

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

79162

SULU ÇAMURLARIN SEDİMENTASYONU VE
KONSOLİDASYONU

İnş. Müh. Gökçe Çiçek İNCE

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Prof. Dr. İ. Kutay ÖZAYDIN

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN Prof. Dr. Gökhan Baykal Prof. Dr. Sencer Yıldırım
Kutay ÖZAYDIN Gökhan Baykal Sencer Yıldırım

İSTANBUL, 1998



Sevgili eřim'e teőekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	i
ÇİZELGE LİSTESİ.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. GİRİŞ	1
1.1 Sulu Çamurların Sedimentasyonu ve Konsolidasyonu Üzerinde Daha Önce Yapılmış Bazı Çalışmalar.....	3
1.2 Haliç Dipsel Çamurunun Geoteknik, Kirlilik ve Konsolidasyon Özellikleri.....	7
1.2.1 İncelenen malzemenin bünyesel özellikleri.....	8
1.2.2 Sulu çamur konsolidasyonu ile hazırlanan blok numuneler üzerinde yapılan deneyler.....	10
2. KİL BULAMACININ DAVRANIŞI	13
2.1 Kil Bulamacının Davranışına Temiz Suyun Etkisi.....	14
2.2 Kil Bulamacının Davranışına Deniz Suyunun Etkisi.....	17
2.3 Kil Bulamacının Permeabilite-Boşluk Oranı ve Boşluk Oranı-Efektif Gerilme İlişkileri.....	20
2.4 Kil Bulamacının Davranışına Ph Değerinin Etkisi.....	22
2.5 Kil Bulamacının Davranışına Sentetik İyonik Olmayan Polimerlerin Etkisi.....	23
2.6 Kil Bulamacının Davranışına Sızıntı Kuvvetinin Etkisi.....	25
2.7 Kil Bulamacının Kayma Mukavemeti.....	27
3. SEDİMENTASYON ve KENDİ AĞIRLIĞINDA ALTINDA KONSOLIDASYONİÇİN GENEL BİRLEŞİK TEORİ.....	33
3.1 Sedimentasyon ve Konsolidasyon Davranışını Modelleme Yaklaşımları.....	34
3.2 Birleşik Teoride Eşitliklerin Korunması.....	35
3.2.1 İki fazlı matematiksel değişmeyen eşitlikler.....	35
3.2.2 Değişken seçimi.....	36
3.2.3 Kütlelerin korunumu ve sürekliliği.....	37
3.2.4 Momentum dengesi.....	39
3.3 Süspansiyon Kuvvet Dengesi.....	39
3.3.1 Süspansiyonda sıvı-katı etkileşimleri.....	39
3.3.2 Katı-katı etkileşimleri ve süspansiyon içerisindeki kuvvet dengesi.....	41
3.4 Doymuş Zeminlerde Gerilme Dengesi.....	42
3.4.1 Doymuş zeminlerdeki katı-katı etkileşimi.....	42

3.4.2	Sıvı-katı etkileşimi ve doymuş zeminlerde gerilme dengesi.....	43
3.5	Birleşik Model.....	44
3.5.1	Birleşik gerilme denge eşitliği.....	44
3.5.2	Permeabiliteye karşı oturma hızı.....	44
3.5.3	Genel eşitlik.....	45
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	47
4.1	Haliç Taban Çamurunun Özellikleri.....	48
4.2	Deneylerde Kullanılan Zemin Özellikleri ve Endeks Özellikleri.....	50
4.3	Deney Aygıtları.....	51
4.3.1	Sedimentasyon ve konsolidasyon deney aleti.....	51
4.3.1.1	Deney aletini taşıyan alt parça.....	52
4.3.1.2	Numunenin içerisine yerleştirildiği, şeffaf iki parçalı deney hücresi ve onları birbirine bağlayan vidalı bilezik.....	52
4.3.1.3	İçerisinde poroz taş bulunan hareketli piston.....	52
4.3.1.4	Konsolidasyon deneyi aşamasında üzerine yüklerin konulabileceği başlık parçası.....	52
4.3.1.5	Deney aletinin diğer parçaları.....	53
4.3.2	Numunenin hazırlanması ve deney aletine yerleştirilmesi.....	53
4.3.3	Sedimentasyon deneyi.....	53
4.3.4	Konsolidasyon deneyi.....	55
4.3.5	Ödometre deneyi.....	55
5.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	62
5.1	Drenajlı Deney Sonuçları.....	63
5.1.1	Sedimentasyon deneyleri.....	63
5.1.2	Konsolidasyon deneyleri.....	65
5.1.3	Ödometre deneyleri.....	70
5.2	Drenajlı Deney Sonuçları.....	74
5.2.1	Sedimentasyon deneyleri.....	74
5.2.2	Konsolidasyon deneyleri.....	76
5.2.3	Ödometre deneyleri.....	79
6.	ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	83
6.1	Sedimentasyon ve Kendi Ağırlığı Altında Konsolidasyon.....	83
6.2	Sürşarj Yükü Altında Konsolidasyon.....	84
	KAYNAKLAR.....	88
	EKLER.....	89
Ek 1	D1 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	90
Ek 2	D2 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları.....	96
Ek 3	D2 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	98
Ek 4	D3 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları.....	103
Ek 5	D3 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	105
Ek 6	D4 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları.....	109
Ek 7	D4 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	110

Ek 8	D6 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları.....	116
Ek 9	D6 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	118
Ek 10	D6 Ödometre Deneyi Sonuçları.....	123
Ek 11	D7 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları.....	130
Ek 12	D7 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları.....	132
Ek 13	D7 Ödometre Deneyi Sonuçları.....	138
Ek 14	D5 Deneyi CS2 Programı Sonuçları.....	145
Ek 15	D6 Deneyi CS2 Programından Elde Edilen Değerler.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....		149



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	BNR3'ün temiz suda çökmesi esnasında yoğunluk profilleri..... 15
Şekil 2.2	Farklı derinlikler için BNR3 çökeltilerinin dane boyut analizleri..... 16
Şekil 2.3	BNR3'ün çökme davranışına tuzluluğun etkisi..... 17
Şekil 2.4	Temiz su ile karıştırılmış BNR3 için arayüzey yüksekliğinin zamanla değişimi..... 18
Şekil 2.5	Farklı derinlikler için BNR3 çökeltilerinin dane boyut analizleri..... 19
Şekil 2.6	Farklı başlangıç su muhtevalarında BNR3'ün katı konsantrasyonunun permeabilite ile değişimi..... 20
Şekil 2.7	On yumuşak zemin numunesi için ölçülmüş hidrolik geçirgenliğin efektif gerilme ile değişimi..... 21
Şekil 2.8	Teorik model için düşey hidrolik geçirgenliğin düşey efektif gerilme ile değişim..... 22
Şekil 2.9	Güney yolu körfez kilinin adım yükleme ve hidrolik konsolidasyon deneylerinden elde edilmiş permeabilite değerlerinin efektif gerilme ile değişimi..... 23
Şekil 2.10	Güney yolu körfez kilinin adım yükleme ve hidrolik konsolidasyon deneylerinden elde edilmiş özelliklerinin karşılaştırılması 24
Şekil 2.11	Fosfatik killerin sıkışabilirlik ilişkileri..... 25
Şekil 2.12	Fosfatik killerin boşluk oranı değerinin permeabilite ile değişimi..... 26
Şekil 2.13	BNR3'ün çökme davranışına pH'nın etkisi..... 26
Şekil 2.14	BNR3'ün çökme davranışına sentetik iyonik olmayan polimerin etkisi.. 27
Şekil 2.15	BNR3'ün çökme davranışına sızıntı yükünün etkisi(arayüzey yüksekliğinin zamanla değişimi)..... 28
Şekil 2.16	BNR3'ün çökme davranışına sızıntı yükünün etkisi (yoğunluk profilleri) 29
Şekil 2.17	Farklı su muhtevalarındaki BNR3'ün kayma gerilmesi ile kesme hızı arasındaki ilişki..... 30
Şekil 2.18	BNR3'ün plastik viskozite ve akma gerilmesinin su muhtevası ile değişimi..... 31
Şekil 2.19	BNR3 içerisine kum penetrasyonuna başlangıç su muhtevasının etkisi..... 32
Şekil 4.1	Sedimentasyon ve konsolidasyon deney aleti..... 57
Şekil 4.2	Numunenin çökmesi ve kendi ağırlığı altında konsolidasyonu..... 58
Şekil 4.3	Deney esnasında ölçülen değerler..... 59
Şekil 4.4	Çökelen ve kendi ağırlığı altında konsolide olan numunenin üzerine ağırlık konularak konsolidasyonu..... 60
Şekil 4.5	Ödometre deney aleti..... 61
Şekil 5.1	Tortu yüksekliğinin zamanla değişimi..... 64
Şekil 5.2	Toplam çıkan suyun zamana bağlı değişimi..... 64
Şekil 5.3	Su yüksekliğinin zaman bağlı değişimi..... 65
Şekil 5.4	Her yük kademesinde birim sıkışma miktarının zaman bağlı değişimleri... 66
Şekil 5.5	Boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi..... 71
Şekil 5.6	Her yük kademesinde birim sıkışma miktarının zaman bağlı değişimleri... 71
Şekil 5.7	Ödometre demneyinde boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi 75
Şekil 5.8	Tortu yüksekliğinin zamanla değişimi..... 75
Şekil 5.9	Su yüksekliğinin zaman bağlı değişimi..... 76

Şekil 5.10	Her yük kademesinde birim sıkışma miktarının zaman bağılı değişimleri...	76
Şekil 5.11	Boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi.....	79
Şekil 5.12	Ödometre deneyinde değişik yük kademelerindeki sıkışma miktarlarının zaman bağılı değişimi.....	80
Şekil 5.13	Ödometre deneyinde boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi..	82
Şekil 6.1a	Deney ve CS2 çökelme-zaman uyumu.....	85
Şekil 6.1b	Boşluk oranının efektif gerilme ile değişimi.....	86
Şekil 6.1c	Boşluk oranının permeabilite ile değişimi.....	86
Şekil 6.2.a	Deney ve CS2 çökelme-zaman uyumu.....	86
Şekil 6.2.b	Boşluk oranının efektif gerilme ile değişimi.....	87
Şekil 6.2c	Boşluk oranının permeabilite ile değişimi.....	87



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Haliç dipsel çamurunun fiziksel özellikleri..... 9
Çizelge 1.2	Elek analizi sonuçları..... 9
Çizelge 1.3	Dipsel çamurda konsolidasyon öncesi ve sonrası bazı özellikler..... 10
Çizelge 1.4	Dipsel çamurun konsolidasyon parametreleri..... 11
Çizelge 1.5	Blok numuneler üzerinde laboratuvar veyn deneyleri..... 12
Çizelge 1.6	Blok numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajsız deneyler..... 12
Çizelge 5.1	Yapılan sedimentasyon deneyleri..... 62
Çizelge 5.2	Sedimentasyon sonrası yapılan konsolidasyon deneyleri..... 66
Çizelge 5.3	Konsolidasyon basıncı ile boşluk oranının değişimi..... 70
Çizelge 6.1	A, B, C ve D katsayılarının değerleri..... 85



ÖNSÖZ

Nüfusun çoğalması ve sanayinin hızla gelişmesi, kullanılan su ve oluşan atık miktarında büyük bir artış meydana getirmiştir. Üretim faaliyetlerinin gelişmesi atık madde sorununda beraberinde getirmiş, başlangıçta tabiatın özümleme kapasitesi atıkların bertarafını sağlamışsa da, alınan önlemlerin yetersizliğiyle günümüzde ciddi çevre problemleriyle karşılaşmıştır. Özellikle büyük şehirlerde ve sanayinin yoğun olduğu bölgelerde kullanılan sular, tekniğin gerektirdiği şartlarda toplanmadığı ve arıtılmadan akarsulara, göllere ve denizlere verildiği için sağlık, estetik ve kirlenme sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Denizlerde biriken bu atıkların tarama ve uzaklaştırma yöntemi belirlenmeden önce çamurun dayanım karakterleri ve sedimentasyon karakterlerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir.

Sulu çamurların sedimentasyonu ve konsolidasyon özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada, benzer şekilde kirlenmenin olduğu Haliç numuneleri üzerinde özel olarak yaptırılan sedimentasyon ve konsolidasyon deney aletinde bir seri drenajlı ve drenajsız deney yapılmıştır.

Çalışmalarım sırasında teknik ve idari konulardaki yardımlarını esirgemeyen proje danışmanım, hocam Prof.Dr.Sayın İ.Kutay ÖZAYDIN'a, değerli hocalarım Prof.Dr.Sayın Sönmez YILDIRIM'a, Doç.Dr.Sayın Mustafa YILDIRIM'a, Yrd.Doç.Dr.Sayın Nejat ÇETİNKAYA'ya, değerli ilgileri nedeniyle Yrd.Dç.Dr.Sayın Mehmet BERİLGİN'e, her ihtiyacım olduğunda yanımda bulduğum Arş.Gör.Sayın Saadet BERİLGİN'e, değerli katkılarından dolayı Dr.Sayın Zafer Kütüğ'e, Dr.Sayın Şükrü ÖZÇOBAN'a, Arş.Gör.Sayın Havva Nur KILIÇ'a, Arş.Gör. Sayın Murat TONAROĞLU'na, deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan laboratuvar görevlileri teknisyen Erhan EROL'a, Ali YÜKSEL'e ve emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Sulu çamurların çökme ve konsolidasyon davranışlarının araştırılması sadece zemin mekaniği değil, hidroloji, jeoloji, çevre, kimya mühendislikleri gibi pek çok bilim dalı tarafından yapılmaktadır. Konuya zemin mekaniği açısından bakıldığında, bu tip çamurların konsolidasyon ve çökme karakteristiklerinin bilinmesi, çamurun ıslah yönteminin belirlenmesi için gerekli olmaktadır. Zemin taneleri oturduğunda ve bulamacın su muhtevası azaldığında, dayanımında çarpıcı bir artış olmaktadır. Bu artış çok küçük olmasına karşılık, çamurun ıslah edilmesi için kullanılabilir. Bu çalışmada ise, yaklaşık seksen yılı aşkın süredir Haliç'te meydana gelen kirlenmeden dolayı taranmasına karar verilen dipsel çamurun depolandıktan sonra çökme ve konsolidasyon karakteristiklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla, Singapur denizel kilinin konsolidasyon özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada Lee, Choa, Lee ve Quek (1993) tarafından geliştirilen ve deney için numune hazırlamakta kullanılan deney düzeneğinden örneklenerek özel bir deney aleti yaptırılmıştır. Ve bu deney aleti üzerinde drenajlı ve drenajsız deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler üç aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama deneylerde, yukarıda bahsedilen ve iki ayrı parçadan oluşan deney aletinde sulu çamur numunelerinin önce çökmesi, daha sonra sıkışması zamana bağlı olarak gözlenmiştir. Ayrıca drenajlı deneylerde çıkan su miktarı da zamana bağlı olarak ölçülmüştür. İkinci aşamada ise, deney aletinin üst parçası çıkarılarak diğer kısımlar üzerinde kademeli olarak sürşarj yükleri uygulanmış ve her yük kademesinde sıkışma-zaman davranışı ile sıkışma-gerilme ilişkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise, iki aşama sonunda elde olunan blok zemin numunesinde hazırlanan örnekler üzerinde standart odometre deneyleri uygulanmıştır. Birinci aşamada, kendi ağırlığında konsolide olan zemin kolonunda yükseklik boyunca efektif gerilme değişimi bilinmemektedir. Kullanılan deney düzeneğinde de efektif gerilmenin doğrudan ölçülmesi mümkün olmadığı için deneylerden belirlenen boşluk oranı ve permeabilite değerlerinden yararlanılarak efektif gerilme tahmini yapma yoluna gidilmiştir. Bu çalışmada, Somogyi(1979) tarafından önerilen $e=A\sigma'^B$ $k=Ce^D$ bağıntılarından yararlanılmıştır. Burada C ve D katsayıları deneysel ölçümlerden belirlenmiş, A ve B katsayıları ise Fox ve Barles (1997) tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı kullanılarak yapılan iterasyonlarla bulunmuştur. İkinci ve üçüncü aşamada ise, kalın yumuşak zemin tabakası halindeki bu çökellerin sürşarj yükleri altında zamana bağlı sıkışma miktarları ölçülmüş ve elde edilen e-log P grafikleri birinci aşamada elde edilenlerle birleştirilerek birlikte gösterilmiştir. Benzer sonuçların daha fazla numune üzerinde tekrarlanması ve arazi ölçümleri ile kalibre edilmesi durumunda, arazideki çamur tabakasının uzun süreli davranışı hakkında gerçeğe yakın öngörülerde bulunulabileceği düşünülmektedir.

ABSTRACT

The investigations on behaviour of sedimentation and consolidation of slurries have been performed not only by researchers of soil mechanics but also by those of hydrology, geology, environments and chemistry. From soil mechanics view point, to know the sedimentation and consolidation characteristics of a slurry is necessary to determine its treatment method. When soil particles settle and the water content of slurry decrease, its strength dramatically increases. The sea bottom sediments of Haliç has been decided to be dredged and stored on-land after being pollution over 80 years. In this study, the sedimentation and consolidation characteristics of slurry deposited in the storage area have been investigated. For this aim, a special experiment system similar to the one developed by Lee et al (1993) for studying the consolidation characteristics of Singapore marine clay has been built. By using this experiment system, several drained and undrained sedimentation and consolidation tests have been performed. These experiments consisted of three stages. In first stage, time dependent sedimentation and consolidation of slurry in the above-mentioned experiment system, consisting of two different parts, has been observed. Additionally, in drained experiments, the water drain out of sample has been measured. In the second stage, the upper part of the experiment system has been taken off and multiple stage surcharge loads have been applied on the sample in the lower part and at each load stage compression-time and compression-stress relationships have been determined experimentally. In the third stage, standard oedometer experiments have been performed on samples which are prepared from the block samples obtained at the end of the first two stages. Effective stress variation along the height of a soil column, consolidating under its self-weight, is not clearly known. Since the effective stresses could not be directly measured in experiment system used, effective stresses have been predicted by using void ratios and permeability values determined from experiments. For this aim, the equations proposed by Somogy (1979) $e = A\sigma'^B$ and $k = Ce^D$ have been used, where A and B are coefficients obtained by iteration using a computer programme developed by Fox and Barles (1997), C and D are coefficients determined from experiments. In second and third stages, time dependent compression of soft soil sediments have been measured under surcharge loads, and e -logP curves are shown together with the data obtained in the first stage. It is believed that long term field behaviour of slurry deposits can be better estimated by performing similar experiments on a larger number of samples and by calibrating the predictions with in-situ measurements.

1.GİRİŞ

Nüfusun çoğalması ve sanayinin hızla gelişmesi kullanılan su ve oluşan atık miktarında büyük bir artış meydana getirmiştir. Üretim faaliyetlerinin gelişmesi artık madde sorununda beraberinde getirmiş, başlangıçta tabiatın özümleme kapasitesi atıkların bertarafını sağlamışsa da, alınan önlemlerin yetersizliğiyle günümüzde ciddi çevre problemleriyle karşılaşmıştır.

Çevre kaynakları arasında bulunan denizlerin bu atıklar karşısındaki durumu farklıdır. Denizler çeşitli kaynaklar sebebiyle kirletilmektedir; denizin havadan, karadan ve denizden kirletilmesi sözkonusudur. Bu kirletici kaynaklar arasında en önemli etkiyi denizin denizden kirletilmesi yapmaktadır. Bu kirlenme kaynağının boyutu, deniz kirlenmesinin yerel boyutta kalmayıp hızla yayılma özelliği taşıması sebebiyle uluslararası önem kazanmıştır.

Canlılar doğanın bozulmadığı yörelerde hiçbir etki altında kalmadan çoğalır ve gelişirler. İnsan eli doğaya uzandığı zaman canlı yaşamı etkilenmeye başlar. Son yıllarda ekonomi, teknoloji ve endüstrinin hızla gelişmesi, nüfus artışı, şehirleşme ve sanayinin yoğun olduğu bölgelerde kullanılan sular, tekniğin gerektirdiği şartlarda depolanmadığı ve artılmadan akarsulara, göllere ve denizlere verildiği için sağlık, estetik ve kirlenme sorunlarını da beraberinde getirmektedir.

Böylece oluşan bu kirliliğin taranması ve uzaklaştırılması bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Taranan bulamaç halindeki çamurun depolanması ve ıslahı, atık tortularıyla ilgilenen pek çok mühendisin yüzyüze geldiği bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerçekleştirilecek tarama işleminin kıyılarda zemin hareketine yol açmaması, tarama araç ve yönteminin seçimi, taranacak çamurun ilave çevresel sorunlara yol açmayacak şekilde ve en ekonomik şekilde uzaklaştırılabilmesi için çamurun geoteknik ve kirlilik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu tip çamurların depolandıktan sonraki sedimentasyon ve konsolidasyon karakteristikleri ve permeabilite özelliklerinin belirlenmesi için zemin mekaniğinde geliştirilmiş geleneksel

çamur konsolidasyon deneylerinin yanısıra özel geliştirilmiş deney teknikleri kullanılmaktadır. Bu deney teknikleri birbirleriyle karşılaştırılarak en ekonomik ve en hızlı şekilde çamurun sedimentasyon ve konsolidasyon özelliklerinin nasıl belirlenebileceğide tartışılmaktadır. Depolanmadan sonra zemin tanecikleri çökelediği zaman ve bulamacın su muhtevası azaldığında, dayanımında çarpıcı bir artış meydana gelmektedir. Dayanımındaki bu artış, zemin mekaniğine göre küçük olmasına karşılık çamurun stabilizasyonu için oldukça önem taşımaktadır. Bulamacın sedimentasyon sonundaki dayanımını arttırmak üzerine kum tabakası serilebileceği önerilmektedir. Fakat bulamacın bu kum taneciklerini taşıyabilecek kadar bir dayanıma sahip olması gerekmektedir.

Sedimentasyon, bir süspansiyon içerisindeki taneciklerin çökmesi olayıdır. Depolanan, biriken tanecikler, sıvı sütununun tabanı üzerinde, doymuş ince bir zemin tabakası olarak sediment yatağında biçimlenir. Konsolidasyon, zemin iskeletinin kendi ağırlığı yada muhtemel diğer yüklerle zamana bağlı sıkışmasıdır. Her iki yöntem, farklı bilim dallarını ilgilendirmektedir. Böylece, bu konuda oldukça geniş bir literatür bulmak mümkün olmaktadır. Bu çalışma ise, Haliç Islah Projesi kapsamında taranmış ve depolanmış çamurun, depolanmadan sonraki davranışını araştırmaya yönelik bir çalışmadır.

Haliçte 80 yılı aşkın devam eden kirlenme, deniz tabanında bir çamur tabakası oluşturmuştur. Bu çamur tabakası zaman içinde birikme sonucunda oldukça kalınlaşarak batimetrik seviyenin genel olarak düşmesine sebep olmuştur. Haliç Islah Projesi kapsamında derinlikleri 10m ile 25m arasında değişen toplam 19 adet zemin etüt sondajı gerçekleştirilmiştir. Bu sondaj sırasında ve alınan numuneler üzerinde hem arazi hem laboratuvar deneyleri aracılığı ile, 25m derinliğe kadar zeminin endeks özellikleri ile taban çamurunun kayma mukavemeti ve konsolidasyon özelliklerini belirleyen laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Çünkü gerçekleştirilecek tarama işleminin kıyılarda zemin hareketine yol açmaması, tarama araç ve yönteminin seçimi, taranacak çamurunun ilave çevresel sorunlara yol açamayacak ve en ekonomik şekilde uzaklaştırılabilmesi için taban çamurunun bu özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bütün bunların sonucunda çeşitli tarama ve uzaklaştırma yöntemleri incelenmiş ve sonuçta karadan borular vasıtasıyla çamurun deniz

suyu ile sulandırıldıktan sonra Alibeköy civarındaki boşaltılmış maden ocağına basılması en uygun yol olarak seçilmiştir.

1.1 Sulu Çamurların Sedimentasyonu ve Konsolidasyonu Üzerinde Daha Önce Yapılmış Bazı Çalışmalar

Sedimentasyon ve konsolidasyon farklı bilim dallarını ilgilendiren konular olduğundan bu konuda yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle farklı bilim dallarında farklı yaklaşımlar ve bunların neticesinde oluşturulmuş modeller bulunmaktadır. Schiffman vd., (1985) ve Alexis, Thomas ve Gallois (1993), bu farklı bilimlerde üretilmiş olan sedimentasyon ve konsolidasyon teorilerine yeniden gözden geçirmişlerdir. Kimya mühendisliği ve zemin mekaniği gibi birbirinden oldukça farklı bilim dallarında birbirinden bağımsız olarak sedimentasyon ve konsolidasyon konuları üzerinde araştırmalar yapılmıştır. İlki süspansiyon içerisindeki taneciklerin çökme davranışı (sedimentasyon) ile ilgilenirken diğeri zeminlerin oturma davranışını (konsolidasyon) incelemiştir. İlk sedimentasyon teorisi Kynch (1952) tarafından ortaya atılmıştır ve konsantrasyon edilmiş süspansiyondaki çökme davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. İlk konsolidasyon teorisi ise Terzaghi (1923) tarafından ortaya atılmıştır. Ve daha sonra Terzaghi (1942) küçük şekil değiştirmeler için konsolidasyon denklemini formüle etmiştir. Daha sonra geliştirilen konsolidasyon modelleri ise genellikle lineer olmayan büyük şekil değiştirmeler için Gibson, England ve Hussey (1967) önerilen modele dayanmaktadır.

Kimya mühendisliğinde kolloidal süspansiyonların oturma davranışını tahmin edebilmek için konsolidasyon teorisi Tiller (1981) tarafından bulunmuştur. Bu konuda daha fazla teoriksel çalışma Batchelor (1972) tarafından yapılmıştır. Benzer zamanlarda hidrolik mühendisliğinde yeni bir araştırma olan kohezyonlu sedimentlerin taşınması araştırması yapılmıştır. Sedimentin taşınma modellemesinde, biraz değiştirilmiş Stokes Kanunu, süspansiyon edilmiş sediment taneciklerinin ortalama çökme hızları ile derinliklerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Süspansiyonun hız transferi üzerine yoğunluğun etkisi ihmal edilmiştir çünkü numune çok düşük konsantrasyonlardadır. Kohezyonlu sedimentin oturma davranışı, yavaşça konsolide olan bir sıvı çamur tabakasının şekillenmesiyle

sonuçlanmaktadır. Kohezyonlu sediment araştırma gurubu, sedimentasyon ve konsolidasyonun modellenmesi için değerli bilgiler sağlamıştır. Been (1980), geleneksel konsolidasyon modelleri ile Kynch'ın (1952) sedimentasyon teorisi arasındaki benzerliği göstermekte ilk olmuştur. Bu arada Tan, Yong, Leong ve Lee (1990) ve Toorman ve Berlamont (1991,1993) tarafından birbirlerinden bağımsız olarak, kohezyonlu sediment süspanسیونları için çökme hızlarının deneysel değerlerini elde etmek için Kynch'ın teorisi kullanılmıştır. Sedimentasyon ve Konsolidasyonu birbirine bağlayan ilk kuramsal ana prensip, ilk olarak Gibson eşitliğinden Pane ve Schiffman (1985) tarafından ortaya atılmıştır. Buscall (1990), sedimentasyon ve konsolidasyon konularında bulunan mühendislik, kimyasal yada matematiksel yaklaşımlar arasındaki benzerliği göstermiştir. Toorman (1996) tarafından sedimentasyon ve kendi ağırlığında konsolidasyon için genel birleşik teorisi, doymuş zeminler için geliştirilmiştir.

İmai (1979), yumuşak zeminlerde hidrolik geçirimsizlik ve sıkışabilirliğin ölçümü için "Hidrolik Konsolidasyon" olarak adlandırılan bir konsolidasyon deneyi geliştirmiştir. Bu hidrolik konsolidasyon deneyi, rijit duvarlı bir konsolidasyon aletindeki numunenin içinden aşağıya doğru uygulanan hidrolik eğim uygulamasıyla yapılmaktadır. Sızıntı kuvvetleri zemini konsolide etmekte ve numune içerisinde üniform olmayan efektif gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Daha sonra sabit akış durumuna erişilmekte ve numune içindeki lokal boşluk suyu basınçları ölçülmektedir. Boşluk oranı dağılımı ise, deney sonunda numunenin bölünmesiyle elde edilmektedir. Elde edilen bu datalardan, numunenin boşluk oranı-permeabilite ve boşluk oranı-efektif gerilme değerleri elde edilmektedir. Carrier vd., (1983), hidrolik konsolidasyon deneyinin diğer deneylerle karşılaştırıldığında bazı avantajları olduğunu bulmuştur. Bunlar ise; tek bir deneyden sıkışabilirlik ve hidrolik geçirgenlik ilişkisi elde edilebilmektedir. Boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı- permeabilite arasındaki ilişki, tek bir hidrolik eğim için geçerlidir. Ve deney sonuçlarının teoriksel yorumuna ihtiyaç olmaksızın boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisi direkt olarak elde edilebilmektedir. Ayrıca, düşük efektif gerilme bölgelerindeki ölçümler için çok elverişlidir. Fakat bunun yanında orijinal olarak İmai tarafından sunulan tekniğin bazı dezavantajlarının olduğu Baxter (1994) tarafından bulunmuştur. Bu dezavantajlar ise şöyledir; akış esnasında lokal boşluk suyu basınçlarını ölçmek için özel deney aletlerine

ihtiyaç vardır. Numune, lokal su muhtevalarını ölçmek için deney sonunda bölünmelidir ve ayrıca deney sonuçları, konsolidemetrenin duvarı boyunca akış kanallarının şekillenmesiyle geçersiz sayılabilmektedir. Diğer bir yandan, sabit akış esnasında numune içindeki çeşitli değişimler de lokal boşluk suyu basınçlarının ölçümünü zorlaştırmaktadır.

Yüksek sıkışabilirliğe sahip atık maddelerin (fosfatlı killer, lağım tortuları ve bataklıklar gibi) ekonomik ve çevresel olarak en iyi bir şekilde düzenlenmesi için hidrolik konsolidasyon testinin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Sulu çamurların depolanma ve ıslah çalışmaları için oturma tahmininin yapılmasında sonlu gerilme ve konsolidasyon teorisi kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Schiffman vd., 1984; Scully vd., 1984; Caldwell vd., 1986; McVay vd., 1986; Townsend ve McVay vd., 1990). Alternatif olarak hidrolik konsolidasyon tekniği, yüksek derecede sıkışabilir atık maddelerin konsolidasyon karakteristiklerinin belirlenmesi için ortaya atılmıştır (Huerta vd., 1988; Abu-Hejleh vd., 1996).

Orijinal İmai testinin bazı ihmallerinden kaçınmak için, Huerta vd., (1988) tarafından hidrolik konsolidasyon deneyinde bazı değişiklikler yapılması ve deney sonuçlarının yorumu için yeni bir analiz tekniği önerilmiştir. Huerta vd., (1988), lokal boşluk basıncı ve numune içindeki boşluk oranı dağılımının kullanımını önlemiştir. Çözüm elde etmek için sabit durum akış değerinin gerekli olduğu ve numune tabanındaki boşluk oranının deney sonunda ölçülmesi gerektiğini savunmuştur. Abu-Hejleh vd., (1996), hidrolik konsolidasyon deneyi için alternatif bir deney ve analiz tekniği sunmuştur. Buna göre, deneysel prosedür üç aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar; başlangıç efektif gerilme ve boşluk oranının ölçümü, numunenin yüksekliği ve sabit akış durumunda numunenin içerisindeki farklı yerlerdeki boşluk basıncı ölçümü ve hidrolik geçirgenliğin ölçümüdür.

Diğer taraftan yine sulu çamurların oturma davranışının incelemesinde, sıkışma ve akışın tek boyutlu olduğu, düşey hidrolik geçirgenlik ile düşey efektif gerilmenin logaritması arasında lineer bir ilişkinin olduğu ve duvar sürtünmesinin ve bulamaç ağırlığının toplam gerilmeyle karşılaştırıldığında küçük olduğundan ihmal edilebileceği Fox ve Baxter (1997) tarafından kabul edilmiştir.

Sulu çamurlarda efektif gerilme ile hidrolik geçirgenlik arasında lineer bir ilişkinin var olduğu on farklı zemin numunesinin incelenmesinden görülmüştür(Huerta vd.,1988; Townsend ve McVay vd.,1990). Bu on farklı yumuşak zemin numunelerinin eğrilerinin dar bir bantta değiştiği görülmüş ve permeabilite ile efektif gerilme arasında aşağıda gösterildiği gibi bir eşitlik elde edilmiştir.

$$k_v = B * \sigma^{-A}$$

$$k_v = 3.68 * 10^{-8} (\sigma', \text{kPa})^{-0.78} \quad (1.1)$$

Burada $A=0.78$ sabiti, sonlu gerilme konsolidasyon ve hidrolik konsolidasyonun nümerik ve analitik sonuçları için kabul edilmiştir.

Fox ve Baxter (1997) tarafından yapılan kabullerden duvar sürtünmesi ve bulamaç ağırlığının ihmal kabulü, Been ve Sills (1981) ve Tan vd.,(1988) tarafından incelenmiş ve kil bulamacının kendi ağırlığındaki konsolidasyonu için duvar kenarındaki sürtünmenin toplam gerilme üzerinde küçük bir etkisinin olduğunu bulmuşlardır. Laboratuvar numuneleri için, bu kabullerle kurulan ilişkilerdeki hata payının, numune içinde meydana gelen boşluk suyu basıncındaki büyük değişimler ve uygulanmış çevrimlerle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu (Znidarcic vd.,1986; Fox 1996) tarafından bulunmuştur.

Sulu çamurların konsolidasyon karakteristiklerinin araştırılması konusunda bir çalışmada Florida'da çıkarılan fosfatlı killer üzerinde yapılmıştır. Dünya fosfatının %30'nun burada üretildiği tahmin edilmektedir. Böylece her sene büyük miktarlarda fosfatlı atık kil ortaya çıkmaktadır(McVay vd.,1986). Bu bulamaç üzerinde Liu(1990) tarafından yapılan incelemeye göre, boşluk oranı 40 ile 130 arasında değişen kil bulamacı, pompalandığı havuzlarda bir kaç gün yada bir kaç hafta içerisinde sedimentasyonunu tamamlamaktadır. Ve efektif gerilmenin oluşmaya başladığı kendi ağırlığında konsolidasyon safhasına gelmektedir. Efektif gerilme ilkesinin uygulanmaya başladığı bu aşamada, zemin formasyonunun boşluk oranının bulamaç boyunca sabit olmadığı ancak, başlangıç boşluk oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Carrier vd.,(1983), fosfatik killer için, e değerinin 30 civarında olduğunu, diğer atık killer için ise e 'nin tipik değerlerini listelemiştir.

Efektif gerilme ile permeabilite ve boşluk oranı değişimleri, özellikle efektif gerilmenin düşük olduğu konsolidasyonun ilk devrelerinde yumuşak killer için oldukça önemlidir. Bu gibi zeminler için, konsolidasyon karakteristiklerinin tespit edilmesinin oldukça zor olduğu (Zndarcic vd.,1982) tarafından bulunmuştur.

1.2 Haliç Dipsel Çamurunun Geoteknik, Kirlilik ve Konsolidasyon Özellikleri

Haliç İslah Projesi-Fizibilite raporu için taban çamurunun geoteknik ve kirlilik özellikleri Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Geoteknik bölümü tarafından tespit edilmiştir. Ayrıca, taban çamurunun konsolidasyon davranışını incelemek üzere çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Haliç'ten taranacak çamurun uzaklaştırılması için kullanılacak alternatif yöntemlerden birisinin, taranan çamurun açık arazide depolanması olduğu düşünülmüştür. Etrafı çevrelenmiş bir alanda havuzlanarak depolanarak taranmış sulu çamurun konsolidasyon davranışı deneysel olarak incelenerek, depolanma sahalarındaki zeminin zamana bağlı olarak mukavemet ve taşıma gücü kazanımı ile yük altındaki sıkışabilirliği belirlenmiştir. Çünkü, elde edilen alanların ne kadar süre sonra ve hangi amaçla kullanılabilir hale getirilecekleri, hangi aralıklarla bir öncekinin üzerine yeni malzeme yerleştirilebileceği gibi sorulara verilecek yanıtın dipsel çamurun konsolidasyon özellikleri ile direkt ilişkisi vardır. Tarandığında yüksek su muhtevası ile sifıra yakın kayma mukavemetindeki çamurlar zamanla bünyelerindeki suyun çıkması ve yüzeyde buharlaşma ile mukavemetlerinde bir artış olmaktadır. Çok düşük permeabilite nedeniyle bu artış hızı oldukça düşüktür.

Haliç ıslah projesi kapsamında gerçekleştirilen zemin etüt sondajları çalışmaları sırasında, her sondaj noktası civarında deniz tabanı yüzeyine yakın seviyelerden süspansiyon halinde çamur numuneleri alınmıştır. Bu numuneler arasından, Haliç'teki kirlenme durumu açısından farklı bölgeleri temsil ettiği düşünülen belirli sayıda örnek üzerinde sulu çamur konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonunda hazırlanmış konsolide blok numuneler üzerinde ise standart mukavemet ve konsolidasyon deneyleri yapılarak, taranmış taban

çamurunun konsolide olduktan sonra arazide beklenebilecek davranışı ile ilgili geoteknik parametreler belirlenmiştir.

1.2.1 İncelenen malzemenin bünyesel özellikleri

Haliç ve benzeri jeolojik oluşumlarda taranan dipsel çamurlar genellikle çok yüksek su muhtevası, düşük permeabilitesi ve sifra yakın kayma mukavemeti ile tanınırlar. Haliç gibi evsel ve endüstriyel atıkların boşaltıldığı yerlerde dipsel çamurun ayrıca organik madde ve kirlilik özellikleri de belirgindir. Haliç ıslah projesi kapsamında, dipsel çamur örnekleri üzerinde yapılan deneylerden belirlenen çamurun fiziksel özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir. Bu değerlere göre örneklerin Casgrande plastisite kartındaki yerlerinin yüksek plastisiteli killi silt/siltli kil (MH/CH) sınıfına girdiği görülmüştür.

Alınan dipsel çamur örneklerinden, üzerinde konsolidasyon deneyi yapılanların granülometrik özellikleri ise Çizelge 1.2'de gösterilmiştir. Dipsel çamur örneklerinden üç adedi sulu çamur konsolidasyon deney aygıtı diye adlandırılan ve bu iş için yaptırılan düzenekte arazi ölçme koşullarına benzer şekilde konsolide edilmiş ve elde edilen daha katı kıvamdaki zemin blokları üzerinde daha sonra geoteknik parametreler saptanmıştır.

Sulu çamur konsolidometreye yerleştirilen örneklerin su muhtevaları başlangıçta %121 ile %193 arasında değişirken son konsolidasyon basınçları olarak kullanılan 100-200 kPa basınç altında su muhtevaları %49 ile %76 arasında kalmıştır. Bu değerler ise Çizelge 1.3'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre her basınç basamağında hesaplanan konsolidasyon katsayısı ile hacimsel sıkışma katsayısı değerleri Çizelge 1.4'te verilmiştir.

Çizelge 1.1 Haliç dipsel çamurunun fiziksel özellikleri (Özaydın, 1995)

Numune No	Su Muh. wt(%)	Plastik L. w _p (%)	Likit L. W _l (%)	Top.Katı Mad. (%)	Organik Mad. (%)
AR-1 BD1	176	34	53	33.12	6.72
AR-2 BD1	103	27	48	51.74	4.9
AR-3 BD1	240	33	75	35.48	6.88
AR-4 BD1	124	30	64	46.26	6
AR-5 BD1	250	45	77.5	27.4	5.34
AR-6 BD1	113	36	58	41.14	4.88
AR-7 BD1	241	28	58	31.56	3.82
AR-9 C1	244	30	64	26.2	3.86
AR-10 BD1	121	39	60	47.2	4.88
AR-11 BD1	135	34	55	37.42	3.48
AR-12 BD1	167	55	74	34.44	5.68
AR-13 BD1	120	45	71	44.66	4.86
AR-14 BD1	86	24	42	53.7	1.88
AR-15 BD1	114	38	53	36.14	4.18
AR-16 BD1	74	25	49	60.96	2.88
AR-17 BD1	133	40	65	44.12	3.46
AR-18 BD1	219	42	62	48.44	3.12
AR-19 BD1	104	39	55	45.84	2.92
AR-20 BD1	57	22	48	56.56	3.96

Çizelge 1.2 Elek analizi sonuçları(Özaydın, 1995)

ÖZELLİK	AR-4 BD1	AR-19 BD1
Çakıl (%)	-	-
Kum (%)	28	14
Silt (%)	72	71
Kil (%)	-	15

Çizelge 1.3 Dipsel çamurda konsolidasyon öncesi ve sonrası bazı özellikler(Özaydın, 1995)

KONSOLIDASYON ÖNCESİ

Örnek No.	Son Basınç (kPa)	Su Muh. W _i (%)	Bir.Hac.Ağ.γ _i (kN/m ³)	Boşluk O. e _i ((%)	Doy.Derecesi S _i ((%)
AR-4 BD1	200	149	11.28	4.85	83
AR-12 BD1	100	193	9.91	6.83	76
AR-19 BD1	100	121	12.99	3.51	93

KONSOLIDASYON SONRASI

Örnek No.	Son Basınç (kPa)	Su Muh. W _f (%)	Bir.Hac.Ağ.γ _f (kN/m ³)	Boşluk O. e _f ((%)	Doy.Derecesi S _f ((%)
AR-4 BD1	200	51.5	12.34	2.28	61
AR-12 BD1	100	76	14	2.93	70
AR-19 BD1	100	49	15.49	1.79	74

1.2.2 Sulu çamur konsolidasyonu ile hazırlanan blok numuneler üzerinde yapılan deneyler

Taranan dipsel çamurların etrafı çevrili alanlarda gerek kuruyarak gerek kendi ağırlığı veya sürşarj etkisinde kalarak katılaştıktan sonra kullanılabilirliği sulu çamurdan elde edilen örneklerin geoteknik özelliklerine bağlıdır. Yapılan ödometre deneyinden çıkan sonuçların yorumlanmasından ortalama sıkışma indisinin (C_c) 0.5-1.0 dolaylarında olduğu görülmüştür. Böylece basınç altında konsolide olmuş dipsel çamurun tekrar yüklenmesi halinde sıkışabilirliği fazla organik zemin gibi davranacağı görülmüştür.

Dipsel çamurun mukavemet özelliklerini saptamak için ise laboratuvar veyn ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar veyn deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 1.5'te gösterilmiştir. Çamur üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajsız deney sonuçları ise Çizelge

1.6'da gösterilmektedir. Yapılan tüm bu deneylerden çamurun zamana bağlı olarak bünyesinden su çıkması ile mukavemetinde artış olduğu, 100-200 kPa arasında basınçlar altında konsolide olduktan sonra bu çökellerin doğada rastlanılan organik zeminler kıvamına ulaştığı gözlenmiştir. Bu tip zeminlerin mukavemet ve yük altında sıkışma özelliklerinin incelenmesinden 100-200 kPa arasında basınçlar altında konsolide olan bu zeminlerin yüksek sıkışabilirliğe sahip orta katı kıvamda kohezyonlu tabii zeminlere benzer özelliklere sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 1.4 Dipsel çamurun konsolidasyon parametreleri(Özaydın, 1995)

Örnek No	Basınç Basamağı(kPa)	$c_v(m^2/sn)$	$m_v(kPa^{-1})$
AR-4 BD1	25	$4.10 \cdot 10^{-7}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$
	50	$1.64 \cdot 10^{-7}$	$9.81 \cdot 10^{-4}$
	100	$1.17 \cdot 10^{-7}$	$8.62 \cdot 10^{-4}$
	200	$7.3 \cdot 10^{-8}$	$5.72 \cdot 10^{-4}$
	400	$7.82 \cdot 10^{-8}$	$2.73 \cdot 10^{-4}$
	800	$4.38 \cdot 10^{-8}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$
AR-12 BD1	25	$1.26 \cdot 10^{-7}$	$6.91 \cdot 10^{-4}$
	50	$4.34 \cdot 10^{-8}$	$1.48 \cdot 10^{-3}$
	100	$2.34 \cdot 10^{-8}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$
	200	$1.93 \cdot 10^{-8}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$
	400	$1.74 \cdot 10^{-8}$	$3.83 \cdot 10^{-4}$
	800	$1.35 \cdot 10^{-8}$	$1.98 \cdot 10^{-4}$
AR-19 BD1	25	$1.31 \cdot 10^{-6}$	$1.25 \cdot 10^{-4}$
	50	$2.08 \cdot 10^{-7}$	$4.38 \cdot 10^{-4}$
	100	$6.57 \cdot 10^{-8}$	$5.63 \cdot 10^{-4}$
	200	$2.53 \cdot 10^{-8}$	$5.94 \cdot 10^{-4}$
	400	$2.19 \cdot 10^{-8}$	$3.44 \cdot 10^{-4}$
	800	$1.11 \cdot 10^{-8}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$

Çizelge 1.5 Blok örnekler üzerinde laboratuvar veyn deneyleri(Özaydın, 1995)

Deney örneği	c_u (kPa)	σ'
AR-4 BD1	57.66	200
AR-12 BD1	20.72	100
AR-19 BD1	22.21	100

Çizelge 1.6 Blok örnekler üzerinde konsolidasyonlu drenajsız deneyler(Özaydın, 1995)

Örnek No.	Hücre Basıncı σ_3 (kPa)	Kırılma sırasında efektif küçük gerilme σ'_{3f} (kPa)	Deviatör Gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) _f (kPa)
AR-4 BD1	200	185.3	38
AR-4 BD1	250	211.6	50
AR-12 BD1	100	61.6	70
AR-19 BD1	200	179.7	110

2. KİL BULAMACININ DAVRANIŞI

Bulamaç planlama ve ıslah edilmesi, bu konuyla ilgilenen pek çok mühendisin yüzyüze geldiği bir problemdir. Bulamaç çok sulu olduğu zaman, taneciklerin çökmesi çok yavaş olmaktadır. Bunun giderilmesi için, zemin taneciklerinin hepsinin birden çökmesi arzu edilmektedir. Zemin tanecikleri çökeldiği zaman ve bulamacın su muhtevası azaldığında, dayanımında çarpıcı bir artış meydana gelmektedir. Dayanımdaki bu artış, zemin mekaniğine göre küçük olmasına karşılık, çamurun daha sonraki stabilizasyonu için önemlidir. Bulamaç dayanımını arttırmanın bir yolu, bulamaç üzerine yatay olarak drenaj tabakası şeklinde bir kum tabakası sermektir. Bu uygulamanın başarılı olabilmesi için, bulamaç dayanımının kum taneciklerini yüzeyde tutabilecek kadar büyük olması gerekmektedir. Kum taneciklerinin çökmesinin bitiminde, çamur için yeterli bir dayanım sağlanmış olmaktadır.

Bulamaç depolanması ve ıslah edilmesi konusunda bir çalışma Singapur'da Tan, Yong, Leong ve Lee (1990) tarafından yapılmıştır. Toplam ağırlığa göre, zemin miktarı %3 ile %8 arasında olacak şekilde oluşturulmuş büyük miktardaki sulu bulamaç, yapılan havuzlara pompalanmıştır. Bulamacın zayıf zemin karakterleri, oturmasının yıllar alması bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, iyi tavsiyeler yapılmadan önce, bulamacın dayanım karakteristikleri ve sedimentasyon karakteristiklerinin en doğru şekilde bulunması gerekmektedir.

Süspansiyon içindeki zemin taneciklerinin çökmesi, onların boyutları, yoğunluğu, yüzey özellikleri ve süspansiyon ortamının bileşimine bağlı bir fonksiyondur. Genellikle bulamacın oturma davranışının üç aşamadan meydana geldiği kabul edilmiştir (Fitch, 1979; İmai, 1980, 1981; Davis ve Acrivos, 1985). Bunlar ise aşağıda şöyle sıralanmaktadır;

1. Ayrık zemin tanelerinin serbest çökmesi
2. Zemin tanelerinin kütle içinde engellenmiş çökmesi
3. Dengede olmayan efektif gerilmeler altında oluşan zemin iskeletinin sıkışması ya da kendi ağırlığındaki konsolidasyonu

Zemin mekaniğinde, efektif gerilmelerin yokluğu ile tanımlanabilen ilk iki aşama sedimentasyon safhası olarak kabul edilmektedir. Sulu çamurlar üzerinde yapılan bu araştırmalarda, çalışmalar 3.Safha yani kendi ağırlığında konsolidasyonda yoğunlaştırılmıştır(Mikasa,1965; Gibson vd .,1967; ve Been ve Sills, 1984).

Tan, Yong, Leong ve Lee (1990), çamurun sedimentasyon davranışına ilave olarak, iki farklı sedimentasyon projesi oluşturmuşlar ve bulamacı iki farklı yolla ıslah etmeyi ve böylece çamurun 2. çökelmeyi daha hızlı bir şekilde yapmasını sağlamayı denemişlerdir. Ayrıca sızıntı yükü kullanımını da incelemişlerdir.

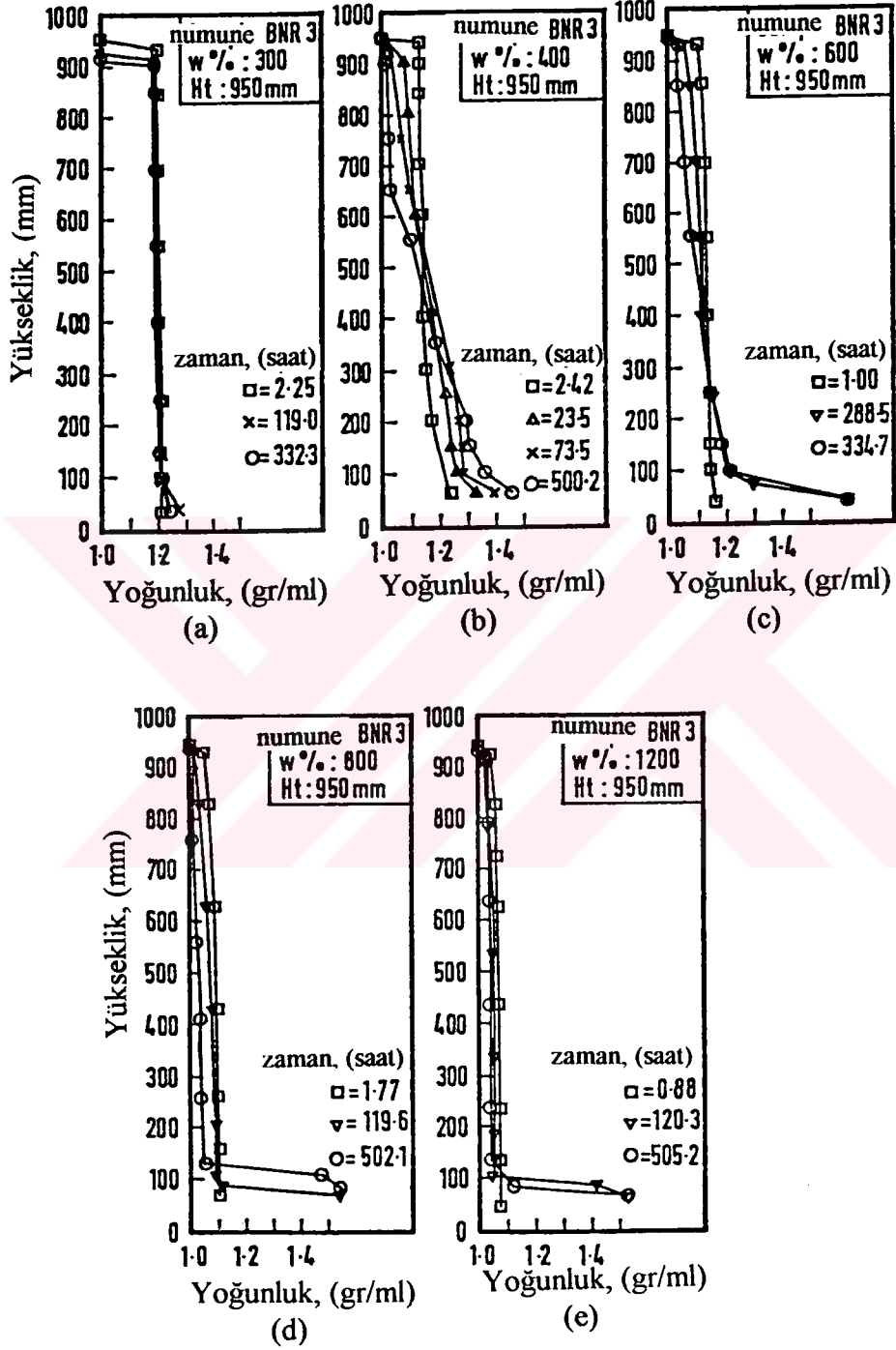
Sedimentasyona uğrayan kil bulamacı çökmesini tamamladığında, su muhtevası likit limit değerinin çok daha üzerinde bir değerdedir ve bulamaç hala sıvı gibi davranmaktadır. Dayanımını artırmak için bulamaç yüzeyi üzerine dikkatli bir şekilde kum tabakası serilmesi (Lee vd .,1987) tarafından önerilmiştir.

Bulamacın sedimentasyon davranışını anlayabilmek için, Tan, Yong, Leong ve Lee (1990) tarafından yapılan sedimentasyon deneyinde su muhtevası %300 ile %1200 arasında değişen numuneler kullanılmıştır. 150 mm çapında ve 1000 mm yüksekliğinde deney aleti kullanılmıştır. Deney için numune elde edilirken, numune likit limit değerinin 1.5 veya 2 kez katı olan su muhtevalarında hazırlanmış ve 2 mm'lik elekten elenmiş ve sadece ince daneli malzemelerle gereken su muhtevalarında numuneler hazırlanmıştır. Süspansiyonun çökme davranışını anlamak için, yoğunluk değişim profilleri elde edilmiştir.

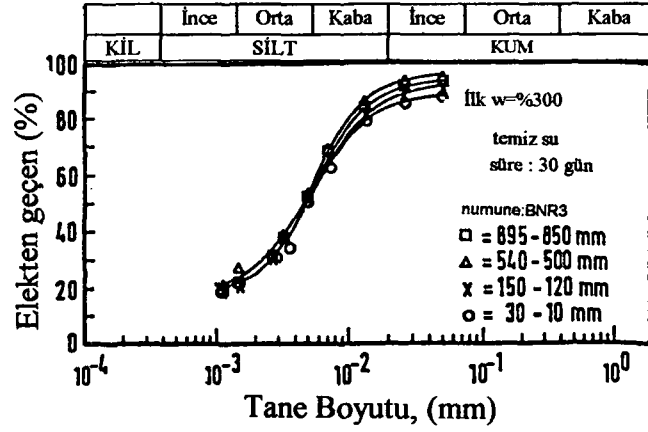
2.1 Kil Bulamacının Davranışına Temiz Suyun Etkisi

Su muhtevaları %300 ile %1200 arasında olacak şekilde temiz su ile karıştırılarak hazırlanmış zemin numunelerinin yüksekliğe karşı yoğunluk profilleri Şekil 2.1a, 2.1b, 2.1c, 2.1d, 2.1e'de gösterildiği gibi çıkartılmıştır.

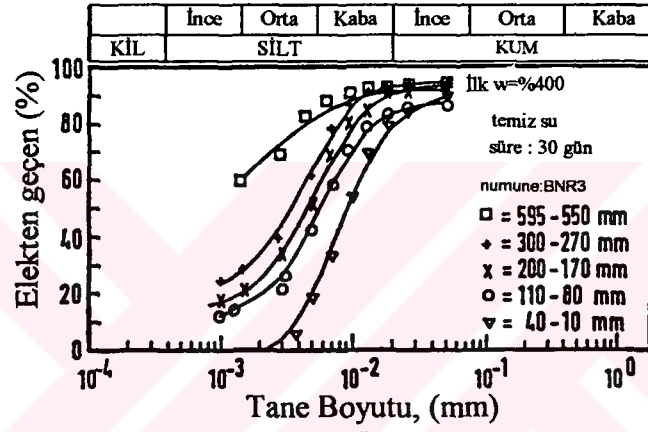
Başlangıç su muhtevaları %800 ile %1200 arasındaki örnekler için, daha ağır partiküllerin dibe çöktüğü ancak, daha hafif partiküllerin çökmesinin engellendiği görülmektedir. Bu,



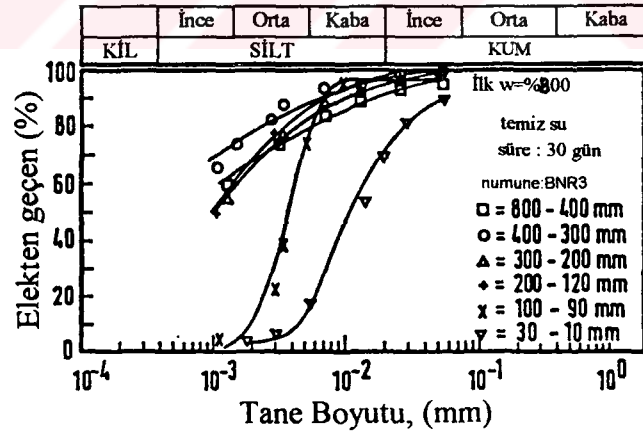
Şekil 2.1 BNR3'ün temiz suda çökelmesi esnasında yoğunluk profilleri



(a)



(b)



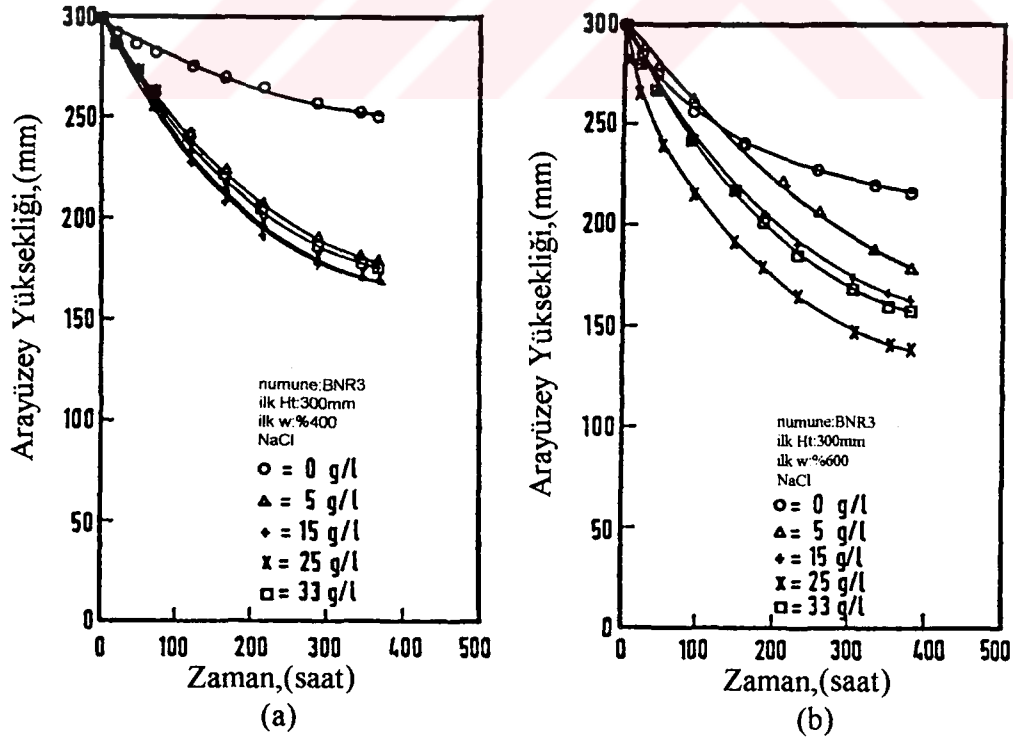
(c)

Şekil 2.2 Farklı derinlikler için BNR3 çökeltilerinin dane boyut analizleri

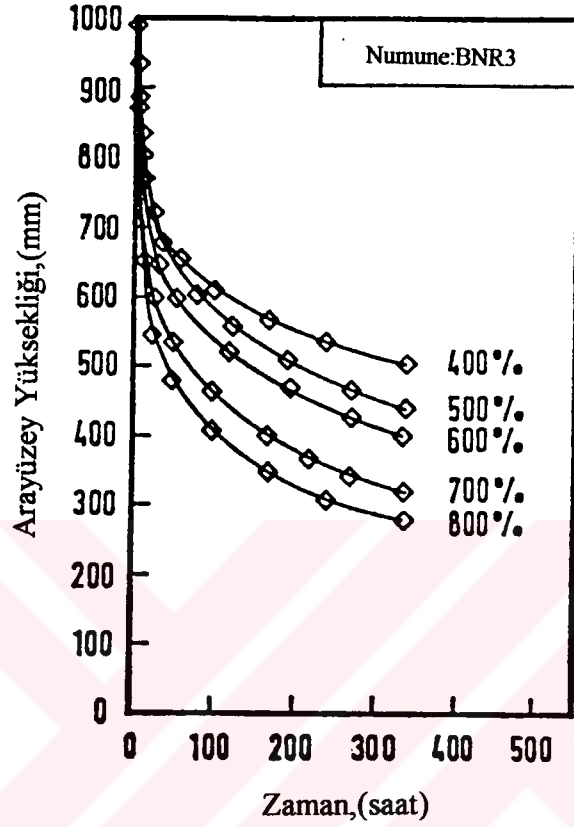
hem ölçülmüş yoğunluk profillerinden hemde çökeltme analizi sonunda yapılan dane boyut analizlerinden elde edilmiştir (Şekil 2.2). Ayrıca, yine bu ayırım, üst kısımda dalgalı bir bölge ve alt kısımda ise kalın bir tabakanın oluşmasıyla gözlemlenebilmektedir. Diğer taraftan, kil bulamacının başlangıç su muhtevası %300, %400 ve %600 olduğunda ise, yoğunluk profillerine bakıldığında, su muhtevası arttıkça ağır partiküllerin çökeldiği ancak hafif danelerin engellendiği görülmektedir. Burada dikkat çekici olarak, çökeltmenin engellenmesinin %300 ile %400 su muhtevaları arasında başladığı görülmektedir.

