İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAZIK DESTEKLİ RIHTIMLAR ETRAFINDA DALGA KAYNAKLI OYULMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Ferhat BASTEM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAZIK DESTEKLİ RIHTIMLAR ETRAFINDA DALGA KAYNAKLI OYULMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Ferhat BASTEM
(501221502)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

WAVE-INDUCED SCOUR AROUND PILE SUPPORTED QUAYS

M.Sc. THESIS

Ahmet Ferhat BASTEM
(501221502)

Department of Civil Engineering

Hydraulics and Water Resources Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR

MONTH YEAR OF DEFENSE

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501221502 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet Ferhat BASTEM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KAZIK DESTEKLİ RIHTIMLAR ETRAFINDA DALGA KAYNAKLI OYULMA" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Dr. Öğr. Üyesi Erdal KESGİN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Dilek Eren AKYÜZ İstanbul Universitesi	.....
		.....

Teslim Tarihi : **30 Mayıs 2025**
Savunma Tarihi : **17 Temmuz 2025**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, akademik bilgi birikimimi derinleştirme yolunda attığım en önemli adımlardan biri olmuştur. Tez süreci boyunca bana destek olan, katkı sunan ve yol gösteren tüm kişi ve kurumlara teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Çalışmamın her aşamasında engin bilgi ve deneyimiyle yolumu aydınlatan, akademik rehberliğini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, görev yaptığım Erciyes Üniversitesi'nde Dekanlık görevini yürüten ve araştırma sürecim boyunca değerli desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER'e de şükranlarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimleriyle bana büyük katkı sağlayan Ayşegül ÜÇÜNCÜ'ye ve Arş. Gör. Sinan ERUÇAR'a destekleri için teşekkür ederim. Deneylerin gerçekleştirilmesinde gösterdikleri yardım ve iş birliği bu çalışmanın başarısı için büyük önem taşımaktadır.

Tüm katkı sağlayanlara en içten şükranlarımla...

Haziran 2025 Ahmet Ferhat BASTEM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **ix**
İÇİNDEKİLER ..... **xi**
KISALTMALAR ..... **xiii**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xxiv**
ÖZET ..... **xxv**
SUMMARY ..... **xxix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Araştırmanın Arka Planı 1
1.2 Problemin Tanımı 2
1.3 Çalışmanın Önemi ve Uygulama Alanları 2
1.4 Tezin Organizasyonu 3
2. LİTERATÜR TARAMASI **5**
3. TEZİN AMACI **25**
3.1 Deneysel Düzenek ve Ölçüm Teknikleri 25
3.1.1 Deney düzeneği ve uygulama genel tanıtımı 25
3.1.2 Kullanılan ölçüm sistemleri ve teknikleri 26
3.2 Dalga Parametrelerinin ve Kazık Dizilimlerinin Oyulma Süreci Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi 27
3.3 Araştırmanın Uygulama Alanları ve Katkıları 27
3.3.1 Endüstriyel katkılar 28
3.3.2 Akademik katkılar 28
4. YAKLAŞIM **31**
4.1 Deneysel Çalışmanın Genel Amacı 31
4.2 Deney Ortamında Genel Bakış 31
4.3 İncelenen Parametreler ve Değişkenler 31
4.4 İncelenen Problemler ve Hedeflenen Bulgular 32
4.5 Ölçüm ve Değerlendirme Yöntemleri 32
4.6 Parametrelerin Oyulma Üzerindeki Etkileri 33
5. DENEYLER **35**
5.1 Deney Düzeneği ve Dalga Kanalının Özellikleri 35
5.2 Deneysel Yapı ve Konfigürasyonlar 39
5.2.1 Kazık özellikleri 39
5.2.2 Kazık yerleşimi konfigürasyonları 39
5.2.3 Deney düzeneğinin dalga kanalına yerleştirilmesi 40
5.3 Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Yöntemleri 41
5.3.1 PIV (Particle Image Velocimetry) 42
5.3.1.1 PIV (Particle Image Velocimetry) nedir? 42
5.3.1.2 Deneylerde PIV (Particle Image Velocimetry) ölçümlerinin alınması 46
5.3.1.3 PIV (Particle Image Velocimetry) ile yapılan analiz aşamaları 47
5.3.2 Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging)(3D tarama) 50
5.3.2.1 Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging) nedir? 51
5.3.2.2 Deneylerde Lidar ölçümlerinin alınması 52
5.3.2.3 Lidar ile yapılan analiz aşamaları 53
5.3.3 Limnimetre 54
5.4 Deney Matrisi 55

5.5 Deneysel Bulgular 56
5.5.1 PIV ölçümleri ve hız vektörlerinin sonuçları 57
5.5.2 Lidar ölçümleri ile yüzey batimetrisi sonuçları 69
5.5.3 Deney sonuçları matrisi 75
6. DEĞERLENDİRMELER **77**
6.1 Deney Matrisinin Genel incelenmesi 77
6.2 Fazlara Bağlı PIV Ölçümlerinin Oyulma ile İlişkisi 77
6.3 Kazık Yerleşimi Konfigürasyonlarının Oyulma Üzerindeki Etkileri 79
6.4 Eksik ve Başarısız Deneyler 80
6.5 KC Sayıları ve Akım Rejimi Etkisi 80
6.6 Genel Tartışma ve Öneriler 82
6.6.1 Kazık yerleşiminin önemi 82
6.6.2 Gelecek çalışmalar için öneriler 83
7. TARTIŞMA VE BULGULAR **85**
KAYNAKLAR **87**
EKLER **89**
ÖZGEÇMİŞ **171**

KISALTMALAR

PIV : Particle Image Velocimetry
LİDAR : Laser Imaging Detection and Ranging
PVC : Polyvinyl Chloride
ADV : Acoustic Doppler Velocimeter
HVAC : Heating, Ventilating and Air Conditioning
RGB : Red-Green-Blue
SF : Scalar Fields
ADV : Acoustic Doppler Velocimeter

SEMBOLLER

T	**:** Dalga periyodu
θ	**:** Dalga geliş açısı
D	**:** Kazık çapı
B	**:** Kazıklar arası palplanş mesafesi
S	**:** Oyulma derinliği
KC	**:** Keulegan-Carpenter sayısı
t	**:** Zaman
d_{50}	**:** Malzeme tane boyu dağılımında ortanca (medyan) tane çapı.
ω	**:** Açısal Frekans
c	**:** Işık Hızı
d	**:** Nesne Mesafesi
H	**:** Dalga Yüksekliği
L	**:** Dalga Boyu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1: Malzeme Granülometrisi. **35**
Çizelge 5.2: KC hesaplama tablosu. **39**
Çizelge 5.3: Deney Matrisi. **57**
Çizelge 5.4: Deney Sonuçları Matrisi. **75**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kazık+Palplanş İnşa Edilen Limanlar. **1**

Şekil 2.1: (a) salınımlı akış KC=10 (Test 8, Tablo 2), (b) KC=20 (Test 14, Tablo 2) ve (c) sabit akım (Test 1, Tablo 2) için kazık etrafındaki yatak kayma gerilmesinin amplifikasyonu. Model sonuçları solda verilmiştir ve deneysel sonuçlar sağ tarafta verilmiştir. Baykal, Sumer, Fuhrman, Jacobsen, and Fredsoe, 2017. ..... **7**

Şekil 2.2: Yatak yüzeyi gelişimi. Yatağa yakın bozulmamış Keulegan-Carpenter sayısı K = 3 ve bozulmamış Shields sayısı ($Q \approx 0,2$) ile A.02–Q5 (dalga etkisi altında) geri dolma testleri. (Çift oklar dalga hareketini göstermektedir).Hartvig, Thomsen, Frigaard, and Andersen, 2011. ..... **8**

Şekil 2.3: Yang, Qi, Wang, and Li, 2020. ..... **10**

Şekil 2.4: Farklı δ/D değerleri için taban kesme gerilmesinin amplifikasyon konturları için model sonuçları. Hidrolik cilalı cidar. ($Re_D = 2 \times 10^5$). Roulund, Sumer, Fredsøe, and Michelsen, 2005. ..... **11**

Şekil 2.5: Deneysel kanal ve test bölümü düzenlemesi. Gong, Pan, Shengtao, Wu, Lv, Sun, Ding, and Liang, 2025. ..... **12**

Şekil 2.6: Kanaldaki B3-B5 testlerinden çekilen fotoğraflar. Gong, Pan, Shengtao, Wu, Lv, Sun, Ding, and Liang, 2025. ..... **13**

Şekil 2.7: KC'ye Karşı Çizilen Denge Oyulma Derinliği. B. Sumer and Fredsøe, 1998. ..... **14**

Şekil 2.8: Boyutsuz kazık aralığı G/D = 2 olan P3M3 etrafındaki yerel oyulmanın hesaplama sonuçları: (a) üç boyutlu akış alanı; (b) üç boyutlu oyulma çukuru modeli ve (c) son saniyede yatak yüksekliği kontürleri; ve (d) farklı kazıklar etrafındaki maksimum oyulma derinliğinin zaman içindeki gelişimi. Zhang, Zhou, and Wang, 2017. ..... **15**

Şekil 2.9: Boyutsuz kazık aralığı G/D = 4 olan P3M1 etrafındaki yerel oyulmanın hesaplama sonuçları: (a) üç boyutlu akış alanı; (b) üç boyutlu oyulma çukuru modeli ve (c) son saniyede yatak yüksekliği kontürleri; ve (d) farklı kazıklar etrafındaki maksimum oyulma derinliğinin zaman içindeki gelişimi. Zhang, Zhou, and Wang, 2017. ..... **15**

Şekil 2.10: (a) silindir (Re=46000 ve Fr=0.18 ve akış soldan sağa doğru), (b) kare (Re=30000 ve Fr=0.19 ve akış sağdan sola doğru) ve (c) elmas (Re=36000 ve Fr=0.13 ve akış aşağıdan yukarıya doğru) köprü ayağı geometrisine sahip deneysel kanal için dengede oyulmuş yatak. Khosronejad, Kang, and Sotiropoulos, 2012..... **16**
Şekil 2.11: Yataktan (a) z=0,4 cm; (b) z=5 cm; (c) z=25 cm Uzaklıkta Periyot Ortalamalı Hızların Vektör Diyagramı (Sabit Akış) B. M. Sumer and Fredsøe, 2001..... **17**
Şekil 2.12: Koruma taşları ve filtre tabakası uygulanmış tabana monte kazıkların tanım krokisi (ölçekli). Petersen, Mutlu Sumer, Fredsøe, Raaijmakers, and Schouten, 2015..... **18**
Şekil 2.13: Taban batimetreleri (Abdi, Doğan, Kaya, and Ozgenc Aksoy, 2020). **19**
Şekil 2.14: EPro grafiği sonuçları (Margheritini, Frigaard, Martinelli, and Lamberti, 2006)..... **21**
Şekil 2.15: Shahhosseini, Yue, Xu, Zhang, and Yu, 2025. ..... **22**
Şekil 3.1: Dalga Kanalı (Wave Flume)..... **26**
Şekil 5.1: Granülometri grafiği. **36**
Şekil 5.2: Deneylerde kullanılan dalga kanalının profili. **37**
Şekil 5.3: 2 Farklı kazık yerleşimi için kum yatağı plan görünümü. **38**
Şekil 5.4: Kazık özellikleri. **40**
Şekil 5.5: İlk kazık birleşimi özellikleri..... **41**
Şekil 5.6: İkinci kazık birleşimi özellikleri. **42**
Şekil 5.7: Deneyler öncesi hazırlık süreci aşamaları. **43**
Şekil 5.8: PIV sistemi..... **45**
Şekil 5.9: Ölçümlerde kullanılan ek boru. **47**
Şekil 5.10: Lidar çalışma prensibi. **51**
Şekil 5.11: Lidar deney öncesi-sonrası taramaları. **53**
Şekil 5.12: Lidar renk skalası örneği. **55**
Şekil 5.13: Limnimetre ölçümleri..... **56**
Şekil 5.14: Konf.1' de $\theta = 30^\circ$ ve T= 1.25'de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No=8)..... **58**
Şekil 5.15: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0^\circ - 90^\circ$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **60**
Şekil 5.16: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **61**
Şekil 5.17: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0^\circ - 90^\circ$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **62**
Şekil 5.18: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **63**
Şekil 5.19: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0^\circ - 90^\circ$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **64**
Şekil 5.20: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **65**

Şekil 5.21: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **66**
Şekil 5.22: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **67**
Şekil 5.23: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **68**
Şekil 5.24: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **69**
Şekil 5.25: Deney no: 1-2-3-4 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **70**
Şekil 5.26: Deney no: 1 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . . **71**
Şekil 5.27: Deney no: 2 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . . **72**
Şekil 5.28: Deney no: 3 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . . **73**
Şekil 5.29: Deney no: 4 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . . **74**
Şekil 6.1: Deney sonuçlarının S/D-KC grafikleri. **81**
Şekil 6.2: S/D-KC Tüm konfigürasyonlar. **82**
Şekil 1: Konf.1' de $\theta = 60°$ ve T= 1.25' de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No= 12). **90**
Şekil 2: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **92**
Şekil 3: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **93**
Şekil 4: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **94**
Şekil 5: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **95**
Şekil 6: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **96**
Şekil 7: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **97**
Şekil 8: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **98**
Şekil 9: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **99**
Şekil 10: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **100**
Şekil 11: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **101**
Şekil 12: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **102**
Şekil 13: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **103**
Şekil 14: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **104**

Şekil 15: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **105**
Şekil 16: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-8'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **106**
Şekil 17: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-8'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **107**
Şekil 18: Konf.2' de $\theta = 30°$ ve T= 1.25' de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No= 24). **108**
Şekil 19: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **109**
Şekil 20: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **110**
Şekil 21: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **111**
Şekil 22: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **112**
Şekil 23: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **113**
Şekil 24: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **114**
Şekil 25: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **115**
Şekil 26: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **116**
Şekil 27: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **117**
Şekil 28: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **118**
Şekil 29: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **119**
Şekil 30: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **120**
Şekil 31: Konf.2' de $\theta = 60°$ ve T= 1.25' de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No= 28). **121**
Şekil 32: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **122**
Şekil 33: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **123**
Şekil 34: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **124**
Şekil 35: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°− ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **125**
Şekil 36: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° − 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **126**

Şekil 37: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= $225° -$ ve $270°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **127**
Şekil 38: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve $180°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **128**
Şekil 39: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $225° -$ ve $270°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **129**
Şekil 40: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve $180°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **130**
Şekil 41: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= $225° -$ ve $270°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **131**
Şekil 42: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve $180°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **132**
Şekil 43: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= $225° -$ ve $270°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **133**
Şekil 44: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve $180°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. **134**
Şekil 45: Konf. 2'de $\theta = 60°$ ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $225° -$ ve $270°$ 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri. . **135**
Şekil 46: Deney no: 5-6-7-8 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **136**
Şekil 47: Deney no: 5 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **137**
Şekil 48: Deney no: 6 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **138**
Şekil 49: Deney no: 7 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **139**
Şekil 50: Deney no: 8 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **140**
Şekil 51: Deney no: 9-10-11-12 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **141**
Şekil 52: Deney no: 9 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **142**
Şekil 53: Deney no: 10 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **143**
Şekil 54: Deney no: 11 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **144**
Şekil 55: Deney no: 12 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **145**
Şekil 56: Deney no: 13-14-15-16 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **146**
Şekil 57: Deney no: 13 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **147**
Şekil 58: Deney no: 14 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **148**
Şekil 59: Deney no: 15 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **149**
Şekil 60: Deney no: 16 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **150**
Şekil 61: Deney no: 17-18-19-20 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **151**
Şekil 62: Deney no: 17 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **152**
Şekil 63: Deney no: 18 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **153**
Şekil 64: Deney no: 19 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **154**
Şekil 65: Deney no: 20 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **155**
Şekil 66: Deney no: 21-22-23-24 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **156**

Şekil 67: Deney no: 21 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **157**
Şekil 68: Deney no: 22 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **158**
Şekil 69: Deney no: 23 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **159**
Şekil 70: Deney no: 24 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **160**
Şekil 71: Deney no: 25-26-27-28 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **161**
Şekil 72: Deney no: 25 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **162**
Şekil 73: Deney no: 26 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **163**
Şekil 74: Deney no: 27 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **164**
Şekil 75: Deney no: 28 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **165**
Şekil 76: Deney no: 29-30-31-32 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. **166**
Şekil 77: Deney no: 31 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **167**
Şekil 78: Deney no: 32 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları. . **168**

KAZIK DESTEKLİ RIHTIMLAR ETRAFINDA DALGA KAYNAKLI OYULMA

ÖZET

Deniz yapılarının etrafında oluşan oyulma hem yapısal hem de çevresel açıdan kritik bir rol oynamaktadır. Kazık ve palplanş destekli rıhtım yapılarına olan talebin artmasıyla birlikte, bu yapıların tasarımlarının titizlikle yapılması büyük önem kazanmıştır. Ekonomik bir tahkimat yapısının inşa edilebilmesi için, yapının bulunduğu kıyı ortamında oluşabilecek olumsuz koşulların önceden tahmin edilmesi ve buna göre tasarımın yapılması kritik bir gerekliliktir.

Kıyı ortamına inşa edilecek bir yapı, bulunduğu bölgedeki akım koşullarını önemli ölçüde değiştirebilir. Bu değişimin başlıca etkilerinden biri, akış alanındaki bozulmalar nedeniyle meydana gelen sediment taşınımıdır. Sediment taşınımı, yapının stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Ayrıca, kıyı yapılarının etrafında hem akıntı hem de dalga kaynaklı oyulma mekanizmaları gözlemlenmektedir. Ancak, kıyı ortamında dalga etkisiyle oluşan oyulma genellikle daha baskın olmaktadır. Akıntı ve dalga kaynaklı oyulma mekanizmaları birbirinden farklı dinamiklere sahip olduğundan, bu iki sürecin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir.

Yapı stabilitesini etkileyebilecek olan ve önceden tahmin edilemeyen oyulma gibi olumsuz etkiler, yapısal hasarlara ve dolayısıyla yüksek onarım maliyetlerine yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra, oluşabilecek can kayıpları da yapı etrafındaki bu olumsuz etkilerin önceden öngörülmesinin ne denli hayati olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, bir dalga kanalına yerleştirilen çoklu kazıkların etrafında oluşan oyulmayı incelemek için yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, farklı dalga uzunlukları, dalga periyotları ve gelen dalga geliş açıları gibi hidrodinamik parametrelerin yapının çevresinde oluşturduğu oyulma etkilerini deneysel olarak belirlemektedir. Deneylerde kazıklar, 0, 30, 60 ve 90'lik derecelerde hizalanarak farklı dalga yaklaşma açılarının oyulma derinliği ve alanı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Elde edilen verilere dayanarak, dalga-kazık ekileşimi sonucunda oluşan akımların, oyulma mekanizması, çevre ve yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu sayede hem yapının stabilitesi hem de çevre koşulları üzerindeki rolü ortaya konmuştur. Bu kapsamda rijit bir kanal tabanı üzerinde kum havuzu deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan, 26 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 60 cm derinliğinde periyodik dalga üreten bir kanal kullanılmıştır. Kanal tabanı düz bir geometriye sahip olup betondan yapılmıştır.

Deneyler sırasında su derinliği sabit olarak kanal tabanından yukarı doğru 40 cm'ye ayarlanmıştır. Bu su derinliği kum havuzu üzerinde 34 cm olarak belirlenmiştir. Dalgalar flap tipi bir palet kullanılarak oluşturulmuştur. Deneylerde her biri 12,5 cm çapında ve 60 cm uzunluğunda üç adet PVC (Poli Vinil Clorür) boru kullanılmıştır. Bu borular kanal tabanına dik olarak monte edilmiştir. Kazıklar birbirlerine pleksiglas malzeme ile bağlanmıştır. Kazıklar arası bağlantı kısımlarından oluşabilecek sızıntılar önlenmiştir. Ayrıca kazıklar ile kanal tabanı arası da sızdırmaz hale getirilmiştir. Oyulma derinlikleri ve oyulma profilleri incelenmiştir. Kazıklar 2 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 6 cm yüksekliğinde kum havuzuna yerleştirilmiştir. Deneylerde $D_{50} = 0.32$ mm olan homojen, ince kum kullanılmıştır.

Kazıklar arası mesafe 6.25 cm ve 12.5 cm olan iki farklı yapı konfigürasyonunda oyulma derinlikleri incelenmiştir. İlk olarak kazıklar arası mesafenin, kazık çaplarının yarısı olan 6.25 cm alınarak 4 farklı periyot ve 4 farklı dalga geliş açısı deneyleri yapılmıştır. Kazıklar arası mesafe, kazık çapı kadar olan 12.5 cm olacak şekilde yapı değiştirilmiş ve önceki deneylerde kullanılan periyot ve dalga geliş açılarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Her iki yapıda da 0, 30, 60 ve 90 derecelik dalga geliş açılarında, yapı uygun şekilde döndürülerek deneyler yapılmış ve dört farklı dalga periyodunda oyulma incelenmiştir. Toplamda, dalga yaklaşma açısı ve yapı şekline bağlı olarak 32 farklı senaryoda oyulma derinlikleri analiz edilmiştir. Ancak dalga kanalı genişliğinin yeterli olmaması ve yükselen frekans dolayısıyla ikinci kazık birleşiminin T=0.707 ve T=0.909 deneyleri dalga yüksekliklerinin çok artmasından dolayı gerçekleştirilememiştir. Deneyler sonrası kanal içerisindeki suyun tahliyesinin oluşan yatak profilini etkilenmemesi için kum havuzunun altına yerleştirilen ek drenaj borusu da kullanılarak kanaldaki su yavaş ve kontrollü olarak boşaltılmıştır. Deneylerin her biri 3.5 saat yapılmıştır.

Deney düzenekleri ve sonuçları, deneylerden önce ve sonra yüksek çözünürlüklü Lidar tarayıcı ile taranarak üç boyutlu olarak yüzey değişimleri analiz edilmiştir. Bu yöntem sayesinde deneylerden sonra oluşan oyulma derinlikleri ve alanları hem görsel hem de sayısal olarak ortaya konmuştur.

Deneysel bulgular, dalga periyodu arttıkça oyulma derinliğinde belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. Özellikle yüksek seviyedeki periyotlarda (T=1.25 ve T=1.11), KC (Keulegan Carpenter) sayısının 1'in üzerine çıkmasından dolayı, deneylerde oyulma derinlikleri ve alanları gözle görülür şekilde artış göstermiştir. Diğer bir parametre olan dalga yaklaşım açısı değişiminin oyulma derinlikleri üzerinde doğrudan bir bağlantı kurulamamıştır. Kazıklar arası birleşim konfigürasyonları açısından düşünüldüğünde ise kazıklar arası mesafenin artması akım alanı önünde oluşan engelin büyümesinden dolayı oyulma alanını ve derinliğini genişletmiştir. Ayrıca yapı etrafında oluşan akım alanlarını analiz edebilmek içim 4 deneyde PİV (Particle Image Velocimetry) cihazıyla hız alanı ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler ile yapı etrafında oluşan hız vektörleri ve hız büyüklükleri analiz edilmiştir. Bu sayede Lidar ile yapılan üç boyutlu tarama sonuçları doğrultusunda gözlemlenen oyulma alanları ve derinlikleri PİV ile detaylı olarak incelenmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde düşük periyotlarda yapılan deneylerde, oyulma sınırlı boyutlarda kalmıştır. Deney sonuçlarına göre maksimum oyulma ikinci yapı konfigürasyonunda dalga yaklaşım açısının 0 derece olduğu yapıda T=0.707 sn'de

ölçülmüştür. Maksimum oyulma ise ikinci yapı konfigürasyonunda dalga yaklaşım açısının 60 derece olduğu yapıda T=1.25 sn'de ölçülmüştür.

Mevcut literatürde, özellikle birleşik kazıklı (kazık+palplanş destekli) yapıların dalga etkisi altındaki oyulma mekanizmaları üzerine yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan çalışmalarda genellikle, tekil kazıklar veya düzenli kazık gruplarının akım etkileri altındaki oyulma süreçlerine odaklanmakta, dalga etkisi altında oluşan oyulma süreçleri görece daha az irdelenmiştir. Ayrıca, farklı kazık geometrilerinin, kazıklar arası mesafenin ve yapı konfigürasyonlarının, dalga geliş açısı gibi karmaşık parametrelerle birlikte ele alındığı deneysel çalışmalar neredeyse yok denecek kadar azdır. Bu yönüyle yapılan bu deneysel çalışma, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmakta ve mühendislik projeleri için özgün veriler sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, özellikle kazıklı rıhtım yapılarının güvenli ve ekonomik şekilde tasarlanmasına yönelik mühendislik yaklaşımlarının geliştirilmesine zemin oluşturmaktadır. Ayrıca, dalga kaynaklı oyulma mekanizmalarının gelecekte farklı yapı geometrileri ve zemin koşulları altında da araştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, deniz yapılarında dalgalardan kaynaklanabilecek olumsuz koşulların anlaşılması ve analiz edilmesi için temel bir yapı taşı görevi görmektedir.

Deneyler, dalga periyotlarının ve geliş açılarının yapı üzerindeki kritik önemini ortaya koymuştur. Bu durum, gelecekteki çalışmalarda farklı yapılar için ve çeşitli dalga koşulları altında tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Oyulma, Kıyı yapıları, Kazık destekli rıhtımlar, Cidara tutturulmuş düşey kazıklar

WAVE-INDUCED SCOUR AROUND PILE SUPPORTED QUAYS

SUMMARY

Scour around marine structures plays a critical role both structurally and environmentally. With the increasing demand for pile and sheet pile supported quay wall structures, meticulous design of these structures has become of great importance. For the construction of an economical retaining structure, it is essential to predict adverse conditions that may arise in the coastal environment beforehand and to design accordingly.

A structure constructed in a coastal environment can significantly alter the local flow conditions. One of the main effects of this alteration is sediment transport caused by disturbances in the flow field. Sediment transport can adversely affect the stability of the structure.

Moreover, scour mechanisms around coastal structures are observed to be caused by both currents and waves. However, wave-induced scour in coastal environments is generally more dominant. Since current- and wave-induced scour mechanisms have different dynamics, these two processes need to be investigated separately.

Unpredicted adverse effects such as scour, which can affect the structural stability, may lead to structural damage and consequently high repair costs. Additionally, potential loss of life clearly demonstrates how vital it is to foresee these adverse effects around structures in advance.

This study was conducted to investigate scour occurring around multiple piles installed in a wave flume. The aim of this study is to experimentally determine the scour effects caused by hydrodynamic parameters such as different wave lengths, wave periods, and incoming wave approach angles around the structure. In the experiments, the piles were aligned at angles of 0°, 30°, 60°, and 90°, and the effects of different wave approach angles on scour depth and area were also examined. Based on the obtained data, the currents resulting from wave-pile interaction, the scour mechanism, and their effects on the environment and the structure were investigated. Thus, the roles on both the structure's stability and environmental conditions were revealed. In this context, sediment basin experiments were carried out on a rigid channel bed.

In the study, a wave channel with a length of 26 m, a width of 1 m, and a depth of 60 cm, located in the Hydraulic Laboratory of Istanbul Technical University, was used. The channel bed had a flat geometry and was made of concrete. During the experiments, the water depth was kept constant at 40 cm above the channel bed. This water depth corresponded to 34 cm above the sediment bed. Waves were generated using a flap-type paddle. Three PVC (Polyvinyl Chloride) pipes with a diameter of 12.5 cm and a length of 60 cm were used in the experiments. These pipes were

mounted vertically on the channel bed. The piles were connected with plexiglass material. Possible leaks at the connections between piles were prevented. Also, the interface between the piles and the channel bed was sealed. Scour depths and scour profiles were examined. The piles were placed in a sediment basin with dimensions of 2 m length, 1 m width, and 6 cm height. Homogeneous fine sand with a median grain size (D_{50}) of 0.32 mm was used.

Scour depths were investigated in two different structural configurations with pile spacings of 6.25 cm and 12.5 cm. First, the pile spacing was set to half the pile diameter, 6.25 cm, and experiments were conducted with four different wave periods and four different wave approach angles. Then, the spacing was increased to the full pile diameter, 12.5 cm, and experiments were performed with the same wave periods and wave approach angles used previously. In both structures, experiments were conducted by rotating the structure appropriately at wave approach angles of 0°, 30°, 60°, and 90°, and scour was examined at four different wave periods. In total, scour depths were analyzed in 32 different scenarios depending on wave approach angle and structural configuration. However, due to the insufficient channel width and the increased wave frequency, the second pile configuration experiments at $T = 0.707$ s and $T = 0.909$ s could not be conducted due to excessive wave heights. After the experiments, to prevent the water discharge in the channel from affecting the formed bed profile, a drainage pipe placed under the sediment basin was used to empty the water slowly and controlled. Each experiment lasted 3.5 hours.

Experimental setups and results were scanned before and after the experiments with a high-resolution Lidar scanner to analyze surface changes in three dimensions. This method allowed the scour depths and areas formed after the experiments to be presented both visually and numerically.

Experimental findings showed a significant increase in scour depth with increasing wave period. Especially at higher periods ($T = 1.25$ and $T = 1.11$ s), since the Keulegan-Carpenter (KC) number exceeded 1, scour depths and areas increased noticeably. No direct correlation was found between wave approach angle changes and scour depths. Considering pile spacing configurations, increasing the spacing widened the scour area and depth due to the larger obstruction in the flow field ahead of the structure. Additionally, to analyze the flow fields around the structure, velocity field measurements were performed in four experiments using Particle Image Velocimetry (PIV). These measurements allowed analysis of velocity vectors and magnitudes around the structure. Consequently, the scour areas and depths observed through 3D Lidar scans were investigated in detail with PIV.

Examining the experimental results, scour remained limited in size in experiments with low wave periods. According to the results, the maximum scour was measured in the second structural configuration at a wave approach angle of 0° and period $T = 0.707$ s. The maximum scour was also observed in the second configuration at a wave approach angle of 60° and period $T = 1.25$ s.

In the current literature, studies on scour mechanisms under wave effects on combined pile-supported (pile + sheet pile) structures are very limited. Most studies focus on scour processes around single piles or regular pile groups under current effects, while scour under wave effects has been less explored. Furthermore, experimental studies

considering complex parameters such as different pile geometries, pile spacings, structural configurations, and wave approach angles are almost nonexistent. In this respect, the present experimental study fills an important gap in the literature and provides unique data for engineering projects. The obtained results especially lay the groundwork for the development of engineering approaches aimed at safe and economical design of pile-supported quay wall structures. Additionally, the study reveals the need to investigate wave-induced scour mechanisms under different structural geometries and soil conditions in future work. This study serves as a fundamental building block for understanding and analyzing adverse conditions caused by waves around marine structures.

The experiments revealed the critical importance of wave periods and approach angles on the structure. This finding will contribute to the development of design methods for different structures under various wave conditions in future studies. Further research is needed in this area.

Keywords: Scour, Coastal structures, Pile supported wharfs, Wall attached vertical piles

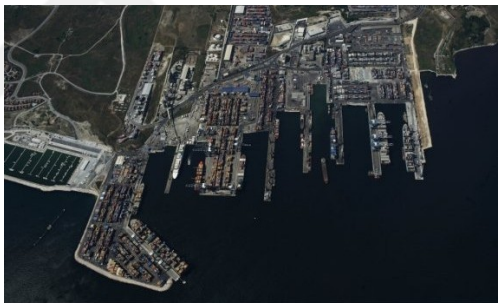
1. GİRİŞ

1.1 Araştırmanın Arka Planı

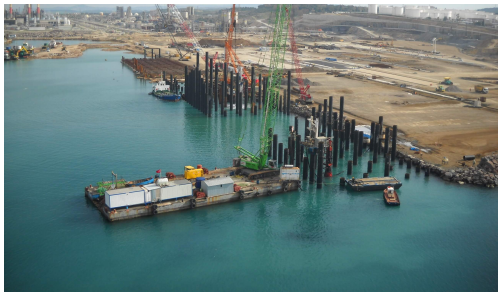
Son yıllarda denizi doldurarak inşa edilen liman projelerinde kullanılan yapı sistemleri (özellikle kazık+palplanş yöntemiyle yapılan limanlar) artış göstermektedir. Örneğin Asyaport, Ambarlı, Aliağa, Derince Limanı ve Mersin Limanı gibi projelerde bu yapı sistemleri kullanılmıştır. Bu yapılar zaman içerisinde dalga ve akıntı kaynaklı oyulma (scour) ve geri dolma (backfilling) gibi sediman taşınımı hareketlerine maruz kalmaktadır. Bu hareketler limanların yapısal güvenliğini ve tasarım kriterlerini doğrudan etkilemektedir.



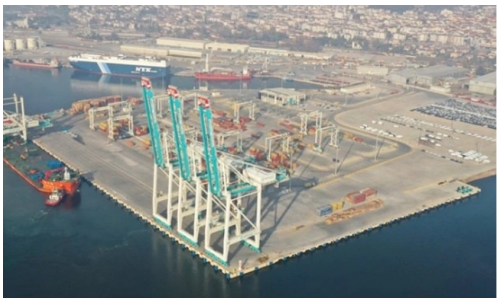
Asyaport Limanı.



Ambarlı Limanı.



Aliağa Limanı.



Derince Limanı.

Şekil 1.1: Kazık+Palplanş İnşa Edilen Limanlar.

Liman yapımı ve diğer deniz dolgu yapı projelerinde sektör hızla gelişmekte olup artan yatırım ve teknolojik imkânlar sayesinde projelerin ölçekleri artmaktadır. Küresel pazarda bu limanlar, lojistik ve ticaret açısından merkezi konumunu gün

geçtikçe güçlendirmektedir. Eş zamanlı olarak çevresel riskler de önemli bir konu haline gelmektedir. Bu riskleri kısaca sediment erozyonu, deniz ekosistemlerinin olumsuz etkilenmesi, su kalitesinin bozulması ve kıyıların koruma sorunları olarak özetleyebiliriz. Bu riskler liman yapılarının sürdürülebilirliğini ve güvenliğini tehdit etmektedir. Bu etkileri azaltmak ve yapı güvenliğini sağlamak amacıyla, hem kamu hem de özel sektör önemli yatırımlarla destek vermektedir. Dolayısıyla bu gibi yapıların uygulaması ve projelendirilmesinde titiz mühendislik uygulamaları ve koruyucu önlemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

1.2 Problemin Tanımı

Kazık+palplanş destekli olarak yapılan dolgu limanlarda özellikle dalga etkileri altında meydana gelen oyulma (scour) ve geri dolma (backfilling) süreçleri; yapının güvenli kullanılabilecek ömrünü, stabilitesini ve yapıya ilişkin bakım maliyetleri açısından kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmada 3 adet geniş kazık (D=12.5cm) kullanılmıştır. Deneylerde bu kazıklar arası palplanşlar, 2 farklı kazık konfigürasyonu kullanılarak birleştirilmiştir. İlki kazıklar arası mesafenin (B) kazık çapının (D) yarısı kadar olacak şekilde ve ikinci birleşim ise kazıklar arası mesafenin kazık çapına eşit olduğu birleşimdir. Ayrıca bu iki farklı yapı konfigrasyonunda da 4 farklı dalga periyodu ve dalga geliş açısı kullanılmıştır. Bu parametrelerin (kazıklar arası birleşim mesafesi, dalga periyodu ve dalga geliş açısı) oyulma ve geri dolma süreçleri üzerindeki etkileri ile ortaya çıkan problemler detaylı olarak incelenmiştir.

1.3 Çalışmanın Önemi ve Uygulama Alanları

Çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar, dolgu limanlarda kullanılan kazık+palplanş tahkimat sistemlerinin tasarlanmasında ve bakım süreçlerine ilişkin yeni ampirik veriler sunarak, yapıların güvenliğinin sağlanması ve çevresel risklerin minimize edilebilmesi açısından önemli katkılar sunacaktır. Bu açıdan, elde edilen veriler, liman tasarımında kullanılacak tasarım kriterlerinin belirlenmesinde, koruma önlemlerinin optimize edilmesi ve gelecekte yapılacak liman sahalarında rehberlik etmesi açısından önemli bir rol oynayacaktır. Bu çalışma dolgu limanlarda kullanılan kazık+palplanş sistemlerinin dalga etkileri altında maruz kaldığı oyulma ve geri

dolma süreçlerini detaylı olarak ele aldığı için hem akademik hem de endüstriyel alanda önemli katkılar sunmaktadır. Endüstriyel açıdan, yapıların bakım masraflarının minimize edilmesi, yapı güvenliğinin sağlanması ve yapı ömürlerinin uzatılmasında kullanılacak tasarım kriterlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca çevresel etkilerinin de (örneğin sediment taşınımı ve erozyonu, kıyı ekosisteminin bozulması) minimal boyutlara çekilmesinde rehber niteliğinde bir rol oynamaktadır. Akademik anlamda ise, mevcut literatürde kazk+palplanş sistemlerinin kullanıldığı büyük ölçekli dolgu liman projelerindeki oyulma süreçlerine ilişkin yetersiz çalışma bulunması nedeniyle, bu çalışma konuya dair deneysel yaklaşımların sayısal sonuçlarla bütünleştirerek, yeni modelleme tekniklerinin geliştrilmesine katkıda bulunmakta ve gelecekte yapılacak araştırmalara yönelik yeni sorular ortaya koymaktadır.

1.4 Tezin Organizasyonu

Bu tez, aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır:

- Bölüm 1 - Giriş: Bu kısımda konunun tanımlanması, problemin tanımı, araştırmanın önemi, tezin amacı ve hipotezlerinin incelenmesi amaçlanmıştır.
- Bölüm 2 – Literatür Taraması: Literatürde yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar incelenecektir. Burada küçük kazıkların, geniş kazıkların, KC (Keulegen-Carpenter) sayısı, difraksiyon parametresi (D/L) gibi kavramlar ve bunların oyulma mekanizması üzerindeki etkileri incelenecektir. Ayrıca yapılan çalışmanın literatürde yapılmış olan kısıtlı kazık+palplanş çalışmaları ve mevcut yaklaşımların eksikleri tartışılacaktır.
- Bölüm 3 – Tezin Amacı: Deniz dolgusuyla yapılan limanlarda kullanılan kazık+palplanş tahkimat yönteminde kazıklar arasındaki palplanş mesafesinin (ilki kazık çapının yarısı kadar, ikincisi ise kazıklar arası mesafenin kazık çapı kadar olduğu durum), dalga etkisi altındaki yapılarda oyulma ve geri dolma süreçleri üzerindeki etkileri incelenecektir. Ayrıca dört farklı dalga periyodunun ve dört farklı dalga geliş açısının oyulma ve geri dolma mekanizmalarının üzerindeki etkileri incelenecektir.

- Bölüm 4 – Yaklaşım (Metadoloji): Bu kısımda ise deneylerde kullanılan ölçüm yöntemleri(örneğin, PİV, 3D lidar taramaları), deneylerde kullanılan iki farklı kazık birleşimi, dalga periyotları ve dalga geliş açıları hakkındaki ayrıntılar ve ölçüm sonuçlarının nasıl değerlendirileceği detaylandırılacaktır.

- Bölüm 5 – Deneyler: Deney düzeneğinde kullanılan 3 kazığın yerleştirildiği deney düzeneği, kazık birleşimi detayları, deneylerin yapıldığı dalga kanalı hakkında bilgiler, deney koşulları değiştirilerek yapılan deneyler ayrıca deneylerde kullanılan cihazlar yardımıyla hız, sediment taşınımı, oyulma derinliği vb. ölçümler detaylanıdırılacaktır.

- Bölüm 6 - Değerlendirmeler (Analiz ve Tartışma): Bu kısımda deneysel sonuçların analizleri sonucunda kazık birleşimi şeklinin, dalga periyotlarının ve dalga geliş açılarının oyulma derinlikleri ve konumları üzerindeki etkileri arasındaki ilişki incelenecektir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılacaktır.

- Bölüm 7 - Sonuçlar ve Değerlendirme: Son kısımda ise çalışmanın temel bulguları ve elde edilen sonuçların uygulama alanlarına katkısı incelenecektir. Elde edilen sonuçların inşaat sahalarında bakım ve tasarım süreçlerine sağlayabileceği katkılar tartışılacaktır. Deneysel olarak sınırlamaların neler olduğu belirtilecektir. Gelecekte yapılacak araştırmalar için öneriler sunulacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

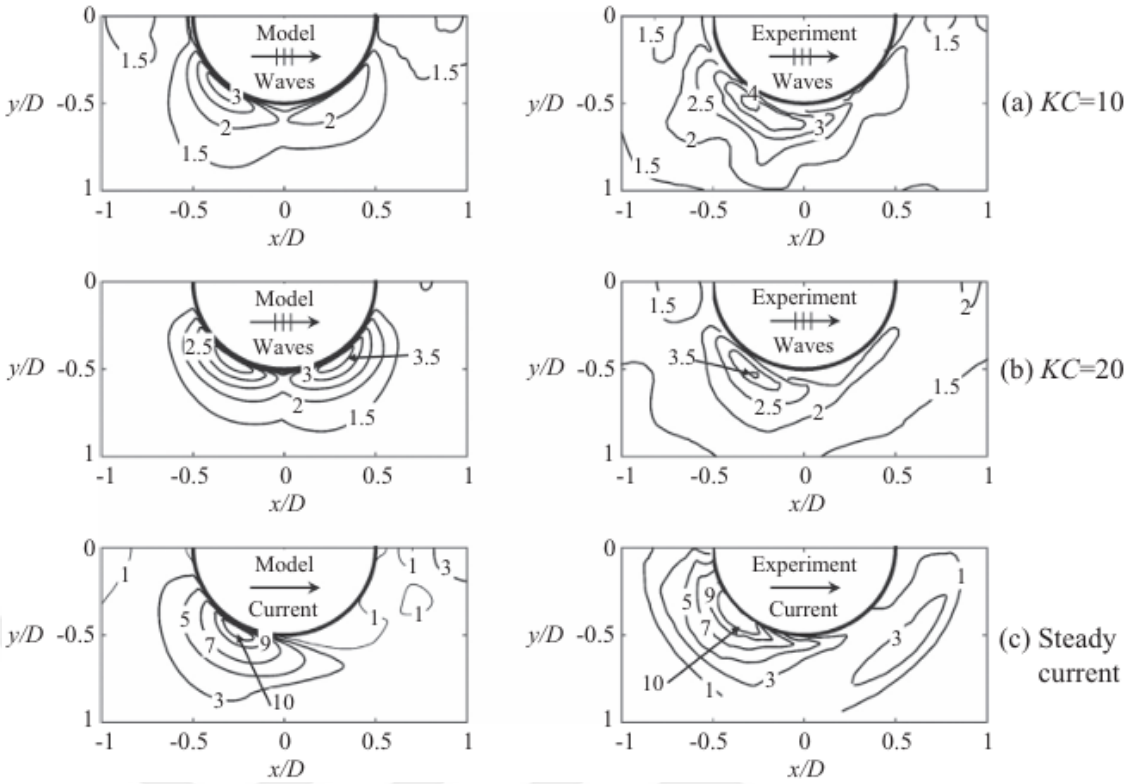
Bu çalışmada, deniz dolgusuyla inşa edilen limanlarda genellike kullanılan kazıklı veya kazık+palplanş uygulamalarından kazık+palplanş uygulanma yöntemine odaklanılmıştır. Örneğin Asyaport, Derince Limanı, Ambarlı Limanı, Aliağa Limanı, Mersin Limanı gibi projelerde bu yöntemler tercih edilmiştir. Çalışmada dalga durumu altında ortaya çıkan yerel oyulma (scour) süreci detaylı olarak deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Aşırı oyulma, yapıların stabilitesini azaltarak yıkılmasına veya yapının ciddi hasar almasına sebep olabilir.

Deneysel çalışmalarda iki farklı kazık birleşimi kullanılmıştır. Birincisi (B=0.5D) kazıklar arasındaki palplanş mesafesinin (B) kazık çapının(D) yarısı kadar olduğu durum, ikincisi ise kazıklar arası palplanş mesafesinin (B) kazık çapı (D) kadar olduğu durum (B=D) olmuştur. Ayrıca deneyler dört farklı dalga geliş açısı ve dört farklı dalga periyodunda gerçekleştirilmiştir. Dalga etkisi altındaki geniş kazık destekli rıhtımlardaki oyulma süreçleri, mühendislik yapılarında oluşabilecek stabilite problemleri açısından önemli bir araştırma konusu olmuştur. Elde edilen sonuçlar dalga etkisi altındaki oyulma dinamiklerinin detaylı olarak incelenmesi ve yapı güvenliğinin sağlanabilmesi için yapılacak tasarım kriterlerinin belirlenebilmesinde önemli veriler içermektedir. Literatüre bakıldığında genellikle tekli kazıklar çalışılmıştır.

Baykal, Sumer, Fuhrman, Jacobsen, and Fredsoe, 2017 yaptıkları çalışmada dalga etkisindeki silindir kazık etrafında meydana gelen oyulma (scour) ve geri dolma (backfilling) süreçlerini sayısal olarak modellemeyi amaçlamışlardır. Reynolds-Avaraged Navier-Stokes (RANS) denklemleriyle k-ω türbülans modeli kullanlarak üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Model sediment taşınımını ve yatak morfolojisinindeki değişimleri de içerecek şekilde tasarlanmıştır. Rijit yatak ve sediment yatak olarak 2 farklı yatak tipi kullanılmıştır. Çalışmada kazığın önünde oluşan horseshoe vortex (at nalı girdabı) ve kazığın arkasında

oluşan lee-wake vortekslerinin oyulma mekanizmasında önemli bir rol oynadığını ortaya koymuşlardır. Özellikle dalga parametrelerinin (örneğin Keulegan-Carpenter sayısı) artması ile oyulma derinliğinin arttığı , geri dolma süreçlerinin ise lee-wake akımının etisiyle şekillendiği gözlemlenmiştir. Sayısal modelleme sonuçları ve laboratuvar deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında modellerinin genel olarak uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. RANS tabanlı modellemenin horseshoe vortekslerinin tam olarak yakalanamadığını ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra LES veya DNS gibi gelişmiş türbülans modellerinin horseshoe vortekslerinin açıklanmasında daha iyi sonuçlar vereceği belirtilmiştir. Bu sonuçlar geniş kazık destekli rıhtımlardaki oyulma mekanizmasının sayısal olarak teyit edilmesi açısından önemli bir referans niteliğindedir. Özellikle dalga etkisi altındaki oyulmanın zamana bağlı değişimini anlamak için KC parametresinin etkisi deneysel çalışmalarla birlikte değerlendirilmelidir. KC sayısının oyulma derinliği açısından kritik bir parametre olduğu ifade edilmiştir. KC<10 olduğunda yani düşük KC sayılarında oyulma sürecinin yavaş olduğunu ve sediment taşınımının az olduğu belirtilmiştir. KC>20 olduğunda ise daha yoğun türbülans oluşumu gözlenmiş ve oyulma derinliğinin artmasına yol açtığı ifade edilmiştir.

B. M. Sumer, Christiansen, and Fredsøe, 1997 çalışmasında dalga etkisi altında sabitlenmiş kazıkların etrafındaki akış yapısı ve vorteks dinamiklerini incelemektedir. Deneylerde iki tür kazık kullanımıştır. Kazıklardan ilki D=40mm çapında dairesel kesitli silindir, ikinci kazık ise aynı genişlikte olan kare kesitli bir silindirdir. Çalışmada dalga etkisinde kazık önünde horseshoe vorteksinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Dairesel kazık için Keulegan-Carpenter (KC) sayısı 6'nın altında olduğunda bu vorteksin oluşmadığı gözemlenmiştir. Farklı geometrilerde bakıldığında ise kazığın oryantasyonunun da vorteks oluşumunu etkilediği gözlemlenmiştir. 90° yönlendirilmiş kare kazıklarda daha düşük KC değerlerinde vorteks oluştuğu ancak 45° oryantasyonunda ise bu değerin dairesel kazığa göre orta seviyede olduğu görülmüştür. KC sayısının artmasıyla vortekslerin boyutunun ve ömrünün arttığını görmüşlerdir. Ayrıca süperpoze akımında (dalga ile beraber eklenen akım) vortekslerin daha da güçlendiği saptanmıştır. Çalışmada kazık arka bölgesinde oluşan lee-wake vorteksleri de incelenmiş ve yatak kayma gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu

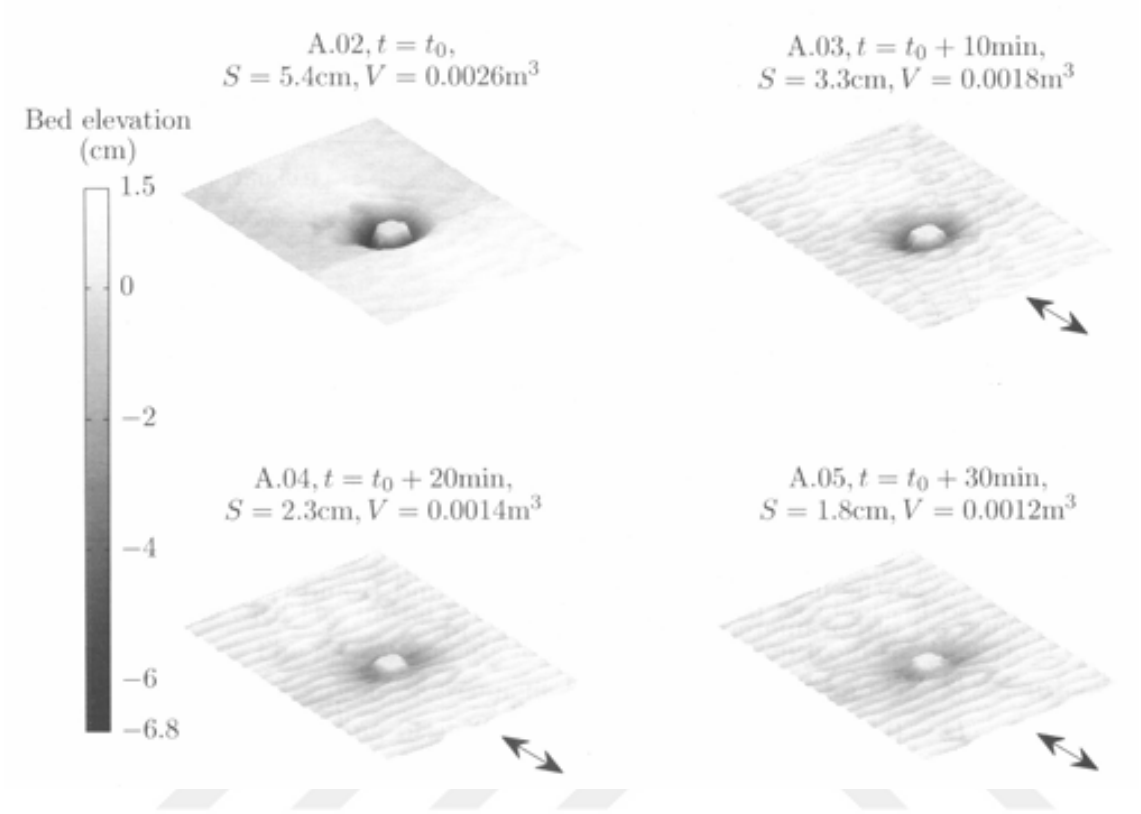


Şekil 2.1: (a) salınımlı akış KC=10 (Test 8, Tablo 2), (b) KC=20 (Test 14, Tablo 2) ve (c) sabit akım (Test 1, Tablo 2) için kazık etrafındaki yatak kayma gerilmesinin amplifikasyonu. Model sonuçları solda verilmiştir ve deneysel sonuçlar sağ tarafta verilmiştir. Baykal, Sumer, Fuhrman, Jacobsen, and Fredsoe, 2017.

gözlemlenmiştir ve bu durum kazık etrafında oluşan oyulma üzerinde kritik etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Hartvig, Thomsen, Frigaard, and Andersen, 2011 tarafından yapılan çalışmada offshore yapılarında deniz tabanında kazık etrafında oluşan oyulma (scour) ve geri dolma (backfilling) süreçleri incelenmiştir. Laboratuvar deneylerinde, akıntı ve düzensiz dalga koşullarında, monopile (tekil kazık) etrafındaki oyulma ve geridolma süreçlerinin zamansal ve mekânsal değişimi incelenmiştir. Ölçümler lazerli taban tarayıcıları ve diğer sensörler kullanılarak elde edilmiş, bu sayede oyulma derinliği (scour depth), oyulma hacmi ve oyulma paterni gibi geometrik özelliklerini tanımlayan 'scour shape factor' parametresi belirlenmiştir. Çalışmada oyulma boşluklarının zaman içerisinde derinleşmesinde belirli bir karakteristik zaman ölçeği olduğunu ve dalga-akıntı kombinasyonlarındaki geri dolma süreçlerini önemli ölçüde etkilediğini

göstermiştir. Oyulmanın offshore yapılarında (özellikle rüzgâr enerjisi türbinleri) tasarımında koruma tabakası stratejilerinin belirlenmesinde elde edilen sonuçların önemli bir referans olacağı belirtilmiştir.



Şekil 2.2: Yatak yüzeyi gelişimi. Yatağa yakın bozulmamış Keulegan-Carpenter sayısı K = 3 ve bozulmamış Shields sayısı ($Q \approx 0,2$) ile A.02–Q5 (dalga etkisi altında) geri dolma testleri. (Çift oklar dalga hareketini göstermektedir).Hartvig, Thomsen, Frigaard, and Andersen, 2011.

Yang, Qi, Wang, and Li, 2020 yaptıkları çalışmada deniz yapılarında sıkça kullanılan kazık grupları etrafında, sabit akış altındaki oyulma sürecini deneysel olarak incelemişlerdir. Özellikle kazıkların aralığının ve froude sayısının (Fr) oyulma derinliği, oyulma hacmi ve zamanla gelişen oyulma geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde dört farklı kazık grubu incelenmişir; sıralı iki kazık grubu, 2x2 kare şeklinde yerleştirilmiş kazık grubu, 2x3 şeklinde yerleştirilmiş dikdörtgen kazık grubu ve dört adet sendeli şekilde yerleştirilmiş kazık grubu. Deneyler sabit akım koşulunda farklı Froude sayılarında yürütülmüştür ($Fr \approx 0.25 - 0.46$ aralığında). Farklı konumlarda (kazık önü ve arkası) oyulma derinliği zamana bağlı olarak takip

edilmiştir. Oyulma denge durumuna (equilibrium scour depth) ulaşılınca akım durdurulmuş ve yatak geometrisi lazer tarayıcılar yardımıyla taranmıştır.

Sonuç olarak oyulma mekanizmasının ilk aşamalarda hızlı olduğu, zamanla yavaşlayarak denge durumunda geldiği görülmüştür. Froude sayısı (Fr) arttıkça oyulmanın daha hızlı gerçekleştiği ve denge durumunda daha hızlı geldiği görülmüştür. Akıma ilk maruz kalan kazık ön kısmında en büyük oyulma görülmüş ve kazık arka kısmında ise gölgeleme etkisiyle oyulmanın daha az olduğu saptanmıştır. Kazıklar arası mesafe (G)/kazık çapı (D) küçük olduğu durumlarda daha büyük oyulmalar olduğu görülmüştür. G/D oranı arttıkça kazıkların birbirleri üzerindeki etkisinin azaldığı, özellikle kazık arka kısmında daha az oyulma olduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer husus ise belli bir G/D oranından sonra kazıkların birbirinden bağımsız olduğu ve tekil kazıktan çok farklı olmadığı saptanmıştır. Bu G/D değeri Froude (Fr) sayısı arttıkça daha büyük G/D değerlerine kaymaktadır. Yüksek Froude (Fr) değerlerinde kazık grupları tek bir engel gibi davranmakta ve oyulma çukuru daha büyük bir alana ve derinliğe ulaşmaktadır. Farklı kazık düzeninde özellikle şaşırtmalı gruplarda öndeki kazıklar arasındaki akış hızlanması ve türbülans artışı daha büyük oyulmalara yol açmıştır. Deneyler sonucunda kazık grubu etrafındaki maksimum oyulma derinliği için (G/D ve Fr değişkenlerine bağlı) ampirik formüller elde edilmiştir. Oyulma alanı ve hacmi de G/D ve Fr ile ilişkilendirilerek formülize edilmiştir.

Roulund, Sumer, Fredsøe, and Michelsen, 2005 yaptıkları çalışmada sabit akımda yerleştirilen dikey kazık etrafındaki yerel oyulmayı (local scour) hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Üç boyutlu Reynolds ortalamalı Navier–Stokes (RANS) denklemleri, SST (shear-stress transport) k-ω türbülans modeli çerçevesinde Doppler anemometri ve hot-film taban kayma gerilmesi ölçümleri kullanılarak çözümlenmiş; sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Kazığın önünde ortaya çıkan atnalı girdaplar (horseshoe vortex) ile arka kısmında gelişen lee-wake vorteksler ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Sınır tabaka kalınlığının kazık çapına oranı (δ/D), Reynolds sayısı ve kazık etrafındaki yatak kayma gerilmesinin vortex yapılarına olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan sayısal akım modeli iki boyutlu yatak yükü(bedload) taşınımı ve eğimi aşan durumlardaki kum kayması (sand slide) süreçlerinin içeren bir morfolojik model ile entegre edilmiştir. Özet olarak

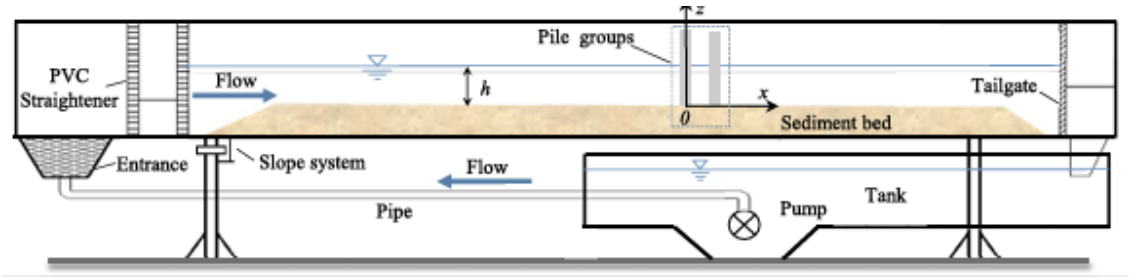


Fig. 1. Experimental flume and general setup.

