

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Dalga Etk, Den. Boru Hat. ve Deniz  
Taban Etk, Mod.

DOKTORA TEZİ

Erin Çevik

1997



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON  
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC): R 150  
320

Kayıt No : 278

Geldiği Yer: Fen.Bil.Ens.

.....  
Tarih : 28.04.1999

Fiyat : 1.300.000.TL.

Fatura No: .....

Ayniyat No: 1-1

Ek : .....

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y. T. Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DAL. BAŞKANLIĞI

**DALGA ETKİSİNDE  
DENİZALTI BORU HATLARI VE DENİZ TABAN  
ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİ**

İnş. Yük. Müh. **Esin ÇEVİK**F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programında  
hazırlanan**DOKTORA TEZİ**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yalçın YÜKSEL

İSTANBUL, 1997

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>TEŞEKKÜR</b>                                                                                                        | iv  |
| <b>ÖZET</b>                                                                                                            | v   |
| <b>ABSTRACT</b>                                                                                                        | vi  |
| <b>SEMBOLLER</b>                                                                                                       | vii |
| <b>1. BÖLÜM</b>                                                                                                        |     |
| <b>DENİZALTI BORU HATLARI VE HAREKETLİ<br/>TABAN EKİLEŞİMİ PROBLEMİNİN ÖNEMİ VE<br/>ÇALIŞMA KONUSUNUN BELİRLENMESİ</b> |     |
| 1.1 Giriş                                                                                                              | 1   |
| 1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı                                                                                         | 3   |
| <b>2. BÖLÜM</b>                                                                                                        |     |
| <b>BORU HATLARI ETRAFINDA AKIM ALANI VE<br/>YEREL TABAN HAREKETİ</b>                                                   |     |
| 2.1 Silindirik Yapılar Etrafında Akım Alanı                                                                            | 4   |
| 2.1.1 Kararlı akım hali                                                                                                | 5   |
| 2.1.2 Kararsız akım hali                                                                                               | 23  |
| 2.2 Boru Hatları Etrafında Yerel Taban Hareketi ve Konu ile İlgili Çalışmalar                                          | 33  |
| 2.2.1 Dalga-katı madde etkileşimi                                                                                      | 33  |
| 2.2.2 Boru hatlarının katı madde hareketine etkisi                                                                     | 35  |
| 2.2.2.1 Kararlı akım halinde yerel oyulmanın incelenmesi                                                               | 35  |
| 2.2.2.2 Dalga ve/veya gel-git etkisinde yerel oyulmanın incelenmesi                                                    | 80  |



### 3. BÖLÜM

## DENEYSEL ÇALIŞMA VE BORU İLE DENİZ TABAN ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİ

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1 Giriş                                                                           | 115 |
| 3.2 Deney Sistemi                                                                   | 116 |
| 3.2.1 Dalga kanalı                                                                  | 116 |
| 3.2.2 Taban malzemesinin özellikleri                                                | 118 |
| 3.2.3 Deneylerde kullanılan boru hatlarının seçimi                                  | 119 |
| 3.3 Hız ve Kayma Gerilmesi Ölçümleri                                                | 120 |
| 3.3.1. Constant Temperature Anemometer (CTA)                                        | 121 |
| 3.3.2. Kalibrasyon yöntemleri                                                       | 124 |
| 3.4 Taban Profili Ölçümleri                                                         | 126 |
| 3.5 Dalga Ölçümleri                                                                 | 129 |
| 3.6 Hava Tüneli                                                                     | 131 |
| 3.7 Su Kanalı                                                                       | 133 |
| 3.8 Boru ile Deniz Taban Etkileşiminin Modellenmesi                                 | 134 |
| 3.8.1 Denizaltı boru hatları etrafındaki yerel taban hareketine etkili parametreler | 134 |
| 3.8.1.1 Katı madde özellikleri ve granülometrenin etkisi                            | 136 |
| 3.8.1.2 Akım ve yörüngesel hızların etkisi                                          | 137 |
| 3.8.1.3 Dalga karakteristiklerinin etkisi                                           | 138 |
| 3.8.1.4 Atak açısının etkisi                                                        | 138 |
| 3.8.1.5 Derinliğin etkisi                                                           | 139 |
| 3.8.1.6 Taban şekillerinin etkisi                                                   | 139 |
| 3.8.1.7 Açıklık oranının etkisi                                                     | 140 |
| 3.8.1.8 Kıyı profillerinin etkisi                                                   | 140 |
| 3.8.2 Boyut analizi                                                                 | 142 |
| 3.9 Deney Programı                                                                  | 147 |

## 4. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Sığlaşmanın Akım Alanı Üzerine Etkileri                                                | 149 |
| 4.2 Kıyı Profillerinin Belirlenmesi                                                        | 165 |
| 4.3 Boru Hatları Etrafında Akım Yapısının İncelenmesi<br>ve Oyulma Çukurunun Gelişimi      | 170 |
| 4.3.1. Tek yönlü akım hali                                                                 | 170 |
| 4.3.2. Sırf dalga hali                                                                     | 178 |
| 4.4 Düzlem Taban Halinde Yerel Oyulma Derinliğinin Değişimi                                | 184 |
| 4.5 Kıyı Şevi Boyunca Yerleştirilmiş Boru Hatları Etrafında<br>Yerel Oyulmanın İncelenmesi | 191 |
| 4.5.1 Rölatif oyulma derinliğinin<br>derinlik parametresiyle değişiminin incelenmesi       | 191 |
| 4.5.2 Rölatif oyulma derinliğinin Keulegan-Carpenter<br>sayısıyla değişiminin incelenmesi  | 207 |
| 4.5.3 Rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresiyle<br>değişiminin incelenmesi        | 215 |
| 4.5.4 Rölatif oyulma derinliğinin surf parametresiyle<br>değişiminin incelenmesi           | 217 |
| 4.5.5 Rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresiyle<br>değişiminin incelenmesi         | 223 |
| 4.5.6 Sığlaşmanın rölatif oyulma derinliği üzerine etkisinin modellenmesi                  | 224 |

## 5. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

|              |     |
|--------------|-----|
| 5.1 Sonuçlar | 232 |
|--------------|-----|

### KAYNAKLAR

239

### EKLER

249

### ÖZGEÇMİŞ



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her türlü ilgi ve desteğini esirgemeyerek bu çalışmanın tamamlanmasında göstermiş olduğu katkılardan dolayı çok değerli hocam Doc Dr Yalçın Yüksel'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Anabilim dalı başkanımız sayın Prof. Dr. Sabahattin Üç'e manevi desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Deney kanalının kurulmasında emeği geçen merhum İnş. Yük. Tek. Lemi Ertit'e, deneyler süresince yardımlarını eksik etmeyen İnş. Müh. Alpaslan Aydın Gakko'ya, her şekilde yardımcı olan Hidrolik Anabilim Dalı'nın tüm elemanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince her türlü destek ve teşvikleri için eşim Hakan Çevik'e ve aileme teşekkür ederim.

Esin Çevik

Ocak, 1997

## ÖZET

Kıyı mühendisliğinin önemli konularından biri olan denizaltı boru hatları günümüzde yaygın olarak kullanılan deniz yapılarından biridir. Ancak, dizaynları ve uygulamaları son derece güç olan bu yapılar proje ömürleri boyunca stabilitelerini koruyarak hizmetlerini sürdürmelidirler. Boru hatlarının dizaynları esnasında dikkate alınması gereken en önemli problemlerden biri bu yapıların altında meydana gelebilecek yerel oyulmalardır. Yerel oyulma çukurunun bir kez oluşmasıyla boru hatlarına tesir eden hidrodinamik kuvvetlerin etkisi altında ya borularda titreşim oluşabilmekte veya boruların kendi kendilerini gömmeleri ile birlikte ilave statik ve dinamik yüklere maruz kalabilmektedirler. Dolayısıyla kısmen veya tamamen kırılarak işlevlerini yerine getirememektedirler. İşte bu nedenle denizaltı boru hatlarının emniyeti açısından yerel oyulma son derece önemlidir.

Ancak, günümüze kadar bu konu tek yönlü akım alanında veya geçiş derinliği şartlarının göz önüne alındığı dalgalı ortamda yapılan çalışmalarla sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada, geçiş derinliğinden kıyıya kadar olan mesafe boyunca denizaltı boru hatları etrafında meydana gelebilecek yerel oyulmanın belirlenmesi amacıyla, bu bölge içerisindeki akım-boru-katı madde etkileşimi incelenmiştir.

Öncelikle, tek yönlü ve dalgalı ortamda boru hattı çevresindeki akım yapısı araştırılmıştır. Daha sonra geçiş derinliğinden kıyıya kadar olan bölge içerisindeki taban kayma gerilmesinin değişimi gerek farklı kıyı şev eğimlerinde gerekse farklı dalga koşullarında belirlenmeye çalışılmıştır. Bunlara ilaveten borunun olmadığı durumda taban profillerinin gelişimi incelenerek, çeşitli konumlara yerleştirilen boru hatları altındaki oyulmaya etkilerinin olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır.

Elde edilen bütün deneysel veriler kullanılarak kıyı şevleri boyunca yerel oyulmanın gelişimi izah edilmiştir. Böylece bu çalışmada probleme çözüm getirecek modeller önerilmiştir.



## ABSTRACT

The submarine pipelines that are one of the most important subjects of coastal engineering are widely used coastal structures. However, they should maintain their functions by keeping their stabilities during their project life due to the hardship of their designs and processes. In the phase of their designs, local scouring can occur under submarine pipelines is to be taken into consideration. In case local scour under the submarine pipelines developed, either the pipelines could vibrate due to the hydrodynamic forces or they could expose additional static or dynamic loads due to the self-burial. Moreover, they destroy partially or fully and can not perform their functions. Therefore, the local scouring is important in terms the fatigue life of the pipelines.

Therefore, local scouring is extremely important for the safety of submarine pipelines. But the studies have limited by oscillatory flow of which the intermediate depth conditions are considered or on steady flow. In this study, pipeline-flow-sediment interaction has been investigated in order to predict the local scour can occur under the submarine pipeline in the distance between intermediate depth and the shoreline.

Initially, flow characteristics around the pipe in steady and oscillatory flow conditions have been observed. Later, the bed shear stress distribution in the distance between the intermediate depth and the shoreline has been investigated for both different wave characteristics and different beach slopes. Moreover, the beach profiles in the absence of pipelines were observed in order to examine the influence on the scour under the submarine pipelines.

By using all experimental data, the development of local scouring under the submarine pipelines was investigated along the beach. So, in this study, models were proposed in solving the problems.

## SEMBOLLER

- $A$  = Su partikülünün yörüngesel hareketinin yatay bileşeninin genliği;  
 $c$  = Konsantrasyon;  
 $C_p$  = Basınç katsayısı;  
 $D$  = Boru çapı;  
 $d$  = Su derinliği;  
 $d_{50}$  = Katı danenin karakteristik bir boyutu;  
 $e$  = Gömülme miktarı;  
 $E_0$  = Rahatsız edilmemiş akımın özgül enerjisi;  
 $e_{kr}$  = Boru hattının altında oyulmanın meydana gelmeyeceği kritik gömülme derinliği;  
 $E_{kr}$  = Kritik özgül enerji;  
 $f$  = Dalga frekansı;  
 $Fr$  = Froude sayısı ;  
 $f_v$  = Vorteks saçılım frekansı;  
 $f_w$  = Dalga sürtünme faktörü;  
 $G$  = Boru alt kenarı ile taban arasındaki açıklık miktarı;  
 $g$  = Yerçekimi ivmesi;  
 $H$  = Dalga yüksekliği;  
 $H_s$  = Borunun merkezinden ölçülen oyulma derinliği;  
 $i_r$  = Boşluk suyu gradyanı;  
 $k^*$  = Rölatif pürüzlülük ( $k/D$ );  
 $k, k_s$  = Mutlak pürüzlülük;  
 $KC$  = Keulegan-Carpenter sayısı ( $U_m T/D$ );  
 $L$  = Dalga uzunluğu;  
 $l$  = Mesnet uzunluğu;

- $L_0$  = Oyulma çukurunun uzunluğu ( iki mesnet arasındaki mesafe; kiriş uzunluğu);  
 $L_s$  = Boru hatları için rijitlik uzunluğu;  
 $N_s$  = Katı madde sayısı ( $U_{cw}^2 = \Delta g d_s$ )  
 $p$  = Boşluk oranı;  
 $q$  = Sürüntü katı madde yükü;  
 $Q_s$  = Birim zamanda yerel oyulmanın hacminde meydana gelen değişiklik;  
 $q_s$  = Oyulma çukurundan taşınan katı madde debisi;  
 $q_{so}$  = Rahatsız edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde debisi;  
 $q_t$  = Birim genişlikten geçen toplam katı madde debisi;  
 $R$  = Boru yarı çapı;  
 $Re$  = Reynolds sayısı;  
 $s$  = Eğim;  
 $S$  = Maksimum denge oyulma derinliği;  
 $S_0$  = Oyulma derinliği;  
 $St$  = Strouhal sayısı;  
 $T$  = Dalga periyodu;  
 $t$  = Zaman;  
 $T^*$  = Normalleştirilmiş zaman ölçeği;  
 $T_h$  = Kiriş uzunluğunun gelişme süresi;  
 $T_v$  = Oyulma çukurunun düşeydeki gelişme süresi;  
 $U$  = Akımın zamansal ortalama hızı;  
 $u$  = Yörüngesel hızın yatay bileşeni;  
 $U_{ö,kr}$  = Taban yakınındaki kritik hızın pik değeri;  
 $U_*$  = Taban kayma hızı (sürtünme hızı);  
 $U_{*m}$  = Maksimum taban kayma hızı;  
 $U_0$  = Rahatsız edilmemiş akımın hızı;  
 $u_a$  = Borunun alt kenarında ölçülen hız;  
 $u_b$  = Rahatsız edilmemiş tabandaki yörüngesel hız;  
 $U_{cw}$  = Dalga ve akıntı bileşke hızı;  
 $U_{eff}$  = Efektif akım hızı ( $U_{eff} = U_0 \sin \alpha$ );



- $U_{kr}$  = Katı maddeyi harekete geçiren kritik hız;  
 $U_m$  = Maksimum yörüngesel taban hızı;  
 $u_p$  = Boru ile taban arasındaki jet hızı;  
 $U_R$  = Ursell parametresi ( $U_R = HL^2/d^3$ );  
 $u_0$  = Borunun üst kenarında ölçülen hız;  
 $v$  = Yörüngesel hızın düşey bileşeni;  
 $V_p$  = Borunun sarkma hızı;  
 $W$  = Oyulma genişliği;  
 $x$  = Akım doğrultusunda borudan olan mesafe;  
 $X$  = Vorteks etki mesafesi;  
 $x_d$  = Rahatsızlık fonksiyonu;  
 $X_m$  = Maksimum oyulma derinliğinin yeri;  
 $y$  = Düşey koordinat eksenini;  
 $\alpha$  = Atak açısı;  
 $\phi$  = Ayrılma açısı;  
 $\omega$  = Dalgaların açısal frekansı ( $2\pi/T$ );  
 $\rho$  = Akışkanın özgül kütlesi;  
 $\rho_s$  = Katı maddenin özgül kütlesi;  
 $\Delta$  = Rölatif özgül kütle ( $\rho_s - \rho / \rho$ );  
 $\theta$  = Shields parametresi (salınımlı akımda  $U_{*w}^2 / (g\Delta d)$ );  
 $\beta$  = Sürtünme şiddeti;  
 $\mu$  = Suyun dinamik viskozitesi;  
 $\nu$  = Suyun kinematik viskozitesi;  
 $\gamma$  = Suyun özgül ağırlığı;  
 $\tau_b$  = Rahatsız edilmemiş taban kayma gerilmesi;  
 $\tau_{kr}$  = Kritik kayma gerilmesi;  
 $\theta_{kr}$  = Taban katı maddesinin harekete başlamasına karşılık gelen kritik Shields parametresi;  
 $\Delta L$  = Akımın bir yarım periyodu esnasındaki art-iz bölgesinin etkilediği akım doğrultusundaki alan;



## BÖLÜM 1

# DENİZALTI BORU HATLARI VE HAREKETLİ TABAN ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNİN ÖNEMİ VE ÇALIŞMA KONUSUNUN BELİRLENMESİ

### 1.1 Giriş

Kıyı mühendisliğinin uygulama ve araştırma konularından biri olan denizaltı boru hatları günümüzde yaygın olarak kullanılan önemli bir deniz yapılarıdır. Bu yapılar deniz deşarj hatları, soğutma suyu boru hatları, petrol nakil hatları, doğal gaz boruları gibi amaçlar ile benzer yapıya sahip enerji nakil ve haberleşme amaçlı kablolar olarak inşa edilmektedirler. Kıyı mühendisliğinde denizaltı boru hatları deniz tabanına değişik konumlarda yerleştirilebilen yatay silindirik yapılar olarak dikkate alınarak incelenirler.

Bu yapılar dizaylarında ve uygulamalarında karşılaşılan zorluklar nedeniyle, araştırmacıların halen üzerinde çalıştıkları güncel bir konu olma özelliğini sürdürmektedirler. Ayrıca denizlerde bulunarak çıkarılmaya çalışılan petrol ve doğal gaz kaynakları boru hatlarının her geçen gün daha uzun ve büyük çapta inşa edilme zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun dışında deniz aşırı ülkeler arası ticaretin gelişmesi su, petrol, doğal gaz gibi kaynaklardan yoksun ülkelerin ucuz bir taşımacılık yöntemi olan bu tip yapıları nakil aracı olarak seçmelerine neden olmaktadır.

Denizaltına döşenen boru hatları ve kablolar dalga ve akıntı gibi çevresel yüklerin etkileri altında stabilitelerini koruyarak proje ömürleri boyunca hizmetlerini sürdürmelidirler. Hizmetleri süresince kara yapılarına göre çok daha olumsuz çevresel etkilere maruz kalan bu tip yapıların, inşa edilmeleri de kara yapıları ile mukayese edildiğinde oldukça zahmetli ve pahalıdır.



Denizaltı boru hatlarının dizaynı sırasında dikkate alınması gereken en önemli problemlerden biri boru hattı çevresinde meydana gelen yerel taban hareketidir. İşte bu nedenle; boru hatları ve kazıklar gibi yapılar etrafında koheziv olmayan tabandaki hareket problemi bir çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bugüne kadar hidrolik yapılar etrafındaki yerel taban hareketine ait çalışmalar genellikle akarsularda olduğu gibi tek yönlü akım (veya kararlı akım şartları) ve gel-git etkisi ile akıntılı ortamdaki şartlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Ne yazık ki sırf dalga etkisinde yapılmış detaylı çalışma literatürde çok fazla değildir. Ve dolayısıyla çözümlenememiş bir çok problem halen mevcuttur.

Akıntı ve/veya dalga etkisi altında hareketli taban ile boru hattı arasındaki etkileşim boru hatları çevresinde oyulma ve yığılma gibi yerel taban hareketlerine neden olmaktadır. Boru hatları boyunca yerel taban hareketi genel olarak üç boyutludur, yani gözlenen bu alan içerisinde borunun mesnetlendiği giriş uzunlukları boyunca sınırlı uzunlukta bir çok oyulma çukurunun olduğu görülmektedir. Oluşan oyulma çukurunun üzerinde askı konumunda kalan boru hattı, eğer eksenel doğrultudaki oyulma çukuru yeteri uzunlukta gelişmiş ise dalga ve akıntı etkisinde davranışındaki değişiminden dolayı kırılabilir. Boru yeterince rijit değilse, oyulma çukuruna doğru sarkarak etrafındaki akım yapısının yeniden değişmesine neden olmakta ve hatta kendi kendine kum taban malzemesi ile gömülebilmektedir.

Boru hattı ile hareketli taban etkileşiminin oldukça karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayı oyulma ve kendi kendine gömülme işlemi tam olarak anlaşılamamıştır. Bu etkileşimin iyi anlaşılması inşası oldukça pahalı olan bu yapıların maliyetlerinin azalmasını sağlayabilecektir. Olaya genel olarak bakıldığında, hareketli bir taban üzerine boru hattının yerleştirilmesi ile akım alanında yaratılan rahatsızlıktan dolayı sırasıyla; boru hattı etrafında sınır tabakası oluşumu, sınır tabakasından ayrılma ve çeşitli büyüklüklerde vorteks oluşumları sonucunda yerel akım alanındaki hız ile taban kayma gerilmesinin şiddetlerinde artma bunun neticesinde ise yerel oyulma olayı meydana gelmektedir. Denizaltı boru hatları dalga etkilerinden, yerel taban hareketinden ve diğer çevresel faktörlerden korunmak için zaman zaman gömülerek inşa edilirler. Ancak belirli dalga ve/veya akıntı koşullarında deniz tabanının aktif konuma gelmesi nedeniyle yeterince korunmamış boru hatlarının açığa çıktıkları ve bu çevresel tesirlerin direkt etkisi altında kaldıkları da bilinen bir gerçektir. (Yüksel ve Çevik, 1996). O halde geçiş derinliğinden

kıyı çizgisine kadar değişen dalga koşulları dikkate alınarak taban-boru etkileşimi incelenmesi gereken en önemli problemlerden biridir. İşte bu çalışmada, derinlik boyunca rijit bir borunun etrafındaki yerel taban mekanizması detaylı olarak incelenmeye çalışılmıştır.

## 1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Yukarıda da bahsedildiği gibi sırf dalga etkisinde boru hatları etrafındaki yerel taban hareketi ile ilgili fazla araştırma yoktur. Literatürde mevcut çalışmalar ise sabit derinlikte, genellikle geçiş derinliği koşullarında, yatay deniz tabanı üzerine yerleştirilmiş denizaltı boru hatları ile ilgilidir. Bu çalışmada ise geçiş derinliğinden itibaren iki farklı kıyı şev eğiminde sığ su şartlarında içerecek şekilde boru hattının farklı konumlara yerleştirilmesiyle dalga-boru-hareketli taban etkileşiminin incelenmesi amaçlanmış ve boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinlikleri deneysel olarak belirlenerek yorumlanmıştır.

Bu amaçla hazırlanan tezin kapsamını şu bölümler oluşturmaktadır.

Bölüm 2’de akıma dik yatay silindirik yapılar etrafında kararlı ve kararsız akım alanları izah edilmiştir. Ayrıca bu bölümde konu ile ilgili geniş bir literatür özeti kritikleri yapılarak verilmiş ve çalışmaya yeterli zemin hazırlanmaya çalışılmıştır.

Bölüm 3’de deneysel çalışma ile ilgili deney sistemleri ve şartları anlatılmış, daha sonra problemin modellenmesi için probleme etkili parametreler tartışılarak, yerel oyulma çukurunun değişimine ait fonksiyonel bağıntı elde edilmiştir.

Bölüm 4’de yapılan deneyler anlatılmış ve bunlar adım adım tartışılmıştır. Deneylerin yeterince sağlıklı olup olmadığını kontrol etmek için teori ve önceki çalışmalarla karşılaştırmalar da yapılmıştır. Deneyler tek yönlü akım alanından dalgalı ortama kadar bir seri işlemi içermektedir. Böylece yerel taban hareketinin gelişimi üzerine bilgiler elde edilmiştir. Deneylerde detaylı olarak akım alanı, boru hatlarının mevcut olması ve olmaması durumunda yerel taban hareketi ayrı ayrı dikkate alınarak dalga-boru-taban etkileşimi tartışılmıştır.

Bölüm 5’de ise yapılan çalışma bir bütün olarak ele alınmak suretiyle elde edilen bütün veriler adım adım yorumlarıyla birlikte sonuçlar halinde verilmiştir.



## BÖLÜM 2

### BORU HATLARI ETRAFINDA AKIM ALANI VE YEREL TABAN HAREKETİ

#### 2.1 Silindirik Yapılar Etrafında Akım Alanı

Boru hatları etrafındaki yerel oyulma çukuru, bu yapıların akım alanını etkilemesiyle meydana gelen basınç ve kayma gerilmesi değişimlerinden oluştuğu bilinmektedir. Art-iz bölgesi olarak isimlendirilen boru hattının mansabında, sınır tabakasından ayrılma nedeni ile vorteks sokağı oluşmaktadır. Mansap bölgesindeki bu akım yapısı, borunun art-iz bölgesindeki oyulmanın borunun menbasına göre daha fazla olmasına sebep olabilmektedir. Oyulmanın nedeni; bu bölgede vortekslerden kaynaklanan türbülans şiddetinin akımın rahatsız edilmemiş bölgesine göre iki kat daha fazla olması ve bunların neticesinde kayma gerilmesinin dört kat , katı madde taşınımının ise sekiz kat artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir ( Yüksel ve Üç, 1989, Sümer and Fredsøe, 1990).

Akım alanına yerleştirilen bu tip yapıların taban yakınında sebep oldukları geometrideki değişim nedeniyle akım çizgilerinde meydana gelecek sapma, taban (ve/veya duvar) yapı etkileşimine neden olurlar. Bu olay Bearman and Zdravkovich (1978) tarafından detaylı olarak incelenmiş ve şu sorulara cevap aranmaya çalışılmıştır:

i) Silindirin sabit bir cidara yaklaşması durumunda etrafından saçılacak vorteksler bu cidardan nasıl etkilenmektedirler? Bu saçılım açıklık oranı olarak bilinen  $G/D$  (burada  $G$  taban ile silindir arasındaki mesafe,  $D$  boru çapı) oranının hangi kritik değerinde cidar etkisinden kurtulmaktadır,

ii) Cidardaki türbülanslı sınır tabakasının bu olgu üzerine etkileri nelerdir,



iii) Cidar ile silindir arasındaki bu etkileşimlerin akım doğrultusunda cidar üzerinde nasıl değiştiğinin belirlenmesidir.

Boru hatları etrafındaki akım alanının değişiminden kaynaklanan yerel oyulma işleminin anlaşılabilmesi için araştırmacılar özellikle bu bölgedeki akım yapısını izah etmeye çalışmışlardır. Problemin daha iyi izah edilebilmesi için öncelikle kararlı akım halinde boru hatları etrafındaki akım alanının temel mekanizması üzerinde kısaca durulacaktır.

Denizaltı boru hatları için bu problem çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak literatürde az sayıda mevcut olan kararsız akım çalışmalarından faydalanarak boru hatları etrafındaki yerel taban hareketi izah edilmeye çalışılacaktır.

### 2.1.1 Kararlı akım hali

Dairesel silindir etrafındaki akışın Reynolds sayısına bağlı olduğu bilinmektedir.

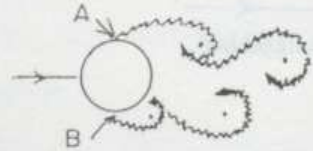
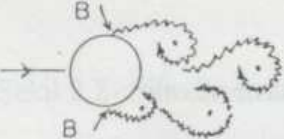
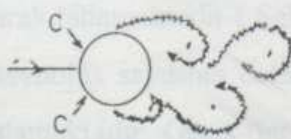
$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (2.1)$$

Burada D silindir çapı, U akım hızı ve  $\nu$  kinematik viskozitedir. Re sayısının sıfırdan itibaren artması farklı akım rejimlerine neden olmaktadır. Akım rejiminin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Herhangi bir durumdaki akım rejimine bağlı olarak dairesel bir silindir etrafındaki akım alanı Şekil 2.2’de verilmiştir.

Şekil 2.1’den görüldüğü gibi Reynolds sayısının çok küçük değerleri için ayrılma meydana gelmezken bu değer 5 olduğunda ilk ayrılma görülmektedir.

Reynolds sayısının  $5 < Re < 40$  değerleri arasında silindirin art-iz bölgesinde bir çift vorteks oluşmaktadır ( Şekil 2.1b).

Reynolds sayısının daha da büyümesi ile art-iz bölgesinin stabilitesi bozulmaktadır. Bu olay vorteks saçılımı olarak isimlendirilmektedir.

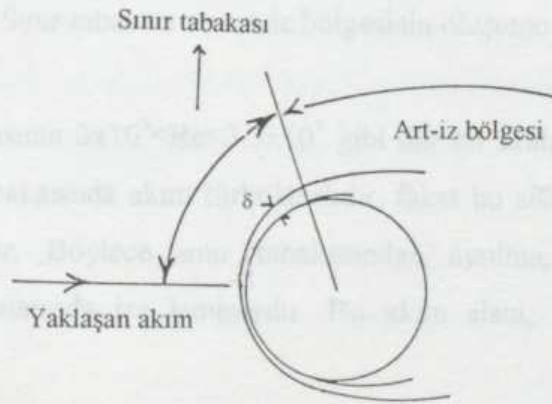
|    |                                                                                     |                                                                                             |                                                                    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| a) |    | Ayrılma yok.                                                                                | $Re < 5$                                                           |
| b) |    | Bir çift simetrik vorteks oluşumu                                                           | $5 < Re < 40$                                                      |
| c) |    | Vorteks sokağında akım (laminer)                                                            | $40 < Re < 200$                                                    |
| d) |    | Art-iz bölgesinde türbülanslı akıma geçiş başlar                                            | $200 < Re < 300$                                                   |
| e) |   | Art-iz bölgesi tamamen türbülanslıdır.<br>A: Laminer sınır tabakasından ayrılma.            | $300 < Re < 3 \times 10^5$<br>Kritik altı rejim                    |
| f) |  | A: Laminer sınır tabakasından ayrılma.<br>B: Türbülanslı sınır tabakasından ayrılma.        | $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$<br>Kritik rejim             |
| g) |  | B: Türbülanslı sınır tabakasından ayrılma, sınır tabakası bazen laminar, bazen türbülanslı. | $3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$<br>Kritik üstü rejim      |
| h) |  | C: Sınır tabakası bir kenarda tamamen türbülanslıdır.                                       | $1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$<br>Kritik geçiş üstü rejimi |
| i) |  | C: Sınır tabakası her iki kenarda türbülanslıdır.                                           | $4 \times 10^6 < Re$<br>Kritik geçiş                               |

Şekil 2.1- Kararlı akım durumunda cilalı, dairesel bir silindir etrafındaki akım rejimi Sümer, 1992).

Reynolds sayısının  $40 < Re < 200$  arasındaki değerleri için vorteks sokağında akım laminar rejimdedir (Şekil 2.1c). Saçılım iki boyutlu, yani silindirin düşey eksenine boyunca değişim yoktur (Williamson, 1989).

Reynolds sayısının artması ile art-iz bölgesinde türbülanslı akım hakim olmaya başlamaktadır (Şekil 2.1d). Reynolds sayısının  $200 < Re < 400$  değerleri arasında akım geçiş rejiminden türbülanslı rejime doğru değişmektedir (Bloor, 1964). Reynolds sayısı 400'e eşit olduğunda akım artık türbülanslı olmaya başlamaktadır (Bloor, 1964).

Gözlemler, Reynolds sayısının  $40 < Re < 200$  değerleri arasında vorteks saçılımının iki boyutlu, fakat daha büyük değerleri için ise üç boyutlu olduğunu göstermiştir (Gerrard, 1978 and Williamson, 1988).

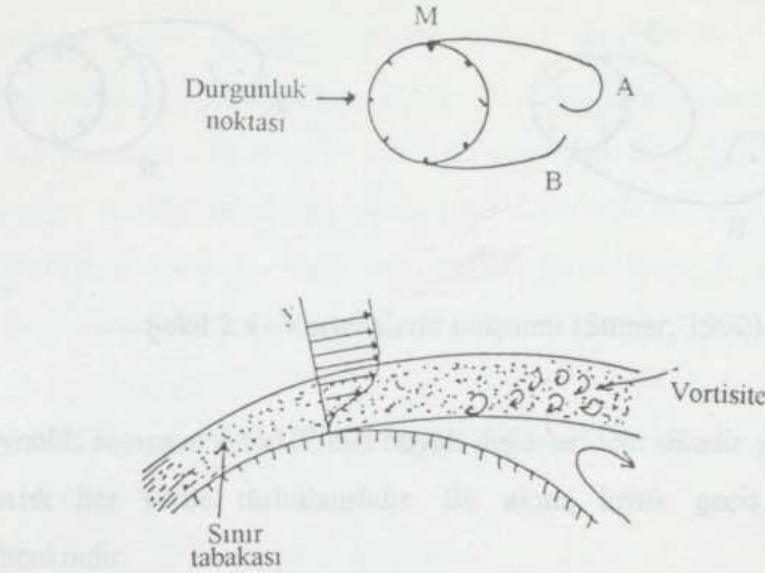


Şekil 2.2- Silindir etrafında sınır tabakası ve art-iz bölgesi (Sümer, 1992).

$Re > 300$  için art-iz bölgesi tamamen türbülanslı hale gelmektedir. Reynolds sayısının artan değerlerinde oldukça geniş bir aralıkta  $300 < Re < 3 \times 10^5$  silindirin yüzeyindeki sınır tabakası içerisinde akım laminar kalmaktadır. Bu da, kritik altı akım rejimi olarak bilinmektedir (Şekil 2.1e).

Reynolds sayısının daha da artması ile sınır tabakası içerisinde türbülanslı akıma geçiş başlamaktadır. Geçiş önce sınır tabakasının ayrıldığı noktada meydana gelmekte ve Reynolds sayısının artışı ile türbülansa geçiş bölgesi, silindirin menba yüzeyi boyunca durgunluk noktasına doğru hareket etmektedir (Şekil 2.1f, 2.1i).





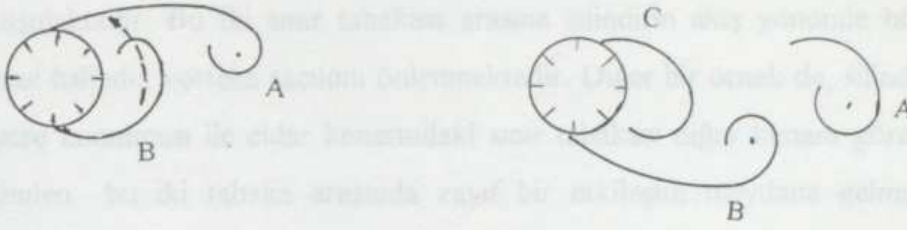
Şekil 2.3- Sınır tabakası ve art-iz bölgesinin oluşumu (Sümer, 1992).

Reynolds sayısının  $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$  gibi dar bir aralığında (Şekil 2.1f) ayrılma noktasındaki sınır tabakasında akım türbülanslıdır, fakat bu silindirin sadece bir tarafında meydana gelmektedir. Böylece sınır tabakasından ayrılma, silindirin bir kenarında türbülanslı, diğer kenarında ise laminardır. Bu akım alanı, kritik akım rejimi olarak bilinmektedir.

Silindirin bir tarafındaki türbülanslı ayrılma bölgesi bir taraftan diğer bir tarafa zamanla değişmektedir (Schewe, 1983).

Reynolds sayısının  $3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$  arasında değer aldığı bir sonraki akım ise, kritik üstü akım rejimi olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda silindirin her iki tarafındaki sınır tabakasındaki ayrılma bölgelerinde akım türbülanslıdır. Ancak sınır tabakasında türbülansa geçiş henüz tamamlanmamış olup, durgunluk noktası ve ayrılma noktası arasında bir yerde türbülansa geçiş bölgesi vardır.

Reynolds sayısının  $1.5 \times 10^6$  değerine ulaşması ile sınır tabakası tamamıyla türbülanslı hale gelmektedir. Buna rağmen silindirin kenarlarından birinde sınır tabakası laminardır. Reynolds sayısının  $1.5 \times 10^6 < Re < 4.5 \times 10^6$  değerleri arasında, sınır tabakasının silindirin bir tarafında tamamen türbülanslı ve diğer tarafında ise bazen laminar bazen de türbülanslı olduğu akıma, kritik geçiş üstü akım rejimi denmektedir.



Şekil 2.4- Vortekslerin oluşumu (Sümer, 1992).

Reynolds sayısının  $4.5 \times 10^6$ 'dan büyük değerleri için silindir yüzeyi üzerindeki sınır tabakası artık her yerde türbülanslıdır. Bu akım, kritik geçiş akım rejimi olarak isimlendirilmektedir.

Genelde  $Re > 40$  değerleri için vorteks saçılım olgusu başlamaktadır. Daha önce belirtildiği gibi Reynolds sayısı yeterince büyük olduğu zaman silindir yüzeyi üzerindeki sınır tabakası ters basınç gradyanından dolayı ayrılarak ve Şekil 2.3'de görüldüğü gibi şekillenmektedir. Bu sınır tabakası A vorteksi içine doğru bükülerek sarmakta ve bu vorteks kendisini saran sınır tabakasındaki vortisiteler ile beslenmektedir.

Aynı şekilde, silindirin diğer tarafında da ters yönde dönen bir vorteks (vorteks B) şekillenmektedir.

Reynolds sayısının  $Re > 40$  değerleri için küçük düzensizliklere karşın bu iki vorteks çifti daha önce de belirtildiği gibi gerçekte stabil değildir. Bu vorteksler  $Re > 40$  için gittikçe büyümektedirler.

Şekil 2.4a'da gösterildiği gibi, art-iz bölgesinde A vorteksi B vorteksinden daha büyük olup ters yönde dönmektedir. Belli bir zaman sonra ters yönde dönen diğer vorteks A vorteksinin daha fazla vortisite ile beslenmesini kestiğinden vorteks sınır tabakasından kopmaktadır. Bu A vorteksinin saçılımı çok kısa bir anda meydana gelmekte ve serbest kalan bu A vorteksi ana akım ile birlikte mansaba doğru taşınmaktadır.

A vorteksinin ayrılmasından sonra silindirin aynı kenarında C vorteksi olarak yeni bir vorteks oluşmaktadır. A vorteksinde meydana gelen olaylar bu sefer B vorteksi üzerinde yinelenmektedir (Şekil 2.4b). Bu olay silindirin iki kenarı arasında ardışık saçılımlar şeklinde devam etmektedir.

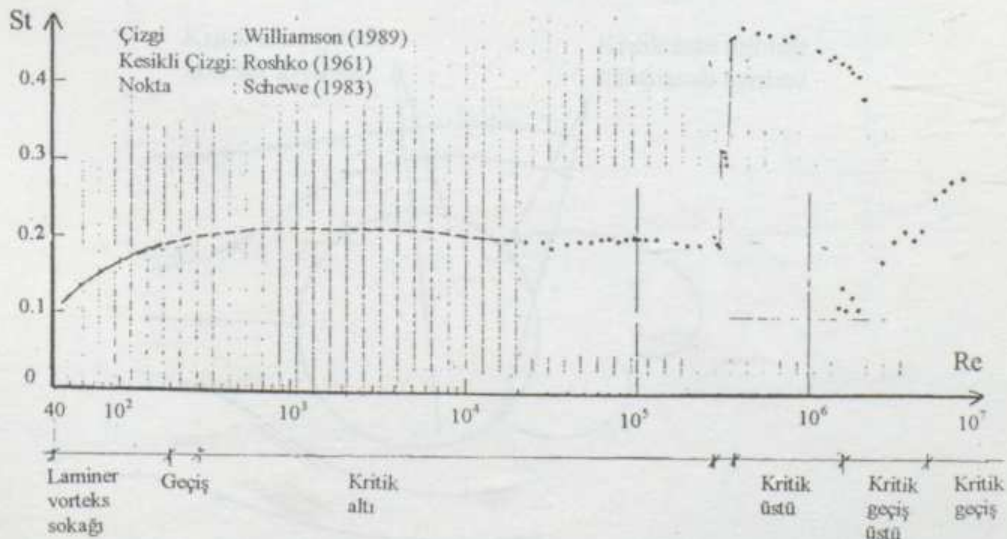
Yukarıda açıklandığı gibi bu iki sınır tabakası birbiriyle etkileştiği zaman vorteks saçılımı oluşmaktadır. Bu iki sınır tabakası arasına silindirin akış yönünde bir levhanın yerleştirilmesi halinde, vorteks saçılımı önlenmektedir. Diğer bir örnek de, silindirin cidara yakın bir yere konulması ile cidar kenarındaki sınır tabakası diğer kenara göre yeterince gelişmediğinden bu iki tabaka arasında zayıf bir etkileşim meydana gelmekte, veya silindirin cidara çok yakın bir yere yerleştirilmesi ile bu kenarda vorteks saçılımı cidar tarafından bastırılarak etkileşimin meydana gelmesi önlenmektedir. Bu olay daha sonra detaylı olarak açıklanacaktır.

Vorteks saçılım frekansı olarak bilinen  $f_v$ , Reynolds sayısının bir fonksiyonudur.

$$f_v = f(Re) \quad (2.2)$$

Normalleştirilmiş vorteks saçılım frekansı ise Strouhal sayısı,  $St$ , olarak isimlendirilmektedir. Burada  $D$  silindir çapı ve  $U$  ise akım hızıdır.

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (2.3)$$



Şekil 2.5- Strouhal sayısının  $Re$  sayısı ile değişimi (Sümer, 1992).

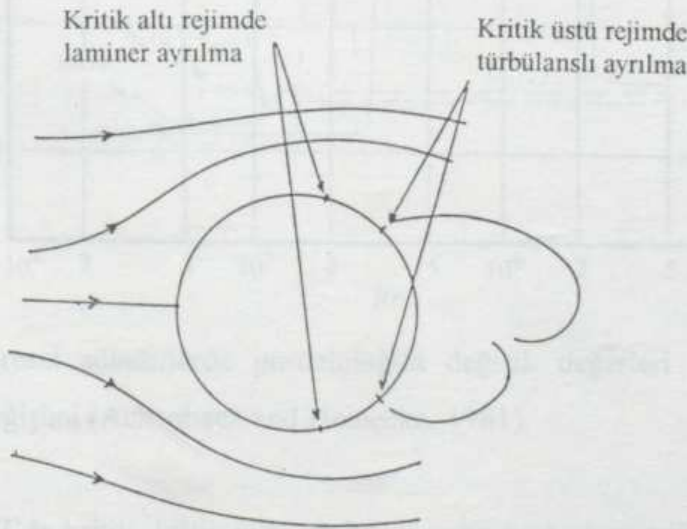


Şekil 2.5’de St sayısıyla Reynolds sayısının değişimi gösterilmiştir. Vorteks saçılımı, daha önce de belirtildiği gibi, Reynolds sayısının 40’a ulaştığında meydana gelmektedir. Şekil 2.5’den görüldüğü gibi Reynolds sayısının bu değerine karşılık gelen vorteks saçılım frekansını karakterize eden Strouhal sayısı, St, 0.1 değerini almaktadır.

St sayısının kademeli olarak artması ile Reynolds sayısı da artmakta, Reynolds sayısının yaklaşık olarak 300 olduğu kritik altı akım rejiminin başlangıcında, Reynolds sayısının değişimine rağmen St sayısı 0.2 değerinde sabit kalmaktadır.

Reynolds sayısının  $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$  değerinde St sayısı ani bir sıçrayış göstermektedir. Bu aralık kritik Reynolds sayısı olarak bilinmekte ve St değeri 0.2 değerinden 0.45 değerine ulaşmaktadır. St sayısının bu yüksek değeri, kritik üstü aralığında meydana gelmekte ve Reynolds sayısının artması ile birlikte yavaşça azalmaktadır.

Kritik üstü akımında St sayısındaki büyük artış aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kritik üstü akım rejiminde, ayrılma noktalarında silindirin her iki kenarındaki sınır tabakası türbülanslıdır. Şekil 2.6’da da gösterildiği gibi ayrılma noktasının mansaba doğru hareketlenmesine sebep olacak şekilde sınır tabakasından ayrılma gecikmektedir. Bunun anlamı ise; vortekslerin kritik altı akımında olduğundan daha hızlı bir oranda birbirlerini etkilediklerinden St sayısının daha büyük değerlere ulaşmasına neden olmalarıdır.



Şekil 2.6- Değişik rejimlerde ayrılma noktalarının gösterilişi (Sümer, 1992).

Reynolds sayısının  $1.5 \times 10^6$  değerine ulaştığı kritik geçiş üstü akım rejimi bölgesinde St sayısında bir süreksizlik söz konusudur. Bu rejimde, artiz bölgesinde asimetrik vorteks saçılımları meydana gelmektedir.

Düzenli vorteks saçılımının yeniden oluşabilmesi için Reynolds sayısının  $4.5 \times 10^6$  değerinden daha büyük değerlere ulaşması gerekmektedir. Bu akım rejimi, kritik geçiş akım rejimidir ve St sayısı da 0.25-0.3 değerine ulaşmaktadır (Şekil 2.5).

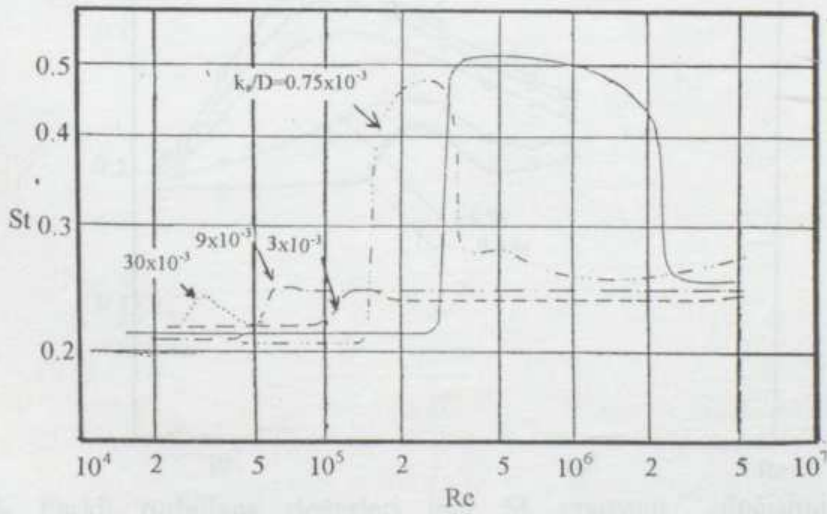
Pürüzlü silindirler için St sayısı, Reynolds sayısı ile pürüzlülüğün fonksiyonudur.

$$St = f(Re, k_s/D) \quad (2.4)$$

burada  $k_s$ , Nikuradse'nin eşdeğer kum pürüzlülüğüdür.

Şekil 2.7'de (Achenbach ve Heinecke, 1981) St sayısının, farklı  $k_s/D$  pürüzlülük değerleri için Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir.

Şekil 2.7'den görüldüğü gibi  $k_s/D > 3 \times 10^{-3}$  olduğu durumda yüzey pürüzlülüğünün etkisi belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır.



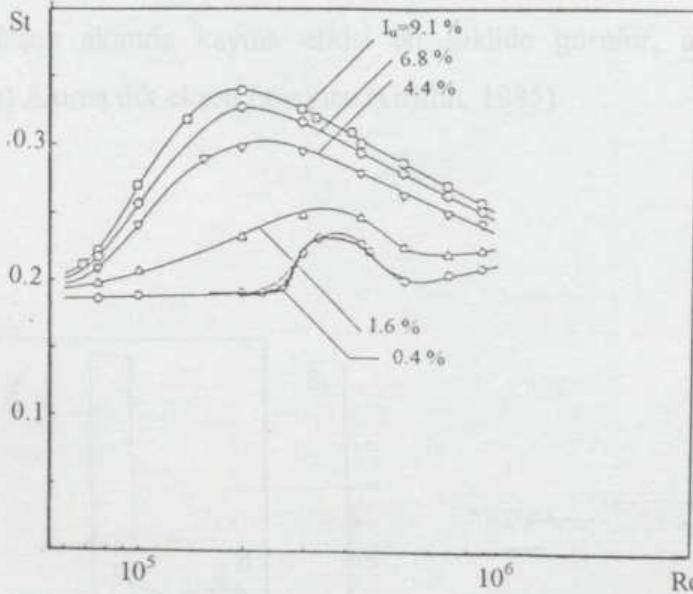
Şekil 2.7- Dairesel silindirlerde pürüzlülüğün değişik değerleri için St sayısının Re sayısına göre değişimi (Achenbach and Heinecke, 1981).

Şekil 2.7'de kritik, kritik üstü ve kritik geçiş üstü akım rejimleri St-Re grafiğinin dar bir bölgesinde meydana gelmekte, akım rejimi bu Reynolds sayısının dar bölgesinin

sınırında kritik geçiş rejimine doğru olmakta ve dolayısıyla bu olay daha küçük Reynolds sayılarında meydana gelmektedir. Şekil 2.7'de  $k_s/D$ 'nin  $30 \times 10^{-3}$  değeri için Reynolds sayısının  $0.3 \times 10^5$  ve  $k_s/D$ 'nin  $3 \times 10^{-3}$  değeri için ise Reynolds sayısının  $1.5 \times 10^5$  olduğu görülmektedir. Bu sonuç şaşırtıcı değildir, çünkü türbülansa geçişin pürüzlü cidarda daha çabuk meydana geldiği bilinmektedir.

Yaklaşan akımdaki türbülansın vorteks saçılımına etkin bir faktör olduğu bilinmektedir. Türbülansın vorteks saçılımı üzerine olan etkisi değişik araştırmacılar tarafından (Cheung ve Melbourne, 1983; Kwok, 1986; Norberg ve Sunden, 1987) ele alınmıştır. Şekil 2.8'de gösterilen St sayıları, Cheung ve Melbourne tarafından hava tüneline türbülansın değişik seviyeleri için elde edilmiştir.

Şekil 2.8'den görüldüğü gibi, türbülans şiddetinin artması ile kritik geçiş bölgesi daha küçük Reynolds sayısında meydana gelmektedir. Bunun nedeni, yaklaşan akımın türbülans şiddetinin artmasıyla, silindirin etrafındaki sınır tabakasının türbülanslı rejime erken geçişidir.

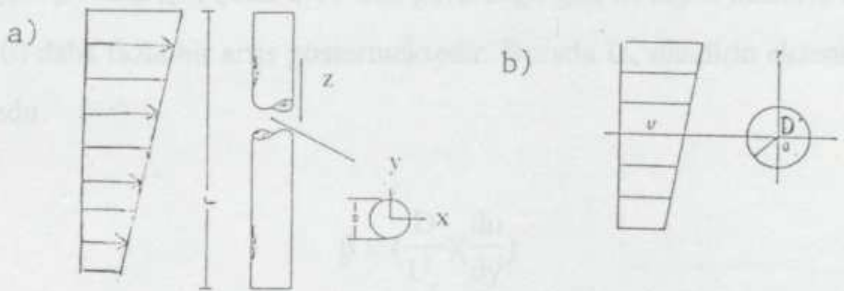


Şekil 2.8- Farklı türbülans değerleri için St sayısının değişimi (Cheung and Melbourne, 1983).

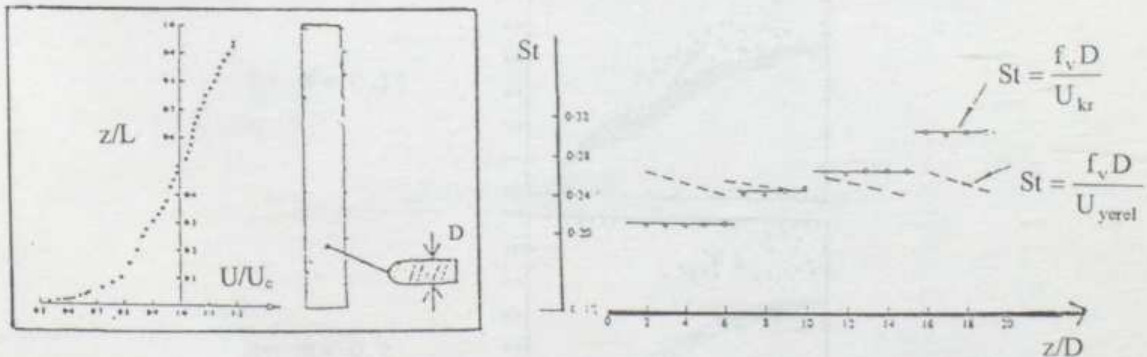
Ayrıca yaklaşan akımda meydana gelen kayma etkisi de vorteks saçılım işlemi üzerine etkili bir parametredir. Kayma etkisi yaklaşan akımda iki türlü görülmektedir. Birincisi, silindirin dikey eksenı boyunca (Şekil 2.9b), diğeri ise akıma dik eksen



boyuncadır (Şekil 2.9a). Dairesel ve dairesele olmayan kesitlere sahip yapılar etrafındaki akımın kayma etkisi karakteristikleri Griffin (1985) tarafından incelenmiştir (Şekil 2.10). Vorteks saçılımları düşey eksen boyunca küçük elemanlar halinde meydana gelmekte ve her bir vorteks elemanı sabit bir frekansa sahip olmaktadır. Şekil 2.10'dan açıkça görüldüğü gibi her biri farklı frekansa sahip dört vorteks elemanının saçıldığı belirlenmiştir. St sayısındaki yerel hızların esas alınması halinde (şekilde kesik çizgiler halinde gösterilmiştir) St sayısının yaklaşık olarak 0.25 civarında toparlandığı görülmektedir.



Şekil 2.9- Yaklaşan akımda kayma etkisi iki şekilde görülür, a) Silindirin eksenel doğrultusunda, b) Akıma dik eksen boyunca (Griffin, 1985).

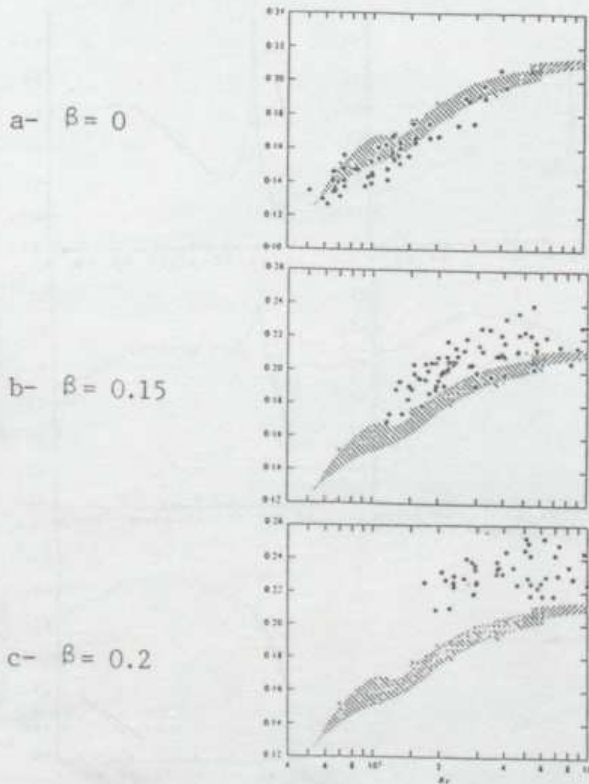


Şekil 2.10- Kayma akımında düşey eksen boyunca St sayısının dağılımı, Yuvarlak: St sayısı eksenindeki hızın fonksiyonu ( $U_c$ ), Kesikli çizgi: St sayısı yerel hızın fonksiyonu ( $U_y$ ), (Maull and Young, 1973).

Griffin (1985) genellikle kayma etkisinin artmasıyla vorteks elemanlarının saçılım uzunluklarının azaldığını göstermiştir.

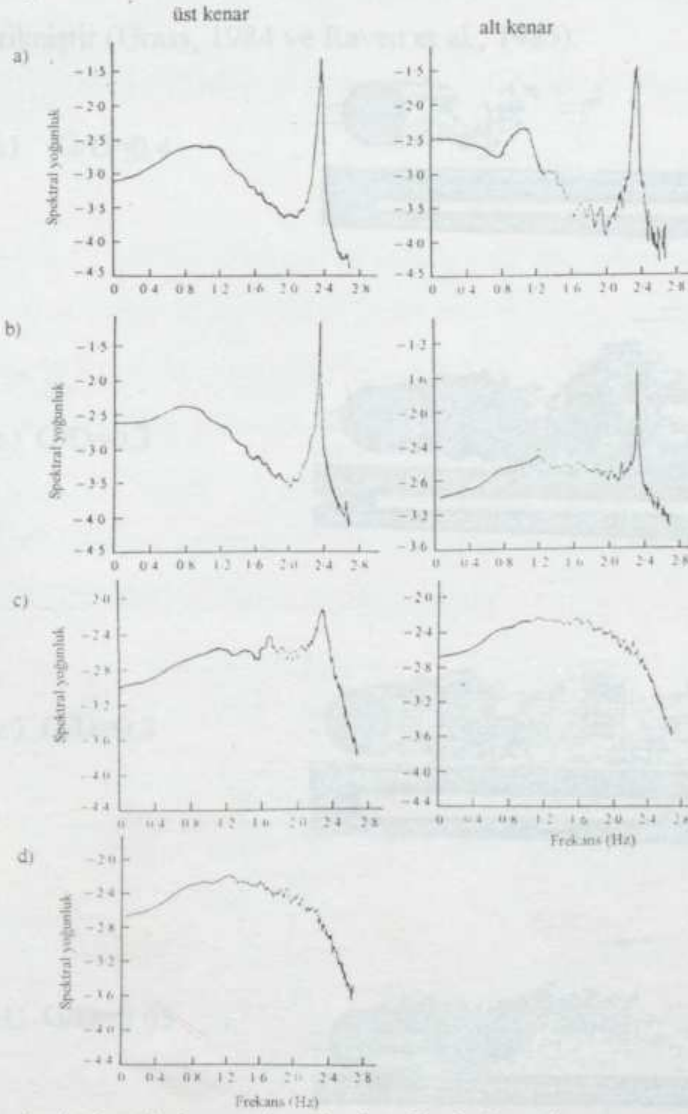
Kayma etkisinin akıma dik eksen boyunca mevcut olması durumunda (ancak bu durumda kayma, silindirin düşey eksenı boyunca üniform olmalıdır) saçılımlar küçük ve orta büyüklükteki sürtünme şiddeti,  $\beta$ , değerlerinde çok az etkilenmektedirler. Ancak  $\beta$ 'nın büyük değerlerinde saçılım daha fazla etkilenmektedir (Kiya, Tamura ve Arie, 1980). Şekil 2.11'de  $\beta$ 'nın üç farklı değeri için Reynolds sayısına karşın  $St$  sayısının değişimi gösterilmiştir.  $\beta = 0.2$  için Şekil 2.11'den görüldüğü gibi  $St$  sayısı üniform akım durumuna göre ( $\beta = 0$ ) daha fazla bir artış göstermektedir. Burada  $U_c$  silindirin eksenı doğrultusunda ölçülen hızdır.

$$\beta = \left(\frac{D}{U_c}\right)\left(\frac{du}{dy}\right) \quad (2.5)$$



Şekil 2.11-  $\beta$ 'nin üç farklı değeri için  $Re$  sayısına karşın  $St$  sayısının değişimi (Kiya, Tamura and Arie, 1980).

Daha öncede belirtildiği gibi, silindirin cidara yakın yerleştirilmesi halinde vorteks saçılımı önlenebilmektedir. Cidardan değişik uzaklıklara yerleştirilen bir silindirin art-iz bölgesindeki her iki kenarından alınan CTA sinyallerinin güç spektrumu Şekil 2.12’de verilmiştir (Bearman and Zdravkovich, 1978). Düzenli vorteks saçılımı yalnızca  $G/D$  oranının 0.3 ve daha büyük olduğu değerler için meydana gelmektedir (  $G$  silindir ile cidar arasındaki dik uzaklık). Bu sonuç ilk kez Bearman ve Zdravkovich (1978) tarafından verilmiş ve daha sonra Grass et al.(1984)’nın ölçümleri ile desteklenmiştir. Angrilli, Bergamaschi and Cossalter (1982)’in deneyleri ise  $0.5 \leq G/D \leq 6$  değerlerinde açıklık oranının azalmasıyla vorteks saçılım frekansının sistematik olarak arttığını göstermiştir.



Şekil 2.12- Art-iz bölgesinde sıcak tel sinyallerinden alınan güç spektrumu, a)  $G/D=2$ , b)  $G/D=0.3$ , c)  $G/D=0.2$ , d)  $G/D=0$ . (Bearman and Zdravkovich, 1978).



Şekil 2.13'deki fotoğraflar ise  $G/D$  oranının 0.3'den küçük olduğu değerler için, vorteks saçılımının bozulduğunu göstermektedir.

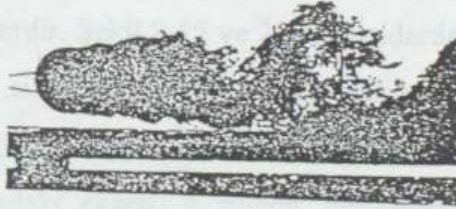
Daha önce de bahsedildiği gibi, cidar tarafında sönümlendirilen vorteks saçılımları silindirin her iki tarafı arasında vorteks saçılımında asimetriye neden olmaktadır. Serbest kenarda kalan vorteks, cidar tarafında kalan vorteksten daha büyük ve güçlü olarak gelişmektedir. Böylece iki vorteksin birbirinden etkilenmesi büyük ölçüde azalmakta ve düzenli vorteks saçılımının kısmen veya tamamen zayıflamasına neden olmaktadır.

Şekil 2.14'de vorteks saçılımının var olduğu  $G/D$  oranları için, vorteks saçılım frekansı üzerindeki cidar etkisine ait ölçümler, saçılım frekansının açıklık oranının azalması ile arttığı gösterilmiştir (Grass, 1984 ve Raven et al., 1985).

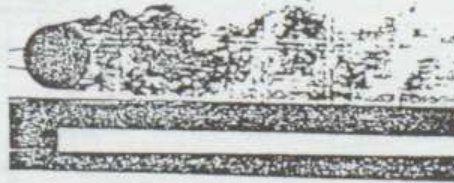
a)  $G/D=0.4$



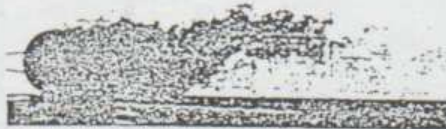
b)  $G/D=0.3$



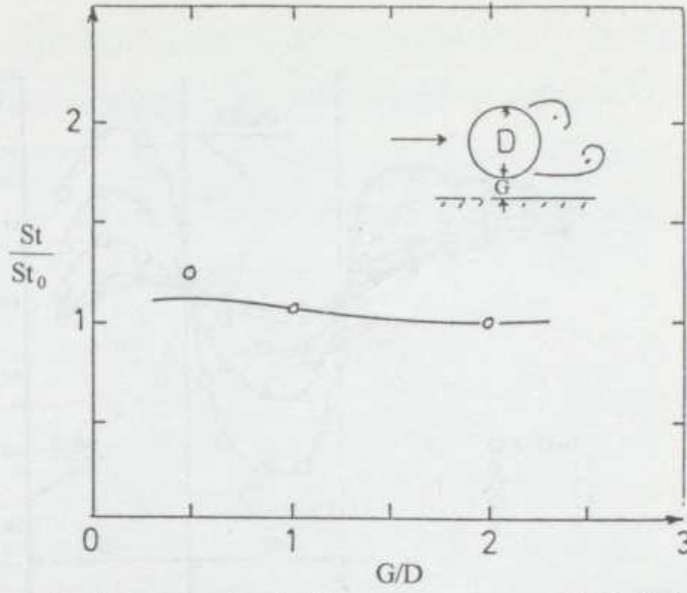
c)  $G/D=0.2$



d)  $G/D=0.05$

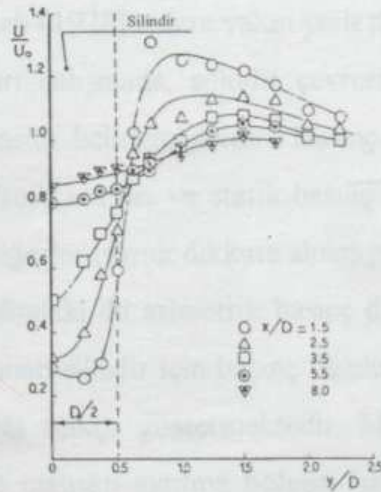


Şekil 2.13- Cidara yakın yerleştirilmiş silindirin art-iz bölgesinin  $G/D$ 'ye bağlı olarak değişimleri (Grass et al., 1984).

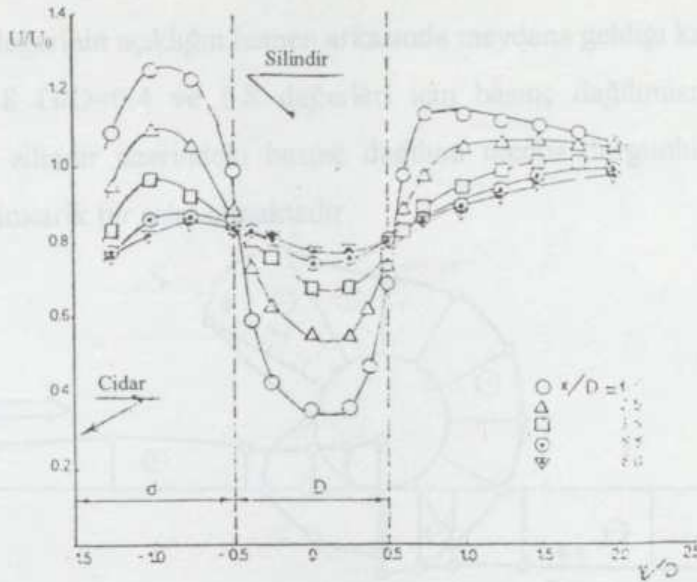


Şekil 2.14-  $G/D$ 'nin fonksiyonu olarak  $St$  sayısının normalleştirilmiş değerleri (Sümer, 1992).

Angrilli et al., (1982) art-iz bölgesinin analizi ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, 0.02m çapındaki silindirin mansabından farklı mesafelerde enine birkaç istasyonda akımın zamansal ortalama hızını,  $U$ , ölçmüşlerdir. Şekil 2.15 ve 2.16'da cidardan uzakta ve cidara bir silindir çapı mesafede bulunan silindir için, beş farklı mansap mesafesinde ( $x/D$ )  $U/U_0$ 'ın  $y/D$ 'ye göre değişimleri gösterilmiştir. Burada  $x$  silindir merkezinden ölçülen mansap tarafında akım doğrultusundaki eksen,  $y$  silindir merkezinden ölçülen düşey koordinat eksen,  $U_0$  rahatsız edilmemiş akım hızıdır.



Şekil 2.15- Cidardan yeterince uzaktaki silindir hali, (Angrilli et al., 1982).



Şekil 2.16- Cidara yakın silindir hali,  $G/D=1.0$ , (Angrilli et al., 1982).

Bu iki şekil karşılaştırıldığında, ilk olarak cidar etkisinin ortalama hız dağılımının asimetrik bir şekil almasına neden olduğu durumlarda mansap yakınında cidar tarafındaki hızın daha büyük olduğu, oysa  $x/D > 2.5$  olduğu yerde tam tersinin söz konusu olduğu görülmüştür. İkinci olarak ise cidarın bulunmadığı halde  $x/D < 3.5$  olduğu mesafelerde art-iz bölgesinin ekseninde hızda sapmalar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca maksimum hız çalkantılarının konumunun  $x/D=2.5$ 'dan yaklaşık olarak 1.5 veya daha az bir mesafeye kadar yer değiştirdiği belirlenmiştir.

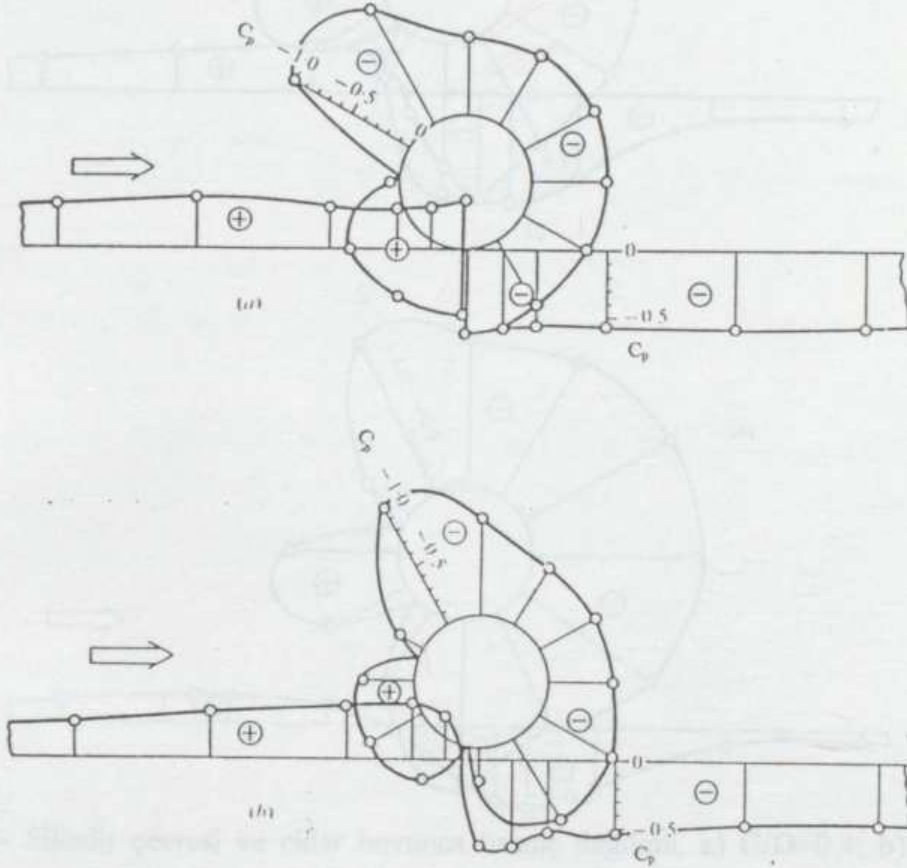
Bearman ve Zdravkovich (1978) cidara yakın yerleştirilmiş silindir etrafındaki akım alanı ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, silindir çevresinde ve cidar boyunca basınç dağılımının zamansal ortalamasını belirlemişlerdir. Basınç değişimi boyutsuz  $C_p$  basınç katsayısı ile temsil edilmiştir (referans hız ve statik basınç cidar olarak göz önüne alınan levhanın hücum kenarındaki değerler olarak dikkate alınmıştır).

Şekil 2.17 silindir etrafındaki iki asimetrik basınç dağılımını göstermektedir. Şekil 2.17a hem cidar üzerinde bulunan silindir için basınç dağılımını, hem de silindir ile cidarın temas noktasındaki süreksizliği açıkça göstermektedir. Menba ayrılma bölgesi yaklaşık olarak pozitif sabit bir  $C_p$  ve mansap ayrılma bölgesi ise negatif sabit bir  $C_p$  değerine sahiptir. Şekil 2.17b ise boru-cidar açıklığı  $G/D=0.1$  için açıklık akımının cidardaki basınç



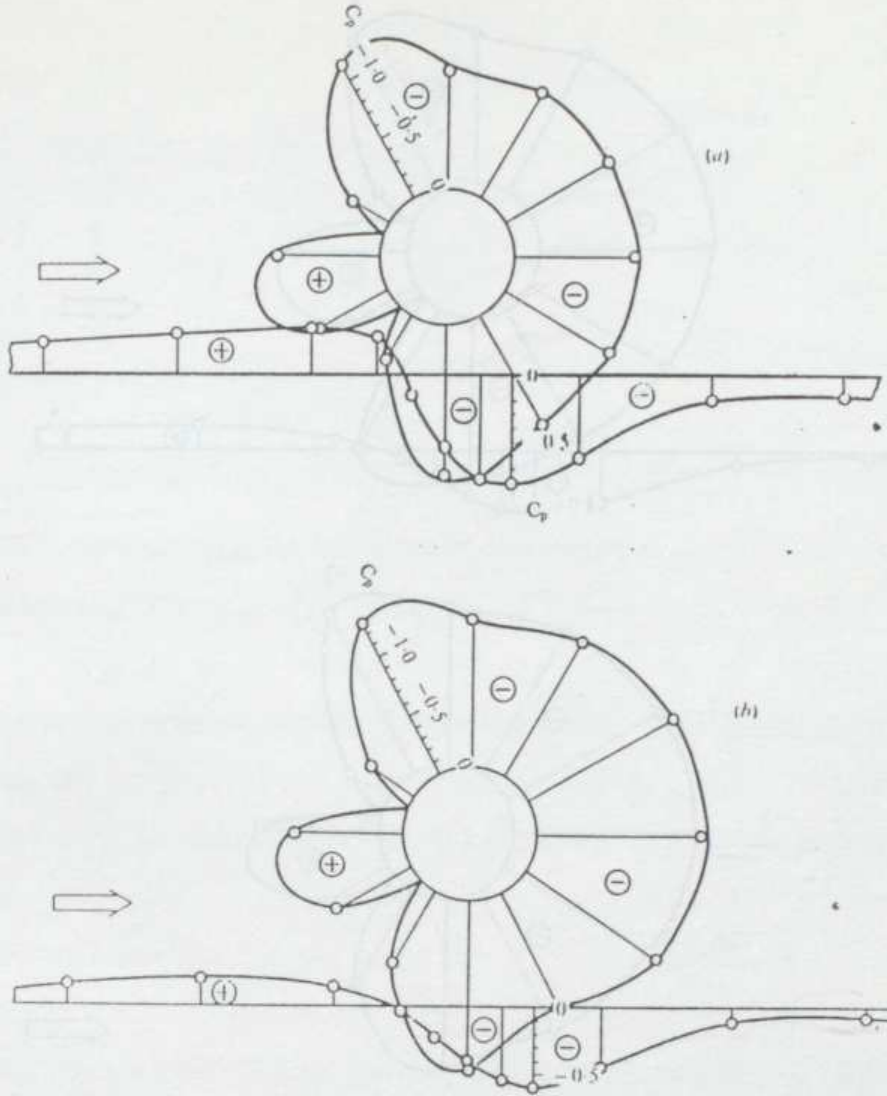
dağılımı üzerindeki etkisini göstermektedir (Cidarda silindirin altında ani bir düşme olduğu ve minimum  $C_p$  değerinin açıklığın hemen arkasında meydana geldiği kaydedilmiştir).

Şekil 2.18  $G/D=0.4$  ve  $0.8$  değerleri için basınç dağılımlarını göstermektedir. Görüldüğü gibi, silindir üzerindeki basınç dağılımı menba durgunluk noktası etrafında yaklaşık olarak simetrik bir şekil almaktadır.



Şekil 2.17- Silindirin çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a)  $G/D=0$ ; b)  $G/D=0.1$ , (Bearman and Zdravkovich, 1978).

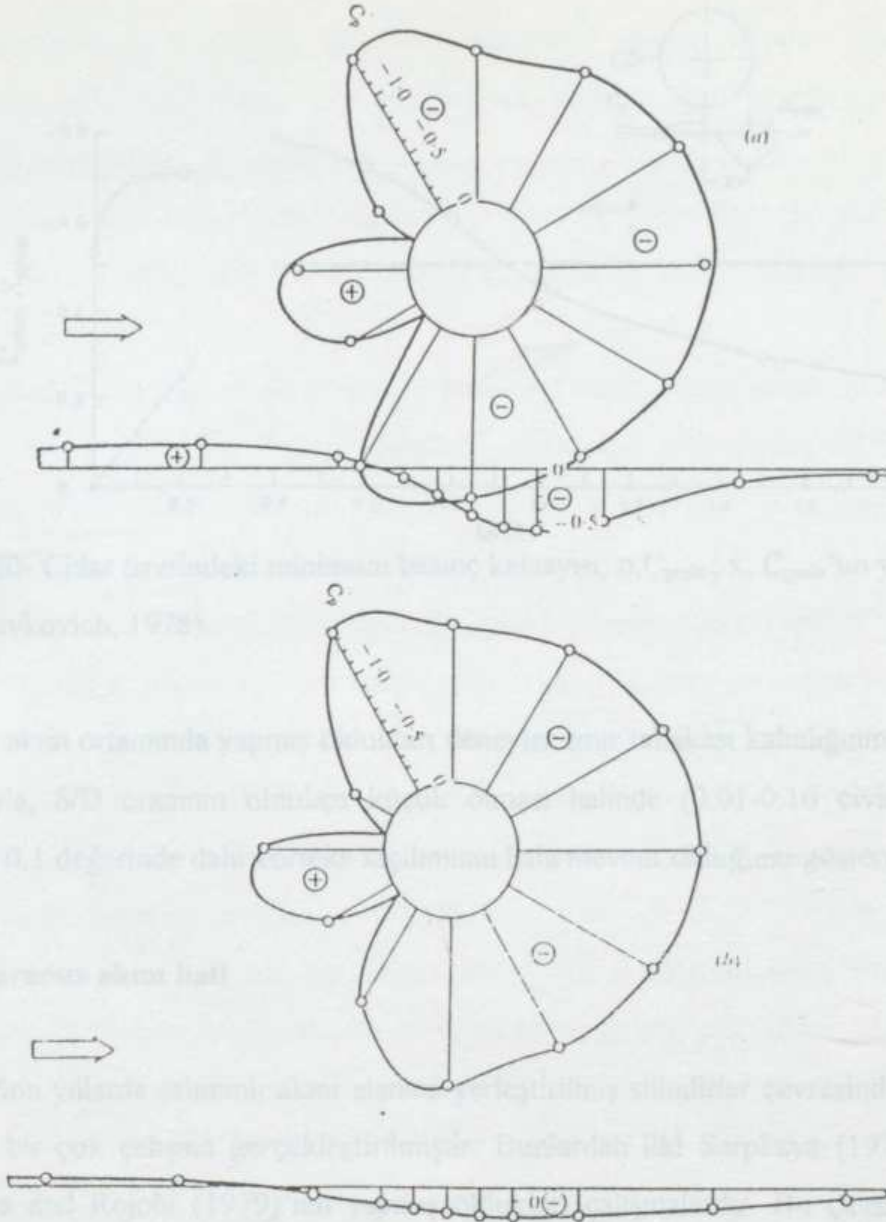
Şekillerden görüldüğü gibi silindirin cidardan uzaklaşmasıyla silindir çevresindeki basınç dağılımı menba durgunluk noktasına göre daha simetrik bir şekil almaktadır.  $G/D$ 'nin bu aralığında taban basınç katsayısının,  $C_{pt}$ , belirgin bir şekilde daha da küçüldüğü görülmektedir. Şekil 2.17'de gösterilen basınç dağılımına benzemeyen bir şekilde, minimum  $C_p$  değerinden sonra cidar boyunca basınçta sürekli bir düzelme görülmekte ve  $G/D$  oranı arttıkça bu minimum basıncın büyüklüğü azalmaktadır.



Şekil 2.18- Silindir çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a)  $G/D=0.4$ ; b)  $G/D=0.8$ , (Bearman and Zdravkovich, 1978).

$G/D$ 'nin 1.0 ve 2.0 değerleri arasındaki basınç dağılımları Şekil 2.19'da gösterilmektedir.  $G/D$ 'nin 1.0'den büyük değerlerinde taban basıncındaki değişimin oldukça küçük olduğu görülmektedir.  $G/D$  oranı arttıkça, serbest akım yönünde simetri ekseninde basınç dağılımında simetrik bir form oluşmaktadır.

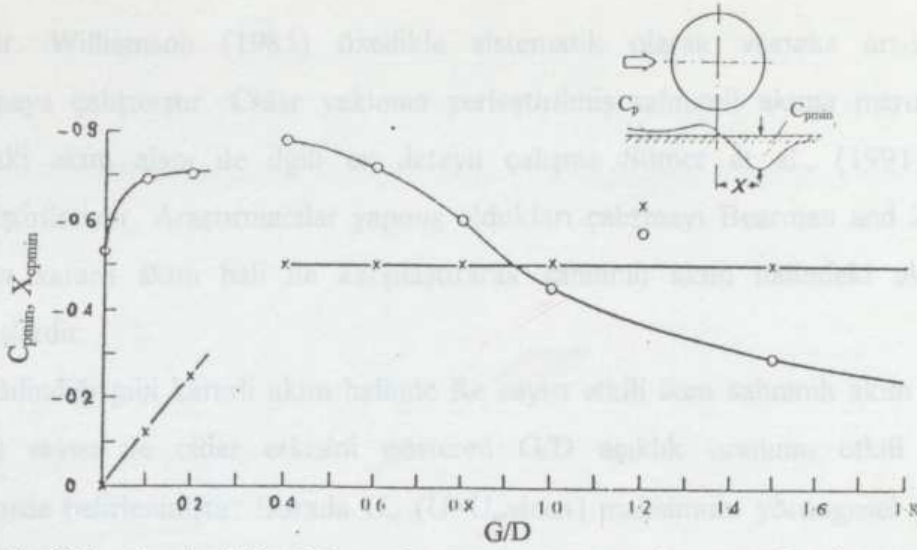
Şekil 2.20 farklı  $G/D$  oranları için  $C_p$ 'nin negatif pikinin büyüklüğünü ve cidar boyunca yerini göstermektedir.  $G/D=0.4$  olduğunda silindirin mansabında  $0.5D$  kadar mesafede basınç maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 2.19- Silindir çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a)  $G/D=1.0$  ; b)  $G/D=2.0$ , (Bearman and Zdravkovich, 1978).

Yaklaşan akımın sınır tabakası kalınlığının,  $\delta$ , vorteks saçılımı üzerine etkisinde şöyle izah edilebilir.  $\delta/D$  oranının çok küçük olması durumunda silindir ile cidar arasından geçen akım miktarı,  $\delta/D$  oranının büyük olması durumuna göre önemli ölçüde artmaktadır. Bu da, cidar kenarındaki vorteksin yeterince güçlenerek diğer taraftaki vorteksle etkileşiminin olabileceğini göstermektedir (Sümer, 1992). Sümer et al. (1991)'in





Şekil 2.20- Cidar üzerindeki minimum basınç katsayısı, o,  $C_{pmin}$ ; x,  $C_{pmin}$ 'un yeri, (Bearman and Zdravkovich, 1978).

salınlımlı akım ortamında yapmış oldukları deneyler sınır tabakası kalınlığının küçük olması dolayısıyla,  $\delta/D$  oranının oldukça küçük olması halinde (0.01-0.16 civarında) açıklık oranının 0.1 değerinde dahi vorteks saçılımının hala mevcut olduğunu göstermiştir.

### 2.1.2 Kararsız akım hali

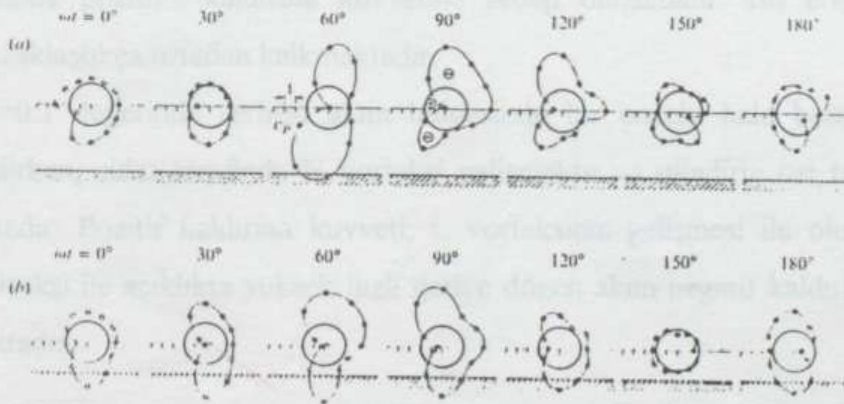
Son yıllarda salınlımlı akım alanına yerleştirilmiş silindirler çevresindeki akım alanı ile ilgili bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki Sarpkaya (1976a, 1977) ve Sarpkaya and Rojebi (1979)'nın yapmış oldukları çalışmalardır. Bu çalışmaların amacı cidardan çeşitli mesafelere yerleştirilmiş silindirler üzerindeki direnç, atalet va kaldırma hidrodinamik katsayılarını belirlemektir. Lundgren, et al., (1976) bir cidara yerleştirilmiş silindir etrafındaki basınç alanını ölçmüştür. Jacobsen, Bryndum, Fredsøe (1984), Ali and Narayanan (1986), Justesen et al. (1987) salınlımlı akım etkisinde dairesel silindire tesir eden hidrodinamik kuvvetlerin cidar etkisi ile nasıl değiştiğini belirlemek için bir takım ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Bearman, Graham and Sung (1979), Singh (1979), Grass and Kemp (1979), Bearman and Graham (1979), Bearman et al. (1981) ve Williamson (1985) ise cidardan uzakta silindirler etrafındaki vorteks saçılımlarının rejimlerini incelemişlerdir. Bu çalışmalar değişik rejimlerde karmaşık vorteks hareketlerini açıklamaya

yöneliktir. Williamson (1985) özellikle sistematik olarak vorteks art-iz bölgesini tanımlamaya çalışmıştır. Cidar yakınına yerleştirilmiş salınlı akıma maruz silindirler etrafındaki akım alanı ile ilgili en detaylı çalışma Sümer et al., (1991) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmayı Bearman and Zdravkovich (1978)'in kararlı akım hali ile karşılaştırarak salınlı akım halindeki akım yapısını tariflemişlerdir.

Bilindiği gibi kararlı akım halinde Re sayısı etkili iken salınlı akım halinde KC ( $U_m T/D$ ) sayısı ile cidar etkisini gösteren  $G/D$  açıklık oranının etkili olduğu bu çalışmalarda belirlenmiştir. Burada  $U_m$  ( $U=U_m \sin \omega t$ ) maksimum yörüngesel yatay hız,  $T$  salınlı akımın periyodu,  $D$  boru çapıdır.

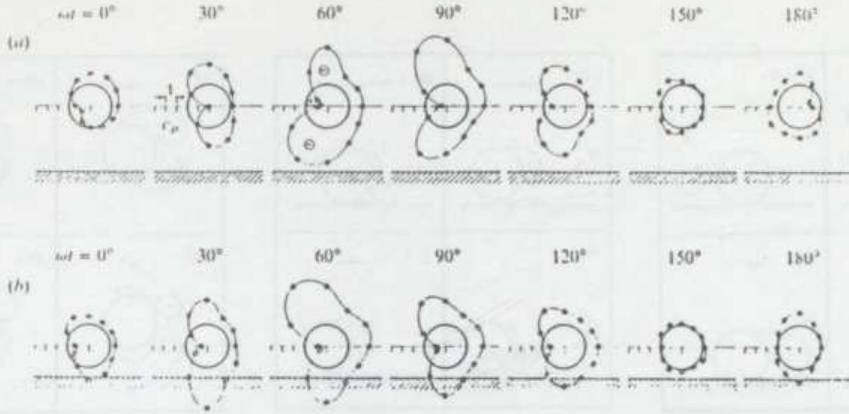
Sümer et al., (1991) silindirler etrafındaki salınlı akım yapısını tariflemek için sakin su içerisine yerleştirdikleri cidara yakın bir silindire, servo motor yardımı ile verdikleri salınlı hareket ile deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmacılar silindire etkili hidrodinamik kuvvetlerin cidardan nasıl etkilendiğini belirlemek için silindir yakınında hız, basınç ölçümleri ve görünürlük çalışmaları yaparak akım yapısı hakkında önemli fikirler vermişlerdir.

Şekil 2.21 ve 2.22'den görüldüğü gibi silindir etrafındaki anlık basınç dağılımları incelendiğinde, maksimum pozitif basıncın meydana geldiği durgunluk noktası salınlı akım geriye dönmeden önce silindirin art-iz bölgesine doğru hareket etmektedir. Silindirin cidara yaklaşmasıyla cidar tarafındaki basınç artmaktadır.



Şekil 2.21- Hareketin bir yarım periyodunda anlık basınç dağılımının gelişimi. KC=10, a)  $G/D=1.0$ ; b)  $G/D=0.2$  (Sümer et al., 1991).



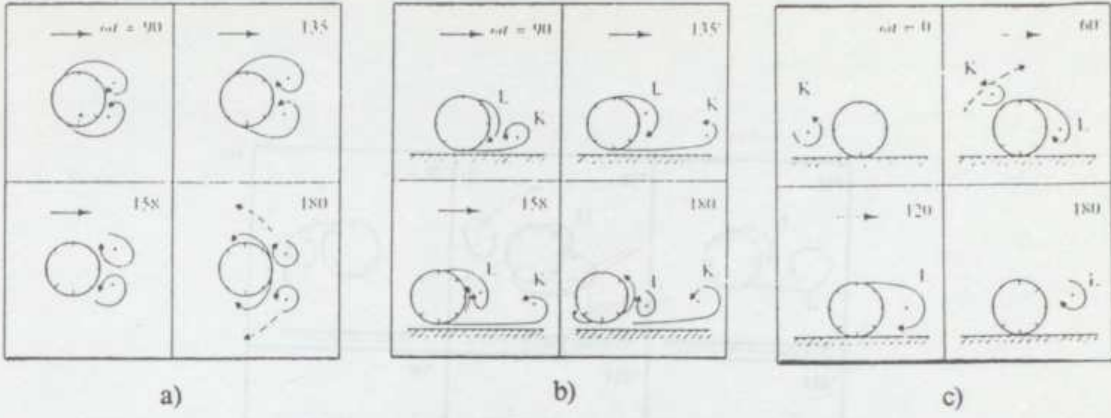


Şekil 2.22- Hareketin bir yarım periyodunda anlık basınç dağılımının gelişimi  $KC=20$ , a)  $G/D=1.0$ ; b)  $G/D=0.2$  (Sümer et al., 1991).

$KC=4.0$  değerinde Şekil 2.23'deki vorteks saçılımları incelendiğinde  $G/D=0.1$  açıklık oranında vorteks saçılımındaki simetri kaybolmaktadır. Ayrıca, salınımlı hareketin her yarım periyodunda art-iz bölgesinde gelişen vorteksler diğer yarım periyotta silindirin diğer tarafına taşınmaktadır.  $7 < KC < 13$  arasında silindirin cidardan uzakta olması durumunda silindirin art-iz bölgesinde akıma dik vorteks caddesi oluşmakta, ancak  $13 < KC < 15$  değerleri arasında bu vorteks saçılım davranışı bozulmakta ve akım doğrultusunda şekillenmektedir. Bu durumda periyodun  $45^\circ$  değerinde art-iz bölgesindeki vorteks çiftleri, salınımlı akım doğrultusunda ve silindirin sadece bir kenarından taşınabilmektedir. Şekil 2.24a'dan görüldüğü gibi  $G/D=1$  için salınımlı hareketin her yarım periyodunda sadece bir vorteks saçılmakta (vorteks L), geriye süpürülen K vorteksi ise silindir üzerinde pozitif kaldırma kuvvetine sebep olmaktadır. Bu etki L vorteksi silindirden uzaklaştıkça ortadan kalkmaktadır.

$G/D=0.1$  değerinde serbest akım bölgesinde bir önceki hale benzer saçılımlar meydana gelirken, cidar tarafında N vorteksi gelişmekte ve silindirin üst tarafına doğru süpürülmektedir. Pozitif kaldırma kuvveti, L vorteksinin gelişmesi ile oluşmakta buna karşın N vorteksi ile açıklıkta yüksek hızlı geriye dönen akım negatif kaldırma kuvvetine neden olmaktadır.

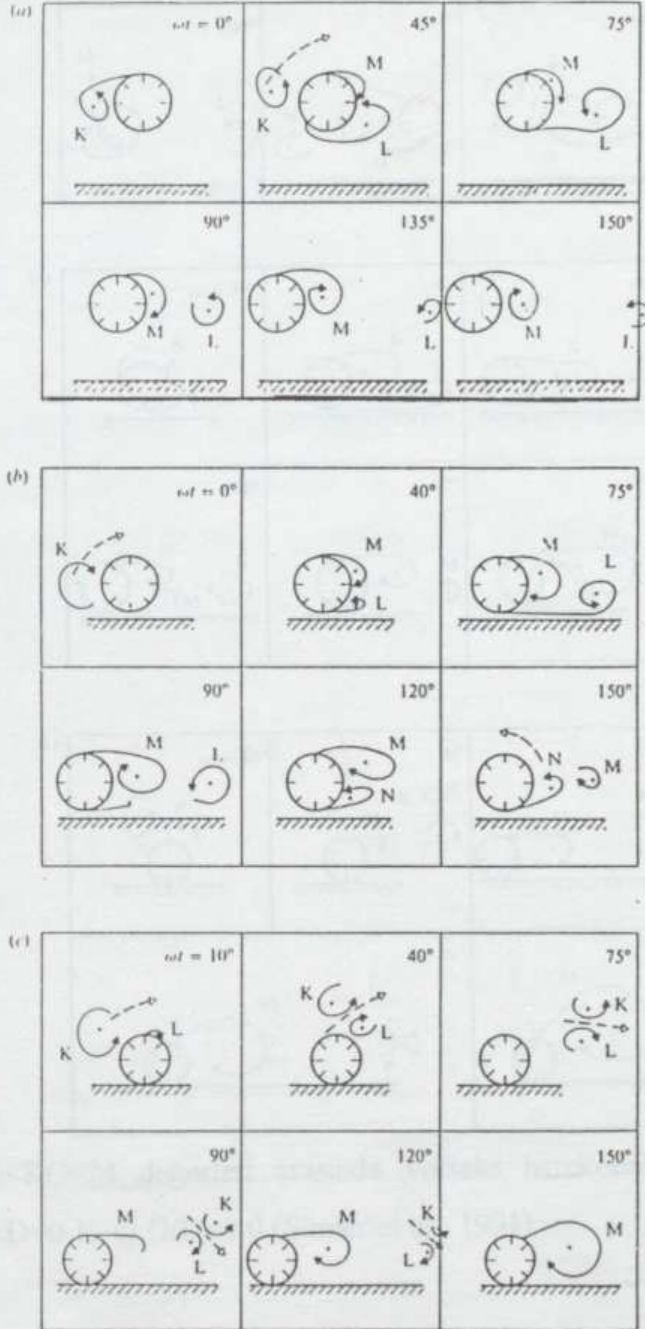




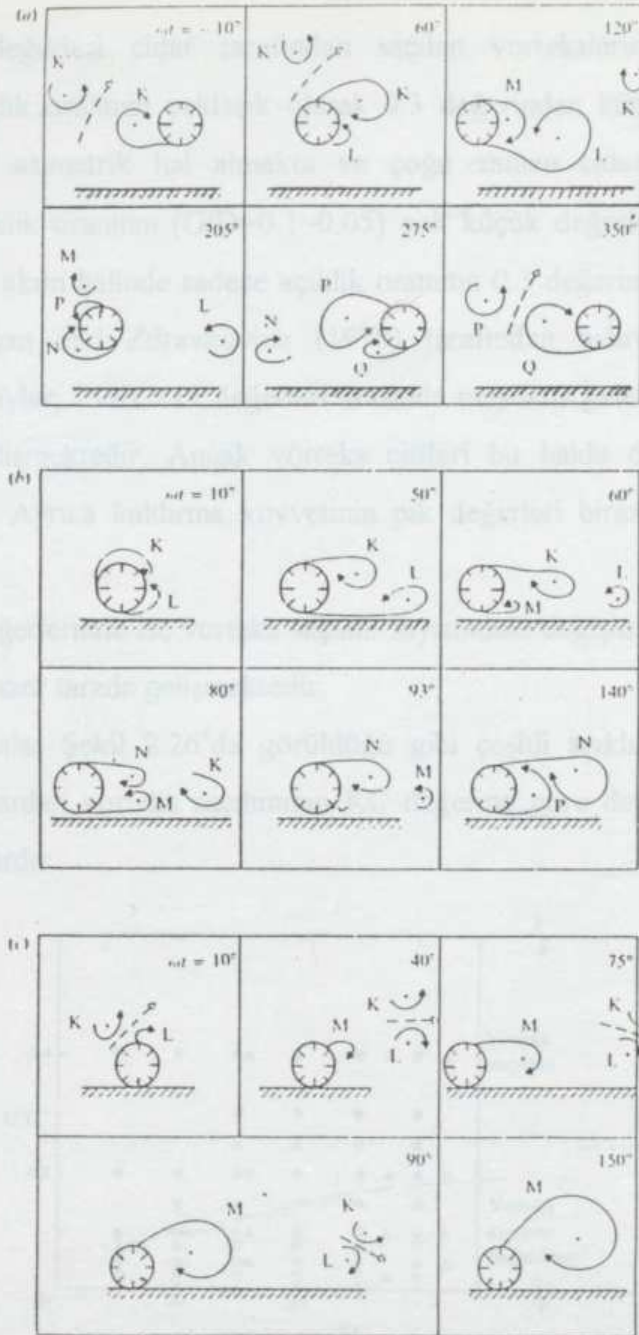
Şekil 2.23- Vorteks hareketinin gelişimi,  $KC=4.0$ , a)  $G/D=2.0$ ; b)  $G/D=0.1$ ; c)  $G/D=0.0$ , (Sümer et al., 1991).

$G/D=0.0$  için silindirin arka tarafında ilk yarım periyotta gelişen K vorteksi, ikinci yarım periyotta gelişen L vorteksi ile birlikte bir vorteks çifti oluşturarak mansap bölgesine taşınmaktadır. L vorteksinin kopmasıyla, yeni M vorteksi gelişmektedir. Araştırmacılar cidar üzerine yerleştirilmiş silindirler için vorteks rejiminin  $KC$ 'nin diğer değerlerinde de benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Kaldırma kuvvetinin pik değerleri, K vorteksinin silindir üzerinden geçişi sırasında meydana gelmektedir ( $\sim 40^\circ$ ).

Şekil 2.25'de  $15 < KC < 24$  değerleri arasındaki vorteks saçılımları incelendiğinde;  $G/D=1.0$  için birbirini takip eden her yarım periyot arasında simetri olmadığı ve her yarım periyotta serbest akım tarafı ve cidar tarafı arasında birbirlerine alternatif olacak şekilde silindirin üzerinde vorteksler süpürül. Kaldırma kuvveti, bu vorteks hareketleri ile birlikte asimetric bir görünüm vermektedir.



Şekil 2.24-  $7 < KC < 15$  sınırları içerisinde vorteks hareketinin gelişimi,  $KC=10$ , a)  $e/D=1.0$ ; b)  $e/D=0.1$ ; c)  $e/D=0.0$  (Sümer et al., 1991).



Şekil 2.25-  $15 < KC < 24$  değerleri arasında vorteks hareketinin gelişimi,  $KC=20$ , a)  $G/D=1.0$ ; b)  $G/D=0.1$ ; c)  $G/D=0.0$  (Sümer et al., 1991).

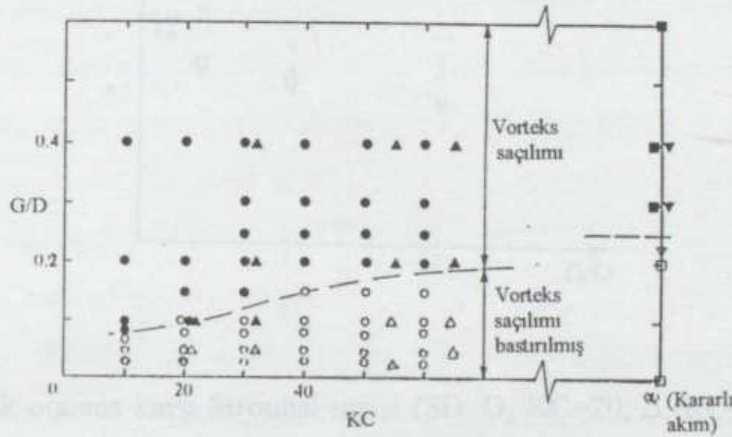
$G/D=0.1$  için bir önceki durumda karşılaşılan, bir yarım periyoddan diğerine vorteks hareketindeki asimetri ortadan kalkmaktadır. Cidar tarafındaki P vorteksi daima diğer yarım periyoddan önce silindir üzerinden süpürülmektedir. Kaldırma kuvveti hareketin büyük bölümünde cidardan serbest akım bölgesine doğru etmektedir. Kaldırma



kuvvetinin pik değerleri cidar tarafından saçılan vortekslerin etkisi ile meydana gelmektedir. Açıklık oranının yaklaşık olarak 0.3 değerinden küçük olması durumunda kaldırma kuvveti asimetrik hal almakta ve çoğu zaman cidardan uzaklaşan yönde etkilenebilir. Açıklık oranının ( $G/D=0.1\sim0.05$ ) çok küçük değerlerinde görülen vorteks saçılımının kararlı akım halinde sadece açıklık oranının 0.3 değerine kadar olan oranlarda gözlemlendiği Bearman and Zdravkovich (1978) tarafından belirtilmiştir.  $G/D=0.0$  için meydana gelen olaylar,  $7<KC<15$  değerleri arasında meydana gelen vorteks hareketlerine benzer tarzda gelişmektedir. Ancak vorteks çiftleri bu halde daha fazla mesafe kat edebilmektedirler. Ayrıca kaldırma kuvvetinin pik değerleri biraz daha erken meydana gelmektedir.

$KC>24$  değerlerinde ise vorteks saçılım sayısındaki değişim haricinde, akım yapısı bir önceki hale benzer tarzda gelişmektedir.

Araştırmacılar Şekil 2.26'da görüldüğü gibi çeşitli açıklık oranları için yapmış oldukları çalışmalardan vorteks saçılımının  $KC$  değerine göre değişimini inceleyerek şu sonuçlara varmışlardır.

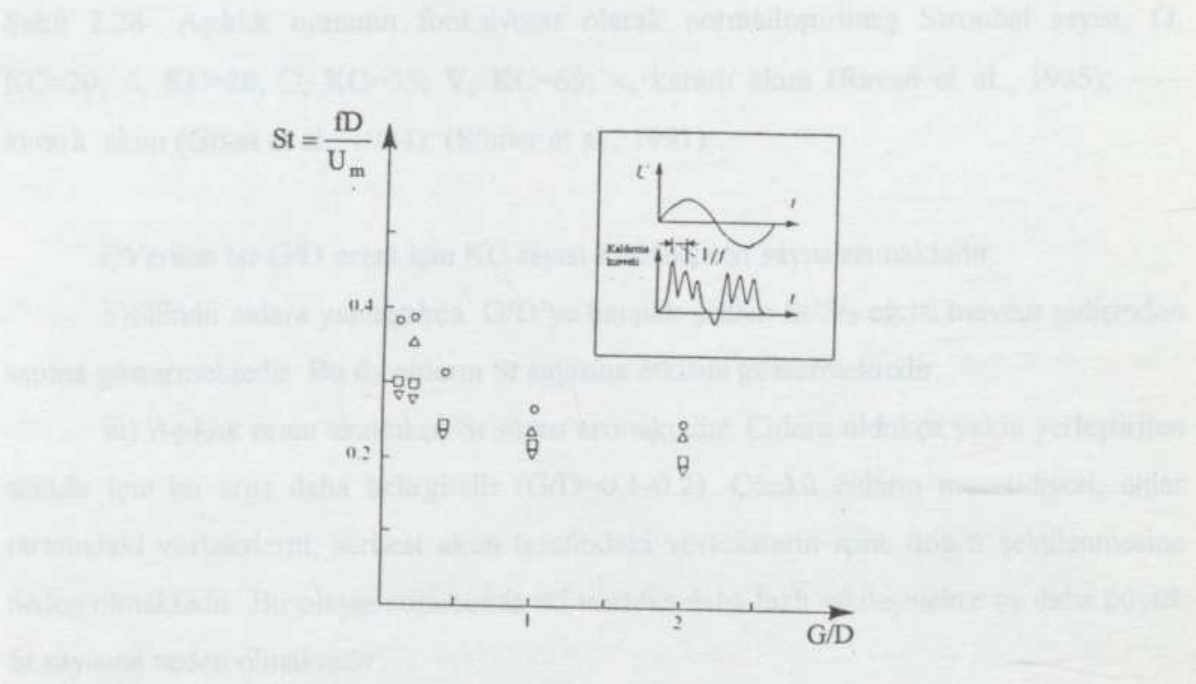


Şekil 2.26-  $G/D$ ,  $KC$  düzleminde vorteks saçılımının sönümlendirildiği bölgeyi gösteren diyagram. Açık semboller: Vorteks saçılımları bastırılıyor; Dolu semboller: Vorteks saçılımları mevcut (Sümer et al., 1991).

i) Kararlı akım halinde olduğu gibi  $KC$ 'nin büyük,  $G/D$ 'nin 0.25'den küçük değerlerinde vorteks saçılımı cidar tarafından sönümlendirilmektedir.

