

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DALGA ETKİSİNDEKİ SU ALTI BORUSU**  
**ALTINDA ZAMANA BAĞLI OLARAK OLUŞAN**  
**OYULMALARIN ARAŞTIRILMASI**

**Mustafa DOĞAN**

**Temmuz, 2013**  
**İZMİR**

**DALGA ETKİSİNDEKİ SU ALTI BORUSU  
ALTINDA ZAMANA BAĞLI OLARAK OLUŞAN  
OYULMALARIN ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik – Hidroloji ve Su Kaynakları  
Programı**

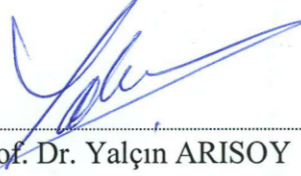
**Mustafa DOĞAN**

**Temmuz, 2013**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MUSTAFA DOĞAN, tarafından YALÇIN ARISOY, PROF. DR. yönetiminde hazırlanan “DALGA ETKİSİNDEKİ SU ALTI BORUSU ALTINDA ZAMANA BAĞLI OLARAK OLUŞAN OYUMLARIN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



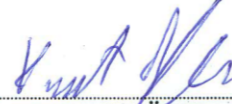
Prof. Dr. Yalçın ARISOY

Yönetici



Prof. Dr. M. Şükrü GÜNEY

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Prof. Dr. Davut ÖZDAĞLAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi




Prof. Dr. Esin ÇEVİK

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Birol KAYA

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca, verdiği destek, yol göstericilik ve tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı, saygı değer hocam Prof. Dr. Yalçın ARISOY'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez izleme komitemdeki hocalarım Prof. Dr. M. Şükrü GÜNEY ve Prof. Dr. Davut ÖZDAĞLAR'a da desteklerinden ve yapıcı eleştirilerinden dolayı müteşekkirim.

Hidrolik Laboratuvarımızın kurucusu, tez çalışmalarımında desteğini daima gördüğüm ve yol göstericiliğine sürekli başvurduğum değerli hocam Prof. Dr. S. Turhan ACATAY'a teşekkürlerimi saygılarımla bildiririm. Hocam, Prof. Dr. Ertuğrul BENZEDEN'e istatistiksel konulardaki yol göstericiliğinden dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın her döneminde bana sabırla destek veren ve her zaman yanımda olan değerli eşim Meryem DOĞAN'a ve varlığıyla sağladığı manevi katkıdan dolayı oğlum Turan DOĞAN'a minnettarım.

Beni yetiştiren ve bugünlere gelmemde büyük emekleri olan değerli annem Aysel DOĞAN'a teşekkürlerimi sunar, tez çalışmamı 2011 yılı temmuz ayında kaybettiğim değerli babam Turan DOĞAN'a ithaf ederim.

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarındaki değerli mesai arkadaşlarıma, Teknisyenimiz İsa ÜSTÜNDAĞ'a ve deneylerde çok yardımını gördüğüm İnş. Müh. Vahid ABDİ'ye müteşekkirim.

Tez çalışmalarımı, hem 2211 kodlu *Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı* bursu ile hem de 111M550 numaralı araştırma projesi ile destekleyen *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu*'na ve 2010.KB.FEN.023 numaralı bilimsel araştırma projesi ile destekleyen *Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü*'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Mustafa DOĞAN

# DALGA ETKİSİNDEKİ SU ALTI BORUSU ALTINDA ZAMANA BAĞLI OLARAK OLUŞAN OYULMALARIN ARAŞTIRILMASI

## ÖZ

Son yıllarda gelişen teknoloji nedeniyle, su altı boru hatları kıyı mühendisliği uygulamalarında yaygın kullanılan yapılar arasında yer almaktadır. Bu yapılar deniz deşarjı sistemlerinde, petrol ve doğalgaz iletiminde, hatta kablolu iletişim araçlarının deniz geçişlerinde kullanım alanı bulmakta; bu nedenle, ekonomik ömürleri süresince dayanımlarının ve stabilitelerinin sürdürülmesi hayati önem taşımaktadır. Deniz ortamında su altı borularının yanal stabilitelerini etkileyen dinamik ve tekrarlı etkiler esas olarak kararlı akıntı ve dalga hareketinden kaynaklanmaktadır.

Su altı borusu etrafında kararlı akıntı etkisi ile oluşan akım ve aşınabilir zeminde meydana gelen oyulmalar çok sayıda araştırmacı ve mühendis için araştırma konusu olmuştur. Ancak, dalga etkisi durumu için yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışmaların da büyük bir kısmı nihai oyulma derinliklerinin araştırıldığı çalışmalardır. Gerçekleştirilen tez kapsamında, dalga etkisine maruz su altı borusu etrafındaki oyulmalar zamana bağlı olarak araştırılmıştır. Bununla beraber boru altı boyunca oyulmanın gelişimi ve serbest bölgenin ilerleyişi de incelenmiştir.

Su altı borusu altındaki oyulma mekanizmasını daha iyi anlamak için, farklı dalga karakteristikleri, boru çapları, taban malzemeleri ve başlangıç taban formları ile çok sayıda deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile elde edilen sonuçlar, “nihai oyulma derinliği”, “zaman ölçeği”, “zamana bağlı oyulma derinliği” ve “oyulmanın boru boyunca gelişimi” başlıkları altında analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar uygulamada faydalanılabilir diyagramlara dönüştürülerek görselleştirilmiştir. Bununla birlikte Flow3D programı kullanılarak deneysel şartları yansıtan iki boyutlu bir sayısal model hazırlanmış ve bulgular deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Su altı borusu, dalga etkisi, oyulma, zamana bağlı oyulma derinliği.

# INVESTIGATION OF TEMPORAL SCOUR DEVELOPMENT BELOW SUBMERGED PIPE UNDER THE WAVE EFFECT

## ABSTRACT

Due to the recent technologic development, submerged pipelines are the most frequently used structures in coastal engineering applications. They are in use in marine outfall systems, oil and gas transportation, submarine cable conduit, as well; accordingly, to maintain their strength and stability, during their economic life, is crucial. In marine environment, dynamic and repetitive effects that affect the lateral stability of submerged pipelines are mainly originated from steady flow and wave motion.

The flows with the effect of steady current around a submerged pipeline and scour in erodible soils have been a research subject for many researchers and engineers. However, the studies under the condition of wave effects are limited. Moreover, the major parts of this investigation are the studies that focus on the final scour depth. In the scope of this thesis, temporal variation of scour around submerged pipelines was investigated. Besides, the scour development along the pipeline and the progression of the free-span were examined.

In order to better understand the phenomenon of scour below submerged pipeline, many experiments were carried out with different wave characteristics, pipe diameters, bed materials and initial forms for bed condition. The results obtained from these experiments were analyzed under the titles entitled “final scour depth”, “time scale”, “time-dependent scour depth” and “scour development along the pipeline”. The obtained results were visually represented by generating diagrams that will help for applications. Also, a two-dimensional numeric model reflecting experimental conditions was generated by using Flow 3D, and the findings were evaluated comparing with the experimental results.

**Keywords:** Submerged pipe, wave effects, scour, time dependent scour depth.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
TEZ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – SU ALTI BORUSU ETRAFINDAKİ AKIM VE BORU-DENİZ- ZEMİN ETKİLEŞİMİ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Su Altı Borusu Etrafında Oluşan Farklı Akım Yapıları .....	3
2.1.1 Kararlı Akıntı Durumunda Su Altı Borusu Etrafında Akım.....	3
2.1.2 Dalga Durumunda Su Altı Borusu Etrafında Akım.....	7
2.2 Su Altı Borusu Etrafında Oluşan Zemin Hareketleri .....	12
2.2.1 Oyulmanın Başlaması .....	13
2.2.2 İki Boyutlu Oyulma .....	15
2.2.3 Üç Boyutlu Oyulma.....	19
<b>BÖLÜM ÜÇ – MEVCUT ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>22</b>
3.1 Literatürde Mevcut Deneysel Çalışmalar .....	23
3.2 Literatürde Mevcut Sayısal Çalışmalar .....	39
<b>BÖLÜM DÖRT – DENEY SİSTEMİ VE ÇALIŞMA YÖNTEMİ .....</b>	<b>42</b>
4.1 Boyut Analizi .....	42
4.2 Deney Sistemi.....	47

4.2.1 Dalga Kanalı .....	47
4.2.2 Dalga Üreteç Sistemi .....	50
4.2.3 Ölçüm Aletleri .....	54
4.3 Yöntem .....	58
<b>BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL BULGULAR.....</b>	<b>61</b>
5.1 Hazırlık Deneyleri .....	65
5.2 Taban Malzemesi Özelliklerinin Belirlenmesi .....	67
5.3 Ölçüm Aletleri Ham Verileri.....	68
5.4 Deney Sonuçlarının Analizi .....	72
5.4.1 Analizler İçin Kullanılan İstatistiksel Yöntemler Ve Sınamalar .....	73
5.4.2 Nihai (Denge Durumu) Oyulma Derinliği İle Gerçekleştirilen Analizler.....	77
5.4.3 Zaman Ölçeği Parametresi İle Gerçekleştirilen Analizler .....	89
5.4.4 Zamana Bağlı Oyulma Ölçümleri İle Gerçekleştirilen Analizler .....	93
5.4.5 Boru Boyunca Oyulmanın Gelişimi İçin Gerçekleştirilen Analizler.....	115
<b>BÖLÜM ALTI – SAYISAL MODEL ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI .....</b>	<b>123</b>
6.1 İncelenen Fiziksel Olayda Etkin Matematiksel İfadeler .....	123
6.2 Flow3D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı Teknik Özellikleri ....	128
6.3 Flow3D Programı İle Sayısal Modelin Oluşturulması .....	143
6.3.1 Sayısal Model Parametrelerinin Belirlenmesi .....	143
6.3.2 Sayısal Model Sonuçları İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması .....	148
<b>BÖLÜM YEDİ – SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>152</b>
7.1 Elde Edilen Sonuçlar .....	152
7.2 Öneriler.....	157
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>159</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Kararlı akıntı durumunda pürüzsüz yüzeyli dairesel borunun etrafındaki akım (Sümer ve Fredsoe, 2006) .....	5
Şekil 2.2 $St$ sayısının $Re_D$ sayısı ile değişimi (pürüzsüz yüzeyli dairesel boru, Sümer ve Fredsoe, 2006).....	6
Şekil 2.3 a) Serbest durumdaki silindirik boru etrafındaki akış ve hareketsiz akım noktasının yeri, b) Tabana yakın silindirik boru etrafındaki akış ve hareketsiz noktanın yeri, S: Laminer sınır tabakasının ayrım noktası .....	6
Şekil 2.4 Su altı borusunun deniz tabanından olan yüksekliği ( $e$ ) ve boru çapına oranı olan boyutsuz değerin ( $e/D$ ) gösterimi.....	7
Şekil 2.5 Kararlı akıntı durumunda su altı boru civarında oluşan dümen suyu çevrintileri .....	7
Şekil 2.6 Dalga etkisinde akışkan parçacığının hareketinin göreceli derinlikle değişimi (CERC, 2000).....	8
Şekil 2.7 Keulegan-Carpenter sayısının tanımı için şematik gösterim .....	10
Şekil 2.8 Pürüzsüz silindirik boru durumunda $Re_D = 10^3$ için $KC$ sayılarına bağlı akım rejimleri (Sümer ve Fredsoe, 2006) .....	11
Şekil 2.9 Dalga durumunda boru etrafında oluşan tekrarlı dümen suyu çevrintileri .	11
Şekil 2.10 Oyulmanın zamana bağlı değişimi ve zaman ölçeği parametresinin elde edilişi.....	12
Şekil 2.11 Temiz su ve hareketli taban oyulmaları durumunda zamana bağlı oyulma derinlikleri.....	13
Şekil 2.12 Taban hareketinin başlaması için farklı birçok araştırmacının çalışmalarını da içeren Shields eğrisi (Sümer ve Fredsoe, 2002).....	15
Şekil 2.13 Kararlı akıntı ve dalga durumlarında taban malzemesi için hareketin oluşup oluşmayacağı sınır eğriler (Sümer ve diğ., 2001).....	16
Şekil 2.14 Boru hattı altındaki farklı oyulma yapıları ve oyulma ilerleyişinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.15 Boru hattı omuzlarında oluşan spiral şekilli vorteks ve üç boyutlu akım yapısı .....	19

Şekil 2.16 Farklı akım yönleri durumunda boru altındaki serbest bölgenin gelişimi	20
Şekil 2.17 Boru altında oluşan göreceli serbest bölge uzunluğunun olasılık yoğunluk fonksiyonu (Orgill ve diğ., 1992).....	20
Şekil 2.18 Boru hattı omuzlarında oyulma ilerleyişi ve serbest bölge üzerinde borudaki sarkma .....	21
Şekil 3.1 Sümer ve Fredsoe (1990) çalışması sonucu elde edilen S/D – KC ilişkisi.	24
Şekil 3.2 Fredsoe ve diğ., (1992) çalışması sonucu elde edilen $T^* - \theta$ ilişkisi.....	25
Şekil 3.3 Çevik ve Yüksel (1999) çalışması sonucu elde edilen S/D – KC ilişkisi ...	25
Şekil 3.4 Çevik ve Yüksel (1999) çalışması sonucu elde edilen S/D – $U_{RP}$ ilişkisi ..	25
Şekil 3.5 Çevik ve Yüksel (1999) çalışmasında farklı deniz tabanı eğimlerinde kritik derinliğin kırılma derinliğine oranının sörf parametresi ile değişimi .....	26
Şekil 3.6 Sümer ve diğ., (2001) çalışması için göreceli kendinden gömülme derinliği ile Keulegan-Carpenter sayısının değişim grafiği (Sümer ve Fredsoe, 1990 çalışması sonuçları ile birlikte) .....	27
Şekil 3.7 Gao ve diğ., (2002) ve Gao ve diğ., (2003) çalışmalarında kullanılan U-şekilli salınımlı akış tüneli .....	28
Şekil 3.8 Kumar ve diğ., (2003) ve Kumar ve diğ., (2005) çalışmalarında kullanılan deney düzeneği en ve boy kesit görünüşleri .....	30
Şekil 3.9 Gao ve diğ., (2006) ve Yang ve diğ., (2008) çalışmalarında kullanılan dalga kanalı boyutları.....	31
Şekil 3.10 Gao ve diğ., (2006) ve Yang ve diğ., (2008) çalışmalarında zamana bağlı oyulma fazları.....	32
Şekil 3.11 Dey ve Singh, (2007) çalışmasında kullanılan deney düzeneği .....	33
Şekil 3.12 Dey ve Singh, (2008) çalışmasında kullanılan farklı geometriye ve konuma sahip su altı boruları .....	34
Şekil 3.13 Öner ve diğ., (2008) çalışmasında kullanılan dalga kanalı boyutları .....	35
Şekil 3.14 Öner ve diğ., (2008) çalışmasında kullanılan ölçüm yöntemi şematığı....	36
Şekil 3.15 Cheng ve diğ., 2009 çalışmasında kullanılan deney kanalı boyutları.....	37
Şekil 3.16 Cheng ve diğ., (2009) çalışmasında an iletkenlik problemlerinin boruya yerleşimi.....	37
Şekil 3.17 Cheng ve diğ., (2009) çalışmasında deney kanalı boyutları ve oyulma çukuru ilerleyişi.....	37

Şekil 3.18 Kızıllöz ve diğ., (2013) çalışmasında URP ile S/D'nin değişimi (Hrms: dalga yüksekliklerinin karelerinin ortalamasının karekökü ve T <sub>p</sub> : pik dalga periyotları ile gerçekleştirilen hesaplar).....	38
Şekil 3.19 Kızıllöz ve diğ., (2013) çalışmasında URP ile S/D'nin değişimi (Hs: dalga yüksekliklerinin en büyük 1/3'lük kısmının ortalaması ve T <sub>m</sub> : spektral ortalama dalga periyodu ile gerçekleştirilen hesaplar).....	38
Şekil 4.1 Dalga kanalı genel görünümü .....	47
Şekil 4.2 Karşılıklı gözlem açıklıkları ve lamine camlar .....	48
Şekil 4.3 Dalga kanalı tabanının gözlem açıklığında aldığı şekil .....	49
Şekil 4.4 Dalga kanalının açık deniz tarafındaki taban şekli ve detayları .....	49
Şekil 4.5 Dalga kanalı sahilinde yer alan dalga sönmeme sisteminin genel görünüşü.....	50
Şekil 4.6 Yürüyüş platformu ve ölçüm platformunun genel görünüşü.....	51
Şekil 4.7 Dalga üreteç sistemi unsurlarının şematik gösterimi .....	51
Şekil 4.8 Dalga üreteç sistemi genel görünümü.....	52
Şekil 4.9 Dalga dubası genel görünümü ve kılavuz raylar.....	52
Şekil 4.10 Eksantrik kolu ile dalga dubası bağlantıları birleşim detayı.....	53
Şekil 4.11 ULS 40-D cihazı ve iki adet USS20130 algılayıcıları .....	54
Şekil 4.12 Deneylerde kullanılan, açık deniz tarafındaki (soldaki görüntü) ve sahil tarafındaki (sağdaki görüntü) USS20130 algılayıcılarının yerleşimi.....	55
Şekil 4.13 UVP cihazı ve 4 Mhz frekanslı algılayıcıları.....	56
Şekil 4.14 Hız ölçümü için kullanılan UVP algılayıcısının kanal üzerinden görünümü .....	56
Şekil 4.15 Boru altında zamana bağlı oyulma derinliği ölçümü için yerleştirilen UVP algılayıcıları.....	57
Şekil 4.16 Deney borusu içerisine yerleştirilen UVP algılayıcıları ve boru sabitleyicileri.....	58
Şekil 4.17 Hız ölçümü için kullanılan UVP algılayıcısının şematik yerleşim şekli ..	59
Şekil 4.18 USS20130 algılayıcılarının deneyler sırasındaki konumları .....	60
Şekil 5.1 Deney kodu ifadesindeki harf ve rakam birleşimlerinin açıklanması.....	61
Şekil 5.2 Başlangıç durumu taban şeklinin plan ve boykesit gösterimleri .....	64
Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan taban malzemelerine ait elek analizi eğrileri .....	68

Şekil 5.4 Borunun bulunduğu kesitteki USS20130 algılayıcısı ile elde edilen zamana bağlı su seviyeleri (dalga kaydı), (a) 62.5 Hz, (b) 75 Hz, (c) 87.5 Hz ve (d) 100 Hz	70
Şekil 5.5 Boru ekseninde ölçülen noktasal hızlar, (a) 62.5 Hz, (b) 75 Hz, (c) 87.5 Hz ve (d) 100 Hz.....	71
Şekil 5.6 H4D2B212080801BT kodlu deneye ait zamana bağlı ham oyulma derinliği ölçüm grafikleri.....	72
Şekil 5.7 Deneysel veriler ile (5.16), (5.17) ve (5.18) bağıntıları ile hesaplanan $S/D$ 'lerin $KC$ sayısı ile değişimi.....	79
Şekil 5.8 Ölçülen ve (5.16) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S/D$ değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 5.9 Deneysel veriler ile (5.20) bağıntısı ile hesaplanan sabit $d_{50}/D$ eğrilerinin gösterimi.....	81
Şekil 5.10 Ölçülen ve (5.20) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S/D$ değerlerinin karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.11 Deneysel veriler ile (5.22) bağıntısı ile hesaplanan sabit $\theta$ eğrilerinin gösterimi.....	83
Şekil 5.12 Ölçülen ve (5.22) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S/D$ değerlerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 5.13 Deneysel veriler ile (5.24) bağıntısı ile hesaplanan sabit $Fr_d$ eğrilerinin gösterimi.....	86
Şekil 5.14 Ölçülen ve (5.24) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S/D$ değerlerinin karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.15 Tez kapsamındaki ve Fredsoe ve diğ., (1992) çalışmasındaki deneysel $T^*$ verilerinin, aynı çalışmalar için türetilen sırasıyla (5.26) ve (5.27) bağıntıları ile çizilen eğrilerle birlikte gösterimi.....	90
Şekil 5.16 Ölçülen ve (5.26) bağıntısı ile kestirimi yapılan $T^*$ değerlerinin karşılaştırılması.....	91
Şekil 5.17 Deneysel $T^*$ değerleri ile (5.29) bağıntısı ile hesaplanan farklı değerlerdeki sabit $KC$ eğrilerinin birlikte gösterimi.....	92

Şekil 5.18 Ölçülen ve (5.29) bağıntısı ile kestirimi yapılan $T^*$ değerlerinin karşılaştırılması .....	93
Şekil 5.19 Deney No.1’de (H2D1B111102701BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi .....	97
Şekil 5.20 Deney No.1’de (H2D1B111102701BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	97
Şekil 5.21 Deney No.23’de (H4D3B112072603BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi .....	98
Şekil 5.22 Deney No.23’de (H4D3B112072603BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	98
Şekil 5.23 Deney No.2’de (H4D1B111103101BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi .....	99
Şekil 5.24 Deney No.2’de (H4D1B111103101BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	99
Şekil 5.25 Deney No.21’de (H3D3B112072601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	100
Şekil 5.26 Deney No.21’de (H3D3B112072601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	100
Şekil 5.27 Deney No.11’de (H4D2B112061301BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	101
Şekil 5.28 Deney No.11’de (H4D2B112061301BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	101
Şekil 5.29 Deney No.9’da (H1D2B112061201BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	102
Şekil 5.30 Deney No.9’da (H1D2B112061201BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	102
Şekil 5.31 Deney No.28’de (H2D3B212080304BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	103

Şekil 5.32 Deney No.28'de (H2D3B212080304BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	103
Şekil 5.33 Deney No.29'da (H4D3B212080601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	104
Şekil 5.34 Deney No.29'da (H4D3B212080601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	104
Şekil 5.35 Deney No.32'de (H3D3B212080604BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	105
Şekil 5.36 Deney No.32'de (H3D3B212080604BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	105
Şekil 5.37 Deney No.33'de (H4D2B212080801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	106
Şekil 5.38 Deney No.33'de (H4D2B212080801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	106
Şekil 5.39 Deney No.49'da (H4D1B212081601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	107
Şekil 5.40 Deney No.49'da (H4D1B212081601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	107
Şekil 5.41 Deney No.50'de (H3D1B212081602BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	108
Şekil 5.42 Deney No.50'de (H3D1B212081602BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	108
Şekil 5.43 Deney No.73'de (H4D3B312091001BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	109
Şekil 5.44 Deney No.73'de (H4D3B312091001BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	109
Şekil 5.45 Deney No.74'de (H3D3B312091002BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	110

Şekil 5.46 Deney No.74'de (H3D3B312091002BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	110
Şekil 5.47 Deney No.105'de (H4D1B312100401BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	111
Şekil 5.48 Deney No.105'de (H4D1B312100401BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	111
Şekil 5.49 Deney No.106'da (H3D1B312100402BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	112
Şekil 5.50 Deney No.106'da (H3D1B312100402BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	112
Şekil 5.51 Deney No.89'da (H4D2B312091801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	113
Şekil 5.52 Deney No.89'da (H4D2B312091801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	113
Şekil 5.53 Deney No.90'da (H3D2B312091802BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi ...	114
Şekil 5.54 Deney No.90'da (H3D2B312091802BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan $S_t/D$ değerlerinin karşılaştırılması .....	114
Şekil 5.55 H4D3B212082901BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	116
Şekil 5.56 H3D1B212082402BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	116
Şekil 5.57 H4D2B212081501BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	117
Şekil 5.58 H3D2B212081502BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	117
Şekil 5.59 H4D1B212082401BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	118
Şekil 5.60 H1D3B312091704BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	118

Şekil 5.61 H3D3B312091702BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	119
Şekil 5.62 H4D1B312101101BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	119
Şekil 5.63 H4D3B312091701BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.....	120
Şekil 5.64 Deneysel verileri ile elde edilen ve (5.38) bağıntısı yardımıyla kestirimi yapılan boyutsuzlaştırılmış oyulma gelişim hızı değerleri için saçılma diyagramı .	121
Şekil 5.65 Deneysel olarak belirlenen ve (5.39) eşitliği yardımıyla hesaplanan $c_s$ değerlerinin karşılaştırılmalı diyagramı .....	122
Şekil 6.1 Su altı borusu etrafında iki boyutlu akım ve oyulma durumu için şematik gösterim.....	123
Şekil 6.2 Flow3D programı hesap hacmi üzerindeki yönler ve tanımları (Kocaman, 2007) .....	128
Şekil 6.3 Flow3D kılavuz menüsü ve ayrıntıları.....	132
Şekil 6.4 Flow3D model kurulum menüsü altındaki genel alt menüsü ve ayrıntıları.....	133
Şekil 6.5 Flow3D model kurulum menüsü altındaki fizik alt menüsü ve ayrıntıları.....	134
Şekil 6.6 Flow3D’de sediment oyulması seçeneği ile birlikte sediment özelliklerinin girilmesi .....	135
Şekil 6.7 Flow3D model kurulum menüsü altındaki akışkan alt menüsü ve ayrıntıları.....	136
Şekil 6.8 Flow3D model kurulum menüsü altındaki ağ ve geometri alt menüsü ve ayrıntıları.....	137
Şekil 6.9 Flow3D’de dalga sınır koşulunun programa tanımlanması .....	138
Şekil 6.10 Flow3D model kurulum menüsü altındaki çıktı alt menüsü ve ayrıntıları.....	139
Şekil 6.11 Flow3D model kurulum menüsü altındaki sayısal alt menüsü ve ayrıntıları.....	140
Şekil 6.12 Flow3D simülasyon menüsü ve ayrıntıları .....	141
Şekil 6.13 Flow3D analiz menüsü ve ayrıntıları .....	142



Şekil 6.14 Flow3D ile çözüm için deney düzeneği modeli geometrisi.....	143
Şekil 6.15 $t=130$ . sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.....	145
Şekil 6.16 $t=261$ . sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.....	145
Şekil 6.17 $t=500$ . sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.....	146
Şekil 6.18 $t=758$ . sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.....	146
Şekil 6.19 $t=1368$ . sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.....	147
Şekil 6.20 $t=1452$ . sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.....	147
Şekil 6.21 H2D1B111102701BT kodlu deney sonuçları ile aynı deneyin parametreleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sonuçların bir arada gösterimi.....	148
Şekil 6.22 H4D1B111103101BT kodlu deney sonuçları ile aynı deneyin parametreleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sonuçların bir arada gösterimi.....	149
Şekil 6.23 H4D3B212080601BT kodlu deney sonuçları ile aynı deneyin parametreleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sonuçların bir arada gösterimi.....	150

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 İki boyutlu oyulma durumunda oyulma derinliği (göreceli oyulma derinliği) bağıntıları .....	17
Tablo 3.1 Kumar ve diğ., (2005) çalışmasındaki boyutsuz parametrelerin değişim aralıkları .....	29
Tablo 5.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların listesi (1. Kısım)	61
Tablo 5.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların listesi (2. Kısım)	62
Tablo 5.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların listesi (3. Kısım)	63
Tablo 5.2 Farklı yöntemler ile belirlenen dalga boyları.....	67
Tablo 5.3 Deneylerdeki boyutlu ve boyutsuz parametrelerin değerleri.....	73
Tablo 5.4 $S/D$ 'nin kestirimindeki regresyon modelleri için $f$ ve kısmi $f$ istatistikleri.....	88

## **BÖLÜM BİR**

### **GİRİŞ**

Özellikle son yıllarda gelişen teknolojik yeniliklerle birlikte, su, petrol, doğalgaz v.b. akışkanların iletiminin sağlanması, sıvı atıkların arıtma tesisinden çıktıktan sonra uzak kıyı bölgesine tahliyesinin gerçekleştirilmesi, limanlama işlemlerinde sıvı maddelerin taşınması gibi amaçların karşılanmasında kullanılan su altı boru hatları, günümüzde kıyı mühendisliği alanında önemli bir yer almaktadır. Bu sistemlerin maruz kaldığı dinamik etkiler özellikle yakın kıyı bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu etkilerden başlıcaları dalgalar ve akıntılar tarafından yaratılmaktadır.

Göreceli dalga sınıflandırmasına göre sığ su veya orta su bölgesinde yer alan bir dalganın etkisi deniz tabanına kadar devam etmekte ancak derin su bölgesinde tabana kadar ulaşmamaktadır. Dalga geçişi sırasında oluşan su parçacığı hareketi durağan su seviyesine yakın bölgelerde eliptik olmakla beraber tabana doğru yatay bir hal almaktadır. Bu bağlamda, su altı borularının yakın kıyı bölgesinde maruz kaldıkları kuvvetler, akıntı, dalga veya her ikisinin de birlikte etkimesi durumlarında oluşurken, açık deniz (uzak kıyı) bölgesinde ise yalnızca akıntı etkisinden kaynaklanmaktadır.

Aşınabilir deniz tabanı üzerinde bulunan su altı boru hatları, yakın kıyı bölgesindeki dalga ve kıyı boyu akıntısı etkilerinden kaçınmak amacıyla sıklıkla gömülü olarak inşa edilmektedir. Boru hatlarının deniz tabanına gömülmesi özel inşaat teknikleri gerektiren pahalı bir mühendislik uygulamasıdır. Ayrıca, başlangıçta gömülü olarak inşa edilen boru hatları etrafında zamanla oyulmalar, birikmeler ve bunlarının tekrarlı hareketleri görülebilmektedir. Hem ekonomik açıdan hem de uygulamadaki güçlükler nedeniyle boruların gömülü olarak inşa edilmesi tek çözüm değildir. Yakın kıyı bölgesinde deniz tabanına oturan boru hatları etrafındaki zemin hareketlerinin incelenmesi ve boru-deniz-zemin etkileşiminin araştırılması inşaat mühendisliğinin bir dalı olan kıyı mühendisliği konusunda oldukça önemli bir yer edinmektedir.

Su altı borusu etrafındaki akım ve zemin hareketleri, akıntı etkisi altında oldukça geniş bir şekilde araştırma alanı bulmuştur. Bununla beraber, dalga etkisi altındaki durum, akıntıda olduğu kadar incelenmemiştir. Bugüne kadar birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Özellikle sayısal çalışmalar son yıllarda geliştirilen yeni yöntemlere ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak artış göstermektedir. Gerek deneysel gerekse sayısal çalışmalarda genellikle su altı borusu kesitindeki iki boyutlu akım ve oyulma mekanizması araştırılmıştır. Zemin hareketinin boru altı boyunca değişiminin hesaba katıldığı üç boyutlu akım ve oyulma mekanizması problemi akıntı durumu için yeni yeni araştırma olanakları bulmaktadır.

Su altı borusunun bir kesitindeki durumun bilinmesi, uç değerlerin ortaya konulması açısından önemli olsa da, boru altı boyunca oluşan oyulma çukuru yayılımı ve boru altındaki oyulmanın zamana bağlı olarak değişimi, karşılaşılabilecek stabilite sorunlarının kestirimi ve planlanma aşamasındaki detayların düzenlenmesi açısından, oldukça önem taşımaktadır.

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında dalga etkisindeki su altı borusu etrafındaki akım ve aşınabilir zeminde oluşan hareketler deneysel olarak ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda gelişmiş ölçüm aletleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, bu tez çalışması için tasarlanıp inşa edilen dalga kanalında, farklı boru çapları, farklı taban malzemeleri ve farklı dalga durumları için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, nihai oyulma derinlikleri, zaman ölçeği parametresi, zamana bağlı oyulma derinlikleri ve boru boyunca oyulmanın gelişimi ile ilgili analizlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Deneysel çalışmalara ek olarak, Flow3D programı kullanılarak incelenen fiziksel olayın iki boyutlu sayısal bir modeli hazırlanmıştır.

Tez çalışmasında farklı taban malzemeleri kullanımı nihai oyulma derinliği ve zaman ölçeği analizlerinde mevcut literatüre seçenekler sunacak niteliktedir. Özellikle bu çalışmada zamana bağlı oyulma ve boru boyunca oyulmanın gelişimi üzerine yapılan analizler bir bütün olarak bu konuya yenilik kazandırmaktadır.

## **BÖLÜM İKİ**

### **SU ALTI BORUSU ETRAFINDAKİ AKIM VE BORU–DENİZ–ZEMİN ETKİLEŞİMİ**

Su altı borularının büyük bir çoğunluğu dairesel kesitli olarak imal edilmektedir. Boru hattı boyunca düşünüldüğünde, silindirik bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda, deniz tabanına yatay bir şekilde, belli projelendirme ölçütleriyle teşkil edilmiş bu silindirik yapıların etrafındaki akımın ve aşınabilir zeminde bu akımdan kaynaklanan yerel hareketlerin bilinmesi ve incelenmesi önem kazanmaktadır. Bu durumda boru kesiti civarında oluşan akımı, etki eden unsurlarına göre ayırmak ve bu durumlar için zemin hareketlerini analiz etmek yerinde olacaktır. Bir su altı borusuna etki eden temel iki akım parametresi kararlı akıntı ve dalgadır.

#### **2.1 Su Altı Borusu Etrafında Oluşan Farklı Akım Yapıları**

Yukarıda da değinildiği gibi, batmış halde deniz tabanı üzerinde yer alan su altı borusuna etki eden temel iki unsur, akıntı ve dalgadır. İki durum için su altı borusu etrafında oluşan akım yapısı ve geliştirdikleri etkiler farklı olduğundan ayrı ayrı ele alınmaları ve değerlendirmeleri gerekmektedir.

##### **2.1.1 Kararlı Akıntı Durumunda Su Altı Borusu Etrafındaki Akım**

Deniz tabanı üzerinde uzanan su altı borusu sıklıkla akıntı tesirleri altında kalmaktadır. Farklı nedenler ile oluşabilecek su altı akıntıları, silindirik su altı borusu etrafında oluşturdukları farklı akım yapıları nedeniyle, boru altındaki aşınabilir zemini harekete geçirebilmektedir. Bunun sonucunda yerel oyulmalar oluşmakta ve stabilite sorunları baş göstermektedir.

Pürüzsüz yüzeyli dairesel bir borunun etrafında oluşan akımı tanımlayan boyutsuz büyüklükler (2.1) eşitliği ile verilen boru Reynolds sayısına ( $Re_D$ ) bağlı olmaktadır.

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


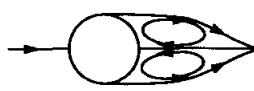


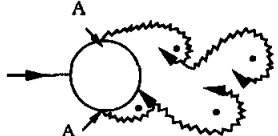
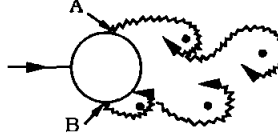
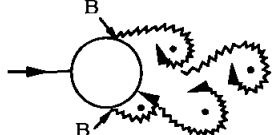
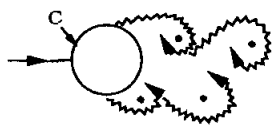
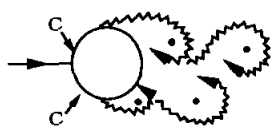
Burada,  $D$  silindirik borunu çapını,  $U$  boru eksenindeki akım hızını ve  $\nu$  akışkanın (suyun) kinematik viskozitesini simgelemektedir.  $\text{Re}_D$  sayısının aldığı değerlere göre boru etrafında oluşan akım rejimini tanımlamak mümkündür. Şekil 2.1'de, farklı  $\text{Re}_D$  sayılarında bu durumlara karşılık gelen akım rejimleri gösterilmektedir. Bu şekilde tanımlanan akım rejimlerinde etki eden en önemli faktör, vorteks yayılımıdır. Özellikle  $\text{Re}_D > 40$  olduğu durumlarda akım karakteristiğinde etkili olmaktadır. Vorteks yayılım frekansı ( $f_v$ ), akım hızı ve borunun çapı normalleştirildiğinde  $\text{Re}_D$  sayısının bir fonksiyonu olan ve (2.2) eşitliği ile verilen boyutsuz Strouhal sayısı elde edilmektedir.

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (2.2)$$

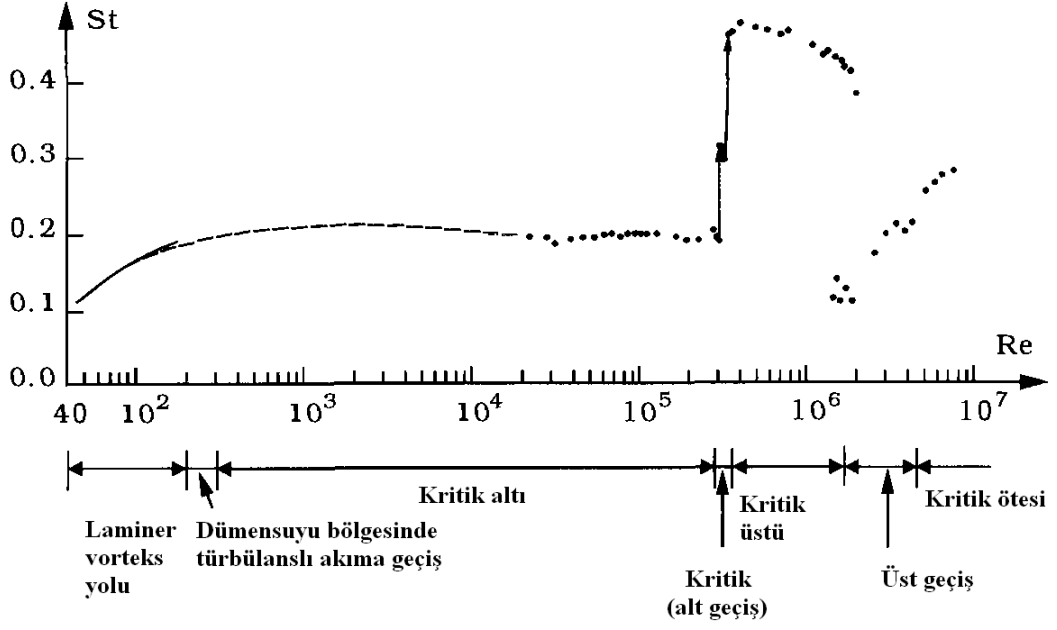
Şekil 2.2'de  $St$  sayısı ile  $\text{Re}_D$  sayısı arasındaki ilişki pürüzsüz yüzeyli dairesel boru için gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde,  $\text{Re}_D$  sayısı arttıkça (akım laminer den tam türbülanslı duruma giderken)  $St$  sayısı kritik rejime kadar yaklaşık olarak durağan kalmakta sonra ani şekilde artıp tedrici bir azalış göstermektedir. Bu durumda, akım hızı arttıkça  $St$  sayısının değeri azalmakta ancak hız arttıkça ve dolayısıyla  $\text{Re}_D$  sayısı büyüdükçe vorteks yayılım frekansı arttıkça (vorteks yayılımı sıklaştıkça)  $St$  sayısının değeri durağan olmakta ancak kritik bölgede ani bir artış göstermektedir.

Vorteks yayılımına ek olarak, su altı borusu civarında akımı etkileyen başka unsurlarda mevcuttur. Bunlar, yüzey pürüzlülüğünün etkisi, borunun en kesit şeklinin etkisi, gelen akımın türbülanslı olmasının etkisi, gelen akımdaki kesme etkisi, boru civarındaki duvar yakınlığının etkisi (boru hatları ile doğrudan ilgili, tabana oturan veya tabandan belli bir mesafe yukarıda duran boru hatları) gibi sıralanabilir.

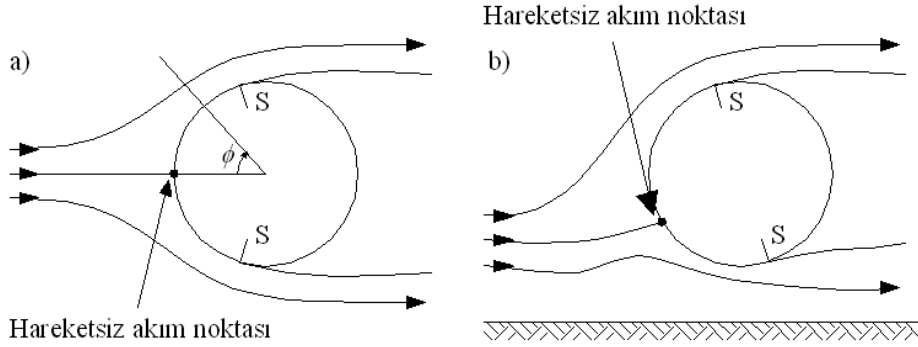
Özellikle boru hatları düşünüldüğünde duvar yakınlığının akım üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi serbest durumdaki borunun etrafındaki akım sırasında yaklaşık olarak merkezde olan hareketsiz nokta ki bu durumda boru etrafındaki akışın yönelişi simetrik olmakta, deniz tabanına yakın bir boru için yer değiştirecek ve bu durumda dümen suyu çevrintilerinin değişimine sebep olacaktır.

a)		Ayrılma olmayan, sarmal akım	$Re < 5$
b)		Sabit çift simetrik vorteksler	$5 < Re < 40$
c)		Laminer vorteks yolu	$40 < Re < 200$
d)		Dümensuyu bölgesinde türbülanslı akıma geçiş	$200 < Re < 300$
e)		Dümensuyu bölgesi tam türbülanslı A: Laminer sınır tabakası ayrımı	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Kritik altı
f)		A: Laminer sınır tabakası ayrımı B: Türbülanslı sınır tabakası ayrımı, ancak sınır tabakası laminer	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Kritik (Alt geçiş)
g)		B: Türbülanslı sınır tabakası ayrımı, ancak sınır tabakası kısmi laminer, kısmi türbülanslı	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Kritik üstü
h)		C: Bir tarafta sınır tabakası tam türbülanslı	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Üst Geçiş
ı)		C: İki tarafta sınır tabakası tam türbülanslı	$4 \times 10^6 < Re$ Kritik ötesi

Şekil 2.1 Kararlı akıntı durumunda pürüzsüz yüzeyli dairesel borunun etrafındaki akım (Sümer ve Fredsoe, 2006).



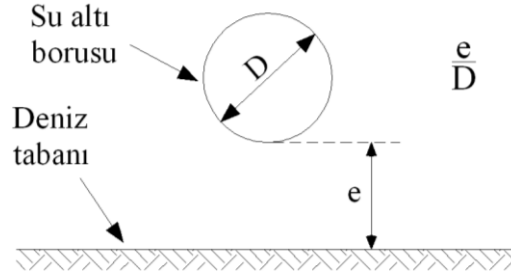
Şekil 2.2  $St$  sayısının  $Re_D$  sayısı ile değişimi (pürüzsüz yüzeyli dairesel boru, Sümer ve Fredsoe, 2006).



Şekil 2.3 a) Serbest durumdaki silindirik boru etrafındaki akış ve hareketsiz akım noktasının yeri, b) Tabana yakın silindirik boru etrafındaki akış ve hareketsiz noktanın yeri, S: Laminer sınır tabakasının ayrım noktası.

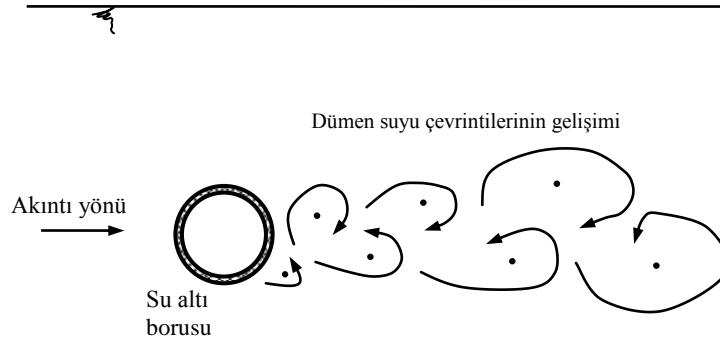
Bu noktada, boru etrafındaki akımın üzerindeki duvar yakınlığı etkisinin ortadan kalktığı durum, su altı borusunun deniz tabanından yüksekliğinin boru çapına oranı ( $e/D$ ) olan boyutsuz sayının 2 değerini aldığı durumdur (Şekil 2.4). Yani boru çapının 2 katı bir yükseklikte deniz tabanının üzerinde askıdaki boru etrafındaki akış, serbest haldeki borunun etrafındaki akış gibi davranmaktadır.





Şekil 2.4 Su altı borusunun deniz tabanından olan yüksekliği ( $e$ ) ve boru çapına oranı olan boyutsuz değerin ( $e/D$ ) gösterimi.

Kararlı akıntı etkisi ile su altı borusunun mansap kısmında dümen suyu çevrintileri yada art-iz vorteksler olarak adlandırılan bir akım yapısı oluşmaktadır (Şekil 2.5). Bu durum sonucu boru yakınındaki taban kayma gerilmesi artmakta ayrıca türbülans seviyesi yükselmektedir. Böylece direnci aşıl原因 sediment harekete başlamakta, boru etrafında oyulma ve yığılmalar oluşmaktadır.



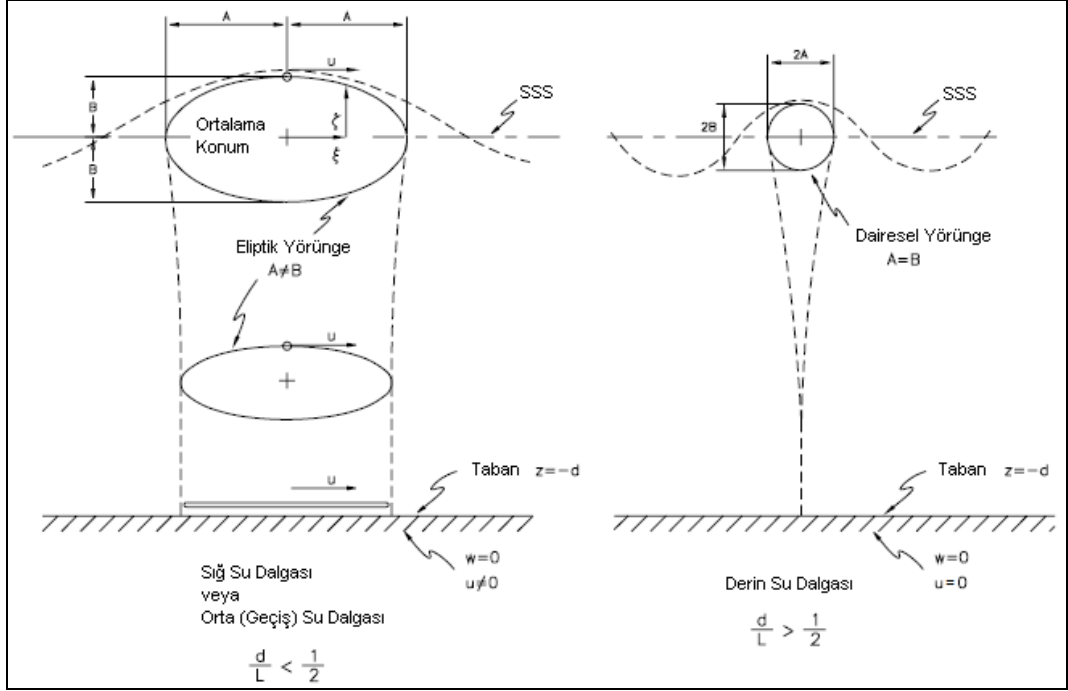
Şekil 2.5 Kararlı akıntı durumunda su altı boru civarında oluşan dümen suyu çevrintileri.

### 2.1.2 Dalga Durumunda Su Altı Borusu Etrafındaki Akım

Su altı boru hatlarının, deniz ortamında maruz kaldıkları bir başka temel etki dalga tesiridir. Farklı oluşum unsurları olmakla beraber, genel olarak deniz dalgaları rüzgar etkisi ile oluşmaktadır. Açık denizde gelişen dalgalar kıyıya doğru hareket etmekte ve batimetriye bağlı olarak sapmalara uğramaktadır.

Su altı boru hatları üzerinde dalgaların etkisi özellikle yakın kıyı bölgesinde anlam kazanmaktadır. Bunun nedeni, Şekil 2.6'da açıklandığı gibi, dalgalanmamış su

derinliğinin ( $d$ ) dalga boyunun ( $L$ ) yarısından büyük olduğu durumlarda, dalga hareketinin tabana ulaşmıyor olmasıdır. Diğer bir deyişle  $d < L/2$  koşullarında, göreceli dalga sınıflandırmasına göre sığ ve orta su koşullarında, dalga etkisi tabana kadar inmekte ve su altı boru etrafında farklı akım yapıları oluşturmaktadır.



Şekil 2.6 Dalga etkisinde akışkan parçacığının hareketinin göreceli derinlikle değişimi (CERC, 2000).

Şekil 2.6'da, SSS statik (dalgalanmamış) su seviyesini,  $A$  ve  $B$  su yüzeyinde hareket eden parçacığın yörünge mesafelerini,  $\xi$  ve  $\zeta$  su parçacığının sırasıyla yatay ve dikey yer değiştirme miktarlarını,  $u$  ve  $w$  su parçacığının sırasıyla yatay ve dikey hız bileşenlerini ve son olarak  $z$  dalgalanmamış su yüzeyi referans alınarak dikey ordinatları göstermektedir.

Şekil 2.6'dan görüleceği üzere, sığ ve orta su koşullarında, deniz tabanında su parçacıklarının hareketi hemen hemen yatay bir doğrultuda tekrarlı olarak gerçekleşmektedir. Bu durum, tek yönlü akıntıdan farklı olarak, dalganın geçişi ile birlikte tekrarlı olarak, bir dalga ilerleme yönünde bir dalga ilerleme yönünün tam tersine akım yapısı oluşturmaktadır.

Bir önceki alt bölümde incelenen kararlı akıntı durumunda boru etrafındaki akımın değişiminin dayandığı parametre olan  $Re_D$  sayısına ek olarak, salınımlı akış hareketi durumunda Keulegan-Carpenter ( $KC$ ) sayısı olarak anılan ve eşitlik (2.3) ile verilen boyutsuz bir parametre daha devreye girmektedir.

$$KC = \frac{U_m T_w}{D} \quad (2.3)$$

Burada,  $U_m$  boru eksenindeki su parçacığı hızlarının yatay bileşenin en büyük değerini ve  $T_w$  dalga periyodunu göstermekte olup, sinüzoidal bir hareket için hız dağılımı (2.4) eşitliğinde verildiği şekliyle tanımlanmaktadır.

$$U = U_m \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

Bu durumda su parçacığının en büyük yatay hız değeri (2.5) eşitliği ile aşağıda verilmektedir.

$$U_m = \xi \omega = \frac{2\pi \xi}{T_w} \quad (2.5)$$

Burada,  $\xi$  boru eksenindeki su parçacığı yatay yer değiştirme değerini,  $\omega$  ise açısal frekansı simgelemektedir. Sinüzoidal bir hareket durumunda  $KC$  sayısı (2.6) gösterilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir.

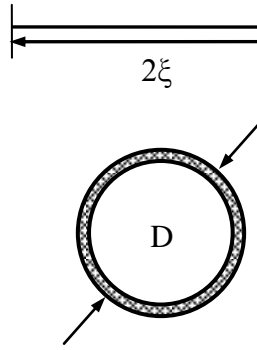
$$KC = \frac{2\pi \xi}{D} \quad (2.6)$$

Keulegan-Carpenter sayısı fiziksel olarak, hareketli akışkan parçacıklarının hareket alanı uzunluğunun boru çapına oranı olarak ifade edilmekte olup Şekil 2.7'de tanımlar verilmektedir.

Dalga durumunda,  $Re_D$  sayısı, kararlı akıntı durumu için verilen ifadesinden biraz farklı olarak tanımlanmaktadır (2.7). Kararlı akıntı durumunda eşitlikte yer alan  $U$  değeri, dalga durumu için en büyük hız değerine ( $U_m$ ) dönüşmektedir.

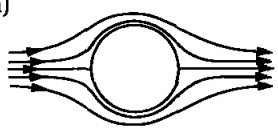
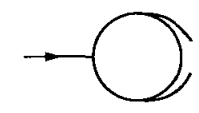
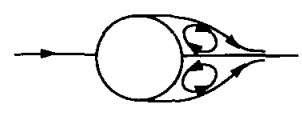
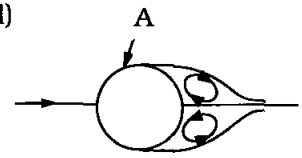
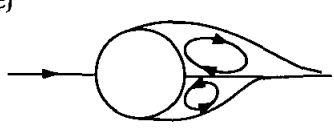

$$Re_D = \frac{U_m D}{\nu} \quad (2.7)$$

Kararlı akıntı durumunda  $Re_D$ 'ye bağlı olarak gösterilen akım rejimleri, dalga durumunda  $KC$  sayısına bağlı olarak verilebilmektedir. Şekil 2.8'de sabit bir  $Re_D$  sayısı için farklı akım rejimleri akım yapıları da gösterilerek sunulmaktadır.

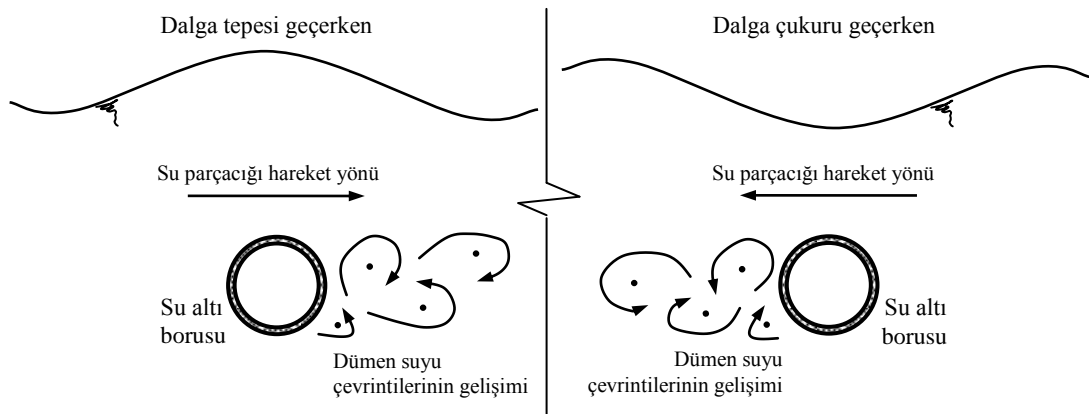


Şekil 2.7 Keulegan-Carpenter sayısının tanımı için şematik gösterim.

Şekil 2.8'de gösterildiği gibi  $KC$  sayısının kritik değeri aşıldıktan sonra, dalga etkisi ile boru etrafında vorteks yayılımları oluşmaktadır. Bu çevrintiler, Şekil 2.9'da açıklandığı üzere, dalga tepesi geçişinde dalga ilerleme yönünde, dalga çukuru geçişinde ise dalga ilerleme yönünün tersine oluşmakta ve kararlı akıntı durumunda olduğu gibi dümen suyu çevrintileri yada art-iz vorteksler olarak adlandırılmaktadır.

a)		Ayrılma yok Laminer akım	$KC < 1.1$
b)		Honji vortekler ile ayrılma	$1.1 < KC < 1.6$
c)		Bir çift simetrik vorteks	$1.6 < KC < 2.1$
d)		Bir çift simetrik vorteks Silindir yüzeyi üzerinde türbülans (A)	$2.1 < KC < 4$
e)		Bir çift simetrik olmayan vorteks	$4 < KC < 7$
f)		Vorteks yayılımı	$7 < KC$ Yayılm rejimleri

Şekil 2.8 Pürüzsüz silindirik boru durumunda  $Re_D = 10^3$  için  $KC$  sayılarına bağlı akım rejimleri (Sümer ve Fredsoe, 2006).



Şekil 2.9 Dalga durumunda boru etrafında oluşan tekrarlı dümen suyu çevrıntileri.

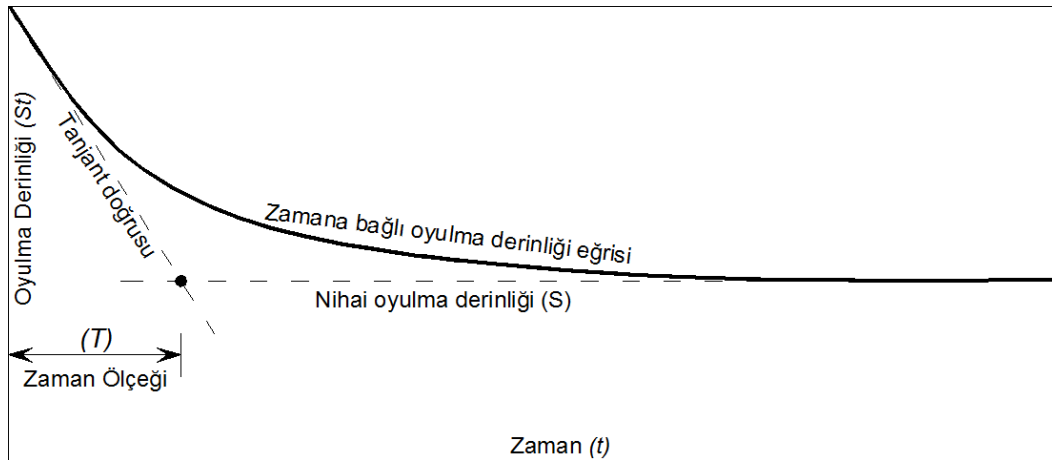
## 2.2 Su Altı Borusu Etrafında Oluşan Zemin Hareketleri

Bir önceki alt başlıkta bahsedilen, hidrodinamik etkiler ile su altı borusu altındaki aşınabilir deniz zemini harekete geçebilmektedir. Bu durumun nedeni, su altı borusuna yakın konumdaki zeminin ortalama kayma gerilmesinin ve boru civarında oluşan türbülansın artışı olarak gösterilebilir. Bu durumda taban kayma gerilmesinde meydana gelen artış oranı, büyültme faktörü ile (2.8) eşitliğindeki gibi ifade edilmektedir (Sümer ve Fredsoe, 2002).

$$\alpha = \tau/\tau_{\infty} \quad (2.8)$$

Burada,  $\tau$  taban kayma gerilmesi ve  $\tau_{\infty}$  bozulmamış akım için taban kayma gerilmesi olmaktadır. Su altı borusu altında meydana gelen oyulma, bir denge durumuna kadar artışını sürdürür. Bu denge durumuna kadar geçen süre zaman ölçeği ( $T$ ) olarak adlandırılmakta ve denge durumundaki oyulma derinliği ( $S$ ) ile gösterilip, (2.9) eşitliği ile verilen aralarındaki ilişki, Şekil 2.10'da grafiksel olarak açıklanmaktadır.  $t=0$  anında zamana bağlı oyulma derinlikleri ( $S_t$ ) eğrisine teğet olan doğrunun, denge halindeki oyulma derinliği seviye değeri ile kesiştirilmesi ile birlikte zaman ölçeği parametresi belirlenebilmektedir.

$$S_t = S(1 - e^{-t/T}) \quad (2.9)$$

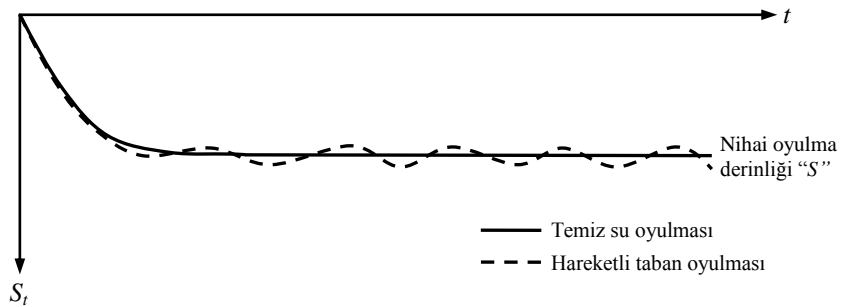


Şekil 2.10 Oyulmanın zamana bağlı değişimi ve zaman ölçeği parametresinin elde edilmesi.

### 2.2.1 Oyulmanın Başlaması

Gerek kararlı akıntı etkisine gerekse de dalga etkisine maruz kalmakta olsun, su altı borusu etrafında oyulmanın başlangıcı, boru civarındaki sedimentin kritik kayma gerilmesinin aşılması ile başlamaktadır. Bu durumu takiben, Şekil 2.5 ve 2.9’da görüldüğü üzere dümen suyu çevrintilerinin etkileri ile boru etrafında oyulma süreci gelişmektedir. Eğer su altı borusu sabit olarak durmakta ve açılan oyulma çukuruna kendiliğinden yerleşmemekteyse, bir zaman sonra boru ile altındaki zemin arasındaki açıklıktan geçen su parçacıklarının hızı artacak ve bu durumda tünel erozyonu olarak adlandırılan süreci başlatacaktır.

