

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KIYI BÖLGESİNDE YER ALAN KAZIKLI
YAPILAR ETRAFINDA OLUŞAN DALGA
KAYNAKLI OYULMALARIN DENEYSEL VE
SAYISAL ARAŞTIRILMASI**

Vahid ABDİ

Ekim, 2020
İZMİR

**KIYI BÖLGESİNDE YER ALAN KAZIKLI
YAPILAR ETRAFINDA OLUŞAN DALGA
KAYNAKLI OYULMALARIN DENEYSEL VE
SAYISAL ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

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

Vahid ABDİ

Ekim, 2020

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

VAHİD ABDİ, tarafından **PROF. DR. BİROL KAYA** yönetiminde hazırlanan **“KIYI BÖLGESİNDE YER ALAN KAZIKLI YAPILAR ETRAFINDA OLUŞAN DALGA KAYNAKLI OYULMALARIN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Birol KAYA

Yönetici

Prof. Dr. Yalçın ARISOY

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Gökçen BOMBAR

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ebru ERİŞ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Birol KAYA'ya teşekkür ederim. Ayrıca, önerileriyle beni yönlendiren Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Yalçın ARISOY ve Prof. Dr. Davut ÖZDAĞLAR'a teşekkür ederim.

Doktora eğitimi boyunca desteklerini esirgemeyen ve çalışmalarımın her aşamasında emeği geçen değerli hocam Doç. Dr. Mustafa DOĞAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarında desteğini esirgemeyen ve bilgileri ile yol gösterildiğinde dolayı değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY'a, deneyler sırasında desteklerinden dolayı İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı, Teknisyeni İsa ÜSTÜNDAĞ'a ve teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Tez çalışmalarını, 215M245 numaralı araştırma projesi ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Vahid ABDİ

KIYI BÖLGESİNDE YER ALAN KAZIKLI YAPILAR ETRAFINDA OLUŞAN DALGA KAYNAKLI OYULMALARIN DENEYSEL VE SAYISAL ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Tez kapsamında, kıyı bölgesinde yer alan silindirik kazıklar ve büyük çaplı rüzgâr türbini ayakları etrafında dalga kaynaklı yerel zemin hareketleri, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Tekil kazıkların denendiği çalışmalara ilave olarak farklı yerleşim şekillerine sahip kazık grupları ve oyulmaya karşı koruyucu önlem içeren çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda iki farklı irilikte üniform kum taban malzemesi kullanılmış olup, sekiz farklı çapta kazık ile deneyler tamamlanmıştır. Deneylerde gerçekleştirilen, zamana bağlı oyulma derinliği ölçümleri, zamana bağlı su seviyesi ölçümleri (dalga kaydı) ve nihai durumda taban batimetrisi ölçümleri için ultrasonik yöntemle çalışan hassas ölçüm donanımları kullanılmıştır.

Deneysel araştırma sonuçları, silindirik kazıklar etrafında dalga etkisi ile oluşan yerel zemin hareketleri probleminde öngörüldüğü gibi Keulegan–Carpenter sayısı (KC) ve Shields parametresinin (θ) birlikte etkin rol oynadığını göstermektedir. Deneysel bulgular kullanılarak göreceli oyulma derinliği ve boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği parametreleri için yeni ampirik bağıntılar türetilmiştir. Tez kapsamındaki deneysel çalışmaları yansıtan sayısal modelin oluşturulması için Flow3D paket programı kullanılmış olup, sonuçların büyük oranda deneysel bulgular ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Düzenli dalgalar, silindirik kazıklar, nihai oyulma derinliği, oyulmanın zamana bağlı değişimi, oyulmanın zaman ölçeği, sayısal model, Flow3D

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF WAVE-INDUCED SCOURING AROUND THE PILED TYPE STRUCTURES LOCATED IN THE COASTAL ZONE

ABSTRACT

Within the scope of the thesis, local scour originating from waves around cylindrical piles and large scale wind turbine towers in coastal areas was investigated both experimentally and numerically. In addition to the studies in which singular piles were tested, some studies were also carried out on pile groups with different settlement patterns and on scour protection.

In the experiments, two different sizes of uniform sand bed material and eight different diameter piles were used. Precise measurement equipment using ultrasound method was used to measure wave heights, time-dependent scour depths and bottom bathymetry.

Experimental results showed that the Keulegan-Carpenter number (KC) and the Shields parameter (θ) play an effective role together, as in the case of scouring caused by wave effects around the cylindrical piles. Using experimental findings, new empirical relations have been developed for the parameters of relative scour depths and non-dimensional time scale. The calculated determination coefficients and scattering indices for these relations were evaluated statistically. Flow 3D software was used to develop the numerical model that reflects the experimental studies within the thesis; and, it is seen that results to a great extent agree with the experimental results.

Keywords: Regular waves, cylindrical piles, equilibrium scour depth, time dependent scour depths, time scale of the scour process, numerical model, Flow3D

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – MEVCUT ÇALIŞMALAR	3
BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ	21
3.1 Boyut Analizi	21
3.2 Deneysel Sonuçların Analizi İçin Kullanılan İstatistiksel Yöntemler.....	25
3.3 Dalga Kanalı.....	26
3.4 Dalga Üreteç	30
3.5 Ölçüm Aletleri.....	32
3.6 Deneylerin Yapılışı	34
3.7 Tekil Kazık Durumunda Yapılan Deneyler.....	43
3.8 Kazık Grupları Durumunda Yapılan Deneyler	46
3.8.1 Birbiri Ardına Yerleştirilen İki Kazık ile Yapılan Deneyleri	46
3.8.2 Yan yana Yerleştirilen İki Kazık ile Yapılan Deneyleri.....	49
3.8.3 Farklı Yerleşimli Dörtlü Kazık Grubu Deneyleri.....	50
3.8.4 Oyulmaya Karşı Koruyucu Önlemler İle gerçekleştirilen Deneyler	53

BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZLERİ 54

4.1 Nihai Oyulma Derinliği Analizleri.....	54
4.2 Zaman Ölçeği Parametresi İle yapılan Analizler	67
4.3 Zamana Bağlı Oyulma Ölçümleri İle yapılan Analizler	69
4.4 Deneyler sonrasında elde edilen nihai taban batimetrleri	76
4.5 Oyulmaya Karşı Önlem Deneyleri	81

BÖLÜM BEŞ – SAYISAL MODEL ÇALIŞMALARI..... 86

5.1 Sayısal Çözüm Yöntemi.....	86
5.1.1 Temel Denklemler	86
5.1.2 Kütle Korunum Denklemi	87
5.1.3 Momentum Denklemleri	88
5.1.4 Sediment Taşınımı.....	89
5.1.5 Türbülans Modelleri Ve Katı Madde Hareketinin Tanımlanması.....	90
5.2 Sayısal Model Sonuçları.....	92
5.2.1 Parametre Optimizasyonu ve Uygun Türbülans Modelinin Belirlenmesi	92
5.2.2 Tekil Kazık Sayısal Model Sonuçları.....	93
5.2.3 Kazık Grupları Sayısal Model Sonuçları.....	104

BÖLÜM ALTI – SAYISAL MODEL SONUÇLARININ DENEYSEL BULGULAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI..... 109

6.1 Deneysel Şartlar Dışındaki Koşullar İle Gerçekleştirilen Sayısal Model	119
--	-----

BÖLÜM YEDİ – SONUÇ VE ÖNERİLER..... 122

KAYNAKLAR 126

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Dey ve diğer. (2006) çalışmasında dalga ve akıntı durumunda kazık etrafındaki akım ve oyulma yapısı	4
Şekil 2.2 zamana bağlı oyulmanın değişimi ve zaman ölçeği parametresinin elde edilişi	5
Şekil 2.3 Sümer ve diğer. (1992a) çalışmasında S/D ile KC'nin değişimi	7
Şekil 2.4 Sumer ve Fredsoe (2001a) çalışmasında S/D ile Ucw parametresinin değişimi	8
Şekil 2.5 Sumer ve Fredsoe (2001b) çalışmasında D/L'nin farklı değerleri için S/D'nin KC ile değişimi	9
Şekil 2.6 Sumer ve Fredsoe (2002b) çalışmasında T^* boyutsuz değişkeninin θ parametresi ile değişimi	10
Şekil 2.7 Dey ve diğer. (2006) çalışmasında, korumasız ve üç farklı korumalı durum için kazık civarındaki oluşan vortekslerin değişimi	11
Şekil 2.8 Dey ve diğer. (2011) çalışmasında, kum içerisinde farklı kil oranları durumunda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen S/D–KC değişiminin yalnızca kum zemin için gerçekleştirilen önceki çalışma sonuçları ile karşılaştırılması	13
Şekil 2.9 Mostafa ve Agamy (2011) çalışmasında, S/D–Ucw değişiminin önceki çalışma sonuçları ile birlikte gösterimi	14
Şekil 2.10 Petersen ve diğer. (2012) çalışmasında, farklı θ değerli için T^* ile Ucw parametresinin değişimi ■: $\delta/D=2,7$ ve $\Theta= 0,13$, ve ●: $\delta/D=2,7$ ve $\Theta= 0,13$	15
Şekil 2.11 Wen Gang ve FuPing (2014) çalışmasında, S/D'nin ortalama akım hızına göre hesaplanan kazık Froude sayısına bağlı değişimi.	16
Şekil 2.12 Ahmad ve diğer. (2017) çalışmasında, yanana ve üçgen şeklinde yerleştirilen kazık grupları etrafında meydana gelen oyulma ve ölçülen serbest yüzey hızları	18
Şekil 2.13 Quezada ve diğer. (2018) çalışmasında elde edilen nihai oyulma derinliğinin deneysel ve sayısal karşılatırılması	19

Şekil 2.14 Ahmad ve diğer. (2020) çalışmasında, farklı zaman dilimindeki ceket etrafında ölçülen oyulma derinlikleri	20
Şekil 3.1 Dalga kanalının genel görünümü	27
Şekil 3.2 Dalga kanalında karşılıklı olarak yer alan gözlem pencereleri.	27
Şekil 3.3 Mengene yardımı ile sabitlenmiş kazıklar ve sönümleyici taşlar	28
Şekil 3.4 Dalga üreteç sisteminin motoru	28
Şekil 3.5 Dalga dubası genel görünümü	30
Şekil 3.6 Kazıkları sabit tutan mengene sistemi	30
Şekil 3.7 ULS 40-D cihazı ve USS20130 algılayıcıları	31
Şekil 3.8 UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) cihazı.....	32
Şekil 3.9 UltraLab UWS - The Lab Echosounder cihazı ve ölçüm sensörü.....	32
Şekil 3.10 Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği dalga kanalı ve arka arkaya yerleştirilen kazıkların ve UVP algılayıcılarının şematik gösterimi.	33
Şekil 3.11 Tekil kazık durumunda test kazığı civarındaki ölçüm donanımlarının şematik gösterimi	34
Şekil 3.12 Tekli kazık ve algılayıcıların yerleştirilmesi.....	34
Şekil 3.13 Nihai durumda kazık grubu etrafındaki taban batimetrisinin UWS cihazı ile belirlenmesi.	35
Şekil 3.14 Sinüzoidal dalga teorisinde temel tanımlar.....	36
Şekil 3.15 Dalga teorilerinin geçerlilik sınırlarını veren abak	37
Şekil 3.16 Hız ölçümünde kullanılan UVP algılayıcısı	38
Şekil 3.17 Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin elek analiz eğrileri.....	40
Şekil 3.18 Deneylerde kullanılan farklı kazık grup yerleşim şekilleri şematik plan görünümü	44
Şekil 3.19 Birbiri Ardına Yerleştirilen İki 63 mm Kazık görünümü	46
Şekil 3.20 Birbiri Ardına Yerleştirilen İki 110 mm Kazık görünümü	47
Şekil 3.21 Yan yana Yerleştirilen İki Kazık görünümü	47
Şekil 3.22 dalga ilerleme yönüne göre 45° açı ile Yerleştirilen Kazıklar	50
Şekil 3.23 Dalga ilerleme yönüne göre 90° açı ile Yerleştirilen Kazıklar	50
Şekil 3.24 1,5D çaplı yaka kullanılarak 160mm kazık etrafında oyulmaya karşı koruyucu önlem oluşturulması	41

Şekil 3.25 2D çaplı yaka kullanılarak 160mm kazık etrafında oyulmaya karşı koruyucu önlem oluşturulması	53
Şekil 4.1 Dalga etkisi ile deney sonrası 90 mm lik kazık etrafında ulaşan oyulma...	54
Şekil 4.2 Göreceli nihai oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi ve (4.3) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen eğri.....	56
Şekil 4.3 S/D'nin gözlenen ve (4.3) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı.	57
Şekil 4.4 S/D'nin gözlenen ve (4.1) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı	57
Şekil 4.5 Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile (4.1)ve (4.3) bağıntıları ile hesaplanan S/D ile KC sayısının değişimi.	59
Şekil 4.6 Göreceli nihai oyulma derinliğinin θ parametresi ile değişimi ve (4.5) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen eğri sabit KC eğrileri	60
Şekil 4.7 Göreceli nihai oyulma derinliğinin KC parametresi ile değişimi ve (5.5) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen eğri sabit θ eğrileri	60
Şekil 4.8 S/D'nin gözlenen ve (4.5) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı	61
Şekil 4.9 Göreceli nihai oyulma derinliğinin θ parametresi ile değişimi ve (4.7) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit KC eğrileri.	62
Şekil 4.10 S/D'nin gözlenen ve (4.7) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı	63
Şekil 4.11 Göreceli nihai derinliğinin Froude sayısı ile değişimi ve (4.9) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit KC eğrileri.....	64
Şekil 4.12 Göreceli nihai oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi ve (4.9) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit Froude eğrileri.....	65
Şekil 4.13 S/D'nin gözlenen ve (4.9) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı	65
Şekil 4.14 S/D'nin gözlenen ve (4.11) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı	66

Şekil 4.15 Boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği parametresinin θ parametresi ile değişimi ve (4.13) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen eğri sabit KC eğrileri	68
Şekil 4.16 T^* değerinin gözlenen ve (4.13) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı	69
Şekil 4.17 TK17 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	71
Şekil 4.18 TK22 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	72
Şekil 4.19 TK24 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	72
Şekil 4.20 TK30 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	73
Şekil 4.21 TK37 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	73
Şekil 4.22 TK63 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	74
Şekil 4.23 TK68 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	74
Şekil 4.24 TK77 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	75
Şekil 4.25 TK82 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış St / D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi	75

Şekil 4.26 TK68 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi	76
Şekil 4.27 TK64 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi	77
Şekil 4.28 GY09 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi.....	77
Şekil 4.29 GY18 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi.....	78
Şekil 4.30 GA33 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi.....	79
Şekil 4.31 GA34 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi.....	79
Şekil 4.32 GD02 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi.....	80
Şekil 4.33 GD12 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi.....	80
Şekil 4.34 Korumasız TK17 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY02 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması	82
Şekil 4.35 Korumasız TK18 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY03 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması	82
Şekil 4.36 Korumasız TK27 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY12 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 4.37 Korumasız TK30 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY15 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 4.38 Korumasız TK50 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı KY18 ve 2,0·D yaka çaplı KY21 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.39 Korumasız TK55 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı KY24 ve 2,0·D yaka çaplı KY27 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 4.40 Korumasız TK60 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı KY30 ve 2,0·D yaka çaplı KY33 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.1 Hesap hacmi ve tanımlar.....	87
Şekil 5.2 Flow3D programında türbülans modelleri.....	90

Şekil 5.3 Flow3D ile D=200 mm tekil kazık modelinin ve ölçüm sondalarının tanımlanması	93
Şekil 5.4 Flow3D ile yapılan D=200 mm çaplı tekil kazık modeli ve ölçüm sondaları	95
Şekil 5.5 D=200 mm çaplı tekil kazık modeli 4 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma derinlikleri	95
Şekil 5.6 D=200 mm çaplı tekil kazık modeli 5 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma derinlikleri	96
Şekil 5.7 D=200 mm çaplı tekil kazık modeli 6 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı su seviyeleri (dalga kaydı)	96
Şekil 5.8 Flow3D ile yapılan D=950 mm tekil kazık sayısal modeli ve ölçüm sondaları	97
Şekil 5.9 D=950 mm tekil kazık modeli 4 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma derinlikleri	98
Şekil 5.10 D=950 mm tekil kazık modeli 1315 s'lik sayısal benzeşim sonunda tabanda oluşan oyulmalar.....	98
Şekil 5.11 D=63 mm, Hw=20 cm, Tw=2,7 s ve d50=1,85 mm koşullarında oluşturulan sayısal modelde zamana bağlı oyulma derinlikleri..	99
Şekil 5.12 D=63 mm, Hw=20 cm, Tw=2,7 s ve d50=1,85 mm koşullarında oluşturulan sayısal modelde zamana bağlı oyulma derinlikleri..	99
Şekil 5.13 D=110 mm, Hw=20 cm, Tw=2,7 s ve d50=0,55 mm koşullarında oluşturulan sayısal modelde zamana bağlı oyulma derinlikleri	100
Şekil 5.14 D=160 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm çaplı taban malzemesi zamana bağlı oyulma derinlikleri	101
Şekil 5.15 D=200 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi için zamana bağlı oyulma derinlikleri	101
Şekil 5.16 D=680 mm kazık çapı, Hw=17 cm dalga yüksekliği, Tw=3,1 s dalga periyodu ve d50=0,55 mm taban malzemesi dane çapı durumu için kurulan sayısal modele ait oyulma	102

Şekil 5.17 D=680 mm kazık çapı, Hw=17 cm dalga yüksekliği, Tw=3,1 s dalga periyodu ve d50=0,55 mm dane çapı durumunda kazık etrafındaki oyulmanın t= 1500 s anındaki üç boyutlu görünümü.....	103
Şekil 5.18 D=120 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi için zamana bağlı oyulma.....	103
Şekil 5.19 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş ikili kazık grubu, ara mesafe D/2, Hw=20 cm, Tw=2,7 s ve d50=1,85 mm için Flow3D ile kurulan sayısal model.....	104
Şekil 5.20 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş ikili kazık grubu, ara mesafe D/2, Hw=20 cm, Tw=2,7 s ve d50=1,85 mm için Flow3D'den elde edilen 1 nolu kazık ön yüzündeki zamana bağlı oyulma derinlikleri.	105
Şekil 5.21 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş ikili kazık grubu, ara mesafe D/2, Hw=20 cm, Tw=2,7 s ve d50=1,85 mm için Flow3D'den elde edilen 2 nolu kazık ön yüzündeki zamana bağlı oyulma derinlikleri.	105
Şekil 5.22 Yan yana iki kazık durumunda birinci ve ikinci kazık konumu	106
Şekil 5.23 Şekil 5.22'de verilen sayısal modelin t=614 s anındaki görünümü	107
Şekil 5.24 Yan yana D/2 aralığında, D=90 mm çaplı kazıklar, Hw=28 cm dalga yüksekliği, Tw=1,7 s dalga periyodu ve d50=1,85 mm dane çapı durumu için yapılan sayısal çözüme ait 1 numaralı kazığın ön yüzündeki zamana bağlı oyulma değerleri.....	108
Şekil 5.25 Yan yana D/2 aralığında, D=90 mm çaplı kazıklar, Hw=28 cm dalga yüksekliği, Tw=1,7 s dalga periyodu ve d50=1,85 mm dane çapı durumu için yapılan sayısal çözüme ait 2 numaralı kazığın ön yüzündeki zamana bağlı oyulma değerleri.....	108
Şekil 6.1 D=200 mm çaplı tekil kazık, Hw=13 cm yüksekli ve Tw=3,6 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm medyan çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak belirlenen sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması	109
Şekil 6.2 D=950 mm çaplı tekil kazık, Hw=13 cm yüksekli ve Tw=3,6 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm medyan çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen	

deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak belirlenen sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması.	110
Şekil 6.3 D=63 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması	111
Şekil 6.4 D=110 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması	112
Şekil 6.5 D=120 mm çaplı kazık, Hw=17 cm yükseklikli ve Tw=3,1 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması	112
Şekil 6.6 D=160 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları.....	113
Şekil 6.7 D=200 mm çaplı kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma.....	114
Şekil 6.8 D=980 mm çaplı kazık, Hw=17 cm yükseklikli ve Tw=3,1 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları.....	114
Şekil 6.9 D=500 mm çaplı kazık, Hw=25 cm yükseklikli ve Tw=2 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları.	114
Şekil 6.10 D=680 mm çaplı kazık, Hw=17 cm yükseklikli ve Tw=3,1 s periyotlu dalga ve d50=0,55 mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen	

deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları	117
Şekil 6.11 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilen kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi durumunda 1 nolu kazığın ön tarafında ölçülen ve Flow3D ile hesaplanan zamana bağlı oyulma derinlikleri.....	117
Şekil 6.12 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilen kazık, Hw=20 cm yükseklikli ve Tw=2,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi durumunda 2 nolu kazığın ön tarafında ölçülen ve Flow3D ile hesaplanan zamana bağlı oyulma derinlikleri.....	117
Şekil 6.13 Yan yana yerleştirilen ve aralarında D/2 kadar mesafe olan D=90 mm çaplı iki kazık, Hw=28 cm yükseklikli ve Tw=1,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi için 1 nolu kazık önünde sayısal benzetim ve deneyde ölçülen oyulma değerleri	118
Şekil 6.14 Yan yana yerleştirilen ve aralarında D/2 kadar mesafe olan D=90 mm çaplı iki kazık, Hw=28 cm yükseklikli ve Tw=1,7 s periyotlu dalga ve d50=1,85 mm çaplı taban malzemesi için 2 nolu kazık önünde sayısal benzetim ve deneyde ölçülen oyulma değerleri	119
Şekil 6.15 D=750 mm çaplı kazık, Hw=28 cm yükseklikli ve Tw=1,7 s periyotlu dalga ve d50=0,2 mm çaplı taban malzemesi durumunun yansıtıldığı sayısal model	120
Şekil 6.16 D=750 mm çaplı kazık, Hw=28 cm yükseklikli ve Tw=1,7 s periyotlu dalga ve d50=0,2 mm çaplı taban malzemesi durumunda zamana bağlı oyulma derinlikleri	121

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Quezada ve diğer. (2018) çalışmasında kullanılan deneysel ve sayısal veriler	19
Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan farklı tipteki dalgalara ait ölçülen karakteristik değerler.....	37
Tablo 3.2 Farklı dalga tipleri için U_m , ξ ve Ursell parametresi değerleri	39
Tablo 3.3 Tez kapsamında tekil kazıklar ile gerçekleştirilen deneylerin listesi	41
Tablo 3.4 Birbiri ardına yerleştirilen kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerin özellikleri.....	45
Tablo 3.5 Yan yana yerleştirilen kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerin özellikleri.....	48
Tablo 3.6 Dörtlü kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerin özellikleri	49
Tablo 3.7 Tekil kazık durumunda yaka kullanılarak oyulmaya karşı koruyucu önlem deneyleri.....	52
Tablo 3.7 Tekil kazık durumunda yaka kullanılarak oyulmaya karşı koruyucu önlem deneyleri.....	51

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Su yapıları mühendisliğinde önemli yeri olan kazıklı temeller hemen hemen bütün kıyı, deniz yapılarında kullanılmaktadır. Bunlar genel olarak rıhtım, açık deniz petrol platformları, limanlar, gemi yanaşma iskeleleri ve benzeridir. Silindirik kazıklar, uzun süredir kıyı bölgelerinde iskele ve rıhtım yapılarının temellerini oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu yapılar genellikle belirli biçimde dizilmiş grup halinde kıyı bölgesi deniz tabanına oturmaktadır. Bu yapılara ilave olarak, son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte açık deniz rüzgâr türbinleri uygulamaları başlamış olup, karasal alanda tesis edilenlere oranla çok daha büyük kurulu güce sahip olanları açık denizlere kurulmaktadır. Buradaki temel iki kazanımdan birincisi deniz ortamında kıyı bölgesinden taşıma kapasitesinin karasal ortama göre oranlara çok daha büyük olması ve daha büyük boyutlu türbinlerin kurulabilmesi ve dolayısı ile büyük kurulu güçlerin elde edilmesidir. İkincisi ise, deniz yüzeyindeki rüzgâr rejiminin karasal bölgelerde topoğrafyadan dolayı kırılmalıklar gösteren rüzgâr rejimine oranla çok daha düzenli olmasıdır.

Yakın kıyı bölgesinde yer alan ve aşınabilir bir deniz tabanı üzerinde bulunan silindirik kazıkların etrafında, dalga veya akıntı etkisi sonucu yerel zemin hareketleri meydana gelebilmektedir. Tekil kazık durumunda, oyulma olarak gözlenen bu yerel zemin hareketleri sonucunda zemin ile temasta olan kazık yüzey alanı azalmakta ve bu durum taşıma gücünü zemin ile arasındaki kayma gerilmesi ile sağlayan sürtünme kazıkları için olumsuz bir durum oluşturmaktadır. Taşıma gücü sorunları göçmelere varan hasarları beraberinde getirebilmektedir.

Bugüne kadar yapılan araştırmaların büyük bir kısmında, kararlı akım etkisi ile kazıklı kıyı yapıları etrafındaki akım yapısı ve oyulmalar incelenmiştir. Bununla birlikte, dalga etkisi altında kazıkların etrafındaki oyulmaların incelendiği çalışmalarda genel olarak nihai değerlerin ölçüldüğü ve zaman içerisindeki değişimin değerlendirilmediği karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca büyük çaplı kazıklar (dalga türbini ayakları gibi) etrafındaki oyulma sürecinde difraksiyon etkisi de kapsamlı bir

şekilde ele alınmamıştır. Literatürde mevcut çalışmaların bir diğer ortak özelliği de nispeten ince deneli taban malzemelerinin kullanılmış olmasıdır.

Tez çerçevesinde deneysel çalışmalarda, ultrasonik yöntem ile çalışan ölçüm donanımları kullanılmıştır. Deneyler, farklı kazık çapları, iki taban malzemesi ve farklı dalga periyotları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı dizilişte kazık grubu durumu için de deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, nihai oyulma derinliği, zaman ölçeği ve zamana bağlı olan oyulma derinlikleri ile ilgili analizlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte özellikle kazık grupları ve büyük çaplı kazıklar için nihai taban batimetrisi de ölçülerek değerlendirilmiştir. Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların son grubunu oyulmaya karşı koruyucu önlemler ile yapılan deneyler oluşturmakta olup bu kapsamda yaka kullanılarak farklı durumlar için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar ile birlikte sayısal model çalışmaları da yapılmıştır. Bu kapsamda, lisanslı olarak Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı bünyesinde yer alan Flow3D paket programı kullanılmıştır. Öncelikli olarak Flow3D paket programında, hem tekil kazık hem farklı kazık grupları durumu için deneysel şartları yansıtacak şekilde sayısal modeller hazırlanmıştır.

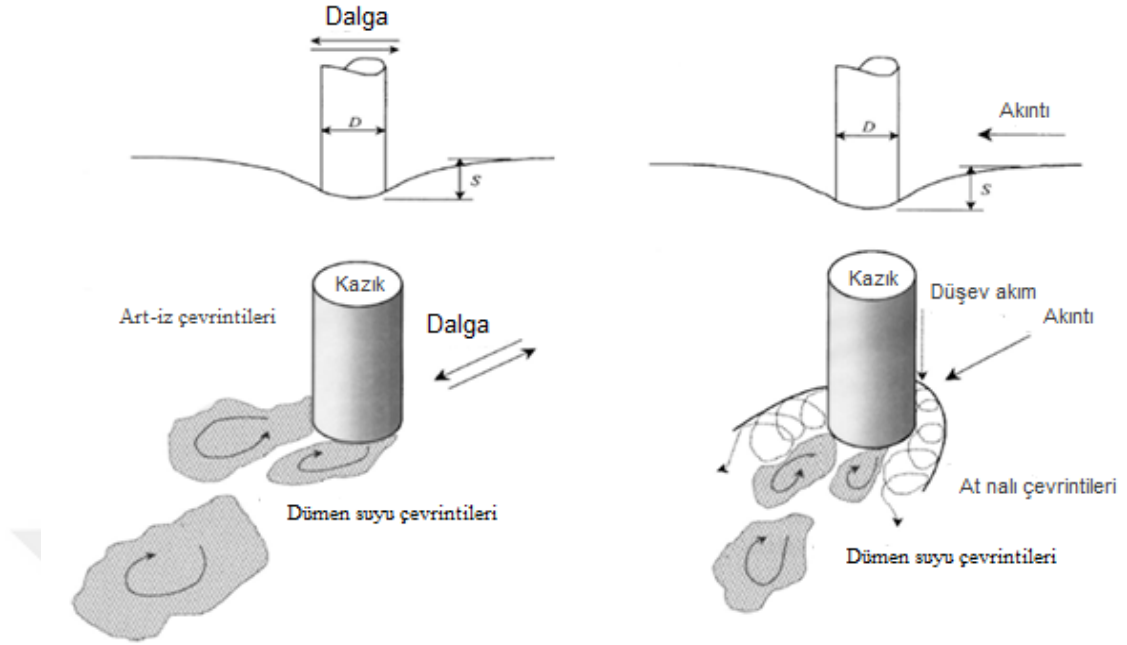
BÖLÜM İKİ

MEVCUT ÇALIŞMALAR

Kıyı yapıları deniz ortamıyla sürekli olarak dinamik bir etkileşim içinde olduğundan bu dinamik etkiler yapıda çeşitli olumsuzluklara yol açabilmektedir. Bu olumsuzluklardan biri ise dalga ve akıntıların etkisiyle kazıkların dibinde oluşacak oyulmalardır. Bu oyulmalar kazığın taşıma gücünün düşmesine ve daha da ilerlediğinde istenmeyen yapısal hasarlara neden olabilmektedir.

Şekil 2.1’de dalga ve akıntı etkisi durumunda kazık etrafında oluşan akım ve oyulma yapısı gösterilmektedir. Dalga durumunda ise dalga tepesi kazığın bulunduğu kesitte dalga ilerleme yönüne göre kazığın ön bölümünde (dalgaın geldiği taraf) düşey akımlar ve at nalı çevrıntiler oluşmakta iken arka bölümünde art-iz çevrıntiler oluşmaktadır. Dalga çukuru kazığın bulunduğu kesitten geçerken, dalga tepesi geçişinde oluşan olayların yerleri değişmektedir. Kazığın geniş çaplı kazık olması ($D/L > 0,1$ D kazık çapı ve L dalga boyu olmak üzere) durumunda bu etkenlere bir de difraksiyon etkisi dâhil olmaktadır. Rüzgâr türbini ayakları genel olarak büyük çaplı kazık özelliği taşımaktadır.

Aşınabilir deniz tabanı üzerinde yer alan kazık etrafında oluşumu belirtilen unsurlar ile yerel zemin hareketleri yaşanabilmektedir. Bu durumda taban malzemesinin harekete başlaması için etken boyutsuz büyüklük olan ve (2.1) eşitliği ile gösterilen Shields parametresi (θ) ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2.1 Dey ve diğer. (2006) çalışmasında dalga ve akıntı durumunda kazık etrafındaki akım ve oyulma yapısı

$$\theta = U_{fm}^2 / (g(s-1)d_{50}) \quad (2.1)$$

Burada, U_{fm} dalga etkisi ile tabanda oluşan kayma hızının en büyük değerini olup ve (3.13) eşitliği ile hesaplanmaktadır, g yerçekimi ivmesini, s göreceli deniz taban malzemesi yoğunluğunu ve d_{50} deniz taban malzemesi dane medyan çapını simgelemektedir. Kazık etrafında meydana gelen oyulma, $\theta > \theta_{cr}$ olduğu ve kazıktan uzak bölgelerde de taban malzemesi hareketinin yaşandığı hareketli taban oyulması ya da $\theta < \theta_{cr}$ olduğu ve yalnızca kazığın etrafındaki zeminin hareket ettiği temiz su oyulması olarak gerçekleşebilmektedir.

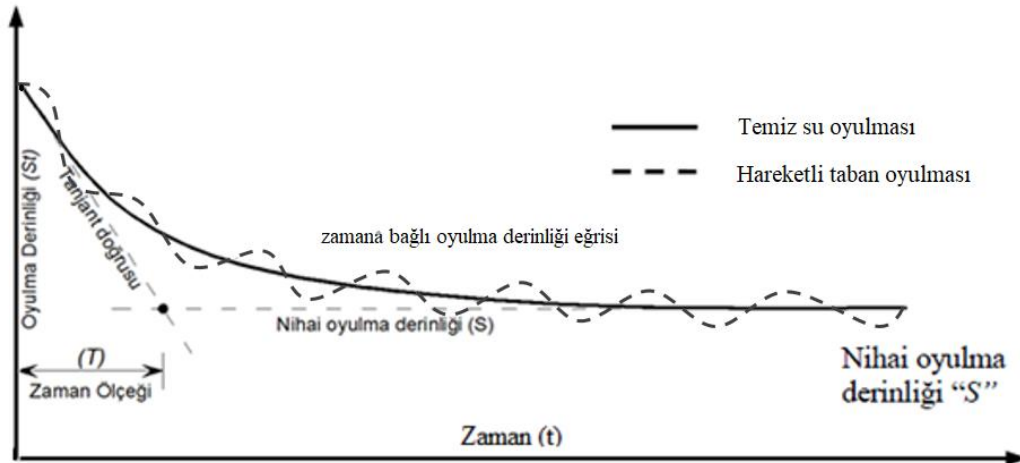
Dalga durumunda kazık etrafındaki akım ve oyulma sürecinde etkin bir diğer parametre ise (2.2) eşitliği ile verilen Keulegan-Carpenter (KC) sayısıdır.

$$KC = U_m T_w / D \quad (2.2)$$

Burada, U_m dalga durumu için tabanda oluşan su parçacığı yatay hızlarının en büyük değerini, T_w dalga periyodunu ve D kazık çapını simgelemektedir. Kazık etrafındaki nihai oyulma derinliği (S) değerinin değişiminin belirlenmesine yönelik çalışmalarda elde edilen bulgular göreceli nihai oyulma derinliği (S/D) ve KC sayısı arasındaki değişimi ortaya koyacak şekilde verilmektedir. Sümer ve diğer. (1992-a) çalışmasında, $D/L > 0,1$ durumu ve $KC > 6$ için S/D ile KC sayısı arasında (3.3) eşitliği ile verilen deneysel bağıntı önerilmiştir. Sümer ve diğer. (1993) çalışmasında ise dairesel olmayan kazıklar etrafındaki göreceli nihai oyulma derinliği ile KC sayısı arasında farklı bağıntılar üretmiştir.

$$S/D = 1,3 (1 - e^{-0,03(KC-6)}) \quad (2.3)$$

Şekil 2.2’de şematik olarak gösterildiği gibi zamana bağlı oyulma derinliği (S_t), oyulmanın denge durumuna ulaşması için geçen zaman olarak tanımlanabilen zaman ölçeği parametresi (T) ve boyutsuz zaman ölçeği (T^*) ile KC sayısı ve θ parametresi arasındaki ilişki Sümer ve diğer. (1992-b) deneysel çalışmasında araştırılmış ve sonuç olarak (2.4) eşitliği ile verilen deneysel bağıntı türetilmiştir.



Şekil 2.2 Zamana bağlı oyulmanın değişimi ve zaman ölçeği parametresinin elde edilişi

$$T^* = 10^{-6} (KC/\theta)^3 \quad (2.4)$$

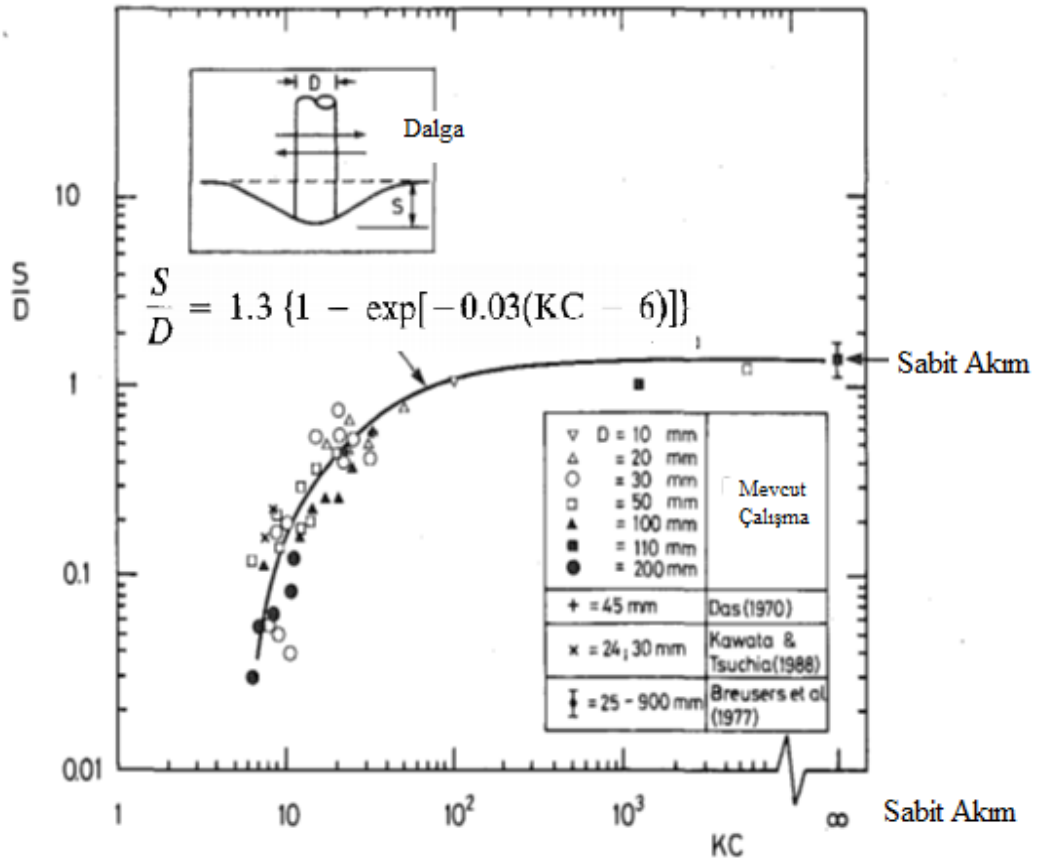
Literatürde kazıklı kıyı yapıları etrafında oluşan akımın ve yerel zemin hareketlerinin incelenmesi konusu geniş bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Temel olarak çalışmalar, silindirik kazıklar etrafında bozulan akım yapısının ve oluşan yerel zemin hareketlerinin incelendiği çalışmalar olarak ayrılmaktadır. Diğer bir sınıflandırmayı ise kazık civarında bozulan akımın kararlı akıntı ya da dalga kaynaklı oluşumuna göre yapılmaktadır. Araştırma yöntemi olarak da, deneysel ve sayısal çalışmalar şeklinde iki gruba ayırmak mümkündür.

Dalga ve kararlı akıntı nedeni ile kazıklı kıyı yapıları etrafında meydana gelen oyulma deneysel ve sayısal olarak uzun süredir araştırılmaktadır. Konu ile ilgili temel araştırmalardan biri de, Mutlu Sümer ve Jorgen Fredsoe tarafından (2002) yılında yazılan, silindirik yapılar etrafında oluşan akım ve kuvvetlerin hidrodinamiği inceleyen kitaptır. Bu kitapta değinen konular; kararlı akıntıya maruz kalan silindirlerin etrafında meydana gelen akış ve kuvvetler, düzenli dalgaya ve düzensiz dalgaya maruz kalan silindir kazığa etki eden kuvvet, difraksiyon etkisi, kazık etrafında meydana gelen akışın numerik olarak araştırması sıralanabilir. Bununla birlikte, açık deniz yapıları etrafında ve kıyı boyunca meydana gelen oyulma mekanizmasını değerlendirmişlerdir.

Sümer ve Fredsoe (2002) kitabında yer verdikleri bölümler, oyulmanın başlangıcı, tekil kazıklar etrafında yerel zemin hareketleri, farklı dizilimi kazık grupları etrafındaki yerel zemin hareketleri, oyulmaya karşı koruyucu önlemler ve matematiksel modelleme olarak sıralanabilir.

Kazık etrafındaki nihai oyulma derinliği (S) değerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda elde edilen bulgular, göreceli nihai oyulma derinliği (S/D) ile KC sayısı arasındaki değişimi ortaya koyacak şekilde verilmektedir. Şekil 2.3’de ise Sümer ve diğer. (1992a) çalışmasında elde edilen deneysel veriler ile daha önce gerçekleştirilmiş sınırlı sayıdaki çalışma sonuçları bir arada sunulmaktadır. Sümer ve

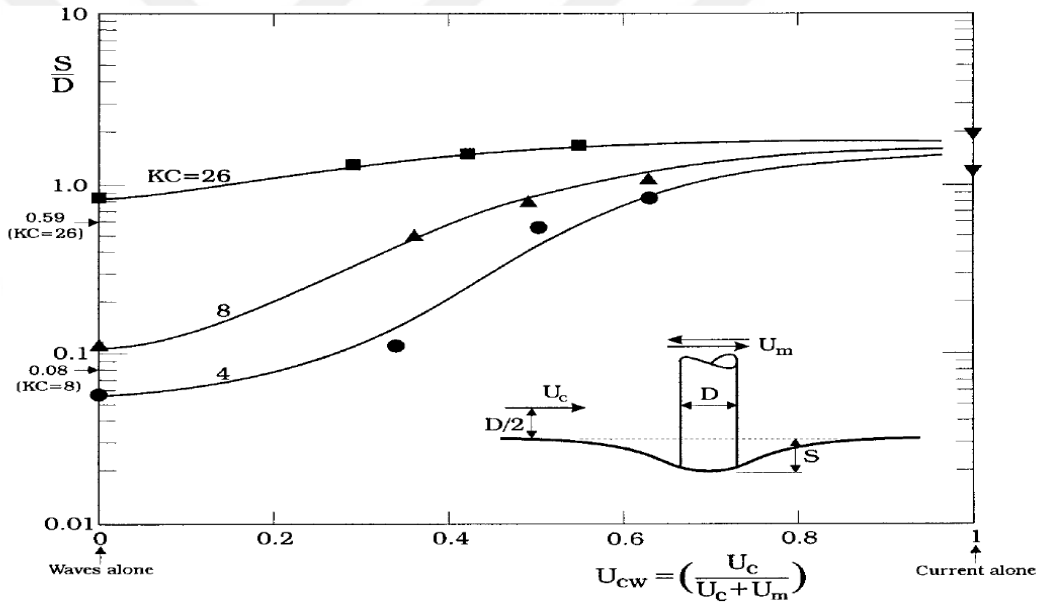
diğer. (1992a) çalışmasında, D kazık çapı ve L dalga boyu olmak üzere $D/L > 0,1$ durumu ve $KC > 6$ için S/D ile KC sayısı arasında (2.3) eşitliği ile verilen deneysel bağıntı önerilmiştir. Sümer ve diğer. (1993) çalışmasında ise dairesel olmayan kazıklar etrafındaki göreceli nihai oyulma derinliği ile KC sayısı arasında farklı bağıntılar üretilmiştir.



Şekil 2.3 Sümer ve diğer. (1992a) çalışmasında S/D ile KC 'nin değişimi

Oyulmanın nihai değerine ulaşması için geçen zaman olarak tanımlanabilen zaman ölçeği parametresi (T) durumunda ise boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği (T^*) ile KC sayısı ve θ parametresi arasındaki ilişki Sümer ve diğer. (1992b) çalışmasında araştırılmış ve sonuç olarak (2.3) eşitliği ile verilen deneysel bağıntı türetilmiştir.

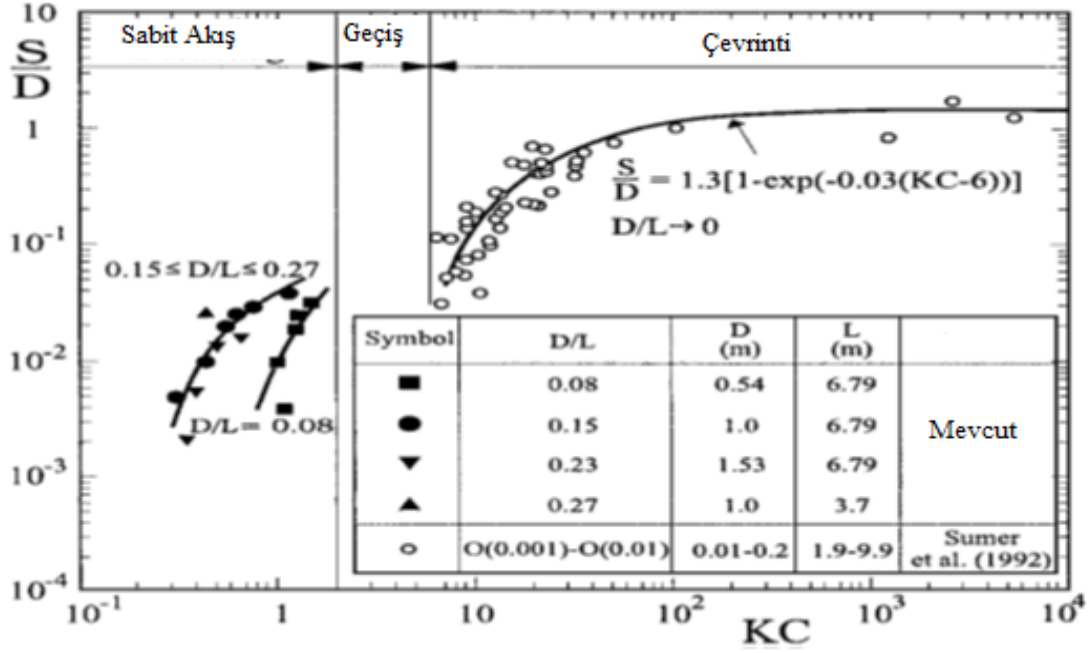
Sumer ve Fredsoe (2001a) çalışmasında, dalga ve akıntı ortamındaki kazık etrafındaki oyulma için deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada; dalga ve akıntının birlikte etkimesiyle kazık etrafındaki oyulma deneysel olarak araştırılmıştır. Akıntıya dik yöndeki dalgalar ve akıntı ile eş yönlü dalgaların her ikisiyle yürütülen deneylerde, düzensiz dalgalar kullanılmıştır. Ölçülen oyulma derinliği, KC sayısının çeşitli değerleri için $U_{cw}=U_c/(U_c+U_m)$ (U_c akım hızı ve U_m deniz tabanındaki yörüngesel hızın maksimum değeri) denkleminin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Deneylerde KC sayısı 5 ile yaklaşık 30 arasında ve U_{cw} ise 0 ile 1 arasında değişmektedir (Şekil 2.4). Sonuç olarak, akıntı bileşeni arttıkça oyulma derinliğinin arttığı ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 2.4 Sumer ve Fredsoe (2001a) çalışmasında S/D ile U_{cw} parametresinin değişimi

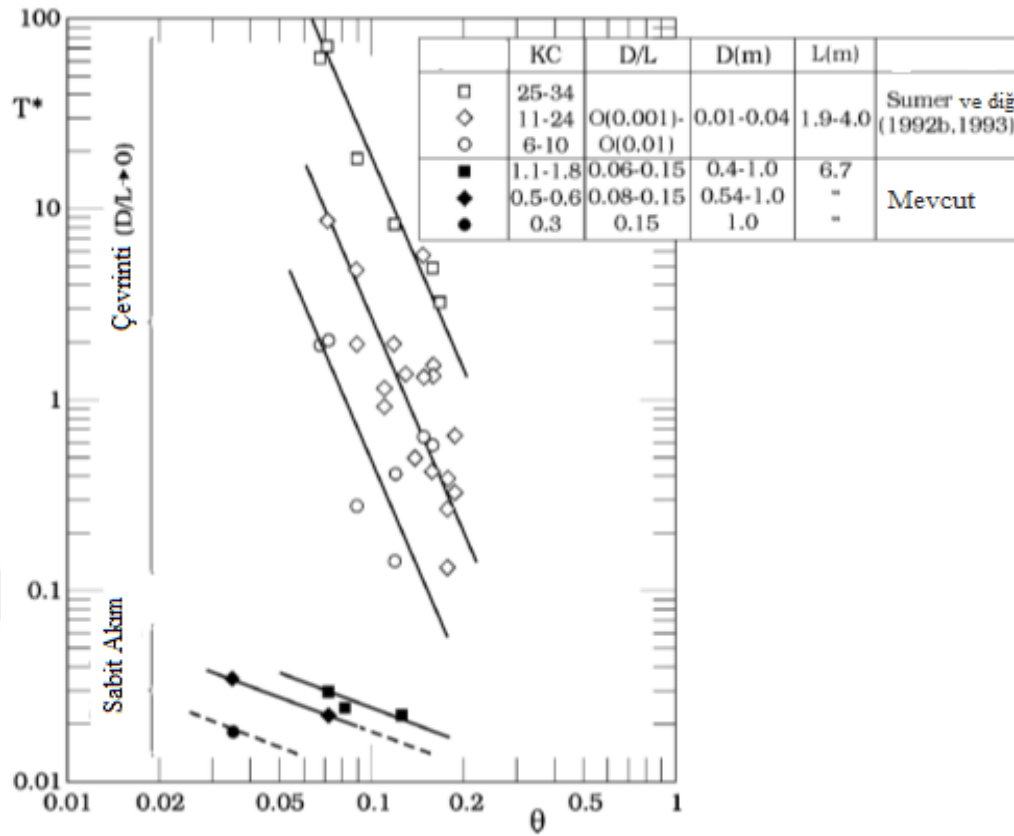
Sumer ve Fredsoe (2001b) çalışmasında, geniş ölçekli ($D/L > 0,1$) kazıklar etrafında oluşan akım yapısı ve bunun sonucundaki oyulmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma temel olarak, sabit taban etrafındaki akım yapısının belirlenmesi ve hareketli tabanda oluşan oyulmalar olarak ikiye ayrılmıştır. Deneyler sonucunda, geniş ölçekli kazık durumunda oyulmanın KC sayısına ilave olarak difraksiyon parametresi ve D/L oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Şekil

2.5’de sürekli akım ve ortaya gelen çevrintiler durumunda Oluşan oyulma derinliklerinin bu boyutsuz parametrelerine bağlı olarak olarak değiştiği rapor edilmiştir.



