

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI MADDE TAŞINMASI NEDENİYLE KANAL
TABANINDA OLUŞAN DEĞİŞİKLİKLERİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Erdi AYDÖNER

**Ekim, 2010
İZMİR**

**KATI MADDE TAŞINMASI NEDENİYLE KANAL
TABANINDA OLUŞAN DEĞİŞİKLİKLERİN
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü

Hidrolik-Hidroloji Su Kaynakları Ana Bilim Dalı

Erdi AYDÖNER

Ekim, 2010

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ERDİ AYDÖNER, tarafından **PROF. DR. M. ŞÜKRÜ GÜNEY** yönetiminde hazırlanan “**KATI MADDE TAŞINMASI NEDENİYLE KANAL TABANINDA OLUŞAN DEĞİŞİKLİKLERİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Şükrü GÜNEY

Yönetici

Prof. Dr. Davut ÖZDAĞLAR

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Birol KAYA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım sũresince bana pozitif enerji veren ve beni hep cesaretlendiren, TũBİTAK 106M274 nolu projede bulunmamı sağlayan değerli danıŐmanım Sayın Prof. Dr. M. Őũkrũ GũNEY' e öncelikle teŐekkũr ederim.

Deneysel çalıŐmalarım sırasında karŐılaŐtıđım teknik problemlerin özũmũ konusunda yardımlarını esirgemeyen laboratuvar teknisyeni İsa ŬSTũNDAđ'a ve takıldığım konularda beni destekleyen aynı zamanda deneyler boyunca yardımlarını esirgemeyen TũBİTAK 106M274 projesinde özellikle Dr Gökçen BOMBAR' a ve AraŐ. Gör. Mustafa DOđAN' a mũteŐekkirim.

Tez çalıŐmalarım boyunca karŐılıksız sabır ve desteklerini esirgemeyen aileme Őũkran borçluyum.

Bu alıŐma boyunca finansal desteği sağlayan TũBİTAK (106M274 nolu)'a minnetlerimi sunarım.

Erdi AYDũNER

KATI MADDE TAŞINIMI NEDENİYLE KANAL TABANINDA OLUŞAN DEĞİŞİKLİKLERİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

ÖZ

İnşaat Mühendisliği kapsamında akarsulardaki katı madde taşınımı akarsu yapılarının tasarım ve işletilmesi aşamalarında çok önemlidir. Bu bağlamda kum ve çakıl arasındaki büyüklükteki tanelerin hareketi önem kazanmaktadır.

Tabanı kohezyonsuz gevşek malzemeden oluşan bir akarsuda akım koşulları taban hareketi için gerekli kritik şartları aştığında tabanda hareket başlamaktadır. Katı madde, türbülansın şiddetine göre taban boyunca oyularak hareket etmekte veya geçici olarak depolanmaktadır.

Bu tez kapsamında, DEÜ Hidrolik Laboratuvarında mevcut 18,6 m uzunluğunda 80 cm genişliğindeki dikdörtgen bir kanal ve 27m³ hacmindeki ana su deposu ve debisi ayarlanabilen pompa ve iletim hatlarını içeren kanaldaki 6 farklı debide ve 2 farklı hidrografta tekrarlanarak taban malzemesinin hareketi sonucu oluşan taban şekilleri incelenmiştir. Kanal tabanında $D_{50}=0,45\text{mm}$ ve $D_{50}=4,8\text{mm}$ 'li Standard sapması $\sigma_g=2,62$ olan üniform olmayan kum ve çakıldan oluşan bimodal malzeme serilmiştir. Bu karışımın median dane çapı $D_{50}=1,03\text{mm}$ 'dir. Literatürde verilen taban malzemesinin harekete başlaması ile ilgili kriterler, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deney sonrasında oluşan taban şekillerinin oluşumu incelenmiş bunlar literatürdeki ampirik formül ve grafikler kullanılarak hesaplananlar ile karşılaştırılmıştır.

Ayrıca deney sonrasında kanal mansabında bulunan elekler ile biriken taban malzemesinin yükü belirlenmiştir. TÜBİTAK 106M274 nolu proje kapsamında yaptığımız deneylerde bulunan veriler ilgili literatürlerde bulunan ampirik denklemler ve sınıflandırmalarla karşılaştırılmış. Bu karşılaştırma sonucunda deneysel bulguların, harekete başlama ile ilgili literatürde yer alan bağıntılar ve abaklar ile uyumlu oldukları gözlenmiştir. Taban şekillerinin sınıflandırılmasında

deneysel bulguların Engelund and Hansen (1966), Zanke (1972) ve Southard and Boguchwal (1990) tarafından verilen taban şekli sınıflandırılmasına daha uyumlu oldukları görülmüştür. Taban şekillerinin yüksekliği konusunda Yalın (1972) ve uzunluğu konusunda ise Van Rijn (1993) tarafından verilen ampirik bağıntının daha uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Dönüşümlü çubukların oluşması kriterleri, yükseklikleri ve uzunlukları ile ilgili abak ve bağıntılarla uyumlu bulgular elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı maddenin harekete başlaması, katı madde hareketi, taban şekilleri, katı madde yükü

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF CHANGES IN CHANNELS BOTTOMS DUE TO SEDIMENT TRANSPORT

ABSTRACT

In the scope of civil engineering, sediment transport is very important in design and operation of river structures. Accordingly, the sediment transport is a topic of utmost importance.

In a river with loose bed material, the sediment transport starts as soon as the flow conditions exceed critical conditions required for sediment motion. The solid material's motion results in erosion or deposition depending on the turbulence intensity.

In this study, numerous experiments are carried out in the experimental system designed and built in the Hydraulics Laboratory of Dokuz Eylül University. It involves a rectangular flume of 18.6 m length and 0.80 m width. The water supply tank has a volume of 27 m³, and water is conveyed by means of a pump whose discharge can be adjusted. The bed forms are measured in steady and unsteady flow conditions with six different steady discharges and by generating two different hydrographs. The sediment is bimodal, composed from two sands with $D_{50} = 0.45$ mm and $D_{50} = 4.8$ mm. Its median size D_{50} and standard deviation σ_g are 1.03 mm and 2.62, respectively. The criteria about the inception of the motion given in the literature are compared with the experimental findings. The bed forms are identified according to the classifications established from previous studies carried out by numerous researchers and their measured values are compared with those calculated from the empirical relations given in the relevant literature.

The bed loads are measured by sieves placed at the downstream end of the channel. The accumulated material is dried and weighed after each experiment. These experimental results obtained through the TÜBİTAK 106M274 project are compared with those found from various charts and empirical formulas.

The experimental findings about the inception of the motion revealed a total compatibility with existing charts and empirical relations.

In the classification of bed forms, the experimental results are in excellent accord with the charts formed by Engelund and Hansen (1966), Zanke (1972) and Southard and Boguchwal (1990).

The empirical relation on the height of bed forms proposed by Yalin (1972) suits better with experimental results, and the empirical relation about bed form lengths given by Van Rijn (1993) is in better accordance with the experimental findings of this study.

The experimental results concerning the alternate bars are compatible with those deduced from available charts and empirical relations.

Keywords: bed forms, dunes, inception of sediment motion, sediment transport, bed load

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	vi
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
1.1 Akarsularda Katı Madde Hareketi.....	1
1.2 Çalışmanı Amacı ve İçeriği.....	4
1.3 Geçmişte Yapılan Bilimsel Çalışmalar.....	5
BÖLÜM İKİ- TABAN MALZEMESİNİN HAREKETE BAŞLAMASI VE TABAN ŞEKİLLERİNİN OLUŞUMU İLE İLGİLİ TEORİK BAKIŞ.....	11
2.1 Katı Madde Karakteristikleri.....	11
2.2 Taban Malzemesinin Harekete Başlaması Üzerine Mevcut Yaklaşımlar.....	13
2.2.1 Shields Yaklaşımı.....	13
2.2.2 Yang Yaklaşımı.....	14
2.2.3 Meyer Peter Müler Yaklaşımı	15
2.3 Taban Şekillerinin Oluşumu.....	16
2.3.1 Farklı Taban Şekilleri Tanımları.....	16
2.3.2 Küçük Rejimli Akımlarda Taban Şekilleri.....	21
2.3.2.1 Kum Dalgacıkları (Ripples).....	21
2.3.2.2 Basamaklar Yada Kumullar (Dunes).....	23
2.3.3 Geçiş Rejimleri (Transition) Taban Şekilleri.....	27
2.3.4 Büyük Rejimli Akımlar Taban Şekilleri.....	28
2.3.4.1 Ters Kumullar (Antidunes).....	28
2.3.4.2 Düşümler ve Göller (Chutes and Pools).....	29

2.3.5 Çubuklar (Bars).....	29
2.3.6 Sürtünme faktörü (f) ve Manning Pürüzlülük Katsayısı(n) Değerlerine Bağlı Olarak Taban Şekillerinin Sınıflandırılması.....	34
BÖLÜM ÜÇ-DENEY SİSTEMİ VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ.....	36
3.1 Deney Düzeneği.....	36
3.2 Ölçüm Cihazları.....	41
3.2.1 Hız Profili Elde Edilebilmesi İçin Ultrasonic Velocity Profiler (UVP)..	41
3.2.2 Pompa Debisi Kontrol Cihazı.....	43
3.2.3 VS100 Hız Ölçümü.....	44
3.2.4 Debi Metre.....	44
3.2.5 Seviye Ölçer.....	45
3.2.6 Veri Kaydedici.....	46
3.3 Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri.....	46
3.4 Deneyin Yapılışı.....	48
BÖLÜM DÖRT-DENEYSEL SONUÇLAR.....	50
4.1 Deneysel Parametreler ve Harekete Başlama Kriterleri.....	50
4.2 Deney Öncesi Taban Şekillerinin Grafikleme.....	52
4.3 Zamanla Değişmeyen Akımlarda Taban Şekilleri ile İlgili Deneysel Bulgular.....	53
4.3.1 4,2cm<h<8,0 cm Arası Küçük Derinlikli Akımlarda Oluşan Taban Şekilleri.....	54
4.3.2 8,0cm<h<10,0 cm Arası Orta Derinlikli Akımlarda Oluşan Taban Şekiller	57
4.3.3 10,0cm<h<12,5 cm Arası Büyük Derinlikli Akımlarda Oluşan Taban Şekiller.....	67
4.3.4 Zamanla Değişmeyen Akımda Taban Malzemesi Kotlarının Zamanla Değişimi.....	75
4.4 Zamanla Değişen Akımda Taban Şekilleri ile İlgili Deneysel Bulgular.....	80

4.4.1 Birinci Hidrograftan Sonra Oluşan Taban Şekilleri.....	81
4.4.2 İkinci Hidrograftan Sonra Oluşan Taban Şekilleri.....	86
4.5 Dönüşümlü Çubuk Oluşumu	91
4.6 Manning Pürüzlülük Katsayısının Deneysel Olarak Belirlenmesi.....	92
4.6.1 Pürüzlülük Katsayısını Etkileyen Faktörler.....	92
4.6.2 Eşdeğer Pürüzlülüğün Belirlenmesi.....	92

**BÖLÜM BEŞ-DENEYSEL SONUÇLARIN AMPİRİK BAĞINTILARLA
KIYASLANMASI.....97**

5.1 Harekete Başlama ile İlgili Bulguların Karşılaştırılması.....	97
5.2 Taban Şekilleri ile İlgili Bulguların Literatür Bilgileriyle Karşılaştırılması...	97

BÖLÜM ALTI- SONUÇ VE ÖNERİLER.....120

KAYNAKLAR.....122

EKLER.....125

Notasyon Listesi.....	125
-----------------------	-----

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Akarsularda Katı Madde Hareketi

Taban şeklinin taban pürüzlülüğünü, taban pürüzlülüğünün ise su derinliğini dolayısıyla akarsu hidroliğini etkilediği bilinmektedir.

Akarsu yatağı ve akım devamlı olarak birbirini etkileyen iki faktördür. Karmaşık bir sistem oluşturan akarsularda su beraberinde katı maddeleri de taşır. Bir akarsuya şu etmenlerden dolayı katı madde girer:

- a. Akarsu havzasında yağmurlardan ve eriyen kardan meydana gelen yüzeysel akışın oluşturduğu erozyon (sökülme)
- b. Akarsuyun kendi yatağında meydana gelen oyulma
- c. Akarsu şevlerinde oluşan yer yer kütleli sökümler
- d. Yatağı konsolide olmamış küçük kanallardaki oyulma

Akarsuyun katı maddeyi taşıma gücü, su hızının azaldığı yerde azalacak, böylece katı madde o bölgelerde yığılacaktır. Hidrolik mühendisliğinin katı madde ile dolaylı ve dolaysız yoldan ilgili konuları şöyle özetlenebilir:

- Katı madde taşıyan akarsuyun hidroliği
- Baraj haznelerinde ölü hacmin belirlenmesi
- Akarsu morfolojisi
- Bağlamaların ve su alma yapılarının projelendirilmesi
- Yığılma ve oyulma
- Köprü ayakları, mahmuz gibi yapılarda yerel oyulmalar

Akarsulara taşınan katı maddeler askı maddeleri ve sürüntü maddesi olarak iki grupta sınıflandırılabilir.

Açık kanallarda katı madde taşınması ile ilgili araştırmalarda aşağıdaki konu başlıklarında belirtilen amaç hedeflemektedirler.

- Katı maddenin niteliksel özellikleri yanında taşınımın niceliksel özellikleri
- Akarsu düzenlemelerinde katı madde taşınımının hangi debilerde gerçekleştiğinin belirlenmesi, belli debilerde taşınmayacak malzeme çapının tespiti
- Taşınım sırasında oluşabilecek taban şekilleri
- Taban şekillerinin açık kanal hidroliğini ve debiyi etkilemesi
- Akım kesitinde katı maddenin dağılımı

Taban şeklini ve akışın direncini etkileyen birçok faktör şunlardır (Simons and Sentürk,1977).

- a-**Su Derinliği
- b-** Akış boyunca kanal eğimi
- c-** Sıvı Yoğunluğu
- d-**Malzemenin konsantrasyonu
- e-**Taban malzemesinin çapı
- f-** Katı maddenin (sediment) çökme hızı
- g-**Kanal enkesiti

Derinlik: D:su derinliği, d:katı madde çapı olmak üzere göreceli derinlik (D/d) veya göreceli pürüzlülük (d/D) şeklinde incelemelerde yer almaktadır. Su derinliğinde artış tabandaki kumul(dune) şeklinin düzgün taban (plane bed) veya ters kumul (antidune) şekline dönüşmesine neden olabilir. Su derinliği azaldığında bu işlemlerin tersi oluşur.

Düzgün taban durumunda derinliğin artması, göreceli pürüzlülük ve akım direncinin azalmasına neden olur. Kum dalgacığı (Ripple) ve kumul durumunda su derinliğinin artması akım direncini azaltır. Ters kumul taban şekli durumunda derinliğin artmasıyla ilk başta akım direnci artmakta sonra azalmaktadır.

Eğim: Sabit bir derinlik için kanal veya enerji eğimindeki artış taban şeklini değiştirebilmektedir.. Taban şekli değişmeden kalsa bile, akışın direnci enerji

çizgisinin eğiminin bir fonksiyonudur. Sığ derinlikte kum dalgacığı şeklindeki taban durumunda akıma direnç, eğimin artmasıyla artmaktadır ve ancak derin akışlar için eğimdeki değişiklikten pek etkilenmemektedir. Kumul içeren yatak durumunda ve su derinlikleri sığ derinlikler olduğu zaman akıma direnç genellikle eğimin artması ile azalmaktadır ve büyük derinlikler söz konusu olduğu zaman eğimin artmasıyla akıma direnç hafifçe artabilmektedir.

Yoğunluk: Katı madde konsantrasyonunu artırmak katı madde su karışım yoğunluğunu artıracaktır. Böylece akışın direnci ve su içindeki katı maddenin ağırlığı azalır.

Taban Malzemesinin boyutu: Taban malzemesinin boyutundaki değişiklik katı madde konsantrasyonunu düşey dağılımını ve dane pürüzlülüğünü değiştirir.

Taban Malzemesinin Gradasyonu : Üniform malzemenin taban şekli aynı ortalama parçacık boyutuna sahip gradasyonlu (sıralanmış) malzemeye göre daha düzgün olup akıma direnci daha yüksektir.

Çökme Hızı: Dane çökme hızındaki bir artış akıma direnci artırabilir ve taban şeklinin kumuldan kum dalgacığına dönüşmesine neden olabilir. Aynı zamanda çökme çapı 0,6 mm'den daha büyük olduğunda kum dalgacıkların gözlenmediği tespit edilmiştir.

Kanalın Enkesit Şekli: Kanalın enkesit şekli hız ve kayma gerilmesi dağılımlarını etkiler. Üniform olmayan hız ve kayma gerilmesi dağılımları kanal boyunca ve enkesiti içinde çok çeşitli taban şekillerinin var olmasına neden olabilir.

Sızan Akım: Kanal içine sızan akım katı madde parçacıklarının etkin ağırlığını ve kararlılığını azaltabilir. Akarsu şevlerine ve tabanına, sızma ters bir etki oluşturur.

Bu çalışmada 6 farklı debide ve 2 farklı hidrografta taban malzemesinin hareketi ve oluşan taban şekilleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Taban şekillerini deney

sonrasında kıyaslamak için tabanda ölçümler yapılmış ve bu şekiller literatürde verilen ampirik bağıntılar ve deneysel grafiklerle hangi taban şekli oluştuğu belirlenmiştir. Seviye ölçer ile ölçülen taban kotları fotoğraflar ile kıyaslanmıştır. En son olarak ta harekete başlama kriterleri ve ölçülen katı madde yükleri literatürde verilen ampirik bağıntılarla karşılaştırılmıştır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve İçerik

Literatürde taban malzemesinin harekete başlaması ve sonrasında oluşan taban şekilleri mevcut ampirik formül ve şekiller ile bulunan değerler, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat mühendisliği Bölümü Hidrolik laboratuvarında bulunan düzenek üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır.

Bu tezin 1. Bölümde; tez konusu hakkında ve açık kanallarda katı madde taşınması hakkında genel bilgiler verilmekte ve bu konu hakkında geçmiş yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar anlatılmaktadır.

2. Bölümde Katı maddenin karakteristikleri ile ilgili genel bilgiler verilmekte, taban malzemesini harekete başlaması için mevcut yaklaşımlar verilmekte ve taban şekilleri oluşum teorisi hakkında geniş bilgi verilmektedir.

3. Bölümde; deney düzeneği ve ölçüm teknikleri hakkında bilgiler verilmektedir.

4. Bölümde; Deneysel sonuçlar sunulmaktadır.

5. Bölümde Deneysel sonuçlar literatürdeki bağıntılar ışığında değerlendirilmekte ve konu ile ilgili diğer araştırma sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlanmaktadır.

6. Bölüm Sonuç ve önerileri içermektedir.

1.3 Geçmişte Yapılan Bilimsel Çalışmalar

Hareketli kanallarda katı madde taşınımı sonucu taban şekilleri oluşmaktadır ve bu taban şekilleri erozyon ve depolama şeklinde olduğundan akım hidroliğini de etkilediğinden uzun yıllar çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda çözüm teknikleri kullanılmaya çalışılmaktadır.

Engel, (2002), , tarafından suyun hızı, katı madde çapı, akım derinliği ve suyun sıcaklığı gibi parametreler taban şekilleri oluşumunda kullanılmıştır ve birçok deneysel çalışmalarda veri olarak kaydedilmiştir. Yapılan deneylerde katı madde üzerinden geçen akım sonucunda tabanda kum dalgacıkları, kumul, düzgün taban ve ters kumulların oluşumunun sınıflandırılması için birtakım yaklaşık sınıflandırmalar yapılmıştır. Bunun için ise taban şekilleri sınıflandırılmasında (Southard ve Boguchwal, 1990) tarafından yapılan sınıflandırılma kullanılmıştır. Deneylerinde 0,05 mm ile 7 mm arasındaki dane çapına, 0,015 m ile 1,5 m arasında akım derinliğine ve 0,2 m/s ile 2 m/s arasında akış hızına ulaşmıştır. Yaptığı çalışmalarda kum dalgacıklarından kumul taban şekline geçerken neden olan özel problemler araştırılmıştır. Southard (1991), suyun farklı sıcaklıklarda aynı akım özelliklerine sahip bir deneyde 0°C 'de oluşan taban şekillerinin uzunluğunun 30°C 'de oluşan taban şeklinden 1,7 kat daha büyük ve hızın ise 1,3 kat daha hızlı olduğu ifade etmiştir..

Talebbeydokhti ve diğerleri (2006) ne göre, Akış direnci su yüzeyi seviyesinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Özellikle kumul taban şekli oluşumlarında toplam pürüzlülük önemli bir etkiye sahiptir. Bu makalede laboratuvar çalışmalarında kanal yatağındaki kum içinde kumulun geometrisi ve onun kanal tabanına yaptığı toplam pürüzlülük hakkında araştırmalar yapılmıştır. Bu deneyler Shiraz üniversitesi hidrolik laboratuvarı içinde deney kanalında gerçekleştirilmiştir. Kumul boyutları ve kumula etkileyen boyutlu parametreler arasında basit ilişkiler araştırılmıştır ve önceki metotlarla yeni veriler kıyaslanmıştır. Deney kanalı 30 m uzunluğunda 1 m genişliğinde dikdörtgen bir beton kanaldan oluşmaktadır. 5,5 m uzunluğunda ve 0,5 m genişliğinde bir kumul modeli oluşturulup kanaldan akım geçirilerek kanaldaki

taban şeklinin kanala etkisine bakılmıştır. Kum özgül ağırlığı $2,65 \text{ g/cm}^3$ dane çapları $0,3-0,5-0,75$ ve $1,25 \text{ mm}$ 'dir. Akım pompa ile sağlanmış ve maksimum debi 80 l/s ve sirkülasyon mansaptan membaya bir tank ile sağlanmıştır. Oluşan kumulların yükseklikleri ve uzunlukları ve su yüzeyi eğimi ölçülmüştür. ve birkaç formül üretilmiştir ve kumulun yüksekliği denklem 1.1 ile ifade edilmiştir.

$$\frac{\Delta_d}{h} = 0,041 \cdot \left(\frac{d_{50}}{h}\right) \cdot (Fr)^{0,4466} \quad (1.1)$$

Kumul uzunluğu için ise denklem 1.2 verilmiştir.

$$\frac{\lambda_d}{h} = 4,5 \quad (1.2)$$

Carling, (1999) çakıl kumullara ender olarak görüldüğünü belirtmiştir. literatürdeki veriler ışığında laboratuvar ortamında dane çapı $28,6 \text{ mm}$ 'ye kadar olan sedimentler durumunda kumullarla karşılaştığı, arazideki gözlemlerde ise 60 mm 'ye kadar olan daneler için kumulların oluştuğu ifade etmektedir. Kumul uzunluklarının $0,6 \text{ m}$ ile 100 m arasında değiştiğini; kumul yüksekliklerinin ise $0,1$ ile 16 m arasında değiştiğini belirtmektedir. Kumulların Froude sayısının $0,75$ 'e kadar olan değerlerinde oluştuğu ifade edilmiştir.

Carling ve diğerleri (2002), çalışmasında kumullardan ters kumullara geçiş ince çakıllı katı maddede incelenmiştir. Deneylerde $Fr < 0,84$ 'den küçük değerlerde ve göreceli derinlik (h/d_{50}) 'nin büyük değerlerinde geçiş taban şekilleri oluşmaktadır. Froude sayısı kritik rejim değerine yaklaştıkça ters kumullar oluştuğu ve deneylerde ters kumulların membaya doğru değil mansaba doğru hareket ettiği anlatılmıştır.

Kuhnle ve diğerleri (2006), Laboratuvar deneyleriyle kum çakıl taban malzemesiyle oluşan taban şekilleri incelenmiştir. Ortalama dane çapının akış derinliğine oranı ile kayma gerilmesinin kritik kayma gerilmesinin oranı kıyaslanıp taban şekillerinin oluşumu için gereken süre, taban şeklinin yükseklikleri ve uzunlukları deneylerden elde edilmiştir. Aynı zamanda taban şekilleri sonucunda oluşan taban yükünün hesabı yapılmıştır. Deneylerde kullanılan dane çapı $8,3 \text{ mm}$ ile $1,82 \text{ mm}$ arasındadır. Laboratuarda yapılan deneylerde gerçek alanda yapılmış çalışmalardaki aynı parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler akış derinliğinin

dane çapına oranında, kayma gerilmesinin kritik kayma gerilmesine oranında taban şekilleri oluşumu ve taban yükü taşınımında kıyaslanmıştır. Taban şekilleri oluşan taban şekillerinin yüksekliği ve uzunluğuna göre sınıflandırılmıştır. Deneysel kanal 15,2 m uzunluğunda 0,356 m genişliğinde 0,457 m derinliğindedir. Su derinliği 0,18 m'dir yapılan çalışmalar Southard ve Boguchwal, (1990) tarafından hazırlanan sınıflandırmayla kıyaslanmıştır.

Carling (1999) farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneyler sonunda elde edilen taban şekillerinin Froude sayısına ve dane çapına bağlı olarak sınıflandırmasını yapmış olup söz konusu çalışmaların özeti Tablo 1.1 ve boyutsuz kayma gerilmesi cinsinden sonuçlar Tablo 1.2'de verilmektedir.

Tablo 1.1 Froude sayısına ve Dane çapına bağlı olarak geçmişte yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular (Carling,1999).

Reference	Source	Froude number Fr (-)	Grain size D ₅₀ (mm)	Bedform
				<u>2-D Dunes</u>
Menard (1950)	Theory	<1.0	8-20	2-D Dunes
Baker (1973)	Theory	0.5-0.9	8-50	2-D Dunes
Carling (1996a)	Theory	0.32-0.40	32	2-D Dunes
Fahnestock et al. (1969)	Field	<0.59	2.45	Dunes
Ritter and Blakley (1986)	Field	0.40	c.2+	Dunes
Pitlick (1992)	Field	0.75	16	Dunes
Tsubaki et al. (1953)	Field	0.43-0.46	2.26	Dunes
Harrison (1950)	Flume	0.75	1.1; 1.3	Equilibrium 2-D Dunes
Dinehart (1992a)	Field	0.45-0.70	33	2 and 3-D to transition
				<u>3-D Dunes</u>
Galay (1967)	Field	0.29-0.37	c.38	3-D Dunes
Hubbell et al. (1987)	Flume	0.34-0.73	2.1; 6.5; 23.5	Incipient to 3-D Dunes
Gomez et al. (1989)	Flume	0.73-0.75	3.97; 23.5	Incipient to 3-D Dunes
				<u>Transitional</u>
Gilbert (1914)	Flume	0.97-1.28	3.17	Transitional bedforms
Ikeda (1983)	Flume	0.78-0.80	4.3; 6.4	Low-relief dunes
				<u>Antidunes</u>
Alexander and Fielding (1997)	Field	0.94	30	Large antidunes (?)
Coxon et al. (1996)	Estimate	0.94-1.05	16	Antidunes (?) in cobble/boulder fraction
Pitlick (1992)	Field	0.90-1.07	8-16	Antidunes
Ikeda (1983)	Flume	0.78-1.33	6.4	Antidunes
Marion & Fraccarollo (1997)	Flume	0.94	1	Antidunes in coarser fractions (4.3 mm)
Shaw & Kellerhals (1987)	Flume	0.82-1.32	8	Antidunes
		>1.32	8	USPB
Smart & Jaeggi (1983)	Flume	1.06-3.11	2-10.5	Antidunes
Whittaker & Jaeggi (1982)	Flume	0.93-1.76	18	Antidunes

Tablo 1.2 Boyutsuz kayma gerilmesinin taban şekilleri ile bağlantısının geçmişte yapılan çalışmaları (Carling,1999).

Reference	Grain size D ₅₀ (mm)	Shear stress $\tau_c^{(a)}$	Shear Stress $\tau_{LSPB}^{(b)}$	Shear Stress $\tau_{LSPB}^{(c)}$	Shear Stress $\tau_{USPB/antidunes}^{(d)}$	Comments on bedforms present
Wilcock (1992)	5	0.03–0.059				LSPB
Wilcock (1992)	2.6	0.071				LSPB
Dietrich et al. (1989)	3.7		0.08–0.09			Bedload sheets
Bennett & Bridge (1995)	1.8		0.613–0.81			Bedload sheets
Bennett & Bridge (1995)	1.9		0.053			Bedload sheets
Bennett & Bridge (1995)	2		0.040–0.074			Bedload sheets
Hubbell et al. (1987), Gomez (1988), Gomez et al. (1989)	23.5	0.041 0.045	0.045–0.080			Bed undulations (Bedload sheets?)
Baker (1973, 1978)	8–50 ^(e)		0.10 ^(f)			Large Quaternary 2-D dunes
Dinehart (1992a)	33		0.11 (0.19–0.20)	0.25	0.3 (USPB)	Data in parentheses = well-formed 2- and 3-D dunes
Dyer (1972), Langhorne et al. (1986)	16	0.043	>0.08		0.31	Measured on dune crest
Hubbell et al. (1987)	2.1		0.13–0.21			Well formed dunes
Hubbell et al. (1987)	6.5		0.047–0.136			Less well-formed dunes
Kuhle & Southard (1990)	3.03		0.139–0.151			Low-relief dunes
Gilbert (1914)	3.17		0.078–0.178			Low-relief dunes (transitional?)
Gomez (1988), Gomez et al. (1989)	3.97		0.13–0.151			Small dunes
Meyer-Peter & Müller (1948)	5.21		0.125–0.157			'Short high banks and sheds'
Meyer-Peter & Müller (1948)	28.65		0.095–0.105			Flat bedforms
Meyer-Peter & Müller (1948)	28.65		0.115–0.15			Steeper flat bedforms
Pitlick (1992)	16		0.2			Dunes
Wilcock (1992)	2.6		0.1–0.11		0.08–0.20	Low-relief dunes
Ikeda (1983)	6.4			0.05–0.07	>0.35	Low-relief transitional dunes/antidunes
Carling (1990)	15				0.31	Transition to USPB on artificial dune crest
Marion & Fraccarollo (1997)	c.1 ^(g)				0.21–0.45	Antidunes in coarser fraction ~ 4.7 mm
Pitlick (1992)	8–26 ^(h)					Antidunes
Shaw & Kellerhals (1978)	8				0.275–1.2	Antidunes
Shaw & Kellerhals (1978)	8				>1.2	USPB
Smart & Jaeggi (1983)	2–10.5 ⁽ⁱ⁾				0.18–2.54	Antidunes
Whittaker & Jaeggi (1982)	18				0.613–0.851	Antidunes

^(a) Threshold of motion of LSPB; ^(b) Data range for sheets or dunes; ^(c) Transitional (diminished) bedforms; ^(d) Dune/antidune threshold, or range of values for observed USPB/antidunes; ^(e) Range of grain sizes in single distribution; ^(f) Step-backwater calculation; ^(g) Mid-point in bimodal mix; ^(h) Range of median for seven separate grain size populations; ⁽ⁱ⁾ Range of median for four separate grain size populations.

Robert ve Uhlman (2001), Tarafından yapılan deneysel çalışmalarda Kum dalgacıklarından kumullara geçişte tabanda oluşan evreler araştırılmıştır. Akım hızı artırıldığında; başlangıçta taban düzgün iken yavaşça 2 boyutlu kum dalgacıklarına dönüşmektedir. Akım hızı daha da artırılırsa 2 boyutlu kum dalgacıklarından düzensiz kum dalgacıkları oluşmuştur. Hız daha da artırıldığında kumullara geçiş belirlenmiştir. Her bir taban yüzeyi üzerinde akım karakteristiklerini bulmak için Doppler velocimeter kullanılmıştır. Sonuç olarak bu taban şekillerinin konturları belirlenmiş ve hangi akımda oluştuğu sonucuna varılmıştır. Türbülans yoğunluğu ve Reynolds gerilmeleri geçiş sırasında yavaşça artmaktadır. Deneylerdeki 8 m uzunluğundaki kanal 60 cm genişliğinde 50 cm derinliğinde yanları pleksiglasstan yapılmıştır. Kanal tabanına 12-15cm kalınlığında ortalama dane çapı 0,4 mm olan malzeme serilmiştir. Yapılan deneylerde kum dalgacıklarından kumullara geçerkenki deney sonuçları ise sırasıyla;

2D kum dalgacıklarının oluşumunda yapılan deneyde; su derinliği: 8,41 cm, hız: 32,3 cm/s, debi: 16,3 lt/s, taban şeklinin yüksekliği: 12 mm'dir.

Düzensiz kum dalgacıkları oluşumunda ise; su derinliği:11,7cm, hız:44 cm/s, debi:30,9 lt/s, taban şekli yüksekliği:25mm

Kumulların oluşumunda ise; su derinliği: 11,4 cm, hız: 55,8 cm/s, debi: 38,1 lt/s ve taban şekli yüksekliği 36,5 mm ölçülmüştür.

Ikeda ve Asce (2010), teorik ve ampirik birçok formül ile, dönüşümlü çubukların dalga uzunluklarını hesaplamayı amaçlamışlardır. Bu formüller çalışanlar tarafından laboratuarlarda test edilmiştir. Bu dönüşümlü çubukların sağlanmasında geçerli olan tek parametre Froude sayısının 0,8'den büyük olmasıdır. ve deneyler sonunda elde edilen dönüşümlü çubukların dalga boyları ile ampirik olarak bağıntılar elde edilmiştir. Bu formüller gerçek nehirlerde de uygulanmıştır. Bu çubukların menderes çizen nehirlerde çok yaygın olduğu görülmüştür ve çubuklar; tek sıralı çubuklar, çift sıralı çubuklar ve iç içe girmiş çubuklar olarak 3'e ayrılmıştır. Çalışmalarda tek sıralı dönüşümlü çubuklar incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda kanal genişliği(B):91,4 cm ile 400 cm arasındadır. Hidrolik değerlerde ise Froude sayısı $0,13 \leq Fr \leq 1,98$ arasında boyutsuz kayma gerilmesi $0,051 < \tau_* < 11,5$, Reynold sayısı $1510 < Re < 3,13.10^6$, göreceli derinlik $3,5 < \frac{B}{h} < 60$ ve göreceli pürüzlülük ise $3,76 < \frac{h}{d_{50}} < 422$ olarak belirlenmiştir. Froude sayısının 0,8'den büyük değerlerinde dalga boyu denklemi (1,4)'deki verilen bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{\lambda}{B} = 5,3 \cdot \left(\frac{B}{h}\right)^{0,55} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-0,45} \quad (1,4)$$

Da Silva (2006), 'On the Initiation of Meandering and the Subsequent Plan-Development of Meander Loops' başlıklı çalışmada taban şekillerinin yatay ve dikey türbülansın etkileri ile oluştuğunu ve menderes çizen kanallarda oluştuğunu belirtmiştir. Yatay türbülansla, B genişlikli kanalda oluşan dönüşümlü çubukların $\lambda = 6B$ bağıntısı ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Düşey türbülans su derinliğinin etkisiyle kumul taban şeklini oluşturmakta ve $\lambda = 6.h$ bağıntısı ile uyum olduğu belirtilmektedir.

Yalın (1964,1972), çalışmalarında taban şekilleri konusunda boyut analizine ilave olarak yaptığı deneylerde kanalın genişliği 0,65 m olup 18 m uzunluğundadır. Kullanılan dane çapı 0,14 mm ile 2,45 mm arasındadır. Yapılan çalışmalar sayesinde kum dalgacıkları uzunlukları, dane çapının 1000 katı kadardır. Kumul taban şeklinin uzunluğu ise su yüksekliğinin 6,3 katı olduğunu ampirik denklemlerle belirtmiştir.

Allen (1968) deneysel çalışmalarında kum dalgacıkları taban şekilleriyle uğraşmıştır. Kullanılan dane çapı 0,14 mm'dir. Arazi ölçümü boyunca ortalama akış derinliği ve akış hızı 12,2 m ve 0,50 m/s'dir. Yapılan araştırmalarda; Kum dalgacıklarının uzunluğu ve yüksekliğinin su derinliğine bağlı olduğunu belirlemiştir.

Van Rijn, (1993) deneylerinde taban şekillerinin akım özelliklerine ve dane çapına bağlı olarak oluştuğunu ve akım rejiminin önemini anlatmıştır. Küçük akım rejiminde taban şekilleri 3'e ayrılmaktadır. Mini kum dalgacıkları, Mega kum dalgacıkları ve kumullardır. Ortalama dane çapı 0,19 ile 1,35 mm arasındadır. akım derinliği 0,10 ile 0,49m arasında, akış hızı ise 0,34 m/s ile 1,17 m/s arasındadır. Kumul taban şekli oluşumunda kumul uzunluğu su derinliğinin 7,3 katı kadar olduğunu belirlemiş ve kum dalgacıkları için ampirik bağıntılar elde etmiştir.

BÖLÜM İKİ

TABAN MALZEMESİNİN HAREKETE BAŞLAMASI VE TABAN ŞEKİLLERİNİN OLUŞUMU İLE İLGİLİ TEORİK BAKIŞ

2.1 Katı Madde Karakteristikleri

Dane çapı, katı maddenin şekli, özgül kütlesi, granülometri eğrisi gibi özellikler katı maddeyi tanımlayan parametreler olup, aşağıda kısaca özetlenmektedir.

Dane Çapı: Katı maddenin en önemli özelliklerindedir. Danelerin şekli çok farklılık gösterdiği için dane çapı tanımı üç farklı şekilde yapılabilmektedir.

- 1.Elek çapı: Danelerin geçebileceği eleğin çapıdır.
- 2.Nominal çap: Hacmi küreninkine eşit olan dane çapıdır.
- 3.Katı madde çapı: Aynı akışkan içerisinde çökme hızı ve özgül ağırlığı daneninkine eşit olan kürenin çapıdır.

Dane Şekli: Dane şekli şekil faktörü yardımıyla dile getirilmekte olup, Şekil

Faktörü: $\text{ŞF} = \frac{c}{\sqrt{a.b}}$ eşitliği ile tanımlanmakta, a,b ve c danenin birbirine dik eksen

eksenler üzerindeki sırası ile en uzun, orta, ve en kısa boyutlarını simgelemektedir.

Katı Maddenin Özgül Kütlesi(ρ_s): Birim hacimdeki katı maddenin kütlesi (yoğunluk) olup kum için ortalama 2650 kg/m^3 mertebesindedir.

Katı Maddenin Özgül Ağırlığı(γ_s): Katı maddenin birim hacim ağırlığı olup

$\gamma_s = \rho_s \cdot g$ eşitliğinden bulunan değeri 2,45-2,65 arasında değişmektedir.

Katı Maddenin Su İçindeki Relatif Özgül Kütlesi veya Özgül ağırlığı (Δ):

Boyutsuz bir büyüklük olup ρ suyun yoğunluğu olmak üzere, $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$

şekildeki ifadeden de görülebileceği gibi katı maddenin su içindeki özgül kütlesi

(veya özgül ağırlığının) suyun özgül kütlesi (yada özgül ağırlığına) oranına karşılık gelmektedir.

Çökme Hızı(v_f): Başlangıçta hızı sıfır olan bir dane durgun bir suya bırakıldığında hızı gittikçe artmaktadır. Bu daneye etkiyen başlıca kuvvetler, aşağıya doğru etkiyen su içindeki tane ağırlığı ve hareket yönüne ters yönde etkiyen direnç kuvvetidir. Direnç kuvveti hızın karesiyle ters orantılı olduğundan, başlangıçta sıfır olan direnç, hız artıkça büyümektedir. Bir müddet sonra direnç kuvveti su içindeki ağırlığa eşit olur. Bu durumda daneye etkiyen net kuvvet sıfır olacağından ivme de sıfır olur. Bu andan itibaren dane sabit hızla çökmeye devam eder. Bu hıza dane çökme hızı denir.

Granülometri eğrisi: Malzeme çapı yatayda, elekten geçen malzemenin yüzdesi düşeyde gösterilerek malzemenin granülometri eğrisi çizilir. Granülometri eğrisi dane dağılımının histogramının kümülatif toplamından elde edilir.

Akarsu morfolojisi katı madde taşınımı ve hidroliği için D_{90} , D_{65} , D_{35} gibi çaplar önem taşır. D_{50} aynı zamanda ortalama dane çapıdır.

D_g , geometrik ortalama çap ve σ_g ise geometrik standart sapma olmak üzere

$$D_g = (D_{84} \cdot D_{16})^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$\sigma_g = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{84}}{D_{16}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad (2.2)$$

eşitliklerinden hesaplanabilmektedir. Mühendislik uygulamalarda çok kullanılan geometrik standart sapma σ_g , çakıl tabanlı bir akarsuda yaklaşık olarak 3.5-4.0 aralığında değer almaktadır.

Dane dağılımının üniform veya üniform olmayan (geniş dağılımlı) malzeme olarak tasnif edilmesini sağlayan Üniformluk katsayısı, C_u , şöyle tanımlanmaktadır:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.3)$$

Üniformluk katsayısı $C_u > 3.0$ olması durumunda taban malzemesinin geniş dağılımlı olduğu kabul edilmektedir.

Porozite(n): Birim hacimdeki bir zeminde boşluk hacmi, V_v ' nin toplam hacim V 'ye oranı şeklinde tanımlanmakta olup zeminin tane büyüklüğü, şekli ve sıkışma derecesine bağlıdır.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.4)$$

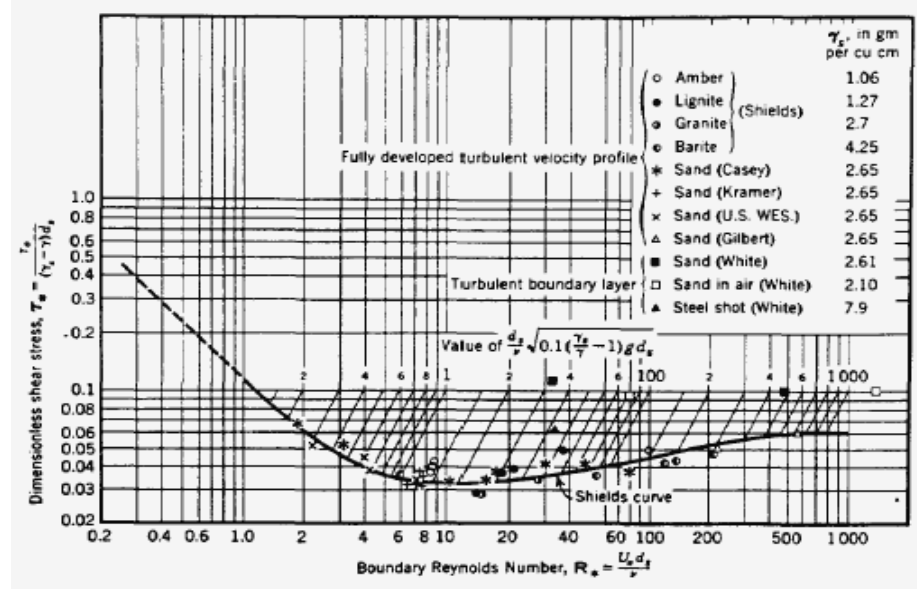
2.2 Taban Malzemesinin Harekete Başlaması Üzerine Mevcut Yaklaşımlar

Laboratuar ortamında yapılan deneylerde γ sıvının özgül ağırlığı R hidrolik yarıçap ve S_0 kanal taban eğimi olmak üzere kanal yatağı kayma gerilmesi $\tau_0 = \gamma.R.S_0$ şeklinde tanımlanmaktadır. Başlangıçta hareketsiz olan parçacık τ_0 kayma gerilmesinin artarak kritik τ_c değerine ulaşması durumunda hareket başlamaktadır. τ_c 'den daha büyük değerlerde hareket var olmaktadır (Subramanya, 2006)

Her ne kadar üniform olmayan malzeme için de ilgili formül ve yöntemler mevcut (Wu, 2007) ise de bu çalışmada üniform malzeme için verilen yaklaşımlar kullanılmıştır.

