

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

57590

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

F.C. YÜKSEK LİSANS  
DOKÜMANTASYON  
Zİ

## YUMUŞAK ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

İnş. Müh. Saffet Birhan SÖZEN

F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalının Geoteknik Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Nejat Nuri ÇETİNKAYA

57590

İSTANBUL, 1996

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

SEMBOL LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ	VIII
TEŞEKKÜR	IX
ÖZET	X
SUMMARY	XI
1. GENEL GİRİŞ	
2. ATIKLARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE UYGULANACAK YÖNTEMİN SEÇİLMESİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Organik ve İnorganik Bileşikler	3
3. ATIKLARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN FİZİKSEL YÖNTEMLER	5
3.1. Giriş	5
3.2. Fiziksel Yöntemler	5
3.2.1. Sedimentasyon	6
3.2.2. Filtrasyon	6
3.2.3. Flokülasyon ve koagülasyon	6
3.2.4. Dizayn Parametreleri	7
4. ATIKLARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN KİMYASAL YÖNTEMLER	9
4.1. Giriş	9
4.2. Ph'ın değiştirilmesi	9
4.3. Oksidasyon	10
4.4. Kimyasal Çökeltme	10
4.4.1. Hidroksit Çöktürmesi	11
4.4.2. Sülfat Çöktürmesi	11
4.4.3. Karbonat Çöktürmesi	13
4.4.4. Sodyum-Barohidrit Çöktürmesi	13
4.4.5. Diğer Çökeltme Yöntemleri	13
5. STABİLİZASYON VE KATILAŞTIRMA	14
5.1. Giriş	14
5.2. Katılaştırma İşlemine Etkiyen Fiziksel Faktörler	15
5.2.1. Dane Büyüklüğü ve Şekli	15
5.2.2. Katı Madde Muhtevası	15
5.2.3. Spesifik Ağırlık	15
5.2.4. İslatma	16
5.2.5. Karıştırma	16
5.2.6. Sıcaklık ve Nem	16
5.2.7. Hızlandırıcı ve Geciktiriciler	16
5.3. Katılaştırma İşlemine Etkiyen Kimyasal Faktörler	17
6. KATILAŞTIRMA TÜRLERİ	18
6.1. Giriş	18

6.2. İnorganik Sistemler	18
6.3. Organik Sistemler	18
6.4. Çimento ile Katılaştırma	19
6.5. Uçucu Kül / Çimento Yöntemi	19
6.6. Çimento / Çözünür Silikat Yöntemi	20
6.7. Kireç / Uçucu Kül yöntemi	20
6.8. Özet ve Sonuçlar	21
7. TARAMA İŞLEMLERİNDE KULLANILAN FLOKÜLASYON TEKNİKLERİ	22
7.1. Giriş	22
7.2. Bu Konuda Yapılan Bir Çalışma	22
7.3. Sistem Dizaynı	22
8. SULU ÇAMUR KONSOLİDASYONU ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA	26
8.1. Giriş	26
8.2. Arazilerin Sudan Arındırılması: İn-Situ Konsolidasyon	27
8.3. Sonuçlar	29
8.4. Laboratuvar Deneyleri	30
8.5. Sonuçlar	31
8.6. Matematik Modelleme	32
8.7. Arazi ve Laboratuvar Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	33
8.8. Matematik Modellemede Kısıtlamalar	34
8.9. Genel Sonuçlar	35
9. LABORATUVAR DENEYLERİ	36
9.1. Birinci Kısım Deneyler	36
9.2. İkinci Kısım Deneyler	37
9.3. Üçüncü Kısım Deneyler	38
9.4. Dördüncü Kısım Deneyler	39
9.5. Beşinci Kısım Deneyler	40
10. DENEY SONUÇLARI	41
10.1. Birinci Kısım Deneyler	41
10.2. İkinci Kısım Deneyler	45
10.3. Üçüncü Kısım Deneyler	51
10.3.1. AR-2 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları	51
10.3.2. AR-10 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları	56
10.3.3. AR-19 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları	57
10.4. Dördüncü Kısım Deneyler	61
10.5. Beşinci Kısım Deneyler	72
11. ÖZET VE SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR	75
EKLER	78
ÖZGEÇMİŞ	103

## SEMBOL LİSTESİ

$C_c$	sıkışma indisi
$c_u$	drenajsız kayma mukavemeti
$c_v$	konsolidasyon katsayısı
$d$	dane çapı
$e$	boşluk oranı
$G_s$	özgül yoğunluk
$H_d$	numune yüksekliği
$I_c$	relatif konsistans
$I_L$	likitlik indisi
$I_p$	plastisite indisi
$k$	permeabilite
$m_v$	hacimsel sıkışma katsayısı
$P$	vakum basıncı
$t$	zaman
$w_L$	likit limit
$w_n$	tabii su muhtevası
$w_p$	plastik limit
$\gamma_n$	tabii birim hacim ağırlık
$\sigma'_v$	düşey efektif gerilme

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 4.1. Metal sülfatlarının Ph'a bağlı olarak çözünürlüğü	12
Şekil 4.2. Metal hidroksitlerinin Ph'a bağlı olarak çözünürlüğü	12
Şekil 7.1. Flokülasyon deneyleri için kurulan sistem	23
Şekil 7.2. Temiz su akışı - kirli su akışı	23
Şekil 8.1. Sudan arındırma amaçlı arazi parçalarının yerleşimi	27
Şekil 8.2. Çökeltme kolonu deney düzeneği	30
Şekil 8.3. Drenajlı (KO5) ve drenajsız (KO6) kolonlar için yoğunluk eğrileri	31
Şekil 8.4. Drenajlı (KO5) ve drenajsız (KO6) kolonlar için konsolidasyon eğrileri	32
Şekil 8.5. L <sub>2</sub> arazi parçasında yoğunluk değişimi	34
Şekil 10.1. Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda FeCl <sub>3</sub> kullanarak elde edilen oturma oranları	46
Şekil 10.2. Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda AlSO <sub>4</sub> kullanarak elde edilen oturma oranları	47
Şekil 10.3. Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda CaCl <sub>2</sub> kullanarak elde edilen oturma oranları	48
Şekil 10.4. Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda MgO kullanarak elde edilen oturma oranları	49
Şekil 10.5. Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda MgSO <sub>4</sub> kullanarak elde edilen oturma oranları	50
Şekil 10.6. AR-10 çamur numunesinde değişik oranlarda AlSO <sub>4</sub> kullanarak elde edilen oturma oranlarına değişen Ph'ın etkisi	52
Şekil 10.7. AR-19 çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl <sub>3</sub> kullanarak elde edilen oturma oranlarına değişen Ph'ın etkisi	53
Şekil 10.8. AR-20 çamur numunesinde değişik oranlarda AlSO <sub>4</sub> kullanarak elde edilen oturma oranlarına değişen Ph'ın etkisi	54
Şekil 10.9. Özgül direnç deney düzeneği	55
Şekil 10.10. AR-2 çamur numunesinde çökeltme deneyi ile elde edilen boşluk oranı - düşey efektif gerilme değişimi	58
Şekil 10.11. AR-10 çamur numunesinde çökeltme deneyi ile elde edilen boşluk oranı - düşey efektif gerilme değişimi	59
Şekil 10.12. AR-19 çamur numunesinde çökeltme deneyi ile elde edilen boşluk oranı - düşey efektif gerilme değişimi	60
Şekil 10.13. Hacimsel sıkışma katsayısının konsolidasyon basıncına bağlı olarak değişimi	62
Şekil 10.14. Konsolidasyon katsayısının konsolidasyon basıncına bağlı olarak değişimi	63
Şekil 10.15a AR-2 çamur numunesinde ödometre deneyi ile elde edilen boşluk oranı - düşey efektif gerilme değişimi	64
Şekil 10.15b AR-2 çamur numunesinde maksimum çökelmeyi sağlayan kimyasal maddenin kullanımı ile elde edilen boşluk oranı düşey efektif gerilme değişimi	65

Şekil 10.16a AR-10 çamur numunesinde ödometre deneyi ile elde edilen boşluk oranı - düşey efektif gerilme değişimi	66
Şekil 10.16b AR-10 çamur numunesinde maksimum çökelmeyi sağlayan kimyasal maddenin kullanımı ile elde edilen boşluk oranı düşey efektif gerilme değişimi	67
Şekil 10.17a AR-19 çamur numunesinde ödometre deneyi ile elde edilen boşluk oranı - düşey efektif gerilme değişimi	68
Şekil 10.17b AR-19 çamur numunesinde maksimum çökelmeyi sağlayan kimyasal maddenin kullanımı ile elde edilen boşluk oranı düşey efektif gerilme değişimi	69



## TABLO LİSTESİ

## Sayfa No

Tablo 7.1. %2 Polimer konsantrasyonu %1.6 Katı madde oranı 241dak/gr besleme oranı	24
Tablo 7.2.%3 Polimer konsantrasyonu %1.5 Katı madde oranı 228 dak/gr besleme oranı	25
Tablo 7.3.%1 Polimer konsantrasyonu %1.3 Katı madde oranı 219 dak/gr besleme oranı	25
Tablo 8.1. Arazide doyumma özellikleri	28
Tablo 8.2. Uygulanan drenaj teknikleri	28
Tablo 8.3. Çamur yüksekliğinin değişimi	29
Tablo 10.1. Haliç numunelerinin organik madde oranları ve Ph sayıları	41
Tablo 10.2. Likit limit deneyleri	42
Tablo 10.3. Haliç numuneleri zemin özellikleri	43
Tablo 10.4. AR-2 çamur numunesinde yapılan özgül direnç deney sonuçları	56
Tablo 10.5. AR-10 çamur numunesinde yapılan özgül direnç deney sonuçları	56
Tablo 10.6. AR-19 çamur numunesinde yapılan özgül direnç deney sonuçları	57
Tablo 10.7. Özgül direnç deneylerinden elde edilen nihai numune yükseklikleri	61
Tablo 10.8. Ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlar	70
Tablo 10.9. Katılaştırma deneyinde kullanılan kirecin kimyasal yapısı	72
Tablo 10.10. Katılaştırma deneyinde kullanılan uçucu kül kimyasal yapısı	73
Tablo 10.11.Katılaştırma deneyi sonuçları	73

## TEŞEKKÜR

Bu tezin seçiminde, bütün ara aşamalarında ve sonuçlandırılmasında emeği geçen başta tez danıŐmanım Yrd.Doç.Dr Nejat Nuri ÇETİNKAYA'ya, Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN'a, ArŐ.Gör. Cem AKGÜNER'e, diğer hocalarıma ve laboratuvar görevlilerine teşekkür ederim.





## ÖZET

Haliç'te uzun yıllardır devam eden kirlenme, deniz tabanında bir çamur tabakası oluşturmuştur. Çamur tabakası zamanla kalınlaşmış ve batimetrik seviyenin düşmesine neden olmuştur.

Haliç İslah Projesi kapsamında üniversitemizde bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında Haliç'ten alınan 19 adet örselenmiş çamur numunesi üzerinde yapılan bazı deneylerden bahsedilmektedir. Haliç'ten taranarak alınacak çamurun çökeltme yoluyla suyunun geri boşaltılması böylelikle nakliyatın azaltılması ayrıca depo edilmiş malzemede sızmanın önlenmesi ve mukavemet artışının sağlanması hedeflenmektedir. Bu amaçla çökeltme ve vakum yöntemleriyle sudan arındırma miktarı, ödometre deneyi ile depo edilmiş malzemede beklenebilecek davranışlar, katılaştırma deneyi ile çamur numunedeki mukavemet artışları ölçülmüştür. Çökeltme deneylerinde kullanılan kimyasal maddelerin hangilerinin hangi oranlarda en iyi sonucu verdiği, katılaştırma için kullanılabilir maddeler ve bunların karışımları üzerine öneriler getirilmiştir.

Çeşitli kaynaklardan elde edilen konuyla ilgili bilgilerle daha önce yapılan çalışmalar derlenmiş ve teze eklenmiştir.

## SUMMARY

The pollution in the Golden Horn, which has continued for years, has built up a mud deposition at the bottom of the sea. The mud is getting thicker year by year and the bathymetrical level is dropping to a critical level.

In this study some laboratory tests were conducted on disturbed mud samples provided from Golden Horn. The main aims are:

- 1) By the help of flocculation and vacuum experiments to maintain the dewatering of dredged material.
- 2) Stabilization and solidification tests to prevent the leaching characteristics and increase the shear strength of it.

Some advices were given about inorganic chemicals used in flocculation and stabilization/solidification tests; which one to use in which proportion.

Literature review was done and studies made by other researchers were put in the thesis.



## BÖLÜM 1

### GENEL GİRİŞ

İstanbul'un doğal limanı Haliç son yüzyılda büyük bir kirlenmeye maruz kalmıştır. 60'lı yıllardan sonra yerli ve yabancı birçok bilimadamı oluşan kirlenmenin boyutlarını araştırmış ve çözüm önerilerinde bulunmuşlardır.

Arıtmasız kanalizasyon deşarjı, sanayi artıkları, çöpler, inşaat molozları, Haliç'e dökülen derelerin getirdiği süprüntü maddelerinin Haliç'in kirlenmesinde ve büyük bir dipsel birikimin oluşmasında önemli etkileri olmuştur. Su içindeki canlı hayatı durmuş, ulaşım bile güçlükle yapılagelmiştir. Ayrıca oluşan gazların çevreye verdiği rahatsızlık had safhaya ulaşmıştır. Haliç'in temizlenmesi uzun süredir İstanbul'un gündem konularından biridir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi bu amaçla bir islah projesi hazırlamaya karar vermiştir. Valide Sultan Köprüsünün mansap tarafı su derinliği en az 5 m olacak şekilde tarama yapılarak taban çamurunun uzaklaştırılması düşünülmektedir. Ancak tarama yöntemi kıyılarda zemin hareketlerine yol açmamalı ve ekonomiyi sağlamalıdır. Bunun için Haliç taban çamurunun geoteknik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Konumu ve derinlikleri ünivesitemizce belirlenmiş noktalarda STFA Temel Araştırma ve Sondaj Ltd. Şti. tarafından zemin etüt sondajları açılmış, sondajlardan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınarak laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvar deneyleriyle karşılaştırmak üzere bölgede SPT, CPT, Veyn gibi arazi deneyleri yapılmıştır. Taranacak taban çamurunun uzaklaştırılması için kullanılacak alternatifin seçiminde çamurun hacmi ve nitelikleri, yöntemin uygulanabilirliği, ve ekonomik olması yanında projenin amaçları ile uyumluluğu önemli olmaktadır. Tarama sonucu alınan Haliç çamurunun ne yapılabilineceğine dair getirilen öneriler şunlardır:

- 1) Denize boşaltma (Boğaz, Marmara Denizi, Karadeniz) Yüzeyden ya da tabana gömme.
- 2) Karaya boşaltma (Kemerburgaz' da eski kömür ocağı çukurlarında depolama)
- 3) Park ve rekreasyon alanları oluşturma.
- 4) Kıyı şeridi stabilizasyonu ve erozyondan koruma.

5) İnşaat malzemesi olarak kullanım.

6) Dolgu malzemesi olarak kullanım.

7) Çöp depolama sahalarının islahı.

Taranacak çamurun karada depolanmasına karar verilirse iki seçenekle karşılaşılmaktadır: Sulu çamurun bir pipe -line sistemiyle depolama alanına iletilmesi veya malzemenin hacmini azaltmak için bazı fiziksel -kimyasal işlemlerle suyunun alınması ve kamyonlarla depolama sahasına taşınması. Bu tez çalışmasında bu fiziksel-kimyasal işlemlerin neler olabileceği araştırılmış ve bunlardan bazıları deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.



## BÖLÜM 2

# ATIKLARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE UYGULANACAK YÖNTEMİN SEÇİLMESİ

### 2.1 Giriş

Atıkların iyileştirilmesinde uygulanacak yöntemin seçilmesi öncelikle atığın depo edilip edilmemesine ya da geri kazanımın amaçlanıp amaçlanmamasına bağlıdır. Diğer faktörler şöyle sıralanabilir:

- 1) Atığın kimyasal yapısı (Organik, inorganik, karışım)
- 2) Atığın fiziksel yapısı (Katı, sıvı, gaz)
- 3) Bulunduğu yerde veya farklı bir yerde depolama.
- 4) Yasal sınırlar

Atıkların iyileştirilmesinde uygulanan yöntemler ise şunlardır:

- 1) Fiziksel yöntemler
- 2) Kimyasal yöntemler
- 3) Termal yöntemler
- 4) Biyolojik yöntemler

### 2.2 Organik ve İnorganik Bileşikler

Atıkların sınıflandırılmasında adı geçen organik ve inorganik bileşikler şöyle ifade edilebilir:

**Organik bileşikler :** Bir ya da daha çok karbon atomunun başta hidrojen, oksijen veya azot olmak üzere öbür elementlerin atomlarına bağlanmasıyla oluşan kimyasal bileşiklerin sınıfı.

**İnorganik bileşikler:** Karbon dışındaki kimyasal elementlerin ikisinin ya da daha fazlasının belirli oranda birleşmesiyle oluşan bileşikler.

Organik bileşikler havada yanabilir. Genellikle daha düşük kaynama ve donma noktaları vardır. Suda daha az çözünürler ve çürüyüp parçalanma özellikleri

vardır.Reaksiyonlar molekülerdir. Moleküler ağırlıkları çok fazla olabilir. Bu da çözünürlük, uçuculuk gibi özelliklerine etki eder. Karbon içeren bazı bileşikler bu sınıfta yer almaz, (karbürler, karbonatlar, siyanürler gibi.)

İnorganik bileşikler metaller ve ametaller olarak ikiye ayrılabilir. Metaller oksidasyon indirgenmesi sırasında elektronlarını verebilirken ametaller veremezler. Ametaller oksijen, florin veya sülfür içerirler. Metaller oksijen içeren anyonlarla (sülfat ve nitrat gibi) tuz oluştururlar. Ametaller asidik karakterli oksitler oluştururlar ve bazılarla reaksiyona girerler. Bazı metaller ağır metaller olarak bilinirler. Bunlar çözünmez sülfatlardır. Ağır metallerin bu özelliği atıkların iyileştirilmesinde kullanılır. Ağır metal konsantrasyonları çok düşük seviyelere indirilebilir.

Atıkların iyileştirilmesinde fizibilite analizi de önemlidir. Fizibilite analizi şöyle tarif edilebilir:

- 1) Teknik (yapılabilirlik)
- 2) Ekonomik (kaç liraya mal olacak ?)

Teknik inceleme güvenlik, ürün kalitesi, gerekli teçhizatın elde edilebilirliğini kapsar.

Ekonomik inceleme, sermaye, geri ödeme süresi, tahmini kârı kapsar. Kârlılık atığın miktarının azaltılması yöntemleriyle ve geri ödeme süresinin kısa tutulmasıyla arttırılabilir (Freeman, 1989).

## BÖLÜM 3

### ATIKLARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN FİZİKSEL YÖNTEMLER

#### 3.1 Giriş

Fiziksel yöntemler kendi başlarına kullanıldıkları gibi diğer yöntemlerle birlikte ön-iyileştirme ya da son-iyileştirme olarak da kullanılırlar. Örneğin atık sulardan metallerin kimyasal yöntemlerle uzaklaştırılması işleminden önce fiziksel yöntemler ön-iyileştirme olarak kullanılırlar. Fiziksel yöntemler esas olarak bir ayırıştırma işlemidir ve uygulanmaları sonucu kirletici bileşiklerin ayrışması ve/veya konsantrasyonunun azalmasıyla, iyileştirmenin sonraki aşamalarında muameleye tabi tutulacak kısım da azaltılmış olur.

Tehlikeli / Zehirli atıkların karakterize edilmesi ve ona göre uygulanacak yöntemin seçilmesi burada da çok önemlidir. Organik madde, zehirli anyonlar ağır metaller veya bunların birleşimlerini içeren atıklar daha farklı muamele edilmelidir. Atığın sıvı, yağlı-sıvı, sulu-çamur, katı şeklinde karakterize edilmesi, kimyasal yönden karakterize etme ve son olarak da pilot uygulama ya da bire-bir uygulamayla kullanılacak yöntemi belirleme önemlidir. Bire-bir uygulama daha çok atıkdaki bileşiklerin ve oluşacak yan ürünlerin tam olarak bilinmemesi durumunda tavsiye edilir.

Fiziksel yöntemler ayrıca zehirli, organik, inorganik sıvı atıkların biyolojik ve kimyasal yöntemlerle iyileştirilmesi sonucu geride kalan kısımdan metal hidroksitlerin ve biyolojik katıların uzaklaştırılması için kullanılırlar. Tekrar kullanım ya da deşarj için gerekli olan kirleticilerden arındırılmış sıvı elde edilmiş olur (Freeman, 1989).

#### 3.2 Fiziksel Yöntemler

Atıkların iyileştirilmesinde kullanılan fiziksel yöntemler şunlardır:

- 1) Sedimentasyon
- 2) Filtrasyon
- 3) Flokülasyon ve koagülasyon

Tehlikeli atıkların kimyasal yöntemlerle iyileştirilmesi örneğin metallerin kimyasal yöntemlerle çökeltilmesinden sonra bu yöntemler uygulanır. Uygulanan her yöntem sıvıdaki metallerin konsantrasyonunu azaltır (Freeman, 1989).

### **3.2.1 Sedimentasyon**

Yerçekimi kuvvetleriyle süspans katıların, daha önceden muamele edilmiş atık karışımından ayrılması demektir. Bu yöntem emülsifiye yağlar içeren atıklarda ve karışım içindeki katı maddelerin yoğunluğunun suyun yoğunluğundan fazla olması durumlarında uygulanmaz. Sedimentasyon yöntemi, zehirli sıvı atıklardan yağın, biyolojik katıların uzaklaştırılmasında kullanılır.

### **3.2.2 Filtrasyon**

Bir sıvı içindeki katı maddelerin poroz bir madde yardımıyla tutulmasına denir. Filtrasyon için gerekli basınç gradyanı yerçekimi kuvveti, santrifüj kuvvet, vakum ya da atmosfer basıncından daha büyük bir basınçla sağlanır. Sıvı içinde çözülmüş maddeler filtrasyon yoluyla uzaklaştırılmazlar. Örneğin çözünebilir zehirli organik maddeleri uzaklaştırmada direkt olarak filtrasyon uygulanamaz. Katran, yağlı çamur gibi viskoz sıvılarda uygulanamaz.

### **3.2.3 Flokülasyon ve Koagülasyon**

Flokülasyon, muamele edilmiş ve edilmemiş zehirli atıklardaki süspans katıların çökebilirliğini ve filtre edilebilirliğini arttıran bir yöntemdir. Viskozitesi yüksek atıklarda kullanımı tavsiye edilmez. Koagülasyon ise bir sıvı içindeki süspans partiküller üzerindeki elektrik şarjlarının nötralizasyonuna dayanan bir yöntemdir. Bu iki yöntem ağır metal içeren atıkların iyileştirilmesinde kullanılır.

Süspans katıların flokülasyonu ve koagülasyonu 4 adımda gerçekleşir:



- Ph ayarı ve hızlı karışım
- Koagulantların karışımı
- Flokülanların eklenmesi ve karışımı
- Nötralize partiküllerin toplanması

Organik ve inorganik olmak üzere 2 tür flokülan-koagulant vardır. Organik kimyasallar poli-elektrolitler veya polimerlerdir. İnorganik kimyasallar  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Demir klorit hidrat),  $\text{MgO}$  (Magnezyum oksit),  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (Alüminyum sülfat) vb. Ph düzenleyiciler  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Kireç),  $\text{NaOH}$  (Sodyum hidroksit),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Sülfürik asit) dir.

Polimerler, birçok monomerin biraraya gelmesiyle oluşmuş organik makromoleküllerdir. Polimerler genellikle şu özellikleriyle sınıflandırılırlar:

- Tip (Anyonik, katyonik)
- Moleküler ağırlık
- Moleküler yapı
- Yoğunluk
- Suda kullanıma uygunluk

Polimer dozajı olarak genellikle 1-1000 mg/l kullanılır.

### 3.2.4 Dizayn Parametreleri

- Uygun Ph
- Uygun koagulant ve flokülan dozajı
- Kimyasal doyma konsantrasyonları
- Karışım enerjisi
- Karışım ve flokülasyon süresi
- Çökeltme oranları

Çoğu inorganik koagulant optimum sonucu belli bir Ph seviyesinde verir. Anyonik polimerlerle flokülasyon daha az Ph seviyesine bağlıdır ve ilave Ph ayarı gerektirmez. Uygun dozaj ve doyma konsantrasyonu önemlidir. Koagulant ve flokülantla aşırı doyurulmuş sistemlerde ters yönde etkiler beklenmelidir. Flokülasyon sırasında karışım zamanı önemlidir çünkü gereğinden çok ya da az zaman partiküllerin yeterince floküle olmamasına neden olur. Hızlı karışım ve flokülasyon için tipik karışım süreleri 1-2, 3-10 dakikadır.



## BÖLÜM 4

### ATIKLARIN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN KİMYASAL YÖNTEMLER

#### 4.1 Giriş

Zehirli atıkların kimyasal yollarla iyileştirilmesinde çeşitli yöntemler mevcuttur. Ph'n değiştirilmesi (yani istenilen seviyeye getirilmesi), oksidasyon, kimyasal çökeltme, stabilizasyon ve katılaştırma en çok kullanılan yöntemlerdir. Kimyasal yöntemlerin kullanılmasında dikkate alınması gereken birtakım unsurlar vardır (Freeman, 1989):

- 1) Atığın bulunduğu yerden alınan numunelerin bütün bölgeyi temsil edecek şekilde seçilmesine yani atığın yapısının doğru tahmin edilmesine dikkat edilmelidir
- 2) Kimyasal maddeler kullanılmadan önce denenmelidirler. Ortaya çıkan ürün ve yan ürünlerin (örneğin gazların) atığın orjinal halinden daha az tehlikeli olduğu gösterilmelidir.
- 3) Kimyasal maddeler iyileştirme yapılacak yerde ya da atığın depolanacağı bölgede uygulanmalıdır. İnsan sağlığına ve çevreye verilebilecek zarar önlenmiş olur.
- 4) Birden fazla kimyasalın kullanılacağı durumlarda bunların birbirinden etkileşimi araştırılmalıdır.
- 5) Karışım için uygulanacak yöntem dikkat edilmelidir. Atık sıvı, uygulanacak kimyasal gaz halindeyse aspiratörler, atık katı (granüler), uygulanacak kimyasal sıvı veya katı halindeyse tuğla-çamuru karıştırma değirmeni kullanılabilir.
- 6) Uygun kimyasalın seçiminde maliyet unsuru göz önüne alınmalıdır.

#### 4.2 Ph'n Değiştirilmesi

Ph'n değiştirilmesi işlemi Ph seviyesine duyarlı kirli sularda uygulanır. Kirli suyun zehirli yapısının iyileştirilmesinde bazı durumlarda tek çözüm yoludur. Bazık

yapıdaki akarsular asidik kimyasallarla, asidik yapıdaki akarsular bazik kimyasallarla istenen Ph seviyesine getirilebilir. Ph'ı arttırmak için hidrate-kireç  $\text{CaOH}_2$  (sodyum hidroksit) kullanılırken Ph'ı düşürmek için HCl ve  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kullanılır. Ph düzenlemesi gerektiren atıklar genellikle sıvı haldedir. Ph'ın değiştirilmesi için gerekli olan kimyasallar sıvı, gaz ve katı (granüler) halde bulunabilir. Ph'ı düşürmek için kullanılan karbon-dioksitin diffüzyonu statik karıştırıcılar, suya batırılmış türbünlerle sağlanır. Ph'ı değiştirilmesi gereken katı maddeler öğütülerek granüler hale getirilir ve kimyasalla etkileşimi arttırılır.

### 4.3 Oksidasyon

Organik bileşiklerin oksidasyonu bazı reaksiyonlarla sağlanır. Oksijen eklenmesi hidrojenin uzaklaştırılması, elektronlarla birlikte protonların ya da sadece elektronların uzaklaştırılması gibi. Oksidasyon reaksiyonları için kullanılan kimyasal maddeler şunlardır : Oksijen veya hava ( $\text{O}_2$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), hidrojen-peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), potasyum-permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ), klorin ( $\text{Cl}_2$ ), klorin dioksit ( $\text{ClO}_2$ ) vb.

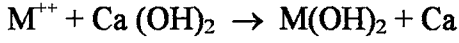
Uygun kimyasal maddenin seçimi için maliyet ve kullanım kolaylığı gözönüne alınmalıdır. Karıştırma işlemi Ph'ın düzenlenmesindeki gibidir. Reaksiyon süreleri deneylerle bulunur. Oksidasyon sırasında redoks ölçümleri ve sensörler yardımıyla kirliliğin değişimi ölçümleri yapılmalıdır. Bu yöntem demir, mangan, organik madde, sülfat, fenol, benzen bileşiklerinin bertaraf edilmesinde kullanılır.

### 4.4 Kimyasal Çökeltme

Kimyasal çökeltme çözünebilir maddelerin çözünemez hale dönüştürülmesi işlemidir. Bu ya bir kimyasal reaksiyon vasıtasıyla ya da çözücünün yapısında birtakım değişiklikler yaparak çözücülüğünün azaltılmasıyla gerçekleştirilir. Sıvı haldeki atıkların ve ağır metaller içeren sulu çamurların iyileştirilmesinde kullanılır. Kadmiyum, bakır, kurşun, cıva, nikel, çinko içeren bileşiklerde uygulanması tavsiye edilir. Çöken katı daha sonra katılaştırma ve/veya filtrasyon yoluyla uzaklaştırılır. Metal içeren atık

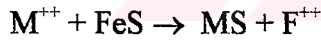
üreten büyük endüstriler şunlardır : Metal kaplama ve cilalama, çelik, demir içermeyen metaller, inorganik pigmentler, maden işletmeciliği ve elektronik endüstrisi . Metallerin büyük bir kısmı sülfat olarak çöktürülebilir, bir kısmı da karbonat olarak çöktürülür.

#### 4.4.1 Hidroksit Çöktürmesi

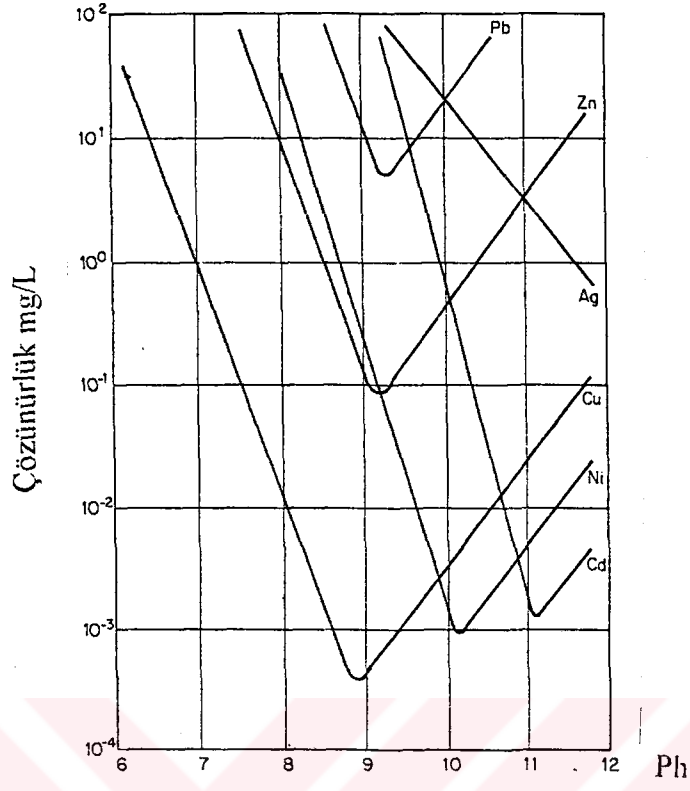


Hidroksit çöktürmesinde  $Ca(OH)_2$  ve  $Na(OH)_2$  çöktürücü olarak kullanılır. Reaksiyon sonucu metaller çözünmez metal hidroksitlere dönüşürler. Yeterli çöktürmenin sağlanması mevcut metal bileşiklerinin oranına, kullanılan çöktürücü oranına, reaksiyon koşullarına özellikle Ph'a ve diğer metal bileşiklerinin varlığına bağlıdır. 1 mg/lt bazen 0.1 mg/lt den az metal konsantrasyonlarında bu yöntem uygulanır. Bazı metal hidroksitlerin çözünürlüğü şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi çözünürlük düşük ve yüksek Ph seviyelerinde fazladır. Her metal için çöktürmeye en uygun Ph seviyesi farklıdır.

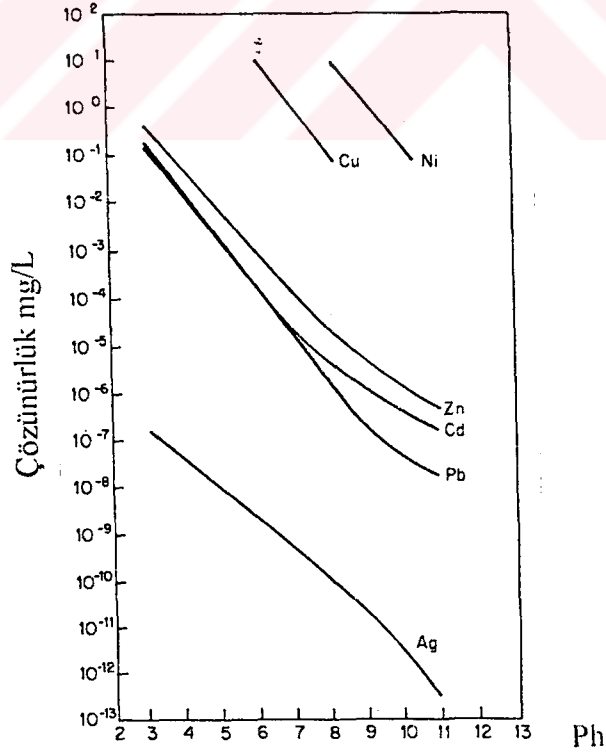
#### 4.4.2 Sülfat Çöktürmesi



$FeS$  (demir sülfat),  $NaHS$  (sodyum hidrosülfat),  $Na_2S$  (sodyum sülfat) kullanılır. Metal sülfatların çözünürlüğü şekil 4.2'de gösterilmiştir. Hidroksit çöktürmesine göre avantajlı yönü metal sülfatların çözünürlüğünün metal hidroksitlerden daha az olmasıdır. Dezavantajı ise reaksiyon sırasında zehirli hidrojen sülfat gazının oluşma olasılığıdır. Ph seviyesi 8'in üzerinde tutularak bu gazın oluşması önlenebilir. Bir diğer dezavantajı ise reaksiyon sonucu oluşan artık sülfat ve bunun tekrar bertaraf edilmesi gereğidir.

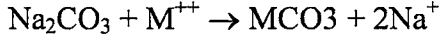


Şekil 4.1 Metal sülfatlarının Ph'a bağlı olarak çözünürlüğü



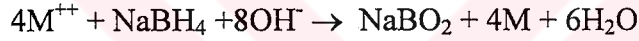
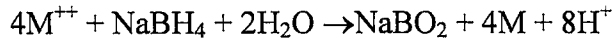
Şekil 4.2 Metal hidroksitlerinin Ph'a bağlı olarak çözünürlüğü

#### 4.4.3 Karbonat Çöktürmesi



Sodyum karbonat kullanılır. Kadmiyum ve kurşun içeren bileşiklere uygulanması daha uygundur. Bu metal türleri için efektif çöktürme Ph'ın 10 ve üzeri değerlerinde gerçekleşir. Karbonat olarak çöktürme ise Ph'ın 7.5-8.5 aralığında gerçekleşir.