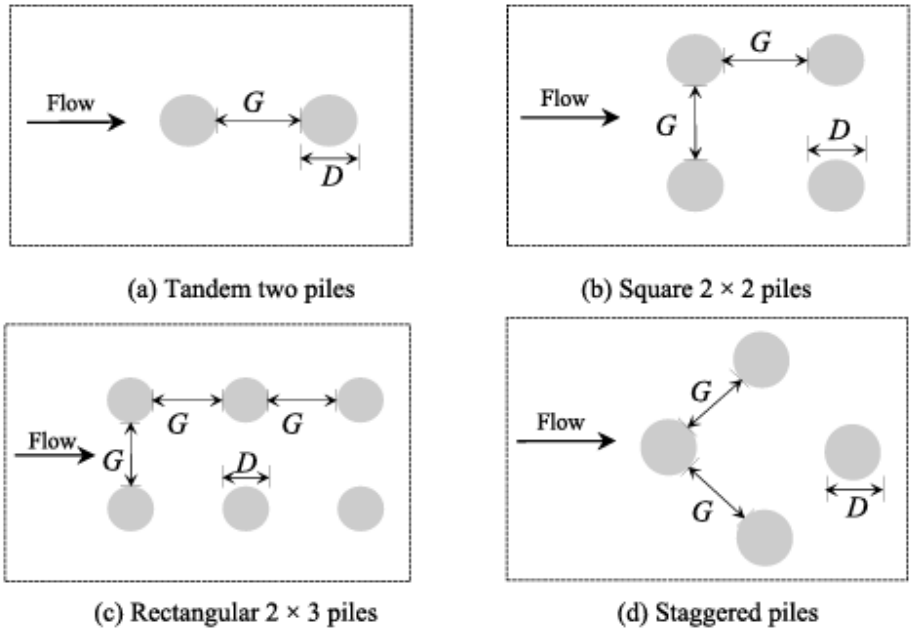
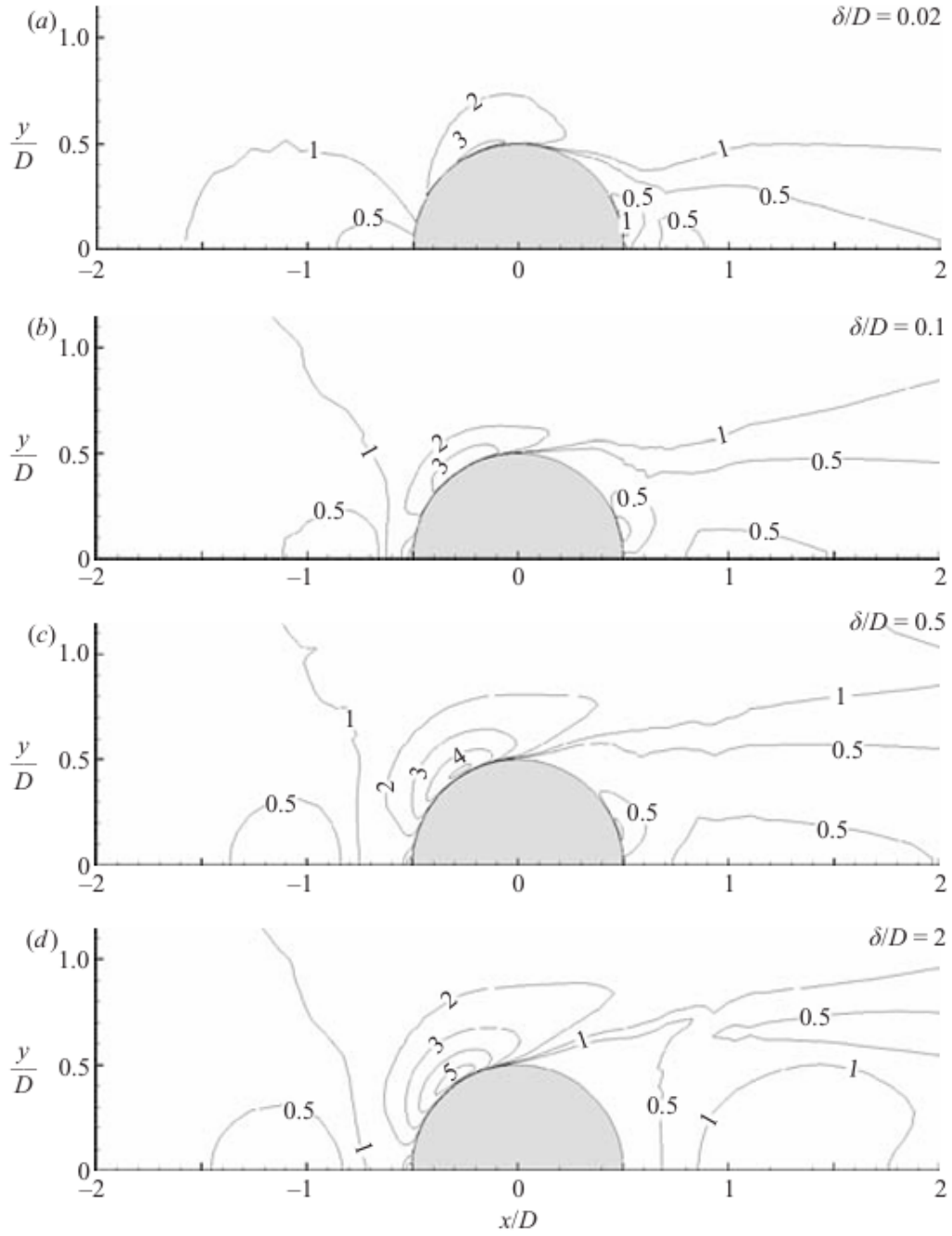


Fig. 2. Configurations of pile groups.

Şekil 2.3: Yang, Qi, Wang, and Li, 2020.

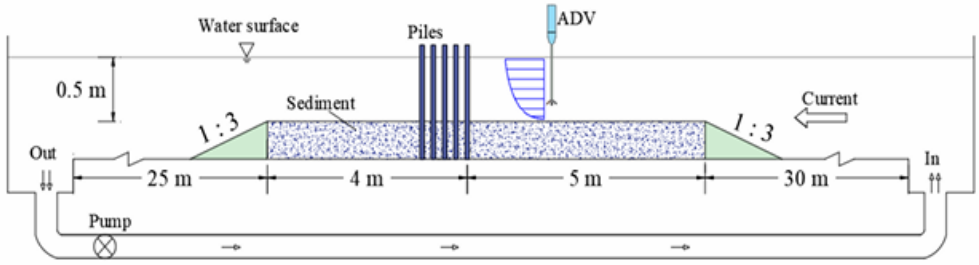
sayısal modelde kazığın önünde oluşan denge oyulma derinliği (equilibrium scour depth) deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kazık arkasındaki denge oyulma derinliğin 30% saptığı görülmüştür. İlk başta yüksek olan taban kayma gerilmesi amplifikasyonu süreç ilerlerdikçe ve denge durumuna ulaşıldığında önemli ölçüde azalmıştır. Atnalı girdapları üzerinde δ/D, Reyolds sayısı ve sınır tabaka kalınlığının belirgin etkileri olduğunu göstermişlerdir. Entegre ettikleri morfolojik modelin ise canlı yatak (live-bed scour) koşullarında oyulma süreçlerini başarılı bir şekilde simüle ettiğini, böylece sayısal modelleriyle akım dinamikleri ve sediman taşınımının etkileşimini ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.4: Farklı δ/D değerleri için taban kesme gerilmesinin amplifikasyon konturları için model sonuçları. Hidrolik cilalı cidar. ($Re_D = 2 \times 10^5$). Roulund, Sumer, Fredsøe, and Michelsen, 2005.

Gong, Pan, Shengtao, Wu, Lv, Sun, Ding, and Liang, 2025 çalışmalarında sabit akıntı altında 5x5 kazık grubu etrafındaki yerel oyulmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler clear-water ($Q < Q_c$) koşulunda gerçekleştirilmiştir. Kazıklar arası mesafe kazık çapının (kazık çapı D=2cm) 5 katı yani 10cm olarak

konumlandırılmıştır. Deneyler akış yoğunluğu 0.37-1.0 aralığında gerçekleştirilmiştir. Akış yoğunluğu (U/U_C), yaklaşan akış hızının (U) eşik akış hızına (U_C) oranı olarak tanımlanmıştır. U/U_C oranı bir kazık etrafındaki yerel oyulma için yaklaşık 0.4 iken, kazıksız bir kum yatağındaki genel oyulma için 1.0'dır. Membadaki kazıkların mansaba doğru olan kazıklar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Maksimum oyulma derinlikleri ve oyulma paternleri analiz edilmiştir. Deneyler sonucunda oyulma için minimum akış yoğunluğunun 0.4 olduğu belirlenmiştir. Akış yoğunluğu 1.0 olduğunda kazıklar arasında lokal oyulmadan ziyade global bir oyulma fenomeni gözlemlenmiştir. Mansap tarafında olan kazıkların oyulma süreci memba tarafında olan kazıklara göre daha yavaş gerçekleşmiştir ancak başlangıçta hızlı bir ivmelenme göstermiştir. Merkezde bulunan kazıkların çevresinde oluşan oyulma derinliği kazık çapının 0.5 katına yaklaşmış ve daha yüksek akış yoğunluğunda (0.8-1.0) birinci sıradaki kazıklarda maksimum oyulma gözlemlenmiştir. Kazık diziliminin ve akış yoğunluğunun oyulma mekanizması üzerinde önemli etkileri olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 2.5: Deneysel kanal ve test bölümü düzenlemesi. Gong, Pan, Shengtao, Wu, Lv, Sun, Ding, and Liang, 2025.

B. Sumer and Fredsøe, 1998 yaptıkları çalışmada dalga etkisi altında farklı kazık grupları etrafında oluşan oyulmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde yedi farklı kazık yerleşimi ve kazık sayısı kullanılmıştır. Bu kazıklar; ardışık sıralı, yan yana, üçgen ve kare gruplama olarak test edilmiştir. Deneylerde Keulegan-Carpenter (KC) sayısının ve kazıklar arası mesafenin, kazık çapına oranının oyulma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Sonuç olarak, küçük KC sayılarında oyulma derinliğinin, tekli kazığa kıyasla 10 kat veya daha fazla arttığı; orta seviyelerdeki KC (yaklaşık 10) sayılarında ise

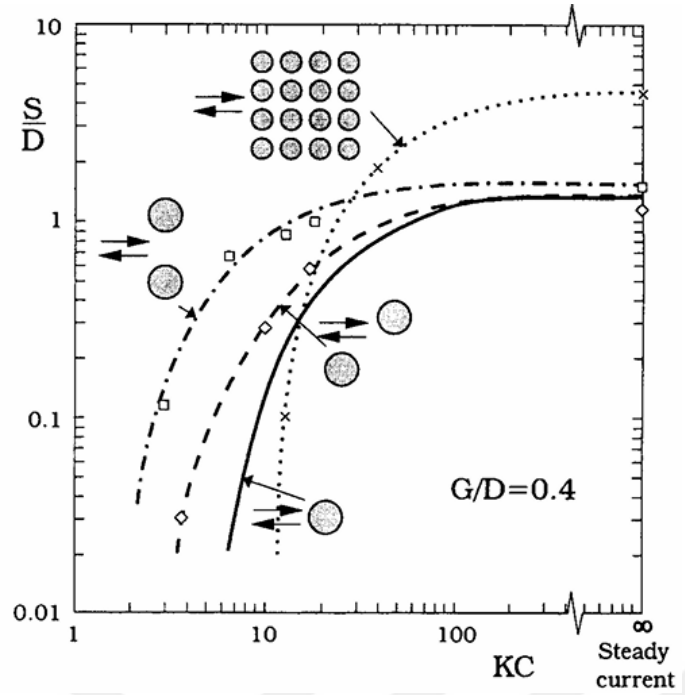


(a) Test B3, $U/U_c = 0.60$ (b) Test B4, $U/U_c = 0.80$ (c) Test B5, $U/U_c = 1.0$

Şekil 2.6: Kanaldaki B3-B5 testlerinden çekilen fotoğraflar. Gong, Pan, Shengtao, Wu, Lv, Sun, Ding, and Liang, 2025.

kazıkların yan yana ve ardışık sıralandığı, ayrıca kazık aralığının 0.5'ten küçük olduğu durumlarda (G/D < 0.5), oyulma derinliğinin tekli kazık durumuna göre 3 katına kadar çıkabildiği belirtilmiştir.Kazıklar arası mesafe arttıkça, oyulma etkisinin tekil kazık etrafında oluşan oyulma durumuna yaklaştığı; KC sayısındaki artışla birlikte ise oyulma derinliği ve oyulma yüzeyinin büyüdüğü belirtilmiştir. Ayrıca, kazıkların üçgen formasyonla yerleştirildiği durumlarda, kalkanlama (shielding) etkisi nedeniyle oyulmanın azaldığı ifade edilmiştir.

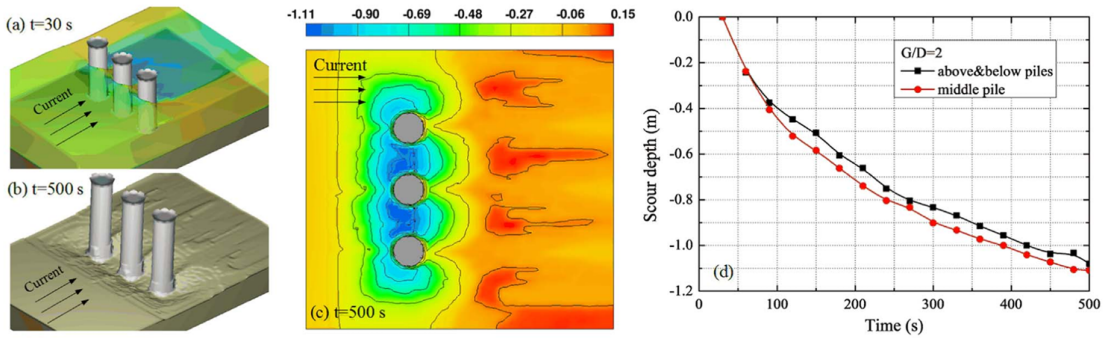
Zhang, Zhou, and Wang, 2017 yaptıkları çalışmada sabit akım koşulunda üç bitişik kazık(three adjacent piles) etrafındaki oyulma mekanizmasını Flow3D yazılımında sayısal olarak modellemişlerdir. Akış alanı RANS denklemleri ve RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile çözmüş, sediman taşınımı modeli kullanılarak oyulma, geri dolma ve çökelme süreçlerini incelemişlerdir. Yapılan analizler Khosronejad, Kang, and Sotiropoulos, 2012 köprü ayakları üzerinde yapılmış olan deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Kazıklar arası mesafe/kazık çapı (G/D)'nin oyulma üzerindeki etkileri incelendiğinde G/D oranı azaldıkça oyulma çukurları birleşerek daha derin ve geniş oyulmalara sebep olduğu görülmüştür. G/D=2 olduğunuda ön kısımdaki kazıkların çevresinde oluşan oyulma çukuru arkada olan kazık oyulma alanları ile birleşerek daha büyük oyulma alanı oluşturduğu görülmüştür. G/D=4 olduğu durumda ise kazıklar arası etkileşimin zayıfladığını dolayısıyla kazıklar etrafındaki oyulmanın



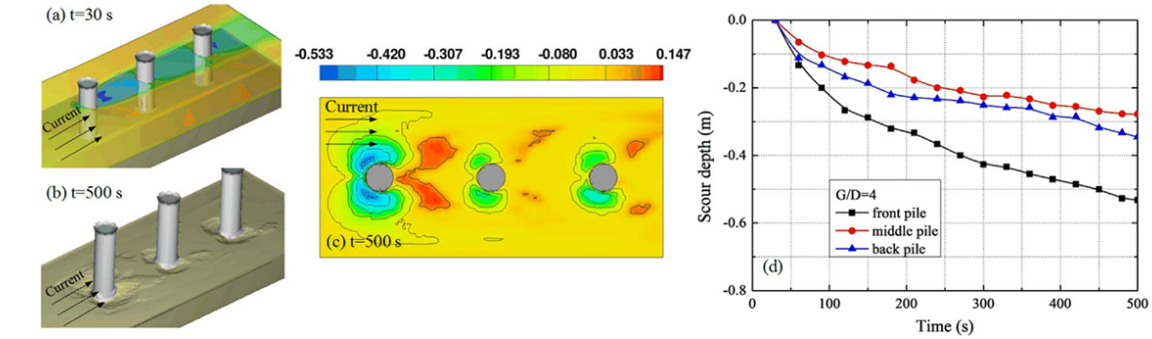
Şekil 2.7: KC'ye Karşı Çizilen Denge Oyulma Derinliği. B. Sumer and Fredsøe, 1998.

tekli kazık (mono pile) etrafında oluşan bağımsız oyulmaya evrildiği görülmüştür. Kazık diziliminde yapılan değişiklikler sonucunda en fazla oyulmanın G/D=2 olan yan yana dizilmiş ve yapı açısının 90° olduğu yapı diziliminde görülmüştür. Sıralı dizilimde (tandem) önde olan kazık akıntıyı keserek arkada olan kazıkların oyulmasını geciktirmiş ve azaltmıştır. Ancak akıntının hızlanmasıyla arkadaki kazıklarda daha fazla oyulma gözlemlenmiştir. Üçgen ve kare dizilimde ise akış yönlendirilmiş ve türbülanslı alanlar oluşarak farklı oyulma düzenleri elde edilmiştir. Ön kazık etrafında oluşan atnalı girdapları o bölgedeki yatak kesme gerilmesini artırarak oyulma üzerinde önemli bir rol oynamıştır. Orta sırada bulunan kazıklarda ise öndeki kazığın gölgeleme etkisi nedeniyle yatak kesme gerilmesini düşürmüş ve oyulma derinliği azaltmıştır. Ön kazıklarda oyulma daha hızlı gerçekleşirken arka kısımda kalan kazıkların oyulması daha yavaş gerçekleşmiştir. P3M1 diziliminde yani sıralı (tandem) 3 kazık ve G/D=4 olan yapı dizilimi en düşük ortalama oyulma derinliği göstererek kazık temelli yapıların stabilitesi için ideal bir düzenleme olabileceğini belirtilmiştir.

Khosronejad, Kang, and Sotiropoulos, 2012 yaptıkları çalışmada hem deneysel hem de nümerik simülasyon yöntemlerini kullanarak clear-water koşulunda üç farklı kazık



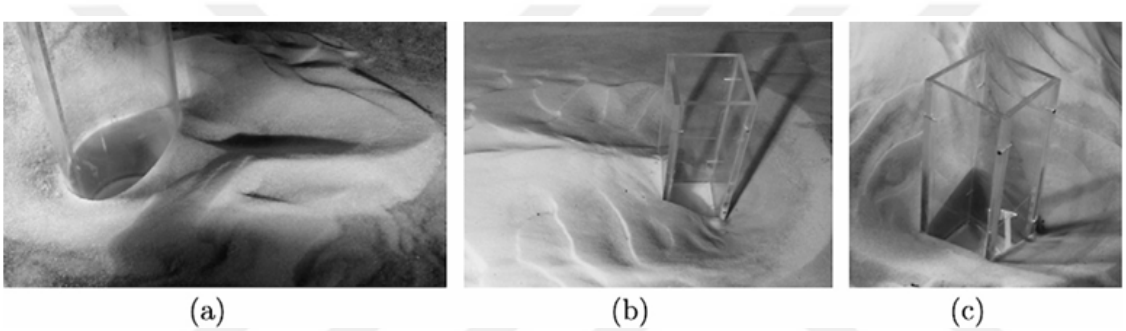
Şekil 2.8: Boyutsuz kazık aralığı G/D = 2 olan P3M3 etrafındaki yerel oyulmanın hesaplama sonuçları: (a) üç boyutlu akış alanı; (b) üç boyutlu oyulma çukuru modeli ve (c) son saniyede yatak yüksekliği kontürleri; ve (d) farklı kazıklar etrafındaki maksimum oyulma derinliğinin zaman içindeki gelişimi. Zhang, Zhou, and Wang, 2017.



Şekil 2.9: Boyutsuz kazık aralığı G/D = 4 olan P3M1 etrafındaki yerel oyulmanın hesaplama sonuçları: (a) üç boyutlu akış alanı; (b) üç boyutlu oyulma çukuru modeli ve (c) son saniyede yatak yüksekliği kontürleri; ve (d) farklı kazıklar etrafındaki maksimum oyulma derinliğinin zaman içindeki gelişimi. Zhang, Zhou, and Wang, 2017.

geometrisine (silindir, kare, elmas şeklinde) sahip köprü ayaklarındaki yerel oyulmayı incelemişlerdir. Çalışmada URANS (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes) denklemleri, $k-\varepsilon$ türbülans modeli ve CURVIB (curvilinear immersed boundary) yöntemleri kullanılarak akış-yatak etkileşimini ve sediment taşınımını sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar daha sonrasında yapılan deneyel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Deneylerle yapılan karşılaştırmalar sonucunda modelleri elmas şeklindeki köprü ayağında iyi sonuçlar verirken, silindir ve kare şeklindeki köprü ayaklarında horseshoe vortekslerinin tam anlamıyla çözümlenememesi kaynaklı,

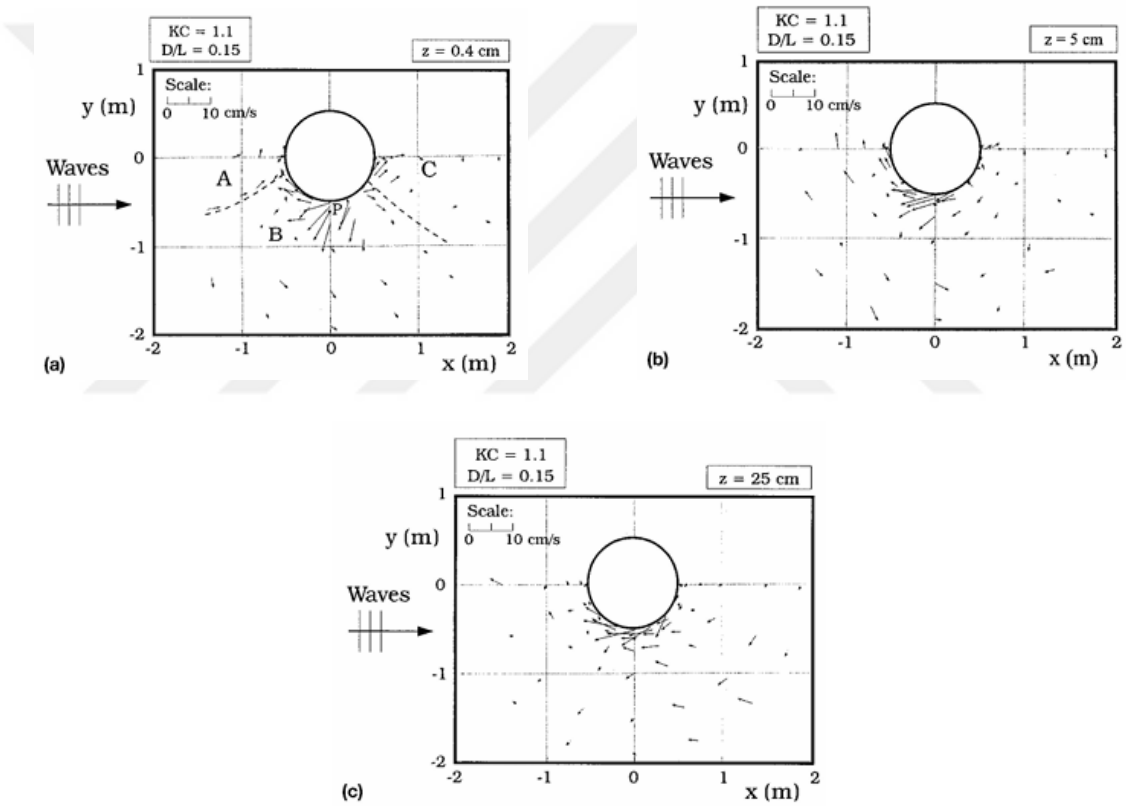
oyulma derinliği ve geometrisi hakkında iyi sonuçlar vermediği görülmüştür. Farklı grid çözünürlüklerinde yaptıkları incelemeler sonucunda ise sonuçların grid hassasiyetinden bağımsız olduğunu ve temel hidrodinamik süreci yakalama yeteneğine vurgu yapmışlardır. Yatak kesme gerilmesini artırmak için ampirik düzeltmeler yapsalar da bu kesme gerilmesinin kazık geometrisine ve akışa göre değişmekte olduğunu ve dikkatli bir şekilde ele alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda URANS tabanlı modellerin keskin kenarı olan (elmas şeklinde) yapıların dinamiklerini anlamakta iyi sonuçlar verdiğini ancak daha yuvarlak ve kare kesitlerde horseshoe vortekslerinin sisteminin anlaşılmasında yetersiz kaldığını göstermişlerdir. Bu durumda LES/DES gibi yüksek çözünürlüklü modellere ihtiyaç duyulduğu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.10: (a) silindir (Re=46000 ve Fr=0.18 ve akış soldan sağa doğru), (b) kare (Re=30000 ve Fr=0.19 ve akış sağdan sola doğru) ve (c) elmas (Re=36000 ve Fr=0.13 ve akış aşağıdan yukarıya doğru) köprü ayağı geometrisine sahip deneysel kanal için dengede oyulmuş yatak. Khosronejad, Kang, and Sotiropoulos, 2012.

B. M. Sumer and Fredsøe, 2001 çalışmalarında ilerleyen dalgaların etkisi altında büyük dikey bir silindir etrafında oluşan oyulma (scour) süreçlerini incelemişlerdir. Küçük kazıkarda oluşan oyulmanın lee-wake vorteksleri ve horseshoe vortekslerine bağlıyken büyük kazıklarda akım ayrılmadan (unseparated flow) devam etmekte; burada KC (Keulegan-Carpenter) sayısı O(1)'den küçük kalmaktadır. Dolayısıyla dalga kaynaklı sabit akış, sediment taşınımınının ana mekanizmasını oluşturmaktadır. Deneylerde 3 farklı kazık çapı (0.54m, 1m, 1.53m) kullanılmıştır. 1m çapındaki silindirin etrafında rijit yatak deneylerinde, LDA (lazer-Doppler anemometri) kullanılarak yapılan hız ölçümleri sunucunda yatağa çok yakın bölgelerde üç boyutlu bir steady streaming akımının olduğu ve silindir olmadığı durumlarda bu akımın oluşmadığı

gözlemlenmiştir. Canlı yatak (live-bed $Q_c < Q$) koşulunda yapılan deneylerde dalgaların sedimenti havaya kaldırıp askıya aldığı ve askıdaki bu malzemenin steady streaming akımıyla silindir etrafından uzaklaştırması sonucunda oyulma oluştuğu gözlemlenmiştir. Steady streaming akımında, akım kopması olmadığı durumlarda sediment taşınımında önemli rol oynadığını göstermişlerdir. Bu akım, yatağa çok yakın kısımda, maksimum undisturbed orbital hızın %20-25'ine ulaşabilmektedir. Oyulma derinliğinin hem KC sayısına hemde difraksiyon parametresine (D/L)(silindir çapının dalga boyuna oranı) bağlı olarak arttığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak steady streamin akımının büyük deniz yapılarının tasarımında önemli bir rol oyandığı ve dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

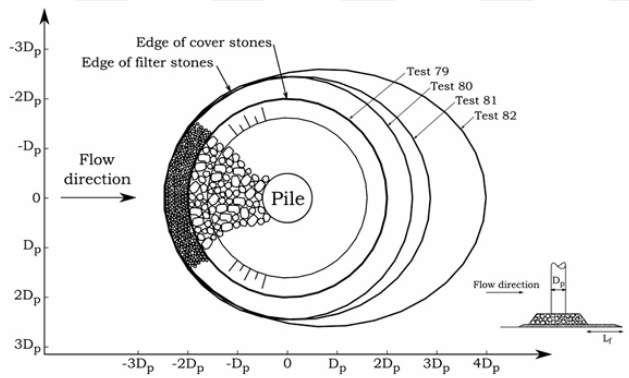


Şekil 2.11: Yataktan (a) z=0,4 cm; (b) z=5 cm; (c) z=25 cm Uzaklıkta Periyot Ortalamalı Hızların Vektör Diyagramı (Sabit Akış) B. M. Sumer and Fredsøe, 2001.

Petersen, Mutlu Sumer, Fredsøe, Raaijmakers, and Schouten, 2015 Yaptıkları çalışmada deniz ortamında tekil kazıklı offshore türbin ayaklarının etrafına yerleştirilen oyulma koruma sistemlerinin, yapı kenarında oluşan oyulma (scour) süreçleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma laboratuvar ve saha verileriyle

de desteklenmiştir. Çalışma özellikle akıntı ve dalga-akıntı birleşimi altında oluşan kenaer oyulmalarının anlaşılmasını amaçlamıştır. Yapılan fiziksel model sayesinde akış hızı,vorteks yapıları, oyulma derinlikleri ve yatak kesme gerilmesi detaylı olarak ölçülmüştür.

Çalışmanın sonucunda oyulma derinliği ve boyutlarının, tekil kazığın çapında (D) ve koruma tabakasının kalınlığı/genişliği oranına bağlı olarak değiştiğini belirlenmiştir. Akıntının, tek kazıklı ve oyulma korumalı dalgakıranlarda gözlemlenen en büyük akıntı derinliğine yol açan hakim akış ortamı olduğu saptanmıştır. Ayrıca counter-rotating vorteks çiftlerinin oynadığı rol ve filtre tabakasının 'falling apron (düşme engeli)' prensibiyle oyulmanın etkilerini sınırladığı görülmüştür. Saha verileri ve literatürdeki çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar sonucunda modelin gerçek ile uyumlu olduğunu ifade edilmiştir.

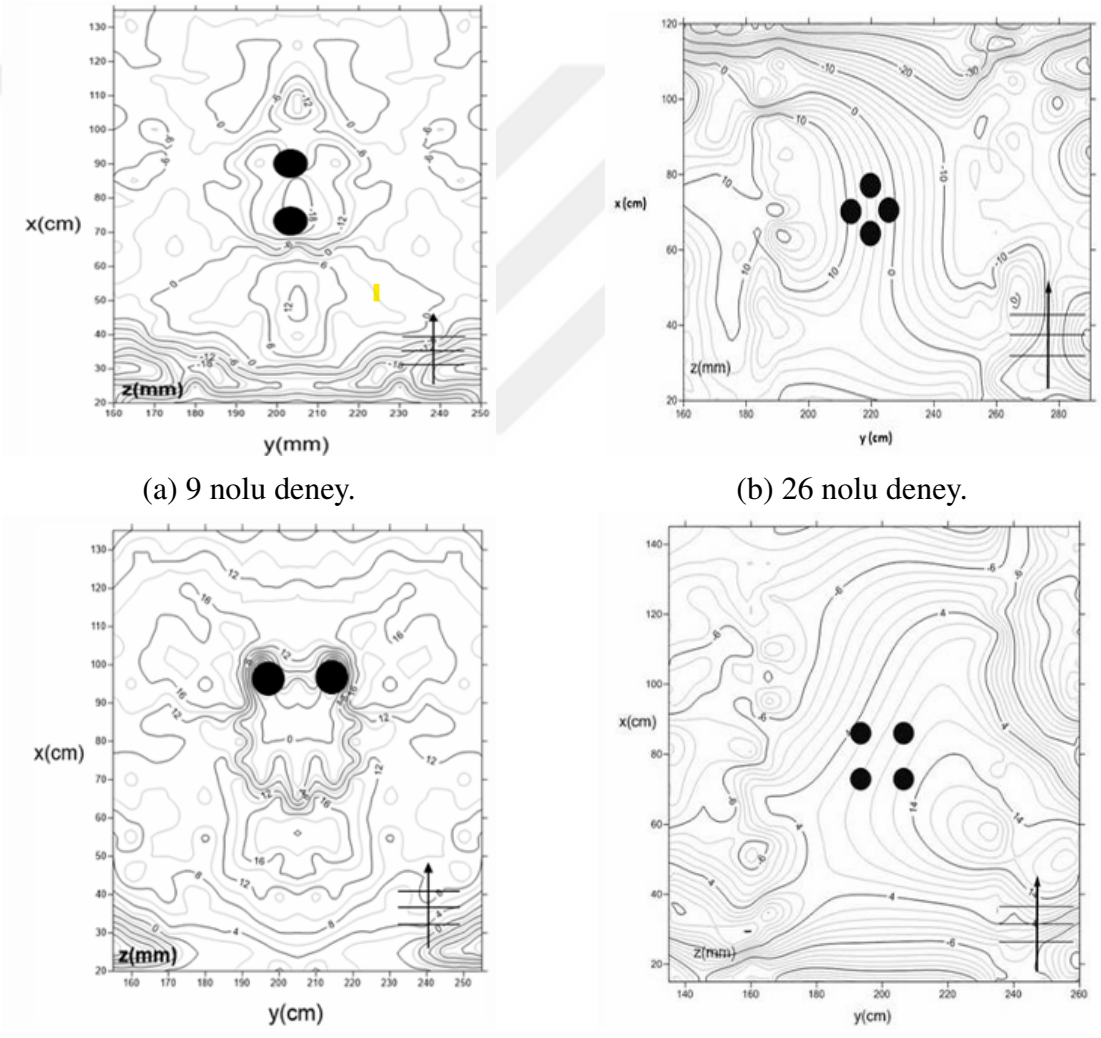


Şekil 2.12: Koruma taşları ve filtre tabakası uygulanmış tabana monte kazıkların tanım krokisi (ölçekli). Petersen, Mutlu Sumer, Fredsøe, Raaijmakers, and Schouten, 2015.

Abdi, Doğan, Kaya, and Ozgenc Aksoy, 2020 Yaptıkları çalışmada kıyı bölgesinde yer alan silindirik kazık grupları etrafında dalga kaynaklı oluşan genel ve lokal oyulma süreçlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalar, 3.6 m genişliğinde, 33 m uzunlukta ve 1.2 m derinlikteki bir dalga kanalında, farklı periyot ve yüksekliğe sahip düzenli dalgalar altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aynı çapa sahip kazıklar dört farklı grup yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kazıklar arası mesafe kazık çapı kadar düzenlenmiştir. Kazık grupları, dalgaya dik iki yan yana kazık ve 4 adet kare şeklinde yerleştirilen kazık grubu, dalga yönüne paralel sıralı iki kazık ve dalga

geliş açısı 45° olan 4 adet kare şeklinde yerleştirilen kazıklardır. Deneylerde, kazık grubu etrafındaki oyulma süreçleri UVP cihazları ile zamana bağlı oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Taban batimetri ölçümleriyle sonuçtaki taban profilleri belirlenmiştir (Şekil 2.13).

Sonuç olarak grup şeklinde kullanılan kazıkların tekil kazıklara oranla daha büyük oyulmalara sebep olduğu, özellikle dörtlü grup yerleşimlerinde dalgaya ilk maruz kalan kazıkların daha fazla oyulmaya maruz kaldıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan iki taban malzemesinde, iri taneli olan taban malzemesinde oyulmaların daha az olduğu belirlenmiştir.



(a) 9 nolu deney.

(b) 26 nolu deney.

(c) 20 nolu deney.

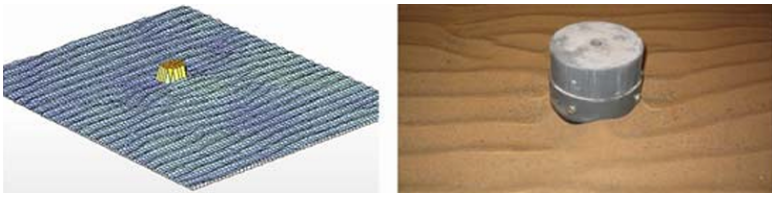
(d) 29 nolu deney.

Şekil 2.13: Taban batimetreleri (Abdi, Doğan, Kaya, and Ozgenc Aksoy, 2020).

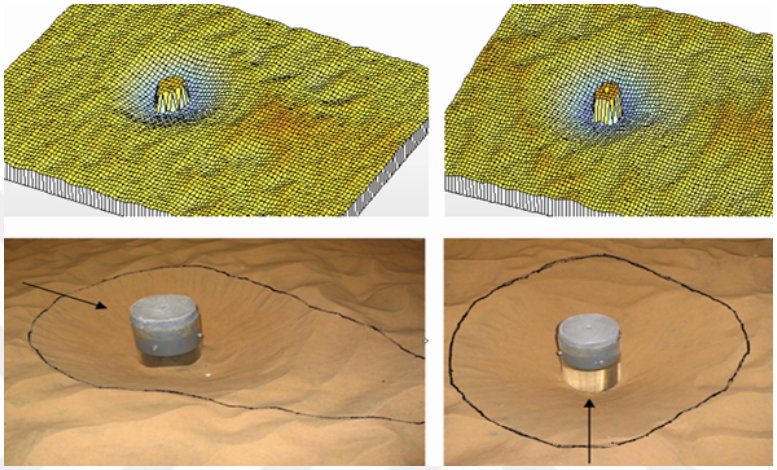
Dixen, 2012 Yaptıkları çalışmada, offshore rüzgar türbini tekil kazığı (4.7 m) temeli etrafında oluşan oyulma uzun dönemli davranışını incelenmiştir. Sonar ve ADCP ile 6 aylık sürekli gözlemler ve oyulma derinlikleri kayıt altına alınmıştır. Alınan bu verilerde oyulma derinliğinin, dalga ve gelgit etkileri ile korele olduğunu göstermiştir. Ölçümler sonucunda, maksimum oyulma derinliğinin kazık çapının 1.53 ile 1.7 katı olduğu belirlenmiştir. Araştırmada, mevcut tahmin formülleri (B. M. Sumer and Fredsøe, 2002) ile saha ölçümleri karşılaştırılarak, bu formüllerin dalga ve akım etkileri altında oyulma süreçlerini tam yakalayamadığı ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra geliştirdikleri matematiksel model, oyulma ve geri dolma süreçleri hakkında öngörüde bulunabilmek amacıyla kullanılmıştır. Modelleme sonucunda geri dolma zaman ölçeğinin, oyulma zaman ölçeğine göre yaklaşık on katı daha uzun olması gerektiğini ortaya koymuşlardır ve model ile saha verileri arasındaki uyumu önemli ölçüde artırdığını ifade etmişlerdir. Çalışmada ayrıca tekil kazık temellerin etrafında oluşan oyulma sürecinin zamansal dinamiklerinin daha doğru tahmin edilebilmesi için hem yerel hem de küresel ölçekte deniz tabanı etkilerinin uzun süreli gözlemlerle elde edilen verilerle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Margheritini, Frigaard, Martinelli, and Lamberti, 2006 Yaptıkları çalışmada 2 farklı çapa sahip tekil kazıkların tek yönlü akıntı, dalga ve gelgit akımları altındaki oyulma süreçlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler Aalborg Üniversitesinde bulunan 25 m uzunluk, 1.2 m genişlik ve 1.5 m derinliğe sahip hem dalga hem akıntı üretebilen kanalda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bu akımların altında oluşan oyulma derinlikleri, oyulma hacimleri ve batimetrisi zamansal olarak incelenmiştir. Çalışmada tekil kazıkların etrafında oluşan oyulmanın, dalga ve akıntıda farklı karakteristiğe sahip olduğu belirtilmiştir. Özellikle tek yönlü akıntı durumunda oyulma derinliğinin zamanla eksponansiyel olarak bir artış gösterdiği, asimetrik bir oyulmanın kazık önünde oluştuğu, gelgit akımlarında ise akım yönündeki değişimlerin sonucunda asimetrik bir oyulma çukurunun olduğu tespit edilmiştir. Her iki akım durumunda oyulma derinliklerinde anlamlı bir fark olmadığını ancak gelgit durumunda oyulma hacminin daha büyük olduğu ifade edilmiştir (simetrik oyulma çukurunun oluşmasından kaynaklı). Ayrıca çalışmada oyulma derinliğini etkileyen parametreler (KC, Shields parametresi vb.) kullanlılarak, oyulma tahmin formülleri

de değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar açık denizde yapılacak temel tasarımlarına oyulma sürecinin değerlendirilmesi ve koruma yapılarının tasarlanabilmesi açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır.



(a) Dalga etkisi altında oyulma çukuru oluşmamış.



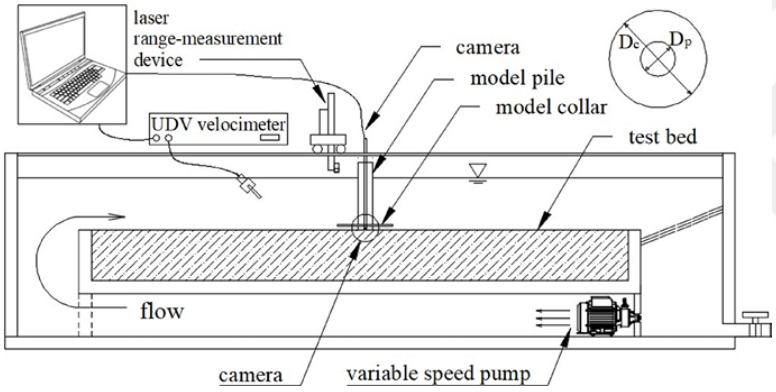
(b) Soldaki akıntı ve sağdaki gelgit akımı altındaki oyulma çukurları. Oklar akış yönünü göstermektedir.

Şekil 2.14: EPro grafiği sonuçları (Margheritini, Frigaard, Martinelli, and Lamberti, 2006).

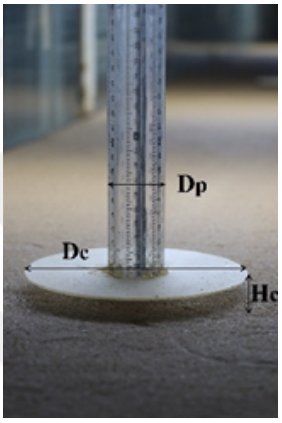
Shahhosseini, Yue, Xu, Zhang, and Yu, 2025 Çalışmalarında açık su koşullarında (clear-water) akış kaynaklı oyulmayı azaltmak için kullanılan yaka sistemlerini deneysel olarak incelenmiştir. Akış hızının yüksek olduğu nehir ya da deniz tabanında oluşan oyulma, deniz yapılarının stabilitesi için büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda laboratuvar ölçeğinde farklı yaka geometreleri (yaka çapı, yaka yüksekliği ve akış hızı) kullanılarak yerel oyulma derinliğinin değişimi incelenmiştir. Deneylerde; yaka çapı, yakanın yerleştirildiği yükseklik ve yığın çapı arasındaki oranlar değişiklik göstermiş, akış hızı ve su derinliği gibi parametreler değiştirilerek oyulma derinlikleri kayıt altına alınmıştır.

Çalışmanın sonucunda, uygun konfigürasyonda yerleştirilen yakaların (tabana yakın) oyulma derinliğini %71 oranında azalttığı görülmüştür. Yapılan hassasiyet

analizleri, yaka yüksekliğinin de yaka çapından daha baskın bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, deney verilerinden elde edilen ampirik formüllerle, yaka koruması için oyulma derinliği ve akışın oluşturduğu kuvvetler arasındaki ilişkiyi açıklamışlardır. Literatürde yapılan çalışmalar, elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında yüksek doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür. Araştırmada yaka sistemlerinin tasarım parametrelerinin optimize edilmesinin önemi vurgulanmıştır. Yakaların doğru parametreler kullanılarak tasarlandığında oyulma derinliğinin kayda değer şekilde azaltabileceğini ve yapı stabilitesini artıracağı sonucuna varmışlardır. Bu bulgular mühendislik tasarımlarınlarında etkin ve pratik bir çözüm olarak değerlendirilebilecek niteliktedir.



(a) Deney kanalı şeması.



(b) Model kazık tasarımı ($D_P = 4cm - D_C = 16cm$).

Şekil 2.15: Shahhosseini, Yue, Xu, Zhang, and Yu, 2025.

Najafzadeh, Barani, and Hessami-Kermani, 2013 Yaptıkları çalışmada yeni bir yaklaşım olan GMDH (Group Method of Data Handling) kullanarak dalgalar altındaki kazıkların etrafında oluşan oyulmayı tahmin etmeye çalışmışlardır. GDMH yöntemi Levenberg-Marquardt (LM) algoritmasıyla eğitilmiştir. Oyulma mekanizmasının bağlı olduğu boyutsuz parametreler (KC sayısı, Shield parametresi, kazık ve sediment Reynold sayısı vb.) ışığında modelleme yapılmıştır. GMDH-LM sonuçları Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Radial Basis Function-Neural Network (RBF-NN) ve ampirik formüllerle karşılaştırma yapılmıştır. Diğer modeller arasından en iyi tahmini GDMH-LM modelinin sağladığı ifade edilmiştir (korelasyon katsayısı R=0.983). Hassasiyet analizleri sonucunda KC parametresinin oyulma mekanizması

üzerindeki en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. GDMH-LM'nin performansının veri seti aralıklarındaki değişimler açısından esnek olduğu, $5 < KC < 10$ aralığında diğer aralıklara kıyasla daha az hata oranıyla sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ayrıca GDMH-LM'nin diğer çalışmalarla kıyaslanınca veri seti sınırlamalarını başarılı şekilde karşıladığı gözlemlenmiştir. Bu sayede kare şeklindeki kazıklar etrafında oluşacak oyulmanın tahmininde başarılı olmuştur ve karmaşık oyulma süreçlerinde tümevarım yönteminin en iyi şekilde gerçekleştirilmesini sağlamıştır.

Lança, Fael, Maia, Pêgo, and Cardoso, 2013 Yaptıkları çalışmada köprü ayaklarında kullanılan kazık grupları etrafındaki oyulma süreçlerini açık su (clear-water) koşullarında incelemiştir. Kazık gruplarının geometrik parametrelerini ve konfigürasyonlarının (kazıklar arası mesafe, eğim açısı, kolon sayısı), denge oyulma derinliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler, 1,2,3 sütun ve 4 sıra halinde farklı düzenlemelerde, kazıklar arası mesafeler 1, 2, 3, 4.5 ve 6 kazık çapı kadar olduğu durumlarda ve eğim açıları $0°, 15°, 30°, 45°$ ve $90°$ olduğu sistematik senaryolarda gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda en fazla oyulmanın $30°$ eğim açısında gerçekleştiği ifade edilmiştir. Kazık gruplarının etkileşimlerinin ve konfigürasyonlarının yerel akış yapısını (oyulma sürecini) önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Çalışmada özellikle deney süresinin kısalığının oyulma tahminlerinde belirsizliklere neden olacağı ifade edilmiştir. Çalışma, açık su (clear-water) koşullarında yapılan deneysel verilerin yorumlanması ve deniz yapılarında dalga etkisi altındaki kazıkların etrafında oluşan oyulma mekanizmasının değerlendirilmesi açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

3. TEZİN AMACI

Bu tezin amacı, deniz dolgusu yöntemlerinden biri olan kazık+palplanş destekli sistemle yapılan rıhtımlarda, dalga koşulları altında meydana gelen oyulma(scour) ve geri dolma(bakfilling) süreçlerini deneysel olarak incelemektir. Çalışma kapsamında iki farklı kazık birleşimi kullanılarak;

- Konfigürasyon 1 - B=D/2: Kazıklar arası mesafe kazık çapının yarısı,
- Konfigürasyon 2 - B=D: Kazıklar arası mesafe kazık çapı kadar,

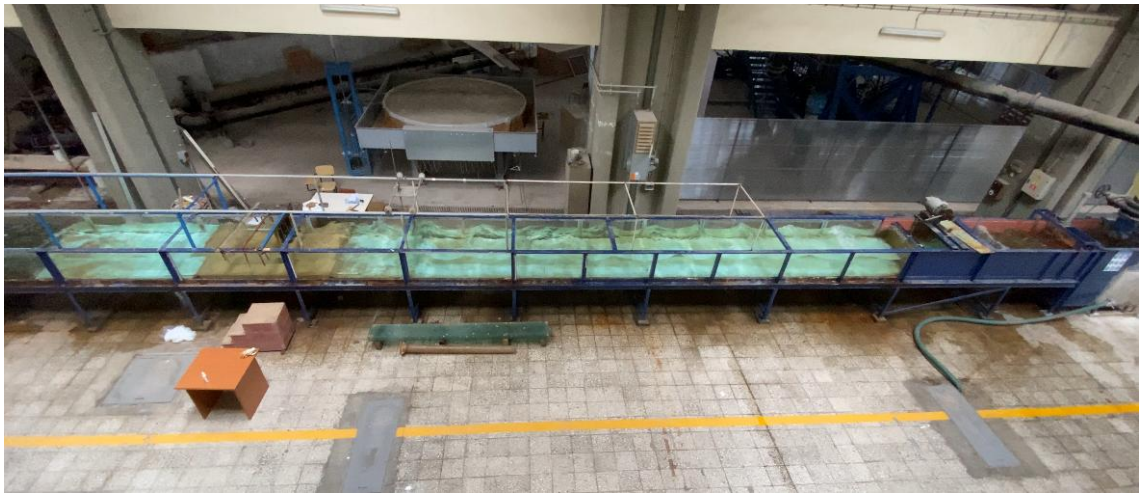
olarak uygulanmıştır. Bu 2 farklı konfigürasyonda 4 farklı dalga periyodu ve 4 farklı dalga geliş açısının etkileri detaylı olarak ele alınacaktır.

3.1 Deneysel Düzenek ve Ölçüm Teknikleri

Deneylerde kullanılan düzenek (dalga kanalı, kazıklar, kazıkların birleşim şekilleri,farklı dalga özellikleri vb.) ve ölçüm cihazları (limnimetre, PİV, LİDAR taraması) bu bölümde kısaca tanıtılacaktır. Daha detaylı tanımlama lütfen için Bölüm 5 'e bakınız.

3.1.1 Deney düzeneği ve uygulama genel tanıtımı

Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalar, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yer alan dalga kanalında (Şekil3.1) gerçekleştirilmiştir. Deneyler kapsamında 3 adet geniş çaplı (D=12.5cm) hidrolik olarak pürüzsüz kazıklar kullanılmıştır. Bu kazıklar kazık arası birleşim mesafesi açısından 2 farklı şekilde palplanş ile birleştirilmiştir. İlk birleşimde kazıklar arası mesafe kazık çapının yarısı olacak şekilde ve ikinci birleşimde ise kazıklar arası mesafe kazık çapı kadar bırakılarak iki farklı yapı formasyonu tasarlanmıştır. Bu yapı konfigürasyonlarının, dalga etkisi altında oyulma davranışının incelenmesi amacıyla, 4 farklı dalga geliş açısı ve 4 farklı dalga periyodu kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Dalga Kanalı (Wave Flume).

3.1.2 Kullanılan ölçüm sistemleri ve teknikleri

Deneylerde akım alanlarının ve oyulma mekanizmasının nedenlerinin daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla gelişmiş ölçüm cihazlarından yararlanılmıştır. Akım alanlarındaki hız vektörlerinin ve büyüklüklerinin incelenebilmesi amacıyla Particle Image Velocimeter (PIV) sistemi kullanılmıştır.Bu sistem akış içerisindeki parçacıkalrın hareketlerini lazer ışınları ve yüksek hızlı kamera aracılığıyla kaydederek iki boyutlu hız vektör alanlarının hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

Yüzey deformasyonlarının ve oyulma derinliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla ise LİDAR teknolojisi kullanılmıştır. Bu sistem deneyler öncesinde ve sonrasında yüzeylerin 3 boyutlu olarak taranıp sanal ortama taşınması açısından efektif olmaktadır. Bu şekilde oyulma alanları ve derinlikleri hesaplanabilmektedir. Ayrıca LİDAR taramalarının verilerinin doğrulanması amacıyla farklı noktalarda manuel olarak limnimetre ölçümleri alınmıştır. Bu sayede deneylerden önce ve sonra elde edilen yüzey profilleri manuel ölçülerek optik ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak optik sonuçlar destelenmiş ve doğrulukları artırılmıştır.

3.2 Dalga Parametrelerinin ve Kazık Dizilimlerinin Oyulma Süreci Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, farklı dalga periyotları ve farklı dalga geliş açıları, dolgu tipi rıhtımlarda kullanılan tahkimat tipi kazık+palplanş sistemleri etrafında oluşan oyulma alanı, oyulma konumlanması ve oyulma deriniliğinin gelişimi deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan dalga periyotları (P1, P2, P3 ve P4) ve dalga geliş açıları $(0°, 30°, 60°, 90°)$ sistematik olarak değiştirilmiş ve bu parametrelerin akış üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda deneyler yapılmadan önceki beklenti, daha dik gelen dalga geliş açılarında akışın önünde oluşacak engelin daha büyük olması dolayısıyla daha büyük bir oyulmanın oluşması beklenmektedir. Örneğin yapılacak deneylerde $0°$ ve $90°$ deneyleri düşünüldüğünde yapı önünde daha fazla engel olacak olan $90°$ dalga geliş açısında dalga yüksekliklerinin iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Dolayısıyla daha fazla oyulma beklenmektedir. Farklı dalga periyotlarında yapılan deneylerde ise büyük periyota sahip deneylerde daha büyük oyulma derinliği elde edileceği öngörülmektedir. Ayrıca dalga kaynaklı oyulmalarda akım bileşenleriyle yapı etrafında oluşabilecek vorteks yapıları birleşerek oyulma mekanizması üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelemek hedeflenmektedir.

Deneysel yaklaşımda sadece dalga kaynaklı oyulma mekanizması düşünülmüştür. Böylece sadece dalga kuvvetlerinin yapı etrafında oluşturacağı oyulma davranışları net bir şekilde gözlemlenmiştir. Oyulma öncesi ve sonrasında yüzey profilleri LİDAR ile 3D olarak taranmış, ayrıca bu değişimlerin zaman içerisinde değişimi ise PIV yardımıyla alınan hız vektörleri ve büyüklükleriyle ilişkilendirilerek oyulma mekanizmasını daha net bir şekilde anlamak amaçlanmıştır.

3.3 Araştırmanın Uygulama Alanları ve Katkıları

Araştırmanın uygulama alanları ve katkıları iki ana başlık altında şu şekilde özetlenebilir.

3.3.1 Endüstriyel katkılar

Çalışmada deniz yapılarında özellikle dolgu liman tasarımlarında ve kıyı koruma uygulamaları açısından önemli endüstriyel faydalar sağlaması beklenmektedir. Endüstriyel açıdan bakıldığında 3 temel başlık altında faydaları şunlar olacaktır;

- Dolgu tipi yapılan liman yapılarında kazık+palplanş sistemleri tasarımında dalga etkisi altındaki oyulma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi ve yapı temellerinin daha güvenli şekilde tasarlanmasına olanak sağlayacaktır.
- Kıyı yapılarının inşaa edildikten sonra bakım-onarım için ayrılacak bütçelerin minimum seviyelere çekilmesi sağlanabilir. Oyulma mekanizmasının daha iyi anlaşılması sayesinde kritik bölgelerin önceden tahmin edilmesi bu masrafların azaltılabilmesi açısından önem arz etmektedir.
- Yeni liman yatırımlarında sürdürülebilir bir altyapı planlamasının yapılmasına olanak sağlayacaktır. Farklı dalga geliş açıları ve periyotlarında yapılan deneyler sayesinde gerçek deniz koşullarındaki yapı davranışı önceden tahmin edilebilecektir.

Ayrıca yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen veriler liman ve kıyı yapıları tasarımı yapan firmalar ve proje mühendisleri için bir referans niteliği taşımaktadır. Benzer yapı sistemlerinde çevresel koşulların etkilerinin daha önceden tahmin edebilecek bilimsel bir temel sunmaktadır.

3.3.2 Akademik katkılar

Mevcut literatür incelendiğinde, özellikle dalga etkisi altındaki kazık+palplanş sistemlerinde oluşan oyulma ve geri dolma süreçleri kısıtlı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan birçok çalışmada tekil kazık veya akıntı altındaki kazıklar etrafındaki oyulmayı çalışılmıştır. Dolayısıyla kompozit yapı sistemleri ile dalga kaynaklı sediment taşınımı arasındaki etkileşim hâlâ yeterince çalışılmamış ve anlaşılamamıştır. Bu çalışmada literatürdeki eksiği kapatmak amacıyla, iki farklı kazık birleşimi deneysel olarak çalışılmıştır. Dalga geliş açılarının ($0°$, $30°$, $60°$, $90°$) çeşitlendirilmesiyle

dalga yönelimi ile geometri arasındaki ilişki detaylı olarak ele alınmıştır. 4 farklı dalga periyodu ile sediment hareketi ve oyulma derinlikleri incelenmiştir. PIV ve LİDAR teknolojisi kullanılarak daha yüksek çözünürlüklü ve daha güvenilir analizler yapılmıştır. Çalışmanın bu yönü sayesinde dalga etkisinde gelişen oyulma sürecinin fiziksel temelleri daha iyi bir şekilde anlaşılıp, aynı zamanda benzer deneysel çalışmalar için metodolojik bir çerçevede sağlayarak literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Yüksek çözünürlüklü ölçüm cihazlarının eş zamanlı olarak kullanılması gelecekte yapılacak çalışmalar açısından model önerisi sunmaktadır. Farklı yapı konfigürasyonlarının kullanılması da ileride yapılacak parametrik denesel çalışmalar için temel teşkil etmektedir. Sadece dalga kaynaklı oyulma incelendiğinden belirli çevresel koşullar özelinde analizler yapılmasına zemin hazırlamıştır.

