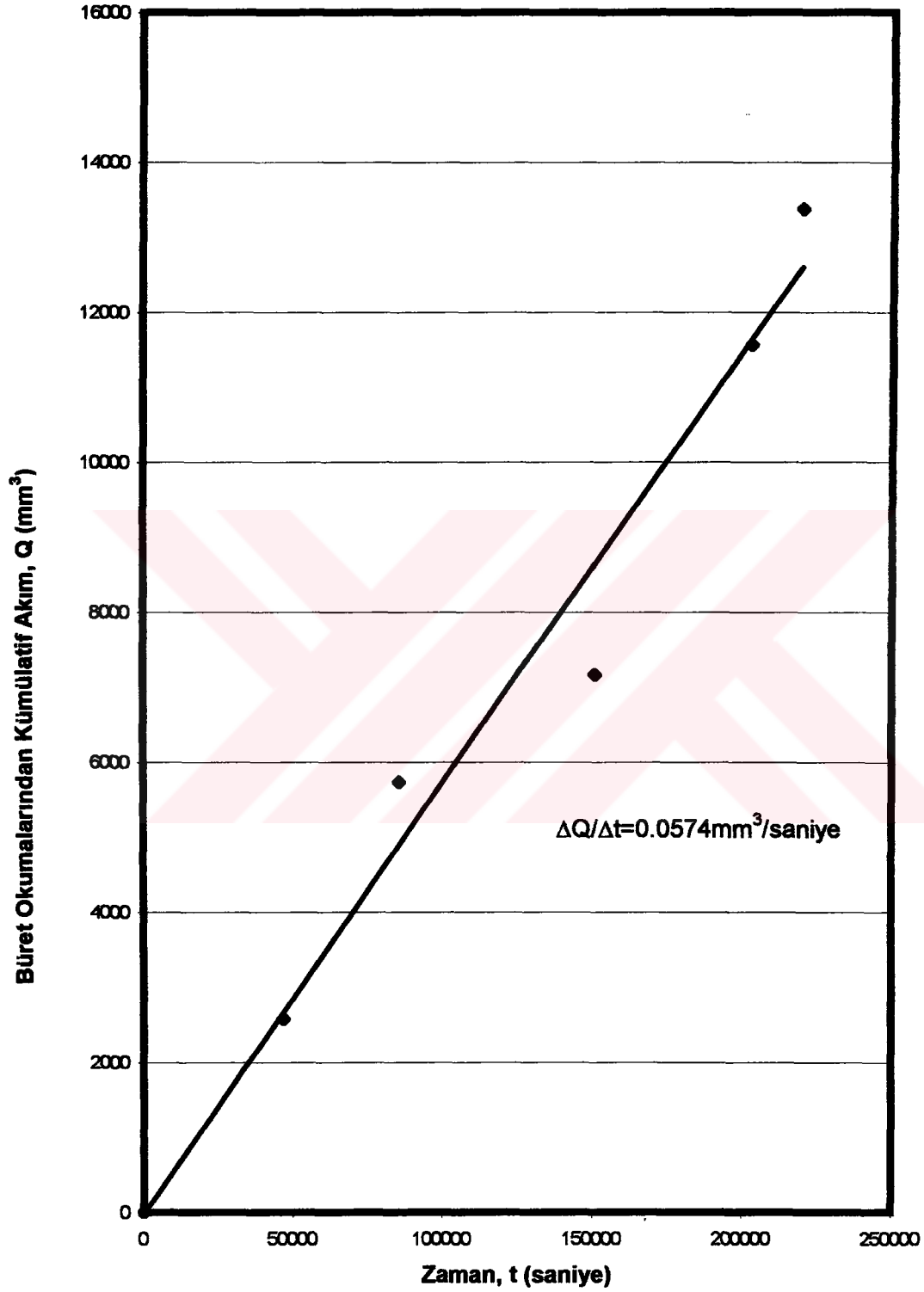
Ek 6. Ağırlıkça %20'lik karışımın 20kN/m² lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi



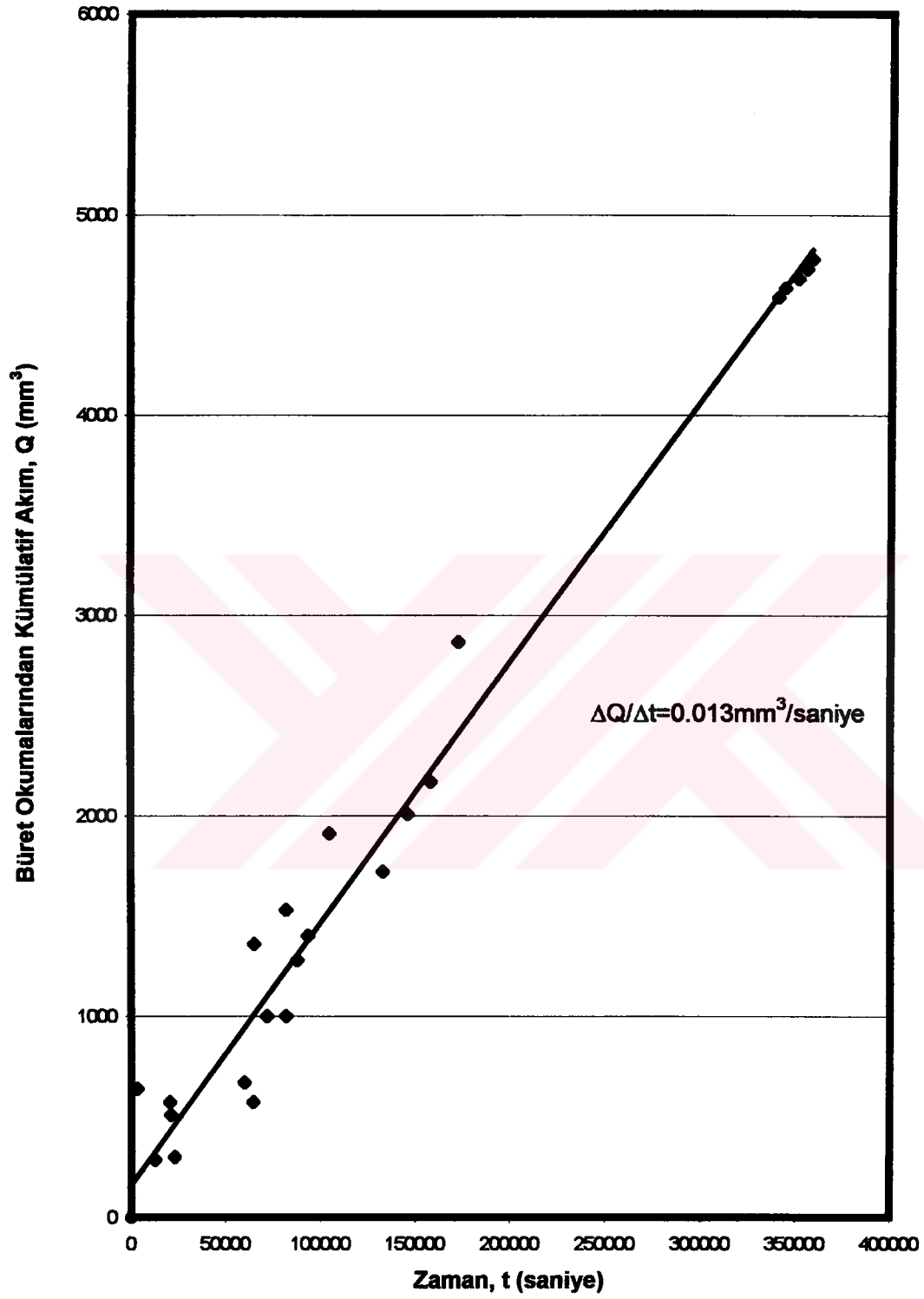
Ek 7. Ağırlıkça %20'lik karışımın 80 kN/m^2 lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi.



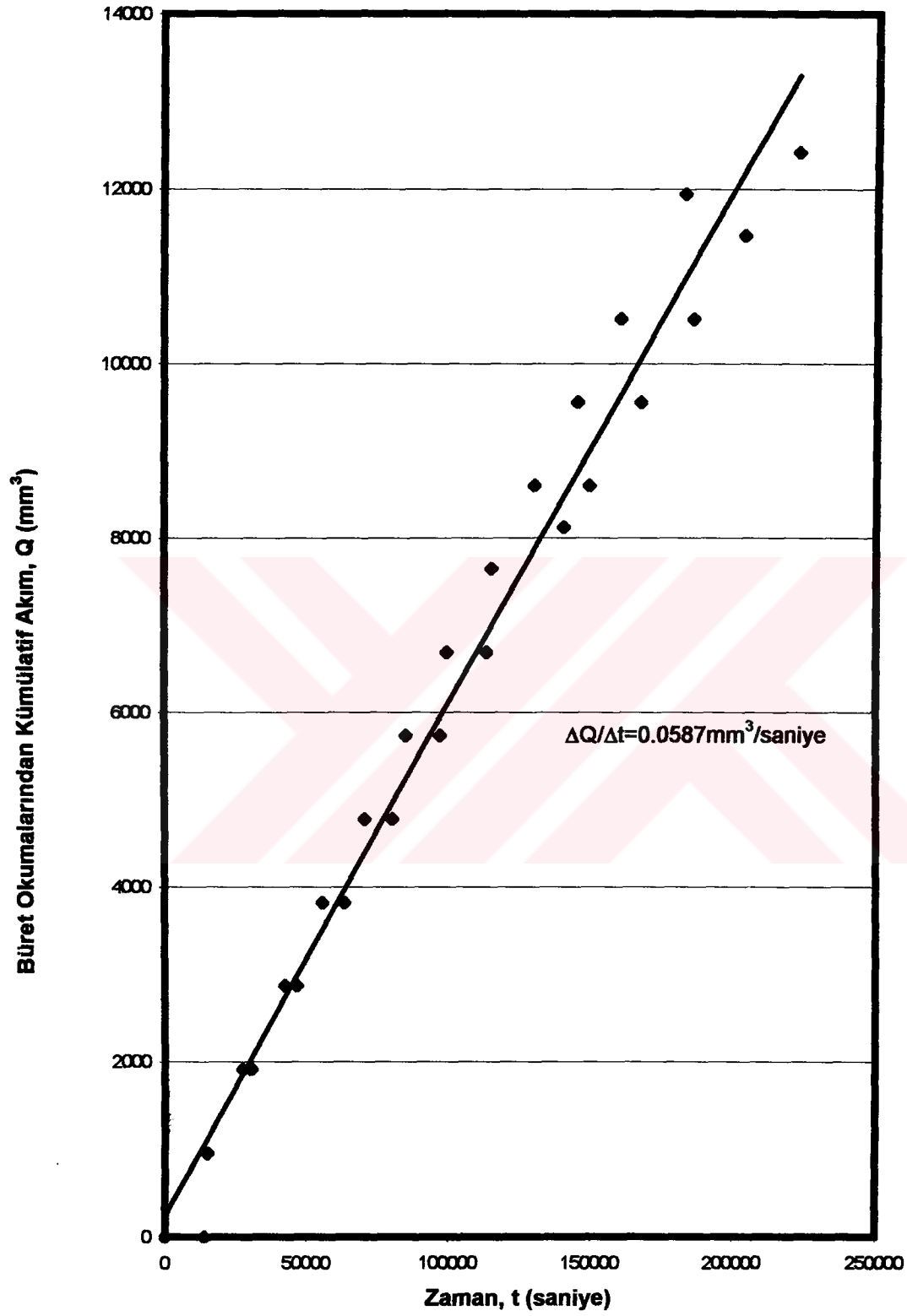
Ek 8. Ağırlıkça %30'luk karışımın 20kN/m² lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi



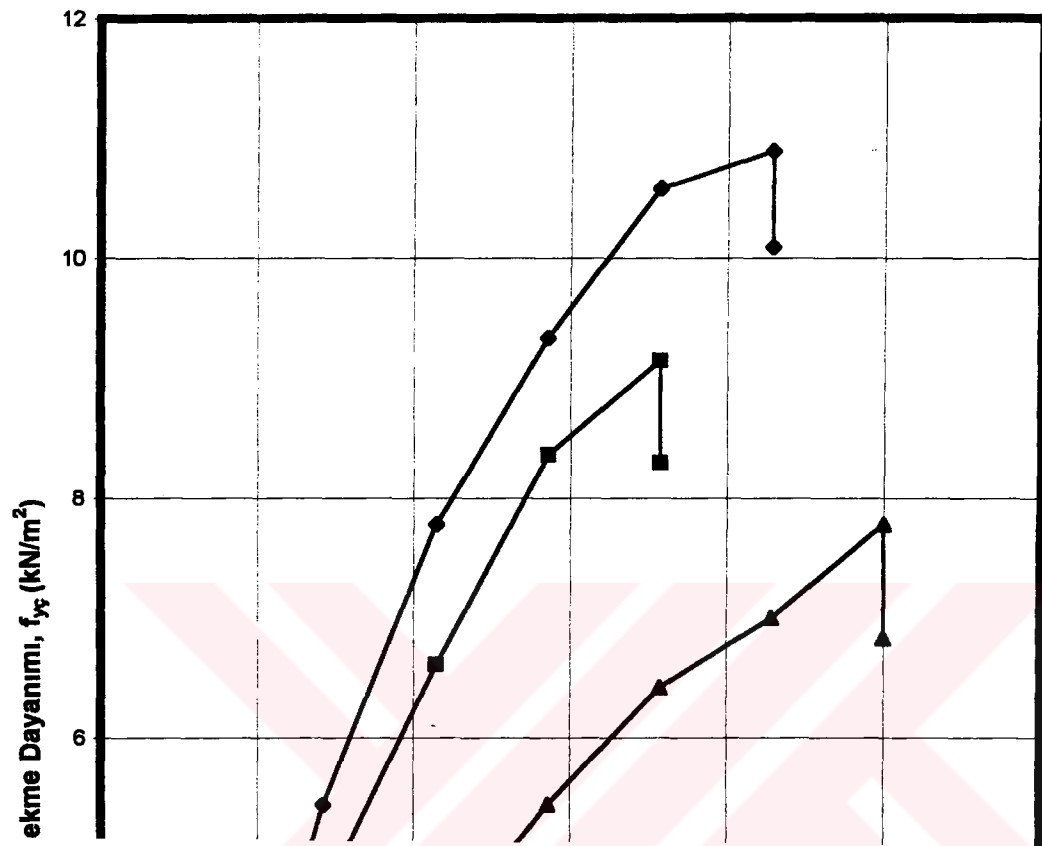
Ek 9. Ağırlıkça %30'luk karışımın 60 kN/m^2 lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi

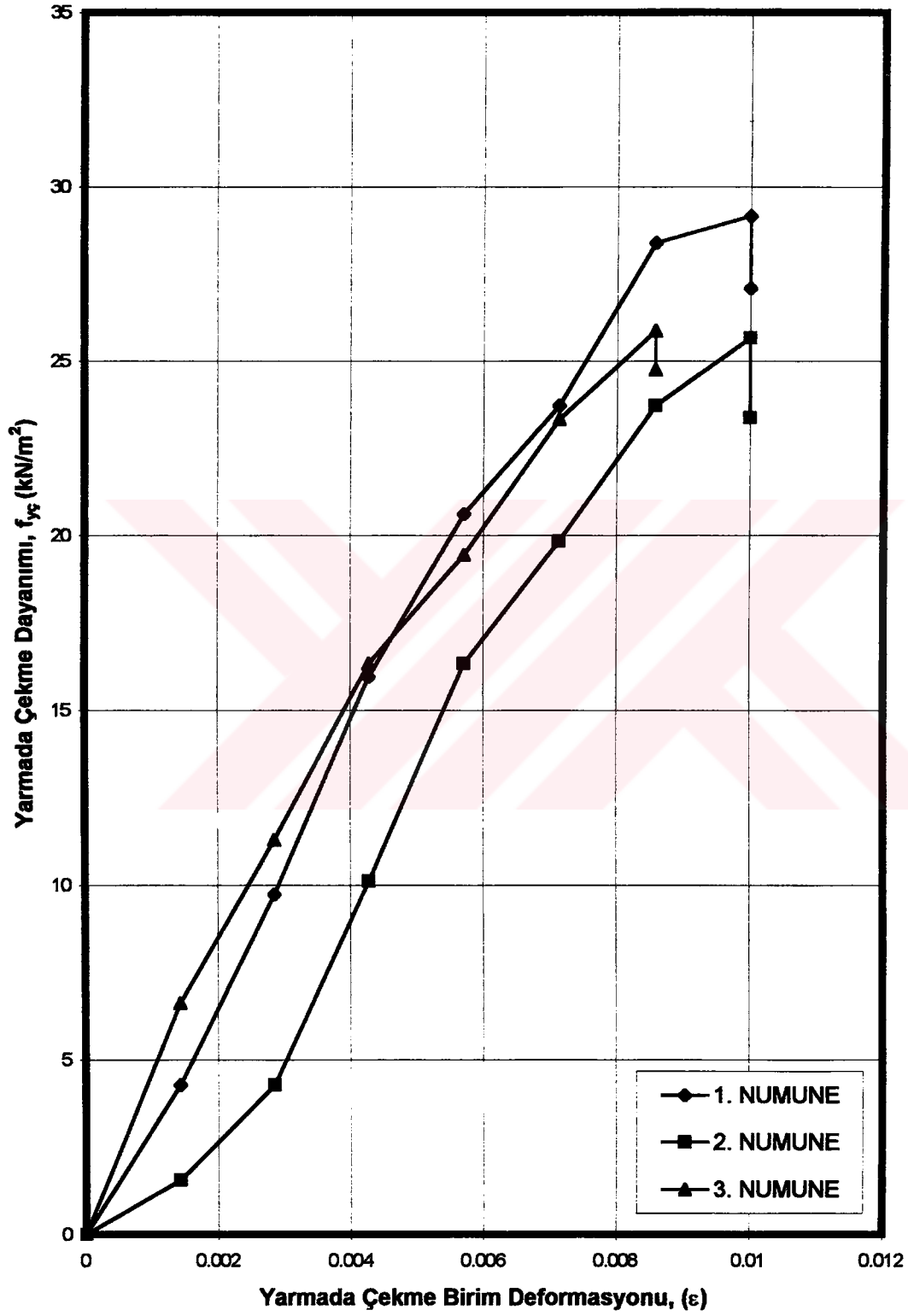


Ek 10. Ağırlıkça %30'luk karışımın 80 kN/m^2 lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi

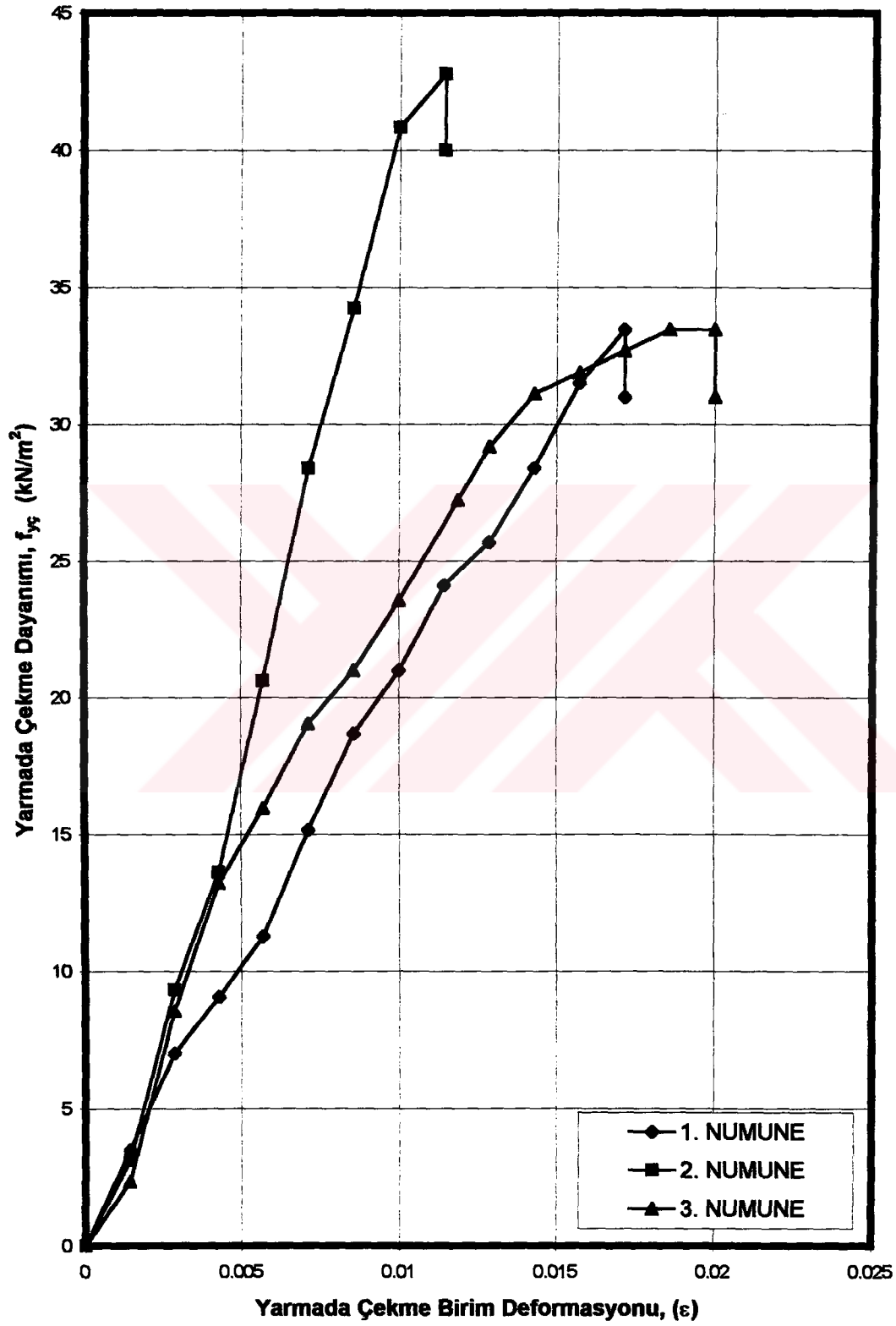


Ek 11. Ağırlıkça %30'luk karışımın 100kN/m² lik geri besleme basıncı altında kümülatif akım - zaman ilişkisi

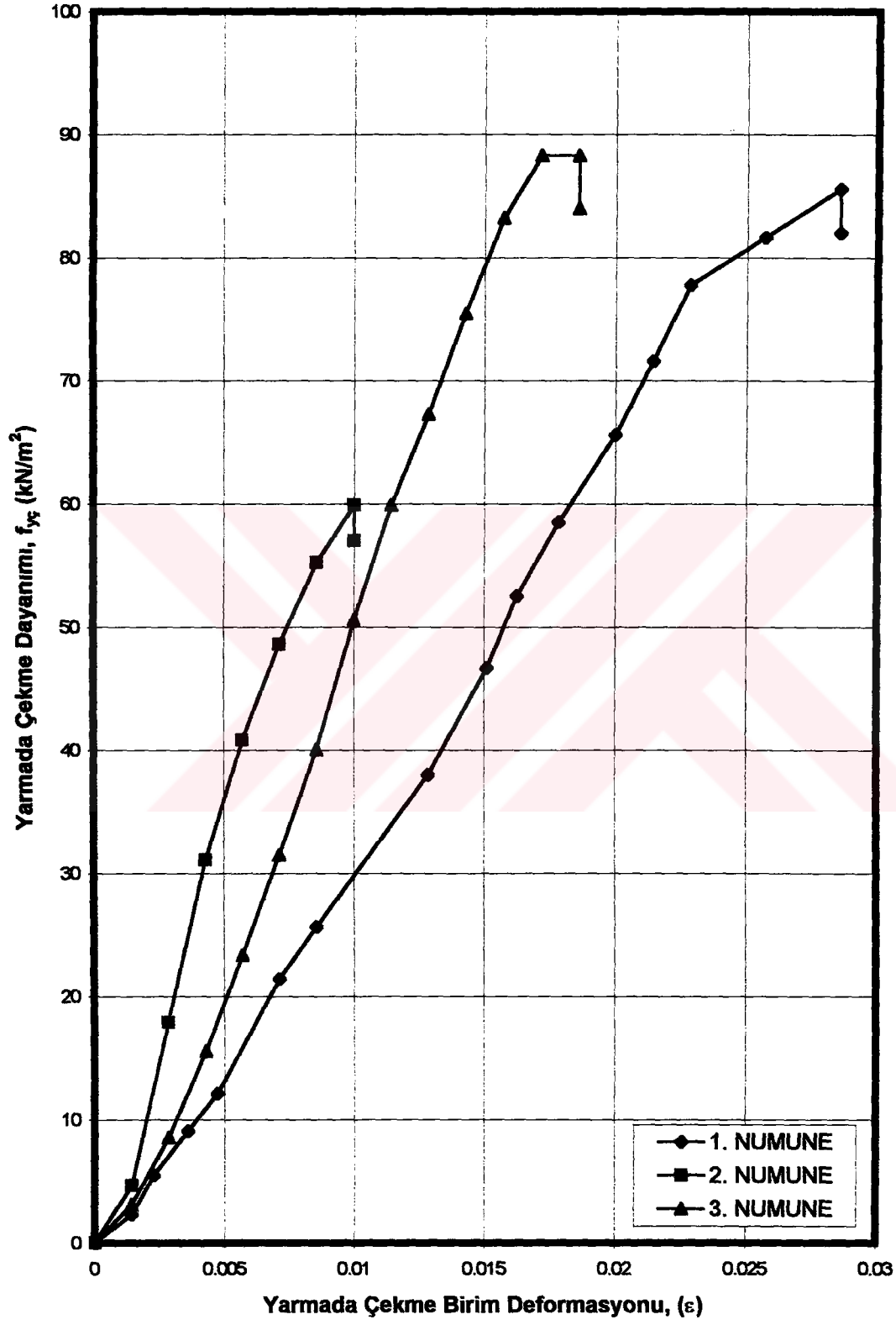




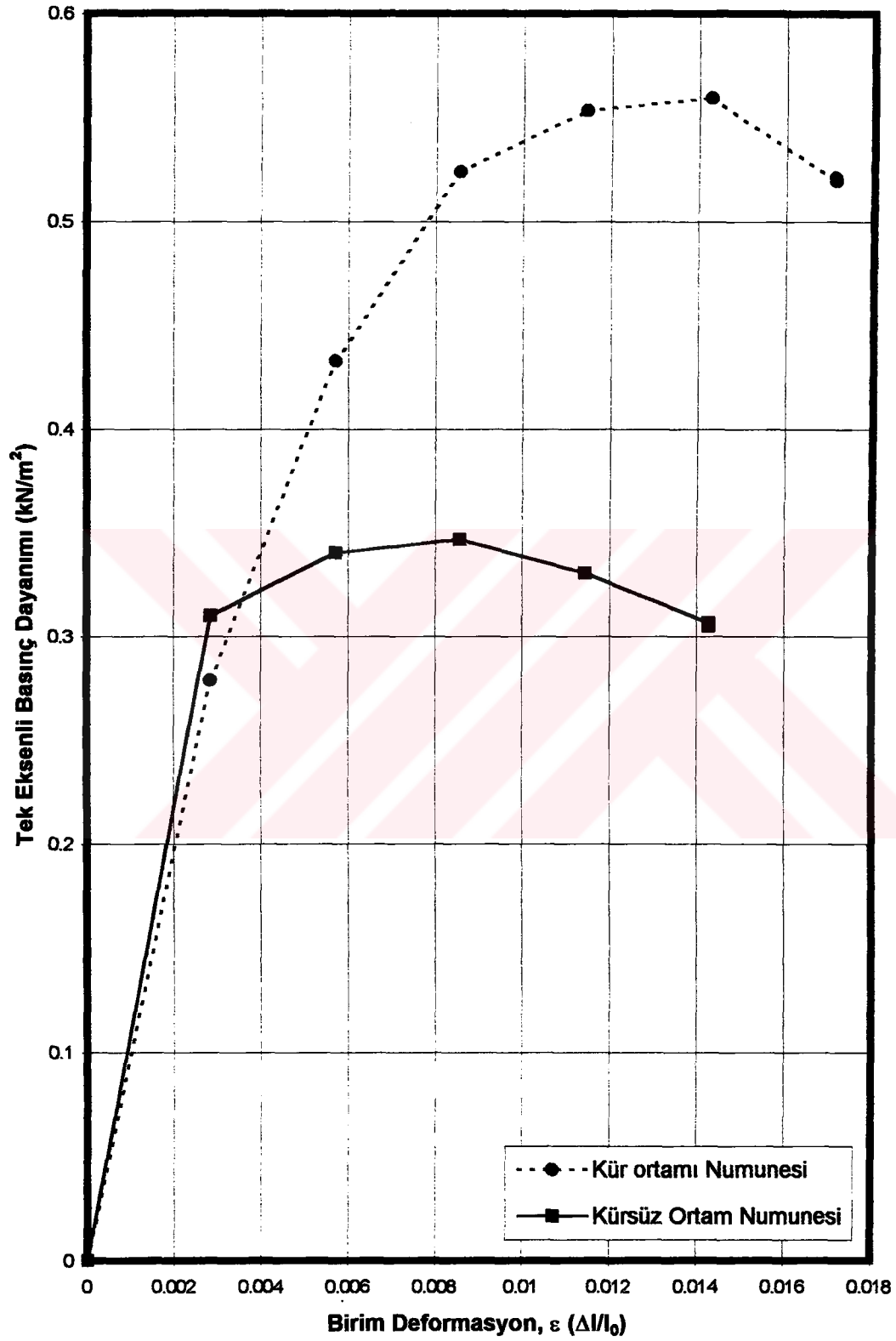
Ek 13. %10'luk karışım numunelerinin f_{yf} - ϵ ilişkisi