Oyulma olayının sona ermesi, boru etrafındaki sediment için kritik kayma gerilmesi değerinin altına düşülmesi ile son bulmaktadır. Ancak, boru altında göreceli olarak oyulma son bulsa da sedimentler tekrarlı olarak oyulma-yığılma hareketine devam edebilir. Bu nedenle su altı borusu etrafında meydana gelen oyulma iki kategoride incelenmektedir. Bunlardan ilki temiz su oyulması olup, borudan etkilenmeyen kesimde taban malzemesinde herhangi bir hareketin yaşanmadığı durumdur ( $\theta < \theta_{kr}$ ). Diğer durum, hareketli taban oyulması olarak adlandırılmakta ve borudan uzak kesimlerde de sediment taşınımı oluşmaktadır ( $\theta > \theta_{kr}$ ). Şekil 2.11’de temiz su ve hareketli taban oyulmaları durumunda zamana bağlı oyulmaların nasıl değiştiği şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2.11 Temiz su ve hareketli taban oyulmaları durumunda zamana bağlı oyulma derinlikleri.

Taban malzemesinin harekete başlamasında kritik sayı olan Shields parametresi dalga durumunda (2.10) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$\theta = \frac{U_{fm}^2}{g (s-1) d_{50}} \quad (2.10)$$

Burada  $U_{fm}$ , dalga durumunda tabanda oluşan en büyük kayma hızını göstermekte olup (2.11) bağıntısı ile tanımlanabilmektedir.  $g$ , yerçekimi ivmesini,  $d_{50}$  deniz zemini dane medyan çapını,  $\rho_s$  deniz zemini yoğunluğunu ve  $\rho$  suyun yoğunluğunu göstermek üzere  $s = \rho_s / \rho$  deniz zemini bağıl yoğunluğunu simgelemektedir.

$$U_{fm} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} U_m \quad (2.11)$$

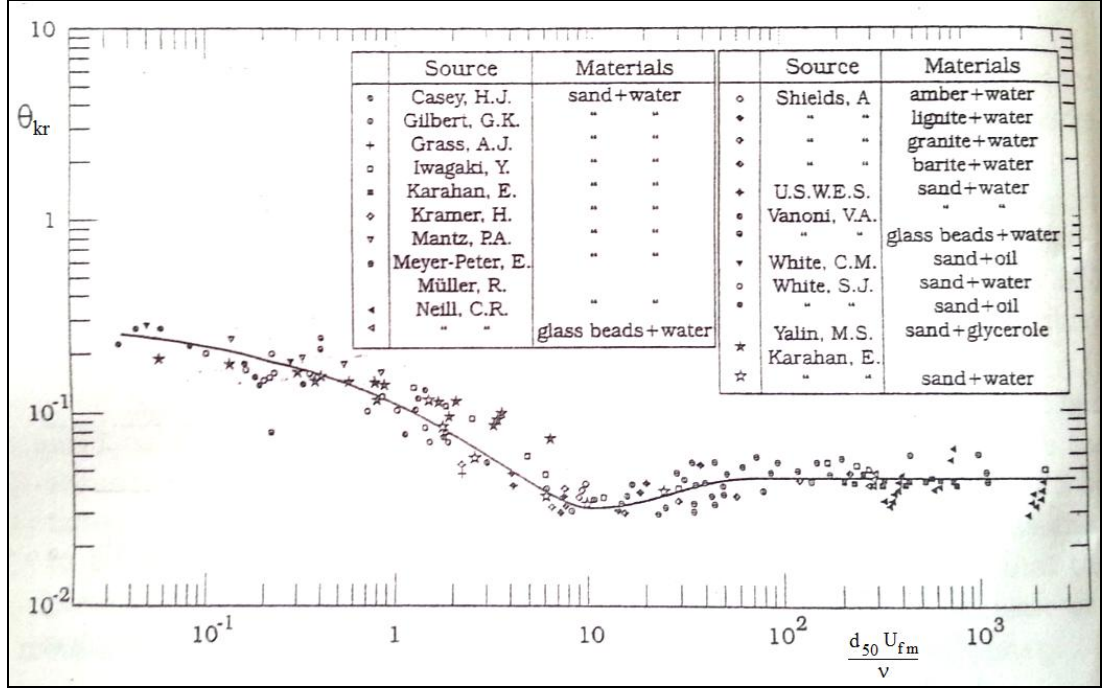
$f_w$  dalga sürtünme katsayısını göstermekte olup, tabanın pürüzlü sınır kabul edilmesi ile Fredsoe ve Deigaard (1992) çalışmasında önerildiği gibi (2.12) bağıntısı ile ifade edilebilir (Fredsoe ve Deigaard, 1992).

$$f_w = 0.04 \left( \frac{\xi}{k_b} \right)^{-1/4} \quad (2.12)$$

Burada  $k_b$ , taban pürüzlülük yüksekliğini göstermekte olup  $2.5 \cdot d_{50}$  alınabilmektedir (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Yukarıdaki bahsedilen kritik Shields parametresi ise Şekil 2.12’de verilen grafik yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu grafikte yatay ekseninde dane kayma Reynolds sayısı olarak adlandırılan boyutsuz değer yer almakta olup, eğri yardımıyla düşey ekseninde kritik Shields sayısı belirlenebilmektedir. Eğrinin üzerinde kalan bölgelerde taban malzemesi hareketi başlamakta, eğrinin altında ise hareket yaşanmamaktadır. Önceden de belirtildiği gibi hesaplanan  $\theta$  değeri kritik Shields parametresinden küçük kalsa da, boru etrafında temiz su oyulması olarak adlandırılan olay yaşanabilmektedir.





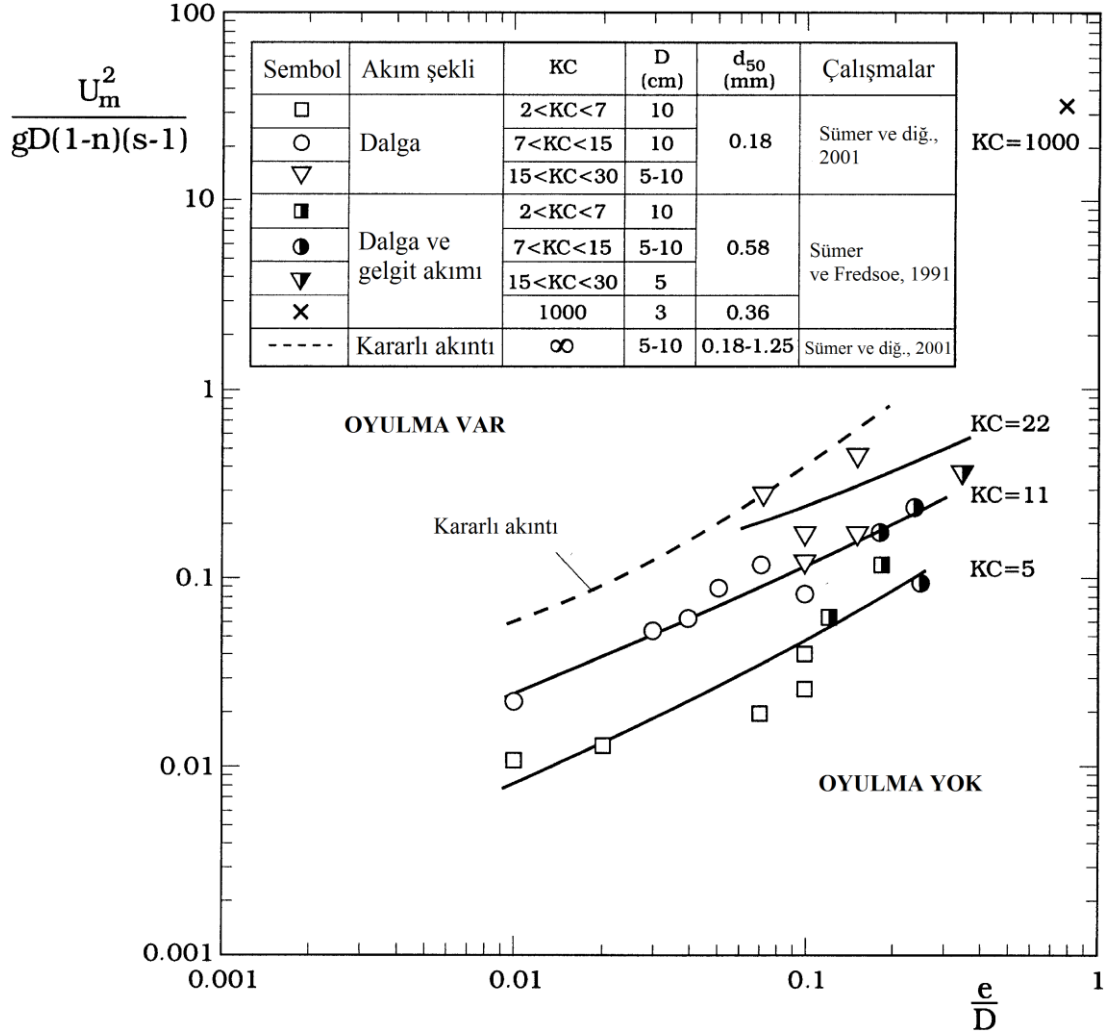
Şekil 2.12 Taban hareketinin başlaması için farklı birçok araştırmacının çalışmalarını da içeren Shields eğrisi (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Kararlı akıntı ve dalga durumlarında, boru etrafındaki taban malzemesi için hareketin oluşup oluşmayacağını gösteren, farklı  $e/D$  durumları için geliştirilmiş grafik Şekil 2.13'de verilmektedir.

### 2.2.2 İki Boyutlu Oyulma

Gerçekte su altı borusu altında meydana gelen oyulma üç boyutludur. Ancak, oyulma su altı borusu altında başlar ve boru uzunluğunca devam eder. Bu noktadan sonra, askıda duran boru kısmının altında oluşan oyulma iki boyutlu düşünülebilir (Şekil 2.14). Boru hattı omuzlarında (destek kısımlarında) devam eden oyulma ise üç boyutlu olarak ele alınmaktadır (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Boru altında serbest bölge gelişiminin yaşandığı kesimde, dalga hareketinin devamı ile birlikte boru altındaki oyulma çukurunun genişliği ve derinliği değişmeye devam etmektedir. Bu nedenle bu bölgedeki oyulma iki boyutlu olarak ele alınabilir. Ancak, boru hattı omuzları olarak adlandırılan kesitte, oyulma çukurunun genişliği ve derinliğine ilave olarak uzunluğu (üçüncü boyut) da değişmektedir.

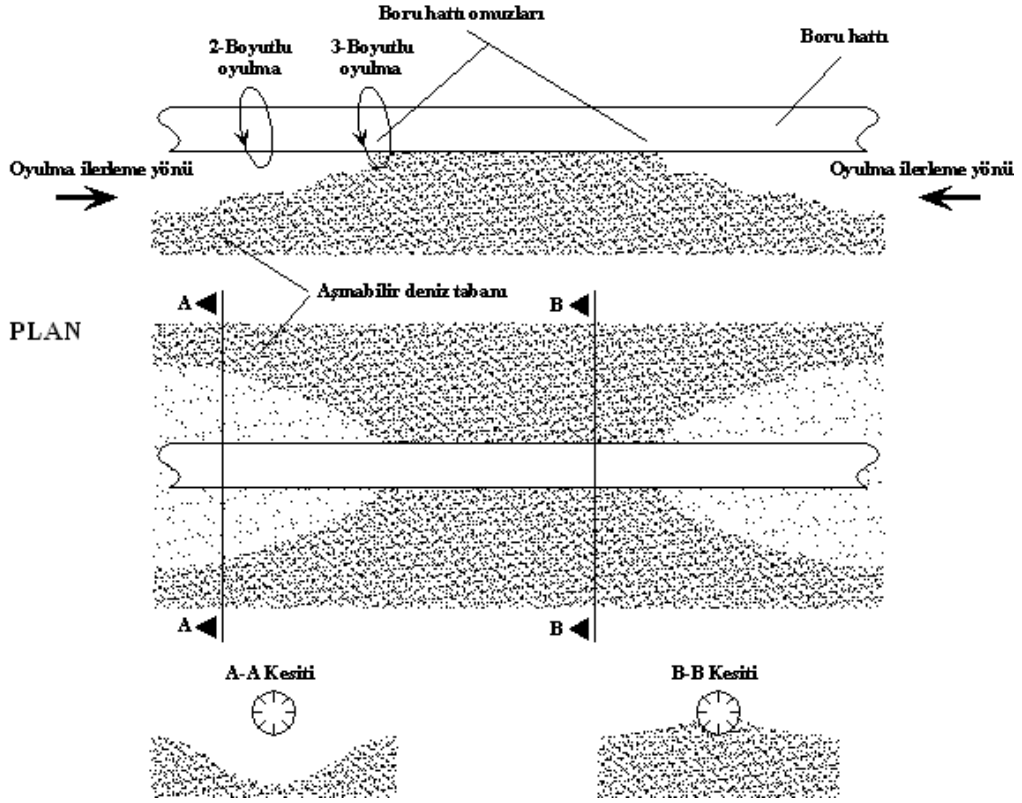


Şekil 2.13 Kararlı akıntı ve dalga durumlarında taban malzemesi için hareketin oluşup oluşmayacağı sınır eğriler (Sümer ve diğ., 2001).

İki boyutlu oyulma durumu için günümüze kadar gerçekleştirilen çalışmalardan en yaygın olarak kullanılanları, hem kararlı akıntı hem de dalga durumu için karakteristik bilgileri ile birlikte Tablo 2.1’de verilmektedir.

Bu tabloda,  $n$  poroziteyi,  $W$  oyulma çukuru genişliğini,  $U_{RP}$  ise Ursell sayısından ( $U_R$ ) türetilmiş düzenlenmiş Ursell sayısını göstermektedir.

## BOYKESİT



Şekil 2.14 Boru hattı altındaki farklı oyulma yapıları ve oyulma ilerleyişinin şematik gösterimi.

Tablo 2.1 İki boyutlu oyulma durumunda oyulma derinliği (göreceli oyulma derinliği) bağıntıları.

Etki	Çalışma	Bağıntı	Geçerlilik koşulları	Deney deniz zemini
Kararlı Akıntı	Kjeldsen ve diğ. (1973)	$S = 0.972 \left( \frac{U^2}{2g} \right)^{0.2} D^{0.8}$	Hareketli taban oyulması	$d_{50} = 0.18 \text{ ve } 0.58 \text{ mm}$ Yatay taban
	Bijker ve Leeuweistein (1984)	$S = 0.929 \left( \frac{U^2}{2g} \right)^{0.26} D^{0.78} d^{-0.04}$	Hareketli taban oyulması	$d_{50} = 0.074 \text{ ve } 0.17 \text{ mm}$ Yatay taban
	İbrahim ve Nalluri (1986)	$\frac{S}{D} = 0.084 \left( \frac{U}{U_{kr}} \right)^{0.30} \left( \frac{U}{\sqrt{gD}} \right)^{-0.16} + 1.33$ $\frac{S}{D} = 4.706 \left( \frac{U}{U_{kr}} \right)^{0.89} \left( \frac{U}{\sqrt{gD}} \right)^{1.43} + 0.06$	Hareketli taban oyulması Temiz su oyulması	$d_{50} = 0.425, 0.8 \text{ ve } 1.5 \text{ mm}$ Yatay taban
Dalga	Fredsoe ve diğ. (1992)	$\frac{S}{D} = 0.6 \mp 0.01$	Hareketli taban oyulması	$d_{50} = 0.36 \text{ mm}$ Yatay taban
	Sümer ve Fredsoe (1990)	$\frac{S}{D} = 0.1 \sqrt{KC}$	Hareketli taban oyulması	$d_{50} = 0.18 \text{ ve } 0.58 \text{ mm}$ Yatay taban
	Çevik ve Yüksel (1999)	$\frac{S}{D} = 0.11 KC^{0.45}$	Hareketli taban oyulması	Yatay taban $d_{50} = 1.28 \text{ mm}$
		$\frac{S}{D} = 0.042 U_{RP}^{0.41}$	Hareketli taban oyulması	Hem yatay hem de eğimli deniz tabanı (1/5 ve 1/10)
	Sümer ve Fredsoe (1990)	$\frac{W}{D} = 0.35 KC^{0.65}$	Hareketli taban oyulması	$d_{50} = 0.18 \text{ ve } 0.58 \text{ mm}$ Yatay taban

Ursell sayısı (2.13) ve düzenlenmiş Ursell sayısı da (2.14) eşitlikleri ile verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır. Bağıntılardaki  $H$  dalga yüksekliğini simgelemektedir.

$$U_R = \frac{H L^2}{d^3} \quad (2.13)$$

$$U_{RP} = U_R \left( \frac{H}{D} \right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2} \quad (2.14)$$

Harekete neden olan unsurlar incelendiğinde ise, dalga ve akıntı tesirlerinden kaynaklanan oyulma durumlarında oluşan oyulma çukurunun şekli etki eden unsura göre değişmektedir. Akıntı durumunda tek yönde hareket olduğundan, oluşan oyulma çukuru asimetrik, dalga durumunda ise salınımlı su hareketi olduğundan, oyulma çukuru simetrik olmaktadır.

Su altı borusu etrafında oluşan oyulmalar üzerinde etkili olan başka etkenlerde mevcuttur. Bunlar;

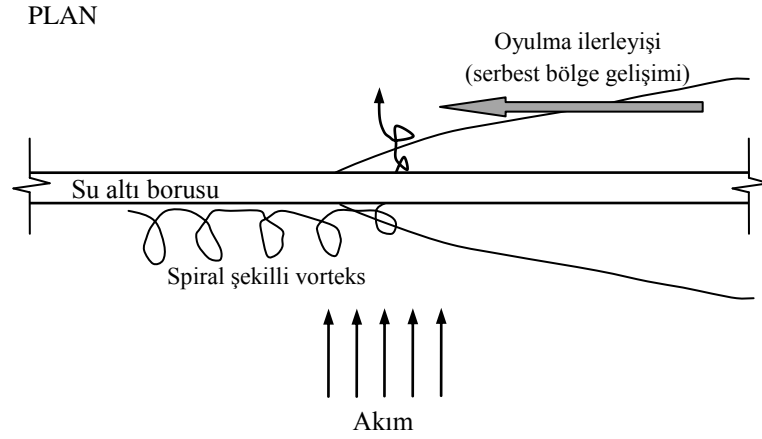
- Boru yüzey pürüzlülüğünün etkisi,
- Shields parametresinin etkisi,
- Borunun düşeydeki konumunun etkisi,
- Boru titreşiminin etkisi,
- Etki eden unsurların geliş açısının etkisi,
- Birden fazla boru hattı olması durumunun etkisi,
- Boru üstü kaplamanın ve teşkil şeklinin etkisi,
- Kohezif sediment olması durumunun etkisi,
- Su derinliğinin etkisi
- Dalga iklimi değişiminin etkisi

olarak sıralanabilir.

### 2.2.3 Üç Boyutlu Oyulma

Şekil 2.13’de görüldüğü gibi, su altı boru hattı altında oyulma başladıktan ve serbest bölge gelişimi oluştuktan sonra bu bölgede oluşan akım ve oyulma iki boyutlu olarak değerlendirilebilmektedir.

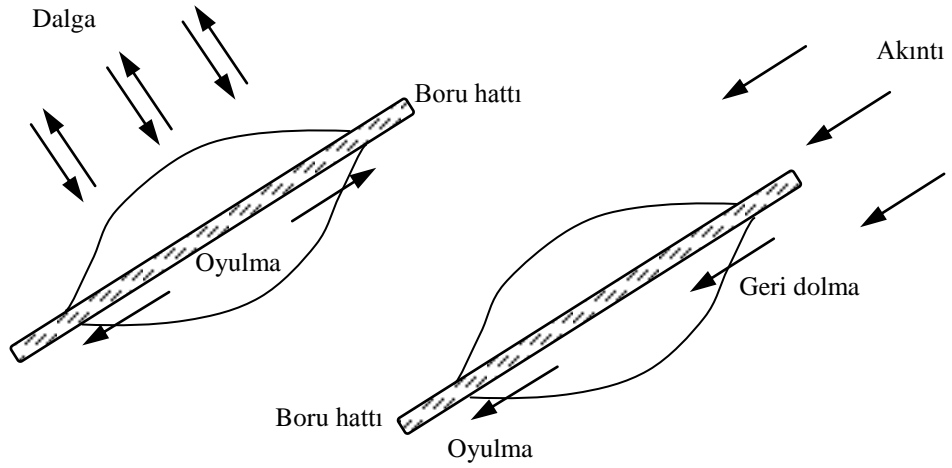
Ancak, boru hattı omuzları olarak adlandırılan ve Şekil 2.15’de şematik olarak gösterilen bölgedeki durum farklıdır. Buradaki akım yapısı da oyulma da üç boyutlu olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.15 Boru hattı omuzlarında oluşan spiral şekilli vorteks ve üç boyutlu akım yapısı.

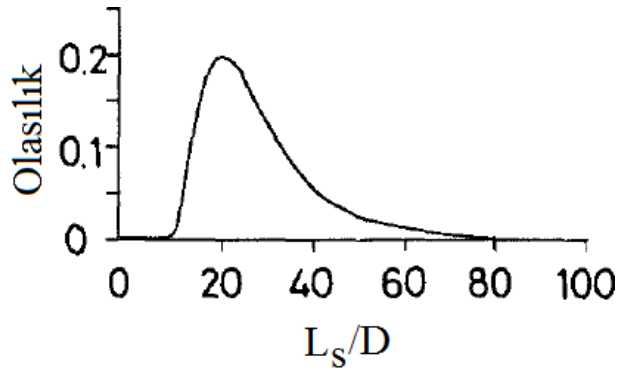
Serbest bölgenin oluşumundan sonra, boruya dik şekilde bir akım unsurunun etkimesi durumunda, serbest bölgenin gelişimi yada diğer bir deyişle oyulmanın ilerleyişi her iki tarafta eşit şekilde olmaktadır (Şekil 2.16). Ancak, boruya paralel etkileyen akıntı durumunda, akıntı geliş yönündeki bölümde geri dolma, diğer bölümde ise oyulma gözlenmektedir. Benzer şekilde boru eksenine açı bir etki söz konusu olursa, bu durumda serbest bölgenin gelişim her iki tarafta eşit olmamaktadır.

Oluşan serbest bölgenin uzunluğu ve gelişim mekanizması hakkında günümüze kadar yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu konu henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır (Sümer ve Fresoe, 2002). Konu ile ilgili hali hazırda Orgill ve diğ., (1992) tarafından yapılan bir saha çalışması mevcuttur (Orgill ve diğ., 1992).



Şekil 2.16 Farklı akım yönleri durumunda boru altındaki serbest bölgenin gelişimi.

Gerçekleştirilen saha çalışmaları sonucu göreceli serbest bölge uzunluğunun ( $L_s/D$ ) değişimi için Şekil 2.17’de gösterilen olasılık yoğunluk grafiği verilmiştir.

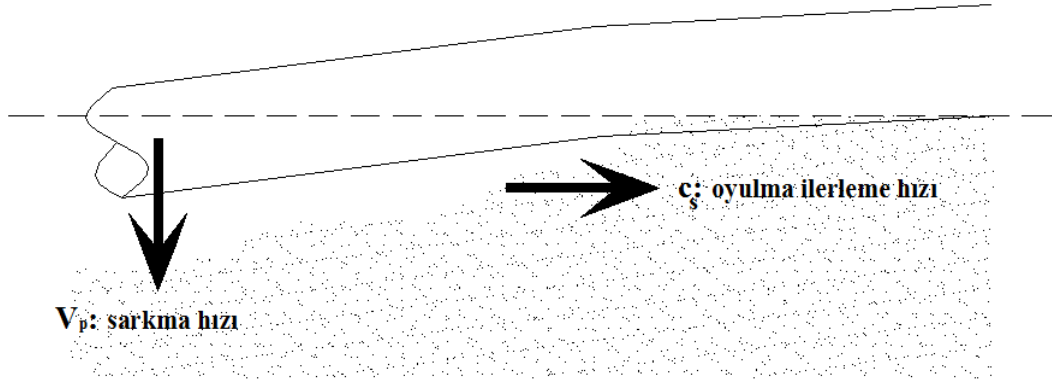


Şekil 2.17 Boru altında oluşan göreceli serbest bölge uzunluğunun olasılık yoğunluk fonksiyonu (Orgill ve diğ., 1992).

Şekil 2.17’den de görüleceği üzere,  $L_s/D$  boyutsuz oranı 10 ila 90 arasında değişmekle birlikte, %20 olasılıkla 20 değerini almaktadır.

Üç boyutlu oyulma mekanizması düşünüldüğünde göz önüne alınması gerekli diğer durumlar ise boru hattı omuzlarındaki kendinden gömülme ve sabit borular için sarkma yada bel verme olarak adlandırılan fiziksel olaydır.

Şekil 2.18’de gösterildiği gibi boru hattı omuzlarında devam eden oyulma ile gelişen serbest bölge durumunda, bu kesim üzerindeki su altı boru hattı yayılı yük etkisine maruz basit mesnetli kiriş gibi davranmaya başlayacaktır.



Şekil 2.18 Boru hattı omuzlarında oyulma ilerleyişi ve serbest bölge üzerinde borudaki sarkma.

Boru hattının, altında oluşan oyulma ile birlikte kendini gömmesi durumu ise çok farklı stabilite sorunlarını peşin sıra getirmektedir. Bunlardan biri, boru altında oluşan oyulma sonrası borunun kendinden gömülmesi ile oyulma sürecinin tekrarlı olarak sürmesi ve bunun sonucu boru hattının, sağlam taban üzerinde duran kısmı ile arasında kot farkı oluşması ve sonucunda kırılma, çatlama gibi sorunların doğmasıdır.

Günümüze kadar gerçekleştirilen çalışmalarda, özellikle kararlı akıntı durumu için iki boyutlu oyulma mekanizması geniş çaplı araştırılmıştır. Bununla birlikte, dalga durumu ve özellikle üç boyutlu oyulma mekanizması çalışmaları sınırlı sayıda kalmıştır. Takip eden ana bölümde, tez çalışma konusunu yakından ilgilendiren geçmiş çalışmalara yer verilmektedir.

## **BÖLÜM ÜÇ**

### **MEVCUT ÇALIŞMALAR**

Su altı boruları etrafında oluşan akışın ve zemin hareketlerinin incelenmesi konusu geniş bir alana yayıldığından, bu bölümde özellikle tez çalışma alanını oluşturan dalga etkisindeki su altı borusu etrafında oluşan oyulmaların araştırıldığı ve yakın geçmişte gerçekleştirilen çalışmalar verilmektedir. İncelemenin kolaylığı açısından, geçmiş deneysel ve sayısal çalışmalar ayrı bölümlerde ele alınmıştır. Bununla birlikte, tez çalışma alanı ile ilgili olarak kaynak teşkil edecek başlıca yayınlar mevcuttur.

Su altı borusu etrafında, dalga ve kararlı akıntı unsurları ile oluşan akım ve yerel zemin hareketleri, deneysel ve sayısal olarak 1950'li yıllardan günümüze değin araştırılmakta ve hala araştırılmaya devam etmektedir. Konu ile ilgili temel çalışmalardan biri, Mutlu Sümer ve Jorgen Fredsoe tarafından kaleme alınan ve 1997'de ilk basımı yapılan, silindirik yapılar etrafında oluşan akımın ve bunun oluşturduğu kuvvetlerin hidrodinamiğinin incelendiği kitaptır (Sümer ve Fredsoe, 2006). Bu yayında konuyla ilgili o güne kadar yapılan çalışmalar derlenmiş ve devamında 2006 yılındaki geliştirilmiş baskısıyla çalışma güncellenmiştir. Bu çalışmada temel olarak incelenen konular; kararlı akıntı durumunda bir silindir etrafındaki akış ve oluşan kuvvetler, salınımlı hareket durumunda bir silindir etrafında oluşan akış, düzenli dalga durumunda bir silindire etki eden kuvvetler, bir silindir etrafındaki akışın matematiksel ve nümerik işleyişi, difraksiyon etkisi, düzensiz dalga durumunda bir silindire etki eden kuvvetler ve silindirlerin akış tesirli titreşimleri olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, Mutlu Sümer ve Jorgen Fredsoe tarafından 2002'de, kıyı ve açık deniz yapıları etrafında oluşan oyulma mekanizmasının değerlendirildiği ve o güne kadar yapılan çalışmaları da içeren bir kitap yayınlanmıştır (Sümer ve Fredsoe, 2002). Bahsedilen bu çalışmalar, konu ile ilgili temel kaynaklar olmakta ve hazırlandıkları tarihe kadar gerçekleştirilen çalışmaların bir ürünü haline gelmektedir. Bu yayında, temel olarak incelenen konular (tez çalışma alanıyla ilgili olduğu kadarıyla), oyulmanın başlangıcı, tünel erozyonu, iki boyutlu oyulma, boru hattı omuzlarında üç boyutlu oyulma ve



kendinden gömülme, ölçek etkisi, boru hatları için oyulmaya karşı koruma önlemleri ve matematiksel modelleme olarak sıralanabilir.

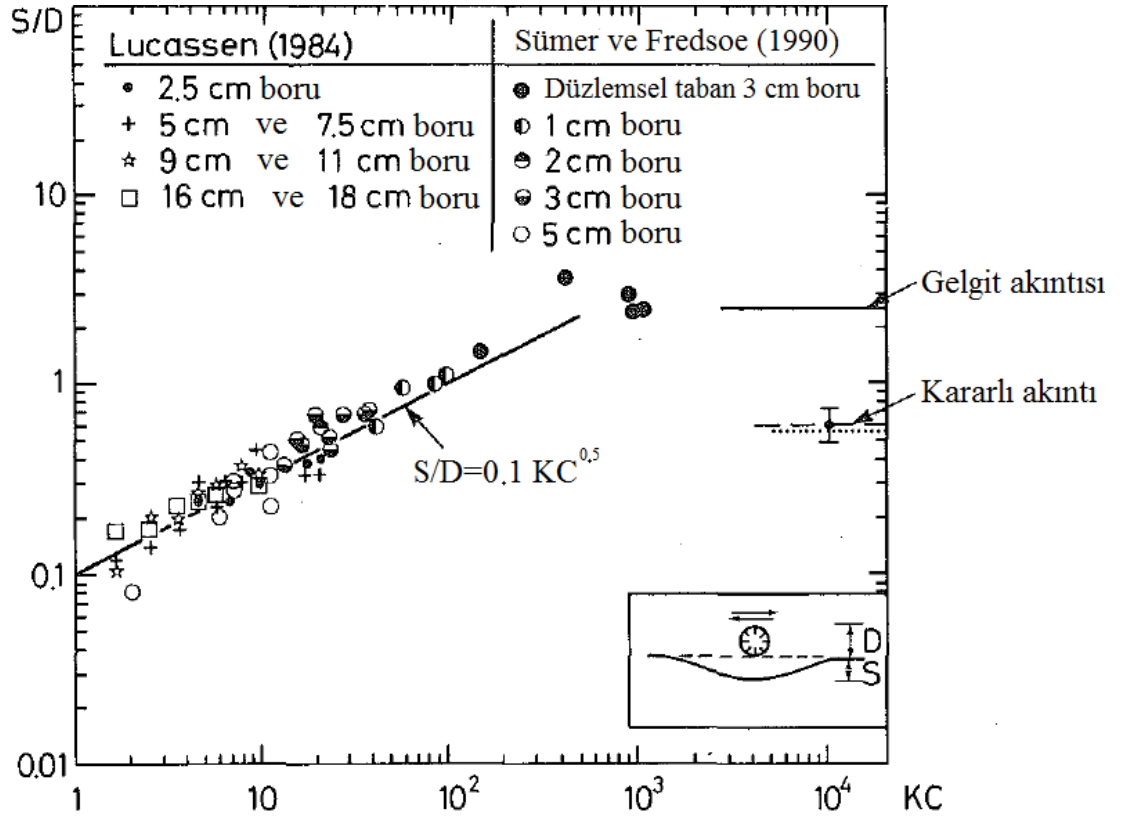
Yukarıda değinilen bu temel kaynaklara ilave olarak, konu ile ilgili gerçekleştirilmiş çeşitli lisansüstü tezleri, projeler ve bunların ürünü olan makaleler bulunmaktadır. Bu çalışmalardan belli başlıları ve özellikle tez çalışma konusunu yakında ilgilendirenleri deneysel ve sayısal olarak gruplandırılarak aşağıda verilmiştir.

### 3.1 Literatürde Mevcut Deneysel Çalışmalar

Sümer ve diğ., (1988) çalışmasında akıntı durumunda su altı borusu altında meydana gelen oyulmalara dümen suyu (art-iz) çevrintilerinin etkisi deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Çalışma, farklı  $e/D$  oranlarında, farklı Shields parametrelerinde ( $\theta$ ) ve farklı Reynolds sayılarında ( $Re$ ) gerçekleştirilmiştir. Göreceli oyulma derinliği ( $S/D$ ) ve göreceli oyulma genişliği ( $W/D$ ) değerlerinin olayda etkin boyutsuz sayılarla değişimi araştırılıp, ayırık çevrinti modeli olarak adlandırılan nümerik çözüm yöntemi ile bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çevri kopması olayının, oyulma sürecinin başlarında dümen suyu çevrintilerinin etkin olduğu zamanda meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Ayırık çevri modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (Sümer ve diğ., 1988).

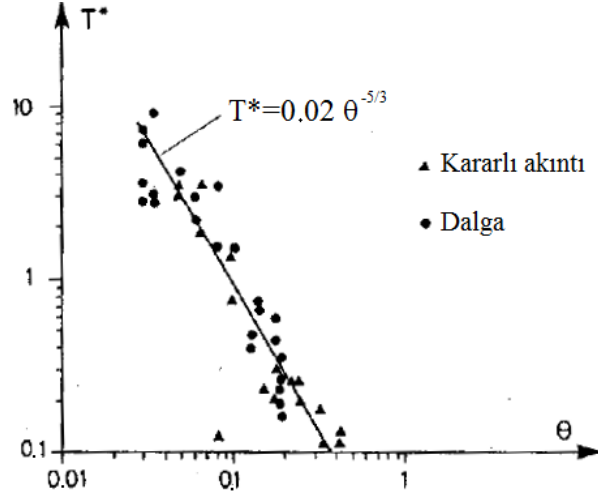
Sümer ve Fredsoe, (1990) çalışmasında, dalga etkisi ile boru altında oluşan oyulmalar deneysel olarak incelenmiştir. Temel olarak, Keulegan-Carpenter ( $KC$ ) sayısının olayda etkin olduğu saptanmıştır. Akabinde göreceli oyulma derinliği ( $S/D$ ) ile  $KC$  sayısı arasında ilişki kurulmuştur. Buna göre,  $S/D$ 'nin  $KC$  sayısının karekökü ile doğru orantılı olarak değiştiği ortaya konmuştur (Şekil 3.1). Ayrıca, Shields parametresinin oyulma üzerindeki etkisi araştırılmış ancak bunun  $KC$  sayısı kadar etkin olmadığı sonucuna varılmıştır. Göreceli boru yüzey pürüzlülüğünün de olaydaki etkisinin yok denebilecek kadar az olduğu belirtilmiştir (Sümer ve Fredsoe, 1990).

Fredsoe ve diğ., (1992) çalışmasında, hem dalga hem de akıntı durumunda boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği parametresi ( $T^*$ ) ile Shields parametresi ( $\theta$ ) arasındaki ilişki deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 3.2). Zaman ölçeğinin fiziksel anlamı ve nasıl elde edildiği beşinci ana bölümde ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Deneysel sonuçlarda dalga etkisi halinde boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği parametresinin Shields parametresinin  $-5/3$ 'üncü kuvveti ile orantılı olduğu belirtilmiştir (Fredsoe ve diğ., 1992).

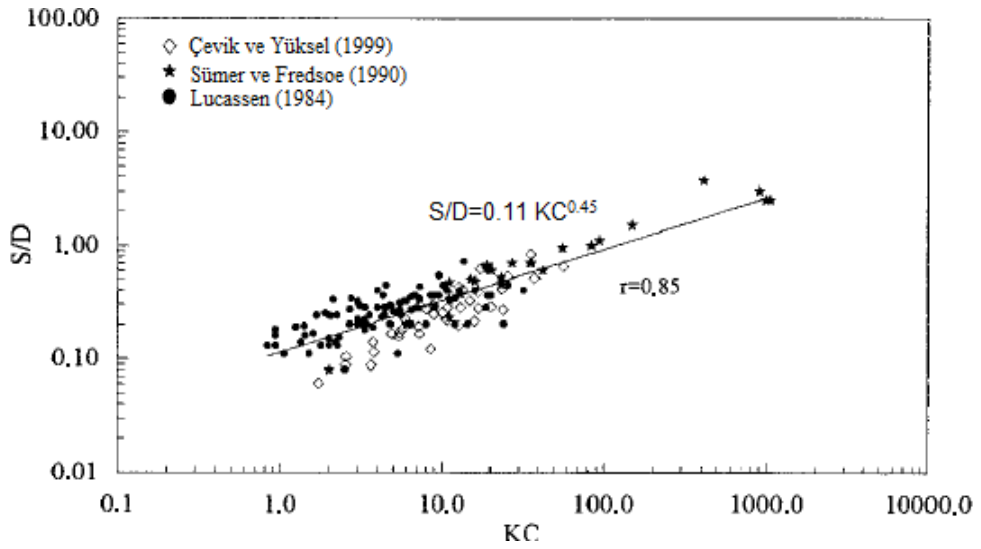


Şekil 3.1 Sümer ve Fredsoe (1990) çalışması sonucu elde edilen  $S/D - KC$  ilişkisi.

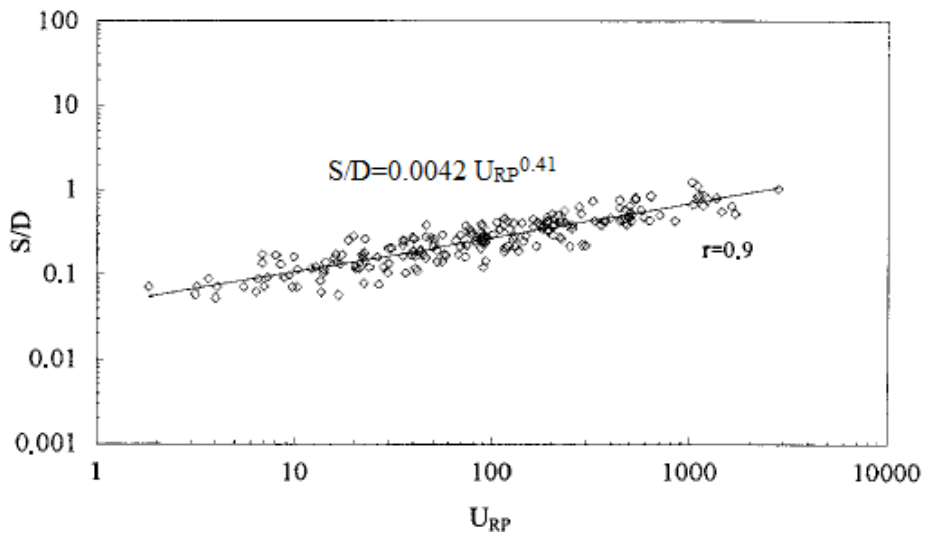
Çevik ve Yüksel, (1999) çalışmasında, dalga etkisindeki ve aynı zamanda sığlaşma koşullarındaki boru etrafındaki oyulmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen bağıntılardan  $S/D$  ile  $KC$  sayısı arasındaki ilişki (Şekil 3.3), Sümer ve Fredsoe, (1990) çalışmasını doğrular niteliktedir. Bununla birlikte,  $S/D$  ile düzenlenmiş Ursell sayısı (Şekil 3.4) ve kritik derinlik ile sörf parametresi (Şekil 3.5) arasında deneysel bağıntılar sunulmuştur (Çevik ve Yüksel, 1999).



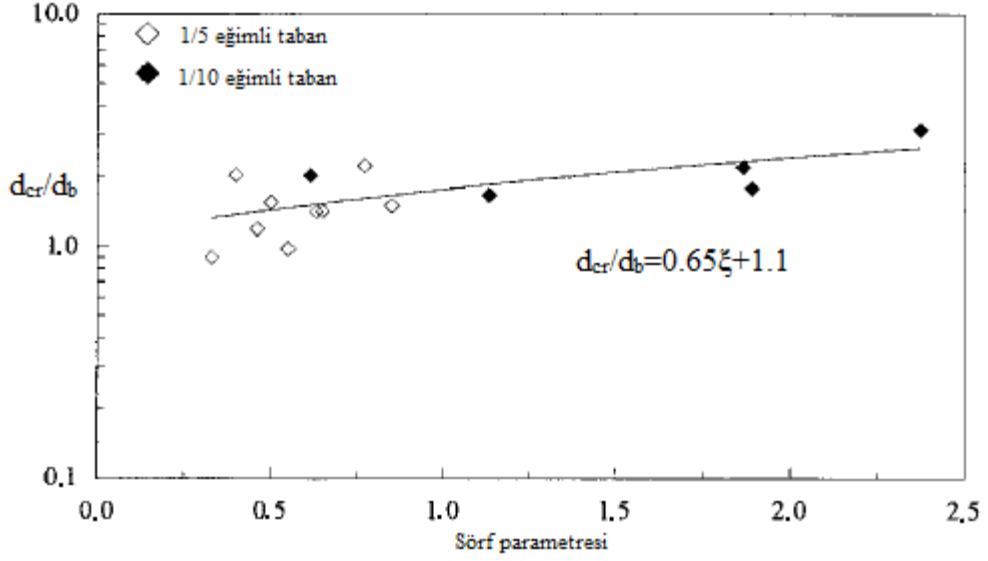
Şekil 3.2 Fredsoe ve diğ., (1992) çalışması sonucu elde edilen  $T^* - \theta$  ilişkisi.



Şekil 3.3 Çevik ve Yüksel (1999) çalışması sonucu elde edilen  $S/D - KC$  ilişkisi.



Şekil 3.4 Çevik ve Yüksel (1999) çalışması sonucu elde edilen  $S/D - U_{RP}$  ilişkisi.



Şekil 3.5 Çevik ve Yüksel (1999) çalışmasında farklı deniz tabanı eğimlerinde kritik derinliğin kırılma derinliğine oranının sörf parametresi ile değişimi.

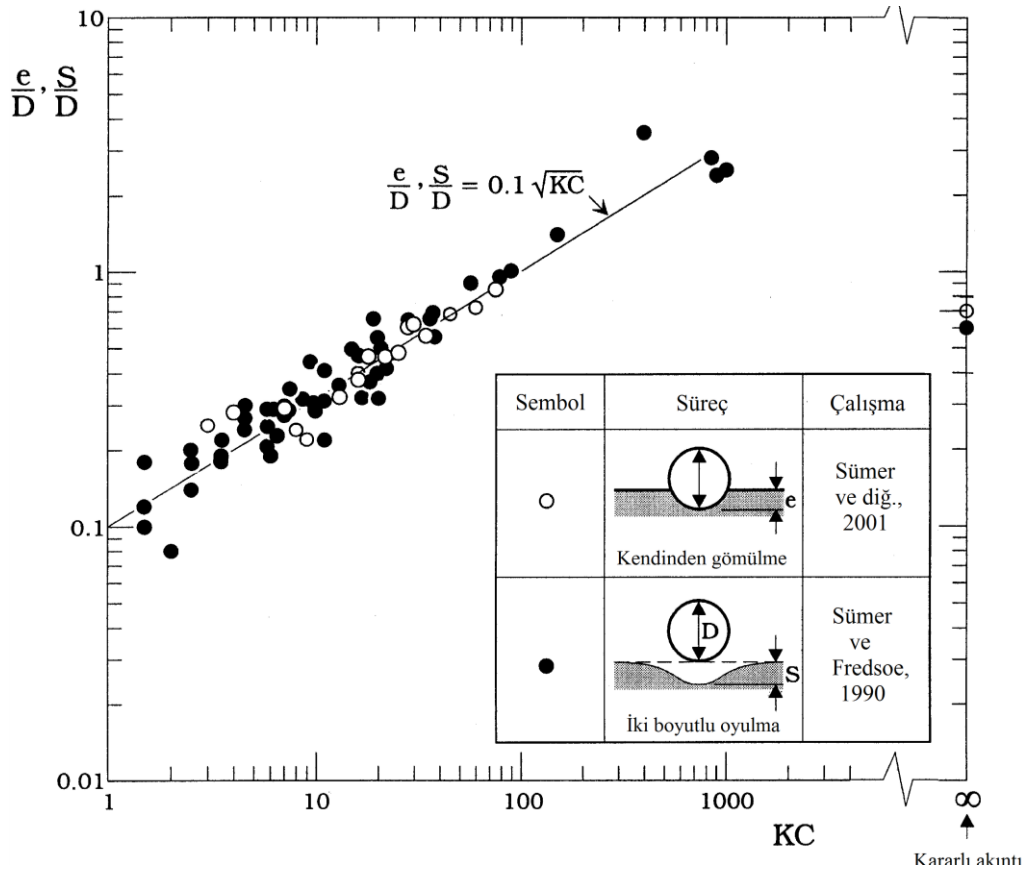
Burada,  $d_{cr}$  eğimli tabanda oluşan en büyük oyulma derinliğini ve  $d_b$  dalgaların kırıldıkları derinliği göstermektedir.  $\xi$  ile simgelenen sörf parametresi,  $H_0$  derin su dalga yüksekliğini,  $L_0$  derin su dalga boyunu ve  $\alpha$  eğimli deniz tabanının yatayla yaptığı açığı göstermek üzere (3.1) ile verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (2.13)$$

Sümer ve diğ. (2001) çalışmasında, su altı borusu civarında oluşan oyulmanın başlangıcı ve borunun kendinden gömülmesi durumları deneysel olarak geniş kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Deneysel kararlı akıntı için,  $U=72.5 \text{ cm/sn}$  değerine kadar ulaşan hızlarda ve  $Re = 7.3 \cdot 10^4$  değerine kadar ulaşan Reynolds sayılarında, dalga durum için ise,  $U_m=50.2 \text{ cm/sn}$  değerine kadar ulaşan hızlarda ve  $KC=75$  değerine kadar ulaşan Keulegan-Carpenter sayılarında gerçekleştirilmiştir.

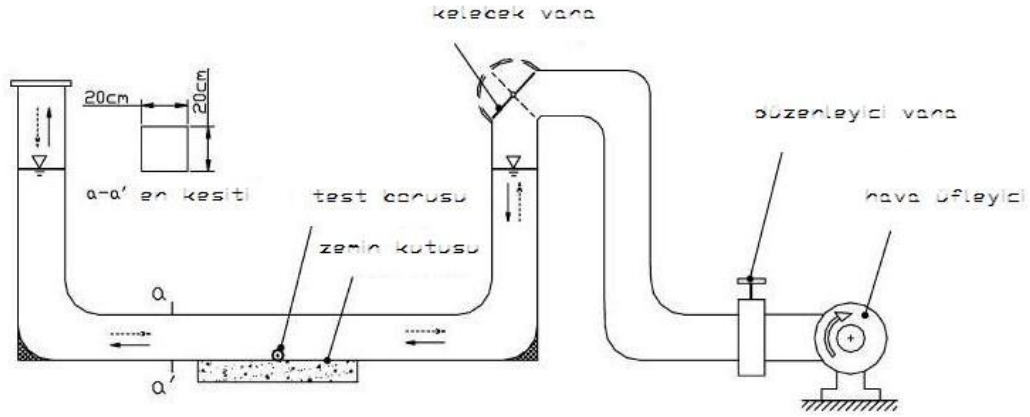
Deneysel kullanılan temsili su altı borusunun yüzey pürüzlülüğü çoğunlukta  $k_s/D \cong 0$  (yüzeyi pürüzsüz boru) iken bazı deneylerde  $k_s/D = 6 \cdot 10^{-2}$  (yüzeyi pürüzlü boru) değerini almaktadır. Kum tabandaki borunun kendinden gömülmesinin araştırılması için memba ve mansap tarafında olmak üzere iki noktadan basınç

ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, oyulmanın başlangıcına sebep olan faktörlerin, aşırı sızma akışı ve sonucunda oluşan borulanma olduğunu göstermiştir. Boru altındaki oyulmanın başlangıcının araştırılması için tekrarlı deneyler hem kararlı akıntı hem de dalga durumları için gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda, oyulma mekanizmasının boru boyunca bir noktada başladığı sonra zamana bağlı olarak yayıldığı ve neticesinde boru hattı omuzlarının meydana geldiği görülmüştür. Bundan sonra bir noktada artık zemin taşıma gücü yenilmekte (genel kayma göçmesi) ve boru kendi ağırlığı ile gömülmeye başlamaktadır. Bu duruma kadar olayı kontrol eden parametre Keulegan-Carpenter sayısı ( $KC$ ) iken bu noktadan sonra Shields parametresi de ( $\theta$ ) devreye girmektedir. Bir başka değişle oluşan oyulma geometrisi yalnızca  $KC$  sayısının değil artık hem  $KC$  hem de  $\theta$  değerlerinin fonksiyonu olmaktadır (Sümer ve diğ., 2001). Çalışma sonucu elde edilen göreceli kendinden gömülme derinliği ve göreceli oyulma derinliği ile Keulegan-Carpenter sayısının değişimi Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Sümer ve diğ., (2001) çalışması için göreceli kendinden gömülme derinliği ile Keulegan-Carpenter sayısının değişim grafiği (Sümer ve Fredsoe, 1990 çalışması sonuçları ile birlikte).

Gao ve diğ., (2002) ve Gao ve diğ., (2003) çalışmalarında ise, su altı borusunun dalga kaynaklı stabilite problemleri deneysel olarak araştırılmıştır. Burada, dalga etkisinin oluşturulması için aşağıda şematik çizimi gösterilen U-şekilli salınlımlı akış tüneli kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Gao ve diğ., (2002) ve Gao ve diğ., (2003) çalışmalarında kullanılan U-şekilli salınlımlı akış tüneli.

Bu deney düzeneğinde, düzenleyici vana sayesinde dalgayı temsil eden sinüzoidal harmonik hareketin genliği ayarlanabilmekte ve kelebek vananın açılıp kapanma zamanları ile de hareketin periyodu değiştirilebilmektedir. Bu deney sistemi ile oyulma ve boruda stabilite kaybına yol açan su zerreciğinin yatay hareketi modellenebilse de, dalgaların yol açtığı dinamik basınç modellenemez. Bununla birlikte küçük ölçekli hareketlerde dalganın oluşturduğu dinamik basınç hidrostatik basınca oranla daha küçüktür. Temsili deniz tabanı olarak  $d_{50} = 0.38\text{mm}$ ,  $D_r = 0.37$  (kumun göreceli yoğunluğu) ve  $d_{50} = 0.21\text{mm}$ ,  $D_r = 0.60$  olan iki farklı kum kullanılmıştır. Kum oyulmasının zamana bağlı değişiminin kaydı için video kamera kullanılmıştır. Deneylerde, uzunluğu  $l = 0.19\text{m}$  olan  $D = 0.014\text{m}$ ,  $D = 0.02\text{m}$  ve  $D = 0.03\text{m}$  çaplı borular kullanılmıştır. Bu iki çalışmada temel olarak araştırılanlar, serbest uçlu boru ile yuvarlanması engellenmiş boruda dalga kaynaklı oluşan stabilite kaybı, serbest uçlu boru durumunda kum danelerinin boyutunun borunun yanıl dengesizliğine etkisi, boyutsuz boru ağırlığı ( $G$ ) ile Froude sayısı ( $Fr$ ) arasındaki deneysel bağıntı olarak sıralanabilir (Gao ve diğ., 2002 ve Gao ve diğ., 2003).

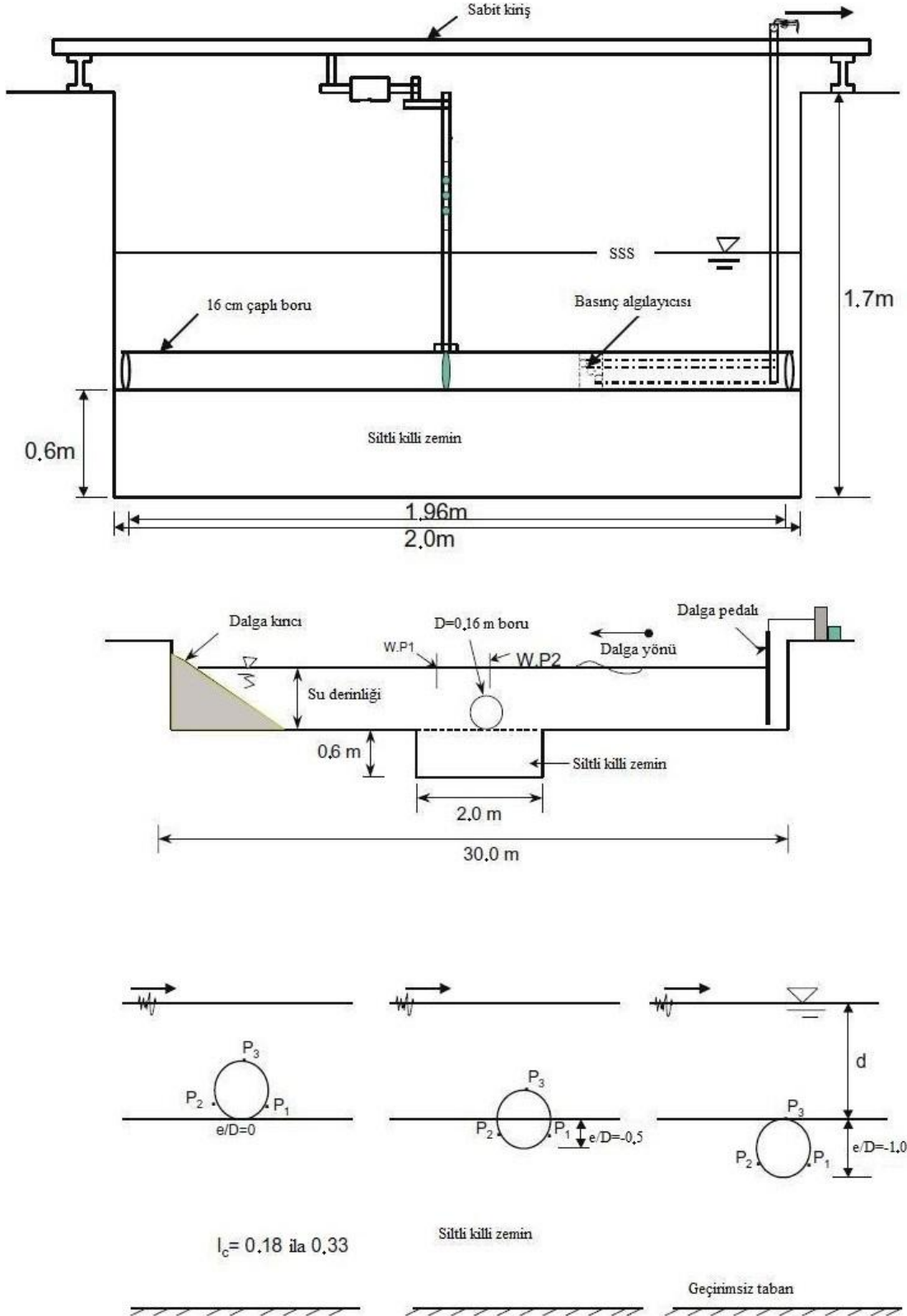
Kumar ve diğ., (2003) çalışmasında, killi deniz zeminlerinde bulunan su altı boruları civarında oluşan oyulma ve kaldırma kuvvetleri dalga etkisi durumunda deneysel olarak araştırılmıştır. Borunun düşeydeki yerleşimine göre (zemin üstünde, yarı gömülü ve tam gömülü gibi) oluşan oyulma derinliklerinin değişimleri incelenmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Deneylerde, oluşturulan dalga diklikleri  $H/L=0.01-0.18$  arasında ve göreceli su derinlikleri  $d/L=0.08-0.4$  arasında değiştirilmektedir. Bu çalışmanın diğerlerinden farkı, kohezyonlu temsili deniz zemini ile deneylerin gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu çalışma sonucunda elde edilen temel bulgular şöyledir; 1. Dalga kaynaklı normalleştirilmiş basınç değerleri, göreceli su derinliği 0.08’den 0.35’e kadar artarken %35–45 oranında azalmaktadır; 2.  $e/D$  oranı 0.0’dan (zeminin üzerinde) -1.0’a (tamamen gömülü) kadar giderken, dalga kaynaklı normalleştirilmiş basınç değerleri %30–52 ve kaldırma kuvveti değerleri ise %70–78 oranında azalmaktadır (Kumar ve diğ., 2003).

Kumar ve diğ., 2005 çalışmasında, gelişigüzel dalga durumunda ve farklı  $e/D$  oranları için, killi deniz zeminlerinde yer alan su altı borularına etkiyen dalga basıncı ve kaldırma kuvveti parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde gerçekleştirilen boyutsuz parametrelerin değişim aralıkları Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Bu çalışma için kullanılan deney düzeneği, yukarıda anlatılan ve yine aynı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmada kullanılan deney düzeneği ile aynıdır.

Tablo 3.1 Kumar ve diğ., (2005) çalışmasındaki boyutsuz parametrelerin değişim aralıkları.

Parametre	Değer aralığı
Dalga dikliği ( $H/L$ )	0.015–0.07
Dalga yükseklik oranı ( $H/D$ )	0.24–1.25
Su derinliği oranı ( $d/a$ )	3.75–6.25
Göreceli su derinliği ( $d/L$ )	0.05–0.24
Zeminin kıvam indeksi ( $I_c$ )	0.17–0.33
Göreceli gömülme derinliği ( $e/D$ )	0.0–1.0

\*  $a = H/2$  dalga genliğini simgelemektedir.



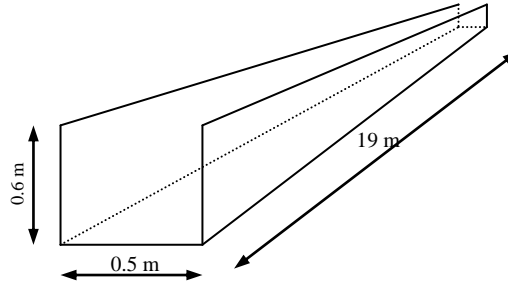
Şekil 3.8 Kumar ve diğ., (2003) ve Kumar ve diğ., (2005) çalışmalarında kullanılan deney düzeneği en ve boy kesit görüntüleri.



Burada  $I_c=(LL-DNI)/(LL-PL)$  olup,  $LL$ ; likit limit,  $PL$ ; plastik limit ve  $DNI$ ; doğal nem içeriğini göstermektedir. Deneysel için kullanılan düzeneğin, boy kesit ve en kesit görünüşleri aşağıdaki Şekil 3.8’de verilmektedir.

Deneysel sonuçunda temel iki bulguya ulaşılmıştır. Dalga basıncı ve kaldırma kuvveti spektrumu parametreleri göz önüne alındığında, yüksek kıvam indeksli zeminlerdeki değerlerin, düşük kıvam indeksli zeminlerdeki değerlerden daha küçük olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca,  $I_c=0.33$  değeri için tamamen gömülü boru ( $e/D=-1.0$ ) durumundaki kaldırma kuvveti değerinin, deniz tabanı üzerine oturan ( $e/D=0.0$ ) boru durumundaki kaldırma kuvveti değerinden %60 daha düşük olduğu belirlenmiştir (Kumar ve diğ., 2005).

Gao ve diğ., (2006) ve Yang ve diğ., (2008) çalışmalarında borunun vorteks kaynaklı titreşimi ile aşınabilir deniz tabanı oyulması arasındaki ilişki deneysel olarak araştırılmıştır. Bunun için kurulan deney düzeneği geometrisi Şekil 3.9’da gösterilmektedir.

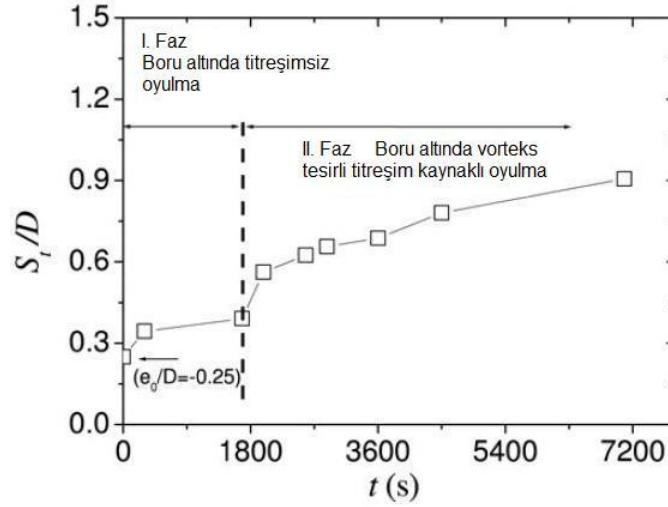


Şekil 3.9 Gao ve diğ., (2006) ve Yang ve diğ., (2008) çalışmalarında kullanılan dalga kanalı boyutları.