#### 4.4.4 Sodyum - Barohidrit Çöktürmesi



Bu yöntem Ph'ın 8-11 aralığında bulunduğu durumlarda uygulanır. Ph seviyesi 8'in altında bulunduğu durumlarda barohidritin hidrolize olmasıyla barohidrit tüketimi artar. 11'in üzerinde olması durumunda ise reaksiyon hızı yavaşlar. Kurşun, cıva, nikel, bakır, kadmiyum gibi metaller için kullanılır.

#### 4.4.5 Diğer Çökeltme Yöntemleri

Spesifik metal bileşikleri içeren solüsyonlar, özellikle tek çeşit metal içeren solüsyonlar için fosfat çökeltmesi kullanılabilir. Demir, alüminyum ve kromiyum gibi katyonlar bu yolla solüsyondan ayrıştırılabilirler. Baryum baryum sülfat olarak çöktürülebilir. Selenyum sülfür dioksit yardımıyla çöktürülür. Ayrıca selenit çözülmüş demir selenit tozu olarak, gümüş gümüş - klorit olarak çöktürülebilir.

Bazı metal türleri için yukarıda sayılan çökeltme yöntemleri tek başına yeterli olmaz. Amonyum, siyanür gibi. Bunlardan siyanür alkalın klorinlenmesinden geçirilir.

## BÖLÜM 5

### STABİLİZASYON VE KATILAŞTIRMA

#### 5.1 Giriş

Zehirli atıkların polimerlerle ve puzzolanlarla karıştırılarak mümkün olan en katı kıvama, en düşük derecede zehirli madde içeriğine getirilmesine ve yüzey alanının azaltılarak sızmanın önlenmesine ya da azaltılmasına katılaştırma denir. Stabilizasyon ve katılaştırma terimleri genellikle karıştırılır. Stabilizasyon genel bir terimdir, katılaştırmayı da kapsar. Stabilizasyon, atığın kimyasal olarak daha kararlı bir yapıya getirilmesine denir. Toksik bileşikler, yeni ve toksik olmayan bileşik ya da maddelere dönüşür. Katılaştırma ise atıklara çeşitli katkı maddelerinin eklenmesiyle katı bir yapının elde edilmesidir, yani yapısal bütünlük gösteren bir monolitik blok oluşur. Kirleticiyle katkı arasında kimyasal bir bağ oluşması şart değildir.

Stabilizasyon/Katılaştırma atığın muamele edilmesini kolaylaştırır. Fiziksel karakteristiklerini iyileştirir. Yüzeysel alanı azaltarak kirleticilerin sızmasını engeller. Çözünürlüğü azaltır.

Stabilizasyon/Katılaştırma konusunda daha önce yapılan çalışmalarda araştırmacılar daha çok organik kimyasal maddelerin (fenol, benzen vs.) katılaştırmaya etkilerini saptamaya çalışmışlardır. Çeşitli oranlarda kimyasal maddelerle karıştırılan atıklar değişik mukavemet değerleri vermiştir. Ayrıca katı madde muhtevası ve organik kirleticilerde reaksiyonları geciktirerek veya hızlandırarak mukavemeti etkilemiştir. Bu konuda çalışmalar yapan araştırmacılar şöyle sıralanabilir:

Sonksen ve Lease (1982), Musser ve Smith (1984), Titlebaum ve diğerleri (1986), Cullinane ve Bricka (1987), Byers (1988), Zirschky (1988), Forslund ve diğerleri (1989), Holmes ve diğerleri (1989), Knox ve diğerleri (1994), Cullinane ve Jones (1992).



Stabilizasyon / Katılaştırma yöntemi, atık zehirli suların araziye rastgele boşaltılmasının bazı ülkelerde yasaklanmasıyla birlikte daha da önem kazanmıştır. Katılaştırma işlemine etkiyen birtakım fiziksel ve kimyasal faktörler vardır.

## **5.2 Katılaştırma İşlemine Etkiyen Fiziksel Faktörler**

Katılaştırma işlemine etkiyen fiziksel faktörler şunlardır (Freeman, 1989):

### **5.2.1 Dane büyüklüğü ve Şekli**

Dane büyüklüğüne bağılı olarak katılaştırma sonucu ortaya çıkan ürün çamur ya da sulu çamur olabilir. Ayrıca yüzey alanının büyüklüğü sızmanın artmasına neden olur.

### **5.2.2 Katı Madde Muhtevası**

Katı madde muhtevası ve spesifik ağırlıklık katılaştırmanın çökeltme ve kür aşamalarında çok önemlidir. Elde edilen ürün maddenin fiziksel özelliklerine etki ederler. İnorganik katılaştırma sistemlerinde düşük katı madde muhtevası atığın uzaklaştırılmasına ve uzun süreli dayanımın kazanılmasına engel olur.

### **5.2.3 Spesifik Ağırlık**

Atık ve katkı maddesinin spesifik ağırlıklarının farklı oluşu bazen sistemde faz ayrışmalarına neden olabilmektedir. Katkı/atık 1.5-2'yi bulmaktadır. Spesifik ağırlık problemi filtre-keklerinin ve bazı sulu çamurların katılaştırılmasında önemli değildir. Bu tür atıkların katkı maddeleriyle yeterli karışımının sağlanabilmesi için genellikle suya ihtiyacı vardır. Bu da ayrışmanın kontrol edilebileceğı anlamına gelir.

#### **5.2.4 Islatma**

Katılaştırmada kullanılan katkı maddelerinin reaksiyona girmesi için karışımın su ile ıslatılmasını gerekir. Danelerin yüzeysel alanları arttıka ıslatmada o derecede zorlaşmaktadır.

#### **5.2.5 Karıştırma**

Yanlış mikserle karıştırma ya da gereğinden fazla karıştırma kür süresinin uzamasına ve istenen fiziksel özelliklere ulaşılmasına engel olmaktadır. Fazla karıştırma portlant çimentonun silika jel yapısını bozabilmektedir

#### **5.2.6 Sıcaklık ve Nem**

Katılaştırma işlemi sıcaklıkla artmaktadır. Ancak fazla sıcaklık jel yapısını bozarak ürün maddesinde geri dönölmez değişiklikler yapmaktadır. 0°C altında katılaşmada gecikmeler, 30°C ın üzerinde hızlanmalar, 66°C ın üzerinde bozulmalar görülür. Ayrıca kür aşamasında da belli oranda nem gerekmektedir.

#### **5.2.7 Hızlandırıcı ve Geciktiriciler**

Birçok kimyasal maddenin katılaştırmanın katılaşma ve kür aşamalarında hızlandırıcı veya geciktirici etkisi söz konusudur. Hızlandırıcılar çimentonun katılaşmasını çabuklaştırırlar bu da genellikle arzu edilen bir durumdur. Sülfanat ve karboksilat bileşikleri çimento jelinin oluşumunu geciktirirler. Alkoller, glikoller, aromatik organikler katılaşma süresini arttırırlar ve durabiliteyi azaltırlar.

Kondo ve diğerleri (1977) yaptıkları çeşitli deneyler sonucu bazı anyonların silika jeline nüfuz ederek çimento danelerinin etrafını çevirdiğini ve kalsiyum iyonunu uzaklaştırarak elektriksel olarak nötr bir durum yarattığını ifade etmişlerdir.

Çimentoya kirecin katılması gecikmeye neden olan bileşiklere engel olmuş ve yeterli mukavemetin kazanılmasını sağlamıştır.

### **5.3 Katılaştırma İşlemine Etkiyen Kimyasal Faktörler**

Kimyasal faktör denilince iyon değişimi anlaşılmaktadır. İyon değişimi katılaştırmayı iki anlamda etkilemektedir:

- 1) Solüsyonda kalsiyumun yer değiştirmesi ve bu maddenin eksikliği nedeniyle çimentolaşmanın tam olmaması katılaştırmayı geciktirmektedir.
- 2) Solüsyondan metallerin uzaklaştırılması katılaştırmayı hızlandırmaktadır.



## BÖLÜM 6

### KATILAŞTIRMA TÜRLERİ

#### 6.1 Giriş

Atıkların iyileştirilmesinde kullanılan kimyasal yöntemlerden biri olan katılaştırma inorganik sistemler ve organik sistemler olarak 2'ye ayrılır.

#### 6.2 İnorganik Sistemler

İnorganik sistemlerde binder ve atık arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu sahte mineral katı bir matriks oluşur. Sert yapıyı ve stabiliteyi işte bu matriks sağlar. Yaygın olarak kullanılan inorganik sistemler şunlardır : Portland çimentosu, kireç / uçucu kül, portland çimentosu / uçucu kül, portland çimentosu / uçucu kül / kireç, portland çimentosu / sodyum silikat.

İnorganik sistemlerin avantajları şöyle sıralanabilir : Görece düşük maliyet, iyi ve uzun süreli stabilite, uygulamada tecrübenin fazla olması, düşük su geçirgenliği, bileşenlerinin toksik özellikler içermemesi. Hacim artışlarının meydana gelmesi ve depo edilecek ya da taşınacak malzemelerin artmasına bağlı olarak maliyet artışı ise dezavantajlı yönüdür.

#### 6.3 Organik Sistemler

Organik tür radyoaktif atıklarda kullanılır. Epoksi, polyesterler, bitüm, ve polimerleştirme sistemleri uygulanır. Yüksek maliyeti, mikroorganizmalara ve ultraviyole ışımına bağlı olarak stabil olmayan yapıları, ve uygulamada tecrübe noksanlığı dezavantajlı yönleridir.

#### 6.4 Çimento ile katılaştırma

Çimento atık çamurdaki suyla reaksiyona girerek silikat hidratları ve alüminyum bileşikleri oluşturur. Atık içindeki katı maddeler agrega gibi davranırlar. Atıkdaki katı madde oranı arttıkça katılma daha kısa bir sürede olmaya başlar. Çimento danelerinin hidratasyona uğrayabilmesi için su/çimento oranının minimum 0.48 olması gerektiği kabul edilir. Öte yandan gereğinden fazla suyun eklenmesi katılmış atığın üzerinde bir su tabakası oluşmasına neden olur. Bu durum permeabilitenin artmasına, mukavemetin azalmasına neden olur.

Organik maddelerin çimentolaşma üzerindeki etkisi uzun yıllar araştırılmış ve bunların çoğunun yeterli mukavemetin kazanılmasında gecikmelere yol açtığı saptanmıştır. Fenol, yağ, gres, trikloroetilen, hegzaklorobenzen gibi. Mangan, kalay, kurşun, çinko, bakır, sodyum fosfat, sodyum sülfatın ise mukavemeti azaltıcı yönde etki yaptıkları saptanmıştır.

İnce zemin daneleri (kil, silt) partiküllerin üzerini kapatarak çimentoyla partiküller arası bağları zayıflatır. Bu da katılaşmada gecikmelere yol açar.

#### 6.5 Uçucu kül / Çimento yöntemi

Uçucu kül silika, alüm, demir oksit ve kalsiyum oksitten oluşur. Tek başına bağlayıcılık özelliği yoktur. Ancak yeteri derecede çimentoyla karıştırıldığı zaman bağlayıcılık özelliği kazanır. Portland çimentosunun kalsiyum hidroksiti uçucu külün silikasıyla reaksiyona girerek kalsiyum silika hidratı oluşturur. Sonuçta çimentonun tek başına sağlayacağı katılıktan daha büyük bir katılık elde edilebilir.

Portland çimentosu ve uçucu kül beton yapımında yıllardır kullanılmaktadır. Uçucu kül %25-%30 arasında çimentoyla yer değiştirerek beton yapımında yer almakta ve maliyetin azalmasını sağlamaktadır. Çimento / Uçucu Kül 1/ (3 veya 4) oranı az yoğun katı atık katılaştırmasında kullanılır. Uçucu külün bir diğer faydası da metal iyonlarını absorblaması ve Ph'ı düşürmesidir. Bu yöntemin dezavantajlı yönü hacim ve ağırlık artışına paralel olarak atığın uzaklaştırılması maliyetinin artmasıdır.

Bu oran %25-75 lik hacim artışı, %50-150 lik ağırlık artışı getirmektedir.

Ağırlık artışının önemli olmadığı durumlarda en optimum çözümdür. Cote (1986) yaptığı deneyler sonucu sızmanın çimento / uçucu kül karışımında en düşük derecede olduğunu saptamıştır. Bunun sonucu olarak sistemin Ph'ı ne kadar fazlaysa o derece sızma oluşacaktır denilebilir.

## 6.6 Çimento / Çözünür Silikat Yöntemi

Düşük konsantrasyonlarda da olsa kalsiyum ve magnezyum iyonlarının varlığı silikanın sızmasına engel olur. Çözünür silikatlar, toksik metal iyonları silikat jel matriksine hapsederek sızmalarına engel olur, bu nedenle katılaştırma işlemlerinde kullanılırlar. Sistemin esas çimento ve silikat arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşan katı matrikse dayanır. 3 tip reaksiyon vardır. Sırasıyla 1) Metal iyonları ve çözünür silikatlar arasındaki hızlı reaksiyonlar. Bu reaksiyon düşük çözünürlükte metal silikatları meydana getirir. 2) Çözünür silikatlarla çimentonun tepkiyen bileşikleri arasındaki reaksiyonlar. 3) Çimento, atık, su arasında hidroliz, hidrasyon ve nötralizasyon şeklinde olur.

Silikat %33.7NaO<sub>2</sub>, %28.7 SiO<sub>2</sub>, %37.6 katı maddeden oluşur ve spesifik ağırlığı 1.39 dur. Çözünür silikatlar ayrıca düşük katı madde muhtevası olan atıkların katılaştırılmasında da kullanılır. Sistemin dezavantajlı yönü suya bağlı olarak katının porozitesinin artmasıdır. Bu da permeabilitenin artması, mukavemetin azalması demektir.

## 6.7 Kireç / Uçucu Kül Yöntemi

Kireç tek başına atıklarda Ph'ı arttırmak ve kokuyu azaltmak için kullanılır. Tek başına yeterli mukavemeti sağlamaz. Uçucu küle birlikte kullanımı yaygındır.

Genel olarak kireçle katılaştırma metallerin sızmasına engel olma bakımından çimentoyla katılaştırma yöntemi kadar etkili değildir. Bu durumun bir nedeni kireçin alkalinitesine bağlı olarak yüksek Ph değeridir. Bir diğer nedeni ise puzzolanik

reaksiyonların kurşun ve kromiyum gibi metalleri silika matriksine çimento kadar etkili getirememesidir. Genel olarak kireç / uçucu kül yöntemi tehlikesiz atık uygulamalarında 1/2, 1/6 oranlarında kullanılır (Cote, 1986).

## 6.8 Özet ve Sonuçlar

Atığın türüne ve istenen iyileştirme derecesine bağlı olarak çeşitli katkıları kullanılabilir. Optimum çözüm için birtakım ön denemeler yapılmalı ve uygun katkı türü belirlenmelidir. Katılaştırmada karışım işlemi çok önemlidir. Daha önce yapılan çalışmalara dayanarak yerinde karıştırmanın, nakliyat olmaması ve zararlı atıkların çevreye saçılması tehlikesinin önlenmesi gibi avantajlarının yanında plente karıştırmaya nazaran yeterli karışımın sağlanamaması gibi bir dezavantajının olduğu söylenebilir.

Puzzolanla katılaştırma ekonomik yönden avantajlıdır. Ancak katılaştırılan atık hacmi bazı durumlarda iki katına kadar çıkabilmektedir. Polimer maddelerin kullanımı ekonomik olmamakla beraber hacim artışı oldukça azdır. Ekonomiyi belirleyen faktörler şu şekilde sıralanabilir :

1) Atığın fiziksel ve kimyasal yapısı. Bazı durumlarda atık üzerinde ön işlem uygulanması. (Fazla suyun uzaklaştırılması gibi)

2) Ulaşım (Kullanılacak malzemelerin araziye getirilişi, katılaştırma sonucu depolamak üzere atığın uzaklaştırılması)

Çimentoyla yapılan katılaştırma deneylerinde serbest basınç mukavemeti 100-7000 kPa aralığında değişmiştir. Permeabilite katsayısı 'k'  $10^{-7}$ - $10^{-10}$  arası ölçülmüştür.

Mukavemet arttırımının direkt olarak maliyete bağlı olduğu unutulmamalıdır.

## BÖLÜM 7

### TARAMA İŞLEMLERİNDE KULLANILAN FLOKÜLASYON TEKNİKLERİ

#### 7.1 Giriş

Sulu çamurların suyundan arındırılması işlemi, flokülasyonu sağlayan polimerlerin kullanımı ile bugüne değin başarıyla uygulanmıştır. Solüsyon içersinde asılı halde duran süspans partiküllerin flokülasyonu için gerekli polimerin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken birtakım faktörler vardır. Polimerin tipi, moleküler ağırlığı ve konsantrasyonu yanında süspans partiküllerin yüzeysel elektrik şarjları, porozitesi, solüsyon özellikleri de önemlidir.

#### 7.2 Bu Konuda Yapılan Bir Çalışma

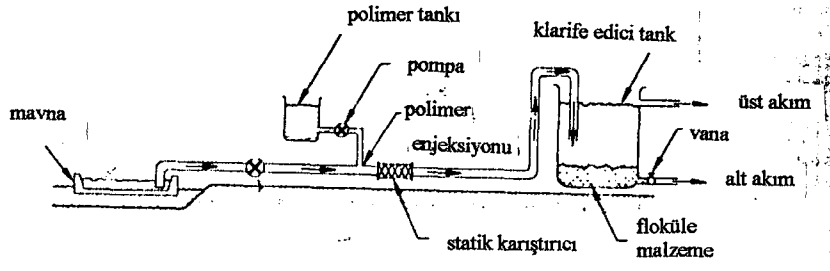
Amerika Birleşik Devletler Madenler Bürosu (USBM) bu konuda çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan amaçlanan ise, düşük maliyetli flokülasyon metotları ile temiz suyun kaynağına geri gönderilmesi sonucu nakledilecek atığın hacminin azaltılmasıyla ekonomik yarar sağlanması, atığın sonraki iyileştirme işlemleri sırasında muamele edilmesinin kolaylaştırılmasıdır.

Buffalo nehrinden taranarak alınan sulu çamur numuneleri laboratuvarında test edilmiştir. 3 tür polimer (anyonik, nötr, kationik) kullanılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda bir anyonik polimer olan fotoflok 1110 arazi deneyleri için seçilmiştir. Fotoflok 1110 akrilamit ve sodyum akrilatın anyonik kopolimeridir. Zehirsiz ve akıcı kıvamdaki fotoflok bazık yapıdadır. Polimer az miktarda (%2 den az) akrilamit monomeri de içerir (Dredging, 1994).

#### 7.3 Sistem Dizaynı

Şekil 7.1'de görülen sistem, Buffalo Nehri projesi için dizayn edilmiştir. Mavnadan alınan malzeme 4 inçlik borularla taşınır. Polimer tankından gelen polimerle





Şekil 7.1 Flokülasyon deneyleri için kurulan sistem



Şekil 7.2 Temiz su akışı (üstte)

Kirli su akışı (altta)

reaksiyona girer. Malzeme buradan klarifikasyon tankına taşınır. Floküle edilmiş malzeme tankın dibine çöker. Tankın tabanından alınan su çamurlu, bulanık sudur. Tankın üst kısmından ise temiz, berrak su kalmıştır. Buradan alınan su şekil 7.2'de gösterilmiştir.

Deneyler 3 ayrı polimer konsantrasyonunda gerçekleştirilmiştir ; %2, %3 ve %1. Tablo 7.1, 7.2, ve 7.3'de polimer akış hızını, besleme oranını, katı madde yüzdelerini göstermektedir. Her deneyde polimer konsantrasyonu sabit tutulmuş ve 10 dakika aralıklarla polimerin akma hızı değiştirilmiştir. Üst akımdan alınan numunelerde NTU (bulanıklık) ölçümleri yapılmıştır. Klarife edici tanka 200 gr / dakika malzeme pompalanmıştır. Böylelikle yaratılan türbülanslı ortam bazı floküle olmuş maddelerin üst akımla temiz suya karışmasına neden olur. Bu nedenle üst akım numunelerinde NTU ölçümleri yapabilmek için 8 saatlik bir bekleme süresine gerek duyulmuştur.

Tablo 7.1: %2 Polimer konsantrasyonu %1.6 Katı madde oranı 241 dak/gr besleme oranı

Test No	Polimer Dozajı (gr/ dak)	Üst Akım Bulanıklığı	1000 Galon için Harcanan Para × (0.01dolar)
1	19.87	17	8.23
2	16.90	15	7.01
3	11.51	13	4.78
4	7.06	17	2.93
5	3.96	13	1.64

Tablo 7.2: %3 Polimer konsantrasyonu %1.5 Katı madde oranı 228 dak/ gr besleme oranı.

Test No	Polimer dozajı (gr/ dak)	Üst Akım Bulanıklığı	1000 galon için harcanan para × (0.01 dolar)
1	20.15	14	13.24
2	17.38	14	11.42
3	12.22	12	8.03
4	4.16	13	2.73
5	2.37	16	1.56

Tablo 7.3: %1 Polimer konsantrasyonu %1.3 Katı madde oranı 219 dak/gr besleme oranı

Test No	Polimer Dozajı (gr/dak)	Üst Akım Bulanıklığı	1000 Galon için Harcanan Para × (0.01 dolar)
1	20.43	12	4.66
2	17.91	12	4.08
3	12.11	13	2.76
4	6.96	15	1.59
5	2.27	27	0.52

3'nolu testin 5. deneyi dışında NTU değerleri yaklaşık aynı kalmıştır. Alt akımdan alınan numunelerde katı madde oranı tayini yapılmış ve yaklaşık olarak ağırlıkça %31 bulunmuştur.

## BÖLÜM 8

### SULU ÇAMUR KONSOLİDASYONU ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

#### 8.1 Giriş

Toorman ve Sas (1994 ) tarafından yapılan bir çalışmada tarama ile alınmış sulu çamurların çeşitli deneyler, in-situ ölçümler ve bilgisayar simülasyonlarıyla konsolidasyon davranışları incelenmiştir. Deneylerden amaçlanan model parametreler yani permeabilite ve efektif gerilme için yararlı deneysel veriler elde etmektir. Sonuçlar, yerçekimsel drenajın sudan arındırmada olumlu rol oynadığı şeklindedir. Sedimentasyon ve konsolidasyon teorilerine eleştirel yaklaşımlarda bulunulmuş, matematiksel konsolidasyon metotları tartışılmıştır.

Arazi depolama kapasitelerinin sınırlı olması nedeniyle taranmış malzemenin sudan arındırılması önem kazanmaktadır. Böylelikle arazi kullanımında tasarruf sağlanır ve bir sonraki taranmış malzeme depolaması için yer açılmış olur.

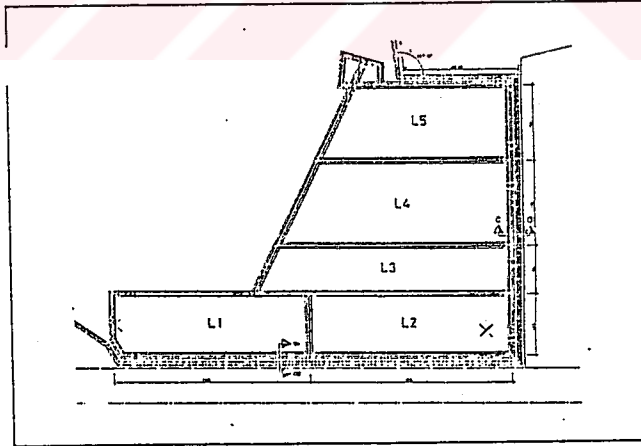
Taranmış malzemenin kompaksiyonunun optimizasyonu için konsolidasyon davranışının iyice anlaşılması gerekir. Laboratuvar deneylerinde dikkatli olunması ve numuneler üzerinde ölçümlerin zeminin zayıf yapısına zarar vermeyecek şekilde yapılması gerekir. Konsolidasyon davranışını etkileyen birçok parametre vardır. Sıcaklık, tabaka kalınlığının başlangıç konsantrasyonu, çamur bileşimi (dane çapı, organik madde), boşluk suyundaki iyonlar (yani çözülmüş tuz) ve meteorolojik koşullar. Atığın tuzluluğu ve boşluk suyu, daneler arası bağ kuvvetlerini dolayısıyla zemin yapısını etkiler. Atıktaki organik madde çürüyebilir ve gaz oluşumuna neden olabilir. Sıcaklık, organik maddelerin parçalanmasına ve viskozluğa etki eder.

Yeraltı depolamaları ve arazi depolamaları arasında konsolidasyon davranışında önemli farklar görülür, çünkü su altındaki atığın yoğunluğu suyla karışmak suretiyle azalır, bu da kaba daneli malzemelerin ayrışmasına yolaçar.

Bu bildiride değişik drenaj sistemleriyle laboratuvar ve in-situ konsolidasyon ölçümleri yapılmıştır. Arazide konsolidasyon tek yönlü olarak ele alındığı için sulu çamur karışımında da tek boyut esas alınmıştır. Tek boyutlu matematiksel modelin kapasitesi ve sınırı tartışılmıştır.

## 8.2 Arazilerin Sudan Arındırılması : In - Situ Konsolidasyon

Antwerp Left Bank limanında ince daneli taranmış malzemelerin sudan arındırılması amacıyla yaklaşık 4.5 ha. lık 5 adet sudan arındırma amaçlı arazi parçası oluşturulmuştur.(Şekil8.1) Bunlar Scheldt nehrinden taranarak alınmış çamurla doldurulmuştur. Bu miktar  $286000 \text{ m}^3$  e karşılık gelen 157000 ton kuru malzemedir. Her saha için farklı sudan arındırma sistem kombinasyonları uygulanmıştır.



Şekil 8.1 Sudan arındırma amaçlı arazi parçalarının yerleşimi

Tablo 8.1 Arazide Doyurma Özellikleri

Arazi No	Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	Toplam Yükseklik (m)	Oturma Sonu Yükseklik (m)
L <sub>1</sub>	42.612	4.0	1.64
L <sub>2</sub>	42.612	3.6	1.75
L <sub>3</sub>	40.216	4.8	2.09
L <sub>4</sub>	64.056	4.0	1.93
L <sub>5</sub>	44.160	4.0	1.74

Tablo 8.2 Uygulanan Drenaj Teknikleri

Drenaj Sistemi	Arazi No	Buharlaştırma Artırımı
Yerçekimsel	L <sub>1</sub>	Yok
Drenler ve vakum	L <sub>2</sub>	Çimlendirme (3 ay sonra)
Yok	L <sub>3</sub>	Çimlendirme (3 ay sonra)
Yok	L <sub>4</sub>	Mekanik yöntemler
Yerçekimsel	L <sub>5</sub>	Mekanik yöntemler

Kullanılan çamurun geoteknik özellikleri:

Arazi yoğunluğu  $\rho_n = 1.34 \text{ t / m}^3$

Su muhtevası  $W = \%149$

Danelerin spesifik ağırlığı  $\rho_s = 2.695 \text{ t / m}^3$

Organik madde miktarı  $= \%8.6$

Boşluk oranı  $e = 4.05$

Dane çapı dağılımı:

$$d_{50} = 7.10^{-3} \text{ mm}$$

$$\text{kum } (d > 63.10^{-3} \text{ mm}) = \%3.3$$

$$\text{silt } (63.10^{-3} > d > (2.10^{-3})) = \%64.9$$

$$\text{kil } (d > 2.10^{-3} \text{ mm}) = \%31.5$$

### 8.3 Sonuçlar

4 ay boyunca sulu çamurun konsolidasyonu gözlenmiş ve sonuçlar tablo 8.3'de gösterilmiştir. L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> ve L<sub>5</sub> de drenaj tekniklerinin kullanımına bağlı olarak daha hızlı konsolidasyon oturmaları meydana gelmiştir. 4 ay içerisinde %35 ler mertebesinde oturmalar olmuştur.

Tablo 8.3 Çamur yüksekliğinin değişimi

Arazi No	İlk yükseklik	n gün sonra boy (m)				% boy azalması
		30	75	90	120	
L <sub>1</sub>	1.64	1.33	1.10	1.07	1.07	65
L <sub>2</sub>	1.75	1.33	1.18	1.16	1.15	65
L <sub>3</sub>	2.09	1.86	1.61	1.58	1.58	76
L <sub>4</sub>	1.93	1.66	1.47	1.47	1.45	75
L <sub>5</sub>	1.74	1.30	1.11	1.10	1.09	64

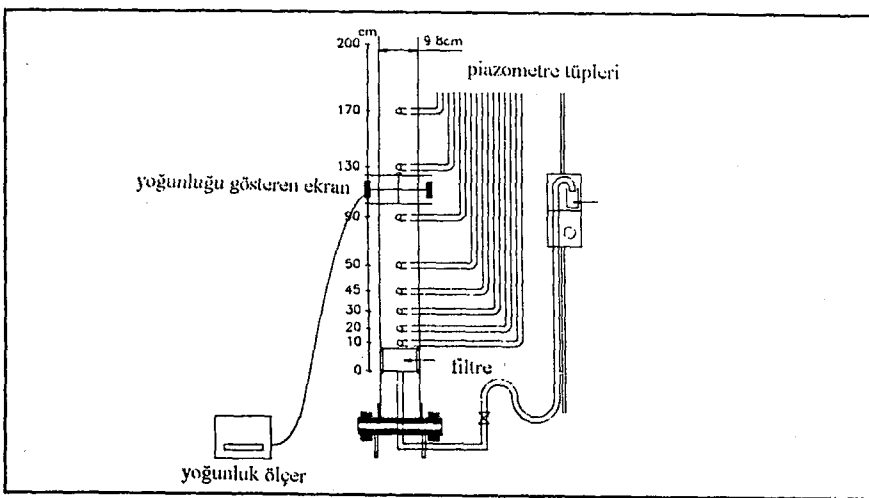
4 ayın sonunda bazı mekanik teknikler kullanılarak sudan arındırma arttırılmaya çalışılmıştır. Amfirol kullanılmış fakat sonuç alınamamıştır. Hendek kazılarak yatay basınç gradyanları oluşturulmuş ve drenaj arttırılmıştır. L<sub>2</sub> ve L<sub>3</sub> arazi parçalarına çimen dikilmiş ve buharlaşma sağlanmıştır.

4 yıl konsolide edilmiş çamur, endüstriyel liman bölgesiyle tarım arazileri arasında tampon bölge oluşturmak üzere yapılan yeşil alanda kullanılmıştır. Çamurun in situ yoğunluğu kendi ağırlığında konsolidasyon sonucu değişik arazi parçalarında küçük farklarla birlikte ortalama olarak  $1.48 \text{ t / m}^3$  e yükselmiştir.

#### 8.4 Laboratuvar DeneYleri

Belçika Katolik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında Scheldt nehrinden alınan çamur numuneleri üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmalardan, konsolidasyon parametrelerinin doğru formülasyonu ve bünye denklemlerinin kalibrasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca farklı drenaj sistemleri kullanılmıştır.

Deneyler için şeffaf sütun şeklinde deney tüpleri kullanılmıştır. Yoğunluk, boşluk suyu profilleri ve çamur/su oranının değişimi belli zaman aralıklarıyla kaydedilmiştir. Deney sonuçlarının kullanılan tüplerin çapından etkileneceği unutulmamalıdır. Azalan tüp çapı veya tüp kalınlığına ve artan tüp pürüzlülüğüne bağlı olarak konsolidasyon oranında azalmalar beklenebilir. Deney tüplerinin pürüzsüzlüğü esas alındığında min. 100 mm. lik çap bu etkiyi ihmal edilebilir kılar. Drenajsız koşullar için deney düzeneği şekil 8.2'de gösterilmiştir. Tüp çapı 98 mm dir.



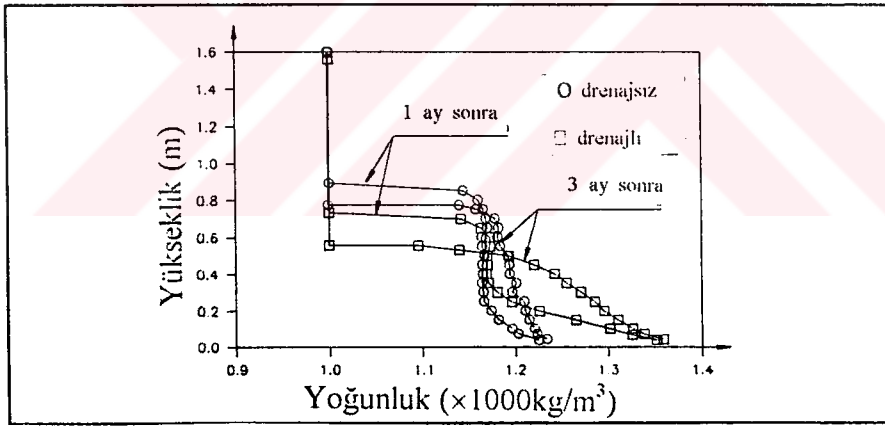
Şekil 8.2 Çökeltme kolonu deney düzeneği



Yoğunluk gama-yayıcı prob ile ölçülmüştür. Boşluk suyu basınçları piyozometrik tüpler ile ölçülmüştür. Drenaj basıncı ayarlanabilir rezervuar seviyesiyle kontrol edilmiştir. Deneyler sıcaklık kontrollü karanlık odalarda 10° C da yapılmıştır. Bu sıcaklık Scheldt nehrinin tabanındaki çamura karşılık gelir. Bu yolla fermentasyon azaltılmış olur.

### 8.5 Sonuçlar

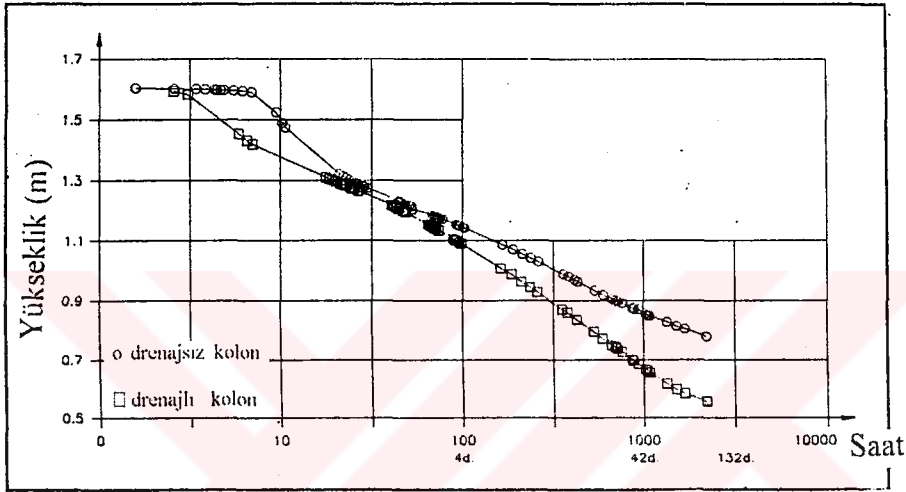
Drenaj sonucu hidrolik gradyan değişir ve çamur 2 ayrı katmana ayrılır. Üst katman yukarı yönde drene olurken alt katman aşağı yönde drene olur. Alt katmanın kalınlığı toplam kalınlığa oranla zamanla artar. Şekil 8.3 de görüldüğü gibi alt katmanın yoğunluğu daha fazladır. Böylece, kolaylıkla beklenebileceği gibi, daha yüksek kompaksiyon daha iyi drenaj sağlamaktadır.



