

624.131.6 : 519.876.5  
A 467 S

1996-1372

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK  
ARAŞTIRMA KURUMU

PROJE NO : MAG-245

SU YAPILARINDA KAPAKLAR ALTINDAKİ  
YEREL OYULMANIN BENZEŞİM KANUNLARI

Y.Prof.Dr.H.Doğan ALTINBİLEK

Ankara, 1971

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

Mühendislik Araştırma Grubu

Proje No : 245

624.131.6:519.876.5

A467S

SU YAPILARINDA KAPAKLAR ALTINDAKİ

YEREL OYULMANIN BENZEŞİM KANUNLARI

Proje Direktörü : Y.Prof.Dr.H. Doğan Altınbilek

Yardımcı Araştırmacı : Yakup Basmacı

Bu Proje Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumunun Desteği ile  
O.D.T.Ü. Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümünde yapılmıştır.

Başlama Tarihi : 1.9.1970

Bitme Tarihi : 1.9.1971

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK

ARAŞTIRMA KURUMU

(PROJE MAG-245)

SU YAPILARINDA KAPAKLAR ALTINDAKİ  
YEREL OYULMANIN BENZEŞİM KANUNLARI

Proje Direktörü : Y.Prof.Dr.H.DOĞAN ALTINBİLEK

ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ SULAMA LABORATUARI

ANKARA, 1971

14558

ÖNSÖZ

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından müstareken desteklenmiş olup, çalışmanın gerektirdiği deneyler O.D.T.Ü. Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır. Araştırmanın nümerik hesaplamaları için O.D.T.Ü. Elektronik Hesap Bilimleri Merkezi'nin IBM-360 sistemi kullanılmıştır.

Araştırmanın deney çalışmaları ve donelerin değerlendirilmesi Sulama Laboratuvarı asistanlarından Yardımcı Araştırmacı İnşaat Mühendisi Yakup Basmacı tarafından yapılmış olup yazar kendisine dikkatli ve gayretli çabalarından ötürü teşekkürü borç bilir. Yazar, ayrıca destekleyici iki kuruluşa ve bu çalışma sırasında emekleri geçen fotoğrafçı-ressam Haluk Cangökçe, deneyci Aydın Mendi ile raporun hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Fulya Yeşiladalı'ya içtenlikle teşekkür eder.

ABSTRAKT

Su yapılarında dik kapaklar altında ve kohezyonsuz gevşek zeminlerde yatay jet akımdan dolayı meydana gelen oyulmanın benzeşim kanunları araştırıldı. Yerel oyulmanın analizi, süreklilik denkleminin yerel oyulma çukuru için tatbikine dayanmaktadır. Oyulmanın analizi sırasında teorik ifadelerin katsayıları deneysel neticelere dayanarak tayin edilmektedir. İki - boyutlu jet akımla değişik kapalı aralıkları ve üç çeşit malzeme ile oyulma deneyleri yapılarak oyuntu çukurunun zamanla değişmesi incelendi. Elde edilen deneysel neticeler, oyuntu derinliğini tahmin için bulunan denklemle karşılaştırıldı. Limit oyulma derinliğini veya oyulmanın zamanla değişimini tayin için pratikte kullanılacak abaklar hazırlandı.

ABSTRACT

The similarity laws for the scour caused by jet flow under the vertical gates of hydraulic structures are investigated. The analysis of local scour is based on the application of continuity principle to scour hole as control volume. In analysis the coefficients of theoretical expressions are obtained from experimental data. Scour experiments were made to determine the development of scour hole under two-dimensional jet flow for different gate openings and for three different size of bed material. Experimental data is compared by prediction equation. Nomographs are prepared for determination of terminal scour depth and for the development of scour hole.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM		SAYFA
I	YEREL OYULMANIN TANIMLANMASI VE LİTERATÜRÜN İNCELENMESİ	1
	A. Genel	1
	B. Araştırmanın Amacı	1
	C. Literatür Çalışması	2
II	YEREL OYULMALARIN TEORİK ANALİZİ	12
	A. Genel	12
	B. Süreklilik Denklemi	14
	C. Yerel Oyulma Çukurundan Çıkan Sürüntü Yüğü	15
	D. Yerel Oyulma Çukuru Geometrisi	20
	E. Yerel Oyulmanın Zamanla Değişimi	21
III	MODEL ÇALIŞMALARI	24
	A. Genel	24
	B. Deney Tesisleri	24
	C. Deneylerde Kullanılan Malzeme	28
	D. Deneylerin Yapılışı	30
IV	DENEY SONUÇLARI	33
	A. Deneylerin Kapsamı	33
	B. Oyulmanın Oluşumu	33
	C. Oyulma Çukuru Geometrisi	37

BÖLÜM		SAYFA
V	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	44
	A. Genel	44
	B. Limit Oyulma Derinliği	44
	C. Oyuntudan Çıkan Sürüntü Yükünün Tayini	45
	D. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi	53
VI	SONUÇLARIN TARTIŞILMASI	63
VII	SONUÇLAR	67
	ÖZET	68
	LİTERATÜR	70
	SİMGELER	72
	EK - DENEYLER SIRASINDA ÇEKİLMİŞ FOTOĞRAFLAR	73

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
1	Permanan Oyulma Modelinin Uzunlamasına Kesiti	17
2	Permanan Katı Madde Taşınımı	18
3	Deney Tesislerinin Genel Görünüşü	25
4	Cam Kanal Plân ve Profili	26
5	Kullanılan Malzemenin Granülometri Eğrisi	29
6	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi	36
7	Batık Olmayan Akımda Oyulmanın Zamanla Değişimi (Deney 18)	38
8	Boyutsuz Oyulma Çukuru Geometrisi	39
9	Oyulma Çukuru Profilinin Zamanla Değişimi	40
10	Oyuntu Çukuru Geometrisinin Zamana Bağlı Olmadığını Gösterir Boyutsuz Şekil (Kaynak-Tarapore)	41
11	Oyuntu Çukuru Geometrisinin Zamana Bağlı Olmadığını Gösterir Boyutsuz Şekil (Kaynak-Laursen)	41
12	Basitleştirilmiş Oyulma Çukuru	41
13	Ölçülen ve Hesaplanan Oyuntu Hacimlerinin Korelasyonu	43
14	Hesaplanan ve Ölçülen Terminal Oyulma Derinliklerinin Karşılaştırması	46
15	Limit Oyulma Çukuru Derinliği	47
16	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi ( $D_g = 6.5$ mm)	50
17	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi ( $D_g = 2.65$ mm)	51
18	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi ( $D_g = 1.30$ mm)	52
19	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak - Laursen; $D_g = 0.69$ mm)	54
20	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak - Laursen; $D_g = 0.24$ mm)	55
21	Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak - Laursen; $D_g = 1.6$ mm)	56
22	Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri ( $Fr = 2$ )	58



Şekil		Sayfa
23	Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri (Fr = 4)	59
24	Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri (Fr = 6)	60
25	Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri (Fr = 8)	61
26	Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri (Fr = 10)	62

## BÖLÜM I

### YEREL OYULMANIN TANIMLANMASI VE LİTERATÜRÜN İNCELENMESİ

#### A. Genel

Yerel oyulmalar, akımdan dolayı meydana gelen yerel erozyon olayıdır. Yerel oyulmanın örneklerine alçak barajların boşalma kapakları, su alma yapılarındaki kapaklar ve köprü ayakları gibi akımın hızlandığı veya çevrintiler meydana getirdiği yerlerde rastlanır. Milattan önceki çağlarda Orta Doğu'nun muhtelif yerlerinde yapılmış tarihi barajlardan pek çoğunun zamanla tamamen yokolduğu hatırlanırsa yerel oyulmaların önemi daha iyi belirecektir. Bu tarihi barajların bazıları 30 metreden daha yüksek ve bugün ayakta kalmış çağdaş kemer ve kervansaraylarla karşılaştırıldığında daha sağlam yapıtlardı. Bu tarihi barajların, tamamen yokolma sebeplerinden en önemlisi şüphesizki yerel oyulmalardır. Yakın geçmişte bazı modern alçak barajlar yine yerel oyulmalar sebebi ile çalışamaz hale gelmiş ve yeniden işletilebilmeleri için önemli meblağlar sarfedilmesi gerekmiştir. Su yapıları için zararlı olan yerel oyulmaların önlenmesi ve muhtemel yerel oyulma derinliğinin tayini proje ve işletme çalışmaları yönünden önemlidir.

#### B. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın amacı su yapılarında düşey kapaklardan sonra batık jet akımdan dolayı meydana gelen yerel oyulmanın benzeşim kanunlarının bulunmasıdır. Rasyonel analiz ve deneysel neticelere dayanılarak bulunacak benzeşim kanunlarından yerel oyulma derinliğini zamanın fonksiyonu olarak tesbit etmek mümkün olacaktır. Düşey kapaklar altında meydana gelen oyulmanın analizi, süreklilik denkleminin yerel oyulma çukuru için tatbikine dayanmaktadır. Diferansiyel denkleme mevcut katı madde taşıma yükü

ve hacim ifadeleri deneysel neticelerden tesbit edilerek, süreklilik denkleminin integrali alındığında benzeşim kanunları fonksiyonel ve grafik olarak bulanabilmektedir.

### C. Literatür Çalışması

Dik kapaklar altındaki yerel oyulmalar çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Dik kapaklar altında yatay jet akımdan dolayı meydana gelen oyulmalarda başlangıçtaki akım şartları iyi bir şekilde belirlenebildiği için bu çalışmalar oyulma olayındaki diğer değişkenlerin daha iyi anlaşılmasına da yardımcı olmaktadır.

Yerel oyulmalar ile ilgili çalışmalar deneysel, empirik ve analitik olarak üç grupta toplanabilir. Deneysel çalışmalarda modellere münhasır kalındığından veya problemin sadece bazı yönleri araştırıldığından, genel benzeşim kanunlarına geçilememiştir. Ancak yakın tarihlerde yapılan bazı model çalışmalarında yerel oyulma olayının etkenleri arasındaki parametrik ilişki araştırılmıştır. Bu tip araştırmalarla dane çapı, akım hızı gibi etkenlerin yerel oyulma üzerindeki tesirleri laboratuarda model çalışmaları ile incelenmiştir. Öte yandan prototip çalışmaları, değişkenlerin çokluğu, ve arazideki şartların karışık olması sebebiyle güvenilir neticeler vermemiştir. Analitik çalışmaların sayısı ise çok azdır.

Bu raporda yalnızca dik kapaklar altındaki yatay jet akımdan meydana gelen oyulmayla ilgili literatürden bahsedilecektir. Yerel oyulmanın temel mekanizması ve diğer yönleri ile ilgili yayınların geniş bir listesi Karaki ve Haynie 1/ tarafından yapılan bir literatür çalışmasında mevcuttur. Bu eserde 1/ Karaki ve Haynie yerel oyulmalar konusunda 1963 yılına kadar yayınlanmış 300 kadar yazının abstraktlarını vermektedirler.

Su yapılarında dik kapaklar altında yatay akımdan dolayı meydana gelen yerel oyulmalar Burns ve White 2/, Bose ve Pramanick 3/, Framji 4/,

Laursen 5/, Ahmad 6/, Li 7/, Tarapore 8,9/, Latif 10/, Yalın 11/, Carstens 12/, Tsuchiya ve Iwagaki 14/, Sarma 15/ ve Valentin 16/, tarafından incelenmiştir. Bu araştırmalar hakkında bilgi aşağıdadır.

Burns ve White 2/, Bose ve Pramanick 3/, ve Framji 4/ tarafından yapılan çalışmalar su yapılarından sonraki yerel oyulmaları önleme çarelerini araştıran model deneyleriydi.

Laursen 5/ bir kum yatağı üzerinde yatay jet akımla oyulma deneyleri yaparak yerel oyulmanın özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamıştır.

- a. Oyulma hızı, oyuntu çukurundan birim zamanda çıkan ve oyuntu çukuruna giren sürüntü yükü farkına eşittir.
  - b. Oyulmanın bir üst değeri (limiti) vardır.
  - c. Limit oyuntu derinliğine zamanla asimtotik olarak erişilir.
- Yukardaki ilk prensip aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$\frac{df(B)}{dt} = g(B) - g(S) \quad (1)$$

Başıntı 1'de  $f(B)$ , oyulma çukuru sınırlarının matematik ifadesi;  $t$ , zaman;  $g(B)$ , oyuntudan taşınan sürüntü maddesi,  $g(S)$ , oyuntuya giren sürüntü yüküdür. Yukardaki denklemi bir yerel oyulma problemine uygulayabilmek için akımın sürüntü maddesi taşıma kapasitesi ve oyulma çukuruna giren sürüntü yükü bilinmelidir. Bu sebeple deneysel neticeler kullanılması gerekli olmaktadır. Laursen'in deneyleri üç çeşit kum için yapılmıştır. Her deney başlangıcında yatak düz ve yataydı. Model deneylerinde yerel oyulma olayı sadece akım hızı ve akım jetinin boyutları parametreleri ile tarif edilmekteydi. Her deneyde akım hızı değişik fakat deney süresince sabitti. Deneylerin ilk safhalarında taşınan daneler sürüntü yükü olarak taşınmıştır. Fakat oyuntudan çıkan maddenin mansap yönünde meydana getirdiği yığıntının şev açısı, doğal şev açısının değerine eriştiğinde taşıma mekanizması

suspensiyona (askıda malzeme) dönüşür. Bundan sonra oyulma çukuru geometrisi sabit kalmıştır. Laursen bu deneylerde Froude ve Reynolds sayılarının tesiri olmadığını varsaymış ve deneysel bir  $g(B)$  fonksiyonu kullanılarak yukarıda verilen ifadenin integralini almıştır. Bu çözüm deney neticelerini doğrulamaktaysa da benzerin kanunlarına geçilememiştir. Ayrıca çözüm neticesi oyuntu derinliğinin zamana bağlı olmayarak artacağını yani bir limit değeri olmadığını göstermektedir ki bu sonuç Laursen'in yukarıda bahsedilen (b) varsayımına aykırıdır.

Ahmad 6/ su yapılarının mansap tarafında meydana gelen oyulmaları akım şartları ve yapı geometrisi yönünden incelemiştir. Yerel oyulmaların iyice anlaşılabilmesi için Ahmad, akım tipi, birim genişlikten geçen debi, oyulmadan önceki beton tabanın uzunluğu ve dane çapı parametrelerinin tesirlerinin tayin edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ahmad alçak savaklar üzerindeki veya dik kapaklar altındaki hidrolik sıçrama meydana getiren akımlar için yaptığı deneylerde yukarıdaki parametrelerin oyulma şekli üzerindeki tesirlerini incelemiştir. Ahmad, gözlemleri neticesi su yapıları altındaki yerel oyulmanın çevrintiler (vorteksler) sebebiyle meydana geldiğini saptamıştır. Oyulma derinliği  $R/q^2/\delta$  parametresinin bir fonksiyonu olmakta ve akım debisi, taban uzunluğu ve dane çapı parametreleri bu fonksiyonun oran katsayısını vermektedir. Yukarıdaki parametrede  $R$ , hidrolik yarı çap;  $q$ , birim genişlikten geçen debidir. Ahmad tarafından yapılan model deneyleri genellikle yeter derecede sistematik olmayıp, varılan neticeler diğer oyulmalar için doğru olmamaktadır.

Li 7/, yerel oyulma modellerinde kullanılacak sürüntü maddesinin dane çapının tesbiti için gerekli kriterleri belirlemek üzere model deneyleri yapmıştır. Li'nin deneylerinde iki ayrı boyutta savak ve üç

değişik kapak açıklığı kullanılmıştır. Her modelde değişik akım şartları altında özgül ağırlık ve dane çapları farklı altı çeşit sürüntü maddesi kullanılmıştır. Deneylerin amacı model çalışmalarında dane çökme hızının, sürüntü maddesi seçininde kriter alınması gerektiği hipotezini doğrulamaktır. Deneylerin hepsinde kaba sürüntü maddesi yatak sürüntü yükü olarak taşınmıştır. İnce sürüntü maddesi ile yapılan deneylerde bazı daneler askıda taşınmıştır. Süspensiyon miktarı akım şartlarına dayanmakta ve zamanla azalmaktadır. Deney neticeleri, iki ayrı kapak açıklığı ve altı çeşit kum için  $y/L$  ve  $twd/L^2$  boyutsuz değişkenlerine bağlı olarak verilmiştir. Burada  $y$ , oyuntu derinliği;  $L$ , kapak genişliği;  $t$ , zaman;  $w$ , dane çökme hızı;  $d$ , dane çapıdır. Bazı deneylerde oyulma derinliği çok küçük değerler almaktadır.

Deney neticelerinin analizi ile  $Li$  7/ aşağıdaki sonuçlara varmıştır.

- a. Benzer akım şartları ve oyulma geometrisi halinde oyulma çukuru derinliği dane çapı ve model ölçeğine bağlı değildir.
- b. Oyulma devam ederken tabandaki akım hızı azalır ve sonunda oyuntu derinliği bir limite erişir. Limit oyulma derinliği, akım hızına, dananın çökme hızına, sıvı viskozite ve yoğunluğuna, kuyruk suyu derinliğine ve kapak genişliğine bağlıdır.
- c. Oyulma modellerinde benzerlik sağlanabilmesi için model-prototip dane çökme hızları oranı modeldeki akımın hız ölçeğine göre seçilmelidir. Yatak malzemesi dane çapı modelde lineer ölçekle küçültülemez.
- d. Oyulma hızı, modeldeki akımın hız ölçeğine bağlı değildir. Oyulma derinliği  $dwt/L^2$  boyutsuz değişkeninin bir fonksiyonu olacaktır.

$Li$ 'nin elde ettiği sonuçlar yerel oyulmaları etkileyen değişkenler

hakkında fikir vermekteyse de yerel oyulma derinliğinin zamanla değişmesi ve oyuntu çukuru derinliğinin önceden tahmini için yararlı olmamaktadır.

Tarapore 8/ dik kapaklar altındaki yerel oyulmanın batık jet akım maddesi sürüntü yükü getirmedeği hallerde bir limite ulaştığını deneyle göstermiştir. Tarapore, dana çapı 4.4 mm, akım hızı 2.6 m/sn ve kapak aralığı 3.2 mm olan bir deney tertipliyerek limit derinliğe erişmek için 23 günlük bir süre gerektiğini tesbit etmiştir. Daha sonraki bir araştırmasında Tarapore 9/, mabadan çokca sürüntü yükü gelmesi halinde ise denge haline (limit oyulma derinliğine) bir kaç dakikada erişildiğini yazmaktadır. Tarapore, oyulma çukurunun limit derinliğe erişmesini akım hızının azalması ve tabandaki sınır-kesme gerilmesinin sürüntü dânesinin kritik taşıma kuvvetine esit olmasıyla izah etmiştir. Bu takdirde tabandan hiç malzeme taşınmayacaktır.

Leaman 5/, ise limit oyulma derinliğinin var olduğuna neticesine oyuntu çukurunun meydana gelmesinden sonra akım hızı azaltıldığında oyulmanın devam etmediğini tesbit ederek dolaylı bir şekilde vermiştir.

Tarapore oyuntu geometrisinin de zamanla değişmediğini uzun süreli deneyleri ile doğrulamıştır. Oyulma çukurunun şeklinin yaklaşık olarak parabolik olduğunu ve bu parabolun yatayla eğiminin doğal şev açısından büyük önem taşıyacağını belirtmiştir. Tarapore'nin 8/ araştırması dik kapaklar altındaki yerel oyulmayla ilgili bazı noktaları aydınlatmakla beraber de gerek akım hızının sabitliği ve gerekse sürüntü maddesi çözümlenmesi için gerekli akım hızının sabitliği ve gerekse sürüntü maddesi çözümlenmesi için gerekli akım hızının sabitliği ve gerekse sürüntü maddesi çözümlenmesi için gerekli akım hızının sabitliği ile oyuntu derinliğinin verilen bir hal için tamamlanmış olmamaktadır.

Latif 10/, dik sulama kapakları altındaki oyulmanın yeri ve derinliğini model çalışmalarıyla tayin edebilmek için bağıntılar

bulmuştur. Bulunan bağıntılar modeldeki kapağın şekline bağlı değildir. Bağıntılar boyut analizleri ile bulunmuş, katsayılar ise deneylerle tayin edilmiştir. Selim Yalın'ın 11/, koyduğu model ve prototip sürtün-  
tü yükünün benzerlik şartları Latif'in çalışmasının esasını teşkil  
etmektedir. Yalın'a göre model ve prototipteki daneler aynı şekil ve  
geometrik benzerlikte olmalıdır. Model ölçeğine  $L_r$  denilirse  
 $L_r = \lambda_s \cdot \lambda_{\gamma_s}$  olmaktadır.  $\lambda_s$  ve  $\lambda_{\gamma_s}$ 'in tarifleri aşağıdaki gibidir.

$$\lambda_{\gamma_s} = \frac{\text{Modeldeki dane özgül ağırlığı}}{\text{Prototipteki dane özgül ağırlığı}}$$

$$\lambda_s = \frac{\text{Modeldeki dane çapı}}{\text{Prototipteki dane çapı}}$$

Latif'in deneylerinde  $\lambda_{\gamma_s} = 1$  seçilerek model prototip dane çapı  
oranı model ölçeğine esit alınmıştır. Şüphesiz prototipteki dane çapı  
büyük değilse, yukardaki oran geçerli olmayacaktır. Bu takdirde mole-  
küller kuvvetler önem kazanarak sonuçlar gerçekten uzaklaşacaktır. Mo-  
del çalışmaları neticesinde Latif  $D_s/d_s$  ve  $L_s/l_s$  oranlarının model-  
prototip dane çapı oranı ile model ölçeğine bağlı olduğunu gösterir  
empirik bağıntılar elde etmiştir.  $D_s$ , prototipteki oyuntu derinliği;  
 $d_s$ , modeldeki oyuntu derinliği;  $L_s$ , prototipde kapak ile maksimum oy  
oyuntu derinliği arasındaki yatay uzunluk;  $l_s$ , modelde kapak ile mak-  
simum oyuntu derinliği arasındaki yatay uzunluktur. Latif'in deneyleri  
 $L_r$ 'in 1/1 ve 1/3 değerleri ile model-prototip dane çapı oranının  
0.14-1.0 değerleri arasında yapılmıştır. Bu oranların dışında kalan  
şartlarda Latif, bağıntıların kullanılmayacağını ve yeni deneyler ya-  
pılması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca bu bağıntı denklemlerinin ge-  
çerli olduğu sahada kullanılabilmesi için yapılacak model çalışmaları



rında da model ve prototipteki dane çapı dağılım eğrisi, özgül ağırlıkları, dane şekilleri eşit olmalı ve oyulma derinliğinin akım derinliğine oranı 0.1 ile 0.97 arasında değişmelidir.

Carstens 12/, yerel oyulma olayında sürüntü yükü fonksiyonunun obstrüksiyon geometrisine dayandığını ve bu sebeble genel bir sürüntü yükü fonksiyonu elde etmenin imkansızlığını belirtmiştir. Bununla beraber Carstens, sıvı, sürüntü danesi ve akım parametrelerinin geometrik parametrelerden ayrıca gruplanabileceğini kabul etmiştir. Sürüntü maddesi taşıma ifadesi ile geometrik değişkenler arasındaki bağıntının oyulma tipine göre değiştiği ve fakat sürüntü maddesi taşıma ifadesi ile sıvı, sürüntü danesi ve akım değişkenleri arasındaki bağıntının sabit kaldığı varsayılmıştır. Yatak üzerindeki tipik bir sürüntü maddesi danesine etki eden kuvvetleri analiz ederek yukardaki ikinci bağıntı için teorik bir ifade elde eden Carstens, Laursen'in deney sonuçlarını kullanarak dik kapaklar altındaki oyulma için bir bağıntı bulmaya çalışmıştır. Carstens, oyulma çukurunun profilini, kenarlarının eğimi doğal şev açısına eşit bir üçgen olarak kabul ederek, birim zaman içindeki sürüntü yükü hızının bir ifadesini elde etmiştir. Membadan gelen sürüntü yükü maddesi sıfır kabul edildiğinde, oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü, oyulma hacminin zamanla değişimine eşit olmaktadır. Laursen'in deney sonuçları kullanılarak, süreklilik denklemini çözüldüğünde aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$\left(\frac{S}{b}\right)^6 = 2.85 (10^{-3}) (N_s^2 - 4)^{5/2} \tan \phi \left(\frac{D_g}{b}\right) \left(\frac{V_{ot}}{b}\right) \quad (2)$$

Bağıntı 2'de S, oyulma çukuru derinliği; b, Laursen'in deneylerindeki jet kalınlığı;  $\phi$ , doğal şev açısı;  $D_g$ , dane çapı;  $V_{ot}$ , akım hızı;

t, zaman;  $N_s$ , sürüntü maddesi katsayısıdır. Yukardaki bağıntı Laursen'in  $D_p = 0.24$  mm/dane çarlı kumu için deney sonuçlarını doğrulamıştır.

Carstens'in teklif ettiği çözüm metodu rasyonel ise de gerek analizlerde kullanılan deney neticelerinin azlığı ve gerekse de kullanılan sürüntü yükü ifadesinin yetersizliği sebebiyle verilen bağıntı genel olarak kullanılamaz. Ayrıca Carstens'in neticeleri Laursen'in ve Tarapore'nin mevcudiyetini belirttikleri limit derinliği vermemektedir. Carstens'in sürüntü yükü ifadesi daha sonra LeFeuvre, Altınbilek ve Carstens 13/, tarafından yeniden araştırılarak, daha mükemmel bir hale getirilmiştir.

Tsuchiya ve Iwagaki 14/, daha önceki araştırmacılarından farklı olarak, kapaklar altında meydana gelen oyulmayı akım jetinin özelliklerini hesaba katarak ve kritik taşıma kuvveti teorisine dayanarak incelemişlerdir. Model çalışmalarında sekiz ayrı çeşit kum kullanılmıştır. Oyulma çukuru derinliğinin zamana göre değişimini gösteren eğri üç bölgeye ayrılmıştır. Birinci kısım oyulmanın başlangıç safhasıdır. Başlangıç safhasında oyulma zamanla doğru orantılıdır. İkinci bölge bir geçiş bölgesidir. Üçüncü bölge oyulmanın ilerlediği bölgedir. Üçüncü safhada oyulma eğrisi yatıklaşır. Oyulma çukurunun limit derinliği akım jeti ve çevrinti özelliklerine dayanır. Bu çalışmada "Başlangıç Safhası" için akım jeti ve sürüntü maddesi taşıma fonksiyonuna dayanan bir teorik çözüm verilmiştir. "İlerlemiş Oyulma" için de oyulma çukuru geometresinin zamanla değişmediği varsayımına ve oyulma çukuru boyunca sürüntü yükü taşıma hızının dağılımına dayanan bir çözüm yolu önerilmiştir. Bu çözümlerde sürüntü maddesi taşıma fonksiyonu için Einstein ve Kalinske'nin çalışmalarından yararlanılmıştır. Bulunan teorik çözümler deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve genellikle deneylere uygun neticeler elde edilmiştir. Teorik yollardan ulaşılan denklemlerde şu değişkenler kullanılmıştır: danenin çökme hızı; kesme

gerilmesi, dane taşıma kuvveti, akım hızı, oyuntunun derinliği ve uzunluğu, kapaşın özellikleri, çevrinti özelliklerini karakterize eden bir sayı, porosite, dane çapı, yer çekimi ivmesi, su ve danenin özgül ağırlıkları.

Sarma 15/, iki boyutlu düşey ve yatay jet akımlarla deneyler yaparak yalnızca yatak sürüntü maddesi taşınan akımlardaki oyulmalar için bağıntılar elde etmiştir. Yatay jet akımlar için oyulmanın uzunluğu, akım ve dane çökme hızı oranı ile Froude sayısının fonksiyonu olmaktadır. Oyuntu çukuru derinliği ise yine Froude sayısının bir fonksiyonudur. Sarma'nın verdiği bağıntılarda dane ve obstrüksiyon geometrisinin özelliklerine bağlı çeşitli katsayılar mevcuttur. Bu katsayıların her oyulma için ayrı ayrı tayin edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden Sarma tarafından bulunan bağıntılar yalnızca su yapılarındaki yerel oyulmaların analizinde Froude sayısının ve dane çökme hızının etkilerini göstermekte yararlı olmaktadır.

Valentin 16/, diklapeklar altındaki oyulmanın limit derinliğini araştıran deneyler yaptı. Yapılan on deneyde kullanılan sürüntü malzemesinin dane çapı 0.73-13.5 mm ve Froude sayısı ise 2.28-6.52 arasında değişmekteydi. Limit oyulma derinliği Froude sayısı, dane çapı ve kapak aralığı değişkenlerinin bir parametresi olarak tesbit edildi. Limit oyuntu derinliği ile Froude sayısı arasındaki bağıntı logaritmik olmaktadır. Sürüntü malzemesinin özgül ağırlığının ve dane çapı dağılımının oyulmalar üzerindeki etkilerinin incelenmediği çalışmada Valentin limit oyulma derinliğinin zaman ile olan ilişkisini de araştırmamış ve fakat model araştırmalarında ölçülen limit oyulma derinliğinin ölçeklerin distorsiyonu ile değişebileceğini göstermiştir.

Yerel oyulma üzerinde yapılan yukarıda bahsedilen çalışmalar tamamen gevşek (kohezyonsuz) zeminlere münhasır kalmıştır. Hernekadar toprağın kohezyonu kanal şevlerinin oyulması ve kanal inşaatı gibi hallerde ehemmiyet kazanırsa da, tamamen kohezyonsuz zeminlerdeki yerel oyulmalarda önemli olabilir. Örneğin barajlardaki boşaltım yolları ve kapaklar altındaki oyulmalar genellikle kohezyonsuz zeminlerdeki yerel oyulmalardandır. Ayrıca kohezyonsuz sürüntü maddeleri ile yapılan çalışmalar kohezyonlu yataklardaki proje çalışmalarına da geniş ölçüde ışık tutmaktadır.

## BÖLÜM II

### YEREL OYULMALARIN TEORİK ANALİZİ

#### A. Genel

Yerel oyulmalar tamamen teorik bir çözümü halen mevcut olmıyan gayet kompleks bir hidrolik olaydır. Düşey kapaklarda akım alanının azalmasından dolayı artan akım hızı, sürüntü yükü taşıma kapasitesini de arttıracaktır. Akımın artan sürüntü maddesi taşıma kapasitesi neticesi kapaktan sonra bir yerel oyulma çukuru meydana gelir. Yerel oyulma, permanan yani zaman içinde sabit olmıyan bir olaydır. Oyulma çukurunun sınır geometrisi zamanla devamlı olarak değişir. Sınır geometrisindeki değişikliklerle oyulma çukurundaki çevrintinin hızı ve büyüklüğü de değişecektir. Dolayısıyla akımın taşıdığı sürüntü yükü de devamlı değişir. Böyle sürekli değişikliklerle yerel oyulma devam eder. Oyulmanın ilk safhalarında akımın yataktan katı madde taşıma kapasitesi, ileri safhalarında ise oyulma çukurundan sürüntü danelerinin askıda malzeme olarak taşınabilmesi kapasitesi yerel oyulmayı kontrol eden faktörler olmaktadır. Verilen bir kontrol alanında, eğer alandan dışarı çıkan sürüntü yükü taşıma kapasitesi, alana gelen akımın sürüntü yükü taşıma kapasitesinden büyükse yerel oyulma devam eder. Aksi halde, yani alandan çıkan sürüntü maddesinin, giren sürüntü maddesinden az olması halinde ise yerel dolgu olur. Sınır geometrisi ve akıntı ağındaki değişiklikler, oyulma ile dolgu arasında denge sağlanana kadar devam edecektir. Yerel oyulmaların yukarıda anlatılan kompleks mekanizmasına ilâveten, akım yatağının düzensizlikleri, akım debisinin zamanla değişmesi, yatak malzemesinin uniform olmaması ve derinlikle değişebilmesi gibi diğer etkenlerde eklenirse yerel oyulmaların teorik

Dik kapaklar altındaki batık jet akından ötürü meydana gelen yerel oyulmalar bir çok araştırmacı tarafından etüd edilmiştir. Bu tip araştırmalarda başlanğıçtaki akım şartları en basit şekilde belirle-  
nebildiğinden diğer temel değişkenlerin sistematik olarak incelenmesi mümkün olmaktadır. Bununla beraber sınır şartları daimi olarak değişen oyulma çukurunda akım hızının değişmesini ifade eden kesin bir bağıntı mevcut olmadığı gibi oyulma çukurunda yerel katı madde taşıma kapasitesi de zamanla değişmektedir. Yerel oyulmanın zamanla değişimini inceleyecek bir metodun, oyulma çukurundaki akımın değişmeleriyle yerel sürüntü yükü taşıma kapasitesindeki değişiklikleri birleştirmesi gerekir. Sürekli olarak değişen sınır geometrisi ve pek çok sayıdaki sürüntü yükü taşıma etkenleri sebebiyle yerel oyulmalar için genel teorik bir çözüm aramak yerine dik kapaklar altındaki yerel oyulmanın çözümünün deneysel neticelere dayanması en uygun yol olmaktadır. Yerel oyulma çukuru geometrisinin zamanla değişmesinin deneysel neticelere dayanarak hesaplanmasını öneren rasyonel bir analiz metodu Altınbilek 17,18/ tarafından teklif edilmiştir. Teklif edilen metoda göre yerel oyulmanın analizi Laursen ve Carsten'in araştırmalarındaki gibi süreklilik denkleminin yerel oyulma çukuru için tatbikine dayanmaktadır. Süreklilik denkleminin integrali, yerel oyulma çukuru derinliğini zamanın fonksiyonu olarak vermektedir. Diferansiyel denkleme mevcut üç ayrı terim diferansiyel hacim, oyulma çukuruna giren ve çıkan katı madde yükü ifadelerinin deneysel neticelere dayanılarak tesbiti için rasyonel esaslar teklif edilmiştir. Önerilen genel metodun bütün yerel oyulma halleri için geçerli olması gerekmektedir. Aşağıda bu genel metodun dik kapaklar altında batık jet akından dolayı meydana gelen yerel oyulmalar için tatbikati izah edilmiştir.

### B. Süreklilik Denklemi

Yerel oyulma için genel matematiksel bir ifade süreklilik (maddenin sakımı) prensibine dayanılarak yazılabilir. Süreklilik denklemi, oyulma çukuru hacmi, kontrol hacmi kabul edilip yazıldığında aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{so} - Q_{si} \quad (3)$$

$dV/dt$ , oyulma çukuru hacminin zamana göre değişmesi;  $Q_{so}$ , oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü;  $Q_{si}$ , oyulma çukuruna giren sürüntü yükü olmaktadır. Yukarıdaki denklemde  $Q_{so}$ 'nun,  $Q_{si}$ 'dan büyük olması ( $dV/dt > 0$ ) halinde yerel oyulma olacaktır. Denklem sol tarafındaki ifadenin sıfır olması halinde ise tabanda stabilite olup, yerel oyulma duracaktır. Yerel oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{so}$  ile oyulma çukuruna giren sürüntü yükü,  $Q_{si}$ 'nin bağımsızlığı kabul edilirse Bağıntı 3 ayrılarak aşağıdaki hali alır.

$$t = \int_0^S \frac{dV}{Q_{so} - Q_{si}} \quad (4)$$

Yukarıdaki ifadede  $S$ , yerel oyulmanın derinliğidir. Bağıntı 4'deki integral alındığında yerel oyulma geometrisi (ve derinliği) zamanın bir fonksiyonu olarak bulunacaktır. Metodun tatbiki için Bağıntı 4'deki diferansiyel hacim,  $dV$ ; oyulma çukuruna giren ve çıkan sürüntü yükü,  $Q_{so}$  ve  $Q_{si}$ , ifadelerinin tayini gerekmektedir. Fakat bu terimler için bütün yerel oyulma hallerini kapsıyan teorik genel ifadeler bulmanın imkânsızlığı aşikârdır. Bu ifadelerin tayini için en rasyonel yol teorik ifadelerin deneysel neticelere dayanarak empirik ifadeler haline getirilmesidir. Oyuntu çukuruna giren ve çıkan katı madde yükü

ifadeleri için rasyonel genel esaslar yazarın önceki yazılarında 17,18/ teklif edilmiştir.

Genellikle dik kapaklar altındaki yerel oyulmalarda akımın oynatma çukuruna mebadan getirdiği sürüntü yükü azdır ve ihmal edilebilir. Bu takdirde Bağıntı 3 ve 4'de ki  $Q_{s1}$  ifadesi mevcut olmayacaktır. Dolayısıyla aşağıda yalnızca yerel oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükünü ( $Q_{s0}$ ) tayin metodu incelenmiştir.

#### C.Yerel Oyulma Çukurundan Çıkan Sürüntü Yükü

Oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü ifadesi iki ayrı fonksiyona orantılı olarak düşünülebilir. Bu fonksiyonlardan ilki sıvı, sürüntü daresi ve akım özelliklerinin değişkenlerini içine alacaktır. Birinci fonksiyon yerel oyulmada birim alandan taşınan sürüntü yüküne orantılı olup, her yerel oyulma için aynı kalacaktır. İkinci fonksiyon ise oyulma çukuru geometrisini temsil eden değişkenlerden kuruluş olup bir yerel oyulma tipinden diğerine değişecektir. Yerel oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{s0}$  ifadesinin birinci fonksiyonu için genel bir katı madde taşınımı ifadesi yeterli değildir. Katı madde taşınımı ifadesinin çoğunluğu Shields parametresi adı verilen  $\tau_0/(s-1)\gamma D_g$  değişkeninin fonksiyonudur. Bu ifadede  $\tau_0$ , ortalama cidar-kesme gerilmesi;  $s$ , sediment ve sıvı özgül ağırlıklarının oranı;  $\gamma$ , sıvı özgül ağırlığı;  $D_g$  ise ortalama dane çapı olmaktadır. Fakat permanent olmıyan yani zamanla değişen yerel oyulmalar halinde, ölçülmesi zor olan cidar-kesme gerilmesinin kullanılması pratik değildir. Yerel oyulmanın analizinde kullanılabilecek daha uygun bir değişken akım hızı olmaktadır.