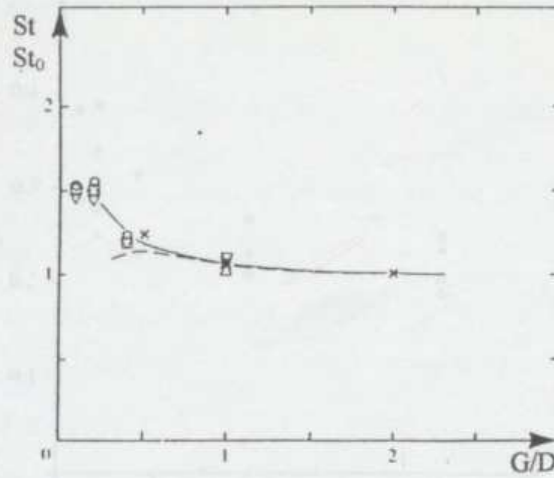
ii) Şekil 2.26'dan görüldüğü gibi açıklık oranının daha küçük değerlerinde bile KC sayısının 10-20 aralığında vorteks saçılımı söz konusudur. Bu kadar küçük açıklık oranlarında vorteks saçılımının olmasının nedeni, silindirin cidar tarafından geçen akım miktarının, salınımlı akımın küçük KC sayılarında kararlı akımdakinden daha fazla olmasındandır.

Şekil 2.27'de KC sayısı üçüncü parametre olmak üzere, Strouhal sayısının (St) G/D oranları için değişimi verilmiştir. Gerçekte vorteks saçılım frekansı (f) salınımlı akımın periyodu boyunca değişmektedir. Burada tanımlanan St sayısı yeteri uzunlukta bir zaman aralığı boyunca alınmış ortalama değerlerdir.



Şekil 2.27- Açıklık oranına karşı Strouhal sayısı (St). O, KC=20; Δ, KC=30; □, KC=55; ∇, KC=65, (Sümer et al., 1991).

Şekil 2.28'de G/D'nin büyük değerleri için belirlenmiş  $St_0$  (G/D'nin büyük değerlerinde erişilen St değeridir) sayısı ile normleştirilmiş  $St/St_0$  oranının G/D oranı ile değişimi görülmektedir. Bu şekilde ayrıca, kararlı akım ile ilgili değerlerde işlenmiştir. Araştırmacılar (Sümer et al, 1991) gerek Şekil 2.27 ve gerekse Şekil 2.28'den şu sonuçları elde etmişlerdir.



Şekil 2.28- Açıklık oranının fonksiyonu olarak normalize edilmiş Strouhal sayısı, O,  $KC=20$ ;  $\Delta$ ,  $KC=20$ ;  $\square$ ,  $KC=55$ ;  $\nabla$ ,  $KC=65$ ;  $\times$ , kararlı akım (Raven et al., 1985); -.-.- kararlı akım (Grass et al., 1984), (Sümer et al., 1991).

i) Verilen bir  $G/D$  oranı için  $KC$  sayısı azaldıkça  $St$  sayısı artmaktadır.

ii) Silindir cidara yaklaştıkça  $G/D$ 'ye karşılık çizilen  $St/St_0$  eğrisi mevcut gidişinden sapma göstermektedir. Bu da cidarın  $St$  sayısına etkisini göstermektedir.

iii) Açıklık oranı azaldıkça  $St$  sayısı artmaktadır. Cidara oldukça yakın yerleştirilen silindir için bu artış daha belirgindir ( $G/D=0.1-0.2$ ). Çünkü cidarın mevcudiyeti, cidar tarafındaki vortekslerin, serbest akım tarafındaki vortekslerin içine doğru şekillenmesine neden olmaktadır. Bu olayın sonucunda iki vorteks daha hızlı etkileşmekte ve daha büyük  $St$  sayısına neden olmaktadır.

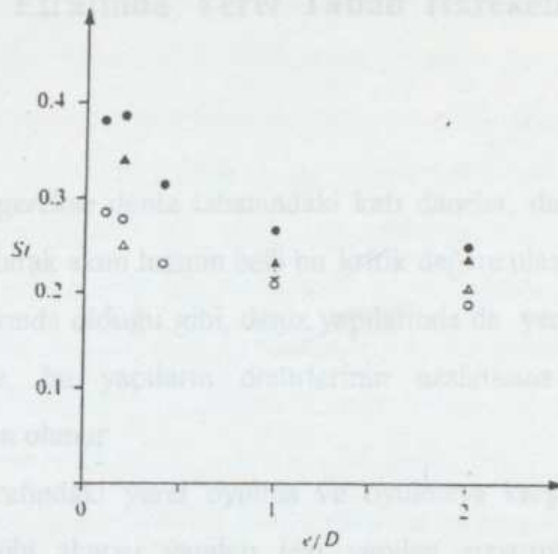
Silindirin pürüzlülüğünün akım yapısına etkisi incelenmiş ve Şekil 2.29'da çeşitli açıklık oranlarına karşılık  $KC$  sayısı, gerek pürüzlü gerekse cilalı silindir için çizilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi silindir pürüzlülüğünün akım yapısına önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Sümer et al. (1991) tarafından bir silindir etrafındaki kararsız akım yapısı için şu önemli sonuçlar aşağıdaki özetlenmiştir.

i)  $KC < 4-5$  değerlerinde; cidardan uzak bir silindir için, vorteks hareketleri ve şekillenmelerindeki simetri, silindirin cidara yaklaşması ile kaybolmaktadır.



## 3.2 Boru Hatları Etrafında Yerel Taban Hareketi ve Kuvvet İle İlgili Çalışmalar



Şekil 2.29- Açıklık oranına karşılık Strouhal sayısı. O, pürüzsüz silindir; Δ, pürüzlü silindir, Dolu semboller:  $KC=20$ ; Açık semboller:  $KC=65$ , (Sümer et al., 1991).

ii) Cidardan uzak silindir etrafındaki vorteks rejimi, açıklık oranı  $G/D$ 'nin 1'in altına düştüğünde önemli değişimler göstermektedir.

iii)  $7 < KC < 13$  değerlerinde, cidardan uzak silindir için akım doğrultusuna dik vorteks saçılımları gözlenmekte, bu açıklık oranı 1.7'nin altına düştüğünde kaybolmaktadır.

iv) Küçük açıklık oranlarında vorteks saçılımı sönümlendirilmekte ve bu sönümlendirme  $KC$ 'nin artan değeri ile artmaktadır. Küçük  $KC$  değerlerinde (10-20 gibi) açıklık oranının küçük değerlerinde bile (0.1 gibi) vorteks saçılımına rastlanmaktadır. Saçılım frekansı  $G/D$ 'nin bir fonksiyonu olup  $G/D$ 'nin azalması ile artmaktadır.

v) Silindir cidara yaklaştıkça duvardan uzaklaşan yönde kısa süreli kaldırma kuvveti pikleri meydana gelmektedir. Bu pikler, silindirin cidar tarafından saçılan vortekslerle ilgilidir.

vi) Silindir cidara tam değdiğinde, akım tipinin ana karakteristikleri her bir yarım periyodda silindirin art-iz bölgesinde vorteks çifti şekillenmesidir. Bu vorteks çiftleri silindirden kararlı bir biçimde akımın yarım periyotluk süresi içinde uzaklaşmaktadır. Kaldırma kuvvetindeki en büyük pik, art-iz bölgesindeki vorteksin silindirin üzerinden süpürülmesi ile meydana gelmektedir.

## 2.2 Boru Hatları Etrafında Yerel Taban Hareketi ve Konu ile İlgili Çalışmalar

Gerek akarsu gerekse deniz tabanındaki katı daneler, dane karakteristiklerine ve akım şartlarına bağlı olarak akım hızının belli bir kritik değere ulaşması durumunda hareket ederler. Akarsu yapılarında olduğu gibi, deniz yapılarında da yerel taban hareketine karşı önlemler alınmaz ise, bu yapıların ömürlerinin azalmasına ve görevlerini yerine getirememelerine neden olunur.

Su yapıları etrafındaki yerel oyulma ve oyulmaya karşı alınan önlemler köprü ayaklarında olduğu gibi akarsu yapıları için yapılan araştırmalardan uzun zamandır bilinmektedir. Deniz yapıları etrafındaki yerel oyulma ile ilgili bilgiler problemin, akımın periyodik yapısından veya dalga-akıntı kombinasyonları gibi nedenlerden dolayı daha karmaşık olması sebebiyle daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu bu güne kadar yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Bazı deniz yapılarının 50-100 yıllık proje dalga ve akıntı koşullarına maruz kalabilecekleri düşünüldüğünden, bu problemin ne derece önemli olduğunu gösterir.

Bu kısımda boru hatları etrafındaki yerel taban hareketi ile ilgili literatürde mevcut çalışmalar detaylı olarak incelenerek problem izah edilecektir. Ancak öncelikle dalga etkisindeki katı madde hareketi üzerinde kısaca durularak, akım alanına yerleştirilecek boru hattı gibi bir engel nedeniyle, değişecek akım alanının katı madde hareketi üzerindeki etkisinin anlaşılması sağlanacaktır.

### 2.2.1 Dalga-katı madde etkileşimi

Şiddeti ve doğrultusu periyodik olarak değişen hız vektörü nedeniyle, tek yönlü kararlı akım haline göre, deniz tabanındaki katı maddenin hareketi daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Tek yönlü akım halinde hidrodinamik direnç ve kaldırma kuvvetinin etkisi altındaki bir katı madde dalga halinde ivmeli akım nedeniyle bu kuvvetlere ilaveten bir de atalet kuvvetinin etkisi altında kalmaktır.



Çeşitli araştırmacılar tarafından dalgalı akım ortamında düzlem taban üzerinde hareketin başlangıcı ile ilgili çeşitli denklemler önerilmiştir. Yapılan çalışmalar katı maddenin hareketi için dalga periyodunun etkisini açıkça göstermektedir. Katı madde hareketinin başlangıcı için kritik şartlar dalga periyodunun artması ile artmaktadır (Van Rijn, 1990). Yapılan çalışmalar bir dalga periyodu boyunca zamansal ortalama taban kayma gerilmesi dikkate alındığında, tek yönlü akım halinde hareketin başlangıcı için önerilen Shields parametresinin, dalga etkisindeki hareketin başlangıcı içinde büyük bir yaklaşım ile kullanılabileceğini göstermiştir. Shields eğrisi düzlem taban halinde dikkate alınmalıdır, çünkü tabanda kum dalgacıkları gibi düzensizliklerin bulunması durumunda çevrilerin yapılmasından dolayı kritik şartlar daha erken oluşmaktadır. Örneğin Carstens (1969) kum dalgacıklarına sahip bir tabanda kritik yörüngesel hızın ( $U_{s,kr}$ ) %50 azaldığını belirtmiştir.

Shields parametresinde mevcut kritik taban kayma gerilmesinin zamansal ortalama değeri;

$$\bar{\tau}_{b,kr} = \frac{1}{4} \rho f_w (U_{s,kr})^2 \quad (2.6)$$

ile ifade edilmiştir. Burada  $f_w$  dalga sürtünme faktörü,  $U_{s,kr}$  taban yakınında kritik yörüngesel hızın pik değeridir.

Genellikle deniz tabanında dalgaların yarattığı taban kayma gerilmesi, bir dalga periyodu göz önüne alındığında bu süre içinde değişken bir karakter göstermektedir. Bir dalga periyodu süresince anlık taban kayma gerilmesi, iki defa farklı yönlerde maksimum değerine ulaşırken, sıfır ile maksimum arasında değerler almaktadır.

Deigaard et al. (1991) dalga kanalında 1/30 eğimli sabit bir cidar üzerinde CTA yardımıyla kırılan ve kırılmayan dalga şartlarında taban kayma gerilmesinin zamanla değişimini ölçmüşlerdir.

Araştırmacılar deneylerinde spilling ve plunging kırılma tiplerini dikkate almışlar ve kırılma noktalarının yerlerini gözlemle belirlemişlerdir. Surf bölgesinin içinde ve dışında kaydettikleri kayma gerilmelerinin zamanla değişimleri incelenerek şu sonuçlara varılmıştır.



i) Her dalga periyodunda taban kayma gerilmesinin iki piki mevcuttur. Kıyıya doğru pozitif pikin zaman aralığı, açığa doğru oluşan taban kayma gerilmesi zaman aralığından daha kısadır.

ii) Surf bölgesi dışında taban kayma gerilmesinin değişimi periyodiktir ve türbülans etkisi fazla gözükmemektedir, ancak surf bölgesi içerisinde taban kayma gerilmesine türbülans etkisi belirgin olarak mevcuttur. Bu özellikle negatif taban kayma gerilmesinde belirgindir.

iii) Surf bölgesi içerisinde taban kayma gerilmesi yine dış bölgedeki gibi periyodik karakter taşımaktadır. Ancak surf bölgesi içerisindeki taban kayma gerilmesi dış bölgedekinden çok büyük değildir.

iv) Maksimum taban kayma gerilmesi, spilling tipi kırılmalar için kırılma noktasından kırılma noktasının derinliğinin birkaç katı kadar kıyı tarafında, plunging tipi kırılmalar için ise yine kırılma noktasından plunging noktasının yerel derinliğinin bir kaç katı kadar kıyı tarafında meydana gelmektedir.

v) En büyük kayma gerilmeleri plunging noktasında oluşmaktadır. Bunun nedeni plunging tipi kırılmanın oluşturduğu jetten kaynaklanmaktadır.

vi) Gerek spilling gerekse plunging tipi kırılmalarda, taban kayma gerilmesi üzerindeki türbülans çalkantıları, kırılma noktasında belirginleşmeye başlamaktadır.

vii) Sonuç olarak surf bölgesi içinde, türbülansın kayma gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır.

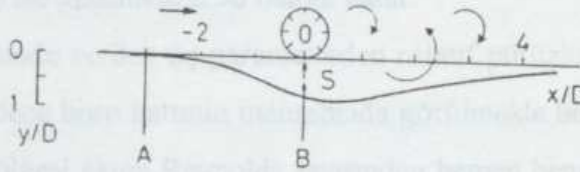
## 2.2.2 Boru hatlarının katı madde hareketine etkisi

### 2.2.2.1 Kararlı akım halinde yerel oyulmanın incelenmesi

Deniz ya da akarsu tabanına yerleştirilmiş kararlı akım etkisinde bir boru hattının varlığından dolayı akım yapısının bozulması ile bu boru hattının çevresinde meydana gelecek olan yerel oyulma profili borunun menbasında dik, buna karşılık mansabında daha yumuşak olan bir eğime sahip olacaktır. Borunun çevresinde oluşan bu asimetrik şekil, menba ve mansap bölgesindeki akım alanlarının birbirlerinden farklı olmalarından

kaynaklanmaktadır. Borunun mansabında akımın ayrılması ile uzunca bir vorteks sokağı oluşmaktadır. Mansapta meydana gelen akım şekli aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı menba akımına göre daha fazla erozyona neden olmaktadır; 1) türbülansın daha fazla erozyona neden olması, 2) mansaptaki vortekslerin anlık hızlarının, rahatsız edilmemiş akım hızının iki veya daha fazla katı olmasındandır. Bu artan oyulmanın neticesinde Şekil 2.30'da görüldüğü gibi mansapta daha yumuşak bir eğim meydana gelmektedir (Sümer and Fredsøe, 1990).

Boru hattının altında denge oyulma derinliğine ancak borunun altındaki katı madde taşınım miktarının, menbasındaki katı madde taşınım miktarına eşit olduğunda ulaşılmaktadır.



Şekil 2.30- Akıntı durumunda oyulma profili (Sümer et al., 1988b);  $d_{50}=0.36\text{mm}$ ,  $D=100\text{mm}$ ,  $\theta=0.1$ .

Borunun altındaki oyulma çukurunun büyümesi ile bu bölgedeki akım hızı yavaşladığından B noktasındaki katı madde taşınım miktarı oyulma işleminin ilerlemesi ile azalmaktadır. Bundan dolayı oyulma çukurunun gelişmesi bir süre sonra durmaktadır.

Boru hattının varlığından etkilenen akım yapısı şu parametrelere bağlıdır; boru çapı,  $D$ , akım hızı,  $U$ , kinematik viskozite,  $\nu$ , boru pürüzlülüğü,  $k$ , taban malzemesinin dane çapı,  $d_{50}$ . Bu büyüklüklerden yola çıkılarak boyutsuz oyulma derinliğinin aşağıdaki parametrelerin fonksiyonu olduğu gösterilmiştir (Sümer and Fredsøe, 1990).

$$\frac{S}{D} = \frac{S}{D}(k^*, Re, \theta) \quad (2.7)$$

burada  $k^* = k/D$  rölatif pürüzlülük,  $Re = UD/\nu$  borunun Reynolds sayısı,  $\theta$  katı madde taşınımındaki etkili Shields parametresi olup aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;



$$\theta = \frac{U_*^2}{\Delta g d_{50}} \quad (2.8)$$

burada  $\Delta$  katı maddenin rölatif özgül kütlesi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $U_*$  rahatsız edilmemiş taban kayma hızıdır.  $U_*$  aşağıda verilen Colebrook-White formülünden hesaplanmaktadır.

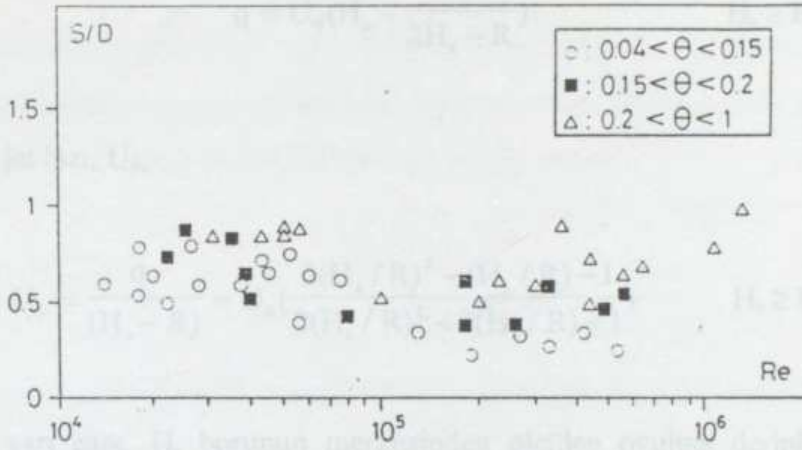
$$\frac{U_0}{U_*} = 8.6 + 2.5 \ln\left(\frac{D}{2k_s}\right) \quad (2.9)$$

burada  $U_0$  taban üzerindeki akım (borunun merkezinde) hızıdır. Taban pürüzlülüğü  $k_s$  (mutlak pürüzlülük) ise genellikle 2.5d olarak alınır.

2.7 denkleminde verilen üç parametreden rölatif pürüzlülük  $k^*$  ( $k/D$ ) ve Reynolds sayısının etkileri sadece boru hattının mansabında görülmekle birlikte eğer boru hidrolikçe pürüzlü ise art-iz bölgesi akımı Reynolds sayısından hemen hemen hiç etkilenmemektedir. Bununla birlikte hidrolikçe cilalı bir boruda Reynolds sayısı mansaptaki vorteks saçılımlarının düzeni üzerinde etkili olmaktadır. Reynolds sayısının  $10^5$ - $3 \times 10^5$  değerlerinde oyulma derinliğinde çok hafif bir azalma olduğundan Reynolds sayısının oyulma derinliği üzerine etkisi zayıftır. Serbest dairesel bir silindir için bu değer kritik altından kritik üstü rejimine geçiş ile çakışmaktadır. Bu geçiş bölgesinde, vorteks saçılımları daha az belirgin bir duruma geldiğinden daha küçük bir art-iz erozyonuna ve bundan dolayı da daha küçük bir oyulma derinliğine neden olabilmektedir.

Shields parametresinin,  $\theta$ , etkisi dikkate alındığında bunun iki farklı kategoride incelenmesi gerekmektedir; 1) temiz su durumunda "borudan uzakta katı madde hareketinin gözlenmediği durum", 2) hareketli taban durumu "borudan uzak mesafede katı madde taşınımının söz konusu olduğu haldir". Temiz su durumunda oyulma derinliğinin  $\theta$  ile değişimi daha belirgindir ve  $\theta$ 'nın çok küçük değerlerinde  $S/D$  oranı sıfırdan,  $\theta$ 'nın hareketli taban durumuna yaklaşması ile 0.4-1.0 değerine kadar değişmektedir. Bununla birlikte hareketli taban durumunda  $S/D$  oranında çok küçük bir değişiklik gözlenmiştir (Şekil 2.31).





Şekil 2.31- Kararlı akım halinde oyulma derinliğinin Re sayısı ve Shields parametresi ile değişimi (Sümer and Fredsøe, 1990).

Bu konu ile ilgili literatürde mevcut belli başlı çalışmalar:

#### Chao and Hennessy (1972):

Chao and Hennessy, (1972) kararlı akım halinde denizaltı boru hatları çevresindeki maksimum oyulma derinliğini analitik yöntemle hesaplamışlardır. Bu hesaplama yöntemi potansiyel akım teorisine dayanmakla birlikte bir takım varsayımlar da yapılmıştır.

Yaklaşan akım durumu için oyulma çukurundaki debi ve boru ile taban arasındaki su jeti hızı hesaplanmaktadır.

Jet hızı, boru ile taban arasındaki açıklıktaki taban katı madde kayma gerilmesi  $\tau_{kr}$ 'e eşit oluncaya kadar oyulmayı devam ettirmektedir. Oyulma derinliğinin hesaplanması için elde edilen bu yaklaşım, oyulma çukuruna katı madde taşınımının olmadığı temiz su durumunda uygulanabilmektedir. Ancak borunun menbasında katı madde taşınımı mevcut olduğunda, oyulma çukuruna giren ve çıkan katı madde eşit olursa dinamik dengeye ulaşılmaktadır.

Çukurun birim genişliğindeki akımın debisi,  $q$ ,

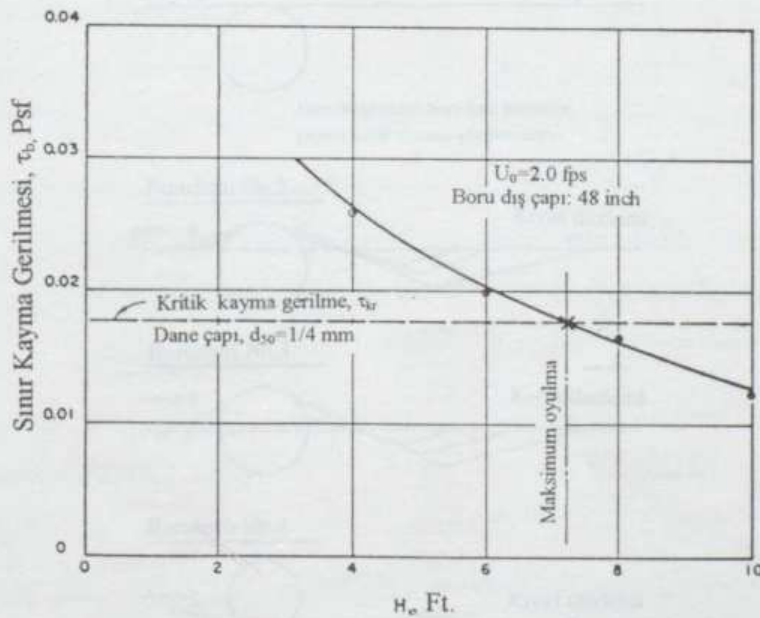
$$q = U_0 \left( H_s - \frac{R^2}{2H_s - R} \right) \quad H_s \geq R \text{ için} \quad (2.10)$$

ve ortalama jet hızı,  $U_p$ ,

$$U_p = \frac{q}{(H_s - R)} = U_0 \left( \frac{2(H_s / R)^2 - (H_s / R) - 1}{2(H_s / R)^2 - 3(H_s / R) + 1} \right) \quad H_s \geq R \text{ için} \quad (2.11)$$

$R$  borunun yarı çapı,  $H_s$  borunun merkezinden ölçülen oyulma derinliği,  $U_0$  borunun üzerindeki rahatsız edilmemiş akım hızı olarak tanımlanmıştır.

Bu yöntemin en önemli sakıncası, çözümde potansiyel akım teorisinin kullanılmış olmasıdır. Oysa gerçek akımda akışkan viskozdur ve borunun mansabında ayrılma meydana gelmektedir. Bu ayrılma akım alanını etkilemektedir. Önerilen bu hesaplama yöntemi oyulma çukurundaki debi ve jet hızı için büyük değerler vermektedir. Aynı zamanda bu hesap yöntemi oyulma çukurundaki taban malzemesi için kritik kayma gerilmesi hesabını gerektirmektedir. Ancak araştırmacılar kritik kayma gerilmesinin nasıl hesaplandığı hakkında herhangi bir bilgi vermemişlerdir.



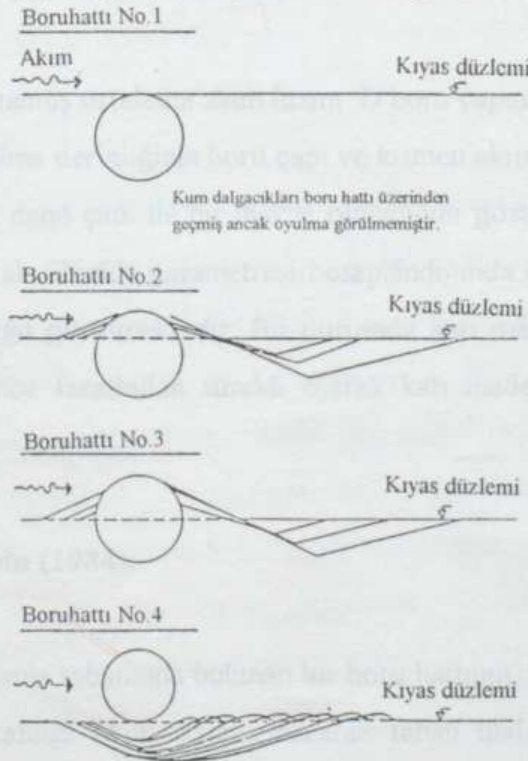
Şekil 2.32- Oyulma çukuru derinliği ile sınır kayma gerilmesinin değişimi.

Şekil 2.32'de gösterilen grafikte dane çapının 0.1 mm ile 1.0 mm olan değerlerine karşılık gelen kayma gerilmesi klasik Shields fonksiyonu ile karşılaştırıldığında beş kat fazla olması, hesaplanan oyulma derinliğinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca böyle bir eğrinin niçin kullanıldığı hakkında bir bilgi verilmemiştir.

#### Kjeldsen (1973):

Araştırmacı yerel oyulmaya tek yönlü veya dalgalı bir akım ortamına yerleştirilmiş yapının neden olduğunu belirtmiştir. Bu olayın, yapının mansabında kuvvetli vorteks oluşumuyla başladığı gözlenmiştir. Bu vorteksin türbülans enerjisi tabanın oyulmasına neden olmaktadır. Enerjinin zayıf olması durumunda, oyulma çukuruna taşınan malzeme miktarı oyulma çukurundan taşınan ile aynı olacağından kararlı bir durum olduğu halde enerjinin kuvvetli olması durumunda yapının altı oyularak katı madde yapıdan daha uzak bir mesafede yığılmaktadır.

Araştırmacı farklı gömülme durumlarında yerleştirilmiş, kararlı akıma maruz boru hatları için oyulma derinliğinin gelişimini Şekil 2.33'de gösterildiği gibi açıklamıştır.



Şekil 2.33- Oyulmanın gelişimi.





Tamamıyla gömülü bir boru hattında oyulmanın oluşmadığını,

Boru hattının, boru çapının dörtte üçü kadar gömülmesi durumunda, borunun menba ve mansabında katı madde yığılması ve borunun mansabından belli bir mesafe sonra akım hızı ve boru çapına bağlı olarak bir oyulma çukurunun geliştiğini,

Boru çapının yarısı kadar gömüldüğünde bir önceki ile aynı olayların gözlemlendiğini,

Boru hattının tabanın hemen üzerine yerleştirilmesi durumunda oyulmanın boru hattının hemen altında akımın başlaması ile başladığını ve oyulma derinliğinin akım hızına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Maksimum türbülans şiddeti, deneyin başladığı anda boru hattının hemen mansabında ve boru hattının üzerinde, oysa gelişmiş safhada yine boru hattının mansabında fakat bu sefer boru hattının alt kısmında belirlenmiştir.

Araştırmacı başlangıçta zemine yerleştirilmiş ve tek yönlü akıma maruz bir deniz altı boru hattı altındaki maksimum yerel oyulma derinliği S için Coleman(1971)'in vermiş olduğu aşağıdaki şu ampirik ifadeyi elde etmiştir.

$$S = 0.972(U_0^2 / 2g)^{0.2} D^{0.8} \quad (2.12)$$

Burada  $U_0$  rahatsız edilmemiş ortalama akım hızını D boru çapını belirtmektedir.

Bu denklem oyulma derinliğinin boru çapı ve kısmen akım hızı ile orantılı olduğunu ancak akım derinliği ve dane çapı ile bir ilişkisi olmadığını göstermektedir. Akım hızı ve dane çapı dikkate alınarak Shields parametresi hesaplandığında deney şartlarının hareketli taban durumu için olduğu görülmektedir. Bu durumda katı madde taşınımı olduğundan, oyulma çukurunun menba tarafından sürekli olarak katı madde ile beslendiğini ortaya koymaktadır.

#### **Bijker and Leeuweistein (1984):**

Araştırmacılar deniz tabanında bulunan bir boru hattının, hız profilinin tabana yakın bölümünün etkisinde kaldığı akım alanını bozarak taban malzemesinin erozyonuna ve

yığılmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmada çalışma kararlı akım şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Bir boru hattı çevresindeki erozyonun başlıca nedeni, boru hattını geçen akımın taşıma kapasitesindeki yerel artıştır ve bu kapasitenin azalması ise yığılmaya neden olmatadır. Taşıma kapasitesindeki bu değişim tabanın denge durumuna ulaşmasına kadar devam etmektedir. Taşıma kapasitesi  $q$  ile gösterilirken " $s$ " indisi borunun altını ve " $s_0$ " indisi ise borudan uzak mesafeyi göstermektedir. Sürüntü malzemesi ve askı malzemesi ayrı ayrı hesaplanması gerektiği halde bu çalışmaya basitlik getirmek için toplam katı madde dikkate alınmıştır. Denge safhasına ulaşıldığında hem denge oyulma derinliği  $S_0$  hem de boru-taban açıklığı  $G$  sabit kalmaktadır. Bu durumda aşağıda ifade edildiği gibi katı madde dengesi söz konusu olmaktadır.

$$q_s = q_{s_0} \quad (2.13)$$

Bir boru altında oyulma derinliğinin gelişmesi esnasında oyulma çukuruna giren ve çıkan katı madde hareketinde denge bulunmamaktadır.

$$q_s > q_{s_0} \quad (2.14)$$

Erozyon safhası daha detaylı olarak iki adımda tanımlanmıştır. Birincisi, borunun menbasında taşınımın olmaması ve taşınımın sadece borunun altında muhtemelen borunun hemen mansabında olması yani temiz su oyulması ( $q_s, q_{s_0}=0$ ), ikincisi ise taşınımın her yerde olduğu durum yani hareketli taban oyulmasıdır ( $q_s > q_{s_0} > 0$ ). İkinci halde muhtemelen sürüntü malzemesi ile askı malzemesi arasındaki değişimden gelişen oyulma çukuruna katı madde temini söz konusudur. Boru etrafında verilen bir akım için, erozyon hızının ve maksimum oyulma derinliğinin katı madde dengesi ile belirlenebileceği belirtilmiştir.

Ancak araştırmacılar bu temel yaklaşımın, borunun altındaki erozyonun hesaplanması için aşağıdaki nedenlerden dolayı oldukça yetersiz olduğunu belirtmişlerdir.

Bunlardan ilki yerel akım şartı ile ilgili taşıma kapasitesi genellikle üniform akım şartlarında geliştirilmiştir. Ancak bunun tam tersine deniz tabanı üzerinde veya çukur



üzerinde bulunan boru hattı çevresinde akım üniform değildir. Bundan dolayı katı madde taşınım formülünü oluşturan taban kayma gerilmesi ve katı madde taşınımı arasındaki ilişki geçersiz hale gelmektedir.

İkincisi , üniform akım koşullarına bile uygulanmasının sınırlı olması,

Üçüncüsü ise boru çevresinde türbülans çevrileri mevcut olmadığında akımın tariflenememesidir.

Hareketli tabana yerleştirilmiş, tek yönlü akıma maruz bir boru hattı çevresinde erozyon veya yığılmanın üç farklı bölgede olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Borunun menba tarafında meydana gelen vorteksler menba tarafında oyulma ya da yığılmaya neden olmaktadır.

Ana akımın boruyu geçtikten sonra tabana ulaşmasıyla ve borunun mansabında art-iz bölgesindeki türbülanslı akım yapısı nedeniyle, mansap tarafında oyulma ya da yığılma meydana gelmektedir. Ayrıca borunun altında artan akım hızı nedeniyle meydana gelen oyulma bölgesi tünel erozyonu olarak tanımlanmıştır.

Araştırmacılar boru hattı çevresindeki oyulmanın başlıca nedenini; boru hattı çevresindeki akım yapısında meydana gelen değişimin sebep olduğu taşıma kapasitesindeki yerel artıştan kaynaklandığını, taşıma kapasitesinin azalmasıyla birlikte yığılmanın meydana geleceğini belirtmişlerdir.

#### **Sümer and Fredsøe (1984):**

Araştırmacılar boru hatlarının mesnetlerinde kendi kendilerine gömülme işleminin anlaşılabilmesi için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarda boru hatları ile ilgili iki tip gömülme olduğu bilinmektedir. Bunlardan ilki; borunun altındaki oyulma çukuru (yani mesnetler arası giriş uzunluğu) yeterince uzun olduğunda boru oyulma çukuruna doğru sehim yapmaya başlar bu olaya "borunun sarkması" denir, boru tabana eriştiğinde oyulma durarak geri doldurma işlemi başlar ve sonunda boru hattı kum tarafından örtülerek muhtemelen gömülür, bu olaya da "borunun kendi kendisini gömmesi işlemi" denir. İkincisi ise mesnetlerdeki gömülmelerdir. Bu



işlemin gelişmesi üç boyutlu oyulma ile yakından ilgili olan giriş uzunluğu boyunca serbest açıklığın mesnetle birleştiği boru hattının altındaki oyulmadır.

Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma ile boru-hareketli taban etkileşiminde üç farklı safha olduğunu aşağıdaki gibi açıklamışlardır.

1) Boru hattının serbest açıklıkları her iki taraftan oyulmaya maruz mesnetler ile bölünmekte ve oyulma işlemi, mesnet uzunluğu,  $l$ , kritik bir değere ulaşana kadar devam etmektedir.

2) Bu kritik değere ulaşıldığında boru mesnetlerde kuma gömülmeye başlamaktadır. Borunun kuma bu şekilde gömülmesinin nedeni mesnette zeminin içsel direncinin kaybolmasıdır. Oyulma işlemi ilerledikçe borunun ağırlığından dolayı olan yük gittikçe daha küçük bir alana etkimekte ve zeminin taşıma kapasitesi aşılarak boru bundan dolayı kuma gömülmektedir.

Boru mesnedin her iki tarafındaki oyulma tamamıyla durana kadar gömülmeye devam etmekte, ve bundan dolayı zeminin taşıma kapasitesinin aşılmadığı ana gelindiğinde, gömülme belli bir seviyede durmaktadır.

Farklı yoğunlukta boru modelleri ile yapılan bu çalışmadaki deneyler, boru kararlı akıma maruz kaldığında, gömülme seviyesi başlangıç taban seviyesinin %50-80D kadar aşağısında olduğunu göstermiştir. Dalgalı ortamda bu seviye KC sayısının bir fonksiyonu olabileceği ve borunun KC sayısının 30'dan büyük olduğu ortamda daha düşük seviyelere kadar gömülebileceği ifade edilmiştir. Ancak henüz bunu destekleyecek verilerin mevcut olmadığı belirtilmiştir.

3) İşlemin üçüncü safhası oyulmanın durması anıdır. Bu periyot esnasında oyulma çukuru ile boru arasındaki boşluk yavaşça kumla doldurulmakta, bu esnada mesnet uzunluğu,  $l$ , artmaktadır. Bu borunun bütün açıklığı kumla kaplanana kadar devam etmektedir.

#### **Leeuwestein et al. (1985):**

Akıntı veya gel-git etkisinden dolayı denizaltı boru hatlarının kendi kendilerine gömülmeleleriyle ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, deneysel ve prototip

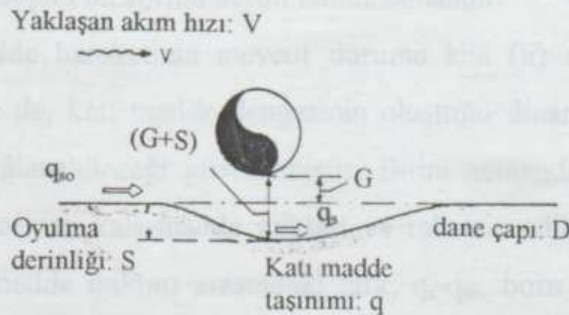
ortamında ölçümler yapılarak ölçek etkileri araştırılmıştır. Ayrıca probleme teorik bir yaklaşım da yapılarak sonuçlar ölçüm değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Araştırmacılar öncelikle boru hatları etrafındaki yerel oyulmanın mekanizması üzerinde detaylı olarak durarak, boru etrafındaki akım yapısı ile taban hareketi arasındaki etkileşimi teorik olarak izah etmişlerdir. Buna göre; taban yakınına yerleştirilen boru hattı yerel taban hareketi dengesini bozmaktadır. Yerel taban hareketi için, yarı kararlı akım alanı ve katı madde konsantrasyonunu,  $c(x, y, t)$ , taban sınır şartlarıyla birlikte dikkate alarak aşağıda belirtilen süreklilik denklemini tanımlamışlardır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_{d_b}^d c dy \right\} + \frac{\partial q_t}{\partial x} + (1-p) \frac{\partial d_b}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

burada  $q_t$  birim genişlikten geçen toplam katı madde debisi,  $d_b$  tabanın yerel yüksekliği,  $d$  akım derinliği,  $p$  taban porozitesi ve  $t$  ise zamandır. Denklem 2.15'e göre  $\partial d_b / \partial t < 0$  olduğunda  $\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_{d_b}^d c dy \right\} > 0$  birim zamanda akım kapasitesiyle boru hattı civarından taşınan katı madde ve  $\partial q_t / \partial x > 0$  akım doğrultusunda artan katı madde taşınım gradyanı dolayısıyla tabanda yerel erozyon meydana gelmektedir.

Dinamik denge durumunda (2.15) denklemindeki tüm türevler sıfır olmakta ve her ne kadar akım ile taban arasında bir etkileşim gözükme de katı madde hareketi, taban ve askı yükü olarak tabanda ve boru hattının altında söz konusu olmaktadır (Şekil 2.34).



Şekil 2.34- Oyulma çukurunun gelişiminin şematik izahı.



Eğer askı ve sürüntü malzemesi arasında önemli bir alış-verişin olmadığı varsayılırsa ve sadece sürüntü yükü kapasitesinin gradyanının  $\partial q_i / \partial x$  bir fonksiyonu olarak taban değişiyorsa (2.15) denklemi aşağıdaki belirtilen basit forma indirgenmektedir.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (1-p) \frac{\partial d_b}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

Genelde sürüntü yükü

$$q = (x_d, \tau_b, y_b, d_{50}, \Delta) \quad (2.17)$$

ile verilmektedir. Burada  $\tau_b$  rahatsız edilmemiş taban kayma gerilmesi,  $x_d$  rahatsızlık fonksiyonu,  $d_{50}$  dane çapı ve  $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$  rölatif özgül kütledir.

Boru hattının mevcudiyetinden dolayı akım yerel olarak bozulmakta, bu da (2.17) denkleminde kayma gerilmesine bağımlı  $x_d$  rahatsızlık fonksiyonu ile basitçe ifade edilmektedir.  $x_d$  yaklaşan akımın hızı,  $U$ , boru çapı,  $D$ , borunun rahatsız edilmemiş tabandan uzaklığı,  $G$  ve oyulma çukurunun anlık şekli gibi hidrolik parametrelere bağlıdır. Borunun rahatsız edilmemiş tabandan uzaklaşmasıyla  $x_d$  rahatsızlık parametresi azalmaktadır.  $x_d$  için uygun bir tanımın bugüne kadar tam olarak verilmediği bu çalışmada belirtilmiştir.  $x_d$  için araştırmacılar, aşağıda belirttikleri şartlar sağlandığında bir tanımın verilebileceğini belirtmişlerdir; i) akım yapısını tanımlayan bir model "bu model  $\tau_b$  taban kayma gerilmesini ve türbülans karakteristiklerini hesaplayacak detaylı bir model mevcut olmalıdır", ii) hesaplanan akım karakteristiklerinin tamamının bir fonksiyonu olarak katı madde hareketi ile ilgili uygun bir formülasyon tanımlanmalıdır.

Ayrıca katı madde hareketinin mevcut durumu için (ii) durumunu tam olarak sağlamadığı belirtildiyse de, katı madde dengesinin olduğu dinamik denge durumunda bunun yeterli olarak sağlanabileceği gösterilmiştir. Birim zamanda akımın kapasitesiyle boru hattının altından taşınan katı madde miktarı ve rahatsız edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde miktarı arasındaki fark,  $q_s - q_{so}$ , boru yakınında katı madde taşınım gradyanı olarak tanımlanmıştır. Buna göre oyulma çukuru gelişimi ile  $S$  oyulma çukuru derinliği



$q_s > q_{so}$  olduğunda  $S'$  in arttığı,

$q_{so} = q_s$  olduğunda  $S'$  in dinamik denge şartına ulaştığı,

$q_s < q_{so}$  olduğunda  $S'$  in azaldığı belirtilmiştir.

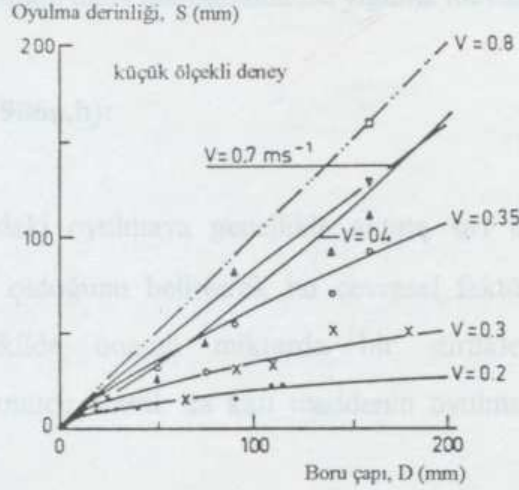
Yerel oyulma çukurunun tünel erozyonu ve art-iz erozyonu olmak üzere iki bölgeden oluştuğu belirtilmiştir (Şekil 2.35). Araştırmacılar art-iz erozyonunun zaman ölçeğinin, tünel erozyonunun zaman ölçeğinin en azından iki katı mertebesinde olduğunu belirtmişlerdir. Ortalama taban kayma gerilmesinin  $\tau_b$ , doğrudan tünel erozyonuna neden olduğu ve art-iz erozyonuna ise türbülanslı iz bölgesindeki daha çalkantılı taban kayma gerilmesi ile katı madde taşınım dengesinin bozulmasının neden olduğu gösterilmiştir. Sadece dalga etkisinde, boru hattının her iki tarafından katı madde taşınımı nedeniyle meydana gelecek yerel oyulmanın tünel erozyonu şeklinde meydana geleceği ve akıntı etkisinde gelişen yerel oyulma çukuruna dalganın da etkisi süperpoze edilmesi durumunda, dalganın  $q_{so}$  ve  $q_s$  taşıma kapasitelerini etkileyecek ancak oyulma çukurunun akıntı etkisinde olduğu gibi gelişeceğini belirtmişlerdir.



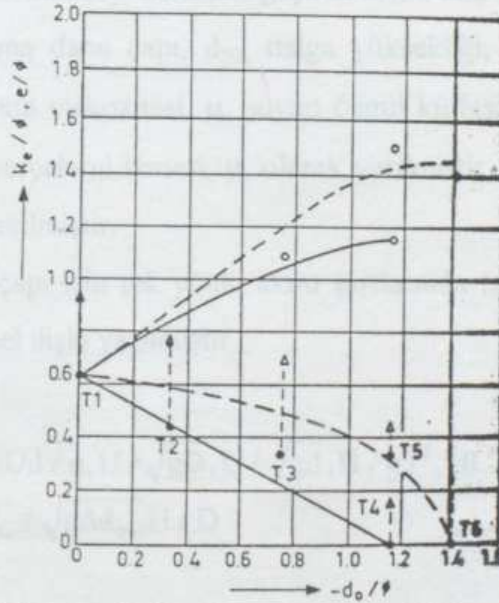
Şekil 2.35- Erozyon tipleri.

Oyulma çukurunun oluşmasından sonra aksenel olarak gelişimi ile giriş uzunluğunun yeterince uzaması durumunda boru hattı oyulma çukuruna doğru sarmaktadır. Böylece boru hattının oyulma çukuruna ulaşması ile katı madde ile gömüleceğini belirtmişlerdir. Ancak  $q_{so} \gg q_s$  şartı sağlandığında bu olay söz konusudur. Araştırmacılar çalışmalarında kararlı akım halindeki Coleman (1971)'in vermiş olduğu (2.12) denklemini (denge tünel erozyonu) ve yine kararlı akım hali için Lucassen (1984) tarafından verilen Şekil 2.36'yı dikkate almışlardır.

Boru hattının ağırlığından dolayı, oyulma çukuruna sarkması ile boru-taban açıklık oranının azalması sonucunda  $q_s$  oyulma çukurundan taşınan katı madde miktarı arttığından oyulma çukuru derinliği artmaktadır (Şekil 2.37). Borunun mesnetlendiği, mesnet bölgelerinde erozyon miktarı arttığından uzayan kiriş açıklığı ile birlikte borunun sarkan



Şekil 2.36- Akıntı durumunda oyulma.



Şekil 2.37- Sarkan boru hattı altındaki oyulma.

miktarıda artmaktadır. Daha sonra azalan  $q_s$  miktarı ile birlikte gömülme işleminin başlamakta olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada oyulma çukurunun mansabından ayrılan

akımın, mansapta oyulma derinliğinin 6 katı kadar mesafede tabana tekrar yapıştığı belirtilmiştir. Çalışmanın sonuçları şöyle özetlenmiştir.

- i) Tek yönlü akım halinde oyulma çukurunda maksimum derinlik boru hattının biraz mansabında meydana gelmektedir.
- ii) Oyulma çukurunun daha mansabında ise yığılma meydana gelmektedir.

### İbrahim and Nalluri (1986a,b):

Boru hattı altındaki oyulmaya genellikle akıntı, sırf dalga, dalga ve akıntının birleşik etkisinin neden olduğunu belirterek bu çevresel faktörün katı madde dinamik dengesini bozacak şekilde önemli miktarda bir sürüklemeye neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sonucu olarak da katı maddenin oyulma veya yığılması meydana gelmektedir.

Denge oyulma derinliği  $S/D$ 'nin şu parametrelere bağlı olduğu belirtilmiştir. Bunlar ortalama akım hızı,  $U$ , katı maddeyi harekete geçiren kritik hız,  $U_{kr}$ , boru çapı,  $D$ , ortalama akım derinliği,  $d$ , ortalama dane çapı,  $d_{50}$ , dalga yüksekliği,  $H$ , dalga boyu,  $L$ , dalga periyodu,  $T$ , deniz suyunun viskozitesi,  $\mu$ , suyun özgül kütlesi,  $\rho$ , katı maddenin sudaki rölatif özgül kütlesi,  $\Delta$ , yerçekimi ivmesi,  $g$ , olarak verilmiştir. Bu değişkenler arasındaki ilişki aşağıda şu şekilde verilmiştir.

Verilen bir dane çapı için tek yönlü akım şartlarında temiz su ve hareketli taban durumu için şu fonksiyonel ilişki yazılmıştır.

$$S/D = f\left(\frac{\rho U D}{\mu}, \frac{\rho U d}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{U}{\sqrt{gd}}, \frac{H}{gT^2}, \frac{HL^2}{d^3}, N_s, \right) \quad (2.18)$$

$$S/D = f\left(\frac{\rho U D}{\mu}, \frac{\rho U d}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{U}{d}\right) \quad (2.19)$$

Temiz su durumu için ( $U/U_{kr} < 1$ ):



$$S/D = 4.706(U/U_{kr})^{0.89}(U/\sqrt{gd})^{1.43} + 0.06 \quad (2.20)$$

Hareketli taban durumu için ( $U/U_{kr} > 1$ ):

$$S/D = 0.084(U/U_{kr})^{-0.30}(U/\sqrt{gd})^{-0.16} + 1.33 \quad (2.21)$$

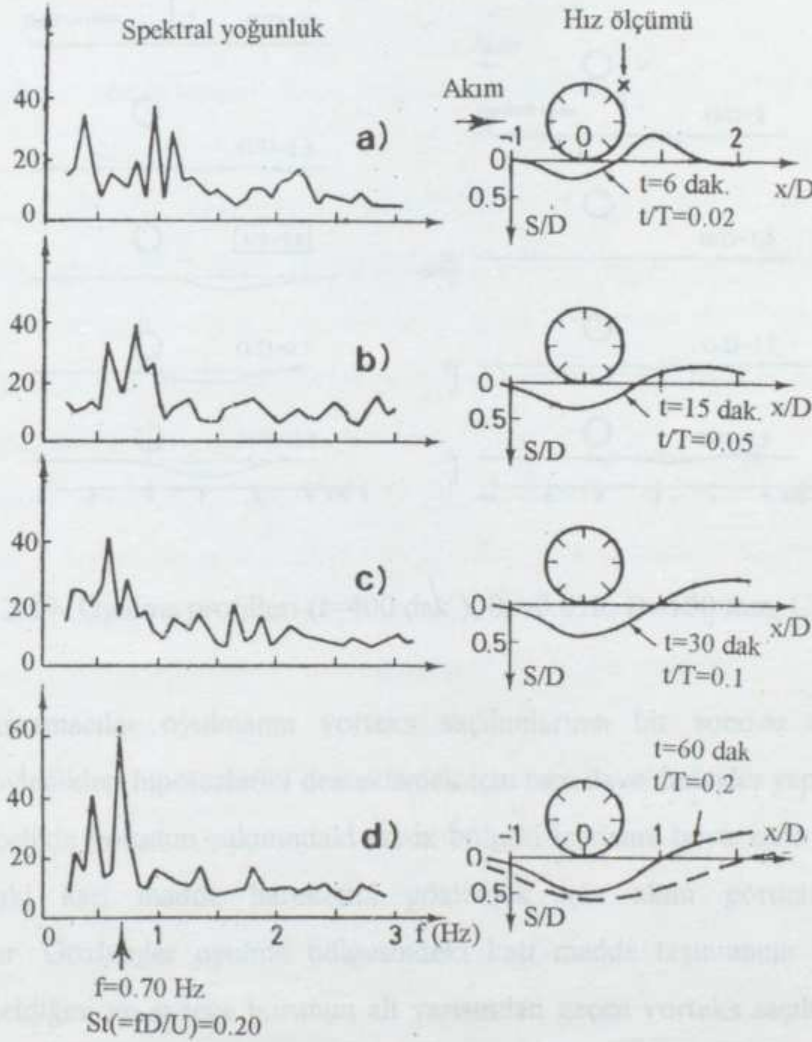
Bu denklemler hız, boru çapı ve akım derinliği ile orantılıdır. Denklem (2.20)'de akım hızı ile doğru ve akım derinliği ile ters orantılı olmasına rağmen, hareketli taban durumunda tam tersi olduğu görülmektedir. Bu denklemler oyulma işleminin fiziksel tanımından değil eğri uygunluk denkleminden çıkartılmıştır. (2.21) denklemindeki 1.33 değeri oldukça büyük bir sabit olup akım derinliği ve hızın sıfır olduğu zaman boru çapının 1.33 katı oranında bir oyulma derinliği görülmektedir.

#### **Sümer et al. (1988b):**

Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmada karalı akıma maruz boru hatları altındaki oyulma üzerine art-iz bölgesinin etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneyler, borudan düzenli olarak saçılan ve mansap yönünde taşınan büyük ölçekli vortekslerin oluşturduğu organize art-iz akımının, borunun mansabında oyulma oluşturduğunu göstermiştir. Boru hattının gel-git akımı veya dalgaya maruz kaldması halinde, borunun mansabındaki oyulma işleminin anlaşılabilmesi için öncelikle tek yönlü akım halinin incelenmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü salınımlı akımların periyodunun yarısında mansap, diğer yarısında ise menba oyulma çukuru oluşacağından bu çalışmanın boru hattı altındaki oyulmanın ilerlemesinde anahtar rol oynayacağı anlaşılmıştır.

Şekil 2.38'den görüldüğü gibi vorteks saçılımları spektral yoğunluk dağılımlarında Strouhal sayısının 0.2 değerinde hakim bir pik ile temsil edilmiş ve borunun art-iz bölgesinde oyulmanın oldukça erken safhalarında başladığı görülmüştür. Şekil 2.38 oyulma işleminin denge safhasına ulaşması için gerekli zaman periyodunun ilk %5'inde vorteks saçılımlarının başladığını göstermektedir. Bundan sonra borudan saçılan ve kararlı olarak mansaba doğru taşınan büyük ölçekli bir vorteks bulutu tarafından borunun

mansabındaki oyulma düzenli bir art-iz akımı etkisine girmektedir. Şekil 2.38'de yapılan çalışmada Shields parametresi, katı madde taşınımının başlaması için gerekli olan 0.04 değerinden biraz daha büyük olup 0.05 olarak alınmıştır. Shields parametresinin daha büyük değerleri için vorteks saçılımları oyulma işleminin daha erken safhalarında bile başlayabilmektedir. Bu nedenle mansap oyulmasının tamamıyla gelişmiş düzenli art-iz akımı etkisinde olduğu söylenmiştir.

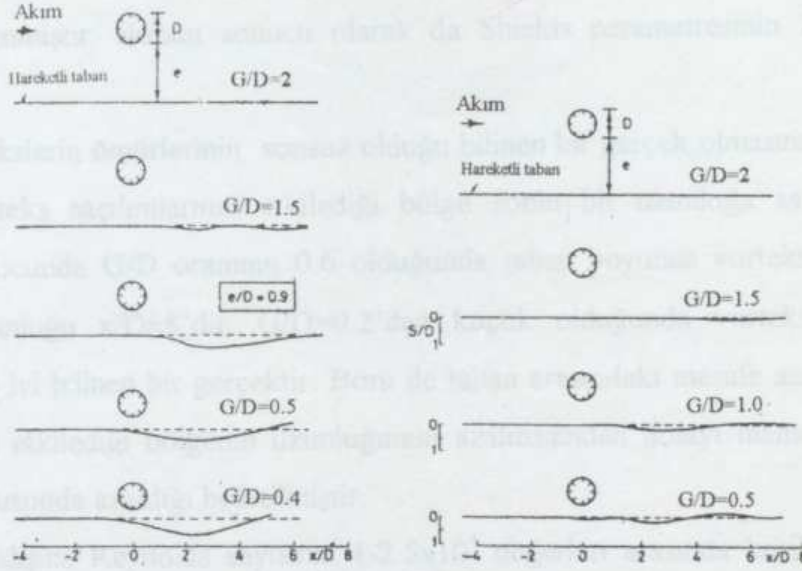


Şekil 2.38- Oyulma çukuru geliştikçe borunun üst kenarı yakınındaki hızın spektral yoğunluk dağılımı ( $\theta_0=0.05$ ,  $D=100 \text{ mm}$ ).

Araştırmacılar vorteks saçılımlarının oyulma olgusu üzerine etkisini araştırmak için kontrollü koşullar altında bir seri deney yapmışlardır. Bu deneylerde boru hattı, vorteks

saçılımlarından başka etkileri minimuma indirmek için tabandan yeterince büyük açıklıkta yerleştirilmiş ve Shields parametresi de 0.018 gibi oldukça küçük bir değer seçilmiştir.

Şekil 2.39 oyulmanın borunun tam altında değil biraz mansabında başlayıp geliştiğini gösterdiğinden, oyulmanın art-iz etkisi ile meydana geldiği belirtilmiştir.



Şekil 2.39- Oyulma profilleri ( $t=400$  dak.),  $\theta_0=0.018$ ,  $D=100$  mm,  $U=25$  cm/sn.

Araştırmacılar oyulmanın vorteks saçılımlarının bir sonucu olarak meydana geldiğini söyledikleri hipotezlerini desteklemek için bazı ilave deneyler yapmışlardır.

Öncelikle borunun yakınındaki art-iz bölgesi içerisine boya zerk ederek, borunun mansabındaki katı madde hareketini gözlemek için akım görünürlüğü deneyleri yapmışlardır. Gözlemler oyulma bölgesindeki katı madde taşınımının belirli aralıklarla meydana geldiğini ve sadece borunun alt yarısından geçen vorteks saçılımlarının mansap yönünde ilerlerken tabanı süpürmesine kadar bir daha katı madde taşınımı olmadığını ortaya koymuştur.

İkinci olarak, oyulma çukurundaki periyodik katı madde hareketinin frekansı için farklı gözlemler yapmışlardır. Gözlemler bu frekansın Strouhal frekansı ile uyum içerisinde olduğunu, oyulmanın vorteks saçılımının bir sonucu olarak meydana geldiğini göstermiştir.



Üçüncü olarak, borunun mansabında tabandaki katı madde taşınımında hız önemli bir rol oynadığından bu hız dağılımının değişimi araştırılmıştır. Yapılan deneyler gözlenen periyodik katı madde taşınımına düzenli vorteks saçılımlarının neden olduğunu göstermektedir. Akımın ortalama hızının 0.25 m/s olduğunda ölçüm noktasından vorteksler geçerken tabana yakın hızın 1.6 kat artarak 0.4 m/s gibi yüksek bir değere ulaştığı gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak da Shields parametresinin 2.6 kez arttığı belirtilmiştir.

Vortekslerin ömürlerinin sonsuz olduğu bilinen bir gerçek olmasına rağmen taban boyunca vorteks saçılımlarının etkilediği bölge sonlu bir uzunluğa sahiptir. Yapılan deneyler sonucunda  $G/D$  oranının 0.6 olduğunda taban boyunca vortekslerin etkilediği bölgenin uzunluğu  $x/D \approx 8$ 'dir.  $G/D=0.2$ 'den küçük olduğunda vorteks saçılımlarının sönümlendiği iyi bilinen bir gerçektir. Boru ile taban arasındaki mesafe azaldıkça vorteks saçılımlarının etkilediği bölgenin uzunluğunun azalmasından dolayı mansap oyulmasının akım doğrultusunda azaldığı belirtilmiştir.

Bu çalışma Reynolds sayısının  $1-2.5 \times 10^4$  değerleri arasında kritik altı rejiminde yürütülmüştür. Ancak Reynolds sayısının büyük değerlerinde, oyulma mekanizmasına hakim olan vorteks saçılımları muhafaza edildiğinden bu şekil değişmemektedir.

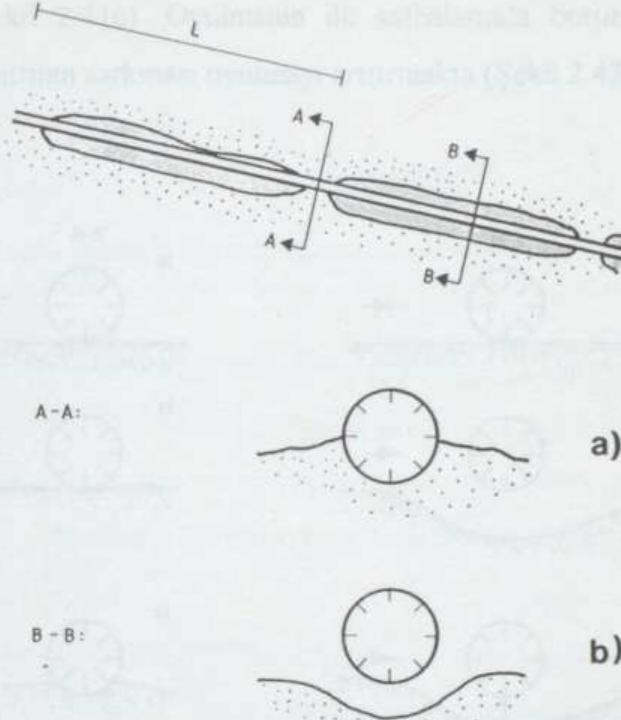
Bununla birlikte Strouhal sayısı akımın daha büyük rejimlerinde önemli değişiklik gösterdiğinden bu durumlarda boru hattının mansabındaki taban malzemesi kritik altı rejimindekinden farklı düzende bir akım etkisine maruz kalabilmektedir.

Bununla birlikte prototipte borunun yüzeyi deniz canlıları ile kaplanmakta, Nikuradse'nin  $k_s/D > 3 \times 10^{-3}$  şartını sağladığında tamamen pürüzlü cidar gibi davrandığından bu durumda vorteks saçılımı üzerine Reynolds sayısının etkisinin kaybolduğu belirtilmiştir.

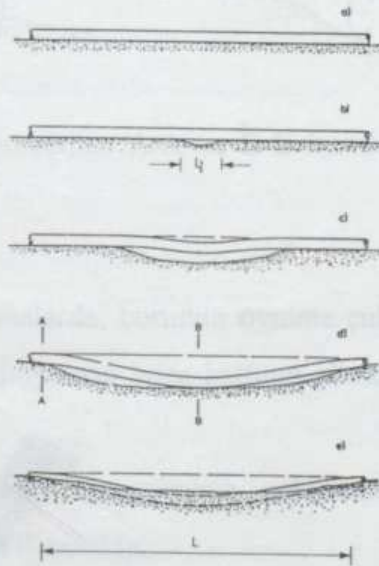
#### **Fredsøe et al. (1988):**

Tek yönlü akıma maruz boru hatları altındaki yerel oyulmanın giriş uzunluğu boyunca eksenel gelişimi ile ilgilenmişlerdir. Şekil 2.40'da görüldüğü gibi boru hattı çevresindeki oyulma, boru boyunca bazı yerlerde B-B kesitinde olduğu gibi iki boyutlu, diğer yerlerde üç boyutludur. Şekil 2.42 A-A ve B-B kesitlerinin gelişimini

göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi bu iki kesitin davranışları oldukça farklıdır. A-A kesitindeki boru tabana yavaşça gömülerek daha fazla oyulma önlediği halde B-B deki oyulma çok daha karmaşık olup şu şekilde izah edilmiştir;



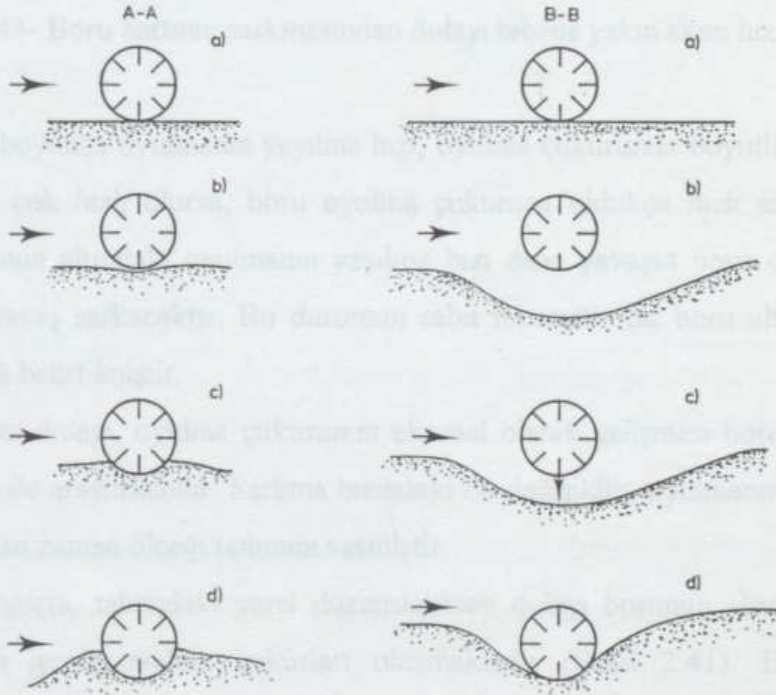
Şekil 2.40- Hareketli tabana yerleştirilmiş boru hatları etrafındaki oyulmanın genel gösterimi,



Şekil 2.41- Üç boyutlu oyulma işleminin ve kendi kendine gömülmenin şematik olarak tasviri.

a) Öncelikle borunun altındaki oyulma oldukça dar bir bölgede başlamakta ve daha sonra boru hattı boyunca yayılmakta (Şekil 2.41b),

b) Oyulma çukuru yeterince uzadığında boru hattı bu çukura doğru sarkmaya başlamaktadır (Şekil 2.41c). Oyulmanın ilk safhalarında borunun altındaki akım hızı arttığından boru hattının sarkması oyulmayı arttırmakta (Şekil 2.43),



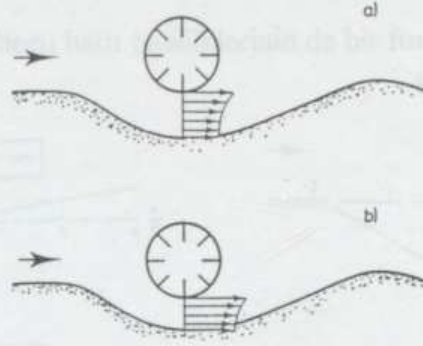
Şekil 2.42- Şekil 2.41'de gösterilen A-A ve B-B kesitlerindeki boru hattı pozisyonunun şematik değişimi.

c) Daha sonraki safhalarda, borunun oyulma çukuruna sarkmasından dolayı boru akıma karşı kısmen korunduğundan boru hattının altındaki oyulma miktarı azalmaktadır (Şekil 2.42),

d) Sonuç safhasında, boru oyulma çukurunun tabanına eriştiğinde borunun altındaki erozyon tamamıyla durmakta,

e) Daha sonra rahatsız edilmemiş kum tabandaki sürekli katı madde hareketinden dolayı boru hattı kısmen kumla kaplanmaktadır (Şekil 2.41e).





Şekil 2.43- Boru hattının sarkmasından dolayı tabana yakın akım hızındaki artış.

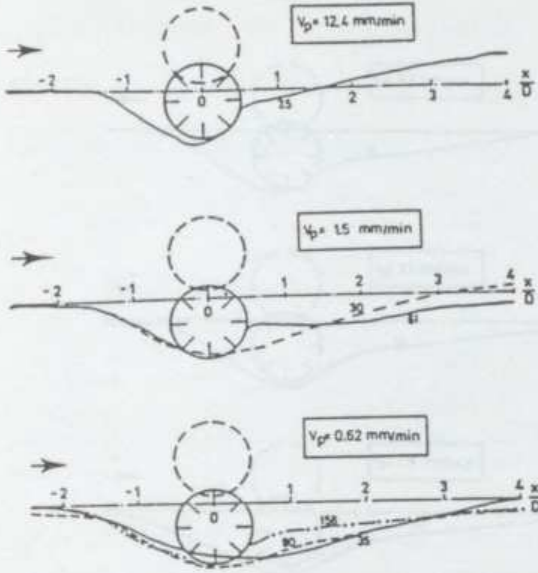
Boru boyunca oyulmanın yayılma hızı, oyulma çukurunun boyutlarını etkileyebilir, eğer yayılma çok hızlı olursa, boru oyulma çukuruna oldukça hızlı sarkacaktır. Diğer yandan, borunun altındaki oyulmanın yayılma hızı daha yavaşsa boru oyulma çukuruna doğru daha yavaş sarkacaktır. Bu durumun sabit mesnetli bir boru altındaki oyulmaya benzer olacağı belirtilmiştir.

Bundan dolayı, oyulma çukurunun eksenel olarak gelişmesi borunun sarkma hızı etkisi yardımı ile araştırılabilir. Sarkma hızındaki bu değişiklik, oyulmanın eksenel gelişimi için önemli olan zaman ölçeği tanımını vermiştir.

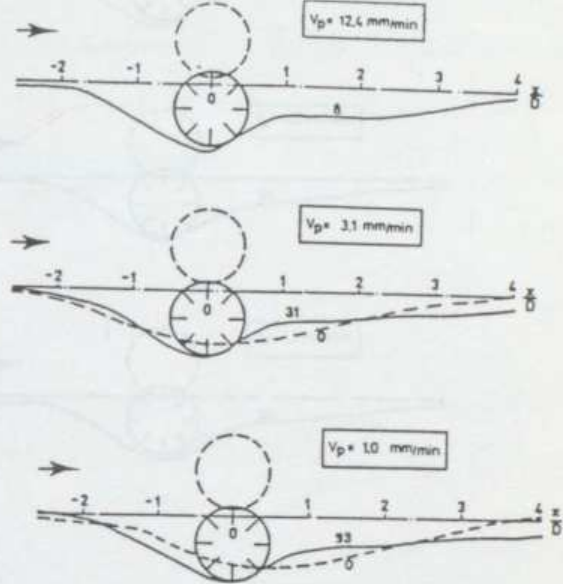
Başlangıçta, tabandaki yerel düzensizlikten dolayı borunun altındaki yerel tünel erozyonundan geniş oyulma çukurları oluşmaktadır (Şekil 2.41). Böylece borunun altındaki  $L_1$  giriş uzunluğu, denge safhasına erişene kadar gelişmeye fırsat bulmaktadır. Bu gelişmenin zaman ölçeği  $T_h$  (oyulma çukurunun eksenel doğrultudaki gelişme süresi) ile ilgili fazla bir araştırmanın mevcut olmadığı, ancak düşey oyulmanın zaman ölçeği  $T_v$ 'nin iyi bilindiği ifade edilmiştir. Normal olarak  $T_v \ll T_h$  olması gerektiği belirtilmiştir. Gravesen ve Fredsøe, (1983) yaptıkları çalışmalarda eksenel gelişmenin yerel düşey oyulma ile karşılaştırıldığında daha yavaş olmasına rağmen çok da yavaş olmadığını göstermişlerdir. Bununla birlikte, borunun birim uzunluğunda uzaklaştırılan katı madde miktarı  $O(D^2)$  mertebesinde iken, oyulma çukurunun giriş uzunluğu  $L_0$  boyunca toplam katı madde hacminin mertebesi  $O(LD^2)$ 'dir. Burada  $L_0$  sadece boru geometrisine (boru çapına) bağlı değil, aynı zamanda borunun rijitliğine de bağlıdır. Bunun anlamı da  $T_v$

sadece boru geometrisinin, hidrolik parametrelerin ve katı madde özelliklerinin fonksiyonu iken  $T_v$  atalet momenti gibi boru hattı özelliklerinin de bir fonksiyonudur.

Sınır Şartı 1

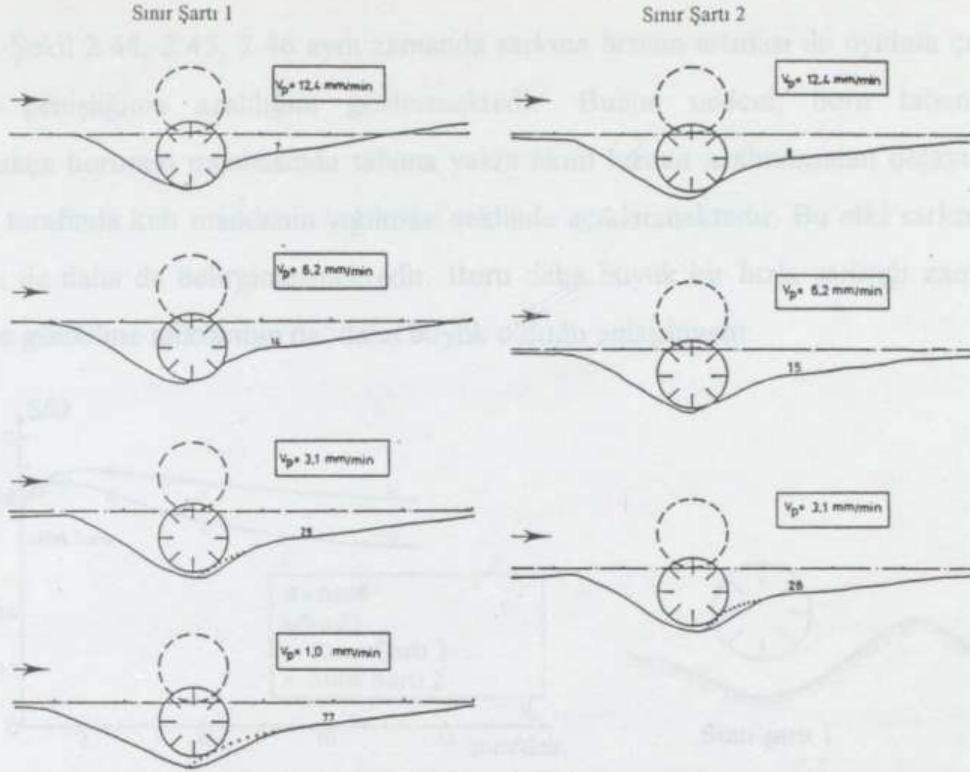


Sınır Şartı 2

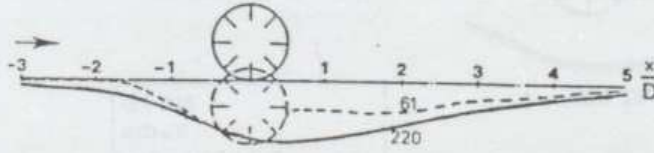
Şekil 2.44-  $\theta=0.098$ ,  $G/D=0.1$  için oyulma profilleri.

Şekil 2.44, 2.45, 2.46'dan görüldüğü gibi sarkma yapmış boru durumundaki oyulma profillerinin ortak özelliği, borunun mansabında daima bir miktar kumun yığılmış olmasıdır. Bu durum özellikle  $\theta$ 'nın çok küçük  $V_p$ 'in rölatif olarak yüksek değerlerinde oldukça önem taşımaktadır.

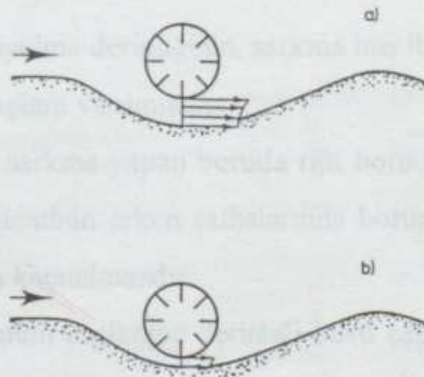
Şekil 2.47'de görüldüğü gibi boru tabana yaklaştıkça boru akıma karşı kısmen korunaklı hale gelmektedir. Bu, borunun mansabında tabana yakın akım hızının azalmasına neden olacağından bu kısımlarda yığılmalar meydana gelmektedir.



Şekil 2.45-  $\theta=0.15$ ,  $G/D=0.0$  için denge oyulma profilleri.



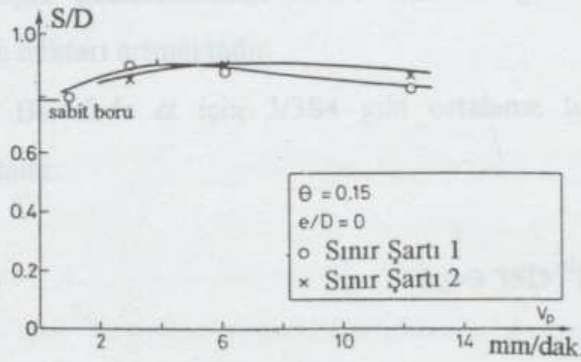
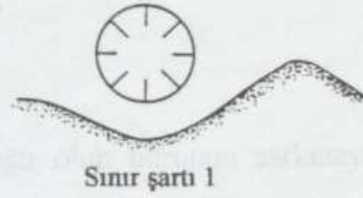
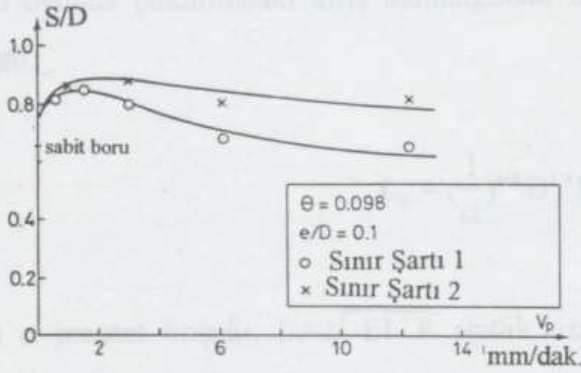
Şekil 2.46- Borunun sarkma hızı  $V_p=1.5$  mm/dakika. Denge oyulma derinliğinin karşılaştırılması, — rijit boru, ---- sarkan boru.



Şekil 2.47- Oyulma çukurundaki borunun korunumu.



Şekil 2.44, 2.45, 2.46 aynı zamanda sarkma hızının artması ile oyulma çukurunun menba genişliğinin azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni, boru tabana doğru yaklaştıkça borunun menbasında tabana yakın akım hızının azalmasından dolayı borunun menba tarafında katı maddenin yığılması şeklinde açıklanmaktadır. Bu etki sarkma hızının artması ile daha da belirginleşmektedir. Boru daha büyük bir hızla sarktığı zaman kendi kendine gömülme miktarının da daha büyük olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 2.48- a, b Sarkma hızına karşılık oyulma derinliği.

Şekil 2.48 denge oyulma derinliğinin, sarkma hızı ile değişimini göstermektedir. Bu şekilden aşağıdaki şu sonuçlara varılmıştır.

i) Oyulma çukuru sarkma yapan boruda rijit borudan daha derindir. Şekil 2.48'de görüldüğü gibi, sarkma işleminin erken safhalarında borunun sarkmasından dolayı tabana yakın akım hızlarının artışı kaçınılmazdır.

ii) Oyulma çukurunun başlangıç derinliği boru çapının 0.4 katı olarak alındığında sınır koşulu; 1 ve 0.6 katı alındığında sınır koşulu; 2 şartları elde edilmektedir. Başlangıçta

sınır koşulu 2 oyulma işlemi başladığında daha derin denge oyulma derinliği elde edildiği görülmektedir.

iii) Şekil 2.48a'daki denge oyulma derinliği Şekil 2.48b'dekine göre daha büyüktür. Bunun nedeninin Shields parametresinin daha büyük değerlerine bağlı olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Sonuç oyulma derinliği, yaklaşık olarak boru çapına ( $S=D$ ) eşit alındığında, üç boyutlu oyulma çukurundaki giriş uzunluğunun hesaplanması için aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$L_0 = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{1/4} D^{1/4} L_s^{3/4} \quad (2.22)$$

burada  $\alpha$  mesnet koşulu,  $L_s = \sqrt[3]{EI/P}$  rijitlik uzunluğu olup borunun sarkmaya karşı davranışını göstermektedir. Boru hattının rijitlik uzunluğu küçüldükçe boru hattının sarkma miktarı artmaktadır.

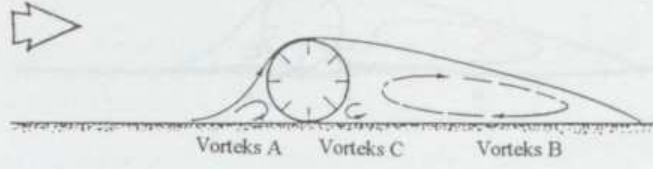
Bu ifade  $\alpha$  için 3/384 gibi ortalama bir değer alınması ile aşağıdaki şekli almaktadır.

$$L_0 = 3.35 D^{1/4} L_s^{3/4} \quad (2.23)$$

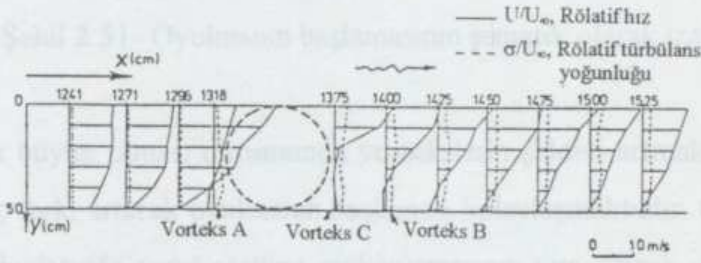
#### **Mao (1988):**

Araştırmacı tek yönlü akım şartlarında boru hatları etrafındaki yerel oyulmanın atak açısı ile değişimini incelemiş ve akım doğrultusunun boru hattı normali ile paralel olması halinde maksimum oyulma çukurunun meydana geldiğini belirtmiştir.

Araştırmacı deneyleri esnasında akım yapısını belirlemek için, boya ve bir çeşit ( $\gamma_p=1$ ) plastik malzeme yardımıyla görünürlük testleri gerçekleştirmiştir. Şekil 2.49'dan görüldüğü gibi silindir etrafında üç adet vorteks oluşumu belirlemiştir. Görünürlük testlerinin yanında ayrıca boru hattı etrafında mikromuline yardımı ile hız dağılımların da Şekil 2.50'de görülmektedir.



Şekil 2.49- Oluşan üç vorteksin şematik olarak izahı.



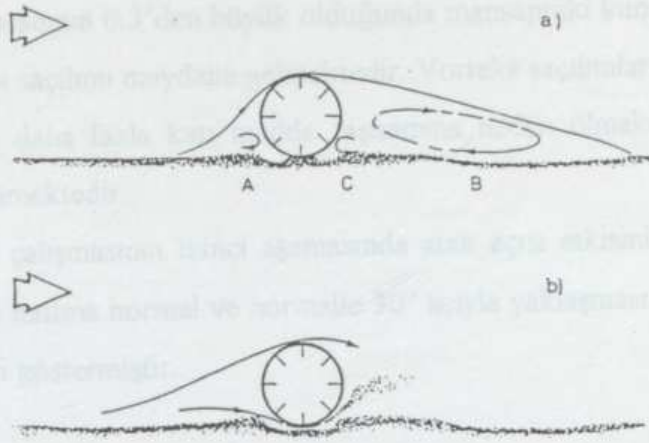
Şekil 2.50- Düzlem bir tabanda bulunan boru etrafındaki akım durumu, ortalama hız  $U_0 = 0.45 \text{ m/s}$  (Kjeldsen et al., 1973).

Mao (1988) deneylerini iki aşamada gerçekleştirmiştir. İlk aşamada oyulmanın nasıl başladığını izlemiştir. Boru hattının yerleştirildiği kum taban boyunca basınç dağılımının değişiminden dolayı yeraltı suyu akımının oyulma olayına etkisi olduğunu, ancak bu etkinin tabandaki kum danelerini hareket ettirebilecek şiddette olmamasına rağmen danelerin sadece hareket etme kabiliyetlerini sağlaması yönünde olduğunu belirlemiştir. Boru hattının art-iz bölgesinde  $C_p < 0$  olması nedeniyle, yerel hız rahatsız edilmemiş serbest akım hızından daha büyük olmaktadır.

Şekil 2.51'de görüldüğü gibi boru hattı etrafında oluşan A ve C vorteksleri birbirlerine ters yönde ve borudan uzaklaşan doğrultuda taban malzemesini taşımaktadırlar. Diğer taraftan, B vorteksi taban malzemesini boruya doğru getirmekte ancak bu vorteksin etki alanının C vorteksi ile sınırlandığı belirlenmiştir.

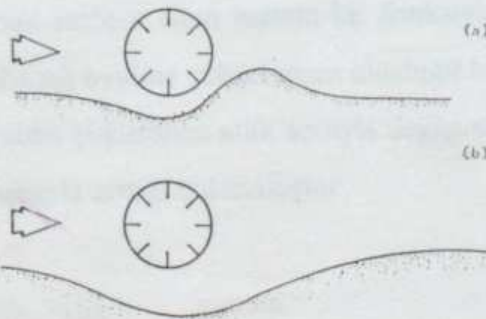
Bu vortekslerin birlikte etkisi ve boru altındaki akım nedeniyle yerel oyulma olayı başlamakta, ve borunun altında küçük bir açıklık meydana gelmektedir. Araştırmacı oyulma olayının başlamasının rahatsız edilmemiş akım hızına bağlı olduğunu belirtmiştir.





Şekil 2.51- Oyulmanın başlamasının şematik olarak izahı.

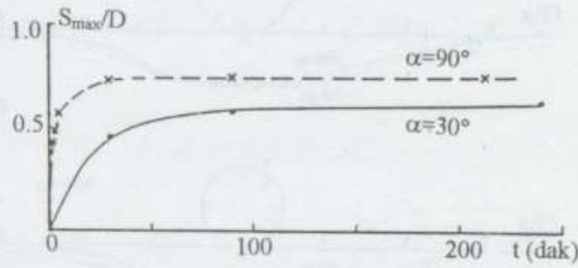
Akım hızının çok büyük olması durumunda vortekslerin şiddeti artmakta, borunun her iki tarafındaki basınç farkı artarak oyulmanın başlaması kolaylaşmaktadır. Çok küçük rahatsız edilmiş akım hızlarında yerel oyulma mekanizmasının tam olarak gelişmediği ve boru hattının altında açıklığın oluşmadığı belirtilmiştir. Araştırmacı oyulma mekanizmasının başlamasından hemen sonra boru hattı boyunca ve akım doğrultusunda yerel oyulmanın hızla geliştiğini, böylece artık oyulma işleminin iki boyutlu olarak gözönüne alınabileceğini belirtmiştir. Oyulma işleminin Şekil 2.52'de görüldüğü gibi; i) jet süreci ve ii) art-iz süreci olmak üzere iki aşamada geliştiği gösterilmiştir. Buna göre önce boru hattı ile taban arasında küçük bir açıklığın oluştuğu, oyulma çukurunun henüz küçük olduğu ve mansap tarafında rölatif olarak büyük bir kum yığını oluştuğu gözlenmiştir. Daha sonra borunun altında oluşan jet akımının etkisiyle kum yığının borunun mansabında daha uzağa taşındığı belirtilmiştir. Bu durumda borunun mansabında vorteks saçılımı yoktur. Bundan sonra oyulma çukurunun büyümesi ile birlikte mansaptaki kum yığını küçülmektedir.



Şekil 2.52- Oyulma işleminin şematik görünümü, a) Jet süreci, b) Art-iz süreci.

G/D açıklık oranının 0.3'den büyük olduğunda mansaptaki kum yığını daha uzakta oluşmakta ve vorteks saçılımı meydana gelmektedir. Vorteks saçılımları tabanı etkileyerek akım doğrultusunda daha fazla katı madde taşınımına neden olmakta, böylece oyulma çukuru daha da büyümektedir.

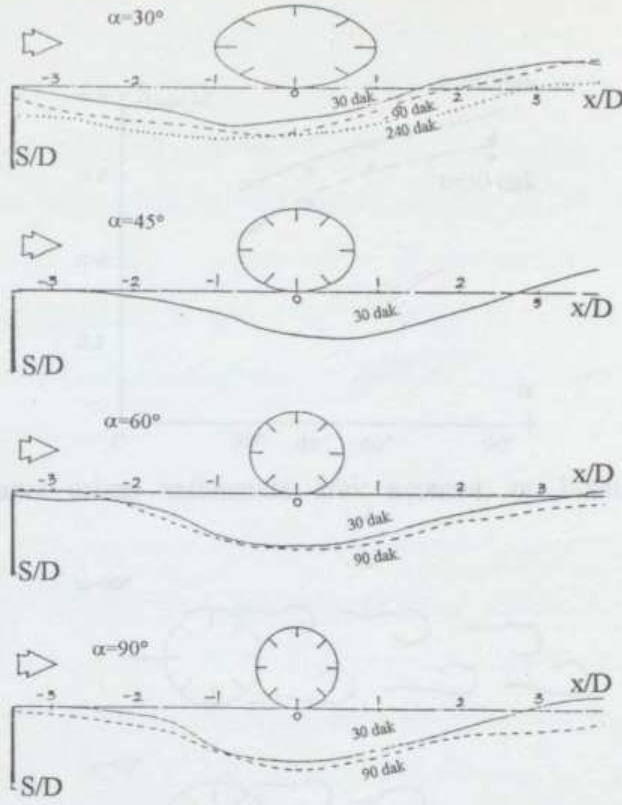
Mao (1988) çalışmasının ikinci aşamasında atak açısı etkisini incelemiş ve Şekil 2.53'de akımın boru hattına normal ve normalle  $30^\circ$  açıyla yaklaşması durumunda oyulma çukurunun gelişimini göstermiştir.



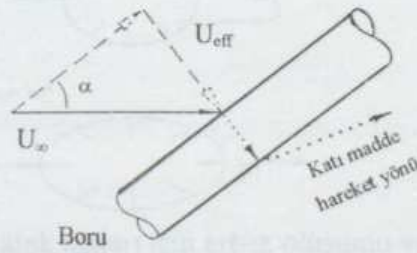
Şekil 2.53-  $\theta=0.098$ , Oyulma işlemleri, --x--  $D=10$  cm  $\alpha = 90^\circ$ , -.-.  $D=11$  cm  $\alpha = 30^\circ$ .

Şekil 2.53'de ise  $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  ve  $90^\circ$  olması durumlarında oyulma çukurunun gelişimleri gösterilmiştir. Atak açısının  $30^\circ$ 'den büyük olması durumunda oyulma çukuru daha hızlı gelişmektedir. Deneylerden kum danelerinin borunun altında boruya normal yönde, oyulma çukurunun mansap eğimi boyunca boruyla açı yapacak şekilde hareket ettikleri gözlenmiştir. Genelde bu danelerin en az dirence maruz kalacak şekilde bir yörünge çizdikleri belirtilmiştir. Oyulma çukurunun tabanı yakınında kum danelerinin hareketini kontrol eden hızın boruya normal olan bileşeni olup bu hız efektif akım hızı olarak adlandırılmıştır ( $U_{eff} = U_0 \sin \alpha$ , burada  $U_{eff}$  efektif hız,  $U_0$  rahatsız edilmemiş akım hızıdır). Oyulma çukurunun serbest akım hızının bir fonksiyonu olduğu, böylece küçük efektif akım hızlarında daha sıkı oyulma çukurlarının oluştuğu belirtilmiştir (Şekil 2.55).

Şekil 2.56'dan oyulma çukurunun atak açısıyla değişiminin incelenmesi sonucunda, oyulma çukurunun atak açısıyla arttığı bulunmuştur.



Şekil 2.54- Taban profillerinin atak açısı  $\alpha$  ile değişimleri,  $D=11\text{cm}$ ,  $d_{50}=0.36\text{mm}$ ,  $\theta=0.098$ .

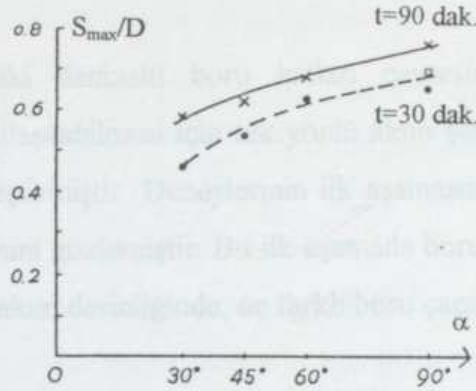


Şekil 2.55- Kum partiküllerinin efektif hızının hareket yönünün şematik izahı.

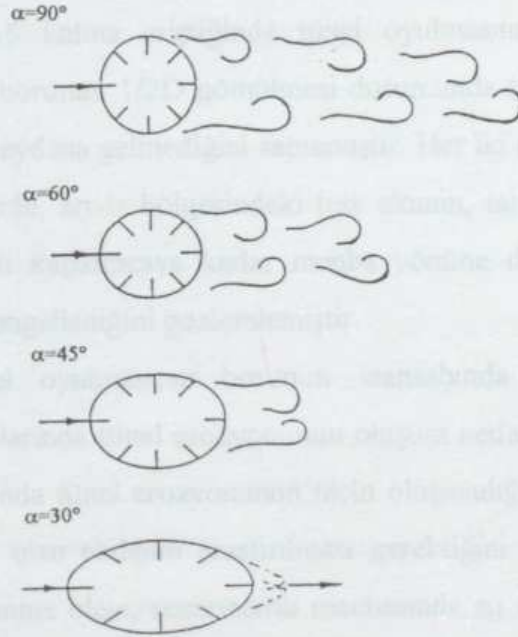
Borunun kesit alanı atak açısına bağlıdır, eğer yapı akım çizgilerine uyum sağlamayan bir kesite sahip ise daha kuvvetli vorteks saçılımlarına neden olmakta ve erozyon miktarında artmaktadır (Şekil 2.57). İşte bu nedenden dolayı atak açısıyla yaklaşan akım boru hattını gördüğü izdüşüm kesitiyle değişmekte ve böylece meydana gelecek oyulma çukuru atak açısının küçülmesiyle küçülmektedir.



Chen (1980)



Şekil 2.56- Oyulmanın erken safhasında atak açısının,  $\alpha$ , borunun altındaki oyulma derinliğine etkisi.



Şekil 2.57- Farklı atak açıları için art-iz oluşumu ve kesitin şematik izahı.

Mao (1988) ayrıca borunun üst tarafında hız değişimini ölçmüş ve vorteks saçılımının da atak açısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Düzenli vorteks saçılımları için kritik atak açısının,  $\alpha_k$  (borudan düzenli vortekslerin saçılmasına karşılık gelen atak açısıdır),  $45^\circ$  ile  $60^\circ$  arasında olduğunu,  $\alpha \neq 90^\circ$  olduğunda vorteks saçılımlarının  $\alpha=90^\circ$  ile karşılaştırıldığında tam gelişmediğini, atak açısının büyümesiyle borunun alt ve üst kenarlarından saçılan vortekslerin oyulmayı özellikle  $\alpha > \alpha_k$  durumunda artırdığını ve  $\alpha=90^\circ$  halinde ise en kuvvetli saçılımların meydana geldiğini belirtmiştir.

### Chiew (1990):

Hareketli tabandaki denizaltı boru hatları çevresinde meydana gelen yerel oyulmanın mekaniğinin anlaşılabilmesi için tek yönlü akım şartlarında oldukça detaylı bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Deneylerinin ilk aşamasında farklı akım koşullarında oyulma çukurunun gelişimini gözlemiştir. Bu ilk aşamada boru hattını  $1/16 D$  ve  $1/2 D$ 'ye kadar gömerek beş farklı akım derinliğinde, üç farklı boru çapı kullanarak değişik şartlarda deneylerini yürütmüştür.

Bu gözlemlerden boru hattının  $1/16D$  derinliğe kadar gömülü olduğunda, su derinliğinin,  $(d/D)$ , küçük değerlerinde oyulmanın hemen başladığını, ancak su derinliğinin boru çapına oranının  $3.5$  katına eriştiğinde tünel oyulmasının meydana gelmediğini belirtmiştir. Buna karşın borunun  $1/2D$  gömülmesi durumunda tünel oyulmasının dikkate alınan hiç bir derinlikte meydana gelmediğini saptamıştır. Her iki durumda da oyulmanın meydana gelmediği hallerde, art-iz bölgesindeki ters akımın, taban malzemesini borunun mansap tarafını tamamen kapatıncaya kadar menba yönüne doğru taşıdığını ve tünel oyulmasının başlamasını engellediğini gözlemlemiştir.

Araştırmacı tünel oyulmasının borunun mansabında başladığını belirtmiştir. Böylece küçük  $d/D$  oranlarında tünel erozyonunun oluşum nedenine ve yüksek  $d/D$  veya büyük gömülme oranlarında tünel erozyonunun niçin oluşmadığına karar verebilmek için tünel erozyonuna sebep olan nedenin araştırılması gerektiğini vurgulamıştır. Baraj gibi hidrolik yapılarda borulanma olayı, rezervuarın menbasında su seviyesi ile çıkış suyunun arasındaki hidrolik gradyan farkından kaynaklanmaktadır. Buna karşın denizaltı boru hatları için basınç gradyanı boru hattının menbasındaki büyük durgunluk basıncından ve mansabında meydana gelen ayrılma bölgesindeki nisbeten düşük basınçtan kaynaklanmaktadır. Eğer mansap basınç gradyanı taban malzemesinin sahip olduğu boşluk suyu gradyanını aşarsa borulanma oluşmaktadır. Borunun mansabındaki katı madde bu hızlandırıcı şartla karşılaştığında kum danelerinin ağırlıkları azalmakta ve bu taban malzemesi mansaba doğru taşınmaktadır. Bu erozyon işlemi ilerleyen bir olgudur. Taban erozyona uğradıkça katı madde hareketi basınç gradyanındaki artış miktarı ile azalmaktadır. Kritik katı madde hareketinin başlangıç değerindeki azalma ile menbadaki



vorteks tabanı kolayca oymaktadır. Hem borulanma hem de menba vorteksleri birleşerek borunun altındaki kum tabanı bozarak tünel oyulmasının başlamasına öncülük ettiği ifade edilmiştir.

Tünelden taşınan taban malzemesinin oyulma çukurunun mansabında yaklaşık olarak boru çapının yarısı yüksekliğinde kum eşiği oluşturduğunu ve zamanla bu kum eşiğinin mansaba doğru ilerlediği gözlenmiştir. Art-iz bölgesindeki türbülans ile borunun üzerinden geçen ana akımın birleşmesi sonucunda mansap erozyonunun baskın olmaya başladığı, böylece oyulma derinliğinin dinamik derinliğe ulaşmaya kadar devam ettiği belirtilmiştir.

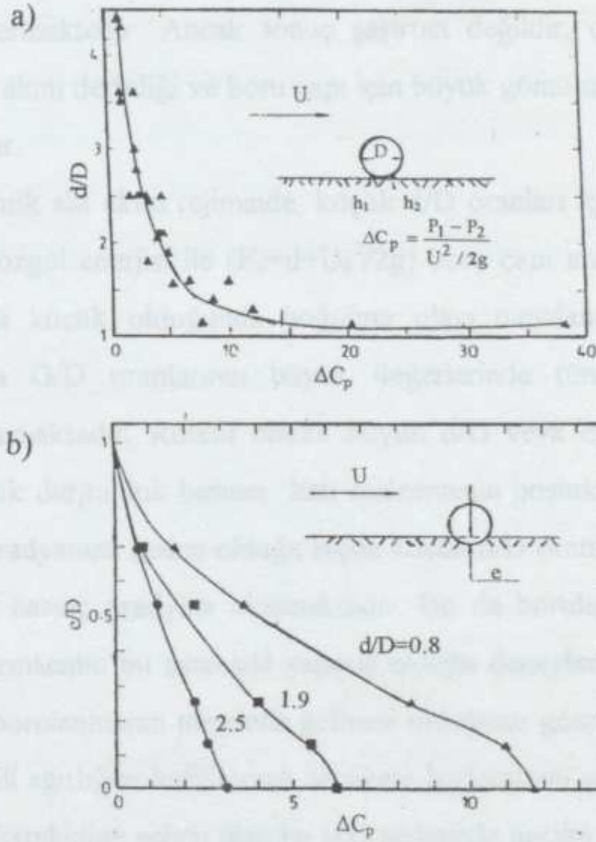
Chiew (1990) deneylerinin ikinci aşamasında ise aşağıdaki araştırmaları yapmıştır;

Borulanmayı engelleyecek şartları hazırlayarak, borulanma olmadığı durumda boru hattının altında tünel oyulmasının meydana gelip gelmediğini kontrol etmiştir. Borulanmayı engellemek için basınç gradyanının taban malzemesinin boşluk suyu gradyanının altında tutulması gerektiğinden, araştırmacı borunun menba tarafına geçirimsiz bir levha yerleştirerek yeraltı suyunun akım çizgilerinin uzamasını sağlayarak boru kesitindeki basınç gradyanının azalmasını sağlamıştır. Bu geçirimsiz levhanın yerleştirilmesi ile tünel oyulması görülmediği için deneyler denizaltı boru hatları altında meydana gelen borulanmanın tünel oyulmasının başlaması üzerindeki etkisinin oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Araştırmacı buradan elde ettiği sonuçların desteği ile borulanma olmadan durgunluk çevrilerinin yalnız başına tünel oyulmasını başlatamayacağı sonucuna varmıştır. Buna ilaveten tünel erozyonunun başlamasına neden olan kritik basınç gradyanını da bulmaya çalışmıştır. Elde ettiği sonuçlardan zemin mekaniğinde borulanmanın hesaplanmasında kullanılan boşluk suyu gradyan formülünün boru hatları çevresindeki oyulmaya da uygulanabileceğini göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda kritik basınç gradyanı ile bu formül kullanılarak hesaplanan boşluk suyu gradyanı arasında oldukça yakın bir benzerlik olduğu görülmüştür. Eğer bir kum tabakası içerisinde suyun yukarıya doğru akımı tabandaki katı maddenin ağırlığını yenecek kadar büyük yeraltı suyu basıncı uygularsa, katı madde normalden daha hızlı harekete başlamaktadır. Hatta daha büyük bir akım, katı maddeyi askı haline bile geçirebilmektedir. Genelde bu tip bir erozyonun boşluk suyu



gradyanı aşıldığında başladığı gösterilmiştir;  $i_f = (1-p)(\Delta-1)$  burada  $p$ : porozite,  $\Delta$ : rölatif özgül küttedir (Bowles, 1984).

Chiew (1990) deneylerinin üçüncü aşamasını farklı akım koşulları yani çeşitli  $d/D$  oranları ve çeşitli  $G/D$  oranları için silindirin menba ve mansabı arasındaki basınç farkını araştırmak için yapmıştır. Bu aşamada elde ettiği deney sonuçlarını aşağıdaki grafiklerle yorumlamıştır.



Şekil 2.58 a)  $e/D=0$  için  $\Delta C_p$ 'ye karşılık  $d/D$ , b)  $d/D$  üçüncü değişken olarak  $\Delta C_p$ 'ye karşılık  $e/D$ .