Bu bağlamda, deneysel kıyı mühendisliği anlamında hem uygulamalı hem de akademik anlamda yapılacak yeni çalışmalar için bir ışık olacaktır.

4. YAKLAŞIM

4.1 Deneysel Çalışmanın Genel Amacı

Bu tez kapsamında, dalga etkisinin altında çalışan kazık+palplanş kullanılan rıhtım yapılarında meydana gelen oyulma süreçleri, laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmanın genel amacı, kullanılan yapı geometrisinin, dalga periyotlarının ve dalga geliş açılarının, kullanılan zemin üzerinde oluşan oyulma alanı, oyulma derinliği ve geri dolma süreçlerinin üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Yapılan çalışma sayesinde dalga kaynaklı sediment taşınımının detaylı olarak incelenmesi ve farklı yapı konfigürasyonlarının oyulma üzerindeki etkilerinin ortaya konması amaçlanmıştır.

4.2 Deney Ortamında Genel Bakış

Deneysel çalışmalar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan 26m uzunluğunda 1m genişliğinde ve 60 cm yüksekliğinde bir dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde su derinliği kanal tabanından 40 cm ve kum havuzu (6 cm) üzerinde 34 cm olacak şekilde belirlenmiştir. Deney düzeneği, kullanılan ölçüm cihazları (PIV, LİDAR vb.), kazık birleşimleri gibi teknik detaylar Bölüm 5'te sunulacaktır. Bu bölümde deneylerin genel mantığına ve izlenen yaklaşıma odaklanılacaktır.

4.3 İncelenen Parametreler ve Değişkenler

Bu çalışmada üç adet geniş kazık bulunan bir yapı kullanılmıştır. Deneylerde incelenen parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dalga Geliş Açıları: Dalga geliş açısı dalgaların yönünü deney kanalının kısıtından dolayı çeviremeyeceğimiz için yapı döndürülerek sağlanmıştır. Deneylerde dalga

geliş açıları $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° olarak belirlenmiştir. Deneylerde bu açılar 2 yapı birleşimi ve 4 farklı dalga periyoduyla eşleşecek şekilde değiştirilmiştir.

- Dalga Periyotları: Deneylerde 4 farklı dalga periyodu kullanılmıştır. Bu periyotlar ise T1, T2, T3, T4 olacak şekilde sırasıyla 0.714 s, 0.909 s, 1.11 s, 1.25 s'dir.
- Yapı Konfigürasyonları: Deneylerde 2 farklı yapı konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu konfigürasyonlardan birincisi kazıklar arası palplanş mesafesinin kazık çapının yarısı kadar olduğu durum (B=D/2), ikincisi ise kazıklar arası palplanş mesafesinin kazık çapına eşit olduğu durumdur (B=D).

Belirlenen bu parametrelerin kombinasyonları, yapı çevresinde oluşan oyulma derinliği, oyulma alanı ve konumları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

4.4 İncelenen Problemler ve Hedeflenen Bulgular

Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sorulara yanıtlar aranmıştır:

- Oyulmanın maksimum olduğu durum hangi yapı şeklinde ve dalga koşullarında gerçekleşmektedir? Hangi koşullar yapı için en kritik durumu oluşturmaktadır?
- Yapı kaynaklı etkilenmiş akış içerisinde dalga tepesi ve dalga çukurunda akımda hızlar nasıl değişmektedir?
- Kullanılan yapı birleşimlerinde kazıklar arası mesafenin, dalga periyodunun ve dalga geliş açısının oyulma mekanizmasına olan etkisi nedir?
- Kazıkların önünde oluşan hız vektörlerinin büyüklükleri ve yönleri oyulma bölgelerini ile nasıl ilişkilendirilebilir?

4.5 Ölçüm ve Değerlendirme Yöntemleri

Deneylerde 3 adet farklı ölçüm tekniği kullanılmıştır. Bunlar:

- LİDAR ile yüzey taraması: Deney öncesi ve sonrası 3 boyutlu taramalar yapılmıştır. Yapılan bu taramalar sayesinde oyulma-dolma bölgeleri ve derinlikleri belirlenmiştir.

- Limnimetre ile yüzey derinlik ölçümü: Lidar ile yapılan 3 boyutlu taramaların doğruluğunu artırabilmek için manuel olarak birkaç deneyde limnimetre ile derinlik ölçümü yapılmıştır.

- PIV ölçümleri: Kazık önlerinde akışın değişimini anlayabilmek için kum yüzeyinden 5-6 cm yükseklikte x-y eksenlerinde hız bileşenleri ölçülmüştür. Dalgaların 0°, 90°, 180°, 225° ve 270°'lerine karşılık gelen hızlar ve büyüklükleri analiz edilmiştir. Bu sayede akımın oluşumu gözlemlenmiş ve oyulmaya neden olan akım davranışları detaylı şekilde incelenmiştir.

4.6 Parametrelerin Oyulma Üzerindeki Etkileri

Dalga geliş açısı, yapı konfigürasyonları ve dalga periyotlarındaki değişimlerin, yapı etrafında oluşan oyulmanın alanı ve derinliklerini nasıl değiştirdiği analiz edilmiştir.

Deneylerde dört farklı dalga geliş açısı ($\theta = 0°, 30°, 60°, 90°$) kullanılmıştır. Lidar taramaları ve PIV ölçümleri, dalga geliş açısının oyulma paternleri üzerinde doğrudan etki etmediğini göstermiştir. Değişen dalga geliş açıları S/D oranları üzerinde doğrusal bir bağlantı saptanamamıştır.

Dört farklı periyot (T = 0.707 sn, 0.909 sn, 1.11 sn, 1.25 sn) incelenmiştir. Bu değişken, akımın enerjisini ve dolayısıyla Keulegan Carpenter sayısını (KC) belirleyerek oyulma derinliği ve alanını kontrol etmektedir: Özellikle $KC > 1$ eşik değeri aşıldığında ($T \geq 1.11$) oyulma derinliğinde belirgin artış gözlenmiştir. Bu süreç, PIV ile ölçülen hız profilindeki artan akış hızı seviyeleri ve Lidar ile tespit edilen geniş alanlı oyulma bölgeleriyle tutarlı bulunmuştur.

Deneylerde iki farklı kazık birleşim konfigürasyonu (Konf.1: B/D=0.5, Konf.2: B/D=1) karşılaştırılmıştır: Konf.1 (B/D=0.5): Kazıklar arasındaki mesafenin az olması, akımın kanal boyunca hızlanmasına neden olmuş, kazıklar arasında yüksek miktarda lokalize oyulma meydana getirmiştir. Konf.2 (B/D=1): Daha geniş kazık mesafesi, akımın yapı etrafındaki yayılımını kolaylaştırmış, oyulma alanının daha homojen ancak daha derin noktalarda yoğunlaştığı bir dağılım sergilemiştir. Bazı düşük periyot ve dar açı koşullarında deneysel başarısızlıklar kaydedilmiştir (Deney No 29,30; $\theta = 90°$ için T =0.707 sn ve 0.909 sn). Şekil 6.1'de konfigürasyonaların

karşılaştırma sonuçları grafiksel olarak ifade edilmiştir. Deneyler sonucunda maksimum oyulma derinliği Deney no:28'de oluştuğu gözlemlenmiştir.

Dalga geliş açısı, yapı konfigürasyonları ve dalga periyotlarının, birleşik ve birbirini etkileyen parametreler olarak oyulma alanı ve derinliğini nasıl şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, liman ve kıyı yapılarının tasarımında kritik öneme sahiptir.

5. DENEYLER

5.1 Deney Düzeneği ve Dalga Kanalının Özellikleri

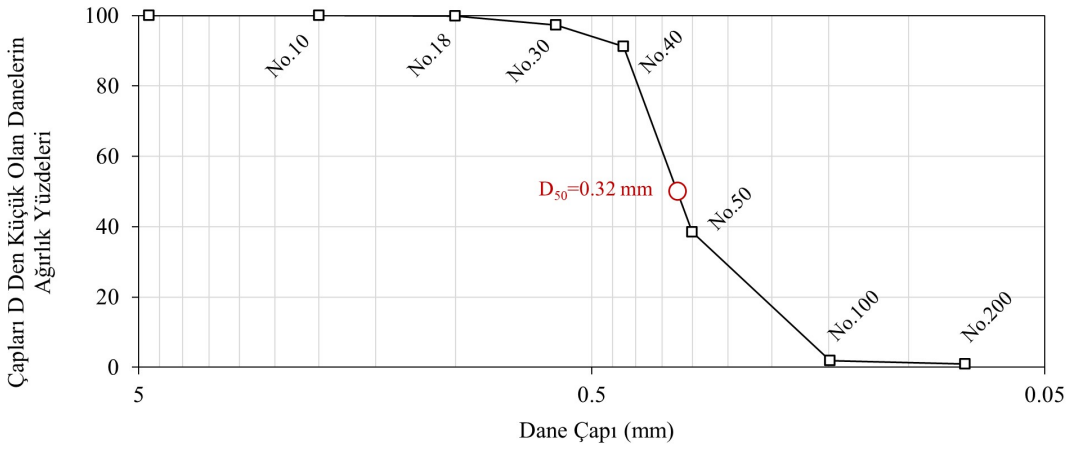
Yapılan tüm deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yer alan dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Fiziksel modelleme için akış-dalga etkileşimlerinin incelenmesi amacıyla yapılan bu kanalda, düzenli dalga üretimi ile detaylı gözlemlere olanak sağlamaktadır.

Dalga kanalının uzunluğu 26 m, genişliği 1 m ve derinliği 60 cm'dir (Şekil 5.2). Kanal tabanı pürüzsüz betondan yapılmıştır. Kanalın duvarları camdan yapılmıştır. Dalga kanalının suyunu doldurmak için su deposundan pompa yardımıyla ve/veya yangın hortumları gerekli olduğu durumlarda kullanılarak doldurulmuştur. Deney düzeneği dalga paletinden 10.5 m uzakta konumlandırılmıştır. Yerleştirilen deney düzeneğinin tabanında $D_{50} = 0.32$ mm olan kum kullanılmıştır. Malzeme granülometrisi Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Malzeme Granülometrisi.

Elek No	Elek Çapı(mm)	Elek Üzerinde Kalan Miktar (gr)	Elekten Geçen Miktar(gr)	Elekten Geçen Yüzde(%)
No.4	4.75	0	1769.60	100
No.10	2	0.5	1769.10	99.97
No.18	1	2.50	1766.60	99.83
No.30	0.6	43.80	1722.80	97.36
No.40	0.425	109.00	1613.80	91.20
No.50	0.3	934.50	679.30	38.39
No.100	0.149	646.00	33.30	1.88
No.200	0.075	16.80	16.50	0.93
Toplam			1753.1	

Kazıklar Çizelge 5.1'de verilen iyi derecelendirilmiş olan kum havuzuna yerleştirilmiştir. Kum havuzu ölçüleri, dalga yönünde 2 m olup genişliği 1 m ve derinliği ise 6 cm'dir. Kum havuzunun dağılmaması için dik üçgen formda 1/2 eğimde tahta

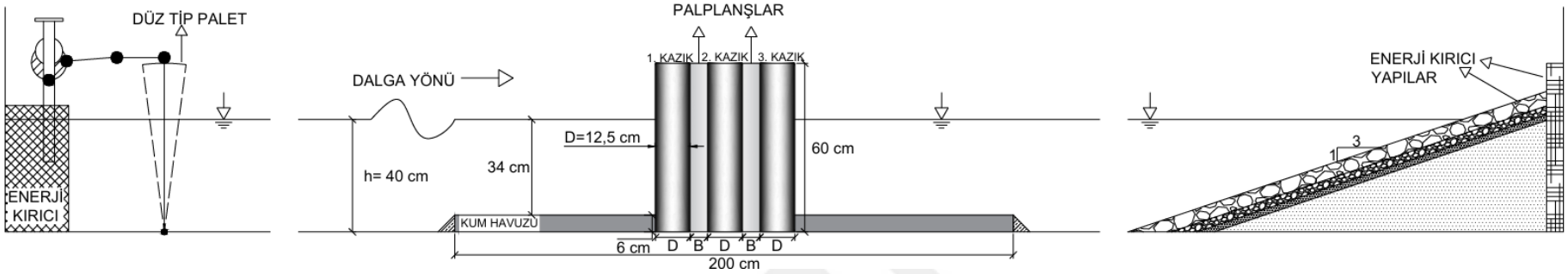


Şekil 5.1: Granülometri grafiği.

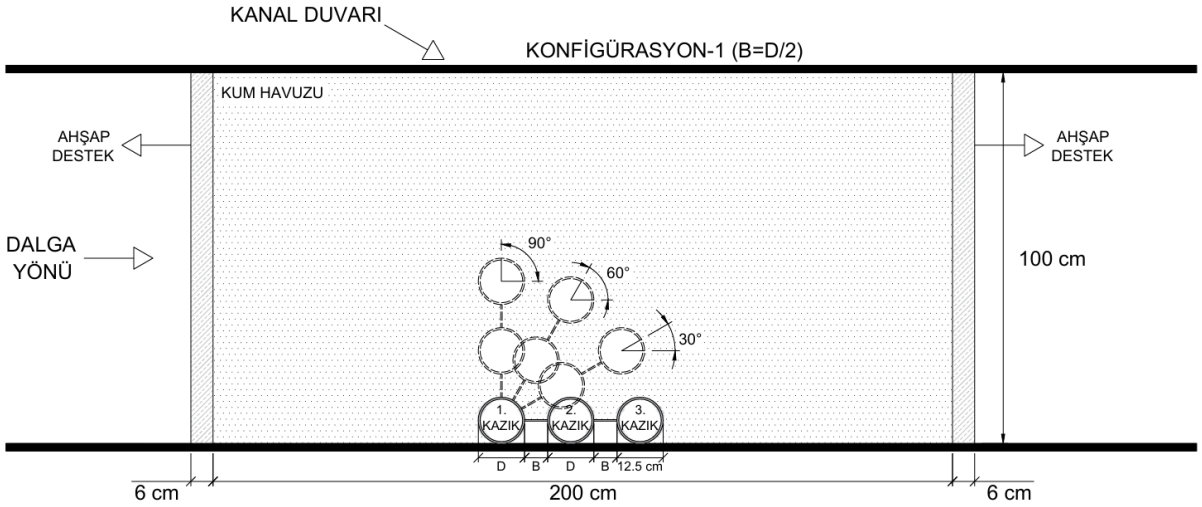
destekler kum havuzunun iki başına konulmuştur. Bu parçaların yüksekliği kum havuzu yüksekliği kadardır.

Deneylerde kullanılan su derinliği kanal tabanından 40 cm yükseklikte ve kum yüzeyinden itibaren 34 cm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, dalga hareketlerinin ve yapıya olan etkilerinin gerçekçi şekilde modellenebilmesi için belirlenmiştir. Periyodik dalga oluşturmak için mekanik tip bir dalga üretici sistem kullanımıştır. Dalga üreten sistem düz tip palet olarak adlandırılmaktadır. Deneyler boyunca farklı dalga periyotları, kullanılan hassas palet hız ayarlayıcı sayesinde kontrol edilmiştir.

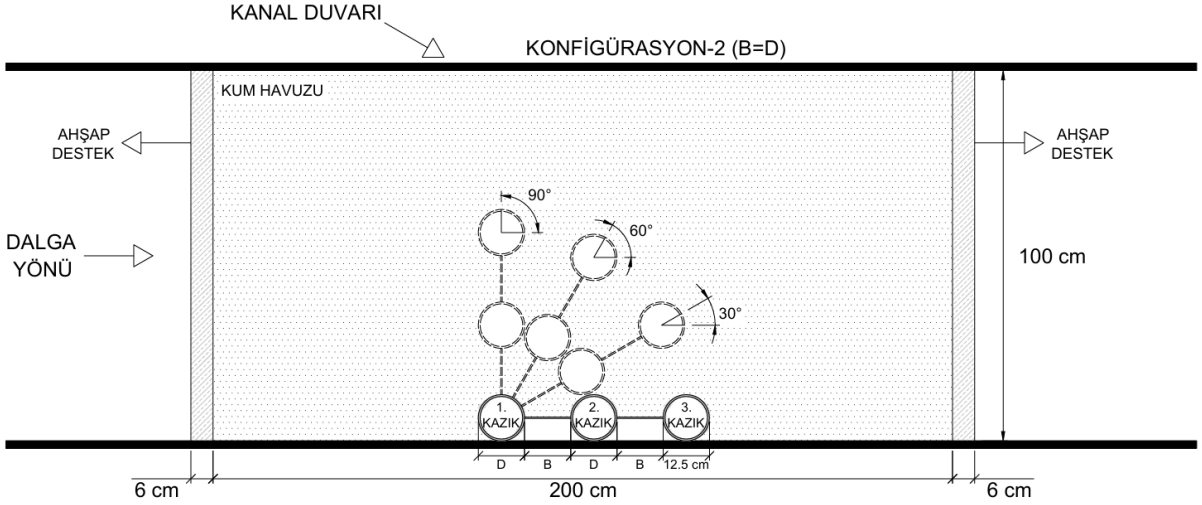
Kanalın diğer ucunda ise üretilen dalgaların geri yansımasını minimum seviyeye indirmek için özel olarak tasarlanmış bir enerji kırıcı (dalga sönümleyici) yapı yapılmıştır. Bu yapı 1/3 eğimli bir yığın şeklinde tasarlanmıştır. Aşağıdan yukarıya doğru farklı boyutlardaki malzemelerle tabakalandırılmıştır. Tabakanın en altında kum, onun üzerinde daha büyük granülometriye sahip çakıl, daha yukarı gidildikçe dane çapları artan ve sonunda daha büyük taşlar kullanılmıştır. Bu sayede dalga kırıcı içerisinde bulunan kumun da deneyler esnasında yansıyan dalgalarla beraber deney düzeneğine taşınması engellenmiştir. Ayrıca gelen dalgaları efektif şekilde sönümleyerek kanal içerisinde yansıyan dalga etkilerini minimum seviyeye çekilmesi sağlanmıştır. Bu fiziksel koşullar sayesinde deneysel yapı etrafında oluşan oyulma ve dalga-akış etkileşimleri yüksek doğrulukla gözlemlenebilmiştir.



Şekil 5.2: Deneylerde kullanılan dalga kanalının profili.



Şekil 5.3a: İlk kazık yerleşimi (B=D/2).



Şekil 5.3b: İkinci kazık yerleşimi (B=D).

Şekil 5.3: 2 Farklı kazık yerleşimi için kum yatağı plan görünümü.

Çizelge 5.2: KC hesaplama tablosu.

T (s)	L (m)	H (m)	$k.h$	$sinh(kh)$	$U_m(m/s)$	KC Sayısı
0.71	0.85	0.135	2.96	4.97	0.0632	0.36
0.909	1.25	0.115	2.01	3.60	0.1095	0.80
1.11	1.80	0.095	1.40	1.79	0.1501	1.33
1.25	2.20	0.075	1.14	1.38	0.1365	1.36

5.2 Deneysel Yapı ve Konfigürasyonlar

Bu çalışmada, dalga etkileri altında meydana gelen zemin oyulmalarını incelemek için, geniş kazık (large pile) sistemleri kullanılmıştır. Deneysel modelleme gerçek yapılar ölçeğinde oyulma mekanizmasının davranışlarını temsil edecek şekilde ayarlanmıştır. Her bir konfigürasyon, dalga-zemin-yapı etkileşimlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmekte kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır.

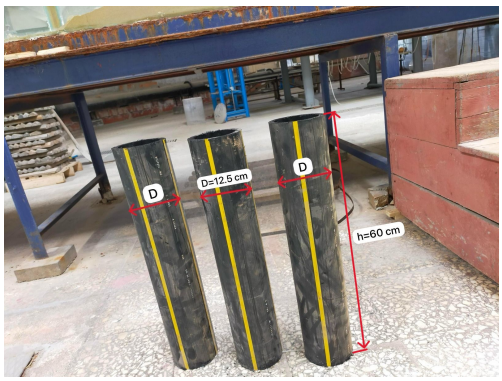
5.2.1 Kazık özellikleri

Deneylerde kullanılan kazıklar 12.5 cm çapında PVC (Polyvinyl Chloride) borulardan seçilmiştir. Kazık yüzeyleri hidrolik olarak pürüzsüz seçilmiştir. Kazıkların yükseklikleri kanal tabanından itibaren h=60 cm'dir.

Kazık malzemesi su etkileri altında korozyona veya aşınmaya uğramayacak bir yapıdadır. Kazıklar deneylerde kanal tabanına sabitlenmiş ve her bir konfigürasyonda aynı rijitlik koşulu sağlanmıştır. Kazıkların , palplanş ara bağlantıların kanal tabanına oturma yüzeyleri ve kazıkların kanal duvarına gelen yüzeyleri cam macunu kullanılarak sızdırmaz hale getirilmiştir. Sızdırmazlığın sağlanmasındaki temel amaç sızıntı akımı olmasının önüne geçilmesidir. Sızıntı olması deneylerde kullanılan zemin malzemesinin sızan noktadan kaçarak oyulma sonuçlarının güvenilirliğini etkileyecektir. Dolayısıyla sızdırmazlık dikkat edilmesi gereken bir aşamadır.

5.2.2 Kazık yerleşimi konfigürasyonları

Deneylerde iki farklı kazık birleşimi kullanılmıştır. Kazıklar arasındaki bağlantılar Plexiglas malzemesi ile yapılmıştır. Kazık yüzeylerinde dikey olarak bu pleksilerin girebileceği gedikler açılmıştır ve silikon ile birlikte bu bağlantılar rijit ve sızdırmaz



Kazıkların Profili.



Kazıkların Kesiti.

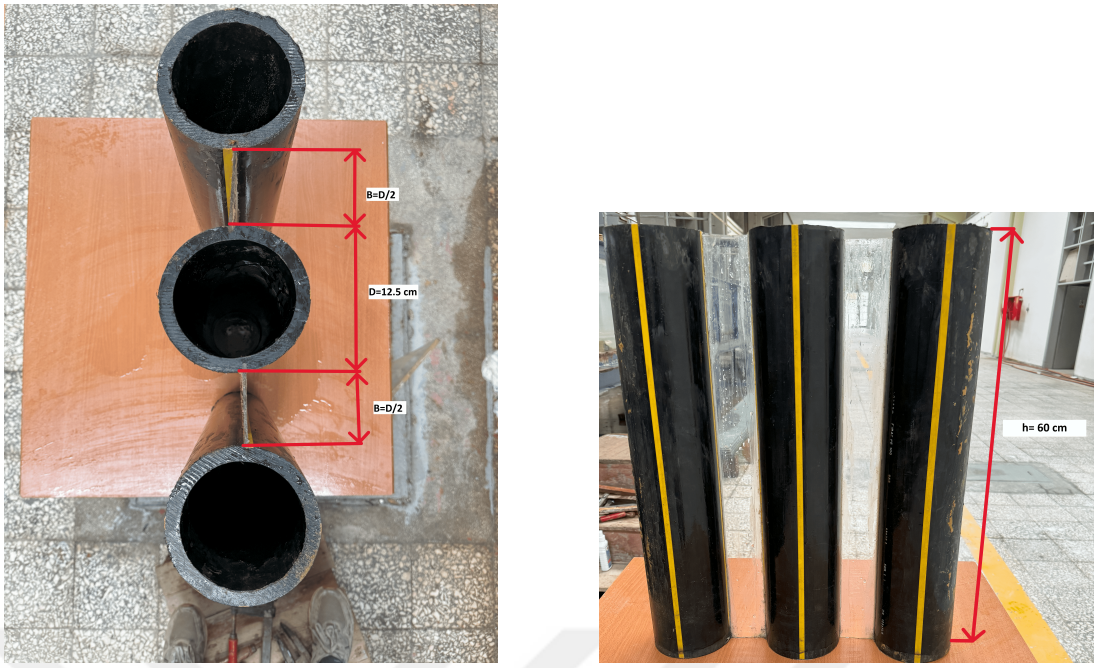
Şekil 5.4: Kazık özellikleri.

hale getirilmiştir. Kazıklar arasında oluşacak bir sızma akış düzenini değiştireceğinden sızdırmazlıkları kontrol edilmiştir. Yapının bir rıhtım yapısı olduğu ve arkasında yapı olacağı düşünüldüğünden bu bölgede sızıntı olmaması gerekmektedir. Kullanılan birleşim tipleri aşağıda gösterildiği gibi:

- Birinci dizilim: Kazıklar arası mesafe kazık çapının yarısı kadar olduğu durumdur (B=D/2). Burada dar açıklıklı birleşimlerin oyulma mekanizmasının anlaşılması amaçlanmıştır (Şekil 5.5).
- İkinci dizilim: Kazıklar arası mesafe kazık çapı kadar olduğu durumdur (B=D). Burada ise daha geniş açıklıklı birleşimlerin oyulma mekanizmasının anlaşılması ve dar birleşimle kıyaslamak amaçlanmıştır (Şekil 5.6).

5.2.3 Deney düzeneğinin dalga kanalına yerleştirilmesi

Deneylerde kullanılan kazık konfigürasyonları dalga kanalına yerleştirildikten sonra dalga etkileriyle hareket etmemeleri için kanal enine atılan demir destekler yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 5.7 (a)). Bu sayede bu kazıkların konumları sabitlenmiş ve kazıklar hareket etmez hale getirilmiş olmaktadır. Daha sonra sabitlenen kazıkların kanal tabanı ve kanal duvarı ile birleştiği yerlerde cam macunu kullanılarak sızıntı akımları engellenmiştir (Şekil 5.7 (c)). Kazıkların dalgaya paralel koyulduğu şekilde kazıklar kanal duvarına paralel bağlanırken açı arttıkça dalganın gidişi doğrultusunda ilk kazık sabit tutularak yapı döndürülmüştür. Deneylerde yapı döndüğünde arkasında



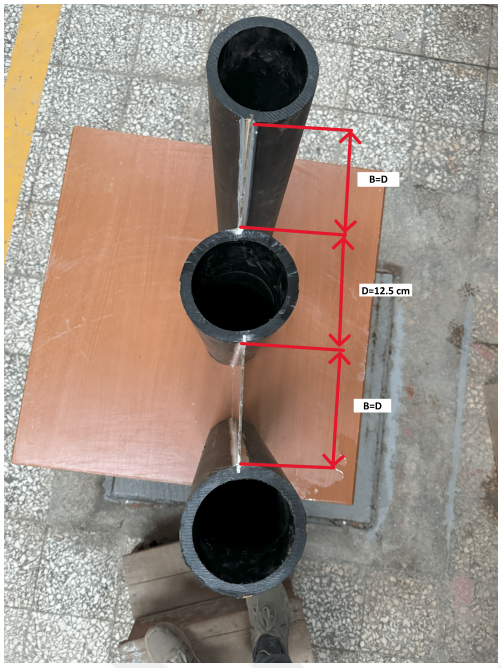
Kazıkların kesiti. Kazıkların profili.

Şekil 5.5: İlk kazık birleşimi özellikleri.

oluşan boşluklar gerçek hayatta rıhtım dolgu kısmını oluşturduğu düşünüldüğünden bu bölgeye su girişini veya dalga dönüşünü (diffraction) engellemek için 3. borudan kanal duvarına kazıkların yüksekliğinde pleksiglass malzemesiyle bağlantı konulmuştur (Şekil 5.7 (b)). Her deney öncesinde kum yüzeyi milimetrik olarak düzenlenmiştir (Şekil 5.7 (d)). Bu sayede deneyler özelinde başlangıç yüzey profilleri sabit tutulmuştur. Aşamaların daha net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla deney hazırlık süreci, B=D/2 ve dalga geliş açısı 60° olan yapı konfigürasyonun hazırlık aşamaları gösterilmiştir.

5.3 Kullanılan Cihazlar ve Ölçüm Yöntemleri

Deneylerde dalga-kazık etkileşimlerinden kaynaklı oyulma ve geri dolma süreçlerinin detaylı olarak izlenebilmesi amacıyla gelişmiş ölçüm sistemlerinden faydalanılmıştır. Deneysel ölçümler hem akış içerisindeki hızların büyüklükleri ve yönleri hem de deney zemininin fiziksel değişimlerinin hassas bir şekilde ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda kullanılan cihazlar şunlardır: Lidar (3 boyutlu yüzey tarayıcısı), PIV (Particle Image Velocimetry) ve limnimetre (yükseklik ölçüm aleti).



Kazıkların kesiti.



Kazıkların profili.

Şekil 5.6: İkinci kazık birleşimi özellikleri.

5.3.1 PIV (Particle Image Velocimetry)

PIV (Particle Image Velocimetry), deneyler sırasında yapı etrafında iki boyutlu hız alanlarını taramak için kullanılmıştır. Bu sayede akışkanın içerisindeki parçacıkların hareketleri yüksek hızlı kamera ve lazer ışığı yardımıyla ölçülmüştür ve analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler deneylerde kullanılan kazıkların önünde ve zemin malzemesinden 5-6 cm yukarıda x-y yönlerinde ölçülmüştür. Ölçümler deneyler bittikten sonra oyulma paternleri denge düzeyine ulaştıktan sonra gerçekleştirilmiştir. PIV ölçümleri 5.2.2 kısmında gösterilen konfigürasyonların 30° ve 60° dalga geliş açısı yerleşimlerinin en yüksek periyodu olan T=1.25 s olan deneylerinde alınmıştır.

5.3.1.1 PIV (Particle Image Velocimetry) nedir?

PIV (Particle Image Velocimetry), akışkanlar mekaniğinde sıklıkla kullanılan gelişmiş ve temassız bir hız ölçüm yöntemidir. Bu yöntem, özellikle akışkanın içerisindeki hız alanlarını detaylı olarak ortaya koymak için kullanılmaktadır. PIV deneysel hidrodinamik çalışmalarda karmaşık yapılar etrafındaki akışın davranışlarını anlamak için önemli bir cihazdır.



(a) Kazıkların sabitlenmesi.



(b) Pleksi yerleştirilmesi.



(c) Sızdırmazlık işlemi.



(d) Kumun düzeltilmesi.

Şekil 5.7: Deneyler öncesi hazırlık süreci aşamaları.

PIV'nin temel çalışma mekanizması şu şekilde özetlenebilir.

- Akışkan içerisinde oluşan parçacıklar izlenmektedir. Ancak gerek duyulması halinde ışığı daha fazla yansıtan parçacıklar eklenebilir.
- Bu parçacıklar yüksek frekanslı lazer yardımıyla görünür hale getirilir.

- Yüksek çekim hızlarına sahip kameralar yardımıyla (milisaniye düzeyinde) iki ayrı görüntü çeker.
- Görüntülerdeki parçacıkların yer değiştirme durumarı özel yazılımlar sayesinde analiz edilir.
- Bu sayede belirli sürede alınan birçok ikili resimler analiz edilir, iki boyutlu veya üç boyutlu hız alanları ve büyüklükleri elde edilir.

PIV ne işe yarar ve avantajları nelerdir?

- Sayısal model sonuçlarıya deneysel doğrulama yapılmasına yardımcı olmaktadır.
- Yapılar etrafındaki akış özelliklerinin görüntülenmesi ve anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.
- Vorteks oluşumları, sınır tabaka kalınlıkları, türbülans bölgeleri gibi karmaşık akış karakteristiklerinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.
- Akışkanın içindeki detaylı hız değişimleri ADV gibi akışı etkilemeden temassız olarak ölçülmesine yardımcı olmaktadır.
- Akışı bozmadan temassız ölçüm yapar.
- Vektörel hız alanını detaylı olarak verir.
- Görsel olarak analiz yapılmasına olanak tanır.
- Karmaşık akış bölgelerini incelemeye olanak tanır(örneğin kazık önleri).

PIV nerelerde kullanılır?

- Otomativ ve HVAC sistemlerinde
- Denizcilik (pervane, gövde gibi yapıların etrafındaki akışlar)
- Biyomedikal (damar içi akış, solunum akışları)
- Hidrolik mühendisliği (örneğin rıhtım, kazık gibi yapıların etrafındaki akış)

- Havacılık mühendisliği (kanat,jet motorları akışları)

Bu tez kapsamında ise kazık+palplanş destekli rıhtımlarda destek elemanlarının önünde oluşan akışın detaylı olarak incelenmesi ve oyulma mekanizmasıyla ilişkilendirebilmek amacıyla kullanılmıştır. Deneylerde özellikle zemin yüzeyinden 5-6 cm yukarıdaki x-y iki boyutlu hız bileşenleri ölçülüp analiz edilmiştir.

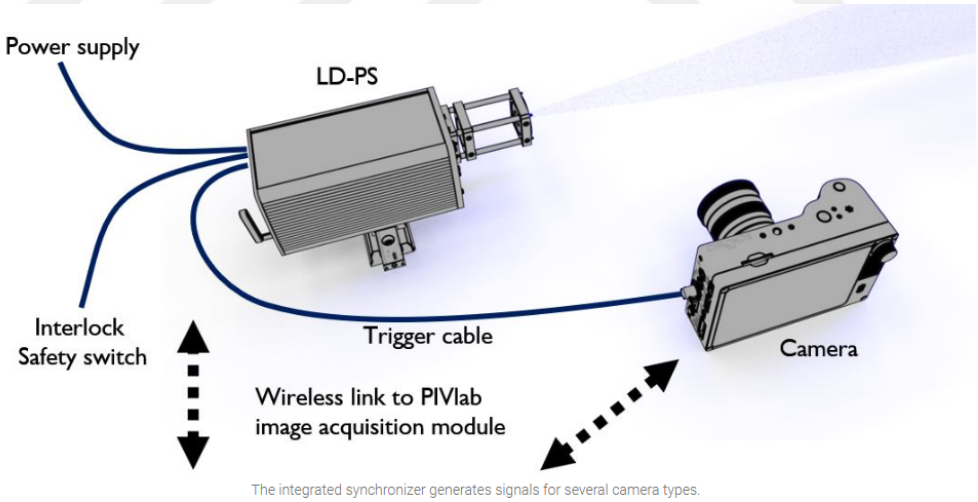
PIV sistemi ve kullanılan donanım aşağıdaki gibidir:



(a) PIV.



(b) PIV'nin lazeri.



(c) PIV'nin çalışma mekanizması.

Şekil 5.8: PIV sistemi.

Şekil 5.8 (a) Hassas görüntüleme kamerası. Yüksek çözünürlük ve yüksek kare hızına sahiptir. Parçacıkların konum değişimi bu kamera ile yakalanır.

Şekil 5.8 (b) Lazer ünitesi (LD-PS), PIV sisteminde parçacıkları aydınlatmak ve görünür hale getirmek için kullanılır. Yüksek frekanslı lazer ışıkları kullanır, net ve kesin parçacıkların görüntülerinin elde edilmesini sağlar.

Şekil 5.8 (c) PIV sisteminin genel bağlantı şeması. Lazer, güç kaynağı, tetikleyici sistem ve kamera ile senkronize şekilde çalışır. Görüntüler kablosuz olarak PIV yazılımına aktarılır.

5.3.1.2 Deneylerde PIV (Particle Image Velocimetry) ölçümlerinin alınması

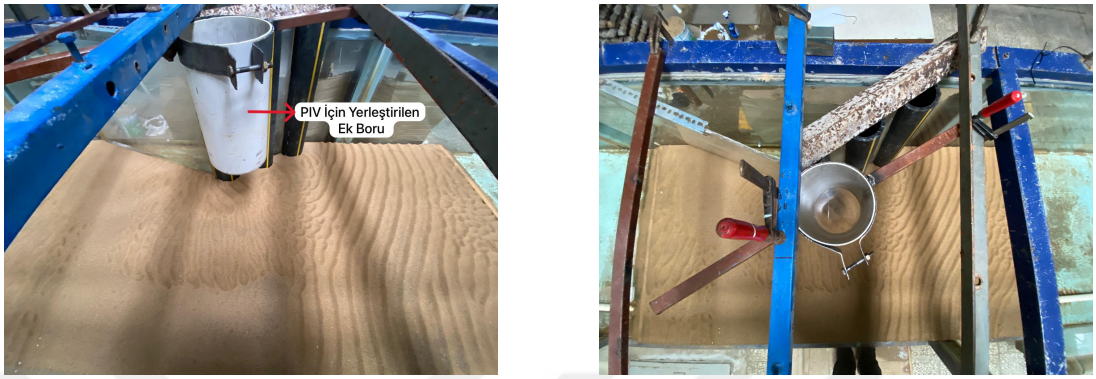
Deneylerde PIV ölçümü almak için ilk olarak kamera dalga kanalının yanına koyulmuş ve PIV lazeri ise kanalın üstünden deney alanına yansıtılmıştır. Bu yöntemle istenilen x-y ekseninden ziyade x-z ekseni ölçülebilmektedir. Dolayısıyla lazerin istenilen x-y ekseninde olması gerekmektedir.

İkinci olarak lazer ve kamera dalga kanalının yanından deney alanına doğru çevirilip ölçüm alınmaya çalışılmıştır. Burada kameranın x-y ekseninde yansıtılan lazer alanını görebilmesi için z ekseninde lazerden daha yukarıda olması gerekmektedir. Bu şekilde açılı olarak alınan ölçümlerde hız vektörleri de açılı olarak çıkmaktadır ve idealize edilip istenilen eksene göre düzenlenmesi gerekmektedir. Bu düzenleme işlemi büyük boyutta alınan ölçümlere uygulanması zor olacağından dolayı kullanılamamıştır.

Üçüncü kamera yerleşimi olarak ölçüm alınacak alanın tam üstünden aşağı doğru bakacak şekilde konumlandırılmıştır. Yani ölçüm alanına yandan lazer tutulmuş ve tepeden kamera ile ölçümler alınmaya çalışılmıştır. Kameranın fokuslandığı alan lazerin geldiği alanda olması gerekmektedir, bu sayede o alanda lazer ışığıyla görünür hale gelen parçacıklar izelenebilmektedir. Ancak yapılan üçüncü yöntemde kamera fokusu durgun su durumunda (dalgalar yokken) lazer alanında iken dalgalar verildiği zaman suyun yüzey hareketlerinden dolayı fokus lazer alanından çıkıp su yüzeyine odaklanmaktadır. Bu yüzden istenilen ölçüm alanı görüntülenememektedir.

Daha sonra ölçümleri almak için su yüzeyinden daha alt bir noktada ölçüm alınması gerektiğinden extra bir boru kullanılmıştır. Bu borunun alt kısmında Pleksiglass (4 mm) ile kapatılarak üst kısmından kamera içeri konumlandırılmıştır. Yerleştirilen bu boru su sızdırmaz hale getirilip içerisine akışkanın girişi engellenmiştir. Bu

sayede suyun altındaymış gibi kamera ölçümleri alınmıştır. Suya yerleştirilen ekstra bu borunun tabanda oluşan hız profilini etkilememesi için suya sadece 6 cm kadar indirilmiştir ayrıca konulan extra ölçüm borusunun zemin akışını etkilememesi sağlanmıştır.



Şekil 5.9: Ölçümlerde kullanılan ek boru.

Ölçümlerin doğru bir şekilde alınabilmesi için ölçüm alanında sadece lazer ışığının olması gerekmektedir. Aksi takdirde gün ışığı nedeniyle istenmeyen alanlardaki parçacıkların görünmesi ölçümlerin hatalı olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla ölçümler gün ışığının olmadığı gece saatlerinde yapılması gerekmektedir. Bu ölçüm koşullarında ölçüm alınacak alanlar belirlenip kamera yerleşimi o alanın üzerine kaydırılarak alınmıştır. Ölçümler 5120x5120 pixel olarak dikdörtgen kesitler halinde alınmaktadır. Koordinatlı şekilde alınan bu kesitler PIV ölçümlerinin analizleri yapıldıktan sonra koordinatlı olarak birleştirilecektir. Alınan ölçümlerin analizlerinin yapılması 5.3.1.3 kısmında detaylı olarak anlatılacaktır.

5.3.1.3 PIV (Particle Image Velocimetry) ile yapılan analiz aşamaları

Çalışmada akış dinamiklerinin anlaşılması ve oyulma mekanizmasını anlamak üzere PIV ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. PIV ile akış içerisindeki hız ve vektör alanları optik görüntüleme yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan analiz süreci aşamalı olarak aşağıdaki adımları izlemiştir.

- ROI (Range of interest alanı belirleme) ve maskeleme: PIV ölçümleri deneysel olarak alındıktan sonra analiz kısmına geçilir. Deneysel çalışmadaki dalga

parametrelerinin verimliliğinin ve sonuçların doğruluğu için ROI'nin doğru belirlenmesi gerekmektedir. ROI dışında kalan alanlar maskelenerek sadece analiz edilen bölgedeki partiküller dikkate alınmış olmaktadır.

- Image pre-processing (görüntü ön işleme): Görüntülerin işlenebilmesi için pre-processing yapılır. Burada yapılan işlemlerde görüntülerdeki partiküllerin netliğini artırmak, gürültülerin azaltılması ve kontrastını düzenlemek olarak özetlenebilir. Analizlerde akışkan içerisindeki partiküllerin deney düzeneğinin tabanında bulunan zeminden ayırmak önem arz etmektedir. Partiküllerin zeminden görüntü olarak ayrılmaması durumunda PIV ölçümlerinde akışkanın hızından ziyade zemindeki kumun hareketlerini ölçeriz ve istediğimiz akışkan hareketlerini izleme amacından çıkmış oluruz dolayısıyla hatalı sonuçlar elde ederiz. Matlab içerisinde bulunan PIV Toolbox üzerinden yapılan analizlerde görüntülerdeki ışık dalgalanmalarını ve diğer optik hataların giderilebilmesi için uygun algoritmaları içermektedir.

- PIV ayarları: İkinci olarak alınan görüntüler üzerinde PIV sisteminin doğru çalışabilmesi için bazı ayarların yapılması gerekmektedir. Bu ayarlar ışık kaynağının yoğunluğu, ölçüm yapılacak zaman dilimi, kare hızı (frame rate), çözünürlük, ölçüm süresi, kamera çözünürlüğüdür. Yapılacak işlemler ölçümümüzün hassasiyetini ve doğruluğunu doğrudan etkilemektedir, dolayısıyla dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu aşamada analizin yapılacağı interrogation area ve yapılacak analizin korelasyon düzeyi belirlenmektedir.

- Analiz yaptırma: Görüntüler üzerindeki ayarlamalar ve analizin yapılacağı piksel boyutları belirlendikten sonra PIV yazılımı ile analizler yapılmıştır. PIV yazılımı temel olarak akışkan içerisindeki partiküllerin hareketlerini takip edip bu hareketler ışığında hız vektörlerini oluşturmaktadır. Bu yazılım cross-correlation tekniğini kullanarak iki ardışık resim arasındaki partikül hareketlerini izler ve hız vektörlerini oluşturur. Ölçümlerde kalibrasyon temel analiz sonrasında yapıldığı için hızlar ilk önce pixel/frame olarak vermektedir.

- Kalibrasyon ve validasyon: Elde edilen verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için deney düzeneğinde kullanılan kalibrasyon ölçeği, ölçüm sonuçlarını

pixel/frame' den m/s boyutuna dönüştürülür. Kalibrasyonun temel amacı ölçülen hız vektörlerinin gerçek fiziksel değerlere uyumlu hale getirilmesidir. Validasyon aşamasında ise belli doğruluk düzeyine göre analiz sonuçlarında oluşan hatalı vektörlerin temizlenmesi sağlanmaktadır. Bu aşamada aşırı parlak olan ve ölçümü etkileyebilecek objeler de filtrelenebilmektedir.

- Yazdırma modifikasyonları ve parametreleri türetme: Analizler tamamlandıktan sonra elde edilen vektörlerin görselleştirilmesi burada yapılmaktadır. Burada vektör ölçekleri, gösterilecek vektör yoğunluğu, vektörlerin transparanlık yüzdeleri, vektör renkleri, görselliği belirleyecek renkli harita tipi, renk ölçeği lejantı gibi ayarlar yapılmaktadır. Ölçüm hızlarının görselleştirilmesinde maviden kırmızıya (negatif hızdan pozitif hıza) olan JET renk haritası kullanılmıştır. Akışta oluşan genel hız profiline göre minimum hız -0,15 m/s, maksimum hız ise +0,15 olarak belirlenmiştir. PIV ölçümleri alındıktan sonra ölçüm kesitinde range of interest alanı ayarlandı. Ayarlanan alan üzerinde ölçüm datasının eksik olduğu kısımlar (deney kazıları, kameranın su haricinde gördüğü kısımlar vb.) masklandı.

- Dalga profili ve hız (m/s) / frame grafiği çizimi: PIV'de analizlerden sonra üretilen dalga parametrelerindeki u hızına bağlı olarak dalga profilinin zamansal değişimi çizdirilmiştir. Bu grafik yardımıyla akış hızının zaman bağlı değişimi ve dalga hareketlerinin zamana bağlı nasıl değişim görüldüğü izlenmiştir. Elde edilen hız profilleri ve dalga profilleri entegre edilerek akışın genel durumu analiz edilmiştir.

- Vektörler ve hız büyüklüğü ile verilerin sunulması: Görselleştirilen bu dalga profili ışığında dalganın $0° - 90° - 180° - 225° - 270°$'lik bölümlerinde (dalga başlangıcı-dalga tepesi-dalga dönüşe başlama noktası-dalga çukurundan öncesi- dalga çukuru) hız vektörleri ve hız büyüklükleri (velocity magnitüde) görselleştirilmiştir. Akış hızlarının görsellerinin kolay anlaşılabilmesi için (0 m/s)-(+0,15 m/s) aralığında olan bir renk ölçeği kullanılmıştır. Ölçekte düşük hız değerleri yeşil renkten başlayarak, hız arttıkça kırmızıya doğru geçiş yapacak şekilde ayarlanmıştır. Bu şekilde hız dağılımı görsel açıdan ayırt edilebilir olmuştur. Akışın farklı bölgelerindeki hız dağılımı ve değişimi daha net bir şekilde görselleştirilmiştir. Tüm elde edilen veriler PIV'den alınan kazık koordinatlarına

bağlı olarak hassasiyetle yerleştirilmiştir. Bu sayede yapı etkisindeki akış hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Ayrıca akışın geldiği ve döndüğü kesitlerinde sunulmasıyla oyulma mekanizmasının arkasındaki sebep net bir şekilde anlaşılmıştır.

- Sonuç ve akışın durumu: Sonuç olarak, elde edilen PIV verileri, akışın hız ve vektör alanlarını görsel olarak sunarak akışın genel dinamiği hakkında bilgiler verilmiştir. Bu veriler, vorteksleri ve diğer dinamik özelliklerini gözlemlemek için kullanılırmıştır. Bu bağlamda, kazık önündeki akışın belirli bölgelerinde hız değişimlerinin nasıl olduğunu, genel akışın nasıl davrandığını, yapının akış üzerindeki ve dalga hareketlerinin oyulma mekanizması üzerindeki etkilerini inceleyebiliriz.

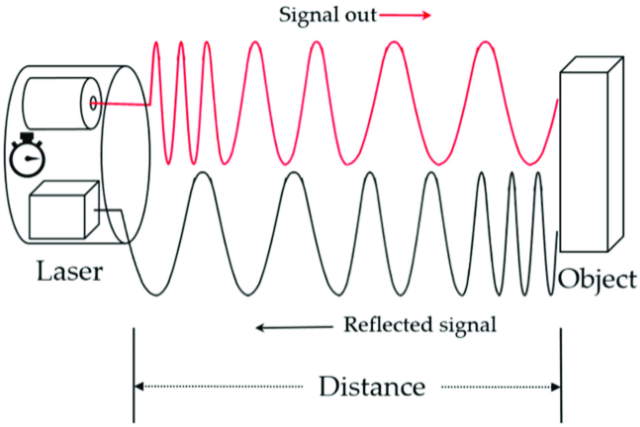
- Oyulma mekanizmasının anlaşılması: Bu PIV ölçümleri ve analizleri, LİDAR tarama yöntemiyle alınan 3D yüzey taramaları üzerinde yapılan oyulma verileri ile karşılaştırılarak oyulma mekanizmasının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Kazık önü akışının hız profilleri ve vektör alanları, tabandaki malzemenin üzerindeki oyulma etkilerini daha net bir şekilde anlamamıza yardımcı olmaktadır. Oyulmanın nedenlerini belirlemek ve akışın taban yüzeyi üzerinde nasıl bir etki yarattığını görmek amacıyla bu veriler karşılaştırılmaktadır. PIV ölçümleri ile akışın hız dağılımları ve yüzey etkileşimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir, böylece oyulma süreçlerinin temel dinamikleri analiz edilmiştir.

5.3.2 Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging)(3D tarama)

Deneysel çalışmalarda, yapı etrafında deneyler sonrası oluşan oyulma ve geri dolma süreçlerinin sonuçları detaylı olarak analiz edilebilmesi için LİDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) teknolojisi kullanılmıştır. Lidar taramaları sonucunda elde edilen nokta bulutu (cloud) verileri CloudCompare gibi yazılımlar kullanılarak analiz edilmektedir. Analizlerde özellikle oyulma ve dolma derinlikleri, yüzey profili analiz edilmiştir. Bu analizlerin sonuçları PIV sonuçları ile karşılaştırılarak oyulmanın nedenleri araştırılmıştır. Ayrıca 3D tarama sonuçları limnimetre ölçümleri ile karşılaştırılıp doğruluk oranları artırılmıştır.

5.3.2.1 Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging) nedir?

Lidar sisteminin temel çalışma mekanizması, bir yüzeye lazer ışını göndererek geri dönen ışığın süresine göre mesafe ölçümü yapılması ve bu şekilde yüzey geometrisinin milimetre hassasiyetinde 3 boyutlu olarak görüntülenmesi esasına dayanan optik görüntüleme teknolojisidir.



Şekil 5.10: Lidar çalışma prensibi.

Lidar sistemlerinin mesafe ölçüm prensibi bir nesneye veya yüzeye lazer ışınları göndererek dönüş süresinin hesaplanmasıdır. Lazer ışınlarının kaynaktan çıkış ve dönüşü arasındaki geçen süreye uçuş süresi denmektedir. Işık hızı saniyede yaklaşık 300.000 km olduğu göz önüne alındığında hesaplamaların çok hızlı gerçekleştiği söylenebilir. Bu prensipten yola çıkarak, Lidarın mesafe ölçümü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$NesneMesafesi = \frac{\text{uçuş süresi} * \text{ışık hızı}}{2} \tag{5.1}$$

$$d = \frac{t * c}{2} \tag{5.2}$$

Normal bir Lidar sistemi saniyede 150 bin ile 2 milyon arası lazer ışını gönderebilmektedir. Işınların dönüş şekli ise nesne yapısına göre değişmektedir. Örneğin düz ve homojen nesnelerden direkt yansırken, ağaç gibi homojen olmayan nesnelerden çoklu olarak yansımaktadır. Öte yandan Lidar ile taranan yüzeylere ait çok sayıda x,y ve z koordinatları kaydedilmektedir. Lazer ışınlarının kullanılma nedeni

ise dalga boylarının daha kısa olmasıdır. Bu sayede yüksek çözünürlük ile diğer sistemlerden daha detaylı haritalandırma yapılmasına olanak tanır.

Lidar sistemleri nerelerde kullanılır?

- Uzay araçları ve uydular.
- Otonom araçlar.
- Deniz coğrafyalarının belirlenmesi.
- Haritalandırma ve arazi modelleme.

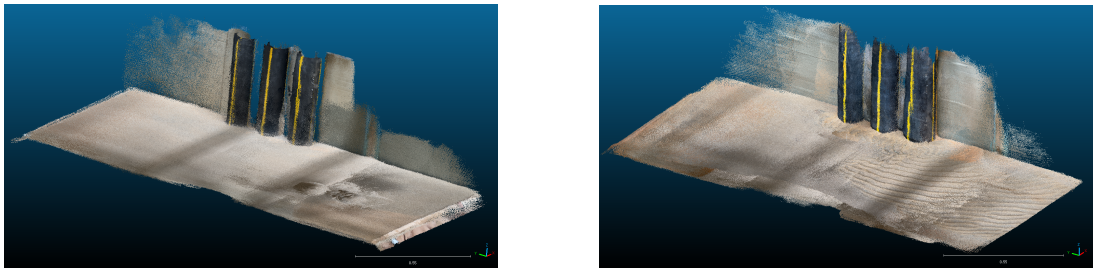
Lidar sisteminin avantajları nelerdir?

- Kesinlik (Kullanılan kısa dalga boyları sayesinde daha yüksek çözünürlük ve doğruluk).
- Hız (Nanosaniyeler içerisinde ölçümler sayesinde geniş alanların taranması kısa sürede gerçekleşmektedir).
- Çeşitli konumlardan toplanabilmesi (Yüksek dağlar, sık ormanlar gibi ulaşılması zor yerler kolaylıkla haritalandırılabilmektedir).
- Düşük maliyet (Diğer arazi ölçümü ve haritalama yöntemleri düşünüldüğünde önemli ölçüde daha az maliyetlidir).

5.3.2.2 Deneylerde Lidar ölçümlerinin alınması

Deneylerde yüzey batimetrisinin belirlenmesi amacıyla Lidar teknolojisi kullanılmıştır. Bu taramalar mobil cihaz destekli bir Lidar sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lidar taramaları her bir yapı konfigürasyonunda deneyler başlatılmadan önce yapılmıştır. Bu taramaların amacı, dalgalar etkisinde bozulmamış yüzey batimetrisinin kaydedilebilmesidir. Kısaca deney sonuçlarıyla karşılaştırılabilmesi amacıyla nivelman olarak kullanılmıştır. Her bir deney sonucunda dalga kanalında bulunan su yüzey profillerini etkilemeyecek şekilde kontrollü olarak boşaltılmıştır. Zemin üzerindeki su tamamen tahliye edildikten sonra (su lazer ışınlarının yanlış

yansıtılmasına sebep olacağından) deney sonuçları da Lidar ile taranmıştır. Deneylerin öncesinde ve sonrasında alınan 3D taramalar CloudCompare yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu sayede kazıkların etrafındaki yüzey formasyonlarında meydana gelen değişimler (oyulma-dolma) detaylı olarak incelenmiş ve 3 boyutlu batimetre haritası elde edilmiştir.



(a) Deney öncesi. (b) Deney sonrası.

Şekil 5.11: Lidar deney öncesi-sonrası taramaları.

5.3.2.3 Lidar ile yapılan analiz aşamaları

Deneylerden önce başlangıçtaki yüzey profili üç boyutlu olarak taranmıştır. Aynı yüzeyin taraması deneylerin tamamlanmasından sonra kum havuzu üzerindeki suyun kontrollü olarak yüzey profilini bozmayacak şekilde boşaltılarak taranmıştır. Bu sayede deneyler sonucunda oluşan oyulmaların tespit edilmesi sağlanmıştır. Alınan lidar taramaları CloudCompare yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve iki kum havuzu arasındaki yükseklik farkları belirlenmiştir.

CloudCompare yazılımda yapılan analizlerin izlediği adımlar ilk olarak taramaların ön işlemesi ve gürültülerin filtrelenmesidir. İlk olarak taramada oluşabilecek hatalı ve istenmeyen noktaların filtrelenmesi amacıyla Statistical Outlier Filter (SOR Filter) kullanılmıştır. Bu filtreleme ile ortalamalardan önemli ölçüde sapma göstermiş olan noktalar belirlenerek atılmış ve yüzey taramaları verilerinin doğruluğu artırılmıştır. Deney öncesi ve deney sonrasında alınan taramalar üst üste getirilerek iki tarama arasındaki farklar hesaplanmıştır.

Deneyde kum havuzunun dağılmasını engellemek için kullanılan tahta üçgen şeklindeki dayanakların etkisinin azaltılması için referans nokta olarak kazık yapısının etkisinin görülmediği uzak bir koordinat belirlenmiştir. Amaçlanan oyulma bölgesi

kesitleri alınmıştır ve analizler bu kesitlerde yapılmıştır. Kesitler kazıkların önü olarak belirlenip kesilmiştir. Alınan bu kesitler standart RGB renk ölçeğiyle görselleştirilmiştir. Daha sonra yüzey değişimlerinin daha net anlaşılabilmesi amacıyla Scalar Field (Skaler Alan) renk haritası oluşturulmuştur. Bu renk ölçeğinde mavi olan bölgeler oyulmanın olduğu bölgeleri, yeşil alanlar yüzeysel olarak değişimin az olduğu bölgeleri ve kırmızı alanlar ise dolmanın olduğu bölgeleri göstermektedir. Bu harita sayesinde deneyler sonucunda meydana gelen oyulma ve dolma bölgeleri belirgin bir şekilde gösterilmesi sağlanmıştır.