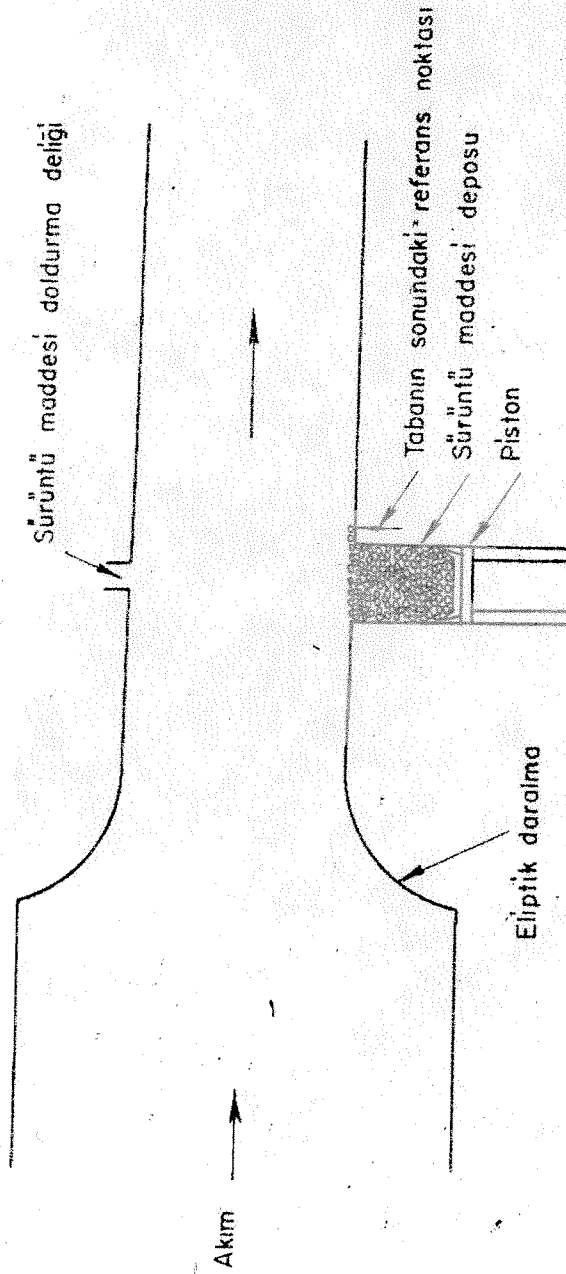
Yerel oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü ifadesinin formüle edilebilmesi için yerel oyulma deneyleri neticelerinin kullanılması



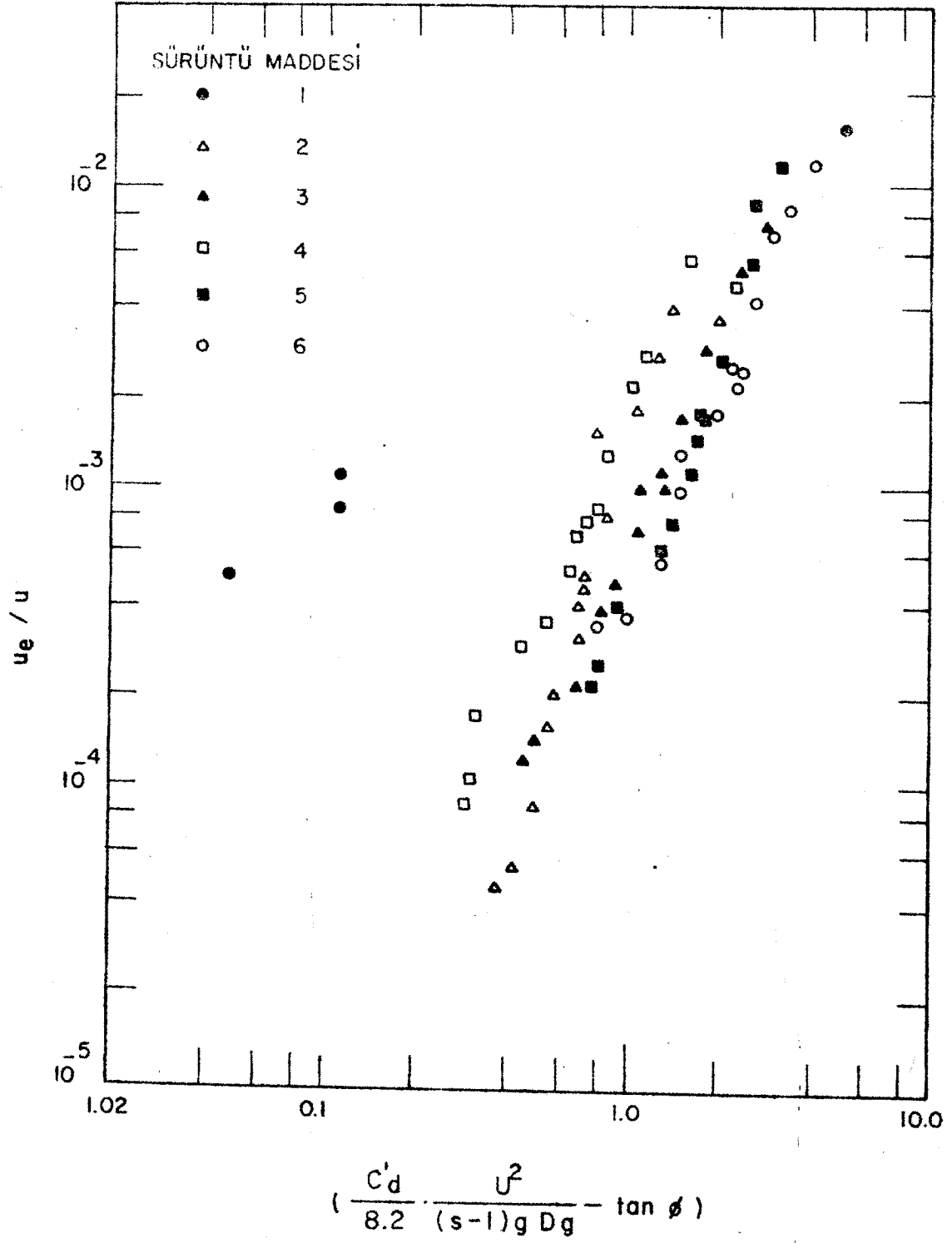
gerekir. Kullanılacak araştırmalarda oyulma çukuruna giren sürüntü yükünün mevcut olmaması ve yatakta kum dalgacıklarının bulunmaması şartı aranmıştır. Boşaltma kapakları altındaki yerel oyulma ile ilgili bazı deneysel araştırmalar Laurson 5/, Tsuchiya ve Iwagaki 14/, ve Tarapore 8/, tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda, başlangıçta yatay ve düz olan bir zemin üzerinde yatay bir jet akım mevcut olup gelen akım, sürüntü yükü getirmemektedir. Ayrıca yukardaki yerel oyulma modellerinin hepsi permanan olmayan oyulmalar olup oyulma çukuru ve oyuntu-  
daki akım hızı zamanla değişmektedir. Bu yüzden sürüntü yükünün zamanla değişimini tesbit zor olmaktadır. Permanan yani zaman içinde de-  
şişmiyen bir yerel oyulma hali için özel bir model tesisi gerekmektedir. LeFeuvre, Altınbilek ve Carstens 19/ böyle bir modelde ufak bir alanın sabit hızda taşınan sürüntü yükünü incelemişlerdir. Araştırma modelinin bir şeması Şekil 1'de görülmektedir. Sürüntü maddesi akım borusuna düşey olarak bağlı bir tp içindeydi. Herhangi bir deney sırasında sürüntü yükü bir piston ve vites kutusu vasıtası ile yukarı doğru istenilen hızda itilebilmekteydi. Piston hızı 126.5 ÷ 1 oranında değişebilmekteydi. Bir deney sırasında akım hızı o şekilde ayarlanıyordu ki sürüntü maddesinin taşınması permanan ve denge halindeydi. Deneyler sırasında 6 çeşit sürüntü maddesi kullanılmış ve 84 deney yapılmıştır. Deneylerde kullanılan sürüntü maddelerinin zellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Elde edilen deneysel neticeler tipik bir yüzey danesi üzerinde etki eden sürükleme, kaldırma ve ağırlık kuvvetlerinin incelenmesi ile analiz edilmiş sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de görülen deneysel neticelere uyacak bir denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{u_e}{u} = 1 (10^{-3}) \left( \frac{C_D'}{8.2 \cos \alpha} \frac{u^2}{(s-1)g D_g} \tan \alpha - \tan \Phi \right)^{5/2} \quad (5)$$



Sekil 1. Permanan Oyulma Modelinin Uzunlamasına Kesiti



Sekil 2. Permanen Katı Madde Taşınımı

TABLO 1

PERMANAN OYULMA MODELİNDE KULLANILAN  
SÜRÜNTÜ MADDESİ ÖZELLİKLERİ

No	Malzeme	Sürüntü maddesi ve suyun özgül ağırlıkları oranı, s	Dane çapı $D_g$ (mm)	Dane çapının standard sapması $\sigma$	Doğal Şev açısı, $\phi$ (o)
1	Nikel	8.75	0.570	1.10	24.7
2	Kum	2.62	0.585	1.04	34.0
3	Kum	2.63	0.185	1.24	34.0
4	Cera	2.47	0.297	1.08	24.7
5	Cera	2.46	0.106	1.05	24.7
6	Plastik	1.20	0.250	1.31	30.0

Bağıntı 5'de  $u_c$ , sürüntü maddesinin taşınma hızı;  $u$ , akımın yataktaki hızı;  $D_g$ , dane çapı;  $C_D^i$ , sürüklenme katsayısı;  $g$ , yerçekimi ivmesi;  $\alpha$ , yatağın eğimi;  $\phi$ , sürüntü maddesinin doğal şev açısıdır. Sürüntü maddesi taşınma hızı,  $u_c$ , menba yönünden sürüntü yükü gelmemesi halinde zeminin birim alanından taşınan maddenin hacmi olmaktadır. Bağıntı 5'in elde edilmesi detaylı şekilde yazarın diğer bir yazısında 19/ sunulmuştur. Bağıntı 5'deki  $(u/\sqrt{(s-1)g D_g})$  parametresi, "Sürüntü Maddesi Sayısı",  $N_s$  olarak bilinir. Sürüntü maddesi sayısı, Froude sayısının değişik bir şekli olup kohezyonsuz yataklardaki yatak şekillerini sınıflandırmakta 17/ kullanılabilir.

Çeşitli yerel oyulma olaylarının genel benzerliklerinden Stürü Bağıntı 5'deki sürüntü maddesi taşıma ifadesinin yukarıda anlatılan oyulma deneylerinden başka yerel oyulmalar için de geçerli olması gerekir.

Şüphesiz ki diğer yerel oyulmalarda değişik geometrilere göre otürü oran katsayısı başka olacaktır. Genel bir hal için oyulma çukurundan taşınan sürüntü yükü ifadesi aşağıdaki şekilde düşünülebilir.

$$\frac{Q_{so}}{UBD_g} = \left( f \text{ (oyuntu çukuru geometrisi, } \frac{S}{B} \text{ )} \right. \\ \left. \text{ dane geometrisi,} \right. \\ \left. \text{ akım özellikleri,} \right. \\ \left. \left( \frac{C_D'}{8.2 \cos \alpha} N_S^2 - \tan \phi - \tan \alpha \right)^{5/2} \right) \quad (6)$$

Bağıntı 6'da  $N_S$  değerini bulmakta kullanılan  $U$  hızı yatak seviyesindeki hızdır.  $B$  terimi yerel oyulmaya sebep olan obstrüksiyonun uygun bir ölçüsüdür. Örneğin düşey kapaklar altındaki yerel oyulmalarda  $B$  terimi kapak açıklığı olarak alınabilir. Boyutsuz  $S/B$  terimi oyulma derinliğinin zamana olan ilişkisini elde etmek için gereklidir. Bağıntı 6'daki  $UBD_g$  terimi,  $Q_{so}$  terimini boyutsuz hale getirmek için kullanılmış bir debi ifadesidir.

#### D. Yerel Oyulma Çukuru Geometrisi

Yerel oyulma çukuru geometrisinin bir yerel oyulmadan diğerine değişmesi beklenir. Bununla beraber yerel oyulma modellerinde ortak olarak müşahade edilen bir özellik oyulma çukurunun şev eğiminin malzemenin doğal şev açısına çok yakın olmasıdır. Bu özelliği de kullanarak verilen bir yerel oyulma hali için oyulma çukuru hacmini yaklaşık olarak matematiksel şekilde yazmak mümkün olmaktadır. Örneğin, dik dairesel kazıklar etrafındaki yerel oyulma Tarapote 8/ ve Altınbilek 20/ tarafından incelenmiştir. Deneysel ölçümler neticesi dairesel kazıklar etrafındaki oyulma çukurunun şekli, ters yatırılmış ve taban çapı kazık çapına eşit olan kesik bir koni olarak bulunmuştur. Bu koninin yan eğimi,

sürüntü maddesinin doğal şev açısı  $\phi$ 'ye eşit alındığında, hacim ifadesi bulunmaktadır. Diferansiyel hacim ifadesi,  $dV$ , ise hacim ifadesinin yerel oyulma derinliği,  $S$ 'ye göre türevi alınarak bulunabilir.

Düşey kapaklar altındaki yerel oyulmalar için de deneysel neticelere dayanarak basit geometrik ifadeler yazmak mümkün olmaktadır. Böyle bir ifade daha sonra deneysel neticeler analiz edilirken verilecektir.

#### E. Yerel Oyulmanın Zamanla Değişimi

Yerel oyulma derinliğinin zamanla değişimi, Bağıntı 4'de verilen integral hesaplanarak bulunabilir. Bağıntı 4 üç ayrı ifadeden ( $dV$ ,  $Q_{s0}$  ve  $Q_{si}$ ) ibarettir. Düşey kapaklar altındaki yerel oyulmalarda akımın oyuntu çukuruna membadan getirdiği sürüntü yükü  $Q_{si}$  azdır ve ihmal edilebilir. Bir çok araştırmacı tarafından da kabul edilen  $Q_{si} = 0$  varsayımını problemin çözümünü büyük ölçüde kolaylaştıracaktır. Oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{s0}$ , için rasyonel bir ifade Bağıntı 6 ile verilmiştir. Ancak Bağıntı 6'nın orantı katsayısı  $f$ 'nin ve diferansiyel hacim ifadesi  $dV$ 'nin deneysel neticelere dayanılarak tayini gerekmektedir.

Deneysel neticelerin gerekliliğinin yanı sıra bütün katı madde taşınımı araştırmalarında olduğu gibi yerel oyulmalarda da gerçek oyulmanın tam bir modelini yapmak mümkün değildir. Hernekadar su yapıları kapaklar ve diğer obstrüksiyonlar istenilen ölçekte küçültülebilirse de, sürüntü maddesinin dane çapı belli bir orandan çok küçültülemez. Zira sürüntü maddesinin dane çapı küçülünce çökme hızı da azalmaktadır. Dolayısıyla, katı madde dane çapı küçülünce, daneler sürüntü maddesi olarak değilde askıda (süspansiyon) dane olarak taşınacaktır. Örneğin,

sürüntü maddesinin doğal şev açısı  $\Phi'$ 'ye eşit alındığında, hacim ifadesi bulunmaktadır. Diferansiyel hacim ifadesi,  $dV$ , ise hacim ifadesinin yerel oyulma derinliği,  $S'$ 'ye göre türevi alınarak bulunabilir.

Düşey kapaklar altındaki yerel oyulmalar için de deneysel neticelere dayanarak basit geometrik ifadeler yazmak mümkün olmaktadır. Böyle bir ifade daha sonra deneysel neticeler analiz edilirken verilecektir.

#### E. Yerel Oyulmanın Zamanla Değişimi

Yerel oyulma derinliğinin zamanla değişimi, Bağıntı 4'de verilen integral hesaplanarak bulunabilir. Bağıntı 4 üç ayrı ifadeden ( $dV$ ,  $Q_{so}$  ve  $Q_{si}$ ) ibarettir. Düşey kapaklar altındaki yerel oyulmalarda akımın oyuntu çukuruna mabadan getirdiği sürüntü yükü  $Q_{si}$  azdır ve ihmal edilebilir. Bir çok araştırmacı tarafından da kabul edilen  $Q_{si} = 0$  varsayımı problemin çözümünü büyük ölçüde kolaylaştıracaktır. Oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{so}$ , için rasyonel bir ifade Bağıntı 6 ile verilmiştir. Ancak Bağıntı 6'nın orantı katsayısı  $f'$ 'nin ve diferansiyel hacim ifadesi  $dV$ 'nin deneysel neticelere dayanılarak tayini gerekmektedir.

Deneysel neticelerin gerekliliğinin yanı sıra bütün katı madde taşınımı araştırmalarında olduğu gibi yerel oyulmalarda da gerçek oyulmanın tam bir modelini yapmak mümkün değildir. Herne kadar su yapıları kapaklar ve diğer obstrüksiyonlar istenilen ölçekte küçültülebilirse de, sürüntü maddesinin dane çapı belli bir orandan çok küçültülemez. Zira sürüntü maddesinin dane çapı küçülünce çökme hızı da azalmaktadır. Dolayısıyla, katı madde dane çapı küçülünce, daneler sürüntü maddesi olarak değilde askıda (süspansiyon) dane olarak taşınacaktır. Örneğin,

1/10 oranında bir modelde prototipteki 0.3 mm çapındaki kum için 0.03 mm çapında dane kullanmak gerekir. Bu iki maddenin çökelme hızları 1/100 oranında değiştiğinden modeldeki daneler prototiptekinin aksine askıda taşınacaktır. Diğer yandan Froude kriterine göre yukarıdaki iki maddenin, çökelme hızlarının oranının 1/100 değil, fakat sadece 1/3.6 olması gerekir.

Model çalışmalarında karşılaşılan diğer bir güçlük de kum dalgacıklarının ve basamaklarının tesirleridir. Laboratuvar modellerinde kum dalgacıkları yerel oyulmaya sebep olan obstrüksiyon ile yaklaşık olarak aynı ölçüdedir. Dolayısıyla kum dalgacıkları civarındaki akıntı ağı obstrüksiyon etrafındaki akıntı ağını büyük ölçüde etkilemekte ve değiştirmektedir. Halbuki prototipteki kum dalgacıklarının boyutları, su yarıklarınıninkinden çok daha küçük olduğu için kum dalgacıklarının prototipteki yerel oyulma üzerindeki tesiri ehemmiyetsizdir. Ayrıca düşey kapaklar altındaki oyulmalarda mambadan sürüntü yükü gelmediğinden kum dalgacıklarının tesiri önemli olmamaktadır.

Yukarıda bahsedilen modelleme güçlüklerini yenmek için yapılacak deneysel çalışmalarda Froude kriterinin sağlanması ve kum dalgacıklarının mevcut olmaması aranmalıdır. Froude kriterinin tatbiki için modeldeki deneyler, arazideki yerel oyulmanın olduğu Froude sayısında yapılmalıdır.

Yerel oyulmanın zamanla değişimini gösteren fonksiyonu bulmak için gereken işlemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- a. Oyulma çukurunun geometrisinin ölçülmesi
- b. Oyulma çukuru hacmi için matematiksel bir ifadenin yazılması
- c. Oyulma çukuru hacminin diferansiyelinin ifadesi



d. Oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü ifadesindeki (Bağıntı 6) deneysel katsayının (f) boyutsal analizlerle ve deneysel neticelerin incelenmesiyle parametrik şekilde tayini

e. Yukarda (c) ve (d)'de bulunan ifadelerin Bağıntı 4'de birleştirilmesi,

f. Bağıntı 4'deki integrali hesaplıyarak yerel oyulma ve zaman fonksiyonunun bulunması

g. Bulunan fonksiyonu deneysel neticelerle karşılaştırarak uyuma olmadığı takdirde (d), (e), (f) ve (g)'nin tekrarı.

### BÖLÜM III

#### MODEL ÇALIŞMALARI

##### A. Genel

Dik kapaklar altında batık jet akımdan dolayı meydana gelen yerel oyulmaların benzeşim kanunlarını bulmak için deneysel neticelerin kullanılması gerekmektedir. Bilinmesi gereken başlıca ölçmeler şunlardır.

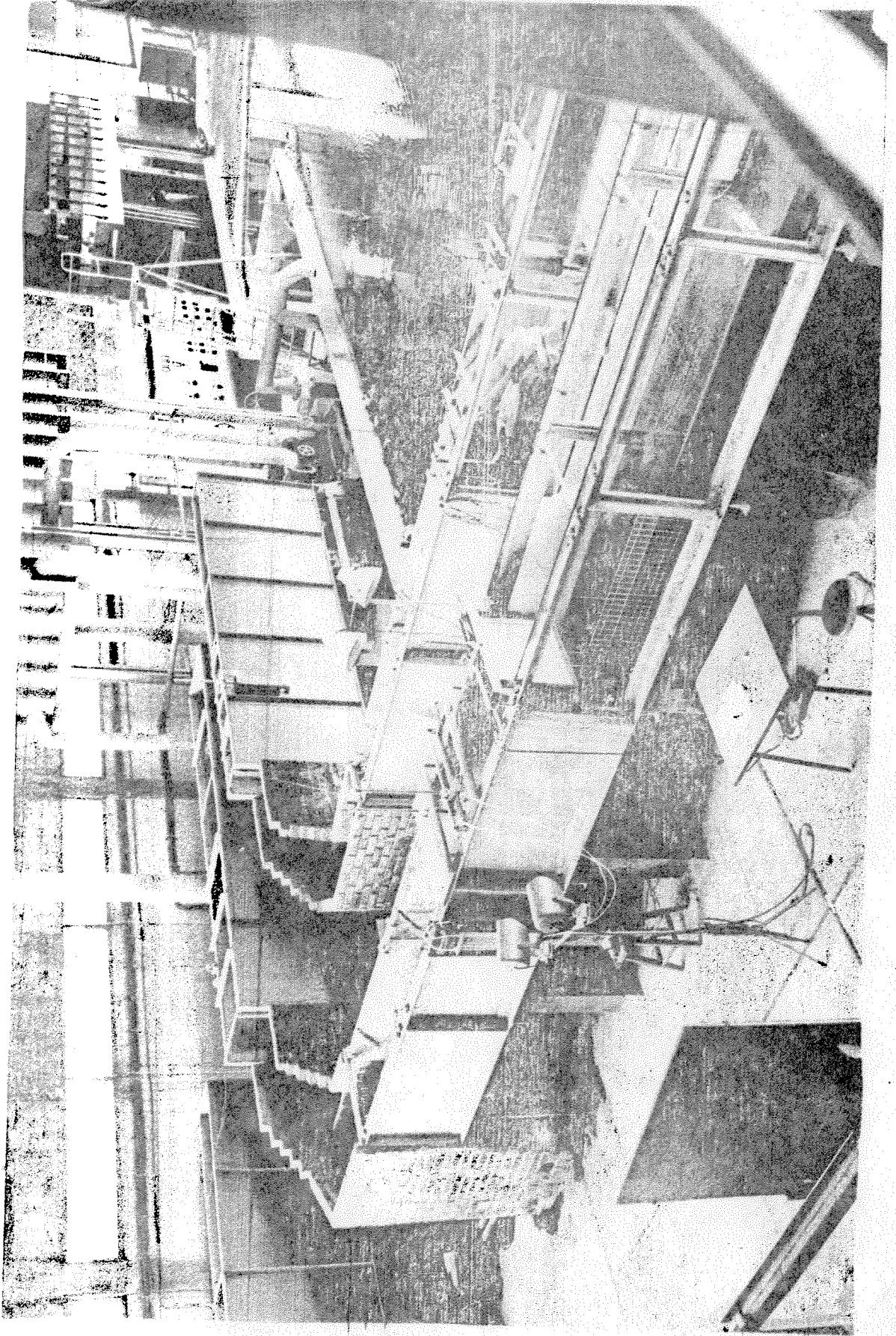
- a. Oyuntu derinliğinin zamanla değişmesi,
- b. Oyuntu geometrisi ve zamanla değişmesi,
- c. Akım özelliklerinin değişimi,
- d. Sürüntü maddesinin özellikleri.

Yukarıda sıralanan bilgiyi toplamak ve çeşitli değişkenlerin oyulma üzerindeki tesirini incelemek amacıyla Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Hidrolik Laboratuvarı'nda bir model çalışması yapıldı. Cam duvarlı bir kanaldaki düşey kapaktan sonra bir sürüntü maddesi yatağı hazırlanarak oyulma deneyleri yapıldı. Oyulma deneylerindeki başlıca değişkenler dane çapı, kapak açıklığı, debi ve kuyruk suyu derinliğiydi. Deney tesisleri ve deneylerin yapılışı ile ilgili bilgi aşağıdadır.

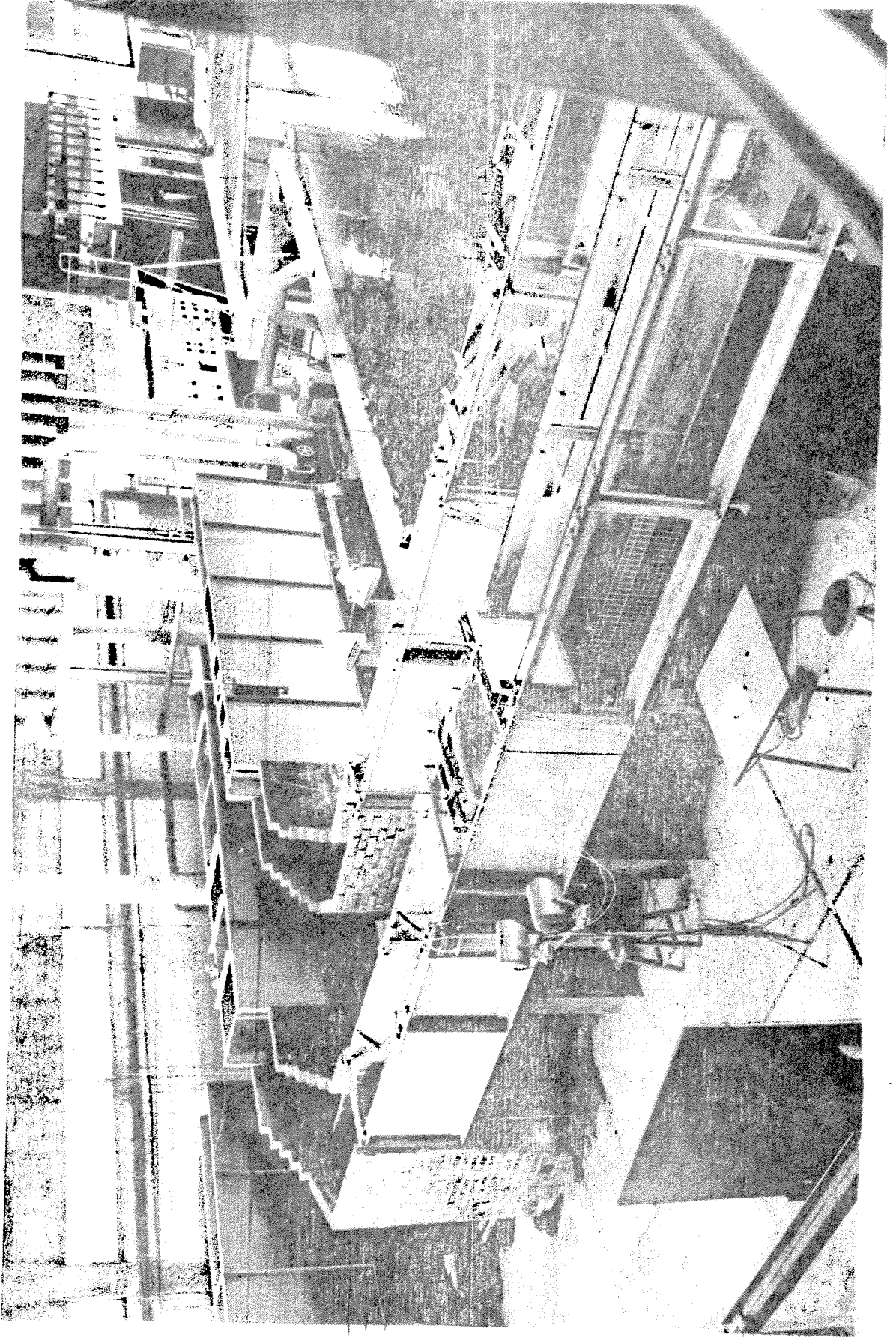
##### B. Deney Tesisleri

Deney tesislerinin genel manzarası Şekil 3'deki fotoğrafta görülmektedir.

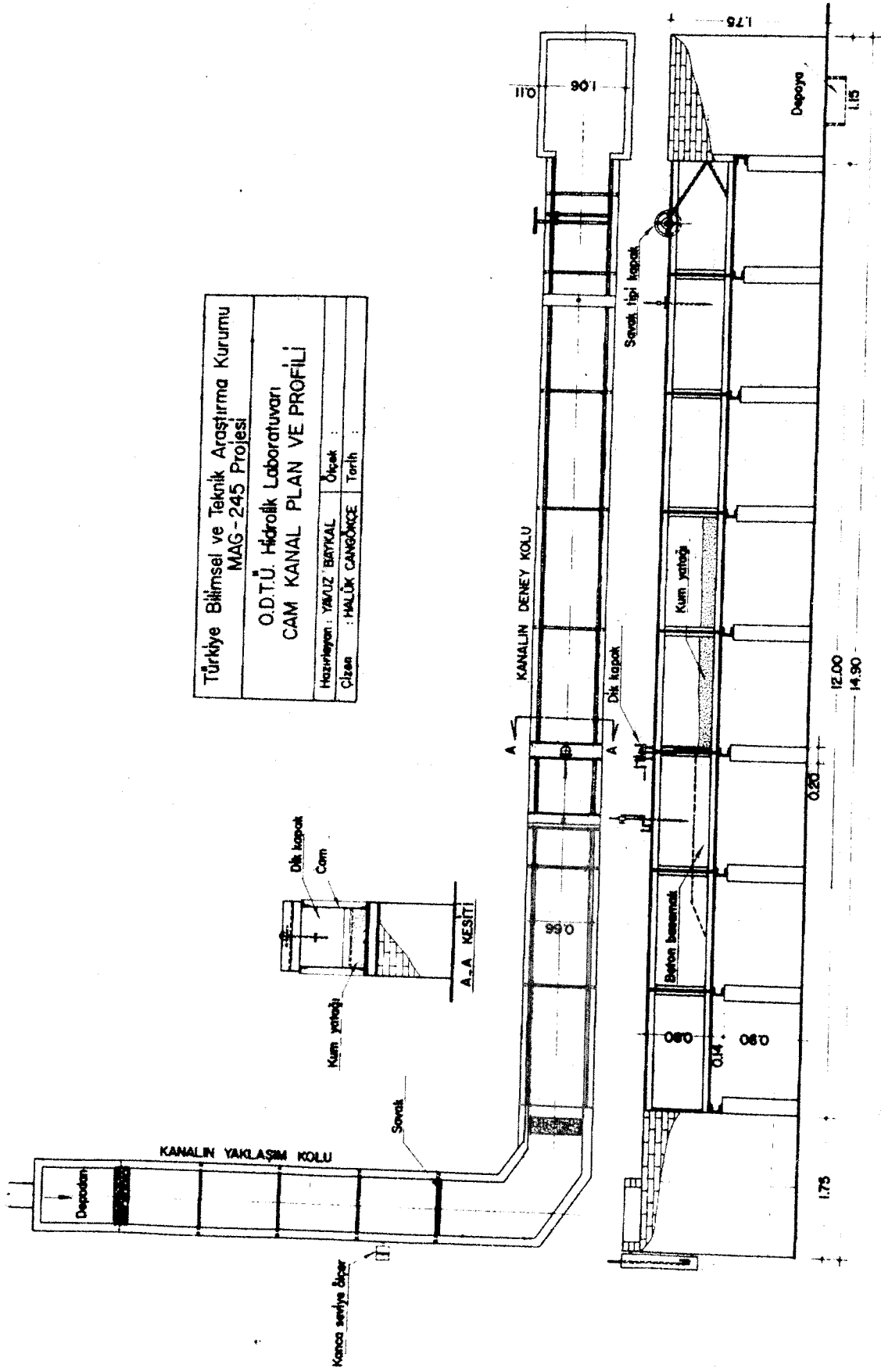
Model çalışmalarında kullanılan cam kanalın plân ve profili Şekil 4'de verilmiştir. Kanal L şeklinde olup 70 cm derinliğinde ve 67 cm genişliğindedir. Kanalın iç yan duvarları tamamen camdan olup tabanı betondur. Kanalın dış duvarları ise "deney bölümü" hariç çelik-



Şekil 3. Deneysel Tesislerin Genel Görünüşü.



Şekil 3. Dency Tesialerinin Genel Görünüşü.



Şekil 4. Cam Kanal Plân ve Profili

tendir. Kanalin yaklaşım kolu 5 m uzunluğunda olup su bu kısmın başına bağlı 30 cm çapındaki bir boru vasıtası ile yükseğe yerleştirilmiş bir depodan gelmektedir. Kanalin yaklaşım kolu, deney kolundan daha yüksekte olup, yaklaşım kolunun sonunda debi ölçmek için keskin uçlu bir savak mevcuttur. Akım savaşa gelmeden türbülansı kırıcı bir tahta kafesden geçmektedir. Savaklanan debiyi ölçmek için kanala bağlı bir cam U-tüp tertibatı içine kanca uçlu bir su seviye ölçeri (hook gage) konulmuştur. L-şeklindeki kanalın diğer deney kolunda "deney bölümü" mevcuttur. Kanalin deney kolu 10 m uzunluğunda ve yerden 1 m yüksekliktedir. Kanalin "deney bölümü" 6 m uzunluğunda olup kanalın içerisinin görülebilmesi için bu kısımdaki yan duvarlar camdan yapılmıştır.

Deney bölümünün başlangıcında pirinçten bir düşey kapak mevcuttur. 5 mm kalınlığında pirinç kapağın alt ucu  $45^{\circ}$  eğimle keskinleştirilmiştir. Kapak bir dişli sistemi ile aşağı ve yukarı hareket ettirilerek 0-10 cm arasında açılabilir. Kapak açıklığı kapağa bitişik bir metreden 0.2 mm hassasiyetle okunabilmektedir.

Kanalin dik kapaktan önceki kısmında 20 cm yüksekliğinde beton bir basamak mevcuttur. Kapaktan sonraki deney bölümünde ise 20 cm derinliğinde ve 3 m uzunluğunda bir sürüntü malzemesi yatağı mevcuttur. Sürüntü malzemesi yatağı yatay olup üst seviyesi kapaktaki kanal tabanı ile aynı seviyededir. Düşey kapaktan önceki ve sonraki su seviyelerini tesbit için kanalın üzerinde iki sabit ve bir hareketli iğne uçlu su seviye ölçeri mevcuttur. Kapaktan sonraki su (kuyruk suyu) derinliği kanalın sonundaki elle kontrol edilen savak cinsi eğik bir kapakla ayarlanmaktadır. Bu kapağın ayarlanmasıyla kanaldaki kuyruk suyu derinliği 0-40 cm arasında değiştirilebilmektedir. Kanala akım daha önce bahsedilen yüksek depodan cazibe ile gelmektedir. Su yüksekteki depoya

laboratuvarın altındaki depodan devamlı olarak pompalanmakta böylece depodaki su seviyesi deney boyunca sabit kalmaktadır. Su sıcaklığının ölçülmesi için kanalda suya batık bir termometre mevcuttur.

### C. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Model çalışmalarında üç çeşit kohezyonsuz taban malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin seçiminde homogen olmasına dikkat edilmiştir. Kullanılan malzemenin fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

TABLO 2

#### KULLANILAN HAREKETLİ MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ

Özellik	Malzeme-A	Malzeme-B	Malzeme-C
Ortalama Dane Çapı $D_g$ (mm)	6.5	2.65	1.30
Dane Çapının standard sapması, $\sigma$	1.30	1.95	1.06
Özgül ağırlık, $s$	2.60	1.30	2.60
Doğal şev açısı, $\phi$ (o)	34	33	31.5

Kullanılan malzemenin ikisi kuvars kumu diğeri ise volkanik tüf idi. 6.5 mm ortalama dane çapındaki kum-çakıl malzemesi (Malzeme-A) nehir yatağından getirilmiş malzemedен elenerek elde edilmiştir. 1.30 mm ortalama dane çapındaki kuvars kumu (Malzeme-C) ise standard bir kum olup, Çimento Sanayi'nden satın alınmıştır. 2.65 mm ortalama dane çapındaki volkanik tüf (Malzeme-B) ise özgül ağırlığı kumdan daha hafif bir malzeme olup Göreme'den getirtilmiştir. Tüf malzemesi çok gözenekli yapısı sebebiyle deneylerden önce bir süre suda bekletilmiştir.

laboratuvarın altındaki depodan devamlı olarak pompalanmakta böylece depodaki su seviyesi deney boyunca sabit kalmaktadır. Su sıcaklığının ölçülmesi için kanalda suya batık bir termometre mevcuttur.