Şekil 8.3 Drenajlı (KO5) ve drenajsız (KO6) kolonlar için yoğunluk eğrileri

Yüksek hidrolik gradyana bağlı olarak alt tabakada yoğunluk artar, permeabilite azalır, böylelikle suyun sızması azalmış olur. Drenaj sudan arındırmayı arttırmıştır

(Şekil 8.4). Tabakanın son kalınlığı seviye farkından meydana gelen basıncın artmasıyla azalmıştır. Drenajlı kolondaki kompaksiyon yani basma, aşağıya doğru itme %10 - 20 daha fazladır.



Şekil 8.4 Drenajlı (KO5) ve drenajsız (KO6) kolonlar için konsolidasyon eğrileri

## 8.6 Matematik Modelleme

Matematik modeller genellikle tek boyutlu düşey konsolidasyonla ilgilidirler. Sulu çamurlar yumuşak, genellikle aşırı doymun ve büyük miktarlardaki deformasyon yapabilen zeminler olduğu için Terzaghi (1923) nin sonsuz küçük gerilme teorisine uygunluk göstermezler. Bunun yerine Gibson (1967) tarafından geliştirilen non-lineer sonlu gerilme modeli daha uygundur. Konsolidasyon modelleri konusunda Schiffman (1985) in çalışmaları vardır. Toorman (1984) zemin mekaniğinde kullanılan boşluk oranı yerine sediment konsantrasyonunu bağımsız değişken olarak kullanmıştır.

Aşağıdaki denklemlerle her kesirdeki kütle dengesi çözülerek sediment karışımları üzerinde nümerik çalışmalar yapılabilir. Bu yaklaşımın doğruluğu Toorman (1993) tarafından önceki makalelerde gösterilmiştir.

Sediment kütle korunumu ile ilgili ilk eşitlik :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (v\phi)}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial S_s}{\partial z} = 0 \quad (8.1)$$

$\phi$  = sediment volümetrik konsantrasyonu

$v$  = sediment dane hızı

$z$  = düşey koordinat (yukarı yönde +)

$t$  = zaman

$S_s = -v_s$  = sediment akışı

2. eşitlik doymuş zemin gerilme dengesidir. (Darcy - Gersevanov yasası)

$$\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial \sigma'}{\partial z} = -(\rho_s - \rho_w)\phi + \rho_w (U - v/k) \quad (8.2)$$

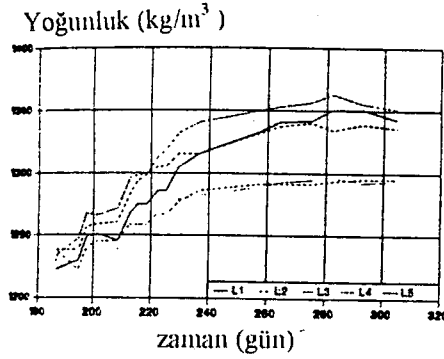
$U$  = ortalama hız =  $\phi v + (1-\phi)u = 0$  (drenajsız durumda)

$u$  = boşluk suyu hızı

Bu eşitlikler 3 konsolidasyon parametresini kapsamaktadır. Oturma oranı  $v$ , permeabilite  $k$ , efektif gerilme  $\sigma'$ . 2. denklemden 1'in çıkartılması suretiyle bu parametrelerden biri elimine edilebilir. Kalan parametreler deneysel olarak elde edilir.

### 8.7 Arazi ve Laboratuvar Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Arazi ve laboratuvar deney sonuçları karşılaştırılırken laboratuvar deney koşullarının hiçbir zaman %100 araziye uygunluk sağlamadığını unutmamalıyız. Deney düzenekleri sadece düşey yönde drenaja izin verdiğinden arazideki hiçbir drenaj sistemi tam olarak simule edilemez. Bununla birlikte drenajlı deneyde ölçülen yoğunluk profilleri ile arazi ölçümleri karşılaştırılabilir (Şekil 8.5, Şekil 8.3). Arazide  $1150 \text{ kg/m}^3$



Şekil 8.5 L<sub>2</sub> arazi parçasında yoğunluk değişimi

olarak ölçülen yoğunluk laboratuvar deneylerinde  $1100 \text{ kg / m}^3$  olarak ölçülmüştür. Arazi ve laboratuvar arasında bir diğer fark doyma hızıdır. Arazide zeminler yaklaşık olarak 2 ayda doyma noktasına gelirken bu zaman laboratuvar koşullarında 2 dakikadır. Bu durum gerilme tarihçelerindeki farklılık dolayısıyla farklı kompaksiyon koşullarında bulunmaları nedeniyledir. Drenajlı kolondaki kompaksiyon arazideki drenajlı durumdan yaklaşık 2 kat fazladır. Bu durum arazide daha küçük drenaj yüzeyi bulunmasına ve daha küçük sediment oranı içermesine bağlanabilir.

### 8.8 Matematik Modellemede Kısıtlamalar

En büyük sınırlama kesin matematiksel eşitliklerin kurulamamasıdır. Drenajlı durumlarda fazladan ortalama hız için bir eşitliğe daha gerek vardır. Ortalama hız sızıntının akış oranına eşittir. Akış oranında permeabilite ve tabandaki basınç gradyanına bağlıdır. Bu problemi çözecek bir metot henüz bilinmemektedir. Nümerik simülasyonlar konsolidasyon deneylerinde iyi sonuç verir. Buna rağmen bir çamur tabakasının konsolidasyonu tahmininde kullanıldığında büyük zıtlıklar görülmektedir.

Öte yandan aynı çamur örneğinde yapılan deneylerde de bazı farklar görülebilir. Genel kanı bu durumun gerilme tarihçelerinin farklılığından yani yapısal farklılıktan kaynaklandığı şeklindedir. Bu yapısal farklar tarama sırasındaki ayrışma oranından, boru hatlarında hidrolik transport sırasındaki kayma akmasından, depolama sahalarının

doyma oranından etkilenir. Bu faktörler değişik yükleme oranlarına karar verilmesini sağlarlar. Bu nedenle çamurların konsolidasyonu üzerine araştırmalar gelecekte bu zamana bağımlı (tikotropi olarak bilinen reolojik zaman faktörü) etkiler üzerinde yoğunlaşacaktır. Model ve arazi deneyleri arasındaki farklar birçok faktöre bağlıdır. Çok az bilinen bünye denklemleri, polidispersiti, tek boyutlu değil 3 boyutlu su akımı gibi.

## 8.9 Genel Sonuçlar

4 ay sonunda çamur depolarında kompaksiyon oranı %10'un üzerinde çıkmıştır. 4 yılın sonunda ise çamur hacminde %35-55 lik bir azalma olmuştur.

Arazi deneylerinin, laboratuvar deneylerinin ve model tahminlerinin detaylı olarak karşılaştırılması şu an için mümkün görünmemektedir. Zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde birçok faktörün rol oynaması ve bunların bazılarının kontrol edilememesi bir karşılaştırma yapmayı güçleştirmektedir. Aynı zemin iç yapısının, arazi ve çevre koşullarının laboratuvarında tam olarak simule edilememesi bu farklılığın ana nedenidir. Efektif gerilme ve permeabilitenin çok daha doğru ve standart tekniklerle deneysel olarak saptanması ve uzun süreli in-situ konsolidasyon davranışının gözlemlenmesi gerekmektedir. Böylelikle bünye denklemlerinde daha tutarlı formülasyonlar yapılabilir.

## BÖLÜM 9

### LABORATUVAR DENEYLERİ

#### 9.1 Birinci Kısım Deneyler

Haliç'in değişik bölgelerinden alınan çamur numuneleri üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Öncelikle kıvam limitlerinden likit limit ( $w_L$ ) ve plastik limit ( $w_P$ ) deneysel olarak saptanmıştır.

Zeminin viskoz bir sıvıdan plastik bir kıvamına dönüştüğü su muhtevası olan likit limit şu şekilde hesaplanmıştır: Değişik su muhtevalarında hazırlanan zemin numuneleri standart likit limit kabına doldurulmuş, numune içinde standart boyutlarda bir yarık açılmış ve aletin kolu çevrilerek kabın 1.0 cm yükseklikten birçok defa düşürülmesi sağlanmıştır. Açılan yarığın 1.25 cm kadarlık kısmının kapanmasına yolaçan düşüş sayısı ile zeminin su muhtevası arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilmiş ve 25 vuruşta yarığın kapanmasına karşılık gelen su muhtevası değeri zeminin likit limiti olarak alınmıştır.

Zeminin plastik bir malzemeden yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su muhtevası olan plastik limit şu şekilde hesaplanmıştır: Nemli numuneler düzgün yüzeyler üzerinde ince silindirler haline getirilmeye çalışılmış ve bu silindirlerin kırılmadan yaklaşık 3 mm kalınlığa getirilebildiği su muhtevası plastik limit olarak alınmıştır. Bu su muhtevası değerleri deneme - yanılma yolu ile bulunmaya çalışılmıştır.

Numunelerin su muhtevaları tayin edilmiş, plastisite indisleri bulunmuştur. Likitlik indisi ( $I_L$ ) bütün numunelerde 1'in üzerindedir. Relatif konsistans ( $I_c$ ) bütün numunelerde 0'in altındadır. Böylelikle haliç çamur numunelerinin viskoz sıvı kıvamda olduğu deneysel olarak da gösterilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma (UCS) sistemine göre çamur numuneleri genel olarak yüksek plastisiteli inorganik silt ve killi-silt sınıfına girmiştir. Düşük plastisiteli inorganik silt ve killi-silt sınıfına giren çamur numunelerine de rastlanmıştır.

Önce etüvde kurutulan sonra dövülerek öğütülen çamur numunelerinde elek analizleri yapılmıştır. 200 no'lu eleğin altına geçen danelerden hidrometre analizleri yapılmış ve danelerin hangi boyut aralığında hangi oranlarda buldukları saptanmıştır.

Çamur numunelerinin içerdiği organik madde miktarının bulunabilmesi amacıyla Amerikan Halk Sağlığı Birliği'nin (APHA) yayınlarından ' Su ve Atık-su İncelemelerinde Standart Metotlar ' adlı kitapta önerilen 500 - 600 ° C da 1 saat yakma işlemi haliç numuneleri üzerinde uygulanmıştır.

Atıkların iyileştirilmesinde önemli bir faktör olan Ph sayısını elde etmek için numuneler saf suyla sulandırılmış ve basit olarak Ph - metre kartlarıyla okumalar alınmıştır.

Birinci kısım deneylerden elde edilen toplu sonuçlar ve değerlendirmeler için ' Deneylerin Sonuçları ' bölümüne bakılabilir.

## 9.2 İkinci Kısım Deneyler

Haliç çamuru numunelerinin temel mühendislik özellikleri elde edildikten sonra bu tezin temel konularından biri olan haliç çamurunun sudan arındırılması ve süspansiyon parçacıklarının çöktürülmesi amaçlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla önce, atıkların iyileştirilmesinde kullanılan fiziksel yöntemlerden biri olan **flokülasyon** metodu uygulanmıştır. Daha önce hesaplanan plastisite indisleri arasında bir sınıflandırma yaparak, diğer numuneleride temsil ettiği düşünülen 5 ayrı Haliç çamur numunesi seçilmiştir. Deneylerde, ağır metal bileşikleri içeren atıkların **floküle** edilmesi amacıyla çeşitli kaynaklarda önerilen 5 ayrı inorganik kimyasal kullanılmıştır: FeCl<sub>3</sub>, AlSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, MgO, CaCl<sub>2</sub>. Bu kimyasallardan FeCl<sub>3</sub> sıvı diğerleri katı haldedir.

Deneyler için 100 mm lik mezürler kullanılmıştır. Bütün deneylerde sabit 20 gr katı çamura karşılık gelen miktarlar kullanılmıştır. Daha önce bulunan su muhtevalarının yardımıyla 20 gr katı çamura karşılık gelen sulu çamurlar mezüre konmuş ve 100 ml ye kadar saf suyla doldurulmuştur. Sonra mezürlere %0.05, %0.1, %0.25, %0.5, %1 oranlarında kimyasallar konmuş ve mezürler bir çubuk yardımıyla daha önceki bölümlerde tavsiye edilen 1-3 dak. lık karıştırma süresine uygun olarak 2

dak. karıştırılmıştır. Mezürlerin ağzı tapalarla kapatılmış ve bir hafta boyunca çökelen katı yüksekliğinin toplam solüsyon yüksekliğine oranı kaydedilmiştir. 5 farklı çamur örneğinde 5 farklı kimyasal 5 farklı oranda kullanılarak deneyler tamamlanmıştır.

Flokülasyon ile Ph sayısı arasındaki yakın ilişki gözönünde bulundurularak 3 ayrı çamur numunesinin orjinal Ph sayıları  $H_2SO_4$  ve  $NaOH$  yardımıyla değiştirilmiş ve çamur çökeltme deneyi tekrarlanmıştır.

İkinci kısım deneylerden elde edilen toplu sonuçlar ve değerlendirmeler için 'Deneylerin Sonuçları' bölümüne bakılabilir.

### 9.3 Üçüncü Kısım Deneyler

Sulu çamurları sudan arındırmada kullanılan tekniklerden biri olan vakumla su alma tekniğini laboratuvarında simule edebilmek amacıyla çevre mühendisliği laboratuvarlarında kullanılan özgül direnç deney düzeneğinden faydalanılmıştır. Deney Buchner Hunisi adı verilen 6.15 cm çapında 3.1 cm yüksekliğinde filtre kağıdı yerleştirilmiş kaba konulan çamurdan vakum yardımıyla suyun bir mezüre çekilmesi esasına dayanır. Çamur numunelerinden sırasıyla 200 mmHg (26.6 kPa), 400 mmHg (53.2 kPa) ve 600 mmHg (79.8 kPa) vakum basınçlarında su çekilmiştir. Her 5 dakikada çamurdan çıkan toplam su miktarı kaydedilmiştir. Deneye, 5 dakikada çamurdan çıkan su  $0.2 \text{ cm}^3$  olana dek her vakum basıncı kademesinde devam edilmiştir.

Deneyden amaçlanan, zamana bağlı suyun çıkışıyla konsolidasyon teorisi arasında bir benzerlik kurmak ve ödometre deneyinde kullanılabilecek ölçüde katılaşmış çamur numuneleri elde etmektir.

Üçüncü kısım deney sonuçları ve değerlendirmeler için 'Deneylerin Sonuçları' bölümüne bakılabilir.



#### 9.4 Dördüncü Kısım Deneyler

Özgül direnç deney düzeneğinden elde edilen çamur numunelerinden (AR-2, AR-10, AR-19) ödometre deneyleri yapılmıştır. Deneyde kullanılan ringin çapı 4.8 cm, yüksekliği ise 2.45 cm dir. Böylelikle 6.15 cm çapı, 3.1 cm yüksekliği olan Buchner Hunisi'nden bozulmamış numune almak mümkün olmuştur. 30,60,120, 240,480,960 kPa gerilme oluşturacak yükleme kademeleri seçilmiştir. Daha sonra boşaltma yaparak 2-3 yük kademesinde numunelerin şişmesine izin verilmiştir. Her yükleme kademesi için 24 saat beklenilmiştir.

Oturma-zaman (h-logt) grafikleri çizilmiş ve konsolidasyonun %50'sinin tamamlandığı  $U=50$  değerine karşılık gelen  $t_{50}$  değeri

$$C_v = 0.197H_d^2 / t_{50} \quad (9.1)$$

formülünde yerine konmuş ve her yük kademesi için konsolidasyon katsayıları ( $c_v$ ) bulunmuştur. 2 yönlü drenaj nedeniyle  $H_d$  numune kalınlığının yarısı (1.225 cm) alınmıştır. Boşluk oranı-düşey efektif gerilme (e-logp) grafikleri çizilerek sıkışma indisi  $C_c$  değerleri hesaplanmıştır. Tabii birim hacim ağırlıkları ( $\gamma_n$ ), tabii su muhtevaları ( $w_n$ ), ve deney sonu birim hacim ağırlıkları ( $\gamma_f$ ) ile deney sonu su muhtevaları ( $w_f$ ) hesaplanmıştır.

Sonra aynı deneyler önceden bulunan, söz konusu çamur numunelerinde optimum çökmeyi sağlayan inorganik kimyasallarla tekrarlanmıştır.  $c_c$  ve  $c_v$  katsayıları tekrar bulunarak daha önce elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

## 9.5 Beşinci Kısım Deneyler

Özgül direnç deneylerinden elde edilen numunelerden katılaştırma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde çimento, kireç ve uçucu kül kullanılmıştır. Ayrıca uçucu kül diğer ikisiyle karıştırılarak deneyler tekrarlanmıştır. Çamur/kimyasal madde oranı olarak 1/0.1 ve 1/0.05 oranları kullanılmıştır. Deneyler 2 ayrı çamur numunesi üzerinde yapılmış ve hazırlanan karışımlar desikatörde saklanmıştır. 7. ve 28. günlerde Laboratuvar Veyn Deneyi yardımıyla numunelerin kayma mukavemetleri ölçülmüştür. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak son bölümde verilmiştir.



## BÖLÜM 10

## DENEYLERİN SONUÇLARI

## 10.1 Birinci Kısım Deneyler

Tablo 10.1 Haliç numunelerinin organik madde oranları ve Ph sayıları

Sondaj No	Numune No	Organik Madde(%)	Ph
AR-1	BD 1	10.9	8.5
AR-2	BD 1	11	7
AR-3	BD 1	18.8	7
AR-4	BD 1	26.8	7.5
AR-5	BD 1	5.8	7
AR-6	BD 1	5.9	8
AR-7	BD 1	15.4	8.5
AR-9	BD 1	2.2	7.5
AR-10	BD 1	1.2	7.5
AR-11	BD 1	29.7	8.5
AR-12	BD 1	4.8	7.5
AR-13	BD 1	7.7	8.5
AR-14	BD 1	4.7	7
AR-15	BD 1	19.8	8
AR-16	BD 1	17.6	7.5
AR-17	BD 1	0.5	7.5
AR-18	BD 2	2.24	8
AR-19	BD 1	4.44	8.5
AR-20	BD 1	0.89	8

Zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde önemli etkileri olan organik madde oranları ve Ph sayıları Tablo 10.1'de gösterilmiştir. Organik madde oranları oldukça değişken (%0.5-%29.7) bir aralıkta bulunmaktadır. AR-1, AR-2, AR-3, AR-5, AR-6, AR-7, AR-9, AR-11, AR-12, AR-13, AR-15, AR-17, AR-18 numuneleri MH-OH, AR-10, AR-14, AR-19, AR-20 numuneleri ML-OL sınıfına girmiştir. Bu numunelerin hangi sınıfa girdiğini tayin edebilmek için organik madde oranları dikkate alınmıştır. %10 ve üzeri değerlere sahip olanlar için, açık havada kurutmak suretiyle, likit limit deneyleri tekrar edilmiştir. Etüvde kurutularak bulunan likit limit değerinin, açık havada kurutularak bulunan likit limit değerinin 0.75'inden az olduğu durumlar için sınıflandırmada düzeltmeler yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 10.2'de gösterilmiştir.

Tablo 10.2 Likit Limit Deneyleri

	Etüvde kurutularak		Açık havada kurutularak	
	Likit Limit	Sınıfl.	Likit Limit	Yeni Sınıfl.
AR-1	53	MH	63	MH
AR-2	52	MH	81	OH
AR-3	75	MH	136	OH
AR-7	58	MH	134	OH
AR-11	55	MH	102	OH
AR-15	53	MH	76	OH

Tablo 10.3'de halic numunelerinin zemin özellikleri toplu halde verilmiştir. Genel olarak su muhtevaları oldukça yüksek ve değişken ( $w = \% 55-261$ ), silt boyutundaki dane oranı fazla (%45-82) kil oranı %5-36, kum oranı %5-30, plastisite indisi 8-52 aralığında ve çoğunlukla MH sınıfına dahildir.

Tablo 10.3 Haliç numuneleri zemin özellikleri

Numune no	Derinlik (m)	Su Muhtevası (%)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Sımf.	Kum Oranı (%)	Silt Oranı (%)	Kil Oranı (%)
AR1 BD1	0.00-2.00	176	53	33	20	MH	12	48	40
AR2 BD1	0.00-5.00	104	52	44	8	OH	22	56	20
AR3 BD1	0.00-2.00	240	75	58	17	OH	10	61	29
AR4 BD1	0.00-2.00	124	64	12	52	CH	28	67	5
AR5 BD1	0.00-2.00	261	65	52	13	MH	15	70	15
AR6 BD1	0.00-5.00	113	58	40	18	MH	23	45	32
AR7 BD1	0.00-2.00	241	58	44	14	OH	21	57	22
AR9 BD1	0.00-2.00	244	64	53	11	MH	24	69	7
AR10BD1	0.00-5.00	126	49	40	9	ML	5	66	29
AR11BD1	0.00-5.00	136	55	40	15	MH	15	45	30
AR12BD1	0.00-5.00	167	74	55	19	MH	16	57	27
AR13BD1	0.00-5.00	120	71	46	25	MH	15	63	22
AR14BD1	0.00-5.00	86	42	28	14	ML	7	57	36

Tablo 10.3 Haliç numuneleri zemin özellikleri (devamı)

Numune no	Derinlik (m)	Su Muhtevası (%)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Sıfıfl.	Kum Oranı (%)	Silt Oranı (%)	Kil Oranı (%)
AR15BD1	0.00-5.00	114	53	41	12	OH	19	75	6
AR16BD1	0.00-5.00	73	49	25	24	CL	25	55	20
AR17BD1	0.00-5.00	133	65	42	23	MH	20	52	28
AR18BD2	1.00-1.50	219	62	35	27	MH	18	82	0
AR19BD1	0.00-5.00	105	49	40	9	ML	19	71	10
AR20BD1	0.00-2.00	55	40	23	17	ML	30	55	15

## 10.2 İkinci Kısım Deneyler

Flokülasyon deneyleri toplu sonuçları, ‘çökelen katı yüksekliği/karışım yüksekliği-zaman’ grafikleri yardımıyla EK 1’de toplu olarak verilmiştir. Bu sonuçlar şekil 10.1, şekil 10.2, şekil 10.3, şekil 10.4, şekil 10.5’de ‘toplam oturma oranı-kullanılan kimyasal’ grafikleri yardımıyla birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir:

1- Deneylerde kullanılan inorganik kimyasal maddeler farklı oranlarda farklı sonuçlar vermiştir. Genel olarak kimyasal maddenin kuru çamura oranı %0.05 in altında ve %1’in üstünde olduğu durumlarda çamurda deflokülasyon eğilimi artmaktadır. %0.1-%0.5 arası flokülasyon maksimum seviyededir.

2- +3 değerlikli kationlar içeren kimyasallar  $FeCl_3$  ve  $AlSO_4$  beklenildiği gibi +2 değerlikli kationlar içeren kimyasallar  $CaCl_2$ ,  $MgSO_4$  ve  $MgO$ ’ya göre daha iyi çökeltme oranları vermiştir. Kationların valans değeri arttıkça çökeltme yeteneklerinin arttığı söylenebilir.

3- Deneylerde kullanılan farklı çamur numunelerinde farklı çökeltme oranları görülmüştür. AR-5 çamur numunesinde çökelen katı/toplam karışım oranı kullanılan bütün kimyasal maddeler için en düşük seviyededir. Dolayısıyla en iyi çökeltme oranı AR-5 çamur numunesinde elde edilmiştir. Bu duruma neden olan faktörler:

a- Düşük katı madde muhtevası

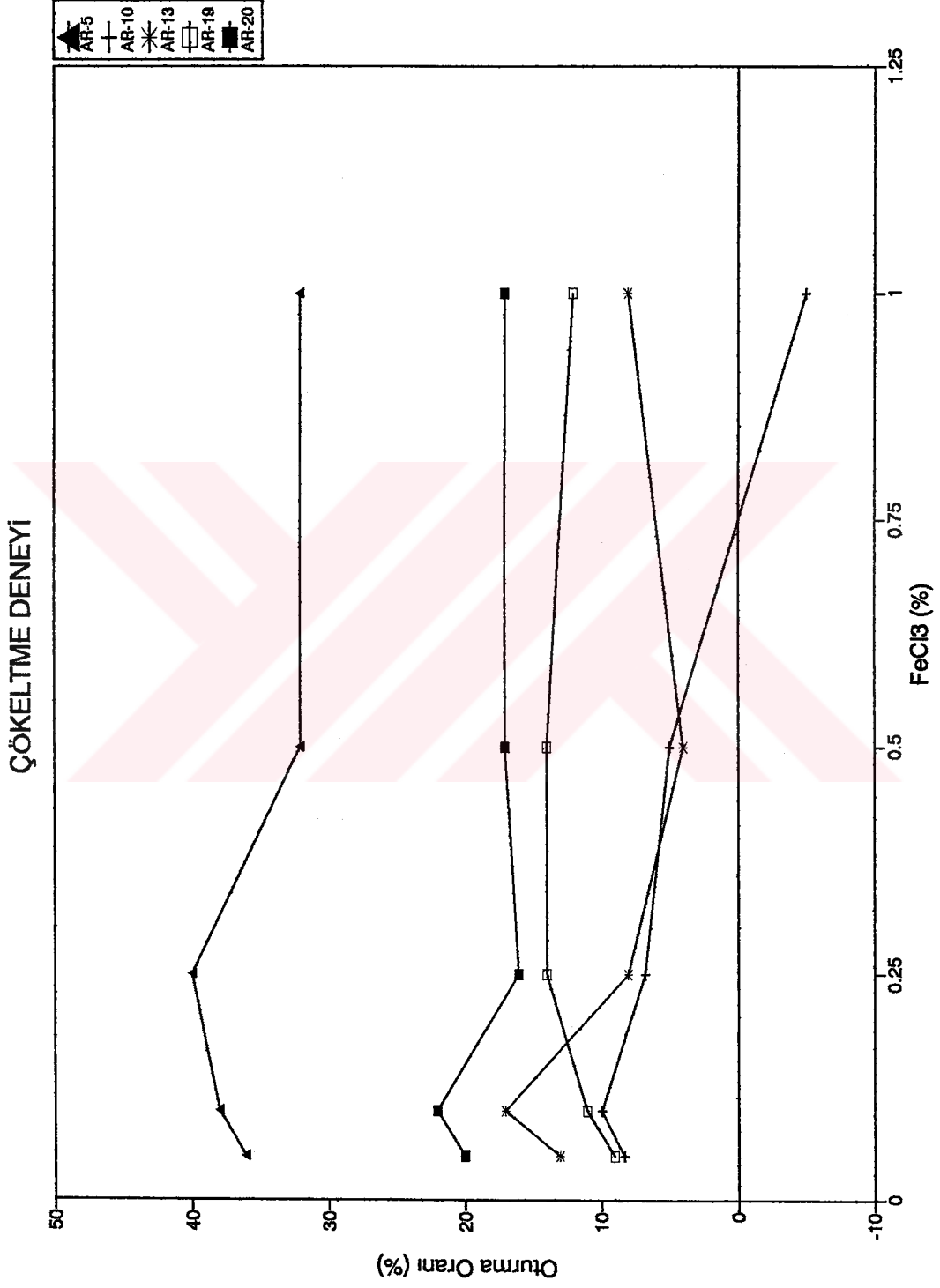
b- Yüksek su muhtevası

4- Çökeltmenin büyük bir kısmı (%80) ilk 3 gün içerisinde gerçekleşmektedir, 7. günün sonunda ise çökeltme bitmektedir.

5- Kaynaklarda önerilmemekle birlikte deneylerde kullanılan  $MgCO_3$ ,  $FeSO_4$ ,  $Na_2CO_3$ ’de daha çok defloküle etme özelliği görülmüştür.

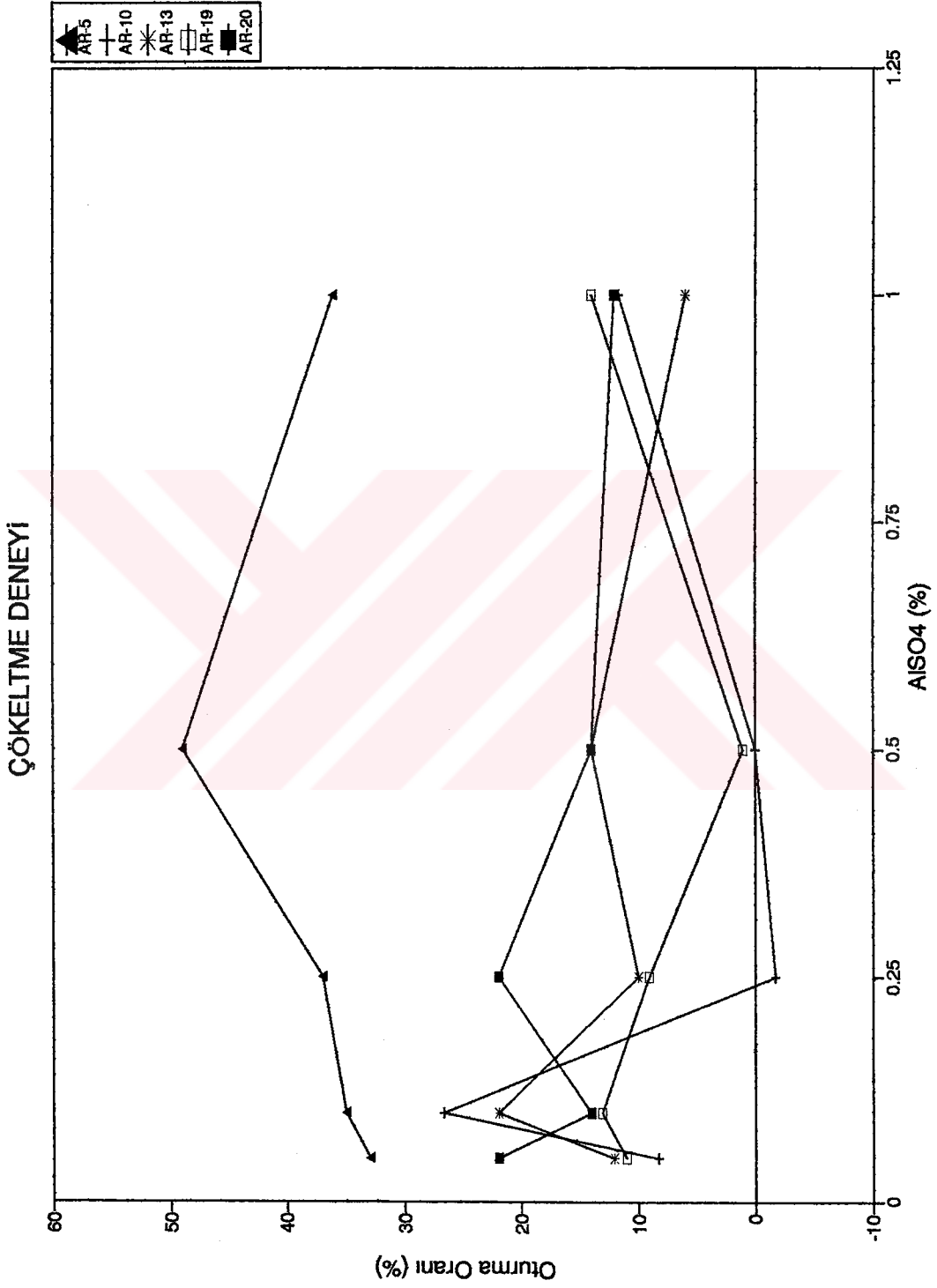
6- Sulu-çamurların doğal flokülasyon miktarını ölçmek için her deney sırasında ‘kontrol’ adı verilen numuneler herhangi bir kimyasal madde kullanılmaksızın çökeltmeye bırakılmıştır. Bu çökeltme oranı %10-%15 mertebesindedir.

7- Kullanılan kimyasal maddelerle bu oran %50 mertebesine kadar çıkmıştır (AR-5 çamur numunesinde), ama genel olarak %15-%27 oranlarında çökeltme seviyeleri elde edilmiştir.