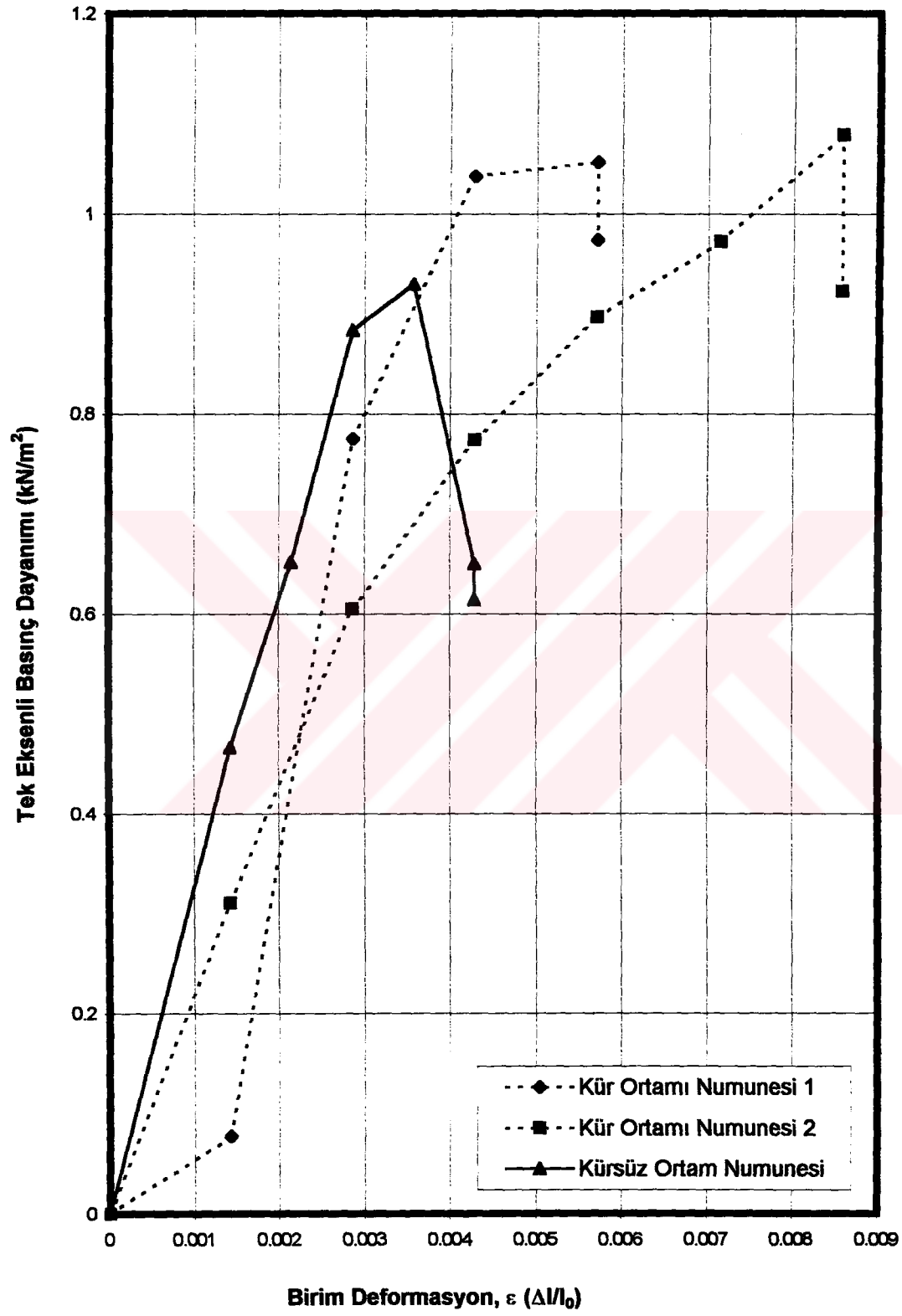
Ek 14. %20'lik karışım numunelerinin f_{yf} - ϵ ilişkisi



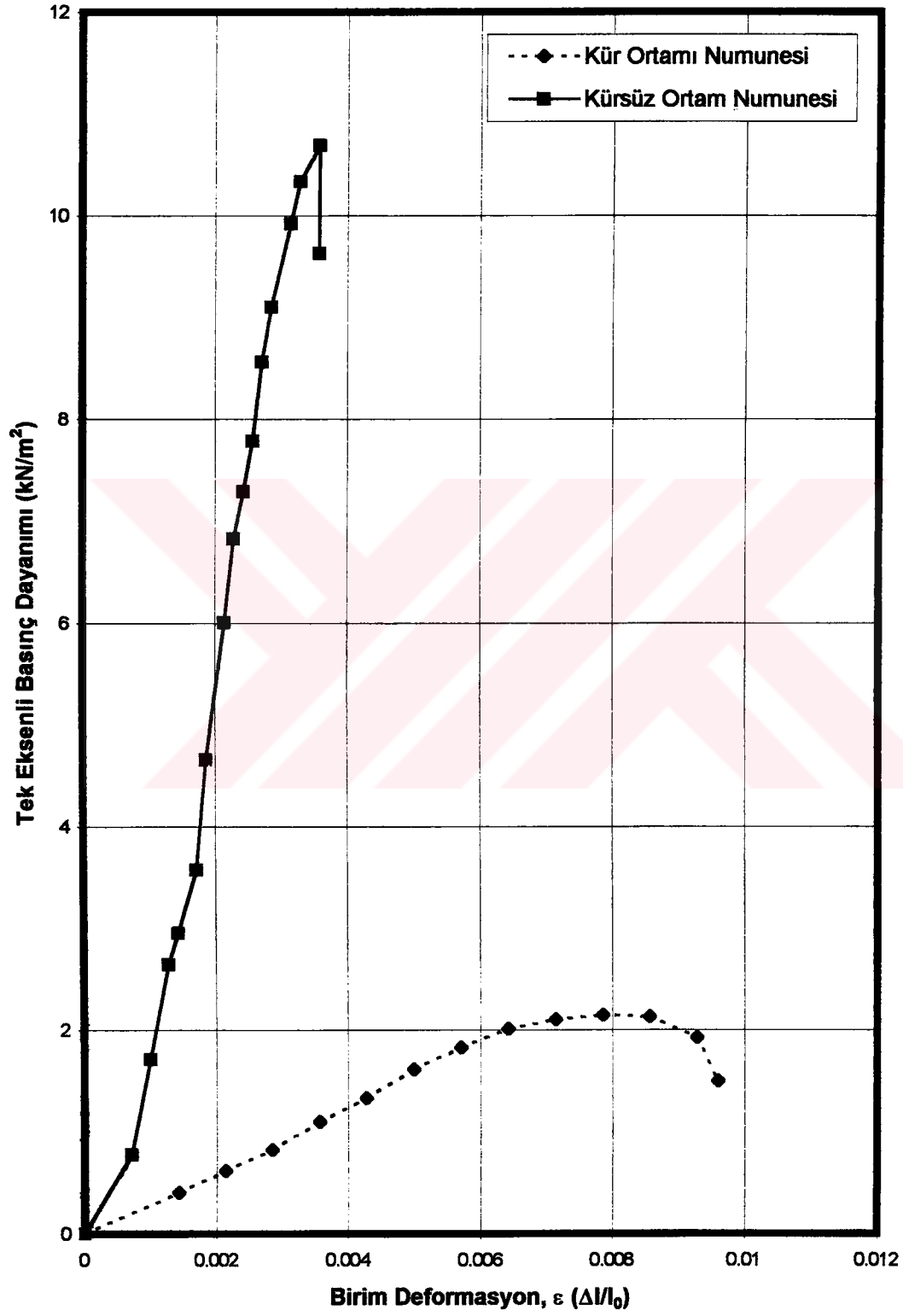
Ek 15. %30'luk karışım numunelerinin $f_{y\check{c}}$ - ϵ ilişkisi



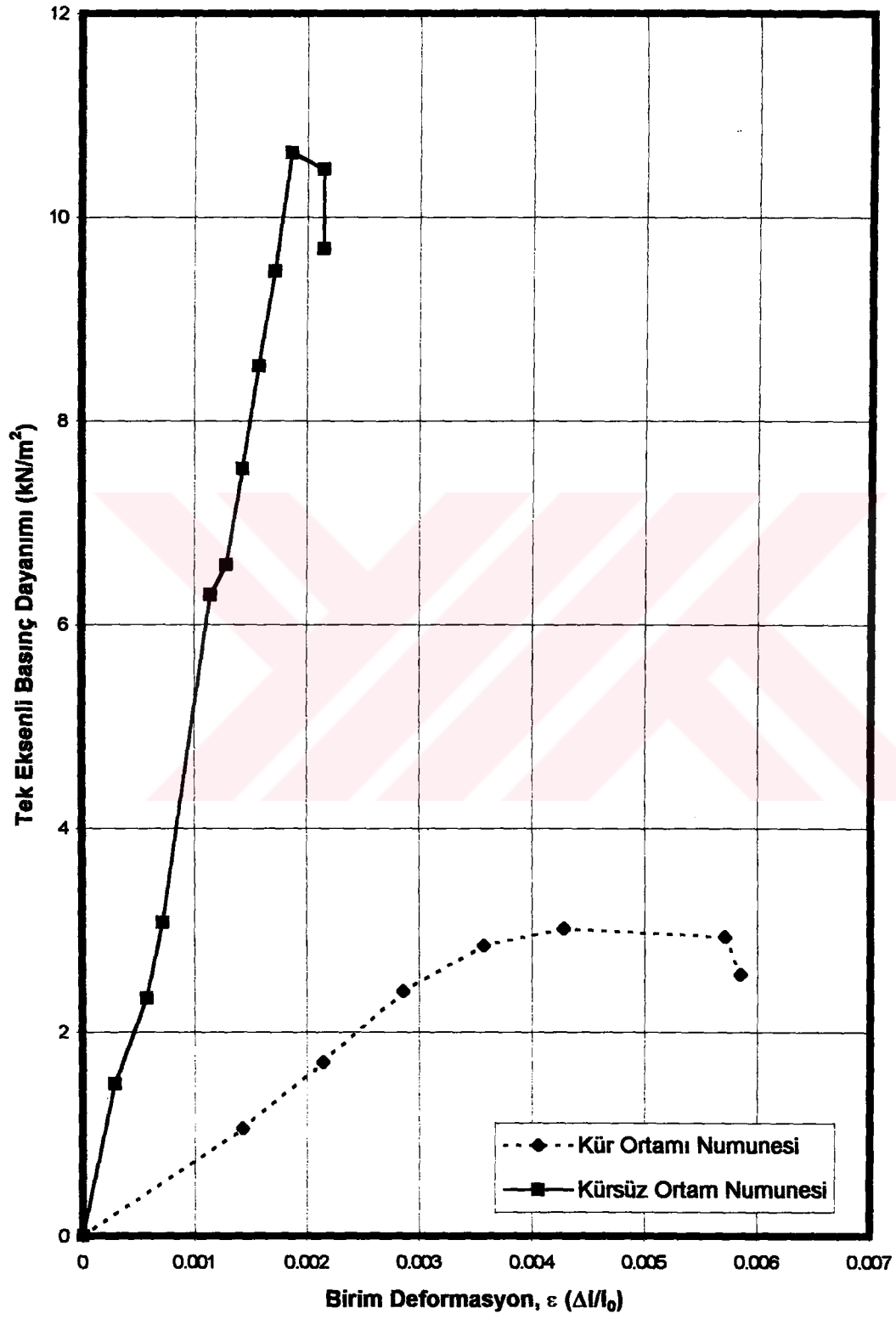
Ek 16. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin, hazırlandıktan hemen sonraki tek esenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



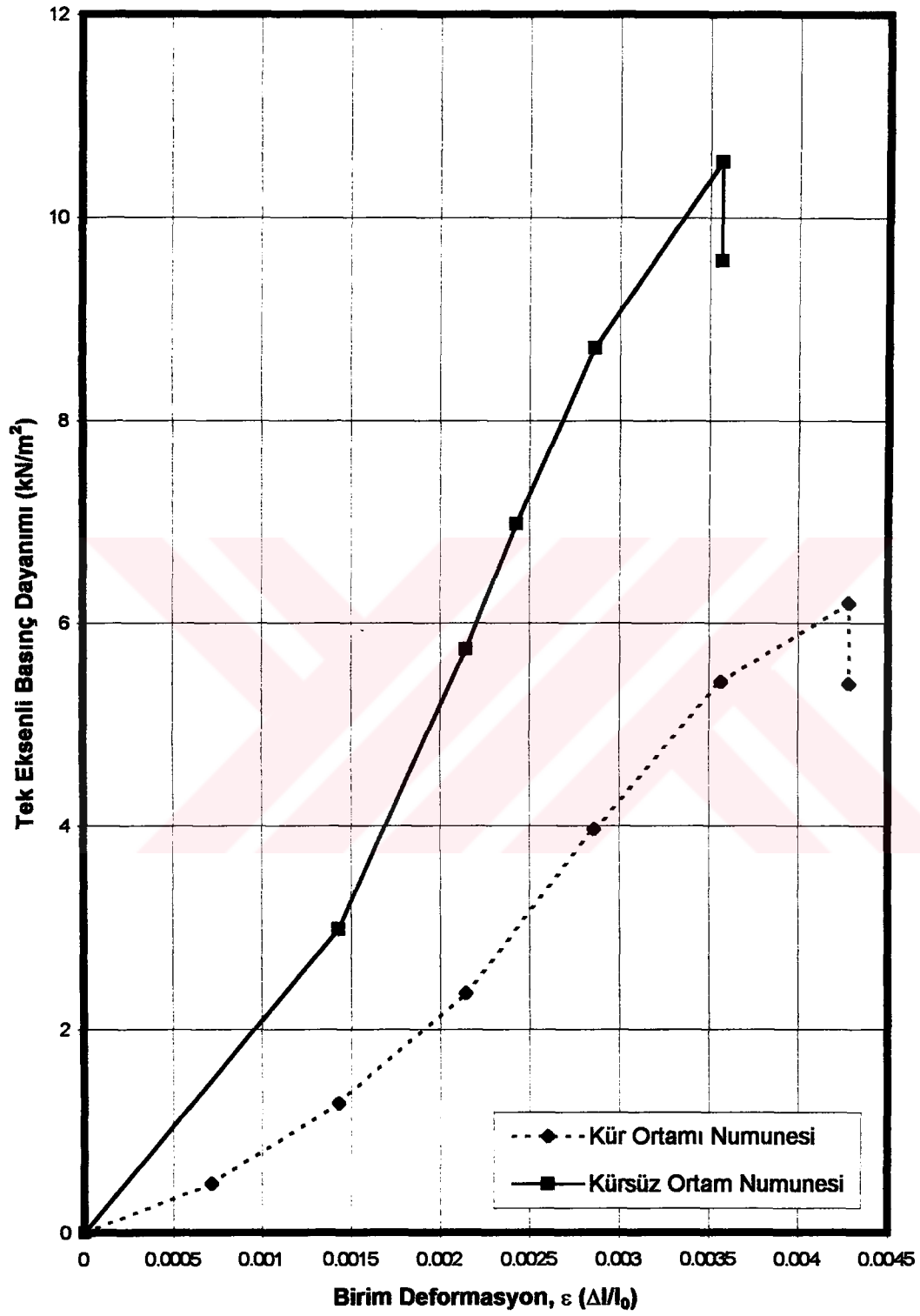
Ek 17. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 1.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



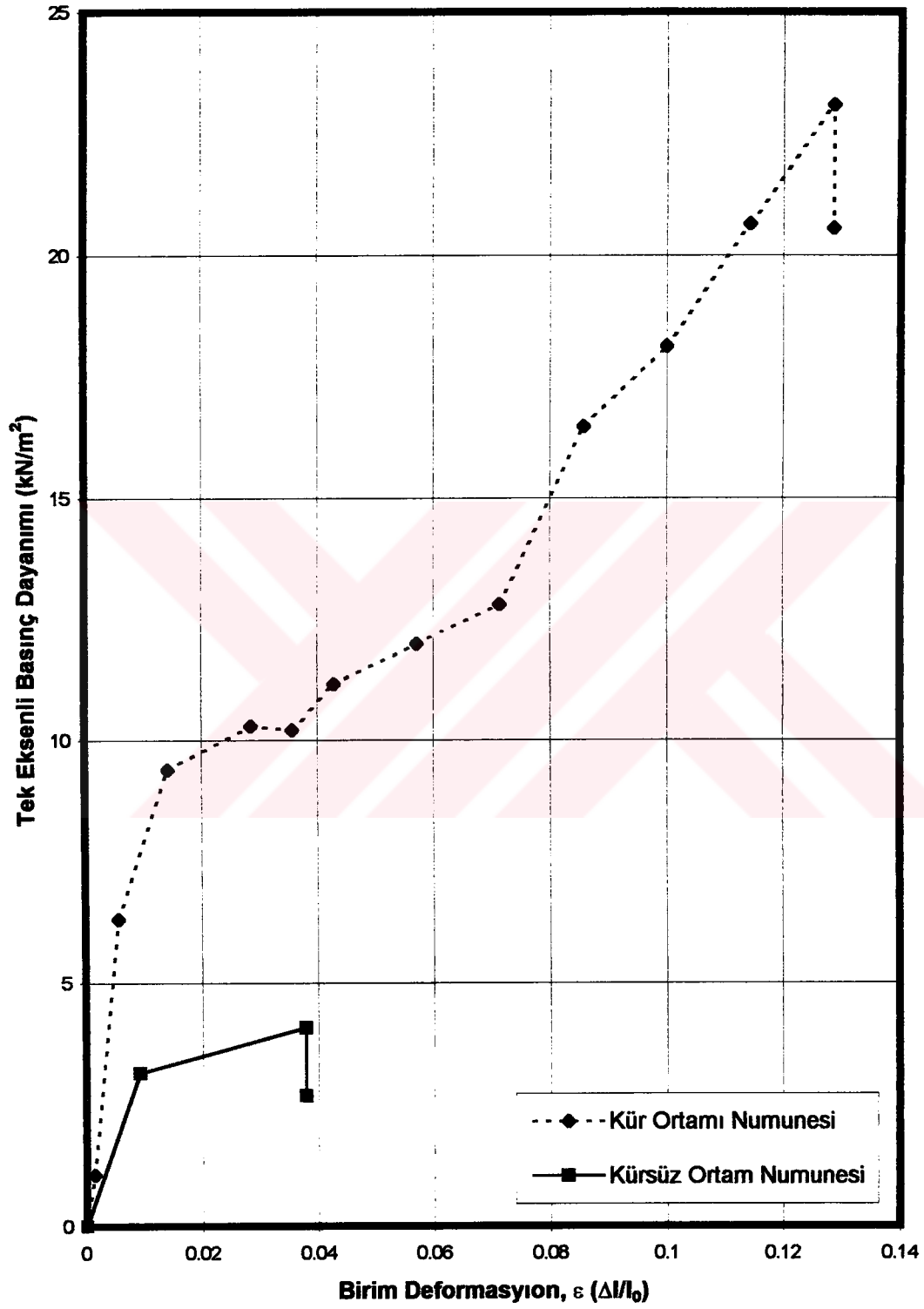
Ek 18. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 3.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



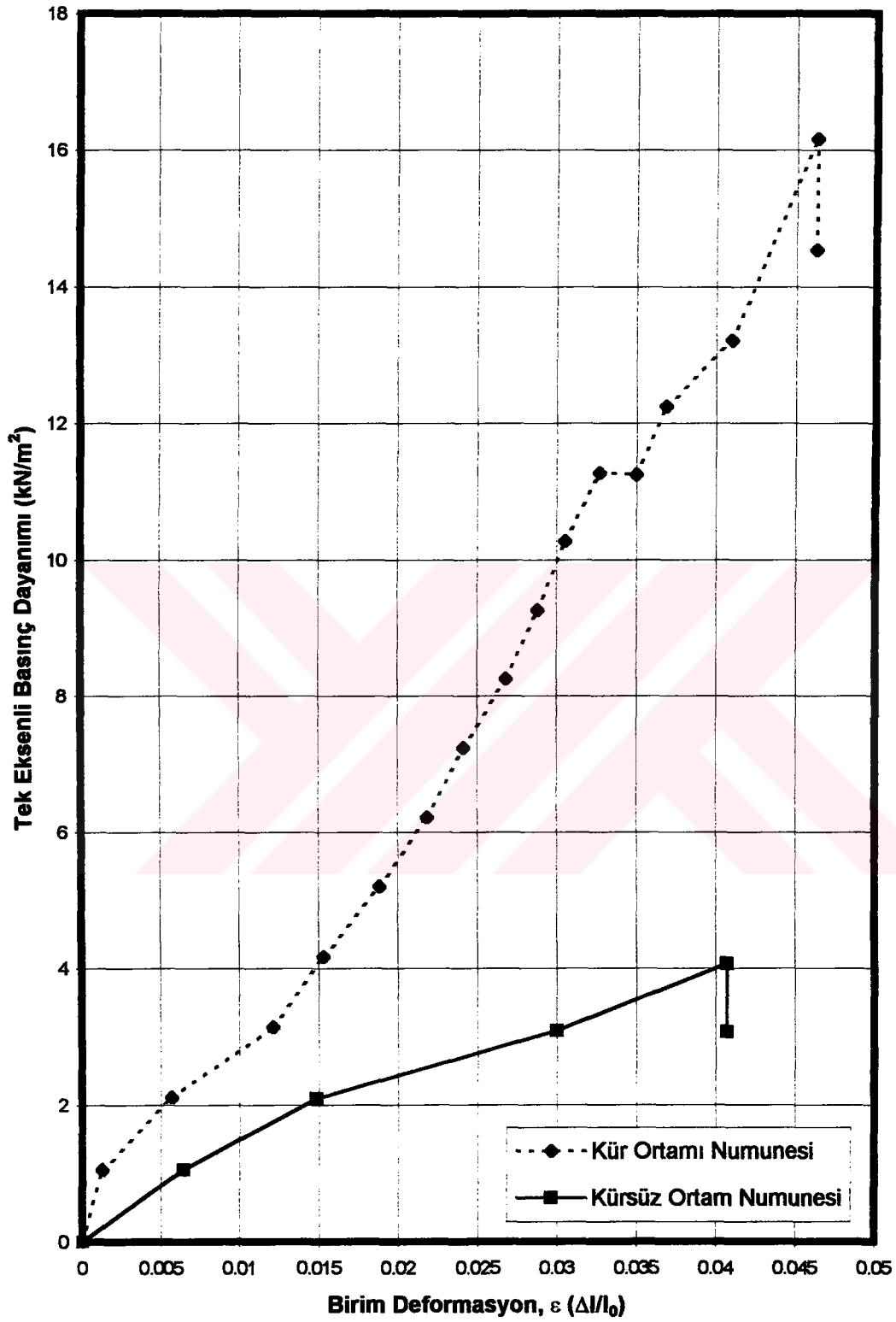
Ek 19. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 5.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



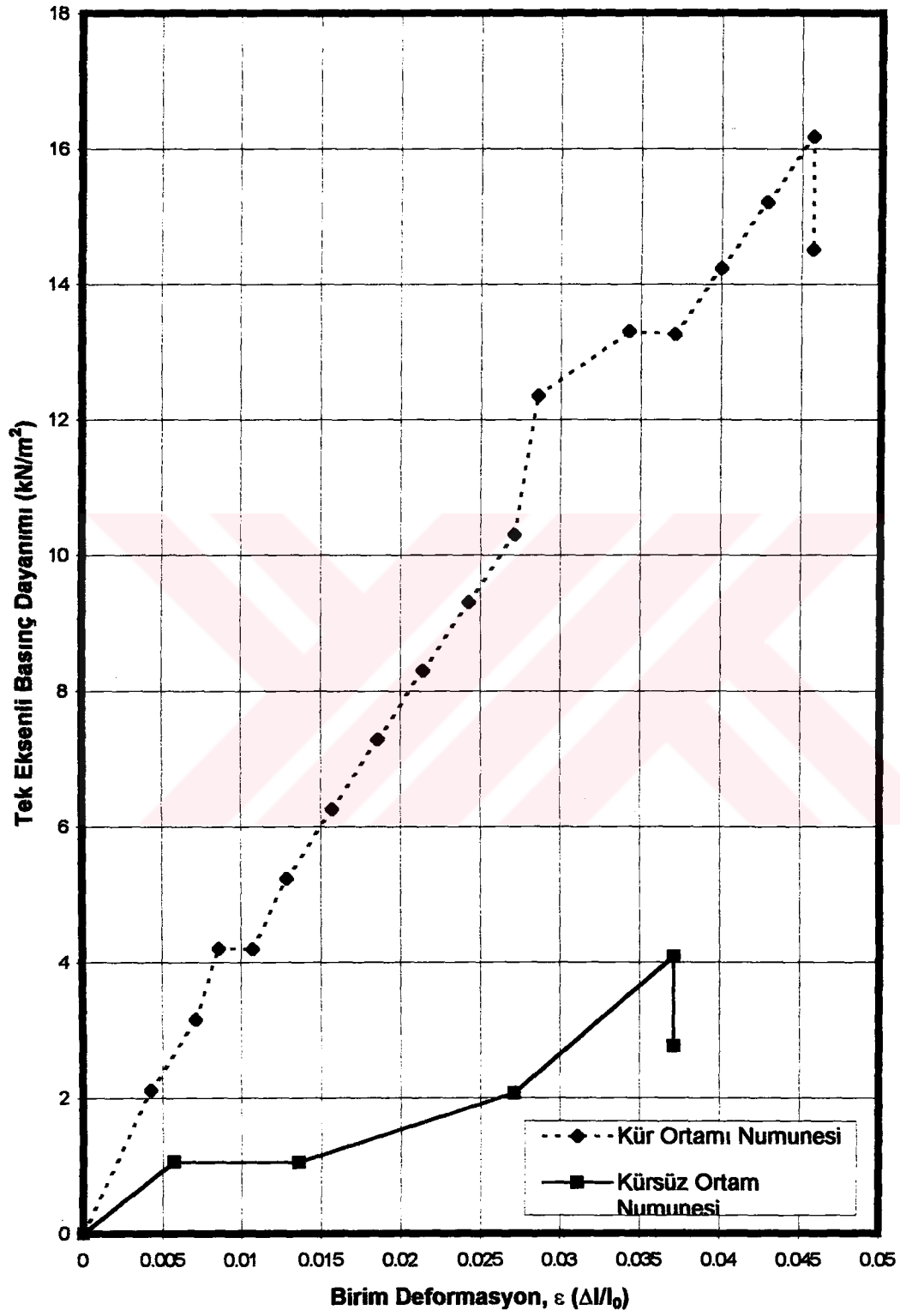
Ek 20. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 7.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