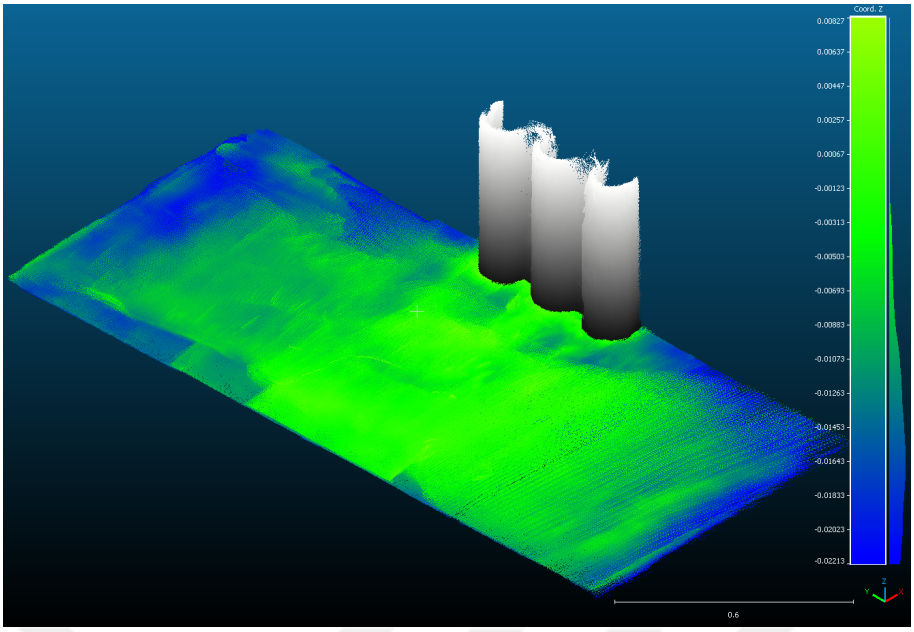
Kazıklar etrafındaki yapılan PİV ölçümlerinden elde edilen hız vektörleri ve büyüklükleri ile 3D tarama analizleri sonucunda oluşan yüzey profilleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu sayede akış hızları ve büyüklükleri ile oyulma-dolma bölgelerin arasındaki ilişki daha net bir şekilde ortaya konmuştur.

Akışın hızlı olduğu yerlerde kayma gerilmesi artacağından oyulmanın da artması ve düşük hız bölgelerinde ise dolmanın görülmesi beklenir. Yapılan bu analiz süreci deneyler sonucunda oluşan oyulma mekanizmasının dinamiklerini açıklamak için kritik bir rol oynamıştır. Yapılan PİV ölçümleri ve 3 boyutlu tarama analizleri sayesinde elde edilen yüzey değişimleri, akışın ve dalgaların oyulma mekanizması üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur.

Ayrıca yapılan bu analizlerle, manuel olarak alınan limnimetre ölçümleri karşılaştırılarak analiz sonuçlarının doğruluk oranı artırılmıştır. Bu yöntem sayesinde, zemin yüzeyindeki formasyonlar hem sayısal olarak hem de görsel olarak analiz edilerek ölçümlerin güvenilirliği yükseltilmiştir.

5.3.3 Limnimetre

Lidar taramalarının doğruluğunu kontrol etmek ve güvenilirliğini artırmak için manuel derinlik ölçümleri alınmıştır. Limnimetre x-y (kanal boyuna-kanal enine) eksenlerinde sabitlendiği yüzey ile birlikte tekerlekleri vasıtasıyla hareket etmektedir. Bu yüzeyin ortasında sabitlenmiş olan ölçekli bir demir çubuk ile z ekseninde kontrollü olarak hareket etmektedir. Ölçümler ilk olarak nivelman bir nokta belirlenmesi ile başlamıştır. Bu nokta deneyler esnasında değişmeyecek olan kanal tabanı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.12: Lidar renk skalası örneği.

Kanal tabanın yüksekliğinin x-y eksenlerinde değişmeyeceği göz önüne alındığında z ekseninin yükseklik değeri bizim için nivelman nokta olarak kullanılmaktadır. Kum yüzeyinin deneyler öncesindeki z koordinatı, dalga kanalının zeminindeki z koordinatına kumun yüksekliği (6 cm) eklenerek bulunmaktadır. Daha sonra deney sonrası kum yüzeyine ait belirli noktaların ve kazık koordinatlarının x-y-z değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu sayede kum yüzeyinin mutlak yüksekliği belirlenmiş ve Lidar ile alınan 3 boyutlu tarama verileri doğrulanmış olmaktadır. Limnimetre ölçümleri, Lidar taramalarında oluşabilecek potansiyel hata paylarını kontrol edebilmek için tamamlayıcı bir veri seti sunmaktadır.

5.4 Deney Matrisi

Bu çalışmada, oyulma süreçlerini etkileyen üç temel parametre incelenmiştir:

- Dalga geliş açısı(θ): $0°, 30°, 60°, 90°$
- Dalga periyodu (T): 0.707 s, 0.909 s, 1.11 s, 1.25 s
- Yapı konfigürasyonu:



Şekil 5.13: Limnimetre ölçümleri.

- Konfigürasyon 1: Kazıklar arası mesafe kazık çapının yarısı (B=D/2) (Şekil 5.3a)
- Konfigürasyon 2: Kazıklar arası mesafe kazık çapı kadar (B=D) (Şekil 5.3b)

Bu değişkenlerin kombinasyonları kullanılarak 32 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her yapı konfigürasyonunda 4 farklı dalga geliş açısı ve 4 farklı dalga periyodu uygulanmıştır. Böylece her bir parametrenin oyulma ve geri dolma süreçleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmiştir. Ayrıca deneylerde PIV ile ölçüm alınan deneyler Çizelge 5.3'de **kalın** olarak gösterilmektedir (Deney no: 8,12,24,28).

Yapılan deneylerin özeti aşağıdaki Çizelge 5.3'de yer almaktadır:

5.5 Deneysel Bulgular

Bu bölümde, kazık+palplanş sistemlerinin etrafında dalga etkileri altında oyulma ve geri dolma süreçlerinin incelenebilmesi amacıyla yapılan PIV ve Lidar ölçümlerinin sonuçları görsel olarak sunulmaktadır. Elde edilen resim ve grafikler, yapılan deneylerin görsel ve nicel sonuçlarını göstermektedir. Verilerin detaylı yorumlanması, karşılaştırılması Bölüm 6'da ele alınmıştır.

Çizelge 5.3: Deney Matrisi.

Deney No	Yapı Konf. (1-2)	θ (Dalga Geliş Açısı) (°)	T (Dalga Periyodu) (s)	H (Dalga Yüksekliği) (cm)	L (Dalga Boyu) (cm)
1	Konf. 1	0	0.707	13-14	85
2	Konf. 1	0	0.909	11-12	125
3	Konf. 1	0	1.11	9-10	180
4	Konf. 1	0	1.25	7-8	220
5	Konf. 1	30	0.707	13-14	85
6	Konf. 1	30	0.909	11-12	125
7	Konf. 1	30	1.11	9-10	180
8	**Konf. 1**	**30**	**1.25**	**7-8**	**220**
9	Konf. 1	60	0.707	13-14	85
10	Konf. 1	60	0.909	11-12	125
11	Konf. 1	60	1.11	9-10	180
12	**Konf. 1**	**60**	**1.25**	**7-8**	**220**
13	Konf. 1	90	0.707	13-14	85
14	Konf. 1	90	0.909	11-12	125
15	Konf. 1	90	1.11	9-10	180
16	Konf. 1	90	1.25	7-8	220
17	Konf. 2	0	0.707	13-14	85
18	Konf. 2	0	0.909	11-12	125
19	Konf. 2	0	1.11	9-10	180
20	Konf. 2	0	1.25	7-8	220
21	Konf. 2	30	0.707	13-14	85
22	Konf. 2	30	0.909	11-12	125
23	Konf. 2	30	1.11	9-10	180
24	**Konf. 2**	**30**	**1.25**	**7-8**	**220**
25	Konf. 2	60	0.707	13-14	85
26	Konf. 2	60	0.909	11-12	125
27	Konf. 2	60	1.11	9-10	180
28	**Konf. 2**	**60**	**1.25**	**7-8**	**220**
29	Konf. 2	90	0.707	13-14	85
30	Konf. 2	90	0.909	11-12	125
31	Konf. 2	90	1.11	9-10	180
32	Konf. 2	90	1.25	7-8	220

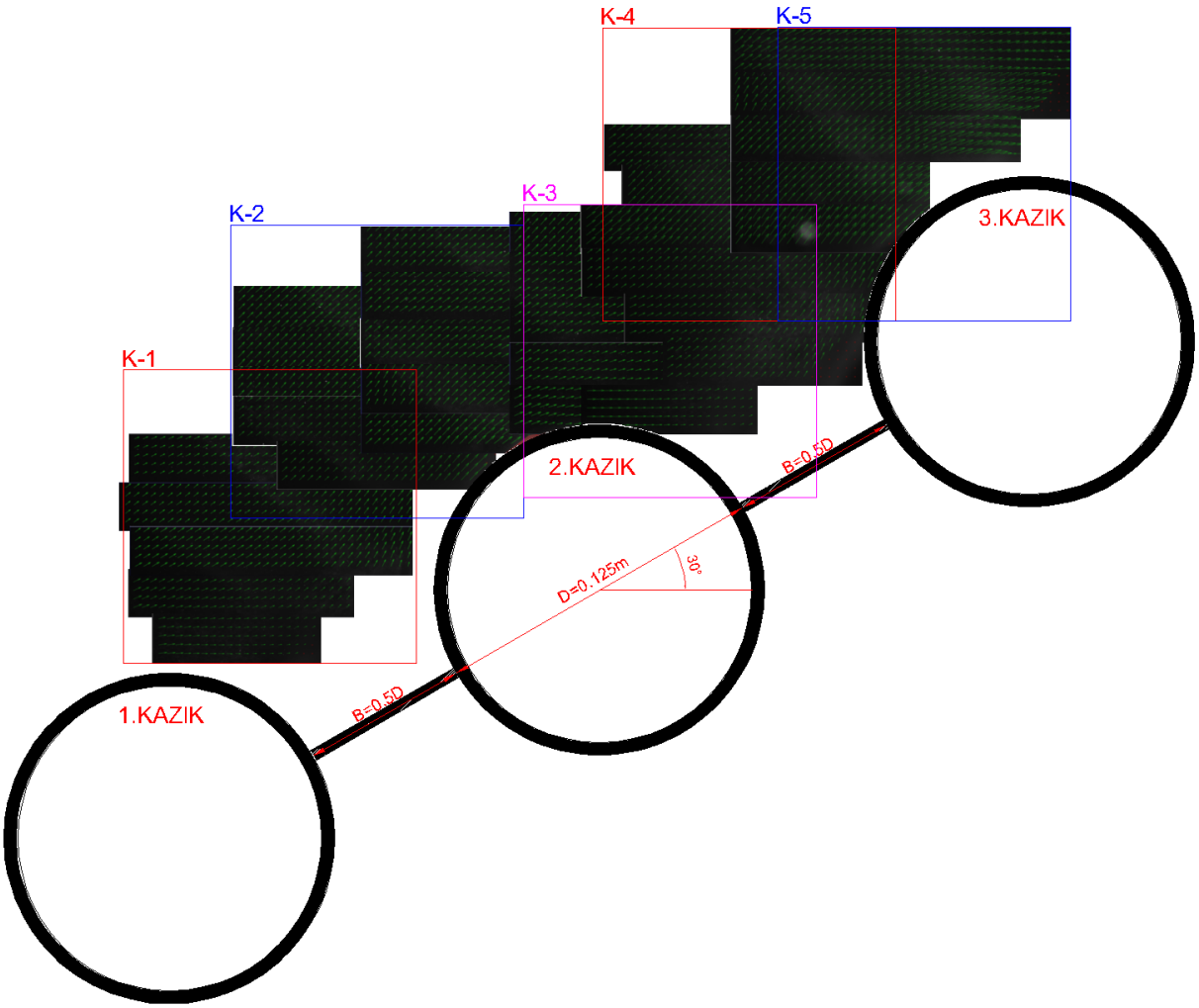
5.5.1 PIV ölçümleri ve hız vektörlerinin sonuçları

Ölçüm koşulları:

- PIV kullanılarak deneyde kullanılan kazıkların önünde, tabandan yakşalık 5 cm yükseklikte dalga fazı $0° - 90° - 180° - 225° - 270°$'lik bölümlerinde (dalga başlangıcı-dalga tepesi-dalga dönüşe başlama noktası-dalga çukurundan öncesi-dalga çukuru) hız verileri kaydedilmiştir.

- Farklı dalga geliş açıları ve dalga periyotları etkisi altında yapılan ölçümer, akımın yönü ve büyüklüğü hakkında bilgiler ortaya koymaktadır.

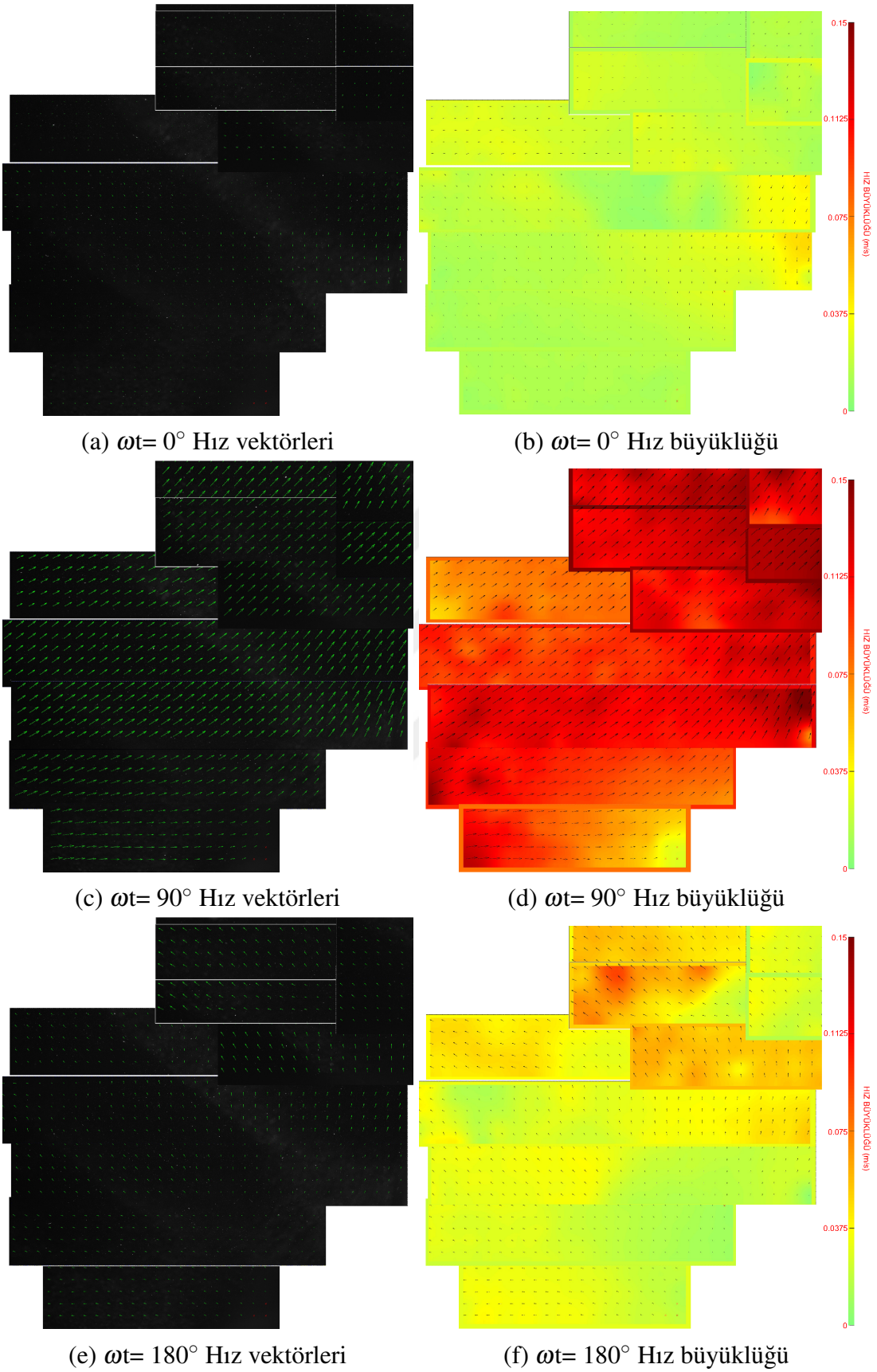
Verilen görsellerde hız büyüklükleri renk ölçeği ile, akım yönleri ise oklarla gösterilmiştir. Ancak, bu verilere ilişkin değerlendirmeler Bölüm 6'da sunulacaktır.



Şekil 5.14: Konf.1' de $\theta = 30^\circ$ ve T= 1.25'de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No=8).

Şekil 5.14' de tam PIV ölçümünün alanı gösterilmektedir. Bu ana ölçüm alanı 5 ana kesite ayrılmıştır (K-1, K-2, K-3, K-4, K-5) ve kesitlerin alındığı alanlar Şekil 5.14 üzerinde işaretlenmiştir. Alt alta yerleştirilen alt resim bloku, her bir kesit noktasında ölçülen anlık hız vektörlerini ve o ana denk gelen hız büyüklüklerini içermektedir. Düzen iki sütun (sol: hız vektörleri, sağ: hız büyüklükleri haritası) x beş satır (farklı

faz açıları) olacak şekilde kurgulanmıştır. Renk haritası 0 m/s'den başlayıp (yeşil) 0.15 m/s (kırmızı) hıza doğru değişim göstermektedir. Yukarıdan aşağı doğru satırlarda ise farklı faz açılarını ($\omega t = 0^\circ - 90^\circ - 180^\circ - 225^\circ - 270^\circ$) temsil etmektedir. Bu kesit işleminde tam görüntünün genel akış yapısı korunarak, her bir kesitin akış fazına bağlı değişimi ve vektörel dağılımının daha net analiz edilebilmesi sağlanmıştır.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri

(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

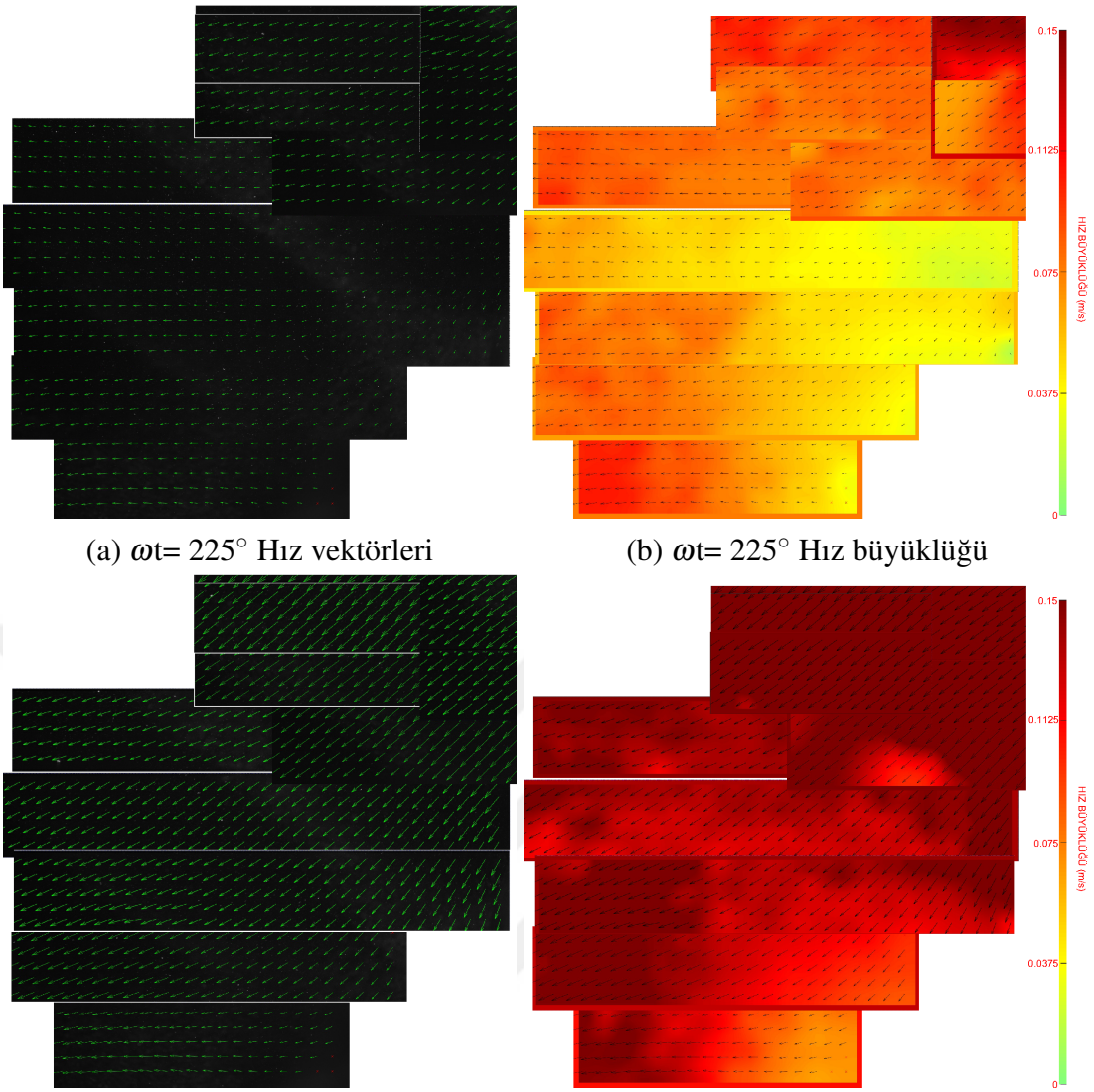
(c) ωt= 90° Hız vektörleri

(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

(e) ωt= 180° Hız vektörleri

(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 5.15: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



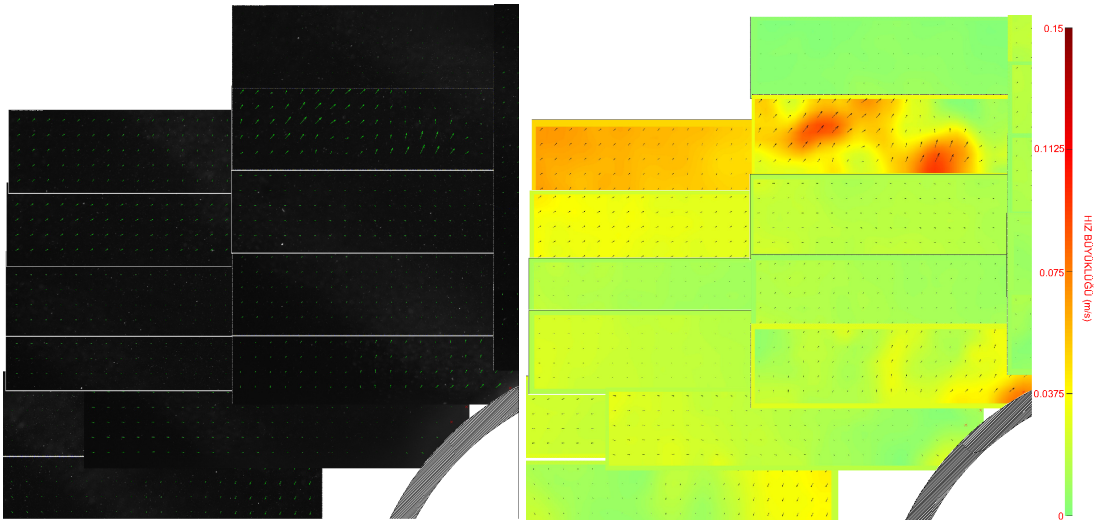
(a) ωt= 225° Hız vektörleri

(b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri

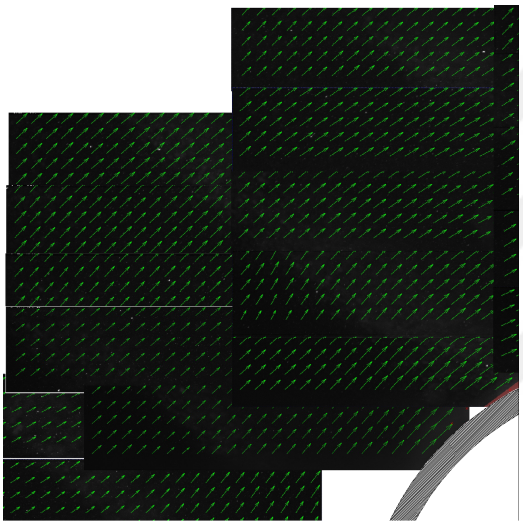
(d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 5.16: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

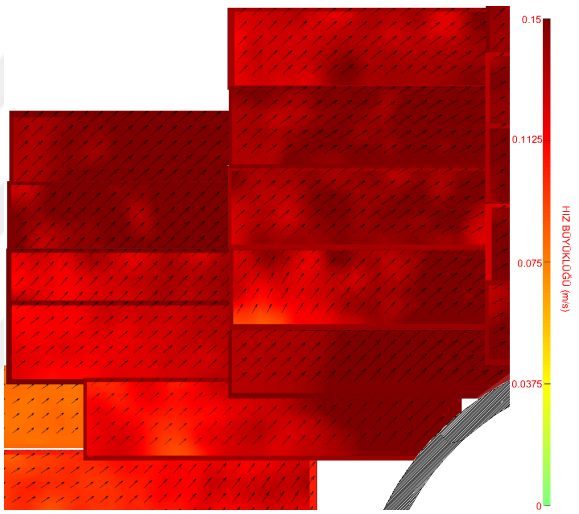


(a) ωt= 0° Hız vektörleri

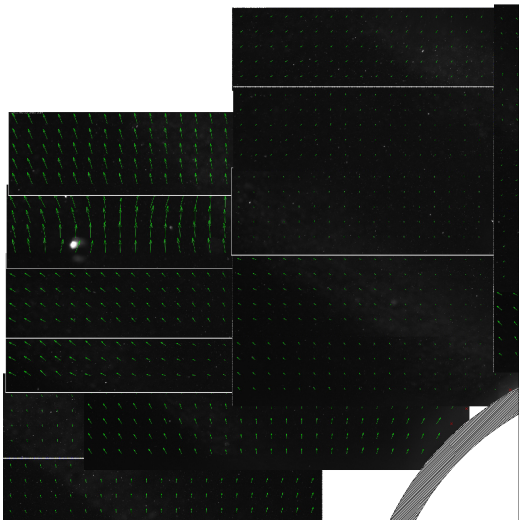
(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



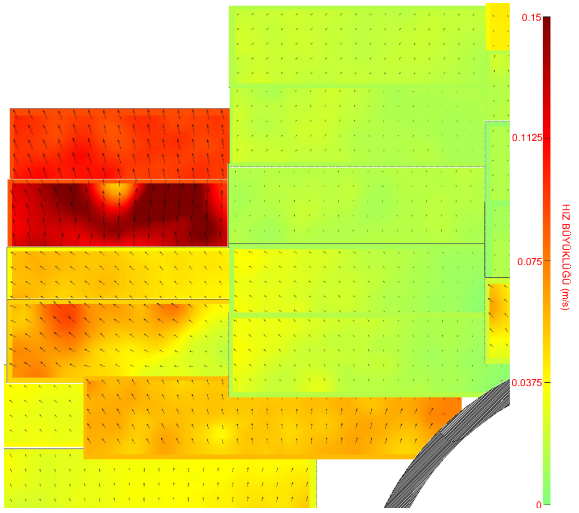
(c) ωt= 90° Hız vektörleri



(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

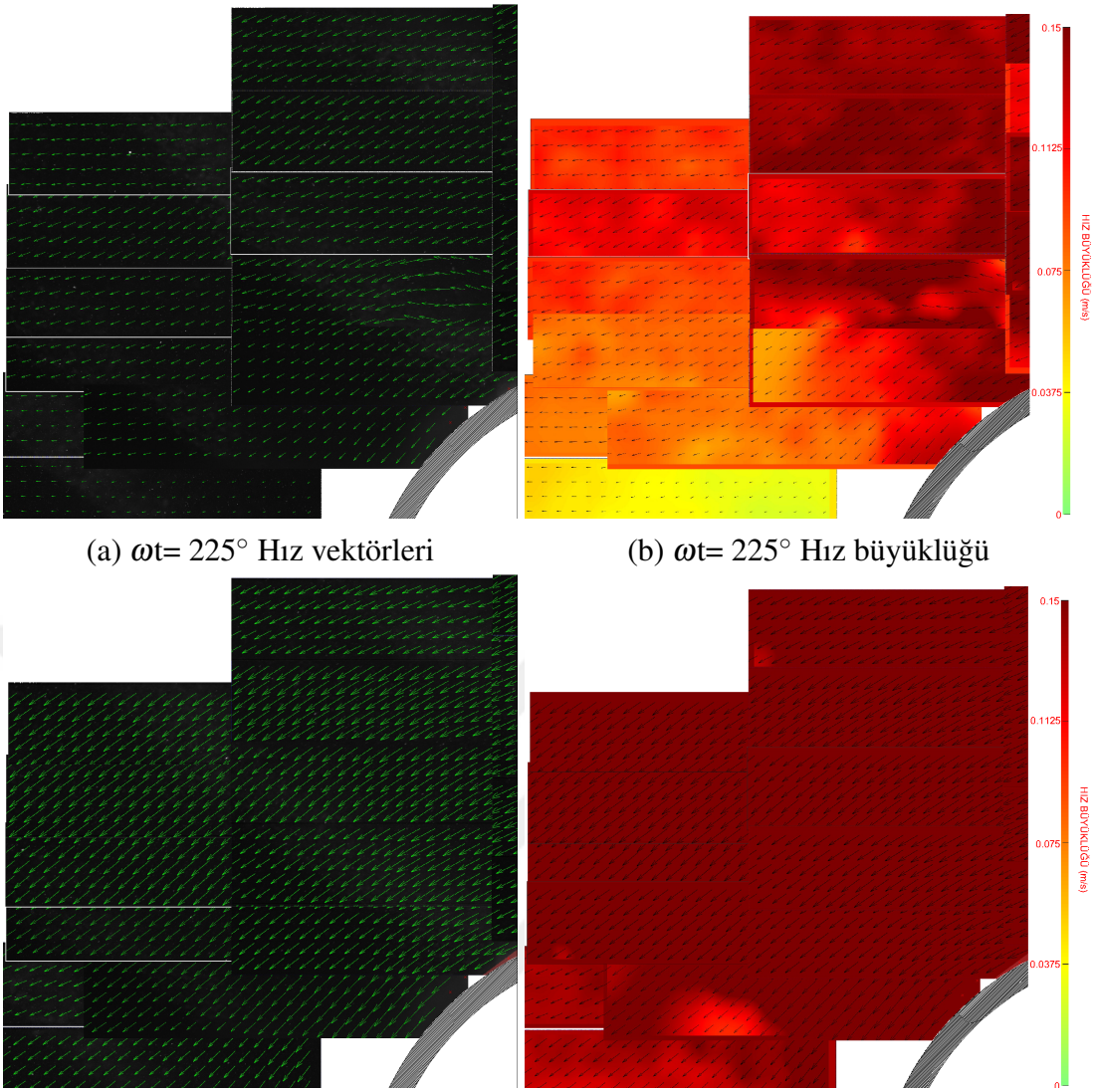


(e) ωt= 180° Hız vektörleri



(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 5.17: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



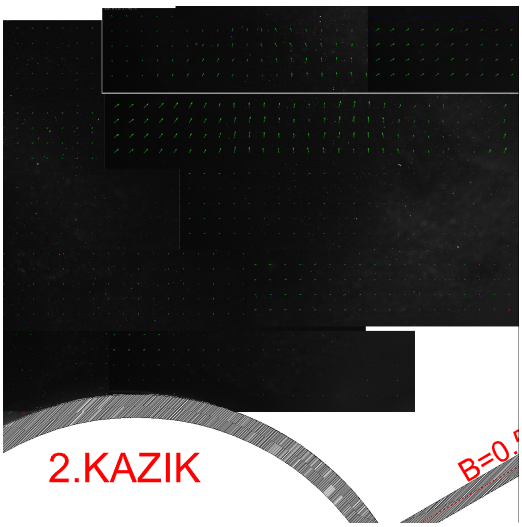
(a) ωt= 225° Hız vektörleri

(b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

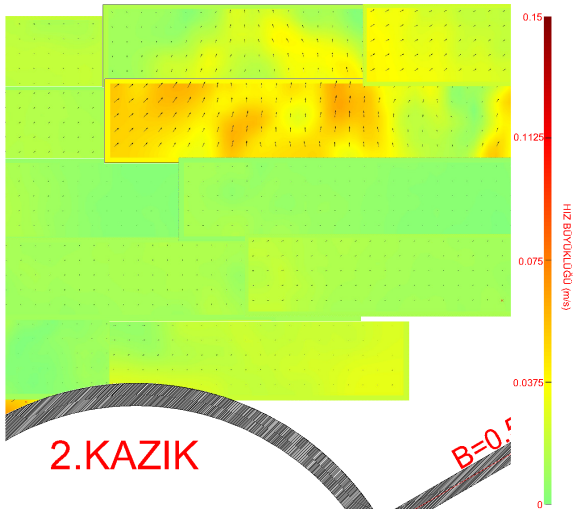
(c) ωt= 270° Hız vektörleri

(d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

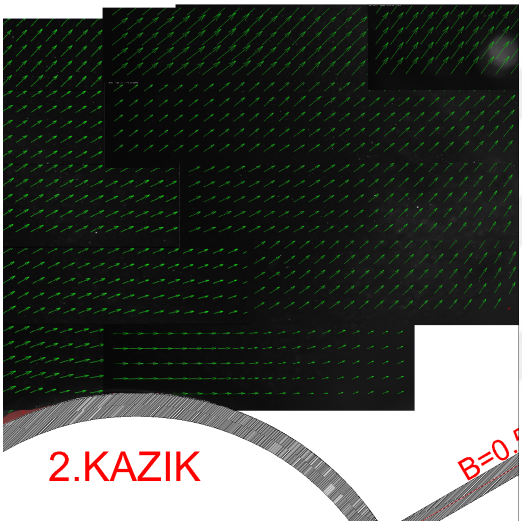
Şekil 5.18: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



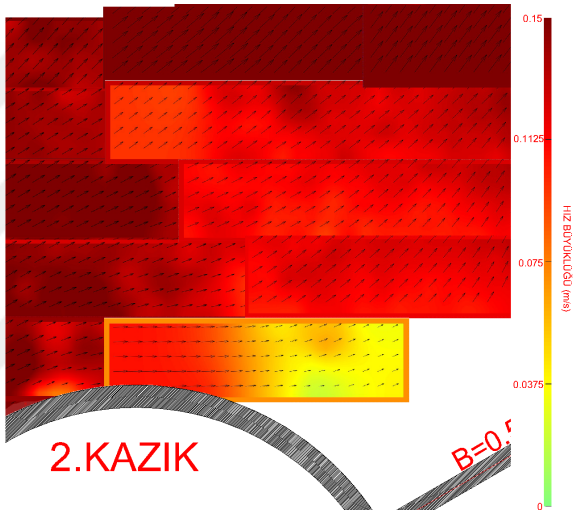
(a) ωt= 0° Hız vektörleri



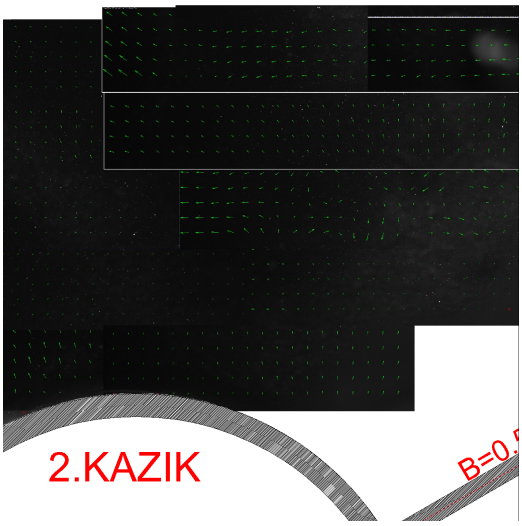
(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



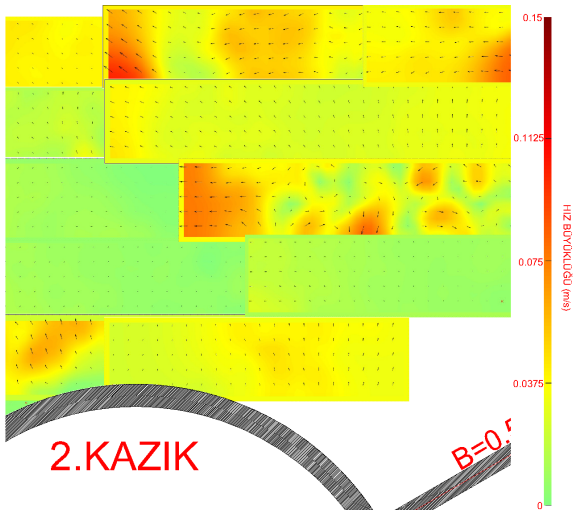
(c) ωt= 90° Hız vektörleri



(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

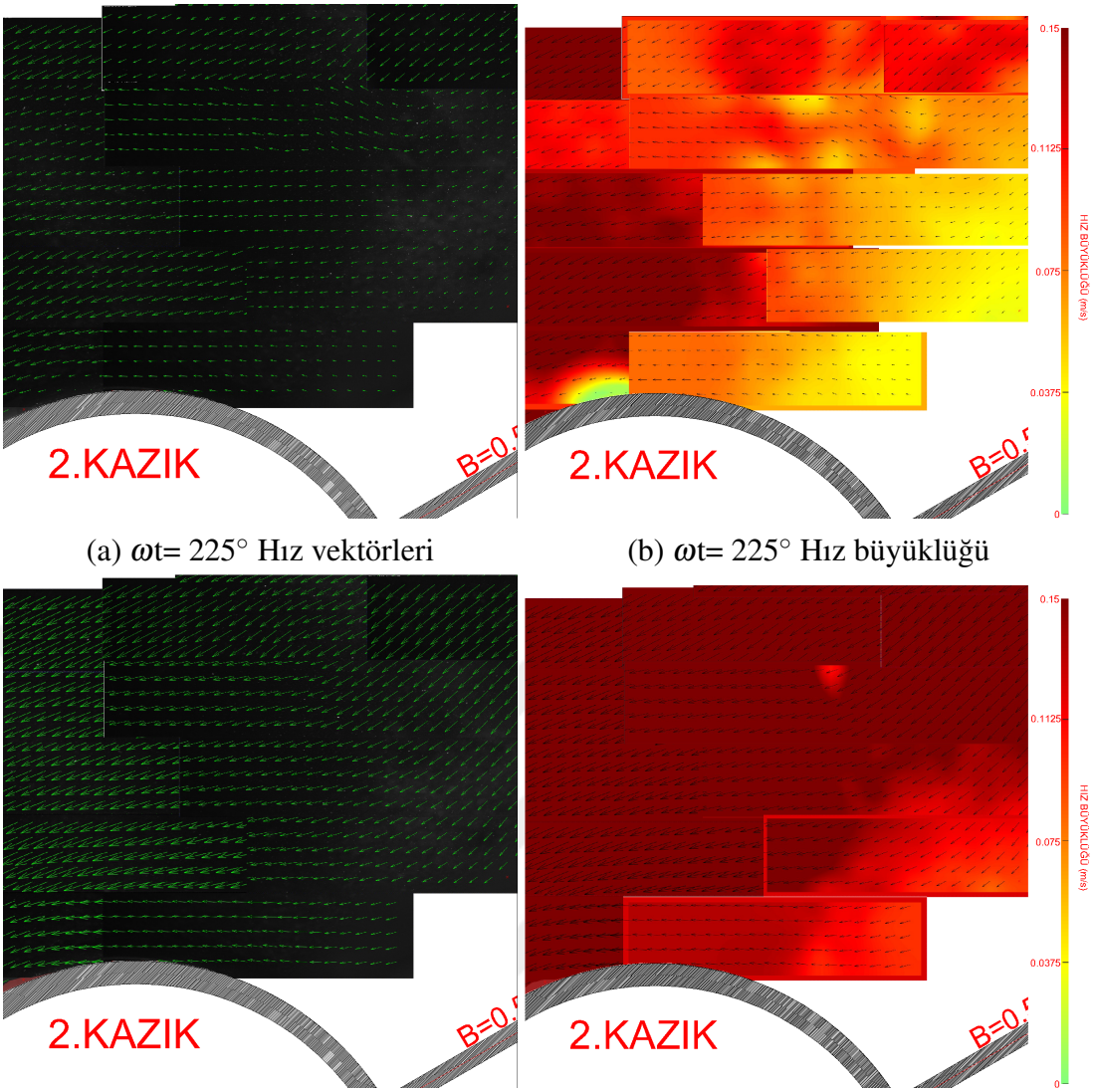


(e) ωt= 180° Hız vektörleri



(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 5.19: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



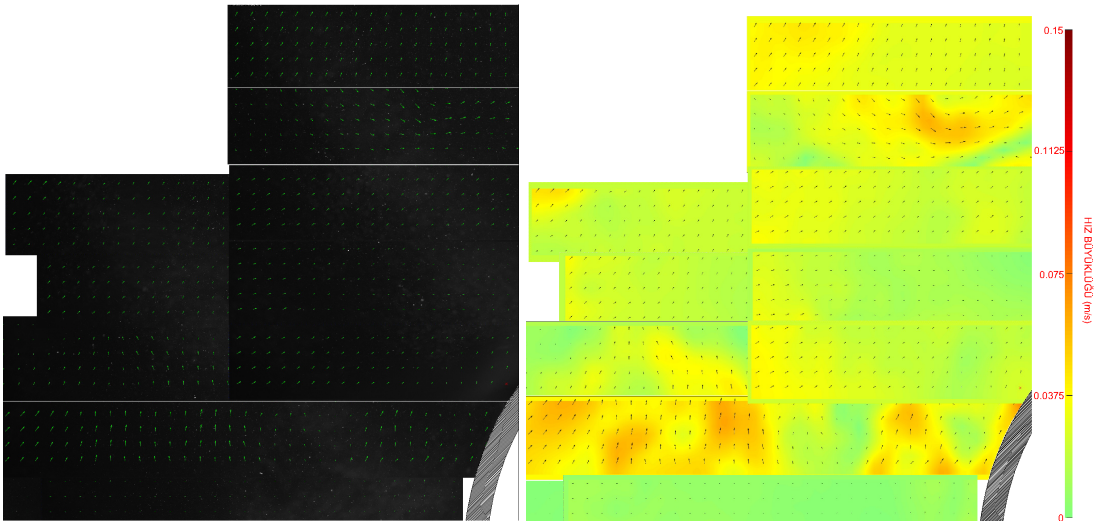
(a) ωt= 225° Hız vektörleri

(b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri

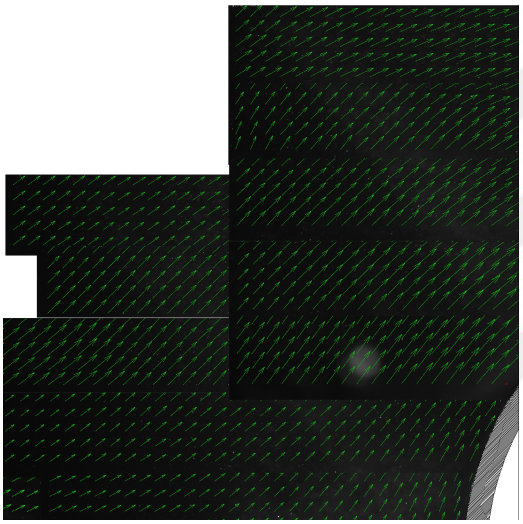
(d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 5.20: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

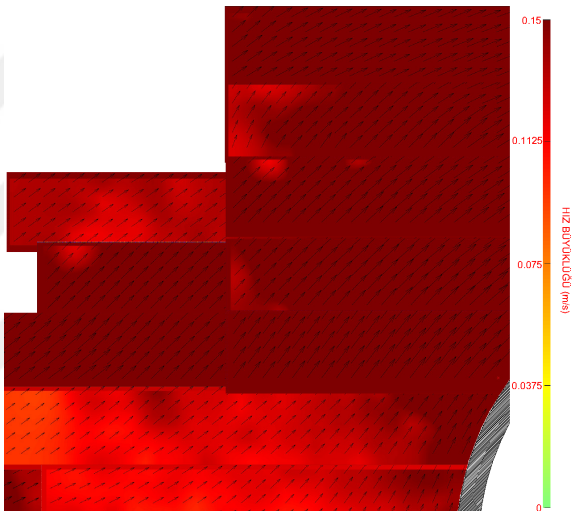


(a) ωt= 0° Hız vektörleri

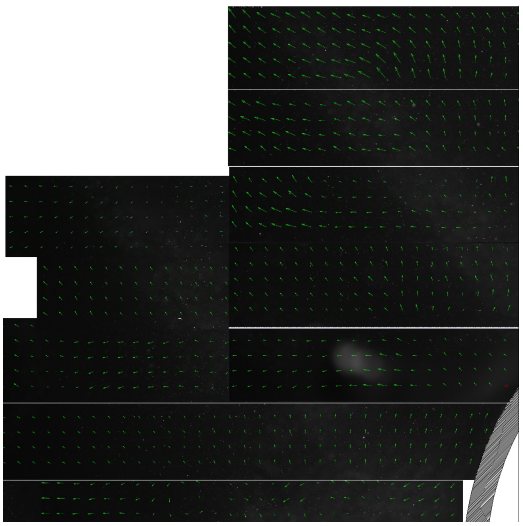
(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



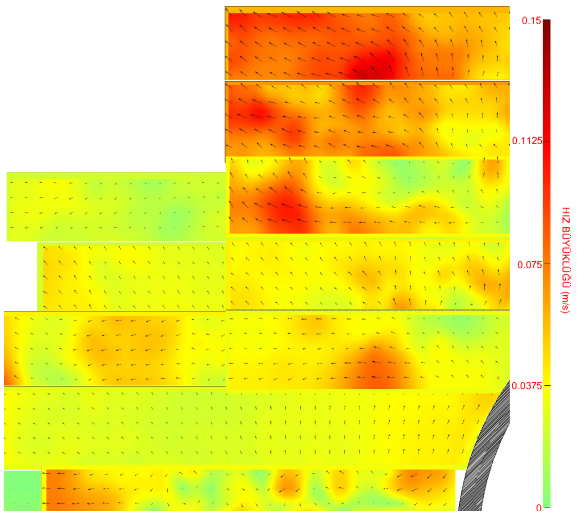
(c) ωt= 90° Hız vektörleri



(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

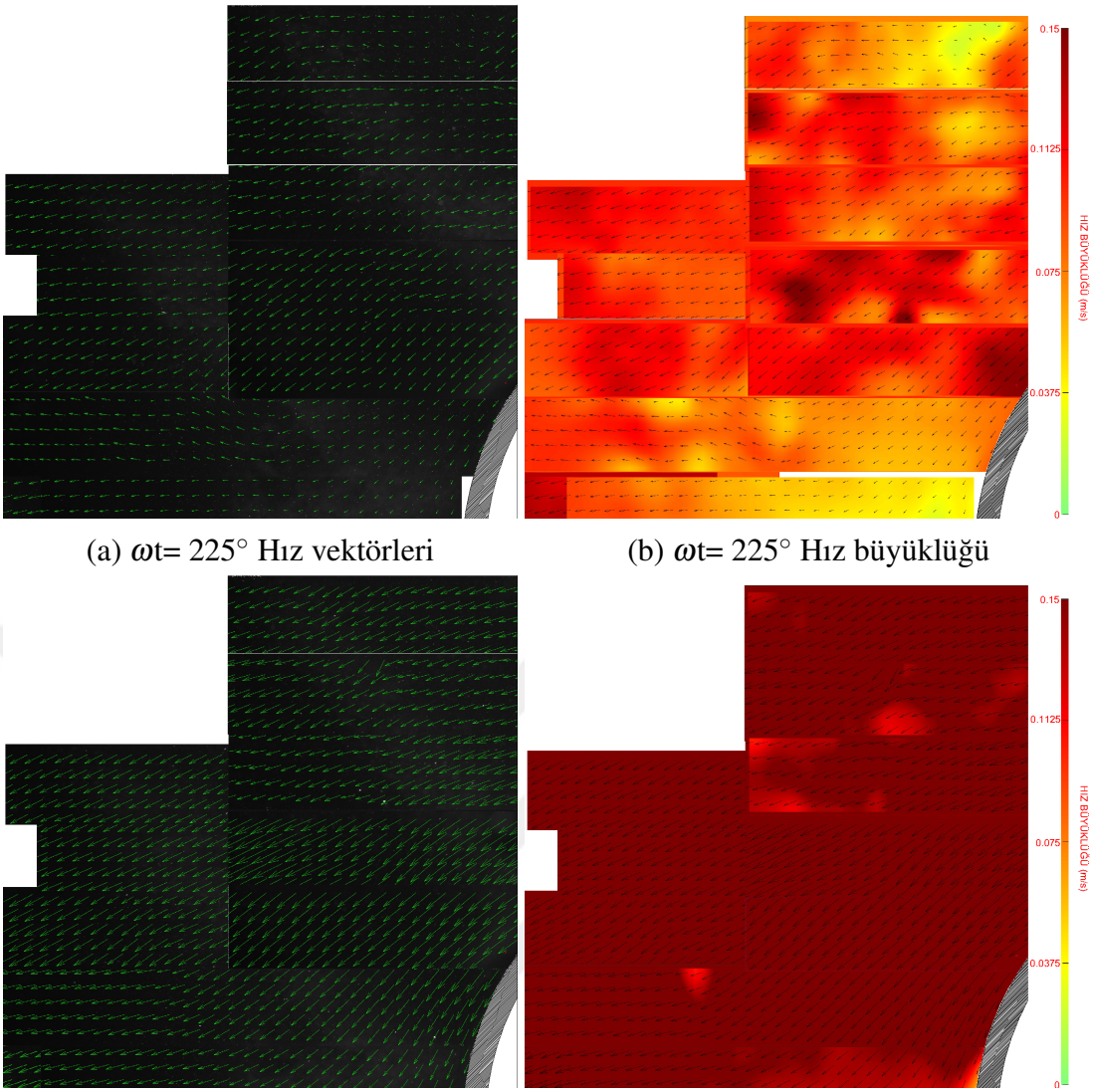


(e) ωt= 180° Hız vektörleri



(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 5.21: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



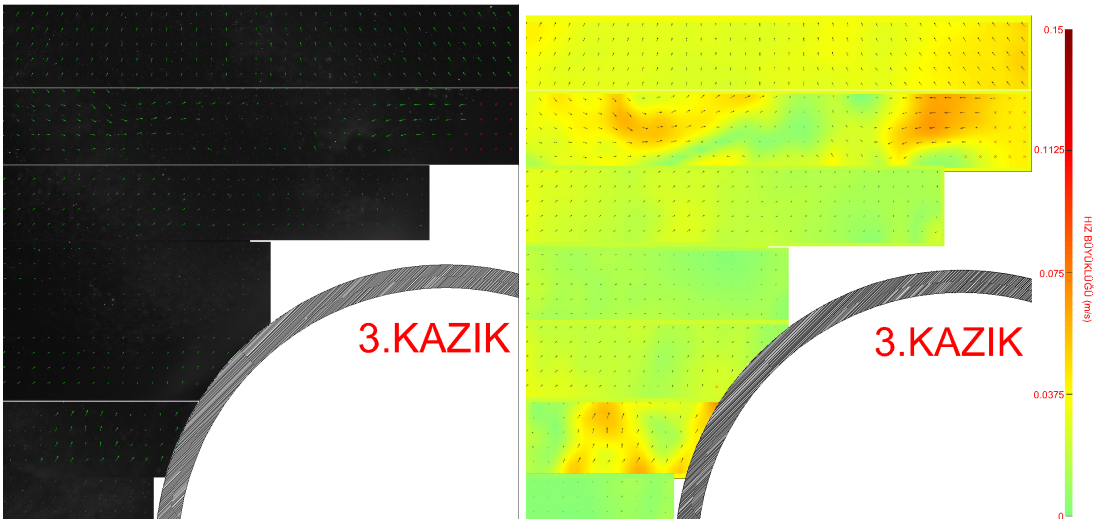
(a) ωt= 225° Hız vektörleri

(b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

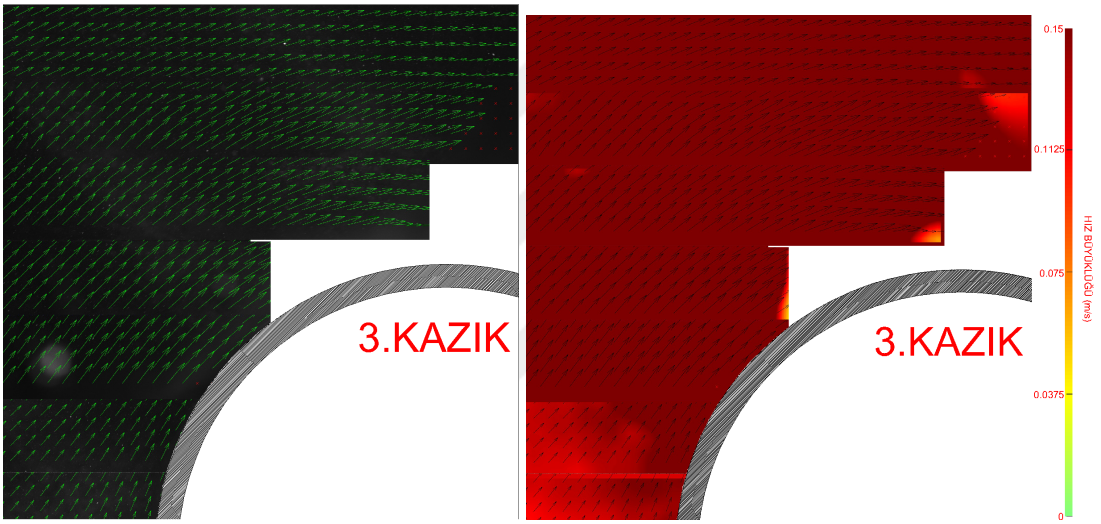
(c) ωt= 270° Hız vektörleri

(d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

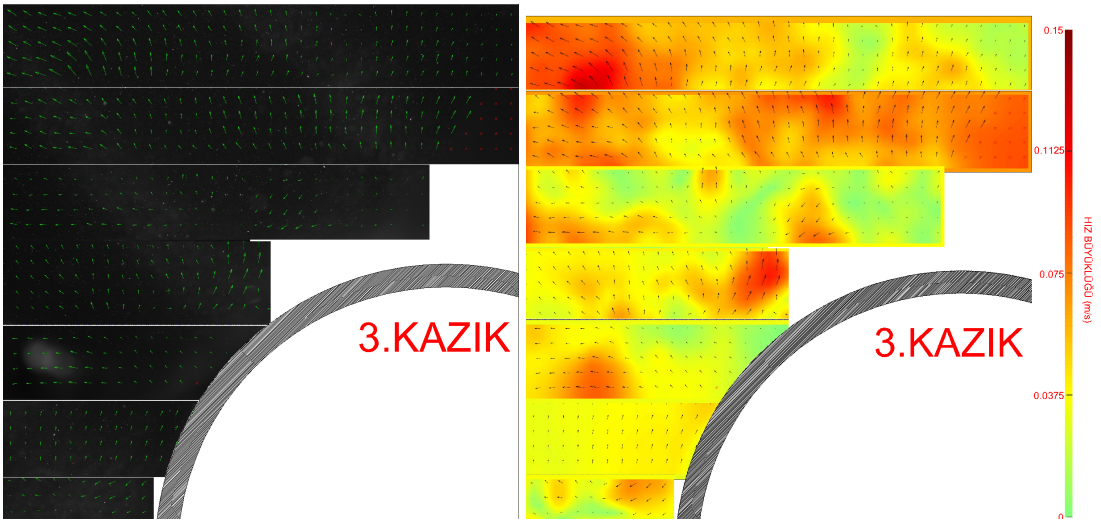
Şekil 5.22: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

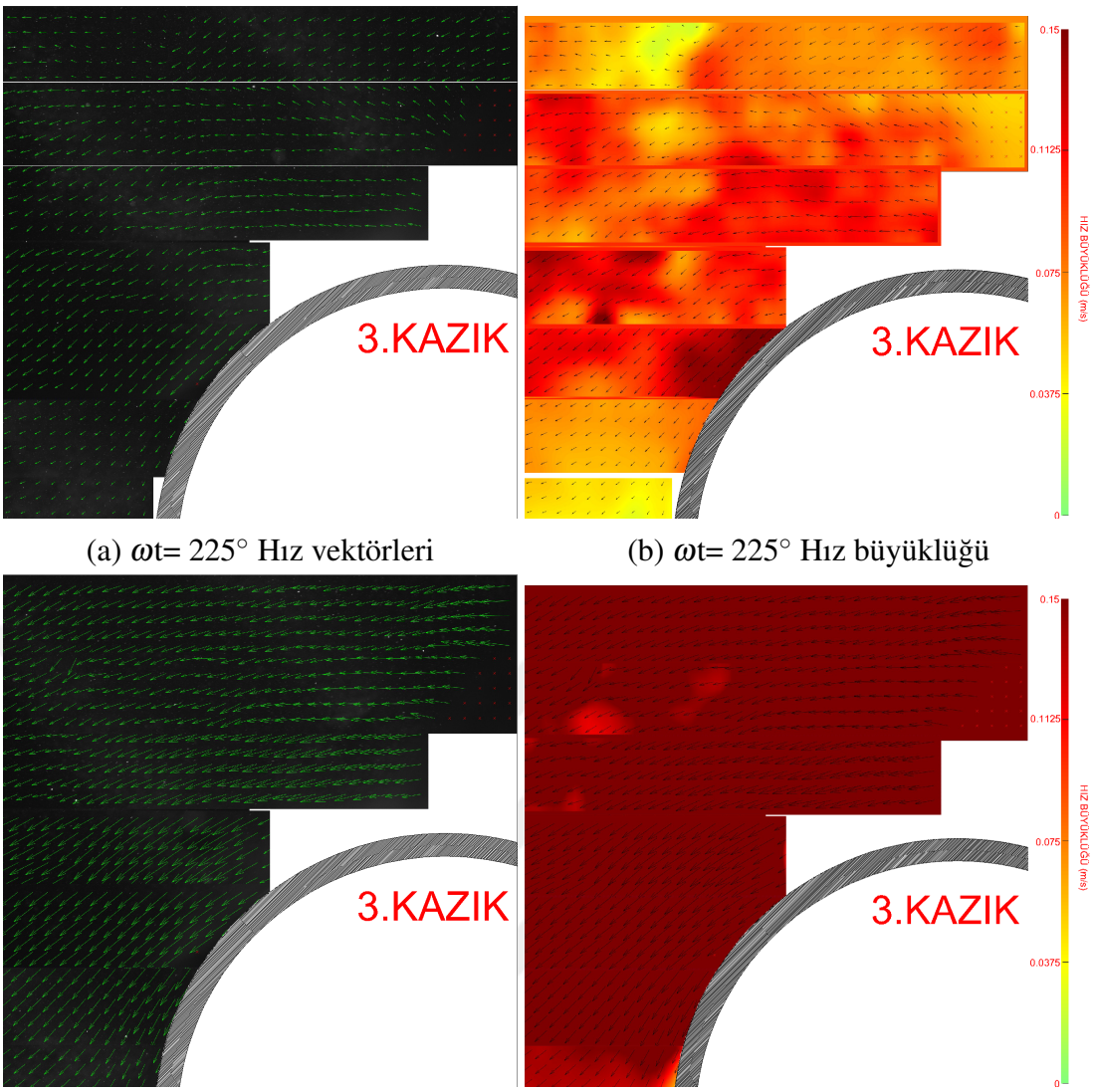


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 5.23: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 225° Hız vektörleri

(b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri

(d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

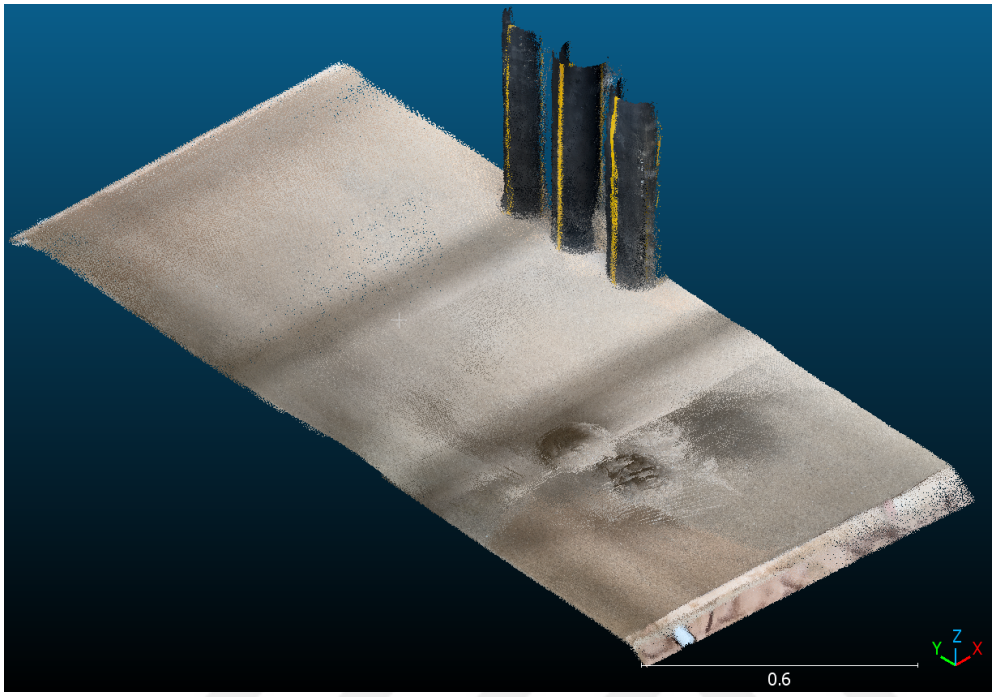
Şekil 5.24: Konf. 1'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

5.5.2 Lidar ölçümleri ile yüzey batimetrisi sonuçları

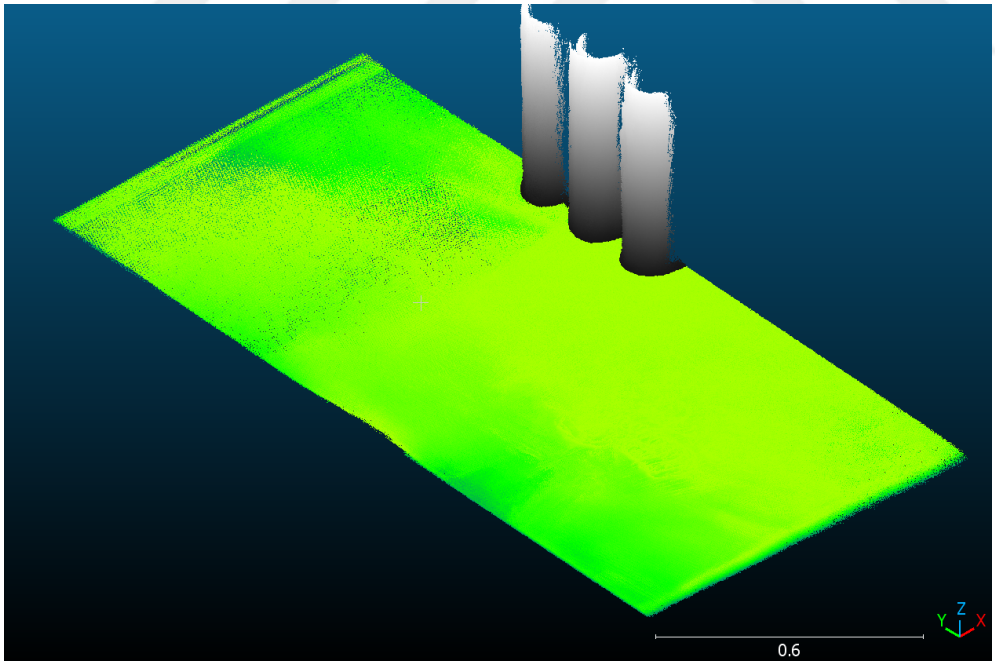
Tarama koşulları ve yöntem:

- Lidar teknolojisi kullanılarak, deney önncesi ve deney sonrası kum yüzeyinde oluşan batimetrik değişimler yüksek hassasiyetle taranmıştır.
- Özellikle kazık önlerinde oluşan oyulma ve geri dolma bölgeleri, ölçüm sonuçlarında açıkça belirtilmiştir.