2.2 Kil Bulamacının Davranışına Deniz Suyunun Etkisi

Sedimentasyonun hızlandırılmasını sağlamak için karıştırılacak su içerisine tuz konulması gerektiği Kranck (1973) tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntemin etkili olup olmadığının araştırılmasıyla, uygulamada deniz suyuyla karıştırmanın kolaylıkla yapılabileceği düşünülmüştür. Yapılan çalışmada değişik miktarlardaki tuz (NaCl), su muhtevası %400 ve %600 olan bulamaca ilave edilmiştir. Ve bunun sonunda ölçülen zamana karşı arayüzey yüksekliği değişimleri Şekil 2.3a ve 2.3b'de gösterilmektedir.



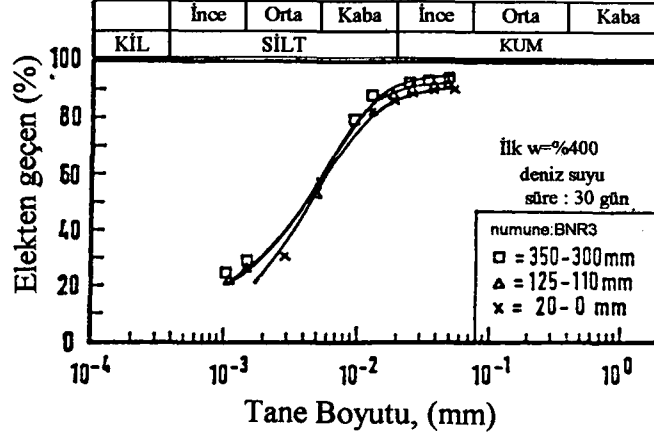
Şekil 2.3 BNR3'ün çökeltme davranışına tuzluluğun etkisi



Şekil 2.4 Deniz su ile karıştırılmış BNR3 için arayüzey yüksekliğinin zamanla değişimi

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi, küçük miktardaki (5 gr/lt) tuz miktarı ile başlanmış ve giderek tuz miktarı artırılarak bulamaç ve su arasındaki arayüzey gözlemlenmiştir. Arayüzeyin oturma hızındaki artma, tuz miktarı artırıldığında meydana gelmektedir. Böylece, ilave edilen tuzun gerçekten de kil taneciklerinin yumaklaşmasında etkili olduğu görülmüştür. Bundan başka, tuz konsantrasyonu 20 gr/lt olan deniz suyu ile karıştırılmış farklı su muhtevalarındaki bulamaçların zamana göre arayüzey yükseklik değişimide incelenmiştir (Şekil 2.4). Buradan da görülebileceği gibi, su muhtevalarının artmasıyla birlikte çökeltme miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca, su muhtevalarının %400 olduğu durum için deney bitiminde yapılmış olan dane boyut analizi elde edilerek Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Saf su ile karıştırılan %400 su muhtevalarındaki numune için elde edilen dane boyut analizi ise Şekil 2.2b'de gösterilmektedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.5b

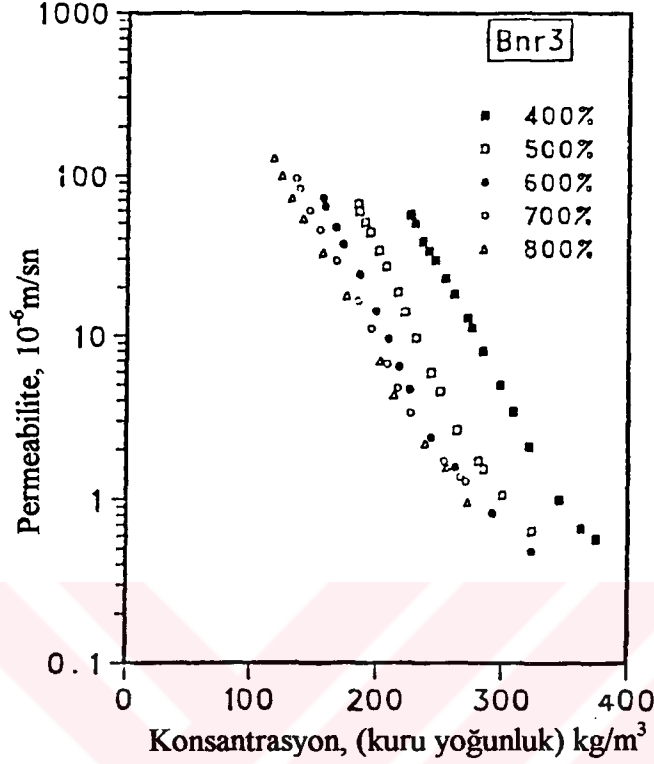
karşılaştırıldıklarında tuz ilave edildiğinde engellenmiş çökmenin ortadan kalktığı görülmektedir.



Şekil 2.5 Farklı derinlikler için BNR3 çökeltilerinin dane boyut analizleri($w_0=400$)

Yapılan bu incelemede, Kynch'nın (1952) sedimentasyon teorisinden yararlanılmıştır. Kynch'nın (1952) teorisinin cazip bir özelliği, ölçülmü olan çökme yüzeyi profilinden, katı konsantrasyon eğrisinin tespit edilmesini sağlamasıdır. Katı konsantrasyonu, zeminin her birim hacmindeki parçacıkların kütlesidir ve katı partiküllerinin birim ağırlığı " ρ_s " ve boşluk oranı " n " olduğundan " $(1-n)\rho_s$ " ye eşittir. Böylece, bu katı konsantrasyon " ρ_d " yani kuru yoğunluğa eşittir. Yine, ölçülmüş olan arayüzey profilinin permeabilite eğrisinin elde edilmesinde kullanılabileceği Tan vd.,(1990) tarafından ortaya atılmıştır. Kynch'nın (1952) teorisinin özelliği, hızın yalnızca konsantrasyonun bir fonksiyonu olduğunun kabul edilmesidir. Bu kabul ile kurulan eşitlik, oturma karakteristiklerindeki artışı verecek olan yarı lineer hiperbolik bir eşitliktir. Bu karakteristiklerin kullanılmasıyla, oturmaya karşı zaman grafiği ve permeabiliteye karşı katı konsantrasyon grafiği elde edilmektedir. Kynch'nın bu metodunun kullanılmasıyla, başlangıç su muhtevaları farklı bulamaçlar için, permeabiliteye karşı katı konsantrasyon eğrileri elde edilmiş ve Şekil 2.6'de gösterilmiştir.

Bu grafikten de görülebileceği gibi, kil bulamacının permeabilite değerinin tek bir değer olmadığı, ancak çok büyük ölçüde başlangıç su muhtevalarına bağlı olduğu görülmektedir. Fakat bununla birlikte, su muhtevaları farklı olan bulamaçların permeabilite-konsantrasyon eğrilerinin bir bant içerisinde ve yaklaşık aynı eğimde oldukları görülmektedir.



Şekil 2.6 Farklı başlangıç su muhtevalarında BNR3'ün katı konsantrasyonunun permeabilite ile değişimi

2.3 Kil Bulamacının Permeabilite-Boşluk Oranı ve Boşluk Oranı-Efektif Gerilme İlişkileri

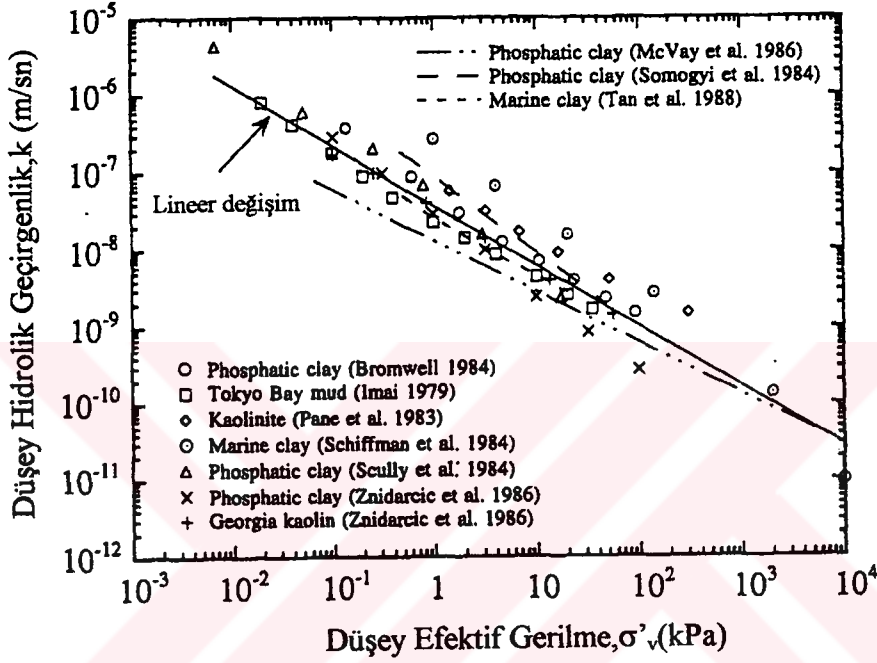
Yapılan bir araştırmada 10 farklı kil bulamacı üzerinde yapılan incelemelerden permeabilite-efektif gerilme eğrisi Şekil 2.7'de görülmektedir (Somongyi vd.,1984; McVay vd.,1986; Tan vd.,1988).

Şekil 2.7'den de görüleceği gibi, bulamacın permeabilite-efektif gerilme eğrileri dar bir bant içerisinde bulunmaktadır. Yapılan iterasyonlar sonucunda, efektif gerilme ile boşluk oranı arasında aşağıdaki gibi bir eşitlik elde edilmiştir.

$$k_v = B \cdot \sigma^{-A}$$

$$k_v = 3.68 \cdot 10^{-8} (\sigma' \text{ kPa})^{-0.78} \quad (2.1)$$

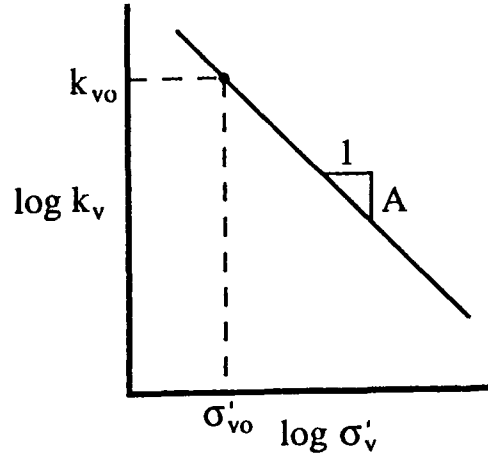
A=-0.78 sabiti, sonlu gerilme ve hidrolik konsolidasyonun nümerik ve analitik çalışmaları için kabul edilmiştir. Böylece, logaritmik permeabiliteye karşı logaritmik efektif gerilme arasında lineer ilişkinin olduğu görülmüştür (Şekil 2.8).



Şekil 2.7 On yumuşak zemin numunesi için ölçülmüş hidrolik geçirgenliğin efektif gerilme ile değişimi

Fox ve Baxter (1997) tarafından yapılan başka bir araştırmada, Imai (1979) tarafından zemin bulamaçları için geliştirilmiş olan hidrolik konsolidasyon deneyinden elde edilmiş olan dataların analizi için alternatif bir analiz tekniği ortaya atılmıştır. Bu analiz tekniğinden elde edilen sonuçlar ile geleneksel çamur konsolidasyon deneyinden elde edilmiş olan deney sonuçları Şekil 2.9 ve Şekil 2. 10'de gösterilmiştir.

Yine bu çalışmadan da görüleceği gibi, permeabilite (log) ile efektif gerilme (log) arasında lineer bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisinin geleneksel konsolidasyon deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.8 Teorik model için düşey hidrolik geçirgenliğin düşey efektif gerilme ile değişimi

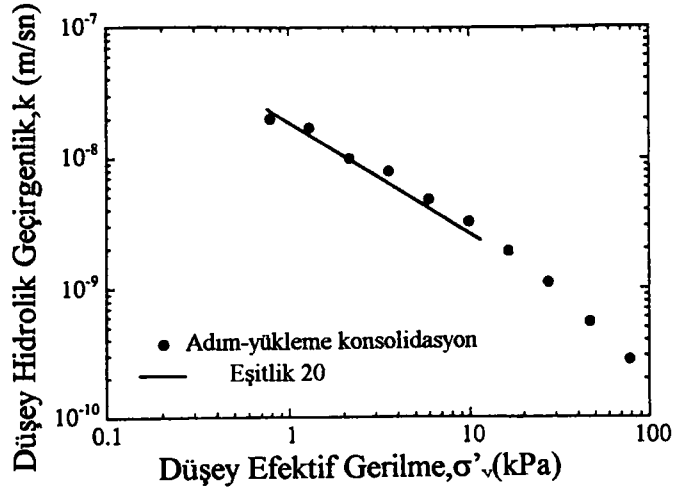
Benzer bir çalışma, Abu-Hejleh, Zndarcic ve Bornes (1996) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, İmai tarafından geliştirilmiş olan hidrolik konsolidasyon deneyinin yeni bir versiyonunu sunulmuş ve analiz edilmiştir. Kil bulamacında düşey efektif gerilme değişimini ifade etmek için $e = A(\sigma'_v + z)^B$ gibi bir fonksiyonun ve permeabilite için $k = C \cdot e^D$ şeklinde bir fonksiyonunun sulu çamurlar için kullanılabileceği (Somogyi, 1979; Al Tabaa ve Wood, 1987) gösterilmiştir. Bu formülasyon kullanılarak, Abu-Hejleh, Znidarcic ve Barnes (1996), fosfatik zemin bulamaçları üzerinde yaptıkları analiz sonucunda elde edilen boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite grafikleri Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'te gösterilmiştir.

Bütün bu araştırmalardan yumuşak zeminlerin düşük efektif gerilmeye sahip oldukları ve efektif gerilmenin boşluk oranıyla ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca yine düşük permeabilite değerine sahip oldukları ve boşluk oranı ile permeabilitenin lineer olarak değiştiği görülmüştür.

2.4 Kil Bulamacının Davranışına pH Değerinin Etkisi

PH değerinin değişik değerleri için %400 ve %500 su muhtevalarındaki kil bulamacının zamana karşı arayüzey yüksekliği değişimi Şekil 2.13'de gösterilmiştir (Tan, Yong, Leong

ve Lee, 1990). Bulamacın pH değeri, onu daha alkali yapmak için sodyum hidroksil veya daha asitik yapmak için sülfirik asit kullanılarak ayarlanmıştır.

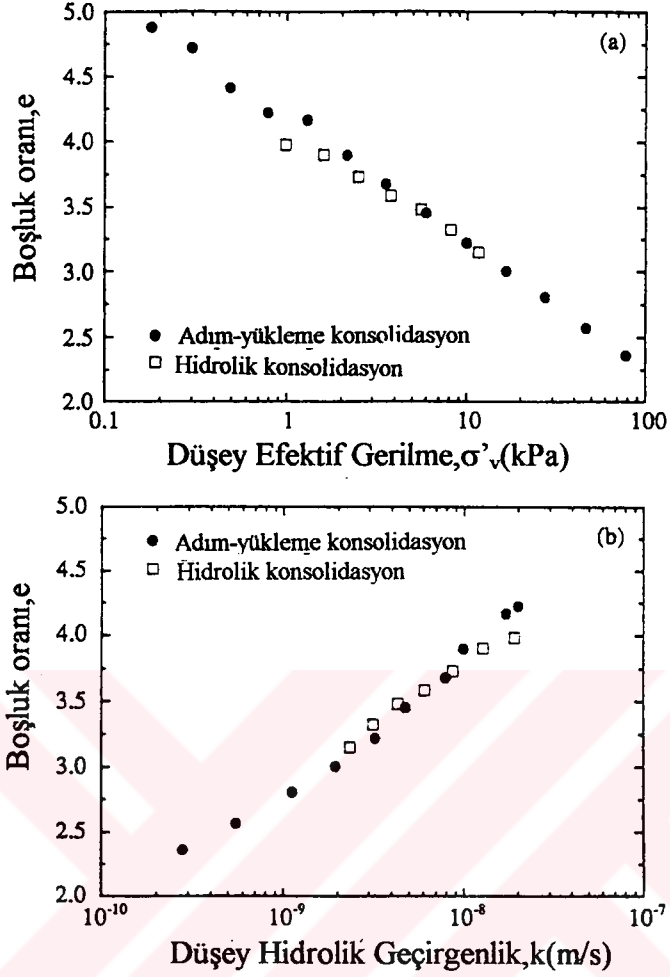


Şekil 2.9 Güney yolu körfez kilinin adım yükleme ve hidrolik konsolidasyon deneylerinden elde edilmiş permeabilite değerlerinin efektif gerilme ile değişimi

Başlangıç su muhtevası %400 ve %600 olan bulamaçlarda pH değeri azaldıkça çökeltme hızı artmaktadır. Şekil 2.13b'de görüleceği gibi, su muhtevasındaki artma ile daha fazla ayrık bir bulamaç elde edilmektedir. Fakat pH değerindeki azalma ile elde edilen çökeltme miktarındaki artma, bulamaç içerisine tuz (NaCl) ilave edilmesiyle gözlenen kadar kuvvetli olmadığı görülmektedir (Şekil 2.3a ve Şekil 2.3b).

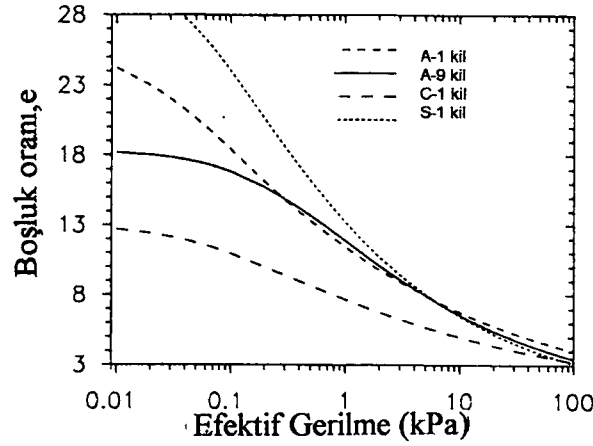
2.5 Kil Bulamacının Davranışına Sentetik İyonik Olmayan Polimerlerin Etkisi

Çevre ve kimya mühendisliğinde, çökeltmenin hızlandırılmasını sağlamak amacıyla yumaklaştırıcı kimyasalların kullanımı yaygındır. Her tip sulu bulamaç için uygun bir yumaklaştırıcı ve pıhtılaştırıcı bir madde bulunmaktadır. Yong (1985), Singapur bulamacı üzerinde yaptığı araştırmada, bulamacın çökeltmesinin hızlanmasında sentetik iyonik olmayan polimerlerin en etkili olduğunu bulmuştur. %600 su muhtevasındaki zemin bulamacı içerisine çeşitli dozajlarda sentetik iyonik olmayan polimer eklenmiş ve flokülütör mikser kullanılarak karıştırılmış ve çökeltme-zaman eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2.14a ve Şekil 2.14b'de gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Güney yolu körfez kilinin adım yükleme ve hidrolik konsolidasyon deneylerinden elde edilmiş özelliklerinin karşılaştırılması (a) Boşluk oranına karşı efektif gerilme (b) Boşluk oranına karşı permeabilite

Sentetik iyonik olmayan polimerler eklendiğinde Şekil 2.14.a'daki gibi gözlenen çökme davranışının, tuz (NaCl) ile karşılaştırıldığında çok daha hızlı olduğu görülmüştür (Şekil 2.3a ve Şekil 2.3b). Farklı dozajlar kullanıldığında oluşan sediment kalınlığıda farklı olmaktadır. Kullanılan dozaja göre oluşan katı konsantrasyon grafiği de Şekil 2.14b'de gösterilmektedir. Eğriden de görüldüğü gibi, dozajın 50 gr/lt ile 75 gr/lt arasında olduğu durumda en kalın sediment elde edilmektedir. Benzer bir çalışma Yong vd.,(1985) tarafından yapılmıştır. Uygulanması gereken optimum dozaj, sentetik olmayan polimer tipine, zemin tipine bulamaç konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir.



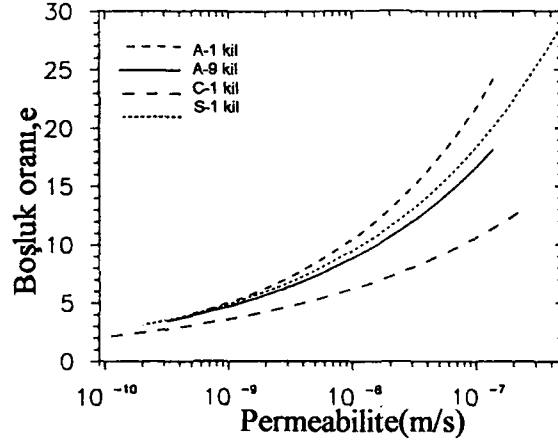
Şekil 2.11 Fosfatik killerin sıkışabilirlik ilişkileri

2.6 Kil Bulamacının Davranışına Sızıntı Kuvvetinin Etkisi

Sedimentasyon ve konsolidasyonun her ikisini de hızlandırmanın bilinen en iyi yolu, sızıntı kuvvetini kullanmaktır. Uygulamada bu, deniz seviyesinden daha yüksekte bir su seviyesini koruyarak başarılabilmektedir. Sızıntı yükünün tesirini incelemek amacıyla başlangıç su muhtevası %400 olan kil bulamacı üzerine sırasıyla, hiç sızıntı yükünün olmadığı, 0.5 m sızıntı yükünün bulunduğu ve 1.0 m yüksekliğinde sızıntı yükünün bulunduğu durumlar uygulanmıştır. Bunun sonucunda bulamacın zamana karşı arayüzey yüksekliği değişimi Şekil 2.15'de görülmektedir.

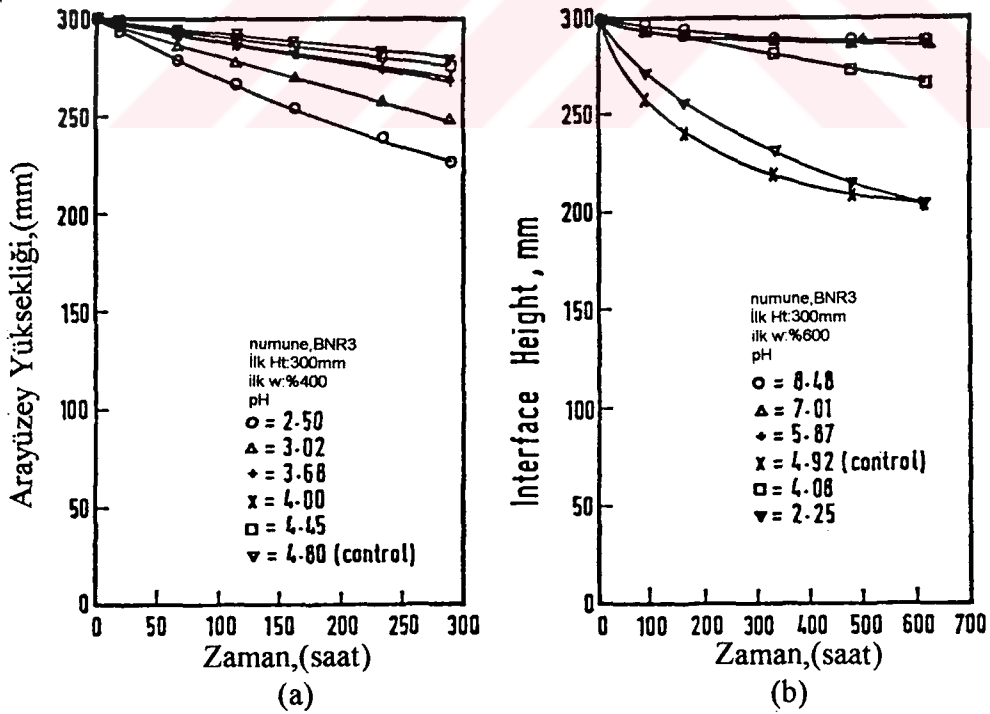
Sızıntı yükünün artmasıyla birlikte çökme miktarında da artış meydana gelmektedir. Ayrıca, %400 su muhtevastaki numunenin sırasıyla bu sızıntı yükleri uygulandığında oluşan yoğunluk profilleri Şekil 2.16'de görülmektedir.

Şekil 2.16'de sızıntı yükü arttıkça oluşan sedimentin yoğunluğunda da artış meydana gelmektedir. Deneye başladıktan 300 saat sonra su muhtevalarına bakıldığında, sızıntı yükü yokken sedimentin su muhtevası %165, 0.5 m sızıntı yükü olduğunda %140, 1.0 m sızıntı yükü varken %120'dir. Böylece, uygulanan sızıntı yükü her ne kadar büyük değilse de, su

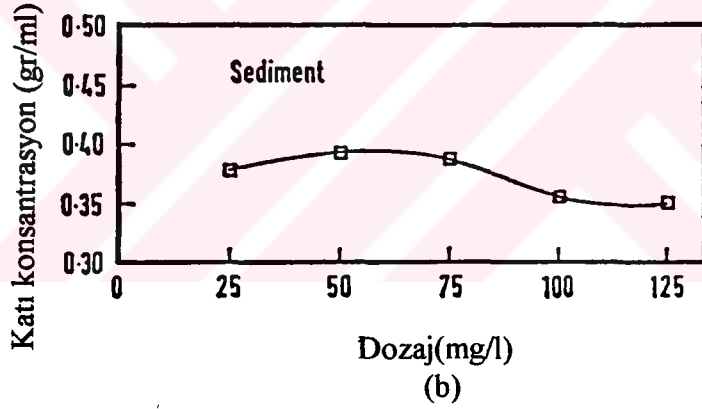
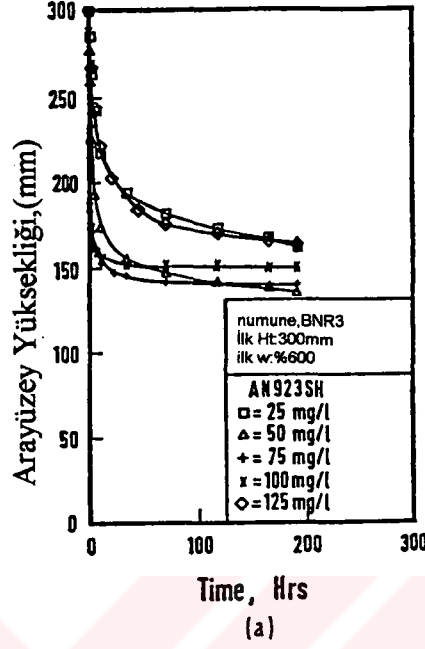


Şekil 2.12 Fosfatik killerin boşluk oranı değerlerinin permeabilite ile değişimi

muhtevasında meydana gelen azalma önemlidir. Zemin bulamacı, efektif gerilmedeki küçük bir değişmeden dolayı boşluk oranındaki büyük değişiklikler neticesinde büyük miktarda sıkışmaktadır.



Şekil 2.13 BNR3'ün çökme davranışına pH'ın etkisi

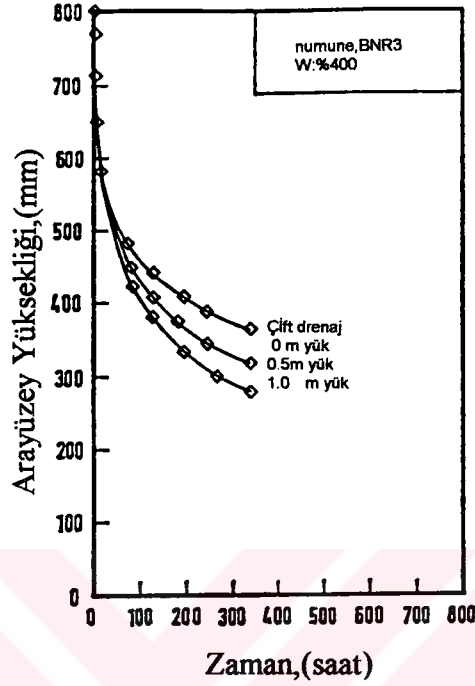


Şekil 2.14 BNR3'ün çökelme davranışına sentetik iyonik olmayan polimerlerin etkisi

2.7 Kil Bulamacının Kayma Mukavemeti

Sediment şekillendiği zaman, her ne kadar zemin mekaniğinde o hala bir sıvı olarak kabul edilse de, dayanımında biraz artma meydana gelmektedir. Dayanımdaki bu artış küçük olabilir ancak maddenin reolojik davranışı açısından önemlidir. Sediment gerçekten de bir sıvı gibi davranmakta olduğundan dayanımı bir viskometre kullanılarak ölçülmektedir. Sulu çamurların kayma dayanımının ölçülmesi amacıyla Moore ve Davis (1956) bir viskometre imal etmişlerdir. Viskometre kullanılarak, kil bulamacında ölçülen kayma gerilmesi ile

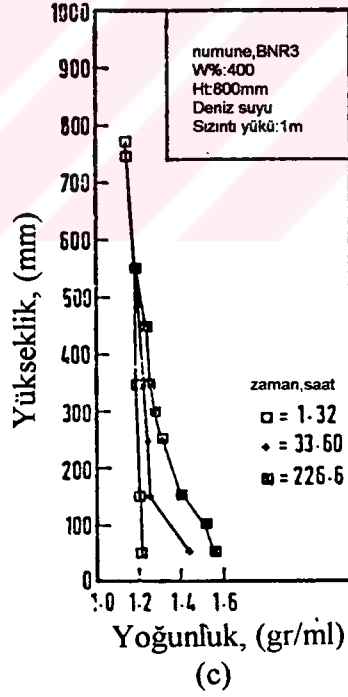
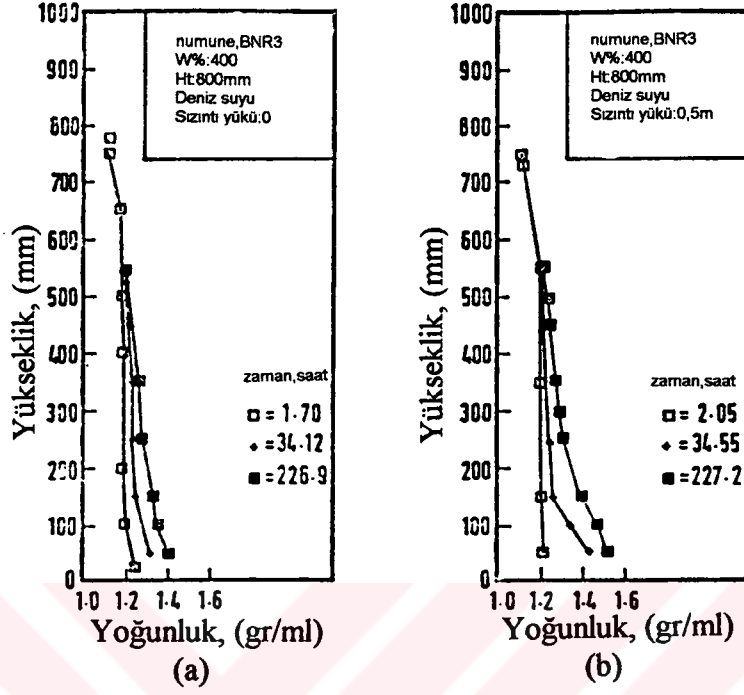
kesme hızı arasındaki ilişki Şekil 2.17a'da gösterilmiştir. Burada numune taze su ile karıştırılmıştır. Şekil 2.17b'de ise, numune deniz suyu ile karıştırılmıştır.



Şekil 2.15 BNR3'ün çökeltme davranışı üzerine sızıntı yükünün etkisi (arayüzey yüksekliğinin zamanla değişimi)

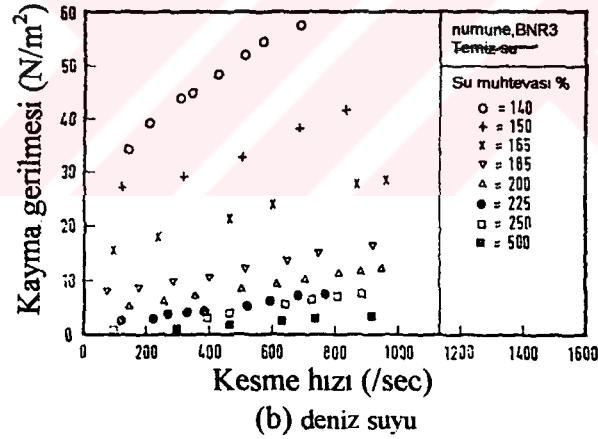
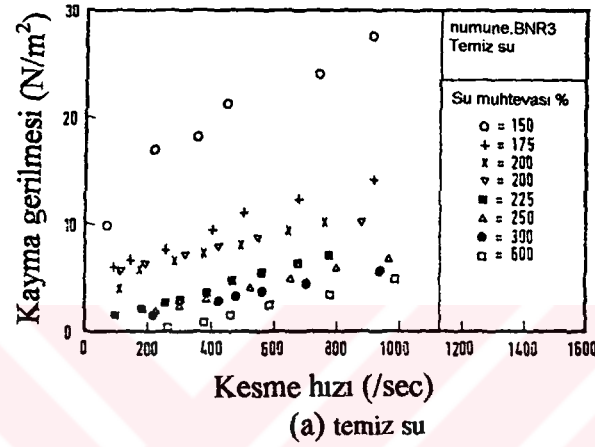
Ayrıca, her su muhtevası değeri için, temiz suyu deniz suyu ile karıştırılmış numunenin plastik viskozitesi ve Bingham akma gerilmeleri Şekil 2.18a ve Şekil 2.18b'de gösterilmiştir. Benzer su muhtevalarında, akma gerilmeleri ve viskozitenin deniz suyu kullanıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Böylece, bulamaca deniz suyu ilave etmenin yani süspansiyondaki iyonları artırmanın daneler arası elektriksel uzaklaştırıcı kuvvetlerin azalmasına yardım ettiği görülmüştür. Böylece daha fazla yumaklaşma olmaktadır. Uzaklaştırıcı kuvvetleri azaltmanın başka bir etkisi, kil prombositleri arasında kenar-kenar yada kenar-yüzey temaslarını artırması ve daha az yüzyüze temas meydana gelmesidir. Bu olay, deniz suyu ile bulamaç karıştırıldığında viskometre kayma mukavemetindeki artışı açıklamaktadır. Bu inceleme, Torrance (1984) tarafından yapılmıştır.

Şekil 2.18b'de bulamacın su muhtevasının %250' en daha az olduğu zaman dayanımda çarpıcı bir artışın olduğu görülmektedir. Su muhtevası daha yüksekken, arazi akma gerilmesi



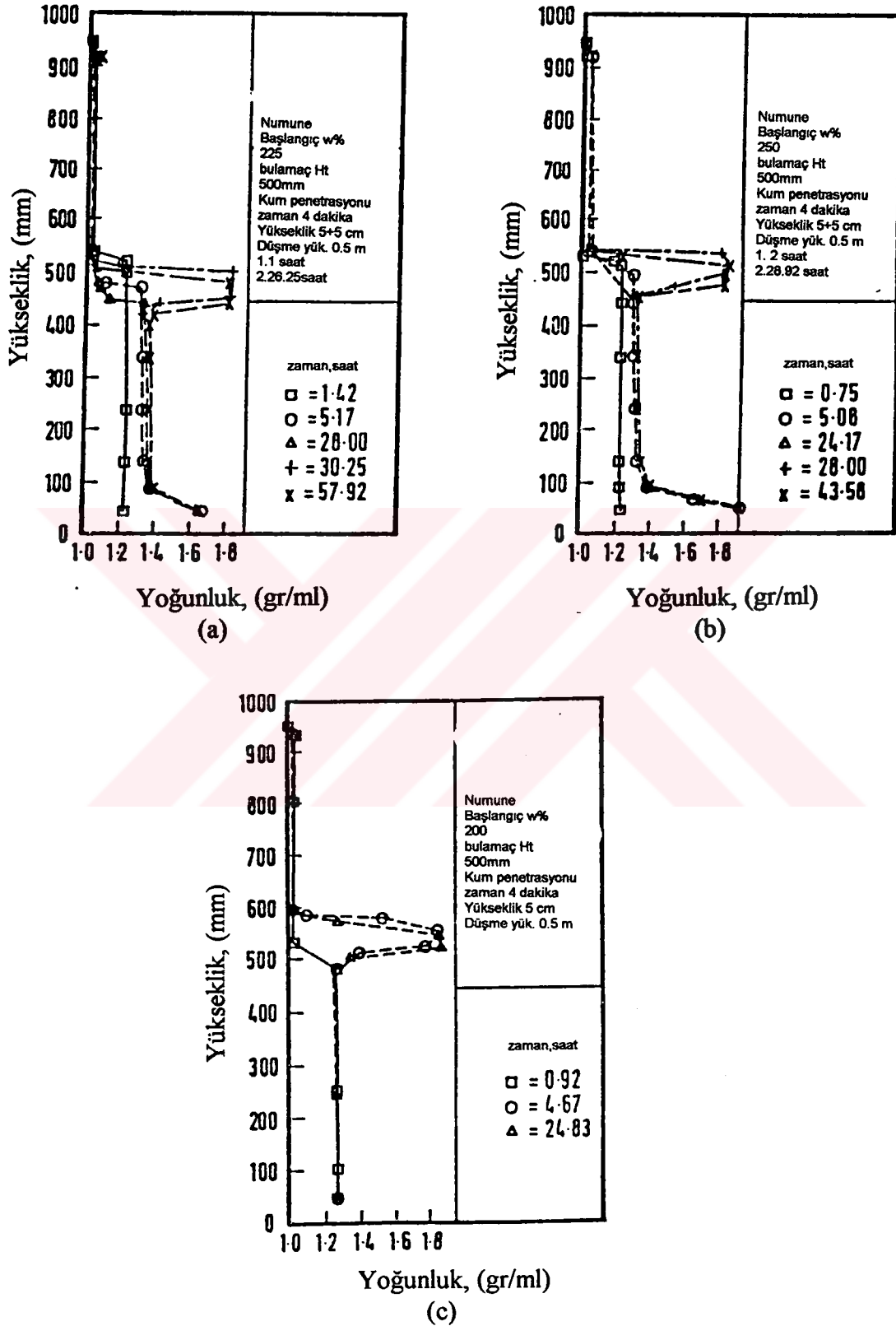
Şekil 2.16 BNR3'ün çökme davranışına sızıntı yükünün etkisi (yoğunluk profilleri)

hemen hemen sıfırdır. Ama su muhtevası %250 veya daha az olduğunda, bulamaç dayanımındaki artış önemlidir. Her ne kadar dayanımdaki bu artış 0.05 kPa'dan daha az küçük olsa da, kil bulamacının davranışı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Dayanımdaki bu artışın önemini göstermek maksadıyla, farklı su muhtevallarındaki numune üzerine 5 cm kalınlığında kum serilerek yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.19'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Farklı su muhtevallarındaki BNR3'ün kayma gerilmesi ile kesme hızı arasındaki ilişki

%225 ve %250 su muhtevalları için kum partiküllerinin sediment içerisine batarak dibe çöktüğü görülmektedir. Bununla beraber, su muhtevası %200 olduğu zaman kum taneciklerinin sediment tarafından durdurulduğu ve kum taneciklerinin sedimentin en üstünde şekillendiği görülmektedir. Böylece, kil bulamaçları için dayanımdaki küçük artışın önemli bir rol oynadığı görülmektedir.



Şekil 2.19 BNR3 içerisine kum penetrasyonu uygulamasına başlangıç su muhtevasının etkisi

3. SEDİMENTASYON VE KENDİ AĞIRLIĞI ALTINDA KONSOLİDASYON İÇİN GENEL BİRLEŞİK TEORİ

Bir süspansiyon içerisinde çökme ve birikme sonucunda oluşan kendi ağırlığı altında konsolidasyon, geoteknik ve kimya mühendisliği tarafından kullanılan teorilerin temel esaslarından yararlanılan genel bir birleşik teori ile tanımlanabilmektedir. Konsantrasyon profilleri, net sediment akışının sebep olduğu konsantrasyon değişimi ile tariflenen katı fazın kütle denge denkleminin çözüme uygulanmasıyla elde edilebilmektedir. Süspansiyon içerisindeki tanecik hızı, termodinamik esaslar da kapsayan genelleştirilmiş Darcy-Gersevanov eşitliği olan tanecik kuvvet denge eşitliğinden elde edilebilmektedir.

Sedimentasyon, bir süspansiyon içerisindeki taneciklerin çökmesi olayı olarak tanımlanmaktadır. Biriken tanecikler, sıvı sütununun tabanı üzerinde, doymuş ince bir zemin tabakası olarak sediment yatağında biçimlenmektedir. Konsolidasyon, zemin iskeletinin kendi ağırlığı yada muhtemel diğer yükler altında zamana bağlı sıkışması olayıdır. Her iki yöntem geoteknik, çevre mühendislikleri, hidroloji, jeoloji, kimya gibi farklı bilim dallarını ilgilendirmektedir. Sonuç olarak bu konuda yapılmış pek çok çalışma yapılmıştır. Tarihte sedimentasyon ve konsolidasyon ile ilgili olarak iki ana teori ortaya çıkmıştır. İlk bakışta birbirlerinden oldukça farklı gibi görünmektedir ve iki olayın birleşik bir teori ile tanımlaması uzun zaman almıştır.

Toorman (1996), tarafından önerilmiş olan birleşik teori, her tür süspansiyon için ve özellikle kimya mühendisliği (endüstriyel kolloidal süspansiyonlar) ve hidrolik mühendisliği (rezervuarlarda, lağımlarda, haliç ve denizel sularda oluşan kohezyonlu sediment süspansiyonlar) gibi bilimin çeşitli alanlarında rol oynayan kolloidal süspansiyonlar için geçerlidir. Teoride dikkatler hareketsiz sıvı içerisinde boydan boya çökerek şekillenen sediment tabakalarında yoğunlaştırılmıştır. Göz önünde tutulan yükleme, sadece numunenin kendi ağırlığıdır.

3.1 Sedimentasyon ve Konsolidasyon Davranışını Modelleme Yaklaşımları

Sedimentasyon olayının süspansiyon içerisindeki tortu taneciklerinin hareketine bağlı olduğu farzedilmektedir. Her bir taneciğin çökme hızı, taneciklerin ağırlığı ve onun üzerine etki eden diğer kuvvetler arasındaki dengeye göre tespit edilmektedir. Hız, danelerin çökmesinin engellenmesinin artmasından dolayı konsantrasyondaki artma ile azalmaktadır. Konsolidasyon teorisinde ise, zemin iskeleti arasındaki boşluk suyu hareketi tariflenmektedir.

Farklı bilim alanlarında, farklı yaklaşımlar ve onlar neticesinde oluşmuş olan modeller bulunmaktadır. Schiffman (1985), Alexsis, Thomas ve Gallios (1993), bu farklı modelleri yeniden incelemiştir. Kullanılan model tipleri arasında kurulan bağıntılara bakmak açısından bu inceleme önemlidir. Kimya mühendisliği ve zemin mekaniği gibi birbirinden çok farklı bilim alanlarında bu konular üzerinde çalışmalar yapılmıştır. İlkinde, süspansiyon içerisindeki taneciklerin oturma davranışıyla ilgilenilirken, diğerinde zeminlerin oturma davranışının önceden tahmini üzerinde çalışılmıştır. İlk konsolidasyon teorisi Terzaghi (1923), tarafından ileri sürülmüş, daha sonra yine Terzaghi (1942) tarafından küçük şekil değiştirme teorisi ile yeniden formülize edilmiştir. Daha sonra gelişen konsolidasyon modelleri ise genellikle lineer olmayan büyük şekil değiştirmeler için Gibson, England ve Hussey (1967) tarafından önerilen modele dayanmaktadır. Hidroloji ve zemin fiziğinde, farklı terminolojiler kullanılması sebebiyle kullanılan teorilerin karşılaştırılması zor olmuştur ancak zemin mekaniği bakışına eşit olduğu görülmüştür.

Kimya Mühendisliğinde kolloidal süspansiyonların çökme davranışını incelemek için konsolidasyon teorisi ancak Tiller (1981) tarafından bulunmuştur. Çünkü, konsantre edilmiş süspansiyonlar içerisindeki tanecikler arasındaki farklı basınçlar, on yıllık süreler içerisinde sistematik olarak incelenmiş ve tam bir teori oluşturulmuştur. Kimya bilimindeki hali hazırdaki durumu Buscall (1990) ve Russel, Saville ve Schowalter (1989) yeniden incelenmiştir. Benzer bir çalışma hidrolik mühendisliğinde yeni bir araştırma olan kohezyonlu sedimentlerin taşınması üzerinde yapılmıştır. Sedimentin taşınması modellenmesinde, biraz değiştirilmiş Stokes Kanunu, süspansiyon edilmiş sediment taneciklerinin

ortalama çökme hızlarının derinlikle değişimini tahmin etmek için kullanılmıştır. Süspansiyon içerisindeki hız değişimi üzerine yoğunluğun etkisi süspansiyonun konsantrasyonu çok düşük olduğundan ihmal edilmiştir. Bu bilime göre, kohezyonlu sedimentin çökme davranışı, yavaşça konsolide olan bir sıvı çamur tabakasının şekillenmesiyle sonuçlanmaktadır. Fakat bu çamur tabakası kolaylıkla akabilir, sıvılaşabilir, aşınabilir ve tekrar süspansiyon haline gelebilir bir durumdadır. Bu çalışma başlangıçta konsolidasyona zemin mekaniği bakış noktasından yaklaşmıştır. Sediment taşınmasının üç boyutlu nümerik modellemesi amacıyla, detaylandırılmış bir sediment modeline ihtiyaç duyulmuştur. Kohezyonlu sedimentin taşınması için yapılan bu araştırma, sedimentasyon ve konsolidasyonun modellemesi ve anlaşılması için değerli katkılar sağlamıştır.

Been (1980), geleneksel konsolidasyon ve Kynch'nın(1952) sedimentasyon teorisindeki benzerliği ilk olarak göstermiştir. Sedimentasyon ve konsolidasyonu birbirine bağlayan kuramsal ana prensip, ilk olarak Gibson eşitliğinden Pane ve Schiffman (1985) tarafından önerilmiştir. Buscall (1990), mühendislik, kimyasal ve matematiksel yaklaşımlar arasındaki benzerliği göstermiştir.

Toorman (1996) doymuş zeminlerde yani zemin içerisindeki boşlukların tamamen sıvı ile dolu olduğu zeminlerde sedimentasyon ve kendi ağırlığında konsolidasyonun birleşik teorisini geliştirmiştir.

3.2 Birleşik Teoride Eşitliklerin Korunması

3.2.1 İki fazlı matematiksel değişmeyen eşitlikler

Süspansiyon, su içerisindeki tortu gibi sıvı içerisindeki katı taneciklerin oluşturduğu iki fazlı bir sistemdir. Onun akış davranışı, her iki safhanın değişmez eşitlikleri ile tariflenmektedir. Her bir safha için kütle korunumu şöyle ifade edilmektedir:

$$(df_j/dt) + (d(v_{ij}f_j)/dx_j) = 0 \quad (3.1)$$

Burada $f_{j,j}$ fazının hacim kısmı (yada hacimsel konsantrasyon), $v_{j,j}$ fazının hız vektörü, t zaman ve x ise koordinat vektörüdür. Her bir faz için momentumun korunumu genelleştirilerek aşağıdaki eşitlikteki gibi yazılmıştır (örneğin Dixon, 1977).

$$\begin{aligned} & r_j * f_j * ((dv_{ji}/dt) + v_{ji} * (dv_{ji}/dx_j)) \\ & = r_j * f_j * g - f_j * (dp/dx_i) + f_{ji} + (dt_{jij}/dx_j) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Burada f kuvveti, iki faz arasındaki birbirine tesir eden kuvvettir. Dolayısıyla, indis s ve w ile gösterilenler sırasıyla katı tanecikler ve su olmak üzere, $f_s = 2 * f_w$ bir süspansiyon için yazılabilmektedir. Kayma gerilmesi τ , sıvı içerisindeki viskoz gerilmeler ve tanecikler arasındaki etkileşimden dolayı oluşan gerilmeler olarak tariflenmektedir. Yukarıdaki eşitliklerin daha doğru bir şekilde iki faz için çözümünde, fazlar arasında momentum değiş tokuşu ile ilgili daha amprik bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yaklaşım, Teisson, Simonin, Galland ve Laurence (1993), tarafından başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Daha yaygın kullanımlarda, makroskopik yaklaşım kullanılmaktadır. Örneğin; sediment taşınması modellenmesinde, değişken yoğunlukla birlikte süspansiyon tek bir faz gibi düşünülmektedir. Bu şekil, sürekli faz yakaşımında, süspansiyonun değişmez eşitlikleri, katıların kütle dengesiyle birlikte çözümlenmektedir.

3.2.2 Değişken seçimi

Her bir faz sıkışmaz farzedildiğinden dolayı, onların karışımlarının, mesafe ve zaman içinde ortalama yoğunluğu ρ şöyle tariflenebilmektedir :

$$\rho = \rho_s * \phi_s + \rho_w * (1 - \phi_s) \quad (3.3)$$

Burada, ρ_w , suyun yoğunluğu, ρ_s , taneciklerin yoğunluğudur. ρ_s 'nin değerini özellikle ayırımın olduğu derecelenmiş tortular için elde etmek kolay değildir. Doğal sedimentler için, kuru yoğunluk, geniş bir alanda değişmektedir. Pratikte, çamur için 2650 kg/cm^3 değeri alınabilmektedir. Bununla birlikte, literatürde denizel sedimentler için bu değer kabaca 2300 ile 3800 kg/cm^3 arasında değişmektedir. Süspansiyonda varolan taneciklerin

toplam kütlesi farklı parametrelerle ifade edilebilmektedir. Çoğunlukla kullanılan C konsantrasyon (sedimentasyon teorisi), hacim kısmı ϕ_s (sedimentasyon teorisi), porozite $n=(1-\phi_s)$ (su hacmi kısmı; zemin mekaniği) ve boşluk oranı $e=n/\phi_s$ (tortu hacmine boşluk hacminin oranı; zemin mekaniği) parametreleri kullanılmaktadır. Bu parametreler birbirleriyle aşağıdaki gibi alakalıdır;

$$\phi_s = 1 - n = (1 / (1+e)) = C / \rho_s = \Delta\rho / \Delta\rho_s \quad (3.4)$$

Burada, $\Delta\rho$; fark yoğunluktur ve $\Delta\rho_s = \rho_s * 2 * \rho_w$ eşitliği madde için değişmezdir. Pratikte, süspansiyonun yoğunluğu ölçülmektedir. Teoride, katıların hacim kısmı ϕ_s , katıların içeriğini tanımlamak için bağlı bir değişken olarak kullanılmıştır. Bunun bir kaç sebebi bulunmaktadır. Katıların konsantrasyonu boşluk oranına tercih edilmektedir çünkü konsantrasyon sıfıra doğru azaldığında sedimentasyon içerisindeki boşluk oranı sonsuz olmaktadır. Bundan başka, eğer sedimentin yayılma davranışı gözönünde bulundurulacaksa, her bir kısım için ayrı ayrı kütle dengesinin çözülmesi gerektiğinden, tanecik konsantrasyonu, süspansiyonun diğer özellikleriyle bağlantı kurmak için iyi bir değişkendir. Teori, tek boyutlu sedimentasyon ve konsolidasyonla sınırlandırılmıştır ve tüm eşitlikler Euler koordinatı çerçevesinde tariflenmiştir.

3.2.3 Kütle korunumu ve sürekliliği

Katı faz için kütle korunumu (3.1) eşitliğine bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilmektedir;

$$(d\phi_s/dt) + (d(v_s\phi_s)/dz) = (d\phi_s/dt) - (dS_s/dz) = 0 \quad (3.5)$$

Burada v_s ; çökelti parçacığının hızı, z; düşey koordinat sistemi ve $S_s = 2 * n_s * \phi_s$ çökelti akış hızıdır. Benzer şekilde akışkan faz için,

$$(dn/dt) + (d(v_w * n)/dz) = 0 \quad (3.6)$$

eşitliği yazılır. Burada, v_w sıvı hızıdır. İki faz için kütle denge eşitliklerinin eklenmesi ve n yerine $(1-\phi_s)$ konulmasıyla,

$$\begin{aligned} d/dz(v_s*\phi_s + v_w*(1-\phi_s)) &= dU/dz = 0 \\ \Rightarrow U &= v_s*\phi_s + v_w*(1-\phi_s) \end{aligned} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Burada U ; ortalama süspansiyon hızıdır.

Bir karışımın yoğunluğu sabit olmadığı zaman, birim hacim başına karışımın kütesinin lokal değişimi, yani ρ 'nun türevi ($d\rho/dt = \partial\rho/\partial t + U\partial\rho/\partial z$), genellikle sıfır olmayabilir. Çünkü karışımın sıkışmazlığı $d\rho/dt$, su tarafından sediment taneciklerinin net yerdeğiştirmesini hesaplamak için S_s akışımın diverjansına eşit olmak zorundadır.

$$d\rho/dt = (d\rho/dt) + U*(d\rho/dz) = d\rho/dt + (d(U\rho)/dz) = dS_s/dz \quad (3.8)$$

Burada $U\rho$ karışımın hızı olup, denklem (3.7)'de tanımlanan ortalama hıza eşitmiş gibi düşünülebilir. (3.7) denklemindeki 2.Eşitlik süreklilik denkleminde çıkarılmaktadır. ρ 'yu, kendisine eşdeğer olan (3.3) denklemini ile yerdeğiştirerek ve $d\rho_w/dt = 0$ ve $\Delta\rho_s$, elde edildikten sonra (3.8) denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$(d f_s/dt) + (dU f_s/dz) = (d f_s/dt) + (U* d f_s/dz) = dS/dz \quad (3.9)$$

Burada $S = S_s*\Delta\rho_s$ akış akısı, (3.5) ve (3.9) denklemlerinin karşılaştırılmasından çıkarılabilir ve aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$S = (U - v_s)*\phi_s \quad (3.10)$$

Bu denklemde net kütle akış akısının, $U=0$ olması durumu hariç, $S_s = v_s*\phi_s$ çökelti akış akısına eşit olmadığına dikkat çekilmelidir. (3.9) ve (3.10) denklemleri fiziksel terimlerle iyi bir şekilde yazılabilir. Herhangi bir andaki hacim içerisindeki yoğunluk değişimleri,

ortalama çökelti akış hızı veya S içerisinde olan başka akılara bağlıdır. Her bir fazın hızı, gerçek malzeme hızına eşittir. Karışımı U hızı, her bir malzeme noktasının hızına mutlaka eşit olmak zorunda değildir çünkü o bir ortalama değerdir.

(3.7) eşitliğinin türevinin alınmasından elde edilen sıkışmaz ortamın sürekliliği, karışımın yoğunluğu sabit olmasa dahi, çökelti askıları için geçerlidir. Malesef sıkışmazlık genellikle sabit yoğunluğa bağlıdır. (3.8) eşitliğinde belirtildiği gibi, net kütle akısının sonucu olarak ortaya çıkan yoğunluk değişikliklerinin olduğu sıkışmaz fazlı karışımlar için bu geçerli değildir .

3.2.4 Momentum dengesi

Sediment tanecik hızı v_s , Auzerans, Jackson ve Russel (1988) tarafından gösterildiği gibi, sıvı basınç şartlarının hariç tutulduğu her bir faz için değişmez momentum eşitliklerinin (3.2) lineer kombinasyonlarının yapılmasıyla elde edilen diğer momentum eşitliğinden elde edilebilmektedir. Bu eşitlik, diğerine göre bir fazın net kuvvetini tariflemektedir ve bundan dolayı “kuvvet dengesi” olarak adlandırılmaktadır. Bu teoride, atalet kuvvetleri ihmal edilmiştir. Fakat bununla beraber, ataletin önemli rol oynadığı bir kaç durum da vardır. Örneğin, çarpma sınır düzlemi ya da sediment yatağı-su arayüzeyi gibi yoğunluğun süreksiz olduğu durumlarda önemlidir (Dixon,1977; Auzerais vd.,1988). Taneciğin başlangıç hızından hızlanarak uç hızına erişmesinin biraz zaman alması durumu, yüzey oturmasında meydana gelen gecikmeyle açıklanabilmektedir.

Gözönüne alınmış kuvvetler ağırlık, katı-katı etkileşimi (tanecikler arası gerilme) ve bağlı hareketin sonucu sıvı-katı etkileşimidir.

3.3 Süspansiyon Kuvvet Dengesi

3.3.1 Süspansiyonda sıvı-katı etkileşimleri

Sıvı-katı etkileşim kuvveti F , tanecik üzerinde kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine bölünebilen hidrodinamik kuvvetlerin toplamıdır. Sıvı kuşatması etkisi altında hareket eden

taneciğin yüzeyindeki sürtünme gibi faktörler akışkan etkilerin sonuçlarıdır. Akış yönüne dik olarak tesir eden kaldırma kuvveti, sıvı hızında önemli yükselme ve düşmeler olduğu zaman yada tanecik dönme hareketi yaptığında etkili olmaktadır. Her iki durum, lokal olarak meydana gelebilir ve sedimentasyon problemlerinde ihmal edilebilir. Kaldırma kuvveti, süspansiyon içerisindeki sediment taneciklerini tuttuğunda sediment taşınmasında ana rol oynamaktadır. Sürüklenme kuvveti, akış yönünde düşey olarak tanecik üzerine tesir eden bir kuvvettir. Tek bir tanecik üzerindeki sürüklenme kuvveti,

$$F_D = 1/2 * C_D * A * \rho * (v_w * 2 * v_s)^2 \quad (3.11)$$

şeklinde bulunmuştur. Burada $(v_w * 2 * v_s)$, partikül hareketine bağlı sıvı hızıdır. A, tasarlanmış tanecik alanının akış yönüne dik olarak kesilmesiyle elde edilmiş alandır. C_D , sürüklenme katsayısıdır ve Reynolds katsayısının bir fonksiyonudur. Reynolds katsayısı, $Re = (v_w * 2 * v_s) d / \nu$ şeklinde ifade edilmektedir (örneğin Roberson ve Crowe, 1990). Burada d; temsil edilen taneciklerin çapıdır ve ν ; sıvının viskozitesidir.

Hareketsiz suda taneciğin oturması, sürüklenme ya da kaldırma kuvvetine göre tanecik ağırlığının daha üstün duruma geldiği durumu anlatmaktadır. Laminer rejimde ($C_D = 24/Re$, $Re < 5$ için) küresel bir tanecik için, diğer taneciklerle etkileşimsiz son oturma hızı w_s , Stokes düşme hızı formülüyle bulunabilir. Sürüklenme kuvveti, düzeni bozulmuş olan akım çizgilerinin olduğu bölgede tanecik civarındaki basınç alanında etkili olmaktadır. Bundan dolayı, küçük taneciğin direncinin bu basınç dağılımı üzerindeki etkisi önemsenmemekte, ihmal edilmektedir.

Tanecik sıvı boyunca aşağıya doğru hızlanıyorken, sabit hızla hareket ettiğinden daha büyük bir sürüklenme kuvvetine maruz kalmaktadır (Dixon, 1977). Bu kuvvet için uygun bir ifade şimdilerde bilinmemektedir. Bununla beraber, süspansiyon içinde pek çok taneciğin düşmesiyle birlikte yerdeğıştiren suyun yukarı doğru akışı, tanecikler üzerindeki sürüklenme kuvvetini arttırıcı bir şekilde etkili olmaktadır. Bazı tanecikler, özellikle küçük olanlar, bu akış esnasında yukarı doğru sürüklenebilir ve yerdeğıştiren su, süspansiyonun arayüzeyi üzerindeki temiz su sütunu üzerine tekrar taşınabilir. Bu, aşağıya doğru sediment akışından

dolayı önemli bir şekilde artmaya başlayan konsantrasyonla birlikte azalmayla sonuçlanmaktadır (Burt ve Parker , 1984). Bu olay, engellenmiş oturmanın ortaya çıkması için birinci sebeptir.