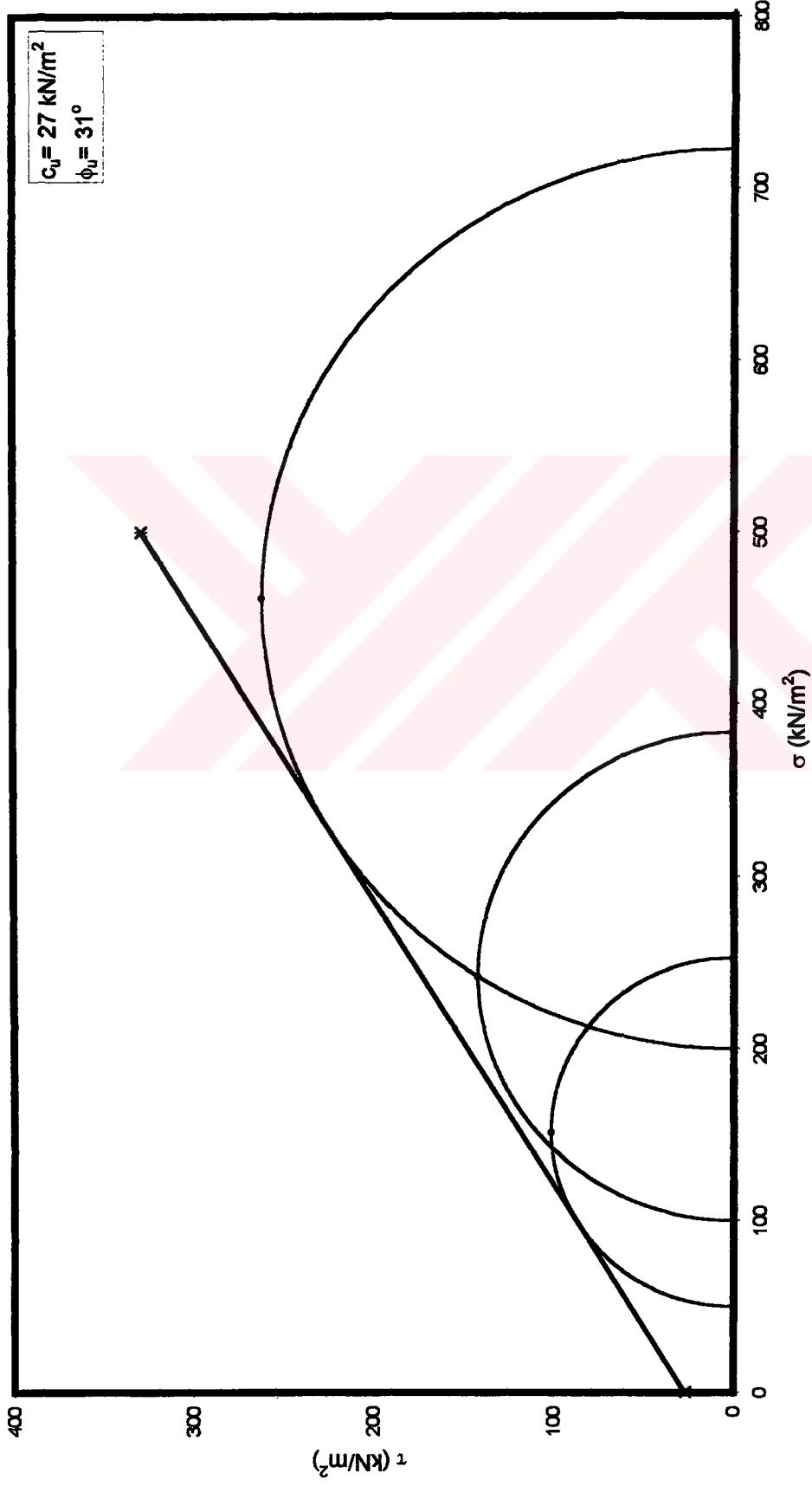
Ek 21. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 14.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



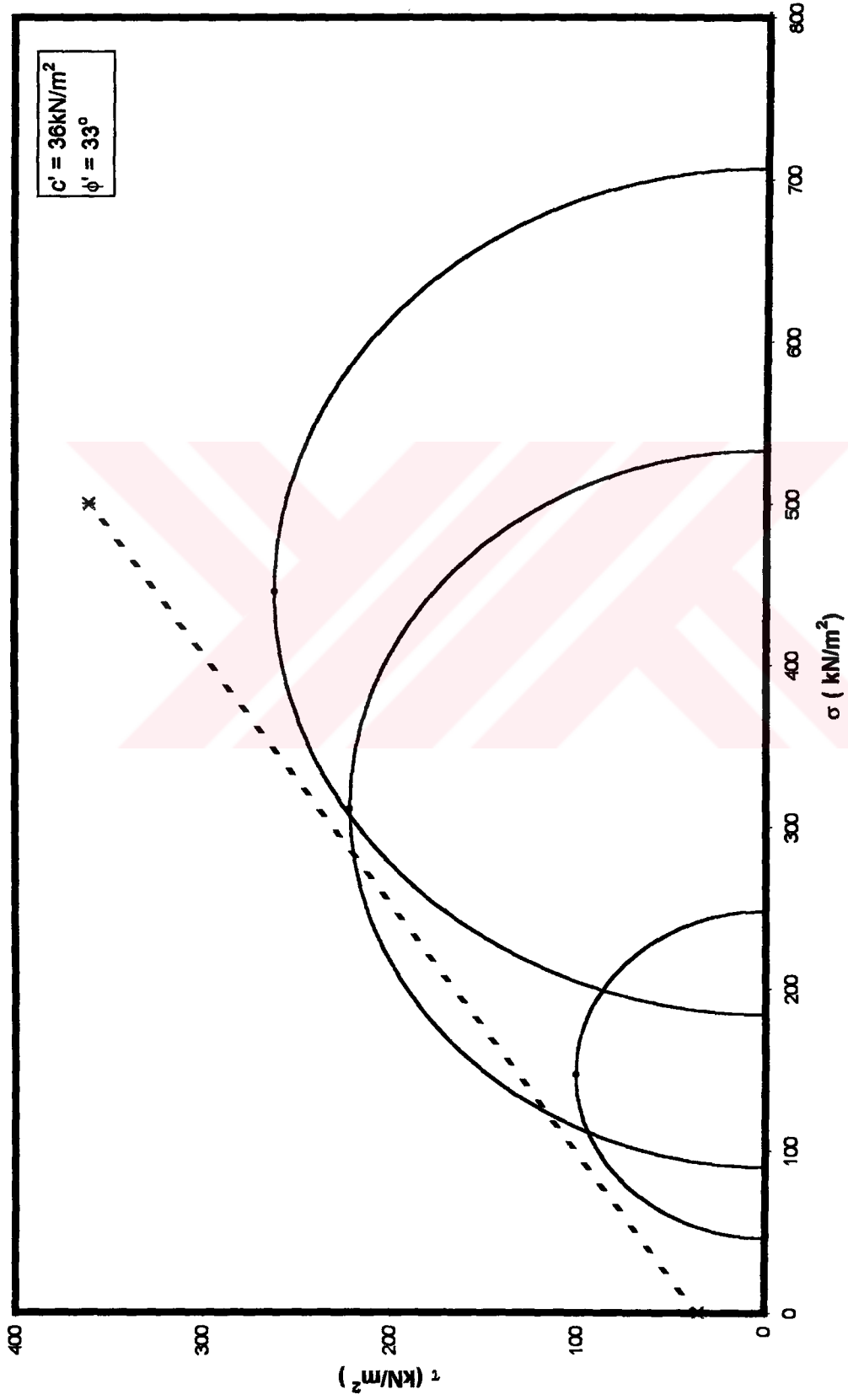
Ek 22. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 28.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



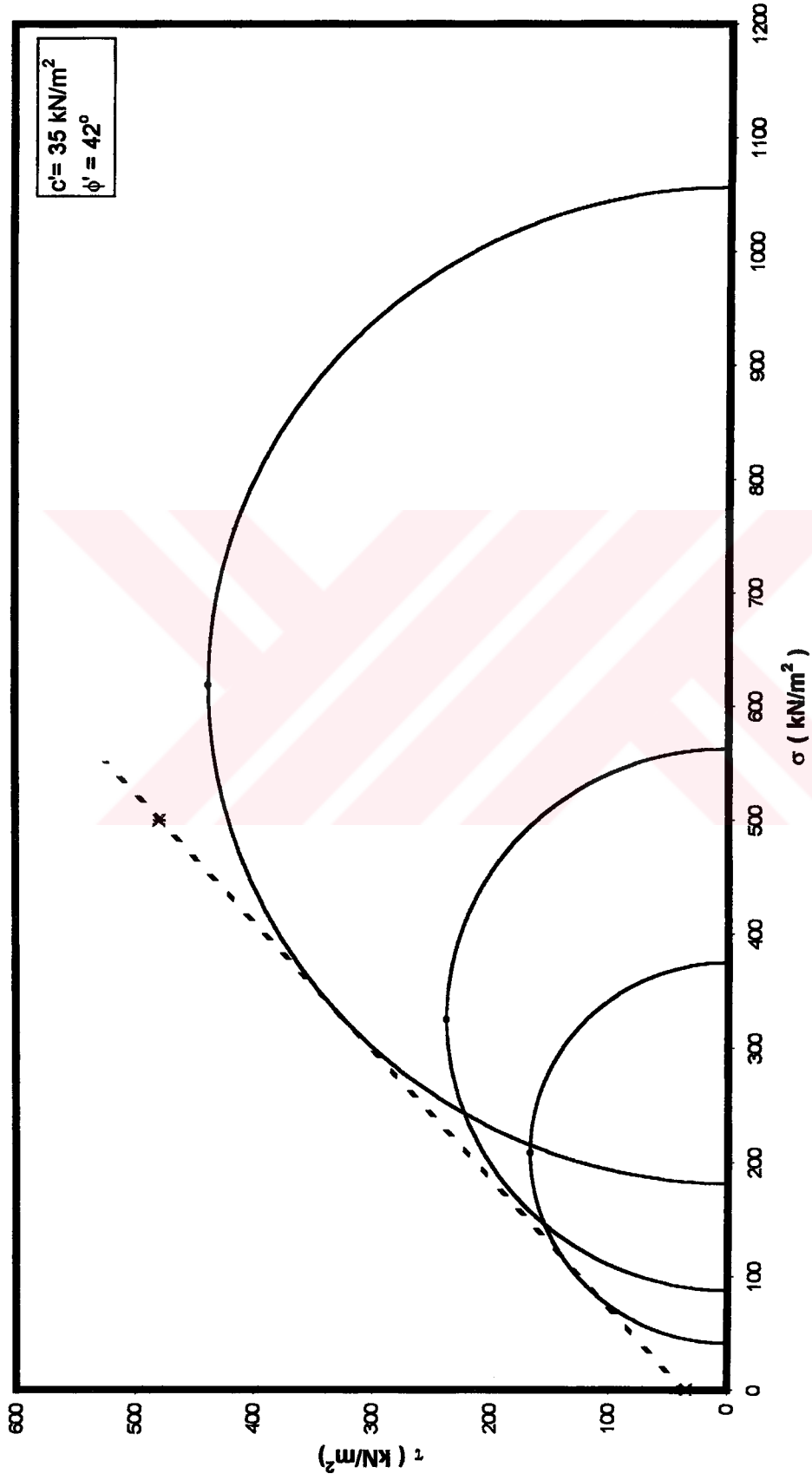
Ek 23. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin 75.gün sonundaki tek eksenli basınç dayanımı - birim deformasyon ilişkisi



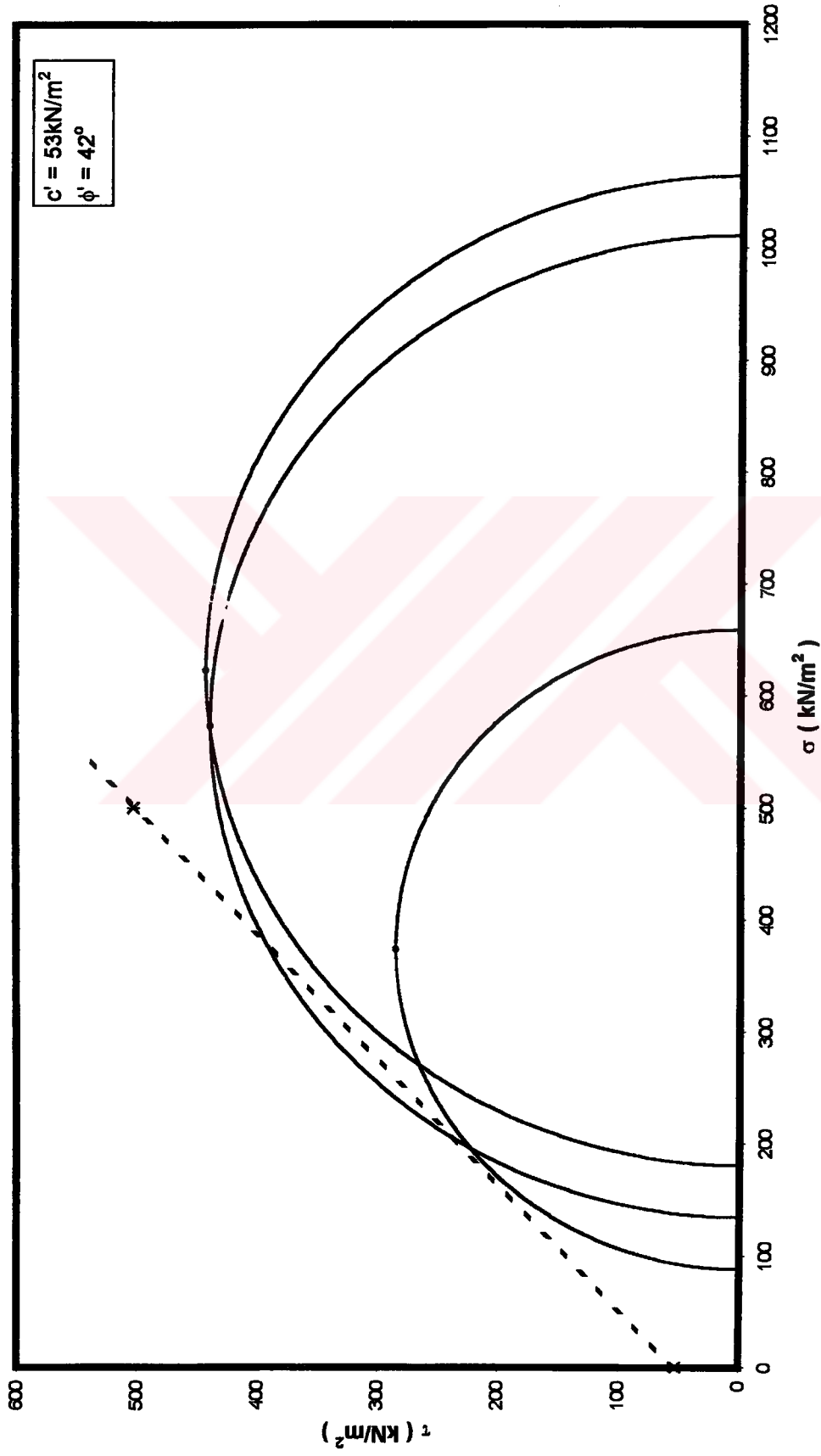
Ek 24. Çatalağzı uçucu kütü numunelerinin üç eksenli deneyi (UU) kırılma zarfı



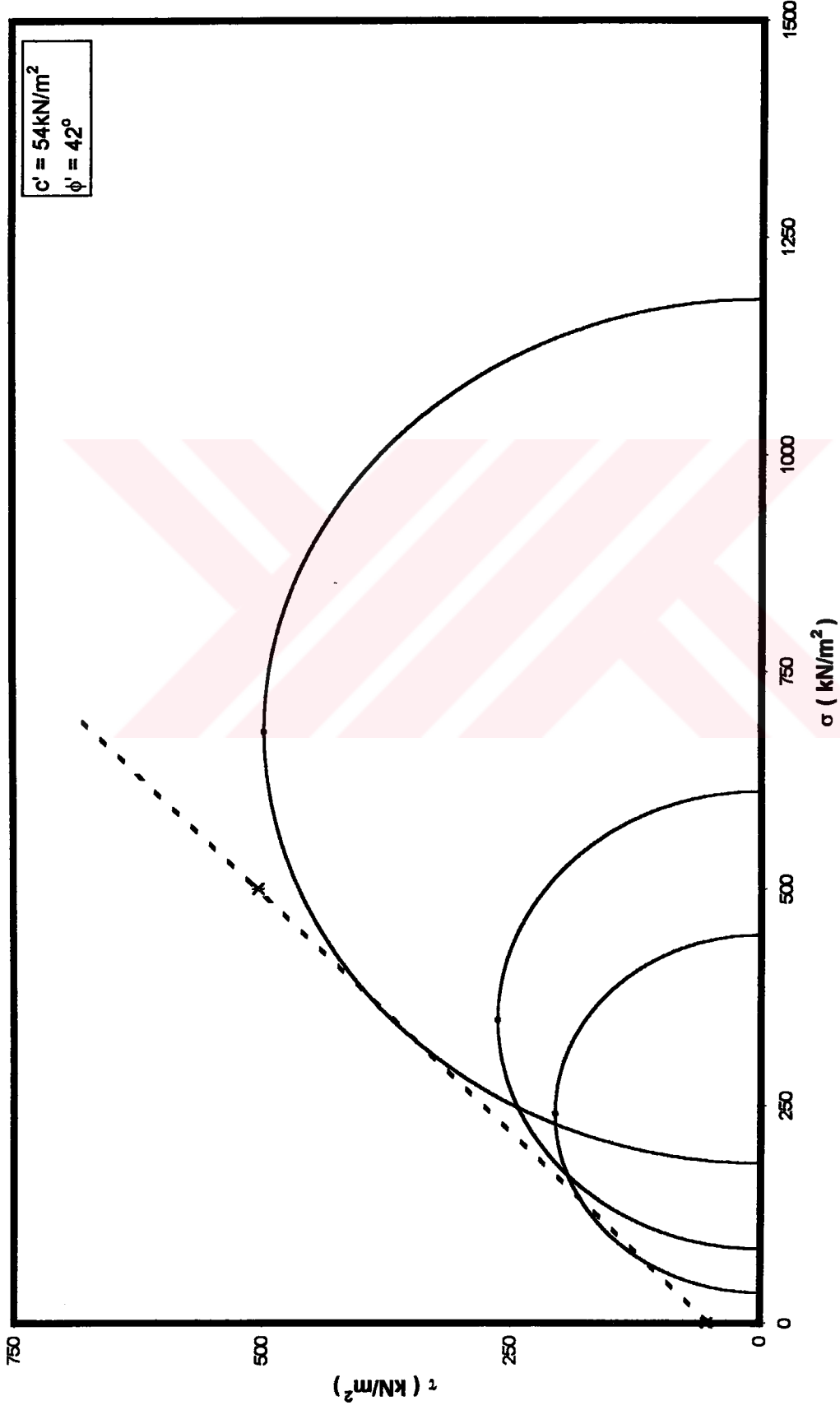
Ek 25. Çatalağzı uçucu kütü üç eksenli deneyi (CU) efektif kırılma zarfı



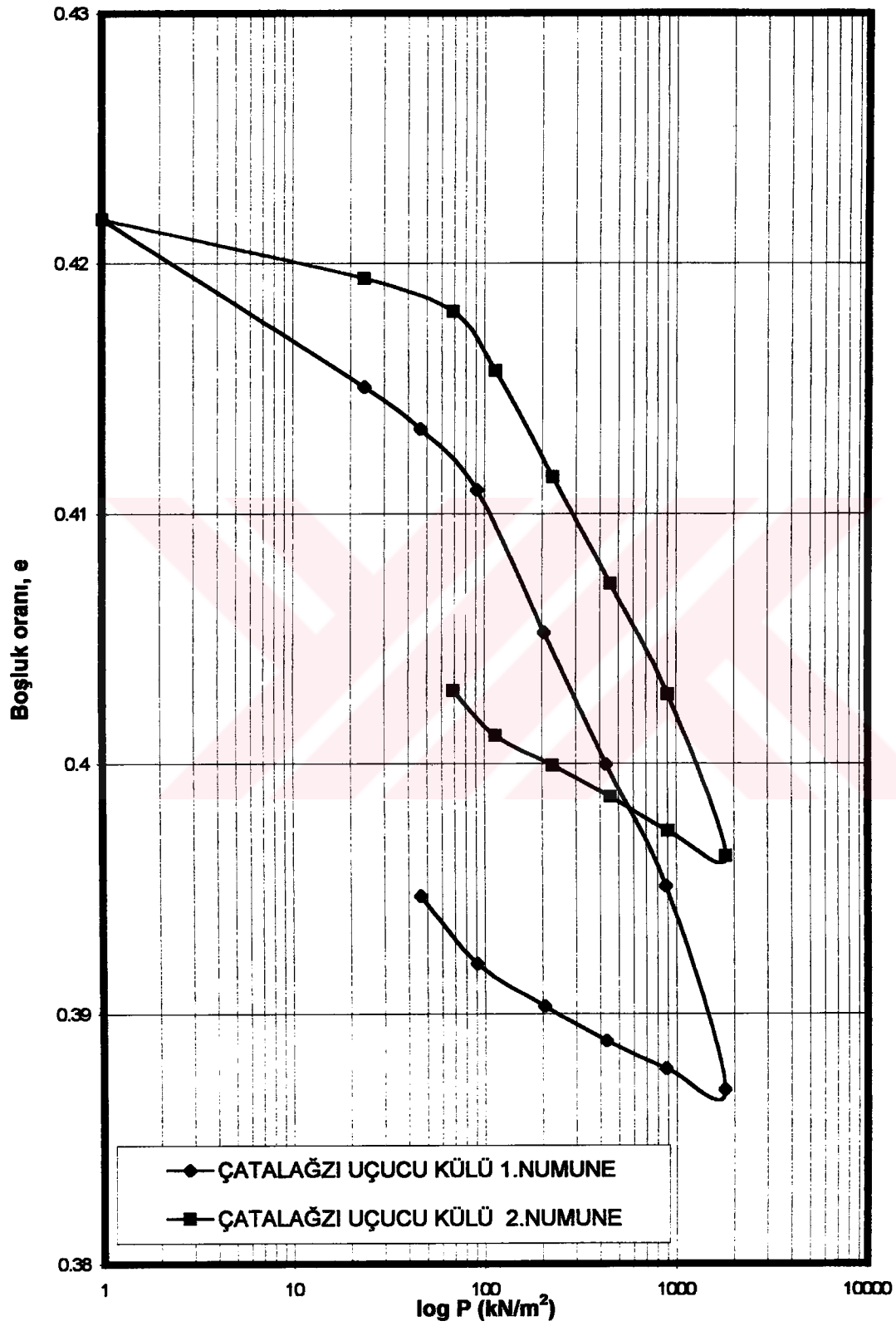
Ek 26. Ağırlıkça %10'luk karışımın üç eksenli deneyi (CU) efektif kırılma zarfı



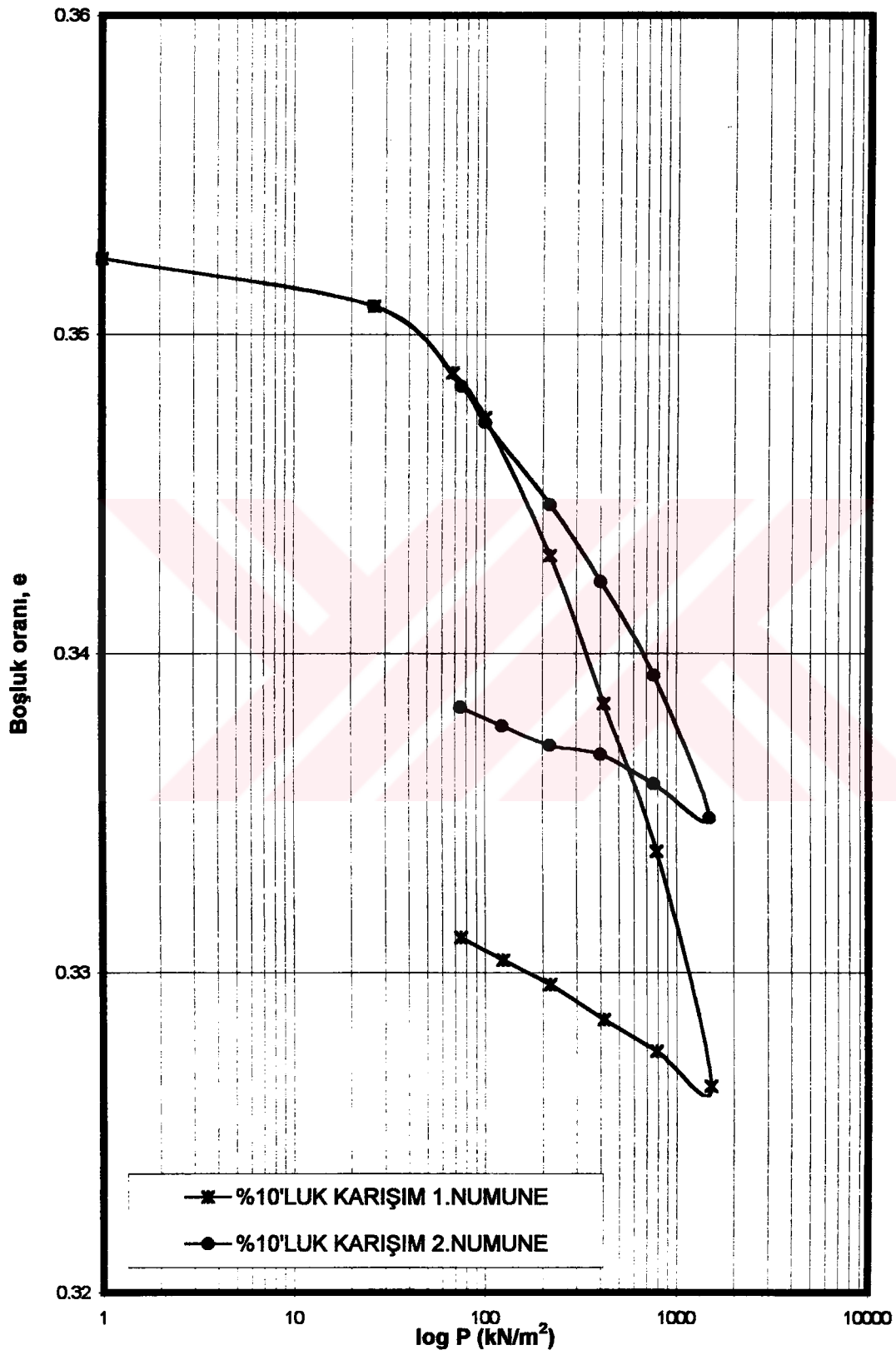
Ek 27. Ağırlıkça %20'lik karışımın üç eksenli deneyi (CU) efektif kırılma zarfı