2.2.1 Shields Yaklaşımı (1936)

Danelerin harekete başladığı kritik noktayı belirlemek için Shields, kendi adıyla anılan ve Şekil 2.1'de verilen Shields eğrisini geliştirmiştir. Bu şeklin yatay ve düşey eksenlerinde sırasıyla denklem (2.5) ve (2.6) ile verilen tane Reynolds sayısı, Re_* ile boyutsuz kayma gerilmesi, τ_* bulunmaktadır. Kayma hızı, $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ denklem (2.7) ile ifade edilebilmektedir. Bu bağıntılarda d_s : katı maddenin d_{50} çapını ν kinematik viskoziteyi simgelemektedir.



Şekil 2.1 Shields Eğrisi (Shields 1936)

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad (2.5)$$

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{\gamma \Delta d} = \frac{u_*^2}{g \Delta d} \quad (2.6)$$

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot S_0} \quad (2.7)$$

Denklem (2.8) ile tanımlanan parametre kullanılarak Shields eğrisinin kullanımı kolaylaştırılmıştır (Vanoni, 2006).

$$p = \frac{d_s}{\nu} [0,1 \Delta g d_s] \quad (2.8)$$

2.2.2 Yang Yaklaşımı (1973)

Yang (1973) farklı araştırmacıların laboratuvar verilerini toplayarak danelerin harekete başlaması hızı V_{cr} (m/sn) ile v_f (m/sn) çökme hızı arasında aşağıdaki

bağıntıları oluşturmuştur. Bu denklemlerde metrik sistemdeki birimler kullanılmaktadır.

$$\frac{V_{cr}}{v_f} = \frac{2,5}{\log(u_* d_s / \nu) - 0,06} + 0,06 \text{ ise } 1,2 < \frac{u_* d_s}{\nu} < 70 \quad (2.9)$$

$$\frac{V_{cr}}{v_f} = 2,05 \quad \text{ise } 70 \leq \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (2.10)$$

Yang (1996) çökelme hızının denklem (2.11) ile belirlenebileceğini ifade edilmiştir.

$$v_f = \begin{cases} \frac{1}{18} \frac{(\gamma_s - \gamma) g d_s^2}{\gamma \nu} & \left\{ \begin{array}{l} d_s \leq 0,1mm \\ 0,1mm < d_s \leq 2,0mm \\ d_s > 2,0mm \end{array} \right. \\ F \left[\frac{g d_s (\gamma_s - \gamma)}{\gamma} \right]^{0,5} \text{ eğer} \\ 3,32 \sqrt{d_s} \end{cases} \quad (2.11)$$

Burada boyutsuz F katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$F = \begin{cases} \left[\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2 \gamma}{g d_s^3 (\gamma_s - \gamma)} \right]^{0,5} - \left[\frac{36\nu^2 \gamma}{g d_s^3 (\gamma_s - \gamma)} \right]^{0,5} \text{ eğer} \\ F = 0,79 \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} 0,1mm < ds < 1.0mm \\ 1.0mm < ds < 2.0mm \end{array} \right. \quad (2.12)$$

2.2.3 Meyer, Peter ve Müller Yaklaşımı (1948)

Danelerin hareketinin başladığı sınır durumdaki dane çapı için denklem (2.13) ile verilen bağıntıyı önermişlerdir.

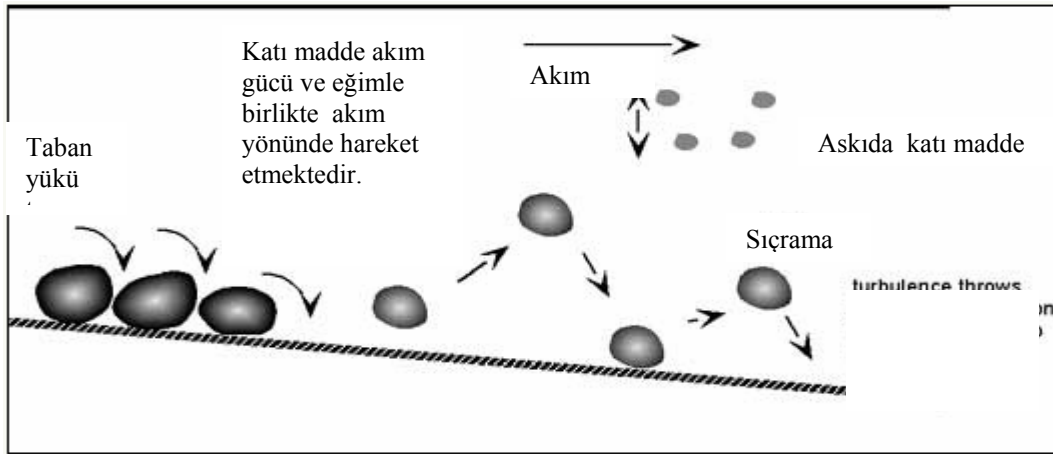
$$d_s = \frac{S_0 H}{K_1 (n / d_{90}^{1/6})^{3/2}} \quad (2.13)$$

Burada K_1 değeri 0,058 alınan sabit bir katsayı, n Manning pürüzlülük katsayısı, d_{90} yüzde 90'ı elekten geçen çap (m)'tir.

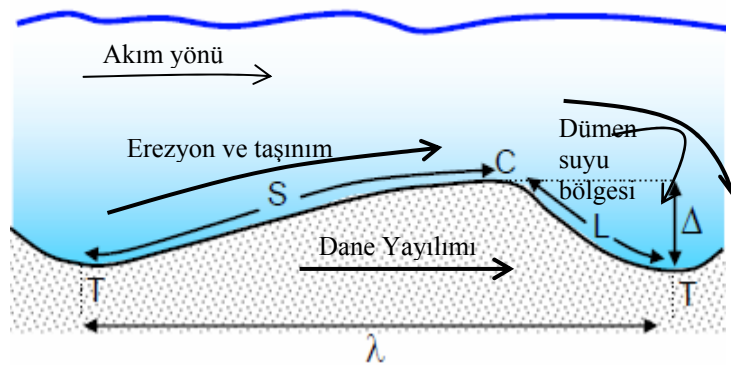
2.3 Taban Şekilleri ve Oluşumları

2.3.1 Farklı Taban Şekilleri Tanımları

Taban kayma gerilmesi (τ_0), kritik sürüklenme gerilmesinin (τ_c) üstündeki bir değere çıktığı zaman cidardaki daneler sürüklenmeye başlar. Sürüntü maddesi akarsu tabanında hareket eden yuvarlanan, kayan ve sıçrayan küçük parçalardan oluşur Yuvarlanarak, kayarak sıçrayarak (Şekil 2.2, Şekil 2.3) hareket halinde bulunan bu daneler akış hızı yavaşlayınca bir süre sonra depolanır .

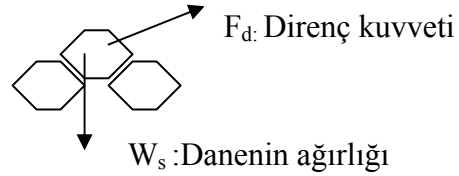


Şekil 2.2 Katı madde parçacıklarının hareket halleri. (Subramanya, 1998)



Şekil 2.3 Kanal tabanında akım sırasında katı madde birikmesi, erozyonu ve taşınımı sonucu taban şeklinin oluşması C: dalga tepesi S: Sirt Bölgesi L: dümen suyu (iz) bölgesi (Kuytu kısım) Δ : Taban şekli yüksekliği λ : taban şekli uzunluğu (Reineck and Singh, 1980)

Akarsu yatağındaki kohezyonsuz bir danenin dengesi düşünülürse, bu daneye etki eden kuvvetler parçanın su içindeki ağırlığı ve daneye etki eden direnç kuvvetidir. Daneye etki eden direnç kuvveti F_d ve dengedeki danenin ağırlığı ise W_s 'dir (Şekil 2.4). Katı madde hareketinin mekaniği oldukça fazla sayıdaki fiziksel büyüklük ile tanımlanmakta olup bu büyüklükler Tablo 2.1 'de verilmektedir (Özbek, 2006).



Şekil 2.4 Dengedeki dane

Tablo 2.1 Katı madde hareketine etki eden fiziksel büyüklükler (Özbek,2006).

Katı madde ile ilgili büyüklükler:	Özgül kütle Dane çapı Sürüntü mad. birim debisi	ρ_s d q_s
Akışkan ve akım ile ilgili büyüklükler:	Özgül kütle Viskosite Su derinliği Ortalama hız ve sürüklenme hızı	ρ μ h u, u_*
Katı madde ve Akışkan ile ilgili	Yerçekimi ivmesi	g

Bu parametreler arasındaki fonksiyonel ilişki

$$f(\rho_s, \rho, \nu, g, \Delta, u_*, q_s, h, d, S_0) = 0 \quad (2.14)$$

10-3=7 adet boyutsuz parametre ile katı maddenin hareketi anlatılabilmektedir.

'Buckingham π Teoremi' aracılığı ile boyut analizi yapıldığında ve bazı yaklaşımlar ile mevcut 7 boyutsuz parametreden en önemli olan 3 tanesi arasında

$$f(\text{Re}_*, \text{Fr}_*, \phi) = 0 \quad (2.15)$$

yazılabilmekte olup Re_* , Fr_* ve ϕ boyutsuz büyüklükleri sırasıyla dane sürüklenme Reynold sayısı ve dane sürüklenme Froude sayısı ve boyutsuz sürüntü maddesi debisini simgelemekte ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Re}_* = \frac{u_* \cdot d_{50}}{\nu} \quad (2.16)$$

$$Fr_* = \frac{u_*^2}{\Delta g d_{50}} \quad (2.17)$$

$$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{g \cdot \Delta d_{50}^3}} = 0 \quad (2.18)$$

ϕ = sürüntü maddesi debisini veren boyutsuz bir ifadedir.

q_s = birim hacimdeki sürüntü maddesi debisidir.

Acık kanal akımlarının sınıflandırılmasında sıkça kullanılan iki boyutsuz parametre; Atalet kuvvetlerinin vizkos kuvvetlerine oranını temsil eden Reynolds sayısı Re , ve atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranını ifade eden Froude sayısı Fr 'dir:.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (2.19)$$

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2.20)$$

Froude sayısı akımın rejimini belirlemekte olup sakın veya nehir rejimi ($Fr < 1$), kritik rejim ($Fr = 1$) ve sel rejimi ($Fr > 1$) durumlarına karşılık gelmektedir.

$Re \leq 500$ durumunda laminer akım, $Re \geq 12500$ durumunda ise tam türbülanslı akım söz konusu olduğu var sayılmakta olup açık kanallardaki akım genellikle türbülanslıdır.

Taban şekillerinin oluşumu açıklanırken harekete başlama anından itibaren yola çıkılmalıdır. Tabanı kohezyonsuz malzemeden oluşan bir akarsudaki türbülans şiddeti az, debisi düşük akımlarda, danelerin üzerine etkiyen sürüklenme ve kaldırma kuvveti gibi hidrodinamik kuvvetlerin bileşkesi daneyi yerinde tutmaya çalışan danenin su altındaki ağırlığından daha düşüktür. Artan debi veya hız nedeniyle hidrodinamik kuvvetler hızla artacağından (bu kuvvetler hızın karesiyle doğru orantılıdır.) danenin dengesi bozulur. akım şiddeti ve dane büyüklüğüne bağlı olarak tabanda hareket başlar. Şekil 2.5 'te tabanın alacağı başlıca şekiller gösterilmiştir.

Akım şiddetine göre dane ya hareket etmekte ya da depolanmaktadır. Tabanda dane hareketi başlangıcından sonra rasgele ve düzensiz taşınan malzeme tabanda kum dalgacıklarını oluşturur. Kum dalgacıklarının yükseklikleri az olduğu için su yüzü profilinde değişiklik yaratmaz. Kum dalgacıklarının mansabında oluşan çevrıntiler taban malzemesini tuttuğu için bu bölgede birikme olur ve dalgacıklar büyümeye başlar. Hızın daha da fazla artmasıyla bu dalgacıklar daha büyük ve tepeleri daha yuvarlak olarak gelişir ve kumullar oluşur. Kumullar kum dalgacıklarından daha büyük olduğu için su seviyesinde değişim olur. Nehir rejiminde oluşan kumullarda tepe noktası üzerinde su seviyesi alçalır. Düşük kotta ise yükselir. Kumulların tepesinde su derinliği azaldığı için akım hızı mesafe boyunca artacaktır. Hızın arttığı tepe bölgesinde erozyon oluşmaktadır. Hızın azaldığı ve çevrıntilerin olduğu tepenin mansabında ise malzeme birikmektedir. Bu durumda kumullar zamanla akım yönünde yükseklikleri azalır boyları büyüyerek yayılmaktadır. Bu durum kum dalgacıkları için de geçerlidir. Bu taban şekilleri akım hızından çok daha düşük hızlarla mansap yönüne ilerler. Taban şeklinin tepesindeki erozyon, mansabında birikme oluşturarak ilerleyen dalga hareketinin mansabındaki şevin dengesinin bozulması nedeniyle zamanla düzgün taban oluşturur. Akım hızının daha da artmasıyla Froude sayısı 1'e ulaşır ve geçer, tabanda yüzeyle aynı fazda olan dalgalar oluşur. Kum dalgasının tepesine doğru akım hızı azaldığından dolayı taban seviyesi yükselir. Böylece taban dalgası memba yönünde hareket etmeye başlar. Froude sayısı 1'den daha büyük olduğu durumlarda yüzey dalgası dikleşir ve kırılır. Memba yönünde hareket eden taban dalgalarına ters kumullar denir.

Taban şekillerine etki eden baskın parametreleri olan katı madde çapı, taban yatağı şekli ve eğimi, derinlik, hız, çökme hızı ve sıvı karakteristiklerine bağlı olarak tabanın farklı seviyelerinde deformasyon ve hareket oluşacaktır. Böylece; alüvyonlu kanaldaki temel taban şekilleri akış, Froude sayısı ve hareket yönüne bağlı olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 2.6).

Farklı durumlar için aşağıdaki taban şekilleri tanımlamaları yapılmaktadır.(Şekil 2.6)

* Küçük rejimli akımlar (Fr: 0,4-1 arasında)

a-Hareket olmayan düzgün taban (Flat bed)

b-Kum dalgacıkları (Ripples)

c- Kumullar veya Basamaklar (Dunes)

* Geçiş (Transition): Kritik rejim ($Fr=1$) olduğu zaman

a) Hareketli katı maddede düzgün taban (plane bed with sediment motion)

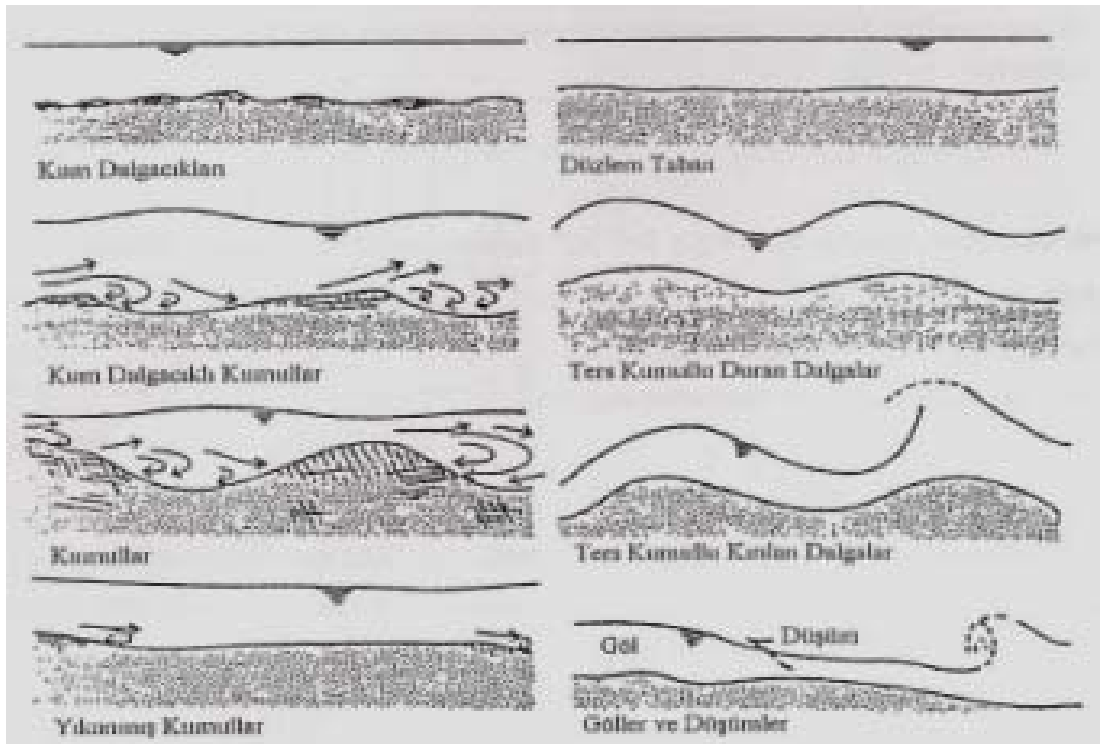
b) Durağan Dalga hareketi (Standing Wave)

* Sel rejimi ($Fr>1$) durumunda

a-Ters Basamaklar (Antidune)

b- Düşümler ve göller (Chutes and pools)

** Kanal genişliği mertebesinde veya daha büyük uzunluklu ve de akış ortalama derinliği mertebesinde yüksekliklere sahip taban şekilleri durumunda noktasal çubuklar (Point bars) Dönüşümlü çubuklar (Alternate bars), Enlemesine çubuklar (Trensvers bars) ve Yan kol çubukları (Tribütary bars) tanımlamaları yapılmaktadır.



Şekil 2.5 Akarsulardaki Taban Şekilleri (Vanoni, 1975)

Bed form (1)	Flow (2)	Bed form motion (3)	Comments (4)
Flat bed	No Flow (or $Fr \ll 1$)	NO	No sediment motion
Ripples	$Fr \ll 1$	D/S	Three-dimensional forms; observed also with air flows (e.g. sand ripples in a beach caused by wind)
Dunes	$Fr < 1$	D/S	Three-dimensional forms; sand dunes can also be caused by wind
Flat bed	$Fr \leq 1$	NO	Observed also with wind flow
Standing waves	$Fr = 1$	NO	Critical flow conditions; bed standing waves in phase with free-surface standing waves
Antidunes	$Fr > 1$	U/S	Supercritical flow with tumbling flow and hydraulic jump upstream of antidune crests
Chute-pools	$Fr > 1$	U/S	Very active antidunes
Step-pools	$Fr > 1$	-	Cascade of steps and pools; steps are often caused by rock bed

References: Henderson (1966) and Graf (1971).
 Notes: D/S = in downstream flow direction; Fr = Froude number; U/S = in upstream flow direction.

Şekil 2.6 Alüvyonlu kanaldaki temel taban şekillerinin akış forude sayısı ve hareket yönüne bağlı olarak sınıflandırılması (Henderson, (1966) and Graf, (1971))

2.3.2 Küçük Rejimli Akımlarda Taban Şekilleri

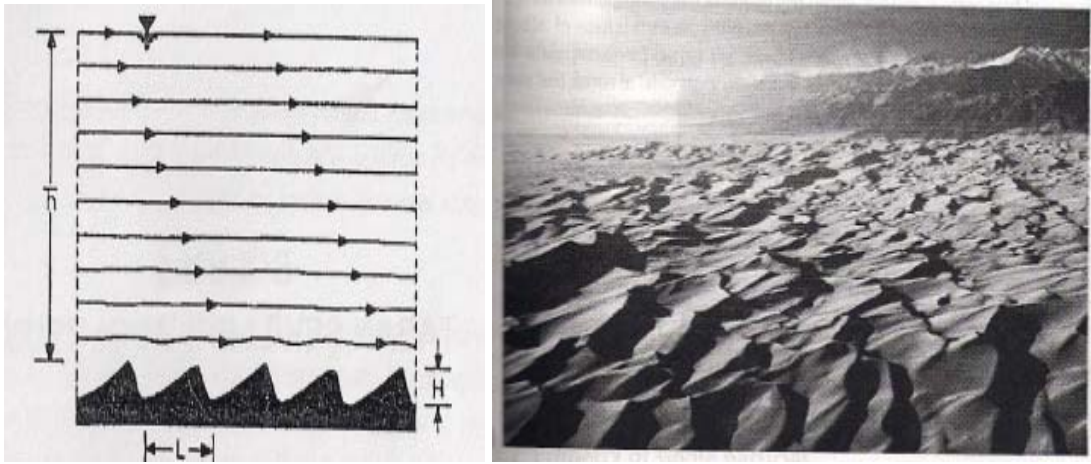
Froude sayısı 0,4-1 arasındaki değerlerden küçük olduğu zaman meydana gelen akımlardır.

2.3.2.1 Kum Dalgacıkları (Ripple)

Kayma gerilmesi τ_0 , Kritik kayma gerilmesinden τ_c 'den büyük olduğunda tabandaki katı madde hareket etmeye başlar ve yakın zamanda taban testere dişi şeklinde kum dalgacıkları ile kaplanır.(Şekil 2.7). Kum dalgacıklarının yüksekliği uzunluğundan yeterince küçüktür. Dalga boyları 5-15 cm civarındadır. yükseklikleri 1 cm mertebesindedir. Kum dalgacıkları dalga boyu L , su derinliğinden h 'dan çok küçüktür. Kum dalgacıklarının özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Subramanya, 1998):

- 0,05mm ile 0,6 mm arasındaki ince malzemeli kumlardan oluşmaktadır.
- Kumullara kıyasla daha simetriktir.
- Katı madde hareketinde büyük bir artış oluşmaz
- Yayılım (Katı madde hareketi) mansaba doğru olmaktadır.
- Zamanla katı madde birikimi artarak 3 boyutlu şekli oluştururlar.

- Su yüzeyi ve derinliğin kum dalgacıkları oluşumunda etkisi yoktur.
- Su yüzeyi gerçekte sakin ve düz kalmaktadır.
- Froude sayısı $Fr \ll 1$ den çok küçük olduğu durumlarda oluşabilmektedir.
- n Manning Pürüzlülük katsayısının $0,018 \leq n \leq 0,030$ arasında olduğu değerlerde ve f sürtünme katsayısının $0,056 \leq f \leq 0,163$ arasındaki değerlerinde görülebilmektedir. Kum dalgacıkları oluşurken sürtünme katsayısında kararlı bir artış görülmektedir.



Şekil 2.7 a) Kum dalgacıkları oluşumu $L \ll h$ (Furthböter, 1980) b) Kum dalgacıkları (Ripple)

Kum dalgacıkları kum tanelerini hareket ettirebilecek geçerli hızlarda oluşabilmektedir. Van Rijn (1993) 'e göre kum dalgacıkları mini kum dalgacıkları ve mega kum dalgacıkları olarak ikiye ayrılır. Mini kum dalgacıklarının uzunluğu su derinliğinden çok küçük iken mega kum dalgacıklarının uzunluğu aşağı yukarı su derinliğinin yarısı kadardır. Kum dalgacıklarının maksimum eğimi (Kum dalgacıklarının uzunluğunun yüksekliğine bölüdüğü zaman) yaklaşık olarak 0,2 'dir (Yalın, 1972). Akış hızı ve kayma gerilmesi artarsa kumul taban şekli oluşumu gerçekleşecektir.

Kum dalgacıkları konusunda birçok çalışma (Yalın (1964,1972), Allen (1968) ve Van Rijn (1993),...) yapılmış ve bu çalışmalarda kum dalgacıklarının boyutları hakkında bir bilgi edinilmiştir.

Yalın'a göre λ_r kum dalgacı uzunluğu ortalama dane çapı d_{50} 'ye bağlı olarak

$$\lambda_r = 1000.d_{50} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Allen Δ_r kum dalgacıkları yüksekliği ve λ_r kum dalgacığı uzunluğunun h su derinliğine bağlı olarak.

$$\frac{\Delta_r}{h} = 0,086.h^{0,19} \quad (2.22)$$

$$\lambda_r = h^{1,6} \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edildiğini belirtmektedir.

Van Rijn taban şekillerinin boyutlarının katı madde çapını bir fonksiyonu olduğunu ifade etmiştir. Büyük ve küçük akış hızlarında yaptığı deneylerde mini kum dalgacıkları durumunda T taşınım durumu parametresinin $T < 3$ ve d_* boyutsuz dane çapının $d_* < 10$ olduğunu gözlemlemiştir. T ve d_* parametreleri

$$T = \frac{\tau_*}{\tau_{*cr}} - 1 \quad (2.24)$$

$$d_* = \left[\frac{(\gamma_s / \gamma - 1) \times g \times d_{50}^3}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilmekte olup, Δ_{mir} kum dalgacığı yüksekliğinin d_{50} değerinin 50 ile 200 katı arasında değiştiğini, λ_{mir} uzunluklarının ise 500 ile 1000 katı mertebesinde olduğunu tespit etmiştir.

Mega kum dalgacıkları durumunda ise T taşınım durum parametresi $T < 10$ olduğunu gözlemlemiş ve yaptığı çalışmalar sonunda

$$\lambda_{mer} = 0,5.h \quad (2.26)$$

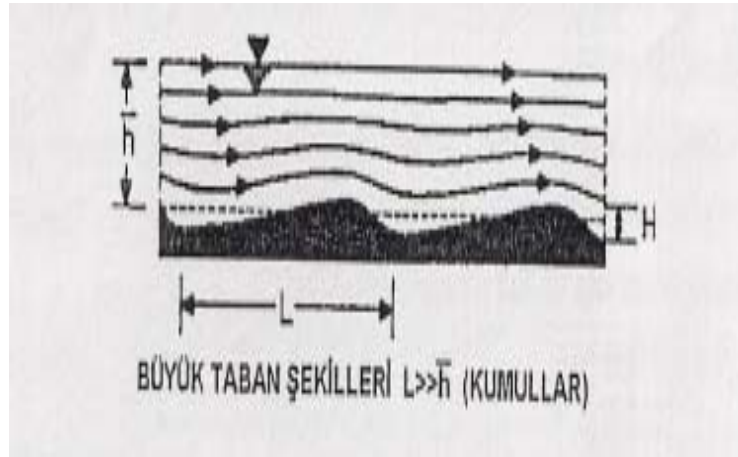
$$\frac{\Delta_{mer}}{h} = 0,02.(1 - e^{-0,1T}).(10 - T) \quad (2.27)$$

bağıntılarını bulmuştur.

2.3.2.2 Basamaklar veya Kumullar (Dunes)

Akım hızı ve kayma gerilmesi kanal tabanında oluşan kum dalgacıklarının üzerinde artıkça kum dalgacıkları büyüyerek kumul taban şeklini oluşturmaktadır (Şekil 2.8). Kumullar kum dalgacıklarından daha uzun ve daha geniştir. Üçgen şeklinedirler. Uzunlukları su derinliği ile alakalıdır ve birkaç katı büyüklüğündedir. ve kumul taban şekli girintili çıkıntılı olup artış veya azalışları su yüzeyindeki ile ters bir durum oluşturur. Kum dalgacıkları ve kumullar membaya doğru düzgün tabana dönüşmektedir. Katı madde taşınımı kum dalgacıkları durumundakinden daha fazladır ve kumul taban şeklinin mansaba doğru ilerleme hızı suyun hızından daha küçüktür. Kumulların özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir (Subramanya, 1998):

- Çok yaygındırlar.
- Asimetrik bir oluşumları vardır.
- Oluşumu su yüzeyinin dalgalılığı ve derinliği ile alakalıdır.
- Sürüklenme kuvvetine önemli bir katkı sağlamaktadır.
- Yayılımları mansaba doğrudur.
- Froude sayısı 1'den küçük ve yakındır. Akım nehir rejimindedir. Manning pürüzlülük katasıyısı n , $0,020 \leq n \leq 0,040$ arasındadır. Sürtünme katsayısı f ise $0,047 \leq f \leq 0,163$ arasındadır.



Şekil 2.8 Kumul taban şeklinin oluşumu (Furtböter, 1980)

Kum dalgacıkları ile kumulları arasında bir duruma karşılık gelen ve kum dalgacıklı kumullar olarak nitelenen taban şekli daha küçük kayma gerilmelerinde birkaç kum dalgacığının kumulların üst taraflarında birikmesiyle oluşmaktadır (Şekil 2.5).

Kumulların maksimum yükseklikleri su derinliğinin ortalama 0,4 katı kadardır. Uzunlukları ise su derinliğinin 6 yada 7 katı kadara ulaşabilmektedir.

Yalın'a (1964,1972) göre; λ_d kumul uzunluğu su derinliğine bağlı olarak

$$\lambda_d = 6,5.h \quad (2.28)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Kumulların uzunluğu ortalama dane çapından ve kumul yüksekliğinden oldukça büyük olup tahmini Δ_d kumul yüksekliğinin ise

$$\frac{\Delta_d}{h} = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\tau_{*cr}}{\tau_*}\right) \quad (2.29)$$

bağıntısından belirlenebileceği ifade edilmektedir.

Van Rijn (1984) kumulların uzunluğunun h akım derinliğine, kumul yüksekliklerinin ise; T taşınım durum parametresi, d_* boyutsuz dane çapı, d_{50} ortalama dane çapı ve h akım derinliğine bağlı olduğunu belirterek λ_d kumulların uzunluğu, Δ_d yüksekliği için

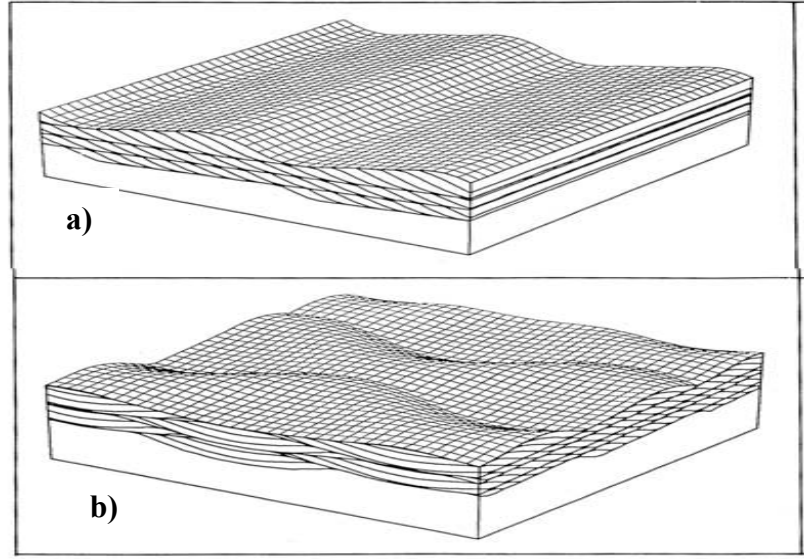
$$\lambda_d = 7,3.h \quad (2.30)$$

$$\frac{\Delta_d}{h} = 0,11 \cdot \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0,3} \cdot (1 - e^{-0,5T}) \cdot (25 - T) \quad (2.31)$$

ifadelerini önermiştir.

Maksimum kumul yüksekliği, akış derinliğinin 0,1 ile 0,2 katı kadara ulaşabilmektedir. T taşınım durum parametresinin ise kumullarda yaklaşık olarak 5 değerlerinde olduğu görülmüştür.

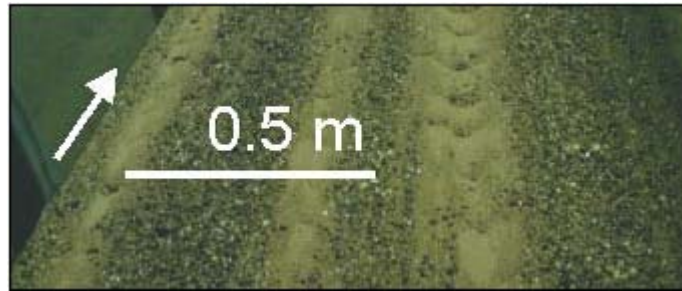
Ayrıca Kumullar 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.9). 2 boyutlu kumullar kanal genişliği boyunca oluşmakta iken 3 boyutlu kumullar ise yaklaşık düzgün aralıklarla kırılarak iç içe girmişlerdir ve çukurlar oluşmaktadır.



Şekil 2.9 Kumulların a) 2D ve b) 3D olarak gösterimi.

Literatürde Kum şeritleri (Sand Ribbons) ve Barchan Kumulları (Barchans Dunes) ve olarak adlandırılan taban şekillerinden bahsedilmektedir. (Kleinhans, 1990).

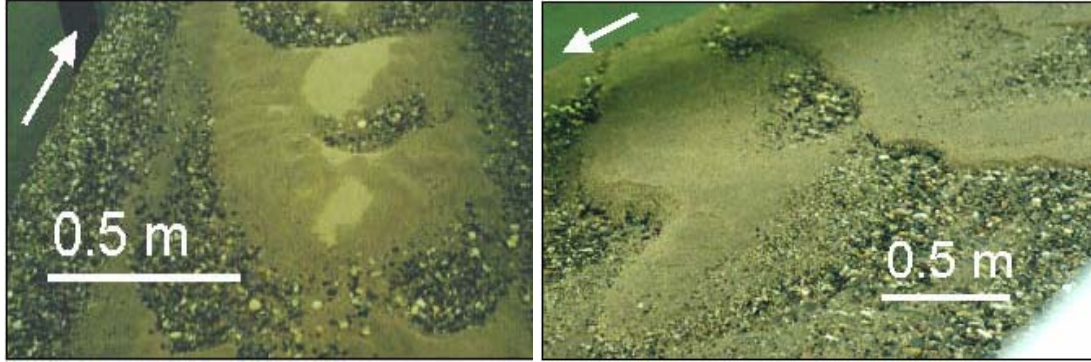
* *Kum Şeritleri*: Akışa paralel olarak kum dalgacıkları ve kumullar üzerinde bulunan taban şeklidir. Yeterli zaman ve yeterli süre olmadığında ve en önemlisi iki farklı dane çapı karıştırıldığında kalın dane çaplı malzeme altta zırh tabakası oluşturmakta ince malzeme ise üstte akım yönünde kum şeridi şeklinde taban şekli bir oluşum meydana getirmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Kum şeritleri (Kleinhans, 1990)

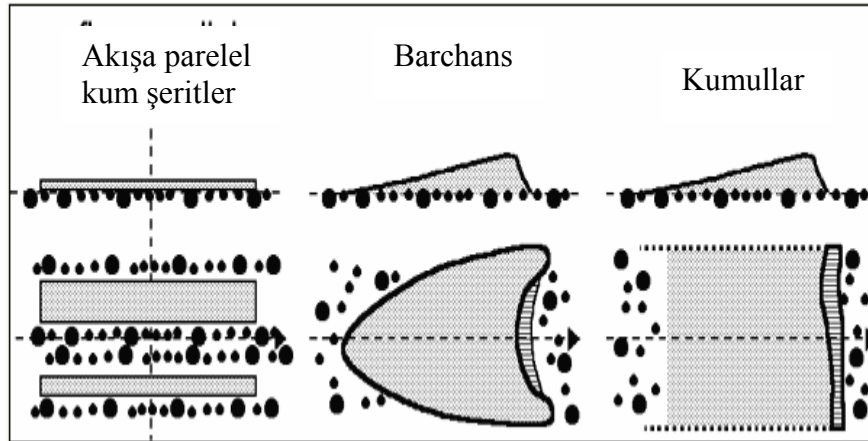
**Barchan Kumulları*: Sürekli kumul oluşturacak kadar yeterli katı madde olmadığı zaman barchan kumulları olarak adlandırılan taban şekilleri ile karşılaşmaktadır. Barchan sadece nehirlerde değil aynı zamanda çöllerde de oluşmaktadır (Hesp ve

Hasting 1998). Barchan kumullarının sahil kıyılarında da oluştuğunu ifade etmiştir. Yeterli katı madde bulunursa barchan kumulları normal kumullara dönüşürler. Barchan kumulları ile ilgili fotoğraflar Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.11 (a,b) Zırh tabakası üzerinde küçük barchan kumulları (Kleinhans,1990)

Şekil 2.12’de yukarıda bahsedilen taban şekilleri arasındaki farklılıkları gösteren krokileri yer almaktadır.



Şekil 2.12 Deneylerde gözlenen taban şekilleri tipleri (Kleinhans, 1990)

2.3.3. Geçiş Rejiminde (Transition) Taban Şekilleri

Geçiş rejimi büyük ve küçük akım rejimleri arasındaki şartlara karşılık gelir. Kayma gerilmeleri daha da artmaktadır. Akım hızının artmasıyla kumul genliği azalmakta uzunluğu artmaktadır. Bunun sonucunda zamanla taban düzleşmekte ve katı madde taşınımı daha da artmaktadır. Şekil 2.5’te yıkanmış kumullar (düz taban) ve ters kumullar durağan dalgalar (Standing wave) olarak adlandırılan taban şekilleri bu durumu yansıtmaktadır.

a) Katı madde hareketli düz taban (Plane bed with sediment motion) Kumul taban şekli geçiş (transition) durumuna yönelerek taban düzleşmeye başlayana kadar katı madde yatakta yıkanacaktır. Katı madde taşınımı kumul durumuna kıyasla çok daha fazla olacaktır. Akış kritik rejime yaklaşacak ve Froude sayısı 1' yaklaşacaktır. Manning pürüzlülük katsayısı $0,010 \leq n \leq 0,013$ 'dir. Pürüzlülük katsayısı $0,020 \leq f \leq 0,040$ arasındadır (Subramanya,1998).

b) Dalga Hareketi (Standing wave): Kayma gerilmesi daha da artıp Froude sayısı 1'i geçerse su yüzeyinde dalgalar oluşmaktadır. Bu oluşan dalgalarla simetrik biçimde oluşan kum dalgaları meydana gelmektedir. Su yüzeyi dalgaları kum dalgaları şeklinde olacaktır. Geçiş fazındaki taban şekli çok durağan değildir (Şekil 2.5'te ters kumullarda duran dalgalar hali).

2.3.4 Büyük Rejimli Akımlarda Taban Şekilleri

Froude sayısı 0,4-1 arasındaki değerlerden büyük olduğu zaman meydana gelen akımlardır (Özbek,2006). Bu akım rejiminde oluşan taban şekilleri yüksek akım hızında, düşük akım direncinde ve yüksek katı madde miktarı taşınımı ile karakterize edilir. Froude sayısı 1'den büyüktür. Büyük rejimli akımlardaki taban şekilleri ters kumullu kırılan dalgalar ile düşümler ve göller şeklinde nitelendirilmektedir.

2.3.4.1 Ters Kumullu Kırılan Dalgalar (Antidune-Breaking wave)

Kanaldaki kayma gerilmesi geçiş rejimindekinden daha da artarsa simetrik katı madde dalgaları membaya doğru yavaşça hareket etmeye başlar. Dalgalar yavaşça dikleşir ve sonra kırılırlar bu şekilde oluşan taban şekline ters kumullu kırılan dalgalar denir (Şekil 2.5). Bu taban şekillerinde katı madde hızlıca yer değiştirdiğinden dolayı kum dalgaları membaya doğru hareket etmektedir. Katı madde membaya doğru depolanmaya başlamakta iken suyun akım yönü mansaba doğrudur. Ayrıca ters kumullar su ve katı madde ile ilişkilidir (Subramanya,1998). Bu şekilde taban şekli çöllerde oluşmamaktadır. Genellikle sığ akımda (Örneğin,

Küçük gel git akımlarında) ve sel rejiminde oluşmaktadır. Ters kumullar kısaca özetlenecek olursa;

- Yayılım hem mansaba hem de membaya doğru olmaktadır.
- Kumullardan ve kum dalgacıklardan daha fazla simetrikdir.
- Su yüzeyi ile aynı şekildedir.
- Kısa ömürlüdürler.
- Katı madde taşınımı oldukça fazladır.
- Manning pürüzlülük katsayısı $0,012 \leq n \leq 0,018$ arasında olduğu ve sürtünme katsayısının $0,040 \leq f \leq 0,065$ arasında olduğu gözlenmiştir. Taban şekli oluşurken sürtünme katsayısında ani bir artış olmaktadır.

Ters kumullar hakkında yapılan çalışmalarda Kennedy (1963) ters kumulların L dalga boylarını aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$$\frac{L}{h} = 2.\pi.Fr^2 \quad (2.32)$$

2.3.4.2. Düşümler ve Göller (*Chute and pools*)

Büyük kanallarda şüt oluşumu ve göllenmeler söz konusudur. Taban Şekilleri yatak şeklinin ilerleyişine veya yatak dalgası ile su dalgası arasında faz farkına göre de sınıflandırılabilirler. Yatak dalgası ile su dalgası arasındaki faz farkına göre yapılan sınıflandırmada, kum dalgacıkları ve kumullarda, taban ve su dalgalanmaları aynı fazda oluşmaktadır (Özbek ve Özcan, 2006). Taban eğimi çok dik olduğu zaman, düşümler ve göller olarak adlandırılan taban şekilleri oluşmaktadır (Yalın, 1972).

2.3.5 Çubuklar (*Bars*)

Literatürde çubuklar (bars) olarak adlandırılan taban şekilleri kanal genişliğiyle aynı uzunlukta yada ondan daha büyük uzunluktadır. Oluşan akımın su derinliğiyle kıyaslanabilecek kadar yükseklikleri vardır. Bu taban şekilleri, noktasal çubuklar (Point bars) Dönüşümlü çubuklar (Alternate bars), Enlemesine çubuklar (Trensvers

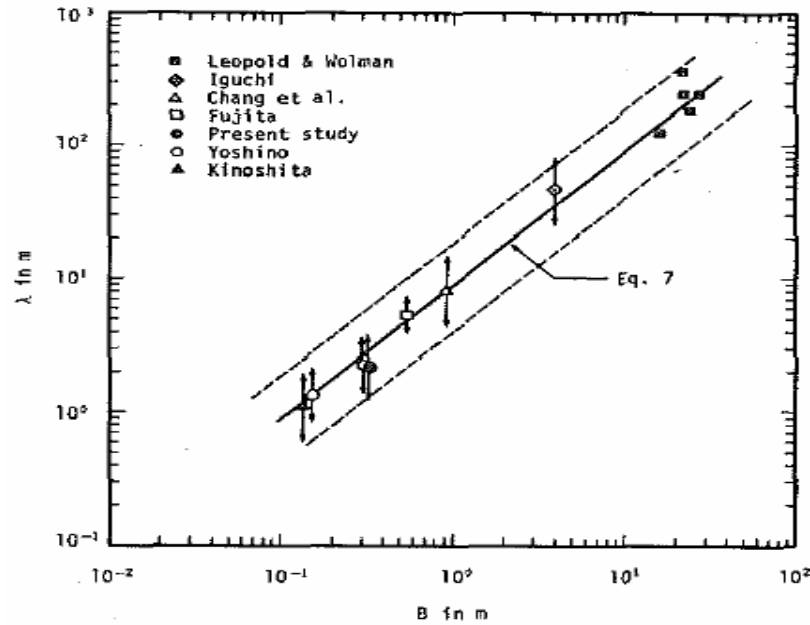
bars) ve Yan kol çubukları (Tribütery bars) tanımlamaları ile anılmaktadır (Şekil 2.13). (Yang, 1996).

Genellikle düşük akımdaki menderes çizen nehir akımlarında dönüşümlü çubukların oluştuğu gözlenmiştir (Howard ve Diğerleri, 1984).

Dönüşümlü çubuk dalga uzunlukları ve dalga yüksekliklerinin tahmini konusunda yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki ampirik formüllerin kullanılabileceği belirtilmiştir (Ikeda ve Asce, 1984). λ_a dalga boyu, B kanal genişliği, h su derinliği, n Manning pürüzlülük katsayısı ve d_{50} dane çapı olmak üzere;

$$\lambda_a = 9B \quad (2.33)$$

şeklinde verilen bağıntının grafiği ve değişik araştırmalar tarafından elde edilen değerler Şekil 2.13'te verilmektedir.



