T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIK GRUBUNDA PERVANE JETİ ETKİSİNDE OYULMANIN ARAŞTIRILMASI

Elif ŞEN ÇAP

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU

Şubat, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAZIK GRUBUNDA PERVANE JETİ ETKİSİNDE OYULMANIN ARAŞTIRILMASI

Elif ŞEN ÇAP tarafından hazırlanan tez çalışması 23.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail DURANYILDIZ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kazık Grubunda Pervane Jeti Etkisinde Oyulmanın Araştırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Elif ŞEN ÇAP

İmza

TEŞEKKÜR

Lisansüstü tez sürecimin her aşamasında, yardım ve desteğini esirgemeyen, beni her zaman motive eden, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım kıymetli hocam Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU'na tüm içtenliğimle sonsuz teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimimde ve tez çalışmalarımda desteğini esirgemediği, kıymetli bilgileri ve yol göstericiliği için sayın hocam Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e, deney sistemi ve fotogrametri teknikleri konusundaki destekleri için Arş. Gör. Mustafa Fahri KARABULUT'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimin bana kazandırdığı değerli dostum Kadir TAHTACI'ya, 20 senedir bana yol arkadaşı ve destekçi olan Elif MERİÇ'e, ve yine en büyük destekçim manevi kardeşim Çağlanur CERKENLİ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca olduğu gibi, bu çalışmamda da beni destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim annem Atman ŞEN, babam Bahaddin ŞEN ve kızkardeşlerim Aleyna ŞEN ve Begüm Cemre ŞEN'e her konuda sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, kilometrelerce uzakta da olsa, aynı evin içerisinde de olsa, her zaman yanımda olduğunu hissettiren, beni cesaretlendiren, destekleyen ve motive eden, biricik eşim Ferhat ÇAP'a sonsuz teşekkür ederim.

Elif ŞEN ÇAP

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 4

1.3 Hipotez 4

2 GEMİ PERVANELERİ ETKİSİNDE MEYDANA GELEN OYULMA 5

2.1 Giriş 5

2.2 Serbest Pervane Etkisinde Oyulma 7

2.3 Kazık Grubu Etrafındaki Oyulma 10

3 DENEY SİSTEMİ 18

3.1 Deney Kanalı Ve Kullanılan Model Özellikleri 18

3.2 Boyut Analizi 24

3.3 Oyulma Geometrisinin Ölçümü 27

4 DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 30

4.1 Pervane Jeti Etkisinde Kazıklar Etrafındaki Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi 30

4.2 Tekil Kazık Durumu 33

4.3 Kazık Grubu 34

4.4 Kazık Gruplarında Global Oyulma 42

4.5 Global Oyulmanın Geometrik Boyutları 49

5 SONUÇ VE ÖNERİLER 54

KAYNAKÇA 56

A EKLER 59

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 83

SİMGE LİSTESİ

Re_f	Akım Reynolds sayısı
S_{mak}	Denge durumundaki maksimum oyulma derinliği
ρ	Deniz suyu özgül kütlesi
S_g	Global denge oyulma derinliği
σ_g	Granülometri eğrisine ait standart sapma
$\Delta\rho$	Katı madde ile deniz suyu özkütlesi arasındaki fark
ρ_s	Katı madde özgül kütlesi
D	Kazık çapı
d_0	Kazık çapı
S_{mn}	Kazık grubu için oyulma ve yığılma yüksekliği
L_d	Kazık grubunun oyulma çukurunun mansap tarafındaki uzunluğu
S_0	Kazık önündeki maksimum oyulma derinliği
N	Kazık sayısı
X_t	Kazıklar arası mesafe
KC	Keulegan-Carpenter sayısı
ν	Kinematik viskozite
$Fr_{d,cr}$	Kritik yoğunluk Froude sayısı
L_s	Küçük oyulmayı da içeren oyulma çukuru uzunluğu
e_{max}	Maksimum boşluk oranı
S	Maksimum denge oyulma derinliği
S_T	Maksimum global denge oyulma derinliği ile maksimum yerel denge oyulma derinliğinin toplamı
L_t	Mansap tarafındaki yığılma dahil olmak üzere profilin toplam uzunluğu
m	Metre
mm	Milimetre
e_{min}	Minimum boşluk oranı
L_w	Oyulma çukurunun maksimum genişliği
D_p	Pervane Çapı
D_h	Pervane hub çapı
X	Pervane ile ön kazık arası mesafe
G	Pervane ile zemin arası mesafe
C_t	Pervane itme katsayısı
V_0	Pervane jet akış hızı
U_0	Pervane jet çıkış hızı
Re_p	Pervane Reynolds sayısı
C	Pervane ucu ile deniz tabanı arası açıklık
β	Pervanenin kanat alanı oranı
D_r	Rölatif sıkılık değeri
cm	Santimetre
h	Su derinliği
g	Yerçekimi ivmesi
Fr_d	Yoğunluk Froude sayısı

e	Zeminin rölatif sıkılığının belirlenmek istendiği durumuna ait boşluk oranı
n	1 saniyedeki pervane dönüş sayısı
d_{16}	%16'sının geçtiği malzeme çapı
d_{50}	%50'sinin geçtiği medyan malzeme çapı
d_{84}	%84'ünün geçtiği malzeme çapı
d_{90}	%90'ının geçtiği malzeme çapı

KISALTMA LİSTESİ

rpm	dakikadaki devir sayısı
RMSE	Kök ortalama karekök hatası

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 İstanbul Ambarlı Limanı iskeleleri.....1
Şekil 2.1 (a) Kapalı (b) Açık rıhtımlar [9].....6
Şekil 2.2 Ro-ro feribotunun yanaşması durumunda ana pervane jet akımı [9] 6
Şekil 2.3 Yan pervaneden dolayı jet akımı [9] 7
Şekil 2.4 Pervane jetindeki dönme [9].....7
Şekil 2.5 Rıhtım duvarı olmayan su kütlesinde pervane jeti [9].....7
Şekil 2.6 Pervane jeti etkisinde tabanda oluşan oyulma profilinin şematik gösterimi [9].....8
Şekil 2.7 Dümenden dolayı pervane jetinin ikiye ayrılması.....10
Şekil 2.8 Küresel ve yerel oyulma [9] 11
Şekil 2.9 Yan yana iki kazık yerleşimi durumunda G/D=1 için rijit tabandan 14.5 cm yukarıda ortalama hız ölçümleri [20].....12
Şekil 2.10 5x5 kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için rijit tabandan 14.5 cm yukarıda ortalama hız ölçümleri [20].....13
Şekil 2.11 Kum zeminden 14.5 cm uzaklıkta türbülans profilleri [9] önceki şekildeki rijit-yatak testleri G/D=4. U_0 aynı seviyedeki rahatsız edilmemiş hız.....14
Şekil 2.12 5x5 kare düzenleme kazık grubu için denge oyulma profilleri G/D = 4 [9] 15
Şekil 2.13 NxN kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için maksimum global denge oyulma derinliğinin (S_g) değişimi. [9] 15
Şekil 2.14 NxN kare kazık grubu için maksimum toplam denge global oyulma derinliği [9] 16
Şekil 3.1 Deney sistemi ve 3×3 kare kazık grubu yerleşimi (birimler metredir) a) plan b) kesit.....18
Şekil 3.2 Pervane sistemi 19
Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan pervane modelleri a) Dp=10 cm, b) Dp=6.5 cm.....20
Şekil 3.4 Taban malzemesi granülometri eğrisi (d_{50}=0.52 mm) 21
Şekil 3.5 3×3 kazık grubu yerleşimi a) Pervane konumu kazık grubu ekseninde, b) Pervane konumu kazıklar arasında.....23
Şekil 3.6 Maksimum oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (a) Kazık önünde (b) Kazık arkasında (D_p= 10 cm, X_t = 2d_0, 670 rpm, d_0=7 cm) 28
Şekil 4.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) 31
Şekil 4.2 Yüksel ve diğ. [13] tarafından önerilen denklemler kullanılarak kazık önünde ölçülen ve hesaplanan göreceli oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (a) S/D_p, (b) S/d_0.....33
Şekil 4.3 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, X_t=2d_0, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde) 38
Şekil 4.4 Pervane kazık ekseninde iken göreceli oyulma derinliğinin (S_{mn}/S_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi 40

Şekil 4.5 Göreceli oyulma derinliğinin (S_{mn}/S_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm) 41
Şekil 4.6 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7cm).....42
Şekil 4.7 Yerel ve global oyulma fotoğrafları (d_0=7 cm, $X_t=d_0$) (a, b) Pervane kazık grubu ekseninde, (c, d) Pervane kazıklar arasında.....43
Şekil 4.8 Pervane kazık grubu ekseninde (n=1) iken boyuna ve enine kesitlerdeki oyulma profilleri (Xt=2d0, d0=7cm) 46
Şekil 4.9 Pervane n=1 ve 2 eksenleri arasında iken boyuna ve enine kesitlerdeki oyulma profilleri ($X_t=2d_0$, d_0=7cm) 47
Şekil 4.10 Göreceli global oyulma derinliği 49
Şekil 4.11 Global oyulmanın şematik gösterimi 50
Şekil 4.12 Pervane konumu kazık grubu ekseninde (n=1) iken göreceli global oyulma boyutları.....52
Şekil 4.13 Pervane konumu kazıklar arasında (n=1 ve 2) iken göreceli global oyulma boyutları.....53
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) 59
Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında) 65
Şekil 5.3 Ek2.1 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=5 cm, $X_t=2d_0$, d_0/D_p=0.5-0.77, pervane kazık ekseninde), ...71
Şekil 5.4 Ek2.2 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde) 73
Şekil 5.5 Ek2.3 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=3d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde) 75
Şekil 5.6 Ek2.4 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında) 77
Şekil 5.7 Ek2.5 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=2d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında) 79
Şekil 5.8 Ek2.6 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=3d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında) 81

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Pervane özellikleri 20
Tablo 3.2 Deneylerde kullanılan taban malzemesi özellikleri 21
Tablo 3.3 Deneylerde kullanılan prototip ve model boyutları 22
Tablo 3.4 Deney şartları 24
Tablo 3.5 Etkili parametreler 25
Tablo 3.6 Farklı pervane hızları için hesaplanan Reynolds sayıları 26

ÖZET

Kazık Grubunda Pervane Jeti Etkisinde Oyulmanın Araştırılması

Elif ŞEN ÇAP

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU

Bu tez kapsamında, bir geminin ana pervanesinin etkisine maruz kalan, farklı konfigürasyonlara sahip kazık gruplarının etrafında oluşan oyulmalar deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler laboratuvar ortamındaki kanalda, kum yatağına yerleştirilen silindirik kazık modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Kazık grubu 3x3 kare olarak düzenlenmiştir. Farklı pervane çapları (6.5 cm ve 10 cm), pervane hızları (590, 670 ve 745 rpm), kazık çapları (d_0 = 5 cm-7cm) ve kazık aralıkları kullanılarak, değişen şartlara göre meydana gelen oyulma türü ve oyulma miktarı deneysel olarak incelenmiştir. Pervane ile ön kazıklar arası mesafe G=10 cm, pervane ile kum yatağı arası mesafe 10 cm olarak konumlandırma yapılmıştır. Deney sisteminin deney öncesi ve deney sonrası 360° açıdan fotoğrafları çekilerek, fotogrametrik yöntemler ile 3 boyutlu modellemesi yapılmıştır. Böylece oyulma çukuru detaylı bir şekilde incelenmiş ve boyutları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Denge durumundaki oyulma çukuru derinliğinin kazıklar arasındaki mesafeye (X_t), densimetrik Froude Sayısına (Fr_d) ve pervanenin konumuna bağlı olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Oyulma, pervane jeti, kazık grubu, iskeleler, rıhtımlar, fotogrametri teknikleri

ABSTRACT

Propeller Jet Scour Around Pile Groups

Elif ŞEN ÇAP

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU

In this thesis, scours formed around pile groups of different configurations, which are exposed to the impact of a ship's main propeller, were investigated experimentally. Experiments were carried out with cylindrical pile models placed in the sand bed in the flume in the laboratory. The pile group is arranged as a 3x3 square. Using different propeller diameters (6.5 cm and 10 cm), propeller speeds (590, 670 and 745 rpm), pile diameters (d0 = 5 cm-7 cm) and pile spacing, the type of scour and the amount of scour due to changing conditions were experimentally investigated. . The distance between the propeller and the front piles is G=10 cm, and the distance between the propeller and the sand bed is 10 cm. Photographs of the experimental system were taken from 360° angles before and after the experiment, and 3D modeling was done with photogrammetric methods. Thus, the scour pit was examined in detail and its dimensions were analyzed in detail. The depth of the scour hole at equilibrium was found to depend on the distance between the piles (X_t), the densimetric Froude Number (Fr_d), and the position of the propeller.

Keywords: Scour, propeller jet, pile group, piers, dolphins, photogrammetric techniques

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kazık grupları, kazık destekli iskeleler ve dolfenler gibi yanaşma yapılarını desteklemek için uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.1). Pervane kaynaklı oyulma, yanaşma yapılarında, özellikle kazık destekli iskelelerde oldukça fazla meydana gelmektedir. İskeleler ve dolfenler çok sayıda kazığa sahiptir ve stabiliteleri kazıkların sayısına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Ancak, kazıkların etrafında ve kazık gruplarının içinde gemi pervane jeti akımından dolayı oluşan oyulma sonucunda kazıklarda ciddi stabilite problemleri meydana gelebilir. Yakın zamanda büyük draftlı konteyner gemilerine yan pervanelerin dahil edilmesi bu sorunu daha da önemli hale getirmiştir. Bu nedenle, oyulma derinliği de dahil olmak üzere amaçlanan tasarım derinliği mutlaka belirlenmelidir. Bununla birlikte, kazık grupları etrafındaki oyulma mekanizması, tek kazık etrafındaki oyulma mekanizmasından çok daha karmaşıktır ve gemi pervane jeti akımı nedeniyle meydana gelen oyulma derinliklerini belirlemek de daha zordur. Ayrıca farklı kazık konfigürasyonlarına göre gemilerin yanaşma konumları da oyulma çukuru morfolojisini değiştirmektedir.



Şekil 1.1 İstanbul Ambarlı Limanı iskeleleri

Kazık grupları söz konusu olduğunda, grup etkileri oldukça önemli hale gelmektedir. Kazık grupları etrafındaki gemi pervane jetinden kaynaklanan oyulmaya ilişkin bazı çalışmalar yapılmıştır [1]. Kazık grupları etrafındaki oyulma

ile ilgili çalışmaların çoğunda, dalga ve kararlı akım koşulları dikkate alınmıştır (Sumer ve Fredsøe [2], Sumer ve diğerleri [3], Ataie-Ashtiani ve Beheshti [4], Amini ve diğerleri [5]). Ancak, kazık destekli rıhtım yapılarının etrafında üç boyutlu dönen gemi pervanelerinin neden olduğu oyulma oluşumunun ayrıntılı bir şekilde incelendiği sınırlı sayıda çalışma (Yüksel ve diğerleri [6]) mevcuttur.

Chin ve diğ. [7] ve Yüksel ve diğ. [8] dairesel duvar jeti etkisinde, düşey bir kazığın etrafındaki oyulmayı incelemiştir.

Sumer ve Fredsøe [2], farklı konfigürasyonlara sahip (ikili, üçlü ve dörtlü olmak üzere yan yana ve art arda kazık düzenlemeleri, üçgen ve 4×4 kare düzenlemeleri) kazık grupları etrafında dalga etkisinde d_{50}= 0.2 mm çapına sahip kum taban üzerinde meydana gelen oyulmayı incelemişlerdir. Ayrıca, oyulma mekanizmasının Keulegan-Carpenter sayısına (KC) ve kazıklar arasındaki mesafeye bağlı olduğunu bulmuşlardır.

Sümer ve Fredsøe [9] kararlı akım ve dalga koşullarındaki kazık grubu etrafındaki oyulmayı araştırmıştır. Ayrıca Sümer ve diğ. [3] meydana gelen oyulmaları tekil kazık etrafında oluşan yerel oyulma ile kazık grubu içinde oluşan ve kum tabanı seviyesinde genel bir azalmaya sebep olan global oyulma olarak iki ayrı mekanizma olarak tanımlamıştır. Ek olarak, kazık grubu içinde oluşan oyulmanın, grup içerisindeki tekil kazıkların yarattığı akım şartları nedeniyle, tekil kazık durumunda meydana gelen oyulmadan önemli ölçüde farklı olacağını belirtmiştir.

Yüksel ve diğ. [6], tekil kazıklar ve kazık grupları etrafındaki yerel oyulmayı araştırmışlardır. Çalışmalarında pervane jeti dairesel bir su jeti ile benzeştirilmiştir. Kazık grubundaki kazıkların etrafında meydana gelen oyulmanın, yoğunluk Froude sayısının (Fr_d), kazıklar arasındaki mesafenin, kazık çapının ve göreceli kazık çapının bir fonksiyonu olduğunu göstermişlerdir.

Ataie-Ashtiani ve Behesti [4] kararlı temiz su koşullarında kazık grupları için yaptığı deneysel çalışmalarda, farklı kazık grubu yerleşimlerinin, farklı akım şartlarının, farklı kazıklar arası mesafenin ve farklı taban malzemesinin oyulma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bazı kazık grupları konfigürasyonları için oyulma derinliğinin tek kazık durumuna göre iki kat kadar arttığını gözlemlemişlerdir.

Amini ve diğ. [5], kararlı akım şartlarında batık ve batık olmayan kazık gruplarında temiz su oyulması üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kazık gruplarının farklı konfigürasyonları için oyulma derinliğinin kazık çapına, kazıklar arasındaki mesafeye ve batıklık oranına göre değiştiğini bulmuşlardır. Ayrıca çalışılan değişkenlerin etkisini göstermek için ampirik bağıntılar elde etmiş ve kazık grubu konfigürasyonlarının, kazık aralığının ve batıklık oranının yerel oyulma derinliği üzerindeki etkisini tahmin etmek için yeni bir yöntem önermişlerdir.

Ozan ve diğ. [10] rıhtım yapılarının altındaki koruyucu tabakalı şevlerde oyulmaya yönelik deneyler gerçekleştirmiştir. Şevde bulunan koruyucu tabakadaki hasarlar, bir hasar seviyesi parametresi ile tanımlanmış ve ek olarak hasar başlangıcı için bir kritik yoğunluk Froude sayısı ($Fr_{d,cr}$) tanımlanmıştır.

Yüksel ve diğ. [11] kazık etrafındaki deniz tabanı yakınlarındaki akım özelliklerinin incelenmesi için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Gemi jetleri, dairesel duvar jeti ve pervane jeti olarak benzeştirilmiştir. Bu çalışmada, açık tip rıhtım yapıları için, silindirik kazıkların etrafında ve şevlerde, jet ekseni boyunca taban kayma gerilmesi ve hız profilleri belirlenmiştir. Pervane jeti deneylerinin sonuçları şevlerdeki erozyonu açıklamak için de kullanılmıştır.

Cihan [12], kazıklı koruyucu tabakalı şeve sahip yanaşma yapılarındaki hasarlara gemi pervane jetinin etkisini belirlemeye çalışmıştır.

P.I.A.N.C. [1] pervane jeti oyulmasının nasıl önlenebileceğini gösteren bir rapor yayınlamıştır. Bu rapor, yanaa yapılarının önünde ve çevresindeki oyulmayı, hasar yerlerini ve stabilite risklerini ortaya koymuştur.

Yüksel ve diğ [13] pervane jetinin tekil kazık etrafında oluşturduğu oyulmayı deneysel olarak incelemiştir. Oyulma profilinin yüksek oranda yoğunluk Froude sayısına (Fr_d), pervane çapına (D_p), pervane –taban arasındaki açıklığa (G) ve kazık çapına (d_0) bağlı olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, kazık önündeki oyulma derinliğini tahmin etmek için yeni ampirik denklemler önerilmiştir.

Yang ve diğ. [14], kararlı akım koşullarında farklı kazık grubu konfigürasyonlarında (arka arkaya iki kazık, 2x2 kare kazık, 2×3 dikdörtgen kazık ve kademeli kazık) meydana gelen oyulmayı incelemişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde, gemi ana pervanesinin farklı koşullarda, 3x3 kare yerleşimli bir iskele yapısının silindirik kazık grubu etrafında, meydana getirdiği oyulma araştırılmıştırr. Aynı zamanda pervane jet akımının etkisinde yerel oyulma ve global oyulma olarak iki şekilde oluşabilen oyulma türlerinden baskın olanı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmadaki amaç sadece tekil kazıklar etrafında oluşan oyulmanın araştırmak değil, aynı zamanda kazık grubunun ve pervane jeti akımının tüm sisteme etkisinin de incelenmesidir. Kazıklı bir iskeleye geminin yanaşma durumuna göre, pervanenin hem kazık ekseninde, hem de kazık eksenleri arasında bulunma durumları dikkate alınmıştır. Ek olarak, kazıkların arasındaki mesafenin oyulma oluşumuna etkisi araştırılmış ve kum zemin üzerinde kazık grupları için oyulma oluşumu üzerinde iki farklı pervane boyutu ile çalışılmıştır.

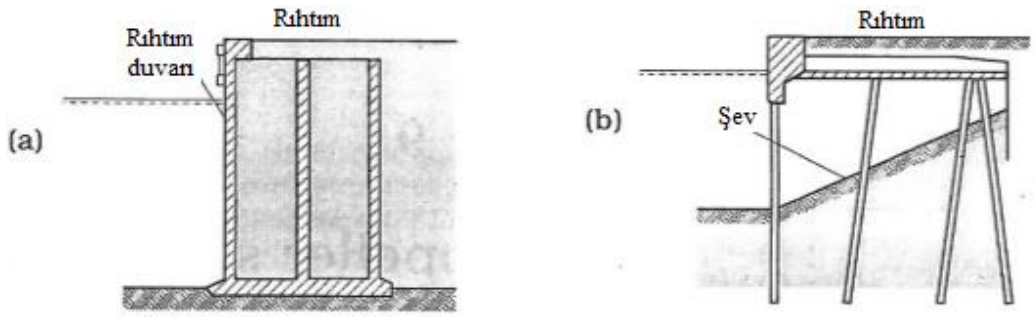
1.3 Hipotez

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, pervane jetinin kazık grubu etrafında oluşturduğu oyulma konusunda yeterli çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu amaçla, kazık grubu etrafında gerçekleşecek oyulma oluşumunun, pervanenin kazık eksenlerine göre konumu, pervanenin çapı, kazıklar arasındaki mesafe ve kazıkların çapı dikkate alınarak değişiminin belirlenmesi için farklı şartlarda deneysel bir çalışma gerçekleştirilmesi öngörülmüştür.

2
GEMİ PERVANELERİ ETKİSİNDE MEYDANA GELEN OYULMA

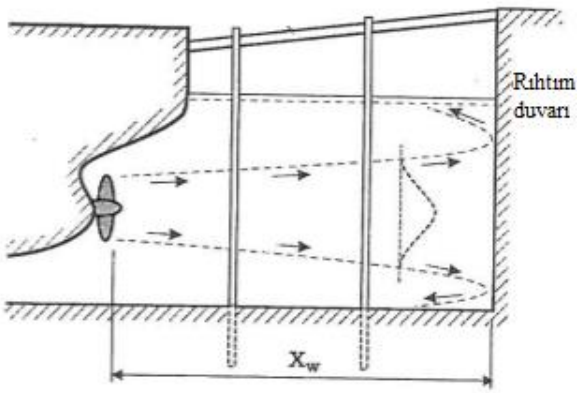
2.1 Giriş

Yanaşma yapılarının etrafında meydana gelen oyulmaların en önemli nedenlerinden birisi gemi pervane jetinin yapıların yakınlarındaki akım yapısını değiştirmesidir. Modern gemilerin kıç tarafındaki ana pervanelere ilaveten gemi omurgasına dik olarak yerleştirilmiş genel olarak baş tarafta bazen de kıç tarafında yan pervaneler de bulunmaktadır. Rıhtım altındaki şevlerde veya deniz tabanında meydana gelen en şiddetli erozyon etkisi genellikle hem ana pervaneden hem de yan pervanelerden kaynaklanabilir. Konteyner gemileri, Ro/Ro gemileri ve feribotların pervanelerinin rıhtım yakınındaki erozyona büyük katkı sağladığı bilinmektedir. Bu pervaneler gemilerin römorkör yardımı almadan rahatça manevra yapmasını sağlamaktadır. Özellikle gemilerin yanaşma ve ayrılmaları sırasında kullanılmaktadır ve bu esnada rıhtım yapısı önündeki deniz tabanında veya rıhtım altındaki şevde oyulmaya neden olurlar. Rıhtım yapıları kapalı veya açık olabilir ve kazıklarla desteklenebilir (Şekil 2.1). Kapalı yanaşma veya rıhtım yapıları deniz etkilerini ön yüzeyleri ile karşılayan ve arka taraflarına geçirmeyen yapılardır. Açık tip rıhtımlar ise genellikle kazıklı olarak inşa edilirler ve şevli bir yapı ile rıhtımı oluştururlar. Bu şevli yapı farklı eğimlerde tasarlanabilir. Şevli yapının sakin su yüzeyine yakın bölgesi dalga etkisinde tabana yakın kısmı ise gemi pervane jeti etkisinde erozyona uğrayabilmektedir.

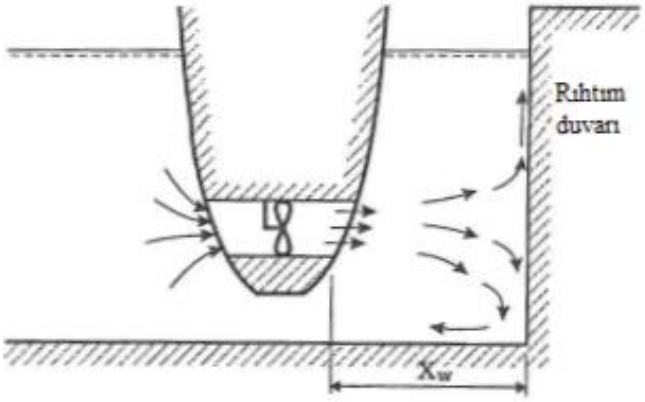


Şekil 2.1 (a) Kapalı (b) Açık rıhtımlar [9]

Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 kapalı rıhtım yapısında ana pervaneden ve yan pervaneden dolayı meydana gelen jet akımının taban ve rıhtım duvarındaki sapmasını göstermektedir. Bu durumda tabanda ve rıhtım duvarı etrafında oluşan hızlar çok yüksek büyüklüklere ulaşabilmektedir. Bu nedenle özellikle gemilerin yanaşma ve ayrılmaları sırasında rıhtım yapısı önündeki deniz tabanında veya rıhtım altındaki şevde oyulmaya neden olabilmektedirler. Rıhtım yapılarında gemi pervane jeti etkisinden kaynaklanan hasar problemlerini listeleyen bir dizi vaka çalışması rapor edilmiştir [15]. Bergh ve Cederwall [16] İsveç'teki limanlarda gemi pervanelerinin meydana getirdiği hasarlar üzerine yürütülen araştırmada, 18 limandan 16'sının pervane kaynaklı oyulmaya maruz kaldığını göstermiştir. Quarrain [17] İngiliz limanlarında gemi pervanelerinin neden olduğu hasarı araştırmıştır. Bu araştırmada, büyük limanların %42'sinde hasar olduğunu ve bunlardan %29'unun onarım gerektiren ciddi hasarlar olduğunu belirtmiştir.



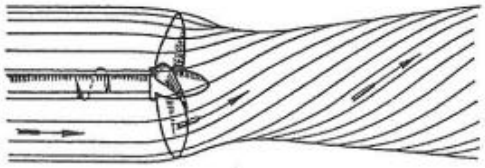
Şekil 2.2 Ro-ro feribotunun yanaşması durumunda ana pervane jet akımı [9]



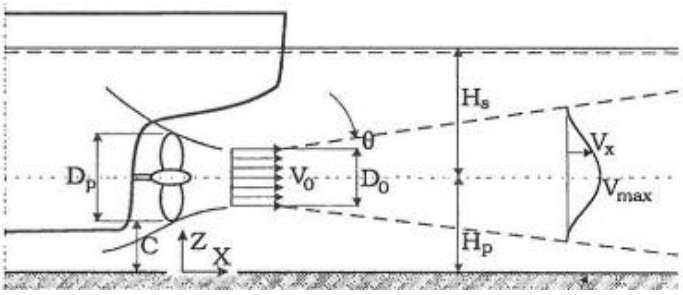
Şekil 2.3 Yan pervaneden dolayı jet akımı [9]

2.2 Serbest Pervane Etkisinde Oyulma

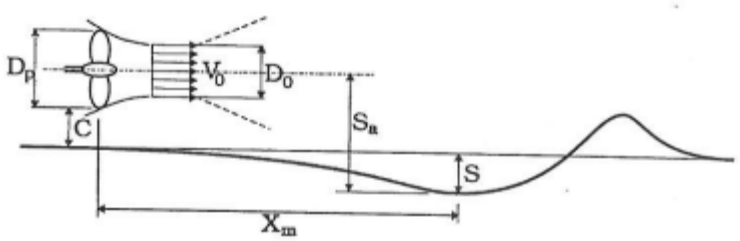
Bir gemi pervanesi, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi girdap biçiminde olan bir jet üretmektedir. Herhangi bir rıhtım yapısının olmadığı bir su kütlesi içinde böyle bir jeti meydana geldiğinde, bu jet serbest pervane jeti olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.5) ve tabanda oyulmaya neden olmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.4 Pervane jetindeki dönme [9]



Şekil 2.5 Rıhtım duvarı olmayan su kütlesinde pervane jeti [9]



Şekil 2.6 Pervane jeti etkisinde tabanda oluşan oyulma profilinin şematik gösterimi [9]

S, maksimum denge oyulma derinliği aşağıdaki parametrelerin fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$S=f(V_0, D_p, d_{50}, C, \rho, g, \Delta\rho, \nu) \tag{2.1}$$

Burada V_0 pervane jet çıkış hızı, D_p pervane çapı, C pervane ucu ile deniz tabanı arasındaki açıklık, d_{50} yatak tane boyutu, ρ deniz suyu özgül kütlesi, $\Delta\rho=\rho s-\rho$ katı madde özgül kütlesi ile deniz suyu özgül kütlesi arasındaki fark, ν kinematik viskozite ve g yer çekimi ivmesidir. Pervane jet çıkış hızı şu şekilde hesaplanır:

$$V_0 = nD_p\sqrt{C_t} \tag{2.2}$$

Burada n bir saniyedeki pervane dönüş sayısı, C_t pervane itme katsayısıdır [15].