3.3.2 Katı-katı etkileşimleri ve süspansiyon içerisindeki kuvvet dengesi

Konsantrasyon artarken taneciklerin dönmesi, etrafındaki tanecikler tarafından daha da etkilenmektedir. Taneciklerin çarpışması gibi doğrudan doğruya katı-katı etkileşimlerine hidrodinamik, elektrostatik ya da termodinamik kuvvetler tarafından sebep olunmaktadır. Elektrostatik kuvvetler, çekme ya da tanecik yüzey özelliklerine bağlı olarak itme şeklinde olabilmektedir. Çarpma sıklıkla konsantrasyonla arttığından dolayı, bu etkileşimler daha yüksek konsantrasyonlarda oturma akışının azalmasına katkıda bulunmaktadır. Yerdeğiştiren sudan dolayı ya da komşu taneciklerin uzaklaştırıcı elektrostatik kuvvetlerinden dolayı oluşan direk olmayan katı-katı etkileşimleri de vardır.

Bu etkiler, konsantrasyonun artma fonksiyonu olarak hesabı yapılan çökme hızında hesaba katılmaktadır (Kynch , 1952). Akışın azalmasını hesaplamak için, başka daha iyi bir yol ise, nisbi hızla orantılı olarak değişen ve deney sonuçlarına dayandırılmış sürüklenme kuvveti vasıtasıyla akış direncinin bulunmasıdır (Auzerais vd.,1988). Nisbi hız üzerindeki C_D sürüklenme katsayısının etkisi ihmal edilmektedir. Sürüklenme katsayısı, sadece konsantrasyonun bir fonksiyonu gibi düşünülmektedir.

Süspanse edilmiş tanecikler, sıvı moleküllerinin Brown hareketinden dolayı termodinamik kuvvetlere maruz kalmaktadır (Russel,1981). Konsantrasyonda farklılıklar olduğu zaman, süspansiyonun kimyasal yapısında yükselme ve düşmeler var demektir. Denge sağlamak için, dağılık akış oluşur. Kuvvet dengesi, bu akışı devam ettirecek artan küçük basınç yükselmelerini gerektirir. Bu basınç “osmos basınç” olarak adlandırılır(Hurter,1989). Bundan sonra, süspansiyon için kuvvet ya da moment dengesi şu şekilde yazılabilir (Buscall, 1990).

$$C_D*(v_w - v_s) - \Delta\gamma_s*\phi_s = d\Pi/dz \quad (3.12)$$

Burada Π ; osmos basıncı, $\Delta\gamma_s = \gamma_s \cdot 2 \cdot \gamma_w$; yüzen taneciklerin birim ağırlığı, g ; yerçekimi ivmesi ve $\gamma = g \cdot \rho$; birim hacim ağırlıktır. Brown yayılımı, oldukça küçük tanecikler için önemli olmaktadır. Kolloidal tanecikler için, osmos basıncı suyun kaldırma kuvvetinden daha üstün gelmekte ve böylece tanecikler süspansiyon edilmiş şekilde olduğu gibi kalmaktadır.

3.4 Doymuş Zeminlerde Gerilme Dengesi

3.4.1 Doymuş zeminlerdeki katı-katı etkileşimi

Belirli bir konsantrasyonda tüm tanecikler yanındakine dokunduğu zaman sürekli bir yapılanma meydana gelmektedir. Konsolidasyonun başladığı bu noktada, ağırlık ve tanecikler arasındaki esnek birleşme yavaş bir şekilde toptan göçmeyi sağlamaktadır. Kimya mühendisliğinde, bu gibi doymuş yapı ağı “jel” olarak adlandırılmaktadır ve onun oluştuğu konsantrasyon jel noktasıdır (Buscall, 1990).

Hareketsiz sıvıda ölçülmüş sıvı basıncı U_w , osmos basıncı ihmal edildiği zaman, toplam gerilmeye σ (ya da birim yüzeydeki ağırlık) eşittir çünkü malzeme sıvı gibi davranmaktadır. Bu kabul, yayılmış malzeme şekillenirken geçerli değildir çünkü bu esnada malzeme kendi ağırlığının bir kısmını da taşımaktadır. Dokular arasındaki suyun basıncı sonucunda, boşluk suyu basıncı U_w (ya da kılcal damar basıncı) karışımın toplam ağırlığından daha küçük olacaktır. Yapısal kenetlenmeler tamamen rijit olmadığından dolayı, yapı kendi ağırlığı altında yavaş bir şekilde göçecektir. Bundan dolayı sistem dengede değildir ve boşluk suyu basıncı U_w , hidrostatik basıncı U_o 'dan daha büyük olacaktır. Aradaki fark artan boşluk suyu basıncı, $U = U_w \cdot 2 \cdot U_o$ olarak bulunabilmektedir. ((U_w/γ_w) ; nem potansiyeli, (U_o/γ_w) ; yerçekimsel potansiyel, (U/γ_w) ; toplam potansiyel olacak şekilde bu parametreler zemin fiziğinde kullanılmaktadır (Philip, 1969).) Yapı tarafından taşınan efektif gerilme σ' , şöyle bulunmaktadır;

$$\sigma' = \sigma - u_w = \sigma - u_0 - u \quad (3.13)$$

Sediment tabakasındaki herhangi bir noktadaki σ değeri, z_i su-katı arayüzeyi ile bu noktanın z derinliği arasındaki ρ 'nun entegrasyonu ile elde edilebilmektedir.

$$\sigma = \sigma_0 + \int \rho * g \, dz \quad (3.14)$$

Burada σ_0 ; z_i seviyesindeki yüzeysel zemin gerilmesidir. Konsolidasyon, bu toplam gerilmeden boşluk suyu basıncının çıkarılmasından sonra geriye kalan basıncın değerlerine bağlı olarak devam etmektedir. Dengeye ancak boşluk suyu basıncı sıfırlanınca erişilir ama bu yüklemeye bağlı olarak uzun zaman alabilmektedir.

3.4.2 Sıvı-katı etkileşimi ve doymuş zeminlerde gerilme dengesi

Zemin mekaniğinde, zemin iskeleti referans olarak alınmıştır ve sıvı hareketi de zemine bağlı olarak gözönüne alınmıştır. Tanecik üzerindeki sürüklenme kuvveti yerine, zemin içerisinde akmakta olan boşluk suyunun akış direnci gözönüne alınmıştır. Zemin iskeleti deforme olurken, boşluk suyu sıkışacak ve boşluk dışına çıkarılacaktır. Zemin iskeletinin çökmesiyle birlikte boşluk suyu tarafından meydana getirilen artan basınç eğimi, yarı amprik Darcy-Gersevanov yasası tarafından tariflenmiştir (Gersevanov, 1934). Ve aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir (Schiffman, 1985).

$$(-1/\gamma_w) * (du/dz) = ((1-\phi_s)/k) * (v_w - v_s) \quad (3.15)$$

Zeminin permeabilite değeri genellikle sabit değildir ancak konsantrasyona ve muhtelif diğer faktörlere bağlı olmaktadır. Eşitlik (3.15)'te (3.13) eşitliği yerine konulursa;

$$d\sigma'/dz = -\Delta \gamma_s * \phi_s + \gamma_w * (1-\phi_s) * (v_w - v_s) / k \quad (3.16)$$

eşitliği elde edilmektedir. “Doymuş Zemin Gerilme Dengesi” diye adlandırılan bu eşitlikte, taneciklerin oluşturduğu her bir tabakanın efektif gerilmesi, aşağıya doğru taneciklerin batık ağırlığı ve yukarıya doğru sürüklenme kuvveti alınarak tariflenmiştir.

3.5 Birleşik Model

Önceki kısımlardaki temel eşitlikler biraraya getirilerek birleşik model oluşturulmuştur. Ayrıca, kuvvet denge eşitliği, sediment kütle dengesiyle birleştirilerek sedimentin hacim kısmının hesaplanabildiği genel bir eşitlik oluşturulmuştur.

3.5.1 Birleşik gerilme denge eşitliği

Doymuş zemin için eşitlik (2.16) ve süspansiyonlar için eşitlik (2.12) kuvvet denge eşitliğinin karşılaştırılması ile her iki eşitliğin benzer şekilde olduğu görülmüştür. İkisinin birleştirilmesi için $(1-\phi)/k$ ile C_D sürüklenme katsayısının yer değiştirilmesi önerilmiştir. Buradan, permeabilitenin anlamı genelleştirilmiştir. Benzer şekilde, efektif gerilme ve osmos basıncı, süspansiyon faz için $\sigma' = 0$ ve katı faz için $\Pi = 0$ olacak şekilde $(\Pi + \sigma')$ olarak sabit bir değişken içinde birleştirilebilmektedir. Fakat bununla beraber onları ayrı ayrı tutmak daha iyidir çünkü onlar tamamiyle farklı niteliktedirler.

Eşitlik (3.7)'de kullanılan U (süspansiyonun ortalama hızı), sediment-su karışımının genel kuvvet denge eşitliğinde de kullanılır.

$$(d\sigma'/dz) + (d\Pi/dz) = -\Delta\gamma_s \cdot \phi_s + \gamma_w \cdot (U - v_s) / k \quad (3.17)$$

Kütle denge eşitliği (2.5) ve kuvvet denge eşitliği (3.17), ortalama tanecik hızı ve konsantrasyonu çözmek için kullanılır. Diğer parametreler için kapanma eşitlikleri deneysel olarak elde edilir.

3.5.2 Permeabiliteye karşı oturma hızı

Oturma hızı w , pozitif yönü aşağıya doğru alınan ortalama tanecik hızına göre tespit edilmiştir (örneğin, $w = Ss/\phi_s = 2 \cdot v_s$). w , oturma hızından çok oturma oranı olarak adlandırılmıştır çünkü o daha sonra Stokes'in düşme hızı ile birleştirilmiştir. Oturma oranı

kavramı, konsolidasyon fazında sediment akışıyla direk olarak birleştirildiğinde kullanılabilir.

Sedimentasyon ve konsolidasyon ortak bir modelde birleştirildiği zaman, deneysel verilere göre permeabiliteden daha çok oturma oranını kullanmanın daha uygun olduğu görülmüştür. Bunun başlıca iki sebebi bulunmaktadır. İlki, yapının sürekli olarak varolmadığı durumda konsantrasyon kritik değerin altında olduğu zaman, efektif gerilme yoktur ve konsolidasyon yerine engellenmiş oturma meydana gelmektedir. Bu durumda osmos basıncı ihmal edilerek eşitlik kısaltılmakta ve aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$k = (w_o \cdot \gamma_w) / (\Delta\gamma_s \cdot \phi_s) \quad (3.18)$$

Burada w_o ; efektif gerilme ihmal edildiği zaman kabul edilen oturma oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu ilk olarak Been (1980) tarafından belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak, bir taneciğin oturması için bu sınırlamalar gözönüne alındığı zaman, konsantrasyon hemen hemen sıfır olduğu için $w(\phi=0)$, permeabilite değeri sonsuz olmaktadır. İkincisi ise, permeabilitenin doğru fiziksel anlamı genellikle arayüzeyde direk olarak ölçülebilen oturma oranından daha az gerçektir. Özellikle, zemin yapısının olmadığı süspansiyon fazda, permeabilite yalnızca fiktif bir değerdir fakat eşitlik (3.17) ile oturma oranı bulunabilmektedir.

3.5.3 Genel eşitlik

Genel kütle denge eşitliği oluşturulurken, eşitlik (3.5) ve eşitlik (3.18) arasında tanecik hızı elimine edilebilmektedir.

$$d\phi_s/dt = (d/dz) \cdot [(k \cdot \Delta\gamma_s \cdot \phi^2) / \gamma_w + (k \cdot \phi_s / \gamma_w) \cdot ((d\sigma'/dz) + (d\Pi/dz))] \quad (3.19)$$

Yada eşitlik (3.18) arasında yapılırsa,

$$d\phi_s/dt = (d/dz) \cdot [w_o \cdot \phi_s + (w_o / \Delta\gamma_s) \cdot (d\sigma'/dz) + (d\Pi/dz)] \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilmektedir. Süspansiyon içerisindeki osmotik basınç, difüzyon akışının bir sonucudur ve o sadece konsantrasyonun bir fonksiyonudur (Hunter, 1989). Böylece, eşitlik (3.20) aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$d\phi_s/dt = (d/dz) * [w_o * \phi_s + (w_o / \Delta\gamma_s) * (d\sigma'/dz) + (d\Pi * d\phi_s) / (d\phi_s * dz)] \quad (3.21)$$

Burada, D_B Brown difüzyon katsayısıdır. Çoğu kez σ' , tek başına konsantrasyonun bir fonksiyonu gibi düşünülür. Böylece eşitlik (3.21) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir;

$$\begin{aligned} d\phi_s/dt &= (d/dz) * [w_o * \phi_s + ((w_o * d\sigma') / (\Delta\gamma_s * d\phi_s) + D_B) * (d\phi_s / dz)] \\ &= (d/dz) * (w_o * \phi_s + D * (d\phi_s / dz)) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.21), Brown difüzyonu ve konsolidasyonu da içeren genelleştirilmiş Kynch'nın sedimentasyon teorisinin mantıklı bir uzantısı olmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sulu çamurların çökme ve konsolidasyon davranışlarının araştırılması sadece zemin mekaniği değil hidrolik, jeoloji, çevre, kimya mühendislikleri v.b pek çok bilim dalı tarafından yapılmaktadır. Konuya zemin mekaniği açısından bakıldığında, bu tip çamurların konsolidasyon ve çökme karakteristiklerinin bilinmesi, çamurun ıslah yönteminin belirlenmesi için gerekli olmaktadır. Zemin tanecikleri oturduğunda ve bulamacın su muhtevası azaldığında dayanımında çarpıcı bir artış meydana gelmektedir. Bu artış çok küçük olmasına karşılık çamurun ıslah edilmesi için kullanılabilir. Bu çalışmada ise, yaklaşık seksen yılı aşkın bir süredir Haliç'te meydana gelen kirlenmeden dolayı taranmasına karar verilen dipsel çamurun depolandıktan sonra çökme ve konsolidasyon karakteristiklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla, özel olarak yaptırılan deney aletinde bir seri drenajlı ve drenajsız deneyler yapılmıştır.

4.1 Haliç Taban Çamurunun Özellikleri

Haliç ıslah projesi kapsamında derinlikleri 10m ile 25m arasında değişen toplam 19 adet zemin etüt sondajı yapılmıştır. Bu sondajlar sırasında ve alınan numuneler üzerinde hem arazi, hem laboratuvar deneyleri aracılığı ile 25m'ye kadar zeminin endeks özellikleri ile taban çamurunun kayma mukavemeti ve konsolidasyon özellikleri belirlenmiştir. Deneysel olarak belirlenen değerlerin değişim aralığı ve kabul edilen ortalama değerler aşağıda sırasıyla belirlenmiştir(Özaydın vd., 1995e).

İlk 9m boyunca zeminin tabii birim hacim ağırlığı oldukça geniş bir aralıkta değişmekte olup,

$$\gamma_i = 12,0-16,5 \text{ kN/m}^3$$

ortalama değer olarak,

$$\gamma_{\text{ort}} = 15.5 \text{ kN/m}^3$$

alınabilir. Aynı şekilde arazi su muhtevası da oldukça geniş bir aralıkta değişmekte,

$$W_i = \%35-83$$

ortalama bir değer olarak,

$$W_{iort} = \%55$$

alınabileceği gözlenmektedir. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan likit ve plastik limit değerleri ise,

$$W_L = \%26-99$$

$$W_p = \%12-49$$

aralıklarında değişmektedir. Ortalama değerler olarak,

$$W_{Lort} = \%55$$

$$W_{Port} = \%35$$

alınması önerilmiştir. Atterberg limitlerine göre tariflenen likidite indisinin derinlikle değişiminin,

Derinlik(m)	I_L
0-10	3,0-1,6
10-25	1,6-1,0

olduğu görülmüştür. Doğal pik kayma mukavemetinin yoğurulmuş ya da aşırı deformasyondan sonraki kayma mukavemetine oranı olarak tariflenen hassaslık ise yine ilk 10m derinlik boyunca,

$$S_t = 2,3-13,0$$

olduğu görülmüştür. Ortalama değerler olarak,

H(m)	S _{tort}
0-8	3.5
8-25	4.5

alınmıştır.

Drenajsız kayma mukavemetinin ölçülmesi için arazi veyn deneyleri, arazi koni penetrasyon deneyleri ve laboratuvar veyn deneyleri ile konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılarak,

$$(c_u/\sigma_p)' = 0,27$$

alınabileceği görülmüştür.

Drenajlı kayma mukavemeti parametrelerinden kohezyon değerinin bu tip normal konsolide olmuş zeminler için ($c' = 0$) olacağı bellidir. Efektif gerilme cinsinden sürtünme açısı (ϕ') değeri için, örselenmemiş tüp numuneler ve çamur konsolidasyonundan elde edilmiş numuneler üzerinde yapılmış CU deneyleri sonucunda ortalama değerler olarak,

$$\phi'_{pik} = 19^\circ$$

$$\phi'_r = 12^\circ$$

olarak bulunmuştur. Sıkışma indisi C_c 'nin zemin yüzeyinde 0,80 olup derinlikle azalarak 0,30 değerine düştüğü görülmüştür. Hacimsel sıkışma katsayısı ise,

σ_v' (kPa)	m_v' (kPa) ⁻¹
25-100	$8 \cdot 10^{-5}$
100-200	$6 \cdot 10^{-5}$
200-400	$3 \cdot 10^{-5}$
400-800	$1,7 \cdot 10^{-5}$

değerleri kabul edilmiştir. Konsolidasyon katsayısı ise,

σ_v' (kPa)	c_v (cm ² /sn)
25-50	$9 \cdot 10^{-4}$
50-100	$4,5 \cdot 10^{-4}$
100-200	$3 \cdot 10^{-4}$
200-400	$2,5 \cdot 10^{-4}$
400-800	$1,5 \cdot 10^{-4}$

olarak bulunmuştur.

4.2 Deneyleerde Kullanılan Zemin Özellikleri ve Endeks Özellikleri

Yapılan bu çalışmada, Haliç güncel çökellerinden taranan çamur kullanılmıştır. Haliç güncel çökellerinin kalınlığı 5-15 m arasında değişmektedir. Bu çökeller siyah renkli, organik muhtevası yüksek ve çok yumuşak kıvamdadır. İçerisinde ayrıca jips kristalleri, akarsu ortamıyla taşınmış bitki artıkları, kömür kırıntıları tespit edilmiştir. Dere ağızları dışında, genellikle iri taneli malzeme içermeyen bu üst çamur kesiminin, tamamen korunmuş bir ortamda, muhtemel askıntılardan çökeldiği anlaşılmaktadır. Malzeme ıslak analiz ile 40 Nolu elekten geçirilip içerisindeki çöp, taş v.s gibi malzemelerden arındırılarak kurutulup deneyleerde kullanılır hale getirilmiştir.

Zeminlerin endeks özelliklerini belirlemek amacıyla kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlığı ve hidrometre deneyleeri yapılmıştır. Numunenin birim hacim ağırlığının $\gamma_n=1.27 \text{ gr/cm}^3$ olduğu tespit edilmiştir. Likit limit ve plastik limit değerlerinin ise sırasıyla $W_L=\%56$ ve $W_p=\%36$ olduğu ve yapılan hidrometre deneyi sonucuna göre ise numunenin MH (yüksek plastisiteli silt) gurubuna girdiği tespit edilmiştir.

4.3 Deney Aygıtları

4.3.1 Sedimentasyon ve konsolidasyon deney aleti

Haliç güncel çökellerinin karada depolanmaları durumunda, çamurun davranışını önceden belirlemek, zayıf zemin karakterlerini iyileştirmek, yıllarca süren çökme ve oturma süresini tahmin edebilmek ve sonuçta depolama bölgesinin yeniden kullanıma kazandırılmasını sağlamak amacıyla taranmış sulu çamurun depolanma sahasında çökme ve kendi ağırlığı altında konsolidasyon davranışını laboratuvar koşullarında araştırmak için özel bir sedimentasyon ve konsolidasyon deney aleti yaptırılmıştır. Uygulamada taranan çamur yoğunluğu 1.17 gr/cm^3 olacak şekilde deniz suyu ile sulandırılıp karıştırılarak borularla depolama alanına boşaltılmaktadır. Bu durum laboratuvarında numuneye %0.8 oranında tuz içeren temiz su eklenerek sağlanmıştır. Ayrıca, engellenmiş oturmanın tuzlu su kullanıldığında ortadan kalktığı da yapılan diğer çalışmalarda görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan deney aleti, Singapur denizel kilinin konsolidasyon özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada Lee, Choa, Lee ve Quek (1993) tarafından yapılan ve deney için numune hazırlamakta kullanılan deney düzeneğinden örneklenerek yaptırılmıştır ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Yükseklikleri birbirinden farklı iki adet deney aleti yaptırılmıştır. Deney aleti toplam dört kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla şöyledir:

1. Deney aletini taşıyan alt parça
2. Numunenin yerleştirildiği, şeffaf iki parçalı deney hücresi ve onları birbirlerine bağlayan vidalı bilezik
3. İçerisinde poroz taş bulunan hareketli piston
4. Konsolidasyon deneyi aşamasında üzerine yüklerin konulabileceği başlık parçası
5. Deney aletinin diğer parçaları

4.3.1.1 Deney aletini taşıyan alt parça

Bu kısım paslanmaması için prinçten yaptırılmıştır. Deney hücresinin alt parçasına pimlerle üzerinde açılan delikler sayesinde birleştirilebilmektedir. Konsolidasyon aşamasında bu pimler çıkartılarak uygulanan yükün numune tarafından alınması sağlanmaktadır. Malzeme yüksekliği; 10cm, çapı; 8.8 cm ve et kalınlığı ise 3mm'dir. Ayrıca su çıkışını sağlamak için drenaj boşluklarına sahiptir.

4.3.1.2 Numunenin içerisine yerleştirildiği, şeffaf iki parçalı deney hücresi ve onları birbirine bağlayan vidalı bilezik

Deney hücresi, "flexglass" diye adlandırılan şeffaf bir malzemeden yaptırılmıştır. Çökeltme deneyinden konsolidasyon deneyine geçişi sağlamak amacıyla iki parçadan meydana gelmektedir. 1. deney hücresinin üst parçası, 75cm yüksekliğinde ve alt parçası 15cm yüksekliğindedir. Malzemenin dış çapı 11cm, iç çapı 10 cm ve et kalınlığı ise 5mm'dir. 2. deney hücresinin ise üst parçası 35 cm ve alt parçası 15 cm yüksekliğindedir.

4.3.1.3 İçerisinde poroz taş bulunan hareketli piston

No.40 ve No.200 arasında kalan podima kumu ile epoksi adlı bağlayıcı bir malzeme hafif nemli bir kıvamda karıştırılıp bir piston içerisine dökülerek bu parça oluşturulmuştur. Piston altındaki çıkış yardımıyla poroz taştan süzülen su dışarıya alınabilmektedir. Bu malzeme, deney hücresi alt parçası içerisine yerleştirilir.

4.3.1.4 Konsolidasyon deneyi aşamasında üzerine yüklerin konulabileceği başlık parçası

Çökeltme deneyi bitiminde deney hücresinin üst parçası ve onu alt parçaya birleştiren bilezik çıkarılarak yerine bu başlık takılır. Bu parça, numune üzerine uygulanan yüklerin konulduğu bir parçadır.

4.3.1.5 Deney aletinin diğer parçaları

Yukarıda anlatılan ana parçaların yanında deney hücresi alt parçası ile üst parçası arasındaki su sızıntısını önlemek amacıyla o-ring, oturma değerlerinin ölçülmesi için okuma saati, suyun drenajını sağlamak için drenaj hortumları, çıkan suyun ölçüldüğü mezur ve mezurda biriken fazla suyun tahliye edilmesi için hortum ucuna vana bağlanmıştır.

4.3.2 Numunenin hazırlanması ve deney aletine yerleştirilmesi

Deney hücresi alt parçasının içerisine poroz taşlı piston geçirilir. Deney hücresi alt ve üst parçası pirinç bilezik yardımıyla birleştirilir ve deney sistemini taşıyan alt parça üzerinden geçirilerek pimlerle birbirine birleştirilir. Piston içerisindeki poroz taştan geçen suyun tahliye edilmesini ve ölçülmesini sağlamak amacıyla piston çıkışı ile cam mezur arası hortumla birleştirilir. Pistondan çıkan hortum ikiye ayrılarak biri cam mezura ve diğeri vanaya gidecek şekilde ayrılır. Vana, cam mezurda fazla suyu tahliye etmek için kullanılır. Poroz taş üzerine ayrıca geotekstil ve poroz kağıtlar konular ve cam mezur datuma gelinceye kadar su ile doldurulur. Bunun sebebi numune dökülür dökülmez su çıkışını hemen gözlemleyebilmek içindir.

Öncelikle numunenin yoğunluğu 1.17 gr/cm^3 olarak belirlenmiştir. Daha sonra numune , su ve %0.8 oranında tuz mikser yardımıyla karıştırılmıştır. İyice karıştırılmış zemin numunesi bir huni yardımıyla deney hücresi içerisine doldurulmuştur (Şekil 4.2). Dökülme anından itibaren zamana karşı numunenin yüksekliğinde meydana gelen değişiklikler ile çıkan su miktarı ölçülmüştür. Su ile katı kısım arasında arayüzey oluştuktan sonra, katı kısmın yüksekliğindeki azalma miktarı da ölçülmüştür. Bu ölçümlere katı kısmın çökmesinin durduğu, kalınlığının değişmediği duruma kadar devam edilmiştir.

4.3.3 Sedimentasyon deneyi

Drenajlı ve drenajsız olmak üzere iki tip sedimentasyon deneyi yapılmıştır. Böylece uygulamada çamurun döküldüğü alandaki geçirimli ve geçirimsiz tabakalardaki durum

örneklenmiştir. Drenajsız deneyde pistondan çıkan suyun çıkışı bir vana yardımıyla engellenmiş ve zeminin sadece çökme davranışı zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Drenajlı deney de ise, su çıkışı serbest bırakılmış ve drenaj hortumunun ucuna bağlanan bir cam mezur yardımıyla çıkan su miktarı zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Drenajlı deney esnasında Şekil 4.3’de gösterilen h_1 , h_2 ve h_3 değerleri ölçülmüştür. Burada h_1 ; deney başında dökülen numune yüksekliğindeki zamana bağlı azalma miktarı , h_3 ; arayüzey oluştuktan sonra tortu yüksekliğindeki zamana bağlı azalma miktarı ve h_2 ; zamana bağlı olarak ölçülen çıkan su miktarıdır. Okunan h_3 değeri kullanılarak tortu yüksekliği hesaplanmış ve zamana bağlı olarak çizilmiştir. Numuneden çıkan toplam su miktarı ölçülen h_2 değerlerinden hesaplanarak zamana bağlı olarak çizilmiştir. Yine ölçülen h_2 değeri kullanılarak numunenin permeabilite değeri,

$$k = \ln(50/h_2) * (a/A) * (t_2 - t_1) * H_{\text{tortu yük.}} \quad (4.1)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada 50, cam mezurdaki su seviyesinin başlangıç değeri, $a = 1.54 \text{ cm}^2$ cam mezurun alanı, $A = 78.5 \text{ cm}^2$ numune alanıdır. Cam mezurda biriken su belirli zaman aralıklarında vana yardımıyla boşaltılmaktadır. Bu iki durum arasında geçen süre $(t_2 - t_1)$ olarak ifade edilmiştir. Numunenin zamana bağlı permeabilite değerleri de grafik olarak gösterilmiştir. Drenajsız deneyde ise h_2 değeri ölçülmediğinden bu hesaplama yapılmamıştır.

Numunenin katı konsantrasyonu, zeminin her birim hacmindeki parçacıkların kütlesidir ve katı partiküllerin birim ağırlığı “ ρ_s ” ve boşluk oranı “ n ” olduğundan “ $(1-n) * \rho_s$ ” ye eşittir. Böylece katı konsantrasyon yani kuru yoğunluğa “ ρ_k ”, eşittir (Kynch, 1952). Böylece numunenin başlangıç konsantrasyonu,

$$\gamma_k = \gamma_0 * (1 + w_0) \quad (4.2)$$

formülünden hesaplanmıştır. Deney esnasında zaman aralıklarında katı konsantrasyon C değerleri,

$$C = (C_0 * H_0) / H_{\text{tortu yük.}} \quad (4.3)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada H_0 ; başlangıç numune yüksekliğidir. Bulamacın zamanla değişen boşluk oranı değerleri ise,

$$e = (G_s - C) / C \quad (4.4)$$

formülünden hesaplanmıştır. $G_s = 2.7 \text{ gr/cm}^3$ sabit değer olarak alınmıştır. Tüm bu hesaplanan konsantrasyon, boşluk oranı, permeabilite değerlerinin zamana bağlı eğrileri çizilmiştir. Ayrıca boşluk oranı ile konsantrasyon ve permeabilite arasındaki eğrilerde elde edilmiştir.

4.3.4 Konsolidasyon deneyi

Çökeltme deneyinin bitiminde, deney hücresi üst parçası ve onu alt parçayla birleştiren bilezik çıkartılmış ve yükleme başlığı alt deney hücresine vidalanarak birleştirilmiştir. Daha sonra, oluşan oturmayı ölçmek için yükleme başlığı üzerine okuma saati monte edilmiştir. Deneye başlamak için deney hücresi alt parçası ile en alt parçayı birleştiren pimler çıkartılmıştır. Ve böylece yük uygulandığında deney hücresinin aşağıya doğru hareket etmesi sağlanmıştır. Yapılmış olan deney düzeneği şekil 4.4'de gösterilmiştir.

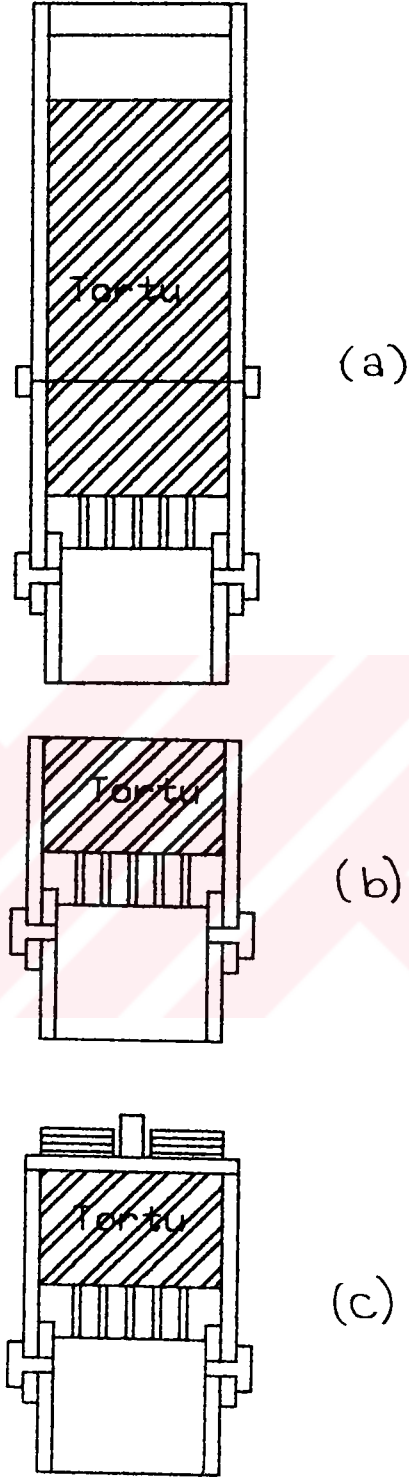
Uygulanan yük kademeleri sırasıyla 1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52, 51.1 kPa şeklindedir. Elde edilen okumalardan sıkışma-zaman eğrileri ve boşluk oranı-gerilme eğrileri elde edilmiştir.

4.3.5 Ödometre deneyi

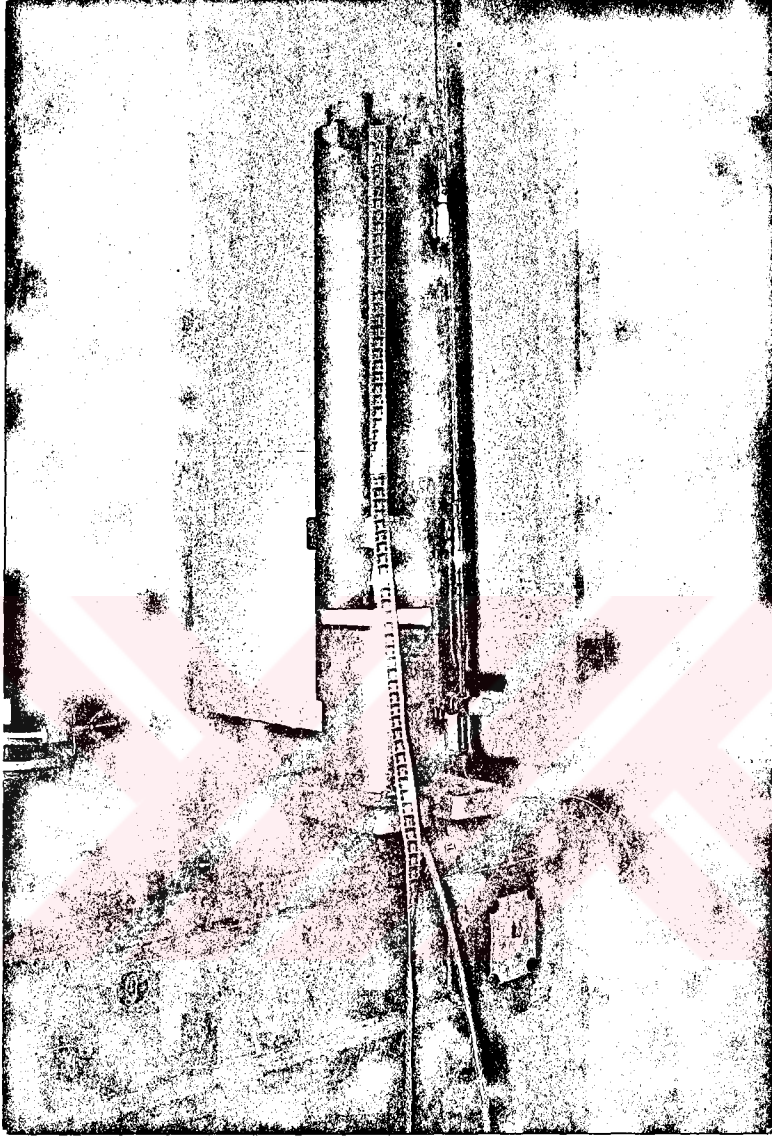
Özel deney aletinde yapılan konsolidasyon deneyinin sonunda çıkarılan numune üzerinde geleneksel konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Bu deneyin yapılmasının amacı, taranan çamurun karada depolanması durumunda kendi ağırlığı altında konsolide olduktan sonra yük altında sıkışabilirlik özelliklerini araştırmak içindir.

Arazideki zemin tabakalarının dūşey yüklemeler altındaki sıkışması esas olarak tek boyutlu bir sıkışma (dūşey doğrultuda) problemi oluşturduğu için, laboratuvar deney düzeninde zeminin yanal genişlemesine izin verilmemekte ve belirli dūşey yükler altında zeminin boy kısılması ölçülmektedir. Şekil 4.5’de gösterilen ödometre aletinde zemin numunesi rijit bir halka içerisine yerleştirilmektedir. Numunenin alt ve üst yüzeylerine konan poroz taşlardan zemin içerisindeki suyun dūşey doğrultuda hareketle dışarı çıkması sağlanmakta, uygulanan sabit yük altında meydana gelen dūşey şekil değiştirmeler hassas bir okuma saati vasıtasıyla zamana bağlı olarak ölçülmektedir. Zemin numunesinin alanı sabit kaldığı için boy kısılması ölçümlerinden hacim değişimleri de hesaplanmaktadır.

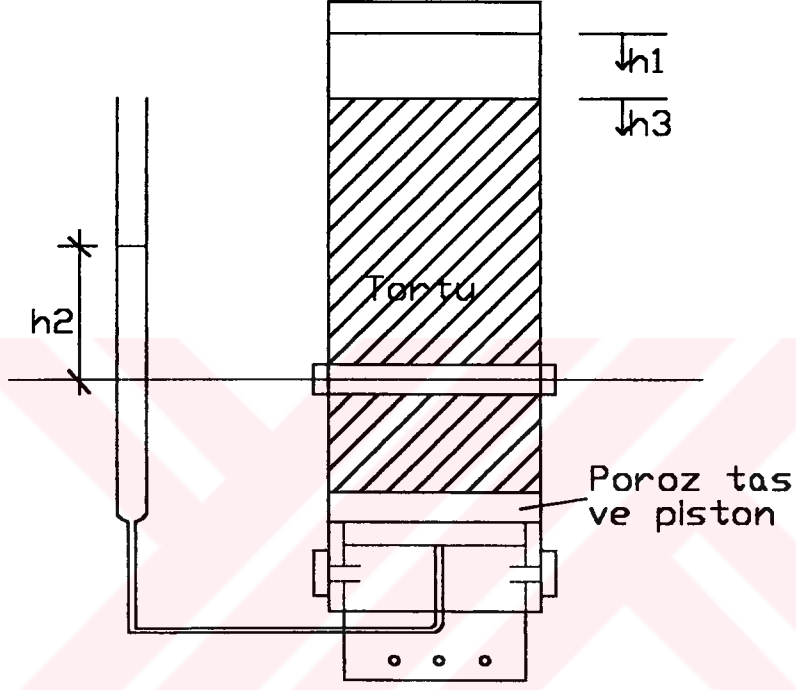




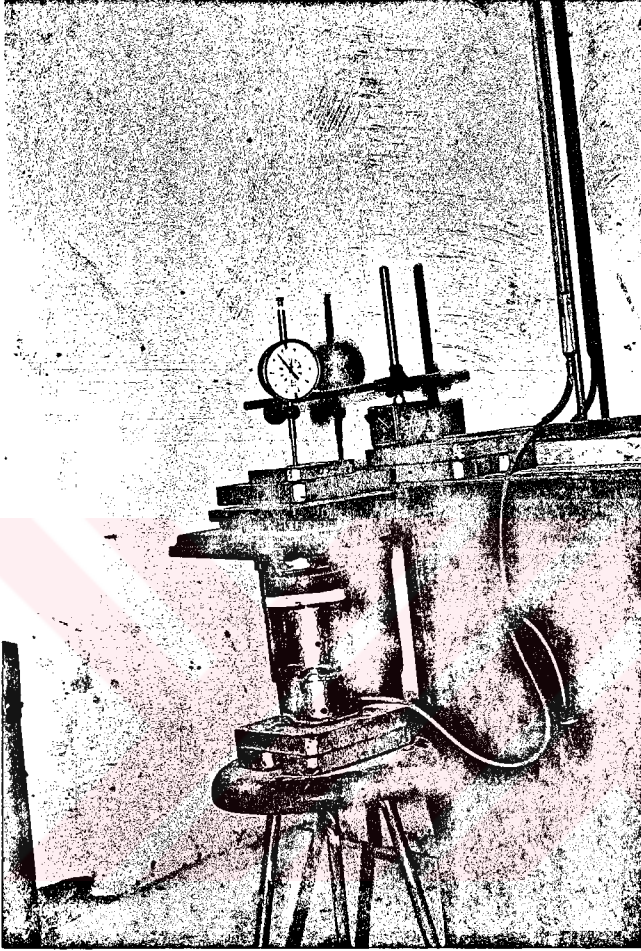
Şekil 4.1 Sedimentasyon ve konsolidasyon deney aleti (a) Sedimentasyon deneyi (b) Sedimentasyon bitiminde üst parça alındıktan sonraki durum (c) Konsolidasyon deneyi



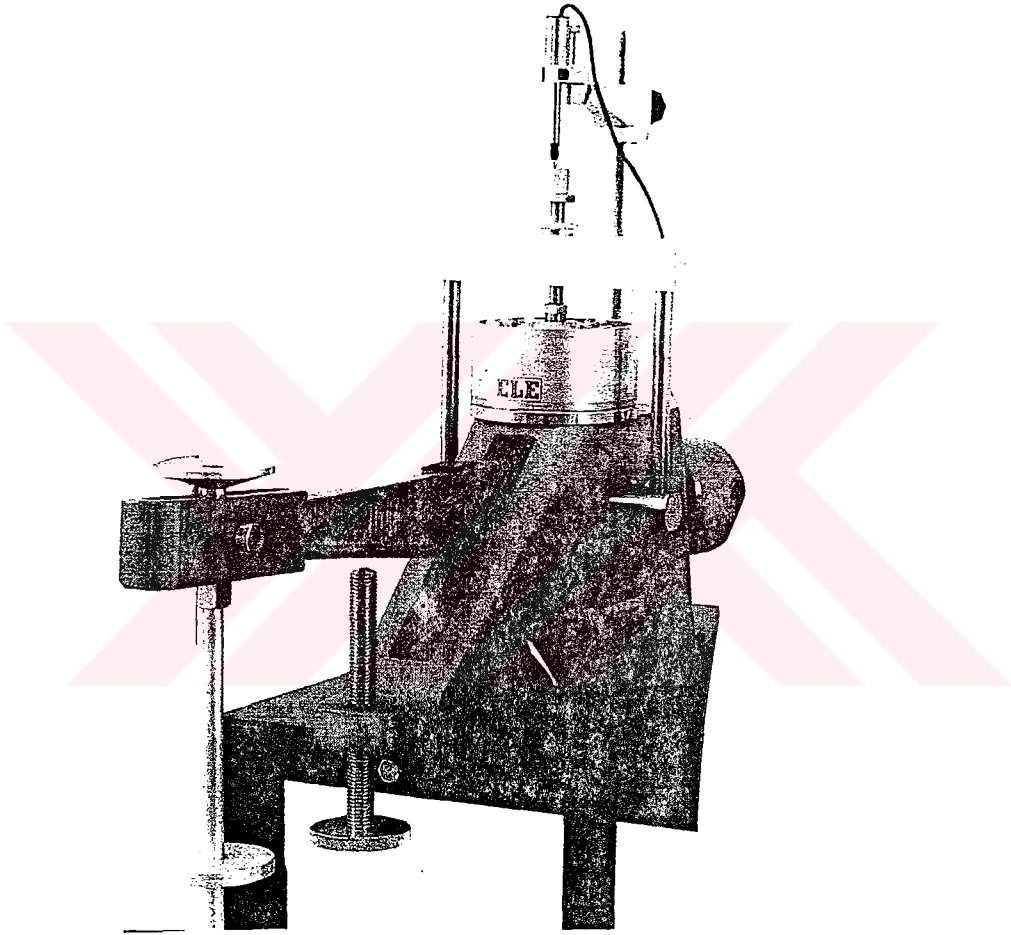
Şekil 4.2 Numunenin çökmesi ve kendi ağırlığı altında konsolidasyonu



Şekil 4.3 Deney esnasında ölçülen değerler



Şekil 4.4 Çökelen ve kendi ağırlığı altında konsolide olan numunenin üzerine ağırlık konularak konsolidasyonu



Şekil 4.5 Ödometre deney aleti

5. DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada Haliç güncel çökellerinden taranan çamur kullanılmıştır. Bu çökeller siyah renkli, organik muhtevası yüksek ve çok yumuşak kıvamdadır. Yapılan deneylerden malzemenin birim hacim ağırlığı $\gamma=1.27 \text{ gr/cm}^3$, likit limit ve plastik limit değerleri $W_L=\%56$ ve $W_p=\%36$ olduğu ve numunenin MH(yüksek plastisiteli silt) gurubuna girdiği görülmüştür.

Numuneler üzerinde drenajlı ve drenajsız olmak üzere toplam sekiz adet çökeltme ve konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Bu deneylere ait özellikler Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Yapılan sedimentasyon deneyleri

Deney No	Deney Başı Su muh. $W_o(\%)$	Deney Başı Bulamaç Yük.(cm)	Drenaj Durumu	Sedimentasyon sonu su muhtevası(%)
D1	445	40	Drenajlı	-
D2	480	69	Drenajlı	156
D3	300	39.5	Drenajlı	149
D4	300	73.3	Drenajsız	176.5
D5	240	70	Drenajlı	119
D6	230	38	Drenajlı	135
D7	300	65	Drenajlı	156
D8	600	40	Drenajsız	316

5.1 Drenajlı Deney Sonuçları

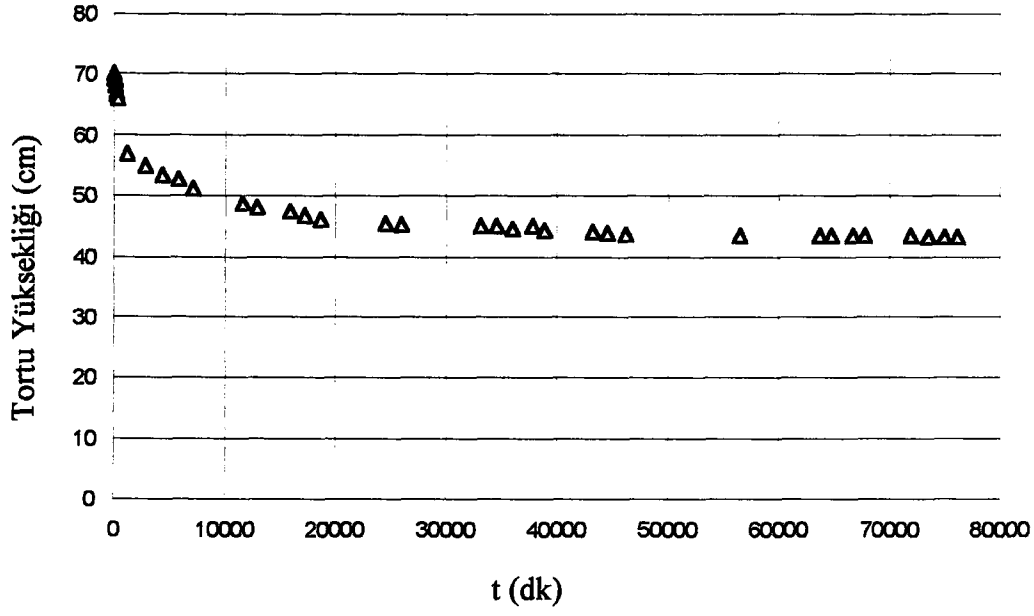
5.1.1 Sedimentasyon deneyleri

Numuneler taranan çamurun depolama sahasına pompalandığı yoğunluğa yakın değerlerde bulamaç halinde sedimentasyon ve konsolidasyon deney aletine yerleştirildikten sonra drenajlı deneylerde alt kısımdan su çıkışına izin verilerek Şekil 4.3'te gösterildiği gibi h_1 , h_2 ve h_3 değerleri deney esnasında belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Ayrıca deney başında deney aletine konulan toplam numunede, yüksekliği de ölçülmüştür. Bu deney esnasında konulan bulamaç halindeki numune belirli bir süre sonra (yaklaşık olarak bu süre iki saat civarındadır) zemin tanecikleri çökmekte ve katı kısım ile sıvı(su) kısım birbirlerinden ayrılmaktadır. Çökelen tortu kısmı ile sıvı kısım arasında bir arayüzey meydana gelmektedir. Zaman içerisinde tortu kısmı kendi ağırlığı altında konsolide olurken içerisindeki suyun bir kısmı alt yüzeyden dışarı çıkarken(drene olurken) bir kısmı da yukarıya doğru hareket ederek katı kısım üzerinde bir su kütlesi oluşturmaktadır. Böylece deney sonuna kadar tortu kalınlığının zamanla değişimi,

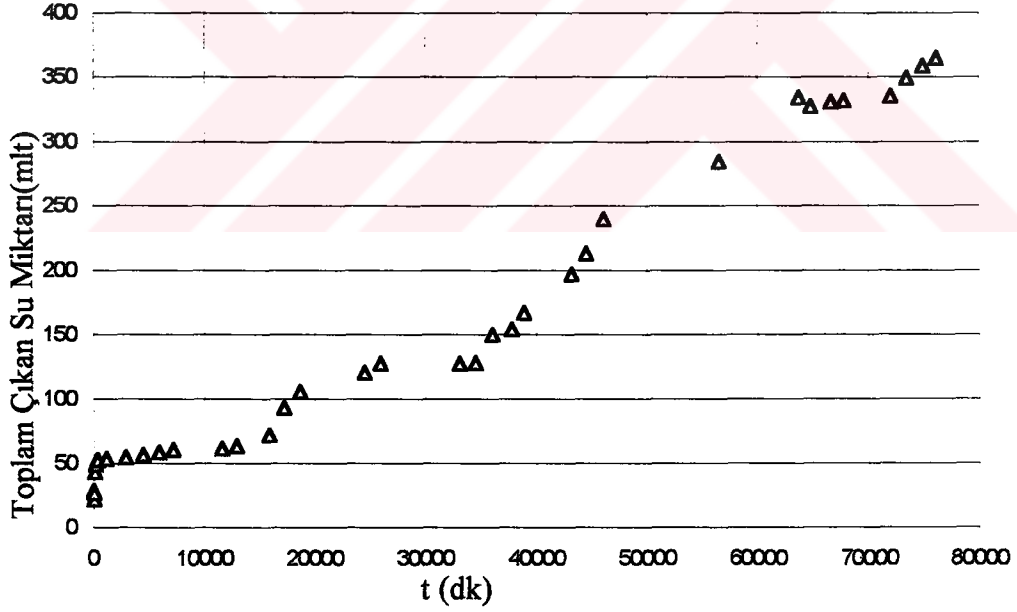
$$H_{\text{tortu}} = H_0 - h_3 \quad (5.1)$$

formülü kullanılarak bulunmuştur. Burada H_0 deney başındaki numune yüksekliği, h_3 ise tortu yüksekliğindeki zamana bağlı azalma miktarıdır ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Tüm deney süresi boyunca tortu yüksekliğinin zamana bağlı olarak değişimi grafik olarak çizilmiş ve Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Örnek olarak D5 deneyi değerleri gösterilmiş, diğer deneylerin sonuçları ise ekler bölümünde verilmiştir. Şekil 5.1'den de görüleceği gibi biriken tortu kısmının yüksekliği zamanla azalmakta olduğu görülmektedir.

Yapılan drenajlı deneylerde numuneden çıkan su miktarı da zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Böylece deney süresince numuneden çıkan toplam suyun zamana bağlı olarak değişim grafiği çizilmiş ve Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Tortu yüksekliğinin zamanla değişimi (Deney No:D5)

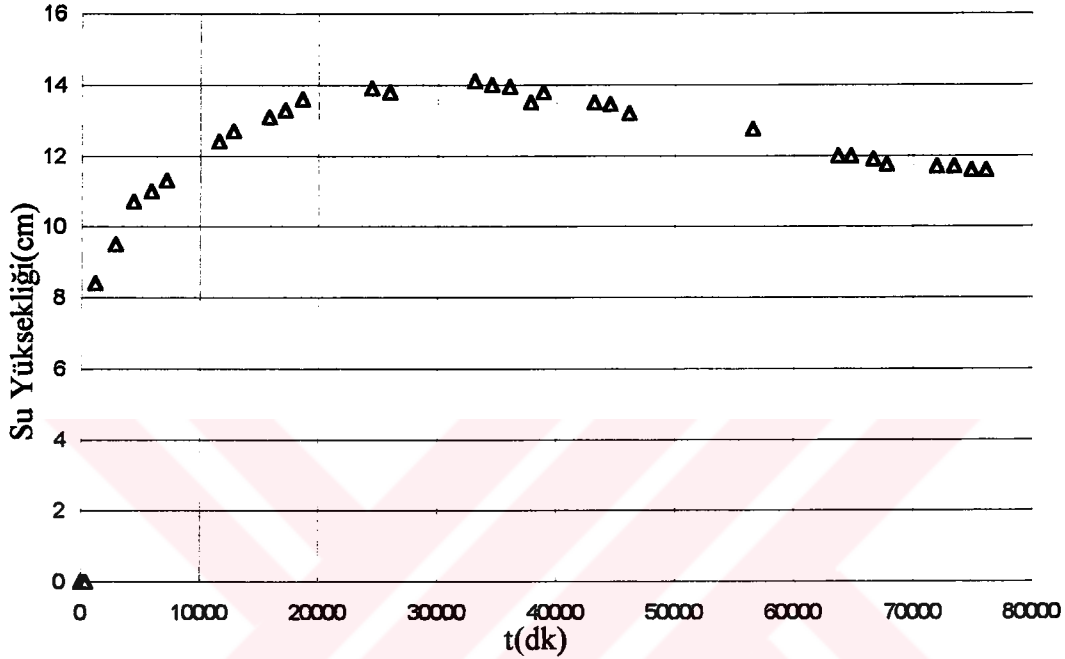


Şekil 5.2 Toplam çıkan suyun zamana bağlı değişimi (Deney No:D5)

Sedimentasyon esnasında katı kısım ile sıvı kısım ayrıldıktan sonra sıvı kısmın yüksekliğinin deney boyunca değişimi,

$$H_{su\ yük.} = H_o - (h_1 + H_{tortu}) \quad (5.2)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada, h_1 toplam numune kalınlığında deney boyunca meydana gelen azalma miktarıdır (Şekil 4.3). Hesaplanan su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi ise Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (Deney No: D5)

5.1.2 Konsolidasyon deneyleri

Sedimentasyon deneyleri bitiminde numunelerin su muhtevası saptanmış ve Çizelge 5.1'de verilmiştir. Deney aletinin üst parçası çıkarılmış ve alt kısmında kalan numuneye aynı deney aletinde kademeli olarak yükler uygulanarak konsolide edilmiştir. Bir önceki aşamada numunenin doğal hale uygun bir şekilde sedimentasyonuna izin verildikten sonra numunenin hiç yerdeğiştirmeden aynı deney aletinde konsolidasyona tabi tutulması doğal hali örneklemektedir. Gerçekleştirilen deneyler ile ilgili bilgiler Çizelge 5.2'de verilmiştir. Uygulanan her yük kademesinde numunenin zamana bağlı sıkışma miktarları ölçülmüştür. D5 deneyi için her yük kademesindeki birim boy kısalmasının zamana bağlı değişimi çizilerek Şekil 5.4'te gösterilmiş, diğer deneylerin sonuçları ekler bölümünde verilmiştir.

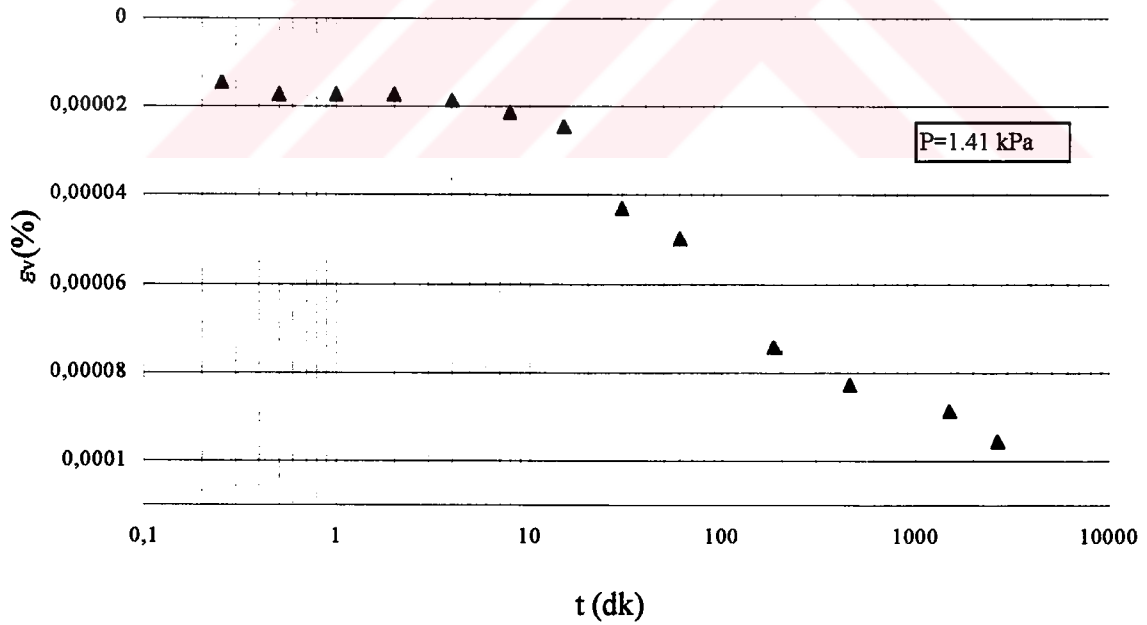
Çizelge 5.2 Sedimentasyon sonrası yapılan konsolidasyon deneyleri

Deney No	Nihai numune kalınlığı(mm)	Nihai su muhtevası(%)	Yükleme kademeleri(kPa)
D11	54.892	93.2	1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52
D22	47.1	74.684	6.51, 12.88, 25.62, 51.1
D33	50.8	75.75	12.88, 25.62, 51.1
D44	40.31	91.2	1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52
D55	45.025	79	1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52, 40.9, 65.1
D66	55.35	83	1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52, 40.9
D77	59.53	90	1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52, 40.9
D88	27.06	90	1.41, 2.68, 5.23, 10.33, 20.52, 40.9

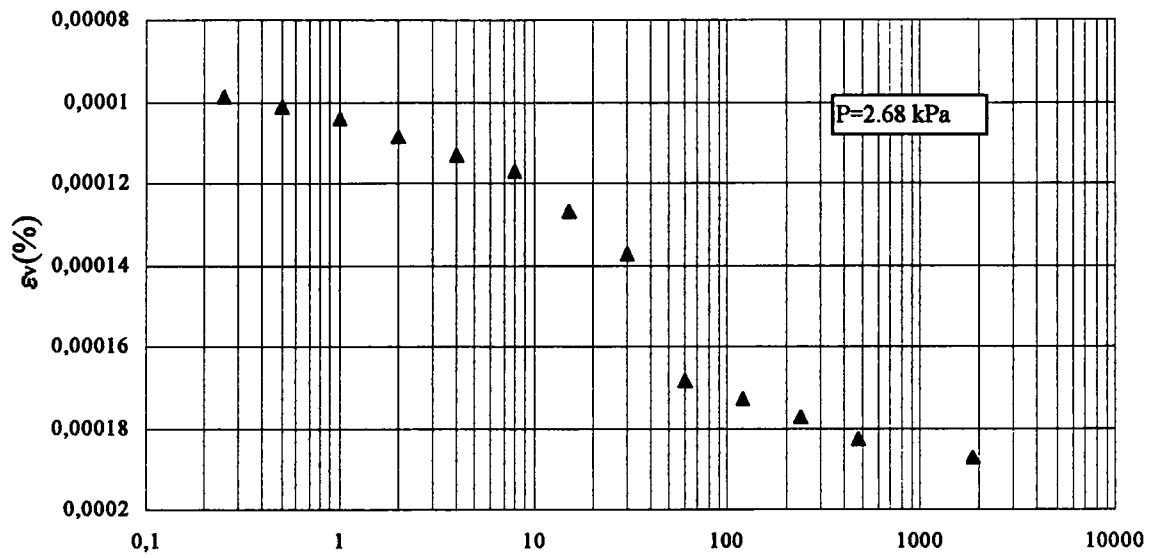
Notlar: (1) Bütün deneylerde başlangıç numune kalınlığı 70mm'dir.

(2) Bütün deneyler için başlangıç su muhtevası (sedimentasyon sonu su muhtevası)

Çizelge 5.1'de verilmiştir.