Şekil 2.13 Denklem 2.33'in uyarlandığı bölgede kaldığı sürece dönüşümlü çubuk oluşumu belirlenmektedir. Ikeda ve Asce (1982)

$$\lambda_a = 5 \left(\frac{Bh}{C_f} \right)^{0,5} \quad (F < 0,8 \text{ için}) \quad (2.34)$$

Burada $C_f = 0,0293 \left(\frac{h}{d_{90}} \right)$ 'dır.

$$\frac{\lambda_a}{B} = 5.3. \left(\frac{B}{d} \right)^{-0,45} \left(\frac{B}{h} \right) \quad (F \geq 0,8 \text{ için}) \quad (2.35)$$

$d_{50} \approx d_{90}$ durumunda

$$\frac{\lambda_a}{B} = 181. C_f \left(\frac{B}{h} \right)^{0,55} \quad (2.36)$$

ifadesi türetilebilmektedir.

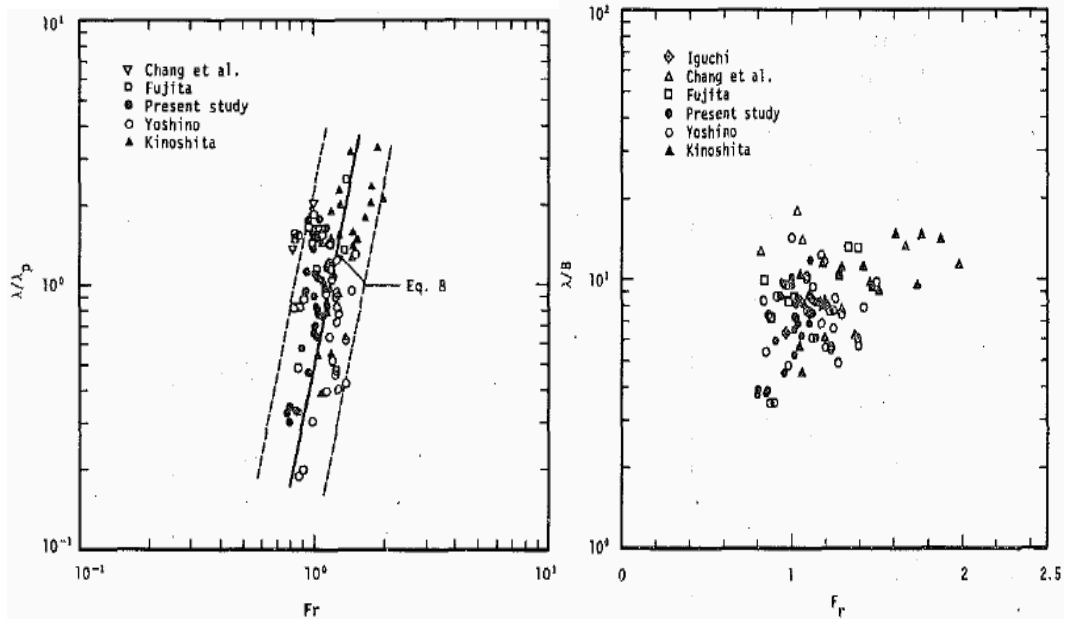
λ_p : tahmin edilen çubuk dalga uzunluğu olmak üzere

$$\lambda = a.2.\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{B.h}{C_f}} \quad (2.37)$$

$$= a.\lambda_p \quad (2.38)$$

$$F \geq 0,8 \text{ durumunda } \frac{\lambda}{\lambda_p} = \gamma F^{4,5} \quad (2.39)$$

yazılabilmekte olup buradaki γ sayısal sabiti 0,12 ile 2 arasında değişmekte olup $\gamma = 0,5$ alınabilmektedir. Bu denklemin grafiği ve değişik araştırmacılar tarafından elde edilen bulgular Şekil 2.14 verilmektedir.



Şekil 2.14 $Fr > 0,8$ durumunda; Froude sayısına bağlı olarak $\frac{\lambda}{\lambda_p}$ ve $\frac{\lambda}{B}$ değerleri

Martin ve Jaeggi, 1982 tarafından yapılan çalışmada dönüşümlü çubukların oluşması için gerekli kriterleri aşağıda sıralamıştır.

* Kinoshita (1972), dönüşümlü çubuklar hakkında yapılan çalışmalarında kanal derinliği ile kanal genişliği arasında

$$5 < \frac{B}{h} < 20 \quad (2.40)$$

ilişkisi olması durumunda dönüşümlü çubukların oluşacağını öne sürmüştür.

* Chang ve diğerleri (1971) ise çubukların ancak

$$\frac{B}{h} < 12 \quad (2.41)$$

olduğu zaman oluştuğunu görmüşlerdir.

* Shukegawa ise

$$\frac{B}{h} = \frac{\eta^2}{125.S_0} \quad (2.42)$$

Denkleminin dönüşümlü çubuk oluşumu için kritik değer olduğunu bu kritik değerden daha büyük değerlerde ise kumul ve ters kumul oluşacakları sonucunu elde etmiştir.

* Muramoto ve Fujita ise

$$\frac{Z}{Z_B^{0,47}} < 0,45 \quad (2.43)$$

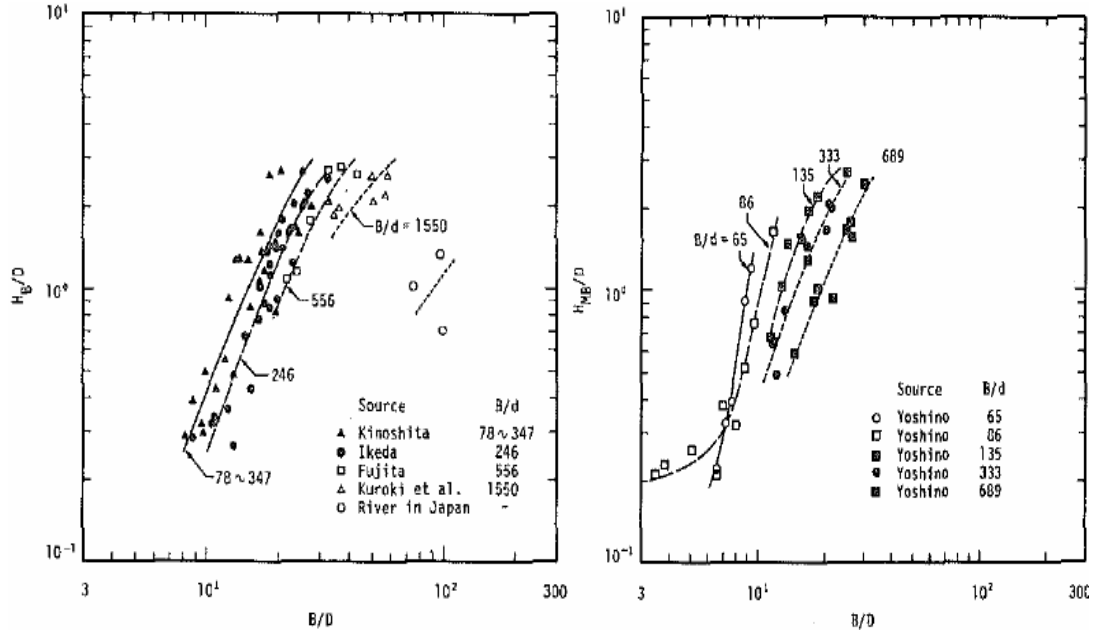
$$\text{ve} \quad 1 < \eta < 12 \quad (2.44)$$

bağıntılarının dönüşümlü çubukların oluştuğu bölgeyi tanımladığı göstermiştir. bu

bağıntılarda $\eta = \frac{\tau_*}{\tau_{*c}}$ $Z=h/d$ ve $Z_B=B/d$ 'dir.

Literatürde, dönüşümlü çubuk yükseklikleri için de birçok araştırmacı tarafından yapılan araştırmalar sonucunda elde edilmiş olan abaklar mevcuttur.

Ikeda ve Asce (1982) yaptığı çalışmalarda H_B : çubuk yüksekliği H_{MB} : Maksimum çubuk yüksekliği, D : akış derinliği olmak üzere, Japonya'daki nehirlerden elde ettiği verilere dayanarak Şekil 2.15'te verilen abakları oluşturmuşlardır.

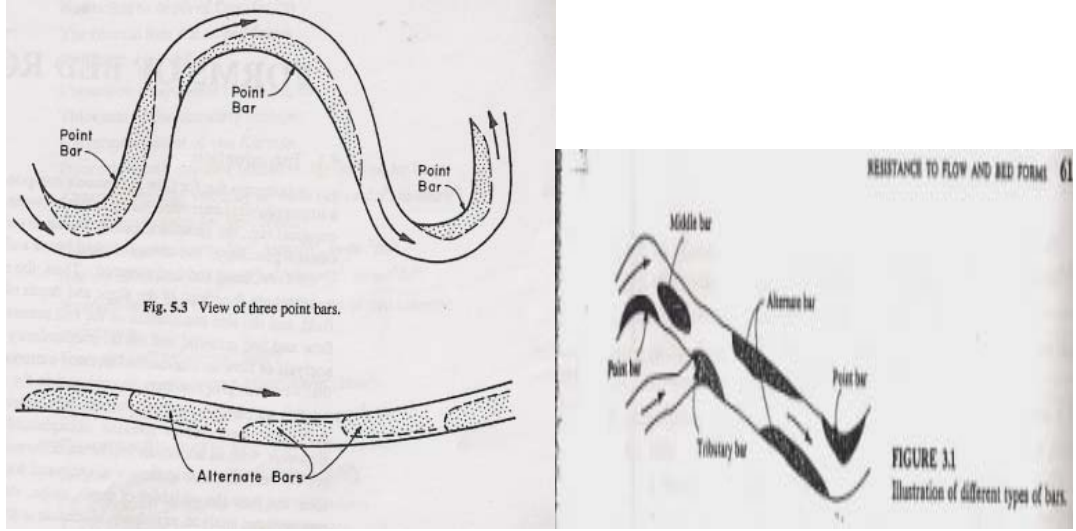


Şekil 2.15 B/D bağılı olarak H_B/D ve H_{MB}/D değerleri. Ikeeda ve Asce (1982)

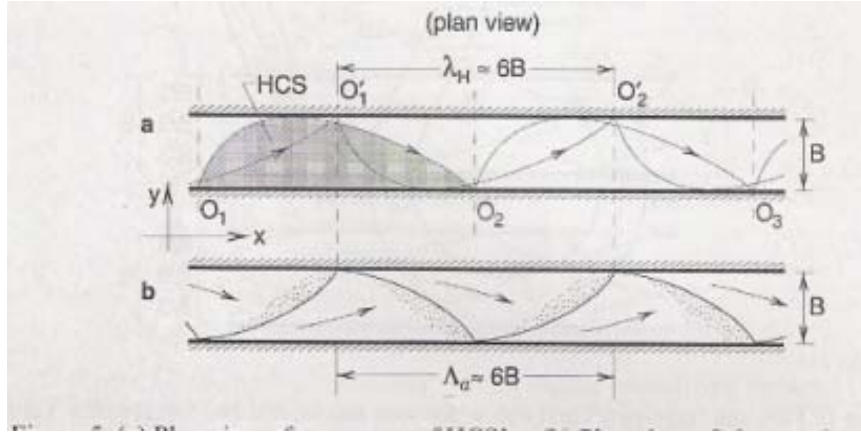
Vito Vanonin (1975), yaptığı deneylerde dönüşümlü çubuklar kanal genişliğinden biraz daha küçük olduğunu ve yavaşça mansaba doğru hareket ettiğini gözlemlemiştir.

Dönüşümlü çubuklarının oluşumunda diğer taban şekillerinin oluşumu gibi düşey türbülansın (vertical turbulence) değil, yatay türbülansın (horizontal turbulence) etkili olduğu düşünülmektedir. Da Silva, (2006) alternatif çubuk uzunluğunun kanal genişliğinin 6 katı olduğunu ifade etmiştir (Şekil 2.17).

$$\frac{\lambda_a}{B} \approx 6 \quad (2.45)$$



Şekil 2.16 Çubuk çeşitleri (Alternate Bar) (Da Silva, 2006).



Şekil 2.17 Alternatif Çubukların oluşumu (Da Silva, 2006)

2.3.6 Sürtünme Katsayısı (f) ve Manning Pürüzlülük Katsayısı (n) Değerlerine Bağlı Olarak Taban Şekilleri Sınıflandırılması

L uzunluklu dikdörtgen kanalda oluşan sürtünme kaybı Darcy-Weishbach formülü kullanıldığında

$$h_f = f \frac{L}{4R} \cdot \frac{u^2}{2g} = S * L \quad (2.46)$$

şeklinde ifade edilmekte olup f : sürtünme faktörü

$$f = \frac{8gRS}{u^2} \quad (2.47)$$

şeklinde yazılabilmekte kayma hızı $u_* = \sqrt{gRS}$ bağıntısı ile birleştirilerek

$$\frac{u}{u_*} = \left(\frac{8}{f} \right)^{1/2} \quad (2.48)$$

bağıntısı elde edilmekte

$$u = C \sqrt{R.S} \quad (2.49)$$

Şeklindeki Chezy formülündeki Chezy katsayısı $C = \sqrt{8g/f}$ ı ve

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} . S^{1/2} \quad (2.50)$$

Şeklinde yazılan Manning formülündeki n : Manning pürüzlülük katsayısı oluşan taban şekilleri ile ilişkilendirildiğinde Şekil 2.18'deki değer aralıkları söz konusu olmaktadır.

190 Flow in Open Channels

Table 11.1 Range of resistance factors—Manning's coefficient n , Friction factor f and Chezy coefficient C/\sqrt{g} —at various bed forms

Ref. [7] [Note: $C/\sqrt{g} = \sqrt{8/f}$]

Bed Form	Darcy-Weisbach friction factor f	Manning's coefficient n	Non-dimensional Darcy coefficient C/\sqrt{g}
Plane bed without sediment motion	0.020 – 0.036	0.012 – 0.016	15 – 20
Ripples	0.056 – 0.163	0.018 – 0.030	7 – 12
Dunes	0.047 – 0.163	0.020 – 0.040	7 – 13
Plane bed with sediment motion	0.020 – 0.040	0.010 – 0.013	16 – 20
Antidunes (Breaking)	0.040 – 0.065	0.012 – 0.018	11 – 16

Şekil 2.18 Manning katsayısının n , sürtünme faktörü f , Chezy katsayısının çeşitli taban şekillerine etkisi (Subramanya, 1998)

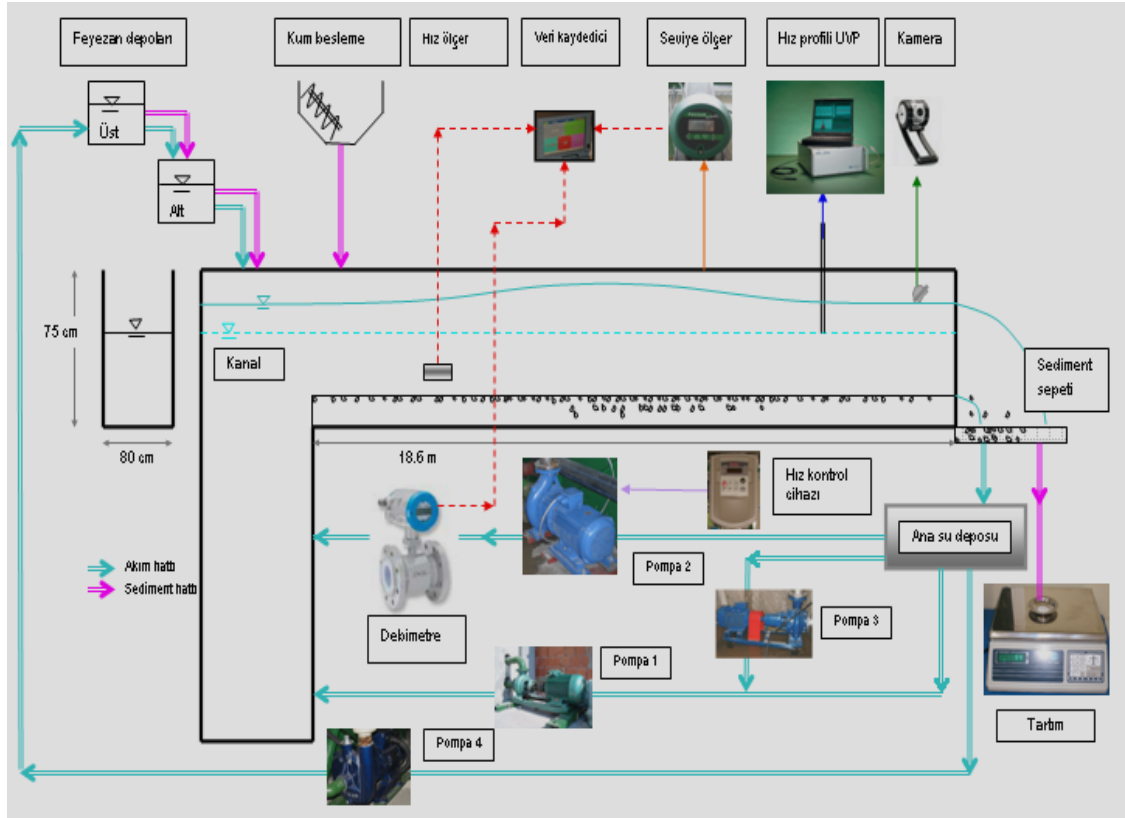
Şekil 2.15 laboratuvar ortamında $d=0,28\text{mm}$ çapındaki kum temel alınarak yapılan deneyler sonucunda oluşturulmuştur. Buna göre kum dalgacıkları ve kumullar oluşmasıyla Sürtünme faktörü f düzgün olarak artmaktadır. Geçiş taban şekli durumunda ise f aniden düşmektedir. Ters basamaklar oluşumunda f aniden artmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

DENEY SİSTEMİ VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

3.1 DeneY DüzenEği :

TÜBİTAK 106M274 nolu ve ‘Kararsız Acık Kanal Akımlarında Katı Madde Taşınımının Deneysel ve Teorik Araştırılması- Bulguların Tahtalı Havzası Derelerine Uygulanması’ başlıklı proje kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Tınaztepe Yerleşkesi’ndeki Hidrolik Laboratuvarında kapsamlı bir deneY sistemi tasarlanarak inşa edilmiştir. Bu tez çalışmasının deneysel bölümlerinin de gerçekleştirildiği sistem Şekil 3.1’de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.1 Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı’nda mevcut deneY düzenEği ve ekipmanların şematik gösterimi.

Kanal 18.6 m uzunluğunda 80 cm genişliğinde kanal yan duvarları 75 cm yüksekliğinde, eğimi 0,001 ile 0,01 oranında değiştirilebilen çelik konstruksiyon bir kanaldır(Şekil 3.2). Kanal yan duvarları pleksiglastandır. Kanal eğiminin kolayca değiştirilebilmesi amacıyla iki noktadan mesnetlenmiş ve 17 m açıklığında projelendirilmiştir.



a)



b)

Şekil 3.2 a ve b Deney düzeneğinin genel görünüşü

18,5 kw gücündeki pompa 27 m³ hacmindeki ana su deposundan suyu alarak kanala basmakta, kanaldan ana su deposuna geri dökülen suyun debisinin ayarını yapabilmek için pompanın ağzında da bir küresel vana bulunmaktadır. (Şekil 3.3.a). Kanal mansabında bulunan 1,5 m uzunluğundaki sakinleştirme havuzu ile birlikte toplam uzunluk 20,1 m'dir. Suyun sakinleştirilmesi için yapılan sakinleştirme havuzu içine delikli saçtan üç levha yerleştirilmiştir.

Maksimum debisi 100 lt/sn olan pompa, Şekil 3.3.b'de gösterilen debi kontrol cihazı ve bir bilgisayara bağlanarak pompanın devir sayısı değiştirilerek istenen debide suyu basması sağlanmaktadır. Bu kontrol cihazı aynı zamanda istenilen sürede ve debide kanala taşkın hidrografi da verebilmektedir.



Şekil 3.3 a) 2. basma hattı üzerindeki pompa, ayar vanası ve manometre b) Debi Kontrol Cihazı

Kanaldaki suyun debisi kanal sonunda, su deposu üzerine yerleştirilen dikdörtgen savaklarda ölçülebilmektedir. Yan büzülmesi olmayan bu dikdörtgen savağın (Bazin savağı) savak genişliği $l=80$ cm ve eşik yüksekliği $p=30$ cm'dir (Şekil 3.4). Savağın tabanına bağlanan piyozemetre borusu, savak yükünün ölçülmesine imkan vermektedir. Kanalın sonuna yerleştirilen bir panjur sistemi ile üzerindeki kol çevrilmesi ile tam açık veya kısmen açık yapılarak istenilen su derinliği sağlanabilmekte ve akım kontrol edilebilmektedir. (Şekil 3.5) Ana su deposu kanalın mansap ucunda yer almakta olup taban alanı $3\text{ m} \times 6\text{ m}$ olmak üzere 18 m^2 dir. Deponun yüksekliği 1,5m ve hacmi 27 m^3 'tür.

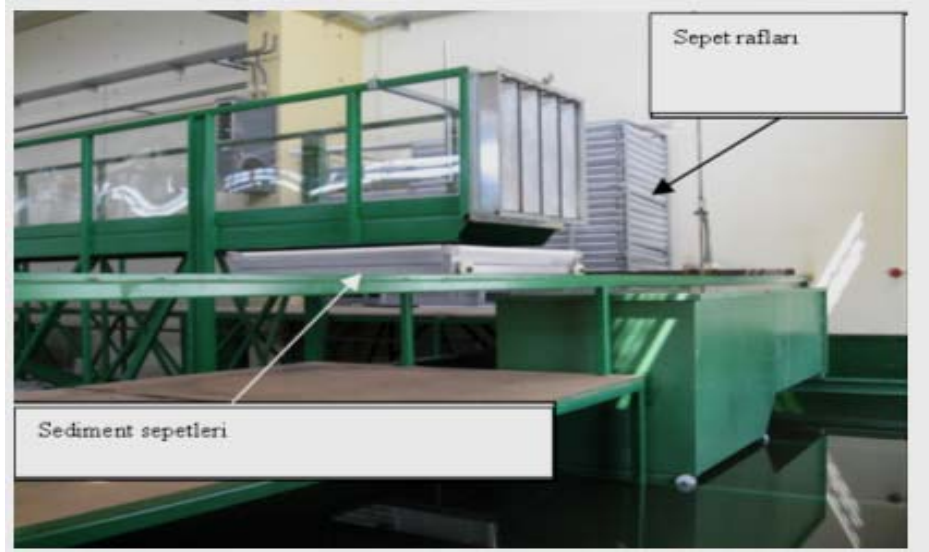


Şekil 3.4 Ana su deposu ve dikdörtgen savak

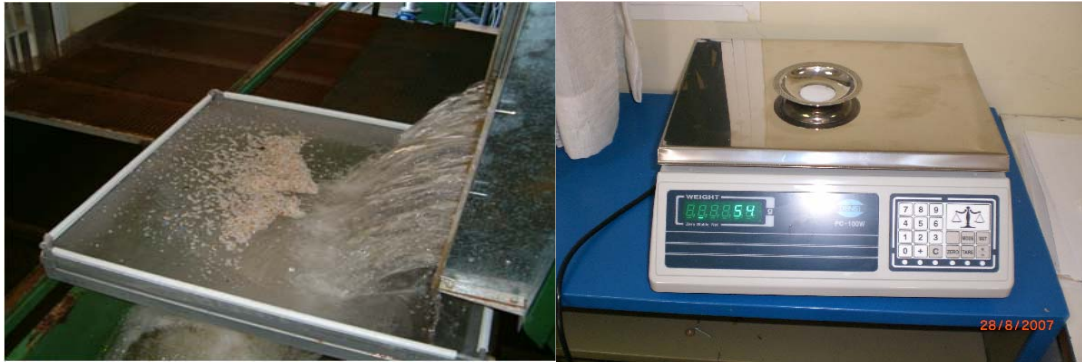


Şekil 3.5 Kanalın mansabındaki panjur sistemi

Tabana serilmiş malzemenin bir miktarı akımın etkisiyle kanal mansabına doğru taşınmakta ve burada 80 cm x 80 cm x 5 cm boyutlarında imal edilmiş olan kum yakalama sepetleri vasıtasıyla tutulmaktadır. Bu sepetler, altlarının tekerlekli olması sebebiyle ana su deposu üzerine sabitlenmiş rayların üstünde kolayca itilerek 15 saniyede bir ve bazı deneylerde 30 saniyede bir yenisi ile değiştirilebilmektedir. Sepetler, üzerlerindeki suyun süzülmesi için 60 sepet kapasiteli bir raf sistemine alınabilmekte ve kurutulan malzeme tartılmaktadır. Söz konusu ray ve raf sistemi Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu sepetler içindeki sedimentlerin kurutulduktan sonra tartılması için 1 gr hassasiyetli ve 10 kg kapasiteli tartı mevcuttur (Şekil 3.7).



Şekil 3.6 Kanalın mansabında bulunan sepetler ve sepet rafları



Şekil 3.7 a) Katı madde sepeti b) Terazi

Platform, kanalın yanında, kanal boyunca 1m genişliğinde ve laboratuvar tabanından 1,8 m yükseklikte imal edilmiştir. Platform ana su deposuna doğru uzanmaktadır. Platforma çıkabilmek için ayrıca bir merdiven yapılmıştır.

Deney sırasında Puslar IMP + seviye ölçer ile suyun seviyesi ölçülmektedir. Boru hattı üzerine yerleştirilen debimetre ile de akımın debisi ölçülmektedir. Kanal boyunca belli bir kesite yada pompa basma hattı üzerine UVP cihazına bağlı algılayıcılar (transducerlar) yerleştirilerek, zamana bağlı olarak istenilen kesitte hız profili çıkarılabilmektedir. VS 100 ile kanaldaki su hızı ölçülebilmektedir. Deney sırasında Puslar IMP+ 'dan, debi ölçerden ve hız ölçerden elde edilen veriler veri kaydedicide toplanmıştır. Deney sonrasında oluşan taban şekilleri Puslar IMP+ ile taban seviyeleri ölçülerek belirlenmektedir.

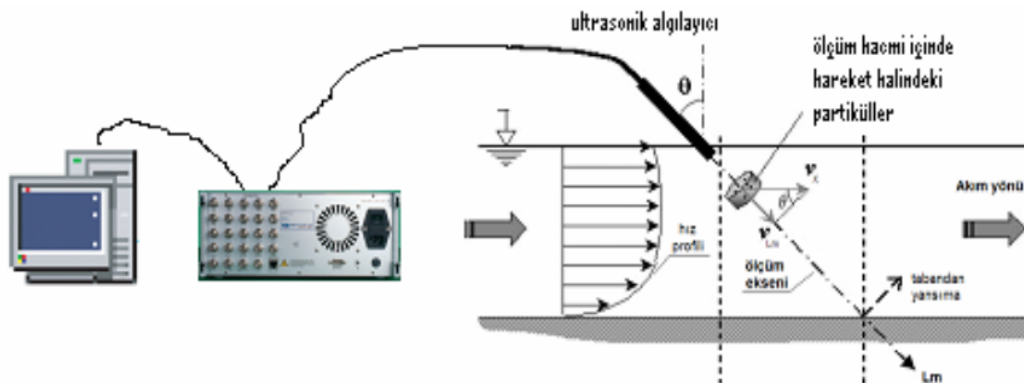
3.2 Ölçüm Cihazları

3.2.1 Hız Profili Elde Edilmesi için Ultrasonic Velocity Profiler (UVP)

Akustik yöntemle çalışan UVP DUO-MX (Met-Flow SA) isimli cihaz ile hız ölçümleri gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.8). UVP yüksek frekanslı ses dalgalarının su içindeki parçacıklara çarptıktan sonra yansyarak geri dönen ses dalgalarının frekanslarındaki değişimini (Doppler prensibi) kullanarak akım hızını bulmaktadır. Bu cihaz serbest yüzeyli açık kanal veya basınçlı akım koşullarında enkesit içerisinde noktasal hızları ölçüp hız profili çıkartabilmektedir. Cihaz, kendisine bağlanan algılayıcılar (transducerlar) vasıtası ile 0,5 – 1 – 2 ve 4 MHz frekansları yayabilmekte, kullanıcıya ait bir bilgisayara bağlanarak değerleri bilgisayara aktarabilmektedir. UVP'nin çalışma prensibi Şekil 3.9'da verilmiştir.



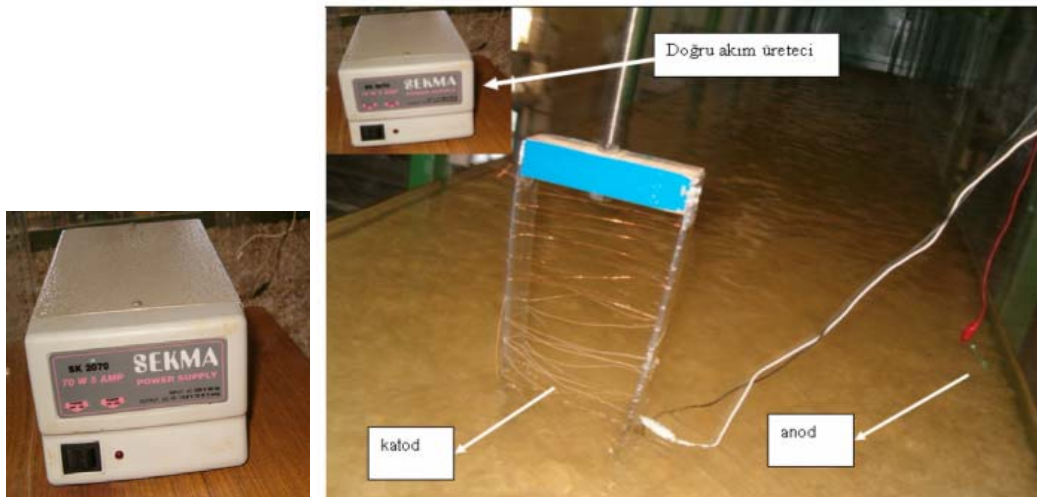
Şekil 3.8 UVP genel görünüm



Şekil 3.9 UVP'nin çalışma prensibi

Cihazın içinde bulunan “multiplexer” ile aynı tipte olmak koşuluyla, birden fazla algılayıcı ile farklı akım kesitlerinde aynı anda hız profili çıkartabilmektedir. Bu prensip ile iki boyutlu hız ölçümü de yapılabilmekte, akım haritası oluşturabilmektedir.

Suya parçacık eklemek literatürde kullanılan ve tarafımızdan denenmiş bir yöntem olmakla birlikte, suyu bulanıklaştırması yöntemin dezavantajıdır. UVP gibi ultrasonik yöntem kullanan hız ölçüm cihazlarının ölçümleri gerçekleştirebilmeleri amacıyla sudaki parçacıkları arttırmak için yeni yeni kullanılmaya başlanan bir yöntem de suda hidroliz gerçekleştirmektir. Şekil 3.10’de verildiği gibi ölçüm noktasından 2-4 m kadar membaya kurulan düzenek ile katoddan hidrojen kabarcıkları çıkartılmaktadır.



Şekil 3.10 Kanalda hidroliz uygulaması

Hidrolik laboratuvarında mevcut 10 adet transducera ait özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu transducerlar hafif ve küçük oldukları için amaca uygun tasarlanmış adaptörler ile kullanılabilir. Örneğin kararsız akım deneylerinde UVP DUO cihazına ait transducerlar Şekil 3.11’de verilen ölçüm yuvalarına oturtularak hız ölçülebilmektedir.

Tablo 3.1 Mevcut UVP transducerlerinin özellikleri

Frekans	Kablo uzunluğu (m)	Adet
0,5 MHz	4	1
1 MHz	4	1
2 MHz	4	1
4 MHz	4	4
4 MHz	8	3



Şekil 3.11 UVP transduceri

3.2.2 Pompa Debisi Kontrol Cihazı

Deneyler sırasında istediğimiz tipte hidrograflar elde etmek için pompa debisini (devir hızını) kontrol cihazı kullanılmıştır(Şekil 3.12). Bu cihaz laboratuvar içerisindeki kanala su basan pompaya bağlıdır. Cihaz, bir bilgisayara bağlanarak önceden yüklenmiş yazılım sayesinde kontrol edilmektedir. Bu yazılımda, frekans değerleri, hidrografın yükselme zamanı, alçalma zamanı gibi parametreler girilerek çeşitli hidrograflar oluşturulmakta yada sabit frekansta kararlı akımlar elde edilmektedir.



Şekil 3.12 Pompa debisini kontrol cihazı

3.2.3 VS100 ile Hız Ölçümü

Kanalda hızı ölçmekte ve çok kanallı veri kaydedicisine verilerini aktarmaktadır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 (a) Hız ölçer, (b) hız ölçer sensörü

3.2.4 Debimetre

Şekil 3.14'te verilen OPTIFLUX 1000 elektromanyetik debimetre, Faraday kanununa göre çalışmaktadır. Debimetrenin montajı besleme hattı üzerine yapılmıştır. Memba yönünde boru çapının 4 katı ve mansab yönünde ise 2 katı kadar

mesafede düzgün akım şartı gerekmektedir. Bu kurulum şartları sağlanmış olup, halen deneylerde kullanılmaktadır.



Şekil 3.14 Kanal girişine yerleştirilmiş debimetre

3.2.5 Seviye Ölçer

Su seviyesi ölçümü için Şekil 3.15'te verilen Pulsar IMP + seviye ölçer kullanılmaktadır. Mevcut iki adet seviye ölçer ile aynı anda iki farklı kesitte ölçüm yapılabilmektedir. IMP 3 versiyonu ile 0,15m - 3 m aralığındaki seviyeler için ölçüm yapılabilmektedir. Cihaz su yüzeyinden en az 15 cm yukarıda monte edilmelidir. Cihazdan çıkan iki kablodan bir tanesi güç kablosu olarak prize diğeri monitöre bağlanmaktadır. 1 mm hassasiyetle değer okuyan bu cihazlardan sadece iki adet mevcut olup taban batimetresini ayrıntılı bir şekilde elde etmek için ek cihazların satın alınması gereklidir.



Şekil 3.15 (a) IMP+ level meter (b) seviye ölçer için hareketli sistem

3.2.6 Veri Kaydedici

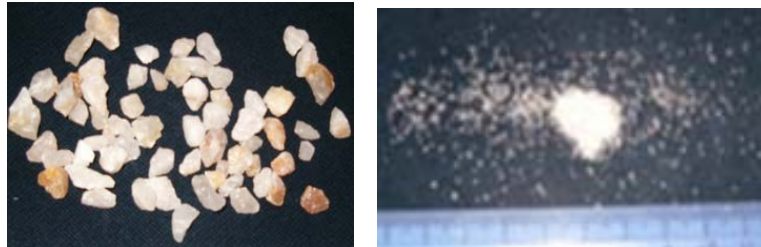
Debi ölçer ve seviye ölçerden elde edilen veriler Şekil 3.16'da verilen veri kaydedicide toplanmıştır. Saniyede bir veri alabilen veri toplayıcı 6 kanallıdır. Veriler hem veri kaydedicinin ekranında görülebilmekte hem de deneyler sonrasında CF kartı ile bilgisayara aktarılabilmektedir.



Şekil 3.16 Veri kaydedici

3.3 Deneylerde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri

Deneylerde Şekil 3.17'de gösterilen kaba ve ince malzemelerin karışımından elde edilen uniform olmayan malzeme kullanılmıştır. Taban yatağında taban profillerinin oluşması için $d_{50}=4,6$ mm çakıl ile $d_{50}=0,45$ mm kum karıştırılarak uniform olmayan malzeme kullanılmıştır. Bu karışımın ortalama dane çapını bulmak için 5 farklı numune deney düzeneğinin farklı bölümlerinden alınarak elek analizi yapılmıştır.



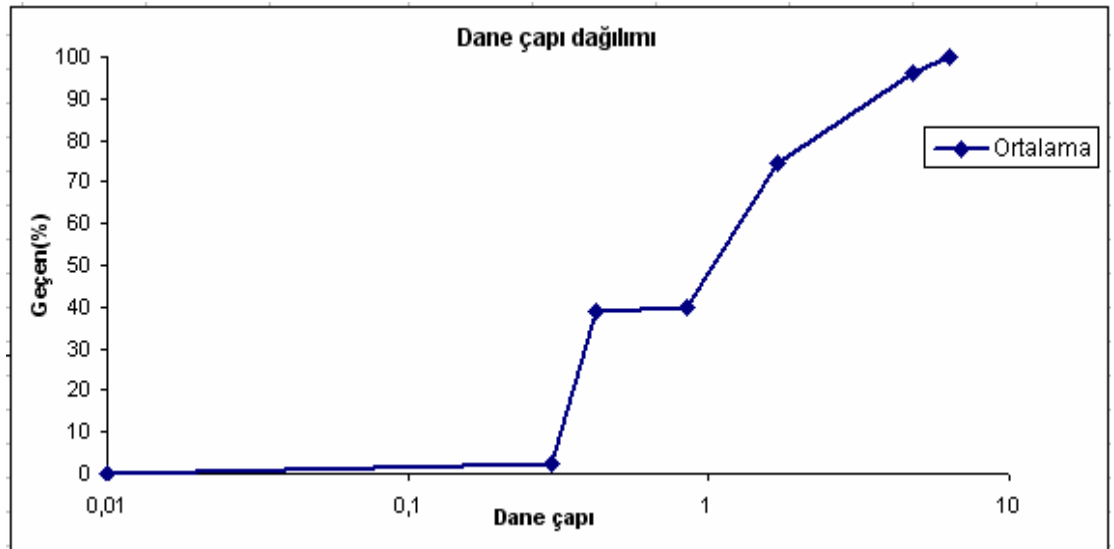
Şekil 3.17 Kullanılan taban malzemesi (a) kaba malzeme (b) ince malzeme

Şekil 3.17'de fotoğrafları verilen ince ve kaba malzeme karıştırılarak uniform olmayan malzeme elde edilmiştir. Elde edilen karışımdan alınan numuneler üzerinde

yapılan elek analizi sonuçları Tablo 3.2’de, dane çapı dağılımı grafiği Şekil 3.18’de verilmiştir. Kanaldan alınan karıştırılmış 5 numunenin ortalama dane çapı $d_{50}=1,03\text{mm}$ ’dir.

Tablo 3.2 Uniform olmayan malzeme ile yapılan elek analizi sonuçları

Elek Çapı	Num1 %	Num2 %	Num3 %	Num4 %	Num5 %	Numort %
0,01mm	0	0	0	0	0	0
0,3mm	2,17	0,94	3,24	2,01	2,43	2,17
0,425mm	38,65	34,96	41,10	39,20	41,22	39,04
0,85mm	39,53	38,71	41,43	39,52	41,48	40,14
1,7mm	74,58	75,01	75,79	75,18	72,71	74,66
4,75mm	96,14	94,93	97,21	96,35	95,73	96,08
6,3mm	100	100	100	100	100	100
D50	1,046	1,055	1,01	1,042	1,027	1,03
D10	0,323	0,329	0,319	0,32	0,321	0,323
D60	1,274	1,276	1,236	1,268	1,282	1,267
D5	0,308	0,313	0,305	0,31	0,307	0,308
D95	4,499	4,771	4,274	4,47	4,598	4,51
Dg	0,916	0,965	0,86	0,913	0,904	0,91
Sg	2,614	2,481	2,69	2,61	2,707	2,62
D16	0,342	0,35	0,337	0,335	0,339	0,342
D84	2,663	2,704	2,522	2,59	2,814	2,661
Cu	3,94	3,88	3,87	3,96	3,99	3,92



Şekil 3.18 Uniform olmayan malzemenin dane çapı dağılımı

3.4 Deneylerin Yapılışı

Deneyler, DEÜ hidrolik laboratuvarında 18,6m uzunluğunda 80cm genişliğinde kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal taban eğimi 0,005 olarak sabitlenmiştir. Taban malzemesi olarak iki farklı çapta olan gradyasyonlu taban malzemesi karıştırılarak üzerinde deneyler yapılmıştır. Tabana serilen malzemenin medyan çapı $D_{50}=1,9$ mm'dir. Uygun şekilde karıştırılan taban malzemesi deney kanalına serilip deney öncesi taban düzeltilmektedir. Taban malzemesi 7,5 cm kalınlığındadır. Kanal tabanı ile aynı eğimde olacak şekilde düzenlenmesi için (Şekil 3.19)'de verilen sistem kullanılmıştır. Deney öncesinde taban kotları Puslar IMP+ ile okunarak deney sonrasında oluşan taban şekillerinin farklılığı gözlenmiş ve oluşan taban şekilleri bu konuda mevcut literatürdeki bilgiler ışığında değerlendirilmiştir.



Şekil 3.19 Taban malzemesi yüzeyinin oluşturduğu eğiminin belli bir değerde tutulmasını sağlayan sistem

Sakinleştirme tankından geçen su kanala ulaştığında su seviyesi Puslar IMP+ ile her saniyede bir ölçülmektedir ve bu ölçümler veri kaydedicisi ile deney sırasında kaydedilmektedir.

Deney süresi akıma göre ya 15 dk'da yada 10 dakikadır. Bu sırada her 30 saniyede bir yada her dakikada bir gelen taban malzemesinin yükünü hesaplamak

için sırayla deney kanalına yerleştirilmiş kayar mekanizma ile sedimentler sepetlere toplanmış ve bunlar kurutularak tartılmıştır. Pulsar IMP+ seviye ölçer aleti ile kanalın genişliğinin her 10 santimetresinde, kanal boyunca da 25 santimetrede bir ve dikine olarak taban seviyesi ölçülmektedir. Bu sayede deney sonrasında oluşan taban profilleri seviye ölçer aleti ile 3 boyutlu olarak incelenip profillerin kum dalgacıkları (ripple), kumullar (dunes), ters kumullar (antidune) ve çubuklar (alternate bars) oluşup oluşmadığı gözlenmiştir.

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Deneysel Parametreler ve Hareket Başlama Kriterleri:

Zamanla değişmeyen akım şartlarında üniform olmayan gradasyonlu malzeme ile yapılan deneylere ait parametreler Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1 Zamanla değişmeyen akım şartlarında üniform olmayan malzeme ile yapılan deneylere ait parametreler.