Boyut analizi yapıldığında, pervane çapı ile boyutsuzlaştırılan maksimum denge oyulma derinliği şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\frac{S}{D_p} = f_1\left(\frac{V_0}{\sqrt{gD_{50}\frac{\Delta\rho}{\rho}}}, \frac{V_0 D_p}{\nu}, \frac{D_p}{d_{50}}, \frac{C}{d_{50}}\right) \tag{2.3}$$

Fonksiyondaki birinci terim Froude Sayısı olarak adlandırılmaktadır.

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gD_{50}\frac{\Delta\rho}{\rho}}} \tag{2.4}$$

Fonksiyondaki ikinci terim akıma ait Reynolds sayısıdır.

$$Re_j = \frac{V_0 D_p}{\nu} \tag{2.5}$$

Rajaratnam [16], Reynolds sayısının 10^4'ten büyük olması durumunda viskozite etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle normalleştirilmiş maksimum denge oyulma derinliği,

$$\frac{S}{D_p} = f_1(F_0, \frac{D_p}{d_{50}}, \frac{C}{d_{50}}) \tag{2.6}$$

haline gelmiştir.

Hamill [17] ve Hamill ve diğ. [18], maksimum oyulma derinliğinin zamanla değişimini incelemişlerdir. Yapmış oldukları deneylerden, maksimum oyulma derinliğini (S_t) zamanın ve (2.4) denklemindeki parametrelerin (F_0, D_p/d_{50} ve C/d_{50}) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki ampirik ifadeyi elde etmişlerdir.

$$S_t = k\Omega[\ln(t)]^{\Gamma} \tag{2.7}$$

Burada k=38.97 değerini alan bir sabittir. S_t milimetre, t ise saniye birimindedir.

$$\Gamma = F_0^{-0.53}(\frac{D_p}{d_{50}})^{-0.48}(\frac{C}{d_{50}})^{0.94} \tag{2.8}$$

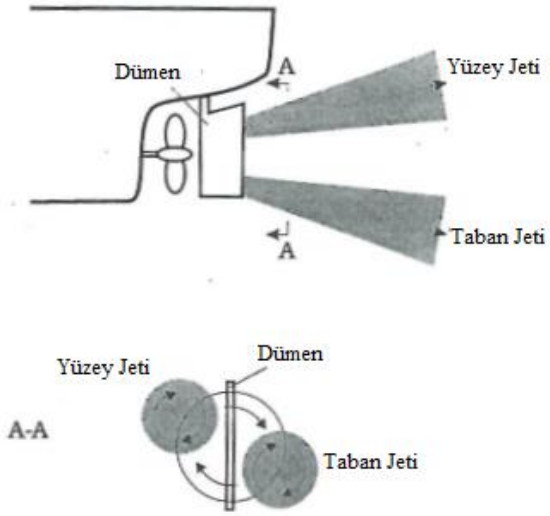
$$\Omega = \Gamma^{-6.38} \tag{2.9}$$

Hamill ve diğ. [18] önceki çalışmalarda elde edilen denklemlerin sadece pervane ile deniz tabanı arasındaki mesafenin belli değerleri ($0.5D_p < C < 2.5D_p$) için geçerli olduğunu belirtmiştir. Hamill ve diğ. [18] ayrıca pervaneden maksimum denge oyulma derinliğinin olduğu konuma kadar olan mesafenin belirlenmesi için de ampirik bir denklem vermiştir (Şekil 2.6):

$$\frac{X_m}{C} = F_0^{0.94} \tag{2.10}$$

Burada X_m maksimum denge oyulma derinliğinin pervaneye olan uzaklığıdır.

Pervanenin önünde konumlandırılmış olan dümen de pervane jeti akımında etkili olmaktadır (Şekil 2.7). Gözlemler, dümenin varlığının pervane jeti akımını biri yüzeye (yüzey jeti) diğeri tabana (taban jeti) doğru olmak üzere ikiye ayırdığını göstermektedir.



Şekil 2.7 Dümenden dolayı pervane jetinin ikiye ayrılması

Hamill ve McGarwey [19] dümenin oyulma üzerine etkisini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya göre dümen açısı sıfır derece ise (dümen pervane eksenine paralel) oyulma derinliği yaklaşık %25 kadar artmaktadır. Dümen açısının aşağı doğru olması durumunda taban jeti daha etkili olacağından tabandaki oyulmaya etkisi oldukça önemli olmaktadır. Maksimum oyulma derinliğinin konumu maksimum hızın oluştuğu konuma yakın olmaktadır. Aynı zamanda dümen etkisini dikkate alarak maksimum denge oyulma derinliğini belirleyen bir ifade vermişlerdir.

2.3 Kazık Grubu Etrafındaki Oyulma

Kazık grupları, kazıklı iskeleler gibi rıhtım yapılarını desteklemek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Pervane kaynaklı oyulma, özellikle kazıklı yanaşma yapılarında oldukça yaygındır. Bilindiği gibi iskeleler çok sayıda kazıktan oluşmaktadır ve kazık grupları içerisinde bulunan kazıkların etrafında pervane jet akımından dolayı meydana gelen oyulma problemi oldukça önemlidir. Bu durum kazık stabilitesinde ciddi sorunlara neden olabilmektedir. Yakın zamanda büyük draftlı konteyner gemilerine yan pervanelerin dahil edilmesi bu sorunu daha da

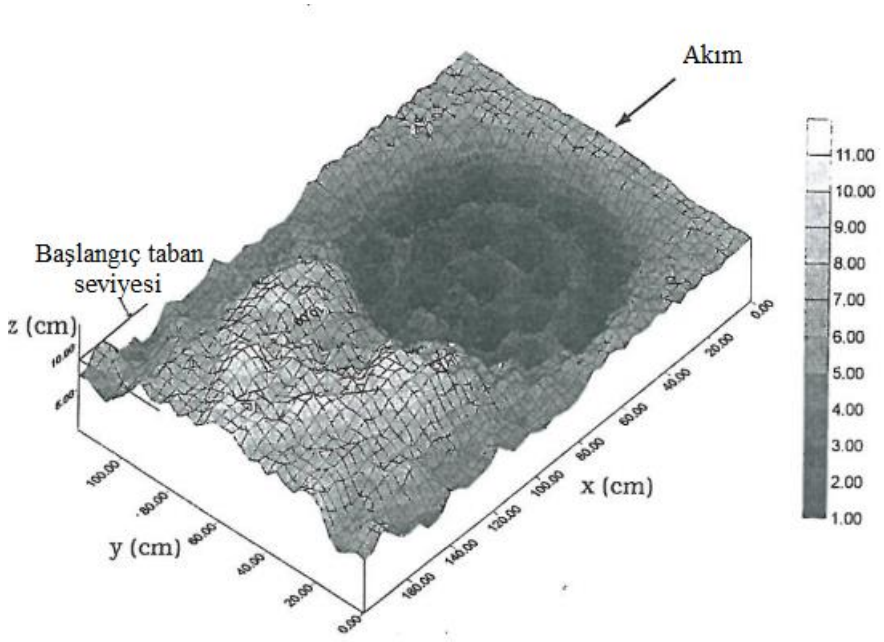
önemli hale getirmiştir. Bu nedenle, tasarım sırasında oyulma derinliği de mutlaka belirlenmelidir. Bununla birlikte, kazık grupları etrafındaki oyulma mekanizmaları, tek kazık etrafındaki oyulma mekanizmasından çok daha karmaşıktır ve gemi pervane jeti akımı nedeniyle meydana gelen oyulma derinliklerini belirlemek de daha zordur.

Kazık grupları akıma maruz kaldıklarında iki çeşit oyulma meydana gelmektedir.

1) Yerel oyulma

2) Global oyulma

Oyulmayı yerel ve global olarak iki ayrı mekanizmada inceleyen ilk çalışmalardan biri Sumer ve diğ. [22] tarafından yapılmıştır. Kararlı akım koşullarında (1) İki kazık yan yana (2) İki kazık arka arkaya (3) 2x2 kare kazık grubu (4) 3x3 kare kazık grubu (5) 5x5 kare kazık grubu (6) eşdeğer dairesel kazık grubu olmak üzere 6 farklı kazık düzenlemesi kullanarak rijit taban üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, şekilde de görüleceği gibi, global ve yerel oyulmalar ayırt edilebilir şekilde meydana gelmiştir (Şekil 2.8).

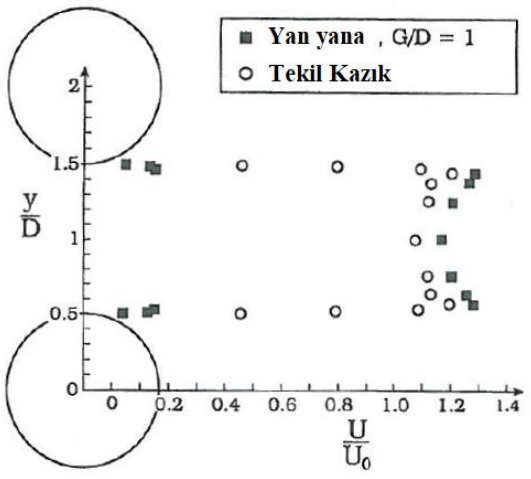


Şekil 2.8 Küresel ve yerel oyulma [9]

Yerel oyulma her bir tekil kazığın önünde oluşan oyulmadır. Akım çizgilerinin birbirlerine yaklaşmasıyla at nalı vorteksler meydana gelir. Bu at nalı vorteksler sebebiyle oluşur. Oyulma karakteristikleri tek bir kazık etrafında oluşan oyulma karakteristikleriyle benzerdir [9].

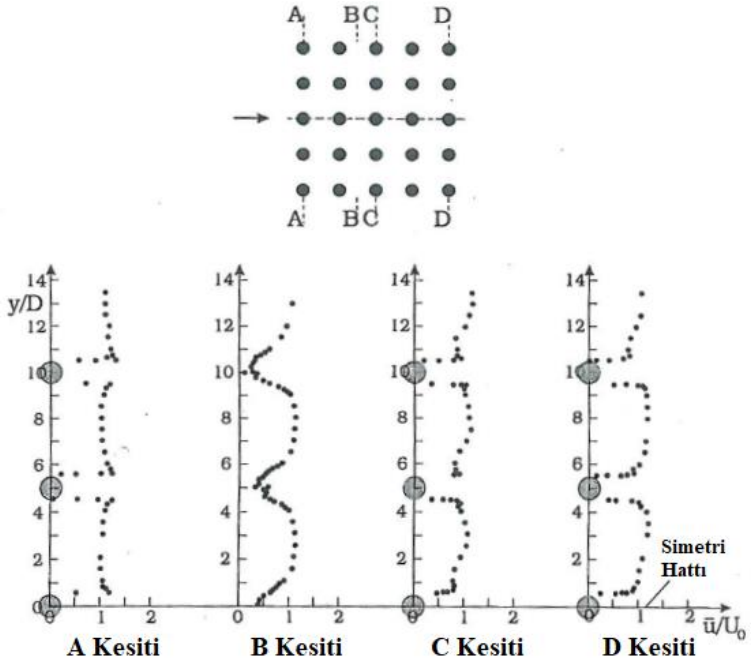
Global oyulma ise oyulmanın kazık gruplarının kapladığı bütün alan boyunca meydana gelmesidir. Global oyulma, iki nedenden kaynaklanmaktadır.

Birinci neden kazıklar arasındaki açıklıkta akım hızında meydana gelen değişimdir. Kazıklar arasındaki açıklıkta hız, tek kazık durumuna göre artar. Bu, tabanda oyulmaya neden olur ve kazıkların arasındaki taban kayma gerilmesi bozulmamış taban durumundaki taban kayma gerilmesi değerine düşene kadar oyulma işlemi devam eder. Şekil 2.9'da yan yana iki kazık durumu için Sümer ve diğ. [20] tarafından yapılan hız ölçümleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi kazıklar arasındaki açıklıkta tek kazık durumuna göre hız değerleri artmaktadır. Bu şekilde G/D=1'dir. Burada G kazıklar arasındaki açıklığı, D ise kazık çapını göstermektedir. Diğer açıklık oranları için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. G/D=4 iken hızların %5 mertebesinde arttığı görülmüştür. Bu da tabanda oyulma olacağını ifade etmektedir ve bu oyulma kazıklar arasındaki hızın artması nedeniyle meydana gelmektedir.



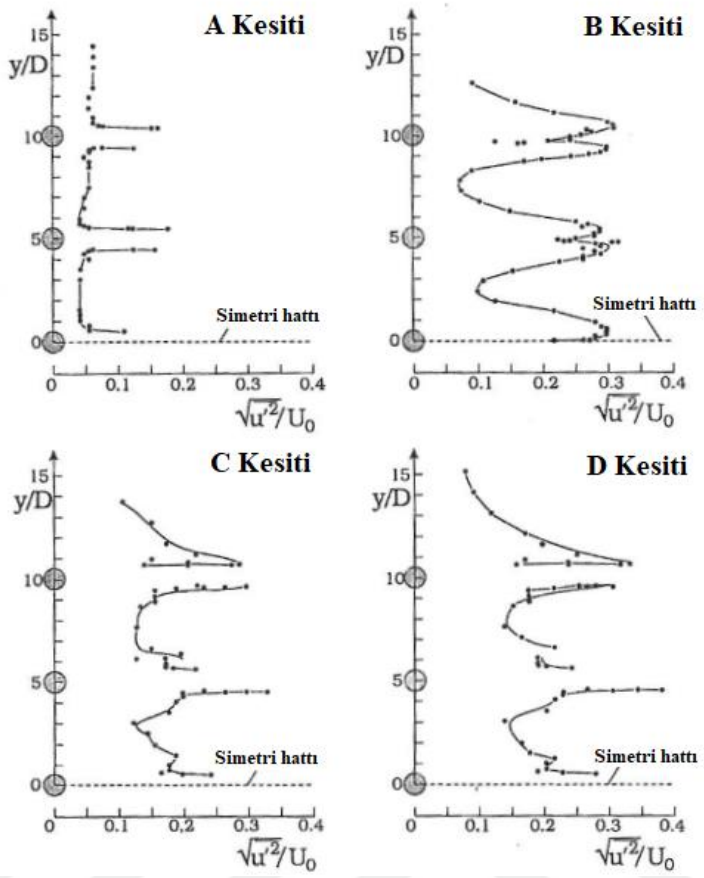
Şekil 2.9 Yan yana iki kazık yerleşimi durumunda G/D=1 için rijit tabandan 14.5 cm yukarıda ortalama hız ölçümleri [20]

İkinci neden ise kazık grubu içindeki tekil kazıklardan dolayı meydana gelen türbülanstır. Kazıkların iç tarafında yoğun türbülans olması, kazıkların etrafındaki katı madde taşınımının önemli ölçüde artmasına ve türbülansın yarattığı global oyulmadan dolayı taban seviyesinin düşmesine yol açar. Şekil 2.10'da 5x5 kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için A, B, C ve D kesitlerine ait ortalama hız ölçümleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi hızlar tek kazık durumuna göre önemli bir artış göstermemiştir. Kazık grubunun içindeki hızlar shielding etkisinden dolayı yer yer azalmaktadır.



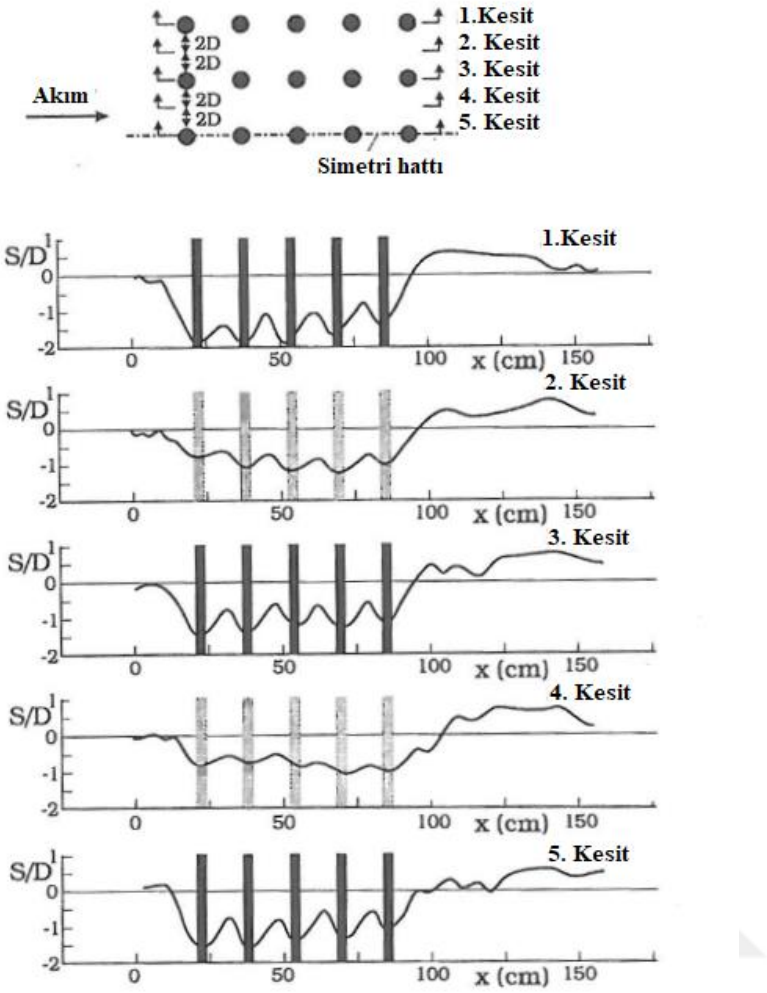
Şekil 2.10 5x5 kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için rijit tabandan 14.5 cm yukarıda ortalama hız ölçümleri [20]

Şekil 2.11'de aynı kesitlerde ölçülen türbülans değerleri görülmektedir. Burada u hızın akım doğrultusundaki bileşenini, u′ çalkantı hız bileşenini ve parametre üzerindeki çizgi de zamansal ortalamayı göstermektedir. Kazık grubu içinde meydana gelen türbülansın oldukça önemli miktarda (3 katı kadar) arttığı belirlenmiştir. Kazık grubu içerisindeki şiddetli türbülansın mevcudiyetinin anlamı, kazık grubunun tamamında oluşacak olan oyulmanın önemli derecede artacağı ve genel olarak tabanın alçalmasıyla türbülans etkisiyle oluşacak olan global oyulmanın meydana gelmesidir.

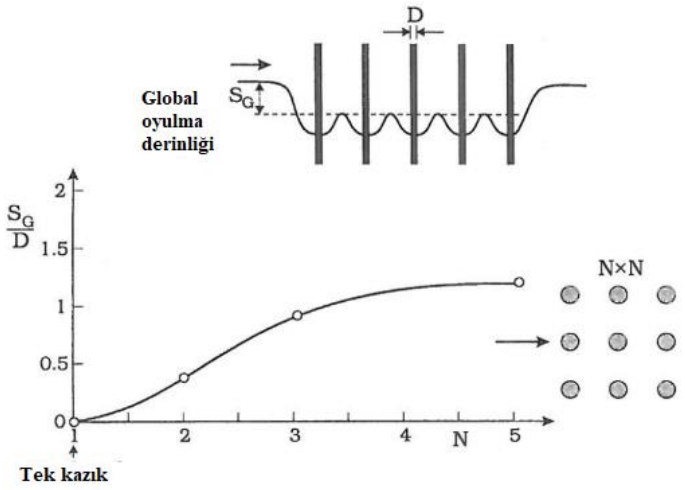


Şekil 2.11 Kum zeminden 14.5 cm uzaklıkta türbülans profilleri [9] önceki şekildeki rijit-yatak testleri G/D=4. U_0 aynı seviyedeki rahatsız edilmemiş hız.

Şekil 2.12'de 5x5 kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için ölçülmüş oyulma profilleri görülmektedir. Bu şekil, global oyulmanın yerel oyulmadan belirgin bir şekilde ayırt edilebileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 2.13'te NxN kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için maksimum global denge oyulma derinliğinin (S_g) değişimi çizilmiştir. Burada maksimum global oyulma derinliği kazık çapı D ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi kazık sayısının (N) artmasıyla, oyulma derinliği de artmaktadır (N≤4-5 için). Bununla birlikte kazık sayısı daha fazla arttığında oyulmanın sabit kaldığı görülmektedir. Bu da, türbülans etkisi ile açıklanabilir. Şekil 2.11'de de görüldüğü üzere, C kesitinden (3. kazık sırası) D kesitine (5. kazık sırası) kadar büyük bir türbülans değişimi meydana gelmemektedir. Gerçekten de bu iki bölüm arasındaki türbülans değeri aşağı yukarı aynıdır ve 0.3-0.4 değerini almaktadır. Bu da N=3-5 olana kadar türbülans değerinin arttığını ve 3-5'ten büyük değerlerinde ise sabit kaldığını kanıtlamaktadır. Bunun Şekil 2.13'te de desteklendiği görülmektedir.



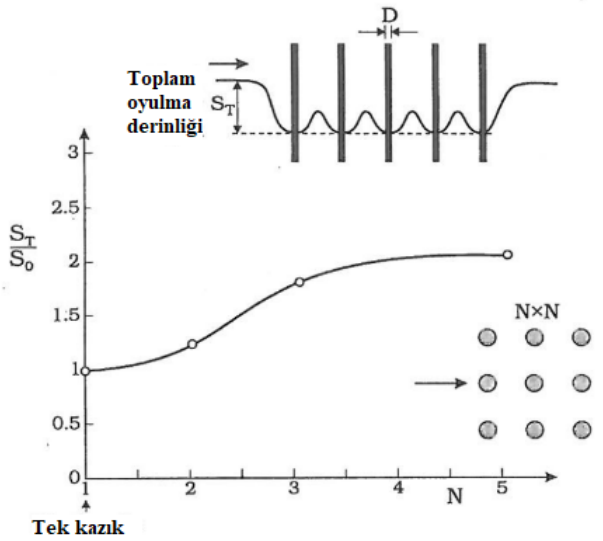
Şekil 2.12 5x5 kare düzenleme kazık grubu için denge oyulma profilleri G/D = 4 [9]



Şekil 2.13 NxN kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için maksimum global denge oyulma derinliğinin (S_g) değişimi. [9]

Şekil 2.14, NxN kare kazık yerleşimi durumunda G/D=4 için maksimum toplam denge oyulma derinliğinin, S_T, (maksimum global denge oyulma derinliği ile maksimum yerel denge oyulma derinliğinin toplamı) kazık grubu içindeki kazık sayısı ile değişimini göstermektedir. S_0 ise tam olarak aynı akım koşullarında tek kazık durumunda ölçülen maksimum denge oyulma derinliğidir. Görüldüğü gibi global oyulmanın da mevcudiyetiyle oyulma derinliği önemli derecede artmaktadır. Bu artış 4x4 ve 5x5 kazık gruplarında 2 katı veya daha fazla olabilmektedir.

Sümer ve diğ. [20] maksimum yerel oyulma derinliğinin akımın geldiği tarafta ilk sıradaki kazıkların menbasında oluştuğunu ifade etmişlerdir (Şekil 2.12). Bu eğilim diğer kare kazık grubu deneylerinde de gözlenmiştir. Şekil 2.12'de de görülebileceği gibi, maksimum oyulma derinliği ilk kazık sırasının menbasındaki köşede bulunan kazık önünde oluşmaktadır. Bu da ön sıranın köşesinde bulunan kazığın akıma en fazla maruz kalan kazık olmasından kaynaklanmaktadır. Sümer ve diğ. [20] tarafından dairesel kazık grubu için gerçekleştirilen deneylerden de akıma en fazla maruz kalmasından dolayı kazık grubunun menba tarafındaki ilk kazık önünde maksimum yerel oyulmanın meydana geldiği görülmüştür (Şekil 2.8). Şekil 2.13 ve Şekil 2.14 'teki veriler kare kazık grubu yerleşimleri için geçerlidir.



Şekil 2.14 NxN kare kazık grubu için maksimum toplam denge global oyulma derinliği [9]

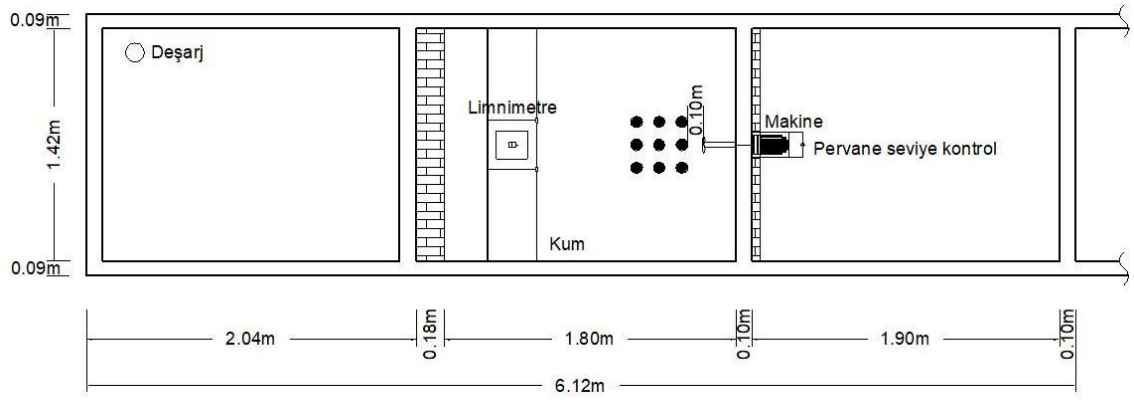
Yan yana ve dairesel kazık grupları için elde edilen sonuçlar ise şu şekilde ortaya çıkmıştır. Yan yana 2 kazık yerleşimi durumunda oluşan global oyulmanın, 2x2 kare kazık grubunda oluşan global oyulmadan daha büyük olduğu belirlenmiştir. 2x2 kare kazık grubu için S/D=0.37 olurken yan yana kazık grubu yerleşimi için S/D=0.78 olarak elde edilmiştir. Bu durumun yan yana kazık grubu yerleşiminde bulunan kazıklar arasındaki hızda belirgin bir şekilde meydana gelen artıştan dolayı olduğu söylenebilir [20]. Bu sonuçlar Hannah [21] tarafından elde edilen sonuçlarla da uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Dairesel kazık grubu yerleşimi durumunda ise (Şekil 2.8), global oyulmanın, 5x5 kare kazık grubu yerleşiminde oluşan global oyulmadan biraz daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durumda 5x5 kare kazık grubu için S/D=1.2 olurken dairesel kazık grubu yerleşimi için S/D=1.5 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada dairesel grup ve 5x5 grup kazık grubunda bulunan kazıkların yoğunluğunun dairesel kazık grubu yerleşiminde bulunan kazıkların yoğunluğuyla aynı olduğu belirtilmiştir [20]. Oyulmadaki bu artışın, dairesel kazık grubundaki kazıkların birbirleriyle şaşırtmalı bir şekilde dizilmesinden dolayı kazıklar arasında oluşan türbülanstaki artıştan kaynaklandığı söylenebilir.

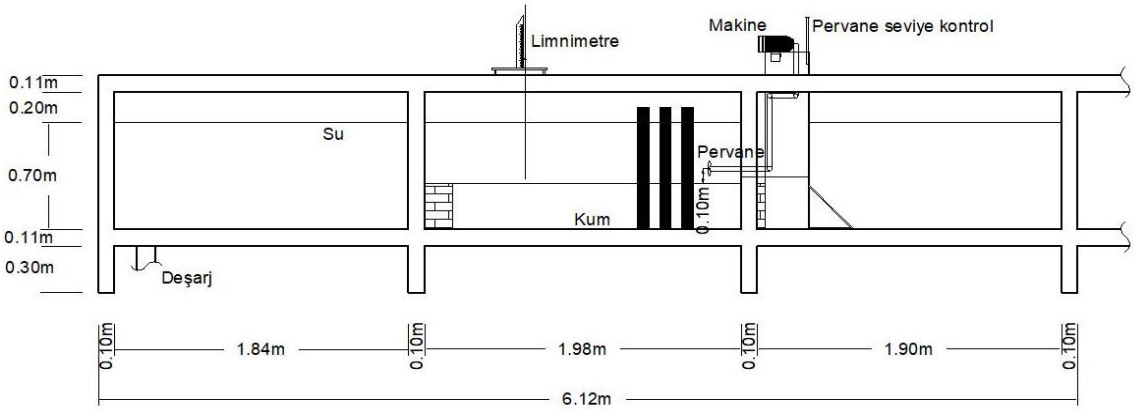
3
DENEY SİSTEMİ

3.1 Deney Kanalı Ve Kullanılan Model Özellikleri

3×3 kazık grubu için bir kum taban üzerinde geminin pervane jeti akım koşullarını benzeştirerek bir seri deney yapılmıştır. Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik ve Kıyı Liman Mühendisliği Laboratuvarı'nda 6.02 m uzunluğunda, 1.42 m genişliğinde ve 1.0 m yüksekliğinde, her iki tarafı camdan yapılmış bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Bu kanala ait plan ve kesit Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



(a)

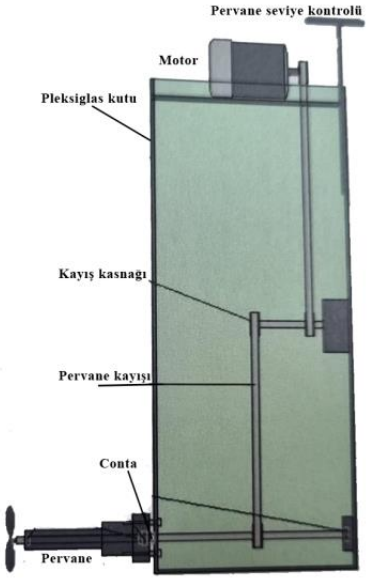


(b)

Şekil 3.1 Deney sistemi ve 3×3 kare kazık grubu yerleşimi (birimler metredir) a) plan b) kesit

Kanal içindeki kum taban 0.2 m derinliğinde, 1.8 m uzunluğunda ve 1.42 m genişliğindedir. Kanal, kum tabanın 0.50 m üzerinde bir yüksekliğe (h) kadar su ile doldurulmuştur. Su deposu, deney sona erdikten sonra suyun temizlenmek üzere boşaltılabileceği bir tahliye sistemi ile donatılmıştır. Her testten önce kum taban tesviye edilmiş ve kanal, kum tabanı bozmayacak şekilde yavaşça suyla doldurulmuştur. Ayrıca, Tan ve Yüksel'in [22] de izah ettiği gibi, kanalın her iki tarafında olacak şekilde kum tabanın altına 10 cm genişliğinde ve 1 cm yüksekliğinde dikdörtgen borulardan oluşan iki adet by-pass yapılmıştır. Böylece pervane jet akımının sürekli olmasından dolayı kanal sonunda biriken su, oyulma bölgesini bozmadan bu borularla geri döndürülmüştür. Deneylerin bitmesinden sonra, kazık gruplarının 3x3 kare kazık grubu içindeki her bir kazık etrafında limnimetre ölçümleri ve fotogrametrik analiz tekniği kullanılarak oyulma profilleri elde edilmiştir.