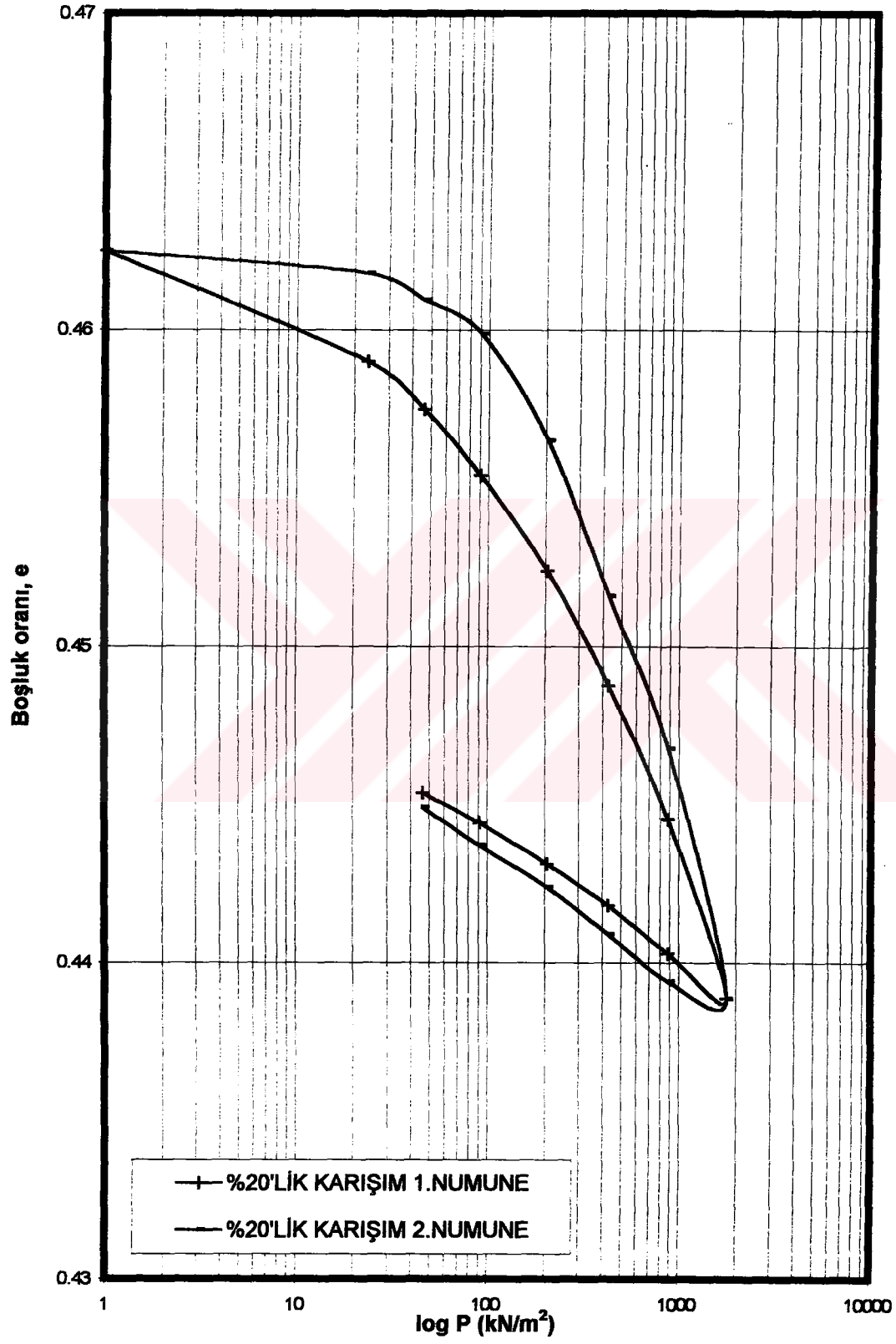
Ek 28. Ağırlıkça %30'luk karışımın üç eksenli deneyi (CU) efektif kırılma zarfı



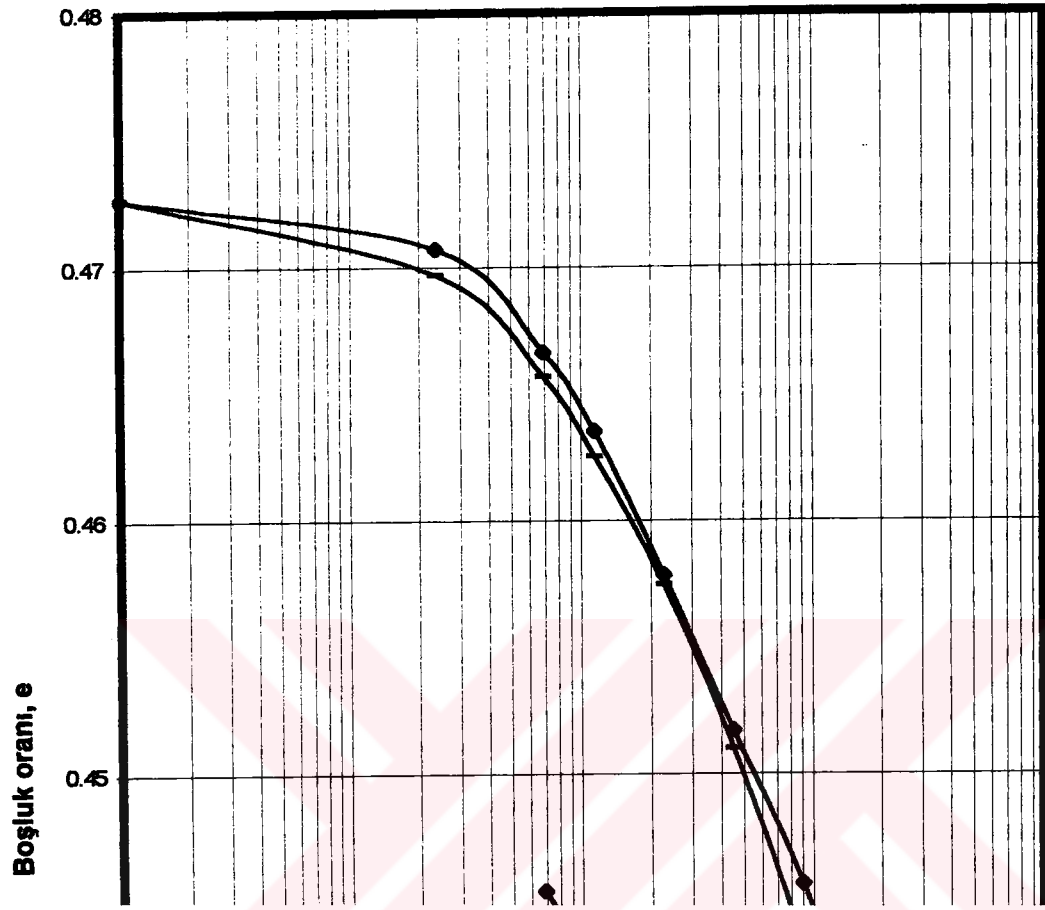
Ek 29. Çatalağzı uçucu külü numunelerinin e-logP ilişkisi

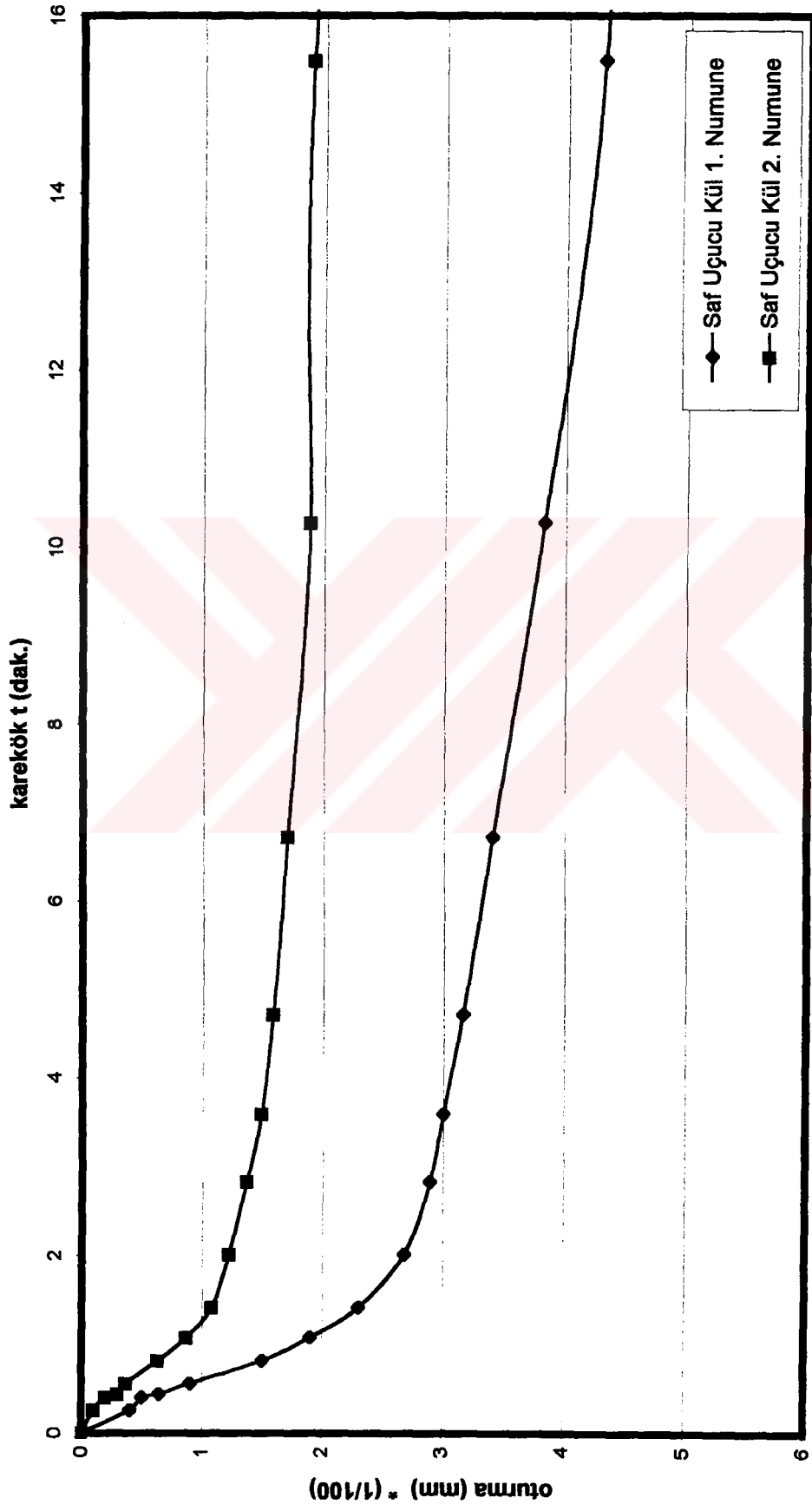


Ek 30. Ağırlıkça 10'luk karışımların e-logP ilişkisi

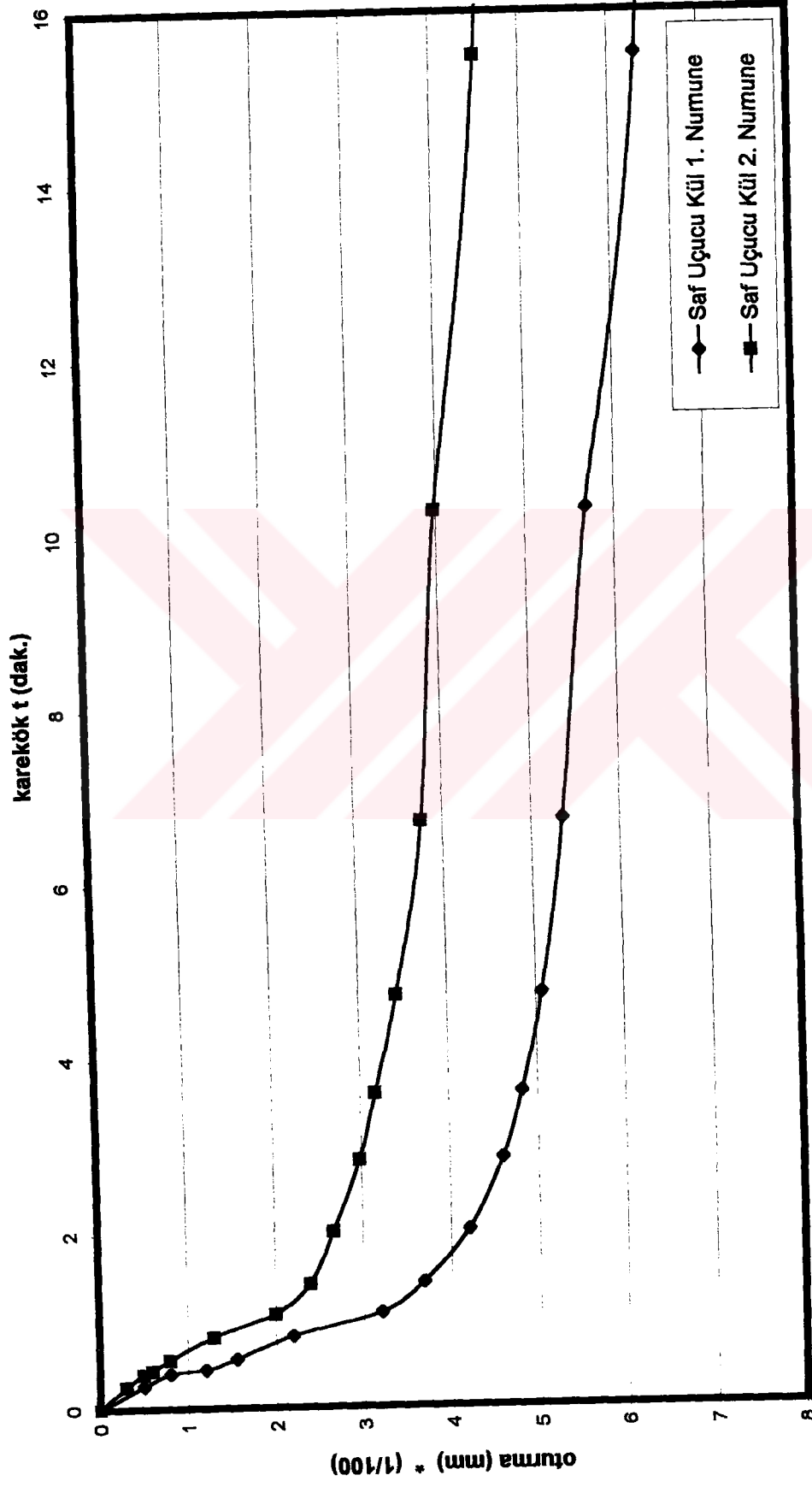


Ek 31. Ağırlıkça 20'lik karışımların e-logP ilişkisi

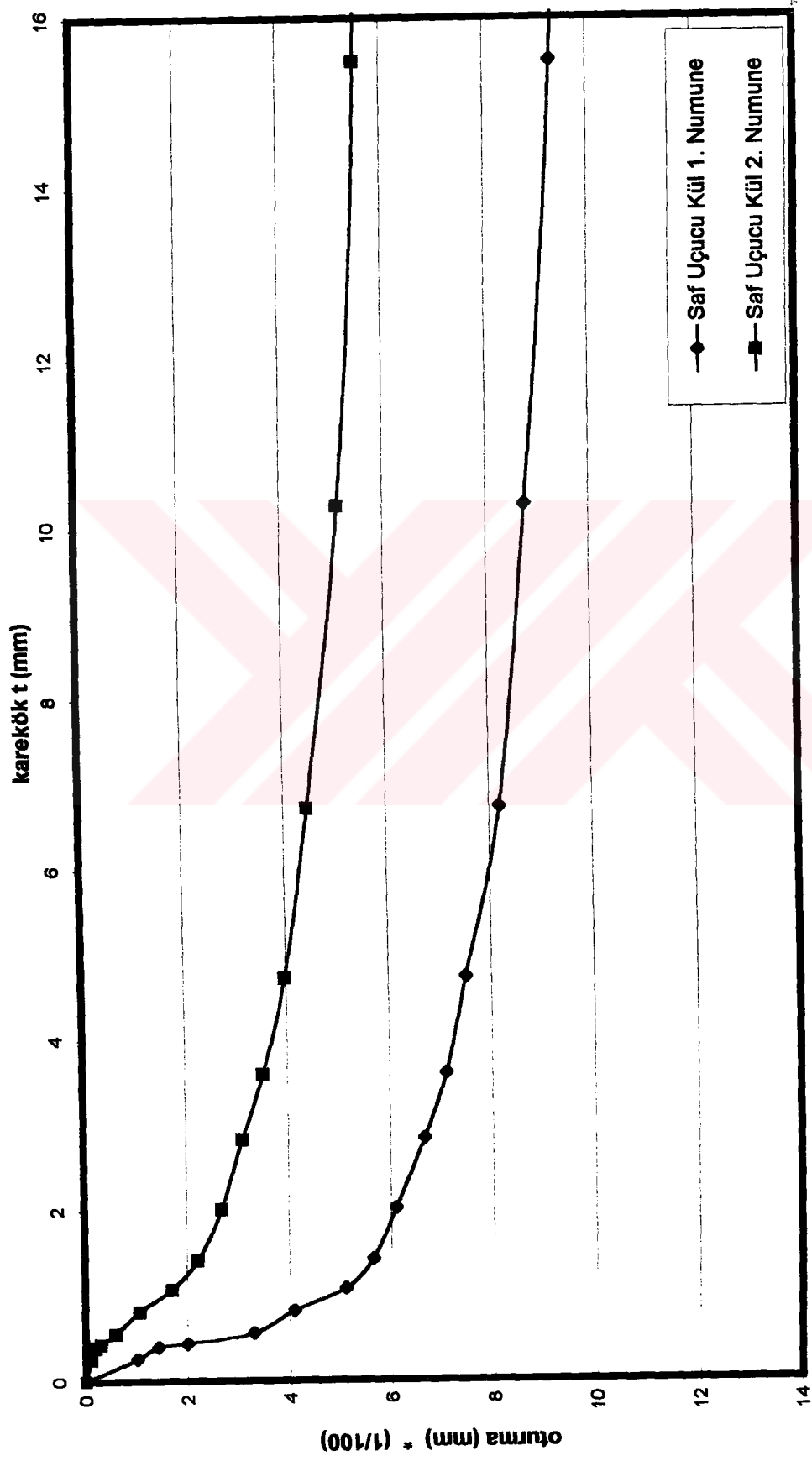




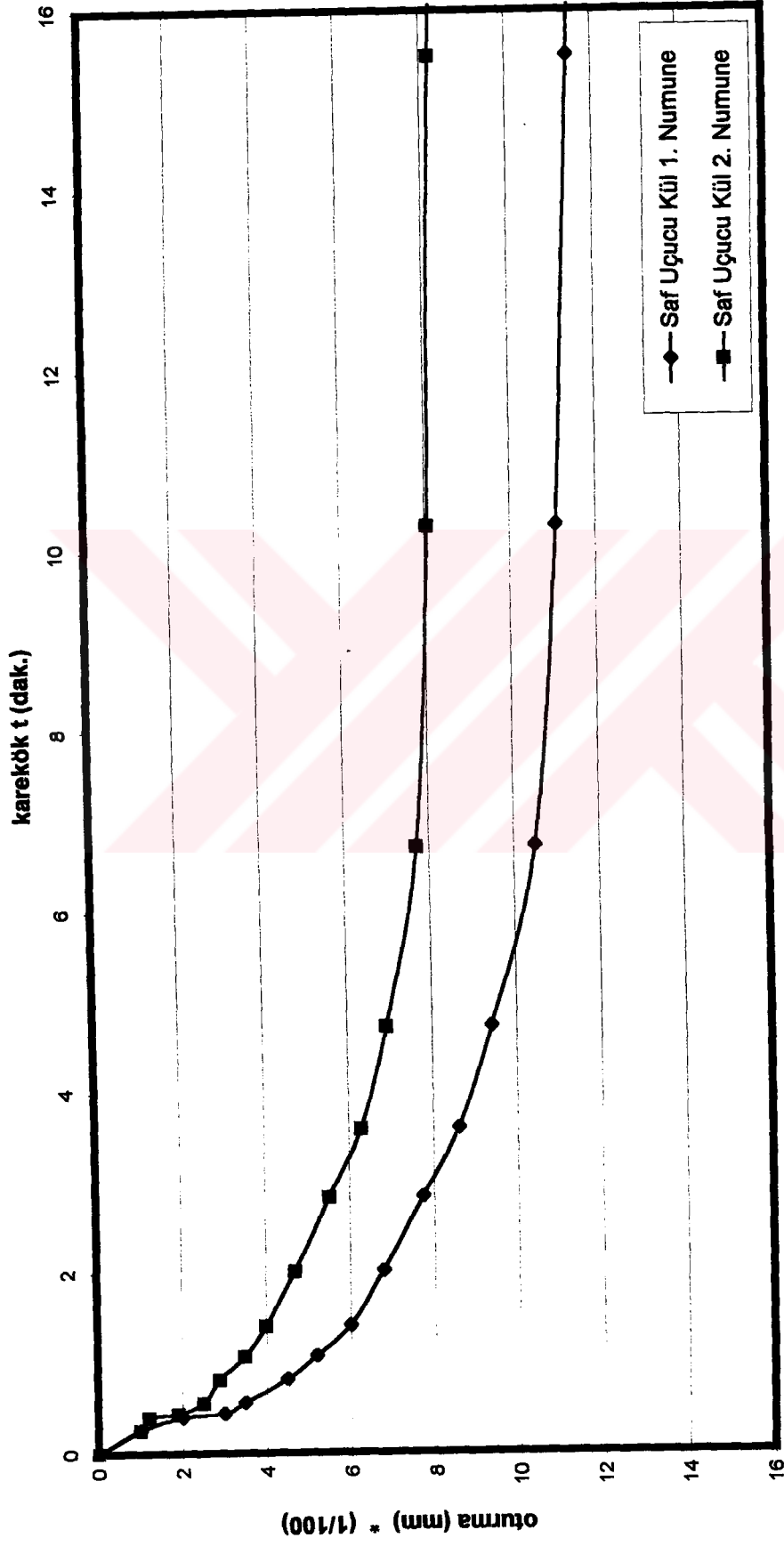
Ek 33. 100 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



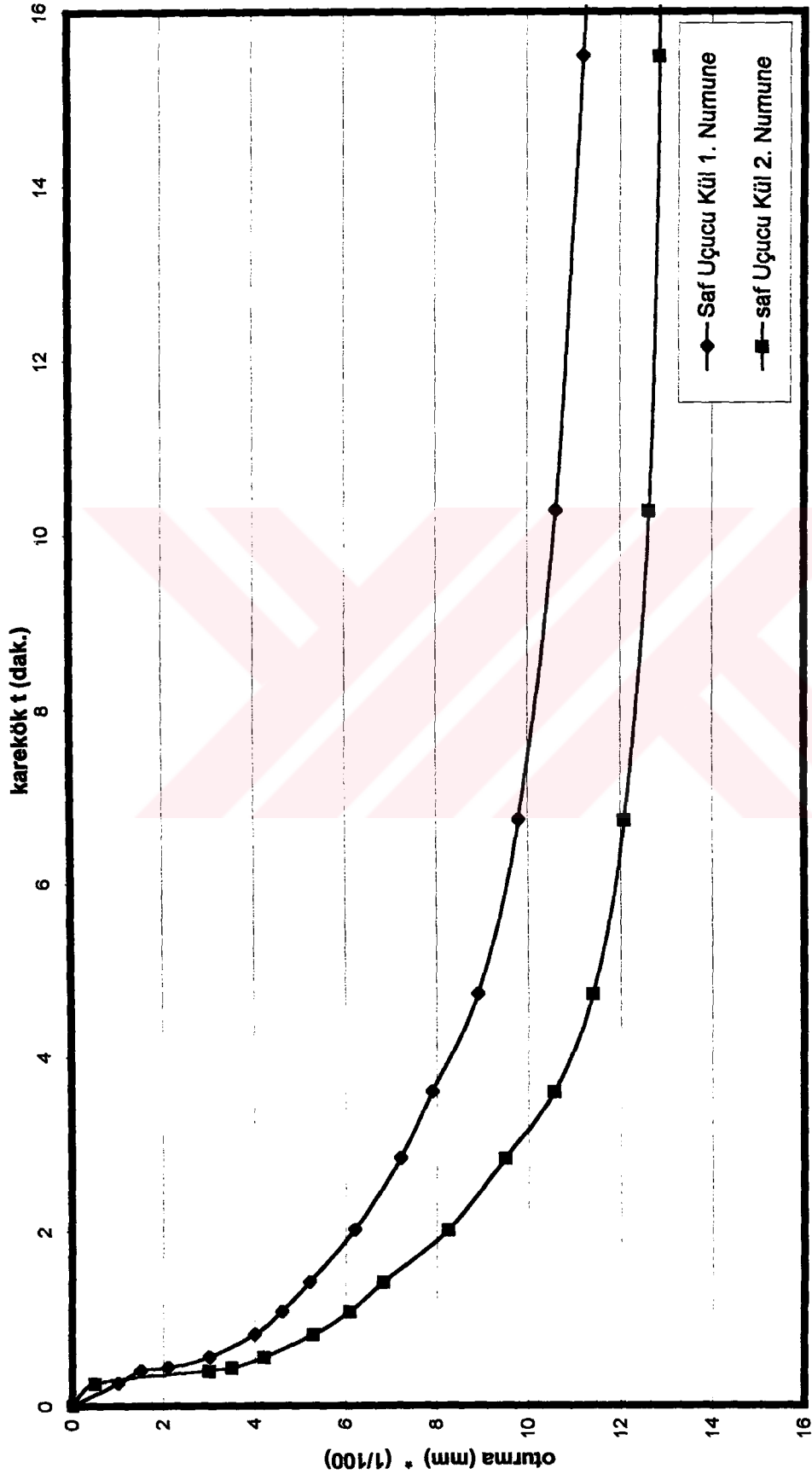
Ek 34. 200 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