### C. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Model çalışmalarında üç çeşit kohezyonsuz taban malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin seçiminde homogen olmasına dikkat edilmiştir. Kullanılan malzemenin fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

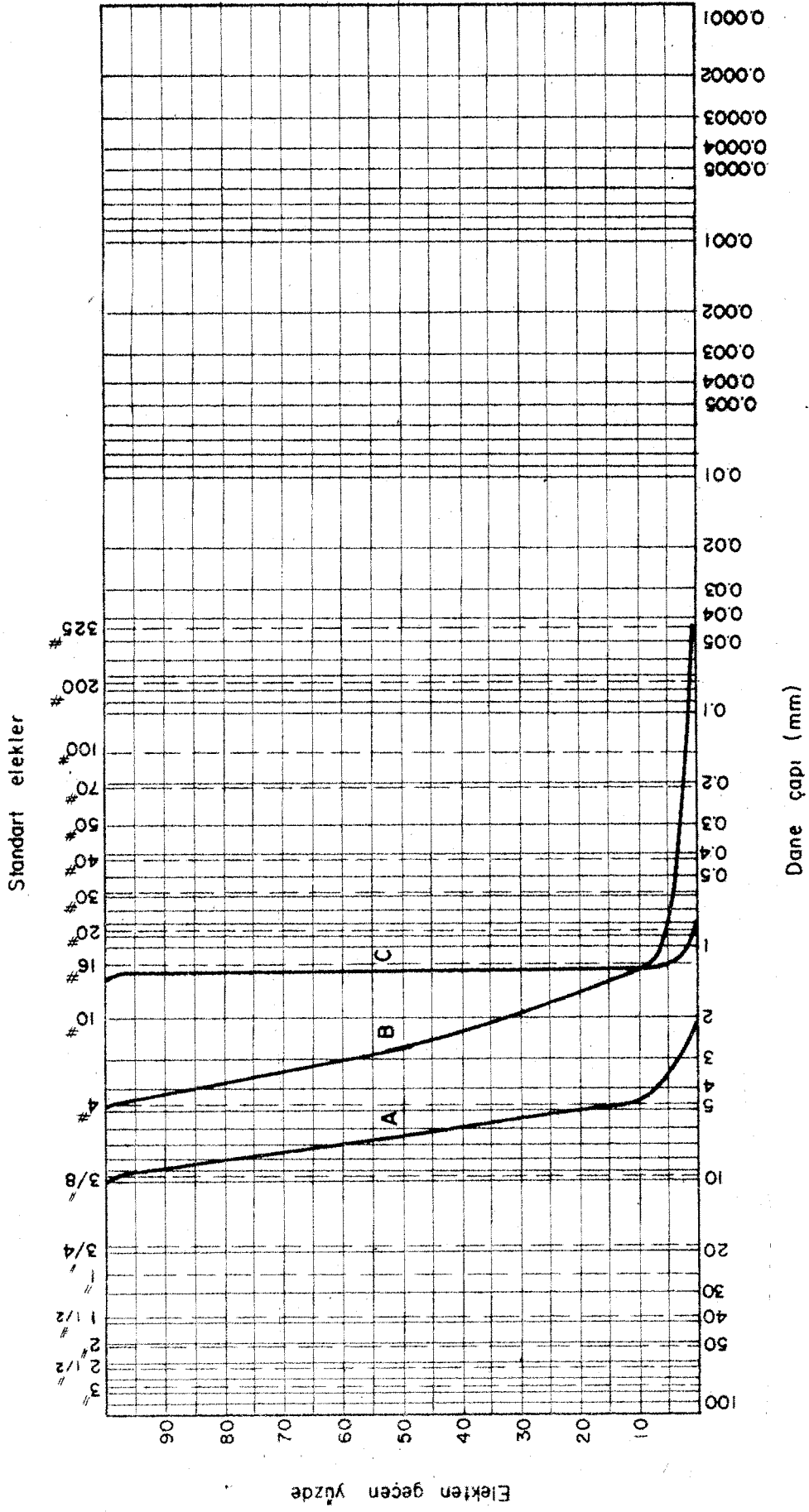
TABLO 2

#### KULLANILAN HAREKETLİ MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ

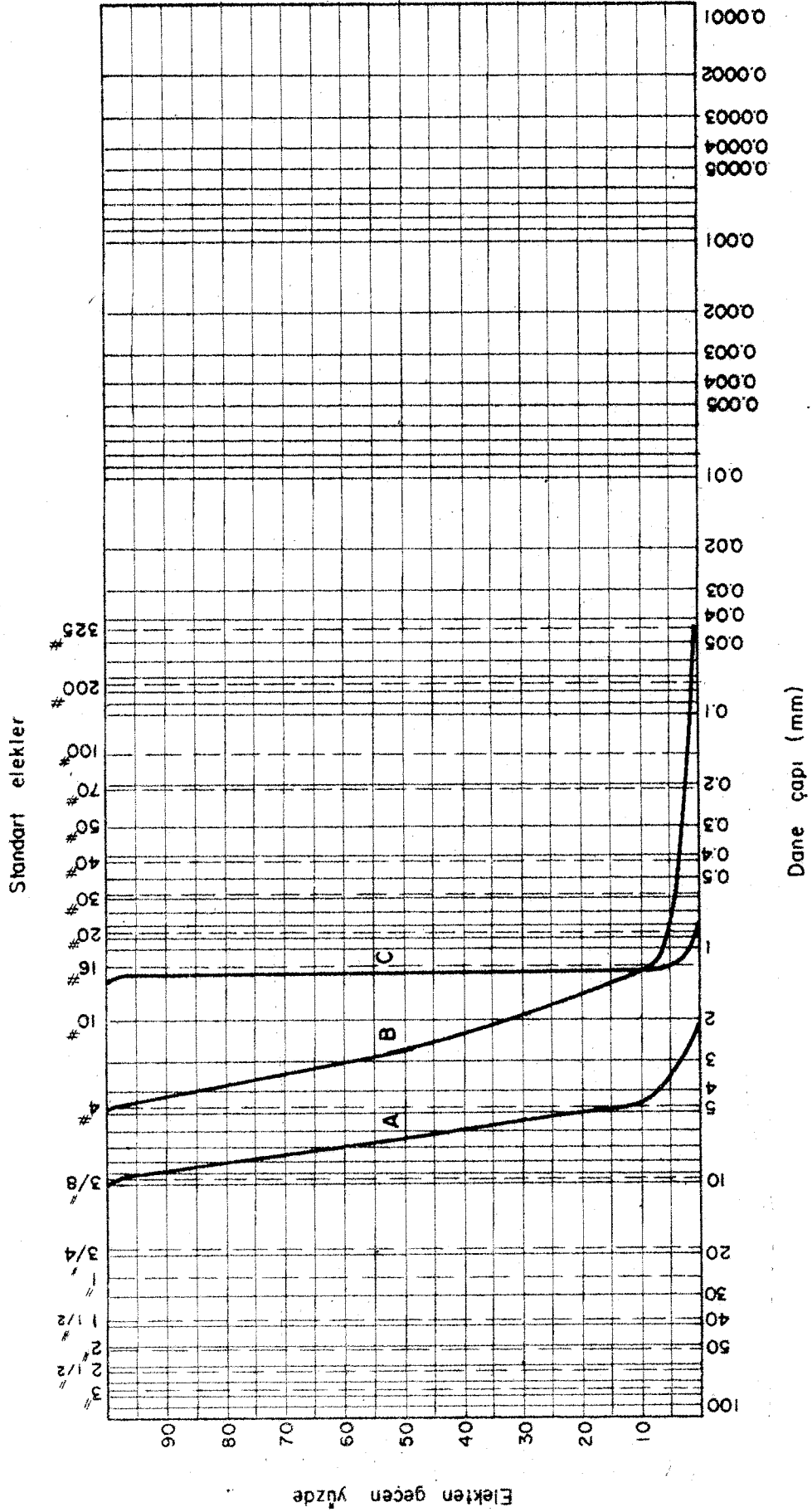
Özellik	Malzeme-A	Malzeme-B	Malzeme-C
Ortalama Dane Çapı $D_g$ (mm)	6.5	2.65	1.30
Dane Çapının standard sapması, $\sigma$	1.30	1.95	1.06
Özgül ağırlık, $s$	2.60	1.30	2.60
Doğal şev açısı, $\phi$ (o)	34	33	31.5

Kullanılan malzemenin ikisi kuvars kumu diğeri ise volkanik tüf idi. 6.5 mm ortalama dane çapındaki kum-çakıl malzemesi (Malzeme-A) nehir yatağından getirilmiş malzemenin elenerek elde edilmiştir. 1.30 mm ortalama dane çapındaki kuvars kumu (Malzeme-C) ise standard bir kum olup, Çimento Sanayi'nden satın alınmıştır. 2.65 mm ortalama dane çapındaki volkanik tüf (Malzeme-B) ise özgül ağırlığı kumdan daha hafif bir malzeme olup Göreme'den getirilmiştir. Tüf malzemesi çok gözenekli yapısı sebebiyle deneylerden önce bir süre suda bekletilmiştir.





Şekil 5. Kullanılan Malzemenin Granülometri Eğrisi



Şekil 5. Kullanılan Malzemenin Granülometri Eğrisi

Deneylerde kullanılan malzemenin granülometri eğrisi Şekil 5'de verilmiştir.

#### D. Deneylerin Yapılışı

Deneylerde belli bir yatak malzemesi, ve akım şartı için düşey kapaklardan sonra meydana gelen yerel oyulmanın zamanla değişimi ve oyuntu çukuru geometrisi incelendi. Ayrıca kuyruk suyu derinliğinin oyulma üzerindeki etkisini tesbit için üç ayrı deney yapıldı. Değişik akım şartlarında yapılan deneylerin başlangıcında deney bölümündeki malzeme yatağı daima yatay ve düzdü. Böylece oyulma olayını ilk anından itibaren gözlemek ve çeşitli deneyleri karşılaştırmak mümkün oldu. Bir deney sırasında takip edilen yöntem aşağıda kronolojik sırayla anlatılmıştır.

Her deneyden önce kullanılacak katı malzeme deney bölümüne konularak sürüntü malzemesi yatağının üstü deney bölümünün bir ucundan diğerine uzanacak uzunluktaki düz bir metal çubukla düzeltildi. Kapak civarındaki katı malzeme ayrıca dikkatle düzeltilerek kapaktan önceki taban betonu ile aynı seviyeye getirildi. Daha sonra kanala su verilmeden düşey kapak sonuna kadar açıldı. Kapağın açılmasının sebebi deney bölümündeki katı malzeme yatağında akım hızının düşük olmasını temin ederek katı malzeme hareketini önlemektir. Daha sonra yüksek depo tankına su veren elektromotopomp çalıştırıldı ve sırasıyla tabandaki depodan yüksek depoya ve yüksekteki depodan kanala su veren vanalar açıldı. Kanaldaki debi kanca uçlu su seviyesi ölçeri ile kontrol edilerek, vana vasıtası ile ayarlandı. Kanaldaki debi bir deney süresince sabit tutuldu.

Savaklanan debinin hesaplanması için aşağıda verilen Rechbock formülü kullanıldı.

$$Q = (1.782 + 0.24 \frac{h_e}{p}) w h_e^{3/2}$$

$$h_e = h_o + 0.0011$$

(7)

Yukarıdaki bağıntılarda Q, debi (m<sup>3</sup>/sac), w, savak genişliği (m); h<sub>e</sub> ve h<sub>o</sub>, efektif ve ölçülen su yükseklikleri (m), P, ise savak yüksekliği (m) olmaktadır.

Daha sonra kanalın sonundaki eğik kapak ayarlanarak kuyruk suyu seviyesi istenilen derinliğe getirildi. Suyun sıcaklığı da suya batık termometreden okunarak kaydedildi.

Oyulma deneylerinin başlangıcında en az iki gözlemci gerekmekteydi. Birinci gözlemcinin ilk görevi deneyin başlayabilmesi için açık olan kapağın kapatılmasıydı. Kapak istenilen açıklığa getirilince akım hızlanmakta ve oyulma başlamaktadır. Aynı gözlemcinin deney sırasındaki görevi debi ve akım hızı değişmelerinin bilinmesi için kapaktan önceki ve sonraki su seviyelerini kısa zaman aralıkları ile okuyup kaydetmektir. İkinci gözlemci görevi ise kapağın kapatılması ile hızla oyulmaya başlayan oyulma çukurunun gelişmesini tesbit etmektir. Oyuntu çukurunun derinliği ve profili kısa zaman aralıkları ile kanalın cam duvarından gözlenmekte ve kaydedilmektedir. Kanalın deney bölümünün cam duvarları 2 cm aralıklı koordinat eksenleri ile işaretlenmişti. Şekil 3'deki fotoğrafta görülen bu işaretlerle deneyler sırasında oyulma profilini kolaylıkla tesbit edebilmek mümkün oldu.

Savaklanan debinin hesaplanması için aşağıda verilen Rechbock formülü kullanıldı.

$$Q = (1.782 + 0.24 \frac{h_e}{P}) w h_e^{3/2}$$

$$h_e = h_o + 0.0011$$

(7)

Yukardaki bağıntılarda Q, debi (m<sup>3</sup>/sec), w, savak genişliği (m); h<sub>e</sub> ve h<sub>o</sub>, efektif ve ölçülen su yükseklikleri (m); P, ise savak yüksekliği (m) olmaktadır.

Daha sonra kanalın sonundaki eğik kapak ayarlanarak kuyruk suyu seviyesi istenilen derinliğe getirildi. Suyun sıcaklığı da suya batık termometreden okunarak kaydedildi.

Oyulma deneylerinin başlangıcında en az iki gözlemci gerekmektedir. Birinci gözlemcinin ilk görevi deneyin başlayabilmesi için açık olan kapağın kapatılmasıydı. Kapak istenilen açıklığa getirilince akım hızlanmakta ve oyulma başlamaktadır. Aynı gözlemcinin deney sırasındaki görevi debi ve akım hızı değişmelerinin bilinmesi için kapaktan önceki ve sonraki su seviyelerini kısa zaman aralıkları ile okuyup kaydetmektir. İkinci gözlemci görevi ise kapağın kapatılması ile hızla oyulmaya başlayan oyulma çukurunun gelişmesini tesbit etmektir. Oyuntu çukurunun derinliği ve profili kısa zaman aralıkları ile kanalın cam duvarından gözlenmekte ve kaydedilmektedir. Kanalın deney bölümünün cam duvarları 2 cm aralıklı koordinat eksenleri ile işaretlenmişti. Şekil 3'deki fotoğrafta görülen bu işaretlerle deneyler sırasında oyulma profilini kolaylıkla tesbit edebilmek mümkün oldu.

Oyuntu çukurunun derinlik ölçmeleri deneyin başlangıç safhalarında her 30 saniyede yapıldı. Daha sonraları ise oyulma hızı azaldığından ölçmeler daha uzun zaman aralıkları ile kaydedildi. Bir deneyin başlamasından 1/2 saat sonra oyulma hızı yukarıda bahsedilen bütün işlerin bir gözlemci tarafından yapılmasına imkân verecek kadar yavaşlamaktadır. İlk deneyler sırasında oyulma çukurunun gelişmesi çeşitli zaman aralıklarında fotoğraflar çekilmek suretiyle de tesbit edildi. Ek 1'de verilen bu fotoğraflarda deney numarası ve deneyin başından itibaren geçen zaman kayıtları mevcuttur. Gözlemcinin kayıtları ile birlikte fotoğrafların mevcudiyeti oyulma çukuru profilinin doğru olarak tesbitini sağlamaktadır. Kanalin cam duvarındaki santimetrik çizgiler oyuntu çukuru geometrisini 2 mm hatayla tesbite imkân vermektedir.

Bir oyulma deneyine oyulma durduğu veya 20 cm derinliğindeki malmemeyi oyup kanalın tabanına eriştiği zaman son verildi. Deney sonunda akım, daha önce bahsedilen vanalar kapatılarak ve pompa durdurularak kesildi. Akım durdurulduktan sonra suyun sıcaklığı kaydedildi. Her deneyin sonunda oyulma çukurunun son halini gösterir bir fotoğraf çekildi ve oyulma çukuru profili ayrıca tesbit edildi. Oyulma çukurunun son halini gösterir fotoğraflar Ek 1'de sunulmuştur. Bazı deneyler için fotoğrafların mevcut olmamasının nedeni fotoğrafların iyi çıkmaması veya renkli diapositif çekilmesi sebebiyle fotoğrafların çoğaltılamamasıdır.

## BÖLÜM IV

### DENEY SONUÇLARI

#### A. Deneyleerin Kapsamı

Üç çeşit katı malzeme ile toplam olarak 26 model deneyi yapıldı. Eğer bir deney sırasında akım şartları önceden tesbit edilen sınırlar dışına çıkarsa aynı akım şartları ile yeni bir deney yapıldı. Diğer bazı deneyler ise sadece deneme maksadıyla veya oyulma çukuru geometrisini tayin için yapıldığından 26 deneyden ancak 19 tanesinde oyulmanın zamanla değişmesi tesbit edildi. Yapılan deneylerde mevcut akım şartları ve katı malzeme ile ilgili fiziksel özellikler Tablo 3'de gösterilmiştir.

#### B. Oyulmanın Oluşumu

Bir deney sırasında oyulma çukurunun oluşumunun bilinmesi oyulma olayının mekaniğinin anlaşılmasında yararlı olacaktır. Deneylerin başında düşey kapak tamamen açık, malzeme yatağı ise düz ve yataydı. Akım debisi ve kuyruksuyu derinliğinin ayarlanmasından sonra kapak daha önce kararlaştıran bir açıklığa kadar hızla kapandı. Kapak açıklığının ayarlanmasıyla kapaktan önceki akım derinliği de artarak yeni bir değere erişti. Kapağın ayarlandığı ve akım derinliğinin değiştiği zaman süresi kısa (20 saniyeden az) olduğundan, bu zaman içinde değişen akım debisinin etkileri ihmal edilmiştir.

Batık jet akımla yapılan deneylerde oyulma çukurunun gelişmesi üç safhada olmaktadır. "Başlangıç safhası" olan ilk devrede oyulma çukuru aniden teşekkül eder. Katı malzemenin yatak sürüntü yükü şeklinde taşındığı, oyulmanın başlangıç safhasında, oyulma çukurunun düşey boyut-

## BÖLÜM IV

### DENEY SONUÇLARI

#### A. DeneYlerin Kapsamı

Üç çeşit katı malzeme ile toplam olarak 26 model deneyi yapıldı. Eğer bir deney sırasında akım şartları önceden tesbit edilen sınırlar dışına çıkarsa aynı akım şartları ile yeni bir deney yapıldı. Diğer bazı deneyler ise sadece deneme maksadıyla veya oyulma çukuru geometrisini tayin için yapıldığından 26 deneyden ancak 19 tanesinde oyulmanın zamanla değişmesi tesbit edildi. Yapılan deneylerde mevcut akım şartları ve katı malzeme ile ilgili fiziksel özellikler Tablo 3'de gösterilmiştir.

#### B. Oyulmanın Oluşumu

Bir deney sırasında oyulma çukurunun oluşumunun bilinmesi oyulma olayının mekaniğinin anlaşılmasında yararlı olacaktır. Deneylerin başında düşey kapak tamamen açık, malzeme yatağı ise düz ve yataydı. Akım debisi ve kuyruksuyu derinliğinin ayarlanmasından sonra kapak daha önce kararlaştıran bir açıklığa kadar hızla kapandı. Kapak açıklığının ayarlanmasıyla kapaktan önceki akım derinliği de artarak yeni bir değere erişti. Kapağın ayarlandığı ve akım derinliğinin değiştiği zaman süresi kısa (20 saniyeden az) olduğundan, bu zaman içinde değişen akım debisinin etkileri ihmal edilmiştir.

Batık jet akımla yapılan deneylerde oyulma çukurunun gelişmesi üç safhada olmaktadır. "Başlangıç safhası" olan ilk devrede oyulma çukuru aniden teşekkül eder. Katı malzemenin yatak sürüntü yükü şeklinde taşındığı, oyulmanın başlangıç safhasında, oyulma çukurunun düşey boyut-



## BÖLÜM IV

### DENEY SONUÇLARI

#### A. Deneylelerin Kapsamı

Üç çeşit katı malzeme ile toplam olarak 26 model deneyi yapıldı. Eğer bir deney sırasında akım şartları önceden tesbit edilen sınırlar dışına çıkarsa aynı akım şartları ile yeni bir deney yapıldı. Diğer bazı deneyler ise sadece deneme maksadıyla veya oyulma çukuru geometrisini tayin için yapıldığından 26 deneyden ancak 19 tanesinde oyulmanın zamanla değişmesi tesbit edildi. Yapılan deneylerde mevcut akım şartları ve katı malzeme ile ilgili fiziksel özellikler Tablo 3'de gösterilmiştir.

#### B. Oyulmanın Oluşumu

Bir deney sırasında oyulma çukurunun oluşumunun bilinmesi oyulma olayının mekaniğinin anlaşılmasında yararlı olacaktır. Deneylelerin başında düşey kapak tamamen açık, malzeme yatağı ise düz ve yataydı. Akım debisi ve kuyruksuyu derinliğinin ayarlamasından sonra kapak daha önce kararlaştıran bir açıklığa kadar hızla kapandı. Kapak açıklığının ayarlamasıyla kapaktan önceki akım derinliği de artarak yeni bir değere erişti. Kapağın ayarlandığı ve akım derinliğinin değiştiği zaman süresi kısa (20 saniyeden az) olduğundan, bu zaman içinde değişen akım debisinin etkileri ihmal edilmiştir.

Batık jet akımla yapılan deneylerde oyulma çukurunun gelişmesi üç safhada olmaktadır. "Başlangıç safhası" olan ilk devrede oyulma çukuru aniden teşekkül eder. Katı malzemenin yatak sürüntü yükü şeklinde taşındığı, oyulmanın başlangıç safhasında, oyulma çukurunun düşey boyut-

TABLO 3

## OYULMA DENYELERİNİN KAPSAMI

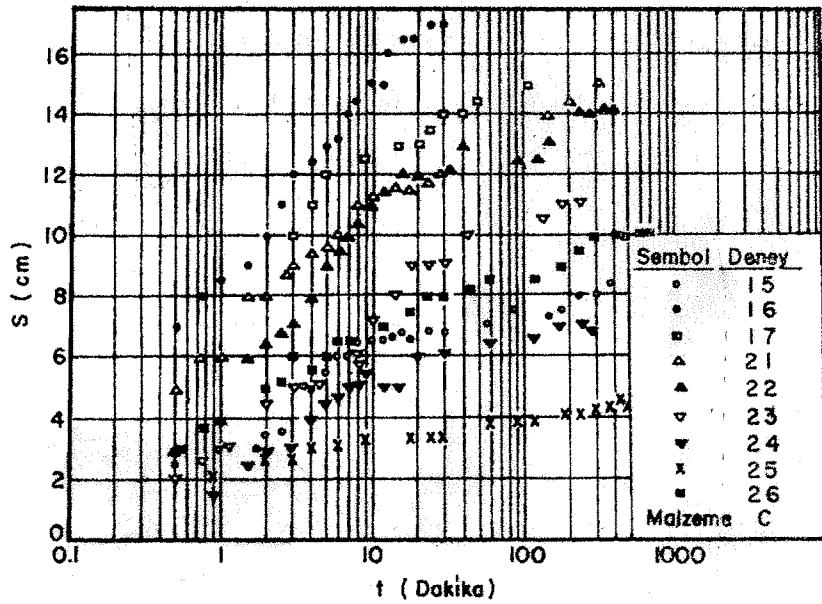
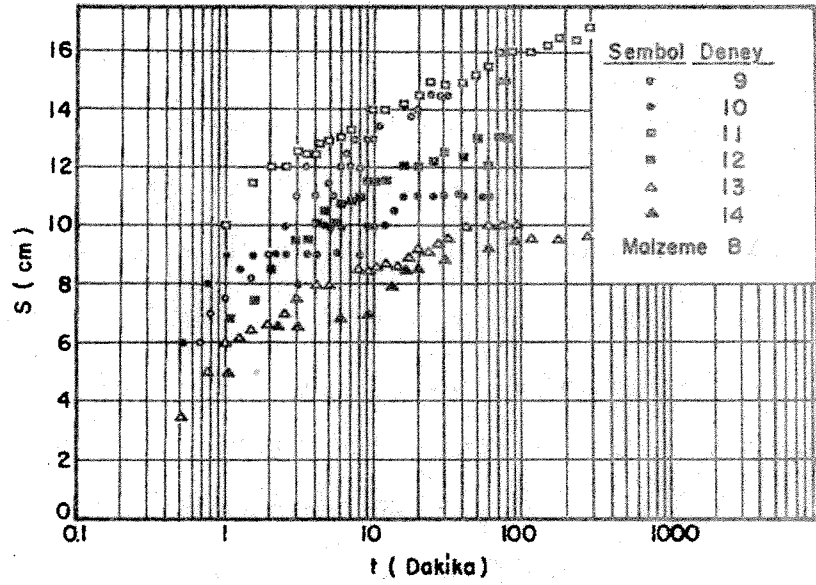
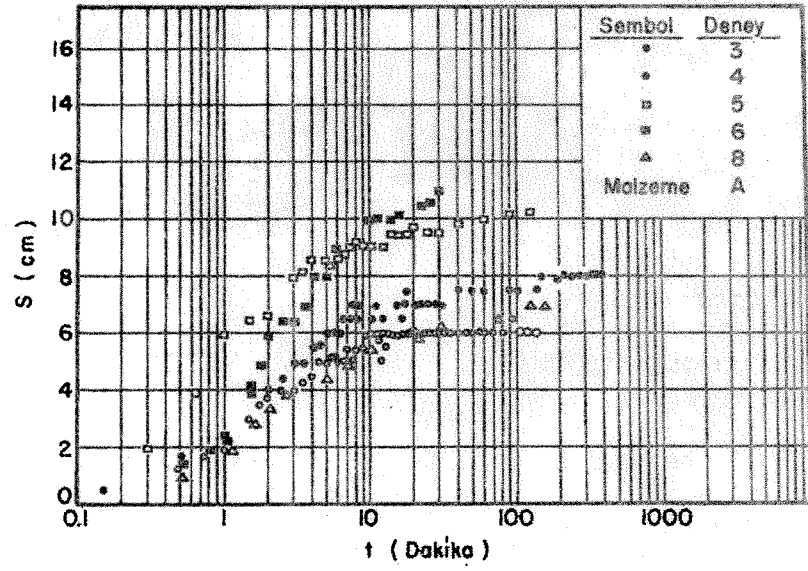
Run No.	Kapak aralığı (cm)	Dane çapı (mm)	Debi (lt/sn)	Maksimum akın hızı (cm/s)	Kuyruk suyu derinliği (cm)	Suyun ısısı (°C)	Sürüntü maddesi sayısı	Froude sayısı $Fr = U/\sqrt{gH}$
1	5.0	6.5	30.2	144	7.0	17	4.52	14.6
2	1.0	6.5	6.9	141	7.0	17	4.4	6.7
3	1.0	6.5	6.88	165	19.4	18	5.1	6.7
4	1.0	6.5	8.00	192	20.6	18	5.9	7.8
5	2.0	6.5	14.35	170	22.7	16	5.3	4.9
6	1.0	6.5	10.95	252	19.3	16	8.1	10.6
7	0.5	6.5	9.1	435	20	17	13.4	24.8
8	0.5	6.5	5.80	276	17.8	17	8.5	15.8
9	1.0	2.65	5.20	125	22.0	18	14.1	5.0
10	2.0	2.65	5.20	62	22.7	18	7.1	1.8
11	3.0	2.65	9.60	77	21.5	18	8.7	1.8
12	1.0	2.65	3.84	93	21.4	18	10.5	3.8
13	1.0	2.65	2.91	70	22.5	18	7.9	2.8
14	0.6	2.65	2.24	90	21.0	18	10.0	4.7
15	1.0	1.3	4.55	109	21.0	20	7.5	4.4
16	2.0	1.3	15.3	182	19.8	20	12.6	5.2
17	2.0	1.3	12.8	150	25.0	20	9.3	3.8
18	2.0	1.3	11.2	135	6.0	20	9.3	3.9
19	2.0	1.3	11.2	135	8.0	20	9.3	3.9
20	2.0	1.3	11.2	135	12.0	20	9.3	3.9
21	2.0	1.3	11.0	135	20.0	20	9.3	3.9
22	1.0	1.3	7.37	176	21.5	20	12.6	7.1
23	0.6	1.3	4.76	190	20.5	20	13.0	9.9
24	0.4	1.3	2.10	128	15.5	20	8.8	8.2
25	2.0	1.3	4.50	55	19.4	22.5	3.8	1.6
26	2.0	1.3	7.90	95	24.9	22.5	6.5	2.7

$$NS = \frac{U}{\sqrt{(s-1)gDg}}$$

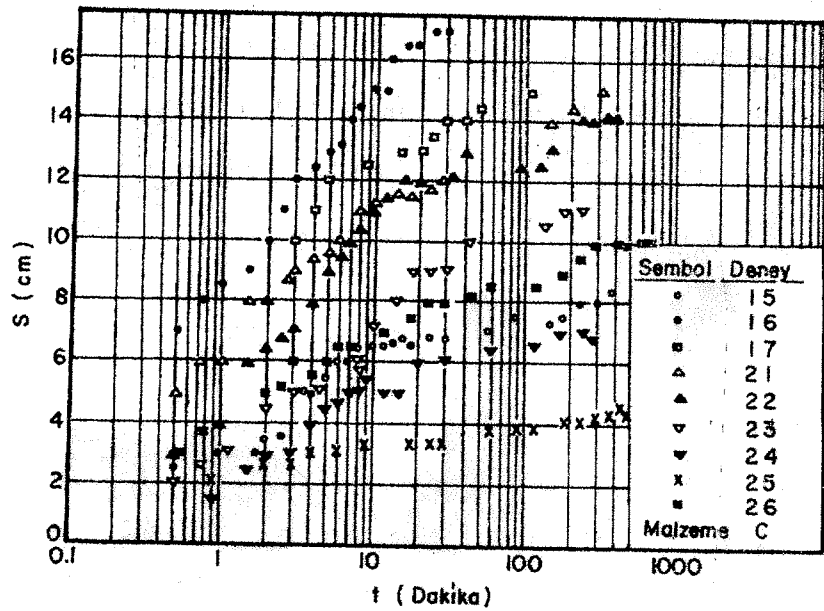
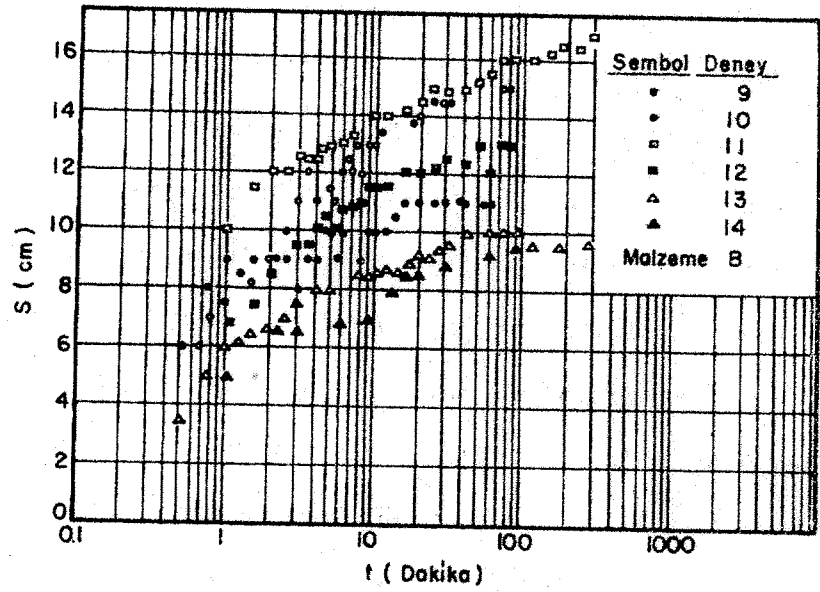
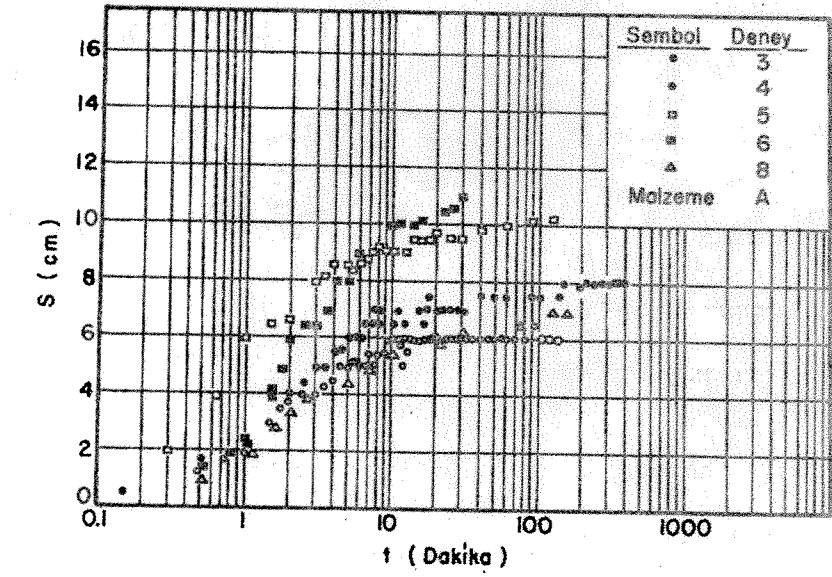
ları yatay boyutlarından daha hızlı artar. Ek 1'deki fotoğraflarda da görüldüğü gibi, oyulmanın başlamasından kısa bir süre sonra oyuntudan taşınan malzeme oyuntudan sonra bir kum dalgacığı meydana getirir.

Kum dalgacığının oluşmasıyla oyulma "gelişme safhasına" geçmiş olmaktadır. Şekil 6'daki oyulmanın zamanla değişmesini gösteren grafiklerden de anlaşılacağı üzere gelişme safhasında oyulma derinliği zamanla logaritmik olarak artmaktadır. Oyuntuyu takip eden kum dalgasının yatayla yaptığı açı malzemenin doğal şev açısına eriştiğinde, oyuntudan çıkan malzeme hem askıda ve hem de yatakta taşınmaktadır. Malzemenin en çok oyulduğu nokta, batık akım jetinin kum dalgasına çarptığı yerdir. Ek'teki fotoğraflardaki Deney 5 ve 6'ya ait resimlerde, bu nokta **açık** şekilde görülmektedir. Akım jetinin kum dalgacığına çarptığı noktada katı malzeme daneleri askıya kaldırılırlar ve oyulma çukurundaki çevrintiye kapılarak saatin ters yönünde dönerler. Askıdaki malzemenin büyük bir kısmı kum dalgacığının oyuntu çukurunu teşkil eden yamacına çökelir. Bir kısmı ise kum dalgacığının zirvesini aşarak dalgacığın menba yamacına çökelir. Bu kum daneleri oyuntu çukurundan çıkan malzeme yükü olmaktadır. Oyulma çukuru "gelişme safhasında" pratikte "limit derinlik" diye adlandırılabilcek bir derinliğe erişmektedir.

Oyulma deneyinin "ileri safhasında" akım tarafından oyuntu çukuru dışına taşınan danelerin sayısı pek azdı. Danelerin çoğu oyuntu çukuru içinde dönmekte ve çökelmektedir. Oyulmanın "ileri safhasında" oyuntu derinliği pek az değiştiği halde kapak ile kum dalgacığının zirve noktası arasındaki mesafe zamanla artmaya devam etti. Bu devreye oyulmanın "aşınma" safhası da denilmektedir.