Her iki çalışmada da kararlı akıntı durumu değerlendirilmiştir ve bu durum için  $Re = 10^5$  değerlerine ulaşılmıştır. Kullanılan deney boruları  $l = 0.47m$  uzunluğa,  $D = 0.032m$  çapa sahip ve yaklaşık olarak pürüzsüz yüzeyledir ( $k_s/D \cong 0$ ). Çalışmalarda borular hep akıma dik olarak yerleştirilmiştir. Kullanılan temsili deniz zemini  $d_{50} = 0.38mm$  ve  $D_r = 0.66$  özelliklerine sahip orta yoğunlukta kumdur ancak çalışmaların birinde rijit taban malzemesi de düşünülmüştür. Deney boruları  $-0.25 < e_0/D < 0.75$  aralığında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yani kısmi gömülü

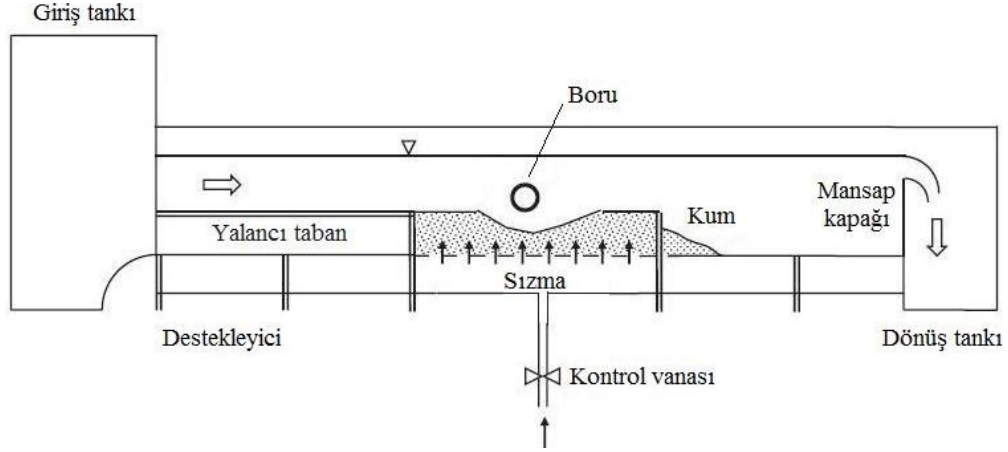
bir durumdan askıda boru haline kadar çeşitli şekillerde denenmiştir. Değınilen bu çalışmalar, boru titreşimi ile boru altı yerel oyulmanın incelendiğı örnek deneysel çalışmalardır. Elde edilen temel bulgular, boru altında oluşan oyulmanın iki fazlı olduğu, bunlardan ilkinin titreşimsiz oyulma ve diğzerinin de gelişen vortekslerle birlikte, vorteks tesirli titreşimlerin sonucu oluşan oyulma olduğunu göstermektedir (II. faz serbest titreşimli borular için). II. fazda boru titreşim genliğı artarken, titreşim frekansı azalmakta ve nihayetinde boru titreşimi ile oyulma denge durumuna gelmektedir (Gao ve diğ., 2006 ve Yang ve diğ., 2008).

Borunun düşeydeki yerleşimi düşünıldüğünde ise boru deniz tabanından uzaklaştıkça yani  $e_0/D$  oranı arttıkça, denge durumundaki oyulma derinliğinin azalmakta olduğu görülmektedir. Bahsedilen bu çalışmalardan elde edilen sonuç grafiğı Şekil 3.10'da gösterilmektedir ( $S_f/D$ : göreceli oyulma derinliğı).



Şekil 3.10 Gao ve diğ., (2006) ve Yang ve diğ., (2008) çalışmalarında zamana bağlı oyulma fazları.

Dey ve Singh, (2007) yılı çalışmasında, su altı borusu etrafında oluşan akıntı kaynaklı oyulmanın deneysel ve nümerik olarak araştırılmasına çalışılmıştır. Bu çalışmanın diğzerlerinden farkı, borunun altında bulunan zemindeki yukarı doğru oluşan sızma etkisinin de hesaba katılmasıdır. Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.11'de yer almaktadır.



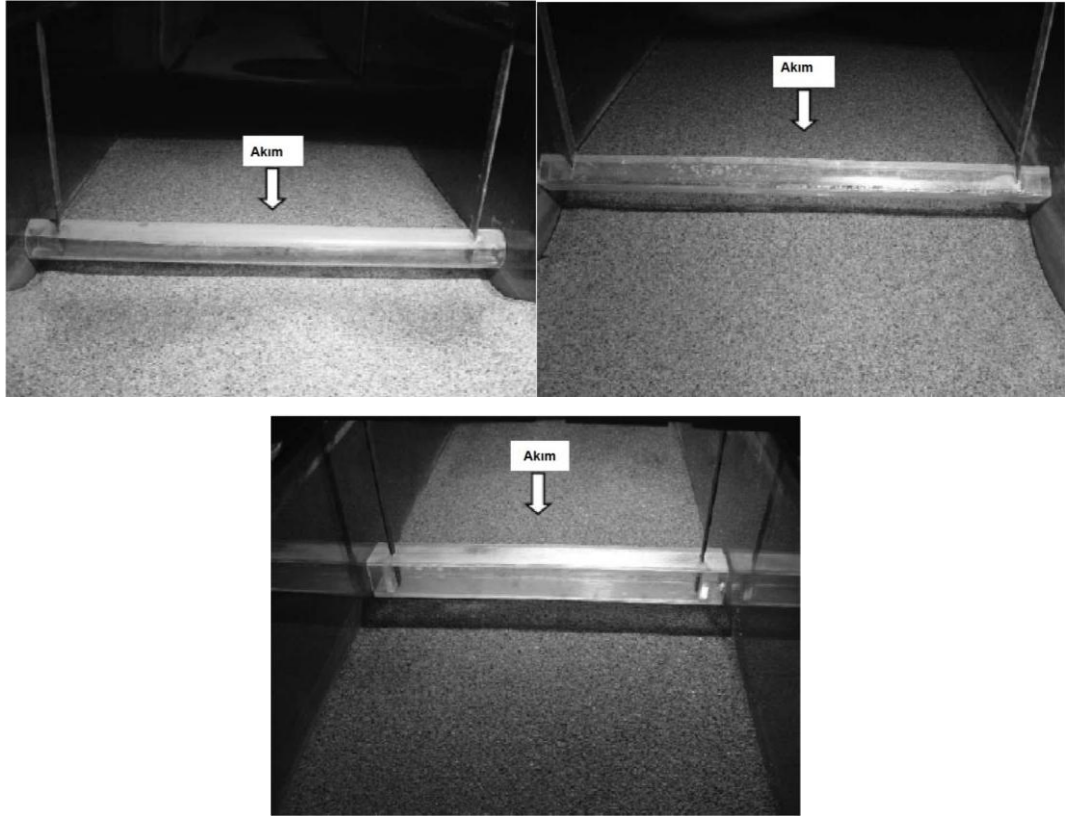
Şekil 3.11 Dey ve Singh, (2007) çalışmasında kullanılan deney düzeneği.

Kullanılan bu deney düzeneği  $b = 0.61m$  genişliğe,  $h = 0.7m$  yüksekliğe ve  $l = 12m$  uzunluğa sahiptir. Deneylerde kullanılan boruların çapları  $D = 3 - 7cm$  ve temsili deniz zemininin dane medyan çapları  $d_{50} = 0.81, 1.86, 2.54$  ve  $3mm$  arasında değişmektedir. Bu çalışmada, potansiyel akış teorisi kullanılarak temiz su oyulması durumu için ( $\theta < \theta_{kr}$ ) maksimum oyulma derinliğini hesaplayan yarı-teorik bir model geliştirilmiştir. Kullanılan model çıktıları ile deneysel olarak elde edilen verilerin uyum içinde olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, boru altındaki deniz tabanında sızma olması durumu için deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak da sızma olduğu durumdaki oyulma derinliğinin sızma olmayan durumdaki oyulma derinliğine göre daha küçük olduğu gözlenmiştir. Burada minimum oyulma derinliğine karşılık gelen, sızma hızının akış hızına oranı olan boyutsuz sayının kritik bir değeri bulunmaktadır (Dey ve Singh, 2007).

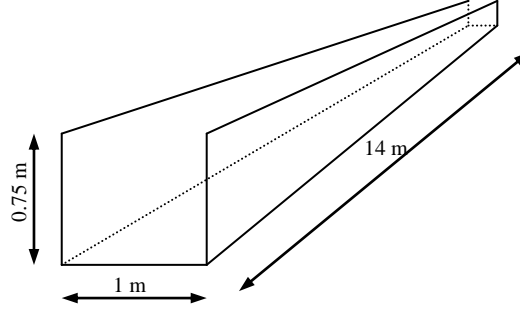
Dey ve Singh, (2008) çalışmasında, kararlı akıntı etkisindeki su altı boruları etrafındaki oyulmalar temiz su oyulması ( $\theta < \theta_{kr}$ ) durumu için deneysel olarak araştırılmıştır. Birçok farklı unsurun denge durumundaki oyulma profiline etkileri incelenmiştir. Diğer çalışmalara göre ilginç nokta, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, farklı geometrideki su altı borularının oyulma olayındaki etkilerinin araştırılmış olmasıdır.

Birçok parametreye bağılı olarak pek çok sonuç elde edilse de, farklı geometride elde edilen sonuçlar ilgi çekicidir. Akıntıya karşı diyagonal biçimde bulunan kare borunun ve akıntının bir kenarına dik gelecek şekilde yerleştirilen kare borunun altında oluşan oyulmalar, aynı koşullar altında silindirik boru civarında oluşan oyulmanın sırasıyla 1.29 ve 1.91 katı olmaktadır (Dey ve Singh, 2008).

Öner ve diğ., (2008) çalışmasında temel olarak boru-deniz ve düz rijit taban arasındaki etkileşim mekanizması deneysel olarak araştırılmıştır. Şekil 3.13’de deneylerde kullanılan ve yan duvarları pleksi-glass malzemeden teşkil kanalın genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 3.12 Dey ve Singh, (2008) çalışmasında kullanılan farklı geometriye ve konuma sahip su altı boruları.

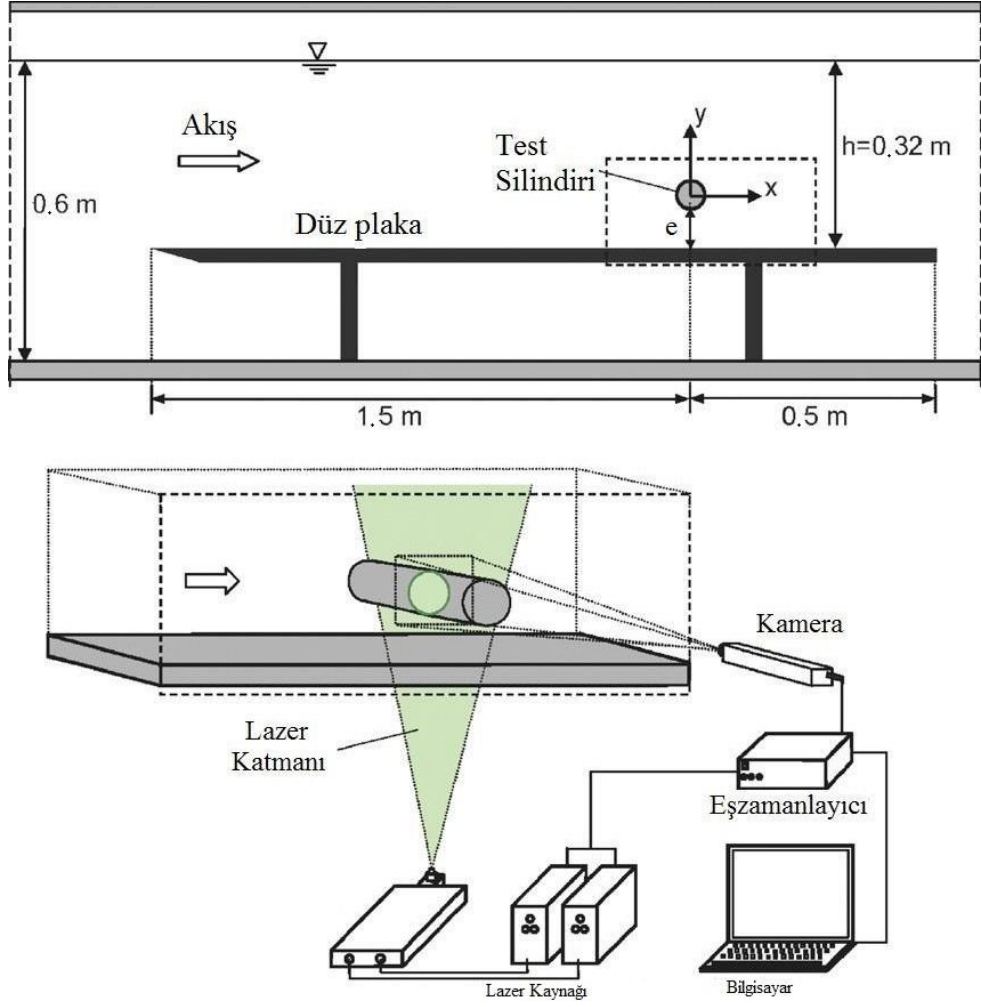


Şekil 3.13 Öner ve diğ., (2008) çalışmasında kullanılan dalga kanalı boyutları.

Bahsedilen çalışma yalnızca kararlı akıntı durumunda gerçekleştirilmiştir. Burada incelenen kararlı, iki boyutlu ve türbülanslı akım durumunda yatay silindir etrafındaki akışın, silindirin tabanla arasındaki düşey mesafenin boru çapına oranı olan boyutsuz sayı ile değişimidir. Çalışmada  $D=50$  mm çapında boru kullanılmış olup, denenen  $e/D$  oranları sırasıyla 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1.0, 2.0 dır. Deneylerde belirlenmesi gerekli en önemli parametrelerden biri olan hız değerleri Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü (*Particle Image Velocimetry*) tekniği ile ölçülmüştür. Burada temel prensip, su içine ilave edilen izleyicilerin hareketi ile silindir etrafındaki akış alanındaki hız değerlerinin belirlenebilmesidir. Şekil 3.14’de ölçüm yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.

Çalışma yukarıda belirtilen değişkenlere ilave olarak, değişik  $Re$  sayılarında da gerçekleştirilmiştir. Bunlar; 840, 4150 ve 9500 değerleridir. Sonuç olarak yedi farklı  $e/D$  oranının ve üç farklı akış koşulunun değerlendirildiği bu çalışmada,  $e/D \geq 1.0$  değerleri için tabanın, silindir etrafındaki harekete etkisinin anlamını yitirmekte olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca,  $e/D=0.0\sim 0.3$  değerli arasında keskin olan akım yapısındaki değişim,  $e/D \geq 0.3$  değerinden sonra azalmaya başladığı tespit edilmiştir (Öner ve diğ., 2008).

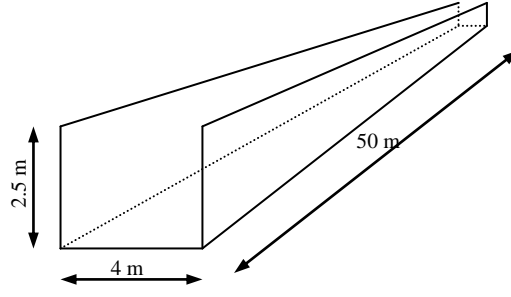
Cheng ve diğ., (2009) çalışmasında, kararlı akıntı durumu için su altı borusu altında oluşan üç boyutlu oyulma deneysel olarak incelenmiştir. Burada temel araştırma konusu olarak, ilk oyulma başlangıcından sonra oluşan oyulma ilerleme hızının ( $c_s$ ) incelenmesi gösterilebilir. Deneyler için kullanılan kanalın genel görünüşü Şekil 3.15’de verilmektedir.



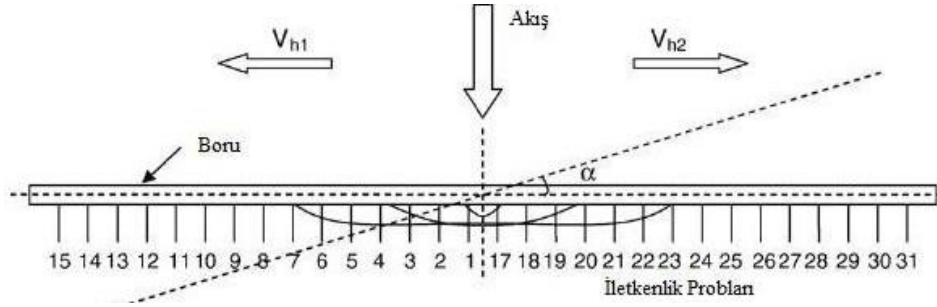
Şekil 3.14 Öner ve diğ., (2008) çalışmasında kullanılan ölçüm yöntemi şematığı.

Deneyler sırasında birçok boyutsuz parametrenin olaya etkisi araştırılmıştır. Burada öne çıkan değerler,  $e/D$  oranı, gelen akımın Shields sayısı ( $\theta$ ) ve akımın boruya geliş açısı olarak sıralanabilir. Bu çalışmada, oyulma derinliklerinin ölçümü için özel geliştirilen iletkenlik algılayıcıları kullanılmıştır. Bu düzeneğe ait gösterim Şekil 3.16'da verilmektedir.

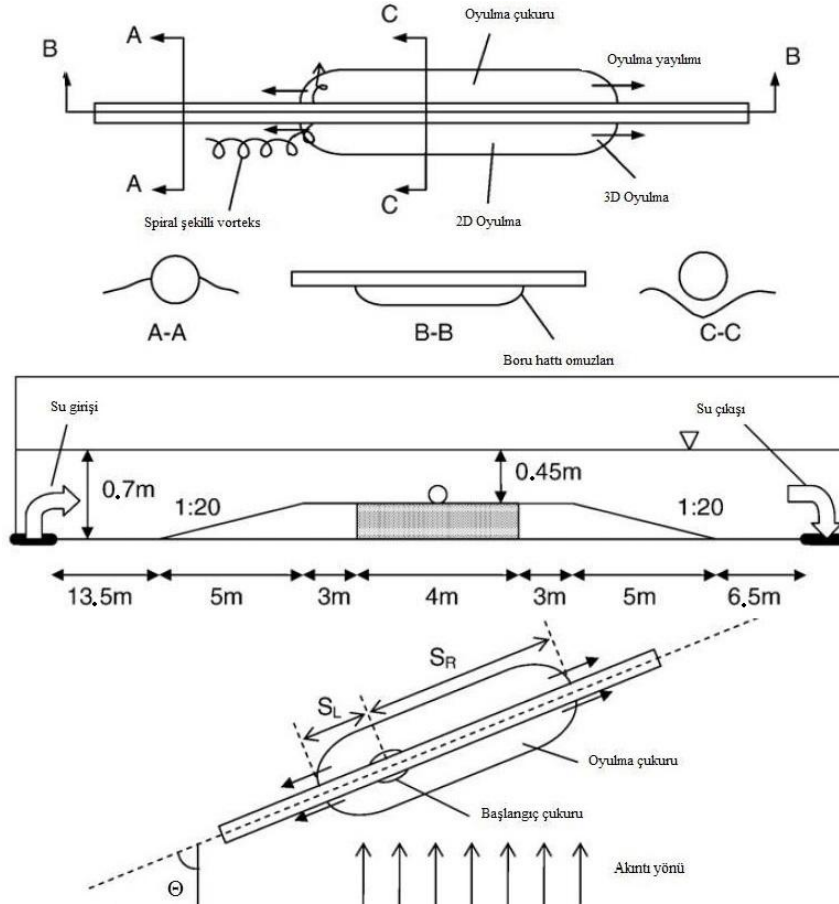
Kanaldaki diğer uzunluk değerleri ve şematik gösterimlere Şekil 3.17'de yer verilmektedir. Çalışmadan üretilen temel sonuçlar temel inceleme konusu olan oyulma ilerleme hızı üzerinedir. Gelen akımın Shields sayısı ( $\theta$ ) arttıkça oyulma ilerleme hızı da ( $c_s$ ) artmaya başlamaktadır. Göreceli gömülme derinliği ( $e/D$ ) azaldıkça (gömülme derinliği arttıkça) oyulma ilerleme hızı ( $c_s$ ) azalma göstermektedir (Cheng ve diğ., 2009).



Şekil 3.15 Cheng ve diğ., 2009 çalışmasında kullanılan deney kanalı boyutları.

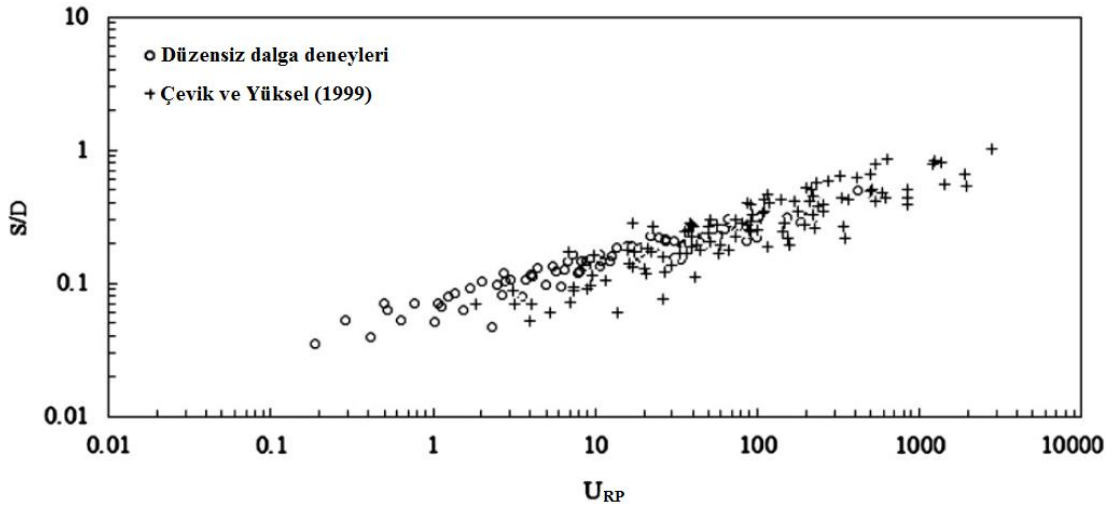


Şekil 3.16 Cheng ve diğ., (2009) çalışmasında an iletkenlik problemlerinin boruya yerleşimi.

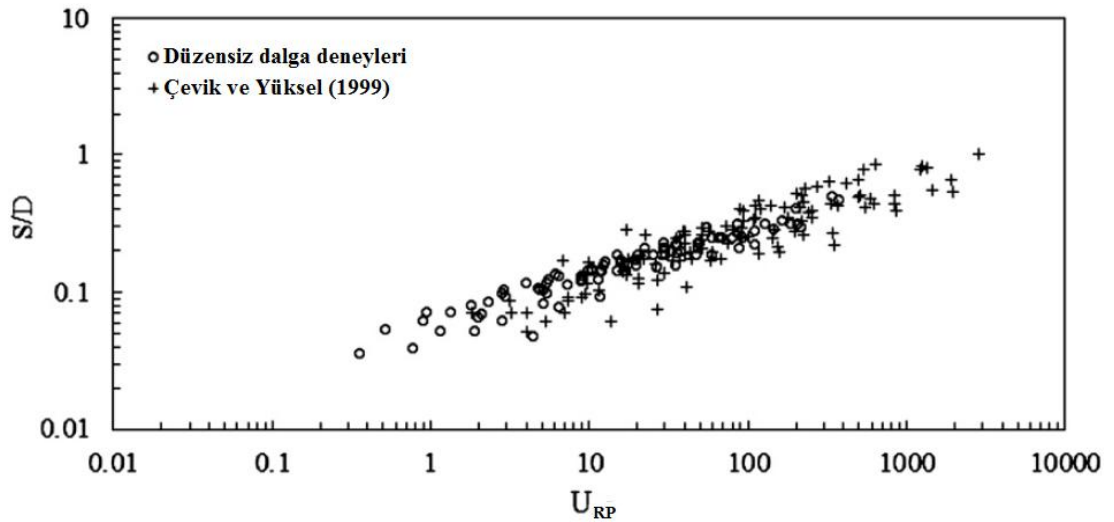


Şekil 3.17 Cheng ve diğ., (2009) çalışmasında deney kanalı boyutları ve oyulma çukuru ilerleyişi.

Kızılöz ve diğ. (2013) çalışmasında, düzensiz dalga etkisindeki sabitlenmiş su altı borusu altındaki oyulmalar hem yatay taban hem de 1/10 eğimli kıyı şevi durumlarında deneysel olarak araştırılmıştır. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da gösterildiği gibi düzenlenmiş Ursell sayısına bağlı olarak verilen göreceli nihai oyulma derinlikleri, ikinci ve üçüncü yazarın 1999 yılındaki çalışmalarında düzenli dalgalar ile elde ettikleri sonuçlar ile benzer bir değişim göstermektedir (Çevik ve Yüksel, 1999; Kızılöz ve diğ., 2013).



Şekil 3.18 Kızılöz ve diğ., (2013) çalışmasında  $U_{RP}$  ile  $S/D$ 'nin değişimi ( $H_{rms}$ : dalga yüksekliklerinin karelerinin ortalamasının karekökü ve  $T_p$ : pik dalga periyotları ile gerçekleştirilen hesaplar).



Şekil 3.19 Kızılöz ve diğ., (2013) çalışmasında  $U_{RP}$  ile  $S/D$ 'nin değişimi ( $H_s$ : dalga yüksekliklerinin en büyük 1/3'lük kısmının ortalaması ve  $T_m$ : spektral ortalama dalga periyodu ile gerçekleştirilen hesaplar).



### 3.2 Literatürde Mevcut Sayısal Çalışmalar

İncelenen konu ile ilgili sayısal model çalışmaları 20. yüzyılın son çeyreği ile başlamakla birlikte, sayısal çözüm yöntemlerinin hızlı gelişimi ve bilgisayar teknolojisindeki yenilikleri ile özellikle son on beş yılda büyük bir ivme yakalanmıştır.

Li ve Cheng (1999) çalışmasında, potansiyel akım teorisine dayanan bir sayısal model geliştirilmiştir. Kararlı akıntı durumunda su altı borusu etrafında oluşan oyulma çukurunun denge halinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan modelde sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözüm yapılmıştır. Önceki deneysel çalışmalar ile gerçekleştirilen karşılaştırmalar sonucu, oluşturulan sayısal modelin temiz su oyulması durumunda uygun sonuç verdiği bildirilmiştir (Li ve Cheng, 1999).

Smith ve Foster (2005) çalışmasında, aşınabilir bir taban üzerinde bulunan ve altı oyulmuş su altı borusu etrafındaki akım yapısını, Flow3D programı ile sayısal olarak modelleyip incelemişlerdir. İki boyutlu olarak gerçekleştirilen modellemede, iki denklemlilikli türbülans kapanış şemalarından  $k-\epsilon$  modeli ve doğrudan benzeşim yöntemlerinden Smagorinsky LES türbülans şemaları denenmiştir.  $k-\epsilon$  modelinin önceki gözlem sonuçları ile daha uygun olduğu sonucuna varılmış olmakla birlikte, bu modelin vorteks yayılımını yakalamak için, çözüm ağına oldukça bağımlı olduğu da vurgulanmıştır (Smith ve Foster, 2005).

Liang ve Cheng (2005) çalışmasında, dalga etkisi altındaki su altı borusu etrafındaki akım ve oyulma sayısal olarak modellenmiştir. Modelde sinüzoidal formda dalgalar üretilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Akım modeli için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri çözülmüş olup, zemin hareketi için hem askıdaki sediment konsantrasyonu hem de taban malzemesi hareketi dikkate alınmıştır. Akım hesapları ile sediment hesaplarının birlikte ele alınabilmesi için özel geliştirilen bir teknik uygulanmıştır. Sonuç olarak, literatürde mevcut üç farklı deneysel durum için çalıştırılan model sonuçları uygun sayılabilecek ölçüde bulunmuştur (Liang ve Cheng, 2005).

Liang ve diğ. (2005a) çalışmasında, kararlı akıntı durumunda su altı borusu etrafındaki iki boyutlu oyulma durumu için bir model geliştirilmiştir. Kurulan modelde özellikle Reynolds sayısının olaydaki etkisinin belirlenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Askıdaki sediment konsantrasyonu için yeni bir yöntem uygulanmıştır. Saha çalışmalarındaki borular dikkate alınarak gerçekleştirilen model analizlerinde elde edilen oyulma verilerinin sahadaki ölçümlere oranla %10-15 arasında daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca model, literatürde mevcut bağımsız deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış olup değerlerin bir hayli uyumlu olduğu rapor edilmiştir (Liang ve diğ., 2005a).

Liang ve diğ. (2005b) çalışmasında, kararlı akıntı etkisindeki su altı borusu etrafındaki oyulmalar iki boyutlu olarak modellenmiştir. Bu çalışmada çözümler sonlu farklar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, türbülans kapanışı için standart  $k-\epsilon$  modeli ve Smagorinsky modeli denenmiştir. Sonuçlar hem temiz su hem de hareketli taban oyulmaları durumlarında iyi sonuç vermekte olup, standart  $k-\epsilon$  modeli diğerine oranlar daha tercih edilebilir bir yapıda bulunmuştur (Liang ve diğ., 2005b).

Lu ve diğ. (2005) çalışmasında, su altı boru etrafında oluşan oyulmalar RNG türbülans modeli ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. RNG modelinin oyulmanın tahmini için uygun sonuçlar verdiği bildirilmiş olup, gerçekleştirilen analizler sonucunda, boru etrafındaki oyulmanın üzerinde taban kayma gerilmesi parametresinin çok etkin olduğu belirtilmiştir (Lu ve diğ., 2005).

Zhao ve Cheng (2008) çalışmasında, sırt sırta vermiş üstteki dar alttaki geniş iki boru hattı durumu için kararlı akıntı etkisi ile oluşan akım ve oyulmalar sayısal olarak modellenmiştir. Bu çalışma kapsamında Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmüştür. Zemin hareketi için askıda sediment konsantrasyonu denklemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, dar boru hattı ile geniş boru hattı arasındaki açıklığın hem akım hem de oyulma yapısını oldukça etkilediği sonucuna varılmıştır (Zhao ve Cheng, 2008).

Zhang ve diğ. (2009) çalışmasında, hem kararlı akıntı hem de dalga durumlarında su altı borusu etrafındaki oyulmanın başlangıcı için bir sayısal model geliştirilmiştir. Bu modelde Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri ve türbülans kapanışı için  $k-\omega$  modeli kullanılmıştır. Çözüm için sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Tabandaki sızma için Laplace denklemini de çözen modelde, farklı etkiler altında oyulmanın başlangıcı için çok sayıda analiz gerçekleştirilmiştir (Zhang ve diğ., 2009).

Alam ve Cheng (2010) çalışmasında, su altı borusu etrafındaki akım ve oyulma için üç boyutlu çözüm yapabilen bir model geliştirilmiştir. Bu model ile yalnızca akım yönündeki değil akıma dik yöndeki oyulma gelişimi de dikkate alınabilmektedir. Gerçekleştirilen analizler ile boru hattı omuzlarında oluşan spiral şekilli çevrintilerin oyulmaya etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Akım yönündeki oyulma verileri literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, boru boyunca oyulmanın gelişim hızının hemen hemen değişmediği ve oyulma çukuru eğiminin da sabit kaldığı bildirilmiştir (Alam ve Cheng, 2010).

Zhao ve Cheng (2010) çalışmasında, titreşimli su altı borusu etrafında kararlı akıntı etkisi ile oluşan akım ve oyulmalar sayısal olarak modellenmiştir. Geliştirilen model hem akımı hem de zemin hareketlerini bir arada çözmektedir. Çözüm için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, titreşimli boru durumunda sabitlenmiş durumdakine nazaran daha büyük oyulma derinliklerinin olduğu ortaya konulmuştur. Sayısal model ile elde edilen veriler, literatürde mevcut deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış olup, uyumun yüksek olduğu vurgulanmıştır (Zhao ve Cheng, 2010).

Yeganeh-Bakhtiary ve diğ. (2011) çalışmasında, Euler-Euler iki fazlı modeli kullanılarak su altı borusu altındaki tünel erozyonu durumundaki akım ve taban profili çözülmüştür. Navier-Stokes denklemlerinin türbülans kapanışı için  $k-\epsilon$  modeli kullanılmış olup, model sonuçlarının literatürde mevcut deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması ile geliştirilen sayısal modelin oldukça iyi modelleme yaptığı belirlenmiştir. Bu durum hem taban profili hem de boru altındaki hız alanı için geçerlidir (Yeganeh-Bakhtiary ve diğ., 2011).

## BÖLÜM DÖRT

### DENEY SİSTEMİ VE ÇALIŞMA YÖNTEMİ

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyleri yönlendirmek, incelenecek parametreleri belirlemek, bulguları sunmak ve elde edilecek sonuçları genelleştirmek için öncelikle boyut analizi gerçekleştirilerek incelenen fiziksel olaydaki etkin boyutsuz parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

#### 4.1 Boyut Analizi

İncelen fiziksel olaya etki eden farklı unsurlara ait boyutlu büyüklükler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

Akışa ait parametreler	:	$U_m, g, T_w, H, d, f_v$
Akışkana ait parametreler	:	$\rho, \mu$
Zemine ait parametreler	:	$\rho_s, d_{50}$
Geometrik parametreler	:	$D, S, W, L_s, e, k$

Burada,  $U_m$ ; borunun bulunduğu seviyede en büyük akış hızını,  $D$ ; boru (dış) çapını,  $g$ ; yerçekimi ivmesini,  $T_w$ ; salınımlı akışın (dalga) periyodunu,  $H$ ; salınım (dalga) yüksekliğini,  $d$ ; borunun bulunduğu kesimdeki dalgalanmamış su derinliğini,  $e$ ; boru alt yüzeyi ile deniz tabanı arasındaki düşey mesafeyi,  $k$ ; boru yüzey pürüzlülük yüksekliğini,  $f_v$ ; vorteks yayılım frekansını,  $\rho$ ; akışkanın (suyun) yoğunluğunu,  $\mu$ ; akışkanın (suyun) viskozitesini,  $\rho_s$ ; deniz zemininin yoğunluğunu,  $d_{50}$ ; deniz zemini için dane medyan çapını,  $S$ ; oyulma çukuru derinliğini,  $W$ ; oyulma çukuru genişliğini ve  $L_s$ ; oyulma çukuru uzunluğunu göstermek üzere, tekrarlanan boyutlu büyüklükler olarak  $U_m$ ,  $\rho$  ve  $D$  seçilerek Buckingham- $\pi$  teoremi vasıtasıyla boyut analizleri gerçekleştirilmiştir.

İlk boyutsuz sayı (4.1) eşitliği ile verilen boru Reynolds sayısı olarak elde edilmektedir.

$$\pi_1 = U_m^a \rho^b D^c \mu^1$$

$$K^0 L^0 T^0 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b L^c (KL^{-2}T)^1$$

$$K \rightarrow 0 = b + 1 \Rightarrow b = -1$$

$$T \rightarrow 0 = -a + 2b + 1 \Rightarrow 0 = -a - 2 + 1 \Rightarrow a = -1$$

$$L \rightarrow 0 = a - 4b + c - 2 \Rightarrow 0 = -1 + 4 + c - 2 \Rightarrow c = -1$$

$$\pi_1 = U_m^{-1} \rho^{-1} D^{-1} \mu^1 = \frac{\mu}{U_m \rho D} = \frac{\nu}{U_m D} = \text{Re}_D^{-1} \quad (4.1)$$

Benzer şekilde diğer boyutsuz büyüklükler sırasıyla; Froude sayısı (4.2), Keulegan-Carpenter sayısı (4.3), Strouhal sayısı (4.4), göreceli gömülme derinliği (4.5), göreceli boru yüzey pürüzlülüğü (4.6), boru çapına göre göreceli derinlik (4.7), dalga yükseklik oranı (4.8), deniz zemini bağlı özgül ağırlığı (4.9), boyutsuz deniz zemini dane medyan çapı (4.10), oyulma çukuru göreceli derinliği (4.11), oyulma çukuru göreceli genişliği (4.12) ve oyulma çukuru göreceli uzunluğu (4.13) olarak belirlenir.

$$\pi_2 = U_m^a \rho^b D^c g^1$$

$$\pi_2 = U_m^{-2} \rho^0 D^1 g^1 = \frac{D g}{U_m^2} = \text{Fr}^{-2} \quad (4.2)$$

$$\pi_3 = U_m^a \rho^b D^c T_w^1$$

$$\pi_3 = U_m^1 \rho^0 D^{-1} T_w^1 = \frac{U_m T_w}{D} = \text{KC} \quad (4.3)$$

$$\pi_4 = U_m^a \rho^b D^c f_v^1$$

$$\pi_4 = U_m^{-1} \rho^0 D^1 f_v^1 = \frac{f_v D}{U_m} = St \quad (4.4)$$

$$\pi_5 = U_m^a \rho^b D^c e^1$$

$$\pi_5 = U_m^0 \rho^0 D^{-1} e^1 = \frac{e}{D} \quad (4.5)$$

$$\frac{e}{D} > 0 \Rightarrow \text{Askıda boru}$$

$$\frac{e}{D} = 0 \Rightarrow \text{Deniz tabanına oturan boru.}$$

$$\frac{e}{D} < 0 \Rightarrow \text{Gömülü boru.}$$

$$\pi_6 = U_m^a \rho^b D^c k^1$$

$$\pi_6 = U_m^0 \rho^0 D^{-1} k^1 = \frac{k}{D} = \kappa \quad (4.6)$$

$$\pi_7 = U_m^a \rho^b D^c d^1$$

$$\pi_7 = U_m^0 \rho^0 D^{-1} d^1 = \frac{d}{D} \quad (4.7)$$

$$\pi_8 = U_m^a \rho^b D^c H^1$$

$$\pi_8 = U_m^0 \rho^0 D^{-1} H^1 = \frac{H}{D} \quad (4.8)$$

$$\pi_9 = U_m^a \rho^b D^c \rho_s^1$$

$$\pi_9 = U_m^0 \rho^{-1} D^0 \rho_s^1 = \frac{\rho_s}{\rho} = s \quad (4.9)$$

$$\pi_{10} = U_m^a \rho^b D^c d_{50}^1$$

$$\pi_{10} = U_m^0 \rho^0 D^{-1} d_{50}^1 = \frac{d_{50}}{D} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \pi_{11} &= U_m^a \rho^b D^c S^1 \\ \pi_{11} &= U_m^0 \rho^0 D^{-1} S^1 = \frac{S}{D} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \pi_{12} &= U_m^a \rho^b D^c W^1 \\ \pi_{12} &= U_m^0 \rho^0 D^{-1} W^1 = \frac{W}{D} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \pi_{13} &= U_m^a \rho^b D^c L_s^1 \\ \pi_{13} &= U_m^0 \rho^0 D^{-1} L_s^1 = \frac{L_s}{D} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Yukarıda sıralanan on üç adet boyutsuz parametrenin dışında yine olayda etkin bazı boyutsuz sayılar mevcuttur. Bunlardan ilki Shields parametresidir ( $\theta$ ). Bu parametre sediment parçacığının harekete başlaması kıstası için etkin boyutsuz sayı olup (4.14) eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$\theta = \frac{U_{fm}^2}{g (s-1) d_{50}} \quad (4.14)$$

Diğer bir boyutsuz sayı ise dane yoğunluk Froude sayısıdır ( $Fr_d$ ). Bu sayı, yukarıda çıkarılan klasik Froude sayısından farklı bir anlam taşımakta olup (4.15) eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$Fr_d = \frac{U_m}{\sqrt{g (s-1) d_{50}}} \quad (4.15)$$

$T$  zaman ölçeğini (bu parametre ile ilgili açıklayıcı bilgiler beşinci ana bölümde verilmektedir) göstermek üzere boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği ifadesi (4.16) eşitliği ile verilmektedir.

$$T^* = \frac{\left(g (s-1) d_{50}^3\right)^{1/2}}{D^2} T \quad (4.16)$$

Bu durumda karşımıza, (4.17) eşitliği ile verilen fonksiyonel bağıntı çıkmaktadır. Görüldüğü üzere, su altı borusu altındaki zemin hareketinin incelendiği bir fiziksel olayda etkin boyutsuz parametre sayısı oldukça fazladır.

$$\frac{S}{D}, \frac{W}{D}, \frac{L_s}{D} = f\left(\text{Re}_D, Fr, KC, St, \frac{e}{D}, \kappa, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, s, \frac{d_{50}}{D}, \theta, Fr_d, \dots\right) \quad (4.17)$$

Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasında yukarıdaki boyutsuz sayılardan belirli bir kısmının değişimi incelenebilmiştir. Değiştirilen boyutsuz sayılar, boru etrafındaki akış ve zemin hareketleri olayında etkin parametreler olan  $KC$ ,  $\text{Re}_D$ ,  $Fr$ ,  $Fr_d$ ,  $\theta$  ve  $d_{50}/D$  sayıları ile dalga karakteristiklerinin etkin olduğu  $H/D$ ,  $d/L$  ve  $H/L$  değerleridir.

Tez kapsamında su altı borusu etrafındaki akışın ve bunun sonucu oluşan zemin hareketlerinin incelenmesi boyutsuz parametreler ışığı altında gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç elde edilen boyutsuz sayıların birbirleri ile ilişkisinin ortaya konulmasıdır. Elde edilen sonuçlar, boyutsuz sayılar ile ifade edilebileceğinden uygulamada da kullanılabilir.

Yukarıda değinilen ve incelenen fiziksel olayda etkin boyutsuz parametrelerin değişimlerinin araştırılması ve genelleştirilebilecek bulgulara ulaşılması amacıyla bir deney sistemi oluşturulmuştur.



## 4.2 DeneY Sistemi

Tez çalışması kapsamında deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı yanındaki alanda bir deneY sistemi tasarlanıp inşa edilmiştir. DeneY sistemi iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, deneYlerin gerçekleştirildiği dalga kanalı ve bu kanala dalga sağlayan düzenli dalga üreteç sistemidir.

### 4.2.1 Dalga Kanalı

Dalga kanalı (Şekil 4.1) net ölçüler olarak, 33 m uzunluğa, 3.6 m genişliğe ve 1.2 m derinliğe sahip olacak şekilde inşa edilmiştir. Kanal tabanı 18 cm kalınlığında içerisinde bir sıra Ø5/150/150 mm hasır çelik bulunan betonarme tabliye şeklinde olup yan duvarlar enine yerleştirilmiş blok tuğlalardan teşkil edilmiştir. Sızdırmazlığın sağlanabilmesi için duvarların iç yüzeyine ve tabana çimento esaslı su yalıtım malzemesi sürülmüştür. Ayrıca, kanaldaki su yükünden dolayı oluşacak yanıl basıncın karşılanması amacıyla her 1.5 m’de bir olmak üzere 40x60x2 mm kutu profiller yardımıyla kuşaklamalar yapılmıştır.



Şekil 4.1 Dalga kanalı genel görünümü.

Şekil 4.1’de belirtildiği gibi, dalga kanalında üretcein olduğu kısım açık deniz tarafı ve sönümlenme sisteminin bulunduğu kısım da sahil tarafı olarak adlandırıldığında, kanalının sahil tarafından 6 m açık deniz tarafına doğru olan kesimde karşılıklı olarak 1x1.2 m ebatlarında gözlem açıklıkları bırakılmıştır (Şekil 4.2). Bu kısımda kullanılan 40x60x2 mm kutu profil çerçevelerin üzerine 5+5 mm

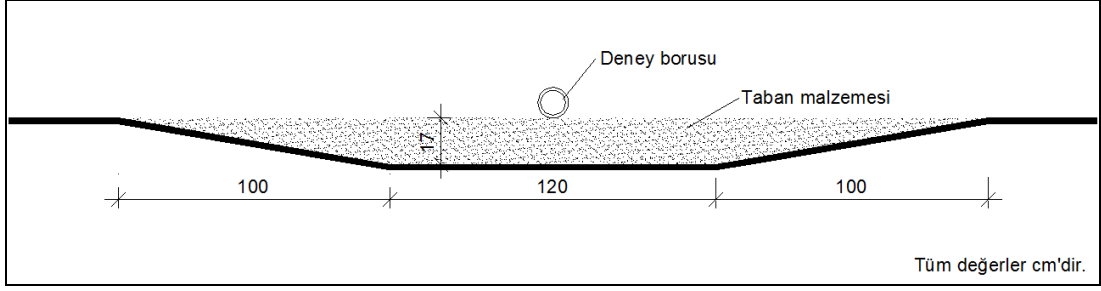
lamine cam oturtulmuştur. Uygulama sırasında cam ile kanalın yan duvarları aynı hizada olacak şekilde ayarlanmış, böylece girinti yada çıkıntı durumunda akımı bozacak etkilerden kaçınılmıştır. Gözlem açıklıklarında bulunan camların dış etkenlere karşı korunması amacıyla bu kısımlara dışarıdan kapatılabilen kapaklar monte edilmiştir.

Dalga kanalı tabanı yatay bir şekilde oluşturulmuş olmasına rağmen iki bölgede bu durum değişmektedir. Bunlar, gözlem açıklıklarının bulunduğu ve deneyler sırasında boruların yerleştirildiği bölge ile dalga üretici dubasının bulunduğu açık deniz tarafı başlangıcıdır.

Şekil 4.3’de görüleceği üzere gözlem açıklıklarının bulunduğu kesimde kanal tabanına trapez şekil verilerek bir taban malzemesi çukuru oluşturulmuştur. Taban malzemesi doldurulduktan sonra çukur düzeltilmekte ve kanalın diğer bölgelerindeki tabanla aynı seviyeye getirilmektedir.

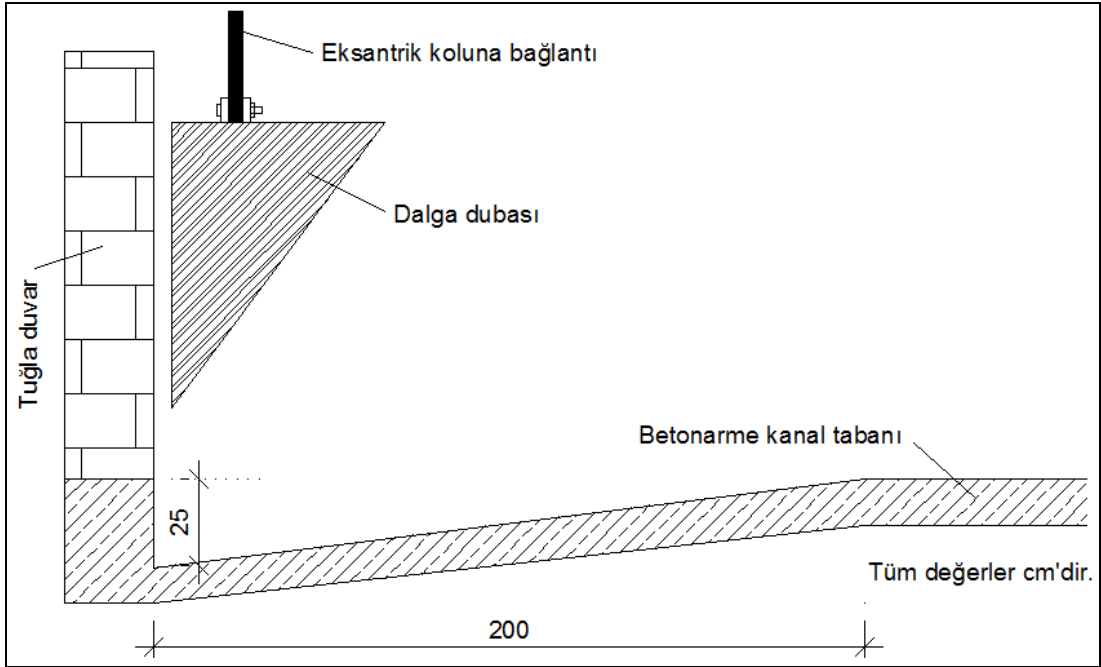


Şekil 4.2 Karşılıklı gözlem açıklıkları ve lamine camlar.



Şekil 4.3 Dalga kanalı tabanının gözlem açıklığında aldığı şekil.

Dalga kanalı tabanındaki bir diğer değişiklik ise dalga üreteç sisteminin suya batıp çıkan kısmı olan dalga dubasının bulunduğu kesimde yer almaktadır (Şekil 4.4). Buradaki amaç dalga dubasının yer değiştirme miktarının geniş bir aralıkta tutulabilmesine olanak tanımaktır. Dalga dubasının hareketi ile yer değiştiren su kütlesi dubanın şekline de bağlı olarak sahil kesimine doğru hareket etmekte bu durumda su yüzeyini periyodik olarak değiştirerek dalgalar oluşturmaktadır.



Şekil 4.4 Dalga kanalının açık deniz tarafındaki taban şekli ve detayları.

Yukarıda verilen ayrıntılara ilave olarak dalga kanalında farklı amaçlara hizmet etmek üzere oluşturulan unsurlar da mevcuttur. Bunlardan biri kanalın sahil kesiminde bulunan ve açık deniz tarafından sahile doğru ilerleyen dalgaları bu bölümde sönmüleyip, geriye yansımalarını engelleyen sistemdir. Şekil 4.5'te genel

görünümü verilen sönümleme sistemi, delikli blok tuğlaların delikleri dalga geliş yönüne bakacak şekilde ve şaşırtmalı sırada piramit biçiminde yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur.

Dalga kanalındaki işlevsel bir diğer unsur da, kanalın sol yanı (kanalda açık deniz tarafından sahile doğru bakıldığında) boyunca yer alan yürüme platformu ile ölçüm kesiti öncesi kanal genişliği boyunca bulunan ölçüm platformudur (Şekil 4.6). Yürüyüş platformu ile dalga üreticinin bulunduğu açık deniz tarafı ile ölçüm kesitinin bulunduğu bölge arasında hareket olanağı sağlanmakta, kanal boyunca gözlemler gerçekleştirilebilmektedir. Ölçüm platformu ile de, deneyler öncesinde, esnasında ve sonrasında ölçüm aletlerinin yerleştirilmesi, işletilmesi ve toplanması faaliyetleri gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 4.5 Dalga kanalı sahilinde yer alan dalga sönümleme sisteminin genel görünüşü.

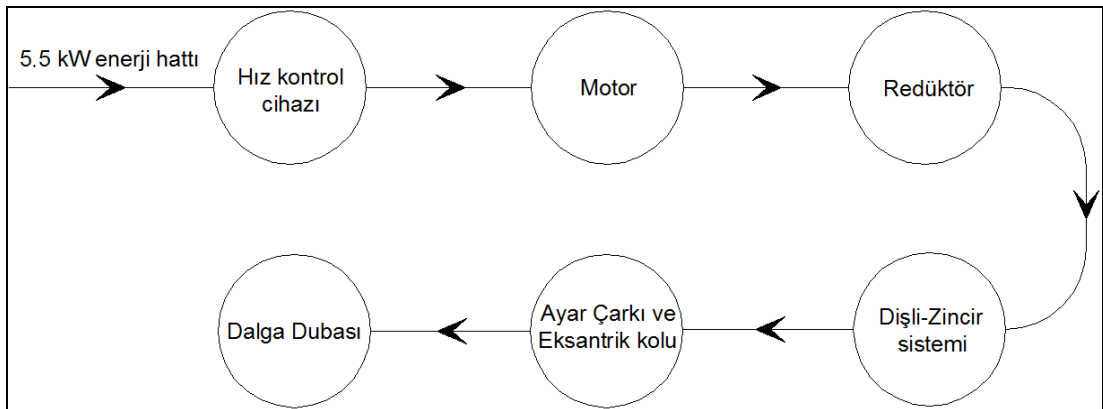
#### ***4.2.2 Dalga Üreteç Sistemi***

Şekil 4.7'deki şematik çizimde görüldüğü gibi, dalga üreteç sistemi 5.5 kW trifaz hız kontrol cihazı yine 5.5 kW, 1400 devir/dakika motor, 28 devir/dakika redüktör,

redüktör sonundaki motor miline bağlı 22 dişli  $\phi 267\text{ mm}$  çaplı çark, bu çarka zincir ile bağlı 55 dişli  $\phi 667\text{ mm}$  çaplı ayar çarkı, bu çarka beş farklı noktadan bağlanabilen eksantrik kolu ve kol sonunda yukarı aşağı hareket edebilen üçgen prizma şeklindeki dalga dubasından oluşmaktadır (Şekil 4.8).



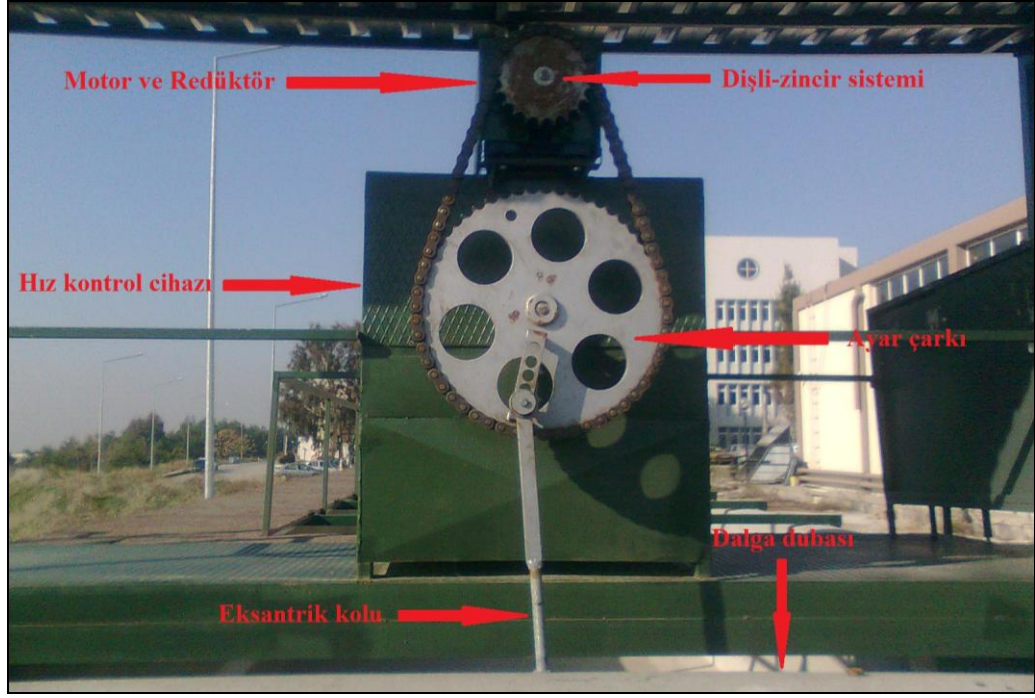
Şekil 4.6 Yürüyüş platformu ve ölçüm platformunun genel görünüşü.



Şekil 4.7 Dalga üreteç sistemi unsurlarının şematik gösterimi.

Dalga üreteç sisteminin çalışma şemasında son unsur olan dalga dubasının genel görünümü Şekil 4.9’da verilmektedir. Burada tercih edilen duba formu ters dik üçgen kesitli olup dubanın dik kenarı ile kanalın açık deniz tarafındaki duvar arasında çok

küçük bir boşluk kalacak şekilde çalışmaktadır. Ayrıca, sistemin verimli çalışabilmesi ve çalışma sırasında yanlara doğru eğilmelerin önlenmesi amacıyla dalga dubası kanalın her iki duvarında bulunan kılavuz raylar içerisinde tekerlekli bir sistem ile hareket etmektedir. Bu sayede kanalda ilerleyen dalgaların ortogonalinin kanalın boyuna eksenine paralel olması sağlanmaktadır.



Şekil 4.8 Dalga üreteç sistemi genel görünümü.



Şekil 4.9 Dalga dubası genel görünümü ve kılavuz raylar.

Dalga üreteç sistemi üzerindeki önemli detaylardan bir diğeri de eksantrik kolunun dalga dubası bağlantıları ile birleştiği bölümde gerçekleştirilmiştir. Burada, eksantrik kolu sonunda bulunan sonsuz vida sayesinde, dalga dubasının başlangıç konumu ayarlanabilmekte bu da farklı dalgalanmamış su seviyelerinde çalışma olanağı sunmaktadır (Şekil 4.10).

Dalga üreteç sisteminde temel olarak üç ana unsurun ayarı yapılabilmektedir. Bunlar, motor mili dönüş hızı kontrolü, dubanın düşey yer değiştirme miktarı kontrolü ve dubanın harekete başlayacağı seviyenin kontrolüdür.



Şekil 4.10 Eksantrik kolu ile dalga dubası bağlantıları birleşim detayı.

Motor mili dönüş hızının, dolayısıyla da dalga dubasının suyun içerisine batıp-çıkma frekansının ayarlanması ile kanalda farklı periyotlarda dalgaların oluşturulması sağlanmıştır. Hız kontrol cihazı değişim aralıkları, motor-redüktör devirleri ve çıkış çarkı ile ayar çarkı arasındaki geçiş göz önüne alındığında kanalda oluşturulacak dalgaların periyotlarının 2.7 sn ile 10.7 sn aralığında değişim gösterdiği görülmektedir. Dalga periyodu ayarıyla birlikte, kanalda ilerleyen dalgaların genliklerinin değiştirilebilmesi için yukarıda da bahsedildiği gibi iki farklı ayar mevcuttur. Ayar çarkı üzerinde yer alan beş farklı bağlantı noktası ile dalga

dubasının toplam yer değiştirmesi bir diğer değişle batma-çıkma ykseklęi ayarlanabilmektedir. Ayrıca, dalga kanalındaki dalgalanmamış su seviyesine bağlı olarak dalga dubasının harekete başlayacağı konumda eksantrik kolu sonundaki sonsuz vida üzerinden ayarlanabilmektedir.

#### **4.2.3 lm Aletleri**

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, temelde iki farklı ölçüm aleti kullanılarak üç farklı türde ölçüm gerçekleştirilmiştir. Kullanılan lm aletlerinin ortak noktası ikisinin de yüksek frekanslı ses dalgası yöntemiyle çalışmasıdır.

Kanalda ilerleyen dalgaların karakteristiklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla deney dzeneninde kullanılan ölçüm aleti ULS (Ultra Lab System) cihazı ve USS (Ultra Sound Sensor) algılayıcılarıdır (şekil 4.11). Algılayıcılar düşey konumda ve suya girmeyecek bir şekilde yerleştirilmektedir.

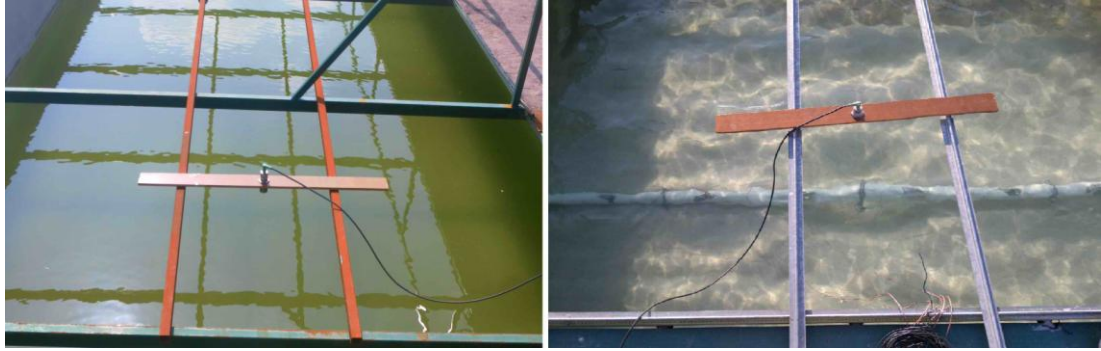


şekil 4.11 ULS 40-D cihazı ve iki adet USS20130 algılayıcıları.

Ana cihaza bağlanan algılayıcılar yardımıyla su yüzeyine yüksek frekansta ses dalgaları gönderilmekte ve geri dönen ses dalgaları algılanarak su yüzeyi ile algılayıcının ucu arasındaki düşey mesafe ölçülebilmektedir. Kalibrasyona ihtiyaç duymayan bu cihaz ile elde edilen veriler eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına



aktarılmakta ve saklanmaktadır. ULS cihazına ait iki tipte USS algılayıcıları mevcuttur. Bunlardan biri USS635 ve diğeri de USS20130 algılayıcılarıdır. USS kısaltmasının yanındaki rakamlar 'cm' biriminde çalışma aralıklarını göstermektedir. Örneğin, USS635 algılayıcıları, algılayıcı ucuyla su yüzeyi arasındaki düşey mesafenin en az 6 cm en çok da 35 cm olduğu durumlarda çalıştığını göstermektedir. Benzer şekilde USS20130 algılayıcıları da 20 cm ila 130 cm aralığında hizmet vermektedir. Deneyler sırasında, biri deney borusun bulunduğu kesitte diğeri de bu kesitten 4.5 m açık deniz tarafında olacak şekilde yerleştirilmiş iki adet USS20130 algılayıcıları kullanılmıştır (Şekil 4.12).