Verilen batimetrik haritalar renk ölçeğiyle (kırmızı:dolma, mavi:oyulma) görselleştirilmiş, batimetre üzerindeki değişiklikler açıkça belirtilmiştir. Tarama sonuçlarının detaylı analizleri ise Bölüm 6'da yer alacaktır.

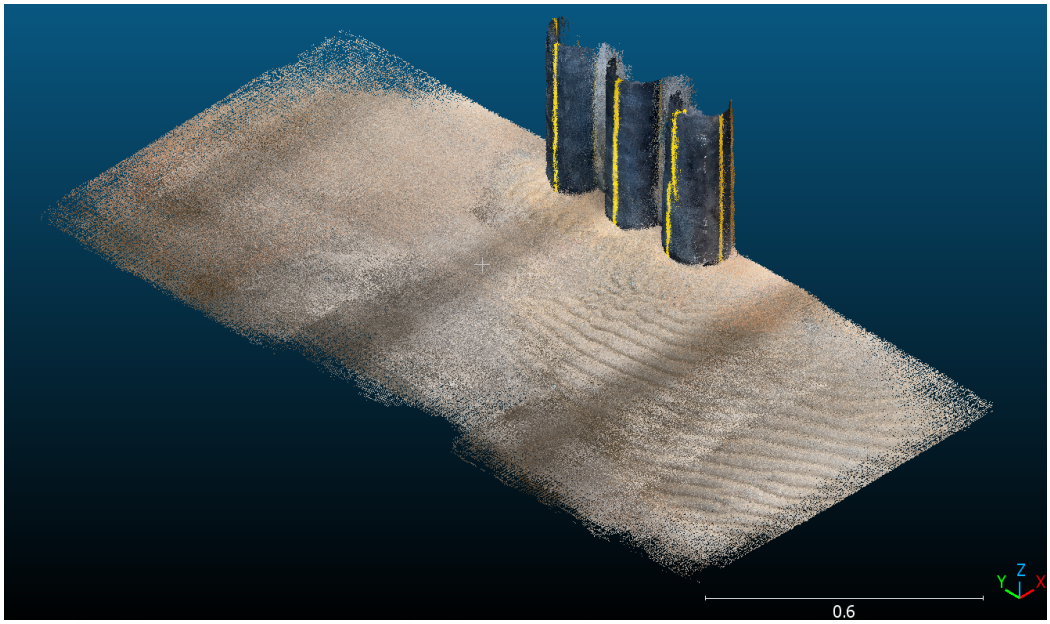


(a) RBG ölçeği

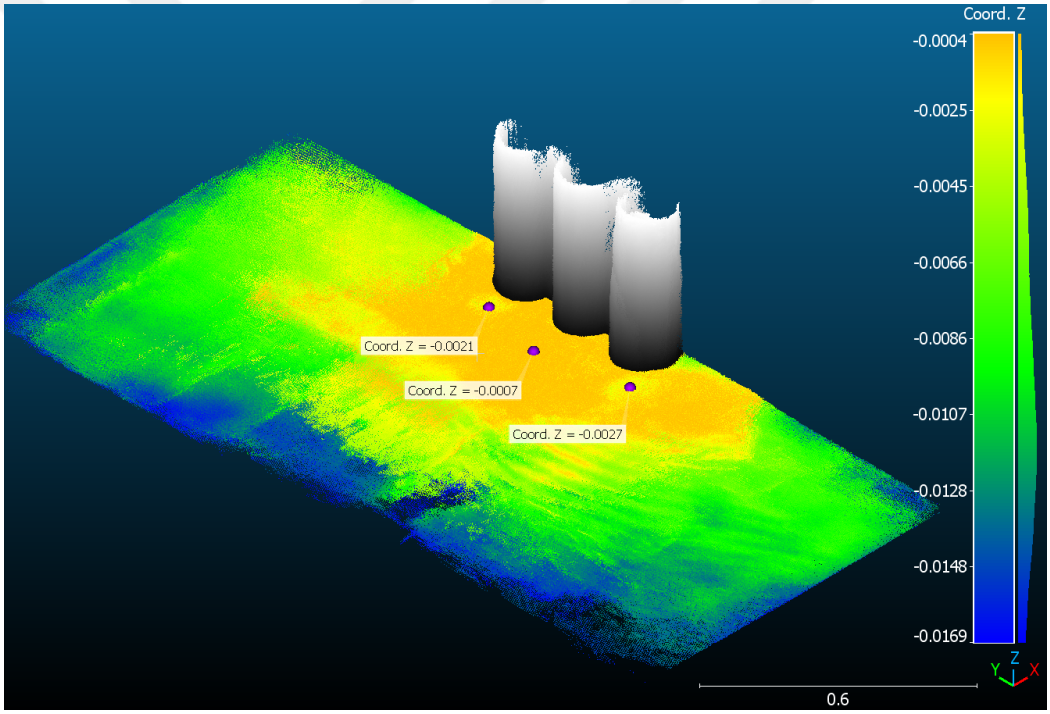


(b) Sf ölçeği

Şekil 5.25: Deney no: 1-2-3-4 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



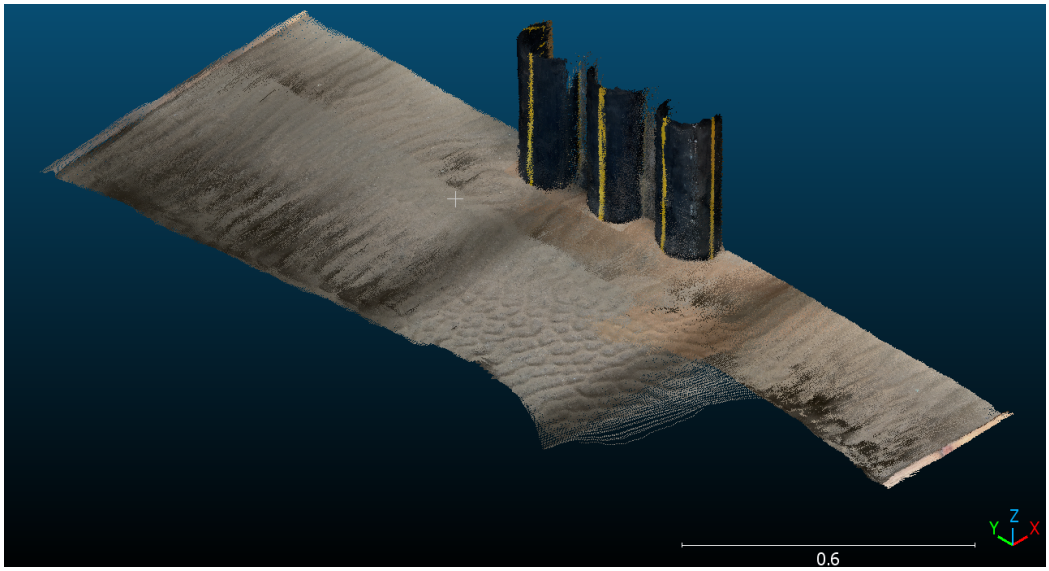
(a) RBG ölçeği



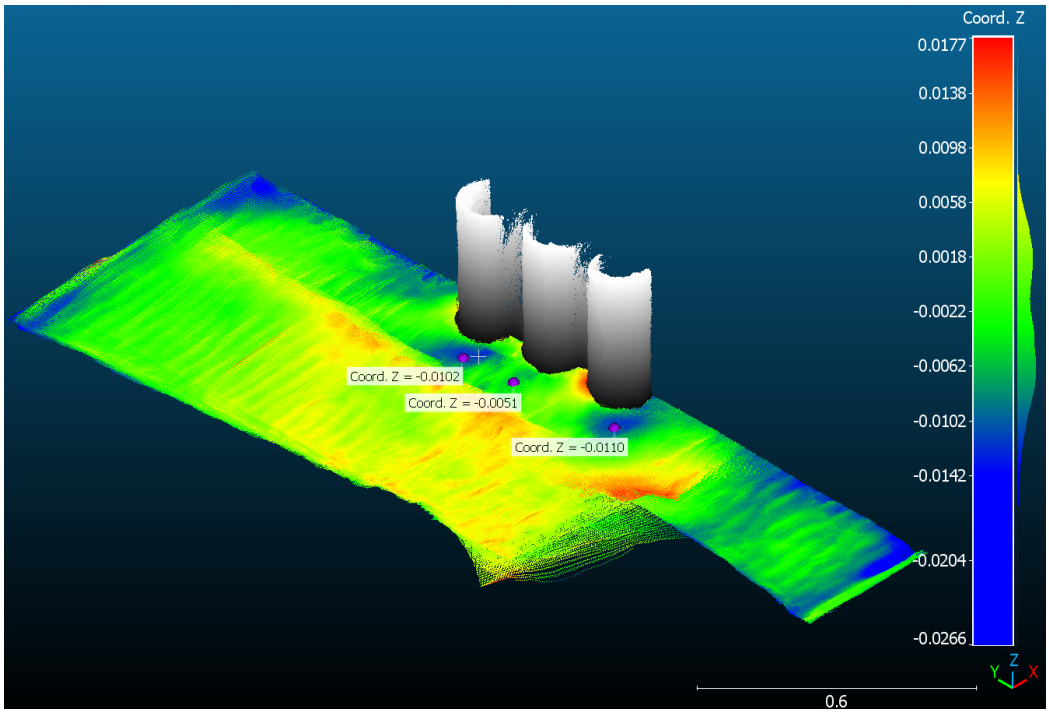
(b) Sf ölçeği

Şekil 5.26: Deney no: 1 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 5.26'de Deney No: 1'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 0.27$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.07$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.21$ cm oyulma derinliği gözlemlenmiştir.



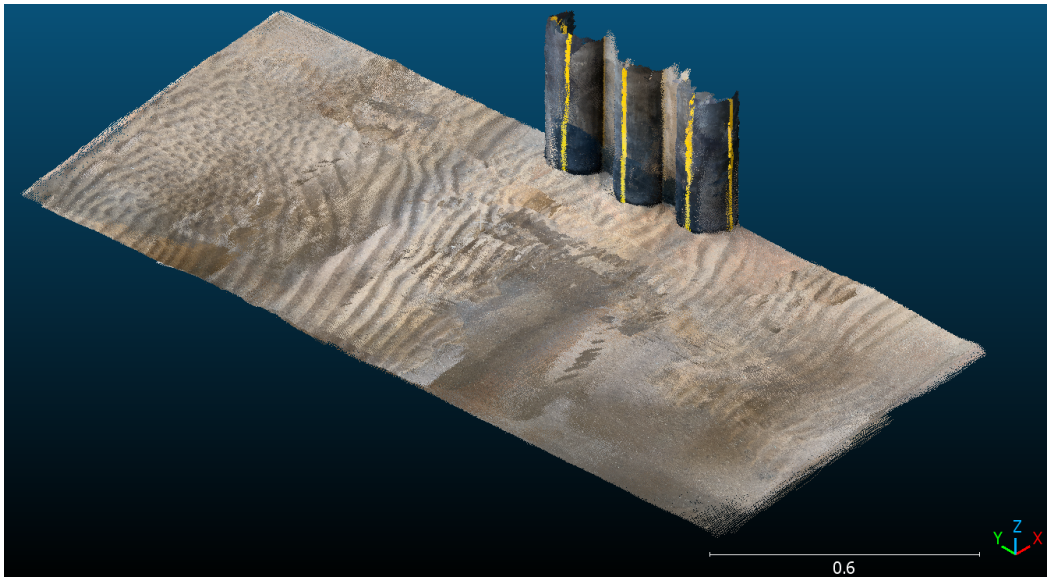
(a) RBG ölçeği



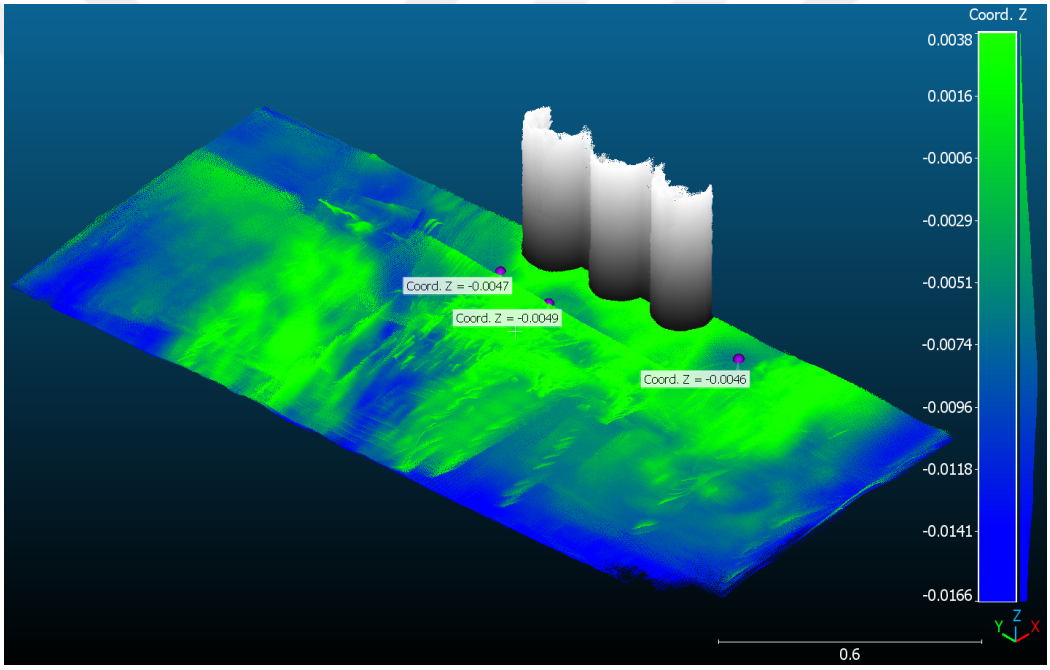
(b) Sf ölçeği

Şekil 5.27: Deney no: 2 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 5.27'te Deney No: 2'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 1.1$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.51$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 1.02$ cm oyulma derinliği gözlemlenmiştir.



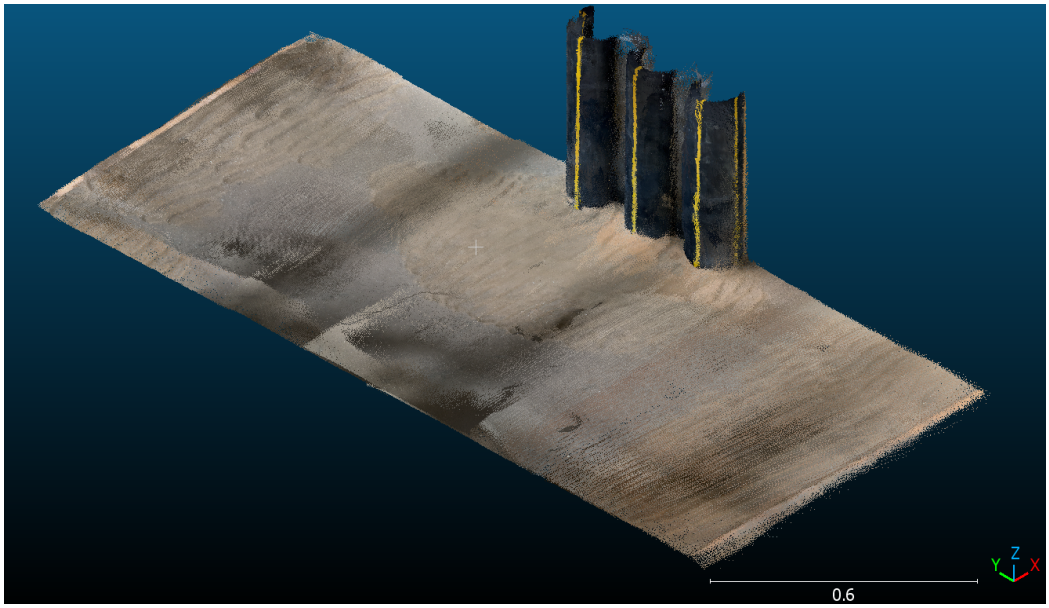
(a) RBG ölçeği



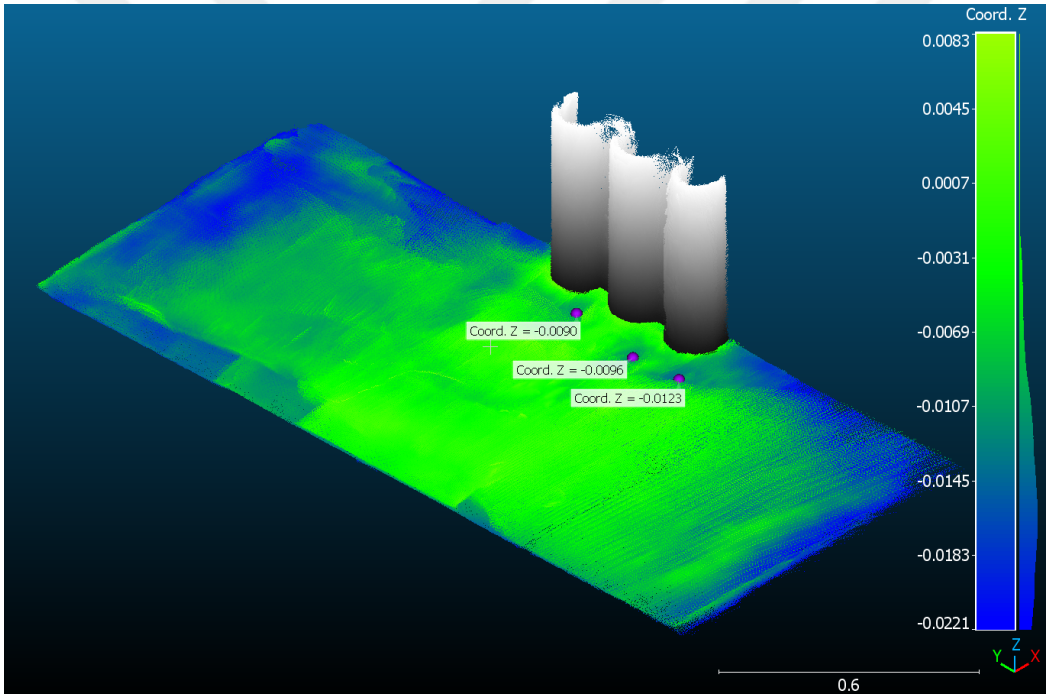
(b) Sf ölçeği

Şekil 5.28: Deney no: 3 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 5.28'da Deney No: 3'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği ikinci kazık önünde $S_{max} = 0.49$ cm olarak ölçülmüştür. İlk kazık önünde $S = 0.46$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.47$ cm oyulma derinliği gözlemlenmiştir.



(a) RBG ölçeği



(b) Sf ölçeği

Şekil 5.29: Deney no: 4 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 5.29'de Deney No: 4'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 1.23$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.96$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.9$ cm oyulma derinliği gözlemlenmiştir.

5.5.3 Deney sonuçları matrisi

Deney matrisi kapsamında deneylerin sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.4: Deney Sonuçları Matrisi.

Deney No	**Yapı Konfigürasyonu**	**θ (Dalga G**eliş Açısı) (°)	**T (Dalga P**eriyodu) (s)	**S/D** (Oyulma/Kazık Çapı)
1	Konfigürasyon 1	0	0.707	0.0216
2	Konfigürasyon 1	0	0.909	0.088
3	Konfigürasyon 1	0	1.11	0.0392
4	Konfigürasyon 1	0	1.25	0.0984
5	Konfigürasyon 1	30	0.707	0.0184
6	Konfigürasyon 1	30	0.909	0.1296
7	Konfigürasyon 1	30	1.11	0.0968
8	Konfigürasyon 1	30	1.25	0.0912
9	Konfigürasyon 1	60	0.707	0.0352
10	Konfigürasyon 1	60	0.909	0.0464
11	Konfigürasyon 1	60	1.11	0.0768
12	Konfigürasyon 1	60	1.25	0.1376
13	Konfigürasyon 1	90	0.707	0.0168
14	Konfigürasyon 1	90	0.909	0.0328
15	Konfigürasyon 1	90	1.11	0.2112
16	Konfigürasyon 1	90	1.25	0.048
17	Konfigürasyon 2	0	0.707	0.0104
18	Konfigürasyon 2	0	0.909	0.044
19	Konfigürasyon 2	0	1.11	0.104
20	Konfigürasyon 2	0	1.25	0.0656
21	Konfigürasyon 2	30	0.707	0.0184
22	Konfigürasyon 2	30	0.909	0.0816
23	Konfigürasyon 2	30	1.11	0.1704
24	Konfigürasyon 2	30	1.25	0.0896
25	Konfigürasyon 2	60	0.707	0.0272
26	Konfigürasyon 2	60	0.909	0.0616
27	Konfigürasyon 2	60	1.11	0.14
28	Konfigürasyon 2	60	1.25	0.2504
29	Konfigürasyon 2	90	0.707	–
30	Konfigürasyon 2	90	0.909	–
31	Konfigürasyon 2	90	1.11	0.1016
32	Konfigürasyon 2	90	1.25	0.1104

Bu bölümde, elde edilen analiz (PIV, Lidar) görselleri ve çizelgelerle elde edilen deneysel veriler somut bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen verilerden çıkarılabilecek yorumlar, ölçüm hassasiyetleri, literatürle karşılaştırma ve hata payları Bölüm 6'da detaylandırılacaktır. Bölüm 5, okuyucunun öncelikle deneylerin nasıl yapıldığını,

kullanılan ölçüm cihazlarını ve deney sonuçlarını görmesi amacıyla yapılmıştır. Bu sayede ardından gelen değerlendirmeler ve sonuçlar bölümleri ile okuyucunun yapılan yorumları takip etmesi sağlanacaktır.

6. DEĞERLENDİRMELER

6.1 Deney Matrisinin Genel incelenmesi

Çizelge 5.4'e bakıldığında S/D oranları, dalga geliş açıları ve periyotlarına bağlı olarak sistematik bir değişim göstermiştir.

- Kısa periyotların (T=0.707 sn ve 0.909 sn) uygulandığı deneyelerde S/D oranı genellikle düşük (0.01 < S/D < 0.12 aralığında) kalmıştır. Yüksek frekanslı dalga tekrarları kum taneciklerinin sürekli taşınmasıyla derin oyulma çukurlarına (yüksek S/D) izin vermemiştir.

- Orta seviye periyotta (T=1.11 sn) yapılan deneyler için S/D oranı en yüksek değerlere (0.03 < S/D < 0.21) ulaşmış; bu aralıkata hem zemin malzemesinin taşınımı hem de sürüklenmesi birlikte çalışarak maksimum oyulma zeminlerini hazırlamıştır.

- Yüksek seviye periyotta (T=1.25 sn) yapılan deneylerde ise S/D oranı 0.04 < S/D < 0.25 aralığında olmuştur. Yapılan tüm deneyler kapsamında maksimum oyulma derinliği Konf. 2, $\theta = 60^{\circ}$ kombinasyonunda görülmüştür ve S/D oranı 0.2504 olarak ölçülmüştür. Dalga boyunun uzaması, akımın kazıkların çevresinde yön değiştirmesini kolaylaştırarak hem oyulma hem de bazı koşullarda dolmayı beraberinde getirmiştir.

6.2 Fazlara Bağlı PIV Ölçümlerinin Oyulma ile İlişkisi

PIV ile elde edilen hız profillerinin, Çizelge 5.4'ten seçilen kritik koşul örneği (Konf.2, $\theta = 60^{\circ}$, T = 1.25 sn, S/D = 0.2504) (Şekil 75) üzerinden değerlendirirsek: Dalga tepesinde (90°) (Şekil 44 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{90} = 0.067 m/s$ iken, dalga çukurunda (270°) (Şekil 45 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{270} = 0.13 m/s$ olarak kaydedilmiştir. Yaklaşık %94'lük bu hız artışı, kum taneciklerinin süspansiyondan

çökelmeye geçmesini engelleyerek S/D'nin artmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, dönüş evresi (180°) ve dalga çukuru öncesi (225°) ölçümlerinde görülen hızlı yön değişimleri, Konf.2, $\theta = 60°$, T=1.25 sn koşullarında (S/D = 0.2504) girdap oluşumlarını destekleyerek maksimum oyulmayı derinleştirmiştir.

Çizelge 5.4'ten seçilen diğer koşul örneği (Konf.2, $\theta = 30°$, T = 1.25 sn, S/D = 0.0896) (Şekil 70) üzerinden değerlendirirsek: Dalga tepesinde (90°) (Şekil 21 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{90} = 0.1173m/s$ iken, dalga çukurunda (270°) (Şekil 22 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{270} = 0.16m/s$ olarak kaydedilmiştir. Yaklaşık %36'lık bu hız artışı, kum taneciklerinin süspansiyondan çökelmeye geçmesini kısmen engelleyerek S/D'nin nispeten daha az olmasını sağlamıştır. Benzer şekilde, dönüş evresi (180°) ve dalga çukuru öncesi (225°) ölçümlerinde görülen yön değişimleri, Konf.2, $\theta = 30°$, T=1.25 sn koşullarında (S/D = 0.0896) girdap oluşumlarını destekleyerek maksimum oyulmanın sınırlı kalmasını sağlamıştır.

Çizelge 5.4'ten seçilen diğer kritik koşul örneği (Konf.1, $\theta = 60°$, T = 1.25 sn, S/D = 0.0.1376) (Şekil 55) üzerinden değerlendirirsek: Dalga tepesinde (90°) (Şekil 14 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{90} = 0.075m/s$ iken, dalga çukurunda (270°) (Şekil 15 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{270} = 0.108m/s$ olarak kaydedilmiştir. Yaklaşık %44'lık bu hız artışı, kum taneciklerinin süspansiyondan çökelmeye geçmesini engelleyerek S/D'nin artmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, dönüş evresi (180°) ve dalga çukuru öncesi (225°) ölçümlerinde görülen hızlı yön değişimleri, Konf.1, $\theta = 60°$, T=1.25 sn koşullarında (S/D = 0.1376) girdap oluşumlarını destekleyerek maksimum oyulmayı derinleştirmiştir.

Çizelge 5.4'ten seçilen diğer koşul örneği (Konf.1, $\theta = 30°$, T = 1.25 sn, S/D = 0.0912) (Şekil 50) üzerinden değerlendirirsek: Dalga tepesinde (90°) (Şekil 5.23 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{90} = 0.1221m/s$ iken, dalga çukurunda (270°) (Şekil 5.24 (c-d)) ölçülen ortalama hız $U_{270} = 0.1675m/s$ olarak kaydedilmiştir. Yaklaşık %37'lık bu hız artışı, kum taneciklerinin süspansiyondan çökelmeye geçmesini kısmen engelleyerek S/D'nin nispeten daha az olmasını sağlamıştır. Benzer şekilde, dönüş evresi (180°) ve dalga çukuru öncesi (225°) ölçümlerinde görülen yön değişimleri, Konf.1, $\theta = 30°$,

T=1.25 sn koşullarında (S/D = 0.0912) girdap oluşumlarını destekleyerek maksimum oyulmanın sınırlı kalmasını sağlamıştır.

6.3 Kazık Yerleşimi Konfigürasyonlarının Oyulma Üzerindeki Etkileri

Konf. 1'de ve Konf. 2'de $\theta = 30°$, T=1.25 deneylerinde dalga tepesi ve çukuru fazlarında yapılan hız ölçümleride hız artışları benzer oranda (%37 civarında) kalarak S/D oranları birbirine yakın olan sırasıyla 0.0912-0.0896 değerlerine ulaşmıştır. Ancak iki farklı yapı konfigürasyonlarındaki $\theta = 60°$, T=1.25 deneylerindeki hız artışı, konfigürasyon 2'den(%94) konfigürasyon 1'e(%44) göre %50 daha fazla artış göstermiştir. Bu artış, S/D oranının 0.1376'dan 0.2504'a yükselmesine sebep olmuştur. Benzer şekilde deney no 7 ve 23 incelendiğinde kazıklar arası mesafe artışı S/D oranının 0.0968'den 0.1704'e yükselmesine sebep olmuştur. Bir diğer örnek olarak deney no 10 ve 26 incelendiğinde S/D oranı 0.0464'ten 0.0616'ya yükselmiştir. Diğer deney oranları da incelendiğinde genel olarak kazıklar arası mesafenin artışı S/D oranını artırmaktadır.

Bu bağlamda kazıklar arası mesafe artışı olduğunda yapı akış önünde daha büyük bir engel oluşturduğundan oyulma alanı ve derinliği önemli ölçüde artış göstermiştir. Ancak her dalga geliş açısında bu genelleme tam anlamıyla doğru olmamaktadır. Dolayısıyla diğer parametrelerin etkileri de detaylı olarak incelenmelidir.

Farklı dalga geliş açıları ($\theta = 0°$, $\theta = 30°$, $\theta = 60°$ ve $\theta = 90°$) incelendiğinde ise doğrudan dalga geliş açısının değişimi ile S/D oranı üzerinde bir yorum yapmak doğru olmamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde dalga geliş açılarının değişimi ve S/D oranları arasında mantıksal bir oran saptanamamıştır.

Öte yandan dalga periyotları açısından incelendiğinde ise genel olarak artış gösterdiği görülmüştür. Ancak aynı yapı durumunda(konf. ve θ) değişen periyotlar arasında maksimum oyulma genellikle T=1.11 sn olan durumlarda rastlanmıştır. Bu etkiye sebep olarak hesaplanan KC sayıları efektif olmaktadır. Dalga periyodu, dalga geliş hızı, dalga yüksekliği ve dalga boylarına göre hesaplanan KC sayısı maksimum T=1.25 sn'de olsa da T=1.11 için hesaplanan KC değerine çok yakın bir değerde

hesaplanmıştır. Dolayısıyla yapı konfigürasyonlarının ve dalga geliş açılarının KC sayılarıyla birlikte düşünülmesi gerekmektedir.

6.4 Eksik ve Başarısız Deneyler

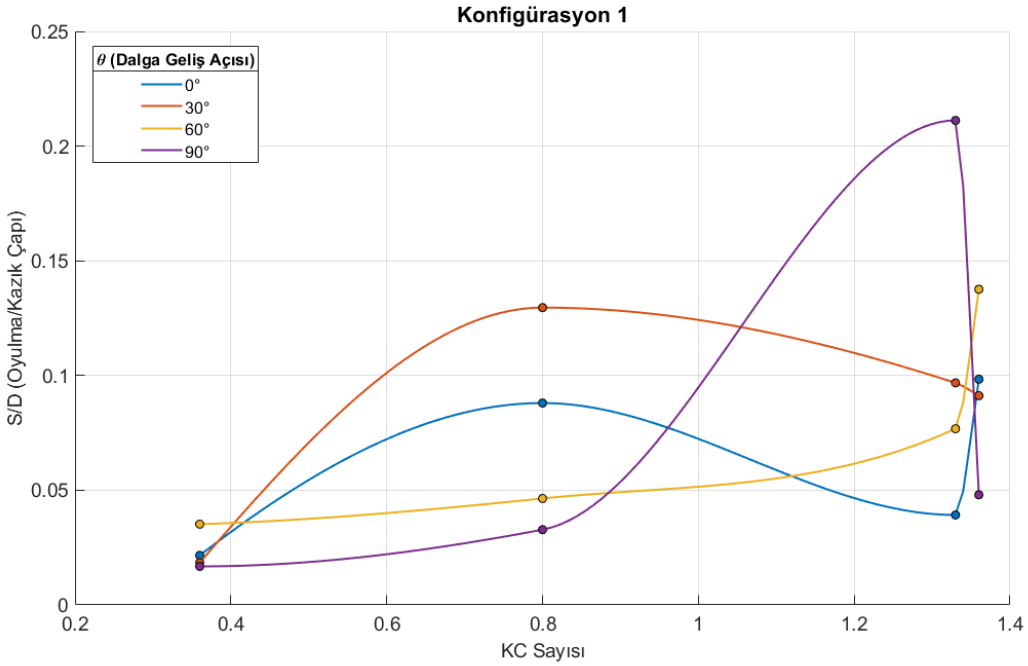
Deney no 29 (Konf.2, $\theta = 90^\circ$, T=0,707 sn) ve Deney no 30 (Konf.2, $\theta = 90^\circ$, T=0,909 sn) koşullarında, düşük periyotlar çok yüksek frekanslı dalga üretip kanalın dar kısmında aşırı genlikli dalgalar oluşturduğundan PIV ve Lidar ölçümleri yapılamamıştır. Bu iki koşul "başarısız" olarak kabul edilmiştir ve Çizelge 5.4'te S/D değerleri boş bırakılmıştır.

6.5 KC Sayıları ve Akım Rejimi Etkisi

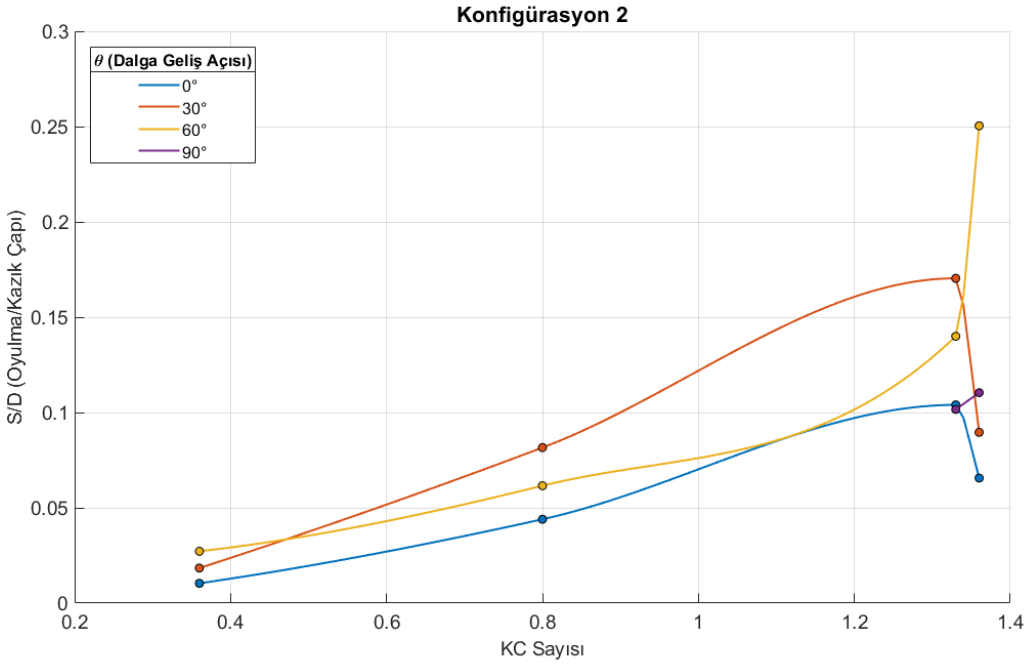
Hesaplanan KC aralığı (0,36–1,36) incelendiğinde:

- KC < 0,5: yatak sürüklemesi baskın, minimum oyulma gözlemlenmiştir (örn. Deney no 17, Konf.2, $\theta = 0^\circ$, T=0,707 sn, S/D=0,0104).
- 0,5 < KC < 1,35: ara rejim; hem sürükleme hem de süspansiyon aktif olmaktadır. (örn. Deney no 15, Konf.1, $\theta = 90^\circ$, T=1.11 sn, S/D=0,2112).
- KC > 1,3: bu rejimde ise T=1.25 açısından düşünüldüğünde sediment taşınımı maksimum seviyede gözlemlenmiştir. (örn. Deney no 28, Konf.2, $\theta = 60^\circ$, T=1.25 sn, S/D=0,2504).

Şekil 6.1'de deneylerde kullanılan yapı konfigürasyonları ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 6.1(a)'da konfigürasyon-1 (kazıklar arası mesafe kazık çapının yarısı olduğu yerleşim) için farklı KC değerlerinde elde edilen S/D oranları grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 6.1(b)'de ise konfigürasyon-2 (kazıklar arası mesafe kazık çapı kadar olduğu yerleşim) için farklı KC değerlerinde elde edilen S/D oranları grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu grafikler sayesinde Çizelge 5.4'de verilen sonuçların daha anlaşılır bir biçimde sunulması sağlanmıştır.

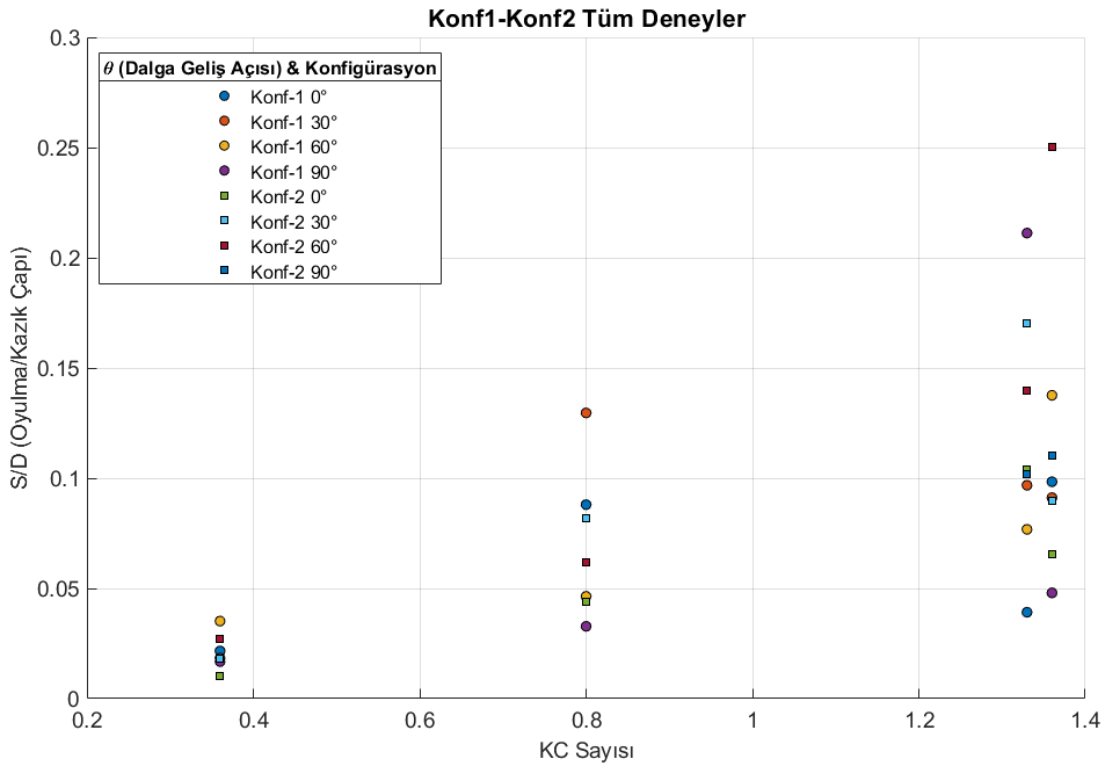


(a) Konfigürasyon-1 için S/D-KC grafiği



(b) Konfigürasyon-2 için S/D-KC grafiği

Şekil 6.1: Deney sonuçlarının S/D-KC grafikleri.



Şekil 6.2: S/D-KC Tüm konfigürasyonlar.

Şekil 6.2'de laboratuvarda gerçekleştirilen tüm deneyler noktasal grafik kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu grafikte farklı yapı konfigürasyonları ve dalga geliş açılarında ($\theta = 0°, 30°, 60°, 90°$) elde edilen S/D sonuçları gösterilmiştir.

6.6 Genel Tartışma ve Öneriler

6.6.1 Kazık yerleşiminin önemi

Konf.1'in sık yerleşimi, yüksek frekanslı kısa periyotlarda bile akışın daha dengeli dağılmasını sağlayarak yaygın ancak sığ oyulma desenleri ürettiği gözlemlenmiştir.

Konf.2'nin geniş aralıkları, özellikle orta ve uzun periyotlarda lokal hız pikleri yaratarak derin ve dar çukurlar oluşmasına neden olduğu görülmüştür.

6.6.2 Gelecek çalışmalar için öneriler

Farklı aralık-geometri kombinasyonlarının oyulma derinliği ve yayılımına etkisi üzerinde sistematik bir parametre çalışması yapılmalıdır. Literatürde bulunan birleşik kazık sistemlerinin daha çok çalışılması, bu yapılarda oluşacak oyulmaların anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Literatürde eksik olarak görülen birleşik kazık sistemlerinde ayrıca koruma tabakaları da dahil edilerek çalışma kombinasyonları genişletilmelidir.

7. TARTIŞMA VE BULGULAR

- Deneylerde kullanılan periyotlar incelendiğinde: aynı yapı konfigürasyonunda kullanılan kısa periyotlarda (T=0.707 sn ve T=0.909 sn) oyulma sınırlı kalmış, orta seviyedeki periyotta (T=1.11 sn) oyulma miktarı yüksek seviyelere çıkmakta ve son olarak yüksek periyotta (T=1.25 sn) yapılan deneylerde ise maksimum oyulma olan S/D=0.2504 elde edilmiştir.

- Maksimum oyulma derinliği Konfigürasyon-2'de, dalga geliş açısı 60° ve T=1.25 sn olduğu deney no 28'de gözlemlenmiştir.

- Minimum oyulma derinliği Konfigürasyon-2'de, dalga geliş açısı 0° ve T=0.707 sn olduğu deney no 17'de gözlemlenmiştir.

- Kazık yerleşimleri açısından düşünüldüğünde yapı açısına bağlı olacak şekilde S/D oranı etkilenmiştir. İlk kazık birleşiminde, düşük periyotlarda genellikle oyulma ikinci kazık birleşimine göre fazla olurken, orta ve yüksek peritolarda ikinci kazık birleşimi durumunda daha yüksek oyulma derinikleri görülmüştür. Bu açıdan incelendiğinde düşük dalga periyotlarına sahip kıyılarda kazıklar arası birleşimin kısa olması daha avantajlı iken, periyoları nispeten daha yüksek olan kıyılarda, kazıklar arası mesafenin daha geniş olması tercih edilmelidir.

- Dalga geliş açıları açısından incelendiğinde ise oransal bir sonuç elde edilememiştir. Dalga geliş açısı ile beraber diğer dalga parametrelerinin etkileri de göz önünde bulundurularak bu etkiler birlikte incelenmelidir.

- Dalga kanalı kısıtlarından dolayı gerçekleştirilemeyen konfigürasyon-2'de düşük periyotlu deneylerin uygun koşullarda incelenmesi gerekmektedir.

- PIV ile yapılan ölçümler incelendiğinde ise kazıklar arası birleşim mesafesi arttığında kazıklar arasında akışın daha büyük vorteks oluşumlarını desteklediği

görülmüştür. Ayrıca kazıklar arası mesafe artışıyla beraber oyulma derinliğinin yanı sıra oyuma alanı da daha geniş bir bölgeye yayılım göstermektedir.

- KC (Keulegan Carpenter) sayıları açısından incelendiğinde: düşük KC sayılarında oyulma minimum düzeyde kalırken, artan KC sayısıyla beraber oyulma alanı ve oyulma derinlikleri de büyük ölçüde artış göstermiştir. Dolayısıyla oyulma açısından incelendiğinde oyulmayı etkileyen parametreler arasında KC sayısı en önemli oyulma parametresi olmaktadır.

KAYNAKLAR

Abdi, **V.**, **Doğan**, **M.**, **Kaya**, **B.**, & **Ozgenc Aksoy**, **A.** (2020). Dalga etkisi sonucu farklı yerleşim şekillerine sahip kazık grupları etrafında oluşan yerel ve genel oyulmaların deneysel araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, *22*(66), 749–757. https://doi.org/10.21205/deufmd.2020226610

Baykal, **C.**, **Sumer**, **B. M.**, **Fuhrman**, **D. R.**, **Jacobsen**, **N. G.**, & **Fredsoe**, **J.** (2017). Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES*, *373*(2033, SI). https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0104

Dixen, **M.** (2012). *Scour development around offshore wind turbine foundation* (tech. rep.) (Accessed: 2024-04-13). Danish Hydraulic Institute (DHI). https://www.dhigroup.com/upload/publications/coastsea/Dixen_2012.pdf

Gong, **M.**, **Pan**, **X.**, **Shengtao**, **D.**, **Wu**, **G.**, **Lv**, **Y.**, **Sun**, **Y.**, **Ding**, **G.**, & **Liang**, **B.** (2025). Laboratory study of local scour around an array of pile groups in clear-water scour conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, *13*, 137. https://doi.org/10.3390/jmse13010137

Hartvig, **P. A.**, **Thomsen**, **J. M.**, **Frigaard**, **P.**, & **Andersen**, **T. L.** (2011). Experimental study of the development of scour and backfilling. *Coastal Engineering Journal*, *53*(2), 177–180. https://doi.org/10.1142/S0578563411002251

Khosronejad, **A.**, **Kang**, **S.**, & **Sotiropoulos**, **F.** (2012). Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources*, *37*, 73–85. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.09.013

Lança, **R.**, **Fael**, **C.**, **Maia**, **R.**, **Pêgo**, **J. P.**, & **Cardoso**, **A. H.** (2013). Clear-water scour at pile groups. *Journal of Hydraulic Engineering*, *139*(10), 1089–1098. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000770

Margheritini, **L.**, **Frigaard**, **P.**, **Martinelli**, **L.**, & **Lamberti**, **A.** (2006). Scour around monopile foundations for off-shore wind turbines: [The International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection ; Conference date: 08-05-2006 Through 10-05-2006]. *The First International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (CoastLab06)*.

Najafzadeh, **M.**, **Barani**, **G.-A.**, & **Hessami-Kermani**, **M.-R.** (2013). Group method of data handling to predict scour depth around vertical piles under regular waves. *Scientia Iranica*, *20*(3), 406–413. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scient.2013.04.005

Petersen, **T. U.**, **Mutlu Sumer**, **B.**, **Fredsøe**, **J.**, **Raaijmakers**, **T. C.**, & **Schouten**, **J.-J.** (2015). Edge scour at scour protections around piles in the marine environment — laboratory and field investigation. *Coastal Engineering*, *106*, 42–72. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.08.007

Roulund, **A.**, **Sumer**, **B. M.**, **Fredsøe**, **J.**, & **Michelsen**, **J.** (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, *534*, 351–401. https://doi.org/10.1017/S0022112005004507

Shahhosseini, **M.**, **Yue**, **S.**, **Xu**, **J.**, **Zhang**, **M.**, & **Yu**, **G.** (2025). Scour depth at a pile with a collar at bed level in clear-water current. *Ocean Engineering*, *320*, 120319. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120319

Sumer, **B. M.**, **Christiansen**, **N.**, & **Fredsøe**, **J.** (1997). The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves. *Journal of Fluid Mechanics*, *332*, 41–70. https://doi.org/10.1017/S0022112096003898

Sumer, **B. M.**, & **Fredsøe**, **J.** (2001). Wave scour around a large vertical circular cylinder. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *127*(3), 125–134. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2001)127:3(125)

Sumer, **B. M.**, & **Fredsøe**, **J.** (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. World Scientific.

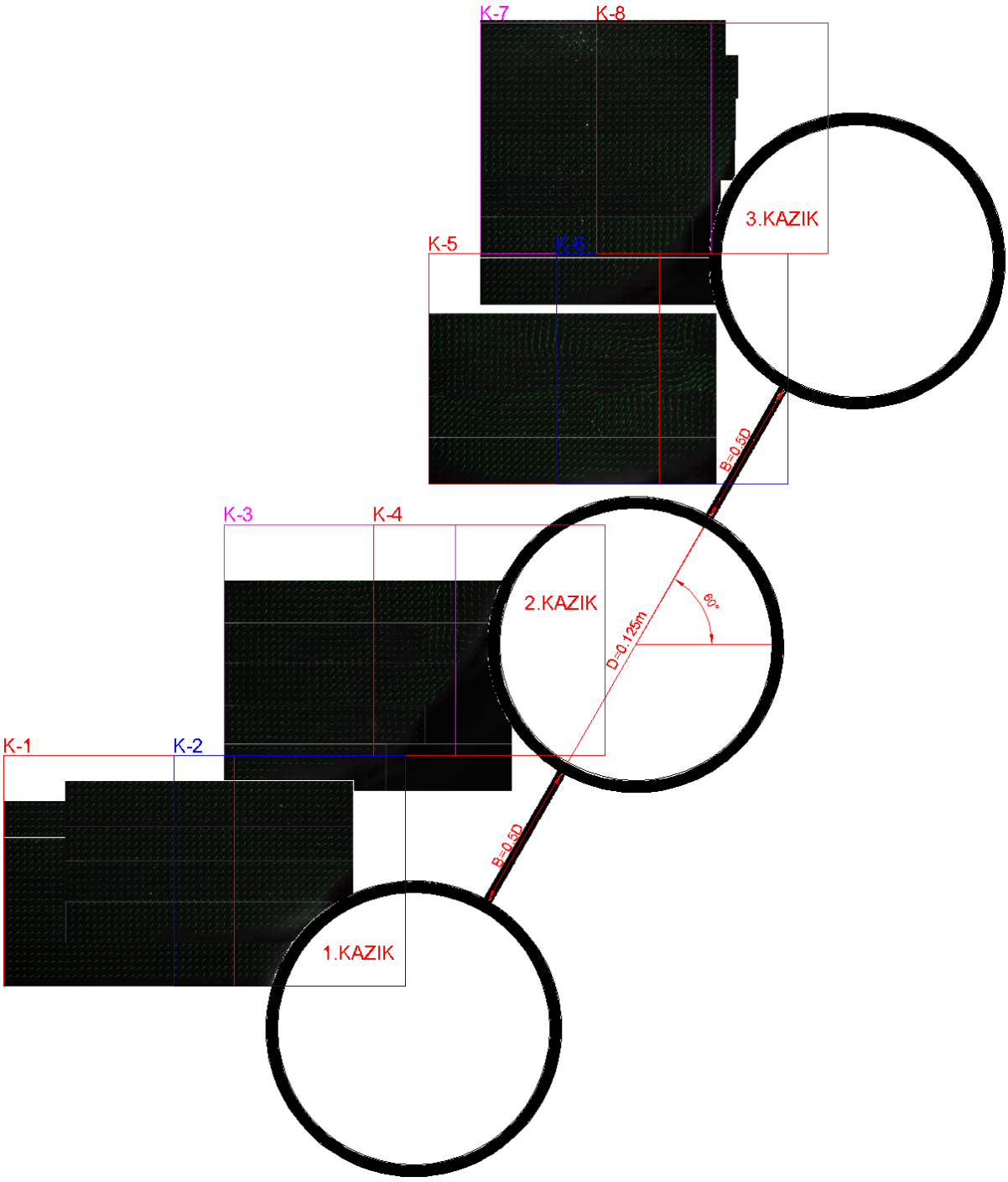
Sumer, **B.**, & **Fredsøe**, **J.** (1998). Wave scour around group of vertical piles [Cited by: 80]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, *124*(5), 248–256. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1998)124:5(248)

Yang, **Y.**, **Qi**, **M.**, **Wang**, **X.**, & **Li**, **J.** (2020). Experimental study of scour around pile groups in steady flows. *Ocean Engineering*, *195*, 106651. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106651

Zhang, **Q.**, **Zhou**, **X.-L.**, & **Wang**, **J.-H.** (2017). Numerical investigation of local scour around three adjacent piles with different arrangements under current. *Ocean Engineering*, *142*, 625–638. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.045

EKLER

EK A: Piv ölçüm sonuçları
EK B: Lidar ölçüm sonuçları



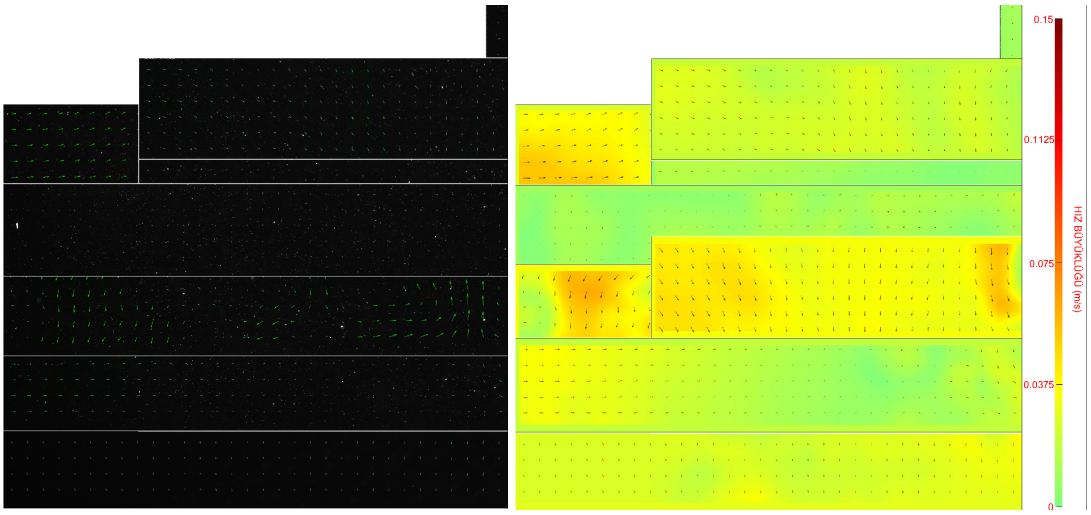
Şekil 1: Konf.1' de $\theta = 60^\circ$ ve T= 1.25' de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No= 12).