Şekil 6. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi

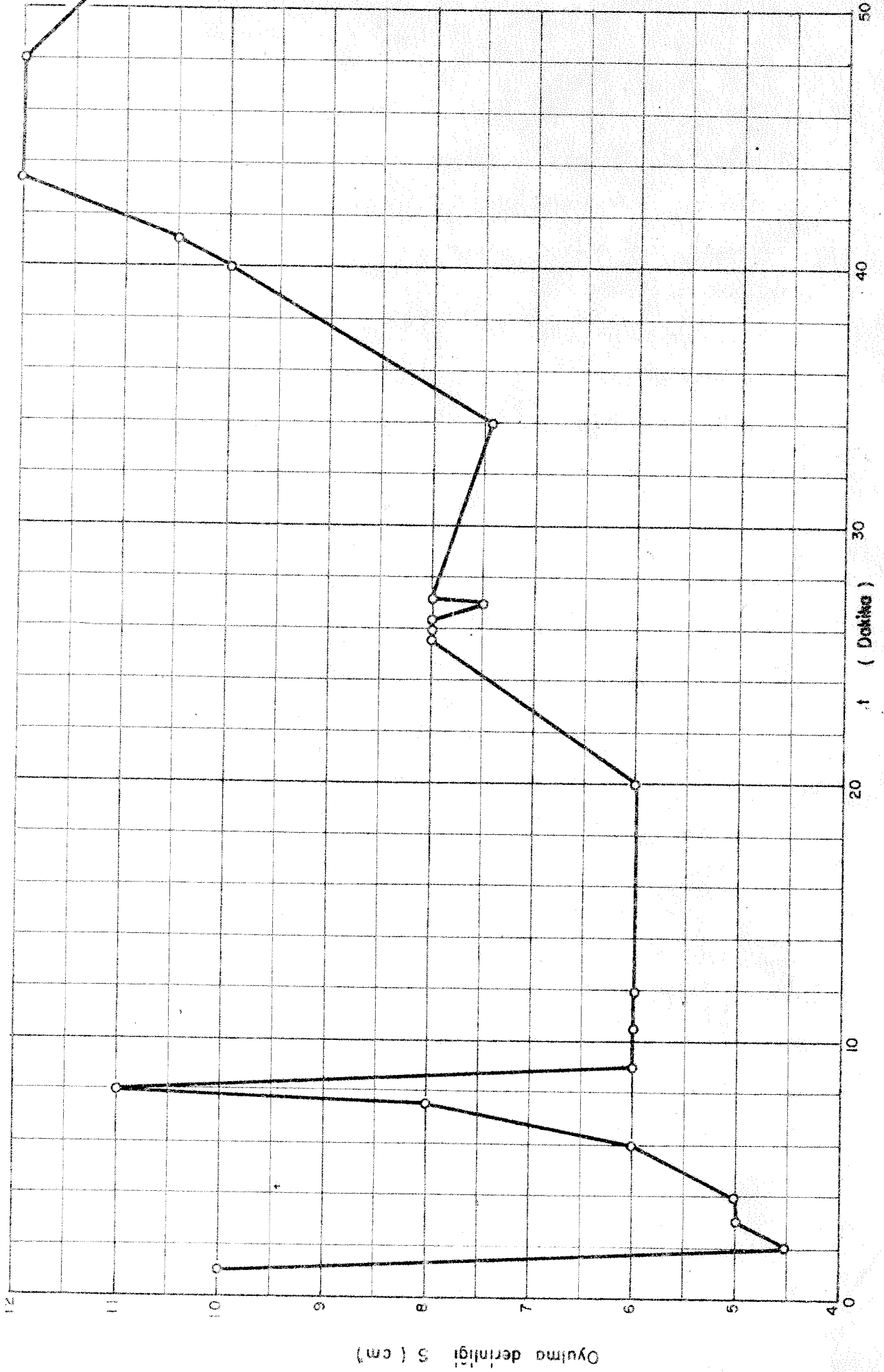


Şekil 6. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi

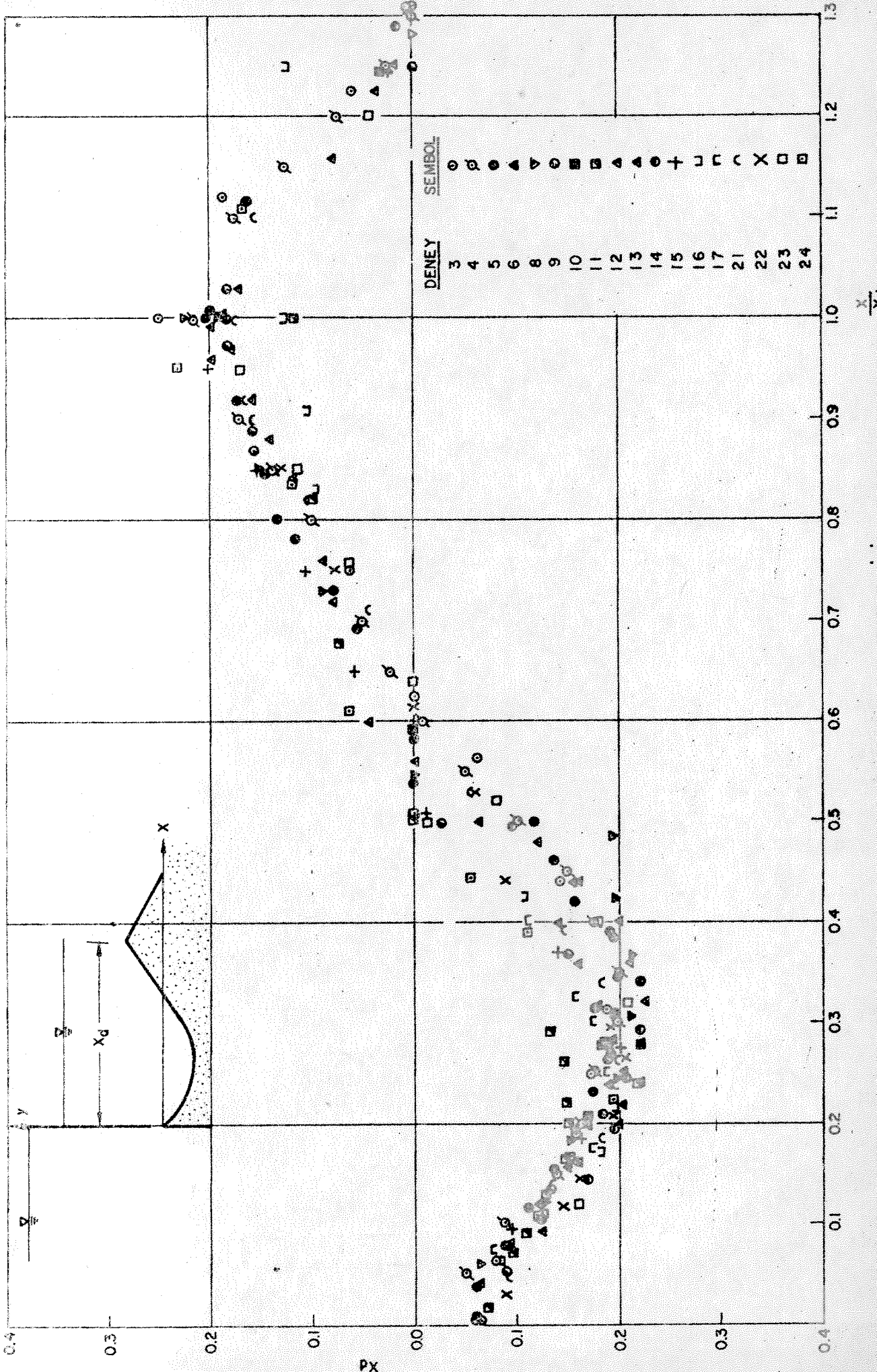
Deney 18, 19, 20'de ise tamamen batık olmiyan akımlarda oyulmanın gelişmesi incelendi. Bu deneylerde kapaktan sonraki kuyruk suyu derinliği, oyulma çukurunu teşkil eden kum dalgacığının derinliğinden daha azdı. Batık olmiyan akımla yapılan deneyler batık akımla yapılan deneylerden değişik bir gelişme gösterdi. Kapaktan sonra bir hidrolik sıçrama meydana gelmekte ve akım şartları hidrolik sıçramanın yerine göre değişmekteydi. Şekil 7'de görüldüğü gibi batık olmiyan jet akımla yapılan deneylerde oyulma derinliği çoğalıp azalabilmektedir. Bu deneylerde kapaktan sonra bir kum dalgacığı oluşmamış ve malzeme yatak sürüntü yükü olarak taşınmıştır. Bu araştırma sırasında batık olmiyan jet akımlardaki oyulmalar araştırılmamış olup, sunulan sonuçlar yalnızca batık akımlar için geçerlidir.

### C. Oyulma Çukuru Geometrisi

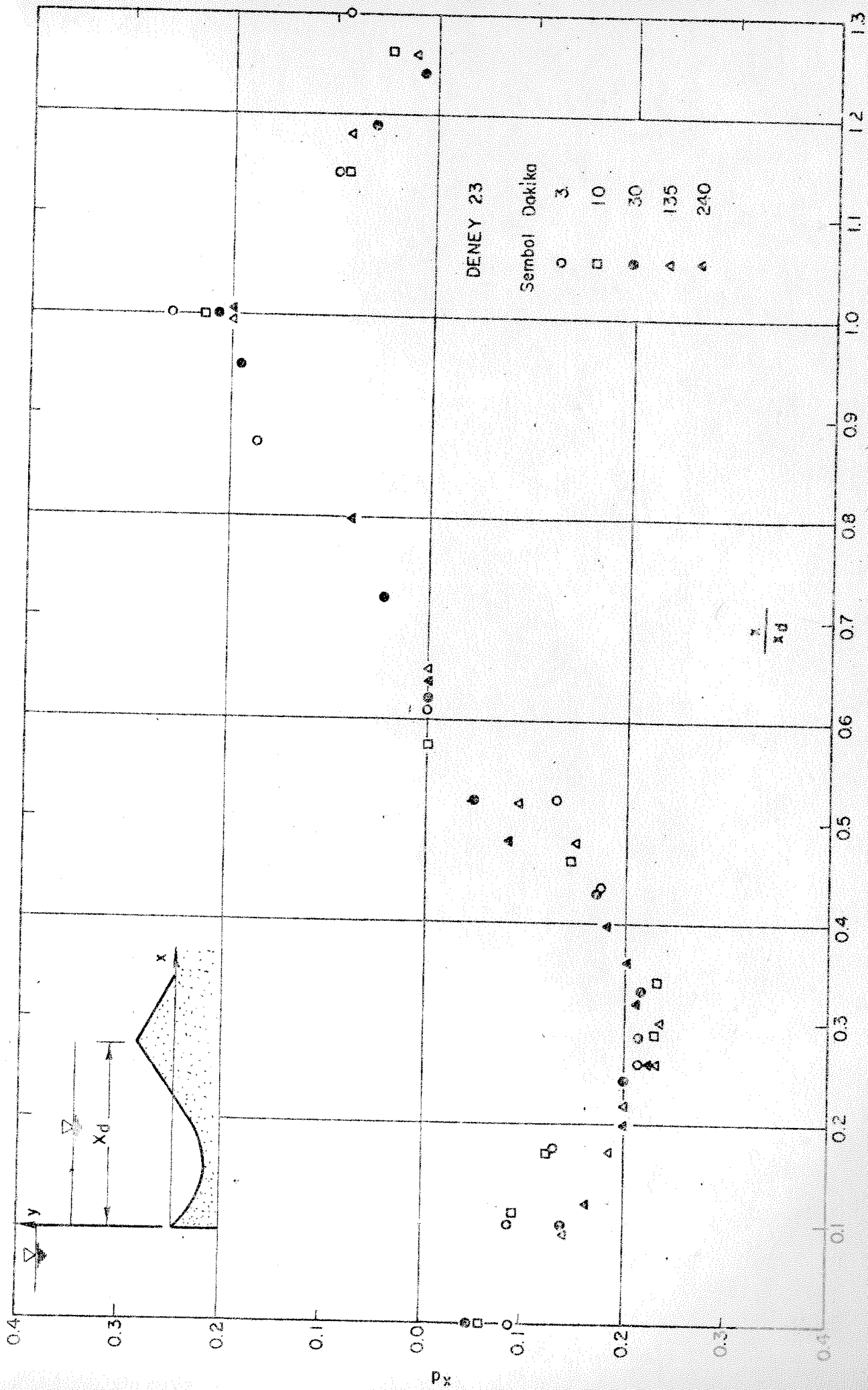
Düsey kapaklardan sonraki batık jet akımdan ötürü meydana gelen oyuntu çukuru geometrisi oyulmanın "gelişme" ve "aşınma" safhalarında değişmeyip sabit kaldığı gibi, değişik akım şartlarında da değişmemektedir. Şekil 8'de, on sekiz değişik akım şartı ve üç ayrı malzeme için ölçülmüş deneysel oyulma profili değerleri boyutsuz şekilde ifade edilmiştir. Şekil 9'da ise oyulma çukurunun bir deney boyunca değişik zamanlarda ölçülmüş profili verilmiştir. Şekil 8 ve 9'da verilen ve oyuntu geometrisinin zamanla değişmediğini gösterir ölçmeler Tarapore 8/ ve Laursen 5/ tarafından elde edilerek Şekil 10 ve 11'de sunulmuş boyutsuz ölçmelerle de doğrulanmıştır. Oyulma çukuru geometrisi parabolik olmaktadır. Bu parabolün yatayla olan maksimum eğimi danenin doğal şev açısına eşittir.



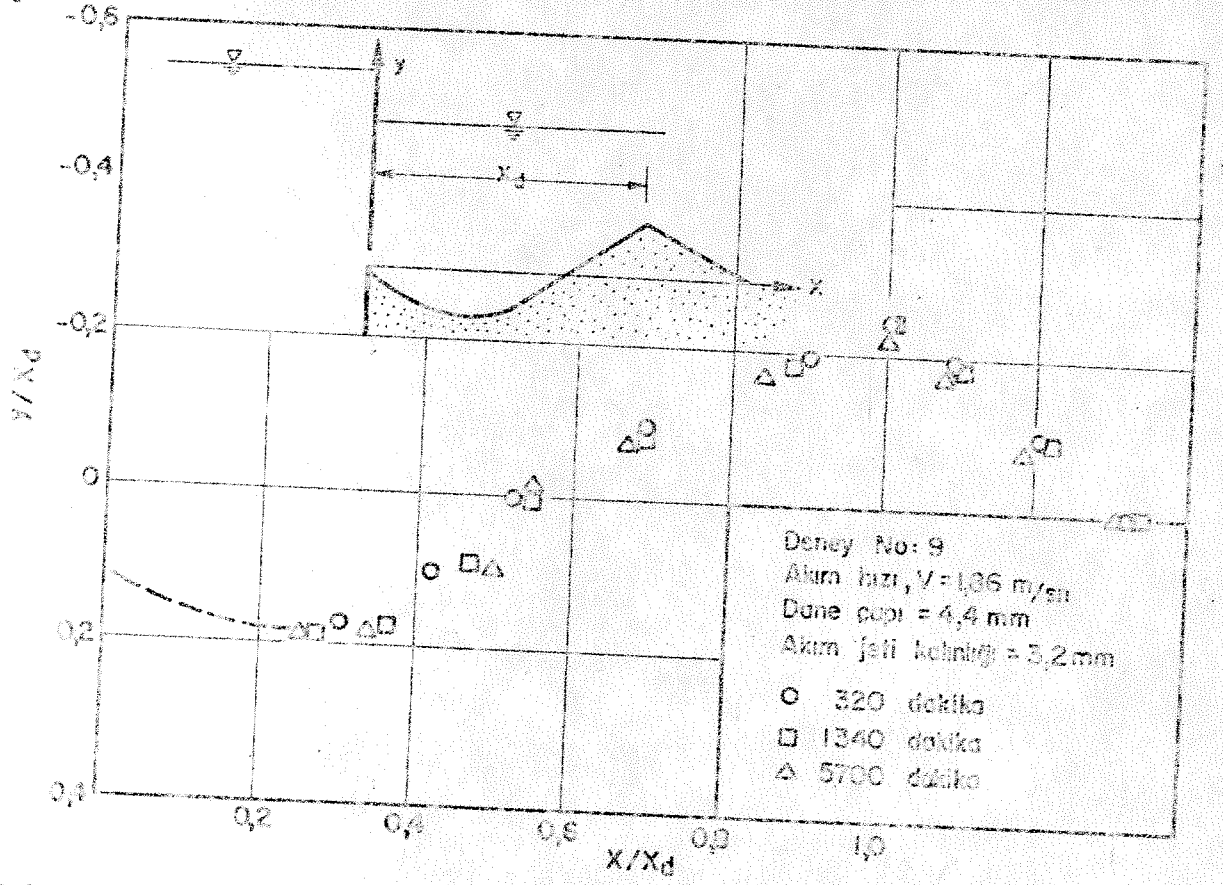
Sekil 7. Batık Olmayan Akında Oyumanın Zamanla Değişimi (Deney 18)



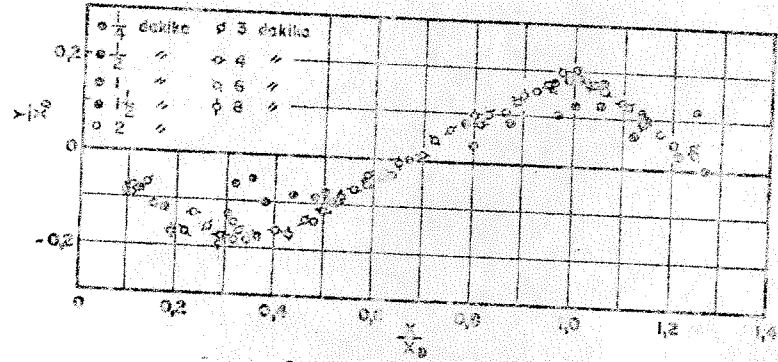




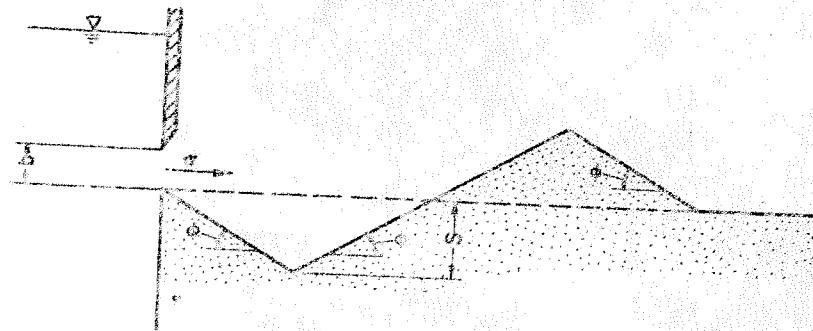
Sekil 9. Oyulma Çukuru Profilinin Zamanla Değişimi



Şekil 10. Oyuntu Çukuru Geometrisinin Zamana Bağlı Olmadığını Gösterir Boyutsuz Şekil (Kaynak-Tarapore)



Şekil 11. Oyuntu Çukuru Geometrisinin Zamana Bağlı Olmadığını Gösterir Boyutsuz Şekil (Kaynak-Laursen)

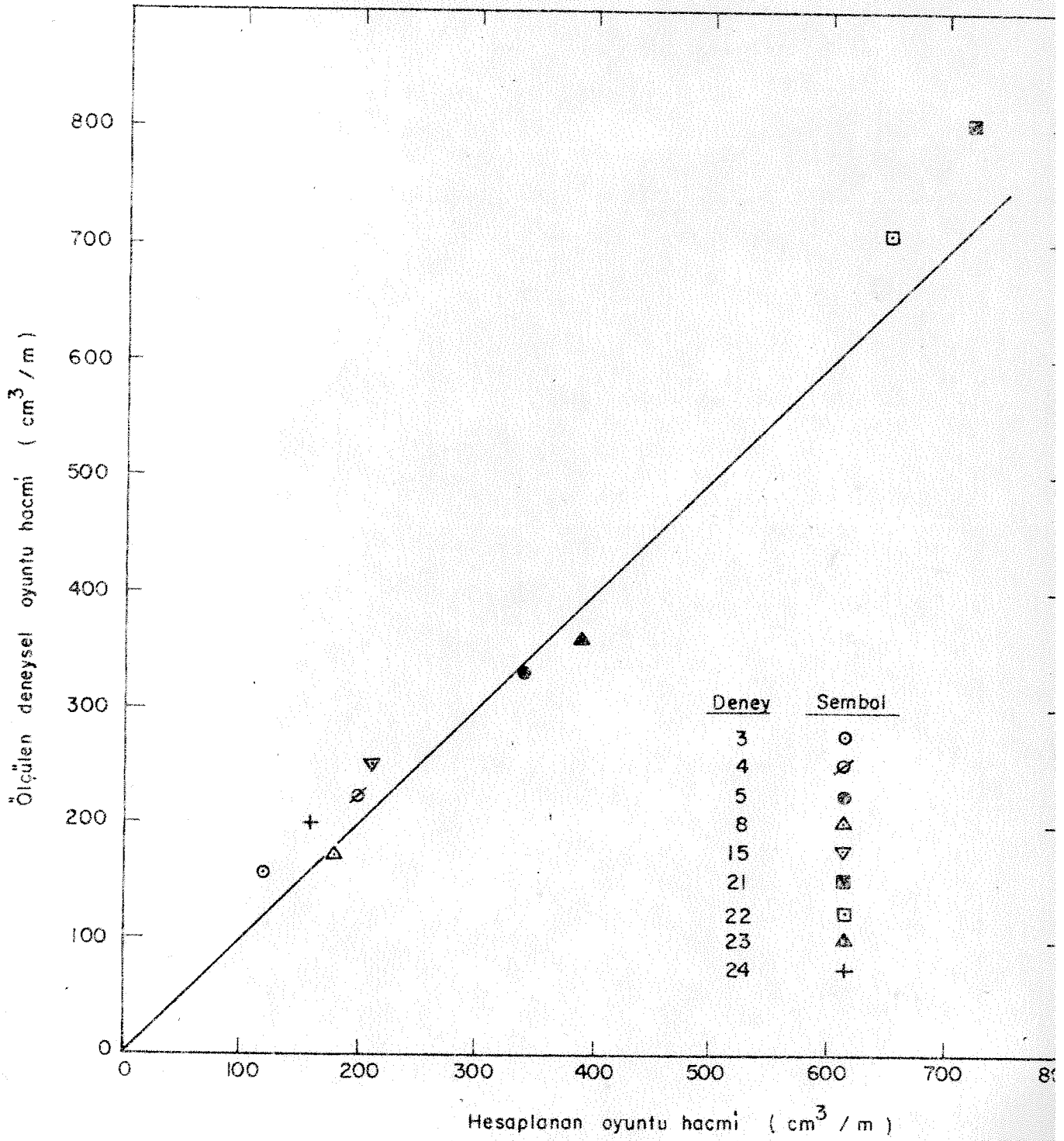


Şekil 12. Basitleştirilmiş Oyulma Çukuru

Eğer oyuntu çukuru Şekil 12'deki gibi üçgen ile gösterilirse hacim ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V = \frac{2SB^2}{\tan\phi} \quad (8)$$

Bağıntı 8'de V, hacim, B, kanalın genişliği, S, oyuntu derinliği,  $\phi$ , ise malzemenin doğal şev açısı olmaktadır. Oyuntu profilini üçgen varsayarak elde edilen Bağıntı 8'deki hacim ifadesi basitliğinden dolayı hesaplamalarda kolaylıklar sağlamakta olup, getirdiği hata miktarı ise gayet küçüktür. Şekil 13'deki 9 ayrı deneye ait birim genişlik için ölçülen ve hesaplanan oyulma hacimlerinin korelasyonu Bağıntı 8'deki hacim ifadesinin uygunluğunu doğrulamaktadır.



Şekil 13. Ölçülen ve Hesaplanan Oyuntu Hacimlerinin Korelasyonu

## BÖLÜM V

### DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

#### A. Genel

Yerel oyulmanın zamanla değişimini gösteren fonksiyonu tayin için gerekli işlemler, daha önce Bölüm II-E'de sıralanmıştır. Oyulmanın zamanla değişimi Bağıntı 3'de verilen integral denklemi hesaplanarak bulunacaktır.

Bağıntı 3'de kullanılacak diferansiyel hacim ifadesi ise Bağıntı 8'de verilen hacim ifadesinin oyulma derinliği S'ye göre türevi alınarak aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$dV = \frac{4B}{\tan\phi} S.dS \quad (9)$$

Deneylerde oyuntu çukuruna giren sürüntü yükü mevcut olmadığından  $Q_{si}$  ifadesi mevcut değildir. Oyuntu çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{so}$ , için genel bir ifade Bağıntı 6 ile verilmiştir. Ancak Bağıntı 6 kullanılmadan önce  $Q_{so}$  ifadesinin oran katsayısı olan f ifadesinin tesbiti gerekmektedir. f fonksiyonunu tayin etmeden, bu fonksiyonun bir sınır değerini belirlemek üzere, limit oyulma derinliği ifadesinin bulunması doğru olacaktır.

#### B. Limit Oyulma Derinliği

Şekil 6'dan da görüleceği üzere yapılan deneylerin bir kısmında limit oyulma derinliğine erişilmiştir. Boyutsal analizler ve deneysel neticeler, limit oyulma derinliğinin malzeme özellikleri ve akım Froude sayısının fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Malzeme özelliklerini

## BÖLÜM V

### DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

#### A. Genel

Yerel oyulmanın zamanla değişimini gösteren fonksiyonu tayin için gerekli işlemler, daha önce Bölüm II-E'de sıralanmıştı. Oyulmanın zamanla değişimi Bağıntı 3'de verilen integral denklemi hesaplanarak bulunacaktır.

Bağıntı 3'de kullanılacak diferansiyel hacim ifadesi ise Bağıntı 8'de verilen hacim ifadesinin oyulma derinliği S'ye göre türevi alınarak aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$dV = \frac{4B}{\tan\phi} S \cdot dS \quad (9)$$

Deneylerde oyuntu çukuruna giren sürüntü yükü mevcut olmadığından  $Q_{s1}$  ifadesi mevcut değildir. Oyuntu çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{s0}$ , içingnel bir ifade Bağıntı 6 ile verilmiştir. Ancak Bağıntı 6 kullanılmadan önce  $Q_{s0}$  ifadesinin oran katsayısı olan f ifadesinin tesbiti gerekmektedir. f fonksiyonunu tayin etmeden, bu fonksiyonun bir sınır değerini belirlemek üzere, limit oyulma derinliği ifadesinin bulunması doğru olacaktır.

#### B. Limit Oyulma Derinliği

Sekil 6'dan da görüleceği üzere yapılan deneylerin bir kısmında limit oyulma derinliğine erişilmiştir. Boyutsal analizler ve deneysel neticeler, limit oyulma derinliğinin malzeme özellikleri ve akım Froude sayısının fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Malzeme özelliklerini

ifade edebilecek başlıca boyutsuz değişkenler, malzemenin dane çapı,  $D_g/b$ , doğal şev açısı,  $\phi$ , ve malzeme özgül ağırlığı,  $s$  olmaktadır.

Yerel oyulmanın limit derinliği ifadesi deneysel neticelerden zamana bağlı olmıyarak aşağıdaki şekilde tesbit edilmiştir.

$$\frac{S_T}{b} = \left( \frac{\tan \phi}{D_g/b} \right)^{1/2} \left( \frac{Fr}{\sqrt{s-1}} \right)^{3/2} \quad (10)$$

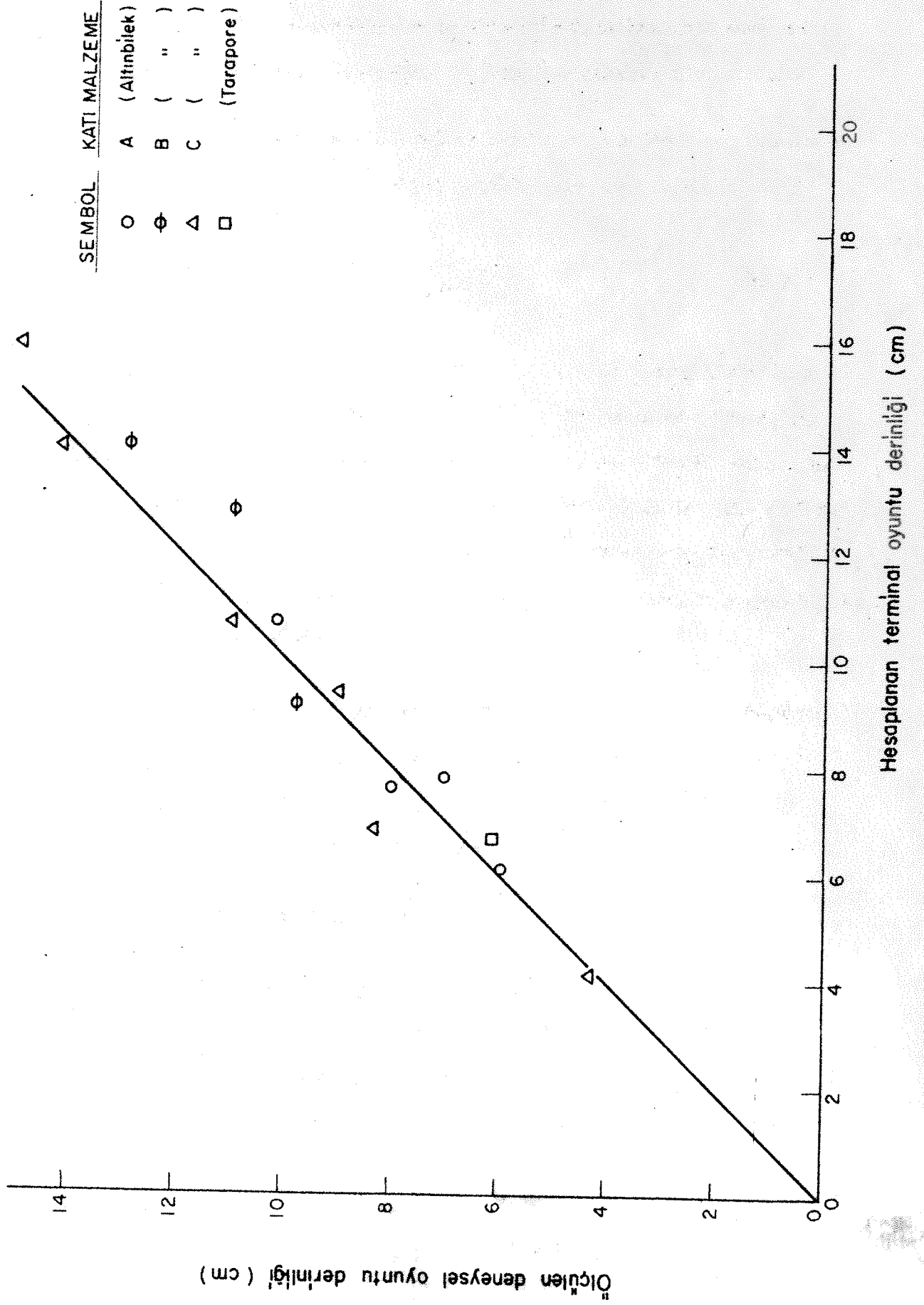
Bağıntı 10'da  $S_T$  limit oyulma derinliği,  $b$ , akım jetinin kapaktan sonraki (vena contracta) kalınlığı,  $\phi$ , malzemenin doğal şev açısı,  $D_g$ , dane çapı,  $s$  ise özgül ağırlık olmaktadır.  $Fr$ , akım Froude sayısı olup, hesaplamasında  $U/\sqrt{gb}$  ifadesi kullanılmıştır. Bağıntı 10 kullanılarak hesaplanan limit oyuntu çukuru derinlikleriyle deneysel olarak ölçülmüş oyulma derinliklerinin Şekil 14'de görülen korelasyonu Bağıntı 10'un uygunluğunu göstermektedir.

Şekil 15'de limit oyulma derinliğini tayin için  $\phi = 38.6^\circ$  ve  $s = 2.60$  değerleriyle hazırlanmış bir abak görülmektedir. Verilen bir akım şartı için  $Fr$  ve  $b/D_g$  bilindiğinde limit oyulma derinliği boyutsuz  $S_T/b$  halinde Şekil 15'den tayin edilebilmektedir.

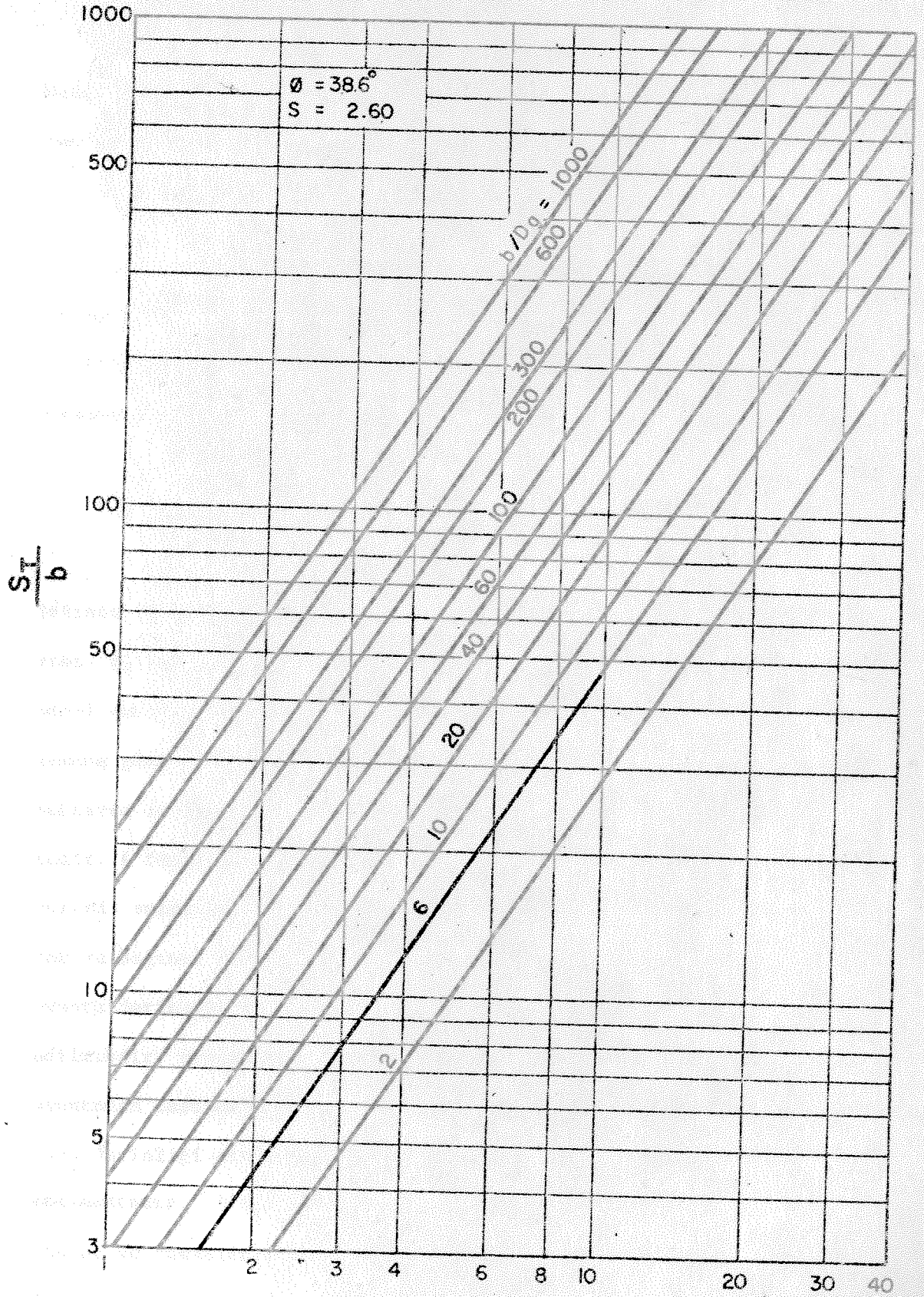
### C. Oyuntudan Çıkan Sürüntü Yükünün Tayini

Oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü,  $Q_{so}$ , ifadesinde mevcut olan  $f$  katsayısı akım, dane ve oyulma geometrisi özelliklerinin bir fonksiyonu olduğundan, bu parametrelerin boyutsuz şekilleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f = f \left( \frac{U}{\sqrt{(s-1)g D_g}}, \frac{D_g}{b}, \phi, \frac{s}{b}, \frac{S_T}{b} \right) \quad (11)$$







Sekil 15. Limit Oyulma Çukuru Derinliği

Bağıntı 11'de  $U/\sqrt{(s-1)g D_g}$  ifadesi sürüntü maddesi katsayısı olup akım özelliklerini içine almaktadır.  $D_g/b$  ve  $\Phi$  ise dane özelliklerini,  $S_T/b$  ile  $S/b$  ise oyuntu çukuru geometrisini temsil etmektedirler.

Öte yandan Bağıntı 11'deki  $f$  ifadesinin sayısal değerinin, deneysel oyulma derinliği ve zaman ölçümlerinden hesaplanması mümkündür. Bağıntı 3'deki ifadeler yerine Bağıntı 6 ve 9'daki eşitleri konarak, Bağıntı 3 yeniden düzenlendiğinde  $f$  ifadesi aşağıdaki şekli almaktadır.

$$f = \frac{4S}{UD_g \tan \Phi \left( \frac{C_D}{8.2} \frac{U^2}{(s-1)gD_g} - \tan \Phi \right)^{2.5}} \cdot \frac{dS}{dt} \quad (12)$$

Bağıntı 12'de  $S$ , oyuntu derinliği;  $D_g$ , dane çapı;  $C_D$ , sürüklenme katsayısı;  $g$ , yer çekimi ivmesi;  $\Phi$ , sürüntü maddesinin doğal şev açısı;  $B$ , kanal genişliği;  $U$  ise akım hızıdır.  $dS/dt$  ifadesi oyuntu derinliğinin zamana göre değişmesinin teğeti olup ölçümlerden grafik olarak bulunabilmekteyse de küçük zaman aralıkları için  $\Delta S/\Delta t$  şeklinde de yazılabilmektedir.  $f$  fonksiyonunun sayısal değeri deneysel ölçümlerden faydalanılarak yukarıda anlatılan şekilde hesaplandı. Deneysel  $S$  ve  $t$  değerleri kullanılarak ve Bağıntı 12 ile hesaplanan  $f$  değerleri incelendiğinde boyutsuz oyuntu derinliği  $S/b$ , arttıkça  $f$  fonksiyonun değerinin azaldığı müşahade edilmiştir. Oyulma limit derinliğe eriştiğinde  $f$  değeri ve dolayısıyla oyuntudan taşınan sürüntü yükü sıfır olmaktadır.  $f$  değerinin oyuntu çukuru derinliği ile azalması lineer olmayıp daha ziyade eksponansiyel olarak azalmaktadır.  $f$  fonksiyonun tayini için Bağıntı 11'deki değişkenlerden ibaret ve hesaplanan  $f$  değerlerinin genel değişimine uygun bir parametrik fonksiyon tayin edildi. Bu fonksiyon ile Bağıntı 4'deki integral hesaplanarak yerel oyulma eğrileri elde edildi. Bu elde edilen eğriler deneysel ölçümlerle uyuncaya kadar  $f$  fonksiyonun parametrik şekli ve sayısal oran

katsayısı değiştirildi. Üç ayrı malzemeyle yapılan 14 deney için en uygun tahmini oyulma derinliği zaman eğrilerinin tesbitine çalışıldı.

Şekil 16, 17 ve 18'de üç ayrı kum için deneysel oyuntu derinliği zaman ölçümleri görülmektedir. Aynı şekillerde görülen eğriler ise Bağntı 4'deki integralin hesaplanmasında aşağıdaki f ifadesinin kullanılmasıyla elde edilmiş eğrilerdir.