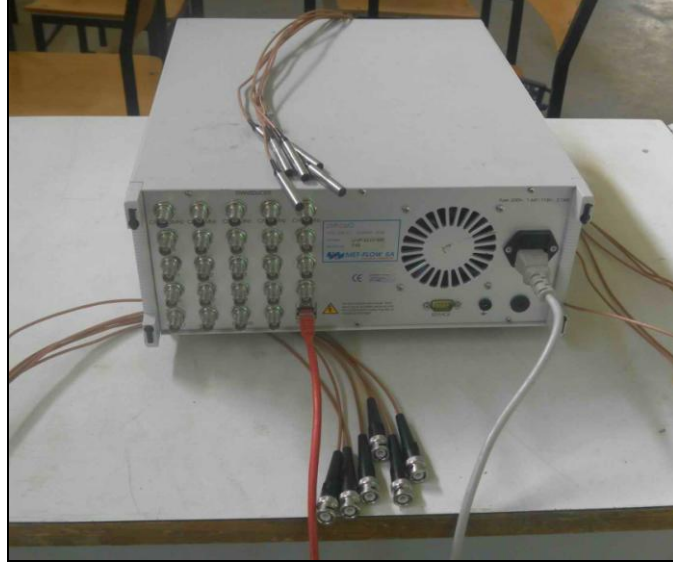


Şekil 4.12 Deneylerde kullanılan, açık deniz tarafındaki (soldaki görüntü) ve sahil tarafındaki (sağdaki görüntü) USS20130 algılayıcılarının yerleşimi.

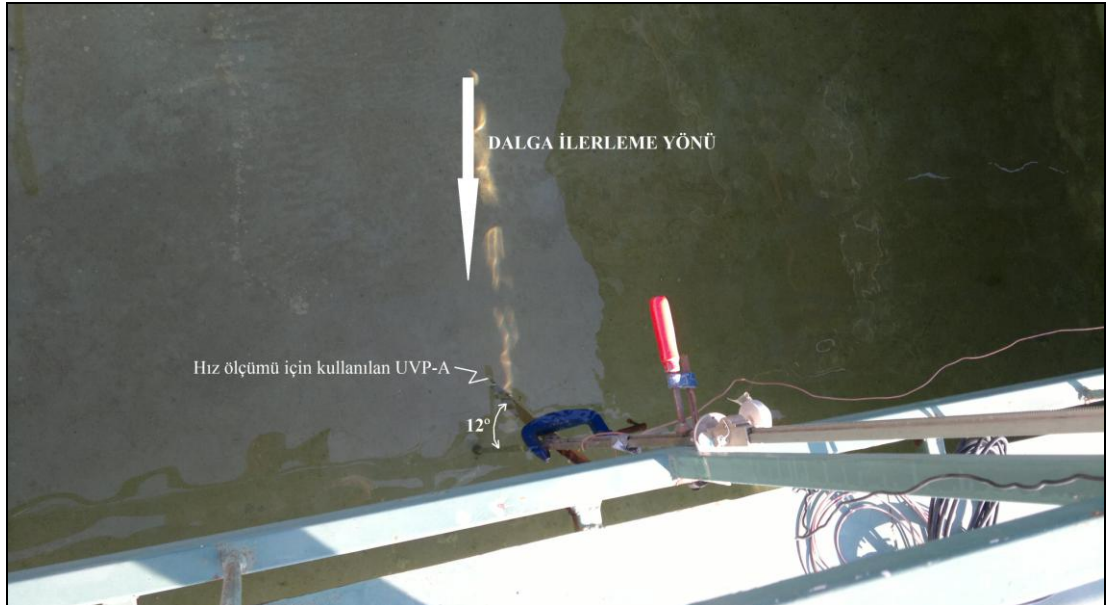
Ölçülen verilerin doğrudan bilgisayara kaydedilmesi ile deney sırasındaki su yüzeyi değişimleri bir dosya içerisinde saklanabilmektedir. Zamana bağlı olarak su yüzeyi kotlarının analizi ile dalgaların genlikleri ve periyotları belirlenebilmektedir.

Deneylerde kullanılan bir diğer ölçüm aleti de UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) cihazı ve algılayıcılarıdır. Şekil 4.13'de gösterilen cihaz, ULS de olduğu gibi yüksek frekanslı ses dalgalarının sıvı içerisinde hareket eden bir parçacığa çarpıp geri dönmesi ve bu durumun tekrarlı olarak gerçekleşmesi ilkesine dayalı olarak çalışmaktadır. UVP cihazı ve algılayıcıları (UVP-A) yardımıyla doğrudan hedeflenen ölçümler, serbest yüzeyli akıştaki herhangi bir kesitte hız profiline elde edilmesidir. Bununla birlikte, bazı ek işlemlerle basınçlı sistemlerdeki akış hızları da belirlenebilmektedir. UVP cihazına bağlı olarak çalışabilen beş farklı tipte algılayıcısı bulunmaktadır. Bu algılayıcılar gönderdikleri ses dalgalarının

frekanslarına göre sınıflandırılmakta ve gerçekleştirilecek çalışmanın niteliğine göre seçilmektedir. UVP algılayıcılarının mevcut tipleri, 0.5, 1, 2, 4 ve 8 MHz frekanslı olanlardır. UVP cihazına, frekansları aynı olmak kaydıyla 20 adet algılayıcı aynı anda bağlanabilmekte ve sıralı bir şekilde ölçüm alınabilmektedir. Şekil 4.14’de boru eksenindeki su parçacığı hızlarını ölçmek için kullanılan UVP-A görülmektedir.



Şekil 4.13 UVP cihazı ve 4 Mhz frekanslı algılayıcıları.



Şekil 4.14 Hız ölçümü için kullanılan UVP algılayıcısının kanal üzerinden görünümü.

UVP cihazı ile hız ölçümleri gerçekleştirilirken, bir kesit boyunca ölçümler yapıldığından, ses dalgalarının tabanda çarpıp geri döndükleri noktanın algılayıcı ucuna olan mesafesi belirlenebilmektedir. İşte bu noktadan yola çıkılarak ve UVP cihazının ikincil bir özelliği kullanılarak su altı borusu altında zamana bağlı oyulmalar belirlenebilmektedir (Şekil 4.15). UVP cihazı algılayıcılarının gerek hız ölçümü gerekse de zamana bağlı oyulma ölçümleri için kullanımına ilişkin ayrıntılı bilgilere takip eden bölümde yer verilmektedir.

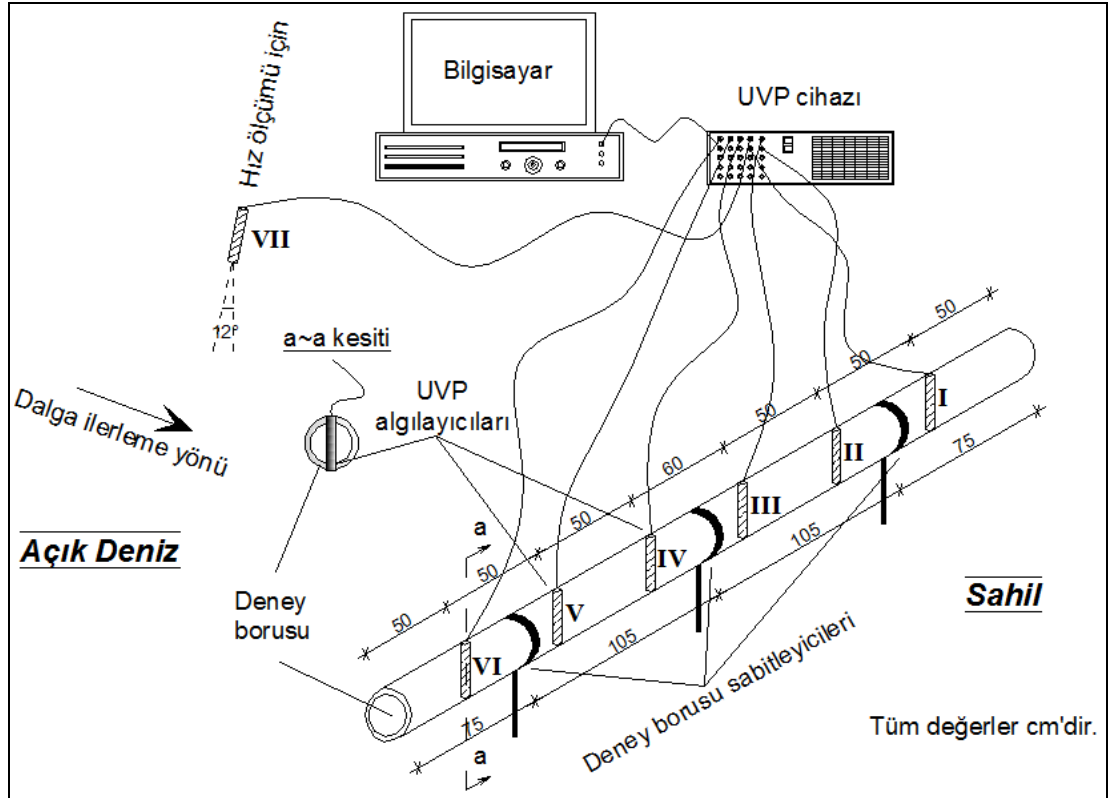


Şekil 4.15 Boru altında zamana bağlı oyulma derinliği ölçümü için yerleştirilen UVP algılayıcıları.

### 4.3 Yöntem

Yukarıda bahsedilen ölçüm aletlerinin deneyler sırasında kullanımı ve akabinde gerçekleştirilen analiz işlemleri bu bölümde ayrıntılı olarak verilmektedir.

Deneyler sırasında, boru altındaki oyulmaların zamana bağlı olarak ölçülmesi ve boru eksenindeki su parçacığı hızlarının belirlenmesi amacıyla, çalışma prensibi bir önceki ara bölümde anlatılan UVP cihazına ait yedi adet 4 MHz frekanslı algılayıcı Şekil 4.16'da gösterildiği gibi yerleştirilerek kullanılmıştır.

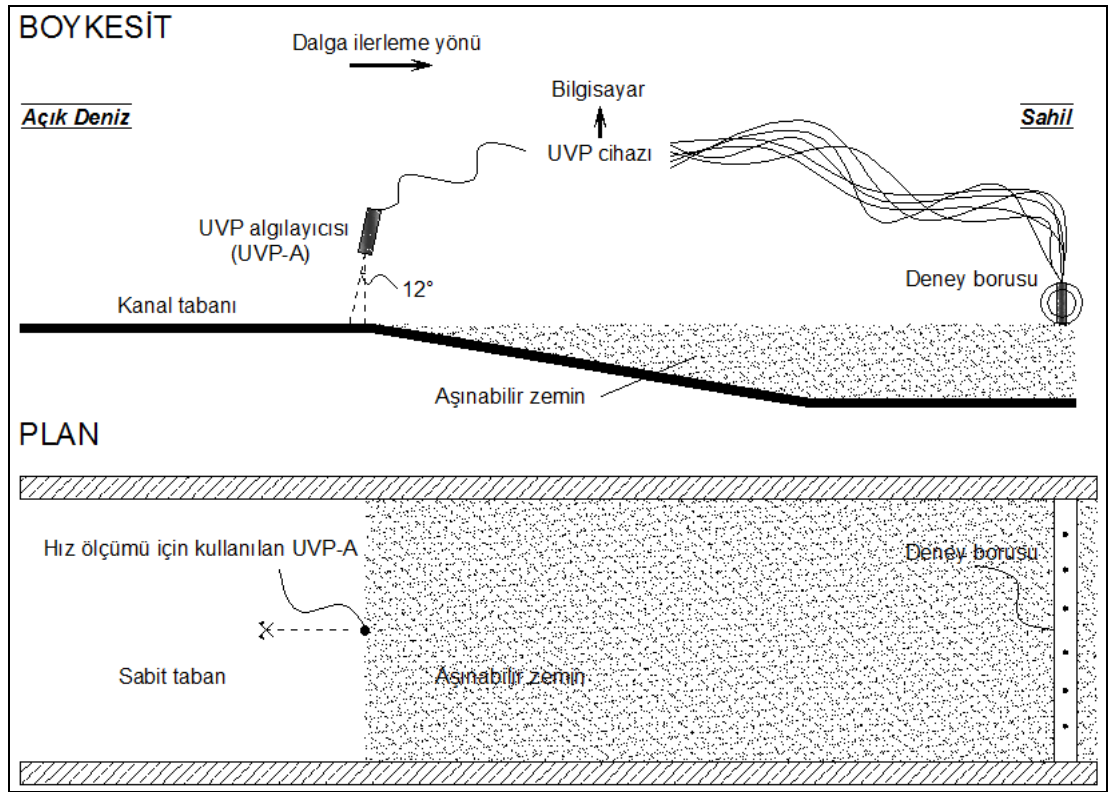


Şekil 4.16 Deney borusu içerisine yerleştirilen UVP algılayıcıları ve boru sabitleyicileri.

UVP algılayıcılarının ve boru sabitleyicilerinin, yukarıdaki şekilde gösterilen aralık değerleri farklı çaplardaki tüm deney boruları için geçerlidir. Boru içerisindeki altı adet algılayıcının eş zamanlı olarak çalışması ile her bir algılayıcı kesitindeki zamana bağlı oyulmaların kaydedilmesine ek olarak boru boyunca oluşan oyulmanın gelişimi de çıkarılmaktadır.

Öte yandan, yedinci UVP algılayıcısı ile de boru eksenindeki su parçacığının hızları ölçülmektedir. Yedinci algılayıcının yerleşimi ile ilgili şematik gösterim Şekil 4.17’de yer almaktadır.

Hız ölçümü için kullanılan UVP algılayıcısı aşınabilir zeminin açık deniz tarafına doğru gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bunun nedeni, bu bölgede kanal tabanında değişiklik olmayacağı ve deneylerde sürekli olarak aynı kesitte ölçüm alınacak olmasıdır. UVP cihazına bağlı bu yedi adet algılayıcıdan gelen veriler doğrudan bilgisayar ortamına aktarılmakta ve saklanmaktadır.

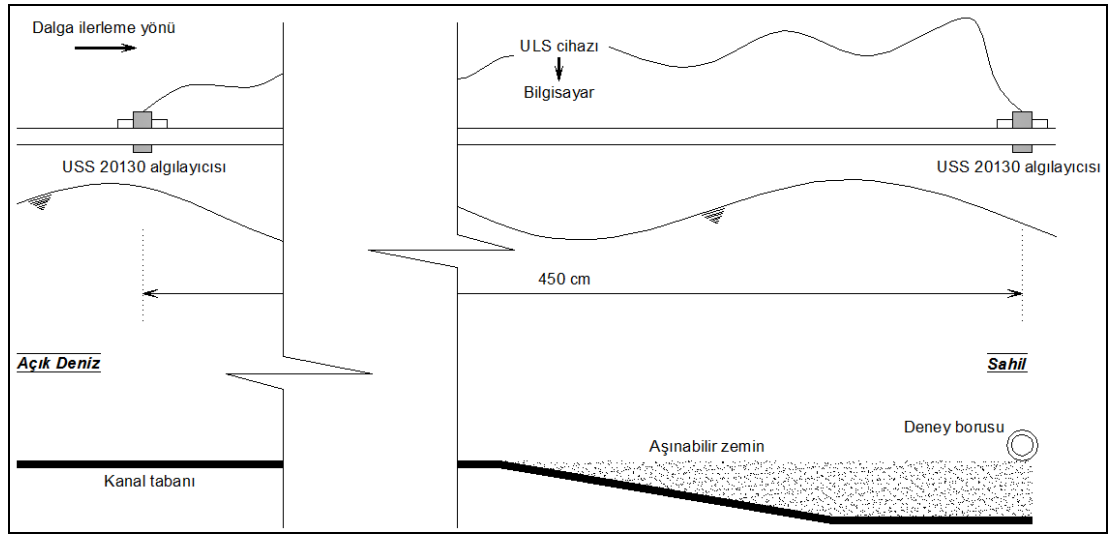


Şekil 4.17 Hız ölçümü için kullanılan UVP algılayıcısının şematik yerleşim şekli.

Kanalda ilerleyen dalganın kaydedilmesi için kullanılan ULS cihazı ve USS20130 algılayıcılarının, deneyler sırasındaki konumları şematik olarak Şekil 4.18’de verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere iki adet algılayıcının kullanımı ile hem boru üzerindeki hem de bu kesitten 4.5 m açık deniz tarafındaki kesitteki kayıtlar alınmakta, böylece doğrulamalı olarak değerler analiz edilip, kanaldaki dalganın

değişimi de anlaşılabilir. İki farklı kesitte eş zamanlı olarak gerçekleştirilen dalga kaydı ile ayrıca dalga boyu da dolaylı olarak hesaplanabilmektedir.

UVP cihazında olduğu gibi, ULS ile dalga kayıtlarının gerçekleştirilmesi sırasında veriler doğrudan bilgisayara aktarılmakta ve saklanabilmektedir. Gerek UVP ile ölçümde gerekse de ULS ile ölçümde olsun bilgisayarda saklanan verilerin daha sonraki analizlerde kullanılabilmesi için birtakım işlemlerden geçirilmeleri gerekmektedir.



Şekil 4.18 USS20130 algılayıcılarının deneyler sırasındaki konumları.

Deneylerin başlatılmasından önce, ihtiyaç duyulan tüm donanımlar kanala getirilmekte ve cihazlar yukarıdaki şematik gösterimlerde verildiği gibi yerleştirilmektedir. Dalga üretici hız kontrol cihazı (dolayısıyla motor), UVP cihazı ve ULS cihazı eş zamanlı olarak başlatılmaktadır. Deneyler esnasında zemin hareketlerinin sona ermesi gözlenerek deneyler sonlandırılmaktadır. Bu zamana kadar, UVP cihazı ile hız ve zamana bağlı oyulma ölçümleri ve de ULS cihazı ile dalga kayıtları devam etmektedir. Ayrıca, dalga kanalının sağ kesiminde bulunan gözlem penceresi dışından (deney borusu kesiti görülecek şekilde) deney süresince farklı tip deneyler için video kamera kaydı da gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM BEŞ

### DENEYSEL BULGULAR

Tez çalışması kapsamında kullanılan donanımlar ve çalışmanın gerçekleştirme yöntemi bir önceki bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu kapsamda 120 adet deney gerçekleştirilmiştir. Dört farklı dalga karakteristiği, üç farklı boru çapı, üç farklı taban malzemesi ve iki farklı başlangıç taban koşulu ile gerçekleştirilen deneylere ait açıklayıcı bilgiler Tablo 5.1’de verilmektedir. Burada, “*Deney Kodu*” başlığı altında verilen harf ve rakam birleşimlerinin ne anlam ifade ettiği Şekil 5.1’de verilmektedir.

Deneyin gerçekleştirildiği				Yıl	Ay	Gün	Gün içi deney sıra numarası
<b>H4</b>	<b>D1</b>	<b>B2</b>	<b>12</b>	<b>08</b>	<b>22</b>	<b>01</b>	<b>BT</b>
Hız kontrol cihazı frekansı		Taban malzemesi	Deney öncesi				
1: 62.5 Hz	Boru çapı	dane medyan çapı	taban şekli				
2: 75 Hz	1: 63 mm	1: 0.55 mm	BT: Bozulmamış taban				
3: 87.5 Hz	2: 90 mm	2: 1.85 mm	BC: Başlangıç çukuru				
4: 100 Hz	3: 110 mm	3: 3.75 mm					

Şekil 5.1 Deney kodu ifadesindeki harf ve rakam birleşimlerinin açıklanması.

Tablo 5.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların listesi (1. Kısım).

Deney No.	Deney Kodu	Başlangıç Taban Şekli	Hız Kontrol Frekansı (Hz)	Boru Çapı $D$ (mm)	Taban Mlz. $d_{50}$ (mm)
1	H2D1B111102701BT	Bozulmamış Taban	75	63	
2	H4D1B111103101BT		100		
3	H1D1B11110102BT		62.5		
4	H3D1B112042501BT		87.5		
5	H1D1B112060501BT		62.5		
6	H2D1B112060502BT		75		
7	H3D1B112060701BT		87.5		
8	H4D1B112060702BT		100		
9	H1D2B112061201BT	Bozulmamış Taban	62.5	90	0.55
10	H2D2B112061202BT		75		
11	H4D2B112061301BT		100		
12	H4D2B112061302BT		100		
13	H3D2B112062001BT		87.5		
14	H3D2B112062002BT		87.5		
15	H1D2B112062101BT		62.5		
16	H2D2B112062102BT		75		
17	H1D3B112072501BT	Bozulmamış Taban	62.5	110	
18	H1D3B112072502BT		62.5		
19	H2D3B112072503BT		75		
20	H2D3B112072504BT		75		
21	H3D3B112072601BT		87.5		
22	H3D3B112072602BT		87.5		
23	H4D3B112072603BT		100		
24	H4D3B112072604BT		100		

Tablo 5.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların listesi (2. Kısım).

Deney No.	Deney Kodu	Başlangıç Taban Şekli	Hız Kontrol Frekansı (Hz)	Boru Çapı $D$ (mm)	Taban Mlz. $d_{50}$ (mm)
25	H1D3B212080301BT	Bozulmamış Taban	62.5	110	
26	H1D3B212080302BT		62.5		
27	H2D3B212080303BT		75		
28	H2D3B212080304BT		75		
29	H4D3B212080601BT		100		
30	H4D3B212080602BT		100		
31	H3D3B212080603BT		87.5		
32	H3D3B212080604BT		87.5		
33	H4D2B212080801BT	Bozulmamış Taban	100	90	
34	H4D2B212080802BT		100		
35	H1D2B212080803BT		62.5		
36	H1D2B212080804BT		62.5		
37	H3D2B212081001BT		87.5		
38	H3D2B212081002BT		87.5		
39	H2D2B212081003BT		75		
40	H2D2B212081004BT		75		
41	H4D2B212081301BC	Başlangıç Çukuru	100		1.85
42	H3D2B212081302BC		87.5		
43	H2D2B212081303BC		75		
44	H1D2B212081304BC		62.5		
45	H4D2B212081501BC		100		
46	H3D2B212081502BC		87.5		
47	H2D2B212081503BC		75		
48	H1D2B212081504BC		62.5		
49	H4D1B212081601BT	Bozulmamış Taban	100	63	
50	H3D1B212081602BT		87.5		
51	H2D1B212081603BT		75		
52	H1D1B212081604BT		62.5		
53	H4D1B212082201BT		100		
54	H3D1B212082202BT		87.5		
55	H2D1B212082203BT		75		
56	H1D1B212082204BT		62.5		
57	H4D1B212082301BC	Başlangıç Çukuru	100		
58	H3D1B212082302BC		87.5		
59	H2D1B212082303BC		75		
60	H1D1B212082304BC		62.5		
61	H4D1B212082401BC		100		
62	H3D1B212082402BC		87.5		
63	H2D1B212082403BC		75		
64	H1D1B212082404BC		62.5		
65	H4D3B212082801BC	Başlangıç Çukuru	100	110	
66	H3D3B212082802BC		87.5		
67	H2D3B212082803BC		75		
68	H1D3B212082804BC		62.5		
69	H4D3B212082901BC		100		
70	H3D3B212082902BC		87.5		
71	H2D3B212082903BC		75		
72	H1D3B212082904BC		62.5		



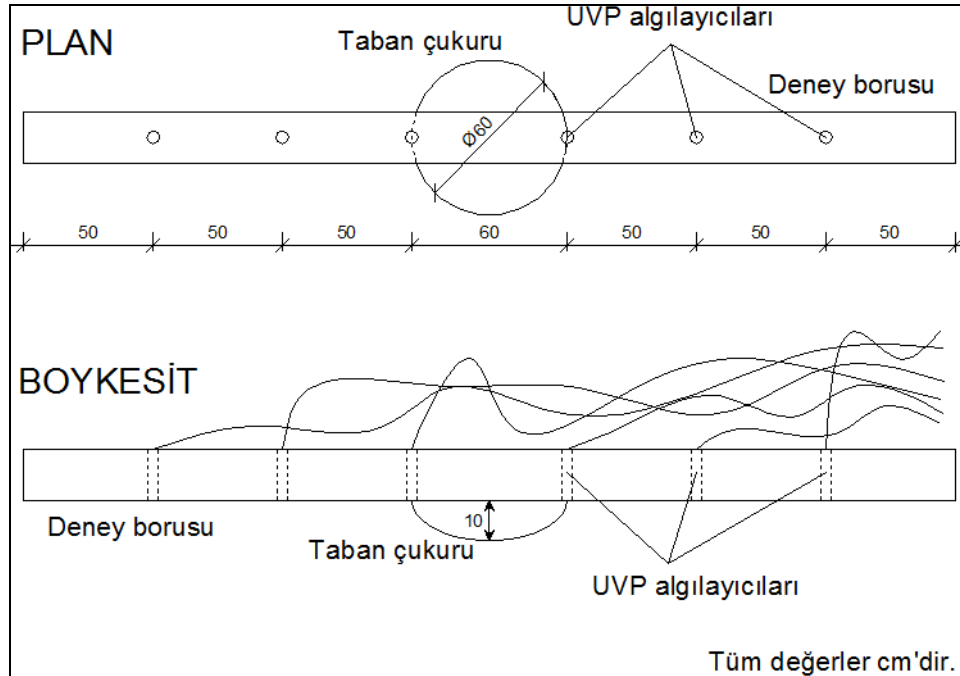
Tablo 5.1 Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların listesi (3. Kısım).

Deney No.	Deney Kodu	Başlangıç Taban Şekli	Hız Kontrol Frekansı (Hz)	Boru Çapı $D$ (mm)	Taban Mlz. $d_{50}$ (mm)
73	H4D3B312091001BT	Bozulmamış Taban	100	110	
74	H3D3B312091002BT		87.5		
75	H2D3B312091003BT		75		
76	H1D3B312091004BT		62.5		
77	H4D3B312091201BT		100		
78	H3D3B312091202BT		87.5		
79	H2D3B312091203BT		75		
80	H1D3B312091204BT		62.5		
81	H4D3B312091301BC	Başlangıç Çukuru	100		
82	H3D3B312091302BC		87.5		
83	H2D3B312091303BC		75		
84	H1D3B312091304BC		62.5		
85	H4D3B312091701BC		100		
86	H3D3B312091702BC		87.5		
87	H2D3B312091703BC		75		
88	H1D3B312091704BC		62.5		
89	H4D2B312091801BT	Bozulmamış Taban	100	90	3.75
90	H3D2B312091802BT		87.5		
91	H2D2B312091803BT		75		
92	H1D2B312091804BT		62.5		
93	H4D2B312092001BT		100		
94	H3D2B312092002BT		87.5		
95	H2D2B312092003BT		75		
96	H1D2B312092004BT		62.5		
97	H4D2B312092401BC	Başlangıç Çukuru	100		
98	H3D2B312092402BC		87.5		
99	H2D2B312092403BC		75		
100	H1D2B312092404BC		62.5		
101	H4D2B312092501BC		100		
102	H3D2B312092502BC		87.5		
103	H2D2B312092503BC		75		
104	H1D2B312092504BC		62.5		
105	H4D1B312100401BT	Bozulmamış Taban	100	63	
106	H3D1B312100402BT		87.5		
107	H2D1B312100403BT		75		
108	H1D1B312100404BT		62.5		
109	H4D1B312100501BT		100		
110	H3D1B312100502BT		87.5		
111	H2D1B312100503BT		75		
112	H1D1B312100504BT		62.5		
113	H4D1B312100901BC	Başlangıç Çukuru	100		
114	H3D1B312100902BC		87.5		
115	H2D1B312100903BC		75		
116	H1D1B312100904BC		62.5		
117	H4D1B312101101BC		100		
118	H3D1B312101102BC		87.5		
119	H2D1B312101103BC		75		
120	H1D1B312101104BC		62.5		

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere deney öncesi taban şekli olarak, bozulmamış taban ve başlangıç çukuru olmak üzere iki farklı durum söz konusudur. Bozulmamış taban durumunda, deney başlangıcında test borusu yatay olarak serilmiş temsili deniz zemini üzerinde bütünüyle uzanmaktadır. Başlangıç çukuru konumunda ise deney öncesi tabanın durumu Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, boru ortasında yer alan iki UVP algılayıcısı arasında olacak şekilde, çapı 60 cm ve derinliği 10 cm olan ters kubbe biçiminde bir başlangıç çukuru oluşturulmaktadır. Bu taban şekli ile gerçekleştirilen deneylerdeki amaç, boru altındaki oyulmanın boru ortasından başlayarak iki yöne doğru ilerleyişinin sağlanması ve boru altı boyunca oyulmanın ilerleme hızının elde edilmesidir.

Tez çalışması kapsamında, sonucu doğrudan kullanılmamakla birlikte kanaldaki dalga boyunun belirlenmesine ve ölçülen dalga karakteristiklerinin doğrulanmasına yönelik bir takım öncü deneyler gerçekleştirilmiş olup bunlara ilişkin bilgi takip eden alt bölümde ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 5.2 Başlangıç çukuru taban şeklinin plan ve boykesit gösterimleri.

## 5.1 Hazırlık Deneyleri

Tablo 5.1’de karakteristik değerleri verilen ve tez çalışmaları kapsamında sonuçlarından doğrudan yararlanılacak asıl deneylere geçilmeden önce, kanalda ilerleyen dalganın ölçümü için kullanılan donanımların doğrulanması ve bu donanımlar kullanılarak doğrudan ölçülemeyen bazı parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla bir dizi öncü deney gerçekleştirilmiştir.

Bir önceki ana bölümde ayrıntılı olarak bahsedilen ölçüm donanımları ile boru eksenindeki su parçacığı yatay hızları, boru altında altı noktada zamana bağlı oyulma derinlikleri ve iki farklı kesitte zamana bağlı su seviyesi (dalga kaydı) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, incelenen fiziksel olaydaki etken olan dalgaya ait karakteristiklerden dalga yüksekliği ve periyodu hassas bir şekilde elde edilebilmektedir. Bununla birlikte dalga boyu doğrudan ölçülememektedir.

Kanalda ilerleyen dalgaların boyları, temel olarak, dalga periyoduna ve ortamın dalgalanmamış su derinliğine bağlıdır. Deneyler sırasında su derinliği  $d = 65 \text{ cm}$  olarak sabit tutulduğundan, kanaldaki dalgaların boylarını belirleyen tek parametre dalga periyodu olmaktadır. Bu durumda farklı dalga periyotlarına karşılık gelecek şekilde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler ile belirlenebilecek dalga boyu parametresine, küçük genlikli dalga teorisi kullanılarak da ulaşılabilmektedir. Bu aşamada önem kazanan, kanalda ilerleyen dalgaların küçük genlikli teoriye (doğrusal “*siniüzoidal*” dalga teorisi) uygunluklarının denetlenmesidir. Bu denetime ve dalgaların küçük genlikli teoriye uygunlukları ile ilgili detaylara ilerleyen kısımlarında yer verilmiştir.

Kanalda ilerleyen dalgaların boylarının belirlenmesi için ilk olarak, eş zamanlı gözlem ve ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Kanal yan duvarlarında yer alan kuşaklama profilleri 1.5 m aralıklar ile teşkil edilmişlerdir. Dalga üreticinin belirli bir mesafe sonrasında yer alan kuşaklama profili gözlenerek dalga tepesi buradan geçtiği anda kronometre ile süre başlatılmakta, aynı dalga tepesi takip edilerek kanalın sahil

kesiminde yer alan diğer bir kuşaklama profiline ulaştığında kronometre durdurulmaktadır. Kanalın açık deniz ve sahil kesimleri arasında seçilen ve aralarında 18 m mesafe bulunan iki kesit arasında gerçekleştirilen ölçümlerde her bir dalga durumu için birçok deneme gerçekleştirilmiş ve elde edilen sürelerin ortalamaları alınarak (5.1) nolu bağıntı yardımıyla dalga ilerleme hızları belirlenmiştir.

$$c = \Delta x / \Delta t \quad (5.1)$$

Buradan hareketle, dalga ilerleme hızı en temel tanımı ile (5.2) bağıntısındaki gibi hesaplanabildiğinden dalga boyu bulunabilmektedir. Burada dalga periyodu, gerek *ULS* kayıtları gerekse de hız kontrol cihazı ile ayarlanan motor devri bilindiğinden güvenilir bir şekilde elde edilmiş durumdadır.

$$c = \frac{L}{T_w} \Rightarrow L = c \cdot T_w \quad (5.2)$$

Dalga boyunun belirlenmesi için kullanılan ikinci yöntem ise ilkiyle benzerlik göstermektedir. Buradaki temel farklılık, iki kesit arasında dalga ilerlemesinin gözlem ve kronometre ile belirlenmesi yerine, bir önceki ana bölümde ayrıntılı olarak bahsedilen *ULS* sistemi ve aralarında 4.5 m mesafe bulunan iki adet *USS* algılayıcılarının eş zamanlı veri alması prensibine dayanmasıdır. Bu algılayıcılar 0.2 sn aralıkla veri almakta ve bu işlem iki algılayıcı için eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece açık deniz tarafında (dalga üretici tarafı) yer alan algılayıcıda görülen dalga tepesinin, sahil kesiminde (dalga sönümleyicisi tarafı) yer alan diğer algılayıcıya ulaşma süresi bulunup (5.1) bağıntısı yardımıyla dalga ilerleme hızı ( $c$ ) elde edilebilmektedir. Benzer şekilde (5.2) bağıntısı ile dalga boyu belirlenebilmektedir.

Tablo 5.2’de, yukarıdaki iki yöntem ile elde edilen dalga boyları ile sinüzoidal (küçük genlikli) dalga teorisi kullanılarak hesaplanan ve (5.3) nolu bağıntı ile verilen dalga boyları karşılaştırmalı olarak yer almaktadır.

$$L = \frac{gT_w^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (5.3)$$

Tablo 5.2 Farklı yöntemler ile belirlenen dalga boyları.

Dalga	Tip	1	2	3	4
Dalga	Periyot (sn)	4.3	3.6	3.1	2.7
Dalga Boy (m)	KGDT <sup>1</sup>	10.6	8.7	7.4	6.4
	ULS <sup>2</sup>	10.7	8.9	6.9	6.0
	Ölçüm <sup>3</sup>	10.7	8.7	7.3	6.2

<sup>1</sup> Küçük genlikli dalga teorisi. (5.3) nolu bağıntı ile dalga boyu hesabı.

<sup>2</sup> Aralarında 4.5 m olan iki adet USS20130 algılayıcıları ile dolaylı dalga boyu hesabı.

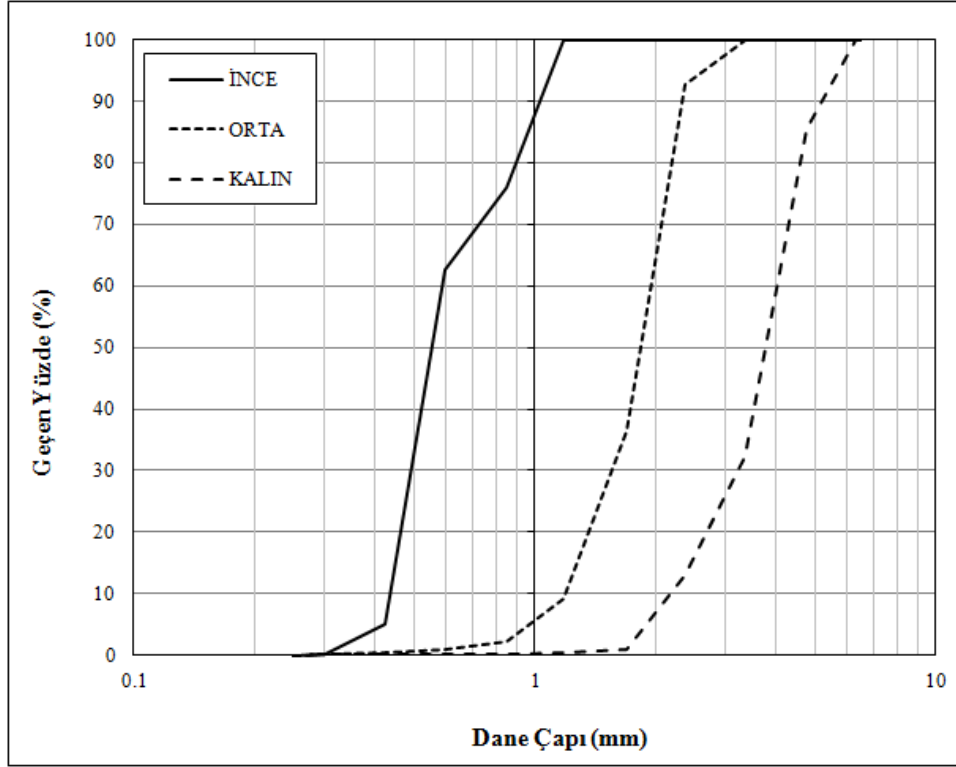
<sup>3</sup> Aralarında 18 m olan iki kesitte iki gözlemci ve kronometre ile dolaylı dalga boyu hesabı.

Tablo 5.2'den görüldüğü ve ayrıca beklendiği üzere, kanalda üretilen nispeten uzun periyotlu ve küçük genlikli dalgalar, sinüzoidal (küçük genlikli) dalga teorisine daha çok uymaktadır. Bu noktada, bütün dalga tiplerinde dalgaların sinüzoidal teori ile örtüşmediği açıktır. Ancak bu durum çalışma açısından bir sakınca doğurmamaktadır. Bunun nedeni, bir önceki ana bölümde bahsedildiği üzere su parçacığı hızlarının ( $U$ ) yüksek hassasiyetle ölçülmesi ve bu parametrenin belirlenmesi için teoriye gereksinim duyulmamasıdır. Su parçacığı hızları ölçülüyor olduğundan, incelenen fiziksel olayda en etkin boyutsuz parametrelerden bir olan Keulegan-Carpenter sayısı (2.3) bağıntısı yardımıyla doğrudan hesaplanabilmektedir.

Deneylerde kullanılan taban malzemelerinin karakteristik değerlerinin belirlenmesi amacıyla elek analizleri gerçekleştirilmiş olup, bulgular aşağıdaki alt bölümde verilmektedir.

## 5.2 Taban Malzemesi Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneyler sırasında kullanılan üç farklı taban malzemesi için elek analizleri gerçekleştirilerek, malzemelerin dane medyan çapı ( $d_{50}$ ) değerlerine ulaşılmıştır. Üç farklı kum malzeme için gerçekleştirilen elek analizi sonuçları Şekil 5.3'de verilmektedir.



Şekil 5.3 Deneysel olarak kullanılan taban malzemelerine ait elek analizi eğrileri.

Şekil 5.3'de veriler granülometri eğrileri incelendiğinde, kullanılan taban malzemeleri için dane medyan çapları ince, orta ve kalın malzemeler için sırasıyla  $d_{50} = 0.55, 1.85, 3.75 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir. Kullanılan taban malzemeleri kuvars ( $\text{SiO}_2$ ) kumu olup özgül ağırlıkları  $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$  değerindedir.

Takip eden alt bölümde, deneyler sırasında kullanılan ölçüm donanımları ile elde edilen ham verilere ait grafikler yer almaktadır.

### 5.3 Ölçüm Aletleri Ham Verileri

Ölçüm yöntemi ve donanımları bir önceki ana bölümde detaylı olarak verildiği üzere iki farklı sistem ile üç farklı ölçüm gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, kanalda ilerleyen dalgaların, aralarında 4.5 m mesafe bulunan iki kesitte zamana bağlı olarak kaydedilmesine olanak sağlayan ölçümlerdir. ULS sistemi ve USS20130 algılayıcıları kullanılarak gerçekleştirilen bu ölçüm sonuçlarına örnek olarak Şekil 5.4'de gösterilen kayıtlar verilmektedir.

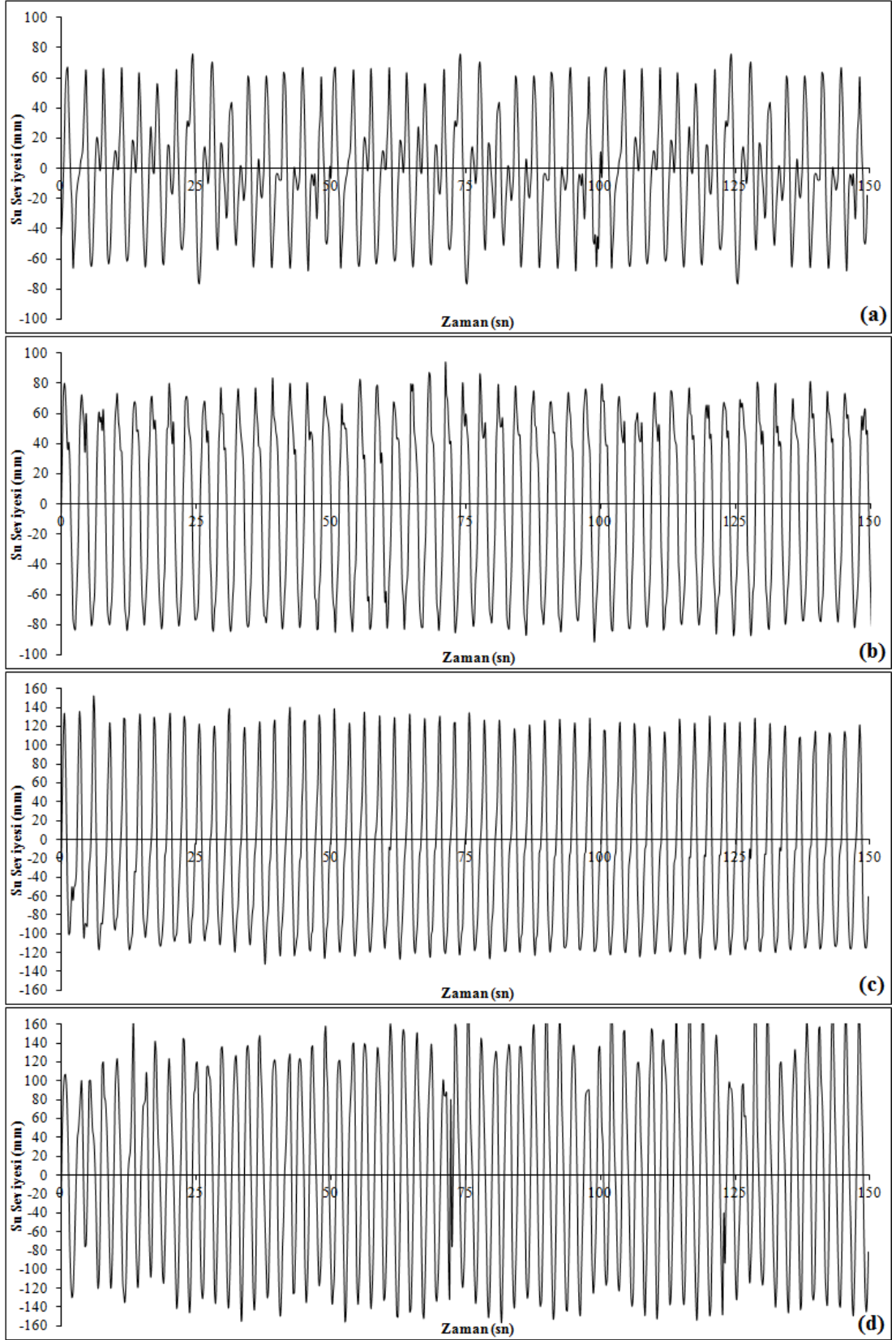
Deneyleerde dalgalanmamış su derinliği  $d = 65 \text{ cm}$  sabit olduğundan, dört farklı dalga periyoduna karşılık olarak dört farklı dalga yüksekliği oluşmaktadır. Şekil 5.4’de örnekleri verilen grafiklerden dalga yükseklikleri;  $T_w = 2.7 \text{ sn}$  (100 Hz) için  $H = 30 \text{ cm}$ ,  $T_w = 3.1 \text{ sn}$  (87.5 Hz) için  $H = 24 \text{ cm}$ ,  $T_w = 3.6 \text{ sn}$  (75 Hz) için  $H = 16 \text{ cm}$  ve  $T_w = 4.3 \text{ sn}$  (62.5 Hz) için  $H = 13 \text{ cm}$  olarak belirlenmiştir.

Deneyleerde ölçülen diğer bir parametre de boru eksenindeki noktasal hızların yatay bileşenleridir. Bu ölçüm için UVP sistemi ve bu sisteme bağlı No.7 algılayıcısı kullanılmıştır. Dört farklı dalga durumu için deneyleerde elde edilen zamana bağlı noktasal hız grafikleri Şekil 5.5’de verilmektedir.

Dalga yüksekliklerine benzer olarak, deneyleerdeki dalgalanmamış su derinliği  $d = 65 \text{ cm}$  sabit olduğundan, dört farklı dalga durumuna karşılık olarak dört farklı en büyük noktasal yatay hız değerleri ( $U_m$ ) belirlenmiştir. Yukarıda verilen zamana bağlı hız kayıtlarında belirli aralıklardaki en büyük ve en küçük değerlerin ortalamaları alınarak;  $T_w = 2.7 \text{ sn}$  için  $U_m = 47.7 \text{ cm/sn}$ ,  $T_w = 3.1 \text{ sn}$  için  $U_m = 38.7 \text{ cm/sn}$ ,  $T_w = 3.6 \text{ sn}$  için  $U_m = 29.0 \text{ cm/sn}$  ve  $T_w = 4.3 \text{ sn}$  için  $U_m = 25.9 \text{ cm/sn}$  olarak bulunmuştur.

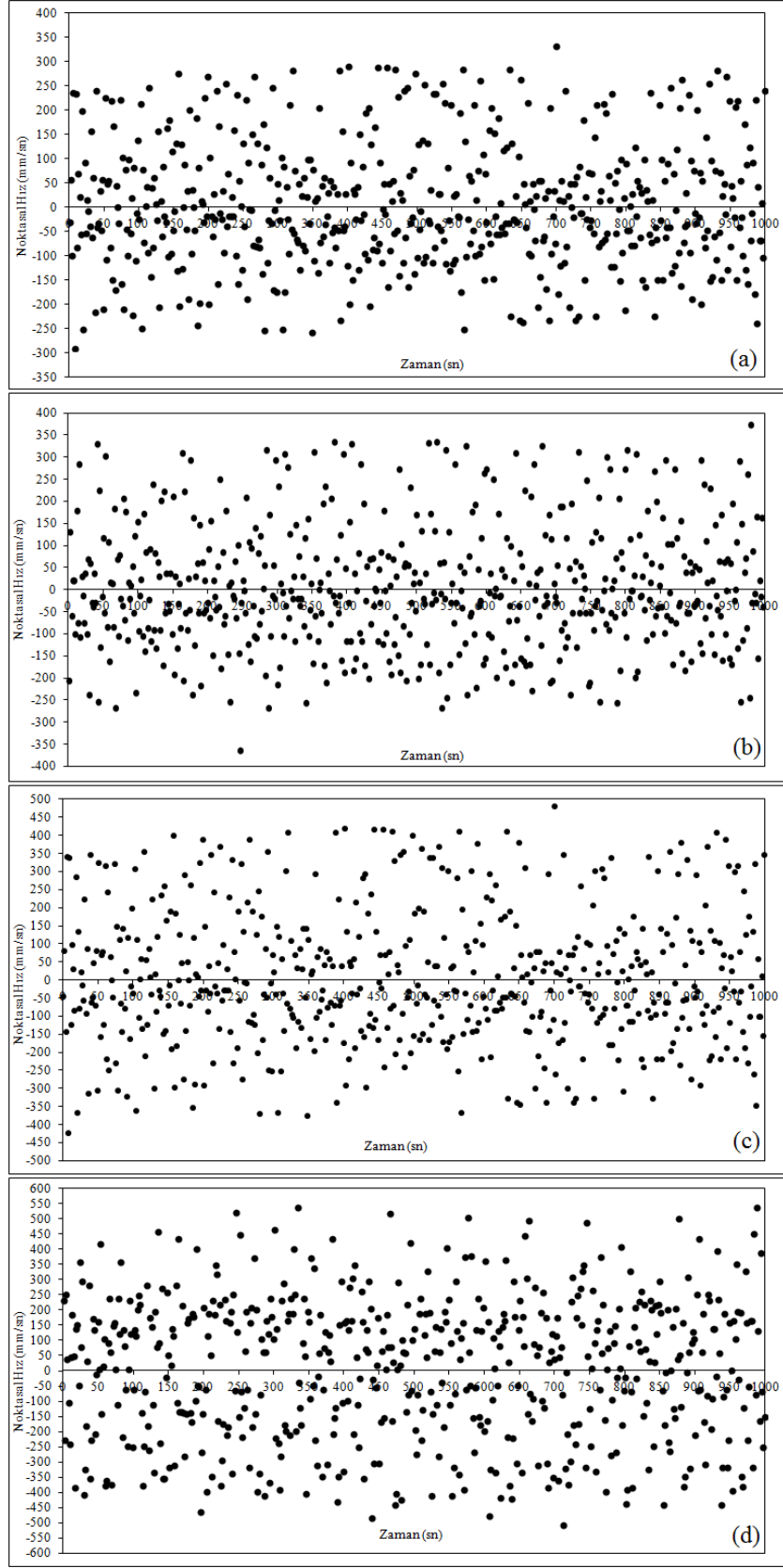
Deneyleerde doğrudan elde edilen son ve en önemli parametre ise, boru altında altı noktada gerçekleştirilen zamana bağlı oyulma ( $S_t$ ) ölçümleridir. Örnek olarak, H4D2B212080801BT kodlu deneye ait altı noktadaki zamana bağlı oyulma derinliği grafiklerine Şekil 5.6’da yer verilmektedir.

Bu grafiklerin analizi ile zamana bağlı oyulma derinlikleri, nihai oyulma derinliği ve zaman ölçeği parametresi değerleri elde edilmektedir. Elde edilen bu parametrelerden yararlanılarak bir sonraki alt bölümde anlatılan dört farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

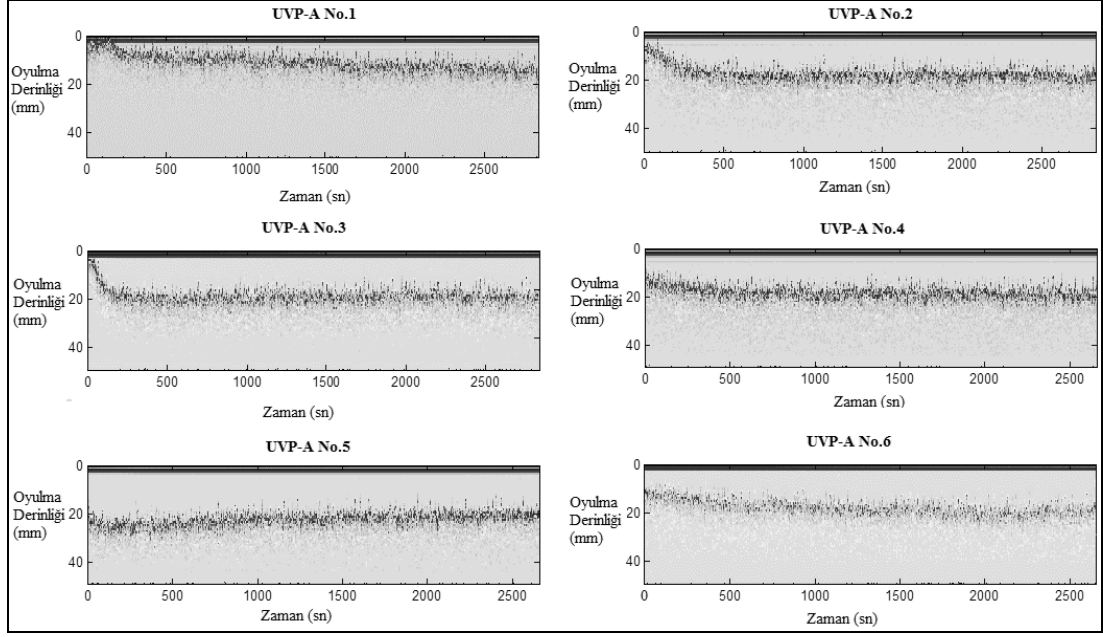


Şekil 5.4 Borunun bulunduğu kesitteki USS20130 algılayıcısı ile elde edilen zamana bağlı su seviyeleri (dalga kaydı), (a) 62.5 Hz, (b) 75 Hz, (c) 87.5 Hz ve (d) 100 Hz.





Şekil 5.5 Boru ekseninde ölçülen noktasal hızlar, (a) 62.5 Hz, (b) 75 Hz, (c) 87.5 Hz ve (d) 100 Hz.



Şekil 5.6 H4D2B212080801BT kodlu deneye ait zamana bağlı ham oyulma derinliği ölçüm grafikleri.

#### 5.4 Deneysel Sonuçlarının Analizi

Tez çalışmaları kapsamında yapılan deneylerin sonuçları ile aşağıda sıralanan dört farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Nihai oyulma derinliği (denge durumu oyulma derinliği) bulgularının, olayda etkin boyutsuz parametreler ile değişiminin araştırılması.
- Zamana bağlı oyulma derinliklerinin, boyutsuz parametreler ile değişiminin araştırılması.
- Zaman ölçeği parametresinin boyutsuzlaştırılarak olayda etkin diğer parametreler ile değişiminin araştırılması.
- Oyulmanın boru altı boyunca gelişiminin araştırılması.

Yukarıda verilen ilk üç analiz için boru altında ölçüm yapan orta bölgedeki algılayıcıların sonuçları kullanılmıştır. Bunun nedeni, ilk üç analizin boru serbest bölgesindeki iki boyutlu oyulma durumunda etkin olmasıdır.

Bu kapsamda öncelikle, olayda etkin boyutlu ve boyutsuz büyüklüklerin deneylerde aldıkları değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 5.3’de ilgili parametrelerin deneylerde aldıkları değerler verilmektedir.

Tablo 5.3 Deneylerdeki boyutlu ve boyutsuz parametrelerin değerleri.

Dalga	$T_w$ (sn)	$H$ (cm)	$U_m$ (cm/sn)	$U_{fm}$ (cm/sn)	$D$ (mm)	$KC$ *	$Re_D$ *	$d_{50}$ (mm)	$\theta$ **	$Fr_d$ **	$\theta_{kr}$ ***
Tip 1	4.3	13	25.9	2.54	63	16.6	16317	0.55	0.0727	2.74	0.032
					90	11.6	23310	1.85	0.0293	1.50	0.046
					110	9.5	28490	3.75	0.0172	1.05	0.047
Tip 2	3.6	16	29.0	2.70	63	17.7	18270	0.55	0.0819	3.07	0.034
					90	12.4	26100	1.85	0.0330	1.68	0.047
					110	10.1	31900	3.75	0.0194	1.18	0.047
Tip 3	3.1	24	38.7	3.34	63	19.0	24381	0.55	0.1257	4.10	0.036
					90	13.3	34830	1.85	0.0506	2.24	0.047
					110	10.9	42570	3.75	0.0298	1.57	0.047
Tip 4	2.7	30	47.7	3.92	63	20.4	30051	0.55	0.1725	5.06	0.038
					90	14.3	42930	1.85	0.0694	2.76	0.047
					110	11.7	52470	3.75	0.0409	1.94	0.047

\* Dalga tipine ve boru çapına bağlı olarak değişen boyutsuz parametreler.

\*\* Dalga tipine ve dane medyan çapına bağlı olarak değişen boyutsuz parametreler.

\*\*\* Şekil 2.12 yardımıyla belirlenen değerlerdir.

#### 5.4.1 Analizler İçin Kullanılan İstatistiksel Yöntemler Ve Sınamalar

Deneylerde elde edilen boyutsuzlaştırılmış parametrelerin, incelenen fiziksel olayda etkin boyutsuz parametreler ile ilişkisini araştırmak ve parametre kestirimi için bağıntılar türetebilmek için istatistiksel yöntemlerden faydalanılmıştır.

Bunlardan ilki, boyutsuz parametrelerinin kestirimi için kullanılacak regresyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ve RMSE (hata karelerin ortalamasının karekökü) ifadesinin en küçük olması prensibine dayanan istatistiksel yöntemdir. Burada,  $RMSE$  ifadesi  $n$  veri sayısını göstermek üzere (5.4) nolu eşitlik ile ifade edilebilmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (5.4)$$

Burada,  $Y$  deneyler sonucu elde edilen bağımlı değişkeni,  $\hat{Y}$  ise  $x$  bağımsız değişkenlerine bağlı olarak (5.5) eşitliği ile verilen genel ifade ile kestirimi yapılan bağımlı değişkeni göstermektedir.

$$\hat{Y} = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots \quad (5.5)$$

Gerçekleştirilen regresyonun verim ölçütü olarak, deneysel verileri ile kestirimi yapılan veriler arasındaki korelasyon katsayıları (5.6) bağıntısı kullanılarak hesaplanmış ve saçılma diyagramları ile birlikte verilmiştir.

$$r(Y, \hat{Y}) = \frac{\text{cov}(Y, \hat{Y})}{S_Y S_{\hat{Y}}} \quad (5.6)$$

Burada  $\text{cov}(Y, \hat{Y})$ ,  $Y$  ile  $\hat{Y}$  değişkenlerinin kovaryansını göstermekte olup (5.7) eşitliği ile hesaplanmaktadır.  $S_Y, S_{\hat{Y}}$  ise  $Y$  ve  $\hat{Y}$  değişkenleri için standart sapmalar olup (5.8) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$\text{cov}(Y, \hat{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}) \quad (5.7)$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{ve} \quad S_{\hat{Y}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2} \quad (5.8)$$

(5.7) ve (5.8) eşitliklerindeki  $\bar{Y}$  ve  $\bar{\hat{Y}}$  değerleri  $Y$  ile  $\hat{Y}$  değişkenlerinin aritmetik ortalamaları olmakta ve (5.9) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{ve} \quad \bar{\hat{Y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \quad (5.9)$$

Saçılma diyagramları üzerinde ayrıca, saçılma göstergesi olarak adlandırılan ve (5.10) eşitliği ile hesaplanan bir parametrenin daha değeri verilmektedir. Bu parametre tahminin,  $r=1$  doğrusundan ne kadar saptığını belirtmektedir.

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \quad (5.10)$$

Öte yandan, regresyon denkleminin bütün olarak uygunluğunun, diğer bir deyişle bağımlı  $Y$  değişkeni ile bağımsız  $x$  değişkeni/değişkenleri arasında anlamlı doğrusal ilişkinin varlığının denetlenmesi amacıyla (5.11) eşitliği ile verilen  $f$  testi uygulanmıştır.

$$f = \frac{SSR/\nu_1}{SSE/\nu_2} \quad (5.11)$$

Burada  $SSR$  regresyon çizgisinin tanımladığı varyansı göstermekte olup (5.12) eşitliği ile belirlenmektedir.  $SSE$  ise hatalara (kalıntılara) kalan varyans olup (5.13) eşitliği ile hesaplanmaktadır.  $\nu_1$  payın serbestlik derecesi olup regresyon modelindeki bağımsız değişken sayısı  $k$ 'ya eşit olmakta,  $\nu_2$  de paydanın serbestlik derecesi olup  $n$  veri sayısını göstermek üzere  $n - k - 1$  olarak hesaplanmaktadır.

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (5.12)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (5.13)$$

Eğer hesaplanan  $f$  istatistiği,  $\alpha$  seçilen anlam seviyesini göstermek üzere  $f_{\alpha,(\nu_1;\nu_2)}$  kritik değerinden büyük kalıyorsa, kurulan regresyon modelinin bütün olarak uygun olduğu sonucuna varılır. Diğer bir deyişle, bağımlı  $Y$  değişkeni ile

bağımsız  $x$  değişkeni/değişkenleri arasında anlamlı doğrusal ilişkinin varlığı kabul edilir.

Deneysel sonuçların analizinde kullanılan bir diğer  $f$  testi ise bağıntılara sonradan eklenen ilave terimlerin anlamlı ölçüde katkı sağlayıp sağlamadığının denetlendiği kısmi  $f$  testidir. (5.14) eşitliği ile hesaplanan  $f$  istatistiğinin, seçilen anlam seviyesinde kritik değerinden küçük yada büyük kalmasına göre karar verilir.

$$f_{kismi} = \frac{(SSR_{II} - SSR_I)/m}{SSE_{II}/(n - k - 1)} \quad (5.14)$$

Burada  $m$  bağımsız değişken sayısı fazla olan  $II$ . modelden çıkartılan terim sayısını ve  $k$  ise yine  $II$ . modeldeki bağımsız değişken sayısını göstermektedir. Burada  $SSR_{II}$  ve  $SSR_I$  sırasıyla, bağımsız değişken sayısı fazla olan  $II$ . model ile ve bağımsız değişken sayısı  $m$  kadar azaltılan  $I$ . model ile regresyon çizgisinin tanımladığı varyansı göstermekte olup,  $SSE_{II}$  ise bağımsız değişken sayısı fazla olan  $II$ . model için hatalara (kalıntılara) kalan varyansı simgelemektedir.