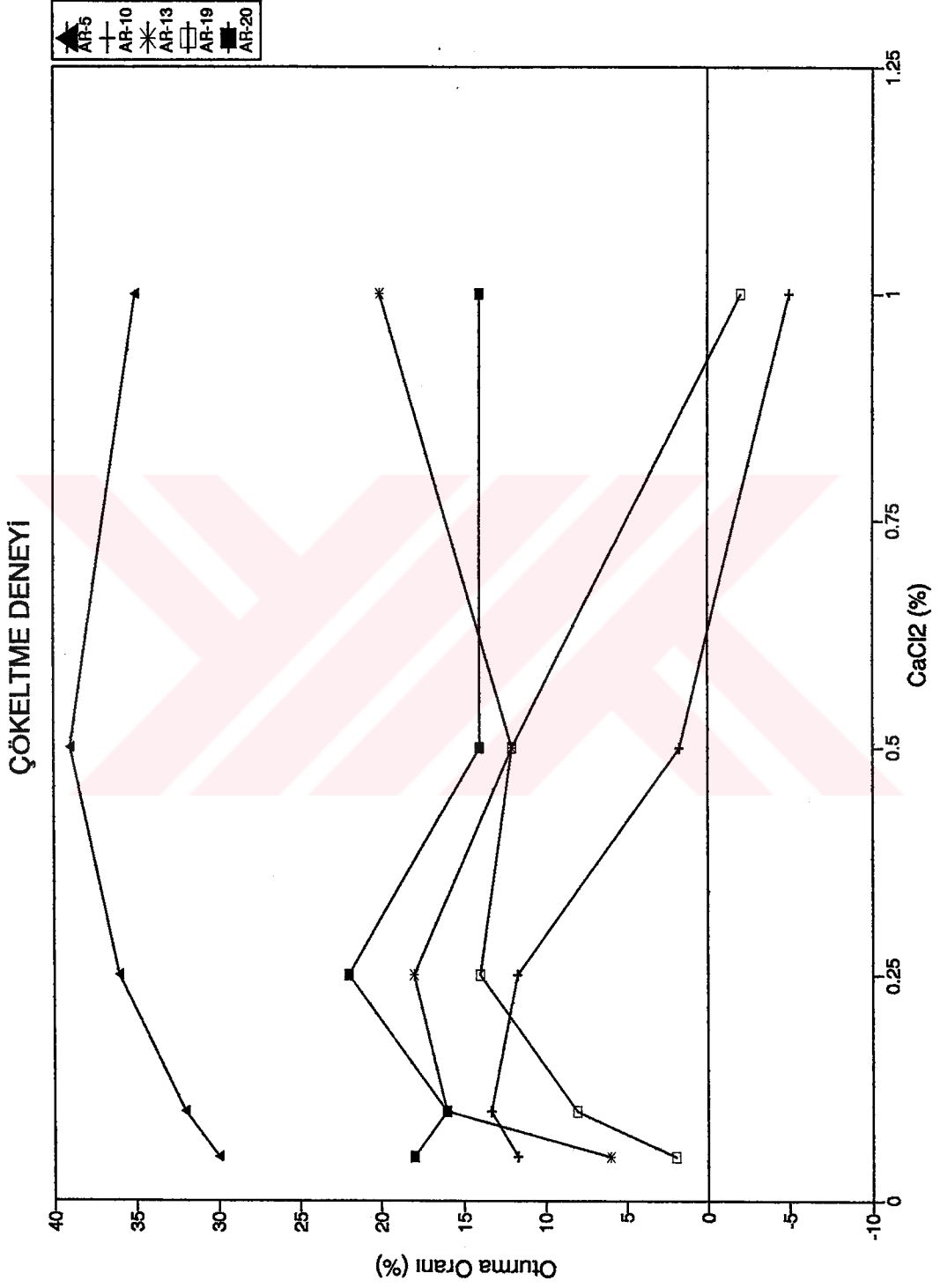


Şekil 10.1 Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanarak elde edilen oturma oranları

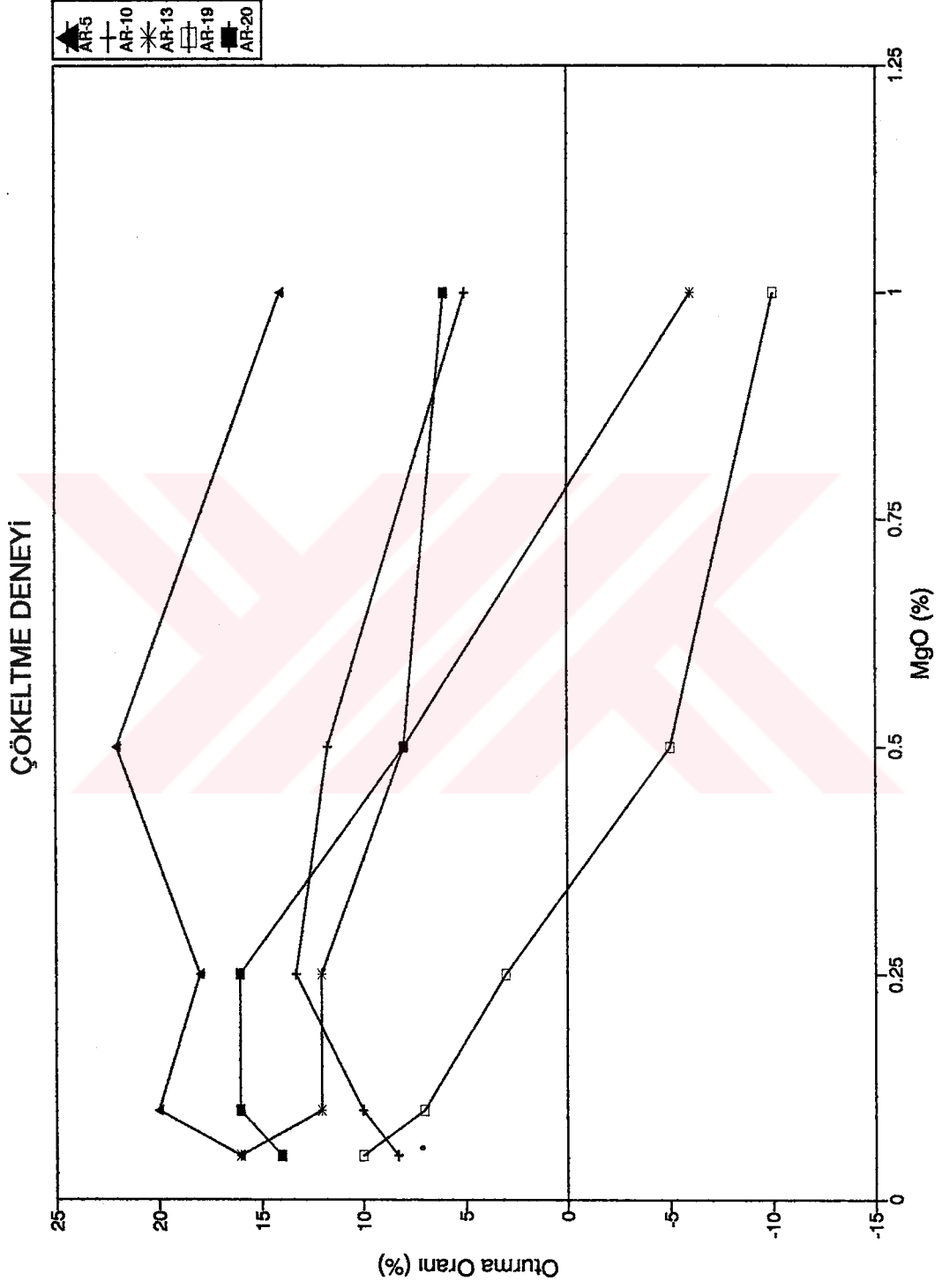




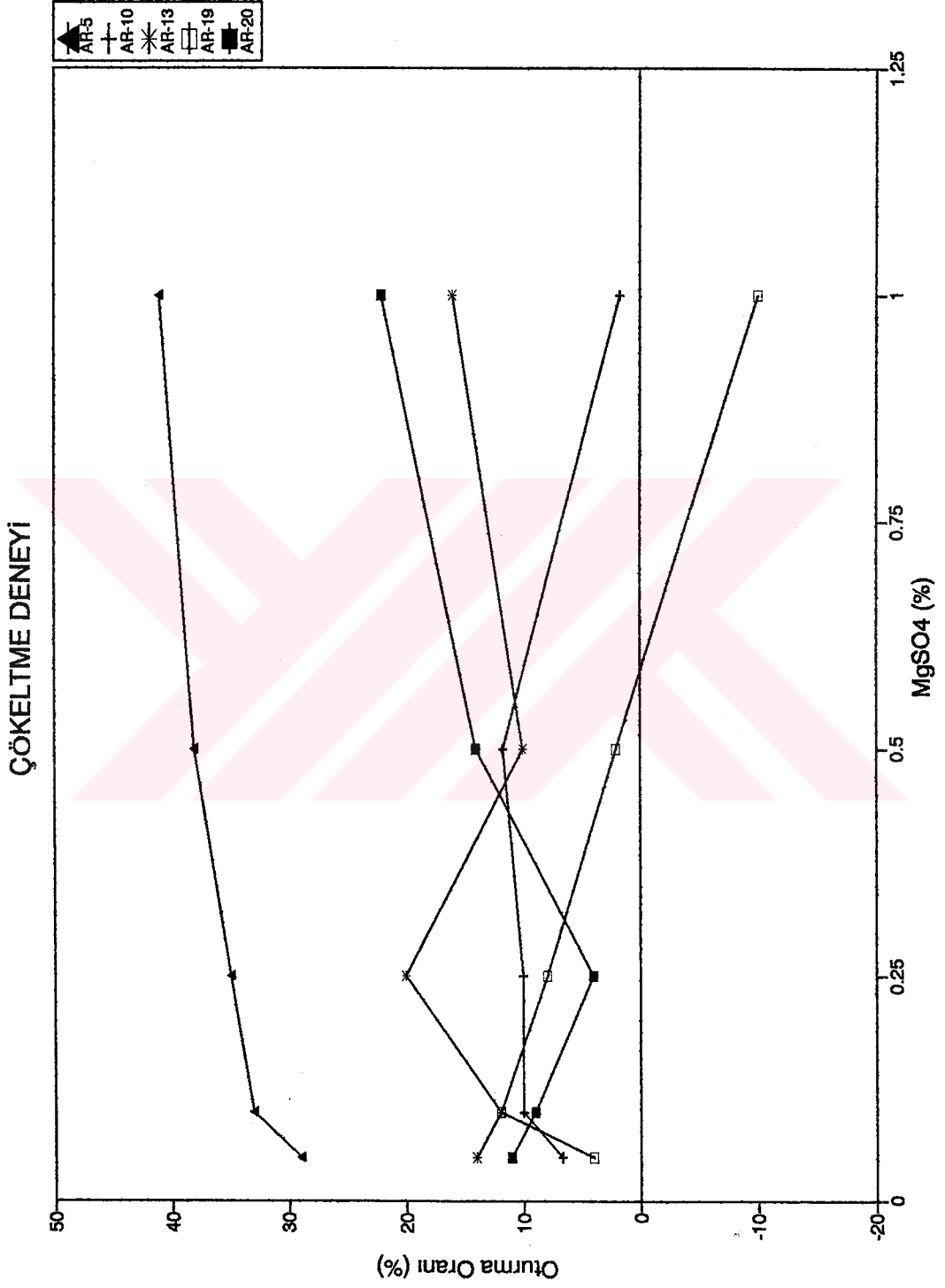
Şekil 10.2 Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda  $AlSO_4$  kullanılarak elde edilen oturma oranları



Şekil 10.3 Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda CaCl<sub>2</sub> kullanarak elde edilen oturma oranları



Şekil 10.4 Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda MgO kullanarak elde edilen oturma oranları



Şekil 10.5 Farklı çamur numunelerinde değişik oranlarda MgSO<sub>4</sub> kullanılarak elde edilen oturma oranları

8- Ph sayılarının değiştirilmesi, beklenildiği gibi, çökeltme oranlarını etkilemiştir. 3 ayrı çamur numunesinde tekrarlanan deneyler sonucunda şekil 10.6, şekil 10.7, şekil 10.8'de görülebileceği gibi çökeltme oranlarında yaklaşık %10 oranında artışlar kaydedilmiştir. Böylelikle doğal flokülasyonla %10-%15 oranında çökebilen çamur numunelerinde %25-%35 oranlarında çökeltmeler sağlanmıştır. Flokülasyonun asidik ortamlarda ( $Ph < 7$ ) en az olduğu, bazik ortamlarda (özellikle  $Ph = 11-12$ ) ise en fazla olduğu gösterilmiştir.

9- Şekil 10.1, şekil 10.2, şekil 10.3, şekil 10.4 ve şekil 10.5'de görülebileceği gibi bazı kimyasal maddelerin bazı oranlarından elde edilen sonuçlar doğal flokülasyon miktarının altındadır. Bu, kullanılan kimyasal maddenin doğal flokülasyonu azalttığı anlamına gelir, – değerler ise deflokülasyonu göstermektedir.

### 10.3 Üçüncü Kısım Deneyler

3 ayrı çamur numunesinde özgül direnç deneyleri yapılmıştır. Zamana bağlı olarak suyun çıkışı her vakum basıncı kademesinde ölçülmüştür. Şekil 10.9'da deney düzeneği görülmektedir.

#### 10.3.1 AR-2 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları

$$\text{Deney başı numune ağırlığı} = 167.7\text{gr}$$

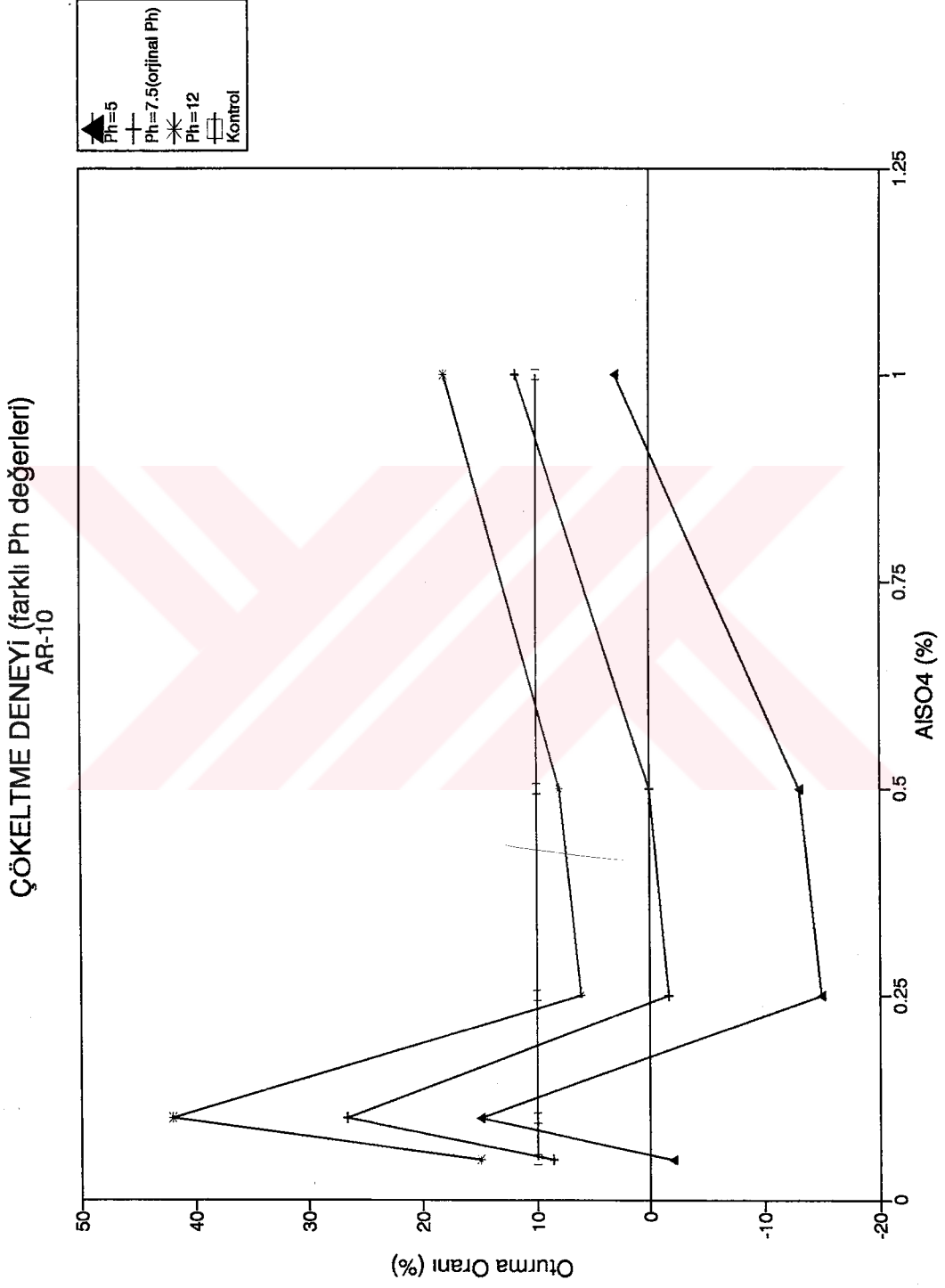
$$\text{Deney sonu numune ağırlığı} = 148.6\text{gr}$$

$$w_i = \%116.7$$

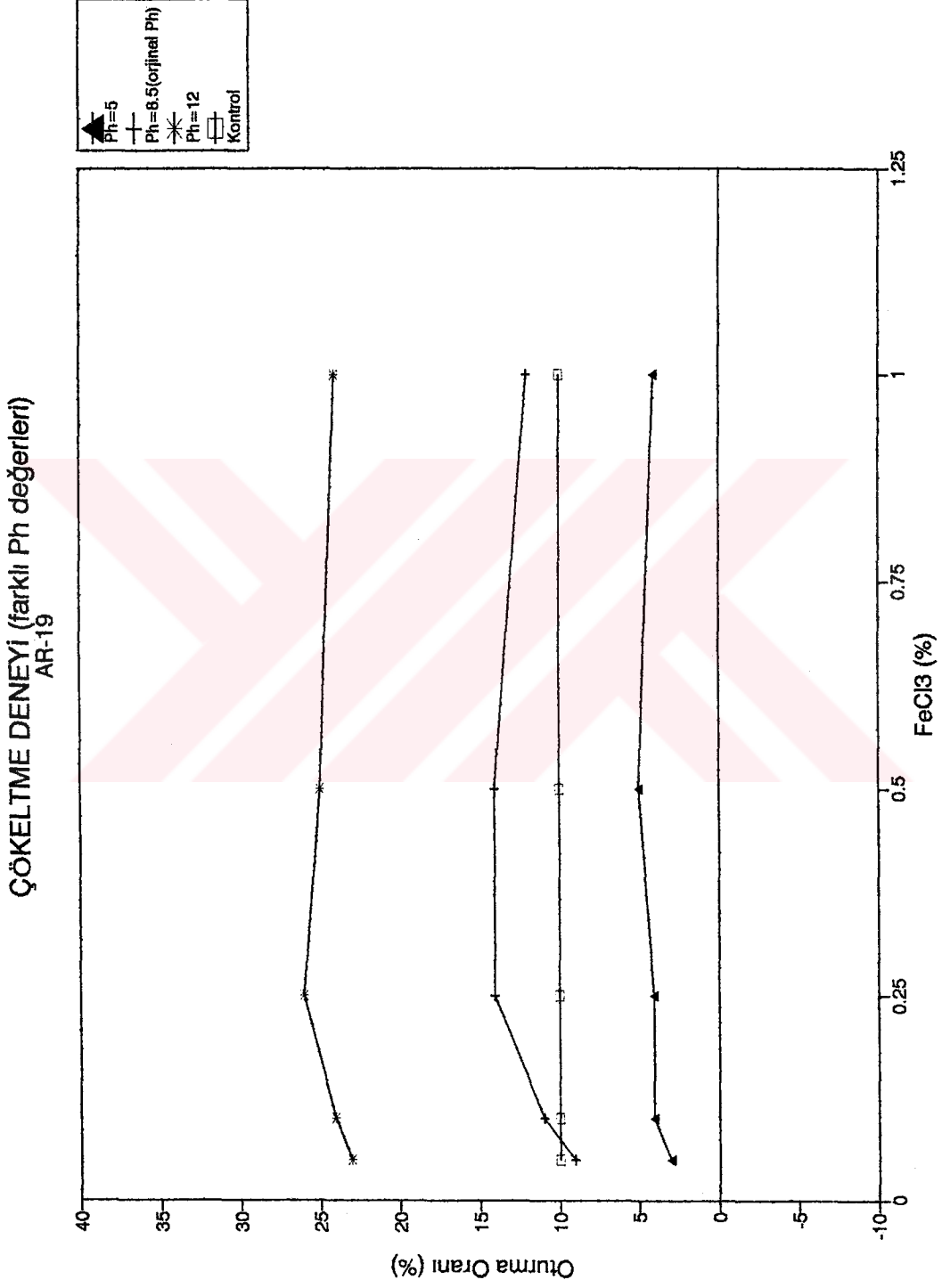
$$w_f = \%72$$

$$G_s = 2.8$$

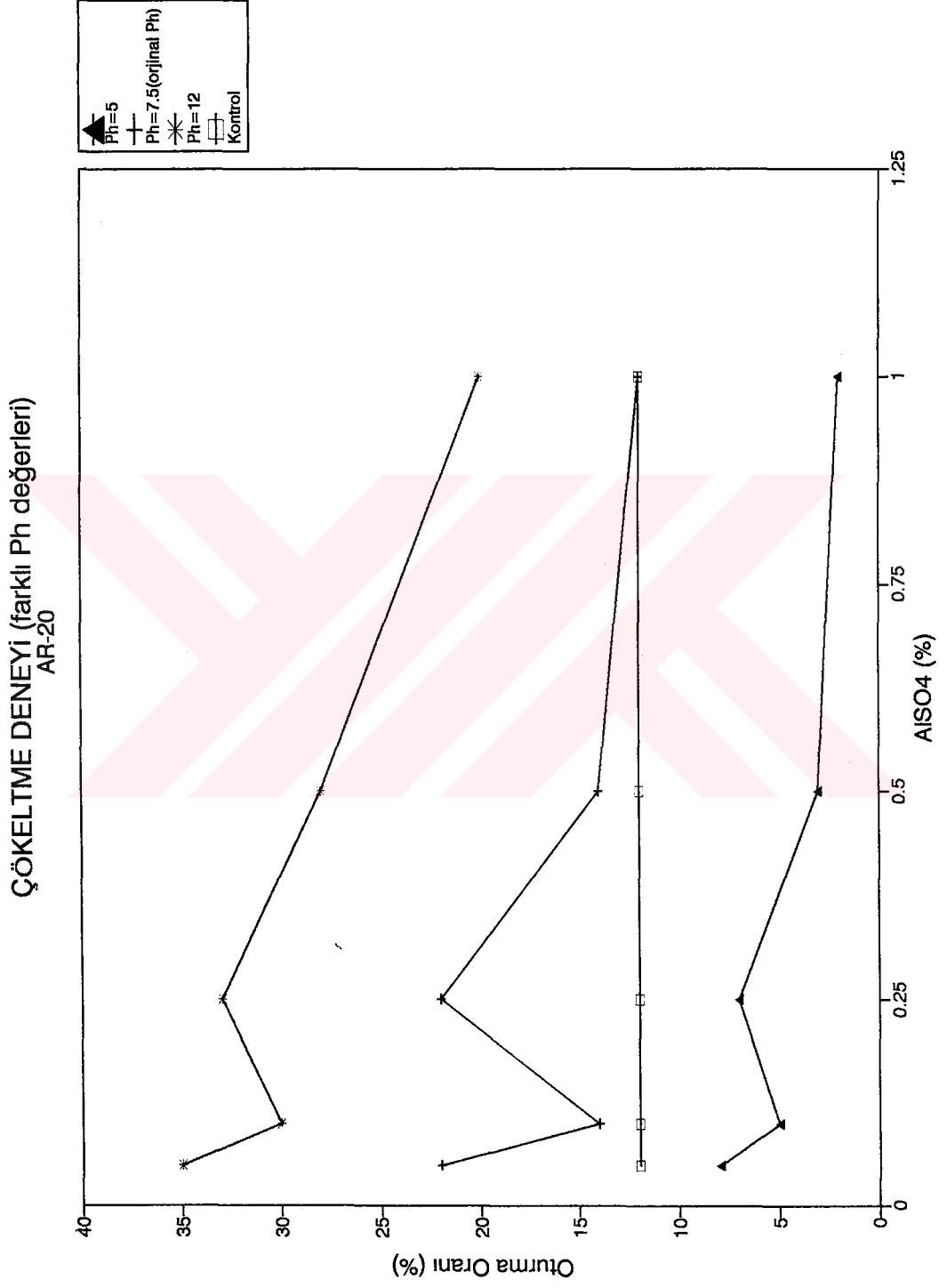
Her basınç kademesinde dışarı çıkan suyun ( $\Delta V$ ), çamurun hacim değişikliğine eşit olduğu kabul edilerek (alan da sabit olduğu için) çamurdaki boy değişimleri ( $\Delta H$ ) bulunmuştur.



Şekil 10.6 AR-10 çamur numunesinde değişik oranlarda  $AlSO_4$  kullanılarak elde edilen oturma oranlarına değişen Ph'ın etkisi

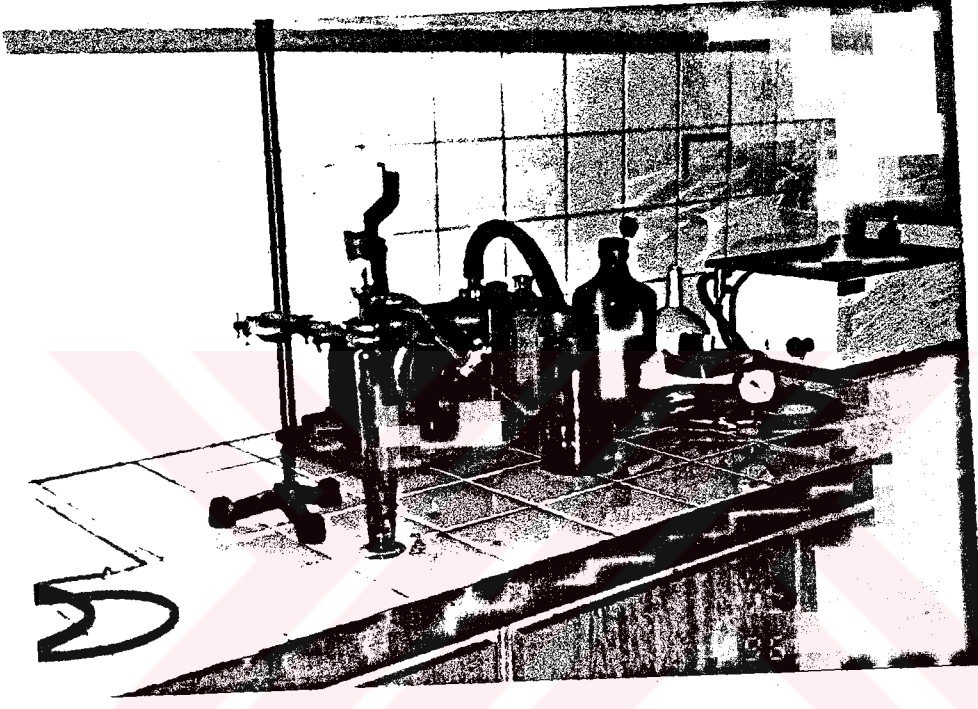


Şekil 10.7 AR-19 çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanılarak elde edilen oturma oranlarına değişen Ph' in etkisi



Şekil 10.8 AR-20 çamur numunesinde değişik oranlarda AlSO<sub>4</sub> kullanarak elde edilen oturma oranlarına değişen Ph'ın etkisi





Şekil 10.9 Özgül direnç deney düzeneği

Tablo 10.4 AR-2 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları

P(kPa) (vakum basıncı)	$\Delta V(\text{cm}^3)$ (dışarı çıkan su)	$\Delta H(\text{mm})$ Çamurda Boy Değişimi	Numune Kalınlığı (mm)	e Boşluk Oranı
0	0	0	31	4.80
26.6	4.8	1.62	29.38	4.50
53.2	5.6	1.89	27.49	4.15
79.8	7	2.35	25.14	3.70

## 10.3.2 AR-10 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları

Deney başı numune ağırlığı = 116.2gr

Deney sonu numune ağırlığı = 97.5gr

$w_i = \%121$

$w_r = \%60$

$G_s = 2.9$

Tablo 10.5 AR-10 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları

P(kPa) (vakum basıncı)	$\Delta V(\text{cm}^3)$ (dışarı çıkan su)	$\Delta H(\text{mm})$ Çamurda Boy Değişimi	Numune Kalınlığı (mm)	e Boşluk Oranı
0	0	0	31	3.68
26.6	4.5	1.15	29.85	3.50
53.2	5.1	1.71	28.14	3.24
79.8	6.9	2.32	25.82	2.90

### 10.3.3 AR-19 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları

Deney başı numune ağırlığı = 172.7gr

Deney sonu numune ağırlığı = 155.8gr

$w_i = \%104.7$

$w_f = \%77$

$G_s = 2.9$

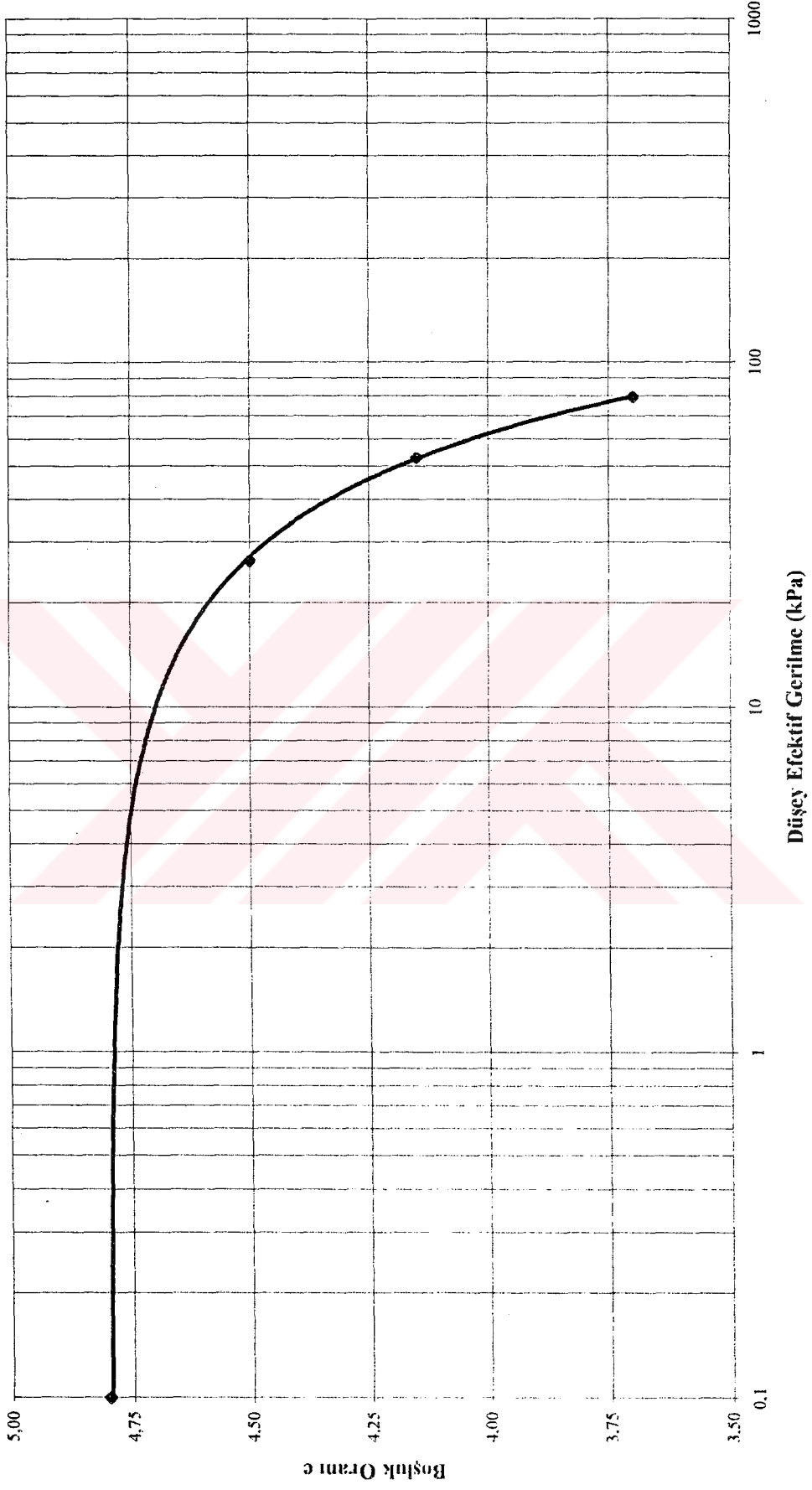
Tablo 10.6 AR-19 Çamur Numunesinde Yapılan Özgül Direnç Deney Sonuçları

P(kPa) (vakum basıncı)	$\Delta V(\text{cm}^3)$ (dışarı çıkan su)	$\Delta H(\text{mm})$ Çamurda Boy Değişimi	Numune Kalınlığı (mm)	e Boşluk Oranı
0	0	0	31	5.13
26.6	5.5	1.85	29.15	4.76
53.2	6.5	2.19	26.96	4.33
79.8	4	1.35	25.61	4.06

AR-2, AR-10, AR19 çamur numunelerinde yapılan özgül direnç deneylerinden elde edilen e-logp eğrileri şekil 10.10, şekil 10.11, şekil 10.12'de gösterilmiştir.

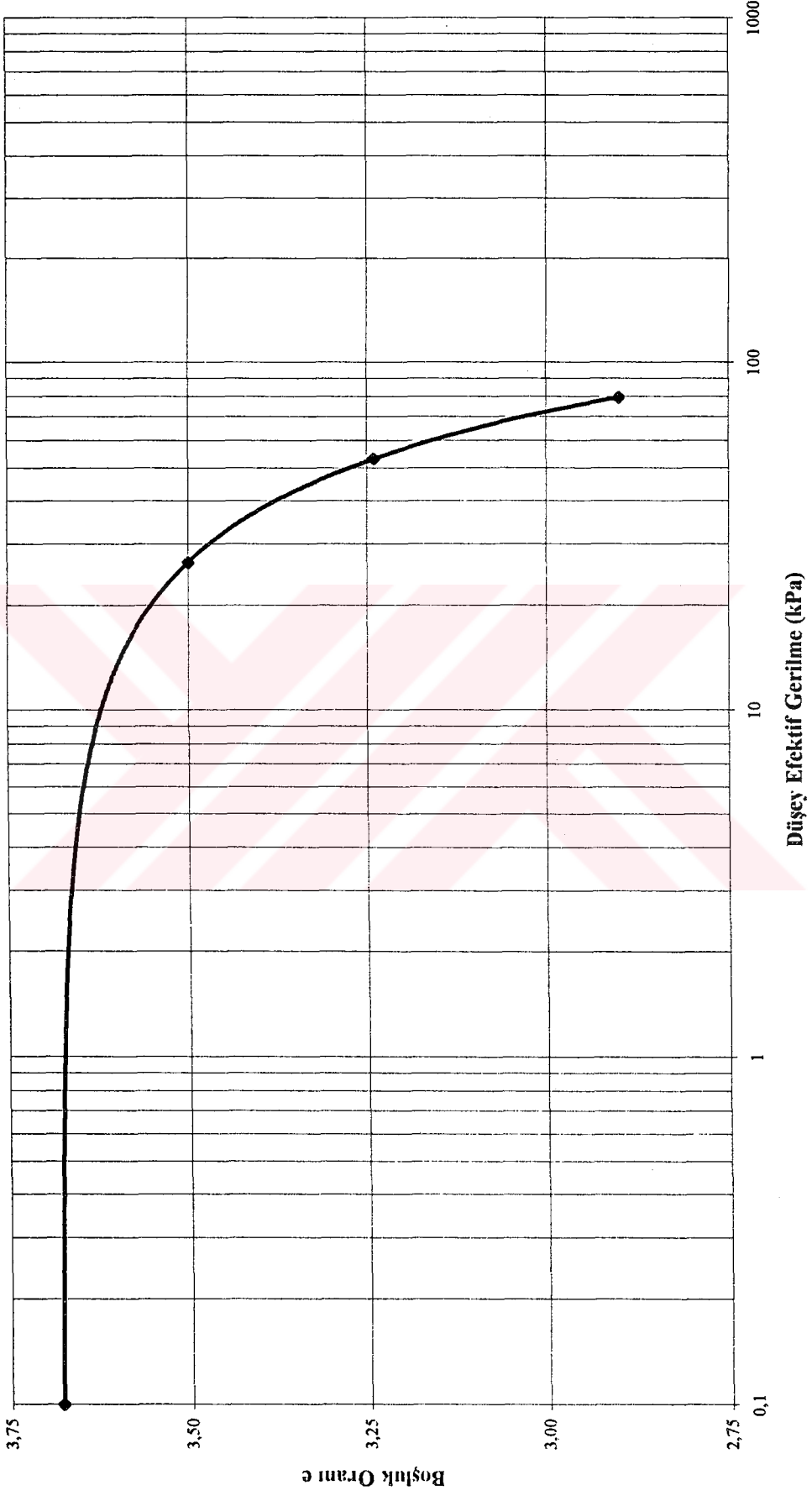
Bu çamur numuneleri için daha önce bulunan ve maksimum çökeltmeyi sağlayan kimyasal maddeler kullanılarak özgül direnç deneyleri tekrar edilmiştir. Deneyler sonucu eşit zamanlarda çamurdan süzülen su miktarının arttığı görülmüştür. Son numune yükseklikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 10.7'de verilmiştir. Hazırlanan bu 6 numunedan daha sonra ödometre deneyi yapılmıştır.