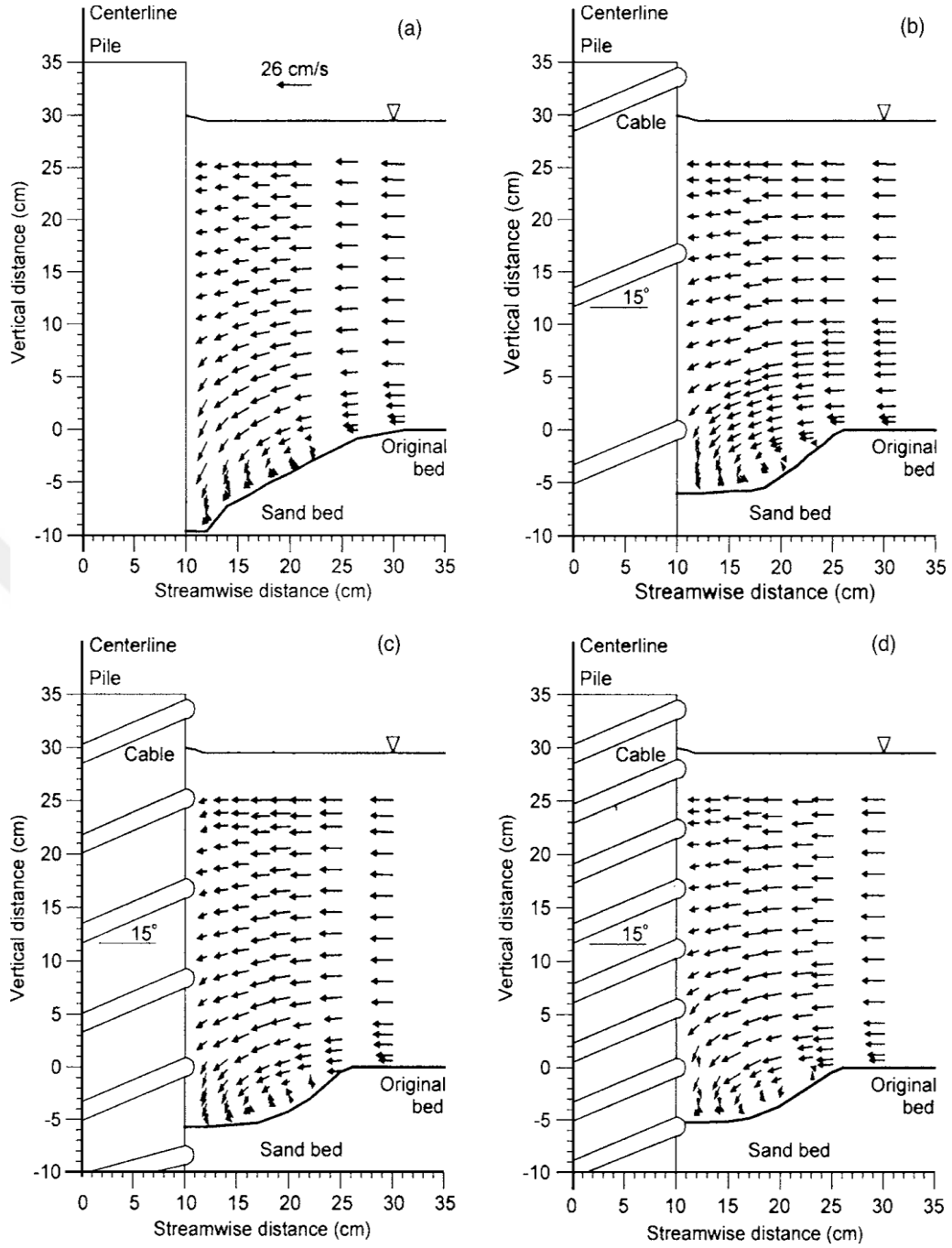
Şekil 2.5 Sumer ve Fredsoe (2001b) çalışmasında D/L 'nin farklı değerleri için S/D 'nin KC ile değişimi

Sumer ve Fredsoe (2002b) çalışmasında, büyük ölçekli (geniş) kazıkları etrafındaki oyulma durumunda zaman ölçeği parametresinin değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, zaman ölçeği parametresinin KC sayısı ve θ parametresine ilave olarak difraksiyon parametresi (D/L) ile değiştiği sonucuna varılmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Sumer ve Fredsoe (2002b) çalışmasında T^* boyutsuz değişkeninin θ parametresi ile değişimi

Dey ve diğer. (2006) çalışmasında, dalga ve akıntı etkisi altında üniform kum taban malzemesi içerisinde yer alan düşey kazıklar etrafında oluşan oyulmaların azaltılabilmesi amacıyla oluşturulan yöntemler denenmiştir. Deneyler hem dalga hem kararlı akıntı durumların hareketli taban oyulması ve temiz su oyulması koşullarında gerçekleştirilmiştir. Oyulmayı azaltıcı önlem olarak kazığın her iki tarafında bulunan ve vorteksin gelişimi engelleyici levhalar ile kazık yüzeyini pürüzlü hale getiren spiral yivler kullanılmıştır (Şekil 2.7). Dalga durumu için iki farklı kazık çapı ve 10 farklı dalga periyodu olmak üzere her iki önlem için 20 deney yapılmıştır. Nihai oyulma derinlikleri engelleyici levhalar kullanarak % 61,6 ve spiral yivler kullanarak % 51,1 azalma göstermiştir.



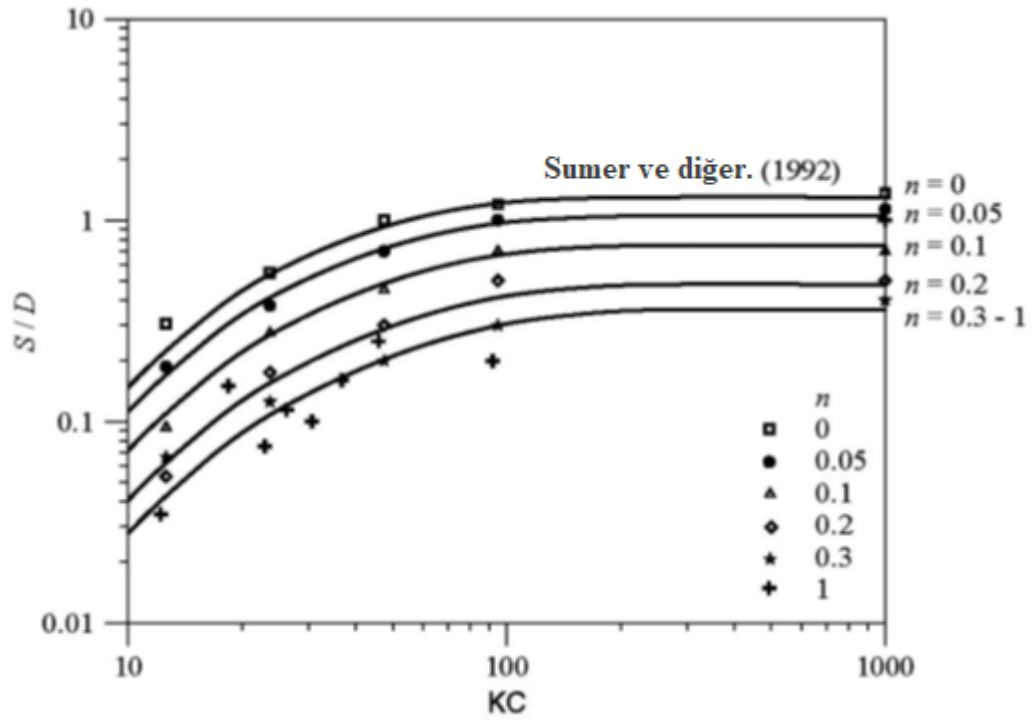
Şekil 2.7 Dey ve diğer (2006) çalışmasında, korumasız ve üç farklı korumalı durum için kazık civarındaki oluşan vortekslerin değişimi

Sumer ve diğer. (2007) çalışmasında deniz zemini olarak, kum, orta yoğunlukta silt ve yoğun silt içerisinde yer alan bir kazık etrafında dalga etkisi ile oluşan oyulmalar incelenmiştir. Çalışma kapsamında, $D_r=0,74\text{mm}$ ve $D_r=0,38\text{mm}$

yoğunluklu silt ve $D_r=0,23$ mm yoğunluklu kum malzemeler kullanılmıştır (D_r göreceli yoğunluğu ifade etmektedir). Gerçekleştirilen deneyler sonucunda orta yoğunlukta silt ve kum, yoğun silt ile değiştirildiğinde oyulma derinliğinin 1,6 ile 2 kat arasında arttığını gözlenmiştir. Bu durum, zemin özelliklerinin de oyulmaya etkisi olduğunu göstermektedir. Dalgaya maruz kalan kazıklar için oyulma derinliği KC sayısı θ parametresine göreceli yoğunluk bağılı olarak deriştirgi görülmüştür.

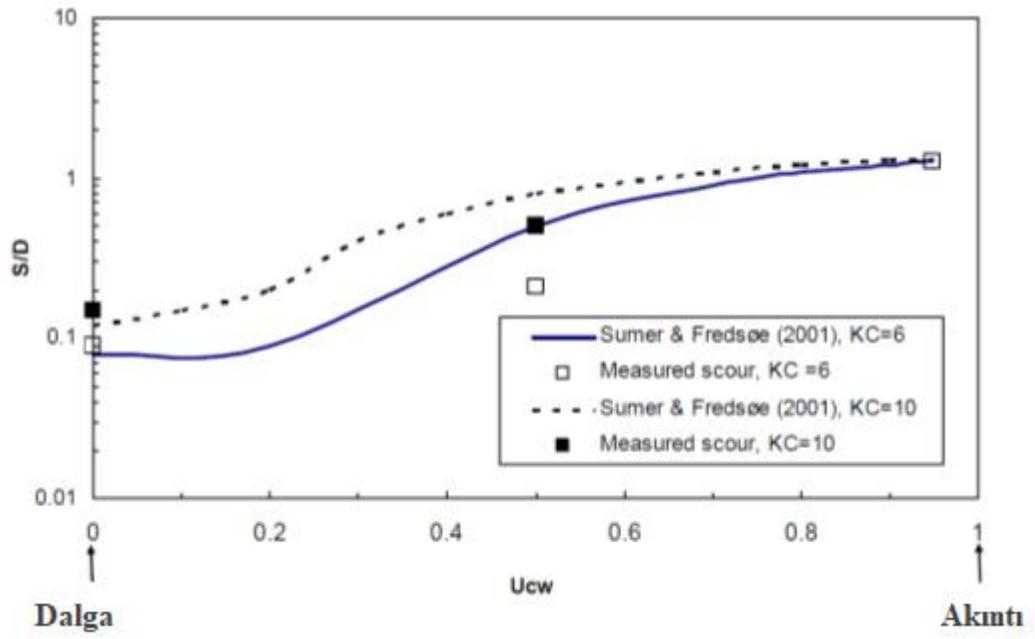
Harris ve diğer. (2010) çalışmasında, deniz ortamında bulunan yapılar etrafında oluşan oyulmaların zaman içerisindeki gelişiminin kestirimi için (scour Time Evolution Predictor) yöntemini kullanarak meydana gelen oyulmanın zaman içinde gelişimi tahmini üzerine model geliştirilmesi yapmışlardır. Tahmin için geliştirilen modelin özellikle açık deniz rüzgâr türbini ayakları etrafında oluşacak oyulmaların kestiriminde kullanılabileceği belirtilmektedir. Bununla birlikte, model hem dalga, hem akıntı hem de dalga/akıntı durumlarında çalışabildiğinden, köprü ayakları etrafındaki oyulmalar içinde kullanılabilir olduğu vurgulanmaktadır.

Dey ve diğer. (2011) çalışmasında, hem killi deniz tabanı hem kil-kum karışımı durumundaki deniz tabanı için kazık etrafında dalga etkisi ile oluşan nihai oyulmalar araştırılmıştır. Çalışma, piston tip dalga üretici ile donatılmış ve belirli bir bölgesi sediment çukuru için ayrılmış bir dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kum-kil karışımındaki kil oranının (n) değeri kadar artması ile oyulma derinliğinin azaldığını göstermektedir (Şekil 2.8).



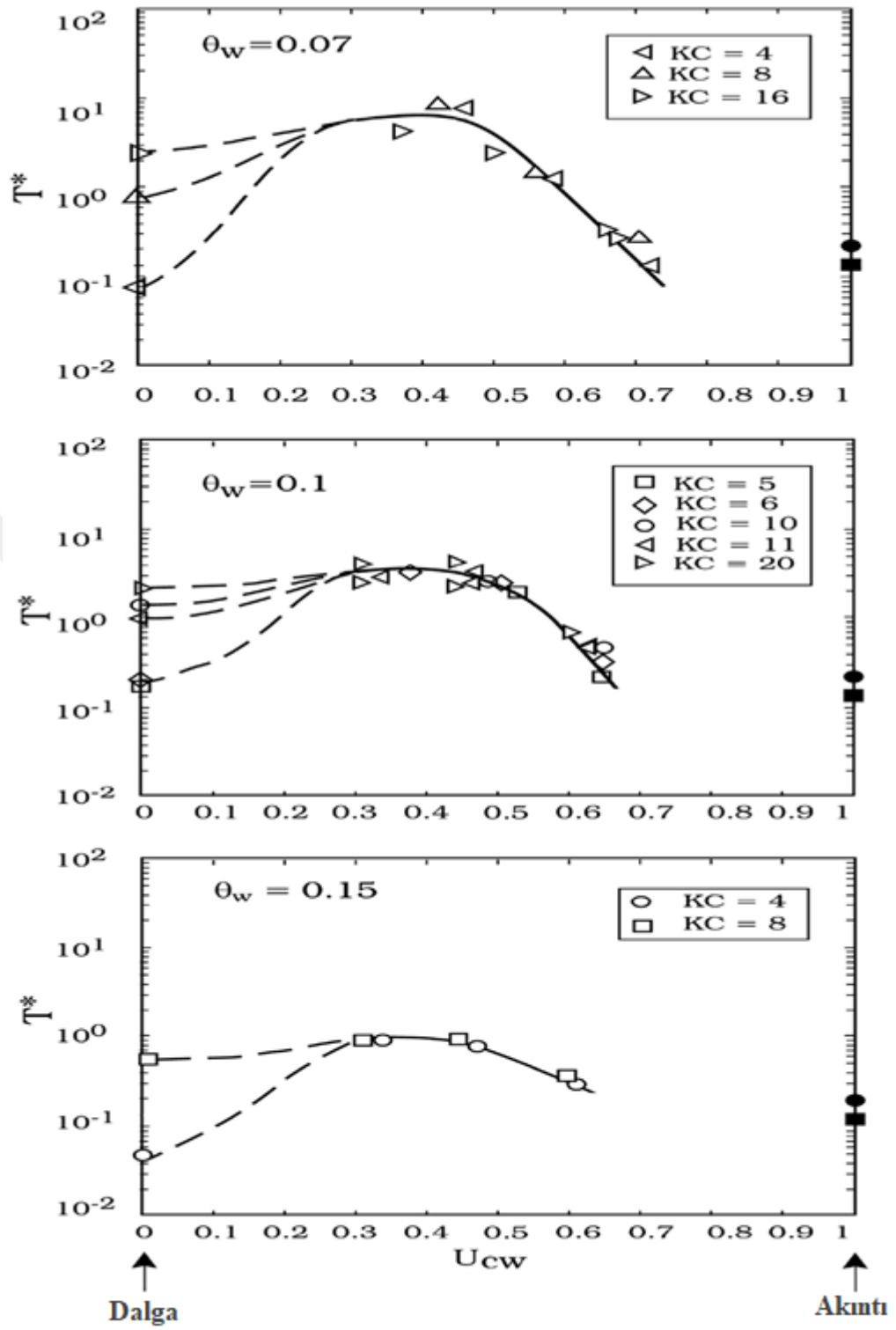
Şekil 2.8 Dey ve diğer. (2011) çalışmasında, kum içerisinde farklı kil oranları durumunda gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen $S/D-KC$ değişiminin yalnızca kum zemin için gerçekleştirilen önceki çalışma sonuçları ile karşılaştırılması

Mostafa ve Agamy (2011) çalışmasında dalga ve akıntı etkisine maruz tekil kazık ve farklı yerleşim şekillerindeki kazık grupları etrafındaki oyulmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Tekil kazık durumu ile beraber dört farklı grup yerleşiminin denendiği çalışma sonucunda, KC sayısı büyüdükçe oluşan oyulma çukuru boyutlarının da büyüdüğü belirtilmektedir. Kazık grubu etrafında oluşan oyulmaların, benzer etkiler altındaki tekil kazık etrafında oluşan oyulmalardan genel olarak büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.9’de, Mostafa ve Agamy (2011) çalışmasında elde edilen deneysel S/D değerlerinin U_{cw} parametresine göre değişimi, literatürde benzer önceki çalışma sonuçlarından Sumer ve Fredsoe (2001a) sonuçları ile karşılaştırılarak bir arada verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan taban malzemesi kum ve dane medyan çapı $d_{50} = 0,5$ mm dir.



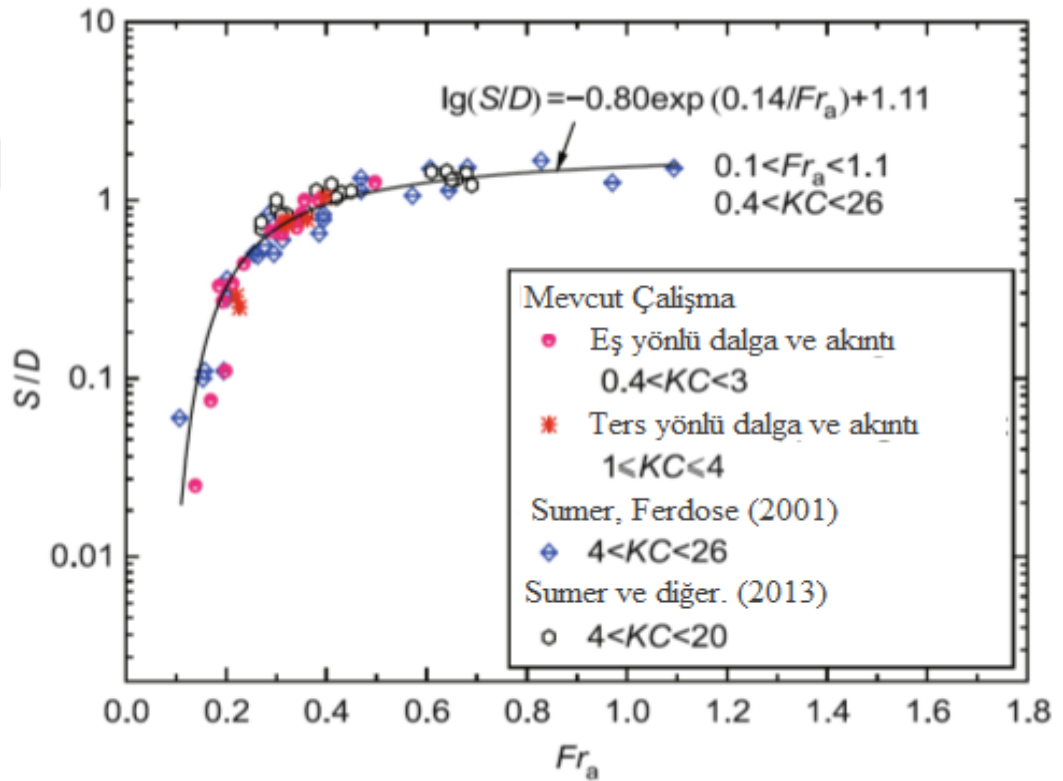
Şekil 2.9 Mostafa ve Agamy (2011) çalışmasında, $S/D-U_{cw}$ değişiminin önceki çalışma sonuçları ile birlikte gösterimi

Petersen ve diğer. (2012) çalışması kapsamında hem dalga hem de akıntıya maruz düşey kazıklar etrafındaki oyulma süreci deneysel olarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde hareketli-taban oyulma rejimleri oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda, kazık etrafında oyulma sürecindeki zaman ölçeği parametresinin, akıntı hızının dalgadan kaynaklanan akım hızına oranı olan boyutsuz sayıya (U_{cw}), Keulegan-Carpenter sayısına (KC) ve Shields parametresine (θ) bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Petersen ve diğer. (2012) çalışmasında, farklı θ değerli için T^* ile U_{cw} parametresinin değişimi ■: $\delta/D=2,7$ ve $\theta=0,13$, ve ●: $\delta/D=2,7$ ve $\theta=0,13$

WenGang ve FuPing (2014) çalışmasında, dalga/akıntı-kazık-zemin etkileşimi, ve akım-yapı-zemin etkileşimi, özel olarak düzenlenen bir kanalda deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, tekil kazık etrafında oluşan at nalı çevrintilerinin oyulma sürecindeki en etkin fiziksel olaylardan bir olduğu anlaşılmıştır. Oluşan oyulmanın göreceli derinliği ile ortalama akım hızına göre belirlenen kazık Froude sayısı arasında bir ilişki kurulmuştur (Şekil 2.11).

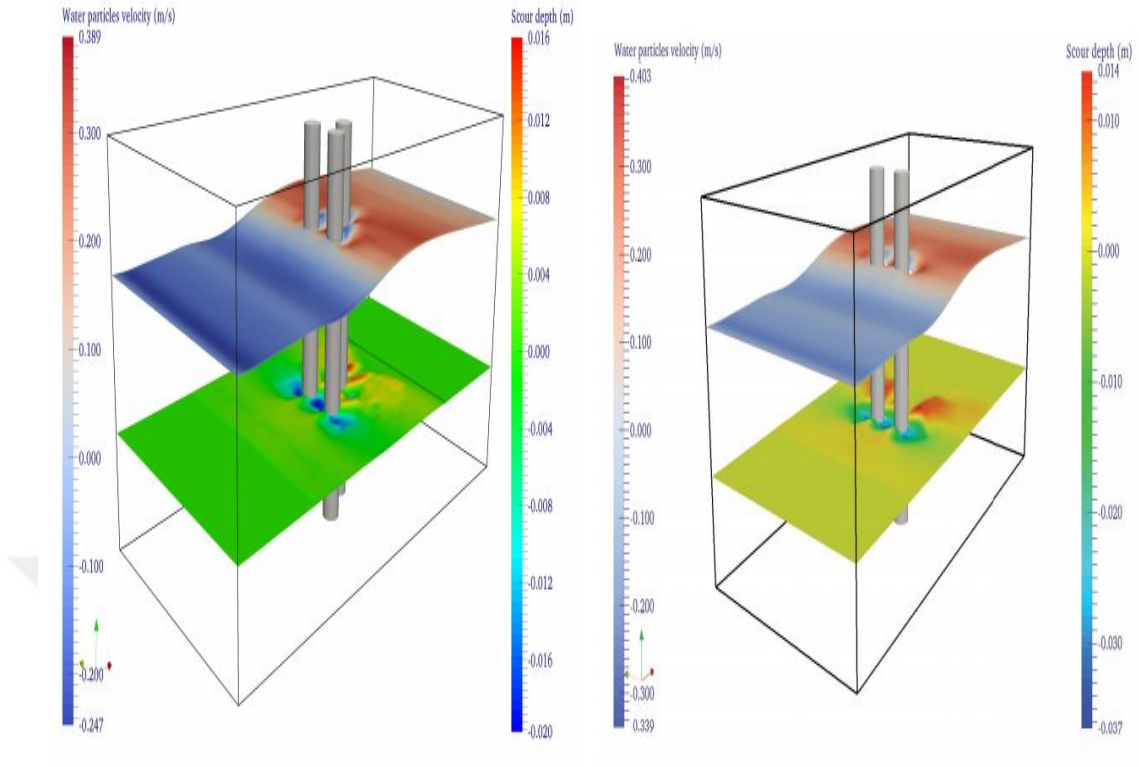


Şekil 2.11 WenGang ve FuPing (2014) çalışmasında, S/D'nin ortalama akım hızına göre hesaplanan kazık Froude sayısına bağlı değişimi

Baykal ve diğer. (2015) çalışmasında dalgalara maruz kalan dikey kazıkların etrafında oluşan oyulmalar Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine bağlı olan üç boyutlu sayısal bir model kullanılarak araştırılmıştır. Bu model k- ω türbülans modeli (k: türbülans kinetik enerjisi, ω : spesifik dağılım oranı), kazık etrafında oluşan çevrintilerin, sediment taşınımını ve yatak morfolojisini kapsamaktadır. Sayısal simülasyonlar Sumer ve diğerlerinin (1997,2013) yaptığı

laboratuvar deneylerinden seçilen şartlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sayısal simülasyondan bulunan sonuçlar ve deneylerle karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar sediment yatağında ve rijit yatakta gerçekleştirilmiştir. Rijit yatakta yapılan simülasyonlar kazığın etrafında dalga nedeniyle oluşan vorteks kazığın yüksekliği boyunca aynı frekansta ve tek hücreli biçimde olduğunu göstermiştir. sediment yatakta yapılan çalışmalar at nalı vorteksinin akıntı ve dalgalarda önemli değişimler yarattığını göstermiştir. Kazığın etrafındaki yatakta at nalı çevrintisi ve iç türbülansi rejimi nedeniyle oluşan kayma gerilmesindeki artış kazığın etrafında oluşan akışı yönlendiren en önemli parametre olan KC sayısında çeşitli değerler alınmasına neden olmuştur. Deneyler sonucunda KC sayısının gözlemler sonucunda bulunan değerleri ile sayısal simülasyon sonucu bulunan değerlerin tam bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Ahmad ve diğer. (2018) çalışmasında yan yana ve üçgen şeklinde dizilmiş kazık gurubu etrafında meydana gelen oyulmaları hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı çözüm yapan REEF3D programı ile üç boyutlu olarak incelemiştir. $d_{50} = 0.16$ mm çaplı taban malzemesi ve $D=90$ mm çapında silindirik kazık kullanılarak sayısal model ile elde edilen sonuçlar Sumer ve Fredsøe (1997) deneysel çalışmasında verilen deneysel sonuçlarla ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.12). Sayısal model hesaplamaları kazık etrafındaki oyulmalar, denge durumua ulaşana kadar sürdürülmüş ve karşılaştırmalar sonucunda yanyana olan iki kazık etrafında büzülme etkisi dolayı daha çok oyulma meydana gelmekdiği ve uçgen kazık gurubu için aynı aralık ile yapılan simülasyonlarda ise daha az oyulma meydana geldiği belirlenmiştir. Bunun nedeninin üçlü kazık grubunun tekil kazık niteliğinde etki göstermesinden kaynaklandığı tesbit edilmistir.



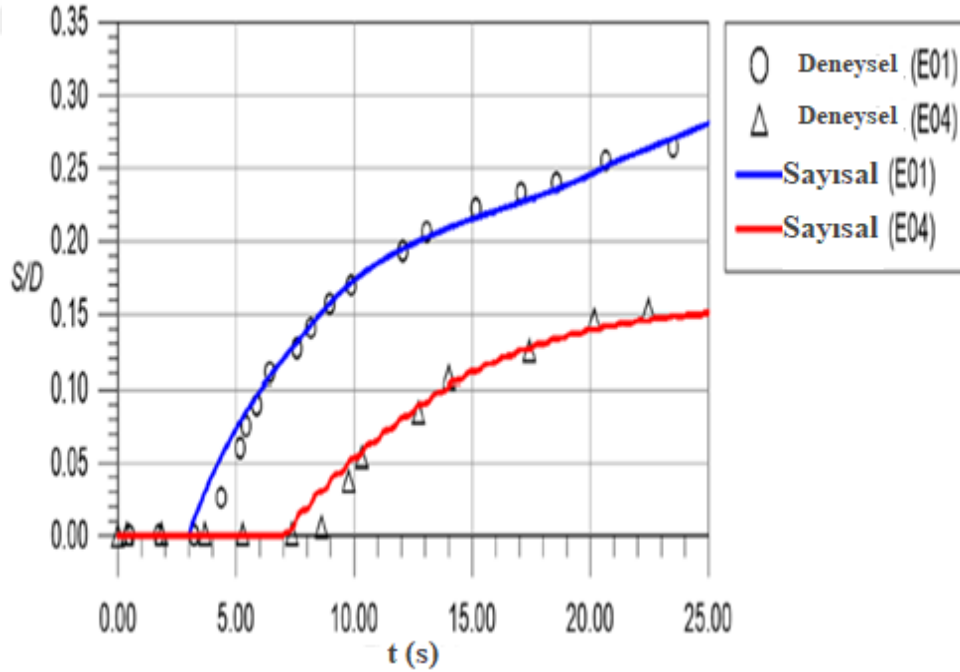
Şekil 2.12 Ahmad ve diğer. (2017) çalışmasında, yanana ve üçgen şeklinde yerleştirilen kazık gurupları etrafında meydana gelen oyulma ve ölçülen serbest yüzey hızları

Quezada ve diğer. (2019) çalışmasında REEF3D programını kullanarak Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine bağlı üç boyutlu sayısal model oluşturularak dalga ve akıntı durumunda kazık etrafında meydana gelen oyulma araştırılmıştır. Bu kapsamda literatürde daha önce elde edilen verileri kullanarak Tablo 3.1’de görüldüğü gibi sayısal model çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1 Quezada ve diğer. (2018) çalışmasında kullanılan deneysel ve sayısal veriler

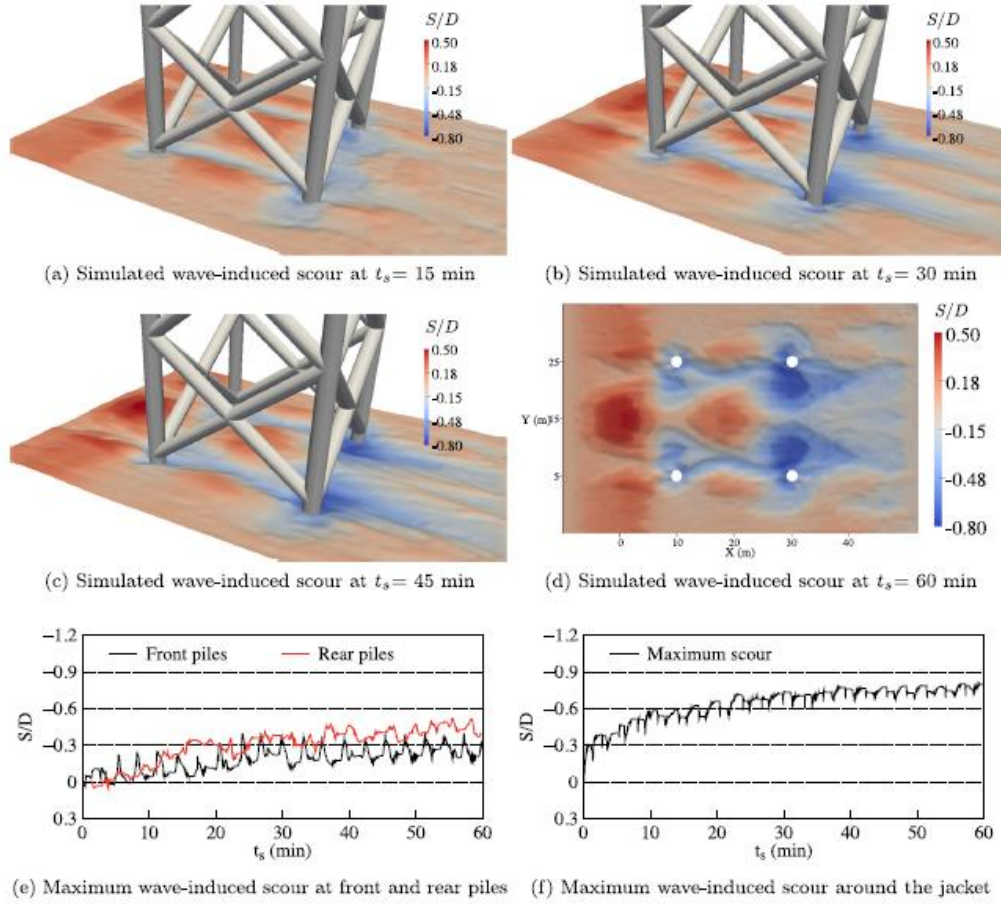
NO	h (m)	D (M)	H(m)	T (s)	KC
E01	0,50	0,20	0,085	1,40	0,86
E02	0,50	0,20	0,085	1,40	0,86
E03	0,50	0,20	0,129	1,40	1,31
E04	0,50	0,20	0,129	1,40	1,31
E05	0,50	0,20	0,150	2,00	0,90
E06	0,50	0,20	0,150	2,00	0,91
E07	0,50	0,20	0,150	3,00	0,92
E08	0,50	0,20	0,150	3,00	0,93

Elde edilen sonuçlarda hem akıntı hem dalgaya maruz kalan kazıkların etrafında daha büyük oyulmalar meydana gelmektedir. Aynı koşullarda gerçekleştirilen sayısal model sonuçları ile literatürde bulunan deneysel sonuçlar arasında uyum olduğu görülmüştür. Şekil (2.13)



Şekil 2.13 Quezada ve diğer. (2018) çalışmasında elde edilen nihai oyulma derinliğinin deneysel ve sayısal karşılaştırılması

Ahmed ve diğer. (2020) çalışmasında ceket yapılarının etrafında hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı program yardımıyla üç boyutlu olarak meydana gelen oyulmanı incelemişlerdir. Bu program Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini kullanarak çözüm yapmaktadır. simülasyon 60 dakika süre ile yapılmıştır ve $d_{50} = 0,30$ mm olan sediment kullanılmıştır. sheild parametresi 0,05 olarak alınmıştır. Düşey kazıkların çapraz bağlantılarla desteklenmesiyle oluşturulan ve şekilde görülen (Jacket structure) yapısının etrafında dalgadan kaynaklanan oyulma durumunda, eğer $6 \leq KC \leq 12$ aralığında olursa oyulma derinliğinin dört kat arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.14 Ahmad ve diğer. (2020) çalışmasında, farklı zaman dilimindeki ceket etrafında ölçülen oyulma derinlikleri

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ

3.1 Boyut Analizi

Deneysel çalışmalarda farklı unsurlara ait etkin boyutlu büyüklükler aşağıdaki gibi sıra ile verilmektedir.

Akım parametreleri : g, T_w, U_m, H, d, f_v

Akışkan parametreleri: ρ, μ

Zemin parametreleri : ρ_s, d_{50}

Geometrik parametreler: D, S, W, L_s, K

U_m ; en büyük akım hızının dalga kaynaklı taban seviyesindeki yatay bileşenini

D ; kazık çapını

g ; yerçekimi ivmesi

T_w ; dalga periyodu,

H ; dalga yüksekliği

d ; dalgalanmamış su derinliği

K ; kazığın yüzey pürüzlülüğünün yüksekliği

f_v ; vorteks yayılım frekansını

ρ ; su yoğunluğunu

μ ; su viskozitesini

ρ_s ; malzemenin yoğunluğu

d_{50} ; malzemenin dane medyan çapı

S ; nihai oyulma çukuru derinliği

L_s : oyulma çukur uzunluğu

W ; oyulma çukurunun genişliğini ifade etmek üzere

Burada U_m , L , ρ ve D tekrarı yapılan boyutlu büyüklükler olarak kullanarak ve Buckingham- π teoremi den yararlanarak boyut analizi yapılmıştır. 15 adet boyutlu büyüklüğe bağlı olarak Buckingham- π teoremi gereğince 12 adet boyutsuz π parametresi elde edilmiştir. Yapılan Boyut analizi sonucunda elde edilen boyutsuz π parametreleri (3.1)'den (3.12)'e kadar olan eşitlikler ile verilmiştir.

Kazık Reynolds sayısı:

$$\text{Re}_D = \frac{U_m D \rho}{\mu} \quad (3.1)$$

Kazık Froude sayısı:

$$\text{Fr}_D = \frac{U_m}{\sqrt{g D}} \quad (3.2)$$

Keulegan-Carpenter sayısı:

$$\text{KC} = \frac{U_m T_w}{D} \quad (3.3)$$

Strouhal sayısı:

$$S_t = \frac{f v D}{U_m} \quad (3.4)$$

Kazık yüzeyi göreceli pürüzlülüğü:

$$\kappa = K/D \quad (3.5)$$

Kazık çapına göre göreceli derinlik:

$$d/D \quad (3.6)$$

Dalga yükseklik oranı:

$$H/D \quad (3.7)$$

Deniz taban malzemesi bağlı özgül ağırlığı:

$$s = \rho_s / \rho \quad (3.8)$$

Boyutsuz deniz taban malzemesi dane medyan çapı:

$$d_{50}/D \quad (3.9)$$

Göreceli oyulma derinliği:

$$S/D \quad (3.10)$$

Göreceli oyulma çukuru genişliği:

$$W/D \quad (3.11)$$

Dalga yüksekliğinin hareket sırasında dalga boyuna oranı:

$$H/L \quad (3.12)$$

Bunların dışında etkin boyutsuz sayılar olarak Shields parametresi (θ) ve Froude sayısı vardır. Shields parametresi sediment taneciklerinin harekete başlayabilmesi için etken olan boyutsuz sayı olarak (2.1) eşitliği ile tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte U_{fm} , tabanda ortaya gelen en büyük kayma hızı olarak (3.13) bağıntısı ile tanımlanabilmektedir.

$$U_{fm} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} U_m \quad (3.13)$$

Burada f_w dalganın sürtünme katsayısıdır ve tabanın pürüzlü sınır olarak kabul edilmesi ile (3.14) eşitliği ile gösterilmektedir. (Fredsoe ve Deigaard, 1992).

$$\begin{aligned} f_w &= 0,04 \left(\frac{\xi}{k_b} \right)^{-1/4} ; \quad \frac{a}{k_b} > 50 \\ f_w &= 0,40 \left(\frac{\xi}{k_b} \right)^{-3/4} ; \quad \frac{a}{k_b} \leq 50 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Burada, ξ taban seviyesindeki su parçacığı yatay yer değiştirme değerini ve a taban kayma gerilmesinin büyültme faktörü k_b taban pürüzlülük yüksekliğini göstermekte olup k_b değeri $2,5 \cdot d_{50}$ alınabilmektedir (Sümer ve Fredsoe, 2002a).

Etkin boyutsuz sayı olarak ikincisi dane yoğunluk Froude sayısıdır (Fr_d) ve (3.15) eşitliği ile verilmektedir.

$$Fr_d = \frac{U_m}{\sqrt{g (s-1) d_{50}}} \quad (3.15)$$

T zaman ölçeğini ve boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği (3.16) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$T^* = \frac{(g(s-1)d_{50}^3)^{1/2}}{D^2} T \quad (3.16)$$

Bu durumda , (3.17) eşitliğinde yazılan fonksiyonel bağıntı ortaya çıkmaktadır. silindirik kazıkların etrafındaki incelenen fiziksel olayda yerel zemin hareketinin etkin olan boyutsuz parametreler oldukça çoktur.

$$\frac{s}{D}, \frac{W}{D} = f \left(Re_D, Fr_D, KC, St, \kappa, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, s, \frac{d_{50}}{D}, \frac{H}{L} \right) \quad (3.17)$$

Tez kapsamındaki deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasında yukarıdaki boyutsuz sayılardan belirli bir kısmının değişimi incelenebilmiştir. Değişimleri incelenebilen boyutsuz sayılar, kazık etrafındaki akım ve sediment hareketleri olayında etkin parametreler olan KC , Fr_d , θ ve d_{50}/D sayılarıdır.

3.2 Deneyisel Sonuçların Analizi İçin Kullanılan İstatistiksel Yöntemler

İncelenen fiziksel olayda etkin boyutsuz parametreler ile deneyler sonucu elde edilen boyutsuzlaştırılmış parametrelerin, ilişkisini araştırmak ve bağıntılar türetebilmek için çeşitli istatistiksel yöntemlerden kullanılmıştır. Bunlardan biri regresyon parametrelerini belirlemesi için kullanılan ve hata karelerin ortalamasının karekökü ($RMSE$) nün en küçük olma prensibine bağlı olan istatistiksel yöntemdir. $RMSE$ değeri (3.18) nolu eşitlik ile gösterilmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (3.18)$$

Bu denklemde, n veri sayısını, Y deneylerden elde edilen bağımlı değişken, $\hat{Y}$ ise X (3.19) eşitliği ile ifade edilen bağımsız değişkenlerine bağlı olarak kestirimi yapılan bağımlı olan değişkeni ifade etmektedir.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots \quad (3.19)$$

Regresyon verimi kıstası olarak, deneylerde elden edilen veriler ile değerlendirmesi yapılan verilerin arasındaki korelasyon katsayıları (3.20) eşitliğini kullanılarak elde edilmiştir.

$$r(Y, \hat{Y}) = \frac{\text{cov}(Y, \hat{Y})}{S_Y S_{\hat{Y}}} \quad (3.20)$$

Yukarıda $\text{cov}(Y, \hat{Y})$, Y ile $\hat{Y}$ değişkenlerinin kovaryansını ifade etmekte olup (3.21) eşitliğini kullanarak hesaplanır. S_Y , $S_{\hat{Y}}$ ise Y ve $\hat{Y}$ değişkenleri için standart sapmalar olup (3.22) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$\text{cov}(Y, \hat{Y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}) \quad (3.21)$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \text{ ve } S_{\hat{Y}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2} \quad (3.22)$$

(3.21) ve (3.22) bağıntılarındaki $\bar{Y}$ ve $\bar{\hat{Y}}$ değerlerin Y ile $\hat{Y}$ değişkenlerinin aritmetik ortalamaları olup ve (3.23) bağıntısı ile hesaplanır.

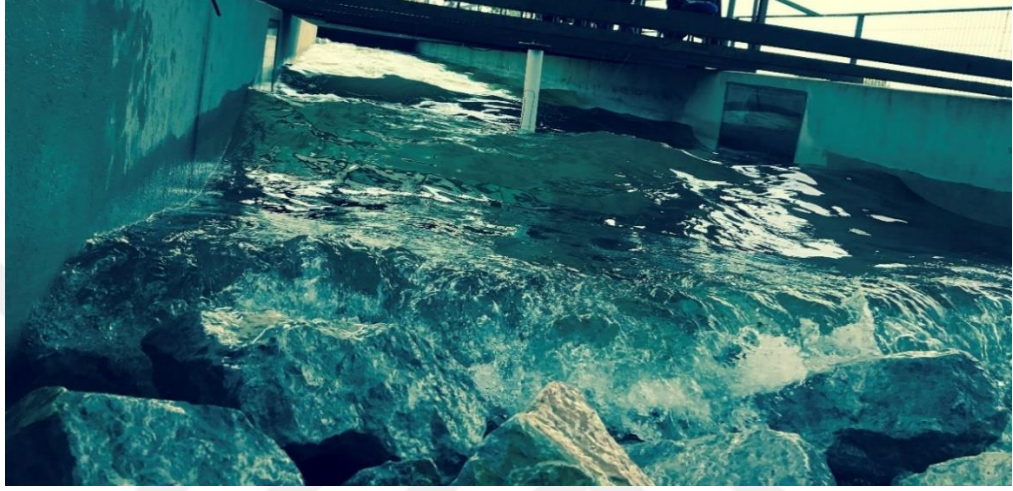
$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \text{ ve } \bar{\hat{Y}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \quad (3.23)$$

Saçılma göstergesi olarak (3.24) bağıntısı ile elde edilen bir parametrenin daha değeri verilmekte ve bu parametrenin tahmini için , r=1 doğrusundan hangi miktarda sapacağını göstermektedir.

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \quad (3.24)$$

3.3 Dalga Kanalı

Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında mevcut genişliği 3,6 m derinliği 1,2 m, uzunluğu 33 m, olan kanalda, dalga etkisiyle kazık etrafındaki oyulmalar deneysel olarak incelenmiştir. Dalga kanalı Şekil 3.1 de görülmektedir.



Şekil 3.1 Dalga kanalının genel görünümü (Kişisel arşiv, 2016)

Dalga kanalında dalga üreteç makinasının bulunduğu taraf açık deniz tarafı, sönümleme sisteminin olduğu taraf da sahil tarafı olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.2 Dalga kanalında karşılıklı olarak yer alan gözlem pencereleri (Kişisel arşiv, 2016)

Dalga kanalının sahil kesiminde, dalgaları sönümleyerek geriye yansımalarını engelleyen taş sistemi bulunmaktadır. Bu taşlar dalga geliş yönüne bakacak şekilde, şaşırtmalı olarak yerleştirilmiştir. Şekil 3.3 de sönümleyici taşlar görülmektedir.