Deney no	1	2	3	4	5	6
Q (l/s)	13,3	40,4	49,8	56,7	83,0	93,5
h (cm)	4,2	7,6	8,5	9,0	11,5	12,1
A (m ²)	0,034	0,061	0,068	0,072	0,092	0,097
P (m)	0,8848	0,952	0,97	0,98	1,03	1,042
R (m)	0,038	0,064	0,070	0,073	0,089	0,093
u (cm/s)	39,2	66,4	73,2	78,8	90,2	96,6
q (m ³ /s/m)	0,017	0,051	0,062	0,071	0,104	0,117
u _* (cm/s)	4,56	6,11	6,46	6,64	7,51	7,70
τ ₀ (kg/m ²)	0,21	0,37	0,42	0,44	0,56	0,59
τ _*	0,126	0,232	0,254	0,270	0,343	0,363
Re _*	46,7	63,3	66,8	68,5	77,2	79,4
Fr _*	0,118	0,212	0,237	0,251	0,32	0,34
τ _{*cr}	0,033	0,034	0,035	0,035	0,036	0,036
τ _{cr} (kg/m ²)	0,050	0,055	0,055	0,055	0,056	0,056
$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	0,61	0,77	0,80	0,84	0,85	0,89
$Re = \frac{V4R}{\nu} (10^6)$	0,06	0,17	0,21	0,23	0,32	0,36
$\frac{u}{u_*}$	8,60	10,87	11,33	11,87	12,01	12,55
$\frac{\tau_*}{\tau_{*cr}}$	2,03	3,56	3,86	4,09	5,08	5,36
$\frac{R}{d_{50}}$	36,89	62,13	67,96	70,87	86,40	90,30

S^*	0,00303	0,00303	0,00303	0,00303	0,00303	0,00303
$\frac{h}{d_{50}}$	40,77	74	82,52	87,37	111,65	121,36
f	0,097	0,057	0,051	0,046	0,043	0,039
n	0,020	0,017	0,016	0,016	0,016	0,015
vf (Çökme hızı)	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
$C/\sqrt{g} = \sqrt{8/f}$	9,08	11,87	12,48	13,17	13,65	14,32
$\tau_0 * V$ Akım gücü (N.m/s ²)	0,8232	2,4568	3,074	3,46	5,05	5,70
d* (Boyutsuz dane çapı)	26	26	26	26	26	26
T (Taşınım durum Parametresi)	2,9	6,2	6,85	7,4	9,6	10,2

Boyutsuz dane çapı ile taşınım durum parametresini belirlemek için kullanılan 4.1 ve 4.2 denklemleri aşağıda verilmektedir:

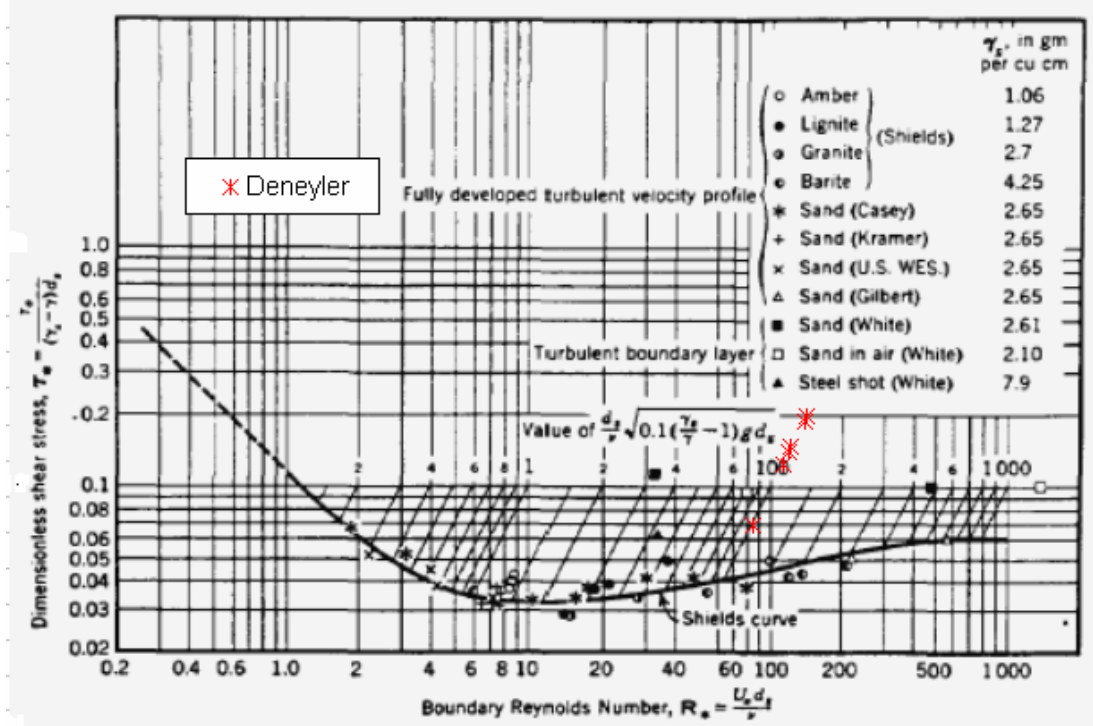
$$d_* = \left[\frac{(\gamma_s / \gamma - 1) \times g \times d_{50}^3}{v^2} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

$$T = \frac{\tau_*}{\tau_{*cr}} - 1 \quad (4.2)$$

2.3. Bölümde verilen taban malzemesinin harekete başlaması ile ilgili kriterler, deneysel sonuçlar ile birlikte Tablo 4.2’de sunulmuştur. Harekete geçme olması durumu (+) işaretiyle, olmaması durumu ise (-) işaretiyle belirtilmiştir. Hepsinde hareket gözlenmiştir. Shields eğrisinin üstünde kalan değerlerde hareketin gözlemlendiği görülmüştür (Şekil 4.1).

Tablo 4.2 Taban malzemesinin harekete başlaması (+ : hareket var, - : hareket yok)

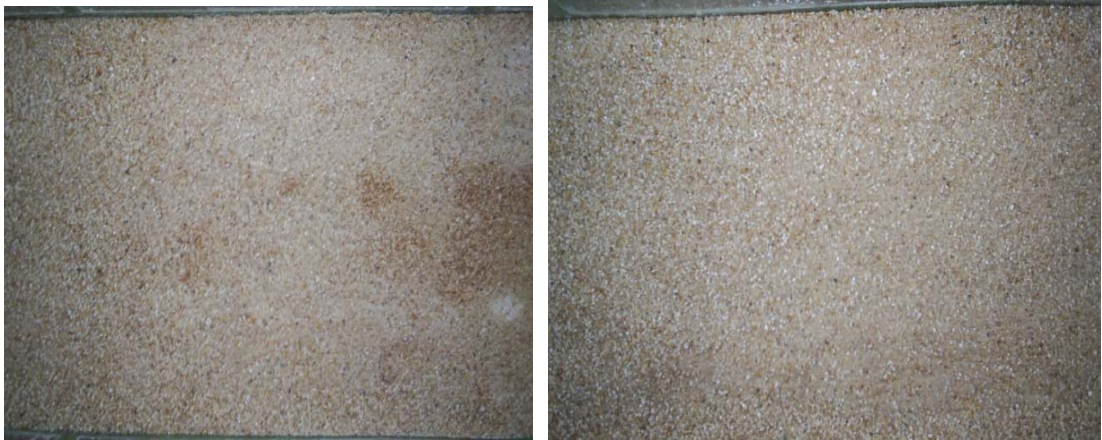
Deney no	1	2	3	4	5	6
Q (lt/sn)	13,3	40,4	49,8	56,7	83,0	93,5
Deney sonucu hareket	+	+	+	+	+	+
Shields kriterine göre hareket	+	+	+	+	+	+
Yang kriterine göre hareket, V _{cr} =0,28 m/sn	+	+	+	+	+	+
MPM kriterine göre hareket	+	+	+	+	+	+



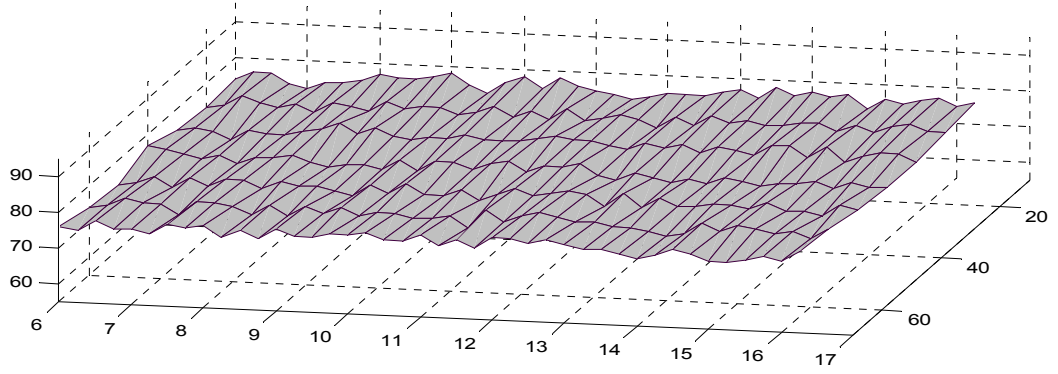
Şekil 4.1 Shields eğrisi ve Re_* ile τ_* 'nin deneysel değerleri

4.2 Deney Öncesi Taban Şekillerinin Grafikleme:

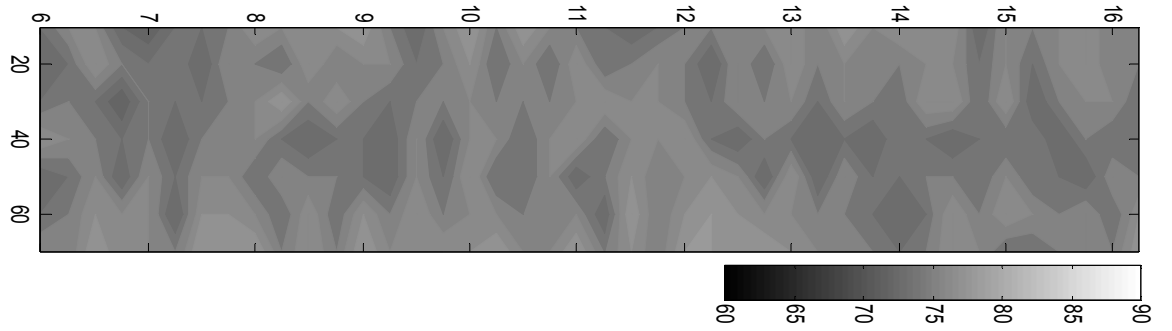
Taban düzleştirildikten sonra Puslar IMP+ ile taban kotları okunmuştur. Kanal tabanının fotoğrafları belirli aralıklarda çekilmiştir (Şekil 4.2). Ölçülen taban kotları kullanılarak Matlab programı ile yapılan konturlar ile taban şekilleri oluşturulmuştur(Şekil 4.3). Hassasiyet mm birimindedir. Kanal eksen kotları göz önüne alınarak çizilen kanal boykesiti Şekil 4.3.c'de gösterilmektedir.



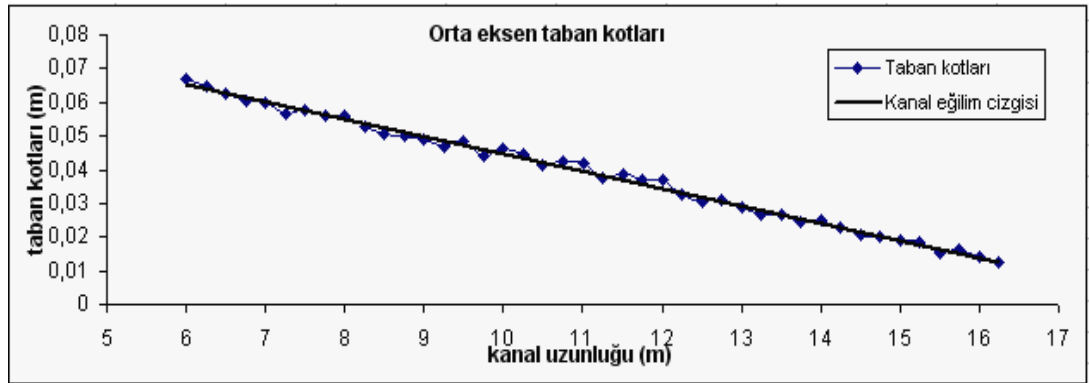
Şekil 4.2 deney öncesi kanal tabanının görünüşü a) 7-8 m arası b) 12-13 m arası.



a)



b)



c)

Şekil 4.3 Deneysel kanal tabanı a) Matlab kullanılarak elde edilen 3 boyutlu taban profilleri b) Matlab kullanılarak elde edilen 2 boyutlu taban topografyası c) kanal boykesiti

4.3 Zamanla Değişmeyen Akımlarda Taban Şekilleri İlgili Deneysel Bulgular:

4.3.1 4,2cm<h<8,0cm Arası Küçük Derinlikli Akımlarda Oluşan Taban Şekilleri:

F: hız kontrol panelindeki frekans, Q: debi, Fr:Froude sayısı, h:akış derinliği ve V:akış hızını simgelemek üzere deneylerdeki değerleri aşağıda verilmektedir:

Deney sonrası kanalın fotoğrafları çekilmiştir. Deney sonrasında ölçülen taban kotları matlab programında 3D, 2D ve 1D olarak oluşturulmuştur. Deney öncesi ve deney sonrasında oluşan grafiklerle depolanma yada aşınmanın olduğu bölgeler gözlemlenmiştir. 2 boyutlu grafiklerde ise deney sonrası fotoğraf çekilerek kıyaslanmıştır.

*1.Deney

F: 13 Herz - Q: 13,3 lt/sn. - Fr:0,61 - h: 4,2 cm, V: 39,2 cm/s.

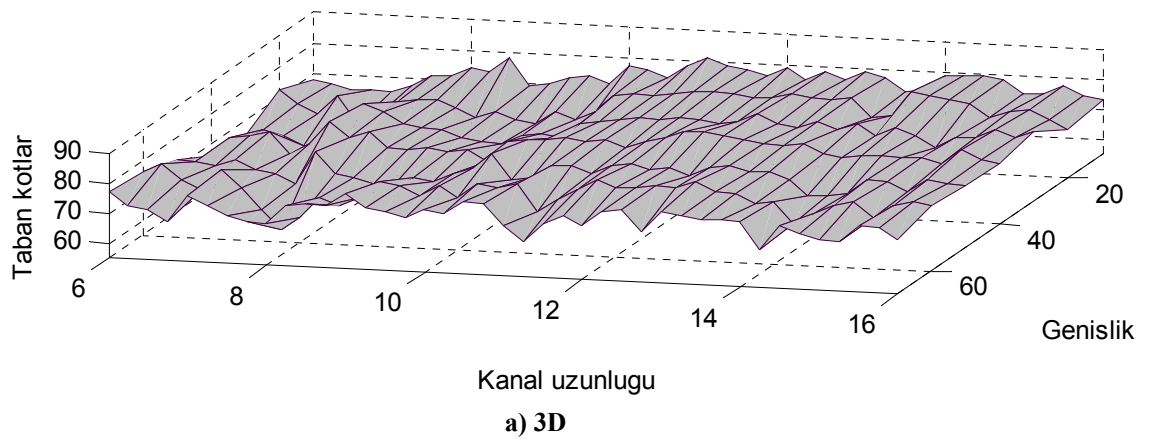
Bu deneyde tabanda hareket ince dane çaplı malzemede görülmüştür. Kalın çaplı malzeme hareket etmemiştir. Taban değişmemiş düz kalmıştır.

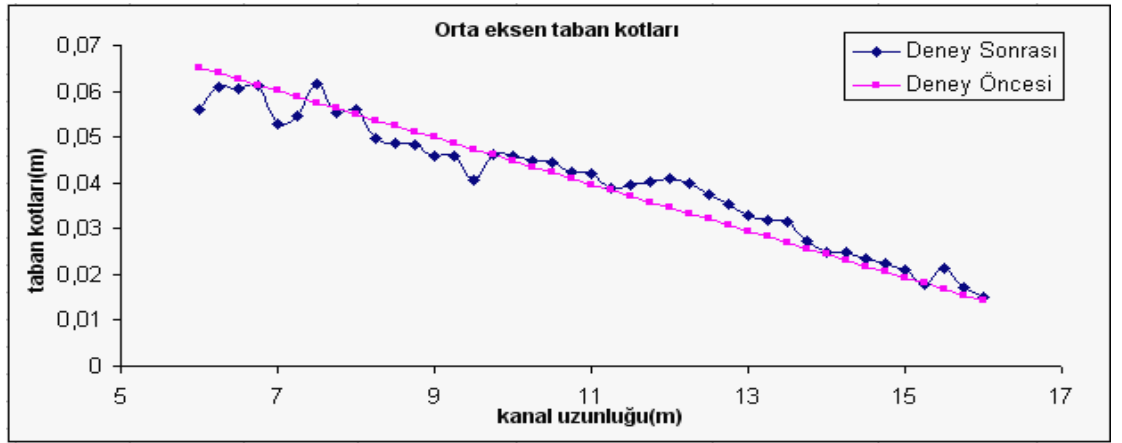
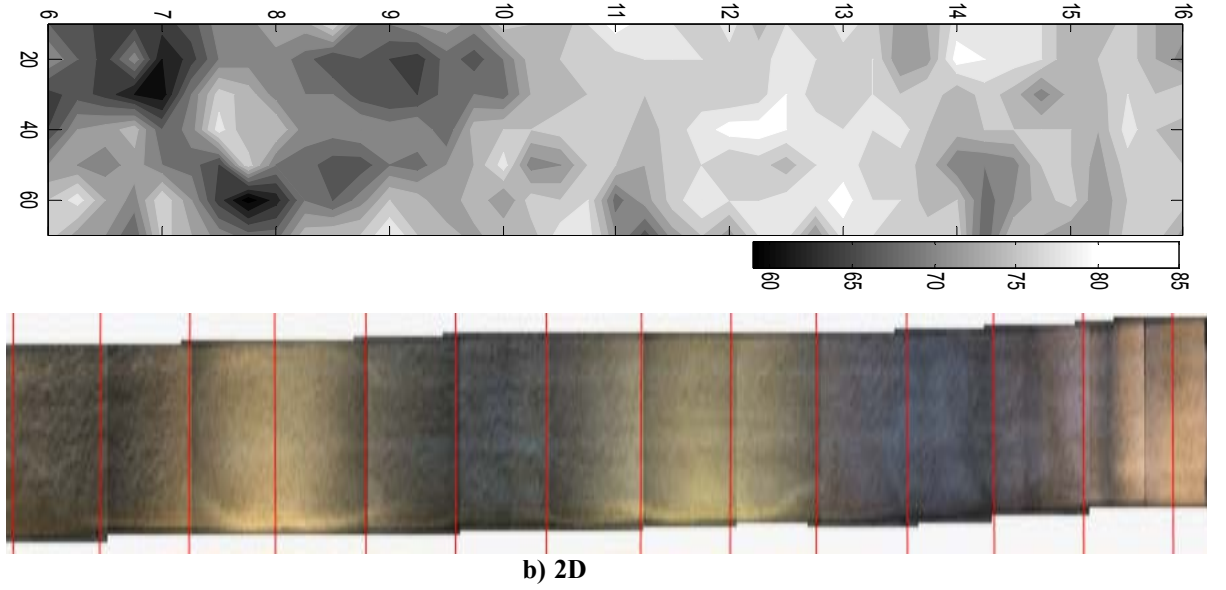
*2. Deney:

*2.1 Kanalda sabit kalınlıkta taban malzemesi varken yapılan deney

F: 25 Herz - Q: 40,4 lt/sn - Fr:0,77 - h: 7,6 cm - V: 66,4 cm/s.

Deney sonrası ölçülen taban kotlarının matlab programında değerlendirilerek 3D, 2D ve 1D olarak oluşturulan topografya Şekil 4.4'te verilmektedir

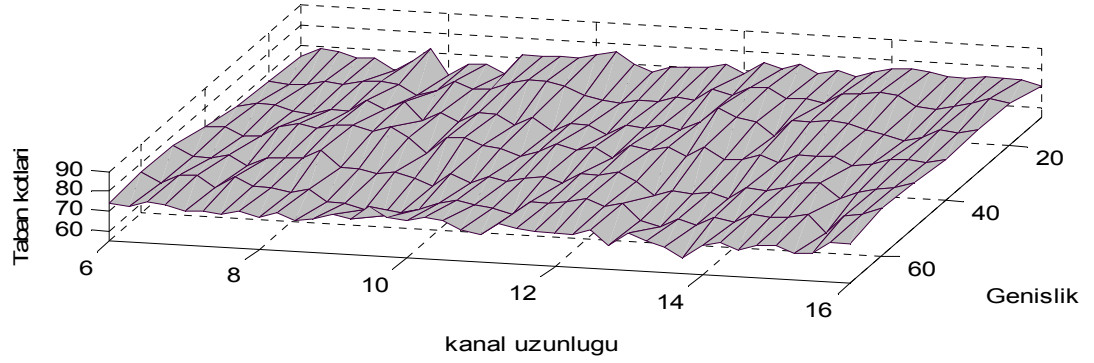




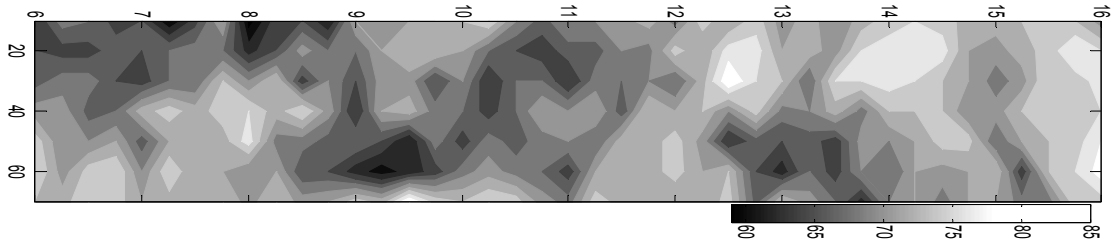
Şekil 4.4 (a.b.c) Kanal taban düzeltildikten sonra 40,4 lt/s debi sonrasında oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir.

*2.2 Kanal tabanı düzeltilmeden 2.1 deney sonrası yapılan deney

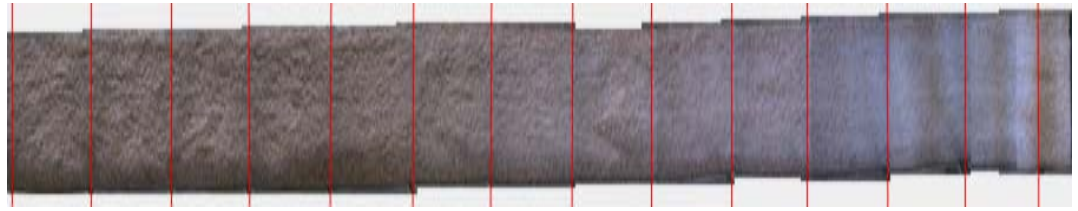
Kanal tabanındaki başlangıç şartları değiştirilerek kanal tabanı düzeltilmeden, aynı debide ve kararlı akımda okunan taban kotları ise 3D,2D,1D olarak grafik oluşturuldu.(Şekil 4.5)



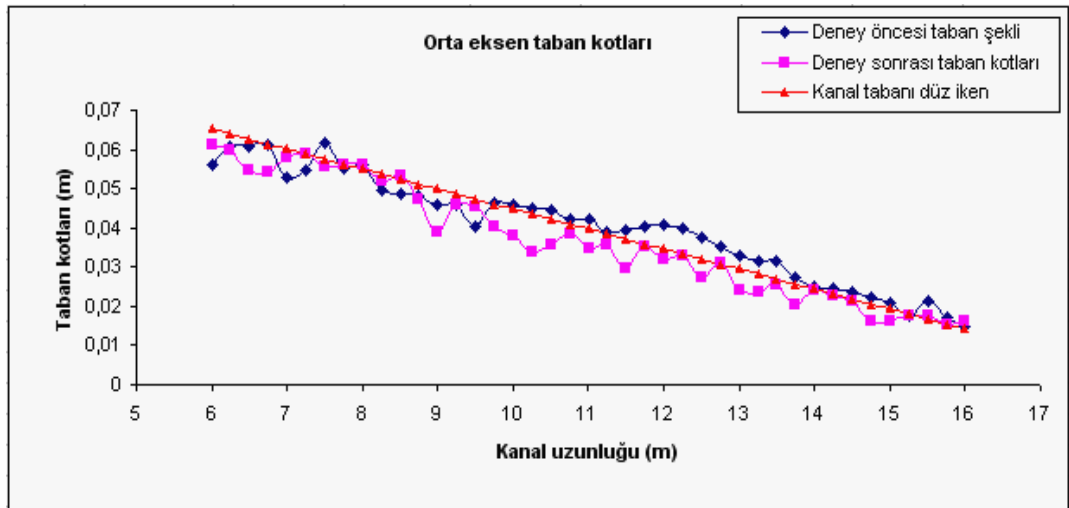
a) 3D



b) 2D



b) 2D



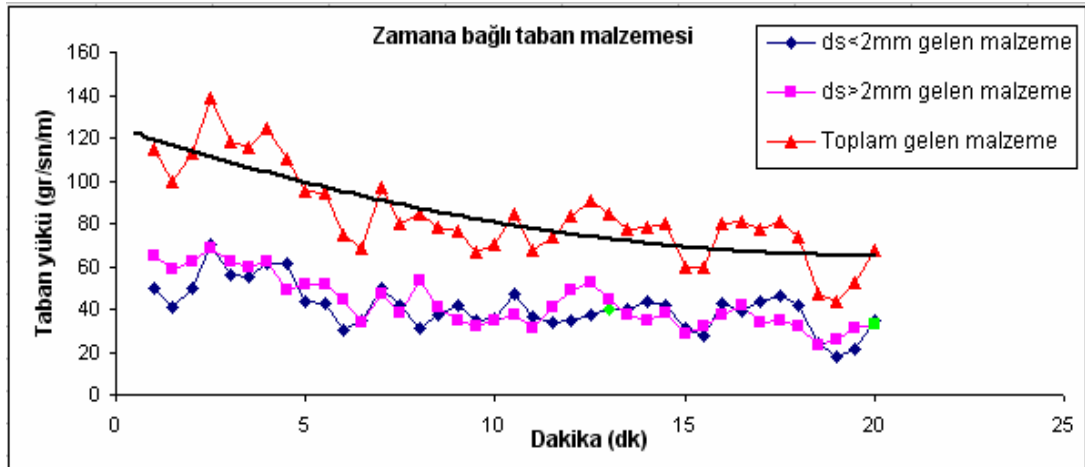
c) 1D

Şekil 4.5 (a.b.c) 2.2 deney sonrasında kanal tabanı düzeltilmeden tekrar 40,4 lt/s aynı debi sonunda oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir. 1. deneyle 2. deney arasındaki fark 1. deneyde depolanma olduğu metrede 2. deneyde aşınma olduğu belirlenmiştir.

Toplam 20 dakika süren deneyler sonrasında 30 sn'de bir sepetlerde toplanan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim genişlikte toplanan katı madde miktarı (taban yükü) belirlenmiştir (Tablo 4.3). Zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.6) Toplanan toplam 79167 gr taban malzemesinde ince malzemenin 38218 gr, iri malzemenin ise 40949 gr olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3 Birim zamanda birim kesitten geçen katı madde miktarı (bed load)

Taban yükü	2.1deney	2.2 deney	Toplam
gb (gr/sn.m) ds<2mm	44,8	37,1	40,8
gb (gr/sn.m) ds>2mm	51,1	36,8	43,7
gb (gr/sn.m)	95,9	73,9	84,6



Şekil 4.6 Birim zamanda gelen katı madde yükü

4.3.2 8,0cm<h<10,0cm Arası Orta Derinlikli Akımlarda Oluşan Taban Şekilleri

*3.Deney:

*3.1 Kanalda sabit kalınlıkta taban malzemesi varken yapılan deney

F: 40 Herz - Q: 49,8 lt/sn - Fr:0,80- h: 8,5 cm V: 73,2 cm/s. Deney sonrası kanalın fotoğrafları çekilmiştir Şekil 4.7'de. Ölçülen taban kotları matlab programında 3D, 2D ve 1D olarak oluşturulan topografyası Şekil 4.8'da verilmektedir.



(a) 13-14. m'de oluşan kum dalgacıkları çünkü dalga boyları $\lambda = 10\text{cm}$ civarında ince malzeme dane çapı ile alakalı $d_{50} = 0,45\text{ mm}$ 'dir. (b) 16-17. m'de oluşan kumullardır. çünkü dalga boyu $\lambda = 90\text{ cm}$ dir. su derinliğini birkaç katı büyüklüğündedir. Kumul yüksekliği 2 cm civarındadır.



c) 15-16. m'deki kumullar



d) 14-15. m'deki taban şekilleri

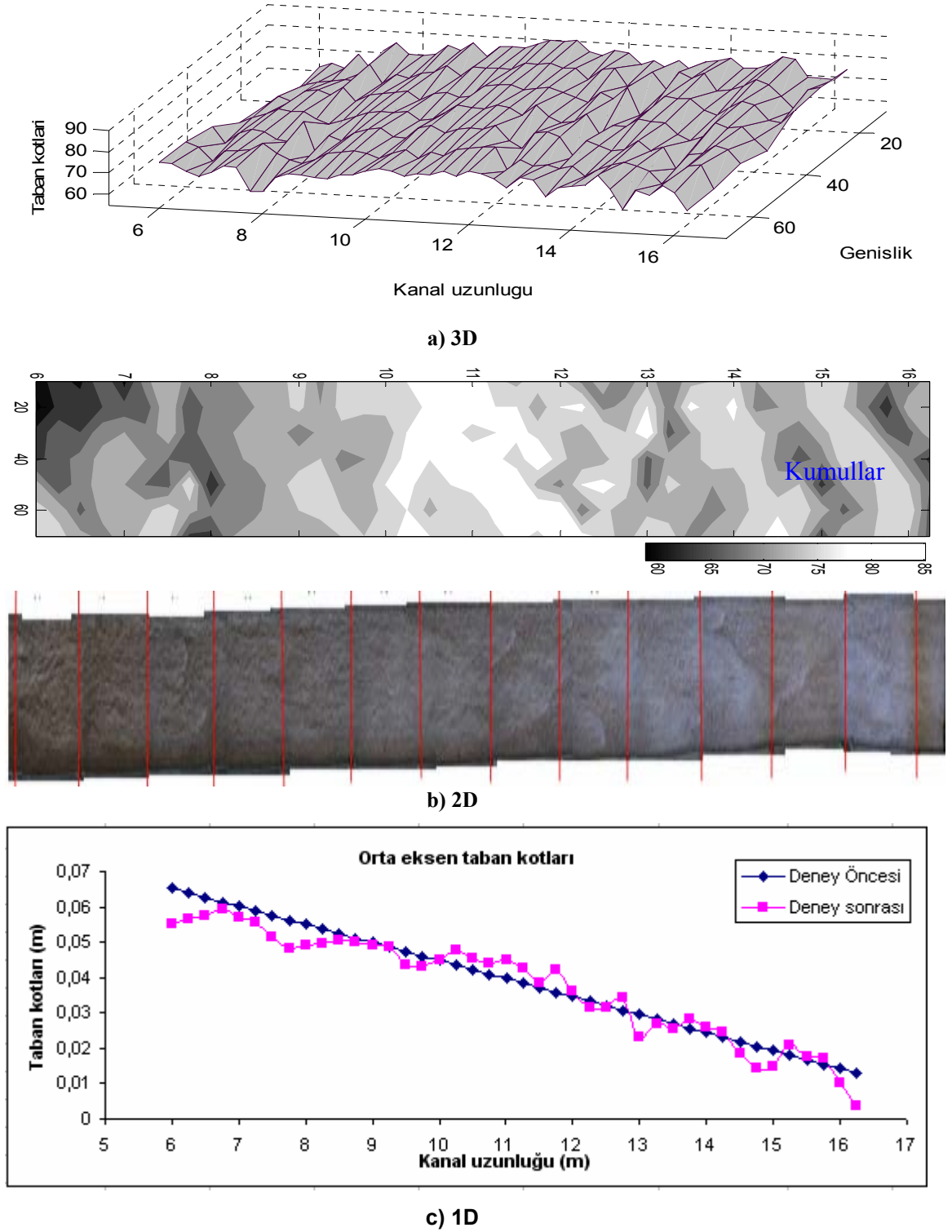


e) 7-8. m'deki taban şekli



f) 5-6. m'deki taban şekli

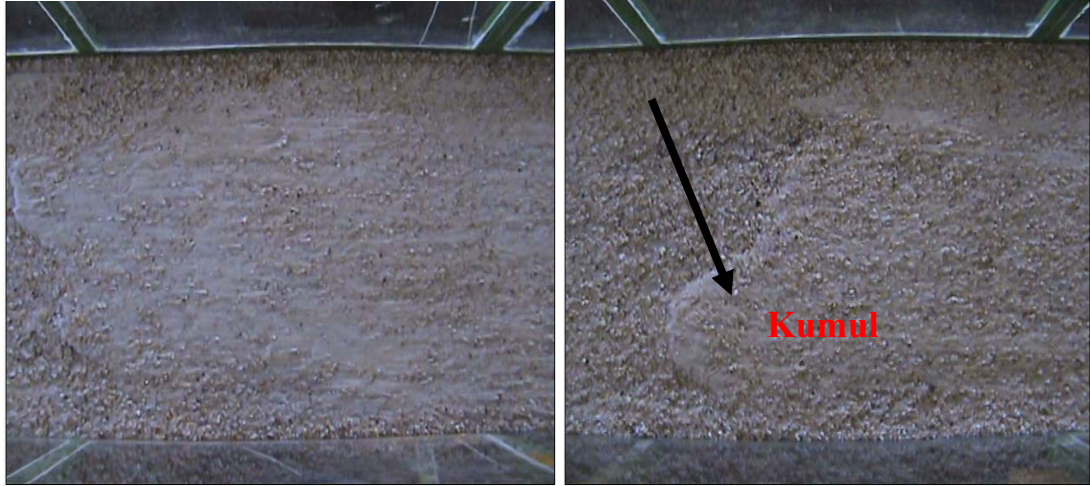
Şekil 4.7(a,b,c,d,e,f) Deney 3.1 sonrası 15 dk süre sonunda kanalın belirli kesitlerinde oluşan taban şekilleri



Şekil 4.8 (a.b.c) Kanal taban düzeltildikten sonra 3.1 deney 49,8 lt/s debi sonrasında oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir.

*3.2 Kanal tabanı düzeltilmeden 3.1 deney sonrası yapılan deney

Kanal tabanındaki başlangıç şartları değiştirilerek kanal tabanı düzeltilmeden, aynı debide ve kararlı akımda taban şeklinin nasıl değiştiği fotoğraflanmıştır (Şekil 4.9) ve Okunan taban kotları ise 3D,2D,1D olarak grafik oluşturuldu (Şekil 4.10).



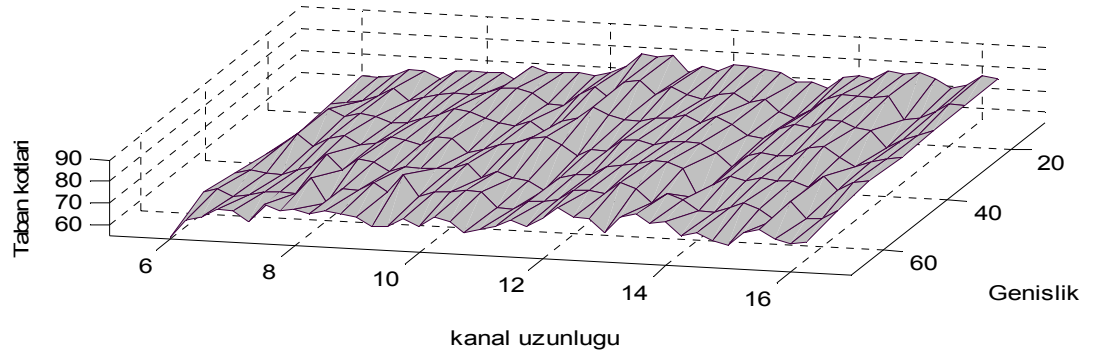
a) 12-13. m'de kumul üzerinde iki farklı malzeme olduğu için akışa paralel olarak oluşan taban şekli (Sand ripples) **b)** 10-11. m'de oluşan kumul su derinliği ile alakalıdır dalga boyu $\lambda = 60$ cm'dir kumul yüksekliği 2 cm civarındadır. Kanal genişliği boyunca olduğu için 2 boyutlu kumul denilmektedir.



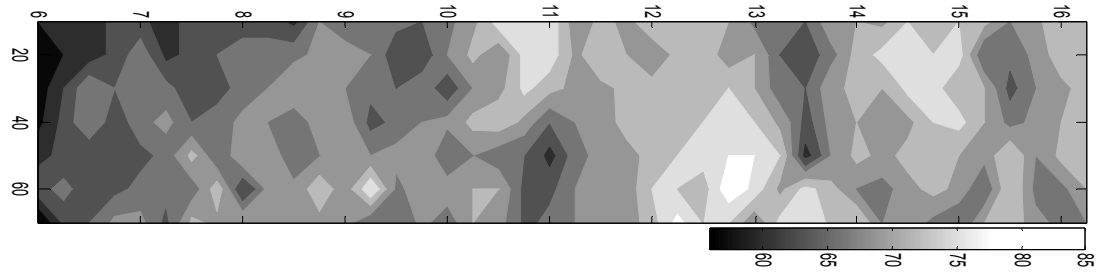
c) 13-14. m'deki taban şekli

d) 10-11. m'de Taban kotları ölçümü yaparken

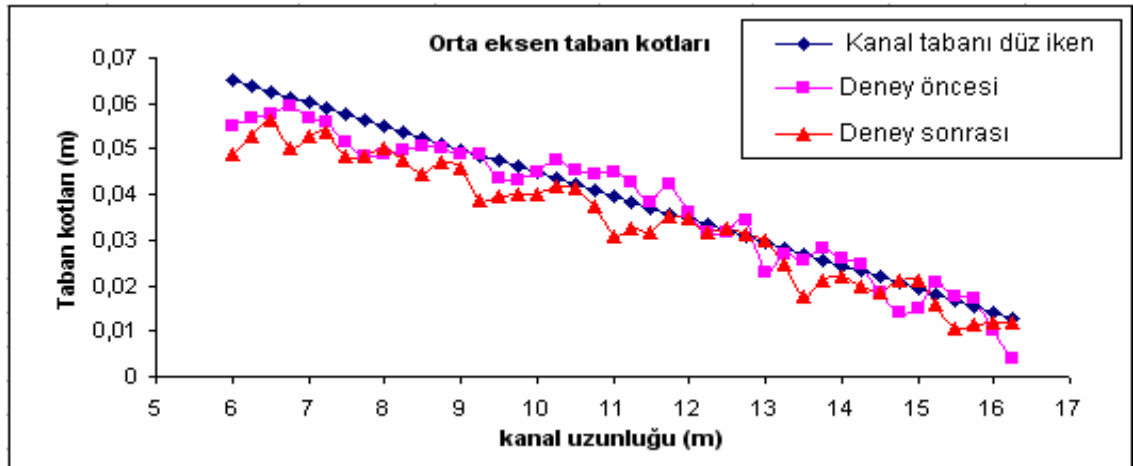
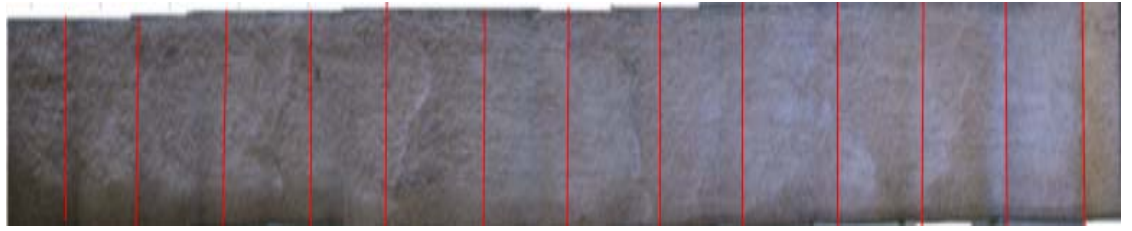
Şekil 4.9 (a,b,c,d) 3.2 Deney sonrası 49,8 lt/s debinin 15 dk süre sonra oluşan taban şekilleri



a) 3D



b) 2D



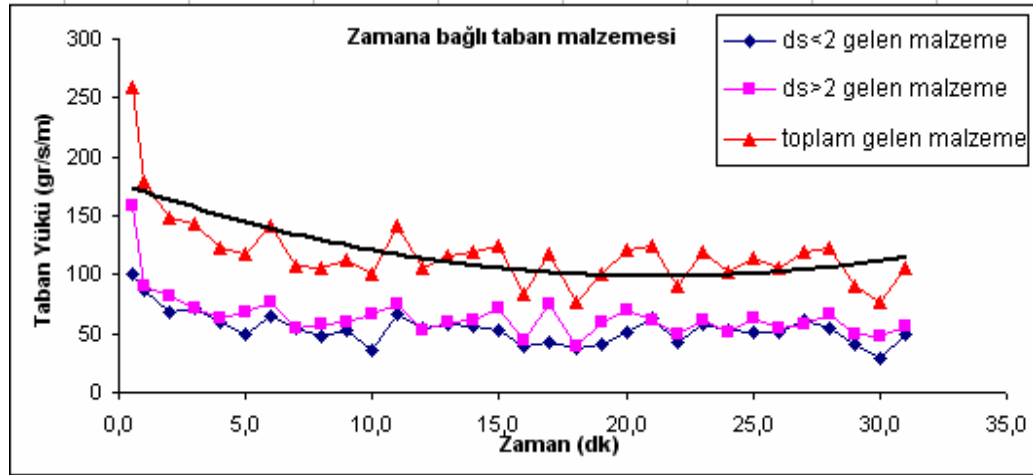
c) 1D

Şekil 4.10 (a.b.c) Taban düzleştirilmeden 3.2 deney sonrasında tekrar 49,8 lt/s debide oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir. 3. deneyle 4. deney arasındaki farkın bir boyutlu olarak belirlenmiştir. (4. deney sonunda daha çok aşınma belirlendi)

Toplam 30 dakika süren deneyler sonrasında 60 sn'de bir sepetlerde kalan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim genişlikte toplanan katı madde miktarı belirlenmiştir (Tablo 4.4). Zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.11) Toplanan toplam 117019 gr taban malzemesinde ince malzeme 80739, iri malzeme ise 96280 gr olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4: Birim zamanda birim kesitten geçen sediment miktarı (bed load)

BED LOAD	3.1 deney	3.2 deney	Toplam
gb (gr/sn.m) ds<2mm	54,2	49,9	52,0
gb (gr/sn.m) ds>2mm	63,7	57,4	60,6
gb (gr/sn.m)	117,9	107,3	112,6



Şekil 4.11 Zamanla gelen katı madde miktarı

***4.Deney:**

***4.1 Kanalda Sabit Kalınlıkta Taban Malzemesi Varken Yapılan Deney:**

F: 45 Herz - **Q:** 56,7 lt/sn - **Fr:**0,84 - **h:** 9,0 cm - **V:** 78,8 cm/s. Deney sonrası kanalın çekilen fotoğrafları Şekil 4.12’te. Ölçülen taban kotları matlab programında 3D, 2D ve 1D olarak oluşturulan topografya Şekil 4.13’te verilmektedir.



a) 9-10 m’deki taban şekli



b) 16-17 m’deki taban şekli

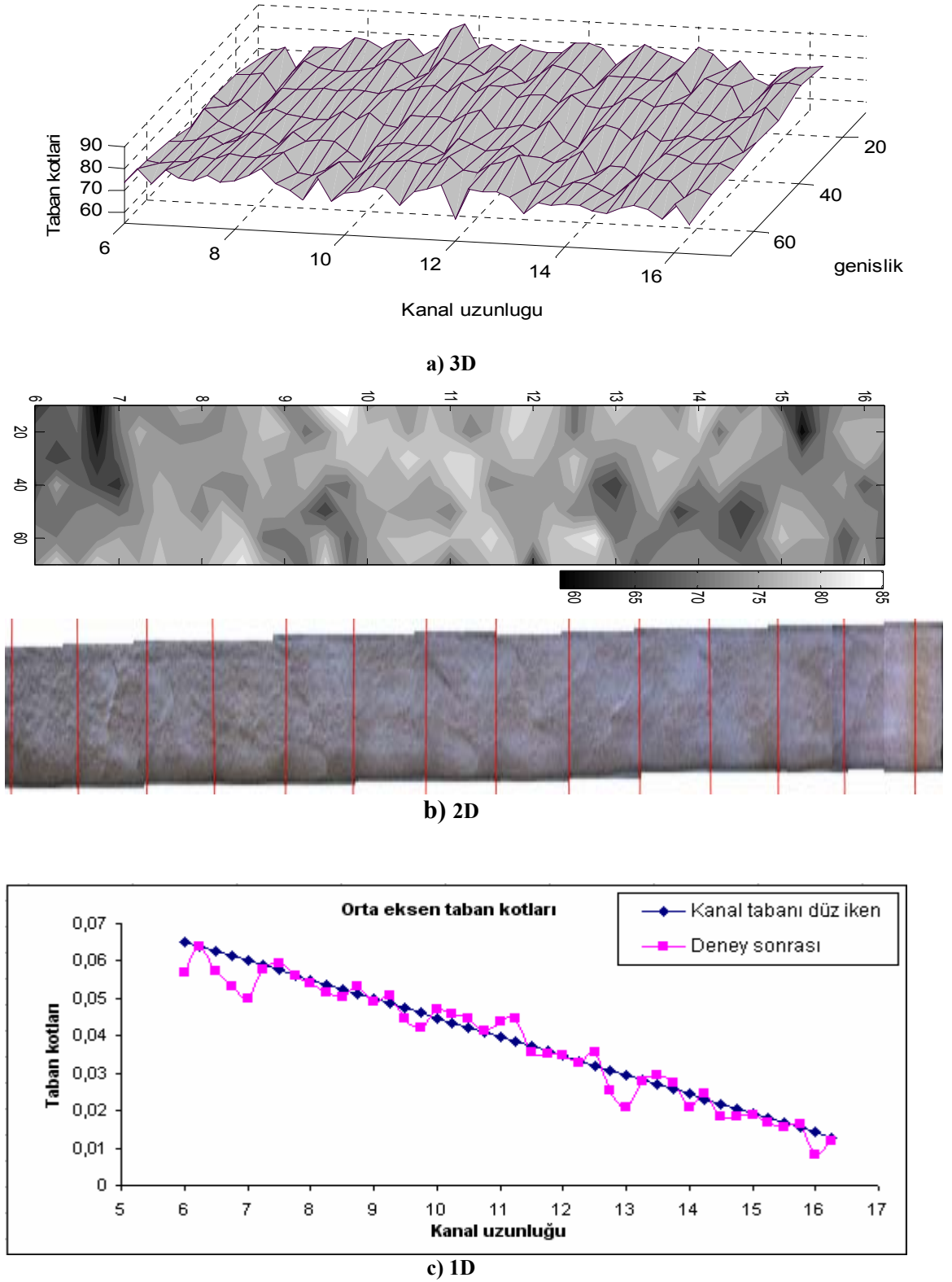


a) 11-12 m arasındaki taban şekli



b) 13-14 m’deki taban şekli

Şekil 4.12 (a,b,c,d): 4.1 Deney sonrası (56,7 lt/s debinin) 10’dk süre geçirildikten sonra tabanda oluşan taban şekilleri.