Şekil 2.58a  $\Delta C_p$ 'nin  $d/D$  oranı ile değişimini göstermektedir. Burada  $\Delta C_p$  borunun menba ve mansabı arasındaki basınç katsayısı farkı olup

$$\Delta C_p = \frac{\Delta h}{(U_0^2 / 2g)} \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilmektedir.  $\Delta h$  borunun menba ve mansabı arasındaki basınç yüksekliği farkıdır. Bu grafikten görüldüğü gibi  $d/D$  oranı  $\Delta C_p$  ile ters orantılıdır. Bu çalışmada  $\Delta C_p$ 'nin Reynolds sayısı ile herhangi ilişkisi olmadığı görülmüştür. Ancak bu  $\Delta C_p$ 'nin Reynolds sayısının (2350-30000) aralığında çok hassas olmadığı şeklinde yorumlanmıştır.

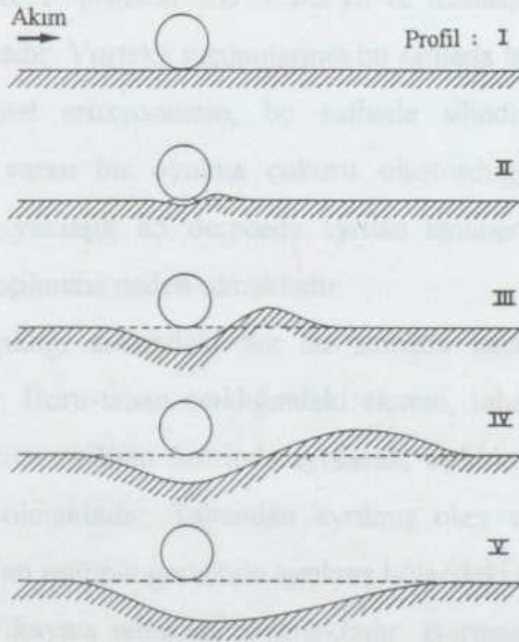
Şekil 2.58b ise  $d/D$ 'yi üçüncü parametre olmak üzere  $\Delta C_p$ 'nin  $e/D$  gömülme oranı ile değişimini göstermektedir. Bu eğri gömülme oranı büyüdükçe  $\Delta C_p$  değerinin küçüldüğünü göstermektedir. Ancak sonuç şaşırtıcı değildir, çünkü dikkate alınan bir rahatsız edilmemiş akım derinliği ve boru çapı için büyük gömülme oranı, büyük  $d/D$  oranı gibi davranmaktadır.

Genelde kritik altı akım rejiminde, küçük  $d/D$  oranları için veya özellikle rahatsız edilmemiş akımın özgül enerjisi ile ( $E_0 = d + U_0^2/2g$ ) boru çapı arasındaki fark kritik özgül enerjiden  $E_{kr}$  daha küçük olduğunda boğulma olayı meydana gelmektedir. Boğulma olgusu,  $d/D$  veya  $G/D$  oranlarının büyük değerlerinde tünel oyulması için neden oluşmadığını açıklamaktadır. Rölatif olarak büyük  $d/D$  veya  $e/D$  oranları için borunun menbasındaki küçük durgunluk basıncı katı malzemenin boşluk suyu gradyanından daha küçük bir basınç gradyanına neden olduğu halde küçük  $d/D$  oranlarında boğulma meydana gelerek büyük bir basınç gradyanı oluşmaktadır. Bu da borulanmanın durmasına sebep olmaktadır. Araştırmacının bu aşamada yapmış olduğu deneyler, oyulmanın başlamasının başlıca nedeninin borulanmanın meydana gelmesi olduğunu göstermiştir. Borulanma olayı katı maddenin etkili ağırlığını hafifleterek harekete başlamasını şartını kolaylaştırmaktadır. Taban malzemesi hareketine sebep olan bu etki nedeniyle menba durgunluk çevrisi artarak oyulmanın başlamasına neden olmaktadır. Diğer yandan borulanmanın durması doğrudan borunun kesitindeki basınç gradyanının rölatif büyüklüğü ve sürüntü malzemesinin boşluk suyu gradyanı ile ilgilidir. Küçük  $d/D$  oranlarında boğulma etkisinden dolayı basınç gradyanı artmaktadır. Büyük  $d/D$  ve büyük gömülme oranlarında basınç gradyanı nisbeten küçüktür, tünel oyulmasının olmamasının nedeni bu küçük basınç gradyanı ile açıklanmıştır.

**Jensen et al. (1990):**

Araştırmacılar boru hatlarını başlangıçta düzlem bir tabana yerleştirmişler ve daha sonra oyulma işleminin gelişimi ile birlikte boru hattı çevresinde oluşan farklı oyulma safhaları için akım alanını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu deneylerde oluşturulan safhaların her biri Mao (1986) tarafından yapılmış olan oyulma deneylerinden elde edilmiş olan taban profilleri ile temsil edilmiştir. Araştırmacılar yapmış oldukları bu deneyler sonunda oyulmanın zamanla gelişmesiyle boru hattı üzerindeki kuvvetlerin ve çevresindeki akım alanının önemli miktarda değiştiğini göstermişlerdir.

Yapılan deneylerden elde edilen verilere ve akım görünürlüğü deneylerine dayanarak beş farklı profil için akım alanlarını aşağıdaki gibi tarif etmişlerdir (Şekil 2.59).



Şekil 2.59- Deneylerde kullanılan oyulma profilleri. Mao (1986)'nın gerçek oyulma deneylerine karşılık gelen profiller. Profil 1:  $t(\text{zaman})=0$ ; 2:  $t=1$  dak; 3:  $t=6$  dak.; 4:  $t=30$  dak.; 5:  $t=300$  dak.

1. Profil: Bu safha tabana yerleştirilmiş bir silindir halini temsil etmektedir. Bu profildeki akım şekli, borunun menbasında bir çevri ve mansabında ise geniş bir ayrılma bölgesi ile temsil edilmektedir. Bu menba vorteksi erozyonun oluşmasında ve bunun



sonucunda borunun altının oyulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bu profilde vorteks saçılımının meydana gelmediği görülmüştür.

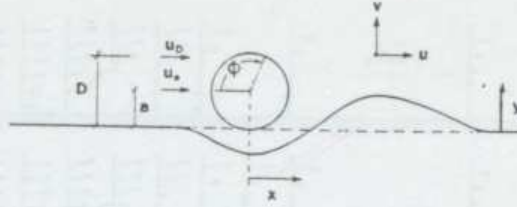
2. Profil: Bu profil borunun altında oyulmanın henüz başlamış olduğu durumu temsil etmektedir. Bu safhada borunun menbasında oluşmuş olan vorteks kaybolmakta ve boru-taban arasındaki açıklıktan geçen akımın hızı borunun üzerinden geçen akışkanın hızına eşit olduğundan bu rölatif yüksek hız kuvvetli bir tünel erozyonuna neden olmaktadır. Boru ile taban arasındaki açıklıktan geçen akım, borunun mansabında oldukça şiddetli bir ters basınç gradyanına neden olur. Bunun nedeni; kısmen yerel açıklığın artmasıyla silindir yüzeyinden ve tabandan sınır tabakasında meydana gelen ayrılma ve kısmen de mansaptaki büyük ayrılma bölgesindeki rölatif olarak küçük hızlardır. Ayrılma bölgesindeki bu akım boru-taban açıklığı arasındaki akımdan etkilenmemekte ve bunun sonucu olarak da 1. ve 2. profilde  $x/D=1.5-2'$ 'ye ve mansapta daha uzun mesafede bir değişiklik oluşmamaktadır. Vorteks saçılımlarının bu safhada hala oluşmadığı görülmüştür.

3. Profil: Tünel erozyonunun, bu safhada silindirin altında sonuç oyulma derinliğinin %60'ına varan bir oyulma çukuru oluşturduğu görülmektedir. Silindirin yüzeyinde gelişen ve yaklaşık 85 derecede ayrılan laminar sınır tabakası, vorteksleri oluşturarak bunların saçılımına neden olmaktadır.

Boru-taban açıklığı arasındaki hız bu safhada hala silindirin üzerindeki hıza yaklaşık olarak eşittir. Boru-taban açıklığındaki akımın, taban üzerindeki sınır tabakası silindirin gerisindeki kum eşiğinin üzerinde ayrılarak, açıklıktaki akımın jet tipi bir akım oluşturmaya neden olmaktadır. Tabandan ayrılmış olan ve saat yönünde dönen su jetindeki akışkan ile kum eşiğinin gerisinde ayrılmış bölgedeki düşük hızlı akışkan arasında yüksek türbülanslı bir kayma tabakası oluşmaktadır. Borunun ön tarafındaki durgunluk noktasının boru yüzeyinin alt kısmından üst kısmına doğru hareket etmiş olduğu görülmüştür.

4. Profil: Bu profil daha önceki profille karşılaştırıldığında bu safhadaki akım şeklinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Borunun alt tarafındaki ayrılma noktası yaklaşık olarak  $95^\circ$  mansaba doğru kaydığından bu yüzdeki hız silindirin üzerindeki hızdan daha yavaştır (Şekil 2.60). Bu safhada vorteksler daha kuvvetli olduğundan tabana yakın akım kıvrılarak bu vortekslerin içine girmesi ile daha büyük bir direnç etkisinin doğmasına

neden olmaktadır. Bu yaklaşık olarak  $x/D$ 'nin 2-3 değerleri arasında meydana gelmekte ve kum eşiğinin gerisinde ayrılma oluşmaktadır.

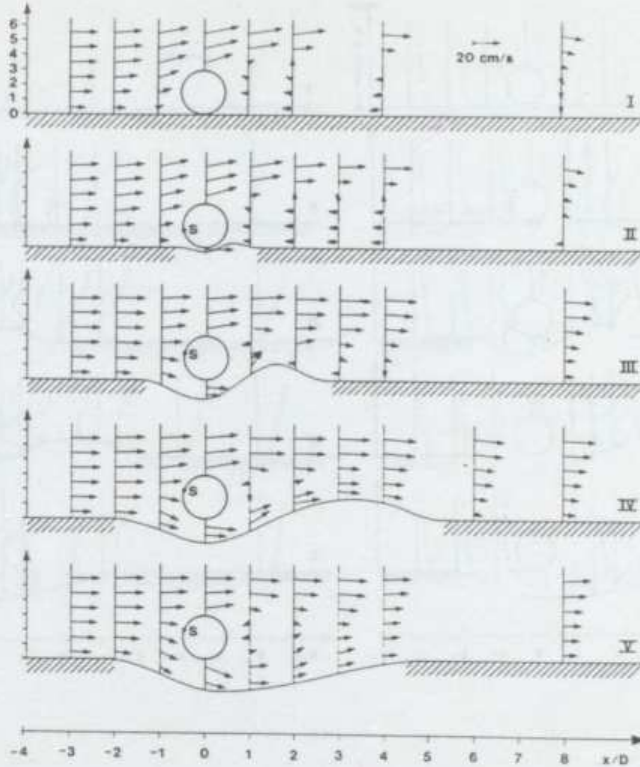


Şekil 2.60- Ayrılma açısının,  $\phi$ , şematik olarak gösterilmesi.

5. Profil: Bu profil oyulmanın dengeye ulaştığı safhayı göstermektedir. Şekil 2.61 ve 2.62'de görüldüğü gibi silindirin ön yüzeyindeki durgunluk noktası daha yüksek bir seviyeye kaymış olup, silindirin alt tarafındaki hız üst tarafındaki akım hızından daha yavaştır (Şekil 2.62). Silindirin alt yüzeyindeki laminar sınır tabakası yaklaşık olarak  $75^\circ$ 'de ayrılmaktadır. Oyulmanın bu safhasında meydana gelmiş olan yumuşak mansap eğimi hemen hemen simetrik vorteks saçılımlarının oluşmasını sağlamaktadır.

Bu deneylerde tabana ait hız ölçümleri tabandan 0.5 cm yukarıdan alınmıştır. 2., 3. ve bir dereceye kadar 4. profil için ortalama hız dağılımının boyuna gradyanı en yoğun tünel erozyonunun nerede olduğunu göstermektedir. Bu yoğun erozyonun olduğu yerlerden hareketlendirilmiş olan katı madde, kum eşiğinin gerisine doğru taşınmakta ve bu bölgedeki küçük ve negatif hızlar sayesinde o bölgede tutulmaktadır. 5. profilde tabana yakın ortalama hızlar  $x$  mesafesi boyunca sabit kalmaktadır.

4 ve 5 profilleri için  $x/D$ 'nin 2-4 mesafesindeki rms dağılımındaki pikler silindirin alt kenarında meydana gelen vorteks saçılımlarından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.63). Oluşan bu vorteksler tabanı süpürerek mansap erozyonuna neden olmaktadır. Bununla birlikte 2 ve 3 profillerindeki rms dağılımında bulunan dar pikler, kum eşiğinin üzerinde taban sınır tabakasındaki ayrılmalardan meydana gelmektedir.

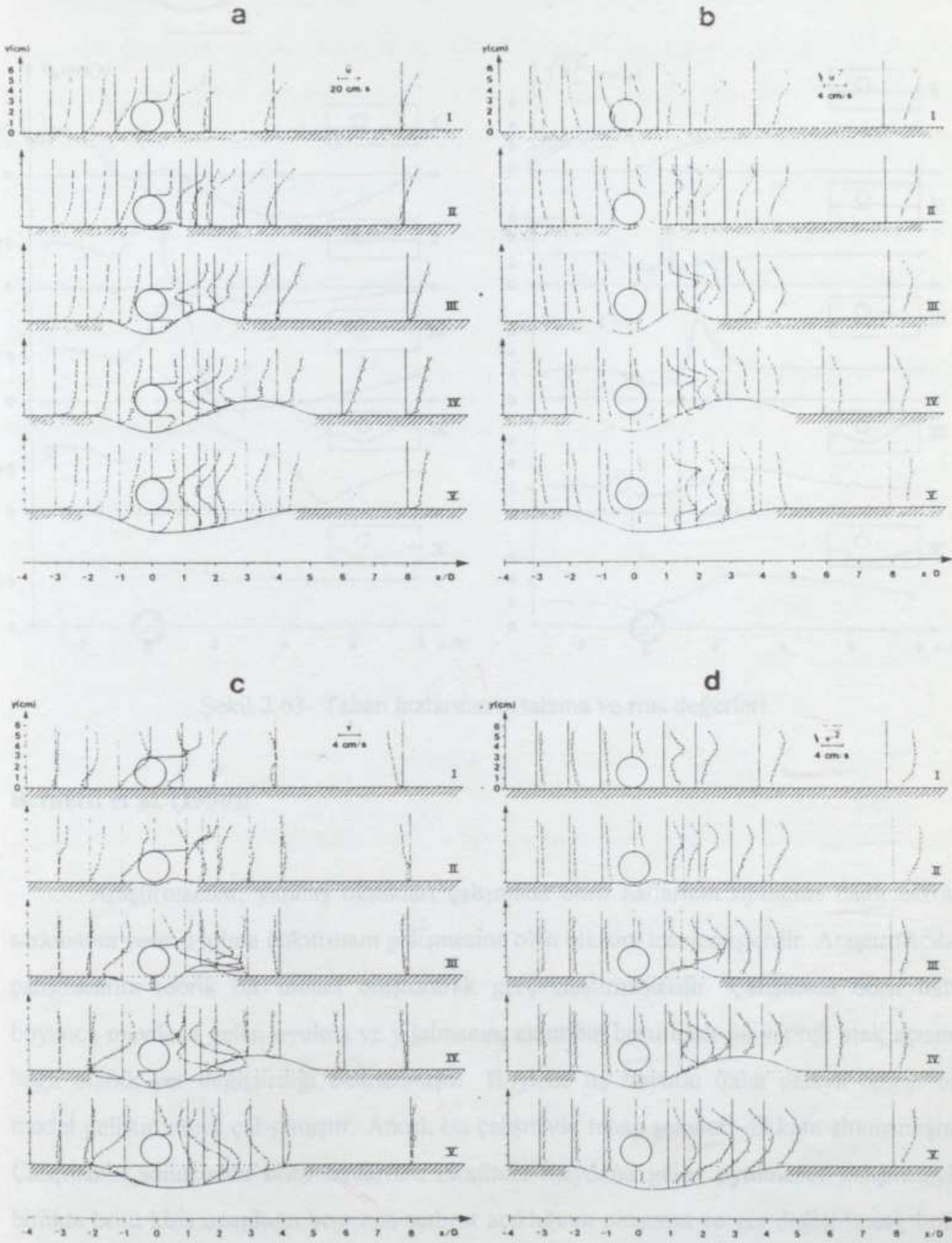


Şekil 2.61- Ortalama hızların vektörel çizimi,  $s$ = yaklaşık olarak durgunluk noktasının konumu.

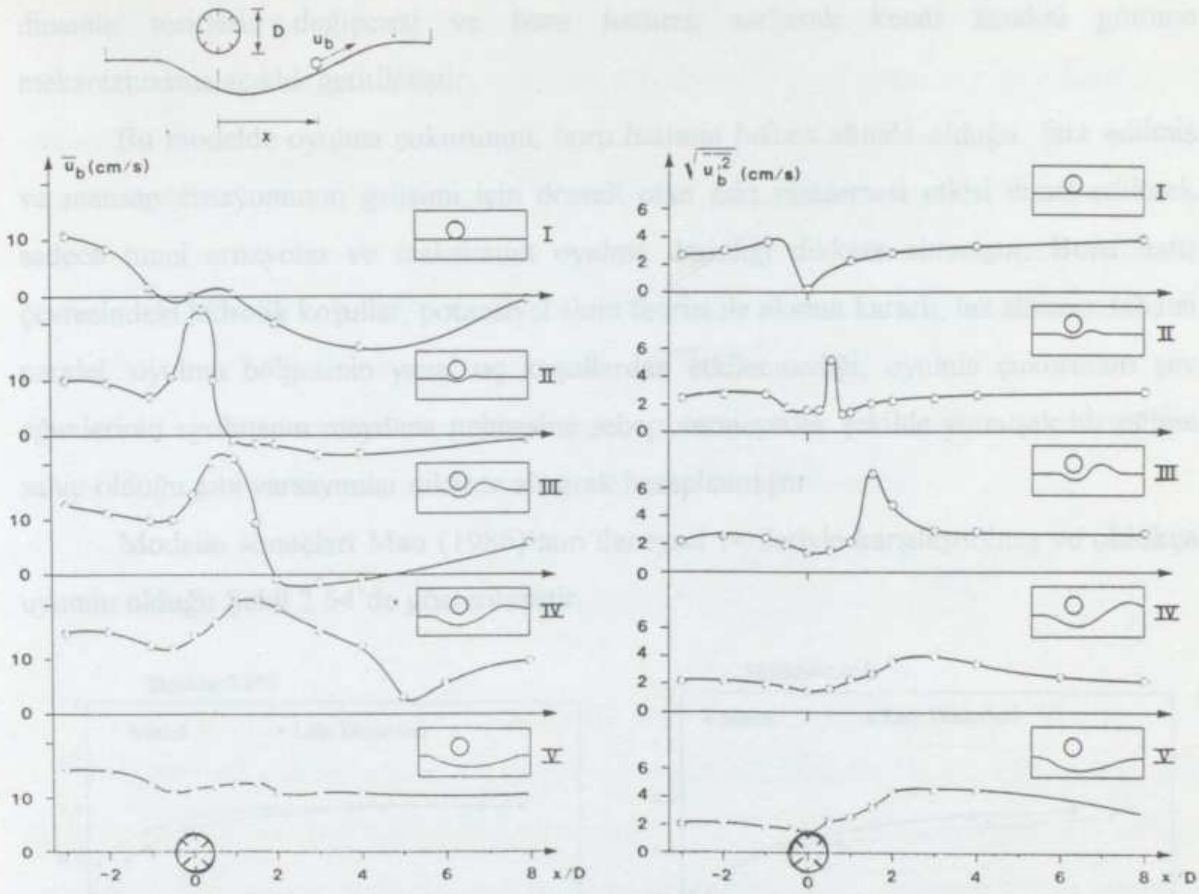
Oyulma işleminin erken safhalarında vorteks saçılımları meydana gelmektedir. Ancak, önceleri borunun mansabında borunun altından oyulan malzemenin depolanması sonucunda oluşan kum eşiğinin yakınlığından dolayı, vortekslerin az gelişmiş şekilleri oluşmaktadır. Fakat bu kum eşiğinin borunun mansabında daha ileriye hareketlenmesiyle vorteks saçılımları yavaş yavaş serbest silindirin vorteks saçılımına benzemektedir.

Üçüncü profilden beşinci profile doğru ilerledikçe saçılım işleminin daha kararlı bir hale geldiği ve bu kararlılığın ise silindirin mansabında simetrisinin artmasına neden olduğu gözlenmiş, vorteks şiddetinin boyutu ile orantılı olduğu belirtilmiştir.





Şekil 2.62- Ortalama ve rms hızları, a)  $u$ -ortalama, b)  $u'$ - rms, c)  $v$ - ortalama, d)  $v'$ - rms.



Şekil 2.63- Taban hızlarının ortalama ve rms değerleri.

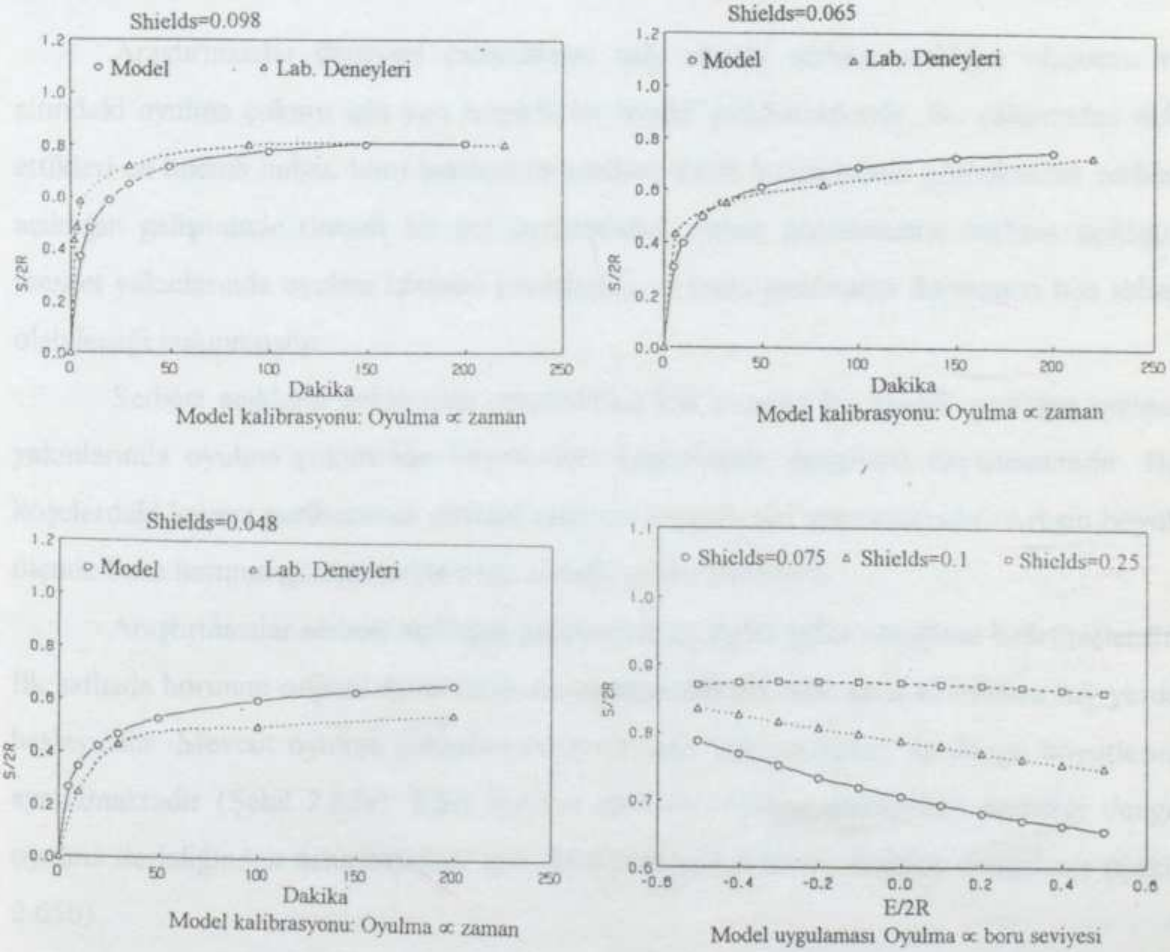
**Bernetti et al. (1990):**

Araştırmacılar, yapmış oldukları çalışmada boru hatlarının rijitliğine bağlı olarak sarkmanın yerel oyulma çukurunun gelişmesine olan etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarını teorik bir model oluşturarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada boru hattı boyunca meydana gelen oyulma ve yığılmanın, akıntının boru hattı ile yaptığı atak açısına bağlı olarak yer değiştirdiği belirlenmiştir. Böylece üç boyutlu daha detaylı teorik bir model geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak bu çalışmada taban şekilleri dikkate alınmamıştır. Çalışmanın sonucunda boru hatlarının etrafında meydana gelen oyulmanın gelişmesiyle birlikte boru giriş uzunluğu boyunca serbest açıklığının oluşumu ve yer değiştirmesi, boru hattının kısmen gömülmesi bu olaylar zincirinin sonunda da boru hatlarının maruz kaldığı

dinamik tesirlerin değişmesi ve boru hattının sarkarak kendi kendini gömme mekanizmasına açıklık getirilmiştir.

Bu modelde oyulma çukurunun, boru hattının hemen altında olduğu farz edilmiş ve mansap erozyonunun gelişimi için önemli olan askı malzemesi etkisi ihmal edilerek sadece tünel erozyonu ve maksimum oyulma derinliği dikkate alınmıştır. Boru hattı çevresindeki hidrolik koşullar, potansiyel akım teorisi ile akımın kararlı, hız alanının tabana paralel, oyulma bölgesinin yanal uç koşullardan etkilenmediği, oyulma çukurunun şev eğimlerinin ayrılmanın meydana gelmesine sebep vermeyecek şekilde yumuşak bir eğime sahip olduğu gibi varsayımlar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Modelin sonuçları Mao (1986)'nın deneysel verileriyle karşılaştırılmış ve oldukça uyumlu olduğu Şekil 2.64'de gösterilmiştir.



Şekil 2.64- Model kalibrasyonu; zamana karşılık oyulma.



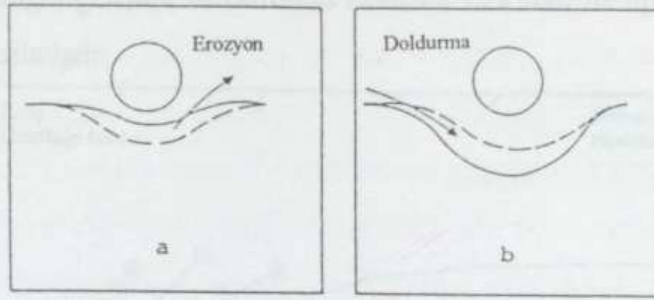
Çevresel ve yapısal parametrelerin, oyulmanın gelişimi ve serbest açıklığın oluşumundaki önemini araştırmak için bazı uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalardan ilki, küçük serbest akım hızlarında boru hattının mevcut konumunun yerel oyulma mekanizmasına etkisinin az olduğunu göstermiştir. Boru hattının oyulma çukuruna boru çapının yarısı kadar sarktığına veya aynı miktarda deniz tabanından kaldırıldığında oyulma derinliğinin ancak %15 kadar değişmekte olduğu belirlenmiştir. Daha hızlı akım şartlarında boru konumu daha az etkili olmaktadır. Farklı boru çapları için boyutsuz kayma gerilmesinin kritik kayma gerilmesi değerinin yaklaşık olarak 5 katı olması durumunda denge oyulma derinliğinde yine kayda değer bir farklılık görülmemiştir.

#### **Hansen et al. (1991):**

Araştırmacılar deneysel çalışmaların ışığı altında serbest açıklığın oluşumu ve altındaki oyulma çukuru için yarı ampirik bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmadan elde ettikleri en önemli bulgu, boru hattının mesnetlere yakın bölgesindeki gömülmenin serbest açıklığın gelişiminde önemli bir rol oynamasıdır. Artan gömülmenin, serbest açıklığın mesnet yakınlarında oyulma işlemini yavaşlattığı ve hatta oyulmanın durmasına bile sebep olabileceği bulunmuştur.

Serbest açıklığın gelişiminin araştırılması için kurulan bu model, açıklığın mesnet yakınlarında oyulma çukurunun köşesindeki katı madde dengesine dayanmaktadır. Bu köşelerdeki kayma gerilmesinin artması erozyon kapasitesini arttırmaktadır. Artışın büyük ölçüde boru hattının gömülmesine bağlı olduğu gösterilmektedir.

Araştırmacılar serbest açıklığın gelişiminde üç farklı safha olduğunu belirtmişlerdir. İlk safhada borunun orijinal deniz tabanına alçalma miktarı öyle azdır ki oyulma her yerde başlayabilir. Mevcut oyulma çukurları erozyon veya yığılma işlemi ile denge boyutlarını ayarlamaktadır (Şekil 2.65a). Eğer mevcut olan bir oyulma çukurunun derinliği denge oyulma derinliğinden daha büyükse geri doldurma işlemi ile bu derinlik dengelenir (Şekil 2.65b).



Şekil 2.65- Oyulma çukurunun düzenlenmesi.

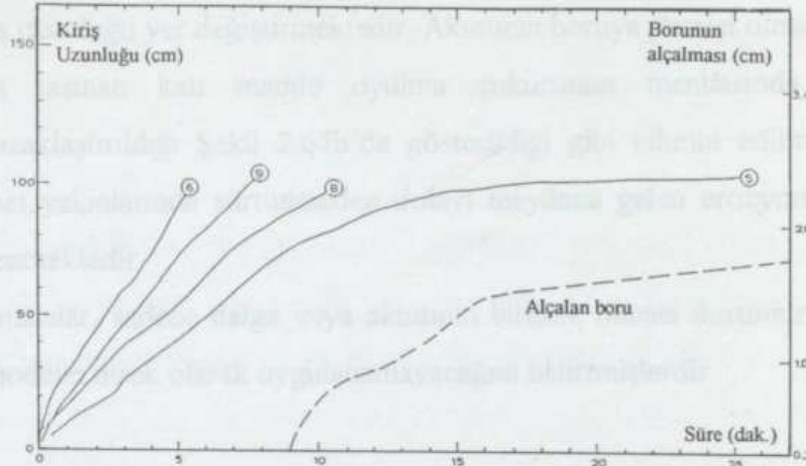
İkinci safhada boru orijinal deniz tabanından o kadar aşağıya alçalır ki boru hattının uzunluğu boyunca artık oyulma çukurları oluşmamakta ve boru hattı gömülmektedir. Mevcut oyulma çukurları birinci safhadaki gibi erozyon veya yığılma işlemleri ile denge boyutlarına göre kendini ayarlamaktadır (Şekil 2.65 a-b). Bu safha ile birinci safha arasındaki fark; 1. safhada her yerde oyulma meydana gelirken, 2. safhada borunun temasta olan kısımlarında gömülmenin meydana gelmesidir.

Son safhada ise boru hattı orijinal deniz tabanına, borunun altından katı madde taşınımını önleyecek kadar alçalarak mevcut oyulma çukurları menbadan gelen katı madde ile geri doldurmaktadır.

Oyulmanın aksel gelişimi 1. ve 2. safhada meydana gelebilmektedir. Boru hattının önemli miktarda uzunluğu 1. safhadaki gibi karakterize edilmesi halinde oyulma kısa aralıklarla başlayacak ve belki de oyulma çukuru denge derinliğine ulaşmadan önce boru kendi kendini alçaltacaktır. Oyulma çukurunun aksel gelişimi 1. halde çok kısa bir zaman aralığında oluşacak ve boru denge oyulma derinliğine erişmeden sarkma işlemi başlayacaktır. Kiriş uzunluğunun daha fazla gelişimi, çevresel şartların değişmesi, boru hattının sarkması ile mesnetlerde boru açısının yatayla değişmesi, mesnetlerde boru hattının sarkması ve homojen olmayan zemin koşulları gibi olaylardan dolayı durabilmektedir.

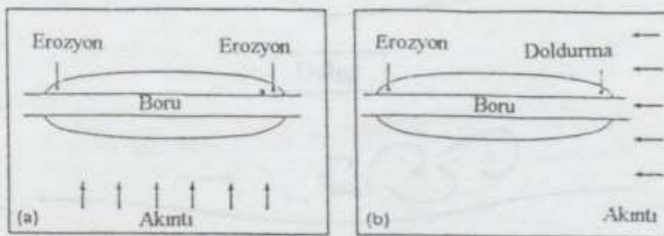
Araştırmacılar bu çalışmada, oyulmanın başlaması değil gelişimi üzerinde durmuşlardır. Deneylerini temiz su oyulmasına göre yapmışlar ve her deneye boru hattı altında küçük bir oyulma derinliği ile başlamışlardır.

Serbest açıklığın gelişimi ve borunun zamanla sarkması ile ilgili deneylerin sonucu Şekil 2.66'da gösterilmiştir.



Şekil 2.66- Serbest açıklığın gelişimi ve borunun zamana karşılık alçalması. —: serbest açıklığın gelişimi, -.-: borunun sarkması.

Bu deneylerden, kiriş uzunluğunun gelişiminde borunun gömülmesinin oldukça önemli olduğu ve borunun üzerinde artan yükün, artan gömülme ile kiriş uzunluğu gelişimini etkilediği gibi önemli sonuçlar elde edilmiştir. Deneylerde oyulmanın aksel gelişiminin, tabana yakın akıntı hızı ve yönü, rahatsız edilmemiş taban seviyesine göre boru hattının yeri, katı madde özellikleri, boru hattının çapı gibi özelliklerin fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı kiriş uzunluğu boyunca erozyon hızı katı madde özellikleri, eksen boyunca taban kayma gerilmesi, borunun gömülmesi ile  $\alpha$  ve  $\beta$  olmak üzere deneylerden bulunan iki katsayı dikkate alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.67- Akımın boruya göre atak açısı, a) akıntı boruya dik, b) akıntı boruya paralel.

Boruya kiriş uzunluğu boyunca akım dik yaklaştığında borunun her iki ucundaki akım koşulları tamamıyla aynı olduğu halde, akımın belli bir atak açısıyla gelmesi halinde

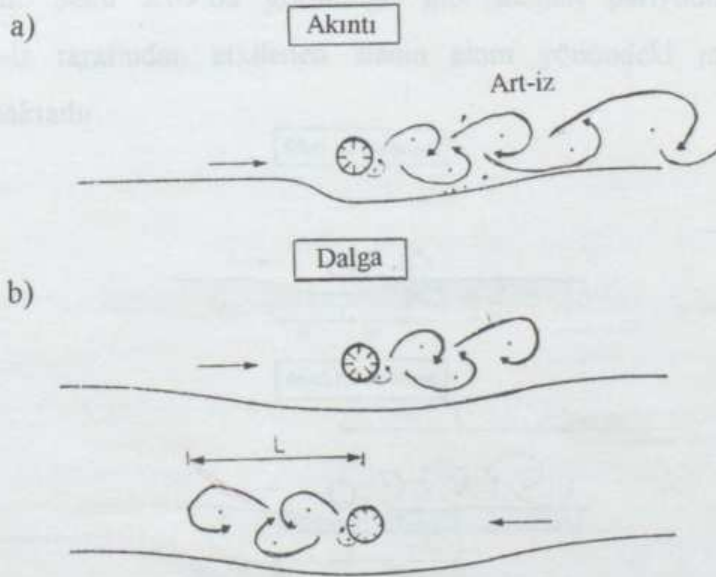


her iki uçtaki akım şartları tamamıyla farklı olmaktadır. Akımın dik açıdan farklı bir açı ile gelmesi durumunda oyulma çukurunun bir ucu dolarken diğer ucu erozyona devam ettiğinden, kiriş uzunluğu yer değiştirmektedir. Akıntının boruya paralel olması durumunda boru boyunca taşınan katı madde oyulma çukurunun menbasında toplanırken, mansabından uzaklaştırıldığı Şekil 2.67b'de gösterildiği gibi tahmin edilmektedir. Aynı zamanda mesnet yakınlarında sürtünmeden dolayı meydana gelen erozyon, akımın atak açısından etkilenmektedir.

Araştırmacılar, sadece dalga veya akıntının birlikte olması durumunda geliştirmiş oldukları bu modelin direk olarak uygulanamayacağını belirtmişlerdir.

#### 2.2.2.2 Dalga ve/veya gelgit etkisinde yerel oyulmanın incelenmesi

Bu bölümde rüzgar dalgaları veya tedricen değişen gel-git akıntısı gibi iki yönlü kararsız akımın neden olduğu boru hatları etrafındaki yerel oyulma incelenmiştir. Kararlı akım hali ile arasındaki en önemli fark, kararlı akım halinde borunun mansabında oluşan art-iz sisteminin bu durumda boru hattının her iki tarafında da oluşmasıdır. Burada boru hattının mansabında oldukça yumuşak bir eğimin oluşmasına neden olan bu kuvvetli art-iz erozyonu kararsız akım halinde borunun her iki tarafında da meydana gelmektedir (Şekil 2.68).



Şekil 2.68- Art-iz etkisi; a) akıntı, b) dalga, (Sümer and Fredsøe, 1990).

Salınlı ortamda art-iz şeklinin oluşumu ve etki mesafesi Keulegan-Carpenter sayısı tarafından kontrol edilmektedir.

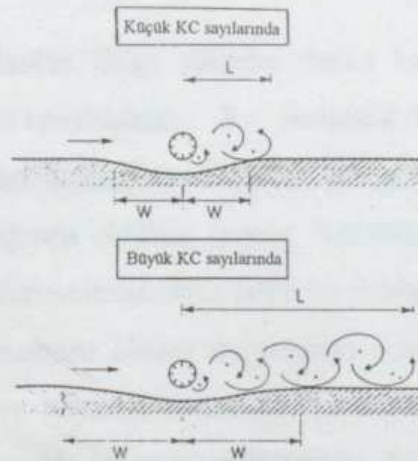
$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (2.25)$$

burada  $U_m$  yörüngesel hızın yatay bileşeninin maksimum değeri,  $T$  dalga periyodu ve  $D$  silindir çapıdır.  $KC$  sayısının çok küçük değerleri için ( $<5$ ) silindirin mansabında art-iz bölgesi oluşmadığı belirlenmiştir. Daha büyük  $KC$  sayılarında silindirin mansabında bir vorteks sokağı oluşmaktadır. Bu sokağın uzunluğu  $KC$  sayısının artması ile lineer olarak artmaktadır.

$$\Delta L/D = 0.3KC \quad (2.26)$$

Burada,  $\Delta L$  akımın bir yarım periyodunda art-iz bölgesinin etkilediği alandır. (2.26) denkleminin Jensen et al. (1989) tarafından yapılan akım görünürlüğü deneyine dayanmakla birlikte, teorik benzeşim ile de oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Borunun mansap tarafında art-iz bölgesinden etkilenen tabanın uzunluğu  $KC$  sayısına bağlıdır. Şekil 2.69'da görüldüğü gibi akımın periyodunun bir yarısında mansaptaki art-iz tarafından etkilenen alanın akım yönündeki mesafesi  $KC$  sayısı büyüdükçe artmaktadır.



Şekil 2.69- Akımın bir yarım periyoduna karşılık gelen art-iz'in akım yönündeki gelişimi (Sümer and Fredsøe, 1990).

Akım art-iz bölgesinde tabanı daha kuvvetli bir şekilde erozyona uğrattığı için artan KC sayısı ile borunun her iki tarafında oyulma çukurunda daha yumuşak eğimler elde edilmektedir.

Oyulma çukurunun her iki tarafındaki eğimlerin gittikçe yumuşak bir hal alması ile borunun altındaki akım bölgesi dış akımlara karşı daha fazla maruz kalacağından borunun altındaki akım hızı artacak ve daha fazla oyulmaya neden olacaktır. Bunların hepsi oyulma derinliğinin KC sayısı ile doğru orantılı bir şekilde arttığını göstermektedir. KC sayısının büyük değerleri için borunun mansabındaki art-iz bölgesinde büyük boyutlu vortekslerin sonlu yaşam süreleri dikkate alındığında, denge oyulma derinliğinin sabit bir değere yaklaşması beklenmektedir. Deneyler art-iz bölgesindeki sistematik akım yapısının borunun mansabından  $\sim 100D$  kadar mesafede belirlendiğini göstermiştir (Jensen 1987, Antonia et al., 1987). 2a (burada a; salınımlı hareketin genliğidir) yaklaşık olarak  $100D$  alındığında buna karşılık gelen KC sayısı 300 olarak bulunmuştur. Bundan dolayı KC sayısının 300'den daha büyük değerleri için boyutsuz  $S/D$  değerinin pratikte sabit kaldığı kabul edilmektedir. Rüzgar dalgasına maruz denizaltı boru hatları için KC sayısı 80'in altında olmasına rağmen KC sayısının daha büyük değerleri, oyulma mekanizmasının tariflenmesinde ve gel-git akımının temsil edilmesinde faydalı olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

#### **Bijker and Leeuwestein (1984):**

Deniz altı boru hatlarının dalga etkisine maruz kalmaları durumunda etrafında meydana gelen oyulmayı araştırmışlardır. Bu durumda boru hatları yüzey dalgaları tarafından üretilen yörüngesel hızlara maruzdurlar. Bu yörüngesel hızların süresi akıntı etkisi süresi ile karşılaştırıldığında oldukça kısadır. Yörüngesel hızların yönleri periyodik olarak değiştiğinden, akıntı durumundan daha farklı bir yaklaşım gerektirmektedir.

Salınımlı akımın sözkonusu olması durumunda oyulma işleminin üç ana konusu vardır. Bunlar; taban ve boru boyunca sürtünme, borunun altında ve deniz tabanındaki hızların büyüklüğü ve katı madde taşıma kapasitesidir. Bu üç fiziksel parametre sırayla



birbirlerine bağlıdır. Denge oyulma derinliğinin belirlenmesi araştırmacıların tarif ettiği gibi şöyle gelişmektedir.

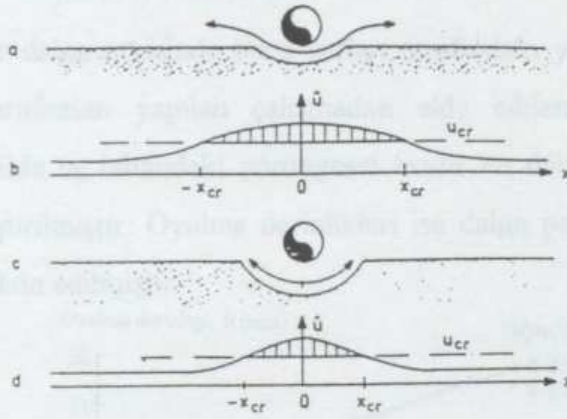
Öncelikle boru ve tabanda meydana gelen sürtünme etkisi türbülanslı akım yapısındaki momentum alışverişi nedeniyle dolaylı sınır tabakasından akımın içine doğru taşınmaktadır. Ancak salınımlı akımda sınır tabakası tamamıyla gelişemediğinden sınır tabakasının akıma etkisi salınım periyodu ile sınırlandırılmaktadır.

Salınımlı akım periyodunun küçük olması halinde, borunun altındaki ve deniz tabanındaki hızlar sürtünmeden az etkilenmektedir. Potansiyel akım teorisinde olduğu gibi sürtünmesiz bir boru hattı çevresindeki akım için verilen nümerik modeller salınımlı bir akımda borunun altındaki hızlar için olumlu sonuçlar vermiştir. Bu hızların rölatif büyüklüğü tek yönlü akım için olanlardan daha büyüktür.

Salınımlı akımdan dolayı sinüzoidal olmayan dalgalar ve taban dalgacıkları gibi ikincil etkiler ihmal edildiğinde net katı madde taşınımı  $q_{so}$  ve  $q_s$  sıfır olabilecektir. Bununla birlikte hareketli bir tabanda boru hatları ile yapılan model deneyleri salınımlı bir akımda boruya yakın vorteks oluşumunun ve boru yakınındaki taban dalgacıklarının borunun çevresindeki yerel katı madde taşınımına katkıda bulunduklarını göstermiştir. (Klein Breteler, 1982). Katı madde hareketinin etkin olduğu durumlarda, borunun altındaki taşınım  $q_s$ , borunun altındaki hıza,  $u_p$ , ve dalga periyoduna,  $T$ , bağlıdır.

Dalga kanalında yapılan deneyler salınımlı akımdaki oyulma derinliğinin sadece akıntı etkisi halinde meydana gelenle karşılaştırıldığında daha az olduğunu göstermiştir. Oyulma derinliğinin dalga yüksekliği,  $H$ , ve dalga periyoduna,  $T$ , bağlı  $u_b$  yörüngesel hızı ile arttığı görülmüştür. Tabandaki taşınım dikkate alındığında, denge oyulma derinliğine neden olan oyulma mekanizması şu şekilde açıklanmaktadır. Boru hattının etki alanı dışında ve şematikleştirilmiş sinüzoidal bir dalga altında ve hemen taban üzerinde yörüngesel hareketin maksimum hızı  $u_b$  ve yörüngesel deplasmanı ise  $A$  dir. Boru hattının altında ise yörüngesel hareketin maksimum hızı  $u_p$  ve yörüngesel deplasmanı ise  $A_p$  dir. Hızın artış değeri,  $u_p/u_b$ , boru çapına,  $D$ , dalga parametrelerine ve borunun konfigürasyonuna bağlı olarak 1 ile 3 değeri arasında değişmektedir ( Klein Breteler 1982, Leeuwestein 1983). Borunun altındaki yörüngesel hareket nedeni ile katı madde oyulma çukuru boyunca ileri geri hareket etmektedir. Borunun merkezinden artan  $x$  mesafesi ile

hızın şiddeti azaldığından belli bir mesafe sonra hızın şiddeti  $u(x)$  artık kritik değeri aşmamaktadır. Bu kritik hız katı madde hareketine neden olan minimum hız olup katı madde özelliklerine bağlıdır. Eğer borunun merkezinden ölçülen  $x_{kr}$  mesafesi  $u(x)=u_{kr}$  şartından elde edilen mesafe ise,  $A_p > x_{kr}$  olduğundan taban malzemesinin oyulma çukurundan erozyonu devam etmektedir. Sadece oyulma derinliği  $A_p \leq x_{kr}$  olacak şekilde arttığı zaman, katı madde oyulma çukurundan uzaklaşacağına boruya doğru taşındığından erozyon durmaktadır (Şekil 2.70).



Şekil 2.70- Dalgalara maruz boru hatları etrafındaki oyulma.

Aynı zamanda borunun etki alanının dışında, taban hızı  $u_b$ 'nin kritik hızı,  $u_{kr}$ , periyodik olarak aştığı durumda, bir dalga periyodunun belirli anlarında oyulma çukuruna doğru katı madde taşınımı olmaktadır. Yörüngesel hareketin boru tarafından rahatsız edilmediği  $A_p$  değerinin  $x_{kr}$  değerini yeterince aştığı mesafeye katı maddenin taşınması halinde oyulma derinliğinin denge durumuna ulaşmakta olduğu belirtilmiştir.

Araştırmacılar dalga etkisine maruz oyulma derinliğinin, akıntı durumunun aksine boru çapından daha az etkilenmekte olduğunu belirtmişlerdir. Deneyler esnasında boru hattı çevresinde sadece yerel taban hareketi gözlenmiştir. Oysa oyulmanın gelişiminde borunun altındaki yörüngesel mesafe önemli bir parametre olduğundan, oyulma derinliği için verilen ampirik fonksiyon, rahatsız edilmemiş tabandaki salınımlı hızın şiddeti  $u_b$  ve dalga periyodunu,  $T$ , ihtiva etmektedir. Çünkü bu iki parametre  $A_p$ 'nin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Dane çapı  $d_{50}$ , katı madde taşınımının başlamasında önemli bir ölçüt olduğundan oyulma derinliği fonksiyonuna dahil edilmelidir.

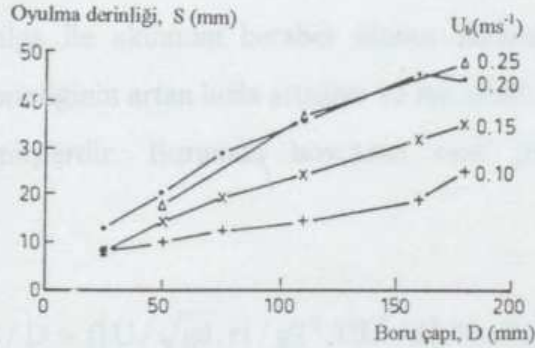


$$S=(D, u_b, T, d_{50}) \quad (2.27)$$

Boru hattının çevresinde vorteks oluşumuyla önemli miktarda askı malzemesinin meydana gelmesi halinde (2.27) denklemi gibi tek bir fonksiyonun oyulma derinliğinin hesaplanmasında yeterli olamayacağı belirtilmiştir.

#### Leeuwestein et al. (1985):

Araştırmacılar dalga etkisinde boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliği için Lucassen (1984) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen Şekil 2.71'i referans vermişlerdir. Bu şekilde  $u_b$  tabandaki yörüngesel hızdır ve dalga periyodu ise 1.5 ile 4 saniye arasında değiştirilmiştir. Oyulma derinlikleri ise dalga periyodu boyunca ortalama derinlikler şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 2.71- Dalga durumunda oyulma.

Prototip ölçümler 100 m uzunluğunda, 3 m genişliğinde bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Bu safhada önce tek yönlü akım etkisinde yerel oyulma derinlikleri belirlenmiş, daha sonra ters doğrultuda akım verilerek gel-git etkisi incelenmiştir. Araştırmanın bu safhasının ikinci aşamasında, değişen hızda akım etkisinde yerel oyulmanın gelişimi belirlenmiştir. Bu testler sırasında borunun sarkması ve kendi kendini gömmesi olayı gözlenerek, ölçek etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları şöyle özetlenmiştir:



i) Boru hattının sarkma miktarı boru çapının 1.4 katı olduğunda oyulma çukurunun yarı genişliği oyulma derinliğinin 8 katı mertebesine erişmekte ve art-iz bölgesinde erozyona neden olmaktadır.

ii) Sarkma miktarı boru çapının iki katı olduğunda bu genişlik oyulma derinliğinin 20 katına ulaşmaktadır.

iii) Fırtına şartlarında sırf dalga etkisinde yerel oyulma tek yönlü akım durumuna göre daha düşük mertebede oluşmaktadır. Akıntıya dalga etkisi süperpoze edildiğinde oyulmanın gelişmesini negatif etkilemektedir.

iv) İnce malzemeye sahip tabanlarda uzun süreli akıntı art-iz bölgesinde erozyon yaratmaktadır.

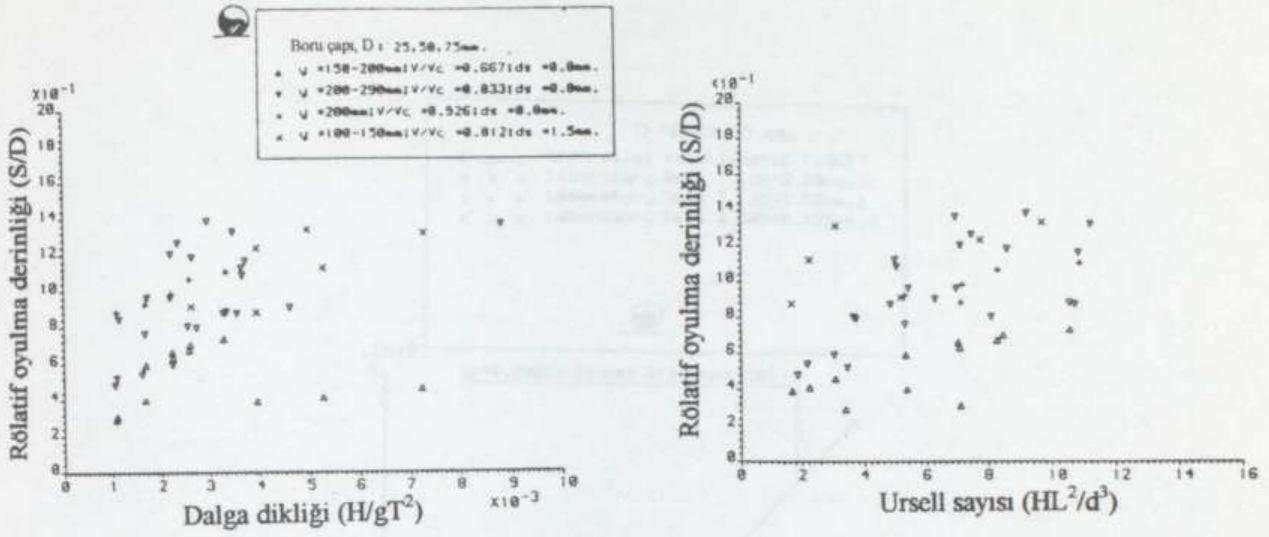
#### İbrahim and Nalluri (1986):

Araştırmacılar dalga ile akıntının beraber olması durumunda verilen bir dalga yüksekliği için oyulma derinliğinin artan hızla arttığını ve tek yönlü akım halinden çok daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Buradaki boyutsuz esas parametreler şu şekilde verilmiştir.

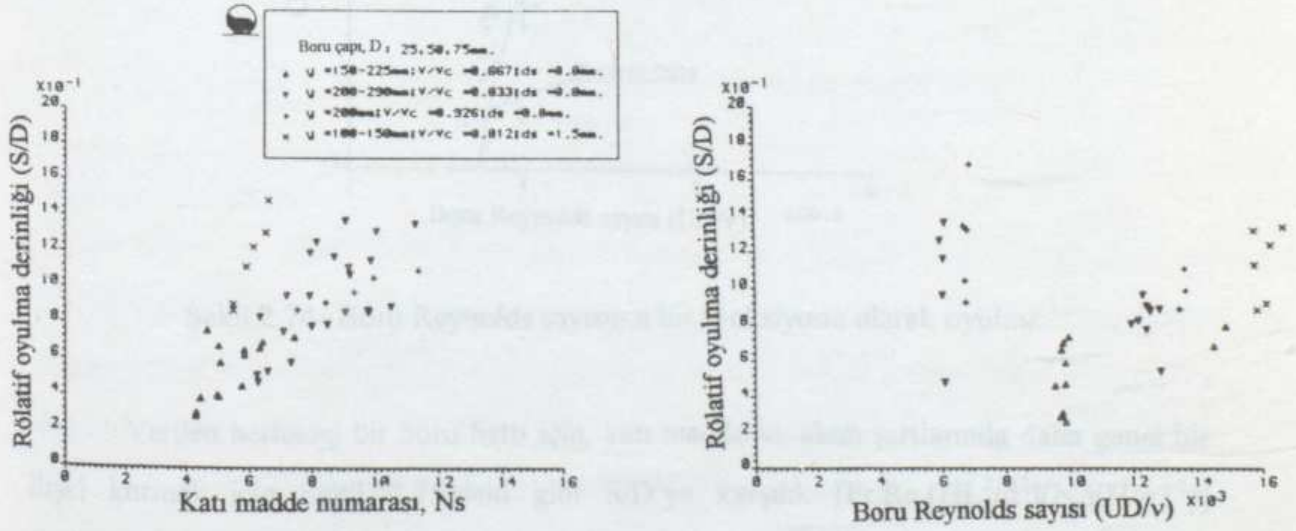
$$S/D = f[U/\sqrt{gd}, H/gT^2, HL^2/d^3, N_s, R_e] \quad (2.28)$$

burada  $H/gT^2$  dalganın rahatsız etme kabiliyetini gösteren dalga dikliği,  $U/\sqrt{gd}$  oyulma işleminde potansiyel ve kinetik enerjinin önemini dikkate alan katı maddenin hareketini karakterize eden Froude sayısıdır.  $HL^2/d^3$  dalga tarafından üretilip tabana iletilen enerji büyüklüğünü ifade eden Ursell sayısı,  $Re=(UD/v)$  boru Reynolds sayısı ve  $(N_s=U_{cw}^2/\Delta gd_s)$  katı madde sayısıdır ve burada  $U_{cw}=(U+(HL/2d)(1/T-U/L))$  akıntı ve dalganın bileşke hızıdır.

Denklem (2.28)'de verilen her boyutsuzun  $S/D$  üzerindeki etkisi Şekil 2.72 ve 2.73'de gösterilmektedir. Bu şekiller başlı başına her boyutsuzun birbirinden bağımsız olduğunu ortaya koymaktadır.

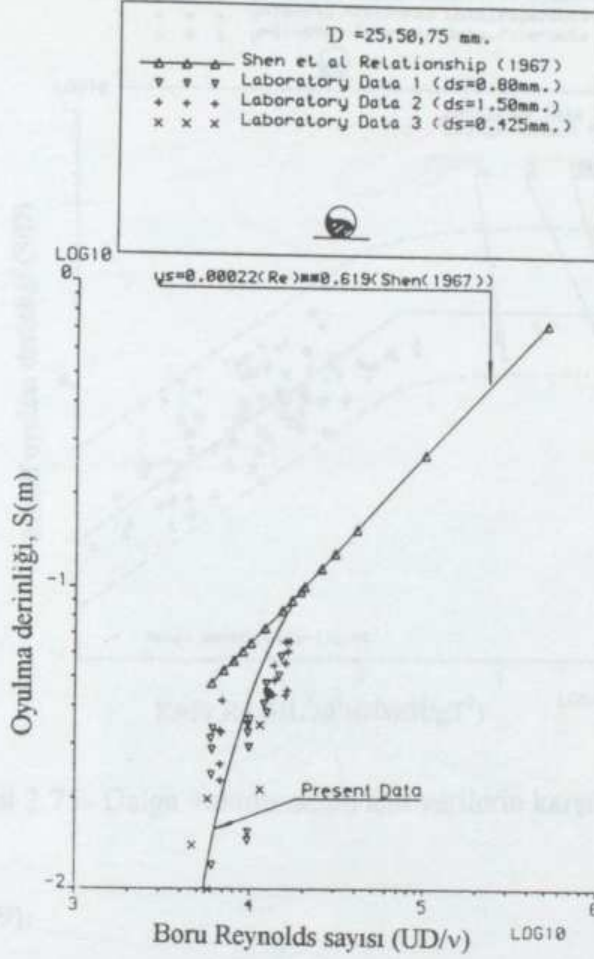


Şekil 2.72- Denge oyulma derinliğine dalga etkisi.



Şekil 2.73- Katı madde ve boru hattı etkisi.

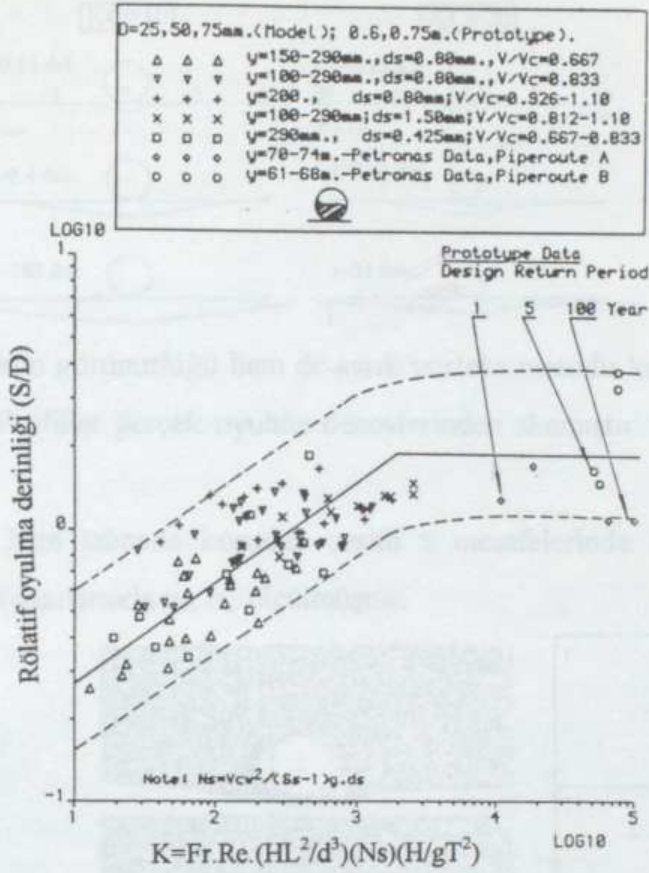
Şekil 2.74 Şekil 2.73b'deki aynı parametrenin log-log ölçeğinde çizilmiş ve Shen (1967)'in dataları ile karşılaştırılmış şeklidir. Bu grafik oyulma derinliği ile boru Reynolds sayısının temiz sudaki bağıntısını göstermektedir.



Şekil 2.74- Boru Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak oyulma.

Verilen herhangi bir boru hattı için, katı madde ve akım şartlarında daha genel bir ilişki kurmak için Şekil 2.75'deki gibi  $S/D$ 'ye karşılık  $[Fr.Re.(HL^2/d^3)(N_s)(H/gT^2)]$  fonksiyonu logaritmik ölçekte çizilmiştir. Bu şekil hem temiz su hem de hareketli taban şartı için geçerlidir. Şekil 2.75 oyulma derinliğinin katı madde karakteristiğine, akım ve dalga özelliklerine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca artan dalga yüksekliği ile oyulma derinliğinin arttığıda görülmüştür. Temiz su şartlarında verilen bir dane boyutu için farklı gömülme oranlarında benzer bir sonuca varılabileceği belirtilmiştir.

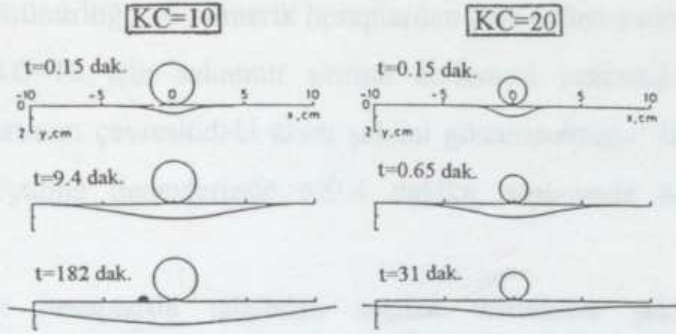




Şekil 2.75- Dalga +akıntı akımı için verilerin karşılaştırılması.

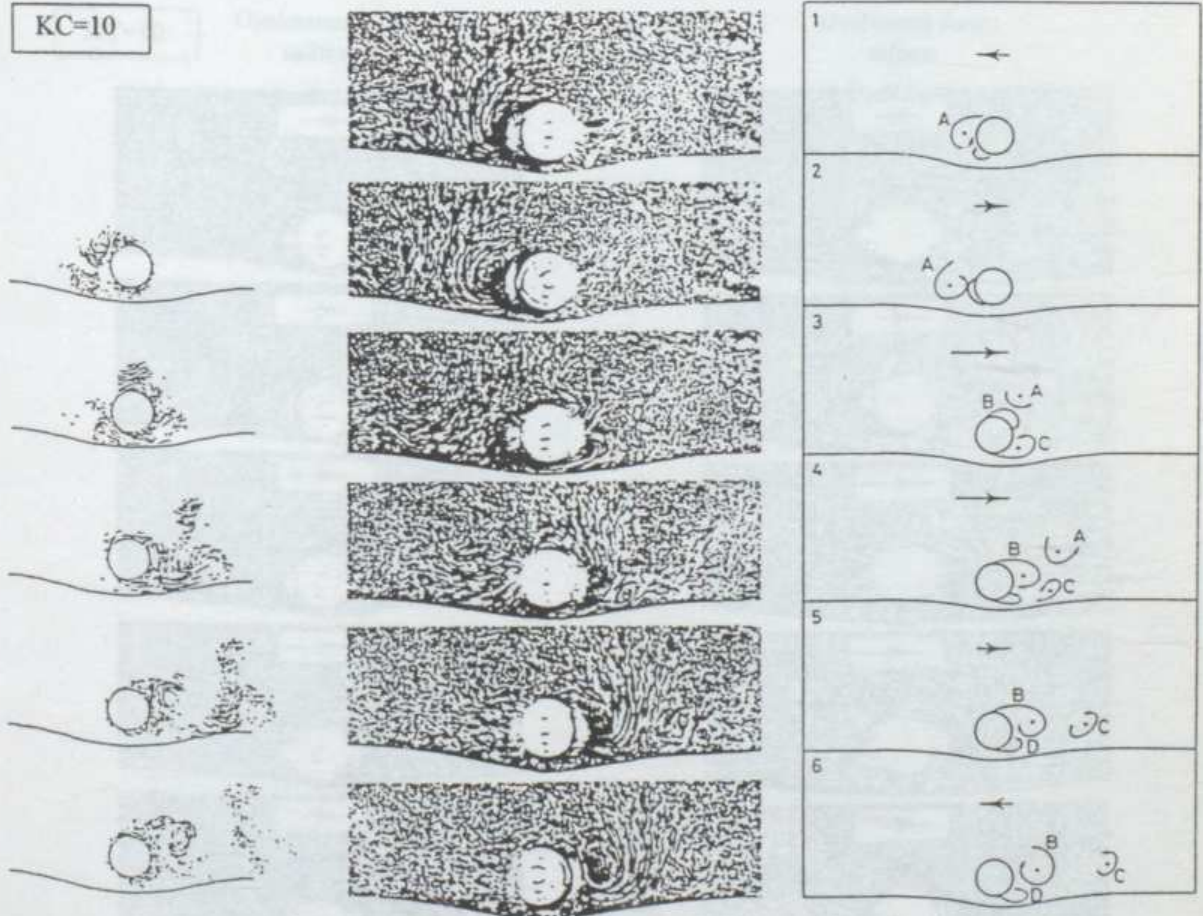
#### Jensen et al. (1989):

Öncelikle hareketli bir tabana yerleştirilmiş ve dalga etkisine maruz bir boru hattı etrafındaki akımı araştırmak için hem nümerik hem de deneysel çalışma yapmışlardır. Bu deneysel çalışmalarda oyulmuş taban modellerinin farklı safhalarının rijit cidarla temsil edilmesi ile akım görünürlüğü ve hız ölçümleri yapılmıştır. Akım görünürlüğü deneyleri üç farklı oyulma profili için yürütülmüştür. Şekil 2.76'da görülen bu üç oyulma profili gerçek bir oyulma deneyinden (Sümer and Fredsøe 1990) elde edilen değerlerdir. Bu üç oyulma profilinden ilki oyulma işleminin oldukça erken safhasını, ikincisi borunun altındaki oyulmanın hala gelişmekte olduğu safhayı ve üçüncüsü ise denge safhasını temsil etmektedir.



Şekil 2.76- Hem akım görünürlüğü hem de ayırık vorteks metodu kullanılarak elde edilmiş oyulma profilleri. Profiller gerçek oyulma deneylerinden alınmıştır. (Sümer and Fredsøe, 1990).

Akım hızı hem tabanda borudan çeşitli  $x$  mesafelerinde  $u_b$ , hem de borunun sırasıyla alt ve üst kenarlarında  $u_b$ ,  $u_a$  ölçülmüştür.

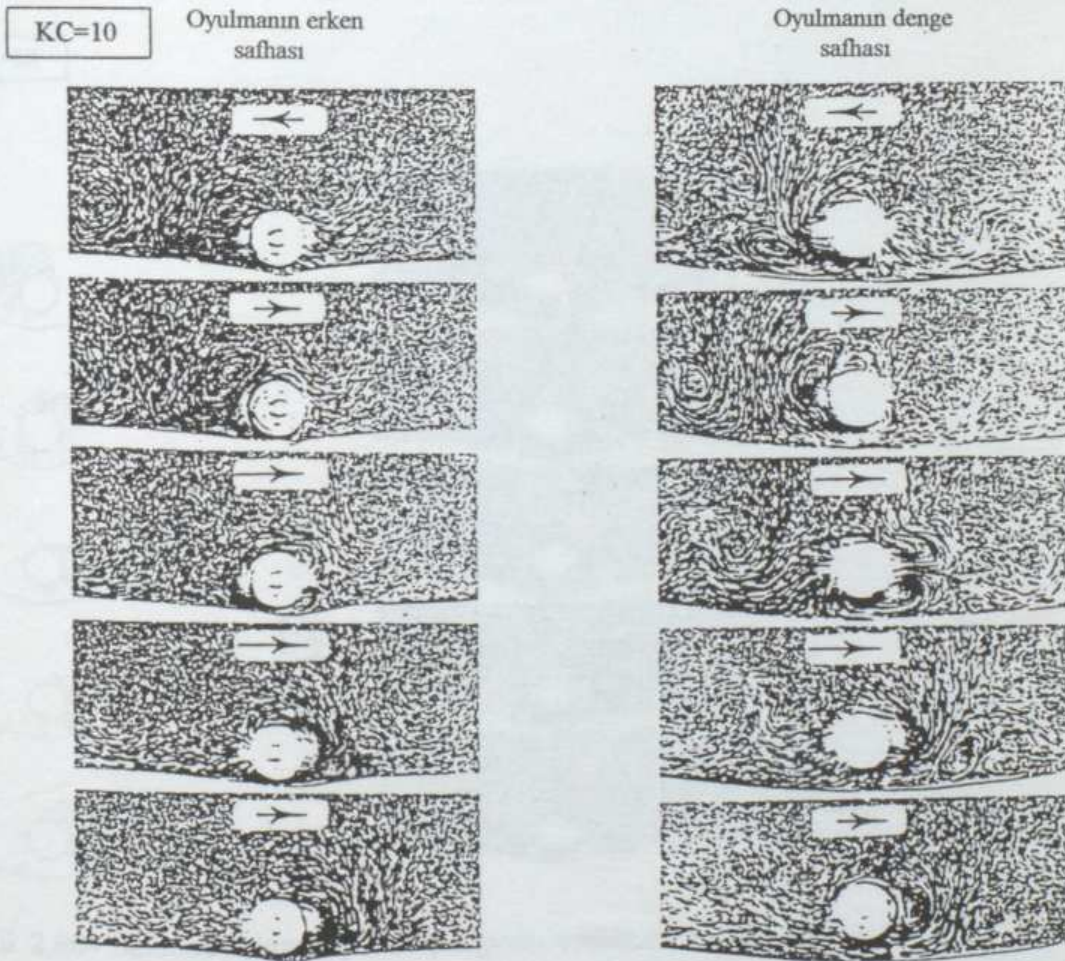


Şekil 2.77- Salınlı akımın bir yarım periyodu esnasındaki akım resimleri.  $t=9.4$  dakikadaki oyulma profili. Soldaki: ayırık vorteks modeli, ortadaki: Deneylerden, sağdaki: Bunlara karşılık gelen şemalar. Yatay oklar silindire göre akım yönünü gösterir.



Akım görünürlüğü ve nümerik hesaplardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 2.77  $KC=10$  için salınlımlı akımın ilerlemesi esnasında hareketin bir yarım periyodunda borunun çevresindeki akım şeklini göstermektedir. Buradaki oyulma profili daha önceki oyulma deneylerinde  $t=9.4$  dakika zamanında ölçülen durumu temsil etmektedir.

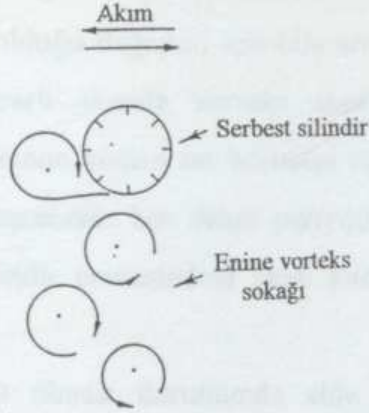
Nümerik hesaplarda tabandan saçılan vorteksler şekli basitleştirmek için gösterilmemiştir. Şekillerden görüldüğü gibi nümerik model ile deney sonuçları uyum içindedirler. Şekil 2.78 oyulma işleminin oldukça erken safhası ( $t=0.15$  dakika) ile denge safhasını ( $t=182$  dakika) göstermektedir. Şekil 2.77 ve 78'deki akım alanları oldukça benzerdirler. Bir safhadan diğerine vorteksin boyutu gelişmekle birlikte, bunların oluşması, gelişmesi ve etkileşimleri üç safhada da aynıdır. Şekil 2.77 ve 78'den görünen



Şekil 2.78- Salınlımlı akımın bir yarım periyodu için oyulmanın erken ve denge safhasını göstermektedir. Yatay oklar akımın yönünü silindire rölâtif olarak göstermektedir.

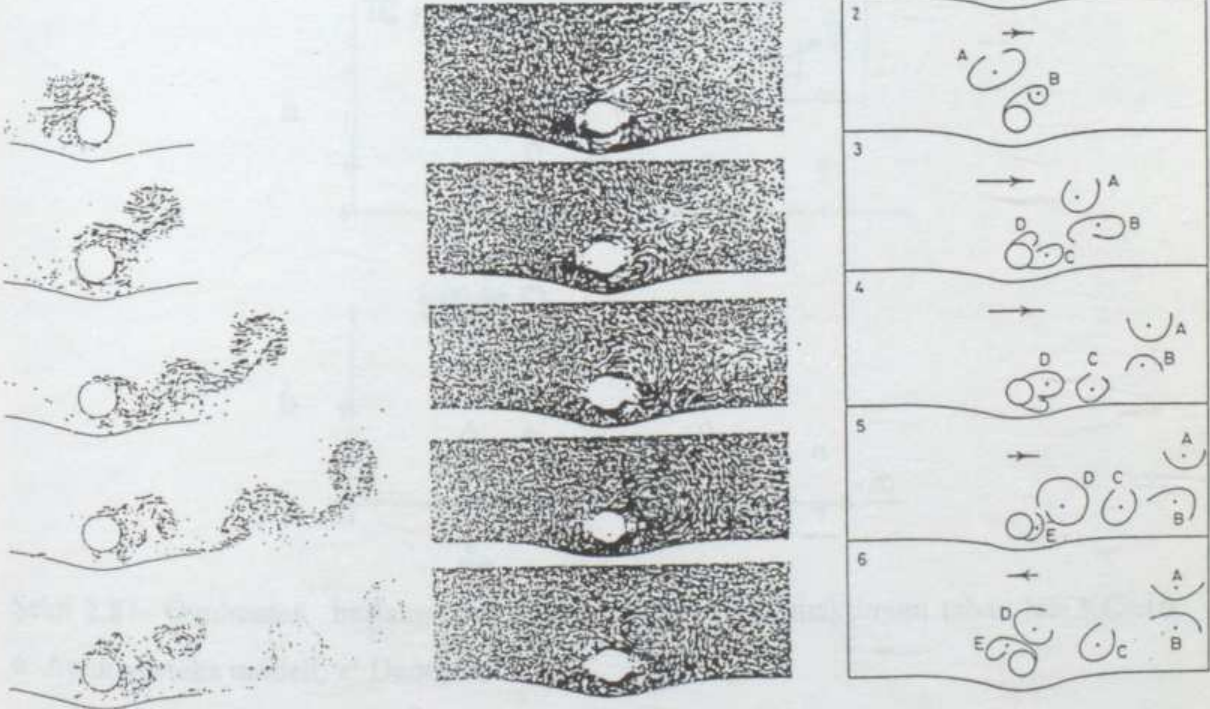


önemli bir gözlem  $KC$ 'nin 10 değeri için serbest silindir çevresinde Şekil 2.79'da gözlenen akıma dik vorteks sokağının bu durumda gözden kaybolduğudur. Bunun nedeni ise borunun deniz tabanına oldukça yakın olmasıdır.



Şekil 2.79- Serbest bir silindir için akıma dik vorteks sokağı  $7 < KC < 13$ .

$KC=20$

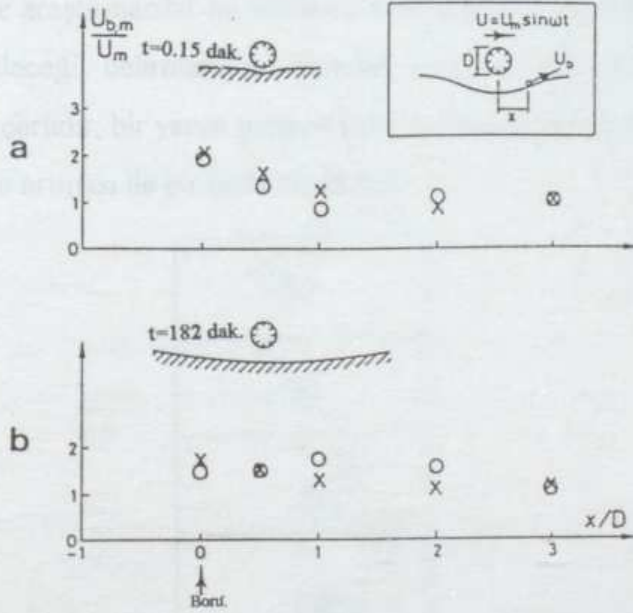


Şekil 2.80- Salınlımlı akımın yarım periyodu esnasındaki akım resimleri  $t=0.65$  dak. da oyulma profili. Soldaki: Ayrık vorteks modeli. Sağdaki: Şemalar. Yatay oklar silindire göre akım yönünü göstermektedir. Ortadaki: Deneyler,  $KC=20$ .

Şekil 2.78'den gözlenen diğer önemli husus ise vorteks saçılımlarının oyulma işleminin oldukça erken safhalarında mevcut olduğudur.

Hem akım görünürlüğü deneyleri hem de nümerik çalışma boru taban açıklık oranının 0.1 kadar küçük olduğu değerleri için bile vorteks saçılımının meydana geldiğini göstermiştir. Oysa ki kararlı akımda vorteks saçılımları ancak  $G/D=0.3$  değerinde oluşmaya başlamaktadır. Bunun nedeni ise borunun üzerindeki sınır tabakasının oldukça ince ve dalgalı ortamda hareketin her dalga periyodunun başlangıcında akım temelde potansiyel olduğu için, silindir çevresindeki akım kararlı akım halinden çok daha hızlı oluşmaktadır.

Şekil 2.80  $KC=20$  olması durumunda elde edilen sonuçları göstermektedir. Buradaki oyulma profili  $t=0.65$  dakikasındaki gerçek oyulmayı temsil etmektedir.  $KC=10$  durumundaki gibi diğer iki oyulma profili için elde edilen sonuçlar akım alanlarının oldukça benzer olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.81- Oyulmanın başlangıç ve denge safhasındaki maksimum taban hızı.  $KC=10$ .  
o: Aynık vorteks modeli, x: Deneyler.

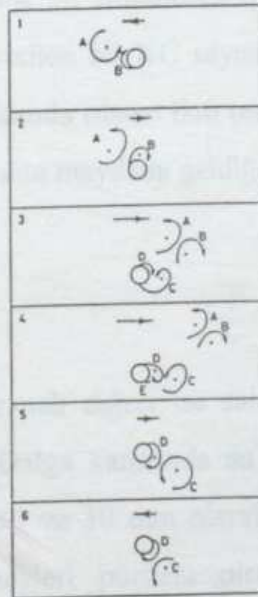
$KC=20$  değerinde de  $KC=10$  halindeki gibi vorteks saçılımları oyulma işleminin oldukça erken safhalarında mevcuttur. Bununla birlikte,  $KC$  sayısının artması ile küçük boru-taban açıklığı için vorteks saçılımları daha az görünür hale gelmektedir.



Şekil 2.82 serbest bir silindir için elde edilen akım yapısını göstermektedir. Şekil 2.80 ve 82 karşılaştırıldığında, tabana yakın yerleştirilen silindir durumunda akımın bir yarım periyodunda vorteks saçılımının bir fazla olduğu görülmektedir. Bu aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

Şekil 2.80'deki tabana yakın boru durumuna bakıldığında D vorteksi E vorteksinden dolayı saçılmaktadır. Oysa Şekil 2.82'de tabandan yeterince uzaktaki boru durumuna bakıldığında vorteksin saçılmasının başlıca nedeni olan cidar burada mevcut değildir. Bundan dolayı D vorteksi ve E vorteksi arasında etkileşim meydana gelmediğinden ilave bir vorteks saçılımı oluşmamaktadır.

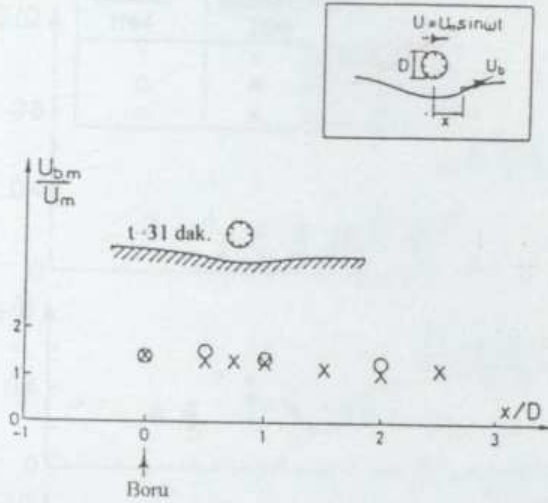
Bu çalışma sadece KC sayısının 10 ve 20 değerleri için gerçekleştirilmiş olsa da, daha büyük KC sayıları için boru hattı çevresindeki akım şekli hakkında bu deneylerden yola çıkarak bazı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlardan KC sayısının artmasıyla akım rejimi değiştiğinden dalga periyodunun bir yarısında saçılan vorteks sayısı bir fazla olmaktadır. Böylece araştırmacılar bu sonucun tabana yakın yerleştirilmiş silindir için aynı şekilde uygulanabileceği belirtilmiştir. Bundan dolayı Şekil 2.80 daha büyük KC rejimlerinde hala geçerlidir, bir yarım periyod için vorteks saçılım sayısı her defasında akım rejiminin bir kademe artması ile bir fazla olmaktadır



Şekil 2.82- Cidardan uzak bir silindir için bir yarım periyoddaki akım resimleri. Yatay oklar silindire göre akım yönünü gösterir.



Araştırmacılar ayrıca borunun altındaki taban hızlarını akım doğrultusu boyunca ölçmüşlerdir. Oyulma işleminin erken safhasında oldukça büyük hızlar ölçülmesine rağmen denge safhasında taban boyunca aynı katı madde taşınım miktarına neden olacak oldukça üniform ve daha küçük hızlar ölçülmüştür (Şekil 83a,b).



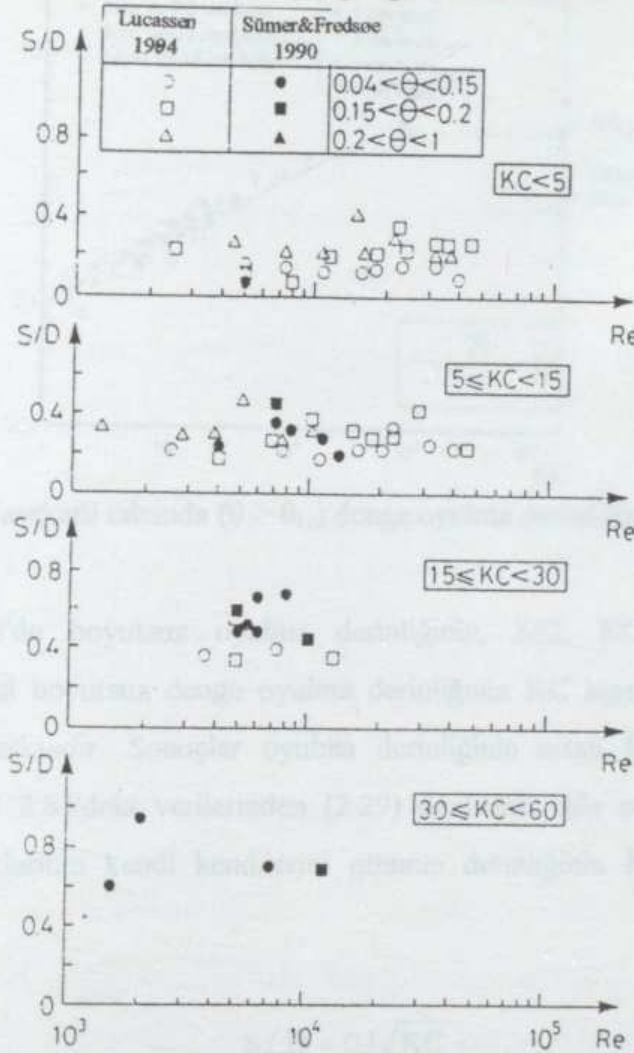
Şekil 2.83- Oyulmanın denge safhasındaki maksimum taban hızı.  $KC=20$ . o: Ayrık vorteks modeli, x: Deneyler.

Bu sonuçlara dayanarak araştırmacılar; dalga etkisine maruz bir boru hattı çevresindeki akım şeklinin serbest bir silindirden oldukça farklı olduğunu, akım şeklinin  $KC$  sayısı ile değiştiğini fakat verilen bir  $KC$  sayısında farklı oyulma profilleri için akım şeklinin değişmediğini, kararlı akımda olanın tam tersine boru-taban açıklığının çok küçük değerlerinde bile vorteks saçılımının meydana geldiği sonucuna varmışlardır.

#### Sümer and Fredsøe (1990):

Deneylerini biri dalga kanalı diğeri ise salınlı U tüpü olmak üzere iki farklı ortamda gerçekleştirmişlerdir. Dalga kanalında su yüksekliğini 40 cm de sabit tutmak şartıyla boru çaplarını 10, 20, 30 ve 50 mm olarak değiştirmişlerdir. Yapılan deneylerin sadece bir kaçında boru yüzeyleri pürüzlü olmasına rağmen diğerlerinin hepsinde hidrolikçe cilalı boru kullanılmıştır.

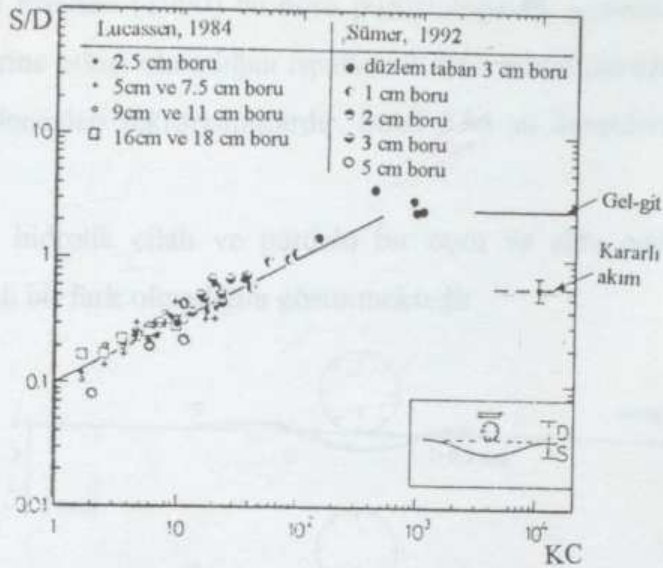
Araştırmacılar Shields parametresini,  $\theta$ , 0.03'den 0.2'ye, KC sayısını 2'den 1000'e ve Reynolds sayısını ise  $1.4 \times 10^3$ 'den  $1.3 \times 10^4$ 'e değiştirerek boru pozisyonunun oyulma derinliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ancak burada KC'nin 150'den 1054'e kadar olan büyük değerleri pratik olarak daha çok gel-git etkisini tasvir etmektedir



Şekil 2.84- Dalgalı ortamda oyulma derinliğinin Re sayısı ve Shields parametresi ile değişimi.

Şekil 2.84 boyutsuz oyulma derinliğinin,  $S/D$ , dalgalı ortamda Reynolds sayısı ve Shields parametresi ile değişimini göstermektedir. Şekil 2.84'den görüldüğü gibi Reynolds sayısının  $10^3$  ve  $10^5$  değerleri arasında oyulma derinliği belirgin bir değişiklik göstermemektedir. Ancak kararlı akım durumundaki gibi geçiş bölgesindeki Reynolds sayısı için ( $2 \sim 3 \times 10^5$ ) oyulma derinliğinde küçük bir azalış beklenmektedir. Aynı zamanda

Şekil 2.84'den oyulma derinliğinin Shields parametresi,  $\theta$ , ile değişiminin oldukça zayıf olduğu da görülmektedir.



Şekil 2.85- Hareketli tabanda ( $\theta > \theta_{kr}$ ) denge oyulma derinliğine karşı KC sayısı.

Şekil 2.85'de boyutsuz oyulma derinliğinin,  $S/D$ , KC sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Şekil boyutsuz denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. Sonuçlar oyulma derinliğinin artan KC sayısı ile arttığını göstermiştir. Şekil 2.85'deki verilerinden (2.29) denklemi elde edilmiştir. Bu denklem denizaltı boru hatlarının kendi kendilerini gömme derinliğinin KC sayısı ile arttığını göstermektedir.

$$S/D = 0.1\sqrt{KC} \quad (2.29)$$

Araştırmacılar yukarıda açıklandığı gibi Reynolds sayısının ve Shields parametresinin oyulma derinliği üzerine etkilerini hidrolikçe pürüzsüz borular için detaylı olarak tartışarak bu iki parametrenin oyulma üzerine etkilerinin oldukça zayıf olduğunu göstermişlerdir.

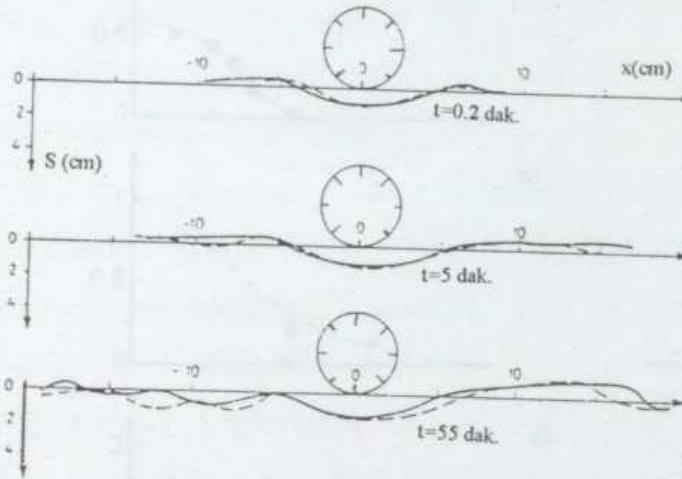
Ancak prototip şartlarında boru hattının yüzeyi deniz canlıları ile kaplanarak tamamıyla pürüzlü cidar gibi davranmaktadır. Bu pürüzlülük miktarı  $k/D > 3 \times 10^{-3}$  şartını



sağlamaktadır. Bu durumda Reynolds sayısının vorteks saçılımları üzerine etkisinin kaybolduğunu Achenbach and Heinecke (1981) gözlemlemişlerdir.

Sümer and Fredsøe (1990) bu boru pürüzlülüğünün genellikle sınır tabakasından ayrılma işlemi üzerine etkisi olmadığını ispatlamak için rölatif pürüzlülüğü  $k/D=0.1$  olan bir boru ile bazı deneyleri tekrarlamışlardır. Şekil 2.86 bu deneylerden birinin sonucunu göstermektedir.

Şekil 2.86 hidrolik cilalı ve pürüzlü bir boru ile elde edilen oyulma profilleri arasında pek önemli bir fark olmadığını göstermektedir.

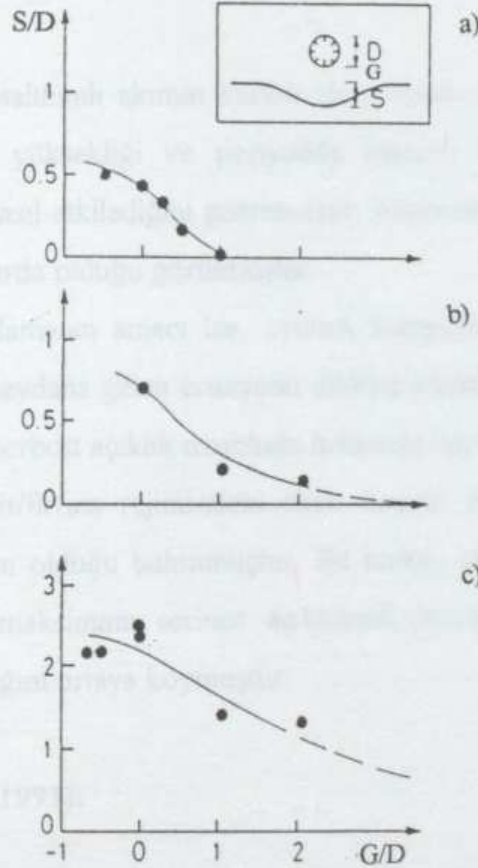


Şekil 2.86- Oyulma profillerinin karşılaştırılması; kesiksiz eğri: pürüzsüz boru; kesikli eğri: pürüzlü boru,  $k/D=0.1$ ,  $KC=7$ ,  $\theta=0.11$ .

Diğer bir ölçek etkisi ise deneylerin yürütüldüğü dalga kanalında dalgaların ürettiği kum dalgacıklarının varlığının etkisidir. Bu kum dalgacıkları  $\theta$  değerinin 0.8 ile 1.0'den küçük olduğu durumlarda mevcuttur. Burada Shields parametresi hesaplanırken denklem 2.8'de  $U_*$  yerine  $U_{*m} = \sqrt{f_w/2U_m}$ ;  $U_m$ : maksimum dış akım hızı Lucassen (1984)'in çalışması ile Sümer and Fredsøe (1990)'nun çalışmaları karşılaştırıldığında aynı  $KC$  sayısı farklı boru çapları için tamamıyla aynı rölatif oyulma derinliği bulunmuştur (Şekil 2.84). Bu her iki halde de kum dalgacıklarının boyutları boru çapı ile bağıntılı olarak önemli ölçüde değiştiği bulunmuştur. Bu kum dalgacıklarının etkisinin oyulma işleminde önemli olmadığını onaylamaktadır. Bu kum dalgacıklarının etkisinin küçük olduğunu gösteren diğer bir neden ise, muhtemelen borunun akım alanını rahatsız ederek kum dalgacıklarının

oluşumunu etkilemesiyle boru hattı civarında kum dalgacıklarının meydana gelmeyişi olarak izah edilmiştir.

Boru hattı ender hallerde tabanla sürekli temastadır. Kimi zaman zemindeki süreksizlikten dolayı zeminin üzerinde, kimi zaman da zemine doğru sarkmış olabilir. Araştırmacılar bu konuyu dikkate alarak farklı KC sayıları için S/D oranlarına karşı G/D oranlarını çizerek aşağıdaki şu yorumları yapmışlardır (Şekil 2.87).



Şekil 2.87- Denge oyulma derinliği üzerine açıklık oranının etkisi. a)  $KC=11$ ,  $\theta=0.19$ ; b)  $KC=27$ ,  $\theta=0.035$ ; c)  $KC=990$ ,  $\theta=2.4$ .

Şekil 2.87'den görüldüğü gibi boru ile taban arasındaki açıklık küçüldükçe boru hattının denge oyulma derinliği üzerine etkisi artmaktadır.

Ancak  $KC$  sayısının ortalama değerleri için, boru hattının  $G/D=1.0$  olacak şekilde yerleştirildiğinde oyulmanın olmaması ilginçtir. Bununla birlikte artan  $KC$  değerleri için  $G/D \approx 3$  olduğu daha büyük açıklık oranlarında bile oyulmanın olabileceği belirtilmiştir. Bu  $KC$  sayısının artmasıyla art-iz bölgesinin büyümesinin bir sonucu olarak açıklanmıştır.

Burada denge oyulma derinliğinin belirlenmesinde boru-taban açıklık oranının önemli bir etki olduğu, boru hattının tabandan bir kaç boru çapı mesafede olması halinde bile oyulmanın olabileceğini ancak bu etkinin KC sayısının artan değerleri ile daha belirgin olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

#### **Bernetti et al. (1990):**

Araştırmacılar salınlı akımın kararlı akım üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Dikkate alınan dalga yüksekliği ve periyotta zamana bağlı akım alanının, oyulma çukurunun gelişimini nasıl etkilediğini göstermiştir. Minimum oyulma derinliğinin yaklaşık 10 sn periyodlu dalgalarda olduğu görülmüştür.

Yapılan uygulamanın amacı ise, oyulma bölgesinin eksenel gelişimini ve boru hattının mesnetlerde meydana gelen erozyonu dikkate alarak serbest açıklığın oluşumu ve olabilecek maksimum serbest açıklık uzunluğu hakkında bazı bilgiler elde etmek olmuştur.

Kuvvetli gel-git/fırtına rejimindeki akım koşulu ile oyulma bölgesinin eksenel gelişim hızın 0.25 m/sn olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, eğilme rijitliği orta veya küçük olan boru hatlarının maksimum serbest açıklığının, ancak 3 ile 6 günlük bir fırtına periyodunda oluşabildiğini ortaya koymuştur.

#### **Sümer and Fredsøe (1991):**

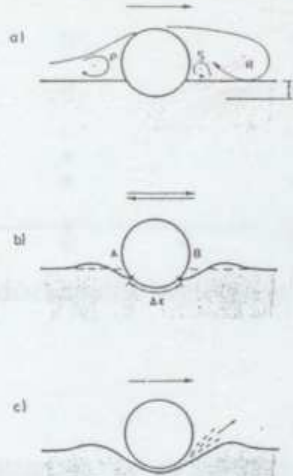
Kısmi olarak deniz tabanına gömülü ve dalga etkisine maruz boru hattı altındaki oyulmanın başlamasını araştırmışlardır. Bu araştırma esnasında iki tip deney gerçekleştirmişlerdir. Bunlardan biri salınlı bir akım ortamında tabana monte edilmiş bir boru hattı civarında taban kayma gerilmesi ölçümü, diğeri ise dalgalı ortamda gerçek oyulma deneyleridir.

Araştırmacılar deniz tabanına yerleştirilmiş bir boru hattı altında oyulmanın başlamasının iki safhadan oluştuğunu göstermişlerdir.

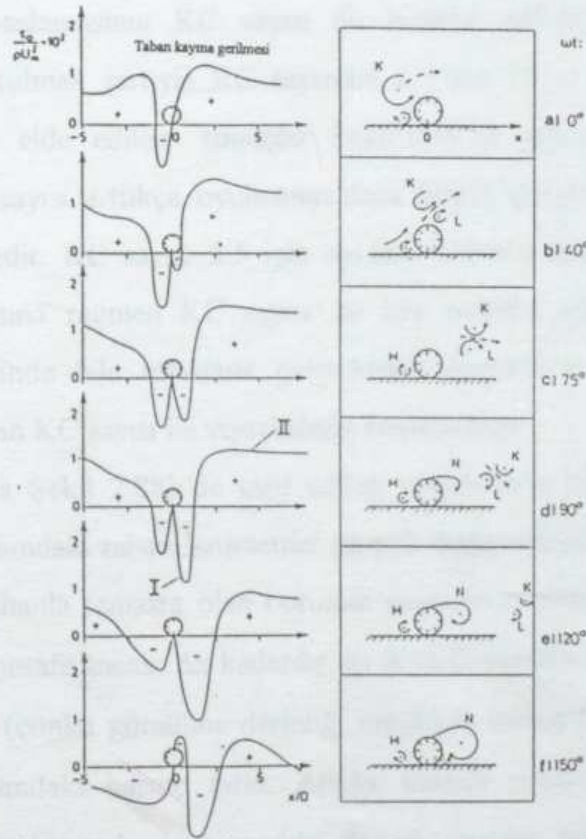
Şekil 2.88a'dan görüldüğü gibi ilk safhada borunun hemen mansabında ve menbasında ayrılan vortekslerin etkisinden dolayı tabanda oyulma işlemi meydana



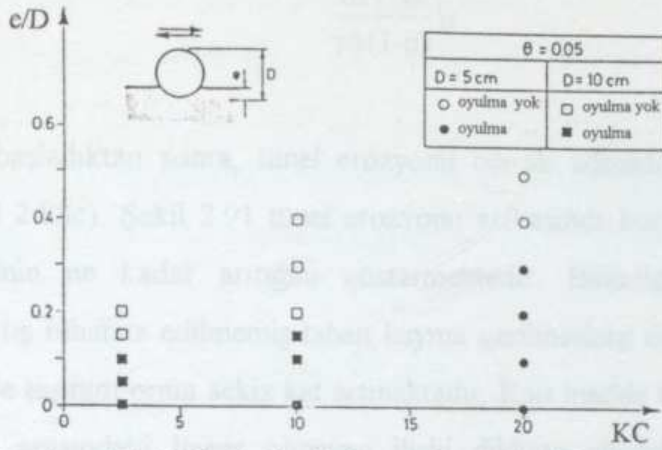
gelmektedir (P,R,S vorteksleri). Şekil 2.89 bu vortekslerin katı maddeyi hareket ettirebilecek kadar kuvvetli olduğunu göstermektedir. Şekil 2.89d açıkça bu vortekslerin neden olduğu taban kayma gerilmesinin rahatsız edilmemiş taban kayma gerilmesi kadar büyük olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.88- Boru hattının altında oyulmanın başlama mekanizması.



Şekil 2.89- Vorteks hareketi ile birlikte salınımlı akımın yarım periyodunda taban kayma gerilmesinin gelişimi. Boru tabana monte edilmiştir.  $KC=10$ .



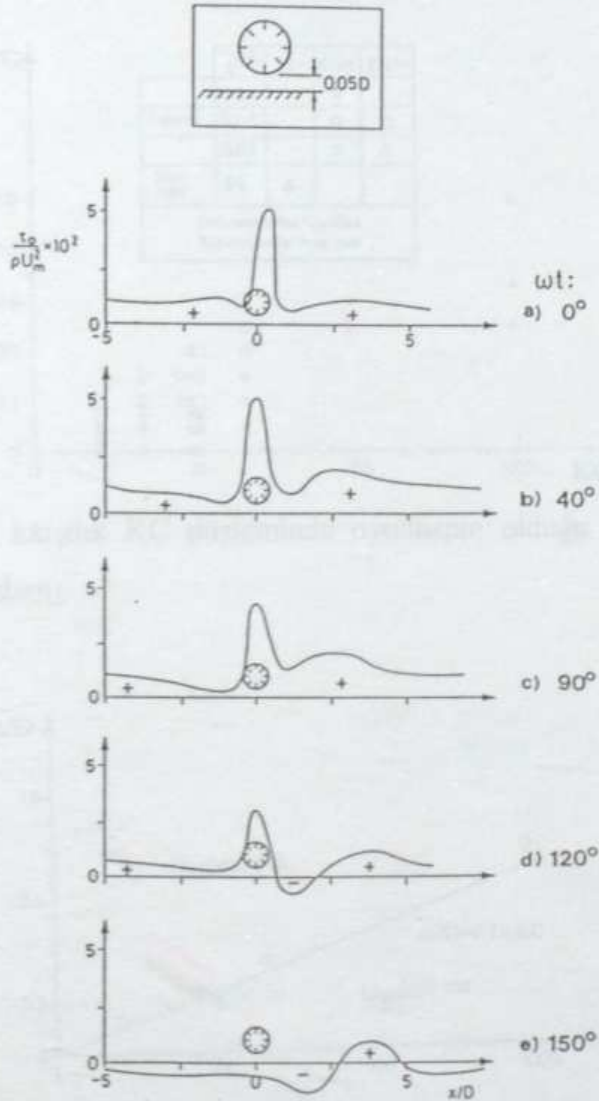
Şekil 2.90- e/D'ye karşılık KC düzleminde oyulmanın olduğu ve olmadığı bölgelerin grafiği (Hareketli taban).