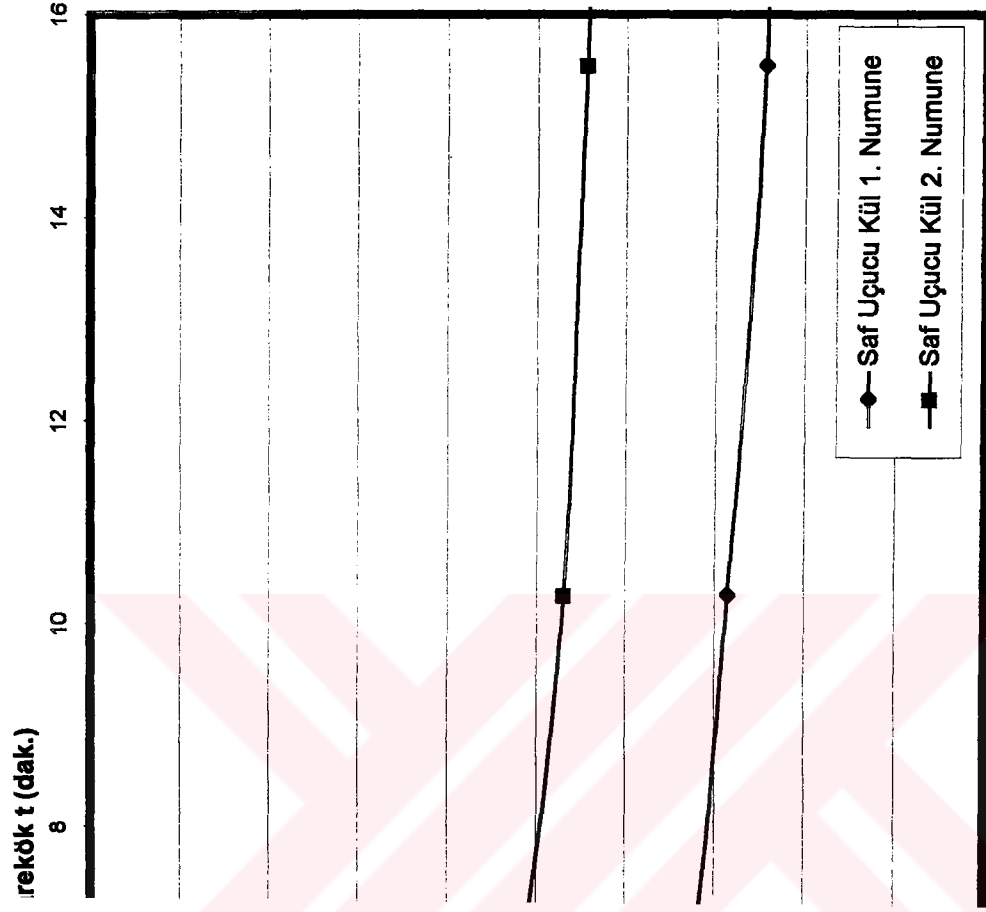
Ek 35. 500 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi

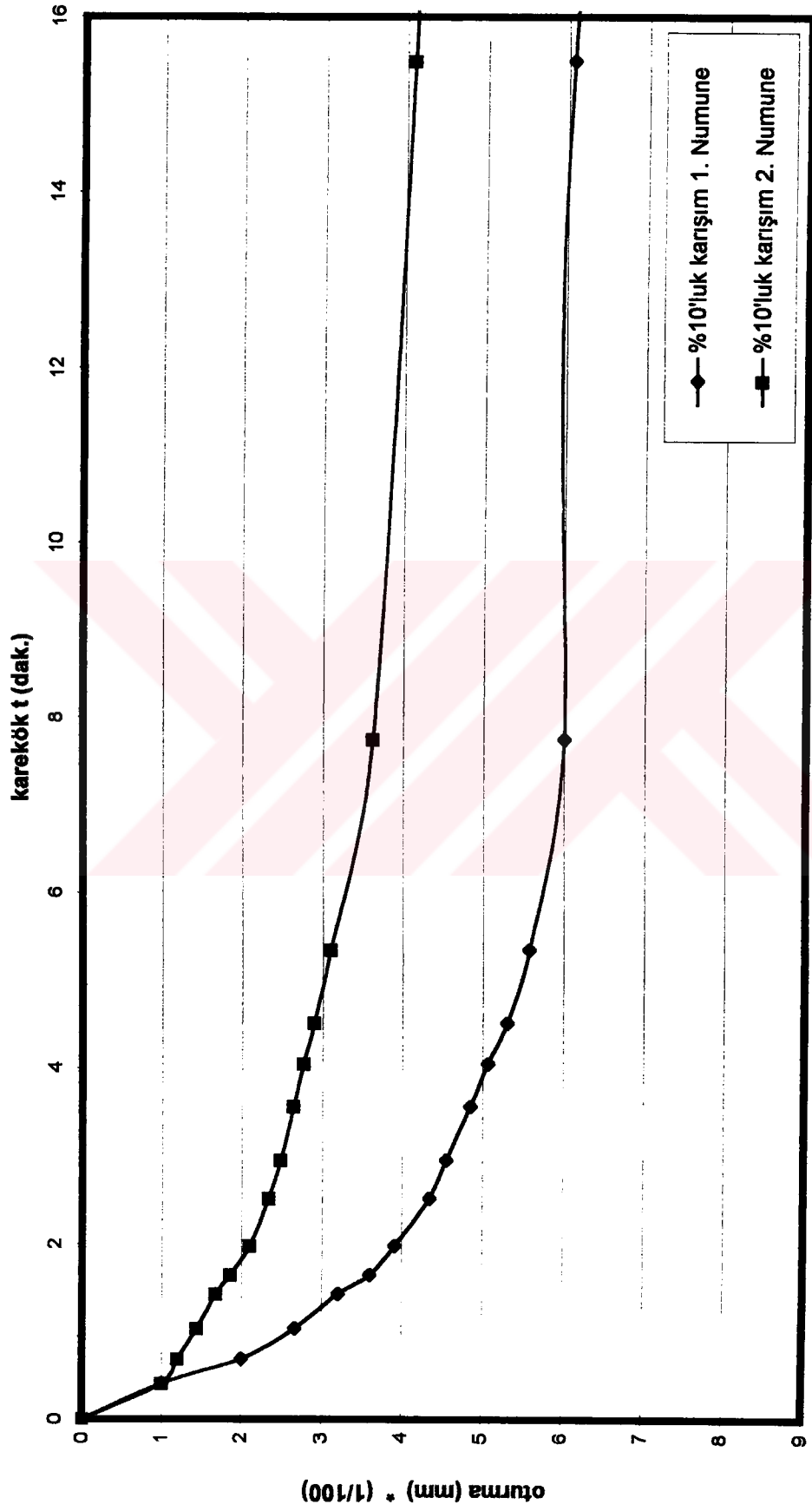


Ek 36. 1000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi

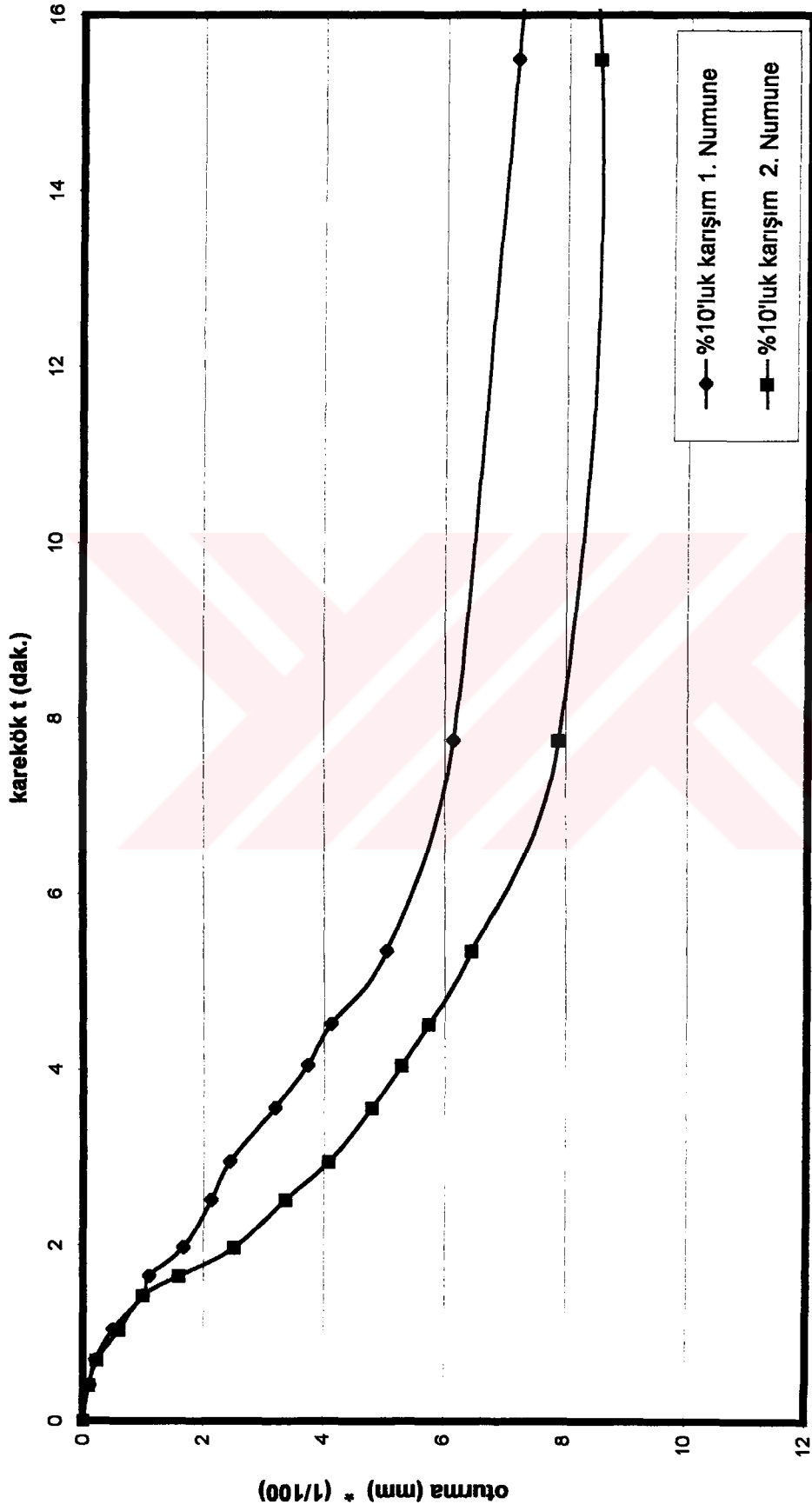


Ek 37. 2000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi

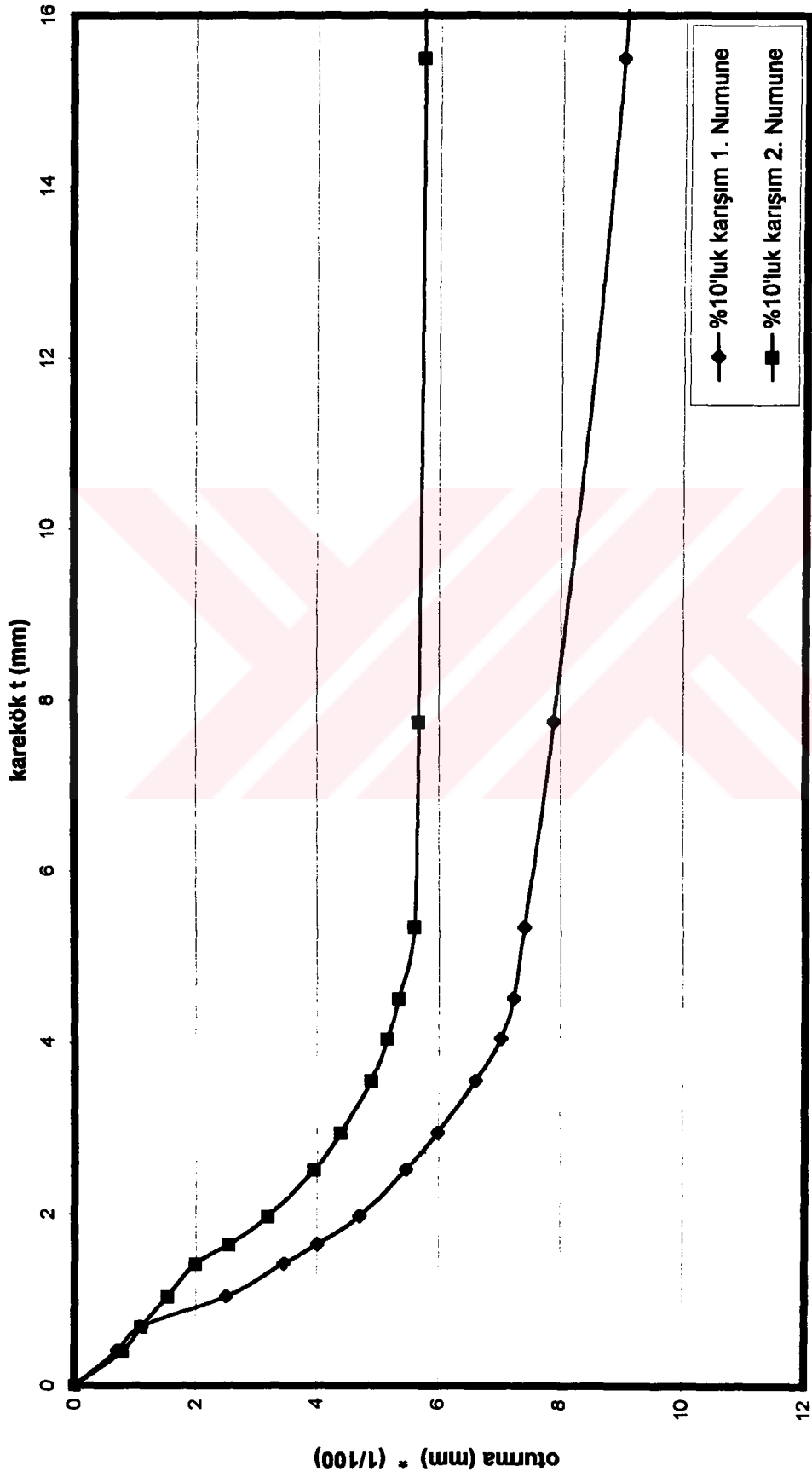




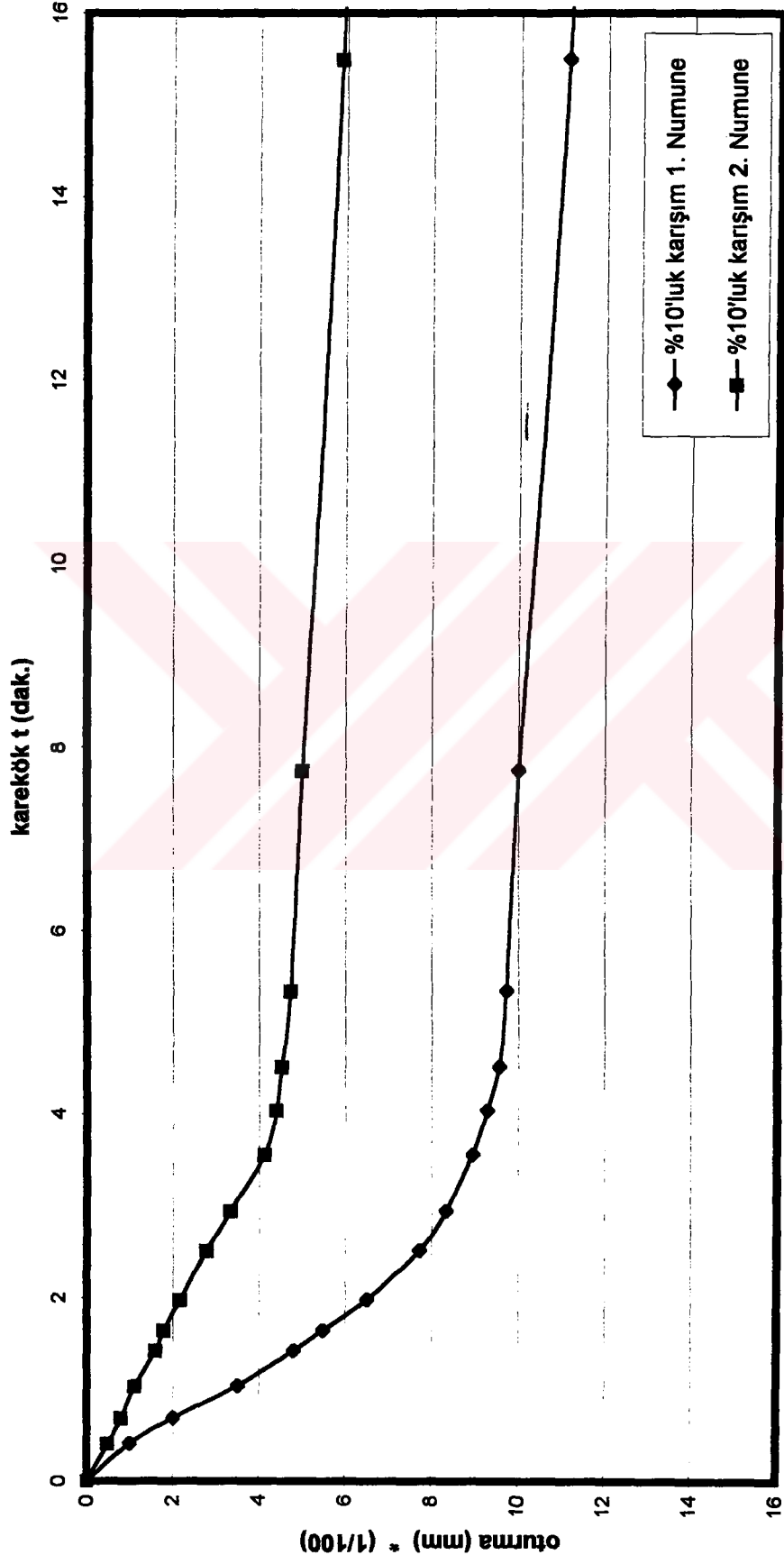
Ek 39. 100 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



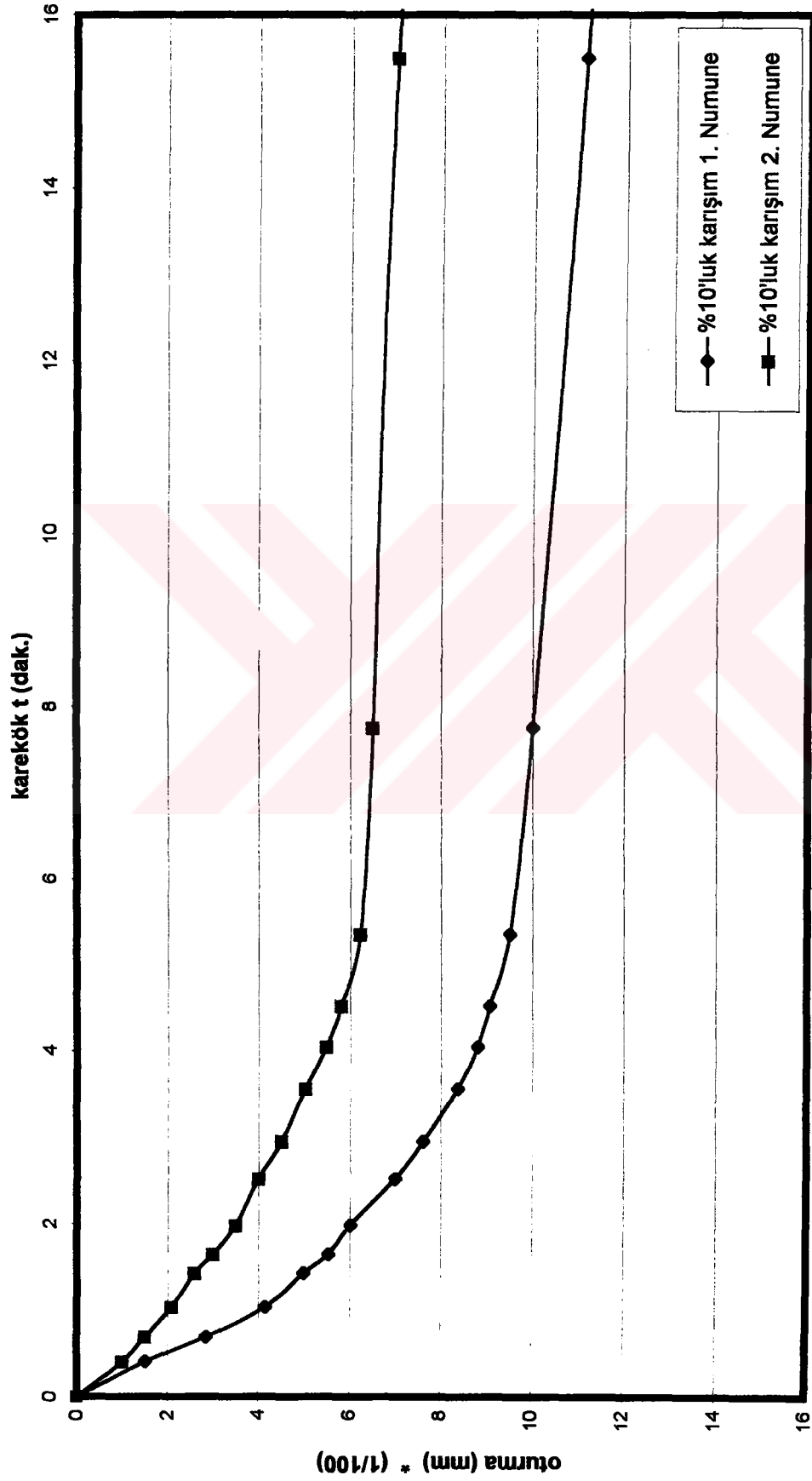
Ek 40. 200 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



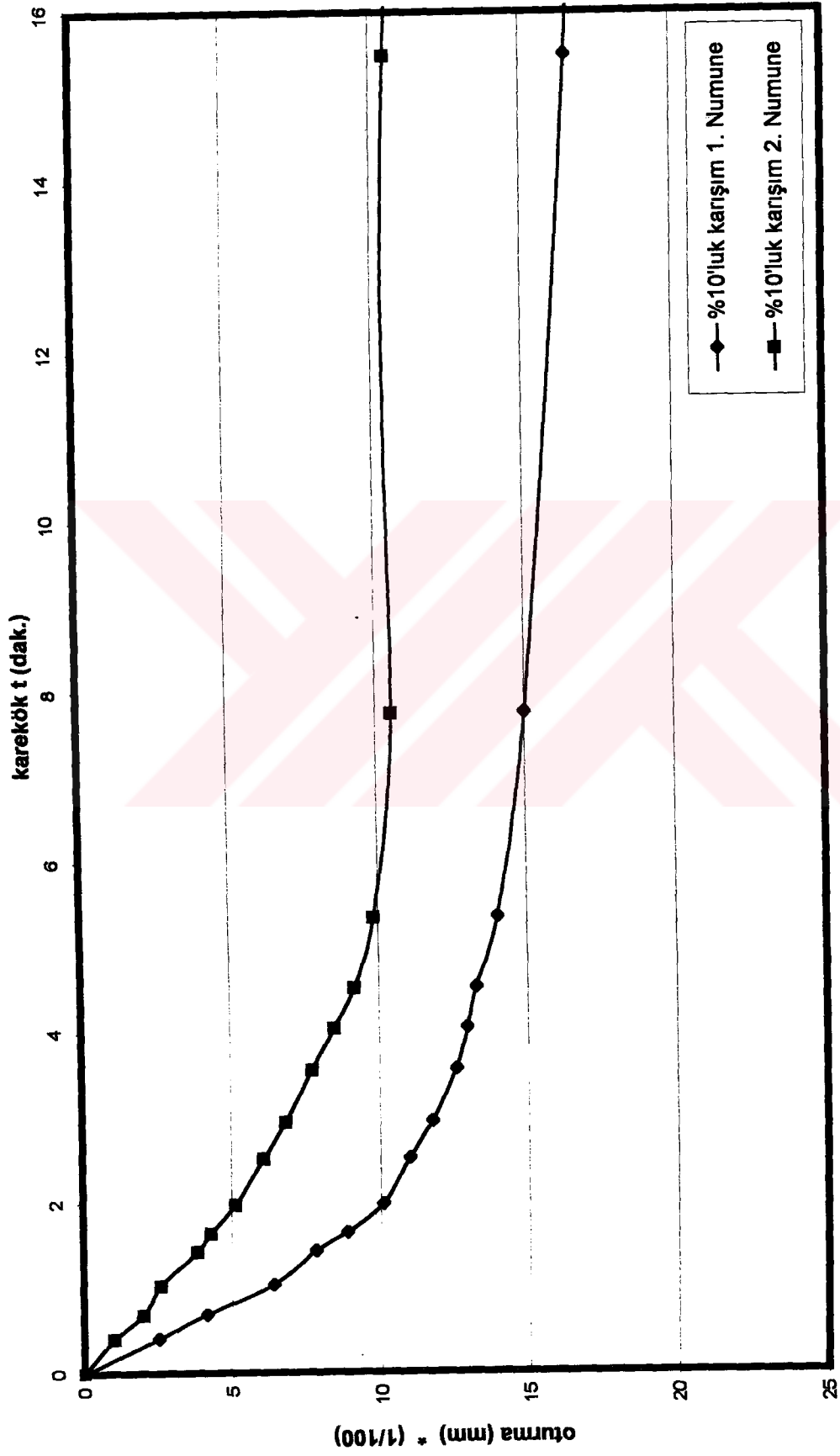
Ek 41. 500 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



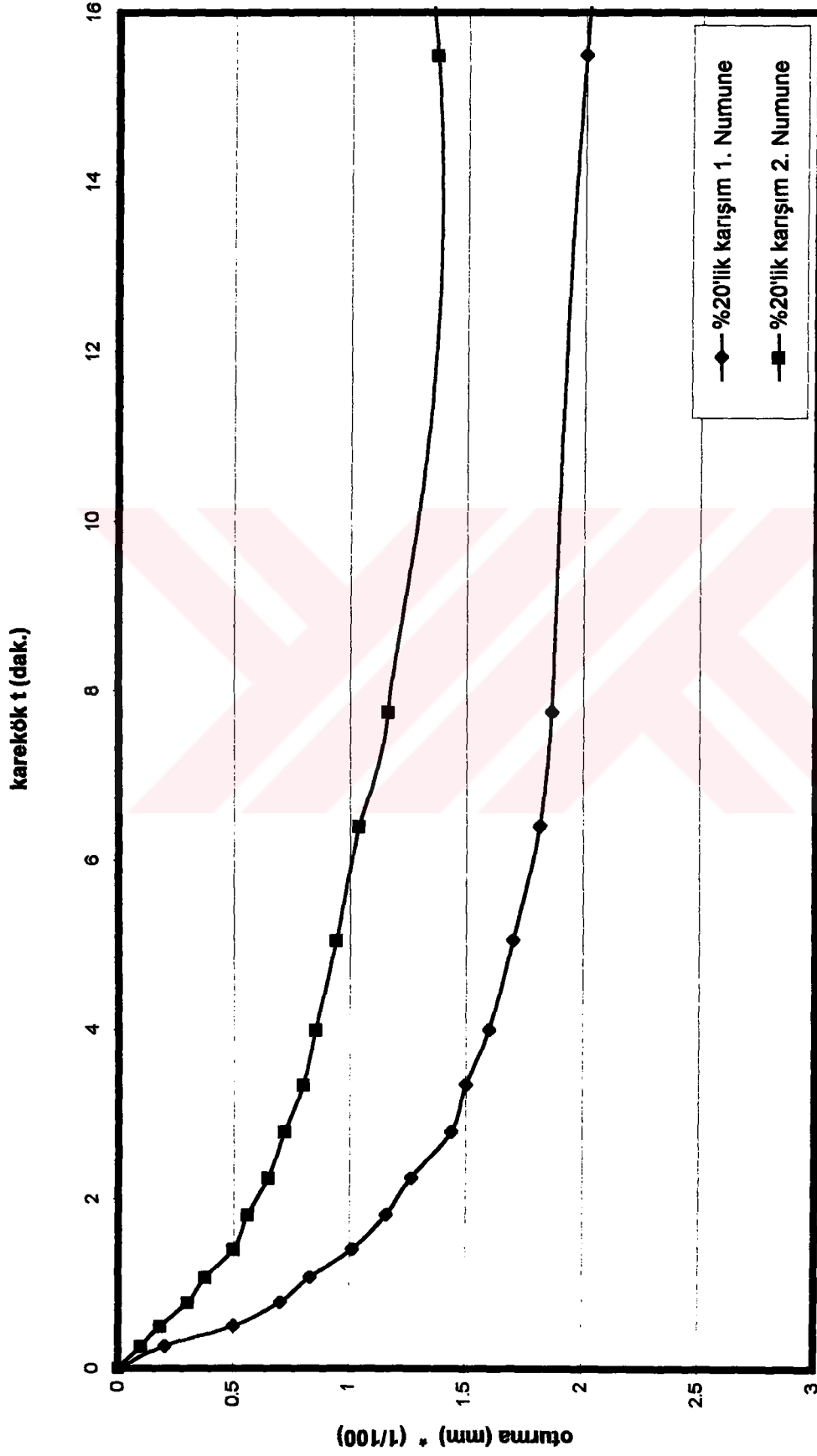
Ek 42. 1000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