Şekil 4.13 (a.b.c) Kanal taban düzeltildikten sonra 4.1 deney sonrasında oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir.

***4.2 Kanal tabanı düzeltilmeden 4.1 deney sonrası yapılan deney:**

Kanal tabanındaki başlangıç şartları değiştirilerek kanal tabanı düzeltilmeden, aynı debide ve kararlı akımda taban şeklinin nasıl değiştiği fotoğraflanmıştır (Şekil 4.14). ve Okunan taban kotları ise 3D,2D,1D olarak grafik oluşturuldu.(Şekil 4.15)



a) 17-18 m'deki taban şekli (Kumul)



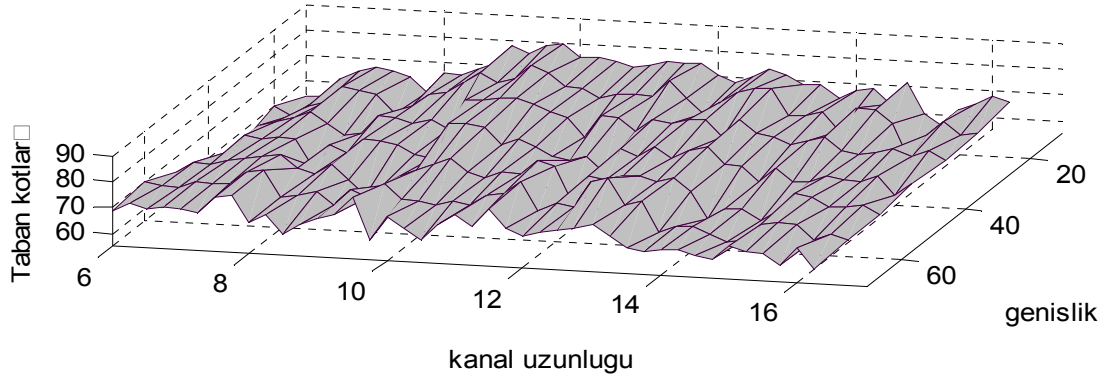
b) 13-14 m'deki taban şekli (Kum dalgacıkları)



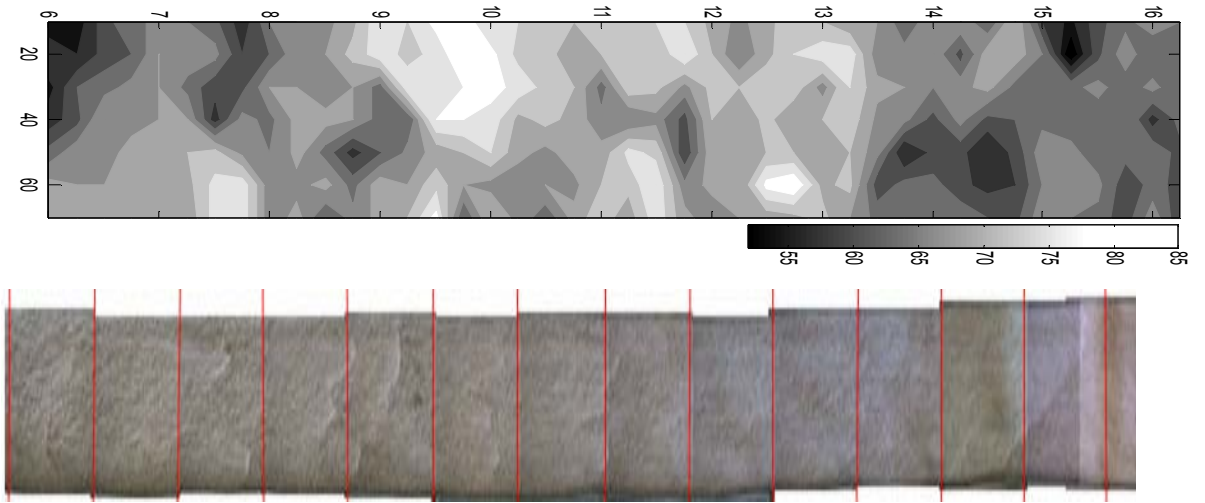
c) 8-9 m arasındaki taban şekli (Küçük kumullar (Brancoïd dunes)) **d)** 9-10 m arasındaki taban şekilleri (Küçük Kumullar)



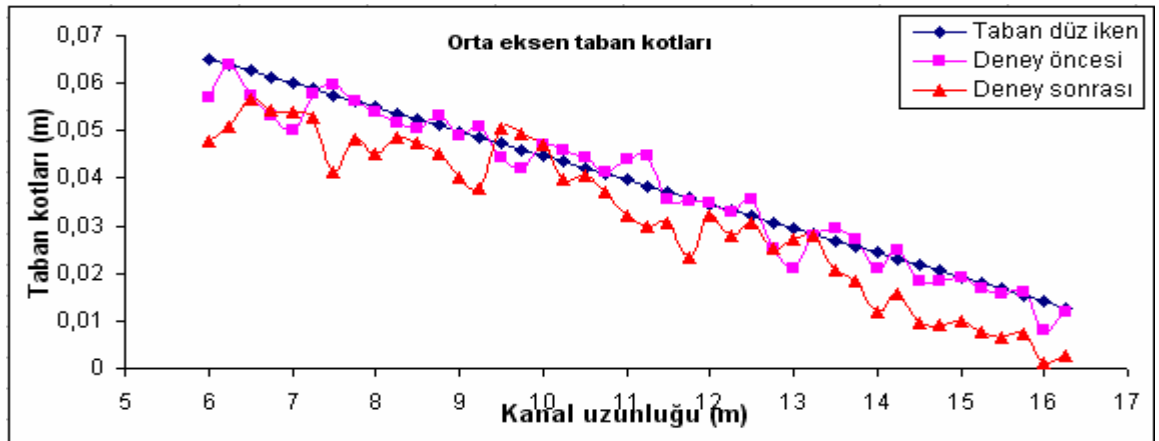
Şekil 4.14 (a,b,c,d) 4.2 deney sonrası 56,7lt/s debinin kanal tabanı düzeltilmeden 10dk süre sonunda oluşan taban şekilleri.



a) 3D



b) 2D



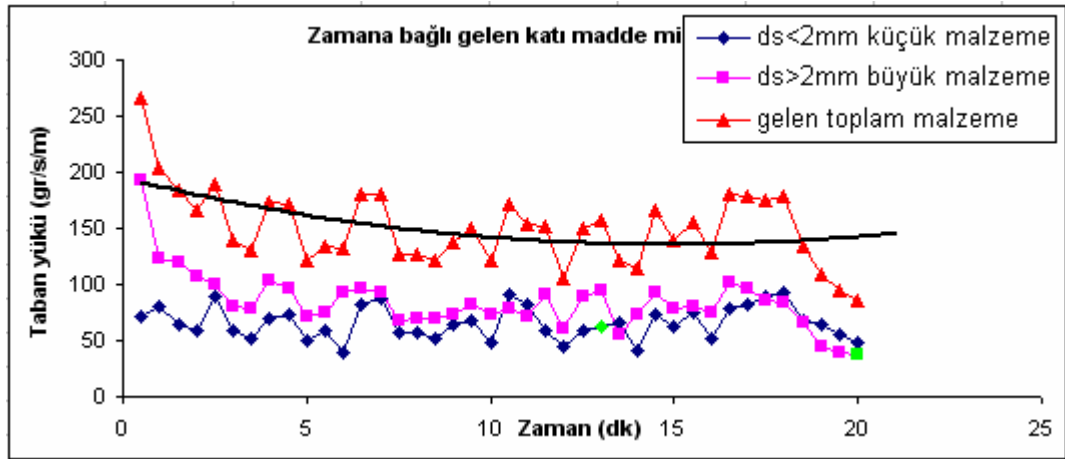
c) 1D

Şekil 4.15 (a.b.c) Taban düzleştirilmeden 4.2 deney sonrasında tekrar 56,7 lt/s debide oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir. 4.1 deneyle 4.2 deney arasındaki farkın bir boyutlu olarak belirlenmiştir. (4.2 deney sonunda daha çok aşınma belirlendi)

Toplam 20 dakika süren deneyler 60 sn'de bir sepetten kalan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim kesitte toplanan katı madde miktarı belirlenmiştir (Tablo 4.5). Zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.16) Toplanan toplam 160299gr taban malzemesinde ince malzemenin 71810 gr, iri malzeme ise 88489 gr olduğu görülmüştür.

Tablo 4.5: Birim zamanda birim kesitten geçen sediment miktarı (bed load)

Taban yükü	4.1 deney	4.2 deney	Toplam
gb (gr/sn.m) ds<2mm	64,3	72,0	68,0
gb (gr/sn.m) ds>2mm	85,8	76,0	81,1
gb (gr/sn.m)	150,1	148,0	149,1



Şekil 4.16 Zamanla gelen katı madde miktarı

4.3.3 10,0cm<h<12,5cm Arası Büyük Derinlikli Akımlarda Oluşan Taban Şekilleri

*5.Deney:

F:45 Herz -Q: 83,0 lt/sn - Fr:0,85 h: 11,5 cm V: 90,2 cm/s. Deney sonrası kanalın fotoğrafları çekilmiştir Şekil 4.17'de. Ölçülen taban kotları matlab programında 3D, 2D ve 1D olarak grafikleri oluşturulan topografya Şekil 4.18'da verilmektedir.



a) 83,0 lt/s Debi sonrasında Membadan görünüş



b) Mansaptan görünüş



c) 14-15m'deki Kumullardır.



d) 9-10m'deki kumullar

Şekil (c,d)'de Dalga boyları $\lambda=80\text{cm}$ civarında kumul yükseklikleri $b=2,3\text{ cm}$ civarındadır. Su derinliğinin birkaç katı büyüklüğündedir. Kanal genişliği ile değil de belirli bir sırada oluşması 3 boyutlu kumul olduğunu göstermektedir.



e) 10-11m'deki Kumullar



f) 11-12m'deki Kumullar



g) 6-7m'deki kumullar



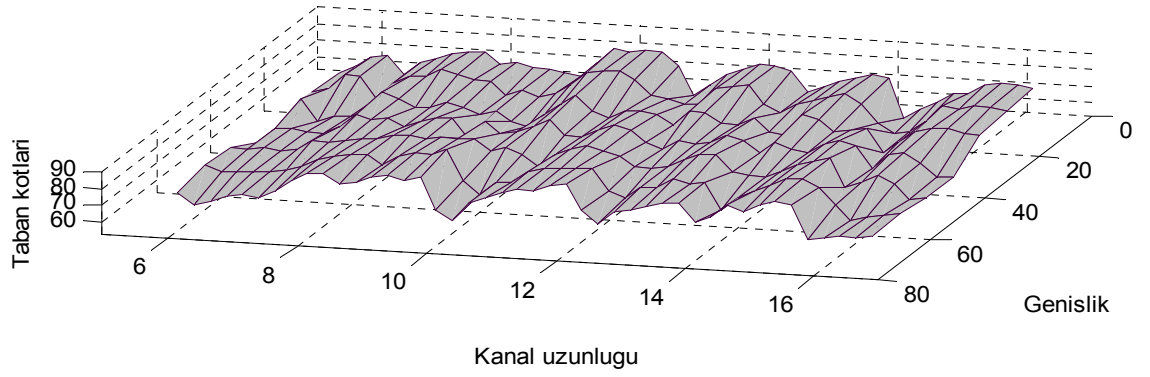
h) 9-10m'deki şeklin yandan görünüşü



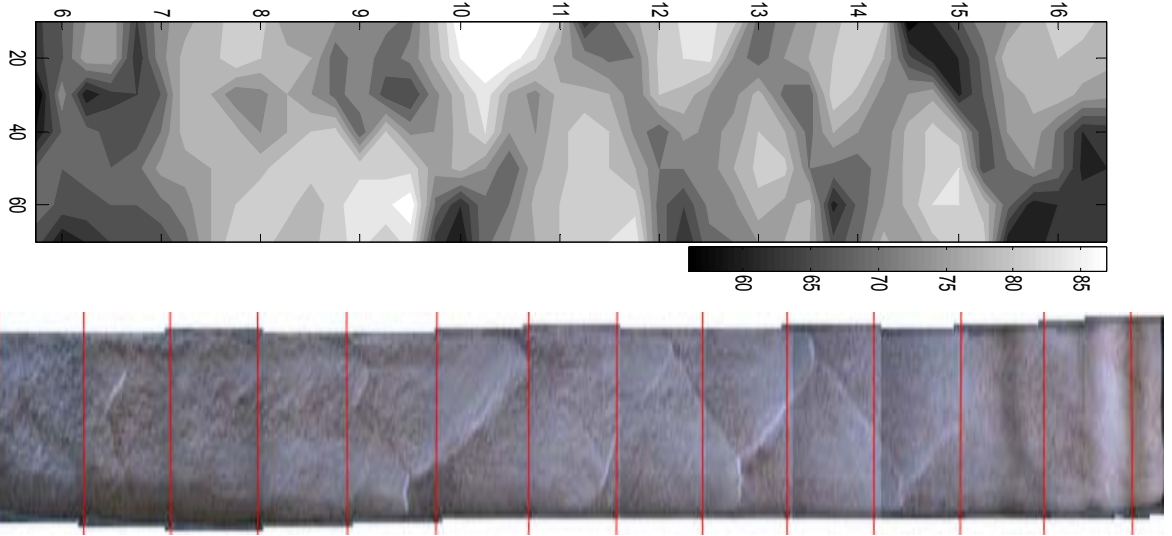
i) 14-15 m arasındaki taban şeklinin yandan ve çaprazdan görünüşü



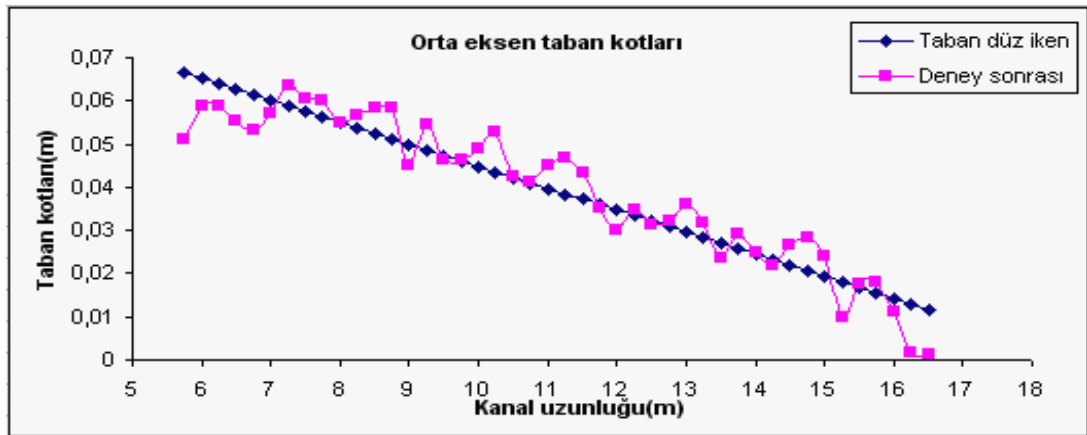
Şekil 4.17 (a,b,c,d,e,f,g,h,i) 83,0 lt/s debi ile 7dk süre sonunda kanal tabanında oluşan taban şekilleri.



a) 3D



b) 2D



c) 1D

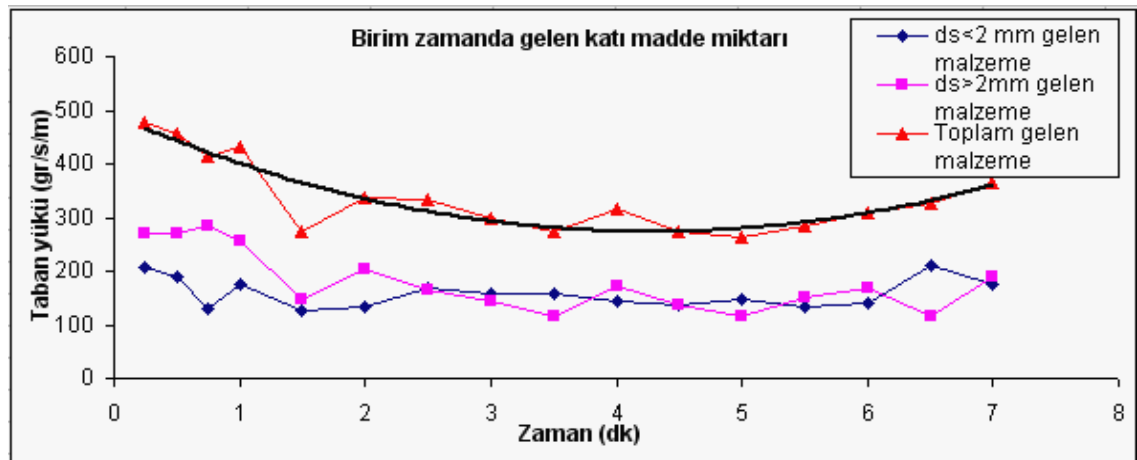
Şekil 4.18 (a.b.c) Taban düzleştirildikten sonra 83,5 lt/s debide oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir.

Toplam 7 dakika süren deneyler 15 sn'de bir sepetten kalan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim kesitte toplanan katı madde miktarı belirlenmiştir (Tablo 4.6). Zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.19) Toplanan toplam 109081gr taban malzemesinde ince malzemenin 52509 gr, iri malzeme ise 56572 gr malzeme toplanmıştır.

Tablo 4.6 5.Deney Sonrası Tartılan K. Malzeme ile B. Malzeme Miktarları.

DENEY	SS	t	T(t)	Dk	İnce Malz.(gr)	İri Malz.(gr)	Toplam (gr)	Birim Zam. K.Malz.	Birim Zam. B.Malz.	Toplam (g/s/m)
83,0 lt/s debide gelen Taban Yükü	1	15	15	0,3	2481	3257	5738	206,8	271,4	478,2
	2	15	30	0,5	2267	3223	5490	188,9	268,6	457,5
	3	15	45	0,8	1573	3392	4965	131,1	282,7	413,8
	4	15	60	1	2099	3079	5178	174,9	256,6	431,5
	5	30	90	1,5	3038	3500	6538	126,6	145,8	272,4
	6	30	120	2	3223	4853	8076	134,3	202,2	336,5
	7	30	150	2,5	4054	3954	8008	168,9	164,8	333,7
	8	30	180	3	3776	3422	7198	157,3	142,6	299,9
	9	30	210	3,5	3823	2755	6578	159,3	114,8	274,1
	10	30	240	4	3469	4138	7607	144,5	172,4	317,0
	11	30	270	4,5	3309	3267	6576	137,9	136,1	274,0
	12	30	300	5	3505	2771	6276	146,0	115,5	261,5
	13	30	330	5,5	3184	3645	6829	132,7	151,9	284,5
	14	30	360	6	3400	4009	7409	141,7	167,0	308,7
	15	30	390	6,5	5079	2769	7848	211,6	115,4	327,0
	16	30	420	7	4229	4538	8767	176,2	189,1	365,3
TOP.					52509 gr	56572 gr	109081 gr	2538 gr/s/m	2896 gr/s/m	5435 gr/s/m
Yüzde							%	47	53	100
Birim zamanda ve birim kesitte gelen katı madde miktarı							g/s/m	<u>158,7</u> gr/s/m	<u>181</u> gr/s/m	<u>339,7</u> gr/sn/m

SS: sepet sayısı, t:süre, T(t):Eklenik süre.



Şekil 4.19 83 lt/s debide gelen katı madde miktarı.

***6.Deney:**

F:50 Herz -**Q:** 93,5 - **Fr:**0,89 **h:** 12,1 cm- **V:** 96,6 cm/s. Deney sonrası kanalın fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 4.20). Ölçülen taban kotları matlab programında 3D, 2D ve 1D olarak grafikleri oluşturulan topografya Şekil 4.21’de verilmektedir.



a) 8-9m’deki taban şekli



b) 10-11 m’deki taban şekli



c) 12-13 m’deki Kumul yüksekliği 2,5 cm civarındadır. Dalga boyları $\lambda = 85$ cm ve 90cm civarında su derinliğinin birkaç katı büyüklüğünde ve kanal genişliği boyunca değil uzunluğu boyunca sırayla oluştuğu için 3D kumullar olarak adlandırılmaktadır. **d)**13-14 m’deki 3D kumullar





e) 14-15 m'deki taban şekli



f) Taban şeklinin önden görünüşü



g) 93,5 lt/s debiden sonra oluşan 3D kumullar



h) Taban şeklinin yandan görünüşü

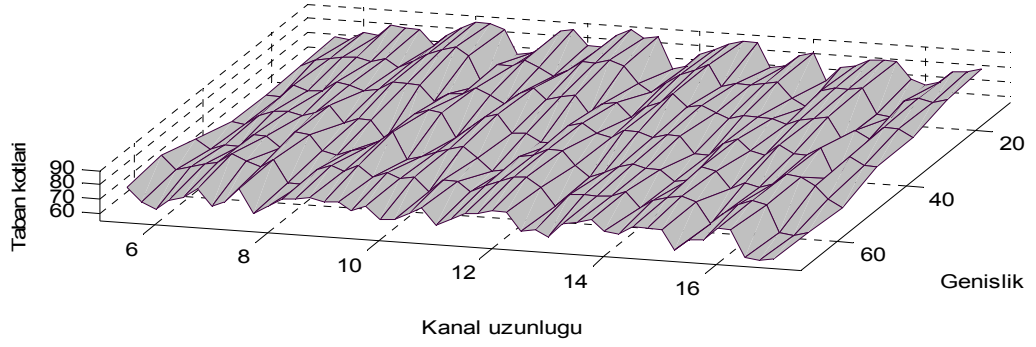


i) 93,5 lt/s debiden sonra mansaptan görünüş

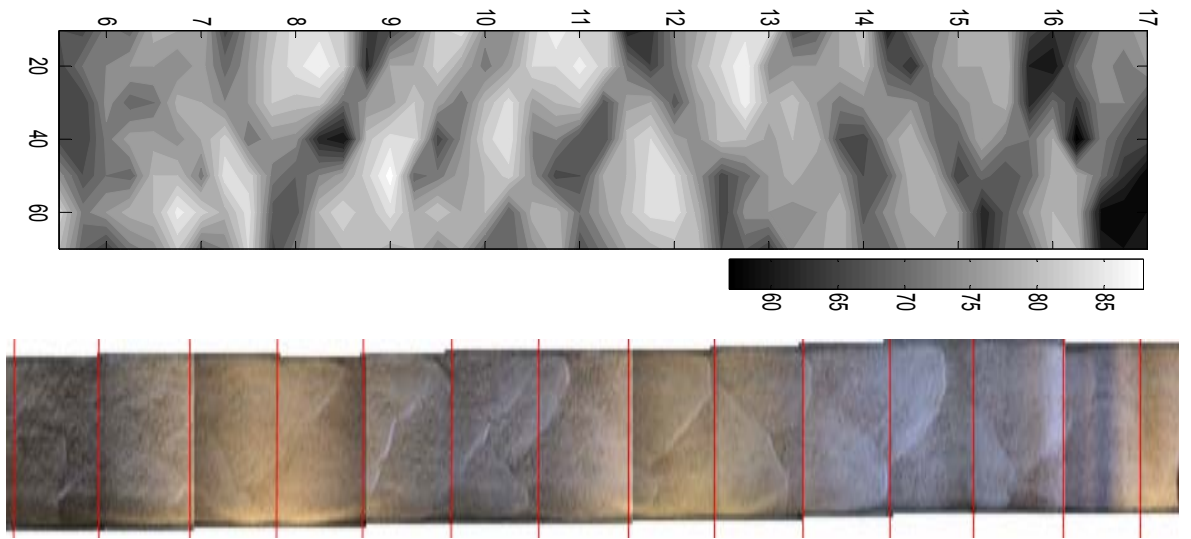


j) Membadan görünüş

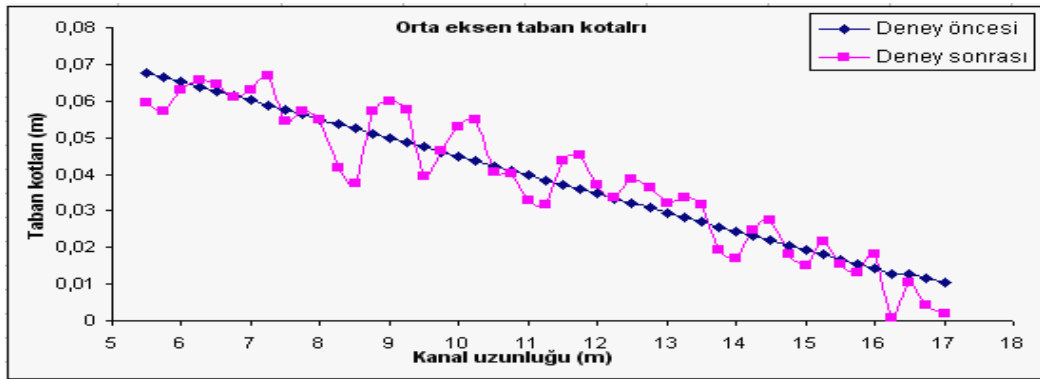
Şekil 4.20 (a,b,c,d,e,f,g,i,j) 6. deney 93,5 lt/s debinin 5dk ile geçirdikten sonra oluşan taban şekilleri fotoğrafları



a) 3D



b) 2D



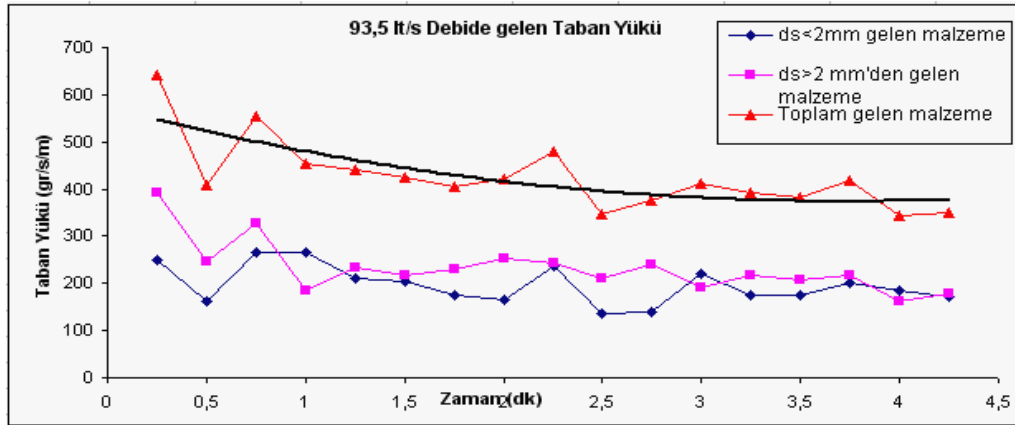
a) 1D

Şekil 4.21 (a.b.c) Taban düzleştirildikten sonra 93,5 lt/s debide oluşan taban şeklinin 3 boyutlu 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir.

Toplam 5 dakika süren deney 15 sn'de bir sepetten kalan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim kesitte toplanan katı madde miktarı belirlenmiştir (Tablo 4.7). Zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.22) Toplanan toplam 88152 gr taban malzemesinde ince malzeme 40540 gr, iri malzeme ise 47612 gr malzeme toplanmıştır.

Tablo 4.7 Birim zamanda birim kesitten geçen sediment miktarı (bed load)

Taban Yükü	Deney 8
gb (gr/sn.m) ds<2mm	<u>196,2</u>
gb (gr/sn.m) ds>2mm	<u>232,5</u>
gb (gr/sn.m)	<u>426,5</u>



Şekil 4.22 93,5 lt/s debide birim zamanda gelen taban yükü.

4.3.4 Zamanla Değişmeyen Akımda Taban Malzemesi Kotlarının Zamanla Değişimi

Yukarda bahsedilen 5.deneye ait, **F**:45 Herz -**Q**: 83,0 lt/sn - **Fr**:0,85 **h**: 11,5 cm **V**: 90,2 cm/s şartlarında oluşturulan 5 dakikalık zamanla değişmeyen akım süresince taban malzemesi kotlarında oluşan değişimler 7 adet UVP transducer yardımıyla dolaylı bir şekilde belirlenmiştir. Transducerlar kanalın 8,10,12,13 ve14.üncü metrelerine kanal eksenini boyunca 5 adet, 13'üncü metrede eksenden 12'şer santimetre sağında ve solunda 2 adet olmak üzere yerleştirilmiştir. 13. metredeki transducerlar taban malzemesi üst koyundan 8 cm yukarıda diğerleri ise taban

malzemesi üst koyundan 5 cm yukarıda yerleştirilmiştir (Şekil 4.23). UVP'den alınan veriler Flow Meth programı sayesinde Excel dosyası olarak alınmıştır. Bu veriler Excelden matlab programına kopyalanarak verilen metrelerde taban malzemesi kotlarının zamanla değişimi grafiklendirilmiştir (Şekil 4.24). Şekil 4.25'te düşey eksende gösterilen taban kotları transducer konumu karşılaştırma düzlemi alınarak ve düşey eksen aşağı doğru artarak ifade edilmiştir. Deney sonrası tabanın fotoğraflar çekilmiştir (Şekil4.25).



a) 13m 'deki 3 transducer



b) 14m'deki transducer



c) Transducerların yerleşimi

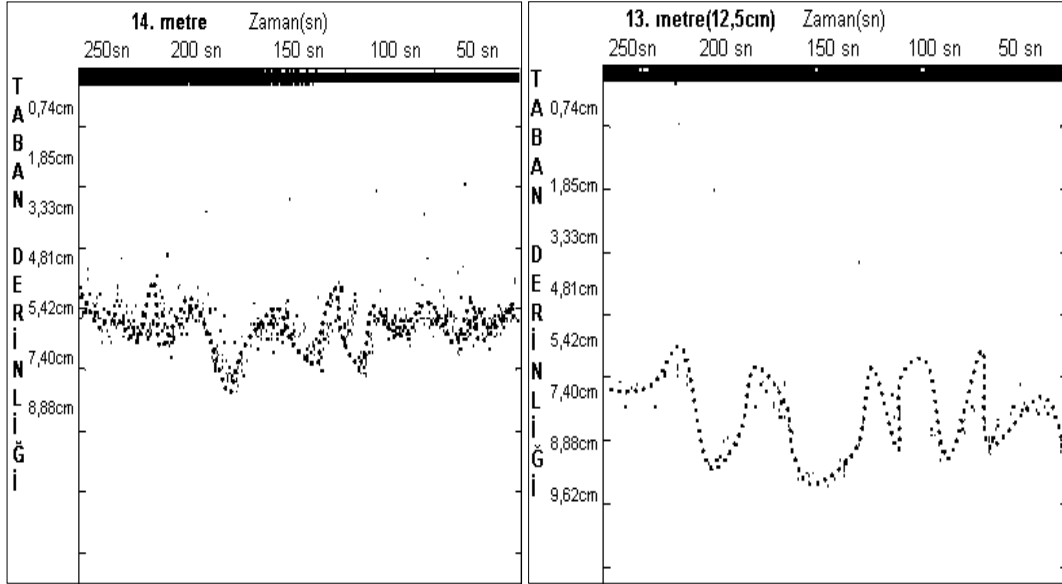


d) Kanalın görünümü

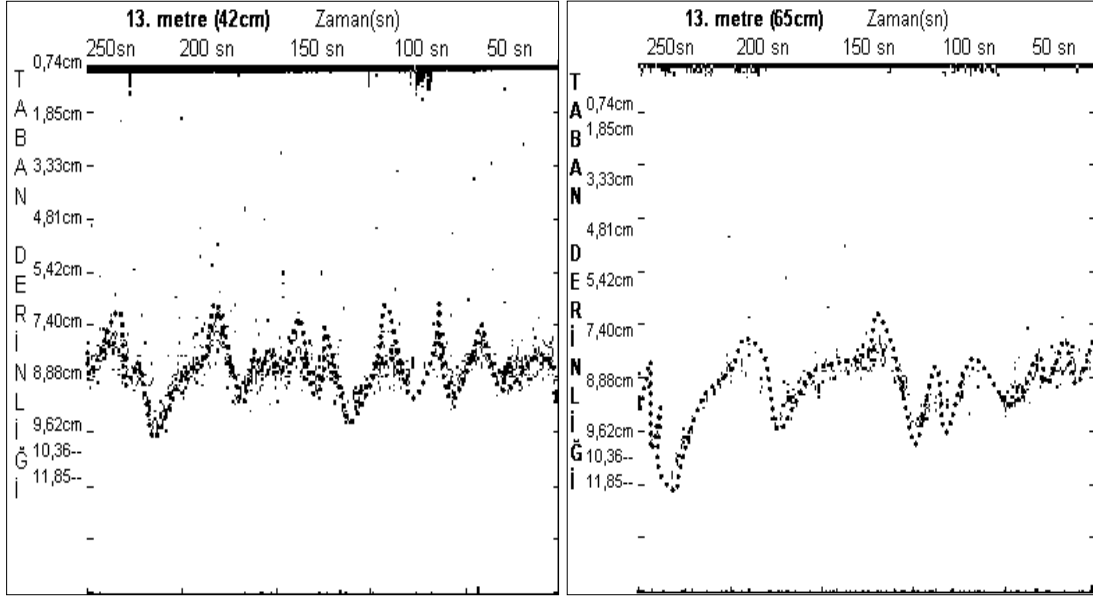


e)12-13 ve 14'üncü metredeki transducerların yerleşimi

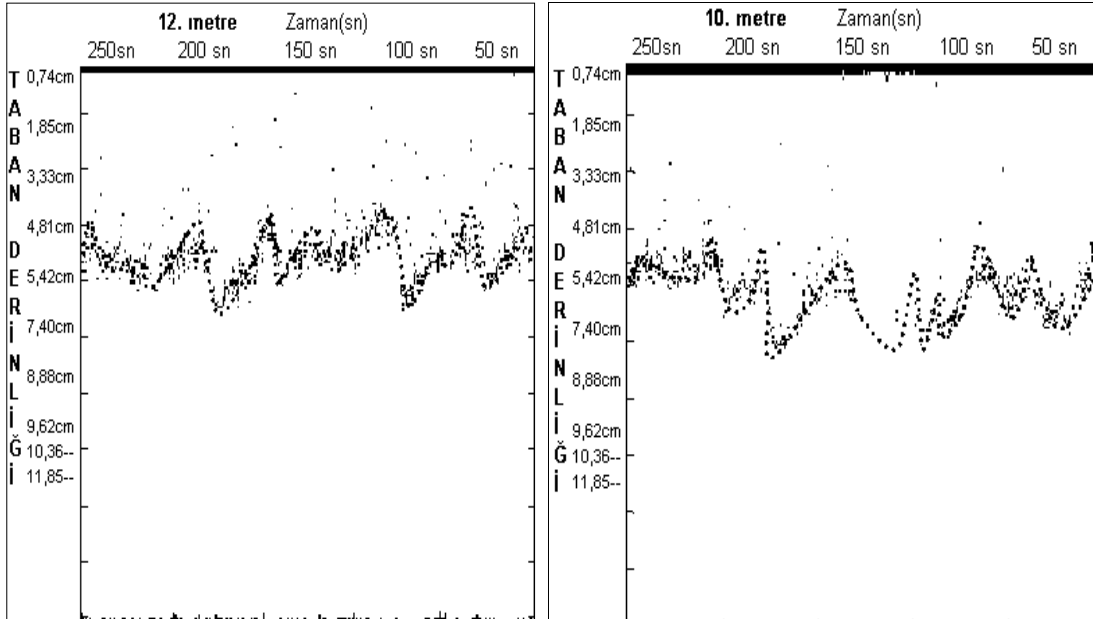
Şekil 4.23 (a,b,c,d,e) Kanal taban kotunu zamanla değişimini belirlemek için yerleştirilen transducerların konumu.



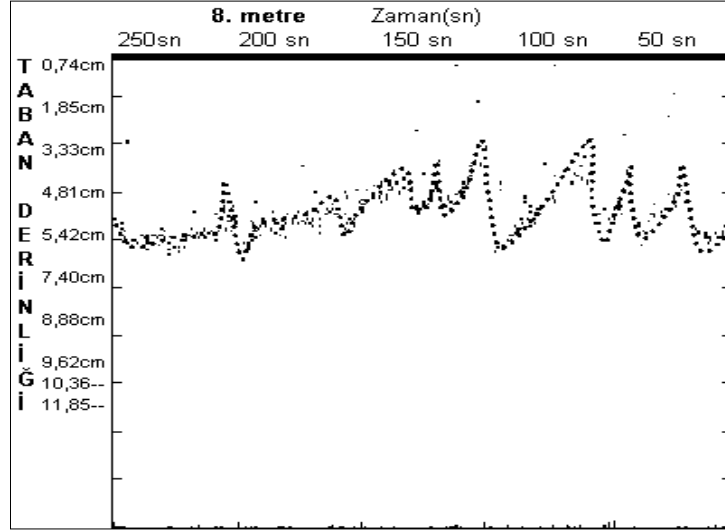
a) 14. m'de 83,0 lt/s debide tabanın zamanla değişimi. b) 13.m'de kanal genişliğinin 12,5cm'sinde tabanın zamanla değişimi



c) 13. m'de kanal genişliğinin 42 cm'sinde tabanın zamanla değişimi tabanda zaman içinde depolanma ve erozyon olayları ardı ardına oluşmaktadır. d) 13.m'de kanal genişliğinin 65cm'sinde tabanda zamanla değişimi



e) Kanalın 12. m'sinde tabanın zamanla değişimi. f) Kanalın 10. m'sinde tabanın zamanla değişimi



g) Kanalın 8. m'sinde tabanın zamanla değişimi

Şekil 4.24 (a,b,c,d,e,f,g) 9. deney sırasında transucerların UVP'ye aktarımıyla zaman içinde taban şeklinin değişimi belirlenmiştir. 14-12-10-8. m'de 5 cm yukarıda transducer bulunmaktadır. 13. m'de ise 8 cm yukarıdadır.



a) 83,0 lt/s debide deney sonrası 10 -11 m arasındaki kumullar dalga boyları $\lambda = 80$ cm civarında kumul yüksekliği 2,5 cm civarında kanal genişliği ile paralel olarak oluşmadıkları için 3 boyutlu kumullardır. **b)** 11-12m arasındaki kumulun yüksekliği



c) 12m'deki kumulun genişliği

d) 12m'deki kumulun genlik boyu

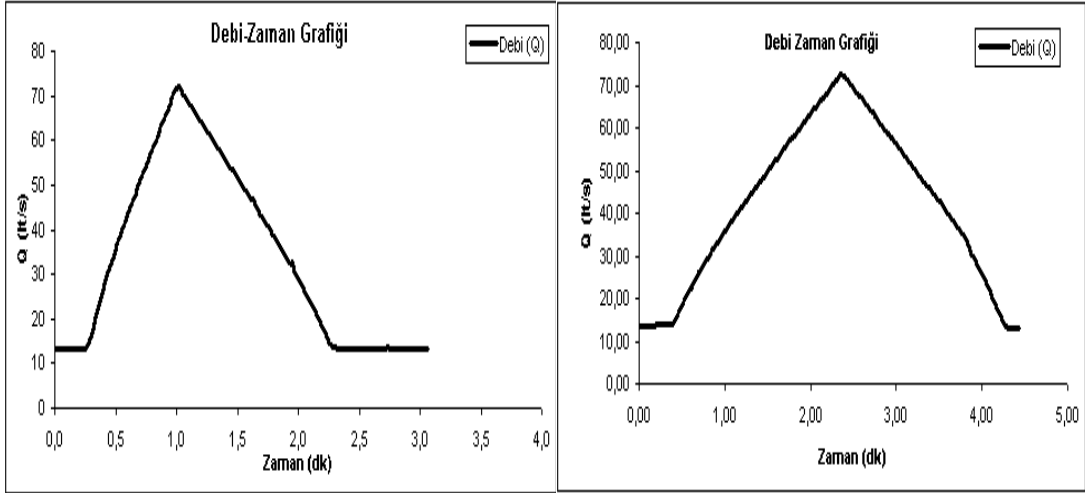
Şekil 4.25 (a,b,c,d) 9. deney sonrası Taban şekillerinin oluşumunun belirli metrelerde fotoğraflanması

4.4 Zamanla Değişen Akımlarda Taban Şekilleri İlgili Deneysel Bulgular:

Zamanla değişen akım koşullarında taban değişikliklerini incelemek amacıyla parametreleri Tablo 4.8'de ve eğrileri Şekil 4.26'de verilen iki hidrograf oluşturulmuştur. Her iki hidrografta da taban akışı 13,3 lt/s pik debisi ise 71,5 lt/s olup birinci hidrografta yükselme ve alçalma süreleri 45'er saniye; ikinci hidrografta 120 saniyedir. Taban kotlarındaki değişim 4 adet UVP transducer yardımıyla dolaylı bir şekilde belirlenmiştir. Deney sonundaki taban topografyası Puslar Imp+ seviye ölçer aracılığıyla belirlenmiştir.