KC sayısı oyulmanın oluşumuna ve gelişimine neden olan vorteksleri kontrol etmektedir. Oyulma işleminin başlamasında bu vortekslerin rolünün önemli olmasından dolayı oyulmanın başlamasının KC sayısı ile kontrol edildiği belirtilmiştir. Shields parametresi sabit tutulmak şartıyla KC sayısının 2.5'dan 20'ye kadar değiştirilmesi ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.90'da gösterilmiştir. Şekil 2.89'dan görüldüğü gibi KC sayısı arttıkça oyulmanın daha büyük gömülme derinliklerinde dahi başladığı görülmektedir. KC sayısı 2.5 için oyulma  $e/D=0.1$ 'den daha küçük gömülme derinliklerinde olmasına rağmen KC sayısı 20 için oyulma  $e/D=0.3$ 'den daha büyük gömülme derinliklerinde bile meydana gelmektedir (burada e gömülme derinliğidir). Bunun nedeni ise artan KC sayısı ile vortekslerin büyümesidir.

İkinci safhada Şekil 2.88b'de tarif edilen vortekslerin hareketlerinin bir sonucu olarak borunun yakınındaki taban batimetrisi az çok değişmektedir. Taban batimetrisinin bu değişimi ile a) tabanla temasta olan borunun çevresinde önemli bir miktarda azalma meydana gelirken bu mesafe ancak  $\Delta x$  kadardır, b) A ve B noktaları arasındaki basınç farkı,  $\Delta P = P_A - P_B$ , artmıştır (çünkü gömülme derinliği azaldıkça basınç farkı,  $\Delta P$  büyür). Sonuç olarak, çıkış noktasındaki basınç farkı,  $\Delta P / \Delta x$  önemli miktarda artmaktadır. Art-iz bölgesindeki çıkış noktasında katı madde danesi üzerine basınç gradyanı,  $\Delta P / \Delta x$ , tarafından uygulanan kuvvet katı maddenin sudaki ağırlığını aştığı zaman kritik şartlara ulaşılmaktadır. Bu durum aşağıdaki matematiksel formülle ifade edilmiştir.

$$\frac{\Delta P / \Delta x}{\gamma \Delta (1-p)} > 1 \quad (2.30)$$

Oyulma başladıktan sonra, tünel erozyonu olarak adlandırılan safha ile devam etmektedir.(Şekil 2.88c). Şekil 2.91 tünel erozyonu safhasında boru ile taban arasındaki kayma gerilmesinin ne kadar arttığını göstermektedir. Bilindiği gibi taban kayma gerilmesindeki artış rahatsız edilmemiş taban kayma gerilmesinin dört katı kadar olduğu zaman katı madde taşınım oranı sekiz kat artmaktadır. Katı madde taşınım oranı ile taban kayma gerilmesi arasındaki lineer olmayan ilişki dikkate alındığında tünel oyulması safhasında boru hattının altındaki tabanın niçin çok hızlı ve şiddetli oyulduğu açıklanabilir.



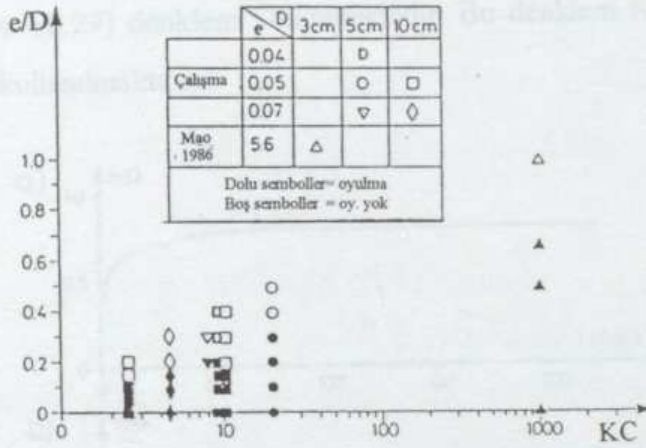
Şekil 2.91-Şekil 2.89'un aynısı olup burada  $G/D=0.05$ 'dir.



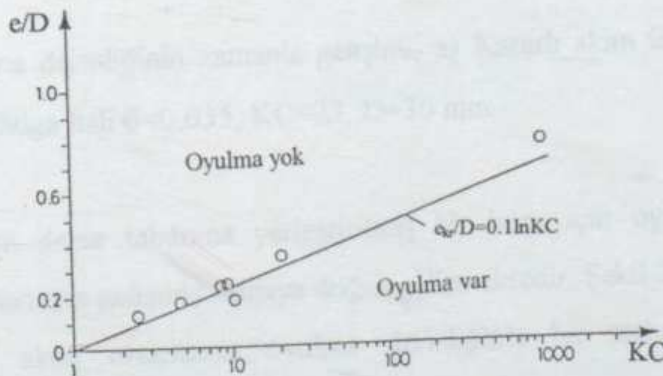
Şekil 2.90'daki verilere ilave olarak bu çalışmada Shields parametresinin 0.004 ve 0.007 değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlarla Mao (1986) tarafından KC sayısının ve Shields parametresinin ( $\theta=5.6$ ) oldukça yüksek değerleri kullanılarak Şekil 2.92 tekrar çizilmiştir. Şekil 2.92'de oyulmanın olmadığı kritik gömülme derinlikleri Şekil 2.93'de tekrardan çizilmiştir. Bu şekilde verilenlerden aşağıdaki şu basit ifade elde edilmiştir.

$$\frac{e_{kr}}{D} = 0.1 \ln KC \quad (2.31)$$

Burada  $e_{kr}$  oyulmanın meydana geldiği kritik gömülme derinliğidir.



Şekil 2.92-  $e/D$ 'ye karşılık KC düzleminde oyulmanın olduğu ve olmadığı bölgelerin grafiği (Hareketli taban).



Şekil 2.93- Kritik gömülme derinliğine karşı KC sayısı (Hareketli taban).

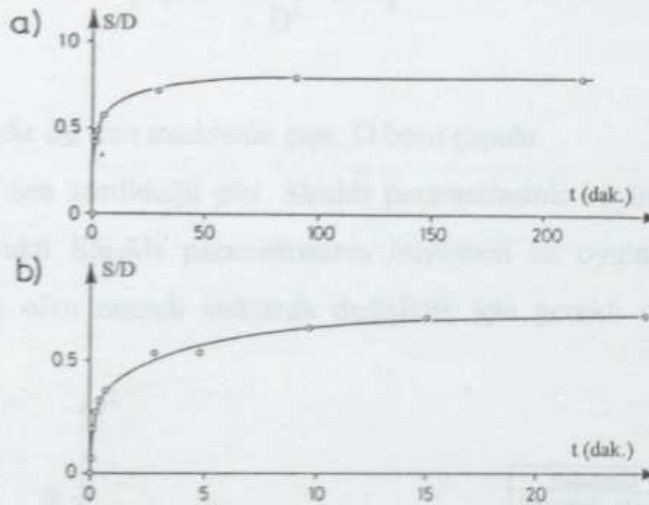
Fredsøe et al. (1992):

Araştırmacılar oyulma işleminin zaman ölçeği üzerinde çalışmışlardır. Kararlı akım şartlarında denge oyulma derinliğinin pratik olarak aşağıdaki formülle belirlenebileceğini ifade etmişlerdir.

$$\frac{S_0}{D} = 0.6 \pm 0.1 \quad (2.32)$$

burada  $\pm 0.1$  standard sapmayı göstermektedir.

Diğer yandan dalgalı bir ortamda denge oyulma derinliğinin belirlenmesi için KC sayısını ihtiva eden (2.29) denklemi bilinmektedir. Bu denklem KC sayısının 2 ile 100 değerleri arasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.94- Oyulma derinliğinin zamanla gelişimi, a) Kararlı akım  $\theta=0.098$ ,  $D=100$  mm (Mao, 1986), b) Dalga hali  $\theta=0.035$ ,  $KC=27$ ,  $D=30$  mm.

Başlangıçta deniz tabanına yerleştirilmiş bir boru için oyulma derinliği geçiş periyodundan tamamıyla gelişmiş safhaya doğru gelişmektedir. Şekil 2.94 hem kararlı akım hem de dalgalı akım ortamında oyulma derinliğinin bu safhada nasıl geliştiğini

göstermektedir. Oyulma derinliğinin zamanla değişimi yaklaşık olarak şöyle hesaplanmaktadır;

$$S = S_0(1 - e^{-1/T}) \quad (2.33)$$

Burada  $S_0$  denge oyulma derinliği,  $T$  oyulma işleminin zaman ölçeği olup oyulmanın büyük miktarının geliştiği zaman periyodudur.

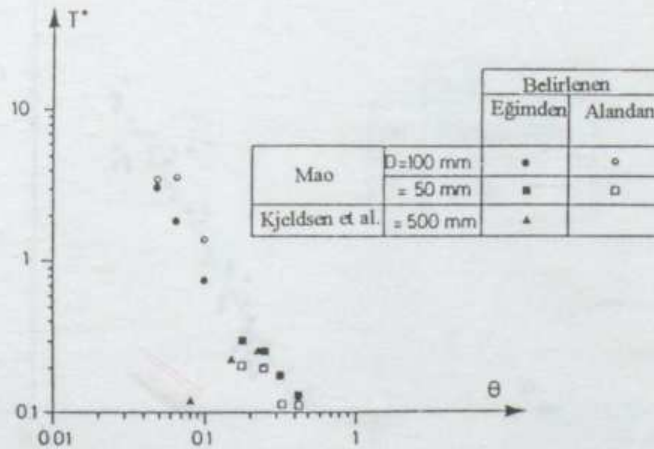
Kararlı akım için normalleştirilmiş zaman ölçeğinin Shields parametresiyle oldukça uyumlu olduğu bulunmuştur. Normalleştirilmiş zaman ölçeği  $T^*$

$$T^* = T^*(\theta) \quad (2.34)$$

$$T^* = \frac{[g(s-1)d_{50}^3]^{1/2}}{D^2} T \quad (2.35)$$

ile verilmiştir. Burada  $d_{50}$  katı maddenin çapı,  $D$  boru çapıdır.

Şekil 2.95'den görüldüğü gibi, Shields parametresinin büyümesi ile zaman ölçeği küçülmektedir. Çünkü Shields parametresinin büyümesi ile oyulmadan dolayı oyulma derinliğinde olacak olan önemli miktarda değişiklik için gerekli olan zaman periyodu kısalmaktadır.



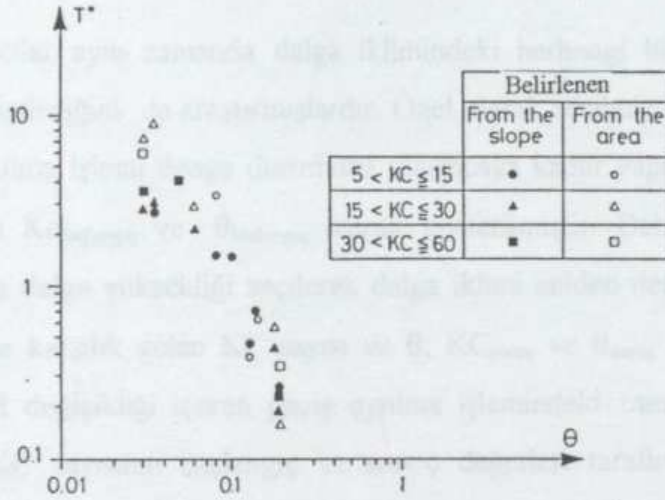
Şekil 2.95- Shields parametresine karşı boyutsuz zaman ölçeği. Kararlı akım. Taban orijinalde düzlem ve boru ile taban arasında açıklık yok.



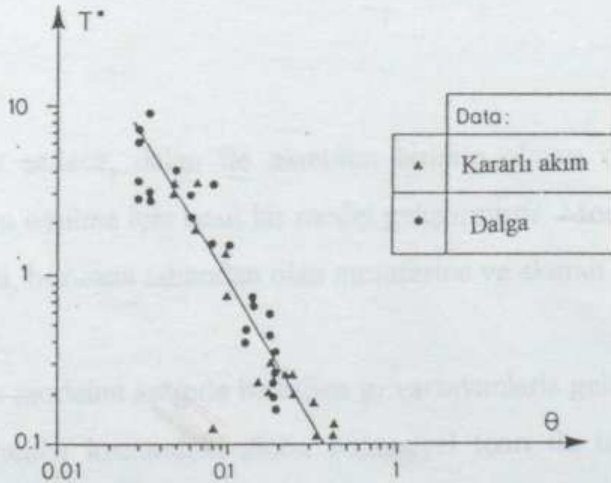
Dalga durumunda, zaman ölçeğinin boyutsuz formülasyonuna KC sayısı ilave parametre olarak katılmaktadır.

$$T=T^*(\theta, KC) \quad (2.36)$$

Şekil 2.96 farklı KC sayısı için Shields parametresine,  $\theta$ , karşı boyutsuz zaman ölçeğini göstermektedir. Şekil sonuç oyulma derinliğinin KC'ye bağlı olmasına rağmen Shields parametresi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.



Şekil 2.96- Shields parametresine karşı boyutsuz zaman ölçeği. Dalga etkisinde.Taban orijinalde düzlem ve taban ile boru arasında açıklık yoktur.



Şekil 2.97- Shields parametresine karşı boyutsuz zaman ölçeği. Dalga+akıntı durumunda. Taban orijinalde düzlem ve taban ile boru arasında açıklık yoktur.

Şekil 2.97'de dalga ve akıntı koşullarında elde edilen veriler birlikte çizilmiştir. Bu oyulma işleminin başlangıç safhasında mansap erozyonunun önemsiz olduğu gerçeğine bağlanabilir.

Sonuçta olarak Şekil 2.97'de  $T^*$  ve  $\theta$  arasındaki ilişki aşağıdaki basit ifade ile verilmiştir.

$$T^* = \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \quad (2.37)$$

Araştırmacılar aynı zamanda dalga iklimindeki herhangi bir değişikliğin zaman ölçeğini nasıl değiştirdiğini de araştırmışlardır. Özel olarak seçilmiş bir dalga periyodu ve yüksekliğinde oyulma işlemi denge durumuna ulaşmaya kadar yapılmıştır. Bu safhadaki KC ve  $\theta$  sayıları  $KC_{\text{başlangıç}}$  ve  $\theta_{\text{başlangıç}}$  olarak gösterilmiştir. Daha sonra farklı dalga periyodu ve farklı dalga yüksekliği seçilerek dalga iklimi aniden değiştirilmiştir. Deneyin bu yeni bölümüne karşılık gelen KC sayısı ve  $\theta$ ;  $KC_{\text{sonuç}}$  ve  $\theta_{\text{sonuç}}$  olarak gösterilmiştir. Dalga iklimindeki değişikliği içeren geçiş oyulma işlemindeki zaman ölçeğinin Shields parametresi ve KC sayısının başlangıç ve sonuç değerleri tarafından kontrol edildiği belirtilmiştir. Aynı zamanda KC sayısının başlangıç ve sonuç değerleri birbirine yaklaştıkça zaman ölçeği küçülmektedir.

#### **Hansen (1992):**

Araştırmacı sadece, dalga ile akıntının birlikte olması durumunda boru hatları altındaki iki boyutlu oyulma için basit bir model geliştirmiştir. Modelde oyulma derinlikleri dalga akıntı oranına, borunun tabandan olan mesafesine ve akımın atak açısına bağlı olarak bulunmuştur.

Araştırmacı modelini aşağıda belirtilen şu varsayımlarla geliştirmiştir.

Borunun menba kısmındaki akım, potansiyel teori ile tariflenmiş olup, oyulma çukuru büyüklüğünün art-iz bölgesinin gelişmesi ile ilgili olduğu ve kararlı bir oyulma derinliği geometrisinin borunun yakınındaki ve uzağındaki katı maddenin boru hattına dik

yönde taşınması ile belirlendiği belirtilmiştir. Oyulma derinlikleri bu varsayımlarla KC sayısının fonksiyonu olan dalga/akıntı oranları, akım atak açısı ve boru hattının sarkması gibi değişkenler dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Geliştirilmiş olan bu model deneylerden elde edilen 2.29 ampirik denklemi ile karşılaştırılmıştır.

Araştırmacı öncelikle  $\theta > \theta_{kr}$  şartında sinüzoidal dalgalar için bir çalışma yapmıştır. Modelin sonucunun 2.29 denklemi ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Oyulma derinliğinin açıklık oranının azalması ile arttığı bulunmuştur. Ancak sarkmanın 0.3'den büyük değerlerinde teoremin geçersiz olduğu,  $\theta < \theta_{kr}$  şartında sinüzoidal dalga altında oyulma derinliğinin artan Shields parametresi ile arttığı belirtilmiştir.

Dalga ile akıntının birlikte olması durumunda akıntı yönünde art-iz mesafesi arttığı halde diğer yönde azalmaktadır. Küçük akıntı oranları için, artan akıntı oranı ile oyulma derinliğinin yavaşça azalmakta olduğu görülmüştür.

Modelin farklı atak açısı ile uygulanmasında  $\alpha$  açısının artması ile derinliğinin azaldığı bulunmuştur.

#### **Bruschi et al. (1994):**

Bu araştırmacılar, oyulmanın neden olduğu serbest açıklığın uzun olması durumunda yapısal salınımın meydana gelerek boru hattı sistemini olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Oyulmanın neden olduğu serbest açıklığın modellenmesinde ve belirlenmesinde şu ana faktörler dikkate alınarak benzeşim yapılmıştır; boru-taban etkileşim parametreleri, serbest açıklığın yapısal davranışı, akımın neden olduğu salınımların meydana gelişi ve büyüklüğü.

Araştırmacılar deniz tabanında bulunan bir boru hattının, kendisine yakın bölgedeki akımın dinamik yapısını değiştirdiğinden borunun mansabında türbülans çevrileri oluştuğunu belirtmişlerdir. Hareketli taban durumunda akım boru hattının altının oyulmasına ve serbest açıklığın oluşmasına neden olmaktadır. Erozyonun başlıca nedeninin borudan saçılan türbülans olduğu belirtilmiştir. Bu türbülans katı maddenin askıya geçmesine neden olmaktadır. Türbülans çevrileri tarafında tabandan taşınan katı maddenin



yerçekimi etkisi altında tabana doğru çökmesi ile dengelenmektedir. Katı maddenin oyulma çukurundan uzaklaştırılması, akım hızının katı maddenin hareketi için gerekli olan başlangıç değerinden büyük olduğu ana kadar devam etmektedir. Oyulma çukurunun büyümesi ile jet hızının küçüldüğü belirtilmiştir.

Maksimum oyulma derinliği ve maksimum giriş uzunluğu hakkında teorik model yaklaşık olarak bir bilgi vermesine rağmen, oyulma olgusunun gelişimi ve ne kadar sürede oluştuğu hakkında bilgi vermektedir.

Hidrodinamik model, boru ile yaklaşan akım arasındaki etkileşimden meydana gelen hidrodinamik yükler için yaklaşık bir çözüm vermektedir. Güvenilir deneysel verilere dayanan bu model, oyulmayla meydana gelen serbest açıklıklar üzerine dalgaların olumsuz etkileri olduğunu göstermiştir.

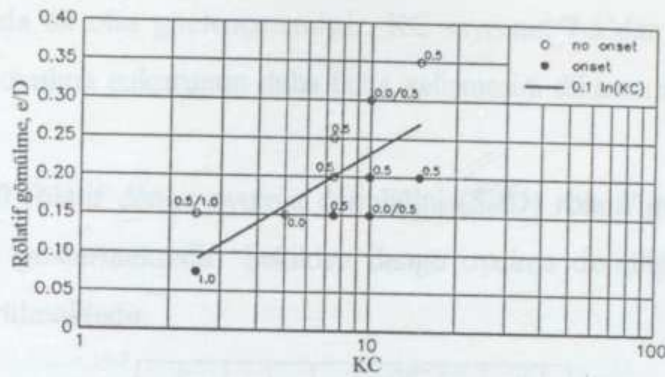
Bununla birlikte oyulma olgusunun fiziğinin, boru-taban etkileşiminin ve hidrodinamik yüklerin tam olarak anlaşılabilmesi için çok daha fazla deneysel çalışmaya ve saha verilerine ihtiyaç olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

#### **Klomp et al. (1995):**

Dalga ve akıntının birlikte olması durumunda oyulmanın başlaması ile iki ve üç boyutlu oyulmanın gelişimini araştırmışlardır. Oyulmanın başlamasının araştırılması için yapmış oldukları deneylerde, akıntı/dalga hız ( $U_c/U_w$ ) oranının 0.5'den küçük olduğu değerlerde elde edilen sonuçlar Sümer et al. (1991)'in elde ettiği 2.29 ampirik ifade ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ancak akıntı/dalga oranının büyük değerleri için sadece iki deney yapıldığı için herhangi bir sonuca varılamamıştır.

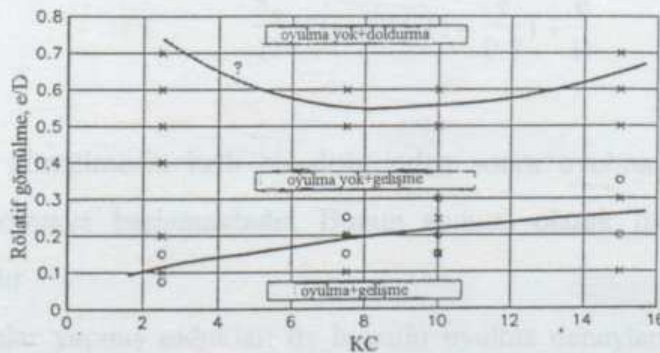
Araştırmacılar Sümer et al. (1991)'in elde ettiği aşağıdaki ifadenin düzensiz dalgalar ve dalganın hakim olduğu dalga ve akıntı etkisinde de geçerli olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.98).

$$\frac{e_{kr}}{D} = 0.1 \ln(KC) \quad (2.38)$$



Şekil 2.98- Oyulmanın başlaması deneylerinin sonuçları (Sümer and Fredsøe, 1991).

Klomp et al. (1995) biri dar diğeri ise üçgen şeklinde olmak üzere iki farklı geometrisi olan önceden oluşturulmuş oyulma çukurları ile düzenli ve düzensiz dalga şartlarında deneyler yapmışlardır. Oyulmanın başlaması/gelişmesi rejimleri KC sayısı ve rölatif gömülme ifadeleriyle Şekil 2.99'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi oyulmanın aniden başlaması ve kararlı bir gömülme arasındaki geçiş, oyulmanın başlaması deneylerinden elde edilmiştir. Mevcut bir oyulma çukurunun geri dolması ve daha fazla gelişimi arasındaki geçiş ise önceden oluşturulmuş oyulma çukuru deneylerinden belirlenmiştir.



Önceden oluşturulmuş oyulma çukuru deneylerinde  $KC=2.5$  olduğunda boru çevresindeki katı madde aktivitesinin oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Geri doldurma çok küçük miktarda da olsa gözlenememiştir.  $KC$  sayısının 7.5'dan küçük değerleri için geri doldurma ve oyulma çukurunun daha fazla gelişmesini dikkate alan genel bir sonuca varılamamıştır.

Şekil 2.100 rölatif denge oyulma derinliğini ( $S_0/D$ ) rölatif gömülmenin ( $e/D$ ) bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekilden denge oyulma derinliğinin artan gömülme oranı ile arttığı görülmektedir.



Şekil 2.100-  $e/D$ 'ye karşılık denge oyulma derinliği.

Rölatif gömülmenin, rölatif denge oyulma derinliği üzerine etkisi aşağıdaki ifade ile verilmiştir.

$$\frac{S_0}{D} = 0.1\sqrt{KC}\left(1 - \frac{e}{0.7}\right) + \frac{e}{D} \quad (2.39)$$

Bu rölatif gömülmenin belli bir değerinden sonra oyulma işlemi durmakta ve oyulma çukuru dolmaya başlamaktadır. Bunun sonucu olarak da eksenel oyulmanın gelişimi durmaktadır.

Araştırmacılar yapmış oldukları üç boyutlu oyulma deneylerinde eksenel oyulma hızının  $KC$  sayısı ile arttığını buna karşın artan gömülme miktarı ile azaldığını belirtmişlerdir. Dalga ve akıntının birlikte olduğu deneyler, akım hızının etkisinin daha az ve dalganın hakim olduğu şartlarda gerçekleştirilmiştir.



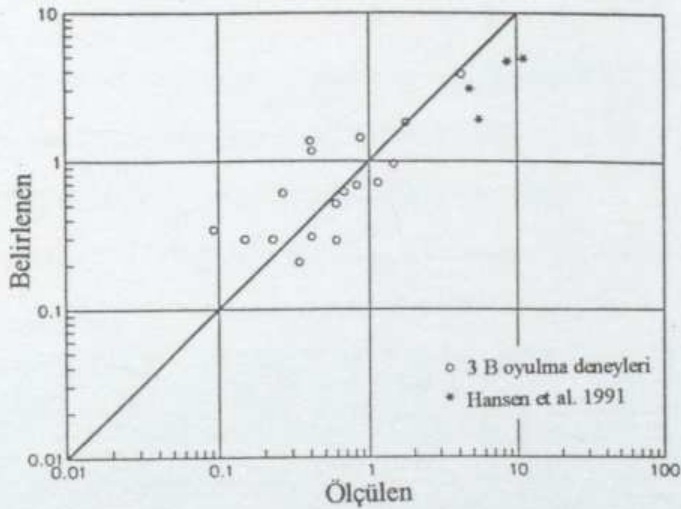
Sabit bir KC sayısı için oyulma hızının sıfır olduğu andaki, kritik rölatif gömülme oranı yani  $(e/D)_{kr}$  aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$\left(\frac{e}{D}\right)_{kr} = 0.25 \ln(KC) \quad (2.40)$$

Bu ifade, oyulmanın daha ne kadar devam edeceği veya durup geri dolmaya geçileceği durumu göstermesi açısından önemlidir.

Araştırmacılar ayrıca serbest açıklığın mesnetlerinin uzunluğunun KC sayısının ve rölatif gömülmenin bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 2.101).

Dalgan etkisinin hakim olduğu dalga ve akıntı birlikte olması durumunda boru hattı altındaki eksenal oyulmanın gelişimi için Hansen et al. (1991) tarafından geliştirilen yarı ampirik ifadenin uygulanabileceğini belirtmişlerdir..



Şekil 2.101- Eksenal oyulma hızı için kalibrasyon sonuçları (m/saat).

Araştırmacılar son olarak boru hattını dalga ve akıntı yönüne farklı açılarla yerleştirerek bazı deneyler yapmışlardır. Boru ekseni ile kanal ekseni arasındaki açının  $60^\circ$  olması durumunda akıma ters yöndeki oyulma hızının akım yönündeki oyulma hızından daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Bu açının  $30^\circ$  olması durumunda ise pozitif oyulma hızının negatif oyulma hızından daha büyük olduğu görülmüştür. Ancak bu değişimin fiziksel açıklaması yapılamamıştır.

**Naum et al. (1995):**

Araştırmacılar, düzensiz bir tabanda bulunan boru hattı için açıklık/gerilme/sapma araştırmalarının sonuçlarını ile analitik bir metod sunmuşlardır. Bu analitik metodun ve yöntemin pratikte deniz altı boru hattının yörüngesini seçmede yardımcı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Çünkü boru hattı hiç bir zaman zeminle sürekli temas halinde değildir. Boru hattının mesnetlerle bölünmüş çeşitli açıklıklarda olması halinde hem kendi ağırlığı hem de içinde taşıdığı akışkanın ağırlığından dolayı ilave gerilmelere maruz kalmaktadır.

Bu çalışmada önerilen hesaplama yöntemi "U" ve "V" şeklindeki mesnet tipleri için boru hattı açıklık durumu, boru hattı sınır ve çalışma koşulları belirlenmiştir.

### 1.1 Giriş

Bu bölümde deney sisteminin kurulması, ölçme teknikleri ve yapılan deneylerden bahsedilecektir. Daha sonra boru ile ilgili olan etkileşim problemleri için parametreler belirlenerek boyut analizi ile boyutlara sayılar elde edilecektir.

Deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Akışkanlar Laboratuvarında yapılan düzenli dalgalar kanalıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Genel görünüm



## BÖLÜM 3

# DENEYSEL ÇALIŞMA VE BORU İLE DENİZ TABAN ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİ

### 3.1 Giriş

Bu bölümde deney sisteminin kurulması, ölçme teknikleri ve yapılan deneylerden bahsedilecektir. Daha sonra boru ile deniz taban etkileşim problemine etkili parametreler belirlenerek boyut analizi ile boyutsuz sayılar elde edilecektir.

Deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı-Liman Laboratuvarında kurulan düzenli dalga kanalında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1- Genel görünüm.



## 3.2 Deney Sistemi

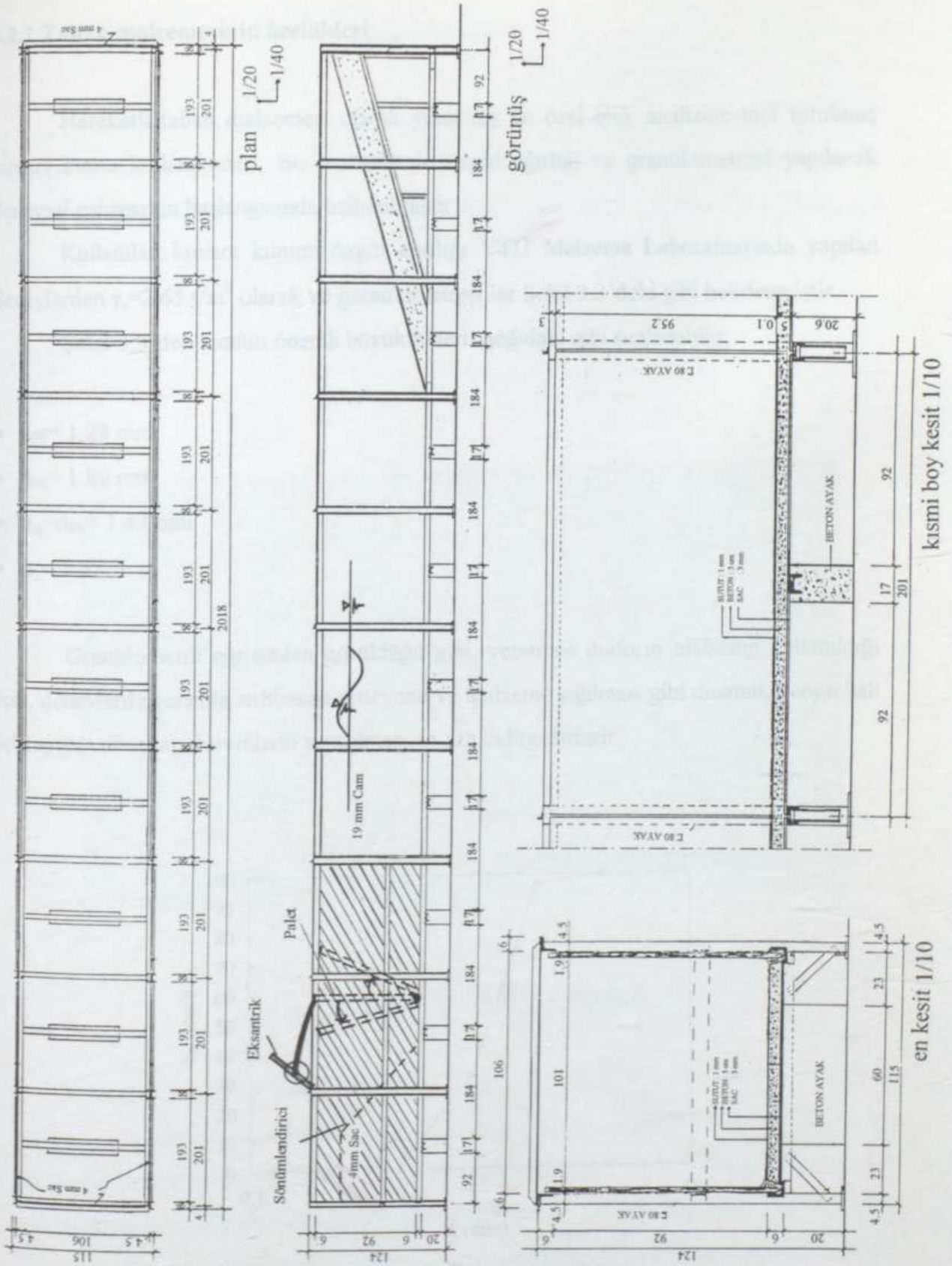
### 3.2.1 Dalga kanalı

İki boyutlu oyulma deneylerinin yapıldığı dalga kanalı 1m genişliğinde ve 20 m uzunluğunda olup kanalın 14 m uzunluğu boyunca her iki kenarı camdan yapılmıştır (Şekil 3.2).

Dalgalar, 1/5 eğimli tabanın bitiminden 14 m ve 1/10 eğimli tabanın bitiminden ise 11m mesafede olan ve bir eksantrik yardımı ile doğru akım motorunun miline bağlanan tabana mafsallı bir palet ile üretilmiştir. İstenilen yükseklik ve periyoddaki dalgalar, bu doğru akım motoruna giden akımı düzenleyen ve kumanda eden redresör ve eksantrik yardımıyla üretilmiştir. Hareketsiz taban halinde kanalın her iki tarafına, hareketli taban halinde ise sadece dalga üreticinin arkasına olmak üzere yansımayı en aza indirmek için dalga sönümlendiricileri yerleştirilmiştir.

Kayma gerilmesi ve hız ölçümlerini gerçekleştirmek için gerek 1/5 ve gerekse 1/10 eğimi oluşturan hareketsiz tabanlı şevler profil ve 3 mm kalınlığında sacdan meydana gelen rijit tabanlar halinde dizayn edilmişlerdir. Düzlem tabandaki kayma gerilmesi ölçümlerinde ise kum üzerine çimento serperek tabanın hareketsiz (sabit) olması sağlanmıştır. Taban yeterince sertleştikten sonra önceden belirlenen yere flush mounting 55R46 tipi prob yerleştirilmek suretiyle CTA yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Yerel oyulma ve kıyı profili oluşumu ile ilgili deneyler için hareketli tabanı oluşturan kum istenilen eğimde düzeltildikten sonra, önceden belirlenen dalgalar üretilerek istenilen deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir oyulma deneyinin sonunda kanal eksenine yerleştirilmiş 6 m uzunluğunda bir ray üzerinde hareket edebilen ve 0.1mm hassasiyetindeki limnimetre ile borunun her iki tarafında ve ortasında olmak üzere üç noktada ölçüm yapılmıştır.



### 3.2.2 Taban malzemesinin özellikleri

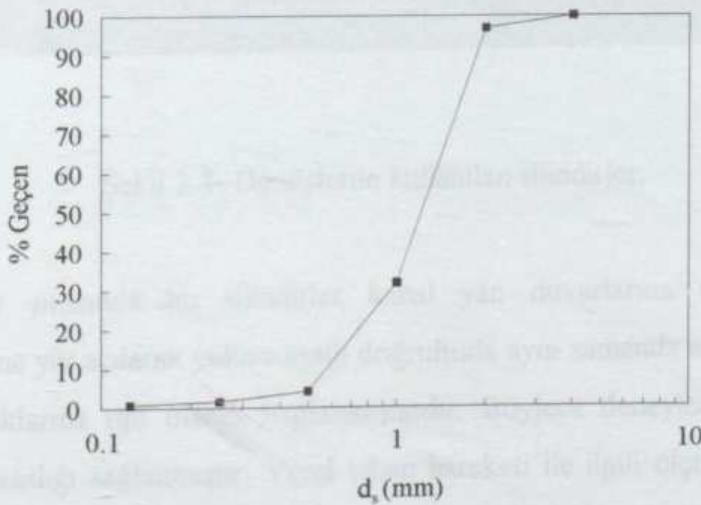
Hareketli taban malzemesi olarak yıkanmış ve özel elek analizine tabi tutulmuş kuvars kumu kullanılmıştır. Bu malzemenin özgül ağırlığı ve granülometresi yapılacak deneysel çalışmanın başlangıcında belirlenmiştir.

Kullanılan kuvars kumun özgül ağırlığı YTÜ Malzeme Laboratuvarında yapılan deneylerden  $\gamma_s=2.65 \text{ t/m}^3$  olarak ve granülometresi ise Şekil 3.3'deki gibi belirlenmiştir.

Şekil 3.3'den kumun önemli büyüklükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- $d_{50}=1.28 \text{ mm}$
- $d_{90}=1.89 \text{ mm}$
- $d_m=d_{60}=1.43 \text{ mm}$
- $\sigma=1.57$

Granülometre eğrisinden görüldüğü gibi, yeterince üniform malzeme kullanıldığı için, deneylerde genelde zırhlanma erozyonu ve malzeme yığılması gibi dinamik denge hali için uygun olmayan durumların yaratılması en aza indirgenmiştir.



Şekil 3.3- Kumun granülometre eğrisi.



### 3.2.3 Deneylerde kullanılan boru hatlarının seçimi

Deneylerin yeterince sağlıklı yapılabilmesi amacıyla üstü boyanmış cilalı çelik silindirlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Gerek düzlem taban halinde gerekse şevlerde dört farklı çapta silindir kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunlar  $D=3.23$  cm, 4.9 cm, 7.7 cm ve 11.4 cm çapındadırlar (Şekil 3.4).

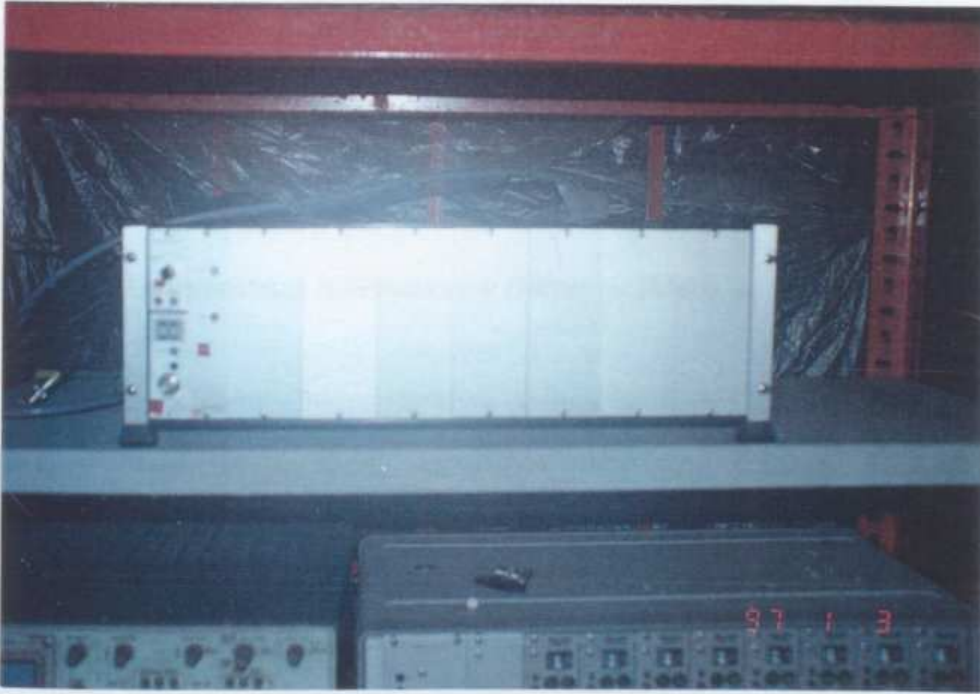


Şekil 3.4- Deneylerde kullanılan silindirler.

Deneyler sırasında bu silindirler kanal yan duvarlarına oynar menteşelerle bağlanmış ve içine yiv açılarak yukarı-aşağı doğrultuda aynı zamanda açı da verilebilen her iki destek çubuklarına rijit olarak bağlanmışlardır. Böylece deneylerde istenilen ölçüm kolaylığı ve hassaslığı sağlanmıştır. Yerel taban hareketi ile ilgili ölçümler, her ne kadar kanal yan duvarlarının ve silindir uçlarının deney şartlarını etkilememeleri sağlanmış ise de deneyler dalga kanalı eksenine doğrultusu esas alınarak yapılmıştır.

### 3.3 Hız ve Kayma Gerilmesi Ölçümleri

Bu çalışmada hız ve kayma gerilmesi ölçümleri için 56C00 tipi CTA (Constant Temperature Anemometresi) kullanılmıştır (Şekil 3.5). DANTEC 56C01 CTA ana güç kaynağına bağlı 56C17 CTA köprü ve 56N21 lineerleştiricinin birleştirilmesi constant temperature anemometresini oluşturmaktadır. Hız ve kayma gerilmesinin belirlenebilmesi için DANTEC 55R46 “flush mounting” hot film tipi prob seçilmiştir. Bu probun düzlem ve eğimli tabana Şekil 3.6’da görülen iki tip pleksiglas ayak yardımı ile gömülmesiyle cidarla aynı yüzeyde olması sağlanmıştır.

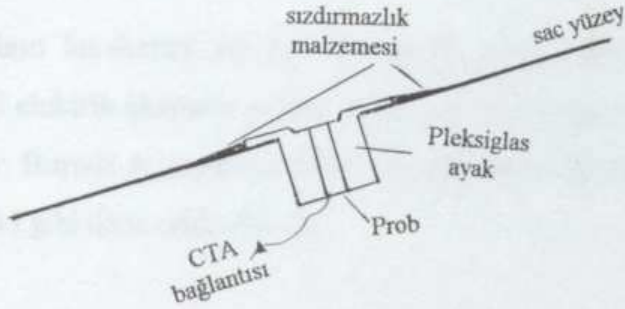


Şekil 3.5- Hız ve kayma gerilmesi ölçümlerinde kullanılan CTA.

CTA'den gelen sinyaller osiloskop, dijital voltmetre ve bilgisayar yardımı ile değerlendirilmiştir. Bilgisayara gelen analog sinyaller ise AD dönüştürücü kart (analog dijital dönüştürücü) yardımıyla dijital değerlere çevrilmiştir.



a) Düzlem tabanda



b) Şevde

Şekil 3.6- Ölçüm esnasında probun yerleştirilmesinin şematik gösterimi.

### 3.3.1 Constant Temperature Anemometer (Sabit sıcaklıklı uç anemometresi)

CTA akışkan akımı içine yerleştirilen probun etrafından akımın geçmesi esnasında soğuması (konvektif ısı transveri) dolayısıyla, ısıyı sabit tutacak elektrik akımının sağlanması suretiyle çalışan bir elektrik devresine sahip olması prensibine dayanmaktadır.

Sıvı akımlarında hot film tipi prob çeşitlerinin kullanılması en uygundur. Bu film algılayıcılar farklı şekillerdeki quartz algılayıcılar üzerine ince bir nikel film tabakasının kaplanmasıyla meydana gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan flush mounting film tipi probda film tabakasının boyutları yaklaşık olarak  $0.2 \times 0.75$  mm'dir. Film yaklaşık olarak  $0.5 \mu\text{m}$  veya  $2 \mu\text{m}$  kalınlığında quartz kaplama ile korunmaktadır. Bu prob tipi gaz, iletken olan ve olmayan sıvı ortamında, düşük ve  $150^\circ$  ye kadar olan orta dereceli ısı ile düşük, orta ve yüksek hızlı akım ortamında kullanılabilme özelliğine sahip olup cidar kayma gerilmesi, ısı ve ısıнын değişimi, laminar ve türbülanslı sınır tabakasındaki yüzey sürtünmesi ile ayrılma ve geçiş noktalarının tesbitinde kullanılmaktadır.



Probus ucunun ısıtılması için gerekli olan voltaj akışkan akımının hızı ile bir korelasyona sahiptir. Akışkan akımının hızı nedeniyle probdan kaybolan ısı “Q” elektrik devresi tarafından  $I^2R$ ’ye eşit bir elektrik gücü yaratılarak sağlanmaktadır. Kaybolan ısı akışkan akımının hızıyla orantılı olduğundan aşağıdaki eşitlik yazılabilmektedir.

$$\frac{I^2R}{R - R_0} = A + B\sqrt{u} \quad (3.1)$$

burada,  $R_0$  probun hareketsiz akışkan içerisindeki soğuk direnci,  $R$  probun ısıtılarak ölçülen direnci,  $I$  elektrik akımının şiddeti,  $A$  ve  $B$  konveksiyon etkisini gösteren katsayılar ve  $u$  akım hızıdır. Burada  $A$  genellikle  $B$ ’nin yanında ihmal edilebilir mertebededir. Pratikte bu ifade aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$E^2 = A + Bu^n \quad (3.2)$$

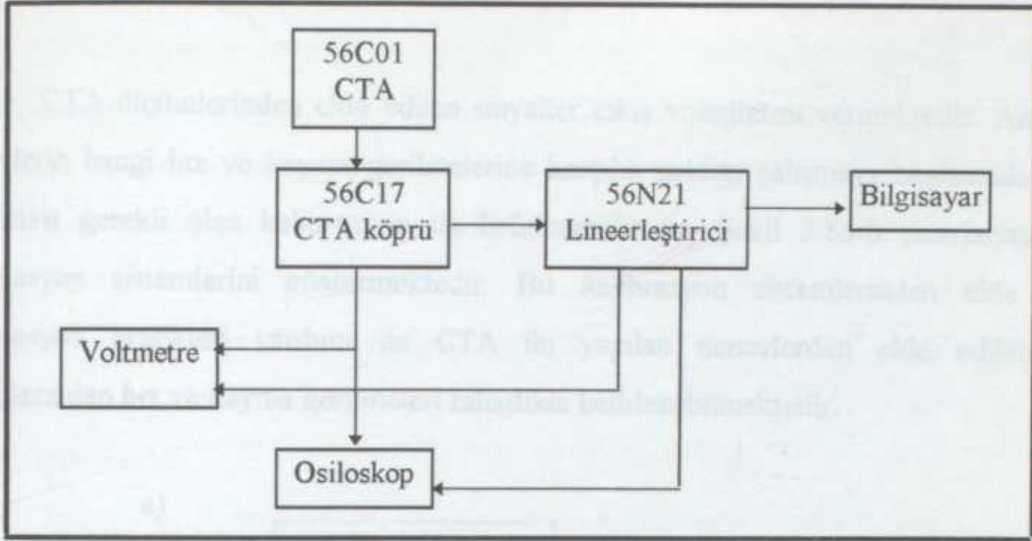
burada  $E=IR$  elektrik gerilimini göstermektedir.  $n=0.5$  civarında olan üstel bir değerdir. Bu ifadedeki  $A$ ,  $B$  ve  $n$  değerleri teorik olarak belirlenemediğinden hot film probun kullanılacağı ortamda doğrudan doğruya kalibrasyon gerekmektedir.

Constant Temperature Anemometresine (sıcak uç anemometresi) ait birimlerin şematik izahı Şekil 3.7’deki gibidir.

CTA’nin ana birimleri ve bu cihazla birlikte kullanılan diğer birimler:

- a) DANTEC 56C01 Ana Güç Kaynağı
- b) DANTEC 56C17 Köprü
- c) DANTEC 56N21 Lineerleştirici
- d) Fluke 80501 Dijital Voltmetre
- e) Wavetek 9302 20mHz Dijital Osiloskop
- f) Bilgisayar (AD karta sahip)

den oluşturulmuştur.



Şekil 3.7- CTA ile ölçümün şematik olarak gösterimi.

a) 56C01 Ana güç kaynağı: Sistemdeki 56C17 köprü ve 56N21 lineerleştiricilerin bağlantısını sağlayarak, sistemin elektrik kaynağını oluşturmaktadır.

b) 56C17 Köprü: Ana birimi oluşturmaktadır. Bu birime prob kablosu bağlanmakta olup bu kablo 5 m uzunluğundadır. Sistemin dengeye getirilmesi bu birim ile yapılmaktadır.

c) 56N21 Lineerleştirici: Hot-wire veya film probdan kaybolan ısı ile akım hızı arasındaki bağıntı lineer olmadığı için sinyalleri lineerleştirme amacıyla geliştirilmiş bir elektronik devreden ibarettir.

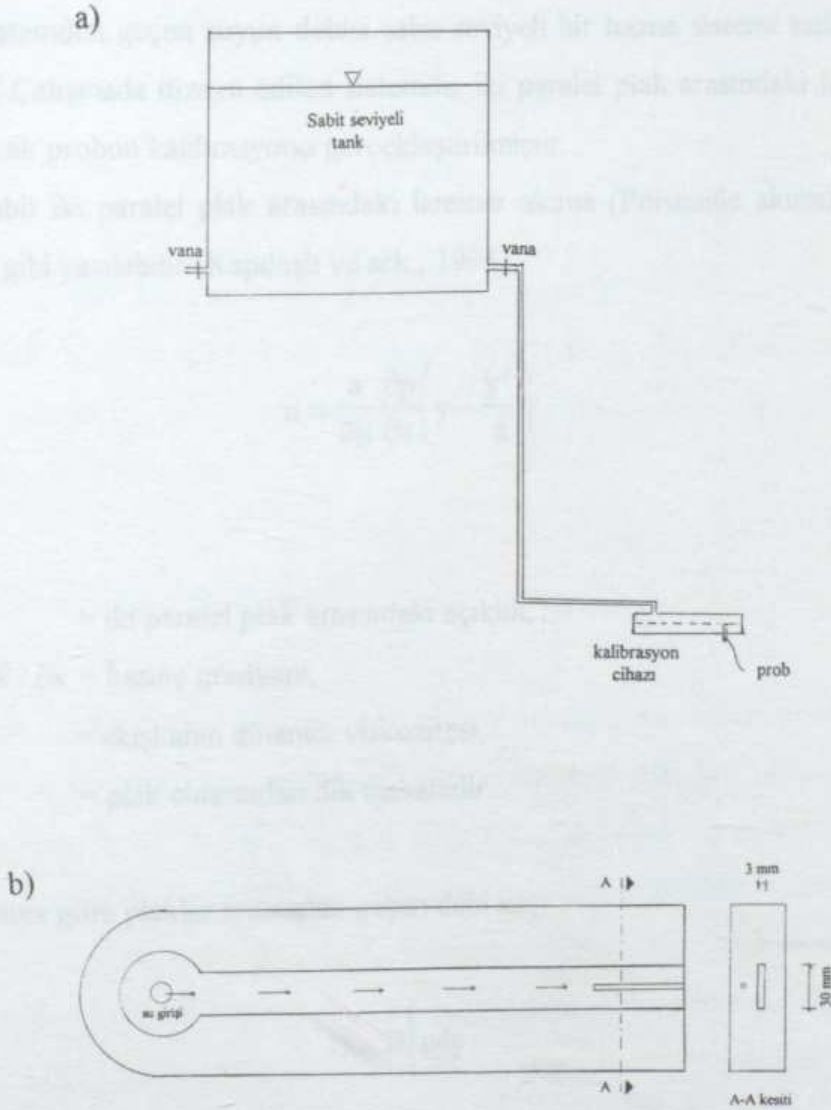
d) Voltmetre: Bu birim ile çıkış voltajları ölçülmüş ve sistemin dengeye getirilmesi sağlanmıştır.

e) Osiloskop: En iyi kare dalga elde etmek için kullanılmış, ayrıca ölçüm esnasında elde edilen çıkışların sağlıklı olarak elde edilip edilmediği sürekli olarak takip edilmiştir.

f) Bilgisayar: AD kartına sahip 386 SX bilgisayar yardımıyla veriler dijital olarak kaydedilmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler GW Basic dilinde hazırlanan bir program ile değerlendirilmiştir.

### 3.3.2 Kalibrasyon yöntemleri

CTA ölçümlerinden elde edilen sinyaller çıkış voltajlarını vermektedir. Ancak bu değerlerin hangi hız ve kayma gerilmelerine karşılık geldiği çalışmaya başlamadan önce yapılması gerekli olan kalibrasyon ile belirlenmektedir. Şekil 3.8a-b tasarlanmış olan kalibrasyon sistemlerini göstermektedir. Bu kalibrasyon sistemlerinden elde edilen kalibrasyon grafikleri yardımı ile CTA ile yapılan deneylerden elde edilen çıkış voltajlarından hız ve kayma gerilmeleri rahatlıkla belirlenebilmektedir.



Şekil 3.8- a)-Kalibrasyon sisteminin genel şeması, b) Kalibrasyon cihazı.



Kayma gerilmesinin belirlenmesini sağlayan flush mounting tip prob için dizayn edilen kalibrasyon sisteminde, laminar akım şartlarında analitik çözümün gerçekleştirilebilme kolaylığı söz konusu olması dolayısıyla, laminar akım koşulunda akışın sağlanabileceği şartlar dikkate alınmıştır. Laminar akışın gerçekleştirilebileceği kalibrasyon sistemi genel planı ve kesiti Şekil 3.8'deki gibidir. Şekil 3.8'den de görüldüğü gibi suyun geçtiği kesit 30 mm x 3 mm'lik bir alana sahiptir. Bu kesitin cidarına probun yerleştirilebileceği kadar bir delik açıldıktan sonra yerleştirilen probun etrafında sızdırmazlık sağlanmış, böylece probun üzerinden laminar akım koşullarında akış gerçekleştirilmiştir.

Sistemden geçen suyun debisi sabit seviyeli bir hazne sistemi kullanılarak kontrol edilmiştir. Çalışmada dizayn edilen sistemde, iki paralel plak arasındaki laminar akım hali esas alınarak probun kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Sabit iki paralel plak arasındaki laminar akıma (Poiseuille akımı) ait hız dağılımı aşağıdaki gibi yazılabilir (Kapdaşlı ve ark., 1995).

$$u = \frac{a}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( y - \frac{y^2}{a} \right) \quad (3.3)$$

Burada;

$a$  = iki paralel plak arasındaki açıklık,

$\partial P / \partial x$  = basınç gradyanı,

$\mu$  = akışkanın dinamik viskozitesi,

$y$  = plak cidarından dik mesafedir.

Buna göre plaklar arasından geçen debi ise;

$$Q = B \int_0^a u dy \quad (3.4)$$

dir. (3.3) ifadesi bu bağıntıda yerine konup integrasyon gerçekleştirilirse;

$$Q = \frac{a^3 B}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.5)$$

elde edilir. Diğer taraftan laminar akımda kayma gerilmesi için geçerli bağıntı

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.6)$$

olduğuna göre, bu denklemin integrasyonu ile cidardaki kayma gerilmesi sistemden geçen debiye bağlı olarak bulunur.

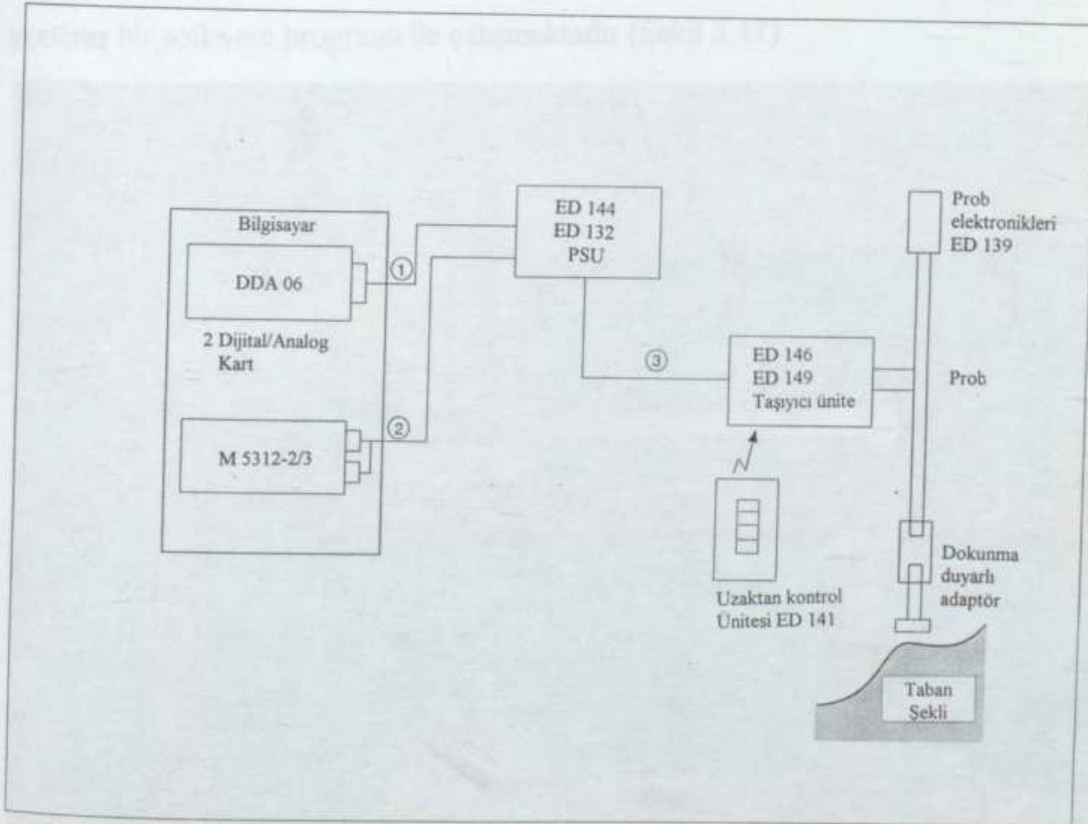
$$\tau_0 = \frac{6Q\mu}{a^2 B} \quad (3.7)$$

Bu ifaden de görüldüğü gibi geçen debiye göre kayma gerilmelerini bulmak mümkündür. Böylece CTA çıkış voltajları ile kayma gerilmeleri arasındaki kalibrasyon bağıntısı, yapılan bir seri deney ile belirlenebilmektedir. Deneylerde  $\pm 3^\circ$ 'lik sıcaklık farkı hassasiyetine dikkat edilmiştir.

### 3.4 Taban Profili Ölçümleri

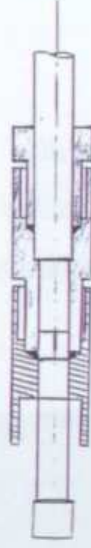
Hareketli tabanda meydana gelen taban profillerinin ölçümü için "HR Wallingford Dokunma Duyarlı İki Boyutlu" profil kaydedici kullanılmıştır (Şekil 3.9). Bu profil kaydedici kum, çakıl, toz gibi benzeri malzemelerden oluşmuş tabanlarda su altında ve üstünde herhangi bir süreksizlik oluşturmada çalışabilmektedir. Profil kaydedici 6 m uzunluğunda bir kiriş üzerinde yatayda hareket etmekte olan, 0.104x0.2x0.15 m ebadında ve 4.3 kg ağırlığında bir taşıyıcı ile düşeyde aşağı-yukarı hareket eden 1.5 m uzunluğunda ve 0.4 kg ağırlığında bir adet probdan oluşmaktadır. Prob 10 mm çapında ve kenarında dişli olan paslanmaz çelik çubuktan meydana gelmektedir (Şekil 3.10). Bu dişli sistem taşıyıcının içinde bulunan ve düşey hareketi sağlayan dc servo motora bağlıdır. Probun alt

ucundaki hafif ağırlıklı dokunmatik algılayıcıdan oluşan bir algılayıcı 20 mm çapındaki bir silindir içinde rahatça aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Profil kaydedici yatayda  $\pm 1$  mm ve düşeyde  $\pm 0.5$  mm hassaslıkta ölçüm yapabilmektedir. Algılayıcının silindire göre durumu ve böylece probun tabana göre durumu optik olarak ölçülebilmektedir. Sistemde üretilen kızıl ötesi ışık kaynağı probun üstüne monte edilmiş olup ışık fiber optik yardımıyla aşağıya iletilmektedir. Diğer bir fiber optik ise dedektörün üzerinden geriye yansıtılan ışığı prob ile taban arasındaki mesafe ile orantılı bir sinyal üreten kızıl ötesi algılamalı foto dioduna iletmektedir. Servo kontrol elektronikleri probu aşağıya doğru harekete geçirerek algılayıcı yavaşça tabana dokunarak durmakta ve böylelikle her bir ölçümde prob ile taban arasındaki mesafe aynı kalmaktadır. Algılayıcı oldukça hafif olduğundan tabanda önemli deformasyonlara neden olmamaktadır.



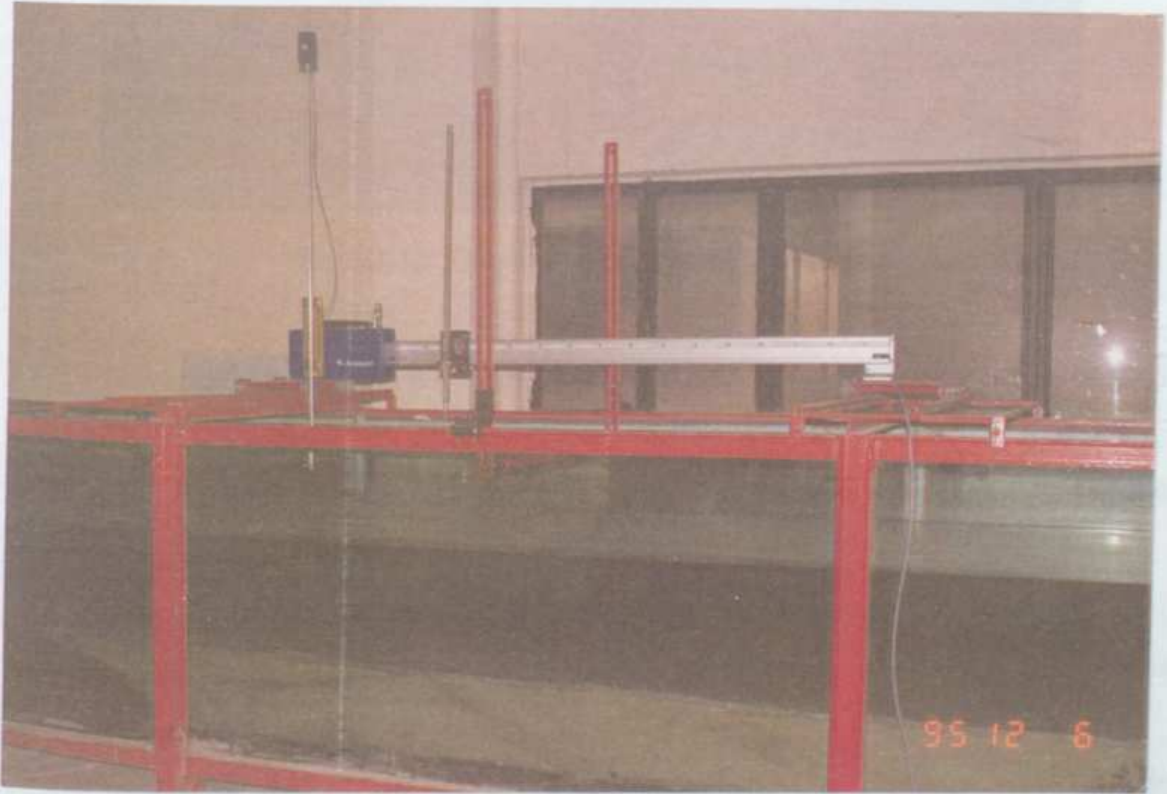
Şekil 3.9- Dokunma duyarlı iki boyutlu profil kaydedici genel şeması.





Şekil 3.10- Profil kaydedici probunun detayı.

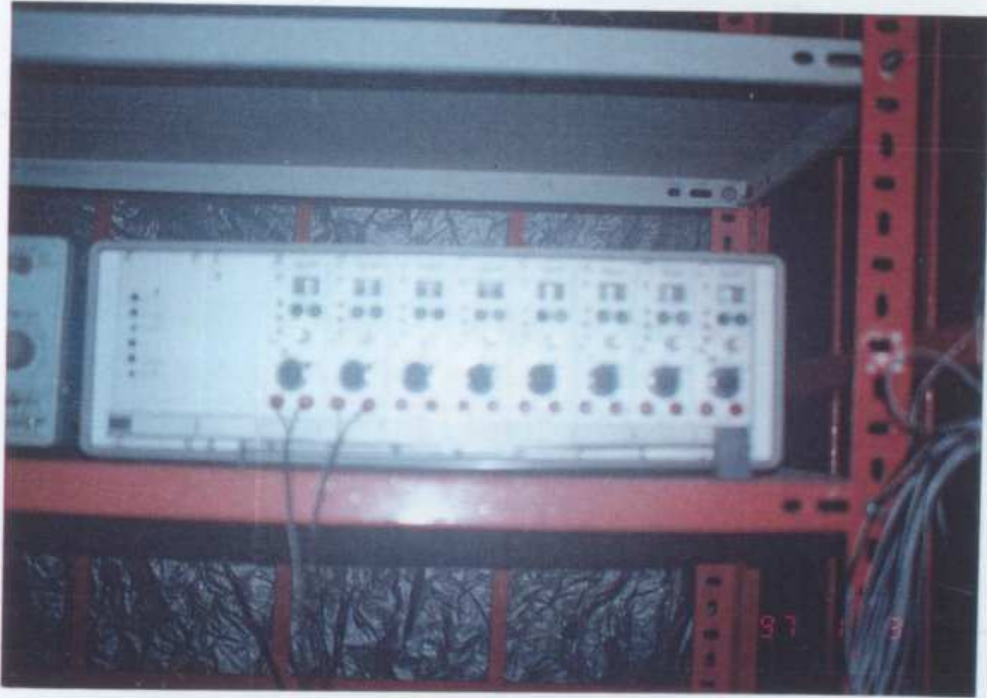
Bu profil kaydedici, içine iki adet AD dönüştürücü kart yerleştirilmiş bir PC 486 DX2-66 ile kontrol edilmekte ve bütün kontrolünün mouse ile yapıldığı özel olarak yazılmış bir software programı ile çalışmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11- HR Wallingford dokunma duyarlı iki boyutlu profil kaydedici genel görünümü.

### 3.5 Dalga Ölçümleri

Dalga kanalında üretilen dalga yükseklikleri ikiz çubuk elektrodlu bir sistem yardımıyla ölçülmüştür. Bu sistemin çalışması elektrodlar arasındaki suyun devreyi tamamlaması ve su seviyesinin alçalıp yükselmesi sırasında direncin değişmesi prensibine dayanmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12- Dalga probunun genel görünümü.

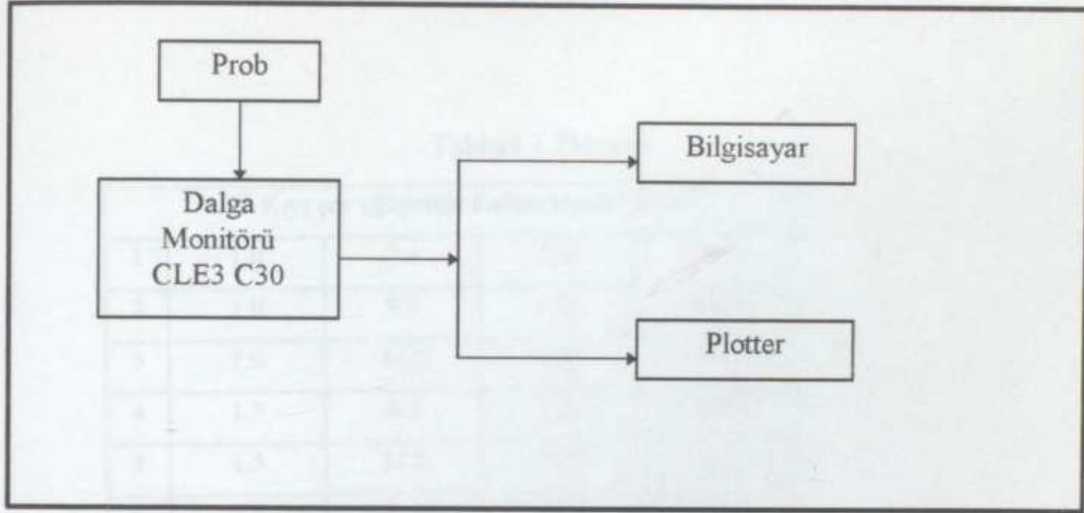
Dirençteki bu değişim bir amplifikatör yardımıyla yükseltilmekte ve buna bağlı Armfield CQ95 tipi bir plotter ile kaydedilmektedir (Şekil 3.13).

Her deneyden önce sakın su durumunda sistemin direnci dengeye getirilmek suretiyle kalibrasyonu yapılmıştır.

Dalga kanalında meydana gelebilecek yansımaları belirlemek amacıyla çift prob yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca üçüncü bir probun eğimli taban üzerine yerleştirilmesiyle sığlaşma tesiri belirlenmiştir.

Deneylerde dikkate alınmak üzere üretilen dalgalara ait özellikler Tablo 3.1'de özetlenmiştir.





Şekil 3.13- Dalga ölçümünün genel şeması.

Tablo 3.1- Dalga karakteristikleri.

| No                                                        | Dalga periyodu | Dalga yüksekliği    | Dalga uzunluğu     | Dalga dikliği                  |
|-----------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                                           | T(sn)          | H <sub>0</sub> (cm) | L <sub>0</sub> (m) | H <sub>0</sub> /L <sub>0</sub> |
| Düzlem taban ve 1/5 kıyı şev eğiminde kullanılan dalgalar |                |                     |                    |                                |
| 1                                                         | 1.0            | 4.9                 | 1.56               | 0.0314                         |
| 2                                                         | 0.8            | 9.36                | 1.00               | 0.0936                         |
| 3                                                         | 0.9            | 13.48               | 1.26               | 0.1066                         |
| 4                                                         | 1.3            | 8.08                | 2.64               | 0.0306                         |
| 5                                                         | 1.1            | 11.6                | 1.96               | 0.0593                         |
| 6                                                         | 1.47           | 10.43               | 3.35               | 0.0311                         |
| 7                                                         | 1.86           | 11.23               | 5.4                | 0.0307                         |
| 8                                                         | 2.64           | 7.7                 | 10.83              | 0.0071                         |
| 9                                                         | 2.6            | 8.64                | 10.55              | 0.008                          |
| 10                                                        | 2.33           | 9.48                | 8.46               | 0.0112                         |
| 11                                                        | 2.58           | 11.97               | 10.37              | 0.0115                         |
| 12                                                        | 2.28           | 15.74               | 8.07               | 0.0195                         |
| 13                                                        | 2.37           | 15.04               | 8.77               | 0.0171                         |



Tablo3.1 Devam.

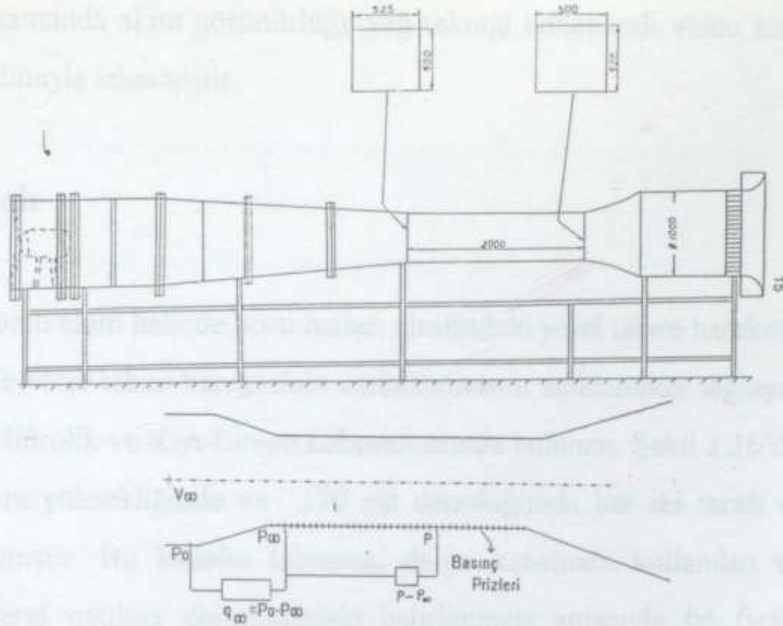
| 1/10 Kıyı şev eğiminde kullanılan dalgalar. |     |       |      |        |
|---------------------------------------------|-----|-------|------|--------|
| 1                                           | 1.0 | 7.4   | 1.56 | 0.0474 |
| 2                                           | 1.0 | 9.9   | 1.56 | 0.0640 |
| 3                                           | 1.0 | 14.5  | 1.56 | 0.0928 |
| 4                                           | 1.5 | 8.2   | 3.51 | 0.0234 |
| 5                                           | 1.5 | 11.6  | 3.51 | 0.0331 |
| 6                                           | 1.5 | 14.41 | 3.51 | 0.0411 |
| 7                                           | 2.0 | 8.6   | 6.24 | 0.0138 |
| 8                                           | 2.0 | 10.7  | 6.24 | 0.0171 |
| 9                                           | 2.0 | 15.9  | 6.24 | 0.0255 |

### 3.6 Hava Tüneli

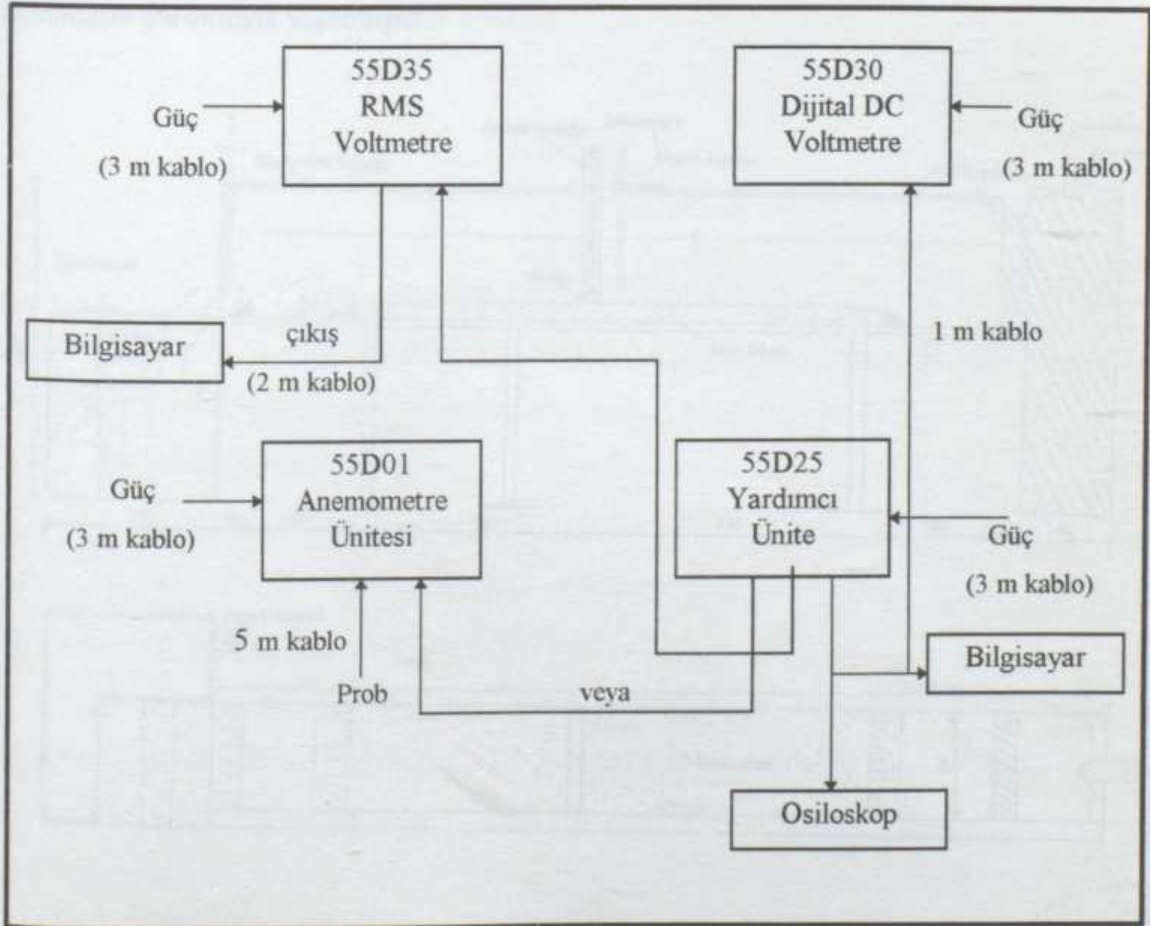
Boru hatları etrafındaki akım yapısını gözlemek ve belirlemek amacıyla İTÜ Uzay ve Havacılık Fakültesi Aerodinamik Laboratuvarında hava tüneli deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler 50x50x200 cm kesitli bir hava tünelinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14). 50mm çaplı dairesel silindir, bu tüneldeki cidarlardan birine paralel ancak akıma dik olarak yerleştirilmiştir. Cidardaki basınç dağılımını ölçmek için 69 adet basınç prizi 2.5'ar cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Silindirin çevresindeki basınç ölçümleri için ise, silindirin orta noktasına bir adet basınç prizinin yerleştirilmesi ve silindirin kendi eksenine etrafında 5'er derecelik açılarla çevrilmesi suretiyle yapılmıştır. Silindirin cidarla arasındaki açıklık oranı (G/D) 0 ile 4.64 arasında çeşitli değerler verilerek değiştirilmiştir. Bütün deneyler silindir çapına bağlı Reynolds sayısı  $6.5 \times 10^4$  değerinde gerçekleştirilmiştir.

Tünel girişine zımpara kağıdı yerleştirilmek şartıyla silindirin bulunduğu yerde tamamıyla türbülanslı sınır tabakası elde edilmiştir.

Cidardaki türbülanslı sınır tabakasını ölçmek için ise D01 tipi sıcak uç anemometresi ile 55P11 tipi tel prob kullanılmıştır (Şekil 3.15). Sınır tabakası kalınlığı 0.033m bulunmuştur.



Şekil 3.14- Hava tünelinin genel görünüşü.

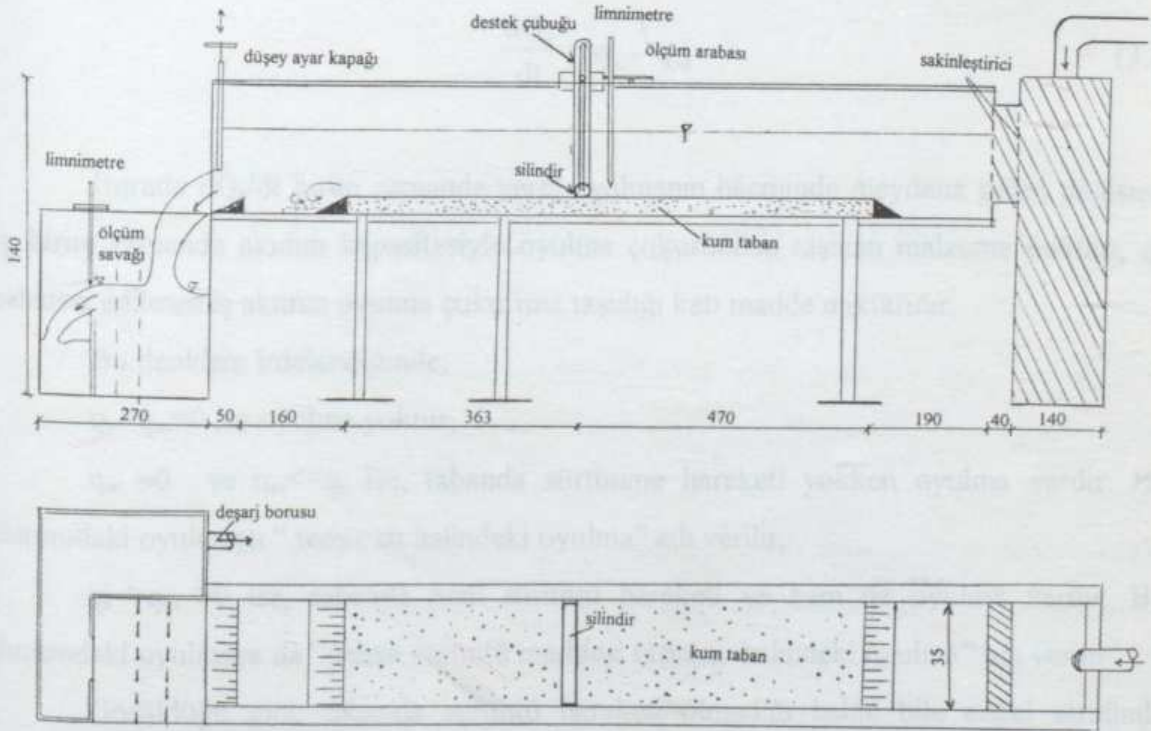


Şekil 3.15- D01 tipi sabit sıcaklı tel anemometresinin şematik izahı.

Aynı zamanda akım görünürlüğü yağ tekniği kullanarak video kamera ve fotoğraf teknikleri yardımıyla izlenmiştir.

### 3.7 Su Kanalı

Tek yönlü akım halinde boru hatları etrafındaki yerel taban hareketinin incelenmesi, dalga etkisinde yerel taban hareketinin mekanizmasını açıklamada sağlayacağı katkılardan dolayı, YTÜ Hidrolik ve Kıyı-Liman Laboratuvarında bulunan, Şekil 3.16'da görülen 35 cm eninde, 140 cm yüksekliğinde ve 170 cm uzunluğunda her iki tarafı camdan yapılmış kanal kullanılmıştır. Bu kanalın tabanına, dalga kanalında kullanılan taban malzemesi serilmiş ve yerel oyulma derinliklerinin belirlenmesi amacıyla üç farklı çapta silindir kullanılmıştır. Bunlar 3.25, 4.91, 7.64 cm'dir. Silindirlerin yerleştirme mekanizması dalga kanalındakine benzer şekilde dizayn edilmiştir. Ölçümler kanal eksenine esas alınarak bir limnimetre yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 3.16- Su kanalının genel görünümü.



### 3.8 Boru ile Deniz Taban Etkileşiminin Modellenmesi

#### 3.8.1 Denizaltı boruhatları etrafındaki yerel taban hareketine etkili parametreler

Bu güne kadar yapılan çalışmalar bir arada düşünülürse yerel oyulmanın temel mekanizması ve olaya etkili parametreler şu şekilde özetlenebilir. Yerel oyulma, bir engel etrafında oluşturulan yerel akımın yapısıyla, taban malzemesinin erozyonundan dolayı engel etrafındaki taban seviyesinin ani olarak azalmasıyla tariflenir.

Yerel akımın yapısıyla ilgili, engel etrafında oluşan vorteks sistemler dolayısıyla sekonder akımın etkisi ile tabanda dengede bulunan malzemelerin yerinden sökülmesi ve taşınması, böylece engel etrafında oyulmanın başlaması ve oyulma çukurunun oluşması şeklinde, olaylar zinciri sıralanabilir.

Genel olarak bir engel etrafında meydana gelen bu yerel değişim matematiksel olarak şu şekilde basitçe ifade edilebilir.

$$\frac{dQ_s}{dt} = q_s - q_{s0} \quad (3.8)$$

Burada  $dQ_s/dt$  birim zamanda yerel oyulmanın hacminde meydana gelen değişme,  $q_s$  birim zamanda akımın kapasitesiyle oyulma çukurundan taşınan malzeme miktarı,  $q_{s0}$  rahatsız edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde miktarıdır.

Bu denklem irdelendiğinde;

$q_s = q_{s0} = 0$  ise oyulma yoktur,

$q_{s0} \approx 0$  ve  $q_{s0} \ll q_s$  ise, tabanda sürtünme hareketi yokken oyulma vardır. Bu durumdaki oyulmaya “temiz su halindeki oyulma” adı verilir,

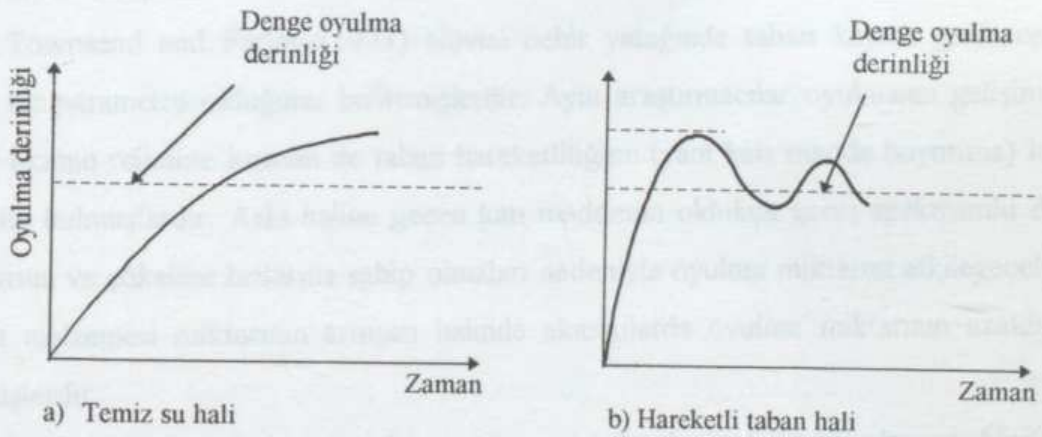
$q_s > q_{s0} > 0$  ise, tabanda hem sürüntü hareketi ve hem de oyulma vardır. Bu durumdaki oyulmaya da “daima sürüntü maddesi taşınımı halindeki oyulma” adı verilir.

Görüldüğü gibi, tabanda sürüntü hareketi olmadığı halde bile engel etrafında oyulma meydana gelmektedir. Bunun nedeni, engelden dolayı oluşan türbülans ve

vortekslerdir. Çünkü, engel etrafındaki taban kayma gerilmesini etkileyen bu olaylar tabanda oyulmaya neden olurlar.

Temiz su oyulmasında, maksimum denge oyulma derinliğine, oyulma çukuru civarındaki kayma gerilmeleri katı maddeyi hareket ettirebilecek gücün altına düştüğünde erişilir. Bu durumda maksimum oyulmaya daha uzun zamanda varılır.

Hareketli taban halindeki oyulmada, maksimum denge oyulması derinliğine, oyulma çukuruna giren katı madde ile oyulma çukurundan çıkan katı madde birbirine eşit olduğunda erişilir. Bu halde ise maksimum oyulmaya çok kısa zamanda ulaşılır ve bu seviyede oyulma çukuru denge değeri civarında periyodik olarak değişir, bunun nedeni ise hareketli tabanda oluşabilecek taban şekilleridir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17- Oyulmanın zamana göre değişimi, a) Temiz su oyulması hali, b) Hareketli taban oyulması hali.

Oyulma çukurunun sınır geometrisi devamlı olarak değişir. Sınır geometrisindeki bu değişim akım alanı ve dolayısıyla yerel akım hızını değiştirecektir. Böylece, akımın taşıdığı sürüntü yükü de değişecektir. Oyulma devam ettikçe hız azaldığından,  $q_s$  de gittikçe azalır ve sonunda  $q_{so}$ 'ye eşit olur. Neticede  $dQ/dt=0$  olacağından oyulma durur. Oyulma olayı kararlı bir karakter taşımadığı halde artık zamanla değişmeyen kararlı bir duruma ulaşılır. Bu oluşan denge durumuna "dinamik denge" adı verilir.



### 3.8.1.1 Katı madde özellikleri ve granülometrenin etkisi

Boru hatları etrafındaki yerel oyulma bir dereceye kadar zemini oluşturan katı madde özelliklerine bağlıdır. Stabil olmayan taban koşulları, boru hatlarının gömülü olmaları durumunda bile çoğu zaman ciddi hasarlara neden olmaktadır. Gerçekten stabilite, tabanı oluşturan katı maddenin fiziksel özelliğine bağlıdır.

Jawad (1983) deneylerinde iki farklı boyutta katı madde kullanmıştır. Aynı boru ve aynı boyutsuz hız alanında  $U/U_{kr}$  yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda kaba malzemenin denge oyulma çukuru üzerine olan etkisinin ince malzemeye göre daha fazla olduğunu belirlemiştir. Gökçe ise (1990) dalgalı ortamda gerçekleştirdiği çalışmasında katı madde boyutunun oyulma derinliğini değiştirmediğini sadece oyulmanın modu üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir.

Townsend and Farley (1973) alüvial nehir yatağında taban kayma gerilmesinin önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar oyulmanın gelişiminin kısmen akımın rejimine kısmen de taban hareketliliğine (yani katı madde boyutuna) bağlı olduğunu bulmuşlardır. Askı haline geçen katı maddenin oldukça geniş spektrumlu dane boyutlarına ve çökme hızlarına sahip olmaları nedeniyle oyulma miktarını etkileyecekleri ve askı malzemesi miktarının artması halinde akarsularda oyulma miktarının azaldığını belirtmişlerdir.

Bununla birlikte zırhlanma oluşumu ve etkisi üzerine çok az çalışılmıştır. Üniform olmayan taban malzemesinde zırhlanma meydana gelmekte ve daha iri olan daneler daha küçük olan malzemeleri tabaka oluşturarak korumaktadırlar. Özellikle akarsulardaki yapıların çevresindeki erozyon alanında zırh tabakasının oluşması, denge derinliğini önemli miktarda azalttığı kabul edilmektedir. Bu sonucun deniz tabanında meydana gelebilecek oyulma hali içinde geçerli olabildiği söylenmektedir.

Kjeldsen (1974)'in kararlı akım halinde oyulma derinliği için vermiş olduğu ampirik ifade dane boyutunun etkisini dikkate almamıştır. Ancak daha sonra Van Heerendand and van Roermund (1981) ve Prost (1982) Kjeldsen'in denklemine benzeyen ancak dane çapının etkisini de ihtiva eden ampirik bir bağıntı elde etmişlerdir.



Bijker and Leeuweistein (1984) dane çapının katı madde taşınımının başlamasında önemli bir etken olduğunu belirterek, kararsız akım şartları için vermiş oldukları oyulma derinliği ifadesine dane çapının etkisinin dahil edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

### 3.8.1.2 Akım ve yörüngesel hızların etkisi

Hızın yerel oyulma üzerine etkisi birçok araştırmacı tarafından farklı şekilde yorumlanmıştır. Kjeldsen et al. (1974) akım hızının oyulma derinliği üzerine etkisinin az buna karşın yapıların geometrisinin etkisinin daha fazla olduğunu ifade ederken, Littlejohns (1977) başlangıçta bozulmamış bir taban üzerine yerleştirilmiş bir boru hattı altındaki yerel oyulmanın denge durumunun akım hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Townsend and Farley (1973) çok kısa zaman aralığında meydana gelen akımdaki ani değişimlerin, mansap oyulma şeklini önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar taban kayma gerilmesinin alüvial akarsu yatağındaki oyulma hızının tariflenmesinde önemli bir parametre olduğu sonucuna varmışlardır.

Jawad (1983) oyulmanın zamanla gelişimi ve denge oyulma derinliği üzerine hem dalga hem de akıntı şartı için hızın oldukça kuvvetli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmıştır. Araştırmacı dalga parametrelerinin sabit tutulması halinde, oyulma derinliğinin akım hızına bağlı olduğunu belirtmiştir. Farklı dalga yükseklikleri için akım hızı ve denge oyulma derinliği arasında lineer bir ilişki olduğunu bulmuştur. Ancak bu lineer ilişkinin sadece temiz su halinde meydana geldiğini belirlemiştir.

Blumberg (1974) boru hatlarının çoğunun uzun periyodlu dalga ve gel-git neticesindeki büyük taban akıntılarından dolayı zarar gördüğünü belirtmiştir.

Wilson et al. (1976) taban yakınındaki akım hızının katı madde taşıma kapasitesine etkisini dikkate alarak çalışmıştır. Katı madde taşıma kapasitesinin dalga iklimi ile değişmekte olduğunu, bundan dolayı boru hattına yakın akıntının yeterince kuvvetli olması (boru hattı gömülü olsa dahi) erozyona, dolayısıyla yapının ortaya çıkmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Bernetti and Leeuweistein (1984) oyulma derinliğinin dalga periyodu,  $T$ , ve dalga yüksekliğine,  $H$ , bağlı olan  $u_b$  yörüngesel hız ile arttığını belirtmişlerdir.

### 3.8.1.3 Dalga karakteristiklerinin etkisi

Jawad (1983) yapmış olduğu çalışmada dalga yüksekliğinin artması ile yörüngesel hızın arttığını ve bundan dolayı temiz su oyulması halinde dalga yüksekliği ile oyulma derinliği arasındaki lineer ilişkiden oyulma derinliğinin arttığını belirtmiştir. Ancak dalga yüksekliği tabanda hareketi başlatacak büyüklüğe ulaştığı zaman bu lineer ilişki bozulmaktadır. Dalga yüksekliğinin çok küçük olması durumunda, denge oyulma derinliği kararlı akım hali ile oldukça uyumludur. Ancak Jawad (1983) oyulma derinliği üzerine dalga yüksekliği ve hızın beraber etkisinin hesaplanmasının oldukça güç olduğunu belirtmiştir.

İbrahim and Nalluri (1986a-b) artan dalga yüksekliği ile oyulma derinliğinin artma eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir.

### 3.8.1.4 Atak açısının etkisi

Atak açısı boru hattı altındaki oyulma derinliğini etkilemesine rağmen çok az dikkate alınan bir parametredir. Herbich (1981) boru hattını dalga yönüne belirli atak açıları ile yerleştirerek etrafındaki oyulmayı araştırmıştır. Araştırmacı boru hattının dalga cephesi ile büyük açı yapması halinde boru hattı yarısına kadar gömülü olsa dahi açığa çıkana kadar oyulmanın meydana geldiğini belirtmiştir.

Hansen et al. (1991) kararlı akım şartlarında her iki tarafından mesnetli bir boruya akımın dik gelmesi durumunda boru hattının her iki ucundaki akım koşulları tamamıyla aynı olduğu halde, belli bir atak açısı ile gelmesi durumunda şartların tamamen farklı hale geldiğini belirtmişlerdir. Akımın dik açıdan farklı bir açı ile gelmesi durumunda mesnetlerden birinde yığılma meydana gelirken diğerinde oyulma olduğunu iki mesnet arasındaki oyulma çukurunun yer değiştirdiğini belirtmişlerdir.



### 3.8.1.5 Derinliğin etkisi

Araştırmacıların bazıları yapmış oldukları çalışmalar sonucunda oyulma derinliğinin akım derinliğine karşı hassas olmadığını belirtmişlerdir. Kjeldsen et. al (1974) tek yönlü akım deneylerinde yaklaşan akım derinliğini değiştirerek akım derinliğinin oyulma üzerine herhangi bir etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Diğer yandan Hussain (1979) akım derinliğinin boru çapına oranının 4'ü aşması durumunda akım derinliğinin oyulmaya etkisinin minimuma indiğini belirtmiştir.

Jawad (1983) akım derinliğinin etkisini akım derinliğinin boru çapına oranı olan bir parametre ile ifade etmeye çalışmıştır. Bu araştırmacı dalga ile akıntının birlikte olması hali için akım derinliğindeki artışın, oyulma derinliğini azalttığını belirtmiştir.

Geçiş veya derin su şartlarında gömülü boru hatları ile ilgili problemlerin, sığ su boru hatları projelerinde karşılaşılanlardan tamamen farklı olduğu bulunmuştur. (Herbich, 1981). Sığ su ve derin su şartlarında zemin özellikleri farklılıklar göstermektedir. Sığ su şartlarında tabanda etkili olan yörüngesel hız nedeniyle çok ince malzemenin askıya geçmesi sonucunda daha kaba olan bir kumsal taban söz konusu olacaktır. Buna karşın derin suda çok ince malzemenin askıya geçmemesi nedeniyle tabanı kil ve çamur ile kaplı bulunacaktır. Bundan dolayı su derinliğindeki farklılıkların bir sonucu olarak sığ su ve derin su boru hatları arasındaki farklı dizayn yaklaşımlar ve faktörler dikkate alınmalıdır.

### 3.8.1.6 Taban şekillerinin etkisi

Shields parametresinin 0.8 ile 1.0'den küçük değerlerinde mevcut olan kum dalgacıklarının oyulma işlemi üzerine etkisinin önemli olmadığı belirlenmiştir (Sümer and Fredsøe, 1990). Bu kum dalgacıklarının etkisinin küçük olduğunu gösteren diğer bir neden ise muhtemelen borunun akım alanını rahatsız ederek kum dalgacıklarının oluşumunu etkilemesiyle boru hattı civarında kum dalgacıklarının meydana gelmeyişi olarak izah edilmiştir (Sümer and Fredsøe, 1990).



### 3.8.1.7 Açıklık oranının etkisi

Boru ile taban arasındaki açıklık küçüldükçe, boru hattının denge oyulma derinliği üzerine etkisi artmaktadır. Ancak oyulma derinliği sadece açıklık oranına göre değil KC sayısına göre de değişmektedir, çünkü aynı açıklık oranında farklı KC sayılarında oyulma miktarı değişebilmektedir. Örneğin belirli KC sayılarında  $G/D=1$  iken oyulma gözlenmezken, KC'nin artan değerlerinde  $G/D \approx 3$  olması durumunda dahi oyulmanın meydana gelebileceği belirlenmiştir (Sümer and Fredsøe, 1990).

### 3.8.1.8 Kıyı profillerinin etkisi

Kıyı morfolojisinin değişime uğraması mühendislik açısından son derece önemli bir konudur. Kıyılarda dalga ve akıntı etkisiyle oluşan katı madde hareketi kıyıyı ya erozyona uğratmakta ya da doldurmaktadır. Kıyı çizgisine dik olan katı madde hareketi kıyının kısa dönemli değişimi açısından önem taşımaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar ve prototip ölçümleri temelde iki tip kıyı profilinin meydana geldiğini göstermiştir. Bunlar normal ve fırtına profilleridir. Normal profil fırtınalı havalarda dışında normal deniz koşullarında herhangi bir kıyıda oluşabilmektedir. Bu profili nisbeten uzun periyodlu ve yüksekliği küçük dalgalar oluşturmaktadır. Kıyı yakınlarında kırılan dalgalar kıyı profili üzerinde tırmanır. Ancak bir sonraki dalganın geliş süresi uzun olduğundan suyun bir kısmı yer altına sızarak geri döner. Bunun neticesinde tırmanma esnasında büyük su kütlesi hareketi ile kıyıya doğru taşınan katı maddeleri bir kısmı zayıf geri dönüş akımından dolayı kıyıda kalırlar. Dolayısıyla kıyıda yığılma meydana gelerek normal profil oluşur. Bu profilin en tipik özelliği profilin orta bölgesinde bir basamağın meydana gelmesidir.

Fırtına profili ise daha küçük periyodlu fakat daha büyük dalga yüksekliğine sahip fırtınalı deniz koşullarında oluşmaktadır. Fırtına şartlarının bir süre devam etmesi sonucunda kıyıya tırmanan büyük miktardaki su hacmi ile surf bölgesi içersindeki ortalama su seviyesinde meydana gelen yükselme kumsalı suya doymun hale getirerek yeraltı su seviyesinin yüzeye daha fazla yaklaşmasına neden olur. Böylece tırmanma ve geri dönüş

akımlarındaki su hacmi dengeye ulaşır. Geri dönüş akımında aşağıya taşınan katı madde miktarı tırmanma sırasında taşınan katı ömadde miktarından çok daha büyüktür. Bunun nedeni ise tırmanma sırasında taşınım kıyı yönünde iken geri dönüş sırasında eğimle aynı yöndedir. Fırtınanın başlamasından kısa bir süre sonra kıyıda erozyonun meydana gelmesiyle açığa taşınan katı madde bir noktada toplanır. Bu noktaya açıktan da katı madde taşınımı olduğundan bir kum tepesi oluşur. Bu barın oluşumu sonunda daha önce kıyıda kırılan dalgalar artık bar üzerinde kırılarak enerjilerinin büyük bölümü burada harcarlar ve kıyıda erozyon sona erer.

Horikawa (1978) taban profilleri ile ilgili yapmış oldukları laboratuvar çalışmalarıyla bu iki kıyı profiline ilaveten bir de geçiş profilinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarının sonucunda elde ettikleri aşağıdaki ampirik ifadeyi kullanarak taban profillerini sınıflandırmışlardır.

$$\frac{H_0}{L_0} = C s^{-0.27} (d_{50} / L_0)^{0.67} \quad (3.9)$$

burada C bir ampirik katsayı olup, aldığı değerlere göre sınıflandırması şu şekilde gerçekleştirilmiştir.

- C>8 fırtına profili,
- 4<C<8 geçiş profili,
- C<4 normal profil.

Bu ifadeden de anlaşıldığı gibi kıyı profillerinin oluşumu sadece dalga dikliğine değil aynı zamanda kıyı eğimine ve dane çapının dalga uzunluğuna oranına da bağlıdır (Horikawa, 1978). Ancak literatürde, kıyı profillerinin boru hatları etrafındaki yerel taban hareketine olan etkisiyle ilgili bilgi yoktur.





### 3.8.2 Boyut analizi

Denizaltı boru hatları altındaki yerel denge oyulma derinliği boru-hareketli taban etkileşimini karakterize eden bazı bağımsız değişkenlere bağlıdır. Bu bağımsız değişkenleri Tablo 3.2'deki gibi şöyle sıralayabiliriz.