Pervane şaftı, camdan yapılmış bir kutu sistemi üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Bu kutu sistemi, pervane şaftı ile kum taban arasındaki mesafeyi ayarlamak için tasarlanmıştır. Deneylerde 6.5 cm ve 10 cm çaplarında Wageningen B serisi iki pervane modeli kullanılmıştır. Her pervane modeli 590, 670 ve 745 rpm olmak üzere üç farklı dönüş hızında çalıştırılmıştır. Pervanelerin bir tanesi sağa (6.5 cm) bir tanesi sola (10 cm) dönmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan pervaneler Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Pervane özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Pervane sistemi



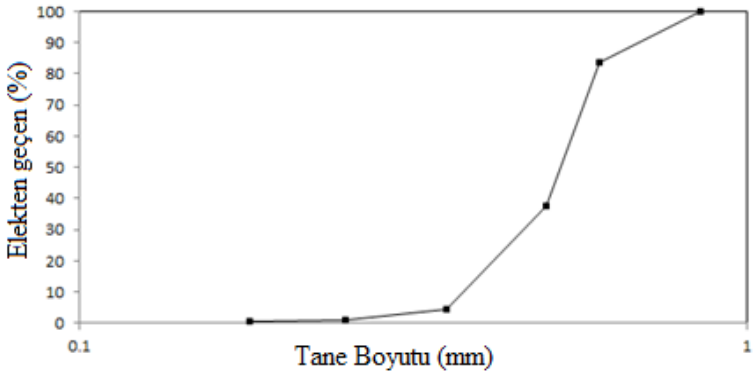
(a) (b)

Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan pervane modelleri a) Dp=10 cm, b) Dp=6.5 cm

Tablo 3.1 Pervane özellikleri

Parametreler	Pervane 1	Pervane 2
Pervane Çapı (Dp, cm)	6.5	10
Üretildiği Malzeme	Pirinç	Pirinç
Kanat Sayısı (N)	4	4
İtme Katsayısı (Ct)	0.61	0.61
Kanat Alan Oranı	0.70	0.70
Dönüş yönü	Sağa doğru	Sola doğru

Deneylerde kullanılan malzemeye ait granülometri eğrisi Şekil 3.4'te verilmiştir. Granülometri eğrisi kullanılarak d_{50}=0.52 mm, d_{90}=0.68 mm olarak belirlenmiştir. Bu eğriye ait standart sapma (σ_g) $\sigma_g=\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ ifadesi ile 1.22 olarak hesaplanmıştır. Burada, d_{84} ile d_{16} sırasıyla %84 ve %16'sının geçtiği malzeme çapıdır.



Şekil 3.4 Taban malzemesi granülometri eğrisi (d_{50}=0.52 mm)

Taban malzemesine ait özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir. Burada, e boşluk oranı, emax ve emin ise sırasıyla maksimum ve minimum boşluk oranıdır. Bu malzemeye ait rölatif sıkılık değeri ise Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \tag{3.1}$$

Tablo 3.2 Deneylerde kullanılan taban malzemesi özellikleri

Parametreler	
d50 (mm)	0.52
d90 (mm)	0.68
σg	1.22
Dr	0.82
emax	0.91
e	0.54
emin	0.46

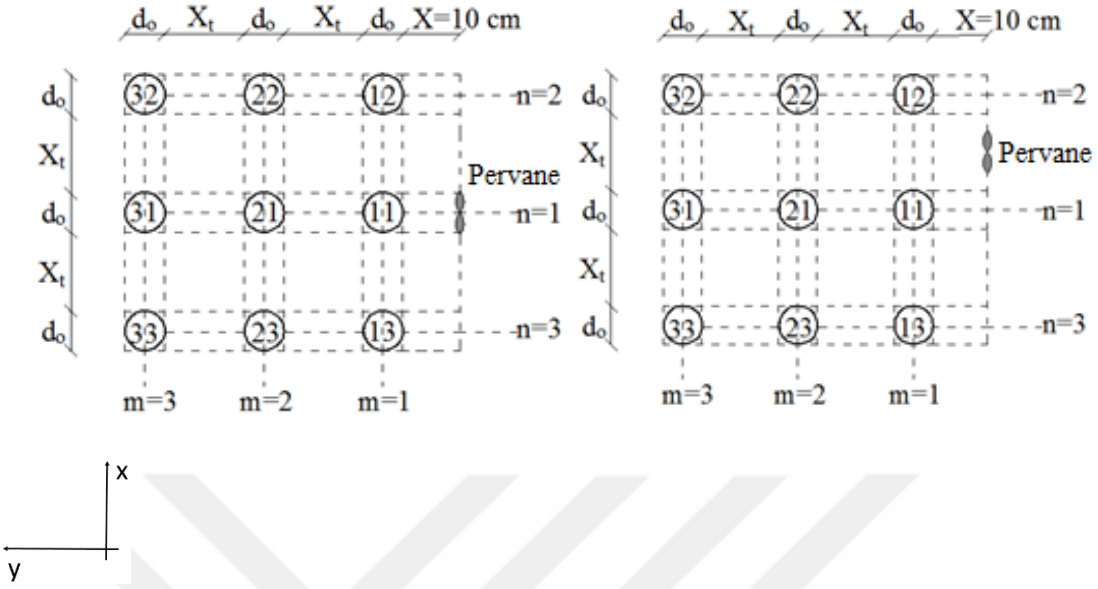
Deneylerde paslanmaz çelikten yapılan 80 cm yüksekliğinde kazık modelleri kullanılmıştır. Kazık tabanına 0.2 cm kalınlığında ve bir kenarı $2d_0$ cm olan kare levha kaynak yapılmıştır. Pervane çapları için kullanılan geometrik ölçek (1:15), kazık çapları için de kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan d_0=5cm ve 7 cm'lik

kazık çapları sırasıyla 0.75 m ve 1.05 m prototip kazık çaplarına karşılık gelmektedir. Bu kazık modelleri ile tek kazık ve kazık grubu testleri yapılmıştır. 6.5 ve 10 cm'lik pervane çapları da gerçekte 1.0 m ve 1.5 m'lik pervane çapına karşılık gelmektedir. Aynı ölçek Yüksel ve diğ. [23] tarafından da kullanılmış ve ayrıca çalışmalarında tek bir kazık etrafındaki oyulmanın belirlenmesi için pratik bir uygulama olarak sayısal bir örnek vermişlerdir. Aynı zamanda Tsinker [24] tasarımda pervane kaynaklı oyulmayı etkileyen ana faktörlerden birinin de, alt omurga açıklığına göre pervanenin konumu olduğunu belirtmiştir. Pervane ekseni ile kum taban arasındaki açıklık (G), manevra alanlarında önerilen minimum 1.5 m omurga altı açıklığı dikkate alınarak belirlenmiştir [24]. Böylece prototip açıklık yüksekliği 1.50 m için modelde 10 cm olarak ayarlanmıştır. Deneylerde dikkate alınan prototip ve model boyutları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3 Deneylerde kullanılan prototip ve model boyutları

Parametre	Birimi	Prototip	Model
Pervane çapı (D_p)	m	1	0.065
	m	1.5	0.1
Pervane açıklığı (G)	m	1.5	0.1
Pervane/kazık mesafesi (X)	m	1.5	0.1
Pervane Katsayısı (C_t)	-	0.35	0.61
Kazık Çapı (d_0)	m	1.05	0.07
	m	0.75	0.05
Kazıklar arası mesafe (X_t)	m	1.05	0.07 (d_0)
	m	2.1	0.14 ($2d_0$)
	m	3.15	0.21 ($3d_0$)
	m	1.5	0.1 ($2d_0$)
	m	2.25	0.15 ($3d_0$)
Ortalama taban malzemesi çapı	m	0.0078	0.00052

Deneyler Şekil 3.5'de görülen ana pervane konumları dikkate alınarak farklı parametreler ve kazık konfigürasyonları için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5 3×3 kazık grubu yerleşimi a) Pervane konumu kazık grubu ekseninde, b) Pervane konumu kazıklar arasında

Birinci aşamada önceki çalışmalarla karşılaştırmak ve kazık grubuna ait oyulma formasyonunu tanımlamak için Tablo 3.4'te görülen deney şartları kullanılarak tek kazık durumu için testler yapılmıştır.

İkinci aşamada medyan çapı d_{50}=0.52 mm olan kum malzemeye sahip taban üzerinde farklı pervane çapları (D_p= 6.5 ve 10 cm), farklı pervane hızları (590, 670, ve 745 rpm) ve iki farklı kazık çapı (d_0= 7 ve 5 cm) kullanılarak 3×3 kare kazık yerleşimi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Kazık çaplarının katı olacak şekilde üç farklı kazık açıklığı seçilerek iki pervane konumu dikkate alınmıştır (Şekil 3.5 a ve b). Şekil 3.5a'da pervanenin kazık grubunun simetri eksenine (n=1 ekseni) yerleştirilmesi durumu, Şekil 3.5b'de ise pervanenin yan kazık ekseni (n=2 ekseni) ile simetri hattındaki kazık ekseni arasında (n=1 ekseni) yerleştirilmesi durumu görülmektedir.

Yapılan bütün testler için deney şartları Tablo 3.4'de özetlenmiştir. Bu çizelgede görülen yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır ve 7.73-15.01 aralığındadır;

$$Fr_d = \frac{U_0}{\sqrt{g d_{50}(\rho_s - \rho/\rho}} \quad (3.2)$$

Burada U_0 pervane jet çıkış hızı, d_{50} taban malzemesinin medyan çapı, ρ suyun özgül kütlesi, ρ_s taban malzemesinin özgül kütlesi, g yerçekimi ivmesidir. U_0 Yüksel ve Tan [25] tarafından verilen Denklem (3.3) kullanılarak belirlenmiştir.

$$U_0 = 1.42 n D_p \sqrt{C_t} \quad (3.3)$$

Burada n pervane hızı, D_p pervane çapı ve C_t itme katsayısıdır [13].

Tablo 3.4 Deney şartları

Deney Şartı	Test	Pervane Konumu	Taban malzemesi çapı	Pervane çapı	Pervane hızı	Kazık Çapı	Kazıklar arasındaki mesafe	Yoğunluk Froude Sayısı
			($d_{50,}$ mm)	(D_p, cm)	(rpm)	(d_0, cm)	(X_t)	(Fr_d)
Tek Kazık	A	Kazık ekseninde	0.52	6.5 / 10	590 / 670 / 745	7 / 5	-	7.73 – 15.01
3×3 Kare Kazık Grubu	B	Kazık ekseninde	0.52	6.5 / 10	590 / 670 / 745	7	d_o / $2d_0$/ $3d_0$	7.73 - 15.01
	C					5	$2d_0$	7.73 - 15.01
	D	Kazıklar arasında	0.52	6.5 / 10	590 / 670 / 745	7	d_0 / $2d_0$	7.73 - 13.50

3.2 Boyut Analizi

Kazık etrafındaki oyulma derinliğinin tanımlanabilmesi amacıyla öncelikle etkili parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Tabandaki oyulmanın oluşumu için Tablo 3.5'deki parametreler dikkate alınarak aşağıdaki fonksiyon oluşturulmuştur. Bu etkili parametreler esas alınarak ve Tablo 3.6'da ifade edildiği gibi Langhaar Metodu yardımıyla boyutsuz büyüklükler bulunmuştur.

$$S = f(U_0, D_p, n, d_{50}, G, \rho, \mu, g, v, \rho_s, d_0, L_m, h, X_t) \quad (3.4)$$

Tablo 3.5 Etkili parametreler

	Parametreler	Sembol	Birim	Boyut
Akışkanı karakterize eden parametreler	Akışkanın özgül kütlesi	ρ	kg/m^3	ML^{-3}
	Akışkanın kinematic viskozitesi	ν	m^2/s	L^2T^{-1}
	Akışkanın dinamik viskozitesi	μ		
Akımı karakterize eden parametreler	Pervane jet çıkış hızı	U_0	m/s	LT^{-1}
	Pervane dönüş hızı	n	Rpm (Hz)	
	Su derinliği	h	m	L
Taban malzemesini karakterize eden parametreler	Taban malzemesi medyan çapı	d_{50}	m	L
	Oyulma derinliği	S	m	L
Geometriyi karakterize eden parametreler	Kazık çapı	d_0	m	L
	Pervane çapı	D_p	m	L
	Pervane ekseninden tabana olan düşey mesafe	G	m	L
	Kazıklar arasındaki mesafe	X_t	m	L
	Pervanenin karakteristik uzunluğu	L_m	m	L
Diğer parametreler	Yerçekimi ivmesi	g	m/s^2	LT^{-2}

Kazıkların etrafındaki oyulma, pervane ile kazık arasındaki yatay mesafeye (X) bağlıdır, ancak bu mesafe (X) kazıkların ilk sırasından itibaren (X = 10 cm) sabit tutulmuştur. Daha sonra bu çalışmada mesafe dikkate alınmamıştır.

Rajatratham [16], Reynolds sayısının 10^4'ü aşması durumunda viskoziteden kaynaklanan ölçek etkilerinin göz ardı edilebileceğini belirtmiştir. Bu çalışmada, pervane çalışma hızlarında (590, 670 ve 745 rpm) pervane Reynolds sayısı (Re_p) ve akım Reynolds sayısı (Re_f) sırasıyla $1.3\times10^4 - 3.8\times10^4$ ve $4.6\times10^4 - 14\times10^4$ aralıklarında değişmiştir. Bu nedenle, viskozitenin etkileri göz ardı edilmiştir. Tablo 3.6, pervanenin dönüş hızlarını ve karşılık gelen Reynolds sayılarını göstermektedir, burada Re_f akım Reynolds sayısı ($=U_0\, D_p\, /\, v$), Re_p pervane Reynolds sayısı ($=n\, D_p\, L_m\, /\, v$) ve n, saniyedeki pervane dönüş hızıdır (rpm). L_m, Blaauw ve Van de Kaa [15] tarafından önerilen denkleme göre hesaplanmıştır.

$$L_m = \beta D_p \pi \left(2N \left(1 - \frac{D_h}{D_p} \right) \right)^{-1} \tag{3.5}$$

burada D_h pervane hub çapıdır, β pervanenin kanat alanı oranıdır ve N kanat sayısıdır. D_h / D_p oranı sistemde hub olmaması halinde 0 olarak kabul edilmektedir.

Tablo 3.6 Farklı pervane hızları için hesaplanan Reynolds sayıları

Pervane çapı D_p (cm)	Pervane dönüş hızı (rpm)	Akım Reynolds Sayısı Re_f ($\times10^4$)	Pervane Reynolds Sayısı Re_p ($\times10^4$)
6.5	590	4.6	1.3
6.5	670	5.2	1.5
6.5	745	5.9	1.6
10	590	11	3.0
10	670	12	3.4
10	745	14	3.8

Ayrıca Faruque ve diğ. [25] ve Sarathi [26], su derinliğinin (h), pervane çapının (D_p) altı katından daha büyük olması durumunda, h/D_p'nin oyulma oluşumu

üzerindeki etkisinin göz ardı edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada su seviyesi (h) pervane çapına kıyasla çok büyük olduğundan h/Dp'nin etkisi ihmal edilmiştir. ρ, ρ_s ve d_{50} deneylerde değişmediğinden etkileri ihmal edilmiştir. Ayrıca çalışmada G sabit tutulmuştur (=10cm). Dolayısıyla göreceli oyulma derinlikleri (S/D_p veya S/d_0) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\frac{S_{max}}{D_p}, \frac{S_{max}}{d_0} = \left[Fr_d, Re, \frac{D_p}{d_0}, \frac{G}{D_p}, \frac{G}{d_0}, \frac{X_t}{d_0}, \frac{G}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{L_m}{D_p}, \frac{h}{D_p} \right] \tag{3.6}$$

Parametreler ihmal edildikten sonra, boyutsuz göreceli oyulma derinlikleri aşağıdaki gibi basitleştirilmiştir.

$$\frac{S_{max}}{D_p}, \frac{S_{max}}{d_0} = \left[Fr_d, \frac{D_p}{d_0}, \frac{X_t}{d_0}, \frac{G}{D_p}, \frac{G}{d_0}, \frac{L_m}{D_p} \right] \tag{3.7}$$

Denklem (3.7)'nin sağ tarafındaki boyutsuz parametreler tüm deneyler yapıldıktan sonra oyulma profilinin gelişimini değerlendirmek için incelenmiştir.

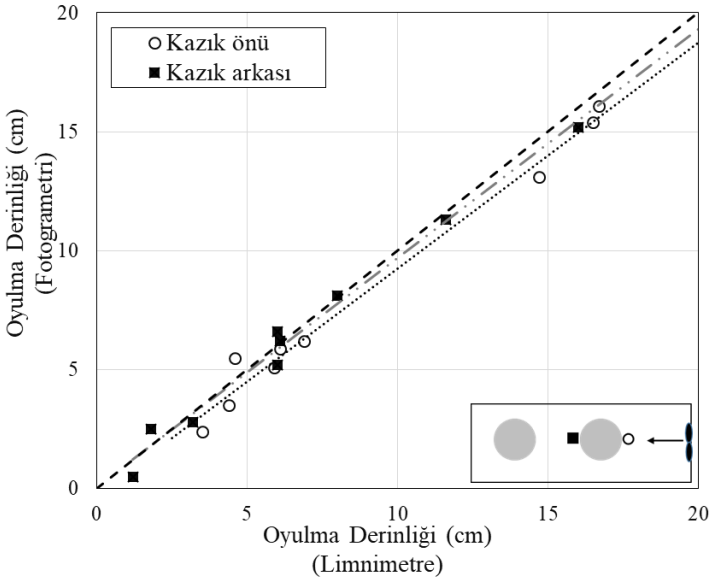
Bu çalışmada, tekil kazık durumu için 12 adet (A), kazık grubu için 39 adet (B, C, D) test gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.4).

3.3 Oyulma Geometrisinin Ölçümü

Pervane jeti etkisinde kazık grupları etrafındaki oyulma mekanizmasının incelenmesi, her bir test için belirli bir süre sonunda oyulma çukurunun geometrisi ölçülerek gerçekleştirilmiştir.

Tekil kazıkların etrafındaki oyulma çukuru geometrisi, kanal üzerinde bulunan raylara yerleştirilen bir limnimetre kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca daha detaylı ölçümler için 3x3 kare kazık grubu konfigürasyonu ile yapılan testlerde fotogrametrik veri toplama ve analiz teknikleri kullanılarak 3 boyutlu global oyulma geometrileri de elde edilmiştir. Limnimetre ve Bentley ContextCapture kullanılarak yapılan ölçümler, kazık grubu testleri için karşılaştırılmış ve doğrulaması sağlanmıştır. Örnek olarak, D_p= 10 cm, $X_t = 2d_0$, 670 rpm şartlarında her bir kazık için oyulma derinliği ölçümleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Her iki oyulma ölçümü için RMSE (%) %3 olarak bulunmuştur. Limnimetre ve fotogrametri sonuçlarından elde edilen ölçüm verileri, kazıkların önünde ve arka

tarafında iyi bir uyum göstermiştir. Başlangıçta (Bentley ContextCapture) yazılımı kullanılmış ancak daha sonra kullanım kolaylığı nedeniyle Agisoft yazılımı ile devam edilmiştir.



Şekil 3.6 Maksimum oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (a) Kazık önünde (b) Kazık arkasında (D_p= 10 cm, $X_t = 2d_0$, 670 rpm, d_0=7 cm)

Becker ve diğ. [27] tarafından da belirtildiği gibi bu çalışmada kullanılan Bentley ContextCapture modelinin kontrol noktalarında en yüksek çözünürlüğe ve en az hataya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu fotogrametrik teknik aşağıdaki prosedürleri içermektedir:

- Modelin coğrafi olarak referanslandırılması için kanalda 23 kontrol noktası işaretlenmiştir. Mesafe ölçümleri için ±1 mm enstrümantal doğruluğa sahip bir elektronik takometre (Leica TCR1201 Total Station) kullanılarak ölçülen verilere göre her bir kontrol noktasının X, Y ve Z koordinatlarındaki fark hesaplanmış ve hata oranı belirlenmiştir.
- Deneylerin başında orijinal taban seviyelerini belirlemek ve her deneyin sonunda (oyulma profili denge durumuna ulaştığında) dijital fotoğraflar çekmek için Canon marka dijital fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Denge durumuna ulaşıldıktan sonra kanaldaki su, oyulma bölgesini bozulmaması için yavaşça boşaltılmıştır. Her bir deney koşulunda oyulma profilinin başarılı bir şekilde yeniden yapılandırılması için tüm oyulma bölgesini ve

kontrol noktalarını kapsayacak şekilde 30 farklı noktada yaklaşık 400 farklı görüntü yakalanmıştır. Fotoğraflar, ContextCapture (2016) tarafından önerildiği gibi, minimum 15° çekim açısı ile iki ardışık görüntü arasında %80 örtüşme sağlanarak çekilmiştir.

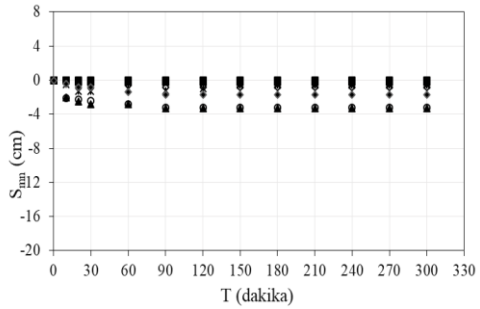
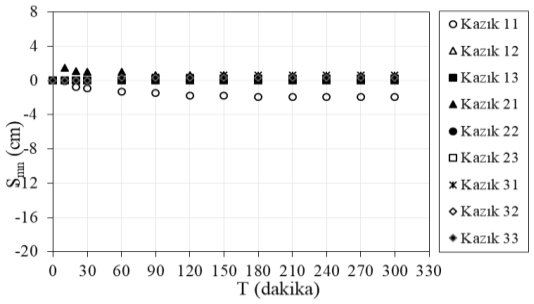
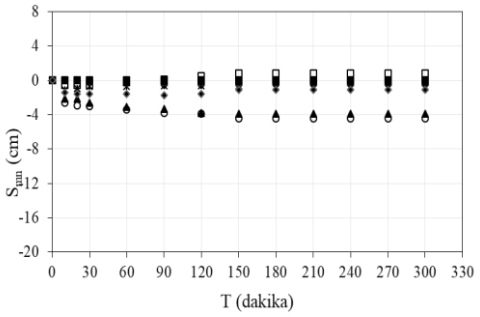
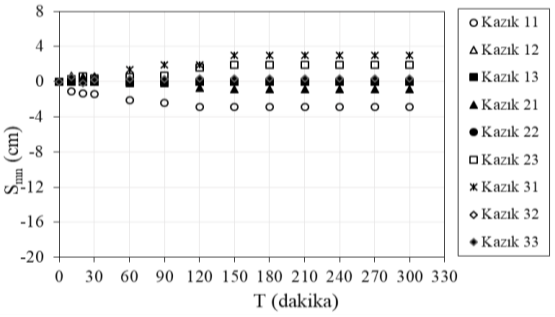
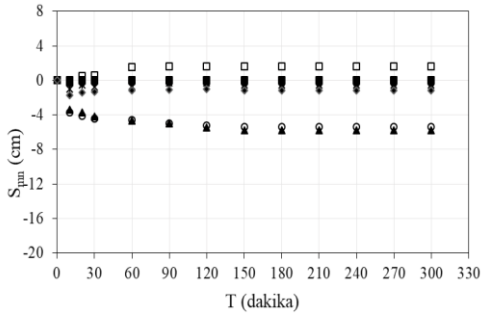
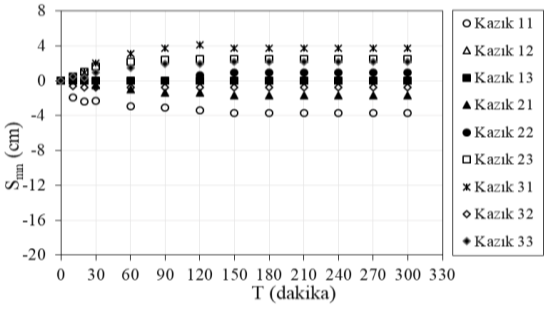
- Bu araştırma için dört dijital fotogrametri yazılım paketi (Bentley ContextCapture, Agisoft, MicroStation 3D ve CloudCompare Sürüm 2.10 alfa (64bit)) test edilmiş ve analizi gerçekleştirilmiştir. MicroStation 3D ve Bentley Context Capture / Agisoft, kontrol noktaları kullanılarak bir dizi dijital fotoğrafın 3 boyutlu fotogrametrik yapılandırılması için nokta bulutu verilerinin üretilmesi amacıyla kullanılmıştır. Her deneyin başında ve sonunda elde edilen nokta bulutu verileri CloudCompare yazılımı ile karşılaştırılarak 3 boyutlu oyulma profili tarama geometrileri oluşturulmuştur.

4
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

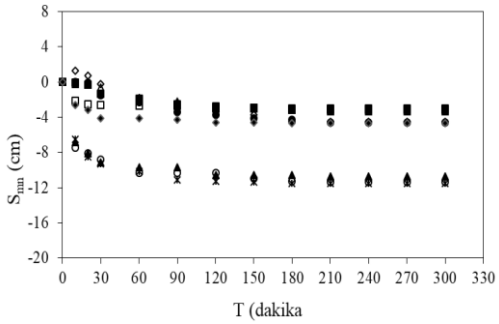
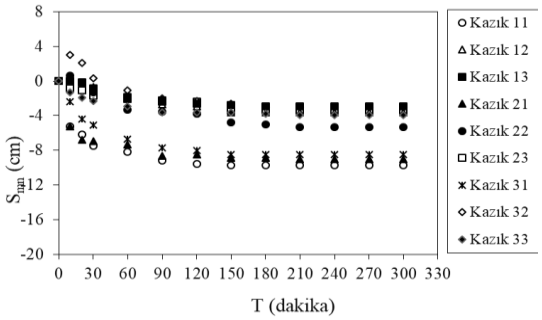
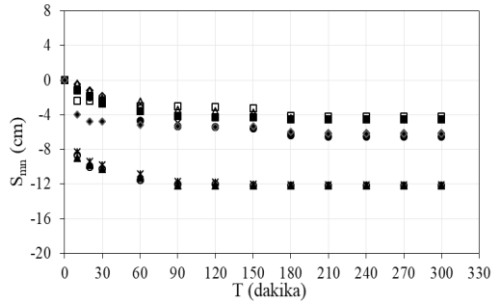
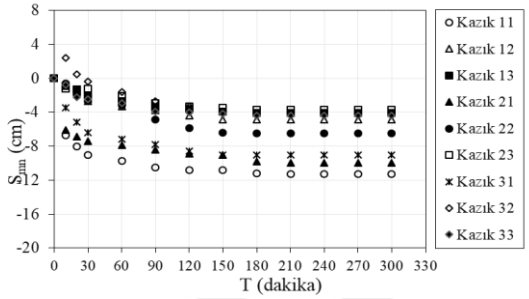
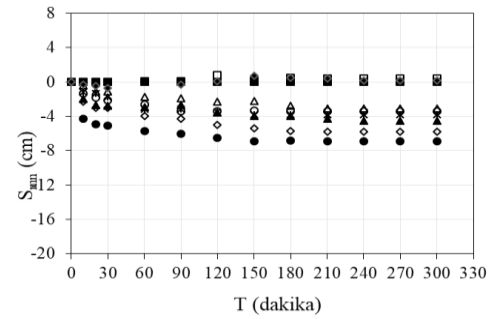
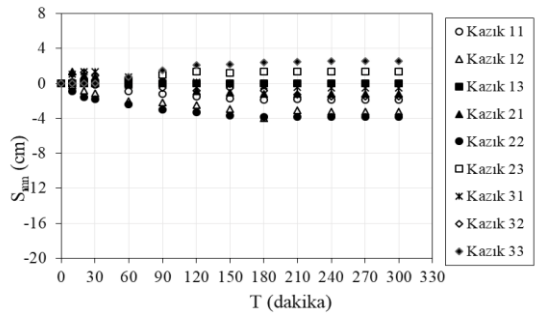
4.1 Pervane Jeti Etkisinde Kazıklar Etrafındaki Oyulma Derinliğinin Zamanla Değişimi

Tipik bir oyulma profilinin gelişimi, belirli bir süreden sonra denge koşullarına ulaşmaktadır. Bu süreden sonra, oyulma çukurunun boyutları değişmeden kalmaktadır. Chin ve diğ. [7] su jeti etkisi altında deneyler yaparak oyulma profilinin zamanla gelişimini açıklamışlardır. Akımın katı madde tanelerini yığılma bölgesinin menba tarafındaki eğimi doğrultusunda yukarı doğru ittiği sonucuna varmışlardır ancak katı madde taneleri geri dönüp çökelerek denge durumunda stabil kalmaktadır. Bu, tanelerin yığılma bölgesini geçmek için yeterli momentuma sahip olmamalarından kaynaklanmaktadır. Mevcut çalışmada, maksimum oyulma derinliğinin zamana bağlı değişimi, her bir deney şartı için, oyulma çukuru denge durumuna ulaşana kadar geçen süre dikkate alınarak (± 1 mm olacak şekilde) ölçülmüş ve oyulma profilleri elde edilmiştir. Oyulma profili pervane dönmeye başladıktan sonra belirli bir zamanda denge koşullarına ulaşmaktadır. Deneyler doğrulama amacıyla birkaç kez tekrar edilmiştir. Oyulma derinliği 240 dakika sonra dengeye ulaşmış ancak bu çalışmada süre 270 dakika olarak kabul edilmiştir. Bu da toplam sürenin yaklaşık olarak %30'u geçtiğinde maksimum oyulma derinliğinin (S_{max}) %70'inden fazlasına ulaştığını göstermiştir. Aynı zamanda, oyulma profilinin büyük kısmının, toplam deney süresine kıyasla çok kısa bir sürede meydana geldiği de görülmüştür. Şekil 4.1, Şekil 3.5a ve b'de gösterilen pervanenin eksende ve kazıklar arasında konumlandırılması durumunda 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimini göstermektedir, burada negatif değerler orijinal kum tabandan aşağı yönde oyulma derinliğini, pozitif değerler ise kum tabandan yukarı yönde yığılmayı göstermektedir. S_{mn}, kazık grubu için oyulma ve yığılma yüksekliğidir. n ve m indisleri, Şekil 3.5a ve 3.5b'de gösterilen kazık matrisi dikkate alınarak kazık konumunu belirtmektedir. Şekil

4.1'de görülen grafikler d_0=5 cm ve $X_t = 2d_0$ olması durumunda bütün pervane çapları ve hızları için pervanenin kazık ekseninde olduğu konum için çizilmiştir. Diğer deney şartları için çizilen grafikler Ek1'de verilmiştir.