Hesaplanan kısmi  $f$  istatistiğinin  $\nu_1 = m$  ve  $\nu_2 = n - k - 1$  olmak üzere  $f_{\alpha,(\nu_1;\nu_2)}$  kritik değerinden büyük olması durumunda, bağımsız değişken sayısı fazla olan  $II$ . modelden  $m$  kadar bağımsız değişkenin çıkarılamayacağı sonucuna varılır. Bu durumun diğer bir anlamı; bağımsız değişken sayısı fazla olan  $II$ . modelin, bağımsız değişken sayısı  $m$  kadar az olan  $I$ . modelden anlamlı ölçüde daha iyi sonuç verdiğidir. Bir başka ifade ile de  $II$ . modelde fazla olan bağımsız değişkenlerin  $Y$  bağımsız değişkeninin değişimi üzerinde anlam taşıdıkları sonunca varılabilir. (5.14) eşitliğindeki  $k$ , bağımsız değişken sayısı fazla olan  $II$ . modeldeki bağımsız değişken sayısını ifade etmektedir.

Tez kapsamındaki istatistiksel çalışmalarda anlamlılık seviyesi  $\alpha = 0.01$  olarak seçilmiştir. Bu değer seçimi tamamen çalışmanın niteliğine bağlı olup genel olarak %5 veya %1 değerleri keyfi olarak seçilmektedir.

Anlamlılık seviyesi istatistiksel olarak tip 1 hata yapma olasılığı olarak tanımlanabilmektedir. Bir diğer deyişle anlamlı kabul edilmesi gereken  $H_0$  hipotezinin reddedilme şansı anlamlılık seviyesi olmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma için bu şans %1 oranındadır. Bu durumda gerçekleştirilecek istatistiksel sınamalardaki güven düzeyi  $1 - \alpha = 1 - 0.01 = 0.99 = \%99$  değerindedir.

#### **5.4.2 Nihai (Denge Durumu) Oyulma Derinliği İle Gerçekleştirilen Analizler**

Öncelikle belirtilmelidir ki; bu bölümde analizi gerçekleştirilen deneysel veriler, deney borusu ortasındaki UVP algılayıcılarından No.3'e ait ölçüm değerleridir.

Konu ile ilgili daha önceki çalışmaların ve tez kapsamında yapılan araştırmaların ışığı altında, su altı borusu altındaki dalga kaynaklı zemin hareketi durumunda ortaya çıkan en etkin boyutsuz parametrenin (2.3) eşitliği ile verilen Keulegan-Carpenter sayısı ( $KC$ ) olduğu açıktır.

Bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalarda genel olarak, göreceli nihai oyulma derinliği ( $S/D$ ) ile  $KC$  arasındaki ilişki ortaya konulmaya çalışılmıştır.  $KC$  sayısı gerek fiziksel anlamından gerekse de matematiksel ifadesinden anlaşılacağı üzere, boru çapını içerdiğinden su altı borusu geometrisine, dalga periyodunu ve dalganın boru ekseninde oluşturduğu akım hızını içerdiğinden dolayı da etkiyen dalganın karakteristiklerine bağlı değişmektedir. Bununla birlikte, boru ekseninde oluşan akım hızı aynı zamanda dalgalanmamış su derinliğinin de fonksiyonu olmaktadır.

Böylece,  $KC$  sayısının işin içersine katılması ile boru, dalga ve ortam derinliği de değişken olarak yer almaktadır. Ancak, su altı borusu etrafında dalga etkisi ile oluşan zemin hareketleri konusunda etkin parametrelerden biri olan dane medyan çapı ( $d_{50}$ ) ve dolayısıyla zemin özellikleri hesaba katılamamaktadır.

Tez çalışması kapsamında, dane medyan çapları birbirlerinden anlamlı derecede farklı olan üç tip kum taban malzemesi kullanılmıştır. Bu değişkenin, nihai göreceli oyulma derinliği üzerindeki etkisine görmek amacıyla,  $d_{50}$  içeren üç farklı boyutsuz

sayı  $KC$  sayısı ile birlikte regresyon ifadesine sokulmuştur. Bu sayılar sırasıyla göreceli dane medyan çapı ( $d_{50}/D$ ), Shields parametresi ( $\theta$ ) ve dane yoğunluk Froude sayısı ( $Fr_d$ ) şeklindedir.

Öncelikle  $S/D$  ifadesinin yalnızca  $KC$  sayısına bağlı olarak düşünüldüğü ve ifadesi (5.15) eşitliğinde gösterilen regresyon denklemi için parametreler belirlenmiştir.

$$\frac{S}{D} = a KC^b \quad (5.15)$$

$a$  ve  $b$  regresyon parametreleri, yöntemi bir önceki alt bölümde verilen  $RMSE$  değerinin en küçük olacağı şekilde belirlenmiştir. Buna göre elde edilen denklem (5.16) eşitliği ile verilmektedir.

$$\frac{S}{D} = 0.001 KC^2 \quad (5.16)$$

Yukarıda verilen regresyon denkleminin yapısı (bağımsız değişkenlerin üstel ve çarpımsal olarak hesaba katıldığı regresyon denklemi) konu ile ilgili önceki çalışmalarda kullanılan şekildedir. Bununla birlikte, tez çalışmaları kapsamında, hem nihai oyulma derinlikleri hem de zaman ölçeği parametresi ile ilgili gerçekleştirilen analizlerde  $\hat{Y} = a_1 x_1^{b_1} + a_2 x_2^{b_2} + \dots$  şeklindeki toplamsal çok terimli regresyon denklemleri denenmiş ancak, yukarıda bahsedilen regresyon denklemleri ile elde edilen ilişkililik değerlerine ulaşamamıştır.

Şekil 5.7'de, farklı dane medyan çaplarına sahip taban malzemeleri ile yapılan deneylerden elde edilen veriler ile (5.16) eşitliği ile verilen regresyon ifadesi ile hesaplanan kestirim eğrisi bir arada gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 5.7'ye karşılaştırma amacı ile (5.17) eşitliği ile verilen Sümer ve Fredsoe (1990) çalışmasında elde edilen bağıntı ve (5.18) eşitliği ile verilen Çevik ve Yüksel (1999) çalışmasında elde edilen bağıntı ile hesaplanan eğrilerde ilave edilmiştir. Sümer ve

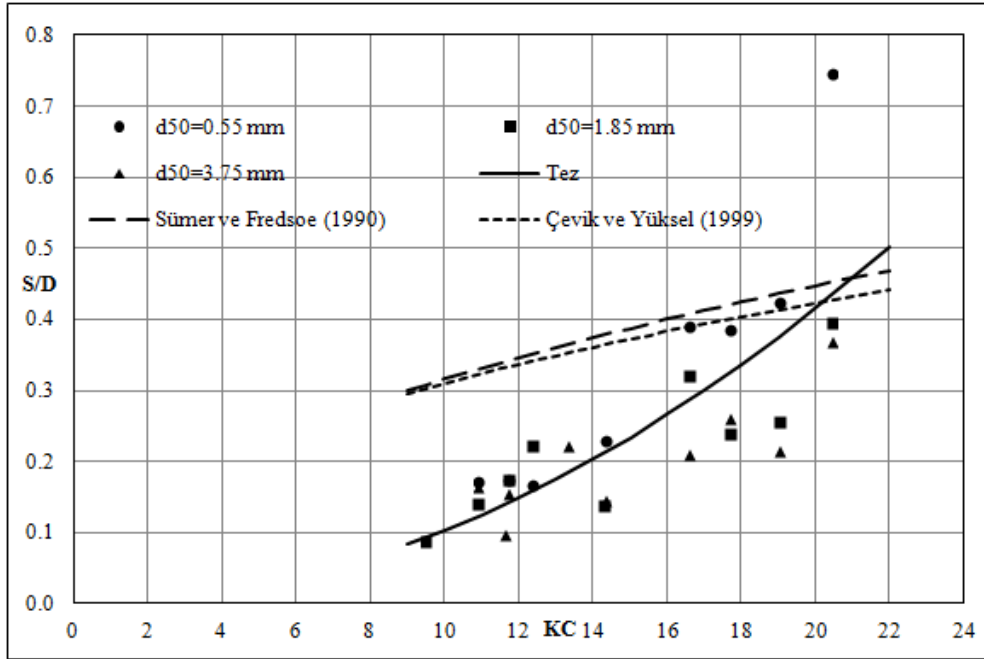


Fredsoe (1990) çalışmasında kullanılan taban malzemesi dane medyan çapı  $d_{50} = 0.18$  ve  $0.58$  mm değerlerinde olup, Çevik ve Yüksel (1999) çalışmasında kullanılan taban malzemesi dane medyan çapı değeri ise  $d_{50} = 1.28$  mm'dir.

$$\frac{S}{D} = 0.1 KC^{0.5} \quad (5.17)$$

$$\frac{S}{D} = 0.11 KC^{0.45} \quad (5.18)$$

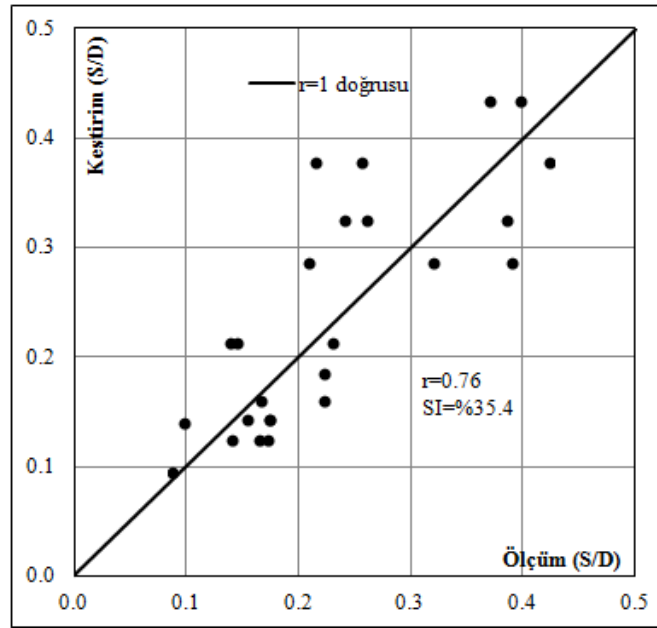
$S/D$ 'nin yalnızca  $KC$  sayısına bağlı olarak (5.16) eşitliği ile verilen bağıntı yardımıyla kestiriminin yapılması durumunda, ölçülen  $S/D$ 'ler ile kestirimi yapılan  $S/D$ 'lerin karşılıklı olarak noktalandığı saçılma diyagramı Şekil 5.8'de gösterilmekte olup, grafik üzerinde ayrıca bu iki dizinin korelasyon katsayısı da verilmektedir.



Şekil 5.7 Deneysel veriler ile (5.16), (5.17) ve (5.18) bağıntıları ile hesaplanan  $S/D$ 'lerin  $KC$  sayısı ile değişimi.

(5.16) eşitliği ile verilen bağıntı yardımıyla gerçekleştirilen  $S/D$  kestirimi için  $f$  testi uygulandığında  $f = 37.14$  olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, tez çalışması için seçilen %1 anlamlılık seviyesindeki kritik  $f_{kr} = 7.82$  değerinden büyük olduğundan, kurulan regresyon modelinin bütün olarak uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 5.7’de, literatürde sıklıkla kullanılan (5.17) ve (5.18) bağıntıları ile elde edilen sonuçların, tez kapsamında bulunan (5.16) bağıntısı ile elde edilen sonuçlara küçük çaplı sedimentlere karşılık gelen büyük  $S/D$  değerlerinde yaklaştıkları görülmektedir. Bunun nedeni, bir önceki paragrafta belirtilen ve (5.17) ile (5.18) bağıntılarının üretildiği çalışmalarda kullanılan taban malzemesini dane medyan çaplarının, tez çalışması kapsamında kullanılan taban malzemelerinden inceye ve ince ile orta arasına tekabül etmesi olarak düşünülmektedir. Bu nedenle  $S/D$  değerlerinin kestirimi için taban malzemesi dane medyan çapını içeren bir başka boyutsuz parametrenin de işin içerisine katılması uygun görünmektedir.



Şekil 5.8 Ölçülen ve (5.16) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

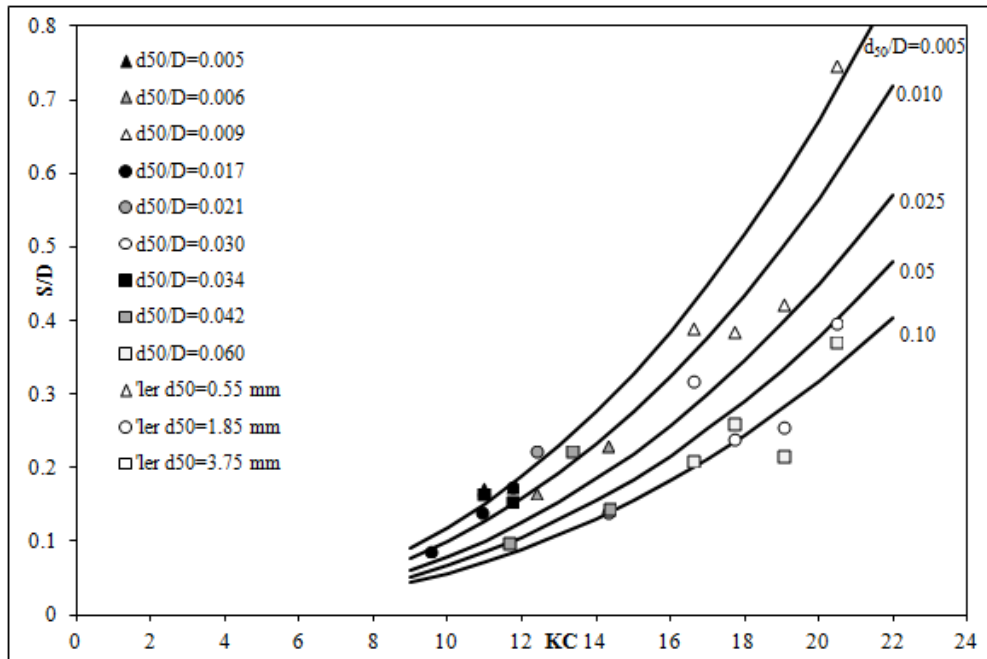
$S/D$  değerlerinin kestirimi için  $KC$  sayısı ile birlikte bağımsız değişken olarak bağıntıya katılacak ilk boyutsuz parametre olarak göreceli deniz zemini dane medyan

çapı ( $d_{50}/D$ ) düşünülmektedir. (5.19) eşitliği ile yapısı verilen regresyon denklemi için parametreler yine *RMSE* değerinin en küçük olması prensibine dayanan yöntem ile belirlenmiştir (5.20).

$$\frac{S}{D} = a KC^b \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^c \quad (5.19)$$

$$\frac{S}{D} = 0.0001 (KC)^{5/2} \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^{-1/4} \quad (5.20)$$

Şekil 5.9’da deneysel veriler ile (5.20) bağıntısı kullanılarak hesaplanan sabit  $d_{50}/D$  eğrileri verilmektedir. Şekil 5.10’da ise deneylerde ölçülen  $S/D$  değerleri ile (5.20) bağıntısı kullanılarak kestirimi yapılan  $S/D$  değeri karşılıklı olarak noktalanarak saçılma diyagramı oluşturulmuştur.

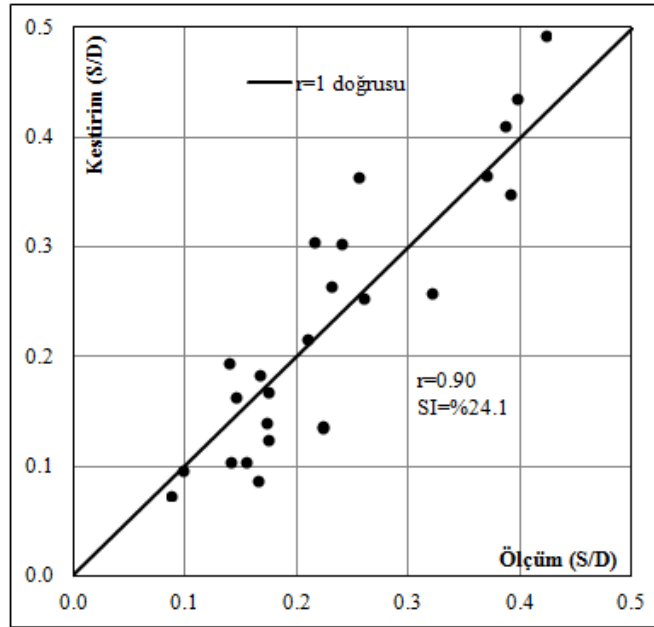


Şekil 5.9 Deneysel veriler ile (5.20) bağıntısı ile hesaplanan sabit  $d_{50}/D$  eğrilerinin gösterimi.

Bu durum için belirlenen korelasyon katsayısı Şekil 5.10’un üzerinde verilmektedir. Görüldüğü üzere elde edilen değer,  $S/D$ ’nin yalnızca  $KC$  sayısına

bağlı olarak kestiriminin yapıldığı model için elde edilen değerden anlamlı ölçüde büyüktür.

(5.20) eşitliği ile verilen regresyon denklemi için gerçekleştirilen  $f$  testi durumunda  $f = 58.04$  olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, tez çalışması için seçilen %1 anlamlılık seviyesindeki kritik  $f_{kr} = 5.66$  değerinden büyük olduğu gibi aynı zamanda  $S/D$ 'nin yalnızca  $KC$  sayısına bağlı olarak kestiriminin yapıldığı model için elde edilen  $f$  değerinden de oldukça büyüktür.  $f$  istatistiğinin büyük olması, kurulan regresyon modelinin daha anlamlı olduğu sonucunu doğurmaktadır.



Şekil 5.10 Ölçülen ve (5.20) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

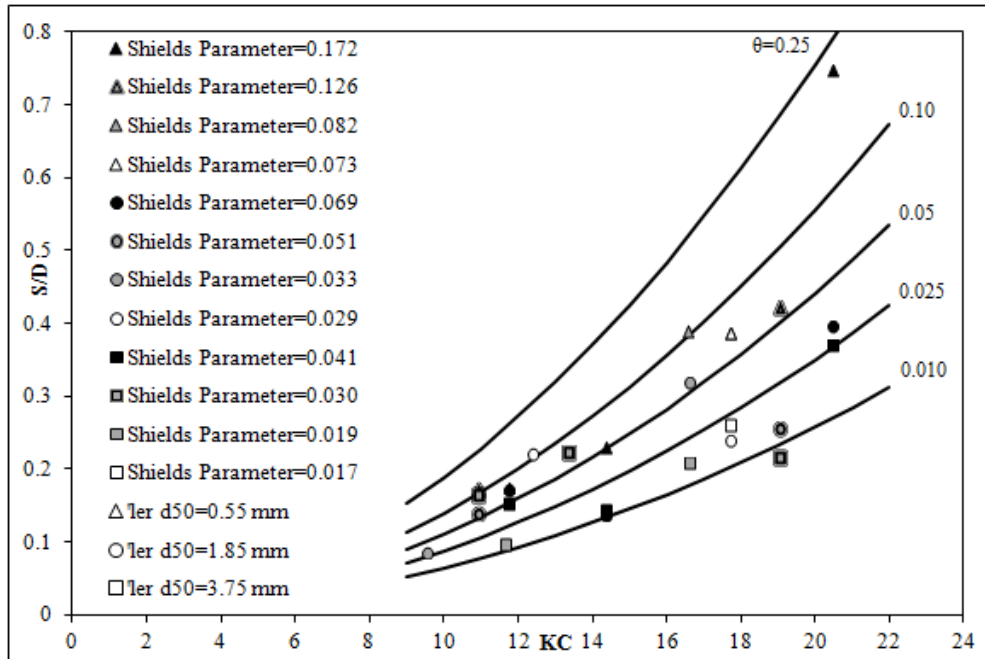
Bu aşamada, uygulanan diğer bir sına da, detayı bir önceki alt bölümde verilen kısmi  $f$  sınımasıdır. (5.14) eşitliği ile verilen bağıntıdaki simgelere göre  $II$ . model (5.20) eşitliği ile verilen ve  $I$ . model de (5.16) eşitliği ile verilen bağıntılar olarak alındığında,  $II$ . modelden  $d_{50}/D$  bağımsız değişkeninin atılması durumundaki kısmi  $f$  istatistiği  $f_{d_{50}/D} = 39.62$  olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer, %1 anlamlılık seviyesinde kritik  $f$  değeri olan  $f_{kr} = 7.88$  değerinden büyük olduğundan  $d_{50}/D$  bağımsız değişkeninin regresyon ifadesinden atılamayacağı

sonucuna varılır. Bu durum ayrıca  $d_{50}/D$  değerinin,  $S/D$ 'lerin değişimi üzerinde anlam taşıdığı sonucunu da beraberinde getirmektedir.

Nihai göreceli oyulma derinliklerinin değişimi üzerinde  $KC$  sayısı ile birlikte etkisi incelenecek  $d_{50}$  içeren diğer bir boyutsuz sayı da (2.10) eşitliği ile ifadesi verilen  $\theta$  parametresidir. (5.21) eşitliği ile gösterilen regresyon denklemi için  $RMSE$  değerinin en küçük olması prensibine dayanan yöntem ile parametreler belirlenmiştir (5.22). Şekil 5.11'de (5.23) bağıntısı ile hesaplanan sabit  $\theta$  eğrileri ile birlikte deneysel veriler bir arada gösterilmektedir.

$$\frac{S}{D} = a KC^b \theta^c \quad (5.21)$$

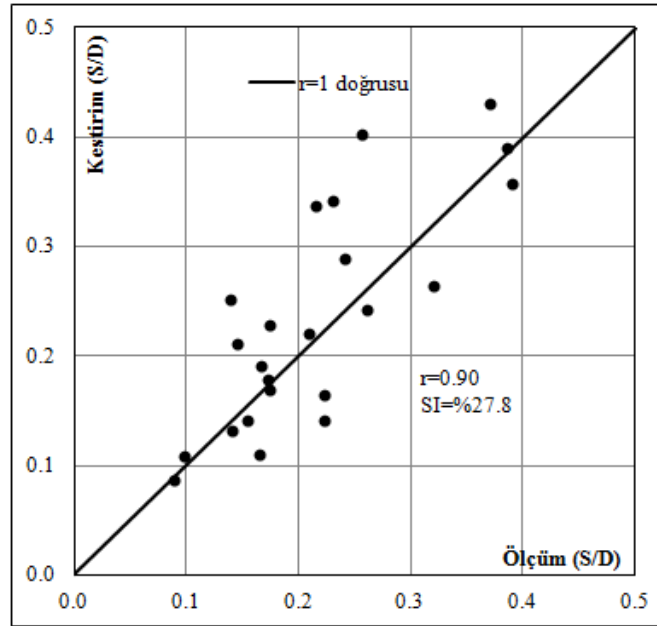
$$\frac{S}{D} = 0.003 KC^2 \theta^{1/3} \quad (5.22)$$



Şekil 5.11 Deneyel veriler ile (5.22) bağıntısı ile hesaplanan sabit  $\theta$  eğrilerinin gösterimi.

(5.22) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  değerleri ile deneyler sonucu elde edilen  $S/D$ 'lerin karşılıklı olarak noktalandığı saçılma diyagramı ise Şekil 5.12'de verilmektedir.

Şekil 5.12 üzerinden görüleceği gibi ölçülen ve (5.22) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  dizileri arasında  $r=0.90$  değerinde bir korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Bu değer,  $S/D$ 'lerin hem  $KC$  sayısı hem de  $d_{50}/D$  parametresi ile kestirimini yapıldığı model için elde edilen korelasyon katsayısı değeri ile aynıdır. Ayrıca,  $S/D$ 'lerin yalnızca  $KC$  sayısına bağlı olarak kestirimini yapıldığı modeldeki korelasyon katsayısı değerinden anlamlı ölçüde büyüktür.



Şekil 5.12 Ölçülen ve (5.22) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

$S/D \propto (KC, d_{50}/D)$  ile  $S/D \propto (KC, \theta)$  regresyonları için hangisinin daha uygun olduğunun belirlenmesi durumunda regresyon katsayıları eşit olduğundan regresyonun bütününe uygulanan  $f$  sınaması sonuçlarına göre karar verilmektedir.

$S/D$ 'lerin kestiriminde, bağımsız değişken olarak  $KC$  sayısı ile birlikte  $\theta$  parametresinin birlikte kullanıldığını regresyon denklemi için  $f = 54.35$  olarak

hesaplanmıştır. Hesaplanan bu istatistik, %1 anlamlılık seviyesindeki  $f_{kr} = 5.66$  sayısından oldukça büyük kalmakta ve kurulan regresyon modeli bütün olarak uygun olmaktadır. Ancak, hesaplanan  $f = 54.35$  istatistiği,  $S/D \propto (KC, d_{50}/D)$  durumunda hesaplanan  $f = 58.04$  değerinden küçük olduğundan, bu durum  $S/D \propto (KC, d_{50}/D)$  şeklinde kurulan regresyonun,  $S/D \propto (KC, \theta)$  regresyonundan nispeten daha iyi sonuç verdiği şeklinde yorumlanabilir.

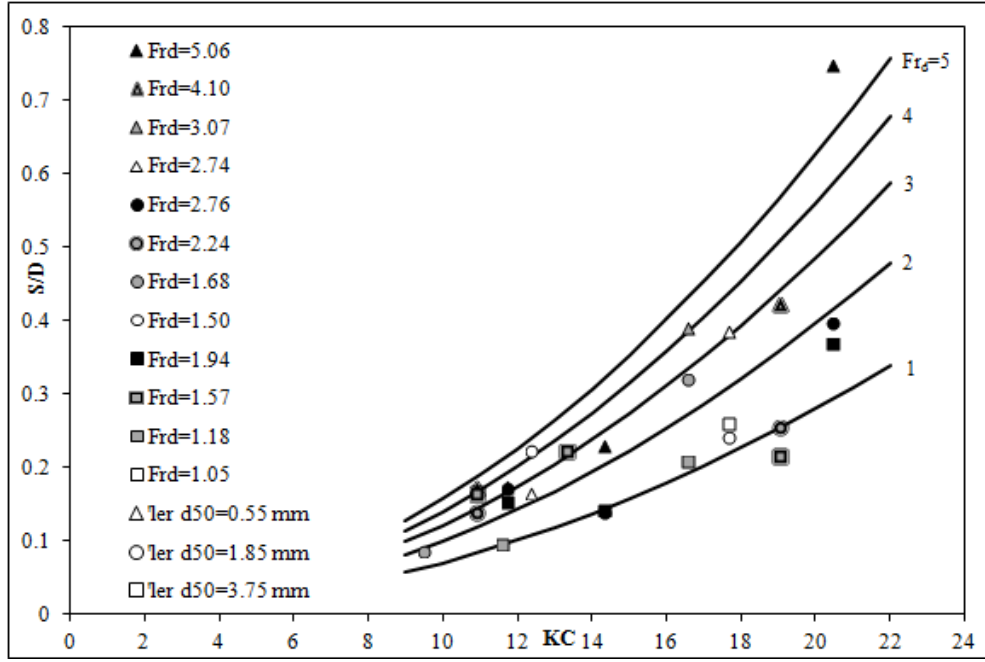
$S/D \propto (KC, \theta)$  regresyon modeline uygulanan diğer bir sınama da kısmi  $f$  sınamasıdır. (5.13) eşitliği ile verilen bağıntıdaki simgelere göre *II.* model (5.22) eşitliği ile verilen ve *I.* model de (5.16) eşitliği ile verilen bağıntılar olarak alındığında, *II.* modelden  $\theta$  bağımsız değişkeninin atılması durumundaki kısmi  $f$  istatistiği  $f_{\theta} = 50.90$  olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer, %1 anlamlılık seviyesinde kritik  $f$  değeri olan  $f_{kr} = 7.88$  değerinden büyük olduğundan  $\theta$  bağımsız değişkeninin regresyon ifadesinden atılamayacağı sonucuna varılır. Bu durum ayrıca  $S/D \propto (KC, d_{50}/D)$  regresyon modelinde olduğu gibi,  $\theta$  değerinin,  $S/D$ 'lerin değişimi üzerinde anlam taşıdığı sonucuna da işaret etmektedir.

Nihai göreceli oyulma derinliklerinin değişimi üzerinde  $KC$  sayısı ile birlikte etkisi incelenecek son parametre, yine  $d_{50}$  içeren ve ifadesi (4.15) eşitliği ile verilen  $Fr_d$  sayısıdır. (5.23) eşitliği ile gösterilen regresyon denklemi için  $RMSE$  değerinin en küçük olması prensibine dayanan yöntem ile parametreler belirlenmiştir (5.24). Şekil 5.13'de (5.24) bağıntısı ile hesaplanan sabit  $Fr_d$  eğrileri ile birlikte deneysel veriler bir arada gösterilmektedir.

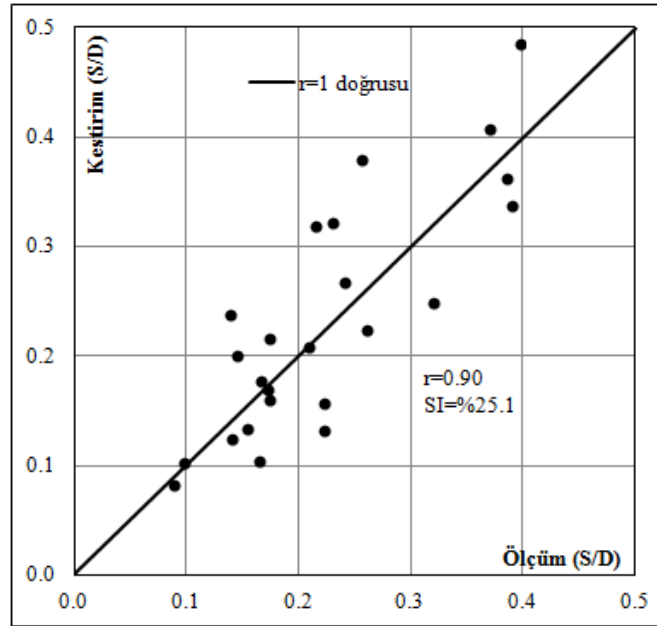
$$\frac{S}{D} = a KC^b Fr_d^c \quad (5.23)$$

$$\frac{S}{D} = 0.0007 KC^2 Fr_d^{1/2} \quad (5.24)$$

Şekil 5.14’de ise (5.24) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  değerleri ile deneyler sonucu elde edilen  $S/D$ ’lerin karşılıklı olarak noktalandığı saçılma diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 5.13 Deneysel veriler ile (5.24) bağıntısı ile hesaplanan sabit  $Fr_d$  eğrilerinin gösterimi.



Şekil 5.14 Ölçülen ve (5.24) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.14 üzerinden görüleceği gibi ölçülen ve (5.24) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S/D$  dizileri arasında  $r = 0.90$  değerinde bir korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu korelasyon katsayısı değeri,  $S/D \propto (KC, d_{50}/D)$  ve  $S/D \propto (KC, \theta)$  regresyonları için hesaplanan korelasyon katsayısı değerleri ile aynıdır.  $S/D \propto (KC, Fr_d)$  için hesaplanan korelasyon katsayısı değeri, diğerlerinde olduğu gibi yine  $S/D \propto KC$  için hesaplanan korelasyon katsayısı değerinden anlamlı ölçüde büyüktür.

$S/D$ 'lerin kestiriminde,  $KC$  sayısından sonra ikinci bağımsız değişken olarak hangi boyutsuz sayının daha etkin olduğunun anlaşılması için,  $S/D \propto (KC, Fr_d)$  regresyonu için  $f$  istatistiği hesaplanarak, diğer durumlarda bulunan  $f$  istatistikleri ile karşılaştırılmalıdır.

$S/D$ 'lerin kestiriminde, bağımsız değişken olarak  $KC$  sayısı ile birlikte  $Fr_d$  parametresinin birlikte kullanıldığı regresyon denklemi için  $f = 57.64$  olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu istatistik, %1 anlamlılık seviyesindeki  $f_{kr} = 5.66$  sayısından oldukça büyük kalmakta ve kurulan regresyon modeli bütün olarak uygun olmaktadır.

$S/D \propto (KC, Fr_d)$  regresyon modelinden,  $Fr_d$  bağımsız değişkeninin çıkartılıp çıkartılamayacağıın sınaması olan kısmi  $f$  sınaması uygulanmak istendiğinde, (5.14) eşitliği ile verilen bağıntıdaki simgelere göre II. model (5.24) eşitliği ile verilen ve I. model de (5.16) eşitliği ile verilen bağıntılar olarak alınıp kısmi  $f$  istatistiği  $f_{Fr_d} = 44.58$  olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer, %1 anlamlılık seviyesinde kritik  $f$  değeri olan  $f_{kr} = 7.88$  değerinden büyük olduğundan  $Fr_d$  bağımsız değişkeninin regresyon ifadesinden atılamayacağı sonucuna varılır. Bu durum aynı zamanda,  $S/D \propto (KC, d_{50}/D)$  ve  $S/D \propto (KC, \theta)$  regresyon modellerinde olduğu gibi,  $Fr_d$  değerinin  $S/D$ 'lerin değişimi üzerinde anlam taşıdığı sonucunu da doğrulamaktadır.

Tablo 5.4’de  $S/D$ ’nin kestiriminde kullanılan regresyon denklemleri için elde edilen  $f$  ve kısmi  $f$  istatistikleri liste halinde verilmektedir.

Tablo 5.4 incelendiğinde,  $S/D$ ’nin kestirimi için kurulan tüm regresyon modellerinin uygun olduğu görülmektedir. Regresyonların bütününe uygulanan  $f$  istatistiklerine bakıldığında, iki bağımsız değişkenli olanların, bir bağımsız değişkenli olana oranla daha iyi sonuç verdiği de rahatlıkla söylenebilir. Yukarıda nasıl ve nereye uygulandığı detaylı olarak anlatılan kısmi  $f$  istatistiği sonuçları da, iki bağımsız değişkenli modellerin daha iyi olduğu çıkarımını doğrular niteliktedir.

Tablo 5.4  $S/D$ ’nin kestirimindeki regresyon modelleri için  $f$  ve kısmi  $f$  istatistikleri.

Regresyon Denklemleri	$f$ İstatistiği	Kritik $f^*$	Kısmi $f$ İstatistiği	Kritik $f^*$
$S/D \propto KC$	37.14	7.82	---	---
$S/D \propto (KC, d_{50}/D)$	58.04	5.66	39.62	7.88
$S/D \propto (KC, \theta)$	54.35	5.66	50.90	7.88
$S/D \propto (KC, Fr_d)$	57.64	5.66	44.58	7.88

\* Seçilen anlamlılık seviyesi %1’dir.

Ancak, iki bağımsız değişken içeren regresyon denklemleri arasında bir sıralama yapılması istenirse, bu durum bir önceki paragrafta yapılan analiz kadar net olamayacaktır. Çünkü, Tablo 5.4’den görüleceği üzere, iki bağımsız değişken içeren regresyon modellerinin hem  $f$  istatistikleri hem de kısmi  $f$  istatistikleri birbirlerine oldukça yakındır. Ayrıca, regresyonun bütününe uygulanan  $f$  sınaması durumunda büyük  $f$  istatistiği olanın kısmi  $f$  istatistiği küçük ve regresyonun bütününe uygulanan  $f$  sınaması durumunda küçük  $f$  istatistiği olanın kısmi  $f$  istatistiği büyüktür.

İki bağımsız değişkenli regresyon modellerine ek olarak üç bağımsız değişken içeren modeller de denenmiştir. Bu modeller  $S/D \propto (KC, d_{50}/D, \theta)$ ,  $S/D \propto (KC, \theta, Fr_d)$  ve  $S/D \propto (KC, Fr_d, d_{50}/D)$  şeklinde sıralanmaktadır. Yapılan analizlerle, üç bağımsız değişkenli regresyon modellerinin bütünü için

uygulanan  $f$  sınamaları sonuçlarının, iki bağımsız değişken içeren modeller ile elde edilen sonuçlara oranla oldukça düşük kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, eklenen üçüncü bağımsız değişkenin anlamlılığı için gerçekleştirilen kısmi  $f$  sına sonuçları da bu ilave edilen bağımsız değişkenlerin modelden atılması yönünde olmuştur. Diğer bir deyişle üçüncü bağımsız değişkenlerin varyans karşılamaya katkısı çok düşüktür.

### **5.4.3 Zaman Ölçeği Parametresi İle Gerçekleştirilen Analizler**

Tez çalışması kapsamında, nihai oyulma derinlikleri ile yapılan analizlerden sonra sırayı zaman ölçeği parametresi ile gerçekleştirilen analizler almaktadır. Nihai oyulma derinliklerinin analizinde yapılanlara benzer şekilde, bu bölümde analizi gerçekleştirilen deneysel veriler, deney borusu ortasındaki UVP algılayıcılarından No.3'e ait ölçüm değerleridir.

Şekil 2.10'da grafiksel olarak tanımlanan zaman ölçeği ( $T$ ) parametresinin, sonuçların analizinde kullanılması için boyutsuzlaştırılmış hali (4.16) eşitliği ile verilmiştir. Zaman ölçeği olarak adlandırılan dilimde su altı borusu altındaki oyulma hızlı bir şekilde gelişmektedir. Diğer bir deyişle bu bölgede oyulma hareketinin hızı büyük olmaktadır. Zaman ölçeğinin doğru olarak kestirimi, çeşitli zamanlarda farklı yönlerden esen fırtınalar sonucu oluşacak dalgaların etkisi ile boru altında meydana gelecek oyulmanın gelişim süreci açısından oldukça önemli olup, bu durum su altı boru hattı stabilitesini yakından ilgilendirmektedir.

Öncelikle boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği ( $T^*$ ) ifadesinin yalnızca  $\theta$  parametresine bağlı olarak düşünüldüğü ve ifadesi (5.25) eşitliğinde gösterilen regresyon denklemi için parametreler belirlenmiştir.

$$T^* = a \theta^b \quad (5.25)$$

$a$  ve  $b$  regresyon parametreleri,  $S/D$ 'nin kestirimi için kullanılan regresyon denklemlerinde olduğu gibi  $RMSE$  değerinin en küçük olması prensibine dayanarak belirlenmiş olup, bağıntının nihai hali (5.26) eşitliği ile verilmektedir.

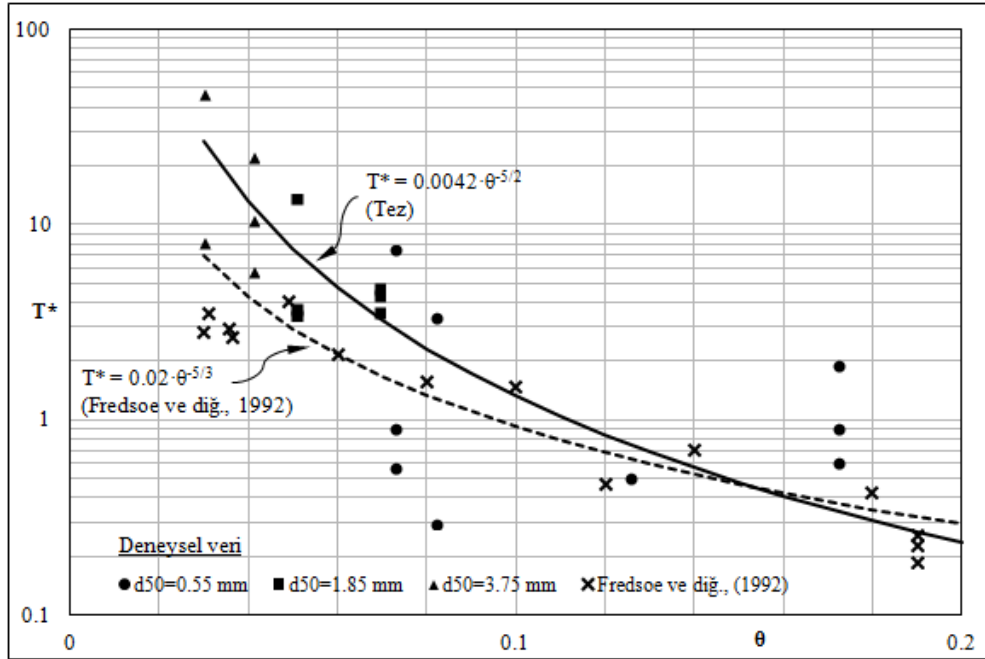
$$T^* = 0.0042 \theta^{-5/2} \quad (5.26)$$

Şekil 5.15’de, tüm deneysel  $T^*$  değerleri, (5.26) bağıntısı ile hesaplanan eğri ile birlikte verilmektedir. Ayrıca, Fredsoe ve diğ., (1992) çalışması sonucu bulunan deneysel  $T^*$  değerleri ve yine aynı çalışmada türetilen ve (5.27) eşitliği ile verilen bağıntı ile hesaplanan eğri de, karşılaştırma amacıyla bir arada sunulmaktadır.

$$T^* = 0.02 \theta^{-5/3} \quad (5.27)$$

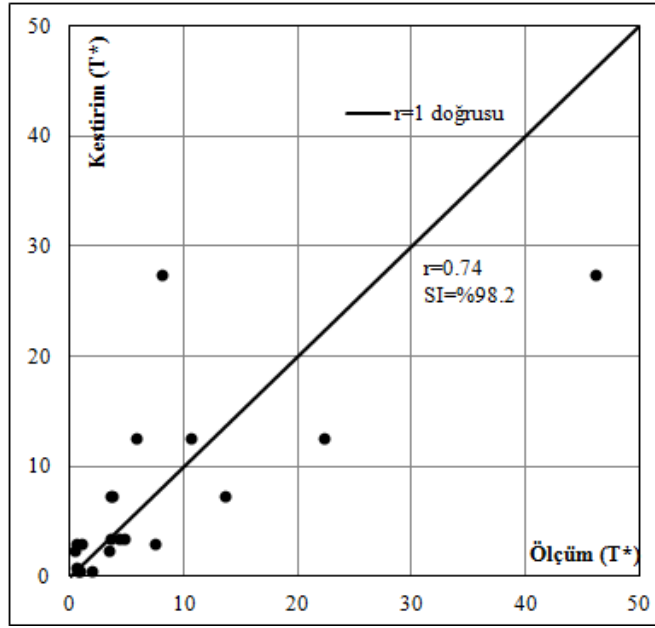
Deneyler sonucu elde edilen ve (5.26) bağıntısı yardımıyla kestirimi yapılan  $T^*$  değeri karşılıklı olarak noktalanarak oluşturulan saçılma diyagramı Şekil 5.16’da verilmektedir.

Verilen saçılma diyagramı üzerinde deneysel ve türetilen  $T^*$  dizileri arasındaki korelasyon katsayısı değeri de gösterilmektedir. Hesaplanan korelasyon katsayısı çok yüksek olmamakla birlikte,  $T^*$  değerlerinin  $\theta$  ile değişim içinde olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 5.15 Tez kapsamındaki ve Fredsoe ve diğ., (1992) çalışmasındaki deneysel  $T^*$  verilerinin, aynı çalışmalar için türetilen sırasıyla (5.26) ve (5.27) bağıntıları ile çizilen eğrilerle birlikte gösterimi.

Öte yandan, nihai oyulma derinliklerinin analizinde gerçekleştirildiği gibi, regresyon denkleminin bütününe  $f$  sınaması uygulamak, bağıntının geçerliliği açısından, burada da doğru olacaktır. Buna göre,  $f$  istatistiği  $f = 22.71$  olarak hesaplanmakta olup, bu değer kritik  $f$  değeri olan  $f_{kr} = 8.29$  değerinden büyük olduğu için,  $\theta$ 'nın  $T^*$  parametresinin değişimi üzerinde anlamlı olduğu sonucuna varılır.



Şekil 5.16 Ölçülen ve (5.26) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $T^*$  değerlerinin karşılaştırılması.

$T^* \propto \theta$  olarak kurulan regresyon ifadesi, yüksek sayılabilecek bir korelasyon katsayısı göstermekte ve aynı zamanda  $f$  sınamasında kritik değerden büyük olmakta olmasına rağmen,  $\theta$  içerisinde su altı borusu geometrisine ait herhangi bir parametre yer almadığından, ikinci bir seçenek olarak  $T^* \propto \theta, KC$  regresyon modelinin de denenmesi düşünülmüştür. Çünkü hem  $\theta$  hem de  $KC$  sayılarının birlikte regresyon ifadesinde yer alması durumunda, hem dalgaya, hem taban malzemesine hem de boru geometrisine ait özellikler için içerisinde katılabilmektedir.

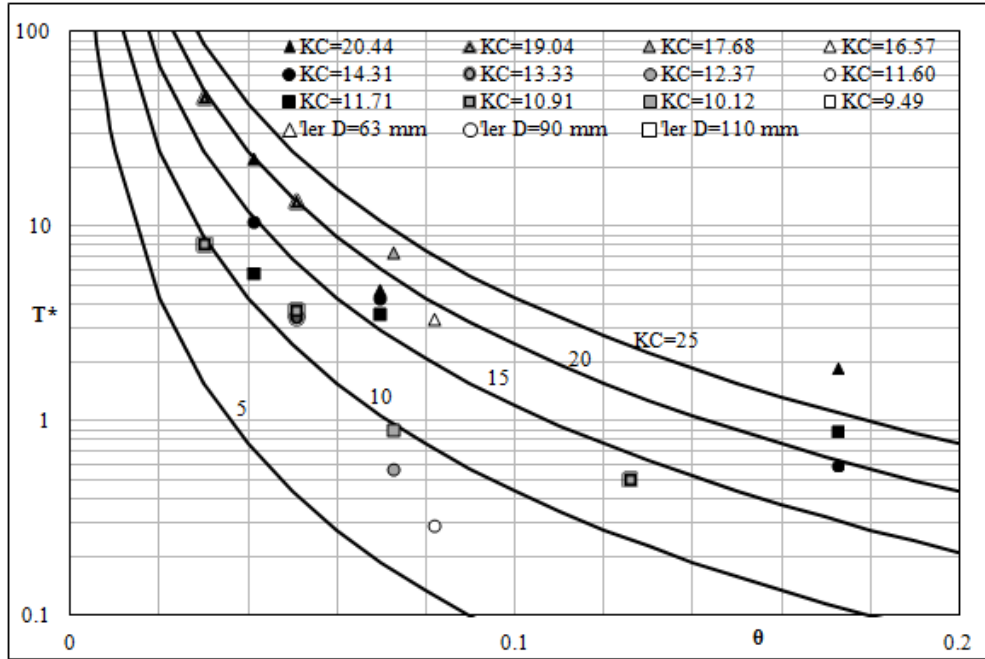
Bu durumda ifadesi (5.28) eşitliği ile verilen regresyon denklemi için parametreler  $RMSE$  değerinin en küçük olması prensibine dayanan yöntem ile (5.29) eşitliğinde gösterildiği gibi belirlenmiştir.

$$T^* = a \theta^b KC^c \quad (5.28)$$

$$T^* = 4.35 \cdot 10^{-6} \theta^{-5/2} KC^{5/2} \quad (5.29)$$

Şekil 5.17’de, deneysel veriler (5.29) eşitliği ile verilen bağıntı yardımıyla hesaplanan sabit  $KC$  eğrileri ile birlikte verilmektedir. Deneylerde ölçülen  $T^*$  değerleri ile (5.29) eşitliği ile verilen bağıntı yardımıyla hesaplanan  $T^*$  değerleri noktalanarak oluşturulan saçılma diyagramı Şekil 5.18’de gösterilmektedir.

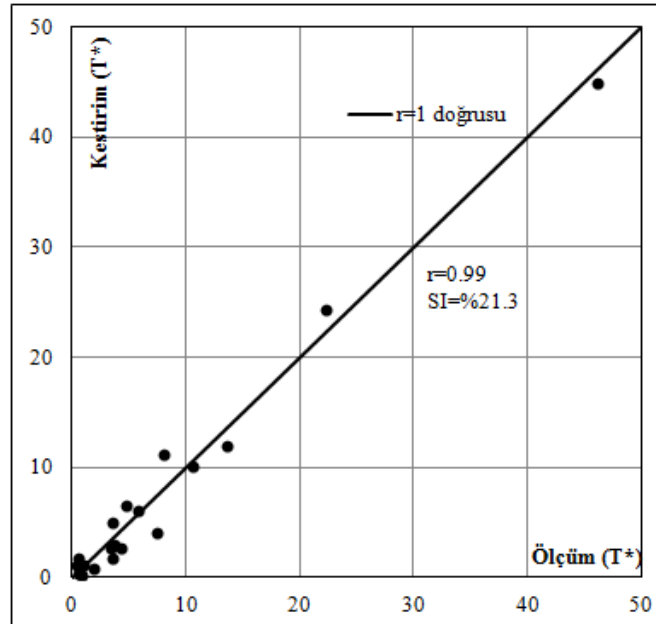
(5.29) eşitliği ile verilen regresyon ifadesinin bütün olarak uygunluğu için gerçekleştirilen  $f$  sınavında,  $f$  istatistiği  $f = 399.48$  olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, kritik  $f$  sayısı olan  $f_{kr} = 6.11$  değerinin çok üzerinde olduğu gibi, aynı zamanda  $T^*$  değerlerinin yalnızca  $\theta$  parametresine bağlı olarak değişiminin incelendiği regresyon ifadesi için elde edilen  $f$  istatistiğinden de epeyce büyüktür. Bu durum,  $T^*$  değerlerinin değişimi üzerinde,  $\theta$  parametresi ile birlikte  $KC$  sayısının da anlam taşıdığına işaret etmektedir.



Şekil 5.17 Deneysel  $T^*$  değerleri ile (5.29) bağıntısı ile hesaplanan farklı değerlerdeki sabit  $KC$  eğrilerinin birlikte gösterimi.

Kısmi  $f$  sınamasının uygulanması durumunda hesaplanan  $f$  istatistiği  $f_{kism} = 344.70$  olarak bulunmakta ve bu değerde kritik  $f$  sayısı olan  $f_{kr} = 8.40$  değerinden oldukça büyük kalmaktadır. Böylece,  $KC$  sayısının  $T^*$  değerlerinin değişimi üzerinde etkin olduğu sonucuna varılarak, ikinci bağımsız değişken olarak  $KC$  sayısının da regresyon ifadesinde yer almasının uygun olacağı söylenebilir.

Yukarıdaki analizlere ek olarak, Şekil 5.18 üzerinden görüleceği gibi deneysel  $T^*$  ile (5.29) bağıntısı ile kestirimi gerçekleştirilen  $T^*$  dizileri arasında  $r = 0.99$  değerinde bir korelasyon katsayısı mevcut olup, bu durum kurulan regresyonun anlamlılığının göstergesidir.



Şekil 5.18 Ölçülen ve (5.29) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $T^*$  değerlerinin karşılaştırılması.

#### 5.4.4 Zamana Bağlı Oyulma Ölçümleri İle Gerçekleştirilen Analizler

Nihai oyulma derinlikleri ve zaman ölçeği parametrelerinin analizinden sonra, tez kapsamında gerçekleştirilen deney sonuçları ile yapılan bir diğer analiz ise zamana bağlı oyulma derinlikleri ile gerçekleştirilenlerdir. Deney borusu ortasında yer alan UVP algılayıcılarından No.3'e ait kayıtlar işlenerek oyulma derinliği – zaman grafikleri elde edilmiştir.

Elde edilen grafikler ile çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizine geçilmiştir. Burada araştırılan, nihai oyulma derinliklerinde olduğu gibi  $KC$ ,  $\theta$ ,  $d_{50}/D$  ve  $Fr_d$  parametrelerinin zamana bağlı göreceli oyulma derinlikleri ( $S_t/D$ ) üzerindeki etkisidir.

Şekil 2.10'da gösterildiği ve (2.10) eşitliği ile verildiği gibi, boru altında oluşan oyulmanın zaman içerisindeki değişimi üstel olduğundan (5.30), (5.31) ve (5.32) eşitlikleri ile verilen bağıntılar, regresyon denklemleri olarak araştırılmıştır.

$$\frac{S_t}{D} = a KC^b \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^c (1 - e^{-dt_s}) \quad (5.30)$$

$$\frac{S_t}{D} = a KC^b \theta^c (1 - e^{-dt_s}) \quad (5.31)$$

$$\frac{S_t}{D} = a KC^b Fr_d^c (1 - e^{-dt_s}) \quad (5.32)$$

Yukarıda sıralanan regresyon denklemlerinde yer alan  $t_s$  değeri boyutsuzlaştırılmış zaman olup,  $t$  zamanı göstermek üzere (5.33) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$t_s = \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}}}{D} t \quad (5.33)$$

Tüm deney setleri için (5.30), (5.31) ve (5.32) regresyon denklemleri için yapılan analizler sonucunda,  $S_t/D$ 'lerin kestirimi için en uygun denklemin  $KC$  ve  $\theta$  içeren (5.31) bağıntısı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumda (5.31) bağıntısındaki regresyon parametreleri (5.34) eşitliğinde verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{S_t}{D} = 0.003 KC^2 \theta^{1/3} (1 - e^{-0.005t_s}) \quad (5.34)$$



(5.34) eşitliğinden görüldüğü üzere, (5.31) eşitliğindeki a, b ve c regresyon sabitleri, nihai oyulma derinliğinin ( $S/D$ )  $KC$  ve  $\theta$  ile tahminindeki değerleri ile aynı bulunmuştur. Bu durum fiziksel olayın matematiksel ifadesinden,  $t_s = 0 \Rightarrow \frac{S_t}{D} = 0$  ve regresyon denklemindeki deneysel  $d$  sabiti negatif olduğundan  $\lim_{t_s \rightarrow \infty} \frac{S_t}{D} = \frac{S}{D}$  şeklinde elde edilebilmektedir.

Şekil 5.19'dan Şekil 5.30'a kadar, ince olarak tabir edilen ( $d_{50} = 0.55 \text{ mm}$ ) taban malzemesi ile gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen zamana bağlı oyulma derinlikleri ile (5.34) bağıntısı yardımıyla hesaplanan değerler bir arada verilmekte olup bu grafiklerin peşin sıra, ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerleri karşılıklı olarak noktalanarak oluşturulan saçılma diyagramları yer almaktadır. Saçılma diyagramları üzerinde, korelasyon katsayısı ve saçılma göstergesi değerleri de belirtilmiştir.

Benzer şekilde, Şekil 5.31 ile Şekil 5.42 arasında orta taban malzemesi ( $d_{50} = 1.85 \text{ mm}$ ) ile gerçekleştirilen deney sonuçlarına ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan değerlere ait grafikler ile saçılma diyagramları yer almaktadır.

Kalın taban malzemesi ( $d_{50} = 3.75 \text{ mm}$ ) ile gerçekleştirilen deneylere ait  $S_t/D$  grafikleri ve saçılma diyagramları Şekil 5.43 ile Şekil 5.54 arasında verilmiştir.

Grafikler üzerinde ayrıca, (2.9) eşitliği ile verilen ve nihai oyulma derinliği ile zaman ölçeği parametresinin bilinmesi halinde zamana bağlı oyulma derinliklerini veren bağıntı sonuçları da gösterilmektedir. Grafikler incelediğinde, saçılma göstergesi değerlerinin ortalama olarak %30 değerini aldığı görülmektedir. Ölçülen zamana bağlı göreceli oyulma derinlikleri ile (5.34) bağıntısı yardımıyla hesaplanan zamana bağlı göreceli oyulma derinliği değerleri arasındaki korelasyon katsayısı değerlerinin ortalaması da 0.89 değerindedir.

Elde edilen grafikler, taban malzemesi farklılıkları göz önünde tutularak incelendiğinde, ince ve orta malzeme sonuçlarında, zamana bağlı oyulmanın hem üstel değişim bölgesinde hem de nihai değerine asimptot olduğu bölgede (5.34) bağıntısı ile yapılan kestirimin uygun sonuç verdiği görülmektedir. Kalın taban malzemesi durumunda ise üstel değişim bölgesinde deneysel sonuçlar ile tahmin arasında bir miktar farklılıklar görülmekle birlikte, hareketli taban oyulmasının yaşandığı ortalama asimptot bölgesinde nihai göreceli oyulma derinlikleri başarılı bir şekilde tahmin edilmektedir.

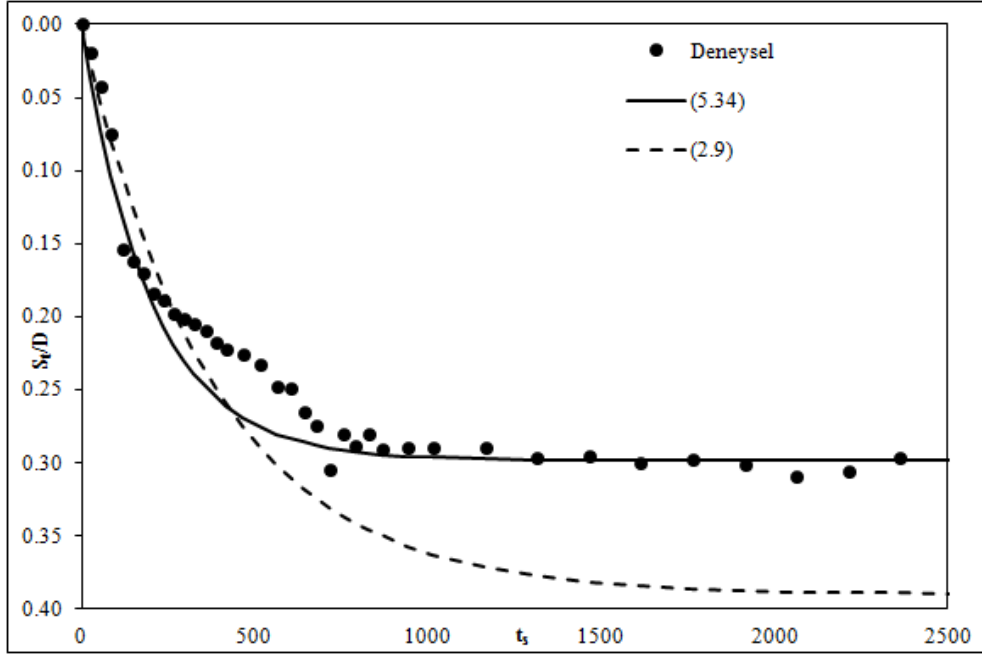
Öte yandan, Şekil 5.19 ile Şekil 5.54 arasındaki zamana bağlı oyulma grafikleri incelendiğinde, bazılarında oyulma derinliği~zaman ilişkisinin (2.9) genel bağıntısı ile tanımlandığı durumdan farklı olarak iki aşamalı değişim gösterdiği söylenebilmektedir. Bu durum için, nihai oyulma derinliği değerine kadar  $KC$  sayısına bağlı doğrusal bir değişim ve buradan itibaren nihai oyulma derinliği değerinde sabit bir doğru şeklinde bir ilişki düşünülmüştür. Doğrusal değişim bölgesi için elde edilen bağıntı (5.35) eşitliği ile verilmektedir.

$$\frac{S_t}{D} = 0.05 \sqrt{KC} t_s; \quad S_t \leq S \quad (5.35)$$

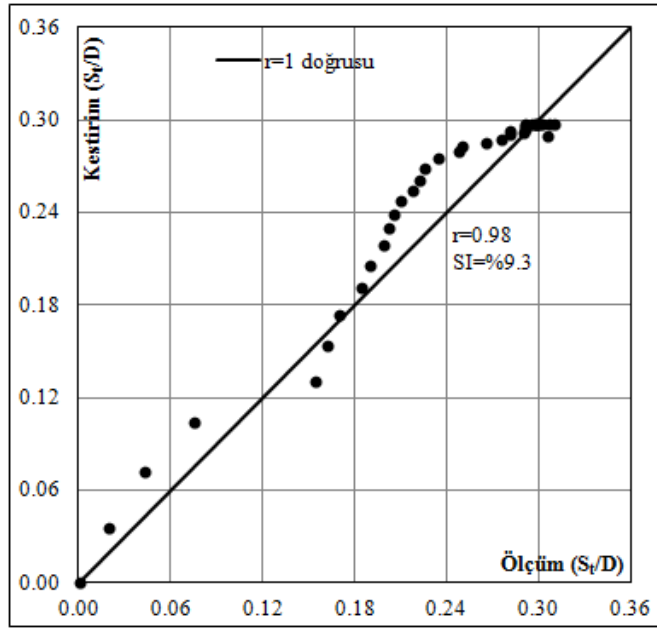
Şekil 5.21, Şekil 5.25, Şekil 5.31, Şekil 5.39 ve Şekil 5.43'te gözlenen bu durum için (5.35) bağıntısı ve devamında nihai oyulma derinliği ile sabit devam eden doğru şeklindeki iki aşamalı ilişki de ilgili şekiller üzerinde gösterilmiştir.

İki aşamalı zamana bağlı oyulma derinliği tahminleri uygulamada çok kullanışlı görülmemektedir. Bunun nedeni, birinci aşamanın sonu ve ikinci aşamanın değeri için nihai oyulma derinliğine başlangıçta ihtiyaç duyulmasıdır.