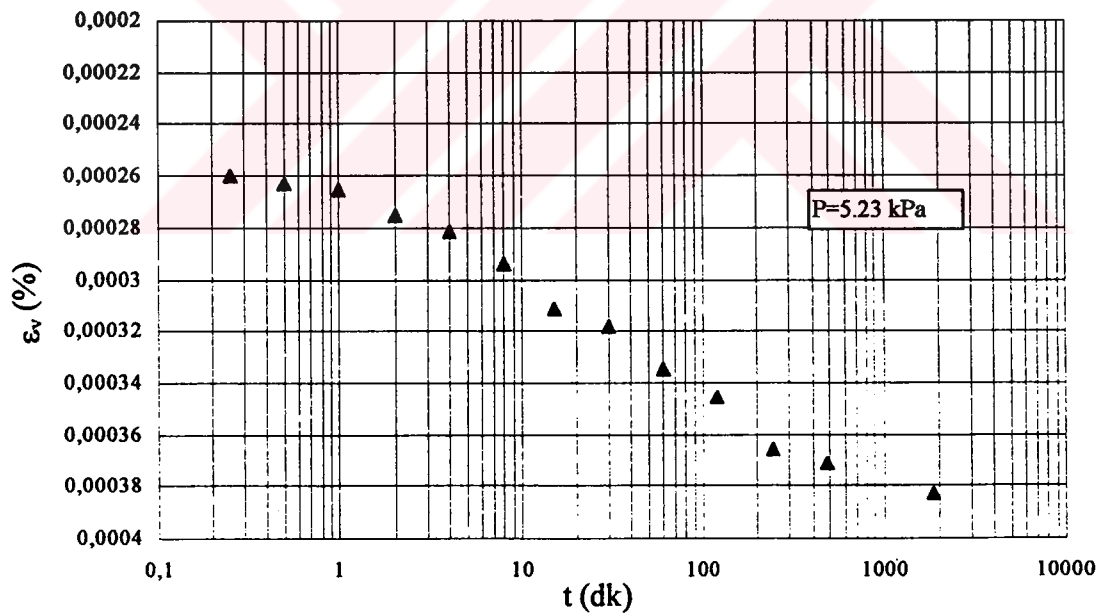


(a)

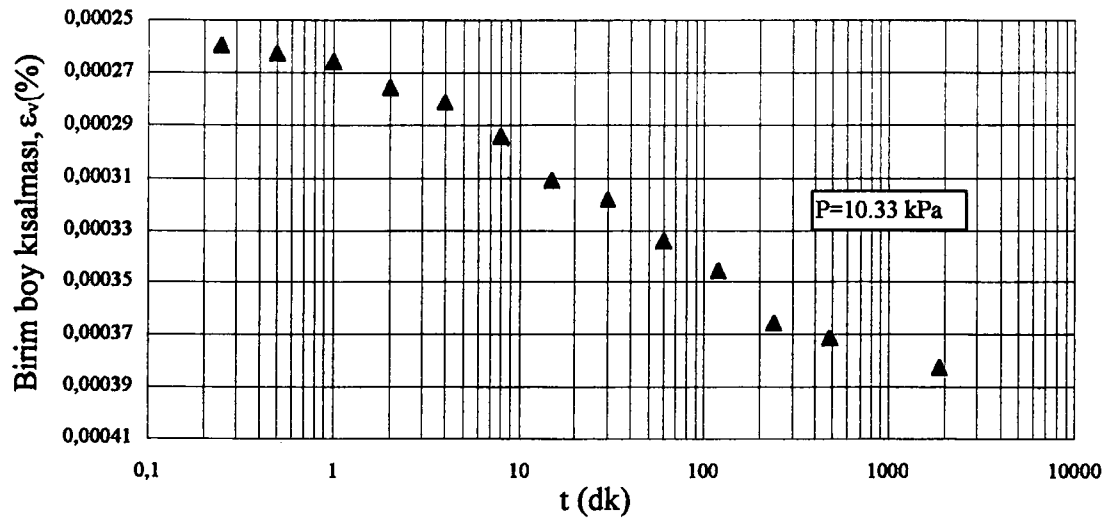


t (dk)

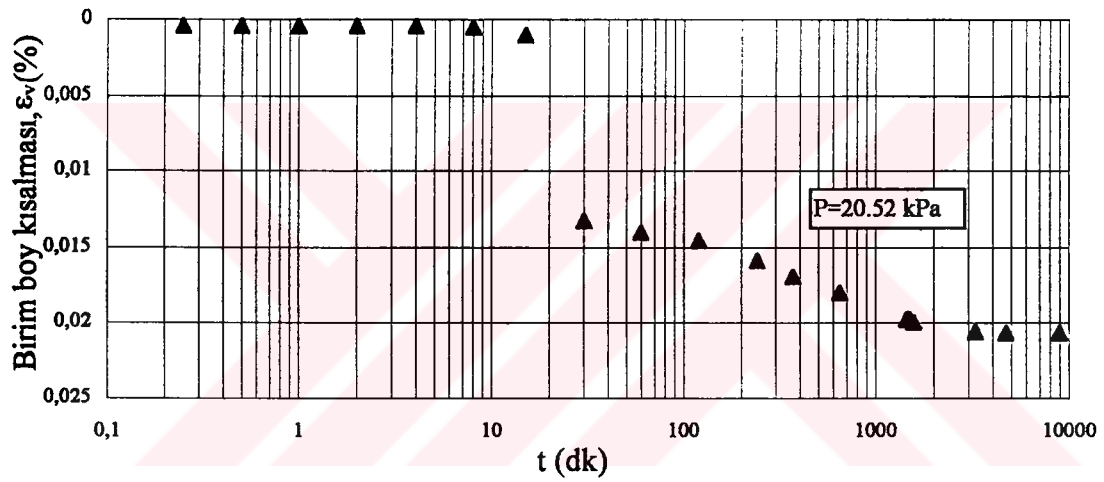
(b)



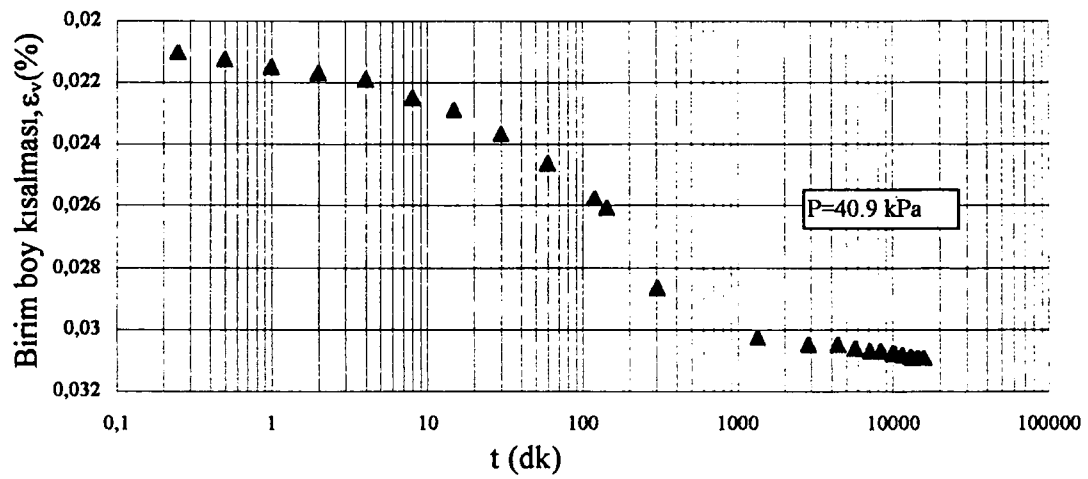
(c)



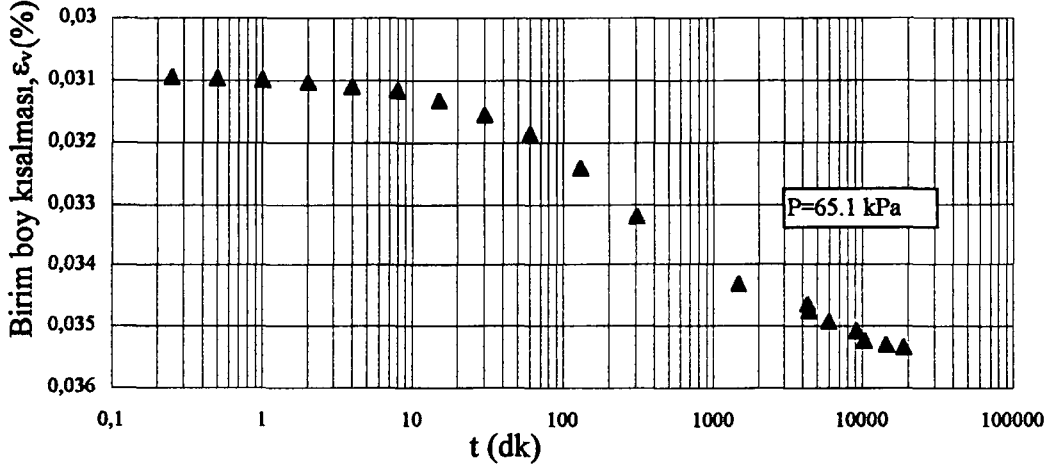
(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 5.4 Her yük kademesinde birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimleri (Deney No:D55)

Konsolidasyon deneyi sonunda numunelerin %100 suya doymuş olduğu kabul edilerek, nihai boşluk oranı

$$e_n * S = W_n * G_s$$

ilişkisinden saptanmıştır. Numune yüksekliği deney hücresi alt parçasının poroz taştan sonra kalan kısmı kadar (70mm) ve tüm deneyler için sabittir. Numunelerin başlangıç boşluk oranının değeri,

$$\Delta H/H_0 = \Delta e/(1+e_0)$$

ilişkisinden saptanmış, ayrıca her yük kademesi sonundaki boşluk oranı değerleri de benzer şekilde hesaplanmıştır. Çizelge 5.3'de D5 no.lu deney için bütün yükleme kademeleri sonundaki hesaplanan boşluk oranı değerleri verilmiştir.

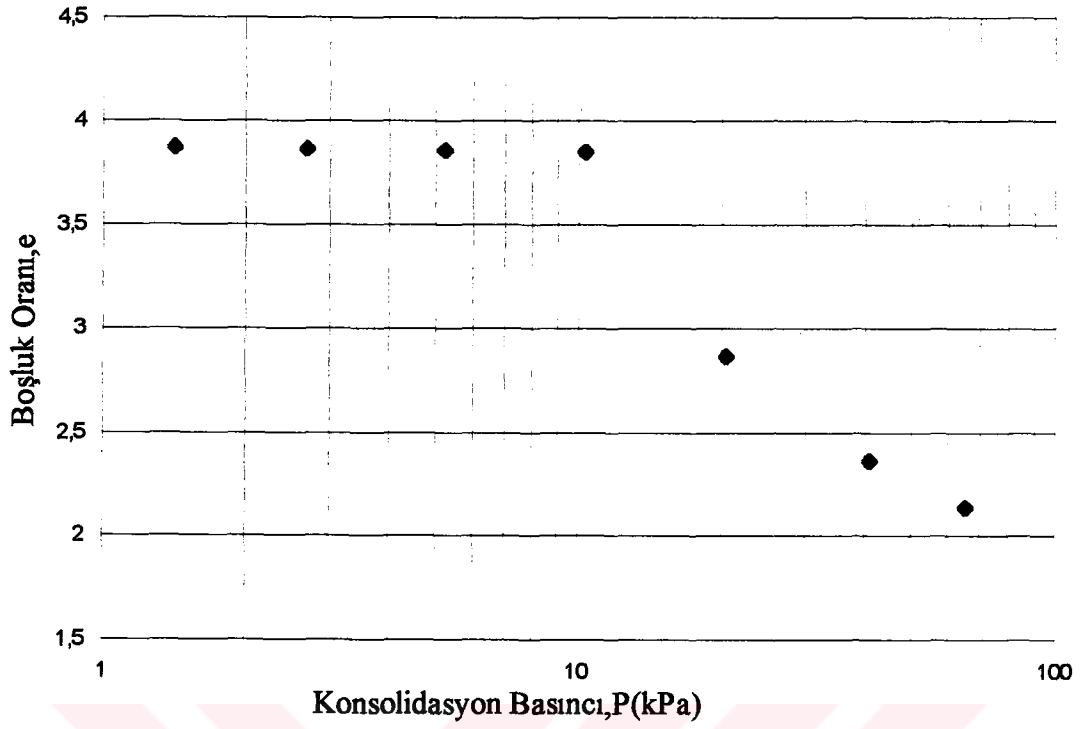
Çizelge 5.3 Konsolidasyon basıncı ile boşluk oranının değişimi(Deney No:D55)

Basıncı(kPa)	$\Delta H = \Delta h_1 - \Delta h_2$	$\Delta e = 0.0696 * \Delta H$	e
0	0	0	$e_0=3.871$
1.41	0.067	0.0047	3.8663
2.68	0.064	0.0045	3.8618
5.24	0.048	0.0033	3.8585
10.33	0.089	0.0062	3.8523
20.52	14.227	0.9902	2.8621
40.9	7.143	0.4972	2.3649
65.1	3.10	0.2158	2.14

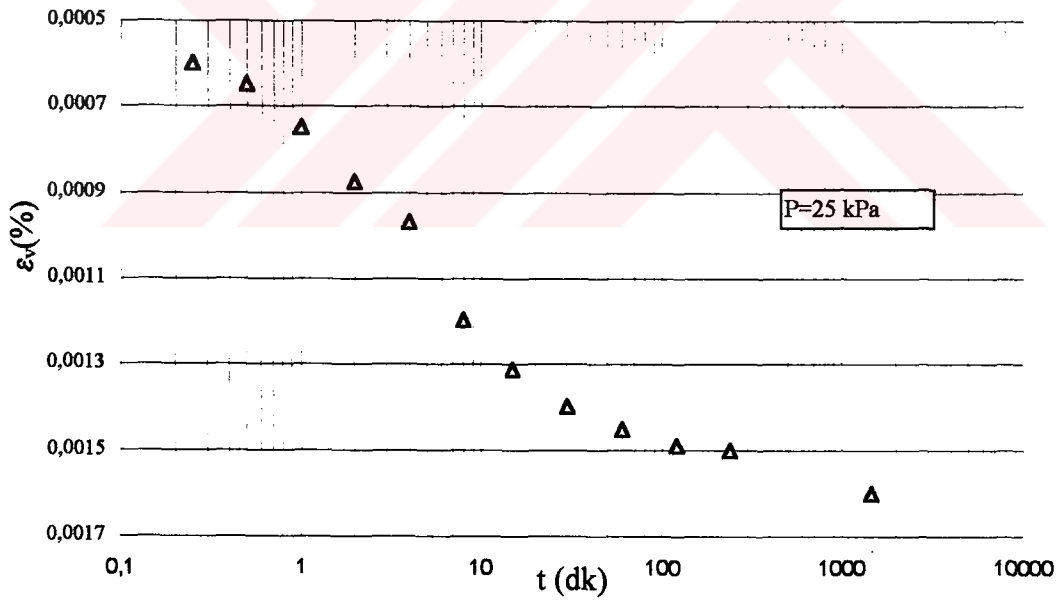
Bulunan boşluk oranları ile uygulanan basınç kuvvetleri arasındaki değişim D55 deneyi için Şekil 5.5'te gösterilmiş, diğer deneylerin sonuçları ekler bölümünde verilmiştir.

5.1.3 Ödometre deneyleri

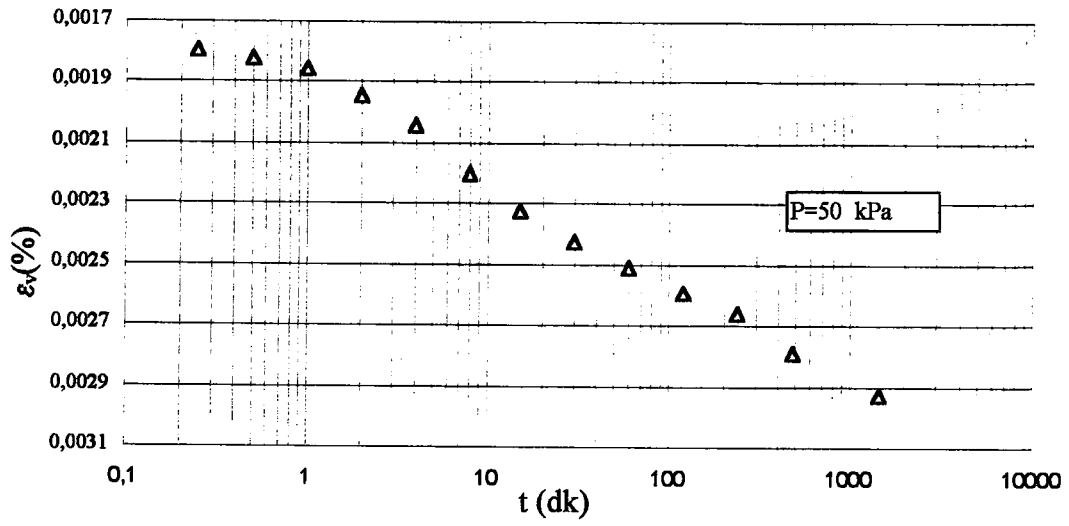
Konsolidasyon deneyi sonunda sedimentasyon ve konsolidasyon deney aletinden çıkarılan blok zemin numunesinden hazırlanan bir numune üzerinde geleneksel ödometre deneyi yapılmıştır. Gerçekleştirilen ödometre deneyleri ile ilgili bilgiler Çizelge 5.4'de verilmiştir. D555 deneyi için numunede oluşan birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi iki her yük kademesi için Şekil 5.6'da gösterilmiş, bütün diğer deney sonuçları ekler bölümünde verilmiştir.



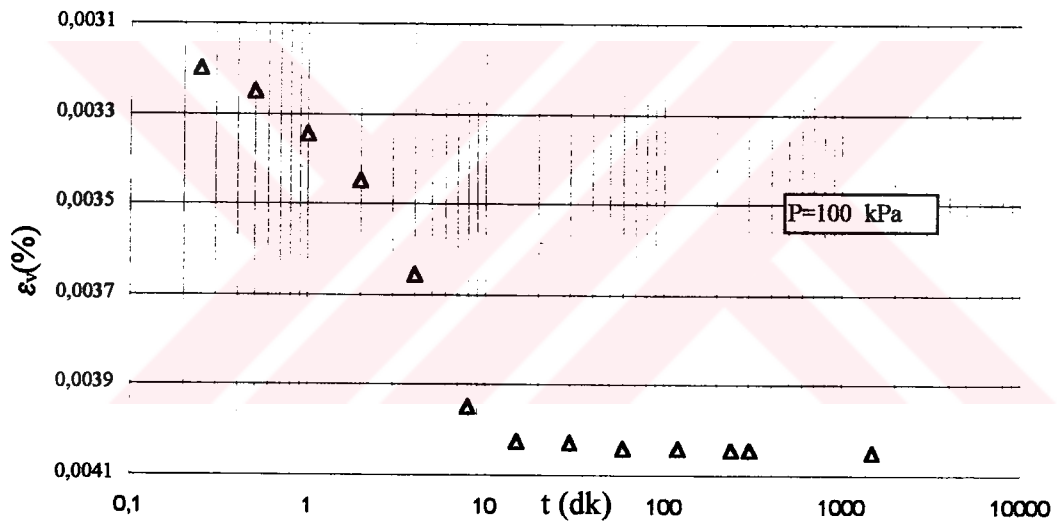
Şekil 5.5 Boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi (Deney No: D55)



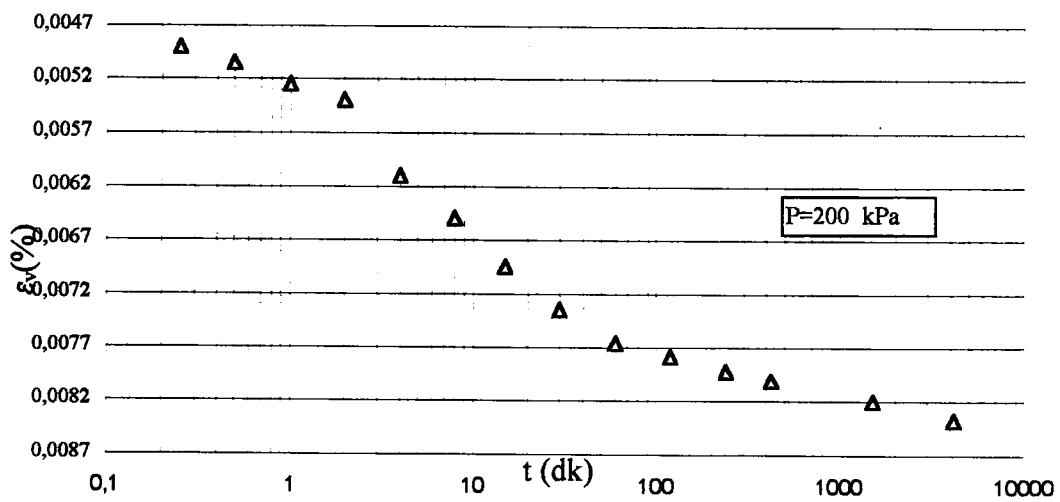
(a)



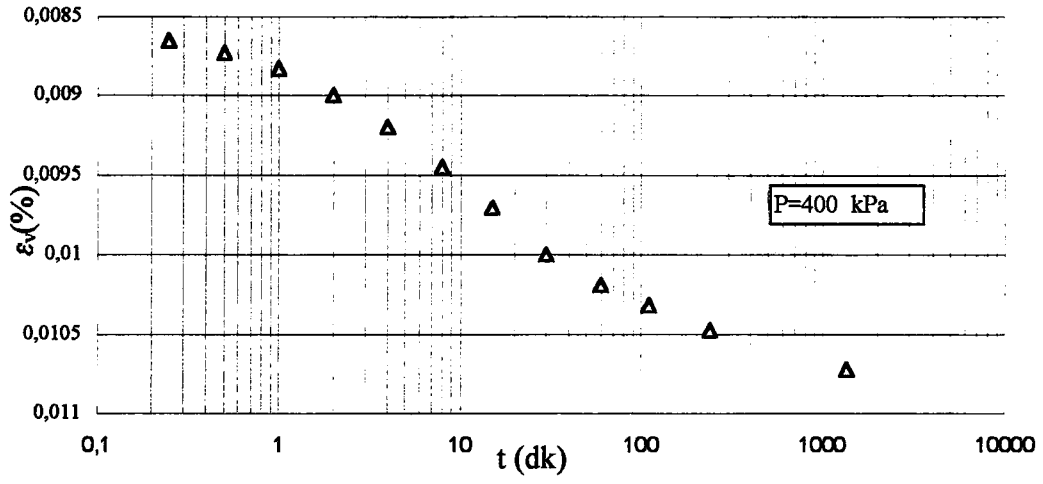
(b)



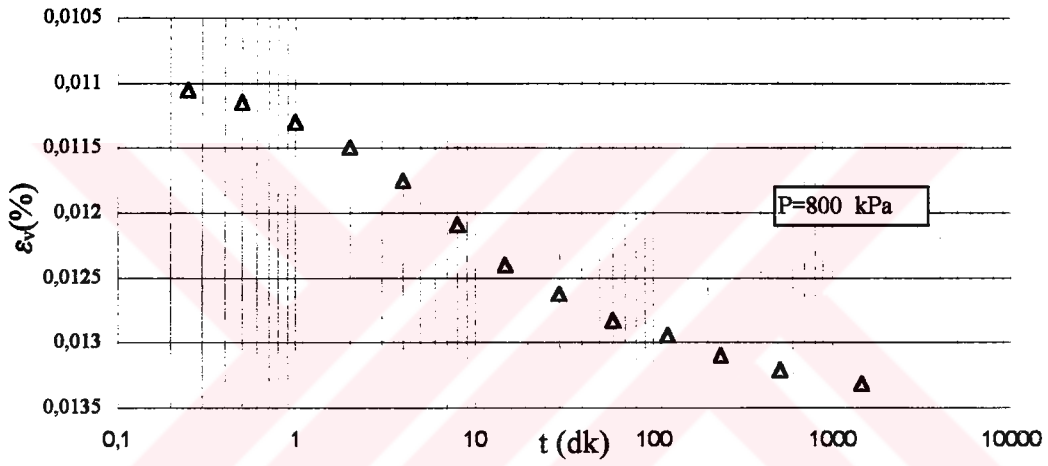
(c)



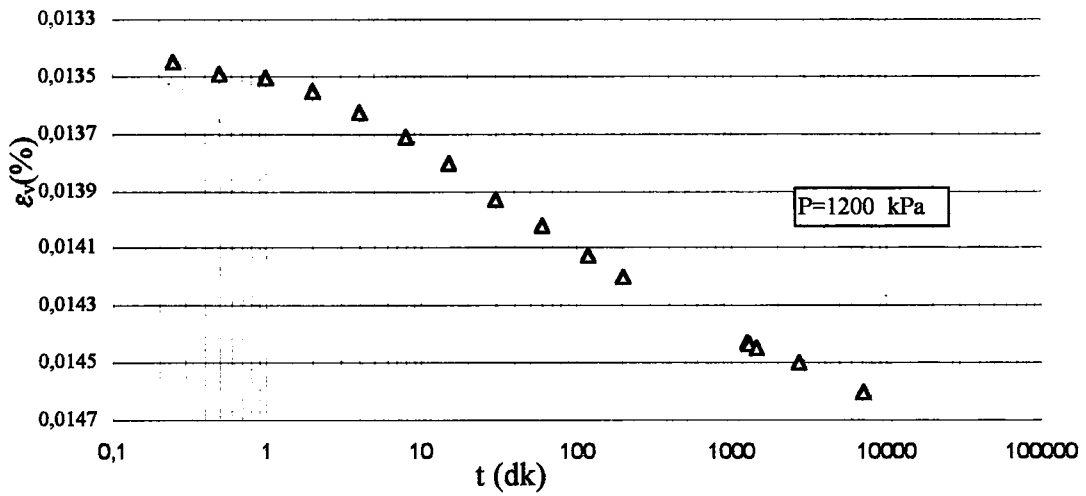
(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 5.6 Her yük kademesinde birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimleri(Deney No:D55)

(2) Bütün deneyler için başlangıç su muhtevası Çizelge 5.2’de nihai su muhtevası kolonunda verilmiştir

Nihai yük kademesi altında konsolidasyon tamamlandıktan sonra, numuneler üzerindeki yük kademeli olarak boşaltılmıştır. Ödometre deneylerinde ölçülen nihai birim boy kısalması miktarları kullanılarak, her yük kademesindeki boşluk oranı değişimleri hesaplanmış ve boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi elde edilmiştir. D555 deneyinde elde olunan boşluk oranı-konsolidasyon basıncı eğrisi Şekil 5.7’de gösterilmiş, diğer deney sonuçları ekler bölümünde verilmiştir. Bu değerler kullanılarak numunenin boşluk oranı ile uygulanan yük değişimi çizilmiş ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

$$H_{\text{su yük.}} = H_o - (h_1 + H_{\text{tortu}})$$

formülü kullanılarak hesaplanmış ve zamana bağlı olarak değişimi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

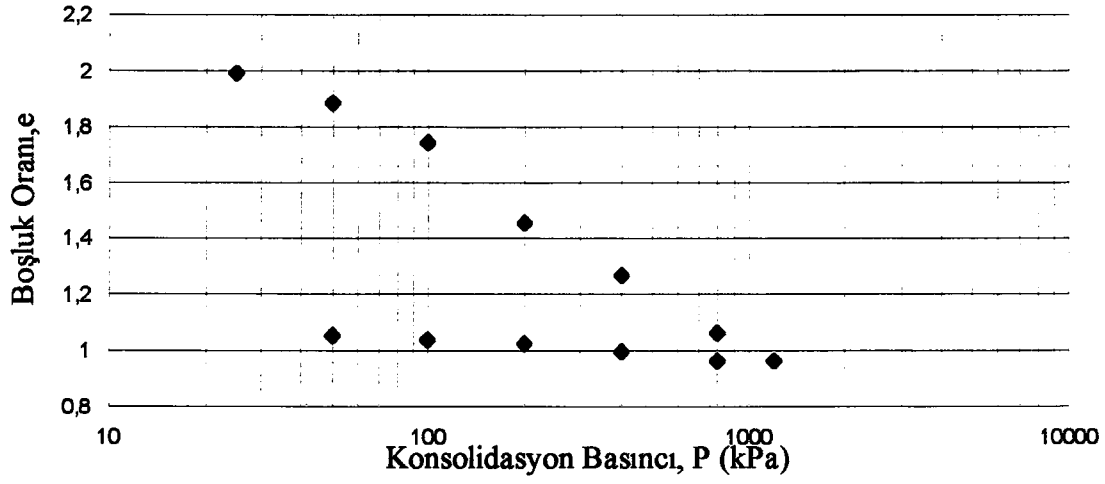
5.2 Drenajsız Deney Sonuçları

5.2.1 Sedimentasyon deneyleri

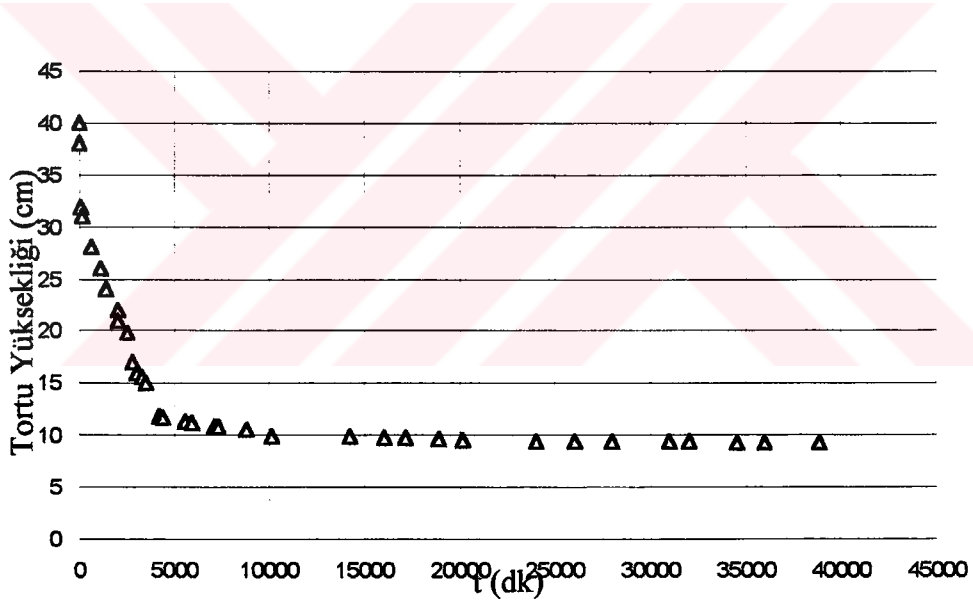
Alt kısımdan su çıkışına izin verilmeden yapılan bu deneyde h_1 ve h_3 okumaları (Şekil 4.3) yapılmıştır. Böylece tortu yüksekliği,

$$H_{\text{tortu}} = H_o - h_3 \quad (5.1)$$

formülü kullanılarak hesaplanmış ve zamana bağlı olarak değişimi D8 nolu deney için Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Ödometre deneyinde boşluk oranının konsolidasyon değişimi (Deney No: D555)

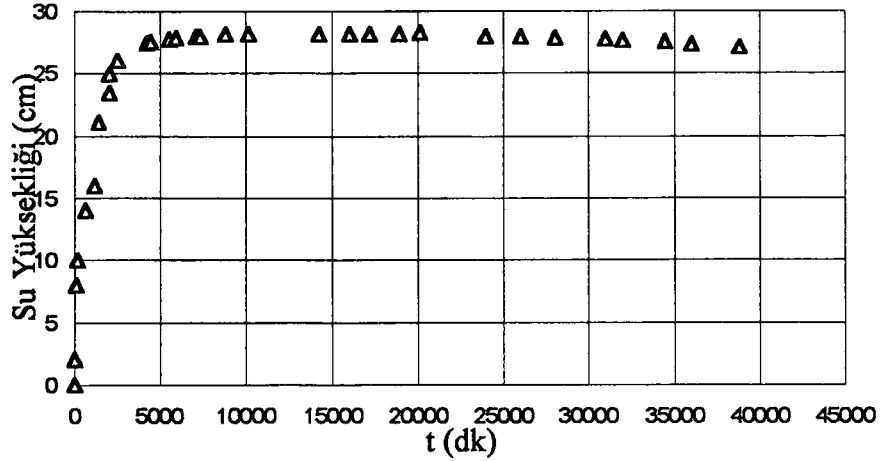


Şekil 5.8 Tortu yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (Deney No: D8)

Arayüzey oluştuktan sonra tortu kısmın üzerinde biriken suyun yüksekliği ise,

$$H_{su\ yük.} = H_o - (h_l + H_{tortu}) \quad (5.2)$$

formülü kullanılarak hesaplanmış ve zamana bağlı olarak değişimi D8 nolu deney için Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

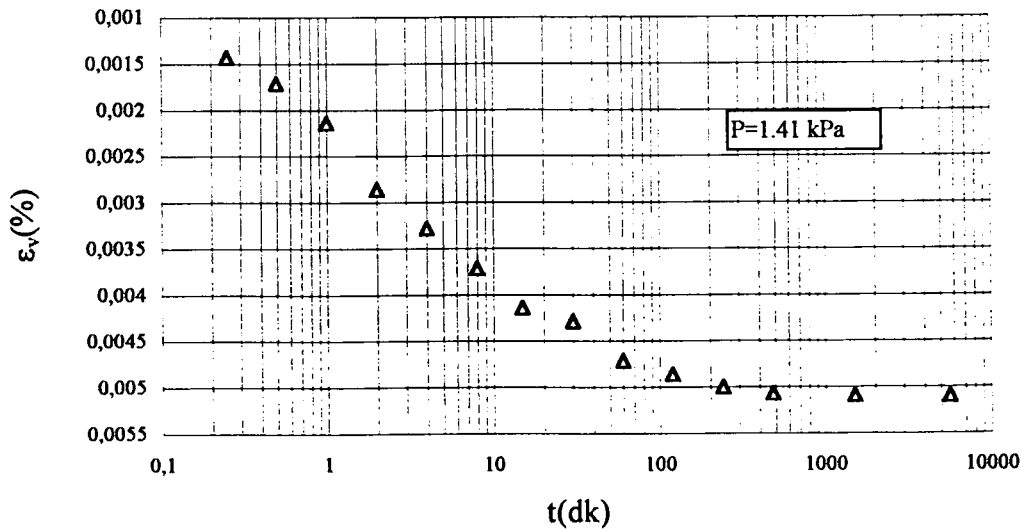


Şekil 5.9 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (Deney No:D8)

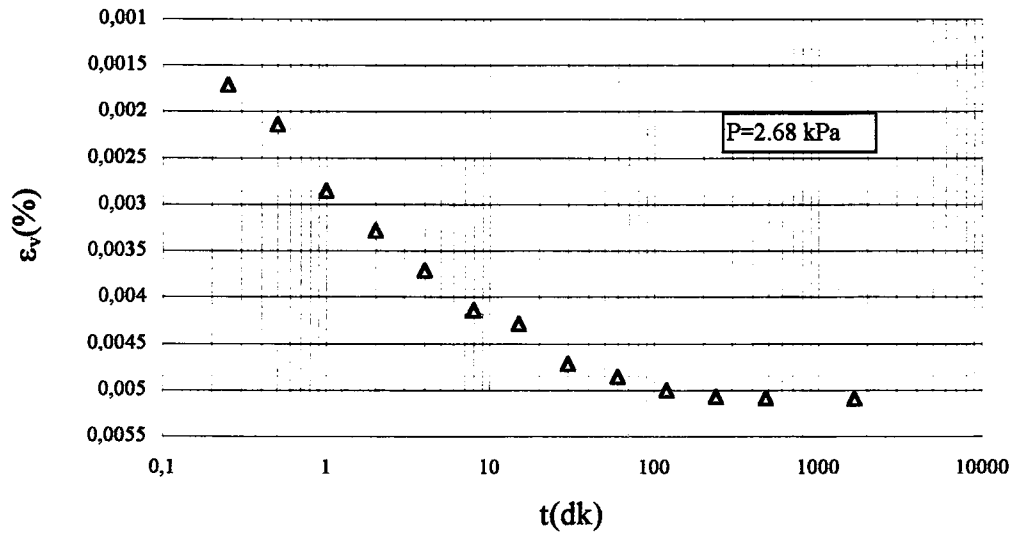
Drenajsız olarak yapılan diğer bir deney olan D4 deneyi çizilen grafikleri ise ekler kısmında verilmiştir.

5.2.2 Konsolidasyon deneyleri

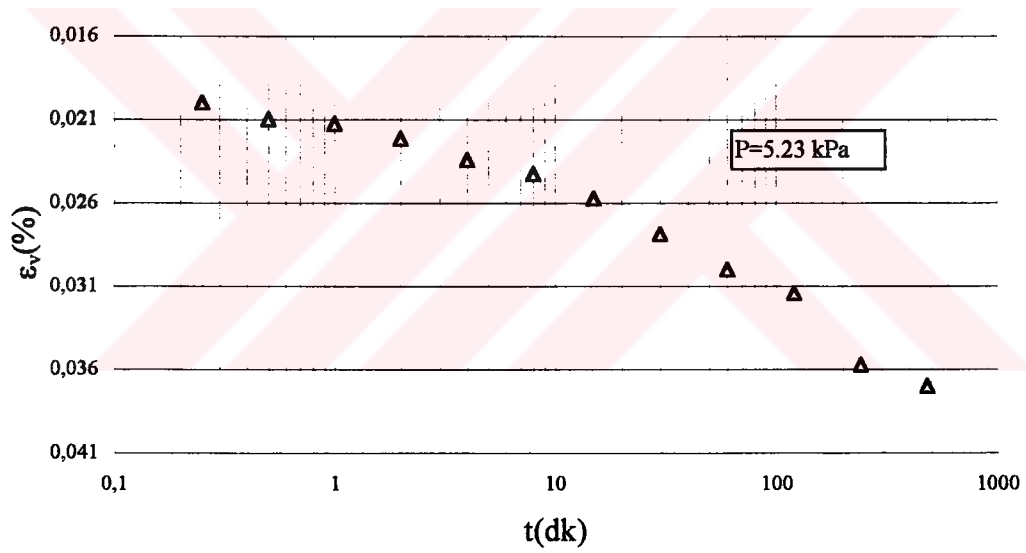
Sedimentasyon sonunda numunelerin su muhtevası saptanmış ve Çizelge 5.1'de verilmiştir. Daha sonra deney aletinin alt kısmındaki numune üzerine ağırlıklar konularak kademeli olarak konsolide olması sağlanmıştır (Çizelge 5.2'de D44 ve D88 nolu deneyler). Her bir yükleme kademesinde oluşan sıkışma miktarları ölçülmüş ve zamana bağlı olarak çizilmiştir. Şekil 5.10, D88 nolu deney için her yük kademesinde ölçülen birim sıkışma-zaman eğrileri gösterilmiştir. D44 deneyi sonuçları ekler bölümünde verilmiştir.



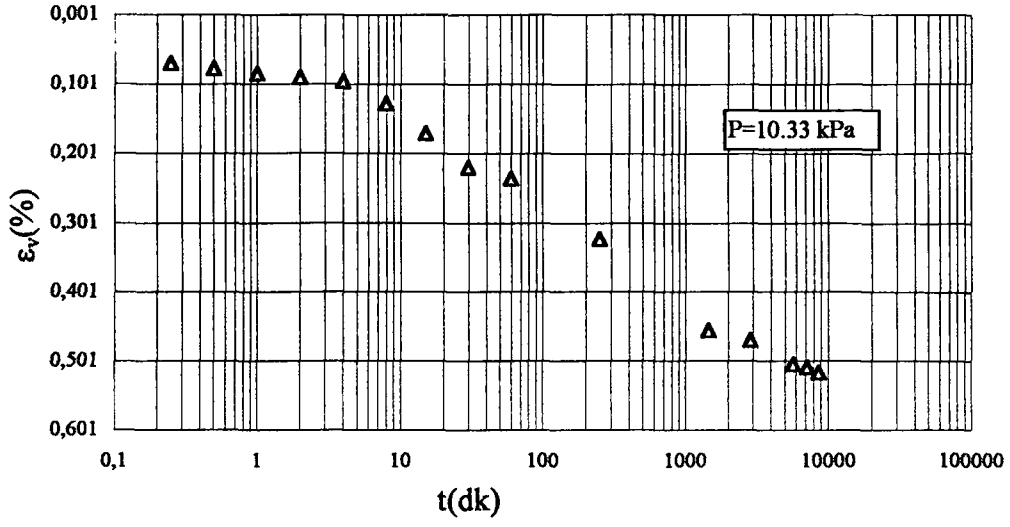
(a)



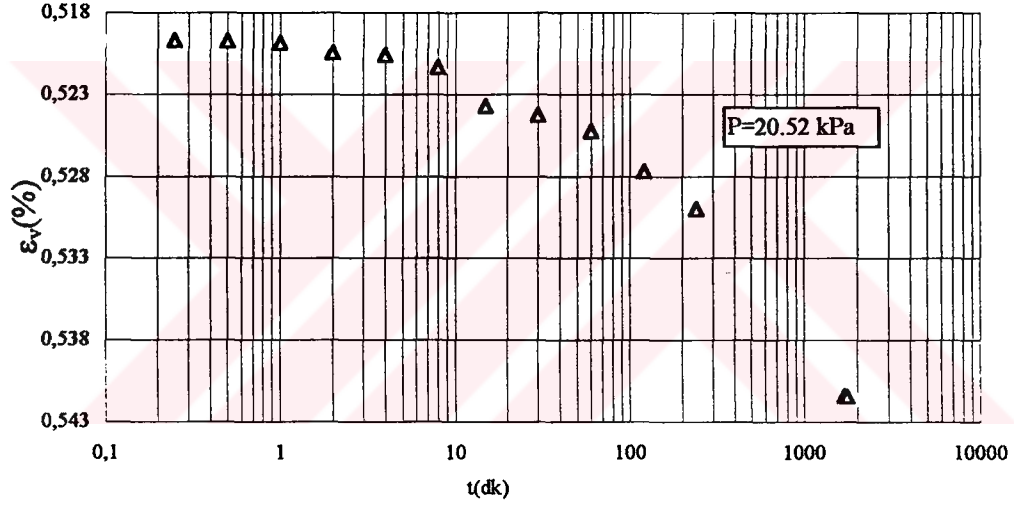
(b)



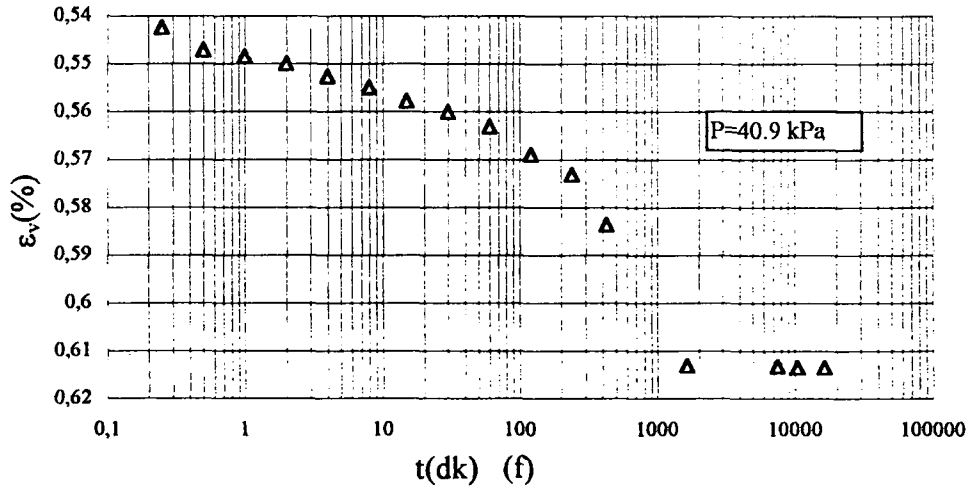
(c)



(d)



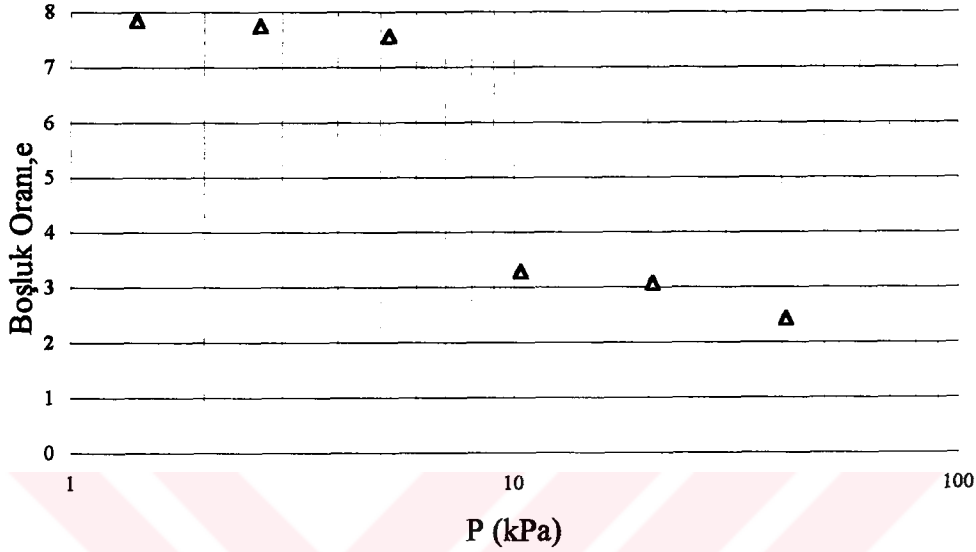
(e)



(f)

Şekil 5.10 Her bir yük kademesi için sıkışma miktarlarının zamana bağlı değişimi (Deney No:D88)

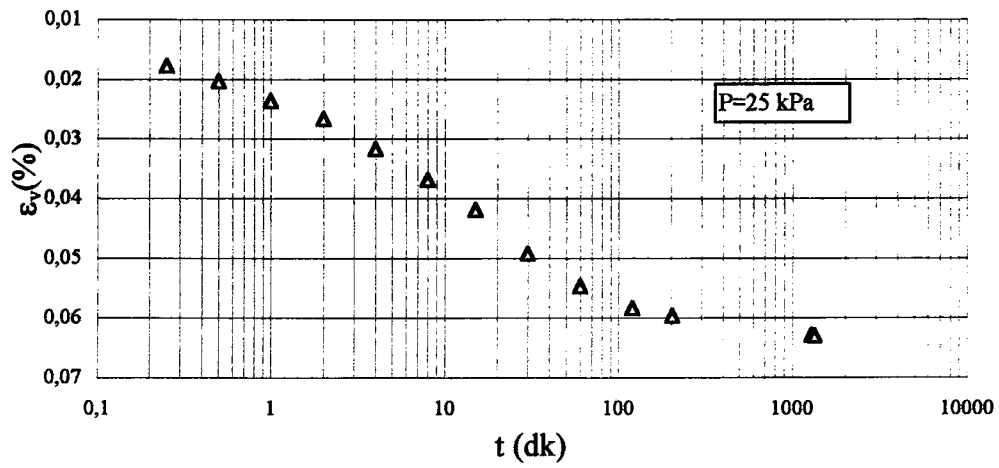
Konsolidasyon deneyi sonunda numunelerin %100 suya doygun olduğu kabul edilerek nihai boşluk oranı ve her yükleme kademesi sonundaki boşluk oranları hesap edilmiştir. D88 deneyi için elde olunan boşluk oranı-konsolidasyon basıncı Şekil 5.11’de gösterilmiş, D44 deneyi ile ilgili sonuçlar ekler bölümünde verilmiştir.



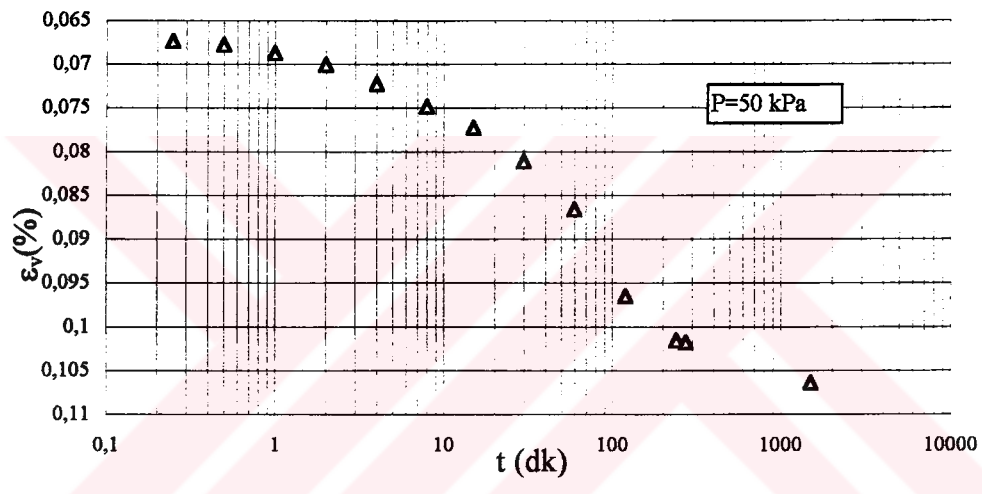
Şekil 5.11 Boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi (Deney No: D88)

5.2.3 Ödometre deneyleri

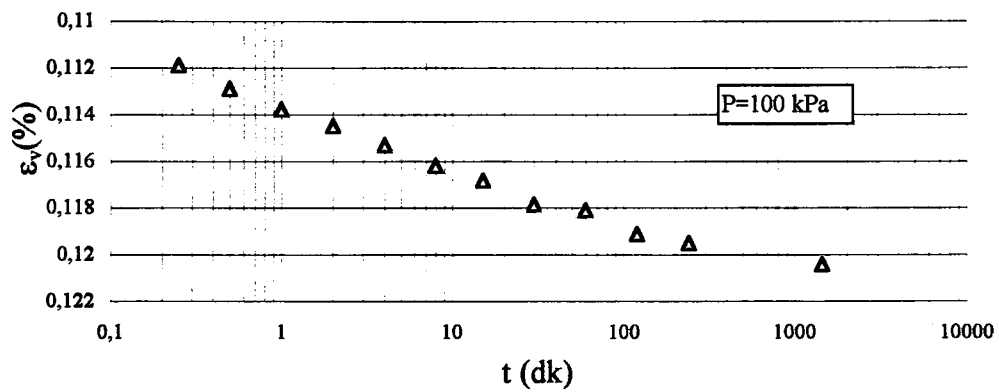
Konsolidasyon deneyi sonunda sedimentasyon ve konsolidasyon deney aletinden çıkarılan blok numunelerden hazırlanan bir numune üzerinde standart ödometre deneyi yapılmıştır. Yapılan ödometre ile ilgili bilgiler Çizelge 5.4’te verilmiştir (D444 ve D888 nolu deneyler). D888 deneyinde her yük kademesinde ölçülen birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir. D44 nolu deney ile ilgili sonuçlar ekler bölümünde verilmiştir.



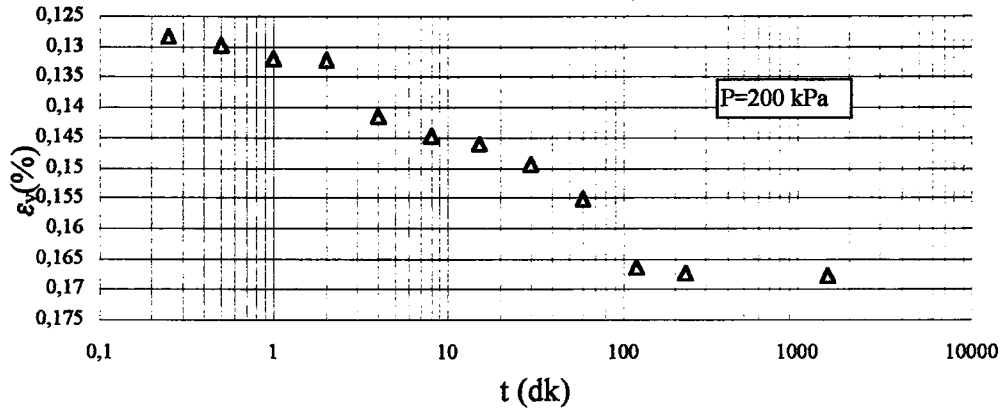
(a)



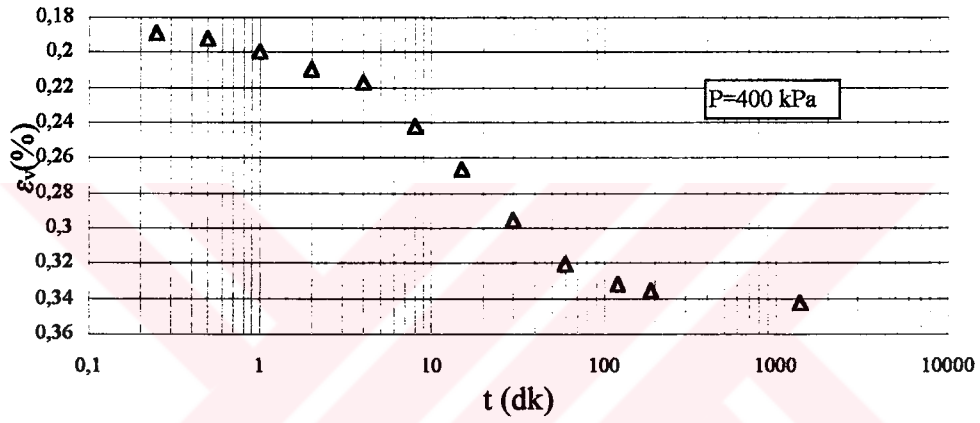
(b)



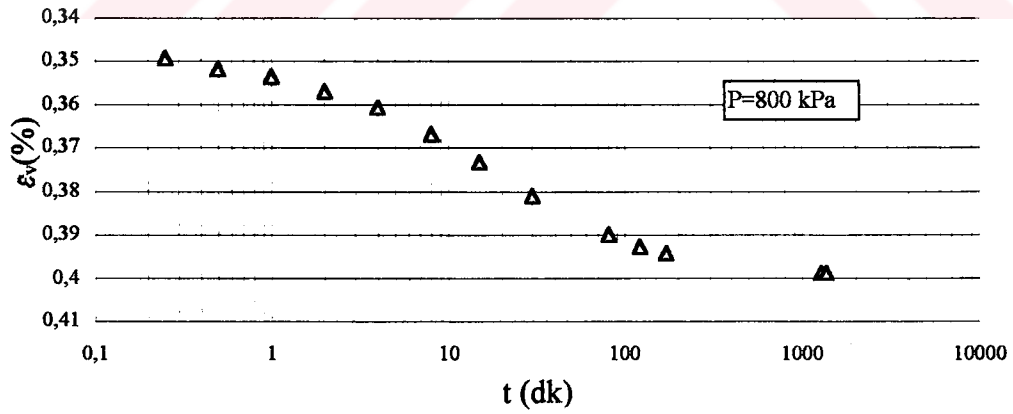
(c)



(d)



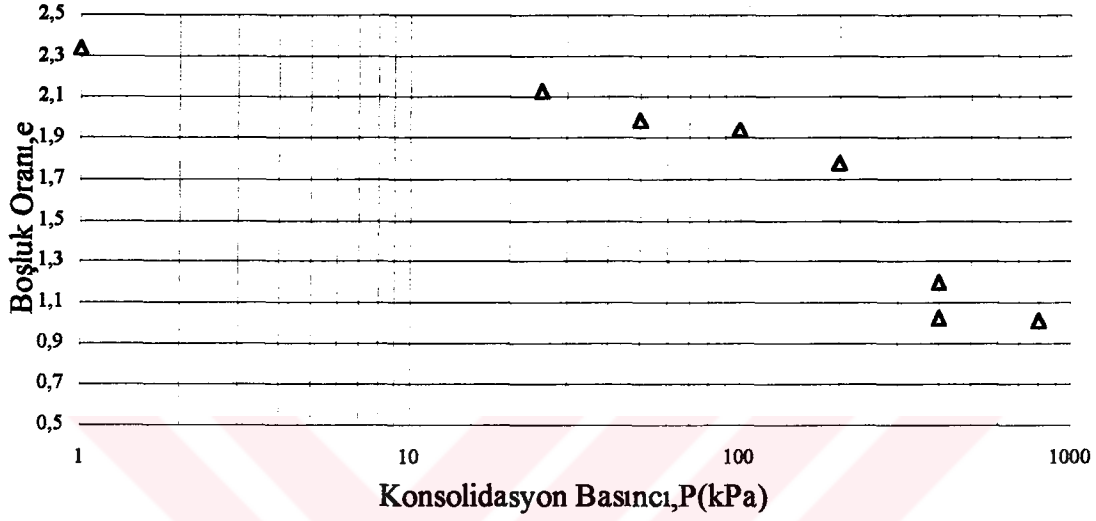
(e)



(f)

Şekil 5.12 Ödometre deneyinde değişik yük kademelerindeki sıkışma miktarlarının zamanla değişimi(Deney No:D888)

Ödometre deneyinde her yük kademesinde konsolidasyonun tamamlanmasından sonra nihai boşluk oranları hesaplanmıştır. D888 nolu deneyde elde olunan boşluk oranı-konsolidasyon basıncı ilişkisi Şekil 5.13'te gösterilmiş, D444 deneyi ile ilgili sonuçlar ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 5.13 Ödometre deneyinde boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi (Deney No: D888)

Çizelge 5.4. Yapılan Ödometre Deneyleri

Deney No	Nihai Numune Kalınlığı (mm)	Nihai Su Muhtevası (%)	Yükleme Kademeleri (kPa)
D5	13.167	38.93	25, 50, 100, 200, 400, 800, 1200
D6	14.1736	38	25, 50, 100, 200, 400, 800, 1200
D7	10.9658	21	25, 50, 100, 200, 400, 800
D8	12.12	20	25, 50, 100, 200, 400, 800

6. ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada Haliç Islah Projesi kapsamında taranan ve özel olarak hazırlanmış bir depolama sahasında sulu bulamaç halinde pompalanan Haliç Dipsel Çamuru'nun davranışını tahmin edebilmek amacı ile deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla depolama sahasındaki sulu çamurun çökeltme-kendi ağırlığı altında konsolidasyon- sürşarj yükü altında konsolidasyon evrelerini laboratuarda modellemek için geliştirilen bir aygıt ve standart ödometre aleti kullanılarak araziden alınmış numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır.

Birinci aşama deneylerde, iki ayrı parçadan oluşan özel çökeltme-kendi ağırlığı altında konsolidasyon aletinde sulu çamur numunelerinin önce çökmesi daha sonra sıkışması zamana bağlı olarak gözlenmiştir. Alt yüzeyinin drenajlı veya drenajsız olması durumu için ayrı ayrı deneyler yapılmış ve numuneden çıkan su miktarı da zamana bağlı olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada, deney aletinin üst parçası çıkarılarak, diğer kısmı üzerine kademeli olarak sürşarj yükleri uygulanmış ve her yük kademesinde sıkışma-zaman davranışı ile sıkışma-gerilme ilişkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise iki aşama sonunda elde olunan blok zemin numunesinde hazırlanan örnekler üzerinde standart ödometre deneyleri uygulanmıştır. Her üç deney aşamasında gözlenen sıkışma-zaman ve sıkışma-gerilme davranışlarını grafikler halinde 6. Bölümde sunulmuştur.

6.1 Sedimentasyon ve Kendi Ağırlığı Altında Konsolidasyon

Kendi ağırlığı altında konsolide olan bir zemin kolonunda yükseklik boyunca efektif gerilme değişimi bilinmemektedir. Kullanılan deney düzeneğinde bu efektif gerilmelerin doğrudan ölçülmesi mümkün olmadığı için, deney sırasında oluşan ortalama efektif gerilmenin yapılan ölçümlerden belirlenen boşluk oranı ve permeabilite değerlerinden yararlanılarak tahmini (hesaplanması) yoluna başvurulmuştur. Konsolide olan bir kil çökeltinde efektif gerilme-boşluk oranı ($\sigma'-e$) ve permeabilite-boşluk oranı ($k-e$) arasında ilişkiler olması beklenilir. Literatürde bu tür ilişkiler konusunda bir çok öneriler olmakla birlikte, bu çalışmada Somonyi (1979) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntılardan yararlanılmıştır.

$$e = A * \sigma^B \quad (5.1)$$

$$k = C * e^D \quad (5.2)$$

Burada A, B, C ve D deneysel olarak belirlenen katsayılardır. Bu çalışmada C ve D katsayıları deneysel ölçümlerden belirlenmiştir. Boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisini elde etmek için, A ve B katsayılarına tahmini değerler verilerek hesaplanan sıkışma-zaman davranışı ölçülen değerlerle karşılaştırılmış ve e- σ ' ilişkisi kalibre edilmiştir.

Kendi ağırlığı altında konsolide olan bir zemin çökelinin sıkışma-zaman davranışının hesaplanmasında, Fox ve Barles (1997) tarafından geliştirilen ve yukarıda verilen (5.1) ve (5.2) bağıntılarını esas alan CS2 isimli bir bilgisayar programından yararlanılmıştır. Bu programda laboratuvar deneylerinden elde olunan σ -e ve k-e ölçümleri veri olarak kullanılmakta ve zamana bağlı oturmalar hesaplanmaktadır.

Şekil 6.1a'da D2 deneyi için deneysel ölçümler ile hesaplanan değerlerin karşılaştırıldığı kendi ağırlığı altında konsolidasyon için sıkışma-zaman grafiği, Şekil 6.1b ve 6.1c'de ise, sırası ile bu hesaplarda kullanılan σ -e ve k-e ilişkileri görülmektedir. D3 deneyi ilgili sonuçlar Şekil 6.2a, 6.2b ve 6.2c'de verilmiştir. Diğer deney sonuçları ile ilgili grafikler ekler bölümünde verilmiştir. Çizelge 5.1'de ise (5.1) ve (5.2) bağıntılarındaki A, B, C ve D katsayılarının deneysel gözlemlerle uyumlu değerleri verilmiştir.