Şekil 3.3 Mengene yardımı ile sabitlenmiş kazıklar ve sönümleyici taşlar (Kişisel arşiv, 2016)

3.4 Dalga Üretici

Dalga üretici makinesi 5,5 kW, 1400 devir/dakika bir motor ve 5,5 kW üç fazlı hız bir kontrol cihazı, 28 devir/dakika redaktöre sahip ve üçgen prizma şeklinde bir dalga dubasından oluşmaktadır. Şekil 3.4 de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Dalga üretici sisteminin motoru (Kişisel arşiv, 2016)

Dalga üreteç makinesinde duba ters üçgen şeklinde ve kanalının yan duvarının üzerindeki ray sistemi içerisinde hareket etmektedir. Dalga üreteç makinesinin üç ana unsuru,

- Dubanın harekete başlayacağı seviyenin kontrolü
- Motor dönüş sayısı kontrolü
- Dubanın batma çıkma miktarı kontrolüdür.

Dalga üreteç sisteminin çalışmasındaki önemli faktörlerden biri hız kontrol sistemidir. Bu sistem doğrudan cihaza bağlıdır ve bu sayede motorun dönüş devri manüel veya bilgisayar kullanılarak ayarlanabilir. Motorun normal dönüş devri 1400 devir/dakikadır. Bu değer hız kontrol cihazıyla artırılabilir veya azaltılabilir. Motorun normal dönme değerinin en fazla 12 katına çıkılabilir ancak bu değer motorun sağlığı açısından tehlike oluşturmaktadır. Önerilen maksimum motor devri normal motor devrinin iki katıdır.

Üreteç Motorunun devrinin ayarlanmasıyla, dubanın suyun girip çıkma frekansı ayarlanır ve bu şekilde dalga kanalında farklı frekans ile dalgalar oluşmaya başlar. Bu oluşan dalgaların periyotları 2,7 sn ile 10,7 sn arasında değişmektedir.

Dalgaların periyotlarının ayarı dışında, dalgalarının genliklerinin değiştirilebileceği iki farklı ayar mevcuttur. Dalga dubasının (Şekil 3.5) batma çıkma yüksekliği ve ayar çarkında yer alan beş farklı bağlantı noktası ile yapılabilir.



Şekil 3.5 Dalga dubası genel görünümü (Kişisel arşiv, 2016)

Kazıkların deney süresince dalga etkisiyle devrilmemesi için özel bir mengene sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Kazıkları sabit tutan mengene sistemi (Kişisel arşiv, 2016)

3.5 Ölçüm Aletleri

Deneyisel çalışmalarda, üç farklı ölçüm donanımı kullanılarak farklı dört türde ölçüm yapılmıştır ve bu aletlerin üçü de yüksek frekanslı ses dalgası yöntemiyle çalışmaktadır. Deney kanalında ölçüm aletleri UVP cihazı (Ultrasonic Velocity Profiler), ULS cihazı (Ultra Lab System) ve USS cihazı (Ultra Sound Sensor) olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.7 ULS cihazı ve USS20130 algılayıcıları (Kişisel arşiv, 2018)

ULS cihazına bağlanan algılayıcılar ile yüksek frekansta ses dalgaları su yüzeyine gönderilmektedir ve geri dönen bu dalgaların su yüzeyi ve algılayıcılarının arasındaki mesafe ölçülmektedir. USS20130 tipinde USS algılayıcısı mevcuttur. USS yanındaki rakamlar 'cm' cinsinden çalışma aralıklarını ifade etmektedir. Deneyler sırasında, algılayıcıların biri test kazığının olduğu kısımda ve diğeri de bu bölgeden 4,5 m kanalın üreteceği doğru olan tarafına yerleştirilmiştir. Deneyler iki adet USS20130 algılayıcısı kullanarak gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan UVP cihazı Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, yüksek frekansla ses dalgaları üreterek, tekrarlı olarak bu dalgaların sıvı içerisindeki hareket halinde olan parçacıklara çarpıp ve geri dönmesi ile ölçüm yapmaktadır. UVP cihazının 5 farklı tipte algılayıcısı mevcuttur. Bunlar, 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 ve 8,0 MHz frekanslı

olarak bulunmaktadır. Cihaza, aynı frekansta 20 adet algılayıcı bağlanarak sıralı olarak ölçüm yapılabilmektedir.



Şekil 3.8 UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) cihazı (Kişisel arşiv, 2018)

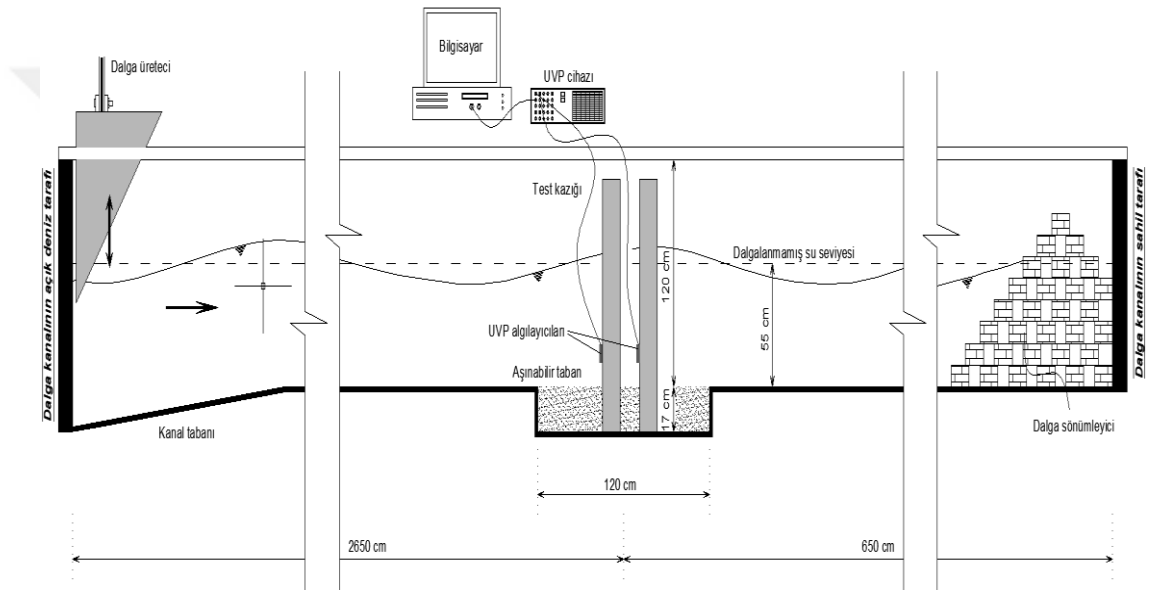
Kullanılan son ölçüm cihazı ultrasonik yöntem ile çalışan UltraLab UWS-The Lab Echosounder cihazı olup (Şekil 4.9), bu cihaz yardımıyla deney sonrasında kanaldaki su boşaltılmadan test kazığı etrafında oluşan nihai taban batimetrisi çıkarılabilmektedir.



Şekil 3.9 UltraLab UWS - The Lab Echosounder cihazı ve ölçüm sensörü (Kişisel arşiv, 2018)

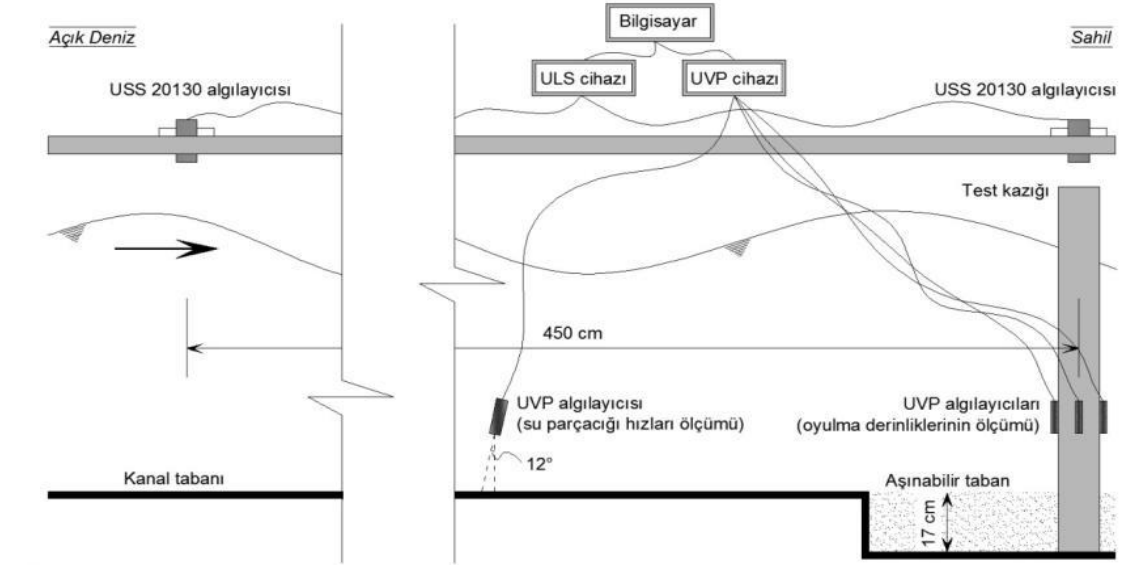
3.6 Deneylerin Yapılışı

Denelere başlamadan önce kullanılan kum dalga kanalındaki oyulama çukuruna yerleştirilmekte ve yüzey tesviyesi yapılır. Daha sonra kanal, içerisinde dalgalanmamış su seviyesi 55 cm yüksekliğinde olacak şekilde kanal suyla doldurulur. Deney ölçümleri farklı kazık tipleri ve farklı taban malzemesi kullanılarak 50 dakika boyunca devam etmiştir. Dalga kanalı ve unsurları, test kazığı ile birlikte şematik olarak Şekil 3.10’da gösterilmektedir.



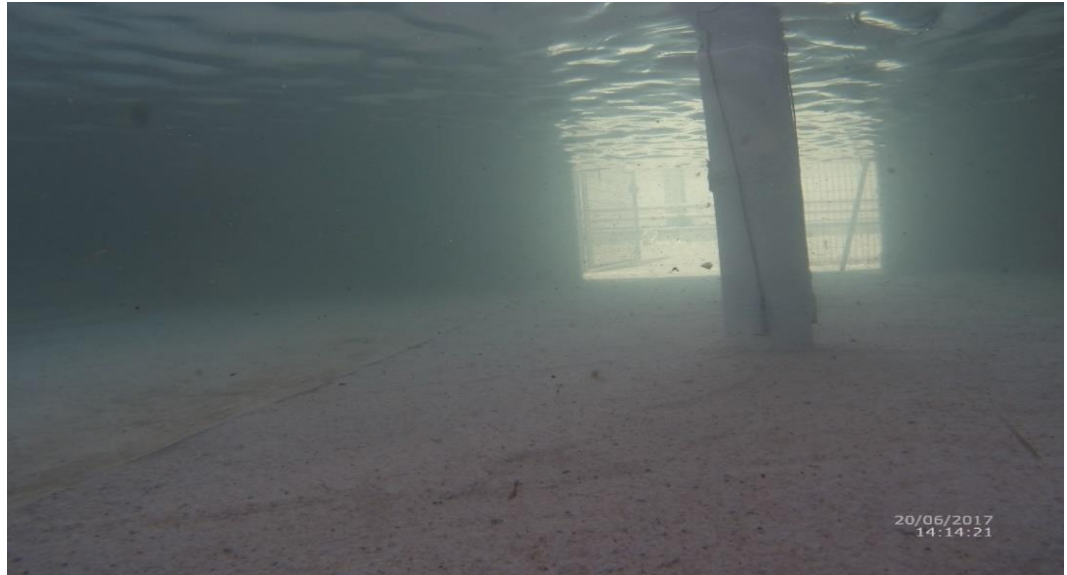
Şekil 3.10 Deneyel çalışmaları gerçekleştirildiği dalga kanalı ve arka arkaya yerleştirilen kazıkların ve UVP algılayıcılarının şematik gösterimi

Deneyler esnasında, kazık çevresindeki oyulmaların zamana göre değişiminin ölçülmesi ve su parçacıklarının hızı ölçme amacıyla taban seviyesinde, 4 MHz frekanslı olan algılayıcılar Şekil 3.11’de görüldüğü gibi kullanılmaktadır.

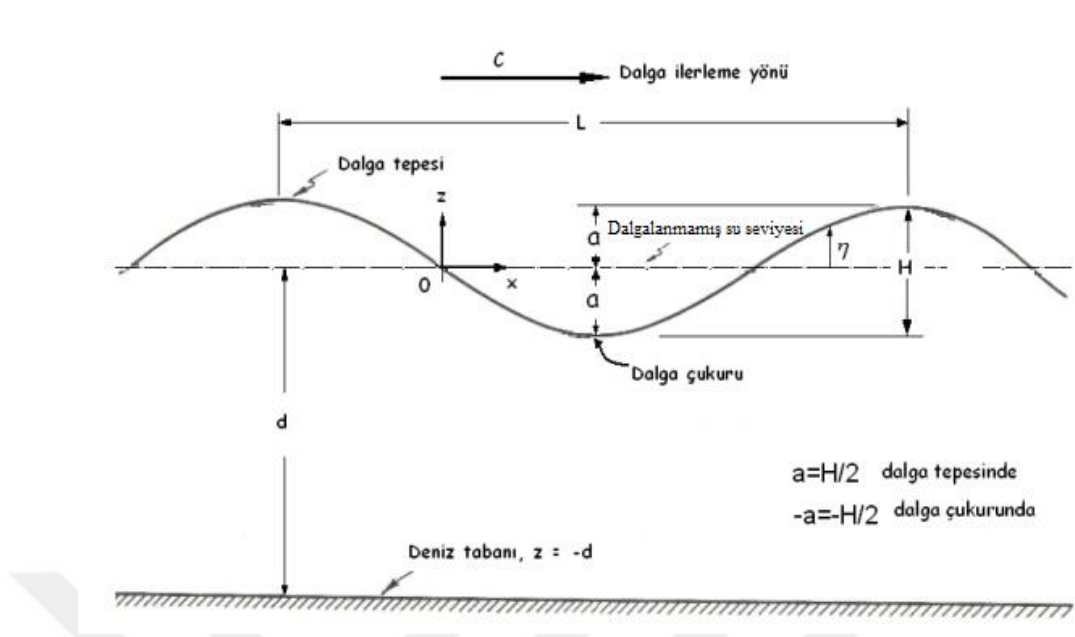


Şekil 3.11 Tekil kazık durumunda test kazığı civarındaki ölçüm donanımlarının şematik gösterimi

UVP cihazlarından biri, taban seviyesinde dalga kaynaklı oluşan su parçacığı hızlarının yatay bileşenlerini ölçmek için kullanılmaktadır. Diğer üç UVP algılayıcısı ise kazık civarındaki yerel zemin hareketlerinin zamana bağlı kaydedilmesine yaramaktadır. Algılayıcıdan ölçülen veriler bilgisayar aktarılmaktadır. Dalganın kaydedilebilmesi için ULS ve USS20130 cihazlarının algılayıcıları kullanılmaktadır.



Şekil 3.12 Tekli kazık ve algılayıcıların yerleşmesi (Kişisel arşiv, 2017)



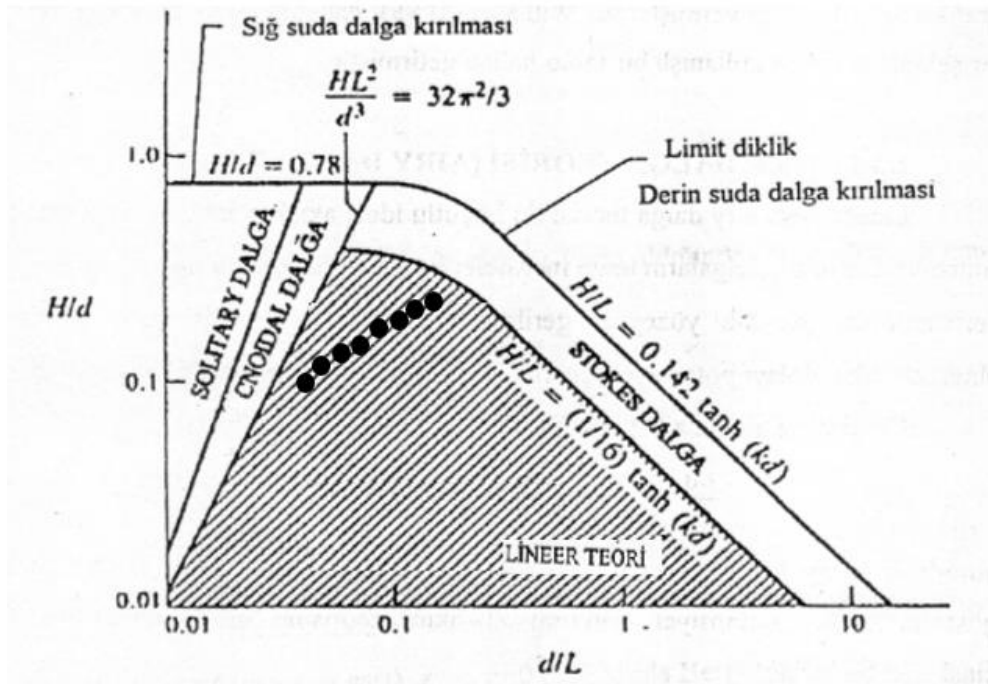
Şekil 3.14 Sinüzoidal dalga teorisinde temel tanımlar

Burada, H dalga yüksekliğini, L dalga boyunu, d su derinliğini, a dalga genliğini, c dalga ilerleme hızını, η dalga profilini, u su partikülü yatay hızını, w su partikülü düşey hızını, a_x su partikülü yatay ivmesini, a_z su partikülü düşey ivmesini, göstermektedir.

Deneylerde kullanılan farklı tipteki dalgalara ait ölçülen karakteristikler tablo 3.1’de verilmektedir. Şekil 4.15’de dalga teorilerinin geçerlilik sınırlarını veren abak üzerinde tez kapsamında kullanılan farklı tipteki dalgalara ait değerler işaretlenmiş olarak verilmektedir.

Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan farklı tipteki dalgalara ait ölçülen karakteristik değerler

Dalga Tipi	Dalga Yüksekliği H_w	Dalga Periyodu T_w	Dalga Boyu L_w
	(cm)	(s)	(cm)
1	6	5,4	1250
2	9	4,3	975
3	13	3,6	800
4	17	3,1	700
5	20	2,7	600
6	22	2,3	500
7	25	2,0	420
8	28	1,7	350



Şekil 3.15 Dalga teorilerinin geçerlilik sınırlarını veren abak (Komar, 1976)

UVP cihazı ve algılayıcıları yardımıyla hem kazık civarındaki zamana bağlı yerel zemin hareketleri hem de kazıktan uzak bölgede (kazığın varlığından dolayı bozulan akım şartları oluşmadan) ve sabit tabanı görecektir şekilde 12° açı ile yerleştirilen UVP

algılayıcısı ile taban seviyesindeki zamana bağlı su parçacığı hızları ölçülmüştür (Şekil 3.16). Hız ölçümü için kullanılan UVP algılayıcısının sonuçlarının analiz edilmesi ile hızların periyodik yönsel değişikliği (o bölgeden dalga tepesi veya çukurunun geçmesine bağlı) ve aldığı en büyük değerler (U_m) belirlenebilmektedir.



Şekil 3.16 Hız ölçümünde kullanılan UVP algılayıcısı (Kişisel arşiv, 2017)

U_m değerinin, çeşitli dalga teorileri yardımıyla belirlenmesi elbette mümkündür. Ancak, bu değer ölçülmesi ile elde edilen deneysel değer özellikle KC sayısının hesaplanmasında doğrudan kullanıldığından daha doğru sonuçlar vermektedir. Yine de, tez kapsamındaki çalışmalarda deneysel olarak ölçülemeyen ve bir dalga teorisi yardımıyla hesaplanması gereken bir parametre mevcuttur. Bu parametre, kazık civarında taban seviyesinde oluşan su parçacığı yatay yer değiştirmesinin en büyük değeridir (ζ).

Tez kapsamında ζ parametresinin belirlenmesi için lineer dalga teorisi kullanılmıştır. Bu durumda, oluşturulan dalgaların lineer teoriye uygunluğu önem

kazanmakta olup bu durumun kontrolü için dalga tiplerine göre (3.25) eşitliği ile verilen Ursell parametresi hesaplanmıştır.

$$U_R = \frac{H_w L_w^2}{d^3} \quad (3.25)$$

Tablo 3.2’de farklı tipteki dalgalar için, tez deneylerinde kullanılan $d=55$ cm dalgalanmamış su derinliği durumunda ölçülen U_m değerleri, lineer teoriye göre belirlenen ζ değerleri ve U_R parametreleri yer almaktadır.

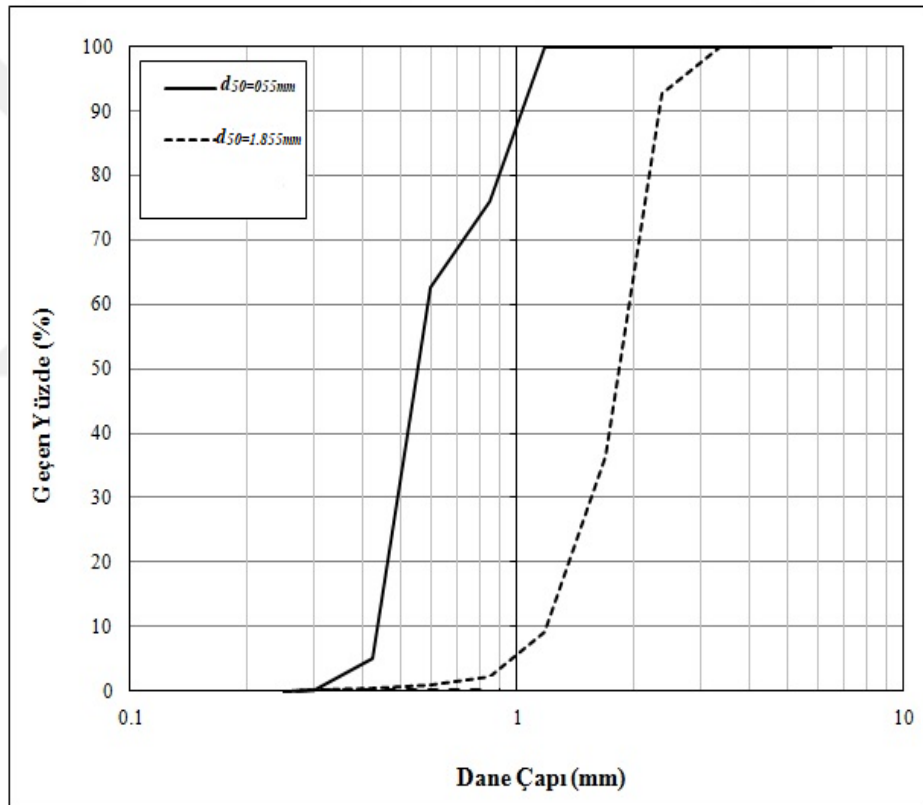
Tablo 3.2 Farklı dalga tipleri için U_m , ζ ve Ursell parametresi değerleri

Dalga Tipi	U_m	ζ	U_R
	(cm/s)	(cm)	---
1	13,0	10,6	56,3
2	18,6	13,9	51,4
3	26,0	17,1	50,0
4	32,9	16,33	50,1
5	37,5	16,3	43,3
6	39,8	14,7	33,1
7	42,9	13,6	26,5
8	44,0	11,9	20,6

Tablo 3.2’den görüldüğü üzere çalışma kapsamında kullanılan dalga karakteristikleri ve dalgalanmamış su derinliği göz önünde bulundurularak elde edilen Ursell parametresi değerleri 20,6 ile 56,3 aralığında değişmektedir.

Deneyselerde kullanılan taban malzemeleri için elek analizi yapılmıştır, böylece her iki malzeme için dane medyan çapı (d_{50}) bulunmuştur. elek analizinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.17’de verilmektedir.

Kullanılan iki taban malzemesi kuvars (SiO_2) kumudur. Bu malzemelerin özgül ağırlığı $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ olup ve dane medyan çapı sırasıyla $d_{50} = 0,55 \text{ mm}$ ve $1,85 \text{ mm}$ dir.



Şekil 3.17 Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin elek analiz eğrileri

Deneysel çalışmalarda, yukarıda değinilen kazık civarı zamana bağlı yerel zemin hareketlerinin kaydedilmesine ek olarak deney sonunda kazık etrafındaki nihai taban batimetrisi de belirlenmiştir. Nihai taban batimetrisi çalışmaları özellikle kazık grupları ve büyük çaplı kazıklar için yapılan deneylerden sonra gerçekleştirilmiştir.

3.7 Tekil Kazık Durumunda Yapılan Deneyler

Tekil kazık deneyleri olarak toplam 83 deney yapılmıştır. Dokuz farklı tekil kazık çapı, sekiz dalga periyodu ve dane medyan çapı $d_{50} = 0,55 \text{ mm}$ ve $1,85 \text{ mm}$ olan iki farklı taban malzemesi kullanarak ölçümler yapılmıştır. Tablo 4.3’de deneylere ait bilgiler verilmektedir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar ile oyulmada etkin olan boyutsuz parametrelerin değişimini araştırmak üzere üç farklı analiz yapılmıştır. Bunlar;

- Nihai Oyulma Derinliği Analizleri,
- Zaman Ölçeği Parametresi İle yapılan Analizler
- Zamana Bağlı Oyulma Ölçümleri İle yapılan Analizler

Tablo 3.3 Tez kapsamında tekil kazıklar ile gerçekleştirilen deneylerin listesi

Deney No	D (mm)	d_{50} (mm)	H_w (cm)	T_w (s)	L_w (cm)	U_m (cm/s)
TK01	950	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK02	950	0,55	9	4,3	975	18,6
TK03	950	0,55	13	3,6	800	26,0
TK04	950	0,55	17	3,1	700	32,9
TK05	950	0,55	20	2,7	600	37,5
TK06	680	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK07	680	0,55	9	4,3	975	18,6
TK08	680	0,55	13	3,6	800	26,0
TK09	680	0,55	17	3,1	700	32,9
TK10	680	0,55	20	2,7	600	37,5
TK11	480	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK12	480	0,55	9	4,3	975	18,6
TK13	480	0,55	13	3,6	800	26,0
TK14	480	0,55	17	3,1	700	32,9
TK15	480	0,55	20	2,7	600	37,5

Tablo 3.3 devamı

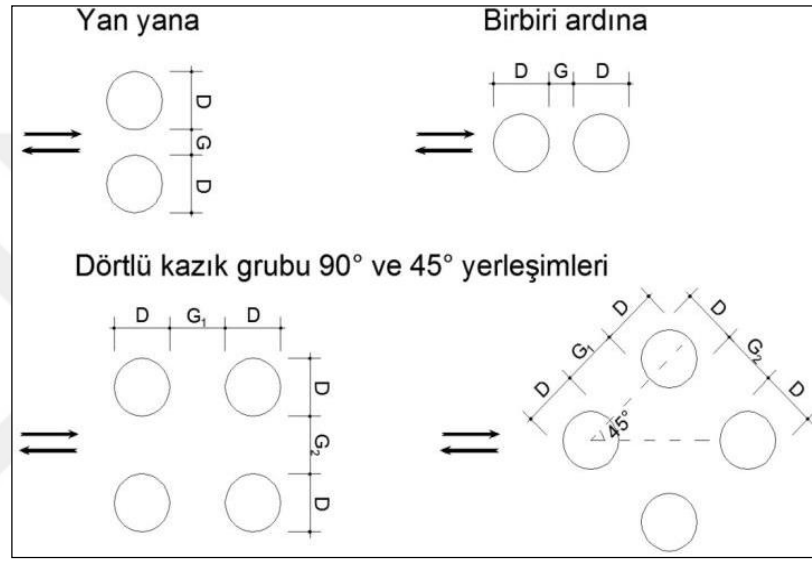
Deney No	D	d_{50}	H_w	T_w	L_w	U_m
	(mm)	(mm)	(cm)	(s)	(cm)	(cm/s)
TK16	200	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK17	200	0,55	9	4,3	975	18,6
TK18	200	0,55	13	3,6	800	26,0
TK19	200	0,55	17	3,1	700	32,9
TK20	200	0,55	20	2,7	600	37,5
TK21	160	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK22	160	0,55	9	4,3	975	18,6
TK23	160	0,55	13	3,6	800	26,0
TK24	160	0,55	17	3,1	700	32,9
TK25	160	0,55	20	2,7	600	37,5
TK26	120	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK27	120	0,55	9	4,3	975	18,6
TK28	120	0,55	13	3,6	800	26,0
TK29	120	0,55	17	3,1	700	32,9
TK30	120	0,55	20	2,7	600	37,5
TK31	110	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK32	110	0,55	9	4,3	975	18,6
TK33	110	0,55	13	3,6	800	26,0
TK34	110	0,55	17	3,1	700	32,9
TK35	110	0,55	20	2,7	600	37,5
TK36	90	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK37	90	0,55	9	4,3	975	18,6
TK38	90	0,55	13	3,6	800	26,0
TK39	90	0,55	17	3,1	700	32,9
TK40	90	0,55	20	2,7	600	37,5
TK41	63	0,55	6	5,4	1250	13,0
TK42	63	0,55	9	4,3	975	18,6
TK43	63	0,55	13	3,6	800	26,0
TK44	63	0,55	17	3,1	700	32,9
TK45	63	0,55	20	2,7	600	37,5
TK46	200	1,85	6	5,4	1250	13,0
TK47	200	1,85	9	4,3	975	18,6
TK48	200	1,85	13	3,6	800	26,0

Tablo 3.3 devamı

Deney No	D (mm)	d_{50} (mm)	H_w (cm)	T_w (s)	L_w (cm)	U_m (cm/s)
TK49	200	1,85	17	3,1	700	32,9
TK50	200	1,85	20	2,7	600	37,5
TK51	160	1,85	6	5,4	1250	13,0
TK52	160	1,85	9	4,3	975	18,6
TK53	160	1,85	13	3,6	800	26,0
TK54	160	1,85	17	3,1	700	32,9
TK55	160	1,85	20	2,7	600	37,5
TK56	120	1,85	6	5,4	1250	13,0
TK57	120	1,85	9	4,3	975	18,6
TK58	120	1,85	13	3,6	800	26,0
TK59	120	1,85	17	3,1	700	32,9
TK60	120	1,85	20	2,7	600	37,5
TK62	110	1,85	20	2,7	600	37,5
TK63	110	1,85	22	2,3	500	39,8
TK64	110	1,85	25	2	420	42,9
TK65	110	1,85	28	1,7	350	44,0
TK67	90	1,85	20	2,7	600	37,5
TK68	90	1,85	22	2,3	500	39,8
TK69	90	1,85	25	2	420	42,9
TK70	90	1,85	28	1,7	350	44,0
TK72	63	1,85	20	2,7	600	37,5
TK73	63	1,85	22	2,3	500	39,8
TK74	63	1,85	25	2	420	42,9
TK75	63	1,85	28	1,7	350	44,0
TK76	480	1,85	22	2,3	500	39,8
TK77	480	1,85	25	2	420	42,9
TK78	480	1,85	28	1,7	350	44,0
TK80	120	1,85	20	2,7	600	37,5
TK81	120	1,85	22	2,3	500	39,8
TK82	120	1,85	25	2	420	42,9
TK83	120	1,85	28	1,7	350	44,0

3.8 Kazık Grupları Durumunda Yapılan Deneyler

Tekil kazık durumu ve tekil kazık durumunda oyulmaya karşı koruyucu önlemler ile gerçekleştirilen deneylere ek olarak, farklı yerleşimlere sahip kazık durumları için de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu durum için Şekil 3.18’de şematik olarak gösterilen dört farklı kazık grup yerleşimi ile deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.18 Deneylerde kullanılan farklı kazık grup yerleşim şekilleri şematik plan görünümü

Bu kapsamda; bir biri ardına yerleştirilen iki kazık ile oluşan kazık grubu durumu, yan yana yerleştirilen iki kazık ile oluşan kazık grubu durumu ve dörtlü kazık grubu durumunda hem 90° hem de 45°’lik yerleşimler için dalga etkisi ile oluşan yerel zemin hareketleri incelenmiştir.

3.8.1 Birbiri Ardına Yerleştirilen İki Kazık İle Yapılan Deneyleri

Aynı çaplı iki kazığın farklı aralıklar ile dalga ilerleme yönüne paralel olarak arkada arkaya yerleştirilmesi ile oluşturulan kazık grubu deneyleri Tablo 3.4’de gösterilmektedir.

Tablo 3.4 Birbiri ardına yerleştirilen kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerin özellikleri

Deney No	D	d_{50}	G	H_w	T_w	L_w	U_m
	(mm)	(mm)		(cm)	(s)	(cm)	(cm/s)
GA01	110	0,55	D	6	5,4	1250	13,0
GA02	110	0,55	D	9	4,3	975	18,6
GA03	110	0,55	D	13	3,6	800	26,0
GA04	110	0,55	D	17	3,1	700	32,9
GA05	110	0,55	D	20	2,7	600	37,5
GA06	90	0,55	D	6	5,4	1250	13,0
GA07	90	0,55	D	9	4,3	975	18,6
GA08	90	0,55	D	13	3,6	800	26,0
GA09	90	0,55	D	17	3,1	700	32,9
GA10	90	0,55	D	20	2,7	600	37,5
GA11	90	0,55	D/2	6	5,4	1250	13,0
GA12	90	0,55	D/2	9	4,3	975	18,6
GA13	90	0,55	D/2	13	3,6	800	26,0
GA14	90	0,55	D/2	17	3,1	700	32,9
GA15	90	0,55	D/2	20	2,7	600	37,5
GA16	63	0,55	D/2	6	5,4	1250	13,0
GA17	63	0,55	D/2	9	4,3	975	18,6
GA18	63	0,55	D/2	13	3,6	800	26,0
GA19	63	0,55	D/2	17	3,1	700	32,9
GA20	63	0,55	D/2	20	2,7	600	37,5
GA21	110	1,85	D	20	2,7	600	37,5
GA22	110	1,85	D	22	2,3	500	39,8
GA23	110	1,85	D	25	2,0	420	42,9
GA24	110	1,85	D	28	1,7	350	44,0
GA25	110	1,85	D/2	20	2,7	600	37,5
GA26	110	1,85	D/2	22	2,3	500	39,8
GA27	110	1,85	D/2	25	2,0	420	42,9
GA28	110	1,85	D/2	28	1,7	350	44,0
GA29	90	1,85	D	20	2,7	600	37,5
GA30	90	1,85	D	22	2,3	500	39,8
GA31	90	1,85	D	25	2,0	420	42,9
GA32	90	1,85	D	28	1,7	350	44,0
GA33	90	1,85	D/2	20	2,7	600	37,5
GA34	90	1,85	D/2	22	2,3	500	39,8
GA35	90	1,85	D/2	25	2,0	420	42,9
GA36	90	1,85	D/2	28	1,7	350	44,0

Tablo 3.4 devamı

Deney No	D (mm)	d_{50} (mm)	G	H_w (cm)	T_w (s)	L_w (cm)	U_m (cm/s)
GA37	63	1,85	D	20	2,7	600	37,5
GA38	63	1,85	D	22	2,3	500	39,8
GA39	63	1,85	D	25	2,0	420	42,9
GA40	63	1,85	D	28	1,7	350	44,0
GA41	63	1,85	D/2	20	2,7	600	37,5
GA42	63	1,85	D/2	22	2,3	500	39,8
GA43	63	1,85	D/2	25	2,0	420	42,9
GA44	63	1,85	D/2	28	1,7	350	44,0

Deneyisel çalışmalarda 63 mm çaplı iki kazığın farklı aralıklar ile dalga ilerleme yönüne paralel olarak arka arkaya yerleştirilmesi Şekil 3.19 ve 110 mm çapında iki kazığın farklı aralıklar ile arka arkaya yerleştirilmesi Şekil 3.20’de verilmektedir.



Şekil 3.19 Birbiri ardına yerleştirilen iki 63 mm kazık görünümü (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 3.20 Birbiri ardına yerleştirilen iki 110 mm kazık görünümü (Kişisel arşiv, 2016)

3.8.2 Yan yana Yerleştirilen İki Kazık İle Yapılan Deneyleri

Aynı çaplı iki kazığın farklı aralıklar ile dalga ilerleme yönüne dik bir şekilde yan yana yerleştirilmesi (Şekil 3.21) ile oluşturulan kazık grubu deneyleri Tablo 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.21 Yan yana yerleştirilen iki kazık görünümü (Kişisel arşiv, 2016)

Tablo 3.5 Yan yana yerleştirilen kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerin özellikleri

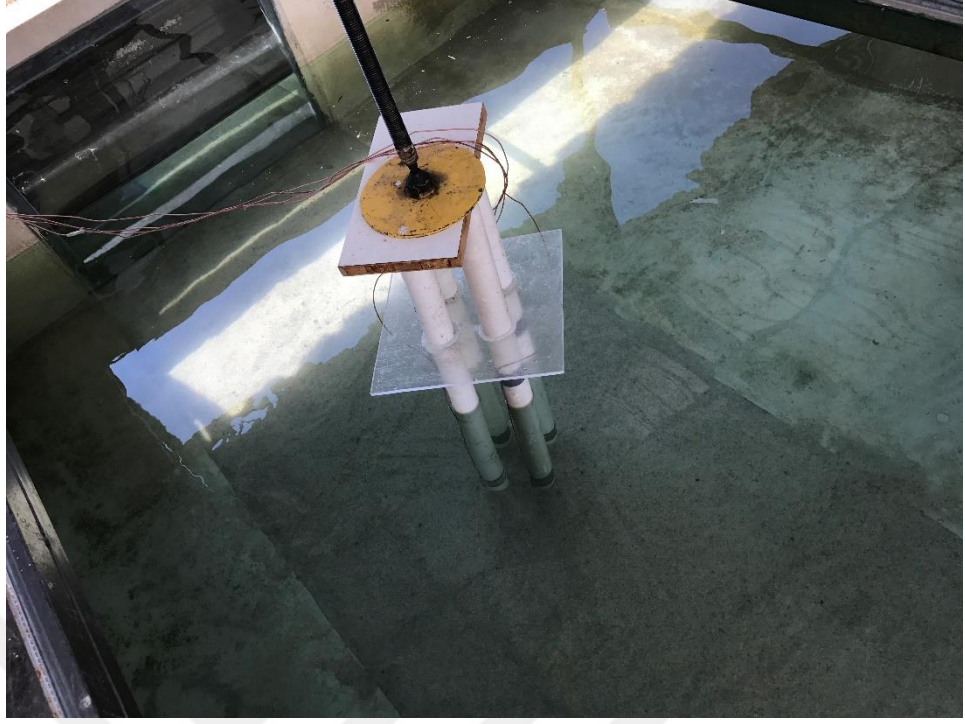
Deney No	D	d_{50}	G	H_w	T_w	L_w	U_m
	(mm)	(mm)		(cm)	(s)	(cm)	(cm/s)
GY01	120	0,55	D	13	3,6	800	26,0
GY02	120	0,55	D	20	2,7	600	37,5
GY03	63	0,55	D/2	6	5,4	1250	13,0
GY04	63	0,55	D/2	9	4,3	975	18,6
GY05	63	0,55	D/2	13	3,6	800	26,0
GY06	63	0,55	D/2	17	3,1	700	32,9
GY07	110	1,85	D	22	2,3	500	39,8
GY08	110	1,85	D	25	2,0	420	42,9
GY09	110	1,85	D	28	1,7	350	44,0
GY10	110	1,85	D/2	22	2,3	500	39,8
GY11	110	1,85	D/2	25	2,0	420	42,9
GY12	110	1,85	D/2	28	1,7	350	44,0
GY13	90	1,85	D	22	2,3	500	39,8
GY14	90	1,85	D	25	2,0	420	42,9
GY15	90	1,85	D	28	1,7	350	44,0
GY16	90	1,85	D/2	22	2,3	500	39,8
GY17	90	1,85	D/2	25	2,0	420	42,9
GY18	90	1,85	D/2	28	1,7	350	44,0
GY19	63	1,85	D	22	2,3	500	39,8
GY20	63	1,85	D	25	2,0	420	42,9
GY21	63	1,85	D	28	1,7	350	44,0

3.8.3 Farklı Yerleşimli Dörtlü Kazık Grubu Deneyleri

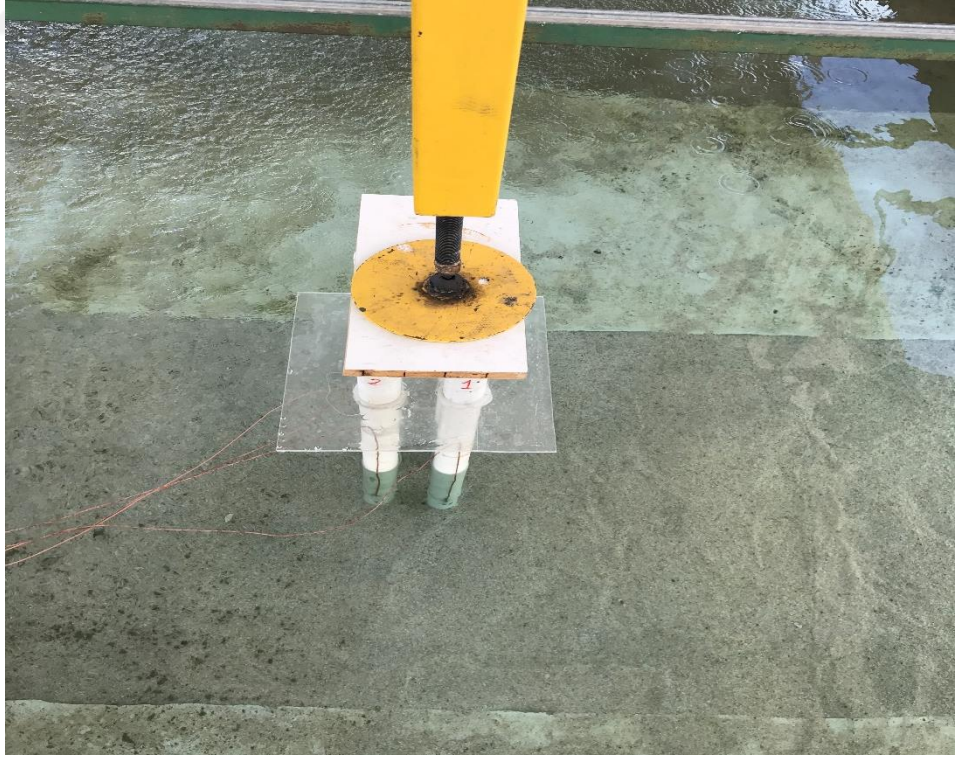
Aynı çaplı dört kazık kullanılarak ve aralarında iki yönde de bir çap kadar boşluk olan kazık grubunun dalga ilerleme yönüne göre 90° ve 45° açılar oluşacak şekilde yerleştirilmeleriyle gerçekleştirilen deneyler, Tablo 3.6'de gösterilmektedir.

Tablo 3.6 Dörtlü kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerin özellikleri

Deney No	D	d_{50}	G	H_w	T_w	L_w	U_m	Grup yerleşim açısı
	(mm)	(mm)		(cm)	(s)	(cm)	(cm/s)	(°)
GD01	63	0,55	D	6	5,4	1250	13,0	45
GD02	63	0,55	D	13	3,6	800	26,0	45
GD03	63	0,55	D	17	3,1	700	32,9	45
GD04	63	0,55	D	20	2,7	600	37,5	45
GD05	63	0,55	D	6	5,4	1250	13,0	90
GD06	63	0,55	D	9	4,3	975	18,6	90
GD07	63	0,55	D	13	3,6	800	26,0	90
GD08	63	0,55	D	17	3,1	700	32,9	90
GD09	63	0,55	D	20	2,7	600	37,5	90
GD10	63	1,85	D	22	2,3	500	39,8	90
GD11	63	1,85	D	25	2,0	420	42,9	90
GD12	63	1,85	D	28	1,7	350	44,0	90
GD13	63	1,85	D	22	2,3	500	39,8	45
GD14	63	1,85	D	25	2,0	420	42,9	45
GD15	63	1,85	D	28	1,7	350	44,0	45



Şekil 3.22 Dalga ilerleme yönüne göre 45° açı ile Yerleştirilen Kazıklar (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 3.23 Dalga ilerleme yönüne göre 90° açı ile Yerleştirilen Kazıklar (Kişisel arşiv, 2016)

3.8.4 Oyulmaya Karşı Koruyucu Önlemler İle gerçekleştirilen Deneyler

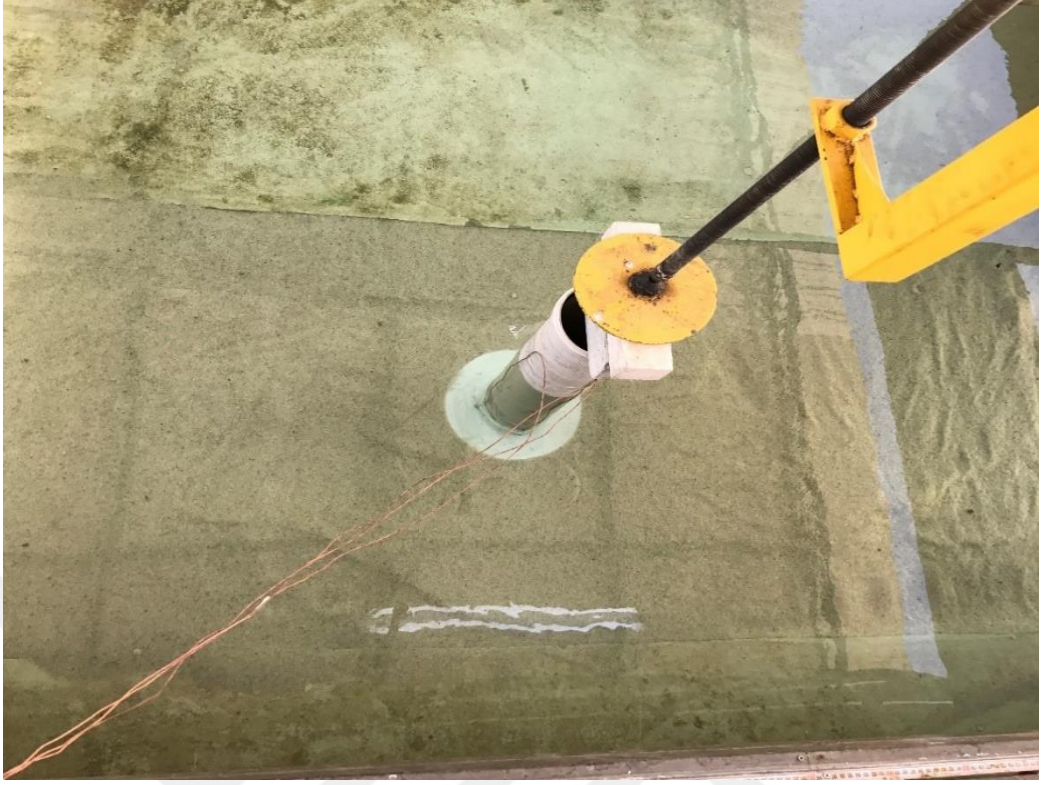
Tez kapsamında, tekil kazıklar etrafında dalga kaynaklı oluşan oyulmalara karşı koruyucu önlem olarak dairesel yakalar kullanılması planlanmıştır. Tablo 3.7’de yaka elemanların kullanılması ile kazık etrafında oyulmaya karşı koruyucu önlem durumu için gerçekleştirilen deneylerin listesi yer almaktadır. Bu elemanlar test kazığının 1,5 kat ve 2 kat çapında olacak şekilde ve 5 mm et kalınlığına sahip plexy-glass levhalar kullanılarak hazırlanmıştır. Sırasıyla Şekil 3.24 ’de ve Şekil 3.25’de verilmektedir.