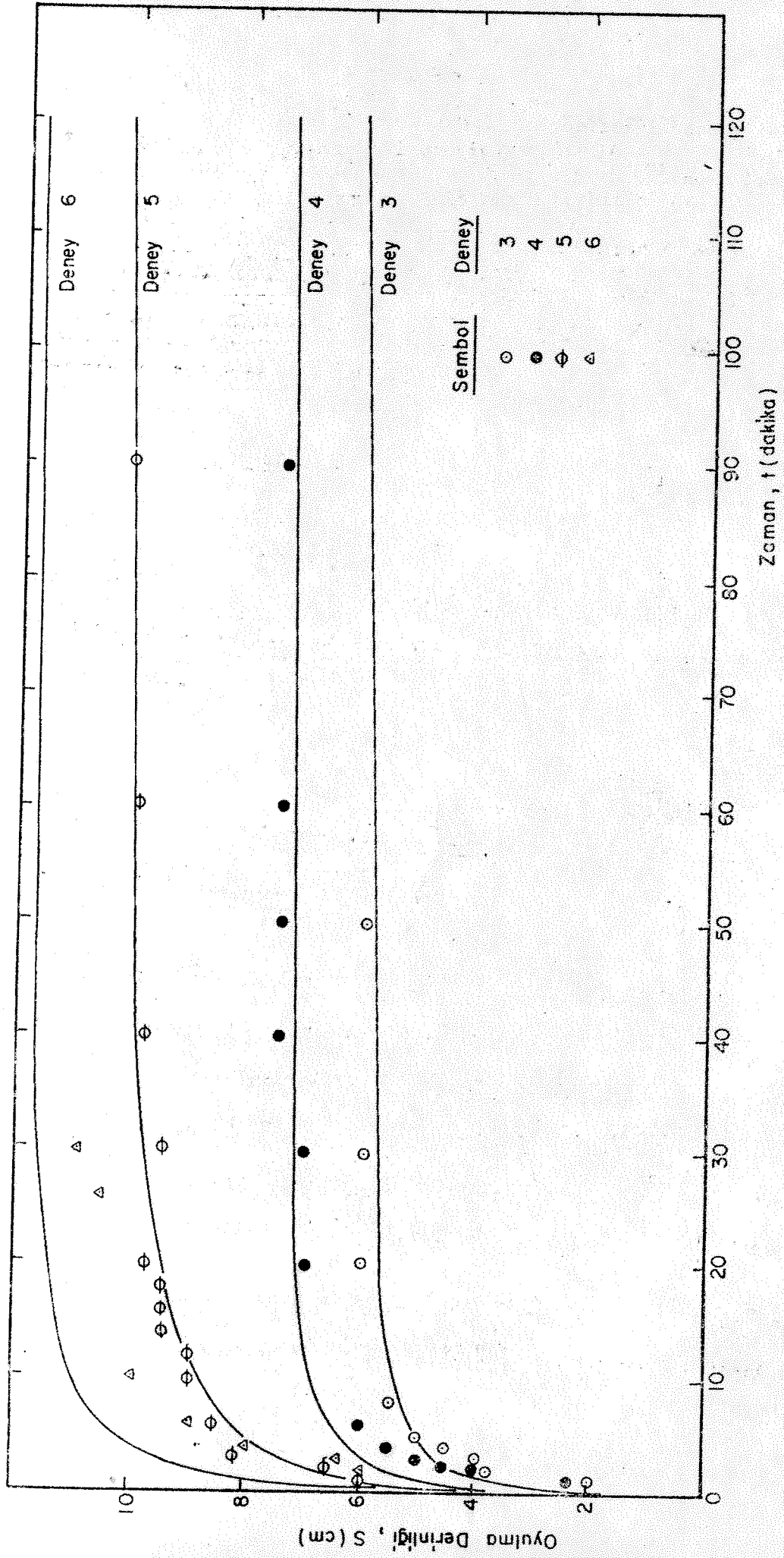
$$f = \frac{\tan \phi}{\left(\frac{D_g}{b}\right)^{1/2} N_s^3} \left( \log \frac{S_T}{S} \right)^2 \quad (13)$$

Bağntı 13'deki  $S_T$  limit oyulma derinliği olup, Bağntı 10' ile verilmiştir.  $S_T$  ve  $N_s$  terimlerinin esitleri yazıldığında Bağntı 13 aşağıdaki hali almaktadır.

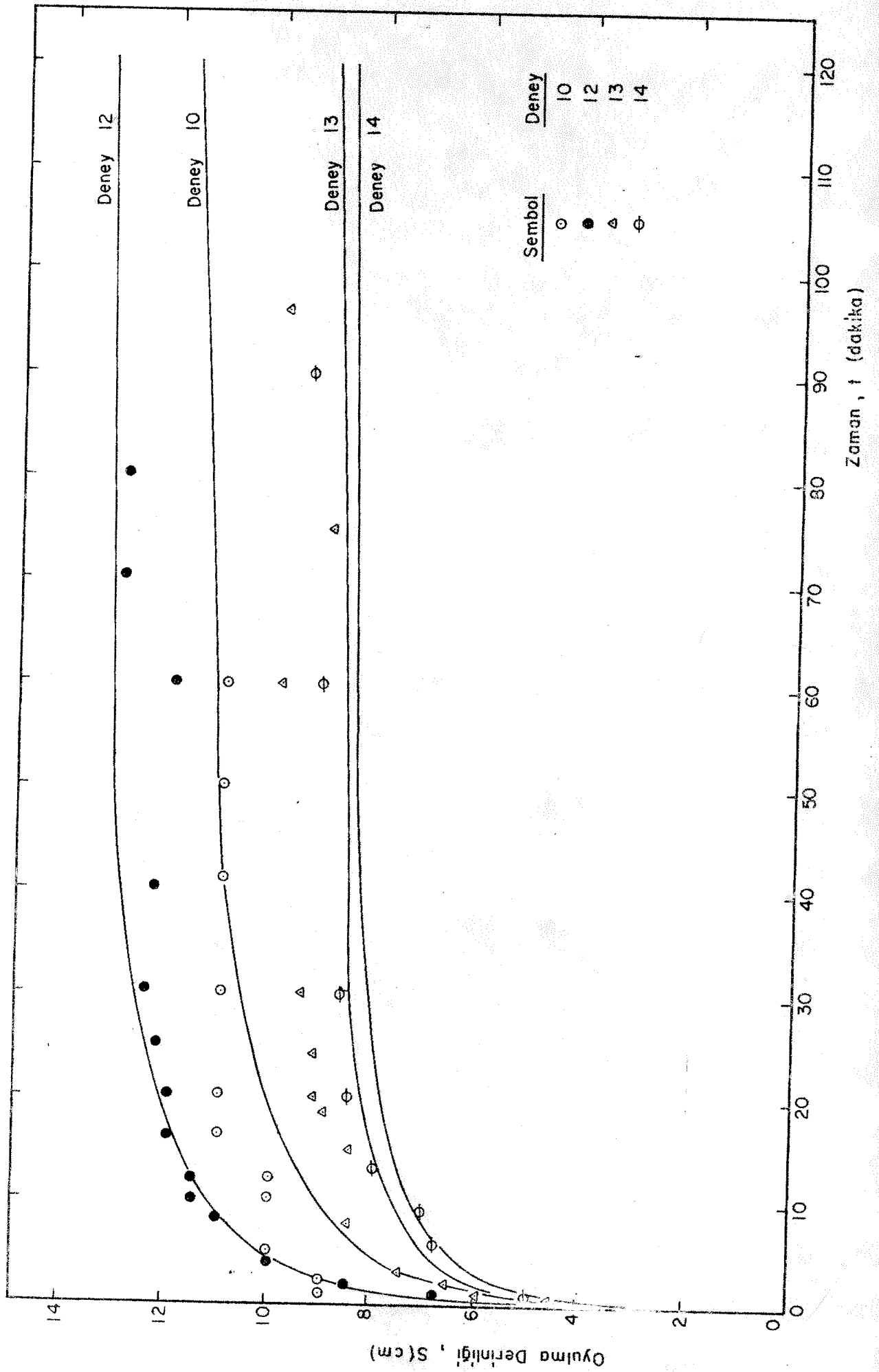
$$f = \frac{\tan \phi}{\frac{D_g}{b} \left(\frac{U}{\sqrt{(s-1)gD_g}}\right)^3} \left( \log \frac{\left(\frac{\tan \phi}{D_g/b}\right)^{1/2} \left(\frac{Fr}{\sqrt{(s-1)}}\right)^{3/2}}{S/b} \right)^2 \quad (14)$$

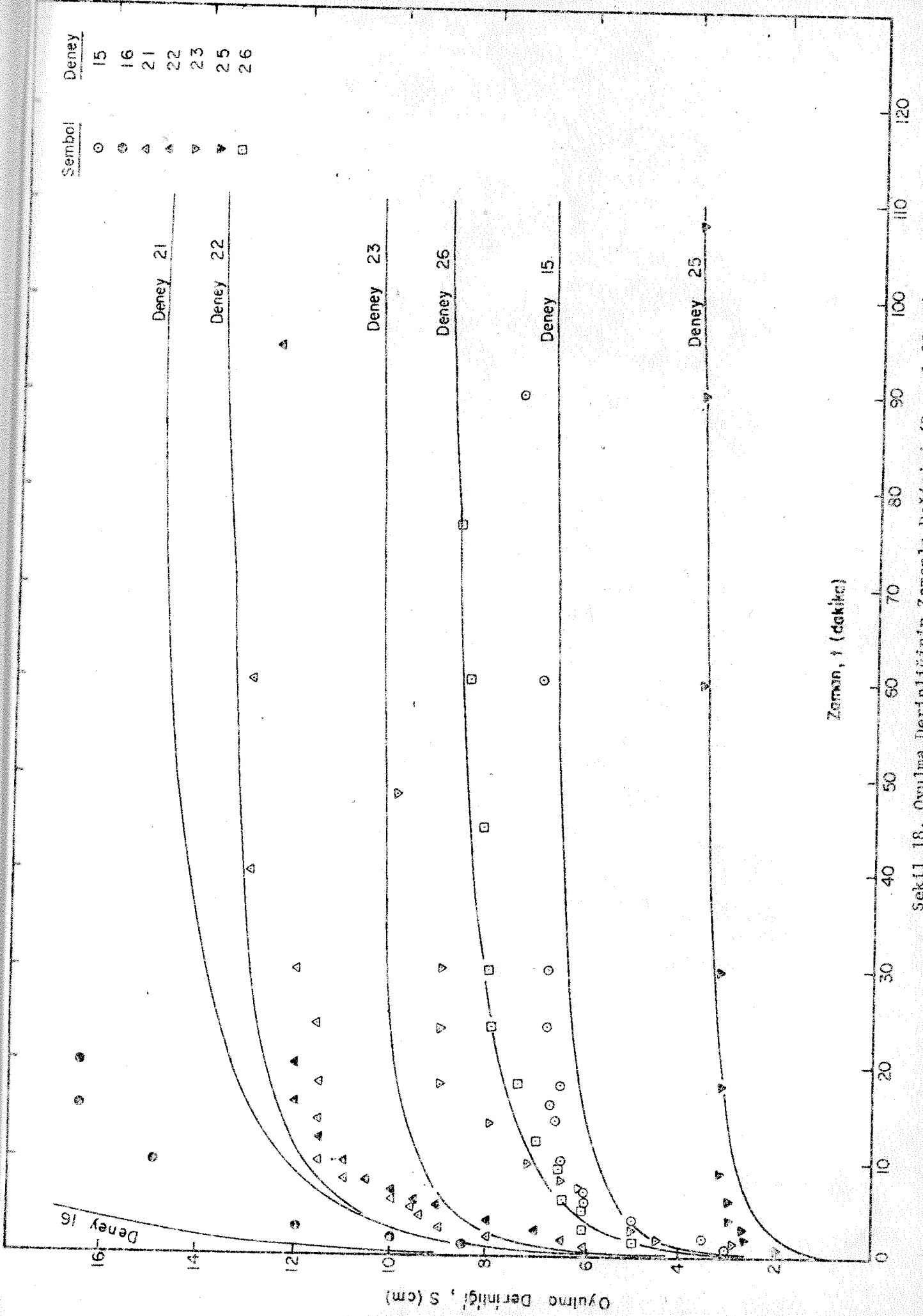
Yukardaki f ifadesi kullanılarak süreklilik denkleminin integralinin alınmasında nümerik bir metod kullanılması gerekmektedir. Hesaplar elektronik hesap makinesi yardımıyla ve ikinci dereceden Runge-Kutta metoduyla yapılmıştır. Şekil 16, 17 ve 18'de görülen eğriler ölçülen noktalarla oyulmanın gelişmesi ve aşınması safhalarında tatmin edici bir korelasyon göstermekte olup yalnızca oyulmanın başlangıcı için tatminkar değildirler.

Elde edilen deneysel bağıntılar bu araştırmadan önce diğer araştırmacılar tarafından elde edilen neticelerin analiziyle de kontrol edilmiştir.



Şekil 16. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi ( $D_g = 6.5$  mm)





Sekil 18. Oyulma Derinliginin Zamanla Değişimi ( $D_0 = 1.30$  mm)

Laursen 5/ yatay ve düz kohezyonsuz yataklarda iki-boyutlu yatay batık jet akımla ve üç ayrı boyutta malzeme ile toplam 17 deney yaptı. Deneylerde jet kalınlığı hep sabitti. Şekil 19, 20 ve 21'de Laursen'in deneylerine ait oyuntu derinliğinin zamanla değişimi ölçümleri görülmektedir. Şekil 19, 20 ve 21'deki eğriler süreklilik denkleminin integrali alınarak hesaplanmış eğrilerdir. Bu araştırmada ölçülen deneysel neticelere dayanılarak elde edilen benzeşim bağıntılarının Laursen tarafından yapılan deneylere de tatminkar bir şekilde uyduğu görülmektedir.

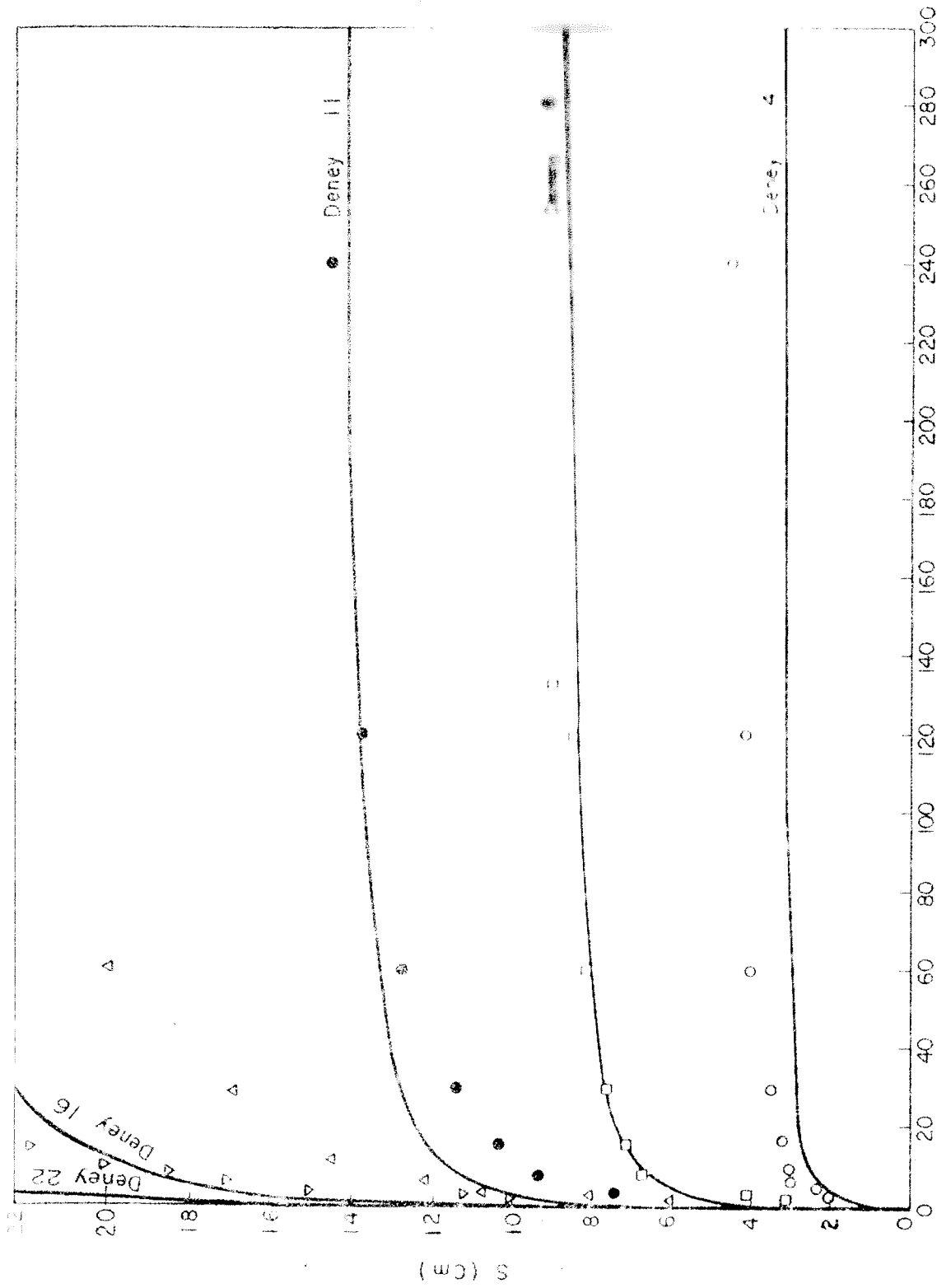
#### D. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi

Dik kapaklar altında batık yatay jet akımdan dolayı meydana gelen yerel oyulmanın zamanla değişimi, daha önce izah edildiği gibi Bağıntı 4'de verilen integral hesaplanarak bulunabilir. Bağıntı 4'deki ifadelerden  $dV$  için Bağıntı 9,  $Q_{s0}$  için ise Bağıntı 6 ve Bağıntı 13'deki eşitleri konduğunda oyulmanın zamanla değişimi akım, sıvı ve dane özellikleri cinsinden aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$t = \int_0^S \frac{4 \left(\frac{D_g}{b}\right)^{1/2} N_s^3 s ds}{\tan^2 \phi \log \left(\frac{S_T}{s}\right)^2 \left(\frac{C_D^1}{8.2} N_s^2 - \tan \phi\right)^{5/2} \cdot U \cdot D_g} \quad (15)$$

Bağıntı 15'deki  $S_T$  ifadesinin eşiti Bağıntı 10 ile verilmiştir. Sürüntü maddesi sayısı,  $N_s$  ise  $U/\sqrt{(s-1)g D_g}$  ifadesiyle hesap edilmektedir.

Model çalışmaları neticeleri için Bağıntı 15 kullanılarak hesaplanan oyulma eğrileri Şekil 16, 17 ve 18'de görülmektedir. Bulunan bağıntıların pratikte kullanılabilmesi için oyulma derinliğinin boyutsuz değişkenler cinsinden ifadesi ve abaklar hazırlanması gerekmektedir. Bu amaçla Bağıntı 4'deki integral ifadesini aşağıdaki boyutsuz şekilde yazmak



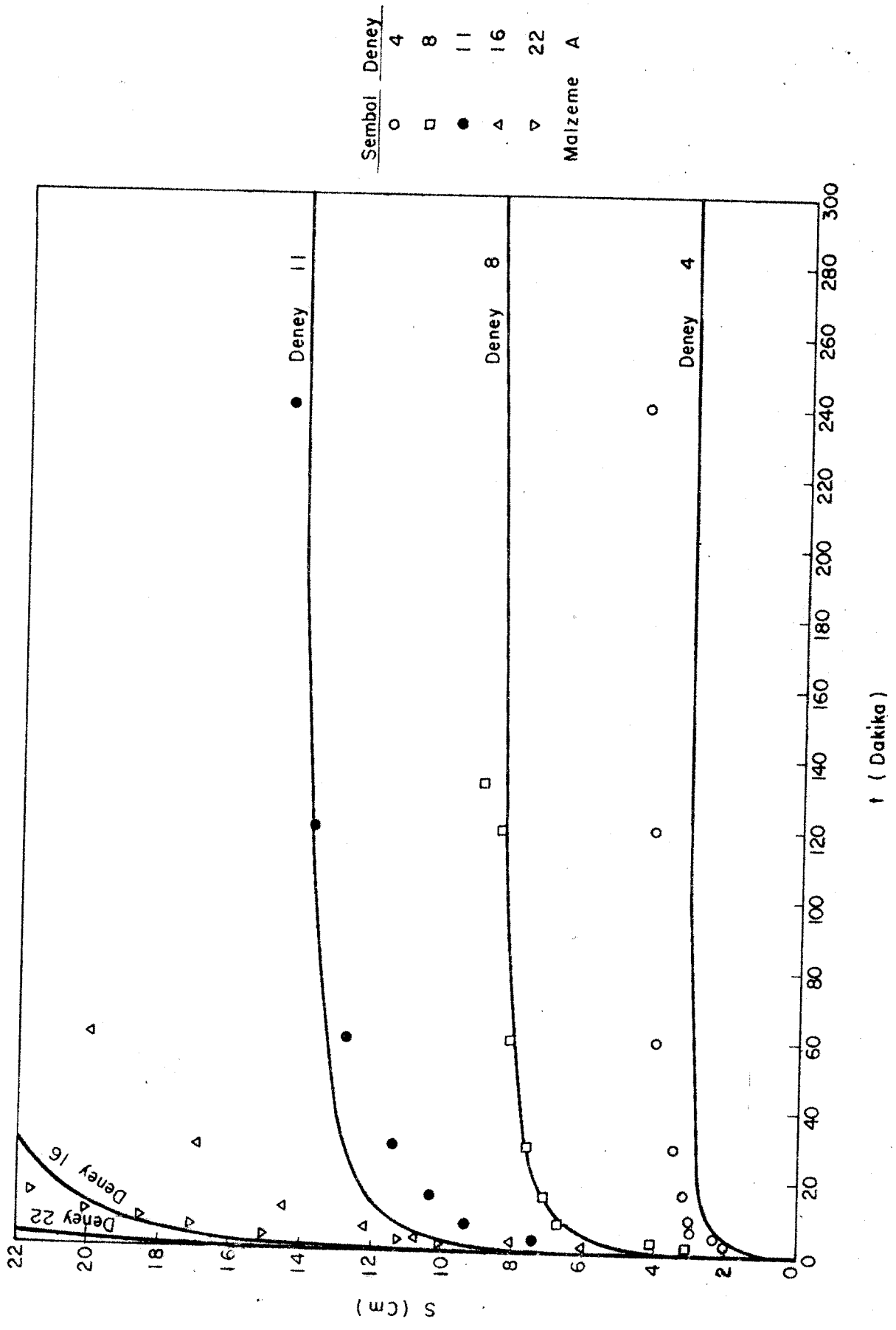
Sembel Deneý

△	16
●	22
□	11

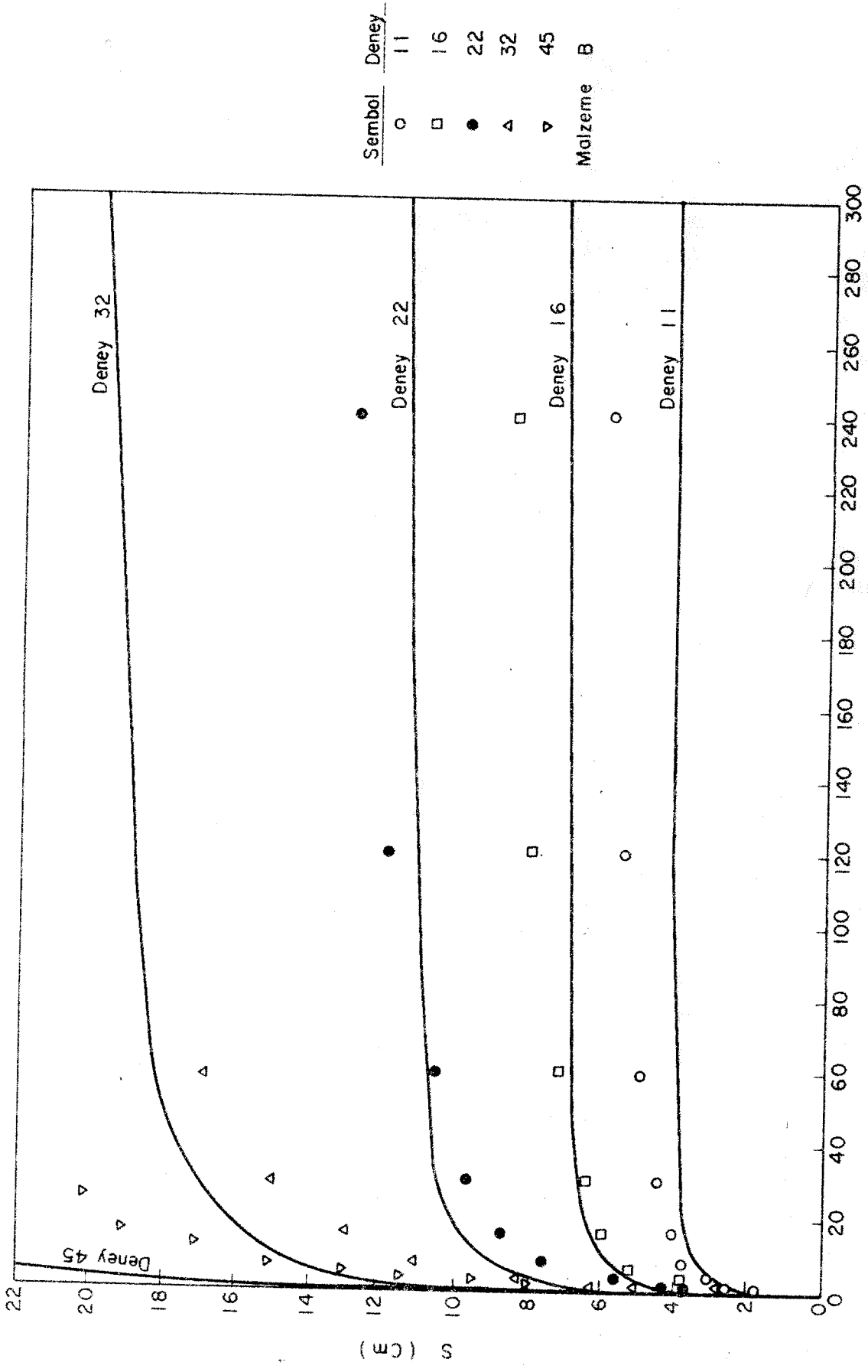
$t$  ( Dakika )

ŞEKİL 19. Çukur Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak-Laurssen;  $D_g = 0.09$  mm)



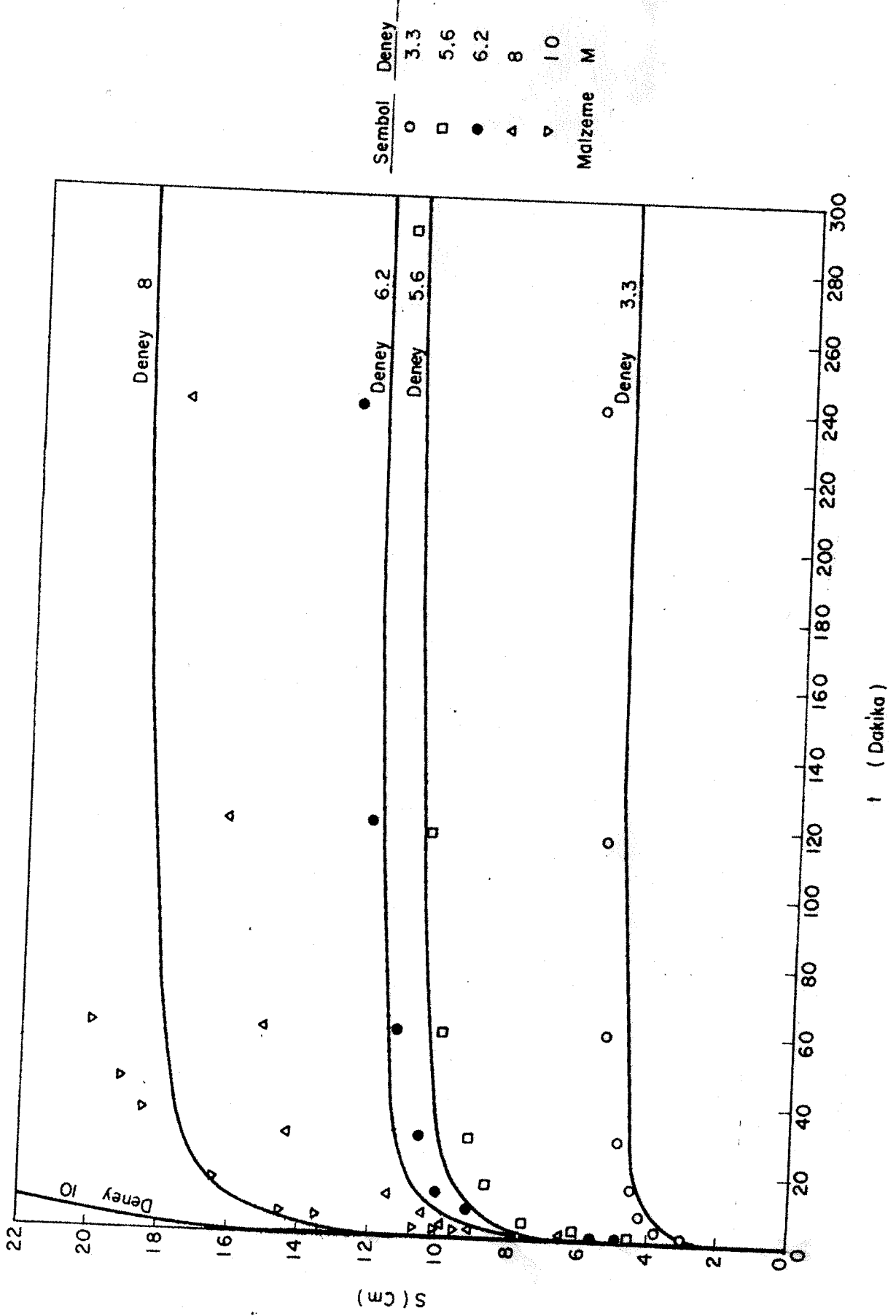


Şekil 19. Oculma Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak-Laurssen;  $D_g = 0.69$  mm)



t ( Dakika )

Şekil 20. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak-Laurssen;  $D_g = 0.24$  mm)



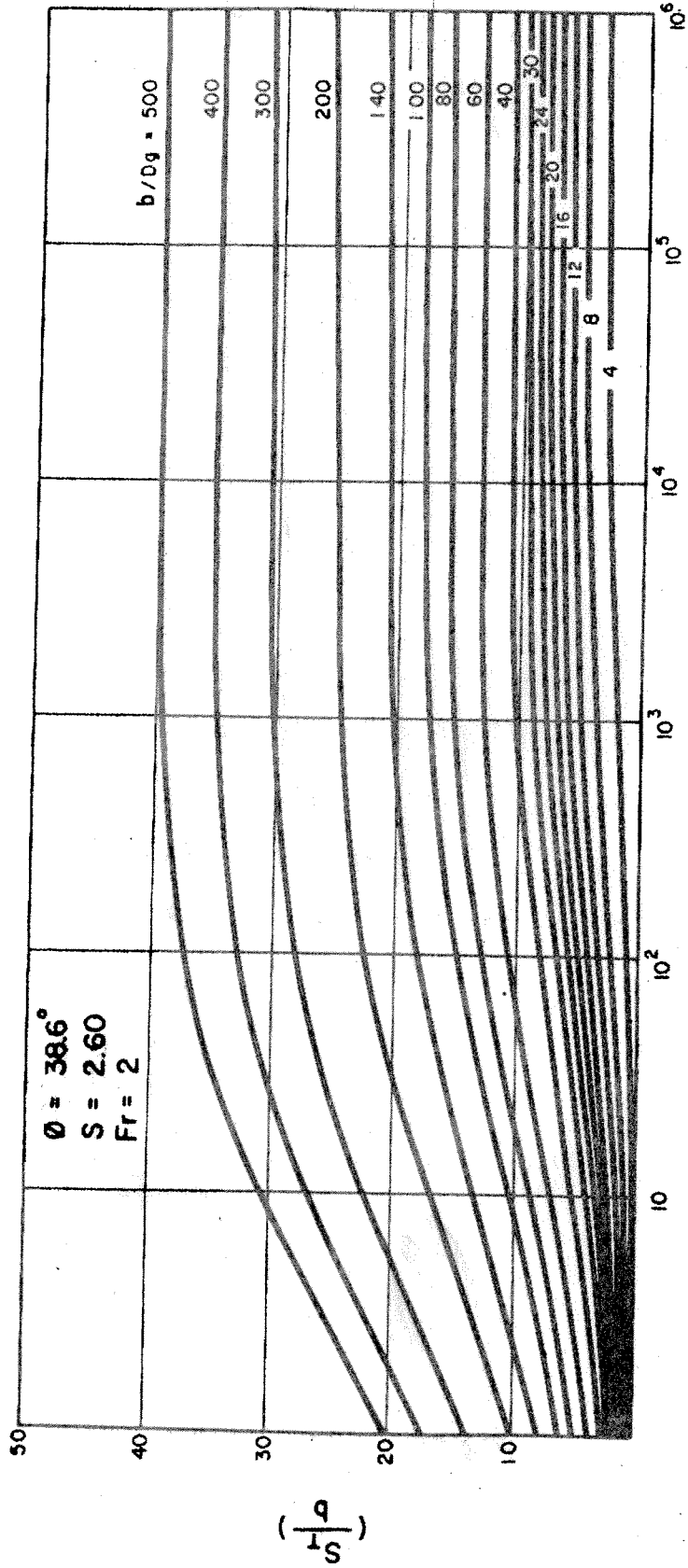
Sekil 21. Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi (Kaynak-Laurssen;  $D_g = 1.6$  mm)

mümkündür.

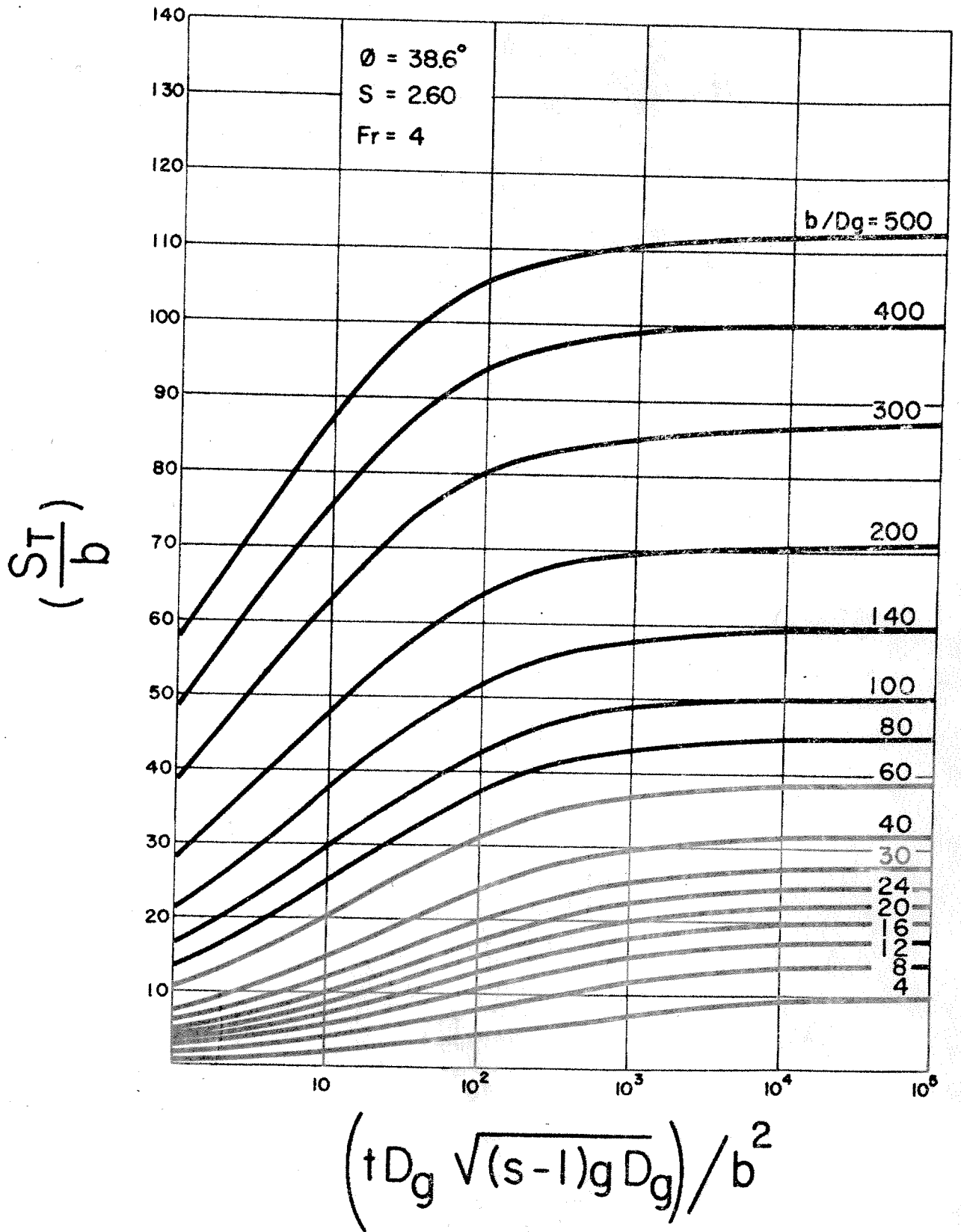
$$\frac{t D_g \sqrt{(s-1)g D_g}}{b^2} = \int_0^{S/b} \frac{d \left( \frac{V}{b} \right)}{Q_{so}} \frac{d \left( \frac{V}{b} \right)}{b D_g \sqrt{(s-1)g D_g}} \quad (16)$$

Bağıntı 16'nın sağ tarafındaki değişkenler tamamen  $S/b$ ,  $N_s$ ,  $Fr$ ,  $C_D'$ ,  $\phi$ ,  $S$ ,  $D_g/b$  boyutsuz değişkenleri cinsinden ifade edilebilirler. Bu boyutsuz değişkenlerin çeşitli değerleri için integralin değeri hesaplanarak, pratikte kullanılacak boyutsuz abaklar hazırlanabilir.