Kazık Önü	Kazık Arkası
	
(a) d_0=5 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 590 rpm	
	
(b) d_0=5 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 670 rpm	
	
(c) d_0=5 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 745 rpm	

Şekil 4.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde)

Kazık Önü	Kazık Arkası
	
(d) d_0=5 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 590 rpm	
	
(e) d_0=5 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 670 rpm	
	
(f) d_0=5 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 745 rpm	

Şekil 4.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) (devamı)

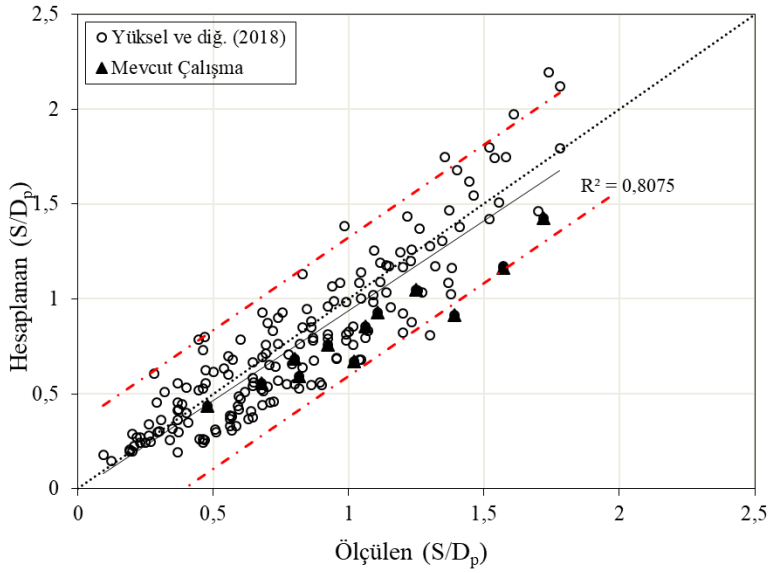
4.2 Tekil Kazık Durumu

Yüksel ve diğ. [13], pervane jet akımı altında tek bir kazık etrafındaki oyulmayı incelemiş ve kazık önündeki oyulma derinliğinin tahmin edilmesi için denklemler önermiştir. Mevcut çalışmada tek kazık durumunda yapılan deneylerde (Tablo 3.4 / A) ölçülen göreceli oyulma derinliklerinin (S_0/d_0 ve S_0/D_p), Yüksel ve diğ. [13] tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanan verilerle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.2). Yüksel ve diğerlerinin [13] önerdiği denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\frac{S_0}{D_p} = 0.232\, Fr_d^{1.911} \left(\frac{G}{d_{50}}\right)^{-0.557} \left(\frac{D_p}{d_0}\right)^{-0.914} \tag{4.1}$$

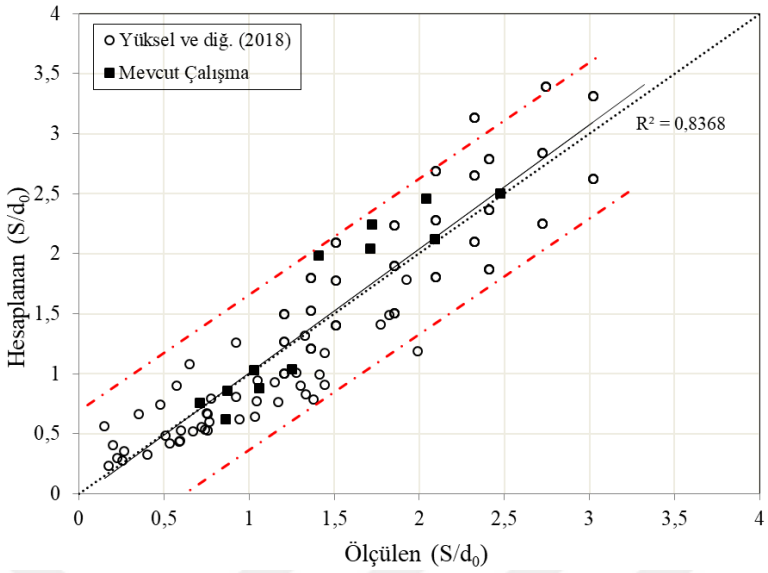
$$\frac{S_0}{d_0} = 0.496\, Fr_d^{1.586} \left(\frac{G}{d_{50}}\right)^{-0.687} \left(\frac{X}{d_0}\right)^{0.575} \tag{4.2}$$

Burada S_0 kazık önündeki maksimum oyulma derinliği, G pervane ile kum taban arasındaki açıklık (düşey mesafe), d_{50} medyan kum çapı, X pervane ile kazık arasındaki yatay mesafe, D_p pervane çapı ve d_0 kazık çapıdır.



(a)

Şekil 4.2 Yüksel ve diğ. [13] tarafından önerilen denklemler kullanılarak kazık önünde ölçülen ve hesaplanan göreceli oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (a) S/D_p, (b) S/d_0



(b)

Şekil 4.2 Yüksel ve diğ. [13] tarafından önerilen denklemler kullanılarak kazık önünde ölçülen ve hesaplanan göreceli oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (a) S/D_p, (b) S/d_0

(devamı)

4.3 Kazık Grubu

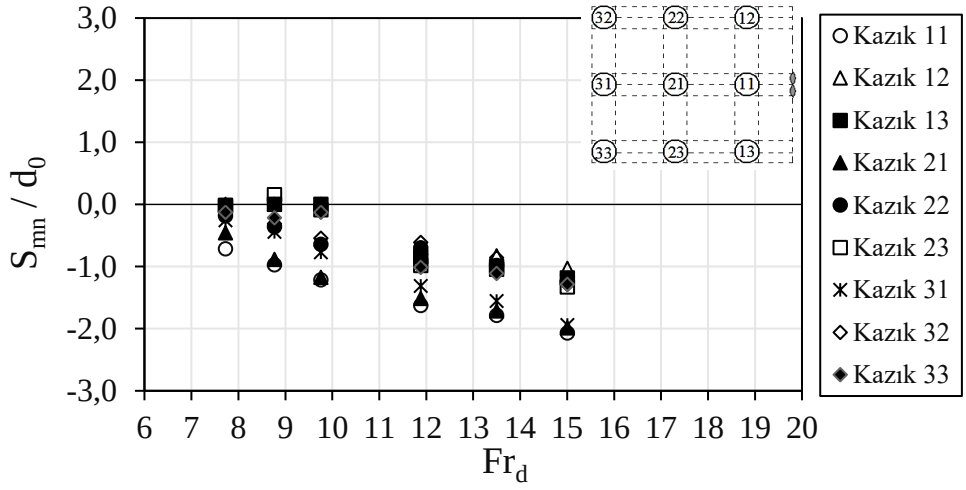
4.3.1 Pervane Konumunun Kazık Ekseninde Olması Durumu

Chin ve diğ. [7] ile Yüksel ve diğ. [8] [13], farklı koşullarda gerçekleştirdikleri çok sayıda deneysel çalışmalarda, tekil bir kazık etrafındaki oyulma olayını araştırmışlardır. Ancak, kazıklı iskeleler için pervane jet akımı etkisinde kazık grupları etrafında meydana gelen oyulmanın nasıl ele alınacağını gösteren bir çalışma mevcut değildir. Sümer ve Fredsøe [9] ve Sümer ve diğ. [3], kararlı durum koşulları altında bir kazık grubu etrafındaki oyulmayı açıklamıştır. Sümer ve diğ. [3], kararlı akım durumunda bir kazık etrafındaki oyulma sürecinde ana akım yapısına at nalı vorteks sisteminin etkili olduğunu ancak kazık grubu durumunda art-iz vorteks sisteminin de önemli olabileceğini belirtmiştir. Kazık önündeki art-iz vorteksi, arkadaki kazığın etrafındaki oyulma sürecinde kesinlikle önemli bir unsurdur ve kazık grubu durumunda hem at nalı-vorteks hem de art-iz vorteks

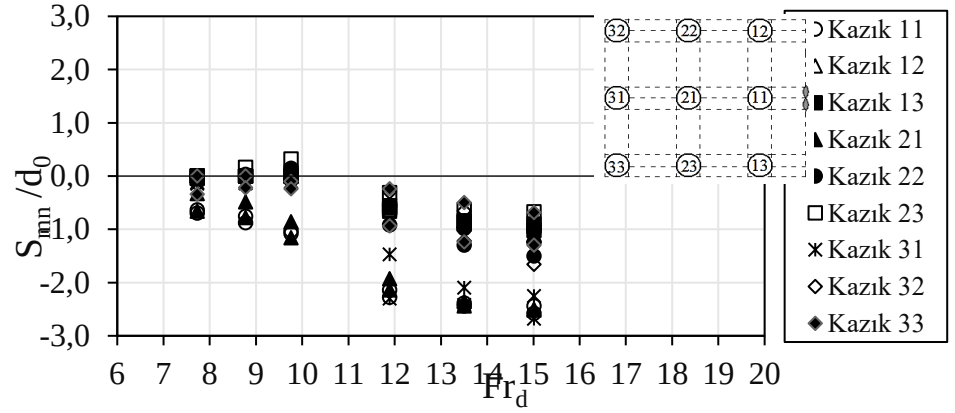
sistemleri önemli değişikliklere maruz kalmakta ve kazık grubundaki oyulma sürecini de değiştirmektedir [9].

Şekil 4.3'de gruptaki her bir kazık için boyutsuz oyulma derinlikleri, S_{mn}/d_0, yoğunluk Froude sayısına karşılık çizilmiştir. m ve n indisleri sırasıyla Şekil 3.5 a ve b'de görülen kazık konumlarını göstermektedir. Burada x akım doğrultusuna dik y ise akım doğrultusuna paralel eksenlerdir. Bu şekilde, kazık grubundaki her bir kazık önündeki boyutsuz maksimum yerel oyulma derinliği (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısına karşılık (Fr_d) kazıklar arasındaki üç farklı açıklık (X_t) için ayrı ayrı irdelenmiştir.

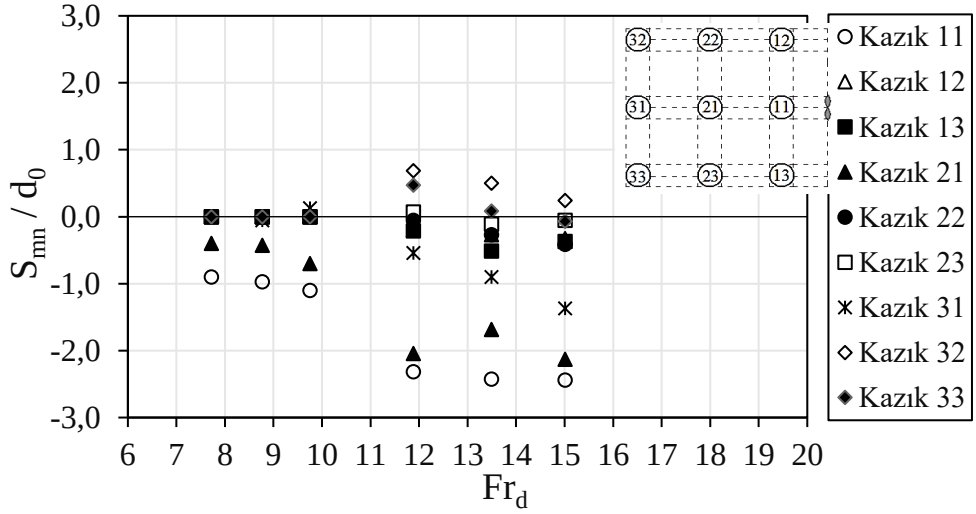
Şekil 4.3'te negatif ve pozitif değerler sırasıyla oyulma ve yığılma koşullarını göstermektedir. Maksimum oyulma derinliği, orijinal kum tabanından aşağı yönde (negatif değer) ölçülürken, yığılma miktarı orijinal kum tabanına göre yukarı yönde (pozitif değer) ölçülmüştür. Yoğunluk Froude sayısının (Fr_d) artmasıyla pervane jet ekseni (n=1) boyunca pervaneye yakın kazıkların (Kazık 11 ve 21) önünde meydana gelen oyulma miktarı artmakta, arka kazıklar etrafında meydana gelen yığılma miktarı ise azalarak oyulmaya dönüşmektedir. $X_t=2d_0$ koşulunda oyulma derinlikleri $X_t=d_0$ ve $3d_0$ için olduğundan daha büyüktür ve oyulma derinlikleri $X_t=d_0$ durumunda en küçük değerlerini almaktadır. Arka kazıklar (Kazık 32 ve 33) etrafındaki yığılma miktarları ise $X_t=3d_0$ durumunda $X_t=2d_0$ için oluşan yığılma miktarından daha büyüktür. Oyulma derinliklerinin aynı deney koşulları altında $X_t=2d_0$ durumunda $d_0=5$ ve 7 cm çaplı kazıkların her ikisinde de benzer oldukları belirlenmiştir ve her iki kazık çapı için bu göreceli oyulma derinlikleri Şekil 4.3b'de gösterilmektedir. $X_t=d_0$, $2d_0$ ve $3d_0$ için pervane jeti etkisinde oyulma derinlikleri Frd=15.01 için sırasıyla kazık çapının (d_0) 1.95, 2.60 ve 2.45 katı olarak maksimum değerine ulaşmıştır.



(a) $X_t=d_0$, $d_0=7$ cm ($G/d_0=1.43$, $d_0/D_p=0.7\text{-}1.08$, $G/D_p=1.00\text{-}1.54$)



(b) $X_t=2d_0$, $d_0=5$ cm and $d_0=7$ cm ($G/d_0=1.43\text{-}2.00$, $d_0/D_p=0.5\text{-}1.08$, $G/D_p=1.00\text{-}1.54$)



(c) $X_t=3d_0$, $d_0=7$ cm ($G/d_0=1.43$, $d_0/D_p=0.7\text{-}1.08$, $G/D_p=1.00\text{-}1.54$)

Şekil 4.3 Boyutsuz oyulma derinliğine (S_{mn} /d_0) karşılık yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) (devamı)

Şekil 4.3 a, b ve c, boyuna eksenlerde (n=1, 2 ve 3) oyulma derinliklerini gösterirken,

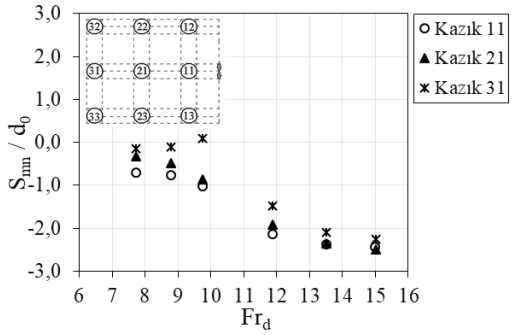
Şekil 4.3 d, e ve f ise enine eksenlerde (m=1, 2 ve 3) oyulma derinliklerini göstermektedir. Burada her bir kazığın önündeki maksimum yerel boyutsuz oyulma derinlikleri (Smn/d0) yoğunluk Froude sayısına (Fr_d) karşılık çizilmiştir.

Şekil 4.3a'da görüldüğü gibi, pervane kazık eksenindeyken (n=1 ekseninde), $X_t = 2d_0$ için, artan Fr_d ile birlikte kazık önünde (Kazık 11 ve 21) her zaman artan bir oyulma vardır. Ancak, arka kazık (Kazık 31) için aynı eksende, $Fr_d \leq 9.76$'ya kadar artan yoğunluk Froude sayısı ile birlikte çok küçük oyulma derinlikleri gözlenmiş ve $Fr_d \geq 11.89$'dan sonra oyulma başlamış ve artmıştır. Ön sıradaki kazıkların önündeki oyulma derinlikleri shielding etkisi nedeniyle arka kazıklardakinden daha büyüktür. Bunun nedeninin öndeki kazıkların arkadaki kazıklara karşı koruyucu bir etki göstermesinden kaynaklandığı söylenebilir.

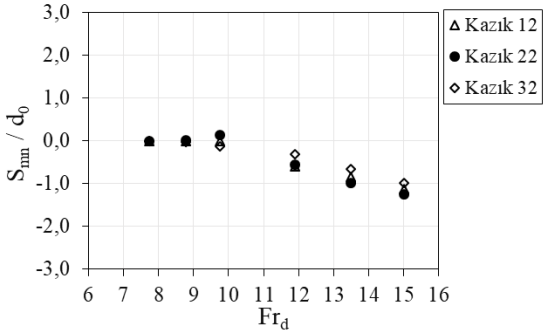
Yan eksenlerde (n=2 ve n=3) bulunan kazıkların (Kazık 13, 23, 33, 12, 22 ve 32) etrafındaki yerel oyulmalar

Şekil 4.3 b ve c'de görüldüğü gibi tam bir simetri göstermemiştir ve hafif asimetrik oyulma konfigürasyonlarına sahiptirler. Pervane dönüş yönü, $Fr_d \leq 9.76$ için n=2 ekseninde biraz daha derin bir oyulmaya ve n=3 ekseninde hafif bir yığılmaya neden olmaktadır. Bunun nedeni, Wei ve Chiew [28] ve Penna ve diğ. [29] tarafından da açıklandığı gibi, pervane jetinin doğası gereği dönen bir jet olması ve memba tarafından pervaneye doğru bakıldığında eksenel olarak simetrik olmasıdır. Ancak, $Fr_d \geq 11.89$'dan sonra her iki yandaki boyuna eksenlerde (n=2 ve n=3) oyulma gözlenmiş, ancak bu oyulmalar orta boyuna eksendeki (n=1) kazıkların önünde meydana gelen oyulmalardan daha az olmuştur. Kazıkların etrafındaki bu yerel oyulma ve yığılma konfigürasyonları,

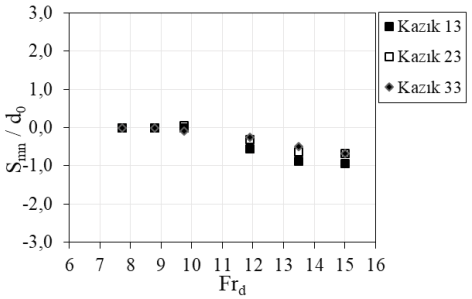
Şekil 4.3 d, e ve f'de de enine eksen (m=1, 2 ve 3) boyunca açıkça gösterilmektedir. Enine doğrultuda her üç eksende de en büyük oyulma miktarları ortadaki kazıklar (Kazık 11, 21 ve 31) etrafında oluşurken, yanlardaki kazıklarda (Kazık 12, 13, 22, 23, 32, 33) daha küçük oyulmalar gözlenmiştir. Diğer deney şartları için de çizilen grafikler Ek 2'de verilmiştir.



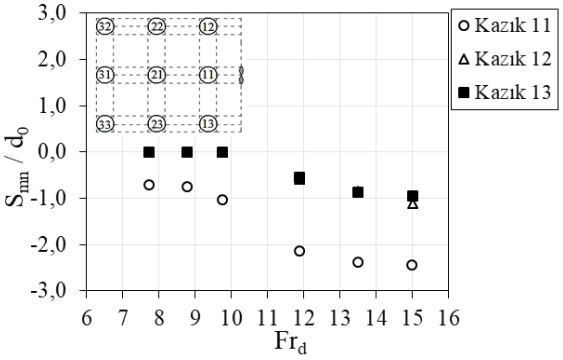
(a) n=1



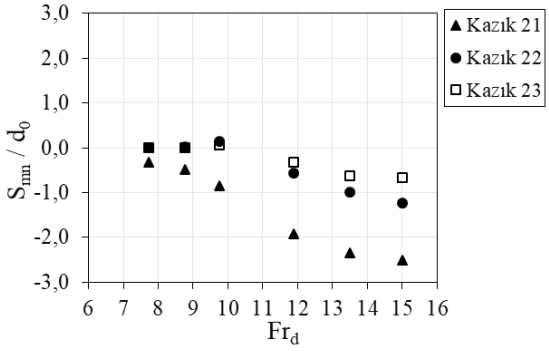
(b) n=2



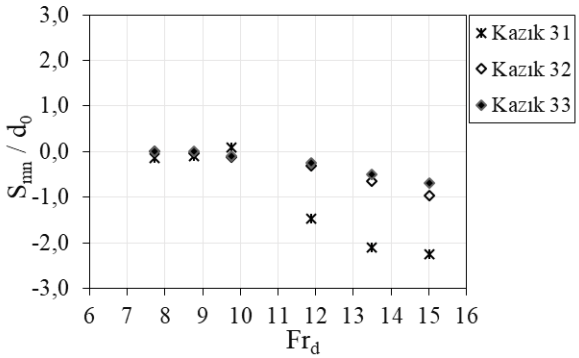
(c) n=3



(d) m=1



(e) m=2

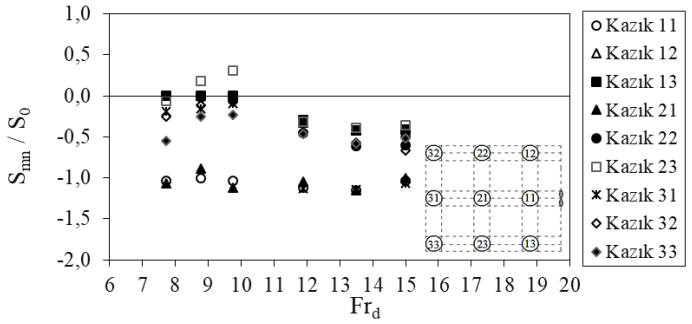


(f) m=3

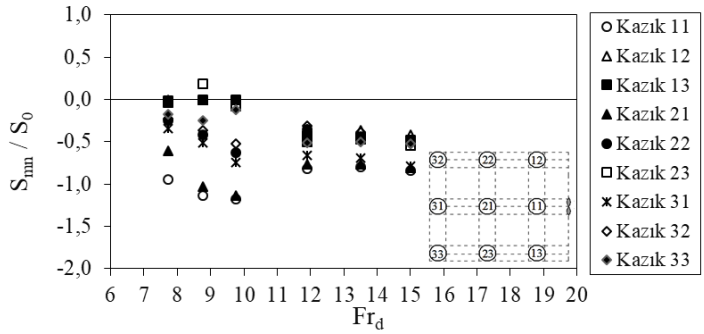
Şekil 4.3 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, X_t=2d_0, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde)

Tek bir kazık ile karşılaştırma yapmak için, oyulma derinliği, aynı deney şartlarında tek bir kazık önündeki oyulma derinliği (S_{mn}/S_0) ile normalize edilmiştir. 3×3 kare kazık grubundaki her bir kazık için tek kazık durumuna göre göreceli oyulma derinliği oranları pervanenin kazık ekseninde olması durumun için Şekil 4.4'de görülmektedir. S_0, tam olarak aynı akım koşullarında tek kazık durumunda ölçülen maksimum oyulma derinliğidir, Şekil 4.4 üç farklı kazık aralığı (X_t= d_0, $2d_0$ ve $3d_0$) ve iki farklı kazık çapı (d_0=5 ve 7 cm) için kazıkların önündeki maksimum oyulma derinliğinin ve yığılmanın yoğunluk Froude sayısı ile önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. X_t/d_0=2 için elde edilen oyulma derinlikleri diğer X_t/d_0 oranlarına göre daha büyüktür (d_0=7 cm). Sümer ve Fredsøe [9], oyulmadaki değişimin nedenini açıklık oranına (X_t/d_0) göre izah etmişlerdir. Ön kazık etrafındaki at nalı vortex sistemi, arka kazığın mevcudiyetinden hafifçe etkilenebilir. Bu, arka kazığın neden olduğu "blokaj etkisi"nden kaynaklanmaktadır ve muhtemelen daha büyük at nalı vortekslerinin oluşmasına yol açan daha büyük ters basınç gradyanına neden olmaktadır.

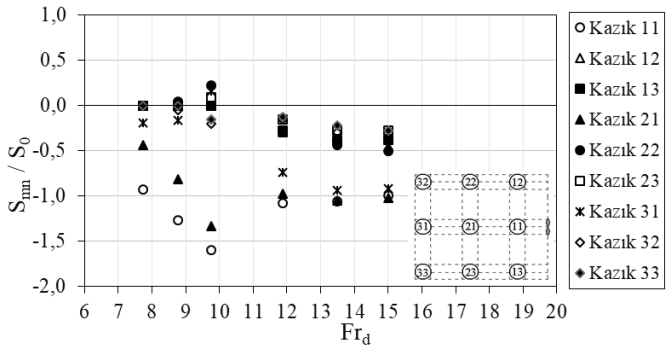
X_t/d_0 arttıkça ön kazıktaki oyulma artmakta, X_t/d_0=2'de maksimum değerine ulaşmakta ve daha sonra tekrar X_t/d_0=3 durumunda azalmaktadır, çünkü Sümer ve Fredsøe (2002) tarafından da belirtildiği gibi bu durumda kazıklar arasındaki etkileşim azalmaktadır. Bu eğilim, Sümer ve Fredsøe'nin [9] söyledikleriyle uyumludur. X_t/d_0=1, 2 ve 3 için ön kazıkta (Kazık 11) oluşan maksimum oyulma derinliklerindeki artış tek kazık durumundaki oyulmaya göre Fr_d=9.76 için sırasıyla 1.14, 1.6 ve 1.15 kat artmıştır. Kazık grubundaki yerel oyulma derinliğinin (S_{mn}) tek kazık için oyulma derinliğine oranı (S_0) öndeki kazıklarda $Fr_d \leq$ 9.76'ya kadar artan bir eğilim göstermiş, ancak Fr_d>9.76'dan sonra oyulma derinliği oranları azalmıştır. Çünkü yoğunluk Froude sayısının bu değerinden itibaren yerel oyulmadan global oyulma formasyonuna geçiş gözlenmiştir. Kazık grubunun tüm alanında yerel oyulmadan global oyulmaya geçiş sırasında orijinal taban seviyesinde bir alçalma meydana gelmiştir. Bununla beraber pervane çapının da bu geçişi etkileyen başka bir faktör olduğu belirlenmiştir. Çünkü pervane çapının büyüklüğü pervane jeti çıkış hızını (U_0) ve dolayısıyla yoğunluk Froude sayısını da etkilemektedir (D_p=6.5 cm için Fr_d<9.76 ve D_p=10 cm için Fr_d>9.76).