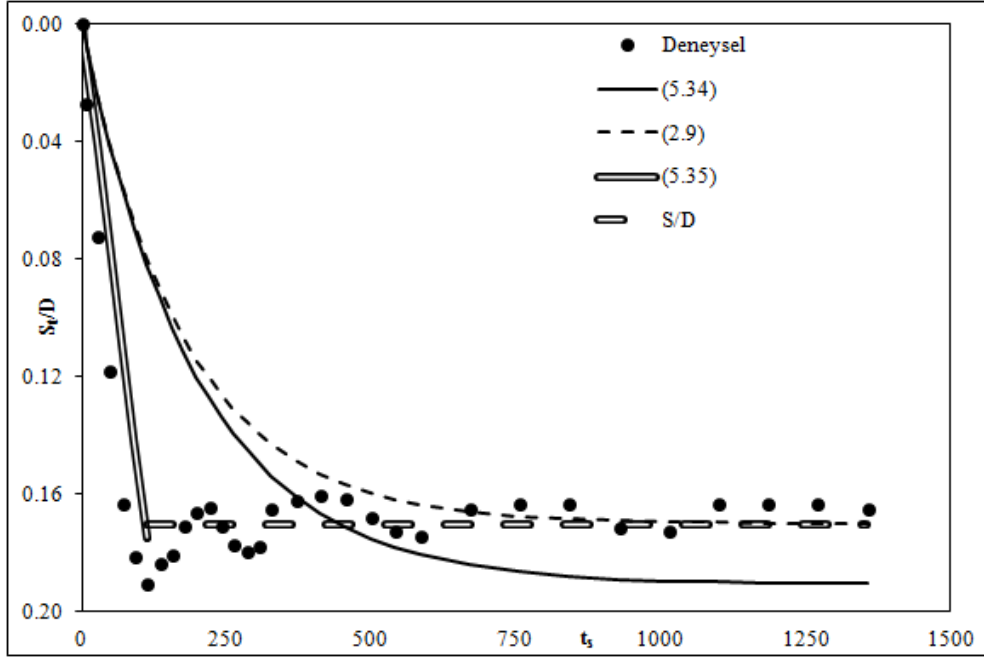
Bu durumda, genel ifadesi (2.9) eşitliği ile verilen ve başlangıçta yalnızca dalga, boru ve zemin karakteristiklerine gereksinim duyan (5.34) bağıntısı kullanılarak gerçekleştirilecek tahminlerin uygulamada daha kullanışlı olacağı düşünülmektedir.



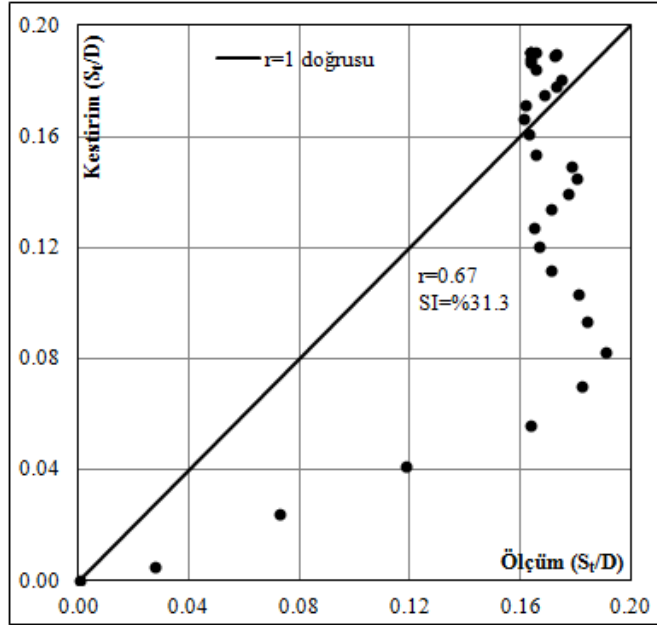
Şekil 5.19 Deney No.1'de (H2D1B111102701BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



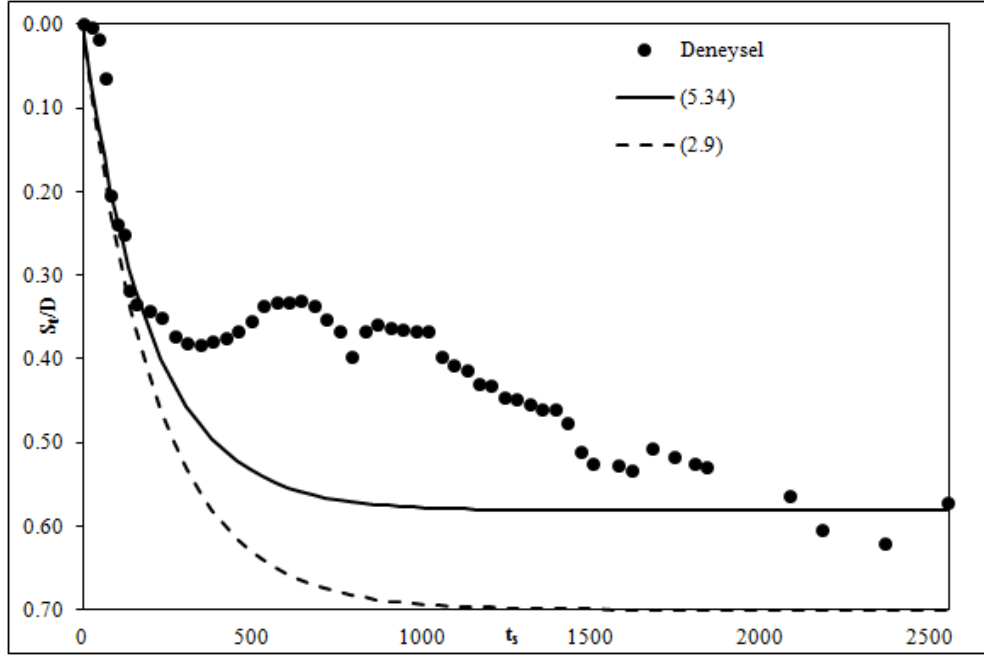
Şekil 5.20 Deney No.1'de (H2D1B111102701BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



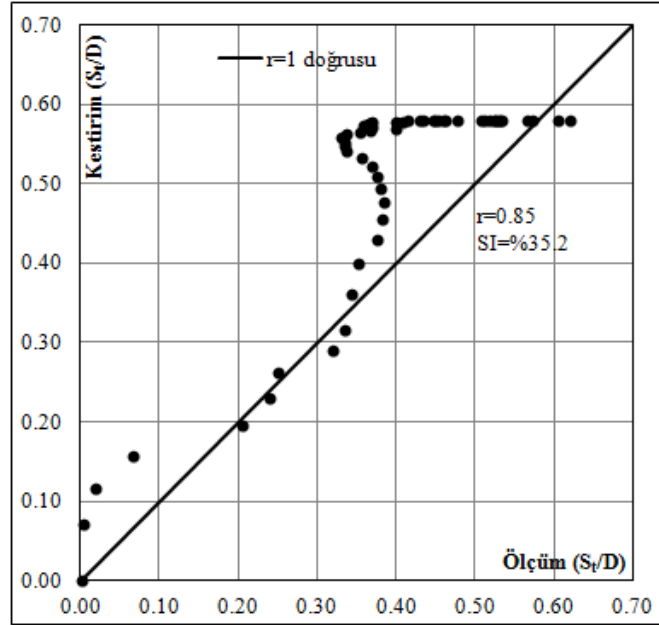
Şekil 5.21 Deney No.23'de (H4D3B112072603BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



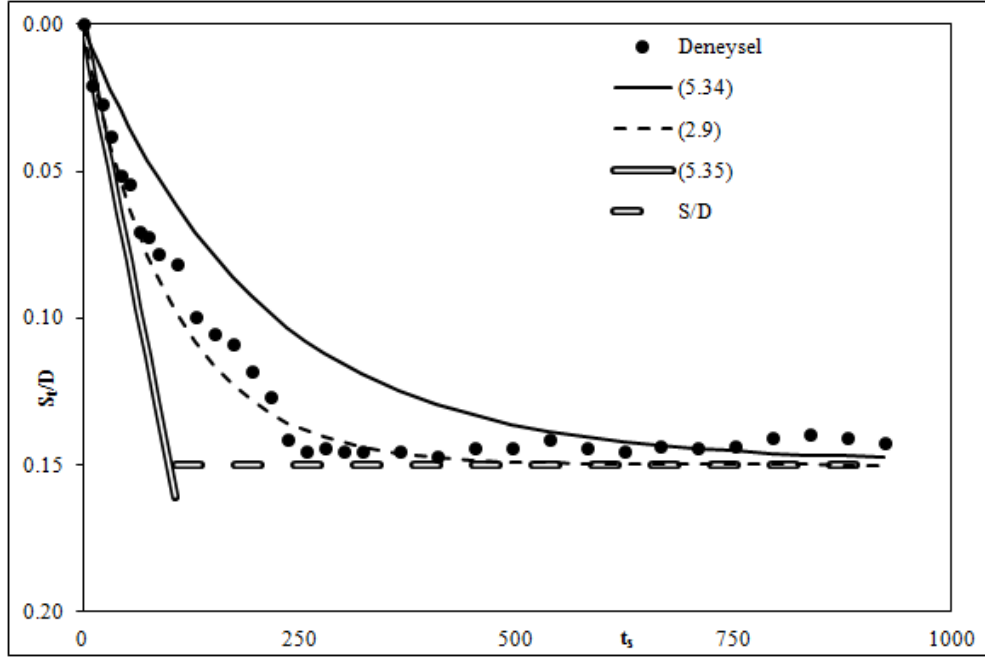
Şekil 5.22 Deney No.23'de (H4D3B112072603BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



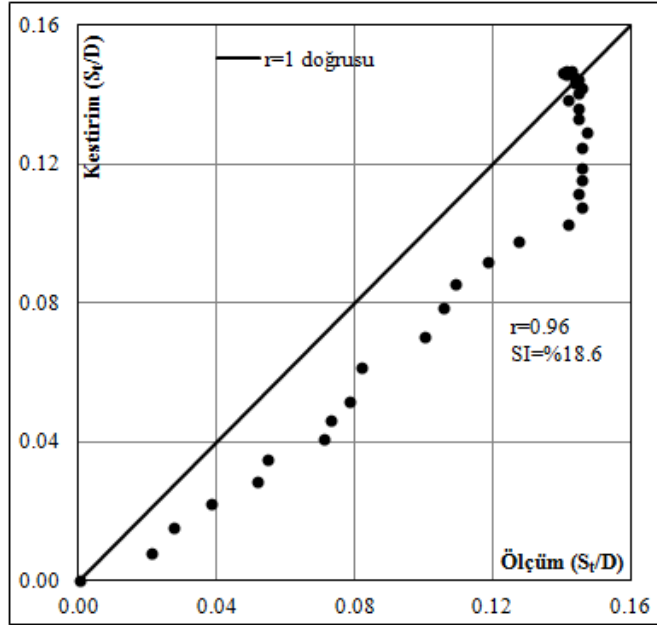
Şekil 5.23 Deney No.2'de (H4D1B111103101BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



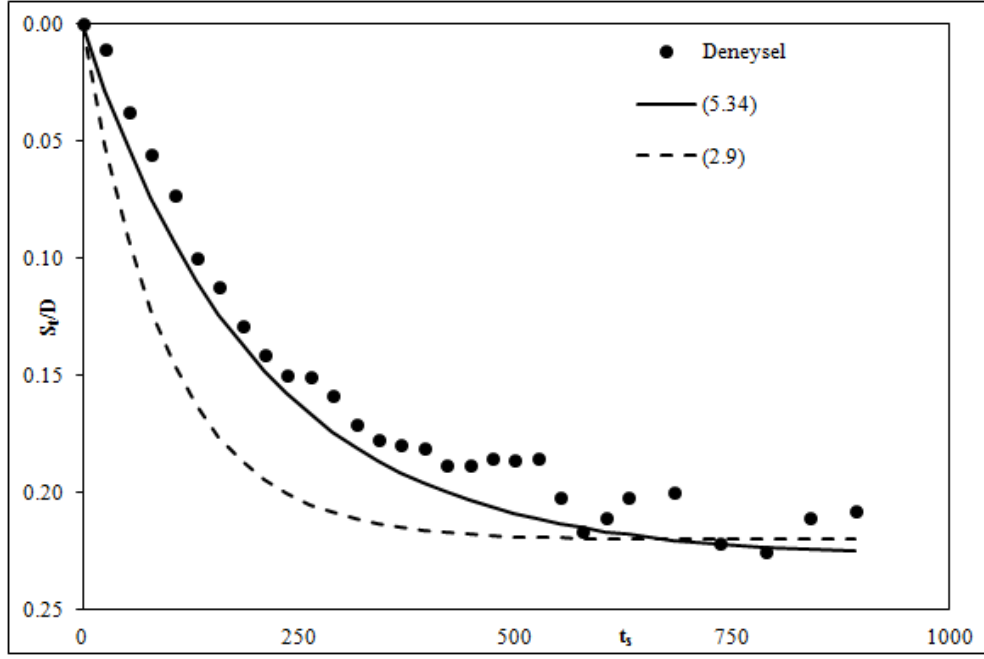
Şekil 5.24 Deney No.2'de (H4D1B111103101BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



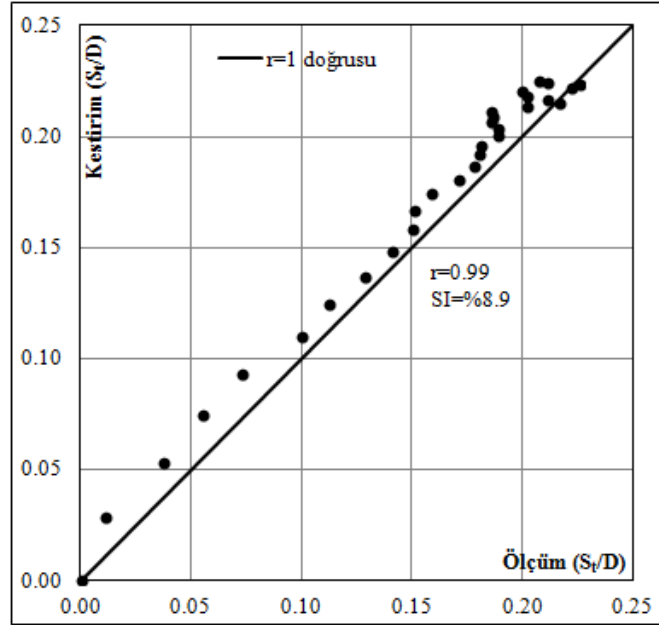
Şekil 5.25 Deney No.21'de (H3D3B112072601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



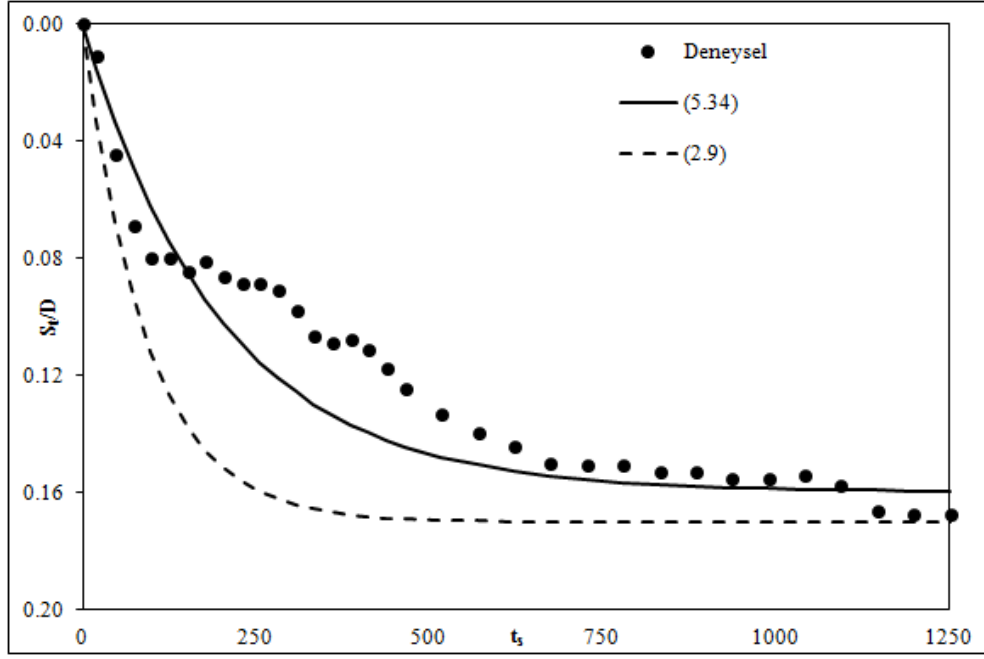
Şekil 5.26 Deney No.21'de (H3D3B112072601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



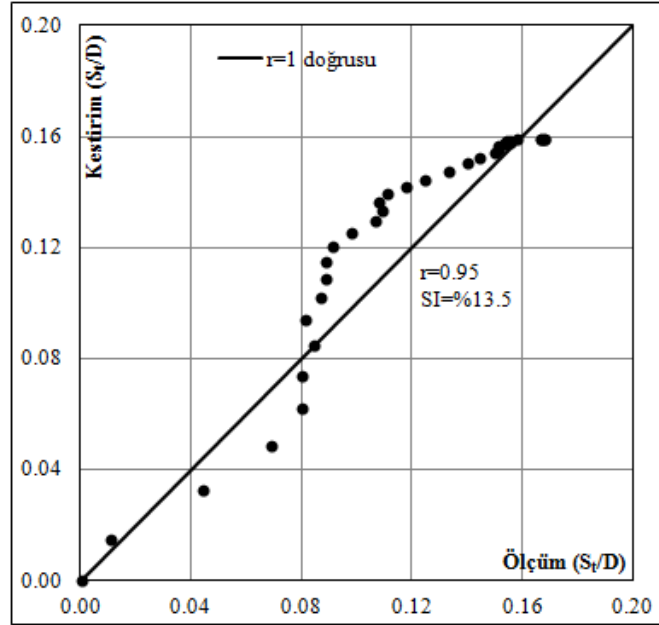
Şekil 5.27 Deney No.11'de (H4D2B112061301BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.28 Deney No.11'de (H4D2B112061301BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

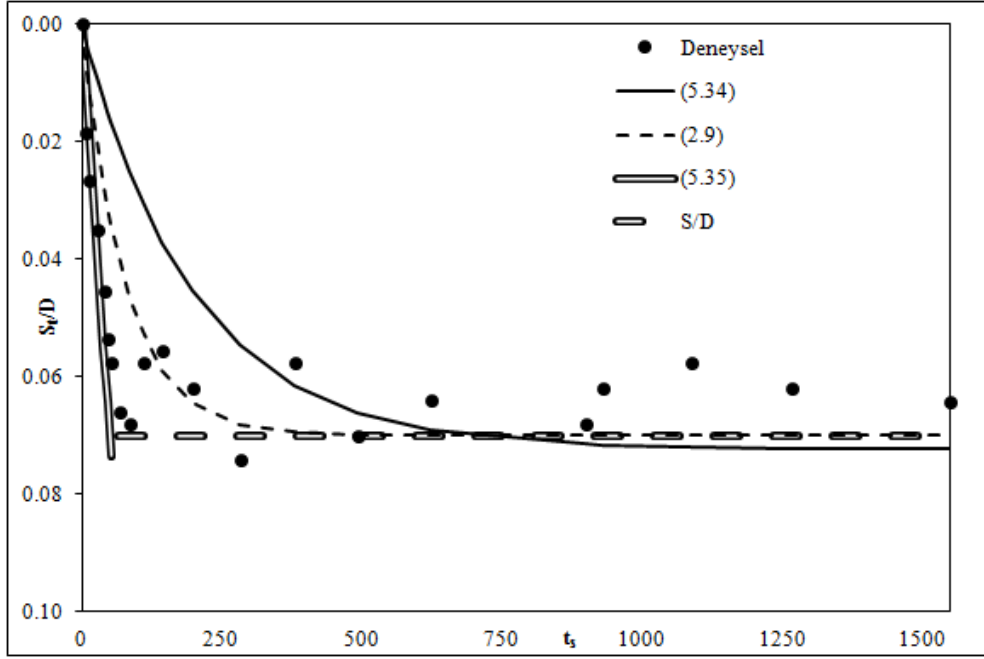


Şekil 5.29 Deney No.9'da (H1D2B112061201BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.

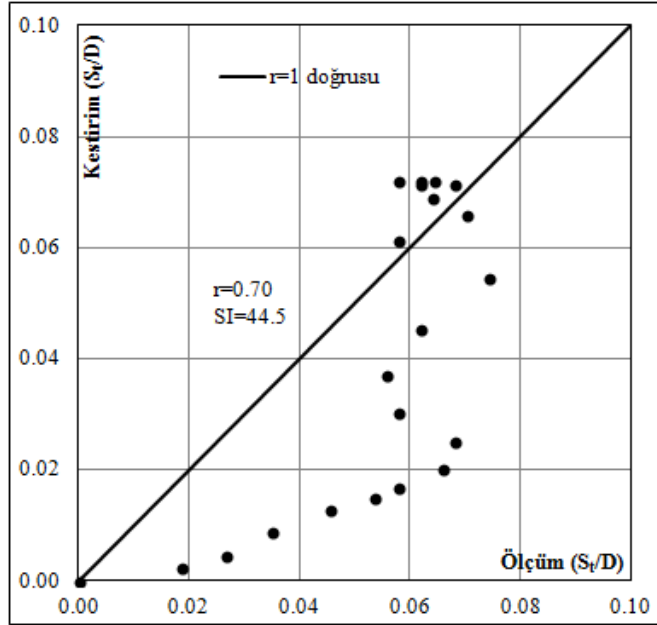


Şekil 5.30 Deney No.9'da (H1D2B112061201BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

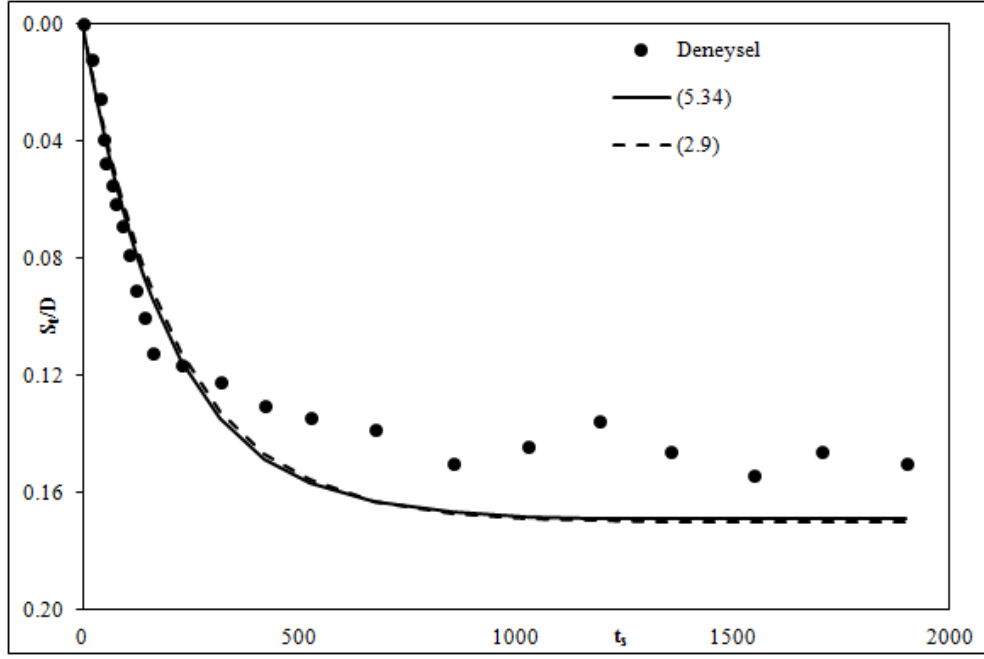




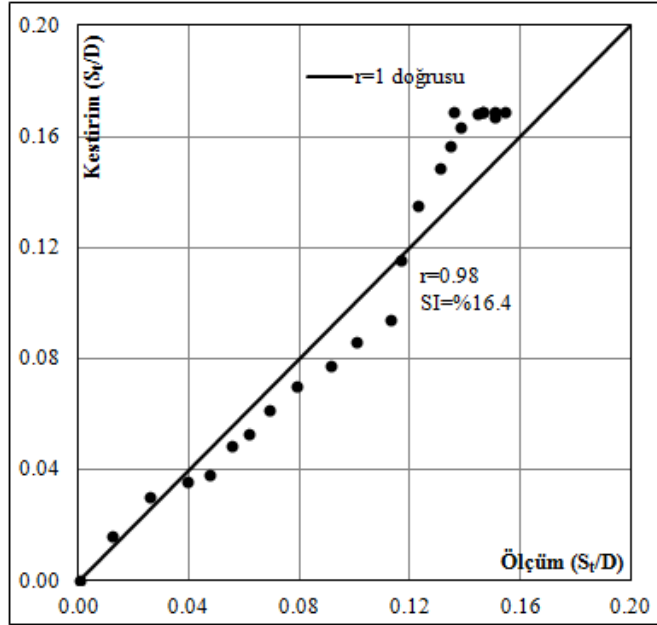
Şekil 5.31 Deney No.28'de (H2D3B212080304BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



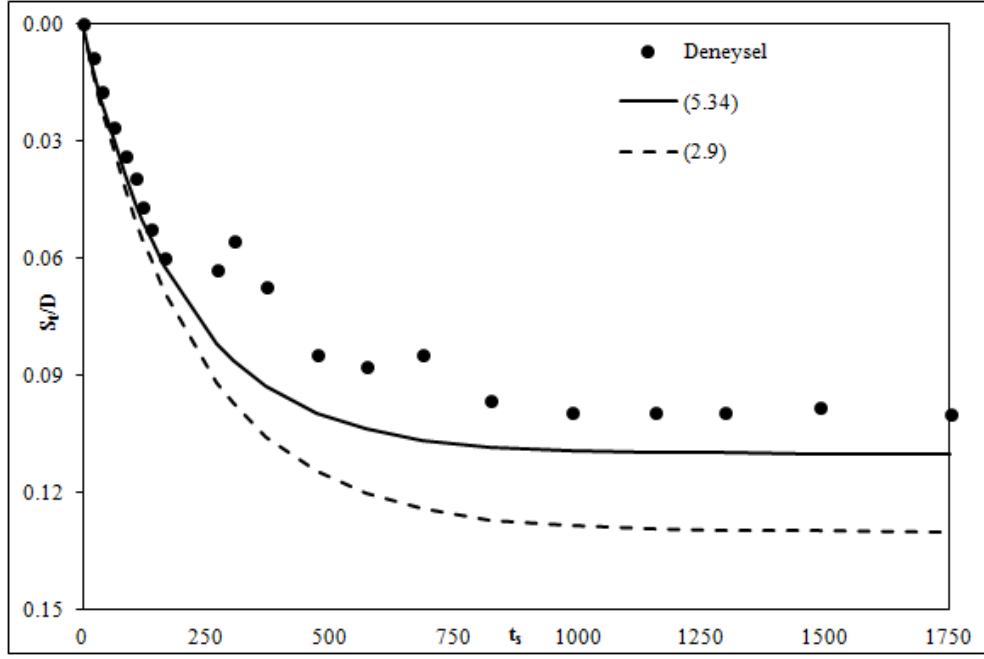
Şekil 5.32 Deney No.28'de (H2D3B212080304BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



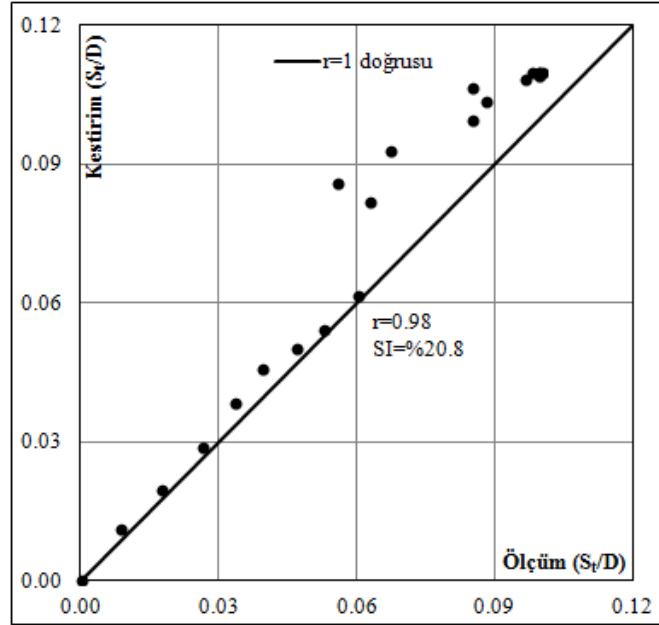
Şekil 5.33 Deney No.29'da (H4D3B212080601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



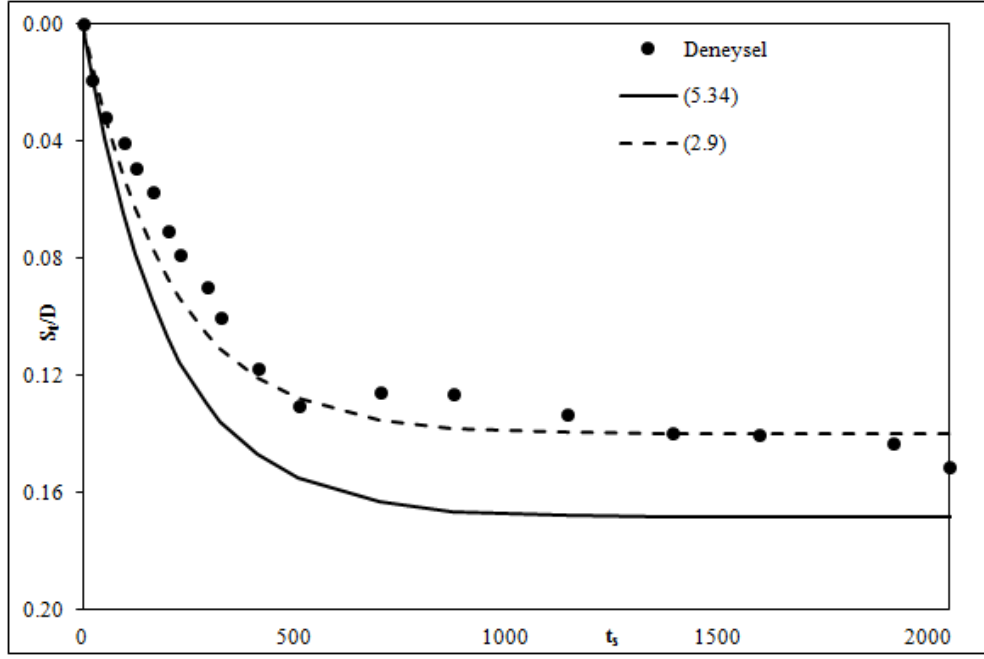
Şekil 5.34 Deney No.29'da (H4D3B212080601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



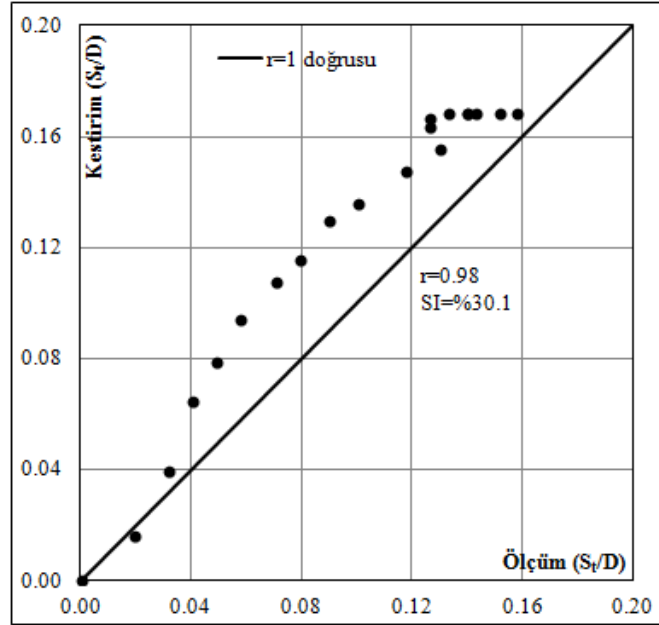
Şekil 5.35 Deney No.32'de (H3D3B212080604BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



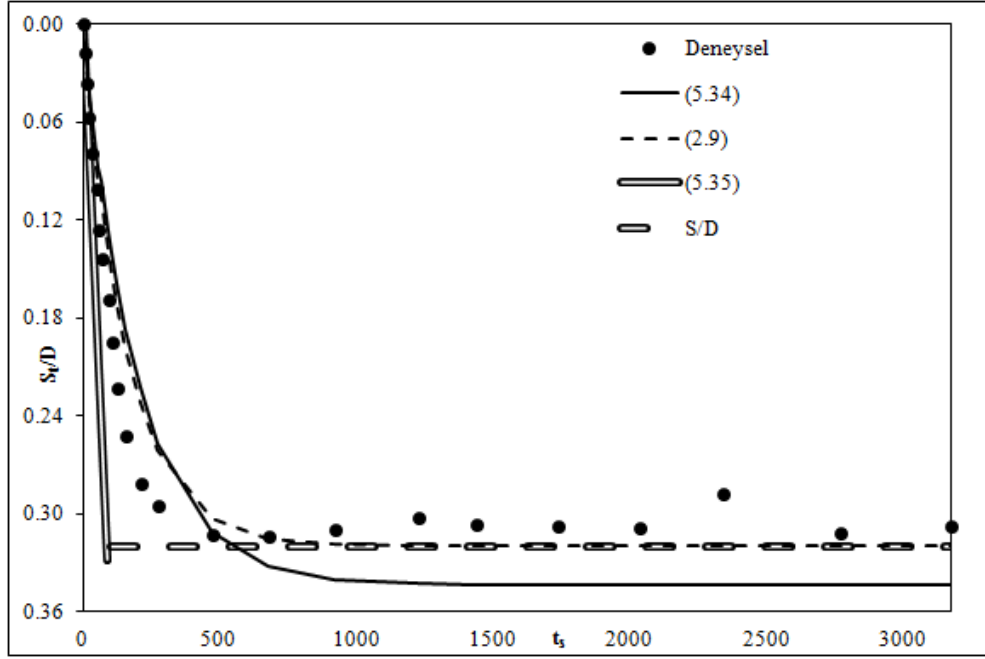
Şekil 5.36 Deney No.32'de (H3D3B212080604BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



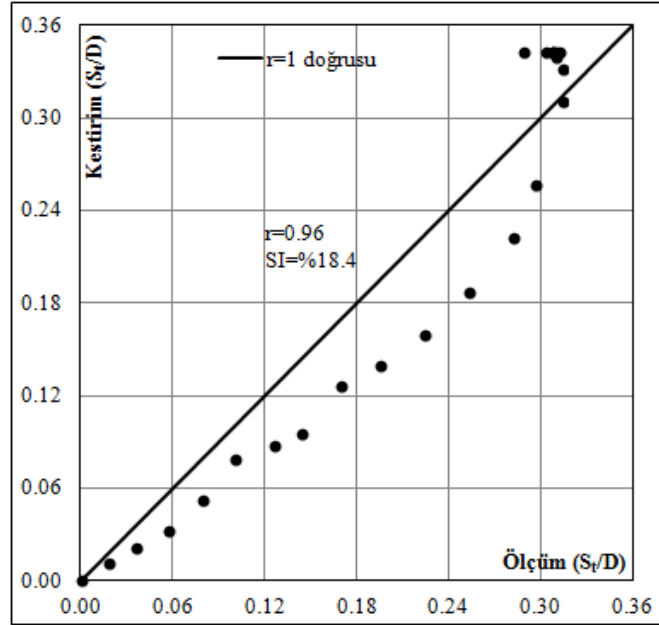
Şekil 5.37 Deney No.33'de (H4D2B212080801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



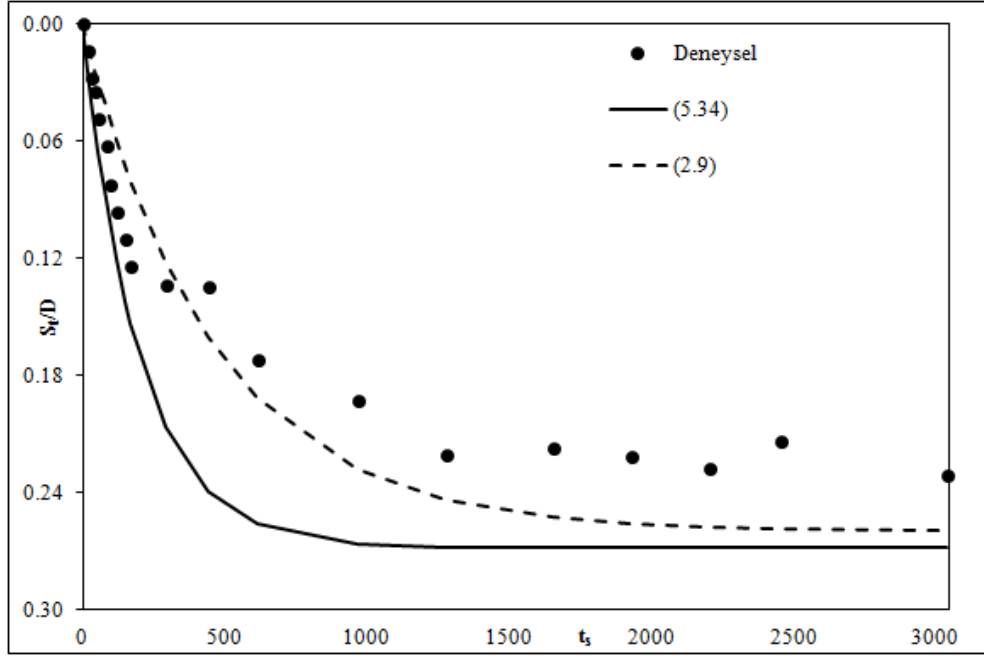
Şekil 5.38 Deney No.33'de (H4D2B212080801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



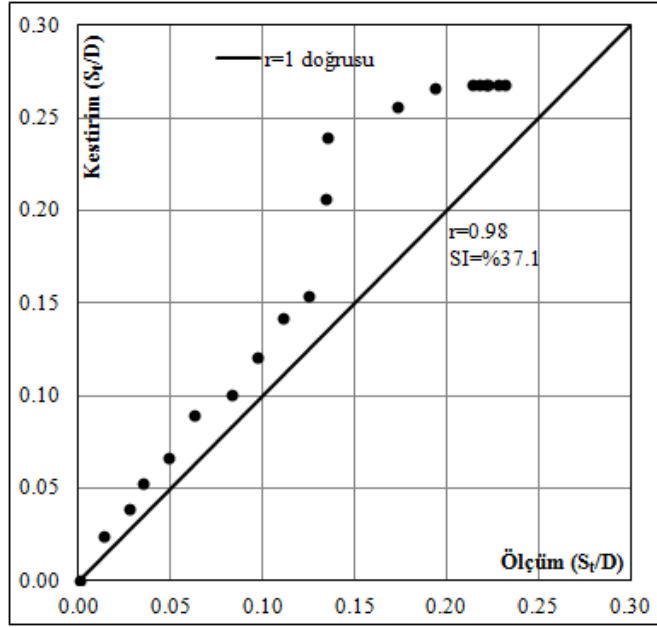
Şekil 5.39 Deney No.49'da (H4D1B212081601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



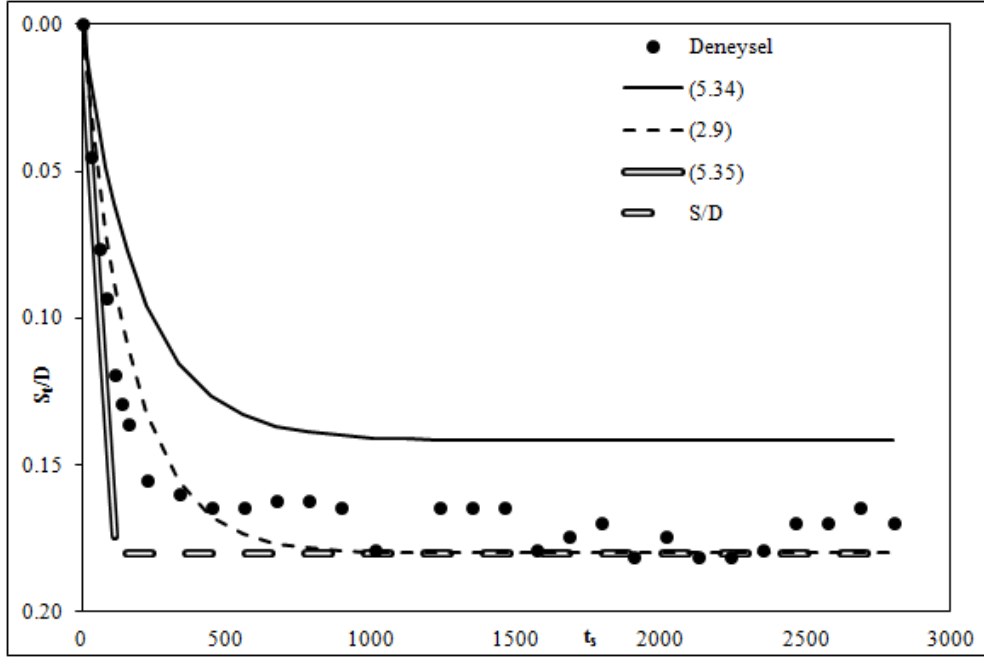
Şekil 5.40 Deney No.49'da (H4D1B212081601BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



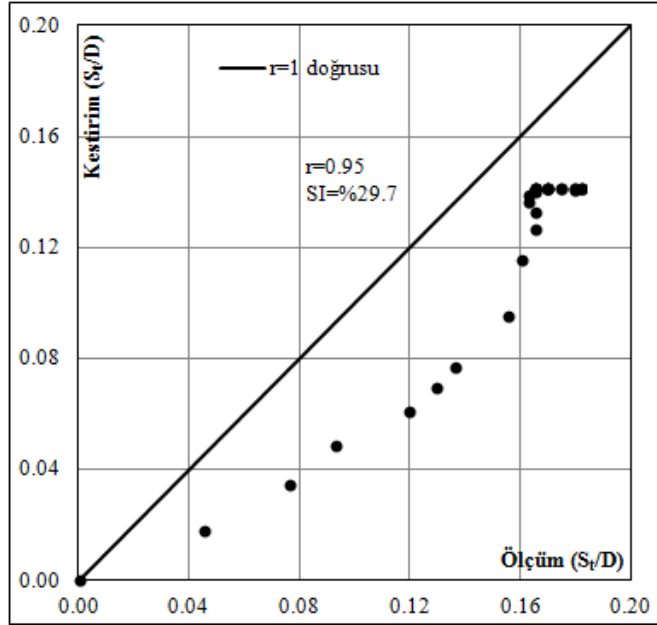
Şekil 5.41 Deney No.50'de (H3D1B212081602BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



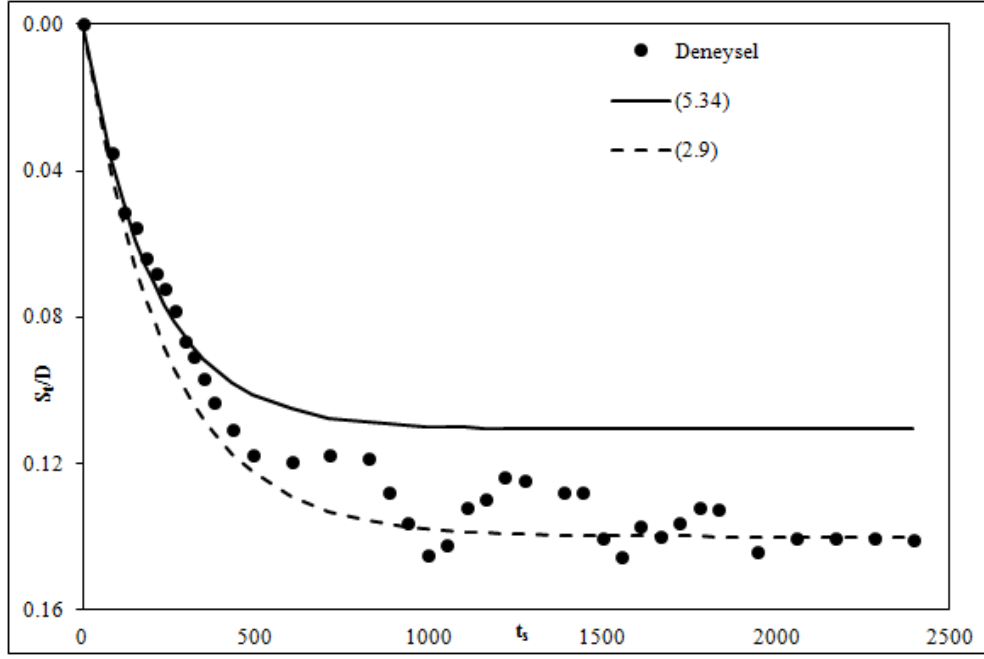
Şekil 5.42 Deney No.50'de (H3D1B212081602BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



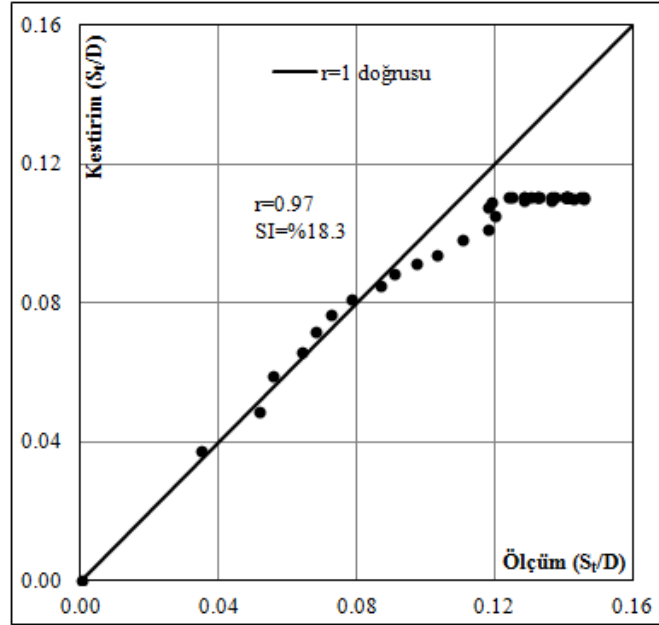
Şekil 5.43 Deney No.73'de (H4D3B312091001BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.44 Deney No.73'de (H4D3B312091001BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

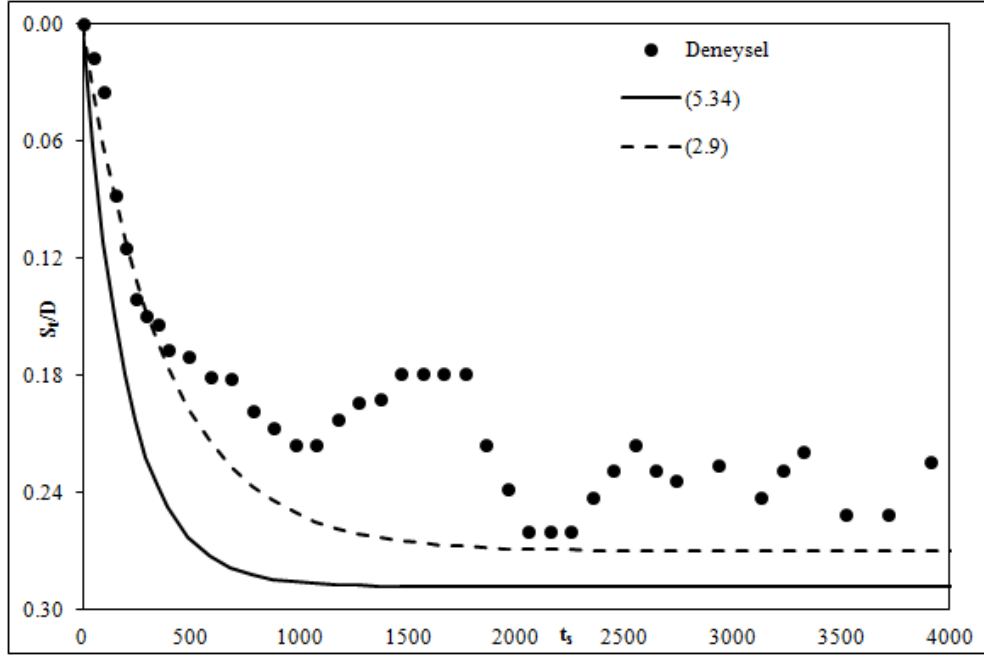


Şekil 5.45 Deney No.74'de (H3D3B312091002BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.

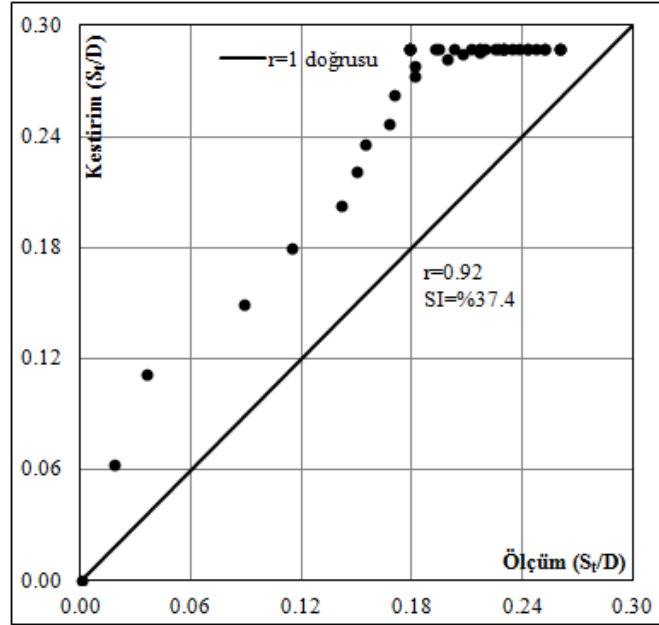


Şekil 5.46 Deney No.74'de (H3D3B312091002BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

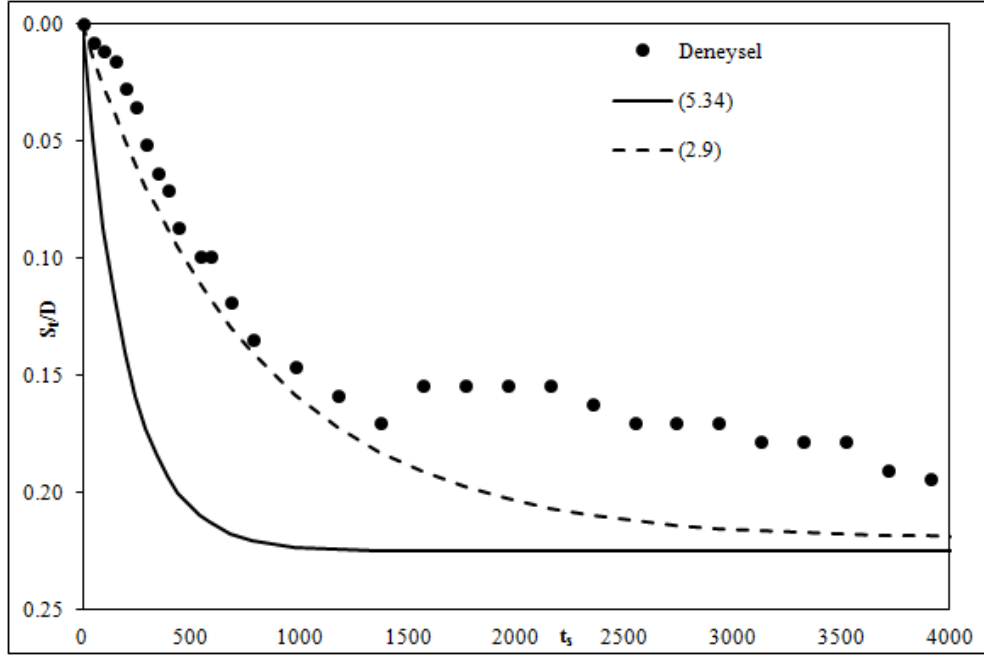




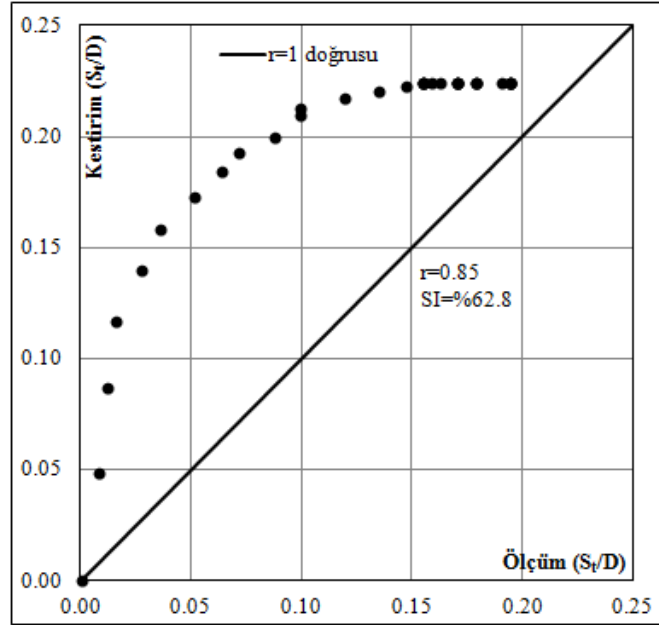
Şekil 5.47 Deney No.105'de (H4D1B312100401BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



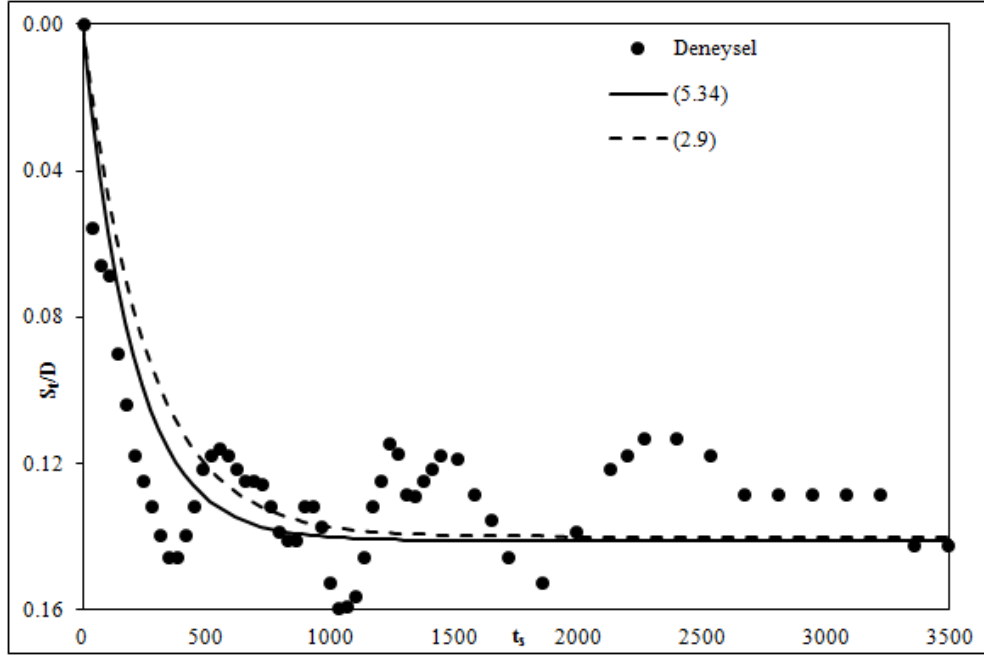
Şekil 5.48 Deney No.105'te (H4D1B312100401BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



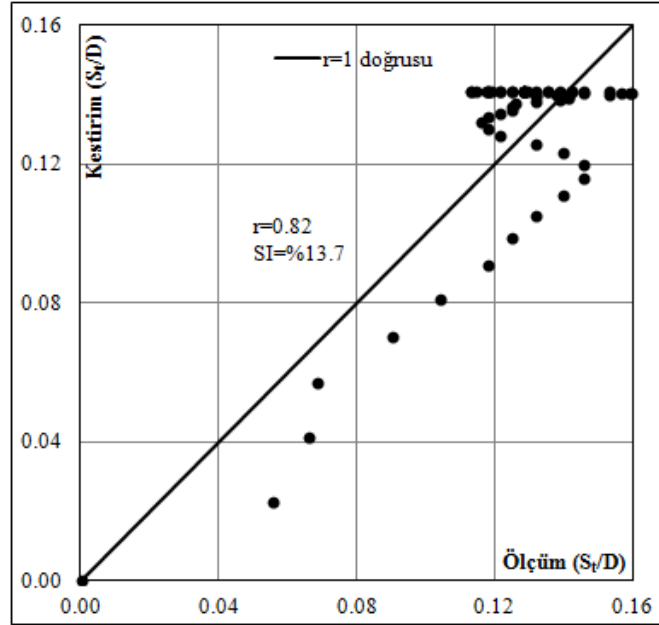
Şekil 5.49 Deney No.106'da (H3D1B312100402BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



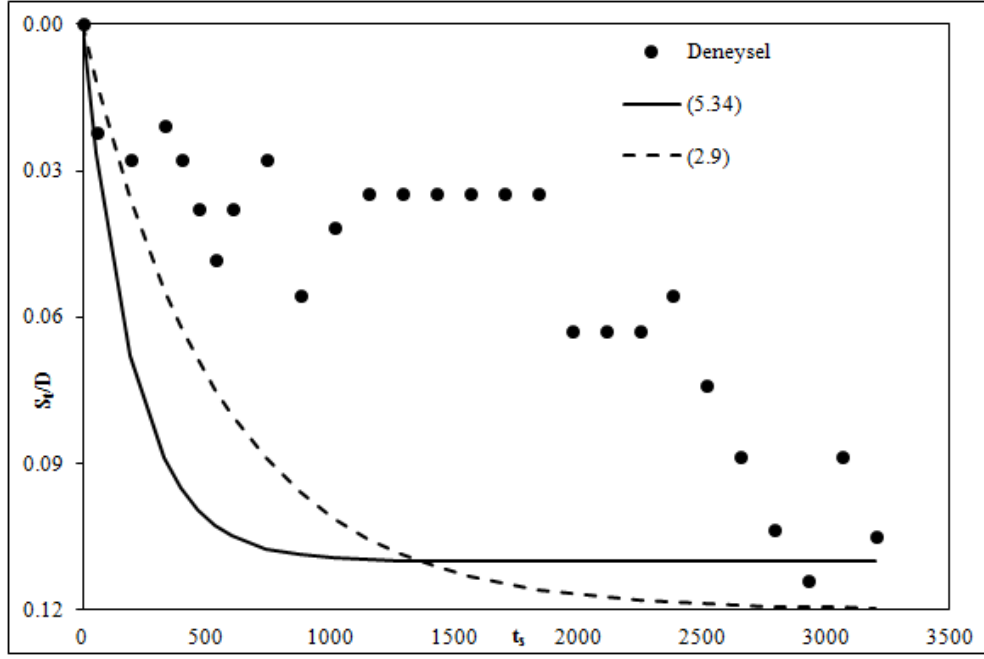
Şekil 5.50 Deney No.106'da (H3D1B312100402BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



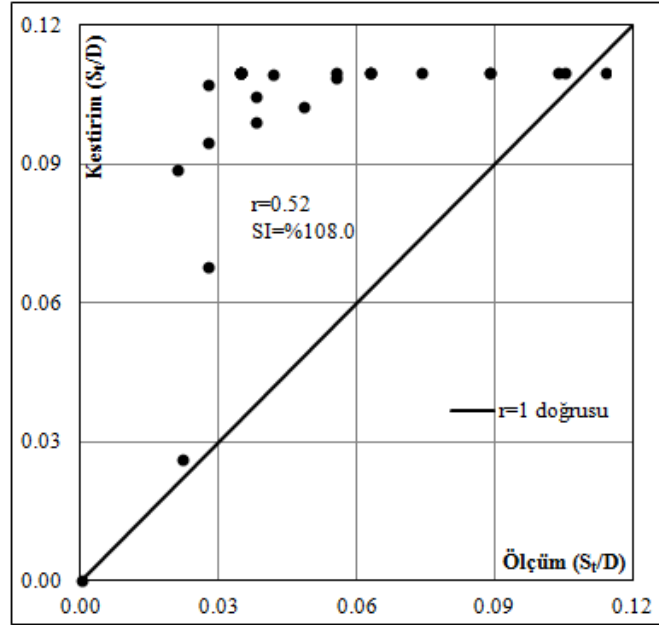
Şekil 5.51 Deney No.89'da (H4D2B312091801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.52 Deney No.89'da (H4D2B312091801BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.53 Deney No.90'da (H3D2B312091802BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin boyutsuzlaştırılmış zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.54 Deney No.90'da (H3D2B312091802BT) ölçülen ve (5.34) bağıntısı ile kestirimi yapılan  $S_t/D$  değerlerinin karşılaştırılması.