**ÖZGÜL DİRENÇ DENEYİ  
AR-2**



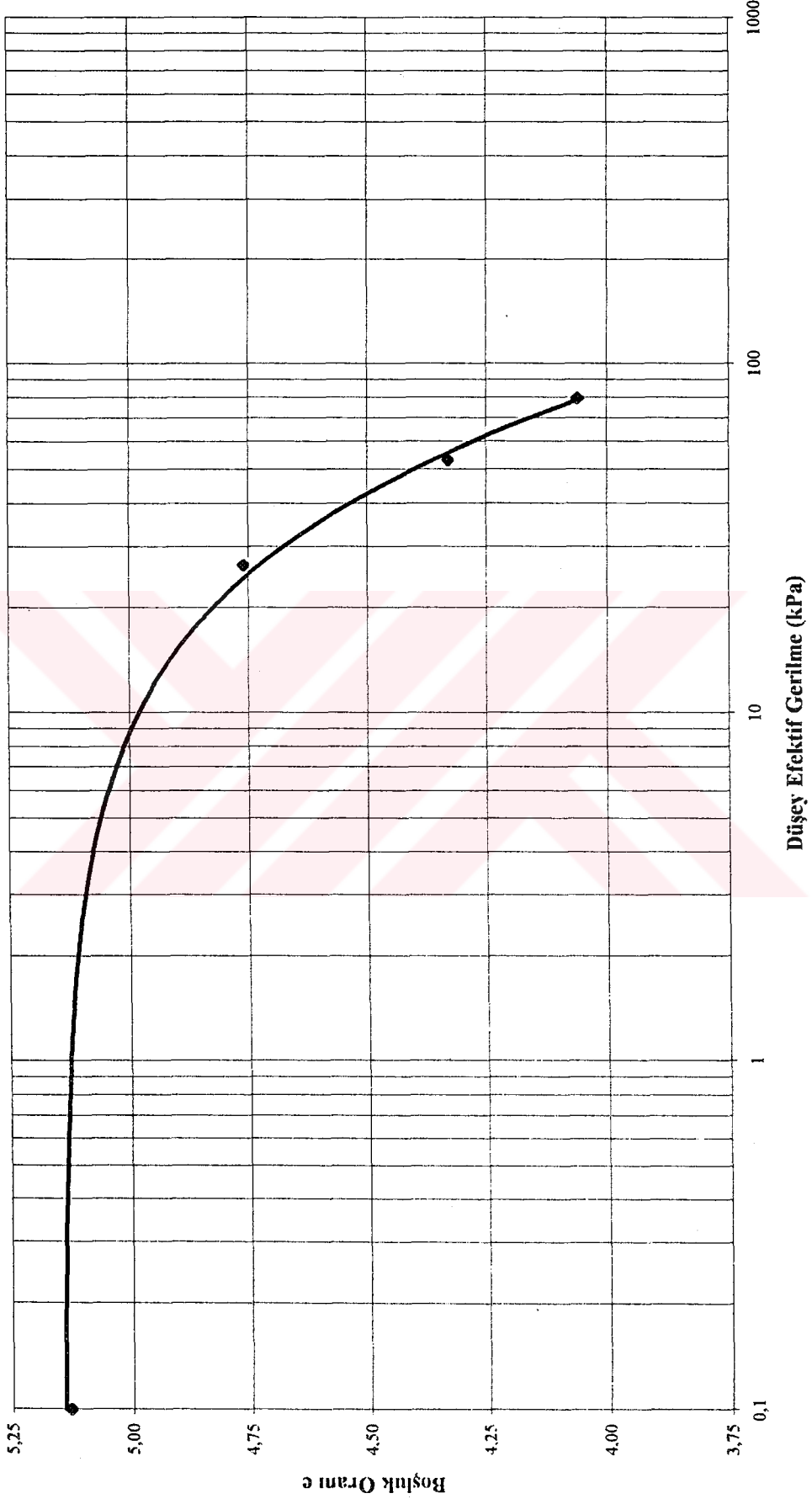
Şekil 10.10 AR-2 çamur numunesinde çökeltme deneyi ile elde edilen boşluk oranı-düşey efektif gerilme değişimi

**ÖZGÜL DİRENÇ DENEYİ**  
**AR-10**



Şekil 10.11 AR-10 çamur numunesinde çökeltme deneyi ile elde edilen boşluk oranı-  
düşey efektif gerilme değişimi

**ÖZGÜL DİRENÇ DENEYİ**  
**AR-19**



Şekil 10.12 AR-19 çamur numunesinde çökeltme deneyi ile elde edilen boşluk oranı-  
düşey efektif gerilme değişimi

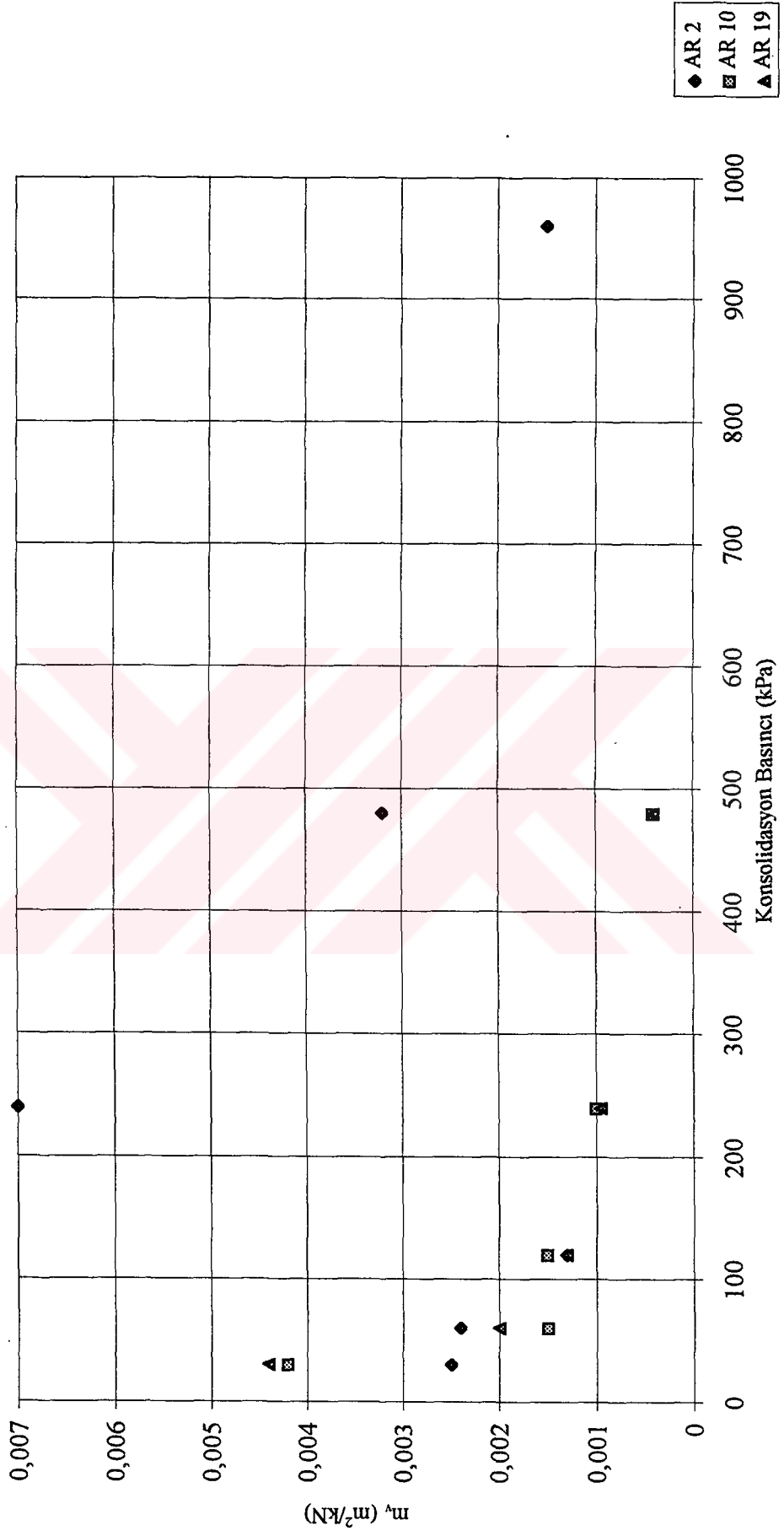
Tablo 10.7 Özgül direnç deneylerinden elde edilen nihai numune yükseklikleri

	Son kalınlık ( H ) (mm)	Son kalınlık ( H <sup>1</sup> ) (mm)
AR-2	25.14	18.5
AR-10	25.82	19.2
AR-19	25.61	19.1

#### 10.4 Dördüncü Kısım Deneyler

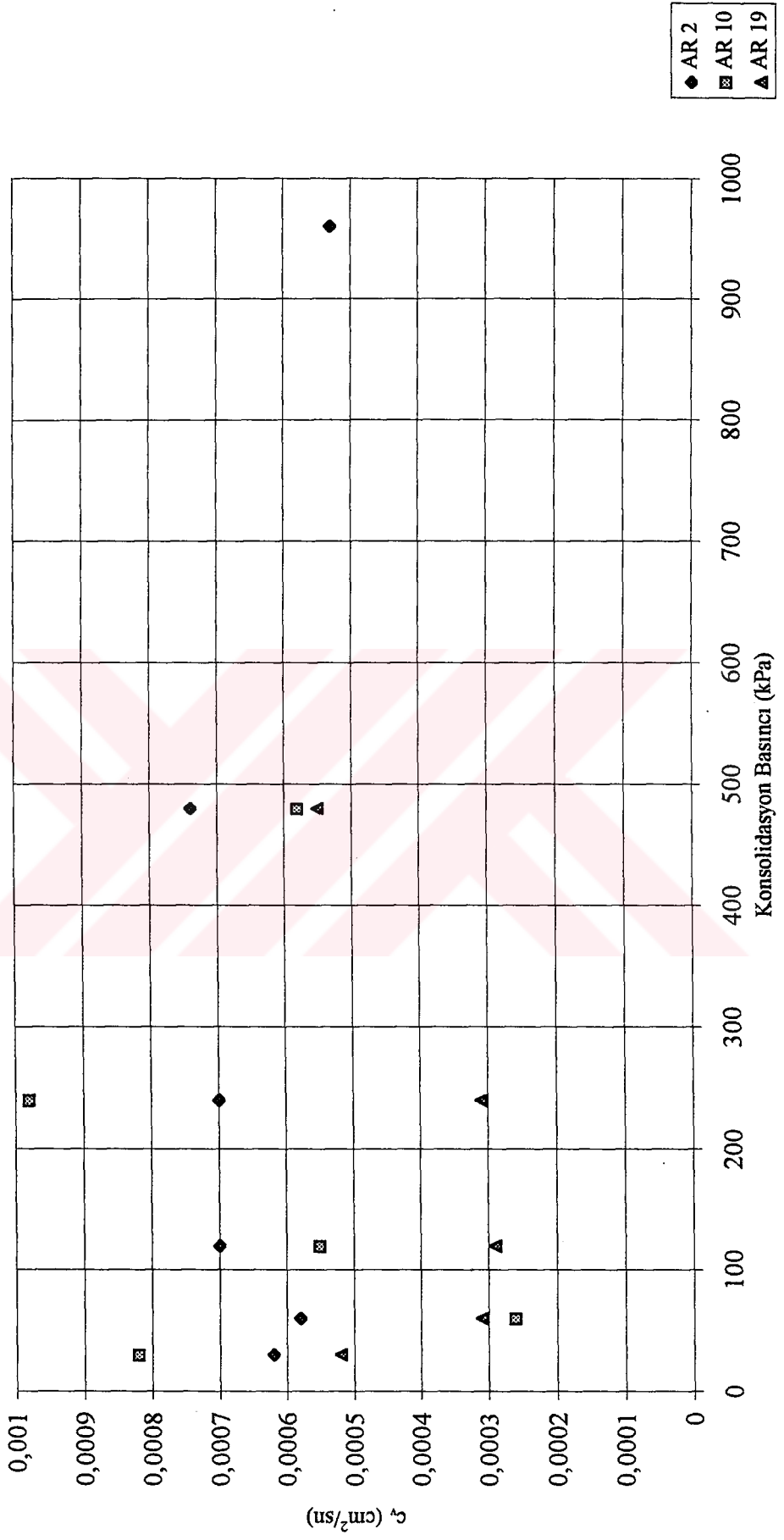
Özgül direnç deney düzeneğinden elde edilen numuneler üzerinde ödometre deneyleri yapılmıştır. Daha sonra kimyasal maddeler yardımıyla sudan arındırılması artırılan numunelerde deneyler tekrarlanmıştır. Sonuçlar Tablo 10.8'de verilmiştir.

Bu deneylerden şu sonuçlar çıkartılmıştır: Konsolidasyon basıncının artmasıyla konsolidasyon katsayısı  $C_v$ 'de beklenen azalmalar olmamış, onun yerine önce azalan sonra artan sonra tekrar azalan bir değişim göstermiştir. Tekrarlanan ödometre deneylerinden elde edilen  $C_v$ ' değerlerinde genelde bir azalma görülmüştür. Sıkışma indisi  $C_c$  değerleri ise 0.86-1.1 aralığında iken tekrarlanan deneyler sonucu  $C_c$ ' değerleri 0.66-0.73 aralığına inmiştir.



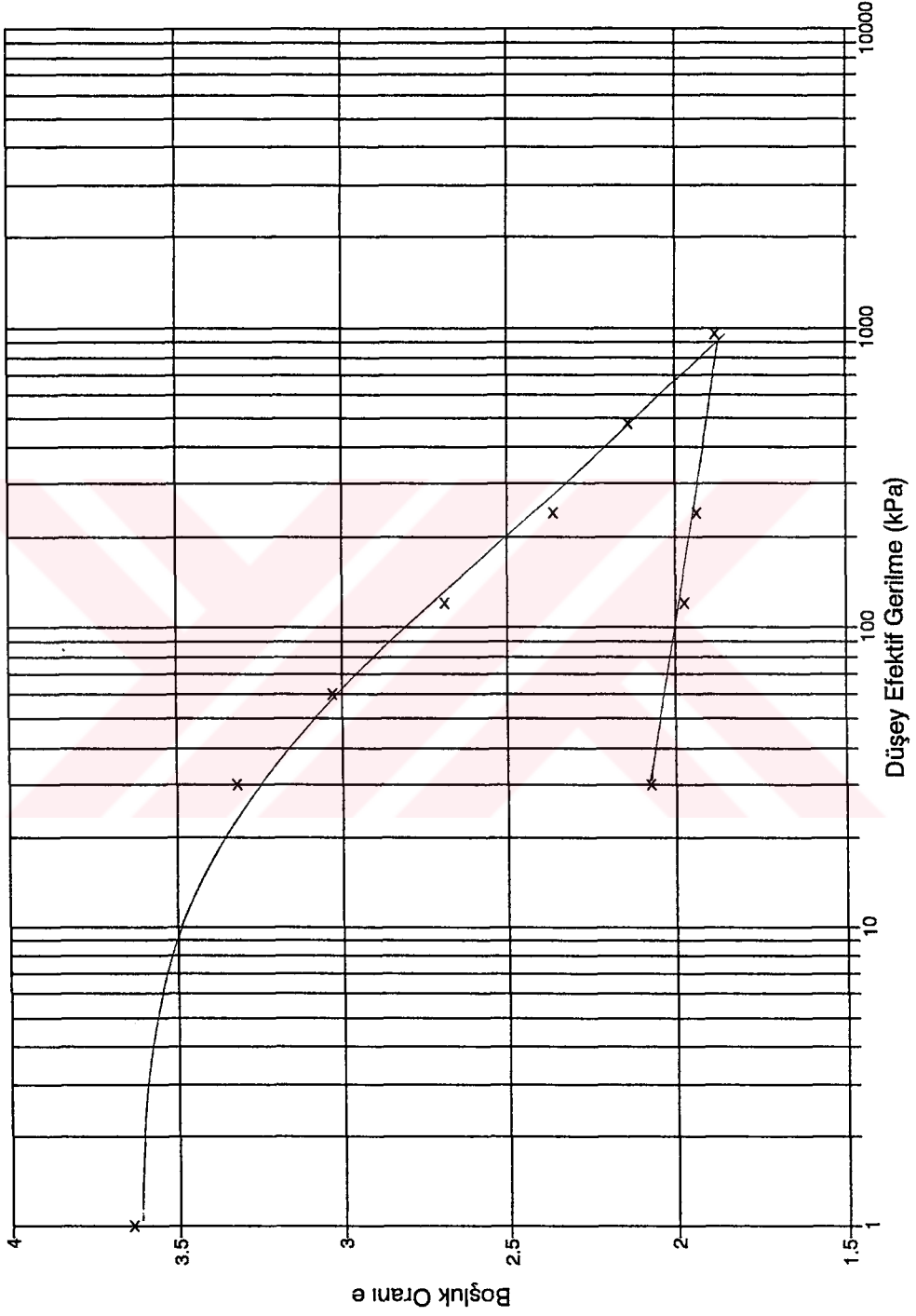
Şekil 10.13. Hacimsel sıkıştırma katsayısının konsolidasyon basıncına bağlı olarak değişimi





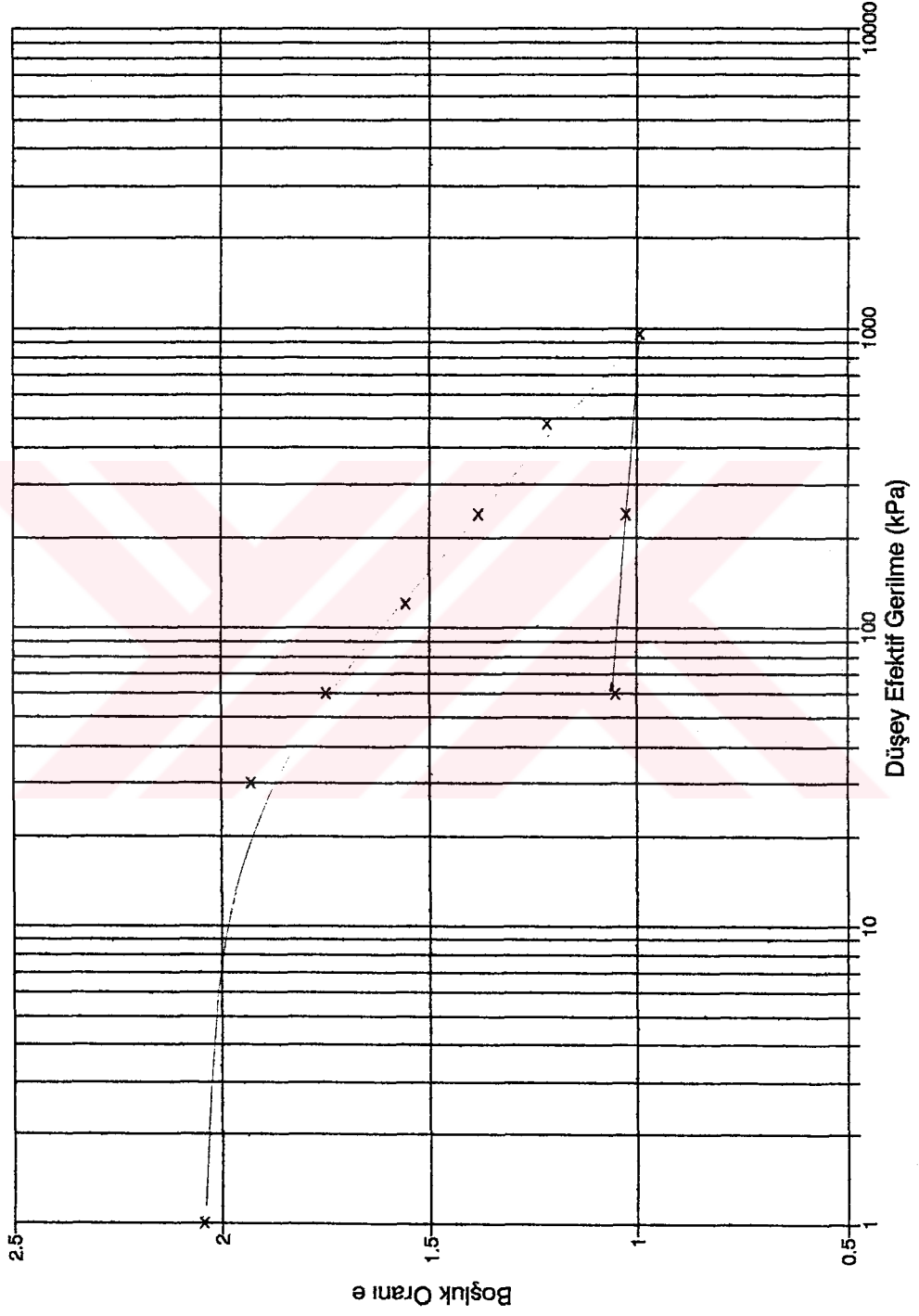
Şekil 10.14 Konsolidasyon katsayısının konsolidasyon basıncına bağlı olarak değişimi

KONSOLIDASYON DENEYİ  
AR-2



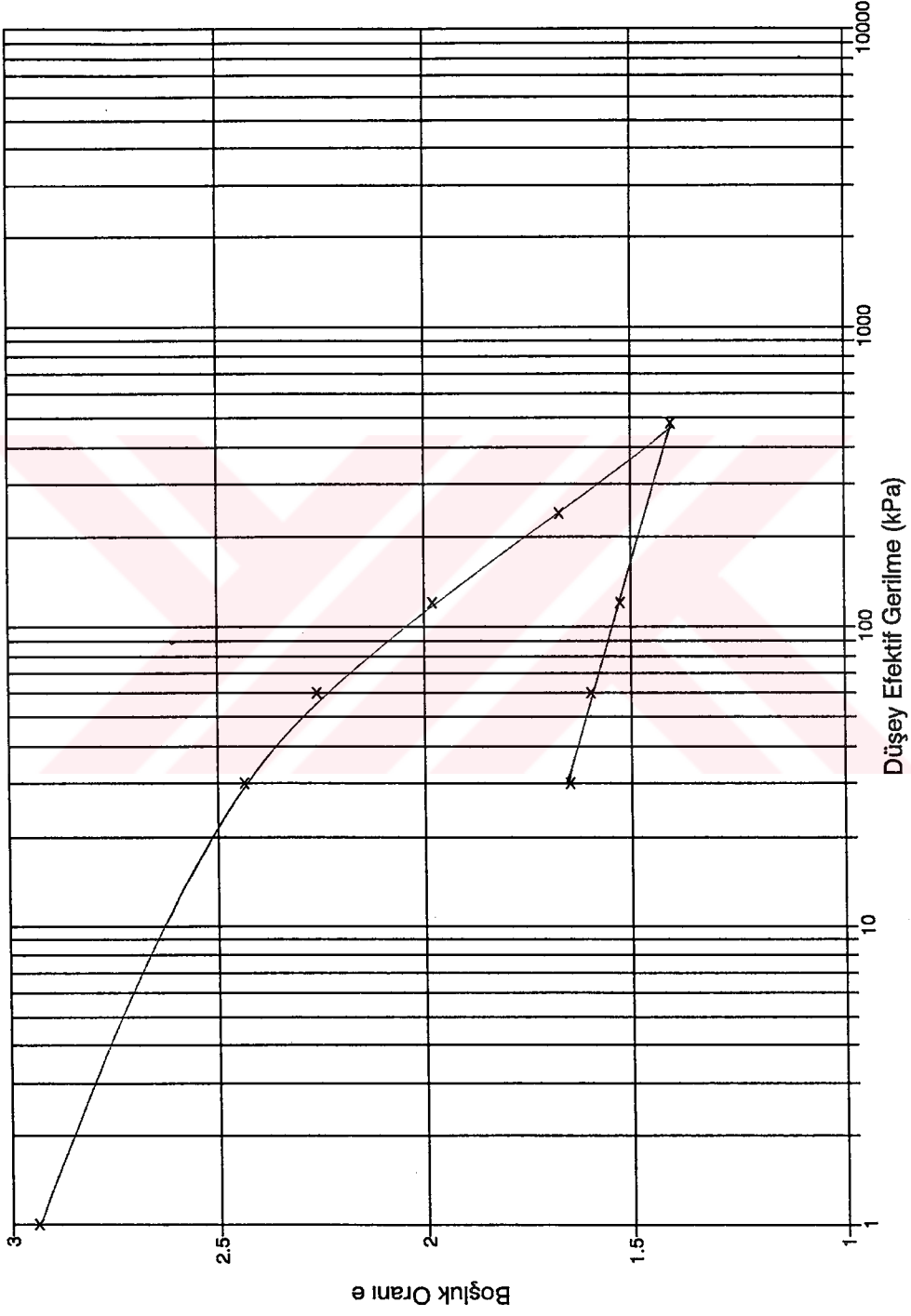
Şekil 10.15a AR-2 çamur numunesinde ödometre deneyi ile elde edilen boşluk oranı-  
düşey efektif gerilme değişimi

**KONSOLIDASYON DENEYİ**  
AR-2 (%0.25 FeCl<sub>3</sub> kullanıldı)



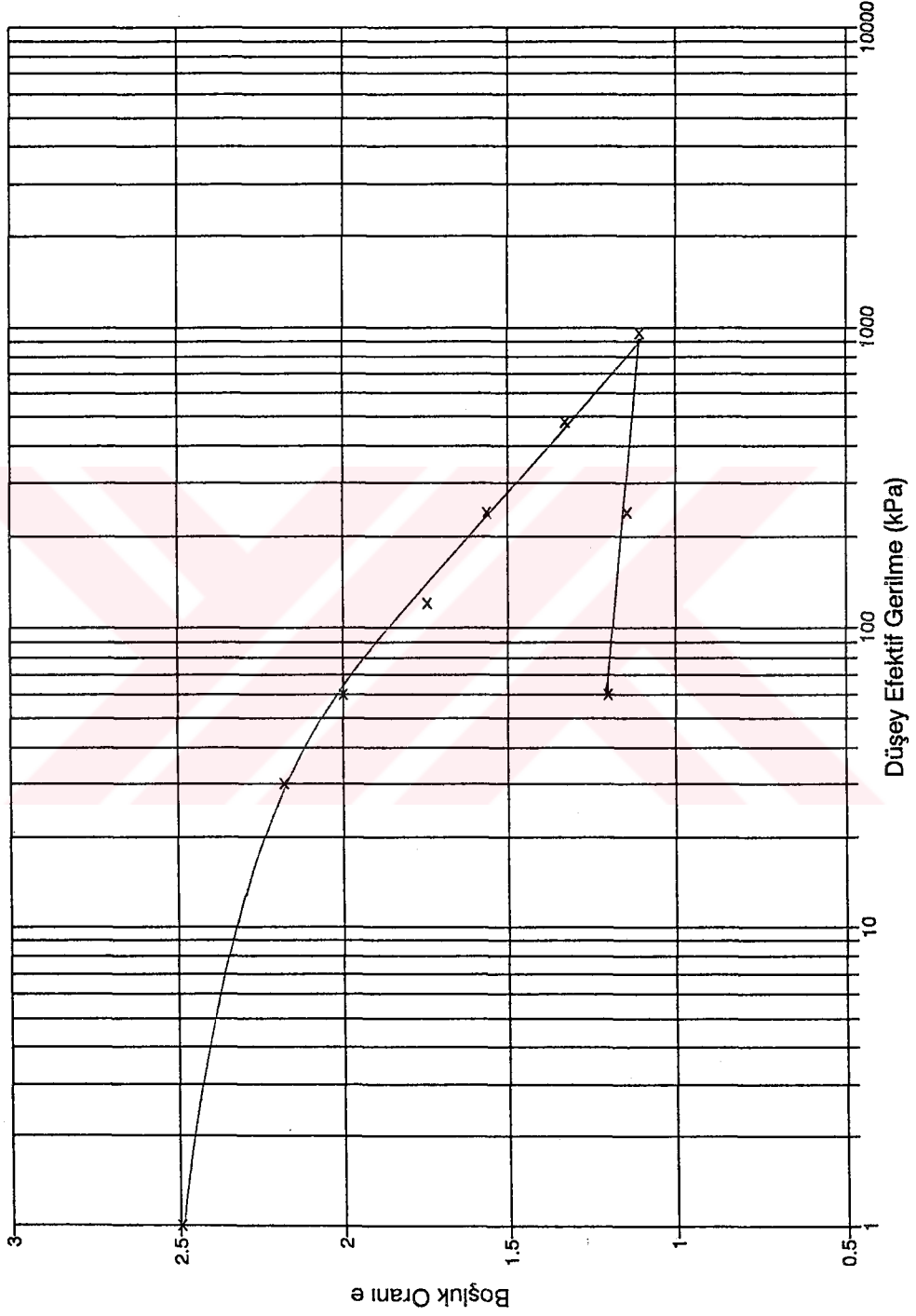
Şekil 10.15b AR-2 çamur numunesinde maksimum çökelmeyi sağlayan kimyasal maddenin kullanımı ile elde edilen boşluk oranı-düşey efektif gerilme değişimi

KONSOLIDASYON DENEYİ  
AR-10



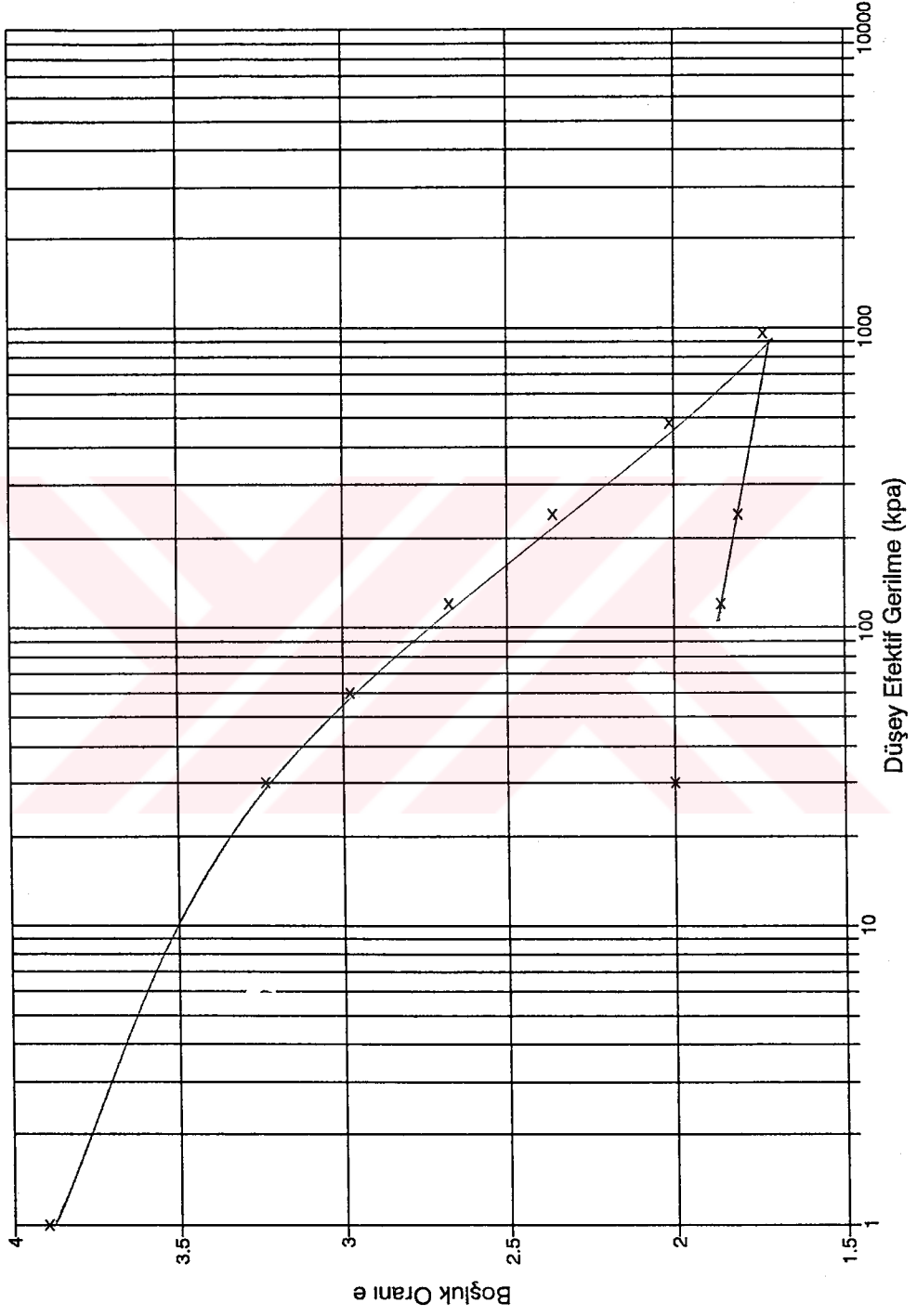
Şekil 10.16a AR-10 çamur numunesinde ödometre deneyi ile elde edilen boşluk oranı-  
düşey efektif gerilme değişimi

**KONSOLIDASYON DENEYİ**  
AR-10 (%0.1 AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanıldı)



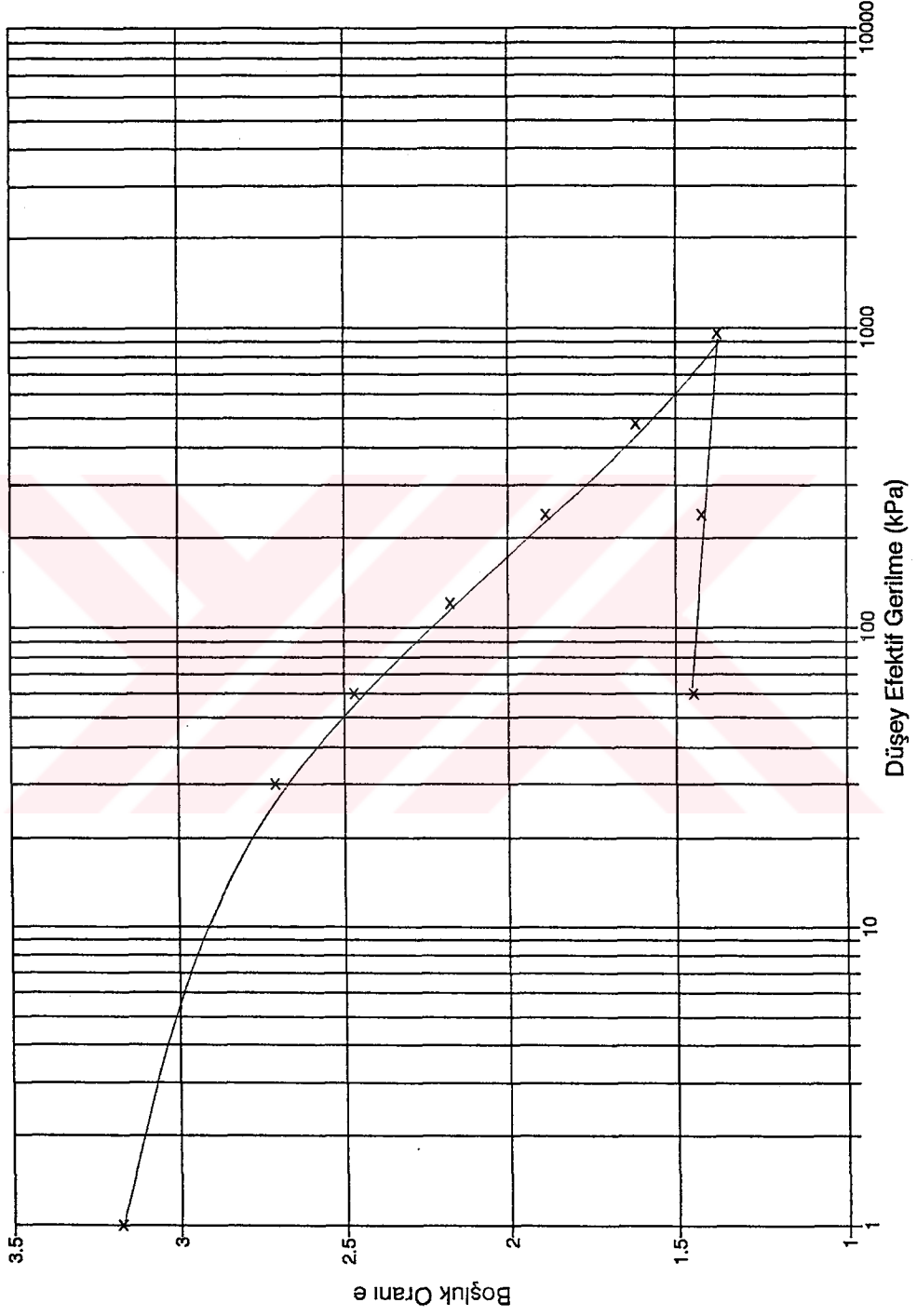
Şekil 10.16b AR-10 çamur numunesinde maksimum çökelmeyi sağlayan kimyasal maddenin kullanımı ile elde edilen boşluk oranı-düşey efektif gerilme değişimi