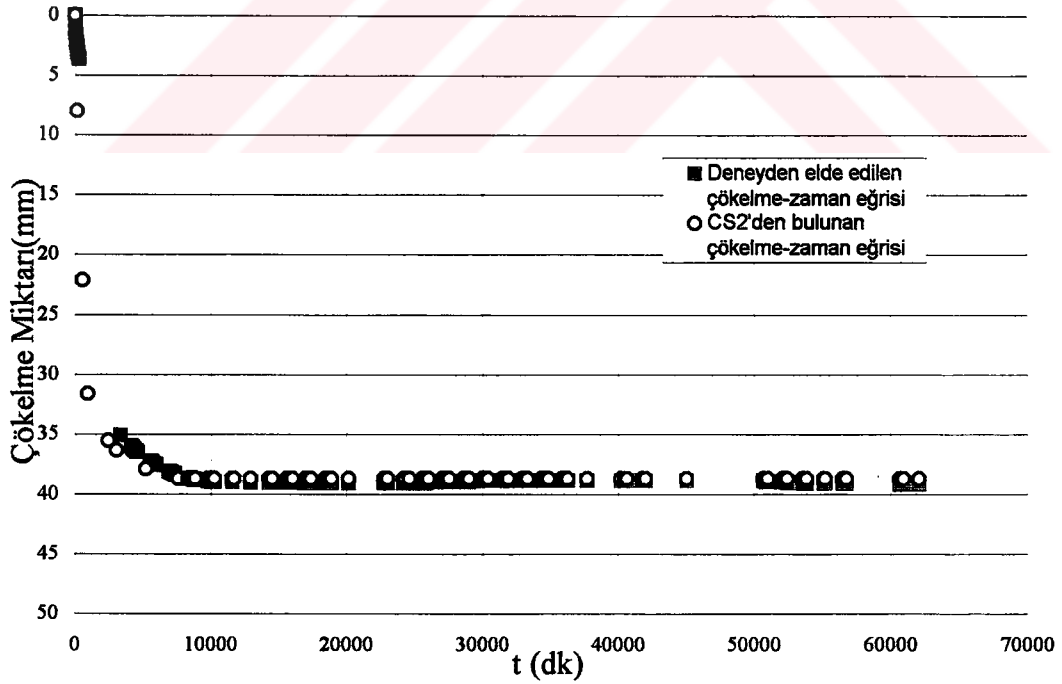
6.2 Sürşarj Yüğü Altında Konsolidasyon

Depolama sahasına sulu çamur şeklinde pompalanmış Haliç Dipsel Çamuru'nun kendi ağırlığı altında bir müddet konsolide olduktan ve yüzeyinde kuruma ve desikasyon sonucu bir bir kabuk tabakası oluştuktan sonra üstünün bir örtü tabakası ile kaplanma ve çamur depolama sahasının bir rekreasyon alanına dönüştürülmesi planlanmaktadır. Bu aşamada kalın yumuşak bir zemin tabakası halindeki bu çökellerin sürşarj yükleri altında zamana bağlı sıkışmasını incelemek için önce sedimentasyon deney aletinde sonra standart odometre aletinde konsolidasyon deneyleri yapılmış ve üç aşama deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesine çalışılmıştır. Şekil 6.4, 6.5, 6.6 ve 6.7'de boşluk oranı-konsolidasyon

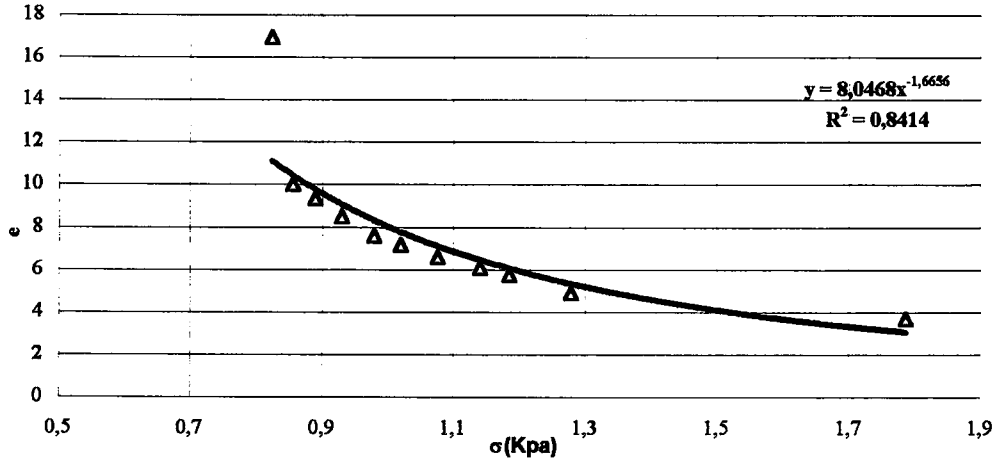
basınç eğrileri, sedimentasyon-kendi ağırlığı altında konsolidasyon-sürşarj yükü altında konsolidasyon deney sonuçları birlikte gösterilerek verilmiştir. Benzer sonuçların daha fazla numune üzerinde tekrarlanması ve arazi ölçümleri ile kalibre edilmesi durumunda, arazideki çamur tabakasının uzun süreli davranışı hakkında gerçeğe yakın öngörülerde bulunulabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 6.1 A, B, C ve D katsayılarının değerleri

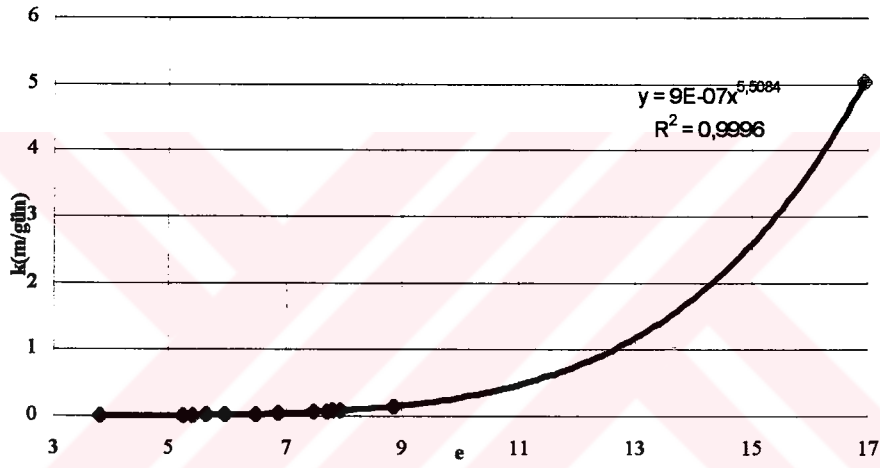
Deney No	A	B	C	D
2	8.046	1.6656	9E-07	5.5084
3	8.0377	1.6798	9E-07	5.5072
5	8.0385	1.6805	9E-07	5.507
6	8.0294	1.6772	9E-07	5.5122



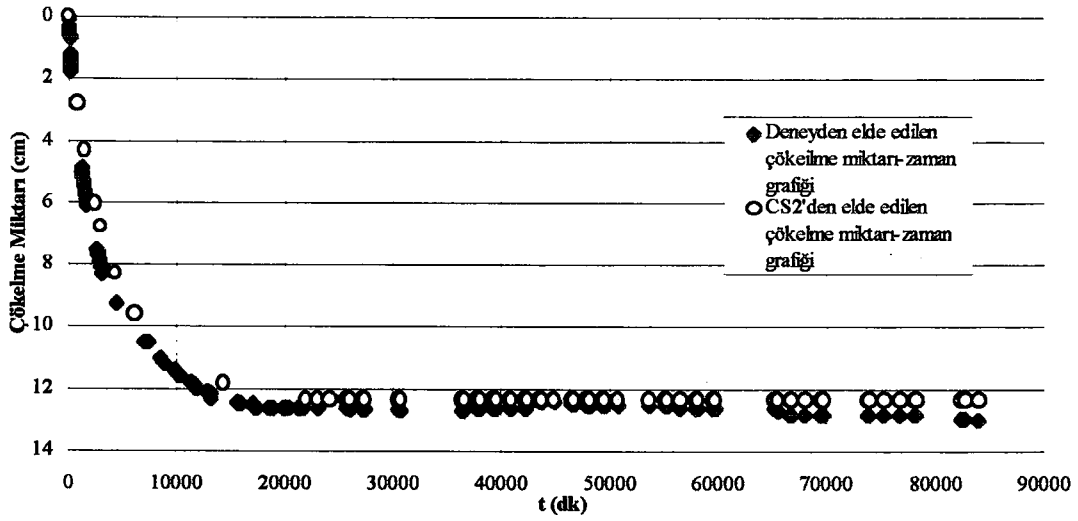
Şekil 6.1a Deney ve CS2 çökme-zaman uyumu(Deney No:2)



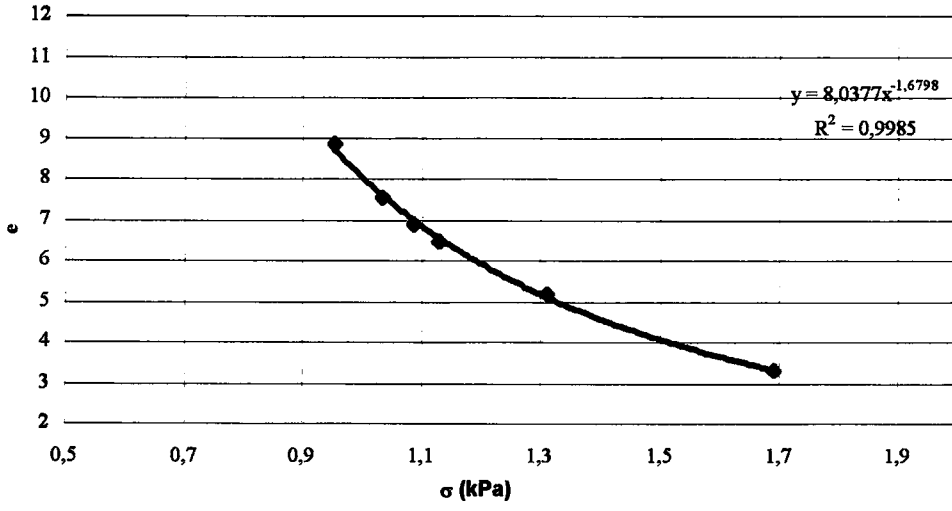
Şekil 6.1b Boşluk oranının efektif gerilme ile değişimi(Deney No:2)



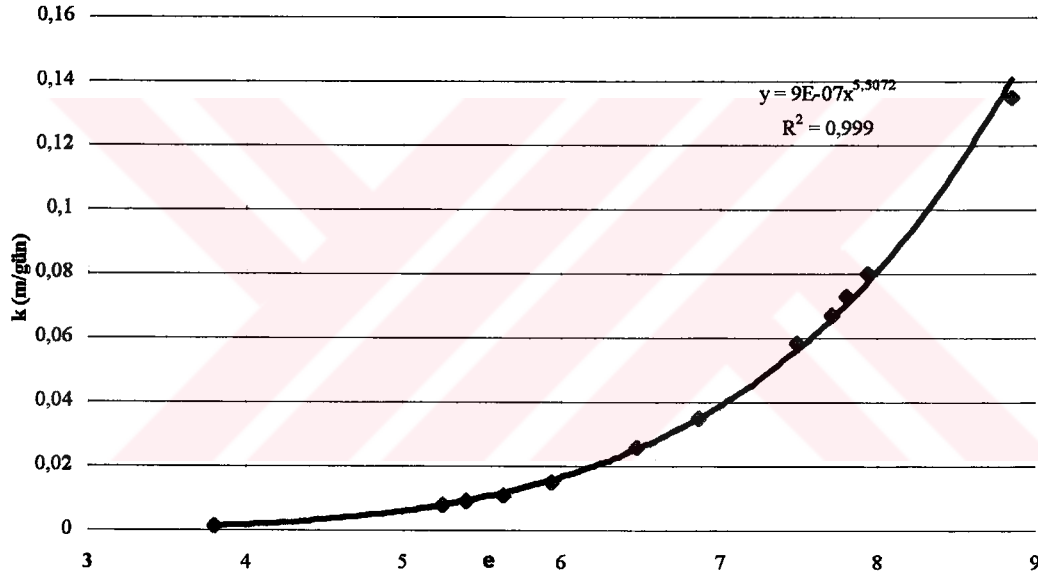
Şekil 6.1c Boşluk oranının permeabilite ile değişimi(Deney No:2)



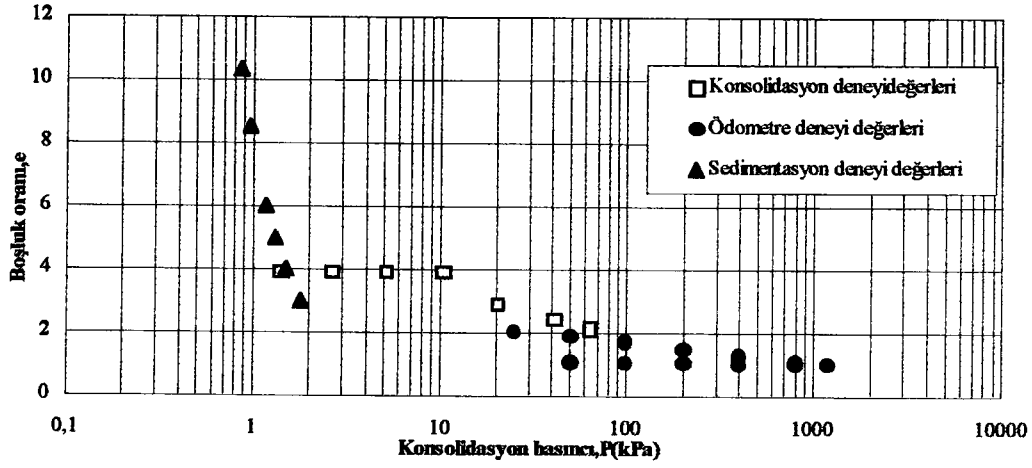
Şekil 6.2a Deney ve CS2 çökeltme-zaman uyumu(Deney No:3)



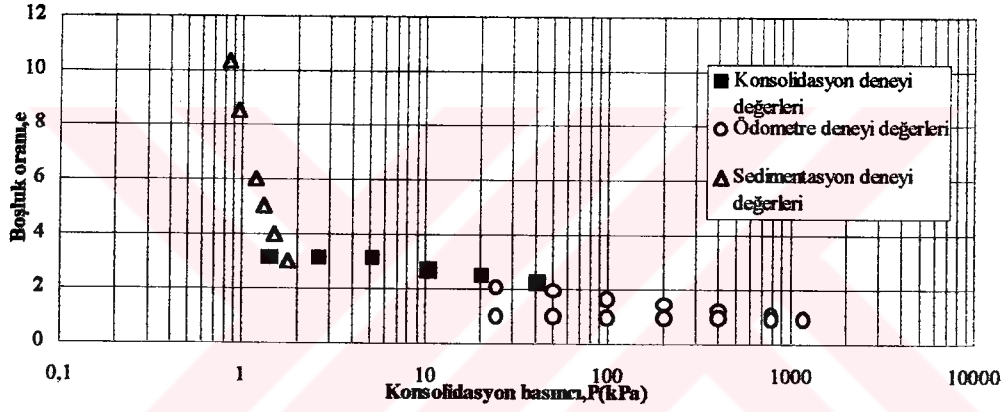
Şekil 6.2b Boşluk oranının efektif gerilme ile değişimi(Deney No:3)



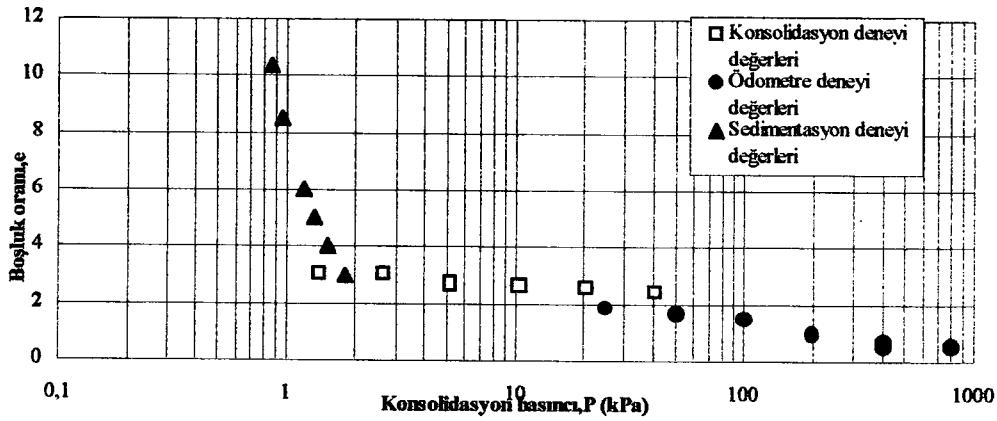
Şekil 6.2c Boşluk oranının permeabilite ile değişimi(Deney No:3)



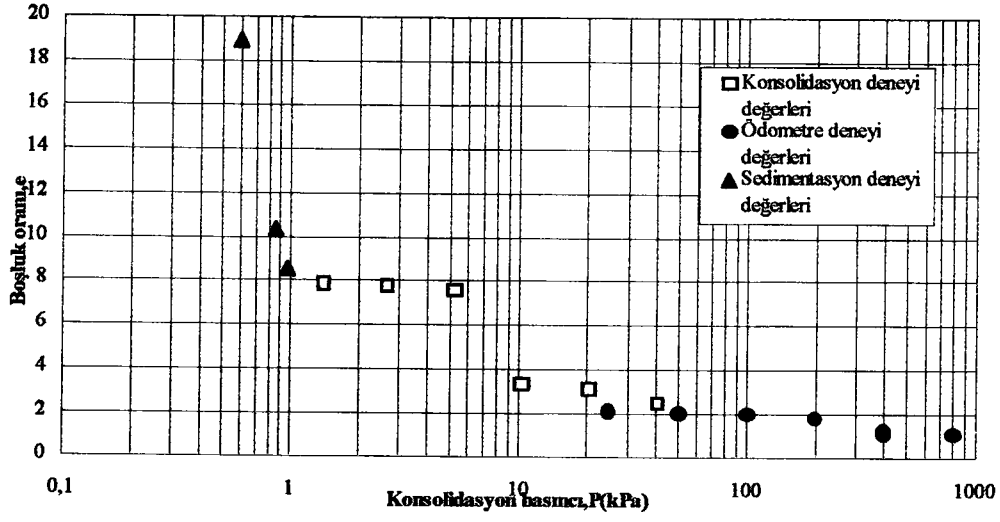
Şekil 6.4 Sedimentasyon, konsolidasyon ve ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı ile konsolidasyon basıncı değişimi (D5 DENEYİ)



Şekil 6.5 Sedimentasyon, konsolidasyon ve ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı ile konsolidasyon basıncı değişimi (D6 DENEYİ)



Şekil 6.6 Sedimentasyon, konsolidasyon ve ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı ile konsolidasyon basıncı değişimi (D7 DENEYİ)



Şekil 6.7 Sedimentasyon, konsolidasyon ve ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı ile konsolidasyon basıncı değişimi (D8 DENEYİ)



KAYNAKLAR

Abu-Hejleh, A.N., Znidarcic, D. ve Barles, B.L., (1996), “ Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4): 295-301.

Akgüner, C., Yıldırım, M., Kılıç, H. ve İpekoğlu, P., (1996), “ Haliç Güncel Çökellerinin Geoteknik Parametreleri” , *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Altıncı Ulusal Kongresi*, 24-25 Ekim 1996, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Fox, P.J. ve Berles, J.D., (1996), “CS2: A Piecewise-Linear Model for Large Strain Consolidation” , *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21: 453-475.

Fox, P.J. ve Baxter, D.P.C., (1997), “ Consolidation Properties of Soil Slurries from Hydraulic Consolidation Test” , *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8): 770-776.

Huerta, A., Kriegsmann, G.A. ve Krizek, R.J., (1988), “ Permeability and Compresibility of Slurries from Seepage-İnduced Consolidation” , *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(5):614-627.

Gibson, R.E., England, G.L. ve Hussey M.J.L., (1967), “ The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays” , *Geotechnique*, 17:261-273.

Lee, K., Choa, V., Lee, S.H. ve Quek, S.H., (1993), “ Constant Rate of Strain Consolidation of Singapore Marine Clay” , *Geotechnique*, 43(3): 471-488.

McVay, A.M. ve Bloomquist, A.M., (1986), “ Quiescent Consolidation of Phosphatic Waste Clays” , *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(2): 1033-1049.

Özaydın, K., Yıldırım, S. ve Yıldırım, M., (1995a), “ Haliç İslah Projesi-Fizibilite Raporu: Birinci Geoteknik Ara Rapor” , *Teknik Rapor*, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Özaydın, K., Yıldırım, S., Yıldırım, M. ve Akgüner, C., (1995b), “Haliç İslah Projesi-Fizibilite Raporu: İkinci Geoteknik Ara Rapor” , *Teknik Rapor*, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Özaydın, K. ve Yıldırım, S., (1995c), “Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu: Üçüncü Geoteknik Ara Rapor”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Özaydın, K., Yıldırım, S., Kılıç, H. ve Akgüner, C., (1995d), “Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu: Dördüncü Geoteknik Ara Rapor”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Özaydın, K., Yıldırım, S. ve Yıldırım, M., “Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu: Dördüncü Geoteknik Ara Rapor”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Pane, V. ve Schiffman, R.L., (1997), “ The Permeability of Clay Suspensions”, Geotechnique, 47(2): 273-288.

Shodja, H.M. ve Feldkamp, J.P., (1993), “ Numerical Analysis of Sedimentation and consolidation by the Moving Finite Element Method, 17: 753-769.

Toorman, E.A., (1996), “ Sedimentation and Self-Weight Consolidation: General Unifying Theory”, Geotechnique, 46(1): 103-113.

Townsend, F.C. ve McVay, M.C., (1990), “ SOA:Large Strain Consolidation Predictions”, Journal of Geotechnical Engineering, 116(2): 222-243.

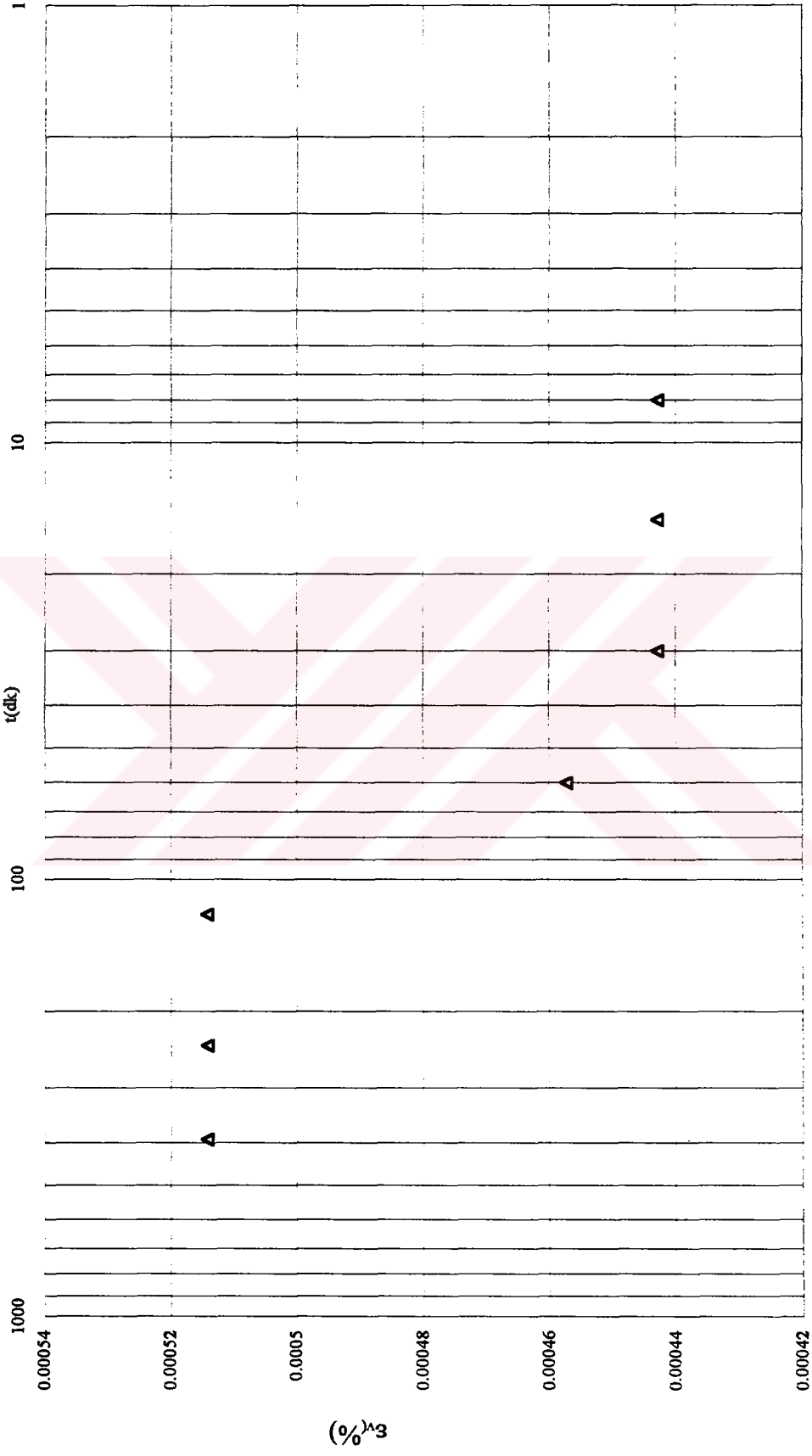
Raymond, N.Y. ve Townsend F.C., (1984), Sedimentation Consolidation Models, American Society of Civil Engineers 345 East 47th street, New York.

EKLER

Ek 1	D1 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları
Ek 2	D2 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları
Ek 3	D2 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları
Ek 4	D3 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları
Ek 5	D3 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları
Ek 6	D4 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları
Ek 7	D4 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları
Ek 8	D6 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları
Ek 9	D6 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları
Ek 10	D6 Ödometre Deneyi Sonuçları
Ek 11	D7 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları
Ek 12	D7 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları
Ek 13	D7 Ödometre Deneyi Sonuçları
Ek 14	D5 Deneyi CS2 Programı Sonuçları
Ek 15	D6 Deneyi CS2 Programı Sonuçları

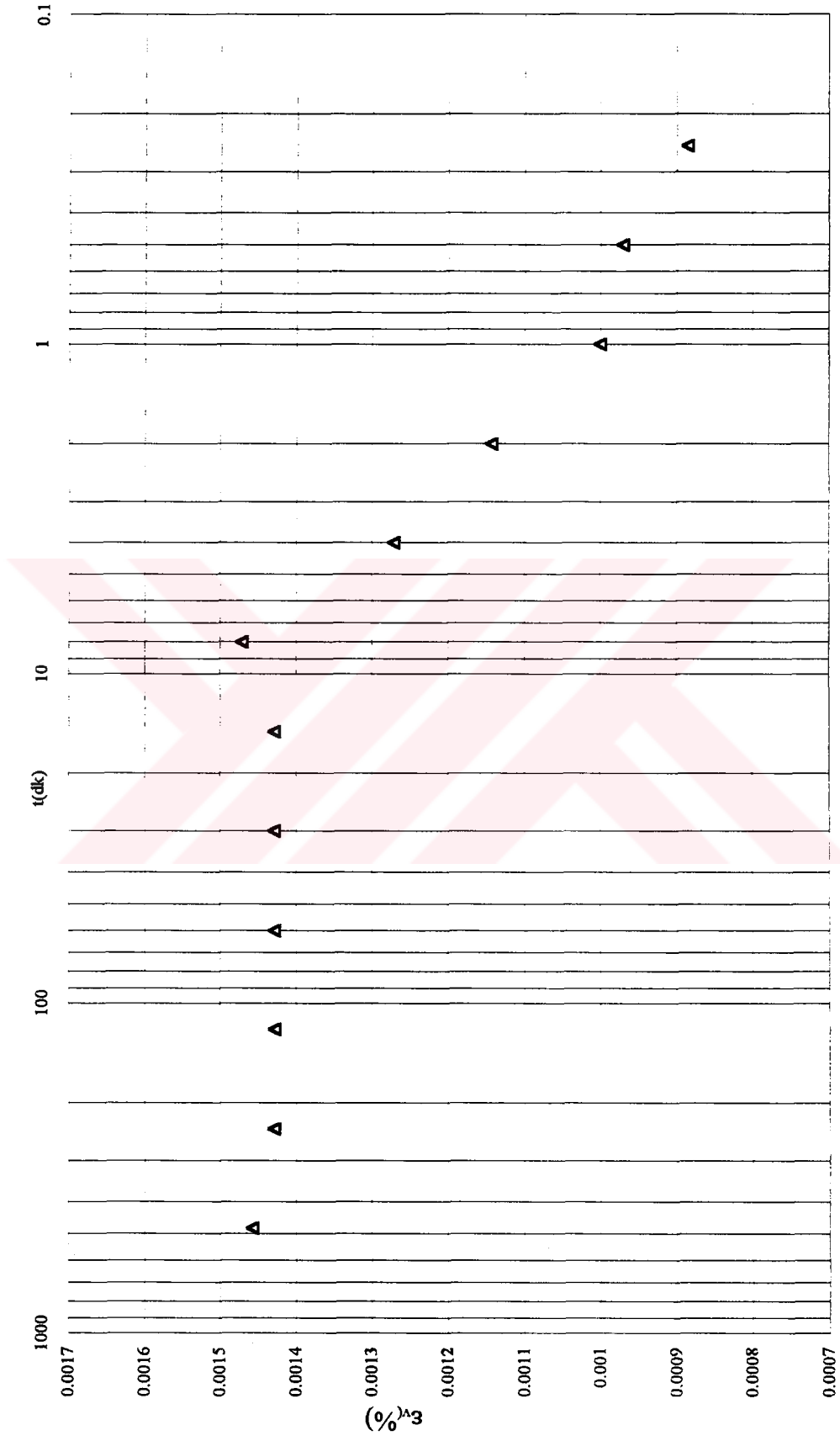


Ek 1 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

DENEY NO:1 $\sigma'_v = 1,41 \text{ kPa}$ 

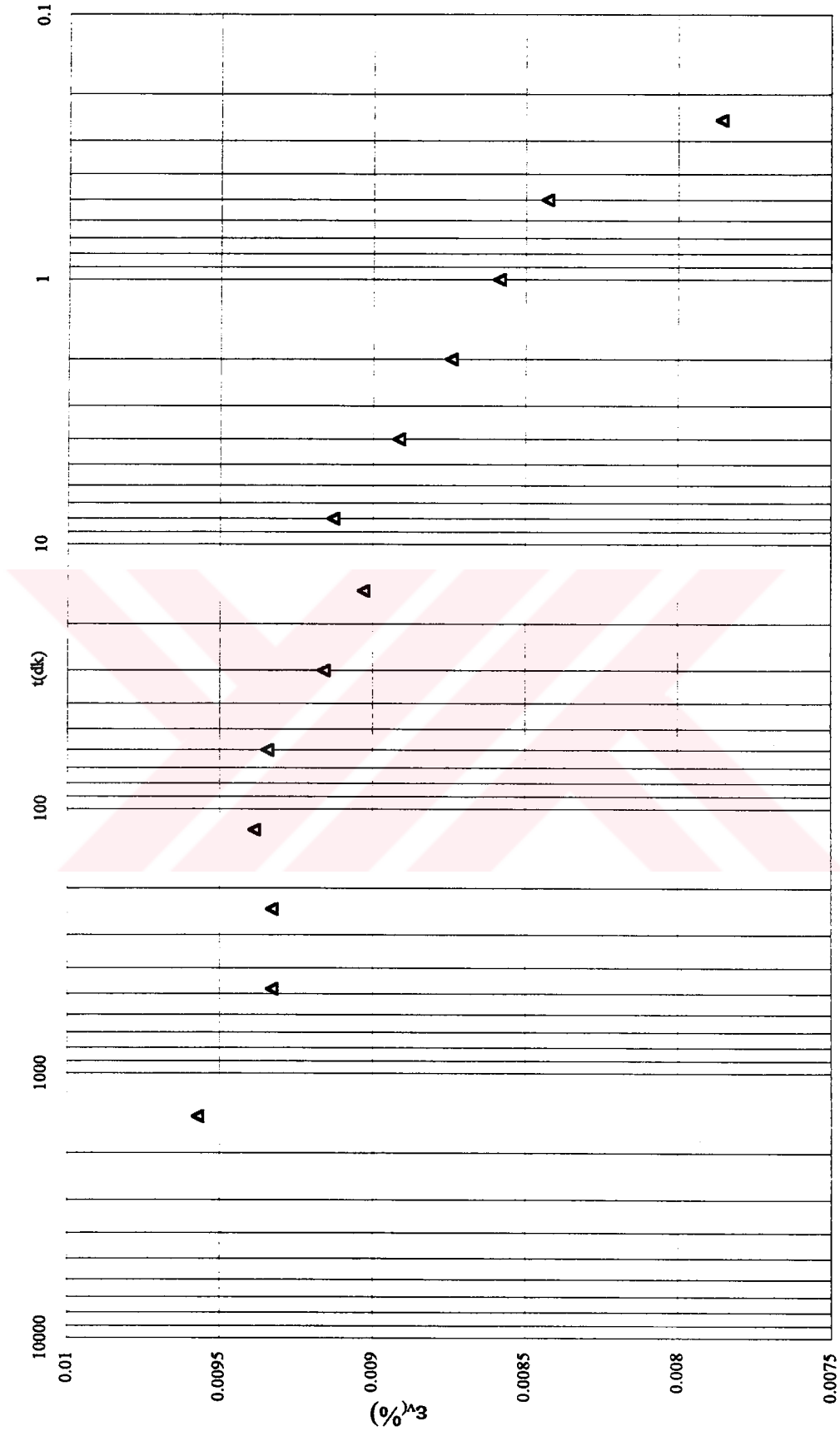
Ek 1.1 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:1 $\sigma'_v = 2,68 \text{ kPa}$



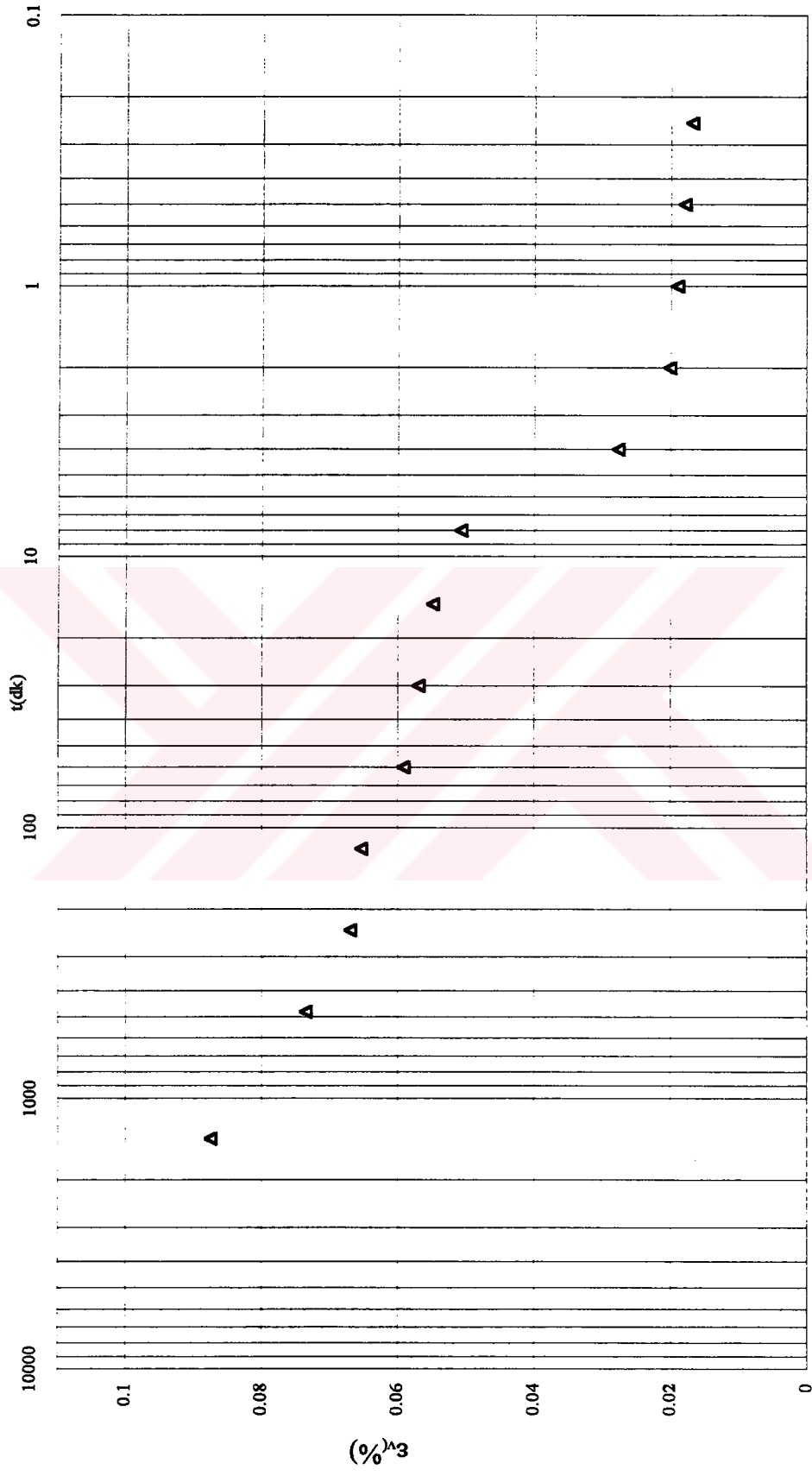
Ek 1.2 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:1 $\sigma'_v = 5,23 \text{ kPa}$



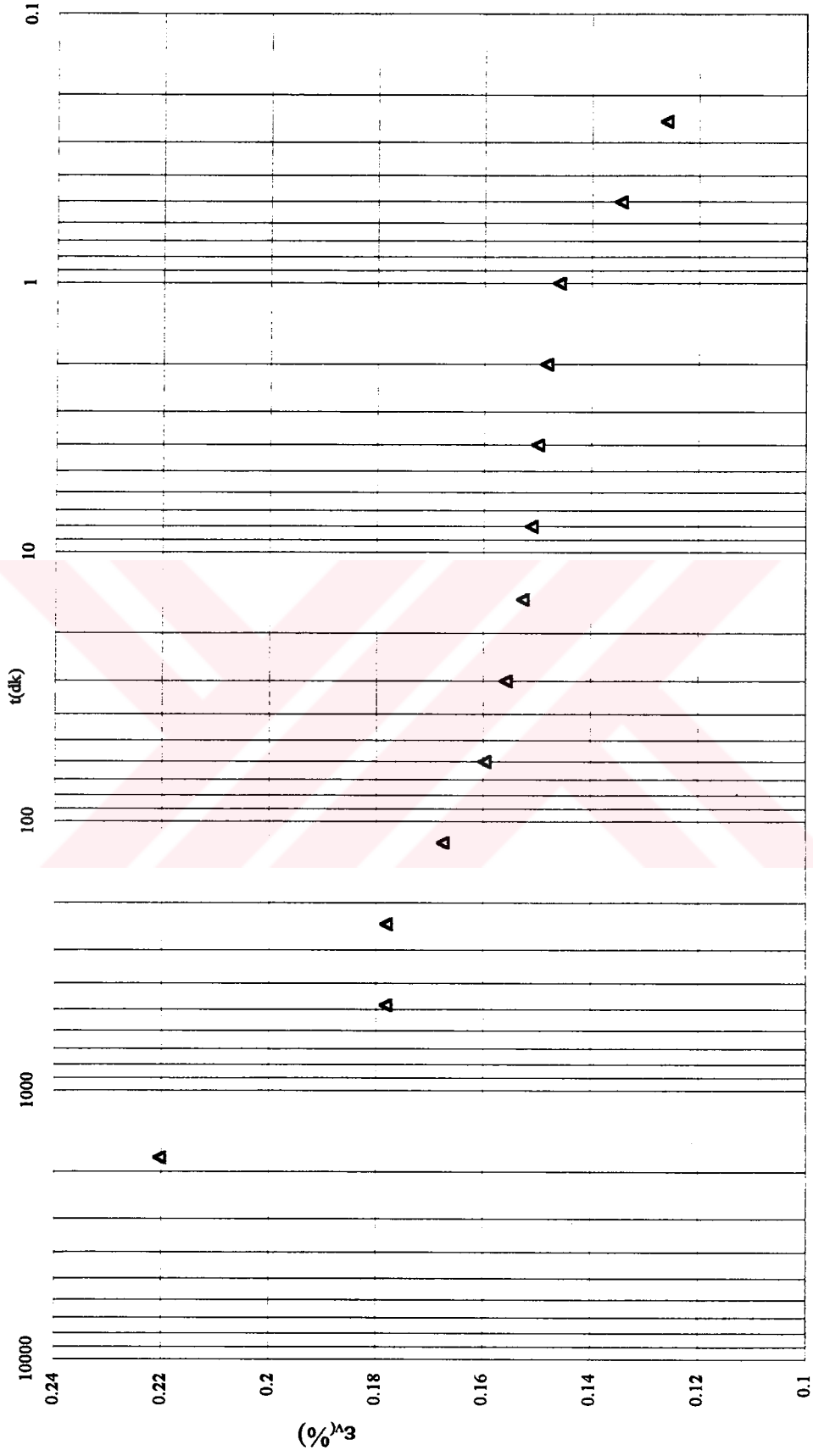
Ek 1.3 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:1 $\sigma'_v = 10,33 \text{ kPa}$



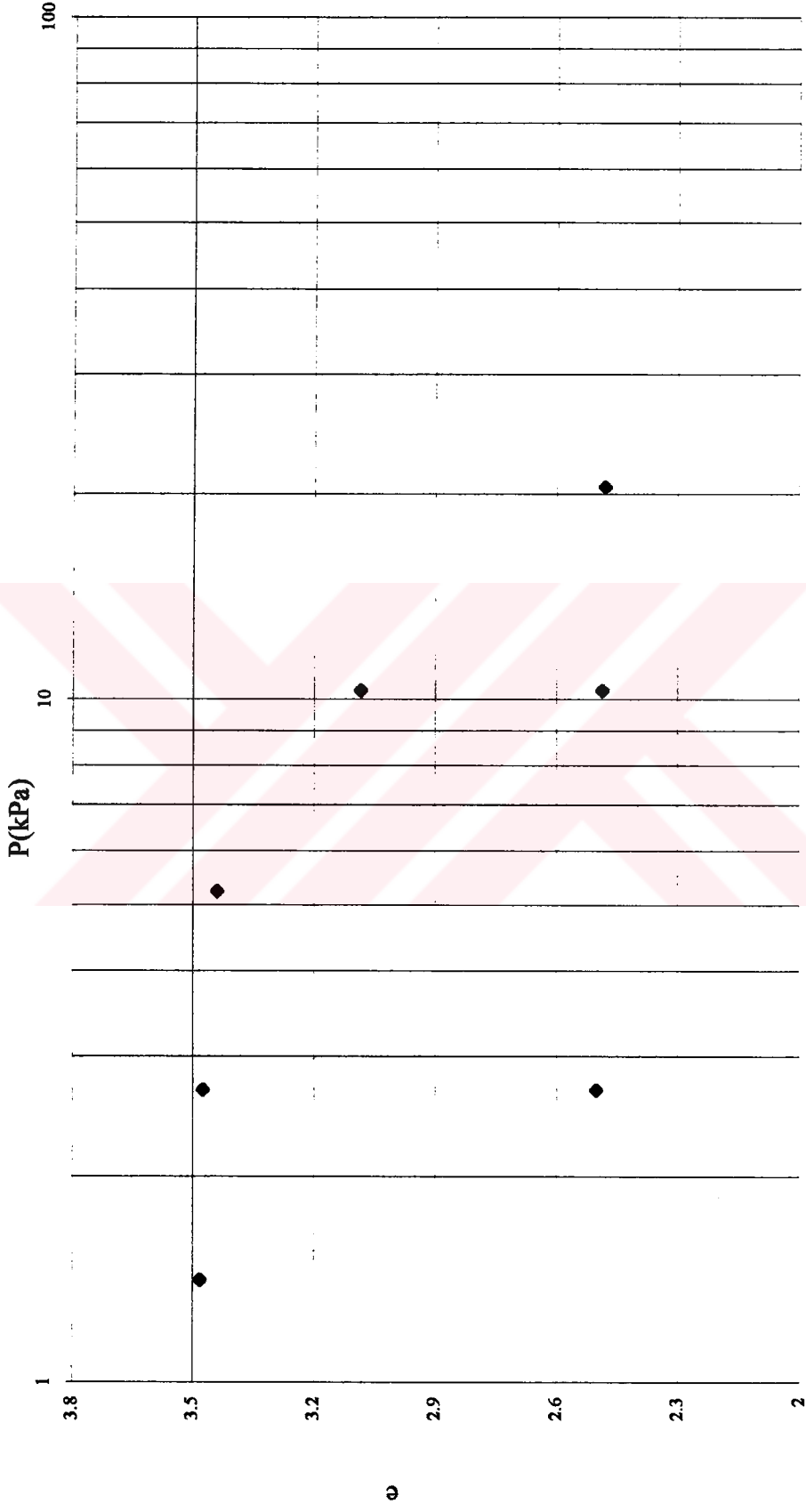
Ek 1.4 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:1 $\sigma'_v = 20,40 \text{ kPa}$



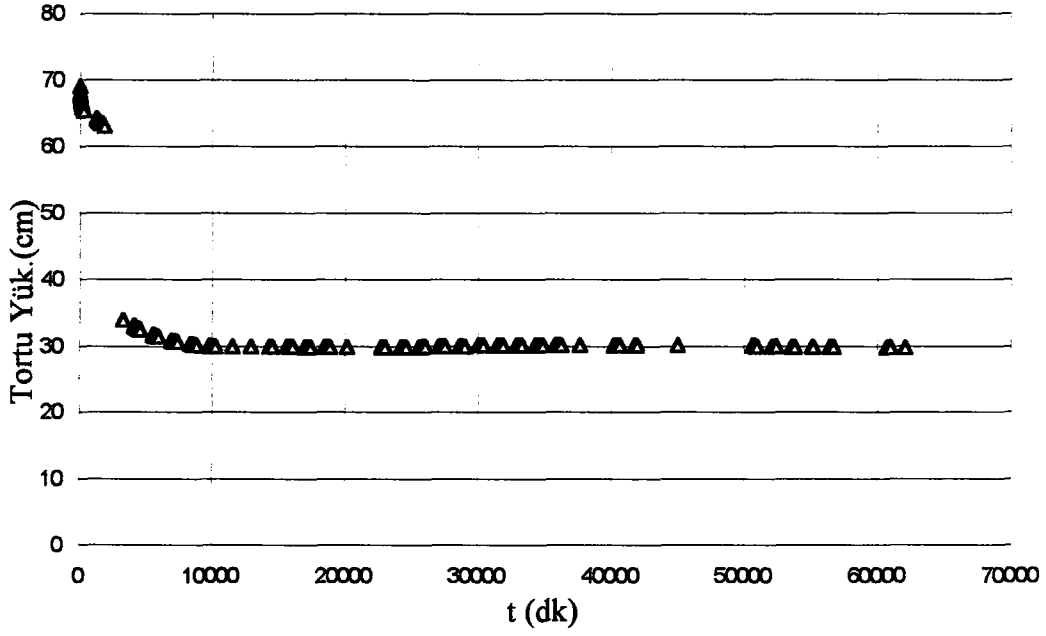
Ek 1.5 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:1

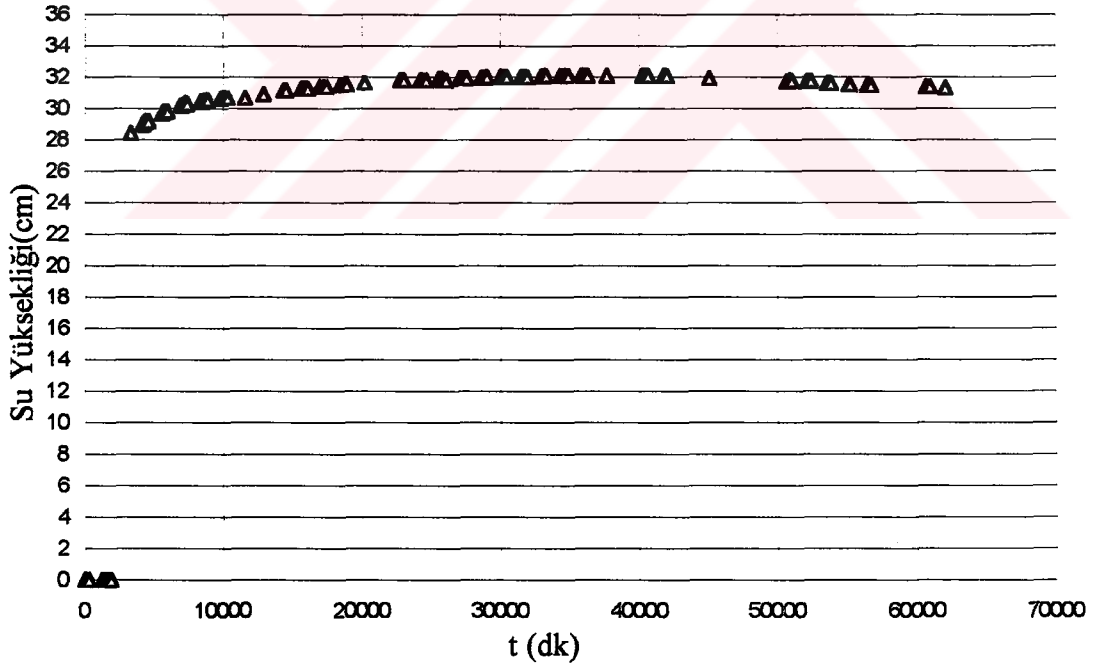


Ek 1.6 Konsolidasyon deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

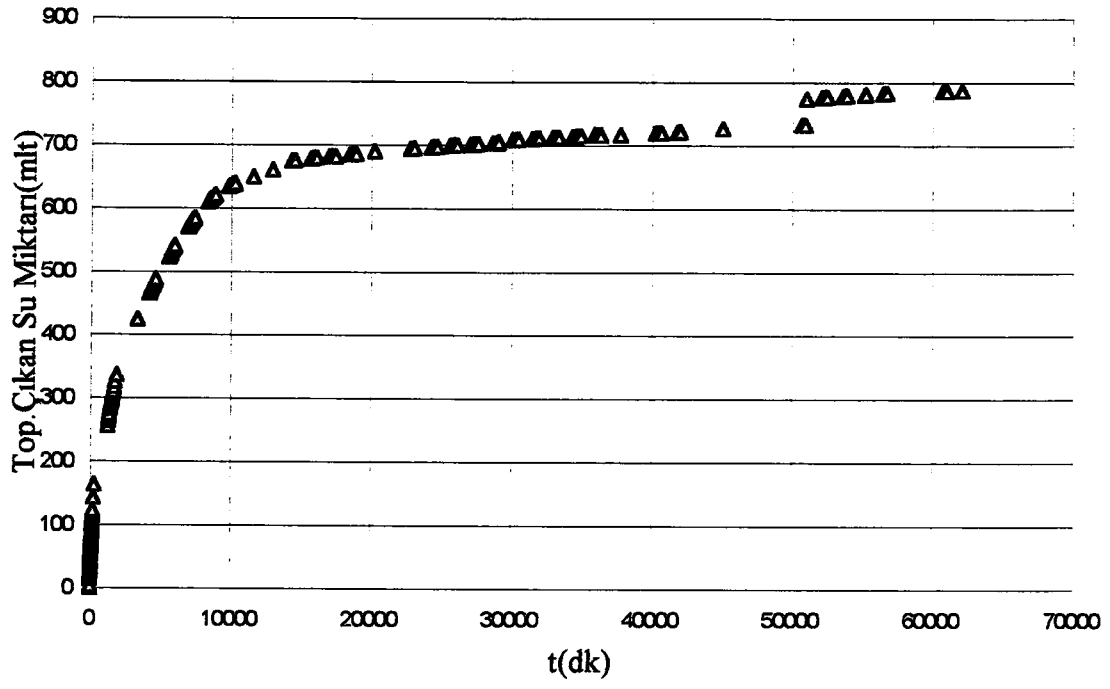
Ek 2 D2 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları



Ek 2.1 Tortu yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D2 Deneyi)

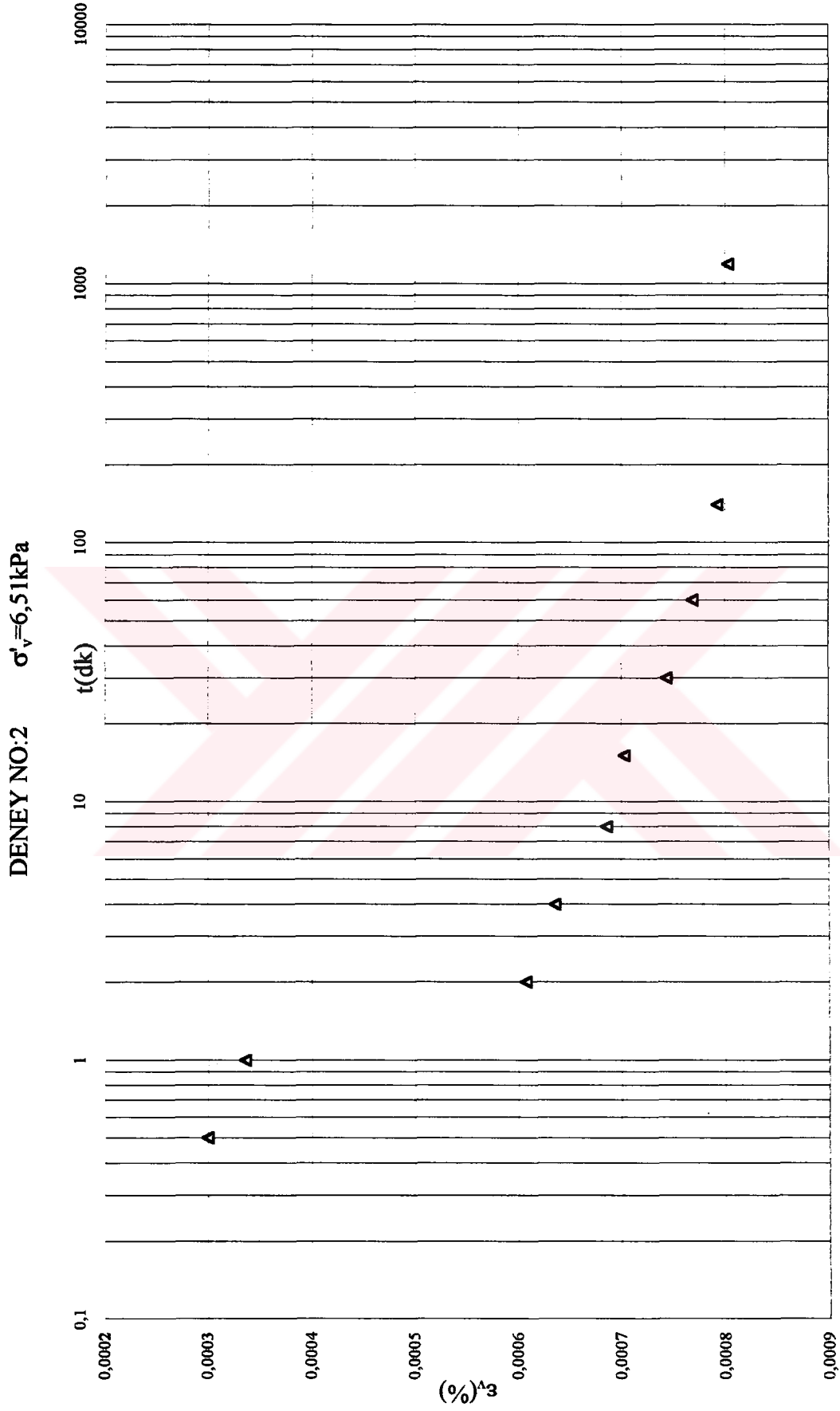


Ek 2.2 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D2 Deneyi)

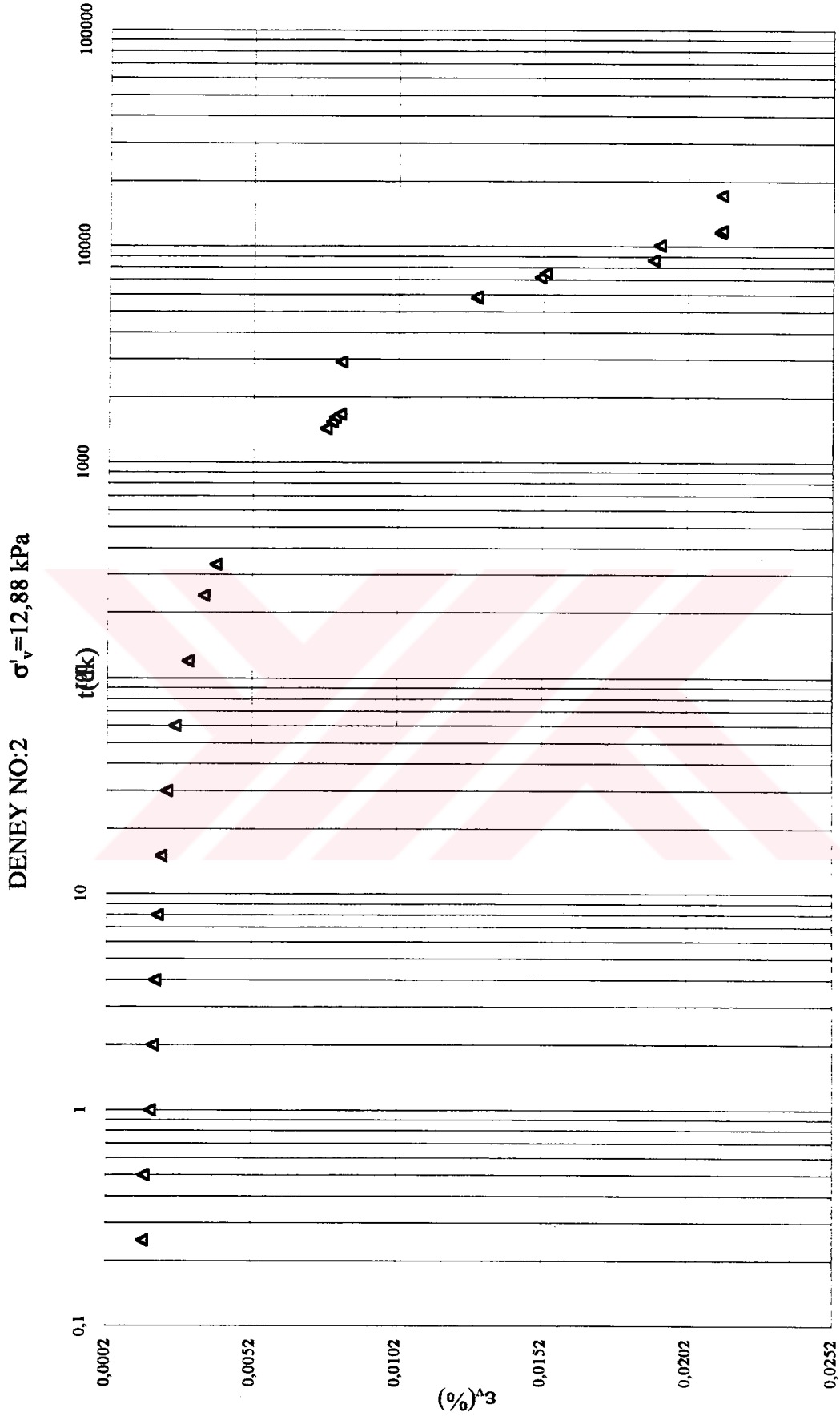


Ek 2.3 Toplam çıkan su miktarının zamana bağlı değişimi (D2 Deneyi)