Tablo 4.8. Üretilmiş hidrograflara ait parametreler

Parametre	Deney1	Deney2
Hidrograf	Hid 01	Hid 02
H_b (cm)	4,2	4,2
H_p (cm)	11,0	11,0
ΔH (cm)	6,8	6,8
T_r (s)	45	120
T_f (s)	45	120
ΔT (s)	90	240
Q_b (l/s)	13,3	13,3
Q_p (l/s)	71,5	71,5
ΔQ (l/s)	58,2	58,2



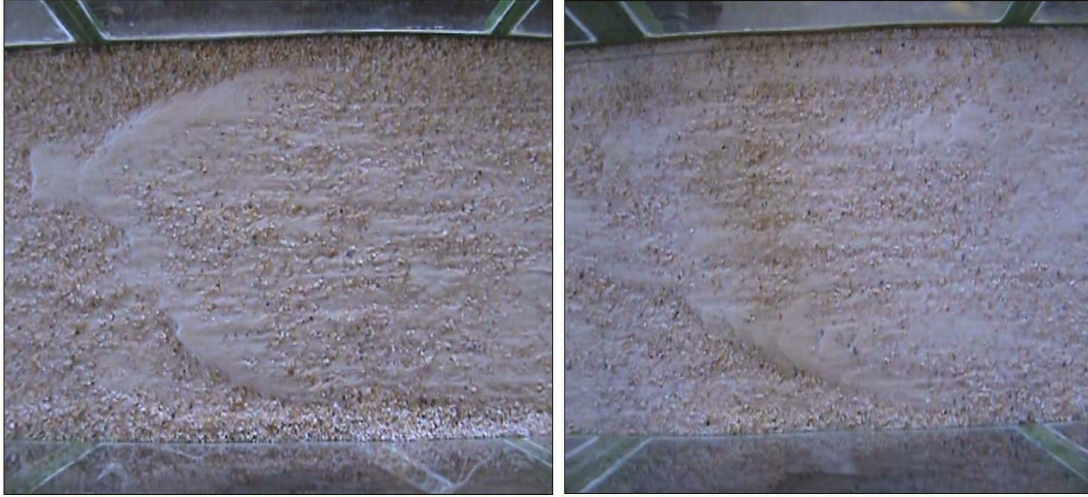
Şekil 4.26 Bu çalışmada kullanılan hidrograflar a) Hid_01 b) Hid_0,2

4.4.1 Birinci Hidrograftan Sonra Oluşan Taban Şekilleri

Deneyle 45 sn yükseliş, 45 sn ise alçalış olmak üzere toplam 90 sn süren ikizkenar üçgen şeklinde bir hidrograf oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası çekilen kanal fotoğrafları Şekil 4.27’de verilmektedir. Deney sonrasında Pulsar Imp+ seviye ölçer cihazı ile taban kotları okunan taban kotları matlab programında değerlendirilerek oluşturulan 2D ve 1D grafikler Şekil 4.28’de verilmektedir. Deney sırasında kanalın 6. ve 12. metrelerine yerleştirilen Pulsar Imp+ seviye ölçer ile elde edilen akım derinlikleri ve kanala su ileten boru üzerine monte edilmiş debimetre ile ölçülen debiler Şekil 4.29’da gösterilmektedir.



a) 10-11 m arasındaki taban şekli (Kumullar) b) 1. deney sonrası taban şekline mansaptan bakış

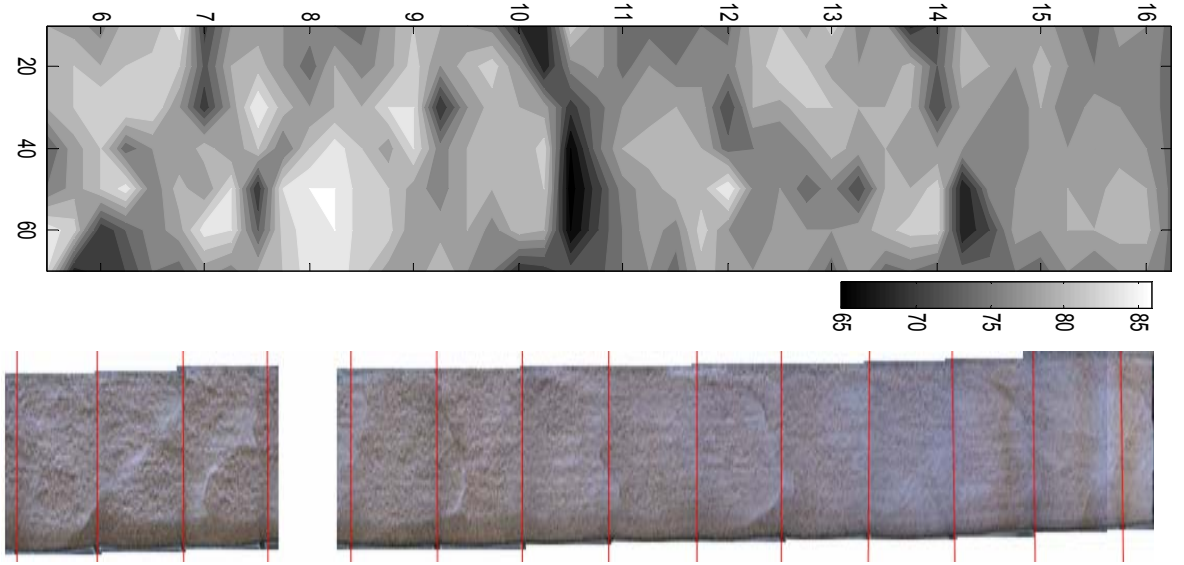


c) 13-14 m'deki Kumul oluşumu Kumul taban şekli üstünde ise akışa paralel olarak şekil alan kum akış çizgileri oluşmuştur d) 16-17 m'deki taban şekli Kumul oluşmaya çalışmıştır ama yeterli katı madde bulunmaması yada süre kısa olduğu için kumul oluşumu gerçekleşmemiştir.

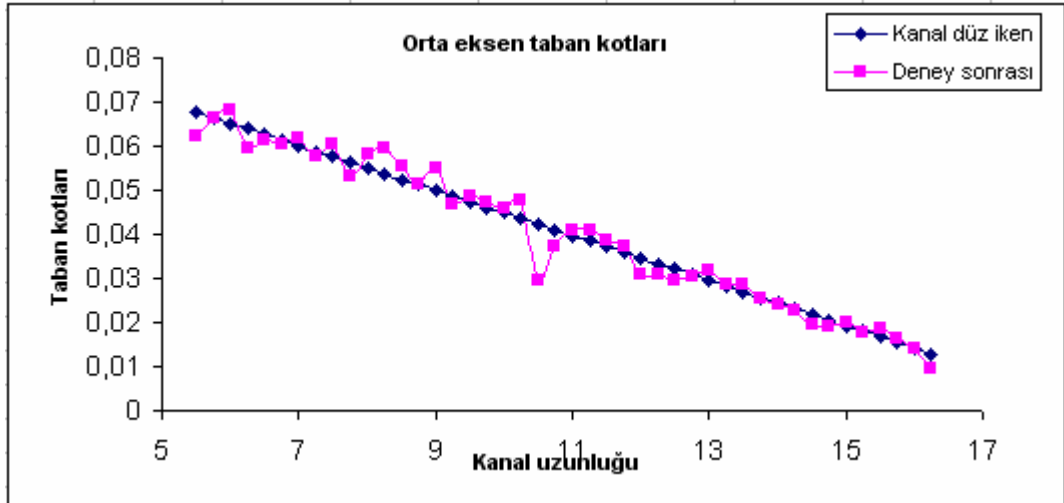


e) Kanal sonunda oluşan Kum dalgacıkları simetrik bir yapıdadır. Kumul üzerinde oluşmuş ve ince dane çapından kaynaklanmaktadır. Su derinliğiyle alakası yoktur. f) 10m'deki oluşan kumullun yandan görünüşü. Yüksekliği 2.0 cm'dir. Dalga boyu ise 45 cm civarındadır. su derinliğinin birkaç katı büyüklüğündedir.

Şekil 4.27 (a,b,c,d,e,f,) 1. Deney sonrasında oluşan taban şekillerinin belirli metrelerde fotoğraflanması.

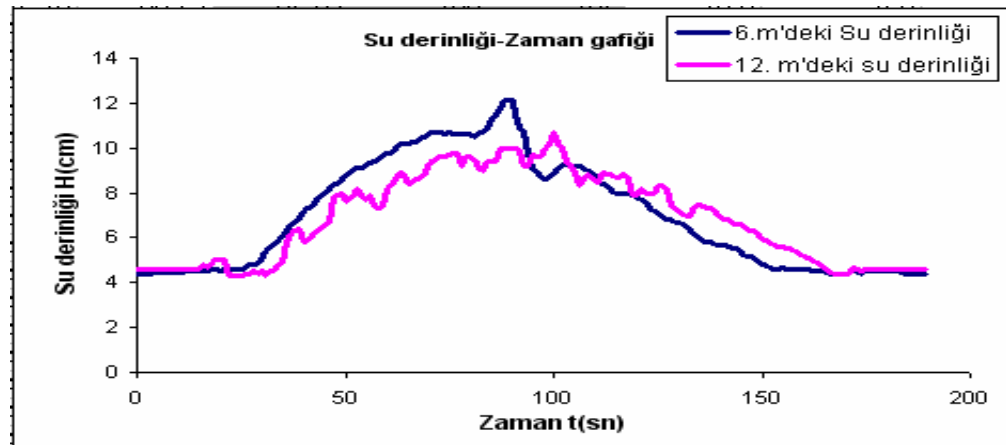


a) 2D

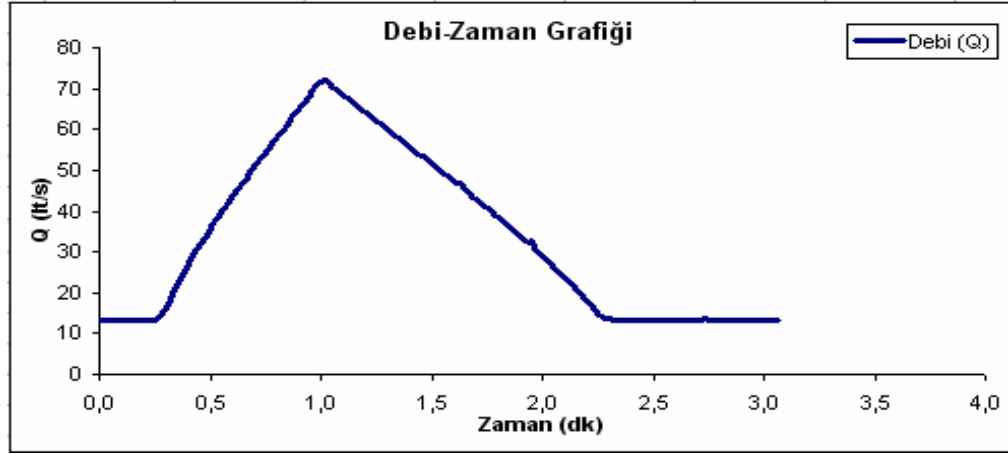


b) 1D

Şekil 4.28 (a.b) Taban düzleştirildikten sonra Hid-01 sonrasında oluşan taban şeklinin 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile incelenmesidir.



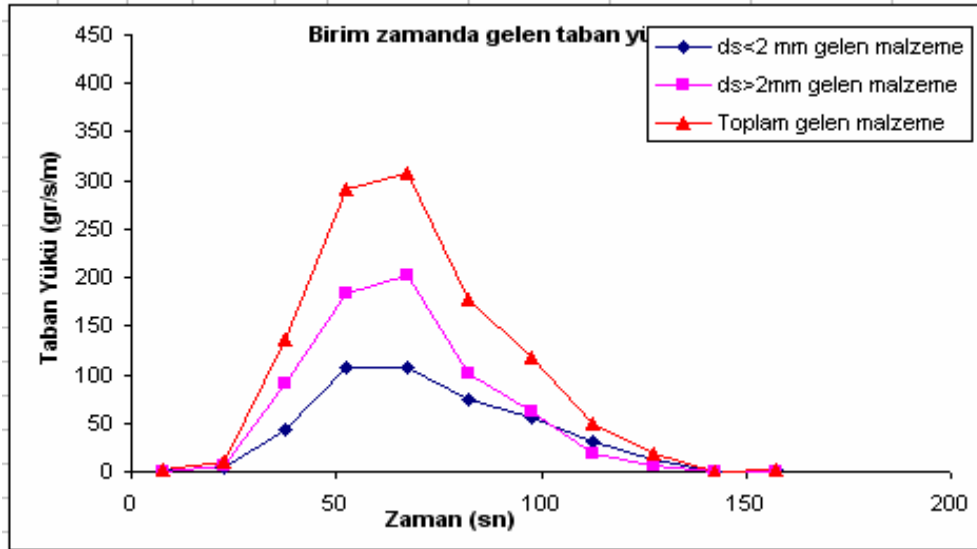
a)



b)

Şekil 4.29 (a,b) IMP Puslar+ aleti ve Debimetre ile Su derinliği ve debinin zamana bağlı olarak değişmesi.

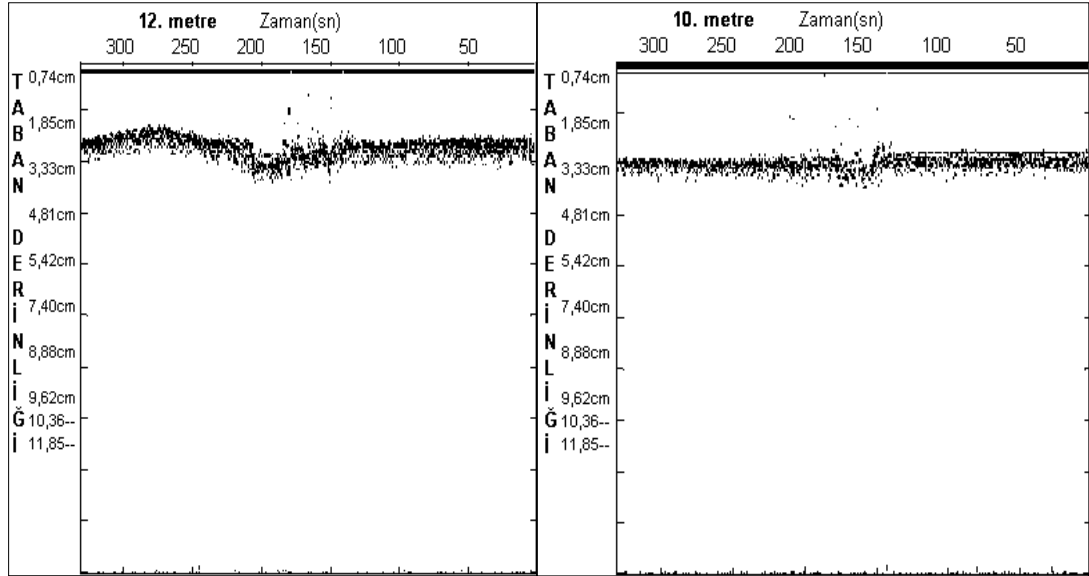
15 sn'de bir sepette kalan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim kesitte toplanan katı madde miktarı belirlenerek zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.30) Toplanan taban malzemelerinde küçük malzeme 10253 gr, Büyük malzeme ise 10817 gr malzeme gelerek toplam 21070 gr malzeme toplanmıştır.



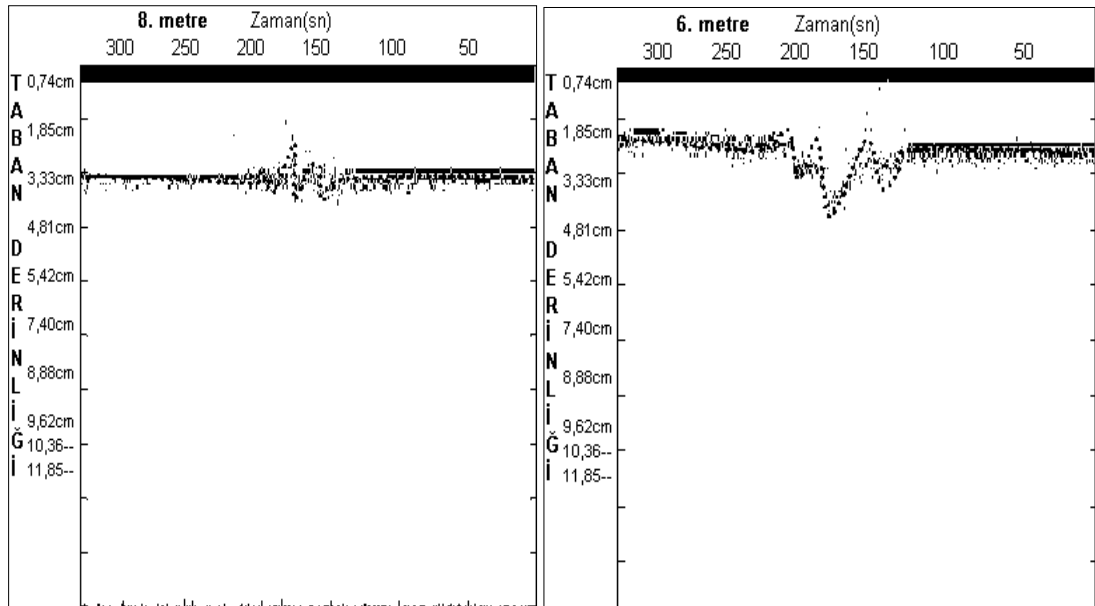
Şekil 4.30 Hid-04 sonrası zamanla gelen katı madde miktarları.

Aynı zamanda birinci hidrograf sırasında ise kararlı akım koşullarında olduğu gibi birinci hidrograf sırasında tabandan 2,25 cm yukardan transducerlar yerleştirilerek UVP aracılığıyla Şekil 4.31'de düşey ekseninde gösterilen taban kotları okunmuştur

okuma esnasında transducer konumu karşılaştırma düzlemi alınarak ve düşey eksen aşağı doğru artarak ifade edilmiştir.



a) Kanalin 12. metresindeki tabanın hidrograf sırasında zamanla değişimi b) Kanalin 10. metresindeki tabanın zamanla değişimi



c) Kanalin 8. metresindeki tabanın zamanla değişimi d) Kanalin 6. metresinde tabanda hidrograf başladığında bir erozyon oluşmakta iken hidrograf sonunda bir depolama oluşmaktadır.

Şekil 4.31 Hid-04 sırasında transducerların UVP'ye aktarılmasıyla zaman içinde taban şeklinin değişimi belirlenmiştir. Kanalin 8-10 ve 12. metrelerinde 2,25 cm yukarda transducer bulunmasıyla kanal tabanın zamanla değişiminin belirlenmesi

4.4.2 İkinci Hidrograftan Sonra Oluşan Taban Şekilleri

Deney sonrası çekilen kanal fotoğrafları Şekil 4.32’te verilmektedir. Deney sonrasında Pulsar Imp+ seviye ölçer cihazı ile taban kotları okunan taban kotları matlab programında değerlendirilerek oluşturulan 2D ve 1D grafikler Şekil 4.33’te verilmektedir. Deney sırasında kanalın 6. 8. ve 12. metrelerine yerleştirilen Pulsar Imp+ seviye ölçer ile elde edilen akım derinlikleri ve kanala su ileten boru üzerine monte edilmiş debimetre ile ölçülen debiler Şekil 4.34’te gösterilmektedir.

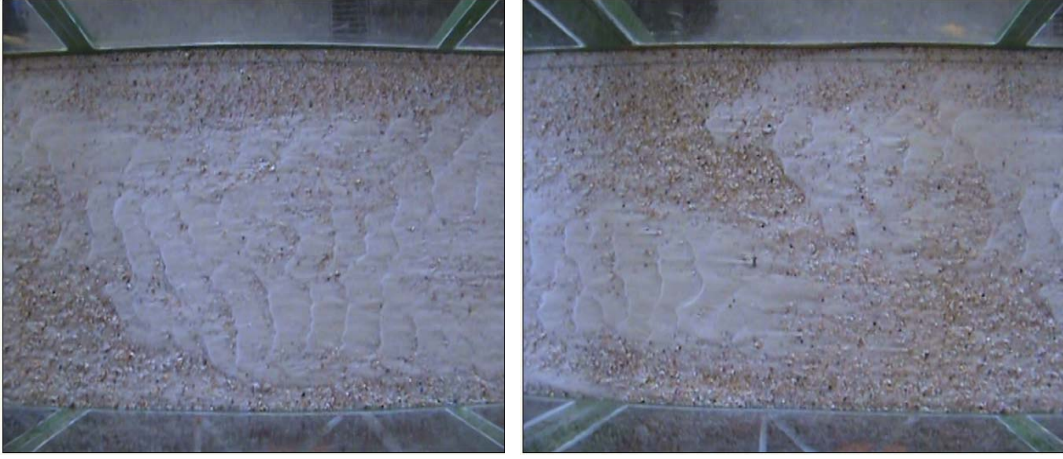


a) 6-7 m’deki kumul ve üzerindeki kum dalgacıkları **b)** 7-8 m’deki oluşan taban şekli



c) 8-9 m’deki taban şekli

d) 10-11 m’deki oluşan kum dalgacıkları



e) 15-16 m'deki taban şekli f) 16-17 m'deki oluşan kum dalgacıkları.



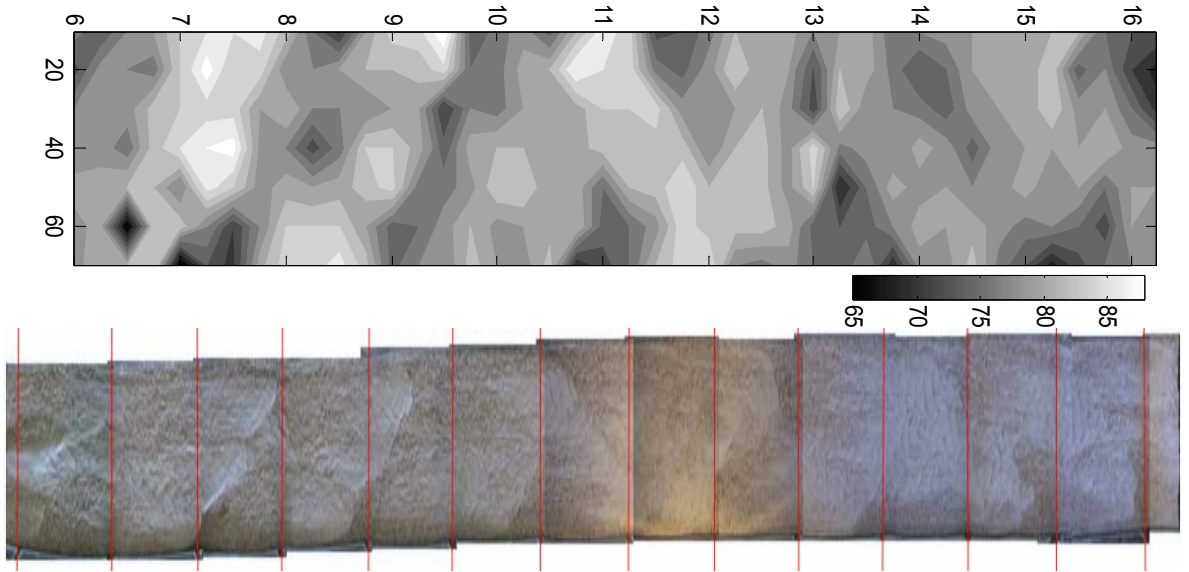
g) mansaptan bakış

h) membadan bakış

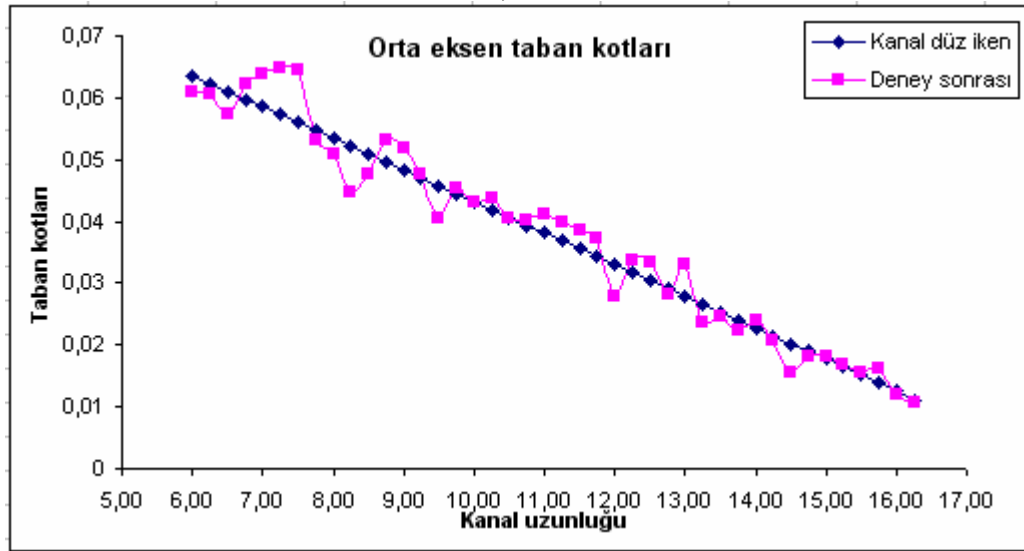


ı) 11-12m arasındaki oluşan kum dalgaları

Şekil 4.32 (a,b,c,d,e,f,g,h,ı) 2. deney sonrası kanal tabanında oluşan taban şekillerinin fotoğraflanmasıdır.

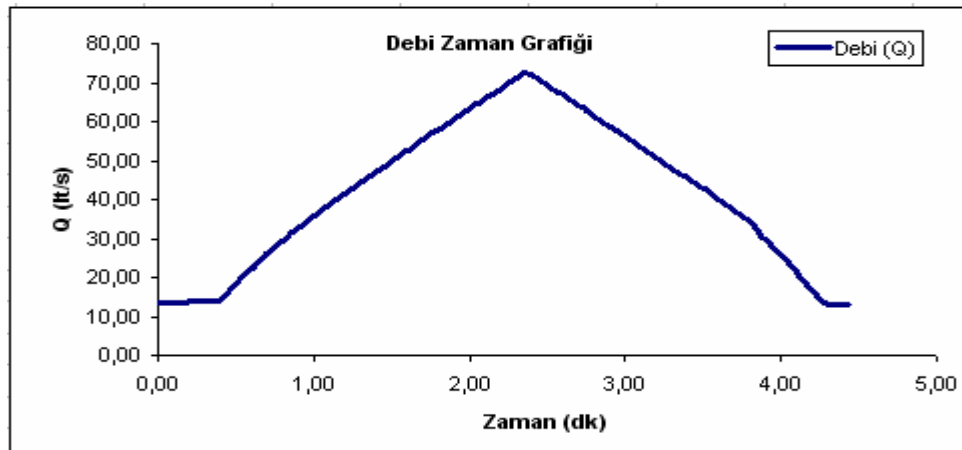


a) 2D

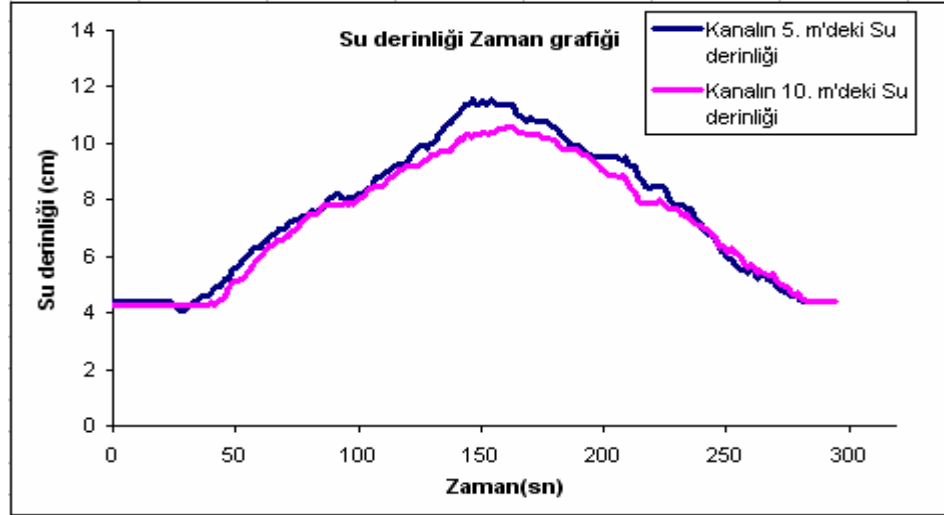


b)1D

Şekil 4.33 Taban düzleştirildikten sonra Hid-02 sonrasında oluşan taban şeklinin 2 boyutlu ve 1 boyutlu olarak grafiklerin oluşturulması ve fotoğraf ile kıyaslanmasıdır.

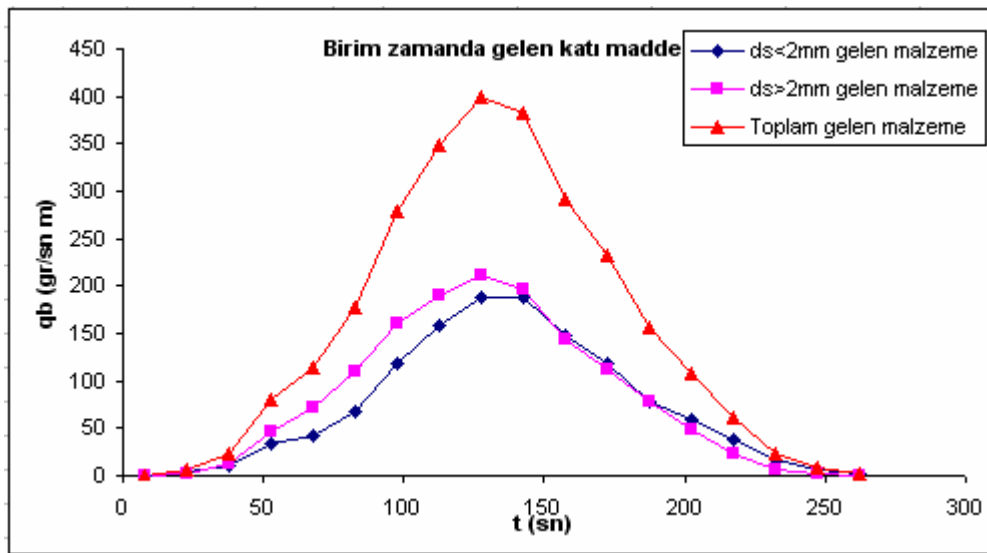


a)



Şekil 4.34 (a,b) IMP Puslar+ aleti ve Debimetre ile Su derinliği ve debinin zamana bağlı olarak değişmesi

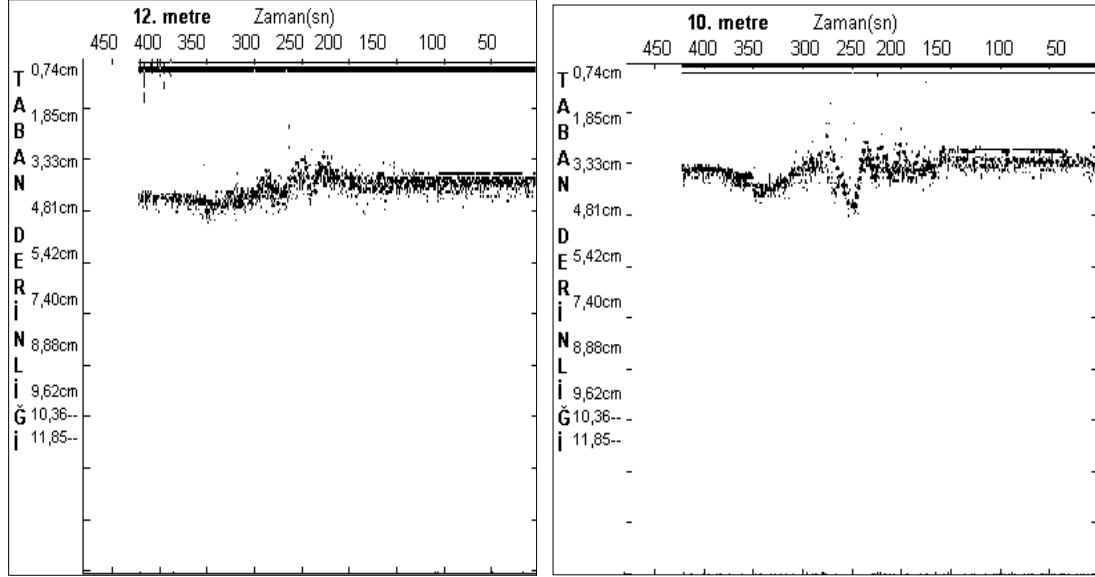
İkinci hidrograf sonrasında 15 sn'de bir sepette kalan malzemeler kurutulup tartıldıktan sonra birim zamanda ve birim kesitte toplanan katı madde miktarı belirlenerek zamana bağlı taban yükü grafiği çizilmiştir (Şekil 4.35) Toplanan taban malzemelerinde küçük malzeme 15243 gr, Büyük malzeme ise 16995 gr malzeme gelerek toplam 32338 gr malzeme toplanmıştır.



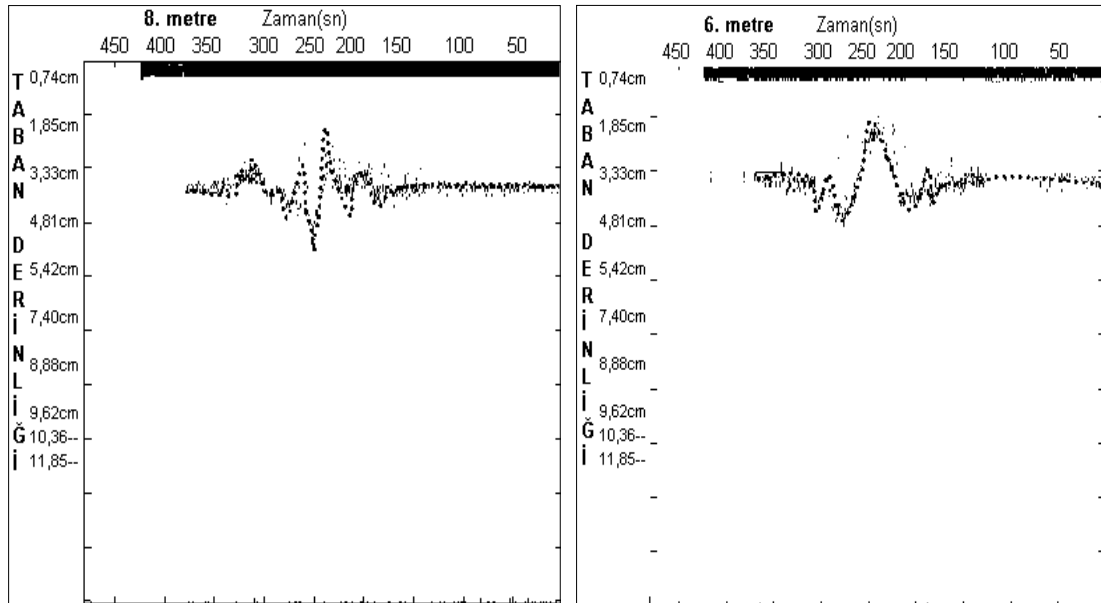
Şekil 4.35 Zamanla gelen katı madde miktarı

Aynı zamanda ikinci hidrograf sırasında ise birinci hidrografta olduğu gibi kanalın 6-8-10 ve 12. metrelere tabandan 3,3 cm yukarıda transducerlar yerleştirilerek UVP aracılığıyla zaman içinde kanalın tabanındaki değişiklik kaydedilmiştir (Şekil

4.36). Okuma esnasında transducer konumu karşılaştırma düzlemi alınarak ve düşey eksen aşağı doğru artarak ifade edilmiştir



a) Kanalin 12. metresindeki tabanın hidrograf sırasında zamanla değişimi b) Kanalin 10. metresindeki tabanın zamanla değişimi

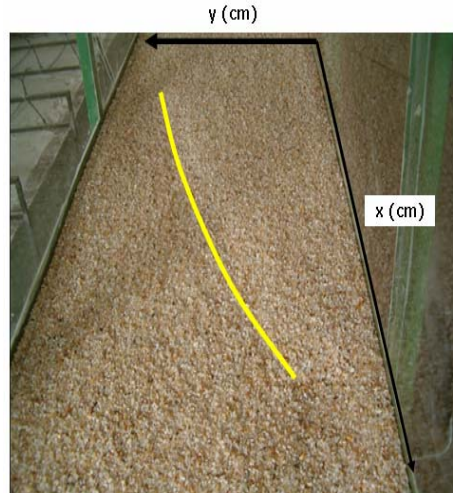


c) Kanalin 8. metresindeki tabanın zamanla değişimi d) Kanalin 6. metresinde tabanda hidrograf başladığında bir erozyon oluşmakta iken hidrograf sonunda bir depolama oluşmaktadır.

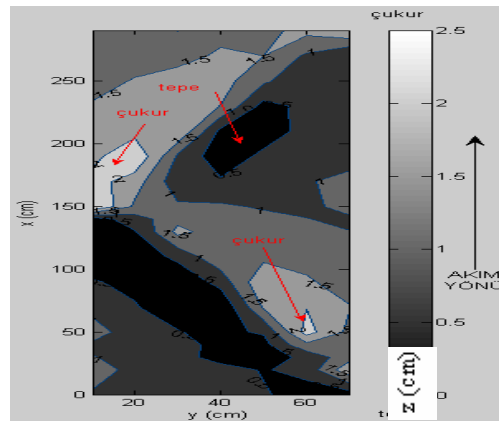
Şekil 4.36 (a,b,c,d) Hid-04 sırasında kanalın belirli yerlerine yerleştirilen problar sayesinde tabanın zamanla değişiminin belirlenmesi.

4.5 Dönüşümlü Çubuk Oluşumu

TÜBİTAK 106M274 nolu ‘Kararsız açık kanal akımlarında katı madde taşınımının deneysel ve teorik araştırılması’ başlıklı proje kapsamında median dane çapı $D_{50}=4,8$ mm olan üniform bir malzeme ile kararlı akım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu malzeme ile yapılan deney sonunda kanal tabanında herhangi bir taban şekli oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir. 68,0 lt/sn debinin geçirildiği deneyde su yüksekliği $h:10$ cm Froude sayısı $Fr=0,86$, akış hızı $u=85$ cm/s olarak ölçülmüştür. Kayma gerilmesi $\tau_0 = 0,5$ kg/m² , $\tau_{cr} = 0,033$ kg/m² , $\tau_* = 0,063$, $\tau_{*cr} = 0,042$ olarak hesaplanmıştır. Deney sonrasında Şekil 4.37’de gösterildiği gibi dönüşümlü barlar gözlenmiştir. Bu taban şekillerinin maksimum yüksekliği $H_B = (\Delta_a) = 2,5$ cm ve toplam uzunluğu λ_a yaklaşık 5 m olarak ölçülmüştür. Mathlap kullanılarak elde edilen eşyüksekti eğrileri Şekil 4.38’de verilmektedir



Şekil 4.37 Deneylerden sonra gözlemlenen dönüşümlü barlar. (Bombar 2009)



Şekil 4.38 Dönüşümlü barların kotları (Bombar 2009)

4.6 Manning Pürüzlülük Katsayısının Deneysel Olarak Belirlenmesi

4.6.1 Pürüzlülük Katsayısını Etkileyen Faktörler

En pratik siliminasyonlarda n değeri çok değişken bir fonksiyondur. Dolayısıyla n 'ye bağlı olan faktörlerin niteliksel bir bilgisi gereklidir. Bu faktörler ise

- a. yüzey pürüzlülüğü
- b. bitki
- c. kanal düzensizliği
- d. Obstrüksiyon
- e. Kanal uyumu
- f. Sedimentasyon ve oyulma
- g. Rejim ve debi

n Manning pürüzlülük katsayısı sadece Reynold sayısı ile değişmez aynı zamanda

- a. Akış Derinliğine
- b. Katı madde taşınımı
- c. Askıdaki madde
- d. En kesit şekli
- e. Taban malzemesinin çapı
- f. Su sıcaklığı
- g. Akım yönü ve büyüklüğü ile de değişmektedir (Önder,2007).

4.6.2 Eşdeğer Pürüzlülüğün Belirlenmesi

Üniform akım durumunda Manning-Strickler (4-3) denkleminde faydalanarak deneylerde bulunan değerlere göre hesaplanan n pürüzlülük katsayıları değerleri Tablo 4.9' de verilmiştir.

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (4-3)$$

Tablo 4.9 Pürüzlülük katsayısı değerleri

Q	Q	h	A	P	R	S₀	k	n
lt/sn	m³/sn	cm	m²	m	m		1/n	
13,3	0,0133	4,2	0,034	0,8848	0,038	0,005	49,52	0,0202
40,4	0,0404	7,6	0,061	0,952	0,064	0,005	58,81	0,0170
49,8	0,0498	8,5	0,068	0,97	0,07	0,005	60,92	0,0164
56,7	0,0567	9,0	0,072	0,98	0,073	0,005	63,49	0,0158
83,0	0,083	11,5	0,092	1,03	0,089	0,005	63,85	0,0156
93,5	0,0935	12,1	0,097	1,042	0,093	0,005	66,60	0,0150

Deney düzeneğindeki kanalımızın iki yanını pleksiglas kaplı olup tabandaki sac üzerinde ortalama 7,5 cm yüksekliğinde katı madde taşınımı için serilmiş malzeme ($D_{50}=1,03$ mm) vardır.

Literatürde taban şevlerinde farklı pürüzlülüklerin söz konusu olduğu heterojen kesitlerin hesaplanması için değişik yaklaşımlar kullanılmıştır. Islak çevre P, hidrolik yarıçap R ve $n=1/k$ olmak üzere,

Einstein formülüne göre,

$$k = \left[\frac{P}{\sum \frac{P_i}{k_i^{3/2}}} \right]^{2/3} \quad (4-4)$$

Lotter formülüne göre,

$$k = \frac{\sum k_i P_i}{P} \quad (4-5)$$

Bazı araştırmacılar heterojen kesitlerin hesabı yapılırken; ortalama bir pürüzlülük katsayısı için,

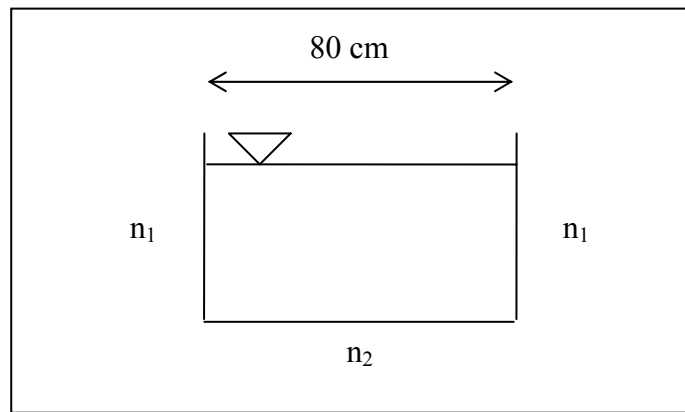
$$1) n = \left(\frac{\sum P_i n_i^{1,5}}{P} \right)^{2/3} \quad (4-6)$$

$$2) n = \left(\frac{\sum P_i n_i^2}{P} \right)^{1/2} \quad (4-7)$$

$$3) n = \frac{P * R^{5/3}}{\sum \frac{P_i R^{5/3}}{n_i}} \quad (4-8)$$

ampirik formüllerini önermişlerdir (Güney, 2006).

Heterojen kesit hesabı yapılırken çeşitli kanal tanımları için verilen pürüzlülük katsayısı değerlerinden; kanalımızın yan cıdarları için $n_1=0,009$ (Mineli ve camlı kaplamalar), taban için $n_2=0,020$ (Pürüzsüz iyi sıkıştırılmış toprak) alınmıştır (Şekil 4.39). Bulunan değerler Tablo 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.39 Heterojen kesit gösterimi

Tablo 4.10 Einstein formülüne göre eşdeğer pürüzlülük

h(cm)	h(m)	k₁	k₂	P(m)	P₁ / k₁^{1,5}	P₂ / k₂^{1,5}	k	n
4,2	0,042	111,11	50	0,8848	3,586E-05	0,0023	52,34	0,019
7,6	0,076	111,11	50	0,952	6,489E-05	0,0023	54,10	0,018
8,5	0,085	111,11	50	0,97	7,257E-05	0,0023	54,55	0,018
9,0	0,09	111,11	50	0,98	7,6841E-05	0,0023	54,79	0,018
11,5	0,115	111,11	50	1,03	9,819E-05	0,0023	55,98	0,018
12,1	0,121	111,11	50	1,042	0,000103	0,0023	56,26	0,018

Tablo 4.11 Lotter formülüne göre eşdeğer pürüzlülük değerleri

h(cm)	h(m)	k₁	k₂	P(m)	k₁*P₁	k₂*P₂	k	n
4,2	0,042	111,11	50	0,8848	4,67	40	55,8	0,018
7,6	0,076	111,11	50	0,952	8,44	40	59,8	0,017
8,5	0,085	111,11	50	0,97	9,44	40	60,7	0,016
9,0	0,09	111,11	50	0,98	10,00	40	61,2	0,016
11,5	0,115	111,11	50	1,03	12,78	40	63,6	0,016
12,1	0,121	111,11	50	1,042	13,44	40	64,2	0,016

Tablo 4.12 (4-7) ampirik formülüne göre eşdeğer pürüzlülük değerleri

h(cm)	h(m)	n₁	n₂	P(m)	P₁*n₁^{1,5}	P₂*n₂^{1,5}	n
4,2	0,042	0,009	0,02	0,8848	3,5860E-05	0,002263	0,019
7,6	0,076	0,009	0,02	0,952	6,48899E-05	0,002263	0,018
8,5	0,085	0,009	0,02	0,97	7,25743E-05	0,002263	0,018
9,0	0,09	0,009	0,02	0,98	7,68433E-05	0,002263	0,018
11,5	0,115	0,009	0,02	1,03	9,81887E-05	0,002263	0,018
12,1	0,121	0,009	0,02	1,042	0,000103312	0,002263	0,018

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL SONUÇLARIN AMPİRİK BAĞINTILARLA KIYASLANMASI

5.1 Harekete Başlama İle İlgili Bulguların Karşılaştırılması

Taban malzemesinin harekete başlaması ile ilgili kriterler ve bu kriterler uyumluluğu Bölüm 4.1, Tablo 4.1 ve 4.2’de özetlenmiştir. Tablo 4.2’den de görülebileceği gibi literatürde üniform malzeme için verilen harekete başlama kriterleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

5.2 Taban Şekilleri İle İlgili Bulguların Literatür Bilgileriyle Karşılaştırılması

Literatürde yer alan ampirik ve grafiksel bağıntılar ile deney sonucunda elde edilen bulgular karşılaştırılarak Şekil 5.1- 5.18’de sunulmaktadır.