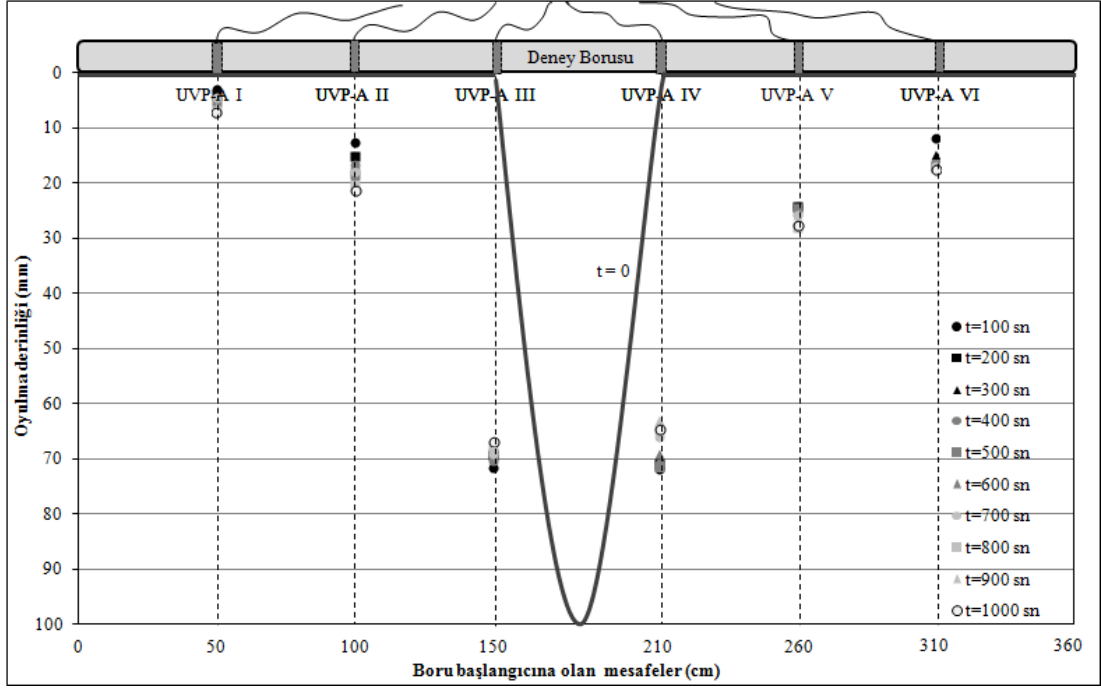
#### **5.4.5 Boru Altı Boyunca Oyulmanın Gelişimi İçin Gerçekleştirilen Analizler**

Deneysel çalışmalar ile gerçekleştirilen son analiz grubu, boru altı boyunca oyulmanın gelişimi için yapılan çalışmalardır. Bu durumun belirlenmesine yönelik olarak, Tablo 5.1’de karakteristik değerleri verilen ve deney kodu kısmında sonu ‘BC’ ile biten deneyler gerçekleştirilmiştir. Beşinci bölümün başlarında belirtildiği gibi, deney öncesi borunun ortasına karşılık gelecek şekilde bir başlangıç çukuru açılmakta ve oyulmanın buradan başlayarak gelişimine yön verilmeye çalışılmaktadır.

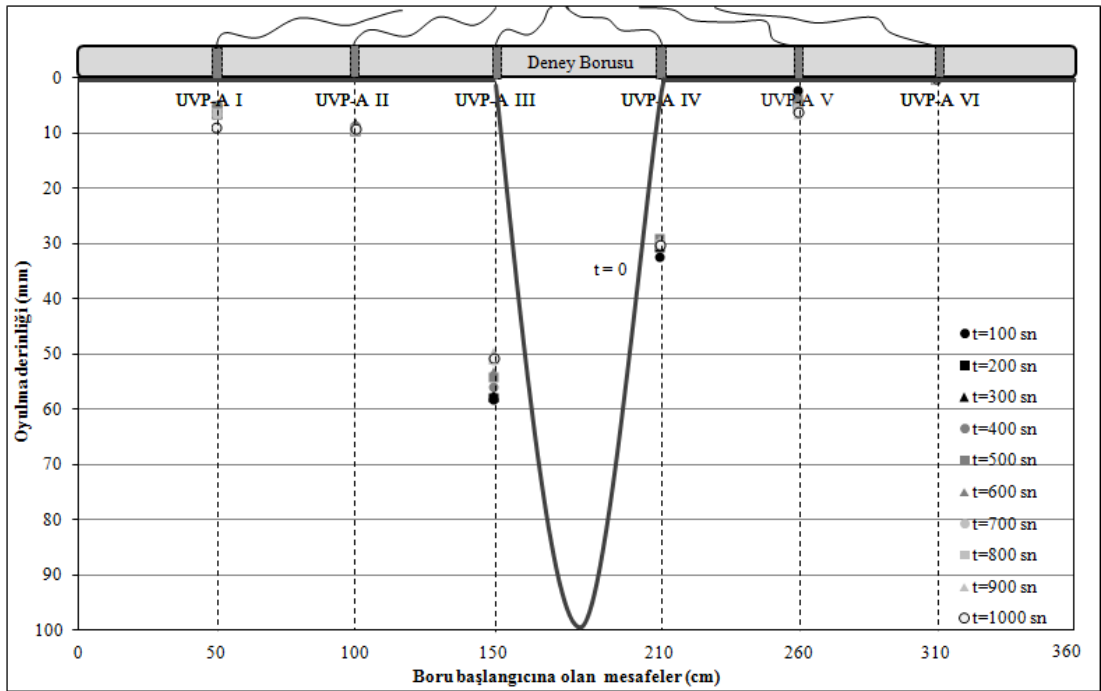
Başlangıç çukuru taban şeklinin uygulandığı deneyler yalnızca orta ve kalın taban malzemeleri ile gerçekleştirilenlerdir. Çünkü ince malzeme ile gerçekleştirilen deneylerde, oyulmanın boru uzunluğu boyunca bir arada başladığı ve tüm noktalarda eş zamanlı olarak sürdüğü gözlenmiştir.

Şekil 5.55, 5.56, 5.57, 5.58, 5.59, 5.60, 5.61, 5.62, 5.63’de orta ve kalın ( $d_{50} = 1.85$  ve  $3.75$  mm) taban malzemeleri ile gerçekleştirilen ve deney öncesi taban durumu başlangıç çukurlu olan deneylere ait su altı borusu altında altı noktada oluşan oyulmaların zamana bağlı olarak gelişimi grafikleri örnek olarak verilmektedir.

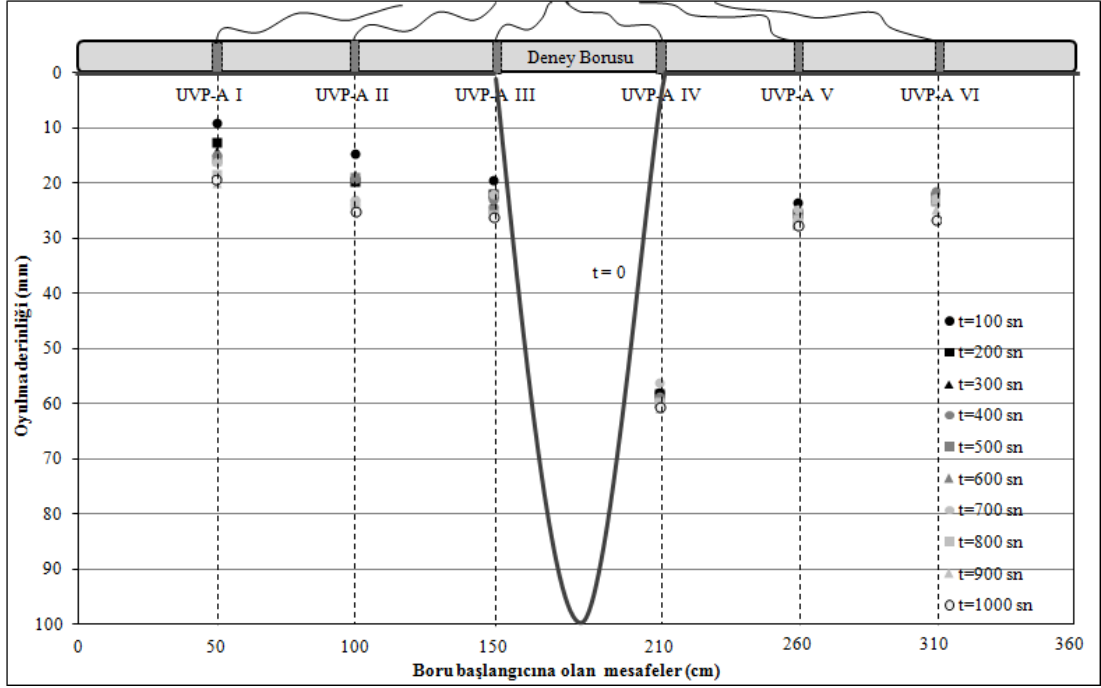
Grafikler incelendiğinde, başlangıçta tabanda herhangi bir müdahale olmayan deneylerden farklı olarak bu grup deneylerde, oyulmanın deney öncesi açılan başlangıç çukurundan kenarlara doğru gelişimleri görülmektedir. Çoğu durumda iki kenara doğru devam eden oyulma gelişimi simetrik değildir. Başlangıç çukuruna çok yakın konumda bulunan UVP algılayıcıları, dalga hareketinin başlaması ile birlikte çukurun geometrisinden çok çabuk etkilenmekte ve böylece ani değişimler göstermektedir.



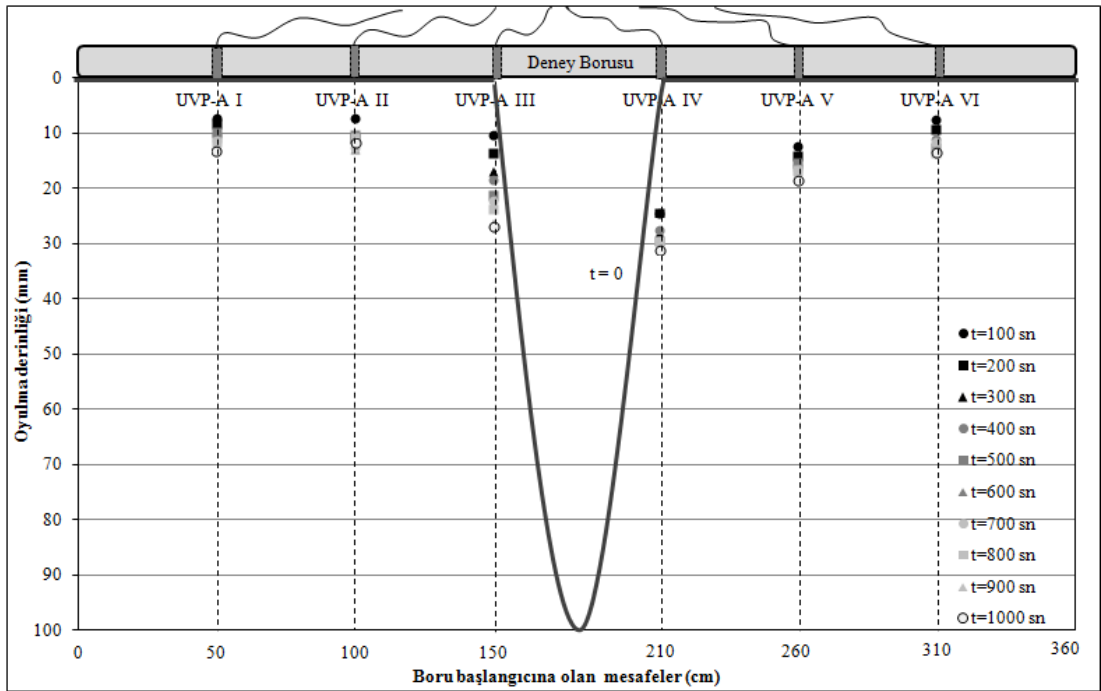
Şekil 5.55 H4D3B212082901BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.



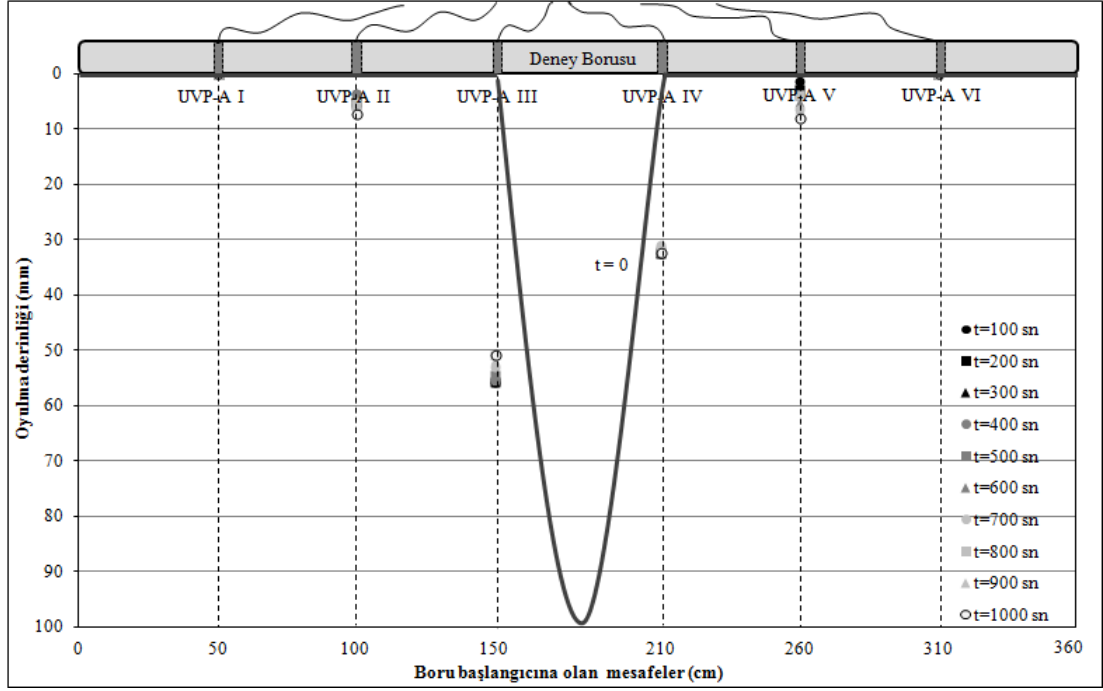
Şekil 5.56 H3D1B212082402BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.



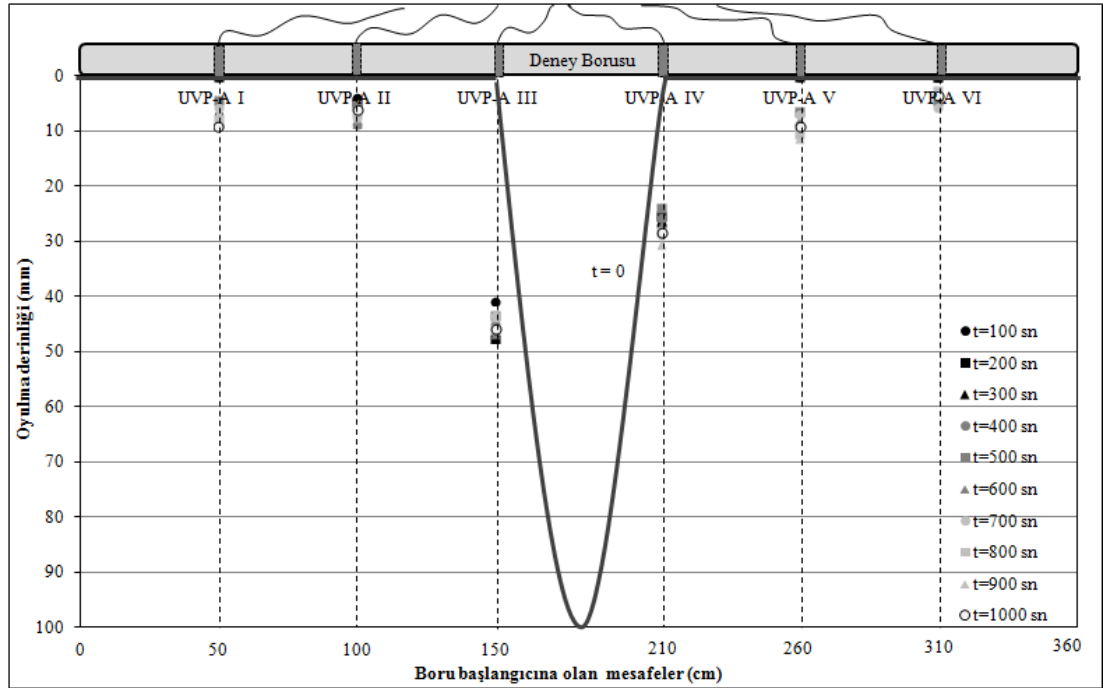
Şekil 5.57 H4D2B212081501BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.



Şekil 5.58 H3D2B212081502BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.

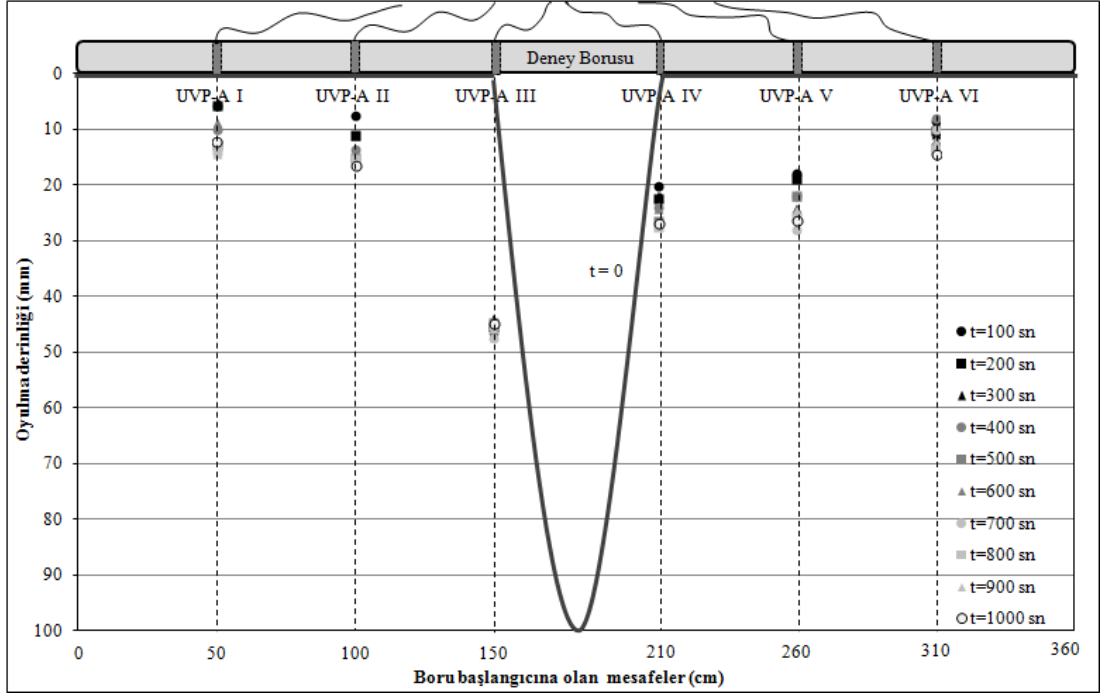


Şekil 5.59 H4D1B212082401BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.

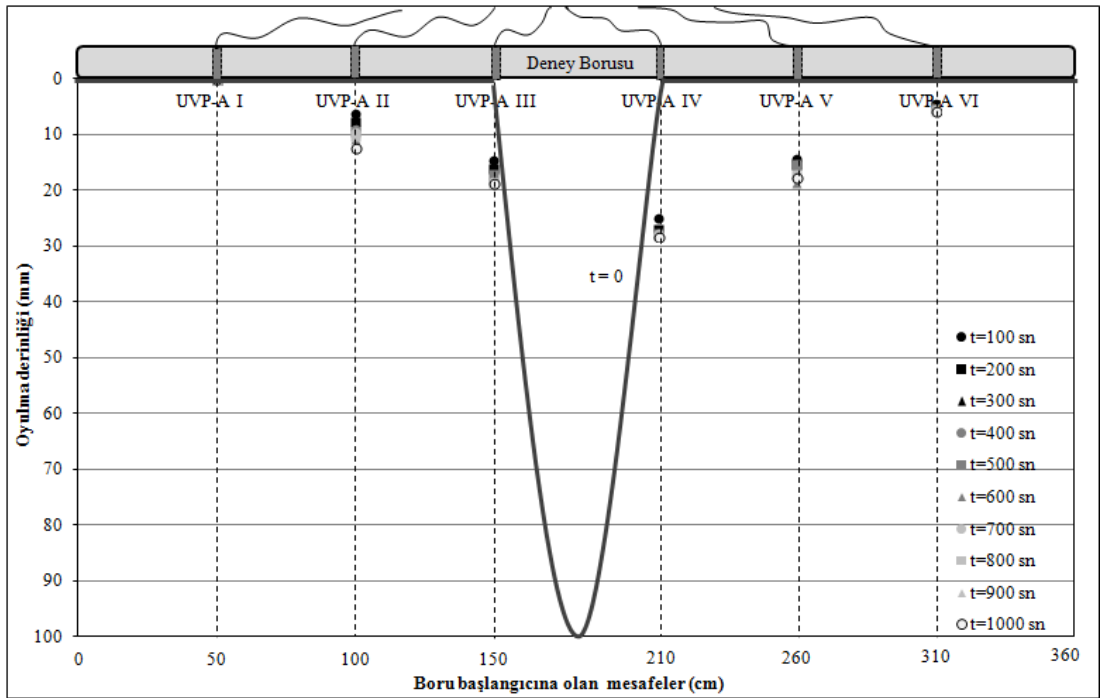


Şekil 5.60 H1D3B312091704BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.

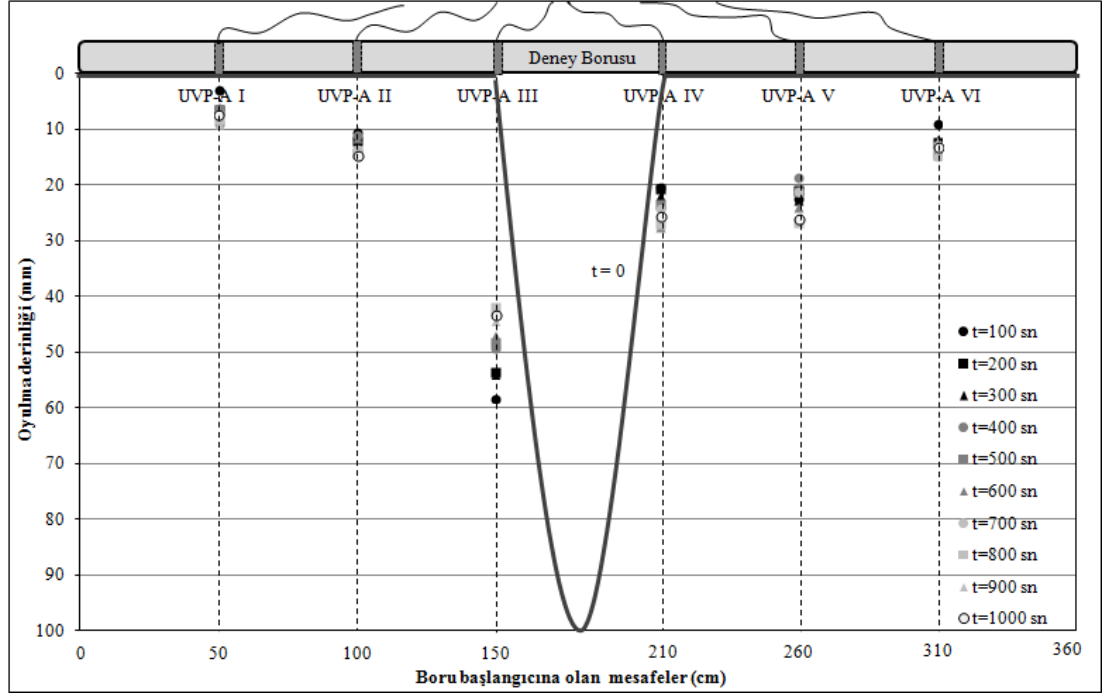




Şekil 5.61 H3D3B312091702BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.



Şekil 5.62 H4D1B312101101BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.



Şekil 5.63 H4D3B312091701BC kodlu deneyde ölçülen oyulma derinliklerinin aynı zaman değerleri için noktalanması ile elde edilen oyulmanın gelişimi grafiği.

Bu durumda, oyulmanın boru altı boyunca gelişim hızı için güvenilir algılayıcılar 1-2 ve 5-6 olmaktadır. Belirtilen algılayıcılarda ölçülen aynı oyulma derinliklerinin elde edildikleri anlar arasındaki farktan yola çıkılarak oyulmanın gelişim hızı ( $c_s$ ) değerleri, iki farklı yön için bulunan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Oyulmanın gelişim hızı değerinin boyutsuzlaştırılması için (5.36) eşitliği ile verilen bağıntı kullanılmıştır.

$$c_s^* = \frac{c_s}{U_m} \quad (5.36)$$

(5.36) eşitliği ile verilen bağıntı yardımıyla hesaplanan boyutsuzlaştırılmış oyulma gelişim hızı değerlerinin kestirimi amacıyla (5.37) eşitliği ile genel yapısı verilen regresyon bağıntısı kullanılmıştır. Önceki alt bölümlerde anlatıldığı şekliyle belirlenen regresyon sabitlerini gösteren denklem ise (5.38) eşitliği ile sunulmuştur.

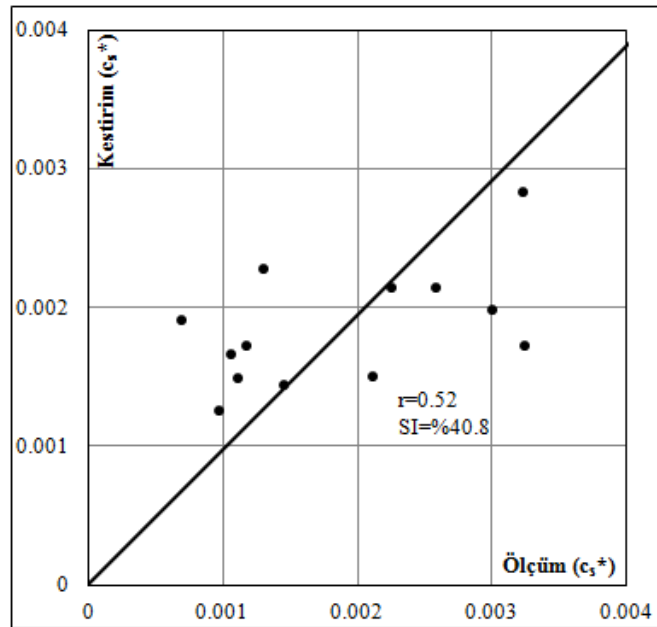
$$c_s^* = a KC^b \theta^c \quad (5.37)$$

$$c_s^* = 0.0024 KC^{-1/2} \theta^{-1/3} = \frac{0.0024}{KC^{1/2} \theta^{1/3}} \quad (5.38)$$

Yukarıda belirtilen deneylerdeki ölçümler yardımıyla elde edilen boyutsuzlaştırılmış oyulma gelişim hızı değerleri ile (5.38) eşitliği ile verilen bağıntı yardımıyla kestirimi yapılan boyutsuzlaştırılmış oyulma gelişim hızı değerlerinin karşılıklı olarak noktalanmasıyla elde edilen saçılma diyagramı Şekil 5.64'de verilmektedir. Bu diyagram üzerine, korelasyon katsayısı ve saçılma göstergesi değerleri de eklenmiştir.

Oyulmanın boru boyunca gelişimi ile ilgili olarak literatürde mevcut tek çalışma Yeow (2007) olup, ayrıntıları üçüncü bölümde verilen bu çalışma kapsamında boru boyunca oyulma miktarı için (5.39) eşitliği ile verilen bağıntı önerilmiştir.

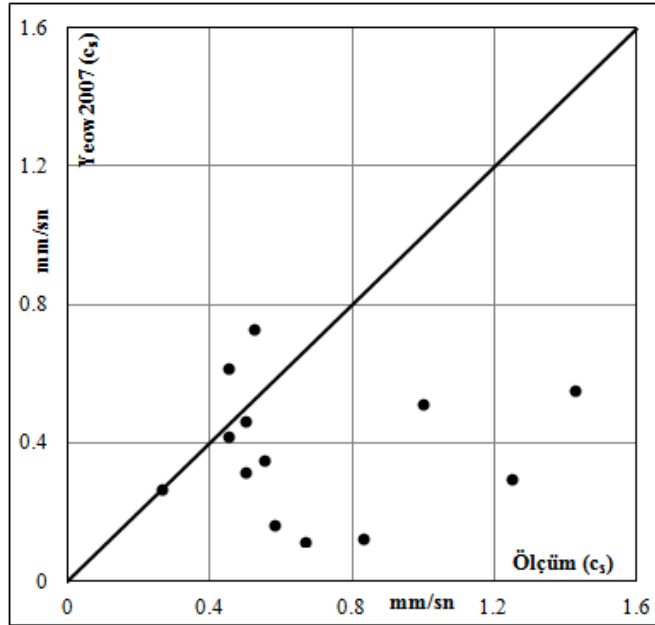
$$V_h = K \left(1 - \frac{e}{D}\right) \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}}{\tan \beta} \theta^{5/3} \sqrt{KC} \quad (5.39)$$



Şekil 5.64 Deneysel verileri ile elde edilen ve (5.38) bağıntısı yardımıyla kestirimi yapılan boyutsuzlaştırılmış oyulma gelişim hızı değerleri için saçılma diyagramı.

(5.39) eşitliği ile verilen bağıntıda  $V_h$ , oyulma miktarını göstermekte olup  $[L^2T^{-1}]$  boyutundadır. Ayrıca,  $K$  deneysel sabit olup, dalga ortogonalinin boru eksenine dik olarak geldiği durum için 36 değerini aldığı bildirilmiştir (Yeow, 2007).  $\beta$ , başlangıç çukurundan oyulmanın gelişimi durumunda çukur kenarlarının şev açısını göstermekte olup, genel yaklaşım ile  $45^\circ$  alınmaktadır.

(5.39) eşitliği ile verilen bağıntının boyutu  $[L^2T^{-1}]$  olduğundan dolayı, sonucun oyulma gelişim hızına çevrilebilmesi için birim boru boyuna bölünmesi gerekmektedir. Bu durumda, tez kapsamındaki deneylerde elde edilen  $c_s$  değerleri ile bu deneysel şartlara karşılık gelen parametreler ile (5.39) bağıntısı yardımıyla hesaplanan  $c_s$  değerleri karşılıklı olarak noktalanması sonucu elde edilen diyagram Şekil 5.65’de verilmektedir.



Şekil 5.65 Deneysel olarak belirlenen ve (5.39) eşitliği yardımıyla hesaplanan  $c_s$  değerlerinin karşılaştırılmalı diyagramı.

Şekil 5.65 incelendiğinde, iki bağıntı sonuçlarının çok uyumlu olmamakla birlikte merteye olarak birbirlerine benzer sonuçlar verdikleri görülmektedir. Özellikle, deneyler elde edilen küçük oyulma gelişim hızlarında sonuçların yakın olduğu söylenebilir.

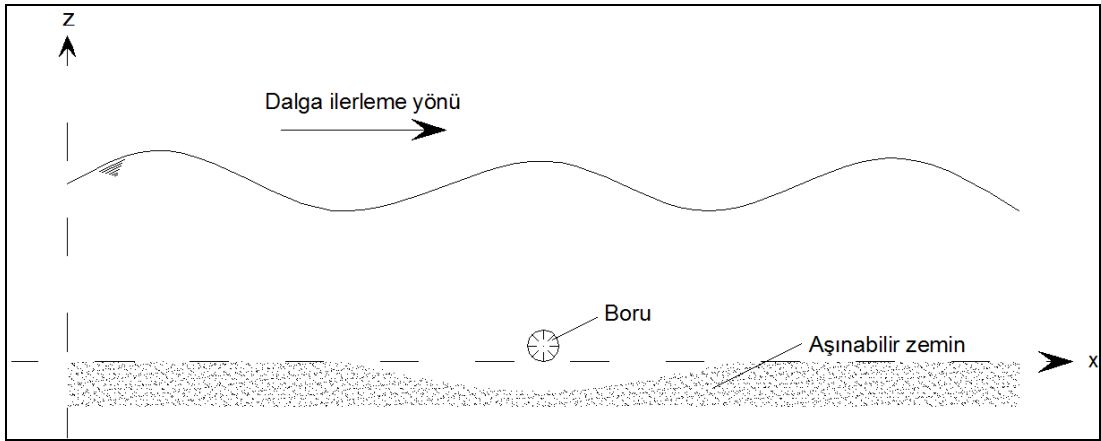
## BÖLÜM ALTI

### SAYISAL MODEL ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir bölümünü deneysel araştırmalar oluşturmaktadır. Dördüncü ve beşinci bölümlerde, deneysel çalışmalar için hazırlanan alt yapı, kullanılan yöntem ve deneylerin ayrıntılı analizine yer verilmiştir. Öte yandan, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerin uygunluğunun denetlenmesi ve sonuçların karşılaştırılabilmesi amacıyla, Flow3D paket programı kullanılarak sayısal çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, deneysel çalışmaların yanında ham sonuçların karşılaştırılması amaçlı olup, geliştirilmeye açık durumdadır.

#### 6.1 İncelenen Fiziksel Olayda Etkin Matematiksel İfadeler

Dalga etkisi altında silindirik su altı borusu etrafındaki akım ve oluşan zemin hareketlerinin iki boyutlu olarak ele alınması durumunda fiziksel olayın şematik gösterimi Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.1 Su altı borusu etrafında iki boyutlu akım ve oyluma durumu için şematik gösterim.

Matematiksel ifadeler iki ayrı grupta düşünülebilir. Bunlardan ilki dalga etkisi ile su altı borusunda etrafında oluşan akımın ifade edildiği denklemlerdir. İkinci grup ise

aşınabilir bir deniz tabanı üzerinde bulunan su altı borusu durumunda boru altında oluşacak zemin hareketlerinin hesaplandığı denklemlerdir.

İki boyutlu ortamda, dalga etkisi ile su altı borusu etrafında oluşan oyulmaların matematiksel ifadesi için (6.1) eşitliği ile verilen süreklilik denklemi ile (6.2) ve (6.3) eşitlikleri ile gösterilen Reynolds gerilmelerini içeren Navier-Stokes denklemleri verilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (6.3)$$

Bu denklemler kartezyen koordinat sisteminde yazılmış olup, sıkıştırılamayan akışkanın zamanla değişen ve sürtünme gerilmeleri taşıyan akımı içindir. Bu denklemlerde  $u$ ;  $x$  yönündeki hızı,  $w$ ;  $z$  yönündeki hızı,  $p$ ; basıncı, ve  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zz}$  türbülans gerilmelerini göstermektedir.

Yukarıda verilen üç adet kısmi diferansiyel denklemin analitik çözümü olmayıp, sayısal yöntemler ile çözümü mümkün olmaktadır. Ancak bu durumda, yukarıda mevcut üç denkleme karşılık bilinmeyenler  $u$ ,  $w$ ,  $p$ ,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  ve  $\tau_{zz}$  olmak üzere altı adet olarak karşımıza çıkmakta olup bu durum türbülans kapanış problemi olarak adlandırılmaktadır.

Türbülans kapanış probleminin aşılıp denklem sisteminin sayısal çözümüne geçilebilmesi için çeşitli türbülans modelleri mevcuttur. Bu modeller üç ana grupta incelenebilmektedir.

- Cebirsel modeller (sıfır denklemliler olarak bilinirler, ör: karışım boyu modeli).
- Türbülans enerji denklemliler modelleri (bir denklemliler ve iki denklemliler modeller).
- Benzeşim modelleri (doğrudan nümerik benzeşim, büyük eddy benzeşimi v.b.).

Türbülans enerji denklemliler modelleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar arasında en çok kullanılanlar iki denklemliler olanlar  $k-\varepsilon$  ve  $k-\omega$  modelleridir.  $k-\omega$  modelinin uygulanması durumunda türbülans kayma gerilmeleri (6.4), (6.5) ve (6.6) eşitliklerinde verilmektedir. Bu model durumunda aşağıda verilen (6.4) ila (6.14) arasındaki bağıntılar için Liang ve diğ., (2005b) çalışmasından yararlanılmıştır.

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k \quad (6.4)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (6.5)$$

$$\tau_{zz} = 2\nu_t \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}k \quad (6.6)$$

Bu üç denklemliler eklenmesi ile birlikte toplam denklemliler sayısı altıya yükselmektedir. Ancak, denklemliler sayısının altıya çıkmasıyla birlikte, yeni bilinmeyenler olarak  $\nu_t$ ; türbülans eddy viskozitesi ve  $k$ ; türbülans kinetik enerjisi terimleri ilave olmuştur. Türbülans eddy viskozitesi  $\nu_t$  (6.7) aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Liang ve diğ., 2005b).

$$v_t = \alpha^* \frac{k}{\omega} \quad (6.7)$$

(6.7) bağıntısındaki  $\omega = \frac{\varepsilon}{\beta^* k}$ ;  $k$ 'nin özel dağılıma oranı olarak adlandırılmaktadır. Buradan hareketle türbülans enerji denklemi modelinin ismini verdiği denklemler (6.8) ve (6.9) eşitliklerinde verildiği gibi karşımıza çıkmaktadır.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + P_k - \beta^* \omega k \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] + \gamma_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \omega^2 \quad (6.9)$$

Burada,  $P_k = \nu_t \left[ 2(\partial u / \partial x)^2 + 2(\partial w / \partial z)^2 + (\partial u / \partial z + \partial w / \partial x)^2 \right]$ ; türbülans üretim oranı,  $\sigma_{k1}$ ,  $\sigma_{\omega 1}$ ,  $\beta^*$ ,  $\gamma_1$ ,  $\beta_1$  ve  $\alpha^*$  da  $k$ - $\omega$  modelinin katsayıları olmaktadır. Bu katsayıların ifadeleri (6.10), (6.11), (6.12) ve (6.13) bağıntılarında verilmektedir.

$$\alpha^* = \frac{1/40 + \text{Re}_T/6}{1 + \text{Re}_T/6} \quad (6.10)$$

$$\gamma_1 = \frac{5}{9} \frac{1/10 + \text{Re}_T/2.7}{1 + \text{Re}_T/2.7} (\alpha^*)^{-1} \quad (6.11)$$

$$\beta^* = \frac{9}{100} \frac{5/18 + (\text{Re}_T/8)^4}{1 + (\text{Re}_T/8)^4} \quad (6.12)$$

$$\sigma_{k1} = 2.0, \sigma_{\omega 1} = 2.0, \beta_1 = 0.075 \quad (6.13)$$

Burada  $\text{Re}_T$  türbülans Reynolds sayısını göstermekte ve (6.14) eşitliği yardımıyla ifade edilebilmektedir.



$$\text{Re}_T = \frac{k}{\omega v} \quad (6.14)$$

Yukarıda belirtilen yöntemler ile denklem sistemi kapalı hale getirilmiştir. Diğer bir deyişle türbülans kapanış problemi aşılmıştır. Yine de elde edilen bu kısmi diferansiyel denklemler doğrudan çözülemeyeceğinden sayısal çözüm yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında bu ihtiyacın karşılanması için Flow3D paket programı kullanılmıştır.

Su altı borusu etrafındaki akımın çözülmesi ile birlikte, boru civarındaki sedimentin hareketinin de modellenmesi gerekmektedir. Bu durumda, askıdaki katı maddenin ve taban malzemesi hareketinin modellenmesi gerekmektedir. Bunun için farklı yöntemler mevcuttur. Genel yaklaşım olarak, literatürde mevcut önceki çalışmalarda elde edilen deneye dayalı bağıntılar kullanılmakta olup, askıdaki sediment malzemesi için (6.15) eşitliği ile verilen denklem çözülmektedir.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (v - \omega_s) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (6.15)$$

Burada,  $c$  sediment konsantrasyonunu,  $\omega_s$  sediment çökme hızını ve  $\sigma_c$  ise türbülans Schmidt sayısını göstermektedir.

Taban malzemesinin modellenmesi için sıklıkla kullanılan deneye dayalı bağıntılardan biri Meyer-Peter ve Müller tarafından önerilen ve (6.16) eşitliği ile verilen formüldür (Meyer-Peter ve Müller, 1948).

$$q_b = 8 \sqrt{g(s-1)d_{50}^3} (\theta - \theta_{kr})^{1.5} \quad (6.16)$$

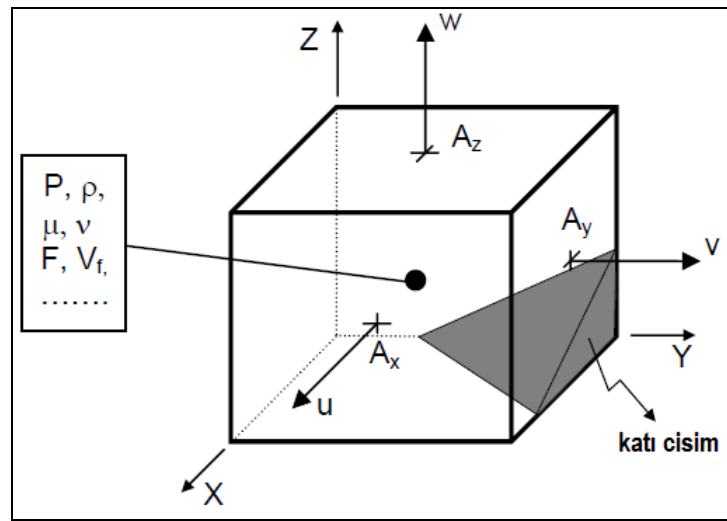
Burada,  $q_b$  birim genişlikteki sediment taşınım miktarını göstermekte olup  $[L^2T^{-1}]$  boyutundadır. Araştırmacılar tarafından yatay taban durumunda kritik Shields sayısının 0.047 alınabileceği vurgulanmaktadır.

Tez çalışmaları kapsamındaki deneysel çalışma sonuçlarının, sayısal sonuçlarla karşılaştırılması amacıyla, Flow3D paket programı kullanılarak oluşturulan model ile elde edilen bulgular kullanılmıştır. Flow3D paket programı ile ilgili teknik bilgilere ve oluşturulan modele bir sonraki alt bölümlerde değinilmektedir.

## 6.2 Flow3D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı Teknik Özellikleri

Flow3D paket programının hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümünde süreklilik, momentum ve enerji temel kanunlarına dayandığından dolayı, birçok uygulamada kullanılabilir. Flow3D programı özellikle serbest yüzeyli akım problemleri için sıklıkla uygulanmaktadır (Kocaman, 2007).

Paket program, yüksek mertebeden kısmi diferansiyel süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinin çözümü için sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntemde hesaplamalar dikdörtgensel ve üniformluk şartı aranmayan hücrelerde gerçekleştirilmektedir. Şekil 6.2'de gösterildiği gibi, Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerindeki skaler büyüklüklerden viskozite, basınç ve yoğunluk değerleri oluşturulan kontrol hacminin merkezinde bulunmaktadır. Üç boyuttaki vektörel hız bileşenleri ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) ise kontrol hacminin yüzeyinde çözüme dâhil olmaktadır.



Şekil 6.2 Flow3D programı hesap hacmi üzerindeki yönler ve tanımları (Kocaman, 2007).

İncelenen problemin geometrisi yukarıda gösterilen çözüm ağı üzerinde bazı hücrelerin katı engeller ile kapatılmasıyla ortaya çıkarılmaktadır. FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) olarak adlandırılan bu yöntemde kontrol hacmi içerisinde yer alan engelin kontrol hacminde ne kadar yer kapladığı (volume fraction) bulunmakta ve bu engelin kontrol hacminin her bir yüzeyinde kapladığı alanlar hesaplanarak ilk bulunan değer bu değere bölünmektedir. Uç değerler olarak, eğer kontrol hacmi tamamıyla katı engelle dolu ise yukarıda bahsedilen değer sıfır, eğer tamamıyla boş ise bu değer bir olmaktadır. Yukarıda hesabı anlatıldığı gibi eğer bir hücre kısmen dolu yada boş ise sıfır ile bir arasında bir değer almaktadır. Bu değer bir nevi her bir hücredeki yüzeylerde akımın oluşacağı alanları ifade etmekte bu durum da ilgili hücrede ne miktarda akışkanın yer aldığını göstermektedir. FAVOR tekniği sayesinde karmaşık geometriye sahip sınırlarda, çözüm için kullanılan ağın geometrisinden bağımsız olarak hassasiyet sağlanabilmektedir.

Flow3D programı CAD yazılımları ile uyumlu çalışabildiğinden, incelenen karmaşık yapıya sahip bir problemin arazi geometrisi, CAD programlarında oluşturulup buradan Flow3D programı içersine yerleştirilebilmektedir. Böylece, su mühendisliği problemlerinde sıklıkla rastlanılan düzensiz topografyadaki akarsu, kıyı bölgesi, baraj gölü v.b. kesimlerin modellenmesi daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Diğer sayısal çözüm programlarında olduğu gibi, kullanılan ağların sıklıkları katı engellerin sınırlarının daha hassas tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

FAVOR yöntemine benzer olarak, Flow3D programı su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi amacıyla VOF olarak adlandırılan akışkan hacmi yöntemini kullanmaktadır (Hirt ve Nichols, 1981). Yine FAVOR yönteminde olduğu gibi çözüm hücrelerinin tamamıyla boş, tamamıyla su ile dolu ve kısmen dolu olmasına göre bu değer değişmektedir. Hesap alanı üzerinde tanımlanan akışkan hacmi eğer bir ise bu hücrenin tamamıyla su ile dolu olduğunu, eğer sıfır ise hücrenin tamamıyla boş olduğunu yada bir başka deyişle tamamıyla hava ile dolu olduğunu göstermektedir. Eğer hücrenin bir kısmı su ile dolu ise kapladığı hacim yüzdesine bağlı olarak sıfır ile bir arasında bir değer almaktadır. Bu yöntemde, eğer serbest

yüzey eğimli ise bir hücredeki eğimi ortaya çıkarabilmek için program o hücreyi çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanmaktadır. VOF yöntemi kullanılarak serbest yüzeyin belirlenmesi için ilk olarak serbest yüzeyin yeri bulunmakta, sonra bu yüzey su-hava arakesitinde keskin bir yüzey olarak belirlenmekte ve son olarak bu arakesite sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır.

Flow3D paket programı, türbülans kapanış probleminin aşılması için bir çok yaklaşımı bünyesinde barındırmaktadır. Bunlar;  $k-\varepsilon$ , Prandtl karışma boyu, türbülans enerjisi, RNG (Renormalized Group) ve LES (Large-Eddy Simulation) gibi farklı yöntemlerdir. Çözümün gerçekleştirildiği uç bölgelerde farklı sınır koşulları tanımlanabilmektedir. Bunlar; simetri, duvar, bağlayıcı (continuative), periyodik, basınç, hız, çıkan akım (outflow) olarak sıralanabilmektedir (Flow Science, INC., 2007).

Flow3D programının menüleri ile ilgili açıklayıcı bilgiler aşağıda yer almaktadır. Şekil 6.3'de programın kılavuz menüsü gösterilmektedir. Burada, çalışma alanları oluşturulabilmekte ve farklı simülasyonlar bu alanlara kaydedilebilmektedir.

Şekil 6.4'de gösterilen alt menü yardımıyla çözülecek probleme ilişkin ayrıntılar belirlenmekte, bununla birlikte kullanılacak birim sistemi, çalışma hassasiyeti gibi durumlarda ayarlanabilmektedir.

Şekil 6.5'de gösterilen alt menü yardımıyla incelenen problemin fiziği tanımlanmakta ve olayda etkin olan durumlar seçilerek programa bildirilmektedir.

Şekil 6.6'da fizik alt menüsü altında seçilen sediment oyulması başlığının faal hala getirilmesi ile birlikte sediment özelliklerinin tanımlandığı ekran gösterilmektedir.

Şekil 6.7’de gösterilen alt menü yardımıyla incelenen problemdeki akışkan ya da akışkanlar tanımlanabilmekte yada programın kendi kütüphanesinden seçilebilmektedir.

Şekil 6.8’de gösterilen alt menü yardımıyla model geometrik elemanları oluşturulabilmekte, bununla birlikte çözümün gerçekleştirileceği ağ kurulmakta ve gerekli detaylandırmalar yapılabilmektedir.

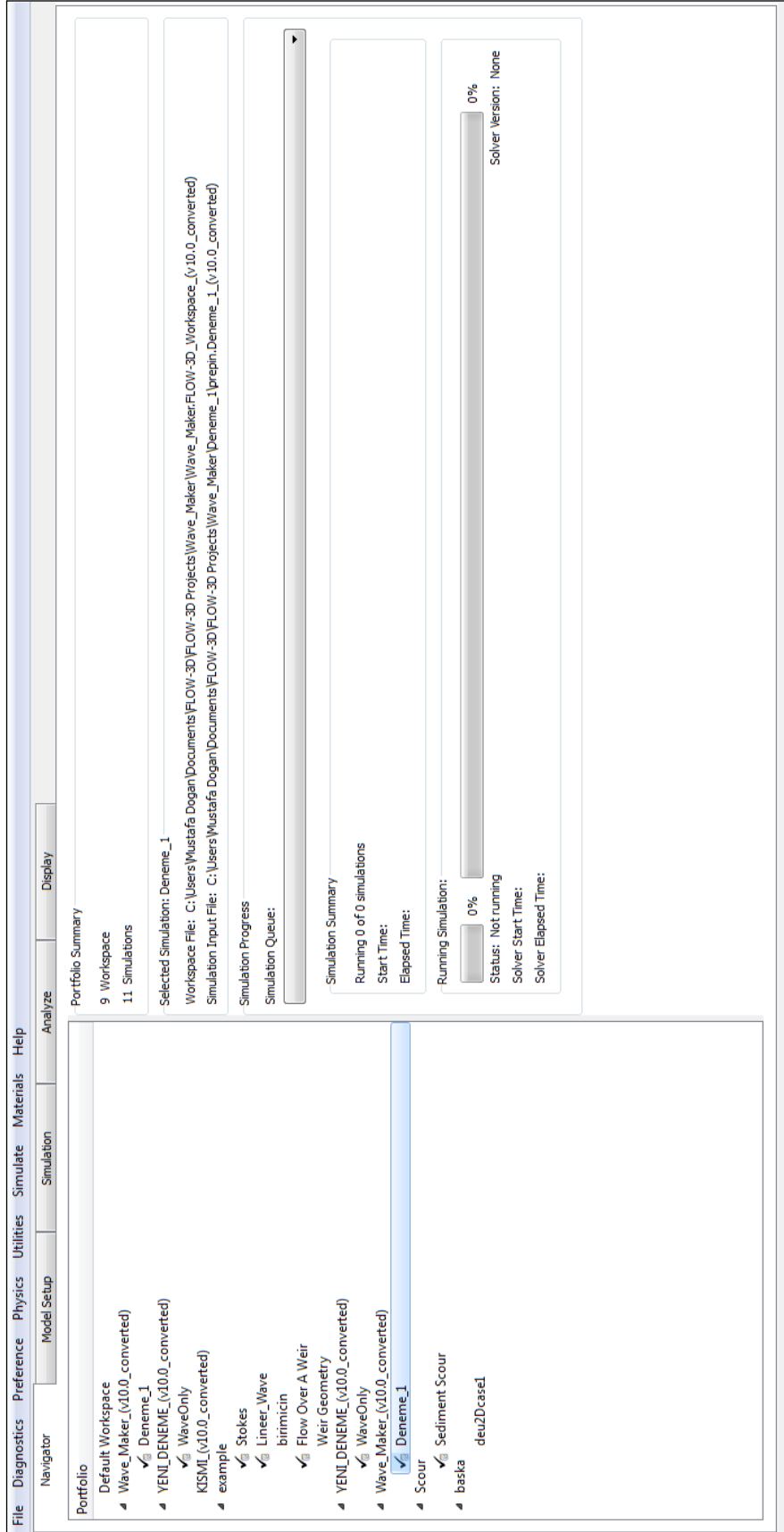
Şekil 6.9’da ağ kurma ve geometri menüsü altında yer alan ve çözüm alanı sınır şartlarının tanımlandığı bölümde, x-min sınırı (dalga kanalı açık deniz kesiti) için uygulanan dalga sınır koşuluna ait gösterim yer almaktadır.

Şekil 6.10’da gösterilen alt menü yardımıyla modelin analizi sonucunda elde edilmek istenen çıktılar düzenlenebilmekte; bunların neler olması gerektiği ve ne sıklıkta olması gerektiği gibi detaylandırmalar gerçekleştirilmektedir.

Şekil 6.11’de gösterilen alt menü yardımıyla modelin analizi için gerçekleştirilecek farklı sayısal çözüm yöntemleri seçilebilmekte ve göz önüne alınacak fiziksel durumlar ortaya konulabilmektedir.

Şekil 6.12’de Flow3D programının simülasyon menüsüne ait bir görsel bulunmaktadır. Buradan modelin simülasyonu sırasında bazı önemli parametrelerin zamana bağlı olarak değişimleri izlenebilmektedir. Bunlara örnek olarak; stabilite limitleri-  $\Delta t$  değişimi, zaman adımı değişimi, akışkan hacmi değişimi gösterilebilir.

Flow3D programı ile elde edilen çıktıların görselleştirildiği, farklı konum ve farklı zaman dilimlerinde sonuçların incelenebileceği analiz menüsüne ait gösterim Şekil 6.13’de verilmektedir.



Şekil 6.3 Flow3D kılavuz menüsü ve ayrıntıları.



Şekil 6.4 Flow3D model kurulum menüsü altındaki genel alt menüsü ve ayrıntıları.



Şekil 6.5 Flow3D model kurulum menüsü altındaki fizik alt menüsü ve ayrıntıları.

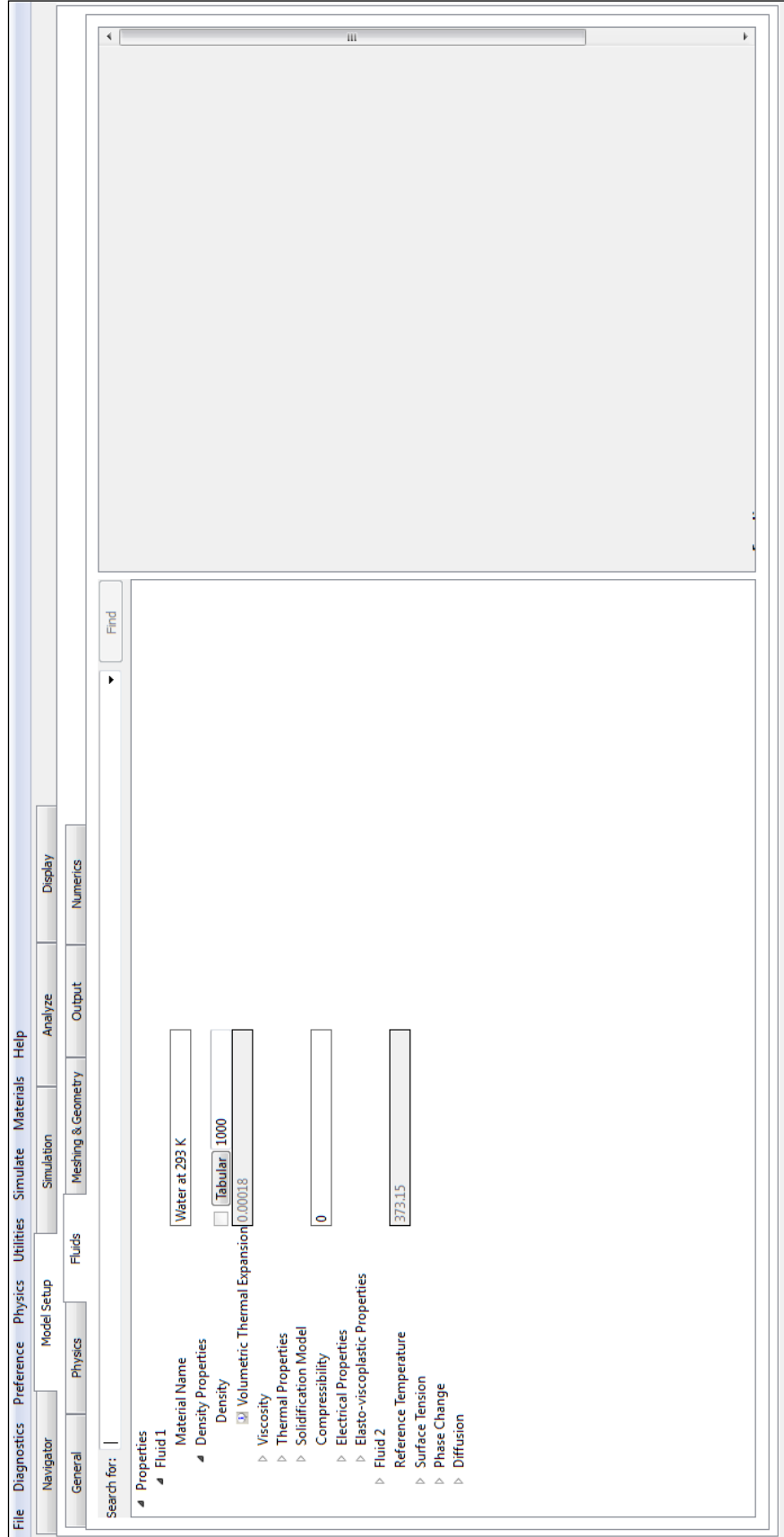


Number of sediment species: 3

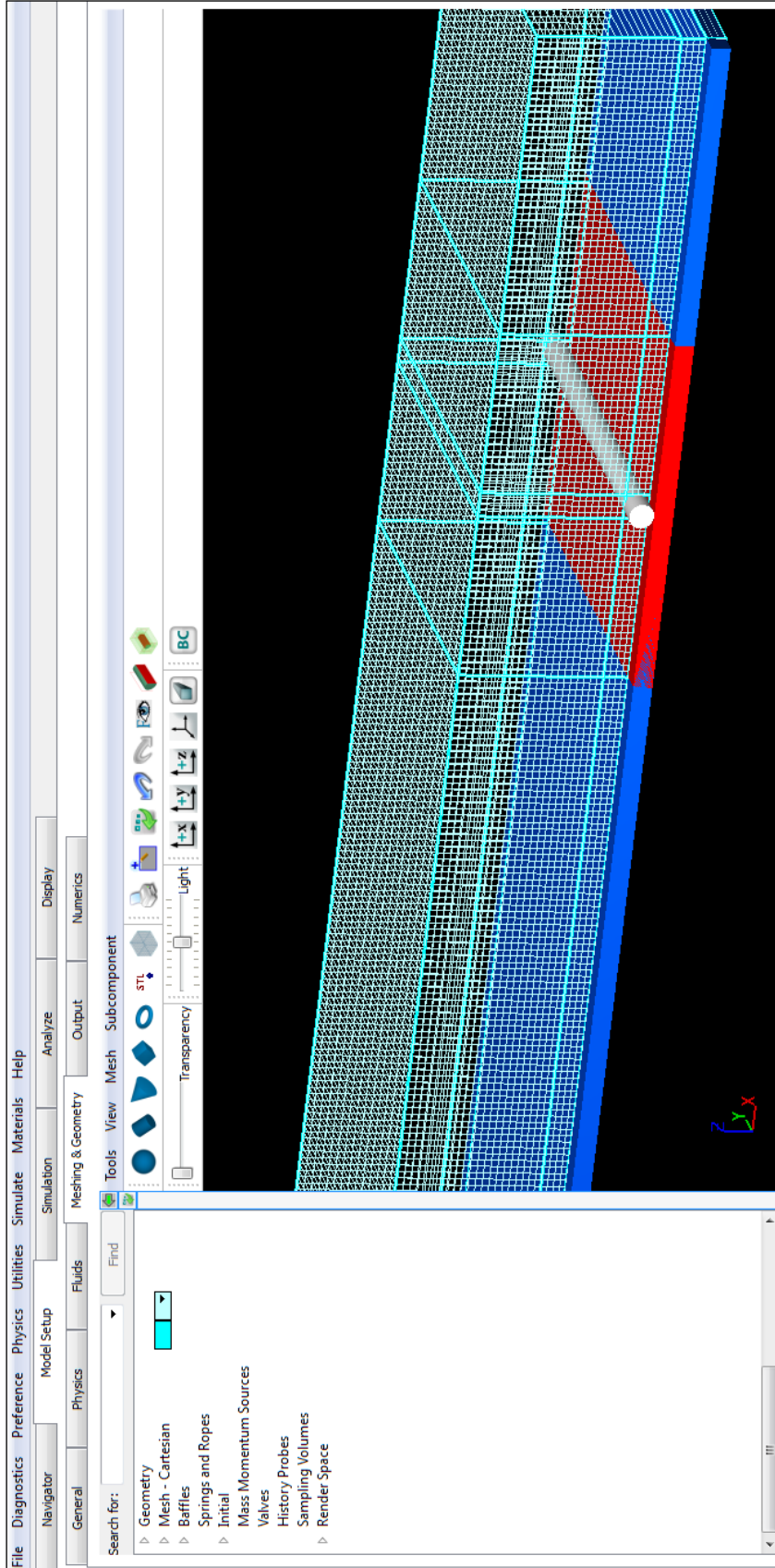
Maximum packing fraction: 0.640

Name	Diameter	Density	Critical Shields Number	Drag Coefficient	Entrainment Coefficient	Bed Load Coefficient	Angle of Repose (Degrees)
Sediment 1 ince	0.00055	2650	0.04	1.5	0.018	8	45
Sediment 2 orta	0.00185	2650	0.04	1.5	0.018	8	45
Sediment 3 kalın	0.00375	2650	0.04	1.5	0.018	8	45

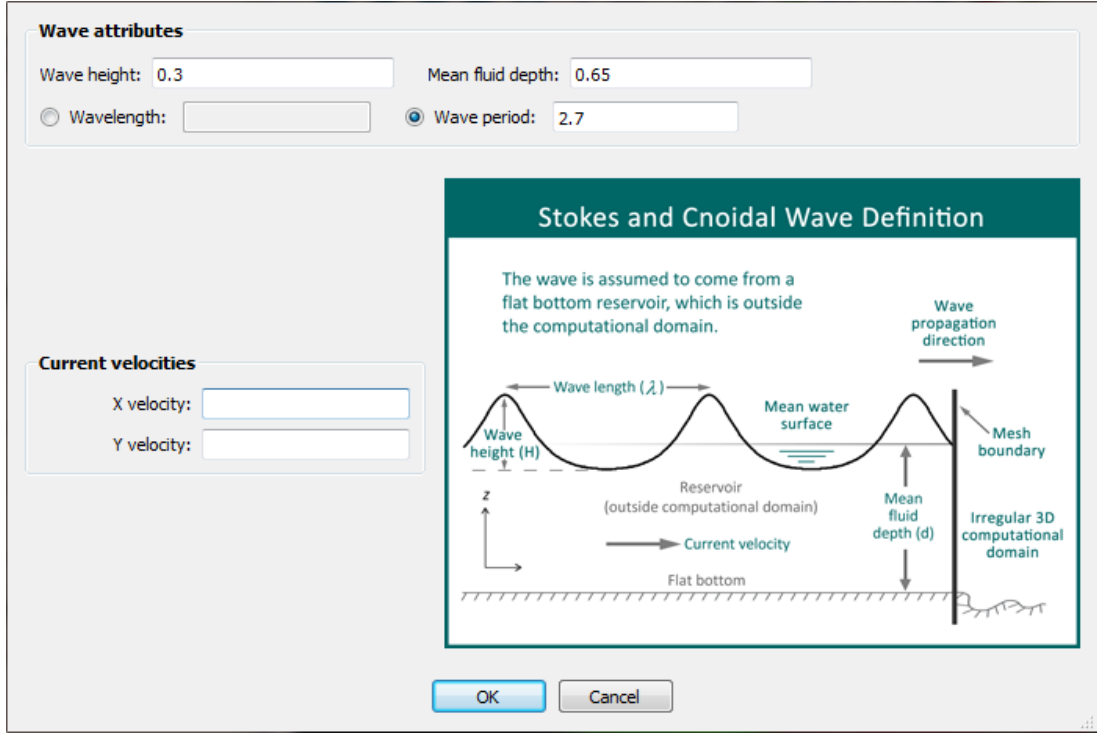
Şekil 6.6 Flow3D’de sediment oyulması seçeneği ile birlikte sediment özelliklerinin girilmesi.