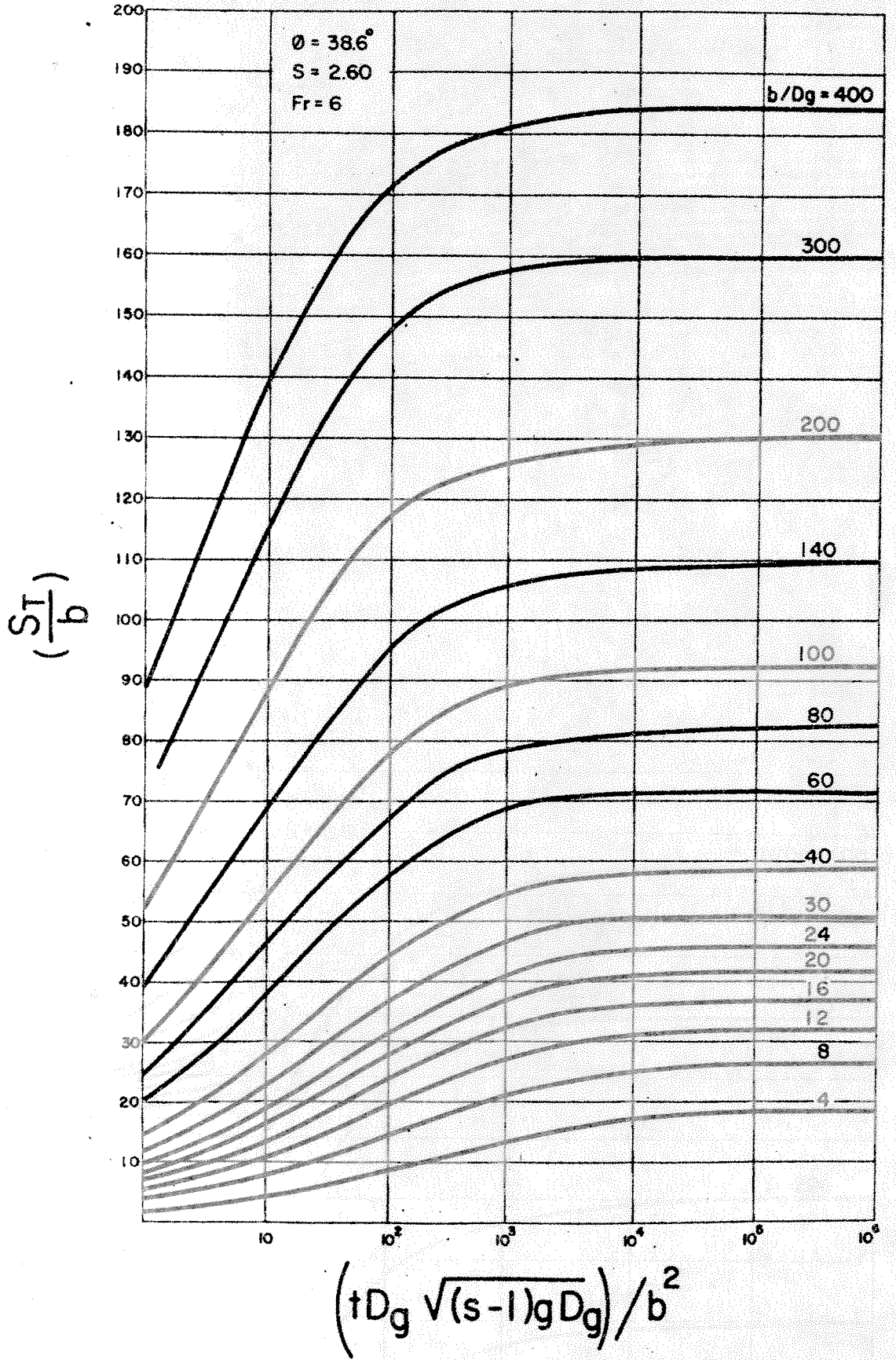
Şekil 22, 23, 24, 25 ve 26'da hazırlanmış bu tip abaklar görülmektedir. Abaklar dane özgül ağırlığı için 2.60 ve doğal şev açısı için 38.6 değerleri alınarak hazırlanmıştır. Bu değerler dane çapı 5 cm'den kaba doğal kum daneleri için geçerlidir. Her abak belli bir Froude sayısı için hazırlanmıştır. Abaklar kullanılırken dikkat edilmesi gereken bir husus  $Fr$  sayısı hesaplanırken kullanılacak  $U/\sqrt{gb}$  ifadesindeki,  $b$  ifadesinin jet akımın vena contracta'daki yani jetin en dar noktasındaki kalınlığı olmasıdır.



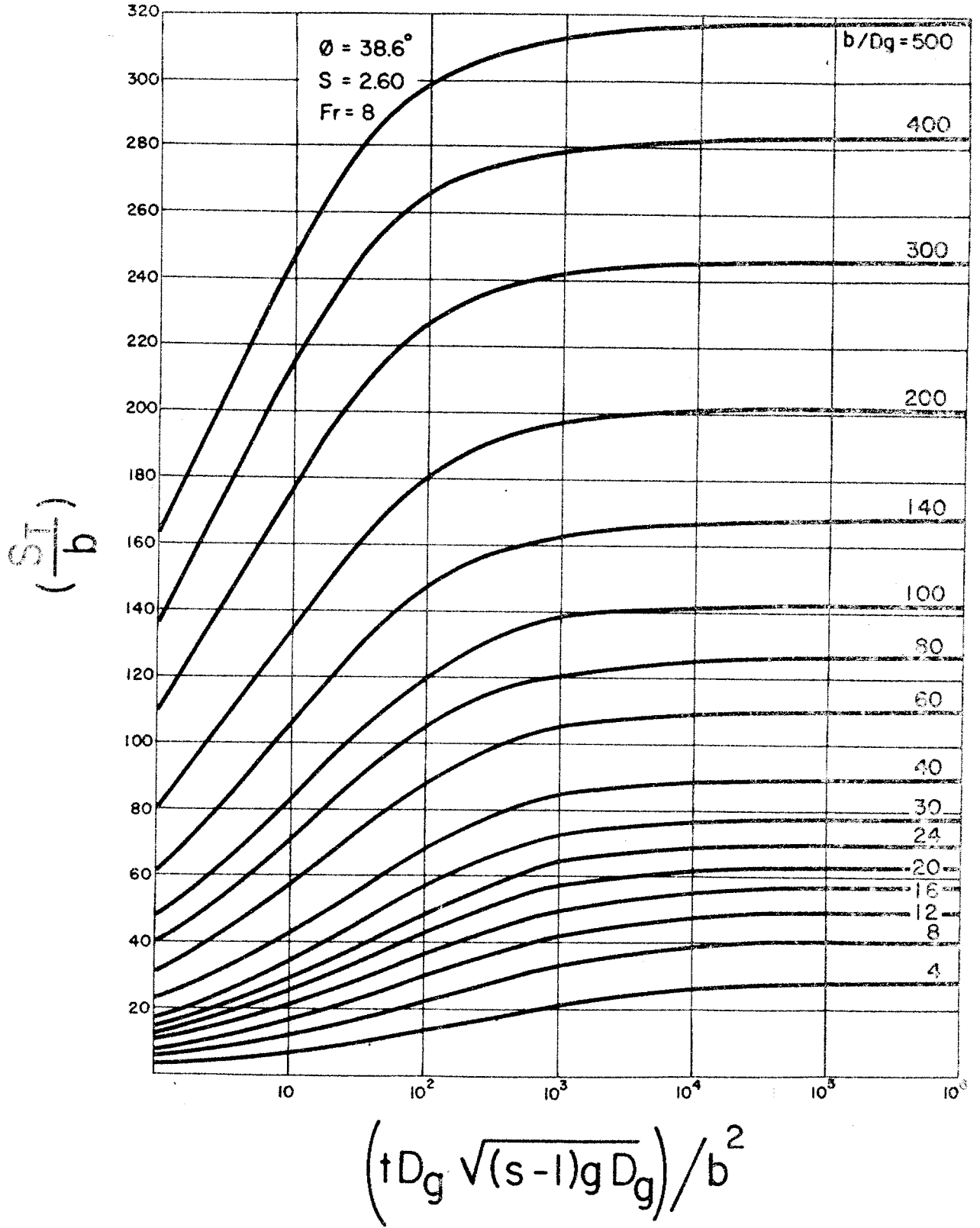
Sekil 22. Boyutsuz Oyulma Derinligi Ekrileri (Fr = 2)



Şekil 23. Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri ( $Fr = 4$ )

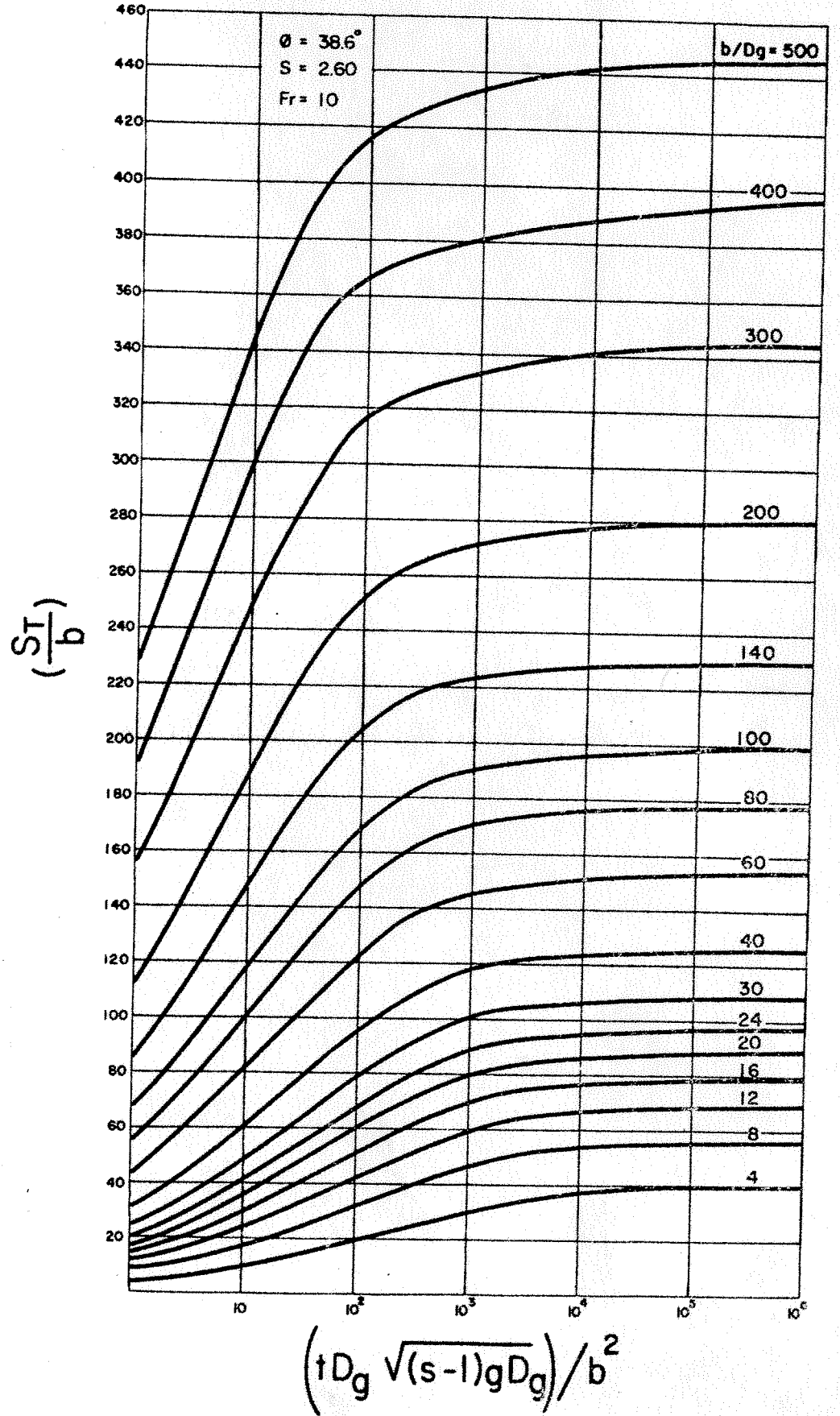


Sekil 24. Boyutsuz Oyalma Derinliği Eğrileri ( $Fr = 6$ )



Sekil 25. Boyutsuz Oyulma Derinliği Eğrileri ( $Fr = 8$ )





Sekil 26. Boyutsuz Oyuлма Derinliği Eğrileri ( $Fr = 10$ )

## BÖLÜM VI

### SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Kohezyonsuz zeminlerde düşey kapaklar altındaki batık jet akımdan dolayı meydana gelen oyulmaların araştırılması için bir metod geliştirildi. Sunulan sonuçlar deneysel ölçümlere dayanmakta olup deneyler membadan sürüntü yükü getirmiyen akımlar için yapılmıştır. Akım hızı olarak jetin kapaktaki maksimum hızı, jet kalınlığı olarak da kapaktan sonra jetin en dar (vena contracta) noktasındaki kalınlık alınmıştır. Dik kapaktan çıkan batık akım jetinin en dar noktasındaki kalınlığın hesaplanması çeşitli araştırmacılar tarafından 22/ verilmiş olup, bu araştırmada minimum jet kalınlığı  $0.625 \times$  (kapak açıklığı) olarak alınmıştır.

Oyulmanın ileri safhalarında oyulma çukurundaki akım hızının azalması ile bir limit derinliğe erişilmektedir. Limit oyulma derinliğinde oyulma çukurundan dışarı sürüntü malzemesi taşınmamaktadır. Limit oyulma derinliği akım Froude sayısına bağlı olmaktadır. Ayrıca malzeme özellikleri olan dane çapı, doğal şev açısı ve dane özgül ağırlığı da limit derinliği etkilemektedir. Bu sonuçlar Valentin'in 16/ sonuçları ile Froude sayısının yüksek değerlerinde mutabakat halindedir. Alçak Froude sayılarında ise (Deney 25, 26) neticeler uyuşmamaktadır.

Limit oyulma derinliğine erişilmesi için geçmesi gereken zaman süresi gayet uzundur. Örneğin, Tarapore'nin 8/ deneylerinde limit derinliğe 23 günde, Valentin'in 16/ deneylerinde ise 15 günde erişilmiştir. Ancak oyulmanın gelişme safhasında oyulma derinliği Şekil 6'da görüldüğü gibi zamanın logaritmasıyla lineer olarak arttığından oyulmanın başlamasından kısa bir süre sonra limit oyulma derinliğine yakın bir değere erişilmektedir.

Oyuntu çukurunu takiben meydana gelen kum dalgacığının zirvesi zamanla mansaba doğru ilerlemektedir. Kum dalgacığının zirvesinin hareketi oyulmanın pratik limit derinliğe erişmesinden çok sonra da devam etmektedir. Bu bulgular başka araştırmacılar tarafından da doğrulanmıştır. Colaric, Picnon ve Sananes 21/ tarafından yapılan ölçmelerde oyulma derinliği oyulmanın başından 17.5 saat sonra limite eriştiği halde kapaktan kum dalgacığının zirvesine olan  $X_D$  uzaklığı 1000 saat geçinceye kadar artmaya devam etmiştir.

Oyuntu çukurundan malzeme taşınması yatakta, ve askıda olabildiğinden, danenin çökelme hızının etkisinin de düşünülmesi gerekmektedir. Danenin çökelme hızı, dane çapı, dane birim ağırlığı ve sürükleme katsayısının fonksiyonu olmaktadır. Danenin çökelme hızı boyutsuz olarak  $U/W$  şeklinde ifade edilebilir. Bununla beraber çökelme hızının oyulmayı izah eden tek veya en uygun parametre olarak düşünülmesi de hatalı olmaktadır. Eğer oyulma olayının limitinde düşük akım hızından ötürü tabandan malzeme taşınmadığından oyulma durmaktaysa bu takdirde çökelme hızı iyi bir seçim olmamaktadır. Diğer yandan, oyulma olayında danelerin oyuntu çukurundan dışarıya askıda taşınması hızı oyulmayı kontrol eden faktör ise o takdirde dane çökelme hızı uygun seçilmiş bir değişkendir.

Çökelme hızı, oyulma olayının analizinde kullanılması gereken uygun ve mantıklı bir değişken olarak gözükmekteyse de böyle bir boyutsal analizin kabulünden önce bütün değişkenlerin tesirlerinin geniş deney limitleri içinde incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmalarda çökelme hızı,  $U/W$ , parametresinin sürüntü yükü taşınması ve limit derinlikleri ile korelasyonu Froude sayısı kadar kuvvetli olmamıştır. Bu cihetle olayın analizinde ve  $f$  fonksiyonunun seçiminde çökelme hızının tesirleri ihmal edilmiştir.

Analizlerde kullanılan dane sürüklenme katsayısı,  $C_D^s$ , küresel doğal kum daneleri için ölçülmüş değerlerden alınmıştır. Sürüklenme katsayısı, dane Reynolds sayısının bir fonksiyonu olup Reynolds sayısının hesaplanmasında  $UD_g/v$  ifadesi kullanılmıştır. Reynolds sayısının 500'den büyük değerleri için  $C_D^s$  sabit olup 1.12 değerini almaktadır.

Benzenişim bağıntılarının kullanılması en iyi şekilde numerik örneklerle anlatılabilir. Örneğin, bir dik kapaktan önce su derinliğinin 2.0 m olduğunu, kapak açıklığının ise 40 cm olduğunu kabul edelim. Eğer kapaktan sonraki çakıl yatağının ortalama dane çapı 2.0 cm ise ve membandan sürüntü yükü gelmiyorsa meydana gelecek oyulma derinliğini hesap edelim. Doğal çakıl danesi için  $\phi = 36.5^\circ$  ve  $S = 2.6$  değerleri uygun olmaktadır.

Akım hızı

$$U = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 1.80} = 6 \text{ m/sec}$$

jet kalınlığı

$$b = 0.625 \times 40 = 25 \text{ cm}$$

Froude sayısı

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gb}} = 3.84$$

olmaktadır. Limit oyulma derinliği Bağıntısı 10'dan

$$\frac{S_T}{b} = \left( \frac{Fr}{\sqrt{S-1}} \right)^{3/2} \left( \frac{\tan \phi \times b}{D_g} \right)^{1/2} = \left( \frac{4}{\sqrt{2.6-1}} \right)^{3/2} \left( \frac{\tan 36.5^\circ \times 0.25}{0.02} \right)^{1/2} = 16.6$$

$$S_T = 16.6 \times 0.25 = 4.1 \text{ m}$$

veya Şekil 23'den  $b/D_g = 12$  ;  $\phi = 38.6^\circ$  ;  $Fr = 4.0$  için:

$$\frac{S_T}{b} = 17.4 \quad S_T = 4.20 \text{ du}$$

olmaktadır. Yukardaki örnekten de görüldüğü gibi doğal şev açısının oyulma rindeki tesiri fazla olmayıp verilen abaklar da oyulmanın hesabında kullanılabilir.

Malzeme yatağının başlangıçta düz olduğunu varsayılarak limit oyulma derinliğinin %90'nının oyulması için geçecek zaman yine Şekil 23' den hesaplanabilir.

$$\frac{S_{.90T}}{b} = 15.7 \quad \text{ve} \quad b/D_g = 12$$

değerleri için

$$\frac{t D_g \sqrt{(s-1)g D_g}}{b^2} = 2 \times 10^3$$

veya  $t = 172$  dakika olmaktadır.

BÖLÜM VII

SONUÇLAR

Kohezyonsuz zeminlerde düşey kapaklardan sonra batık yatay jet akından dolayı meydana gelen yerel oyulmaların hesaplanması için bir metod geliştirildi. Sonuçlar membadan sürüntü yükü gelmemesi ve sürüntü malzemesinin homojen olması hallerinde geçerli olup deneysel araştırmada Froude sayısı ( $U/\sqrt{gb}$ ) 1.6 - 24.7 arasında değişmekteydi. Bu araştırma neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Bir oyulma sırasında oyulma çukuru geometrisi sabit kalmakta olup oyulma çukuru paraboliktir. Oyuntunun boyu derinliğinin yaklaşık olarak 5 katı kadardır.
2. Limit oyulma derinliği Froude sayısı, dane çapı, birim ağırlığı ve doğal şev açısına bağlı olup Bağıntı 10 ile verilmiştir.
3. Oyulma derinliğinin zamanla değişimi süreklilik denkleminin integrali alınarak bulunabilmekte olup bu integral genel şekilde Bağıntı 16 ile verilmiştir.
4. Limit oyulma derinliğinin hesabı ve oyulma derinliğinin zamanla değişiminin tayini için abaklar hazırlanmış olup, abaklar doğal kum dane-leri için yukarıda belirtilen limitler içinde geçerlidir.

ÖZET

Su yapılarında dik kapaklar altında ve kohezyonsuz gevşek zeminlerde yatay jet akımdan dolayı meydana gelen oyulmanın benzeşim kanunları araştırıldı. Yerel oyulmanın analizi, süreklilik denkleminin yerel oyulma çukuru için tatbikine dayanmaktadır. Süreklilik denkleminin integrali alındığında yerel oyulma çukurunun zamanla değişmesi fonksiyonu bulunmaktadır. Diferansiyel denkleme mevcut üç ayrı terim; diferansiyel hacim, oyulma çukuruna giren ve çıkan katı madde yükü ifadelerinin tespiti için deneysel neticeler kullanılmıştır.

Oyulma çukuru geometrisi oyulmanın gelişmesi sırasında sabit kalmakta ve zamanla değişmemektedir. Oyulma geometrisi profili bir üçgen ile gösterildiğinde, hacim ifadesi oyulma derinliği ve yatak malzemesinin doğal şev açısı cinsinden yazılabilmektedir. Gerekli diferansiyel hacim ifadesi de hacim ifadesinin türevi alınarak bulunmaktadır.

Oyulma çukuru zamanla bir limit derinliğe erişmektedir. Çukurdan taşınan sürüntü malzemesi iki fonksiyonun çarpımı olarak alınmıştır. İlk fonksiyon bir sürüntü malzemesi taşıma fonksiyonu olup sürüklenme katsayısı, dane çapı, doğal şev açısı, yatak eğimi ve sürüntü maddesi katsayısı değişkenlerinden meydana gelmiştir. Bu genel sürüntü malzemesi taşıma fonksiyonu bütün yerel oyulma hallerinde geçerli olmaktadır. İkinci fonksiyon ise oyulma çukuru geometrisi, dane geometrisi ve akım özelliklerinin bir fonksiyonudur. Oyulma süresi ilerledikçe sürüntü maddesi taşıma yükü azalmakta ve oyuntu çukuru limit derinliğe erişmektedir.

Oyulma çukuru geometrisine bağlı olan ikinci fonksiyonu ve limit oyulma derinliğini tayin için model deneyleri yapılmıştır. Orta Doğu

Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında iki boyutlu jet akımla değişik kapak aralıkları ve akım hızları ile yapılan deneylerin başlangıcında malzeme yatağındaki kum daima düzdü. Deneyler sırasında üç çeşit taban malzemesi kullanıldı. Deneylerde oyuntu çukurunun zamanla değişmesi, oyulma çukurunun geometrisi ve kapaktan sonraki akımın batıklığının oyulma üzerindeki tesirleri incelenmiştir.

Yapılan model deneylerinde elde edilen neticeler, oyuntu derinliğini tahmin için bulunan denklemle karşılaştırılmıştır. Ayrıca başka araştırmacılara ait deneysel neticeler de benzeşim denklemiyle karşılaştırılmıştır. Pratikte kullanılmak üzere oyulma derinliğinin zamanla değişmesini gösterir genel eğriler hazırlanmış ve limit oyulma derinliği tartışılmıştır.



LİTERATÜR

- 1/ Karaki, S.S. ve R.M.Haynie, "Mechanics of Local Scour, Part II, Bibliography", Report No.CER 6355K46, Civil Engineering Section, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, Kasım 1963.
- 2/ Burns, R.V. ve C.M.White, "The Protection of Dams, Weirs, and Sluice Gates against Scour", Institution of Civil Engineers, London Journal Cilt 4, Kasım 1938, Sayfa 33-46.
- 3/ Bose, N.K., H.R.Pramanick, "Scour Below Weirs", 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research Sayfa 351-360, 1948.
- 4/ Framji, K.K., "Scour Below Weirs", 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structure Research, Sayfa 361-375, 1948.
- 5/ Laursen, E.M., "Observations on the Nature of Scour", Proceedings of 5th Hydraulic Conference, State University of Iowa, Iowa City, Iowa, Bülten 34, Haziran 9-11, 1952, Sayfa 179-197.
- 6/ Ahmad, N., "Mechanism of Erosion Below Hydraulic Works", Proceedings, Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, Minn. Eylül 1-4, 1953.
- 7/ Li, W.H., "Criteria for Similitude of Scour Below Hydraulic Structures", John Hopkins University.
- 8/ Tarapore, Z.S., "Scour Below a Submerged Sluice Gate", M.S. Tezi, University of Minnesota, Minneapolis, Minn., 1956.
- 9/ Tarapore, Z.S., "A Theoretical and Experimental Determination of Erosion Pattern Around Obstructions Placed in Alluvial Channel with Particular Reference to Vertical Cylinders and Piers", Ph.D., tezi, University of Minnesota, 1962.
- 10/ Latif, M.A., "Scour in Model Tests", M.S. tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1964.
- 11/ Yalın, S., "Über die Naturähnlichkeit der Geschiebebewegung bei Modell versuchen", Die Bautechnik, Marz 1959, Berlin.
- 12/ Carstens, M.R., "Similarity Laws for Localized Scour", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol 92. No.HY3, Proc. Paper 4818, Mayıs 1966, Sayfa 13-36.
- 13/ LeFeuvre A.R., H.D.Altınbilek, M.R.Carstens, "Sediment-Pickup Function", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol 96, No.HY10, Ekim 1970.
- 14/ Tsuchiya Y., ve Iwagaki, Y., "On the Mechanism of the Local Scour From Flows Downstream of an Outlet", International Association of Hydraulics Research, 12. Kongre, Cilt 3, 1967.

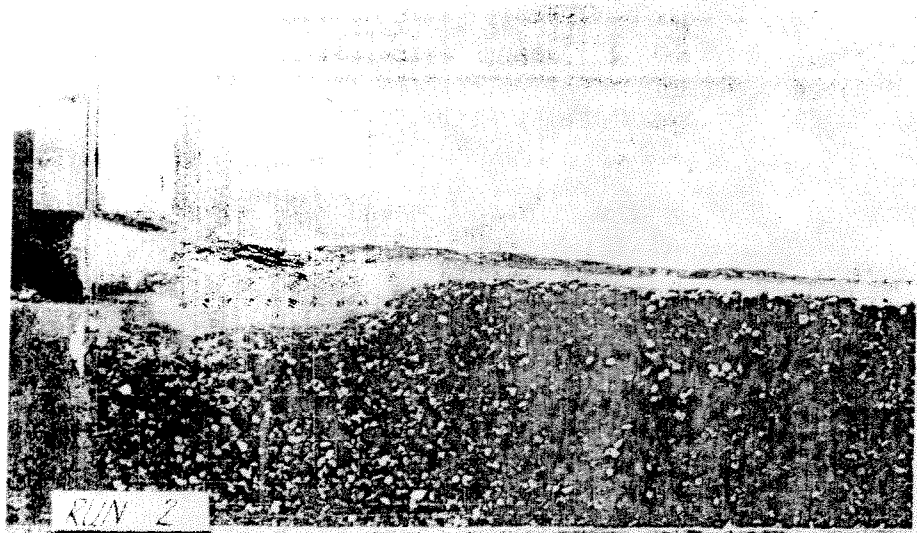
- 15/ Sarma, K.V.N., "Discussion of Similarity Laws For Localized Scour", Journal of Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Cilt 93, No. HY2, Mart 1971. Sayfa 67-71.
- 16/ Valentin, F., "Consideration Concerning Scour in the Case of Flow Under Gates", 12th Congress of the International Association for Hydraulic Research, 11-14 Eylül 1967, Sayfa 92-96.
- 17/ Altınbilek, H.D., "Hidrolik Yapılarda Yerel Oyulmalar" Hidrolik Yaz Okulu, Keban, Eylül 1970, TBTAK, MAG-14.
- 18/ Altınbilek, H.D., "Su Yapılarında Yerel Oyulmalar", İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Bülten 5, Sayfa 35-49, Mart 1971.
- 19/ LeFeuvre, A.R., H.D.Altınbilek, M.R.Carstens, "Sediment-Pickup Function" Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Cilt 96, No.HY10, Ekim 1970, Sayfa 2051-2063.
- 20/ Altınbilek, H.D., "Similarity Laws for Local Scour with Special Emphasis on Vertical Circular Pile in Oscillatory Flow", XIV Congress of International Association of Hydraulic Research, Proceedings, Cilt 3, Sayfa 339, Eylül 1971.
- 21/ Colaric, Pichon, Sananes, "Etude Des Affouillements a Laval D'un Seuil Deversant", IAHR, XIII. Congress, Sayfa 322, 1967
- 22/ Rouse, H., "Engineering Hydraulics" John Wiley Co., 1964.

SİMGELELER

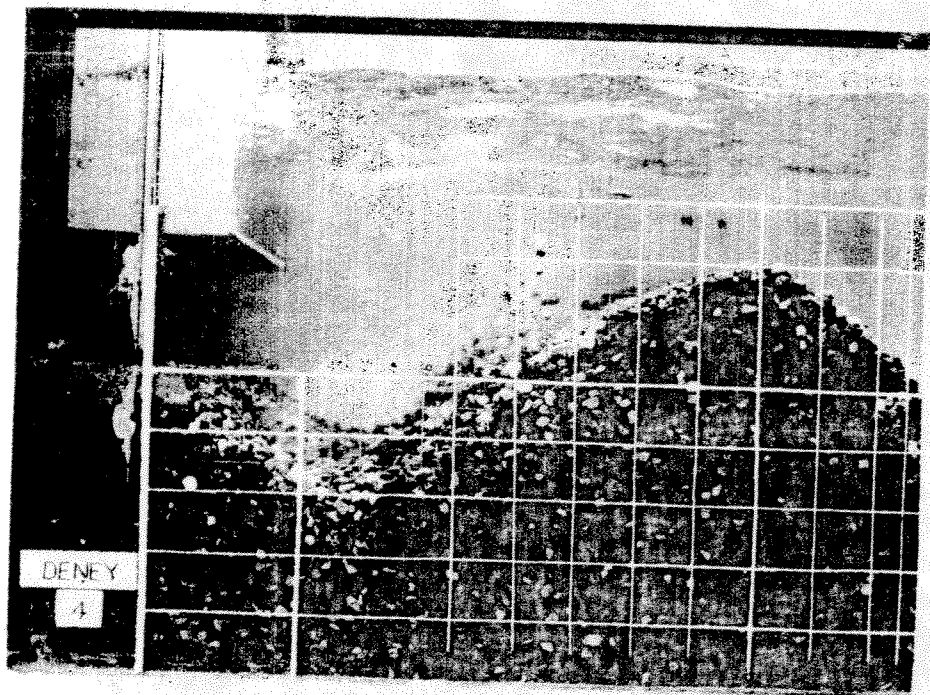
B	:	Kanal genişliği
b	:	Jet kalınlığı
$C_D$	:	Sürüklenme katsayısı
$D_g$	:	Ortalama dane çapı
g	:	Yerçekimi ivmesi
f( )	:	Fonsiyon
Fr	:	Froude Sayısı
$N_S$	:	Sürüntü maddesi sayısı
$Q_{si}$	:	Oyulma çukuruna giren sürüntü yükü
$Q_{so}$	:	Oyulma çukurundan çıkan sürüntü yükü
S	:	Oyulma derinliği
$S_T$	:	Limit oyulma derinliği
s	:	Katı madde ve sıvı özgül ağırlıkları oranı
t	:	Zaman
U	:	Ortalama akım hızı
u	:	Tabandaki akım hızı
$u_e$	:	Sürüntü maddesi taşınımı hızı
V	:	Hacim
$\alpha$	:	Tabanın eğimi
$\sigma$	:	Dane çapının standard sapması
$\phi$	:	Doğal şev açısı
T	:	Cidar-kesme gerilmesi
$\alpha$	:	Orantılı
Y	:	Sıvı özgül ağırlığı

- 74 -

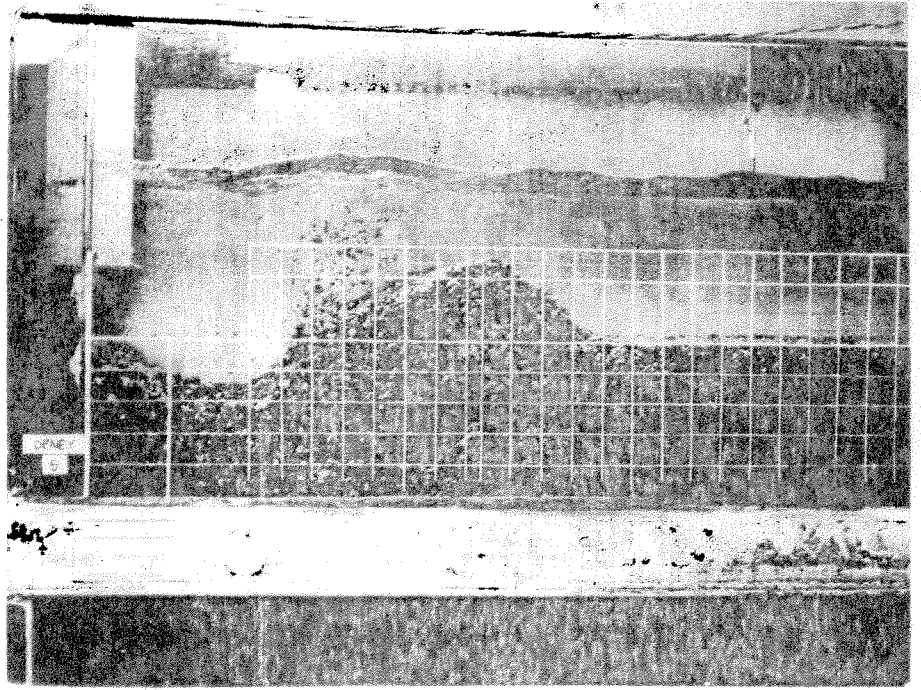
EK : DENEYLER SIRASINDA ÇEKİLMİŞ FOTOĞRAFLAR



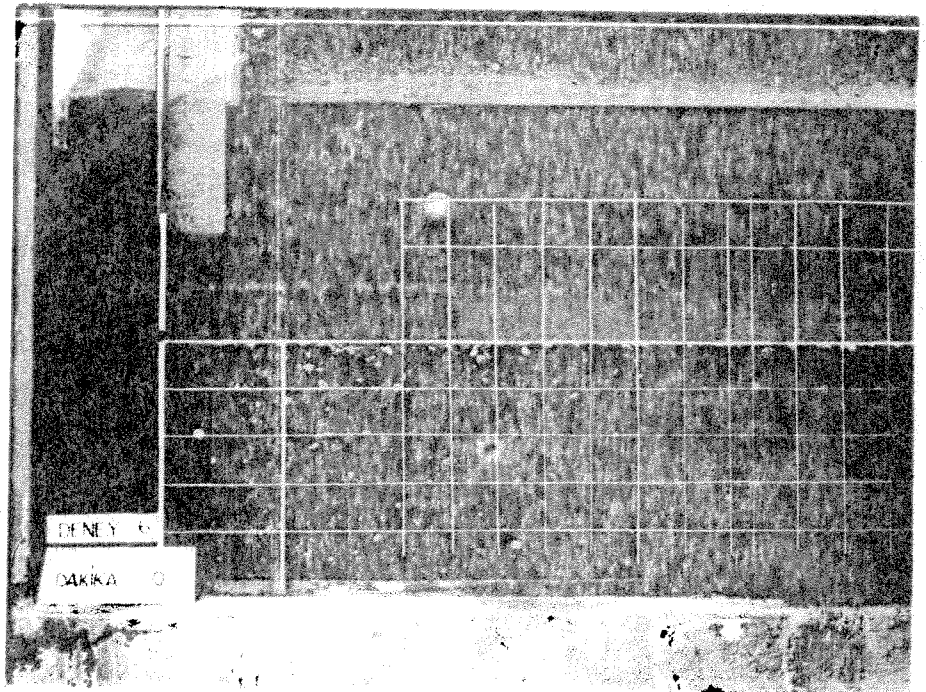
Deney 2



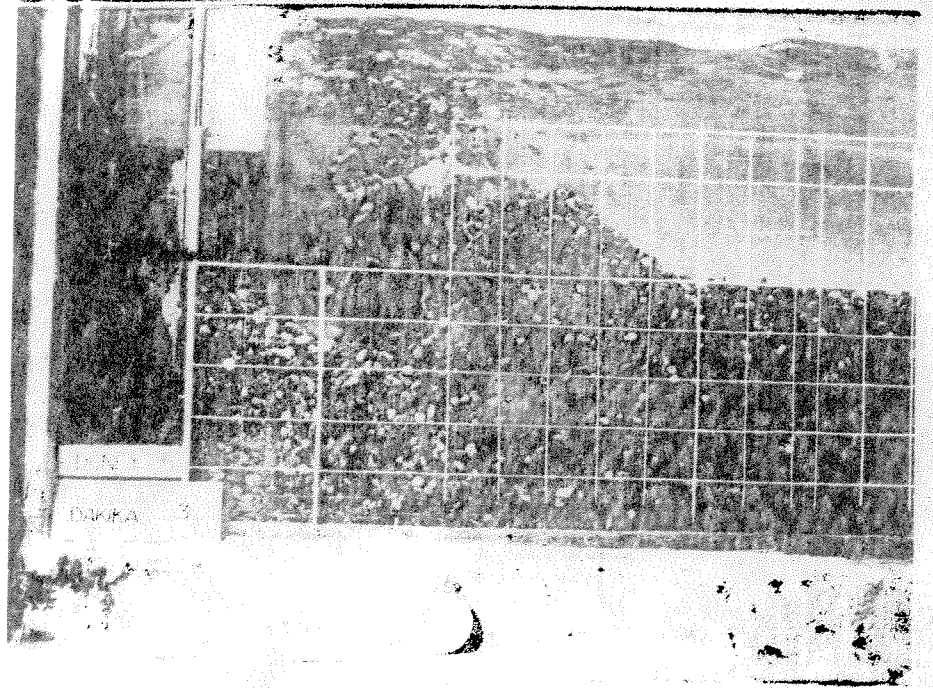
Deney 4



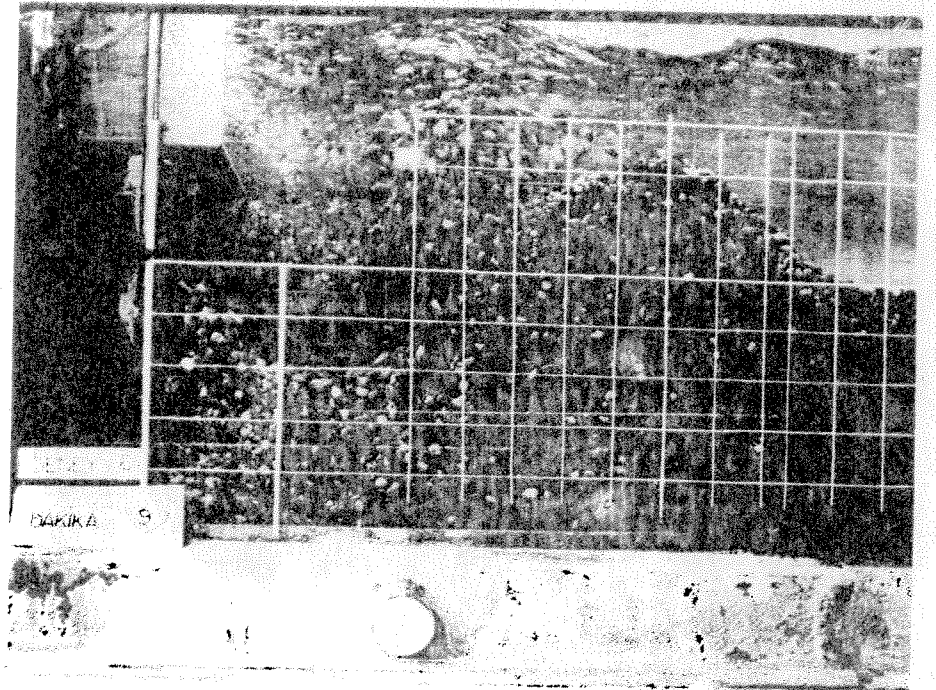
Deney 5



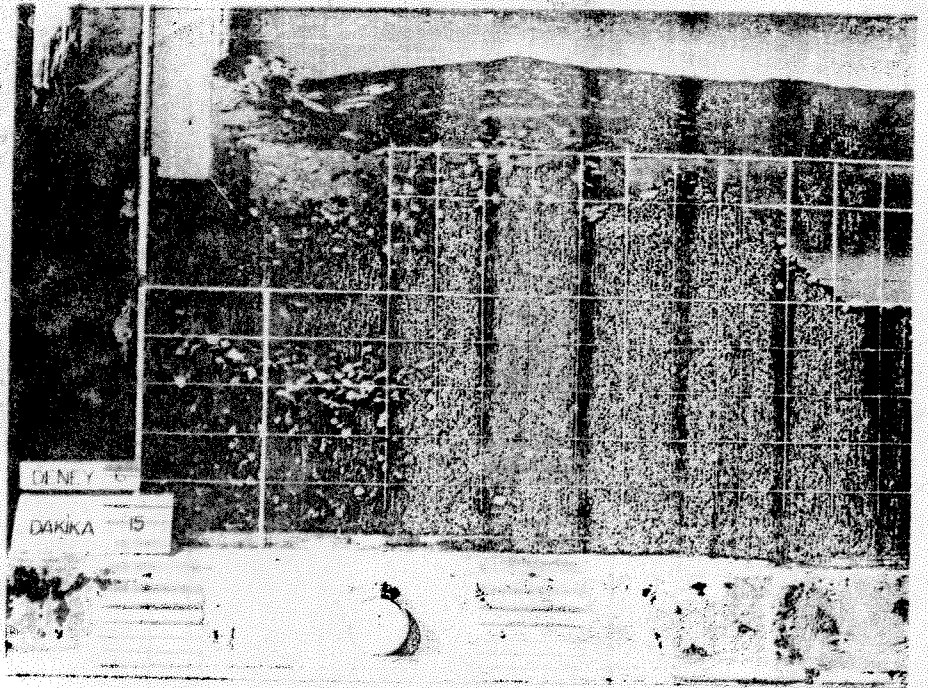
Deney 6 (Zaman = 0 dakika)