Şekil 3.24 1,5D çaplı yaka kullanılarak 160mm kazık etrafında oyulmaya karşı koruyucu önlem oluşturulması (Kişisel arşiv, 2016)

Tablo 3.7. Tekil kazık durumunda yaka kullanılarak oyulmaya karşı koruyucu önlem deneyleri

Deney	d_{50}	D	Yaka	H_w	T_w	L_w	U_m
No	(mm)	(mm)	Çapı ' D_Y '	(cm)	(s)	(cm)	(cm/s)
KY01	0,55	200	1,5·D	6	5,4	1250	13,0
KY02	0,55	200	1,5·D	9	4,3	975	18,6
KY03	0,55	200	1,5·D	13	3,6	800	26,0
KY04	0,55	200	1,5·D	17	3,1	700	32,9
KY05	0,55	200	1,5·D	20	2,7	600	37,5
KY06	0,55	160	1,5·D	6	5,4	1250	13,0
KY07	0,55	160	1,5·D	9	4,3	975	18,6
KY08	0,55	160	1,5·D	13	3,6	800	26,0
KY09	0,55	160	1,5·D	17	3,1	700	32,9
KY10	0,55	160	1,5·D	20	2,7	600	37,5
KY11	0,55	120	1,5·D	6	5,4	1250	13,0
KY12	0,55	120	1,5·D	9	4,3	975	18,6
KY13	0,55	120	1,5·D	13	3,6	800	26,0
KY14	0,55	120	1,5·D	17	3,1	700	32,9
KY15	0,55	120	1,5·D	20	2,7	600	37,5
KY16	1,85	200	1,5·D	22	2,3	500	39,8
KY17	1,85	200	1,5·D	25	2,0	420	42,9
KY18	1,85	200	1,5·D	28	1,7	350	44,0
KY19	1,85	200	2,0·D	22	2,3	500	39,8
KY20	1,85	200	2,0·D	25	2,0	420	42,9
KY21	1,85	200	2,0·D	28	1,7	350	44,0
KY22	1,85	160	1,5·D	22	2,3	500	39,8
KY23	1,85	160	1,5·D	25	2,0	420	42,9
KY24	1,85	160	1,5·D	28	1,7	350	44,0
KY25	1,85	160	2,0·D	22	2,3	500	39,8
KY26	1,85	160	2,0·D	25	2,0	420	42,9
KY27	1,85	160	2,0·D	28	1,7	350	44,0
KY28	1,85	120	1,5·D	22	2,3	500	39,8
KY29	1,85	120	1,5·D	25	2,0	420	42,9
KY30	1,85	120	1,5·D	28	1,7	350	44,0
KY31	1,85	120	2,0·D	22	2,3	500	39,8
KY32	1,85	120	2,0·D	25	2,0	420	42,9
KY33	1,85	120	2,0·D	28	1,7	350	44,0



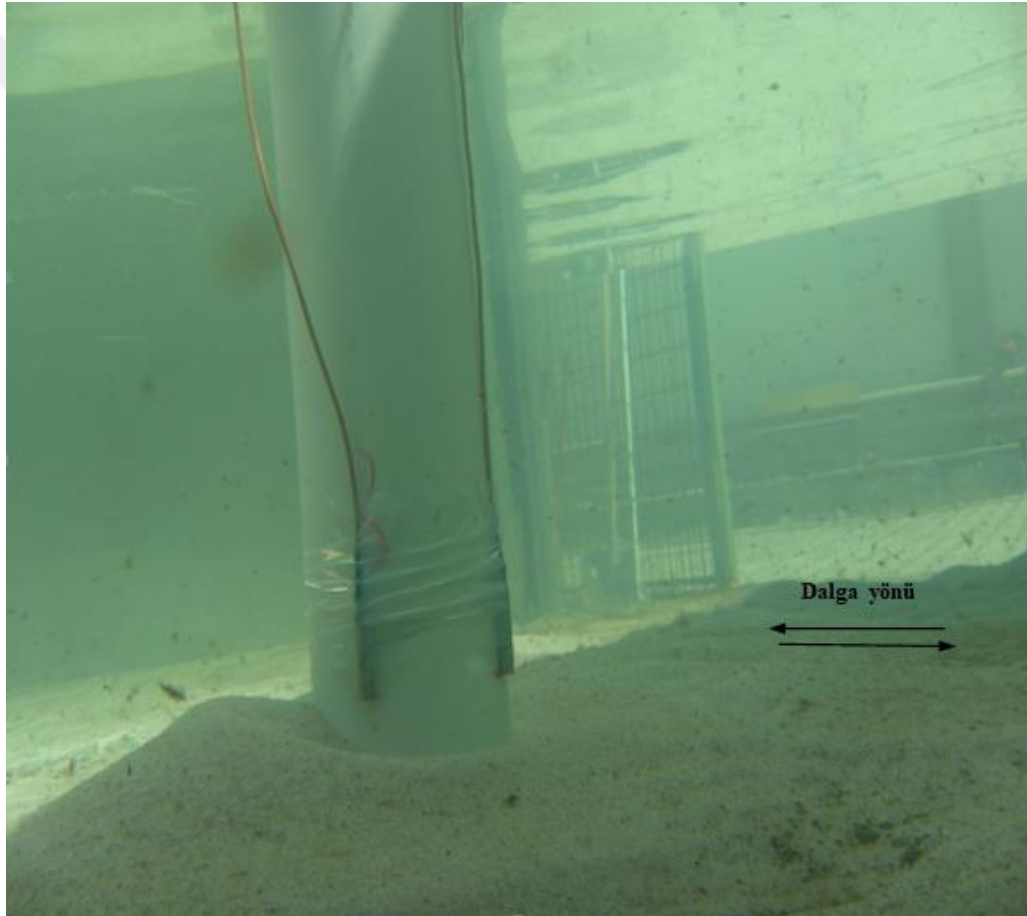
Şekil 3.25 2D çaplı yaka kullanılarak 160mm kazık etrafında oyulmaya karşı koruyucu önlem oluşturulması (Kişisel arşiv, 2016)

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL SONUÇLAR VE ANALİZLERİ

4.1 Nihai Oyulma Derinliği Analizleri

Test kazığının yan yüzeyinde bulunan UVP algılayıcısı Şekil 4.1’de görüldüğü gibi dalga ilerleme yönü ile 90° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Ölçülen deneysel veriler ile sonuçlar analiz edilmiştir.



Şekil 4.1 Dalga etkisi ile deney sonrası 90 mm lik kazık etrafında oluşan oyulma (Kişisel arşiv, 2016)

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda genellikle, göreceli nihai oyulma derinliği (S/D) ile KC sayısının arasındaki ilişki araştırılmıştır. Tez çalışmalarında, iki farklı

dane medyan çapına sahip taban malzemesi kullanılmıştır. Dane medyan çapı (d_{50}) içeren Shields parametresi (θ), ve KC sayısı goreceli nihai oyulma derinliğindeki etkisini gormek için, regresyon ifadesine eklenmiştir.

Goreceli nihai oyulma derinliklerinin (S/D) kestirimi için literatürdeki Sumer ve diğer. (1992a) alışmasında $KC > 6$ durumu için onerilen denklem (4.1) eşitliği ile verilmektedir.

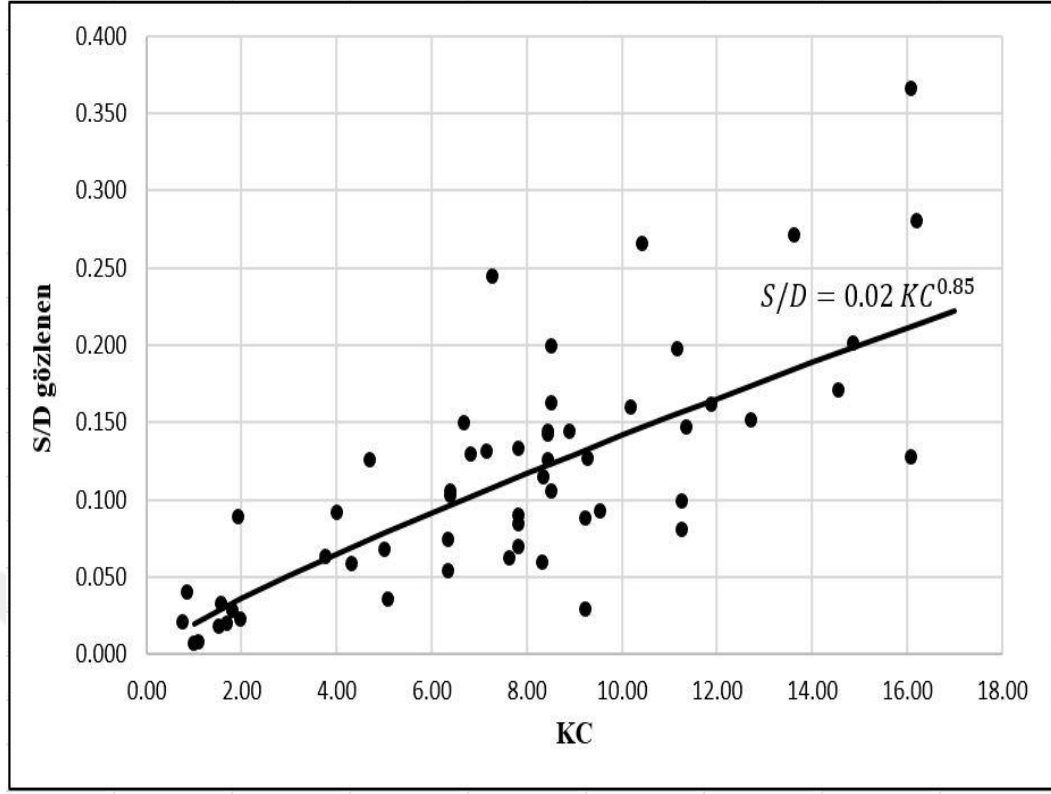
$$S/D = 1,3 \left(1 - e^{-0,03 (KC-6)}\right) ; KC \geq 6 \quad (4.1)$$

Tekil kazıklar ile gerçekleştirilen deneylerinin sonuçları ile (5.2) eşitliğinde olduğu gibi $S/D = f(KC)$ şeklindeki regresyon denklemi kurulmak istendiğinde;

$$\frac{S}{D} = a KC^b \quad (4.2)$$

Burada a ve b regresyona ait parametreler ve $RMSE$ değeri en küçük olacağı şeklinde belirlenmiş olup oluşan denklem (4.3) eşitliği ile verilmektedir. şekil 4.2’de tekil kazık durumunda goreceli nihai oyulma derinliklerinin KC sayısı ile değişimi gorlmektedir.

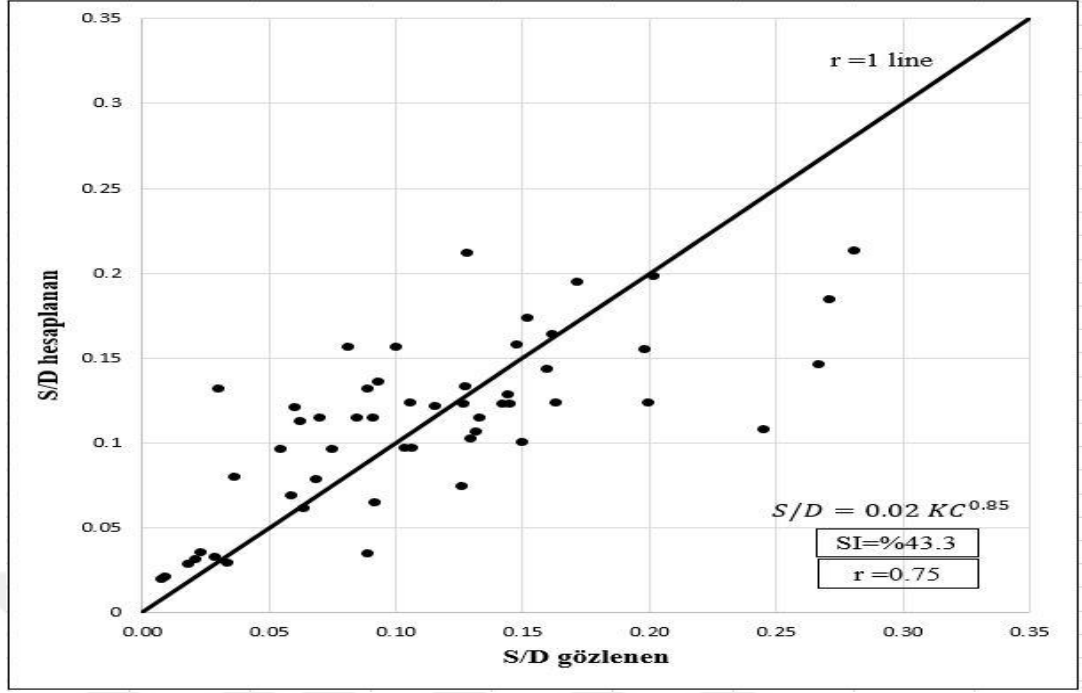
$$S/D = 0,02 KC^{0,85} \quad (4.3)$$



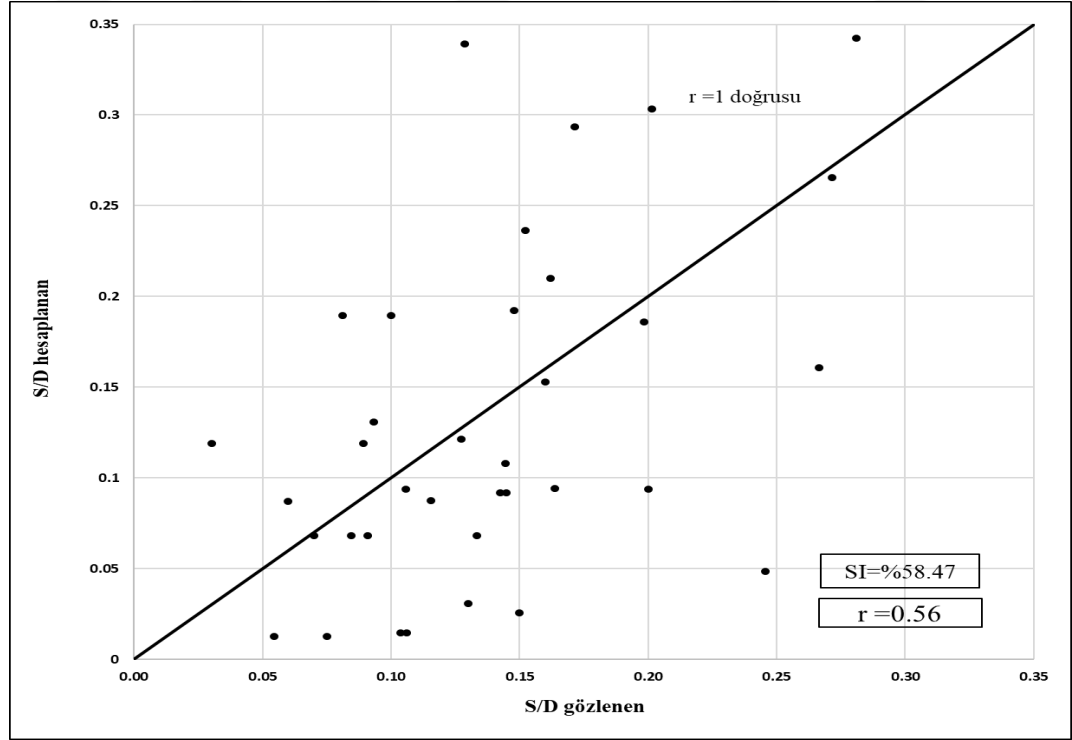
Şekil 4.2 Göreceli nihai oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi ve (4.3) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen eğri

(4.3) eşitliği ile verilen regresyon denklemiyle hesaplanan S/D değerlerinin gözlenen S/D değerleri ile karşılıklı olarak çizilmesi sonucunda elde edilen saçılma diyagramı, üzerinde korelasyon katsayısı (r) ve saçılma göstergesi (SI) değerleri ile birlikte Şekil (4.3)'te verilmektedir.

Benzer şekilde gözlenen S/D değerleri ile Sümer ve diğer(1992a) çalışmasında verilen (4.1) bağıntısından hesaplanan değerlerin karşılıklı olarak çizilmesi sonucunda elde edilen saçılma diyagramı yine üzerinde korelasyon katsayısı (r) ve saçılma göstergesi (SI) değerleri olmak üzere Şekil (4.4)'de verilmektedir.



Şekil 4.3 S/D'nin gözlenen ve (4.3) nolu eşitlik ile hesaplanan değerlerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı



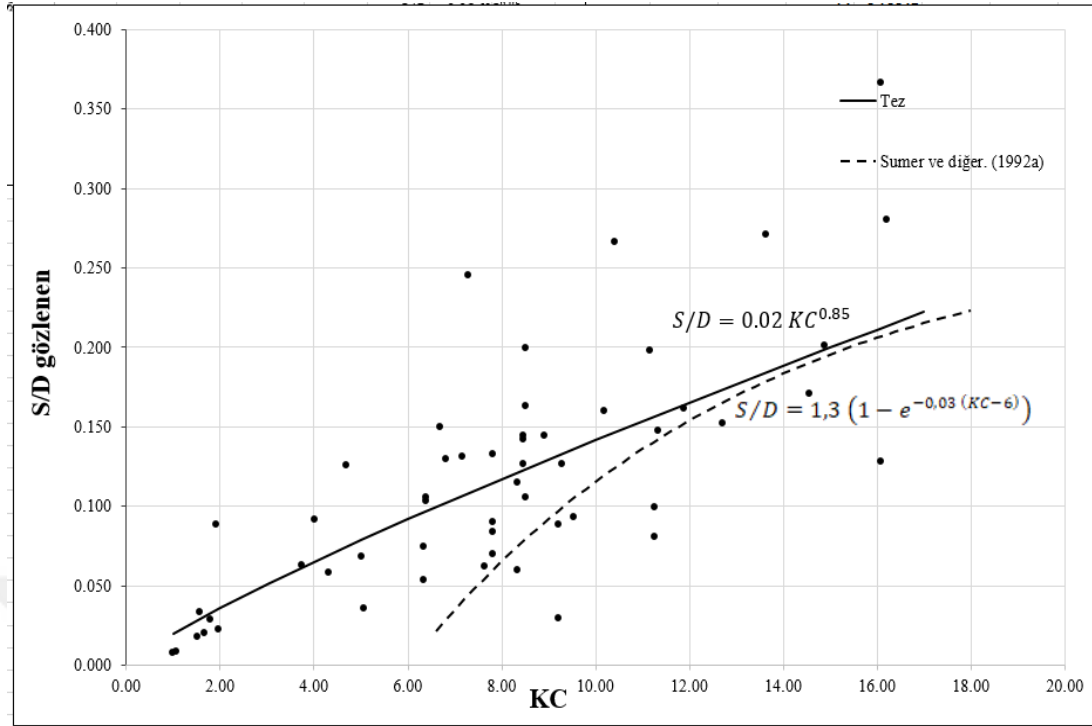
Şekil 4.4 S/D'nin gözlenen ve (4.1) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı

Sümer ve diğer(1992a) çalışmasında verilen (4.1) denkleminde elde edilen değerler ile gözlenen değerler arasındaki korelasyon katsayısı $r = 0,56$ olarak, tez çalışmasında verilen (4.3) denkleminde elde edilen değerler ile gözlenen değerler arasındaki korelasyon katsayısı ise $r = 0,76$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre (4.3) denkleminin (4.1) denklemine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Ancak Sümer ve diğer(1992a) çalışmasında (4.1) denkleminin $KC > 6$ durumunda geçerli olduğu göz önünde bulundurularak sadece $KC > 6$ olan gözlenen değerler ile korelasyon katsayıları hesaplandığında (4.1) denklemi için $r = 0,58$ ve (4.3) denklemi için ise $r = 0,60$ elde edilmiştir.

Şekil 4.5’de Sumer ve diğer (1992a) tarafından verilmiş olan (4.1) eşitliği kullanılarak hesaplanan eğri ile bu çalışmada elde edilen (4.3) bağıntısı ile elde edilen eğri karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Sumer ve diğer (1992a)’nin çalışmalarında kullanılan malzemenin dane medyan çapı $d_{50} = 0,18$ mm ve $d_{50} = 0,36$ mm değerlerindedir. Bu çalışmada kullanılan malzemenin ise dane medyan çapı $d_{50} = 0,55$ mm ve $d_{50} = 1,85$ mm değerlerindedir

Sumer ve diğer (1992a) tarafından verilmiş olan (4.1) eşitliğinin $KC \geq 6$ olması durumunda geçerli olduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla karşılaştırma yapabilmek için özellikle KC nin 6 dan büyük değerlerini içerecek şekilde eğriler verilmiştir

Şekil 4.5’de, Sumer ve diğer (1992a) çalışmasında verilen (4.1) eşitliği ile elde edilen sonuçlar ile, tez çalışmasında kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçlardan bulunan (4.3) bağıntısı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, KC değerinin yaklaşık 10 dan büyük değerlerinde her iki denklemin benzer sonuçları verdiği söylenebilir.



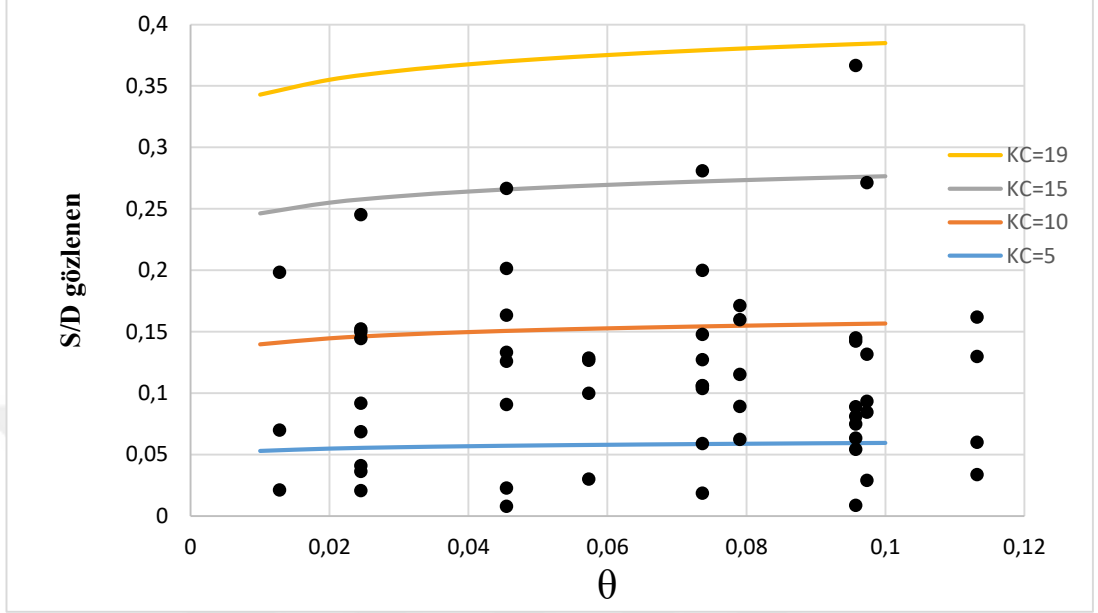
Şekil 4.5 Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile (4.1) ve (4.3) bağıntıları ile hesaplanan S/D ile KC sayısının değişimi.

Göreceli nihai oyulma derinliklerinin kestirimi için $S/D = f(KC)$ şeklindeki regresyon bağıntısına ek olarak Shields parametresinin de etkisinin ortaya konulabilmesi için ikinci olarak (4.4) eşitliğinde olduğu gibi $S/D = f(KC, \theta)$ şeklindeki regresyon denklemi kurulmak istendiğinde;

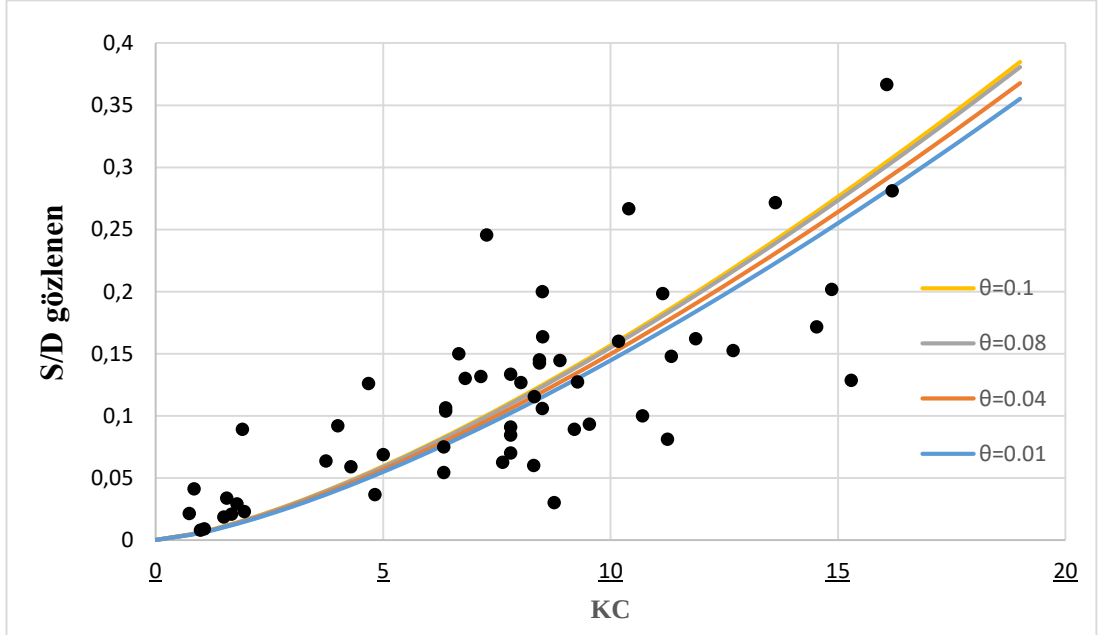
$$\frac{S}{D} = a KC^b \theta^c \quad (4.4)$$

Burada a , b ve c regresyon parametreleri, $RMSE$ değeri en küçük olacak şekilde belirlenmiş olup ve oluşan denklem (4.5) eşitliği ile verilmektedir. Şekil (4.6) ve Şekil (4.7)'de tekil kazık durumunda göreceli nihai oyulma derinliklerinin KC sayısı ve θ parametresi ile değişimi verilmektedir.

$$S/D = 0,007 KC^{1,4} \theta^{0,05} \quad (4.5)$$



Şekil 4.6 Göreceli nihai oyulma derinliğinin θ parametresi ile değişimi ve (4.5) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit KC eğrileri

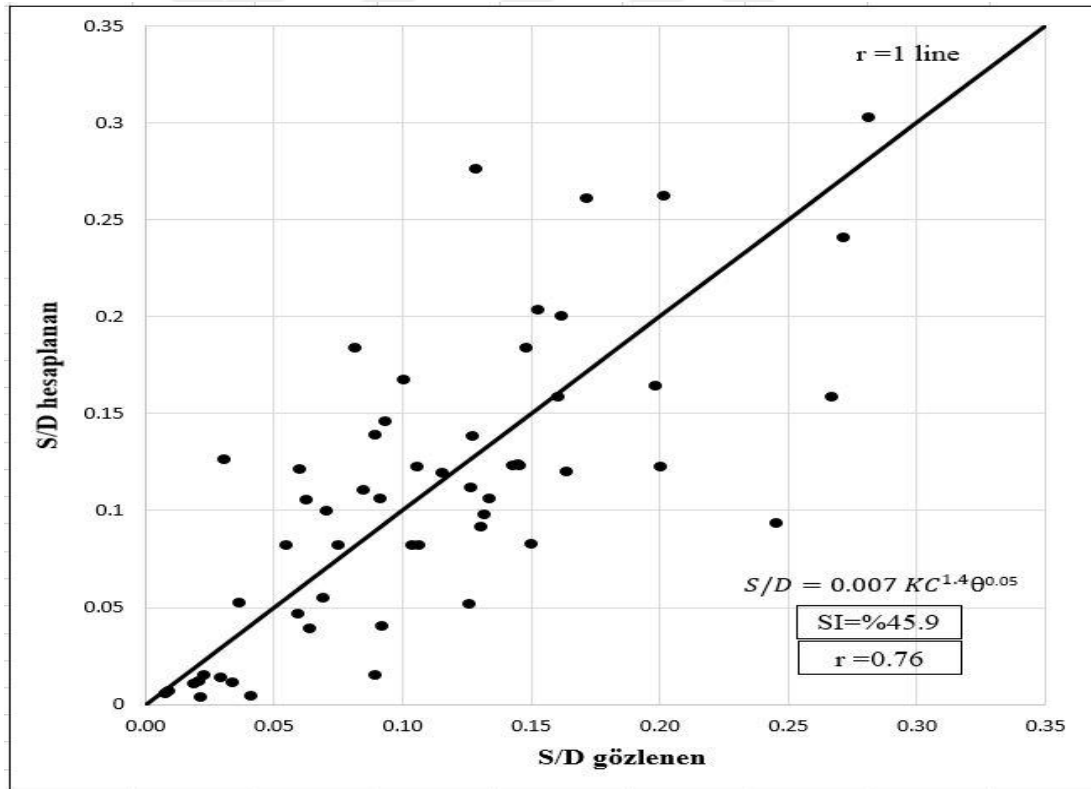


Şekil 4.7 Göreceli nihai oyulma derinliğinin KC parametresi ile değişimi ve (5.5) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit θ eğrileri

(4.5) eşitliği ile verilen regresyon denklemiyle hesaplanan S/D değerlerinin gözlenen S/D verileri ile karşılıklı olarak çizilmesi sonucunda elde edilen saçılma diyagramı, üzerinde korelasyon katsayısı (r) ve saçılma göstergesi (SI) değerleri ile birlikte Şekil 4.7’de verilmektedir.

S/D değerlerinin θ parametresi ve KC sayısına bağlı olarak değişimlerinin verildiği Şekil (4.6) ve Şekil (4.7) incelendiğinde θ parametresinin etkisinin KC sayısına oranla oldukça az olduğu görülmektedir.

Yalnızca KC sayısını içeren (4.3) denklemin sonuçları ile gözlem değerleri arasındaki korelasyon katsayısı 0,75 iken denkleme θ parametresinin de eklenmesi durumunda (4.5 denkleminde) korelasyon katsayısının 0,76 olarak elde edilmesi θ parametresinin etkisinin oldukça az olduğunu göstermektedir.



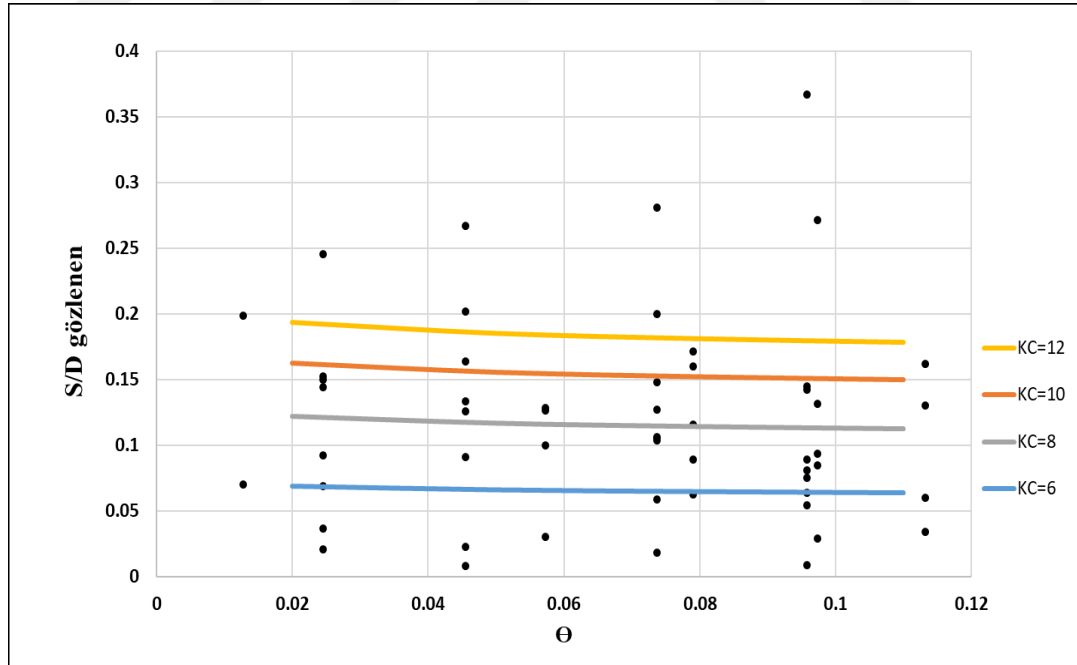
Şekil 4.8 S/D 'nin gözlenen ve (4.5) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı

Farklı regresyon denklemleriyle (4.6) eşitliğinde olduğu gibi regresyon denklemi kurulmak istendiğinde;

$$\frac{S}{D} = a \theta^b (1 - e^{(-c*(KC-4))}) \quad (4.6)$$

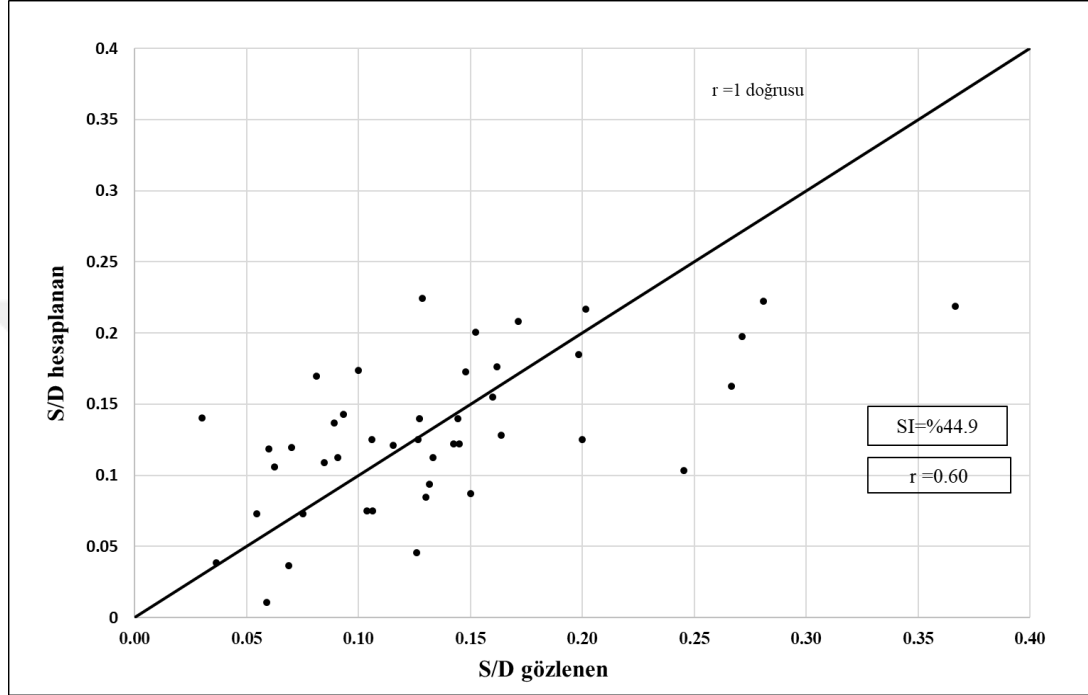
Burada a , b ve c regresyon parametreleri, RMSE değeri en küçük olacak şekilde belirlenmiş olup ve oluşan denklem (4.7) eşitliği ile hesaplanan S/D değerlerinin Shields parametresi ile karşılıklı olarak çizilmesi sonucunda elde edilen saçılma diyagramı, Şekil 4.9'da verilmektedir.

$$\frac{S}{D} = 0.245 \theta^{-0,0478} (1 - e^{(-0,133*(KC-4))}) \quad (4.7)$$



Şekil 4.9 Göreceli nihai oyulma derinliğinin θ parametresi ile değişimi ve (4.7) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit KC eğrileri

Şekil 4.10’da görüldüğü üzere (4.7) eşitliği ile verilen regresyon ifadesinin hesaplanan S/D değerlerinin ile θ ’nin arasındaki ilişki incelendiğinde çizgi yaklaşık olarak doğruya yakın ve θ ’nin fazla etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.10 S/D ’nin gözlenen ve (4.7) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı

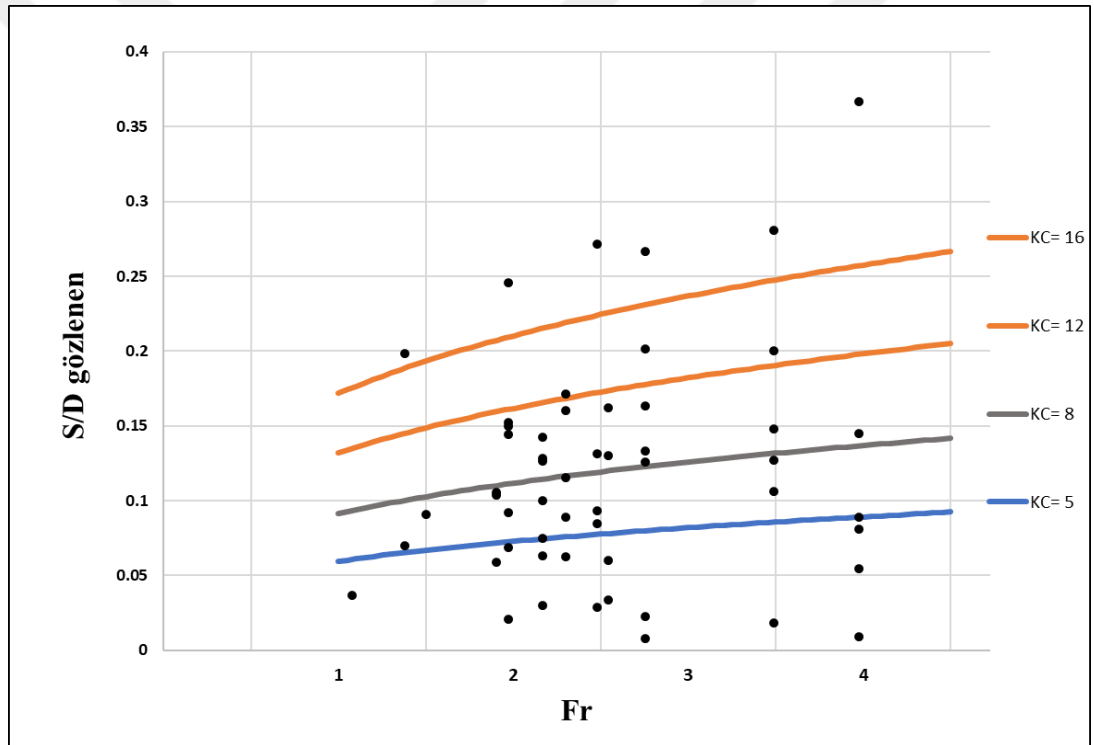
(4.7) denkleminin gözlem değerleriyle regresyonu sonucunda korelasyon katsayısı 0.60 olarak elde edilmiştir. Bu durumda (4.5) denkleminin (4.7) denklemine göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Froude sayısının etkisini görmek için denkleme (4.8) eşitliğinde olduğu gibi Froude sayısı da eklenerek regresyon denklemi kurulmuş ve burada α , b ve c regresyon parametreleri, RMSE değeri en küçük olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\frac{S}{D} = a KC^b Fr_d^c \quad (4.8)$$

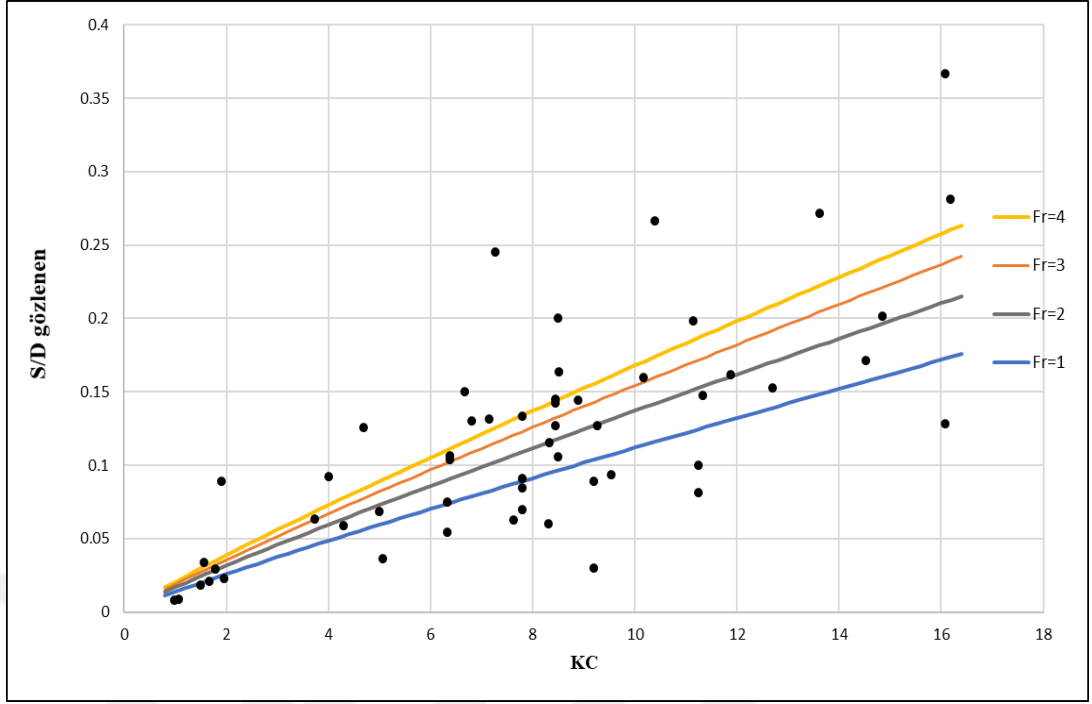
Bu durumda (4.9) denklemi elde edilmiştir. Denklem (4.9) ile hesaplanan S/D değerleri Froude sayısının değişimi farklı KC değerleri için Şekil 4.11’de verilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0,014 KC^{0,91} Fr_d^{0,292} \quad (4.9)$$

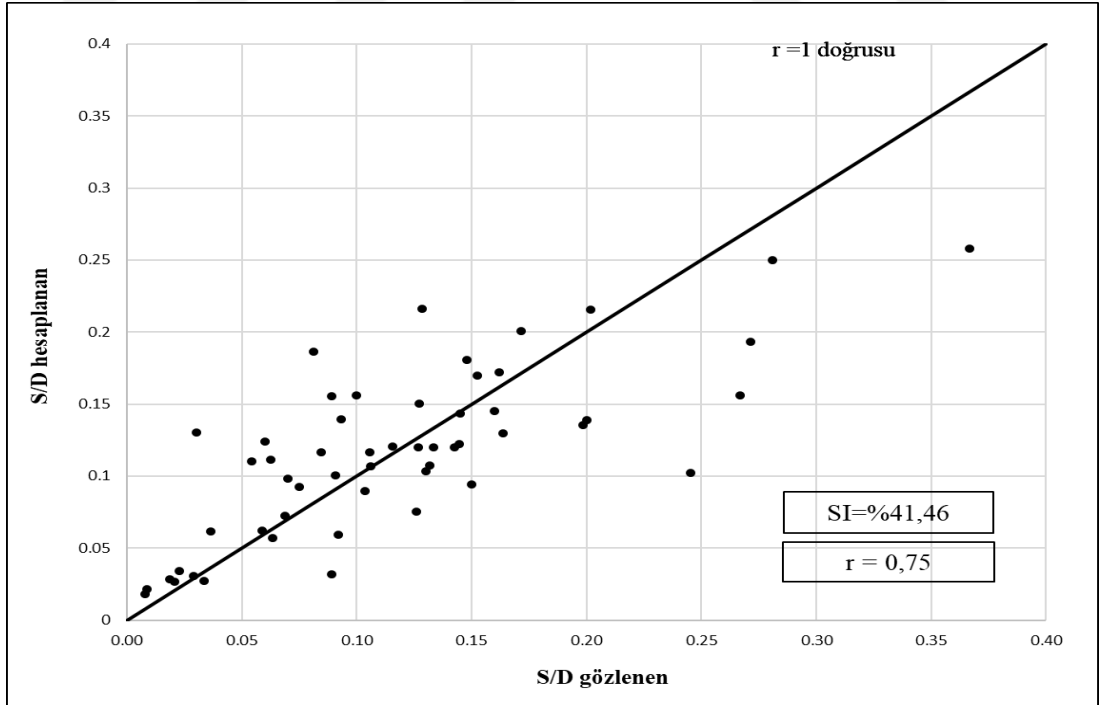


Şekil 4.11 Göreceli nihai derinliğin Froude sayısı ile değişimi ve (4.9) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit KC eğrileri

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi Froude sayısının S/D oranının değişimi üzerinde θ parametresinden daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. KC sayısı arttıkça akım hızı arttığından dan froude sayısının S/D üzerindeki etkisinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.12 Göreceli nihai oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi ve (4.9) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen sabit Froude eğrileri



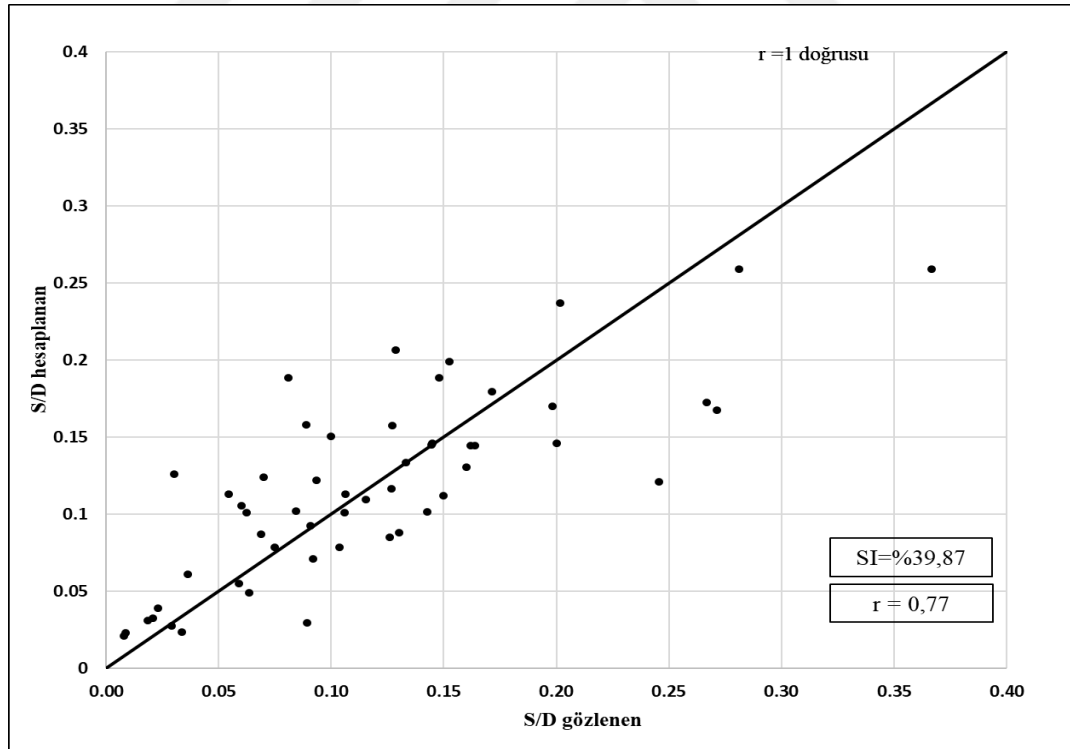
Şekil 4.13 S/D'nin gözlenen ve (4.9) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı

Froude sayısının ve θ parametresinin etkisini görmek için denkleme (4.10) eşitliğinde olduğu gibi Froude sayısı da eklenerek regresyon denklemi kurulmuş ve burada α , b , c ve d regresyon parametreleri, RMSE değeri en küçük olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\frac{S}{D} = a \theta^b F_{rd}^c K C^d \quad (4.10)$$

(4.11) eşitliği ile hesaplanan S/D değerlerinin θ parametresi ile karşılıklı olarak çizilmesi sonucunda elde edilen saçılma diyagramı, Şekil 4.14’de verilmektedir.

$$\frac{S}{D} = 0,005 \theta^{-0,268} K C^{0,88} F_{rd}^{0,6} \quad (4.11)$$



Şekil 4.14 S/D 'nin gözlenen ve (4.11) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı

Şekil (4.13) ve Şekil (4.3) birlikte incelendiğinde her iki regresyon modeli sonuçlarının korelasyon katsayıları hemen hemen aynı olup, saçılma göstergeleri açısından da belirgin bir fark oluşmamaktadır. Hem Froude sayısı hem de θ parametresinin denkleme dahil edilmesi durumunda korelasyon katsayısı 0,77 olarak hesaplanmıştır. Yalnızca KC sayısını içeren (4.3) denkleminin korelasyon katsayısı 0,75 olduğundan θ parametresinin ve Froude sayısının denkleme dahil edilmesinin sonuçlar üzerinde önemli mertebede bir katkısının olmadığını göstermektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen deneyler sonucunda S/D 'nin kestirimi için yalnızca KC sayısına bağlı olan ifade edilen (4.3) nolu eşitlik önerilmektedir.