Şekil 1' de Konf.1' de $\theta = 60^\circ$ ve T= 1.25' de yapılan deneyin PIV ölçümünün tam alanı gösterilmektedir. Bu ana ölçüm alanı 8 ana kesite ayrılmıştır (K-1, K-2, K-3, K-4, K-5, K-6, K-7, K-8) ve kesitlerin alındığı alanlar Şekil 1 üzerinde işaretlenmiştir.

Şekil 18' de Konf.2' de $\theta = 30^\circ$ ve T= 1.25' de yapılan deneyin PIV ölçümünün tam alanı gösterilmektedir. Bu ana ölçüm alanı 6 ana kesite ayrılmıştır (K-1, K-2, K-3, K-4, K-5, K-6) ve kesitlerin alındığı alanlar Şekil 18 üzerinde işaretlenmiştir.

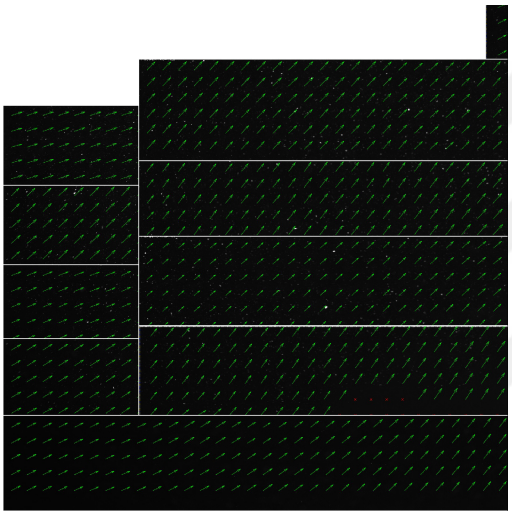
Şekil 31' de Konf.2' de $\theta = 60^\circ$ ve T= 1.25' de yapılan deneyin PIV ölçümünün tam alanı gösterilmektedir. Bu ana ölçüm alanı 7 ana kesite ayrılmıştır (K-1, K-2, K-3, K-4, K-5, K-6, K-7) ve kesitlerin alındığı alanlar Şekil 31 üzerinde işaretlenmiştir.

Şekil 1, Şekil 18 ve Şekil 31' den sonra alt alta yerleştirilen alt resim bloku, her bir kesit noktasında ölçülen anlık hız vektörlerini ve o ana denk gelen hız büyüklüklerini içermektedir. Düzen iki sütun (sol: hız vektörleri, sağ: hız büyüklükleri haritası) x beş satır (farklı faz açıları) olacak şekilde kurgulanmıştır. Renk haritası 0 m/s'den başlayıp (yeşil) 0.15 m/s (kırmızı) hıza doğru değişim göstermektedir. Yukarıdan aşağı doğru satırlarda ise farklı faz açılarını ($\omega t = 0^\circ - 90^\circ - 180^\circ - 225^\circ - 270^\circ$) temsil etmektedir. Bu kesit işleminde tam görüntünün genel akış yapısı korunarak, her bir kesitin akış fazına bağlı değişimi ve vektörel dağılımının daha net analiz edilebilmesi sağlanmıştır.

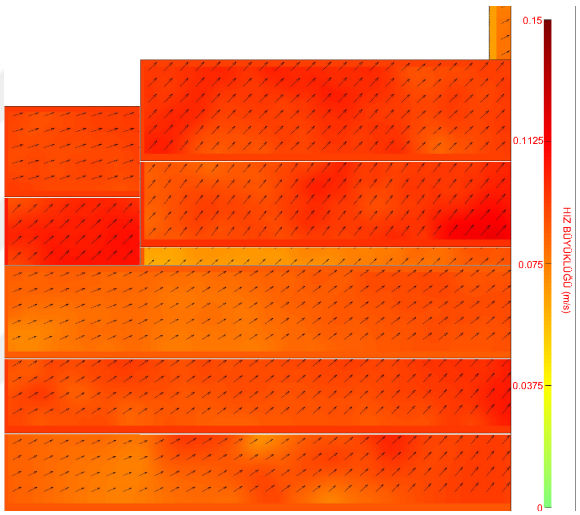


(a) ωt= 0° Hız vektörleri

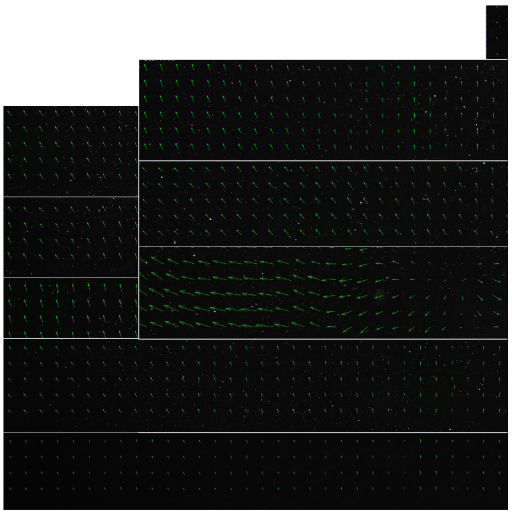
(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



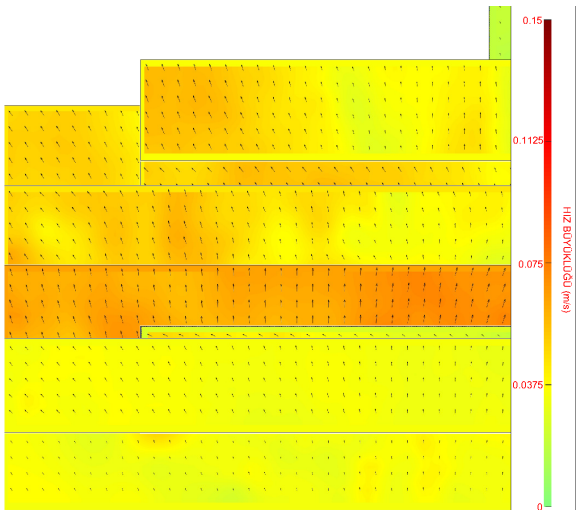
(c) ωt= 90° Hız vektörleri



(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

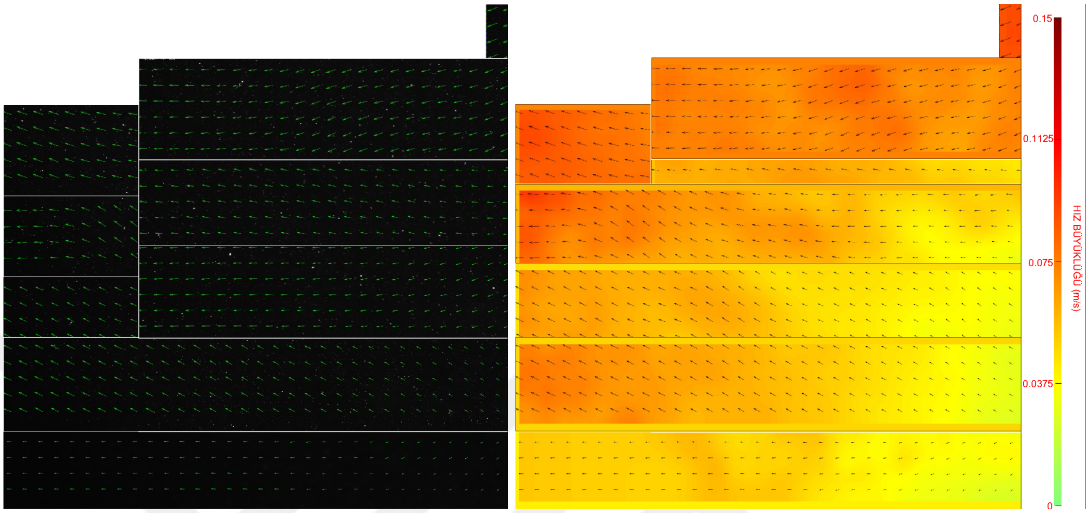


(e) ωt= 180° Hız vektörleri

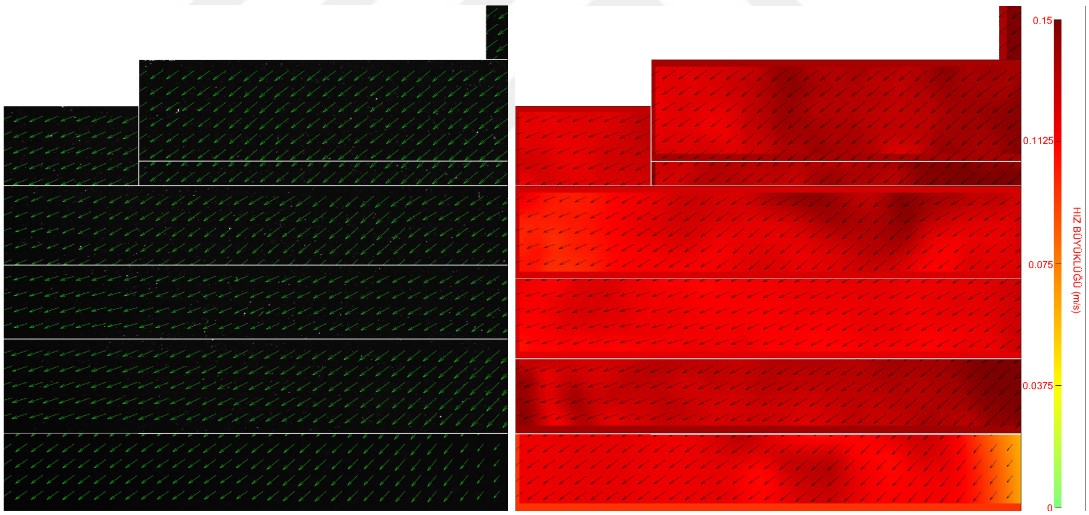


(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 2: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

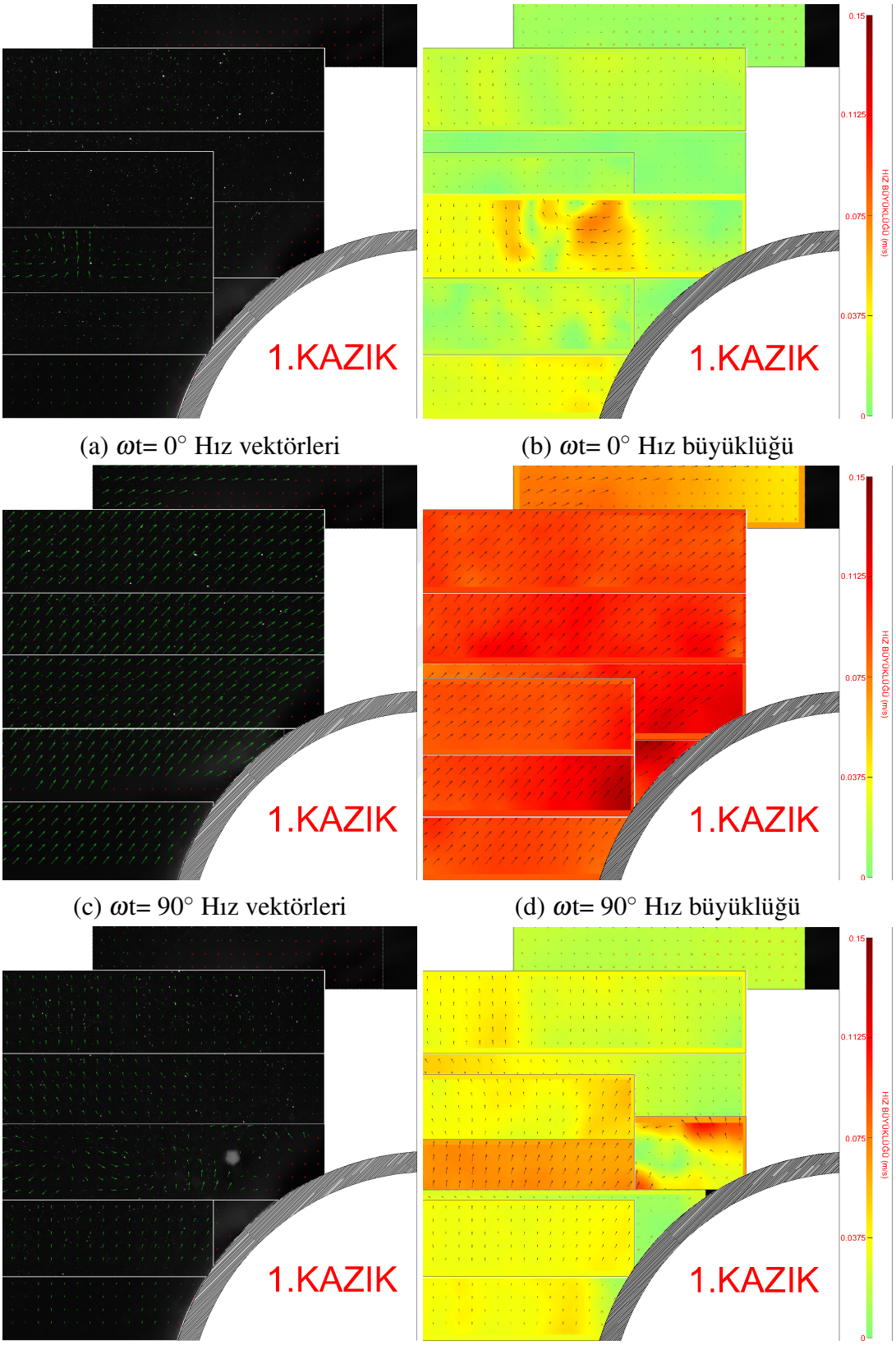


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü



(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 3: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

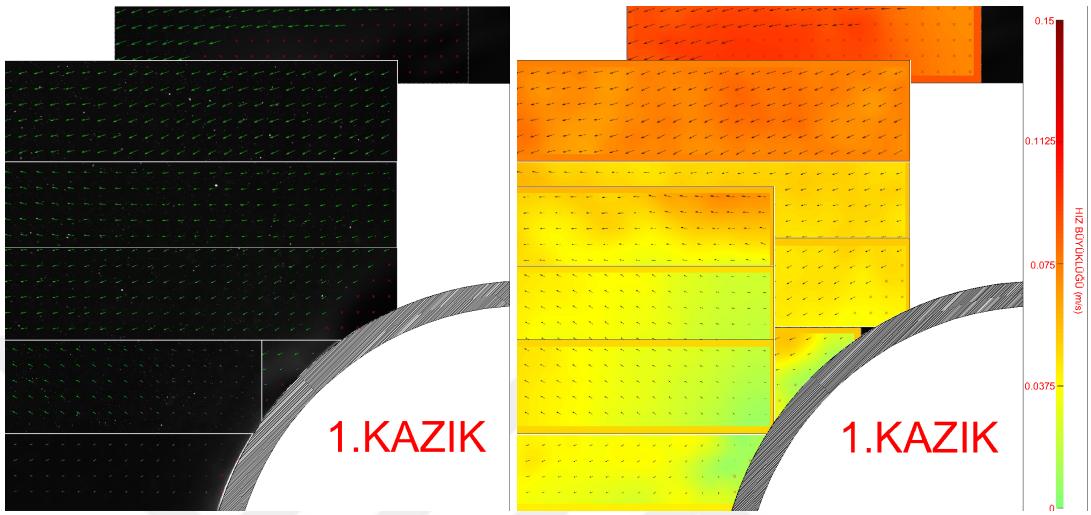


(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

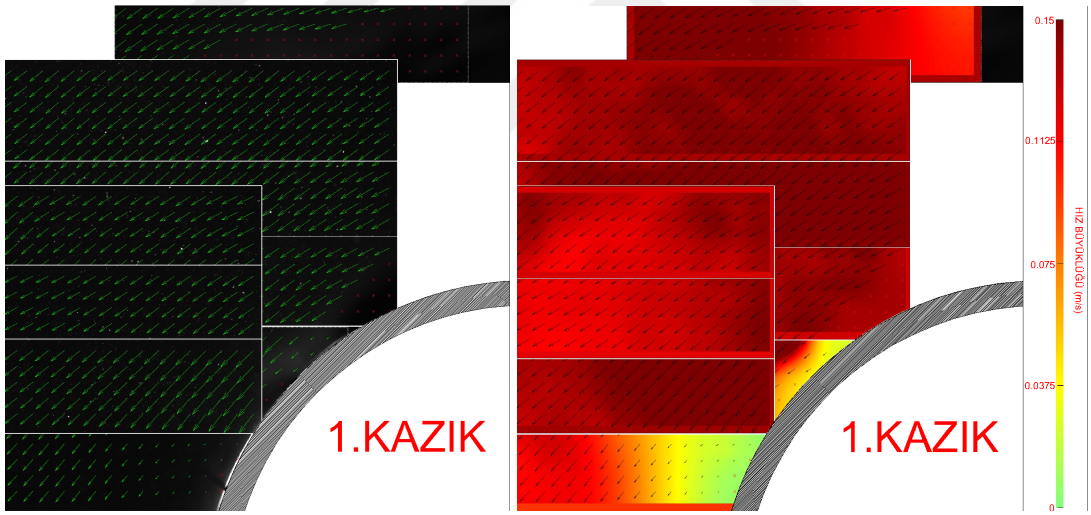
(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 4: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

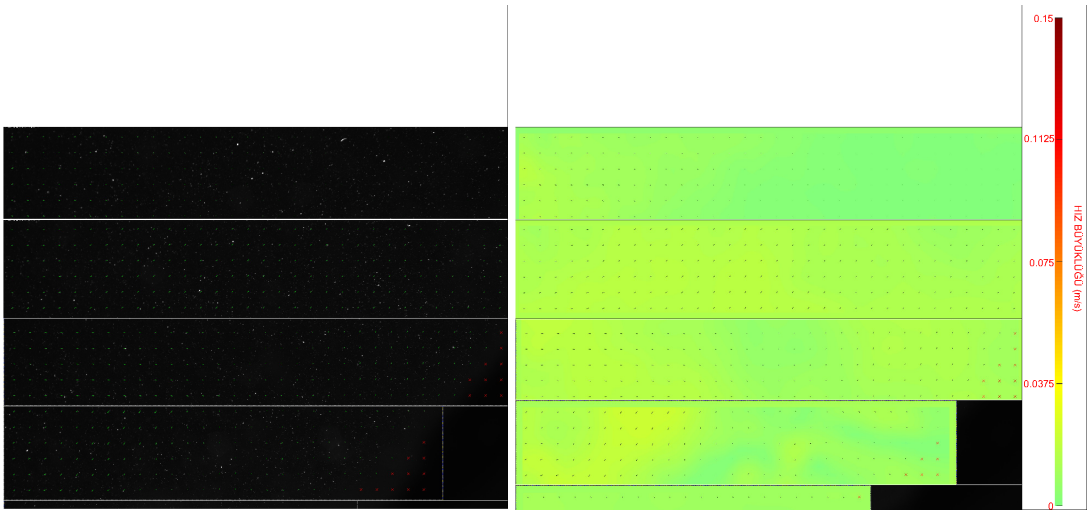


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü



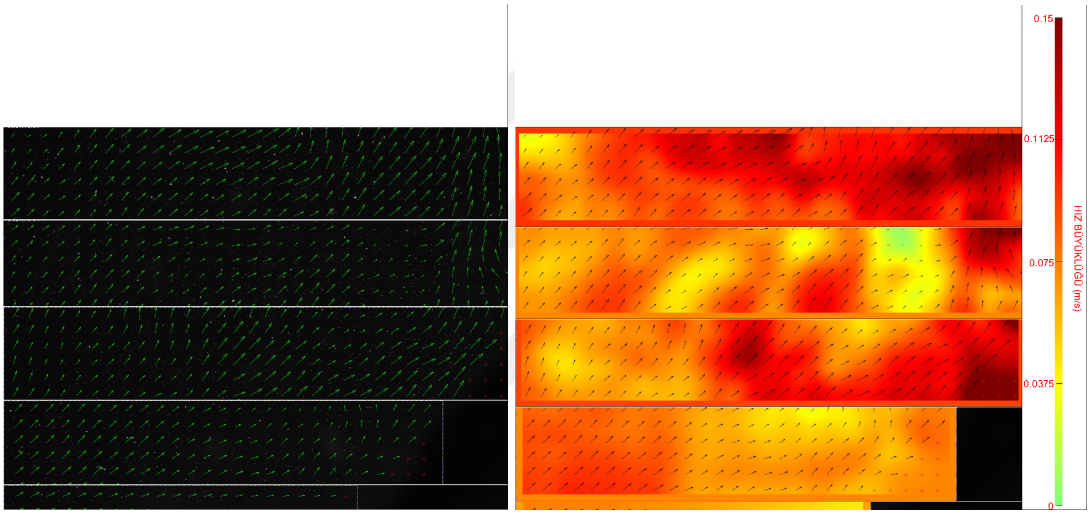
(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 5: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225° – ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



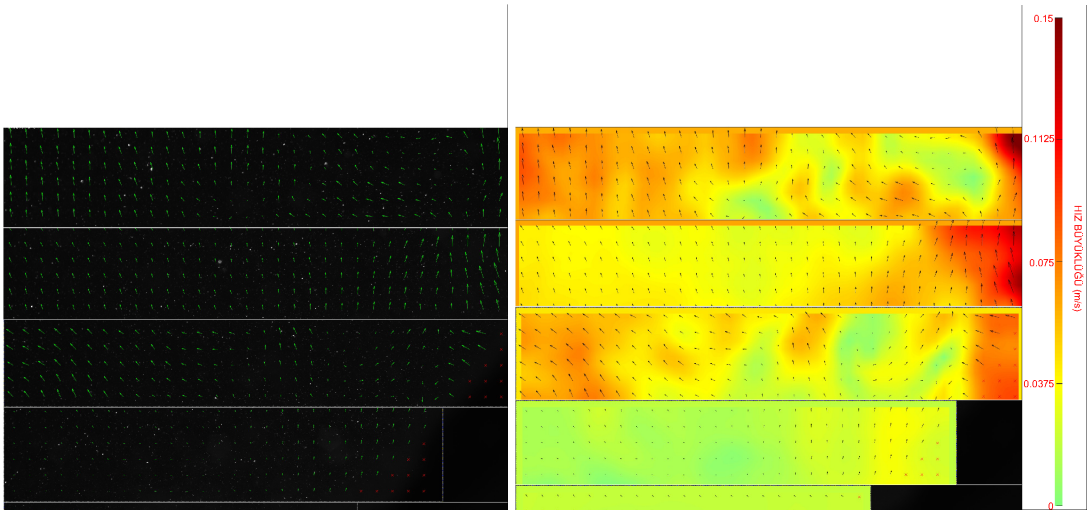
(a) ωt= 0° Hız vektörleri

(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



(c) ωt= 90° Hız vektörleri

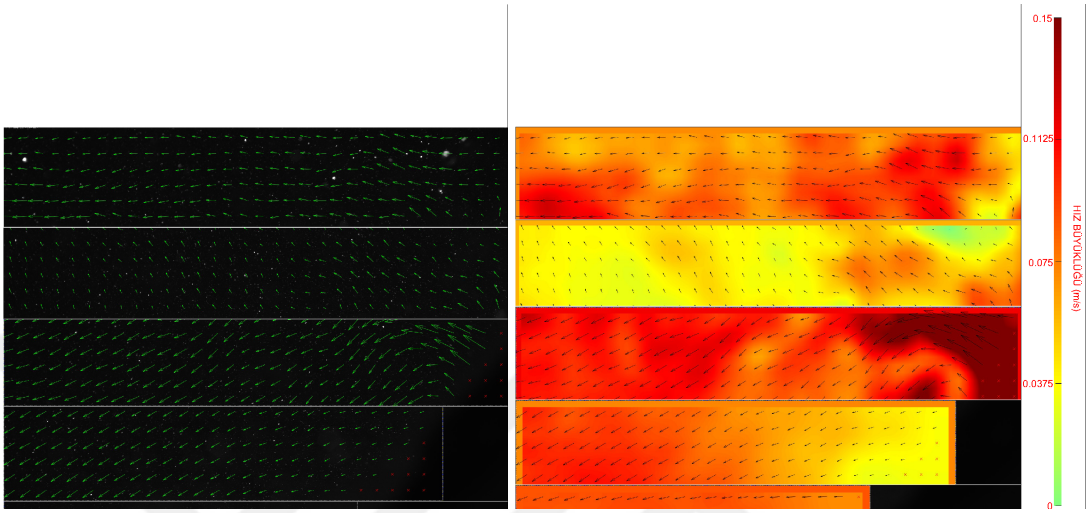
(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



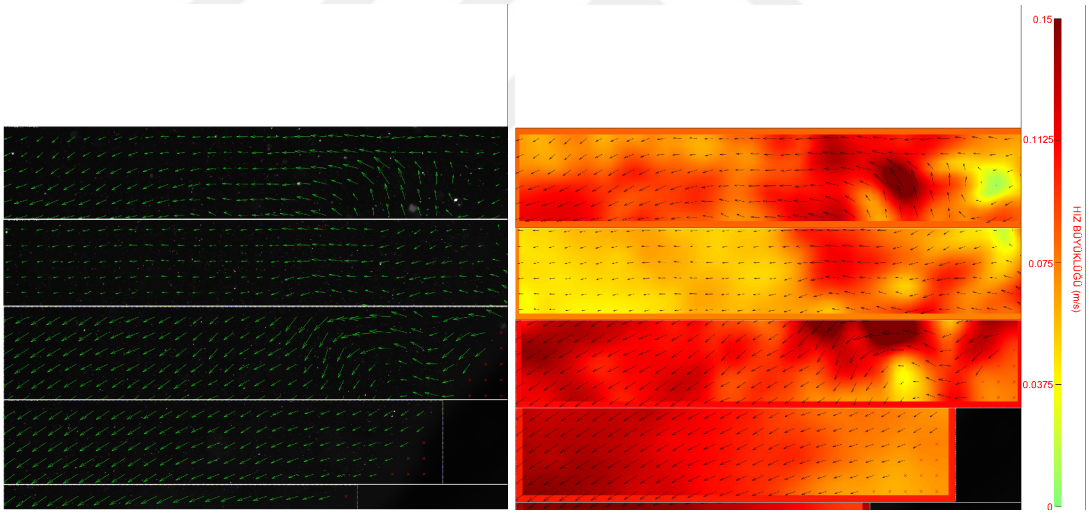
(e) ωt= 180° Hız vektörleri

(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 6: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

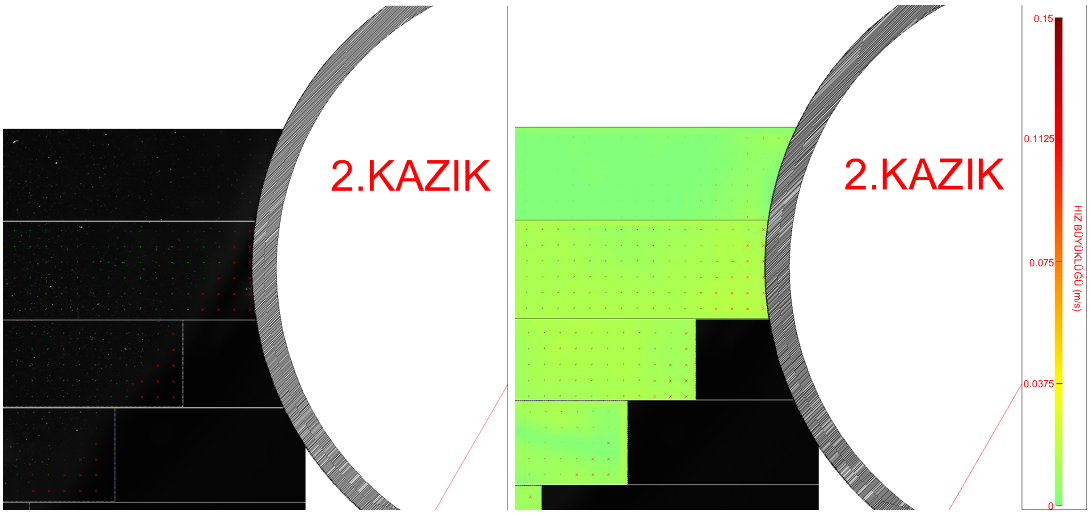


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

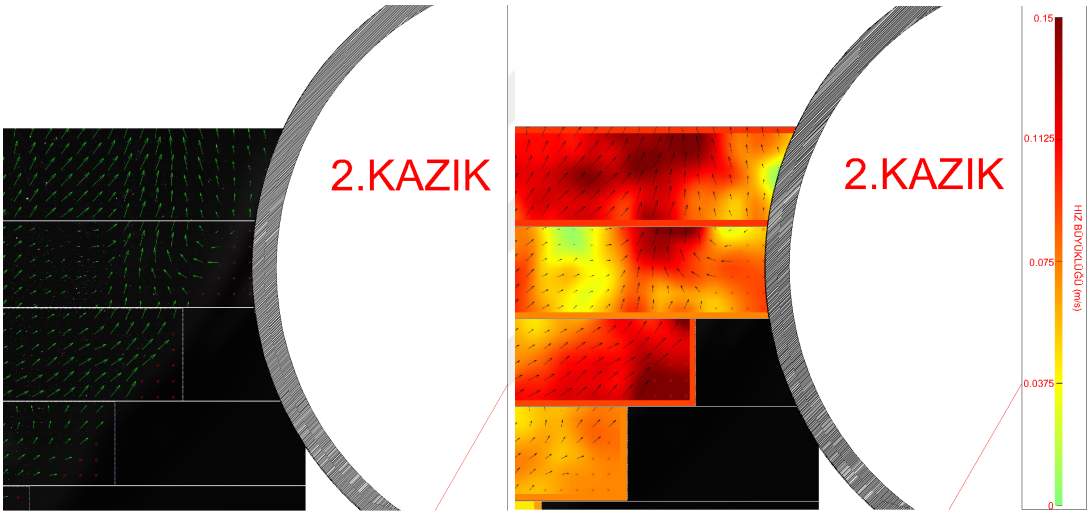


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

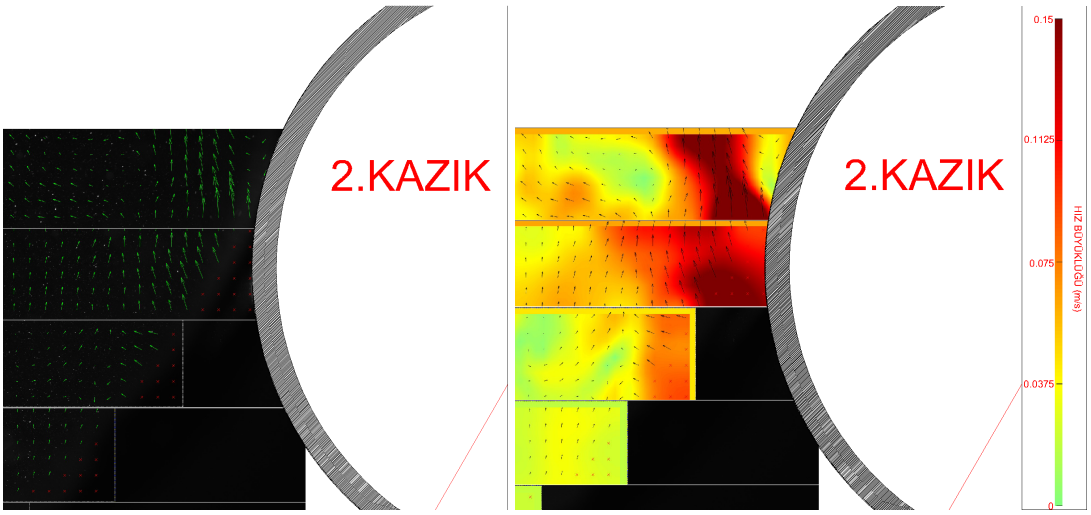
Şekil 7: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225° – ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

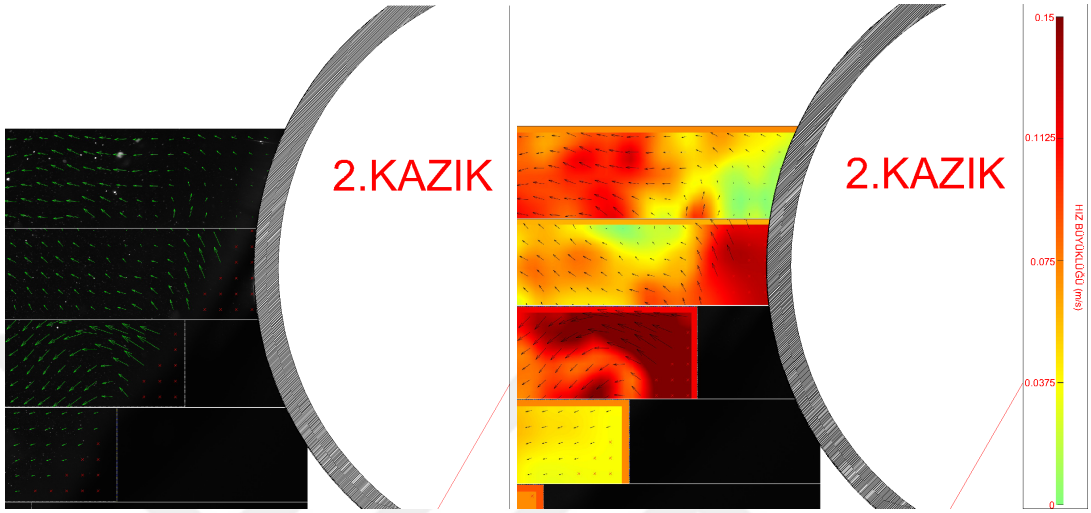


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

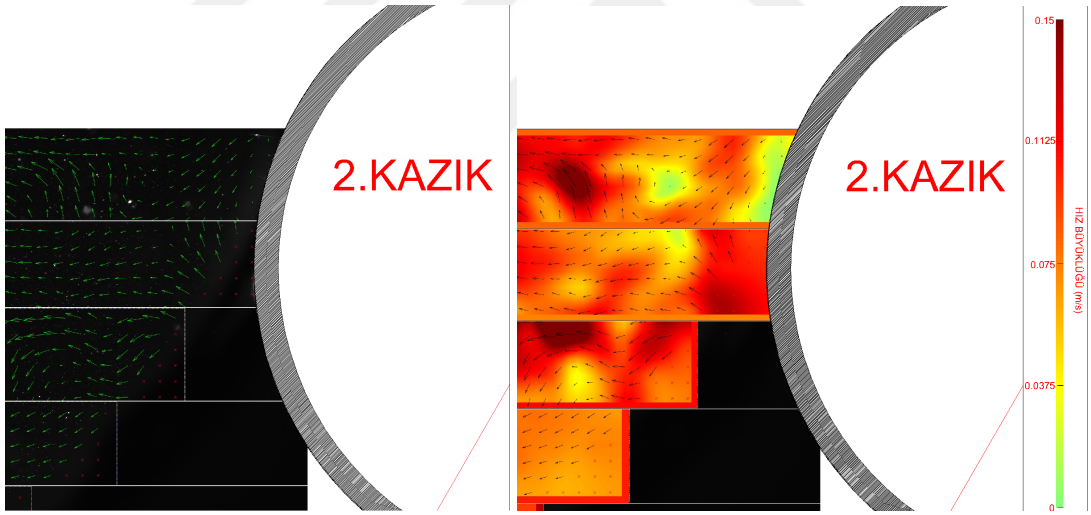


(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 8: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

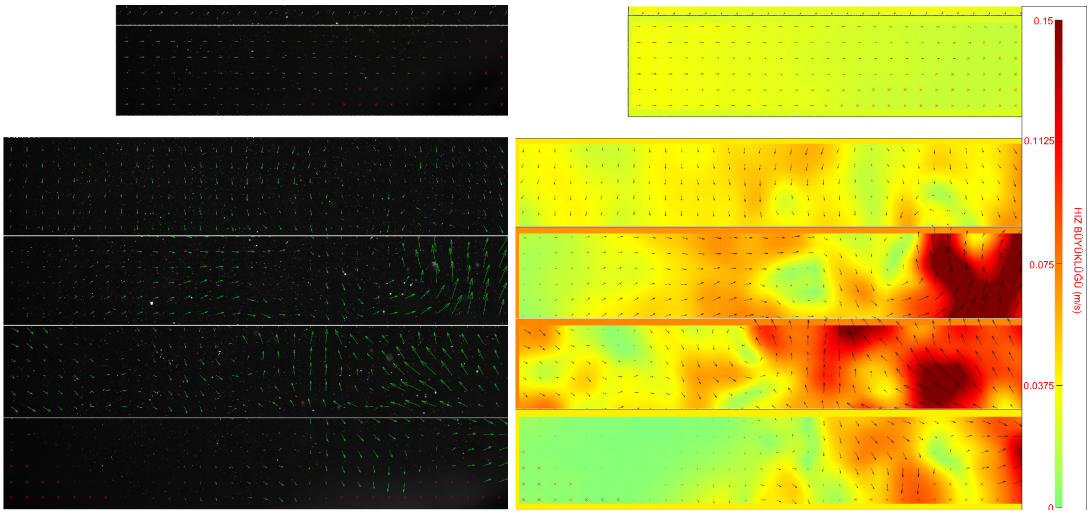


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü



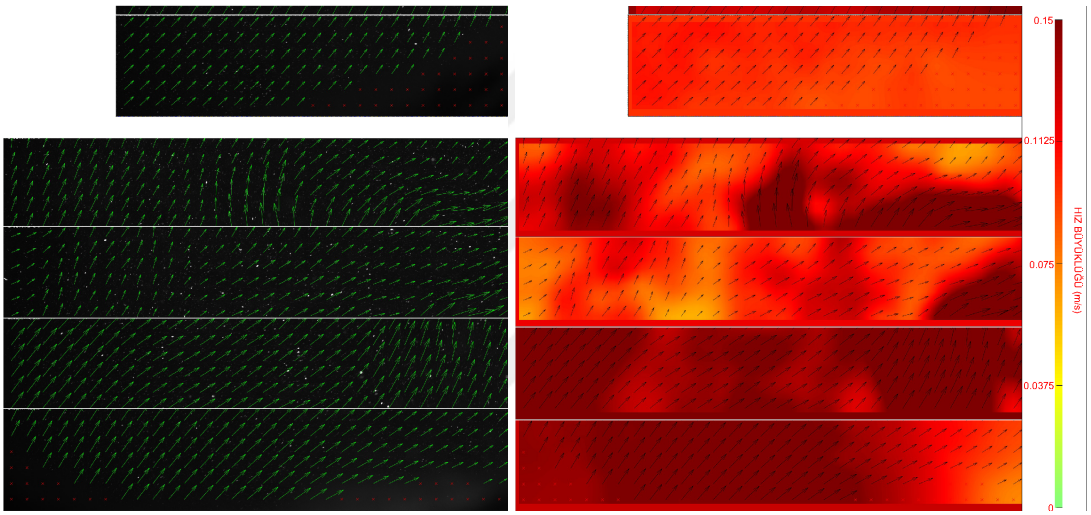
(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 9: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225° – ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



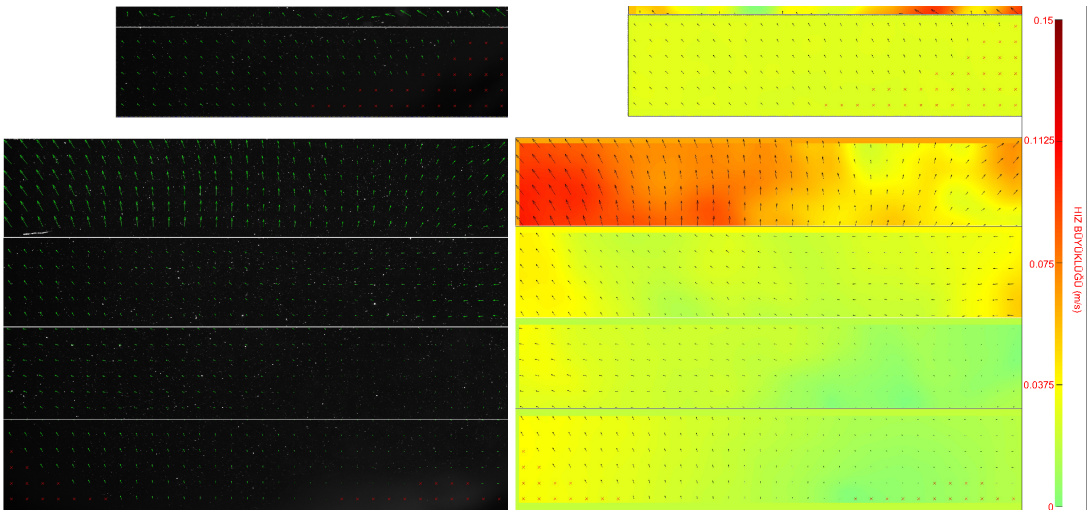
(a) ωt= 0° Hız vektörleri

(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



(c) ωt= 90° Hız vektörleri

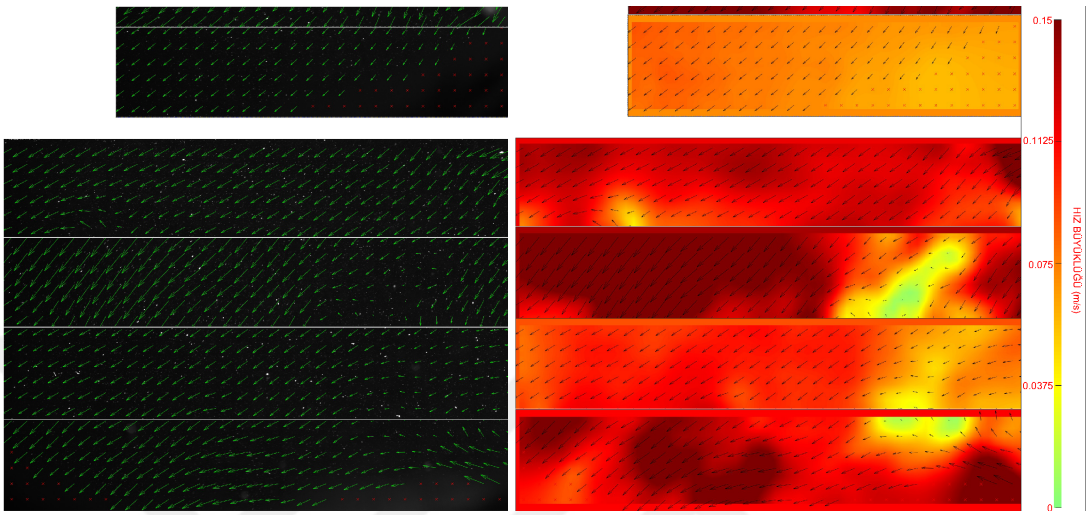
(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



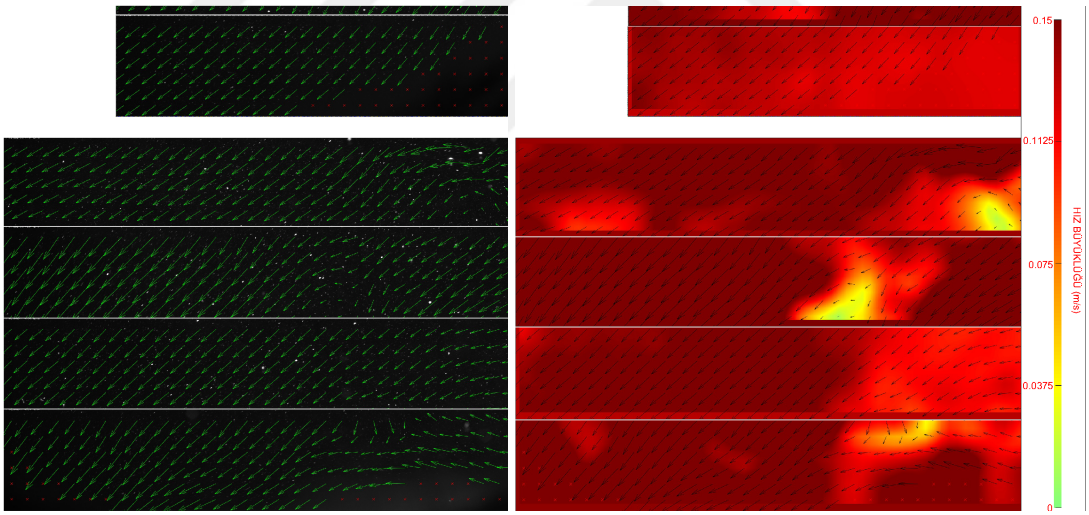
(e) ωt= 180° Hız vektörleri

(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 10: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

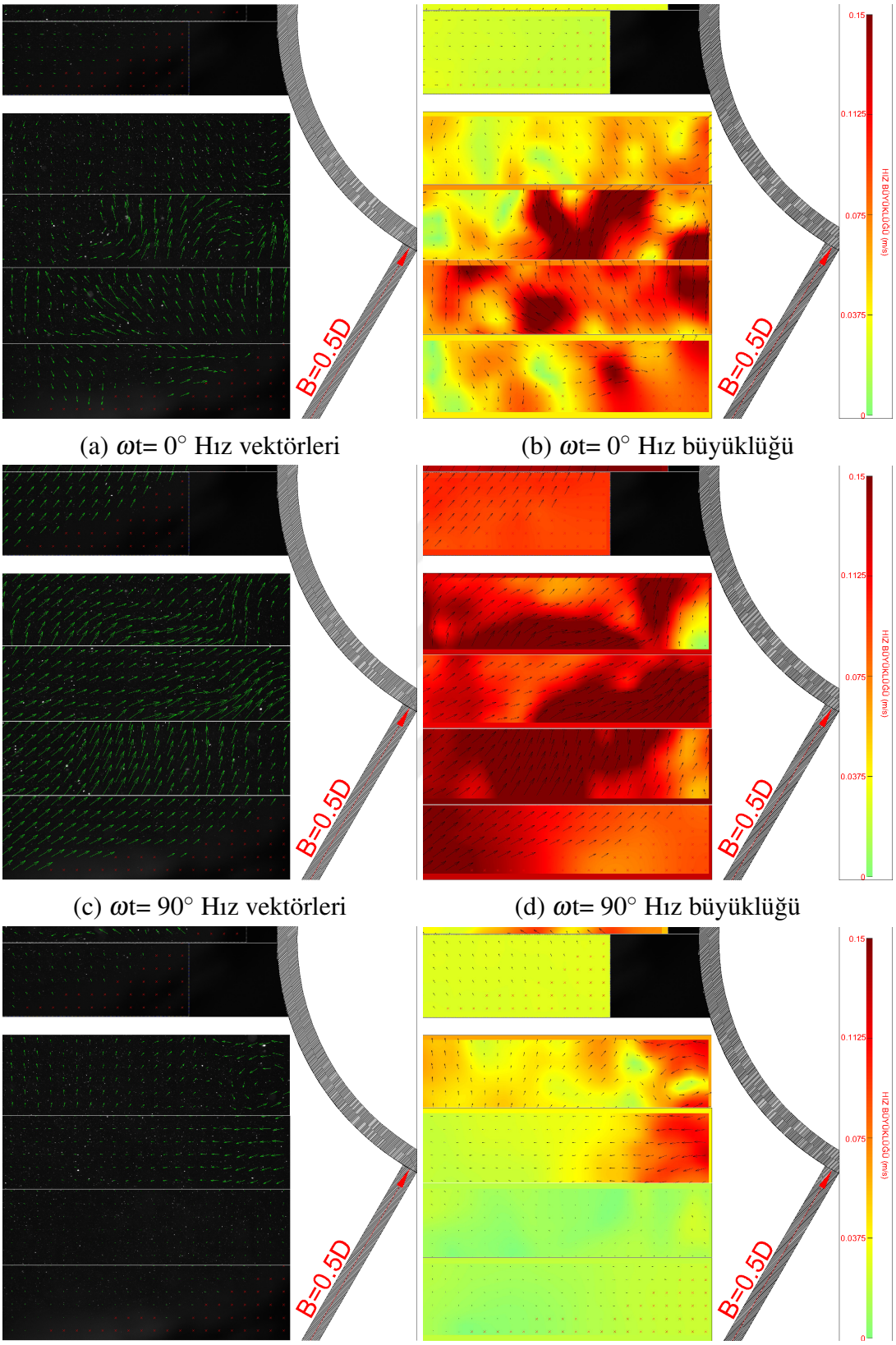


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü



(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 11: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

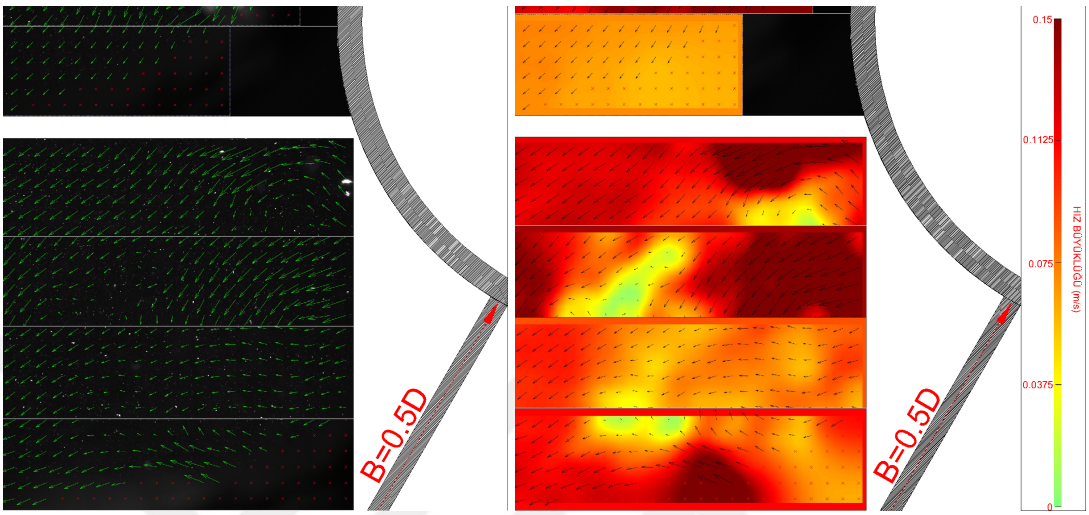


(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

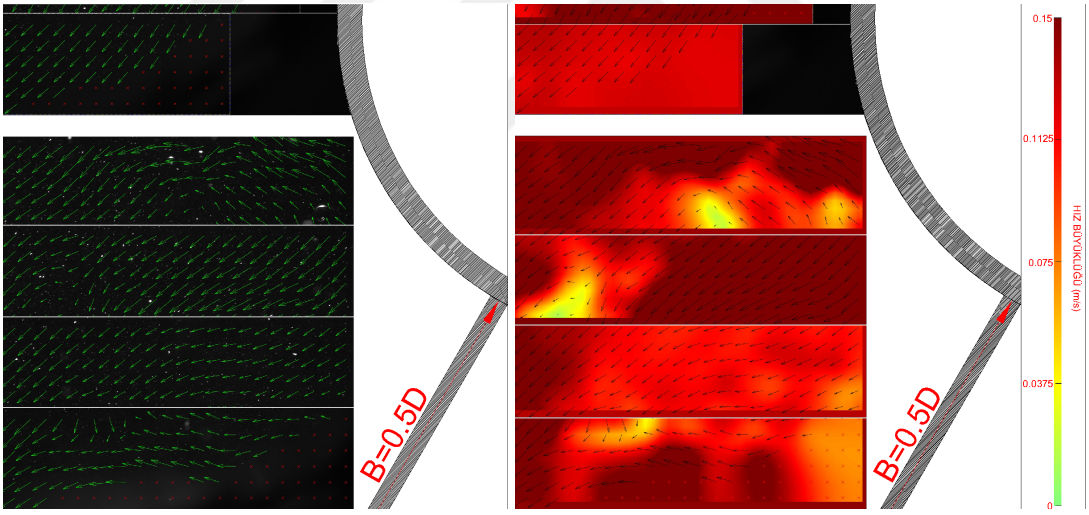
(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 12: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