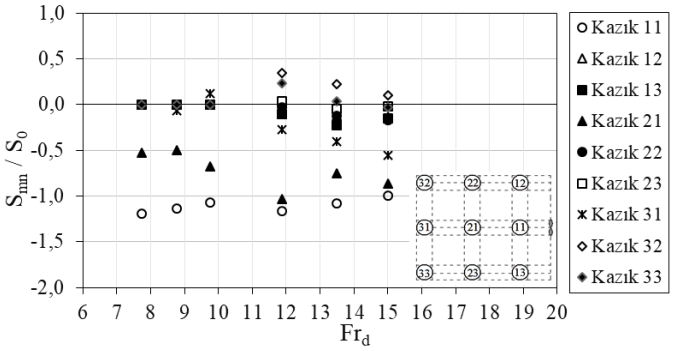
(a) d_0=5 cm, X_t=2d_0



(b) d_0=7 cm, X_t=d_0



(c) d_0=7 cm, X_t=2d_0

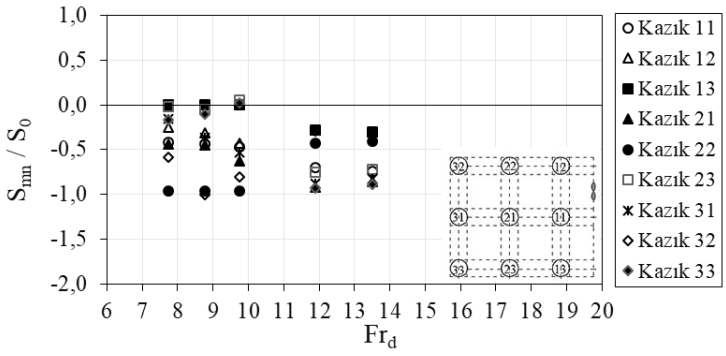


(d) d_0=7 cm, X_t=3d_0

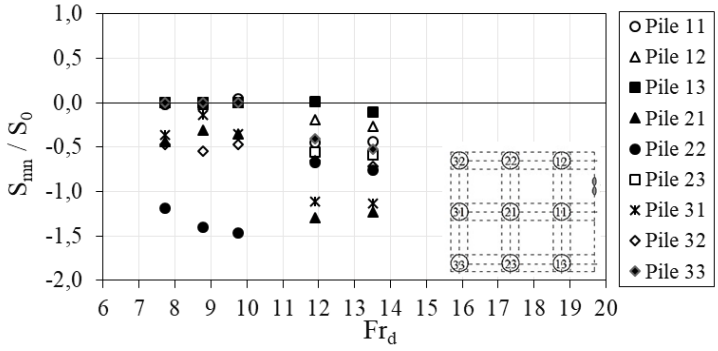
Şekil 4.4 Pervane kazık ekseninde iken göreceli oyulma derinliğinin (S_{mn}/S_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi

4.3.2 Pervane Konumunun Kazıklar Arasında Olması Durumu

Bu durumda pervane jeti, n=1 ve n=2 olarak numaralandırılan kazık eksenleri arasında konumlandırılmıştır. Şekil 4.5a ve b, pervane n=1 ve n=2 olan kazık eksenleri arasındayken aynı deney şartları altında boyutsuz oyulma derinliğine göre kazıkların önündeki yerel oyulma derinliğini ve yığılmayı göstermektedir. Kazık grubunun ikinci sırasında bulunan kazıkların etrafında daha büyük oyulma derinlikleri gözlenmiş ve pervane konumundan dolayı oyulma derinliğinin asimetrik olduğu görülmüştür. Bu durumda, $Fr_d \leq 9.76$ için 22 no'lu kazık önünde oyulma derinliği artmıştır (Şekil 4.5a ve b), çünkü pervane jeti doğrudan kazıklar arasında konumlandırılmıştır. 22 no'lu kazık önünde boyutsuz oyulma derinliği $Fr_d = 9.76$ için 1.5'dur. $Fr_d>9.76$ için yerel oyulma durumundan global oyulma durumuna geçiş nedeniyle, en büyük oyulma, $X_t=2d_0$ için 21 no'lu kazığın önünde bulunmuştur. Ne yazık ki, kanal yan duvar etkisi nedeniyle $Fr_d > 13.50$ ve $X_t = 3d_0$ için deneyler yapılamamıştır.



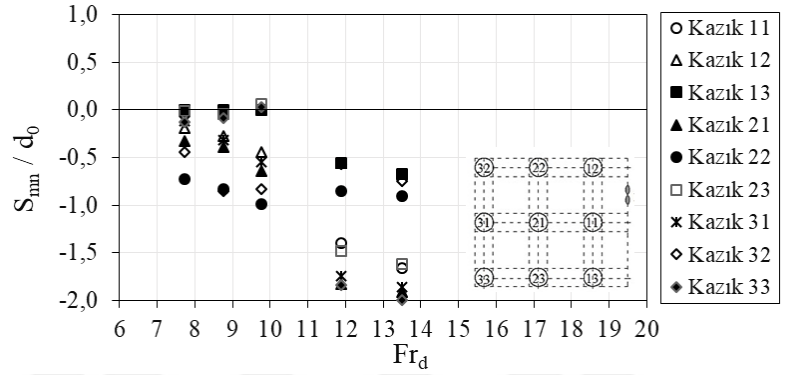
(a) $X_t = d_0$



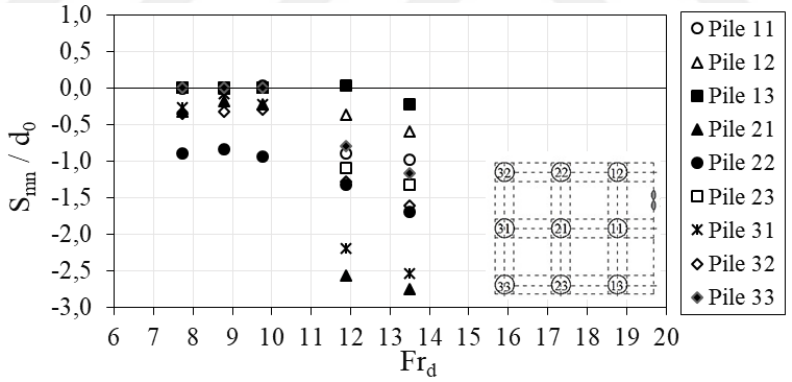
(b) $X_t = 2d_0$

Şekil 4.5 Göreceli oyulma derinliğinin (S_{mn}/S_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm)

Şekil 4.6a ve b, boyutsuz maksimum yerel oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimini göstermektedir. Pervanenin kazık ekseninde olması durumundakine benzer bir eğilim gözlenmiştir. Çünkü $X_t=2d_0$ için oyulma derinlikleri $X_t=d_0$ durumundakinden daha büyüktür. En büyük oyulma, $X_t=2d_0$ ve $Fr_d>9.76$ için 21 no'lu kazığın önünde bulunmuştur. 22 no'lu kazık önünde göreceli oyulma derinliği $Fr_d = 9.76$ için 0.95'tir.



(a) $X_t = d_0$



(b) $X_t = 2d_0$

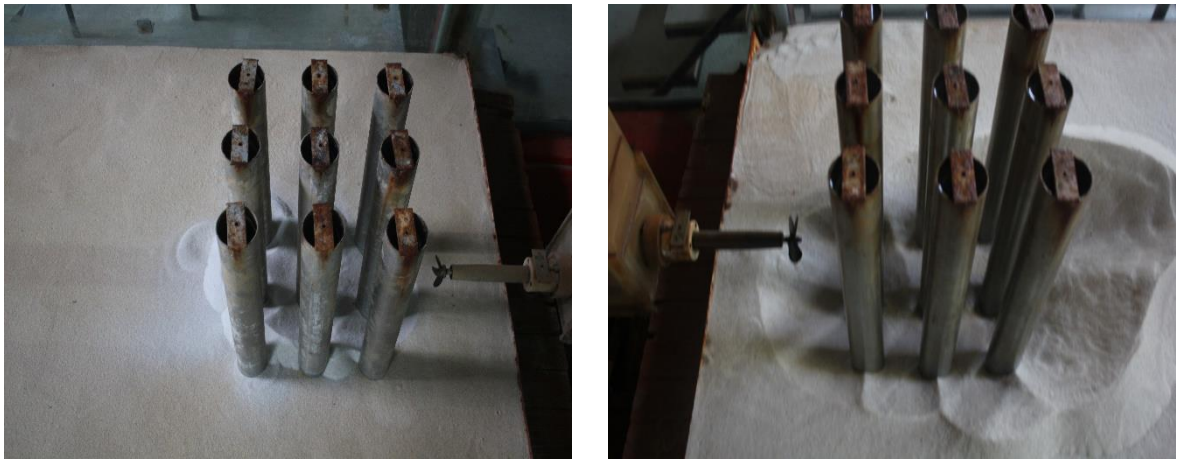
Şekil 4.6 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7cm)

4.4 Kazık Gruplarında Global Oyulma

Sümer ve diğ. [3] ile Yang ve diğ. [14], kararlı akımlarda kazık grupları etrafındaki oyulma üzerinde çalışmış ve sonuçta ortaya çıkan oyulma karakteristiklerinin tek bir kazık durumundakinden farklı olabileceğini ifade etmişlerdir. Benzer bir durum mevcut çalışmada pervane jeti etkisinde

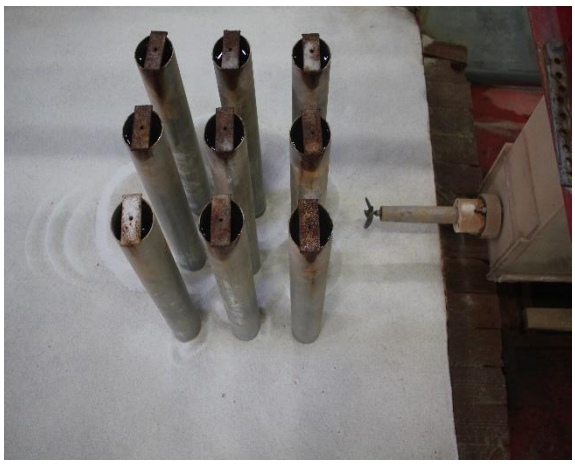
gözlenmiştir. Pervane kazık ekseninde iken kazık grubunun ön sırasında yeralan ve pervaneye en yakın olan 11 no'lu kazık önünde tek kazık durumu ile karşılaştırıldığında daha büyük oyulma derinlikleri oluşmuştur. Pervane n=1 ve 2 eksenleri arasına yerleştirildiğinde ise kazık grubunun ikinci sırasında yeralan 21 ve 22 no'lu kazıkların önünde daha büyük yerel oyulma derinlikleri meydana gelmiştir. Çünkü oyulma konfigürasyonu asimetrik akım durumundan etkilenmiştir.

Ancak, gözlemler $Fr_d > 9.76$ (≈ 10)'dan itibaren yerel oyulmadan global oyulmaya geçişin gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 4.4'de gösterildiği gibi, artan Fr_d ile boyutsuz yerel oyulma derinlikleri (S_{mn}/d_0) belirgin şekilde artmış ve $X_t=2d_0$ için arka kazıkların etrafındaki yığılmalar azalmıştır. Oyulma çukurunun geometrik özelliklerini görsel olarak incelemek için Şekil 4.8 verilmiştir. Bu şekil, farklı yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ve $X_t/d_0=1$ kazık aralığına sahip 3×3 kazık grubu konfigürasyonunda denge oyulma derinliği formasyonlarını göstermektedir. Aynı X_t/d_0 için Fr_d arttıkça kazık grubuna ait oyulma çukuru boyutlarının da arttığı açıktır. Oyulma çukurları tek bir çukura dönüşse de, kazıklar arasında yerel oyulma çukuru hala gözlemlenmektdir. Kazık grubunun oyulma çukurunda, tekil kazıklar etrafında meydana gelen yerel oyulma ve grubun tüm alanı üzerinde meydana gelen global oyulmanın her ikisi de görülebilir [3] [14]).



(a) Yerel oyulma, $Fr_d=8.77$ ($X_t=d_0$) (b) Global oyulma, $Fr_d=11.89$ ($X_t=d_0$)

Şekil 4.7 Yerel ve global oyulma fotoğrafları ($d_0=7$ cm, $X_t=d_0$) (a, b) Pervane kazık grubu ekseninde, (c, d) Pervane kazıklar arasında



(c) Yerel oyulma, Fr_d=8.77 (X_t=d_0)



(d) Global oyulma, Fr_d=11.89

Şekil 4.7 Yerel ve global oyulma fotoğrafları (d_0=7 cm, X_t=d_0) (a, b) Pervane kazık grubu ekseninde, (c, d) Pervane kazıklar arasında (devamı)

Sümer ve diğ. [3] iki oyulma tipi tanımlamışlardır. Bunlardan birincisi tekil kazıkların etrafında meydana gelen yerel oyulma ikincisi ise tüm kazık grubu alanı üzerinde görülen global oyulmadır. Aynı zamanda kazıklar arasındaki mesafe yeterince büyük olduğunda bu iki oyulma tipinin oldukça farklı olduğunu da belirtmişlerdir. Örneğin, Richardson ve Davis [30], kazıklar arasındaki mesafe yaklaşık $5d_0$'dan büyükse, kararlı akım koşullarında tekil kazıkların etrafında meydana gelen oyulma çukurlarının birbirini etkilemediğini, Yang ve diğ. [14] ise kararlı akımda maksimum oyulma çukurunun kazıklar arasındaki mesafe $3d_0$ iken oluştuğunu ifade etmişlerdir.

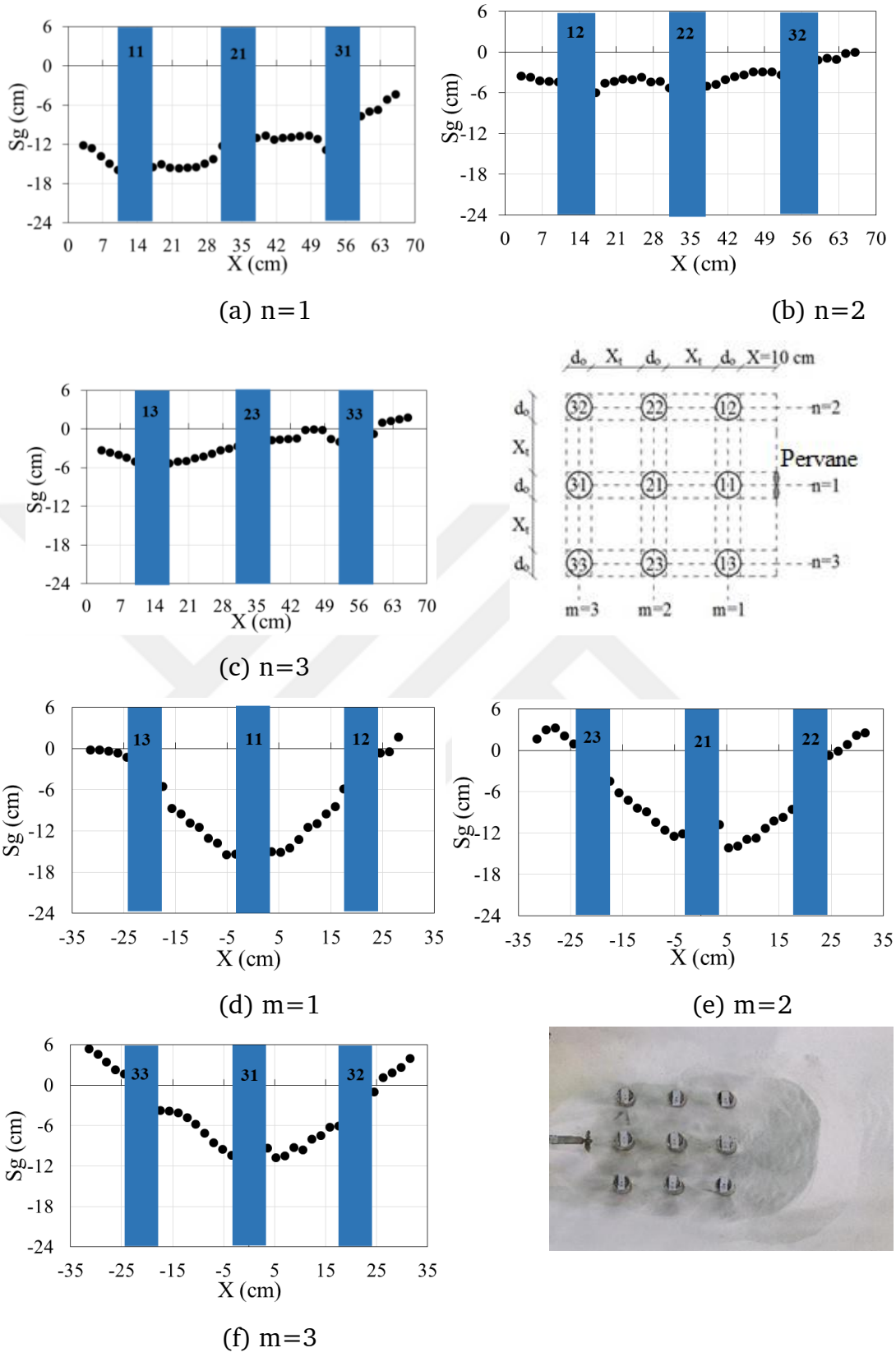
Bu çalışmada, yoğunluk Froude sayısı 9.76'dan büyük olduğunda global oyulma meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 4.7'deki fotoğraflarda, yerel ve global oyulma her bir deneyin denge durumu için açıkça görülmektedir. Pervane jeti etkisi altında tekil kazıklar etrafında yerel oyulma (Şekil 4.7 a ve c) görülürken, tüm kazık grubu alanında global oyulma (Şekil 4.7 b ve d) görülmektedir.

Sümer ve Fredsøe [9] tarafından açıklandığı üzere, yerel oyulmaya, at nalı vorteks sistemi, vorteks çevrileri ve tekil kazıklardan dolayı akım çizgilerinin birbirine yaklaşması neden olmakta, global oyulmaya ise (i) kazıklar arasındaki açıklıkta akım hızında meydana gelen değişiklik ve (ii) kazık grubunun ön sıralarındaki tekil kazıklardan dolayı oluşan türbülans neden olmaktadır. Kazık grubu içinde

yoğun türbülansın mevcudiyeti, katı madde taşınımının önemli ölçüde artmasına ve genel taban seviyesinde global olarak bir azalmaya yol açmaktadır (Şekil 4.7b ve d). Oyulma işlemi, kazıklar arasındaki taban kayma gerilmesi, başlangıçtaki taban kayma gerilmesi değerine düşene kadar devam eder. Bu oyulma, kazıklar arasındaki hız artışının oluşturduğu global oyulmadır.

Pervane kazık grubunun eksenindeyken maksimum yerel oyulma derinliği $X_t=d_0$, $2d_0$ ve $3d_0$ için pervanenin önündeki n=1 ekseninde bulunan kazıkların (11-21-31 no'lu kazıklar) etrafında meydana gelmiştir (Şekil 4.4). Benzer davranış global oyulma için de gözlemlenmiştir. Ancak pervane kazık eksenleri arasına yerleştirildiğinde (n=1 ve n=2 eksenlerinin arasında), maksimum yerel oyulma derinliği 22, 32, 31, 21 no'lu kazıkların sağ tarafında meydana gelmiştir. Şekil 4.7 b ve d'de görüldüğü gibi birinci (m=1) ve ikinci kazık (m=2) sıraları arasında tabandaki alçalmaya bağlı olarak maksimum global oyulma derinlikleri (S_g) gözlenmiştir.

Fotogrametrik verilerin kullanılmasıyla, maksimum global oyulma derinlikleri (S_g) tespit edilmiş, ve pervanenin n=1 ekseninde yerleştirilmesi durumunda boyuna oyulma profilleri çizilmiştir (Şekil 4.8 a, b ve c). Bu şekillerde n=1 ekseni, orijinal tabanın alçaldığını, ancak ön kazıkların etrafındaki yerel oyulmaların hala arka kazıklardakilerden daha büyük olduğunu göstermiştir ($X_t=2d_0$). Ancak pervanenin dönüş yönü nedeniyle asimetrik global oyulma çukurları oluşmuş aynı zamanda yerel oyulmalar da asimetrik olarak meydana gelmiştir. Global oyulma oluşumunda yan eksenlerdeki yerel oyulmalar da görülmektedir ve asimetrik oluşum nedeniyle n=2 eksenindeki yerel oyulmalar n=3 eksenindekilerden daha büyüktür. Yang ve diğ. [14] tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, global oyulma çukurunun memba tarafında taban eğimi, kararlı akım koşullarındakine benzer şekilde mansap tarafındakinden daha büyüktür ve aynı zamanda bu özellik tek kazık durumuna da benzerlik göstermektedir. Gözlemler, Sümer ve diğerlerinin [3] kararlı akım koşullarındaki duruma benzer şekilde, oyulma çukuru derinliğinin ve büyüklüğünün arttığını ve Frd'nin artmasıyla oyulma profili eğiminin yaklaşık olarak sabit kaldığını göstermiştir.



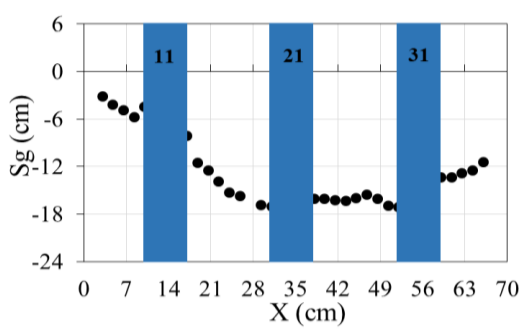
(a) n=1 (b) n=2

(c) n=3

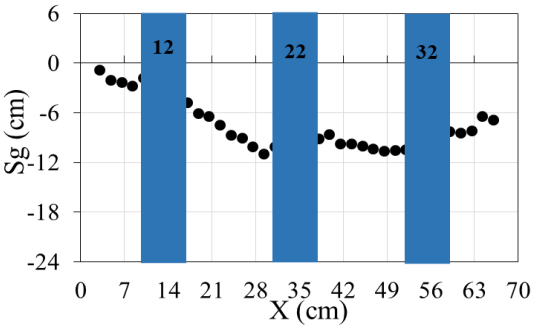
(d) m=1 (e) m=2

(f) m=3

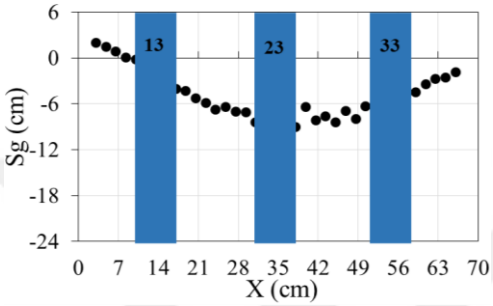
Şekil 4.8 Pervane kazık grubu ekseninde (n=1) iken boyuna ve enine kesitlerdeki oyulma profilleri (Xt=2d0, d0=7cm)



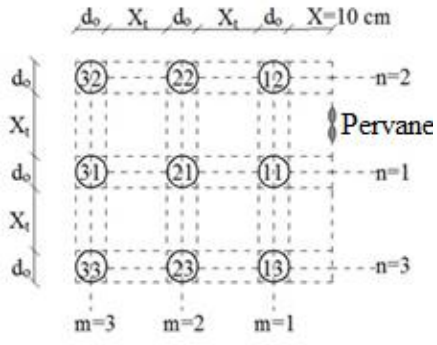
(a) n=1

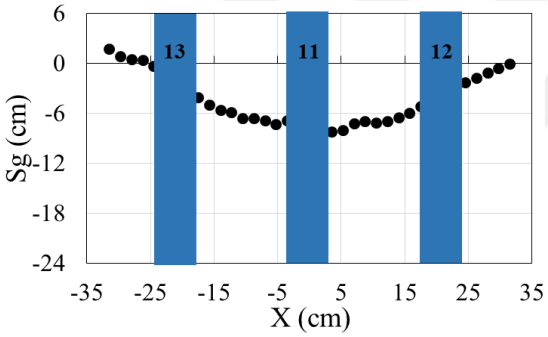


(b) n=2

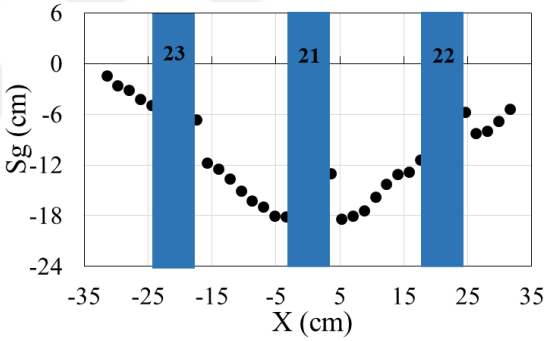


(c) n=3

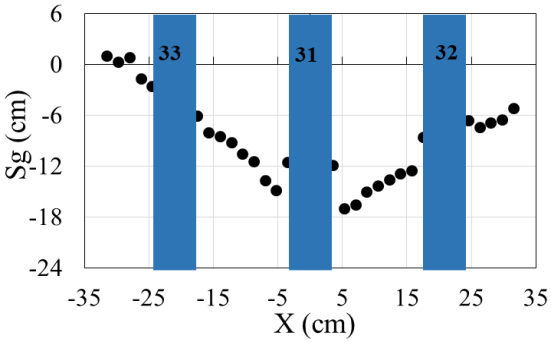




(d) m=1



(e) m=2



(f) m=3



Şekil 4.9 Pervane n=1 ve 2 eksenleri arasında iken boyuna ve enine kesitlerdeki oyulma profilleri ($X_t=2d_0$, $d_0=7cm$)

Şekil 4.8 d, e ve f'de ön kazıklardan (m=1 sırası) arka kazıklara (m=3 sırası) doğru incelendiğinde, asimetrik global oyulma oluşumlarının mansapta daha belirgin olduğu görülmektedir.

Şekil 4.9'da ise pervane kazık eksenleri (n=1 ve 2) arasına yerleştirildiğinde, global oyulma durumu için kazıklar arasındaki mesafe $X_t=2d_0$ iken oluşan oyulma profilleri çizilmiştir. Şekil 4.9 a, b ve c n=1, 2 ve 3 eksenlerindeki boyuna oyulma profillerini göstermektedir, Şekil 4.9 d, e ve f ise m=1, 2 ve 3 eksenlerindeki enin oyulma profillerini göstermektedir. Maksimum yerel oyulmalar ikinci sıra (m=2) civarında meydana gelmiştir. Global oyulma, birinci sıra ile ikinci sıra arasında ikinci sıraya yakın bir konumda maksimuma ulaşmaktadır. Bu duruma, global oyulmanın asimetrisine esas olarak pervanenin konumu neden olmuştur, çünkü pervane jeti n=1 ve n=2 eksenleri arasına doğrudan etki etmektedir. Diğer deney şartlarında da fotogrametrik verilerin kullanılmasıyla, maksimum global oyulma derinlikleri (S_g) tespit edilmiştir.

Tan ve Yüksel [13], yapı olmadığı durumda pervane jet akımından dolayı meydana gelen oyulmayı tahmin etmek için aşağıdaki gibi yeni formüller önermişlerdir

$$Fr_{dc} = 2.1\frac{G}{D_p} \tag{4.3}$$

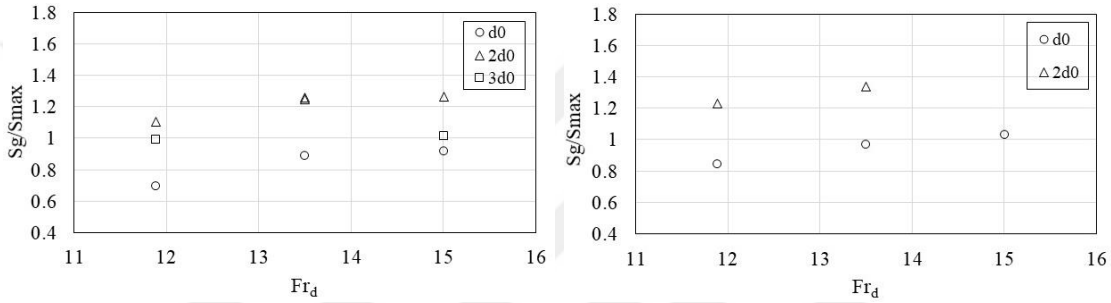
$$\frac{S_{max}}{D_p} = 0.57\,(Fr_d - Fr_{dc})^{0.33}\left(\frac{G}{D_p}\right)^{-1.1} \quad for \quad 2.82 \tag{4.4}$$

burada S_{maks}, yapı olmadığı durumda maksimum oyulma derinliği, D_p, pervane çapı, G, deniz tabanından pervane ekseninin merkezine olan düşey mesafe, Fr_d, yoğunluk Froude sayısı ve Fr_{dc}, oyulmanın başlangıcı için kullanılan kritik yoğunluk Froude sayısıdır.

Fotogrametrik verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen maksimum global oyulma derinliklerinin (S_g), pervane jetinden dolayı oluşan ve Denklem (4.4) kullanılarak elde edilen yapı olmadığı durumdaki maksimum taban oyulmasına oranı hem pervane konumu kazık grubu ekseninde iken hem de kazıklar arasında iken belirlenmiş ve

Şekil 4.10'de yoğunluk Froude sayısına karşılık çizilmiştir.

Şekil 4.10, blokaj etkisinden dolayı $X_t=d_0$ şartı hariç, global oyulma derinliklerinin yapının olmadığı tabandaki oyulmalardan daha büyük olduğunu göstermektedir. Göreceli global oyulma derinlikleri (S_g/S_{maks}), artan yoğunluk Froude Sayısı (Fr_d) ile artmaktadır. $X_t=2d_0$ olduğunda, pervane kazık ekseninde iken göreceli global oyulma derinliği 1.25'e kadar artmıştır. Pervane kazık eksenleri arasında iken göreceli global oyulma derinlikleri 1.3'e ulaşmıştır. Çünkü kazıklar arasından geçen pervane jeti hızı doğrudan kazık grubunun içerisini etkilemektedir.