Şekil 6.7 Flow3D model kurulum menüsü altındaki akışkan alt menüsü ve ayrıntıları.



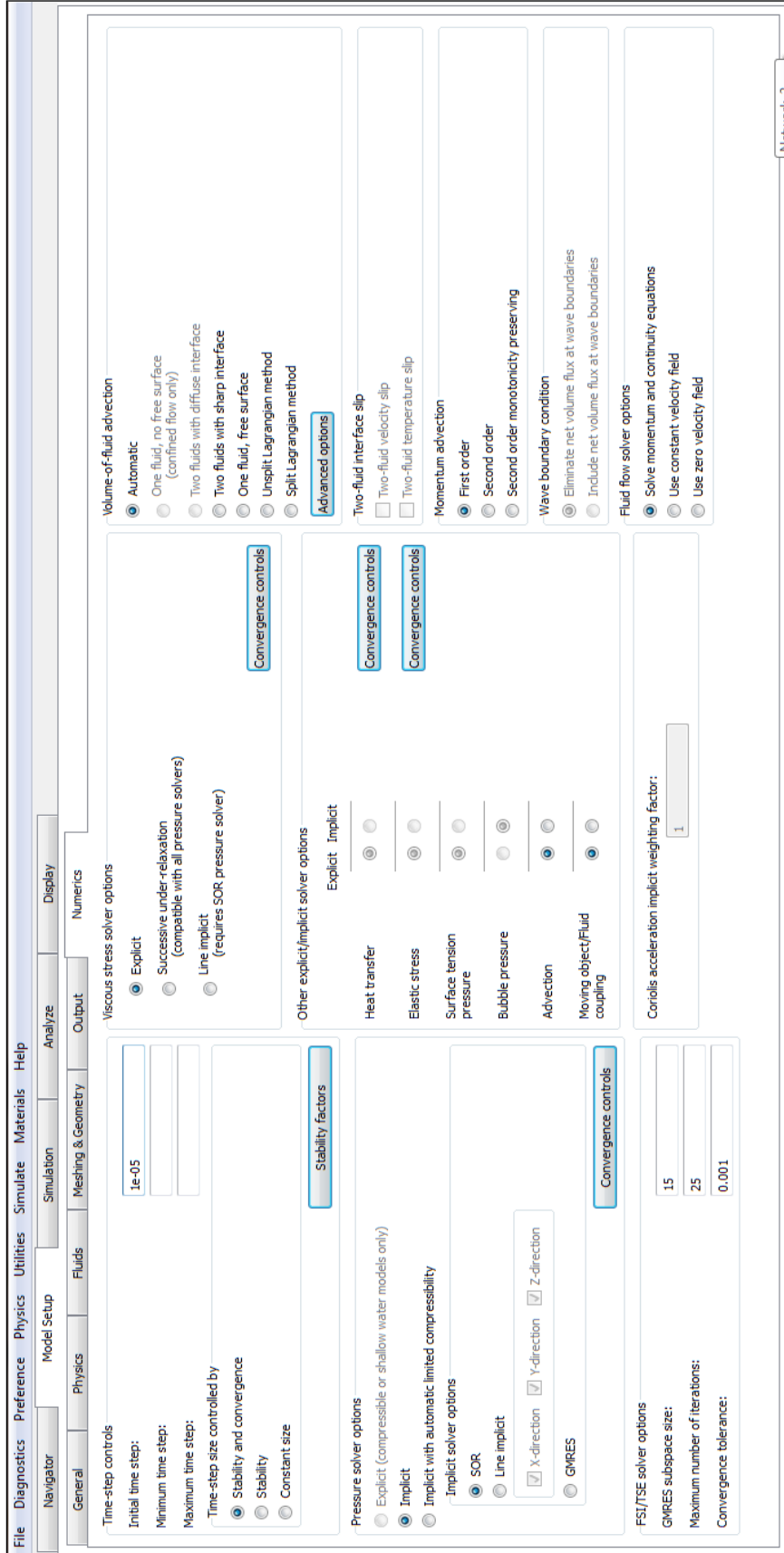
Şekil 6.8 Flow3D model kurulum menüsü altındaki ağ ve geometri alt menüsü ve ayrıntıları.



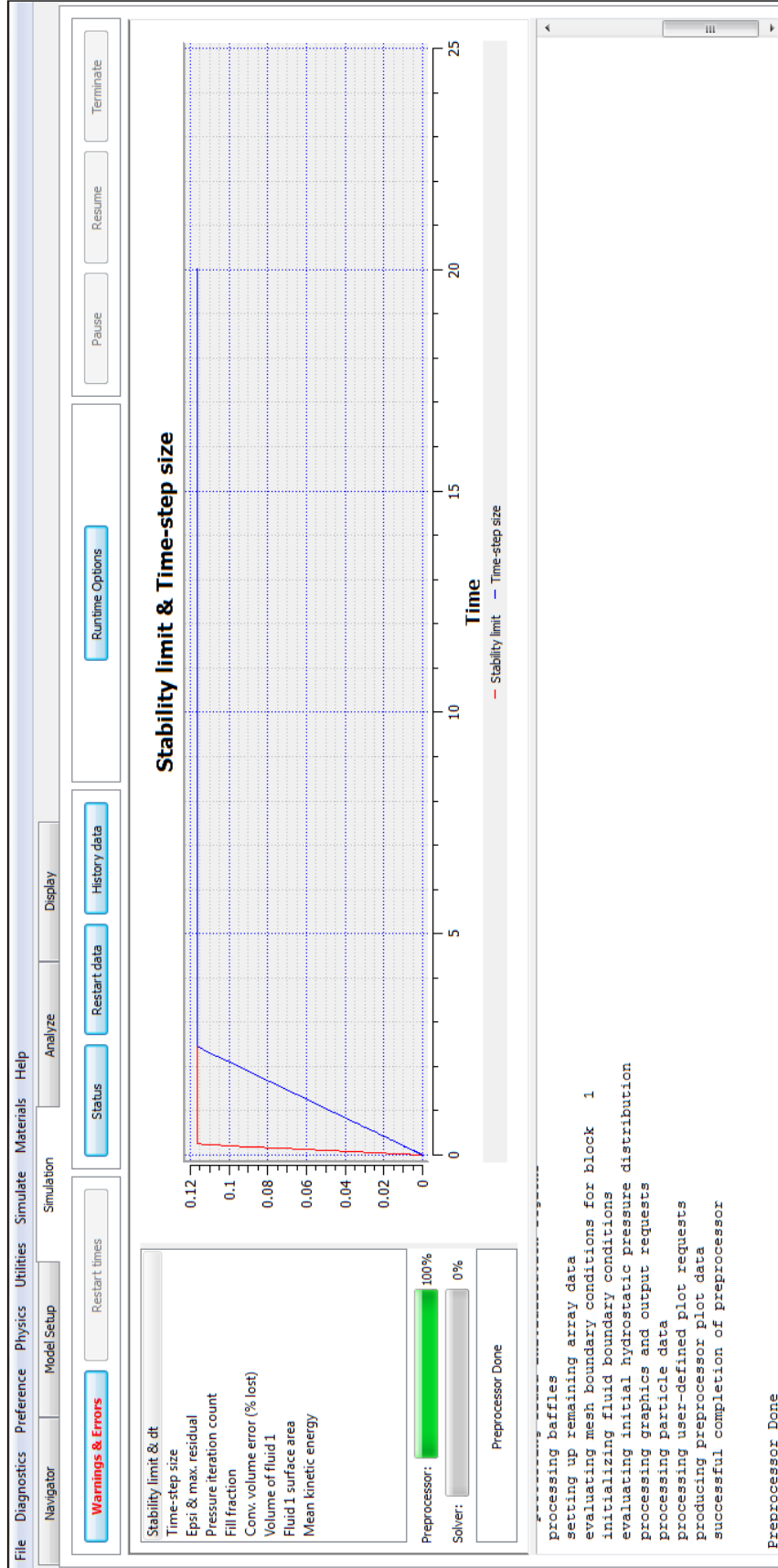
Şekil 6.9 Flow3D’de dalga sınır koşulunun programa tanımlanması.



Şekil 6.10 Flow3D model kurulum menüsü altındaki çıktı alt menüsü ve ayrıntıları.



Şekil 6.11 Flow3D model kurulum menüsü altındaki sayısal alt menüsü ve ayrıntıları.



Şekil 6.12 Flow3D simülasyon menüsü ve ayrıntıları.



Şekil 6.13 Flow3D analiz menüsü ve ayrıntıları.

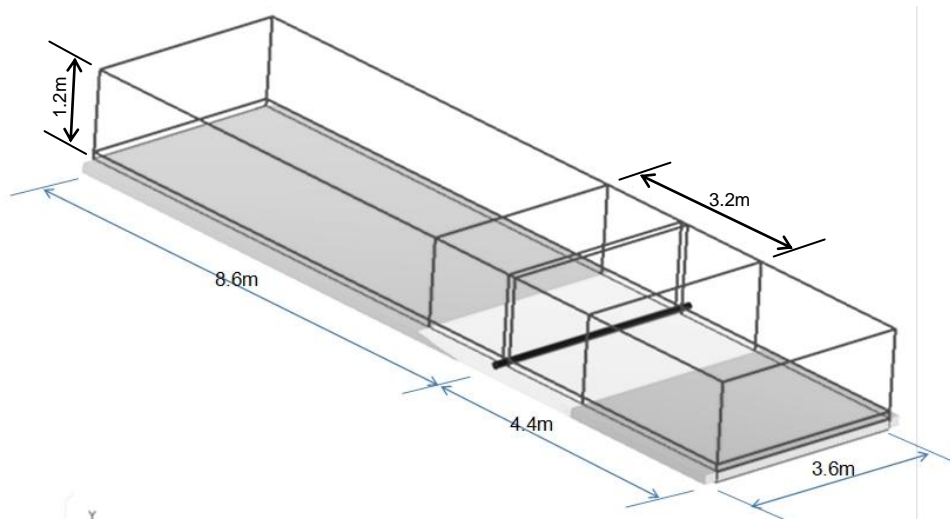


### 6.3 Flow3D Programı İle Sayısal Modelin Oluşturulması

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile elde edilen bulguların karşılaştırılması amacıyla, Flow3D paket programı kullanılarak iki boyutlu ortamda çözüm yapan bir sayısal model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model, başlangıç aşamasında sayılabileceğinden geliştirilmeye açıktır. Sayısal model kapsamında, en uygun çözümün oluşturulabilmesi amacıyla farklı çözüm yöntemleri, farklı türbülans kapanış çözümleri denenmiştir.

#### 6.3.1 Sayısal Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Flow3D paket programı yardımıyla Şekil 6.14’de gösterilen geometriye sahip model oluşturulmuştur. Deney kanalının tamamının tanımlanması yerine çözümün hızlanması ve asıl ilgilenilen bölgeye daha çabuk ulaşabilmek için kanalın belirli bir uzunluğunda işlem yapılmıştır. Kanal başlangıcında giriş sınır koşulu olarak, deneylerde olduğu gibi mekanik dalga üretici tanımlamak yerine ‘dalga sınır koşulu’ (wave) özelliğinden yararlanılmıştır. Dalga sınır koşulu, geometrinin bir sınırından istenen parametrelerle dalga gönderilmesini sağlamaktadır. Deneylerden elde edilen dalga özellikleri dikkate alınarak, kanal girişinde dalga parametreleri tanımlanmıştır. Kanal sonunda ise yansıma olmadığı kabul edilerek ‘çıkış’ (outflow) sınır koşulu uygulanmıştır.



Şekil 6.14 Flow3D ile çözüm için deney düzeneği modeli geometrisi.

Dördüncü bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi deney düzeneğinde sedimentin bulunduğu kısım, sayısal modele de aynı şekilde yansıtılmıştır. Benzer şekilde boru, eksenine sediment çukurunun tam ortasına gelecek şekilde ve tabana oturacak bir vaziyette yerleştirilmiştir. Katı model oluşturulduktan sonra, kanal içerisindeki su için Flow3D programının kütüphanesinden 20°C deki su seçilmiştir. Akım türbülanslı olarak tanımlanmış ve *RNG k- $\omega$*  türbülans modeli kullanılmıştır. Sonlu hacimler yöntemi ile hesap yapan Flow3D programında, sayısal çözümde açık şema kullanılmıştır.

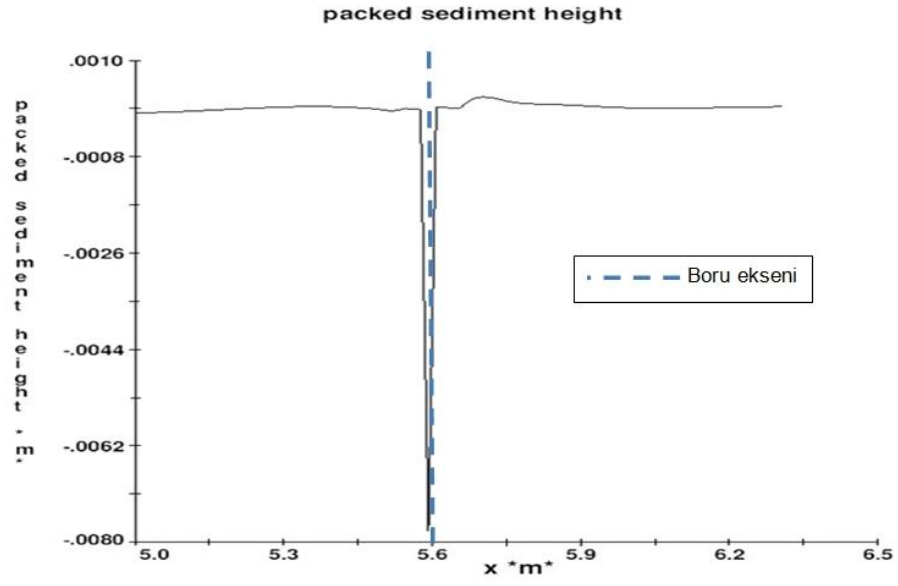
Sayısal modelin kalibrasyonu için H2D1B111102701BT kodlu deneye ait parametreler ve bu deneyin sonuçları kullanılmıştır. Buna göre ilgili deneydeki parametreler;

- Dalgalanmamış su derinliği  $d = 65 \text{ cm}$ ,
- Taban malzemesi dane medyan çapı  $d_{50} = 0.55 \text{ mm}$ ,
- Taban malzemesi özgül ağırlığı  $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$  (üreticinin bildirdiği değer),
- Boru çapı  $D = 63 \text{ mm}$ ,
- Dalga yüksekliği  $H = 16 \text{ cm}$ ,
- Dalga periyodu  $T_w = 3.6 \text{ sn}$ ,

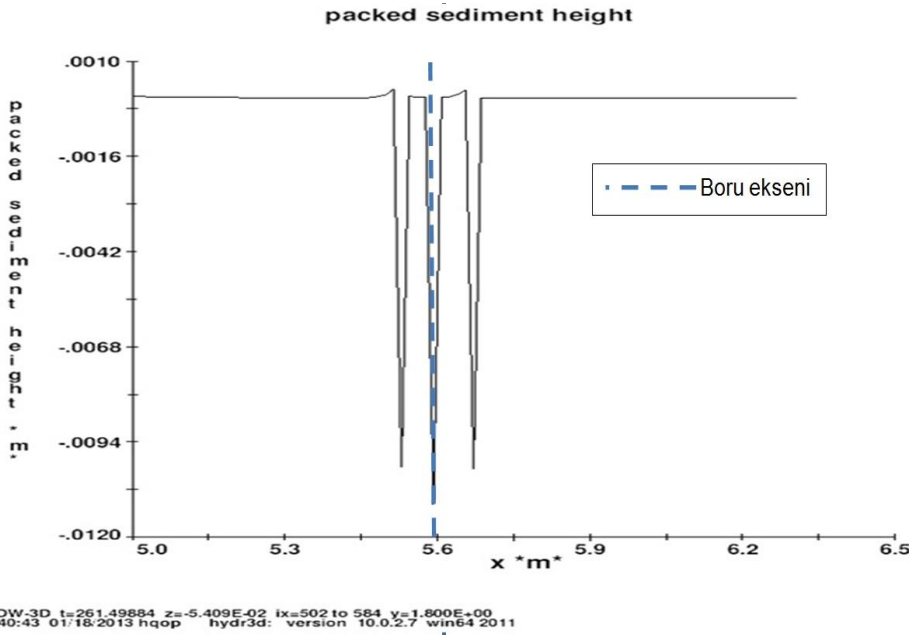
şeklinde dir. Sayısal çözüm bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1500 sn süresince çözüm sürdürülmüştür. Bunun sonucunda, sedimentin olduğu boru altında kalan bölgede  $t=130, 261, 500, 758, 1368$  ve  $1452$  sn anlarındaki taban profilleri Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de verilmiştir.

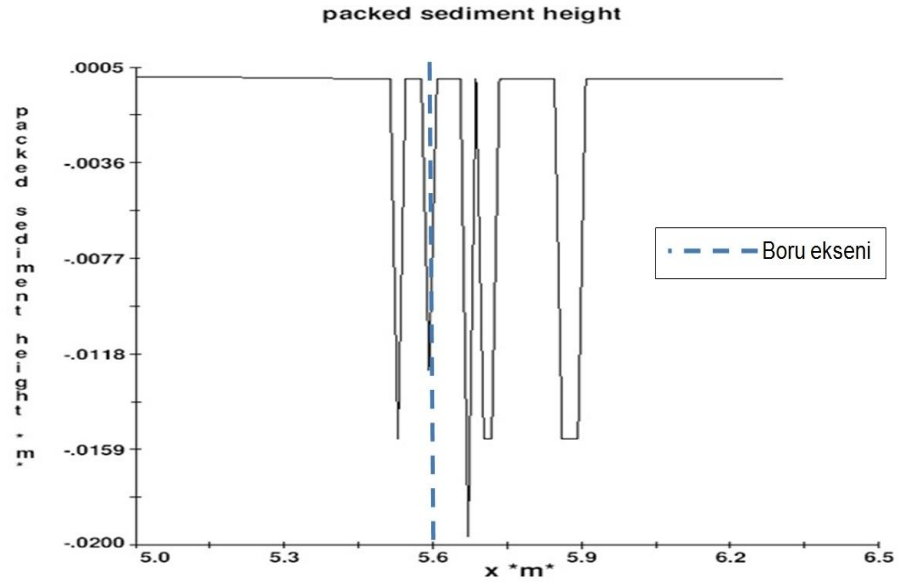
Model oluşturulurken kanalın başlangıç kesimi daha sonra uzatıldığı için kanal başında x eksenine değeri  $-2.99 \text{ m}$  olduğundan boru eksenine  $x=5.61 \text{ m}$  de yer almaktadır.



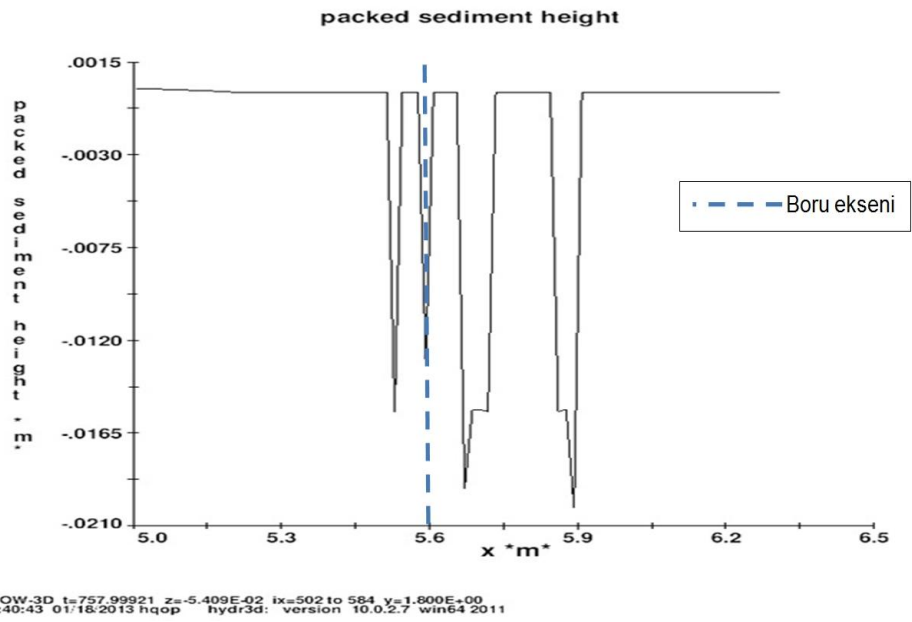
Şekil 6.15 t=130. sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.



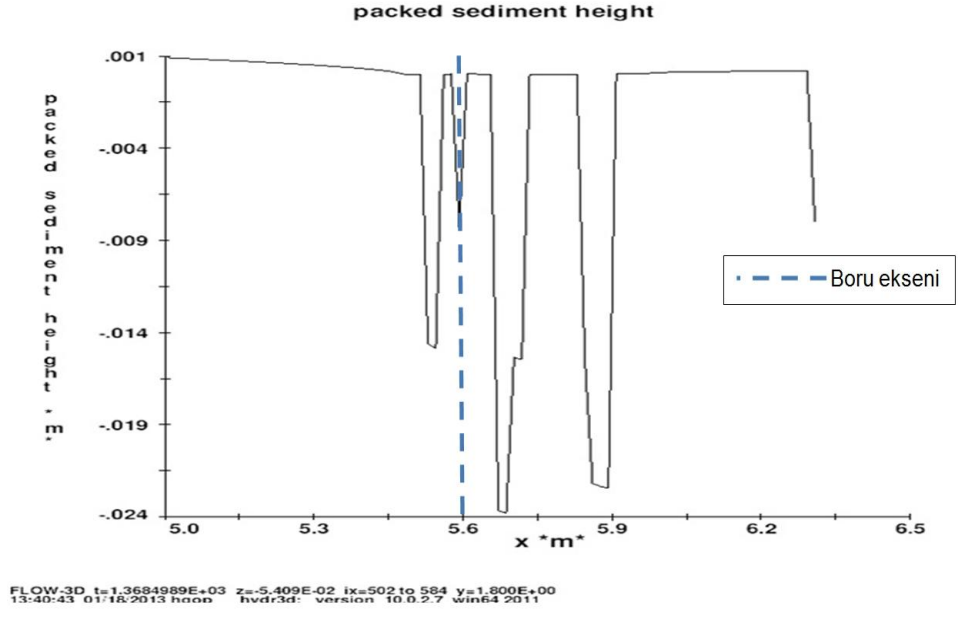
Şekil 6.16 t=261. sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.



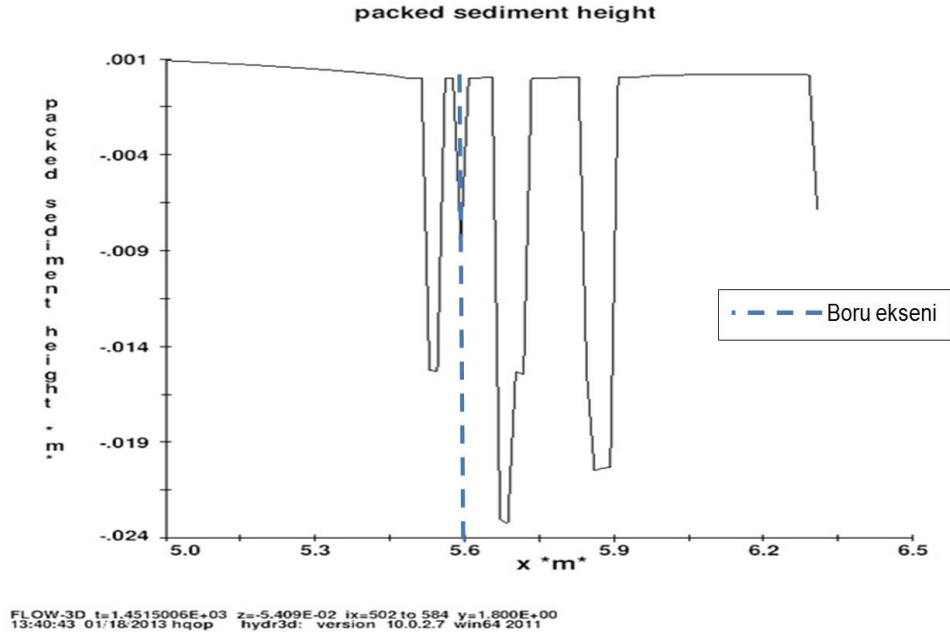
Şekil 6.17 t=500. sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.



Şekil 6.18 t=758. sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.



Şekil 6.19 t=1368. sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.

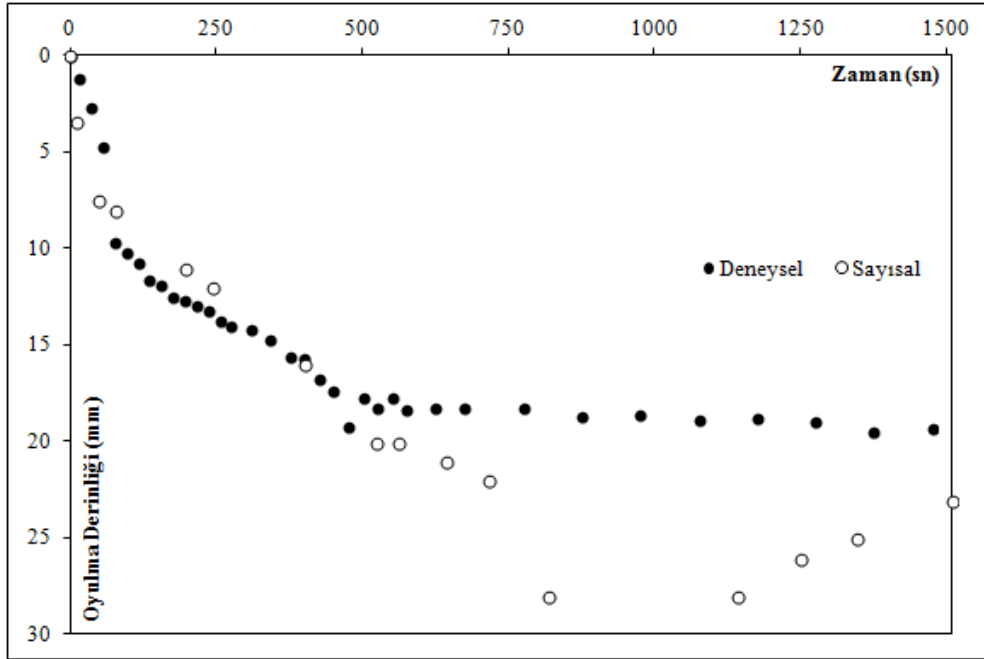


Şekil 6.20 t=1452. sn'de kanalın boru altında kalan kesimindeki taban profili.

Yukarıda verilen grafiklerden elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verileri, deneylerde boru ortasında bulunan UVP algılayıcılarında elde edilen zamana bağlı oyulma ölçüm değerleri ile karşılaştırılarak bir sonraki ara bölümde verilmiştir.

### 6.3.2 Sayısal Model Sonuçları İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

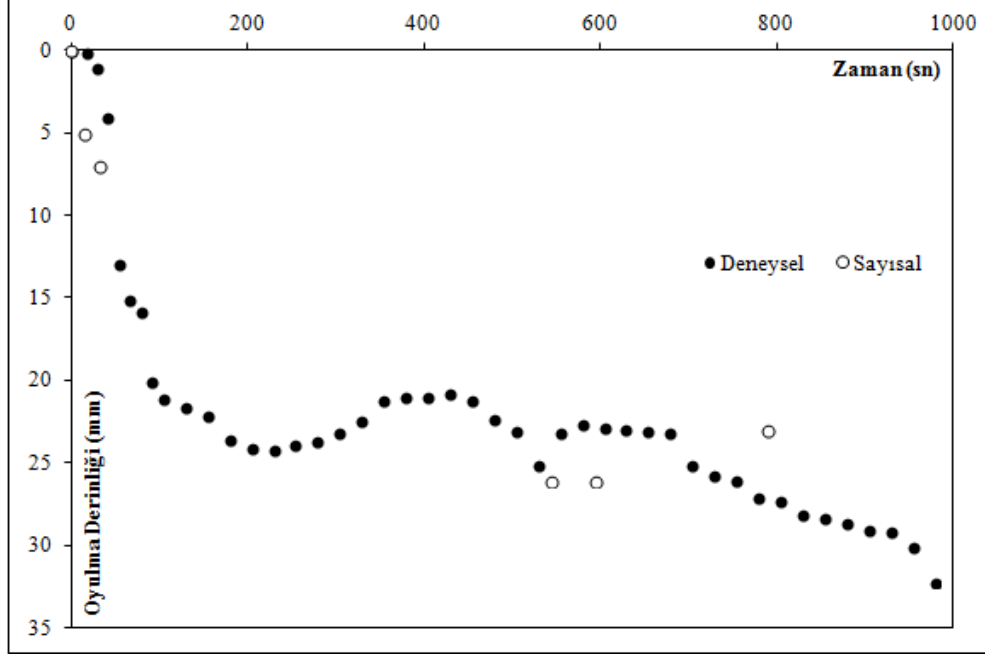
Yukarıda belirtildiği üzere iki boyutlu ortamda zamana bağlı olarak çıkarılan oyulma derinlikleri, karşılaştırma yapabilmek için deneysel sonuçlar ile birlikte düşey eksen oyulma derinliğini yatay eksen ise zamanı göstermek üzere noktalanmışlardır. Şekil 6.21’de H2D1B111102701BT kodlu deney parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözüm ile deneysel sonuçlar bir arada gösterilmektedir. Deneysel veriler 5.4.2, 5.4.3 ve 5.4.4 bölümlerinde olduğu gibi borunun ortasında bulunan UVP algılayıcılarından No.3’e ait ölçüm değerleridir. Sayısal model hâlihazırda iki boyutlu olduğundan y eksenini boyunca değişim söz konusu değildir.



Şekil 6.21 H2D1B111102701BT kodlu deney sonuçları ile aynı deneyin parametreleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sonuçların bir arada gösterimi.

Yukarıdaki grafik incelendiğinde deneysel bulgulardaki oyulmanın üstel değiştiği bölgenin sayısal model ile yansıtılabildiği ancak nihai oyulma derinliğine geçmeden önce sayısal sonuçlarda bir artış yaşandığı gözlenmektedir.  $t=1500$  sn değerlerinde gerek deneysel gerekse de sayısal olarak elde edilen nihai oyulma derinlikleri yakınlık göstermektedir.

Şekil 6.22’de H4D1B111103101BT kodlu deney parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözüm ile deneysel sonuçlar birlikte verilmektedir.



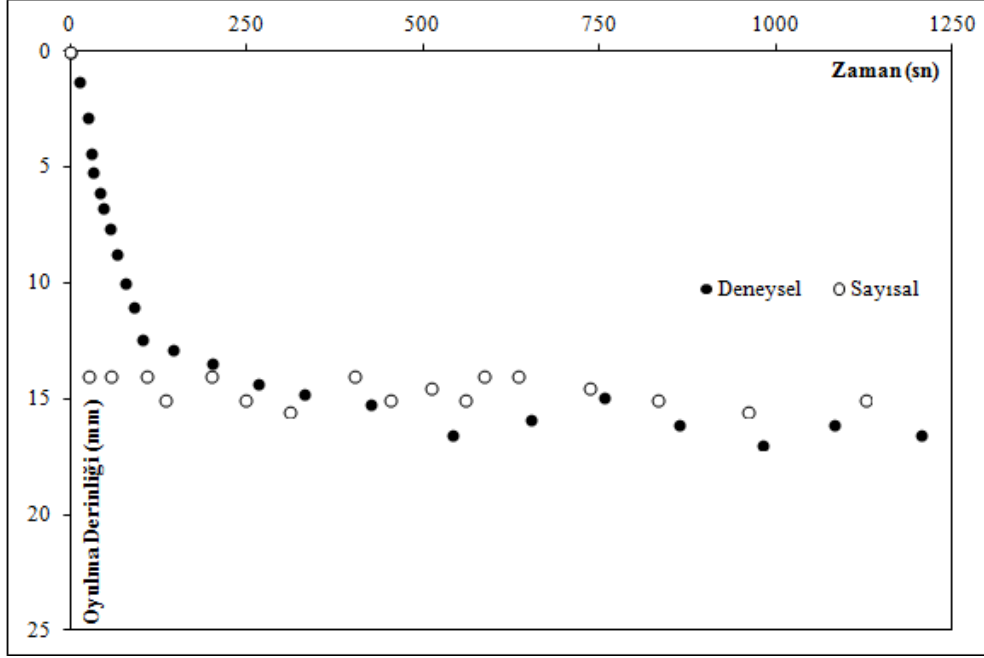
Şekil 6.22 H4D1B111103101BT kodlu deney sonuçları ile aynı deneyin parametreleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sonuçların bir arada gösterimi.

Bir önceki grafikte benzer şekilde Şekil 6.22’de verilen grafikte de deneysel sonuçlardaki oyulmanın zaman içerisindeki gelişimi hem üstel değişim bölgesinde hem de oyulmanın nihai duruma gelmesini takiben hareketli taban oyulmasından kaynaklanan salınımlı değişim bölgesinde, deneysel bulgular ile sayısal sonuçların benzerlikler gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

Yukarıda verilen iki grafik ince taban malzemesi durumlarına karşılık gelmekte olup, Şekil 6.23’de orta taban malzemesi durumu için H4D3B212080601BT kodlu deney parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözüm ile deneysel bulgular karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Orta taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen bu karşılaştırmada, görüldüğü üzere sayısal modelden elde edilen nihai oyulma derinliği verileri deneysel bulgular ile oldukça uyumlu olmakla beraber, oyulmanın başlangıç sürecindeki üstel değişim

formu sayısal modelde ortaya konamamıştır. Diğer bir deyişle, sayısal model çıktılarında oyulmanın zaman içerisinde hızlı bir şekilde artması yerine bir anda nihai değere ulaştığı gözlenmektedir.



Şekil 6.23 H4D3B212080601BT kodlu deney sonuçları ile aynı deneyin parametreleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sonuçların bir arada gösterimi.

Öte yandan, örnek olarak H1D2B212080804BT kodlu deney şartlarına karşılık gelecek şekilde sayısal model çalıştırılmış ve akabinde analiz süresi boyunca 4~5 mm değerleri arasında değişen oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Bu bulgular, H1D2B212080804BT kodlu deneyin zamana bağlı oyulma derinliği değerleri ile oldukça uyumludur. Tez kapsamındaki deneylerde kullanılan en küçük dalga hızı ile gerçekleştirilen bu deneyin algılayıcı sonuçları da benzer değerleri vermektedir.

Kalın taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen Flow3D sayısal model çalışmalarında, analizler sonucu kayda değer oyulma ölçümleri alınamamıştır. Bu durum deneysel bulgular ile uyumlu değildir. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, taban malzemesi dane boyutu büyüdükçe oyulma derinliği nispeten azalmakta ancak sıfırlanmamaktadır. Kalın taban malzemesi için sayısal sonuçların elde edilmesi, çözüm için farklı şemaların, yöntemlerin ya da sınır koşullarının kullanımı



ile mümkün olabilecektir. Flow3D programında hazırlanan sayısal modelde herhangi bir girdi parametresinin değerinin değiştirilmesi yada çözüm ile ilgili herhangi bir şema, yöntem yada sınır koşulu değişikliği programın tekrar analiz yapmasını gerektirmekte ve bu durumda hazırlanan model için günler hatta hafta bazında zaman almaktadır. Bu tez kapsamında, esas hedef olan deneysel çalışmaların karşılaştırılabilmesi amacıyla hazırlanan sayısal model bu aşamada noktalamıştır. Modelin, kalın taban malzemesini de modelleyebilecek şekilde geliştirilmesi ve özellikle üç boyutlu ortamda çözüm yaparak boru altı boyunca oyulmanın gelişimini modelleyebilecek şekilde geliştirilmesi gelecek çalışmalar kapsamında düşünülmektedir.

## **BÖLÜM YEDİ**

### **SONUÇ VE ÖNERİLER**

Su altı boru hatlarının altında dalga etkisi ile oluşan oyulmaların, bu amaç için projelendirilerek inşa edilen bir dalga kanalında deneysel olarak araştırıldığı bu doktora tezi kapsamında ayrıca iki boyutlu oyulma mekanizması Flow3D paket programı yardımıyla sayısal olarak da modellenmiştir.

Deneyler, konu ile ilgili önceki çalışmalardan ayrılabilmesi amacıyla, farklı dane büyüklüklerine sahip taban malzemesi ve boru altındaki oyulmanın boru boyunca altı farklı noktada ve zamana bağlı olarak ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bunlara ilave olarak, farklı boru çapları, farklı dalga karakteristikleri ve farklı başlangıç deniz tabanı durumları da incelenmiştir.

Deneylerde hız ve derinlik ölçümleri, yüksek frekanslı ses dalgası ilkesine dayanan oldukça hassas ölçüm yapabilen aletler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Boru boyunca altı noktada zamana bağlı oyulma derinliği kayıtları, biri ölçüm borusu üzerinde diğeri de bu kesitten 450 cm açık deniz tarafına olacak şekilde iki farklı kesitte dalga kaydı ve borunun açık deniz kesiminde boru eksenindeki noktasal hızları ölçmek amacıyla zamana bağlı hız ölçüm kayıtları gerçekleştirilmiştir.

#### **7.1 Elde Edilen Sonuçlar**

Deneyler  $Re_D = 1.6 \cdot 10^4 \sim 5.3 \cdot 10^4$  arası boru Reynolds sayıları ve  $KC = 9.5 \sim 20.5$  arası Keulegan-Carpenter sayıları değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde üç farklı dane çapına sahip taban malzemesi ve üç farklı çapa sahip boru kullanılmış olup, göreceli dane medyan çapları  $d_{50}/D = 0.005 \sim 0.060$  aralığında değişmektedir. Bu şartlar altında deneyler sonucu varılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir. Burada verilen bilgiler, beşinci ve altıncı bölümlerde ayrıntılı olarak analiz edilen sonuçların bir özeti niteliğindedir.

- Deneysel sonuçta elde edilen göreceli nihai oyulma derinlikleri incelendiğinde bu değerlerin  $Re_D$  sayısı ile kayda değer bir şekilde değişmediği belirlenmiş olup,  $S/D$  ile  $Re_D$  arasında bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Deneysel sonuçta elde edilen göreceli nihai oyulma derinliklerinin değişimi üzerinde, konu ile ilgili önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi  $KC$  sayısının oldukça etkin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde, Keulegan-Carpenter sayısının 15 değerinden büyük olduğu koşullarda ve özellikle ince ( $d_{50} = 0.55 \text{ mm}$ ) ve orta ( $d_{50} = 1.85 \text{ mm}$ ) daneli taban malzemesi durumlarında elde edilen deneysel sonuçlar ile literatürde büyük kabul görmüş ve sıklıkla başvurulan Sümer ve Fredsoe (1990) ile Çevik ve Yüksel (1999) çalışmalarının sonucu elde edilen göreceli nihai oyulma derinliklerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.  $KC$  sayısının 15 değerinden küçük olduğu durumlarda ise deneysel olarak elde edilen nihai göreceli oyulma derinlikleri, Sümer ve Fredsoe (1990) ile Çevik ve Yüksel (1999) çalışması sonucu üretilen bağıntı sonuçlarından uzaklaşmaktadır. Hem Sümer ve Fredsoe (1990) çalışmasında hem de Çevik ve Yüksel (1999) çalışmasında kullanılan temsili deniz tabanı malzemelerinin dane çapları, gerçekleştirilen tez kapsamında kullanılan üç farklı taban malzemesinden özellikle ince olan ile eşleşmektedir. Bu bağlamda elde edilen sonuçların yukarıda anılan iki çalışma ile uyumlu olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu göreceli nihai oyulma derinliklerinin  $KC$  sayısına ilave olarak deniz tabanı malzemesi dane çapına da bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece, nihai oyulma derinliğinin tahmininde yalnızca  $KC$  sayısı değil,  $KC$  sayısı ile birlikte dane medyan çapı parametresini içeren bir başka boyutsuz sayının daha etkisi üzerinde durulmuştur.
- Yukarıda varılan sonucun devamı olarak, göreceli nihai oyulma derinliklerinin tahmini için  $KC$  sayısı ile birlikte  $d_{50}/D$ ,  $\theta$  ve  $Fr_d$  sayıları sırası ile denenmiştir. Bunların sonucunda,  $\frac{S}{D} = 0.0001 (KC)^{5/2} \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^{-1/4}$ ,

$\frac{S}{D} = 0.003 KC^2 \theta^{1/3}$  ve  $\frac{S}{D} = 0.0007 KC^2 Fr_d^{1/2}$  bağıntıları elde edilmiş olup, bağıntıların güvenilirliği ve performansları çeşitli sınamalara tabi tutularak belirlenmiştir. Bu amaçla, regresyon denkleminin bütününe  $f$  sınaması ve ikinci bağımsız değişkenin anlamlılığı için kısmi  $f$  sınamaları gerçekleştirilmiş olup, korelasyon ve saçılma göstergesi değerleri de hesaplanmıştır. Tüm sınama ve göstergelere göre, üç regresyon modeli de, uygun tahmin yapmaktadır. Kısmi  $f$  sınaması haricindeki diğer üç gösterge için  $\frac{S}{D} \propto KC$ ,  $\frac{d_{50}}{D}$ ,  $\frac{S}{D} \propto KC, \theta$  ve  $\frac{S}{D} \propto KC, Fr_d$  regresyonları yaklaşık benzer değerleri gösterse de, kısmi  $f$  sınaması durumunda  $\frac{S}{D} \propto KC, \theta$  için hesaplanan  $f$  istatistiği diğerleri için hesaplanandan anlamlı ölçüde büyük kaldığından, göreceli nihai oyulma derinliklerinin kestirimi için  $\frac{S}{D} = 0.003 KC^2 \theta^{1/3}$  regresyon denkleminin diğerlerine göre daha uygun olduğu sonucuna varılmaktadır.

- Zaman ölçeği parametresinin, Shields parametresi ile değişimi için elde edilen bağıntı, göreceli nihai oyulma derinliklerinin yalnızca  $KC$  sayısına bağlı olarak incelendiği regresyon modelinin literatürdeki mevcut bağıntılardan farklı olduğu kadar değişim göstermese de, zaman ölçeği parametresinin  $\theta$  parametresine bağlı olarak verildiği mevcut bağıntıdan bir miktar farklıdır. Fredsoe ve diğ., (1992) çalışmasında boyutsuz zaman ölçeği parametresi ile  $\theta$  parametresi arasında  $T^* = 0.02 \theta^{-5/3}$  bağıntısı verilmiştir. Buna karşın tez kapsamındaki deneylerde elde edilen sonuçlar ışığı altında boyutsuz zaman ölçeği parametresi ile  $\theta$  parametresi arasında elde edilen bağıntı  $T^* = 0.0042 \theta^{-5/2}$  şeklindedir.
- Tez kapsamında elde edilen  $T^* = f(\theta)$  bağıntısı ile Fredsoe ve diğ., (1992) çalışmasında verilen bağıntı birbirlerine benzer olsa da bir miktar farklılık göstermektedir. Öte yandan, boyutsuz zaman ölçeği parametresinin yalnızca

$\theta$  parametresine bağlı olarak kestiriminin yapıldığı model için iki üstteki maddede belirtilen sına ve göstergeler uygulandığında elde edilen sonuçlar modelin performansının çok yüksek olmadığına işaret etmektedir. Bu durumda, boyutsuz zaman ölçeği parametresinin yalnızca  $\theta$  parametresine bağlı olarak değişmediği,  $\theta$  parametresi ile birlikte dalga karakteristiklerini içeren  $KC$  sayısı ile birlikte regresyon modelinin kurulmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

- Boyutsuz zaman ölçeği parametresinin hem  $\theta$  parametresi hem de  $KC$  sayısı ile ilişkilendirilmesi durumunda,  $T^* = 4.35 \cdot 10^{-6} \theta^{-5/2} KC^{5/2}$  elde edilmektedir. Bu regresyon modeli için gerçekleştirilen sınamalar ve performans göstergeleri her açıdan,  $T^* \propto \theta$  olan modeline göre çok daha iyi sonuçlar vermektedir.

- Zamana bağlı göreceli oyulma derinliklerinin analizinde, göreceli nihai oyulma derinlikleri ile gerçekleştirilen analizlere benzer şekilde

$$\frac{S_t}{D} = a KC^b \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^c (1 - e^{-dt_s}), \quad \frac{S_t}{D} = a KC^b \theta^c (1 - e^{-dt_s}) \quad \text{ve}$$

$$\frac{S_t}{D} = a KC^b Fr_d^c (1 - e^{-dt_s})$$

regresyon denklemleri denenmiştir. Bunların

sonucunda, tıpkı göreceli nihai oyulma derinliklerinin kestiriminde olduğu gibi  $\theta$  parametresinin diğer iki taban malzemesi dane medyan çapı içeren boyutsuz parametreye oranla daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Böylece, zamana bağlı göreceli oyulma derinliklerinin kestirimi için

$$\frac{S_t}{D} = 0.003 KC^2 \theta^{1/3} (1 - e^{-0.005t_s})$$

bağıntısı bulunmuştur. Bu bağıntının

performansı korelasyon katsayısı ve saçılma göstergesi değerleri ile belirlenmiştir. Bu bağıntı içerisinde boyutsuzlaştırılmış zaman ifadesi üstel fonksiyon ile gelmekte olup bunun nedeni, boru altındaki zamana bağlı oyulmaların bu formda değişiyor olmasıdır. Ayrıca, yukarıda verilen bağıntı

koşullarında  $t_s = 0 \Rightarrow \frac{S_t}{D} = 0$  ve  $\lim_{t_s \rightarrow \infty} \frac{S_t}{D} = \frac{S}{D}$  değerlerine ulaşmakta ve bu

durum için incelenen boru altı oyulma olayının fiziksel şartları matematiksel olarak sağlanmaktadır.

- Önceki bölümlerde ayrıntılı olarak belirtildiği gibi, boru altında altı noktada zamana bağlı oyulma derinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi taban koşulu olarak başlangıç çukuru açılan deneyler ile oyulmanın boru altı boyunca gelişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında ince olarak tabir edilen ve dane medyan çapı  $d_{50} = 0.55 \text{ mm}$  olan taban malzemesi ile gerçekleştirilen deneylerde, oyulmaların boru boyunca yaklaşık olarak eş zamanlı olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durumda, ortasında başlangıç çukuru olan deneyler yalnızca orta ( $d_{50} = 1.85 \text{ mm}$ ) ve kalın ( $d_{50} = 3.75 \text{ mm}$ ) taban malzemeleri ile olan deneylerde gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel sonuçların analizi ile birlikte, oyulma çukurunun başlangıç çukurundan başlayarak kenarlara doğru geliştiği görülmüştür. Deney öncesi açılan başlangıç çukuruna yakın olan üç ve dört numaralı algılayıcılarda oyulma derinlikleri çok hızlı değiştiğinden bu algılayıcıların sonuçlarından ziyade, bir-iki ve beş-altı numaralı algılayıcılar arasındaki değişim analiz edilmiştir. Deneylerin analizi ile boyutsuzlaştırılmış oyulma gelişim hızı parametresi ile Keulegan-Carpenter sayısı ve Shields parametresi arasında  $c_s^* = \frac{0.0024}{KC^{1/2} \theta^{1/3}}$  ilişkisi elde edilmiştir. Bu konu ile ilgili ileride gerçekleştirilmesi düşünülen çalışmalar için takip eden alt bölümde öneriler yer almaktadır.

- Bir önceki bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışmaların içeriği ayrıntılı olarak verilmiştir. Dalga etkisi altında aşınabilir bir deniz tabanı üzerinde bulunan su altı borusu altındaki oyulmanın iki boyutlu incelenmesi amacıyla Flow3D paket programı yardımıyla bir sayısal model hazırlanmıştır. Model geometrisi, deneylerin gerçekleştirildiği dalga kanalı boyutlarına göre hazırlanmış olup, diğer model veri parametreleri, deneylerdeki koşullar ile aynıdır. Bu kapsamda, farklı deney senaryoları için

sayısal model çalıştırılarak, boru altında belirli zaman değerlerindeki oyulma derinliklerine ulaşılmıştır. İlgili bölümde ayrıntılı olarak üzerinde durulduğu gibi, sayısal model ile elde edilen ilk bulgular deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler özellikle büyük dalga hızları ve ince-orta taban malzemesi durumlarında ile bir hayli uyumludur. Deneysel veriler ile sayısal bulgular arasındaki uyum özellikle nihai oyulma derinlikleri açısından oldukça yüksektir. Oyulmanın, nihai değerine ulaşmasından önceki üstel değişimi sayısal sonuçlarda iyi bir şekilde gözlenememiştir. Flow3D ile sayısal model çalışmalarında, programın çalıştırılarak analizin gerçekleştirilmesi günler ve hatta hafta mertebesinde sürdüğünden, programda değiştirilebilecek parametrelerin ve çözüm yöntemlerinin tümünün denenmesi mümkün olmamıştır. Sayısal çözüm ile ilgili önerilere aşağıdaki alt bölümde yer verilmektedir.

## 7.2 Öneriler

Gerçekleştirilen tez çalışmasının ardından, gelecekteki deneysel ve sayısal çalışmalar için aşağıda maddeler halinde sıralanan öneriler ortaya çıkmıştır.

- Düzensiz dalga koşulları altında nihai oyulma derinliklerinin, zaman ölçeği parametresinin ve zamana bağlı oyulma derinliklerinin araştırılması.
- Üniform olmayan (bimodal v.d.) deniz tabanı malzemesi durumları için oyulma parametrelerinin araştırılması.
- Kohezyonlu deniz tabanı durumu için zaman ölçeği parametresinin ve zamana bağlı oyulma derinliklerinin araştırılması.
- Yukarıdaki alt bölümde değinildiği gibi, boru altı boyunca oyulmanın gelişimi için deneylerin geniş dalga kanallarında/havuzlarında ( $b > 6m$ ) ve boru boyunca çok daha fazla zamana bağlı oyulma derinliği algılayıcısı ile gerçekleştirilmesi.

- İki boyutlu sayısal model için, farklı türbülans kapanış modellerinin, farklı denklemlerin ve farklı sayısal çözümlerinin denenmesi.
- Üç boyutlu sayısal model geliştirilerek, boru altı boyunca oyulmanın ilerleyişi ve gelişiminin modellenmesi.



## KAYNAKLAR

- Alam, M. S. ve Cheng, L. (2010). A parallel three dimensional scour model to predict flow and scour below a submarine pipeline. *Central European Journal of Physics*, 8 (4), 604-619.
- Bijker, E. W. ve Leeuwenstein, N. (1984). Interaction between pipelines and seabed under the influence of waves and currents. In B. Denness, (Ed.). *Seabed Mechanics* (235-242). Gettysburg: Md.
- CERC (Coastal Engineering Research Center). (2006). *Coastal engineering manual* (2006 edition). USA: US Army Corps of Engineers.
- Cheng, L., Yeow, K., Zhang, Z. ve Teng, B. (2009). Three dimensional scour below offshore pipelines in steady currents. *Coastal Engineering*, 56, 577-590.
- Çevik, E. ve Yüksel, Y. (1999). Scour under submarine pipelines in waves in shoaling conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125 (1), 1-11.
- Dey, S. ve Singh, N. P. (2007). Clear water scour depth below underwater pipelines. *Journal of Hydro-Environment Research*, 1, 157-162.
- Dey, S. ve Singh, N. P. (2008). Clear water scour below underwater pipelines under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 134 (5), 588-600.
- Flow Science Inc. (2007). *Flow3D user's manual*. Santa Fe, N.M.
- Fredsoe, J. ve Deigaard, R. (1992). *Mechanics of coastal sediment transport*. Singapore: World Scientific Publishing.

- Fredsoe, J., Sümer, B. M. ve Arnskov, M. (1992). Time scale for wave/current scour below pipelines. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2 (2), 13-17.
- Gao, F.-P., Gu, X. Y., Jeng, D.-S. ve Teo, H. T. (2002). An experimental study for wave induced instability of pipelines: the breakout of pipelines. *Applied Ocean Research*, 24, 83-90.
- Gao, F.-P., Gu, X. Y. ve Jeng, D.-S. (2003). Physical modeling of untrenched submarine pipeline instability. *Ocean Engineering*, 30, 1283-1304.
- Gao, F.-P., Yang, B., Wu, Y.-X. ve Yan, S.-M. (2006). Steady current induced seabed scour around a vibrating pipeline. *Applied Ocean Research*, 28, 291-298.
- Hirt, C. W. ve Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- İbrahim, A. ve Nalluri, C. (1986). Scour predictions around marine pipelines. *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Tokyo, 3, 679-684.
- Kızılöz, B., Çevik, Y. ve Yüksel, Y. (2013). Scour below submarine pipelines under irregular wave attack. *Coastal Engineering*, 79, 1-8.
- Kjeldsen, S. P., Gjörsvik, O., Bringaker, K. G. ve Jacobsen, J. (1973). Local scour near offshore pipelines. *2<sup>nd</sup> International Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Conference*, Reykjavik, 308-331.
- Kocaman, S. (2007). *Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik incelenmesi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Kumar, A. V., Neelamani, S. ve Rao, S. N. (2003). Wave pressures and uplift forces on and scour around submarine pipeline in clayey soil. *Ocean Engineering*, 30, 271-295.
- Kumar, A. V., Neelamani, S. ve Rao, S. N. (2005). Wave interaction with a submarine pipeline in clayey soil due to random waves. *Ocean Engineering*, 32, 1517-1538.
- Li, F. ve Cheng, L. (1999). Numerical model for local scour under offshore pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125 (4), 400-406.
- Liang, D. ve Cheng, L. (2005). Numerical model for wave induced scour below a submarine pipeline. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 131 (5), 193-202.
- Liang, D., Cheng, L. ve Li, F. (2005a). Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents Part II. Scour simulation. *Coastal Engineering*, 52, 43-62.
- Liang, D., Cheng, L. ve Yeow, K. (2005b). Numerical study of the Reynolds-number dependence of two-dimensional scour beneath offshore pipelines in steady currents. *Coastal Engineering*, 32, 1590-1607.
- Lu, L., Li, Y. ve Qin, J. (2005). Numerical simulation of the equilibrium profile of local scour around submarine pipelines based on renormalized group turbulence model. *Ocean, Engineering*, 32, 2007-2019.
- Lucassen, R. J. (1984). *Scour underneath submarine pipelines*. Report No. PL-4 2A, Netherlands Marine Tech. Res., Netherlands Industrial Council for Oceanology, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, Sep. 1984.

- Meyer-Peter, E. ve Müller, R. (1948). Formula for bed-load transport. *Proceedings of the International Association for Hydraulic Research*, Second Meeting, Stockholm, 3, 39-65.
- Orgill, G., Barbas, S. T., Crossley, C. W. ve Carter, L. W. (1992). Current practice in determining allowable pipeline free spans. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, Calgary, Pipeline Technology, 5 (A), 139-145.
- Öner, A. A., Kırkgöz, M. S. ve Aköz, M. S. (2008). Interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed. *Ocean Engineering*, 35, 1492-1504.
- Smith, H. D. ve Foster, D. L. (2005). Modeling of flow around a cylinder over a scoured bed. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 131 (1), 14-24.
- Sümer, B. M, Mao, Y. ve Fredsoe, J. (1988). Interaction between vibrating pipe and erodible bed. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 114 (1), 81-92.
- Sümer, B.M. ve Fredsoe, J. (1990). Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 116, (3), 307-323.
- Sümer, B. M. ve Fredsoe, J. (1991). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1 (3), 189-194.
- Sümer, B. M., Truelsen, C., Sichmann, T. ve Fredsoe, J. (2001). Onset of scour below pipelines and self burial. *Coastal Engineering*, 42 (4), 213-235.
- Sümer, B. M. ve Fredsoe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. Singapore: World Scientific Publishing.

- Sümer, B. M. ve Fredsoe, J. (2006). *Hydrodynamics around cylindrical structures* (revised edition). Singapore: World Scientific Publishing.
- Yang, B., Gao, F.-P., Jeng, D.-S. ve Wu, Y.-X. (2008). Experimental study of vortex induced vibrations of a pipeline near an erodible sandy seabed. *Ocean Engineering*, 35, 301-309.
- Yeganeh-Bakhtiary, A., Kazeminezhad, M. H., Etemad-Shahidi, A., Baas, J. H. ve Cheng, L. (2011). Euler–Euler two-phase flow simulation of tunnel erosion beneath marine pipelines. *Applied Ocean Research*, 33, 137-146.
- Yeow, K. (2007). *Three dimensional scour along offshore pipelines*. PhD Thesis, School of Civil & Resource Engineering, the University of Western Australia.
- Zang, Z., Cheng, L., Zhao, M., Liang, D. ve Teng, B. (2009). A numerical model for onset of scour below offshore pipelines. *Coastal Engineering*, 56, 458-466.
- Zhao, M. ve Cheng, L. (2008). Numerical Modeling of Local Scour below a Piggyback Pipeline in Currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 134 (10), 1452-1463.
- Zhao, M. ve Cheng, L. (2010). Numerical investigation of local scour below a vibrating pipeline under steady currents. *Coastal Engineering*, 57, 397-406.