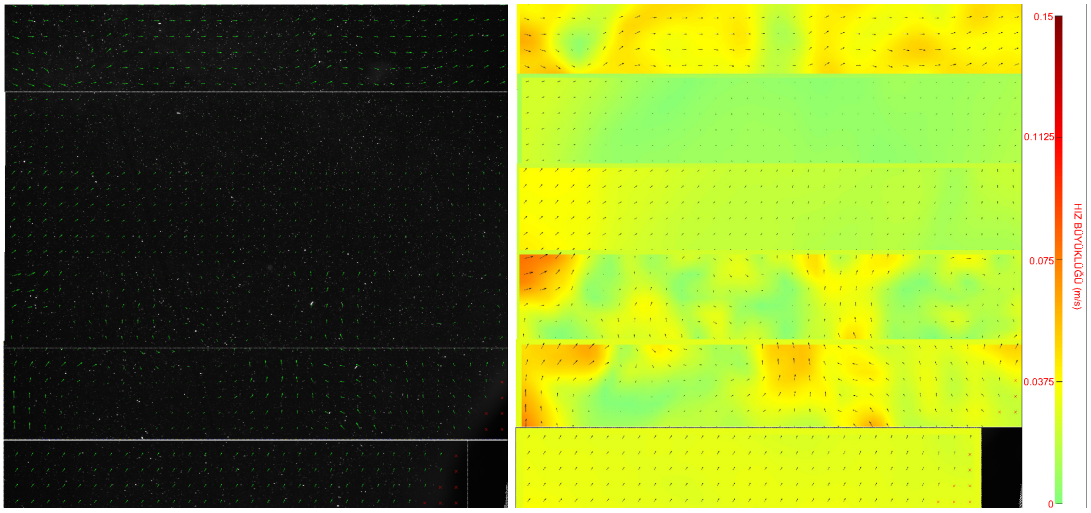


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

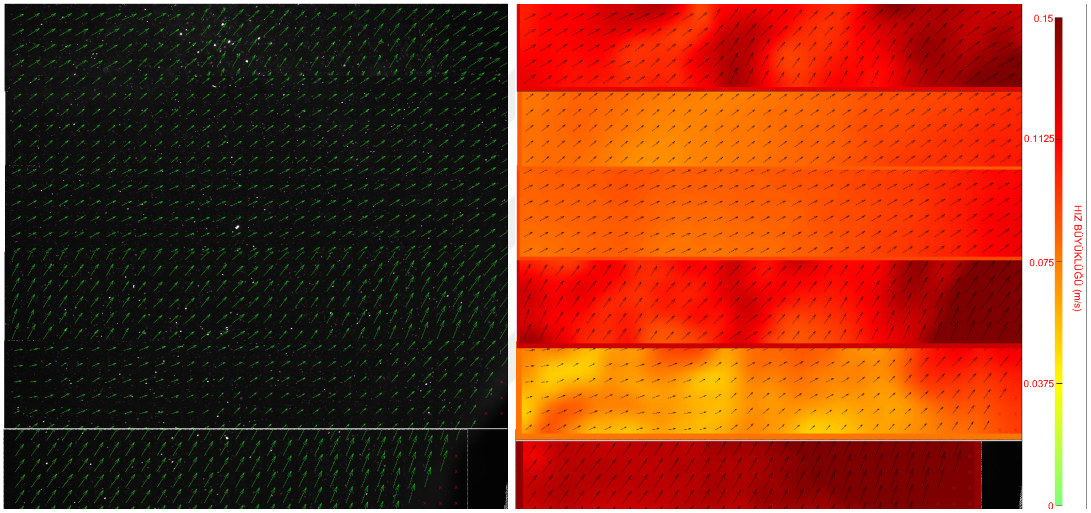


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

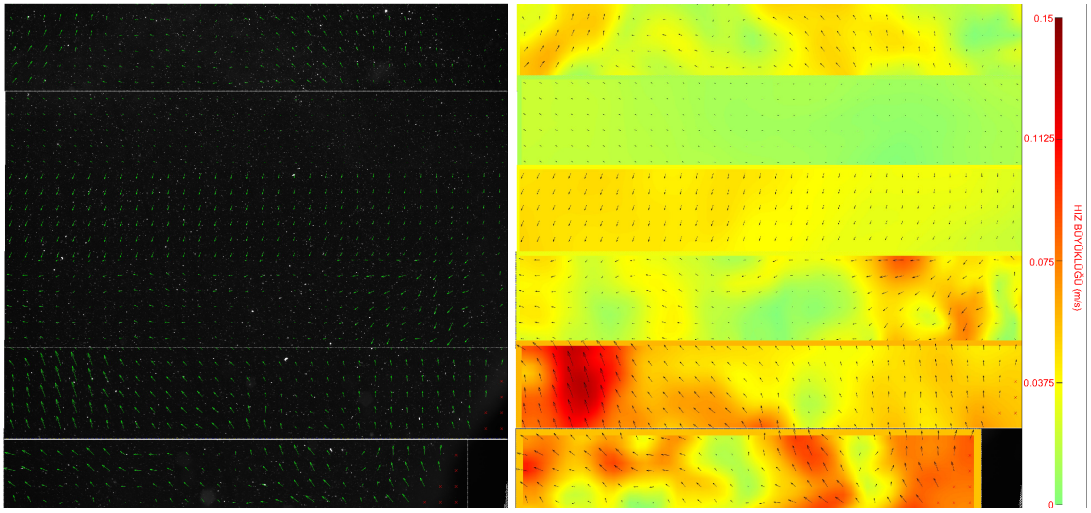
Şekil 13: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

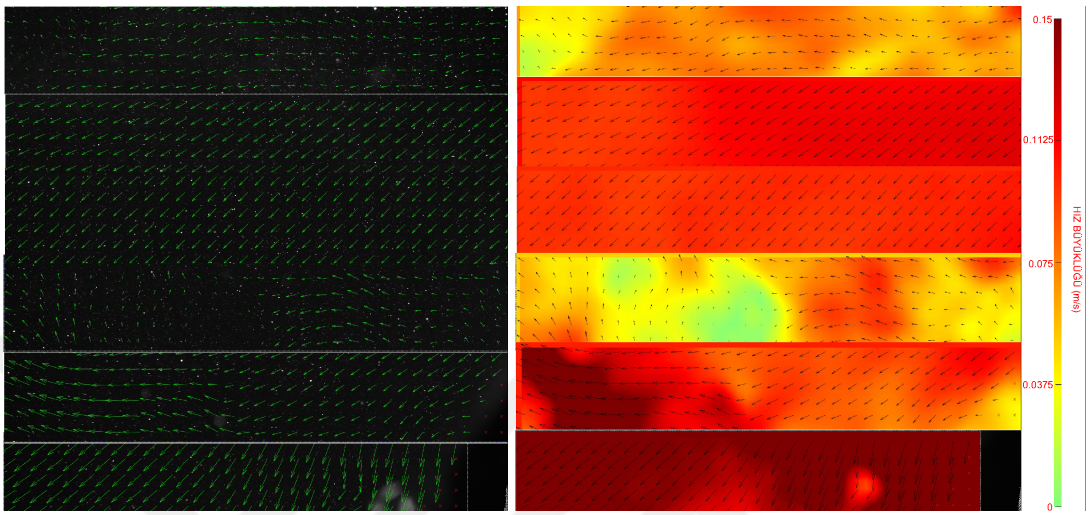


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

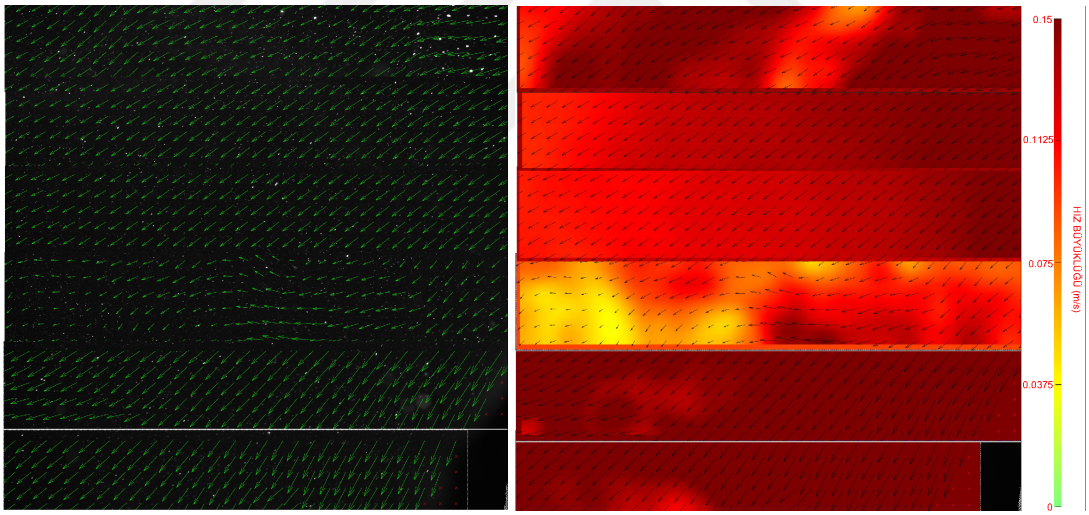


(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 14: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

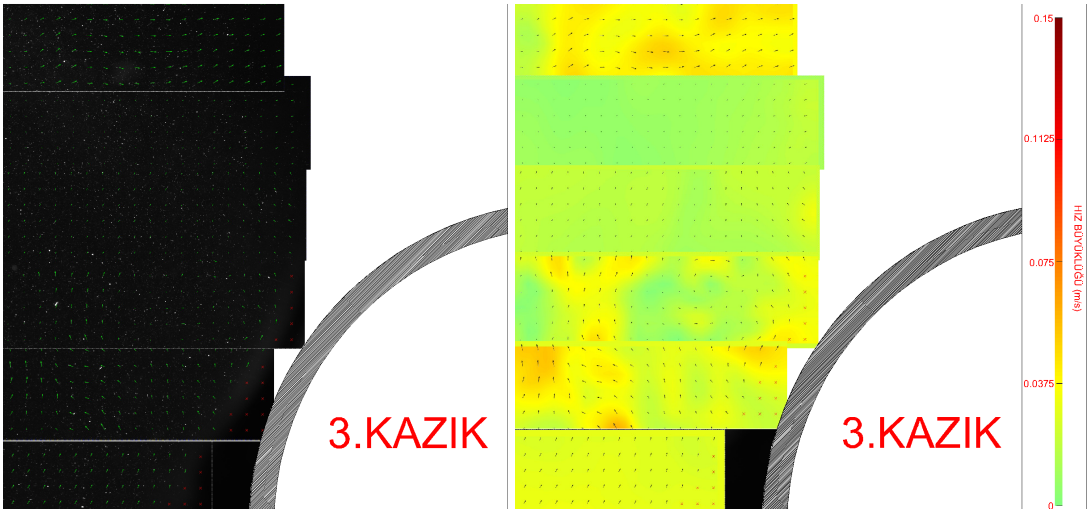


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

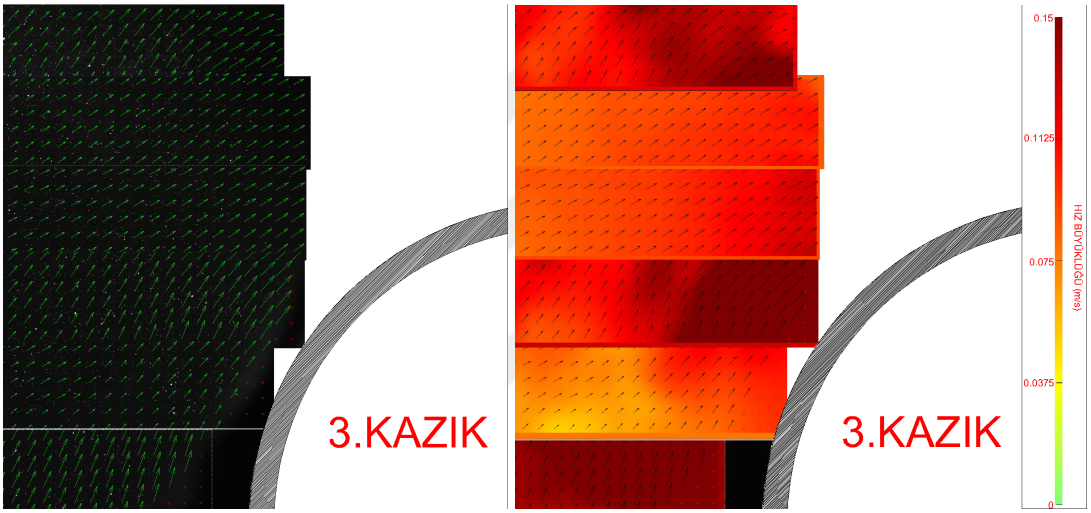


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

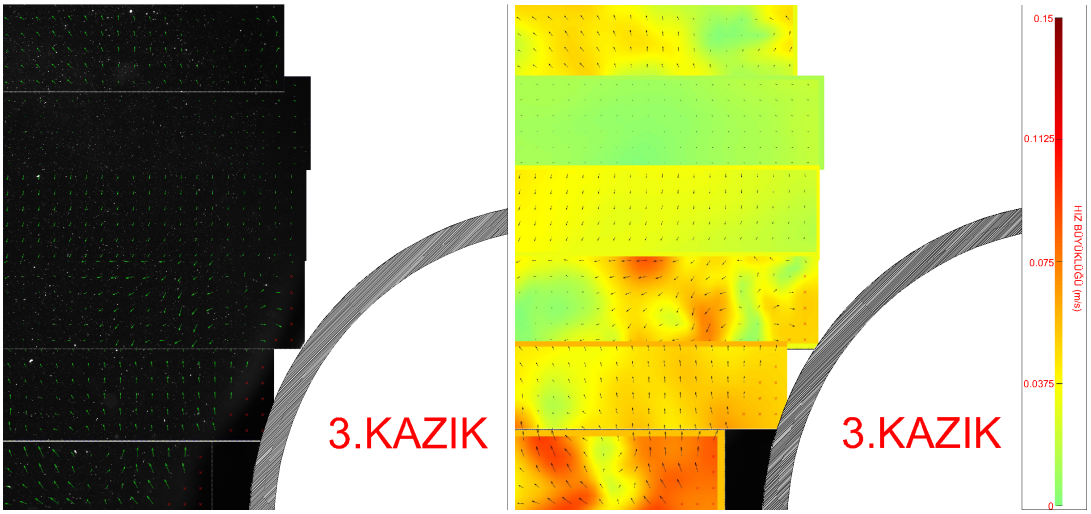
Şekil 15: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

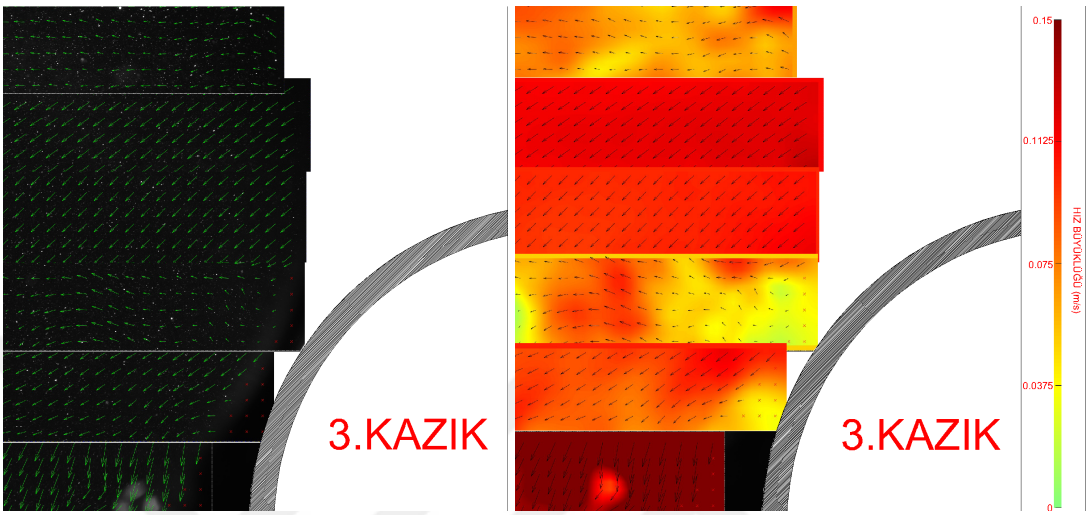


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

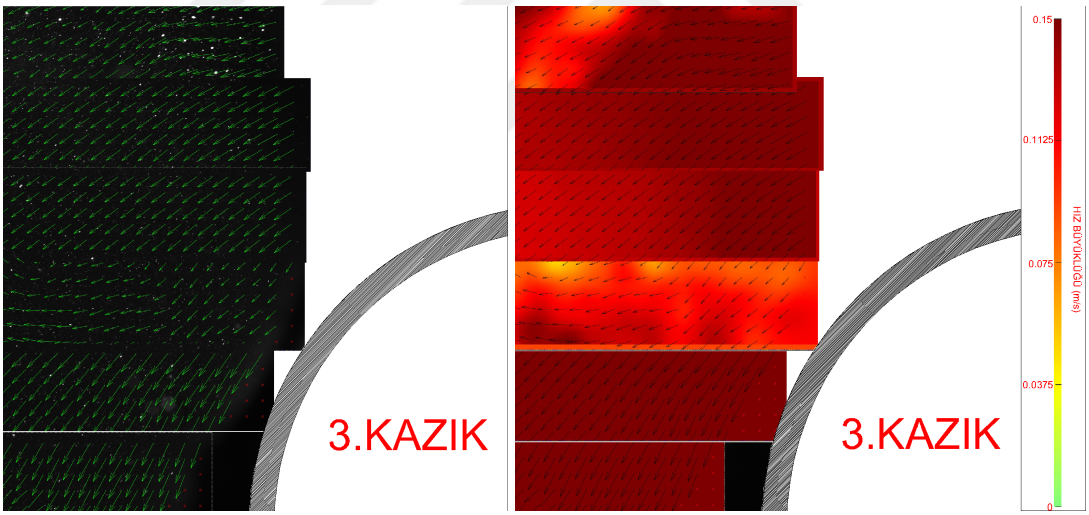


(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 16: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-8'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

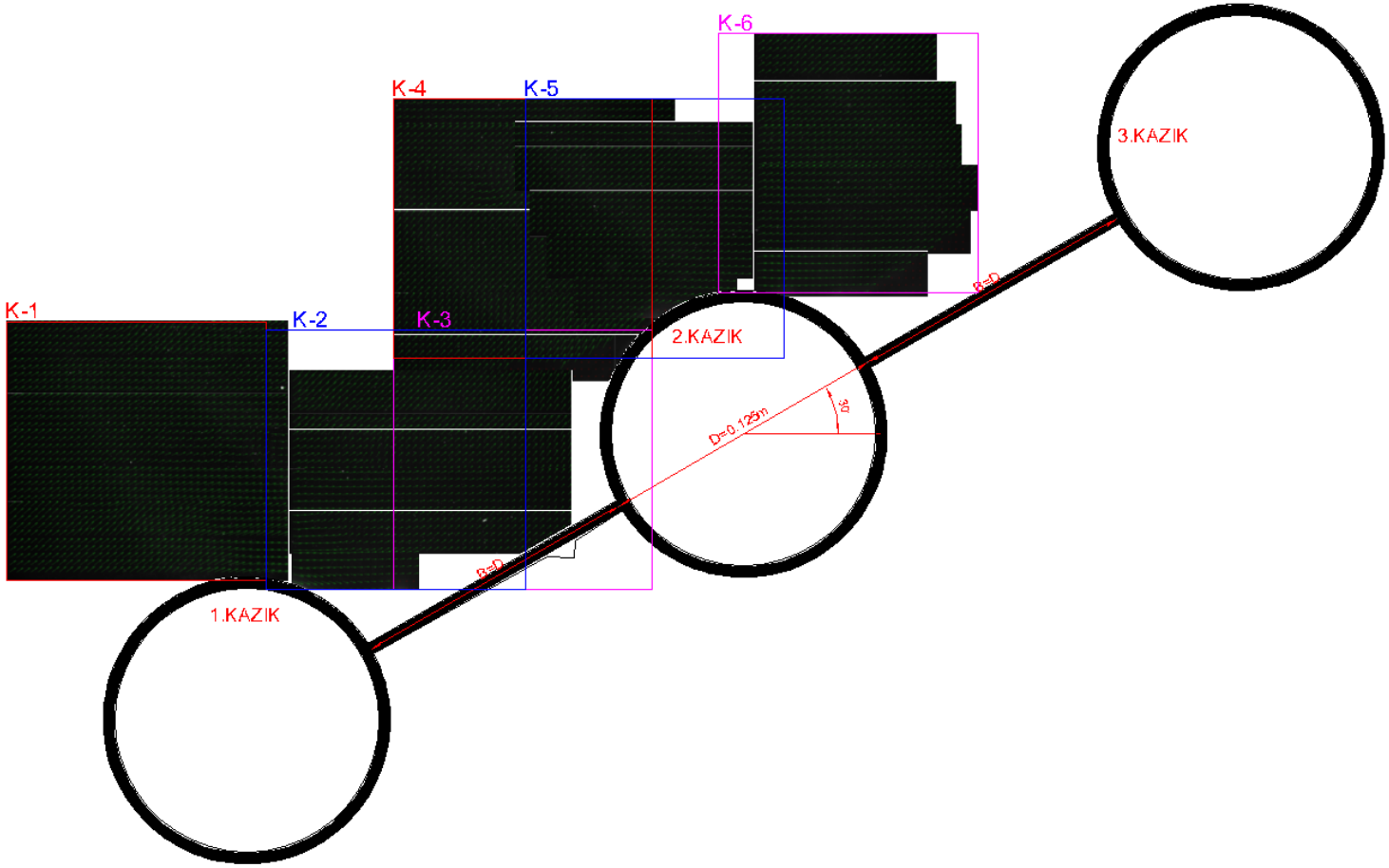


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

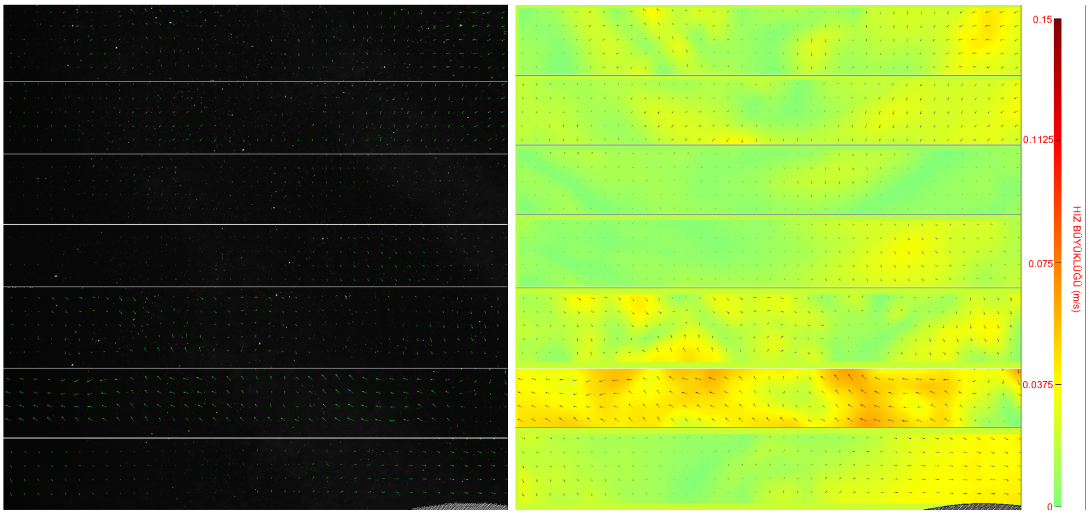


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

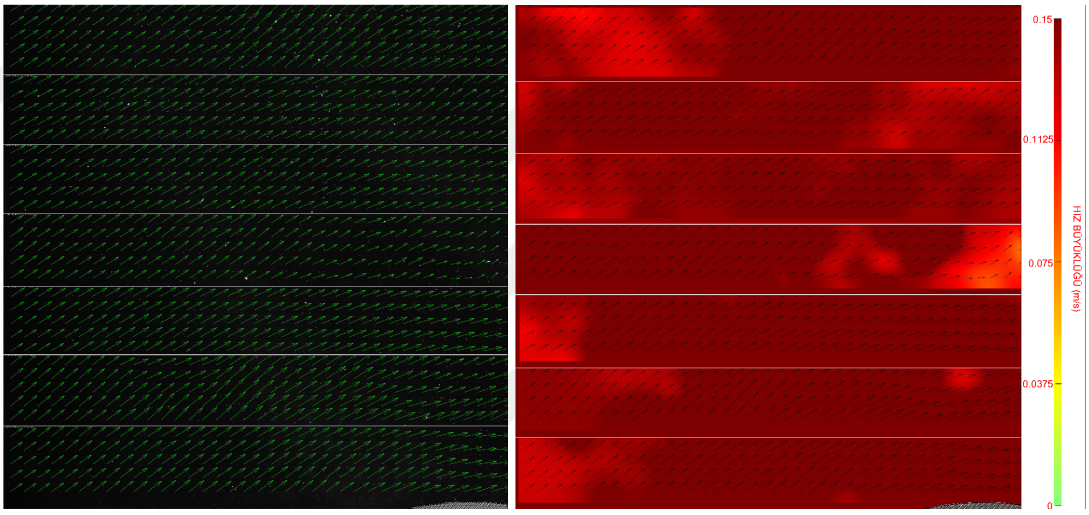
Şekil 17: Konf. 1'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-8'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225° – ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



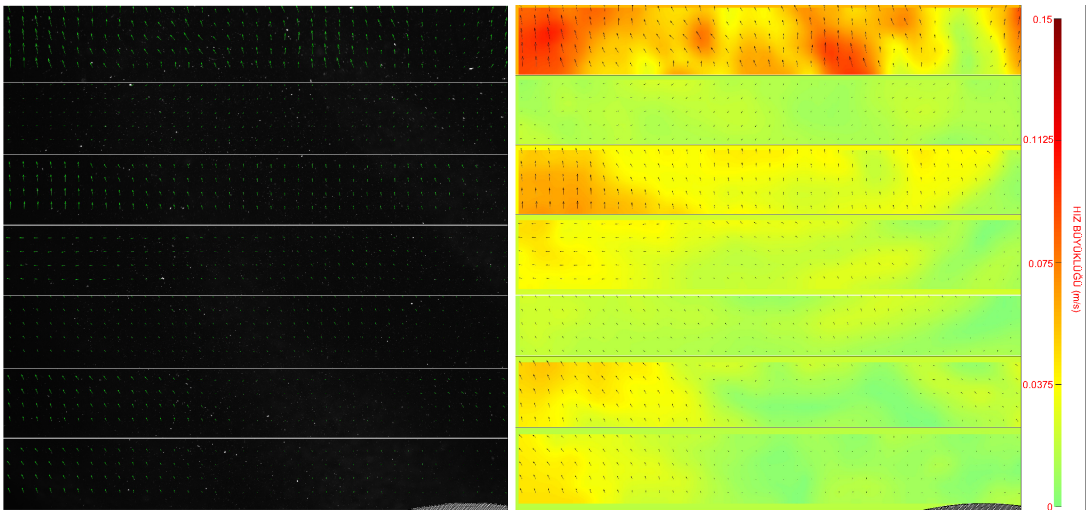
Şekil 18: Konf.2' de $\theta = 30°$ ve T= 1.25' de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No= 24).



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

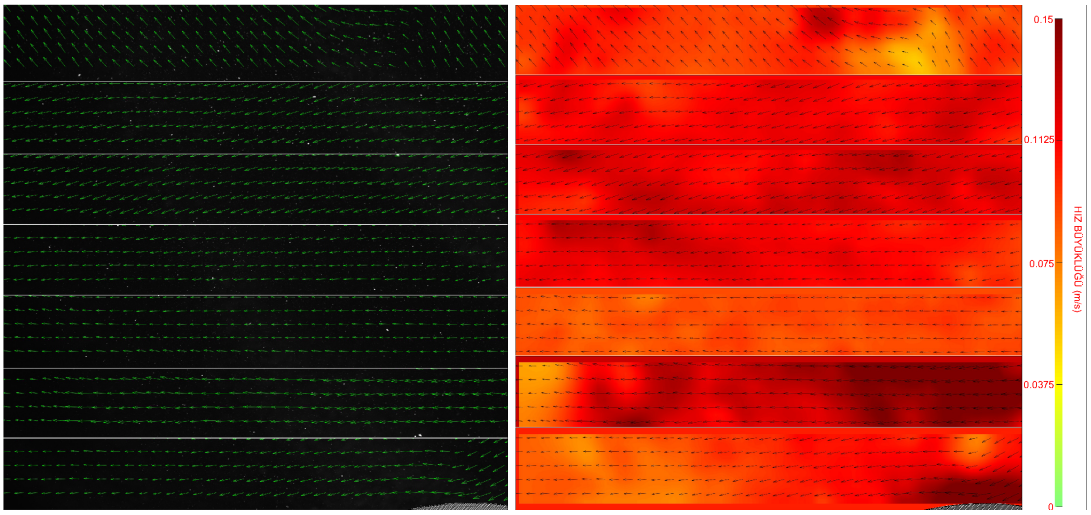


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

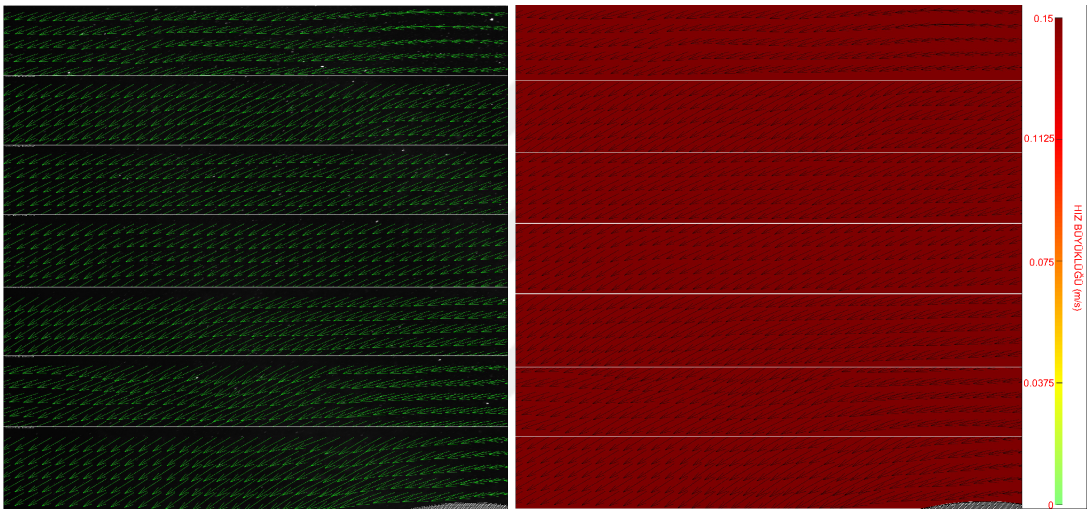


(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 19: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= $0° - 90°$ ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

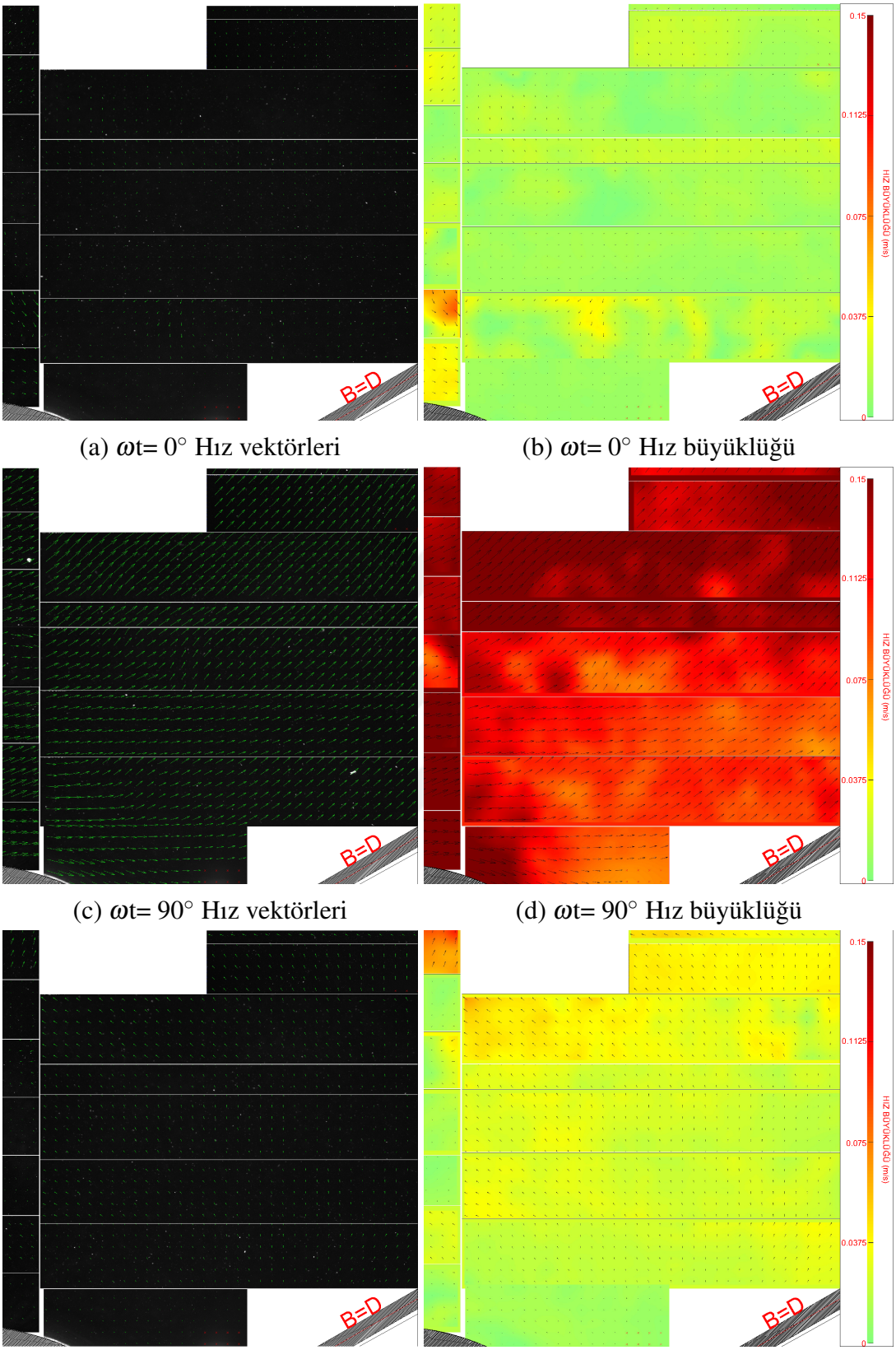


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü



(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 20: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°$-$ ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri

(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

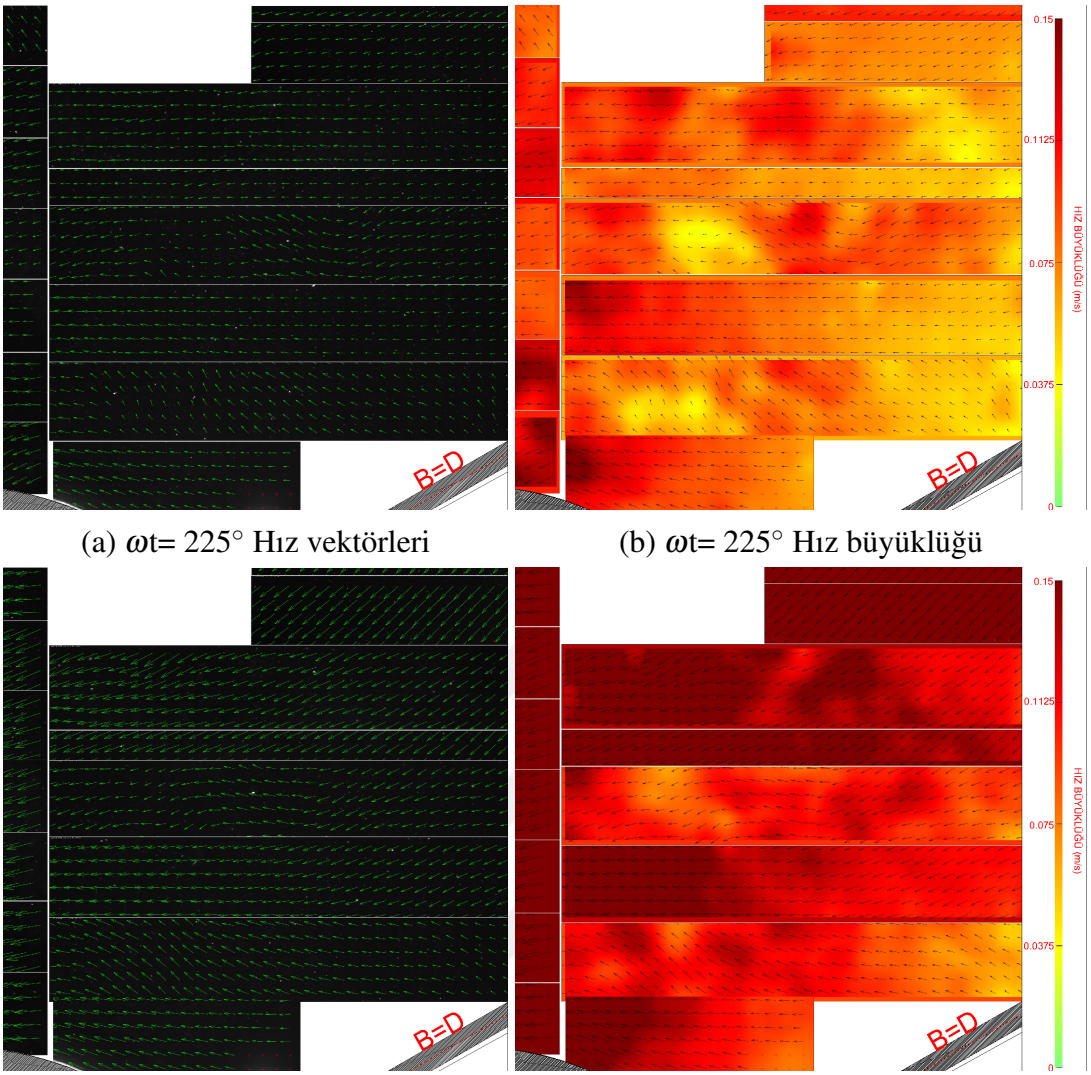
(c) ωt= 90° Hız vektörleri

(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

(e) ωt= 180° Hız vektörleri

(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

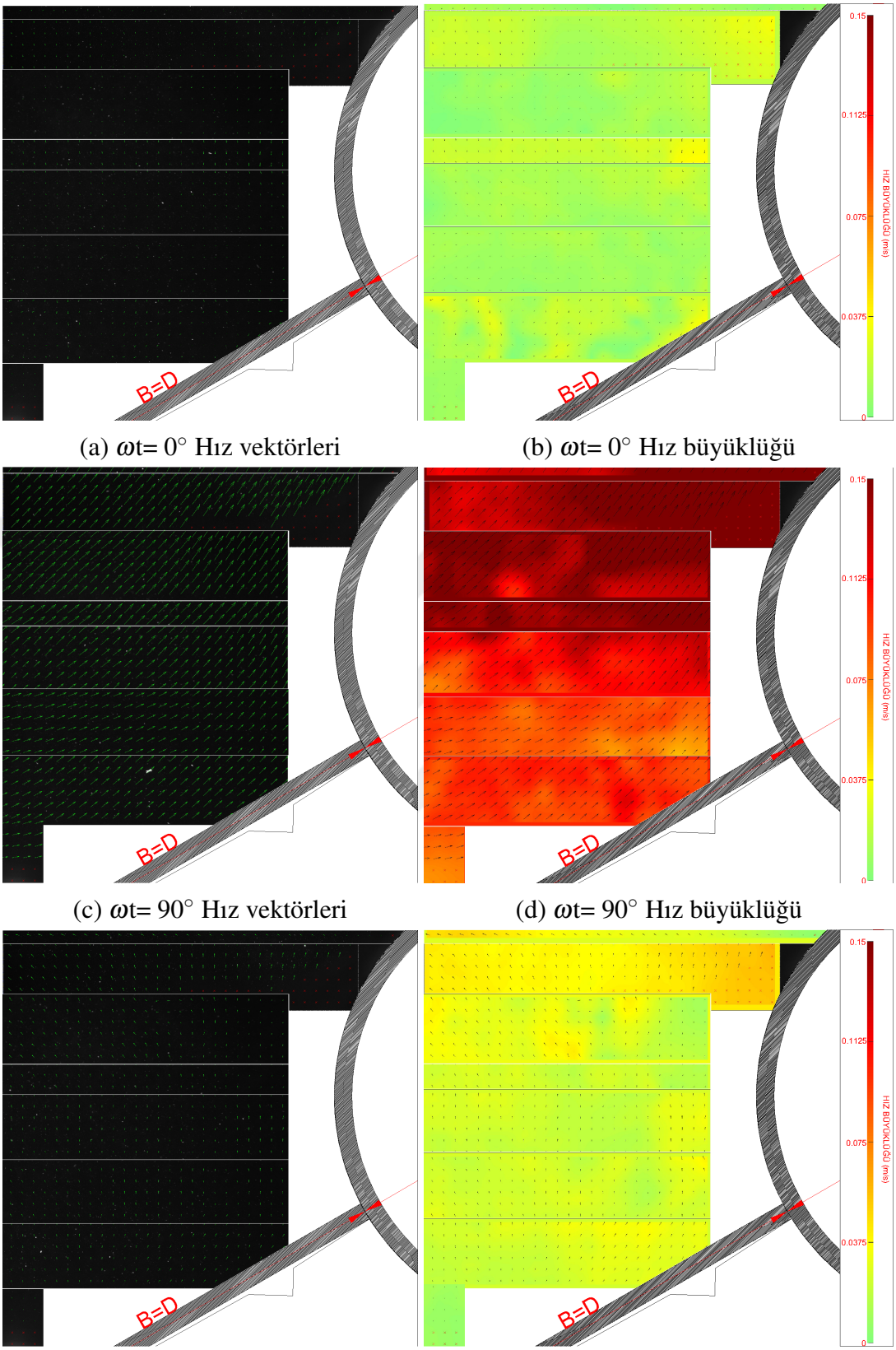
Şekil 21: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 22: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

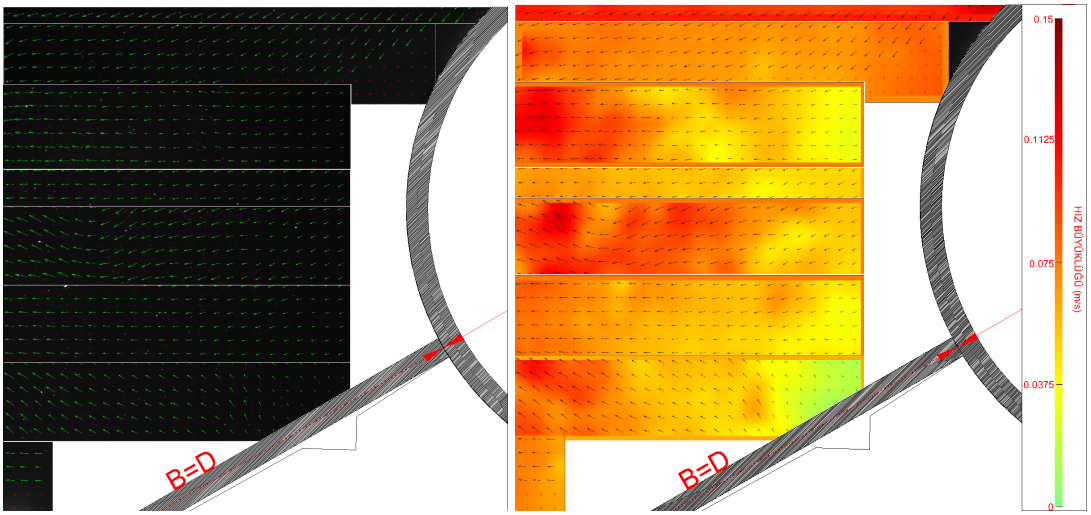


(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

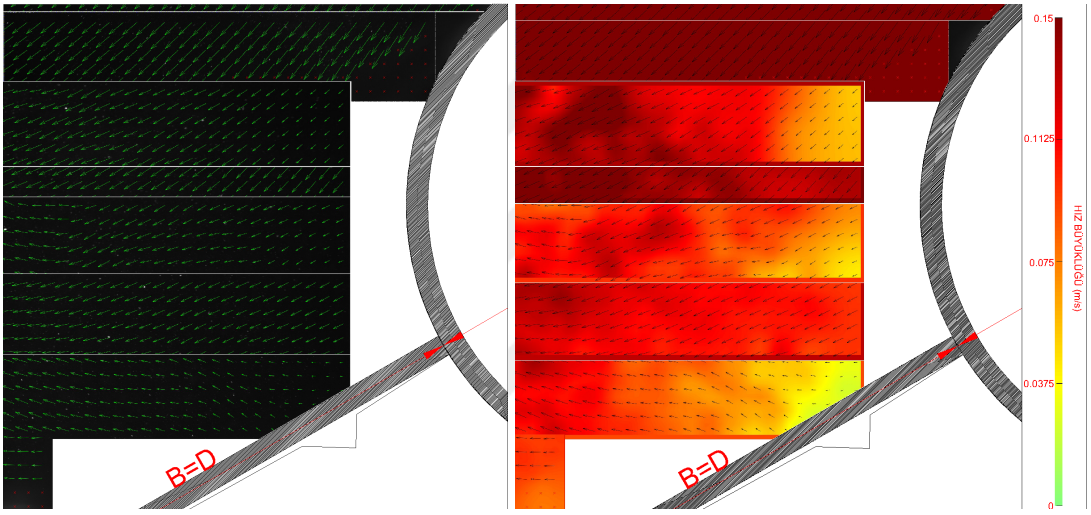
(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 23: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

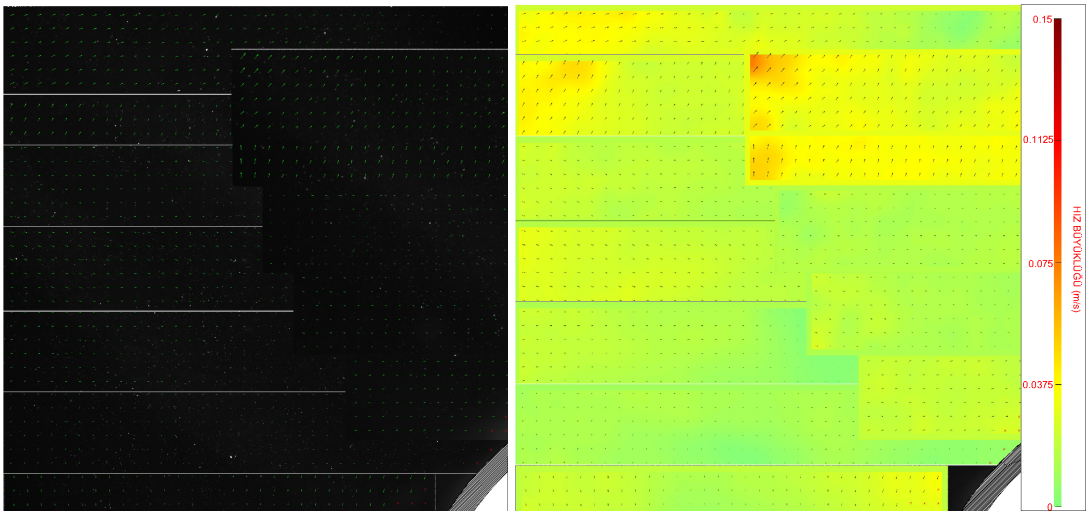


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

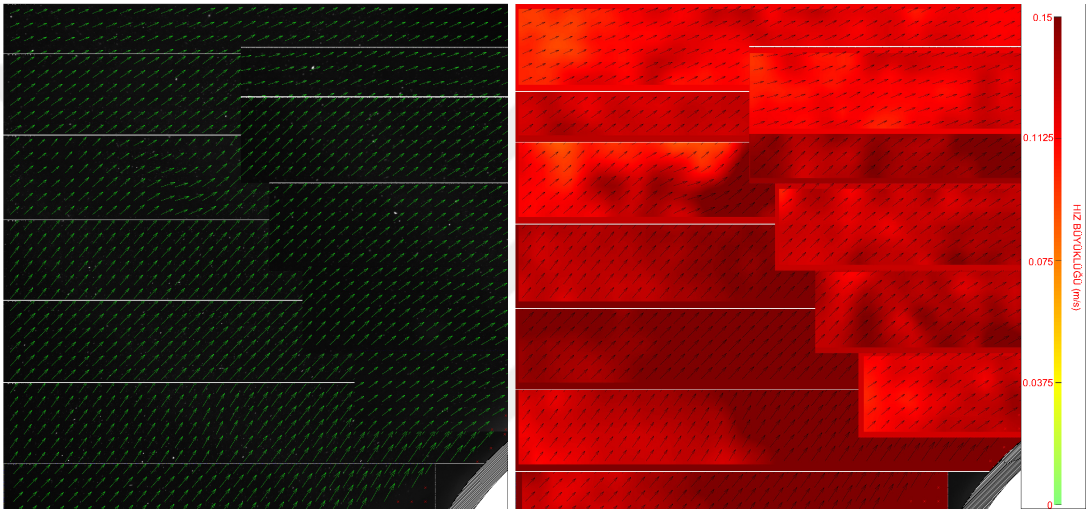


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

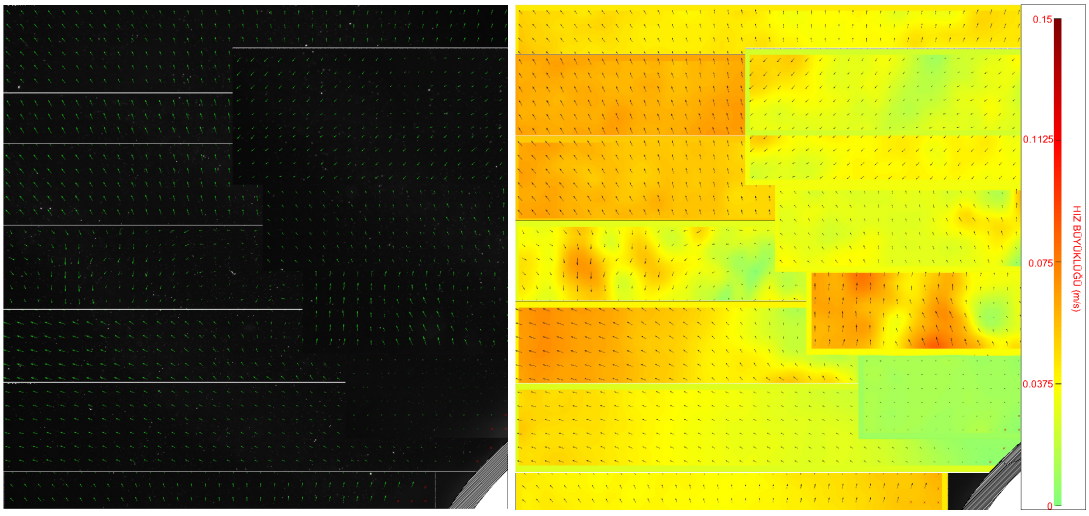
Şekil 24: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

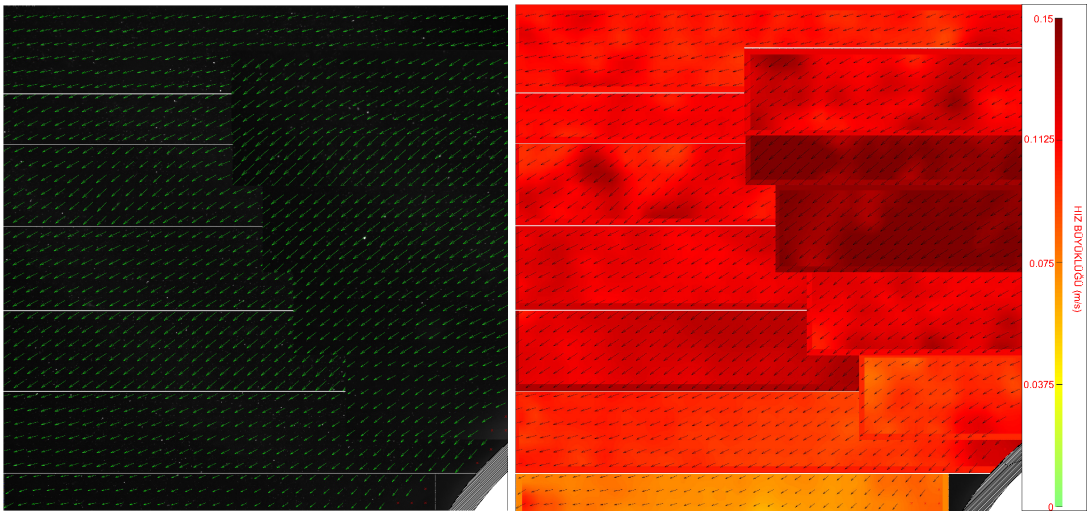


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



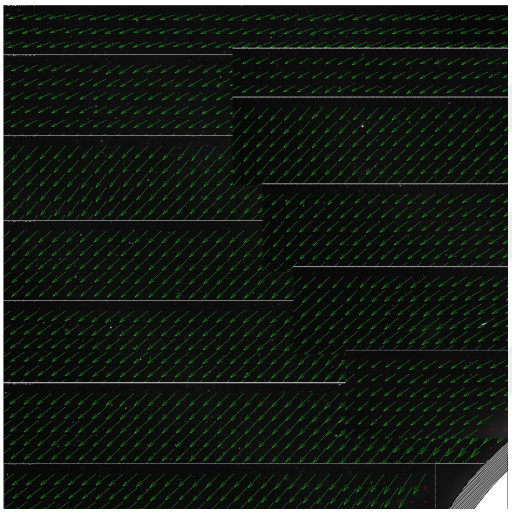
(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 25: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

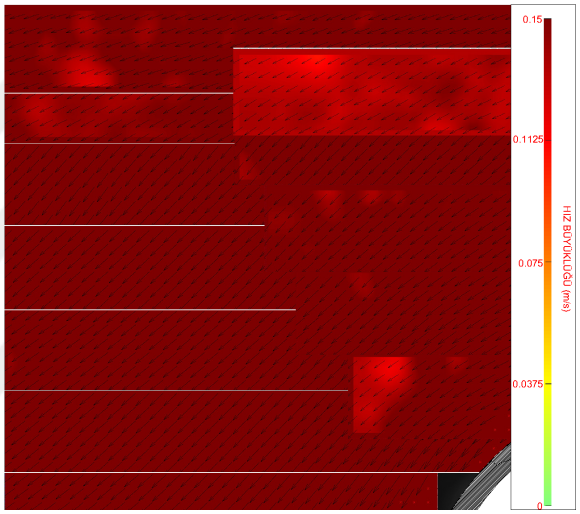


(a) ωt= 225° Hız vektörleri

(b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

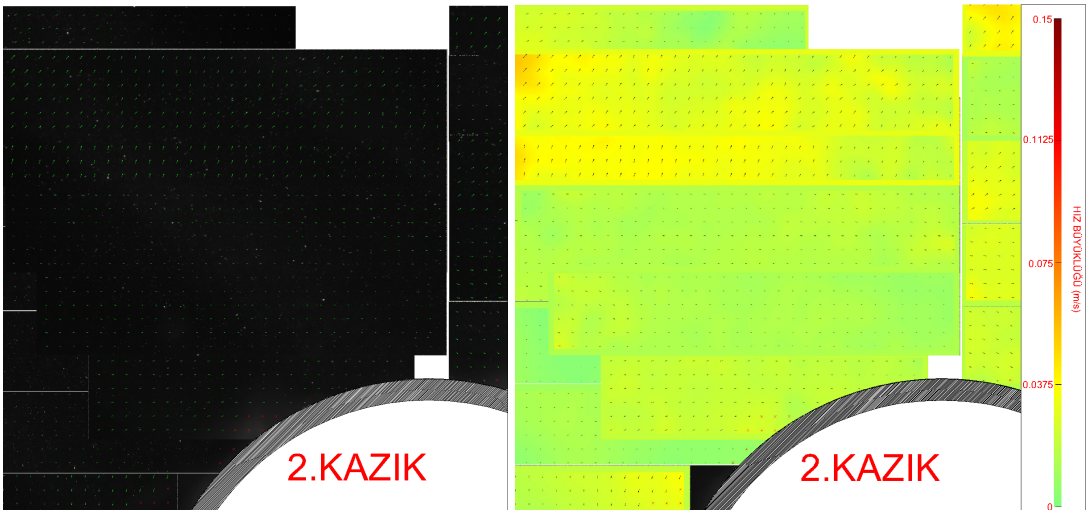


(c) ωt= 270° Hız vektörleri

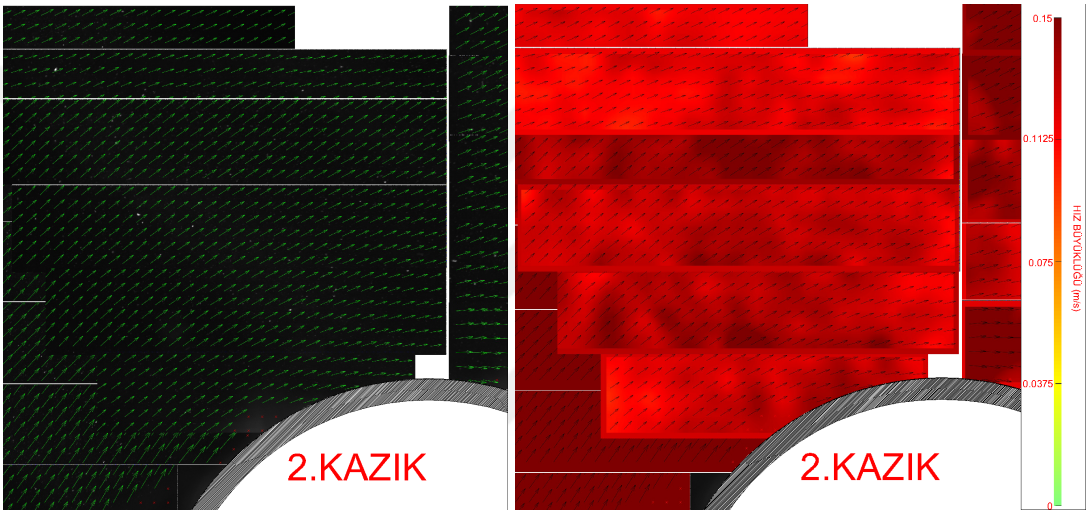


(d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

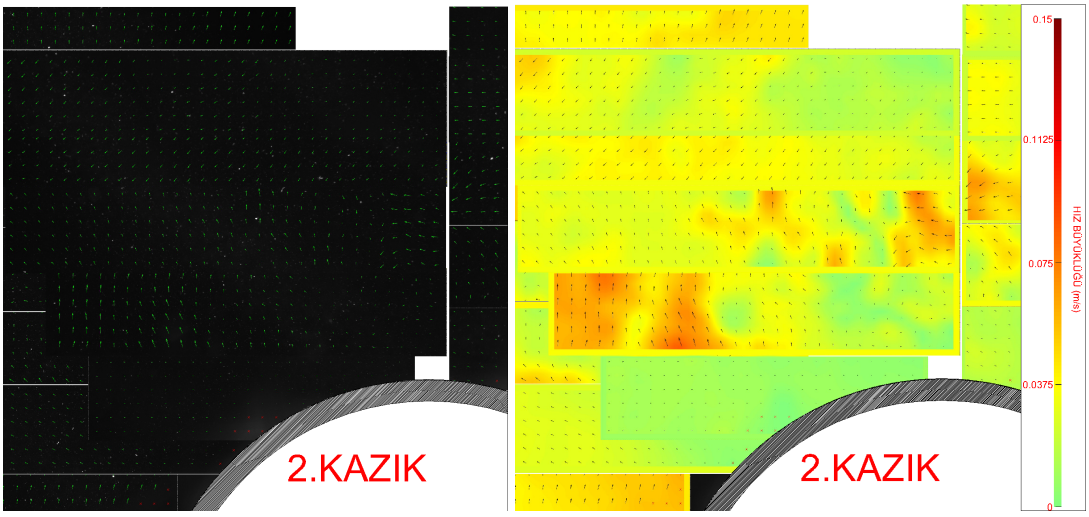
Şekil 26: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