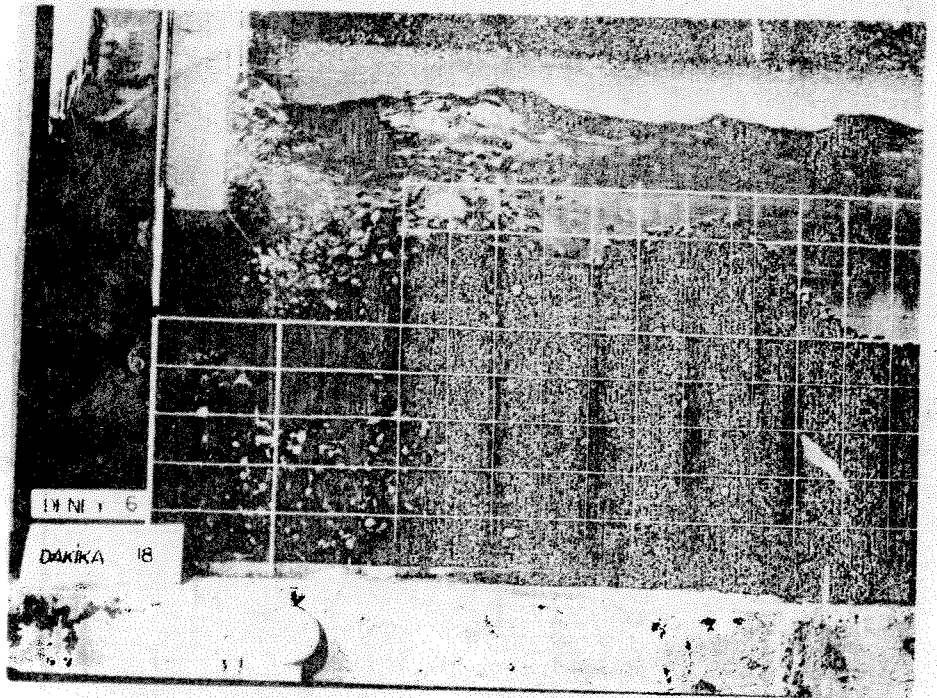
Deney 6 (Zaman = 3 dakika)



Deney 6 (Zaman = 9 dakika)

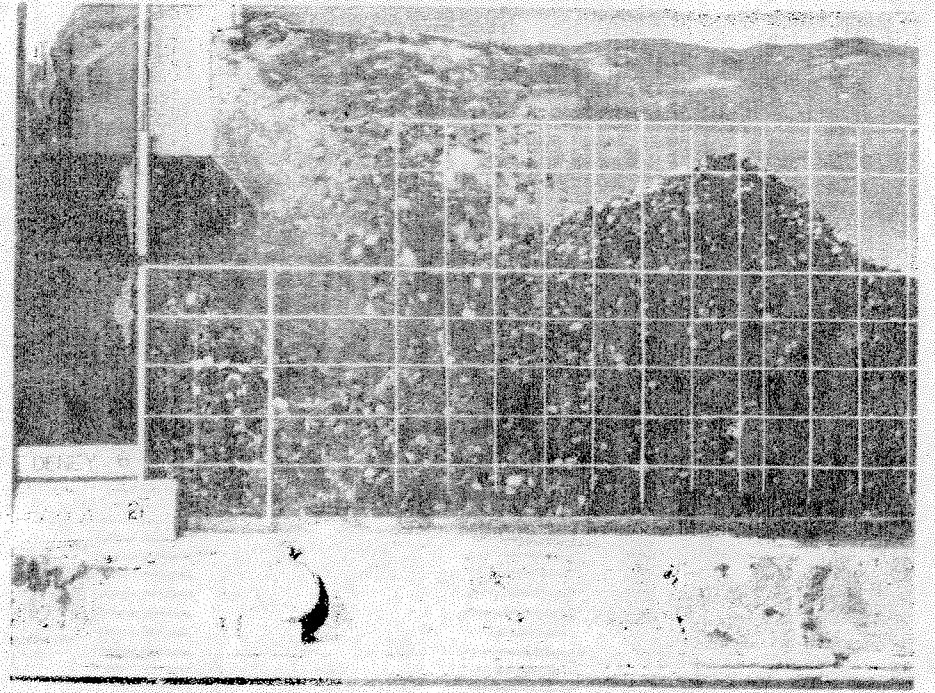


Deney 6 (Zaman = 15 dakika)



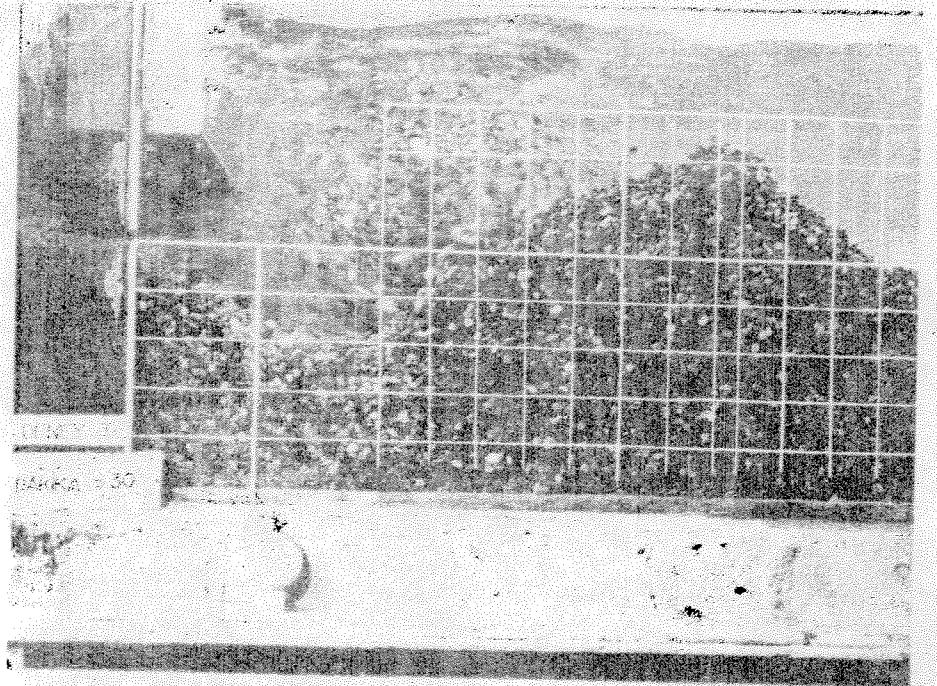
Deney 6 (Zaman = 18 dakika)



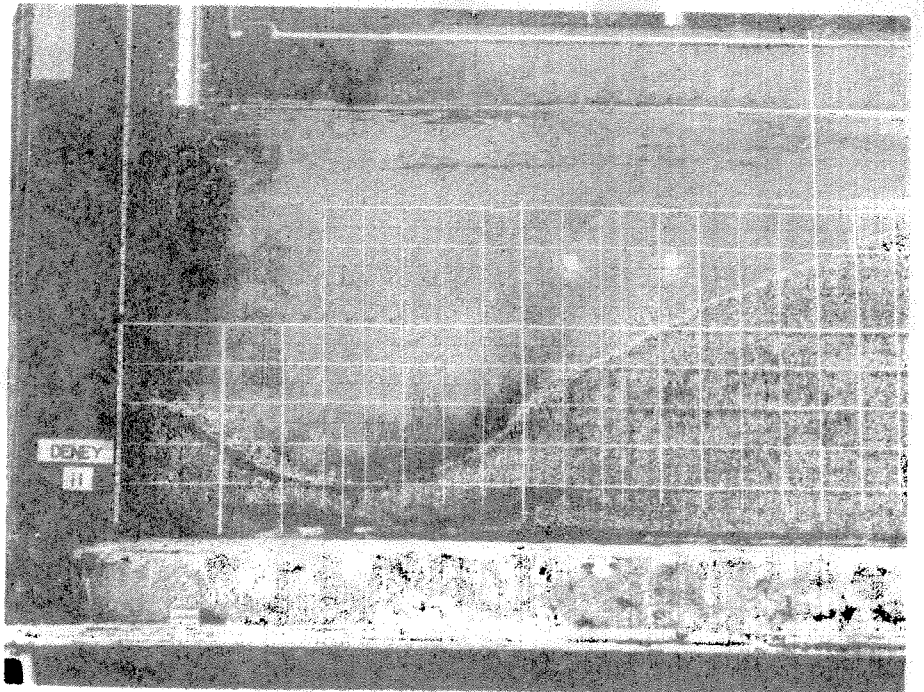


Deney 6 (Zaman = 21 dakika)

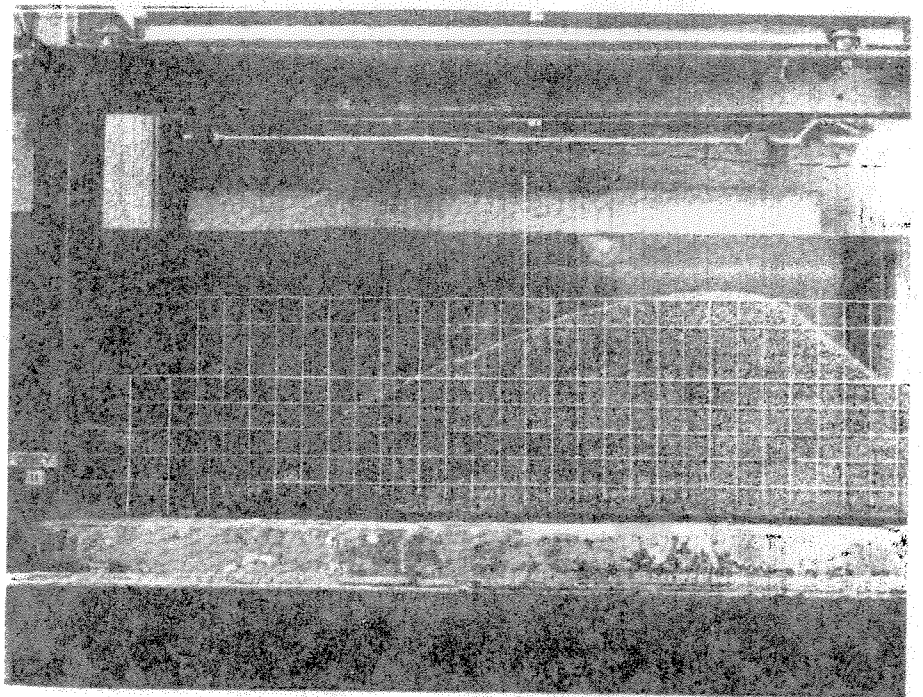
Genel = 11 dakika



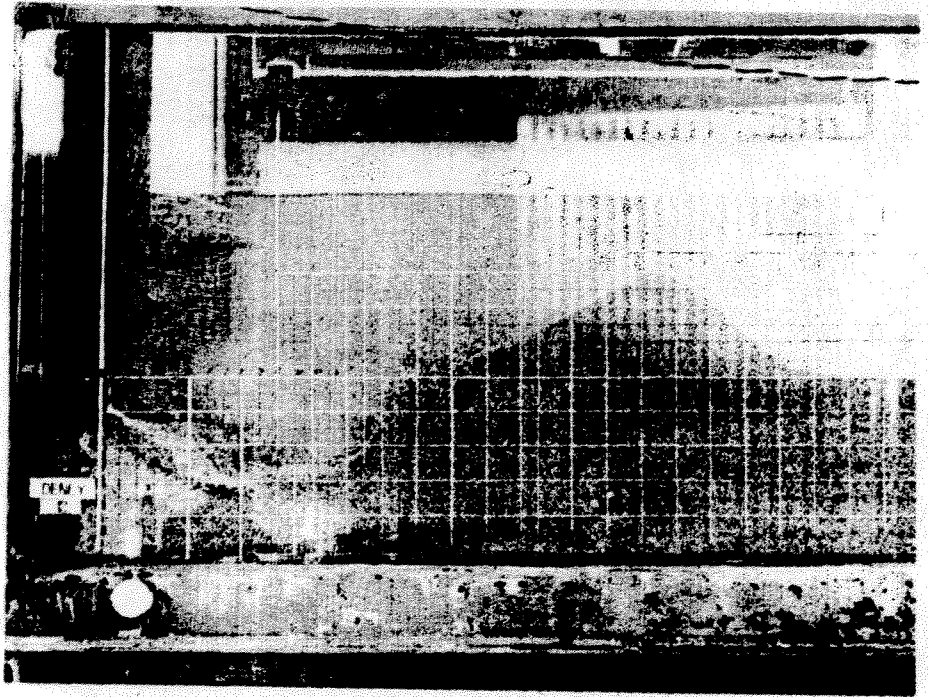
Deney 6 (Zaman = 30 dakika)



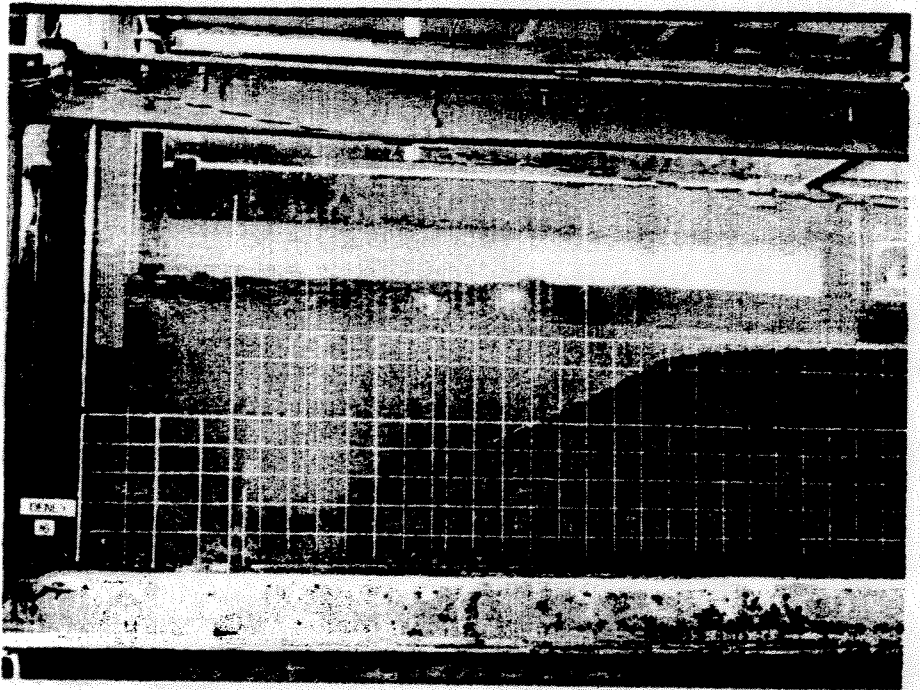
Deney 11



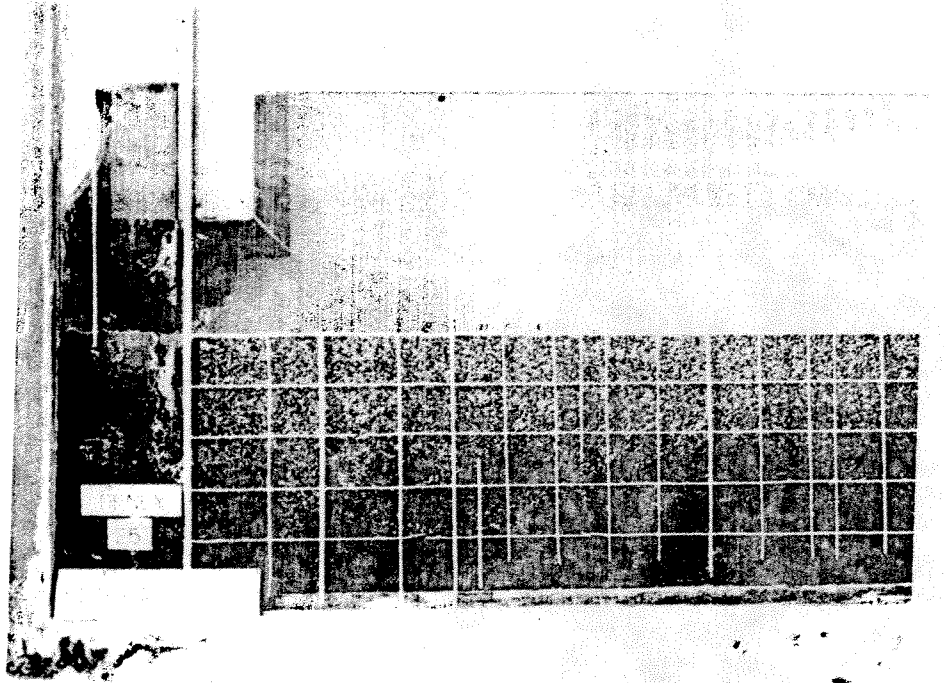
Deney 11



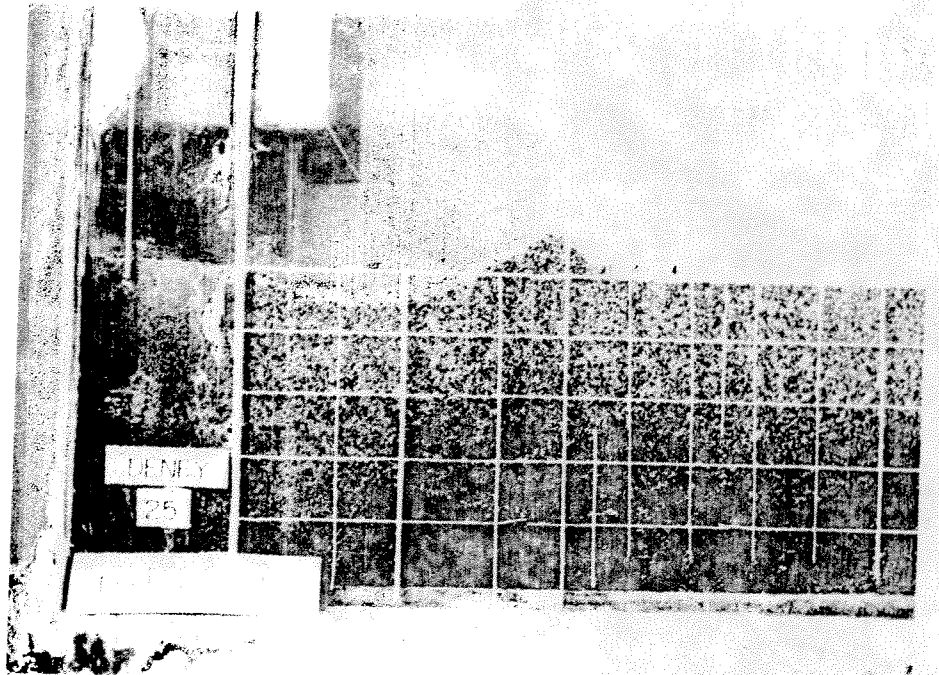
Deney 12



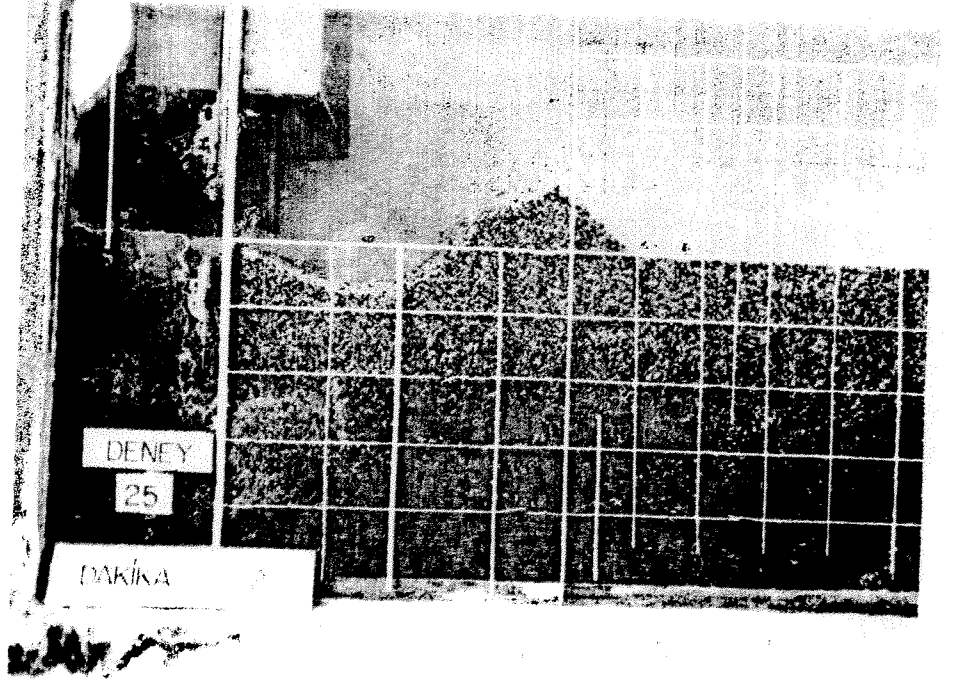
Deney 16



Deney 25 (Zaman = 0 dakika)

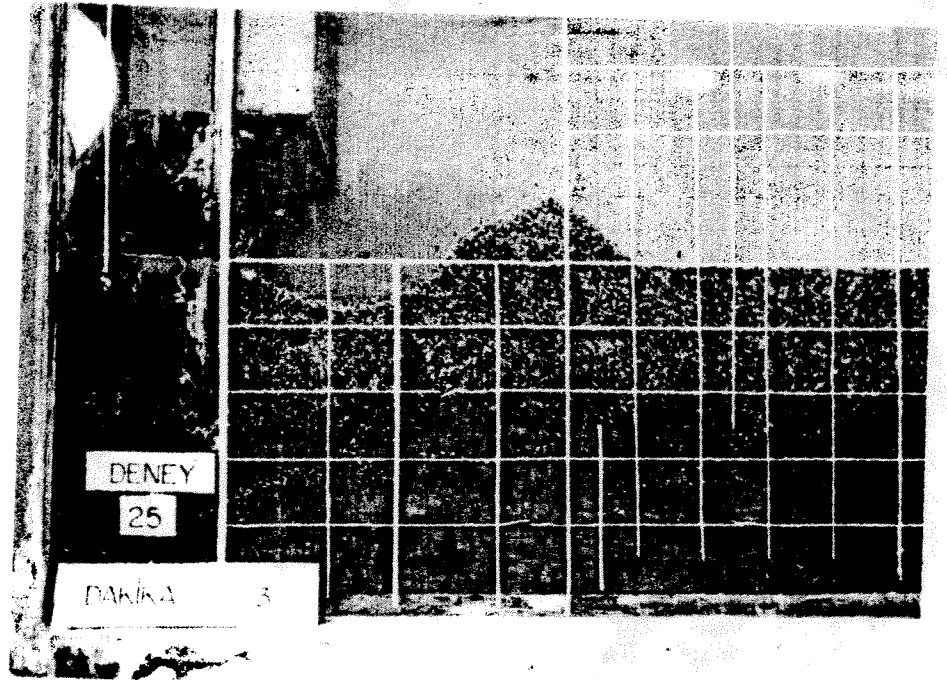


Deney 25 (Zaman = 1 dakika)

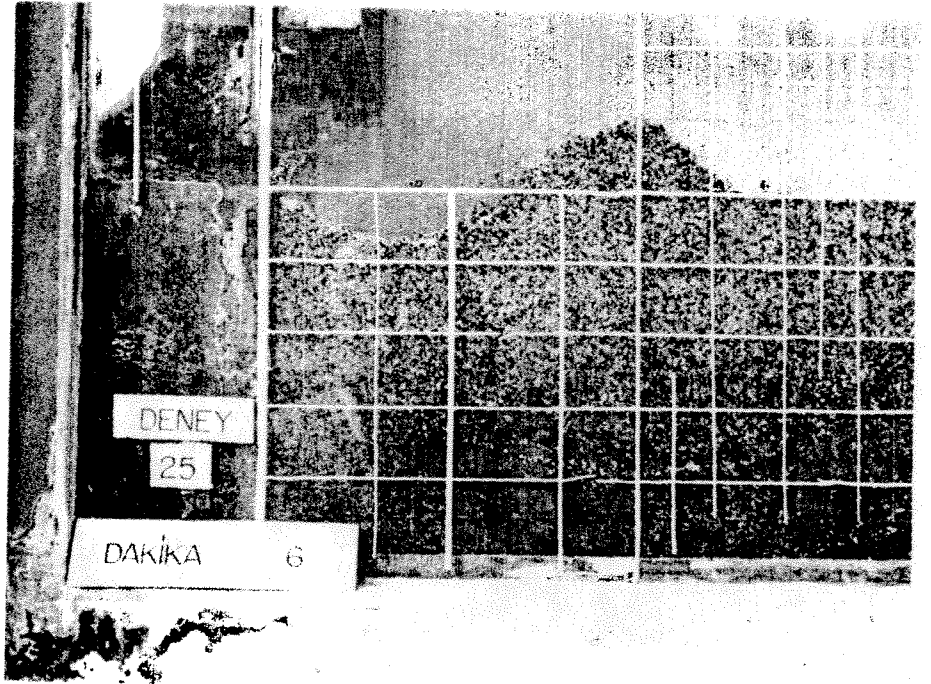


Deney 25 (Zaman = 2 dakika)

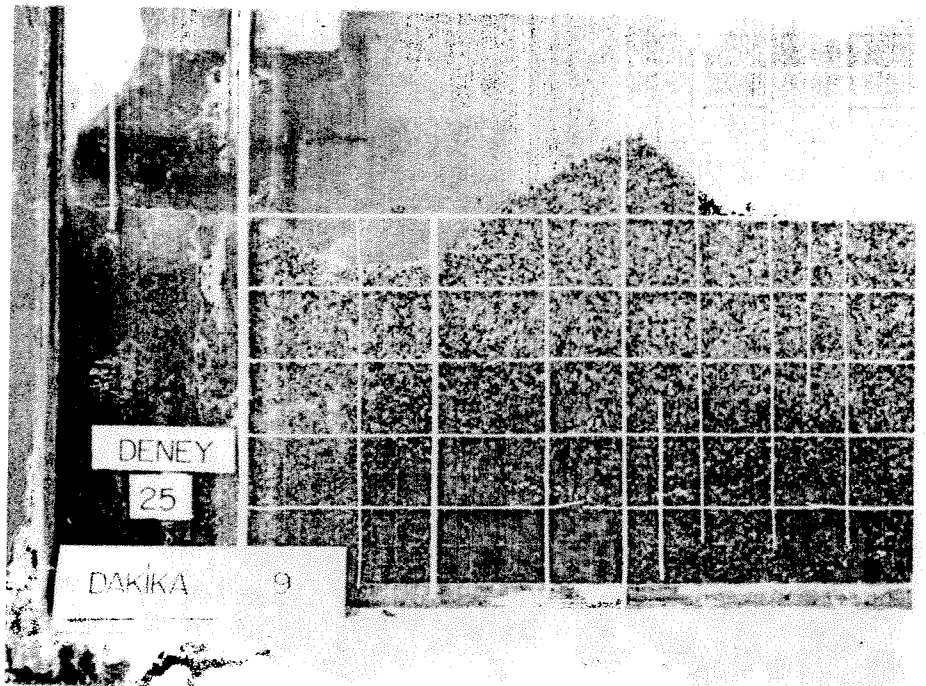
Deney 25 (Zaman = 2 dakika)



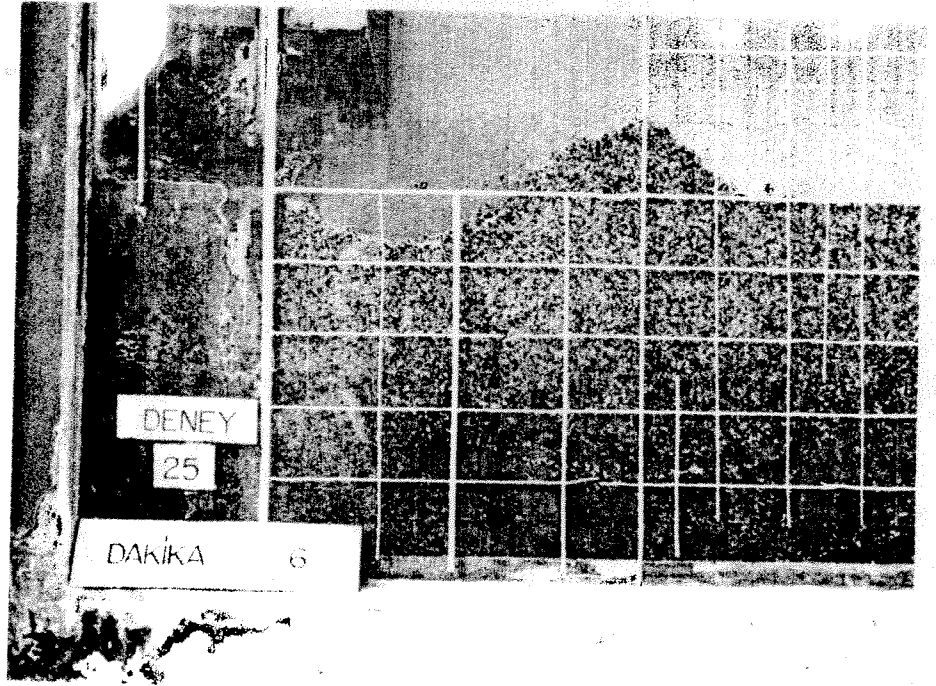
Deney 25 (Zaman = 3 dakika)



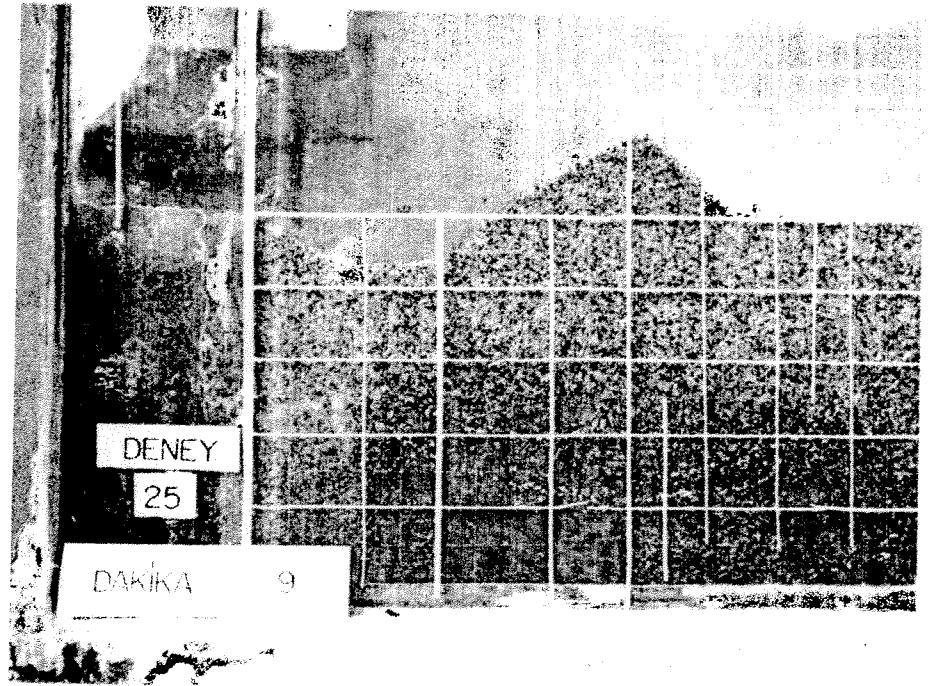
Deney 25 (Zaman = 6 dakika)



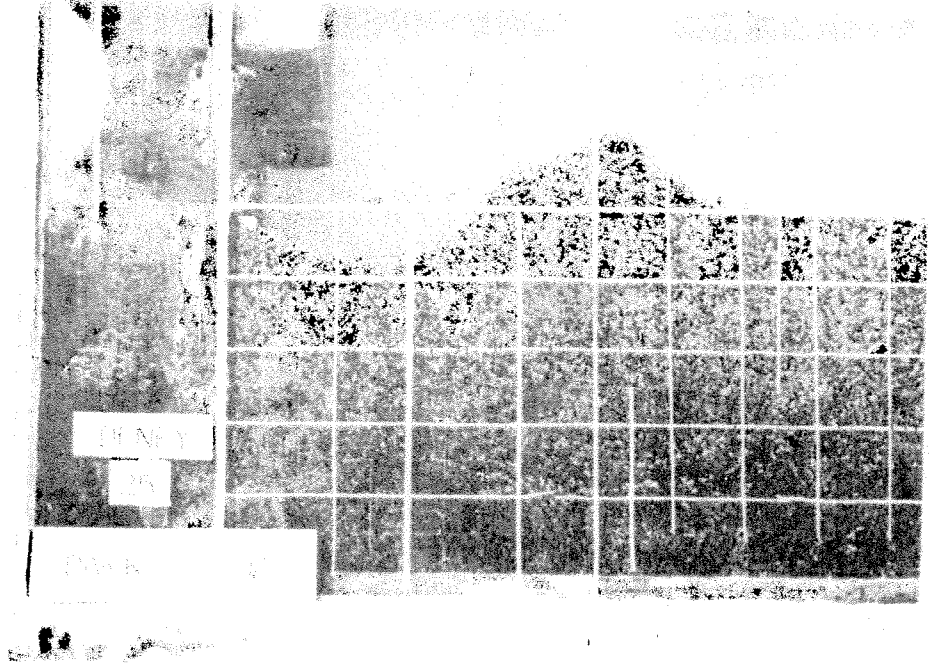
Deney 25 (Zaman = 9 dakika)