KONSOLIDASYON DENEYİ  
AR-19



Şekil 10.17a AR-19 çamur numunesinde ödometre deneyi ile elde edilen boşluk oranı-  
düşey efektif gerilme değişimi

**KONSOLIDASYON DENEYİ**  
AR-19 (%0.25 FeCl<sub>3</sub> kullanıldı)



Şekil 10.17b AR-19 çamur numunesinde maksimum çökelmeyi sağlayan kimyasal maddenin kullanımı ile elde edilen boşluk oranı-düşey efektif gerilme değişimi

Tablo 10.8 Ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlar

Konsolidasyon Basıncı (kPa)	$C_v$ ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ) ( $\times 10^{-4}$ )	$C_c$	Kon. öncesi ve sonrası bir.hac.ağır. ve su muh.	$C_v^1$ ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ) ( $\times 10^{-3}$ )	$C_c^1$	Kon. öncesi ve sonrası bir.hac.ağır. ve su muh.	$m_v$ ( $\text{m}^2/\text{kN}$ )	$m_v^1$ ( $\text{m}^2/\text{kN}$ )
30	6.2			2.1			$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
60	5.8		$\gamma_f = 16 \text{ kN/m}^3$	1.8		$\gamma_f = 14.9 \text{ kN/m}^3$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
120	7.0	0.94	$\gamma_f = 23 \text{ kN/m}^3$	9.0	0.6	$\gamma_f = 18.7 \text{ kN/m}^3$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
240	7.0		$w_1 = \%70$	2.6		$w_1 = \%63.5$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
480	7.4		$w_f = \%35.5$	3.0		$w_f = \%35.4$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
960	5.3			3.0			$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$



Konsolidasyon Basıncı (kPa)	$C_v$ ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ) ( $\times 10^{-4}$ )	$C_c$	Kon. öncesi ve sonrası bir.hac.ağır. ve su muh.	$C_v'$ ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ) ( $\times 10^{-3}$ )	$C_c'$	Kon. öncesi ve sonrası bir.hac.ağır. ve su muh.	$m_v$ ( $\text{m}^2/\text{kN}$ )	$m_v'$ ( $\text{m}^2/\text{kN}$ )
AR-10	30	8.2	$\gamma_i = 15.1 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_f = 19.5 \text{ kN/m}^3$ $w_i = \%60$ $w_f = \%41$	4,1.10 <sup>-3</sup>	0.73	$\gamma_i = 15.8 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_f = 20.4 \text{ kN/m}^3$ $w_i = \%83.6$ $w_f = \%33.7$	4,2.10 <sup>-3</sup>	2,9.10 <sup>-3</sup>
	60	2.6		4,1.10 <sup>-4</sup>			1,5.10 <sup>-3</sup>	2,2.10 <sup>-3</sup>
	120	5.5		5,5.10 <sup>-4</sup>			1,5.10 <sup>-3</sup>	1,4.10 <sup>-3</sup>
	240	9.8		2,5.10 <sup>-3</sup>			1,0.10 <sup>-3</sup>	6,3.10 <sup>-4</sup>
	480	5.8		8,2.10 <sup>-4</sup>			4,1.10 <sup>-4</sup>	3,4.10 <sup>-4</sup>
	960			8,2.10 <sup>-4</sup>				2,3.10 <sup>-4</sup>
AR-19	30	5.2	$\gamma_i = 16.8 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_f = 23.3 \text{ kN/m}^3$ $w_i = \%77$ $w_f = \%33.6$	9,9.10 <sup>-4</sup>	0.66	$\gamma_i = 17.2 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_f = 23.9 \text{ kN/m}^3$ $w_i = \%62.7$ $w_f = \%31.1$	4,4.10 <sup>-3</sup>	4,0.10 <sup>-3</sup>
	60	3.1		3,6.10 <sup>-4</sup>			2,0.10 <sup>-3</sup>	2,8.10 <sup>-3</sup>
	120	2.9		6,2.10 <sup>-4</sup>			1,3.10 <sup>-3</sup>	1,5.10 <sup>-3</sup>
	240	3.1		7,0.10 <sup>-4</sup>			9,5.10 <sup>-4</sup>	9,6.10 <sup>-4</sup>
	480	5.5		6,6.10 <sup>-4</sup>			4,0.10 <sup>-4</sup>	3,8.10 <sup>-4</sup>
	960	3.9		7,6.10 <sup>-4</sup>			1,8.10 <sup>-4</sup>	1,7.10 <sup>-4</sup>

### 10.5 Beşinci Kısım Deneyler

Deneylerde kullanılan kireç ve uçucu külün kimyasal yapıları tablo 10.9 ve tablo 10.10'da verilmiştir:

Tablo 10.9 Katılaştırma deneyinde kullanılan kirecin kimyasal yapısı

Ca(OH) <sub>2</sub>	%83.14
CaO	%67.68
MgO	% 1.20
SO <sub>3</sub>	% 0.34
SiO <sub>2</sub>	% 0.52
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 0.44
Birim ağırlık	425 gr/lt
Özgül ağırlık	2.22 gr/m <sup>3</sup>
İnceliği	3698 cm <sup>2</sup> /gr

Tablo 10.11'de ise katılaştırma deneyi sonuçları verilmiştir. Haliç çamur numunelerinin kayma mukavemetlerini arttırmak amacıyla yapılan katılaştırma deneylerinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Özgül direnç deneyinden alınan w=%72 su muhtevasına sahip AR-2 çamur numunesinin herhangi bir kimyasalla karıştırılmadan elde edilen drenajsız kayma mukavemeti 7 kPa, w=%77 su muhtevasına sahip AR-19 çamur numunesinin ise 12 kPa'dır.
- 2) Deneylerde kullanılan bütün kimyasal maddeler için 1/0.1 oranı 1/0.5 oranından daha iyi sonuç vermiştir.
- 3) Çimentonun uçucu küle karıştırılarak uygulanması, çimentonun tek başına kullanımına göre drenajsız kayma mukavemetini yaklaşık 2 kat arttırmıştır.
- 4) 28 günlük mukavemetler 7 günlük mukavemetlere göre 1.5-3 kat daha fazladır.
- 5) Çimento ve çimento+uçucu kül karışımları AR-19 çamur numunesinde daha yüksek mukavemet değerleri verirken kireç+uçucu kül karışımı AR-19 çamur numunesinde daha iyi sonuç vermiştir.

6) Çimento+uçucu kül karışımı hacim artışının fazla önemli olmadığı, Ph'in düşük olmasının, sızmanın olmamasının istendiği durumlarda kullanılmalıdır.

7) Kireç+uçucu kül karışımı sızmanın göz ardı edilebileceği, Ph'in yüksek olması istendiği durumlarda kullanılmalıdır.

Tablo 10.10 Katılaştırma deneyinde kullanılan uçucu külün kimyasal yapısı

SiO <sub>2</sub>	%42.88
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%9.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%16.10
CaO	%15.90
MgO	%0.73
Na <sub>2</sub> O	%1.80
K <sub>2</sub> O	%0.45
SO <sub>3</sub>	%6.42
CuO	%1.74
Nem	%17.44
İnceliği	3263cm <sup>2</sup> /gr
Özgül ağırlık	2.34

Tablo 10.11 Katılaştırma deneyi sonuçları

Katki (çamur/katki oranı)	C <sub>u</sub> (kPa) (Laboratuvar Veyn) (7 gün sonra)		C <sub>u</sub> (kPa) (Laboratuvar Veyn) (28 gün sonra)	
	AR-2	AR-19	AR-2	AR-19
Çimento (1/0.1)	43.2	33.6	68.3	95.9
Çimento (1/0.05)	24.3	27.6	43.1	75.3
Çimento+uçucu kül 1/0.1/0.1	102.1	64.7	146.7	125.2
Çimento+uçucu kül 1/0.05/0.05	62.0	27.2	86.3	68.2
Kireç+uçucu kül 1/0.1/0.1	76.4	99.5	105.2	142.3
Kireç+uçucu kül 1/0.05/0.05	47.6	49.0	66.2	85.6

## BÖLÜM 11

### ÖZET VE SONUÇLAR

Haliçten alınan örselenmiş çamur numuneleri üzerinde bazı laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Endeks özellikleri belirlenmiş, çökeltme, sudan arındırma, ödometre ve katılaştırma deneyleriyle Haliç'in temizlenmesinde kullanılması düşünülen taranmış malzemenin sudan arındırılması, taşınarak depo edilmiş malzemenin bazı kimyasal maddelerle katılaştırılması konusunda birtakım öneriler getirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar şunlardır:

1- Haliç çamur örneklerinde yapılan çökeltme deneyleri sonucunda numunelerin doğal flokülasyon oranının %10 civarında olduğu saptanmıştır.

2- Atıkların iyileştirilmesinde uygulanan fiziksel yöntemlerden biri olan flokülasyon metodu uygulanmış ve çökeltme miktarlarında yaklaşık %50 oranında artışlar kaydedilmiştir. Doğal flokülasyonla yaklaşık %10 oranında olan çökeltme miktarı bu metodun uygulanmasıyla %15-25 seviyesine yükselmiştir.

3- Flokülasyon metodunda kullanılan inorganik kimyasallardan  $FeCl_3$  ve  $AlSO_4$  en iyi çökeltme oranlarını vermiştir. Genel olarak kimyasal maddelerin içerdiği kationların valans değeri arttıkça floküle etme yeteneğinin de arttığı söylenebilir.

4- Ph sayısı, çamurların çökeltme oranlarında çok önemlidir ve atıkların iyileştirilmesinde kullanılan kimyasal yöntemlerden biridir. Genellikle bazik ortamlarda flokülasyonun maksimum seviyede olduğu söylenebilir. Ph=12 için yapılan çökeltme deneyleri, orjinal Ph sayılarına (Ph=7-8.5) ve asidik ortamlara (Ph=5) göre daha iyi çökeltme oranları vermiştir. İnorganik kimyasallarla %15-25 oranında çökelen çamur numuneleri Ph düzenlemesiyle %25-35'e yükselmiştir.

5- Atıkların iyileştirilmesinde kullanılan kimyasal yöntemlerden bir diğeri olan katılaştırma yöntemi mukavemet artışının gerekli olduğu durumlarda kullanılabilir. İyileştirme derecesinin artışının ve kullanılan katılaştırma türüne bağlı olarak hacim artışının maliyeti arttırdığı göz önüne alınmalıdır. Optimum çözüm için ön-denemelerin yapılması zorunludur.

6) Organik madde oranının ykseklği ve Ph'ın düşüklüğü mukavemete ters yönde etki yapmaktadır.AR-19 amur numunesine kıyasla organik madde oranı yüksek ve Ph'ı düşük AR-2 amur numunesinde mukavemet artışları görece düşük kalmıştır.

7) Uçucu külün imento ve kireç ile karıştırılarak katılaştırmada kullanımı en iyi sonucu vermektedir.



**KAYNAKLAR**

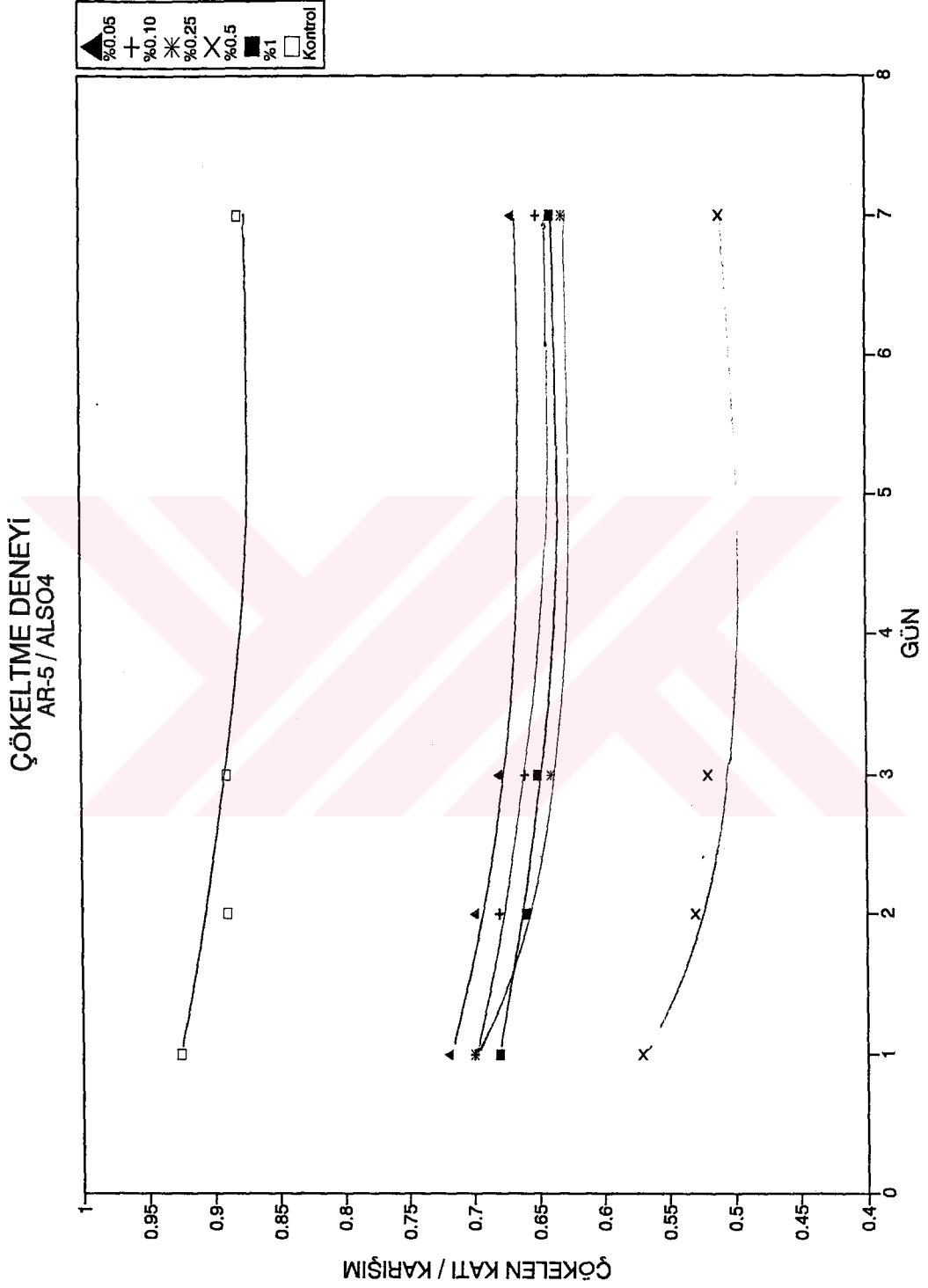
- 1- Carter,M.,and Bentley,S.P.,1991. Correlations of Soil Properties. Pentech Press Limited, London.
- 2- Conner,J.R.,1990. Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes.Van Nostrald Reinhold, pp. 280-427.
- 3- Cote,P.,1986. Contaminant Leaching from Cement-Based Waste Forms Under Asidic Conditions, Ph.D. Dissertation, Mc Master University Hamilton. Ont. Canada.
- 4- Cullinane,M.J.,and Bricka,R.M.,1987. An Assesment of Organic Materials That Interfere with Stabilization and Solidification Processes. In Proceedings of 13th. Annual Research Symposium, Cincinnati, Ohio, pp. 64-71.
- 5- Dredging 94. Proceedings of the Second International Conference on Dredging and Dredged Material Placement Volume 1-2. Edited by McNair,E.C. ASCE, Newyork.
- 6- Freeman,H.M.,1989. Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. Mc Graw-Hill Book Company, Newyork.
- 7- Hazardous Waste Treatment Processes, 1990. Manual of Practice. Prepared by Task Force on Hazardous Waste Treatment, Virginia.
- 8- Kumbasar,V.,ve Kip,F.,1977. Zemin Mekaniği Problemleri. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- 9- Mitchell,J.K.,1976. Fundamentals of Soil Behavior. University of California, Berkeley. Copyright by John Wiley and Sons, Inc.

- 10- Orhon,D.,Özaydın,K.,ve Tünay,O.,1978. Haliç'te Dipsel Çamur Kirliliği ve Uzaklaştırılması Sorunu. TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu Proje No. 439.
- 11- Özaydın,K., 1989. Zemin Mekaniği. Meya Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd. Şti.
- 12- Özaydın,K.,Yıldırım,S., ve Yıldırım,M.,1995. Haliç İslah Projesi Fizibilite Raporu, Nihai Rapor. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- 13- Sharma,H.D., and Sangeeta,P.L.,1994. Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills-Design and Evaluation. John Wiley and Sons, Inc.
- 14- Perloff,W.H.,and Baron,W.,1976. Soil Mechanics. John Wiley and Sons, Newyork.
- 15- Tebbutt,T.H.Y.,1990. Basic Water and Wastewater Treatment. University of Birmingham, England. Butterworth and Co.(publishers) Ltd.
- 16- Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments,1994. Geotechnical Special Publication No.40 Volume 1. Edited by Meung,A.T.,and Felio,G.Y., Texas.



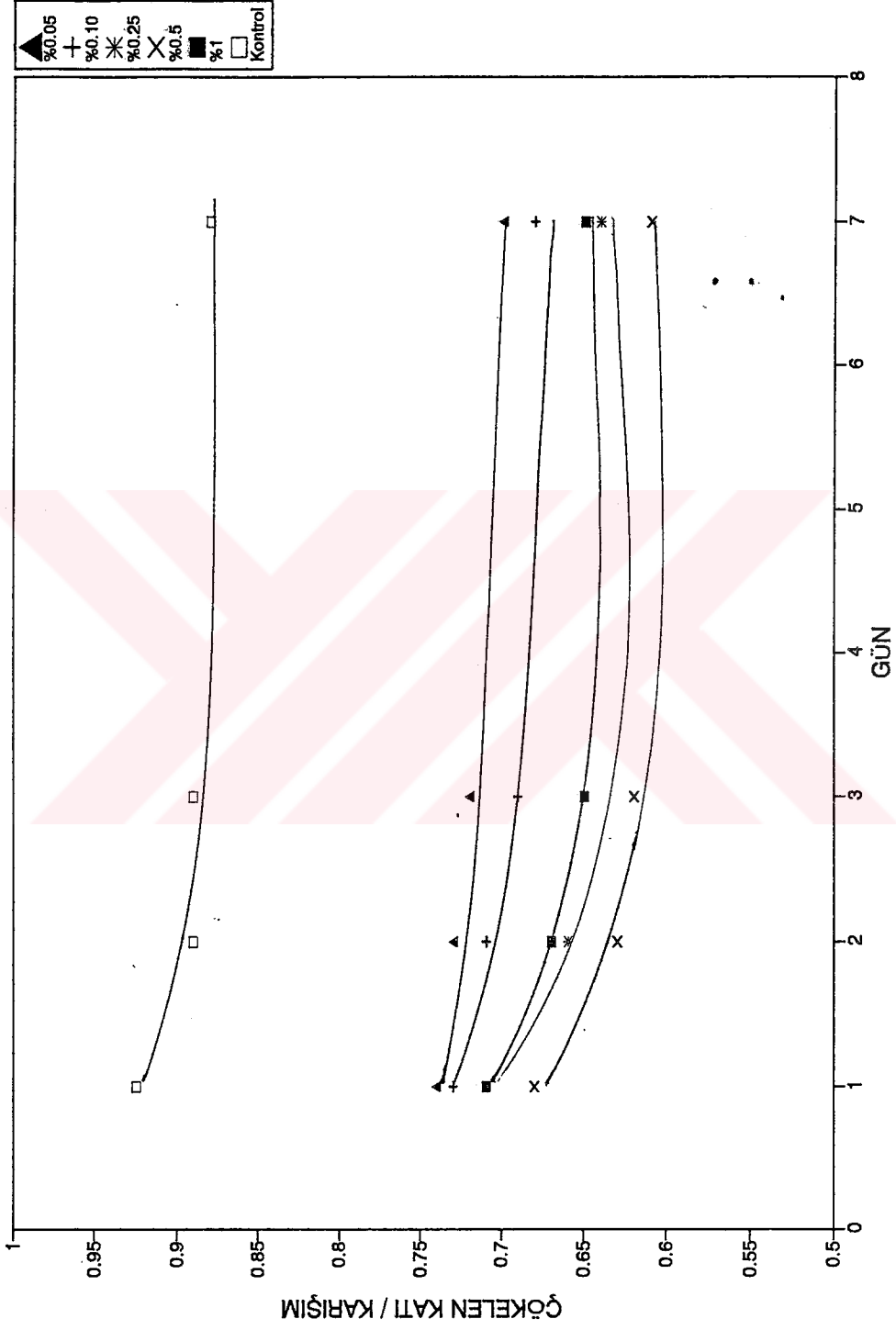
# EKLER





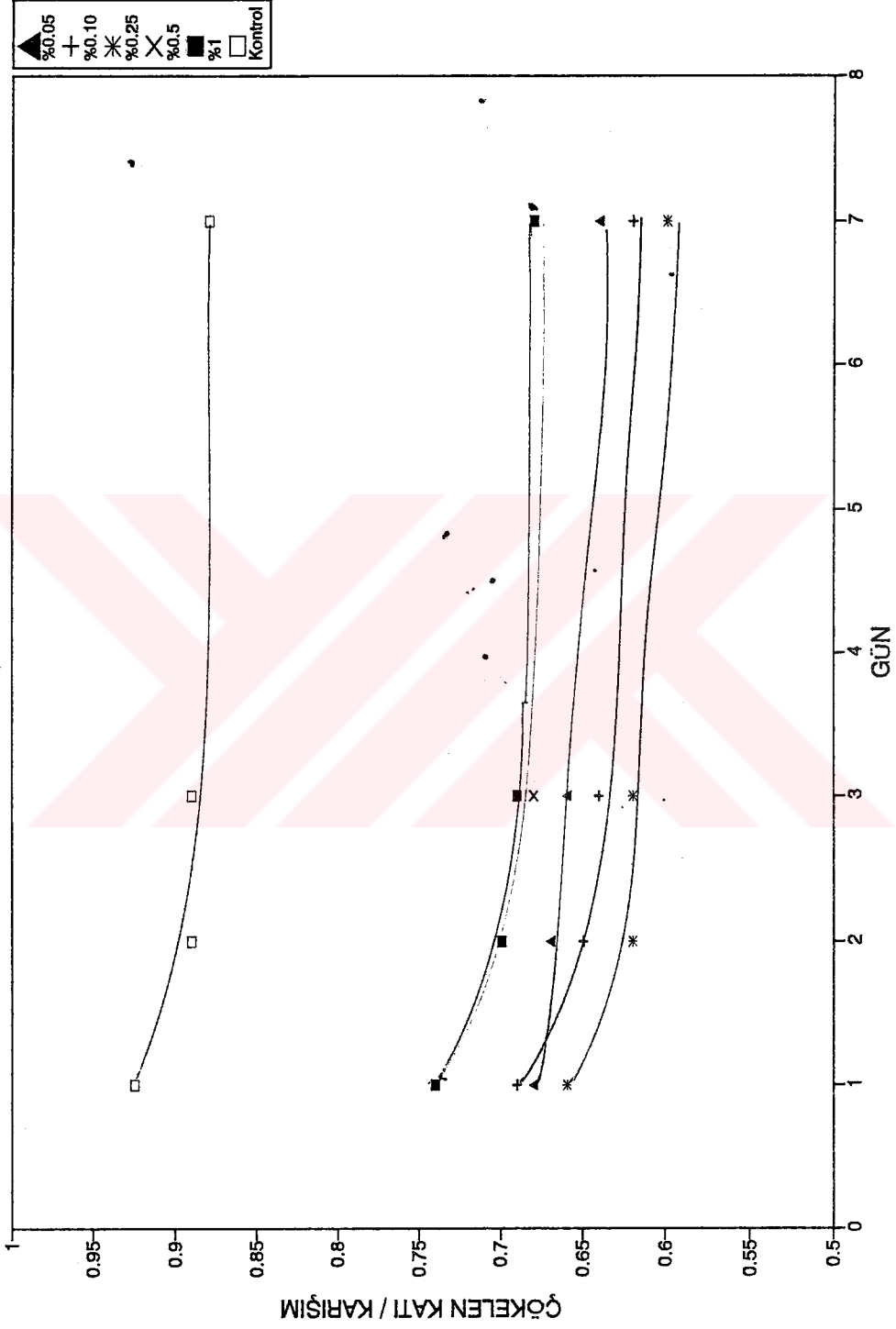
Şekil E1. AR-5 Çamur numunesinde değişik oranlarda  $AlSO_4$  kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

ÇÖKELTME DENEYİ  
AR-5 / CaCl<sub>2</sub>

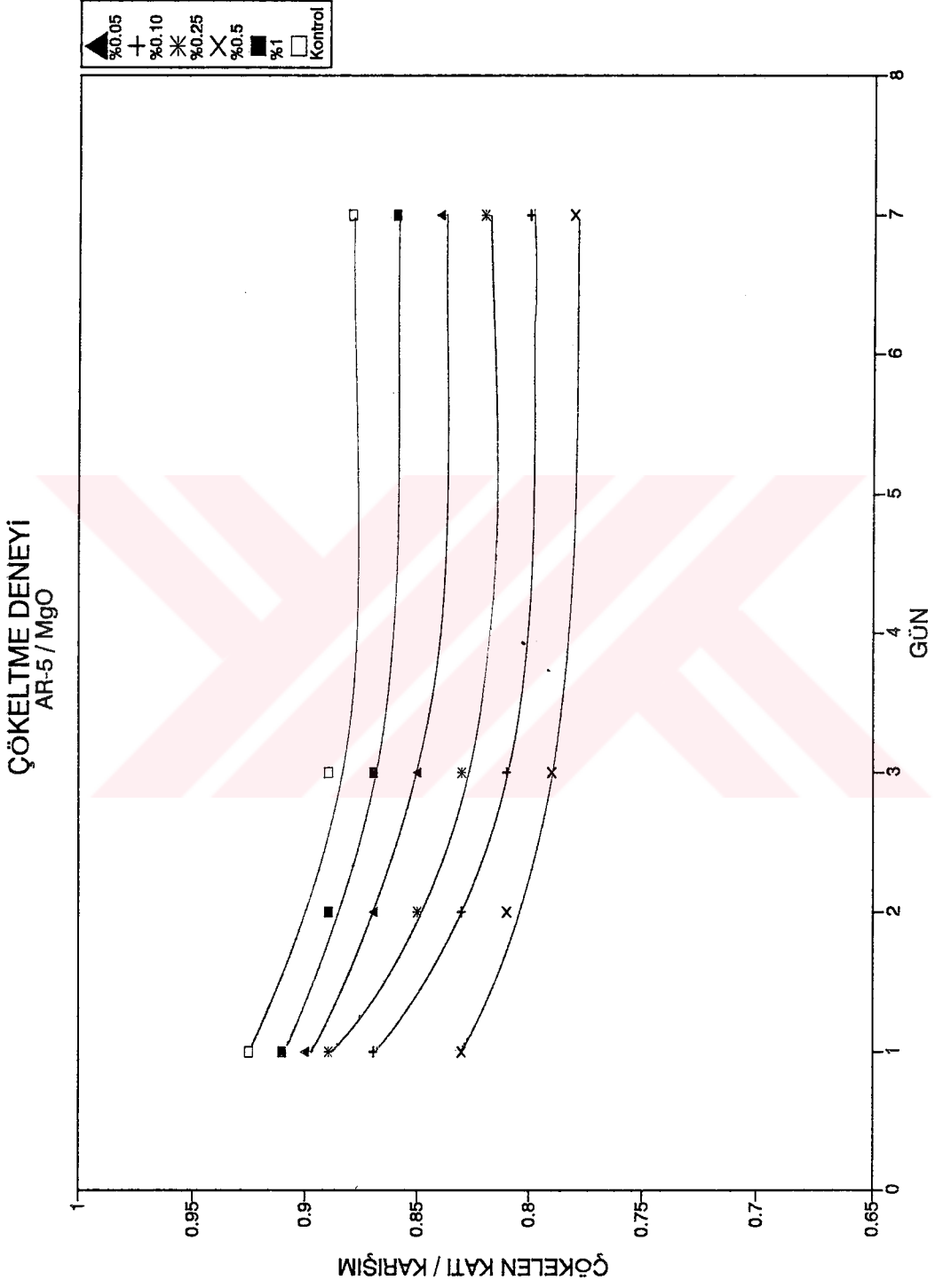


Şekil E2. AR-5 Çamur numunesinde değişik oranlarda CaCl<sub>2</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

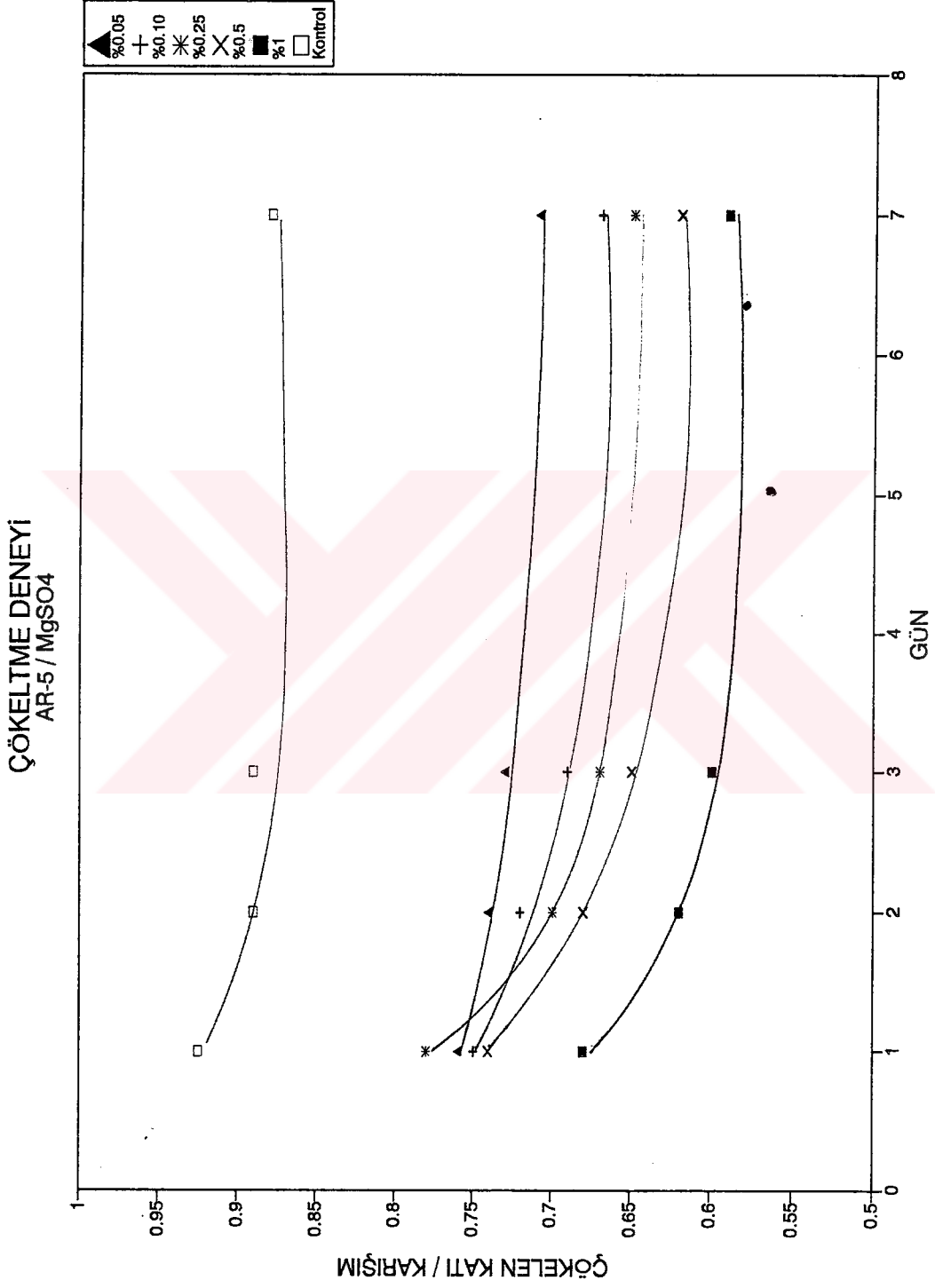
ÇÖKELTME DENEYİ  
AR-5 / FeCl<sub>3</sub>



Şekil E3. AR-5 Çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

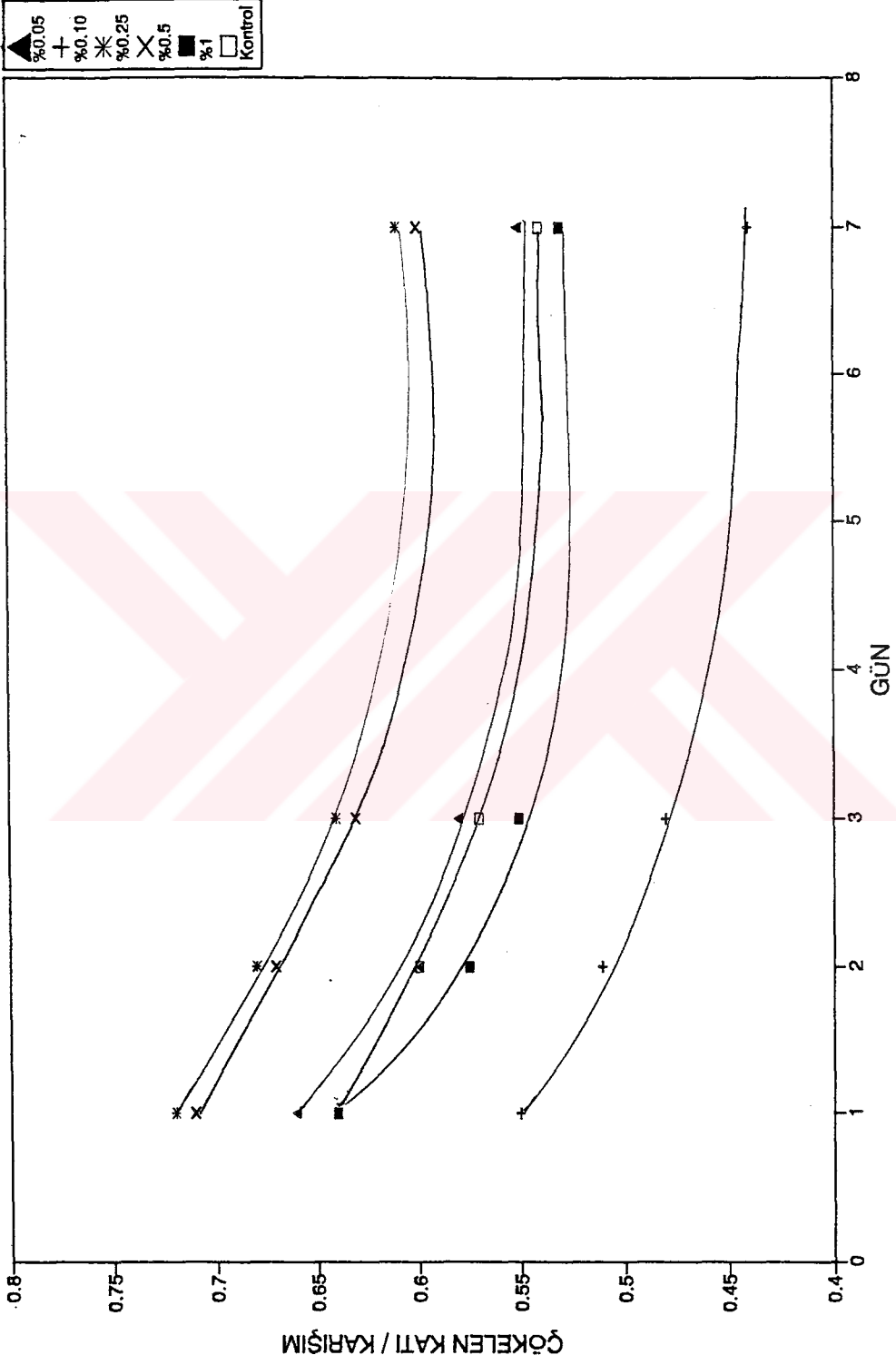


Şekil E4. AR-5 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgO kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