Deneysel çalışmalardaki parametreler Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Elde edilen bulguların geçmişte yapılan çalışmalarla uygunluğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında $d_{50}=1,03\text{mm}$ malzeme kullanılarak 6 farklı kararlı akım debisinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yeterli sayıda tekrarlanan deneyler sonunda 1. deneyde (10 dk süre boyunca $Q=13,3\text{ lt/s}$) düzgün taban gözlemiştir. $40,4\text{ lt/s}$ (10 dk boyunca), $49,8\text{ lt/s}$ (15 dk boyunca), $56,7\text{ lt/s}$ (10 dk boyunca) debileri ile gerçekleştirilen deneylerde 2 boyutlu (2D) kumul (kum dalgacıklı) gözlenmiştir. $83,0\text{ lt/s}$ (7 dk boyunca) ve $93,5\text{ lt/s}$ (5 dk boyunca) debide 3 boyutlu (3D) kumul olarak tanımlanan taban şekilleri görülmüştür. Fazla katı madde taşındığından ve sınırlı sayıda sepet olduğundan büyük debilerdeki deney süreleri kısa tutulmuştur.

Taban debileri $13,3\text{ lt/s}$ ve pik debileri $73,3\text{ lt/s}$ olan ikizkenar üçgen şeklinde kontrol ünitesine tanımı yapılan 2 hidrografın 1.’sinde 90 sn 2.’sinde ise 240 sn’lik toplam süreler uygulanmıştır. Hidrografların geçmişte yapılan çalışmalarla kıyaslama yapabilmek için hidrografların pik debisinde ve hidrografların taban ve pik debisinin ortalama değerleri alınarak kıyaslama yapılmıştır.

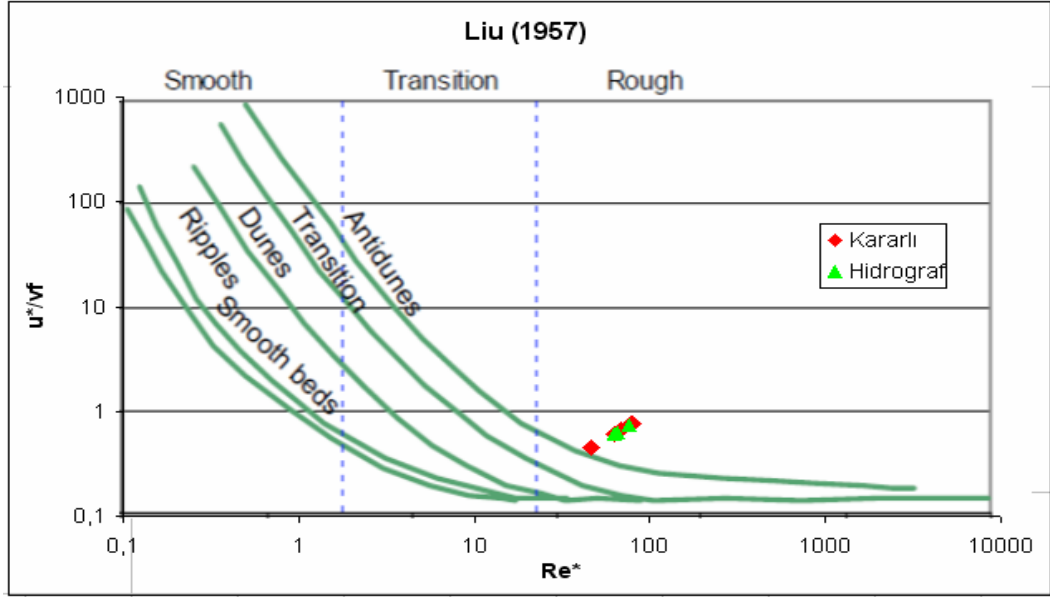
Şekillerde kullanılan simgeler Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1 Taban şekilleri sembolleri

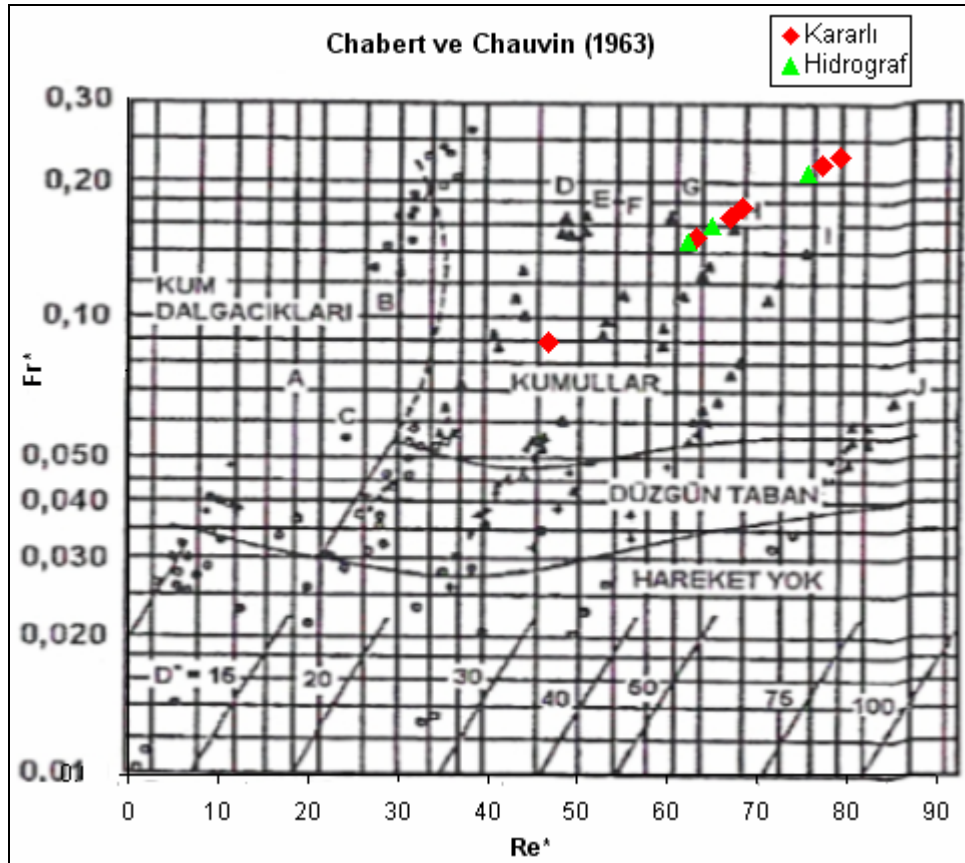
◆ New data (Inner Fiep)	× Megaripples & dunes
— Plane beds	× Dunes
+ Ripples	○ Transition
■ Miniripples	△ Antidunes

Lui (1957) tarafından yapılan taban şekli sınıflandırılmasında u_* / v_f oranı (v_f :çökme hızı ve u_* :kayma hızı’dır.) ile boyutsuz Reynold sayısı Re_* dikkate alınarak eğriler oluşturulmuştur (Şekil 5.1). Bu çalışma kapsamında u_* / v_f oranı 0,45 ile 0,77 arasında değişirken, Re_* ise 46,7 ile 79,4 arasında değişmektedir. Lui tarafından yapılan sınıflandırmaya göre deney 1’de kum dalgacıkları deney 2-6’da ise kumullar oluşmaktadır. Grafikteki eğrilerin 12,2m uzunluğunda 0,3 m genişliğinde 0,6m derinliğindeki bir kanalda oluşturulduğu, deneylerde 0,20mm ile 0,69mm arasında değişen nehir kumu kullanıldığı, akış derinliği ve kayma hızının 0,12m ile 0,03m/s olarak kaydedildiği ve bu ölçümler sonucunda sınıflandırma yapıldığı belirtilmiştir. Oluşan taban şekillerinin abakla uyumsuz bir şekilde tüm deneylerde Ters Kumullar (Antidune) taban şekli olduğu gözlemlenmiştir. Hidrograflarda ise kanalın ortasında oluşan kumul ile ve kanalın mansabında oluşan kum dalgacıkları taban şekli ile uyumlu değildir.

Chubert ve Chauvin (1963)’e göre yapılan sınıflandırmada tez kapsamında yapılan deneylerin tümünde kumul taban şekli oluşmaktadır (Şekil 5.2). Yapılan kararlı akım deneylerin 6 tanesinin 5 tanesi abakla uyumlu olduğu görülmüştür. Hidrografta ise kanalın ortasında oluşan kumul taban şekli ile uyum içindeyken kanalın mansabında oluşan kum dalgacıkları taban şekli ile uyumlu değildir.

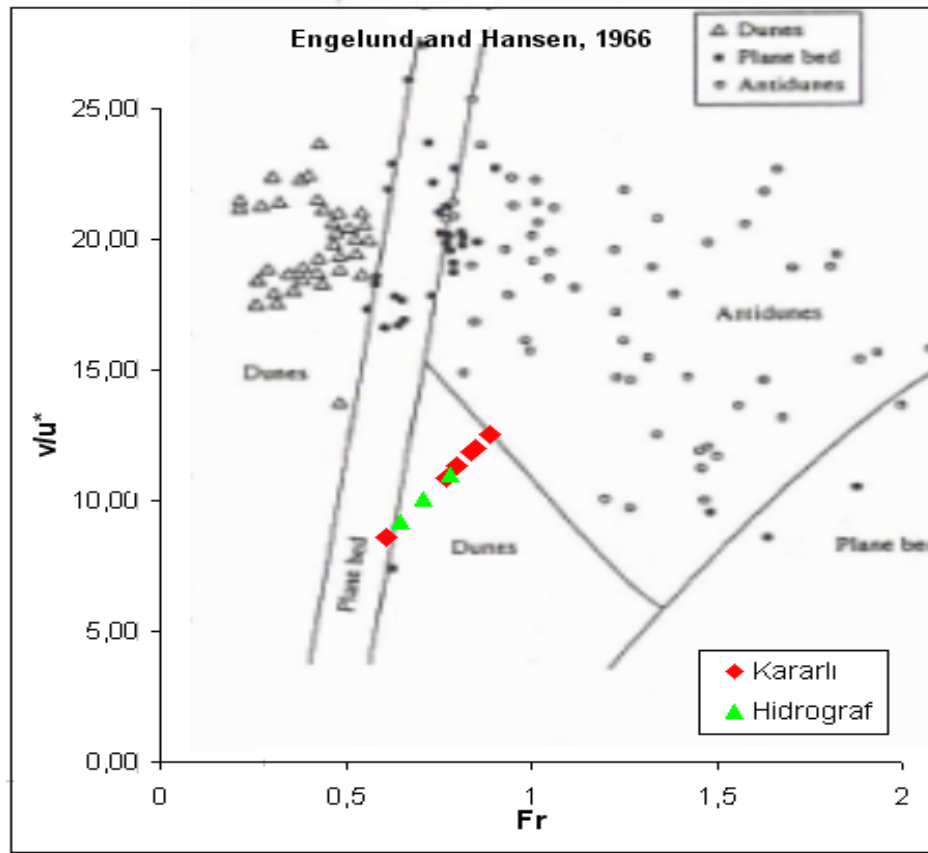


Şekil 5.1 Taban şekillerinin u^*/v_f ve Re^* parametreleri kullanılarak sınıflandırılması u^* : kayma hızı (m/s), v_f : çökme hızı (m/s) Re^* : Tane Reynold sayısı (Liu, 1957)



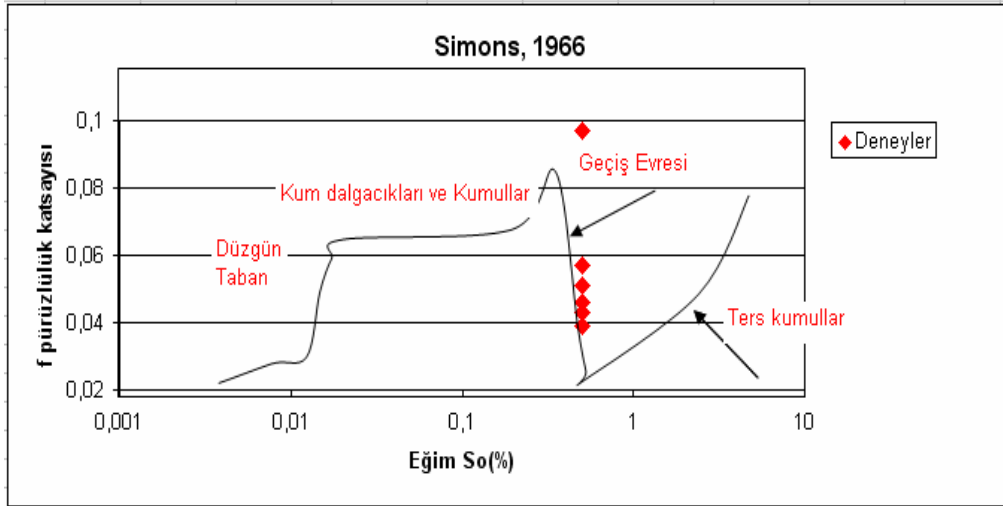
Şekil 5.2 Taban şekilleri Fr^* ve Re^* cinsinden sınıflandırılması. $D^*=26,1$ $Fr>0,11$ olduğu için Kumullar taban şeklidir (Chabert ve Chauvin, 1963).

Engelund ve Hansen (1966) tarafından yapılan taban şekli sınıflandırılmasında kayma hızı (u_*), akım hızı (V) ve Froude sayısı dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında Froude sayısı 0,61 ile 0,89 arasında değişmekte iken v/u_* ise 8,60 ile 12,55 arasında değişmektedir. Kararlı akımda oluşan taban şekli Deney 1’de düz iken Deney 2-5’te kumul taban şekli olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçların tamamı abakla uyum içindedir (Şekil 5.3). Hidrografta ise kanalın ortasında oluşan kumul taban şekli ile uyum içindeyken kanalın mansabında oluşan kum dalgacıkları taban şekli ile uyumlu değildir.



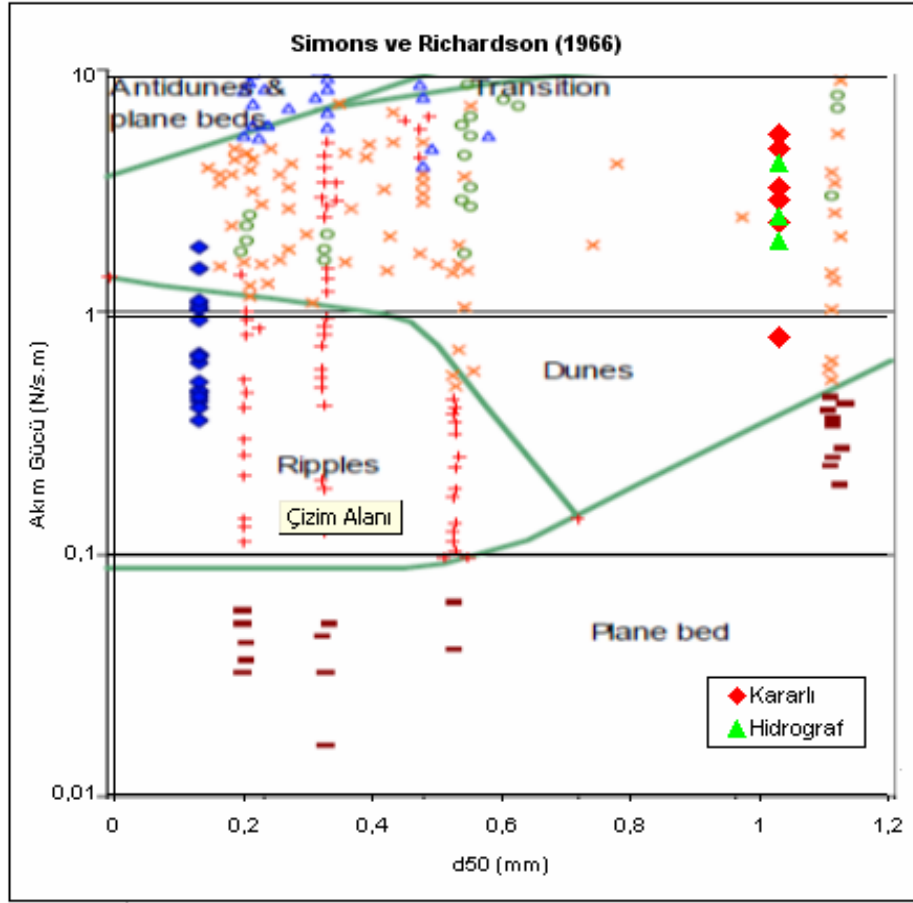
Şekil 5.3 Laboratuvar analizlerini temel alınarak yapılan taban şekillerinin v/u_* ve Fr: Froude sayısı cinsinden sınıflandırılması (Engelund ve Hansen, 1966).

Simons (1966) tarafından yapılan taban şekli sınıflandırılmasında pürüzlülük katsayısı ile eğim dikkate alınmıştır. Debi arttıkça pürüzlülük katsayısı azalmakta, bu çalışma kapsamında Darcy- Weisbach pürüzlülük katsayısı f ; 0,039 ile 0,097 arasında değişmektedir. Oluşan taban şekillerinin abakla uyumsuz bir şekilde tüm deneylerde geçiş evresi (Transition) taban şekli olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.4).



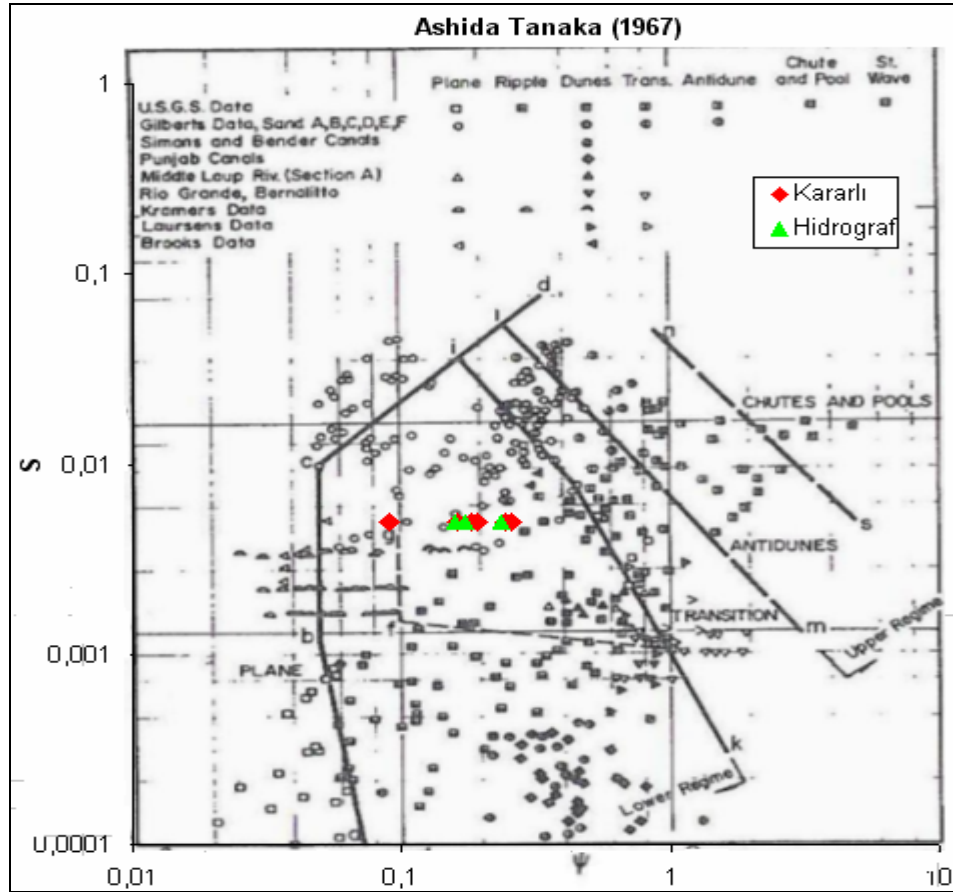
Şekil 5.4 Laboratuvar çalışmaları ile elde edilen Darcy Weisbach pürüzlülük katsayısı (f) ve Eğim (S_0) esas alınarak yapılan taban şekillerinin sınıflandırılması (Simons,1966)

Simons ve Richardson (1966) tarafından akım gücü $\tau_o \cdot u$ ve dane çapı d_{50} esas alınarak (Şekil 5.5) yapılan taban şekli sınıflandırılma 45,7m uzunluğunda 2,4m genişliğinde 0,6m derinliğindeki bir kanalda ortalama dane çapı 0,19mm ile 0,93mm arasındaki kuvars kumu kullanılarak oluşturulmuştur. Aynı zamanda USA ve Hindistan ve Pakistan'daki nehirlerdeki arazi şartlarında eğriye eklenmiştir. Bu çalışma kapsamında $\tau_o \cdot u$: 0,83 ile 5,7 arasında değişirken, dane çapı d_{50} :1,03 mm'dir. Yapılan kararlı akım deneylerin 6 tanesinin 5 tanesi abakla uyumlu olduğu görülmüştür. Hidrografta ise kanalın ortasında oluşan kumul taban şekli hem pik debide hem de ortalama debiler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.5 Taban şekillerinin Akım gücü: τ_0 d_{50} : ortalama katı madde çapı esas alınarak sınıflandırılması

Ashida ve Tanaka's (1967)' göre yapılan sınıflandırma Eğim (S) ve dane boyutu ile ilgili Fr^* kullanılarak $\psi = Fr_*^{-1}$ cinsinden yapılmıştır. Bu kararlı akım çalışmasındaki 6 adet deneysel sonuçun 5 tanesi abakta verilen sınıflandırmaya uygun olarak kumul şeklidir (Şekil 5.6). Hidrorafta ise kanalın ortasında oluşan kumul taban şeklinin hem pik debi de hem de ortalama debiler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



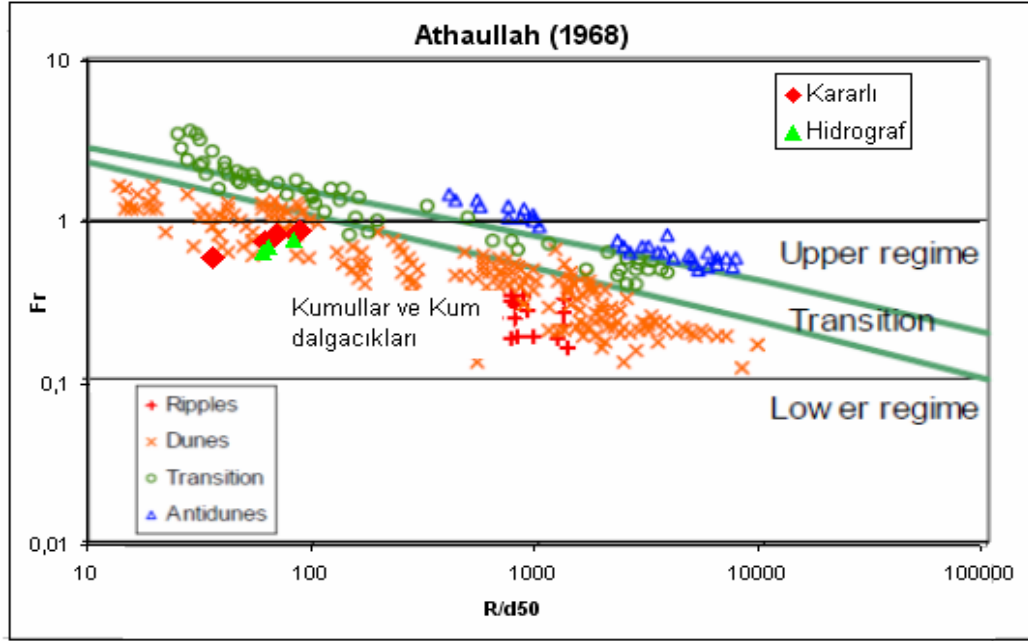
Şekil 5.6 S ve ψ bağılı olarak taban şekilleri sınıflandırması (Ashida ve Tanaka, 1967)

Athallah (1968) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre deney 1-4'te kum dalgacıkları, deney 5-6'da kumul taban şekli oluşumu gözlemlenmiştir.

Bu sınıflandırma Fr:Froude sayısı ve R/d_{50} göreceli pürüzlülük parametreleri göz önüne alınarak yapılmıştır.

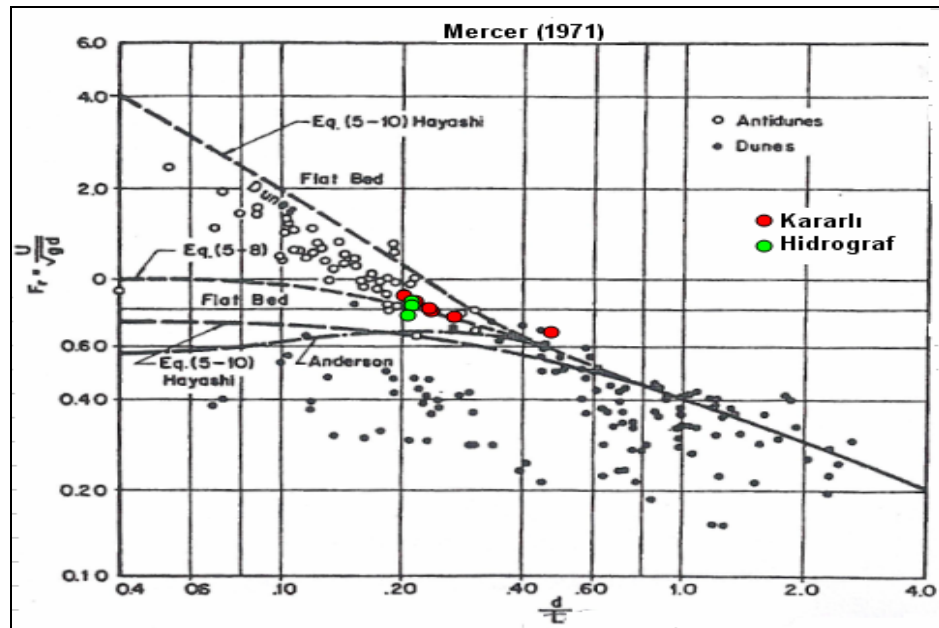
Şekil 5.7'de verilen bu abak USA ve Hindistan'daki doğal kanallar ve laboratuvar ortamındaki kanallar üzerindeki yapılan çalışmalarla oluşturulmuştur. Yapılan kararlı akım deneylerin 6 tanesinin 5 tanesi abakla uyumlu olduğu görülmüştür.

Hidrografta ise kanalın ortasında oluşan kumul taban şeklinin hem pik debi de hem de ortalama debiler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7 Taban şekillerinin Fr:Froude sayısı ,R/d₅₀ göreli pürüzlülük cinsinden sınıflandırması (Athallah, 1968).

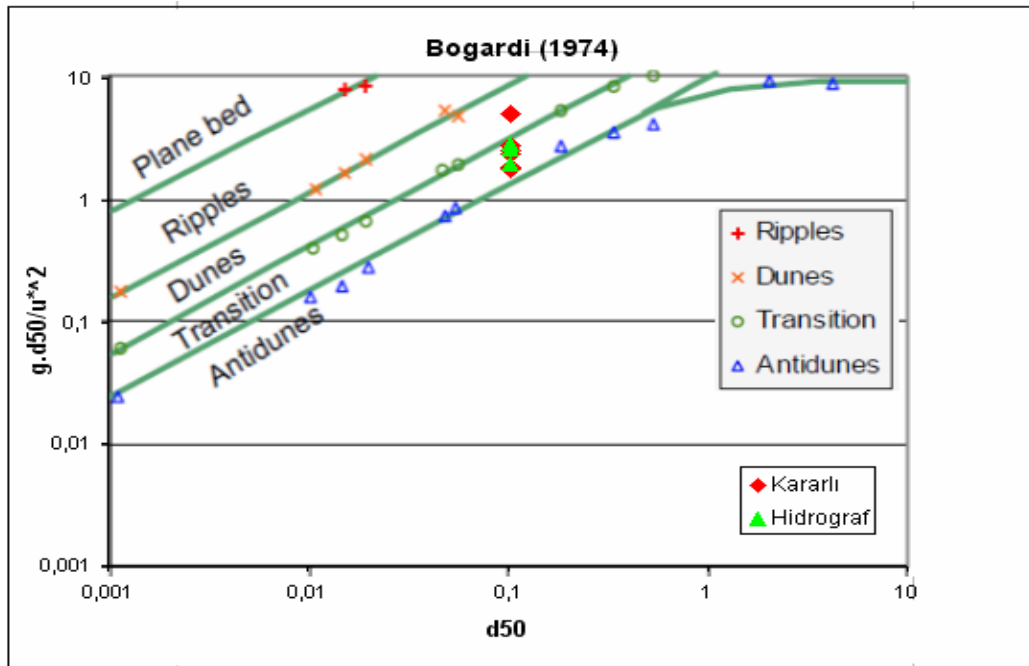
Mercer, (1971) tarafından yapılan sınıflandırma Fr sayısı ile d/L arasındaki bağıntıyla oluşturulmuştur. Burada; $L = \frac{2\pi u^2}{g}$ dalga boyuna eşit olup L değeri Kennedy tarafından ters kumullar için önerilmiş bir parametreyi, d su derinliğini simgelemektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Fr ve d/L baz alınarak yapılan (Ters kumul, kumul ve düzgün taban oluşumundaki) sınıflandırma (Mercer, 1971).

Bu çalışma kapsamında yapılan kararlı akım 6 deneyin sadece 3'ünde abak tarafından tanımlanan bölgelere karşılık gelen uyumlu değerler elde edilmiştir. Hidrograflarda pik debide uyum gösterir iken ortalama debilerde düzgün taban şekli olduğu için deney sonucuyla uyumlu olmadığı belirlenmiştir.

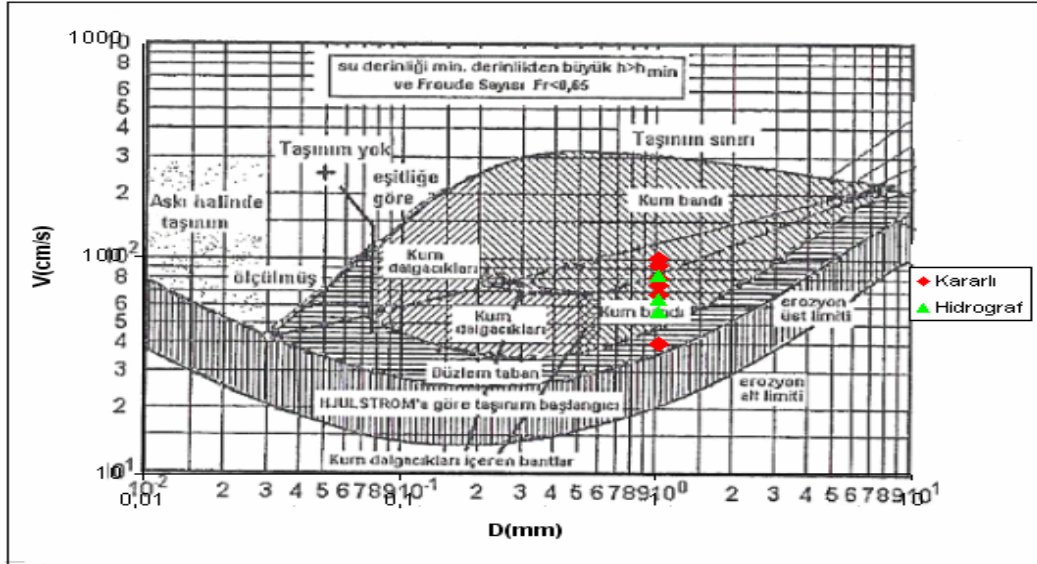
Bogardi (1974) tarafından yapılan sınıflandırma yatayda dane çapı d_{50} ile düşeyde kayma hızına bağlı Froude sayısı Fr^* alınarak bir grafik oluşturulmuştur. Deney 1-5'te geçiş evresi taban şekli deney 6'da kumul taban şekli oluşmaktadır. Bogardi, Liu'nun kullandığı malzemeden daha küçük dane çaplı malzeme kullanarak gerçekleştirdiği deneyler sonunda bu abağı oluşturmuştur (Şekil 5.9). Bu kararlı akım çalışmaları kapsamında yapılan 6 deneyin sadece 1'inde abak tarafından tanımlanan bölgelere karşılık gelen uyumlu değerler elde edilmiştir. Hidrograflarda ise hiçbirisi abak tarafından gösterilen bölgeye uyumlu olmamıştır.



Şekil 5.9 Taban sınıflandırılmasının Fr^* ile d_{50} : medyan dane çapı (cm) cinsinden sınıflandırılması (Bogardi, 1974).

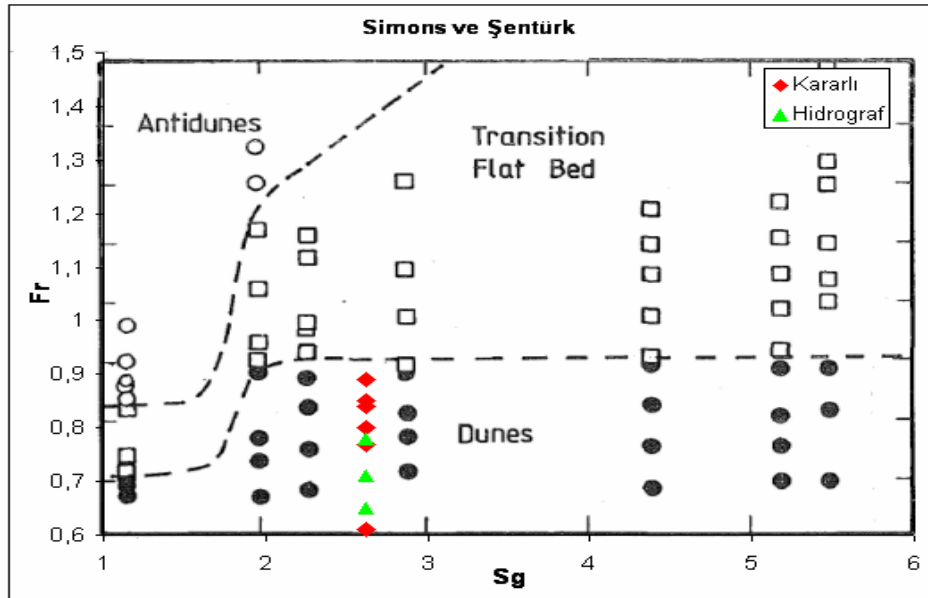
Zanke ,(1976) yapılan taban şekli sınıflandırılmasında dane çapı ve akış hızı göz önüne alınmıştır. Deney 1'de düzgün taban deney 2-6'da ise kum dalgacıkları taban şekli oluşmuştur (Şekil 5.10). Bu çalışmada elde edilen kararlı akım deneysel sonuçlar abak tarafından tanımlanan sınıflandırmayla uyumsuzdur. Abakta kum bandı olarak gösterilen yerin kumul olarak yorumlanması durumunda abakla tam uyumlu

olan bulgular elde edildiği sonucuna varılabilmektedir. Hidrograflar sonucunda oluşan kumul taban şekli abak tarafından gösterilen bölgeye uyumlu olduğu belirlenmiştir.



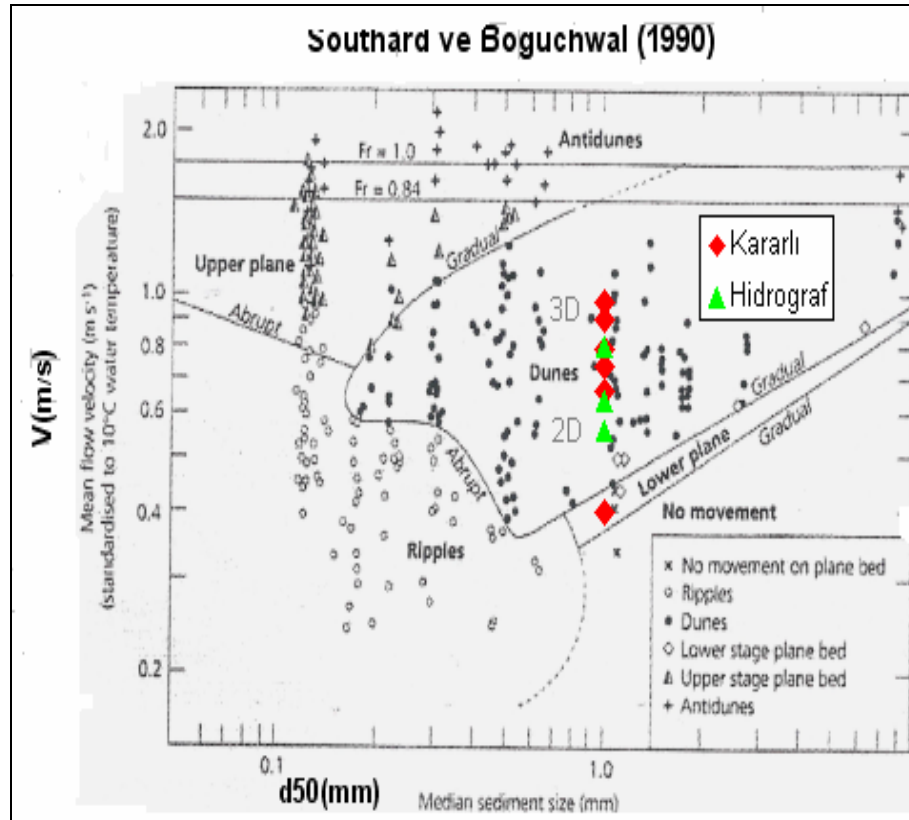
Şekil 5.10 Katı madde çapını ve akım hızına bağlı taban şekli oluşumu Zanke (1976)

Simons ve Şentürk, (1977)'e göre yapılan taban şekli sınıflandırmasında Froude sayısı ve standart geometrik sapma esas alınmıştır. Bu çalışma kapsamında kararlı akım deneysel sonuçların 5/6 oranında abakla uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 5.11). Hidrograflarda ise hem pik debide hem de ortalama debilerde oluşan kumul taban şekli ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.11 Taban şekillerinin Froude sayısı ve danenin geometrik standart sapması S_g cinsinden sınıflandırması (Simons ve Şentürk, 1977).

Southard ve Boguchwal (1990) yaptıkları abakta (Şekil 5.12) kumullar ayrıntılı bir şekilde 2D ve 3D tanımlaması ile sınıflandırılmaktadır. Akış hızı ve dane çapı esas alınarak hazırlanan bu abak son yıllarda birçok araştırmacı tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada akım hızı (V); 0,39m/s ile 0,96m/s arasında değişmektedir. Dane çapı (d_{50}) ise 1,03 mm'dir. Bu çalışma kapsamındaki deneysel bulgular da bu abakla tam bir uyum içindedir. Hidrograflar kapsamındaki deneysel bulgularla abak tam bir uyum içindedir.



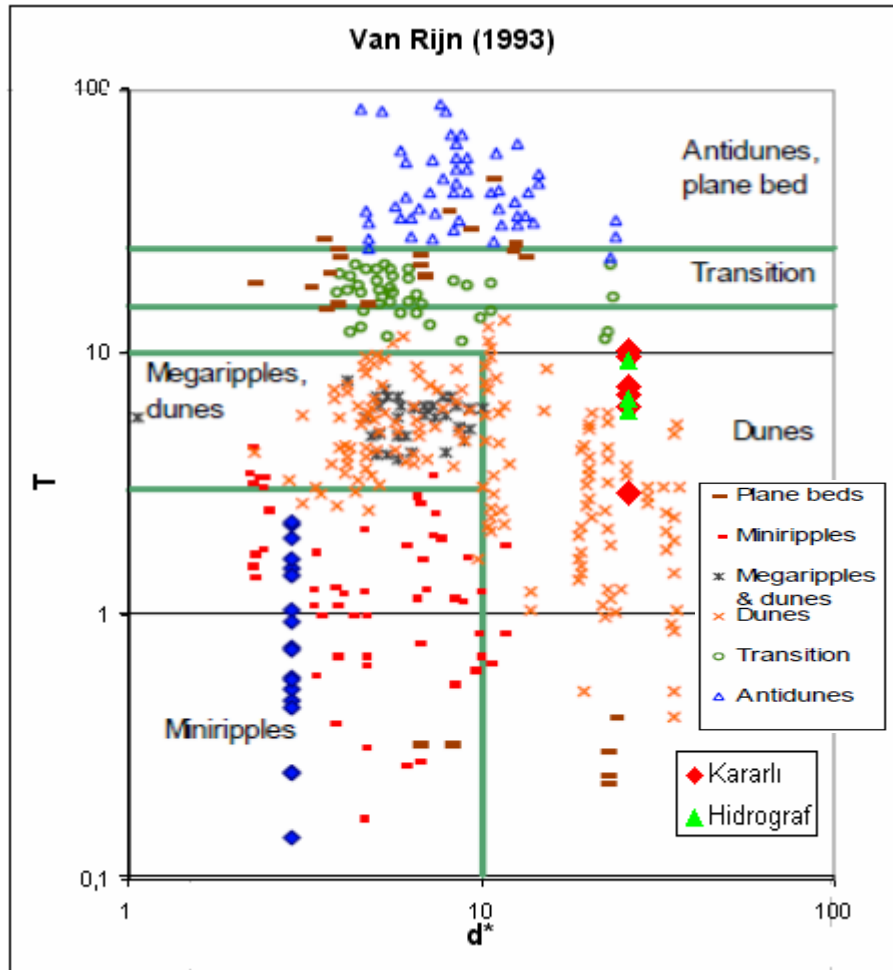
Şekil 5.12 Taban şekillerinin akış hızı ve dane çapına göre sınıflandırılması (Southard ve Boguchwal, 1990).

Van Rijn (1993) tarafından taşınım durum parametresi T ve boyutsuz dane çapı d^* kullanılarak yapılan sınıflandırmalar Tablo 5.2 ve Şekil 5.13'te verilmektedir. Van Rijn'nin abağı arazi koşullarında ve çoğunluğu laboratuvar ortamındaki kanallarında yapılan deneylerle oluşturulmuştur. Van Rijn, kum dalgacıklarını mini kum dalgacıkları ve mega kum dalgacıkları diye iki grupta toplamaktadır.

Bu çalışmada kararlı akım deneyleri sonucunda T : 2,9 ile 10,2 arasında değişmekte olup d^* ise 26,1 değerindedir. Bu çalışma kapsamında deneysel sonuçların 5/6 oranında abakla uyumlu olduğu görülmüştür. Hidrograflarda ise $d^* = 26,1$ ve T : 6,0 ile 9,2 arasında değişmektedir abakla gösterilen bölgede hem pik debide hem de ortalama debide de uyumlu taban şekli oluştuğu görülmüştür.