Tablo 3.2- Etkili parametreler.

|                                                | Parametre                       | Sembol   | Birim              | Boyut                          |
|------------------------------------------------|---------------------------------|----------|--------------------|--------------------------------|
| Boruyu karakterize eden değişkenler            | Boru çapı                       | D        | m                  | L                              |
| Akışkanı karakterize eden değişkenler          | Akışkanın özgül kütlesi         | $\rho$   | kg/m <sup>3</sup>  | ML <sup>-3</sup>               |
|                                                | Akışkanın kinematik viskozitesi | $\nu$    | m <sup>2</sup> /sn | L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> |
| Akımı karakterize eden değişkenler             | Akım derinliği                  | d        | m                  | L                              |
|                                                | Yörüngesel hız                  | $u_b$    | m/sn               | LT <sup>-1</sup>               |
|                                                | Dalga yüksekliği                | H        | m                  | L                              |
|                                                | Dalga boyu                      | L        | m                  | L                              |
|                                                | Dalga periyodu                  | T        | sn                 | T                              |
| Taban malzemesini karakterize eden değişkenler | Katı madde özgül kütlesi        | $\rho_s$ | kg/m <sup>3</sup>  | ML <sup>-3</sup>               |
|                                                | Dane çapı                       | $d_{50}$ | m                  | L                              |
| Diğer değişkenler                              | Kıyı şev eğimi                  | s        | m/m                | -                              |
|                                                | Yerçekimi ivmesi                | g        | m/sn <sup>2</sup>  | LT <sup>-2</sup>               |
|                                                | Oyulma derinliği                | S        | m                  | L                              |

Denizaltı boru hatları altındaki denge oyulma derinliği boru hattı, akım rejimi ve hareketli taban arasındaki etkileşim sonucunda bir çok bağımsız değişkenin olayı etkileyeceği düşünülerek aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir.



$$S=f_1(D, \rho, v, d, u_b, H, L, T, \rho_s, d_{50}, s, g) \quad (3.10)$$

Deneysel çalışmada olaya etkili olan değişkenlerin sayısını azaltmak ve bağımsız değişkenleri boyutsuz formda ifade edebilmek için yukarıdaki değişkenlerden  $D$ ,  $u_b$  ve  $\rho$  tekrarlanan değişkenler olarak seçilerek boyut analizi uygulanmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3- Oyulma derinliğine etki eden parametreler için boyut analizi.

|   | $k_1$ | $k_2$    | $k_3$ | $k_4$  | $k_5$ | $k_6$ | $k_7$ | $k_8$ | $k_9$ | $k_{10}$ | $k_{11}$ | $k_{12}$ | $k_{13}$ |
|---|-------|----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
|   | $d$   | $d_{50}$ | $v$   | $\rho$ | $g$   | $s$   | $H$   | $T$   | $S$   | $L$      | $D$      | $u_b$    | $\rho$   |
| M | 1     | 1        | 2     | -3     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1        | 1        | 1        | -3       |
| L | 0     | 0        | 0     | 1      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 1        |
| T | 0     | 0        | -1    | 0      | -2    | 0     | 0     | 1     | 0     | 0        | 0        | -1       | 0        |

Tablo 3.3'den aşağıdaki bağıntılar yazılabilir;

$$k_4 + k_{13} = 0 \quad (3.11)$$

$$-k_3 - 2k_5 + k_8 - k_{12} = 0 \quad (3.12)$$

$$k_1 + k_2 + 2k_3 + 3k_4 + k_5 + k_7 + k_9 + k_{10} + k_{11} + k_{12} - 3k_{13} = 0 \quad (3.13)$$

Bu üç denklemden  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{13}$  çözülürse;

$$k_{13} = -k_4 \quad (3.14)$$

$$k_{12} = k_8 - 2k_5 - k_3 \quad (3.15)$$

$$k_{11} = -k_1 - k_2 - k_3 - k_5 - k_7 - k_8 - k_9 - k_{10} \quad (3.16)$$

boyutsuz sayılar aşağıdaki Tablo 3.4 yardımıyla elde edilir.

Tablo 3.4- Oyulma derinliğine etki eden boyutsuz parametreler.

|                 | k <sub>1</sub> | k <sub>2</sub>  | k <sub>3</sub> | k <sub>4</sub> | k <sub>5</sub> | k <sub>6</sub> | k <sub>7</sub> | k <sub>8</sub> | k <sub>9</sub> | k <sub>10</sub> | k <sub>11</sub> | k <sub>12</sub> | k <sub>13</sub> |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                 | d              | d <sub>50</sub> | v              | ρ              | g              | s              | H              | T              | S              | L               | D               | u <sub>b</sub>  | ρ               |
| Π <sub>1</sub>  | 1              | 0               | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | -1              | 0               | 0               |
| Π <sub>2</sub>  | 0              | 1               | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | -1              | 0               | 0               |
| Π <sub>3</sub>  | 0              | 0               | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | -1              | -1              | 0               |
| Π <sub>4</sub>  | 0              | 0               | 0              | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | 0               | 0               | -1              |
| Π <sub>5</sub>  | 0              | 0               | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | 1               | -2              | 0               |
| Π <sub>6</sub>  | 0              | 0               | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 0              | 0               | 0               | 0               | 0               |
| Π <sub>7</sub>  | 0              | 0               | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 0               | -1              | 0               | 0               |
| Π <sub>8</sub>  | 0              | 0               | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0               | -1              | 1               | 0               |
| Π <sub>9</sub>  | 0              | 0               | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0               | -1              | 0               | 0               |
| Π <sub>10</sub> | 0              | 0               | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1               | -1              | 0               | 0               |

Yukarıdaki işlemler sonucunda oyulmaya etkili boyutsuz parametreler aşağıdaki gibi bulunmuştur;

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{d}{D}, & \Pi_2 &= \frac{d_{50}}{D}, & \Pi_3 &= \frac{v}{u_b D}, & \Pi_4 &= \frac{\rho_s}{\rho}, & \Pi_5 &= \frac{gD}{u_b^2}, & \Pi_6 &= s, \\ \Pi_7 &= \frac{H}{D}, & \Pi_8 &= \frac{u_b T}{D}, & \Pi_9 &= \frac{S}{D}, & \Pi_{10} &= \frac{L}{D} \end{aligned}$$

O halde rölatif oyulma derinliği,  $S/D$ , diğer boyutsuzların fonksiyonu olarak aşağıdaki ifade ile

$$\frac{S}{D} = f_2\left(\frac{d}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{v}{u_b D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{gD}{u_b^2}, s, \frac{H}{D}, \frac{u_b T}{D}, \frac{L}{D}\right) \quad (3.17)$$

verilir.

3.17 fonksiyonel bağıntısında görülen boyutsuzlar sırasıyla;

- $S/D$  rölaf oyulma derinliği,
- $d/D$  rölaf boru çapı,
- $d_{50}/D$  rölaf dane çapı,
- $Re=u_b D/\nu$  boru Reynolds sayısı,
- $\rho_s/\rho$  rölaf yoğunluk,
- $Fr^2=u_b^2/gD$  boru Froude sayısı,
- $s$  Şev eğimi,
- $H/D$  rölaf dalga yüksekliği,
- $KC=u_b T/D$  Keulegan-Carpenter sayısı,
- $L/D$  rölaf dalga boyu.

olarak bilinmektedir.

Bu boyutsuz büyüklüklerin kendi aralarında bazı işlemlere tabi tutulması ile yeni boyutsuz büyüklükler elde edilebilir. Bu elde edilen yeni boyutsuz büyüklükler;

$$\frac{S}{D} = f_3(Re, KC, \theta, \xi, \frac{d}{H}, \frac{d}{D}, U_R, \frac{H}{L}, \frac{H}{D}) \quad (3.18)$$

veya

$$\frac{S}{D} = f_4(\beta, KC, \theta, \xi, \frac{d}{H}, \frac{d}{D}, U_R, \frac{H}{L}, \frac{H}{D}) \quad (3.19)$$

Şeklinde yazılabilir. Sığlaşma bölgesini de içeren boru-hareketli deniz taban etkileşimini tanımlayan bu bağıntıdaki boyutsuz terimler sırasıyla incelenirse;

- $\beta = \frac{KC}{Re} = \frac{\nu T}{D^2}$ , frekans parametresi, Re sayısı ile KC sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren

bir boyutsuz sayı olup aynı zamanda periyot parametresi olarak da bilinir,



- $KC = \frac{u_b T}{D}$ , Keulegan-Carpenter sayısı, yörüngesel yer değiştirmenin, silindir boyutuna olan oranını göstermektedir. Bu sayı boru hatları etrafındaki vorteks saçılımını çok iyi karakterize etmektedir,
- $\theta = \frac{u_*^2}{g(\Delta - 1)d_{50}}$ , Shields parametresi, tabanda hareketin başlamasını gösteren bu boyutsuz sayının tabanın hareketli olması durumunda boru hatları etrafındaki yerel oyulma olayına etkisinin olmadığı bulunmuştur,
- $\xi = \frac{s}{\sqrt{H/L_0}}$ , surf parametresi, sığlaşma bölgesinde dalganın değişimini ve kırılma tipini karakterize eden bir boyutsuz sayıdır. Bu parametre aynı zamanda kıyı bölgesinde profillerin oluşumunu da tanımlamaktadır,
- $\frac{d}{H}$ , derinlik parametresi, geçiş derinliği bölgesinden itibaren dalganın değişen derinlikle olan etkileşimini karakterize eden bir parametredir,
- $\frac{d}{D}$ , rölatif boru çapı, su derinliğinin boru çapı ile oranını gösteren bu parametre, su derinliğinin boru etrafındaki akım alanına, dolayısıyla taban hareketine olan etkisini göstermektedir,
- $U_R = \frac{HL^2}{d^3}$ , Ursell sayısı, dalgaların lineerlik özelliğini karakterize eden bu sayı yörüngesel yerel ivmenin konvektif ivmeye olan oranı olarak da bilinmektedir. Ursell sayısı bu özelliği ile değişen derinlikle dalga özelliklerinde meydana gelen değişimi tanımlayan bir boyutsuzdur,
- $\frac{H}{L}$ , dalga dikliği,
- $\frac{H}{D}$ , rölatif dalga yüksekliği, dalga yüksekliğinin boru çapına olan oranını gösteren bu boyutsuz, değişen boru çapının dalga yüksekliği ile olan etkileşimi ile boru hattı etrafındaki akım alanındaki değişimi tanımlamaktadır.

Görüldüğü gibi çok sayıda değişkenin etkili olduğu boru-hareketli deniz taban etkileşimi problemi bu anlamlı boyutsuzlar yardımıyla bir seri detaylı deneysel çalışma yapılarak çözümlenmeye çalışılacaktır. Böylece probleme en uygun çözümü getirecek model bağıntı bulunacaktır.

### 3.9 Deney Programı

- Öncelikle hava tüneline silindir etrafındaki basınç dağılımı ve akım yapısı incelenmiştir. Bunun için hız ve basınç ölçümleri ile görünürlük deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- Dalga etkisindeki yerel taban hareketinin mekanizmasına getireceği açıklamalar nedeniyle, tek yönlü akım alanında boru hatları etrafındaki yerel oyulma çukurunun gelişiminin ve derinliğinin belirlenmesi amacıyla farklı çapta silindirler dikkate alınarak bir seri deney yapılmıştır.
- Dalga kanalındaki ölçümlere, deneyler esnasında dikkate alınacak olan dalgaların üretilip bunlara ait özelliklerin belirlenmesiyle başlanmıştır. Gerek 1/5 ve gerekse 1/10 eğimli kıyı şevleri boyunca dalgaların sığlaşma tesirlerinin belirlenmesi için bir seri dalga ölçümü yapılarak dalgaların derinlikle değişen yükseklikleri belirlenmiştir. Kırılma şartları bu ölçümlerden belirlenmiş ve ayrıca video kamera kayıtlarından kontrol edilerek deneysel verilerin sağlıklı olmasına çalışılmıştır.
- Gerek düzlem gerekse 1/5 ve 1/10 rijit kıyı şevleri boyunca farklı ölçüm kesitleri dikkate alınarak hız ve kayma gerilmesi dağılımları her dalga şartı için belirlenmiştir. Bütün bu deneylerin yapılması yine bir seri kalibrasyon deneyini gerektirmiştir.
- Dalga etkisinde, hareketli taban deneylerinin ilk aşamasında gerek yerel taban hareketlerinin incelenmesi gerekse literatürde mevcut çalışmalarla mukayeselerin yapılabilmesi amacıyla video çekimleri yapılmış ve bunlarda değerlendirilmiştir.
- Deneylerde dikkate alınan 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimlerinde hareketli taban durumunda her dalga koşulunda oluşan kıyı profilleri belirlenmiştir.
- 1/5 ve 1/10 kıyı şevleri boyunca sığlaşma bölgesinde tüm dalga koşullarında farklı derinliklerde her silindir için, boru-hareketli taban etkileşimini belirleyebilmek amacıyla boru hattı etrafındaki yerel oyulma derinliği ölçülmüştür.





## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

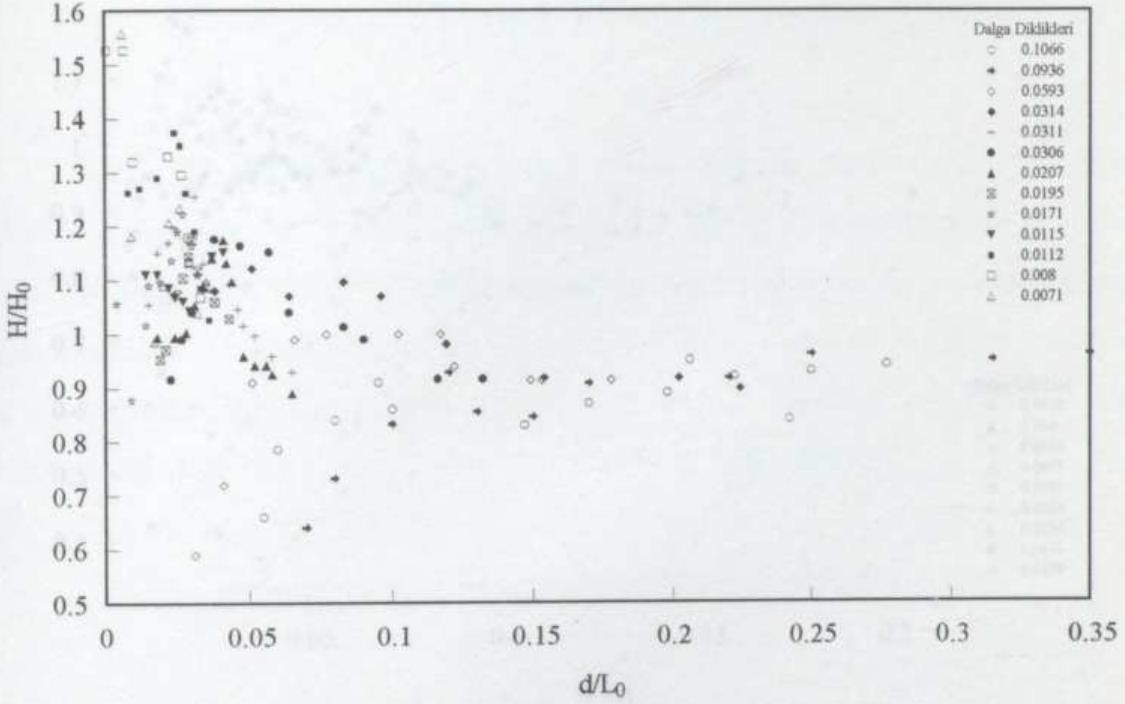
#### 4.1 Sığlaşmanın Akım Alanı Üzerine Etkileri

Dalgaların kıyıya doğru ilerlemeleri esnasında azalan derinlik etkisini göstermeye başlar. Sığlaşma ile birlikte dalgaların boyları kısalır ve yükseklikleri ile diklikleri artar, böylece belli bir derinliğe ulaştıklarında tepeleri köpürerek kırılırlar. Kırılma, belirli bir derinlikte akışkan partiküllerinin yörüngesel yatay hız bileşeninin, dalga yayılma hızından daha büyük olması halinde bu partiküllerin dalga formundan ayrılmasıyla başlar ve bu olayla birlikte büyük enerji kayıpları meydana gelmeye başlar. Bu enerji kaybından dolayı surf bölgesi içerisinde ilerleyen dalgaların yükseklikleri hızla azalır.

Bu bölümdeki deneysel çalışmada dalga karakteristiklerinin sığlaşma bölgesinde değişiminin belirlenmesi ve bu değişimlerin akım alanı üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler teori ve daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalarla kontrol edilmiştir.

Bu bölümde 1/5 ve 1/10 eğimlere sahip iki farklı kıyı şevi üzerinde sığlaşma ile ilgili deneyler yapılmıştır. Bilindiği gibi dalgaların eğimli tabanda ilerlemeleri sırasında dalga parametrelerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Yerel dalga karakteristikleri yaklaşan dalga özellikleri ve taban eğimi ile oldukça yakından ilgilidir. Dalga parametrelerinin sığlaşma bölgesindeki değişimleri deneysel olarak belirlenmiştir. 1/5 ve

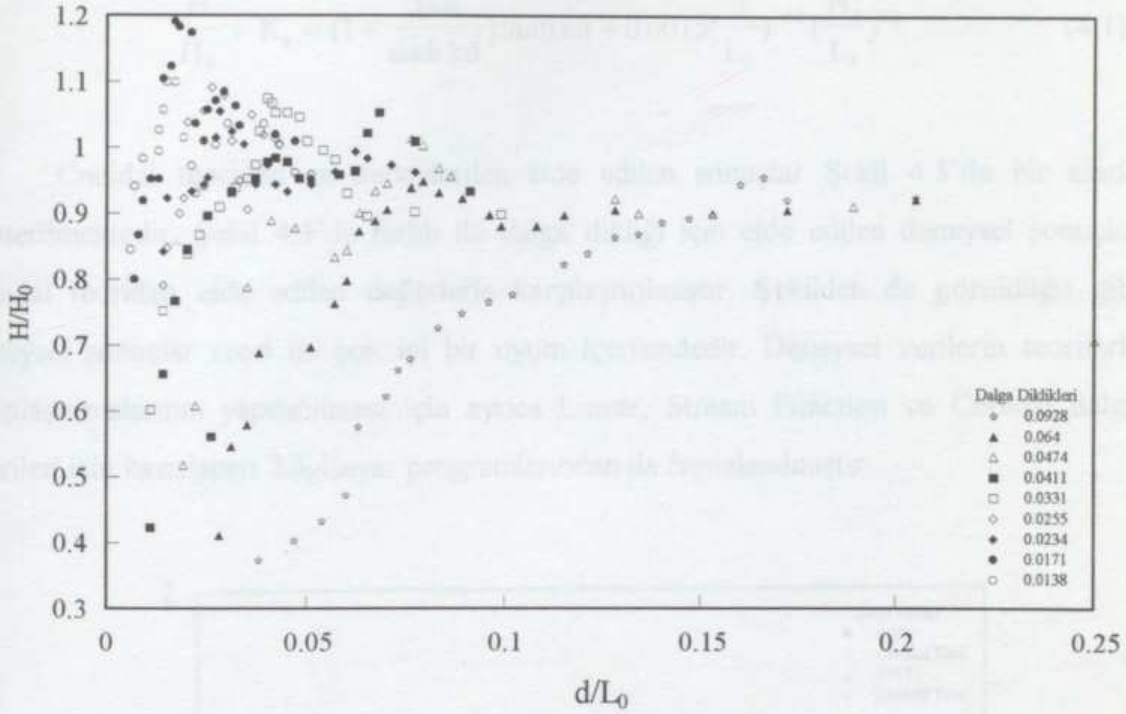
/10 kıyı şev eğimlerine sahip iki tabanda farklı dikliklere sahip dalgaların sığlaşması Şekil 4.1 ve 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1- 1/5 şev eğimli tabanda sığlaşma.

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi 1/5 şev eğimli kanalda yapılan deneylerde spilling, plunging ve surging tipi karakter taşıyan dalgalar mevcuttur. Sığlaşmanın genel özelliği bütün dalgalar için aynı karaktere sahip olsa da, farklı kırılma tipleri için sığlaşma,  $(H/H_0)$ , rölatif derinliğe,  $(d/L_0)$ , bağlı olarak kendine has karakteristik bir değişim göstermektedir. Dalga dikliğinin büyük olduğu spilling tipi dalgalar daha açıkta sığlaşma etkisine maruz kalmakta, dolayısıyla sürekli olarak küçülerek kıyıya doğru ilerlemektedirler. Buna karşılık dalga dikliğinin daha küçük olduğu plunging tipi dalgalar kıyıya daha yakın, yani rölatif derinliğin 0.1'den küçük olduğu bölgede büyük sığlaşma katsayılarına ulaşmakta ve maksimum büyüklüğe ulaştıktan sonra aniden küçülmektedir. Bu tip dalgalarda kırılmadan sonra enerji kaybı çok büyük olup, Şekil 4.1 ve 4.2'den de görüldüğü gibi kırılmadan sonra sığlaşma değişiminin büyük bir eğime sahip olmasından da bu

anlaşılmaktadır. Dalga dikliğinin çok daha küçük olduğu surging tipi dalgalar ise kıyıya çok daha yakın bölgede maksimum dikliklere ulaşmaktadırlar.



Şekil 4.2- 1/10 şev eğimli tabanda sığlaşma.

Iwagaki et al. (1982), Swift and Dixon (1987) ve Kamphuis (1991) dalga transformasyonları hakkında bir takım ifadeler vermişlerdir. Bu araştırmacılar rölatif derinliğin  $d/L_0 < 0.1$  olduğu hallerde lineer dalga teorisinin geçersiz olduğunu ve cnoidal teori ile lineer olmayan dalga teorilerinin uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca  $H/H_0$  oranının sadece rölatif derinliğe, ( $d/L_0$ ), değil aynı zamanda yaklaşan dalga dikliğine de bağlı olduğunu da göstermişlerdir. Bu sonuç Şekil 4.1 ve 4.2'den de gayet açık olarak görülmektedir. Dalga dikliğinin azalmasıyla dalgalar maksimum sığlaşma katsayılarına daha küçük derinlik parametresinde ulaşmaktadırlar. Bu sonuç daha önce yapılmış çalışmalarla oldukça iyi bir uyum göstermektedir.

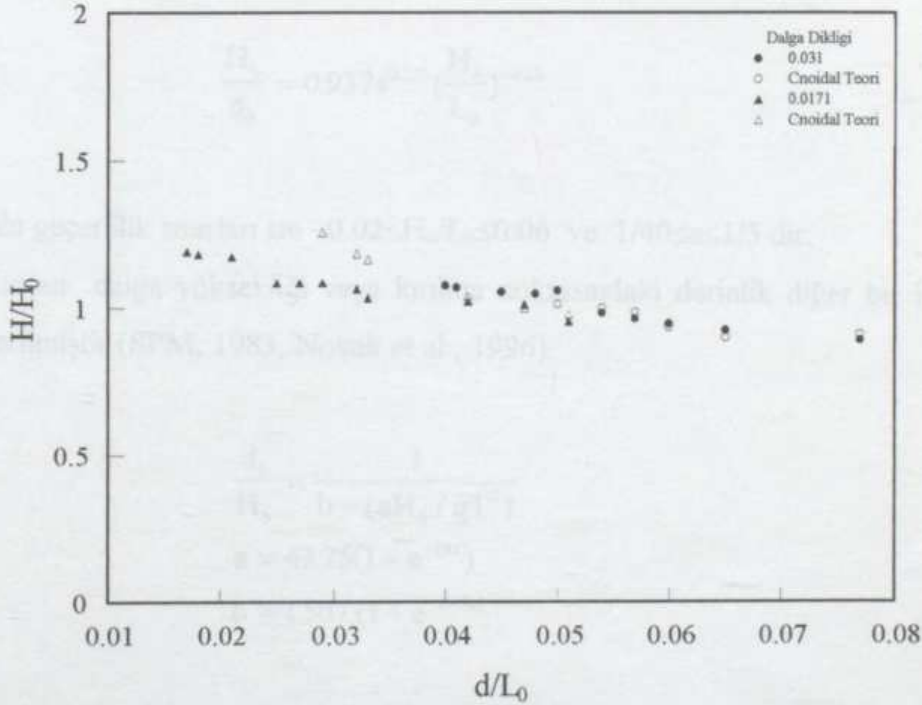
Bilindiği gibi rölatif derinliğin  $d/L_0 < 0.1$  olması halinde artık lineer dalga teorisi geçerli değildir. Rölatif derinliğin bu sınırından sonra Cnoidal dalga teorisi daha gerçekçi sonuçlar verdiğiinden bu teori uygulanmıştır (Yüksel and Narayanan, 1994a). Iwagaki et



al. (1982) kompleks hesaplamalar gerektiren cnoidal dalga teorisi yerine bu teoriyi kullanarak elde edilmiş daha basit bir ifade önermişlerdir (denklem 4.1).

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \left(1 + \frac{2kd}{\sinh kd}\right) \tanh kd + 0.0015 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{-2.8} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1.2} \quad (4.1)$$

Cnoidal teoriden ve deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'de bir arada gösterilmektedir. Şekil 4.3'de farklı iki dalga dikliği için elde edilen deneysel sonuçlar cnoidal teoriden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar teori ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Deneysel verilerin teorilerle karşılaştırmalarının yapılabilmesi için ayrıca Lineer, Stream Function ve Cnoidal dalga teorileri için hazırlanan bilgisayar programlarından da faydalanılmıştır.



Şekil 4.3- Deneylerden elde edilen sığlaşma katsayılarının Cnoidal teori ile karşılaştırılması.

Daha önceki çalışmalardan da bilindiği gibi kırılma noktasındaki derinlik ve dalga yüksekliği derin su dalga parametrelerine H<sub>0</sub>, L<sub>0</sub> ve taban eğimine bağlıdır. Ancak eğimli bir tabanda kırılan dalgaların mekaniği ile ilgili bugüne kadar kabul edilmiş herhangi bir

teori mevcut değildir. Bunun için, Apelt and Piorewicz (1987)'in yapmış oldukları çalışmadaki yöntem uygulanarak kırılan dalga yüksekliği için denklem 4.2 (Méhaute and Koh, 1967) ve kırılma derinliği için ise denklem 4.3 (Singamsetti and Wind, 1980) ve SPM (1983) tarafından önerilen ampirik ifadeler kullanılarak ölçümler kontrol edilmiştir.

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76s^{1/7} \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/4} \quad (4.2)$$

Kırılma noktasındaki dalga yüksekliği,  $H_b$ , şev eğimi ve derin su dalga dikliğine bağlı olup denklem 4.2'nin geçerliliği  $0.002 \leq H_0/L_0 \leq 0.09$  ve  $1/50 \leq s \leq 1/5$  sınırları içerisinde dir.

Kırılma derinliği için ise Singamsetti ve Wind (1980)'e ait aşağıdaki ampirik ifade kullanılmıştır.

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.937s^{0.155} \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.13} \quad (4.3)$$

bu ifadenin geçerlilik sınırları ise  $0.02 \leq H_0/L_0 \leq 0.06$  ve  $1/40 \leq s \leq 1/5$  dir.

Kırılan dalga yüksekliği veya kırılma noktasındaki derinlik diğer bir ifadeyle şu şekilde verilmiştir (SPM, 1983, Novak et al., 1996).

$$\begin{aligned} \frac{d_b}{H_b} &= \frac{1}{b - (aH_0 / gT^2)} \\ a &= 43.75(1 - e^{-19s}) \\ b &= 1.56 / (1 + e^{-19.5s}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dalgaların kırılma tipi, surf parametresi yardımı ile tesbit edilmektedir (Novak et al., 1996).

$$\xi = s / (H / L_0)^{0.5} \quad (4.5)$$

bu parametreye göre kırılan dalgalar:

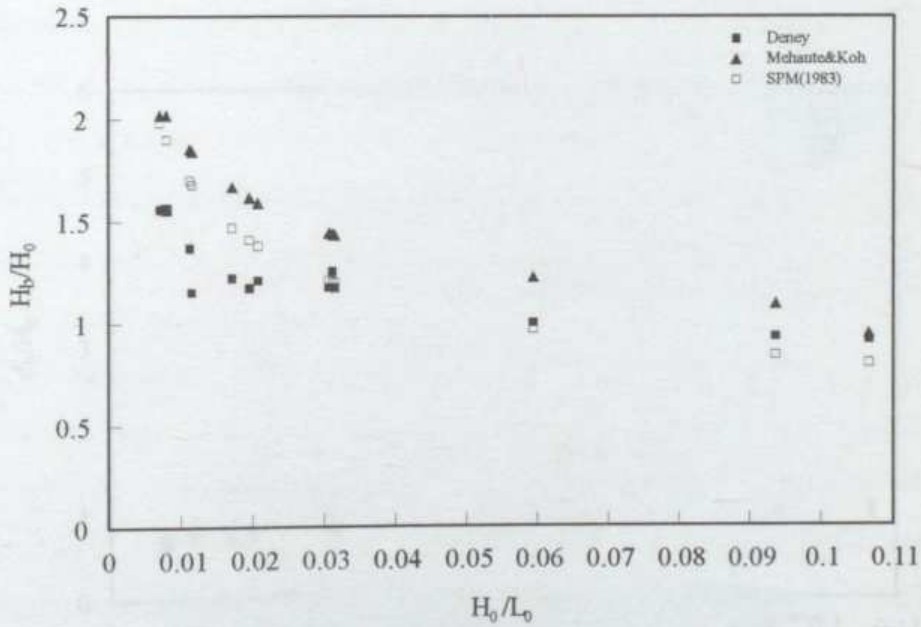
$\xi < 0.5$  spilling,

$0.5 < \xi < 3.3$  plunging,

$\xi > 3.3$  surging

olarak sınıflandırılmaktadır.

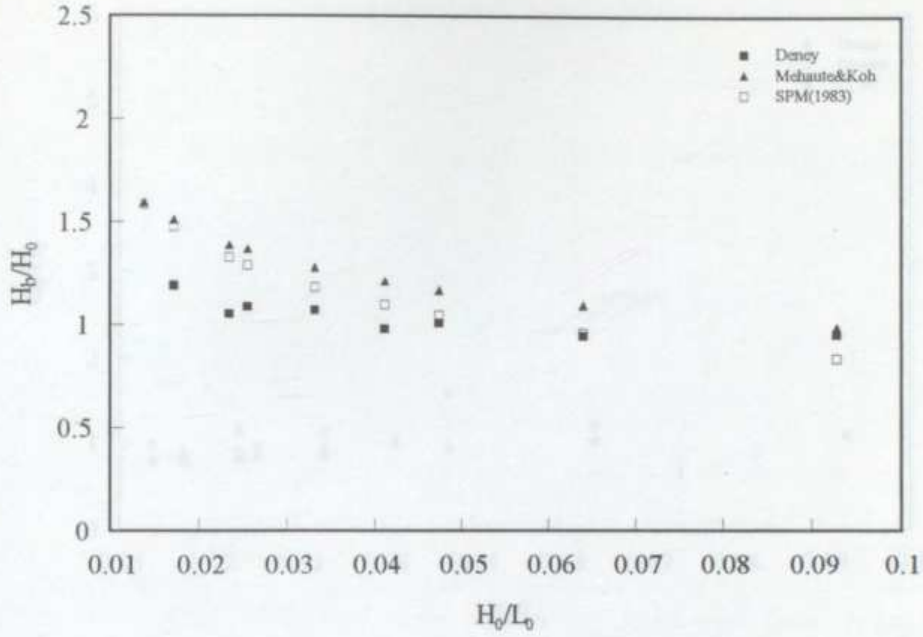
Şekil 4.4 ve 4.5'de deneylerden elde edilen değerler (4.2), (4.3) ve (4.4) eşitlikleri ile kıyaslanmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar bu ifadelerle yeterince uyumludurlar. Dalgaların kırılma derinlikleri hem kıyı boyunca dalga profil kayıtlarının incelenmesi hem de alınan video kayıtlarından yapılan gözlemler yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca  $d_b/H_b$  oranı surf parametresi arttıkça küçülmekte, dalga dikliği ile de artmaktadır. Bu da Battjes (1974)'in çalışmasıyla uygunluk göstermektedir.



a) 1/5 Eğim

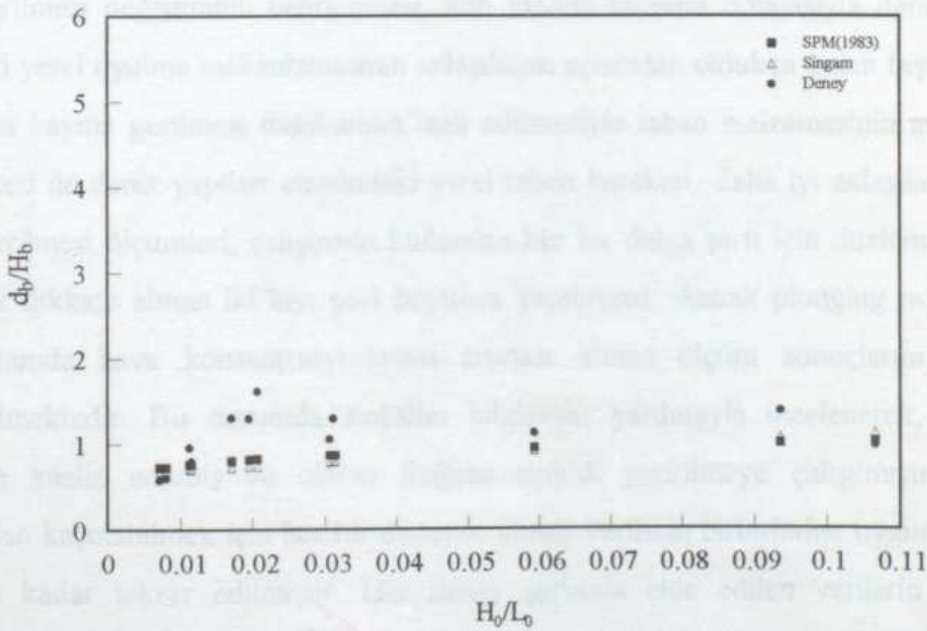
Şekil 4.4-Rölatif kırılma yüksekliğinin derin su dalga dikliği ile değişimi.





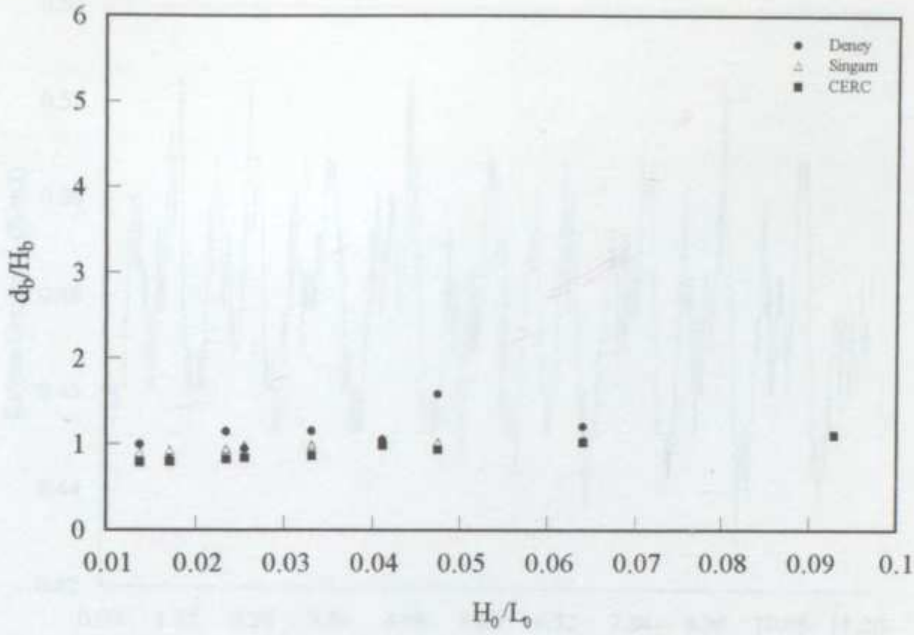
b) 1/10 Eğim

Şekil 4.4- Devam.



a) 1/5 eğim

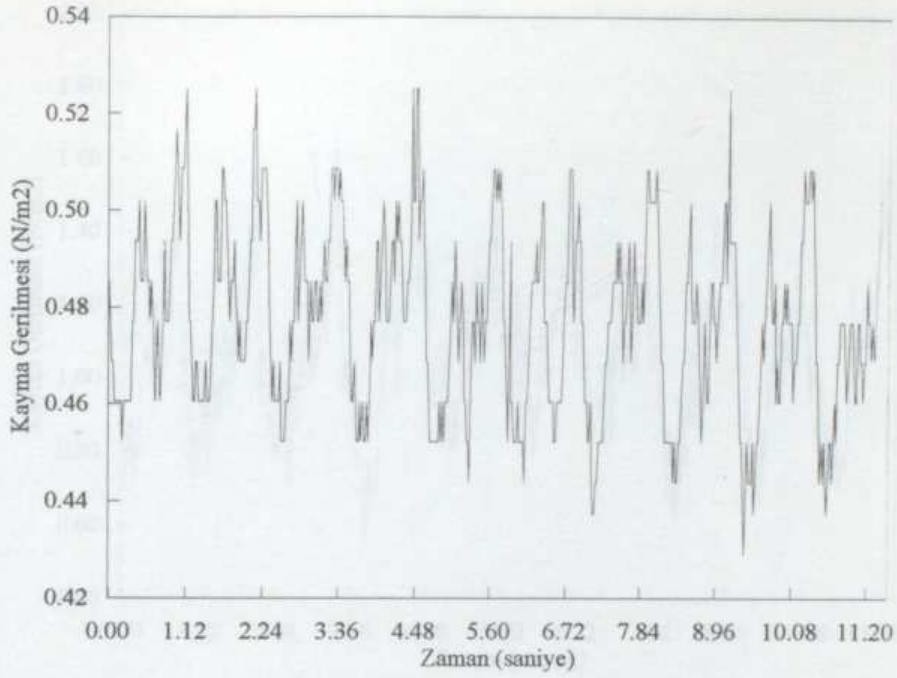
Şekil 4.5- Rölatif kırılma derinliğinin derin su dalga dikliği ile değişimi.



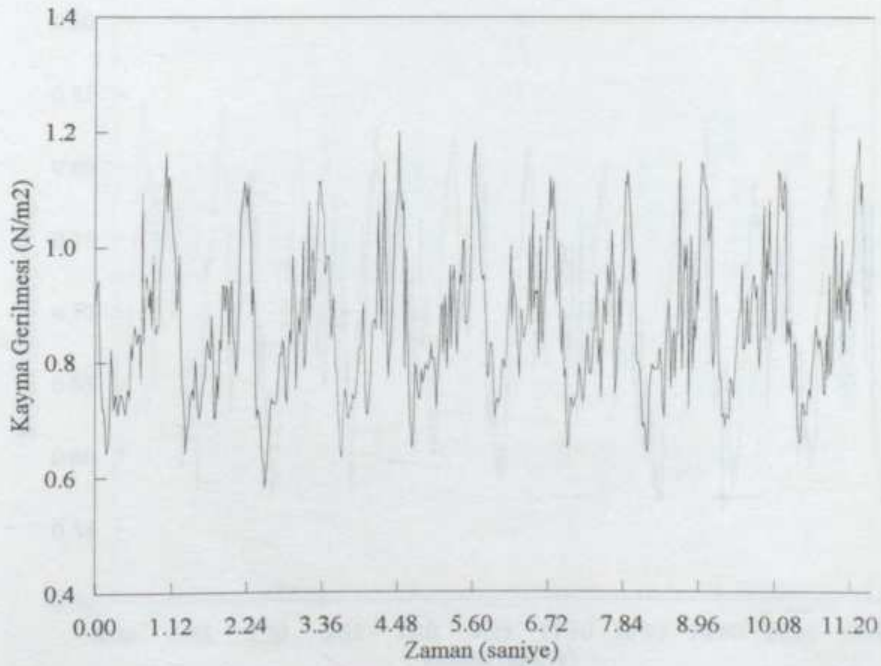
b) 1/10 eğim

Şekil 4.5- Devam.

Sıglaşma bölgesindeki hidrodinamik şartlar son derece önemlidir. Bunun için taban kayma gerilmesi değişiminin belirlenmesi, katı madde taşınımı dolayısıyla deniz yapıları etrafındaki yerel oyulma mekanizmasının anlaşılması açısından oldukça önem taşımaktadır. Dolayısıyla kayma gerilmesi dağılımının izah edilmesiyle taban malzemesinin açık deniz-kıyı hareketi ile deniz yapıları etrafındaki yerel taban hareketi daha iyi anlaşılacaktır. Kayma gerilmesi ölçümleri, çalışmada kullanılan her bir dalga şartı için düzlem tabandan başlayarak dikkate alınan iki kıyı şevi boyunca yapılmıştır. Ancak plunging noktasından sonra ortamda hava konsantrasyonunun artması alınan ölçüm sonuçlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durumda sinyaller bilgisayar yardımıyla incelenerek, mümkün olduğunca analiz edilmiş ve olayın fizikine açıklık getirilmeye çalışılmıştır. Ölçüm hatalarından kaçınabilmek için her bir deneyde alınan verilerin birbirlerine uygunluğu elde edilinceye kadar tekrar edilmiştir. Her deney şartında elde edilen verilerin aritmetik ortalaması değerlendirilmeye alınmıştır. Şekil 4.6 ve 4.7'de farklı dalga şartları için hem surf bölgesi dışında hem de surf bölgesi içerisindeki kayma gerilmesinin zamansal değişimleri gösterilmiştir.



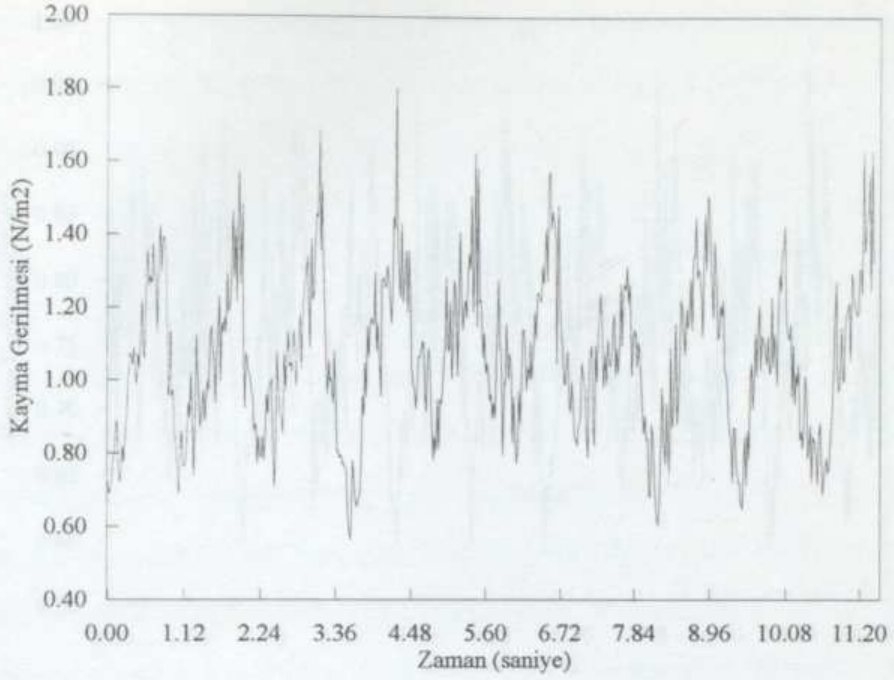
a) Kırılmadan önce ( $d/L_0=0.123$ )



b) Kırılmadan sonra ( $d/L_0=0.041$ )

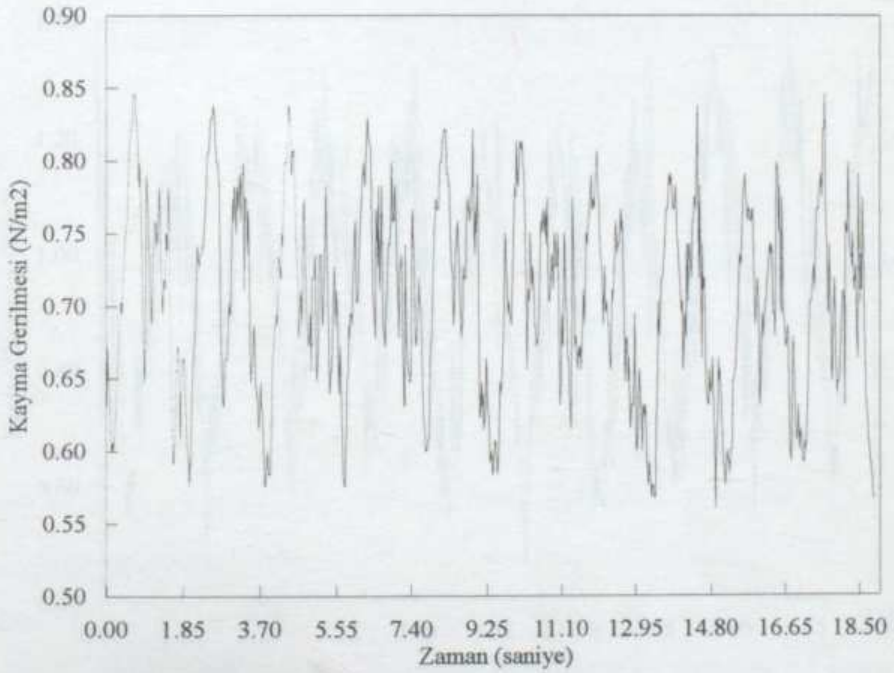
Şekil 4.6- Zayıf plunging tipi dalga için kayma gerilmesinin zamansal değişimi.  
( $H_0/L_0=0.0593$ ,  $\xi=0.821$ )





c) Plunging noktası ( $d/L_0=0.031$ )

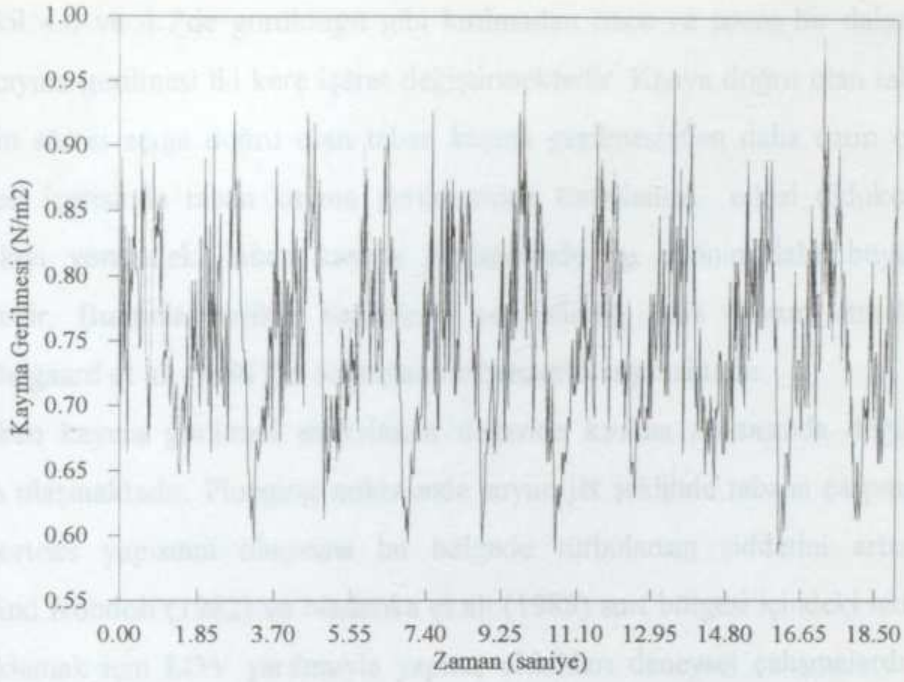
Şekil 4.6- Devam.



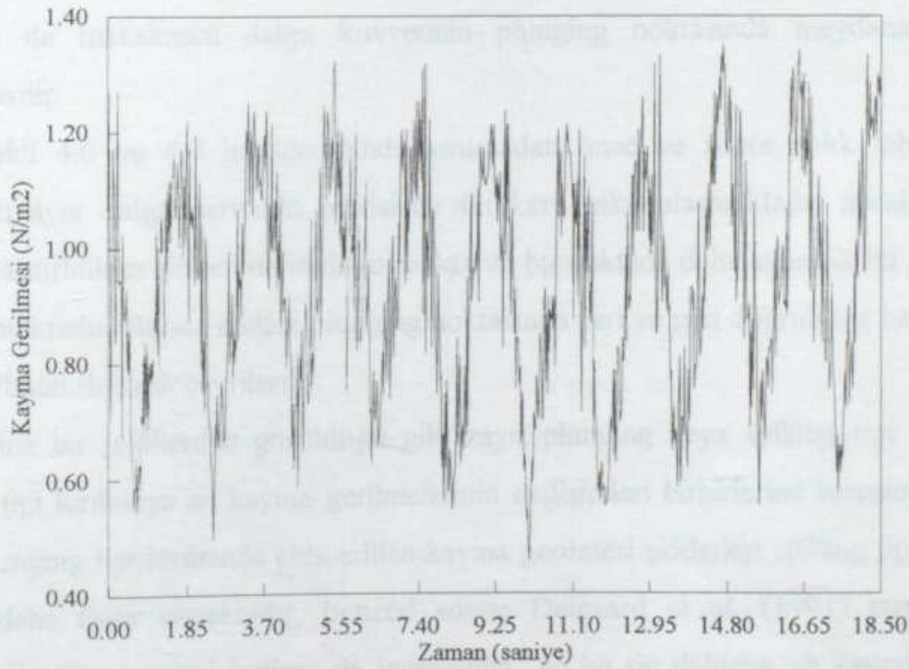
a) Kırılmadan önce ( $d/L_0=0.044$ )

Şekil 4.7- Plunging tipi dalga için taban kayma gerilmesinin zamansal değişimi.

( $H_0/L_0=0.0207$ ,  $\xi=1.39$ )



b) Kırılmadan sonra ( $d/L_0=0.015$ )



c) Plunging noktası ( $d/L_0=0.011$ )

Şekil 4.7- Devam.

Şekil 4.6 ve 4.7'de görüldüğü gibi kırılmadan önce ve sonra bir dalga periyodu sırasında kayma gerilmesi iki kere işaret değiştirmektedir. Kıyıya doğru olan taban kayma gerilmesinin süresi açığa doğru olan taban kayma gerilmesinden daha uzun olmaktadır. Surf bölgesi içerisinde taban kayma gerilmesinde türbülansın etkisi oldukça fazladır. Özellikle kıyı yönündeki taban kayma gerilmesinde bu etkinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte sinyallerin periyodikliği hala devam etmektedir. Bu sonuçlar Deigaard et al. (1991)'ın sonuçları ile benzerlik taşımaktadır.

Taban kayma gerilmesi maksimum değerine kırılma noktasında değil plunging noktasında ulaşmaktadır. Plunging noktasında suyun jet şeklinde tabana çarpması ile çok şiddetli vorteks yapısının oluşması bu bölgede türbülansın şiddetini arttırmaktadır. Nadaoka and Kondoh (1982) ve Nadaoka et al. (1988) surf bölgesi içindeki hidrodinamik yapıyı açıklamak için LDV yardımıyla yapmış oldukları deneysel çalışmalarda plunging noktasında çok şiddetli batık çevrilerin oluştuğunu ve bunların tabana kadar vararak taban yakınındaki türbülans şiddetini arttırdığını belirtmişlerdir. Yüksel and Narayanan (1994b) tabana yerleştirilmiş yatay silindirlere tesir eden kırılan dalga kuvvetleri ile ilgili yaptıkları çalışmada da maksimum dalga kuvvetinin plunging noktasında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Şekil 4.6 ve 4.7 incelendiğinde kırılmadan önce ve sonra anlık taban kayma gerilmeleri aynı dalga periyodu içerisinde iki kere pike ulaşmaktadır ancak plunging noktasında türbülans şiddeti daha da artmakta ve bu noktada daha simetrik bir türbülanslı yapı oluşmaktadır. Bunun nedeni plunging noktasında ileri ve geri doğrultuda hareket eden makro türbülanslı batık çevrilerdir.

Yine bu şekillerden görüldüğü gibi zayıf plunging veya spilling tipi kırılma ile plunging tipi kırılmaya ait kayma gerilmelerinin değişimleri birbirlerine benzemektedirler. Ancak plunging tipi kırılmada elde edilen kayma gerilmesi şiddetleri spilling tipi kırılmaya nazaran daha fazla olmaktadır, benzeri sonuç Deigaard et al. (1991) tarafından da gözlenmiştir. Surging tipi kırılma da incelenmiş ve bu tip dalgaya ait kayma gerilmesi değişiminin diğerlerine benzediği belirlenmiştir.

Deigaard et al. (1991) surf bölgesi içerisindeki taban kayma gerilmesi değişiminin kırılma noktasının hemen dışındaki taban kayma gerilmesi ile karşılaştırıldığında birden bire

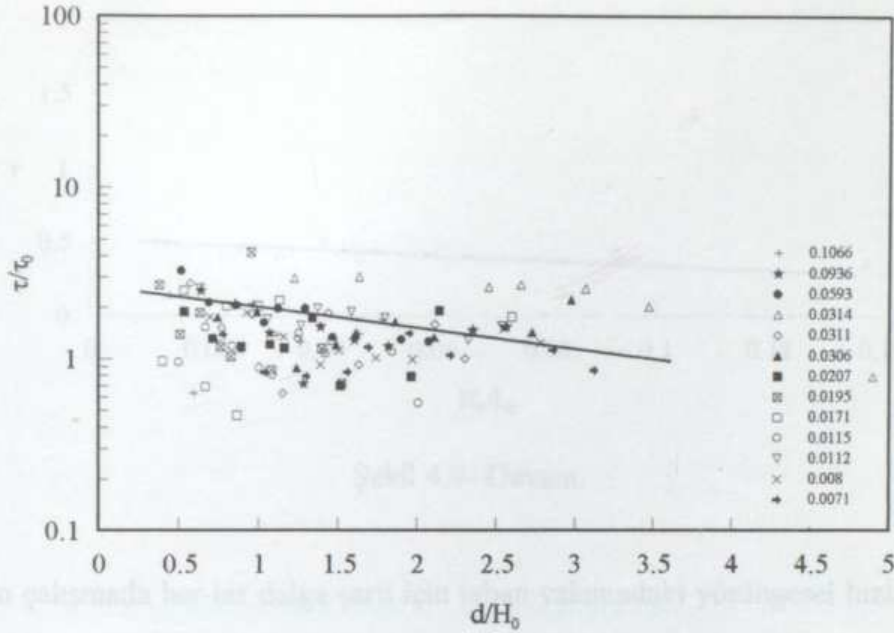


şiddetini arttırmadığını belirtmişlerdir. Bu sonuçta çalışmada elde edilen deneysel verilerle benzerlik göstermektedir.

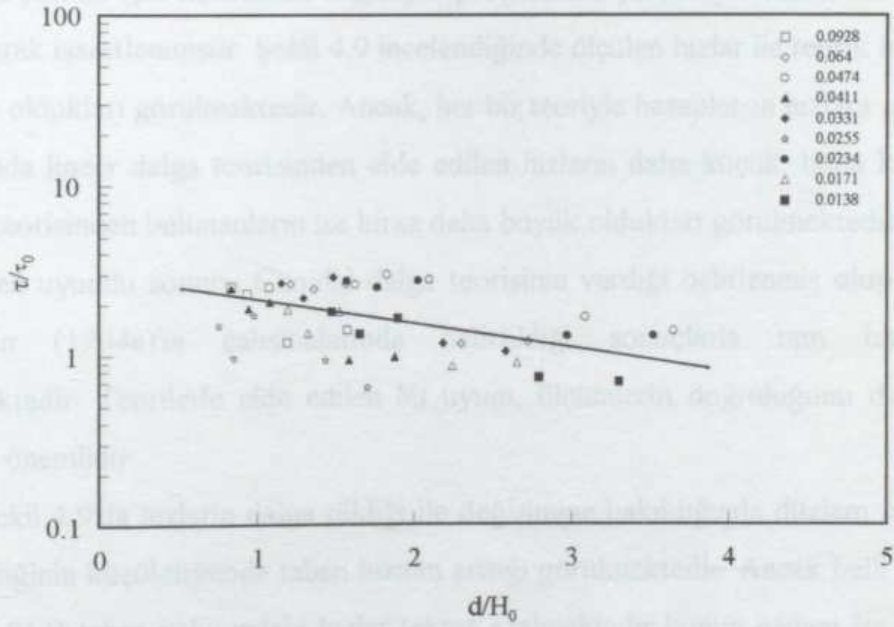
Taban kayma gerilmesinin kıyı şevi boyunca değişimini daha iyi anlayabilmek için, her bir dalga şartında yerel taban kayma gerilmesi düzlem tabana ait kayma gerilmesi ile normalleştirilerek derinlik parametresiyle ( $d/H_0$ ) değişimi Şekil 4.8 a,b'de gösterilmiştir. Burada ölçüm yapılan her derinlik için maksimum anlık kayma gerilmesi dikkate alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 4.8 a,b incelendiğinde derinlik parametresinin ( $d/H_0$ ) 2.5 değerine kadar rölatif kayma gerilmesinin daha yavaş değiştiği ancak bu değerden sonra artma meyilinin daha büyüdüğü ve bu artışın  $d/H_0$ 'ın 2 değerinden sonra oldukça belirgin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni dalgaların kırılma bölgesine yaklaştıkça dikliklerinin artmasıdır. Rölatif kayma gerilmesi kırılma bölgesine yakın bölgelerde yaklaşan dalga dikliğine bağlı olarak ( $d/H_0=2-3$ ) yaklaşık 2 değerine ulaşmaktadır. Yerel kayma gerilmesindeki bu artışın maksimum değeri plunging noktası yakınlarında düzlem tabanda ölçülen taban kayma gerilmesinin hemen hemen 3 katına çıkmaktadır. Buda surf bölgesi içinde katı madde hareketinin çok şiddetli olduğunu açıklamaktadır. Taban kayma gerilmesindeki artışın bir göstergesi de plunging noktasında katı maddenin çok şiddetli askı moduna dönüşmesidir.

Şekil 4.8'de boyutsuz kayma gerilmesinin derinlik parametresiyle ( $d/H_0$ ) değişiminin oldukça fazla saçılım göstermesinin nedeni, her şev eğimi için bütün dalga dikliklerinin bir arada çizilmesinden kaynaklanmaktadır. Çünkü her dalga farklı derinliklerde kırılmakta ve plung etmektedir. Plunging noktasında belli bir pike ulaşan kayma gerilmesi, bu noktadan sonra dalga enerjisinin büyük bir kısmını harcaması nedeniyle azalma eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla boyutsuz kayma gerilmesinin dalga diklikleri ile sistematik bir değişim gösterdikleri belirlenememesine rağmen, belirli bir derinlikte anlık kayma gerilmesinin dikliği büyük olan dalgaların kayma gerilmelerinin, dalga dikliği küçük olanlara göre biraz daha küçük olduğu görülebilmektedir (Şekil 4.8c). Boyutsuz kayma gerilmelerinin derinlik parametresiyle değişimi iki farklı şev için dikkate alındığından, 1/5 kıyı şev eğimi için Şekil 4.8a ve 1/10 kıyı şev eğimi için ise Şekil 4.8b karşılaştırıldığında bu şev eğimlerinde boyutsuz kayma gerilmesinin hemen hemen aynı değişimi gösterdiği belirlenmektedir.



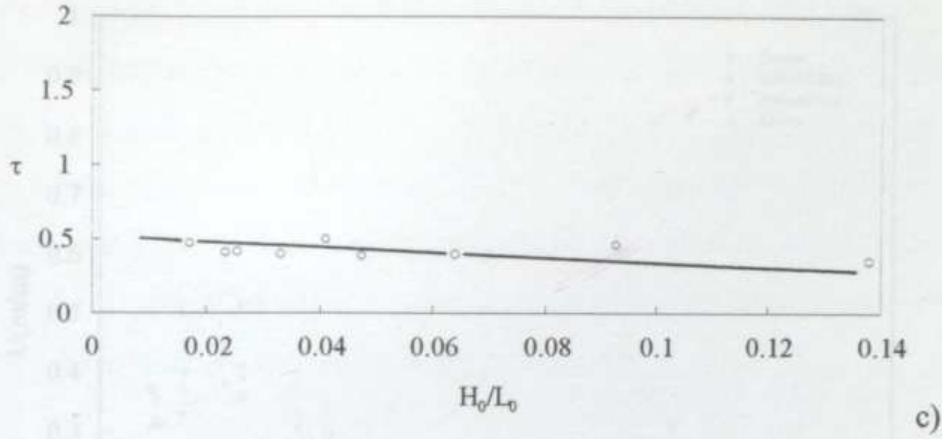


a)



b)

Şekil 4.8- a) 1/5 eğimli tabanda farklı dalga diklikleri için boyutsuz kayma gerilmesi değişimi, b) 1/10 eğimli tabanda farklı dalga diklikleri için boyutsuz kayma gerilmesi değişimi, c)  $d=35$  cm'de kayma gerilmesinin dalga dikliği ile değişimi.

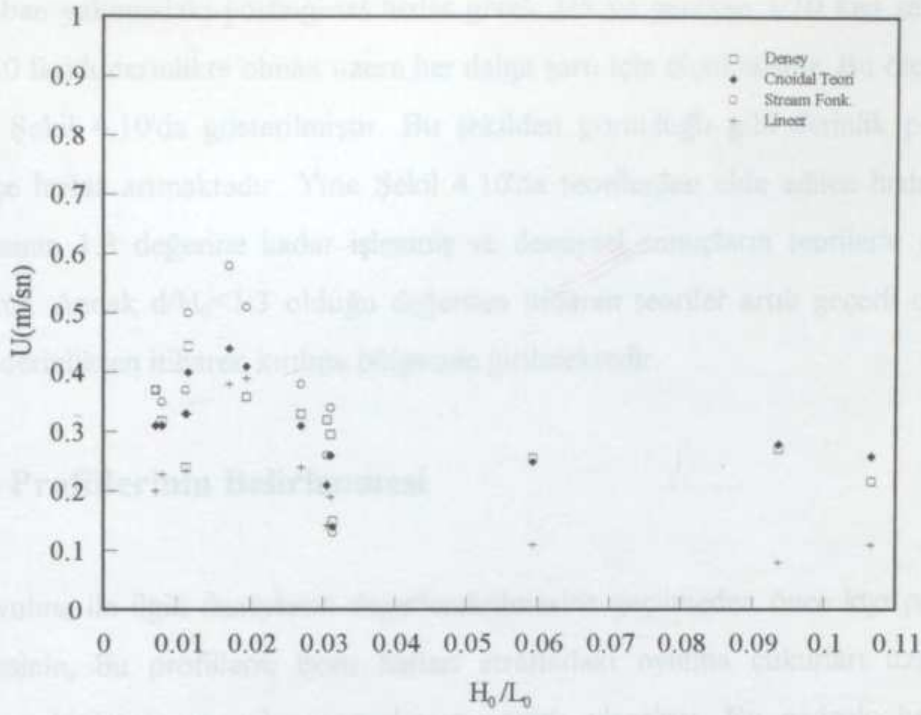


Şekil 4.8- Devam.

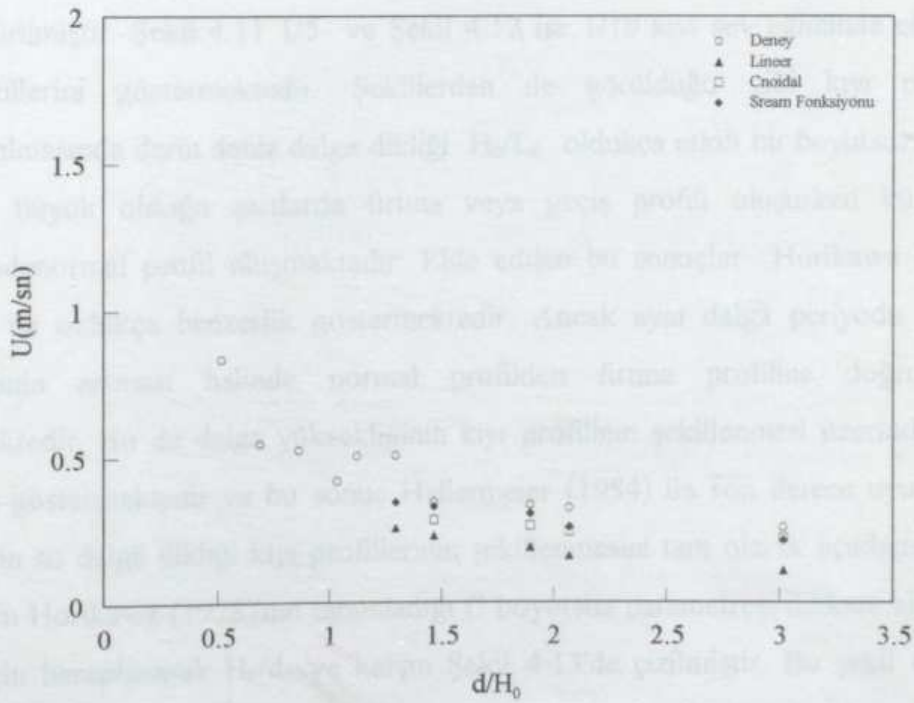
Bu çalışmada her bir dalga şartı için taban yakınındaki yörüngesel hızlar ölçülerek, bunların maksimum değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 4.9'da düzlem tabanda ölçülen hızların derin su dalga dikliklerine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde ayrıca aynı dalga şartları için hazırlanan bilgisayar programları yardımıyla teorik hız değerleri de hesaplanarak işaretlenmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde ölçülen hızlar ile teorik hızların uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Ancak, her bir teoriyle hesaplanan hızlara göre ayrı ayrı bakıldığında lineer dalga teorisinden elde edilen hızların daha küçük, buna karşın stream function teorisinden bulunanların ise biraz daha büyük oldukları görülmektedir. Bu teoriler arasında en uyumlu sonucu Cnoidal dalga teorisinin verdiği belirlenmiş olup Yüksel and Narayanan (1994a)'ın çalışmalarında belirtildiği sonuçlarla tam bir benzerlik göstermektedir. Teorilerle elde edilen bu uyum, ölçümlerin doğruluğunu da göstermesi açısından önemlidir.

Şekil 4.9'da hızların dalga dikliği ile değişimine bakıldığında düzlem taban halinde dalga dikliğinin küçüldüğünde taban hızının arttığı görülmektedir. Ancak belli bir diklikten sonra (0.013) taban yakınındaki hızlar tekrar azalmaktadır bunun nedeni ise bu diklikten sonra aynı periyotta fakat daha küçük yükseklikteki dalgaların daha küçük taban hızlarına neden olmasıdır (Chakrabarti, 1980).





Şekil 4.9- Düzlem tabanda ( $d=35$  cm) yörüngesel hızlar.



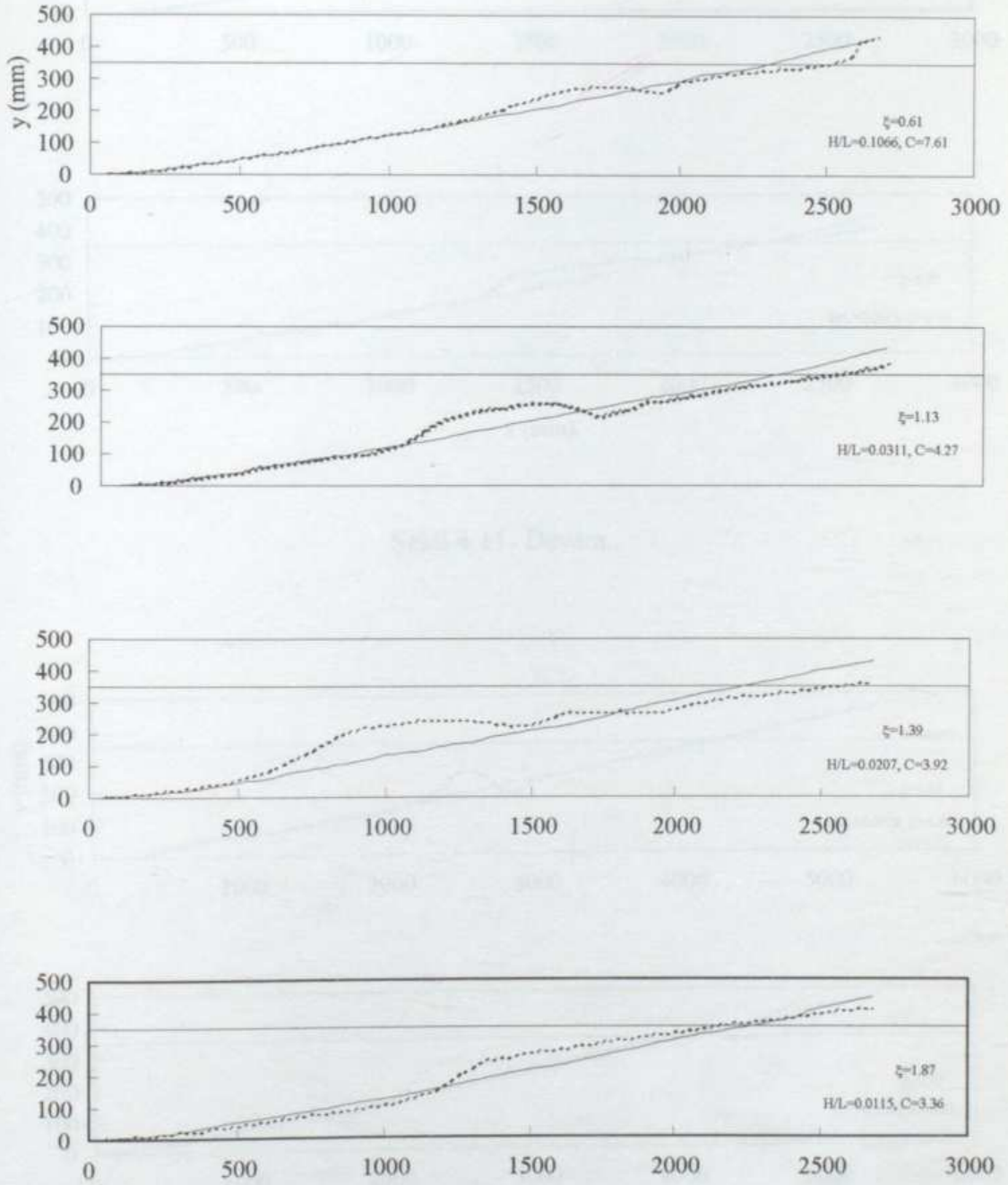
Şekil 4.10- Kıyı şevi boyunca taban yakınında yörüngesel hızın değişimi.

Taban yakınındaki yörüngesel hızlar gerek  $1/5$  ve gerekse  $1/10$  kıyı şev eğimleri boyunca 10 farklı derinlikte olmak üzere her dalga şartı için ölçülmüştür. Bu ölçümlere ait bir örnek Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi derinlik parametresi küçüldükçe hızlar artmaktadır. Yine Şekil 4.10'da teorilerden elde edilen hızlar derinlik parametresinin 1.3 değerine kadar işlenmiş ve deneysel sonuçların teorilerle uygunluğu görülmüştür. Ancak  $d/H_0 < 1.3$  olduğu değerden itibaren teoriler artık geçerli olmamakta çünkü bu derinlikten itibaren kınılma bölgesine girilmektedir.

## 4.2 Kıyı Profillerinin Belirlenmesi

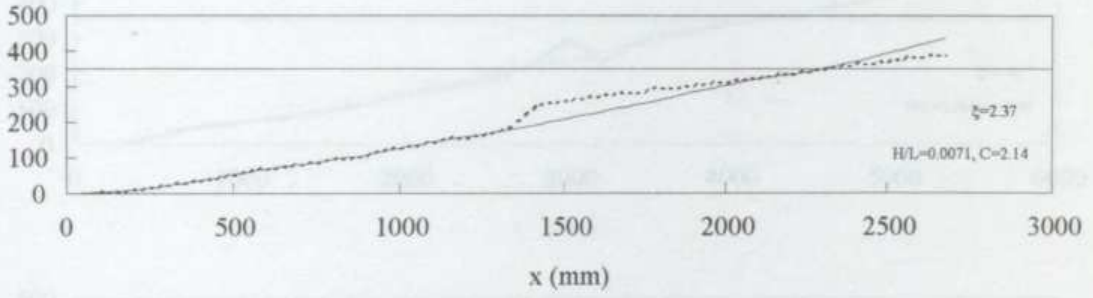
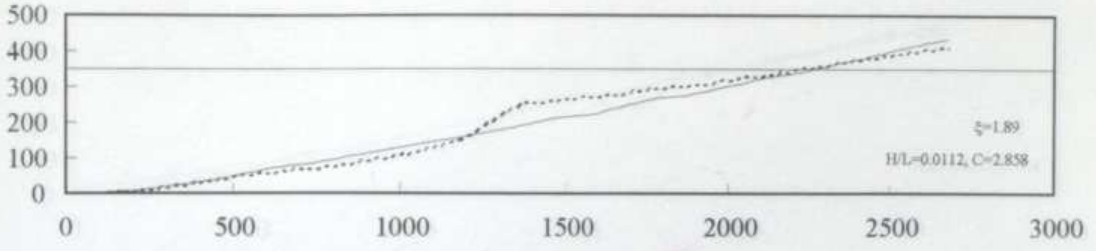
Oyulma ile ilgili deneylerin değerlendirilmesine geçilmeden önce kıyı profillerinin belirlenmesinin, bu profillerin boru hatları etrafındaki oyulma çukurları üzerine olan etkilerinin anlaşılması açısından son derece yararlı olacaktır. Bu nedenle her iki kıyı eğiminde farklı dalga şartları için kıyı profilleri elde edilmiştir. Bu çalışmada kıyı profillerinin aldığı şekiller Horikawa (1978)'nın elde ettiği ampirik ifade yardımıyla değerlendirilmiştir. Şekil 4.11  $1/5$  ve Şekil 4.12 ise  $1/10$  kıyı şev eğiminde elde edilmiş kıyı profillerini göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi kıyı profillerinin sınıflandırılmasında derin deniz dalga dikliği  $H_0/L_0$  oldukça etkili bir boyutsuzdur. Dalga dikliğinin büyük olduğu şartlarda fırtına veya geçiş profili oluşurken küçük dalga dikliklerinden normal profil oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar Horikawa (1978)'nin sonuçları ile oldukça benzerlik göstermektedir. Ancak aynı dalga periyodu için dalga yüksekliğinin artması halinde normal profilden fırtına profiline doğru değişim gözlenmektedir. Bu da dalga yüksekliğinin kıyı profilinin şekillenmesi üzerinde etkisinin olduğunu göstermektedir ve bu sonuç Hallermeier (1984) ile son derece uyumludur. O halde derin su dalga dikliği kıyı profillerinin şekillenmesini tam olarak açıklamamaktadır. Bunun için Horikawa (1978)'nin tanımladığı C boyutsuz parametresi dikkate alınan deney şartları için hesaplanarak  $H_0/d_{50}$ 'ye karşın Şekil 4.13'de çizilmiştir. Bu şekil elde edilen verilerin daha önceki çalışmalarla olan uyumunu göstermektedir. Ancak Horikawa (1978) ve Hallermeier (1984) kıyı profillerinin oluşumunda dane çapının dalga uzunluğuna

oranının da etkili bir boyutsuz olduğunu belirttikleri halde yapılan bu çalışmalarda sabit dane çapı kullanıldığından bu etki irdelenememiştir.

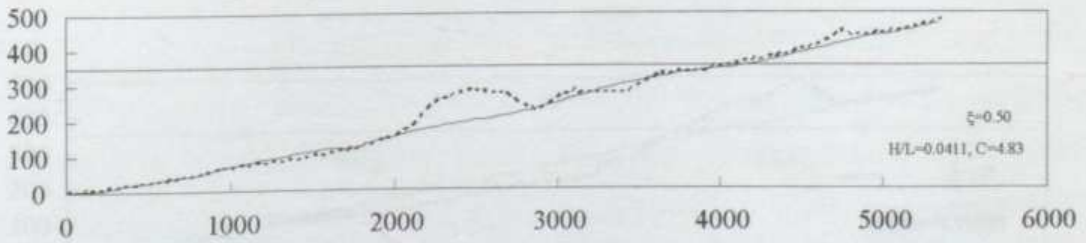
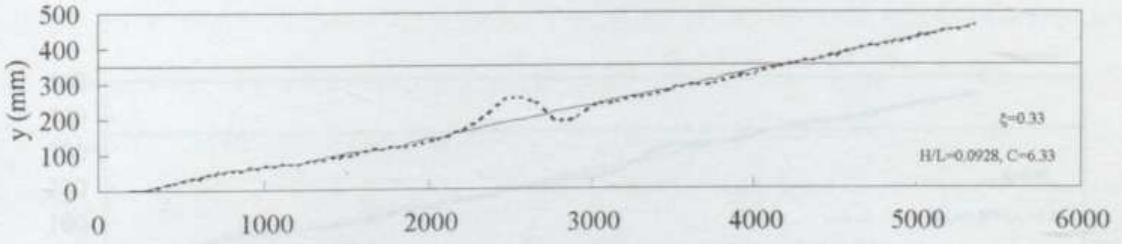


Şekil 4.11- 1/15 kıyı şev eğiminde oluşan taban profilleri.

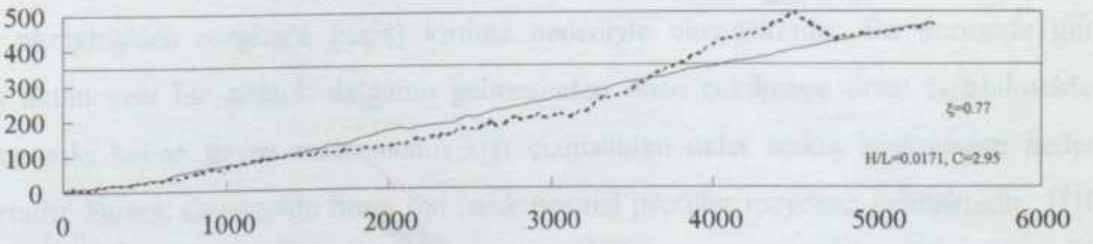
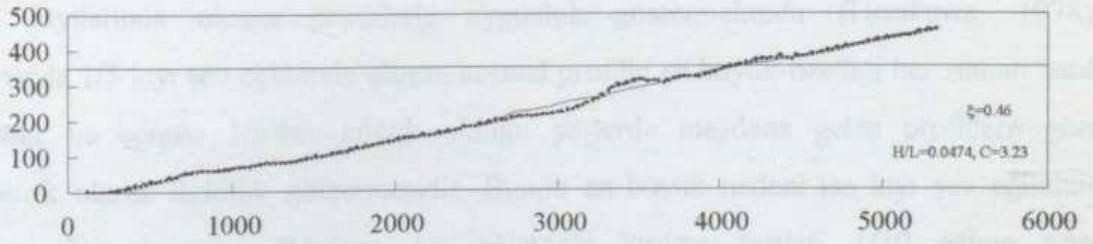
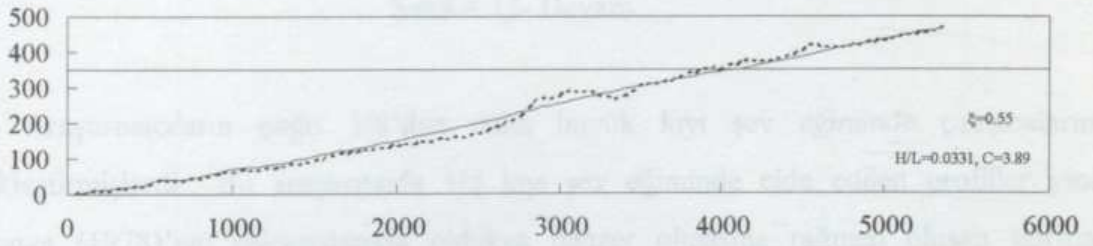
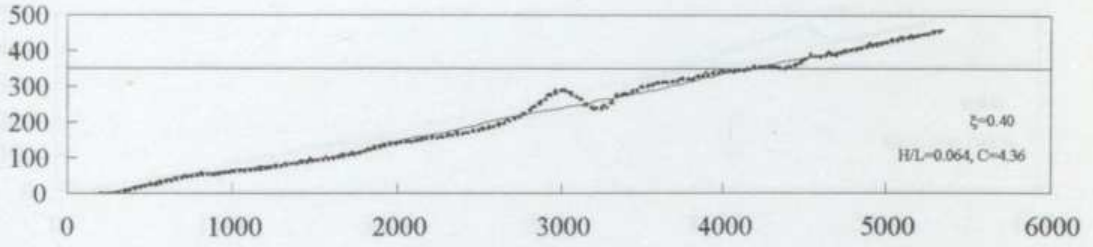
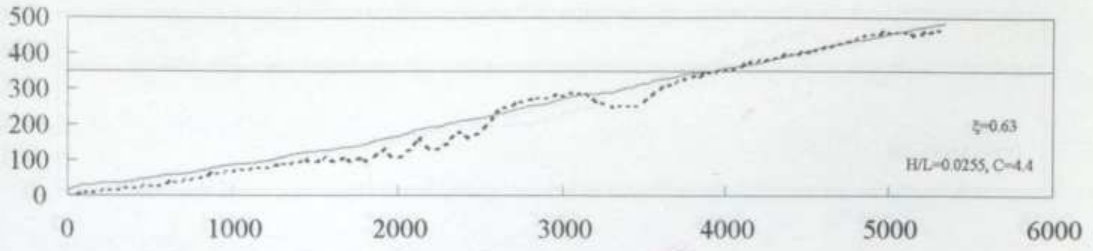




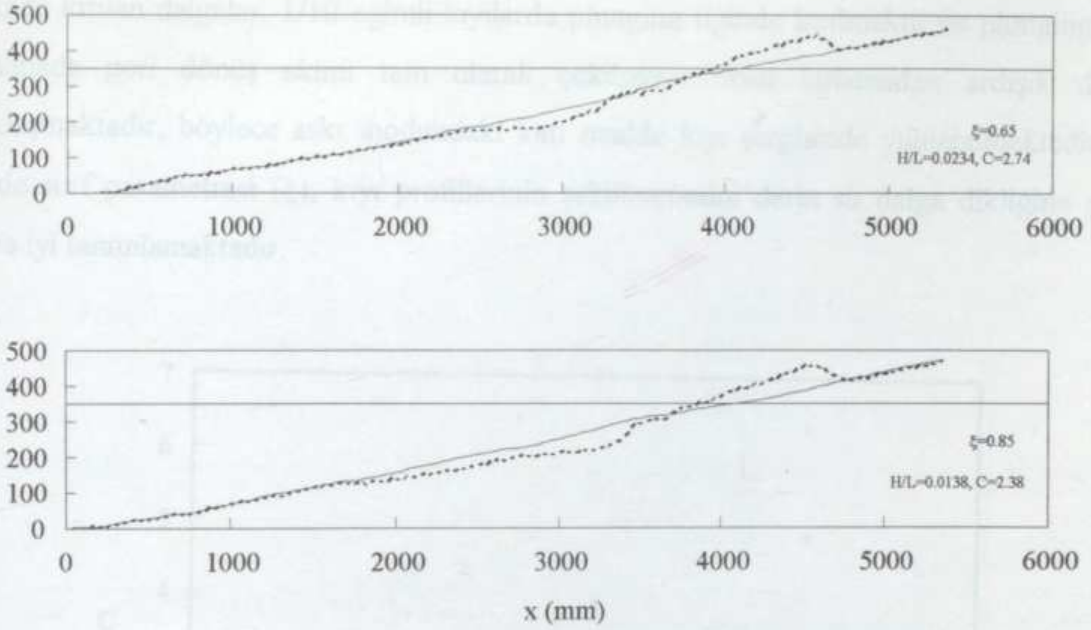
Şekil 4.11- Devam.



Şekil 4.12- 1/10 kıyı şev eğiminde oluşan taban profilleri.



Şekil 4.12- Devam.

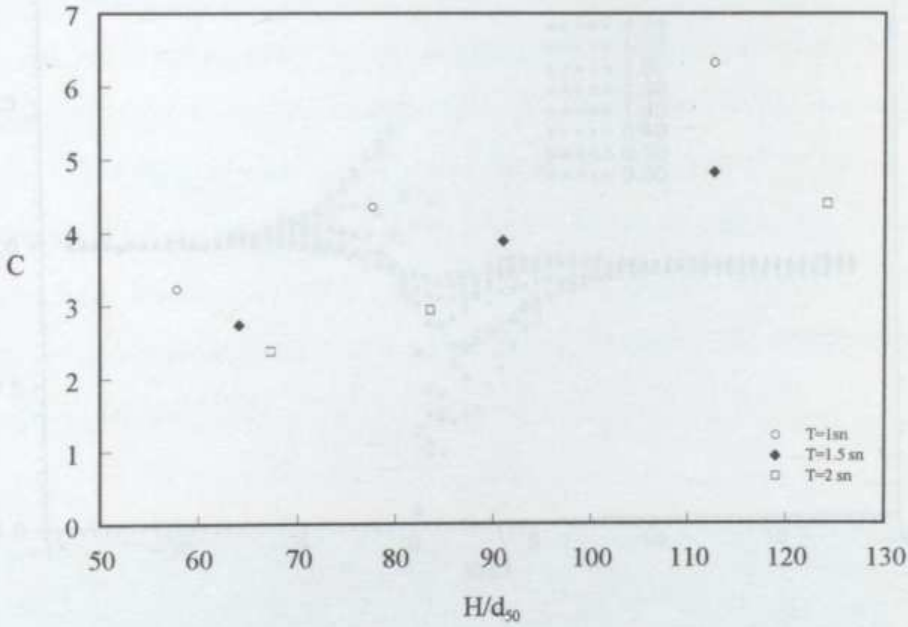


Şekil 4.12- Devam.

Araştırmacıların çoğu 1/8'den daha büyük kıyı şev eğiminde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmada 1/5 kıyı şev eğiminde elde edilen profiller yine Horikawa (1978)'nin çalışmalarıyla oldukça benzer olmasına rağmen oluşan normal profillerin batık olduğu dikkat çekmektedir. Ancak bu çalışmada elde edilen kıyı profilleri Tokai kıyılarında oluşan profillerle uygunluk göstermektedir (Horikawa, 1978). Dolayısıyla 1/5 kıyı şev eğiminde oluşan normal profilin en büyük özelliği her zaman batık olmasıdır ve eğimin 1/5'den küçük olduğu şevlerde meydana gelen profillere göre geometrik olarak farklılık göstermesidir. Bunun en büyük nedeni ise kıyı şev eğiminin oldukça dik olmasıdır. Böylece 1/5 eğimdeki kırılma şartları 1/10 eğime göre değişmektedir. 1/5 eğimdeki normal profilleri periyodun çok büyük olduğu surging tipi (veya plunging'den surging'e geçiş) kırılma nedeniyle oluşmaktadır. Bu durumda geri dönüş akımı yeni bir ardışık dalganın gelmesinden önce çekilmeye fırsat bulabilmekte, böylece askı haline geçen malzemenin kıyı çizgisinden daha açıkta birikmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda berm tipi batık normal profiller meydana gelmektedir. 1/10 eğimde aynı derin su dalga dikliği ile kıyıya yaklaşan dalga, kıyı eğiminin daha yatık olması nedeniyle kırılma tipi 1/5 eğime göre farklılık göstermektedir. Bu farklılık, Şekil 4.11 ve 4.12'deki surf parametrelerinden de açıkça görülmektedir. Çünkü 1/5 eğimde surging



tipinde kırılan dalgalar; 1/10 eğimli kıyılarda plunging tipinde kırılmakta ve plunging tipi kırılmada geri dönüş akımı tam olarak çekilmeye fırsat bulamadan ardışık dalga yaklaşmaktadır, böylece askı modundaki katı madde kıyı çizgisinde yığılabilmektedir. O halde surf parametresi ( $\xi$ ), kıyı profillerinin şekillenmesini derin su dalga dikliğine göre daha iyi tanımlamaktadır.



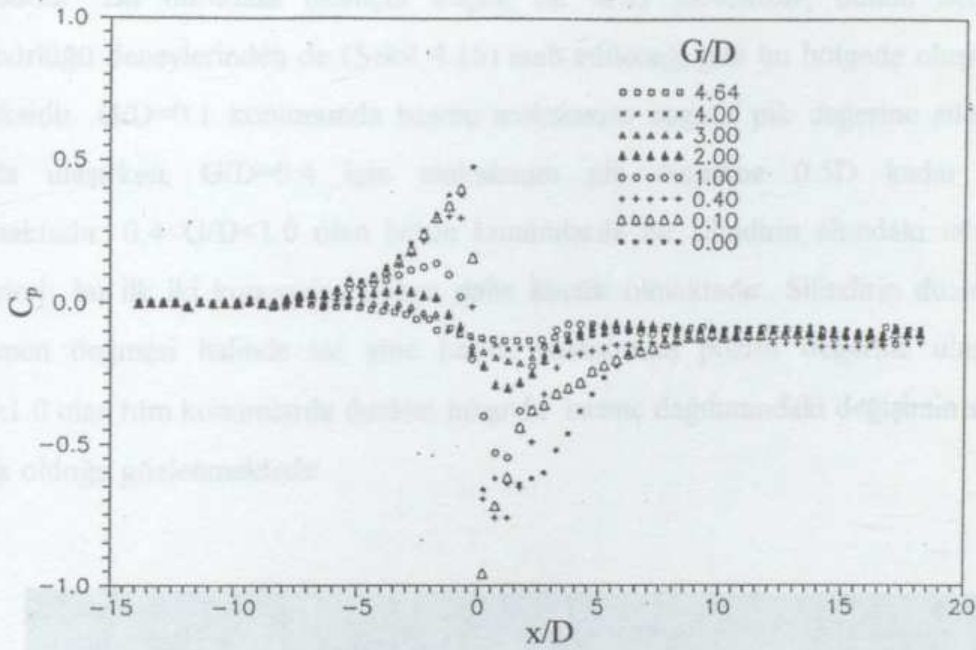
Şekil 4.13- Kıyı profilinin boyutsuz dalga yüksekliği ile değişimi.

### 4.3 Boru Hatları Etrafında Akım Yapısının İncelenmesi ve Oyulma Çukurunun Gelişimi

#### 4.3.1 Tek yönlü akım hali

Yerel oyulma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle boru hatları etrafındaki akım yapısının iyi izah edilmesi gerekmektedir. Ancak burada önemli olan boru hattının varlığından dolayı yaklaşan akım yapısında meydana gelen değişim ve bunun hareketli tabanla olan etkileşiminin belirlenebilmesidir. Salınlımlı akım yapısının oldukça karmaşık olmasından dolayı önce tek yönlü akım yapısının anlaşılması, daha sonraki

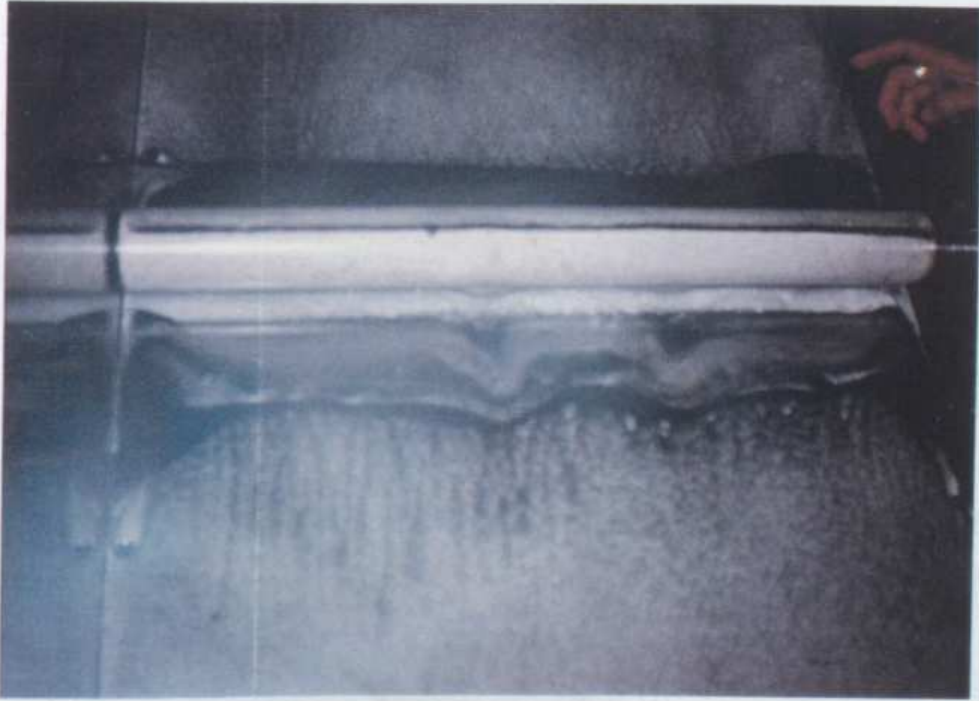
aşamalara kolaylık getirecektir. Bunun için hava tüneline tek yönlü akım şartlarında gerçekleştirilen deneysel çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.14- Düzlem tabanda basınç dağılımı.

Şekil 4.14 silindir çapına bağlı Reynolds sayısının  $6.5 \times 10^4$  olduğu akım alanında, silindirin tabana farklı açıklık oranlarında yerleştirilmesi şartlarına göre düzlem tabandaki basınç dağılımının zamansal ortalama değerlerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi bu basınç dağılımı asimetriktir. Şekilde basınç boyutsuz basınç katsayısı,  $C_p$ , ile ifade edilmektedir. Bu boyutsuz basınç katsayısı  $C_p = (P - P_\infty) / (V_\infty^2 \rho / 2)$  olarak hesaplanmıştır. Burada  $P$  yerel basınç,  $P_\infty$  borudan uzaktaki taban basıncı ve  $V_\infty$  ise serbest akım hızıdır. Açıklık oranının ( $G/D$ ) 0 ile 0.4 aralığında, basınç katsayısı silindirin menbasında

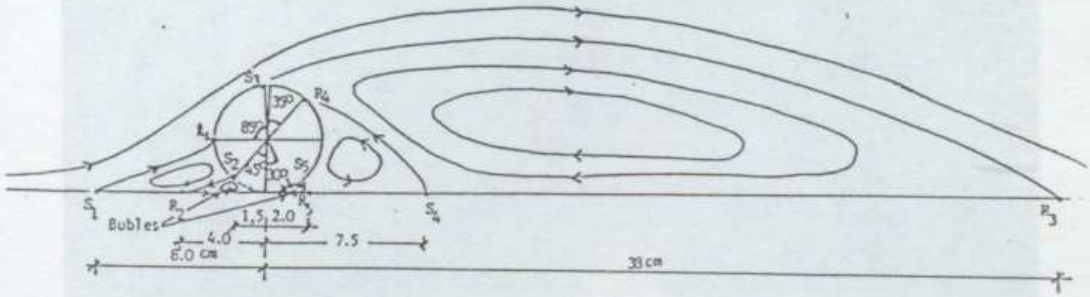
maksimum pozitif ve mansabında ise maksimum negatif değere ulaşmaktadır (burada  $G$  silindirin alt kenarı ile taban arasındaki açıklık,  $D$  ise silindir çapıdır). Basıncıdaki bu değişim silindirin  $6D$  kadar menbasına ve  $7D$  kadar da mansabına kadar hissedilerek başlangıç değerine ulaşmaktadır. Bununla birlikte şekilden de görüldüğü gibi silindir tabana değdiğinde ( $G/D=0.0$ ), silindirin  $2D$  kadar mansabında basınçta bir değişim söz konusudur. Bu durumda basınçta küçük bir artış mevcuttur, bunun nedeni akım görünürlüğü deneylerinden de (Şekil 4.15) izah edileceği gibi bu bölgede oluşan mansap vorteksidir.  $G/D=0.1$  konumunda basınç maksimum negatif pik değerine silindirin tam altında ulaşırken,  $G/D=0.4$  için maksimum pik değerine  $0.5D$  kadar mansapta ulaşmaktadır.  $0.4 < G/D < 1.0$  olan bütün konumlarda ise silindirin altındaki taban basınç değerleri bu ilk iki konumdan daima daha küçük olmaktadır. Silindirin düzlem tabana tamamen değmesi halinde ise yine basınç maksimum pozitif değere ulaşmaktadır.  $G/D \geq 1.0$  olan tüm konumlarda düzlem tabanda basınç dağılımındaki değişimin son derece küçük olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.15- Akım görünürlüğü.



Tek yönlü akıma ait hava tüneline, tabana oturmuş 50 mm çapındaki silindir etrafındaki vorteks yapısının oluşumu fotoğraf ve video çekimleri yardımıyla yapılan akım görünürlüğü deneyleri ile incelenmiştir. Sınır tabakasından ayrılma ve yapışma noktaları silindir ve tabana sürülen yağ yardımıyla tesbit edilmiştir. Problemin daha iyi anlaşılabilmesi açısından bu vorteks oluşumları Şekil 4.16'da şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi silindirin tabana oturması halinde ( $G/D=0$ ) toplam beş adet vorteks oluşmaktadır. Bu beş adet vorteksin üçü silindirin mansabında yapılırken ikisi de silindirin hemen menbasında şekillenmektedir. Şekil 4.17'den de görüldüğü gibi en büyük ayrılma bölgesi silindirin mansabında meydana gelmekte olup bölgenin silindirden olan uzaklığı  $7D$  kadar ölçülmüştür. Silindirin  $2D$  kadar menba ve mansabında ise ikişer küçük çevri sistemleri şekillenmektedir. Silindirler etrafındaki yerel taban hareketinin oluşumu bu vorteks sistemlerinin yapılanması ile oldukça yakından ilgilidir.

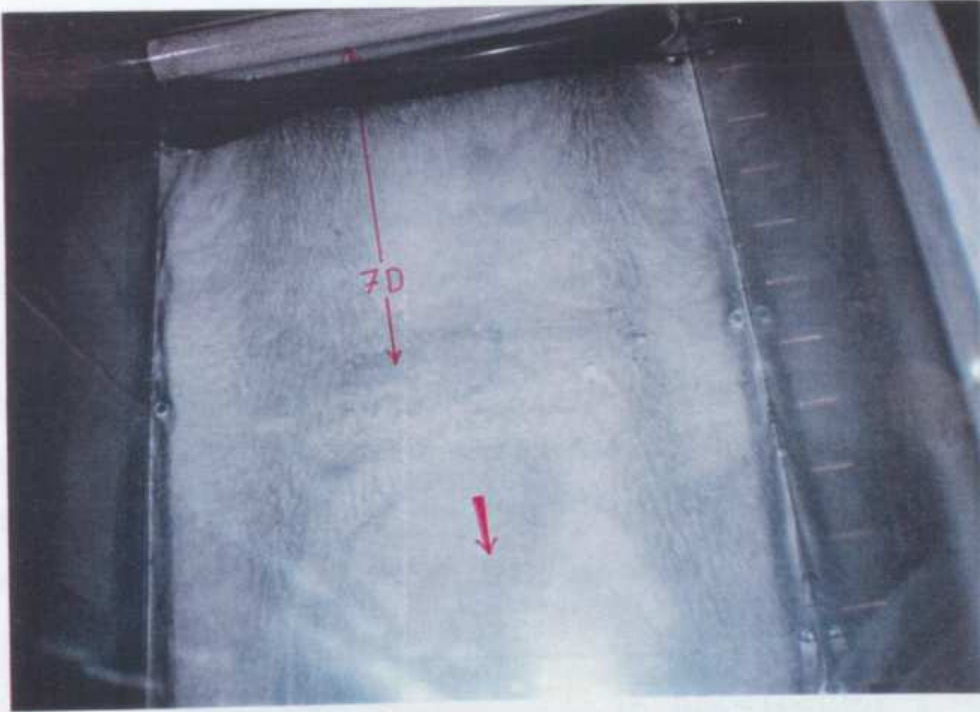


Şekil 4.16-  $G/D=0.0$  için yapılan vorteks sistemi.

Hareketli tabanlı bir su kanalındaki tek yönlü akım hali için boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliğinin ise aşağıdaki boyutsuz parametrelerin fonksiyonu olduğu belirlenmiştir.

$$S/D = f(d/D, d_{50}/D, Re, \theta, X/D) \quad (4.6)$$

Burada  $Re(=UD/v)$  boruya ait Reynolds sayısı,  $\theta$  Shields parametresi,  $d/D$  rölatif su derinliği,  $d_{50}/D$  rölatif dane çapı parametresi ve  $X/D$  ise vorteks etki parametresidir. Ancak tabanın hareketli olması durumunda Shields parametresinin oyulma olayına etkisinin olmadığı çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmiştir.



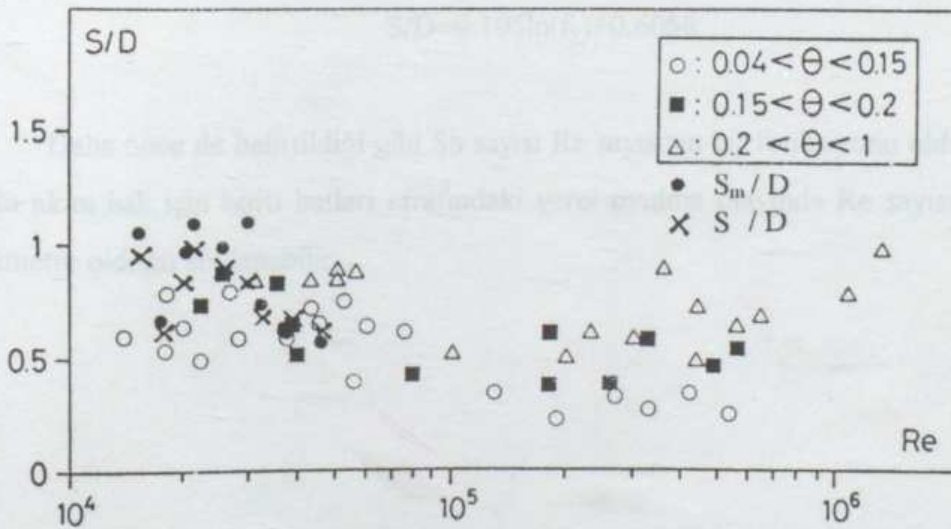
Şekil 4.17-  $G/D=0.0$  için tabandaki akım yapısı.

Bu amaçla tek yönlü akım şartlarının karakterize edildiği hareketli tabanlı su kanalında yapılan bir seri deney sonucunda elde edilen borunun hemen altındaki  $S/D$  rölatif oyulma derinlikleri, Sümer ve Fredsøe (1990) tarafından verilen grafik üzerinde işlenmiştir. Elde edilen verilerin bu araştırmacıların sonuçları ile uyumlu olduğu Şekil 4.18'de

görülmektedir. Oyulma derinliği,  $Re$  sayısının  $10^5$ - $3 \times 10^5$  aralığında azalma eğilimi göstermektedir. Bu değer silindir etrafındaki akım alanlarında kritik altından kritik üstü akıma geçiş aralığını tanımlamakta bu geçiş bölgesinde vorteks saçılımı daha az etkin olmakta ve böylece daha küçük art-iz erozyonu ve oyulma derinliği meydana gelmektedir. Rölatif oyulma derinliği incelendiğinde;

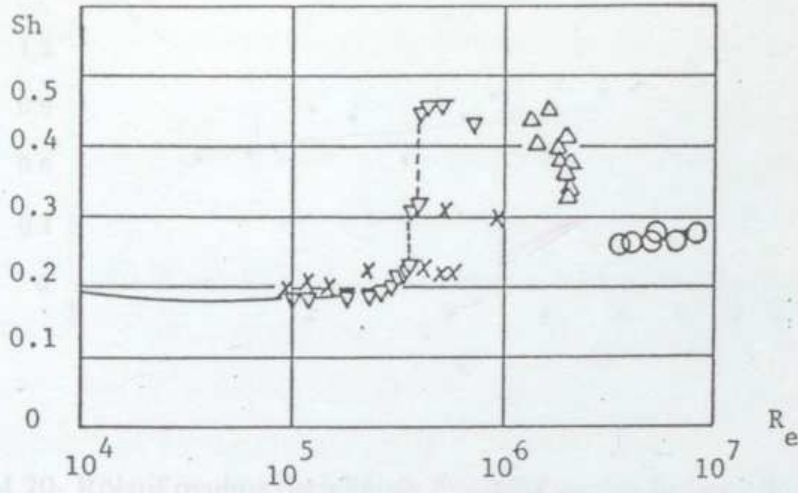
$$\begin{aligned} 10^4 \leq Re \leq 10^5 & \quad \text{için } S=0.8D \\ 10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^5 & \quad \text{için } S=0.4D \\ 3 \times 10^5 \leq Re & \quad \text{için } S=0.8D \end{aligned} \quad (4.7)$$

değerleri arasında bir değişim göstermektedir. Bu değişim tamamen silindir etrafında şekillenerek kopan vorteks yapısından kaynaklanmaktadır. Gerçekten vorteks saçılma frekansını karakterize eden Strouhal sayısının ( $Sh=f_v U/D$ , burada  $f_v$  vorteks saçılım frekansıdır)  $Re$  sayısı ile değişimi de benzeri bir eğilim göstermektedir (Şekil 4.19). Kritik üstü bölgede vorteks saçılımı periyodik karakter taşımamaktadır. Bu bölgeden sonra  $Sh$  sayısı yine yaklaşık olarak 0.2 değerini almaktadır. Bu sonuç Sümer ve Fredsøe (1990)'nın belirttiğinin aksine, oyulma olayına  $Re$  sayısının etkisinin oldukça fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18- Rölatif oyulma derinliğinin  $Re$  sayısı ile değişimi.