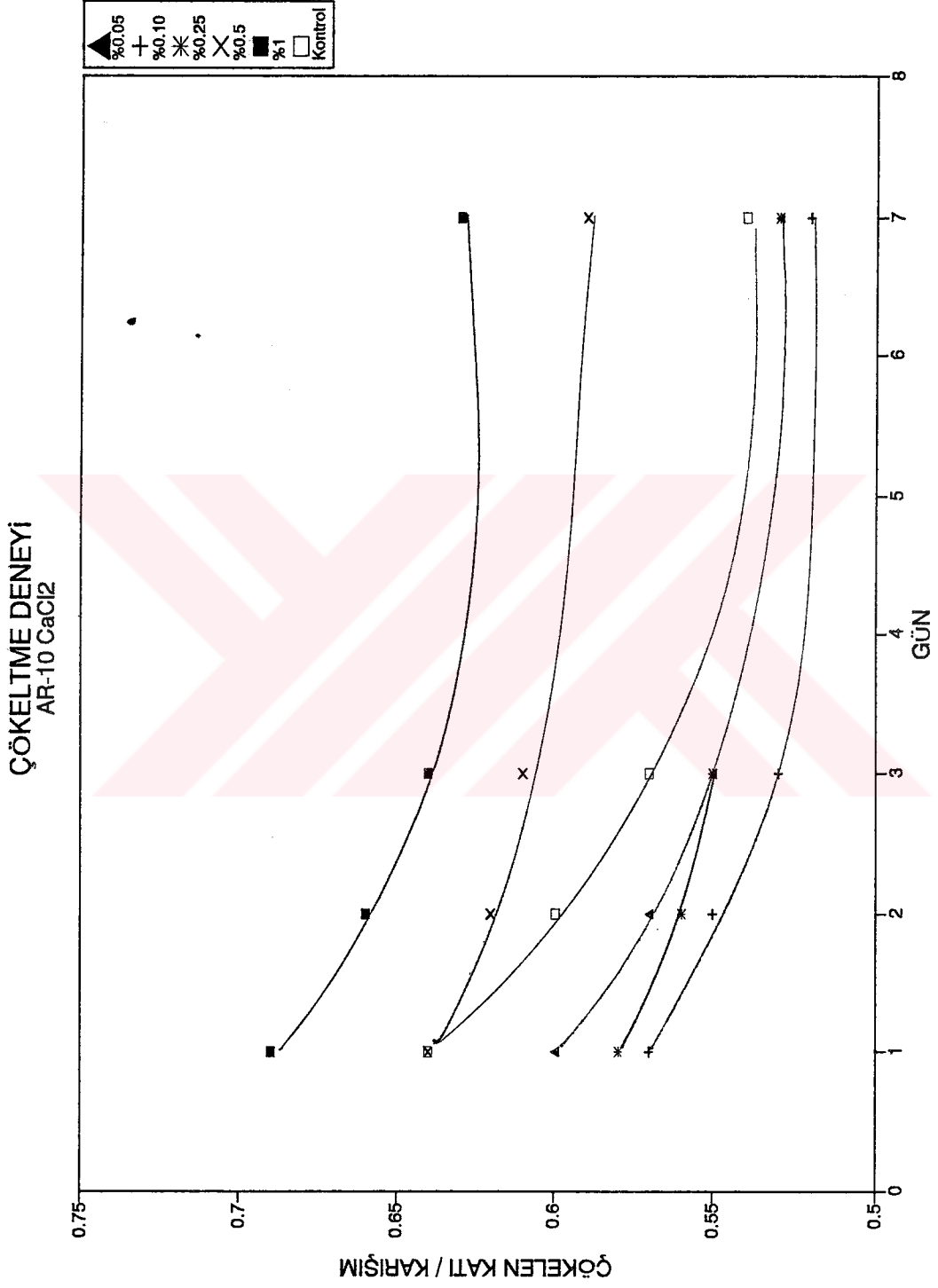


Şekil E5. AR-5 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgSO<sub>4</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

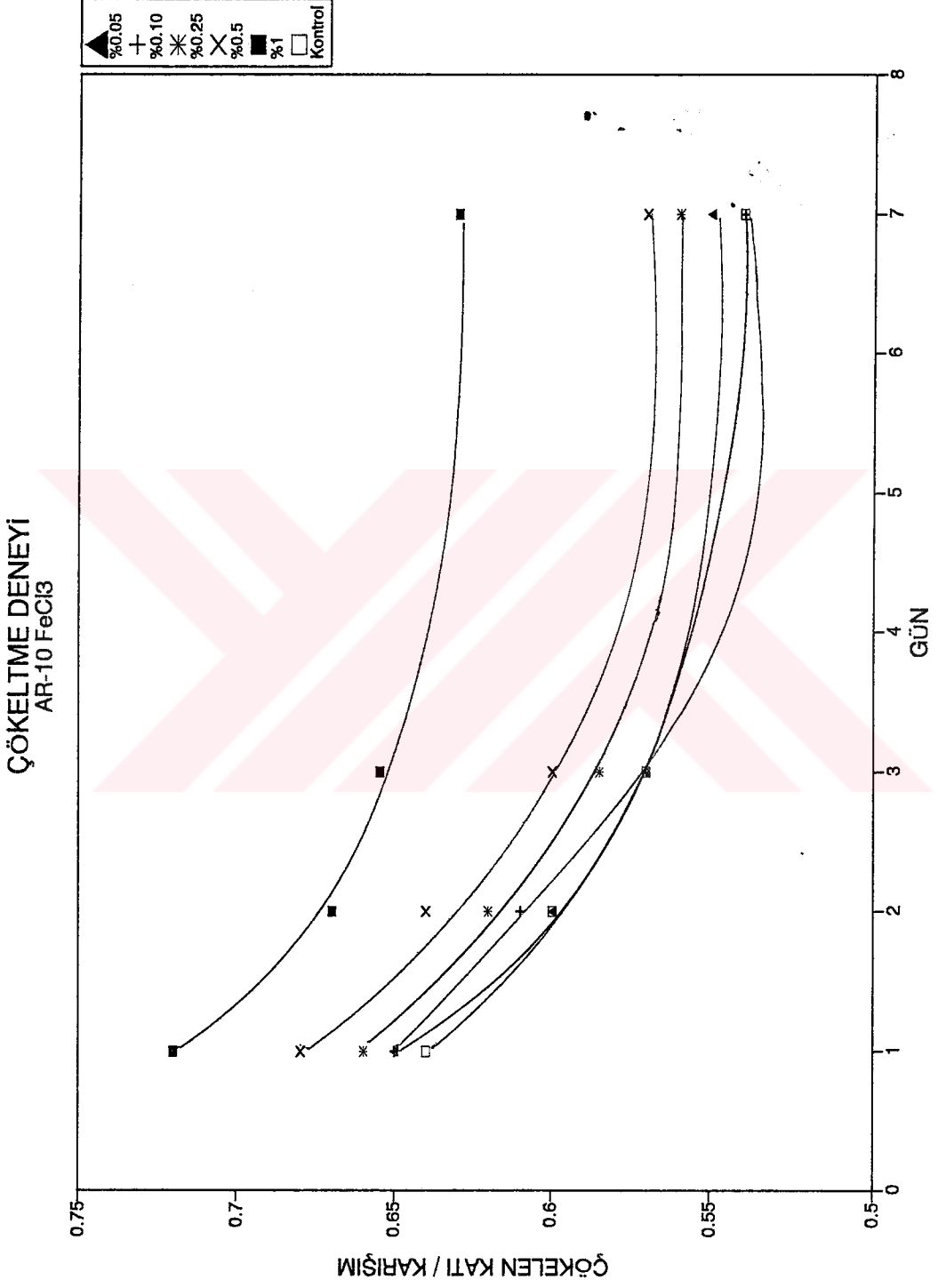
ÇÖKELTME DENEYİ  
AR-10 ALSO<sub>4</sub>



Şekil E6. AR-10 Çamur numunesinde değişik oranlarda ALSO<sub>4</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

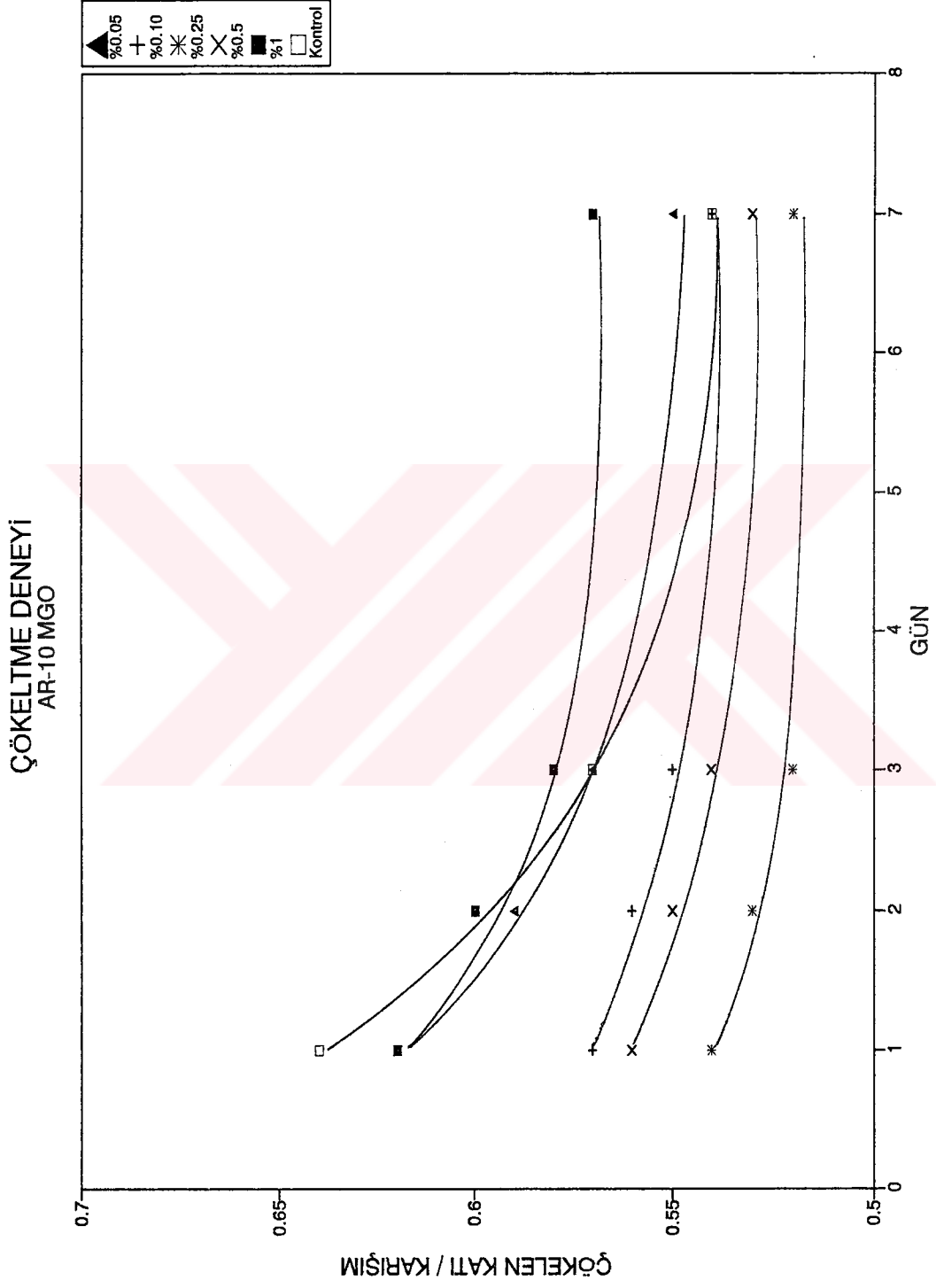


Şekil E7. AR-10 Çamur numunesinde değişik oranlarda CaCl<sub>2</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

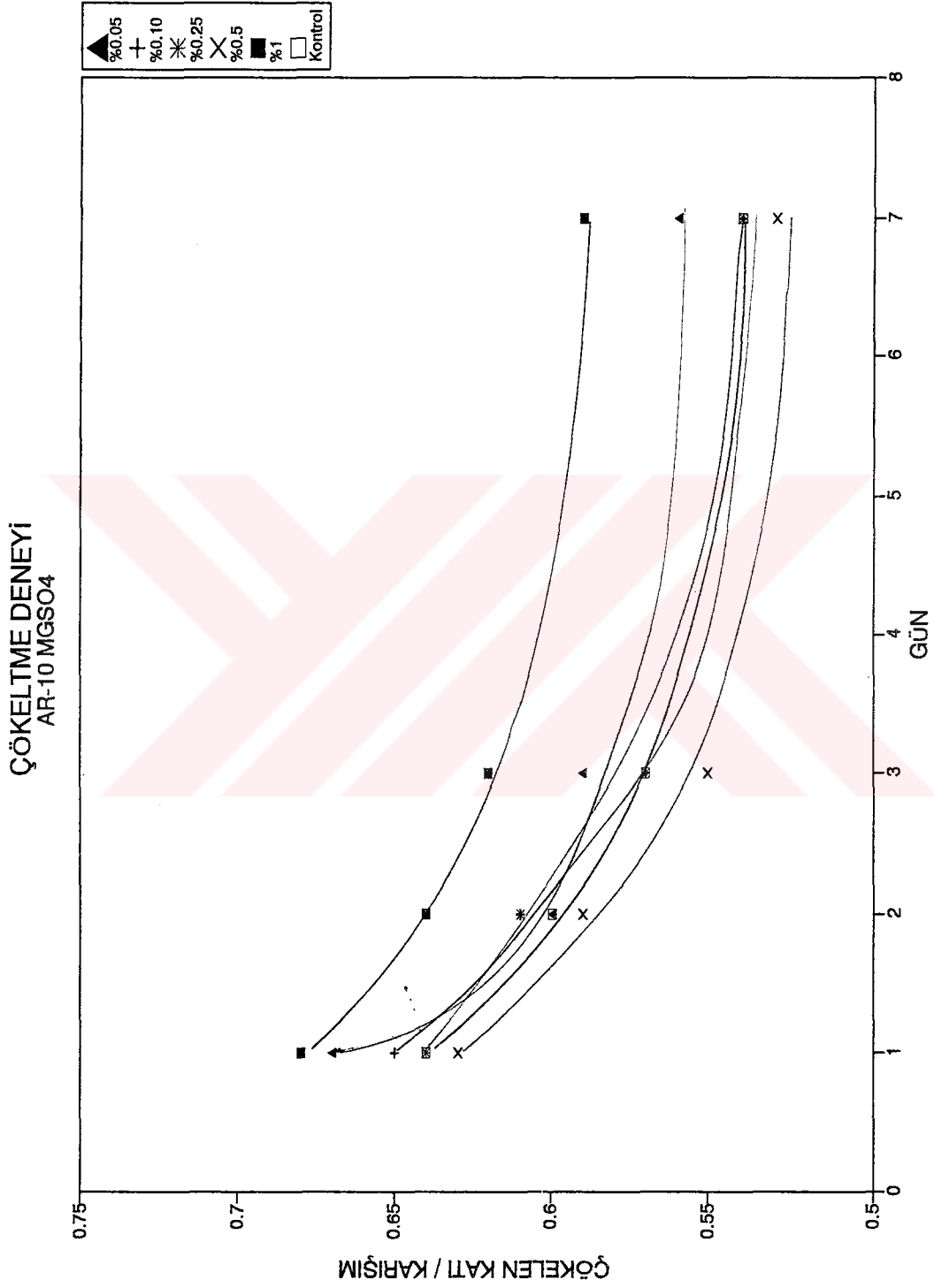


Şekil E8. AR-10 Çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

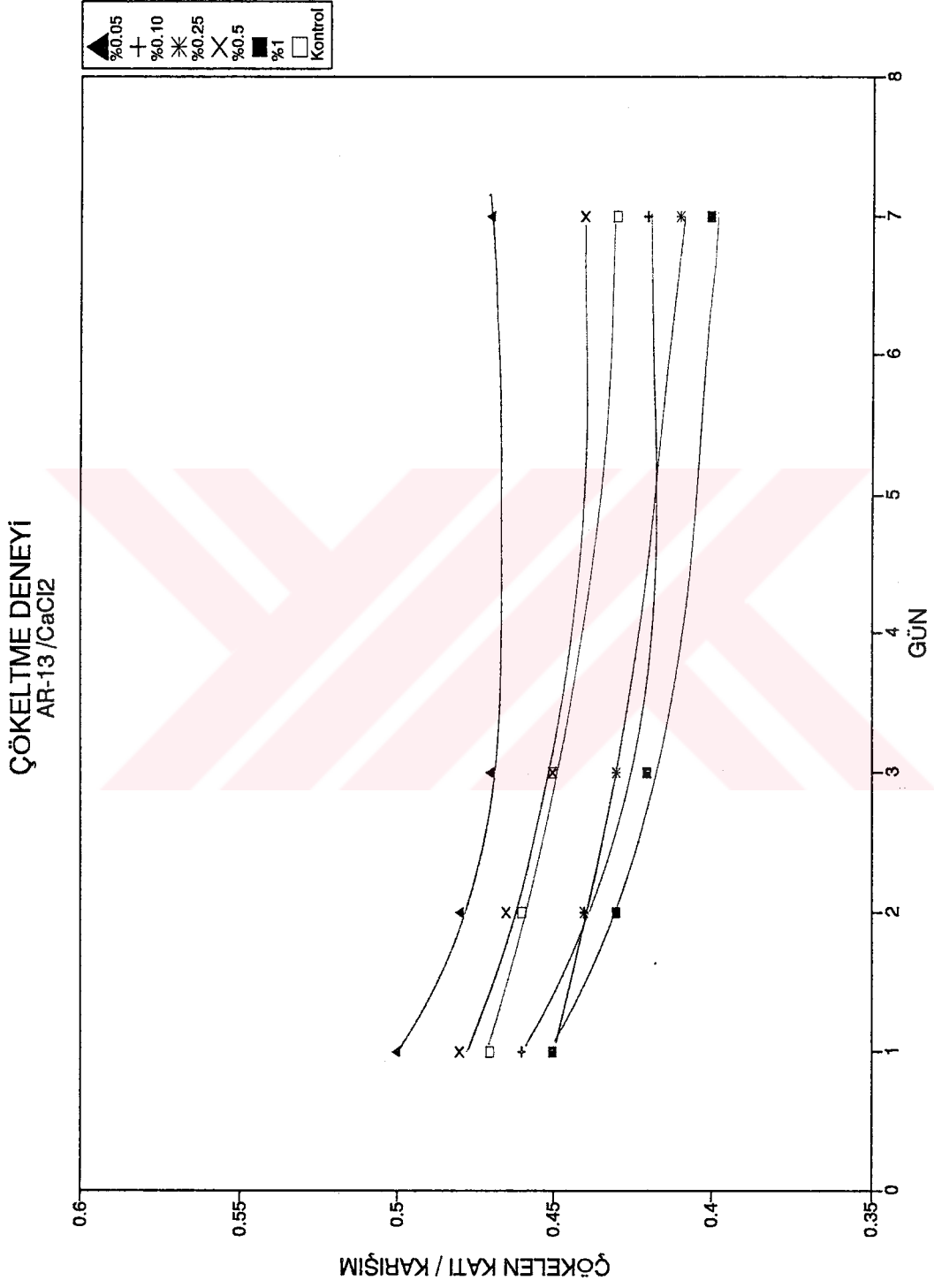




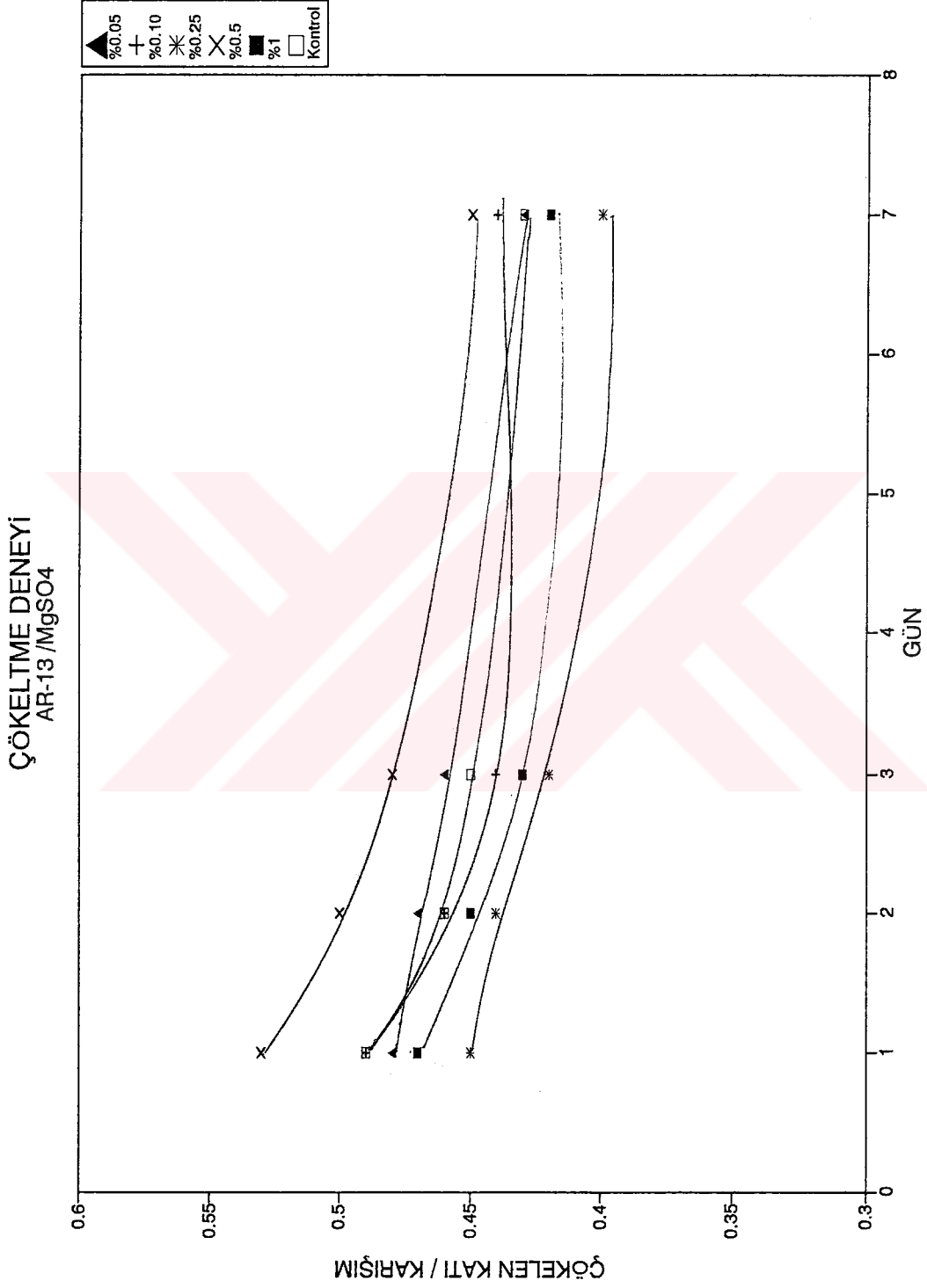
Şekil E9. AR-10 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgO kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları



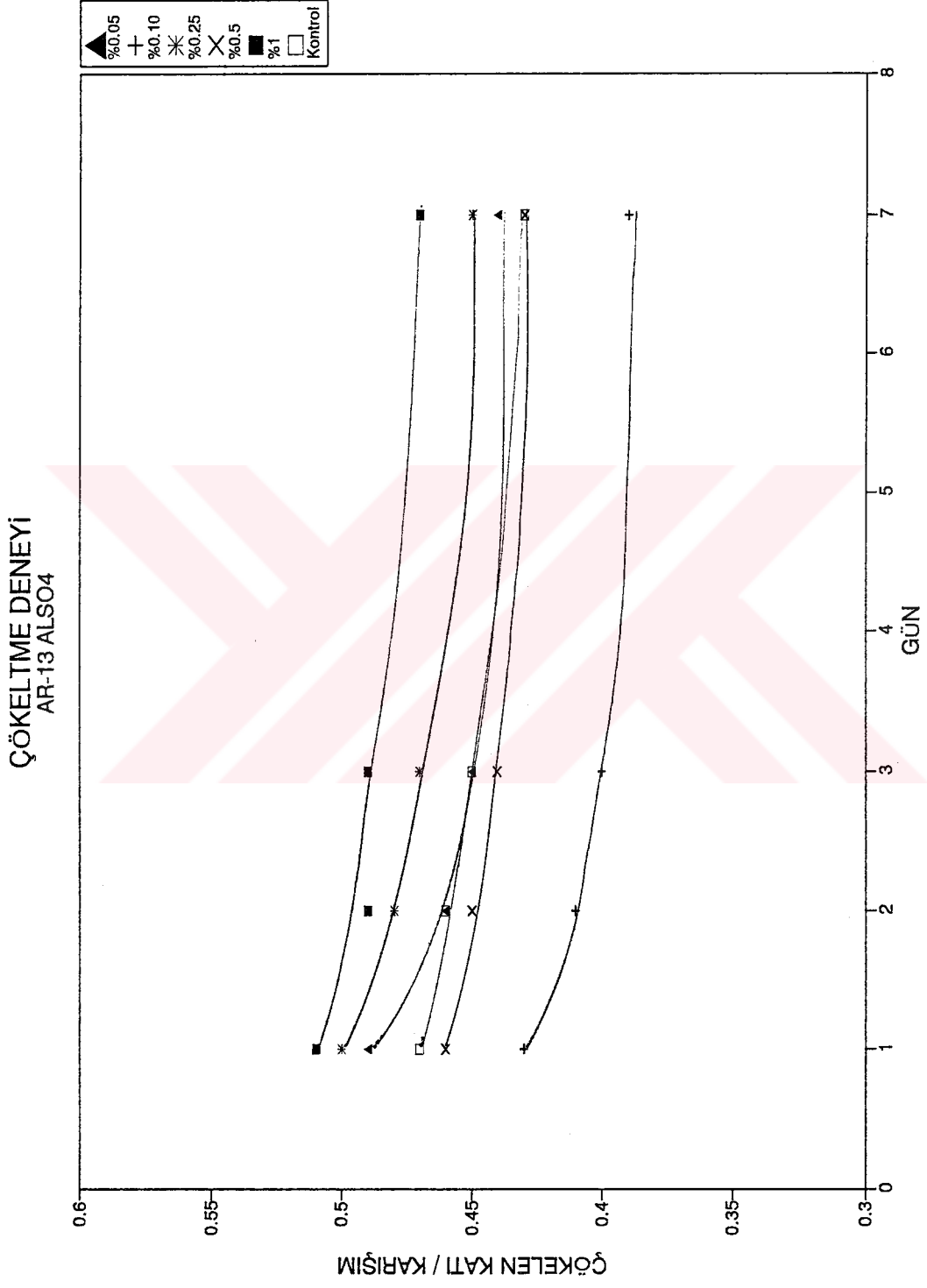
Şekil E10. AR-10 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgSO<sub>4</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları



Şekil E11. AR-13 Çamur numunesinde değişik oranlarda CaCl<sub>2</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

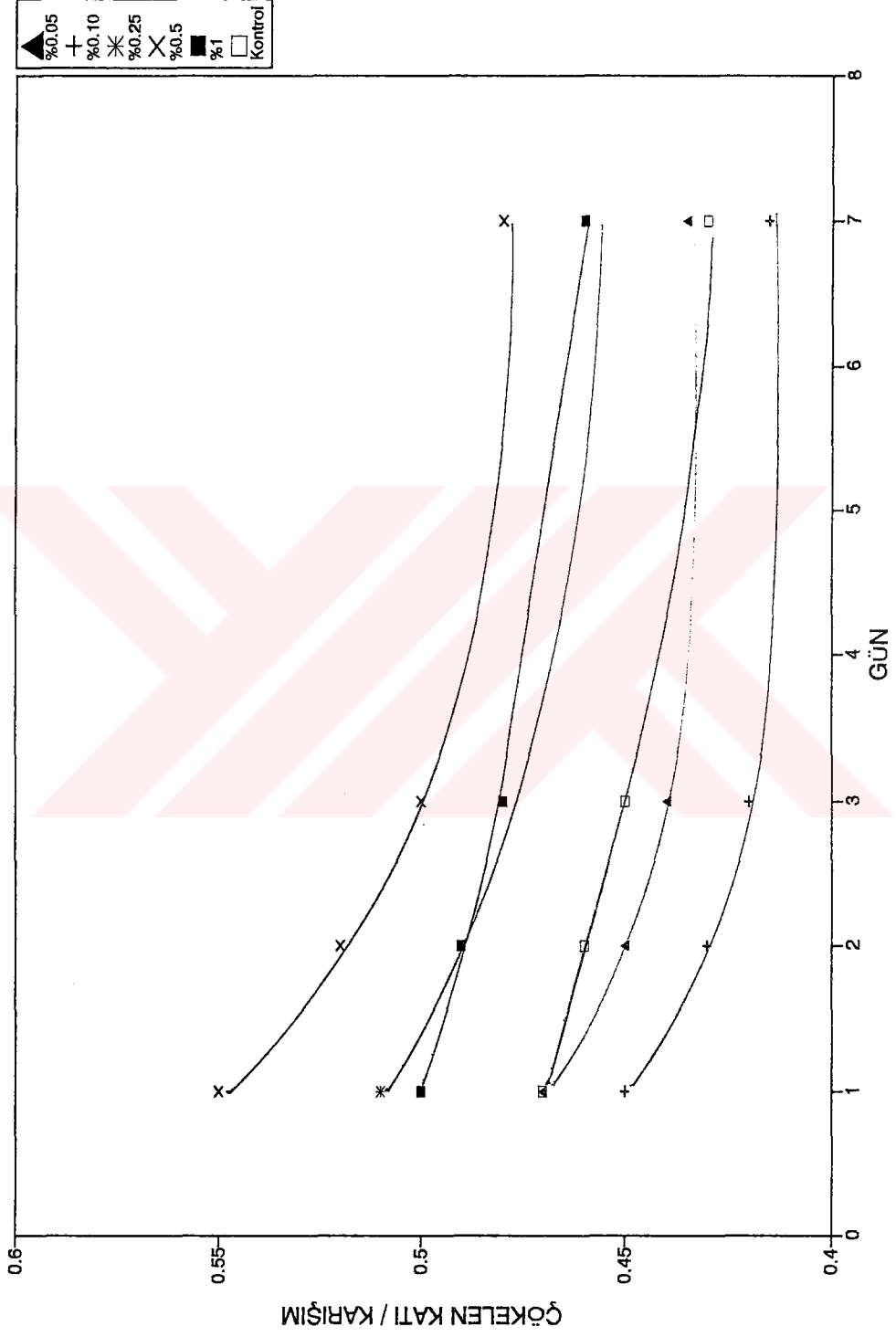


Şekil E12. AR-13 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgSO<sub>4</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

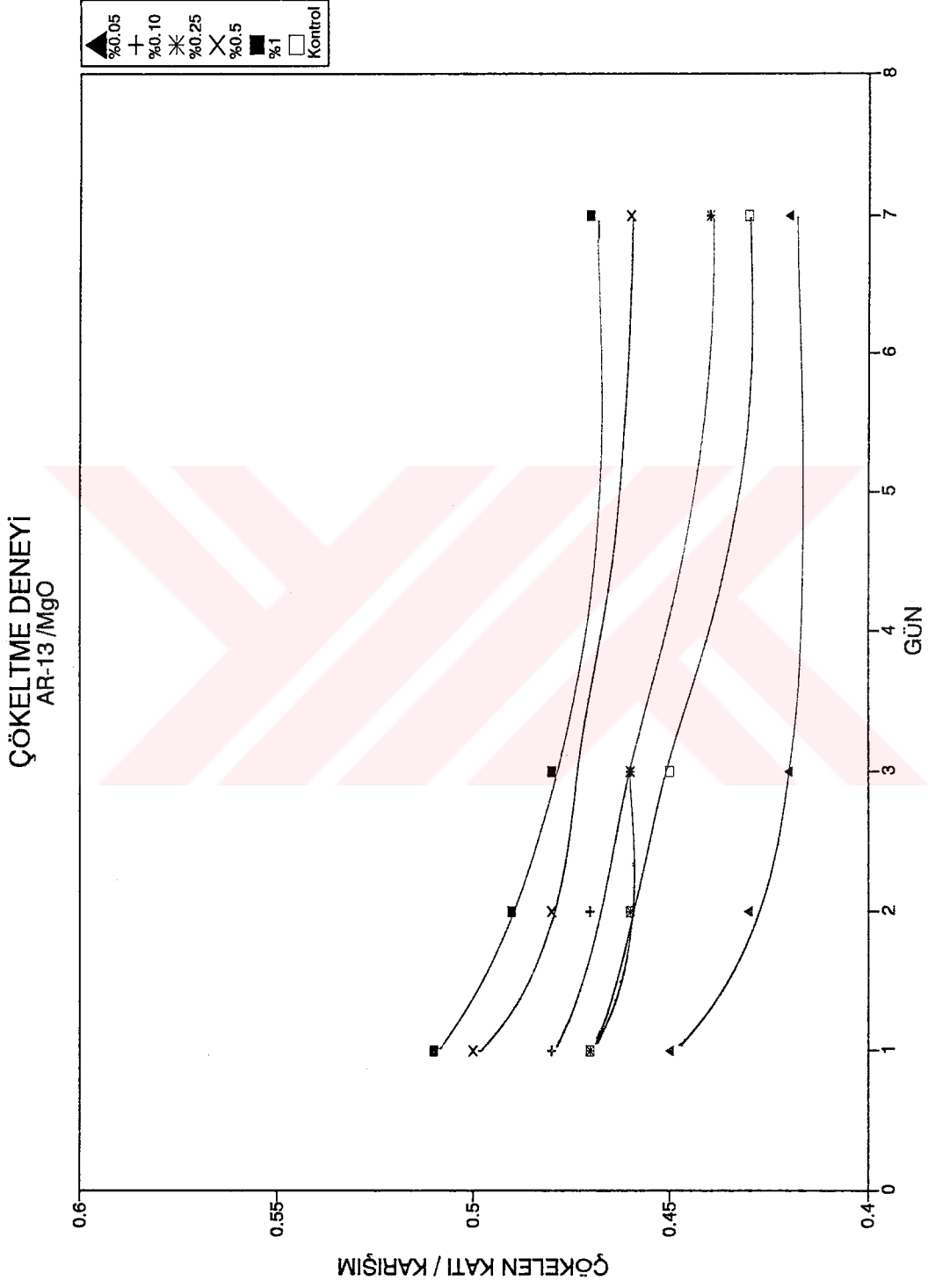


Şekil E13. AR-13 Çamur numunesinde değişik oranlarda  $AlSO_4$  kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