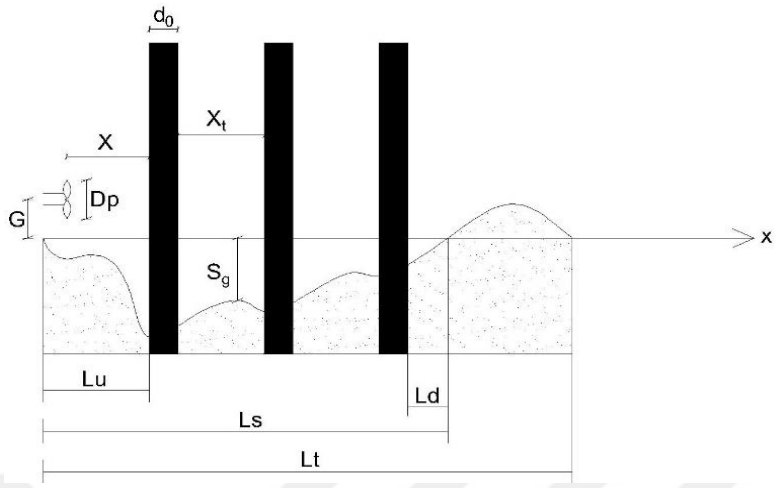
(a) Pervane kazık grubu ekseninde (b) Pervane kazıklar arasında

Şekil 4.10 Göreceli global oyulma derinliği

4.5 Global Oyulmanın Geometrik Boyutları

Uygulamada mühendisler, oyulma problemine karşılık bir koruma alanının boyutlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Yani burada amaç global oyulma alanının boyutlarını tahmin edebilmektir. Oyulma çukurunun geometrik karakteristikleri, Şekil 4.11'de gösterilmektedir, burada L_t, mansap tarafındaki yığılma dahil olmak üzere profilin toplam uzunluğu; L_s, Tan ve Yüksel [22] tarafından tanımlanan küçük oyulmayı da içeren oyulma çukuru uzunluğu; L_u, kazık grubunun oyulma çukurunun memba tarafındaki uzunluğu yani öndeki kazıktan küçük oyulma çukurunun membasına kadar olan yatay mesafe; L_d, kazık grubunun oyulma çukurunun mansap tarafındaki uzunluğu yani en gerideki kazığın arkasından oyulma çukurunun mansap tarafındaki son noktasına kadar olan yatay mesafe; ve L_w, oyulma çukurunun maksimum genişliğidir. Oyulma çukurunun geometrik

karakteristikleri her deneyden sonra elde edilen oyulma profili boyutları ölçülerek ve fotogrametrik verilerden yararlanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Global oyulmanın şematik gösterimi

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13, sırasıyla, pervane konumunun kazık grubu ekseninde (n=1) ve kazıklar arasında (n=1 ve 2) olması durumunda farklı açıklık oranları (X_t/d_0) için, Şekil 4.11'de tanımlanan tüm boyutların kazık çapına oranı dikkate alınarak çizilmiştir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de gösterildiği gibi, global oyulma için boyutsuz geometrik karakteristikler, yoğunluk Froude sayısına (Fr_d) ve açıklık oranına (X_t/d_0) bağlıdır. Bu şekillerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

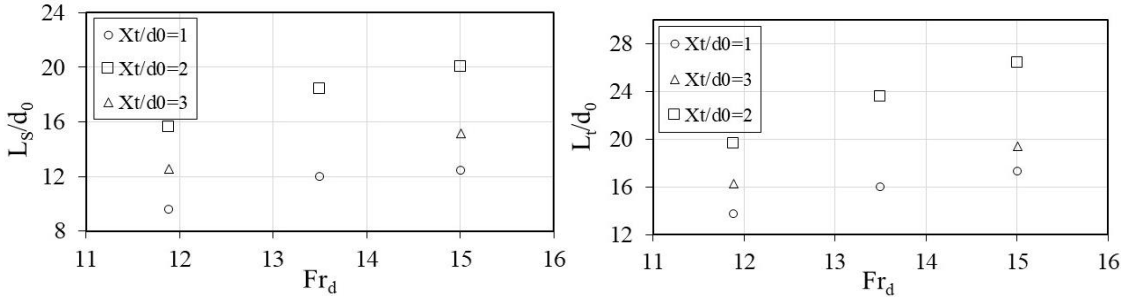
Oyulma çukurunun boyutsuz geometrik karakteristikleri, yoğunluk Froude sayısının (Fr_d) artmasıyla artış göstermektedir. Hem öndeki kazık önünde oluşan at nalı vortex sisteminin yapısı hem de art-iz vorteks sistemi oldukça güçlüdür, bu nedenle artan yoğunluk Froude sayısı daha belirgin oyulma boyutlarına neden olmaktadır.

Oyulma çukurunun boyutsuz geometrik karakteristikleri, aynı yoğunluk Froude sayısı için X_t/d_0=1'den 2'ye kadar artan bir eğilim gösterirken, X_t/d_0=3 için azalan bir eğilim göstermiştir. Çünkü kazıklar arasındaki mesafe daha büyük olduğunda kazık arkasındaki art-iz vortex sisteminin etkileşimi zayıflamaktadır. Bu, Sümer ve diğ. [3] ile de uyumludur. Öyleyse oyulma çukurunun boyutsuz geometrik özellikleri, at nalı ve art-iz vortex sistemlerinin etkisine bağlı olarak X_t/d_0 değerleri ile artmakta ve X_t/d_0 >2 için azalmaktadır. Aynı zamanda Sümer ve diğ. [3] kazık arasındaki mesafe arttıkça kazık arkasındaki akım alanında türbülans etkisinin

azaldığını ve bunun da oyulma boyutlarında azalmaya yol açabileceğini belirtmişlerdir.

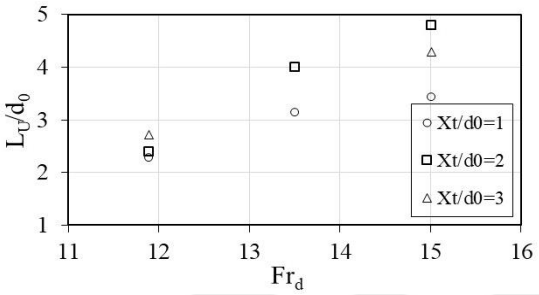
Bu çalışmada global oyulma uzunluğu (L_s) X_t/d_0=2 için kazık çapının 20 katına ulaşmıştır (Şekil 4.12). Oyulma, kazık stabilitesini etkilerken, yığılma da güvenli navigasyon için bir sorundur ve bu çalışma, oyulma profilinin boyutsuz toplam uzunluğunun (L_t) kazık çapının 26 katı civarında olduğunu ve arka kazıkların mansabına kadar uzandığını göstermiştir. Kazık grubunun oyulma çukurunun memba tarafındaki uzunluğu (L_u) kazık çapının 4.8 katı iken kazık grubunun oyulma çukurunun mansap tarafındaki uzunluğu (L_d) kazık çapının sekiz katı kadardır. Pervane konumu kazık grubunun ekseninde iken en büyük oyulma çukuru genişliği (L_w) ise kazık çapının 11 katı olarak bulunmuştur.

Pervane kazık eksenleri arasında iken oyulma çukurunun boyutsuz geometrik karakteristikleri, pervanenin kazık grubu ekseninde olması durumu ile aynı eğilimi göstermiştir (Şekil 4.13). Bununla birlikte, global oyulmanın boyutsuz geometrik karakteristiklerinin pervanenin eksende olduğu konumdaki boyutlardan daha küçük olduğu belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler, asimetrik akım koşullarının kanal yan duvarlarından etkilenmesi nedeniyle sınırlı sayıda tutulmuştur. Toplam global oyulma uzunluğu (L_s) $X_t/d_0 = 2$ için ve pervane kazık eksenleri arasındayken kazık çapının 16 katı olmuştur, ancak mansap tarafındaki yığılmayı da içeren boyutsuz toplam profil uzunluğu (L_t) 20 katı civarındadır. L_u ve L_d ise sırasıyla kazık çapının üç ve altı katı olarak bulunmuş, global oyulma genişliğinin (L_w) de $10.5d_0$ olduğu gözlenmiştir.

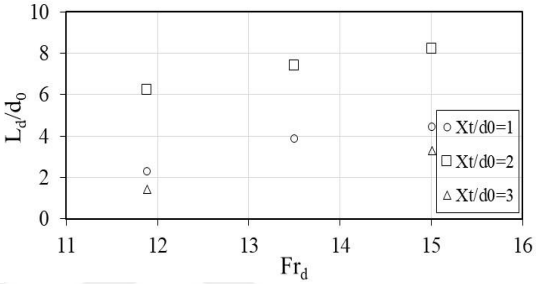


(a)

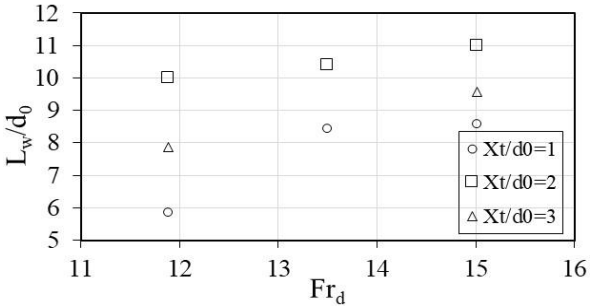
(b)



(c)

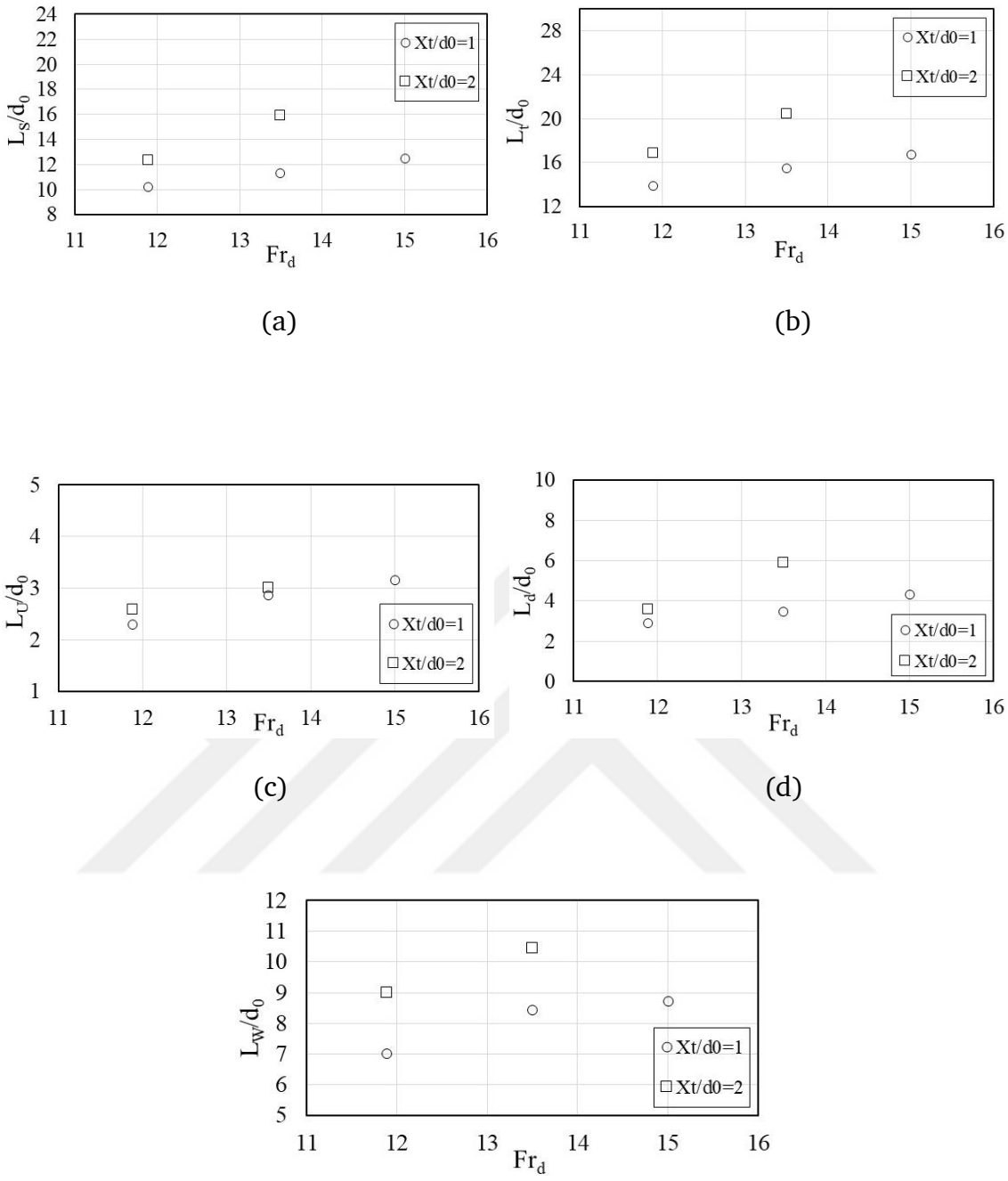


(d)



(e)

Şekil 4.12 Pervane konumu kazık grubu ekseninde (n=1) iken göreceli global oyulma boyutları



Şekil 4.13 Pervane konumu kazıklar arasında (n=1 ve 2) iken göreceli global oyulma boyutları

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kum taban üzerinde pervane jeti etkisinde kazık gruplarının etrafındaki oyulma mekanizmasının belirlenmesi için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler farklı kazık grubu konfigürasyonları (X_t = d_0, $2d_0$ ve $3d_0$, G/d_0=1.43-2.00, G/D_p=1.00-1.54, D_p/d_0=0.93-2.00) için farklı yoğunluk Froude sayıları (Fr_d = 7.73–15.01), farklı pervane çapları (D_p=6.5 ve 10 cm), farklı kazık çapları (d_0= 5 ve 7 cm), farklı pervane dönüş hızları (590, 670 ve 745 rpm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pervane, 3×3 kare kazık grubunun önünde iki farklı pozisyonda, kazıkların boyuna ekseninde (n=1 ekseni) ve kazık eksenleri arasında (n=1 ve 2 eksenleri) konumlandırılmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

3 x 3 kazık grubu durumları için, ön kazıktaki maksimum (denge) oyulma derinliği, tek kazık durumu ile karşılaştırıldığında nispeten daha büyüktür. Önce artmış, sonra kazıklar arasındaki mesafe ile azalmıştır. Tekil kazıklardaki maksimum oyulma Fr_d=15.01 için S_{mn}/d_0 = 2.6 olarak elde edilmiştir. Arka kazıktaki oyulma derinliği, görünüşe göre ön kazıktakinden ve tek kazık durumundan daha küçüktür (yani S_{mn}/S_0 <1).

Pervane dönüş yönü, kazık grubunun bir tarafında biraz daha fazla oyulmaya neden olduğundan, kazıkların etrafındaki yerel oyulmalar simetrik oluşmamıştır. X_t/d_0 = 1, 2 ve 3 için maksimum yerel oyulma derinlikleri ön kazık etrafında bulunmuş ve Fr_d=9.76 için bu tekil oyulma derinlikleri (S_{11}) tek kazık durumundaki oyulma derinliğine (S_0) göre sırasıyla kazık çapının 1.14, 1.6 1.15 katı olarak elde edilmiştir. Yerel oyulmadan küresel oyulma oluşumuna geçiş meydana geldiği için, Fr_d=9.76'dan sonra oyulma derinliği biraz azalmıştır. Ancak, kazık grubu alanındaki tabanın genel olarak alçalması olan global oyulma oluşumunda kazıkların etrafında meydana gelen oyulma çukurları hala gözlenmektedir. Bu çalışmada X_t/d_0=2 için oyulma derinlikleri diğer açıklık oranları dikkate alındığında daha büyük bulunmuştur.

Pervane konumu kazık eksenleri arasında ikena, Fr_d=9.76 için göreceli oyulma derinliği 1.5 olarak bulunmuştur. Ayrıca, pervanenin asimetrik konumundan dolayı oyulmalarda da asimetri görülmüştür.

Gerçekleştirilen çalışmada, yoğunluk Froude sayısı 9.76'dan (≈10) büyük olduğunda global oyulmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Taban alçalmasından dolayı oluşan maksimum global oyulma derinlikleri (S_g) birinci (m=1) ve ikinci (m=2) kazık sırasının arasında görülmüştür. Yerel ve global oyulmalarda görülen asimetri mansap kesimlerinde daha belirgin hale gelmiştir.

Göreceli global oyulma derinlikleri (S_g/S_{max}), artan yoğunluk Froude Sayısı (Fr_d) ile artmıştır. Pervane konumu kazık grubu ekseninde iken $X_t=2d_0$ için göreceli global oyulma derinliği 1.25 kat artmıştır. Pervane konumu kazık eksenleri arasında iken göreceli global oyulma derinlikleri, 1.3 katına ulaşmıştır, çünkü kazıklar arasındaki pervane jet akım hızı, doğrudan kazık grubunun içinden etkilenmiştir. Global oyulmanın boyutsuz geometrik özellikleri, yoğunluk Froude sayısına (Fr_d) ve kazıklar arasındaki açıklık oranına (X_t/d_0) bağlı olarak belirlenmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, daha fazla kazık grubu konfigürasyonunun incelenmesine ve akım yapısının da kazık grubu konfigürasyonları dikkate alınarak ölçülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan sonraki çalışmalar için dümen etkisi de dikkate alınmalıdır. Ayrıca, pervane jeti ile kazık grubu arasında açı olması durumu ve kazık grubu ile pervane arasındaki mesafelerin (X) değiştirilerek ölçümler yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

[1] P. I. A. N. C, "Guidelines for Protecting Berthing Structures from Scour Caused by Ships," in *Report No 180*, 2015.

[2] B. Sumer and J. Fredsøe, "Wave scour around group of vertical piles," *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.,* pp. 248-256, 1998.

[3] M. B. K. F. J. Sumer, "Global and local scour at pile groups," in *Proceedings of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, 2005.

[4] B. Ataie-Ashtiani and A. Beheshti, "Experimental investigation of clear water local scour at pile groups," *Journal of Hydraulic Engineering,* pp. 1100-1104, 2006.

[5] A. M. B. A. T. G. A. Amini, "Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow," *J. Hydraul. Eng.,* no. 132, pp. 177-185, 2012.

[6] A. Yüksel Ozan, Y. Çelikoğlu, E. Çevik and Y. Yüksel, "Jet scour around vertical piles and pile groups," *Ocean Engineering,* vol. 32, no. 3-4, pp. 349-362, 2005.

[7] C. Chin, Y. Chiew, S. Lim and F. Lim, "Jet scour around vertical pile," *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.,* vol. 122, no. 2, pp. 59-67, 1996.

[8] A. Yüksel Ozan and Y. Yüksel, "Simulation of a 3D submerged flow around a pile," *Ocean. Eng.,* vol. 37, no. 8-9, pp. 819-832, 2010.

[9] B. Sumer and J. Fredsøe, "The Mechanics of Scour in the Marine Environment," *World Scientific,* p. 536pp, 2002.

[10] A. Ozan Yüksel, K. Cihan and Y. Yüksel, "Propeller induced scour around the pile type berth structures," *Applied Ocean Research,* vol. 38, pp. 16-22, 2012.

[11] Y. Yüksel, S. Kayhan, Y. Çelikoğlu and K. Cihan, "Open Type Quay Structures under propeller jets," *Coastal Engineering Proceedings,* 2012.

[12] K. Cihan, "The effect of the propeller jet on pile groups," *China Ocean Engineering,* vol. 28, pp. 17-30, 2013.

[13] Y. Yüksel, R. Tan and Y. Çelikoğlu, "Propeller jet flow scour around a pile structure," *Applied Ocean Research,* vol. 79, pp. 160-172, 2018.

[14] Y. Q. M. W. X. J. Yang, "Experimental study of scour around pile groups in steady flows," *Ocean. Eng.,* no. 195, pp. 1-12, 2020.

[15] G. Hamill, H. Johnston and D. Stewart, "Propeller wash scour near quaywalls.," *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering,* vol. 125, no. 4, 1999.

[16] H. Bergh and K. Cederwall, *Propeller Erosion in Harbours,* Stockholm: Hydr. Lab., Royal Inst. of Technol., 1981.

[17] R. Quarrin, *Influence of the sea bed geometry and berth geometry on the hydrodynamics of the wash form a ships propeller,* PhD thesis, Queens University of Belfast, 1994.

[18] H. Blaauw and E. Kaa, "Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships," in *7th International Harbour Congress*, Antwerp, 1978.

[19] N. Rajaratnam, "Erosion by plane turbulent jets," *J. Hydraulic Research,* vol. 19, no. 4, pp. 339-358, 1981.

[20] G. A. Hamill, "The scouring action of the propeller jet produced bya slowly manoeuvring ship," in *Permanent International Association of Navigation Congresses*, 1988.

[21] G. Hamill and J. McGarvey, "Designing for propeller action in harbours," in *Proceedings of the 1996 25th International Conference on Coastal Engineering. Part 1 (of 4)*, Orlando, United States, 1997.

[22] B. Sumer, K. Bundgaard and J. Fredsoe, "Global and local scour at pile groups," Manuscript in preparation, 2002a.

[23] C. Hannah, "Scour at pile groups," University of Canterbury, N.Z., Civil Engineering, 1978.

[24] R. Tan and Y. Yüksel, "Seabed scour induced by a propeller jet," *Ocean Engineering,* vol. 160, pp. 132-142, 2018.

[25] Y. Yuksel, R. Tan and Y. Celikoglu, "Propeller Jet Flow Scour around a Pile Structure," *Applied Ocean Research,* vol. 29, pp. 160-172, 2018.

[26] G. Tsinker, "Marine structure engineering: specialized application," *Chapman & Hall, International Thomson Publishing Inc.,* 1994.

[27] M. Faruque, P. Sarathi and R. Balanchar, "Transient local scour by submerged three-dimensional wall jets: effect of tailwater depth.," in *Second International Conference on Scour and Erosion*, Singapore, 2004.

[28] P. Sarathi, *Scour by submerged square wall jets at low densimetric Froude number,* University of Windsor, Ontario, 2015.

[29] R. Becker, L. Galayda and M. MacLaughlin, "Digital Photogrammetry Software Comparison for Rock Mass Characterization," in *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Seattle, Washington, 2018.

[30] M. Wei and Y. Chiew, Influence of Toe Clearance on Propeller Scour around an Open-Type Quay, Chapman & Hall, International Thomson Publishing Inc., 1994.

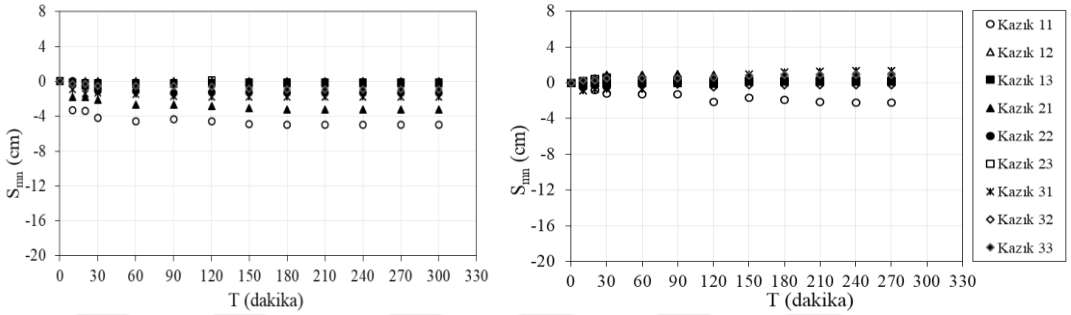
[31] N. Penna, R. G. F. D'Alessandro and G. Tomasicchio, "Threedimensional analysis of local scouring induced by a rotating ship propeller," *Ocean Engineering,* vol. 188, 2019.

[32] E. Richardson and S. Davis, "Evaluating scour at bridges," Hydraulic Engineering Circular no 18, Washington DC, USA, 2001.

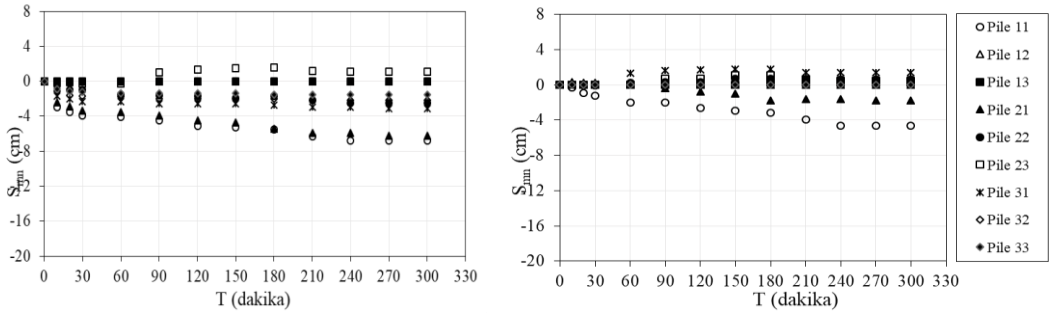
[33] G. Hamill, J. McGarvey and P. Mackinnon, "A method for estimating the bed velocities produced by a ship's propeller wash influenced by a rudder," in *26th International Conference on Coastal Engineers (ICCE'98)*, Copenhagen, Denmark,, 1998.

A
EKLER

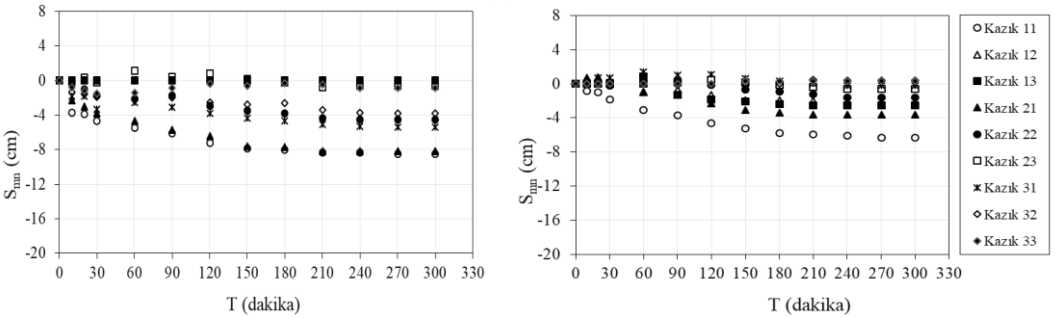
EK 1



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = d_0$, 590 rpm

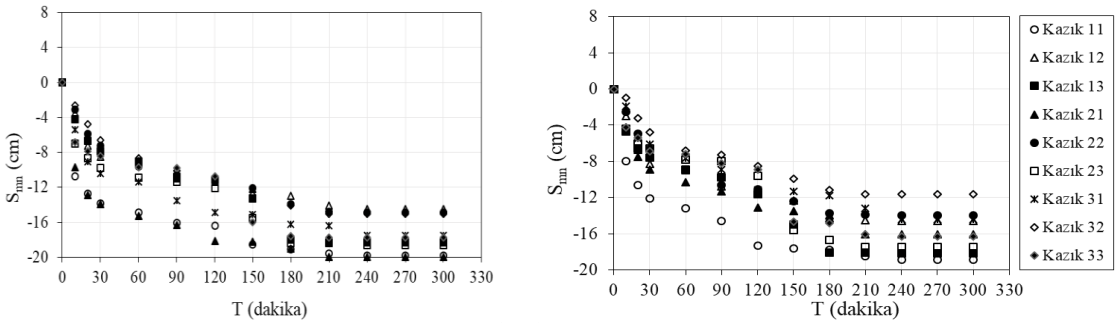


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = d_0$, 670 rpm

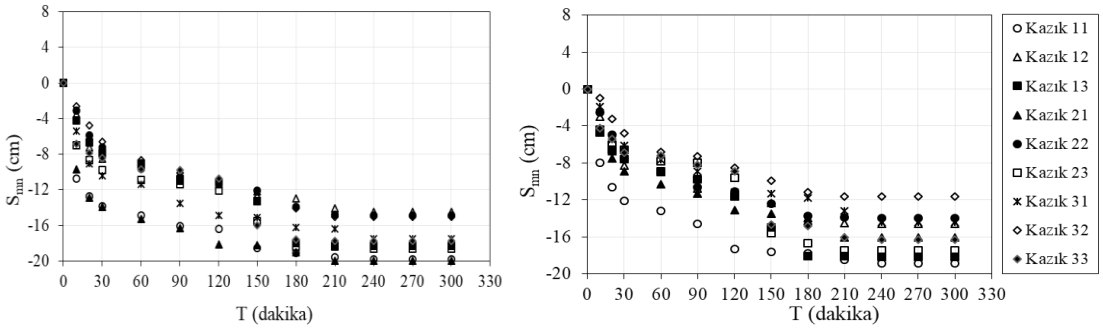


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = d_0$, 745 rpm

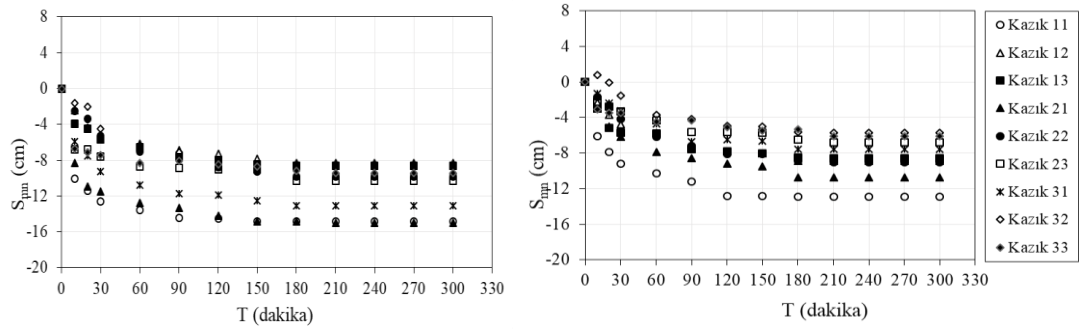
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde)



d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = d_0, 590 rpm

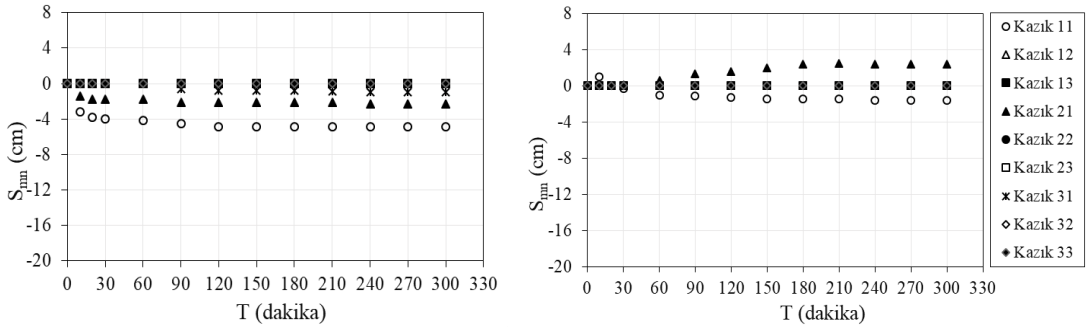


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = d_0, 670 rpm

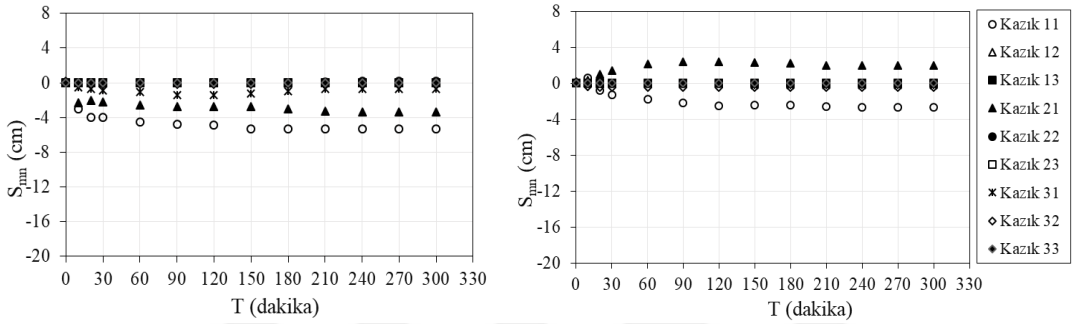


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = d_0, 745 rpm

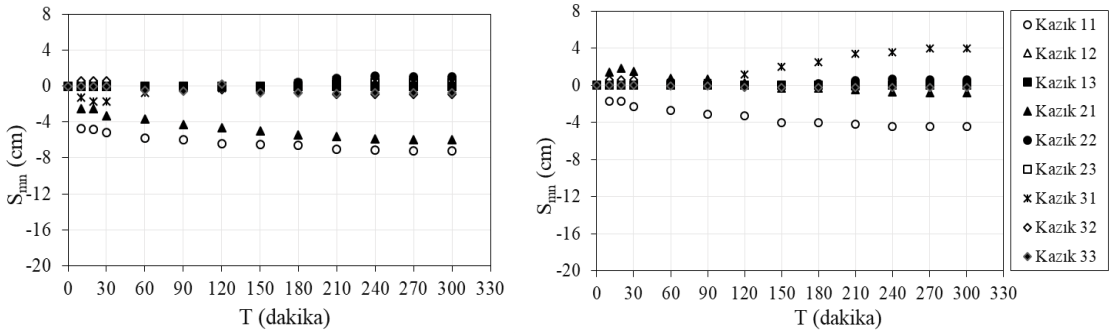
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 590 rpm