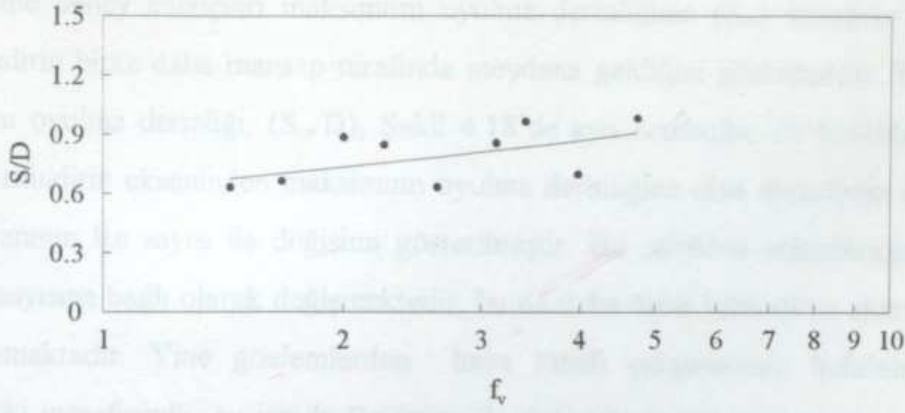


Şekil 4.19-Silindirler etrafındaki vorteks saçılımı için Sh - Re sayıları arasındaki ilişki.

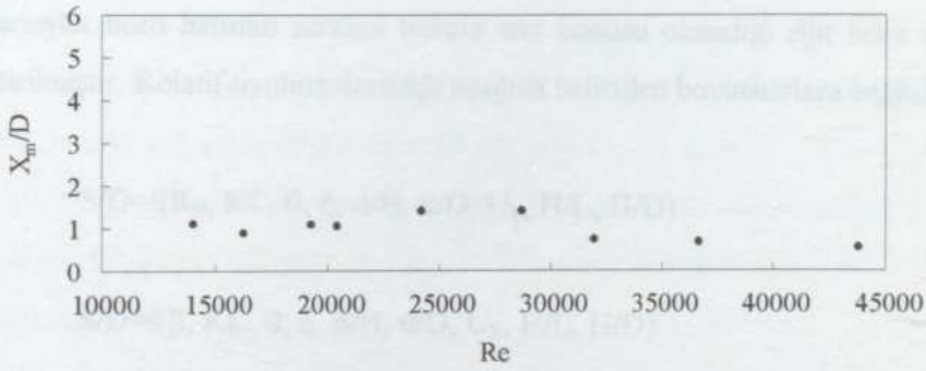
Bu amaçla Şekil 4.19'dan görüldüğü gibi  $Re < 2.5 \times 10^5$  için Sh sayısı 0.2 gibi sabit bir değere sahip olduğundan, vorteks saçılım frekansı  $f_v = 0.2U/D$  eşitliğinden elde edilerek, rölatif oyulma derinliği ile vorteks saçılım frekansı arasında bir bağıntının olup olmadığı araştırılmıştır. Şekil 4.20'den de görüldüğü gibi Re sayısının bu aralığında vorteks saçılım frekansının rölatif oyulma derinliği üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu ilişki için aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir;

$$S/D = 0.195 \ln(f_v) + 0.6058 \quad (4.8)$$

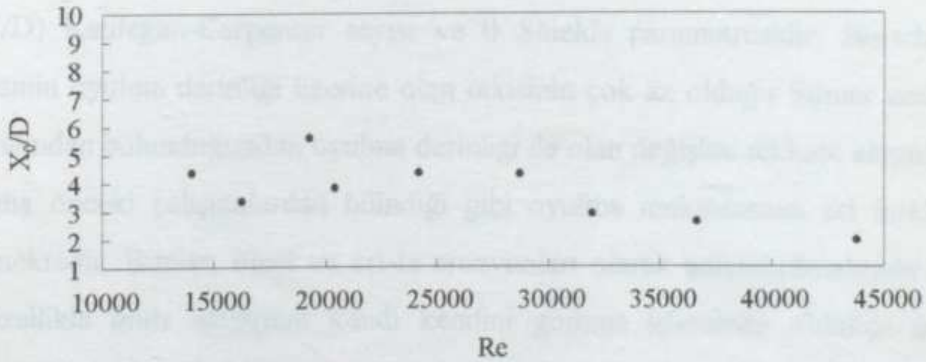
Daha önce de belirtildiği gibi Sh sayısı Re sayısının bir fonksiyonu olduğundan, tek yönlü akım hali için boru hatları etrafındaki yerel oyulma olayında Re sayısının etkin bir parametre olduğu söylenebilir.



Şekil 4.20- Rölatif oyulma derinliğinin  $f$  vorteks saçılım frekansı ile değişimi.



a)



b)

Şekil 4.21- a) Maksimum oyulma derinliği yerinin Re sayısı ile değişimi.

b) Tek yönlü akımda etki mesafesi.

Yine deney sonuçları maksimum oyulma derinliğinin ( $S_m$ ) silindirin tam altında değil silindirin biraz daha mansap tarafında meydana geldiğini göstermiştir. Bu boyutsuz maksimum oyulma derinliği, ( $S_m/D$ ), Şekil 4.18'de ayrı semboller ile belirtilmiştir. Şekil 4.21a'da silindirin ekseninden maksimum oyulma derinliğine olan mesafenin ( $X_m$ ) silindir çapına oranının  $Re$  sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden anlaşılabileceği gibi  $X_m/D$  oranı  $Re$  sayısına bağlı olarak değişmektedir, bu da daha önce bahsedilen akım yapısından kaynaklanmaktadır. Yine gözlemlerden hava tüneli çalışmasında belirlenen mansap vorteks etki mesafesinin su içinde  $Re$  sayısı ile değiştiği ve  $Re$  sayısının aynı aralığında  $4D$ 'ye kadar çıktığı belirlenmiştir (Şekil 4.21b).

#### 4.3.2 Sırf dalga hali

Deneyler boru hattının sarkma halinin söz konusu olmadığı rijit boru şartlarında gerçekleştirilmiştir. Rölatif oyulma derinliği aşağıda belirtilen boyutsuzlara bağlıdır, bunlar;

$$S/D = f(Re, KC, \theta, \xi, d/H, d/D, U_R, H/L, H/D) \quad (4.9a)$$

$$S/D = f(\beta, KC, \theta, \xi, d/H, d/D, U_R, H/L, H/D) \quad (4.9b)$$

dir, burada  $H/L$  dalga dikliği,  $Re$  ( $U_m D/\nu$ ) boru Reynolds sayısı,  $d/H$  derinlik parametresi,  $KC$  ( $U_m T/D$ ) Keulegan-Carpenter sayısı ve  $\theta$  Shields parametresidir. Burada Shields parametresinin oyulma derinliği üzerine olan etkisinin çok az olduğu Sümer and Fredsøe (1990) tarafından bulunduğundan oyulma derinliği ile olan değişimi dikkate alınmamıştır.

Daha önceki çalışmalardan bilindiği gibi oyulma mekanizması iki farklı modda gerçekleşmektedir. Bunlar; tünel ve art-iz erozyonları olarak adlandırılmaktadır. Oyulma modları özellikle boru hatlarının kendi kendini gömme işleminde oldukça önemlidir. Burada öncelikle sadece farklı  $KC$  sayılarında oyulma çukurunun şekli gözlenmiş fakat bu oyulma modlarının bilinen mekanizmasına girilmemiştir. 35 cm su derinliği ve düzlem taban şartlarında yapılan sırf dalga etkisinde boru hatları etrafındaki akım yapısının tek yönlü akım halindeki en önemli farkı, tek yönlü akımda meydana gelen art-iz akım

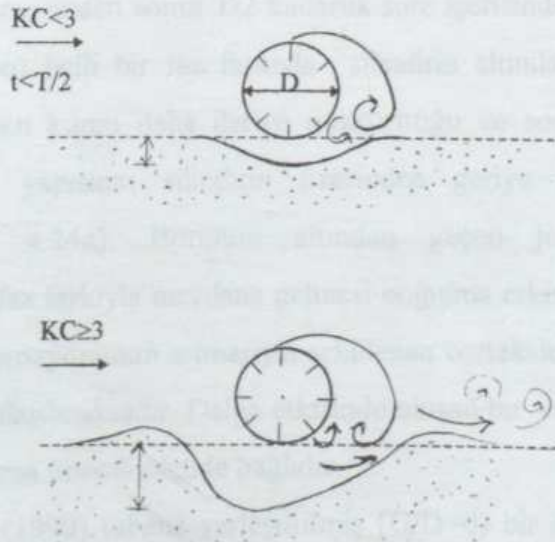


yapısının bu durumda borunun her iki tarafında da meydana gelmesidir. Bu akım yapısı, borunun her iki tarafında daha az eğimli oyulma çukurunu oluşturmakta ve art-iz akım yapısı KC sayısı ile lineer olarak etkisini artırmaktadır (Sümer and Fredsøe, 1990). Buna göre

$$L_v/D=0.3KC \quad (4.10)$$

dir, burada  $L_v$  art-iz vorteks caddesinin etki mesafesini göstermektedir.

Gözlemlerden,  $KC < 3.0$  için simetrik,  $KC \geq 3.0$  için ise asimetrik ve daha yayvan oyulma çukurunun meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.22). Simetrik oyulma çukurunda maksimum oyulma derinliği borunun altında meydana gelirken, oyulma çukurunun asimetrik olması durumunda borunun altından kaymaktadır. Örneğin KC sayısı yaklaşık 20 olduğunda maksimum oyulma derinliği borunun hemen mansap tarafında meydana gelmektedir. Asimetrik oyulma çukurunun meydana gelmesinin nedeni bu şartlarda dalga yapısının sinüzoidal değil non-lineer karakter taşıması yani daha dik dalga tepesi daha yayvan dalga çukuruna sahip olmasıdır. Dalga tepesi altındaki kıyıya doğru yörengesel hızların daha büyük olması borunun kıyı tarafındaki art-iz yapısının daha şiddetli olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.22- Dalga etkisinde oyulma çukurunun şekli; (a)  $KC < 3.0$ , (b)  $KC \geq 3.0$ .

Bu çalışmada dalganın non-lineer karakter taşıdığı teorik olarak da belirlenmiştir. Bilindiği gibi non-lineer karakter taşıyan dalga şartlarında tabanda asimetric bir akım yapısı mevcuttur. Her bir yarım periyotluk süre içerisinde borunun her iki tarafında oluşan vorteks yapısı tek yönlü akım şartlarında oluşacak akım alanına benzer davranışlar göstermektedir. Ancak menba ve mansap taraflarındaki akım yapısında meydana gelecek vorteks şiddetinin farklılığından dolayı, tek yönlü akım halindeki asimetric oyulma çukuruna benzer şekil almasına neden olur. Burada gelişen olayın daha iyi gözlenebilmesi amacıyla deneylerde çekilen video kayıtları incelenmiş ve kayıtlardan bir dalga periyodundaki enstantaneler bilgisayar yardımıyla seçilerek Şekil 4.23'de verilmiştir. Bu kayıtlardan görüldüğü gibi art-iz vorteks yapısıyla askı haline geçen kum bulutu uzun mesafe taşınmaya fırsat bulamadan geriye dönmekte, böylece vorteks etki mesafesi tek yönlü akıma göre daha küçük kalmakta ve yerel oyulma çukuru tek yönlü akım şartlarına göre daha kısa mesafede şekillenmektedir.

Gözlemlerden oyulma çukurunun başlangıç aşamasında tek yönlü akım haline benzer olarak boru hattının her iki tarafında iki küçük çevrinin oluştuğu böylece silindire yapışık olarak yığılmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak kısa bir süre sonra dalga tepesinin silindire yaklaşması esnasında silindirin ön tarafında artan basınç gradyanının etkisiyle bu yapının bozularak tünel erozyonunun yapılandığı gözlenmiştir. Tünel erozyonunun şekillenmesinden sonra  $T/2$  kadarlık süre içerisinde silindirden kopan ve art-iz vorteks sisteminden belli bir faz farkıyla silindirin altından geçen jet akımı, art-iz vorteksle askıya geçen kumu daha ileriye püskürttüğü ve sonraki  $T/2$  periyotluk süre içerisinde bu akım yapısının silindirin üzerinden geriye doğru hareketlendirildiği gözlenmiştir (Şekil 4.24a). Borunun altından geçen jet akımının vortekslerin şekillenmesinden bir faz farkıyla meydana gelmesi boğulma etkisinden kaynaklanmaktadır. Bir süre sonra tünel erozyonunun artmasıyla şekillenen vortekslerin şiddetleri zayıflamakta ve dinamik dengeye ulaşılmaktadır. Dalga etkisinde oluşan bu vortekslerin şekillenmesi ve şiddeti dalga periyoduna önemli ölçüde bağlıdır.

Sümer et al. (1990) tabana yerleştirilmiş ( $G/D=0$ ) bir silindirin mevcudiyetinden dolayı kayma gerilmesinin, silindirin olmadığı orijinal taban şartlarındaki kayma gerilmesine göre iki kat arttığını belirtmiştir. Sakout et al. (1993) rijit taban halinde

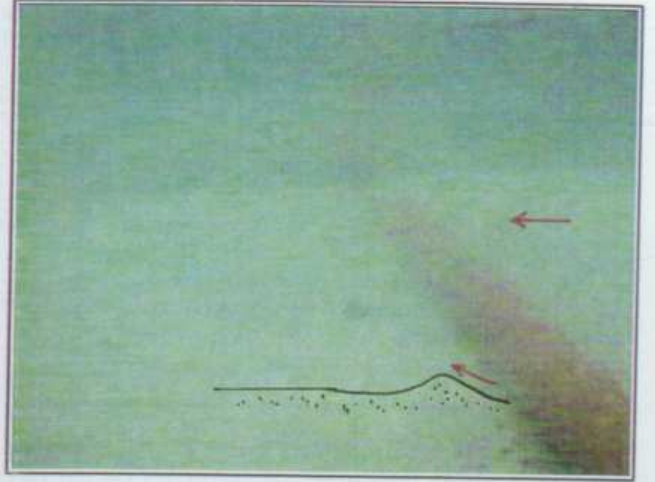
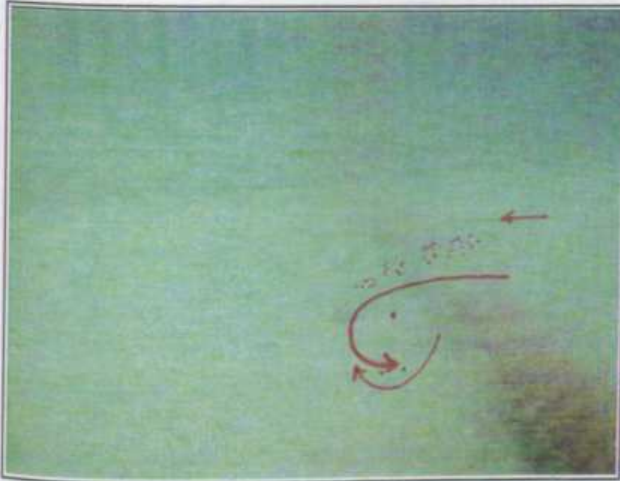
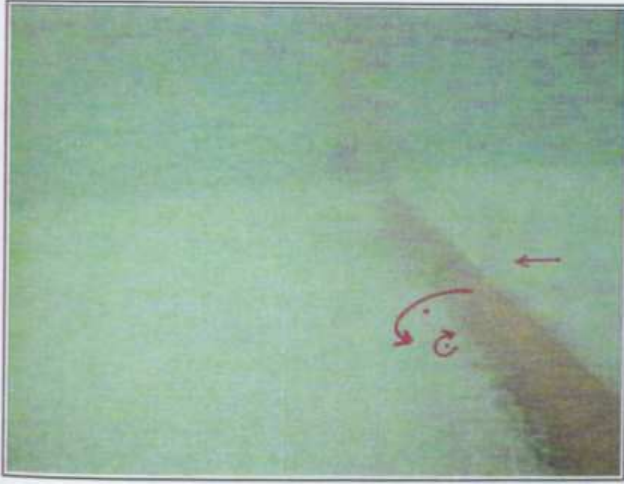
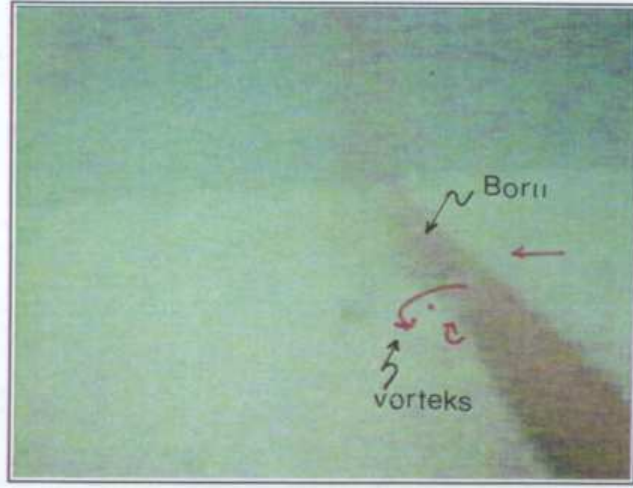


$G/D=0.09$  ve  $0.5$  açıklık oranlarında gerçekleştirdikleri deneylerde,  $G/D=0.09$  hali için borunun her iki tarafında birer küçük çevrinin şekillendiğini ifade etmiş ve borunun altından geçen jet akımının etkisiyle bunların ortadan kaldırıldığını gözlemişlerdir. Bu sonuçlar, bu çalışmadaki deneysel gözlemleri desteklemektedir. Yine aynı araştırmacılar boru hattının her iki tarafındaki taban kayma gerilmelerinin silindirin olmadığı durumdaki kayma gerilmesine göre değişimin silindirden  $2.5D$  mesafeye kadar etkili olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuçta burada belirlenen vortekslerin etki mesafesiyle uyum içindedir.  $G/D=0.09$  için maksimum kayma gerilmesinin silindirden  $0.75D$  kadar mesafede silindirin olmadığı duruma göre  $1.3$  kat arttığı belirlenmiştir. Ancak  $G/D=0.5$  için kayma gerilmesi silindirin olmadığı durumdan daha küçüktür. Yine  $G/D=0.09$  için kayma gerilmesindeki bu rölatif artış bir dalga periyodunun hemen başında ( $t/T=0.15\approx 0.35$ ) meydana gelmekte ve daha sonra azalmaktadır. Bunun nedeni oluşan jet akımının taban yakınında bir durgunluk bölgesini yaratması olarak açıklanmıştır. Bu sonuç jet akımının bir faz farkıyla meydana geldiğini doğrulamaktadır. Borunun mansap tarafında küçük çevri ile vorteksin birbirlerine ters doğrultuda hareket etmesinin kayma gerilmesinin sıfır olmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bunun da başlangıçta boruya yakın bölgede oluşan yığılmanın nedeni olarak düşünülebilir.

Oyulma mekanizmasının başlamasıyla açıklık oranı dolayısıyla silindir yakınındaki akımın rejimide değişmektedir, bu da hareketli taban durumunda oyulma çukuru şeklinin zaman içinde değişimine neden olmaktadır.

Sığlaşma bölgesine doğru boru hattının yerleştirilmesi durumunda artan kayma gerilmesinin etkisiyle birlikte, meydana gelen oyulma çukuru daha yayvan görünüm almaktadır. Ancak kıyı profilinin olduğu bölgeye girildiğinde boru hattı etrafında meydana gelen oyulmanın yerini yığılma almaktadır, hatta profilin tepesine yakın bölgede boru hattı tamamen gömülebilmektedir. Kıyı profilinin etkisiyle boru hattının gömülmesi boru çapına ve profilin yerine bağlı olarak kısmen veya tamamen gömülme şeklinde görülmektedir. Küçük çaplı borular kıyı profilinin şeklini etkilememeksizin tamamen örtülmektedirler.





Şekil 4.23- Oyulma çukurunun şekillenmesi.

a)

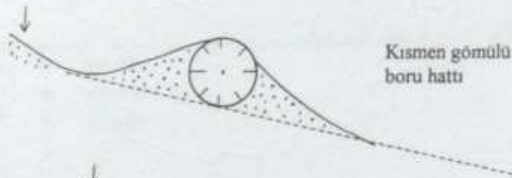
 $t < T/2$  $t < T/2$  $t < T/2$  $t \geq T/2$ 

b)

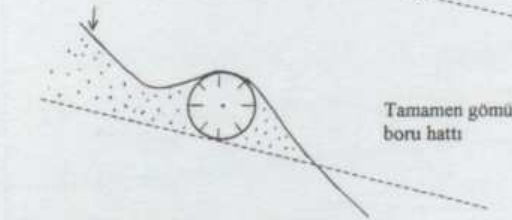
Sıgışma bölgesinde tipik  
oyulma çukuru şekli



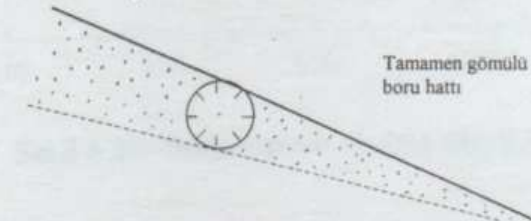
Kısmen gömülü  
boru hattı



Tamamen gömülü  
boru hattı



Tamamen gömülü  
boru hattı



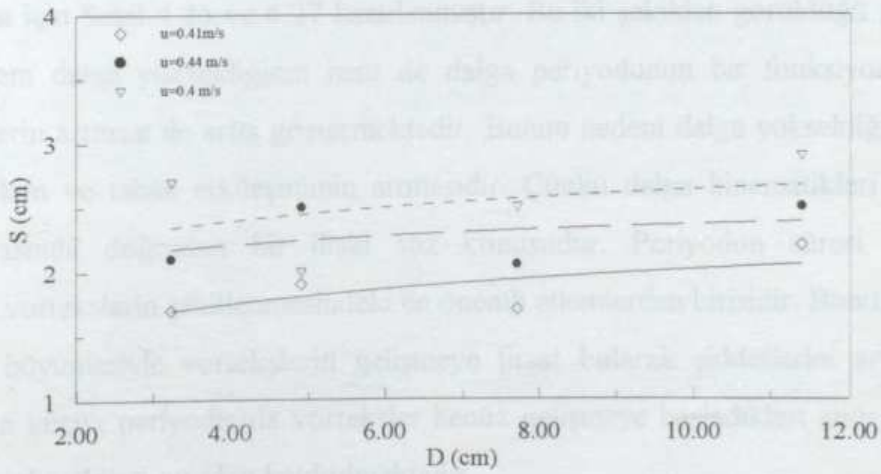
Şekil 4.24- a) Düzlem taban halinde oyulma çukurunun evreleri, b) Sıgışma bölgesinde oyulma çukuru.

#### 4.4 Düzlem Taban Halinde Yerel Oyulma Derinliğinin Değişimi

Dalga etkisine maruz ve 35 cm su derinliğinde düzlem tabana yerleştirilmiş boru hatları etrafındaki yerel oyulma ile ilgili deneyler  $Re$  sayısının  $4.9 \times 10^3 - 7.7 \times 10^4$  ve Keulegan-Carpenter sayısının 1.5-57 değerleri aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde boru hatlarını temsil eden silindirler dalga yayılma doğrultusuna dik olarak yerleştirilmiştir.

Deneyler esnasında sabit granülometreye sahip taban malzemesi, fakat değişken akım şartları ile dört farklı boru çapı kullanılarak bu değişkenlerin akım alanı, dolayısıyla oyulma derinliği üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Öncelikle her bir etkili parametrenin oyulma derinliği ile olan ilişkileri ayrı ayrı irdelenmiştir.

Boru çapı değişiminin oyulma derinliğine olan etkisi Şekil 4.25'de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi boru çapının artması ile oyulma derinliği artmaktadır. Çünkü boru çapının artmasıyla şekillenen vorteks sistemleri ile daha büyük türbülanslı bir akım alanı yaratılmaktadır. Böylece oyulma hızı ve derinliği artmaktadır. Benzeri bulgu İbrahim and Nalluri (1986) tarafından da elde edilmiştir.

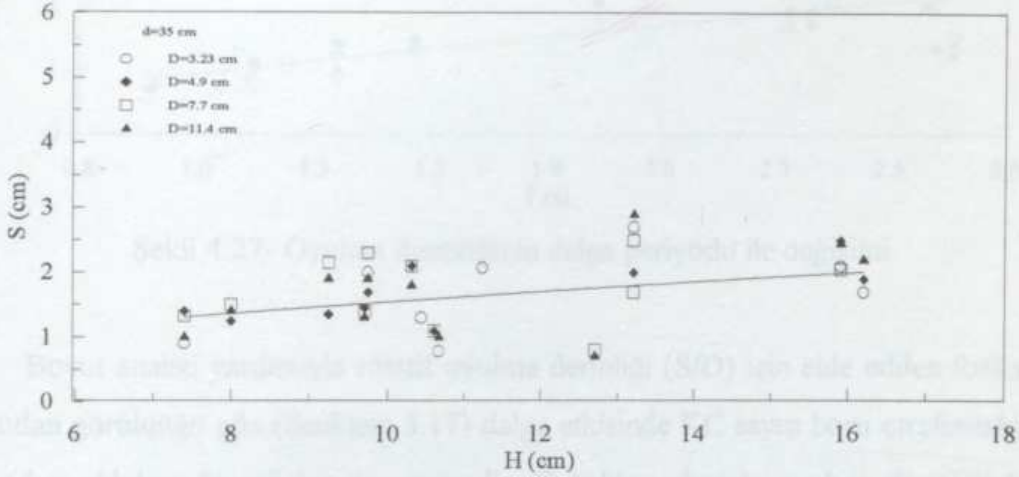


Şekil 4.25- Boru çapının oyulma derinliği üzerine etkisi.

Boru hatları ile taban arasındaki ilişki açıklık oranına da bağlıdır. Ancak açıklık oranının yeterince büyümesiyle art-iz vorteks sisteminin şiddeti azalmaktadır. Böylece silindir etrafındaki oyulma çukurunun büyümesiyle birlikte, silindir ile taban arasındaki açıklık oranı artmaktadır. Silindirin çapına bağlı olarak şekillenen vorteks sistemi aynı

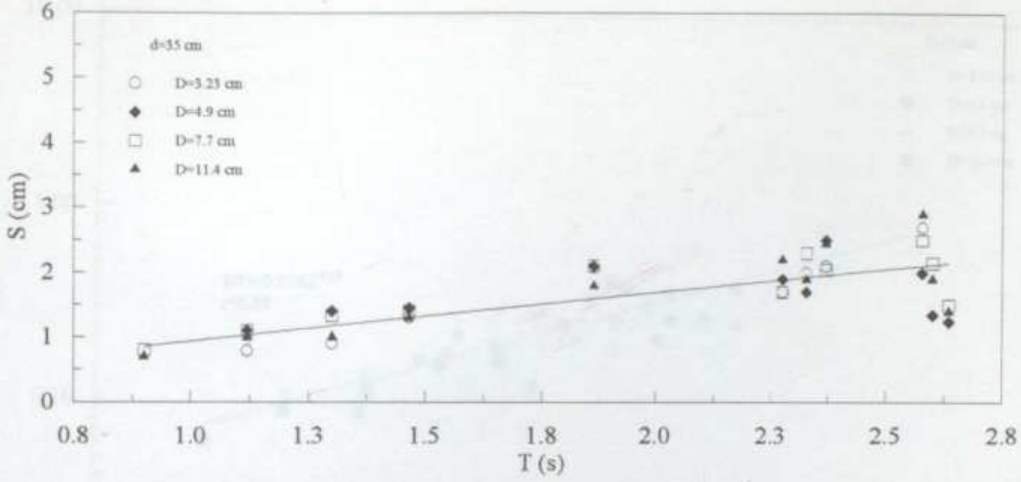


orantıda artan oyulma çukuru nedeniyle şiddetini kaybetmekte ve dinamik dengeye ulaşarak durmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi oyulma çukuruna etkili parametrelerden biri boru çapıdır.



Şekil 4.26- Oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ile değişimi.

Aynı şekilde oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ve dalga periyodu ile değişiminin araştırılması için Şekil 4.26 ve 4.27 hazırlanmıştır. Bu iki şekilden görüldüğü gibi oyulma derinliği hem dalga yüksekliğinin hem de dalga periyodunun bir fonksiyonu olup bu parametrelerin artması ile artış göstermektedir. Bunun nedeni dalga yüksekliğinin artması ile boru, akım ve taban etkileşiminin artmasıdır. Çünkü dalga kinematikleri ve oyulma çukuru arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur. Periyodun süresi silindirlerin etrafındaki vortekslerin şekillenmesindeki en önemli etkenlerden birisidir. Bunun nedeni ise periyodun büyümesiyle vortekslerin gelişmeye fırsat bularak şiddetlerini artırmalarıdır. Buna karşın küçük periyotlarda vorteksler henüz gelişmeye başladıkları anda geri dönen akım nedeniyle etkileri ortadan kaldırılmaktadır.

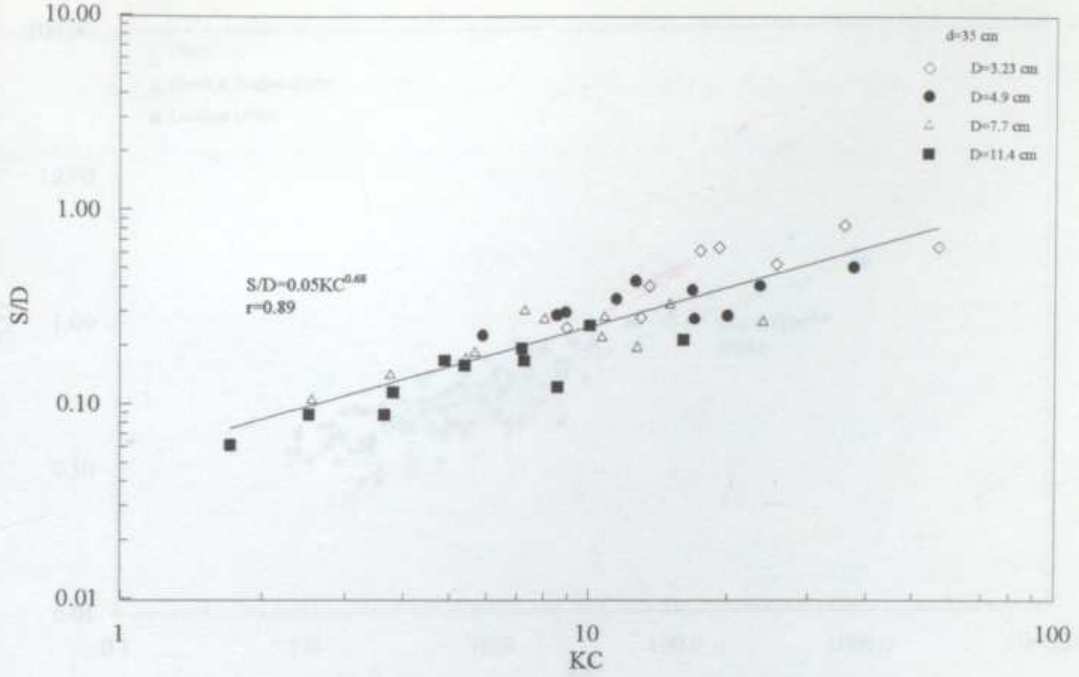


Şekil 4.27- Oyulma derinliğinin dalga periyodu ile değişimi.

Boyut analizi yardımıyla rölatif oyulma derinliği ( $S/D$ ) için elde edilen fonksiyonel bağıntıdan görüldüğü gibi (denklem 3.17) dalga etkisinde KC sayısı boru etrafındaki akımı ifade eden oldukça önemli bir parametredir. O halde yukarıda oyulma derinliği üzerine etkili olan bu değişkenleri ihtiva eden KC ( $U_m T/D$ ) sayısının düzlem taban oyulma derinliğini de iyi bir şekilde temsil etmesi beklenilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen boyutsuz oyulma derinliği Şekil 4.28'de KC sayısına karşılık çizilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi oyulma derinliği KC sayısı ile iyi bir korelasyon içerisinde ve artan KC sayısı ile rölatif oyulma derinliği artmaktadır. Bu değişimden rölatif oyulma derinliği için

$$S/D = 0.05 KC^{0.68} \quad (4.11)$$

bağıntısı elde edilmiştir, yani rölatif oyulma derinliği KC sayısının üstel bir fonksiyonudur.



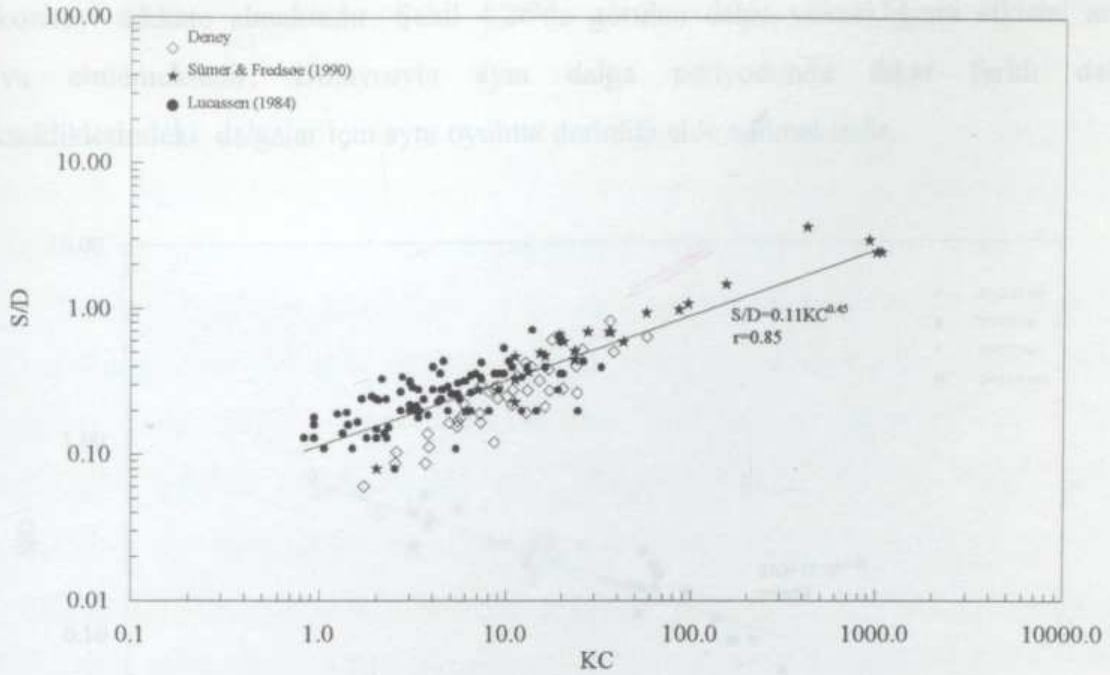
Şekil 4.28- Rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi.

Düzlem taban oyulma derinliği için elde edilen bu sonuçlar Sümer (1990) ve Lucassen (1984)'in verileri ile birlikte çizilerek Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bu araştırmacıların farklı granülometreye sahip taban malzemesi ile yaptıkları deney sonuçları ile burada gerçekleştirilen deney sonuçları oldukça iyi bir uyum sağlamaktadır. Bu sonuç, hem çalışılan farklı granülometrelere rağmen taban malzemesinin oyulma derinliği üzerine etkisinin olmadığını, hem de yapılan deneylerden elde edilen verilerin doğruluğunu göstermesi açısından önemlidir. Tüm bu veriler bir arada çizildiğinde rölatif oyulma derinliği için

$$\begin{aligned} S/D &= 0.11 KC^{0.45} \\ r &= 0.85 \end{aligned} \quad (4.12)$$

bağıntısı elde edilmiştir.





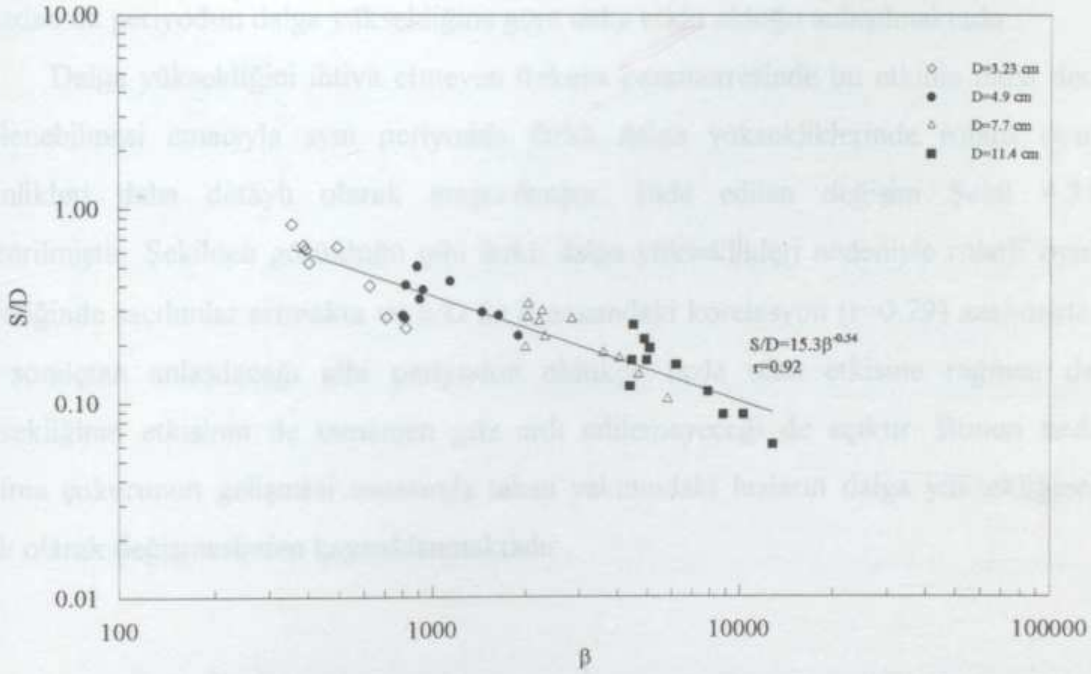
Şekil 4.29- Rölafif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi.

Tek yönlü akım halinde boru hatları etrafında meydana gelen yerel oyulma çukurunun boru  $Re$  ( $=UD/\nu$ ) sayısı ile değiştiği belirtilmişti, çünkü silindirik yapıların etrafında sınır tabakasının oluşumu ve ayrılarak vortekslerin yapılanması  $Re$  sayısına bağlıdır. Dalga etkisindeki periyodik akımlarda ise her yarım periyotluk süre içerisinde akım alanındaki değişimler tek yönlü akımdakine benzer şekilde gelişmektedir. Periyodik akım alanında silindirik yapılar etrafında şekillenen akım yapısında meydana gelen değişimler ve bu değişimlerin sonucunda oluşan yerel oyulma çukuruna  $KC$  ve  $Re$  sayılarının birlikte olan etkisini araştırmak amacıyla, rölafif oyulma derinliğinin frekans parametresiyle olan değişimi incelenmiştir. Bu iki parametrenin birbirine oranlarıyla elde edilen frekans parametresi ( $Re/KC$ ) ile oyulma derinliği arasındaki ilişki Şekil 4.30'da görülmektedir.

$$\text{Frekans Parametresi} = \beta = D^2/\nu T \quad (4.13)$$

Şekilden düzlem taban rölafif oyulma derinliği frekans parametresi ile oldukça uyumlu görülmektedir. Ancak bu parametre sadece boru çapı, dalga periyodu ve

viskoziteyi dikkate almaktadır. Şekil 4.26'da görülen dalga yüksekliğinin etkisini artık ihtiva etmemektedir. Dolayısıyla aynı dalga periyodunda fakat farklı dalga yüksekliklerindeki dalgalar için aynı oyulma derinliği elde edilmektedir.



Şekil 4.30- Rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresi ile değişimi.

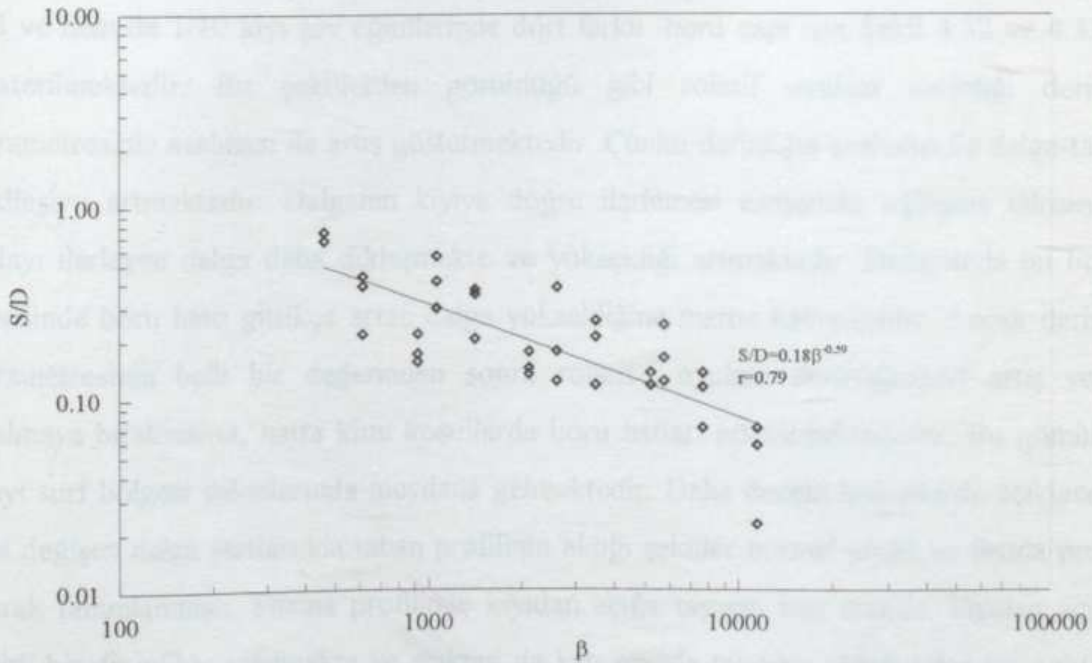
Şekil 4.30'da rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresiyle olan ilişkisi

$$S/D = 15.3\beta^{-0.54} \quad (4.14)$$

bağıntısını vermektedir. Görüldüğü gibi artan  $\beta$  ile birlikte  $S/D$  azalmaktadır. Çünkü  $\beta$  periyotla ters orantılı olarak değişmektedir.  $S/D$  ile  $\beta$  arasındaki korelasyonun ( $r=0.92$ ) oldukça iyi olması  $KC$  ve  $Re$  sayılarının birlikte frekans parametresi ile karakterize edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak Sümer (1990)  $Re$  sayısının tek başına dalga etkisindeki rölatif oyulma derinliğine olan etkisinin az olduğunu göstermiştir, buna karşın İbrahim and Nalluri (1986) dalga-akıntı etkisinde ise boru  $Re$  sayısının  $S/D$  üzerinde etkili olduğunu bulmuştur. Ayrıca Gökçe (1990) rölatif oyulma derinliğinin  $\beta$  frekans parametresiyle değişimini oldukça iyi bir korelasyonla gözlemlemiştir. Frekans

parametresinin hızdan bağımsız olması rölatif oyulma derinliğinin belirlenmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca frekans parametresinin bu etkisi silindirik yapılara tesir eden hidrodinamik dalga kuvvetleri içinde bulunmuştur. Bilindiği gibi hidrodinamik kuvvetlerin şiddetindeki değişim yine yapıların etrafındaki akım alanı ile ilgilidir (Sarpkaya, 1981). Buradan da periyodun dalga yüksekliğine göre daha etkin olduğu anlaşılmaktadır.

Dalga yüksekliğini ihtiva etmeyen frekans parametresinde bu etkinin daha detaylı irdelenebilmesi amacıyla aynı periyodda farklı dalga yüksekliklerinde rölatif oyulma derinlikleri daha detaylı olarak araştırılmıştır. Elde edilen değişim Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi farklı dalga yükseklikleri nedeniyle rölatif oyulma derinliğinde saçılımlar artmakta ve  $S/D$  ile  $\beta$  arasındaki korelasyon ( $r=0.79$ ) azalmaktadır. Bu sonuçtan anlaşılabileceği gibi periyodun oldukça fazla olan etkisine rağmen dalga yüksekliğinin etkisinin de tamamen göz ardı edilemeyeceği de açıktır. Bunun nedeni, oyulma çukurunun gelişmesi esnasında taban yakınındaki hızların dalga yüksekliğine de bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.31- Sabit periyodda farklı dalga yükseklikleri dikkate alınarak  $S/D$ - $\beta$  değişimi.



## 4.5 Kıyı Şevi Boyunca Yerleştirilmiş Boru Hatları Etrafında Yerel Oyulmanın İncelenmesi

Daha öncede bahsedildiği gibi sığlaşma bölgesine girildiğinde dalgalar transformasyona uğramakta ve belli bir derinliğe ulaştıklarında ise kırılmaktadırlar. Değişik karakterli dalgaların bu transformasyonları ve farklı kırılma tipleri nedeniyle sığlaşma bölgesi içerisinde taban profillerinin oluştuğu bilinmektedir. Bu nedenle taban, boru hattı ve akım etkileşimleri bu değişen taban profilleri ile de değişmektedir.

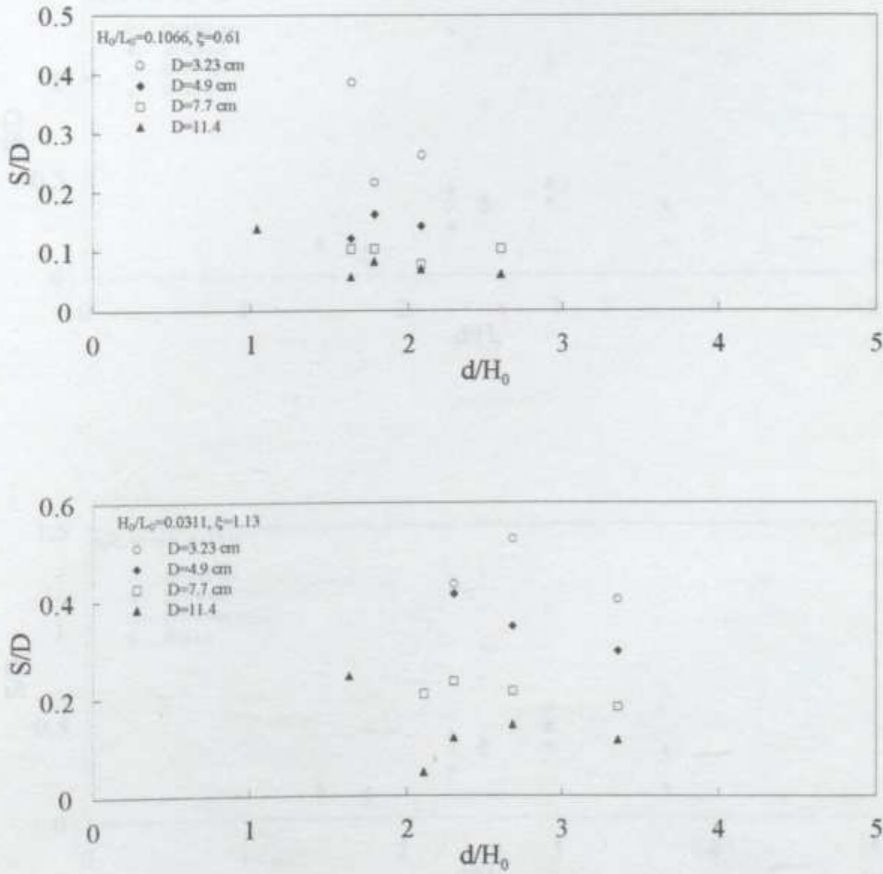
Bu bölümde, sığlaşma bölgesinde bulunan boru hatları etrafındaki rölatif yerel oyulma derinliğinin üçüncü bölümde elde edilen boyutsuz parametrelerle değişimi ayrı ayrı irdelenerek belirlenmiştir (denklem 3.17). Deneylerle belirlenen rölatif oyulma derinliğinin bu boyutsuz sayılarla değişimi ayrı ayrı irdelenecektir.

### 4.5.1 Rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresiyle değişiminin incelenmesi

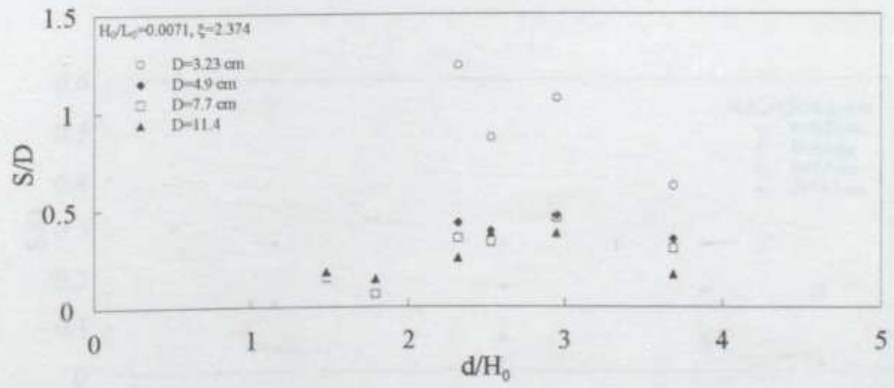
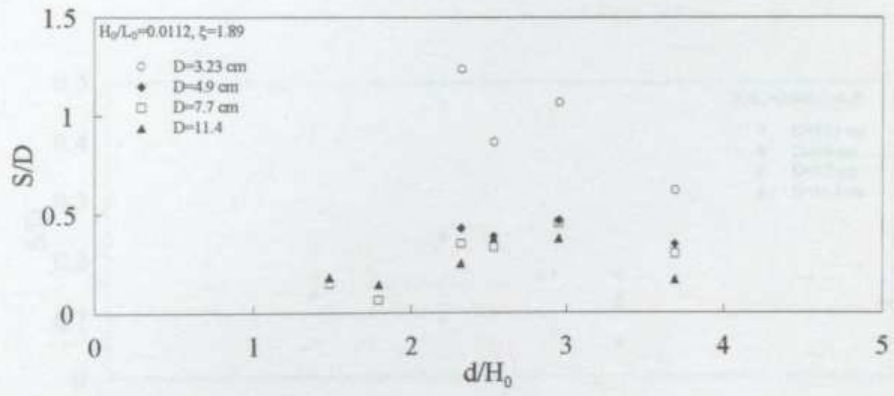
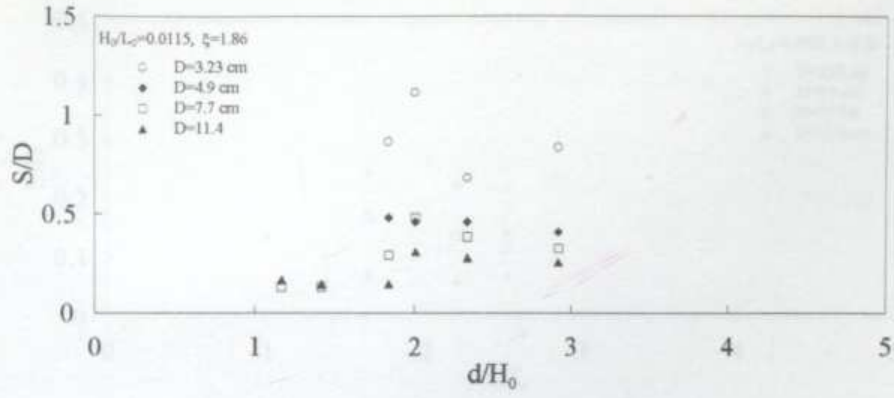
Derinlik parametresinin,  $(d/H_0)$ , rölatif oyulma derinliği,  $(S/D)$ , üzerine etkisi hem 1/5 ve hem de 1/10 kıyı şev eğimlerinde dört farklı boru çapı için Şekil 4.32 ve 4.33'de gösterilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi rölatif oyulma derinliği derinlik parametresinin azalması ile artış göstermektedir. Çünkü derinliğin azalması ile dalga-taban etkileşimi artmaktadır. Dalganın kıyıya doğru ilerlemesi esnasında sığlaşma etkisinden dolayı ilerleyen dalga daha dikleşmekte ve yüksekliği artmaktadır. Dolayısıyla bu bölge içerisinde boru hattı gittikçe artan dalga yüksekliğine maruz kalmaktadır. Ancak derinlik parametresinin belli bir değerinden sonra rölatif oyulma derinliğindeki artış yerini azalmaya bırakmakta, hatta kimi koşullarda boru hatları gömülmektedirler. Bu gömülme olayı surf bölgesi yakınlarında meydana gelmektedir. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi değişen dalga şartlarında taban profilinin aldığı şekiller normal profil ve fırtına profili olarak tanımlanmıştır. Fırtına profilinde kıyıdan açığa taşınan katı madde, kıyıdan açıkta belirli bir derinlikte yığılmakta ve açıktan da katı madde taşınımı olduğundan bu noktada kum eşiği oluşmaktadır. İşte oluşan bu kum eşiği daha önce daha kıyıda kırılan dalgaların daha açıkta kırılmasına yani eşiğin hareket etmesine neden olmaktadır. Küçük boru

çapında boru, fırtına profilinde oluşan kum eşiği tarafından daha kolay gömülmektedir. Ancak boru çapının büyümesi halinde boru hattı bir kum eşiği gibi davranmakta dalganın kırılma yerini ve kum eşiğinin oluşumunu etkilemekte ve böylece de gömülme miktarı küçük boruya göre daha az olmaktadır. Deneylerde bu tip etkilerden kaçınılmış ve sonuçları yanıltıcı yönde etkileyeceğinden değerlendirmelerde dikkate alınmamıştır

Ayrıca bu şekillerden artan boru çapı ile rölatif oyulma derinliğinin azaldığını da söylemek mümkündür. Ancak mutlak oyulma derinliği düzlem taban halinde olduğu gibi artan boru çapı ile artmaktadır.

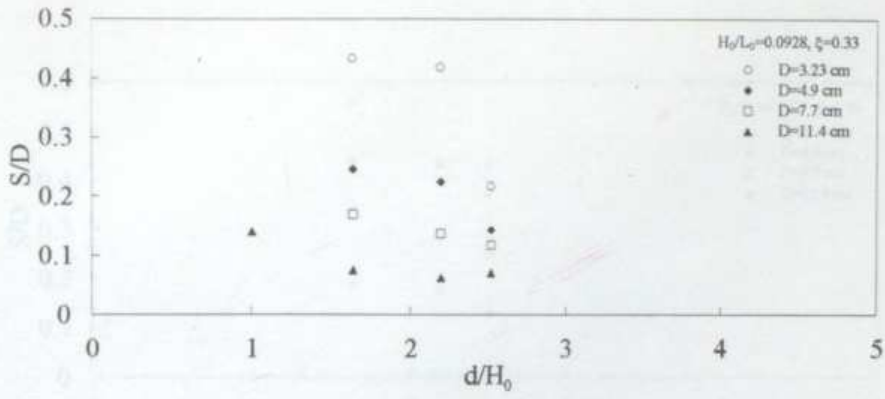


Şekil 4.32- 1/5 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi.

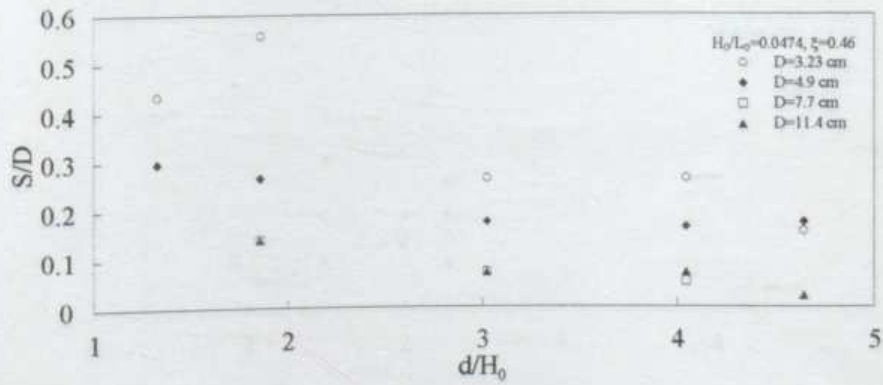
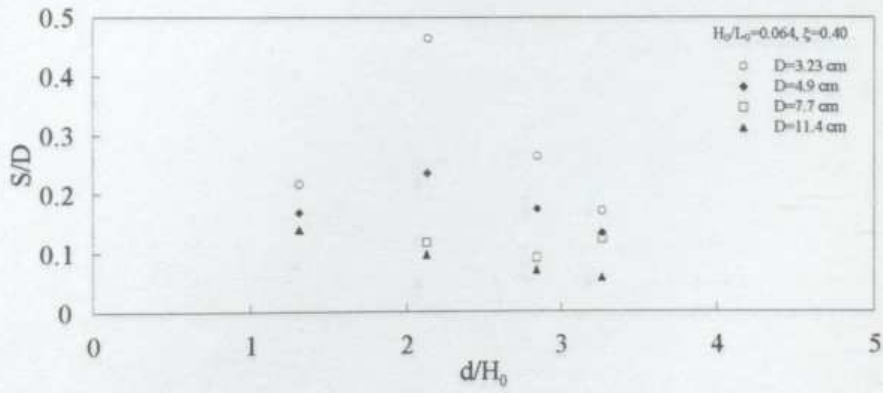


Şekil 4.32- Devam.

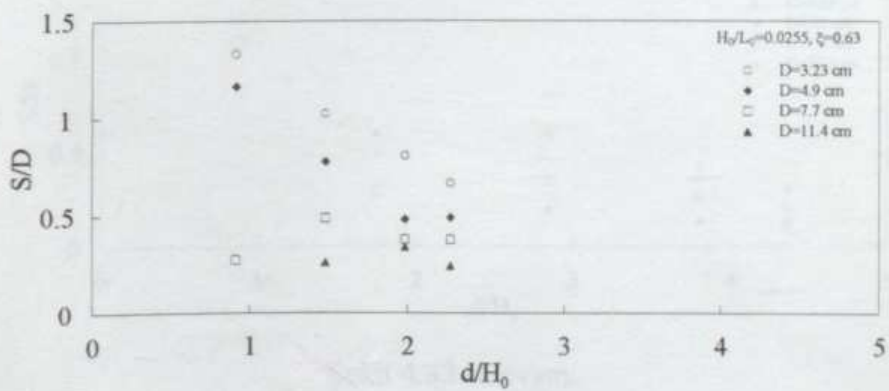
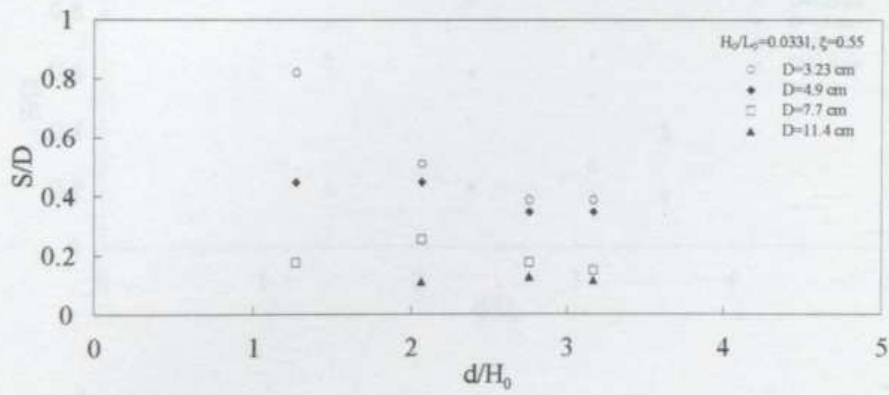
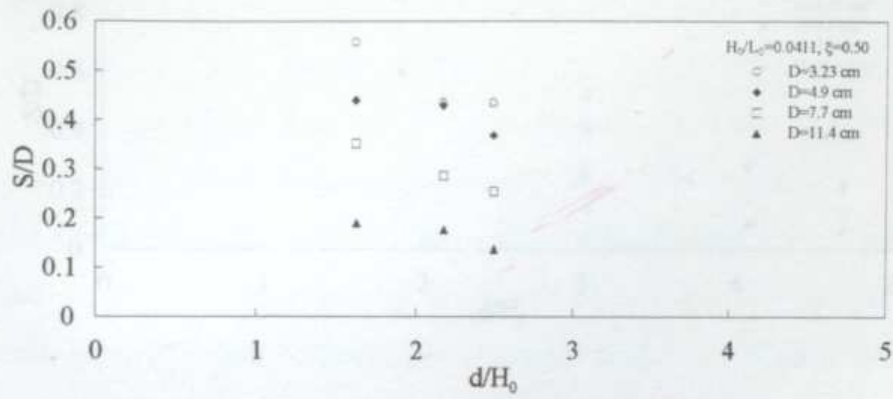




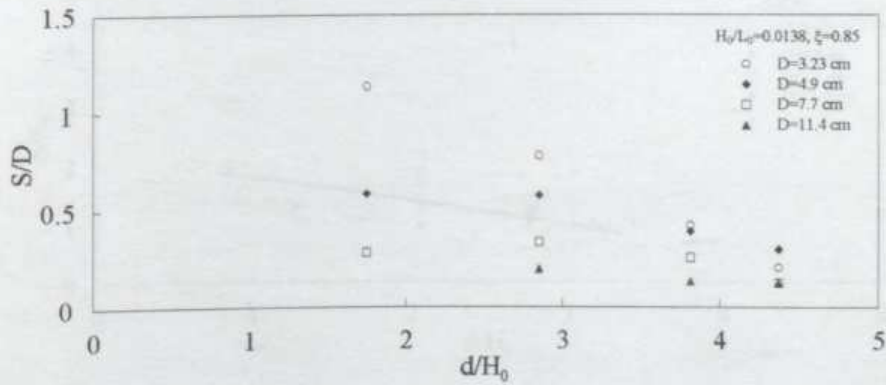
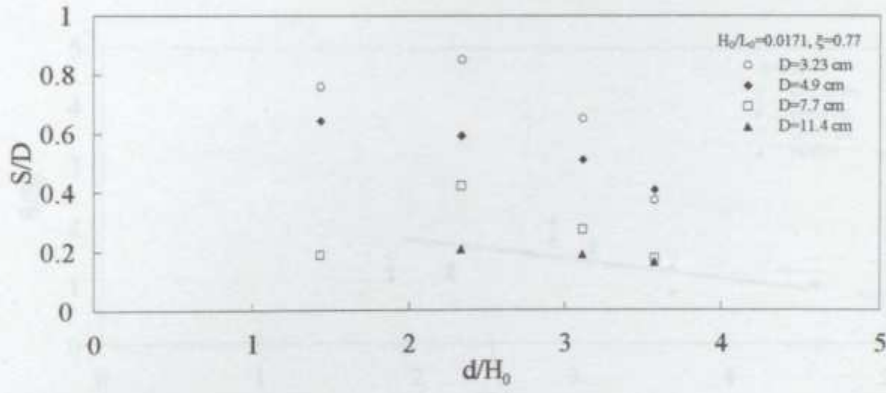
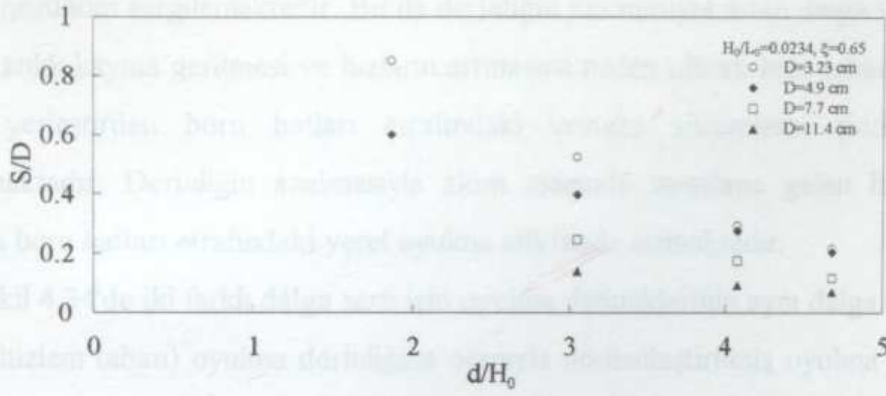
Şekil 4.32- Devam.



Şekil 4.33- 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi.



Şekil 4.33- Devam.



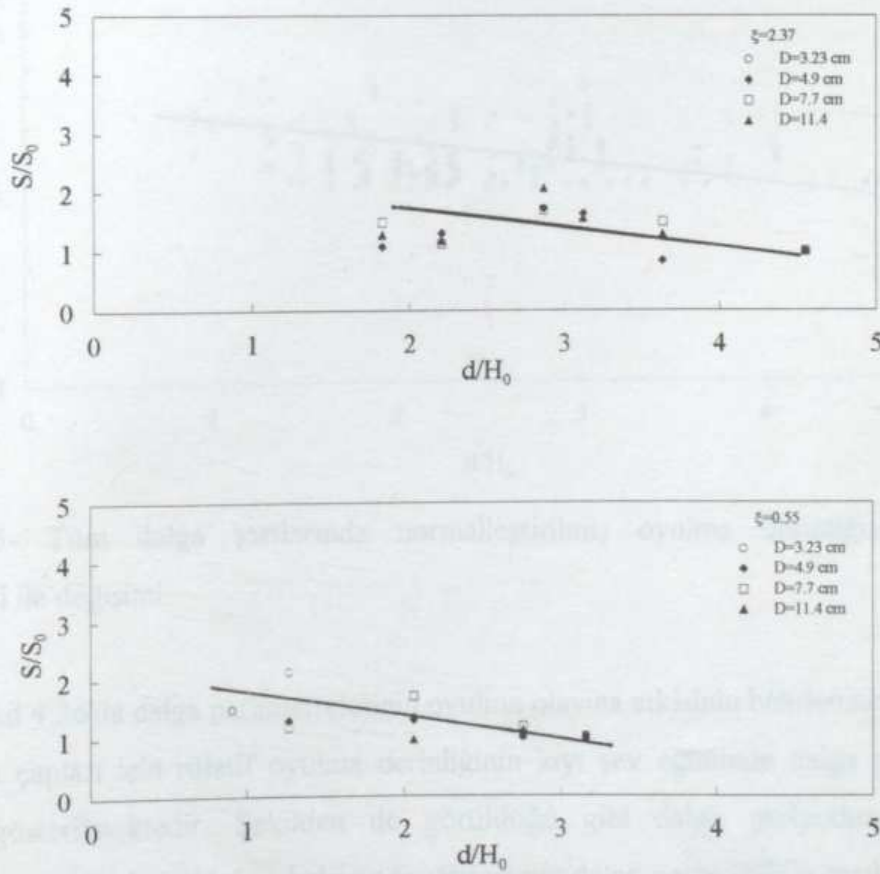
Şekil 4.33- Devam.

Rölatif oyulma derinliğinin azalan derinlik parametresiyle artışı bölüm 4.1'de açıklanan kıyı şevi boyunca kayma gerilmeleri ve taban yakınındaki hızların dağılımına



uygun bir görünüm sergilemektedir. Bu da derinliğin azalmasıyla artan dalga yüksekliğinin tabandaki anlık kayma gerilmesi ve hızların artmasına neden olarak hem taban hareketinin hem de yerleştirilen boru hatları etrafındaki vorteks sistemlerin şiddetlenmesiyle sonuçlanmaktadır. Derinliğin azalmasıyla akım alanında meydana gelen bu değişimin sonucunda boru hatları etrafındaki yerel oyulma miktarıda artmaktadır.

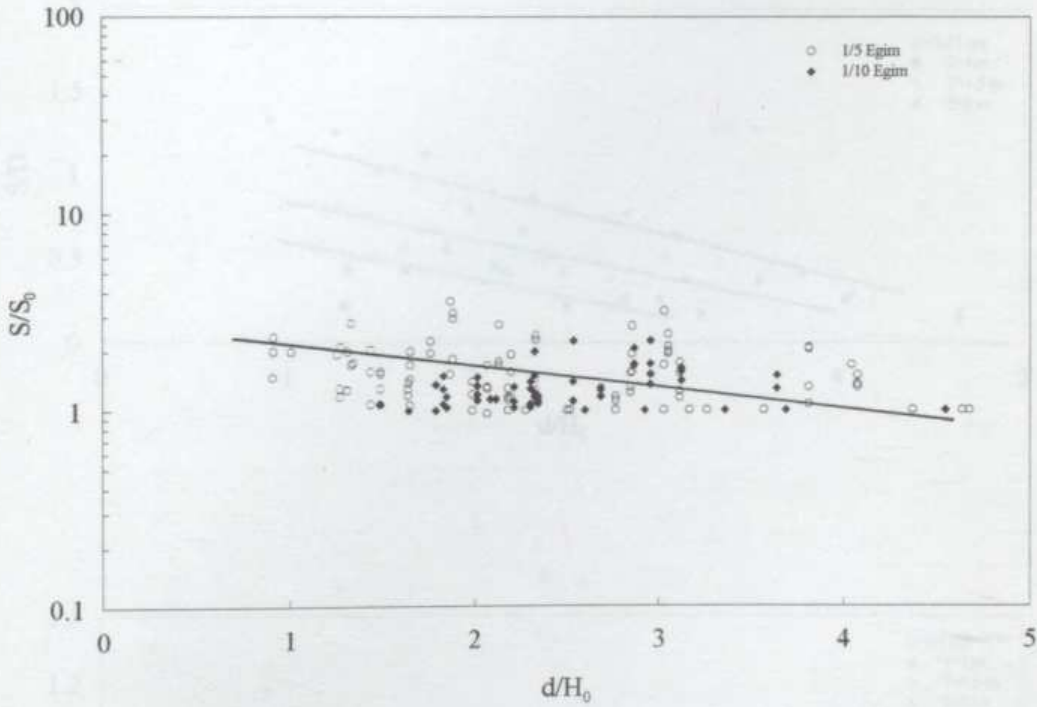
Şekil 4.34'de iki farklı dalga şartı için oyulma derinliklerinin aynı dalga koşullarında açıktaki (düzlem taban) oyulma derinliğine oranıyla normalleştirilmiş oyulma derinliğinin,  $S/S_0$ , derinlik parametresiyle değişimi gösterilmiştir, burada  $S_0$  düzlem taban halindeki oyulma derinliğini göstermektedir.



Şekil 4.34- Normalleştirilmiş oyulma derinliğinin bazı dalga şartlarında derinlik parametresi ile değişimi.

Bütün dalgaların her iki şev eğimi için düzlem tabana göre normalleştirilmiş oyulma derinliklerinin toplu olarak gösterildiği Şekil 4.35 ise oyulma derinliğinin düzlem

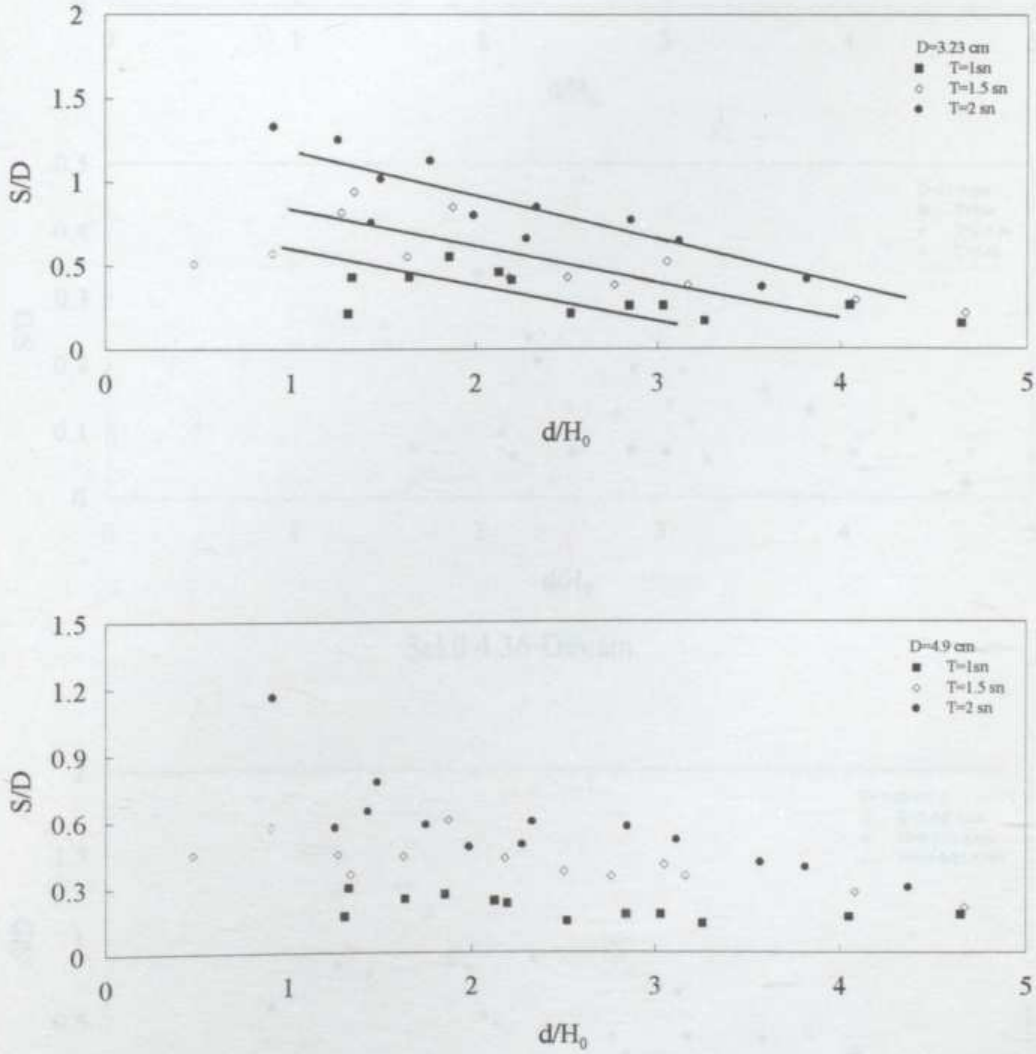
tabana göre kaç kat arttığı hakkında bilgi vermektedir. Oyulma derinliğinin bu artış miktarı  $d/H_0 \leq 2$  civarında yaklaşık olarak 2-3 katı mertebesine çıktığından bu sonuç kıyı şevleri boyunca belirlenen rölatif kayma gerilmesindeki artış miktarıyla hemen hemen bir uyum içindedir. O halde derinliğin azalmasıyla artan oyulma miktarına, taban hareketindeki artışın önemli bir etki olduğunu elde edilen bu sonuç göstermektedir.



Şekil 4.35- Tüm dalga şartlarında normalleştirilmiş oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi.

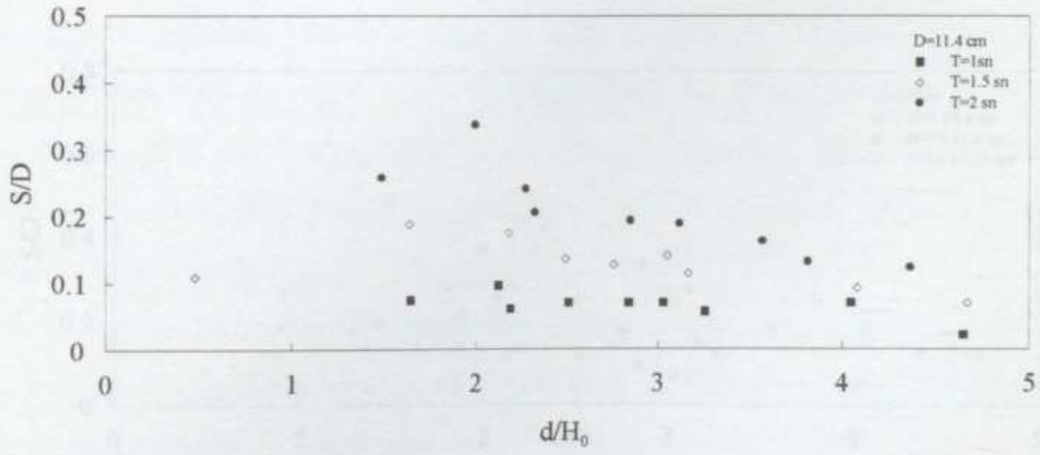
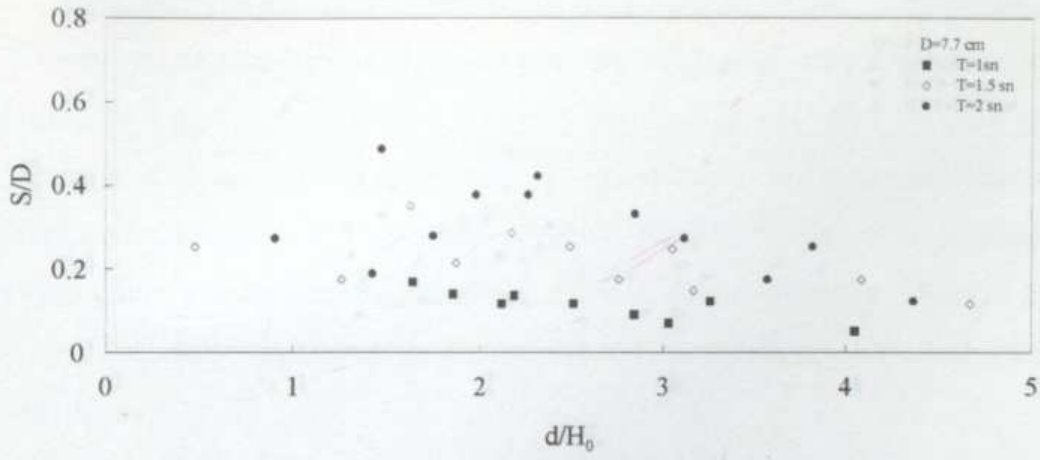
Şekil 4.36'da dalga parametrelerinin oyulma olayına etkisinin belirlenmesi amacıyla, farklı boru çapları için rölatif oyulma derinliğinin kıyı şev eğiminde dalga periyodu ile değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi dalga periyodunun derinlik parametresi ile değişimi oldukça belirgindir. Bu sonuç dalga periyodunun oyulma derinliği üzerine olan etkisinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Şekil 4.37 ise dalga yüksekliğinin kıyı şev eğiminde oyulma derinliği üzerine olan etkisini göstermektedir. Bu grafiklerde büyüyen dalga yüksekliği ile oyulma derinliğinin arttığı genel olarak görülmektedir. Çünkü artan dalga yüksekliği akım- taban-boru etkileşimini artırmaktadır.

Oyulmanın dalga kinematikleriyle direkt ilişkisi nedeniyle oyulma derinliği artmaktadır. Ancak Şekil 4.37'deki verilerin Şekil 4.36'dakine göre daha fazla saçılmış olduğu dikkat çekmektedir. Bunun nedeni çalışılan üç grupta da dalga yüksekliği aralığının geniş seçilmesinden kaynaklanmaktadır.

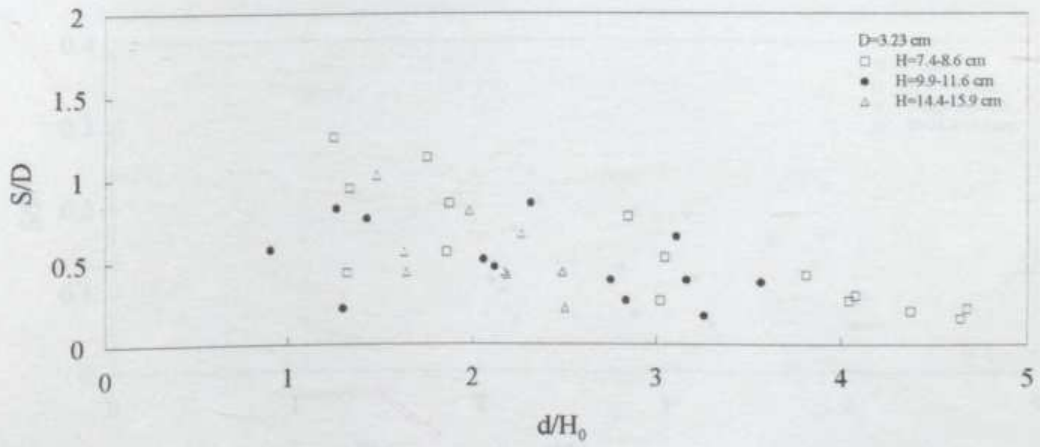


Şekil 4.36- Rölatif oyulma derinliğinin periyoda bağlı olarak derinlik parametresi ile değişimi.

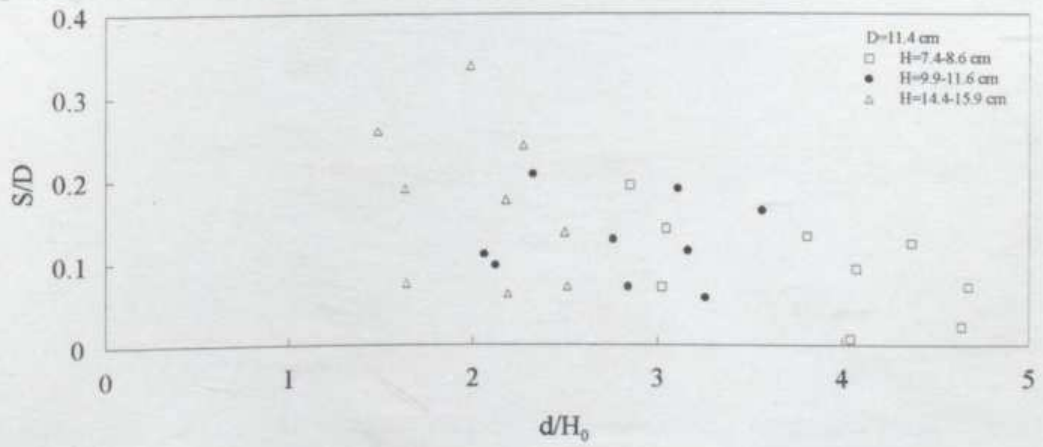
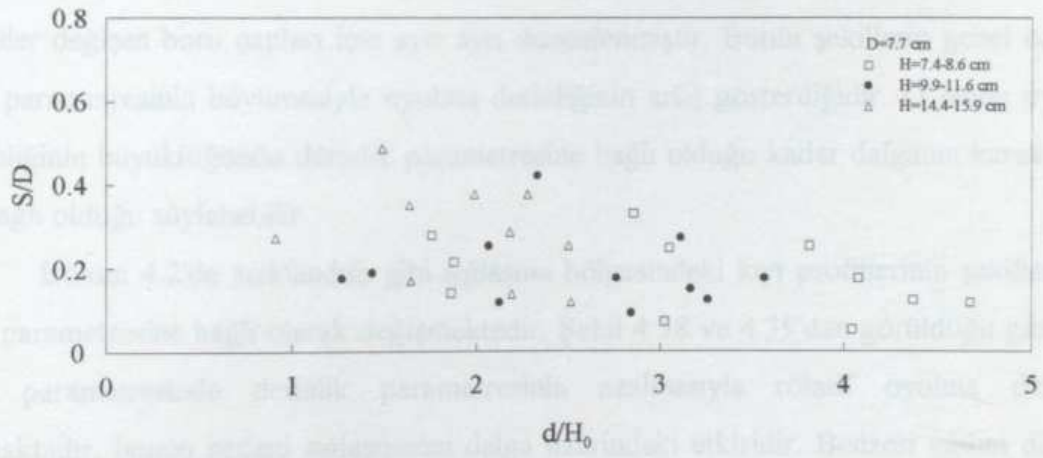
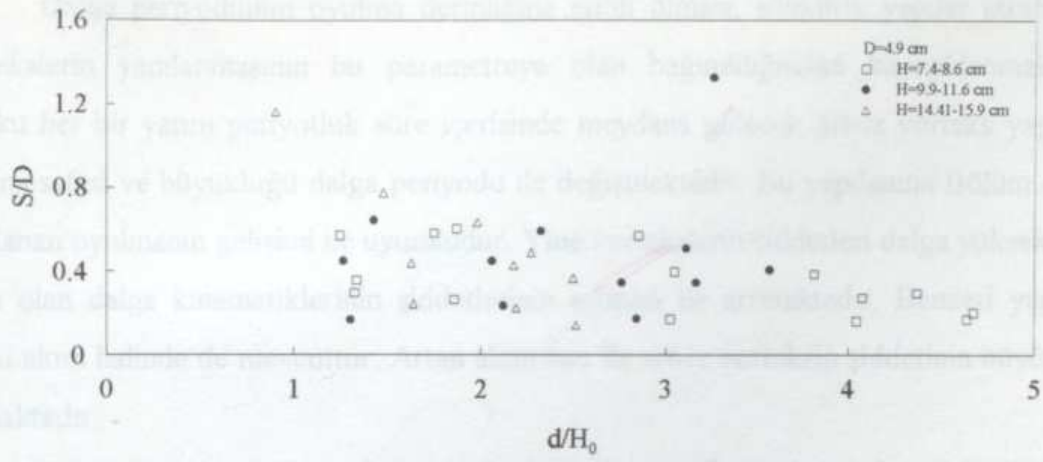




Şekil 4.36-Devam.



Şekil 4.37- Rölative oyulma derinliğinin dalga yüksekliğine bağlı olarak derinlik parametresi ile değişimi



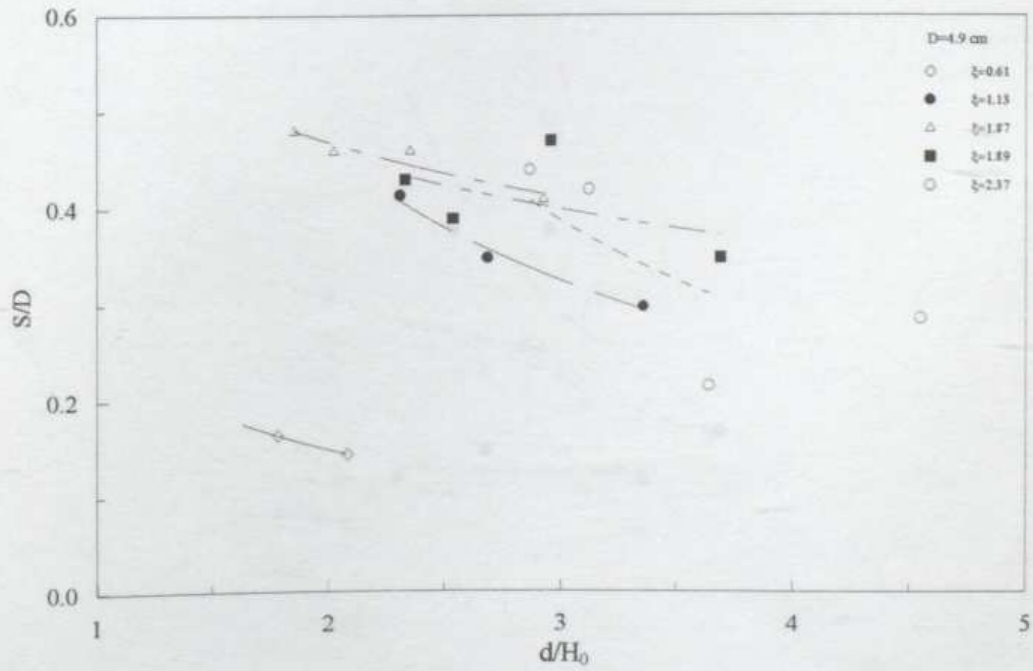
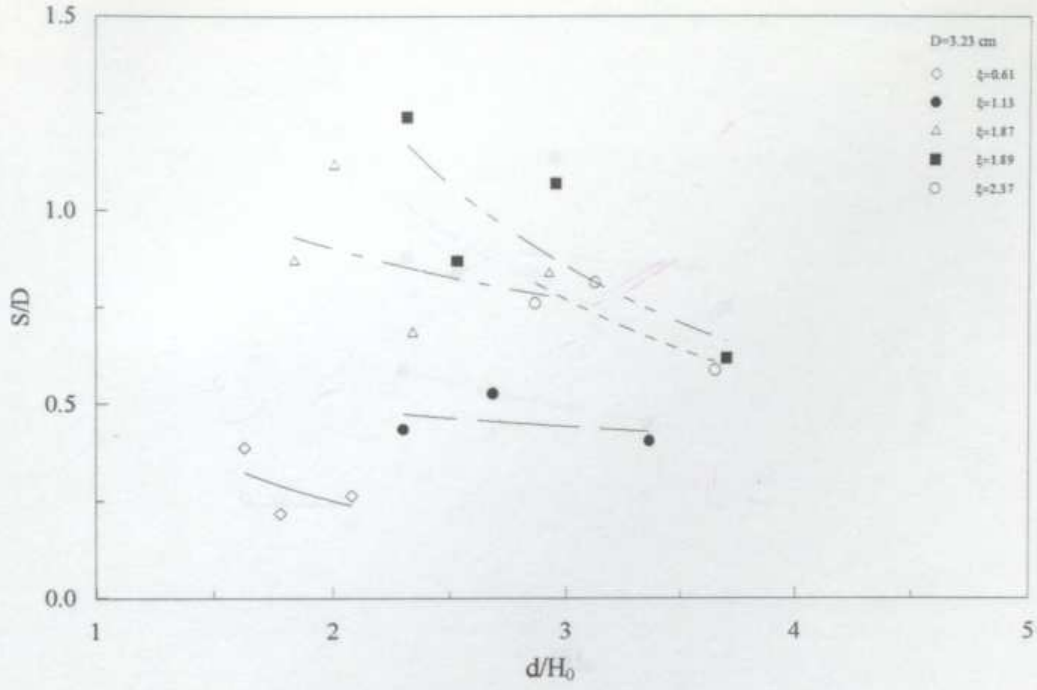
Şekil 4.37- Devam.

Dalga periyodunun oyulma derinliğine etkili olması, silindirik yapılar etrafındaki vortekslerin yapılanmasının bu parametreye olan bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Çünkü her bir yarım periyotluk süre içerisinde meydana gelecek art-iz vorteks yapısının etki mesafesi ve büyüklüğü dalga periyodu ile değişmektedir. Bu yapılanma Bölüm 4.3'de açıklanan oyulmanın gelişimi ile uyumludur. Yine vortekslerin şiddetleri dalga yüksekliğine bağlı olan dalga kinematiklerinin şiddetlerinin artması ile artmaktadır. Benzeri yapı tek yönlü akım halinde de mevcuttur. Artan akım hızı ile art-iz vorteksin şiddetinin büyüklüğü artmaktadır.

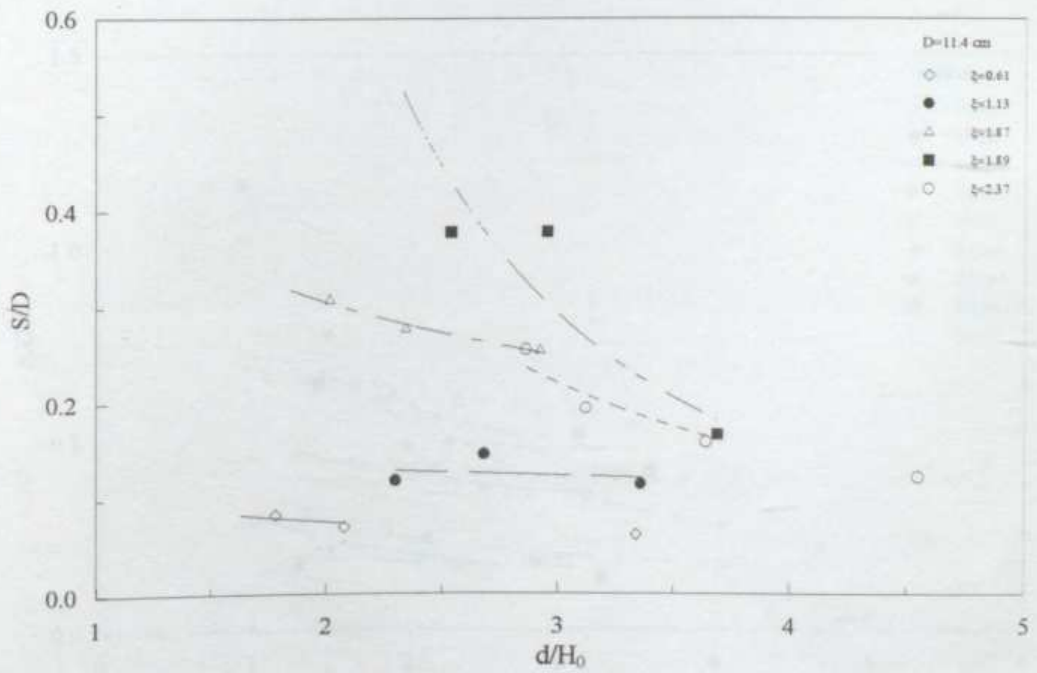
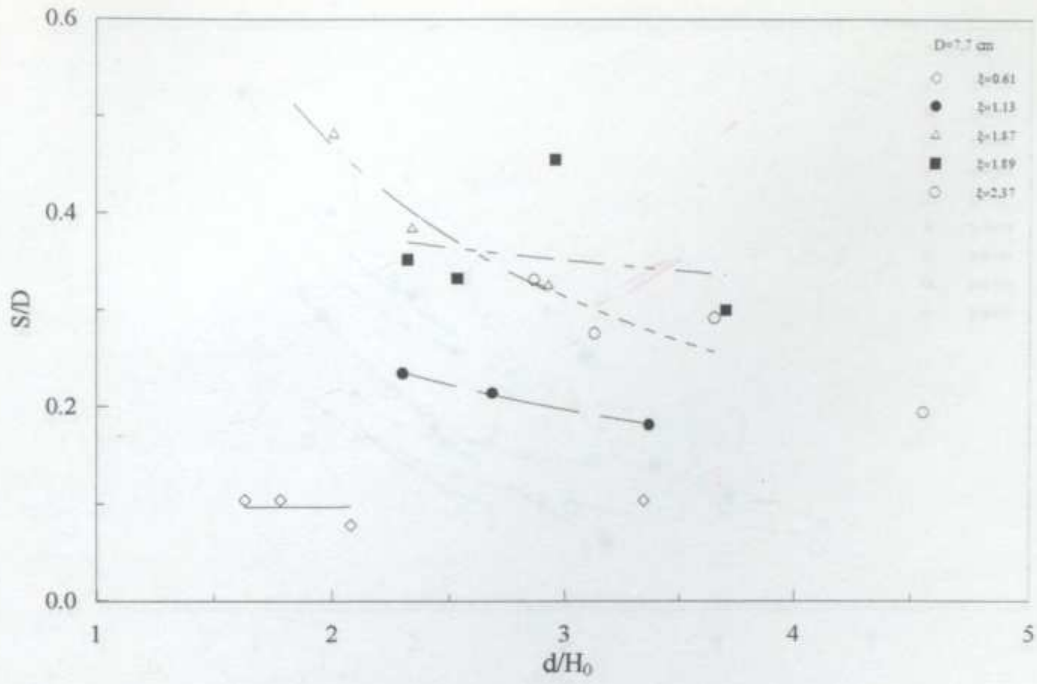
Şekil 4.38 ve 4.39 surf parametresine göre sınıflandırılmış olan dalgaların her birinin kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliği üzerine olan etkilerini göstermektedir. Şekiller değişen boru çapları için ayrı ayrı düzenlenmiştir. Bütün şekillerin genel özelliği surf parametresinin büyümesiyle oyulma derinliğinin artış gösterdiğidir. O halde oyulma derinliğinin büyüklüğünün derinlik parametresine bağlı olduğu kadar dalganın karakterine de bağlı olduğu söylenebilir.

Bölüm 4.2'de açıklandığı gibi sığlaşma bölgesindeki kıyı profillerinin şekillenmesi surf parametresine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.38 ve 4.39'dan görüldüğü gibi aynı surf parametresinde derinlik parametresinin azalmasıyla rölatif oyulma derinliği artmaktadır, bunun nedeni sığlaşmanın dalga üzerindeki etkisidir. Benzeri eğilim dikkate alınan bütün silindir çapları ve kıyı şev eğimleri için aynıdır. Surf parametresinin aldığı değere bağlı olarak oyulma derinliğinin değişimi ise Bölüm 4.5.4'de tartışılacaktır.

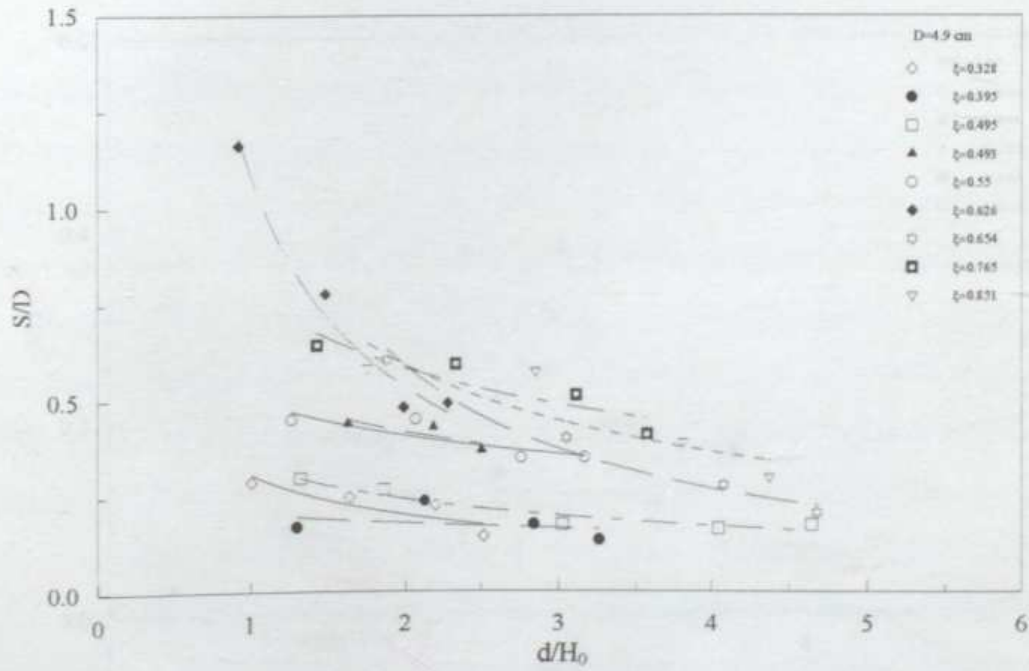
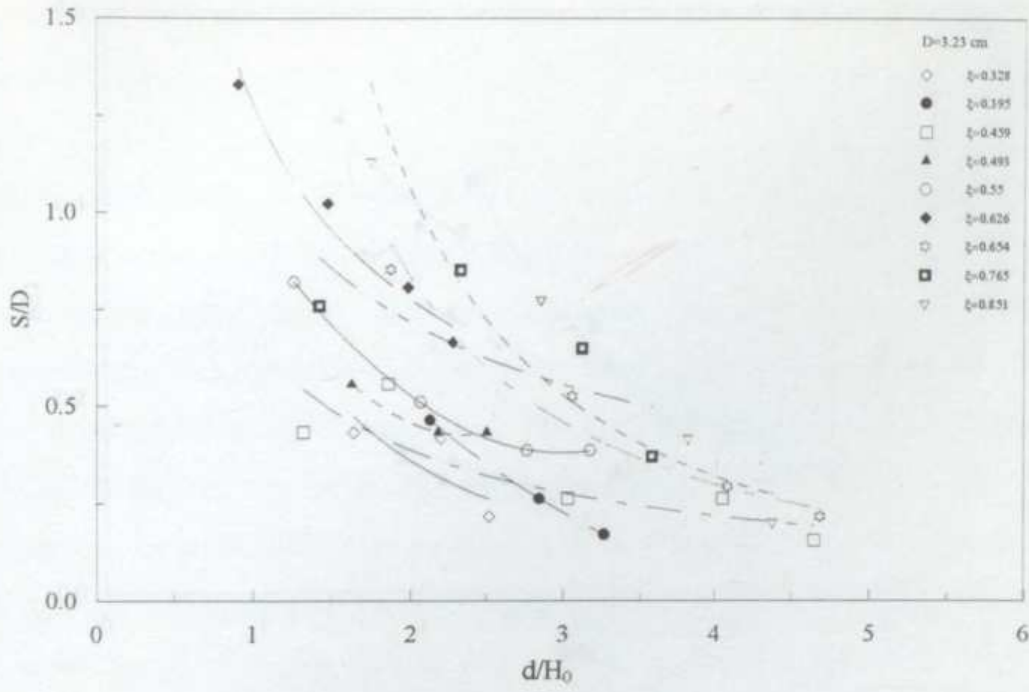




Şekil 4.38- Surf parametresi üçüncü parametre olarak rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (1/5 eğim).