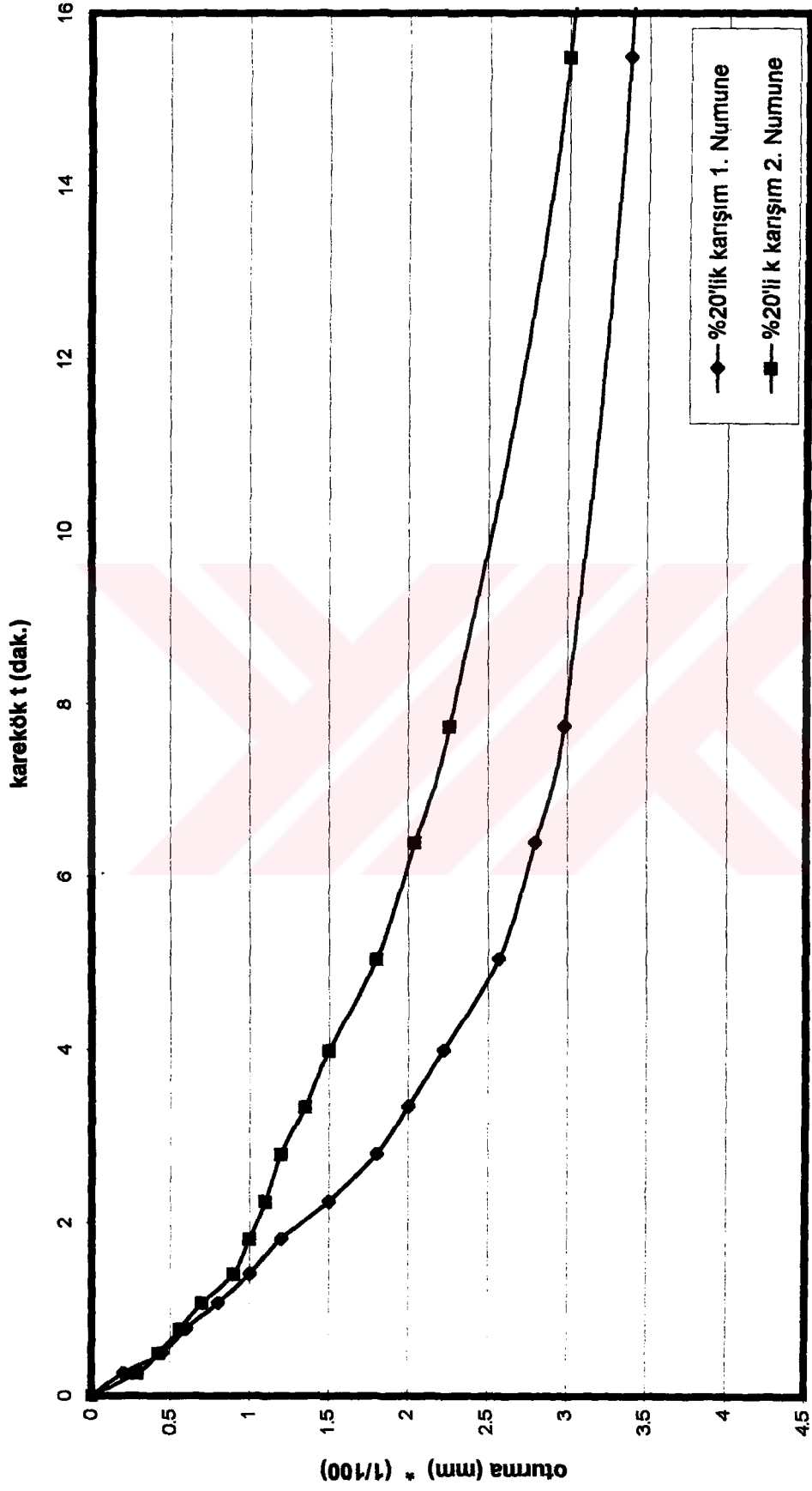
Ek 43. 2000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



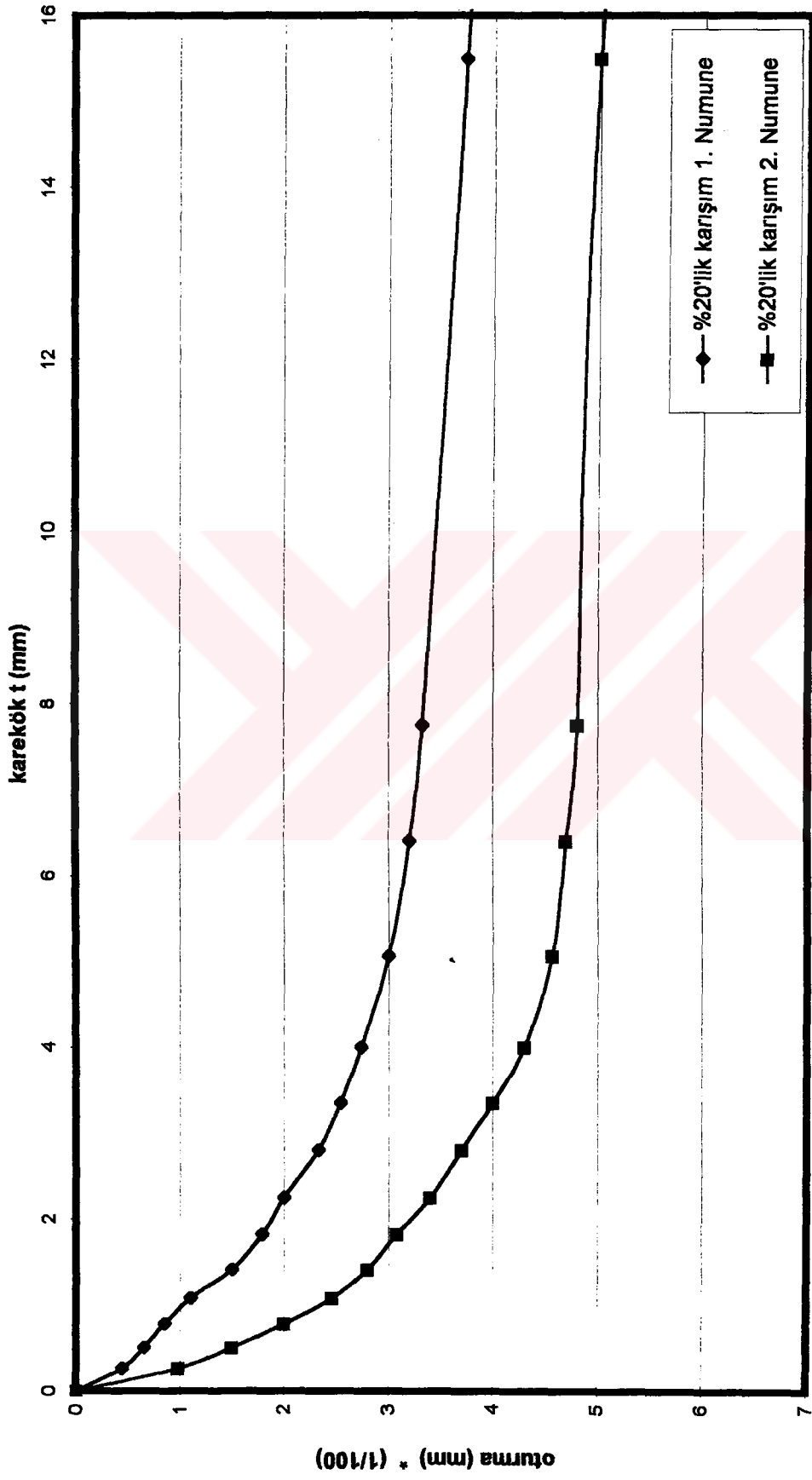
Ek 44. 4000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



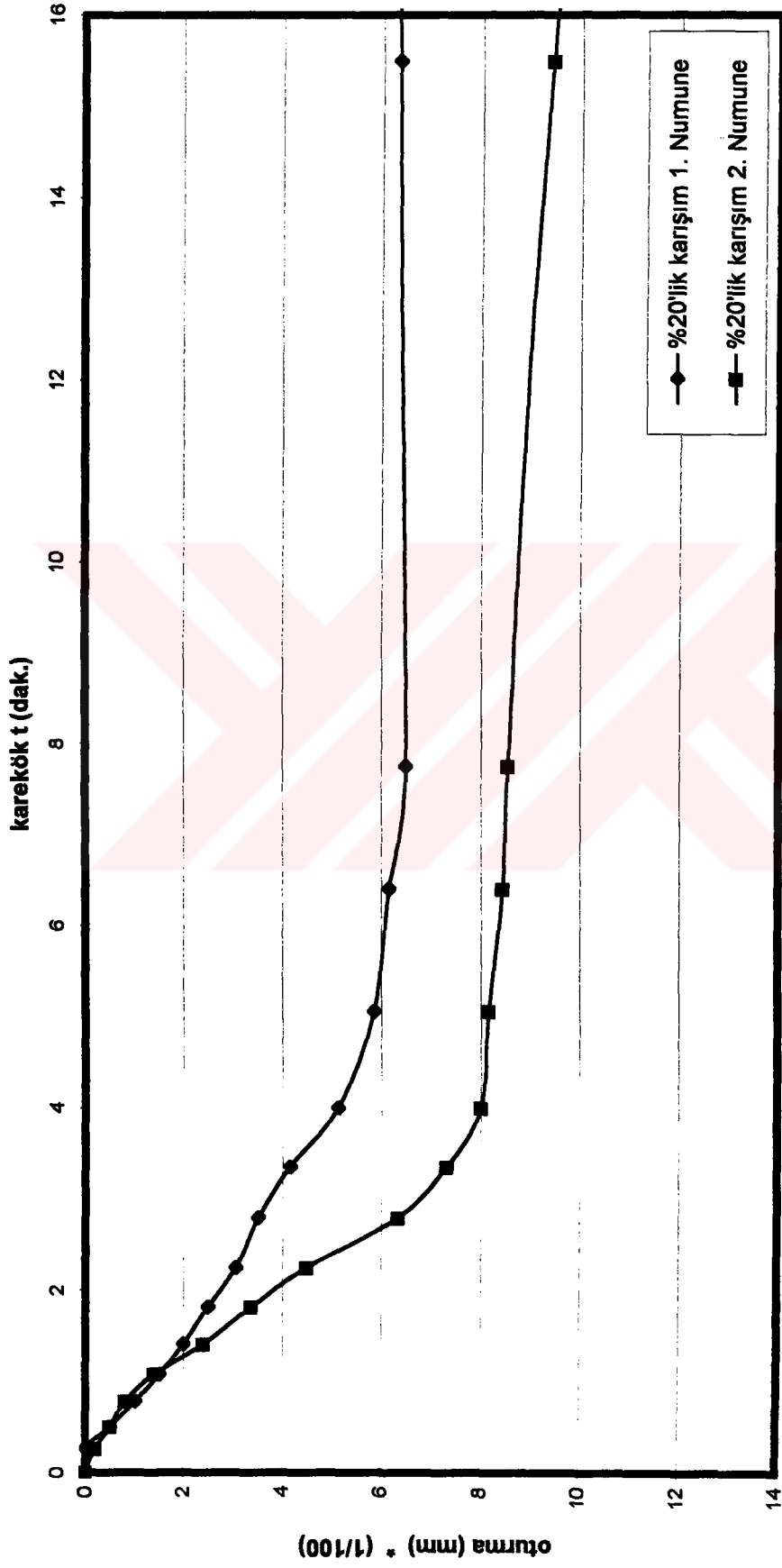
Ek 45. 100 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



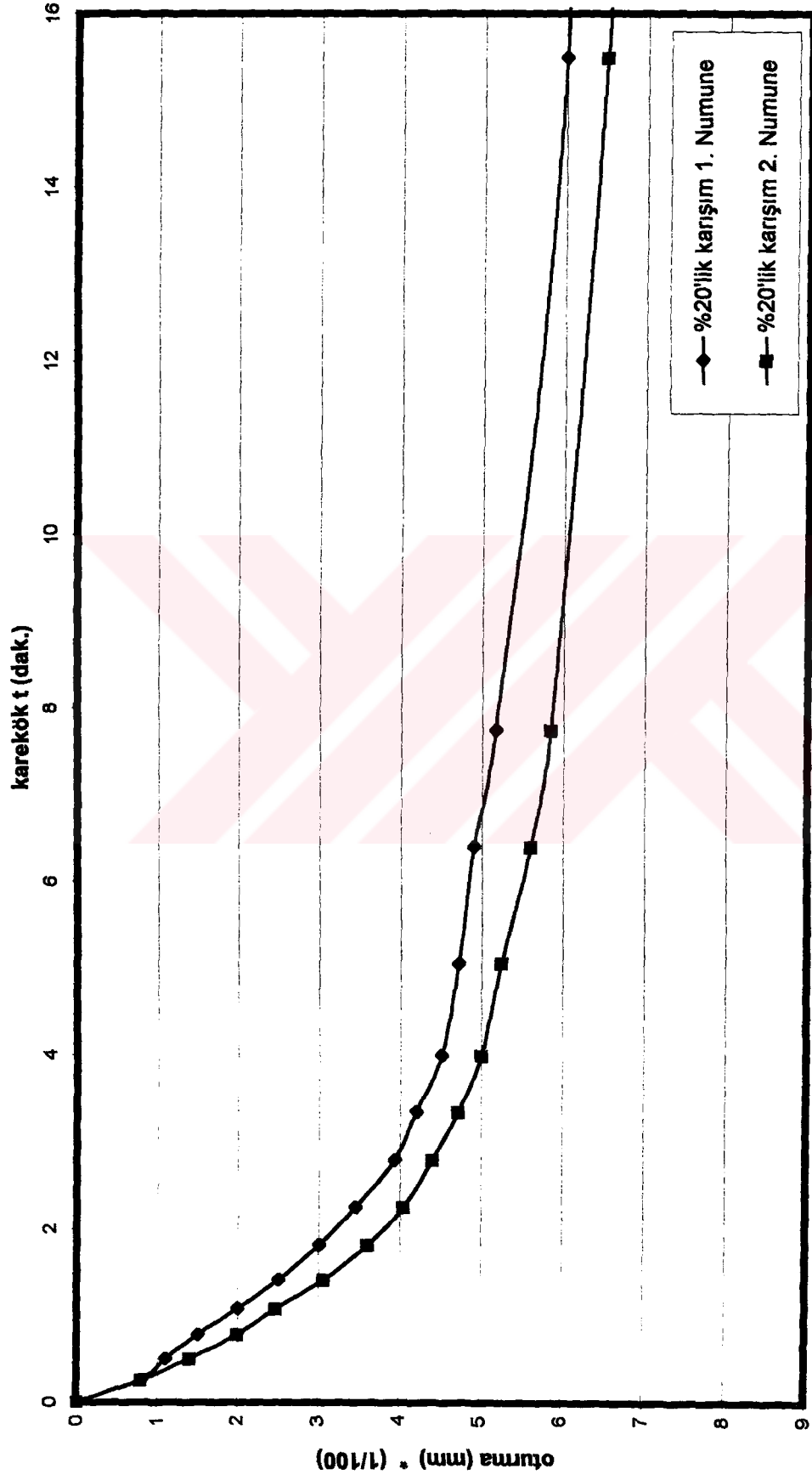
Ek 46. 200 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



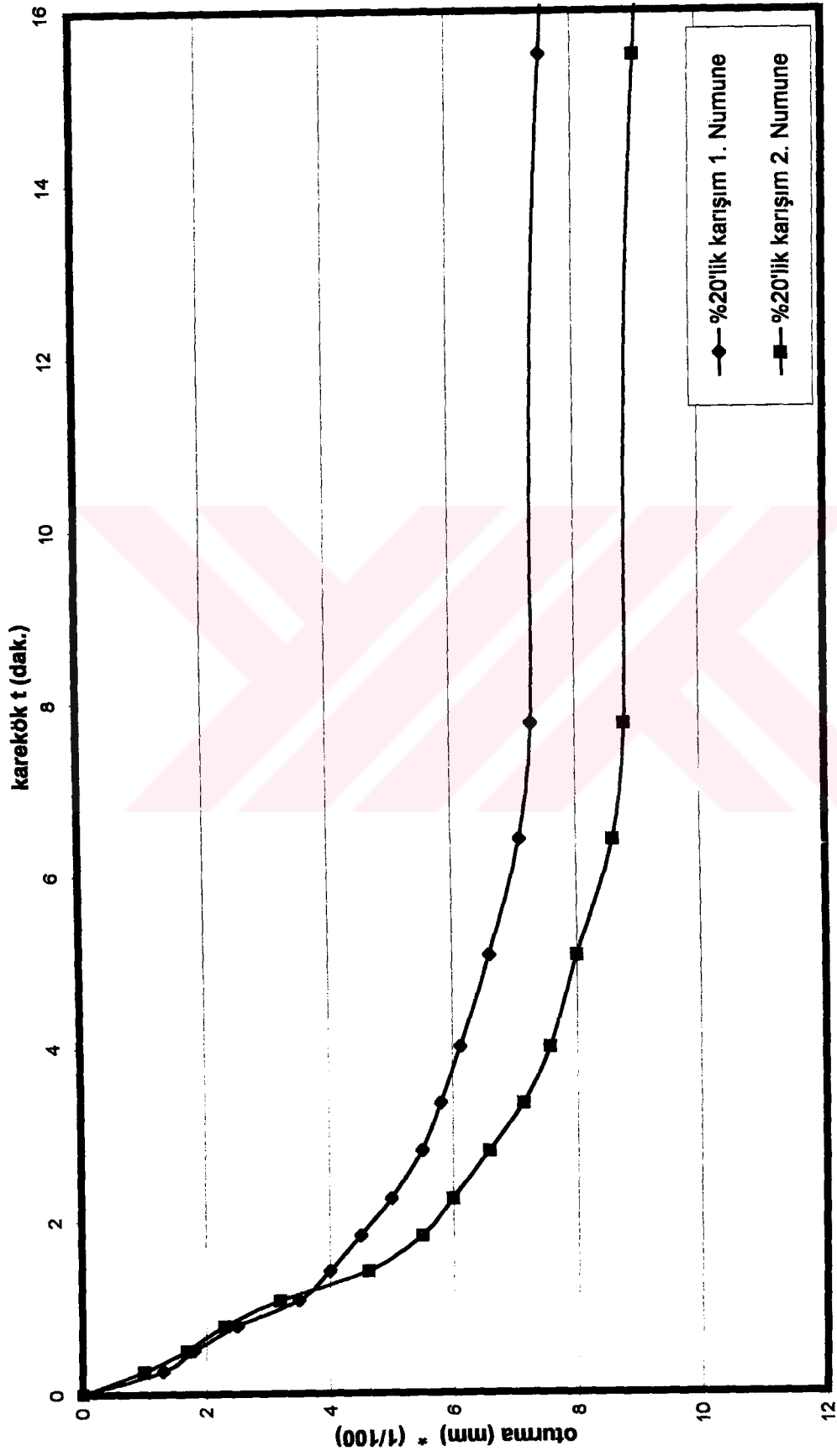
Ek 47. 500 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



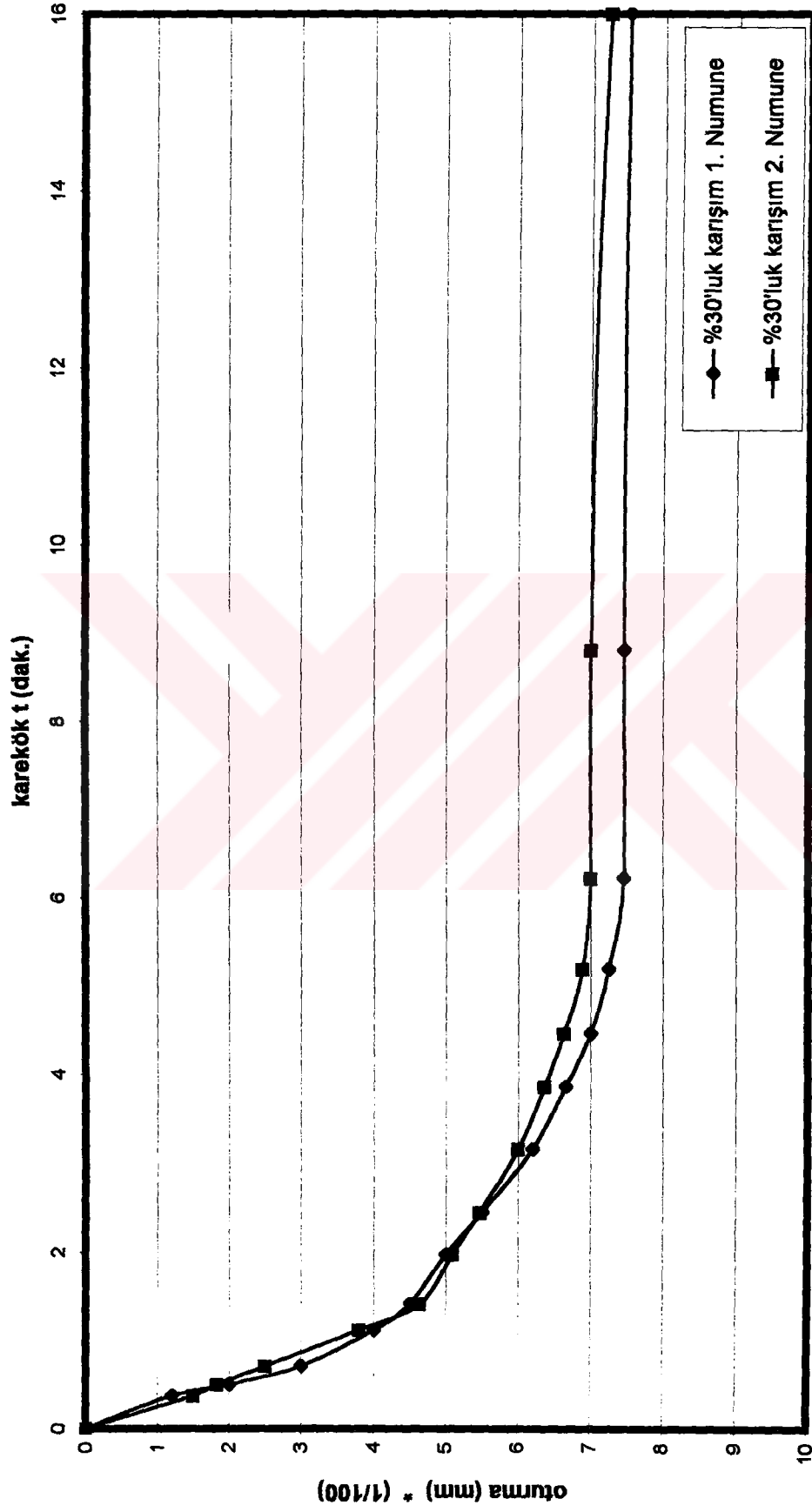
Ek 48. 1000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



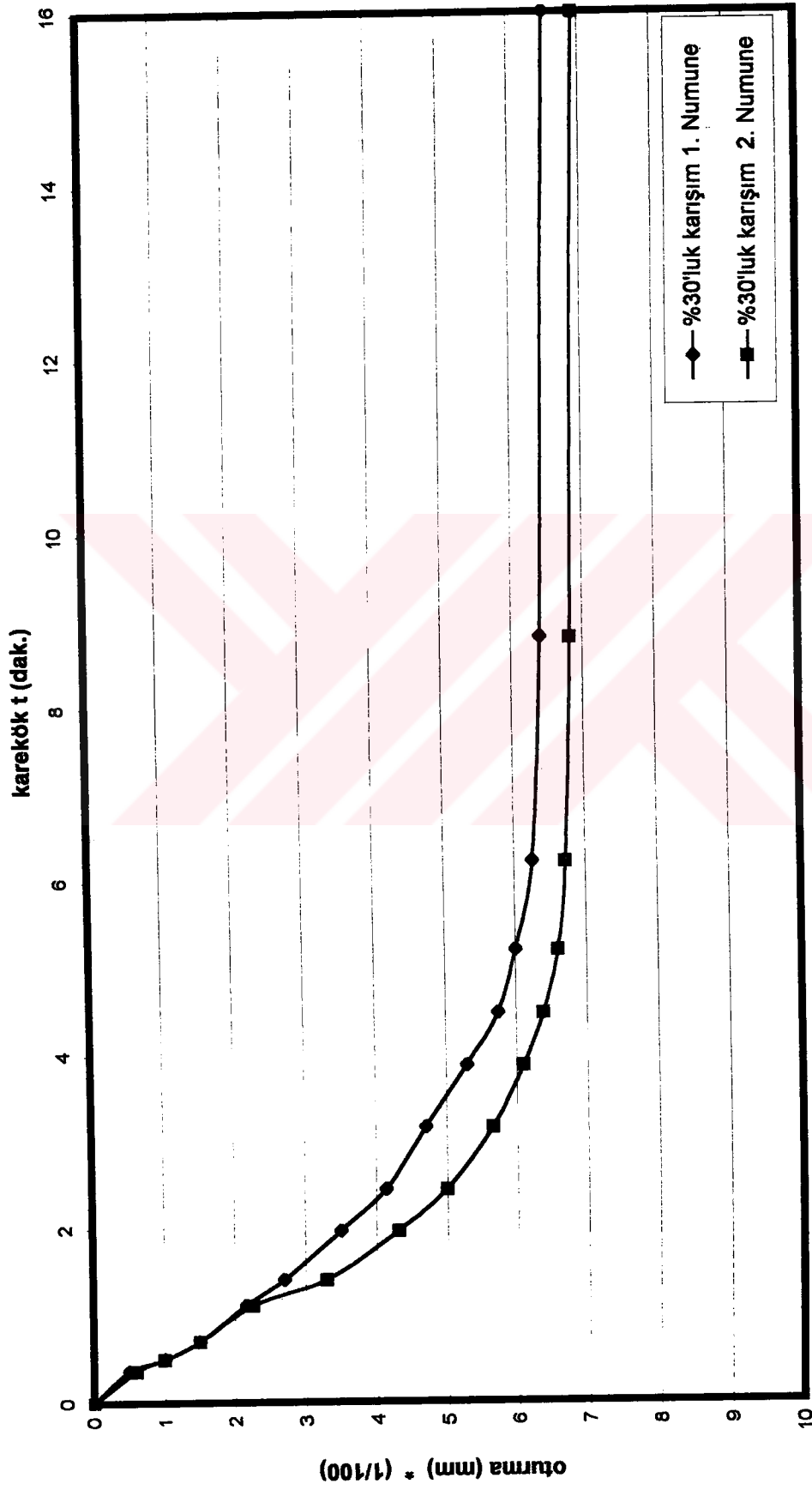
Ek 49. 2000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