4.2 Zaman Ölçeği Parametresi İle Yapılan Analizler

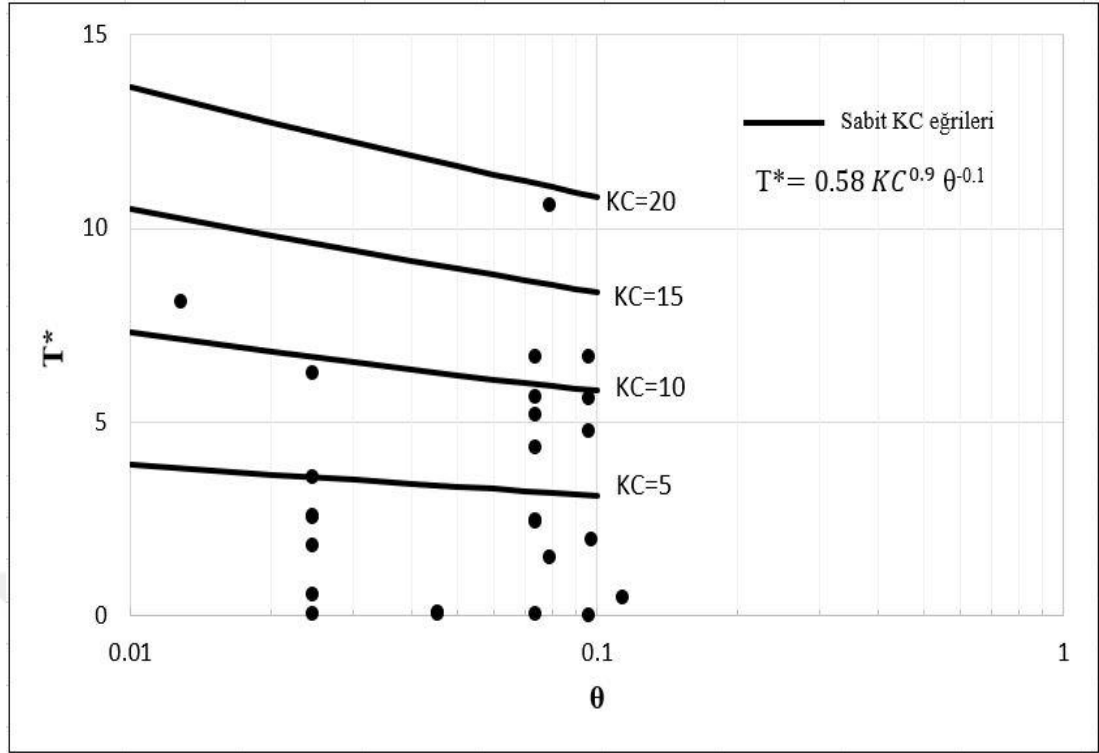
Zaman ölçeği alanızı için kullanılan veriler kazığın yan tarafında yüzey kısmında bulunan UVP algılayıcısı ile elde edilmiştir. Zaman ölçeği tanımı kazık etrafındaki oyulma hareketinin hızlı bir şekilde gelişmekte olmasıdır. Boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği (T^*) ifadesinin hem KC sayısı hem de θ parametresine bağlı olarak değişimini aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir

$$T^* = a \theta^b KC^c \quad (4.12)$$

regresyon denklemi kurulmak istendiğinde; a , b ve c regresyon parametreleri, $RMSE$ değeri en küçük olacağı şekilde belirlenip olup ve (4.13) eşitliği ile ifade edilmektedir.

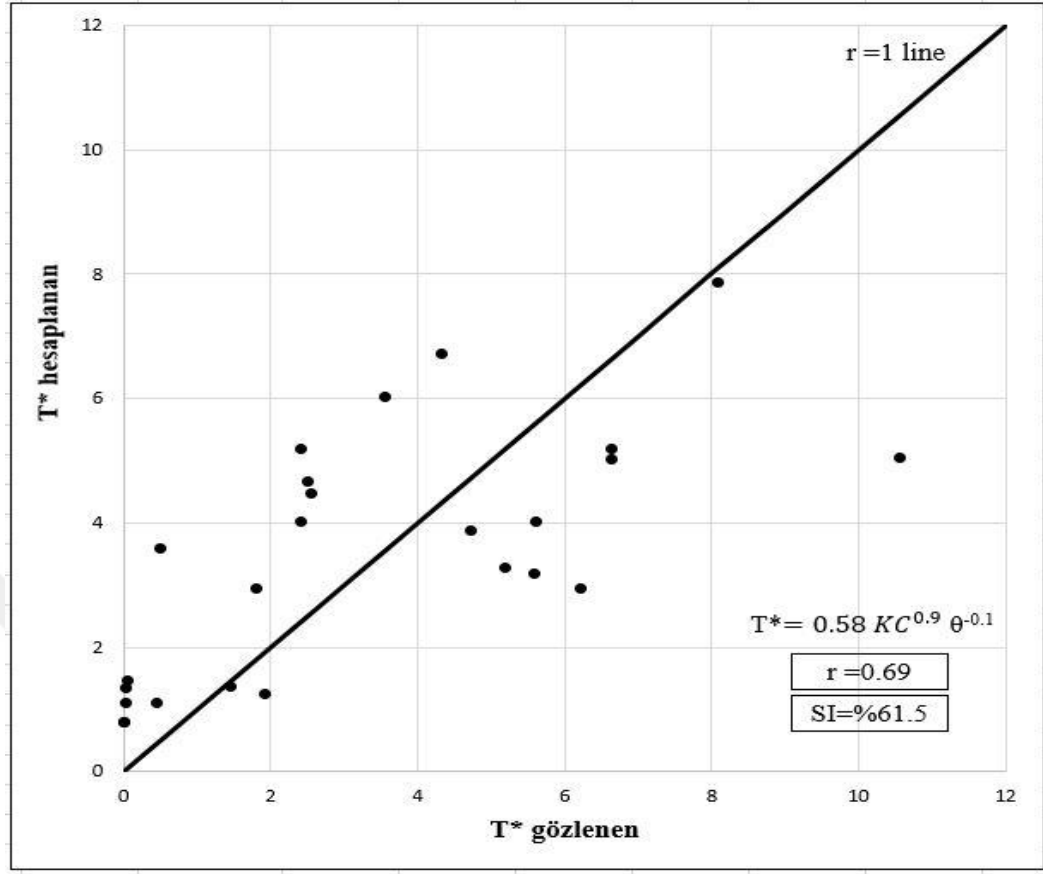
$$T^* = 0,58 KC^{0,9} \theta^{-0,1} \quad (4.13)$$

Şekil 4.15'de tekil kazık durumunda boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği parametresinin KC sayısı ve θ parametresi ile değişimi verilmektedir.



Şekil 4.15 Boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği parametresinin θ parametresi ile değişimi ve (4.13) nolu eşitlik ile verilen regresyon bağıntısına göre çizilen eğri sabit KC eğrileri

(4.13) eşitliği ile verilen regresyon denklemiyle hesaplanan T^* değerlerinin gözlenen T^* verileri ile karşılıklı olarak çizilmesi sonucunda elde edilen saçılma diyagramı, üzerinde korelasyon katsayısı (r) ve saçılma göstergesi (SI) değerleri ile birlikte Şekil (4.16)'da verilmektedir.



Şekil 4.16 T* değerinin gözlenen ve (4.13) nolu eşitlik ile hesaplanan verilerinin karşılıklı olarak çizildiği saçılma diyagramı

4.3 Zamana Bağlı Oyulma Ölçümleri İle Yapılan Analizler

Deneysel çalışmalar sonucunda UVP algılayıcısından kullanarak elde edilen sonuçları işlenerek oyulma derinliği ve zaman grafikleri elde edilmiştir. Sonuç grafikleri ile çok değişkenli ve doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmıştır. KC ve θ parametrelerinin zamana bağlı oyulma derinlikleri (S_t/D) üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Aşağıda (4.14) eşitliği ile ifade edildiği üzere, kazık etrafında meydana gelen oyulmanın zaman içerisindeki değişimi regresyon denklemi olarak (4.15) eşitliği ile araştırılmıştır.

$$S_t = S \left(1 - e^{-t/T}\right) \quad (4.14)$$

$$\frac{S_t}{D} = a KC^b \theta^c \left(1 - e^{-t_s}\right) \quad (4.15)$$

Bu eşitliklerde t zaman ve regresyon denkleminde bulunan t_s değeri boyutsuzlaştırılmış zamanı ifade etmek üzere (4.16) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$t_s = \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}}}{D} t \quad (4.16)$$

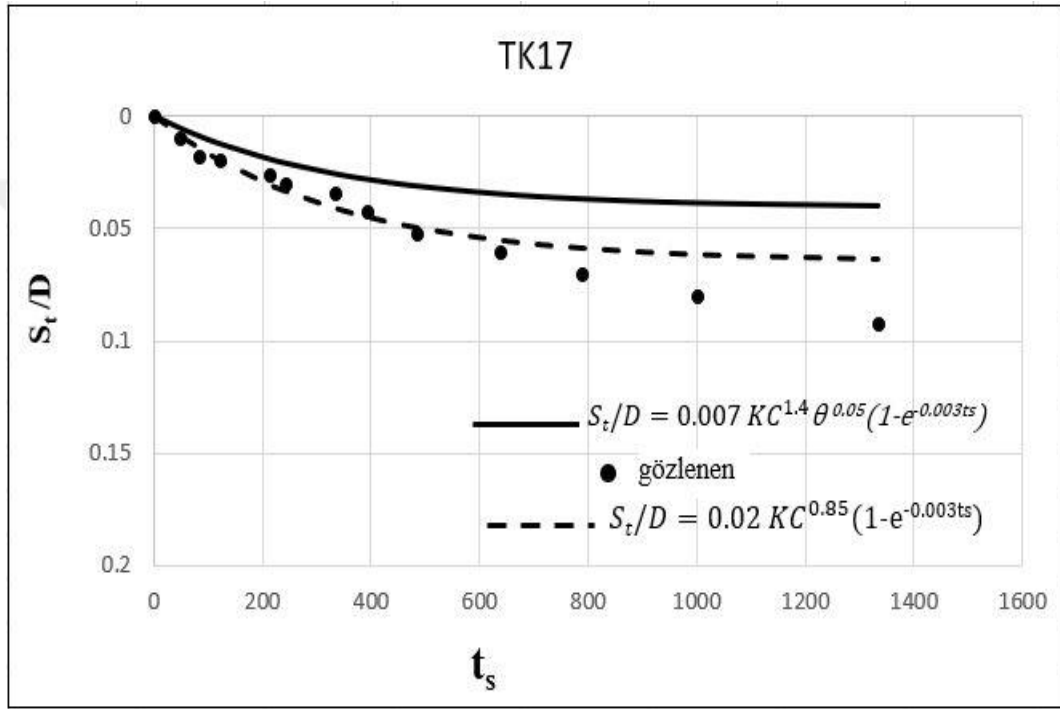
Regresyon analizi sonucu zamana bağlı göreceli oyulma derinliklerinin kestirimi için (4.16) eşitliği ile verilen ifadedeki a , b , c ve d regresyon sabitleri $RMSE$ değerinin en küçük olacağı şekilde belirlenmiş olup oluşan denklem (4.17) eşitliği ile verilmektedir.

$$S_t/D = 0,007 KC^{1,4} \theta^{0,05} (1 - e^{-0,003 t_s}) \quad (4.17)$$

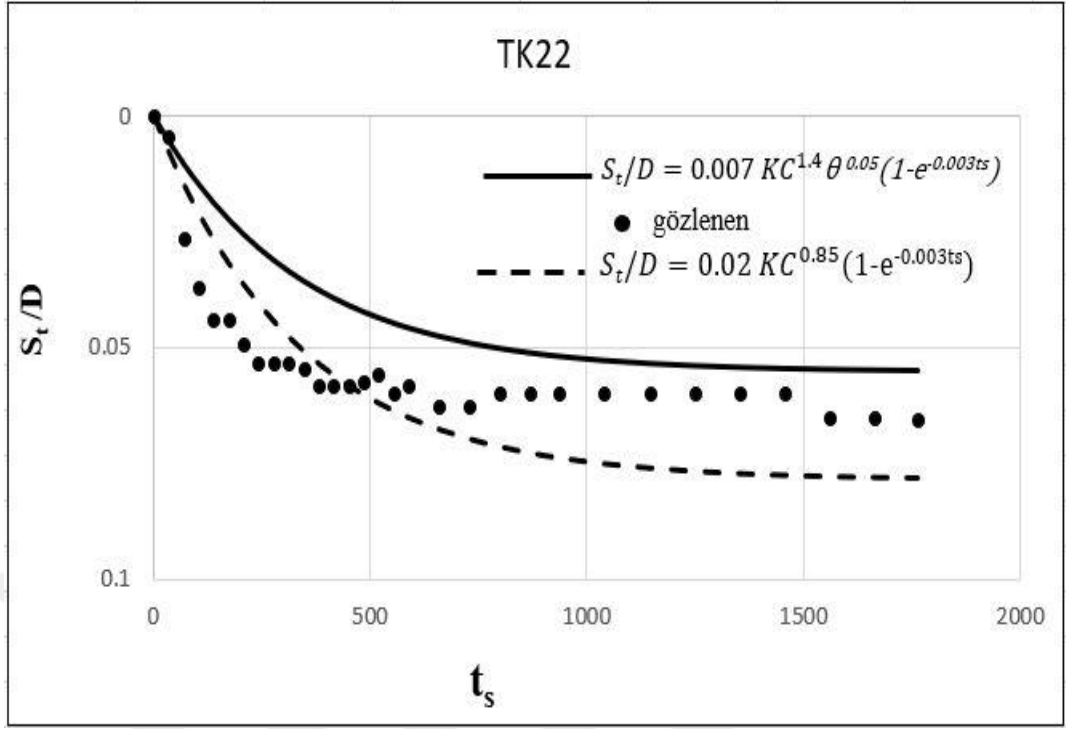
(4.17) bağıntısından görüldüğü üzere, (4.15) bağıntısındaki a , b ve c regresyon sabitleri, için nihai oyulma derinliği S/D 'nin, KC ve θ sayısına bağlı *ile* tahmin değerlerini veren 4.5 eşitliği ile aynı değerler elde edilmiştir. Göreceli nihai oyulma derinliklerinde olduğu gibi S_T/D değerinin tahmininde Shields parametresinin etkisi ihmal edilebilir mertebede olduğundan, $S_t/D = f(KC)$ olacak şekilde regresyon denklemi oluşturulmuş ve (4.18) eşitliği ile verilen bağıntı elde edilmiştir.

$$S_t/D = 0,02 KC^{0,85} (1 - e^{-0,003 t_s}) \quad (4.18)$$

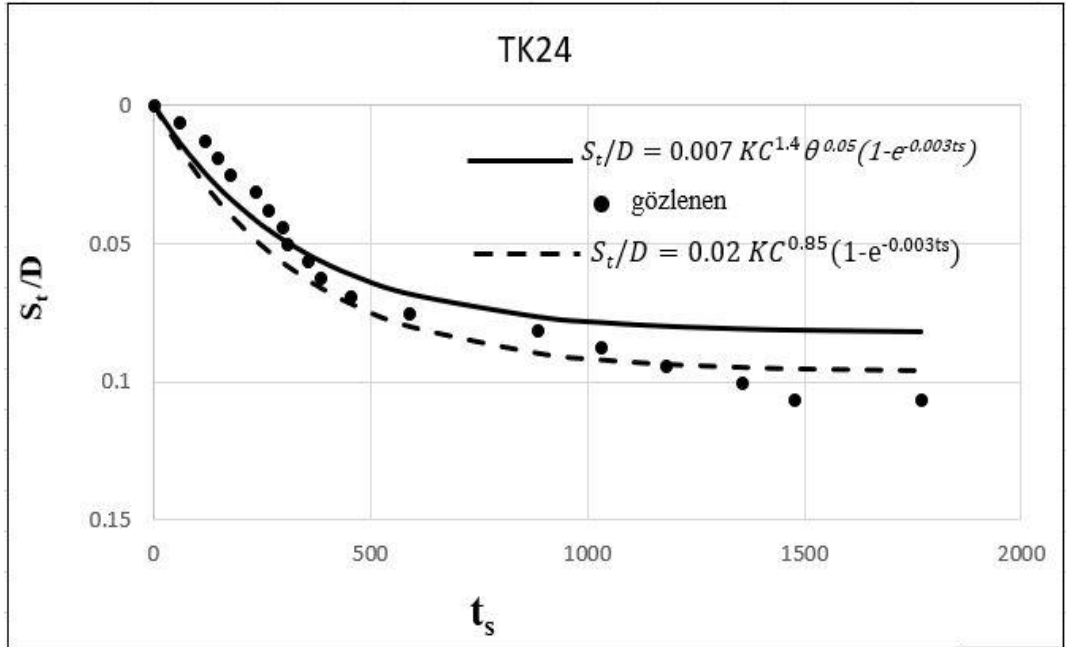
Şekil (4.17) ila Şekil (4.25) arasında $S_t/D = f(KC)$ olacak şekilde kurulan regresyon denklemi sonucu elde edilen S_t/D değerleri, $S_t/D = f(KC, \theta)$ olacak şekilde kurulan regresyon denklemi sonucu elde edilen S_t/D değerleri ve deneysel veriler bir arada sunulmaktadır.



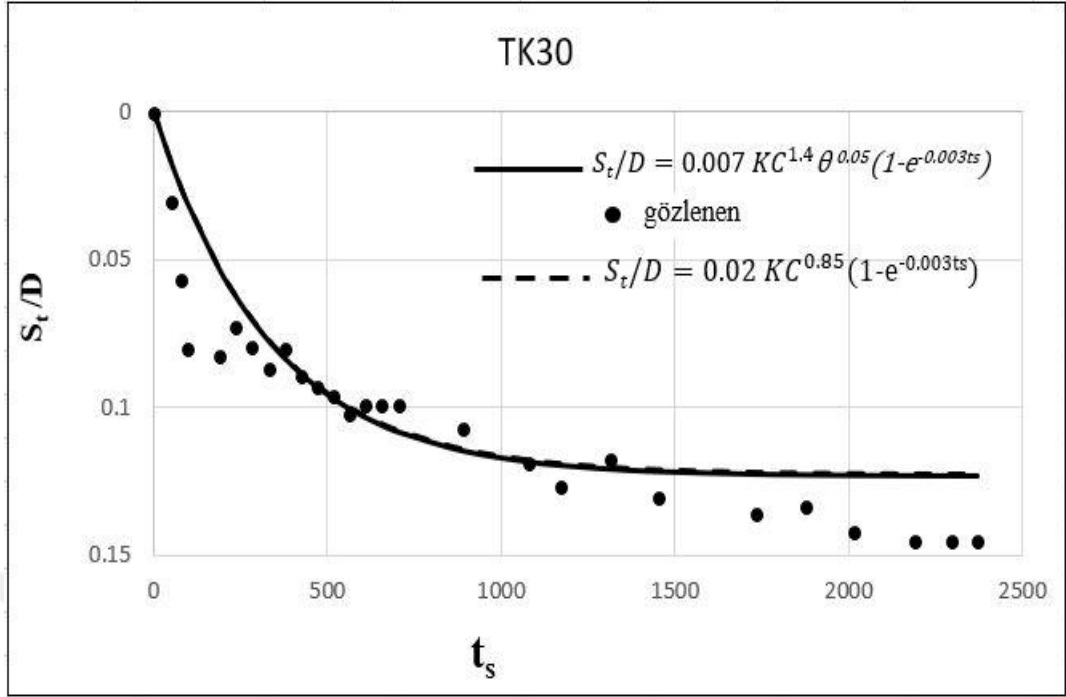
Şekil 4.17 TK17 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



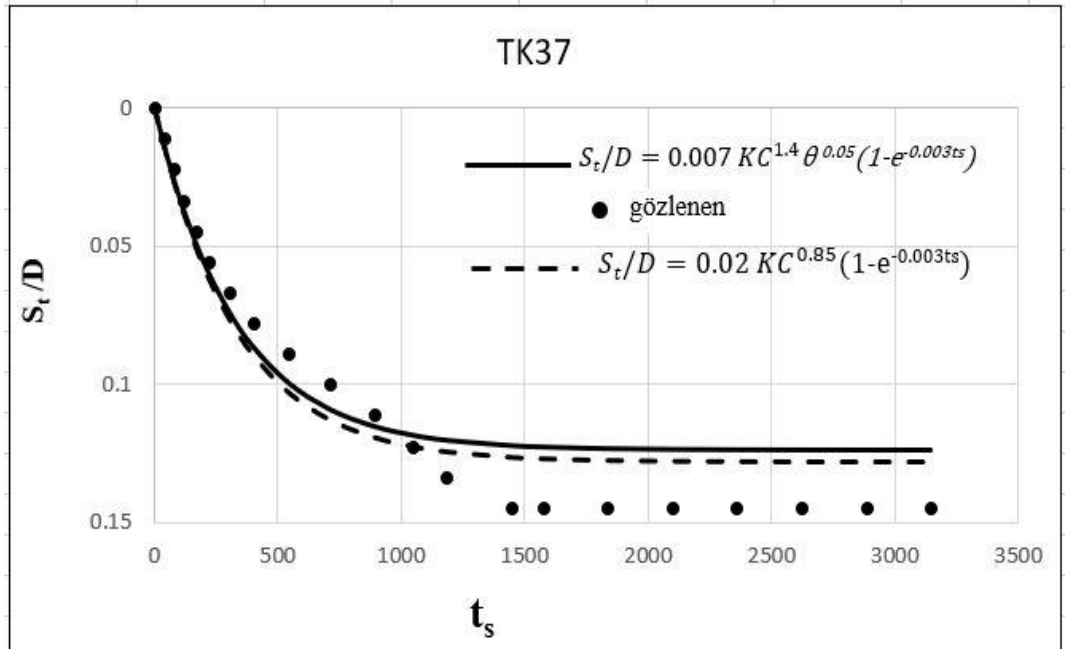
Şekil 4.18 TK22 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



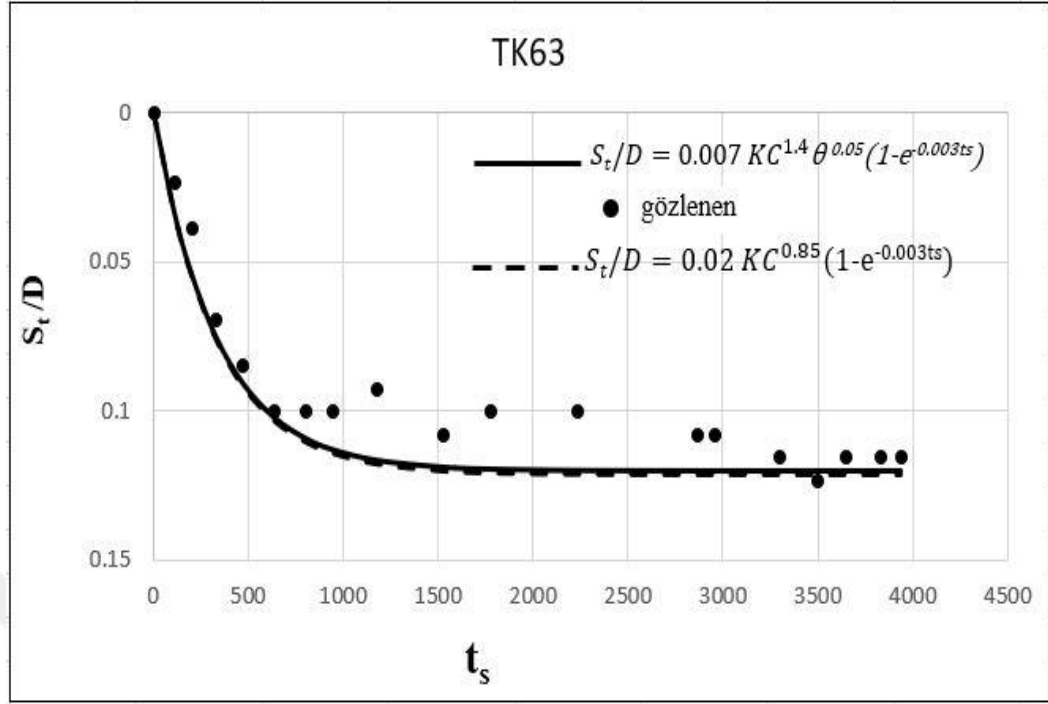
Şekil 4.19 TK24 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



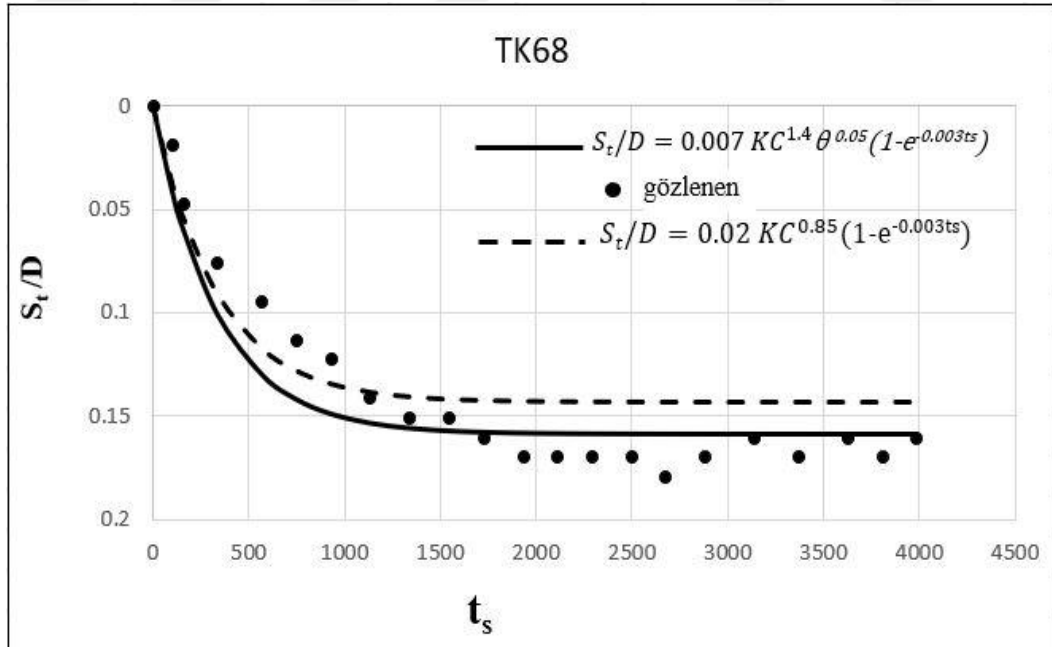
Şekil 4.20 TK30 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



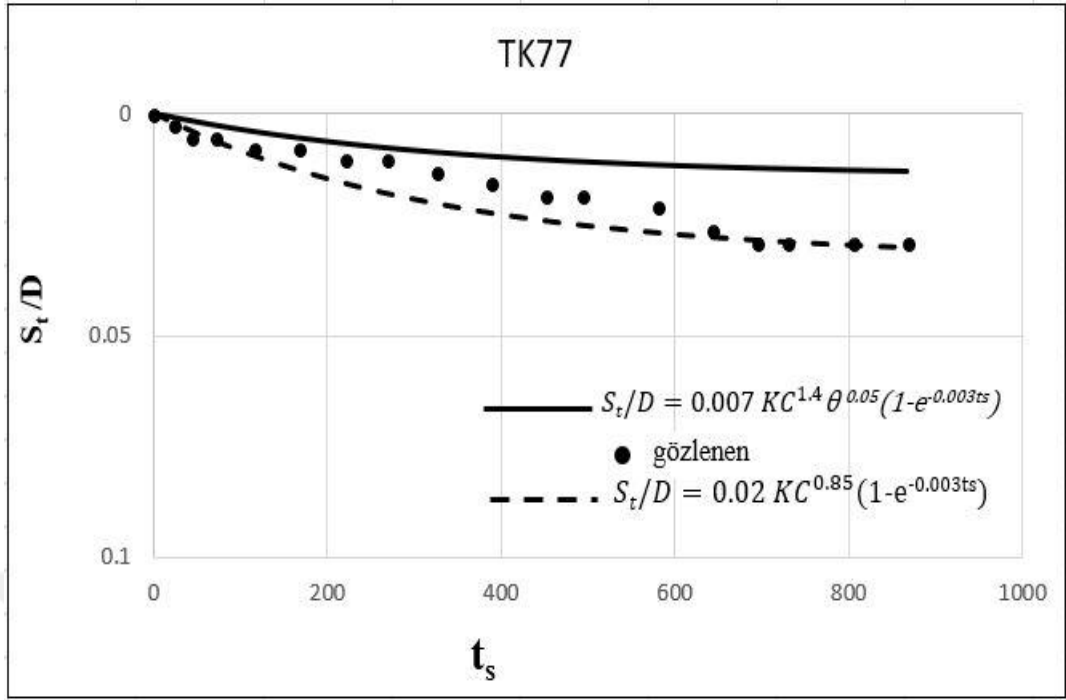
Şekil 4.21 TK37 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



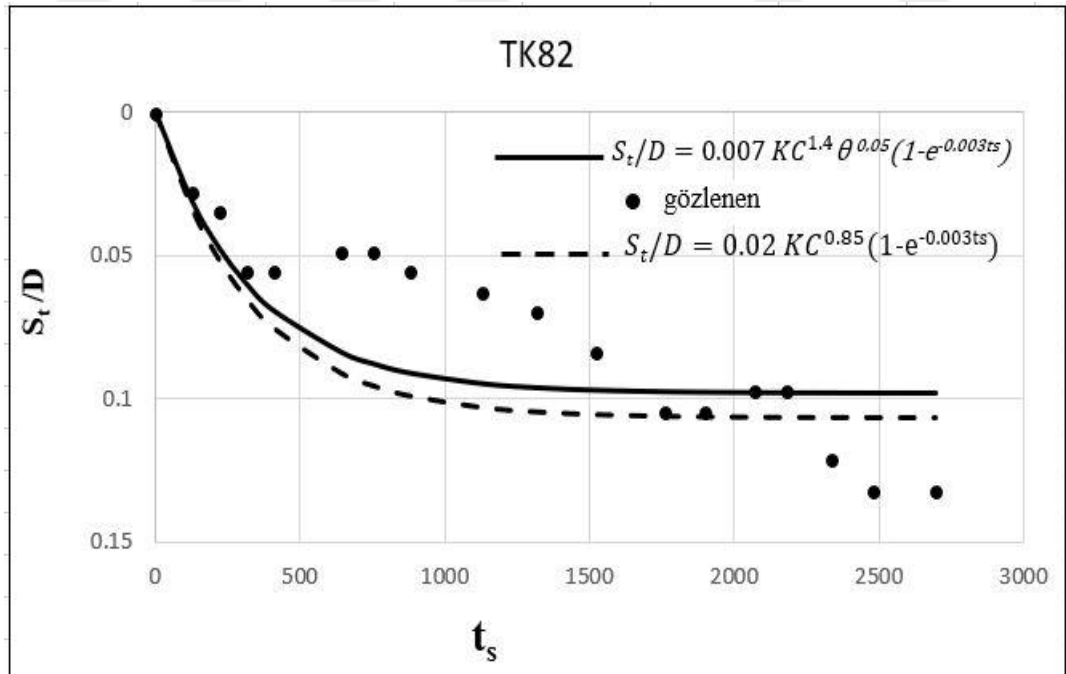
Şekil 4.22 TK63 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.23 TK68 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.24 TK77 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

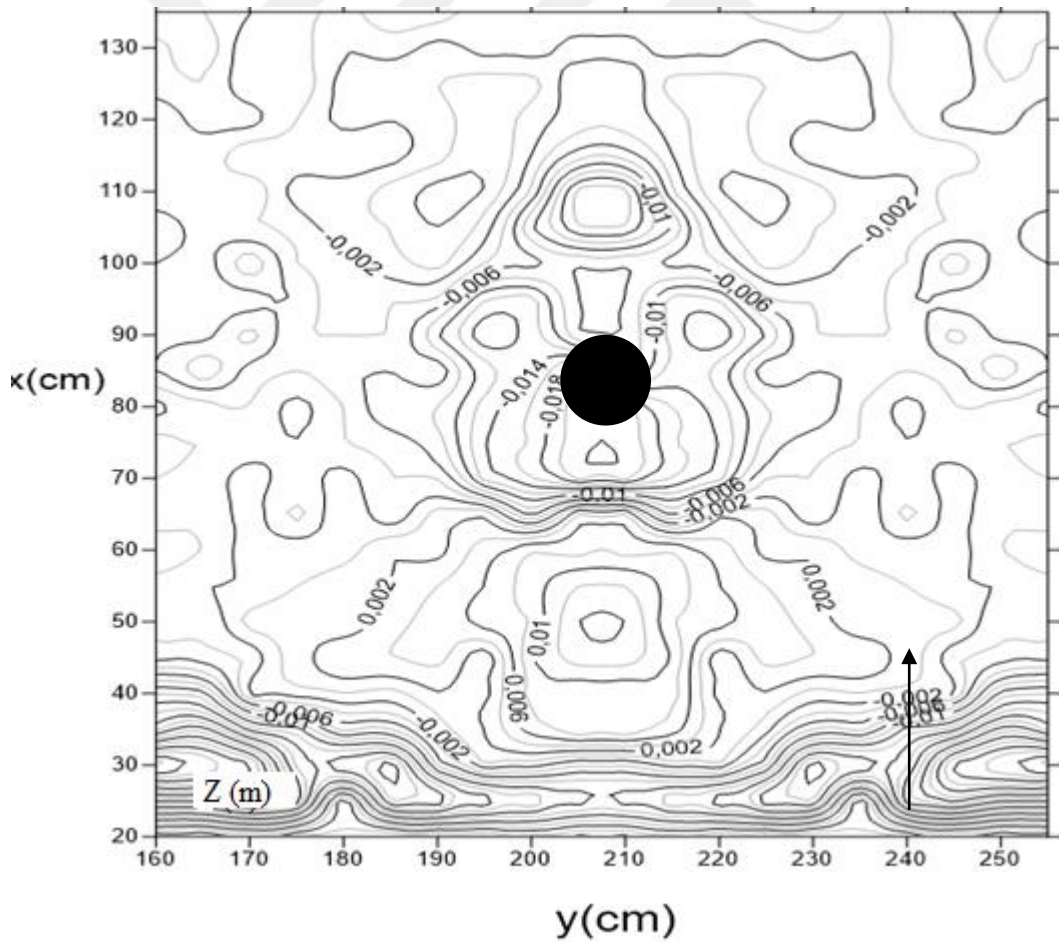


Şekil 4.25 TK82 nolu deneyde ölçülen ile (4.17) ve (4.18) eşitlikleri ile doğrulanması gerçekleştirilen ve boyutsuzlaştırılmış S_t/D değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi

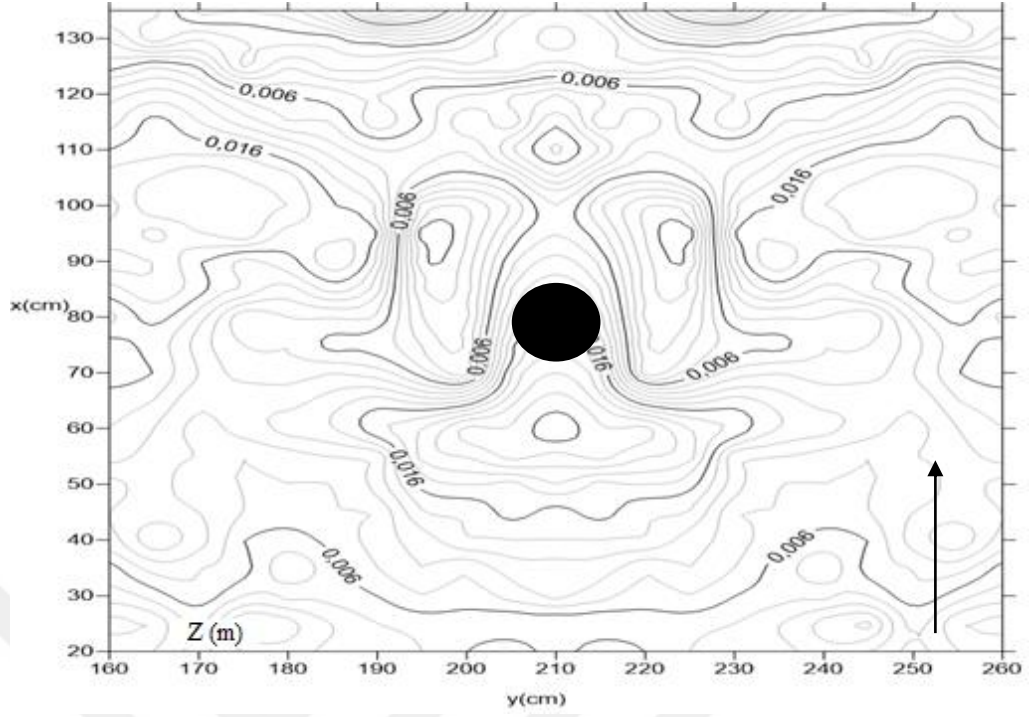
Yukarıda sıralanan şekiller ile verilen grafikler incelendiğinde, göreceli zamana bağlı oyulma derinliklerinin kestirimi için yalnızca KC sayısına bağlı olarak türetilen (4.18) nolu bağıntının örnek olarak verilen farklı deney durumlarında diğer bağıntıya göre “ $S_t/D = f(KC, \theta)$ ” tutarlı sonuçlar vermektedir.

4.4 Deneyler sonrasında elde edilen nihai taban batimetrisi

Şekil 4.26 ve 4.27 de tekli kazık ile deneyler sonrasında elde edilen nihai taban batimetrisi gösterilmektedir. Batimetri ölçümleri test kazağın olduğu eksenden y yönünde yarım metre mesafe ile ölçülmekte ve simetri olarak aktarılmaktadır. Hem x hem y ekseninde her 10 cm aralık ile veriler okumaktadır.

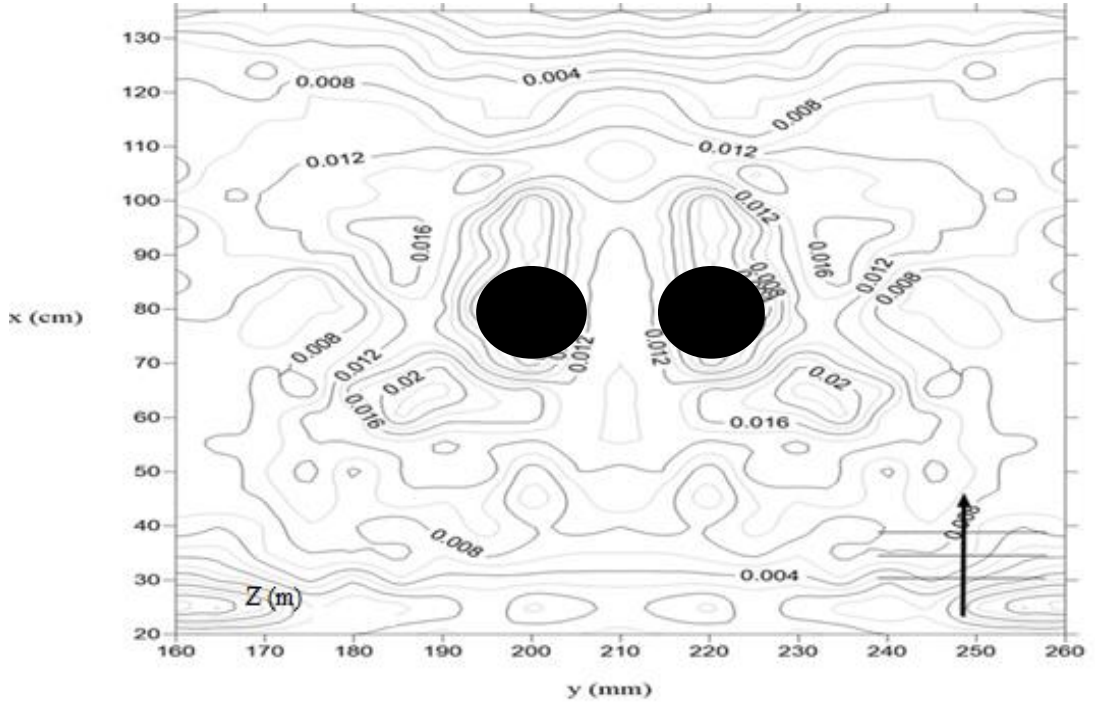


Şekil 4.26 TK68 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi

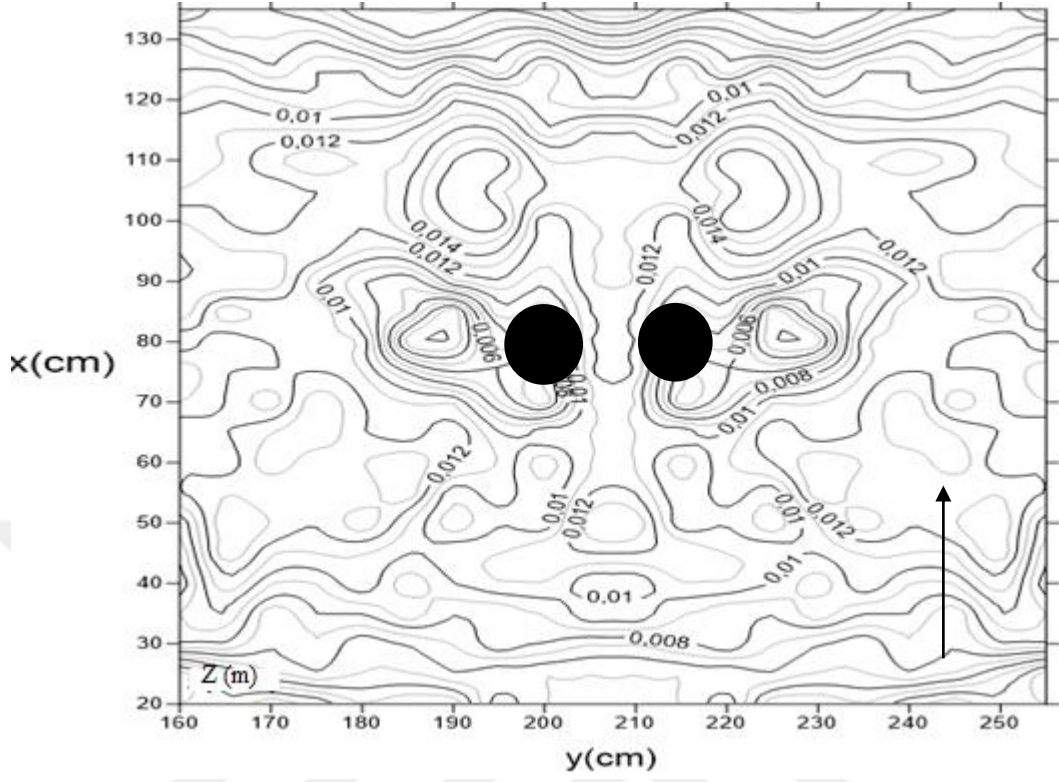


Şekil 4.27 TK64 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi

Şekil 4.28 ile şekil 4.29 arasına da iki kazığın yan yana yerleştirilmesi ile deneyler sonrasında elde edilen nihai taban batimetrisi gösterilmektedir.