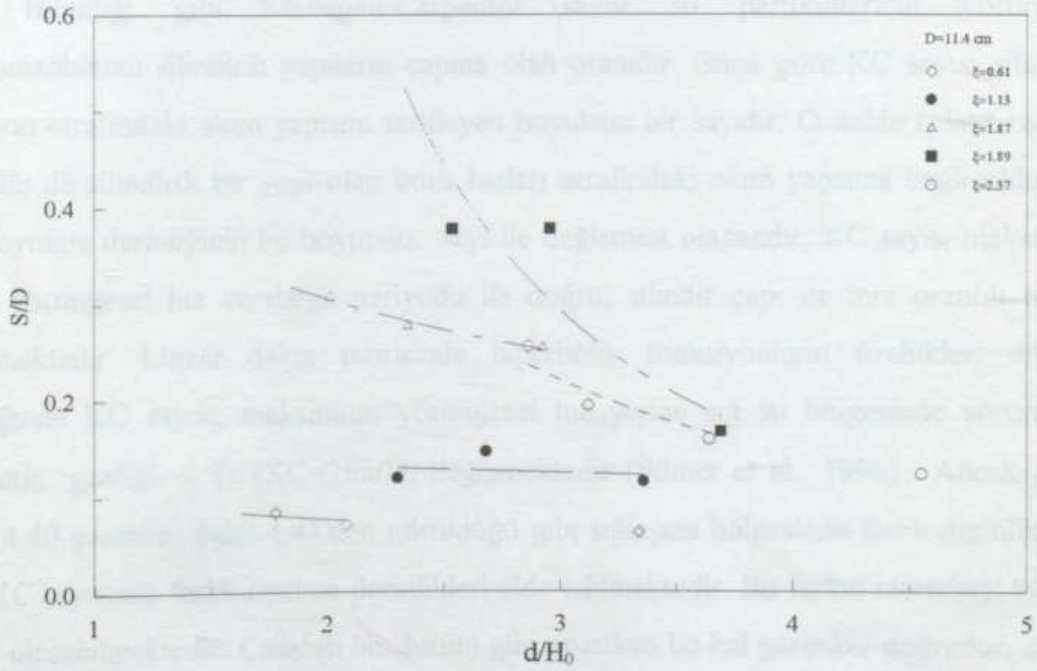
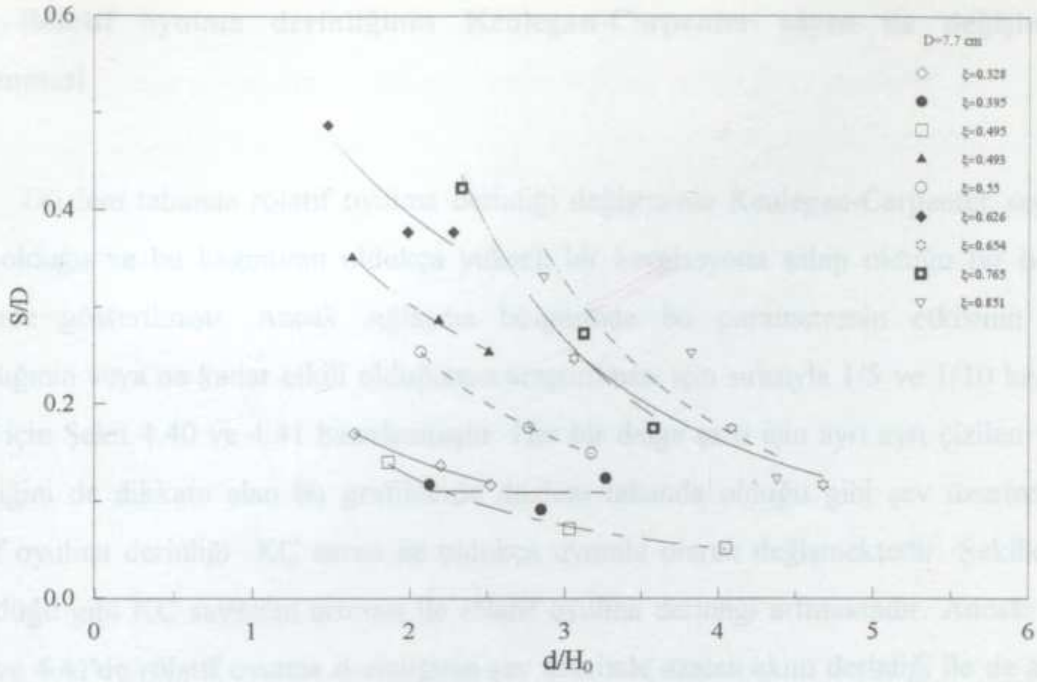


Şekil 4.38- Devam.



Şekil 4.39- Surf parametresi üçüncü parametre olarak rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (1/10 eğim).





Şekil 4.39- Devam.

#### 4.5.2 Rölatif oyulma derinliğinin Keulegan-Carpenter sayısı ile değişiminin incelenmesi

Düzlem tabanda rölatif oyulma derinliği değişiminin Keulegan-Carpenter sayısına bağlı olduğu ve bu bağıntının oldukça yüksek bir korelasyona sahip olduğu bir önceki bölümde gösterilmişti. Ancak sığlaşma bölgesinde bu parametrenin etkisinin olup olmadığının veya ne kadar etkili olduğunun araştırılması için sırasıyla 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimi için Şekil 4.40 ve 4.41 hazırlanmıştır. Her bir dalga şartı için ayrı ayrı çizilen ve su derinliğini de dikkate alan bu grafiklerde düzlem tabanda olduğu gibi şev üzerinde de rölatif oyulma derinliği KC sayısı ile oldukça uyumlu olarak değişmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi KC sayısının artması ile rölatif oyulma derinliği artmaktadır. Ancak Şekil 4.40 ve 4.41'de rölatif oyulma derinliğinin şev üzerinde azalan akım derinliği ile de arttığı görülmektedir. O halde kıyı şevi üzerinde oyulma derinliğinin belirlenmesinde KC sayısına bağlı olarak elde edilmiş olan ifade değişen derinliğin etkisini yeterince yansıtamayacağı düşünülebilir.

Bilindiği gibi Keulegan-Carpenter sayısı su partiküllerinin yörüngesel deplasmanlarının silindirik yapıların çapına olan oranıdır. Buna göre KC sayısı silindirik yapıların etrafındaki akım yapısını tarifleyen boyutsuz bir sayıdır. O halde rölatif oyulma derinliği de silindirik bir yapı olan boru hatları etrafındaki akım yapısına bağlı olduğuna göre oyulma derinliğinin bu boyutsuz sayı ile değişmesi olağandır. KC sayısı maksimum yatay yörüngesel hız ve dalga periyodu ile doğru, silindir çapı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Lineer dalga teorisinde hiperbolik fonksiyonların özellikleri dikkate alındığında KC sayısı, maksimum yörüngesel hız yerine sığ su bölgesinde yörüngesel hareketin genliği,  $a$ , ile ( $KC=2\pi a/D$ ) değişmektedir (Sümer et al., 1990). Ancak gerek Şekil 4.40 gerekse Şekil 4.41'den görüldüğü gibi sığlaşma bölgesinde farklı derinliklerde aynı KC sayısında farklı oyulma derinlikleri elde edilmektedir. Bu farkın mertebesi %7-8'e kadar ulaşabilmektedir. Çelişkili bir durum gibi gözüken bu hal gerçekte doğrudur, çünkü artık sığlaşma bölgesinde dalgaların asimetric yapısı daha da artmakta ve bu da taban yakınında da simetrik olmayan bir akım yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca bölüm 4.1'de şevler boyunca yaklaşan dalgaanın dikliğine bağlı olarak değişen hız



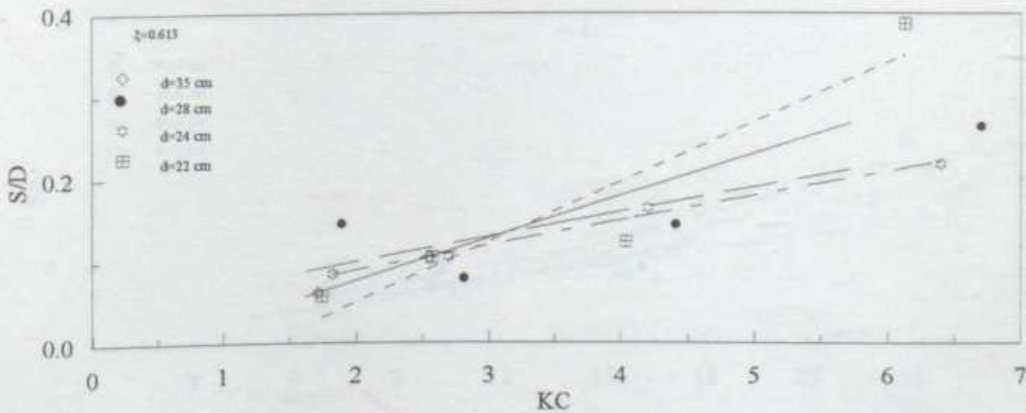
dağılımının açıklanmasından anlaşıldığı gibi derinlik azaldıkça sığlaşma nedeniyle taban yakınındaki hız artmaktadır. Şekiller incelendiğinde aynı KC sayısında aynı dalga periyoduna sahip dalganın azalan derinlikle büyüyen oyulma derinliğine neden olması tabandaki hızın artışından kaynaklanmakta olduğu görülmektedir. Böylece gerek taban hareketi gerekse boru hattı etrafındaki vortekslerin şiddeti ve bunun sonucunda oyulma miktarı artmaktadır. Derinlikle artan bu hız değişimi ise küçük KC sayılarında daha az, büyük KC sayılarında daha büyük olacağından, KC sayısı büyüdükçe su derinliğinin azalmasıyla oyulma derinliklerindeki bu fark daha da artmaktadır. Bilindiği gibi silindirik yapıların açıklık oranına,  $G/D$ , göre cidar yakınındaki basınç alanında değişimler meydana gelmektedir.  $G/D=1$  yani açıklık miktarı boru çapına eşit olduğunda artık silindirik yapının cidar üzerinde basınç dağılımına etkisi kalmamaktadır. Kıyı şevi boyunca azalan derinlikle kıyı profillerinin oluşumu esnasında artan erozyon nedeniyle, bu derinliklerde boru ile taban arasındaki açıklık miktarı boru çapına ulaşmakta olduğu şekillerden görülmektedir. Buna göre borunun tabana olan etkisi azalmakta buna karşılık kıyı profilinin oluşumu boru-taban etkileşimine daha hakim olmasına neden olmaktadır. Şekil 4.40 ve 4.41'deki her bir dalga şartı için bütün şekiller bir arada incelendiğinde küçük KC sayılarında oyulma derinliğindeki fark daha az olmakla birlikte, surf parametresine bağlı olarak büyük KC sayılarında su derinliğinin etkisi daha fazla hissedilmektedir. Örneğin  $\xi < 0.6$  değerlerinde  $KC > 3$ 'den itibaren derinlikle değişim artmakta, buna karşın  $\xi > 1.1$  değerinden itibaren bu farklılık çok daha belirgin olmaktadır.

Şekil 4.42'de göz önüne alınan tüm dalga şartları bir arada rölatif oyulma derinliğine karşılık KC sayısı olmak üzere surf parametrelerine göre çizilmiştir. Şekil dikkatlice incelendiğinde oyulma derinliklerinin surf parametrelerine göre gruplandıkları belirlenmiştir. Bu şekile göre aynı KC sayısında  $0.3 < \xi < 0.5$  değerlerinde daha büyük rölatif oyulma derinliği,  $0.50 < \xi < 0.65$  değerlerinde daha küçük rölatif oyulma derinliği buna karşın surf parametresinin daha büyüyen değerlerinde  $0.65 < \xi < 0.85$  yeniden rölatif oyulma derinliğinde artış gözlemlenmektedir. Bunun nedeni Bölüm 4.2'de anlatılan kıyı profillerinin oluşumu ile açıklanabilir. Surf parametresinin 0.33 ile 0.63 değerleri arasında fırtına profilleri oluşmakta ve surf parametresinin artan değeri ile kum eşiğinin yeri değişmekte ve kıyıda daha açıkta yapılmaktadır. Böylece büyük  $\xi$  değerlerinde daha

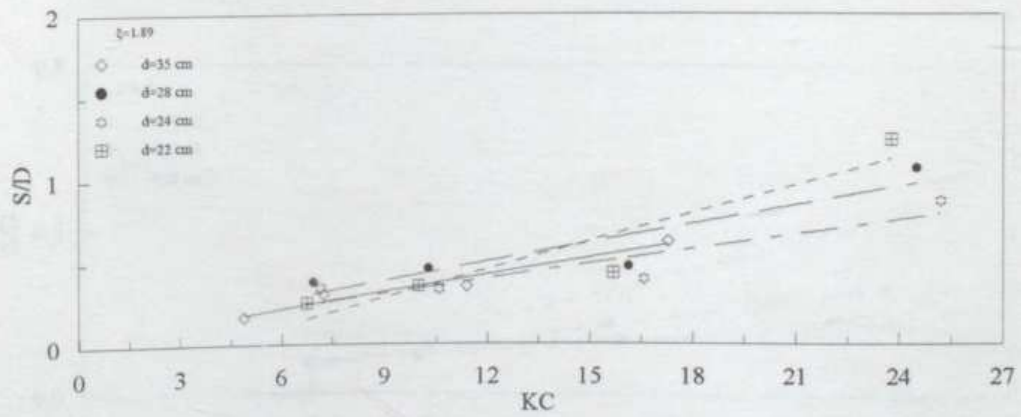
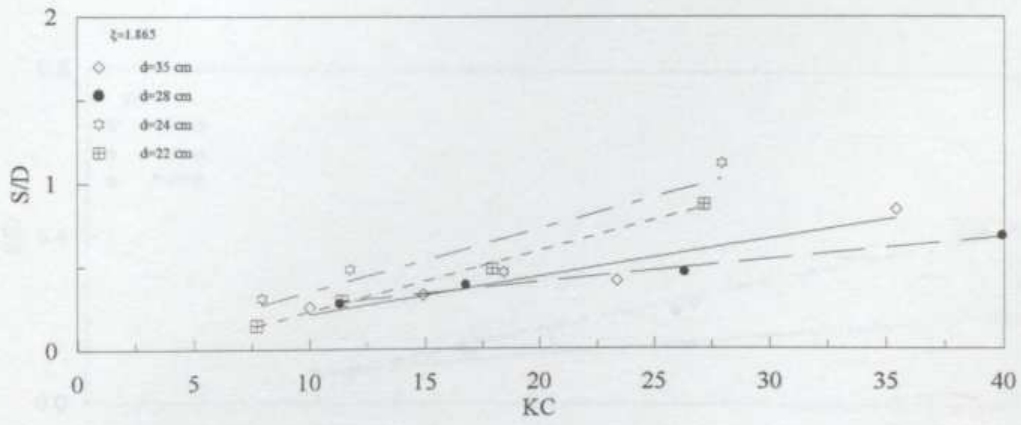
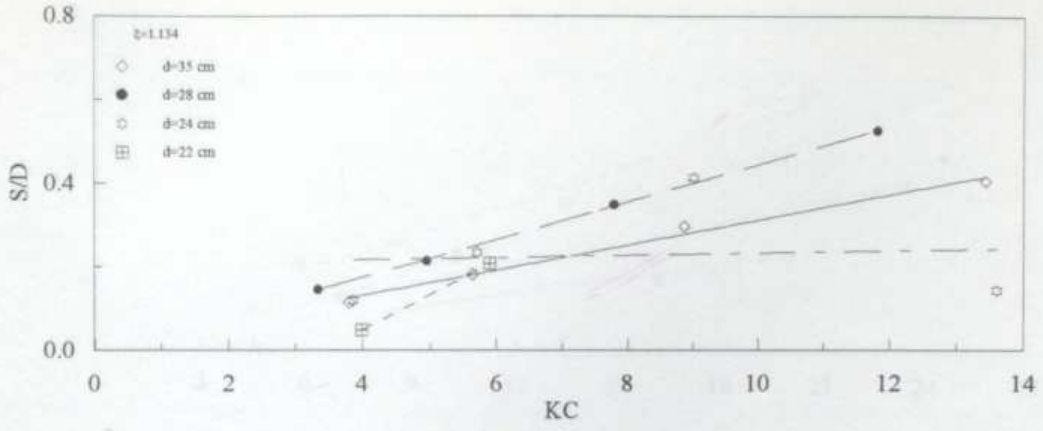


derinde büyük oyulma derinliklerine erişilmekte, buna karşın daha küçük  $\xi$  değerlerinde ise kıyıya daha yakın oluşan fırtına profilleri nedeniyle daha sığ derinliklerde büyük oyulma derinliklerine ulaşılmaktadır. Azalan derinlik etkisiyle birlikte dalga kinematikleri oyulma derinliğini artırmaktadır. Surf parametresinin daha büyük değerlerinde ise ( $\xi \geq 0.65$ ) normal profiller meydana gelerek katı madde kıyıya doğru taşınarak kıyıyı yenilemekte, böylece rölatif oyulma derinliğinde bir dönüş meydana gelerek tekrar daha sığda büyük oyulma derinliklerine ulaşılmaktadır. Surf parametresinin küçük değerleri ile büyük değerlerinde aynı derinliklerdeki oyulma derinlikleri karşılaştırıldığında büyük surf parametrelerinde daha küçük rölatif oyulma derinliğinin meydana gelmesinin nedeninin açıktan daha fazla katı madde taşınımının olması şeklinde gözlenmiştir.

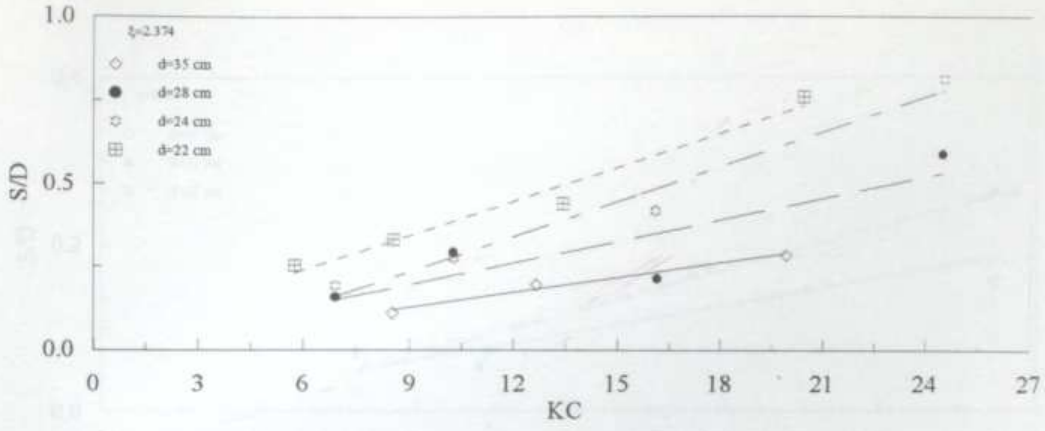
Ayrıca azalan derinliklerde bölüm 4.3.2'de açıklandığı gibi çok yatık oyulma çukurunun oluşması oldukça kuvvetli taban hareketinin meydana gelmesi şeklinde gözlenmişti, bu yapılanmanın KC sayısının değişik derinliklerde meydana gelen farklılığını açıklamaktadır. Çünkü bu derinliklerde sığlaşmadan dolayı akım yapısı artık sadece borudan dolayı meydana gelecek vorteks yapısı üzerinde değil aynı zamanda taban hareketi üzerinde de etkin olmaktadır. İşte bu nedenden dolayı azalan derinlik oyulma çukurunun yapılanmasında etkin olmaktadır.



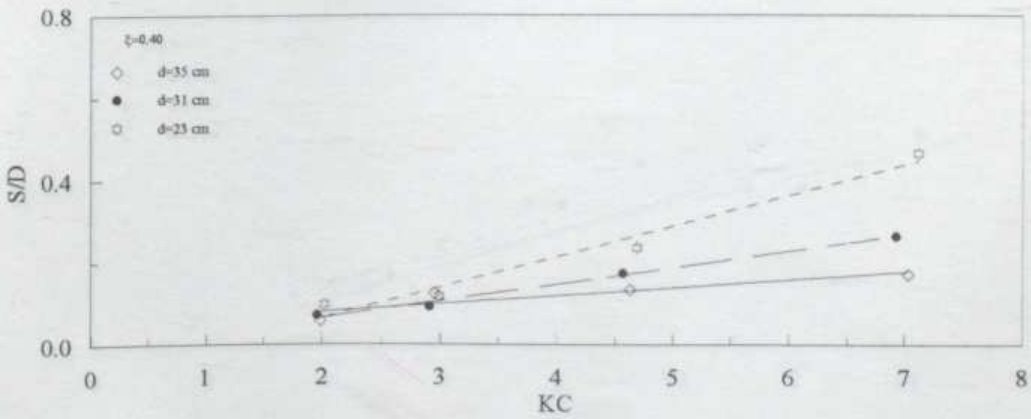
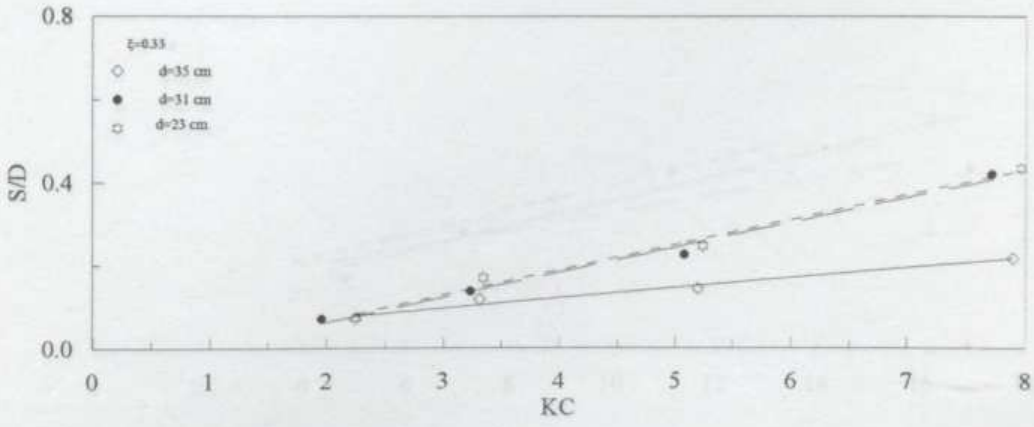
Şekil 4.40-1/5 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi.



Şekil 4.40- Devam.

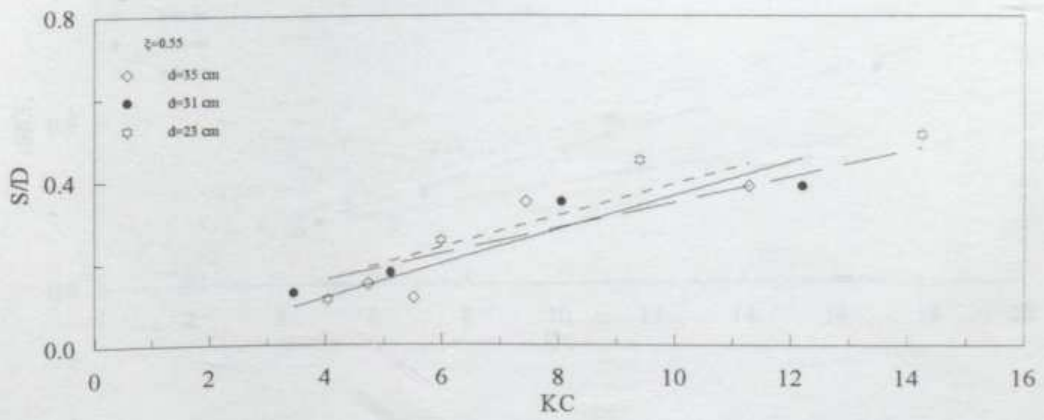
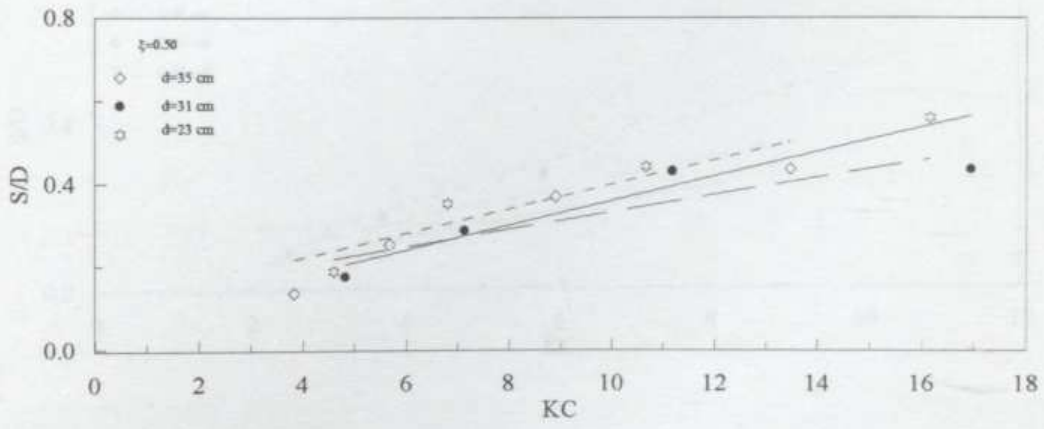
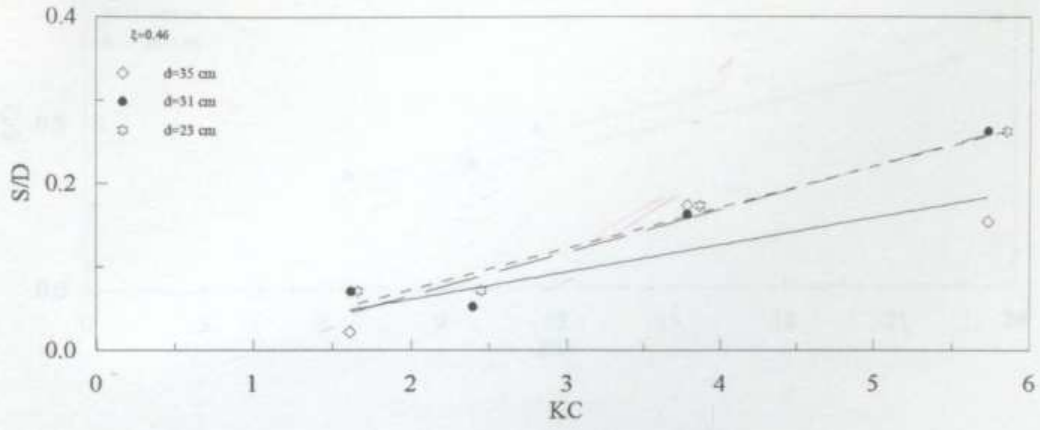


Şekil 4.40- Devam.

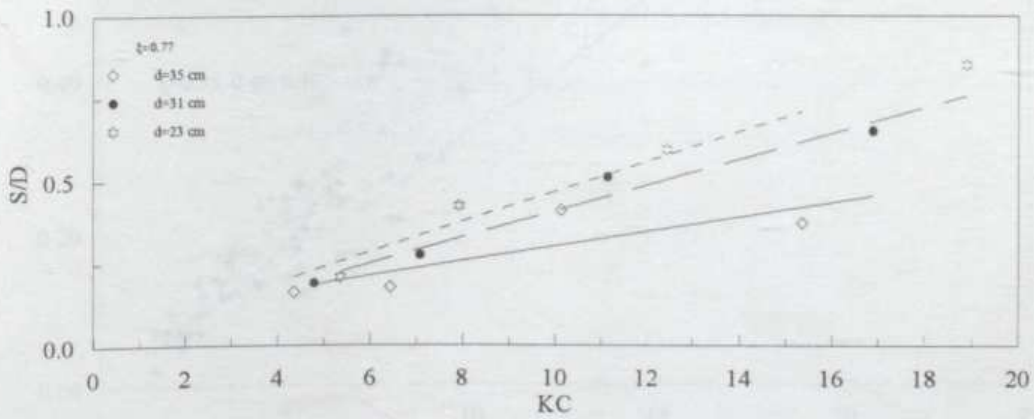
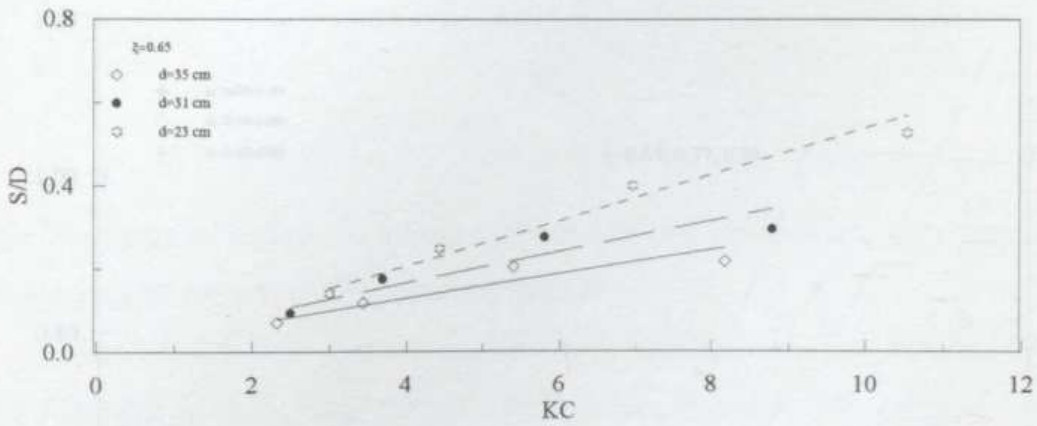
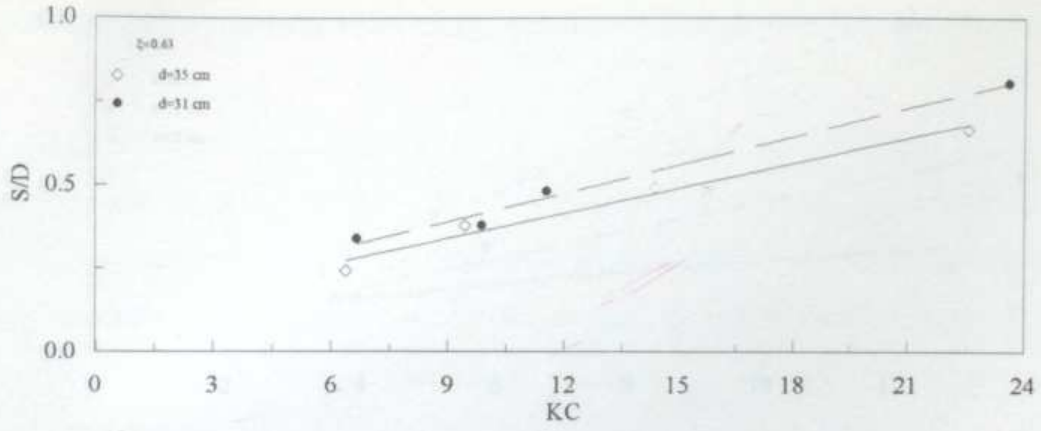


Şekil 4.41- 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi.

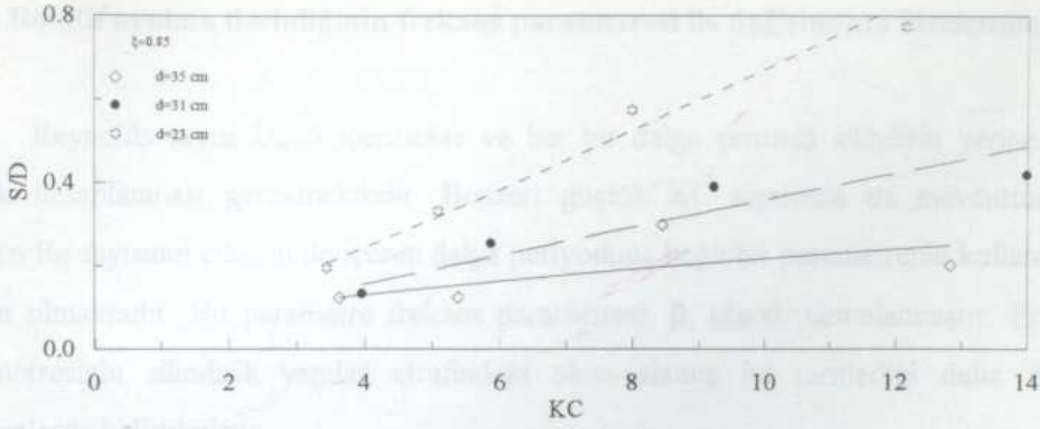




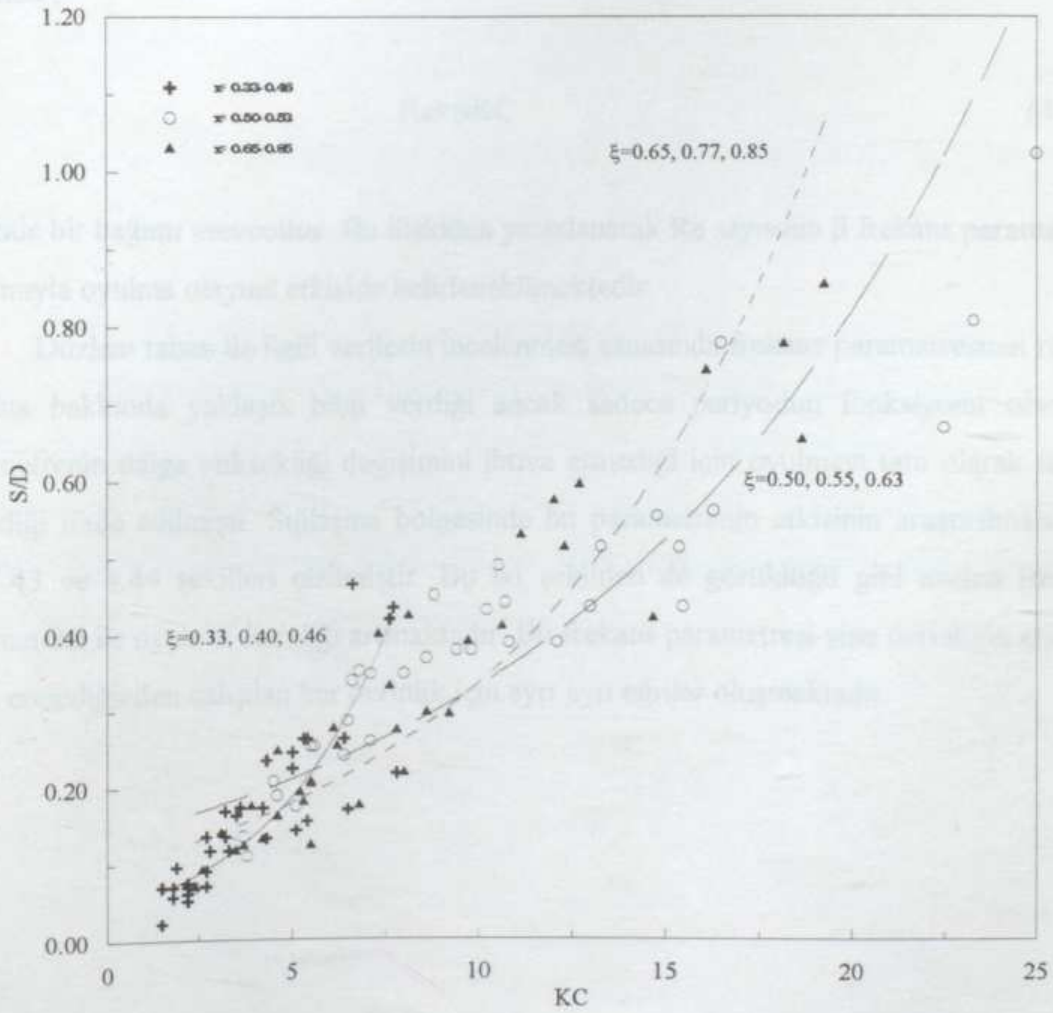
Şekil 4.41- Devam.



Şekil 4.41- Devam.



Şekil 4.41-Devam.



Şekil 4.42- Surf parametresine göre sınıflandırılmış dalgaların rölatif oyulma derinliklerinin  $KC$  sayısı ile değişimi.



#### 4.5.3 Rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresi ile değişiminin incelenmesi

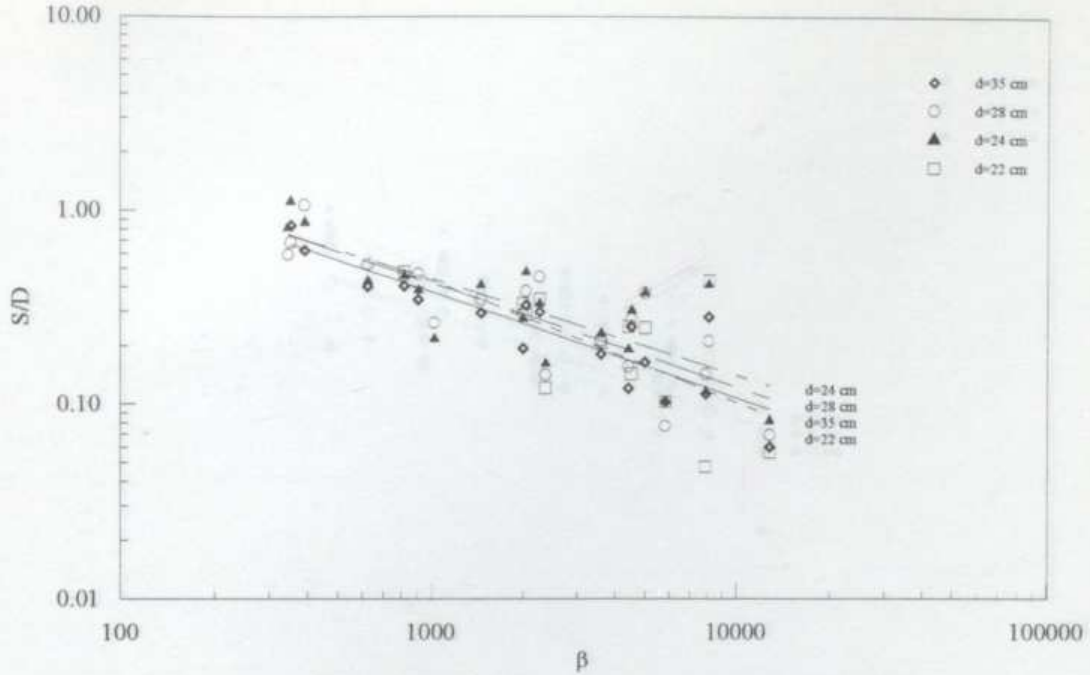
Reynolds sayısı  $U_{max}$ 'ı içermekte ve her bir dalga şartında silindirin yerine bağlı olarak hesaplanması gerekmektedir. Benzeri güçlük KC sayısında da mevcuttur. Bu yüzden Re sayısının etkisini de içeren dalga periyoduna bağlı bir parametrenin kullanılması uygun olmaktadır. Bu parametre frekans parametresi,  $\beta$ , olarak tanımlanmıştır. Frekans parametresinin silindirik yapılar etrafındaki akım alanını iyi tariflediği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir.

Böylece Keulegan-Carpenter sayısı, Reynolds sayısı ve frekans parametresi arasında ,

$$Re = \beta KC \quad (4.16)$$

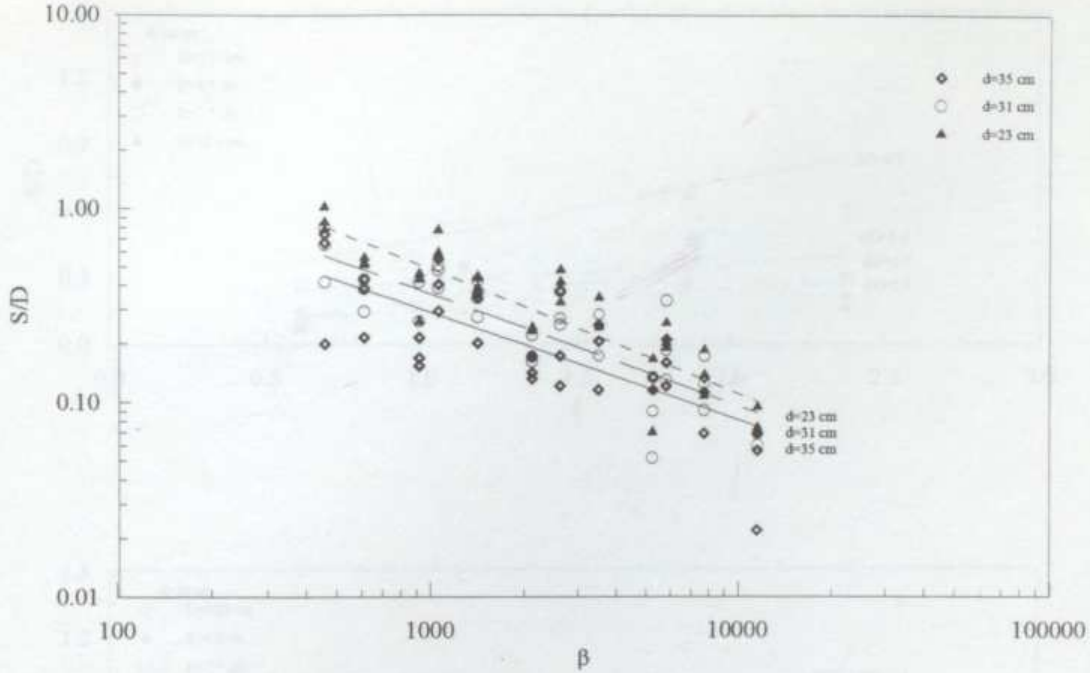
şeklinde bir bağıntı mevcuttur. Bu ilişkiden yararlanarak Re sayısının  $\beta$  frekans parametresi yardımıyla oyulma olayına etkiside belirlenebilmektedir.

Düzlem taban ile ilgili verilerin incelenmesi esnasında frekans parametresinin rölatif oyulma hakkında yaklaşık bilgi verdiği ancak sadece periyodun fonksiyonu olan bu parametrenin dalga yüksekliği değişimini ihtiva etmediği için oyulmayı tam olarak temsil etmediği ifade edilmişti. Sığlaşma bölgesinde bu parametrenin etkisinin araştırılması için ise 4.43 ve 4.44 şekilleri çizilmiştir. Bu iki şekilden de görüldüğü gibi azalan frekans parametresi ile oyulma derinliği artmaktadır. Bu frekans parametresi yine derinliğin etkisini ifade etmediğinden çalışılan her derinlik için ayrı ayrı eğriler oluşmaktadır.



Şekil 4.43- 1/5 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresi ile değişimi.

4.5.4 Tek yönlü akım halinde Re sayısının oyulma derinliğine etkisi olduğu belirlenmişti, çünkü bu durumda vortekslerin yapılması Re sayısı ile değişmekte idi. Ancak salınımlı akım veya dalga etkisinde KC sayısı bu akım yapısını hareketin periyodunu içermesi nedeniyle Re sayısına göre daha iyi temsil etmektedir. Gerçektende Sümer and Fredsøe(1990) dalga etkisinde denizaltı boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliğine Re sayısının etkisinin çok az olduğunu belirlemiştir.

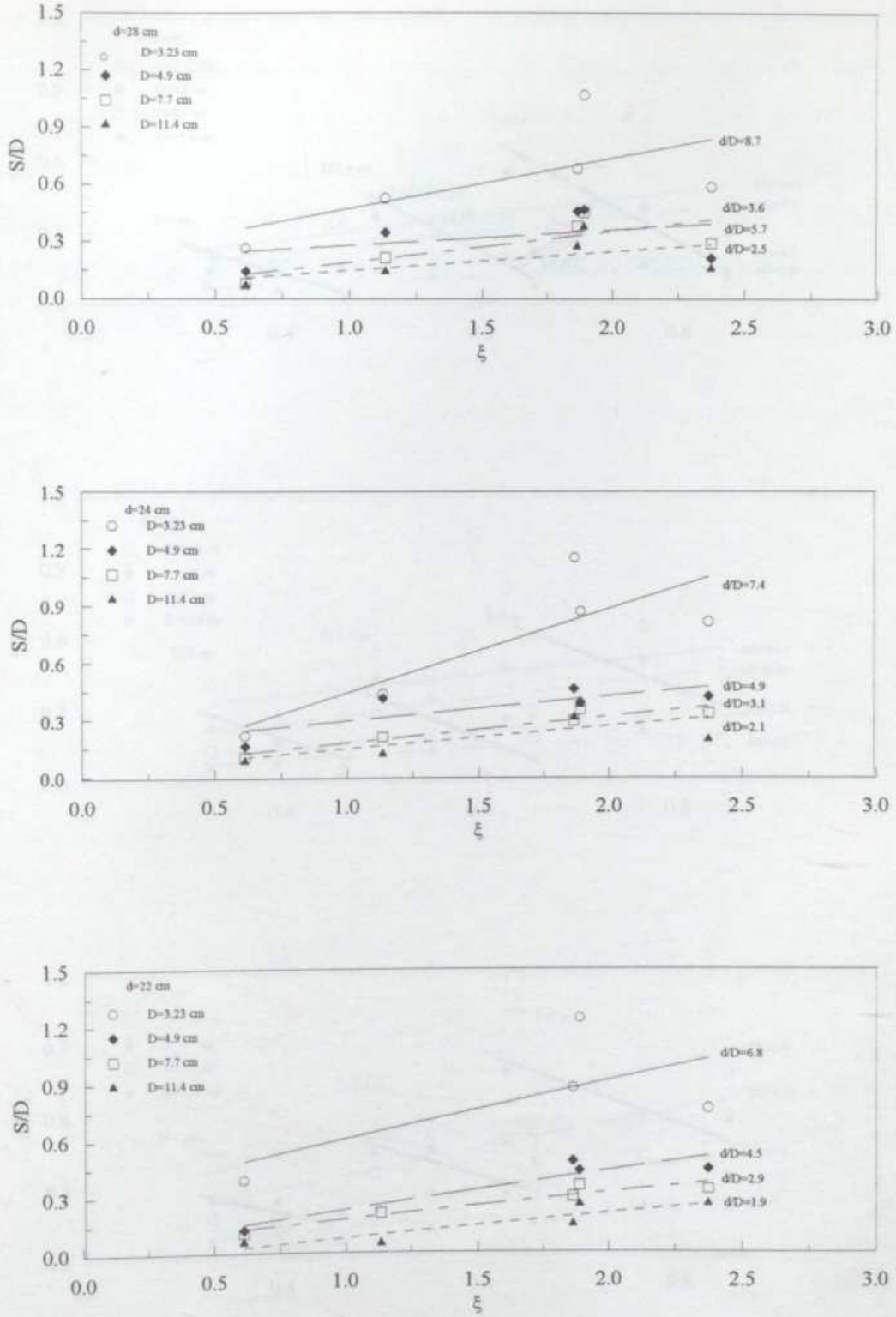


Şekil 4.44- 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresi ile değişimi

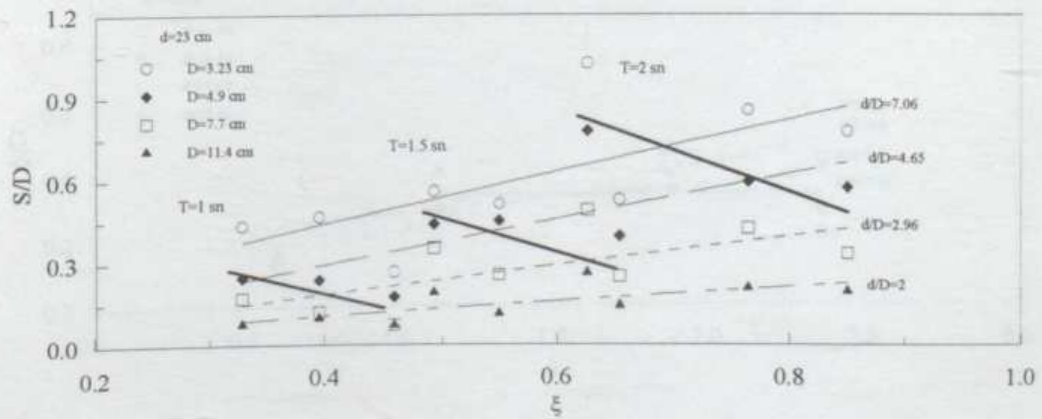
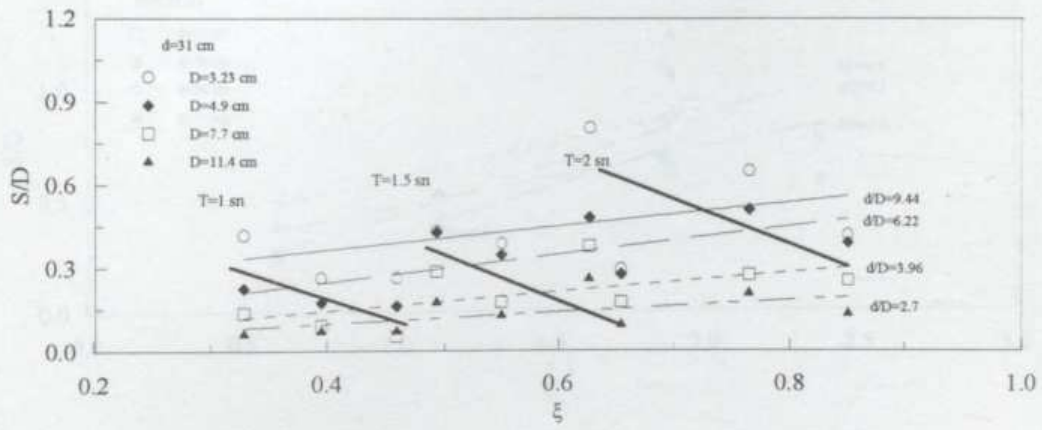
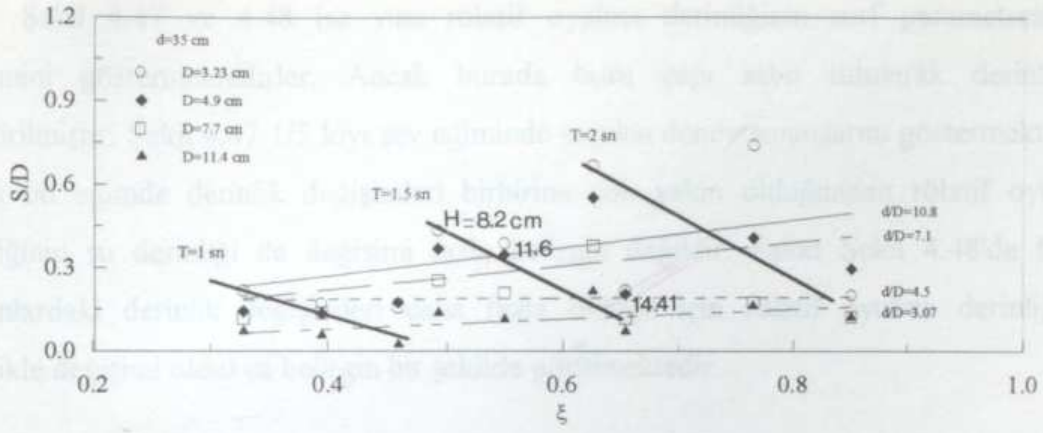
#### 4.5.4 Rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişiminin incelenmesi

Şekil 4.45 ve 4.46 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimleri için oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimini çeşitli derinliklerde ayrı ayrı göstermektedir. Hem 1/5 hem de 1/10 kıyı şev eğiminde görüldüğü gibi surf parametresinin artması ile rölatif oyulma derinliği artmaktadır. Ancak bu değişimin daha detaylı olarak incelenmesi amacıyla 1/10 eğimde her bir periyot için üç farklı dalga yüksekliğinde çalışılmıştır. Bu dalgaların sistematik değişimi incelendiğinde sabit bir dalga periyodunda dalga yüksekliğinin artması ile surf parametresi küçülmektedir. Oysa rölatif oyulma derinliğinin artan dalga yüksekliği ile arttığı daha önce gösterilmişti. Bunun nedeni, surf parametresinin dalga yüksekliği ile ters orantılı olarak değişmesinden ( $\xi = \tan \alpha \sqrt{L_0 / \sqrt{H}}$ ) kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla surf parametresinin yalnız başına rölatif oyulma derinliğinin belirlenmesinde kullanılması hatalı sonuçlar vermektedir. Bu sonuçlarda yine boru çapının rölatif oyulma derinliği üzerinde ne kadar etkili olduğu dikkat çekmektedir.



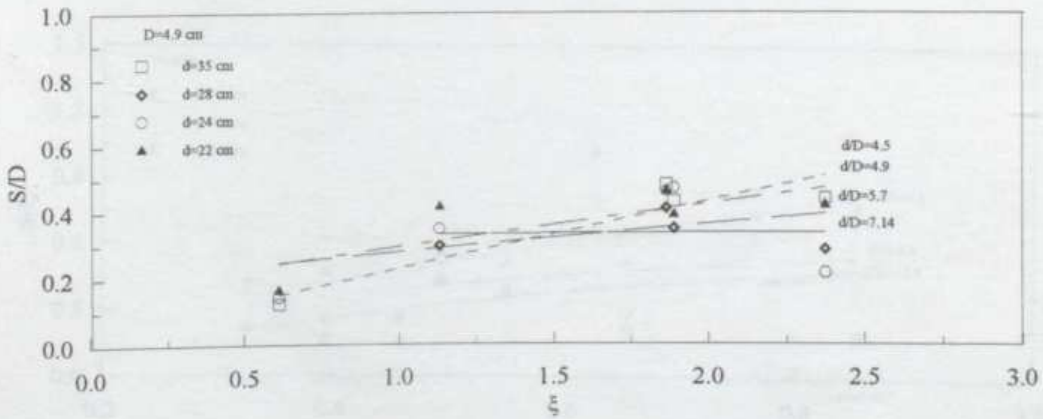
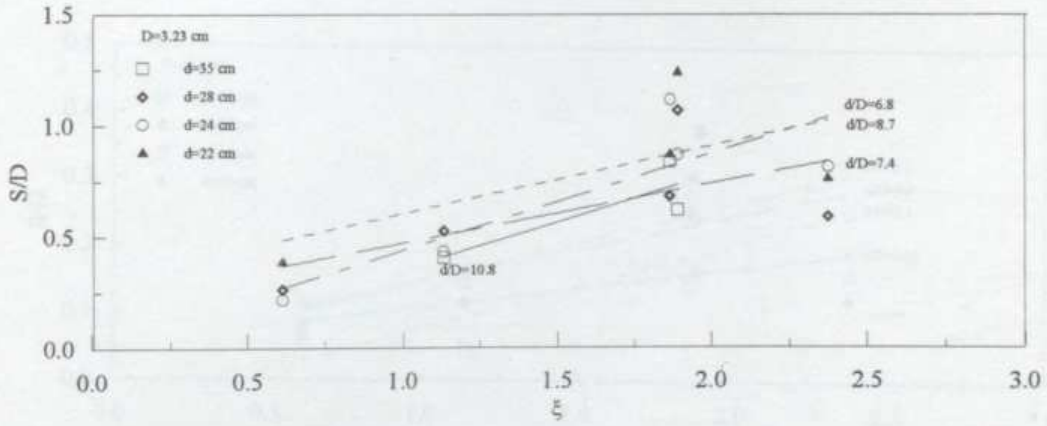


Şekil 4.45- 1/5 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimi.



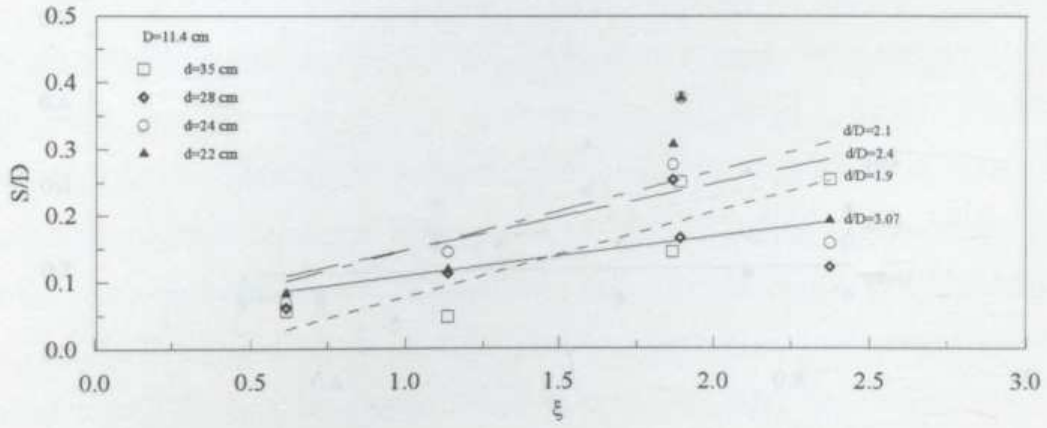
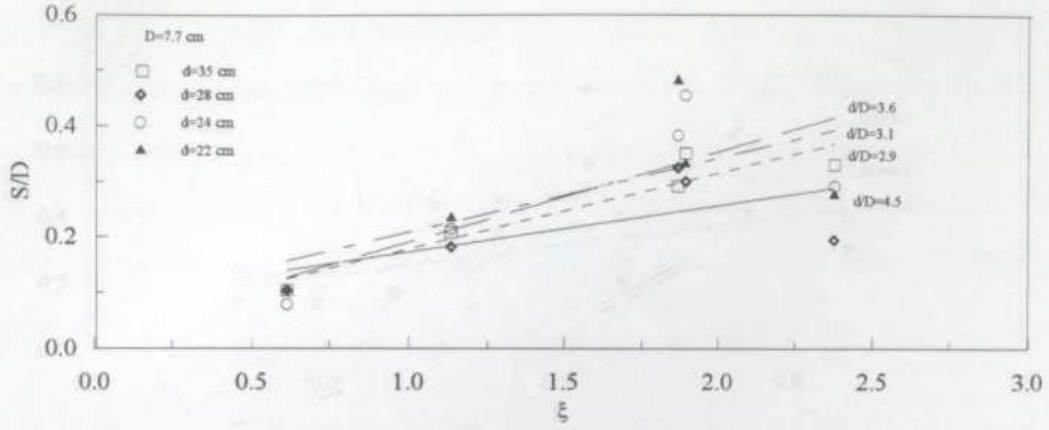
Şekil 4.46- 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimi.

Şekil 4.47 ve 4.48 ise yine rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimini göstermektedirler. Ancak burada boru çapı sabit tutularak derinlikler değiştirilmiştir. Şekil 4.47 1/5 kıyı şev eğiminde yapılan deney sonuçlarını göstermektedir. Ancak bu eğimde derinlik değişimleri birbirine çok yakın olduğundan rölatif oyulma derinliğinin su derinliği ile değişimi fazla belirgin değildir. Fakat Şekil 4.48'de farklı konumlardaki derinlik değişimleri daha fazla olduğu için rölatif oyulma derinliğinin derinlikle değişimi oldukça belirgin bir şekilde görülmektedir.

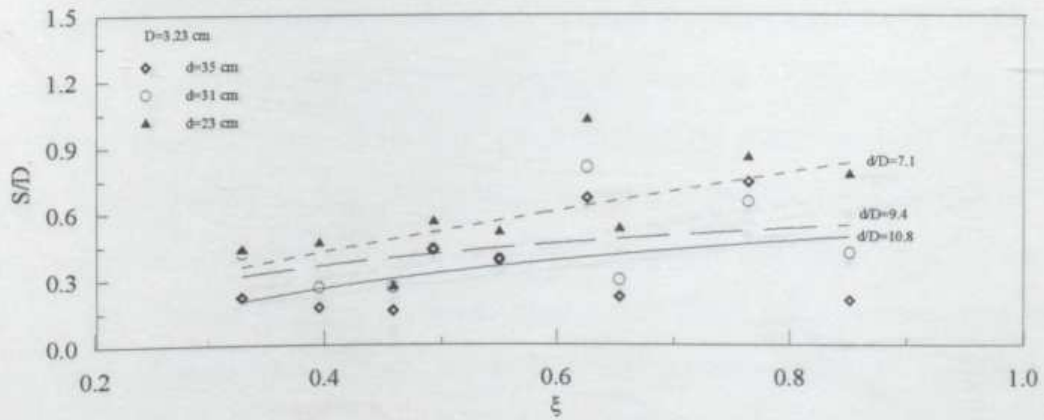


Şekil 4.47- 1/5 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimi.





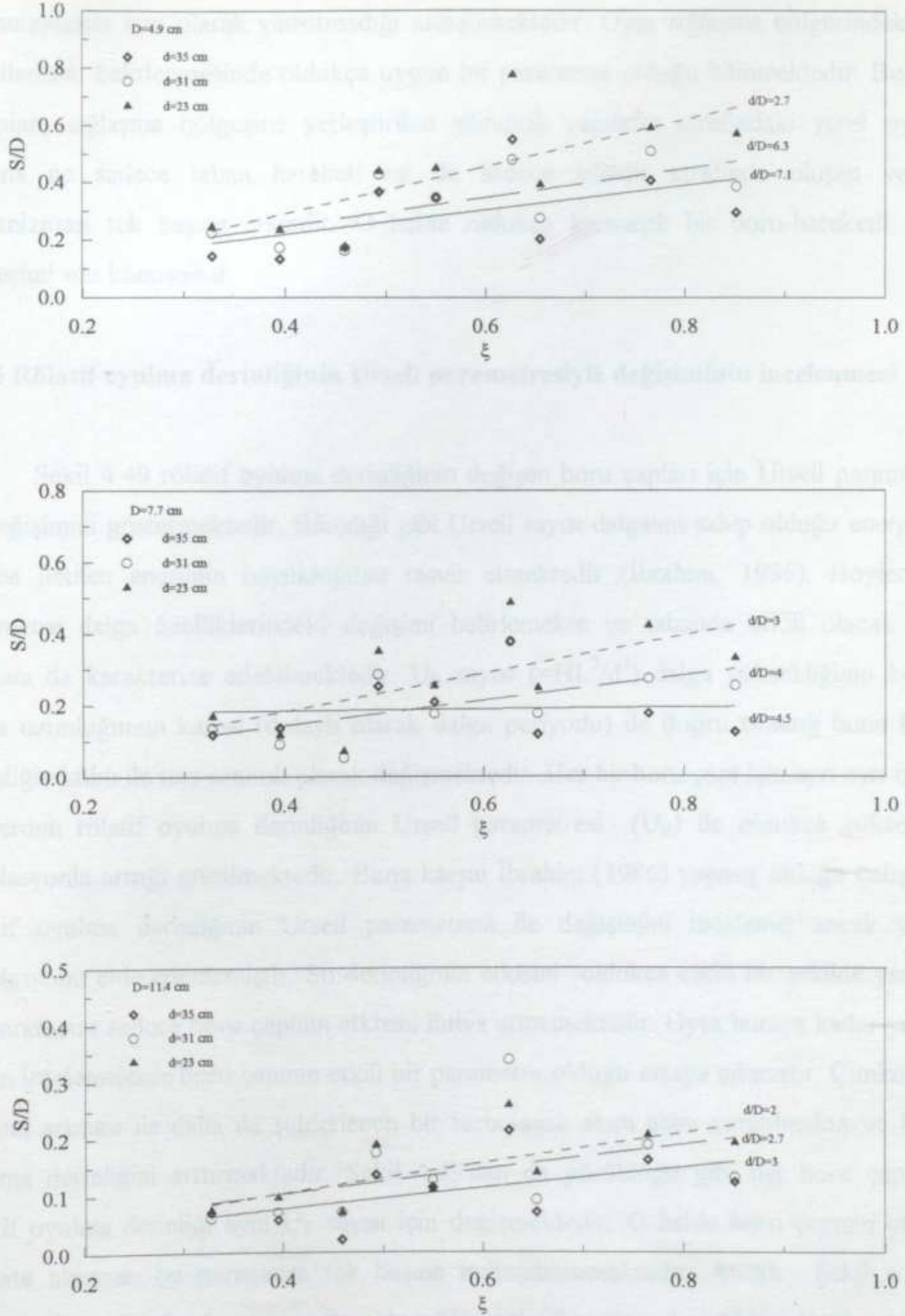
Şekil 4.47- Devam.



Şekil 4.48- Devam.

Şekil 4.48- 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimi.





Şekil 4.48- Devam.

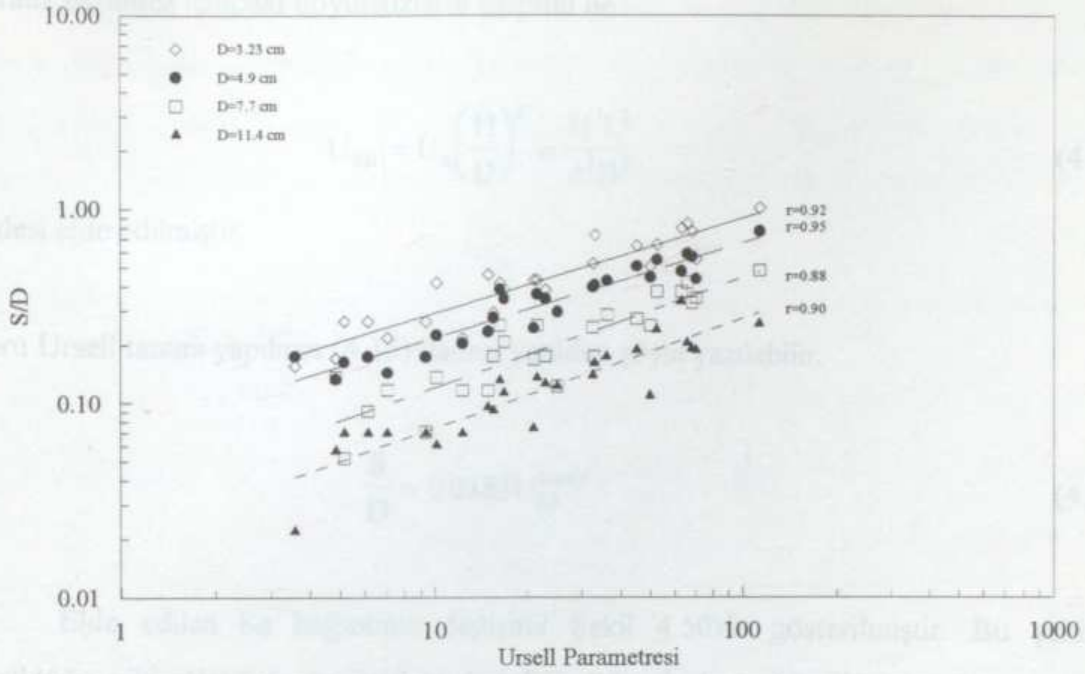
Sonuçta rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimine bakıldığında surf parametresinin artan değerlerinde rölatif oyulma derinliğinin de arttığı ancak oyulma

mekanizmasını tam olarak yansıtmadığı anlaşılmaktadır. Oysa sığlaşma bölgesindeki kıyı profillerinin belirlenmesinde oldukça uygun bir parametre olduğu bilinmektedir. Buradan anlaşılan, sığlaşma bölgesine yerleştirilen silindirik yapıların etrafındaki yerel oyulma olayına ne sadece taban hareketi ne de sadece silindir etrafında oluşan vorteks mekanizması tek başına etkindir. O halde oldukça karmaşık bir boru-hareketli taban etkileşimi söz konusudur.

#### 4.5.5 Rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresiyle değişiminin incelenmesi

Şekil 4.49 rölatif oyulma derinliğinin değişen boru çapları için Ursell parametresi ile değişimini göstermektedir. Bilindiği gibi Ursell sayısı dalganın sahip olduğu enerjiyi ve tabana iletilen enerjinin büyüklüğünü tasvir etmektedir (İbrahim, 1986). Böylece bu parametre dalga özelliklerindeki değişimi belirlemekte ve tabanda etkili olacak akım yapısını da karakterize edebilmektedir.  $U_R$  sayısı ( $=HL^2/d^3$ ) dalga yüksekliğinin kendisi dalga uzunluğunun karesi (dolaylı olarak dalga periyodu) ile doğru orantılı buna karşın derinliğin kübü ile ters orantılı olarak değişmektedir. Her bir boru çapı için ayrı ayrı çizilen eğrilerden rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi ( $U_R$ ) ile oldukça yüksek bir korelasyonla arttığı görülmektedir. Buna karşın İbrahim (1986) yapmış olduğu çalışmada rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi ile değişimini incelemiş ancak yeterli korelasyonu elde edememiştir. Su derinliğinin etkisini oldukça etkili bir şekilde yansıtan bu parametre sadece boru çapının etkisini ihtiva etmemektedir. Oysa buraya kadar yapılan bütün irdelemelerde boru çapının etkili bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır. Çünkü boru çapının artması ile daha da şiddetlenen bir türbülanslı akım alanı yaratılmakta ve bu da oyulma derinliğini arttırmaktadır. Şekil 4.49'dan da görüldüğü gibi her boru çapı için rölatif oyulma derinliği aynı  $U_R$  sayısı için değişmektedir. O halde boru çapının etkisini dikkate almayan bu parametre tek başına kullanılamamaktadır. Ancak Şekil 4.49'da dikkate alınan her bir boru çapında elde edilen rölatif oyulma derinlikleri ölçülen tüm su derinliklerini içermekte ve her boru çapı için korelasyonun oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç sığlaşma etkisinin bu parametre ile oldukça iyi tariflendiğinin göstermektedir.





Şekil 4.49 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi ile değişimi.

#### 4.5.6 Sığlaşmanın rölatif oyulma derinliği üzerine etkisinin modellenmesi

Bölüm 4.5.6'da belirlenen rölatif oyulma derinliğinin  $U_R$  sayısı ile değişiminden, her bir boru çapı için oyulma derinliğinin  $U_R$  sayısı ile oldukça yüksek korelasyona sahip olduğu bulunmuştur. Ancak boru çapını içermeyen bu parametre ile her bir boru çapı için elde edilen oyulma derinliklerinin birbirlerine göre orantılı değiştiği belirlenmiştir. Boru çapının etkisinin de katılması ile rölatif oyulma derinliğinin bu parametre kullanılarak farklı boru çaplarında da elde edileceği düşünülebilir. Böylece yerel dalga yüksekliğinin boru çapına oranıyla verilen dalga yüksekliği parametresi,  $H/D$ , ve Ursell parametresinin,  $U_R$ , fonksiyonu olduğu düşünülen rölatif oyulma derinliği,  $S/D$ , ile aralarındaki ilişki lineer olmayan çoklu regresyon analizi yardımıyla elde edilmiştir. Yapılan bu analiz sonucunda aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$\frac{S}{D} = 0.0383 \left[ U_R \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right]^{0.4267} \quad (4.15)$$

burada parantez içindeki boyutsuzların çarpımı ile

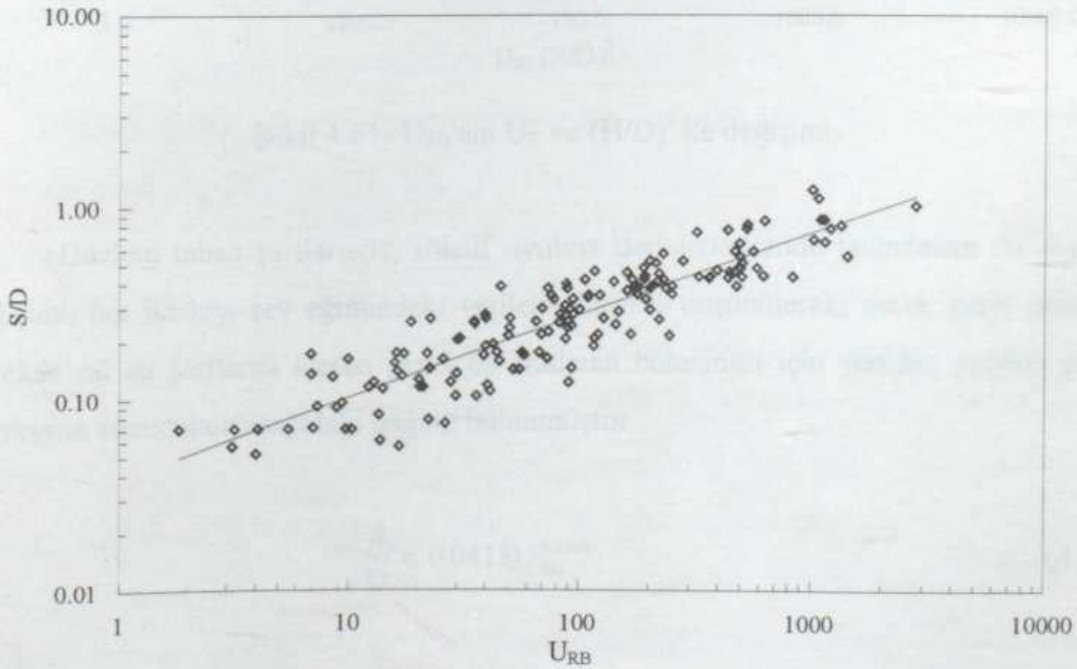
$$U_{RB} = U_R \left( \frac{H}{D} \right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2} \quad (4.16)$$

ifadesi elde edilmiştir.

Boru Ursell tanımı yapılırsa (4.15) ifadesi yeniden şöyle yazılabilir.

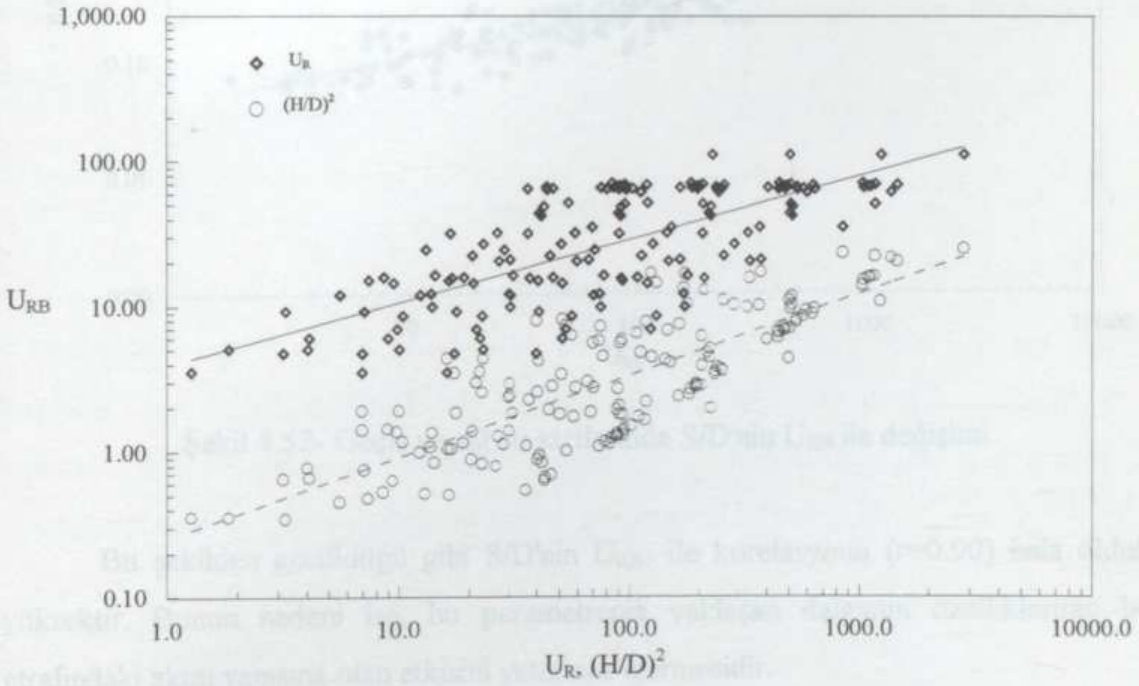
$$\frac{S}{D} = 0.0383 U_{RB}^{0.4267} \quad (4.17)$$

Elde edilen bu bağıntının değişimi Şekil 4.50'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi rölatif denge oyulma derinliği,  $S/D$ , ile boru Ursell sayısı,  $U_{RB}$ , arasında oldukça mükemmel bir korelasyon ( $r=0.91$ ) mevcuttur. Rölatif oyulma derinliği tanımlanan  $U_{RB}$  sayısının artan değerleriyle artmaktadır.



Şekil 4.50- Her iki kıyı şev eğimi için  $S/D$ 'nin  $U_{RB}$  ile değişimi.

Bu değişimin anlamlı olması, bu bölümde yapılan tartışmalarla da uyum içindedir. Çünkü dalga yüksekliğinin, dalga periyodunun, su derinliğinin ve boru çapının ayrı ayrı rölatif oyulma derinliği üzerinde etkili değişkenler olduğu belirlenmişti. Ayrıca sığ su bölgesinde ilerleyen dalga özelliklerini Ursell sayısı oldukça iyi tasvir etmektedir.



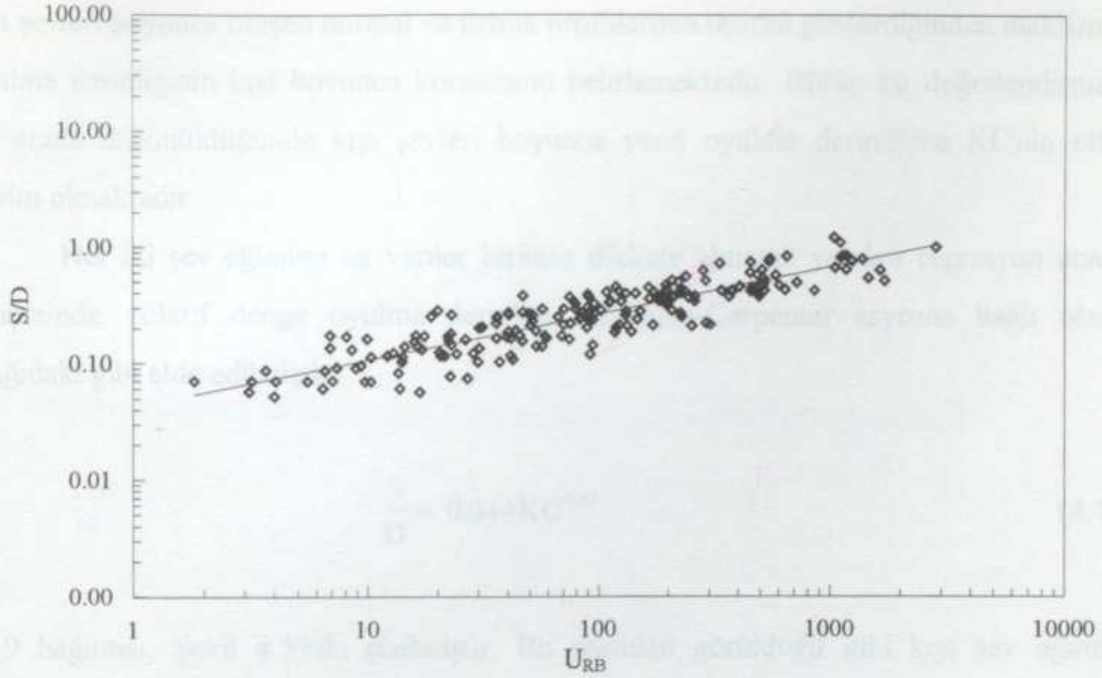
Şekil 4.51-  $U_{RB}$ 'nin  $U_R$  ve  $(H/D)^2$  ile değişimi.

Düzlem taban şartlarında, rölatif oyulma derinliklerinde tanımlanan bu sayı ile değişimi, her iki kıyı şev eğimindeki verilerle birlikte düşünülerek, gerek geçiş derinliği gerekse sığ su şartlarını içeren genel bir ifadenin bulunması için yeniden yapılan çoklu regresyon sonucunda aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$\frac{S}{D} = 0.0418 U_{RB}^{0.4066} \quad (4.18)$$

Tüm verilerin bir arada kullanılmasıyla elde edilen rölatif denge oyulma derinliğinin,  $S/D$ , boru Ursell sayısı,  $U_{RB}$ , ile değişimi ise Şekil 4.52'de gösterilmiştir.





Şekil 4.52- Geçiş ve sığ su şartlarında  $S/D$ 'nin  $U_{RB}$  ile değişimi.

Bu şekilden görüldüğü gibi  $S/D$ 'nin  $U_{RB}$  ile korelasyonu ( $r=0.90$ ) hala oldukça yüksektir. Bunun nedeni ise, bu parametrenin yaklaşan dalgaanın özelliklerinin boru etrafındaki akım yapısına olan etkisini yeterince içermesidir.

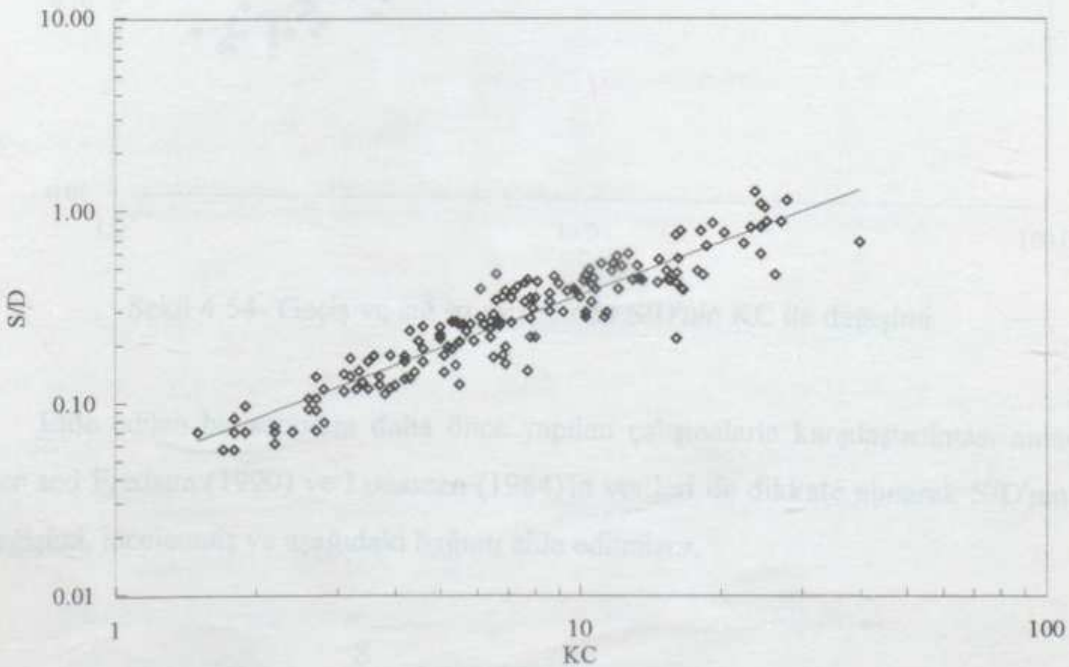
Buraya kadar yapılan değerlendirmelerden, dalga-hareketli taban-boru etkileşimi bir arada düşünüldüğünde daha önce de belirtildiği gibi boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliği, sığlaşma bölgesinde kıyı profillerinin oluşumu esnasında meydana gelen taban erozyonundan da etkilenmektedir. Ancak yapılan çalışmalar  $KC$  sayısının ortalama değerleri için boru hattının  $G/D=1.0$  konumunu alması halinde oluşan vorteks saçılımının yerel taban hareketine etkili olmadığını göstermektedir. Taban erozyonu nedeniyle borunun bu konumda kalabileceği aşıkardır. Bununla birlikte artan  $KC$  değerleri için  $G/D \approx 3$  olduğu daha büyük açıklık oranlarında bile vorteks saçılımlarının yerel taban hareketi üzerinde etkisi olabilmektedir. Bilindiği gibi azalan derinlikle artan taban kayma gerilmesi ve hızın neticesinde taban erozyonu artmakta, bununla birlikte  $KC$  sayısı da büyümektedir. Bu sonuç gerek hava tüneli çalışmalarıyla gerekse kıyı şevlerinde  $d/H$  derinlik parametresinin etkisiyle uyum içindedir. Çünkü  $KC$  sayısı  $d/H$  derinlik parametresinden etkilenmektedir. Olaya etkili diğer parametre olan surf parametresi,  $\xi$ , ise

kıyı şevleri boyunca oluşan normal ve fırtına profillerinin tesirini gösterdiğinden maksimum oyulma derinliğinin kıyı boyunca konumunu belirlemektedir. Bütün bu değerlendirmeler bir arada düşünüldüğünde kıyı şevleri boyunca yerel oyulma derinliğine KC'nin etkisi hakim olmaktadır.

Her iki şev eğimine ait veriler birlikte dikkate alınarak yapılan regresyon analizi sonucunda, rölatif denge oyulma derinliği Keulegan-Carpenter sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.044KC^{0.91} \quad (4.19)$$

4.19 bağıntısı, Şekil 4.53'de çizilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi kıyı şev eğimleri boyunca yerel oyulma derinliğindeki değişim iyi bir korelasyona ( $r=0.93$ ) sahiptir, bu da yukarıda yapılan tartışmayı doğrulamaktadır. 4.19 ifadesinden görüldüğü gibi S/D Keulegan-Carpenter sayısının hemen hemen kendisiyle değişmektedir.

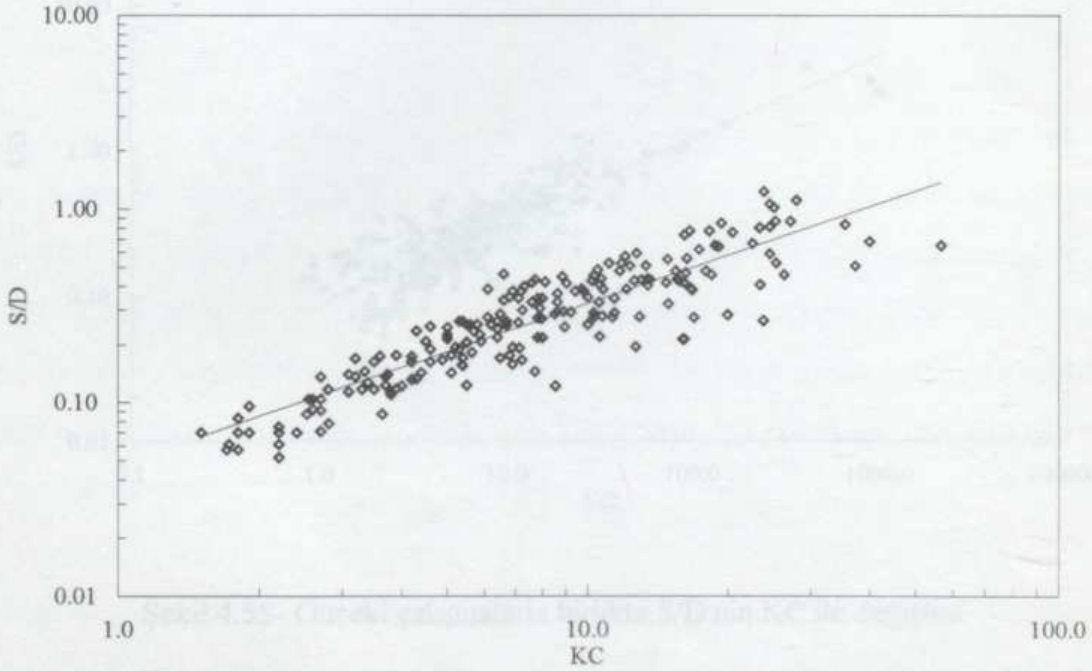


Şekil 4.53- Kıyı şevleri boyunca S/D'nin KC ile değişimi.

Gerek geçiş derinliği gerekse sıg su şartlarının bir arada düşünülerek KC'nin S/D üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla düzlem taban verilerini de içeren tüm veriler birlikte regresyon analizine tabi tutulduğunda;

$$\frac{S}{D} = 0.048KC^{0.833} \quad (4.20)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu bağıntının değişimi Şekil 4.54'de görülmektedir.



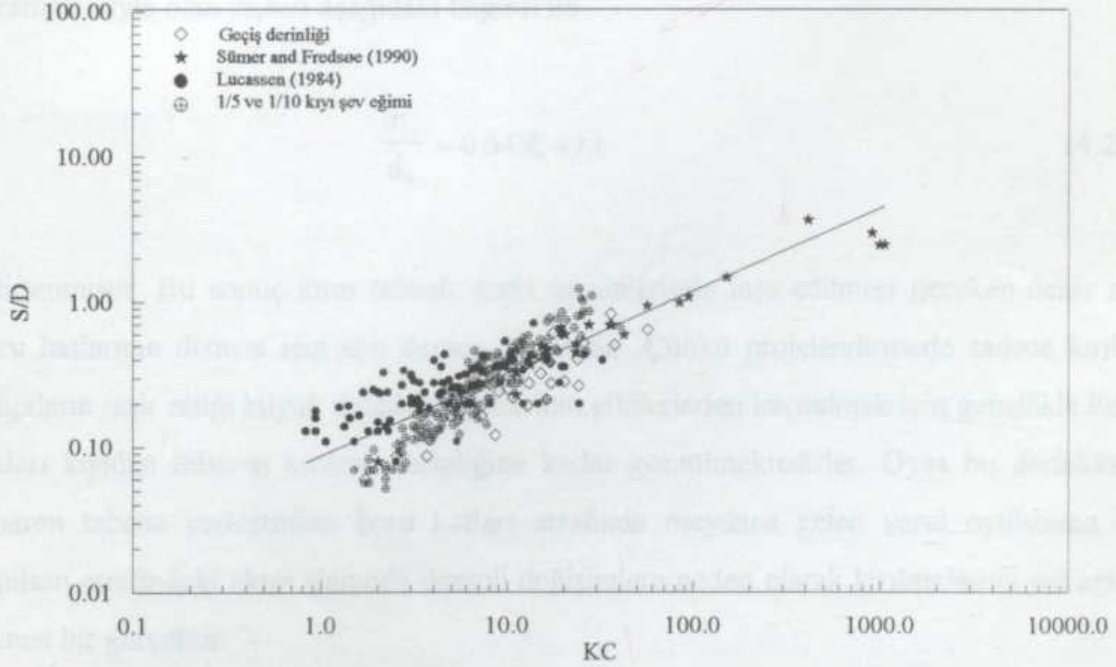
Şekil 4.54- Geçiş ve sıg su şartlarında S/D'nin KC ile değişimi.

Elde edilen bu sonucun daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılması amacıyla Sümer and Fredsøe (1990) ve Lucassen (1984)'in verileri de dikkate alınarak S/D'nin KC ile değişimi, incelenmiş ve aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.088KC^{0.57} \quad (4.21)$$



Bu değişim Şekil 4.55'de çizilmiştir. Şekilden ve 4.20 ifadesinden görüldüğü gibi korelasyon ( $r=0.84$ ) ve KC'nin üstel değeri azalmıştır. Bunun nedeni ise bu çalışmada sığlaşma etkilerinin bulunması ve farklı deney koşullarıdır. Çünkü geçiş derinliği şartlarında elde edilen rölatif oyulma derinliği aynı akım şartlarında sığlaşma bölgesinde 2-3 katı mertebesine kadar artmaktadır.



Şekil 4.55- Önceki çalışmalarıyla birlikte S/D'nin KC ile değişimi.

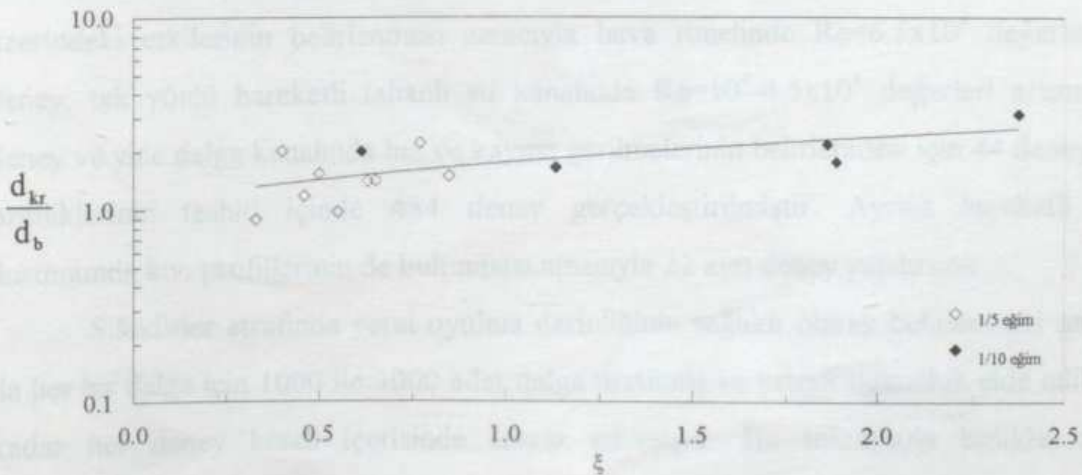
Gerek boru Ursell parametresinin gerekse KC sayısının sığlaşma bölgesi boyunca rölatif oyulma derinliğini oldukça iyi temsil etmesi, her iki boyutsuz birlikte düşünülerek incelendiğinde, bu iki parametrenin de oyulma olayına etkili olduğu daha önce belirlenen dalga yüksekliği,  $H$ , dalga periyodu,  $T$ , su derinliği,  $d$ , ve  $D$  boru çapı değişkenlerini hemen hemen aynı mertebede içermelerinden kaynaklanmaktadır.

Sığlaşma etkisinin az olduğu ve geçiş derinliği şartlarında bulunan düzlem taban halinde elde edilen yerel oyulma derinliğinin sığlaşma bölgesi içerisinde 2-3 kat arttığı elde edilen deney sonuçlarından belirlenmiştir. Farklı dalga şartlarında oluşan maksimum oyulma derinliğinin meydana geldiği su derinliği kritik derinlik,  $d_{kr}$ , olarak adlandırılmış ve

bu derinliğin belirlenmesi için kırılma derinliği ile olan ilişkisi araştırılmıştır. Şekil 4.59'da kritik derinliğin orijinal taban halindeki dalga kırılma derinliğine olan oranının,  $d_{kr}/d_b$ , surf parametresiyle değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi surf parametresinin artmasıyla maksimum oyulma derinliğinin meydana geldiği kritik derinlik ( $d_{kr}$ ) kırılma derinliğine göre daha büyüktür. Bu sonuç daha önce tanımlanan sığlaşma bölgesinde dalga etkisindeki taban hareketi ile uyum içerisindedir. Maksimum oyulma derinliğinin yeri surf parametresiyle olan ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile

$$\frac{d_{kr}}{d_b} = 0.645\xi + 1.1 \quad (4.22)$$

belirlenmiştir. Bu sonuç kum tabanlı deniz zeminlerinde inşa edilmesi gereken deniz altı boru hatlarının dizaynı için son derece önemlidir. Çünkü projelendirmede sadece kırılan dalgaların tesir ettiği büyük dalga kuvvetlerinin etkilerinden kaçınılmak için genellikle boru hatları kıyıdan itibaren kırılma derinliğine kadar gömülmektedirler. Oysa bu derinlikten itibaren tabana yerleştirilen boru hatları etrafında meydana gelen yerel oyulmanın bu yapıların etrafındaki akım alanında önemli değişimlere neden olarak kırılmalarına yol açtığı bilinen bir gerçektir.



Şekil 4.56- Maksimum oyulma derinliğinin yerinin belirlenmesi.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1 Sonuçlar

Denizaltı boru hatları etrafında meydana gelen yerel oyulma çukurunun belirlenmesi amacıyla, geçiş derinliği şartlarından itibaren düzlem taban ve 1/5 ile 1/10 kıyı şev eğimleri boyunca sığılaşma bölgesinde 22 farklı dalga şartında, farklı derinliklere eksenleri dalga ortagonallerine dik olarak, rijit dört farklı çapa sahip silindirin tabana yerleştirilmesiyle toplam 216 deney şartında oyulma derinlikleri  $KC=1.5-57$ ,  $Re=4.9 \times 10^3 \times 7.7 \times 10^4$  değerlerinde hareketli taban boru etkileşimi detaylı olarak incelenmek suretiyle araştırılmaya çalışılmış ve aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Dalga etkisinde oyulma derinliklerinin belirlenmesinden önce gerek boru hatları etrafındaki akım alanının gerekse hareketli taban mekanizmasının oyulmanın değişimi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla hava tüneline  $Re=6.5 \times 10^4$  değerinde 40 deney, tek yönlü hareketli tabanlı su kanalında  $Re=10^4-4.5 \times 10^4$  değerleri arasında 40 deney ve yine dalga kanalında hız ve kayma gerilmelerinin belirlenmesi için 44 deney dalga özelliklerinin tesbiti içinde 484 deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hareketli taban durumunda kıyı profillerinin de bulunması amacıyla 22 ayrı deney yapılmıştır.

Silindirler etrafında yerel oyulma derinliğinin sağlıklı olarak belirlenmesi amacıyla da her bir dalga için 1000 ile 3000 adet dalga üretilmiş ve yeterli uygunluk elde edinceye kadar her deney kendi içerisinde tekrar edilmiştir. Bu tekrarlarla birlikte oyulma derinlikleri toplam 648 deney gerçekleştirilerek belirlenmiştir.



1. Sığlaşma bölgesinde katı madde hareketi açısından önemli bir değişken olan anlık taban kayma gerilmelerinin değişimlerinin periyodik karaktere sahip olduğu belirlenmiştir. Plunging tipi dalgalarda kayma gerilmelerinin plunging noktasında daha şiddetli ve simetrik görünümde türbülanslı yapıya sahip olduğu bulunmuştur. Kıyı şevi boyunca kayma gerilmelerinin dağılımına bakıldığında sığlaşma bölgesinde kayma gerilmesinin düzlem taban şartlarına göre iki katı mertebesinde arttığı, bu değer plunging noktasında üç katına ulaştığı görülmüştür. Ayrıca dalga dikliğinin küçülmesiyle anlık taban kayma gerilmelerinin büyüdüğü belirlenmiştir.

2. Sığlaşma bölgesi boyunca taban yakınındaki hızlar, yaklaşan dalganın özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Dalga dikliği büyüdükçe tabandaki yörüngesel hızların şiddetleri azalmaktadır. Sığlaşma etkisi nedeniyle derinlik azaldıkça dalgaların taban yakınındaki tesirleri artmaktadır. Düzlem taban şartlarında ise yine dalga dikliği büyüdükçe tabandaki hızlar küçülmekte, ancak dalga aynı periyoda sahip azalan dalga yükseklikleri için teorilerle uyumlu olarak değişim göstermektedir.

3. Sığlaşma bölgesinde kıyı profillerinin boru hatları etrafındaki yerel oyulma olayı üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla her dalga şartında oluşan profiller belirlenmiştir. Kıyı profilleri incelendiğinde bunların yapılanmasının surf parametresine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. 1/5 ve 1/10 eğimli kıyı şevlerinde oluşan normal profiller geometrik olarak farklılık göstermektedir. 1/5 kıyı şev eğiminin büyük olması nedeniyle bu eğimdeki normal profiller batık olarak oluşmaktadır.

4. Tek yönlü hava akımı deneyleri, borunun tabandan olan mesafesini gösteren açıklık oranının 0 ile 0.4 aralığında, bu yapıların menba ve mansabındaki basınç alanında meydana getirdiği değişim, sırasıyla çaplarının altı ve yedi katı kadar mesafede hissedilmektedir. Buna karşın boru-taban açıklık oranının boru çapı kadar olması durumundaki taban basınç alanında meydana gelen değişimler son derece küçüktür. Borunun tabana oturması durumunda üçü yapının mansabında ikisi ise menbasında olmak üzere toplam beş adet vorteks şekillenmektedir.

5. Tek yönlü hareketli tabanlı su kanalında yapılan deneylerden, boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliğinin boru Re sayısı ile değiştiği belirlenmiştir. Bunun nedeni ise değişen Re sayısı ile boru hatları gibi silindirik yapılar etrafında yapılan vorteks mekanizmasındaki değişimlerdir. Bu ilişki S/D rölatif oyulma derinliğinin vorteks saçılım frekansı ile olan korelasyonundan açıkça görülmektedir. Ayrıca maksimum oyulma derinliği silindirin tam altında değil Re sayısına bağlı olarak biraz daha mansabında meydana gelmektedir. Mansap vorteks sistemi Re sayısına bağlı olarak yaklaşık silindir çapının dört katı kadar mesafeye ulaşmaktadır.

6. Tek yönlü akımda Re sayısı vorteks oluşumunda etkin bir boyutsuz olmasına karşın, dalga etkisinde düzlem taban şartlarında boru hatları etrafında meydana gelen oyulma çukurunun şekillenmesinde KC sayısının akım yapısını idare etmekte olduğu ve  $KC \geq 3$  değerinden itibaren oyulma çukurunun simetrik yapısının bozulduğu,  $KC \geq 20$  değerinden itibaren de maksimum oyulma derinliğinin borunun mansabına doğru yer değiştirdiği belirlenmiştir. Vortekslerin etki mesafeleri periyodik akım nedeniyle tek yönlü akıma göre daha kısadır. Boru hattı altında tünel erozyonunun oluşmasından sonra T/2 kadarlık süre içerisinde borudan kopan art-iz vorteks sistemi boğulma etkisi nedeniyle belli bir faz farkıyla borunun altından geçen jet akımı ile ileriye doğru püskürtüldükleri belirlenmiştir.

7. Sığlaşma bölgesi içerisinde dalga özelliklerinde meydana gelen değişim nedeniyle azalan derinlikle artan taban kayma gerilmesi ve dalga asimetrisi dolayısıyla oyulma çukuru daha derin fakat yayvan bir şekil almaktadır. Ancak kıyı profilinin şekillendiği bölgede, profilin yerine ve boru çapına bağlı olarak, boru hatları kısmen veya tamamen gömülmektedirler.

8. Düzlem taban şartlarında dalga etkisinde boru hatları etrafında meydana gelen oyulma derinliği boru çapı, dalga yüksekliği ve dalga periyodu ile artmaktadır. Rölatif oyulma derinliği KC sayısının üstel bir fonksiyonudur. Elde edilen deney verileri daha önce



yapılan çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde rölatif oyulma derinliğini KC sayısına bağlı olarak veren ifade;

$$\frac{S}{D} = 0.11KC^{0.45}$$

olarak elde edilmiştir. Hareketli taban halinde diğer çalışmalarla yapılan mukayeseden taban malzemesinin granülometresinin oyulma çukuru derinliğine etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca rölatif oyulma çukurunun frekans parametresiyle,  $\beta$ , bağıntılı olarak değiştiği ancak bu parametrede ulaşılan korelasyonun düşük olduğu bulunmuştur.

9. Sığlaşma bölgesine yerleştirilen boru hatları etrafında meydana gelen rölatif oyulma derinliği ( $S/D$ ), derinlik parametresinin ( $d/H_0$ ) artmasıyla artmaktadır. Sığlaşma bölgesinde oyulma derinliği, düzlem taban şartlarına göre  $d/H_0 \leq 2$  civarında yaklaşan dalga şartlarına bağlı olarak hemen hemen iki ile üç katı mertebesine ulaşmaktadır. Bu sonuç kıyı şevleri boyunca artan kayma gerilmesi değeri ile benzeşim göstermektedir.

10. Sığlaşma bölgesinde de düzlem taban halinde olduğu gibi oyulma derinliği artan dalga periyodu ve yüksekliği ile artmaktadır.

11. Derinlik parametresine bağlı olarak rölatif oyulma derinliği, surf parametresinin artmasıyla artmaktadır.

12. Düzlem taban halinde olduğu gibi sığlaşma bölgesinde de rölatif oyulma derinliği KC sayısı ile artış göstermektedir. Ancak derinlik azaldıkça aynı KC sayısında rölatif oyulma derinliği artan miktarda bir değişiklik göstermektedir. Bu etki artan KC ve  $\xi$  değerleri ile daha da belirginleşmektedir.

13. Rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi surf parametresine göre incelendiğinde fırtına profillerini yansıtan surf parametresi değerlerinde aynı KC sayısında



$\xi$  arttıkça S/D azalmakta ancak  $\xi$ 'nin normal profili oluşturduğu artan değerinde S/D'de yeniden artış meydana gelmektedir.

14. Sığlaşma bölgesinde oyulma olayının oluşumuna sadece boru hatları etrafında meydana gelen vorteks yapısının değil, aynı zamanda hareketli taban mekanizmasının da önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Bu sonuç dalga-hareketli taban ve boru hattı etkileşimini açıklayan bir bulgudur.

15. Düzlem taban halinde olduğu gibi sığlaşma bölgesinde de frekans parametresinin,  $\beta$ , azalan değerlerinde rölatif oyulma derinliğinde artış meydana gelmektedir. Ancak yine düzlem taban halinde olduğu gibi, sadece periyodun ve boru çapının fonksiyonu olması nedeniyle oyulma derinliğini düşük korelasyon ile temsil etmektedir.