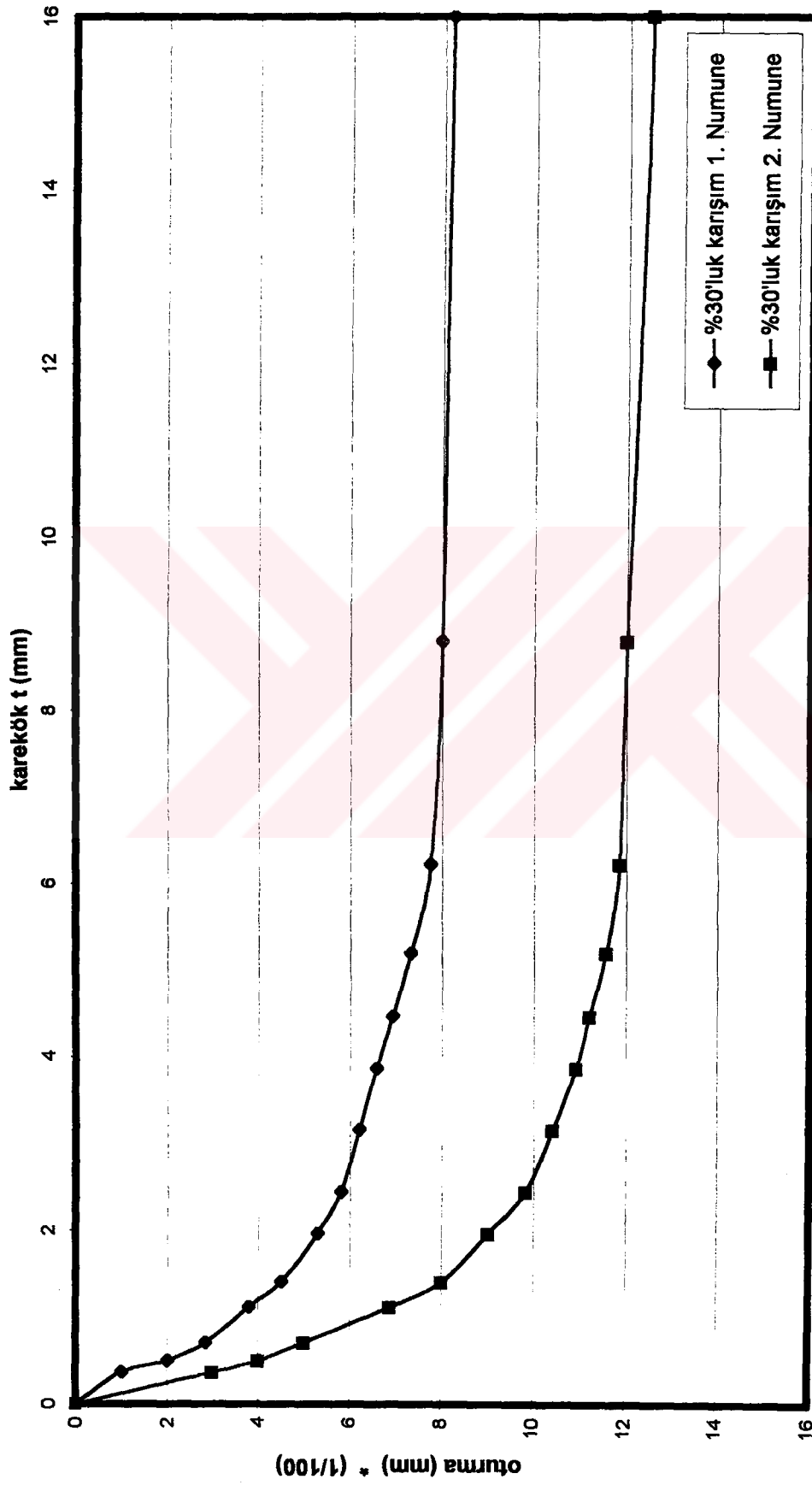
Ek 50. 4000 kN/m² yük altında kareköt t -oturma ilişkisi



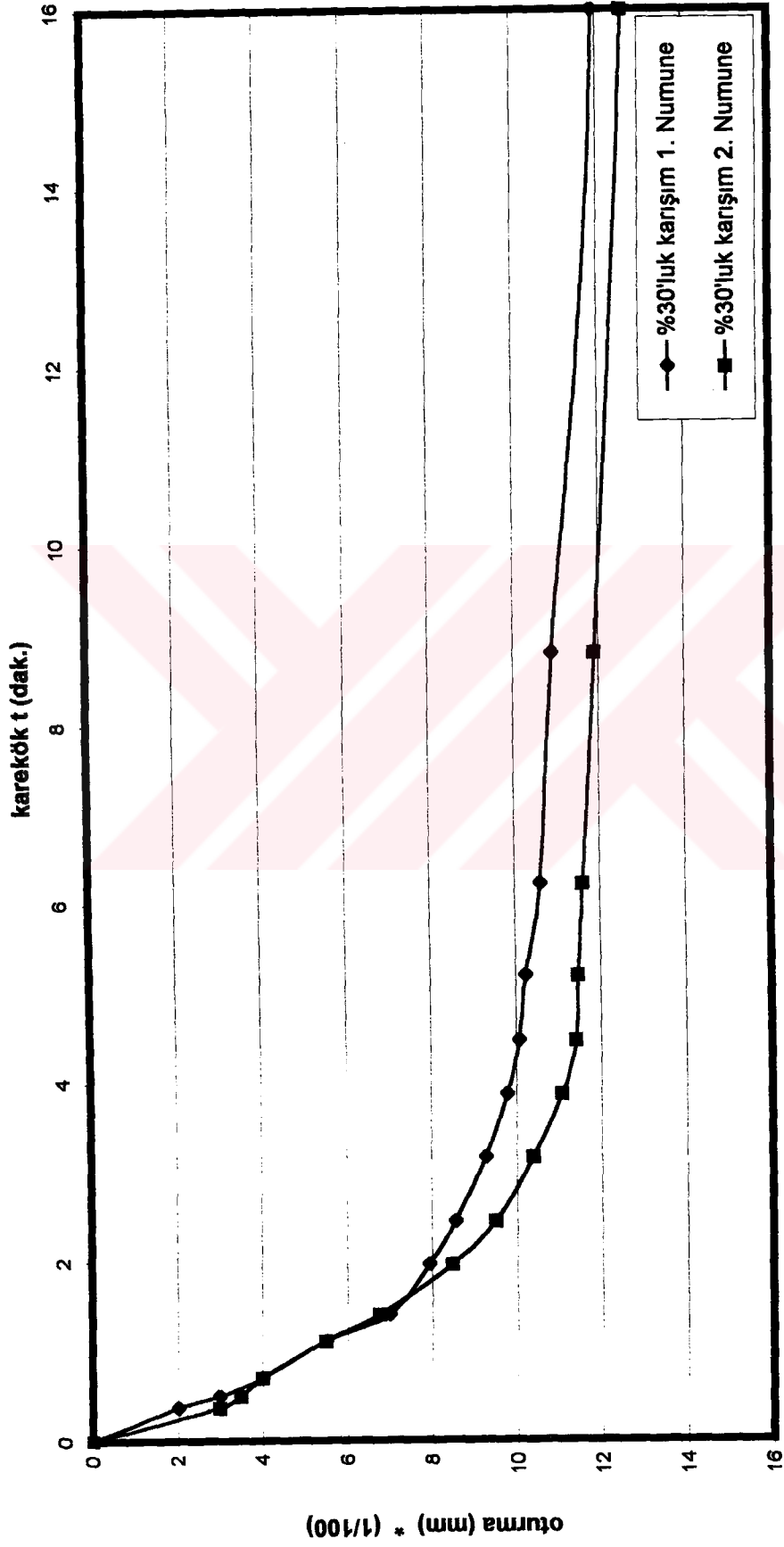
Ek 51. 100 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



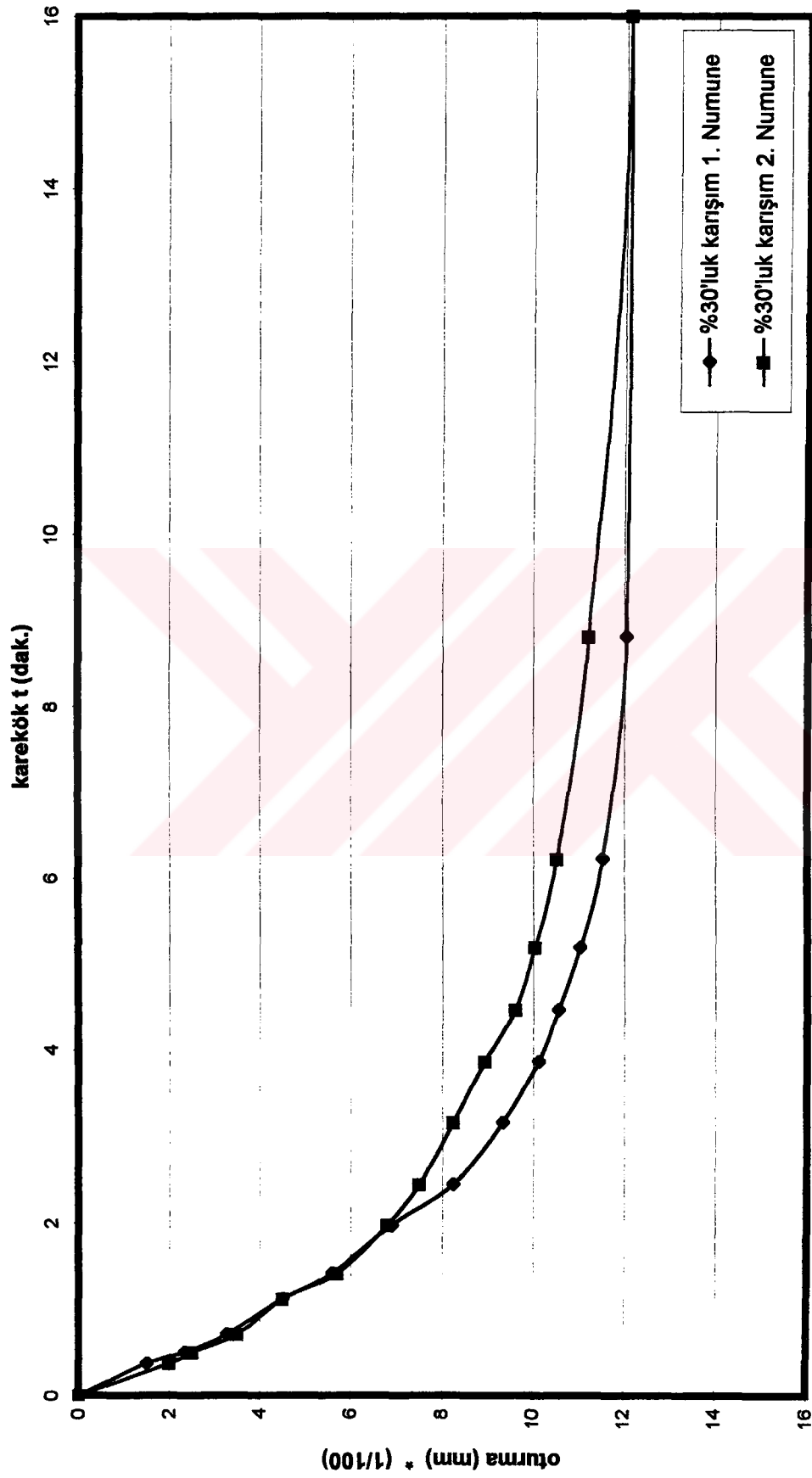
Ek 52. 200 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



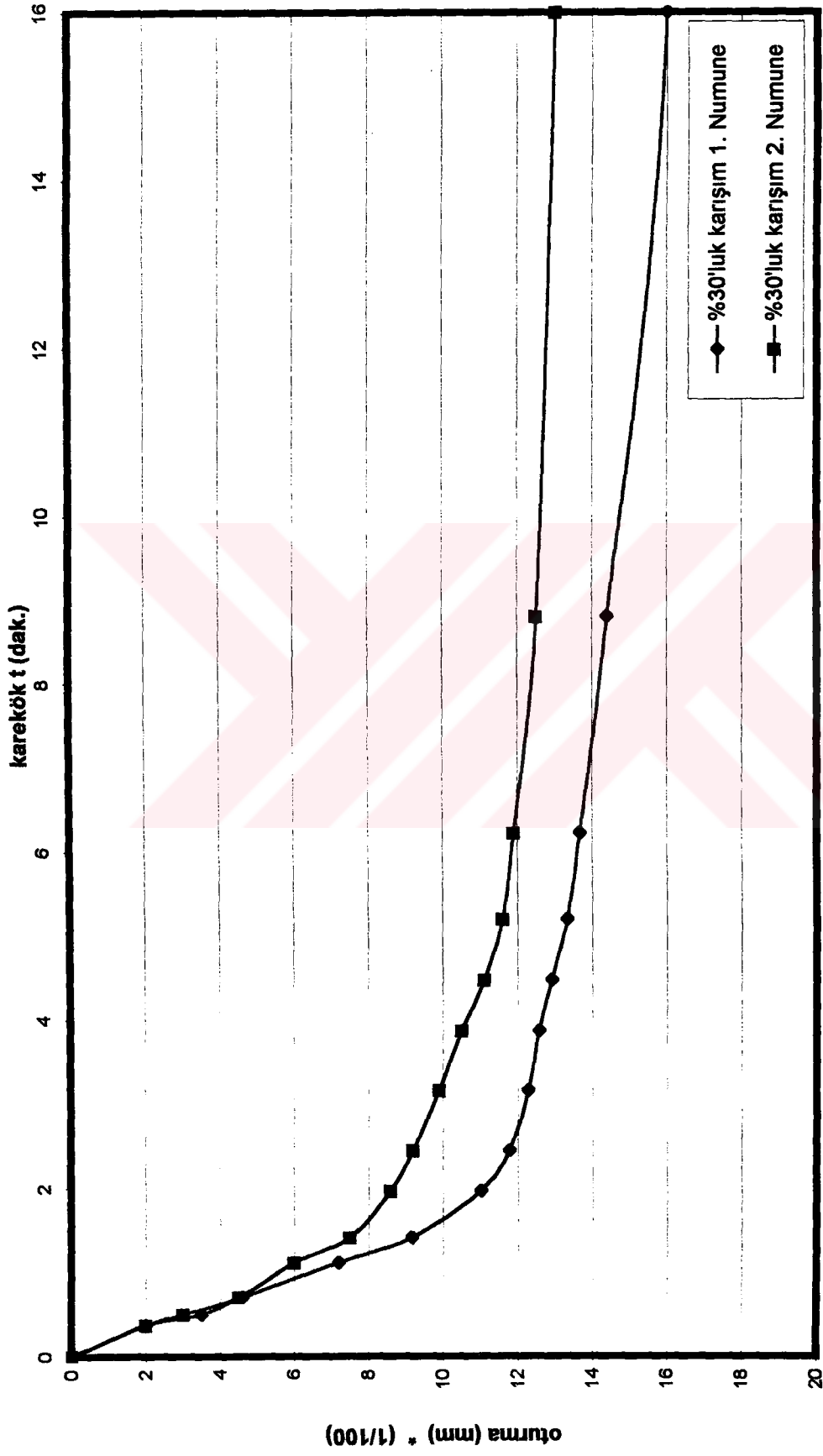
Ek 53. 500 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



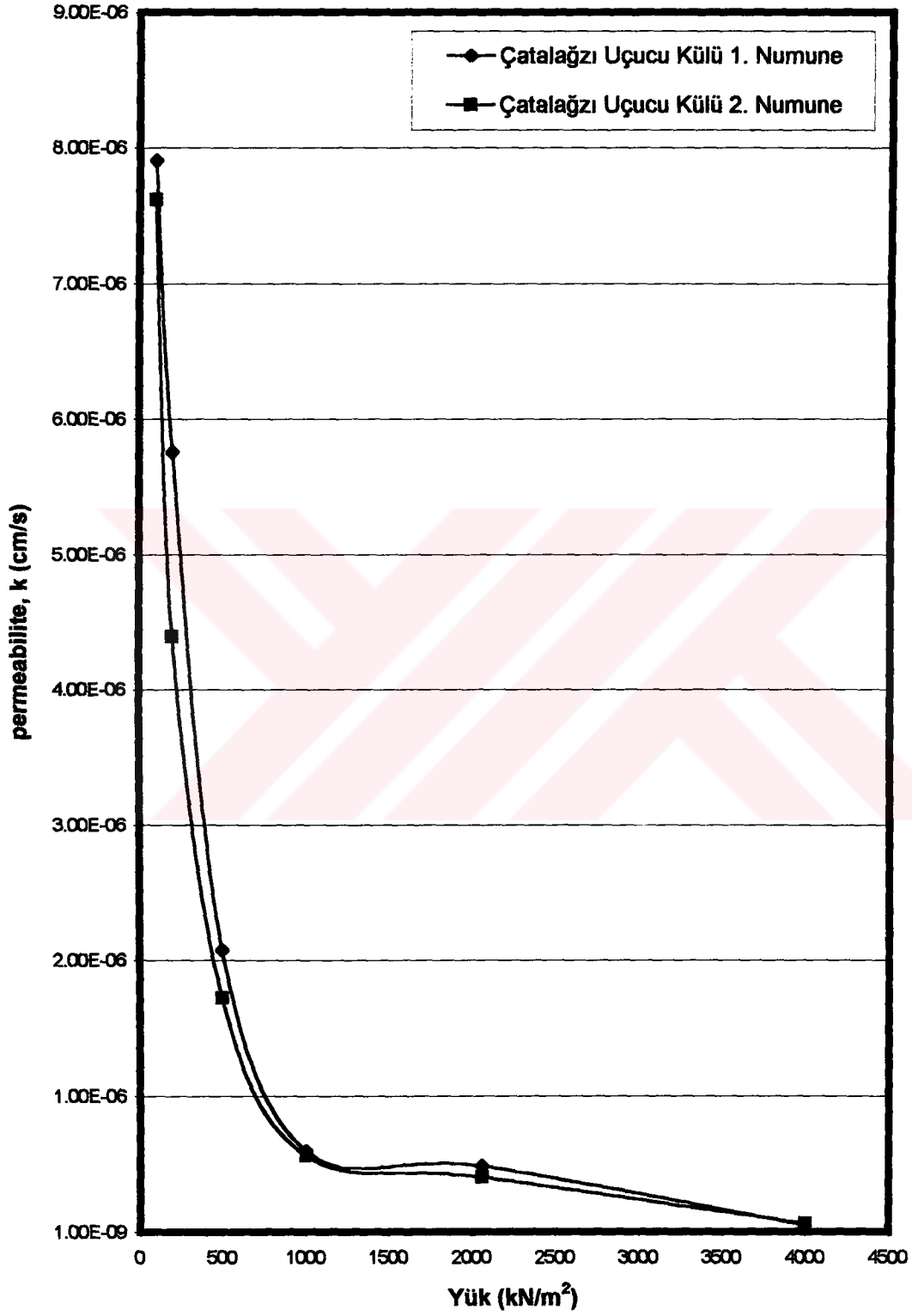
Ek 54. 1000 kN/m² yük altında kareköt t -oturma ilişkisi



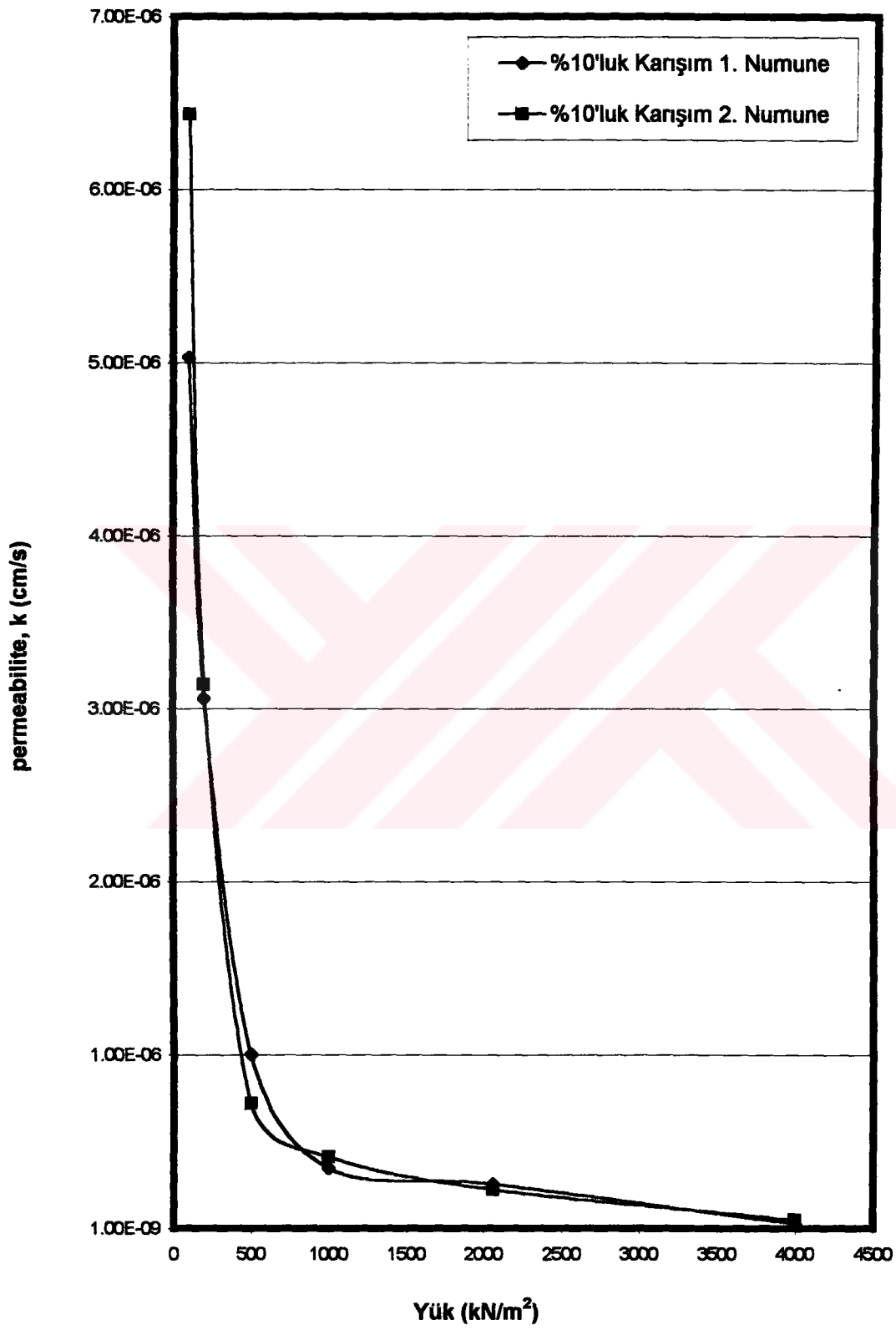
Ek 55. 2000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



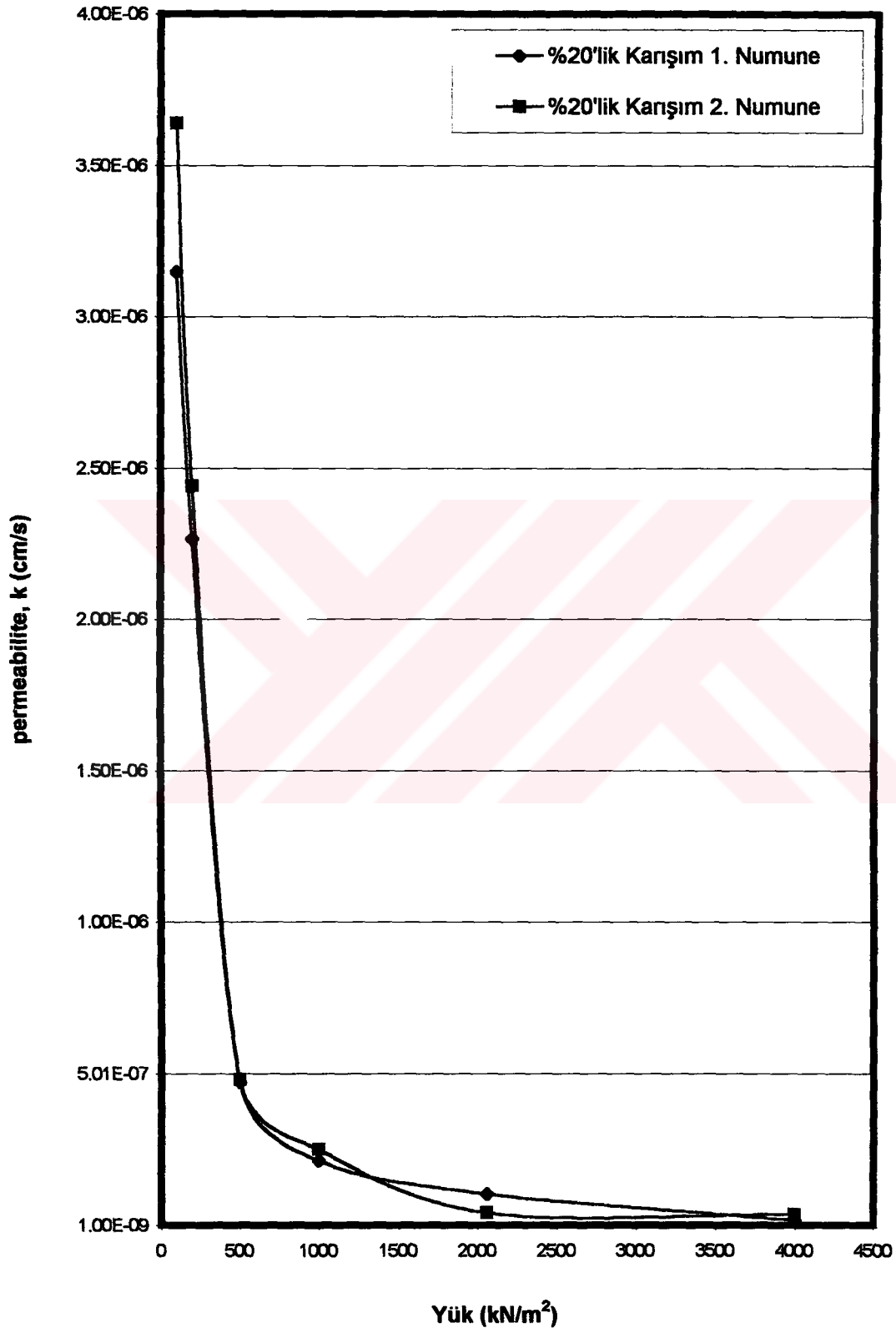
Ek 56. 4000 kN/m² yük altında karekök t -oturma ilişkisi