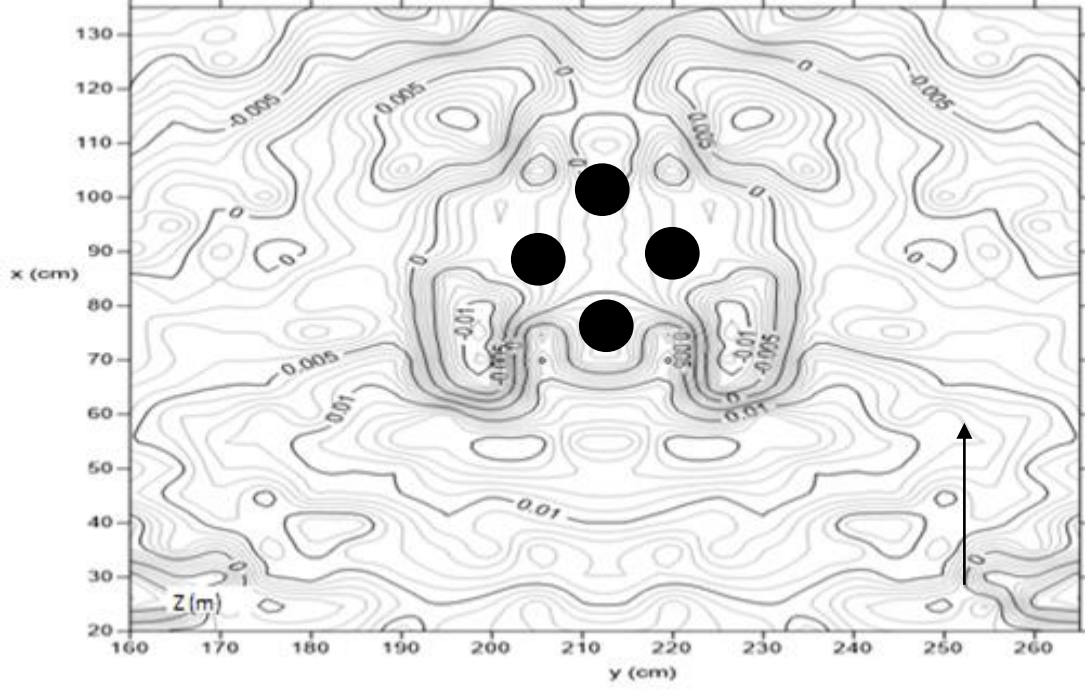
Şekil 4.28 GY09 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi



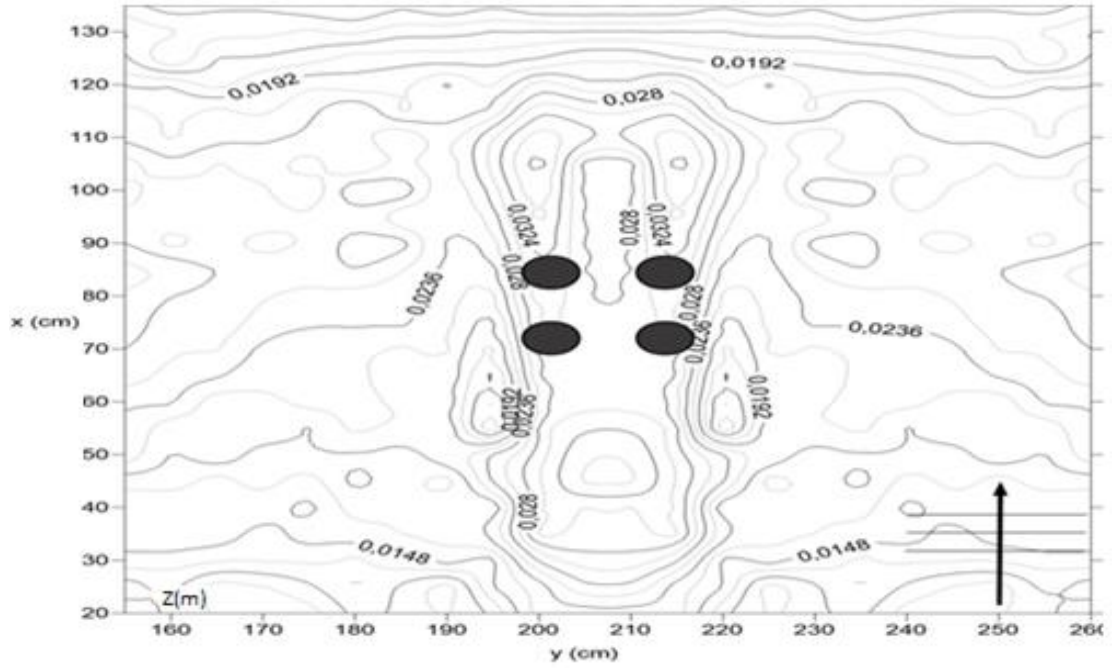
Şekil 4.29 GY18 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi

Şekil 4.30 ile şekil 4.31 arasına da iki kazığın arka arkaya yerleştirilmesi ile deneyler sonrasında elde edilen nihai taban batimetrisi gösterilmektedir.

Aynı çaplı dörütlü kazığın 90° ve 45° yerleşim açıları ile düzenlenmesi durumunda oluşan kazık grubu ile yapılan deneyler sonrasında elde edilen nihai taban batimetrisi Şekil 4.32 ve 4.33’de gösterilmektedir.



Şekil 4.32 GD02 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi



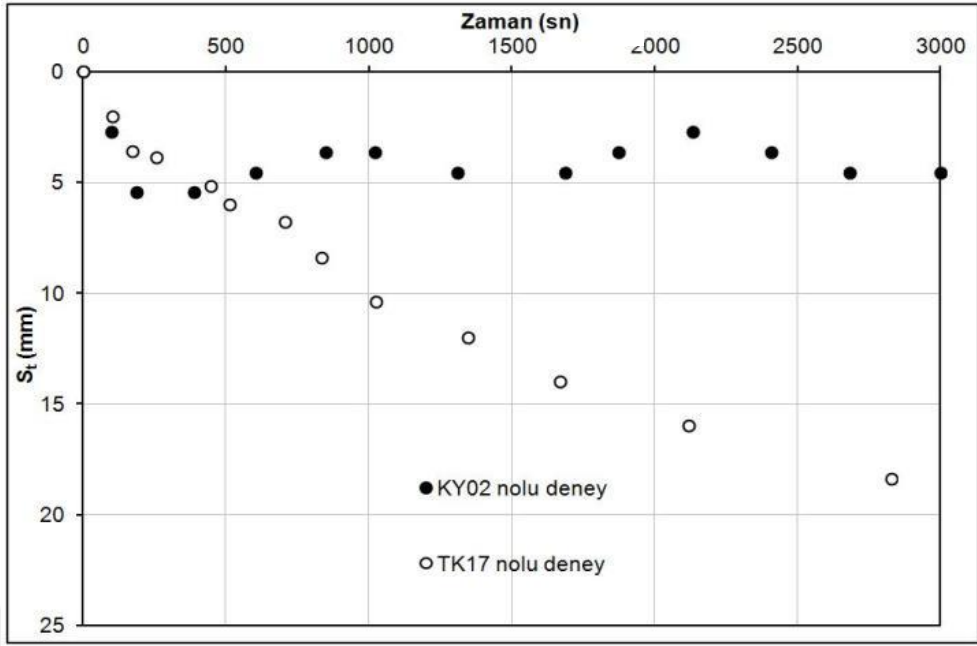
Şekil 4.33 GD12 nolu deney sonrasında elde edilen taban batimetrisi

Kazık grupları etrafında nihai durum için çıkarılan taban batimetrisi sonuçlarından yararlanılarak bulunan genel oyulma derinliklerinin, kazıkların her birinin etrafında zamana bağlı ölçülen yerel oyulma derinliklerinden büyük olduğudur. Bu durum özellikle dalga ilerleme yönüne göre 45° ve 90° yerleşimli dörtlü kazık grubu ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda daha belirgin bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Dörtlü kazık durumunda, her iki yönde aralarında bir çap boşluk bulunan dörtlü kazıkların büyük çaplı büyük bir kazık gibi davrandığı ve böylece tekil kazık durumundakinden daha büyük oyulmaların kazık grubu etrafında olduğu anlaşılmaktadır.

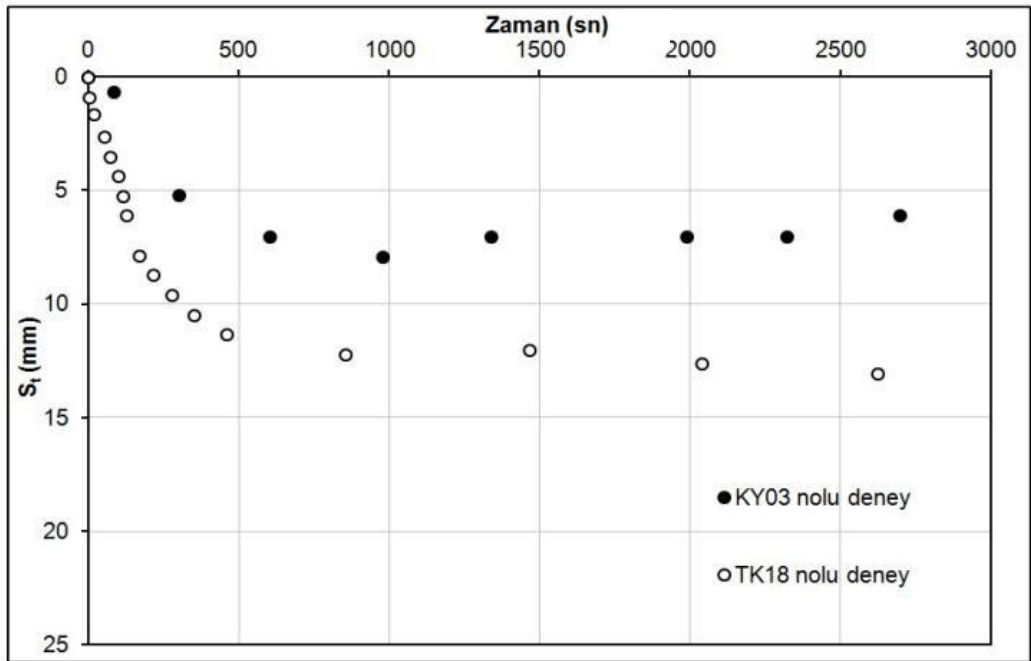
Yine dörtlü kazık gruplarında dalga ilerleme yönüne göre arkada kalan kazıkların etrafında oluşan oyulmaların öndeki kazıkların etrafındaki oyulmadan büyük kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum aynı çaplı iki kazığın dalga ilerleme yönüne göre arka arkaya yerleştirilmesi ile oluşturulan iki kazık grubu deneylerinde de görülmektedir.

4.5 Oyulmaya Karşı Önlem Deneyleri

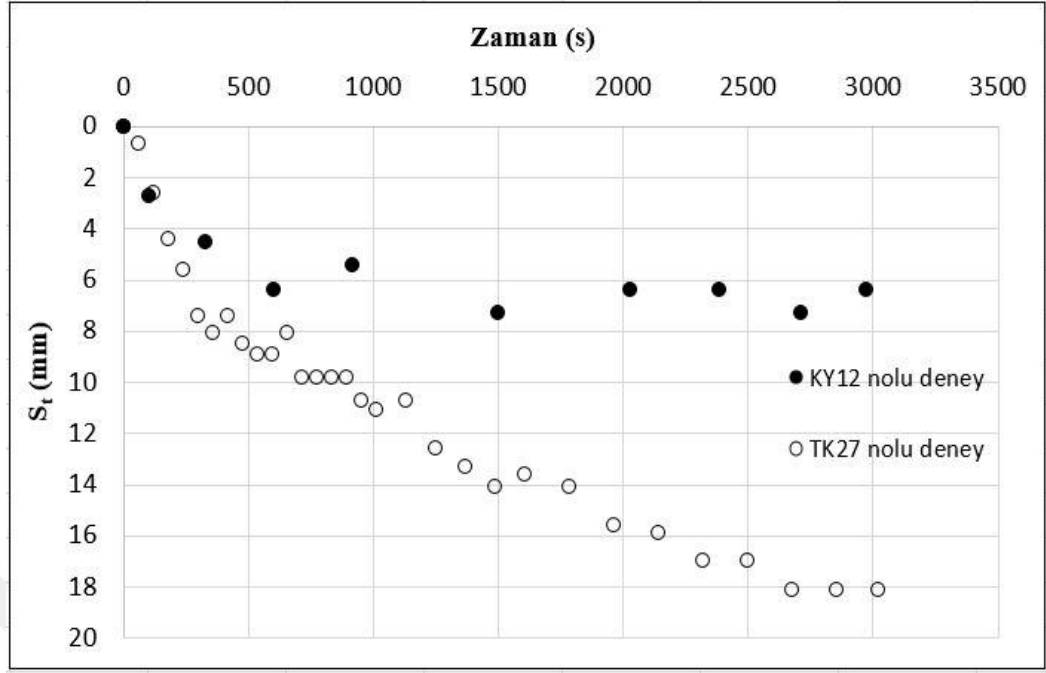
Aynı deneysel şartlarda koruyucu unsur olmadan tekil kazık etrafında zamana bağlı oyulma derinlikleri, yaka ile oluşturulan koruyucu durumdaki sonuçlar ile bir arada Şekil 4.34 ile Şekil 4.40 verilmektedir.



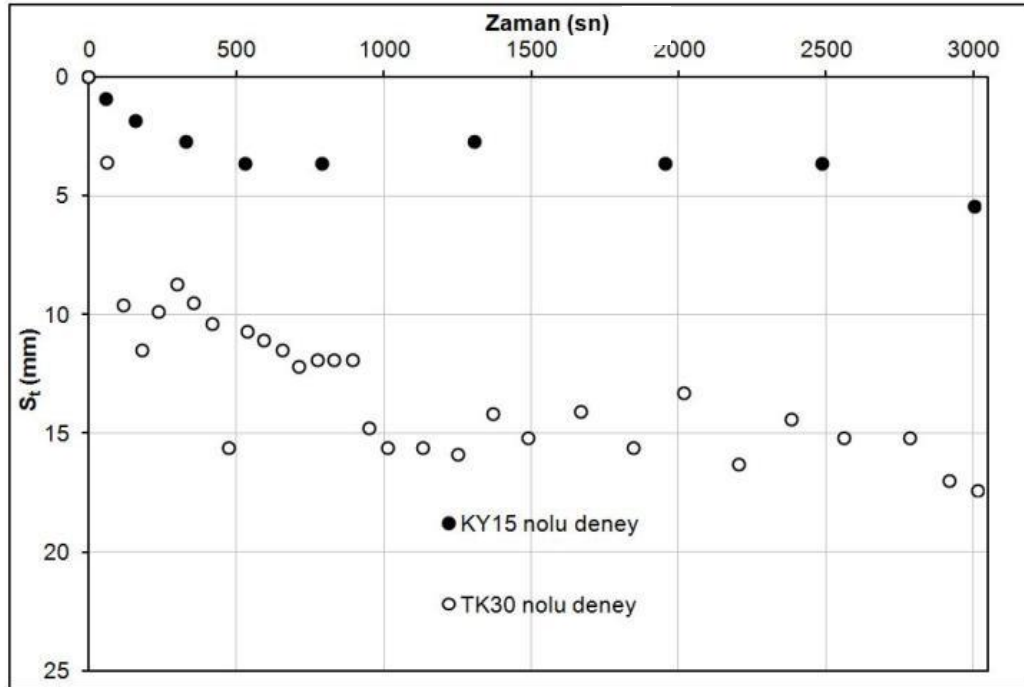
Şekil 4.34 Korumasız TK17 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY02 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması



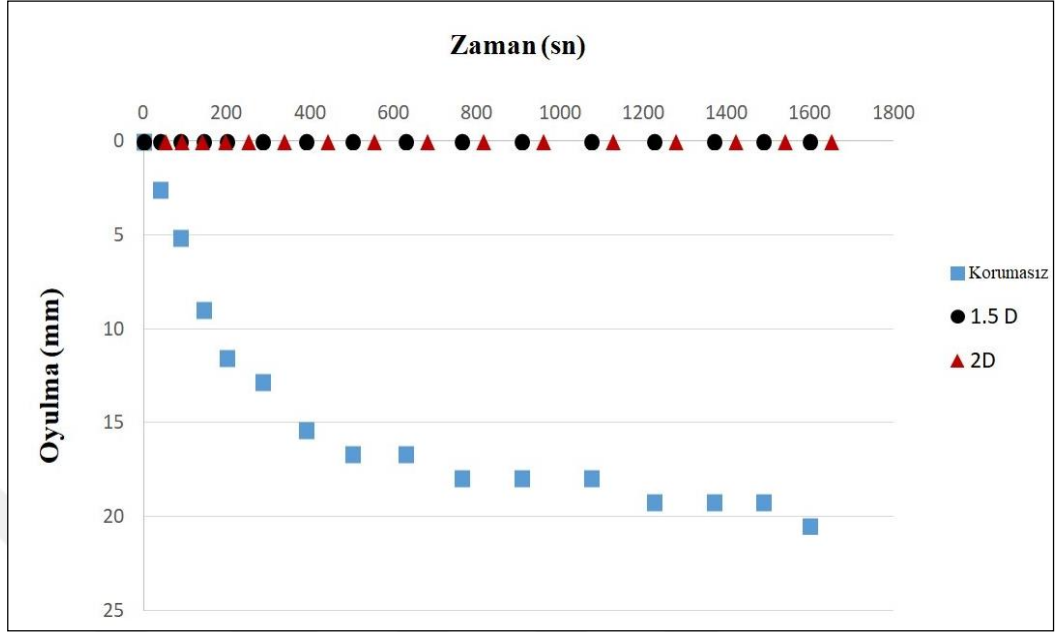
Şekil 4.35 Korumasız TK18 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY03 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması



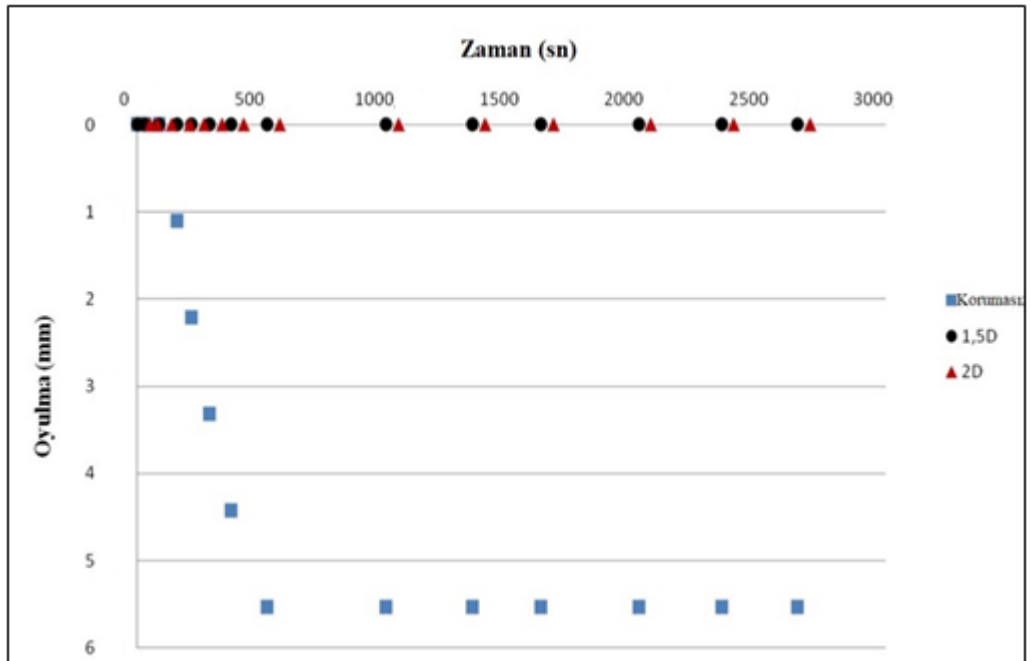
Şekil 4.36 Korumasız TK27 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY12 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması



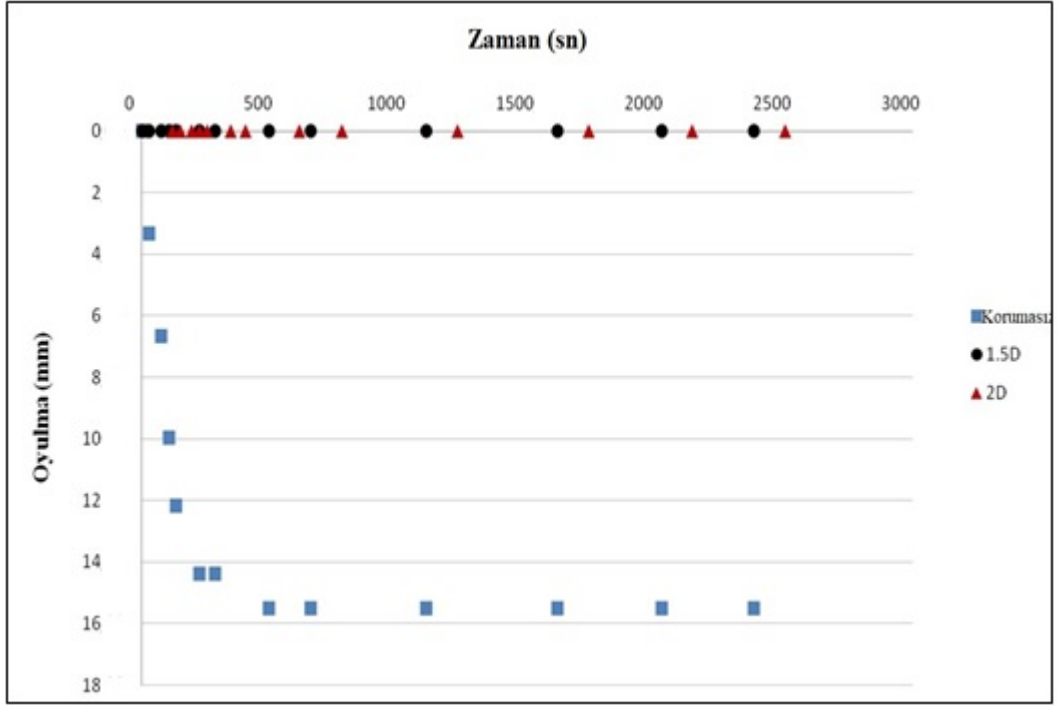
Şekil 4.37 Korumasız TK30 ve aynı koşullarda 1,5D yaka çaplı ile korumalı KY15 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.38 Korumasız TK50 ve aynı koşullarda 1,5·D yaka çaplı KY18 ve 2,0·D yaka çaplı KY21 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.39 Korumasız TK55 ve aynı koşullarda 1,5 D yaka çaplı KY24 ve 2,0·D yaka çaplı KY27 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.40 Korumasız TK60 ve aynı koşullarda 1,5·D yaka çaplı KY30 ve 2,0·D yaka çaplı KY33 deneylerinde elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği verilerinin karşılaştırılması

Verilen grafiklerden Şekil 4.34 ile Şekil 4.37 arasında $d_{50}=1,85$ mm dane çaplı taban malzemesi durumunda hem kazık çapının 1,5 katı hem de 2,0 katı çaplarına sahip yaka ile gerçekleştirilen koruyucu önlem durumlarında hiçbir deneyde kazık etrafında oyulma kaydedilmemiştir. Bu durum, kullanılan yakaların kazık çapının 1,5 katı olduğu durumda dahi bu taban malzemesinde oyulmaya karşı oldukça iyi performans gösterdiklerine işaret etmektedir.

$d_{50}=0,55$ mm dane çaplı taban malzemesi durumunda ise Şekil 4.38 ile Şekil 4.40 arasında koruyucu yaka kullanılan deneylerde nihai oyulma derinliklerinde %67'ye varan azalmalar tespit edilmiştir. Bu durum kullanılan yaka elemanların oyulmayı azaltıcı yönde yüksek performans gösterdiklerini işaret etmektedir. Ayrıca, silindirik kazıklar etrafında yaka kullanımı, inşaat teknikleri açısından uygulamada yer bulabilecek niteliktedir.

BÖLÜM BEŞ

SAYISAL MODEL ÇALIŞMALARI

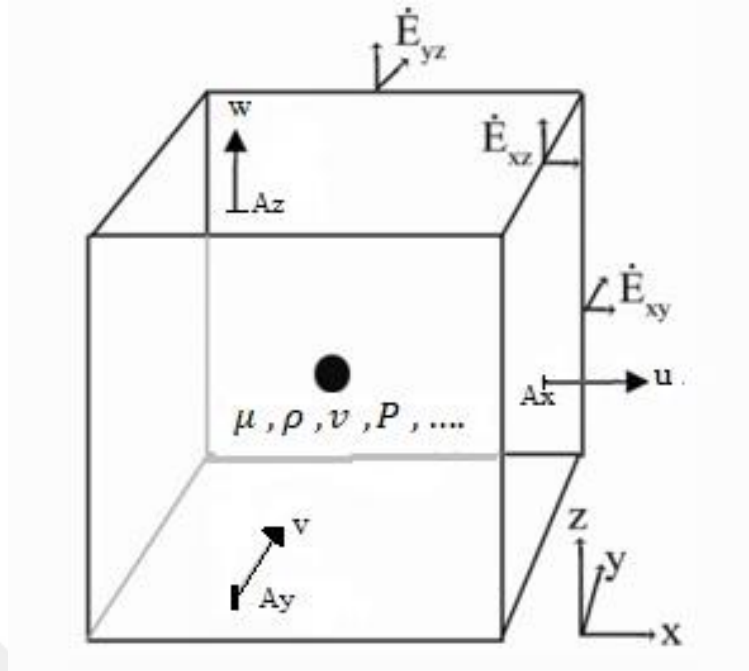
5.1 Sayısal Çözüm Yöntemi

Tez kapsamında sayısal model çalışmaları için Flow3D paket programı kullanılmıştır. Flow3D programı üç boyutlu akım problemlerini çözmektedir. Program bünyesinde akışkan hareketi için doğrusal olmayan ve zamana bağlı ikinci mertebeden diferansiyel denklemler yer almaktadır. Kullanılan akışkan hacmi (The Volume of Fluid–VOF) yöntemi üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlar: VOF taşınım denklemini çözme yöntemi ve akışkan hacmi fonksiyonunun tanımı, serbest yüzeydeki sınır şartlarının oluşturulması şeklindedir. (Flow Science Inc., 2007).

Flow 3D programı kartezyen koordinatlarından (x, y, z) yararlanarak diferansiyel denklemler yazabilmektedir. Yazılan bu denklemler karmaşık geometrisi olan modelleri FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Hareketli engel modelinde Alan ve hacim oranları zamana bağlı olarak değişebilmektedirler.

5.1.1 Temel Denklemler

Kontrol hacminin merkezinde akışkana ait büyüklükler yer almaktadır ve gerçekleşen hesaplar üniform olmayan çözüm ağının üzerinde yapılmaktadır. Vektörel hız değerleri (u, v, w) Şekil 5.1’de gösterildiği gibi kontrol hacmi yüzeyinde hesaplanmaktadır .



Şekil 5.1 Hesap hacmi ve tanımlar

5.1.2 Kütle Korunum Denklemi

Aşağıdaki şekilde verilen kütle korunum denklemlerinde:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A_x u)}{\partial x} + R \frac{\partial(\rho A_y v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho A_z w)}{\partial z} + \xi \frac{\rho A_x u}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (5.1)$$

$$\frac{R_{SOR}}{\rho} = \frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(u A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) + \xi \frac{A_x u}{x} \quad (5.2)$$

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \langle v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \rangle + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \langle v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \rangle + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (5.3)$$

V_F : akıma açık kesirsel hacmi, ρ : akışkan yoğunluğunu, R_{DIF} : türbülans yayılma terimini, R_{SOR} : kütle kaynağını ve u , v ve w hız bileşenlerini simgelemektedir. A_x , A_y ve A_z : x , y ve z doğrultularında akıma açık kesirsel

alanlardır. Kartezyen koordinatlar durumunda $R = 1$ ve $\xi = 0$ olup silindirik koordinatlar durumunda ise $\xi = 1$ değerinde olmaktadır. Hesaplama alanı üzerinde Bu yöntem ile akışkan hacmi ($\forall$) tanımlanır. R_{SOR} yoğunluk kaynak terimi olup örneğin gözenekli engel yüzeyleri boyunca kütle enjeksiyonunu modellemek için kullanılabilmektedir. Sıkıştırılamaz akışkan durumunda ρ sabittir. hücrenin tamamen akışkan ile dolu olduğunda 1, ve tamamen boş olduğunda sıfır, kısmen dolu olduğunda 0 ile 1 arasında bir değer alır. Eğer serbest yüzey eğimi varsa bir hücredeki yüzeyin eğimini ve yerini belirtmek için etrafındaki hücreleri dikkate alan algoritma kullanır.

5.1.3 Momentum Denklemleri

Hareket denklemleri bazı ilave terimler içeren Navier-Stokes denklemlerinden oluşmaktadır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_Z \frac{\partial u}{\partial x} + v A_Y R \frac{\partial u}{\partial y} + \omega A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_Y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \\ \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_x - \partial u_s) & \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_Z \frac{\partial v}{\partial x} + v A_Y R \frac{\partial v}{\partial y} + \omega A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_Y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \\ \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_x - \partial v_s) & \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_Z \frac{\partial \omega}{\partial x} + v A_Y R \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega A_Z \frac{\partial \omega}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_Y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_z + f_z - b_z - \\ \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (\omega - \omega_x - \partial \omega_s) & \end{aligned} \quad (5.4)$$

Bu denklemlerde (G_x, G_y, G_z) kütleel ivmelerine, (f_x, f_y, f_z) viskoz ivmelerine, (b_x, b_y, b_z) akıştaki kayıplarına karşılık gelmektedir.

5.1.4 Sediment Taşınıımı

Flow 3D paket programında sediment taşınıımının için kullanılan denklem u: akım hızı ve C_s : sediment konsantrasyonu, olmak üzere (6,5) bağıntısı kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \nabla \cdot (uC_s) = Diffusion \quad (5.5)$$

Taban hareketinden kaynaklı olan sediment taşınıımı için Meyer-Peter-Müller denklemini kullanılarak birim kesit alanından geçen sediment miktarını aşağıdaki gibi ifade etmektedir

$$Q_i = \beta_i \left(\Theta - \hat{\Theta}_{c,i}^* \right)^{1.5} \rho_i D_i^{1.5} \sqrt{\left(\frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} \right) g} \quad (5.6)$$

Buada

Θ :hesaplanmış shields sayısını

β : Sediment erozyon parametresini

D: tane medyan çapını

$\Theta_{c,i}$ Kritik Shields parametresi

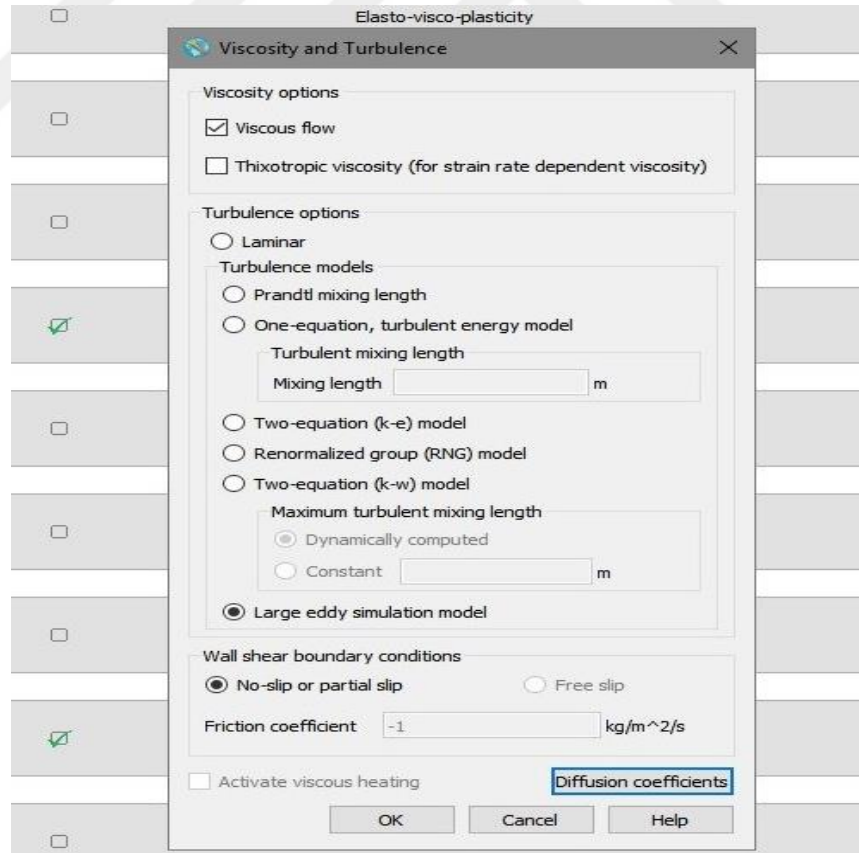
ρ_i sediment yoğunluğunu ve ρ_f akışkan yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\Theta_{c,i} = \frac{0.1}{R_i^{*2/3}} + 0.054 \left(1 + e^{\left(-\frac{R_i^{*0.52}}{10} \right)} \right) \quad (5.7)$$

Kritik shields parametresi 5.7 denklemi ile belirlenmekte, burada μ akışkan viskozitesini göstermektedir.

5.1.5 Türbülans modelleri ve Katı madde hareketinin tanımlanması

Şekil 5.2’de Flow3D programının bünyesinde barındırdığı türbülans modelleri gösterilmektedir. Bunlar Prandtl karışım uzunluğu modeli, tek denklem modeli, iki denklem $k - \varepsilon$ modeli, RNG modeli (Re Normalisation Group), büyük çevrinti modeli (Large Eddy Simulation – LES) dir,



Şekil 5.2 Flow3D programında türbülans modelleri

Her hücrede katı maddeyle ilgili her bileşen – kayma, sürüklenme ve taban malzemesinin taşınması – bağımsız olarak hesaplanmakta ve beraber toplanmaktadır. Taşınan katı madde miktarını belirlemek için kullanılan bağıntı θ_{cr} boyutsuz kritik Shields parametresi θ yerel Shields parametresi olmak üzere;

$$\phi = \beta(\theta - \theta_{cr}) \quad (5.8)$$

Şeklindeki Meyer, Peter ve Müller bağıntısıdır. Taban malzemesinin boyutsuz taşınma oranı olan Φ ile taban malzemesinin q_b hacimsel taşınma oranı arasındaki ilişki, g : yerçekimi ivmesi, ρ_s : katı madde yoğunluğu, ρ : akışkanın yoğunluğu ve d_s : sediment dane çapı olmak üzere;

$$q_b = \Phi \left[g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s^3 \right]^{1/2} \quad (5.9)$$

Şeklinde yazılmaktadır.(5.6) denklemindeki β katsayısı düşük taşınma durumunda 5,0–5,7, orta mertebede taşınma durumunda 8, fazla katı madde taşınması durumunda ise 13’e varan değerler almaktadır. Kullanıcı tarafından aksi belirtilmedikçe yazılımda 8 değeri alınmaktadır (Flow Science Inc., 2007).

5.2 Sayısal Model Sonuçları

Flow3D programı ile Sayısal model çalışmaları kapsamında, önce deney kanalının modeli oluşturulmuş, daha sonra dalga üretimi ve sönümlenmesi ve en sonunda hareketli tabanın eklenerek kazık etrafında zemin hareketlerinin modellenmesi şeklinde bir program izlenmiştir. Deneylerdeki fiziksel koşulların Flow3D programında modellenmesiyle tekil ve farklı yerleşimlerde kazık grupları için sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 Uygun Türbülans Modelinin Belirlenmesi

Deneysel sonuçlar ile Flow3D programından elde edilen sonuçların kalibrasyonu amacıyla programda girilmesi gereken kritik Shields parametresi değerinin optimizasyonu için farklı çözümler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. $d_{50}=1,85$ mm dane çaplı malzeme için deney sonuçları ile farklı kritik Shields parametresi (θ_{kr}) alınarak elde edilmiştir. θ_{kr} değeri 0,01; 0,03 ve 0,05 alınarak yapılan hesapların sonuçları incelendiğinde $\theta_{kr}=0,03$ alınması durumundaki sonuçların deney sonuçlarıyla çok daha uyumlu olduğu görülmektedir. Dolayısıyla $d_{50}=1,85$ mm dane çaplı malzeme için yapılan sayısal çözümlerde $\theta_{kr}=0,03$ alınmıştır. $d_{50}=1,85$ mm dane çaplı malzeme için literatürde verilen farklı araştırmacıların deney sonuçlarına dayanan Shields parametresi eğrisinde, tezdeki deneyel şartlara bağlı olarak bu değerin 0,038–0,047 aralığında olması beklenmektedir. Flow3D programı sonuçlarının deney sonuçları ile uyumluluğu açısından bu değerin 0,03 alınması literatürde verilen değerlere yakındır.

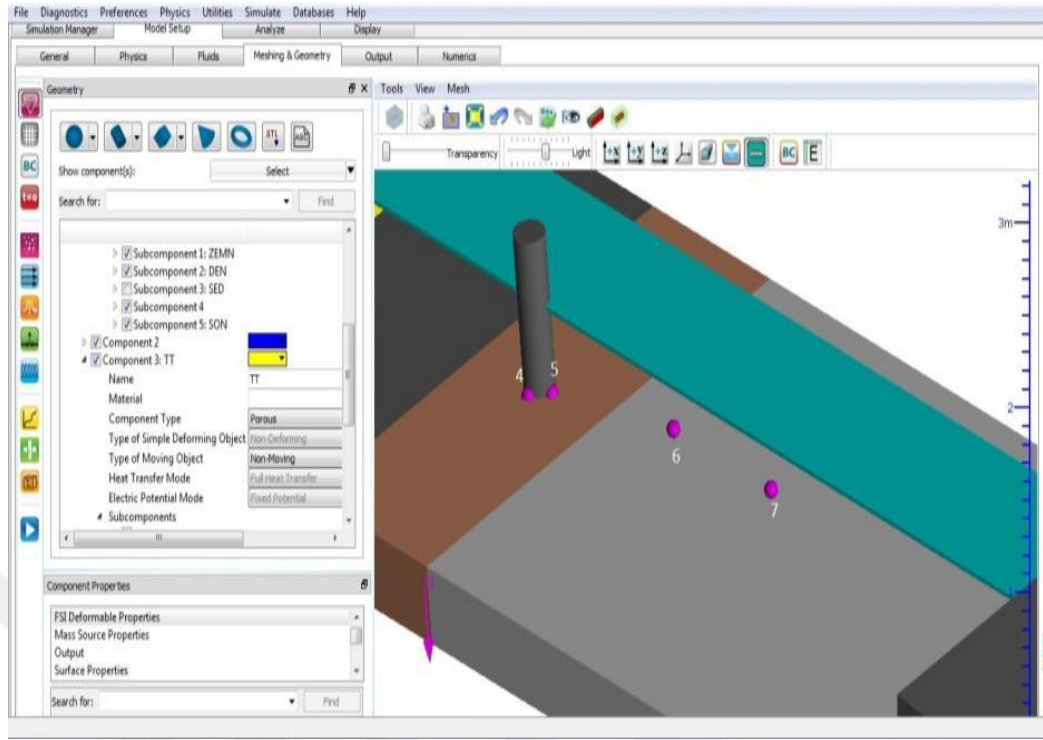
Benzer şekilde $d_{50}=0,55$ mm dane çaplı malzeme için yapılan ön analizlerde θ_k değerinin 0,023 alınması durumunda sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. $d_{50}=0,55$ mm dane çaplı malzeme için literatürden elde edilen değer ise 0,032–0,040

aralığında olmaktadır. Her iki sonuçtan görüldüğü gibi Flow3D sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumu açısından programda alınması gereken kritik Shields parametresi literatürde verilen değerlerden bir miktar küçük olmaktadır.

Seçilen türbülans modeline bağlı sayısal çözümün davranışı ve deneysel sonuçlara uyumu incelenerek sayısal çözümlerde hangi türbülans modelinin seçilmesinin uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bu amaçla 160 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda farklı türbülans modelleri ile sayısal çözümler yapılmıştır ve RNG modeli ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu için diğer tüm çözümlerde RNG modeli kullanılmıştır.

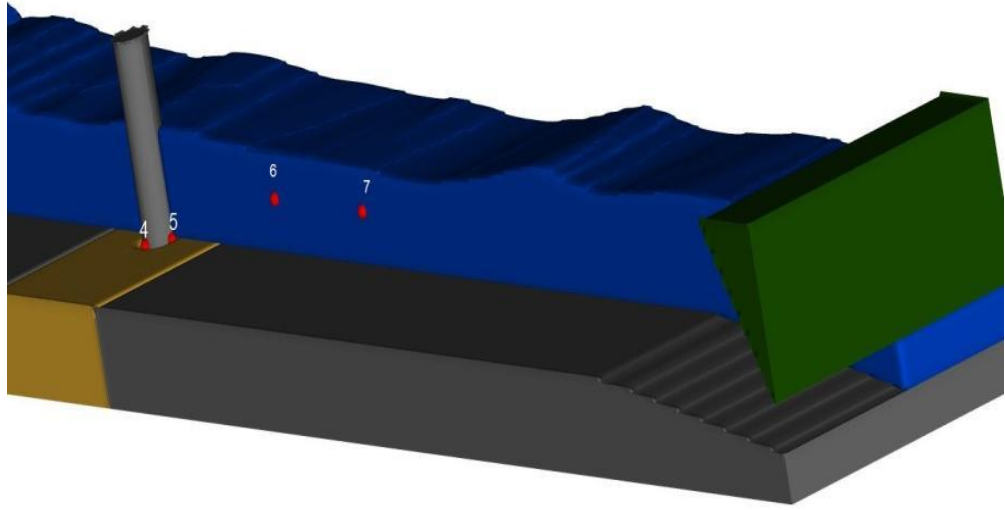
5.2.2 Tekil Kazık Sayısal Model Sonuçları

Tekil kazık için Flow3D ile oluşturulan sayısal modelin ilkinde deneyden elde edilen dalga özellikleri dikkate alınarak $H_w=13$ cm ve $T_w=3,6$ s olan dalga tipi seçilmiştir. Taban malzemesi dane medyan çapı $d_{50}=0,55$ mm'dir. $D=200$ mm çapında tekil kazığın yer aldığı modelin ve ölçüm sondalarının Flow3D programında tanımlanması Şekil 5.3'de gösterilmektedir.



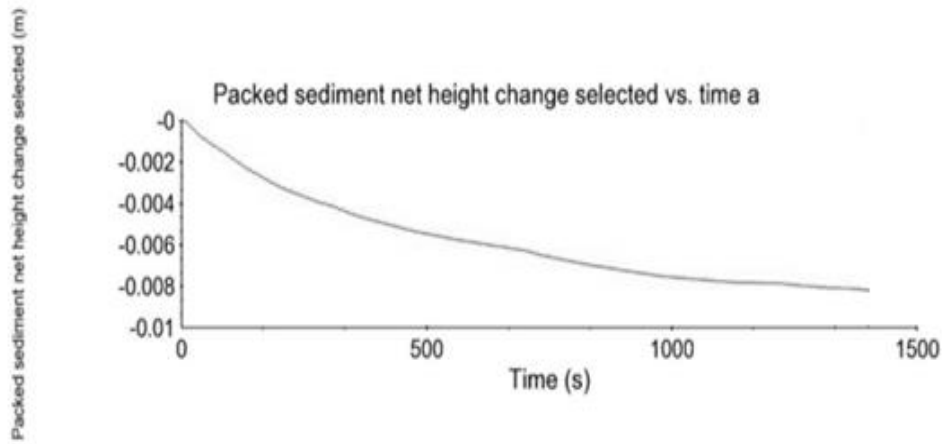
Şekil 5.3 Flow 3D ile D=200 mm tekil kazık modelinin ve ölçüm sondalarının tanımlanması

Şekil 5.4’de sayısal benzeşim için Flow3D programında oluşturulmuş tekil kazık modeli ve ölçüm sondaları görülmektedir. Şekilde görülen 4 ve 5 nolu sondalar tabandaki oyulmaların ölçüldüğü, 6 ve 7 nolu sondalar ise su derinliklerinin ölçüldüğü sondalardır. 5 nolu sonda dalga yönünde kazığın ön kısmına ve 4 nolu sonda ise yan tarafına yerleştirilmiştir. Şekil 5.4’de sarı renkli bölge hareketli taban malzemesinin bulunduğu yeri, gri renkli bölgeler taban ve kazığı, yeşil renkli cisim dalga üreticini, mavi renkli bölge suyu göstermektedir.