Ek 3 D2 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

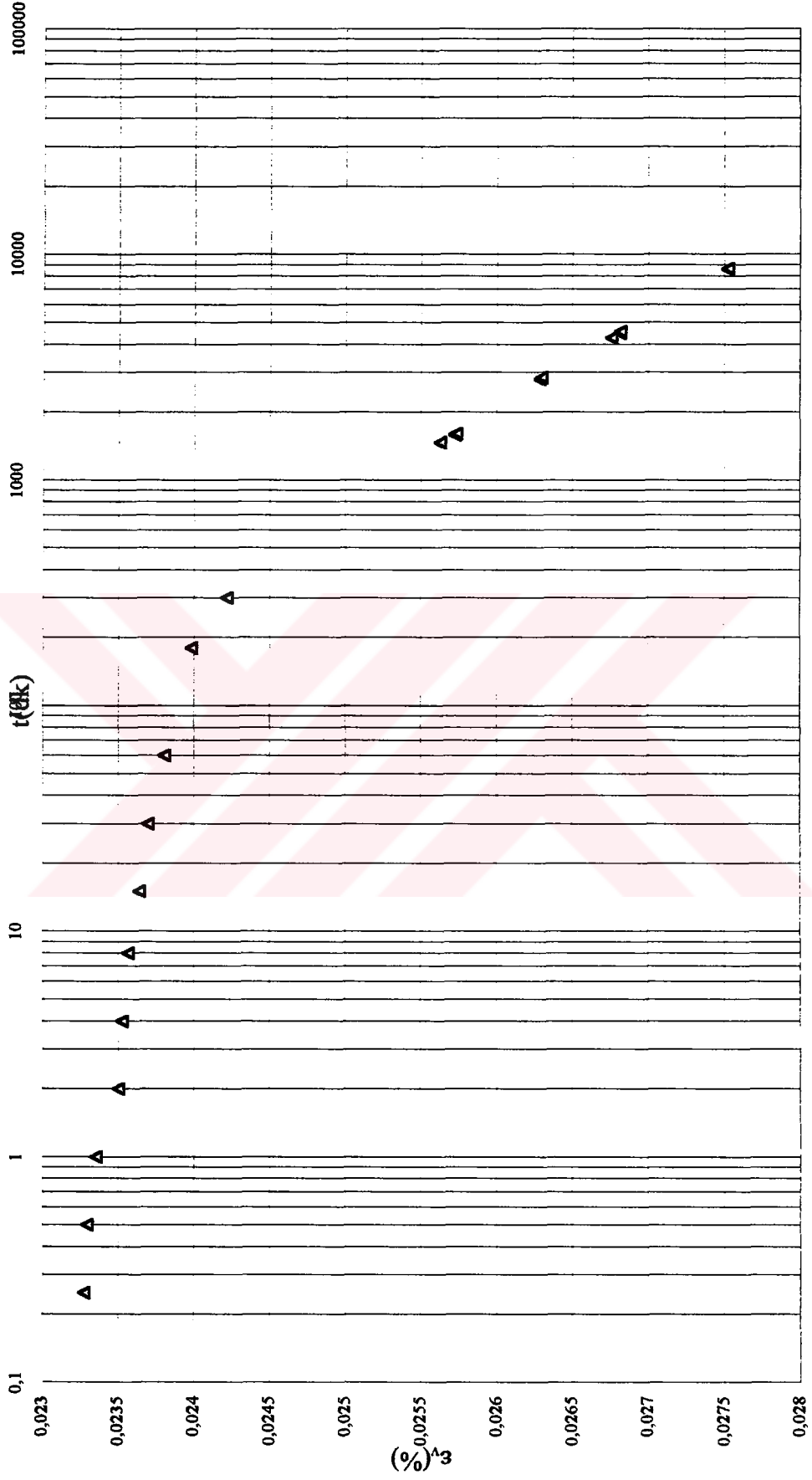


Ek 3.1 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



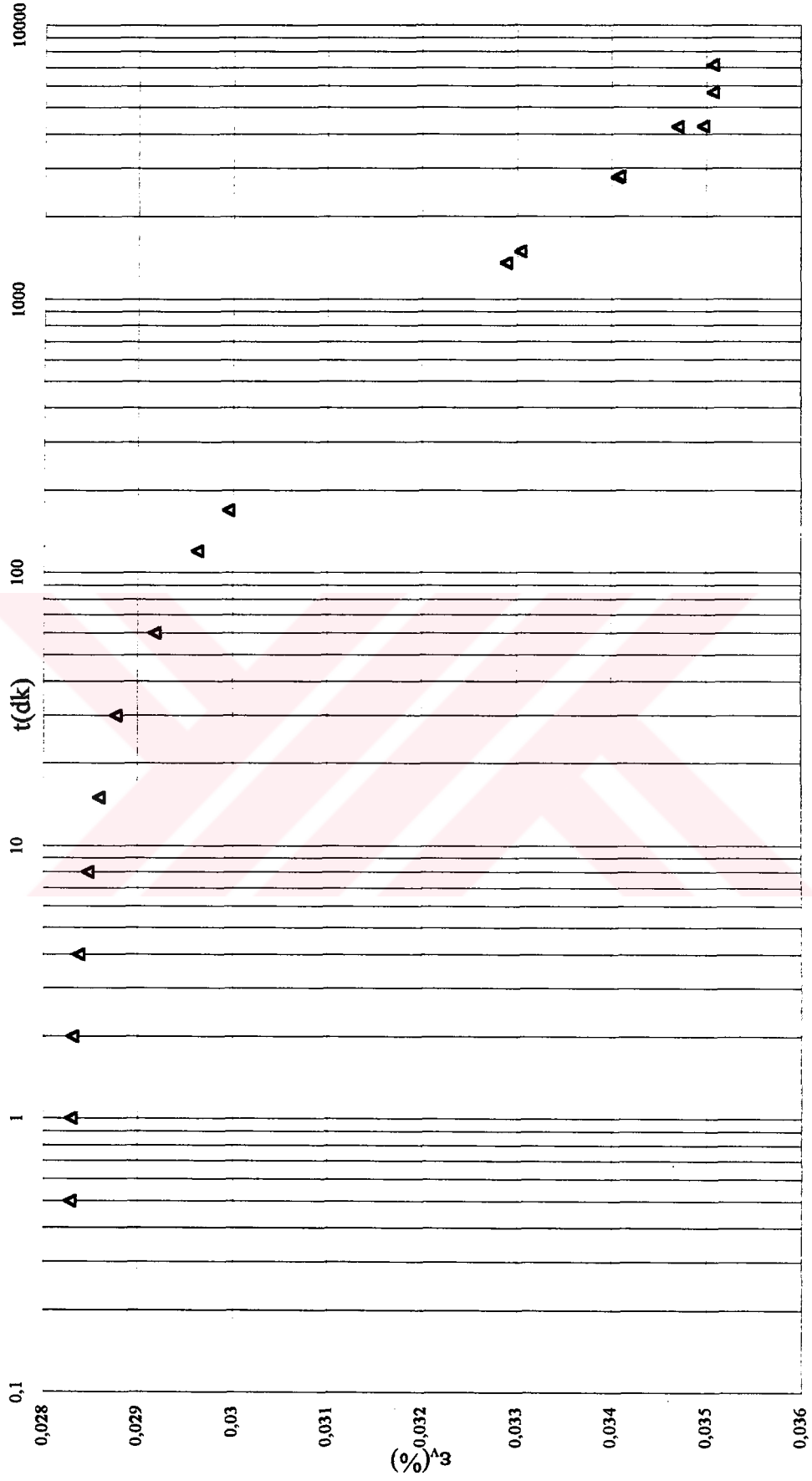
Ek 3.2 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:2 $\sigma'_v = 25,61 \text{ kPa}$



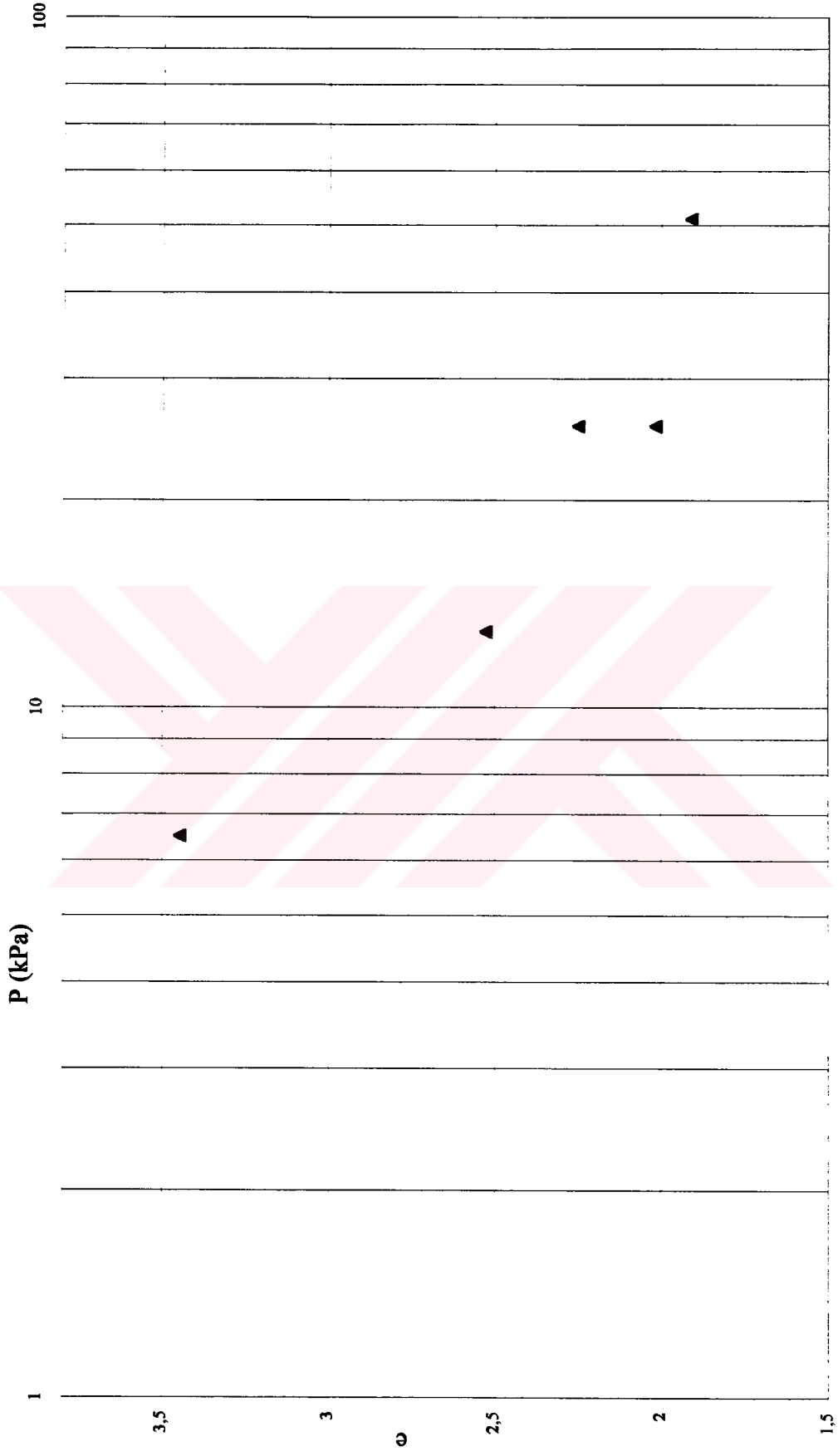
Ek 3.3 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:2 $\sigma'_v=51,1$ kPa



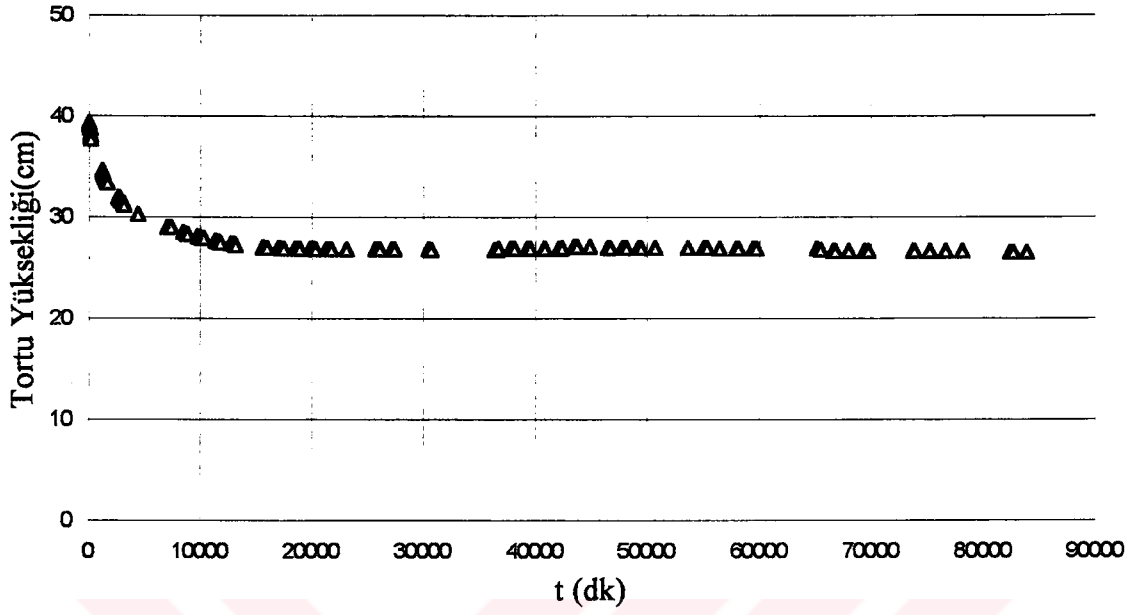
Ek 3.4 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:2

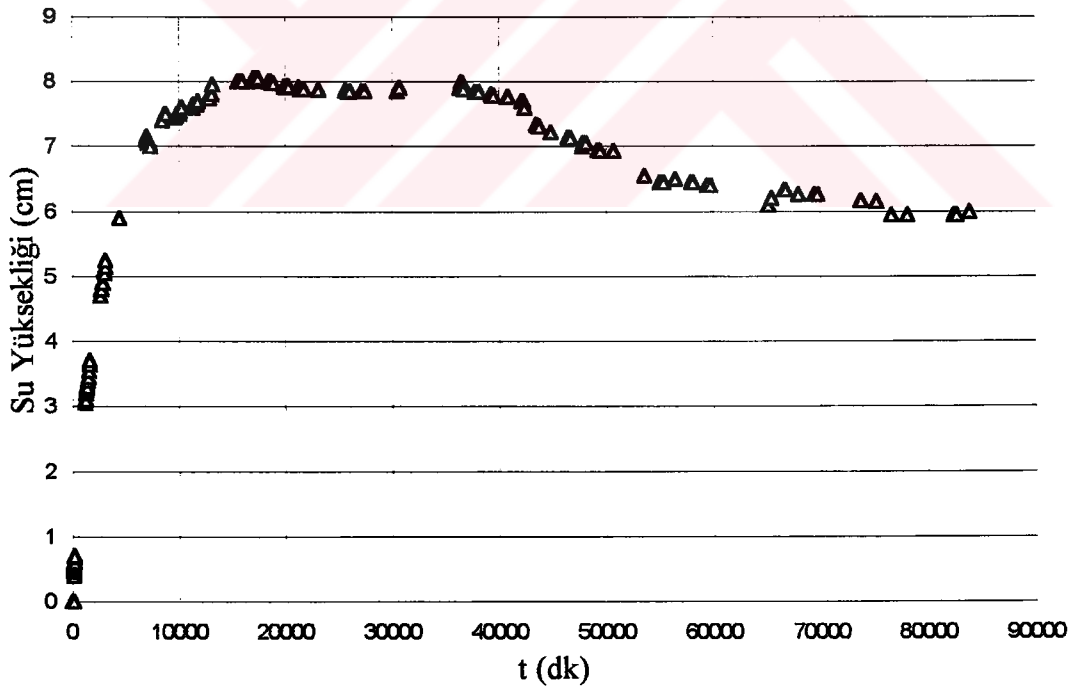


Ek 3.5 Konsolidasyon deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

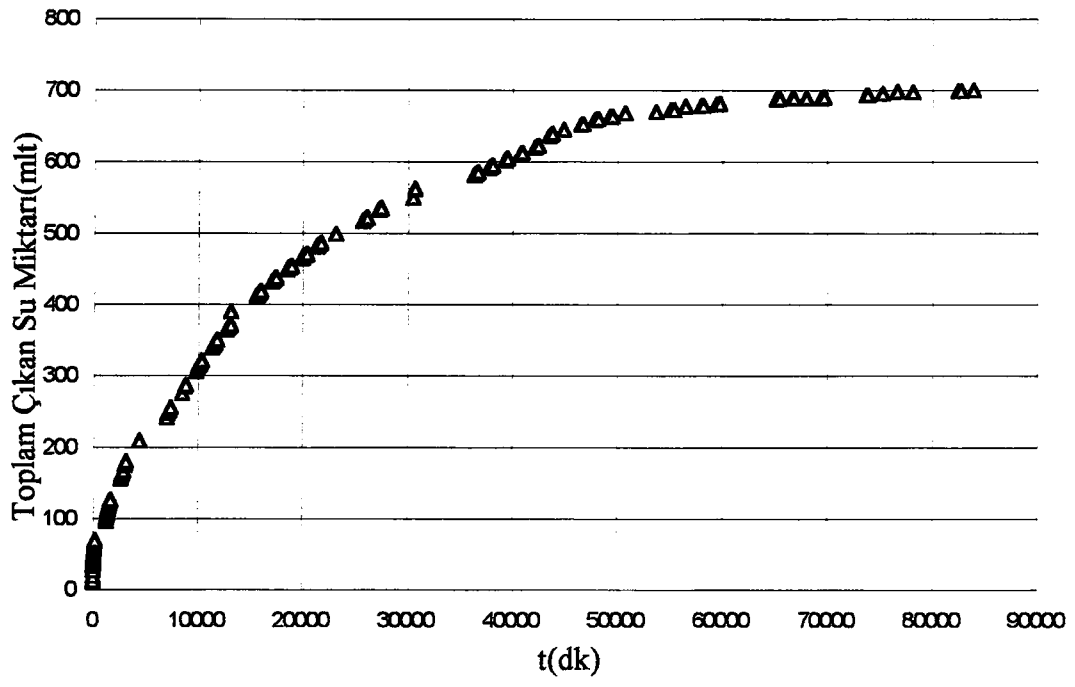
Ek 4 D3 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları



Ek 4.1 Tortu yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D3 Deneyi)

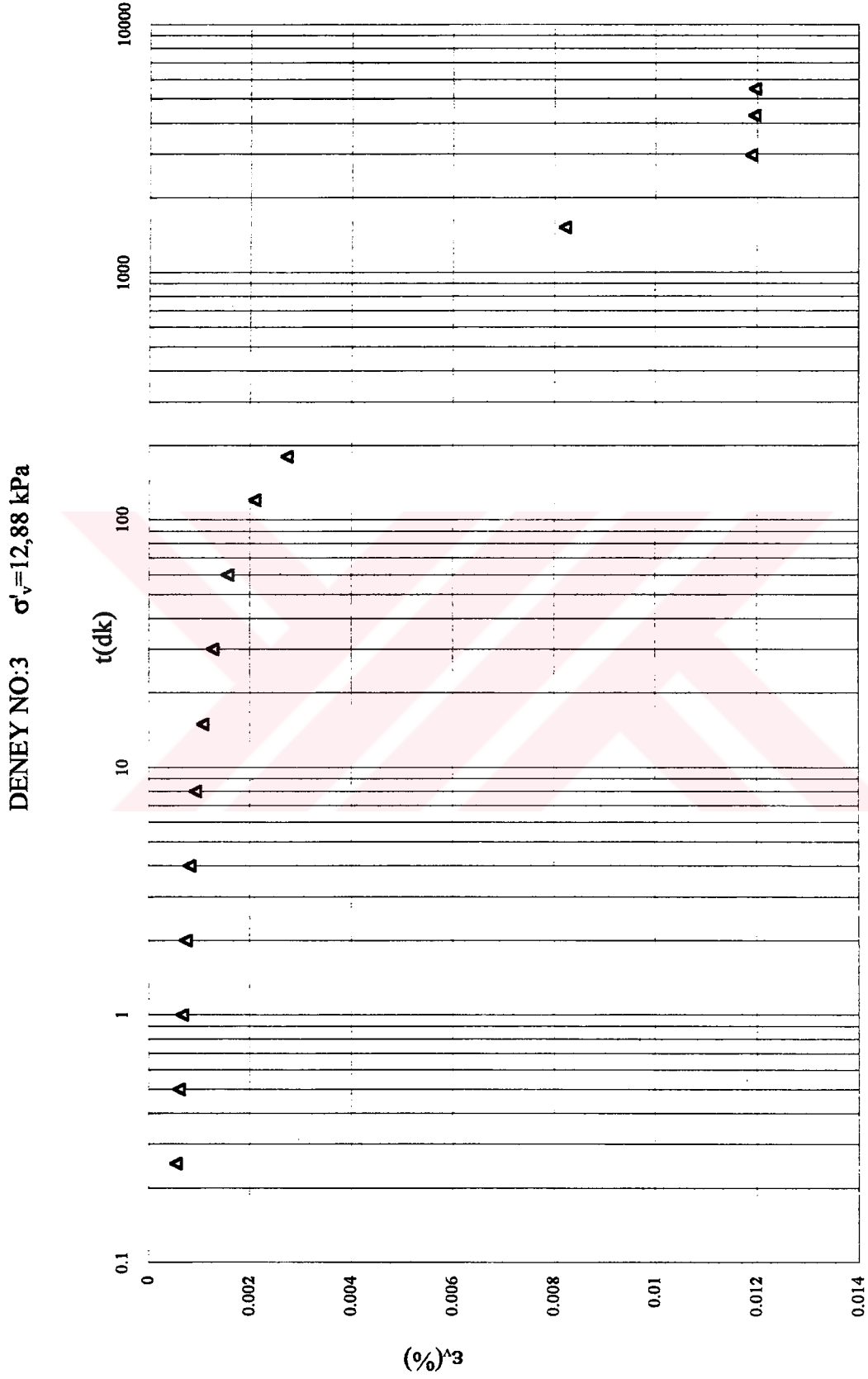


Ek 4.2 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D3 Deneyi)



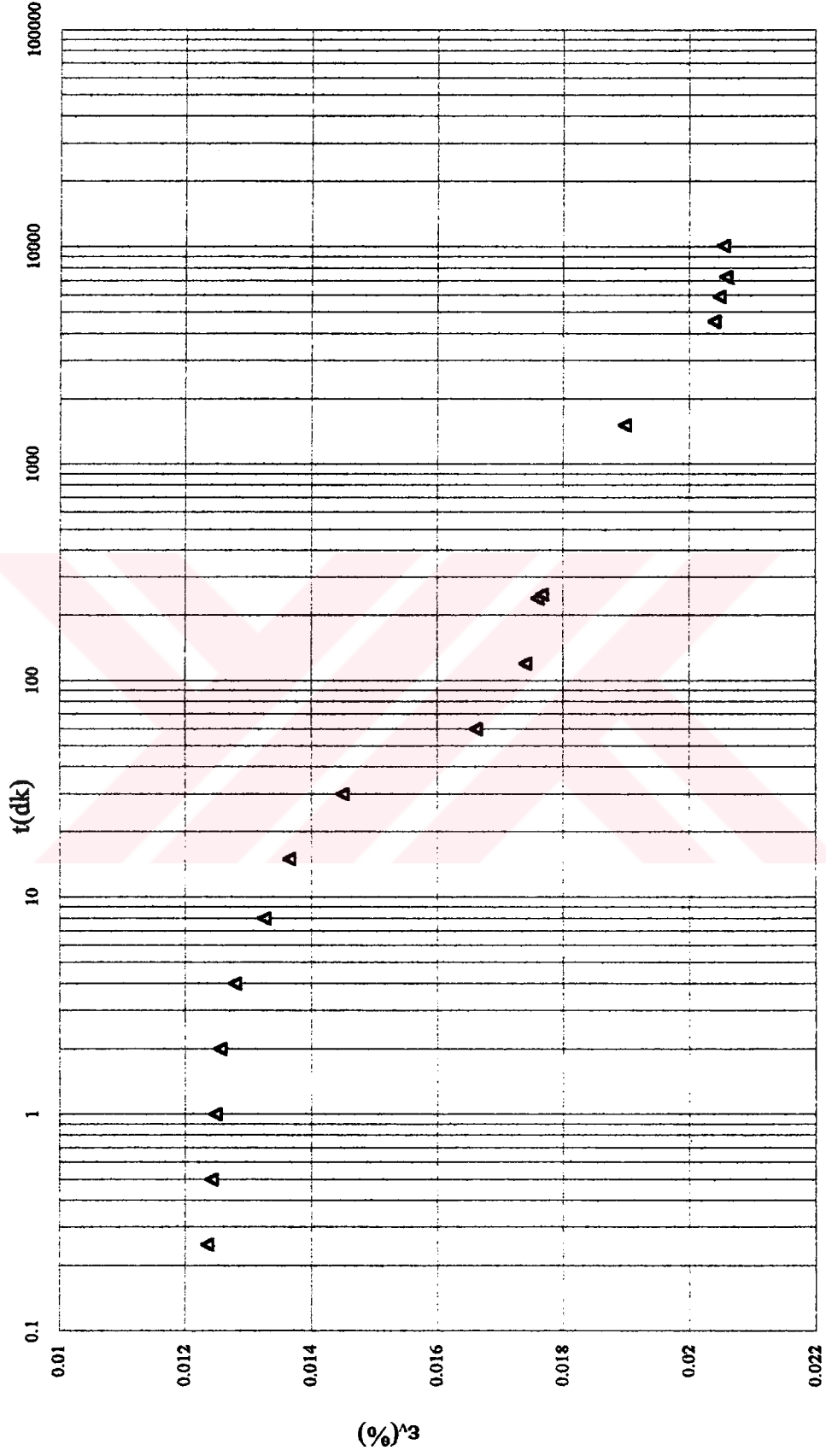
Ek 4.3 Toplam çıkan su miktarının zamana bağlı değişimi(D3 Deneyi)

Ek 5 D3 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları



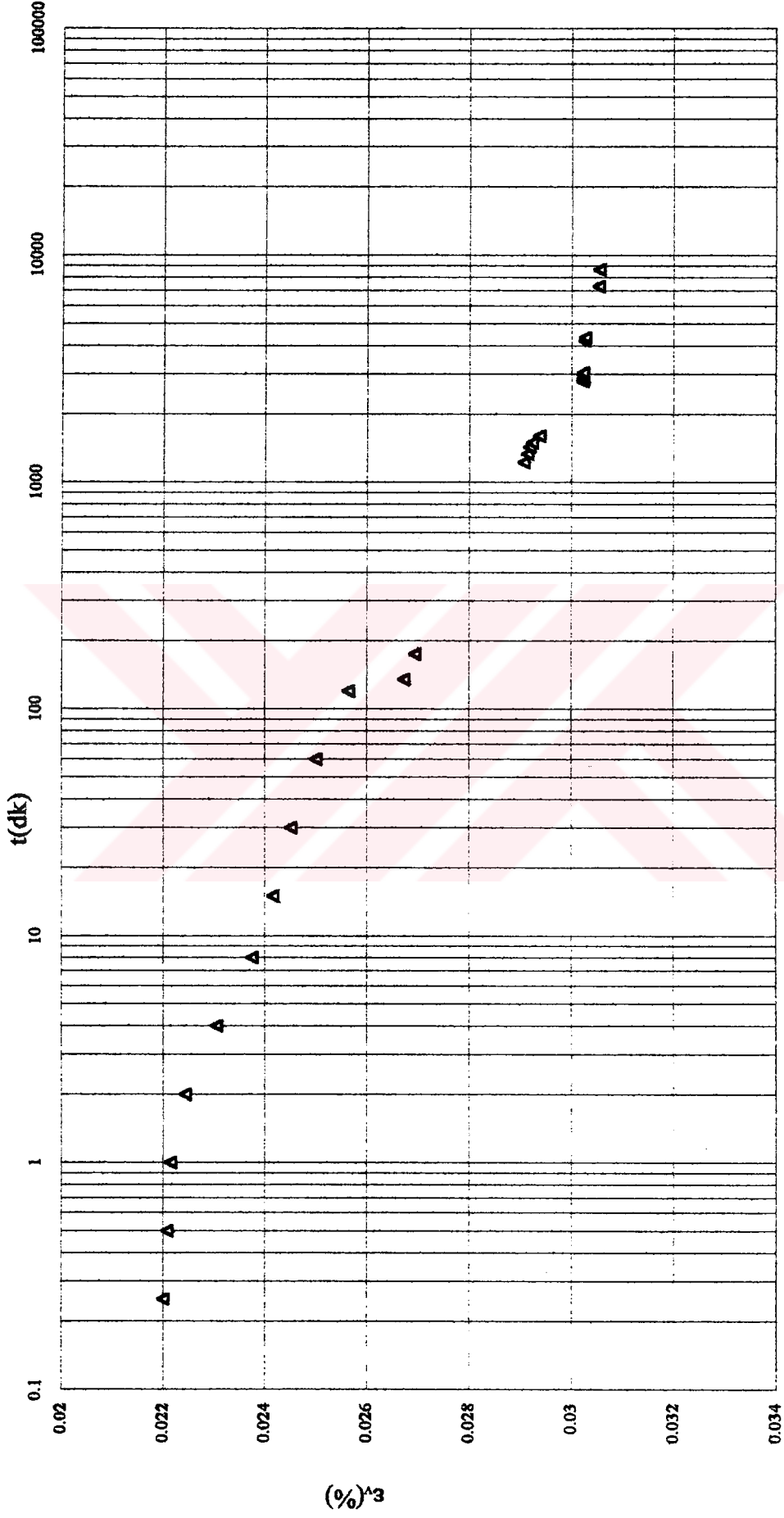
Ek 5.1 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:3 $\sigma'_v=25,61$ kPa



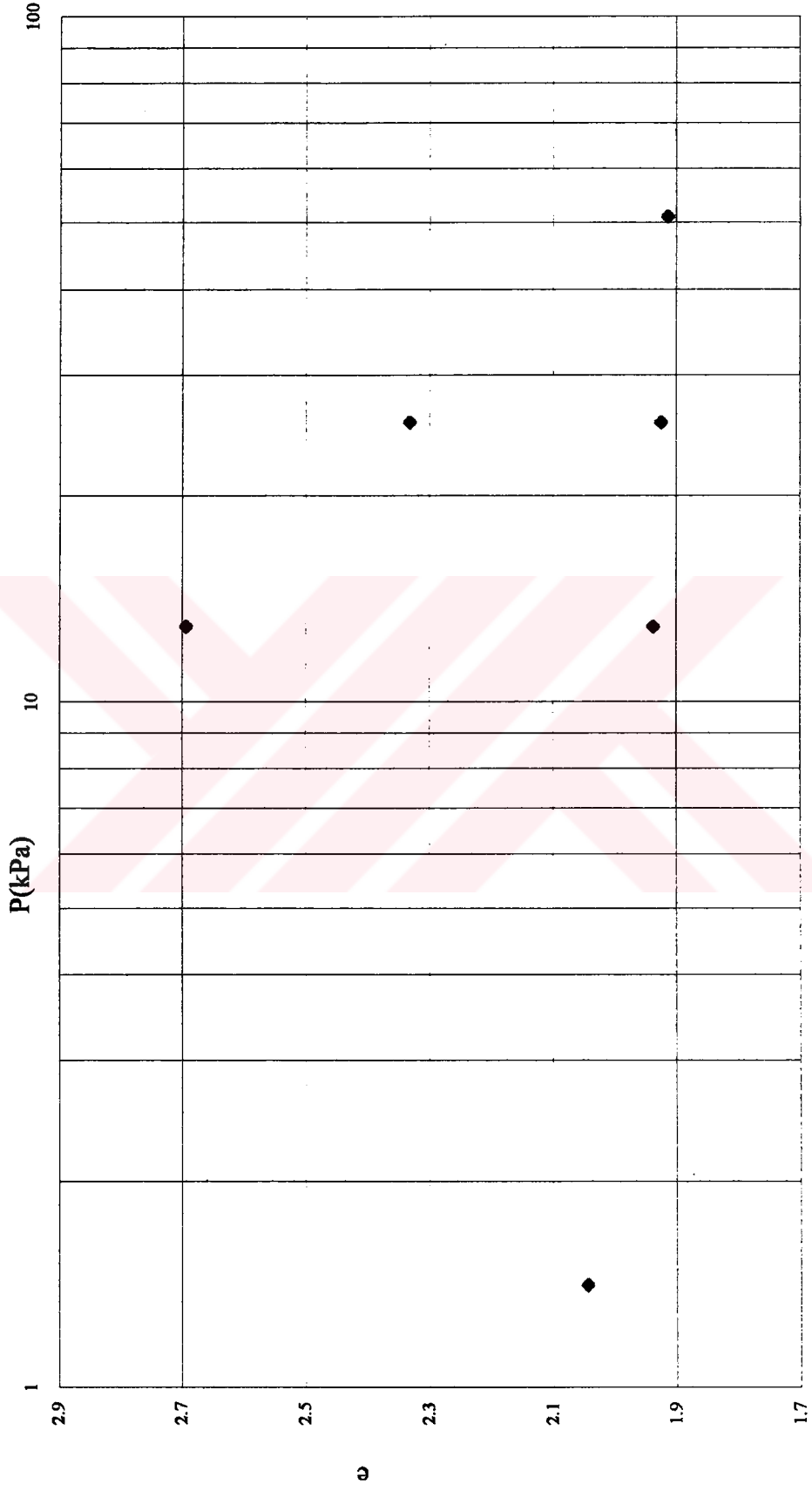
Ek 5.2 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:3 $\sigma'_v=51.1$ kPa



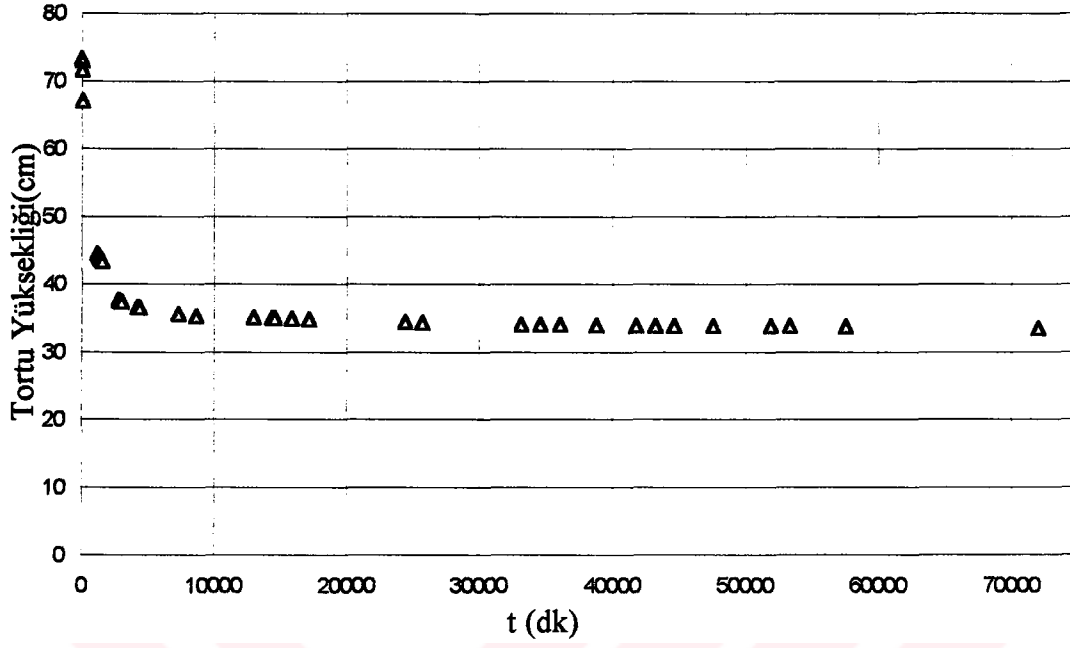
Ek 5.3 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:3

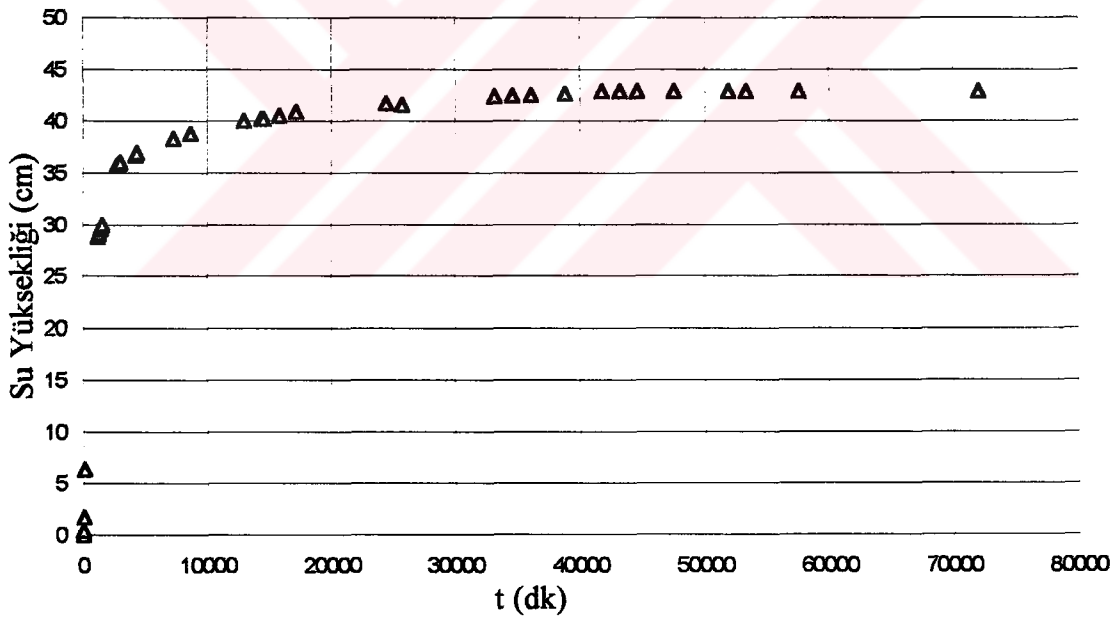


Ek 5.4 Konsolidasyon deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

Ek 6 D4 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları

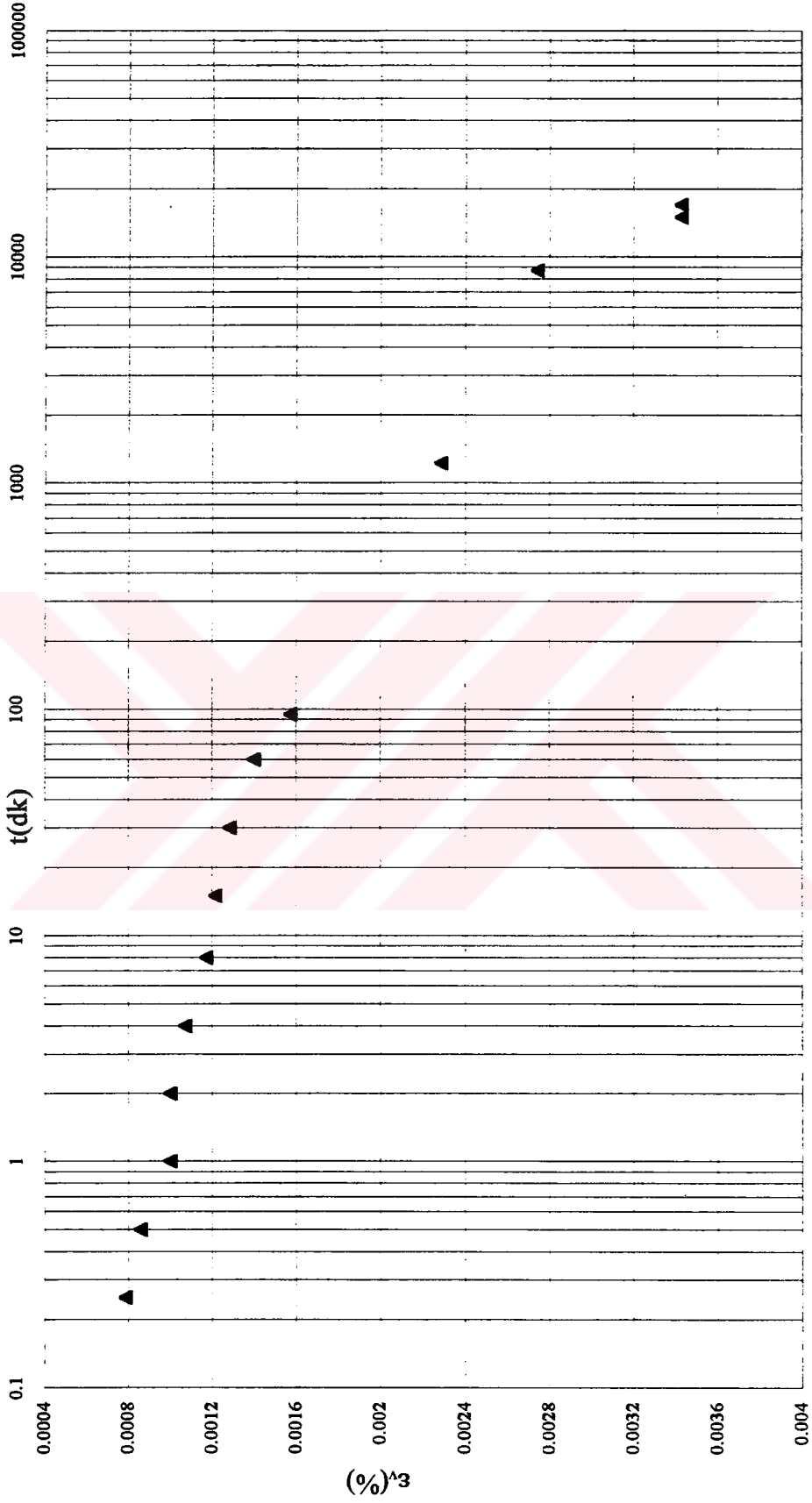


Ek 6.1 Tortu yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D4 Deneyi)



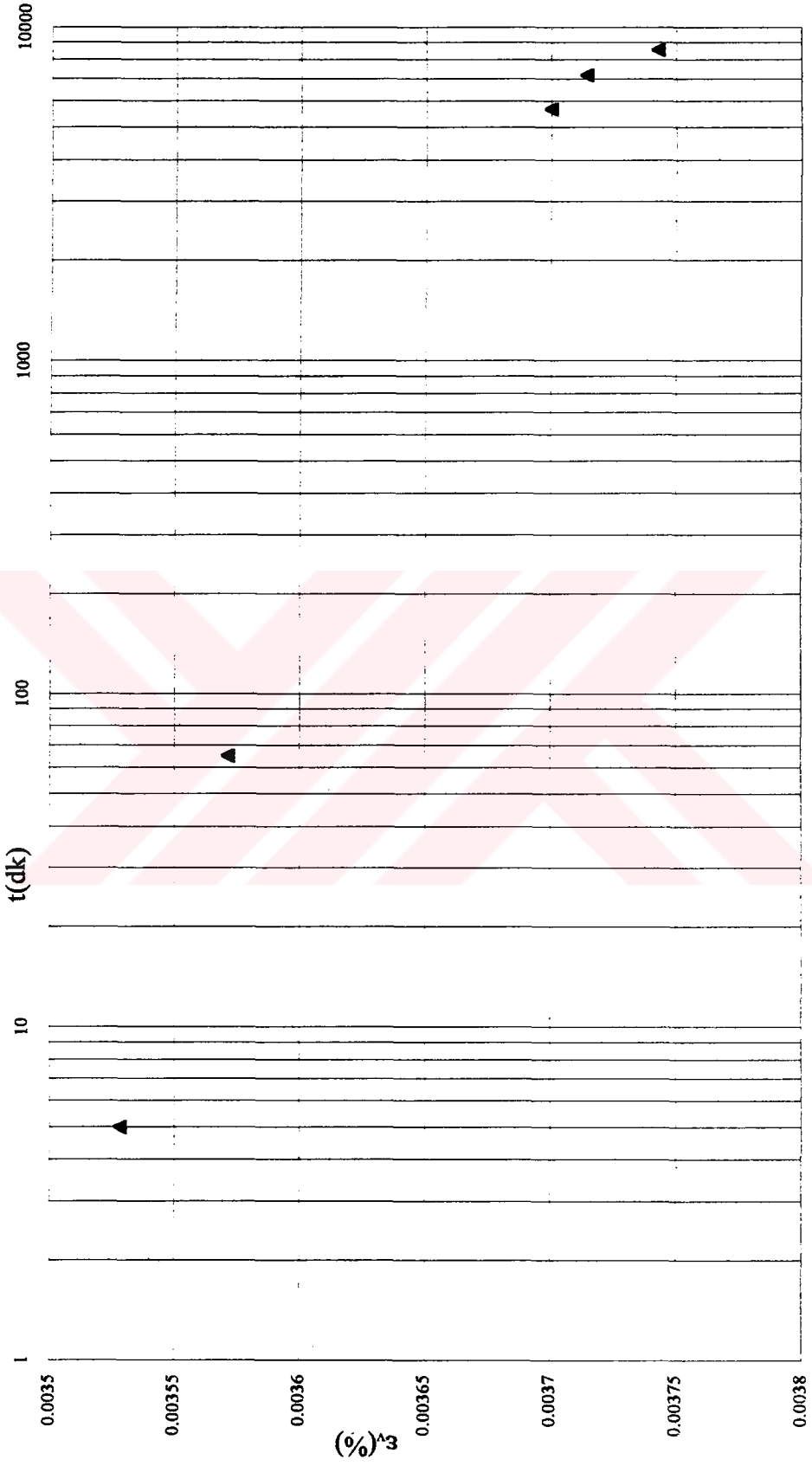
Ek 6.2 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D4 Deneyi)

Ek 7 D4 Konsolidasyon Deneý Sonuçları

DENEY NO:4 $\sigma'_v=1,41$ kPa

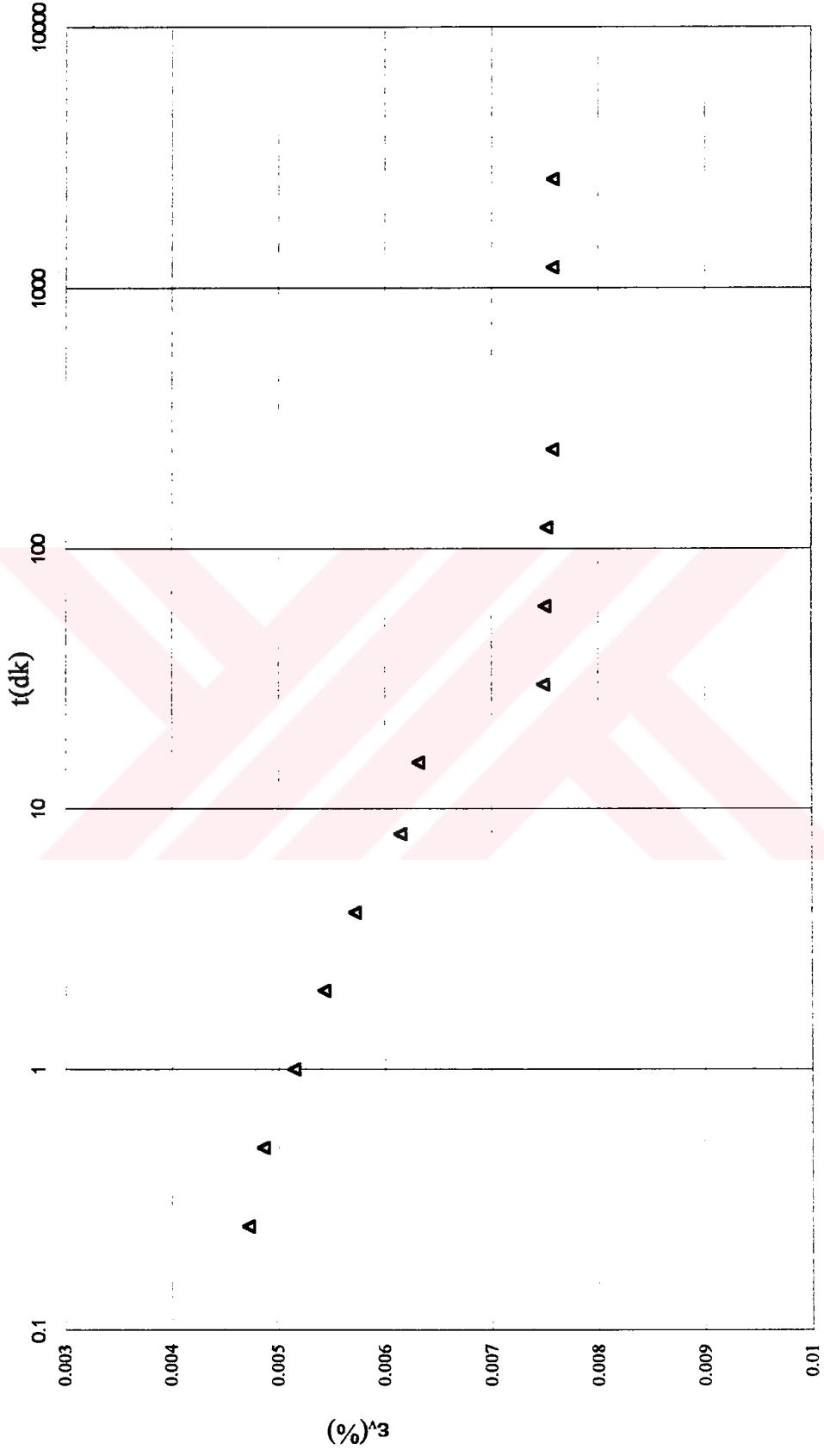
Ek 7.1 Konsolidasyon deneýi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:4 $\sigma_v=2,68$ kPa



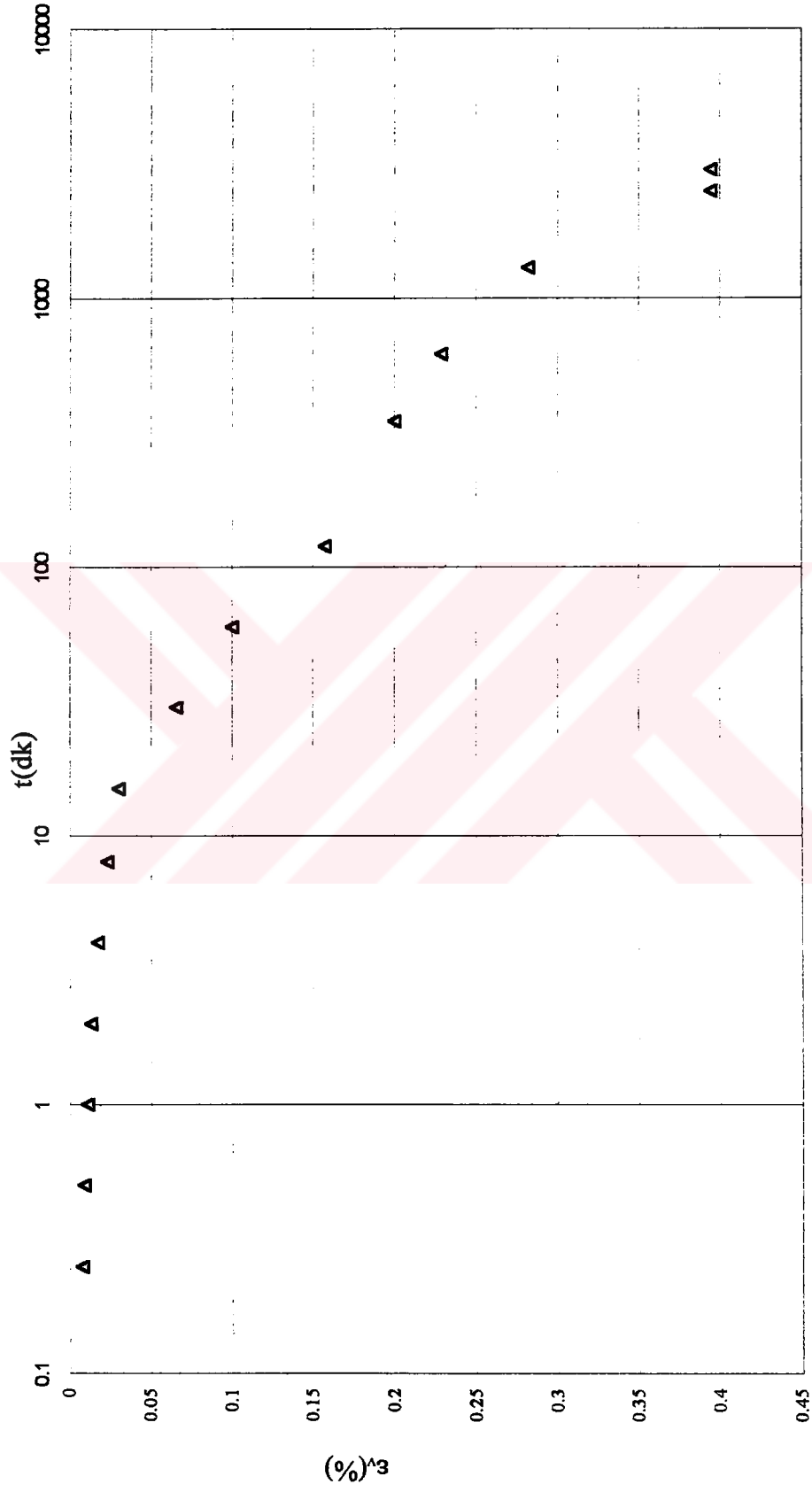
Ek 7.2 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:4 $\sigma'_v=5.23$ kPa



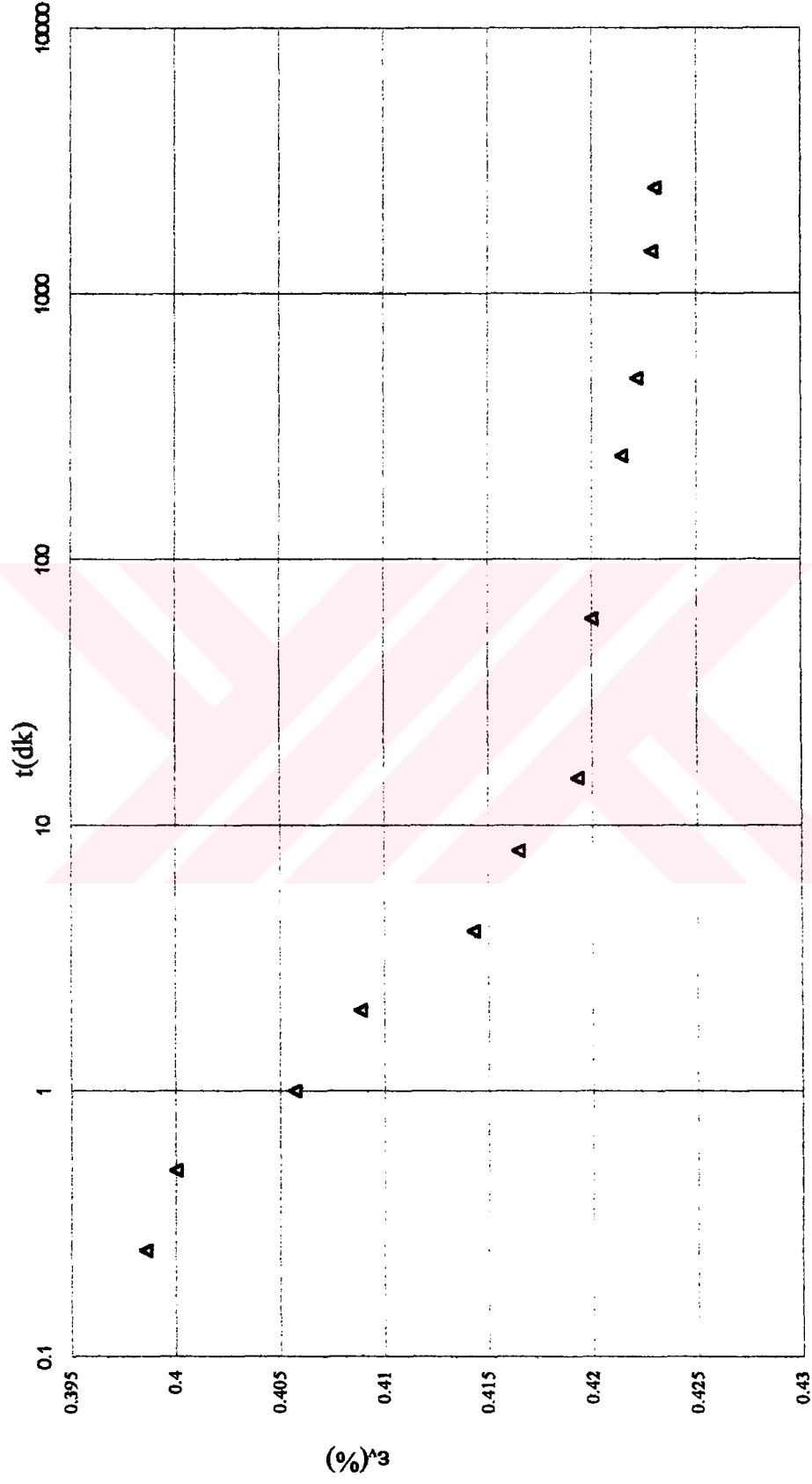
Ek 7.3 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:4 $\sigma'_v=10.33$ kPa

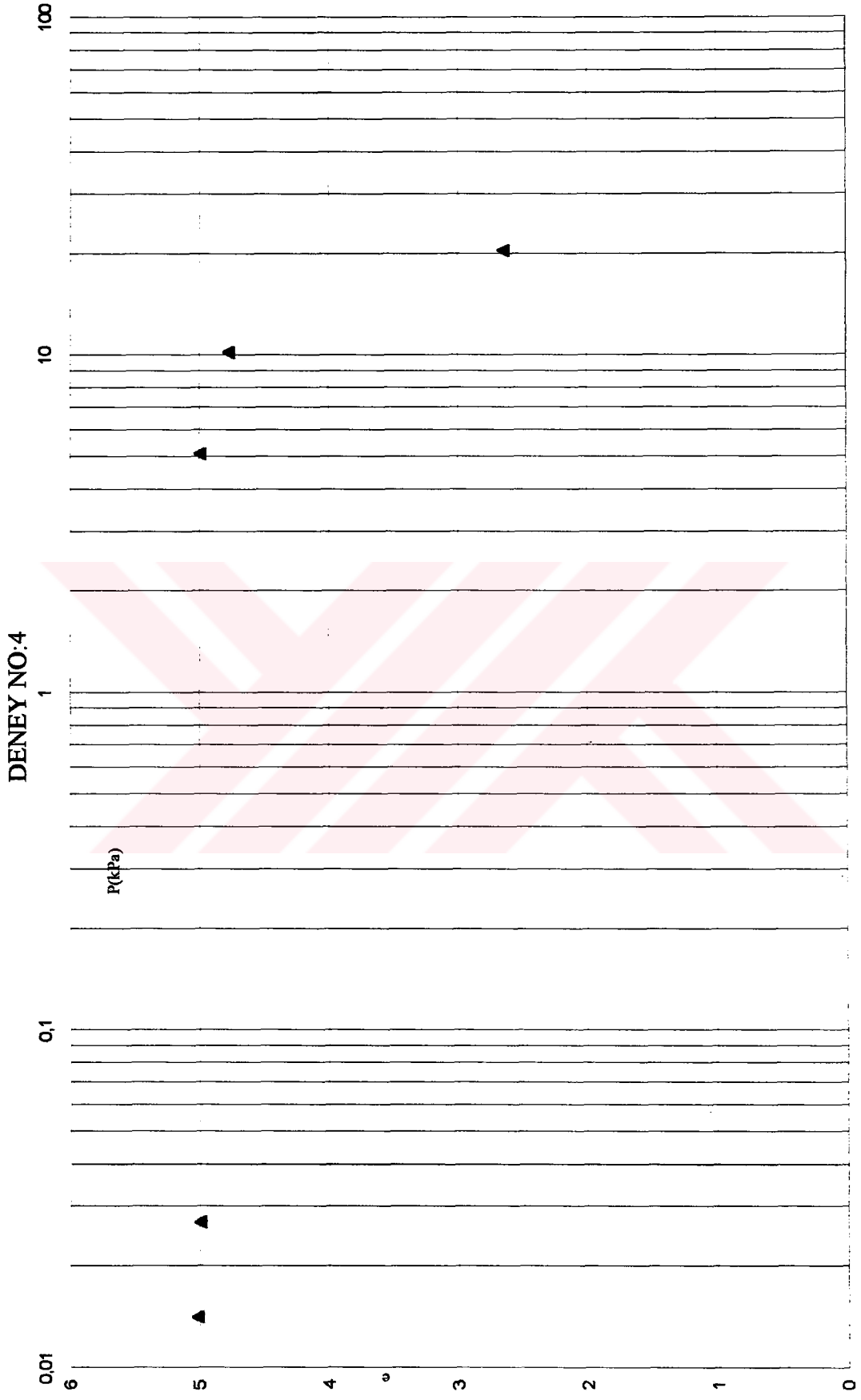


Ek 7.4 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:4 $\sigma'_v=20.40$ kPa