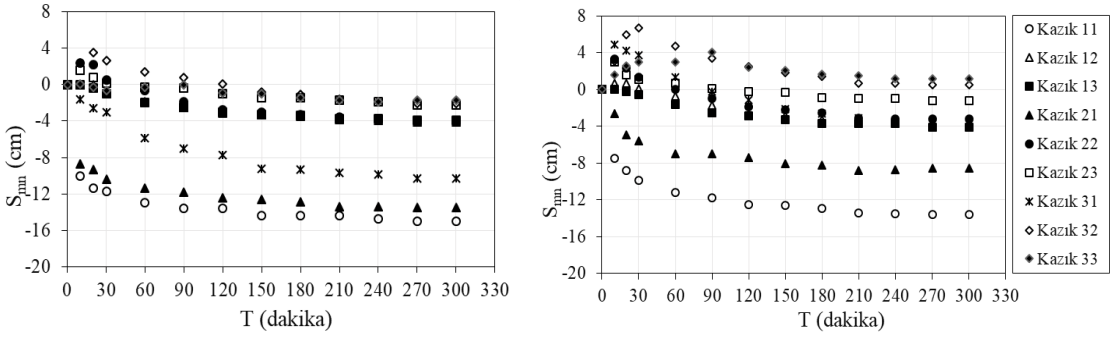


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 670 rpm

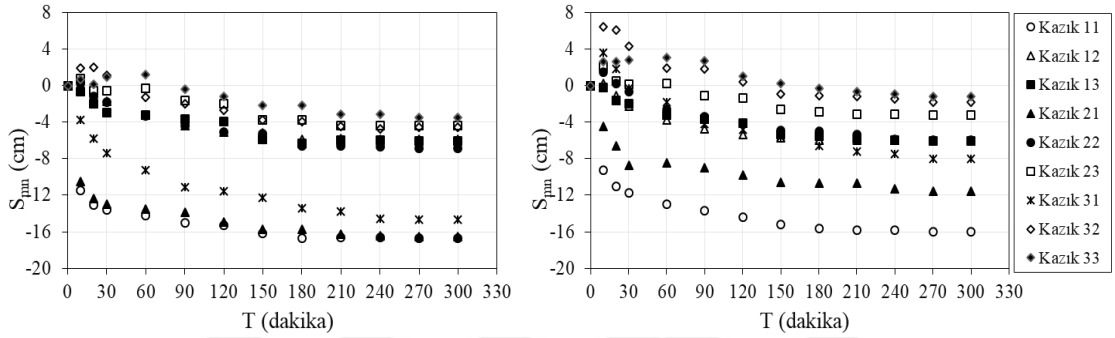


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 745 rpm

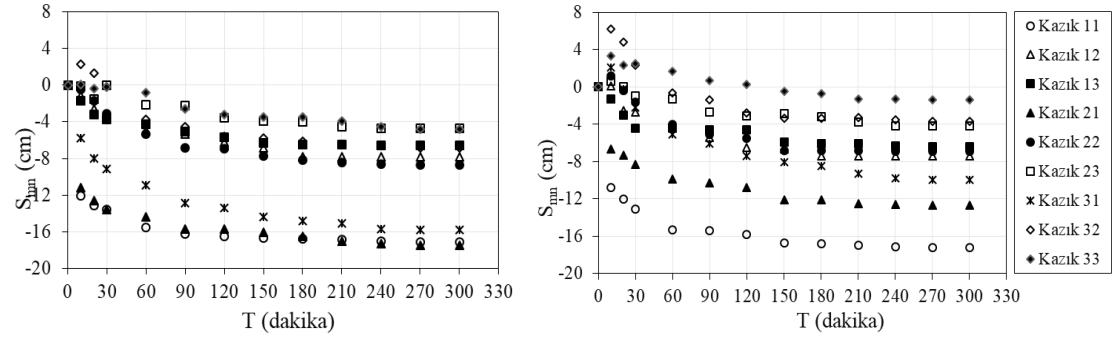
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 590 rpm

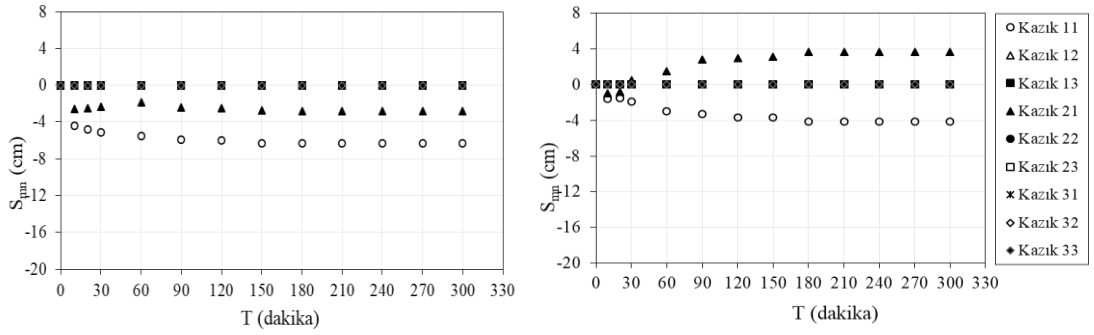


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 670 rpm

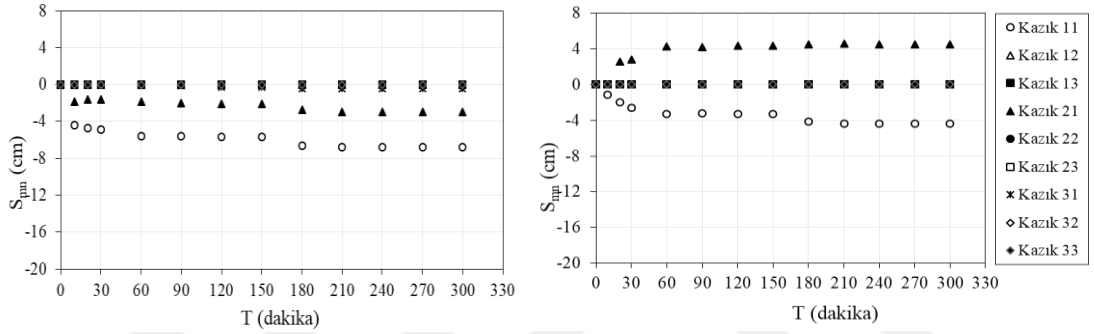


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 745 rpm

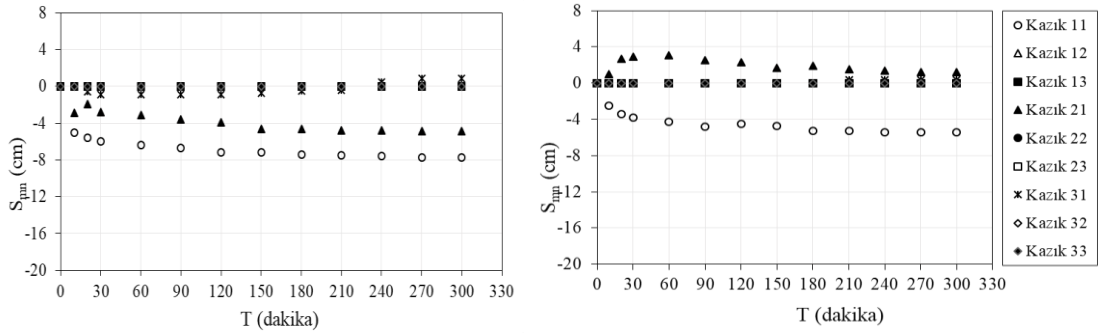
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = $3d_0$, 590 rpm

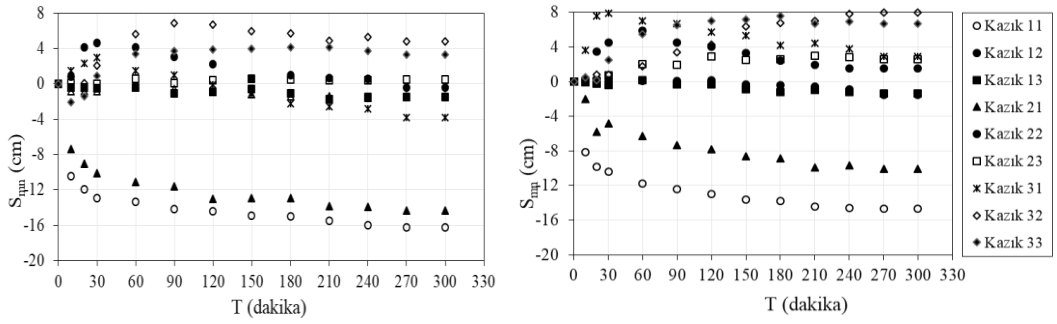


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = $3d_0$, 670 rpm

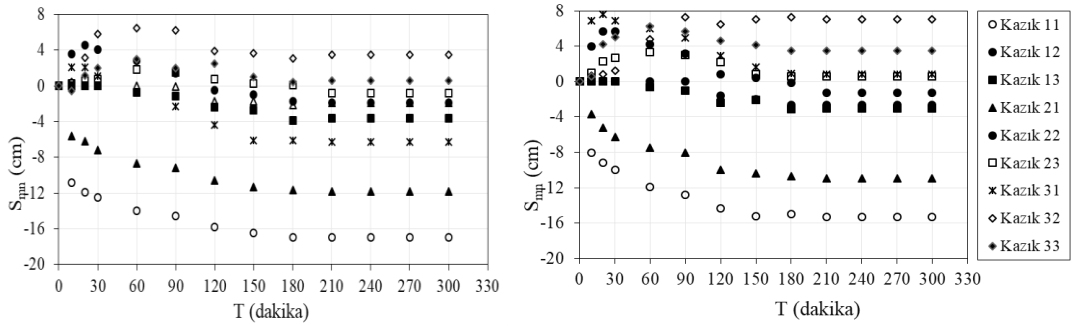


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = $3d_0$, 745 rpm

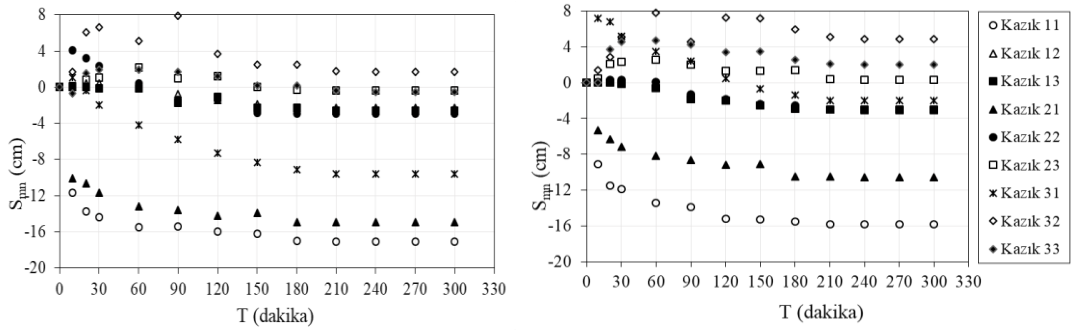
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = 3d_0, 590 rpm

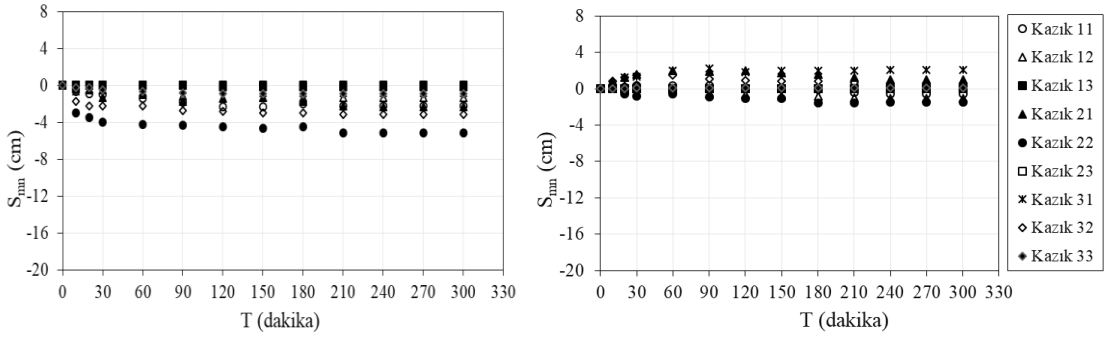


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = 3d_0, 670 rpm

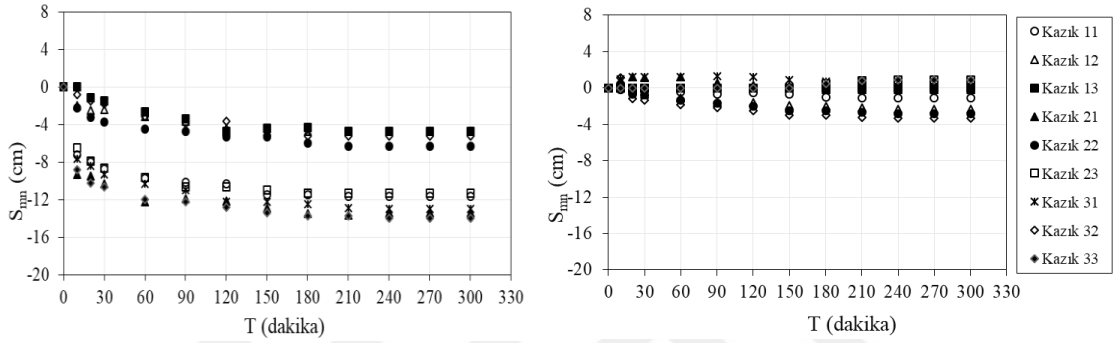


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = 3d_0, 745 rpm

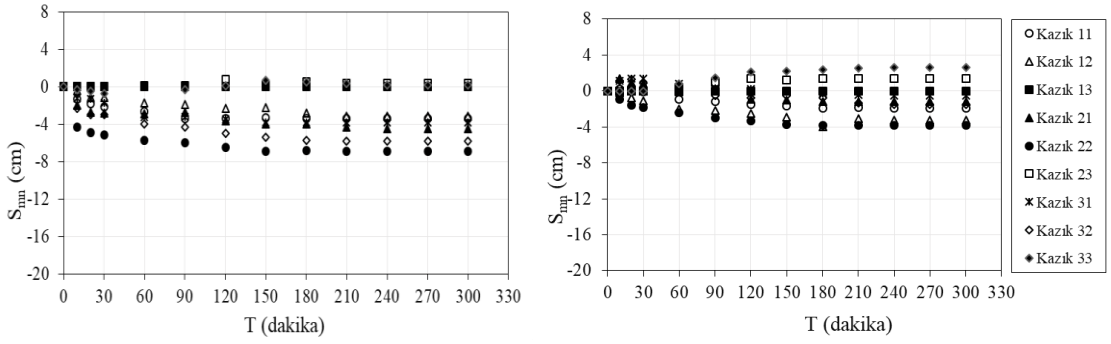
Şekil 5.1 Ek1.1 3×3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazık ekseninde) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = d_0, 590 rpm

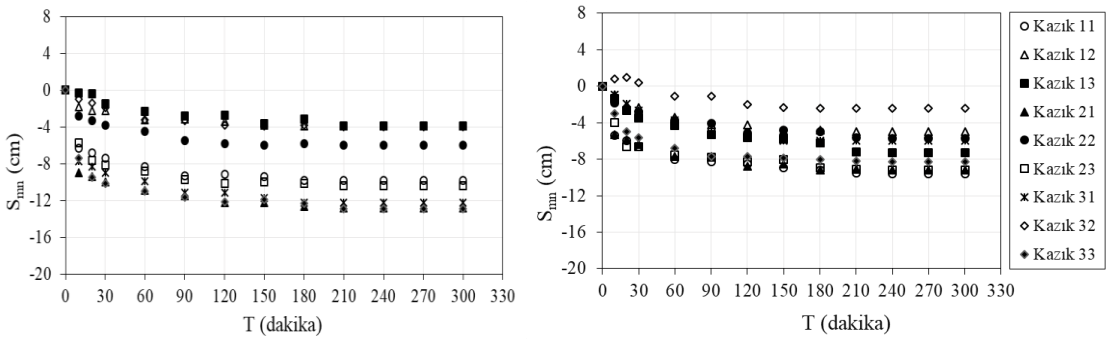


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = d_0, 670 rpm

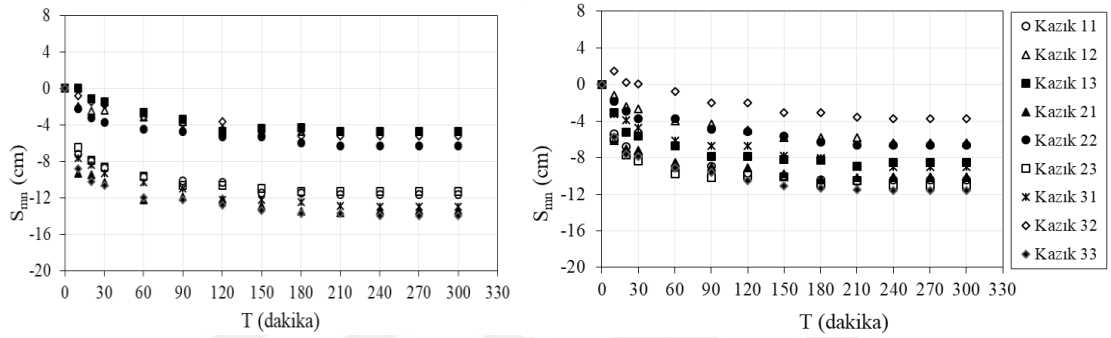


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = d_0, 745 rpm

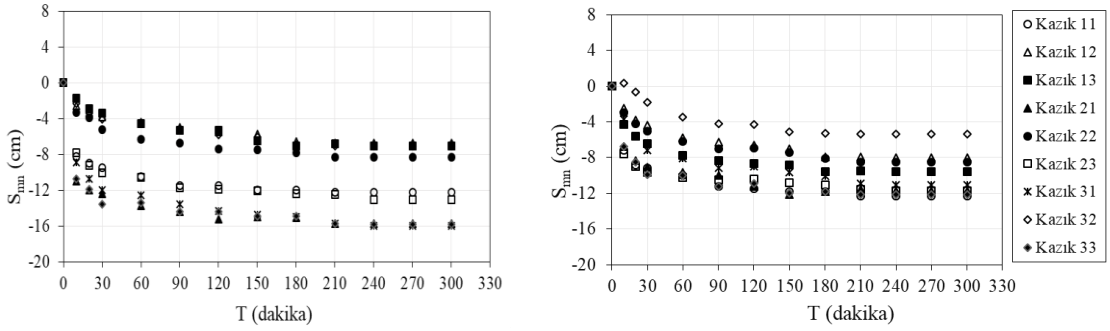
Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında)



d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = d_0, 590 rpm

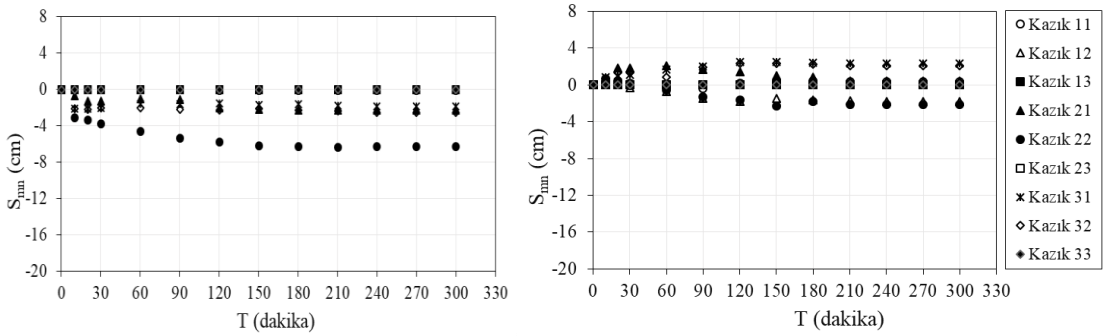


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = d_0, 670 rpm

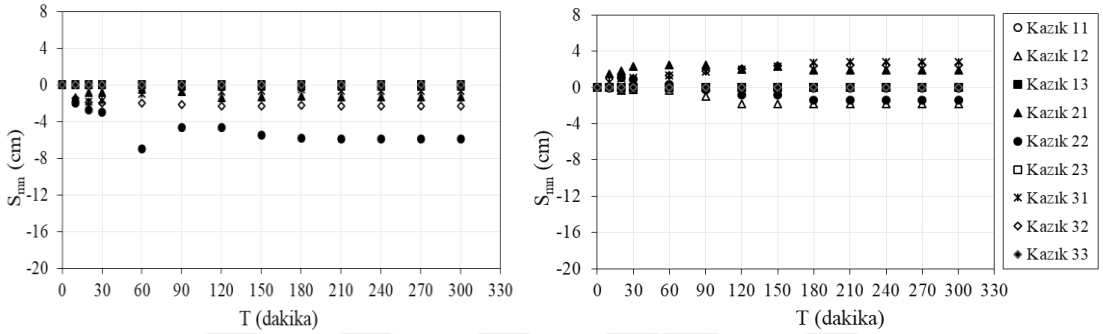


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = d_0, 745 rpm

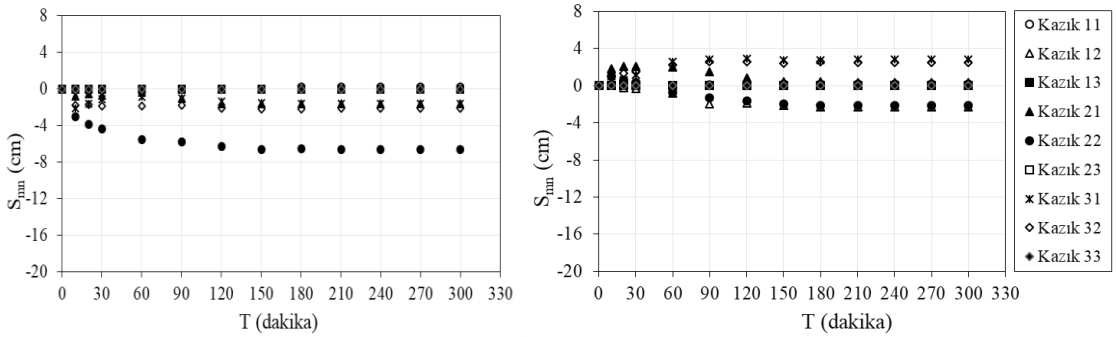
Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 590 rpm

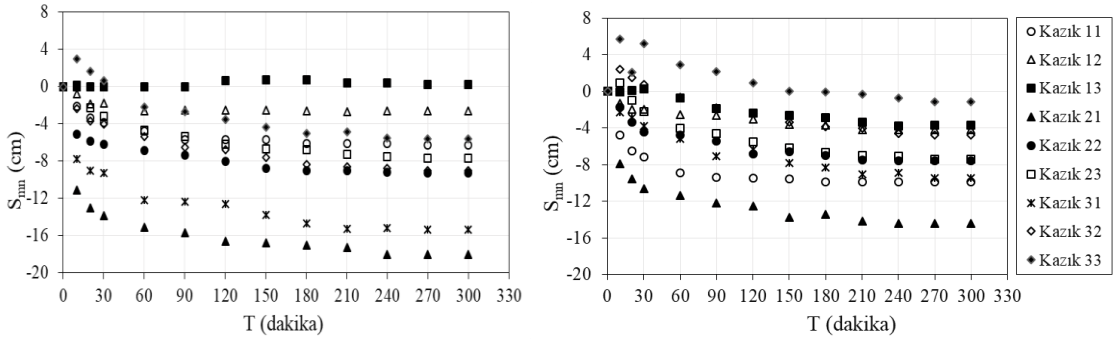


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 670 rpm

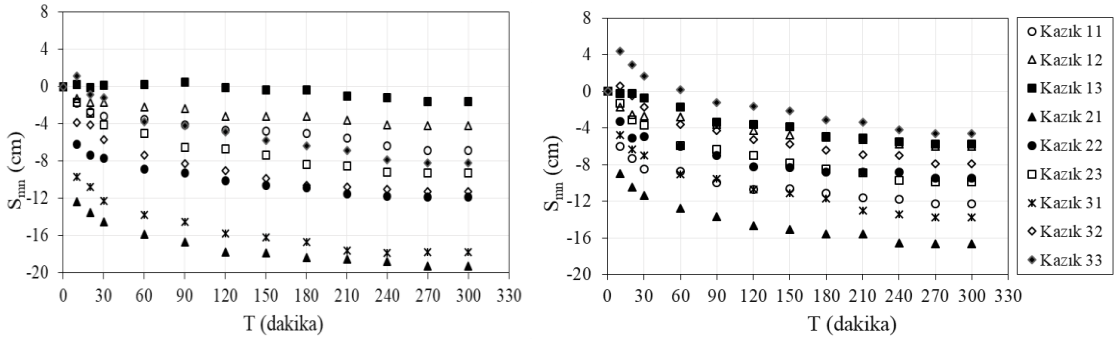


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, $X_t = 2d_0$, 745 rpm

Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında) (devamı)

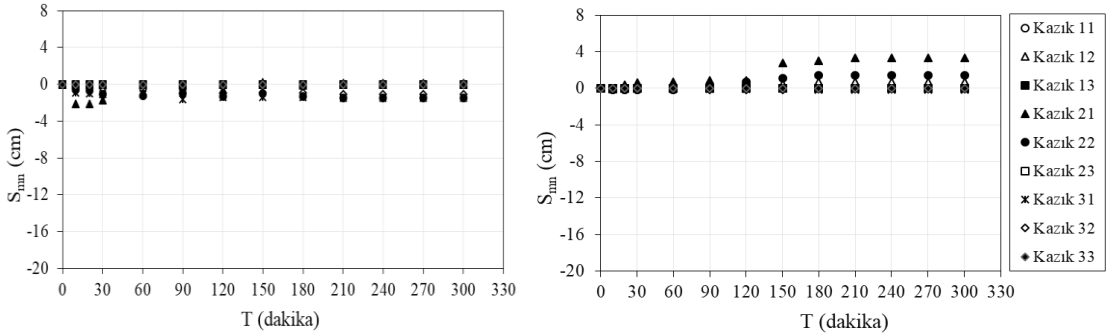


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 590 rpm

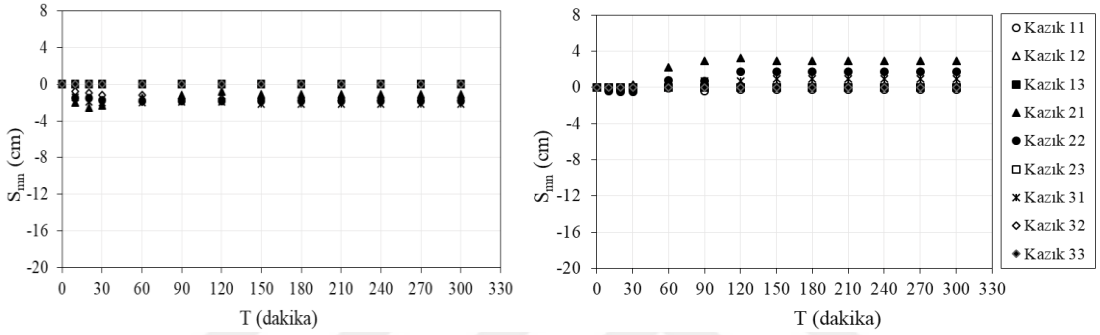


d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = $2d_0$, 670 rpm

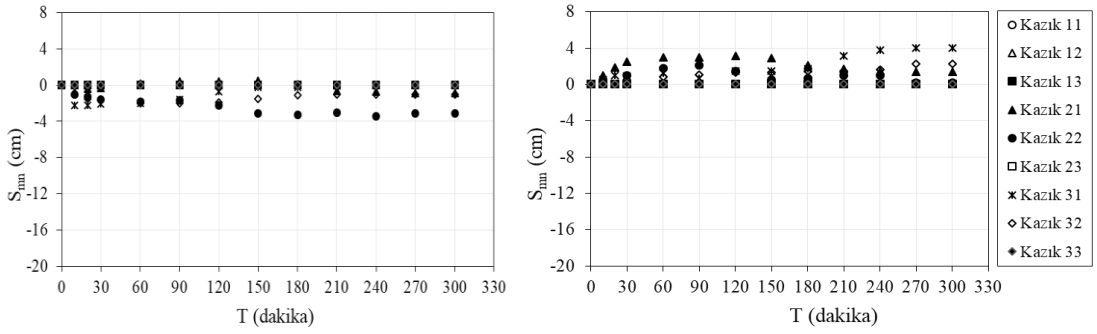
Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında) (devamı)