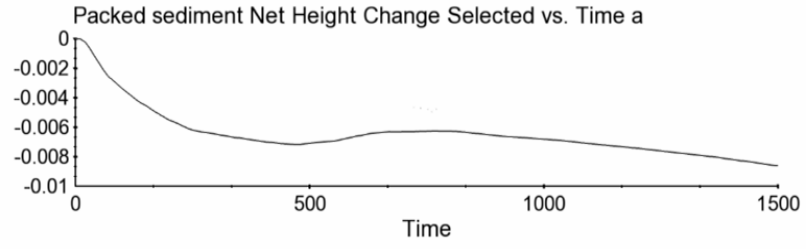
Şekil 5.4 Flow3D ile yapılan $D=200$ mm çaplı tekil kazık modeli ve ölçüm sondaları

4 nolu sonda ile ölçülen tabandaki oyulmaların zamana göre değişimi Şekil 5.5’de, 5 nolu sonda ile ölçülen taban oyulmasının zamana göre değişimi ise Şekil 5.6’da gösterilmektedir. Şekillerde düşey eksen oyulma derinliğini yatay eksen zamanı göstermektedir. 6 nolu sonda ile ölçülen su derinliklerinin zamana bağlı değişimleri ise Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekilde düşey eksen su derinliğini yatay eksen zamanı göstermektedir

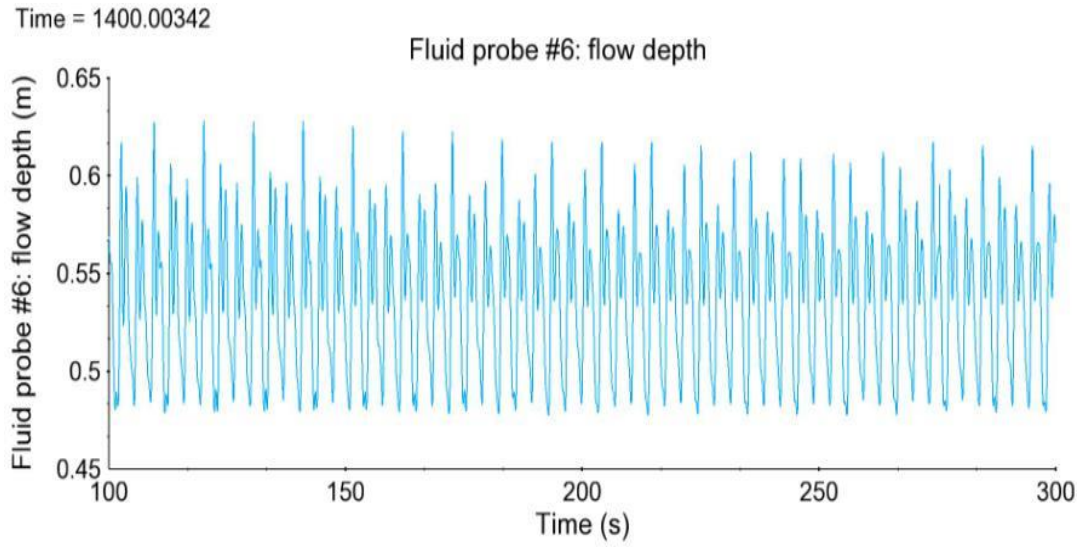


Şekil 5.5 $D=200$ mm çaplı tekil kazık modeli 4 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma derinlikleri

Packed sediment Net Height Change Selected

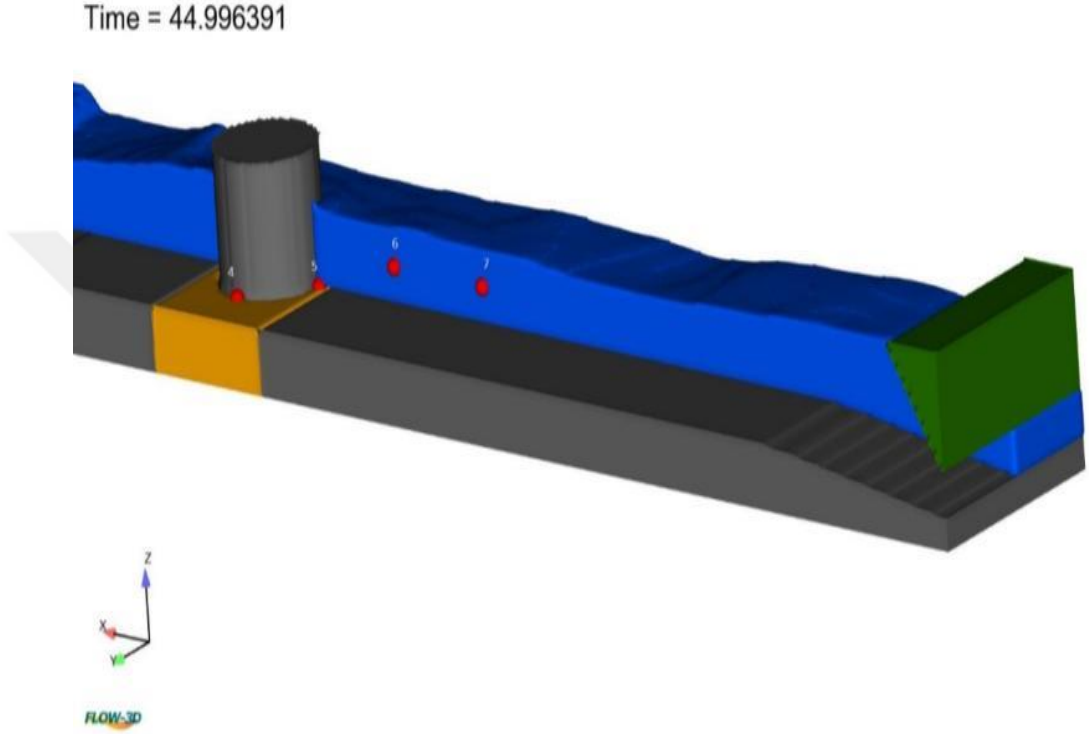


Şekil 5.6 $D=200$ mm çaplı tekil kazık modeli 5 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma derinlikleri



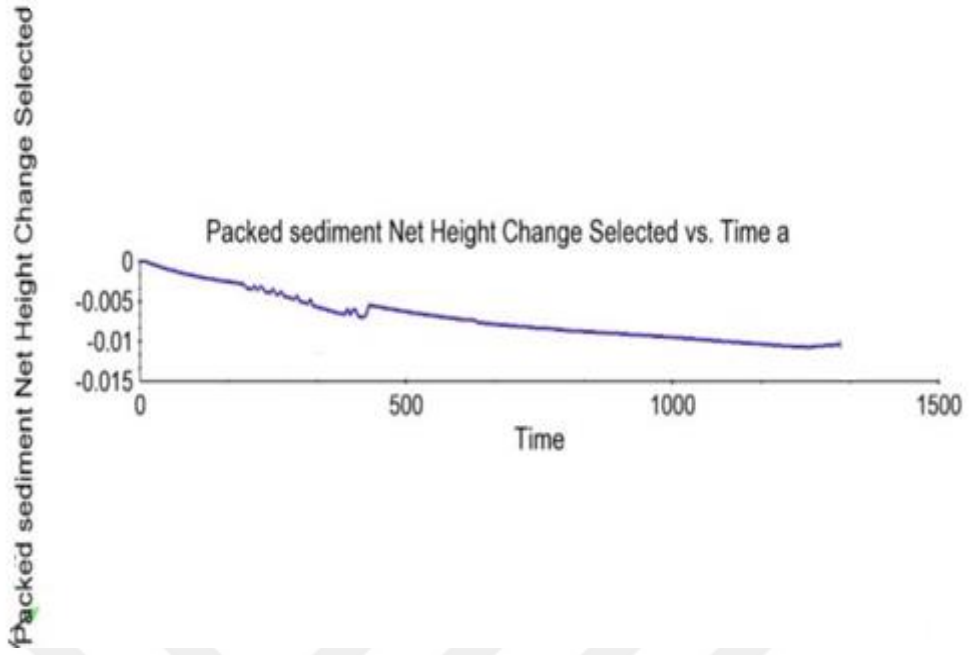
Şekil 5.7 $D=200$ mm çaplı tekil kazık modeli 6 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı su seviyeleri (dalga kaydı)

İkinci sayısal benzeşim modelinde bir önceki ile dalga karakteristikleri açısından aynı deney koşulları dikkate alınmıştır. Taban malzemesi dane medyan çapı $d_{50}=0,55$ mm olup tekil kazık çapı $D=950$ mm'dir. Bu sayısal modele ait ölçüm sondaları Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

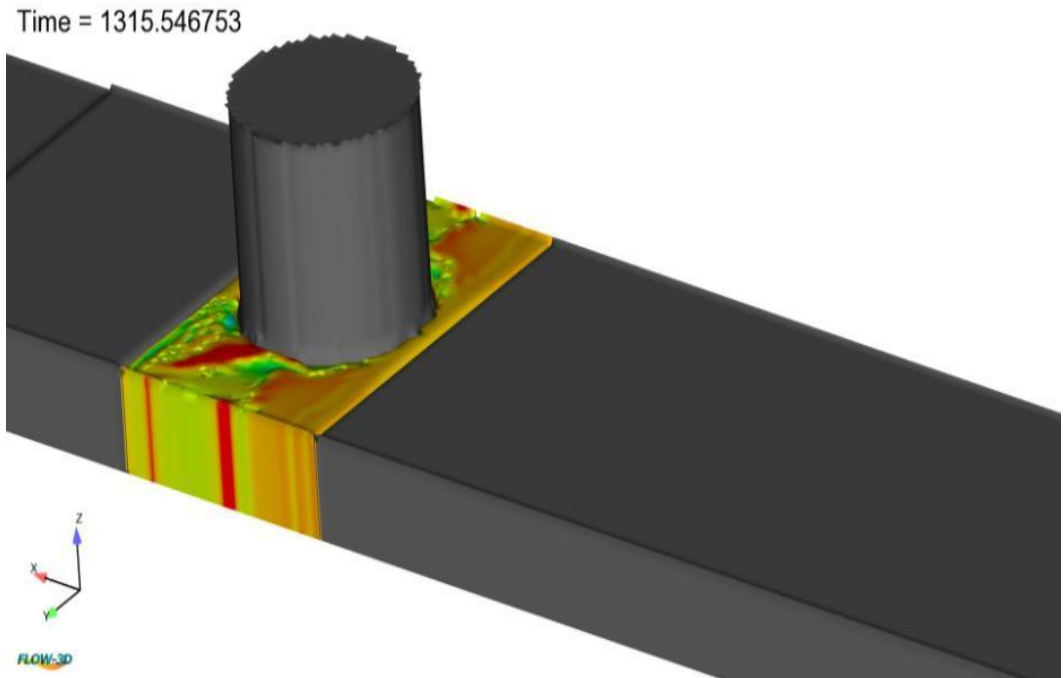


Şekil 5.8 Flow3D ile yapılan $D=950$ mm tekil kazık sayısal modeli ve ölçüm sondaları

$D=950$ mm tekil kazık deney setinin Flow3D ile sayısal benzetimi sonucunda, 4 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma değerleri Şekil 5.9'da, verilmektedir. 1315 s süren sayısal benzeşim sonucunda oluşan taban batimetrisi üç boyutlu görüntüsü ise Şekil 5.10'de yer almaktadır.

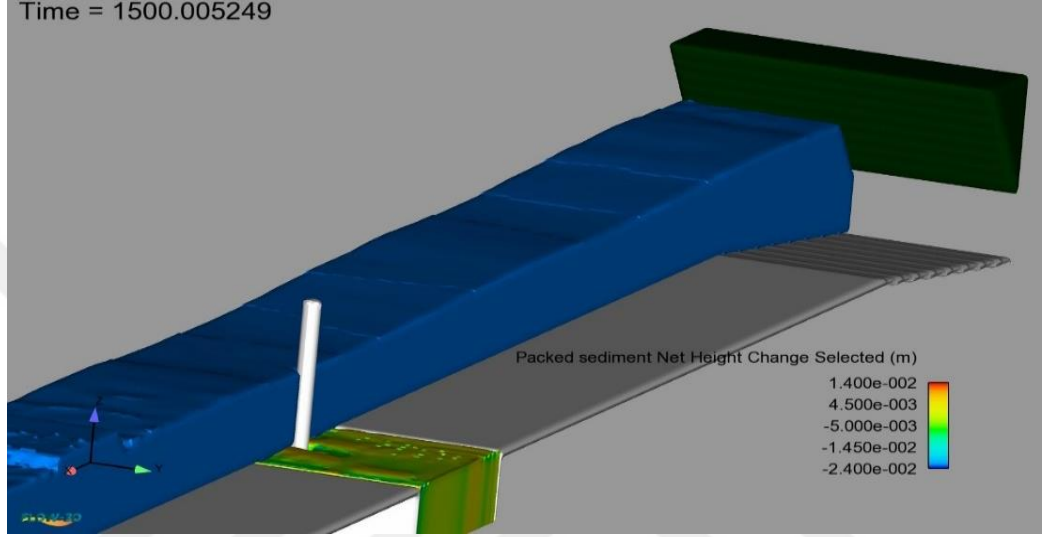


Şekil 5.9 D=950 mm tekil kazık modeli 4 nolu sonda ile ölçülen zamana bağlı oyulma derinlikleri

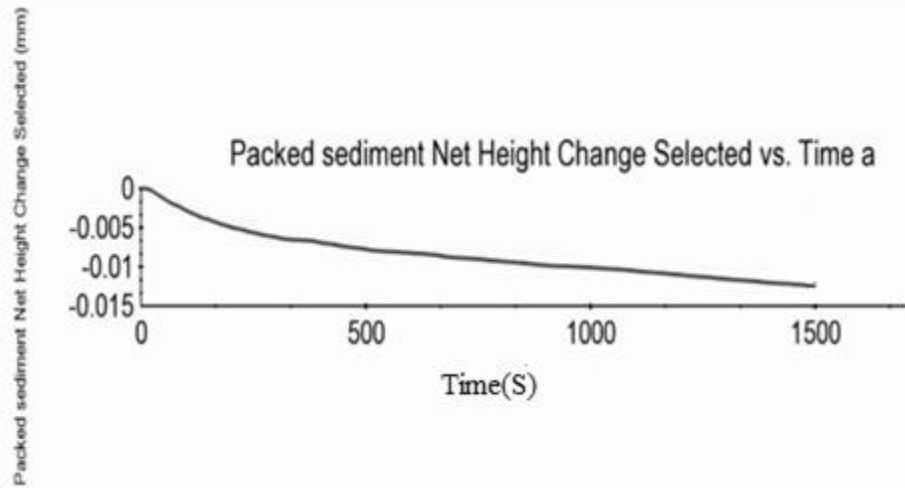


Şekil 5.10 D=950 mm tekil kazık modeli 1315 s'lik sayısal benzeşim sonunda tabanda oluşan oyulmalar

$D=63$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çapındaki taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen sayısal model Şekil 5.11’de, modele ait zamana bağlı oyulma derinlikleri ise Şekil 5.12’de görülmektedir.

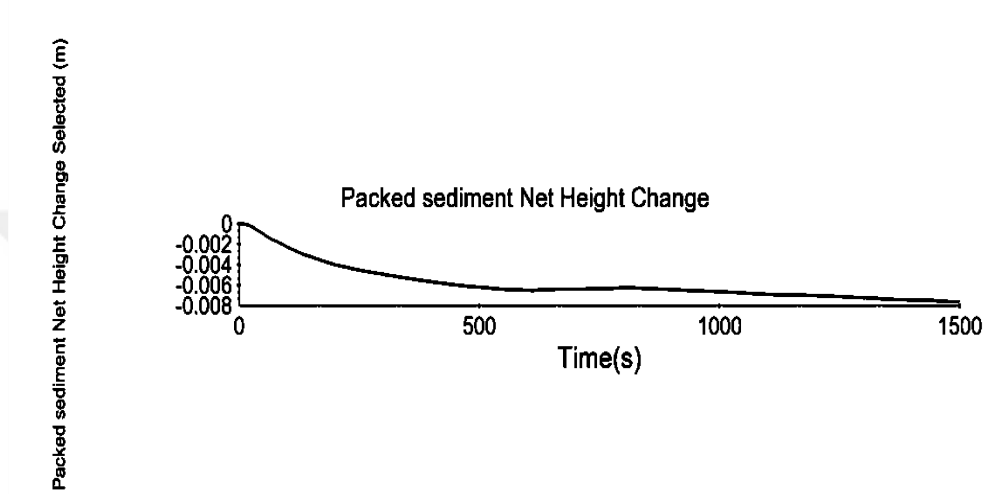


Şekil 5.11 $D=63$ mm, $H_w=20$ cm, $T_w=2,7$ s ve $d_{50}=1,85$ mm için Flow3D yardımıyla oluşturulan sayısal model



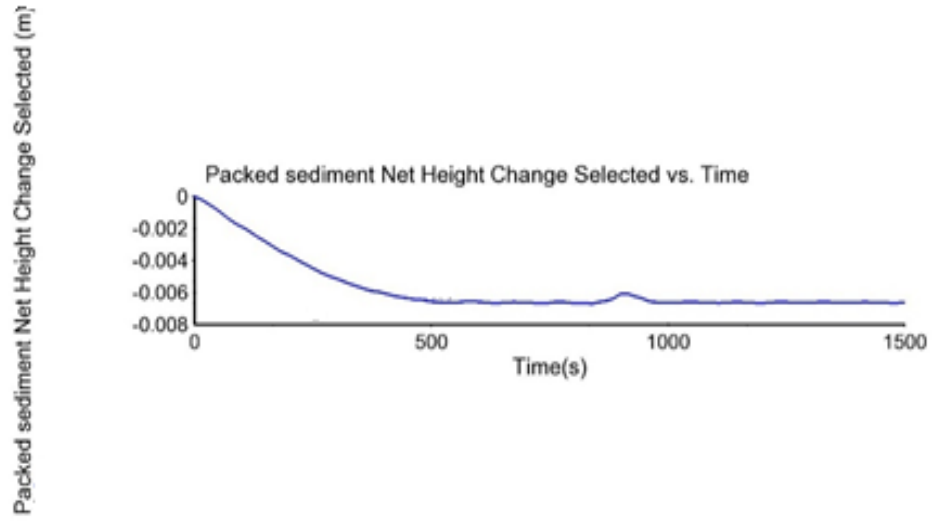
Şekil 5.12 $D=63$ mm, $H_w=20$ cm, $T_w=2,7$ s ve $d_{50}=1,85$ mm koşullarında oluşturulan sayısal modelde zamana bağlı oyulma derinlikleri

$D=110$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çapındaki taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen çözümde elde edilen zamana bağlı oyulma derinlikleri Şekil 5.13’de gösterilmektedir.



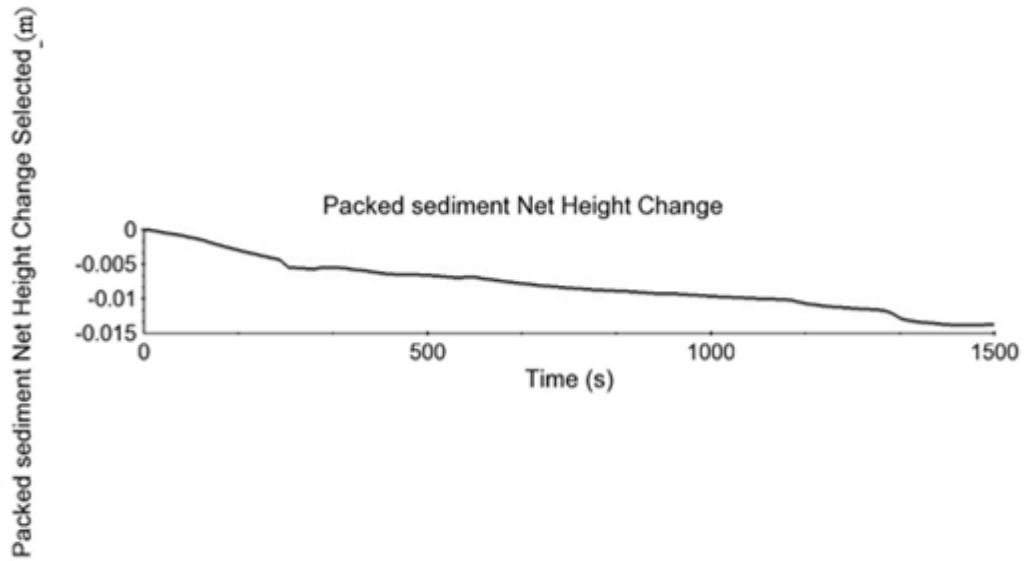
Şekil 5.13 $D=110$ mm, $H_w=20$ cm, $T_w=2,7$ s ve $d_{50}=0,55$ mm koşullarında oluşturulan sayısal modelde zamana bağlı oyulma derinlikleri

$D=160$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi için yapılan sayısal çözüme ait zaman bağlı oyulma değerleri Şekil 5.13’de görülmektedir.



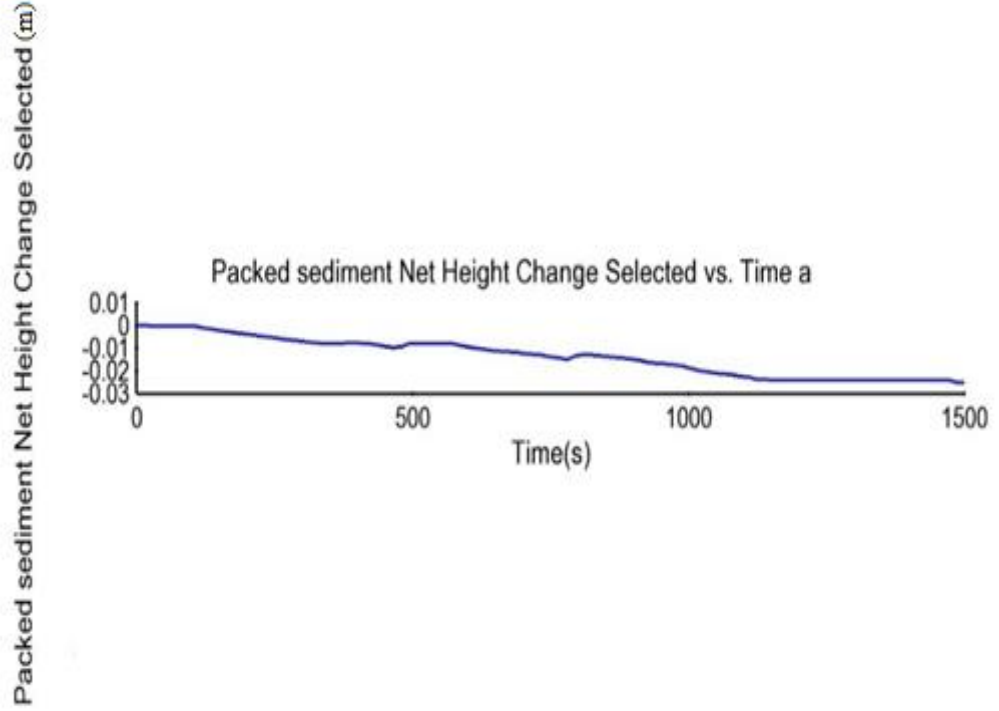
Şekil 5.14 $D=160$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi zamana bağlı oyulma derinlikleri

$D=200$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi için oluşturulan sayısal modele ait sonuçlar Şekil 5.14’de verilmiştir.

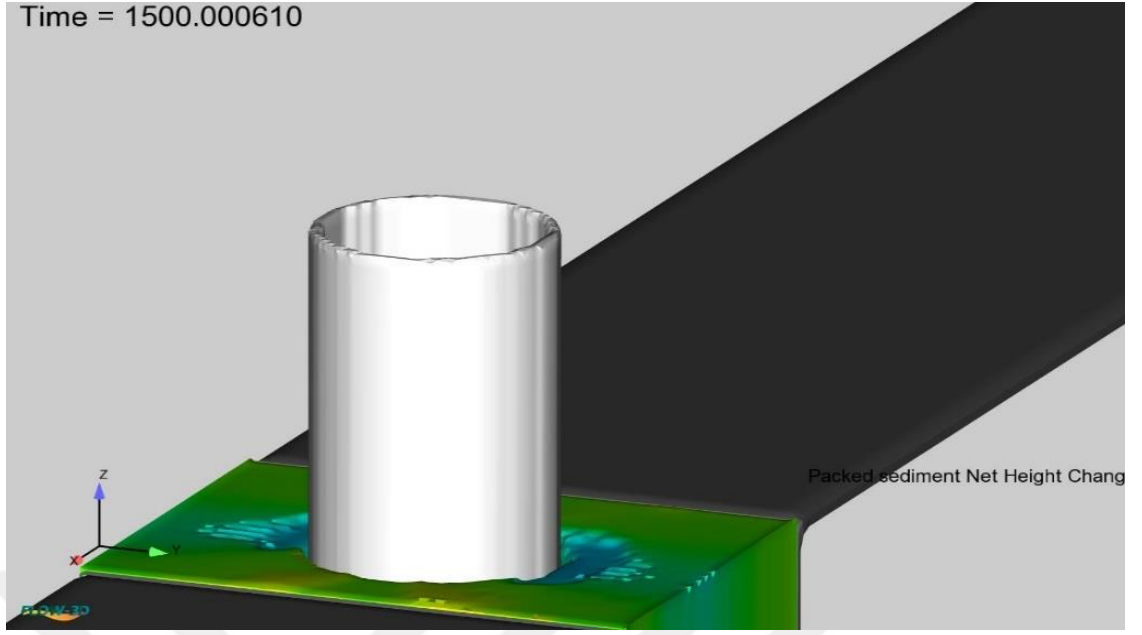


Şekil 5.15 $D=200$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi için zamana bağlı oyulma derinlikleri

$D=680$ mm kazık çapı, $H_w=17$ cm dalga yüksekliği, $T_w=3,1$ s dalga periyodu ve $d_{50}=0,55$ mm taban malzemesi dane çapı durumu için kurulan sayısal modele ait oyulma grafiği Şekil 5.16’da görülmektedir. $T=1500$ s anındaki kazık etrafındaki oyulmanın üç boyutlu görünümü ise Şekil 5.17’de verilmiştir.

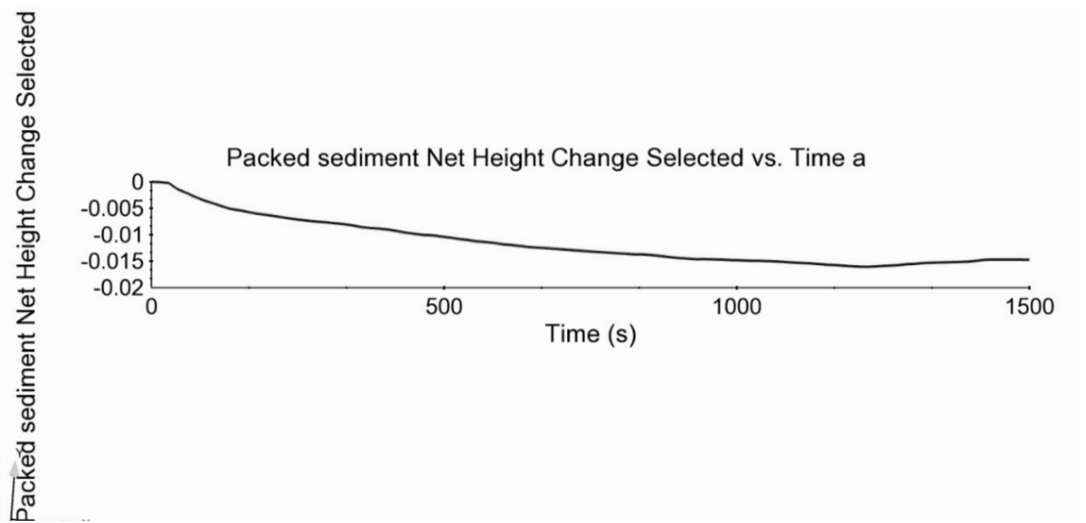


Şekil 5.16 $D=680$ mm kazık çapı, $H_w=17$ cm dalga yüksekliği, $T_w=3,1$ s dalga periyodu ve $d_{50}=0,55$ mm taban malzemesi dane çapı durumu için kurulan sayısal modele ait oyulma



Şekil 5.17 $D=680$ mm kazık çapı, $H_w=17$ cm dalga yüksekliği, $T_w=3,1$ s dalga periyodu ve $d_{50}=0,55$ mm dane çapı durumunda kazık etrafındaki oyulmanın $t= 1500$ s anındaki üç boyutlu görünümü

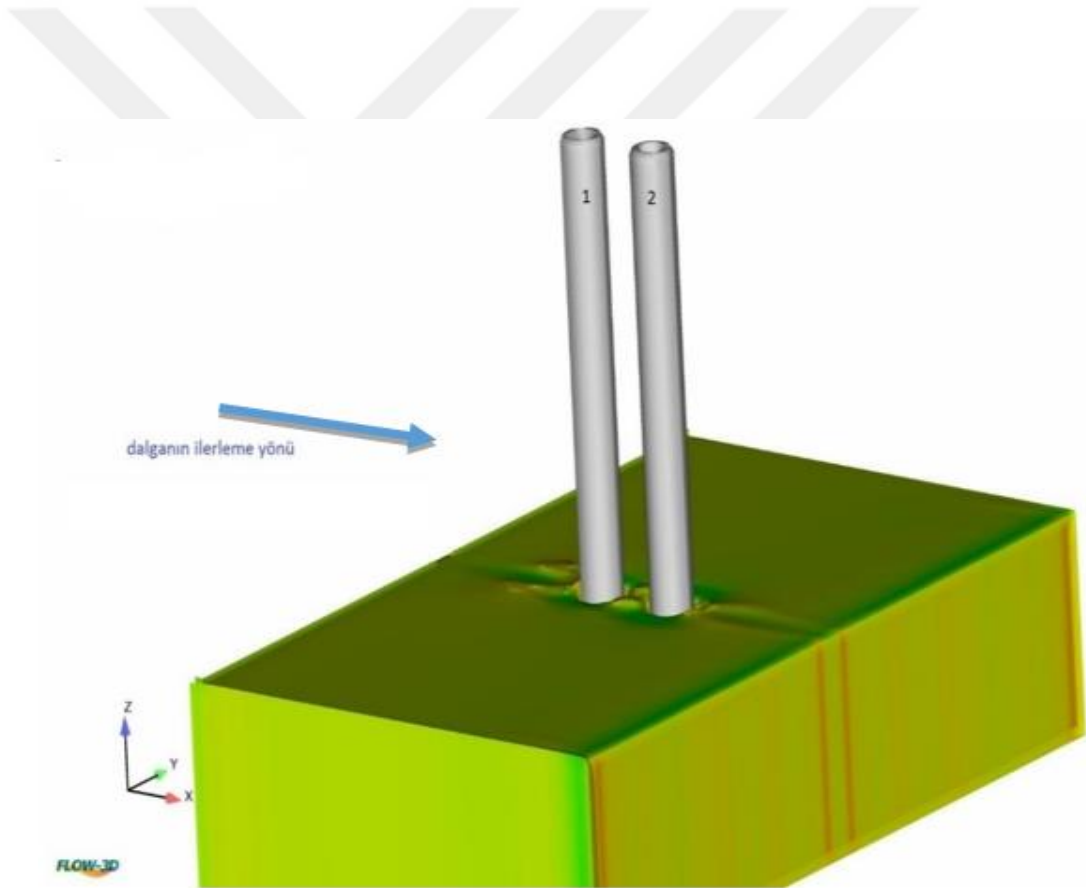
$D=120$ mm kazık çapı, $H_w=20$ cm dalga yüksekliği, $T_w=2,7$ s dalga periyodu ve $d_{50}=1,85$ mm taban malzemesi dane çapı durumu için kurulan sayısal modele ait oyulma grafiği Şekil 5.17’da görülmektedir.



Şekil 5.18 $D=120$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi için zamana bağlı oyulma

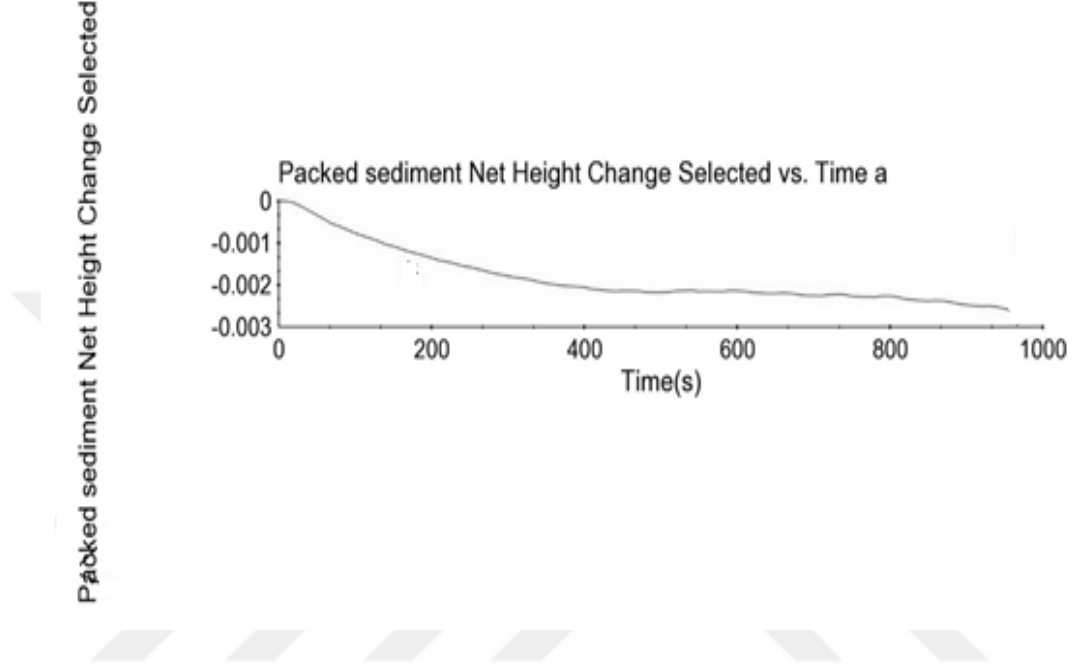
5.2.3 Kazık Grupları Sayısal Model Sonuçları

Kazık grubu deneylerinden sayısal çözümü yapılan deneylere ait sonuçlar aşağıda verilmektedir. İkili ve dörtlü kazık grupları için yapılan sayısal çözümlerden, $D=110$ mm çaplı kazıkların, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi koşullarında aralarında $D/2$ mesafe olacak şekilde birbiri ardına yerleştirilmesi durumu için oluşturulan sayısal model Şekil 5.19’de gösterilmektedir.

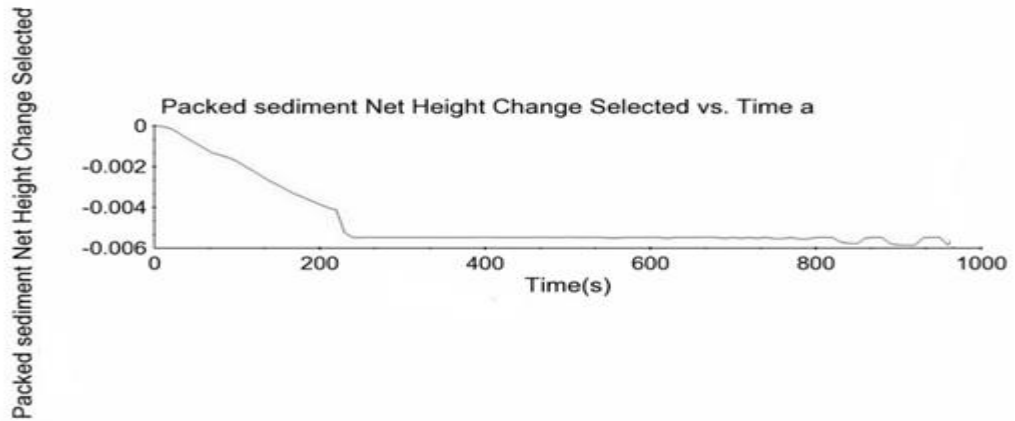


Şekil 5.19 $D=110$ mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş ikili kazık grubu, ara mesafe $D/2$, $H_w=20$ cm, $T_w=2,7$ s ve $d_{50}=1,85$ mm için Flow3D ile kurulan sayısal model

Şekil 5.20’de gösterilen sayısal model için 1 nolu kazığa ait zamana bağlı oyulma derinlikleri Şekil 5.21’de, 2 nolu kazığa ait zamana bağlı oyulma derinlikleri ise Şekil 6.28’te verilmektedir. Gösterilen oyulma derinlikleri kazıkların ön yüzlerine aittir.

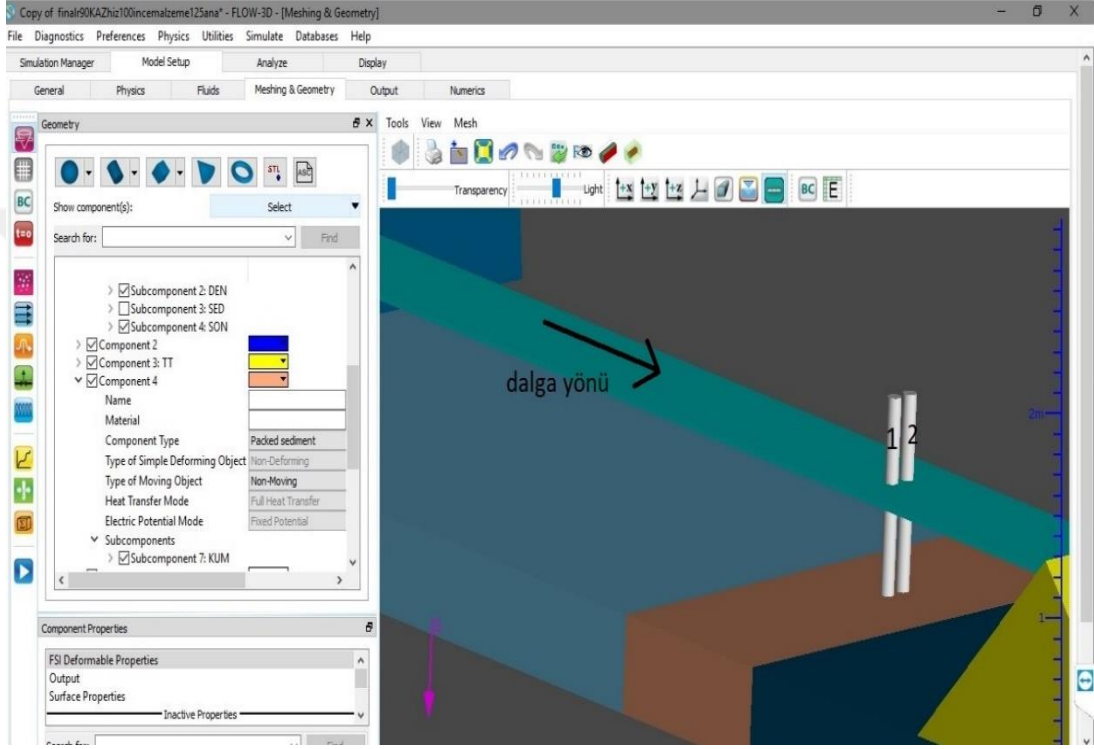


Şekil 5.20 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş ikili kazık grubu, ara mesafe D/2, $H_w=20$ cm, $T_w=2,7$ s ve $d_{50}=1,85$ mm için Flow3D’den elde edilen 1 nolu kazık ön yüzündeki zamana bağlı oyulma derinlikleri



Şekil 5.21 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş ikili kazık grubu, ara mesafe D/2, $H_w=20$ cm, $T_w=2,7$ s ve $d_{50}=1,85$ mm için Flow3D’den elde edilen 2 nolu kazık ön yüzündeki zamana bağlı oyulma derinlikleri

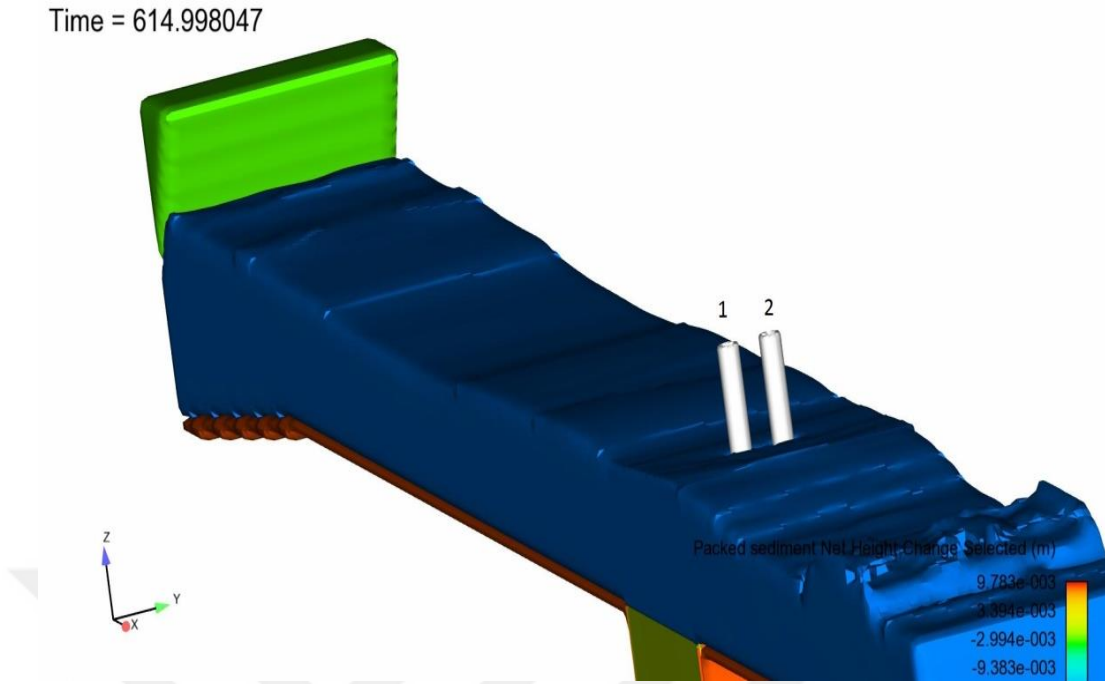
İkili kazık grubu için gerçekleştirilen bir diğer sayısal model ise $D=110$ mm çaplı kazıkların, $H_w=22$ cm yükseklikli ve $T_w=2,3$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi koşullarında aralarında D kadar mesafe olacak şekilde yan yana yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Kazıkların yan yana yerleştirilmesi durumunda model Şekil 5.22’de görülmektedir.



Şekil 5.22 Yan yana iki kazık durumunda birinci ve ikinci kazık konumu

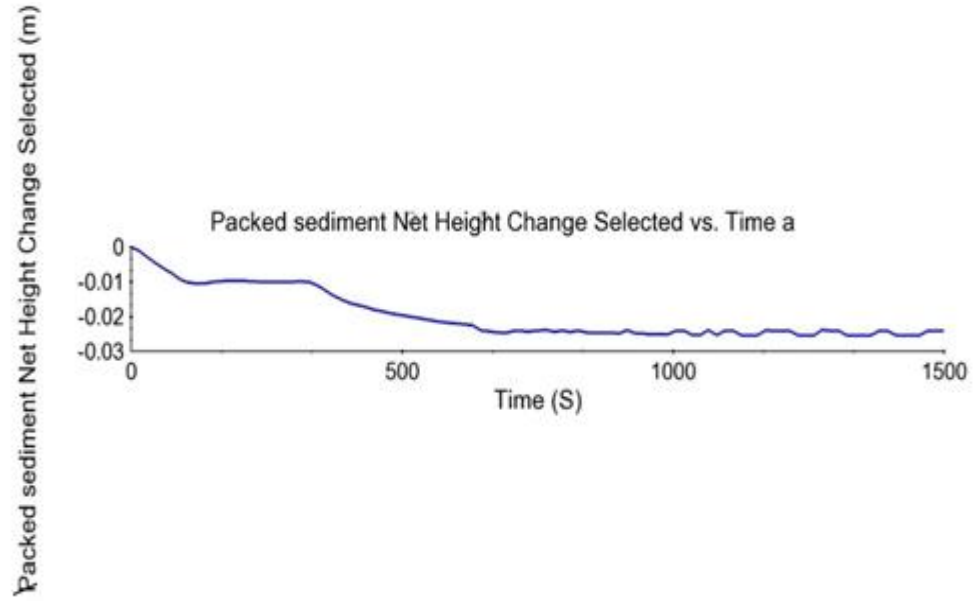
Şekil 5.22’de verilen sayısal modele ait $t=614$ s anındaki üç boyutlu görünüm ise Şekil 5.23’de yer almaktadır

Time = 614.998047

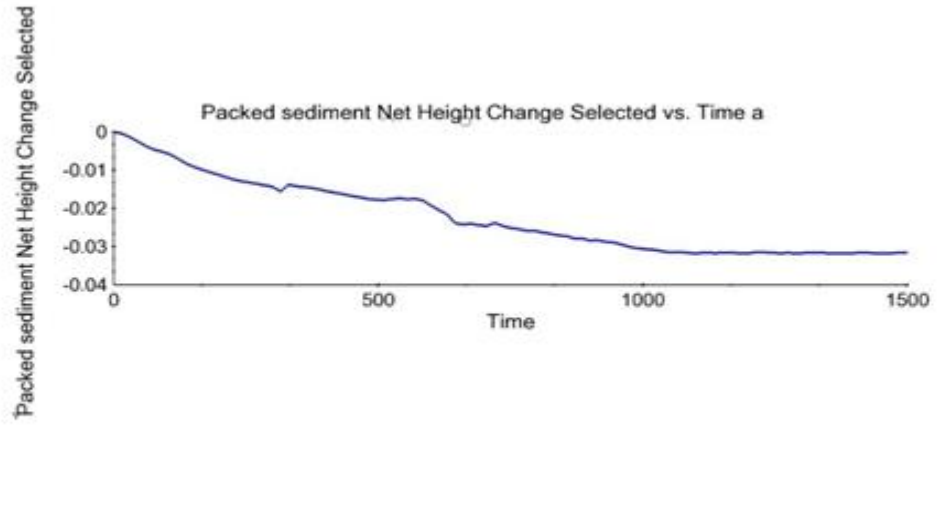


Şekil 5.23 Şekil 5.22’de verilen sayısal modelin $t=614$ s anındaki görünümü

İkili kazık grubu için yan yana $D/2$ aralığında, $D=90$ mm çaplı kazıklar, $H_w=28$ cm dalga yüksekliği, $T_w=1,7$ s dalga periyodu ve $d_{50}=1,85$ mm dane çapı durumu için yapılan sayısal çözüme ait kazık ön yüzlerindeki zamana bağlı oyulma değerleri Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’de görülmektedir.



Şekil 5.24 Yan yana D/2 aralığında, D=90 mm çaplı kazıklar, $H_w=28$ cm dalga yüksekliği, $T_w=1,7$ s dalga periyodu ve $d_{50}=1,85$ mm dane çapı durumu için yapılan sayısal çözüme ait 1 numaralı kazığın ön yüzündeki zamana bağlı oyulma değerleri



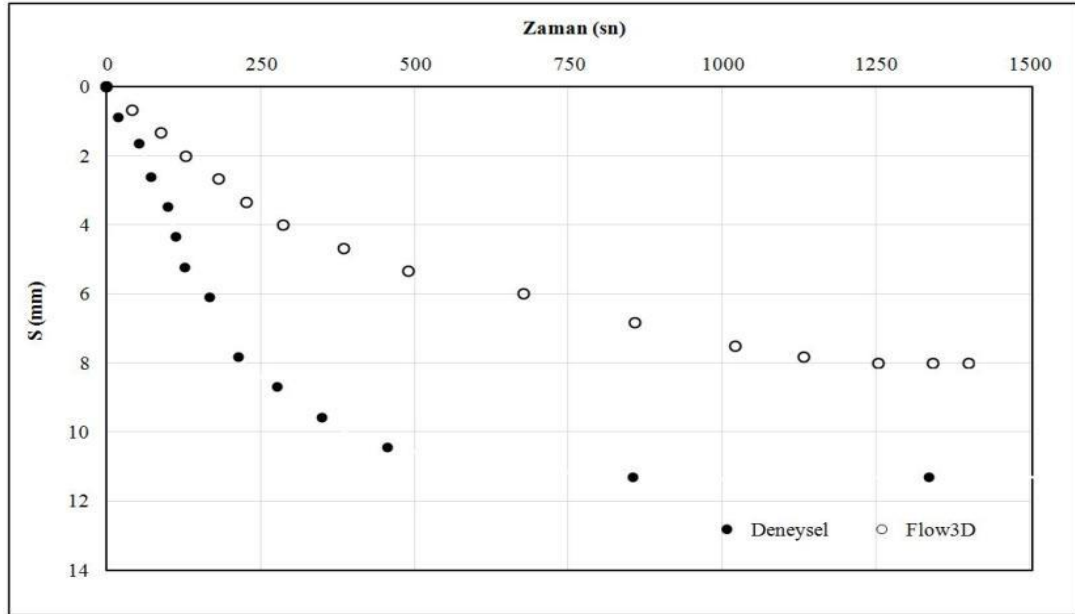
Şekil 5.25 Yan yana D/2 aralığında, D=90 mm çaplı kazıklar, $H_w=28$ cm dalga yüksekliği, $T_w=1,7$ s dalga periyodu ve $d_{50}=1,85$ mm dane çapı durumu için yapılan sayısal çözüme ait 2 numaralı kazığın yüzündeki zamana bağlı oyulma değerleri

BÖLÜM ALTI

SAYISAL MODEL SONUÇLARININ DENEYSEL BULGULAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

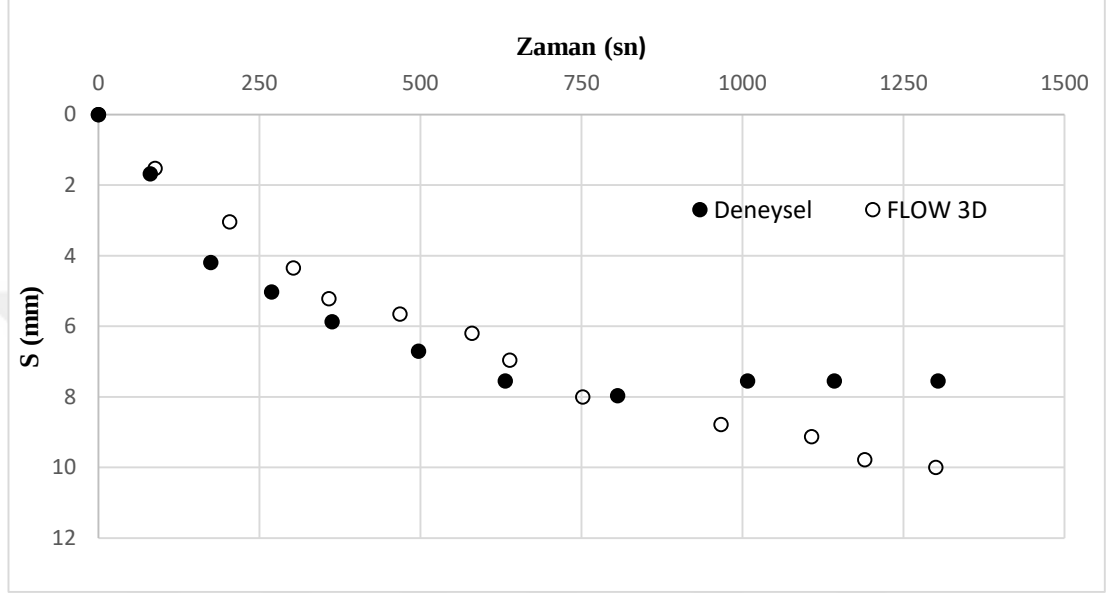
Bu bölümde, bir önceki bölümde ayrıntılı olarak verilen sayısal model sonuçları, aynı koşullar için gerçekleştirilen deneysel bulgular ile karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla sayısal model ve deneysel ölçümlerden elde edilen zamana bağlı oyulma derinlikleri aynı grafik üzerinde çizilerek gösterilmiştir.