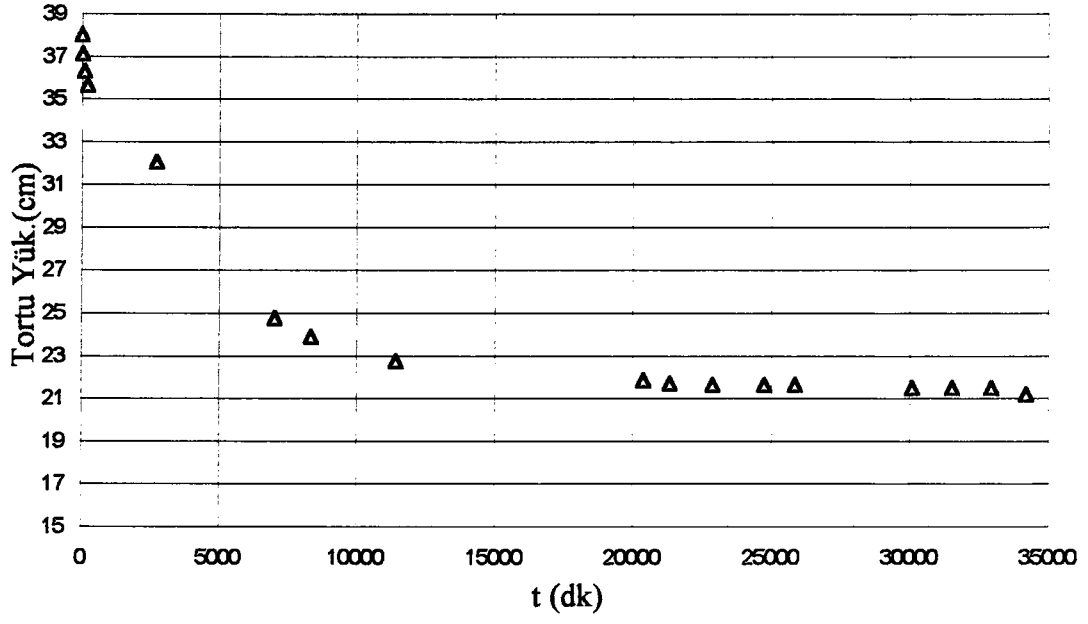


Ek 7.5 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

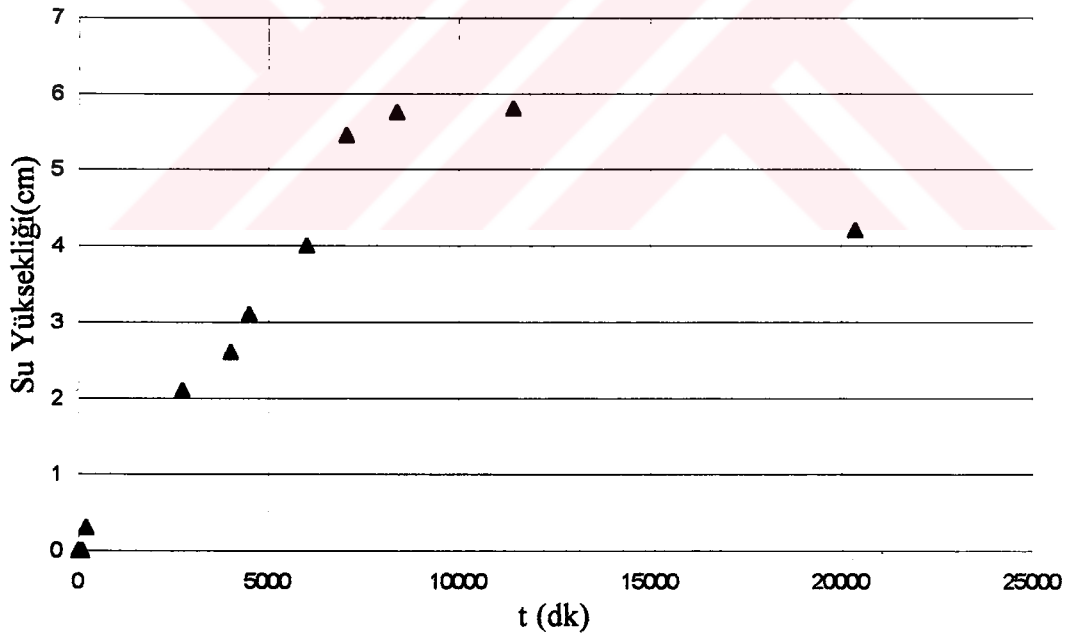


Ek 7.6 Konsolidasyon deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

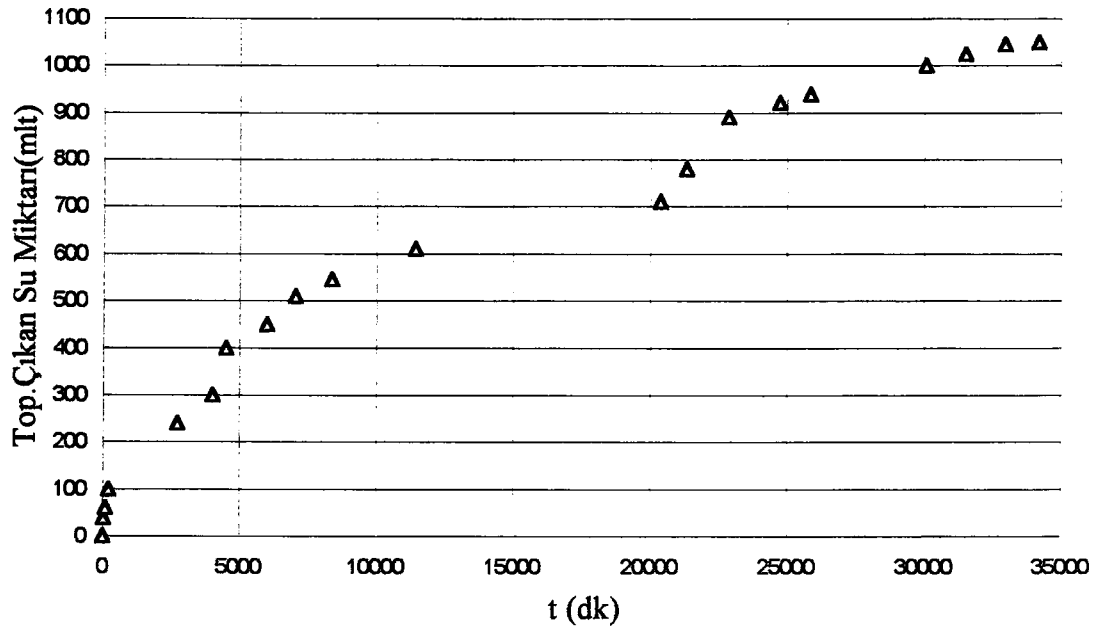
Ek 8 D6 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları



Ek 8.1 Toru yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D6 Deneyi)

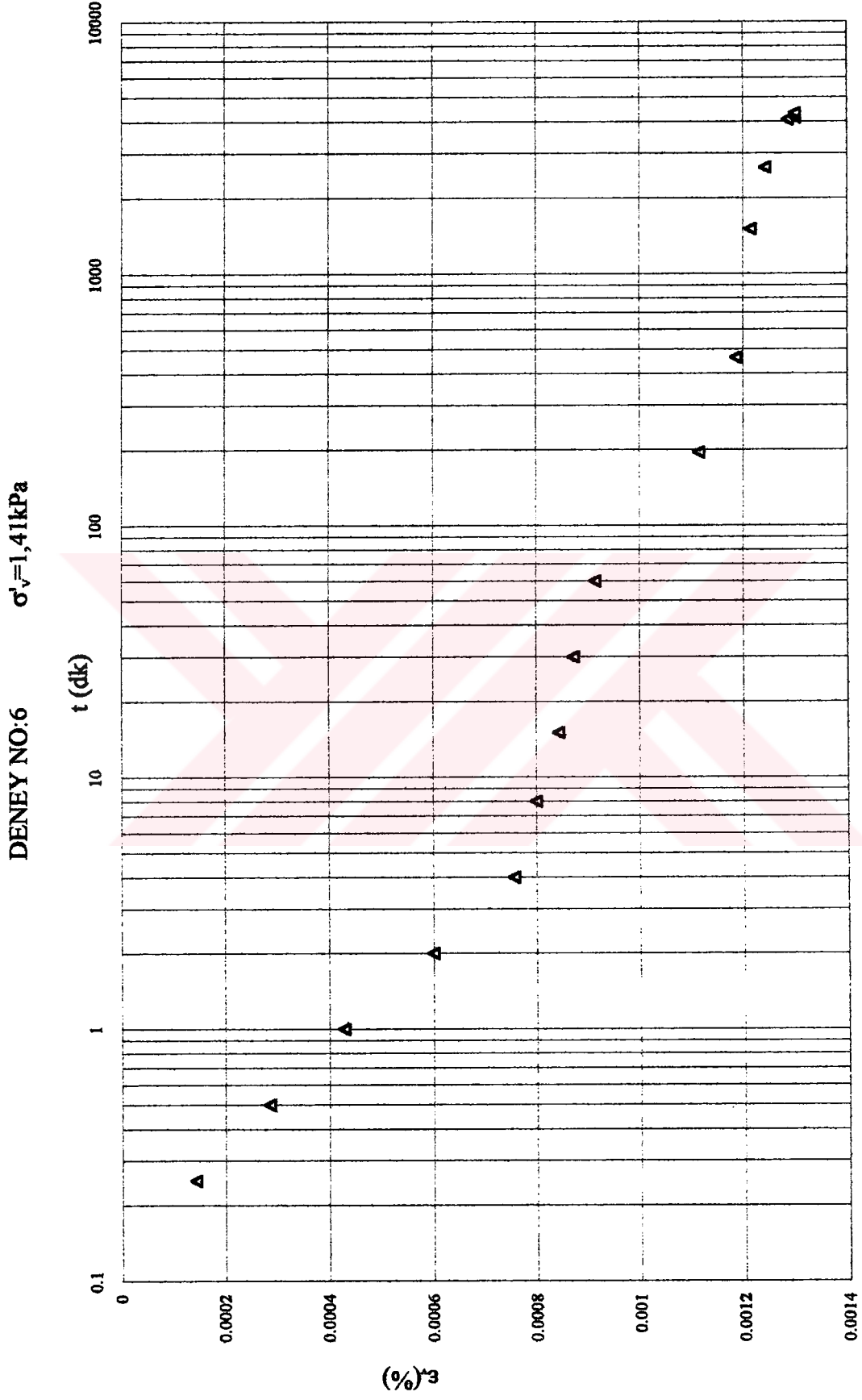


Ek 8.2 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi(D6 Deneyi)



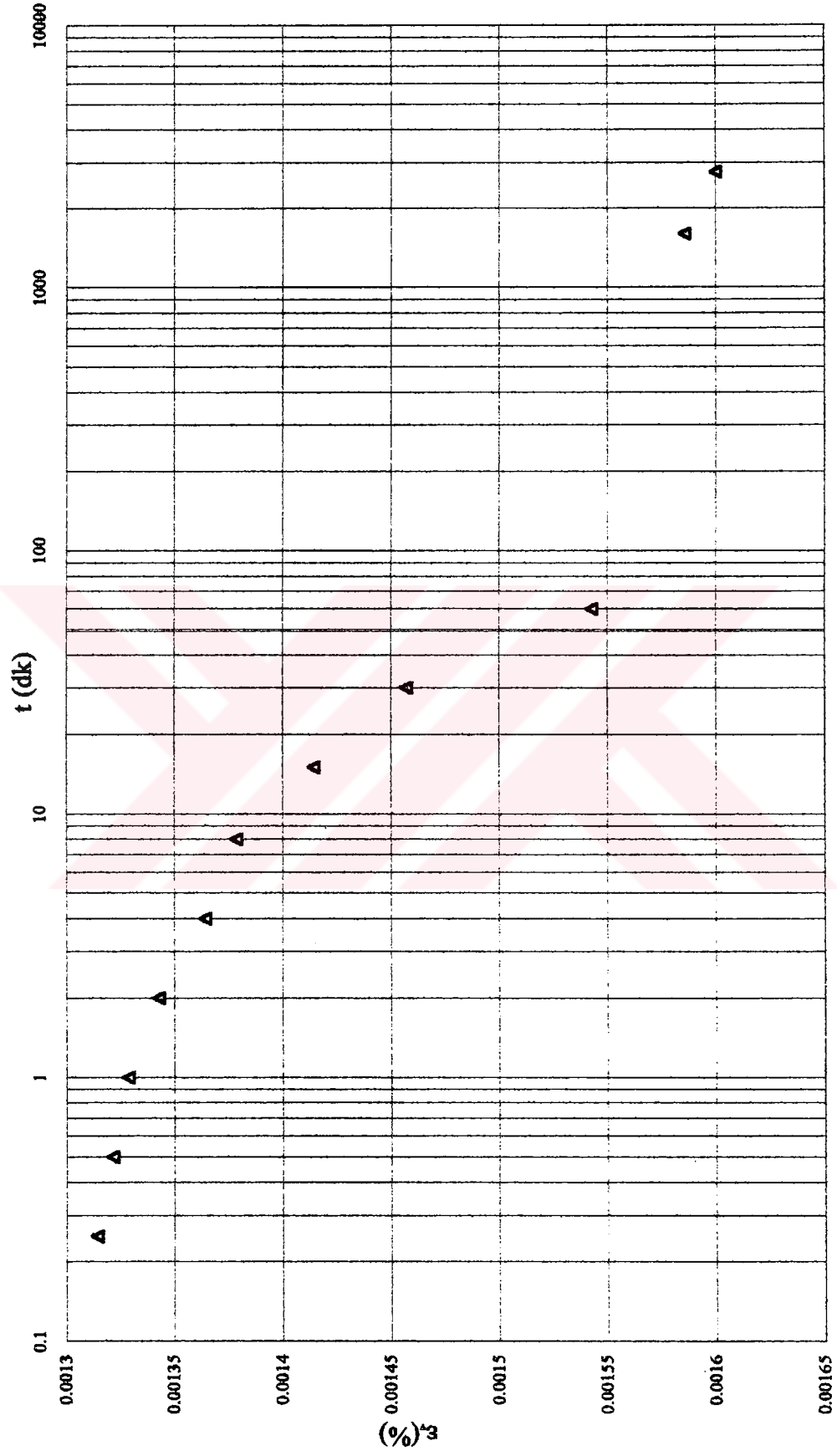
Ek 8.3 Toplam çıkan su miktarının zamana bağlı değişimi(D6 Deneyi)

Ek 9 D6 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları



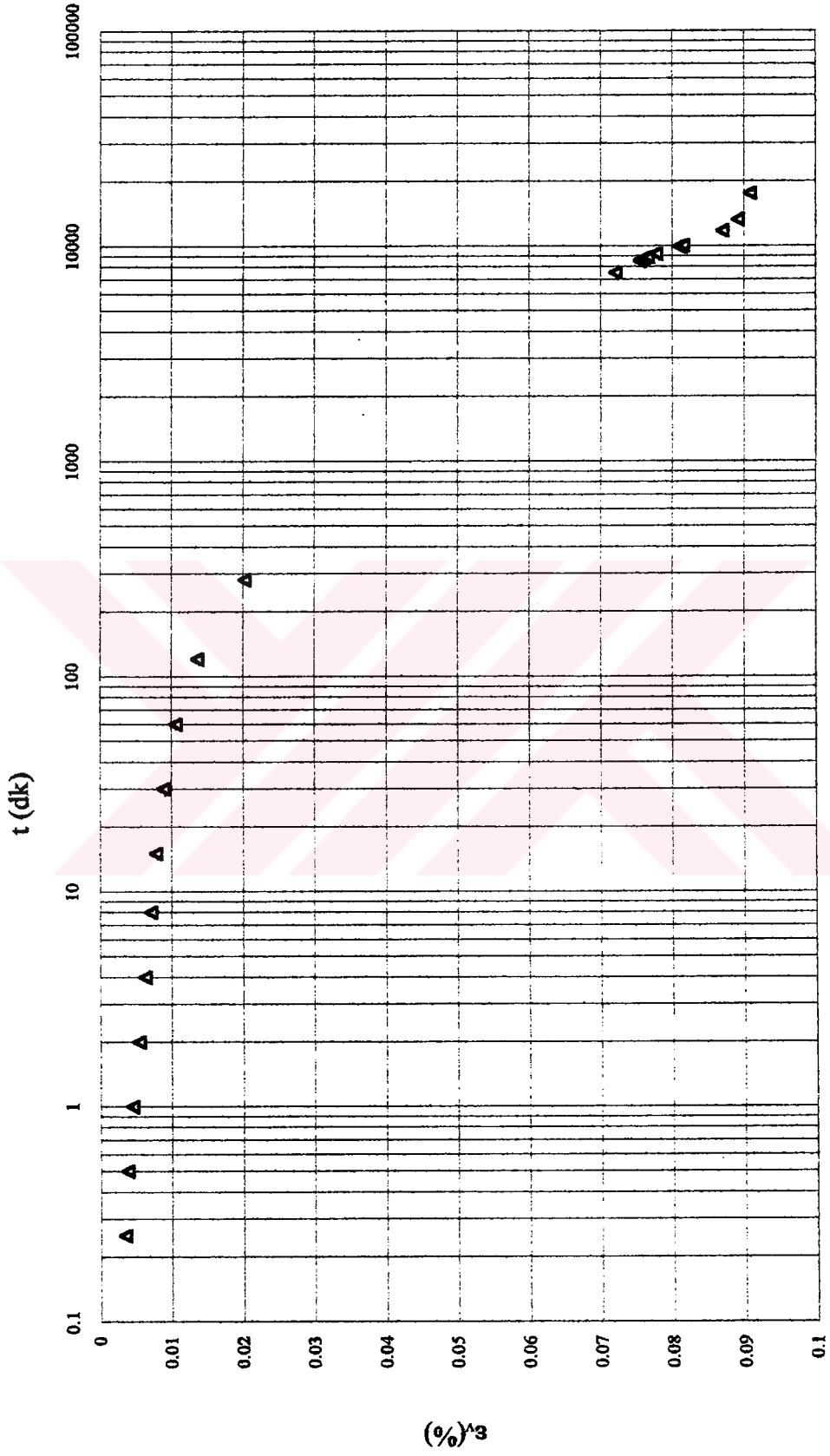
Ek 9.1 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:6 $\sigma'_v=5,23$ kPa



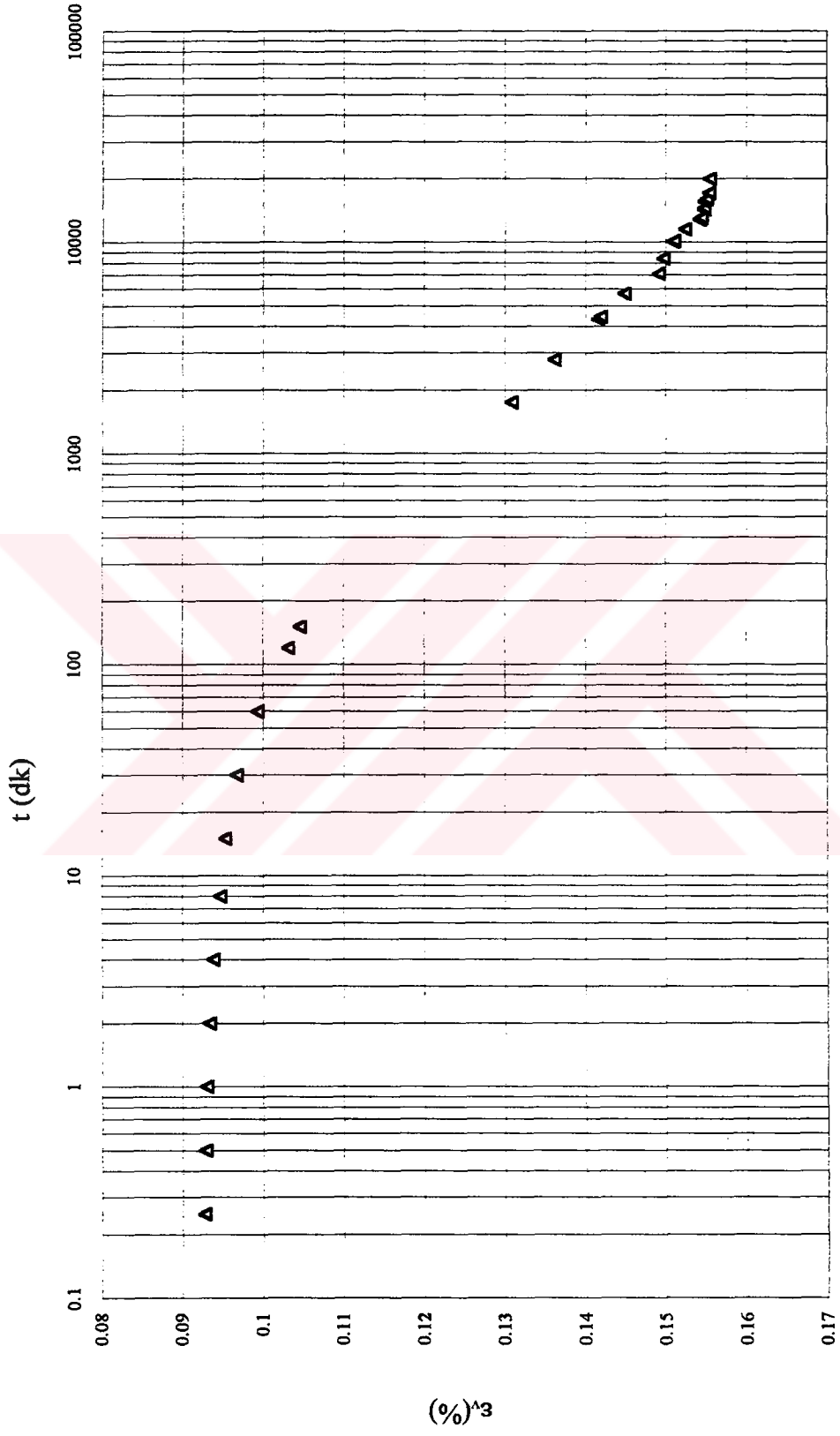
Ek 9.2 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:6 $\sigma'_v=10.33$ kPa



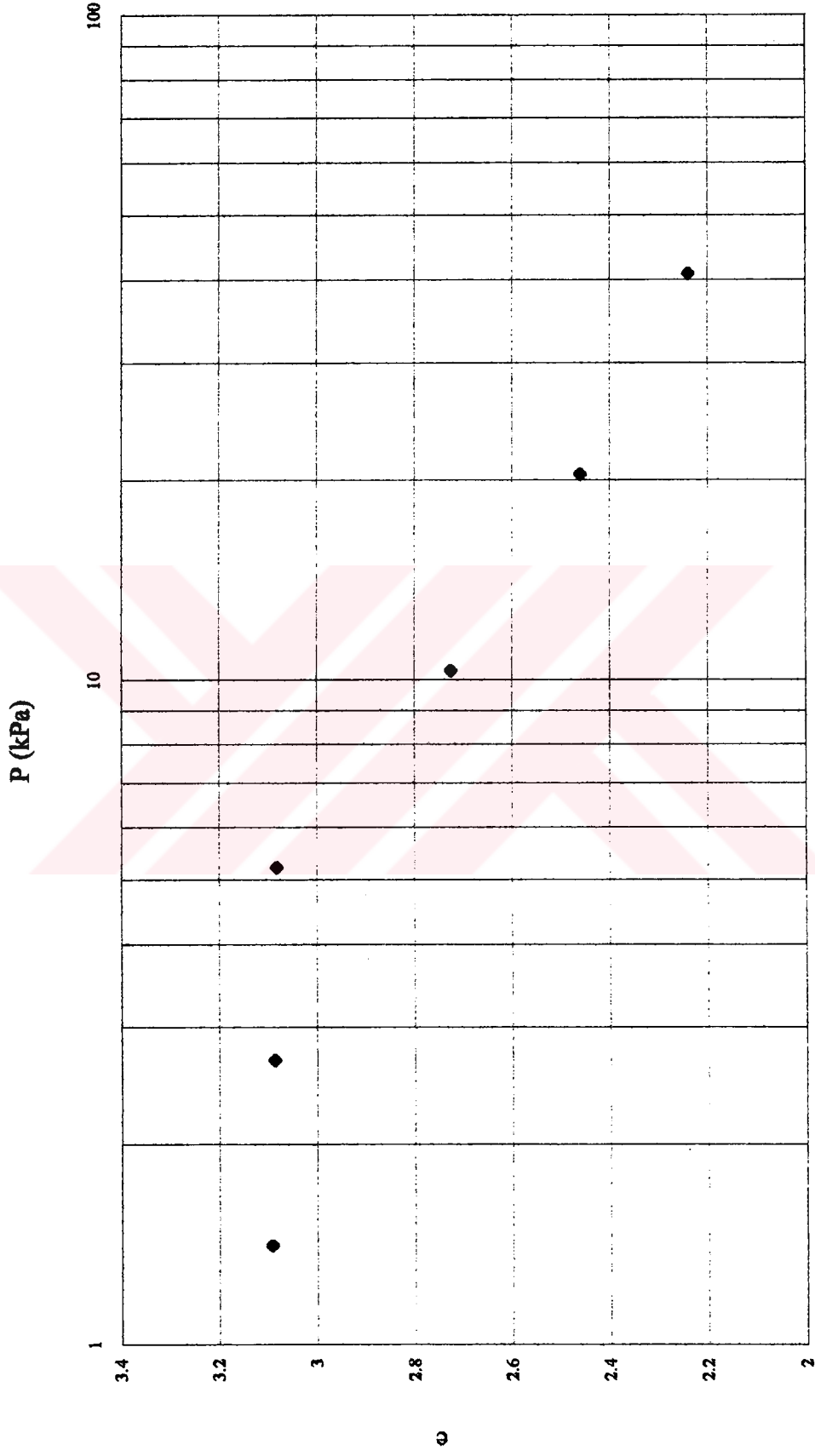
Ek 9.3 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:6 $\sigma'v=20.40$ kPa



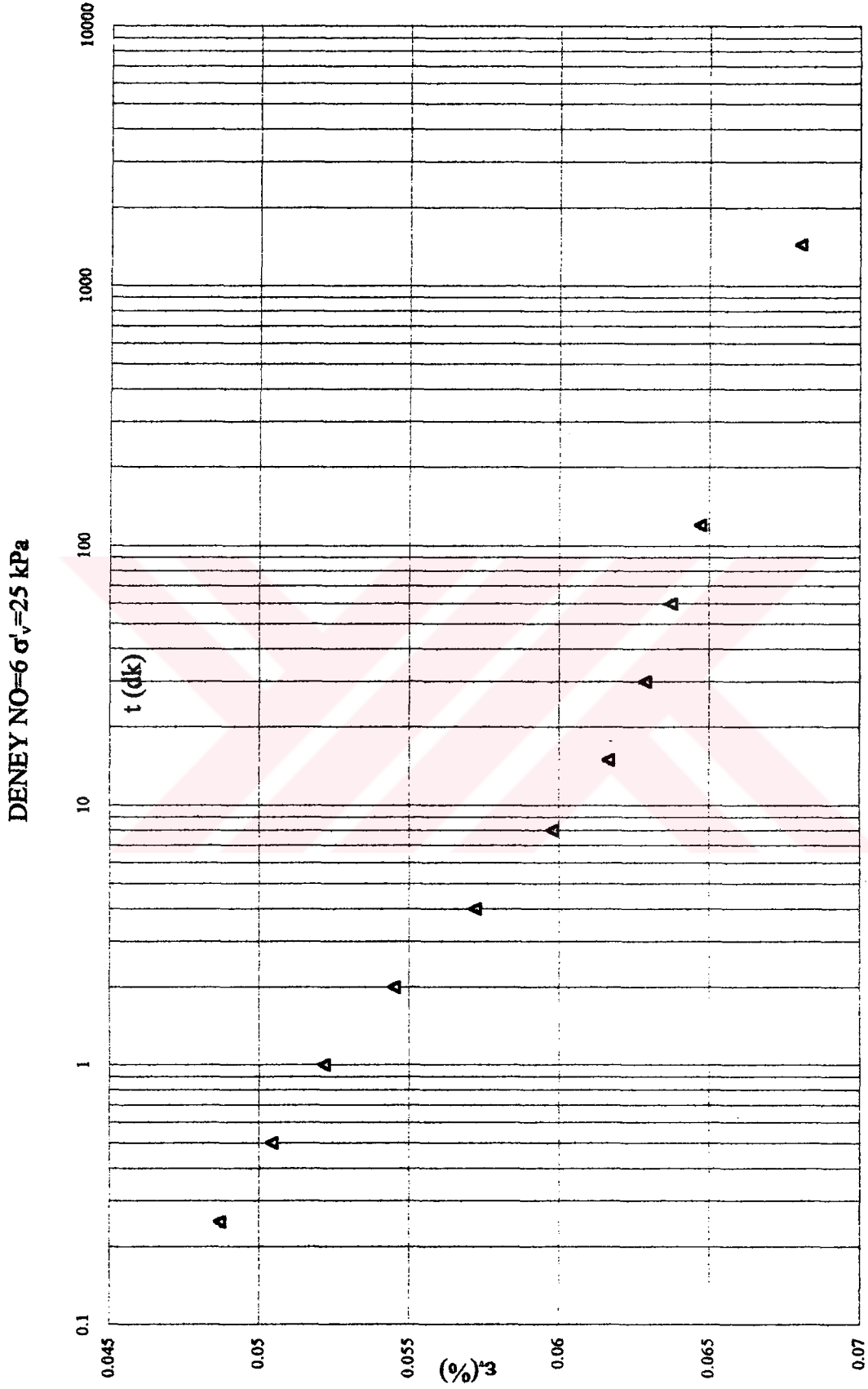
Ek 9.4 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:6

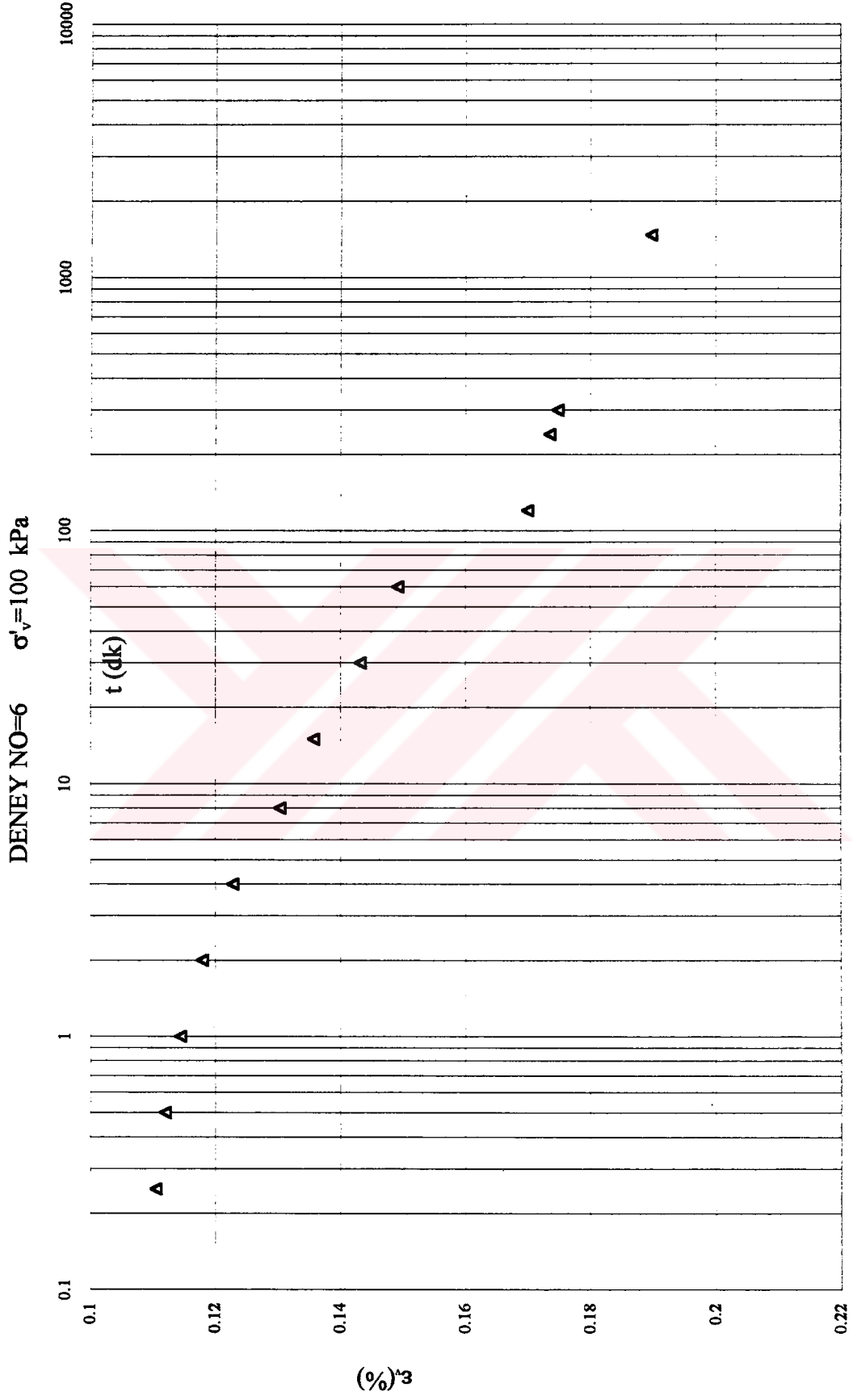


Ek 9.5 Konsolidasyon deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

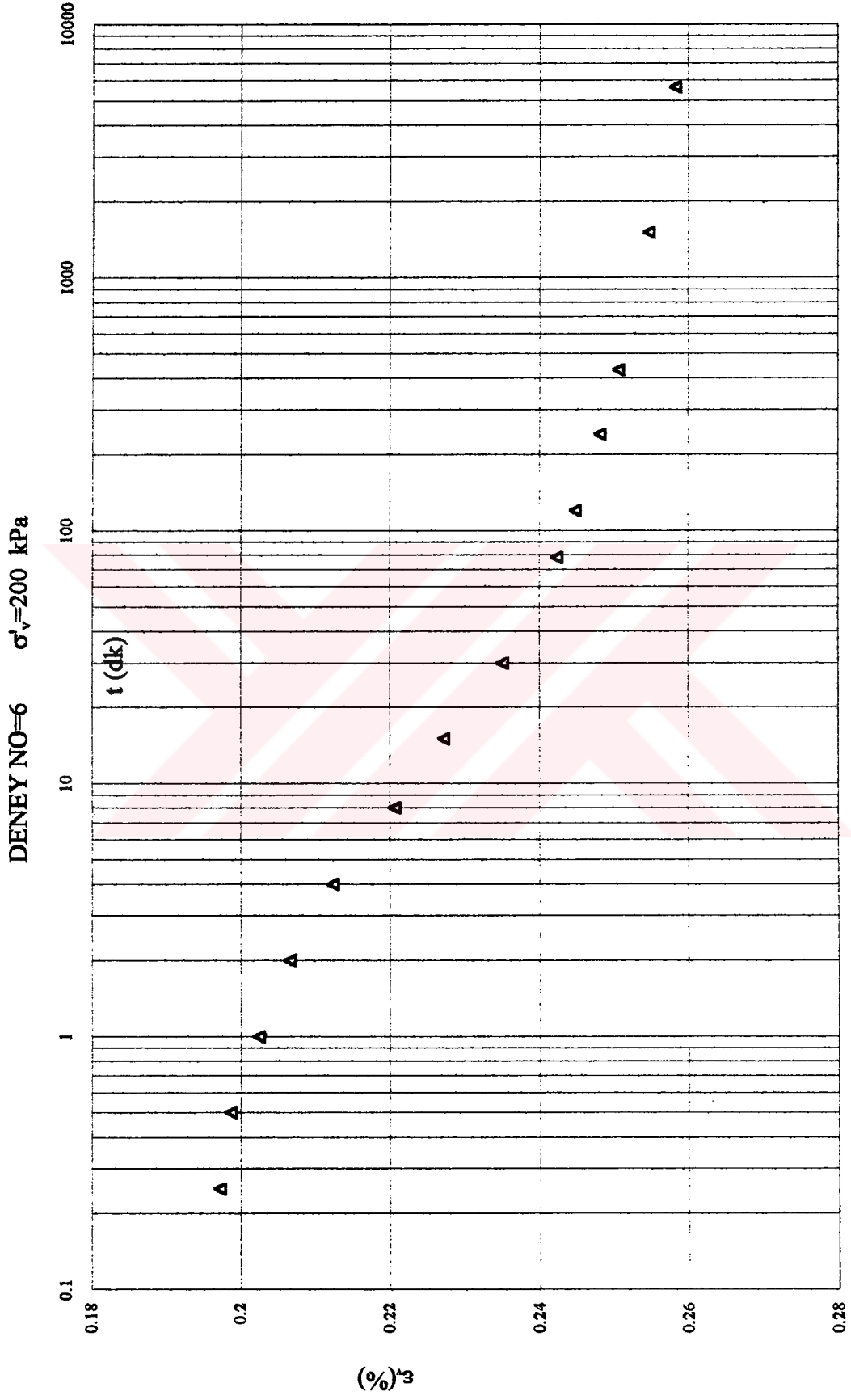
Ek 10 D6 Ödometre Deneyi Sonuçları



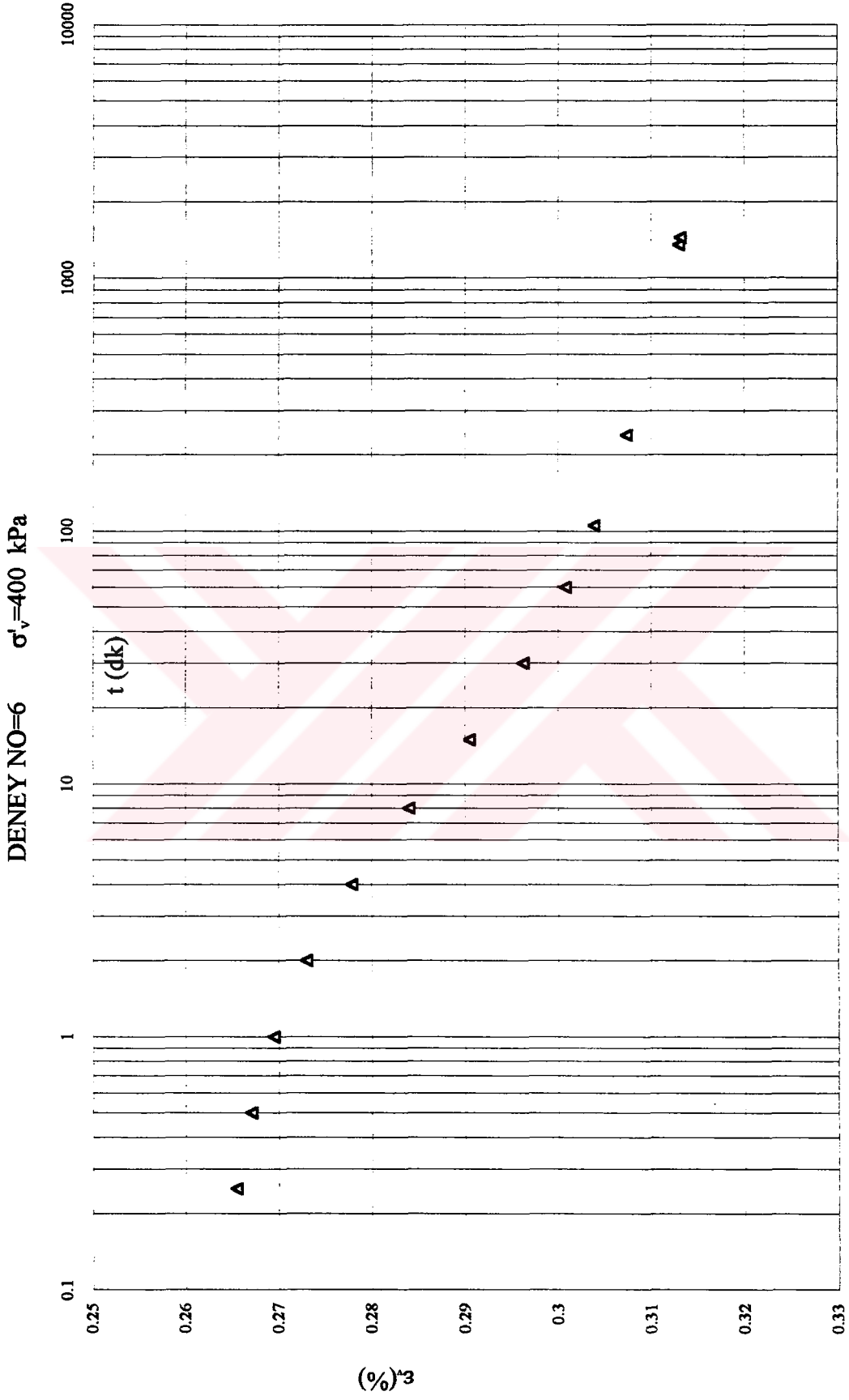
Ek 10.1 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



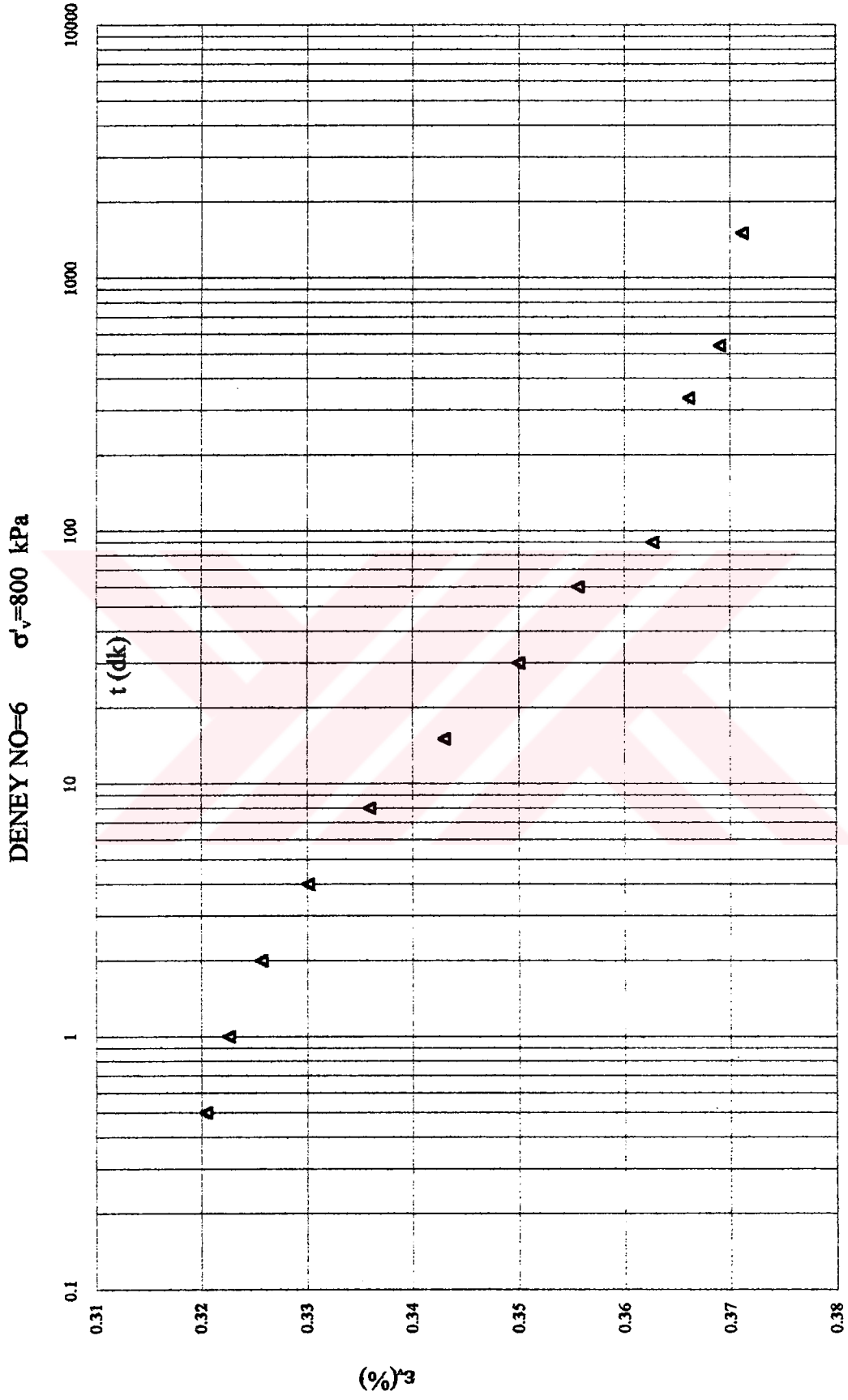
Ek 10.2 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



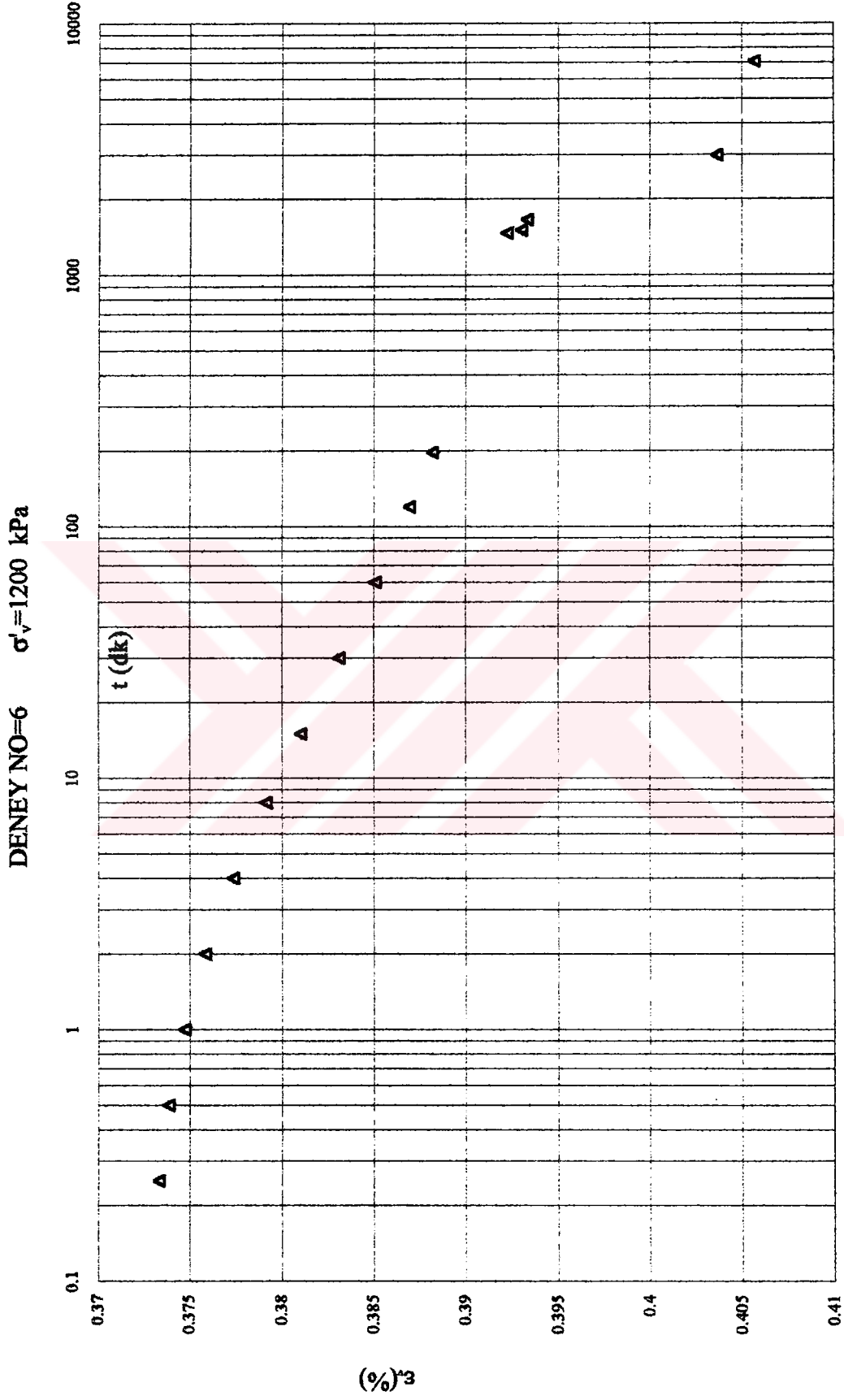
Ek 10.3 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



Ek 10.4 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

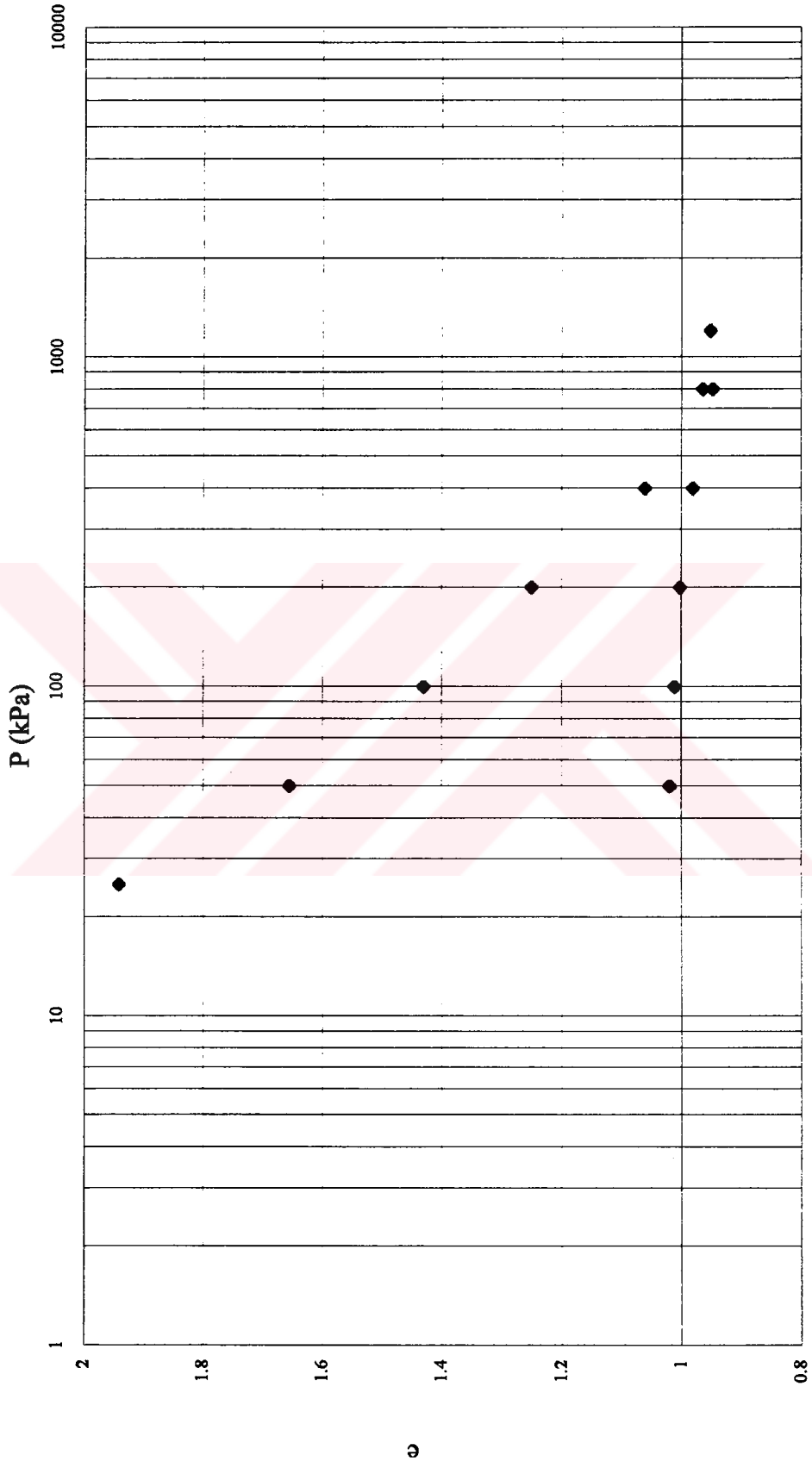


Ek 10.5 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



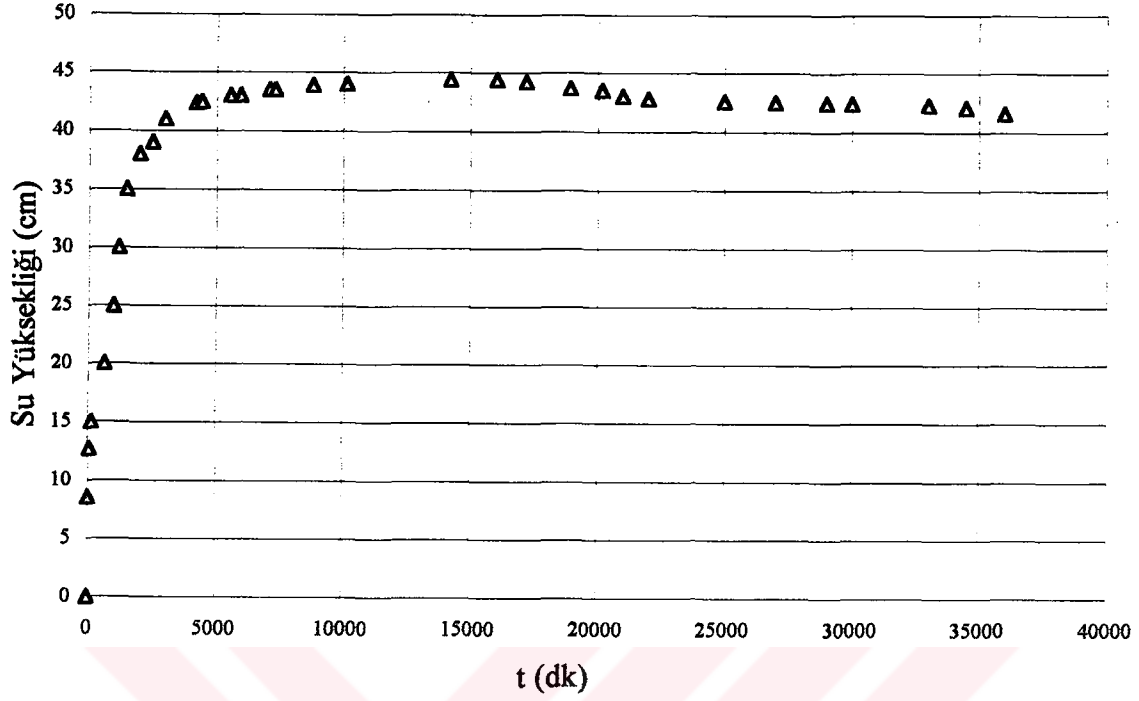
Ek 10.6 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:6

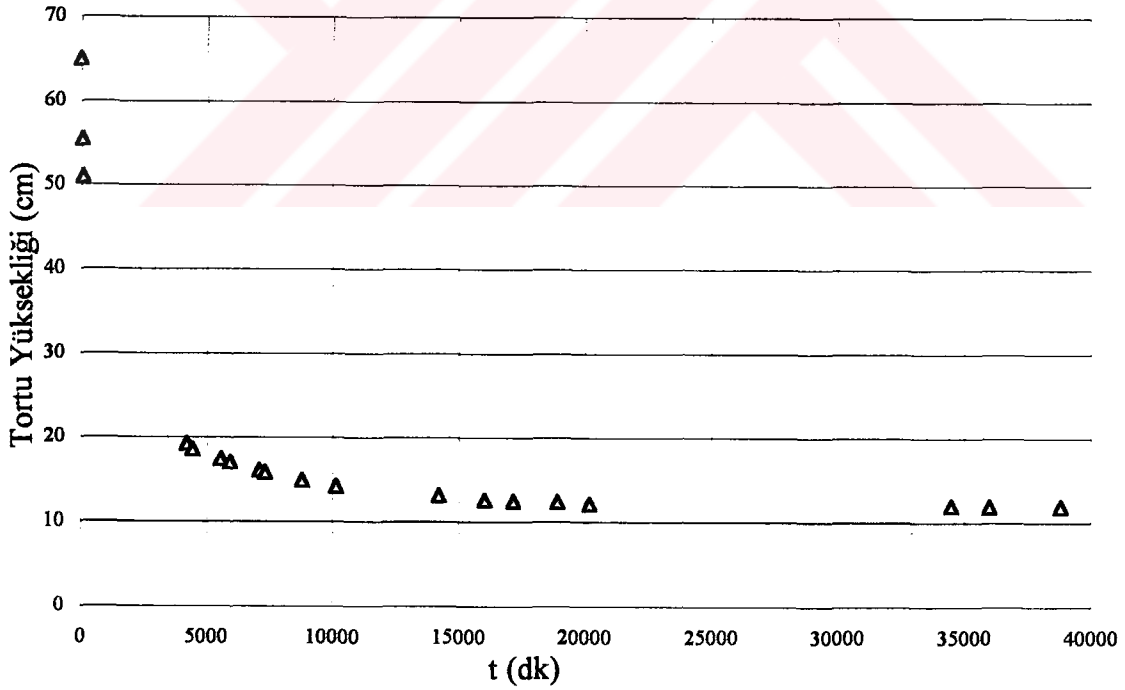


Ek 10.7 Ödometre deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

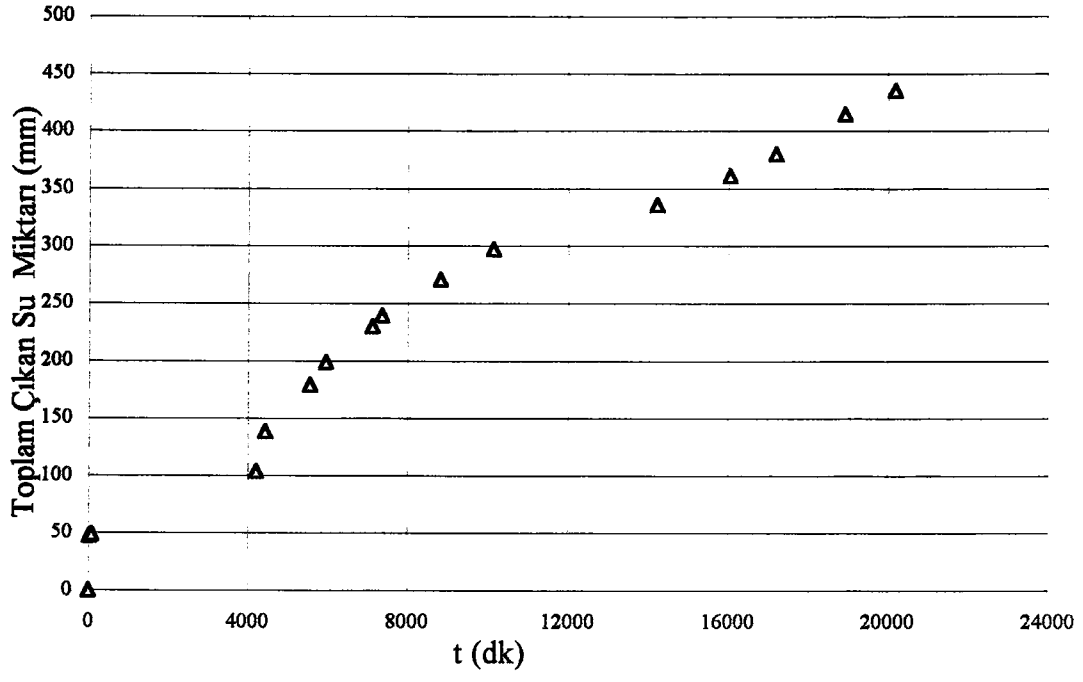
Ek 11 D7 Sedimentasyon Deneyi Sonuçları



Ek 11.1 Su yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (D7 Deneyi)

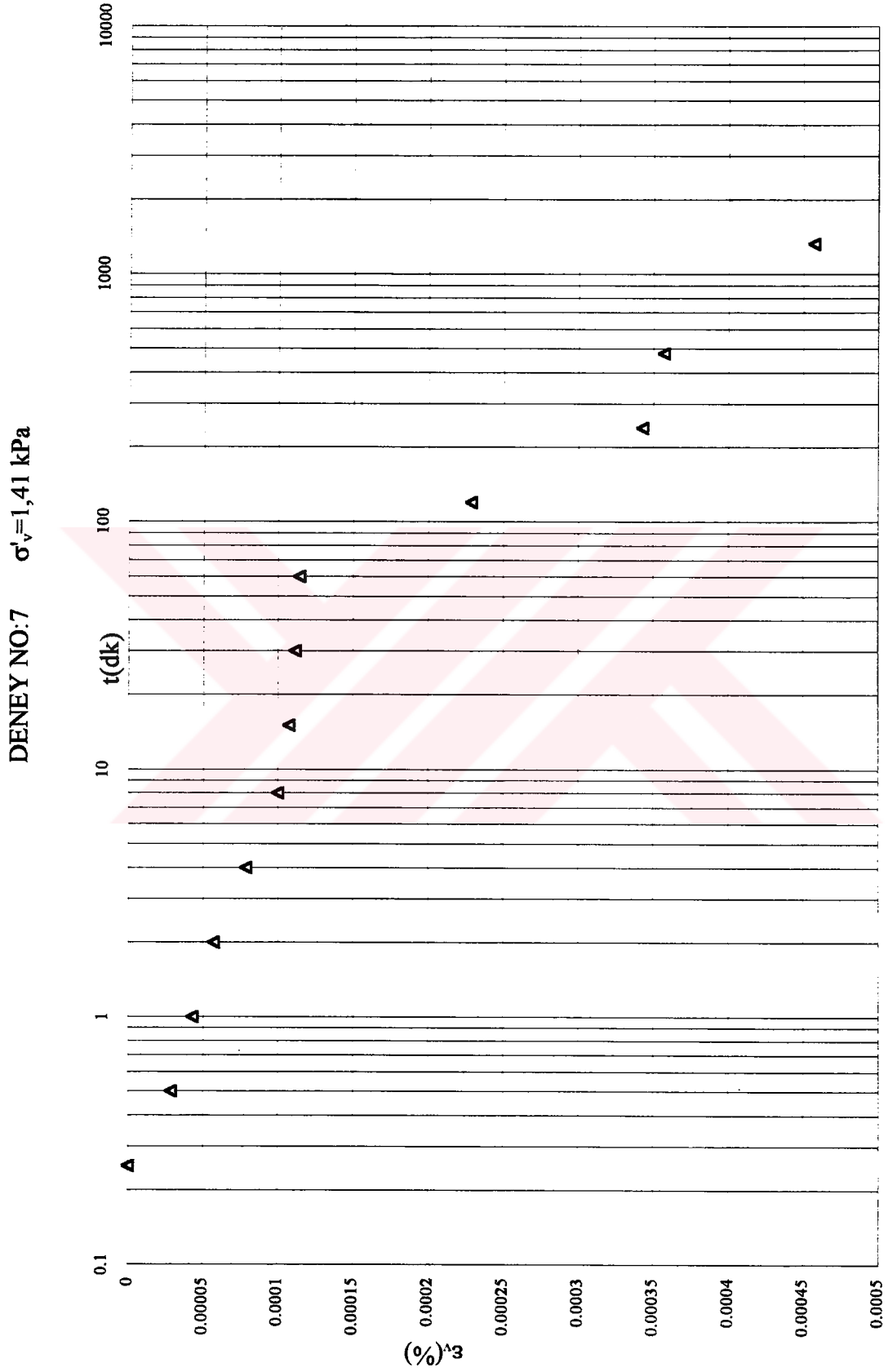


Ek 11.2 Tortu yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (D7 Deneyi)