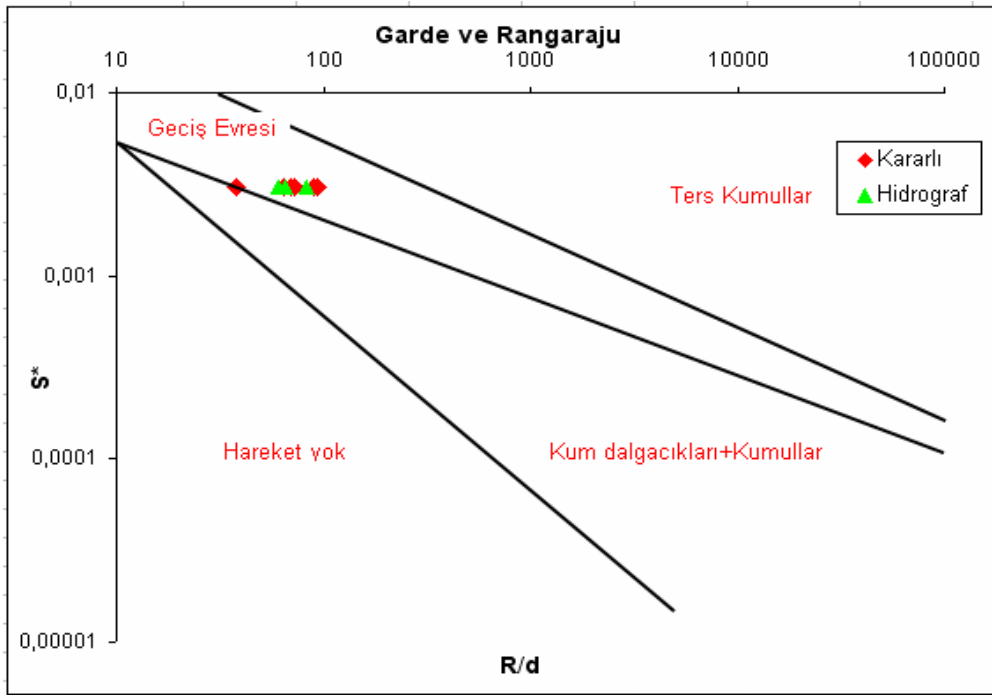
Tablo 5.2 Van Rijn'e göre Taban Şekillerinin Sınıflandırılması.

Taşınım Durum Parametresi		Dane Çapı	
		$1 \leq D_* \leq 10$	$D_* > 10$
Düşük	$0 \leq T \leq 3$	Minikum dalgacıkları	Kumul
	$3 < T \leq 10$	Mega Kum dalgacıkları ve Kumul	Kumul
	$10 < T \leq 15$	Kumul	Kumul
Geçiş	$15 < T < 25$	Yıkanmış Kumullar	
Yüksek	$T \geq 25$ Fr<0,8	Simetrik Kum dalgaları	
	$T \geq 25$ Fr>0,8	Düz taban veya Ters kumullar	



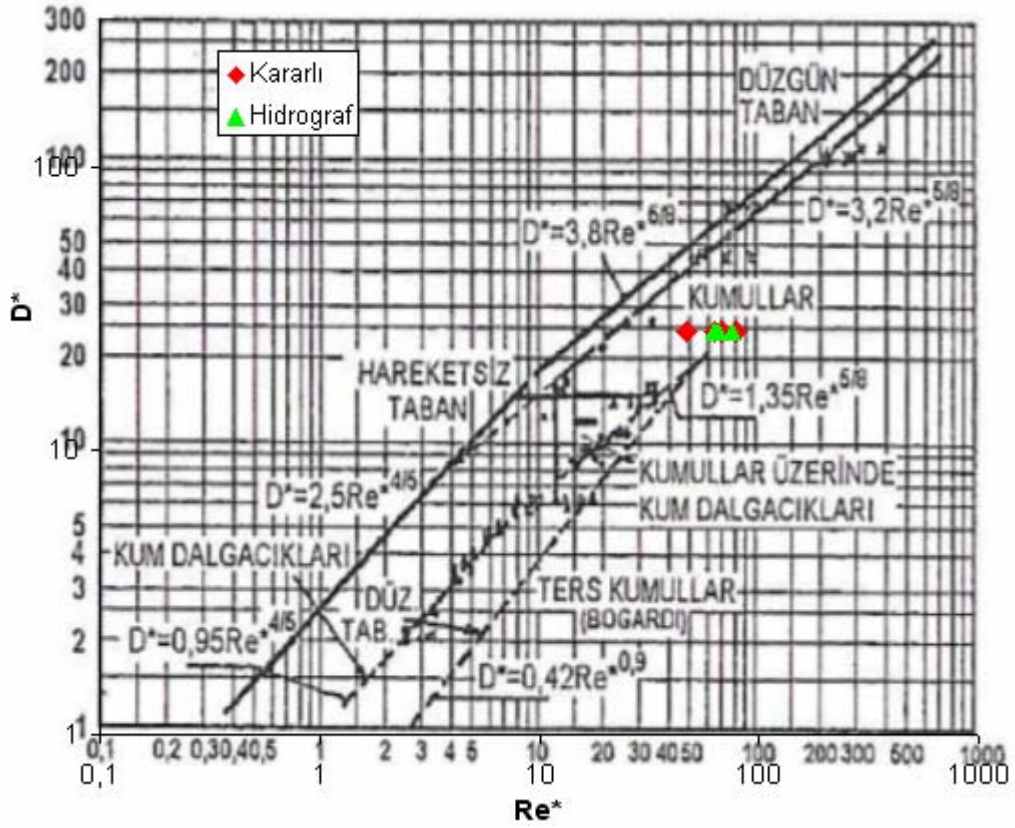
Şekil 5.13 Taban şekillerinin T : taşınım durum parametresi boyutsuz parametresi d^* : boyutsuz dane çapı cinsinden sınıflandırılması (Van Rijn, 1993).

Şekil 5.14'te verilen ve Garde Rangaraju (2000) tarafından hazırlanan abakta taban şekilleri R/d (R :hidrolik yarıçap, d :dane çapı ve $S^* = \frac{S \cdot \gamma}{\gamma_s - \gamma}$ parametreleri esas alınmıştır. Bu çalışmada kararlı akımda $S^* = 0,003032$ ve R/d ise 38 ile 93 arasında değişmektedir. Şekil 5.14'den görüleceği gibi deneysel bulgular abakta tanımlanan şekillerle uyum içinde değildir. Hidrografta ise hem pik debide hem de ortalama debide abakla uyumsuz olduğu görülmüştür.



Şekil 5.14 Taban şekillerinin. R/d ve S^* cinsinden sınıflandırılması (Garde ve Rangaraju, 2000)

Bonnefille ve Pernecker, (1966) ve Volimer ve Giese, (1970) tarafında verilen ve Şekil 5.15'te gösterilen abak Re^* ve D^* parametreleri göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kararlı akım deneysel sonuçların 5/6 oranında abakla uyumlu olduğu görülmüştür. Hidrograflar sonucunda ise kanalın ortasında oluşan kumul taban şekli ile abakla uyum içindedir ama kanal mansabındaki kum dalgacıkları abakla uyumlu değildir.

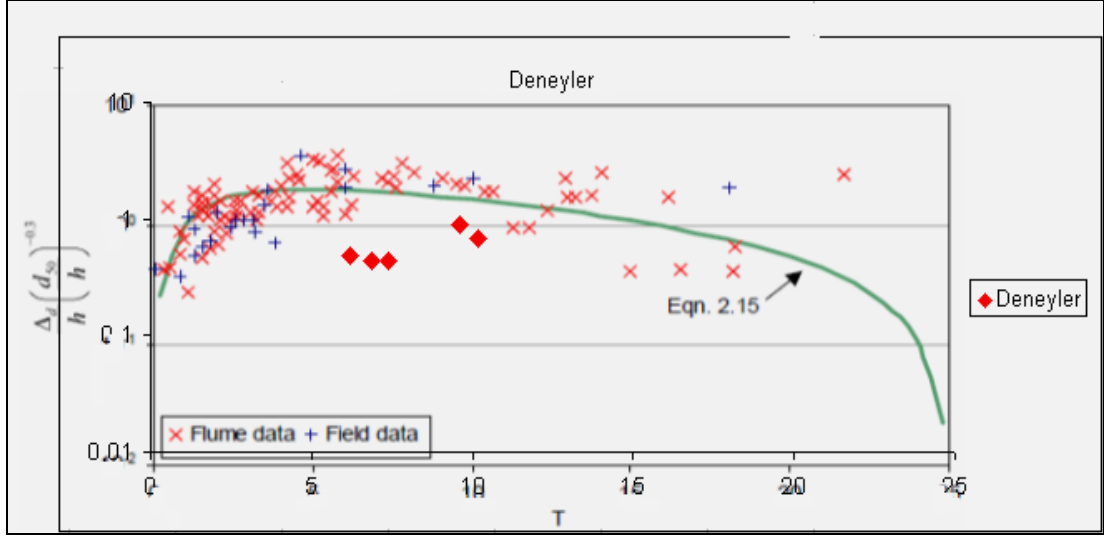


Şekil 5.15 Taban Şekillerinin Re^* ve D^* cinsinden sınıflandırılması Bonnefille/Pernecker, (1966) ve Volimers/Giese, (1970)

Literatürde taban şekillerinin yükseklikleri ile ilgili bulguların yer aldığı abaklar da mevcuttur. Örneğin Şekil 5.16'da verilen ve Van Rijn (1993) tarafından hazırlanan grafikte Δ_d : kumul yüksekliğini simgelemek üzere

$\frac{\Delta_d}{h} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{-0,3}$ parametresinin taşınım durumu parametresi T 'ye bağlı olarak değişimi

verilmektedir. Verilen bir akış derinliğinde dane boyutunun kumul yüksekliğinde pek etkili olmadığı, $T=5$ değeri civarında maksimumu kumul yüksekliğinin $0,1h$ ile $0,2h$ arasında değiştiği ve $T>25$ değerlerinde kumulların 'yıkınmasının' beklendiği Şekil 5.16'dan görülebilmektedir. Bu çalışmada yapılan deneylerde ise T değerleri $6,2$ ile $10,2$ arasında değişmektedir. Deneysel bulguların kabul edilebilir bir uyum içinde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.16 Van Rijn'e göre Kumul Yükseklikleri (Van Rijn,1993)

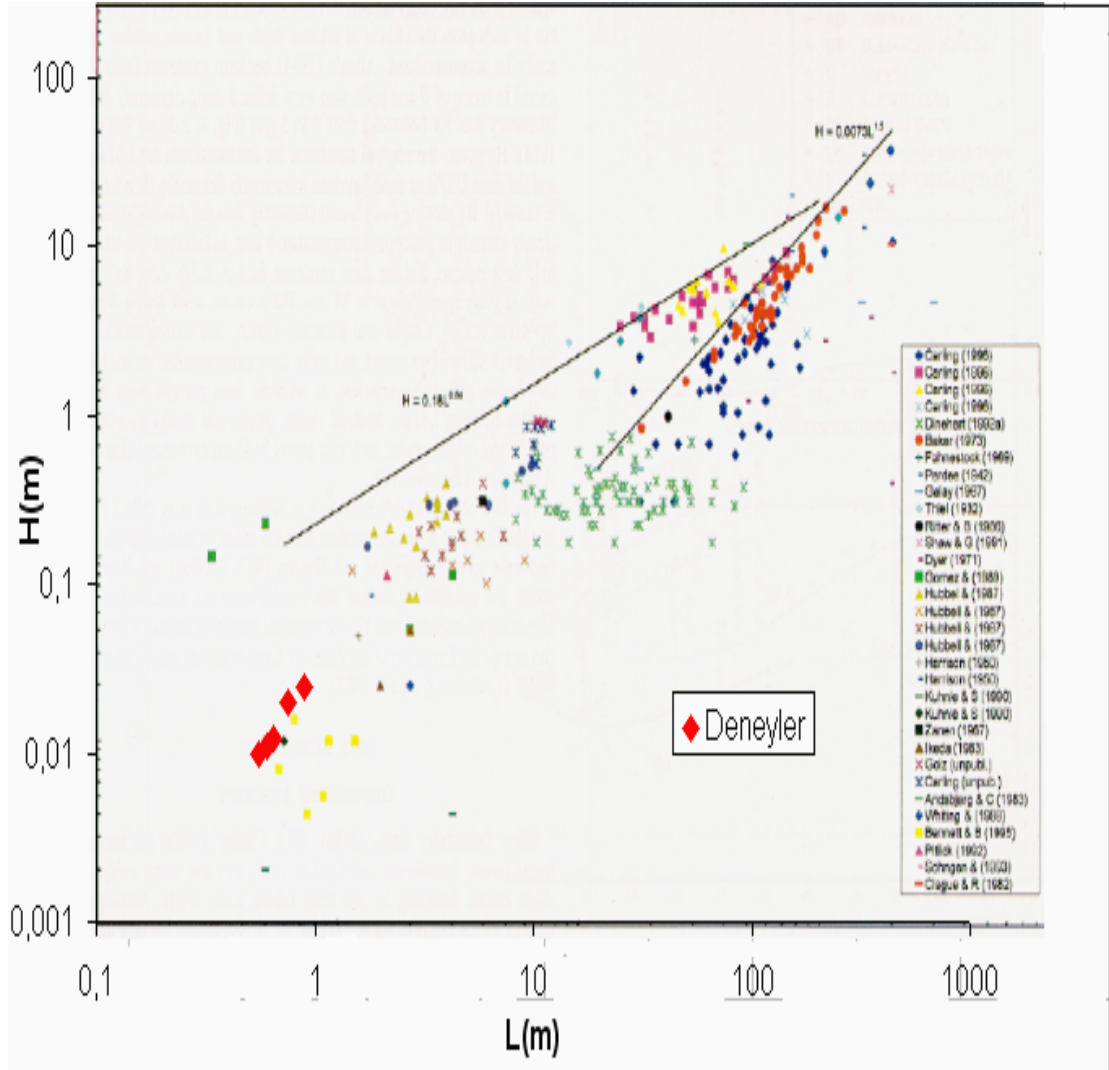
Literatürde taban şekilleri uzunlukları ile yükseklikleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Örneğin Şekil 5.17'de verilen Carling (1999) tarafından hazırlanan abakta değişik araştırmacılar tarafından bir bölümü arazide diğer bir bölümü laboratuvar ortamında yapılan deney sonuçları derlenmektedir.

Bu şekilde, İki boyutlu kumulların dikliği için;

$H = 0,0073.L^{1,5}$ şeklinde ifade edilen bir sınır eğri, 3 boyutlu çakıl kumullar için ise

$H = 0,18.L^{0,84}$ şeklinde ifade edilen bir sınır eğri verilmektedir.

Bu çalışmada taban şekli uzunlukları L: 0,6m ile 0,9m arasında değişmekte, taban şekli yükseklikleri ise 0,01m ile 0,025m arasında değişmektedir. Bu deneysel bulgular 2 sınır eğri tarafından tanımlanan bölge içinde kalmakta olup kabul edilebilir bir uyum gözlenmektedir.



Şekil 5.17 Taban Şekillerinin dikliği ile ilgili deneysel sonuçlar .

Tablo 5.3, Şekil 5.1 den Şekil 5.15'e kadar olan şekillerde verilen abaklar ışığında deneysel sonuçların özetini kapsamaktadır.

Deneysel sonuçlar, taban şekillerinin yükseklikleri ve uzunlukları ile ilgili literatürde mevcut ampirik bağıntılar kullanılarak Tablo 5.4'te irdelenmektedir.

Tablo 5.3 Taban Şekilleri ile ilgili deneysel bulguların özet tablosu.

Grafiksel Sınıflandırma	Deney Numarası ve Taban Şekilleri					
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	4. Deney	5. Deney	6. Deney
Liu, (1957)	Ters Kumul	Ters Kumul	Ters Kumul	Ters Kumul	Ters Kumul	Ters Kumul
Chabert ve Chauvin, (1963)	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Engelund and Hassen, (1966)	Düzensiz Taban	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Simons, (1966)	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş
Simons and Richardson, (1966)	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Ashida ve Tanaka, (1967)	Düzensiz Taban	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Athallah, (1968)	Kum Dalg.	Kum Dalgacıkları	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Mercer, (1971)	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Bogardi, (1974)	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Kumul
Simons and Şentürk, (1977)	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Southard ve Boguchwal, (1990)	Düzensiz Taban	2D Kumul	2D Kumul	2D Kumul	3D Kumul	3D Kumul
Van Rijn, (1993)	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Garde ve Rangaraju, (2000)	Kum Dalg.	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş	Geçiş
Volimer ve Giesse, (1970)	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Zanke, (1976)	Düzensiz taban	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul	Kumul
Gözlenenler	Düzensiz Taban	2D Kumul	2DKumul	2DKumul	3D Kumul	3D Kumul

Tablo 5.4 Deneysel taban şekillerinin uzunluk ve yüksekliklerinin ampirik bağıntılarla kıyaslanması

Veriler				DeneySEL	Yalın Denk 2.28	Van Rijn Denk 2.30	DeneySEL	Yalın Dnek 2.29	Van Rijn Denk 2.31
Deney No:	Q(lt/s)	h(cm)	T	Kumul Uzunlukları $\lambda(cm)$			Kumul Yükseklikleri $\Delta(cm)$		
1	13,3	4,2	2,9	-	26,46	30,66	-	0,52	5,08
2	40,4	7,6	6,2	40	47,88	55,48	0,65	1,08	8,17
3	49,8	8,5	6,85	55	53,55	62,05	1	1,22	8,64
4	56,7	9	7,4	60	56,7	65,7	1,2	1,32	8,79
5	83	11,5	9,6	80	72,45	83,95	2,3	1,72	9,29
6	93,5	12,1	10,2	90	76,23	88,33	2,5	1,81	9,27

Tablo 5.4 Deneysel taban şekillerinin uzunluk ve yüksekliklerinin ampirik bağıntılarla kıyaslanması (devam)

Deneysel	Yalın Dnk 2.21	Allen Denk 2.23	Van Rijn	Deneysel	Allen Denk 2.22	Van Rijn
Kum Dalgacıkları Uzun.			Kum Dalgacıkları Yüks.			
-	45	9,94	22,5	-	0,85	2,25
10	45	25,6	22,5	0,15	2,21	2,25
10	45	30,7	22,5	0,2	2,64	2,25
15	45	33,63	22,5	0,2	2,89	2,25
-	45	49,79	22,5	-	4,28	2,25
-	45	54,01	22,5	-	4,64	2,25

Bu tez çalışmasındaki deneylerin büyük çoğunluğu iki farklı (bimodal) malzemeyle gerçekleştirilmiştir. Yukarıda verilen bulgular kanal ortasında gözlenmiş olup yeterli ince malzeme olmadığından kanalın sonuna doğru, örneğin Şekil 4.28(b)'de görüldüğü gibi, kumullar yerine akıma paralel kum şeritleri (sand ribbons) veya Şekil 4.15(c,d)'de görüldüğü gibi Barchan kumulları gözlenmektedir. Bu sonuçlar Kleinhans, 1990 tarafından yapılan ve Şekil 2.10, Şekil2.11, Şekil2.12'de verilen çalışma sonuçları ile uyumludur.

Aynı zamanda bu tez çalışması kapsamında 2 farklı hidrograf geçirilerek deneylerin sonucunda oluşan taban şekilleri irdelenmiştir. Deneyler hidrografların pik noktasındaki debi ile iki hidrografın ortalama debisi bulunarak yapılan çalışmalarla uyumuna bakılmıştır. Mercer, (1971) tarafından yapılan çalışmada sadece pik noktasında abakla uyumludur. Ortalama debilerde abakla uyumsuz olduğu belirlenmiştir. Bogardi, (1974) ve Gadre Rangaraju, (2000) tarafından yapılan çalışmalarla hiç uyumlu değildir. Diğer yapılan çalışmalarla genelde uyum içinde olduğu görülmüştür. Her iki hidrografta da kanalın ortasında kumullar sonlarına doğru kum dalgacıkları şeklinde taban şekli oluşmuştur. Ancak uzun süreli hidrografta taban şekilleri çok daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır.

Hidrograflarla yapılan deneyler sonucunda aynı debi ve aynı sürede kararlı akıma göre daha az katı madde taşınmaktadır (Tablo 5.5).

Tablo 5.5 Kararlı akım ve hidrograflara göre gelen katı madde miktarları.

	Hidrograf 01	Kararlı akım	Hidrograf 02
Debi (lt/s)	76,5	76,5	76,5
Süre (sn)	150	150	
	-	255	255
Katı Madde (gr)	25575	42954	-
	-	75854	50595

Hidrograf ve kararlı akım deneylerinde oluşan taban şekillerinin boyutlarını kıyaslamak için kararlı akımda ortalama debiye, pik noktasına yakın debide kumul yüksekliklerine ve uzunluklarına bakılmıştır (Tablo 5.6).

Tablo 5.6 Taban şekillerinin geometrik olarak hidrograflarla kıyaslanması.

	Kumul Yükseklikleri Δ (cm)	Kumul Uzunlukları λ (cm)
40,4 lt/s	0,65	40
Hid 01	0,7	55
Hid 02	0,85	65
83,0 lt/s	2,3	80

Ortalama debiye yakın kararlı akımda hidrograflardan daha az belirgin olan taban şekilleri oluşmuştur ama pik debiye yakın kararlı akımda oluşan taban şekli hidrograflardan oluşan taban şekillerinden geometrik olarak daha büyük olduğu denklem 5.1 ve 5.2’de kıyaslanmaktadır.

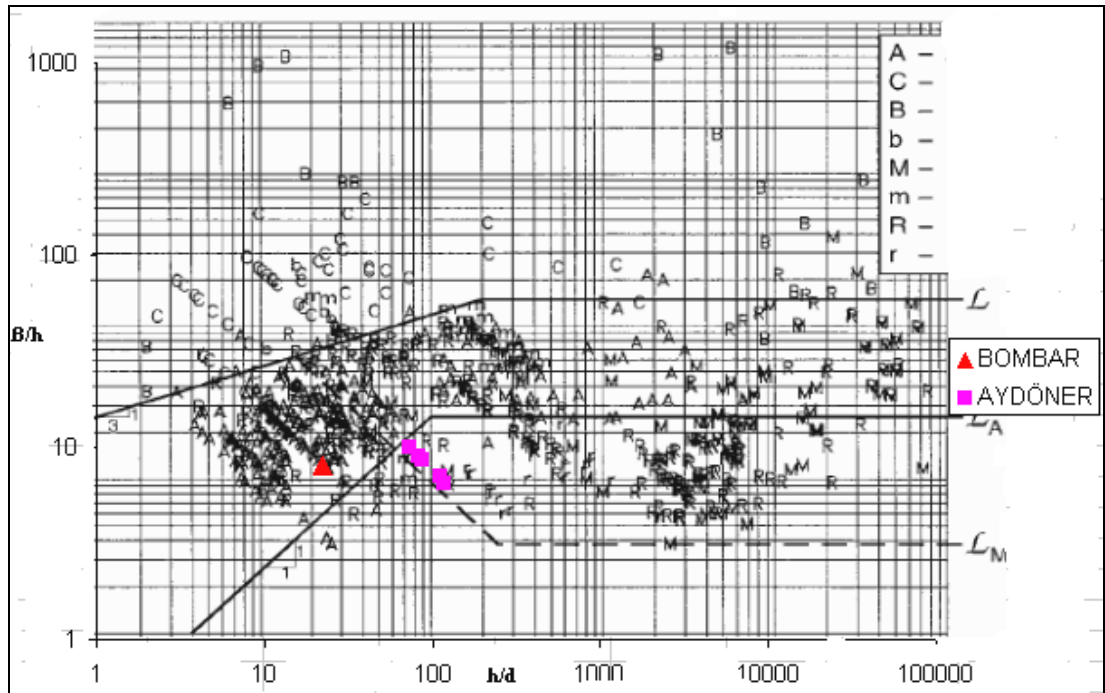
$$\Delta_{40,4} < \Delta_{hid01} < \Delta_{hid02} < \Delta_{83,5} \quad 5.1$$

$$\lambda_{40,4} < \lambda_{hid01} < \lambda_{hid02} < \lambda_{83,5} \quad 5.2$$

Hidrograflarıda kendi içinde kıyaslandığında akım süresi uzun olan ve katı madde taşınımı daha fazla olan hidrografın taban şekli geometrisi daha büyük ve daha belirgindir.

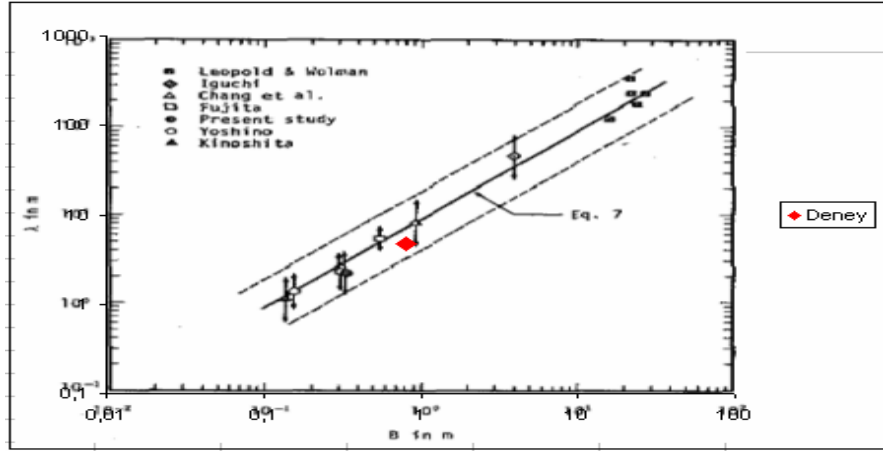
Bu çalışmanın da gerçekleştirildiği TUBİTAK 106M274 nolu proje kapsamında uniform malzeme kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde (Bombar, 2009) dönüşümlü çubuklar gözlenmiştir. Bombar'ın çalışmasında gözlenmiş olan bu taban şekli, literatürde mevcut abaklar ve ampirik bağıntılar kullanılarak ayrıntılı bir şekilde yorumlanacaktır. Ayrıca bu çalışmada dönüşümlü çubukların gözlenmemiş olması akım parametreleri ve malzeme özellikleri ışığında değerlendirilecektir.

Dönüşümlü çubuklarla ilgili abaklardan biri Yalın ve Silva, (2001) tarafından derlenmiş olup Şekil 5.18'de verilmektedir. B: kanal genişliğinin h: akım derinliğine oranı olan B/h düşey ekseninde, d:dane çapı olmak üzere h/d oranının ise yatay ekseninde verildiği bu abakta, dönüşümlü çubukların olduğu alt ve üst sınırlar sırasıyla L_A ve L olarak gösterilmektedir. Şekilde de gösterildiği gibi gerek Bombar tarafından gerekse bu çalışma kapsamında gözlenenler bu abakla tamamen uyum içindedir.



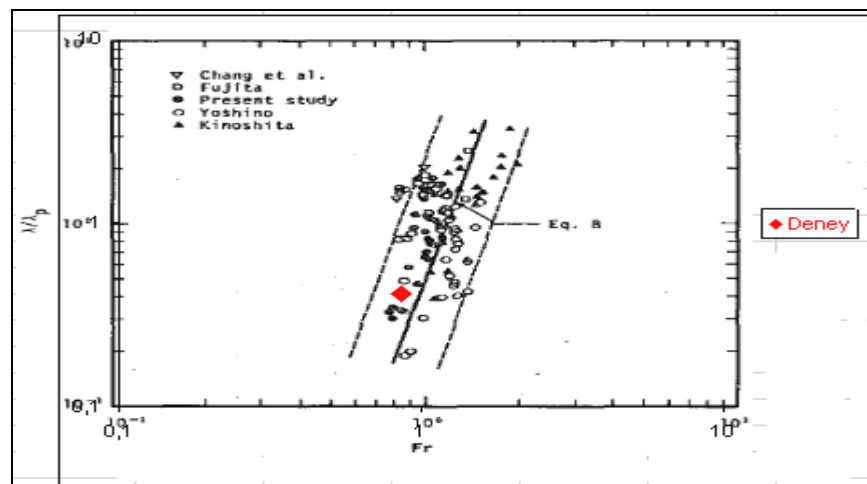
Şekil 5.18 B/h ve h/d parametreleri cinsinden dönüşümlü çubuk oluşabilmesi için gerekli bölge (L_A alt sınırı L ise üst sınırı) A: Dönüşümlü çubuklar R:Rejim nehirleri M:Menderes nehirleri C: Çoklu çubuklar (Yalın ve Silva, 2001).

Denklem 2.33 ile tanımlanan (Şekil 2.13) eğrinin grafiği Bombar'ın deneysel sonucu ile beraber Şekil 5.19'da verilmektedir. Deneysel bulgu ile abak arasında uyum olduğu gözlenmektedir.



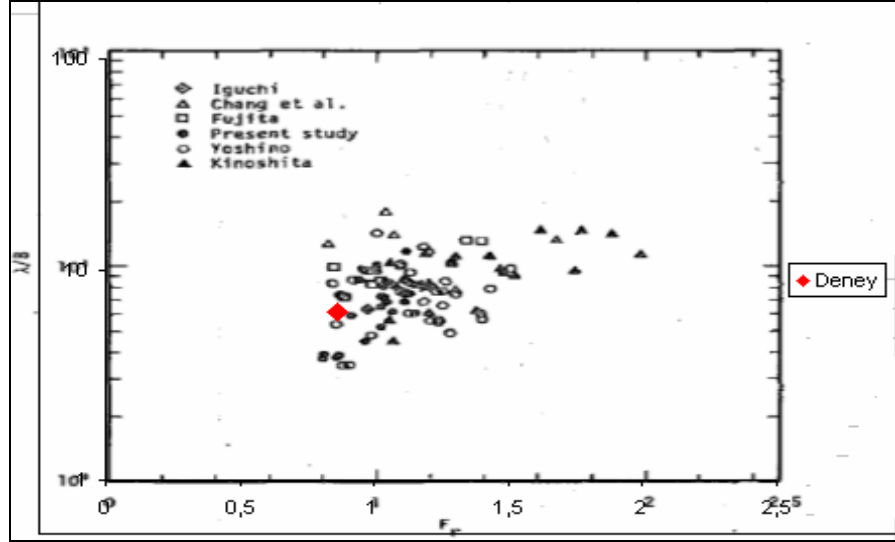
Şekil 5.19 Kanal genişliğine bağlı olarak dönüşümlü çubuk uzunlukları (Ikeda ve Asce, 1982)

Şekil 5.20'de yer alan abakta (Şekil 2.14 denklem 2.39) Froude sayısına bağlı olarak $\frac{\lambda}{\lambda_p}$ oranları verilmektedir. Burada λ : gözlenen çubuk uzunluğu λ_p ise tahmin edilen (beklenen) çubuk uzunluğudur. Bombar, (2009) çalışmasında $Fr=0,86$ ve $\frac{\lambda}{\lambda_p} = 0,41$ olup deneysel bulgu abak ile tam uyum içindedir.



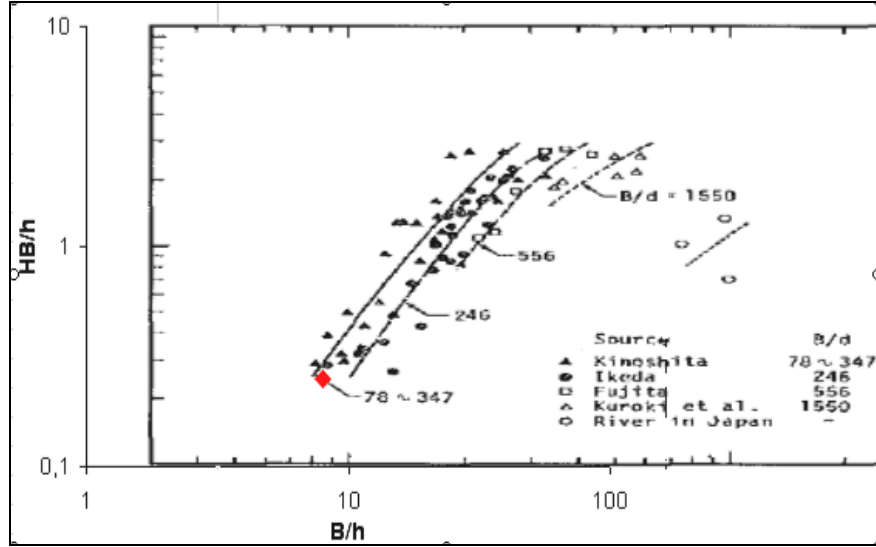
Şekil 5.20 Froude sayısına bağlı olarak $\frac{\lambda}{\lambda_p}$ oranları (Ikeda ve Asce, 1982)

Şekil 5.21’de verilen ve Froude sayısına bağlı olarak $\frac{\lambda}{B}$ değerlerinin verildiği abakta dönüşümlü çubuğun gözlemlendiği deneydeki $Fr=0,86$ ve $\frac{\lambda}{B} = 6,25$ değerleri yerleştirildiğinde abakla uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.21 Dönüşümlü çubuklar ile ilgili ve Fr cinsinden $\frac{\lambda}{B}$ değerlerini içeren geçmişte yapılan çalışma sonuçları (Ikeda ve Asce, 1982)

HB : dönüşümlü çubuk yüksekliği olmak üzere B/h cinsinden HB/h değerlerinin verildiği abak (Ikeda ve Asce, 1982) Şekil 5.22’de verilmektedir. Dönüşümlü çubuğun gözlemlendiği deneyde $\frac{HB}{h} = 0,25$, $\frac{B}{h} = 8$, $\frac{B}{d} = 166,6$ (d : dane çapı) olmaktadır. Deneysel bulgunun abak ile uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.22 Hd/h ile B/h arasındaki bağıntı (Ikeda ve Asce, 1982)

Ayrıca 2. bölümde dönüşümlü çubuk oluşumu için verilen ampirik bağıntılar kullanıldığında:

$$\text{Denklem 2.41'e göre ise } 5 < \frac{B}{h} = 8 < 20,$$

$$\text{Denklem 2.43'e göre ise } \eta = \frac{\tau_*}{\tau_{*cr}} = 1,5 \quad \text{olduğu için } 1 < \eta < 12$$

sonuçları elde edilmektedir. Bu da deneysel bulgunun ampirik bağıntılarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇ VE ÖNERİLER

DEÜ İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında kurulan deney düzeneğinde Katı madde taşınımı nedeniyle oluşan taban şekilleri ile ilgili deneyler ve hassas ölçümler yapılmıştır. Farklı debilerde oluşan taban şekilleri incelenmiş ve sınıflandırılmıştır.

Seviye ölçer aleti ile su seviyeleri ölçülmüş ve deney sonunda taban kotları çıkarılmıştır. Oluşan taban şekillerinin uzunluğu ve yükseklikleri belirlenmiştir.

UVP cihazını dolaylı olarak kullanarak deney esnasında belirli noktada oluşan aşınma ve depolamalar zaman içerisinde belirlenmiştir.

IFC 300 Elektromanyetik debi ölçer ile debinin zamana bağlı olarak değişimi pratik olarak elde edilmiştir.

Manning pürüzlülük katsayısı için açık kanallarda en uygun formülün Lotter ampirik formülü olduğu görülmüştür (Şekil 4.40).

Başlangıçta kanal tabanı düz iken deney sonrasında kanal başlangıcında erozyon olmakla beraber diğer bölümlerinde bazen depolanma bazen de erozyon oluşmaktadır.

Beklendiği gibi kanal sonunda sepetlerde toplanan malzemenin büyük bir bölümü ince malzemedir oluşmuştur.

İkizkenar üçgen olarak tanımlanan hidrografın kanala girdikten sonra kanalın içinde sönümlendiği ve simetrisinin bozulduğu gözlenmiştir.

5 Bölümde verilen karşılaştırılmalı şekiller ve tablolar değerlendirildiğinde;

* Deneysel bulguların Şekil 5.3, Şekil 5.10 ve Şekil 5.12’de verilen abaklarla tam uyum içinde,

* Deneysel bulguların Şekil 5.2, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.11 Şekil 5.13 ve Şekil 5.15'te verilen abaklarla 5/6 oranında uyumlu,

* Deneysel bulguların Şekil 5.8'de verilen abakla 3/6 oranında uyumlu,

* Deneysel bulguların Şekil 5.9'da verilen abakla sadece 1/6 oranında uyumlu,

* Deneysel bulguların Şekil 5.1 Şekil 5.4 ve Şekil 5.14'te verilen abaklarla tamamen uyumsuz olduğu sonucuna varılmıştır.

Kumul yükseklik ve uzunlukları için verilen ampirik bağıntılardan

* Kumul yüksekliği için Yalın (1972) tarafından verilen 2.29 nolu bağıntının

* Kumul uzunluğu için Van Rijn (1993) tarafından verilen 2.30 nolu bağıntının daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Dönüşümlü çubukların oluşması kriterleri, yükseklikleri ve uzunlukları ile ilgili abak ve bağıntılarla uyumlu bulgular elde edilmiştir.

TUBİTAK 106M274 nolu proje kapsamında gerçekleştirilen bu yüksek lisans tezi çalışmalarının devamı olarak:

- Değişik boyutlara sahip üniform malzeme kullanarak kararlı akım deneyleri
- Değişik boyutlara sahip üniform malzeme kullanarak kararsız akım deneyleri
- Üniform gradasyonlu olmayan malzeme kullanarak kararlı akım deneyleri
- Üniform gradasyonlu olmayan malzeme kullanarak kararsız akım deneyleri

yapılması ve bu deneylerde hassas ölçüm cihazları kullanılarak taban batimetrisinin çıkarılması yerinde olacaktır. Böylece kararlı ve zamana bağlı olarak değişen akımlarda meydana gelen taban değişikliklerinin mevcut literatür bilgileri ışığında değerlendirilmesi ve yeni yorumlarla mevcut katkıda bulunulması mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

Bombar (2009), *Experimental and Theoretical Study of Sediment Transport in Unsteady Flows*, Doktora Tezi, DEÜ İzmir.

Bor (2008), *Numerical modeling of unsteady and non-equilibrium sediment transport in rivers*, Yüksek lisans tezi, IYTE, İzmir.

Carling, P.A, Shvidchenko, A.B.,(2002), A Consideration of the Dune: Antidune Transition in Fine Gravel, *Sedimentology* (2002) 49,1269-1282

Carling, P.A. (1999), Subaqueous Gravel Dunes, Hydrodynamics and Sedimentology Laboratory, *Journal of Sedimentary Research* , Vol.69, No.3, May,1999, P. 534-545

Chang, H.H., Asce M., (1986), Formation of Alternate Bars, *Journal of Hyd. Eng.*, Vol 111, No 11, Proceeding Paper No: 20134

Chanson, H. (2004), *The Hydraulics Open Channel Flow an Introduction*, (2. Baskı) Elsevier Butter Worth-Hernemann, Australia

Chiev, M.Y., Asce, M. (1991), Bed Features in Nonuniform Sediments, *Journal of Hyd. Eng.*, Vol 117, No 1, Paper No: 25427

Chaudhry, M. H. (1993), *Open channel flow*. New Jersey: Prentice-Hall Englewood Cliffs

Da Silva, A.M.F., (2006), *On the initiation of meandering and subsequent plan-development of meander loops*, The 7th International Conference on Hydroscience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 – Sep 13, Philadelphia, USA

- Engel, J., (2002), *The Ripple – Dune Transition in Unidirectional Flow-Systems*, 2009, [http:// www.geo.tu-freiberg.de/oberseminer/oso7.08/J.Engel.pdf](http://www.geo.tu-freiberg.de/oberseminer/oso7.08/J.Engel.pdf).
- Graf, (1971), *Hydraulics of sediment transport*, McGraw-Hill Inc, USA
- Güney, M.Ş., (2006), *Laboratuvar Ugulamalı Hidrolik*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir
- Ikeda, S., Asce, M., (1984), Prediction Of Alternate Bar Wavelength and Heigth, *Journal of Hyd. Eng.*, Vol 111, No 4, Proceeding Paper No: 18742
- Karim, F., Asce, M., (1999), Bed-Form Geometry in Sand-Bed Flows, *Journal of Hyd. Eng.*, Vol. 125, No 12, Paper No: 18275
- Kleinhans, M.G., (1990), *The Relation Between Bedform Type, Vertical Sorting in Bedforms and Bedload Transport During Subsequent Discharge Waves in Large Sand Gravel Bed Rivers with Fixed Banks*, 2009, [http:// www.geo.uu.nl/fg/mkleinhans/](http://www.geo.uu.nl/fg/mkleinhans/)
- Kuhnle, R.A., Horton, J.K, Bennetti, S.J., Best, J.L., (2006), Bed Forms in Bimodal sand Gravel Sediments: Laboratory and Field Analysis, *National Sedimentation Laboratory, Sedimentology*, (2006) 53,631-654
- Martin, N., Jaeggi, R., (1984), Formation and Effect of Alternate Bars, *Journal of Hyd. Eng.*, Vol 110, No 2, Proceeding Paper No: 18589
- Özbek , T., Özcan, Ç., (2006), *Akarsularda Katı Madde*, (2. Baskı), TMMOB İnşaat Mühendisliği Odası, Ankara
- Parker, G., (1979), Hydraulic geometry of active gravel rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 105(9), pp 1185-1201.

- Pramono, H.G., (2005) *The Study of Bedforms and Equivalent Roughness Sizes in the Central Dithmarschen Bight*, Doktora Tezi, Kiel
- Robert, A., Uhlman, W., (2001), An Experimental Study On Ripple-Dune Transition, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 615-629 (2001)
- Sturm T.W., (2001), *Open Channel Hydraulics*, (1.Baskı) Mc Graw Hill, USA
- Subramanya, K. (1997), *Flow in Open Channel*, (2. Baskı), Mc Graw Hill, New Delhi
- Talebbeydokhti, N., Hekmatzadeh, A.A., Rakhshandehroo, G.R., *Experimental Modeling of Dune Bed Form in a Sand –Bed Channel*, *Journal of Science-Technology, Transaction B, Engineering*, Vol.30. No. B4
- Vanoni, A.V., (2006), *Sedimentation Engineering*, ASCE Manulas and Reports on Engineering Practice No.54, ASCE
- Van Rijn, L.C. (1984), Sediment Transport, Part III :Bed Forms and Alluvial Roughness, *Journal of Hydraulics Engineering*, 110(12).
- Venditti, J.G., Church, M., Bennett, S.J., On the Transition Between 2D and 3D dunes, *Sedimentology*, 2005 52, 1343-1359
- Yang, C.T., (1973), Incipient motion and sediment transport, *Journal of Hyd. Div.*, ASCE, Vol 99, No HY10, Proceeding pp 10067,1679-1704.
- Yang, C.T., (1996), *Sediment Transport*, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, ISBN 0-07-114882-5, Singapore

EKLER

NOTASYON LİSTESİ

- A = akış alanı, (m²)
- B = dikdörtgen kanal genişliği, (m)
- C= Chezy katsayısı
- D*= Boyutsuz dane çapı parametresi
- D₅₀= ortalama dane çapı
- Fr= Froude sayısı
- Fr*= Kayma hızına bağlı froude sayısı
- g = yer çekimi ivmesi, (m/s²)
- h = su derinliği, (m)
- L = kanal boyu, (m)
- n = Manning katsayısı
- P = ıslak çevre, (m)
- Q = kanaldan geçen debi, (m³/sn)
- R = hidrolik yarıçap, (m),
- Re*= dane reynold sayısı
- S_e = enerji çizgisi eğimi
- S= kanal taban eğimi
- T= Taşınım durum parametresi
- t = zaman, (sn)
- u = kanaldan geçen suyun ortalama hızı, (m/sn)
- u* = kayma hızı (m/s)
- z= taban kotu (mm)
- Δ = Taban şekli yüksekliği (cm)
- λ = Taban şekli uzunluğu (cm)
- γ = akışkanın özgül ağırlığı, (kN/m³)
- ρ = suyun kütle yoğunluğu, (kg/m³)
- τ₀ = kayma gerilmesi