16. Rölatif oyulma derinliğinin surf parametresiyle değişimi irdelendiğinde, genel olarak artan surf parametresi değerleri ile rölatif oyulma derinliği de artmakta, fakat aynı dalga periyodunda surf parametresinin artan dalga yüksekliği ile azaldığı görülmüştür. Sonuçta bu parametrenin oyulma derinliği üzerinde etkisinin olmadığı ancak, maksimum oyulma derinliği konumunun belirlenmesine etkili olduğu anlaşılmaktadır.

17. Dalga tarafından üretilen ve tabana iletilen enerjinin büyüklüğünü gösteren Ursell parametresi, rölatif oyulma derinliğini oldukça iyi bir korelasyon ile temsil etmektedir. Ancak boru çapını içermeyen bu parametre her boru çapı için aynı oyulma derinliği vermektedir. Buna karşın farklı su derinliklerini oldukça iyi bir korelasyonla benzeştirmektedir.

18. Boru çapını da içeren boru Ursell sayısı ( $U_{RB}$ ) rölatif oyulma derinliğinin yüksek bir korelasyon ile belirlenmesini sağlamaktadır. Artan  $U_{RB}$  değerlerinde S/D'de artmaktadır. Rölatif oyulma derinliği ile boru Ursell sayısı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.0418 U_{Rb}^{0.4066}$$

19. Sığlaşma bölgesinde rölatif denge oyulma derinliğinin Keulegan-Carpenter sayısı ile değişimi incelendiğinde, oyulma derinliğinin KC sayısının kendisiyle değiştiği bulunmuştur. KC sayısı sığlaşma bölgesinde de yerel taban hareketini temsil etmektedir. S/D ile KC arasındaki bağıntı bu bölge için aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.044 KC^{0.91}$$

20. Gerek geçiş gerekse sığlaşma bölgelerinde farklı deney koşullarını da içeren daha önce yapılmış çalışmalarla birlikte S/D'nin KC ile değişimi

$$\frac{S}{D} = 0.088 KC^{0.57}$$

şeklinde bulunmuştur. Bu ifade farklı koşulları bir arada içermesi nedeniyle korelasyonda (0.84) ve KC'nin üstel değerinde azalma meydana gelmiştir. İfadeden görüldüğü gibi S/D Keulegan-Carpenter sayısının kare kökü ile değişmektedir.

21. KC sayısı tabandaki yörüngesel deplasmanı veya hızı içermesi dolayısıyla özellikle dalgaların kırılma şartlarında bu parametrenin belirlenmesi oldukça güçtür. Çünkü kırılma bölgesi yakınlarında bu güne kadar dalga kinematiklerini belirleyecek herhangi geçerli bir teorelin bulunmayışı ve deneyler esnasında bu parametrelerin ölçümlerindeki zorluklar nedeniyle KC sayısının belirlenmesinde hesap ve ölçüm hatalarına neden olunabileceği göz önünde tutulmalıdır.

22. Rölatif denge oyulma derinliğinin belirlenmesinde etkin iki parametre tariflenmiştir. Bunlar boru Ursell sayısı ve Keulegan-Carpenter sayılarıdır. Boru Ursell

sayısı yörüngesel taban hızını içermeyip, sadece yerel dalga kerekteristiklerine, akım derinliğine ve boru çapına bağlı olduğundan özellikle sığlaşma bölgesinde hesaplama kolaylığına sahiptir.

23. Sığlaşma bölgesinde değişen dalga koşullarına göre maksimum oyulma çukurunun meydana geldiği kritik su derinliği ( $d_{kr}$ ) ile surf parametresi arasındaki ilişki, kırılma derinliğine göre;

$$\frac{d_{kr}}{d_b} = 0.645\xi + 1.1$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bu ifadeye göre surf parametresinin artan değerlerinde, maksimum oyulma daha derinde meydana gelmektedir.

## 5.2 Öneriler

Gelişen denizaltı teknolojileri ile birlikte denizaltı boru hatları uygulamaları kıyı mühendisliği çalışmalarının önemli bir konusunu oluşturmaktadır. Ancak inşa edilen boru hatlarının dalga etkisiyle etraflarında meydana gelen yerel oyulma nedeniyle yapısal davranışları değişerek kırıldıkları sıkça karşılaşılan bir problemdir. Bu çalışmada mekanizma detaylı olarak incelenmeye çalışılmışsa da aşağıda sıralanan çalışmaların yapılmasında gerekmektedir. Bunlar;

1. Sığlaşma bölgesinde boru hatlarının dalga ortagonallerine belli bir açı ile yerleştirilmesi halinde oyulma çukurunun değişimi,
2. Rijit olmayan boru hatlarında oyulma çukurunun meydana gelmesiyle sarkma probleminin etkisinin incelenmesi,
3. Yine sığlaşma bölgesinde farklı derinliklerde gömülü boruların hareketli taban etkileşiminin belirlenmesi,
4. Boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliğinin düzensiz dalga koşullarında bulunması olarak sıralanabilir



## KAYNAKLAR

1. Achenbach, E. and Heinecke, E., 1981. "On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$ ", J. Fluid Mech., Vol.109, pp.239-251.
2. Ali, N. and Narayanan, R. 1986. "Forces on cylinders oscillating near a plane boundary", Proc. 5<sup>th</sup> Intl. Offshore Mech. and Arctic Eng. (OMAE) Symp., Tokyo, Japan, Vol.3, pp.613-619.
3. Angrilli, F., Bergamaschi, S. and Cossalter, V., 1982. "Investigation of wall-induced modifications to vortex shedding from a circular cylinder", Trans. of the ASME, J. Fluids Eng., Vol.104, pp.518-522.
4. Apelt, C.J., and Piorewicz, 1987. "Laboratory studies breaking wave forces acting on vertical cylinders in shallow water", J. Coastal Eng., Vol.11, pp.263-282.
5. Arnskov, M.M., Fredsøe, J. and Sümer, B.M., 1993. "Bed shear measurements over a smooth bed in three-dimensional wave-current motion", Coastal Eng., Vol.20, pp.277-316.
6. Battjes, J.A., 1974. "Surf similarity", Coastal Eng. Conf. Copenhagen, Denmark.
7. Bearman, P.W. and Graham, J.M.R., 1979. "Hydrodynamic forces on cylindrical bodies in oscillatory flow", Proc. 2<sup>nd</sup> Intl. Conf. On the Behaviour of Offshore Structures, London.

8. Bearman, P.W., Graham, J.M.R., Naylor, P. and Obasaju, E.D., 1981. "The role of vortices in oscillatory flow about bluff cylinders", Proc. Intl. Symp. On Hydrodyn. In Ocean Engr., Trondheim, Norway.
9. Bearmann, P.W. and Zdravkovich, M.M., 1978. "Flow around a circular cylinder near a plane boundary", J. Fluid Mech., Vol.89, Part 1, pp.33-48.
10. Bernetti, R., Brushi, R., Valentini, V. and Venturi, M., 1990. "Pipelines placed on erodible seabeds", Proc. of the 9<sup>th</sup> Intl. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., Houston, Texas, ASME, Vol.5, pp.155-164.
11. Bijker, E.W., and Leeuwestein, W., 1984. "Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents", Seabed Mechanics, B. Denness, Graham and Trotman, Gettysburg, Md., pp.235-242.
12. Blumberg, R., 1974. "Forces acting on unburied offshore pipelines", Pipeline research Committee, American Gas Association, Project PR-91-68.
13. Breteler, K., 1982. "Scour underneath a pipeline due to waves", Delft Univ. of Tech., Coastal Eng. Group ( in Dutch).
14. Bruschi, R., Cimballi, W., Leopard, G. and Vincenzi, M., 1994. "Scour induced free spans analysis"
15. Chakrabarti, S.K., 1980. "Laboratory generated waves and wave theories", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, WW3, pp.349-368.
16. Chao, L. and Hennessy, D.V., 1972. "Local scour under ocean outfall pipelines", J. Pollution Control Federation., Vol.44, pp.1443-1447.

17. Cheung, J.C.K. and Melbourne, H.W., 1983. "Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical Reynolds numbers", J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.14, pp.399-410.
18. Chiew, Y.M., 1990. "Mechanics of local scour around submarine pipelines", J. Hydraulic Eng., ASME, Vol.116, No. 4, pp.515-529.
19. Chiew, Y.M., 1991. "Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines", J. Hydraulic Eng., Vol.117, No.4, pp.452-465.
20. Chiew, Y.M., 1991a. "Flow around horizontal circular cylinder in shallow flows" J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASME, Vol.117(2), pp.120-135.
21. Coleman, N.L., 1971. "Analyzing laboratory measurements of scour at cylindrical piers in sand beds", 16<sup>th</sup> Congress of IAHR, Paris.
22. Deeigard, R., Bro Mikkelsen, M. and Fredse, J., 1991. "Measurement of the bed shear stress in a surf zone", Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Eng. Tech. Univ. Denmark, Prog. Re. 73, pp.21-30.
23. Fredsøe, J. and Hansen, E.A., 1987. "Lift forces on pipelines in steady flow", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol.113, No.2, pp.139-155.
24. Fredsøe, J. Hansen, E.A., Mao, Y., Sümer, B.M., 1987. "Three dimensional scour below pipelines", Proc. Sixth Intl. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Eng., ASME, pp.29-36.
25. Fredsøe, J., Sümer, B.M. and Arnskov, M.M., 1992. "Time scale for wave/current scour below pipelines", Intl. J. of Offshore and Polar Eng., Vol.2, No.1, pp.13-17.



26. Gerrard, J.H., 1978. "The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number", Phil. Transactions of the Royal Soc., London, Series A, 288(A 1354), pp.351-362.
27. Gökçe, T., 1990. "Local scour and self burial of submarine pipelines by waves", Ph.D. Thesis, METU, Ankara.
28. Grass, A.T., Raven, P.W. J., Stuart, R.J. and Bray, J.A., 1984. "The influence of boundary layer velocity gradients and bed proximity on vortex shedding from free spanning pipelines", Trans. ASME, J. of Energy. Res. Technology, Vol. 106, pp.70-78.
29. Gravesen, H. and Fredsøe, J., 1983. "Modelling of liquefaction, scour and natural backfilling process in relation to marine pipelines", Offshore oil and gas pipeline Technology, European Seminar, Copenhagen.
30. Griffin, O.M., 1985. "Vortex shedding from bluff bodies in a shear flow: A review", Trans. ASCE, J. Fluids Eng., Vol.107, pp.278-306.
31. Hallermeier, R.J., 1984. "Wave cuts in sand slopes applied to coastal models", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol.110, No.1, pp.34-49.
32. Hansen, E.A. and Carsten, S., Fredsøe, J. and Sümer, B.M., (1991). "Time development of scour induced free spans of pipelines", Proc. 10<sup>th</sup> Offshore Mech. and Arctic Eng. Conf., Stavanger, Norway, V. Pipeline Technology, ASME, pp.25-31.
33. Hansen, E.A., 1992. "Scour below pipelines and cables, a simple model", 11<sup>th</sup> Offshore Mech. and Arctic Eng. Conf., Calgary, Canada, ASME, Vol.5-A, pp.133-138.
34. Hansen, E.A., Fredsøe, J. and Mao, Y., 1987. "Two-dimensional scour below pipelines", Proc. 5<sup>th</sup> Intl. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Eng., Tokyo, Japan, pp.670-678.

35. Herbich, J.B., 1981. "Offshore pipeline design elements", Maecell Dekker Inc., Newyork.
36. Horikawa, K., 1978. "Coastal Engineering", University of Tokyo Press.
37. Hussain, C.M., 1979. "Scour around horizontal pipes", M. Sc. Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
38. Ibrahim, A. and Nalluri, C., 1986. "Scour prediction around marine pipelines", Proc. 5<sup>th</sup> Intl. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Eng. Tokyo, Japan, ASME, Vol.3, pp.679-684.
39. Iwagaki, Y., Shiota, K. and Doi, H., 1982. "Shoaling and refraction coefficient of finite amplitude waves", Coastal Eng. Jpn., Vol.25, pp.25-35.
40. Jacobsen, V., Bryndum, M.B. and Fredsøe, J., 1984. "Determination of flow kinematics close to marine pipelines and their use in stability calculations", Proc. 16<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conf. Paper OTC 4833.
41. Jawad, J.B., 1983. "Wave effects on scour around horizontal pipelines", M.Sc. Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
42. Jensen B.L., Sümer, B.M., Jensen, H.R., Fredsøe, J., 1990. "Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current", J. Offshore Mech. and Arctic Eng., Vol.112, pp.206-213.
43. Jensen, H.R., Jensen, B.L., Sümer, B.M and Fredsøe, J., 1989. "Flow visualization and numerical simulation of the flow around marine pipelines on an erodible bed in waves" Proc. 8<sup>th</sup> Intl. Conf. on Offshore Mech. and Eng., Vol.112, pp.206-212.

43. Lechman, R.J., 1984. "Seabed scour around submarine pipelines", M.A.T.s Report 84-4.
44. Kamphuis, J.W., (1991). "Wave transformation", J. Coastal Eng., Vol.15, pp.173-184.
45. Kerschenbaum, N.Y. and Harrison, G.E., 1995. "Seabed irregularity in subsea pipeline spanning", Proc. 5<sup>th</sup> Intl. Offshore and Polar Eng. Conf., The Hague, The Netherlands, June 11-16, Vol 3, pp.8-14.
46. Kiya, M., Tamura, H. and Arie, M., 1980. "Vortex shedding from a circular cylinder in moderate Reynolds number shear flow", J. Fluid Mech., Vol.141, pp.721-735.
47. Kjeldsen, S.P., Gjorvik, C., Bringaker, K.G., Jacobsen, J., 1973. "Local scour near offshore pipelines", Proc. 2<sup>nd</sup> Intl. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions Conf., pp.308-331.
48. Klomp, W.H.G., Hansen, E.A., Chen, Z., Bijker, R. and Bryndum, M.B., 1995. "Pipeline seabed interaction, free span development", Proc. 5<sup>th</sup> Intl. Offshore and Polar Eng. Conf., The Hague, The Netherlands, Vol.3, pp.117-122.
49. Kwok, K.C.S., 1986. "Turbulence effect on flow around circular cylinder", J. Engineering Mech., ASCE, Vol.112(11), pp.1181-1197.
50. Le Méhauté, B. and Koch, R.C.Y., 1967. "On the breaking waves arriving at an angle to the shore", J. Hyd. Res., Vol.5(1), pp.67-88.
51. Leeuwestein, W., Bijker, W., Peerbolte, E.B. and Wind, H.G., 1985. "The natural self-burial of submarine pipelines", Conf. Behaviour of Offshore Structures, pp.717-728.
52. Littlejohns, P.S.G., 1977. "A study of scour around submarine pipelines", Report No INT 113, Hydraulic Research Station, Wallingford.



53. Lucassen, R.J., 1984. "Scour underneath submarine pipelines", MATs Report PL-4 2A, Netherlands.
54. Lundgren, H., Mathiesen, B. and Gravesen, H., 1976. "Wave loads on pipelines on the seafloor", Proc. 1<sup>st</sup> Intl. Conf. On the Behaviour of Offshore Structures (BOSS 76), Vol.1, pp.236-247.
55. Mao, Y., 1988. "Seabed scour under pipelines", Proc. 7<sup>th</sup> Intl. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng., Houston, Texas, Vol.5, pp.33-38.
56. Maull, D.J. and Young, R.A., 1973. "Vortex shedding from bluff bodies in a shear flow", J. Fluid Mech., Vol.60, pp.401-409
57. Nadaoka, K. and Kondoh, T., 1982. "Laboratory measurements of velocity field and structure in the surf zone by LDV", Coastal Eng. in Japan, Vol.25, pp.125-145.
58. Nadaoka, K., Ueno, S. and Igavaghe, T., 1988. "Sediment suspension due to large scale eddies in the surf zone", Intl. Coastal Eng. Conf. Malaga, Spain, pp.1646-1660.
59. Norberg, C. and Sunden, B., 1987. "Turbulence and Reynolds number effects on the flow and fluid forces on a single cylinder in cross flow", J. Fluid and Structures, Vol.1, pp.337-357.
60. Raven, P.W.C., Stuart, R.J. and Littlejohns, P.S., 1985. "Full-scale dynamic testing of submarine pipeline spans", 17<sup>th</sup> Annual OTC in Houston, Texas, May 6-9, Paper No5005.
61. Sakout, A., Jarno-Draux, A., Bêlorgey, M., 1993. "Bed shear stress study in the neighbourhood of a near wall cylinder in waves", Sediment Transport Mechanism in Offshore and Polar Eng. Vol.1, pp.15-17.

- Coastal Environments and Rivers, Ed. Belorgey, Rajoana, Sleath, World Scientific, pp.261-268.
- 62.Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981. "Mechanics of wave forces on offshore structures", Van Nostrand Reinhold Company.
- 63.Sarpkaya, T. and Rajabi, F., 1979. "Hydrodynamic drag on bottom mounted smooth and rough cylinders in periodic flow", OTC Paper 3761, pp.219-226.
- 64.Sarpkaya, T., 1975. "Forces on cylinders and spheres in a sinusoidal oscillating fluid", J. Appl. Mech., Vol.42, pp.32-37.
- 65.Sarpkaya, T., 1976. "Forces on cylinders near a plane boundary in a sinusoidally oscillating fluid", J. Fluids Eng., Trans. ASME, pp.499-504.
- 66.Singamsetti, S.R. and Wind, H.G., 1980. "Breaking wave characteristics of shoaling and breaking periodic waves normally incident to plane beaches constant slope", Delft Hyd. Lab. Rep. M 1371.
- 67.Sümer, B.M. and Fredsøe, J., 1990. "Scour below pipelines in waves", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, Vol.116, No.3, pp.307-323.
- 68.Sümer, B.M. and Fredsøe, J., 1991. "Onset of scour below a pipeline exposed to waves", Intl. J. Offshore and Polar Eng., Vol.1, No.3, pp.189-194.
- 69.Sümer, B.M. and Fredsøe, J., 1994. "Self-burial of pipelines at span shoulders", Int. J. Offshore and Polar Eng., Vol.4, No.1, pp.30-35.
- 70.Sümer, B.M., 1989. "Effect of Reynolds number on vibrations of cylinders", J. Offshore and Polar Eng., Vol.111, pp.131-137.

80. Yüksel, Y. and Narayanan, R., 1994b. "Wave forces on horizontal cylinder resting on sloping bottom", Intl. J. Offshore and Polar Eng., Vol.11, pp.85-92.
81. Yüksel, Y. and Narayanan, R., 1994a. "Breaking wave forces on horizontal cylinders close to the sea bed", J. Coastal Eng., Vol.23, pp.115-134.



Tablo 2.1-Dirilçiyi içeren karışımların nyalıme ve flammı deney sonuçları

| No  | İçerik<br>yüzde | İçerik<br>g/g | Yanma<br>zamanı<br>saniye | Yanma<br>zamanı<br>dakika | Yanma<br>zamanı<br>dakika | Yanma<br>zamanı<br>dakika | Yanma<br>zamanı<br>dakika | Yanma<br>zamanı<br>dakika | Yanma<br>zamanı<br>dakika |
|-----|-----------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1   | 3.25            | 35            | 11.48                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 2   | 3.25            | 4             | 8.08                      | 1.33                      | 0.0541                    | 12.58                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 3   | 3.25            | 5             | 11.60                     | 1.26                      | 0.054                     | 9.91                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 4   | 3.25            | 6             | 10.47                     | 1.76                      | 0.0562                    | 13.43                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 5   | 3.25            | 7             | 11.25                     | 1.18                      | 0.0587                    | 10.67                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 6   | 3.25            | 8             | 9.78                      | 1.65                      | 0.0557                    | 10.14                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 7   | 3.25            | 9             | 8.64                      | 1.43                      | 0.0574                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 8   | 3.25            | 10            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0576                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 9   | 3.25            | 11            | 11.87                     | 1.92                      | 0.058                     | 12.48                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 10  | 3.25            | 12            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0618                    | 25.29                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 11  | 3.25            | 13            | 15.04                     | 1.74                      | 0.063                     | 16.37                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 12  | 3.25            | 14            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0623                    | 1.00                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 13  | 3.25            | 15            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0641                    | 3.41                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 14  | 3.25            | 16            | 11.08                     | 1.52                      | 0.06                      | 5.37                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 15  | 3.25            | 17            | 10.43                     | 1.76                      | 0.0642                    | 3.46                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 16  | 3.25            | 18            | 14.73                     | 1.72                      | 0.0672                    | 12.53                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 17  | 3.25            | 19            | 7.78                      | 1.63                      | 0.0787                    | 19.0                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 18  | 3.25            | 20            | 8.64                      | 1.76                      | 0.0714                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 19  | 3.25            | 21            | 1.68                      | 0.028                     | 0.016                     | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 20  | 3.25            | 22            | 11.47                     | 1.58                      | 0.077                     | 23.35                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 21  | 3.25            | 23            | 15.74                     | 1.23                      | 0.0814                    | 16.67                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 22  | 3.25            | 24            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0873                    | 37.26                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 23  | 3.25            | 25            | 13.43                     | 1.64                      | 0.09                      | 1.93                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 24  | 3.25            | 26            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0943                    | 3.46                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 25  | 3.25            | 27            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 26  | 3.25            | 28            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 27  | 3.25            | 29            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 28  | 3.25            | 30            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 29  | 3.25            | 31            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 30  | 3.25            | 32            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 31  | 3.25            | 33            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 32  | 3.25            | 34            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 33  | 3.25            | 35            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 34  | 3.25            | 36            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 35  | 3.25            | 37            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0971                    | 3.44                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 36  | 3.25            | 38            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 37  | 3.25            | 39            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 38  | 3.25            | 40            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 39  | 3.25            | 41            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 40  | 3.25            | 42            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 41  | 3.25            | 43            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 42  | 3.25            | 44            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 43  | 3.25            | 45            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 44  | 3.25            | 46            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 45  | 3.25            | 47            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 46  | 3.25            | 48            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0971                    | 3.44                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 47  | 3.25            | 49            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 48  | 3.25            | 50            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 49  | 3.25            | 51            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 50  | 3.25            | 52            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 51  | 3.25            | 53            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 52  | 3.25            | 54            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 53  | 3.25            | 55            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 54  | 3.25            | 56            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 55  | 3.25            | 57            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 56  | 3.25            | 58            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 57  | 3.25            | 59            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0971                    | 3.44                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 58  | 3.25            | 60            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 59  | 3.25            | 61            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 60  | 3.25            | 62            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 61  | 3.25            | 63            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 62  | 3.25            | 64            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 63  | 3.25            | 65            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 64  | 3.25            | 66            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 65  | 3.25            | 67            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 66  | 3.25            | 68            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 67  | 3.25            | 69            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 68  | 3.25            | 70            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0971                    | 3.44                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 69  | 3.25            | 71            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 70  | 3.25            | 72            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 71  | 3.25            | 73            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 72  | 3.25            | 74            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 73  | 3.25            | 75            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 74  | 3.25            | 76            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 75  | 3.25            | 77            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 76  | 3.25            | 78            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 77  | 3.25            | 79            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 78  | 3.25            | 80            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 79  | 3.25            | 81            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0971                    | 3.44                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 80  | 3.25            | 82            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 81  | 3.25            | 83            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 82  | 3.25            | 84            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 83  | 3.25            | 85            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 84  | 3.25            | 86            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 85  | 3.25            | 87            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 86  | 3.25            | 88            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 87  | 3.25            | 89            | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 88  | 3.25            | 90            | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 89  | 3.25            | 91            | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 90  | 3.25            | 92            | 8.08                      | 1.33                      | 0.0971                    | 3.44                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 91  | 3.25            | 93            | 11.60                     | 1.26                      | 0.09                      | 1.74                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 92  | 3.25            | 94            | 10.47                     | 1.76                      | 0.0942                    | 3.64                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 93  | 3.25            | 95            | 11.25                     | 1.18                      | 0.0973                    | 7.68                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 94  | 3.25            | 96            | 9.78                      | 1.65                      | 0.0977                    | 11.40                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 95  | 3.25            | 97            | 8.64                      | 1.43                      | 0.0974                    | 10.17                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 96  | 3.25            | 98            | 9.48                      | 1.69                      | 0.0916                    | 7.7                       | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 97  | 3.25            | 99            | 11.87                     | 1.92                      | 0.0912                    | 14.01                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 98  | 3.25            | 100           | 15.78                     | 1.83                      | 0.0915                    | 10.60                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 99  | 3.25            | 101           | 15.04                     | 1.74                      | 0.0923                    | 21.71                     | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |
| 100 | 3.25            | 102           | 17.48                     | 1.54                      | 0.0957                    | 1.72                      | 1.20                      | 0.0523                    | 4.07                      |

## EKLER 1

Tablo E.1-Düzlem taban halinde oyulma ile ilgili deney sonuçları.

|    | Boru<br>çapı | Su<br>derinliği | Dalga<br>yüksek.       | Rölatif<br>su<br>derinliği | Dalga<br>periyod<br>u | Shields<br>para. | Keulegan-<br>Carpenter<br>Sayısı | Boru<br>Reynolds<br>Sayısı | Rölatif<br>oyulma<br>derinliği |
|----|--------------|-----------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| No | D<br>(cm)    | d<br>(cm)       | H <sub>0</sub><br>(cm) | d/H <sub>0</sub>           | T<br>(sn)             | θ                | KC                               | Re                         | S/D                            |
| 3  | 3.23         | 35              | 13.48                  | 2.596                      | 0.90                  | 0.0523           | 6.07                             | 6.2x10 <sup>3</sup>        | -                              |
| 4  | 3.23         | "               | 8.08                   | 4.33                       | 1.30                  | 0.0341           | 12.88                            | 9.1x10 <sup>3</sup>        | 0.279                          |
| 5  | 3.23         | "               | 11.60                  | 3.02                       | 1.10                  | 0.04             | 8.91                             | 7.3x10 <sup>3</sup>        | 0.246                          |
| 6  | 3.23         | "               | 10.43                  | 3.36                       | 1.47                  | 0.0342           | 13.43                            | 8.4 x10 <sup>3</sup>       | 0.405                          |
| 7  | 3.23         | "               | 11.23                  | 3.12                       | 1.86                  | 0.0302           | 19.03                            | 9.38x10 <sup>3</sup>       | 0.642                          |
| 8  | 3.23         | "               | 7.70                   | 4.55                       | 2.64                  | 0.0297           | 30.18                            | 11.0x10 <sup>3</sup>       | -                              |
| 9  | 3.23         | "               | 8.64                   | 4.05                       | 2.60                  | 0.0274           | 25.60                            | 9.0x10 <sup>3</sup>        | -                              |
| 10 | 3.23         | "               | 9.48                   | 3.69                       | 2.33                  | 0.0316           | 17.3                             | 6.8 x10 <sup>3</sup>       | 0.619                          |
| 11 | 3.23         | "               | 11.97                  | 2.92                       | 2.58                  | 0.042            | 35.44                            | 12.6x10 <sup>3</sup>       | 0.836                          |
| 12 | 3.23         | "               | 15.74                  | 2.22                       | 2.28                  | 0.0415           | 25.29                            | 10.2x10 <sup>3</sup>       | 0.530                          |
| 13 | 3.23         | "               | 15.04                  | 2.33                       | 2.37                  | 0.0482           | 56.52                            | 21.8x10 <sup>3</sup>       | 0.650                          |
| 3  | 4.90         | "               | 13.48                  | 3.34                       | 0.90                  | 0.0523           | 4.00                             | 9.4x10 <sup>3</sup>        | -                              |
| 4  | 4.90         | "               | 8.08                   | 4.33                       | 1.30                  | 0.0341           | 8.49                             | 13.7x10 <sup>3</sup>       | 0.286                          |
| 5  | 4.90         | "               | 11.60                  | 3.02                       | 1.20                  | 0.04             | 5.87                             | 11.0x10 <sup>3</sup>       | 0.224                          |
| 6  | 4.90         | "               | 10.43                  | 3.36                       | 1.47                  | 0.0342           | 8.86                             | 12.7x10 <sup>3</sup>       | 0.296                          |
| 7  | 4.90         | "               | 11.23                  | 3.12                       | 1.86                  | 0.0302           | 12.55                            | 14.2x10 <sup>3</sup>       | 0.428                          |
| 8  | 4.90         | "               | 7.70                   | 4.55                       | 2.64                  | 0.0297           | 19.9                             | 15.9x10 <sup>3</sup>       | 0.285                          |
| 9  | 4.90         | "               | 8.64                   | 4.05                       | 2.60                  | 0.0274           | 16.87                            | 13.7x10 <sup>3</sup>       | 0.276                          |
| 10 | 4.90         | "               | 9.48                   | 3.69                       | 2.33                  | 0.0316           | 11.40                            | 10.3x10 <sup>3</sup>       | 0.347                          |
| 11 | 4.90         | "               | 11.97                  | 2.92                       | 2.58                  | 0.042            | 23.36                            | 19.1x10 <sup>3</sup>       | 0.408                          |
| 12 | 4.90         | "               | 15.74                  | 2.22                       | 2.28                  | 0.0415           | 16.67                            | 15.4x10 <sup>3</sup>       | 0.388                          |
| 13 | 4.90         | "               | 15.04                  | 2.33                       | 2.37                  | 0.0482           | 37.26                            | 33.1x10 <sup>3</sup>       | 0.510                          |
| 3  | 7.70         | "               | 13.48                  | 3.34                       | 0.90                  | 0.0523           | 2.55                             | 1.5x10 <sup>4</sup>        | 0.104                          |
| 4  | 7.70         | "               | 8.08                   | 4.33                       | 1.30                  | 0.0341           | 5.40                             | 2.2x10 <sup>4</sup>        | 0.170                          |
| 5  | 7.70         | "               | 11.60                  | 3.02                       | 1.20                  | 0.04             | 3.74                             | 1.7x10 <sup>4</sup>        | 0.140                          |
| 6  | 7.70         | "               | 10.43                  | 3.36                       | 1.47                  | 0.0342           | 5.64                             | 2.0x10 <sup>4</sup>        | 0.182                          |
| 7  | 7.70         | "               | 11.23                  | 3.12                       | 1.86                  | 0.0302           | 7.98                             | 2.2x10 <sup>4</sup>        | 0.272                          |
| 8  | 7.70         | "               | 7.70                   | 4.55                       | 2.64                  | 0.0297           | 12.66                            | 2.5x10 <sup>4</sup>        | 0.195                          |
| 9  | 7.70         | "               | 8.64                   | 4.05                       | 2.60                  | 0.0274           | 10.74                            | 2.2x10 <sup>4</sup>        | 0.280                          |
| 10 | 7.70         | "               | 9.48                   | 3.69                       | 2.33                  | 0.0316           | 7.24                             | 1.6x10 <sup>4</sup>        | 0.300                          |
| 11 | 7.70         | "               | 11.97                  | 2.92                       | 2.58                  | 0.042            | 14.87                            | 3.0x10 <sup>4</sup>        | 0.325                          |
| 12 | 7.70         | "               | 15.74                  | 2.22                       | 2.28                  | 0.0415           | 10.61                            | 2.4x10 <sup>4</sup>        | 0.220                          |
| 13 | 7.70         | "               | 15.04                  | 2.33                       | 2.37                  | 0.0482           | 23.71                            | 5.2x10 <sup>4</sup>        | 0.266                          |
| 3  | 11.40        | "               | 13.48                  | 3.34                       | 0.90                  | 0.0523           | 1.72                             | 2.2x10 <sup>4</sup>        | 0.061                          |
| 4  | 11.40        | "               | 8.08                   | 4.33                       | 1.30                  | 0.0341           | 3.64                             | 3.2x10 <sup>4</sup>        | 0.087                          |
| 5  | 11.40        | "               | 11.60                  | 3.02                       | 1.20                  | 0.04             | 2.52                             | 2.6x10 <sup>4</sup>        | 0.087                          |
| 6  | 11.40        | "               | 10.43                  | 3.36                       | 1.47                  | 0.0342           | 3.80                             | 3.0x10 <sup>4</sup>        | 0.114                          |
| 7  | 11.40        | "               | 11.23                  | 3.12                       | 1.86                  | 0.0302           | 5.37                             | 3.3x10 <sup>4</sup>        | 0.157                          |
| 8  | 11.40        | "               | 7.70                   | 4.55                       | 2.64                  | 0.0297           | 8.52                             | 3.7x10 <sup>4</sup>        | 0.122                          |
| 9  | 11.40        | "               | 8.64                   | 4.05                       | 2.60                  | 0.0274           | 7.23                             | 3.2x10 <sup>4</sup>        | 0.166                          |
| 10 | 11.40        | "               | 9.48                   | 3.69                       | 2.33                  | 0.0316           | 4.88                             | 2.4x10 <sup>4</sup>        | 0.166                          |
| 11 | 11.40        | "               | 11.97                  | 2.92                       | 2.58                  | 0.042            | 10.0                             | 4.5x10 <sup>4</sup>        | 0.253                          |
| 12 | 11.40        | "               | 15.74                  | 2.22                       | 2.28                  | 0.0415           | 7.14                             | 3.6x10 <sup>4</sup>        | 0.192                          |
| 13 | 11.40        | "               | 15.04                  | 2.33                       | 2.37                  | 0.0482           | 15.96                            | 7.7x10 <sup>4</sup>        | 0.214                          |



Tablo E.2- 1/5 eğimli tabanda oyulma ile ilgili deney sonuçları.

|    | Boru<br>çapı | Su<br>derinliği | Dalga<br>yüksek.       | Rölatif<br>su<br>derinliği | Dalga<br>periyodu | Surf<br>para. | Shields<br>para. | Keulegan-<br>Carpenter<br>Sayısı | Beta<br>para. | Boru<br>Reynolds<br>Sayısı | Rölatif<br>oyulma<br>derinliği |
|----|--------------|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------|---------------|------------------|----------------------------------|---------------|----------------------------|--------------------------------|
| No | D<br>(cm)    | d<br>(cm)       | H <sub>0</sub><br>(cm) | d/H <sub>0</sub>           | T<br>(sn)         | ξ             | θ                | KC                               | β             | Re                         | S/D                            |
| 3  | 3.23         | 28              | 13.48                  | 1.78                       | 0.90              | 0.61          | 0.0352           | 6.7                              | 1015          | 6.8x10 <sup>3</sup>        | 0.263                          |
| 6  | 3.23         | 28              | 10.43                  | 2.3                        | 1.47              | 1.13          | 0.0461           | 11.8                             | 623           | 7.4x10 <sup>3</sup>        | 0.526                          |
| 8  | 3.23         | 28              | 7.70                   | 3.12                       | 2.64              | 2.37          | 0.0264           | 24.5                             | 347           | 8.5x10 <sup>3</sup>        | 0.588                          |
| 10 | 3.23         | 28              | 9.48                   | 2.52                       | 2.33              | 1.89          | 0.0319           | 24.5                             | 393           | 9.6x10 <sup>3</sup>        | 1.068                          |
| 11 | 3.23         | 28              | 11.97                  | 2.01                       | 2.58              | 1.87          | 0.0693           | 39.9                             | 355           | 14.2x10 <sup>3</sup>       | 0.681                          |
| 3  | 4.9          | 28              | 13.48                  | 1.78                       | 0.90              | 0.61          | 0.0352           | 4.4                              | 2338          | 10.3x10 <sup>3</sup>       | 0.143                          |
| 6  | 4.9          | 28              | 10.43                  | 2.3                        | 1.47              | 1.13          | 0.0461           | 7.8                              | 1435          | 11.2x10 <sup>3</sup>       | 0.347                          |
| 8  | 4.9          | 28              | 7.70                   | 3.12                       | 2.64              | 2.37          | 0.0264           | 16.1                             | 799           | 12.9x10 <sup>3</sup>       | 0.214                          |
| 10 | 4.9          | 28              | 9.48                   | 2.52                       | 2.33              | 1.89          | 0.0319           | 16.2                             | 904           | 14.6x10 <sup>3</sup>       | 0.469                          |
| 11 | 4.9          | 28              | 11.97                  | 2.01                       | 2.58              | 1.87          | 0.0693           | 26.3                             | 816           | 21.5x10 <sup>3</sup>       | 0.459                          |
| 3  | 7.7          | 28              | 13.48                  | 1.78                       | 0.90              | 0.61          | 0.0352           | 2.81                             | 5774          | 16.2x10 <sup>3</sup>       | 0.078                          |
| 6  | 7.7          | 28              | 10.43                  | 2.3                        | 1.47              | 1.13          | 0.0461           | 5.0                              | 3545          | 17.5x10 <sup>3</sup>       | 0.214                          |
| 8  | 7.7          | 28              | 7.70                   | 3.12                       | 2.64              | 2.37          | 0.0264           | 10.3                             | 1972          | 20.2x10 <sup>3</sup>       | 0.292                          |
| 10 | 7.7          | 28              | 9.48                   | 2.52                       | 2.33              | 1.89          | 0.0319           | 10.3                             | 2232          | 22.9x10 <sup>3</sup>       | 0.455                          |
| 11 | 7.7          | 28              | 11.97                  | 2.01                       | 2.58              | 1.87          | 0.0693           | 16.7                             | 2016          | 33.7x10 <sup>3</sup>       | 0.383                          |
| 3  | 11.4         | 28              | 13.48                  | 1.78                       | 0.90              | 0.61          | 0.0352           | 1.9                              | 12744         | 24.0x10 <sup>3</sup>       | 0.070                          |
| 6  | 11.4         | 28              | 10.43                  | 2.3                        | 1.47              | 1.13          | 0.0461           | 3.34                             | 7824          | 26.0x10 <sup>3</sup>       | 0.145                          |
| 8  | 11.4         | 28              | 7.70                   | 3.12                       | 2.64              | 2.37          | 0.0264           | 6.9                              | 4353          | 30.0x10 <sup>3</sup>       | 0.158                          |
| 10 | 11.4         | 28              | 9.48                   | 2.52                       | 2.33              | 1.89          | 0.0319           | 6.9                              | 4927          | 34.0x10 <sup>3</sup>       | 0.377                          |
| 11 | 11.4         | 28              | 11.97                  | 2.01                       | 2.58              | 1.87          | 0.0693           | 11.3                             | 4449          | 50.0x10 <sup>3</sup>       | 0.276                          |
| 3  | 3.23         | 24              | 13.48                  | 1.63                       | 0.90              | 0.61          | 0.028            | 6.4                              | 1015          | 6.5x10 <sup>3</sup>        | 0.217                          |
| 6  | 3.23         | 24              | 10.43                  | 2.10                       | 1.47              | 1.13          | 0.026            | 13.6                             | 623           | 8.5x10 <sup>3</sup>        | 0.433                          |
| 8  | 3.23         | 24              | 7.70                   | 2.86                       | 2.64              | 2.37          | 0.0276           | 24.5                             | 347           | 8.5x10 <sup>3</sup>        | 0.813                          |
| 10 | 3.23         | 24              | 9.48                   | 2.32                       | 2.33              | 1.89          | 0.0339           | 25.2                             | 393           | 9.9x10 <sup>3</sup>        | 0.867                          |
| 11 | 3.23         | 24              | 11.97                  | 1.84                       | 2.58              | 1.87          | 0.0349           | 27.9                             | 355           | 9.9x10 <sup>3</sup>        | 1.115                          |
| 3  | 4.90         | 24              | 13.48                  | 1.63                       | 0.90              | 0.61          | 0.028            | 4.2                              | 2338          | 9.9x10 <sup>3</sup>        | 0.163                          |
| 6  | 4.90         | 24              | 10.43                  | 2.10                       | 1.47              | 1.13          | 0.026            | 9.0                              | 1435          | 12.9x10 <sup>3</sup>       | 0.413                          |
| 8  | 4.90         | 24              | 7.70                   | 2.86                       | 2.64              | 2.37          | 0.0276           | 16.1                             | 799           | 12.9x10 <sup>3</sup>       | 0.418                          |
| 10 | 4.90         | 24              | 9.48                   | 2.32                       | 2.33              | 1.89          | 0.0339           | 16.6                             | 904           | 15.4x10 <sup>3</sup>       | 0.388                          |
| 11 | 4.90         | 24              | 11.97                  | 1.84                       | 2.58              | 1.87          | 0.0349           | 18.4                             | 816           | 15.0x10 <sup>3</sup>       | 0.459                          |
| 3  | 7.70         | 24              | 13.48                  | 1.63                       | 0.90              | 0.61          | 0.028            | 2.7                              | 5774          | 15.5x10 <sup>3</sup>       | 0.104                          |
| 6  | 7.70         | 24              | 10.43                  | 2.10                       | 1.47              | 1.13          | 0.026            | 5.7                              | 3545          | 20.2x10 <sup>3</sup>       | 0.234                          |
| 8  | 7.70         | 24              | 7.70                   | 2.86                       | 2.64              | 2.37          | 0.0276           | 10.3                             | 1972          | 20.2x10 <sup>3</sup>       | 0.276                          |
| 10 | 7.70         | 24              | 9.48                   | 2.32                       | 2.33              | 1.89          | 0.0339           | 10.59                            | 2232          | 23.6x10 <sup>3</sup>       | 0.332                          |
| 11 | 7.70         | 24              | 11.97                  | 1.84                       | 2.58              | 1.87          | 0.0349           | 11.7                             | 2016          | 23.6x10 <sup>3</sup>       | 0.481                          |
| 3  | 11.4         | 24              | 13.48                  | 1.63                       | 0.90              | 0.61          | 0.028            | 1.8                              | 12744         | 23.0x10 <sup>3</sup>       | 0.083                          |
| 6  | 11.4         | 24              | 10.43                  | 2.10                       | 1.47              | 1.13          | 0.026            | 3.9                              | 7824          | 30.0x10 <sup>3</sup>       | 0.118                          |
| 8  | 11.4         | 24              | 7.70                   | 2.86                       | 2.64              | 2.37          | 0.0276           | 6.9                              | 4353          | 30.0x10 <sup>3</sup>       | 0.193                          |
| 10 | 11.4         | 24              | 9.48                   | 2.32                       | 2.33              | 1.89          | 0.0339           | 7.2                              | 4927          | 35.0x10 <sup>3</sup>       | 0.377                          |
| 11 | 11.4         | 24              | 11.97                  | 1.84                       | 2.58              | 1.87          | 0.0349           | 7.9                              | 4449          | 35.0x10 <sup>3</sup>       | 0.307                          |



Tablo E.2- Devam.

|    |      |    |       |      |      |      |        |      |       |                    |       |
|----|------|----|-------|------|------|------|--------|------|-------|--------------------|-------|
| 3  | 3.23 | 22 | 13.48 | 1.63 | 0.90 | 0.61 | 0.0165 | 6.1  | 1015  | $6.2 \times 10^3$  | 0.387 |
| 6  | 3.23 | 22 | 10.43 | 2.11 | 1.47 | 1.13 | 0.0269 | 14.1 | 623   | $8.8 \times 10^3$  | Göm.  |
| 8  | 3.23 | 22 | 7.70  | 2.86 | 2.64 | 2.37 | 0.0199 | 20.4 | 347   | $7.1 \times 10^3$  | 0.759 |
| 10 | 3.23 | 22 | 9.48  | 2.32 | 2.33 | 1.89 | 0.031  | 23.8 | 393   | $9.3 \times 10^3$  | 1.238 |
| 11 | 3.23 | 22 | 11.97 | 1.84 | 2.58 | 1.87 | 0.0331 | 27.1 | 355   | $9.6 \times 10^3$  | 0.867 |
| 3  | 4.9  | 22 | 13.48 | 1.63 | 0.90 | 0.61 | 0.0165 | 4.0  | 2338  | $9.4 \times 10^3$  | 0.122 |
| 6  | 4.9  | 22 | 10.43 | 2.11 | 1.47 | 1.13 | 0.0269 | 9.3  | 1435  | $13.3 \times 10^3$ | Göm.  |
| 8  | 4.9  | 22 | 7.70  | 2.86 | 2.64 | 2.37 | 0.0199 | 13.4 | 799   | $10.7 \times 10^3$ | 0.439 |
| 10 | 4.9  | 22 | 9.48  | 2.32 | 2.33 | 1.89 | 0.031  | 15.7 | 904   | $14.2 \times 10^3$ | 0.429 |
| 11 | 4.9  | 22 | 11.97 | 1.84 | 2.58 | 1.87 | 0.0331 | 17.9 | 816   | $14.6 \times 10^3$ | 0.480 |
| 3  | 7.7  | 22 | 13.48 | 1.63 | 0.90 | 0.61 | 0.0165 | 2.6  | 5774  | $14.8 \times 10^3$ | 0.104 |
| 6  | 7.7  | 22 | 10.43 | 2.11 | 1.47 | 1.13 | 0.0269 | 5.9  | 3545  | $20.9 \times 10^3$ | 0.208 |
| 8  | 7.7  | 22 | 7.70  | 2.86 | 2.64 | 2.37 | 0.0199 | 8.6  | 1972  | $16.9 \times 10^3$ | 0.331 |
| 10 | 7.7  | 22 | 9.48  | 2.32 | 2.33 | 1.89 | 0.031  | 10.0 | 2232  | $22.3 \times 10^3$ | 0.351 |
| 11 | 7.7  | 22 | 11.97 | 1.84 | 2.58 | 1.87 | 0.0331 | 11.4 | 2016  | $22.9 \times 10^3$ | 0.292 |
| 3  | 11.4 | 22 | 13.48 | 1.63 | 0.90 | 0.61 | 0.0165 | 1.7  | 12744 | $22.0 \times 10^3$ | 0.057 |
| 6  | 11.4 | 22 | 10.43 | 2.11 | 1.47 | 1.13 | 0.0269 | 4.0  | 7824  | $31 \times 10^3$   | 0.048 |
| 8  | 11.4 | 22 | 7.70  | 2.86 | 2.64 | 2.37 | 0.0199 | 5.8  | 4353  | $25 \times 10^3$   | 0.254 |
| 10 | 11.4 | 22 | 9.48  | 2.32 | 2.33 | 1.89 | 0.031  | 6.7  | 4927  | $33 \times 10^3$   | 0.250 |
| 11 | 11.4 | 22 | 11.97 | 1.84 | 2.58 | 1.87 | 0.0331 | 7.7  | 4449  | $34 \times 10^3$   | 0.145 |
| 3  | 3.23 | 17 | 13.48 | 1.26 | 0.90 | 0.61 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 6  | 3.23 | 17 | 10.43 | 1.63 | 1.47 | 1.13 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 8  | 3.23 | 17 | 7.70  | 2.21 | 2.64 | 2.37 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 10 | 3.23 | 17 | 9.48  | 1.8  | 2.33 | 1.89 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 11 | 3.23 | 17 | 11.97 | 1.42 | 2.58 | 1.87 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 3  | 4.9  | 17 | 13.48 | 1.26 | 0.90 | 0.61 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 6  | 4.9  | 17 | 10.43 | 1.63 | 1.47 | 1.13 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 8  | 4.9  | 17 | 7.70  | 2.21 | 2.64 | 2.37 | -      | -    | -     | -                  | 0.377 |
| 10 | 4.9  | 17 | 9.48  | 1.8  | 2.33 | 1.89 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 11 | 4.9  | 17 | 11.97 | 1.42 | 2.58 | 1.87 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 3  | 7.7  | 17 | 13.48 | 1.26 | 0.90 | 0.61 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 6  | 7.7  | 17 | 10.43 | 1.63 | 1.47 | 1.13 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 8  | 7.7  | 17 | 7.70  | 2.21 | 2.64 | 2.37 | -      | -    | -     | -                  | 0.221 |
| 10 | 7.7  | 17 | 9.48  | 1.8  | 2.33 | 1.89 | -      | -    | -     | -                  | 0.065 |
| 11 | 7.7  | 17 | 11.97 | 1.42 | 2.58 | 1.87 | -      | -    | -     | -                  | 0.130 |
| 3  | 11.4 | 17 | 13.48 | 1.26 | 0.90 | 0.61 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 6  | 11.4 | 17 | 10.43 | 1.63 | 1.47 | 1.13 | -      | -    | -     | -                  | Göm.  |
| 8  | 11.4 | 17 | 7.70  | 2.21 | 2.64 | 2.37 | -      | -    | -     | -                  | 0.127 |
| 10 | 11.4 | 17 | 9.48  | 1.8  | 2.33 | 1.89 | -      | -    | -     | -                  | 0.149 |
| 11 | 11.4 | 17 | 11.97 | 1.42 | 2.58 | 1.87 | -      | -    | -     | -                  | 0.149 |

Tablo E.3- 1/10 eğimli tabanda oyulma ile ilgili deney sonuçları.

|    | Boru<br>çapı | Su<br>derinliği | Dalga<br>yüksek.       | Rölatif<br>su<br>derinliği | Dalga<br>periyodu | Surf<br>para. | Shields<br>para. | Keulegan-<br>Carpenter<br>Sayısı | Beta<br>para. | Boru<br>Reynolds<br>Sayısı | Rölatif<br>oyulma<br>derinliği |
|----|--------------|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------|---------------|------------------|----------------------------------|---------------|----------------------------|--------------------------------|
| No | D<br>(cm)    | d<br>(cm)       | H <sub>0</sub><br>(cm) | d/H <sub>0</sub>           | T<br>(sn)         | $\xi$         | $\theta$         | KC                               | $\beta$       | Re                         | S/D                            |
| 1  | 3.23         | 35              | 7.4                    | 4.7                        | 1.0               | 0.46          | 0.026            | 5.4                              | 914           | 5.0x10 <sup>3</sup>        | 0.155                          |
| 2  | 3.23         | 35              | 9.9                    | 3.5                        | 1.0               | 0.40          | 0.073            | 6.5                              | 914           | 5.9x10 <sup>3</sup>        | 0.170                          |
| 3  | 3.23         | 35              | 14.5                   | 2.4                        | 1.0               | 0.33          | 0.043            | 7.8                              | 914           | 7.1x10 <sup>3</sup>        | 0.217                          |
| 4  | 3.23         | 35              | 8.2                    | 4.3                        | 1.5               | 0.65          | 0.028            | 8.0                              | 610           | 5.1x10 <sup>3</sup>        | 0.217                          |
| 5  | 3.23         | 35              | 11.6                   | 3.0                        | 1.5               | 0.55          | 0.021            | 10.8                             | 610           | 6.6x10 <sup>3</sup>        | 0.387                          |
| 6  | 3.23         | 35              | 14.4                   | 2.4                        | 1.5               | 0.50          | 0.021            | 13                               | 610           | 7.9x10 <sup>3</sup>        | 0.433                          |
| 7  | 3.23         | 35              | 8.6                    | 4.1                        | 2.0               | 0.85          | 0.03             | 13.7                             | 457           | 6.0x10 <sup>3</sup>        | -                              |
| 8  | 3.23         | 35              | 10.7                   | 3.3                        | 2.0               | 0.77          | 0.03             | 16.1                             | 457           | 7.4x10 <sup>3</sup>        | 0.74                           |
| 9  | 3.23         | 35              | 15.9                   | 2.2                        | 2.0               | 0.63          | 0.026            | 22.5                             | 457           | 10.3x10 <sup>3</sup>       | 0.666                          |
| 1  | 4.90         | 35              | 7.4                    | 4.7                        | 1.0               | 0.46          | 0.026            | 3.6                              | 2104          | 7.5x10 <sup>3</sup>        | 0.174                          |
| 2  | 4.90         | 35              | 9.9                    | 3.5                        | 1.0               | 0.40          | 0.073            | 4.3                              | 2104          | 9.02x10 <sup>3</sup>       | 0.133                          |
| 3  | 4.90         | 35              | 14.5                   | 2.4                        | 1.0               | 0.33          | 0.043            | 5.1                              | 2104          | 10.8x10 <sup>3</sup>       | 0.143                          |
| 4  | 4.90         | 35              | 8.2                    | 4.3                        | 1.5               | 0.65          | 0.028            | 5.5                              | 1403          | 7.7x10 <sup>3</sup>        | 0.204                          |
| 5  | 4.90         | 35              | 11.6                   | 3.0                        | 1.5               | 0.55          | 0.021            | 7.1                              | 1403          | 10.0x10 <sup>3</sup>       | 0.347                          |
| 6  | 4.90         | 35              | 14.4                   | 2.4                        | 1.5               | 0.50          | 0.021            | 8.6                              | 1403          | 12.0x10 <sup>3</sup>       | 0.367                          |
| 7  | 4.90         | 35              | 8.6                    | 4.1                        | 2.0               | 0.85          | 0.03             | 8.6                              | 1052          | 9.06x10 <sup>3</sup>       | 0.296                          |
| 8  | 4.90         | 35              | 10.7                   | 3.3                        | 2.0               | 0.77          | 0.03             | 10.6                             | 1052          | 11.2x10 <sup>3</sup>       | 0.408                          |
| 9  | 4.90         | 35              | 15.9                   | 2.2                        | 2.0               | 0.63          | 0.026            | 14.8                             | 1052          | 15.6x10 <sup>3</sup>       | 0.551                          |
| 1  | 7.70         | 35              | 7.4                    | 4.7                        | 1.0               | 0.46          | 0.026            | 2.3                              | 5196          | 11.8x10 <sup>3</sup>       | -                              |
| 2  | 7.70         | 35              | 9.9                    | 3.5                        | 1.0               | 0.40          | 0.073            | 2.7                              | 5196          | 14.2x10 <sup>3</sup>       | 0.136                          |
| 3  | 7.70         | 35              | 14.5                   | 2.4                        | 1.0               | 0.33          | 0.043            | 3.3                              | 5196          | 16.9x10 <sup>3</sup>       | 0.117                          |
| 4  | 7.70         | 35              | 8.2                    | 4.3                        | 1.5               | 0.65          | 0.028            | 3.5                              | 3464          | 12.1x10 <sup>3</sup>       | 0.117                          |
| 5  | 7.70         | 35              | 11.6                   | 3.0                        | 1.5               | 0.55          | 0.021            | 4.5                              | 3464          | 15.7x10 <sup>3</sup>       | 0.208                          |
| 6  | 7.70         | 35              | 14.4                   | 2.4                        | 1.5               | 0.50          | 0.021            | 5.5                              | 3464          | 18.9x10 <sup>3</sup>       | 0.253                          |
| 7  | 7.70         | 35              | 8.6                    | 4.1                        | 2.0               | 0.85          | 0.03             | 5.5                              | 2598          | 14.2x10 <sup>3</sup>       | 0.123                          |
| 8  | 7.70         | 35              | 10.7                   | 3.3                        | 2.0               | 0.77          | 0.03             | 6.8                              | 2598          | 17.5x10 <sup>3</sup>       | 0.175                          |
| 9  | 7.70         | 35              | 15.9                   | 2.2                        | 2.0               | 0.63          | 0.026            | 9.4                              | 2598          | 24.5x10 <sup>3</sup>       | 0.377                          |
| 1  | 11.4         | 35              | 7.4                    | 4.7                        | 1.0               | 0.46          | 0.026            | 1.5                              | 11470         | 17.5x10 <sup>3</sup>       | 0.022                          |
| 2  | 11.4         | 35              | 9.9                    | 3.5                        | 1.0               | 0.40          | 0.073            | 1.8                              | 11470         | 21.0x10 <sup>3</sup>       | 0.057                          |
| 3  | 11.4         | 35              | 14.5                   | 2.4                        | 1.0               | 0.33          | 0.043            | 2.2                              | 11470         | 25.1x10 <sup>3</sup>       | 0.070                          |
| 4  | 11.4         | 35              | 8.2                    | 4.3                        | 1.5               | 0.65          | 0.028            | 2.4                              | 7647          | 17.9x10 <sup>3</sup>       | 0.070                          |
| 5  | 11.4         | 35              | 11.6                   | 3.0                        | 1.5               | 0.55          | 0.021            | 3.1                              | 7647          | 23.3x10 <sup>3</sup>       | 0.114                          |
| 6  | 11.4         | 35              | 14.4                   | 2.4                        | 1.5               | 0.50          | 0.021            | 3.7                              | 7647          | 28.0x10 <sup>3</sup>       | 0.136                          |
| 7  | 11.4         | 35              | 8.6                    | 4.1                        | 2.0               | 0.85          | 0.03             | 3.7                              | 5735          | 21.1x10 <sup>3</sup>       | 0.123                          |
| 8  | 11.4         | 35              | 10.7                   | 3.3                        | 2.0               | 0.77          | 0.03             | 4.6                              | 5735          | 26.0x10 <sup>3</sup>       | 0.162                          |
| 9  | 11.4         | 35              | 15.9                   | 2.2                        | 2.0               | 0.63          | 0.026            | 6.4                              | 5735          | 36.3x10 <sup>3</sup>       | 0.241                          |



Tablo E.3- Devam.

|   |      |    |      |     |     |      |        |      |       |                    |       |
|---|------|----|------|-----|-----|------|--------|------|-------|--------------------|-------|
| 1 | 3.23 | 31 | 7.4  | 4.2 | 1.0 | 0.46 | 0.0304 | 5.3  | 914   | $4.9 \times 10^3$  | 0.263 |
| 2 | 3.23 | 31 | 9.9  | 3.1 | 1.0 | 0.40 | 0.036  | 6.4  | 914   | $5.9 \times 10^3$  | 0.263 |
| 3 | 3.23 | 31 | 14.5 | 2.1 | 1.0 | 0.33 | 0.0314 | 7.6  | 914   | $6.9 \times 10^3$  | 0.418 |
| 4 | 3.23 | 31 | 8.2  | 4.1 | 1.5 | 0.65 | 0.0225 | 9.2  | 610   | $5.6 \times 10^3$  | 0.294 |
| 5 | 3.23 | 31 | 11.6 | 2.7 | 1.5 | 0.55 | 0.0215 | 12.1 | 610   | $7.4 \times 10^3$  | 0.387 |
| 6 | 3.23 | 31 | 14.4 | 2.2 | 1.5 | 0.50 | 0.0302 | 15.5 | 610   | $9.5 \times 10^3$  | 0.433 |
| 7 | 3.23 | 31 | 8.6  | 3.6 | 2.0 | 0.85 | 0.0185 | 14.7 | 457   | $6.7 \times 10^3$  | 0.418 |
| 8 | 3.23 | 31 | 10.7 | 2.9 | 2.0 | 0.77 | 0.0264 | 18.7 | 457   | $8.5 \times 10^3$  | 0.650 |
| 9 | 3.23 | 31 | 15.9 | 2.0 | 2.0 | 0.63 | 0.0349 | 23.3 | 457   | $5.0 \times 10^3$  | 0.805 |
| 1 | 4.90 | 31 | 7.4  | 4.2 | 1.0 | 0.46 | 0.0304 | 3.5  | 2104  | $7.4 \times 10^3$  | 0.163 |
| 2 | 4.90 | 31 | 9.9  | 3.1 | 1.0 | 0.40 | 0.036  | 4.2  | 2104  | $8.9 \times 10^3$  | 0.173 |
| 3 | 4.90 | 31 | 14.5 | 2.1 | 1.0 | 0.33 | 0.0314 | 5.0  | 2104  | $10.5 \times 10^3$ | 0.224 |
| 4 | 4.90 | 31 | 8.2  | 4.1 | 1.5 | 0.65 | 0.0225 | 6.1  | 1403  | $8.5 \times 10^3$  | 0.276 |
| 5 | 4.90 | 31 | 11.6 | 2.7 | 1.5 | 0.55 | 0.0215 | 8.0  | 1403  | $11.2 \times 10^3$ | 0.347 |
| 6 | 4.90 | 31 | 14.4 | 2.2 | 1.5 | 0.50 | 0.0302 | 10.2 | 1403  | $14.3 \times 10^3$ | 0.429 |
| 7 | 4.90 | 31 | 8.6  | 3.6 | 2.0 | 0.85 | 0.0185 | 9.7  | 1052  | $10.2 \times 10^3$ | 0.388 |
| 8 | 4.90 | 31 | 10.7 | 2.9 | 2.0 | 0.77 | 0.0264 | 12.3 | 1052  | $13.0 \times 10^3$ | 0.510 |
| 9 | 4.90 | 31 | 15.9 | 2.0 | 2.0 | 0.63 | 0.0349 | 15.4 | 1052  | $16.2 \times 10^3$ | 0.480 |
| 1 | 7.70 | 31 | 7.4  | 4.2 | 1.0 | 0.46 | 0.0304 | 2.2  | 5196  | $11.6 \times 10^3$ | 0.052 |
| 2 | 7.70 | 31 | 9.9  | 3.1 | 1.0 | 0.40 | 0.036  | 2.7  | 5196  | $14.0 \times 10^3$ | 0.091 |
| 3 | 7.70 | 31 | 14.5 | 2.1 | 1.0 | 0.33 | 0.0314 | 3.2  | 5196  | $16.5 \times 10^3$ | 0.136 |
| 4 | 7.70 | 31 | 8.2  | 4.1 | 1.5 | 0.65 | 0.0225 | 3.9  | 3464  | $15.4 \times 10^3$ | 0.175 |
| 5 | 7.70 | 31 | 11.6 | 2.7 | 1.5 | 0.55 | 0.0215 | 5.1  | 3464  | $17.5 \times 10^3$ | 0.175 |
| 6 | 7.70 | 31 | 14.4 | 2.2 | 1.5 | 0.50 | 0.0302 | 6.5  | 3464  | $22.5 \times 10^3$ | 0.286 |
| 7 | 7.70 | 31 | 8.6  | 3.6 | 2.0 | 0.85 | 0.0185 | 6.2  | 2598  | $16.1 \times 10^3$ | 0.253 |
| 8 | 7.70 | 31 | 10.7 | 2.9 | 2.0 | 0.77 | 0.0264 | 7.8  | 2598  | $20.4 \times 10^3$ | 0.273 |
| 9 | 7.70 | 31 | 15.9 | 2.0 | 2.0 | 0.63 | 0.0349 | 9.8  | 2598  | $25.4 \times 10^3$ | 0.377 |
| 1 | 11.4 | 31 | 7.4  | 4.2 | 1.0 | 0.46 | 0.0304 | 1.5  | 11470 | $17.2 \times 10^3$ | 0.070 |
| 2 | 11.4 | 31 | 9.9  | 3.1 | 1.0 | 0.40 | 0.036  | 1.8  | 11470 | $20.8 \times 10^3$ | 0.070 |
| 3 | 11.4 | 31 | 14.5 | 2.1 | 1.0 | 0.33 | 0.0314 | 2.2  | 11470 | $24.5 \times 10^3$ | 0.061 |
| 4 | 11.4 | 31 | 8.2  | 4.1 | 1.5 | 0.65 | 0.0225 | 2.6  | 7647  | $19.8 \times 10^3$ | 0.092 |
| 5 | 11.4 | 31 | 11.6 | 2.7 | 1.5 | 0.55 | 0.0215 | 3.4  | 7647  | $26.0 \times 10^3$ | 0.127 |
| 6 | 11.4 | 31 | 14.4 | 2.2 | 1.5 | 0.50 | 0.0302 | 4.4  | 7647  | $33.4 \times 10^3$ | 0.175 |
| 7 | 11.4 | 31 | 8.6  | 3.6 | 2.0 | 0.85 | 0.0185 | 4.2  | 5735  | $23.8 \times 10^3$ | 0.132 |
| 8 | 11.4 | 31 | 10.7 | 2.9 | 2.0 | 0.77 | 0.0264 | 5.3  | 5735  | $30.2 \times 10^3$ | 0.189 |
| 9 | 11.4 | 31 | 15.9 | 2.0 | 2.0 | 0.63 | 0.0349 | 6.6  | 5735  | $37.7 \times 10^3$ | 0.338 |



Tablo E.3- Devam.

|   |      |    |      |     |     |      |        |      |       |                    |       |
|---|------|----|------|-----|-----|------|--------|------|-------|--------------------|-------|
| 1 | 3.23 | 23 | 7.4  | 3.1 | 1.0 | 0.46 | 0.0255 | 5.4  | 914   | $5.0 \times 10^3$  | 0.263 |
| 2 | 3.23 | 23 | 9.9  | 2.3 | 1.0 | 0.40 | 0.0249 | 6.6  | 914   | $6.0 \times 10^3$  | 0.464 |
| 3 | 3.23 | 23 | 14.5 | 1.6 | 1.0 | 0.33 | 0.0193 | 7.7  | 914   | $7.0 \times 10^3$  | 0.433 |
| 4 | 3.23 | 23 | 8.2  | 2.8 | 1.5 | 0.65 | 0.0176 | 11.1 | 610   | $6.7 \times 10^3$  | 0.526 |
| 5 | 3.23 | 23 | 11.6 | 2.0 | 1.5 | 0.55 | 0.0236 | 13.3 | 610   | $8.1 \times 10^3$  | 0.511 |
| 6 | 3.23 | 23 | 14.4 | 1.6 | 1.5 | 0.50 | 0.0309 | 16.3 | 610   | $9.9 \times 10^3$  | 0.557 |
| 7 | 3.23 | 23 | 8.6  | 2.7 | 2.0 | 0.85 | 0.0253 | 18.2 | 457   | $8.3 \times 10^3$  | 0.774 |
| 8 | 3.23 | 23 | 10.7 | 2.2 | 2.0 | 0.77 | 0.028  | 19.3 | 457   | $8.8 \times 10^3$  | 0.851 |
| 9 | 3.23 | 23 | 15.9 | 1.5 | 2.0 | 0.63 | 0.0384 | 25.0 | 457   | $11.4 \times 10^3$ | 1.022 |
| 1 | 4.90 | 23 | 7.4  | 3.1 | 1.0 | 0.46 | 0.0255 | 3.6  | 2104  | $7.5 \times 10^3$  | 0.173 |
| 2 | 4.90 | 23 | 9.9  | 2.3 | 1.0 | 0.40 | 0.0249 | 4.3  | 2104  | $9.1 \times 10^3$  | 0.235 |
| 3 | 4.90 | 23 | 14.5 | 1.6 | 1.0 | 0.33 | 0.0193 | 5.0  | 2104  | $10.6 \times 10^3$ | 0.245 |
| 4 | 4.90 | 23 | 8.2  | 2.8 | 1.5 | 0.65 | 0.0176 | 7.3  | 1403  | $10.2 \times 10^3$ | 0.398 |
| 5 | 4.90 | 23 | 11.6 | 2.0 | 1.5 | 0.55 | 0.0236 | 8.8  | 1403  | $12.3 \times 10^3$ | 0.449 |
| 6 | 4.90 | 23 | 14.4 | 1.6 | 1.5 | 0.50 | 0.0309 | 10.7 | 1403  | $15.1 \times 10^3$ | 0.439 |
| 7 | 4.90 | 23 | 8.6  | 2.7 | 2.0 | 0.85 | 0.0253 | 12.0 | 1052  | $12.6 \times 10^3$ | 0.571 |
| 8 | 4.90 | 23 | 10.7 | 2.2 | 2.0 | 0.77 | 0.028  | 12.7 | 1052  | $13.4 \times 10^3$ | 0.592 |
| 9 | 4.90 | 23 | 15.9 | 1.5 | 2.0 | 0.63 | 0.0384 | 16.5 | 1052  | $17.3 \times 10^3$ | 0.776 |
| 1 | 7.70 | 23 | 7.4  | 3.1 | 1.0 | 0.46 | 0.0255 | 2.7  | 5196  | $11.8 \times 10^3$ | 0.071 |
| 2 | 7.70 | 23 | 9.9  | 2.3 | 1.0 | 0.40 | 0.0249 | 2.8  | 5196  | $14.3 \times 10^3$ | 0.117 |
| 3 | 7.70 | 23 | 14.5 | 1.6 | 1.0 | 0.33 | 0.0193 | 3.2  | 5196  | $16.7 \times 10^3$ | 0.169 |
| 4 | 7.70 | 23 | 8.2  | 2.8 | 1.5 | 0.65 | 0.0176 | 4.6  | 3464  | $16.1 \times 10^3$ | 0.247 |
| 5 | 7.70 | 23 | 11.6 | 2.0 | 1.5 | 0.55 | 0.0236 | 5.6  | 3464  | $19.4 \times 10^3$ | 0.253 |
| 6 | 7.70 | 23 | 14.4 | 1.6 | 1.5 | 0.50 | 0.0309 | 6.8  | 3464  | $23.7 \times 10^3$ | 0.351 |
| 7 | 7.70 | 23 | 8.6  | 2.7 | 2.0 | 0.85 | 0.0253 | 7.6  | 2598  | $19.8 \times 10^3$ | 0.331 |
| 8 | 7.70 | 23 | 10.7 | 2.2 | 2.0 | 0.77 | 0.028  | 8.1  | 2598  | $21.0 \times 10^3$ | 0.422 |
| 9 | 7.70 | 23 | 15.9 | 1.5 | 2.0 | 0.63 | 0.0384 | 10.5 | 2598  | $27.2 \times 10^3$ | 0.487 |
| 1 | 11.4 | 23 | 7.4  | 3.1 | 1.0 | 0.46 | 0.0255 | 1.5  | 11470 | $17.5 \times 10^3$ | 0.070 |
| 2 | 11.4 | 23 | 9.9  | 2.3 | 1.0 | 0.40 | 0.0249 | 1.9  | 11470 | $21.2 \times 10^3$ | 0.096 |
| 3 | 11.4 | 23 | 14.5 | 1.6 | 1.0 | 0.33 | 0.0193 | 2.2  | 11470 | $24.7 \times 10^3$ | 0.075 |
| 4 | 11.4 | 23 | 8.2  | 2.8 | 1.5 | 0.65 | 0.0176 | 3.1  | 7647  | $23.8 \times 10^3$ | 0.140 |
| 5 | 11.4 | 23 | 11.6 | 2.0 | 1.5 | 0.55 | 0.0236 | 3.8  | 7647  | $28.7 \times 10^3$ | 0.110 |
| 6 | 11.4 | 23 | 14.4 | 1.6 | 1.5 | 0.50 | 0.0309 | 4.6  | 7647  | $35.1 \times 10^3$ | 0.189 |
| 7 | 11.4 | 23 | 8.6  | 2.7 | 2.0 | 0.85 | 0.0253 | 5.2  | 5735  | $29.4 \times 10^3$ | 0.193 |
| 8 | 11.4 | 23 | 10.7 | 2.2 | 2.0 | 0.77 | 0.028  | 5.5  | 5735  | $31.1 \times 10^3$ | 0.206 |
| 9 | 11.4 | 23 | 15.9 | 1.5 | 2.0 | 0.63 | 0.0384 | 7.1  | 5735  | $40.3 \times 10^3$ | 0.259 |

Tablo E.3- Devam.

|   |      |    |      |      |     |      |   |   |   |   |       |
|---|------|----|------|------|-----|------|---|---|---|---|-------|
| 1 | 3.23 | 14 | 7.4  | 1.89 | 1.0 | 0.46 | - | - | - | - | 0.557 |
| 2 | 3.23 | 14 | 9.9  | 1.41 | 1.0 | 0.40 | - | - | - | - | 0.217 |
| 3 | 3.23 | 14 | 14.5 | 0.97 | 1.0 | 0.33 | - | - | - | - | Göm.  |
| 4 | 3.23 | 14 | 8.2  | 1.71 | 1.5 | 0.65 | - | - | - | - | 0.851 |
| 5 | 3.23 | 14 | 11.6 | 1.21 | 1.5 | 0.55 | - | - | - | - | 0.82  |
| 6 | 3.23 | 14 | 14.4 | 0.97 | 1.5 | 0.50 | - | - | - | - | Göm.  |
| 7 | 3.23 | 14 | 8.6  | 1.68 | 2.0 | 0.85 | - | - | - | - | 1.13  |
| 8 | 3.23 | 14 | 10.7 | 1.31 | 2.0 | 0.77 | - | - | - | - | 0.759 |
| 9 | 3.23 | 14 | 15.9 | 0.88 | 2.0 | 0.63 | - | - | - | - | 1.331 |
| 1 | 4.90 | 14 | 7.4  | 1.89 | 1.0 | 0.46 | - | - | - | - | 0.265 |
| 2 | 4.90 | 14 | 9.9  | 1.41 | 1.0 | 0.40 | - | - | - | - | 0.168 |
| 3 | 4.90 | 14 | 14.5 | 0.97 | 1.0 | 0.33 | - | - | - | - | Göm.  |
| 4 | 4.90 | 14 | 8.2  | 1.71 | 1.5 | 0.65 | - | - | - | - | 0.602 |
| 5 | 4.90 | 14 | 11.6 | 1.21 | 1.5 | 0.55 | - | - | - | - | 0.449 |
| 6 | 4.90 | 14 | 14.4 | 0.97 | 1.5 | 0.50 | - | - | - | - | Göm.  |
| 7 | 4.90 | 14 | 8.6  | 1.68 | 2.0 | 0.85 | - | - | - | - | 0.582 |
| 8 | 4.90 | 14 | 10.7 | 1.31 | 2.0 | 0.77 | - | - | - | - | 0.643 |
| 9 | 4.90 | 14 | 15.9 | 0.88 | 2.0 | 0.63 | - | - | - | - | 1.163 |
| 1 | 7.70 | 14 | 7.4  | 1.89 | 1.0 | 0.46 | - | - | - | - | 0.140 |
| 2 | 7.70 | 14 | 9.9  | 1.41 | 1.0 | 0.40 | - | - | - | - | Göm.  |
| 3 | 7.70 | 14 | 14.5 | 0.97 | 1.0 | 0.33 | - | - | - | - | Göm.  |
| 4 | 7.70 | 14 | 8.2  | 1.71 | 1.5 | 0.65 | - | - | - | - | 0.214 |
| 5 | 7.70 | 14 | 11.6 | 1.21 | 1.5 | 0.55 | - | - | - | - | 0.175 |
| 6 | 7.70 | 14 | 14.4 | 0.97 | 1.5 | 0.50 | - | - | - | - | Göm.  |
| 7 | 7.70 | 14 | 8.6  | 1.68 | 2.0 | 0.85 | - | - | - | - | 0.279 |
| 8 | 7.70 | 14 | 10.7 | 1.31 | 2.0 | 0.77 | - | - | - | - | 0.118 |
| 9 | 7.70 | 14 | 15.9 | 0.88 | 2.0 | 0.63 | - | - | - | - | 0.273 |
| 1 | 11.4 | 14 | 7.4  | 1.89 | 1.0 | 0.46 | - | - | - | - | Göm.  |
| 2 | 11.4 | 14 | 9.9  | 1.41 | 1.0 | 0.40 | - | - | - | - | Göm.  |
| 3 | 11.4 | 14 | 14.5 | 0.97 | 1.0 | 0.33 | - | - | - | - | Göm.  |
| 4 | 11.4 | 14 | 8.2  | 1.71 | 1.5 | 0.65 | - | - | - | - | Göm.  |
| 5 | 11.4 | 14 | 11.6 | 1.21 | 1.5 | 0.55 | - | - | - | - | Göm.  |
| 6 | 11.4 | 14 | 14.4 | 0.97 | 1.5 | 0.50 | - | - | - | - | Göm.  |
| 7 | 11.4 | 14 | 8.6  | 1.68 | 2.0 | 0.85 | - | - | - | - | Göm.  |
| 8 | 11.4 | 14 | 10.7 | 1.31 | 2.0 | 0.77 | - | - | - | - | Göm.  |
| 9 | 11.4 | 14 | 15.9 | 0.88 | 2.0 | 0.63 | - | - | - | - | Göm.  |



Tablo E.4-1/5 kıyı şev eğiminde hızlar.

|    | Su<br>derinliği | Dalga<br>periyodu | Dalga<br>yüksek.       | Dalga<br>uzunluğu     | Dalga<br>yüksek. | Dalga<br>uzunluğu | Hız<br>Cnoidal | Hız<br>Sream | Hız<br>Lineer |
|----|-----------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------|---------------|
| No | d<br>(m)        | T<br>(sn)         | H <sub>0</sub><br>(cm) | L <sub>0</sub><br>(m) | H <sub>i</sub>   | L <sub>i</sub>    | u<br>(m/s)     | u<br>(m/s)   | u<br>(m/s)    |
| 1  | 35              | 1.0               | 4.90                   | 1.56                  | 4.40             | 1.50              | 0.14           | 0.13         | -             |
| 2  | 35              | 0.8               | 9.36                   | 1.00                  | 9.00             | 1.14              | .28            | -            | 0.08          |
| 3  | 35              | 0.9               | 13.48                  | 1.26                  | 12.70            | 1.32              | 0.26           | -            | 0.11          |
| 4  | 35              | 1.30              | 8.08                   | 2.64                  | 7.40             | 2.25              | 0.21           | 0.26         | 0.142         |
| 5  | 35              | 1.10              | 11.60                  | 1.96                  | 10.60            | 1.75              | 0.25           | -            | 0.11          |
| 6  | 35              | 1.47              | 10.43                  | 3.35                  | 9.70             | 2.51              | 0.26           | 0.34         | 0.19          |
| 7  | 35              | 1.86              | 11.23                  | 5.40                  | 10.30            | 3.36              | 0.31           | 0.38         | 0.24          |
| 8  | 35              | 2.64              | 7.70                   | 10.83                 | 8.00             | 5.10              | 0.31           | 0.37         | 0.2           |
| 9  | 35              | 2.60              | 8.64                   | 10.55                 | 9.20             | 5.40              | 0.31           | 0.35         | 0.23          |
| 10 | 35              | 2.33              | 9.48                   | 8.46                  | 9.70             | 4.65              | 0.33           | 0.37         | 0.23          |
| 11 | 35              | 2.58              | 11.97                  | 10.37                 | 13.20            | 4.61              | 0.4            | 0.5          | 0.33          |
| 12 | 35              | 2.28              | 15.74                  | 8.07                  | 16.20            | 4.22              | 0.41           | 0.51         | 0.39          |
| 13 | 35              | 2.37              | 15.04                  | 8.77                  | 15.90            | 4.25              | 0.44           | 0.58         | 0.38          |
| 3  | 28              | 0.9               | 13.48                  | 1.26                  | 12.40            | 1.24              | 0.24           | 0.25         | 0.14          |
| 6  | 28              | 1.47              | 10.43                  | 3.35                  | 10.40            | 2.40              | 0.26           | 0.25         | 0.24          |
| 8  | 28              | 2.64              | 7.70                   | 10.83                 | 9.50             | 3.90              | 0.30           | 0.25         | 0.25          |
| 10 | 28              | 2.33              | 9.48                   | 8.45                  | 11.96            | 3.50              | 0.34           | 0.30         | 0.33          |
| 11 | 28              | 2.58              | 11.97                  | 10.37                 | 12.70            | 3.40              | 0.50           | 0.32         | 0.34          |
| 3  | 24              | 0.9               | 13.48                  | 1.26                  | 11.9             | 1.20              | 0.23           | 0.25         | 0.17          |
| 6  | 24              | 1.47              | 10.43                  | 3.35                  | 11.15            | 2.30              | 0.30           | 0.28         | 0.28          |
| 8  | 24              | 2.64              | 7.70                   | 10.83                 | 9.30             | 3.10              | 0.30           | 0.27         | -             |
| 10 | 24              | 2.33              | 9.48                   | 8.45                  | 13.00            | 2.70              | 0.35           | 0.35         | -             |
| 11 | 24              | 2.58              | 11.97                  | 10.37                 | 12.90            | 2.70              | 0.35           | 0.34         | -             |
| 3  | 22              | 0.9               | 13.48                  | 1.26                  | 11.70            | 1.20              | 0.22           | -            | 0.16          |
| 6  | 22              | 1.47              | 10.43                  | 3.35                  | 11.50            | 2.20              | 0.31           | 0.3          | 0.32          |
| 8  | 22              | 2.64              | 7.70                   | 10.83                 | 8.40             | 2.88              | 0.25           | 0.25         | -             |
| 10 | 22              | 2.33              | 9.48                   | 8.45                  | 12.20            | 2.50              | 0.33           | 0.34         | -             |
| 11 | 22              | 2.58              | 11.97                  | 10.37                 | 13.06            | 2.40              | 0.34           | 0.36         | -             |



Tablo E.5-1/10 kıyı şev eğiminde hızlar.

|    | Su<br>derinliği | Dalga<br>periyodu | Dalga<br>yüksek.       | Dalga<br>uzunluğu     | Dalga<br>yüksek. | Dalga<br>uzunluğu | Hız<br>Cnoidal | Hız<br>Sream | Hız<br>Lineer |
|----|-----------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------|---------------|
| No | d<br>(m)        | T<br>(sn)         | H <sub>0</sub><br>(cm) | L <sub>0</sub><br>(m) | H <sub>i</sub>   | L <sub>i</sub>    | u<br>(m/s)     | u<br>(m/s)   | u<br>(m/s)    |
| 1  | 35              | 1.0               | 7.40                   | 1.56                  | 6.80             | 1.5               | 0.175          | 0.142        | -             |
| 2  | "               | 1.0               | 9.90                   | 1.56                  | 9.20             | 1.5               | 0.210          | 0.185        | -             |
| 3  | "               | 1.0               | 14.50                  | 1.56                  | 13.40            | 1.5               | 0.251          | 0.246        | -             |
| 4  | "               | 1.5               | 8.20                   | 3.51                  | 7.70             | 2.6               | 0.179          | 0.175        | 0.140         |
| 5  | "               | 1.5               | 11.60                  | 3.51                  | 10.50            | 2.6               | 0.233          | 0.229        | 0.191         |
| 6  | "               | 1.5               | 14.41                  | 3.51                  | 13.50            | 2.6               | 0.280          | 0.28         | 0.245         |
| 7  | "               | 2.0               | 8.60                   | 6.24                  | 8.20             | 3.6               | 0.211          | 0.199        | 0.192         |
| 8  | "               | 2.0               | 10.70                  | 6.24                  | 10.20            | 3.7               | 0.260          | 0.239        | 0.239         |
| 9  | "               | 2.0               | 15.90                  | 6.24                  | 15.30            | 3.8               | 0.363          | 0.269        | 0.359         |
| 1  | 31              | 1.0               | 7.40                   | 1.56                  | 6.80             | 1.5               | 0.172          | 0.154        | -             |
| 2  | "               | 1.0               | 9.90                   | 1.56                  | 9.30             | 1.4               | 0.208          | 0.201        | -             |
| 3  | "               | 1.0               | 14.50                  | 1.56                  | 13.30            | 1.5               | 0.245          | 0.265        | -             |
| 4  | "               | 1.5               | 8.20                   | 3.51                  | 7.90             | 2.4               | 0.198          | 0.192        | 0.144         |
| 5  | "               | 1.5               | 11.60                  | 3.51                  | 10.80            | 2.5               | 0.26           | 0.250        | 0.226         |
| 6  | "               | 1.5               | 14.41                  | 3.51                  | 15.70            | 2.6               | 0.334          | 0.331        | 0.328         |
| 7  | "               | 2.0               | 8.60                   | 6.24                  | 8.30             | 3.4               | 0.238          | 0.215        | 0.216         |
| 8  | "               | 2.0               | 10.70                  | 6.24                  | 10.80            | 3.5               | 0.302          | 0.262        | 0.281         |
| 9  | "               | 2.0               | 15.90                  | 6.24                  | 15.10            | 3.5               | 0.377          | 0.345        | 0.394         |
| 1  | 23              | 1.0               | 7.40                   | 1.56                  | 6.70             | 1.3               | 0.175          | 0.176        | -             |
| 2  | "               | 1.0               | 9.90                   | 1.56                  | 9.10             | 1.4               | 0.212          | 0.226        | -             |
| 3  | "               | 1.0               | 14.50                  | 1.56                  | 12.90            | 1.4               | 0.247          | 0.290        | -             |
| 4  | "               | 1.5               | 8.20                   | 3.51                  | 8.10             | 2.2               | 0.238          | 0.228        | 0.198         |
| 5  | "               | 1.5               | 11.60                  | 3.51                  | 10.40            | 2.4               | 0.287          | 0.274        | 0.254         |
| 6  | "               | 1.5               | 14.41                  | 3.51                  | 14.70            | 2.4               | 0.351          | 0.354        | 0.358         |
| 7  | "               | 2.0               | 8.60                   | 6.24                  | 9.10             | 3.0               | 0.294          | 0.260        | 0.275         |
| 8  | "               | 2.0               | 10.70                  | 6.24                  | 10.10            | 2.8               | 0.311          | 0.282        | 0.306         |
| 9  | "               | 2.0               | 15.90                  | 6.24                  | 16.20            | 2.9               | -              | 0.403        | -             |

| Dalga 11       | Dalga 12       | Dalga 13       |
|----------------|----------------|----------------|
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |
| H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> | H <sub>0</sub> |
| L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> |
| H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> | H <sub>i</sub> |
| L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> | L <sub>i</sub> |

Tablo E.6- 1/5 kıyı şev eğiminde sığlaşma tablosu.

| Dalga 1 |         | Dalga 2 |         | Dalga 3 |         | Dalga 4 |         | Dalga 5 |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ |
| 0.224   | .898    | 0.35    | 0.962   | 0.277   | 0.942   | 0.132   | 0.916   | 0.178   | 0.914   |
| 0.202   | 0.918   | 0.315   | 0.951   | 0.25    | 0.93    | 0.116   | 0.916   | 0.153   | 0.914   |
| 0.154   | 0.918   | 0.25    | 0.962   | 0.242   | 0.84    | 0.09    | 0.99    | 0.143   | 0.914   |
| 0.119   | 0.918   | 0.22    | 0.918   | 0.222   | 0.92    | 0.083   | 1.013   | 0.122   | 0.940   |
| 0.096   | 1.071   | 0.17    | 0.908   | 0.206   | 0.95    | 0.064   | 1.04    | 0.117   | 1.000   |
| 0.083   | 1.097   | 0.15    | 0.846   | 0.198   | 0.89    | 0.057   | 1.152   | 0.102   | 1.000   |
| 0.064   | 1.071   | 0.13    | 0.855   | 0.17    | 0.87    | 0.047   | 1.164   | 0.077   | 1.000   |
| 0.051   | 1.122   | 0.12    | 0.929   | 0.147   | 0.83    | 0.038   | 1.176   | 0.066   | 0.990   |
| 0.038   | 1.081   | 0.1     | 0.833   | 0.10    | 0.86    | 0.03    | 1.04    | 0.051   | 0.910   |
|         |         | 0.08    | 0.732   | 0.095   | 0.91    | 0.0865  | 0.99    | 0.041   | 0.720   |
|         |         | 0.07    | 0.641   | 0.08    | 0.84    | 0.0227  | 0.916   | 0.031   | 0.590   |
|         |         |         |         | 0.06    | 0.786   |         |         |         |         |
|         |         |         |         | 0.055   | 0.66    |         |         |         |         |

| Dalga 6 |         | Dalga 7 |         | Dalga 8 |         | Dalga 9 |         | Dalga 10 |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$  | $H/H_0$ |
| 0.065   | 0.93    | 0.065   | 0.89    | 0.032   | 1.039   | 0.033   | 1.069   | 0.041    | 1.027   |
| 0.058   | 0.959   | 0.058   | 0.925   | 0.029   | 1.136   | 0.029   | 1.134   | 0.037    | 1.086   |
| 0.052   | 0.997   | 0.056   | 0.942   | 0.026   | 1.234   | 0.0289  | 1.18    | 0.036    | 1.191   |
| 0.048   | 1.016   | 0.052   | 0.942   | 0.022   | 1.208   | 0.0265  | 1.296   | 0.033    | 1.262   |
| 0.046   | 1.046   | 0.048   | 0.959   | 0.02    | 1.091   | 0.0218  | 1.33    | 0.031    | 1.35    |
| 0.043   | 1.093   | 0.044   | 1.098   | 0.017   | 0.987   | 0.0095  | 1.32    | 0.028    | 1.374   |
| 0.034   | 1.131   | 0.041   | 1.175   | 0.009   | 1.182   | 0.0066  | 1.527   | 0.026    | 1.29    |
| 0.031   | 1.255   | 0.037   | 1.141   | 0.006   | 1.558   | 0.0057  | 1.527   | 0.024    | 1.27    |
| 0.024   | 1.198   | 0.031   | 1.089   |         |         |         |         | 0.018    | 1.263   |
| 0.022   | 1.170   | 0.028   | 1.054   |         |         |         |         | 0.012    | 1.158   |
| 0.018   | 1.151   | 0.024   | 1.003   |         |         |         |         | 0.008    | 1.134   |
| 0.015   | 1.055   | 0.018   | 0.994   |         |         |         |         |          |         |
|         |         | 0.042   | 0.994   |         |         |         |         |          |         |
|         |         |         | 1.132   |         |         |         |         |          |         |

| Dalga 11 |         | Dalga 12 |         | Dalga 13 |         |
|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| $d/L_0$  | $H/H_0$ | $d/L_0$  | $H/H_0$ | $d/L_0$  | $H/H_0$ |
| 0.029    | 1.044   | 0.043    | 1.029   | 0.04     | 1.057   |
| 0.027    | 10.61   | 0.038    | 1.06    | 0.035    | 1.097   |
| 0.024    | 0.069   | 0.035    | 10.87   | 0.032    | 1.110   |
| 0.022    | 1.086   | 0.032    | 1.118   | 0.030    | 1.164   |
| 0.018    | 1.111   | 0.030    | 1.175   | 0.027    | 1.223   |
| 1.014    | 1.111   | 0.029    | 1.144   | 0.025    | 1.190   |
| 0.011    | 1.153   | 0.027    | 1.105   | 0.023    | 1.137   |
| 0.010    | 1.145   | 0.025    | 1.075   | 0.019    | 1.097   |
|          |         | 0.021    | 0.972   | 0.015    | 1.090   |
|          |         | 0.019    | 0.953   | 0.014    | 1.017   |
|          |         |          |         | 0.009    | 0.878   |



Tablo E.7- 1/10 kıyı şev eğiminde sığlaşma tablosu.

| Dalga 1 |         | Dalga 2 |         | Dalga 3 |         | Dalga 4 |         | Dalga 5 |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ |
| 0.205   | 0.923   | 0.205   | 0.923   | 0.205   | 0.929   | 0.091   | 0.934   | 0.091   | 0.899   |
| 0.189   | 0.912   | 0.172   | 0.906   | 0.172   | 0.921   | 0.077   | 0.963   | 0.077   | 0.903   |
| 0.153   | 0.901   | 0.128   | 0.906   | 0.166   | 0.956   | 0.071   | 0.974   | 0.065   | 0.896   |
| 0.134   | 0.901   | 0.115   | 0.898   | 0.16    | 0.945   | 0.065   | 0.984   | 0.06    | 0.931   |
| 0.128   | 0.923   | 0.108   | 0.881   | 0.153   | 0.898   | 0.062   | 0.994   | 0.057   | 0.982   |
| 0.089   | 0.923   | 0.099   | 0.881   | 0.147   | 0.893   | 0.057   | 0.963   | 0.054   | 0.996   |
| 0.086   | 0.957   | 0.096   | 0.898   | 0.14    | 0.887   | 0.051   | 0.944   | 0.05    | 1.010   |
| 0.083   | 0.969   | 0.089   | 0.923   | 0.134   | 0.869   | 0.045   | 0.933   | 0.048   | 1.046   |
| 0.079   | 1.003   | 0.083   | 0.932   | 0.128   | 0.864   | 0.042   | 0.944   | 0.045   | 1.053   |
| 0.076   | 1.014   | 0.079   | 0.949   | 0.121   | 0.84    | 0.04    | 0.974   | 0.042   | 1.053   |
| 0.07    | 0.946   | 0.076   | 0.94    | 0.115   | 0.823   | 0.037   | 0.944   | 0.041   | 1.068   |
| 0.067   | 0.935   | 0.07    | 0.906   | 0.102   | 0.777   | 0.034   | 1.005   | 0.04    | 1.075   |
| 0.063   | 0.901   | 0.067   | 0.889   | 0.096   | 0.766   | 0.031   | 1.024   | 0.038   | 1.025   |
| 0.06    | 0.845   | 0.063   | 0.873   | 0.089   | 0.748   | 0.028   | 1.055   | 0.037   | 0.974   |
| 0.057   | 0.834   | 0.06    | 0.798   | 0.083   | 0.726   | 0.027   | 1.015   | 0.035   | 0.953   |
| 0.047   | 0.878   | 0.057   | 0.763   | 0.076   | 0.679   | 0.025   | 0.954   | 0.032   | 0.939   |
| 0.041   | 0.889   | 0.051   | 0.697   | 0.073   | 0.662   | 0.024   | 0.944   | 0.031   | 0.931   |
| 0.035   | 0.788   | 0.038   | 0.688   | 0.07    | 0.622   | 0.021   | 0.933   | 0.028   | 0.910   |
| 0.025   | 0.709   | 0.035   | 0.579   | 0.063   | 0.576   | 0.015   | 0.923   | 0.023   | 0.867   |
| 0.022   | 0.608   | 0.031   | 0.546   | 0.06    | 0.472   | 0.014   | 0.842   | 0.02    | 0.838   |
| 0.019   | 0.518   | 0.028   | 0.411   | 0.054   | 0.432   |         |         | 0.014   | 0.752   |
|         |         |         |         | 0.047   | 0.403   |         |         | 0.011   | 0.602   |
|         |         |         |         | 0.038   | 0.373   |         |         |         |         |

| Dalga 6 |         | Dalga 7 |         | Dalga 8 |         | Dalga 9 |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ | $d/L_0$ | $H/H_0$ |
| 0.091   | 0.934   | 0.051   | 0.951   | 0.051   | 0.952   | 0.051   | 0.96    |
| 0.077   | 1.01    | 0.047   | 0.962   | 0.047   | 1.01    | 0.043   | 1.004   |
| 0.068   | 1.053   | 0.043   | 1.005   | 0.042   | 1.02    | 0.039   | 1.019   |
| 0.065   | 1.022   | 0.042   | 1.015   | 0.033   | 1.033   | 0.036   | 1.05    |
| 0.062   | 0.965   | 0.039   | 1.036   | 0.032   | 1.063   | 0.035   | 0.906   |
| 0.058   | 0.959   | 0.03    | 1.036   | 0.029   | 1.085   | 0.033   | 0.95    |
| 0.048   | 0.953   | 0.027   | 1.005   | 0.027   | 1.071   | 0.031   | 1.01    |
| 0.045   | 0.978   | 0.024   | 0.941   | 0.025   | 1.071   | 0.029   | 1.079   |
| 0.042   | 0.984   | 0.022   | 0.93    | 0.024   | 1.071   | 0.026   | 1.091   |
| 0.04    | 0.978   | 0.021   | 0.972   | 0.022   | 1.071   | 0.024   | 1.056   |
| 0.037   | 0.953   | 0.019   | 1.015   | 0.021   | 1.174   | 0.020   | 1.038   |
| 0.031   | 0.933   | 0.017   | 1.099   | 0.018   | 1.183   | 0.019   | 0.923   |
| 0.025   | 0.896   | 0.015   | 1.099   | 0.017   | 1.191   | 0.018   | 0.90    |
| 0.02    | 0.845   | 0.014   | 1.057   | 0.016   | 1.123   | 0.015   | 0.848   |
| 0.017   | 0.767   | 0.013   | 1.026   | 0.014   | 1.104   | 0.014   | 0.791   |
| 0.014   | 0.656   | 0.013   | 0.994   | 0.013   | 0.952   |         |         |
| 0.026   | 0.561   | 0.009   | 0.983   | 0.011   | 0.952   |         |         |
| 0.011   | 0.423   | 0.007   | 0.941   | 0.099   | 0.919   |         |         |
|         |         | 0.006   | 0.845   | 0.008   | 0.867   |         |         |
|         |         |         |         | 0.007   | 0.800   |         |         |



Tablo E.8- 1/5 kıyı şev eğiminde boyutsuz kayma gerilmeleri.

| Dalga 1 |               | Dalga 2 |               | Dalga 3 |               | Dalga 4 |               | Dalga 5 |               |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ |
| 1.224   | 2.965         | 0.641   | 2.51          | 0.445   | 2.365         | 0.743   | 1.746         | 0.517   | 3.27          |
| 1.633   | 3.012         | 0.855   | 2.1           | 0.593   | 0.635         | 0.991   | 1.884         | 0.69    | 2.136         |
| 2.449   | 2.636         | 1.068   | 1.417         | 0.742   | 1.282         | 1.238   | 0.885         | 0.862   | 2.050         |
| 2.653   | 2.726         | 1.282   | 0.718         | 0.89    | 1.101         | 1.486   | 1.212         | 1.034   | 1.631         |
| 3.061   | 2.595         | 1.389   | 1.547         | 0.964   | 2.108         | 1.610   | 1.421         | 1.121   | 1.962         |
| 3.469   | 2.038         | 1.603   | 1.29          | 1.113   | 1.377         | 1.858   | 1.653         | 1.293   | 1.973         |
| 4.49    | 1.968         | 1.816   | 1.186         | 1.261   | 1.264         | 2.105   | 1.343         | 1.466   | 1.342         |
| 4.898   | 0.796         | 2.35    | 1.484         | 1.632   | 1.402         | 2.724   | 1.443         | 1.897   | 1.299         |
|         |               | 2.564   | 1.55          | 1.78    | 1.71          | 2.972   | 2.233         | 2.069   | 1.265         |

| Dalga 6 |               | Dalga 7 |               | Dalga 8 |               | Dalga 9 |               | Dalga 10 |               |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|----------|---------------|
| $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$  | $\tau/\tau_0$ |
| 0.575   | 2.778         | 0.534   | 1.889         | 0.779   | 1.392         | 0.694   | 1.749         | 0.633    | 2.608         |
| 0.767   | 1.527         | 0.712   | 1.318         | 1.039   | 0.835         | 0.926   | 1.872         | 0.844    | 2.037         |
| 0.959   | 1.823         | 0.89    | 1.182         | 1.299   | 0.794         | 1.157   | 1.351         | 1.055    | 1.716         |
| 1.151   | 0.632         | 1.069   | 1.215         | 1.558   | 0.841         | 1.389   | 0.929         | 1.266    | 1.564         |
| 1.246   | 1.321         | 1.158   | 1.16          | 1.688   | 1.170         | 1.505   | 1.125         | 1.371    | 1.984         |
| 1.438   | 1.863         | 1.336   | 1.745         | 1.948   | 1.414         | 1.736   | 1.018         | 1.582    | 1.888         |
| 1.63    | 0.3           | 1.514   | 0.698         | 2.208   | 1.054         | 1.968   | 0.993         | 1.793    | 1.749         |
| 2.109   | 1.597         | 1.959   | 0.794         | 2.857   | 1.136         | 2.546   | 1.51          | 2.321    | 1.297         |
| 2.301   | 1.010         | 2.137   | 1.923         | 3.117   | 0.865         | 2.778   | 1.254         | 2.532    | 1.577         |

| Dalga 11 |               | Dalga 12 |               | Dalga 13 |               |
|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
| $d/H_0$  | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$  | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$  | $\tau/\tau_0$ |
| 0.501    | 0.957         | 0.381    | 2.695         | 0.399    | 0.97          |
| 0.668    | 1.534         | 0.508    | 1.387         | 0.532    | 2.512         |
| 0.835    | 1.186         | 0.635    | 1.86          | 0.665    | 0.689         |
| 1.003    | 0.89          | 0.762    | 1.172         | 0.798    | 2.043         |
| 1.086    | 0.809         | 0.826    | 1.034         | 0.865    | 0.47          |
| 1.253    | 1.41          | 0.953    | 4.2           | 0.997    | 2.04          |
| 1.42     | 1.08          | 1.080    | 0.863         | 1.130    | 2.201         |
| 1.838    | 1.10          | 1.398    | 1.143         | 1.463    | 1.281         |
| 2.005    | 0.555         | 1.525    | 0.722         | 1.596    | 1.775         |



Tablo E.9- 1/10 kıyı şev eğiminde boyutsuz kayma gerilmeleri.

| Dalga 1 |               | Dalga 2 |               | Dalga 3 |               | Dalga 4 |               | Dalga 5 |               |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ |
| 3.65    | 1.383         | 2.72    | 1.202         | 1.865   | 1.196         | 3.52    | 1.291         | 2.58    | 1.05          |
| 3.081   | 1.666         | 2.295   | 1.166         | 1.576   | 1.417         | 2.97    | 1.297         | 2.18    | 1.17          |
| 2.09    | 2.78          | 1.56    | 2.66          | 1.071   | 2.539         | 2.02    | 2.74          | 1.48    | 2.89          |
| 1.82    | 2.99          | 1.359   | 2.477         | 0.93    | 2.316         | 1.76    | 2.51          | 1.29    | 2.18          |
| 1.62    | 2.605         | 1.208   | 2.65          | 0.829   | 2.567         | 1.565   | 2.74          | 1.15    | 2.68          |

| Dalga 6 |               | Dalga 7 |               | Dalga 8 |               | Dalga 9 |               |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ | $d/H_0$ | $\tau/\tau_0$ |
| 1.873   | 0.98          | 3.3     | 0.694         | 2.65    | 0.9           | 1.698   | 0.643         |
| 1.582   | 0.94          | 2.79    | 0.74          | 2.24    | 0.86          | 1.434   | 0.935         |
| 1.076   | 2.076         | 1.89    | 1.65          | 1.52    | 1.82          | 0.975   | 1.727         |
| 0.94    | 1.9           | 1.65    | 1.337         | 1.32    | 1.355         | 0.849   | 0.964         |
| 0.83    | 2.49          | 1.47    | 1.81          | 1.19    | 1.87          | 0.755   | 1.492         |



## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Esin Çevik  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : İstanbul, 06/03/1964  
**Medeni Durumu** : Evli  
**Öğrenim Durumu** :

|               |           |                                                                                |
|---------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| İlkokul       | 1970-1975 | Reşat Nuri Güntekin İlkokulu- İstanbul                                         |
| Orta-Lise     | 1975-1981 | Kadıköy Kâzım İşmen Lisesi - İstanbul                                          |
| Üniversite    | 1981-1987 | Orta Doğu Teknik Üniversitesi<br>Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl. - Ankara           |
| Yüksek Lisans | 1987-1989 | ODTÜ İnşaat Müh.<br>Kıyı ve Liman Müh.                                         |
| İhtisas Prog. | 1989-1990 | İstanbul Üniv. İşletme İktisadi Enstitüsü<br>Deniz İşletmeciliği İhtisas Prog. |
| Doktora       | 1993- ..  | Yıldız Tek. Üniv. İnş. Fak. İnş. Müh. Böl.<br>Hidrolik Anabilim Dalı.-İstanbul |

### Mesleki Tecrübeleri

:  
1987-1989 Aydın Pelin-Can Binzet Müş. Müh. A.Ş.  
Statik ve Betonarme Hesap Müh.  
1991-1992 İF İnşaat Müş. Müh. Ltd. Şti.  
Statik ve Betonarme Hesap Müh.  
1992-1993 S.S. Göksu Evleri Arsa ve Kon. Yapı Koop  
Satın Alma Müd.  
1995- ... Yıldız Teknik Üniversitesi  
İnş. Fak. İnş. Müh. Böl.  
Hidrolik Anabilim Dalı Araş. Gör.

**Yabancı Dili** : İngilizce (İyi)