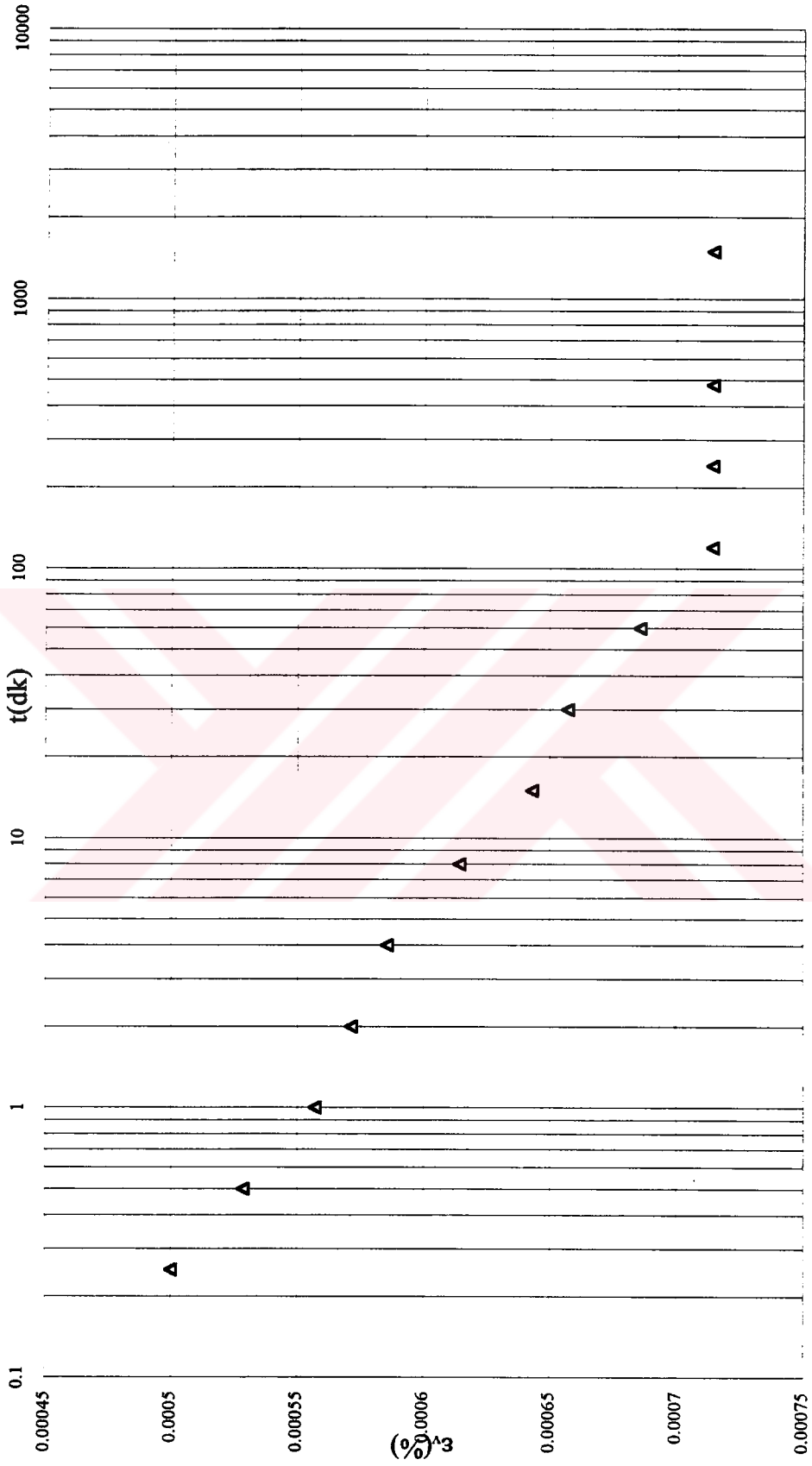
Ek 11.3 Toplam çıkan su miktarının zamana bağlı değişimi (D7 Deneyi)

Ek 12 D7 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

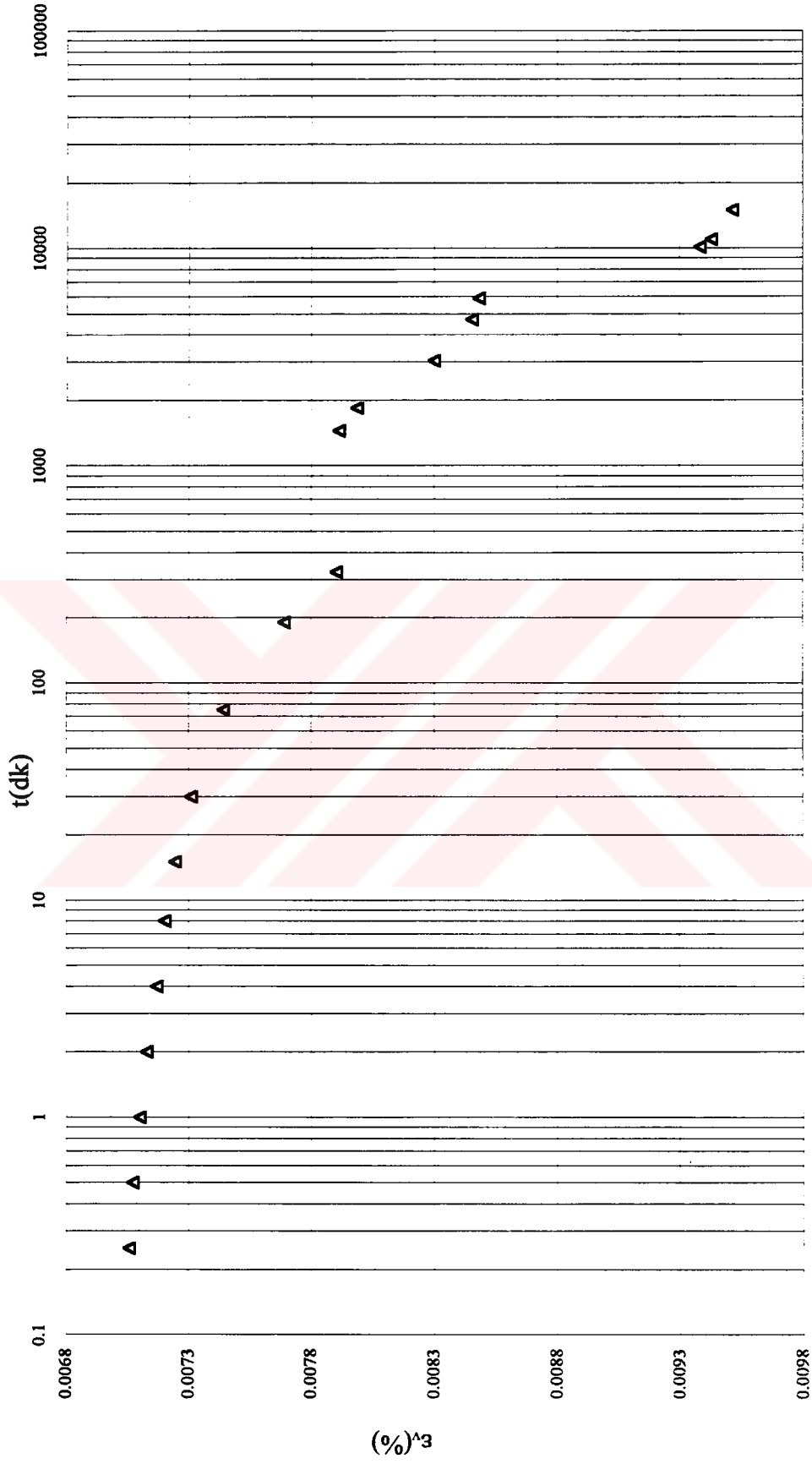


Ek 12.1 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:7 $\sigma'_v=2,68 \text{ kPa}$

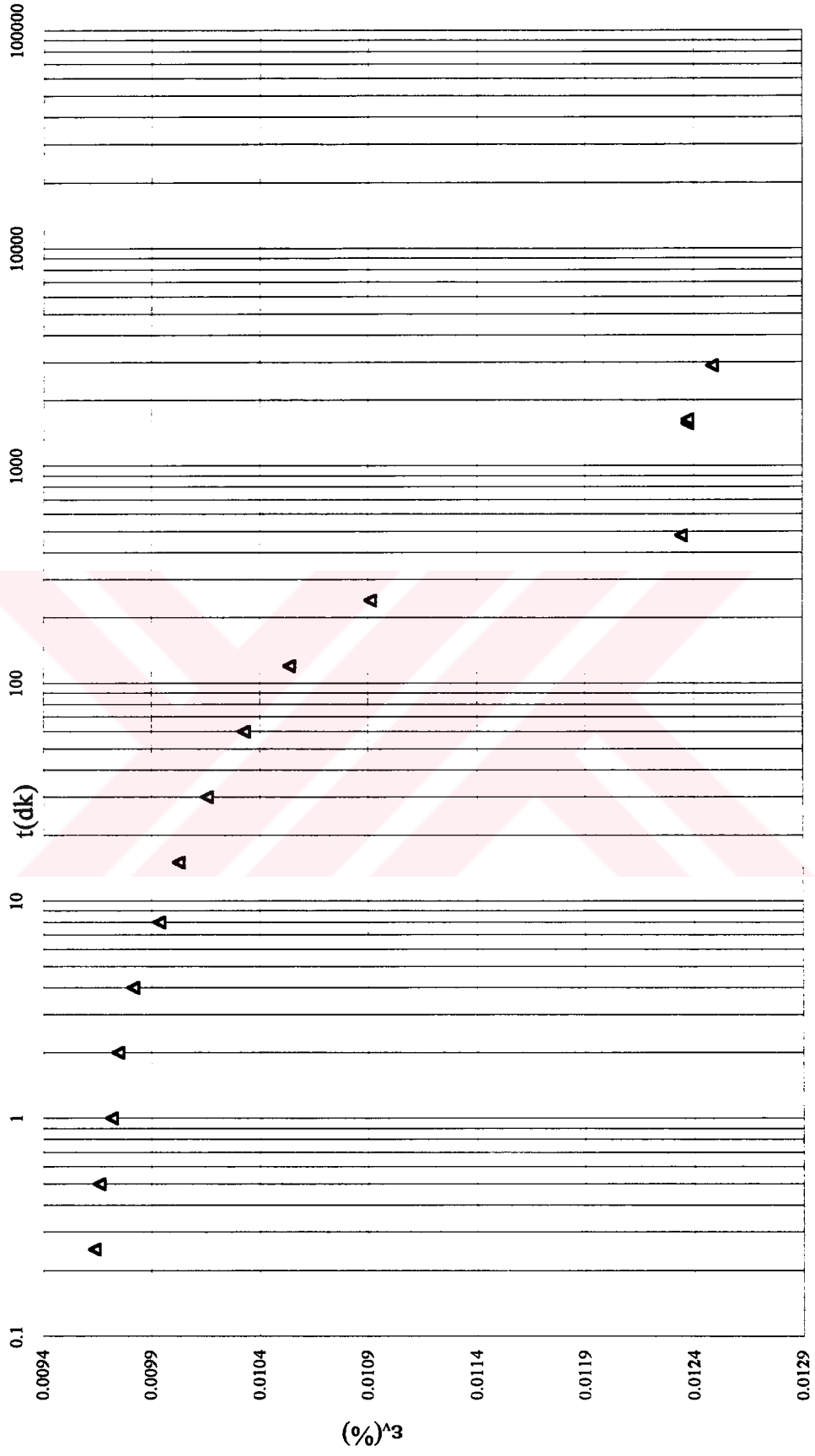


Ek 12.2 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:7 $\sigma'_v=5,23$ kPa

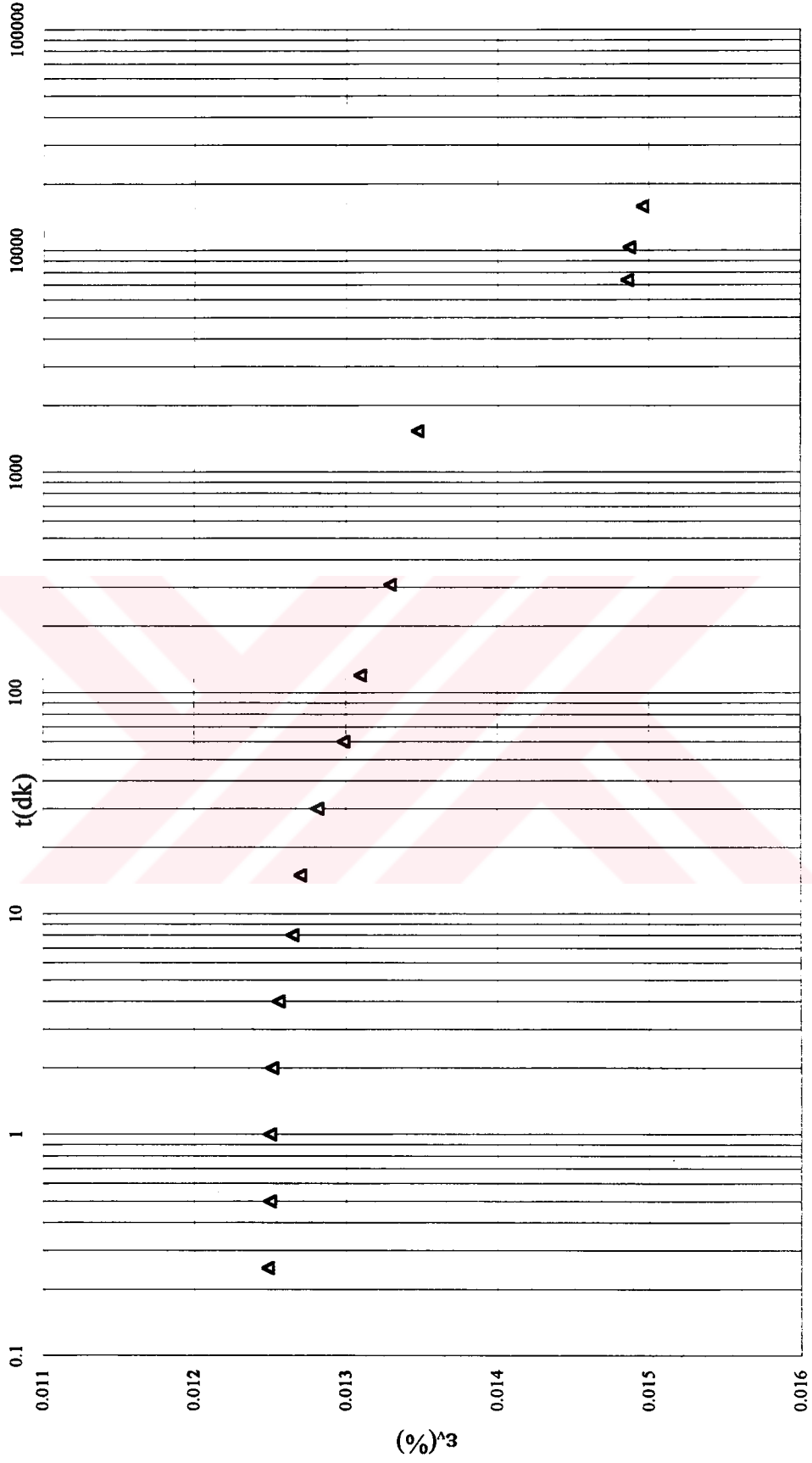
Ek 12.3 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:7 $\sigma'_v=10,33$ kPa



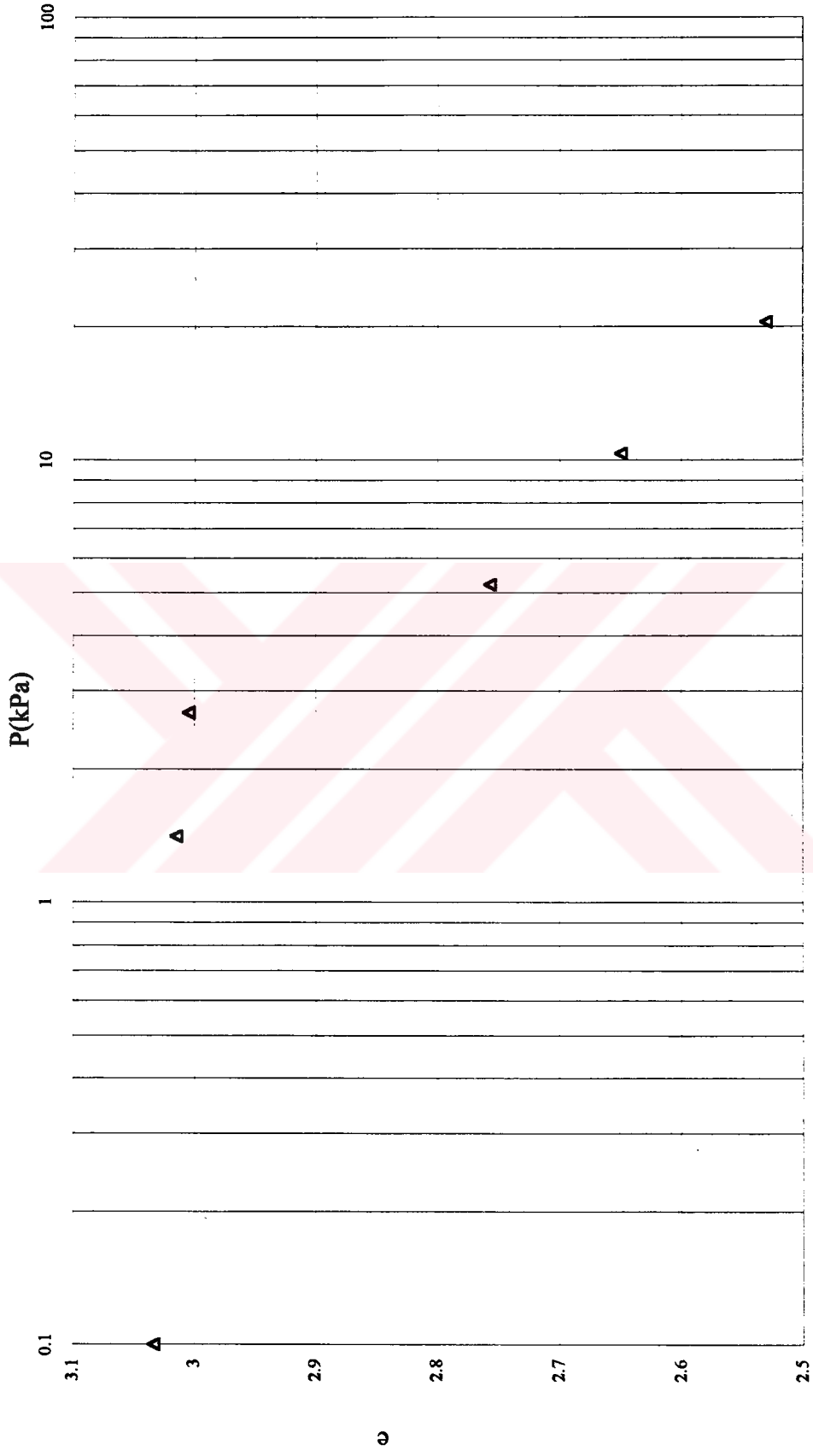
Ek 12.4 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:7 $\sigma'_v=20.40$ kPa



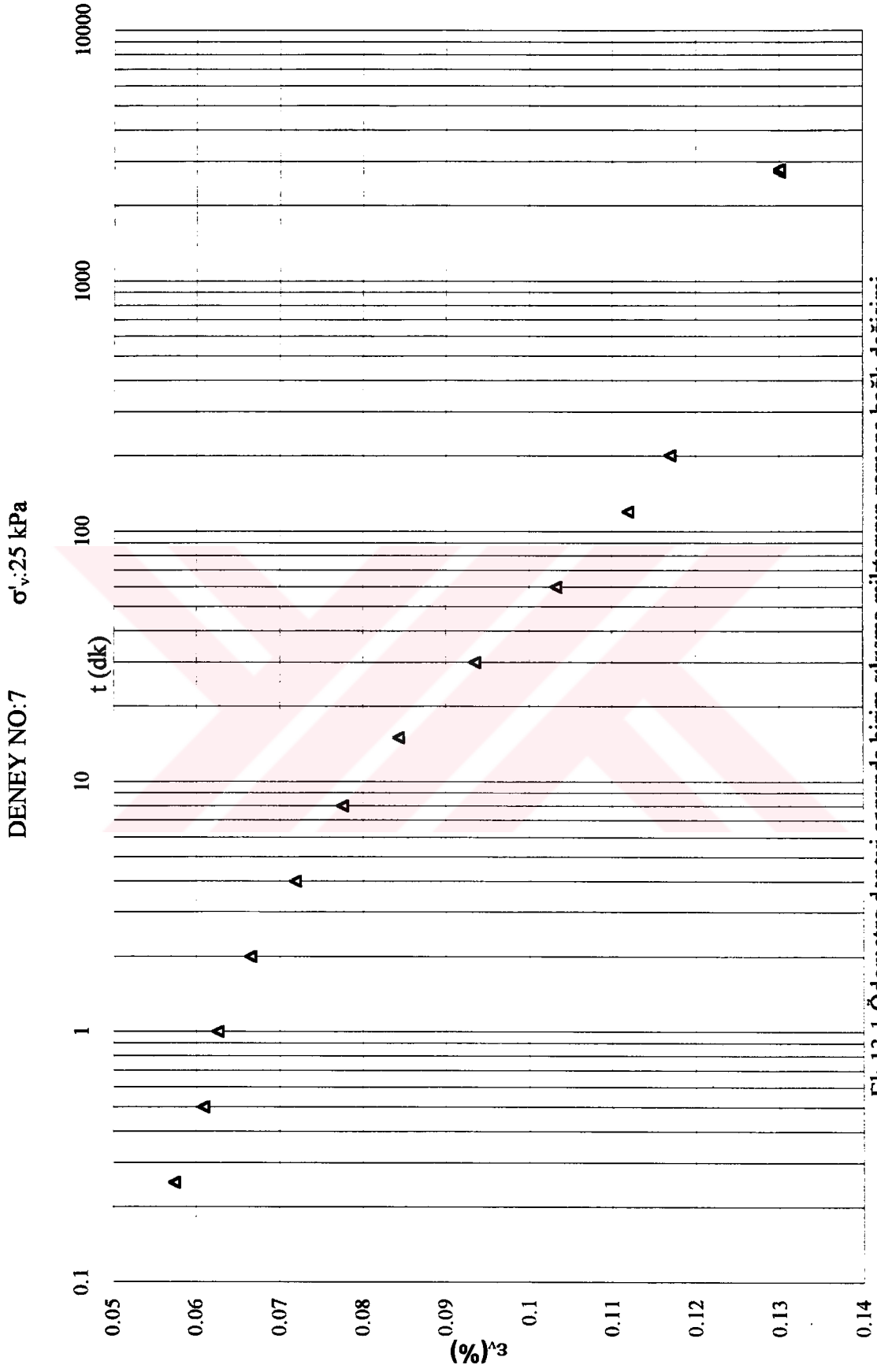
Ek 12.5 Konsolidasyon deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

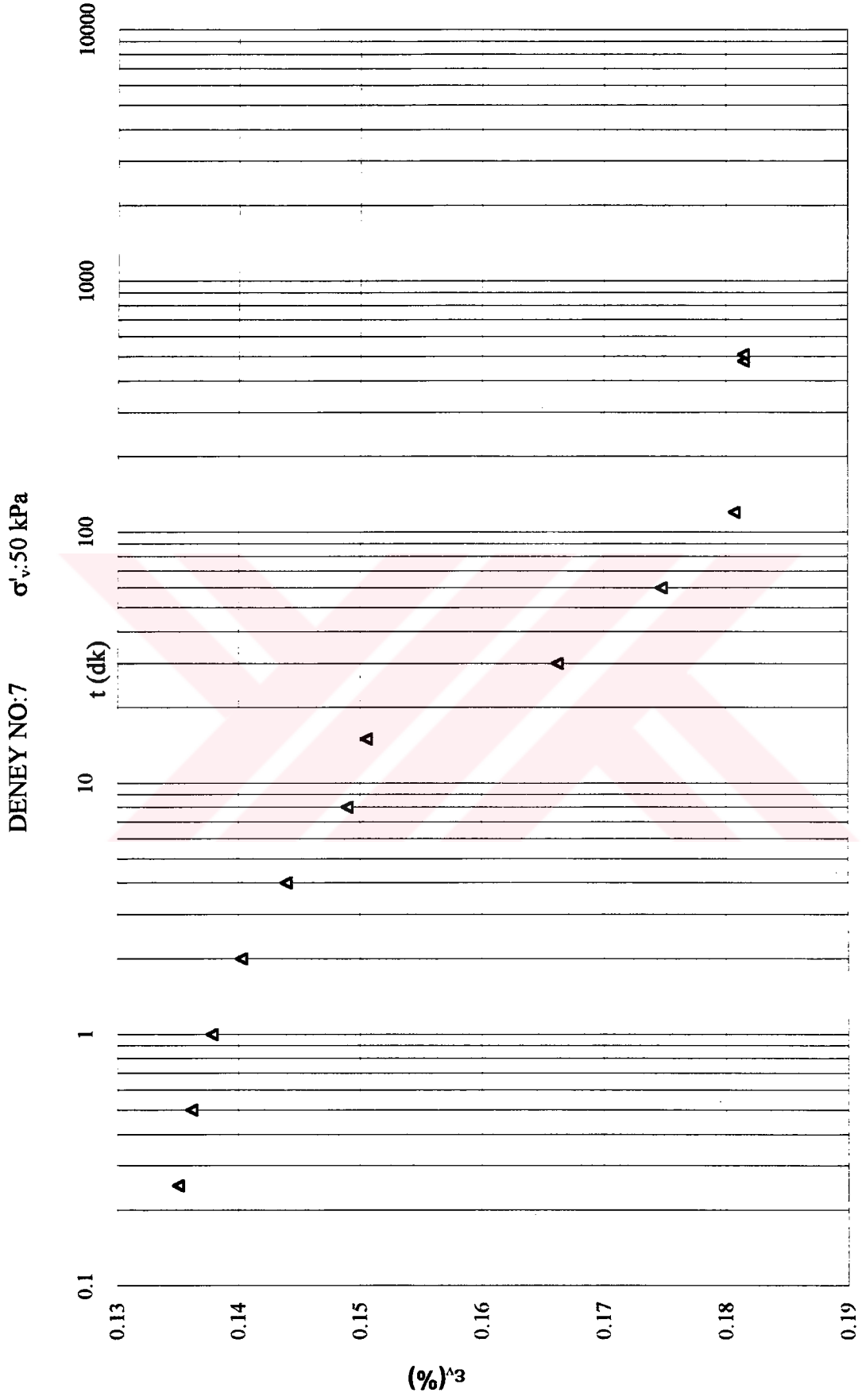
DENEY NO:7



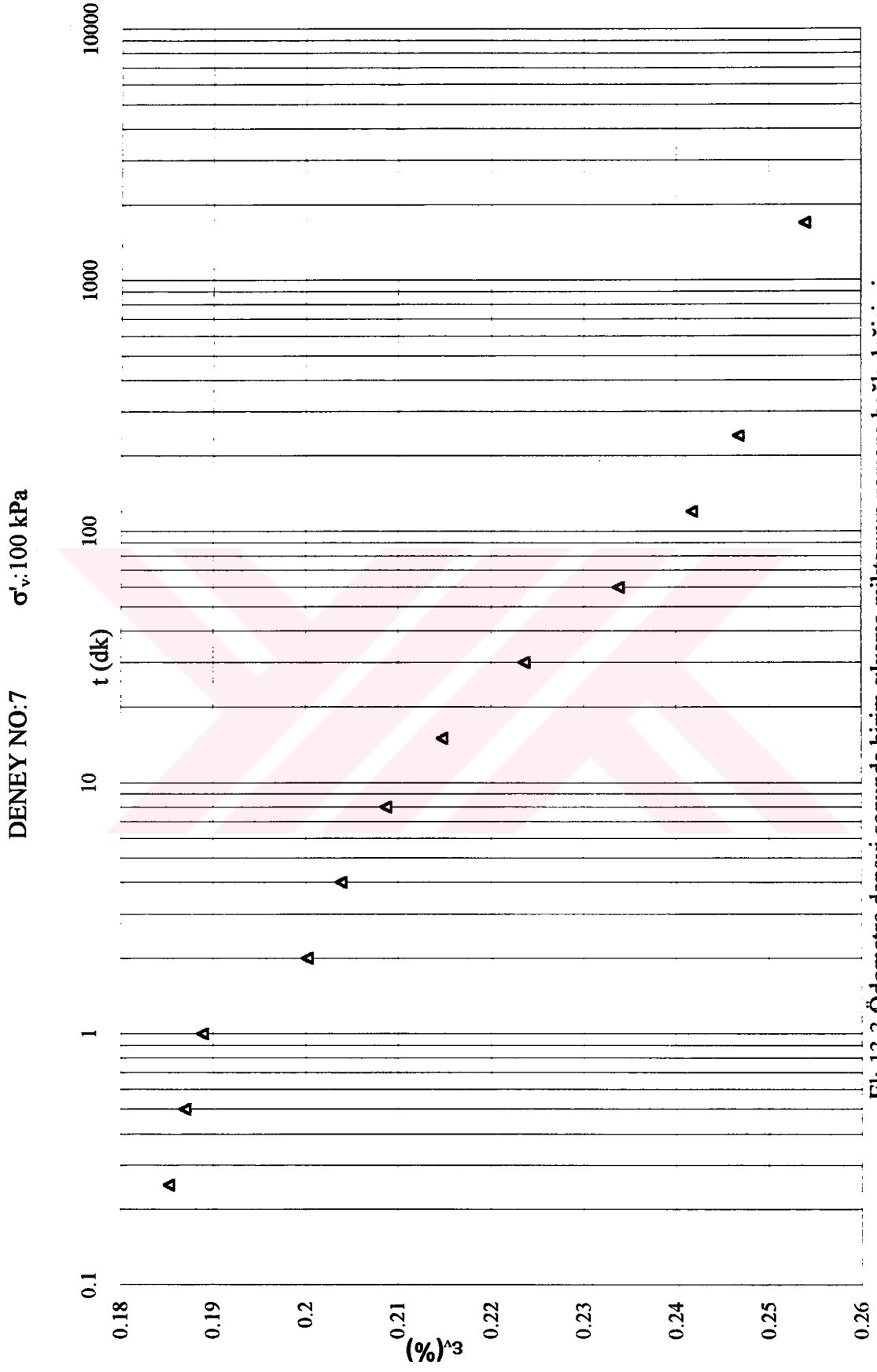
Ek 12.6 Konsolidasyon deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

Ek 13 D7 Ödometre Deneyi Sonuçları

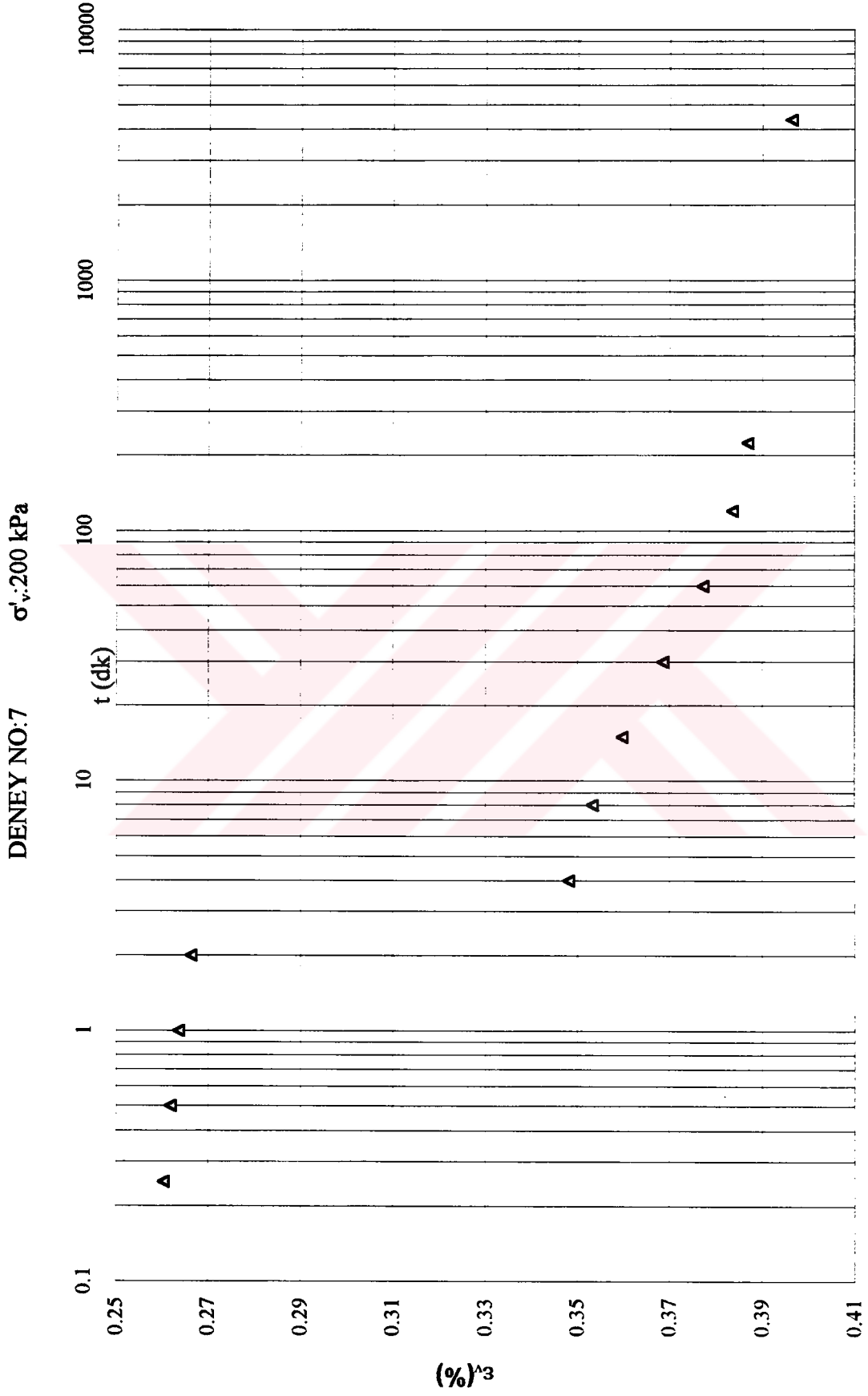




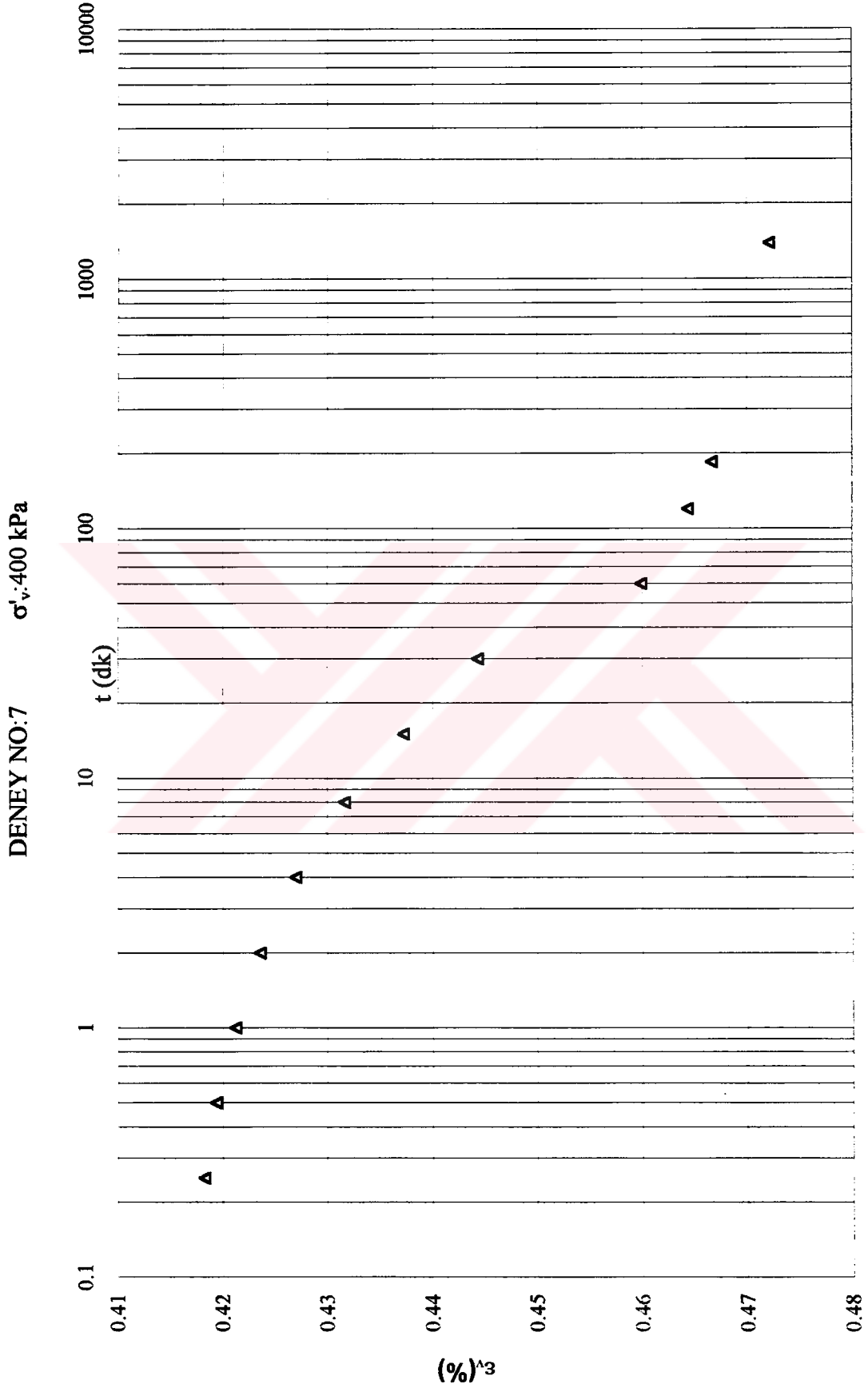
Ek 13.2 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



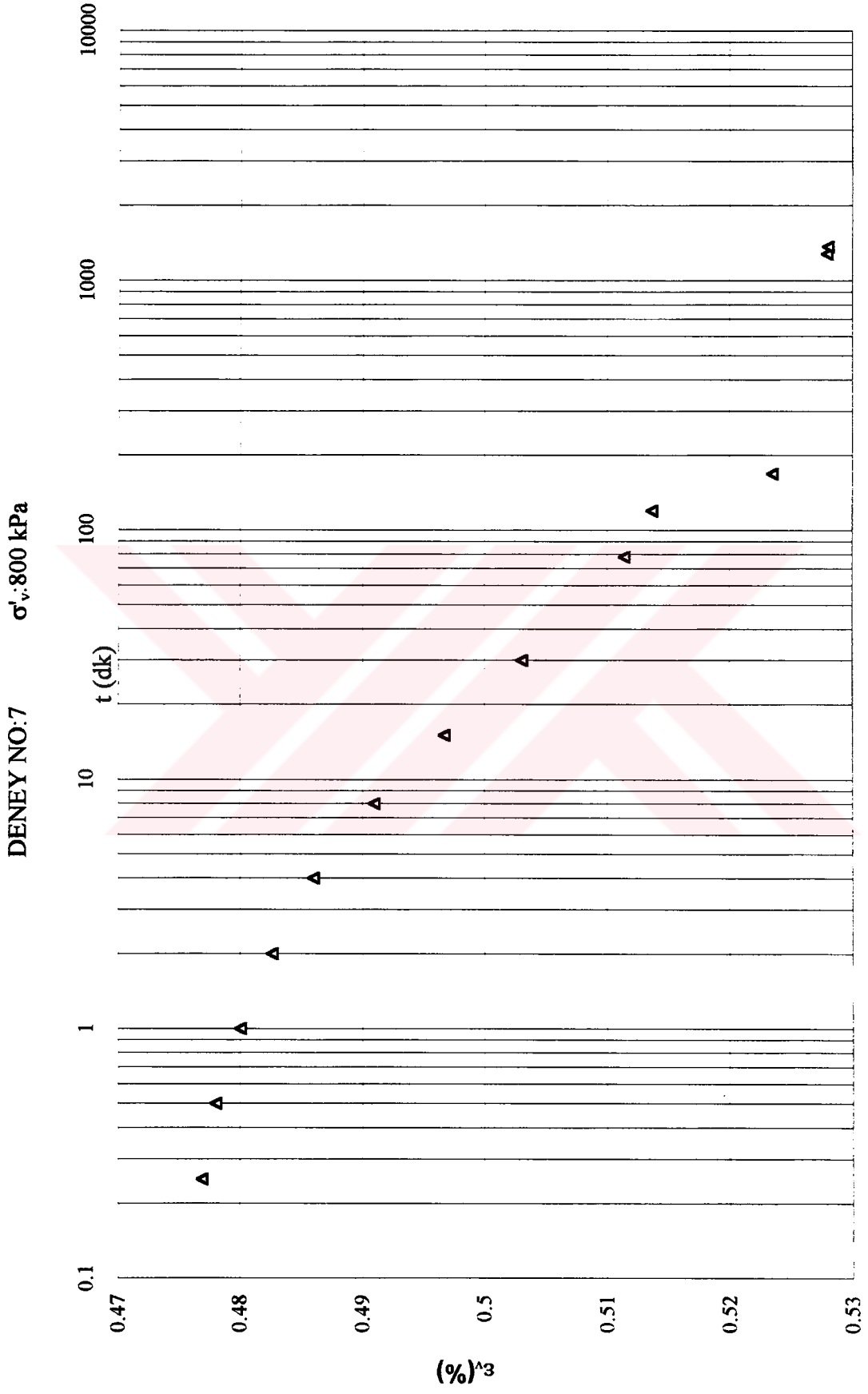
Ek 13.3 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



Ek 13.4 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

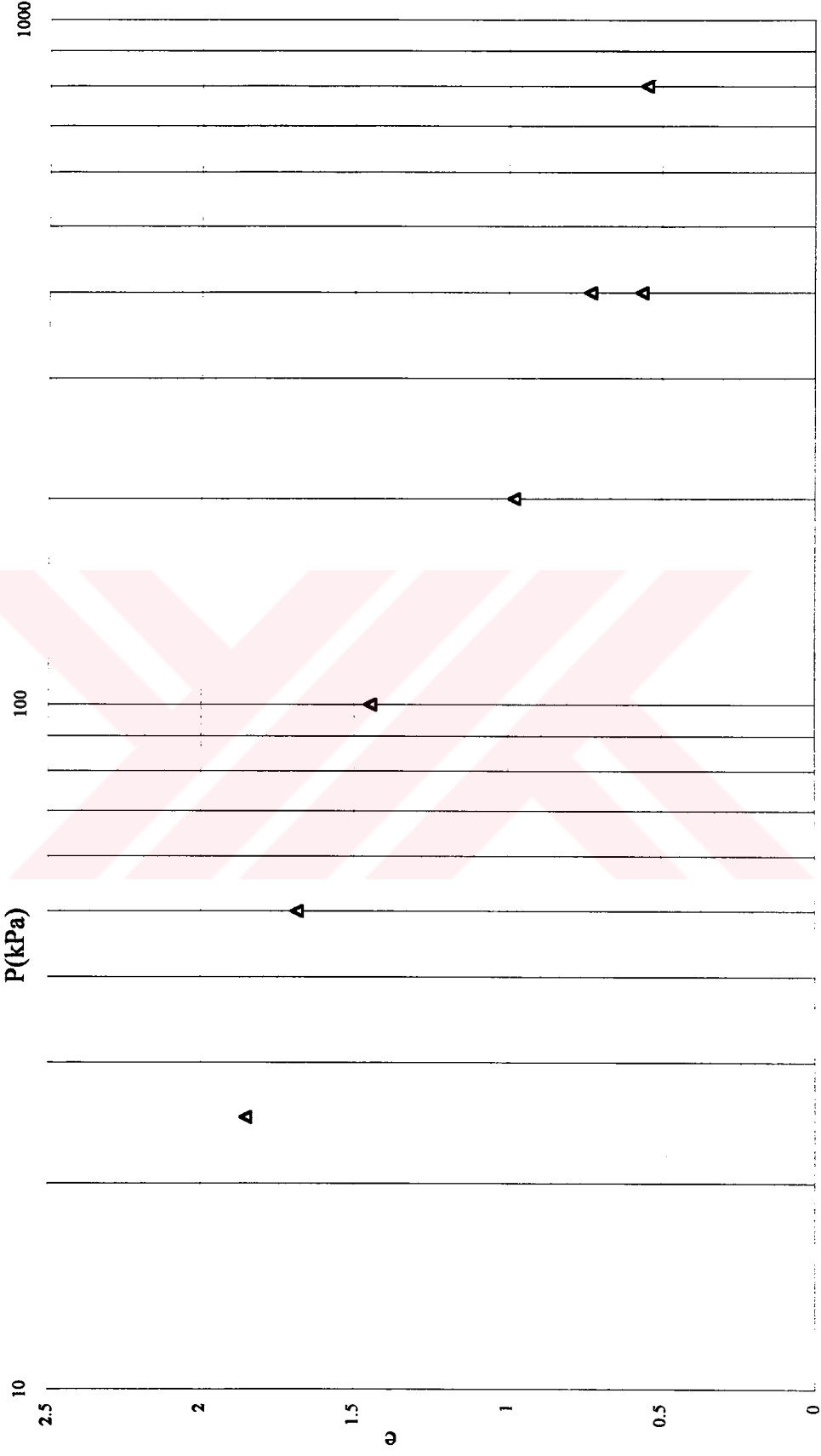


Ek 13.5 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi



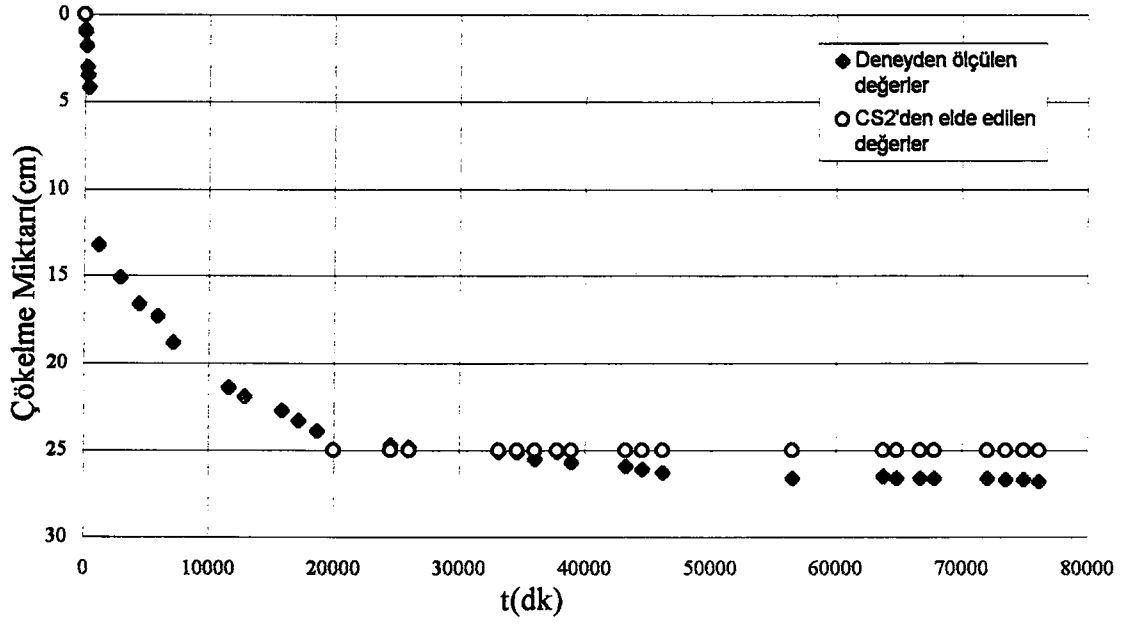
Ek 13.6 Ödometre deneyi sonunda birim sıkışma miktarının zamana bağlı değişimi

DENEY NO:7

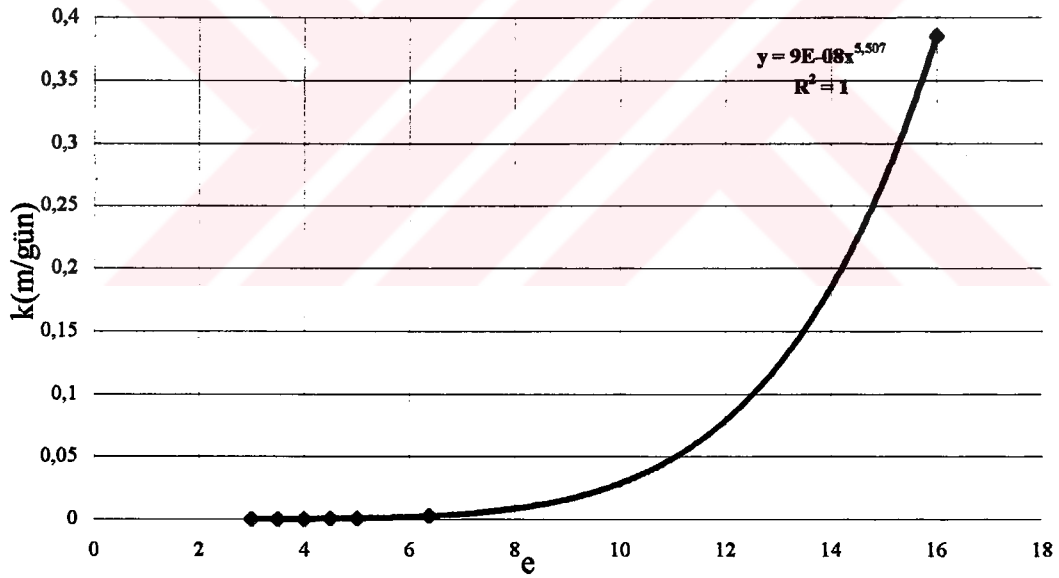


Ek 13.7 Ödometre deneyi sonunda boşluk oranının konsolidasyon basıncı ile değişimi

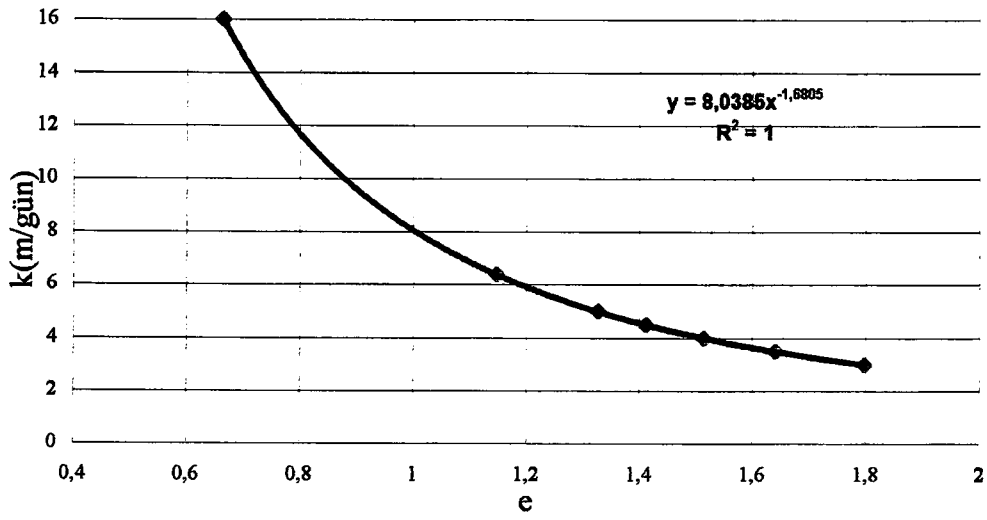
Ek 14 D5 Deneyi CS2 Programı Sonuçları



Ek 14.1 Deney ve CS2 Çökme-zaman uyumu(D5 Deneyi)



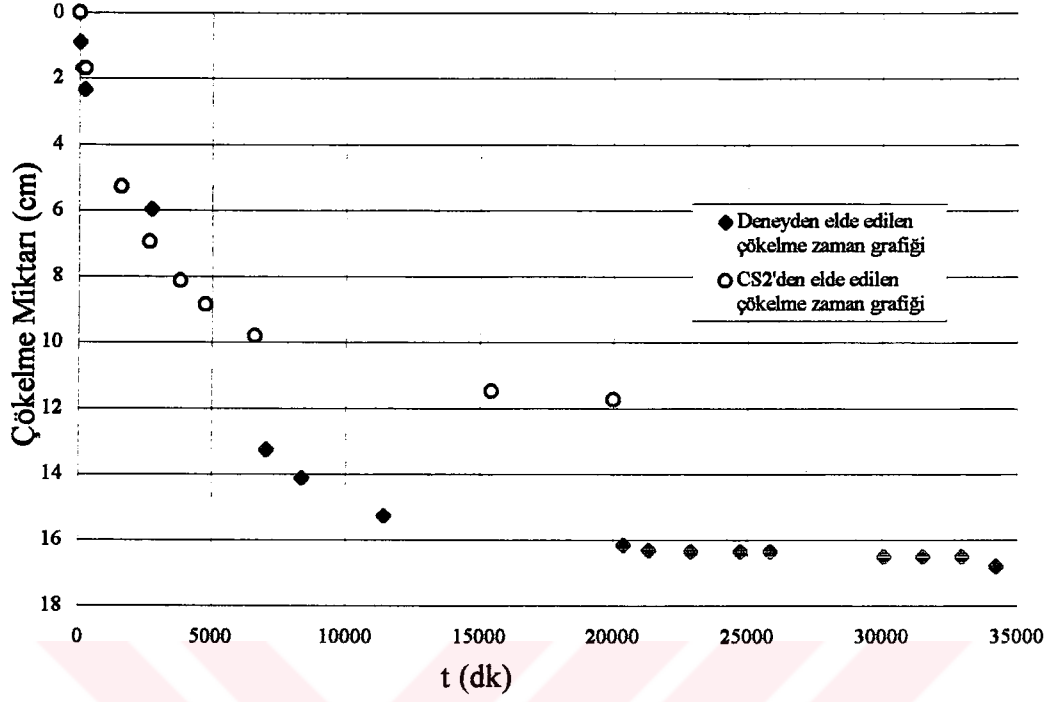
Ek 14.2 Boşluk oranının permeabilite ile değişimi(D5 Deneyi)



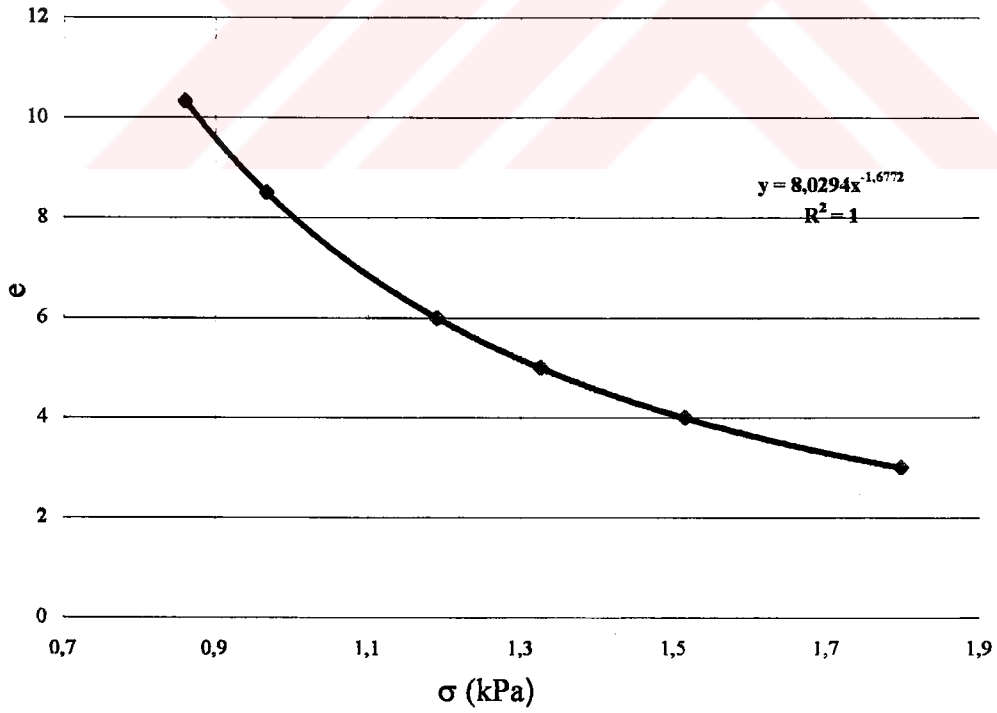
Ek 14.3 Boşluk oranının permeabilite ile değişimi



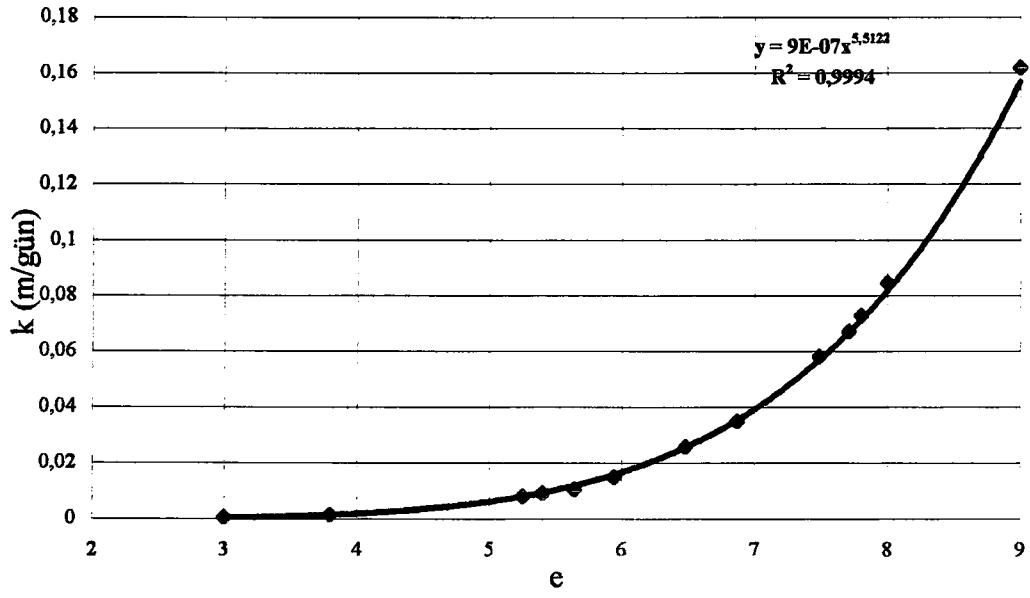
Ek 15 D6 Deneyi CS2 Programından elde edilen değerler



Ek 15.1 Deney ve CS2 çökme-zaman uyumu(Deney No:6)



Ek 15.2 Boşluk oranının efektif gerilme ile değişimi(Deney No:6)



Ek 15.3 Boşluk oranının efektif gerilme ile değişimi (Deney No:6)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.04.1974	
Doğum yeri	Yerköy	
Lise	1987-1990	Nevşehir Lisesi
Lisans	1990-1994	Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1995-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı
Çalıştığı Kurumlar	1994-1998	Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Araştırma Görevlisi