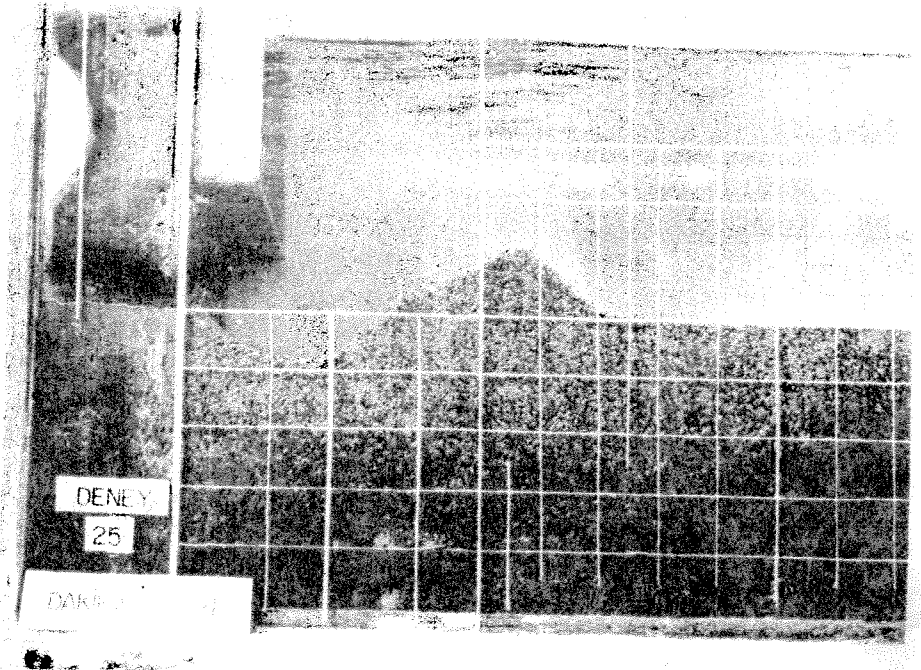
Deney 25 (Zaman = 6 dakika)



Deney 25 (Zaman = 9 dakika)

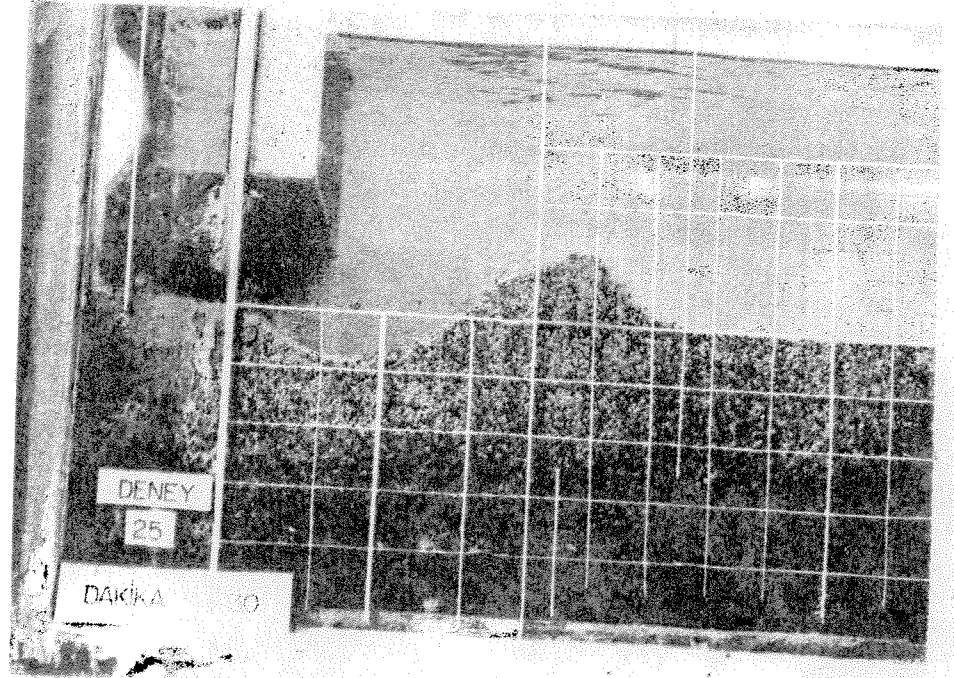


Deney 25 (Zaman = 12 dakika)

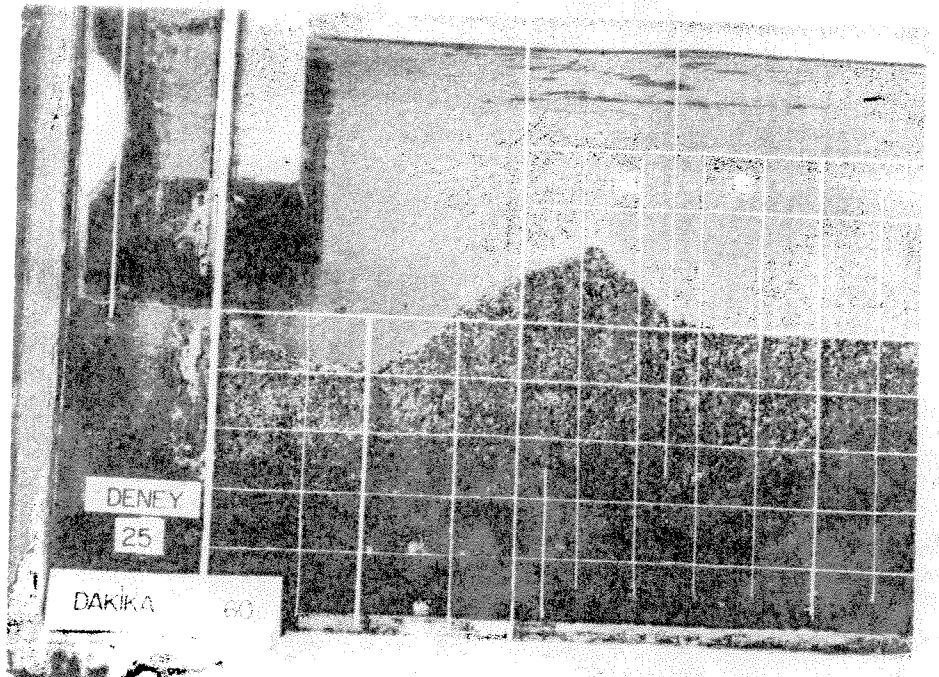


Deney 25 (Zaman = 24 dakika)

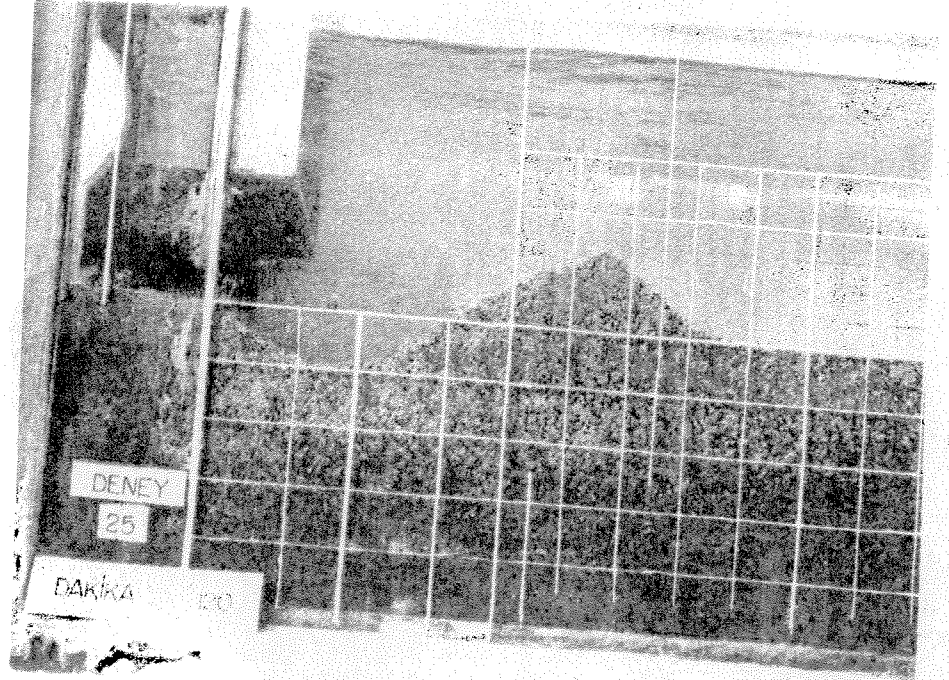




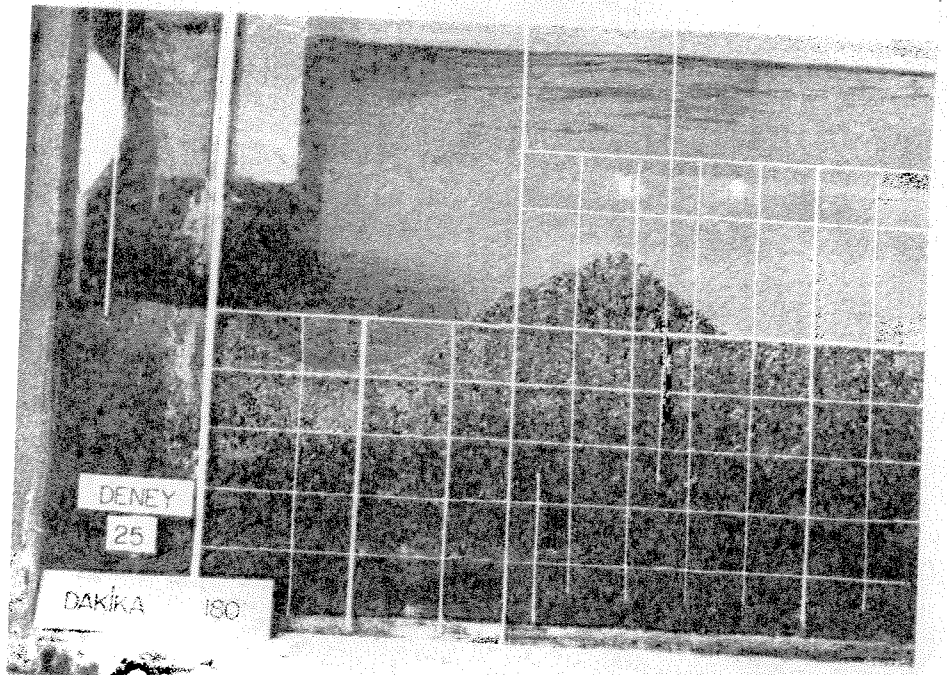
Deney 25 (Zaman = 30 dakika)



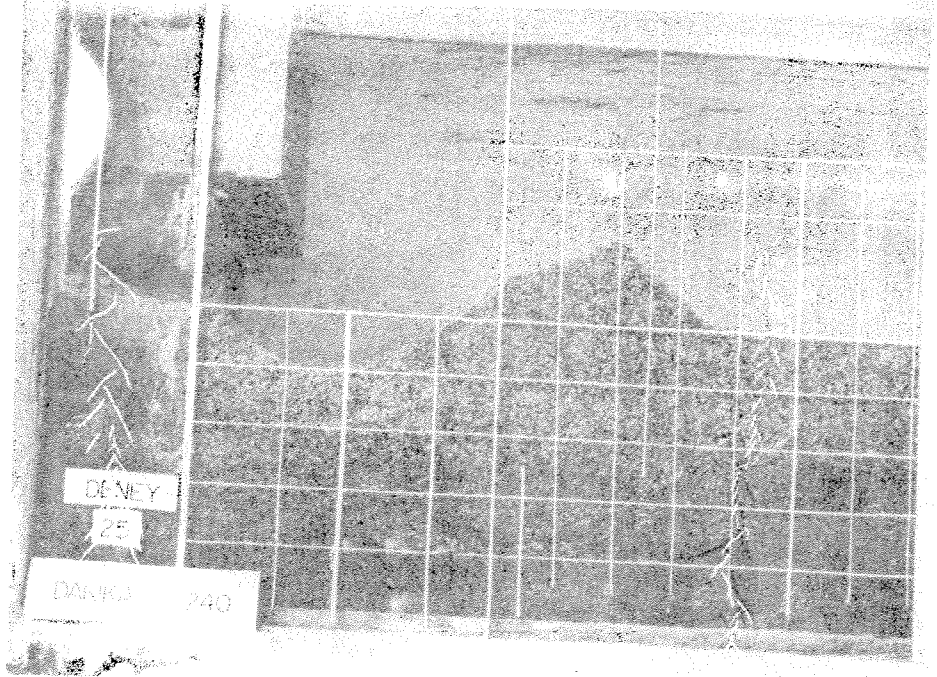
Deney 25 (Zaman = 60 dakika)



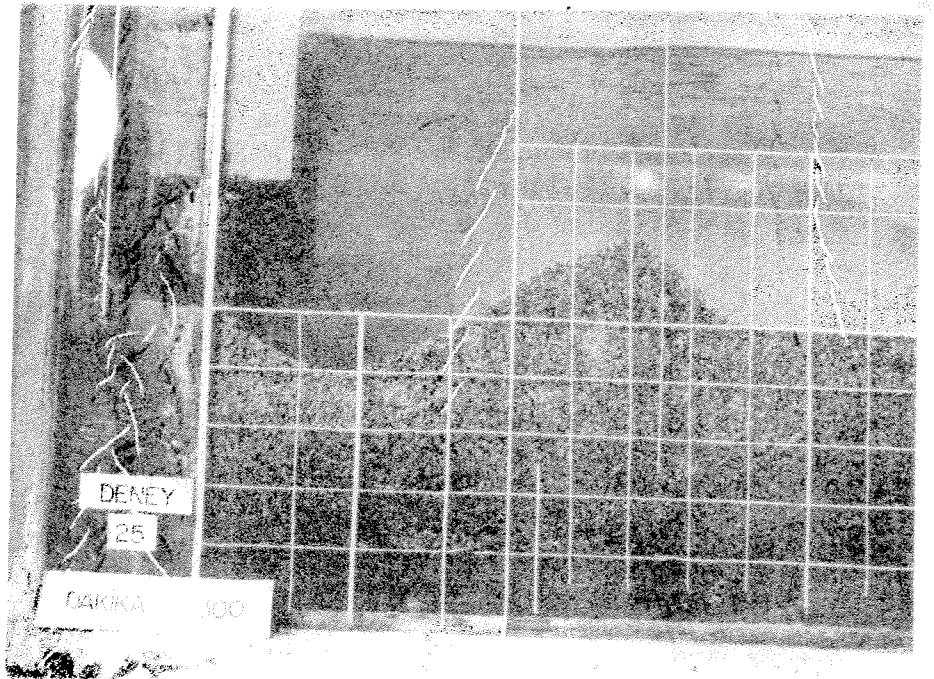
Deney 25 (Zaman = 120 dakika)



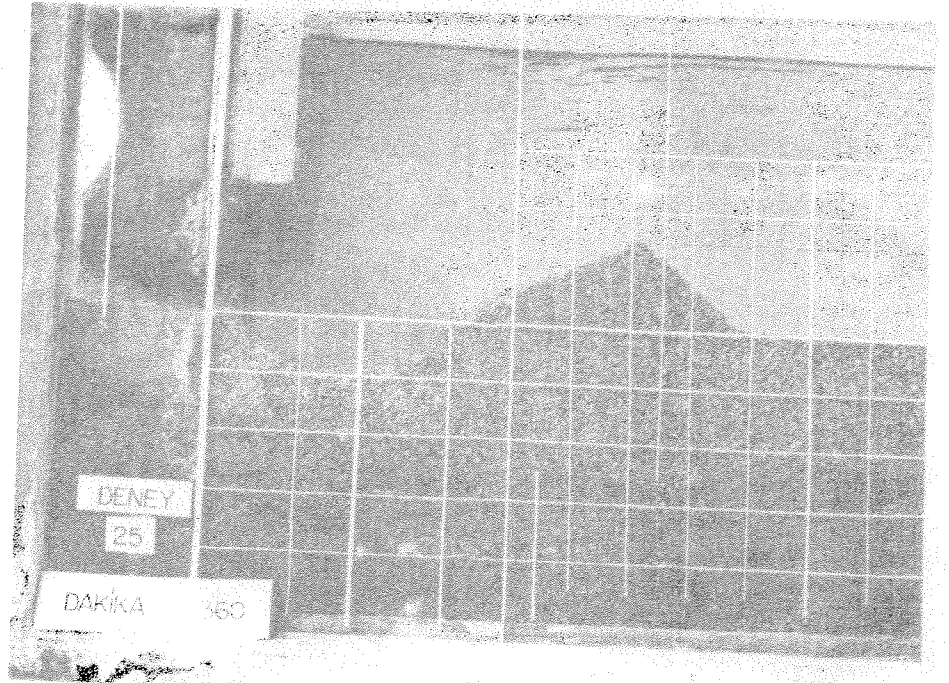
Deney 25 (Zaman = 180 dakika)



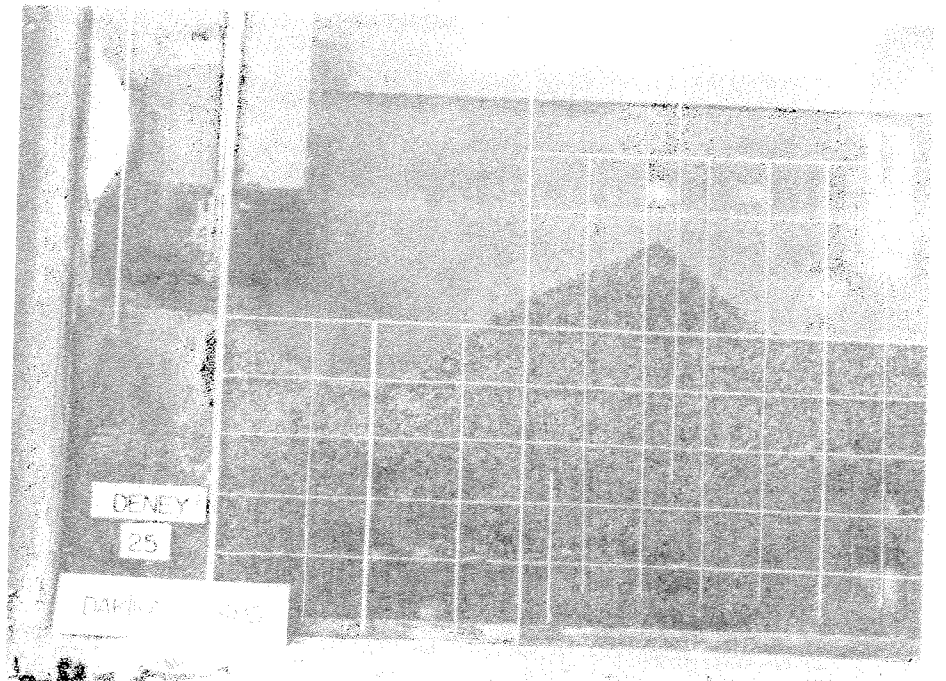
Deney 25 (Zaman = 240 dakika)



Deney 25 (Zaman = 300 dakika)



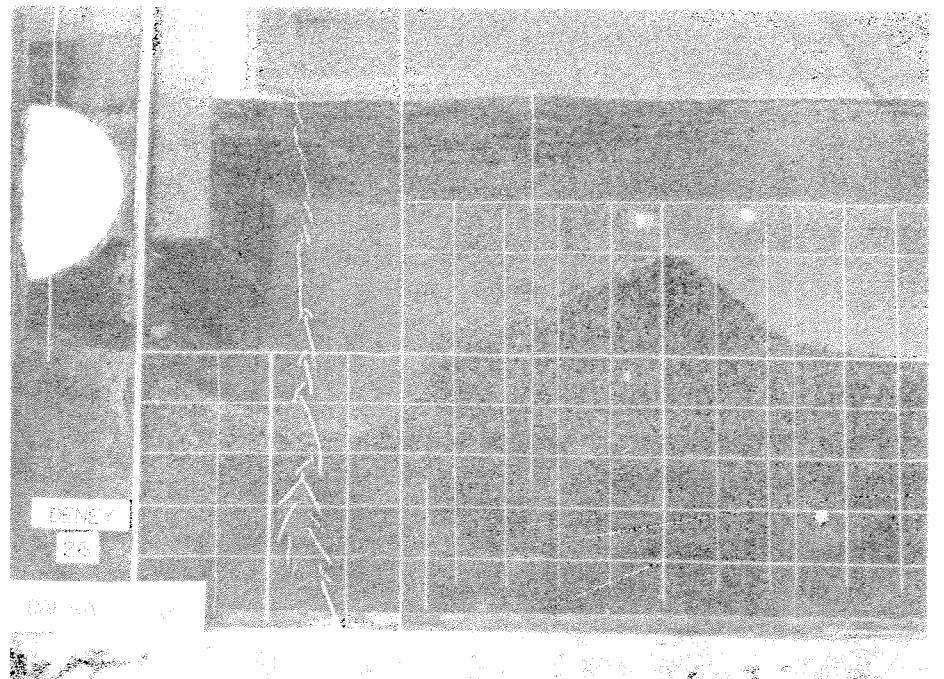
Deney 25 (Zaman = 360 dakika)



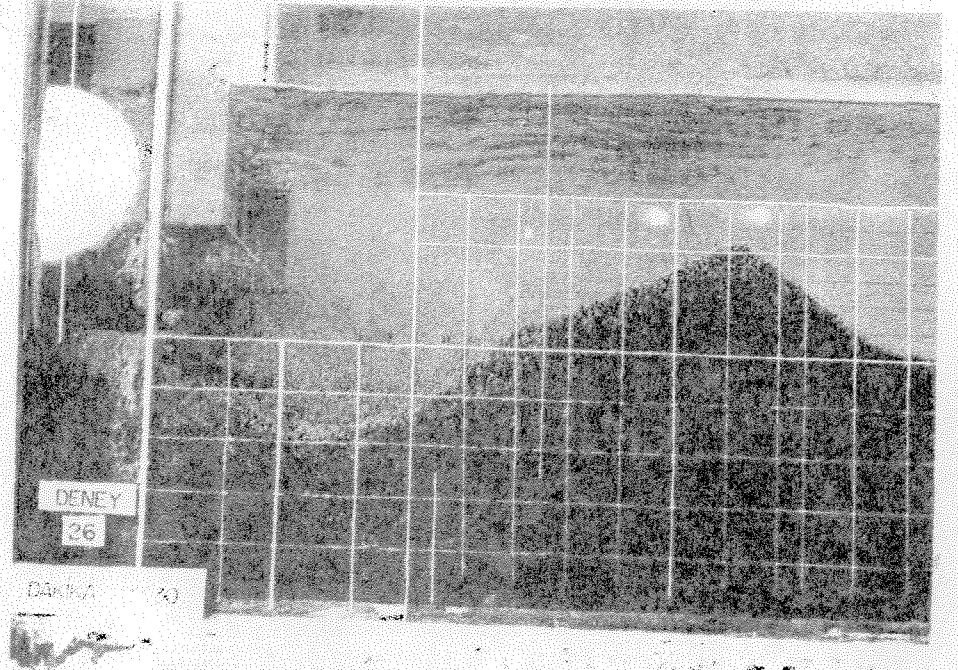
Deney 25 (Zaman = 480 dakika)



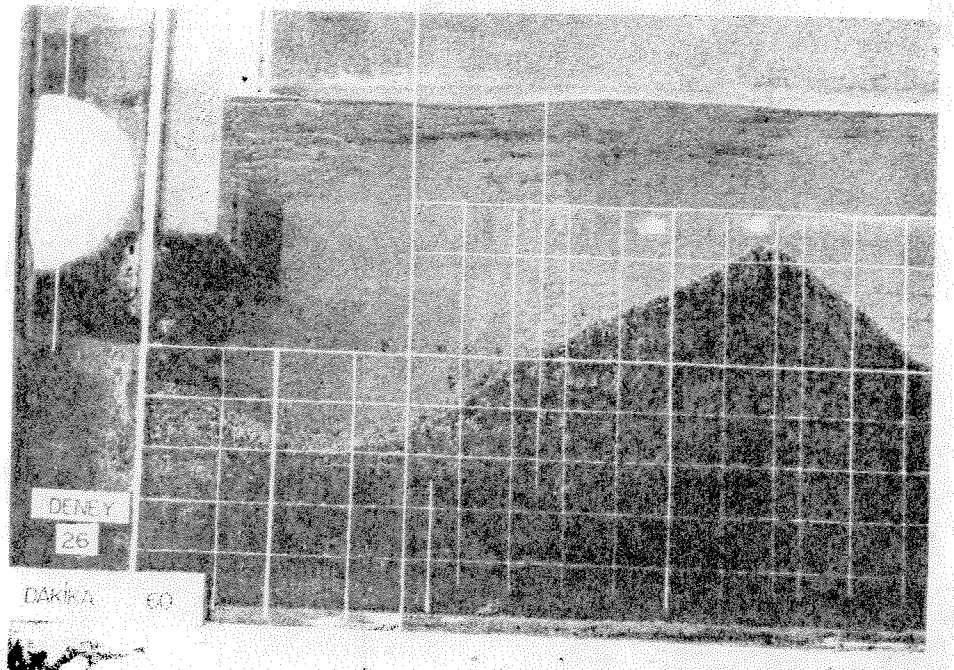
Deney 26 (Zaman = 2 dakika)



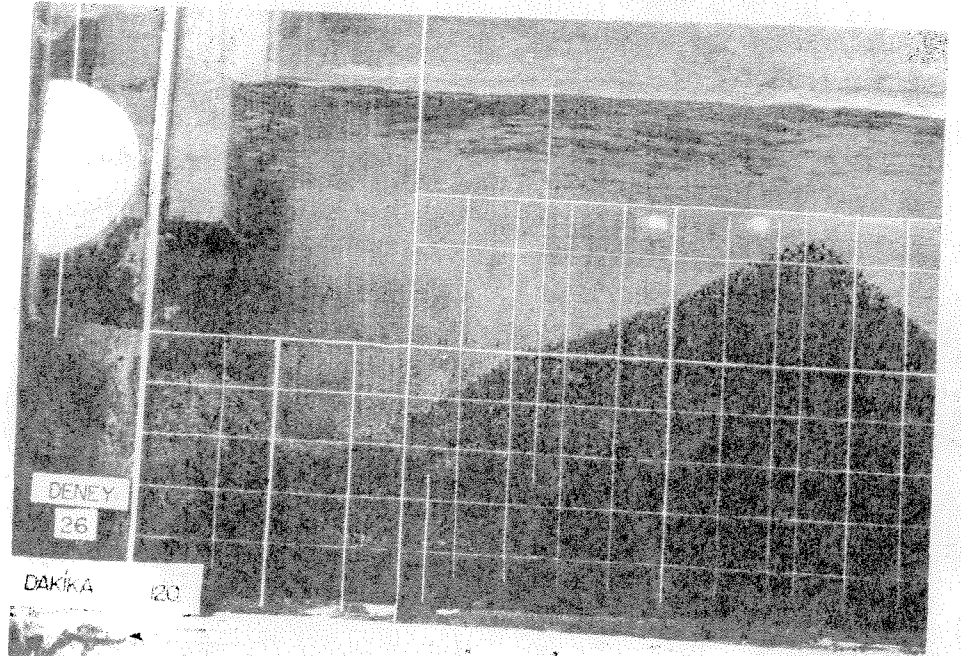
Deney 26 (Zaman = 12 dakika)



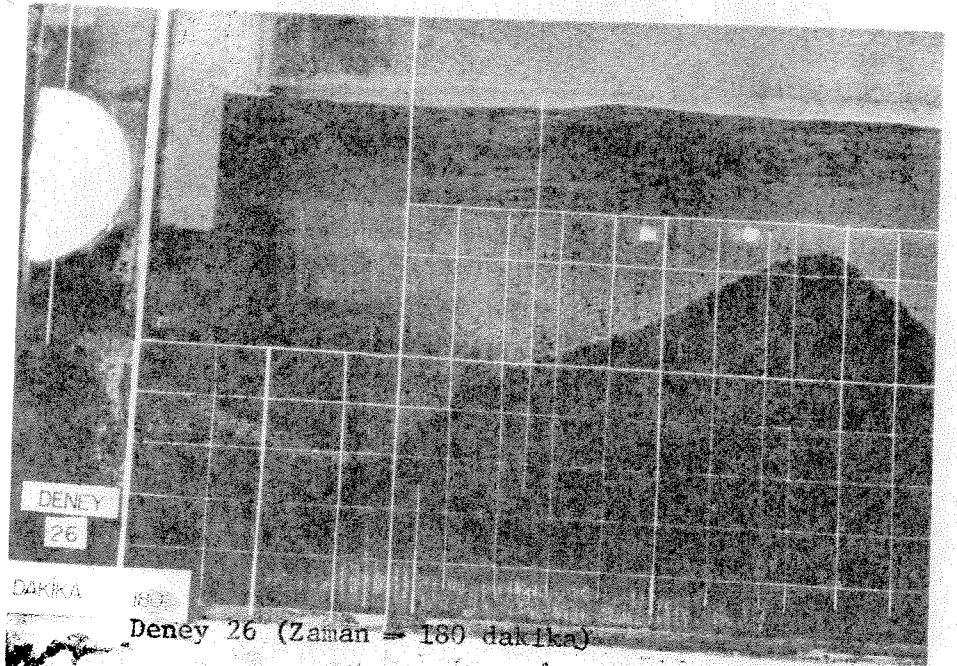
Deney 26 (Zaman = 30 dakika)



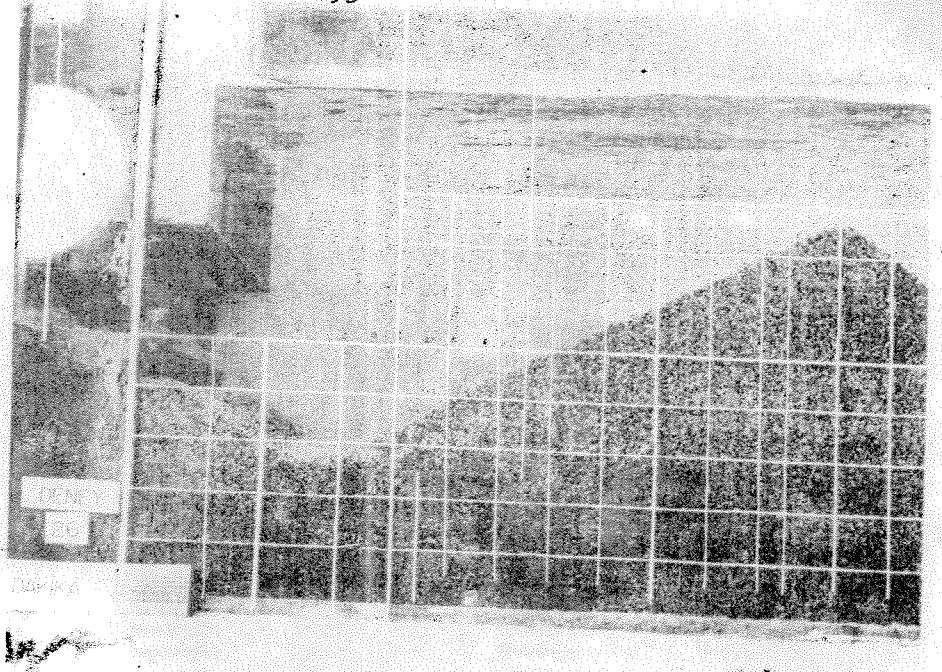
Deney 26 (Zaman = 60 dakika)



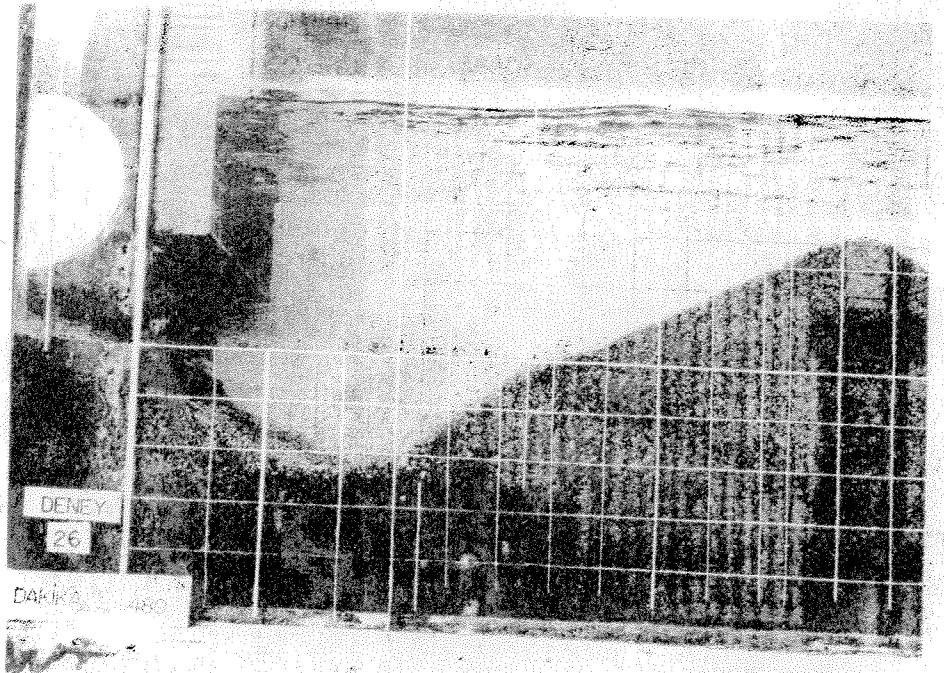
Deney 26 (Zaman = 120 dakika)



Deney 26 (Zaman = 180 dakika)

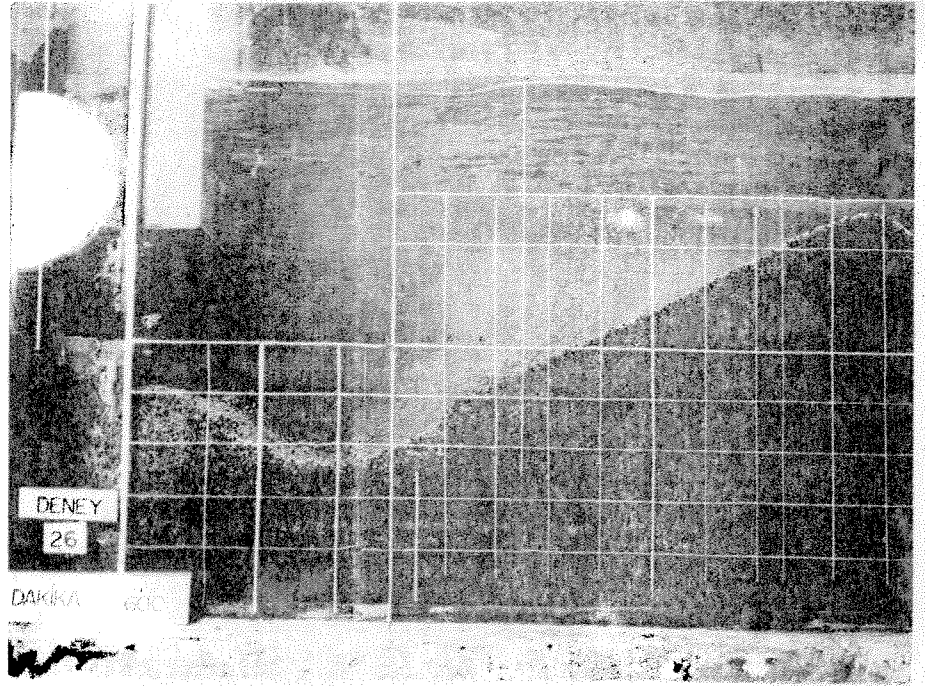


Deney 26 (Zaman = 300 dakika)

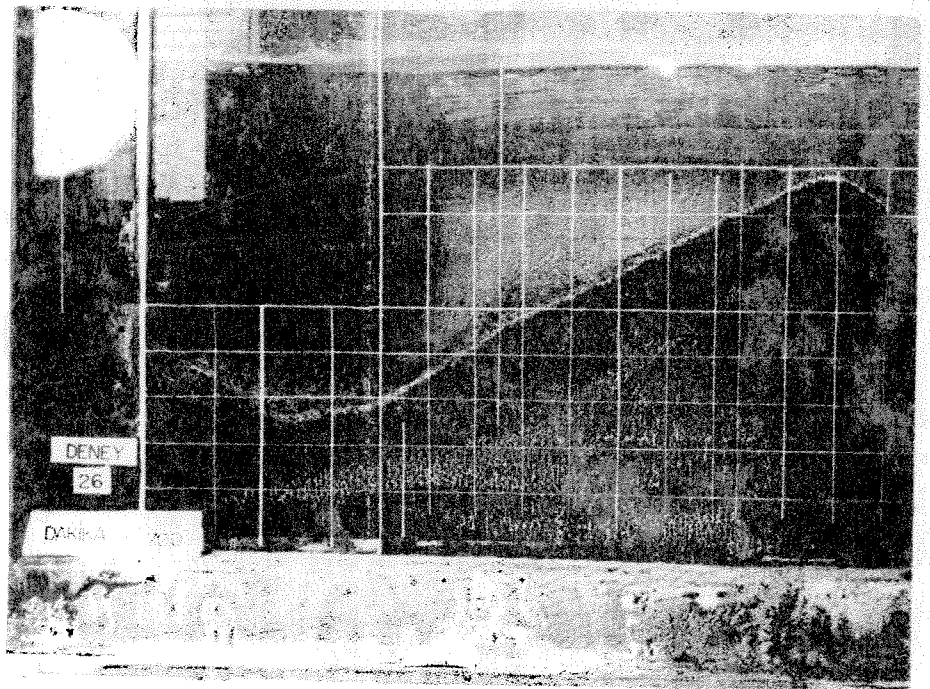


Deney 26 (Zaman = 480 dakika)





Deney 26 (Zaman = 600 dakika)



Deney 26 (Zaman = 700 dakika)