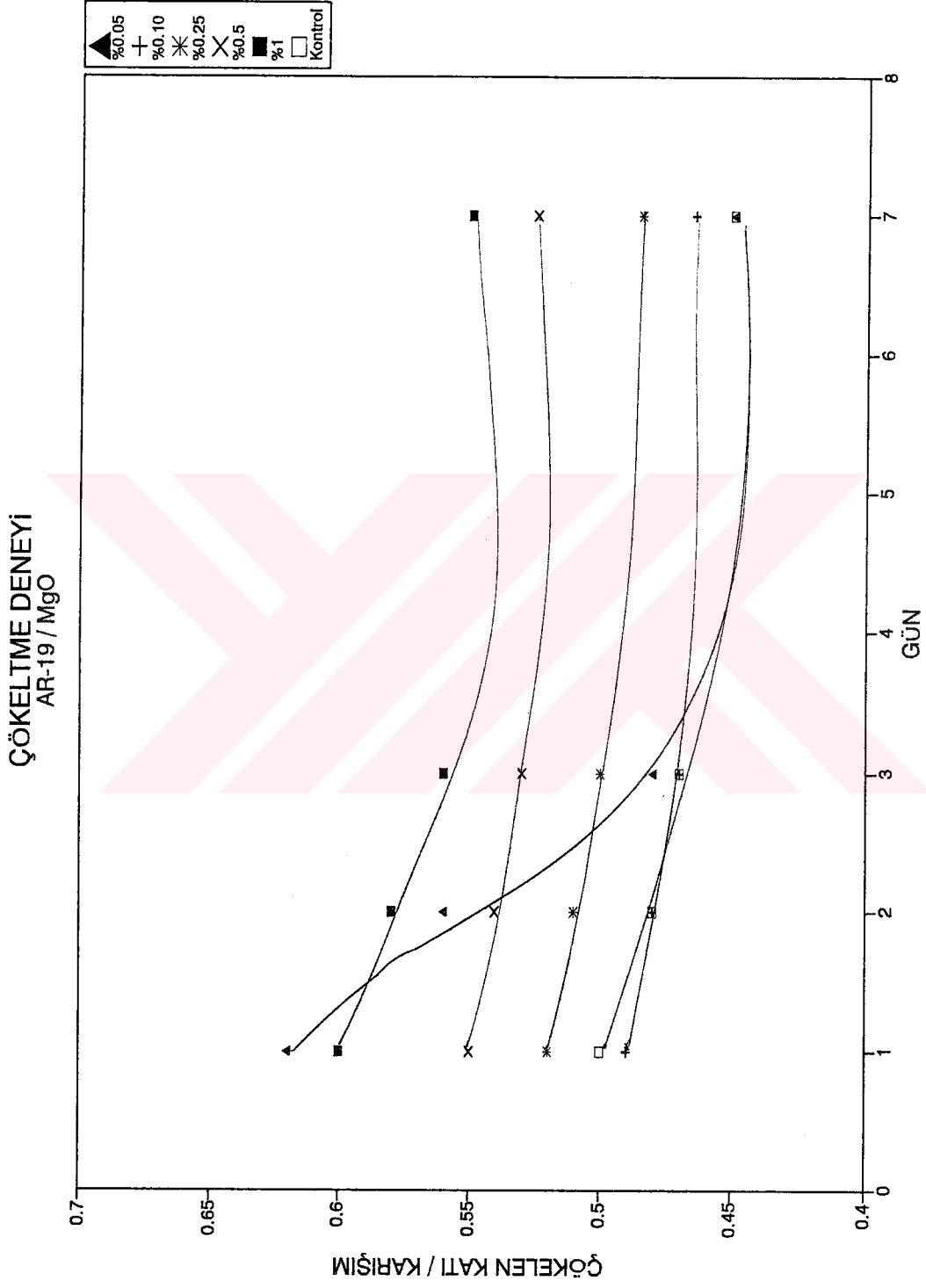
ÇÖKELTME DENEYİ  
AR-13 / FeCl<sub>3</sub>



Şekil E14. AR-13 Çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

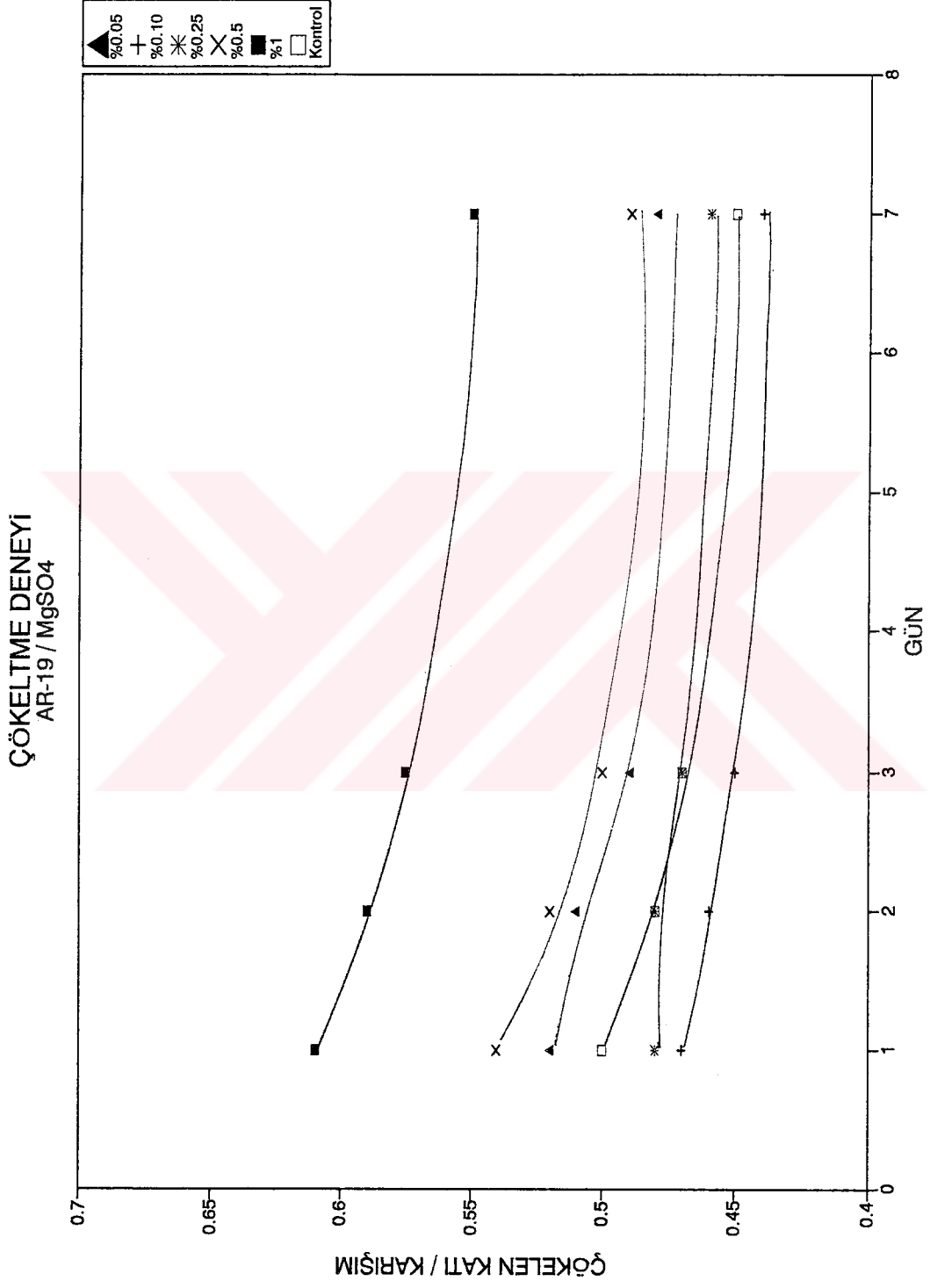


Şekil E15. AR-13 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgO kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

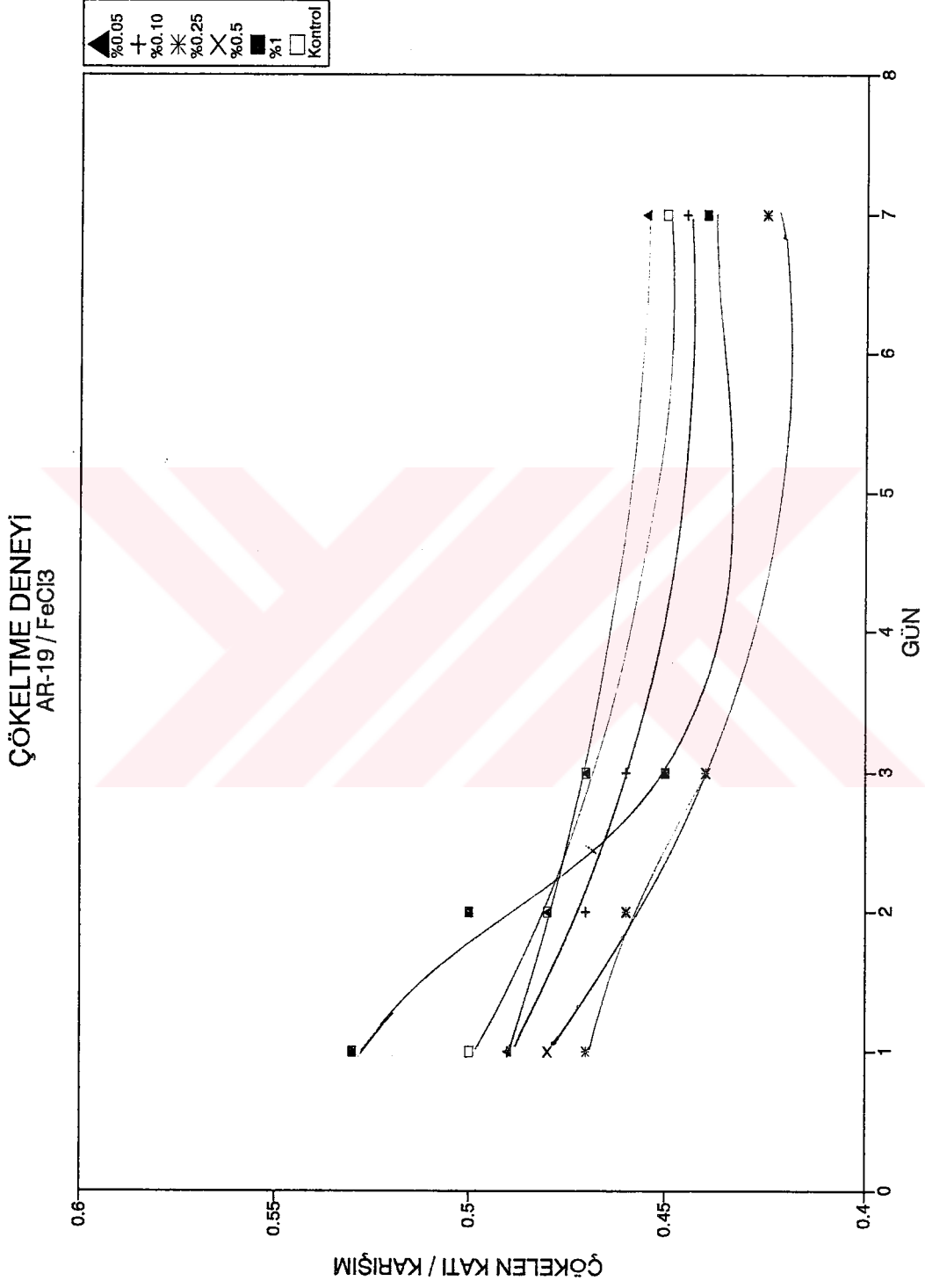


Şekil E16. AR-19 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgO kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

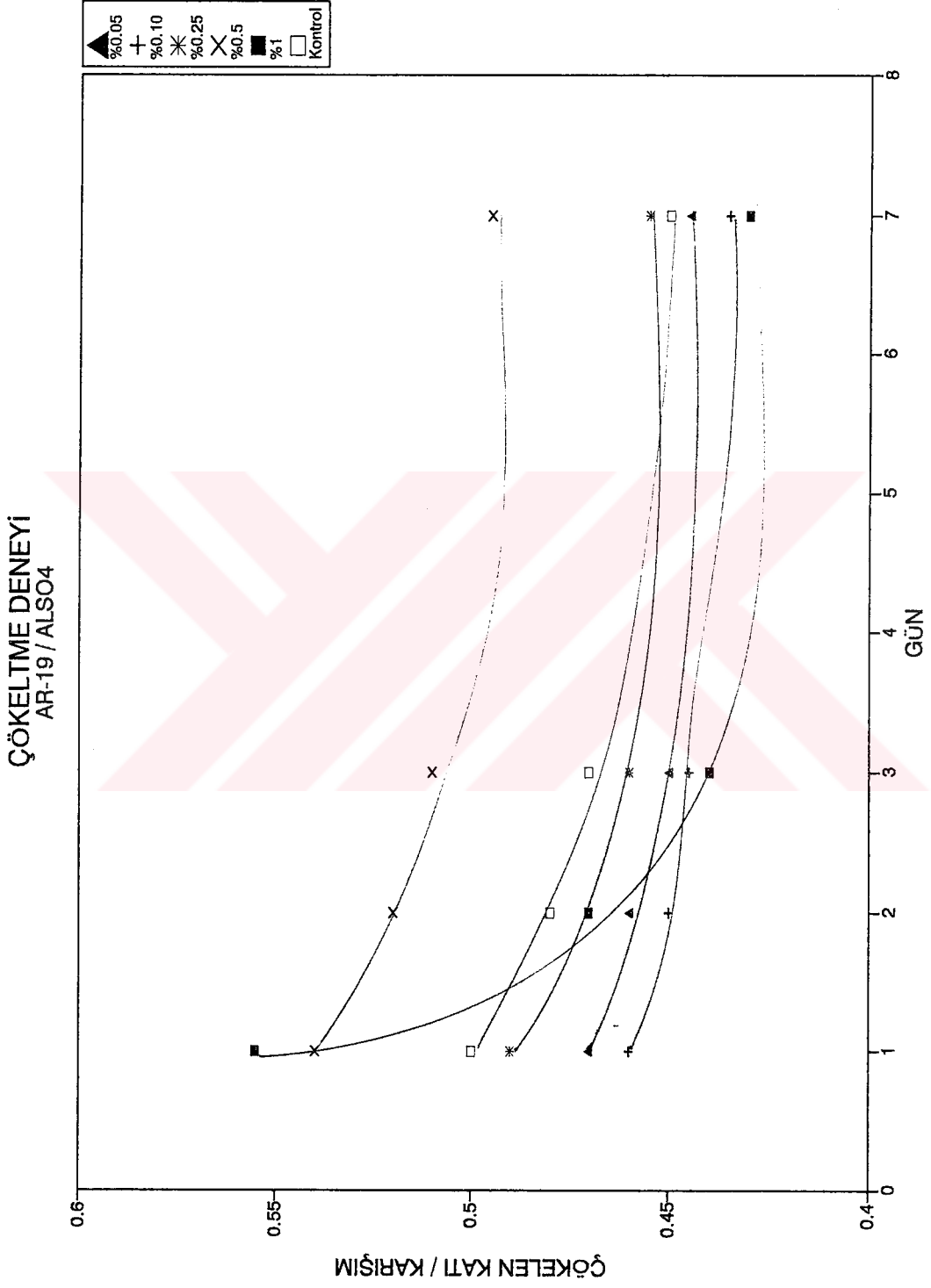




Şekil E17. AR-19 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgSO<sub>4</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

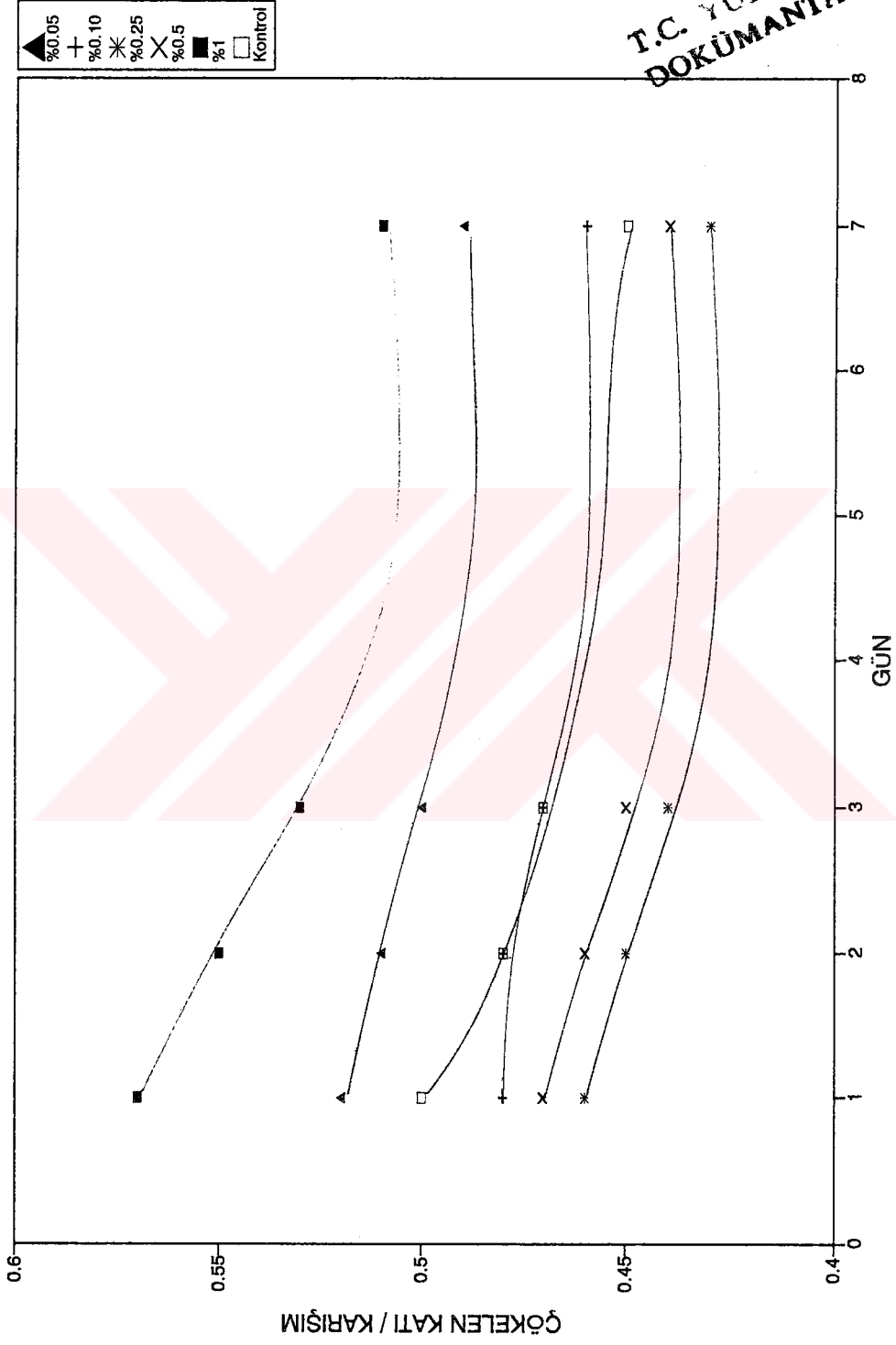


Şekil E18. AR-19 Çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları



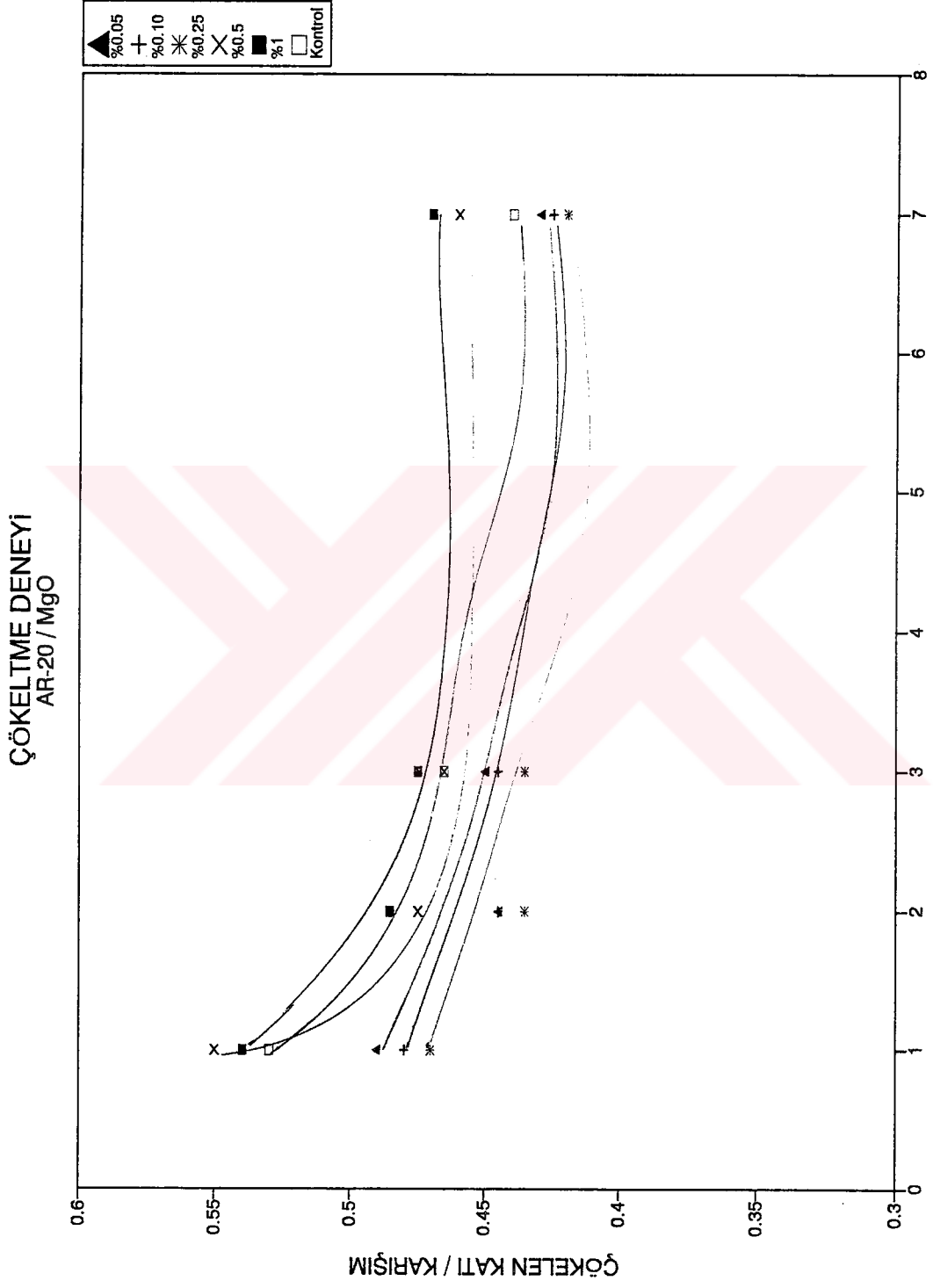
Şekil E19. AR-19 Çamur numunesinde değişik oranlarda AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

ÇÖKELTME DENEYİ  
AR-19 / CaCl<sub>2</sub>

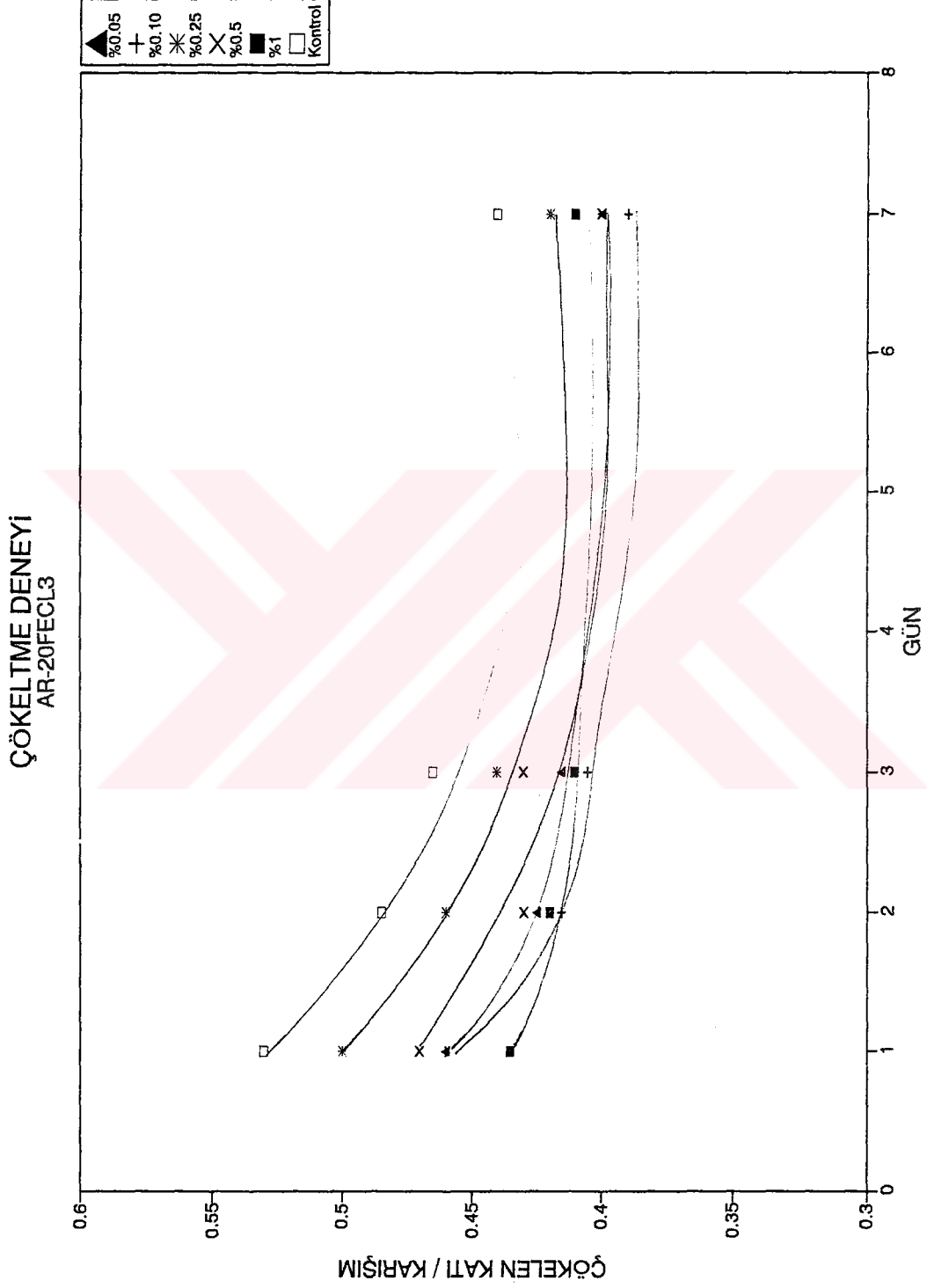


T.C. YÜKSEK  
DOKÜMANTASYON

Şekil E20. AR-19 Çamur numunesinde değişik oranlarda CaCl<sub>2</sub> kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

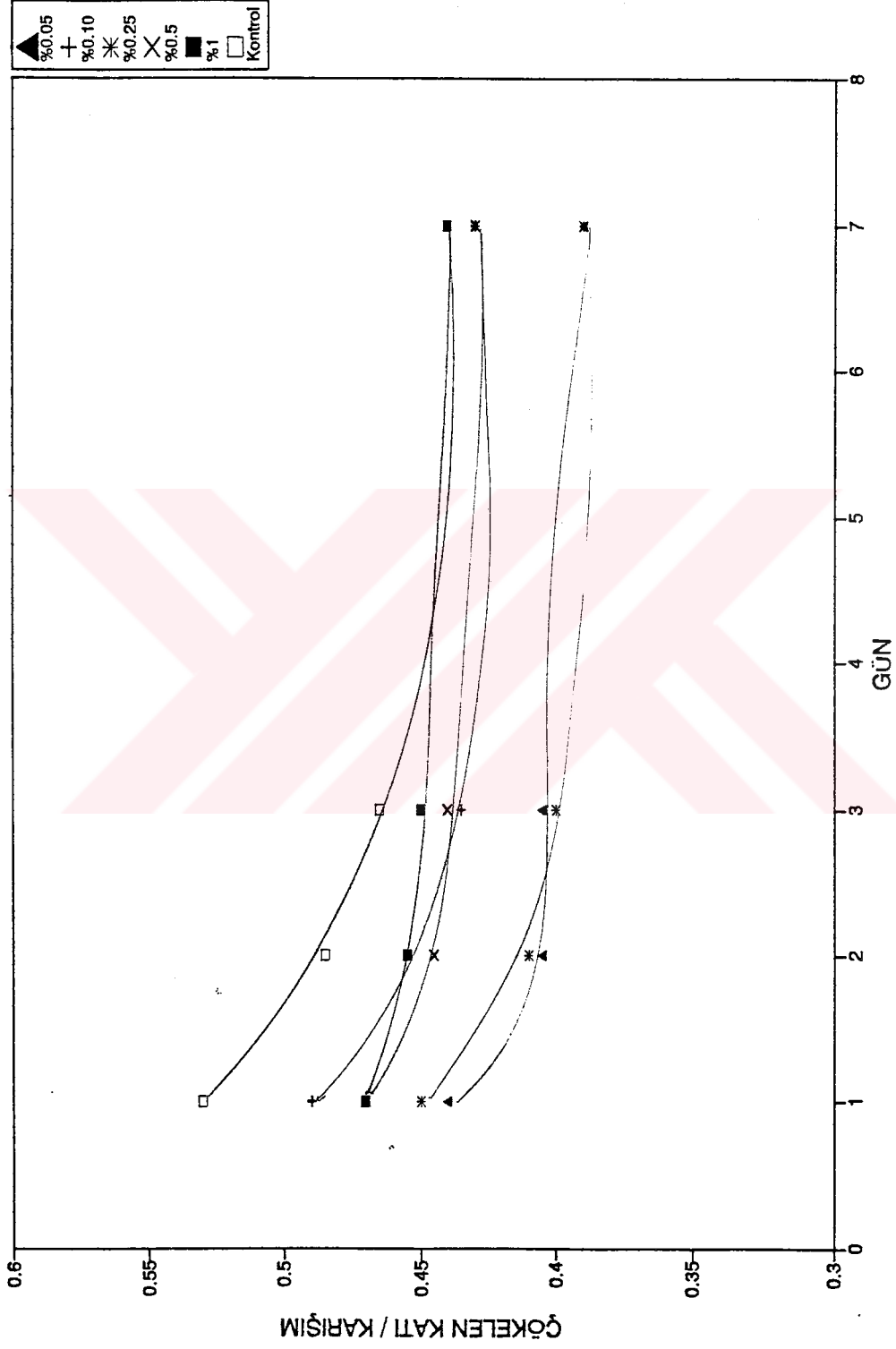


Şekil E21 AR-20 Çamur numunesinde değişik oranlarda MgO kullanılarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

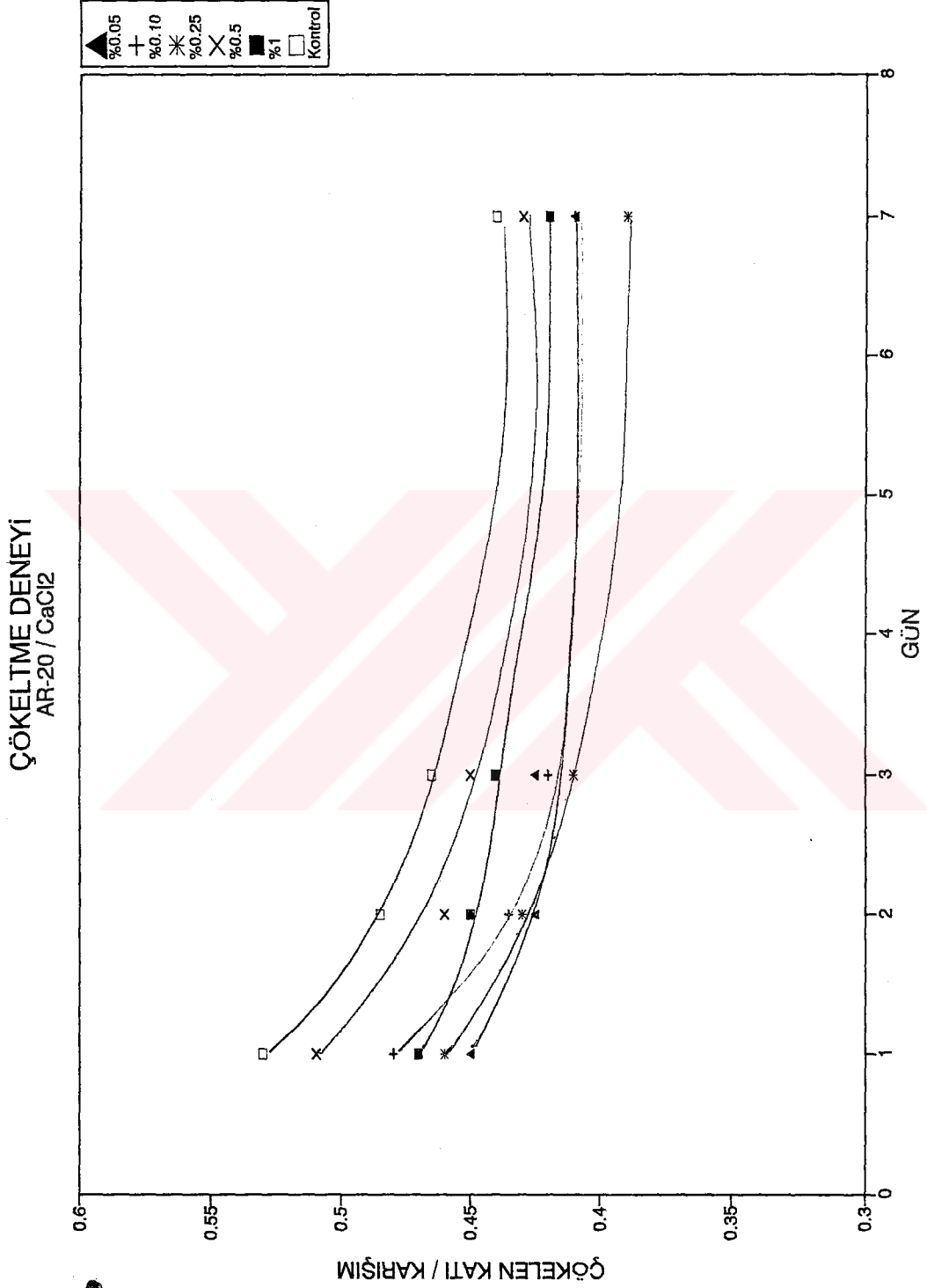


Şekil E22. AR-20 Çamur numunesinde değişik oranlarda FeCl<sub>3</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları

ÇÖKELTME DENEYİ  
AR-20 / AISO<sub>4</sub>



Şekil E23. AR-20 Çamur numunesinde değişik oranlarda AISO<sub>4</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları



Şekil E24. AR-20 Çamur numunesinde değişik oranlarda CaCl<sub>2</sub> kullanarak bir hafta boyunca elde edilen oturma oranları



## ÖZGEÇMİŞ

Doğum Yeri ve Yılı: İstanbul 1971

İlköğrenim: Cide İlkokulu

Ortaöğrenim: Kadıköy Anadolu Lisesi

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