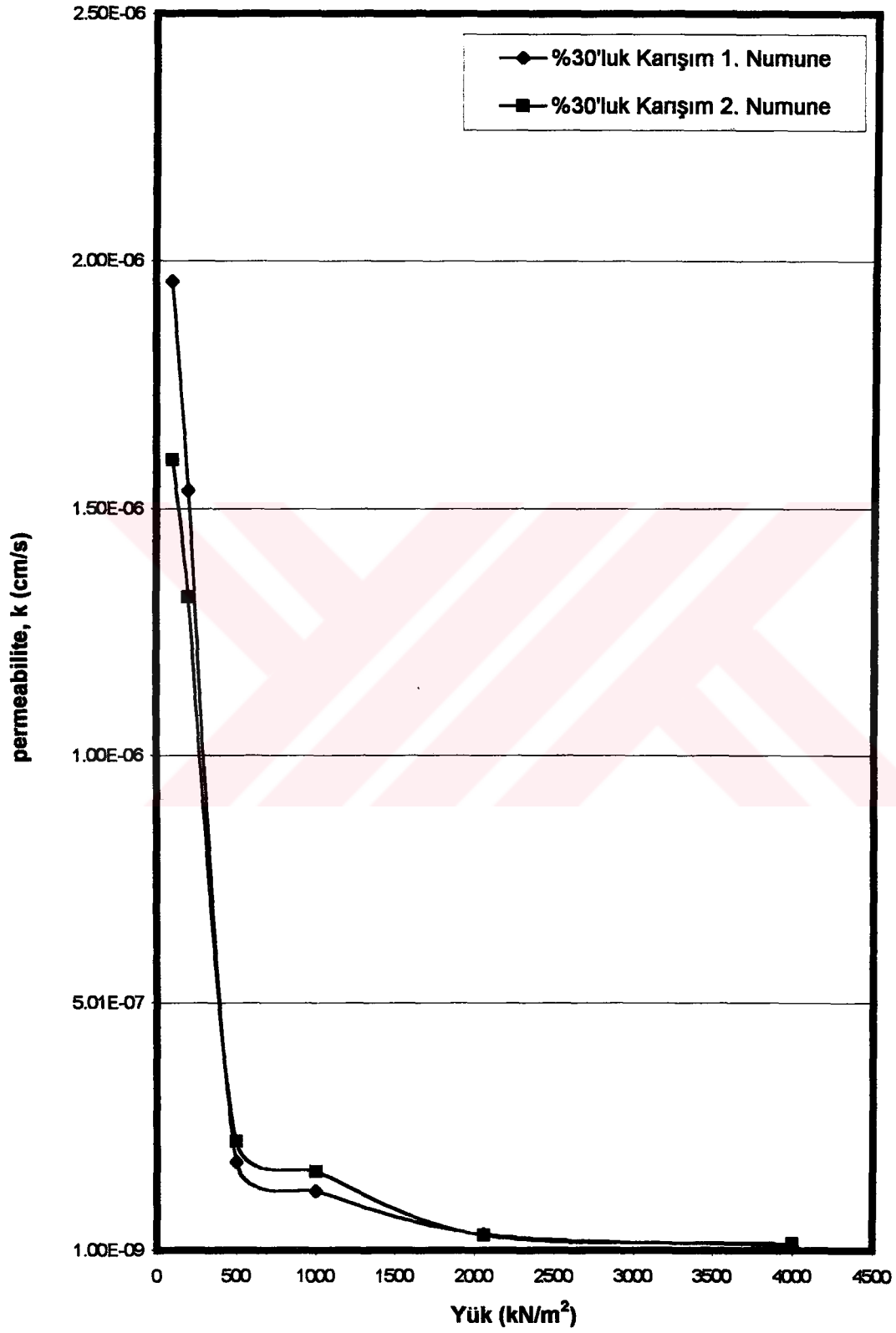
Ek 57. Konsolidasyon yükleri altında Saf Çatalağzı uçucu külünün permeabilite değişimi



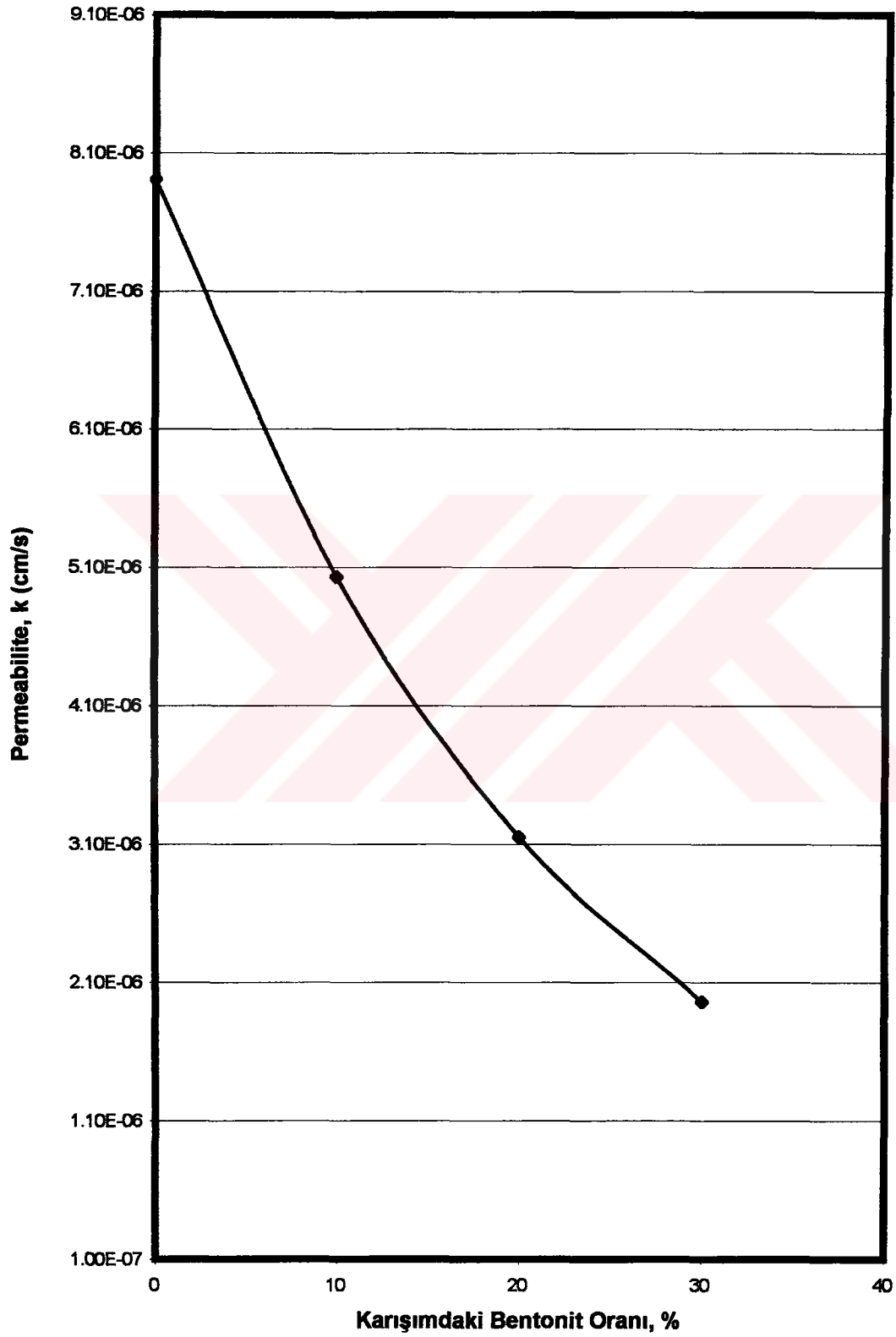
Ek 58. Konsolidasyon yükleri altında %10'luk karışımın permeabilite değişimi



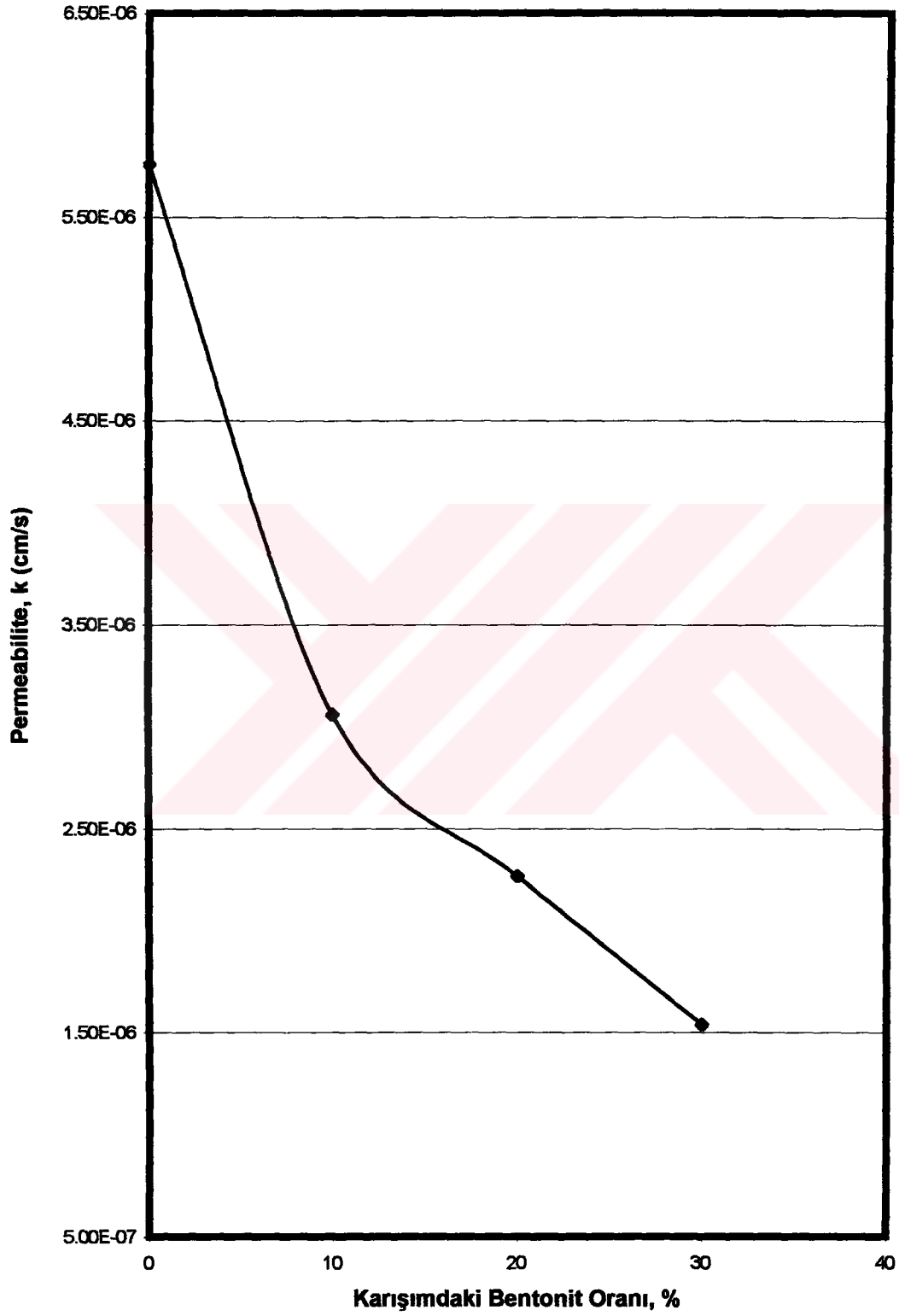
Ek 59. Konsolidasyon yükleri altında %20'lik karışımın permeabilite değişimi



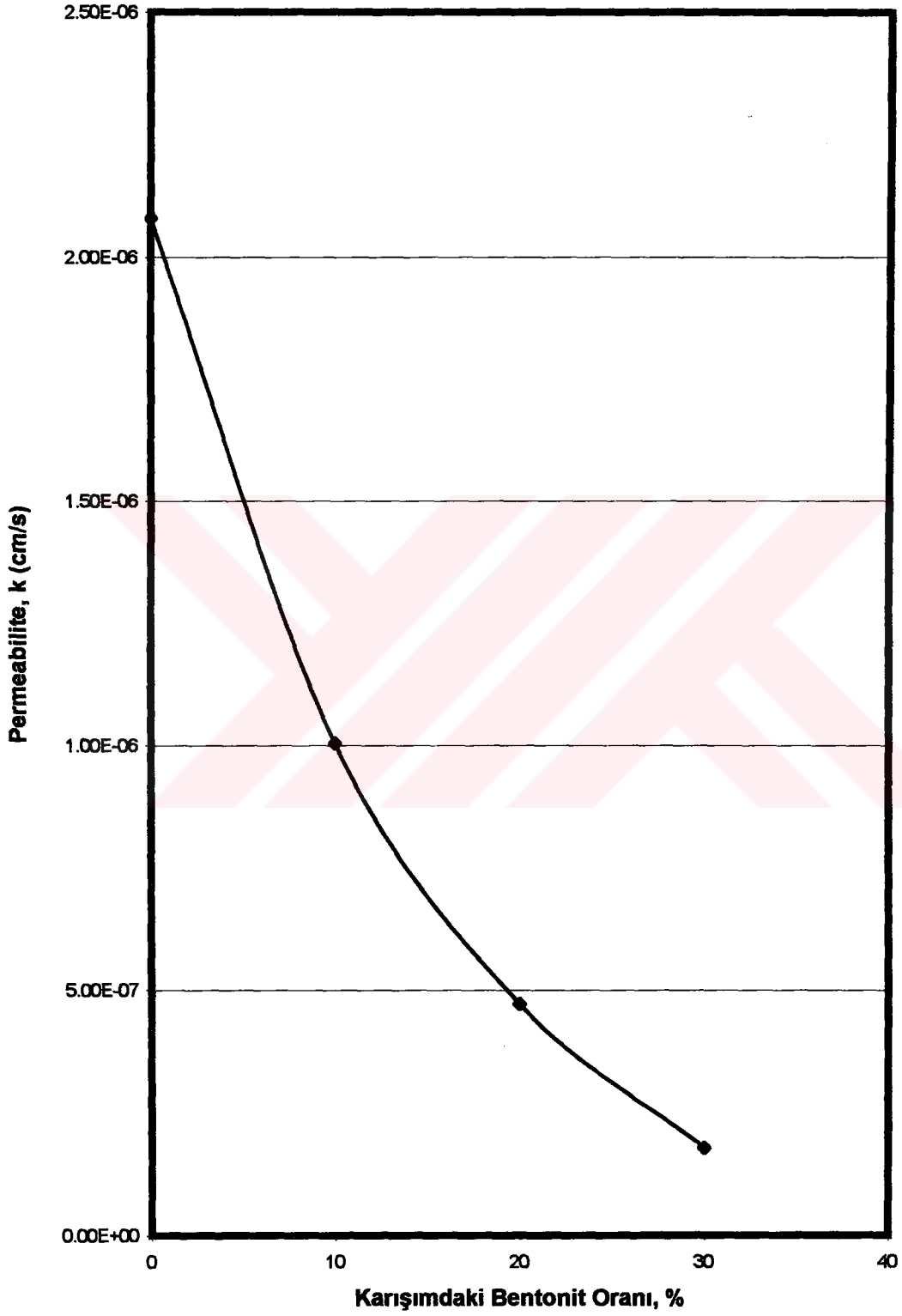
Ek 60. Konsolidasyon yükleri altında %30'luk karışımın permeabilite değişimi



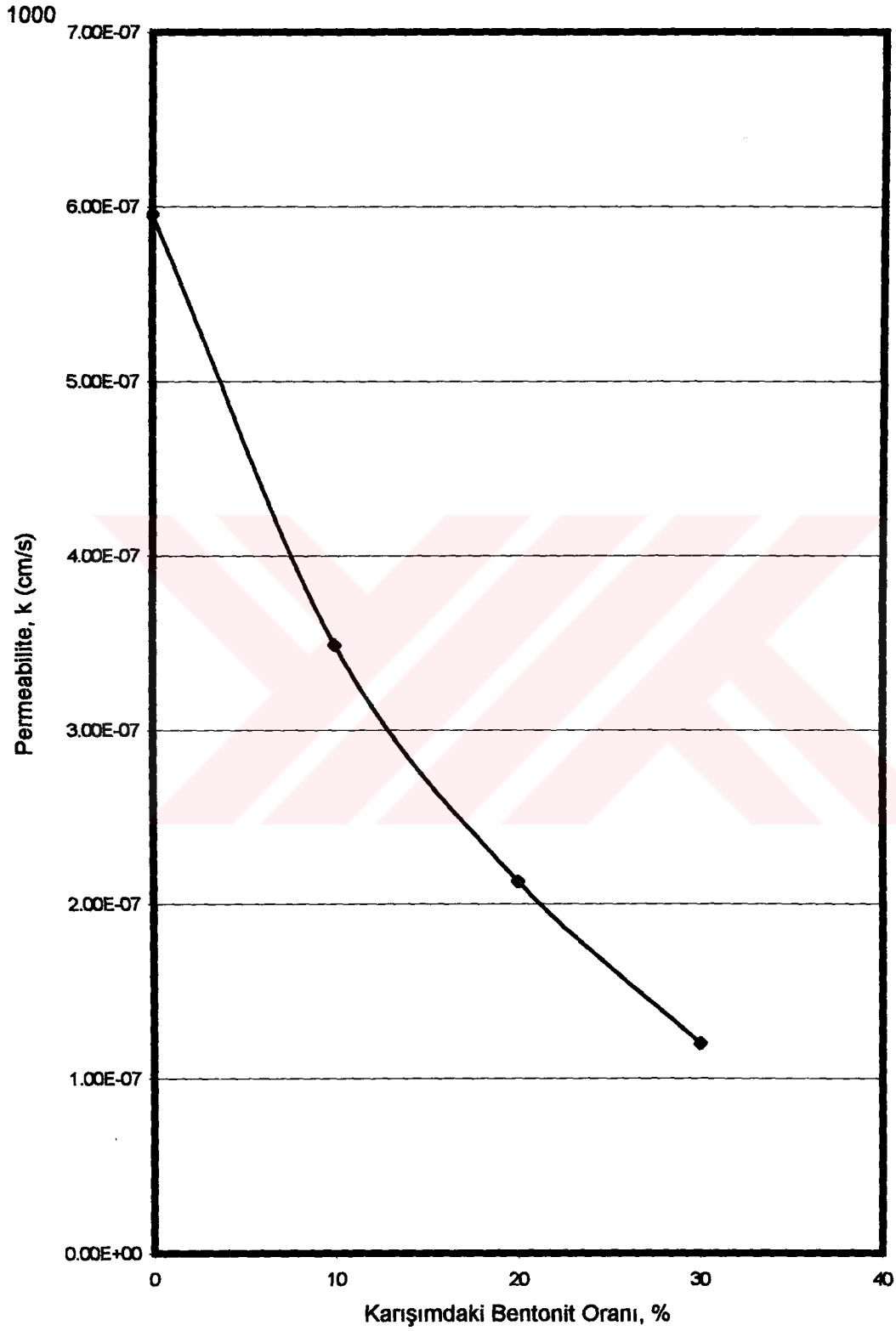
Ek 61. 100 kN/m^2 lik konsolidasyon yükü altında permeabilitenin karışımındaki bentonit oranı ile değişimi



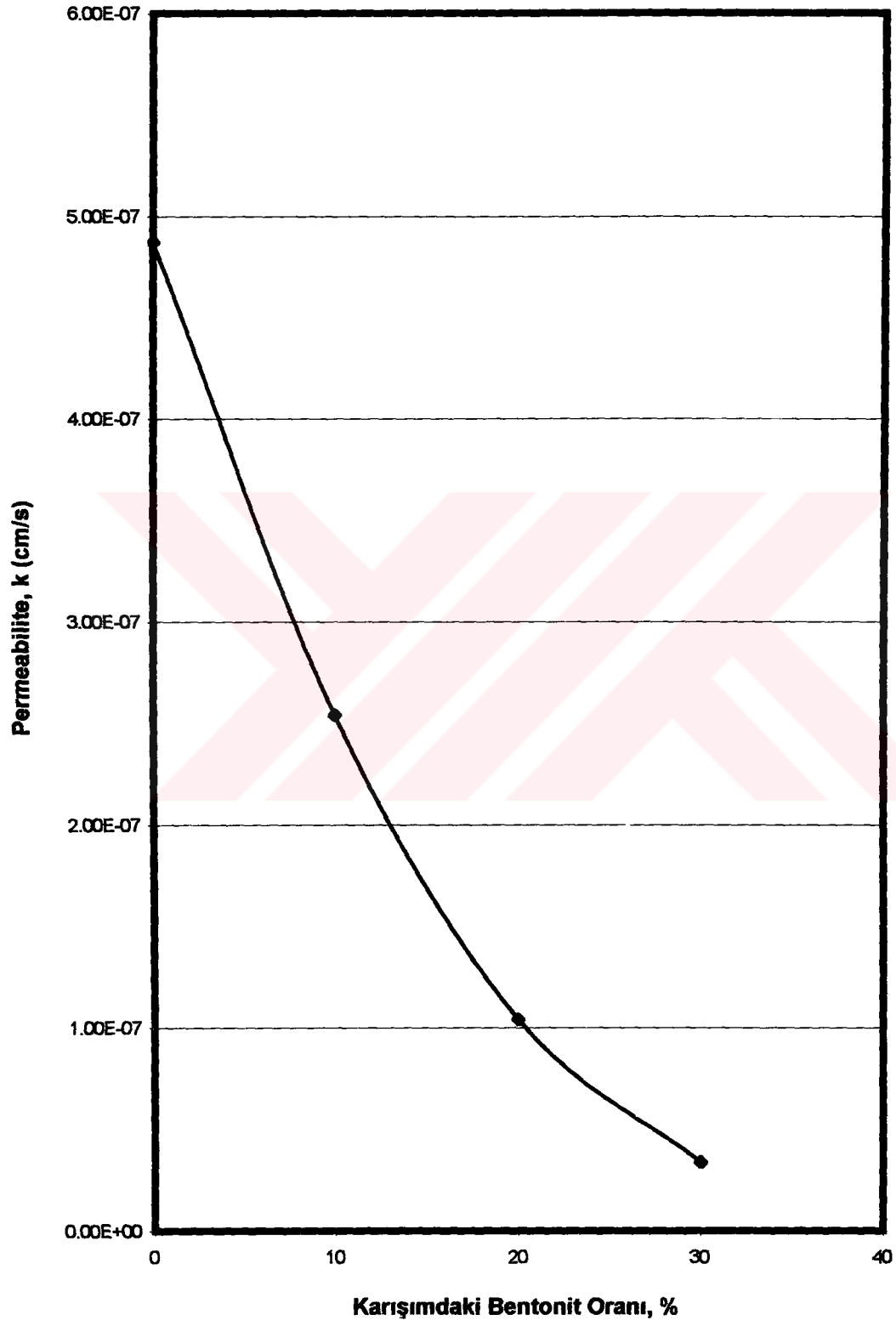
Ek 62. 200 kN/m² lik konsolidasyon yükü altında permeabilitenin karışımındaki bentonit oranı ile değişimi



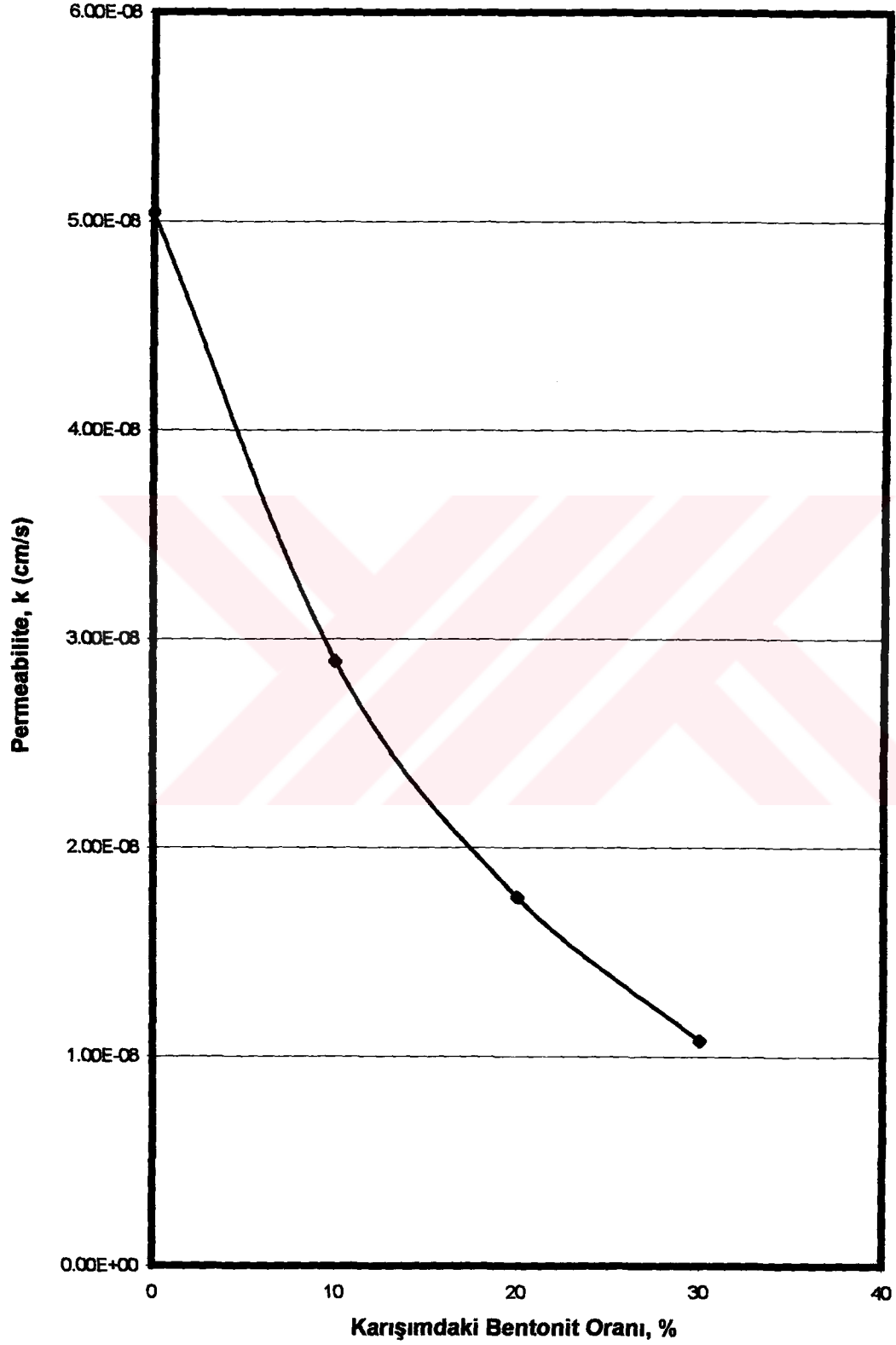
Ek 63. 500 kN/m² lik konsolidasyon yükü altında permeabilitenin karışimdaki bentonit oranı ile değişimi



Ek 64. 1000 kN/m² lik konsolidasyon yükü altında permeabilitenin karışımındaki bentonit oranı ile değişimi



Ek 65. 2000 kN/m² lik konsolidasyon yükü altında permeabilitenin karışımındaki bentonit oranı ile değişimi



Ek 66. 4000 kN/m^2 lik konsolidasyon yükü altında permeabilitenin karışımındaki bentonit oranı ile değişimi

ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında Trabzonda Doğdu. İlk öğrenimini Ankara, Orta öğrenimini Kocaeli, Lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 1996 yılında, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2000 yılında, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Öğrenimini tamamladı.

1996 yılında serbest mühendis olarak çalışmaya başladı. 1997 yılında Haymana Belediyesi'nde, Fen İşleri Müdürü olarak 1 yıl çalıştı. 1998 yılında, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak ataması yapıldı. Halen bu görevde bulunmaktadır.