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = $3d_0$, 590 rpm

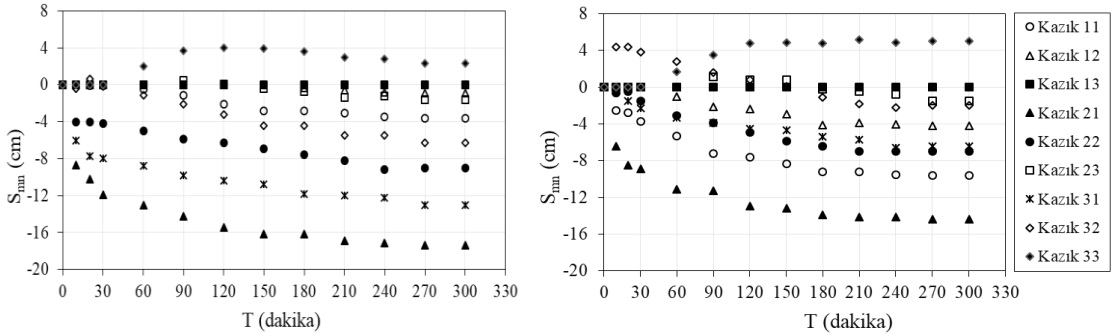


d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = $3d_0$, 670 rpm



d_0=7 cm, D_p= 6.5 cm, X_t = $3d_0$, 745 rpm

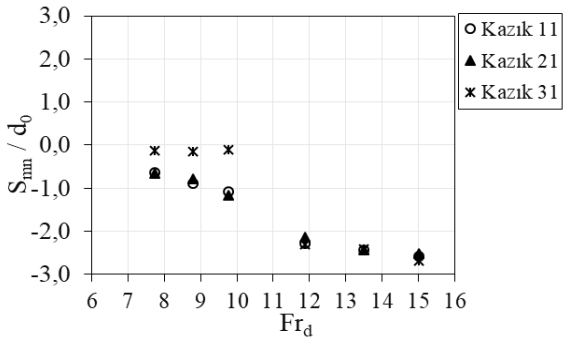
Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında) (devamı)



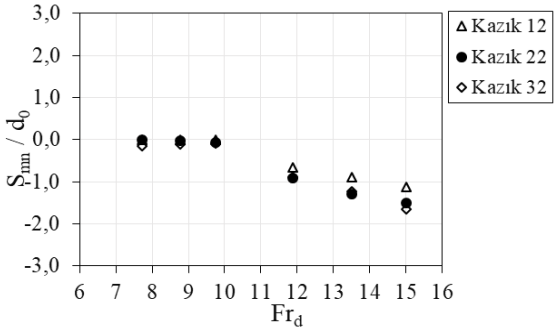
(d_0=7 cm, D_p= 10 cm, X_t = 3d_0, 590 rpm)

Şekil 5.2 Ek1.2 3 × 3 kare kazık grubu için her bir kazığın önündeki ve arkasındaki maksimum yerel oyulma derinliğinin zamanla gelişimi (pervane konumu kazıklar arasında) (devamı)

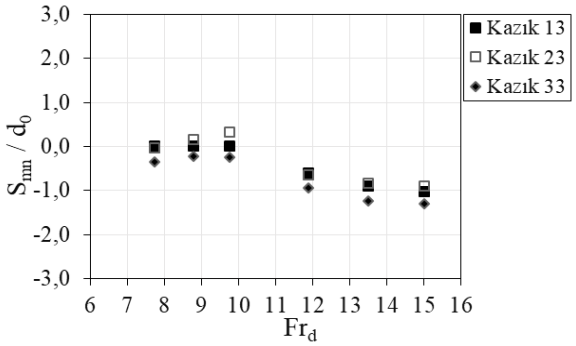
EK 2



(a) n=1

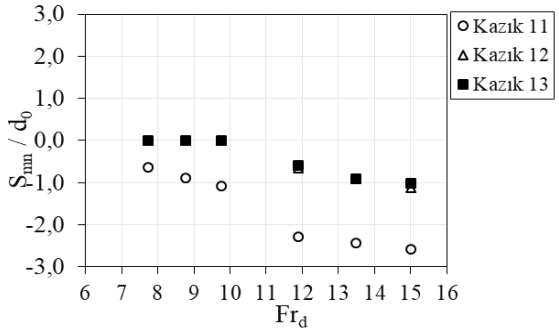


(b) n=2

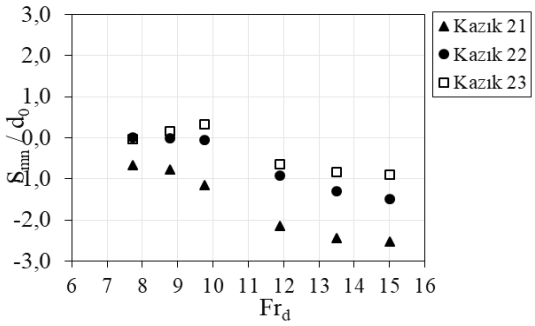


(c) n=3

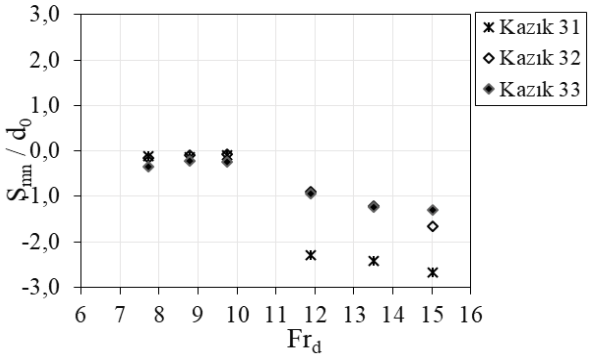
Şekil 5.3 Ek2.1 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=5 cm, $X_t=2d_0$, d_0/D_p=0.5-0.77, pervane kazık ekseninde),



(d) m=1

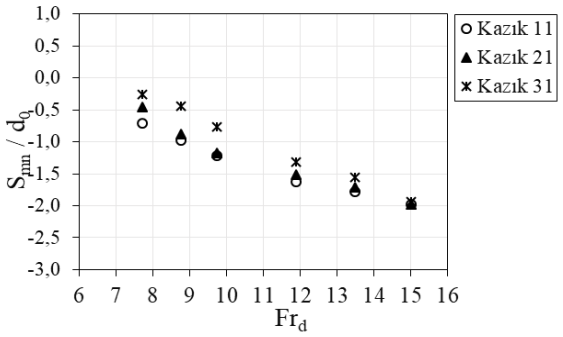


(e) m=2

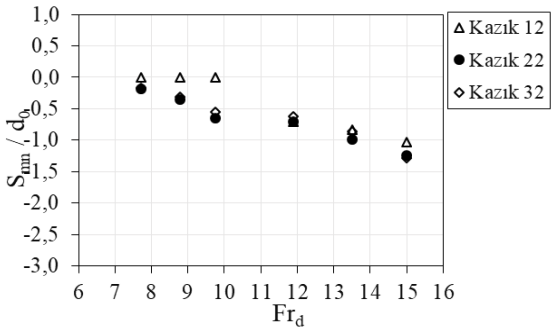


(f) m=3

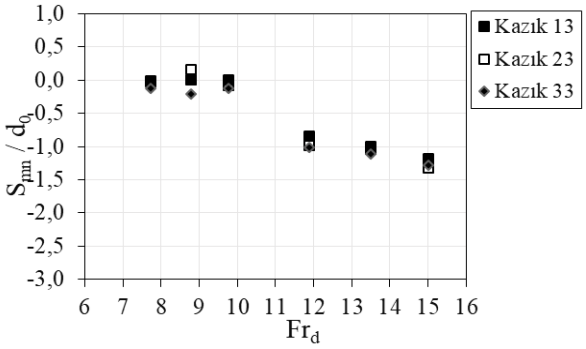
Şekil 5.3 Ek2.1 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=5 cm, $X_t=2d_0$, d_0/D_p=0.5-0.77, pervane kazık ekseninde) (devamı)



(a) n=1

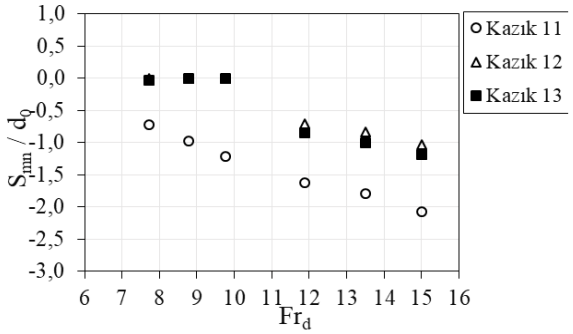


(b) n=2

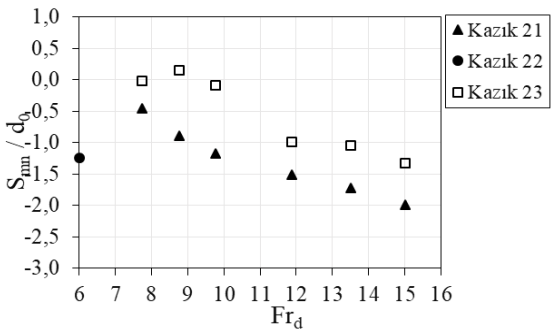


(c) n=3

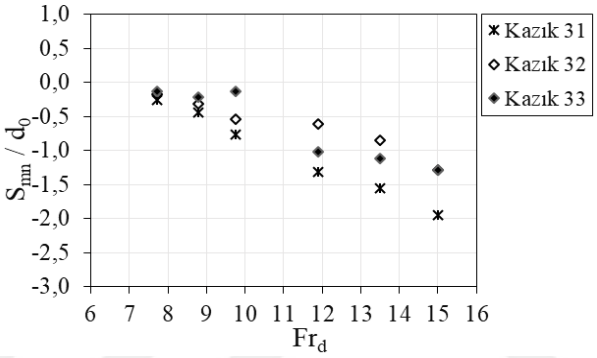
Şekil 5.4 Ek2.2 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde)



(d) m=1

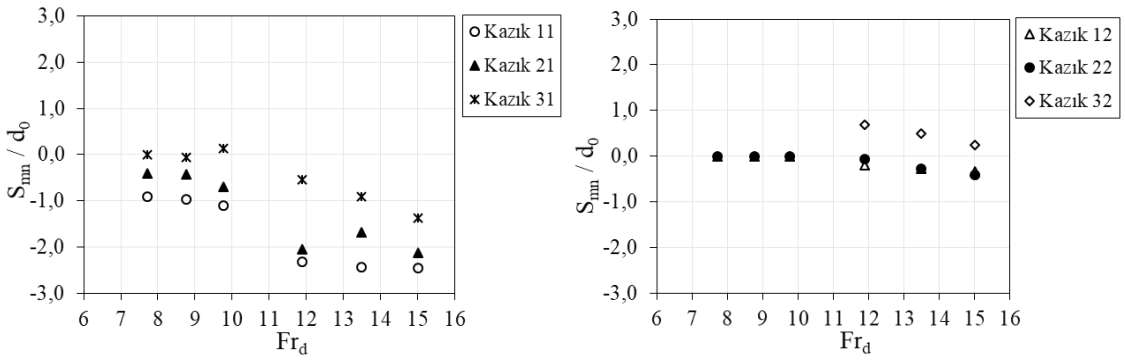


(e) m=2

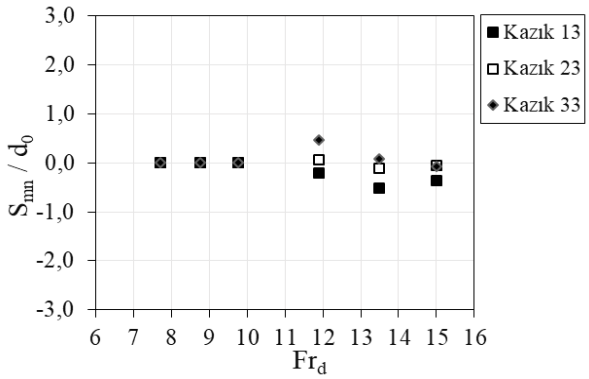


(f) m=3

Şekil 5.4 Ek2.2 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde) (devamı)

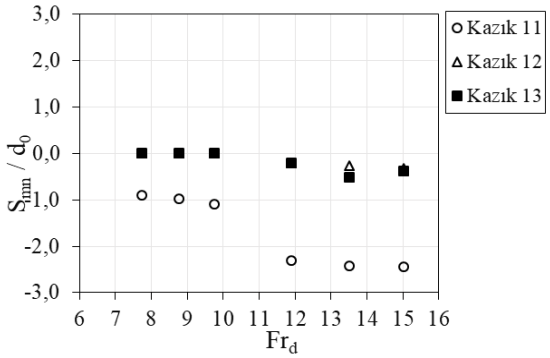


(a) n=1 (b) n=2

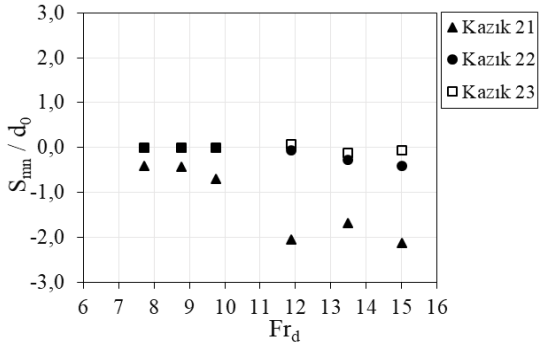


(c) n=3

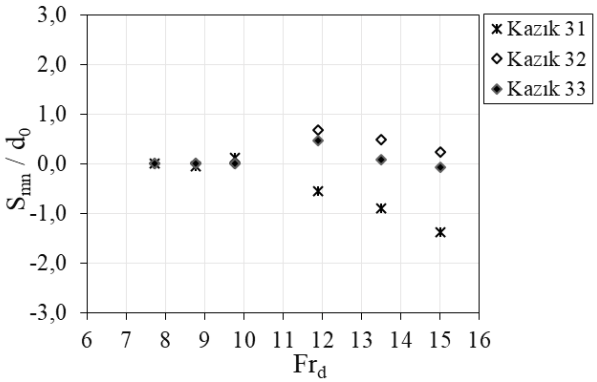
Şekil 5.5 Ek2.3 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, X_t=3d_0, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde)



(d) m=1

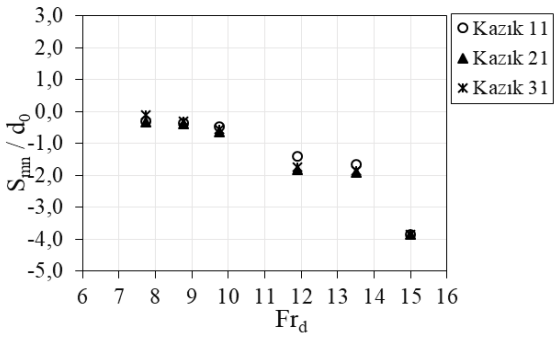


(e) m=2

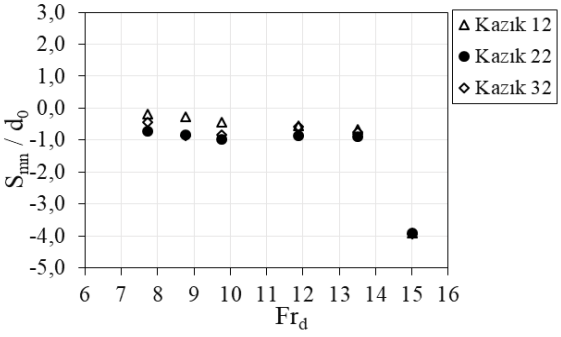


(f) m=3

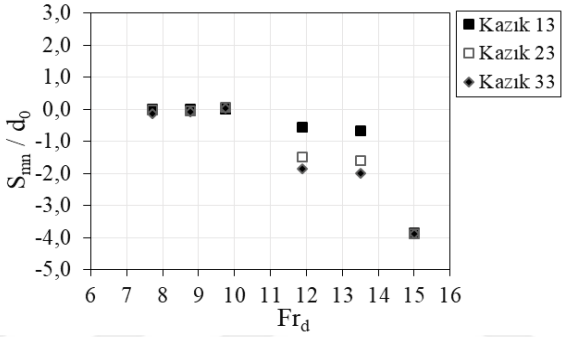
Şekil 5.5 Ek2.3 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=3d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık ekseninde) (devamı)



(a) n=1

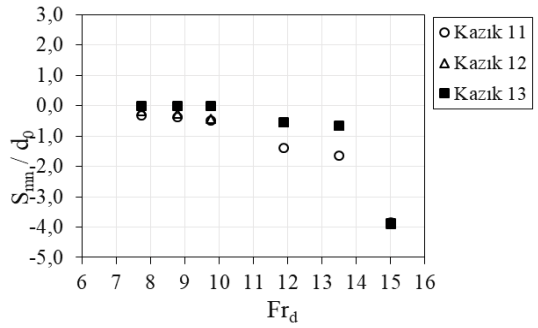


(b) n=2

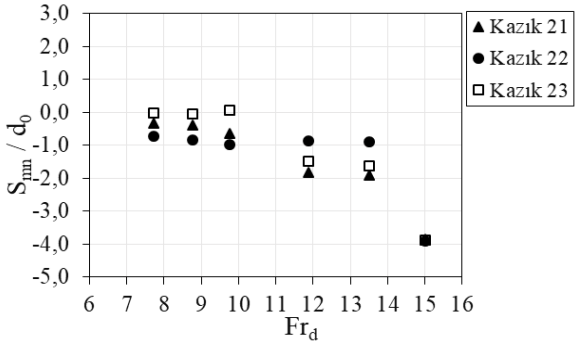


(c) n=3

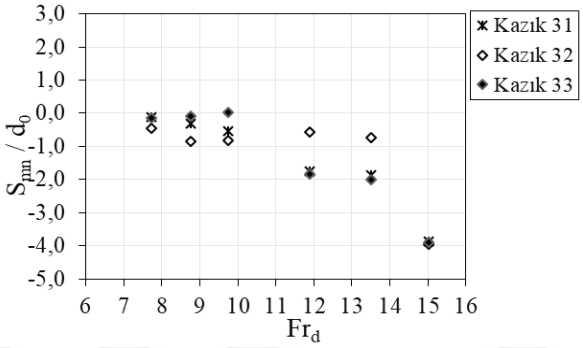
Şekil 5.6 Ek2.4 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında)



(d) m=1

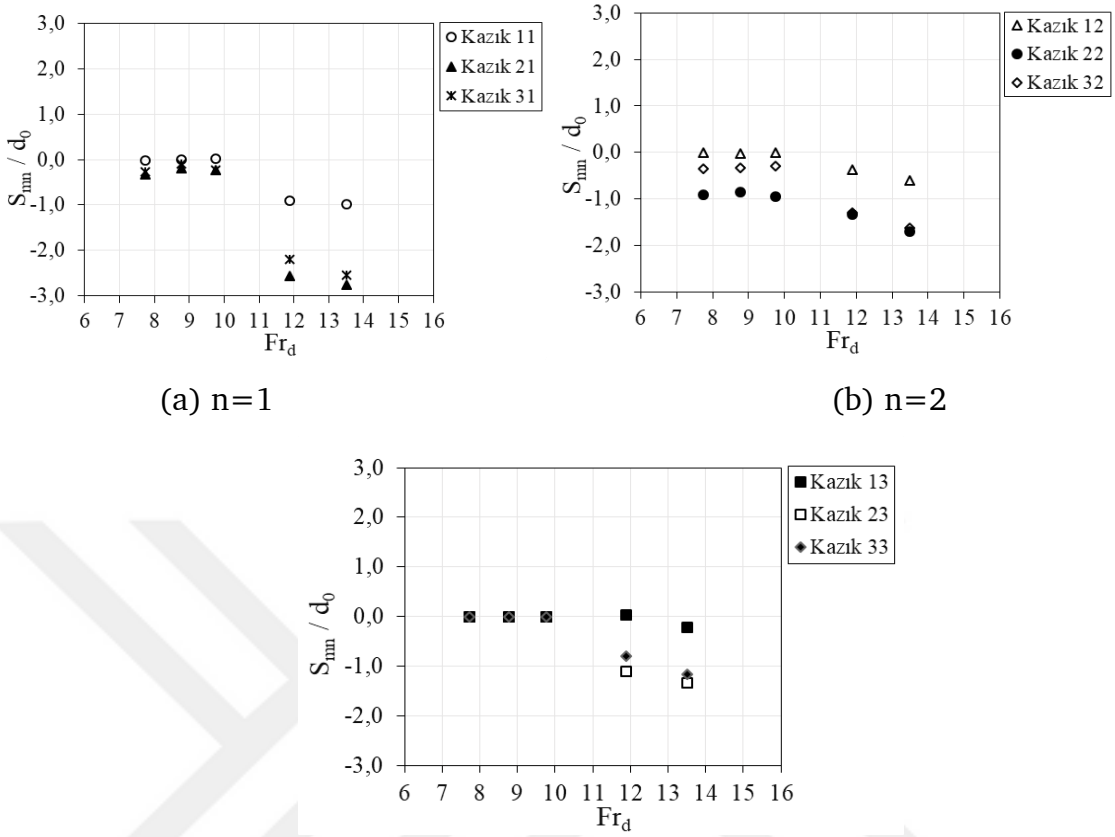


(e) m=2



(f) m=3

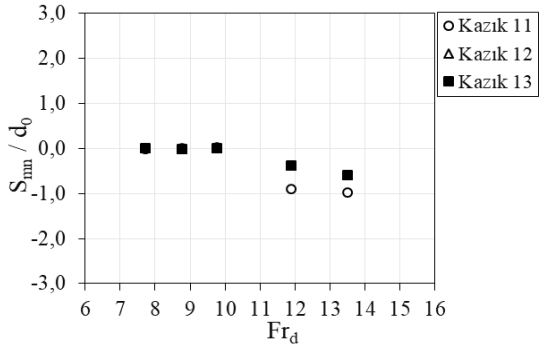
Şekil 5.6 Ek2.4 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında) (devamı)



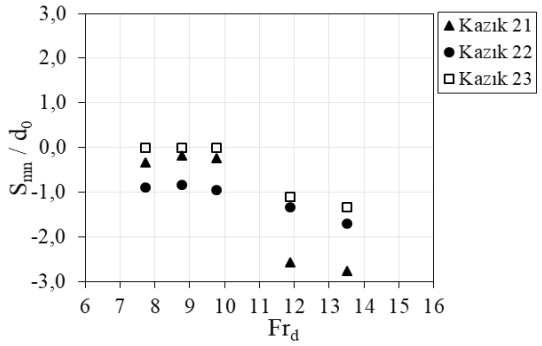
(a) n=1 (b) n=2

(c) n=3

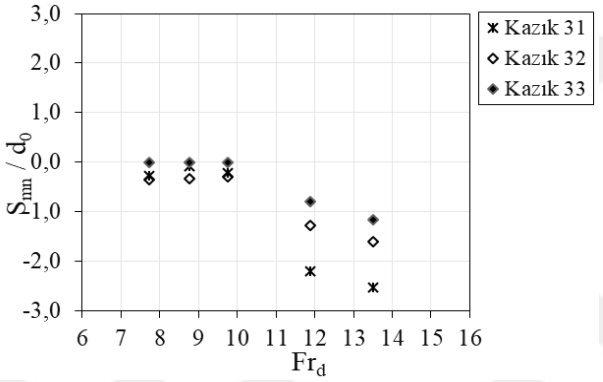
Şekil 5.7 Ek2.5 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=2d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında)



(d) m=1

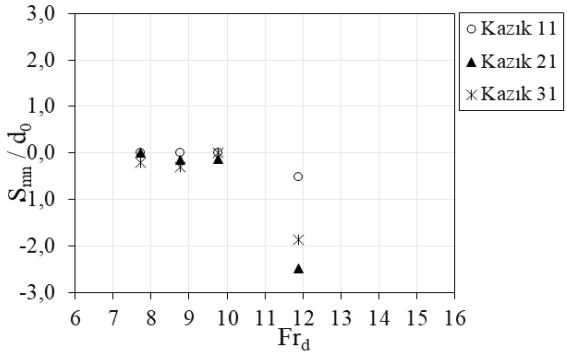


(e) m=2

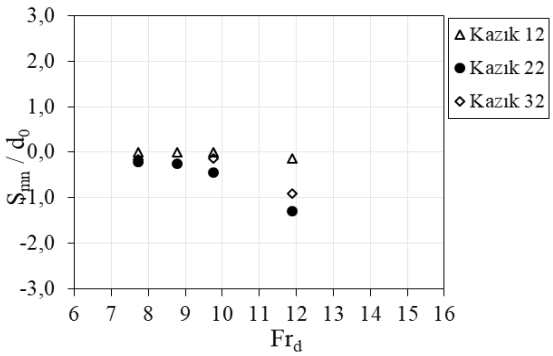


(f) m=3

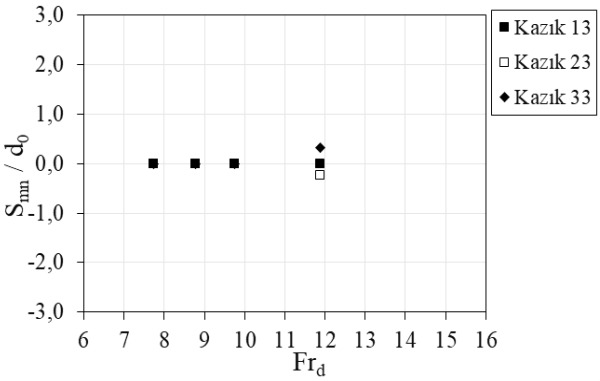
Şekil 5.7 Ek2.5 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=2d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında) (devamı)



(a) n=1

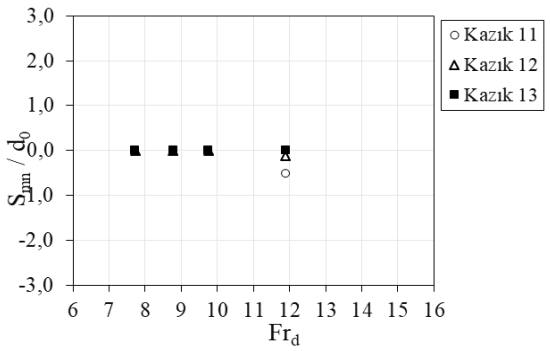


(b) n=2

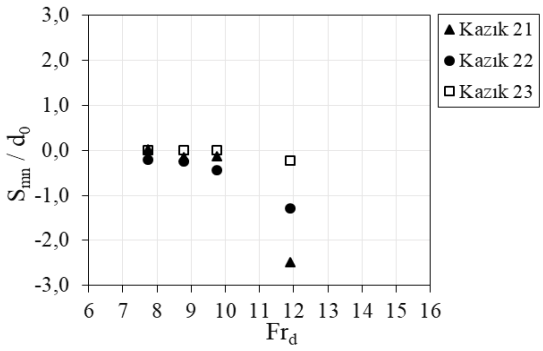


(c) n=3

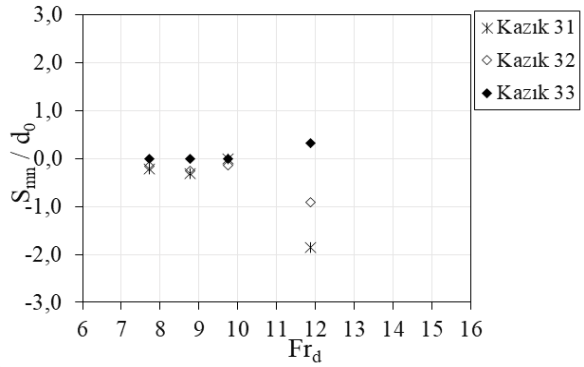
Şekil 5.8 Ek2.6 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=3d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında)



(d) m=1



(e) m=2



(f) m=3

Şekil 5.8 Ek2.6 Boyutsuz oyulma derinliğinin (S_{mn}/d_0) yoğunluk Froude sayısı (Fr_d) ile değişimi (d_0=7 cm, $X_t=3d_0$, d_0/D_p=0.7-1.08, pervane kazık arasında) (devamı)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

[1] Y. Yuksel,Y. Celikoglu, E. Sen, "Propeller jet flow scour around pile group supported piers," *Ocean Engineering,* vol. 239, 2021.