Şekil 6.1’de $D=200$ mm çaplı kazık, $H_w=13$ cm yükseklikli ve $T_w=3,6$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm medyan çapındaki taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen sayısal model sonuçları deneysel bulgular ile bir arada verilmektedir.



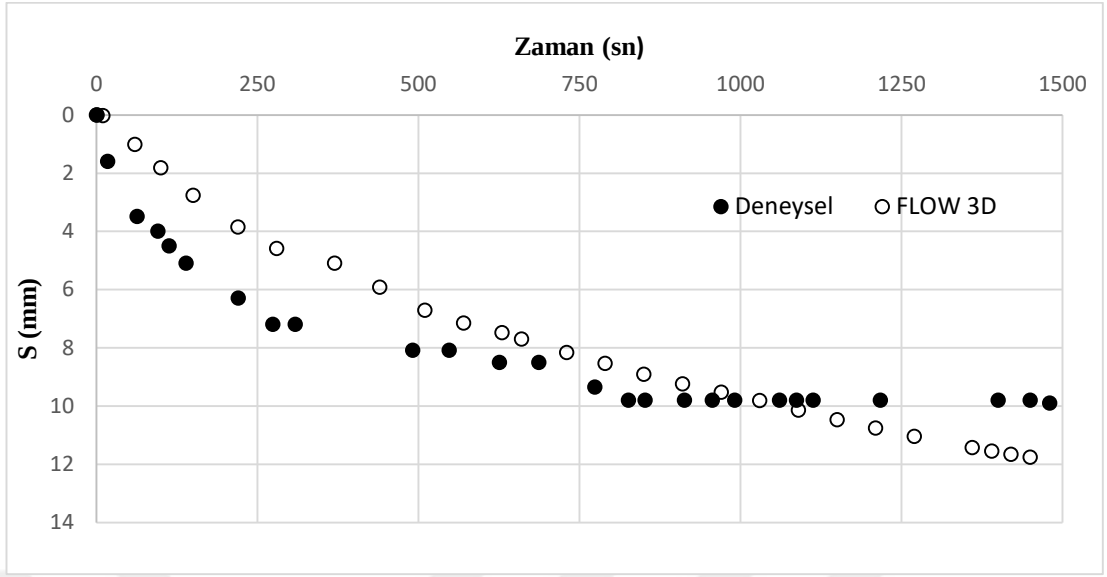
Şekil 6.1 $D=200$ mm çaplı tekil kazık, $H_w=13$ cm yükseklikli ve $T_w=3,6$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm medyan çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak belirlenen sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.2’de, $D=950$ mm çaplı kazık, $H_w=13$ cm yükseklikli ve $T_w=3,6$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm medyan çapındaki taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen sayısal model sonuçları deneysel bulgular ile bir arada verilmektedir.



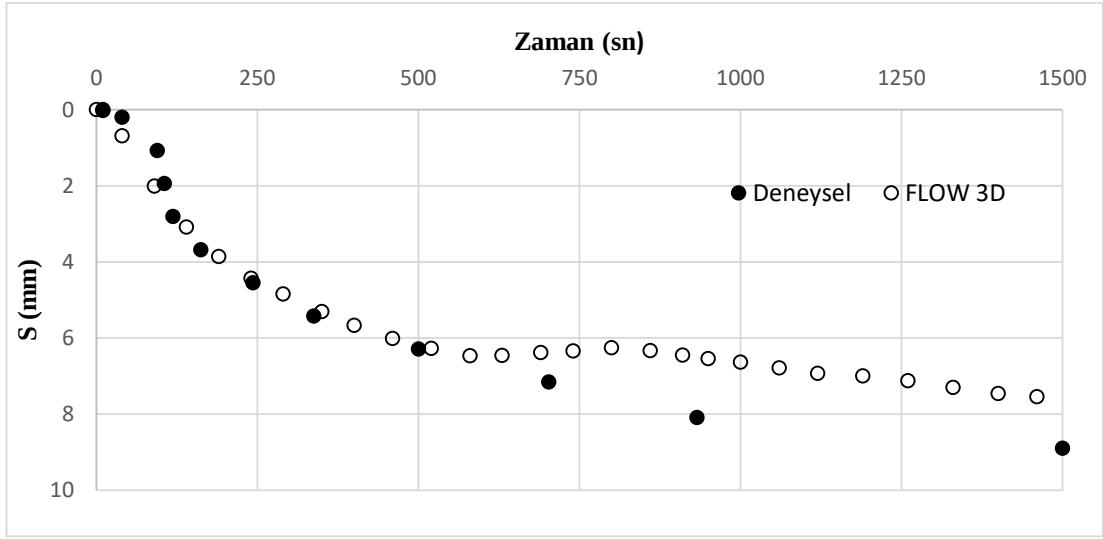
Şekil 6.2 $D=950$ mm çaplı tekil kazık, $H_w=13$ cm yüksekli ve $T_w=3,6$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm medyan çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak belirlenen sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

$D=63$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çapındaki taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen sayısal model sonuçları deneysel bulgular ile bir arada verilmektedir.



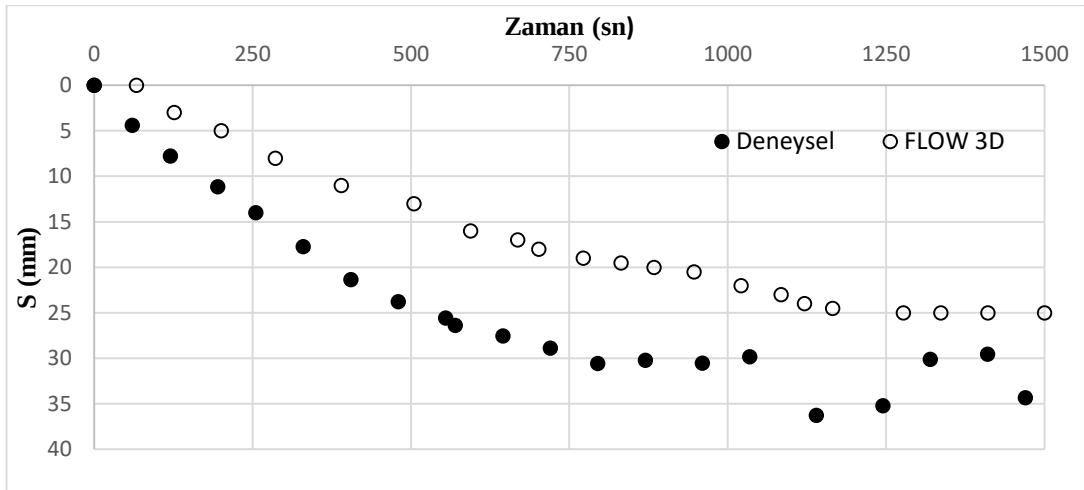
Şekil 6.3 $D=63$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

$D=110$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çapındaki taban malzemesi durumu için gerçekleştirilen sayısal model sonuçları deneysel bulgular ile bir arada verilmektedir.



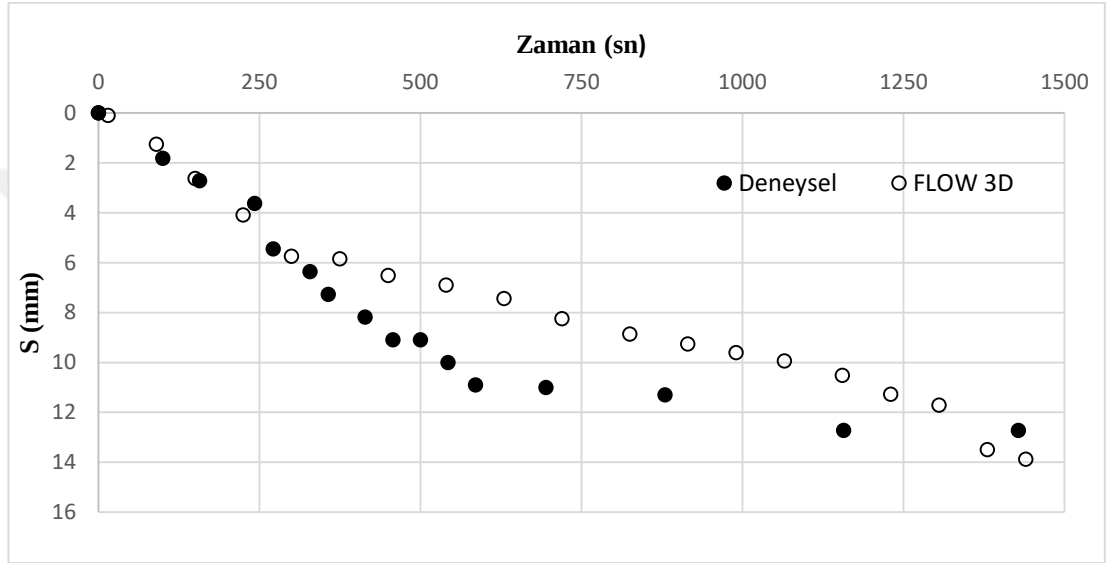
Şekil 6.4 D=110 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

D=120 mm çaplı kazık, $H_w=17$ cm yükseklikli ve $T_w=3,1$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları Şekil 6.5’de gösterilmektedir.



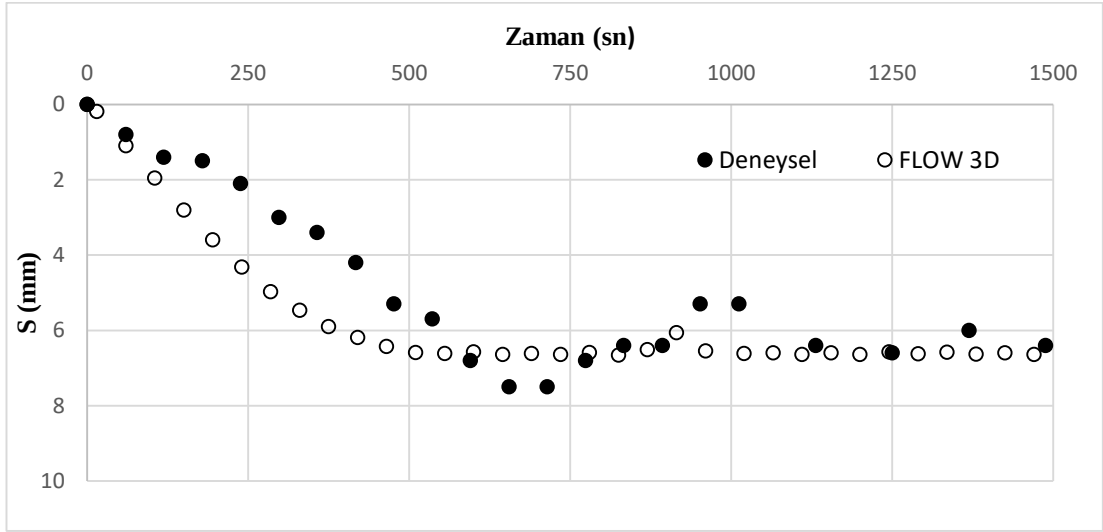
Şekil 6.5 D=120 mm çaplı kazık, $H_w=17$ cm yükseklikli ve $T_w=3,1$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması

D=160 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları Şekil 6.6’da verilmektedir.



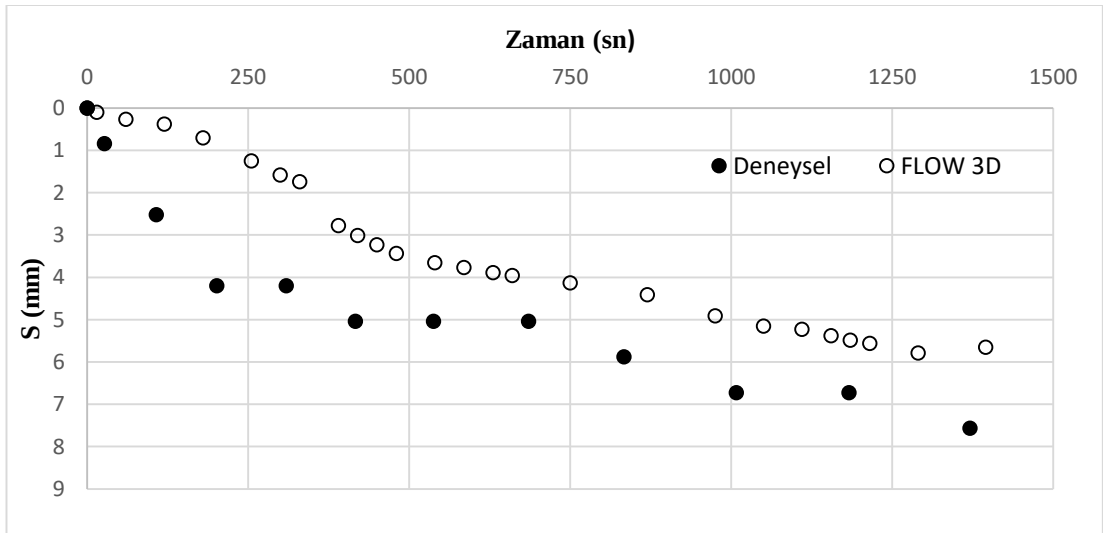
Şekil 6.6 D=160 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları

D=200 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları Şekil 6.7’de görülmektedir.



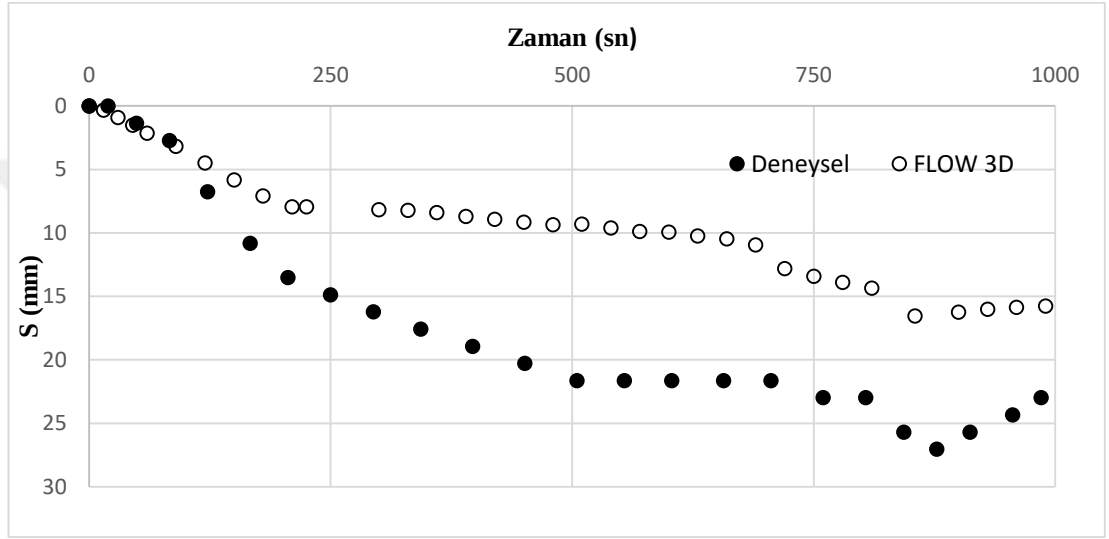
Şekil 6.7 $D=200$ mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları

$D=980$ mm çaplı kazık, $H_w=17$ cm yükseklikli ve $T_w=3,1$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları Şekil 6.8’de verilmektedir.



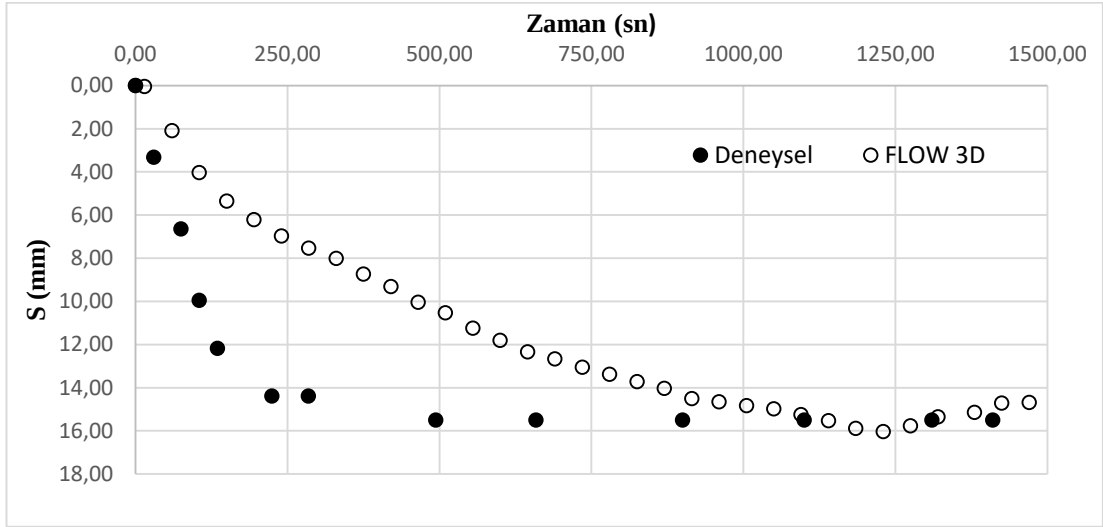
Şekil 6.8 $D=980$ mm çaplı kazık, $H_w=17$ cm yükseklikli ve $T_w=3,1$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,55$ mm çaplı taban malzemesi durumunda ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları

D=500 mm çaplı kazık, $H_w=25$ cm yükseklikli ve $T_w=2$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları Şekil 6.9’de gösterilmektedir.



Şekil 6.9 D=500 mm çaplı kazık, $H_w=25$ cm yükseklikli ve $T_w=2$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları

D=120 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda tekil kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları Şekil 6.10’da görülmektedir.

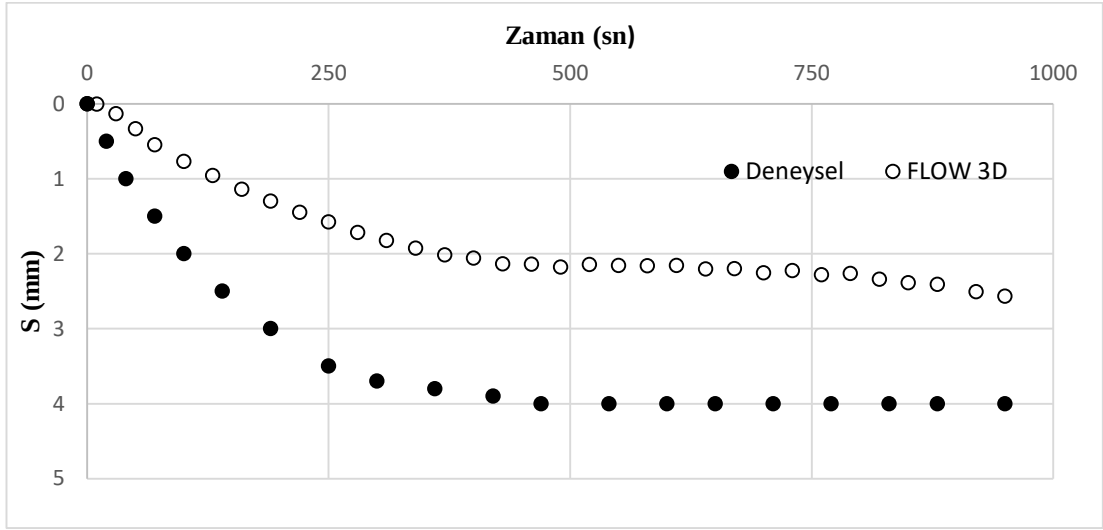


Şekil 6.10 D=120 mm çaplı kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda kazık etrafında ölçülen deneysel oyulma derinlikleri ile Flow3D kullanılarak hesaplanan sayısal model sonuçları

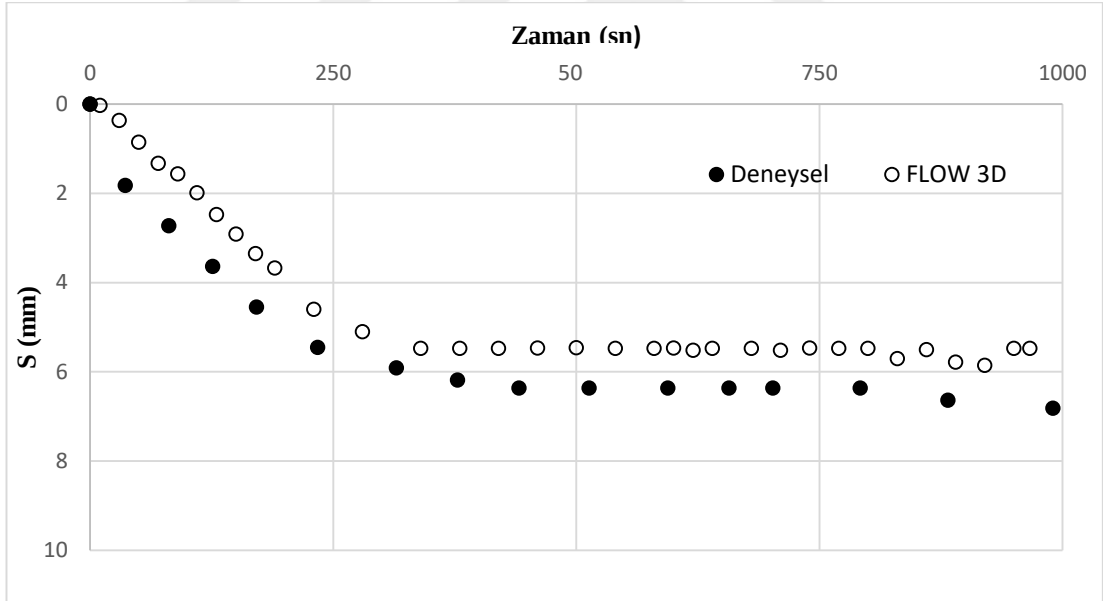
Tekil kazık durumundaki sonuçlar karşılaştırıldığında Flow3D sonuçları ile deneysel sonuçların benzer eğilim gösterdiği görülmektedir. Bazı çözümlerle deneysel sonuçlar arasında farklılıklar gözlenmekle birlikte genel olarak hem oyulmanın zaman içindeki gelişimi hem de oyulmanın nihai değeri açısından deneysel sonuçlarla sayısal çözüm sonuçlarının uyumlu olduğu söylenebilmektedir.

Kazık grupları olması durumunda oyulmaların davranışını incelemek amacıyla yapılan sayısal çözümlerden akım doğrultusunda birbiri ardına yerleştirilen iki kazık örneğinde elde edilen oyulmanın zamanla değişimi deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak incelenmiştir.

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de $D=110$ mm çaplı birbiri ardına yerleştirilmiş kazık grubu, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çapındaki taban malzemesi durumunda gerçekleştirilen sayısal model sonuçları deneysel bulgular ile bir arada verilmektedir.

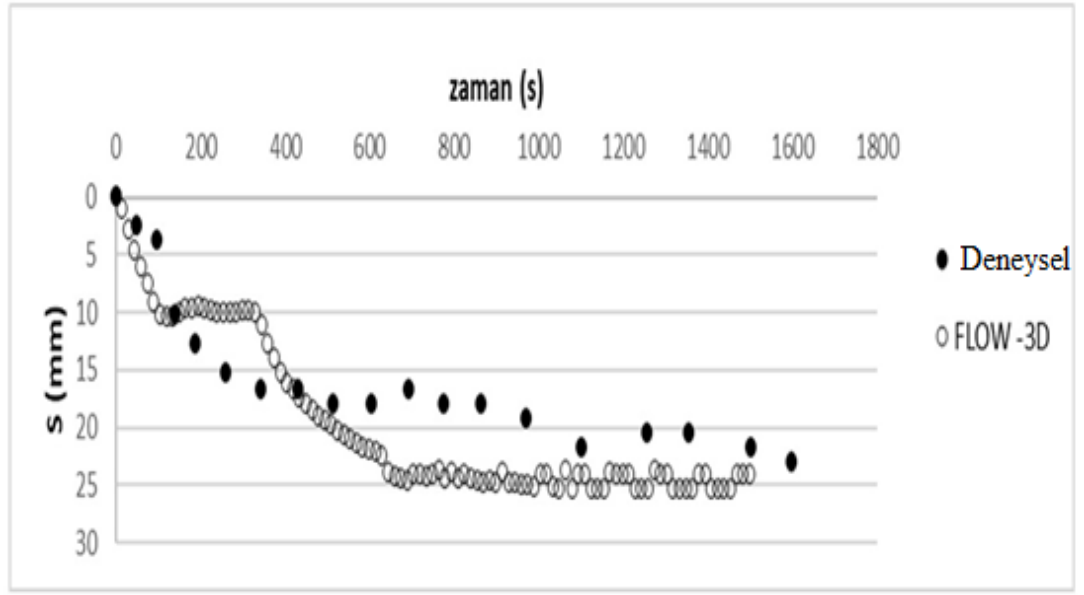


Şekil 6.11 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilen kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda 1 nolu kazığın ön tarafında ölçülen ve Flow3D ile hesaplanan zamana bağlı oyulma derinlikleri

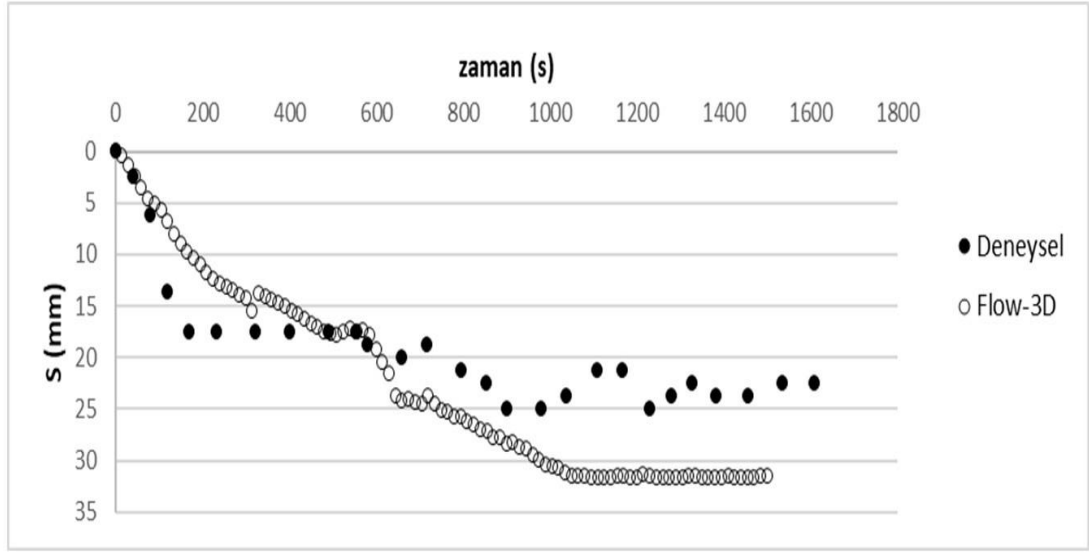


Şekil 6.12 D=110 mm çaplı birbiri ardına yerleştirilen kazık, $H_w=20$ cm yükseklikli ve $T_w=2,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi durumunda 2 nolu kazığın ön tarafında ölçülen ve Flow3D ile hesaplanan zamana bağlı oyulma derinlikleri

Dalga ilerleme yönüne dik bir şekilde yan yana yerleştirilen ve aralarında $D/2$ kadar mesafe olan $D=90$ mm çaplı iki kazık, $H_w=28$ cm yükseklikli ve $T_w=1,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi için sayısal benzetim sonunda hesaplanan oyulma ile deneyde ölçülen oyulmanın zamana bağlı değişimi Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’de verilmektedir.



Şekil 6.13 Yan yana yerleştirilen ve aralarında $D/2$ kadar mesafe olan $D=90$ mm çaplı iki kazık, $H_w=28$ cm yükseklikli ve $T_w=1,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi için 1 nolu kazık önünde sayısal benzetim ve deneyde ölçülen oyulma değerleri



Şekil 6.14 Yan yana yerleştirilen ve aralarında $D/2$ kadar mesafe olan $D=90$ mm çaplı iki kazık, $H_w=28$ cm yükseklikli ve $T_w=1,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=1,85$ mm çaplı taban malzemesi için 2 nolu kazık önünde sayısal benzetim ve deneyde ölçülen oyulma değerleri

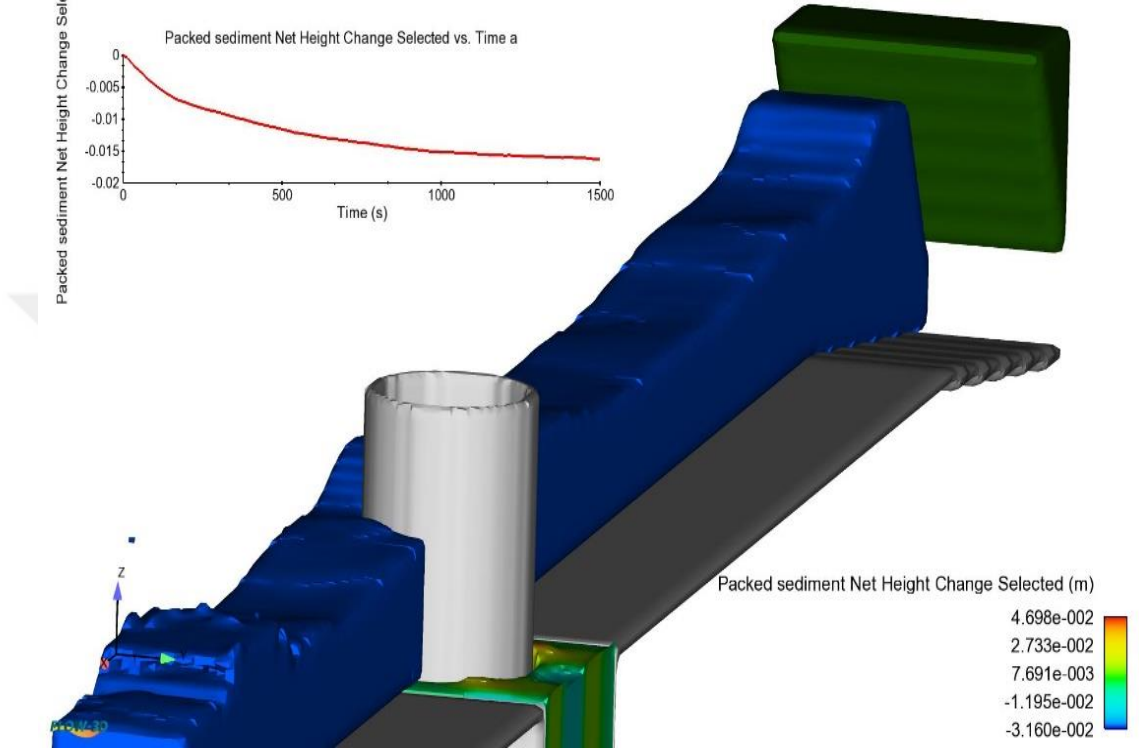
İki kazıklı grup deneylerinden elde edilen nihai oyulma derinlikleri ve oyulmaların zamanla değişiminin, hem birbiri ardına hem de yan yana yerleştirme düzeninde, sayısal çözüm sonuçlarıyla uyumlu görülmektedir.

6.1 Deneyel Şartlar Dışındaki Fiziksel Koşullar İle Gerçekleştirilen Sayısal Model

Çok sayıda deneyel veri ve farklı koşullarda gerçekleştirilen Flow3D ile sayısal model sonuçlarının karşılaştırılmasında sonra, özellikle tekil kazık durumu için sayısal modelin deneyel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

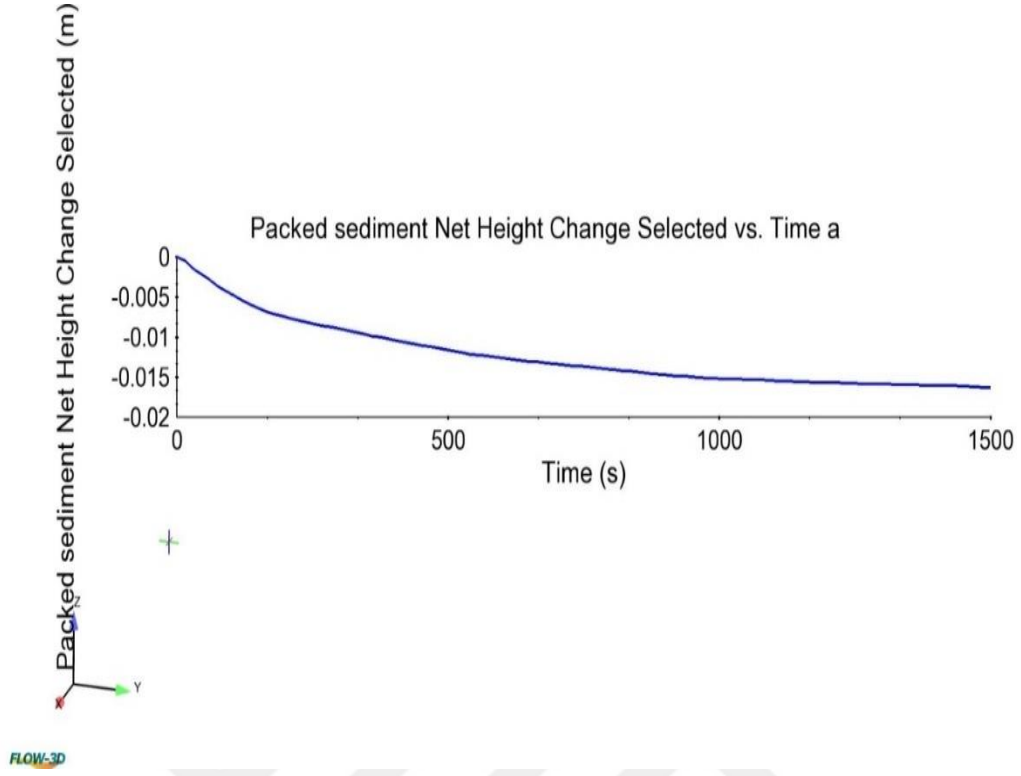
Buradan hareketle, deneyel çalışmalarda ulaşılmayan fiziksel şartların artık sayısal model çalışmaları ile denenebilmesi olanak dâhilindedir. Bu kapsamda, deneyel şartlar dışındaki bir fiziksel durum örnek olarak bu bölümde modellenerek sonuçları verilmiştir.

750 mm çapında silindirik kazık, 28 cm yükseklikli ve 1,7 s periyotlu dalgalar ile 0,2 mm dane medyan çapına sahip zemin koşullarının yansıtıldığı sayısal modele ait genel bir görünüm Şekil 6.15’de verilmektedir.



Şekil 6.15 $D=750$ mm çaplı kazık, $H_w=28$ cm yükseklikli ve $T_w=1,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,2$ mm çaplı taban malzemesi durumunun yansıtıldığı sayısal model

Şekil 6.16’da ise Şekil 6.15’de modellenen kazık etrafında zamana bağlı olarak elde edilen oyulma grafiği yer almaktadır.



Şekil 6.16 $D=750$ mm çaplı kazık, $H_w=28$ cm yükseklikli ve $T_w=1,7$ s periyotlu dalga ve $d_{50}=0,2$ mm çaplı taban malzemesi durumunda zamana bağlı oyulma derinlikleri

BÖLÜM YEDİ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında kıyı bölgesinde yer alan kazıklı yapılar etrafında oluşan dalga kaynaklı oyulmaların deneysel ve Flow3D paket programı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal model çalışmalarıyla araştırılmıştır.

Deneylerde ultrasonik ölçüm cihazları kullanılmıştır. Taban seviyesindeki su parçacığının hızı UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) kullanılarak ölçülmüştür. Hız ölçümü için tasarlanan UVP'nin pik yansıma değerleri yardımıyla kazık etrafındaki oyulmalar zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Zamana bağlı su yüzeyi kotları ULS (Ultra Lab System) cihazı ve USS (Ultra Sound Sensor) algılayıcıları yardımıyla ölçülerek dalga periyot ve yükseklikleri belirlenmiştir. Ayrıca, UWS cihazı yardımıyla deney sonlarında nihai taban batimetrisi çıkarılmıştır.

Deneyler, 33 m uzunluğa, 3,6 m genişliğe ve 1,2 m derinliğe sahip bir dalga kanalında, 0,55 ve 1,85 mm olmak üzere iki farklı dane medyan çapına sahip taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 63, 90, 110, 120, 160, 200, 480, 680 ve 950 mm çaplarına sahip tekil kazıklar ile 63, 90 ve 110 mm çaplarına sahip kazık grupları denenmiştir. Deneyler esnasında karakteristik değerleri olarak periyotları 1,7; 2,0; 2,3; 2,7; 3,1; 3,6; 4,3 ve 5,4 s ile bunlara karşılık yükseklikleri sırasıyla 28, 25, 22, 20, 17, 13, 9 ve 6 cm olan düzenli dalgalar kullanılmıştır. Ayrıca, tekil kazıklar etrafındaki oyulmaya karşı koruyucu önlem olarak yaka kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır.

Tekil kazıklar ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında göreceli nihai oyulma derinliklerinin tahmininin de 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 ve 4.11 bağıntıları elde edilmiş olup, korelasyon ve saçılma göstergesi değerleri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda S/D'nin kestirimi için önerilen denklemler birbirine yakın

sonuçlar vermektedir. Daha az parametre içermesi nedeniyle (4.3) denklemi daha kullanışlı olmaktadır. Bu nedenle deneylere dayanarak türetilen (4,3) bağıntısı önerilmiştir. Önerilen bu bağıntı, konu ile ilgili önceki çalışmalardan olan Sümer ve diğ. (1992a) alışması sonucunda önerilen bağıntıdan daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak aradaki farklılığın önemli ölçüde Sümer ve diğ. (1992a) alışmasında kullanılan taban malzemesinin, tez kapsamında kullanılan her iki taban malzemesinden daha ince olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tekil kazık için göreceli nihai oyulma derinliğinden sonra, değışiminin bilinmesinin önem arz ettiğı bir diğ. boyutsuz sayı ise boyutsuzlaştırılmış zaman lėđ parametresidir. Bu parametre tahmini için de önceki çalışmalarda nerildiğı gibi hem KC sayısına hem de θ parametresine bağı bir değışim ifadesi uygun görülmüştür. Deneylerden elde edilen zamana bağı oyulma kayıtlarının analizi ile (4.13) bağıntısı elde edilmiştir. Göreceli nihai oyulma derinliği için türetilen bağıntıda olduğu gibi boyutsuzlaştırılmış zaman lėđ parametresi için türetilen bağıntı da literatürde mevcut Sümer ve diğ. (1992b) alışması sonucu önerilen bağıntıdan farklılıklar göstermektedir. Göreceli nihai oyulma derinliklerin'de olduğu gibi bunun temel nedeni deniz taban malzemesi dane medyan çaplarının farklılıkları olarak öngörülmekle birlikte, gerçekleştirilen tez kapsamındaki büyük çaplı kazıklarda sonuca etki etmektedir.

UVP cihazı ve algılayıcılarının kullanımı ile zamana bağı olarak ölçülen oyulma derinliklerinden yararlanılarak zamana bağı göreceli oyulma derinliklerinin de değışimi araştırılmıştır. S/D bağıntısına benzer şekilde zamana bağı göreceli oyulma derinliklerinin kestirimi için (4.18) bağıntısı elde edilmiştir. Önerilen bu regresyon ifadesi ile hem oyulmanın gelişimi hem de nihai değer etrafında salınımlar yaparak denge durumunda ilerleyişi ifade edilebilmektedir. Bu bağıntının uygunluğu, dördüncü bölümde verilen on farklı zamana bağı oyulma deneyinin sonucu üzerinde görülmektedir.

Kazık grupları deneylerine geçilmeden önce, tekil kazık durumu için bir de oyulmaya karşı koruyucu önlem deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, kazık çapının 1,5 ila 2,0 katı çapında yaka elemanları bozulmamış zemin seviyesinde yerleştirilerek denenmiştir. Deneyler sonucunda, ince taban malzemesi ($d_{50}=0,55$ mm) durumunda oyulmanın %67 mertebesinde azaldığı, orta taban malzemesi durumunda ($d_{50}=1,85$ mm) ise yaka kullanılan deneylerde oyulmanın olmadığı görülmüştür.

Tekil kazık deneylerinin ardından, farklı yerleşimli kazık grupları ile gerçekleştirilen deneylere geçilmiştir. Bu kapsamda ikili yan yana ve arka arkaya gruplar ile dörtlü 90° ve 45° lik açılar ile kazık grupları oluşturulmuştur. Gruplar ile yapılan deneylerde, zamana bağlı ölçümlere ilave olarak, deney sonundaki taban batimetriteri de ölçülmüştür. Nihai durum taban batimetriteri incelendiğinde aralarında bir çap mesafe bulunan kazık gruplarının neredeyse iki tekil kazık gibi davrandığı ancak bu değerin yarım çapa düşmesi durumunda kazık grup etkisinin ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Ayrıca, dörtlü kazık grubu durumunda kazıklar etrafındaki yerel oyulmalara ek olarak dörtlü grup etrafında global bir oyulma durumu da söz konusudur.

Flow3D yazılımı ile sayısal model çalışmalarına başlanırken önce uygun türbülans modeli seçilmiştir. Türbülans modeli seçiminde deneysel olarak elde edilen zamana bağlı oyulma değerleri kullanılmış ve deneysel sonuçlara en yakın değeri veren türbülans modeli en uygun türbülans modeli olarak seçilmiştir. RNG türbülans modeli, deneysel sonuçlar ile en uyumlu sayısal model sonuçlarının elde edildiği türbülans modeli olmuştur.

Flow3D paket programı yardımıyla hem tekil kazık hem de farklı yerleşim şekillerindeki kazık grupları durumları için birçok sayısal model hazırlanmış ve çalıştırılmıştır. Sayısal model sonuçları, özellikle tekil kazıklar etrafındaki oyulmanın

modellenmesinde deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu çıktılar vermiş olup, tekil kazıklar için alınan sonuçlar kadar olmasa da kazık grupları içinde uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı dalga koşulları, farklı taban malzemeleri ya da farklı kazık çapları durumunda Flow3D modelinin deneysel sonuçlar ile uyumluluğu göz önüne alınarak deneysel şartlar dışında bir örnek modelde Flow3D çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar mukayese edilebilir ve tutarlı bir yapıdadır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ardından, gelecekteki çalışmalar için aşağıda öneriler verilmektedir.

- Tez çalışması kapsamında düzenli dalga durumunda nihai oyulma derinliği, zaman ölçeği parametresi ve zamana bağlı oyulma derinliği incelenmiştir. Düzensiz dalga koşulları altında bu araştırmaların gerçekleşmesi.
- Deneysel ve sayısal olarak bu çalışmada üniform taban malzemesi kullanılmıştır. Üniform olmayan deniz taban malzemesi durumları için oyulma mekanizmasının araştırılması.
- Deneysel ve sayısal olarak Kohezyonlu deniz taban malzemesi için zaman ölçeği parametresi ve zamana bağlı oyulma derinliğinin araştırılması.

KAYNAKLAR

- Abdi, V., Doğan, M. ve Kaya, B. (2018). *Silindirik kazıklar etrafında dalga etkisi ile oluşan oyulmaların zamana bağlı olarak deneysel ve sayısal araştırılması*. 3 Kasım 2018, http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/18370_38_08.pdf
- Ahmad, N., Bihs, H., Myrhaug, D., Kamath, A., ve Arntsen, Ø. A. (2018). Three-dimensional numerical modelling of wave-induced scour around piles in a side-by-side arrangement. *Coastal Engineering*, 138, 132-151.
- Ahmad, N., Bihs, H., ve Kamath, A. (2020). 3D numerical modelling of scour around a jacket structure with dynamic free surface capturing. *Ocean Engineering*, 200, 107104.
- Baykal, C., Sumer, B. M., Fuhrman, D. R., Jacobsen, N. G. ve Fredsøe, J. (2017). Numerical simulation of scour and backfilling processes around a circular pile in waves. *Journal of Coastal Engineering*, 122, 87-107.
- Dey, S., Sumer, B.M. ve Fredsoe, J. (2006). Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132 (3), 270–279.
- Dey, S., Helkjær, A., Sumer, B.M. ve Fredsoe, J. (2011). Scour at vertical piles in sand-clay mixtures under waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 137 (6), 324–331.
- Doğan, M. (2013). *Dalga etkisindeki su altı borusu altında zamana bağlı olarak oluşan oyulmaların araştırılması*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Flow Science Inc. (2007). *Flow3D user's manual*. Santa Fe, New Mexico:Flow

- Fredsoe, J., Sümer, B. M. ve Arnskov, M. (1992a). Time scale for wave/current scour below pipelines. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2 (2), 13-17.
- Guney, M.S., Bombar, G., Ozgenc Aksoy, A.ve Dogan, M. (2013). Use of UVP to investigate the evolution of bed configuration. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17 (5), 1188-1197.
- Güven, A., Azamathulla, H.M. ve Günel, M. (2012). Predicting wave-induced scour around a circular pile. *Maritime Engineering*, 165 , 31-40.
- Harris, J.M., Whitehouse, R.J.S. ve Benson, T. (2010). The time evolution of scour around offshore structures. *Maritime Engineering*, 163 , 3–17.
- Mostafa, Y.E. ve Agamy, A.F. (2011). Scour around single pile and pile groups subjected to waves and currents. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (11), 8160–8178.
- Petersen, T.U., Sumer, B.M. ve Fredsoe, J. (2012). Time scale of scour around a pile in combined waves and current. *6th International Conference on Scour and Erosion, Paris*, 981–988.
- Quezada, M., Tamburrino, A., ve Niño, Y. (2019). Numerical study of the hydrodynamics of waves and currents and their effects in pier scouring. *Water*, 11 (11), 2256.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J. ve Christiansen, N. (1992a). Scour around vertical pile in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, 114 (5), 599–614.

- Sumer, B.M. ve Fredsøe, J. (2001-b). Wave scour around a large vertical circular cylinder. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127 (3), 125–134.
- Sumer, B.M., Christiansen, N. ve Fredsoe, J. (1993). Influence of cross section on wave scour around piles. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119 (5), 477–495.
- Sumer, B.M. ve Fredsoe, J. (2001). Scour around pile in combined waves and currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (5), 403-411.
- Sumer, B.M. ve Fredsoe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Sumer, B.M., Hatipoglu, F. ve Fredsoe, J. (2007). Wave scour around a pile in sand, medium dense, and dense silt. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 133 (1), 14–27.
- WenGang, Q.I. ve FuPing, G.A.O. (2014). Equilibrium scour depth at offshore monopile foundation in combined waves and current. *Science China Technological Sciences*, 57 (5), 1030–1039.