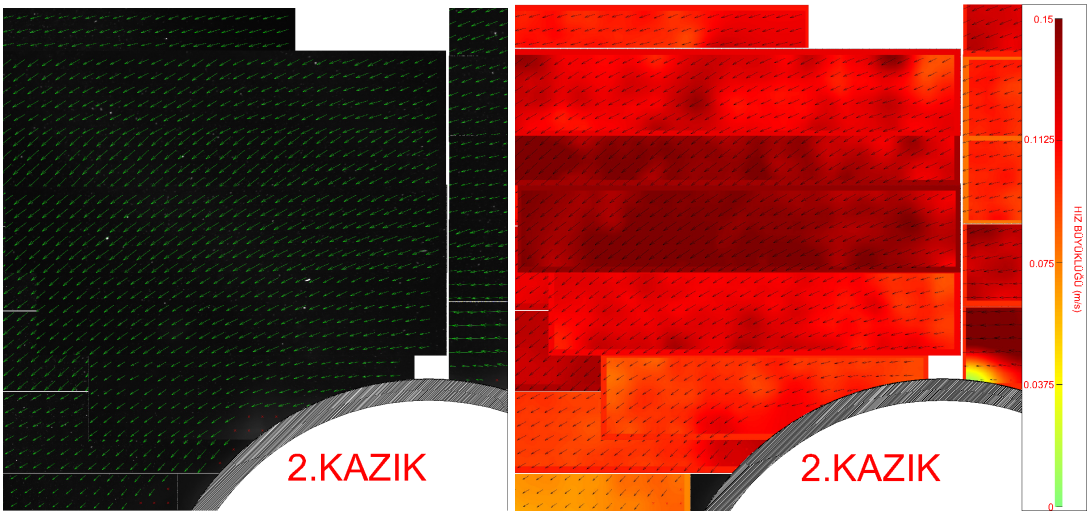


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

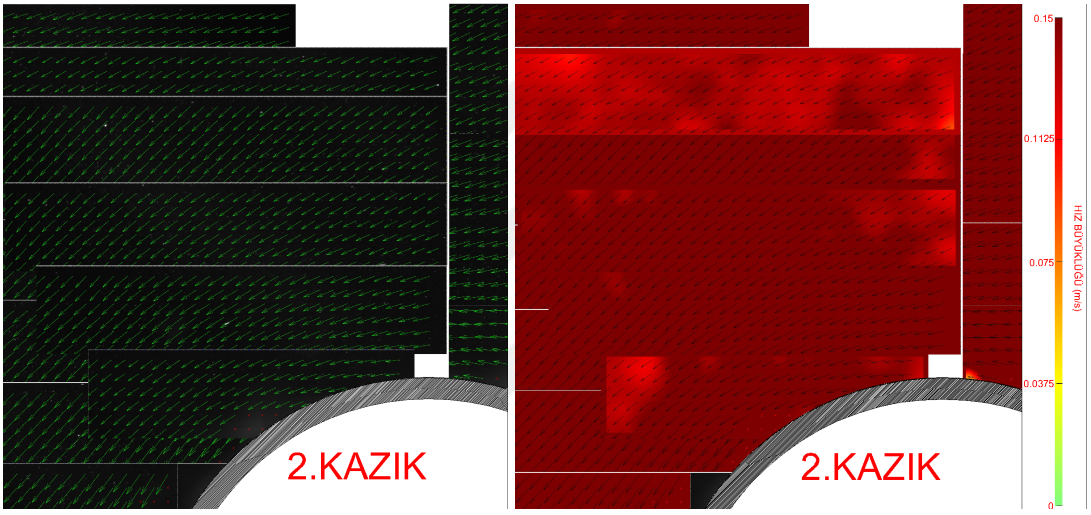


(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 27: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

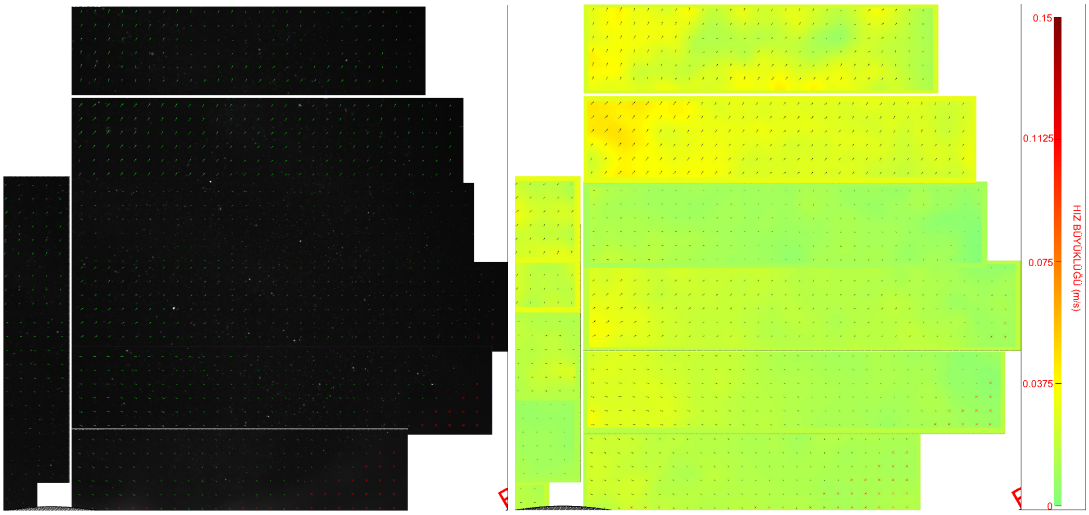


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

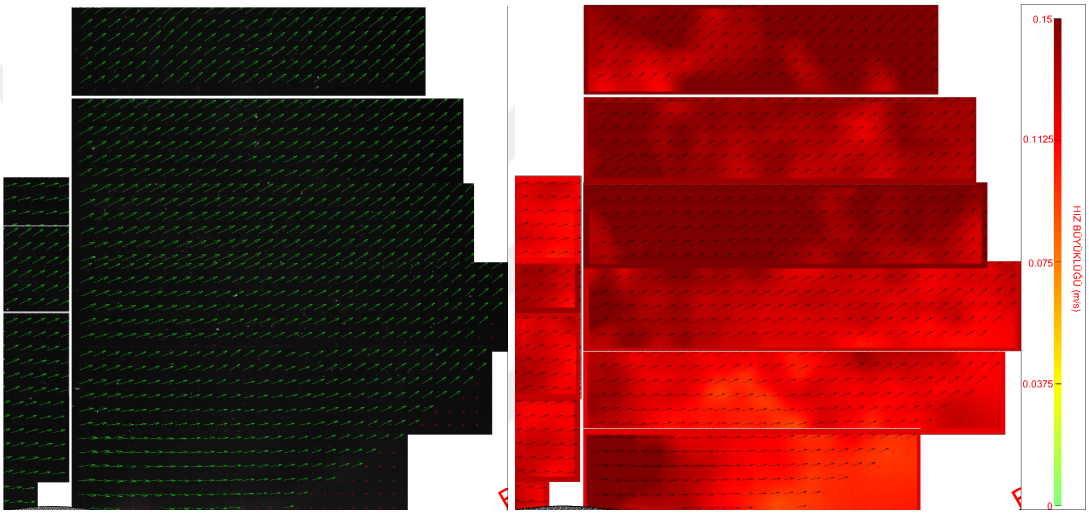


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

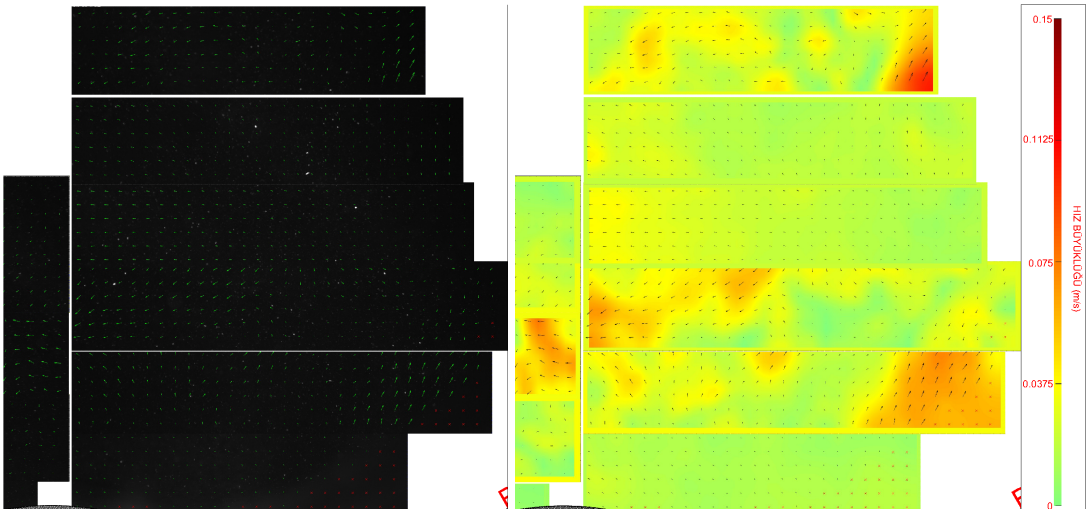
Şekil 28: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

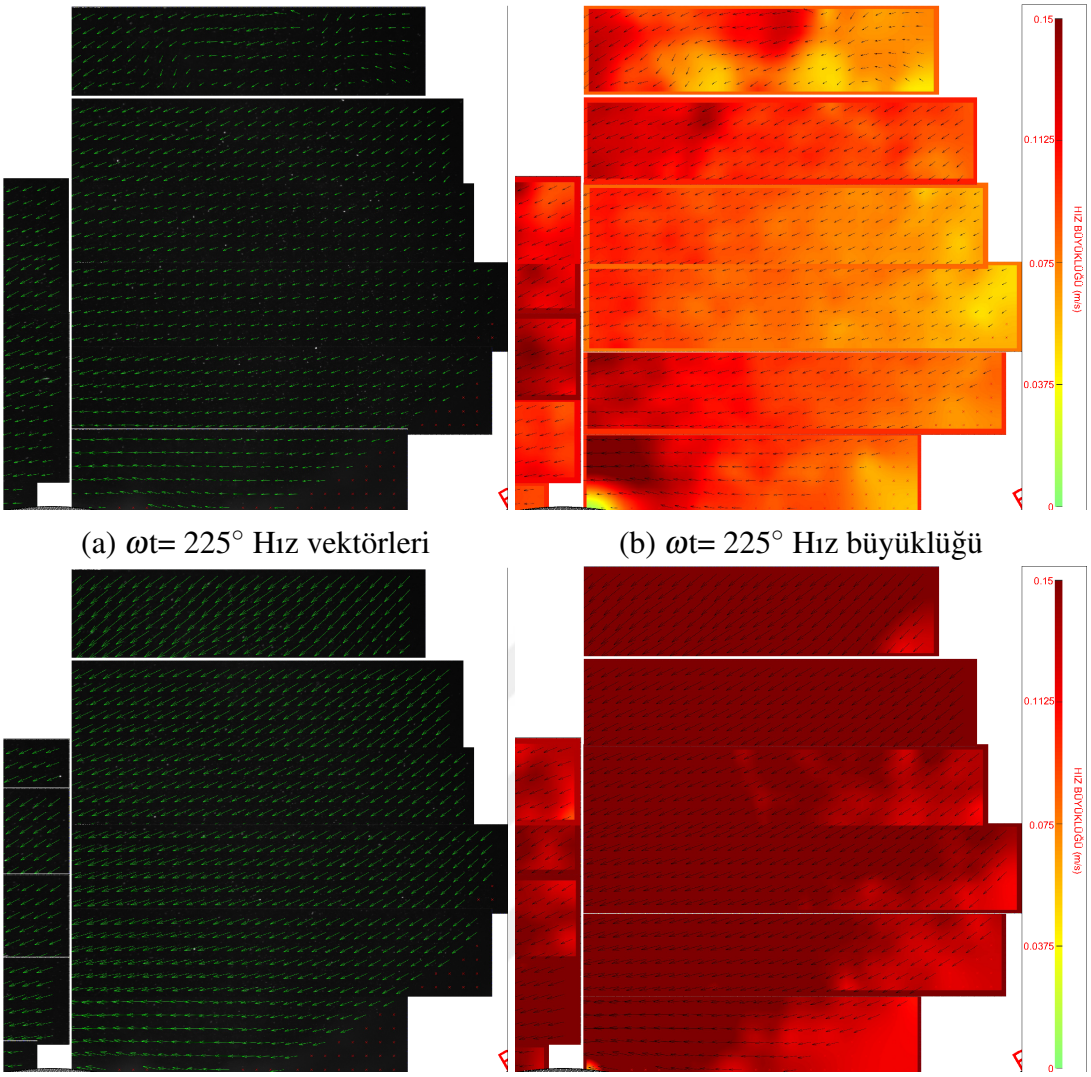


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

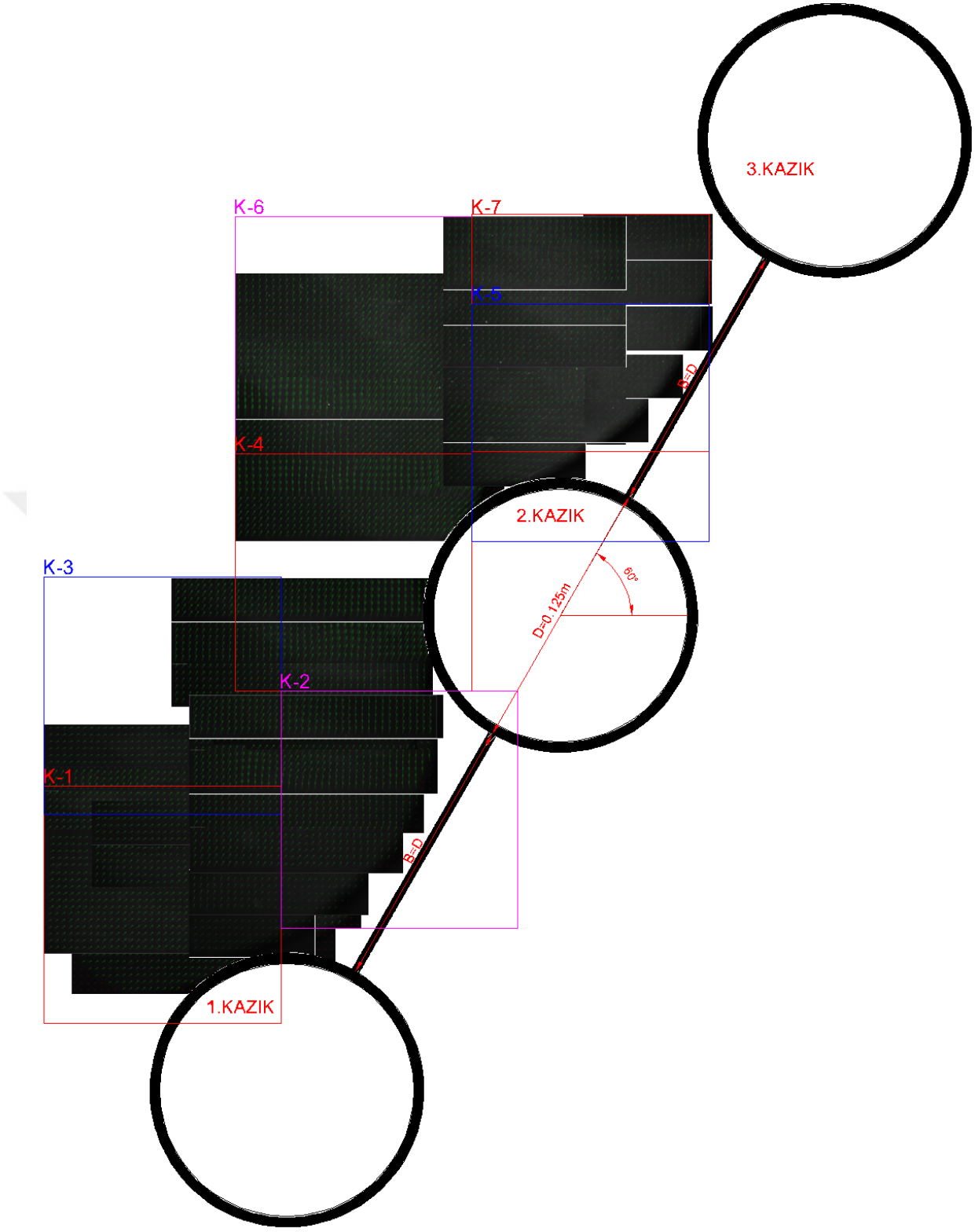
Şekil 29: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



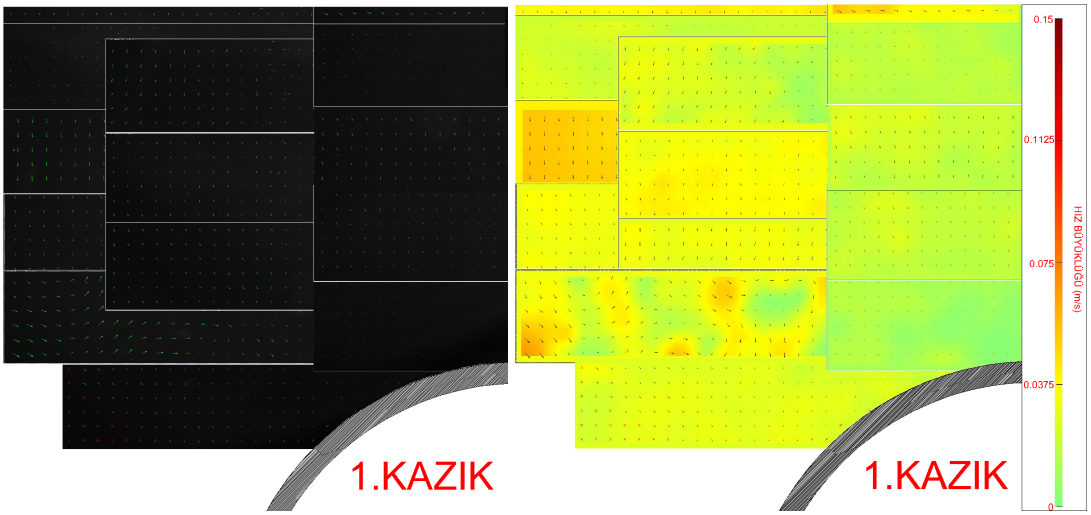
(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

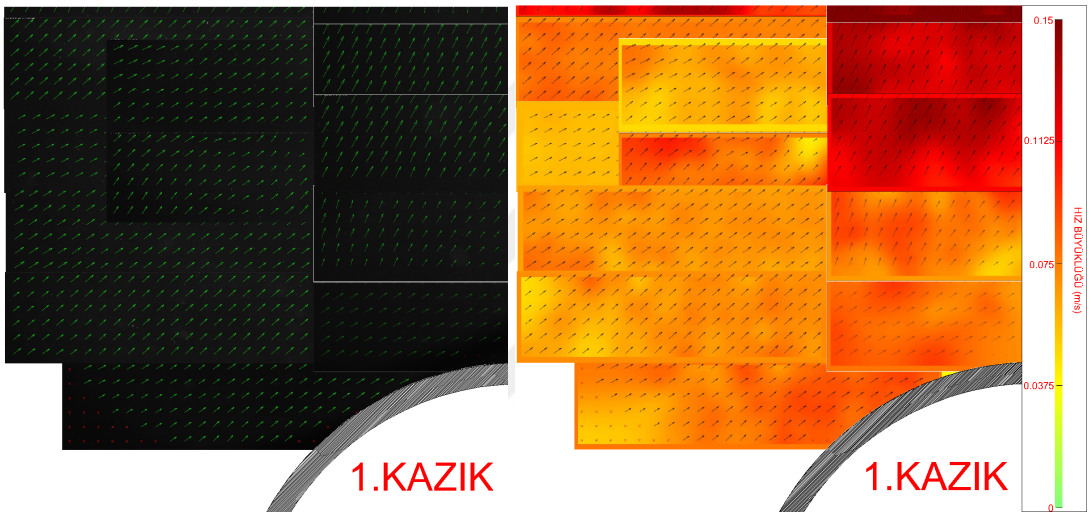
Şekil 30: Konf. 2'de θ= 30° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



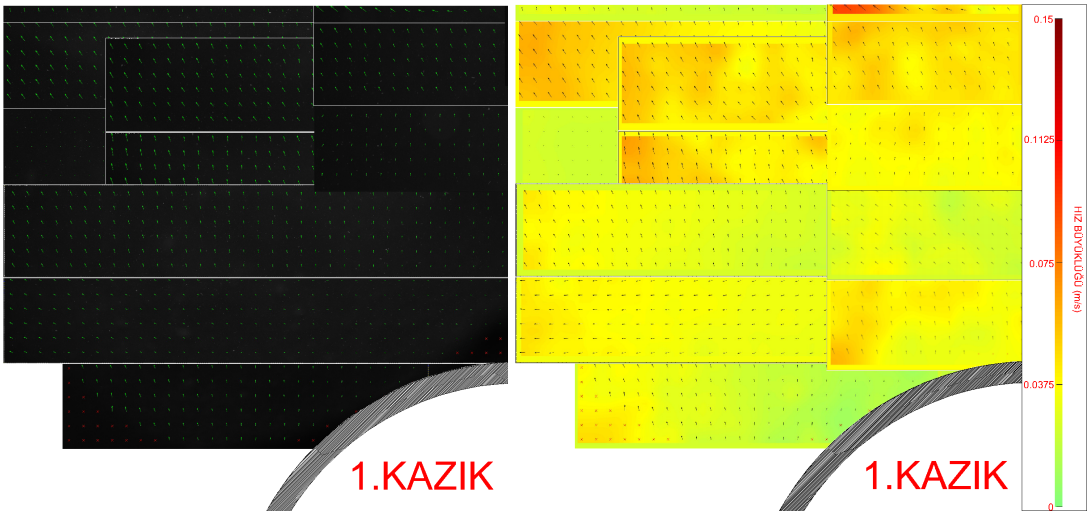
Şekil 31: Konf.2' de $\theta = 60^\circ$ ve T= 1.25' de yapılan PIV ölçüm alanı (Çizelge 5.3, Deney No= 28).



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

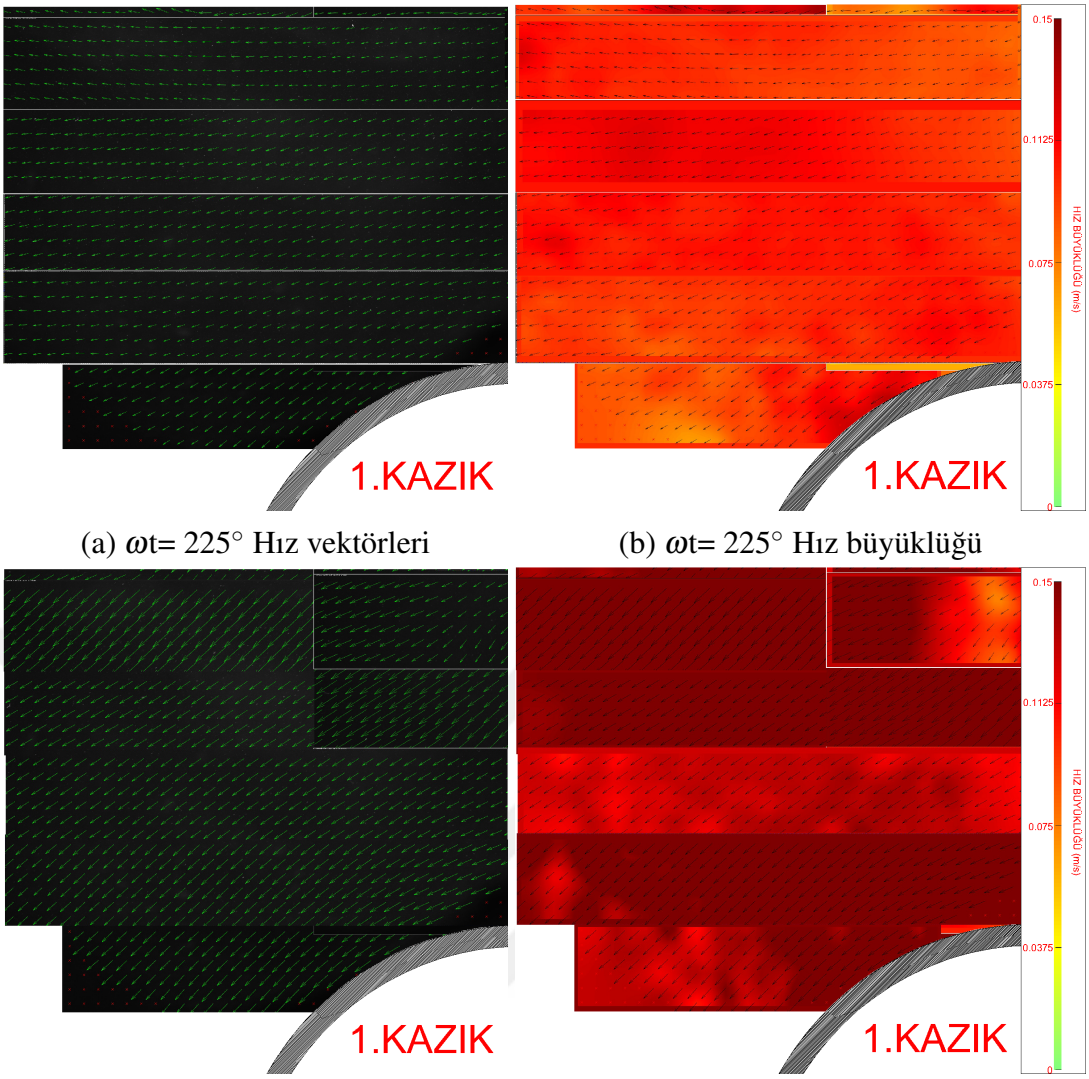


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

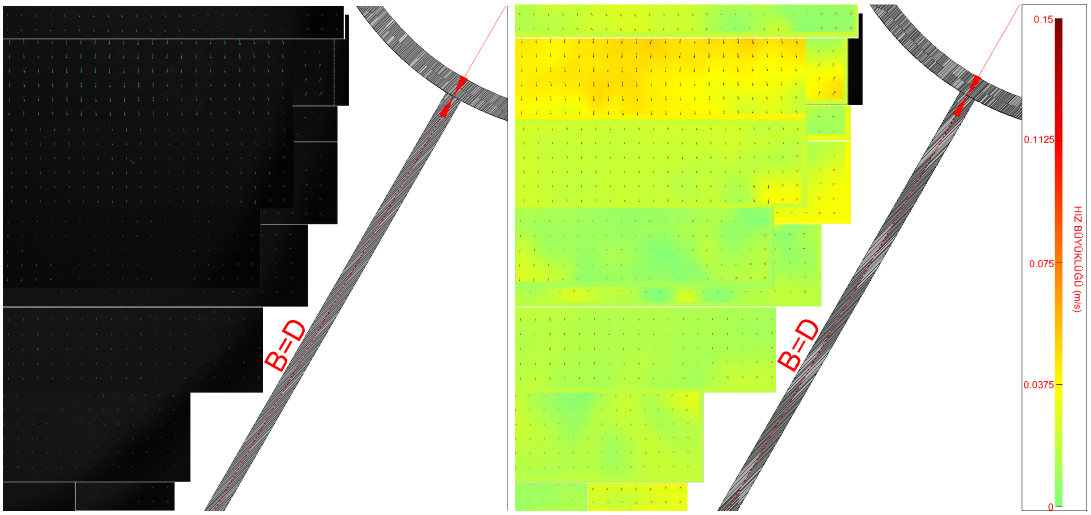
Şekil 32: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



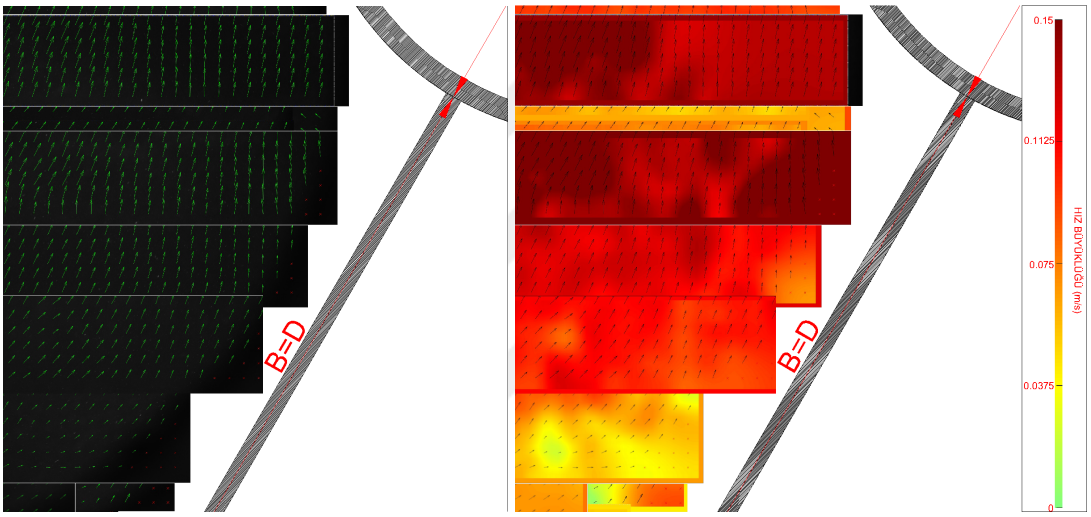
(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

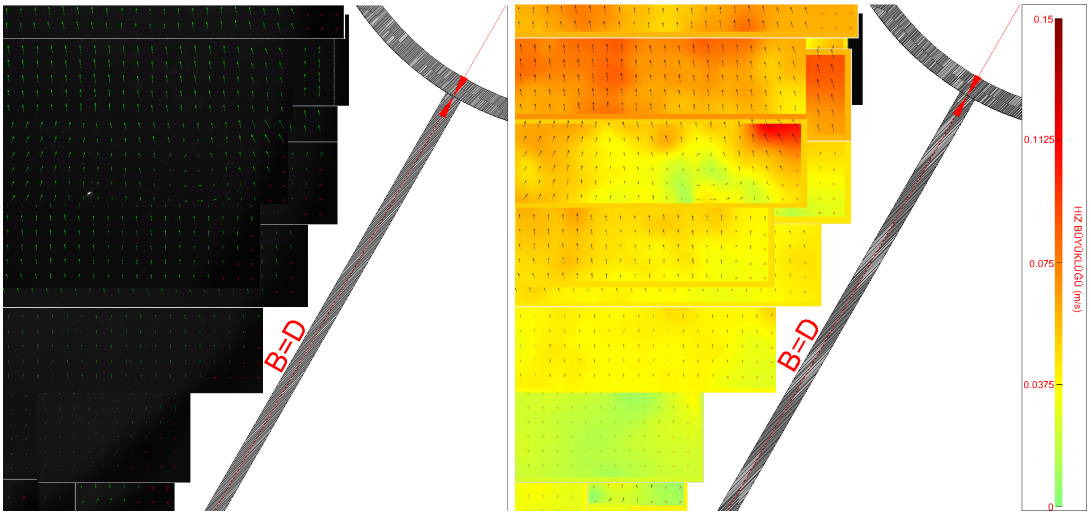
Şekil 33: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-1'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

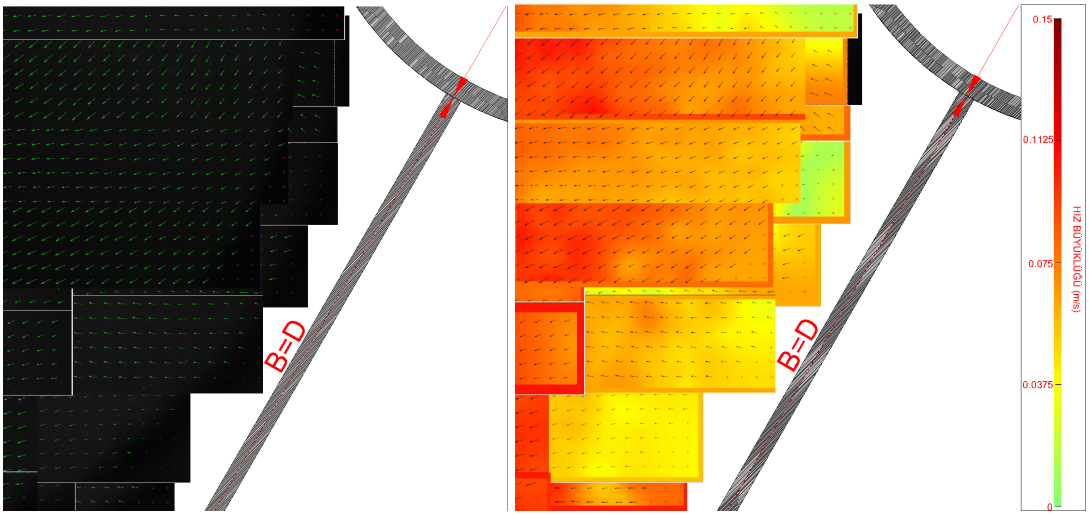


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

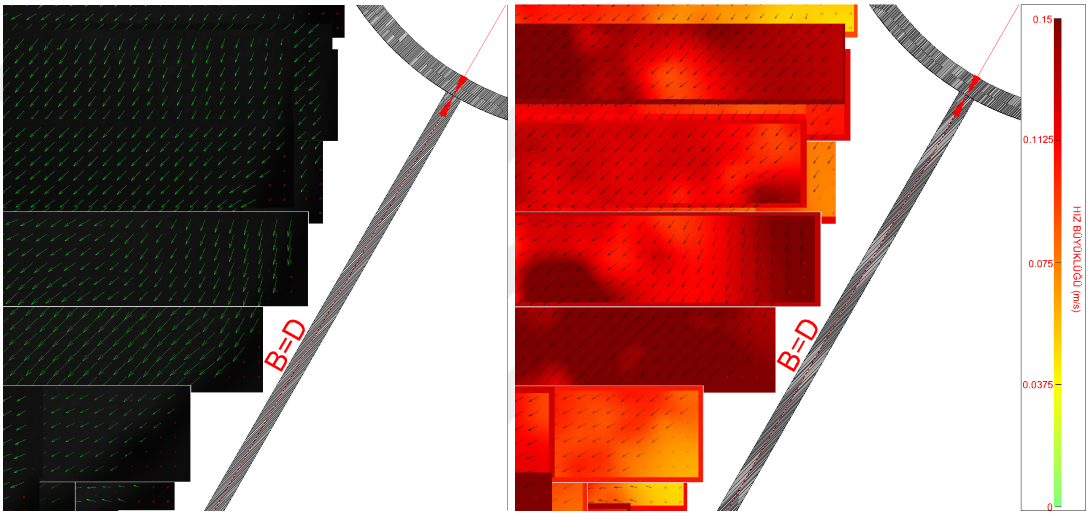


(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 34: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

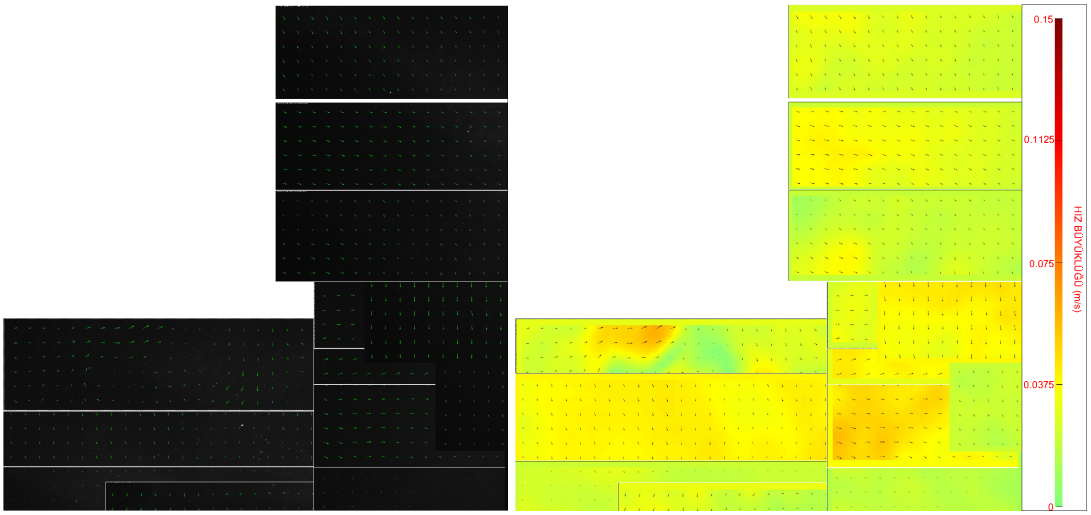


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü



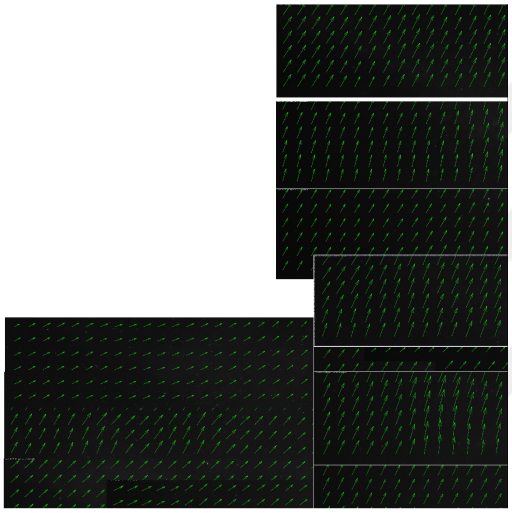
(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 35: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-2'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

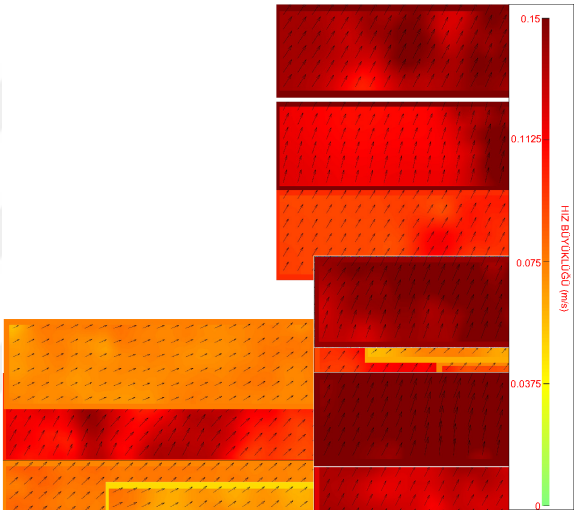


(a) ωt= 0° Hız vektörleri

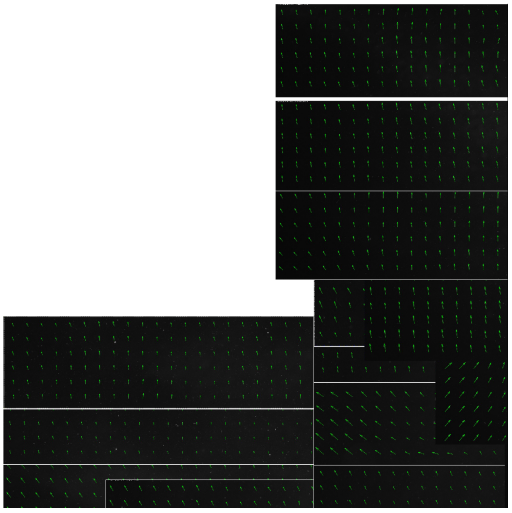
(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



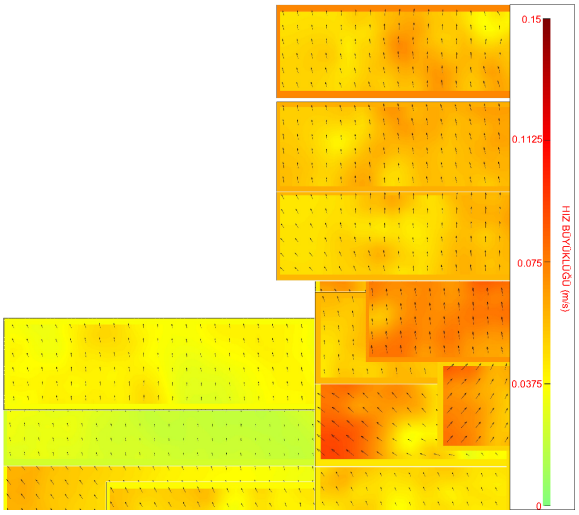
(c) ωt= 90° Hız vektörleri



(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

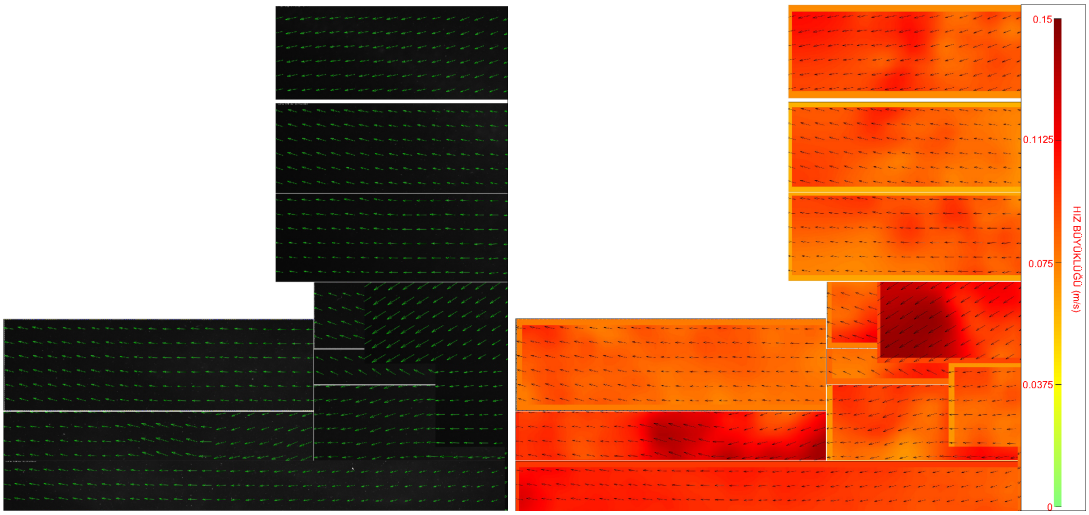


(e) ωt= 180° Hız vektörleri

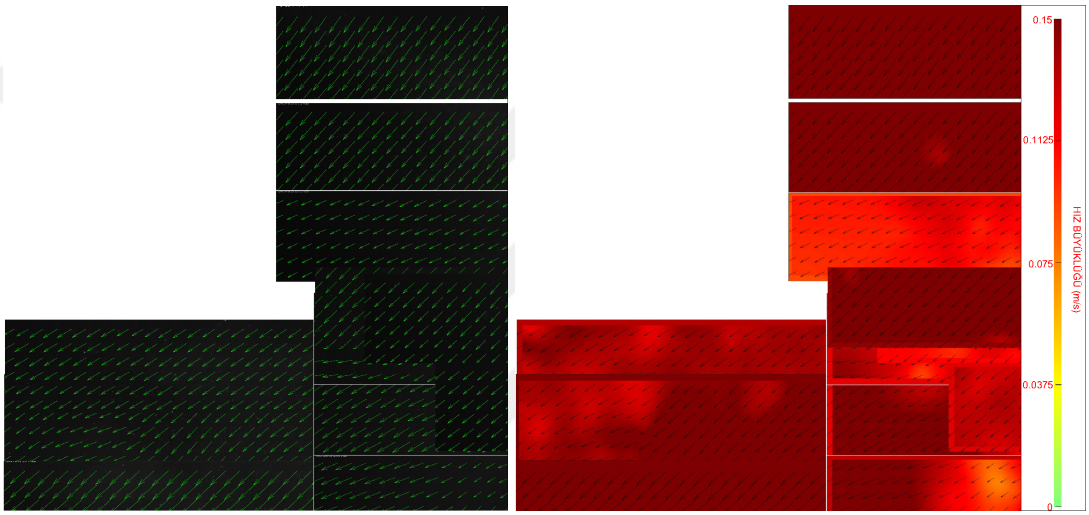


(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 36: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

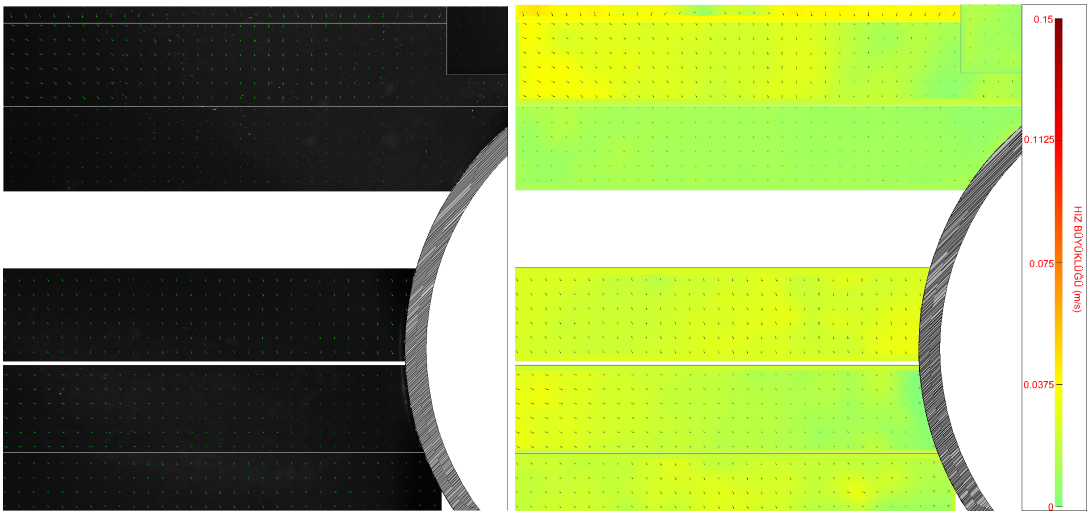


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

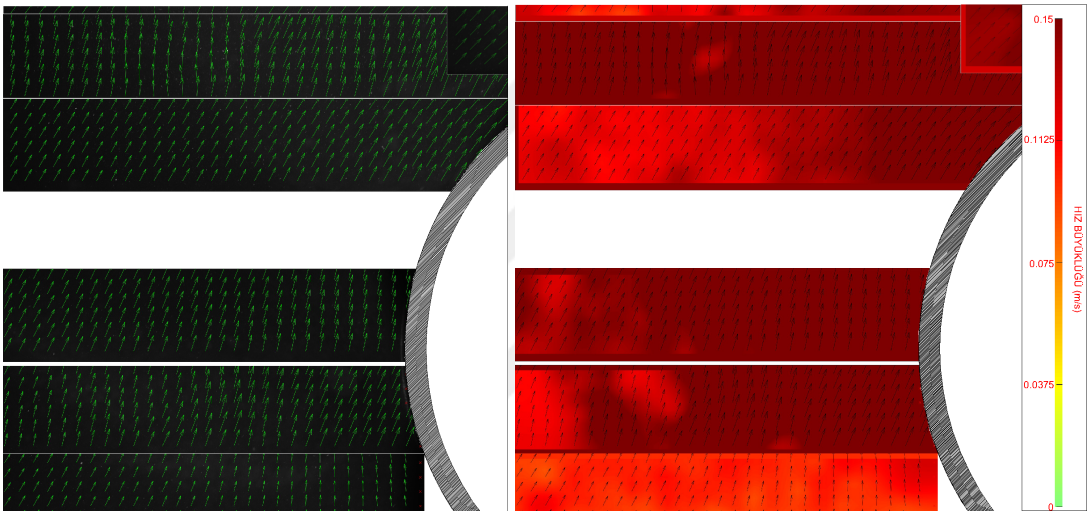


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

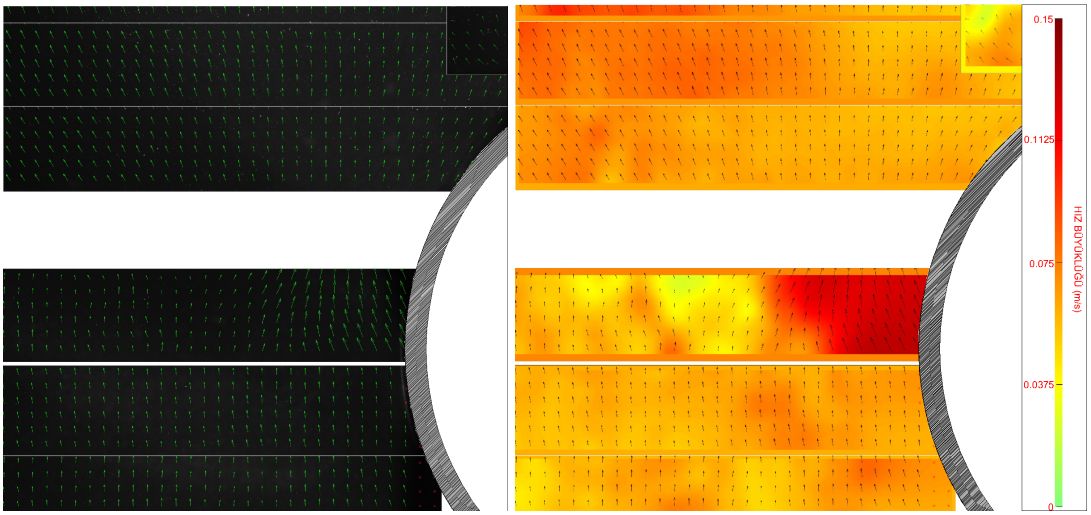
Şekil 37: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-3'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

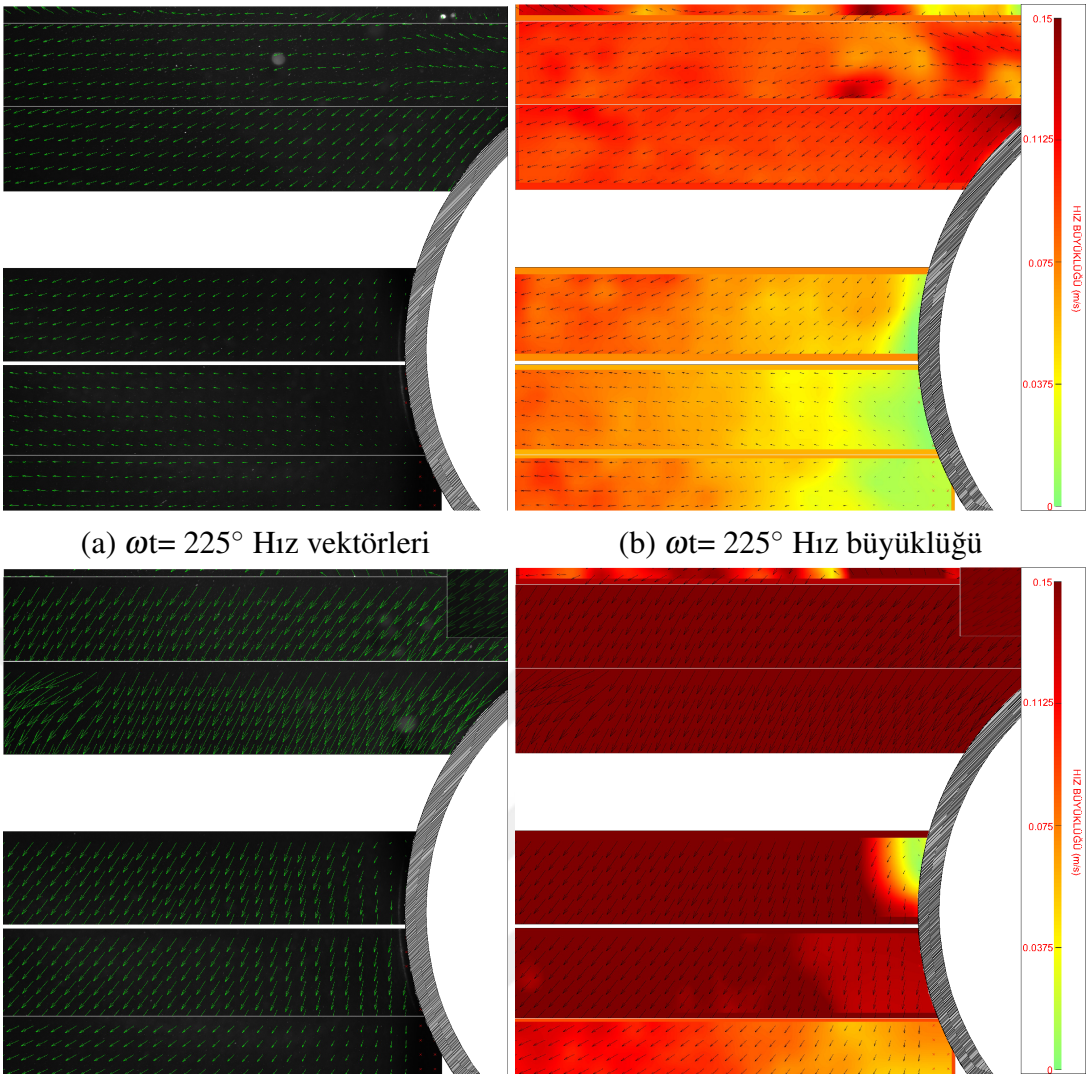


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

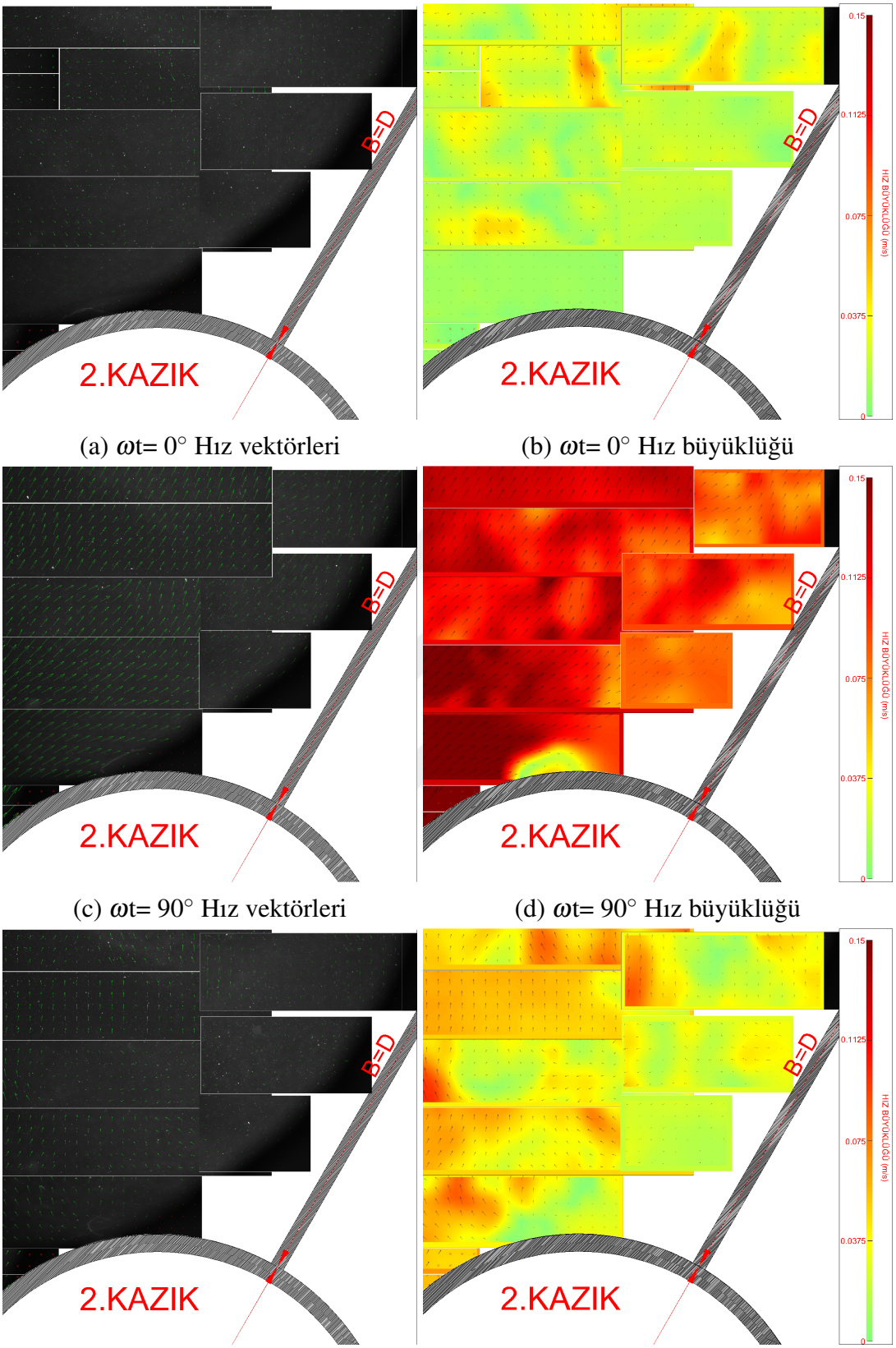
Şekil 38: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 39: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-4'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

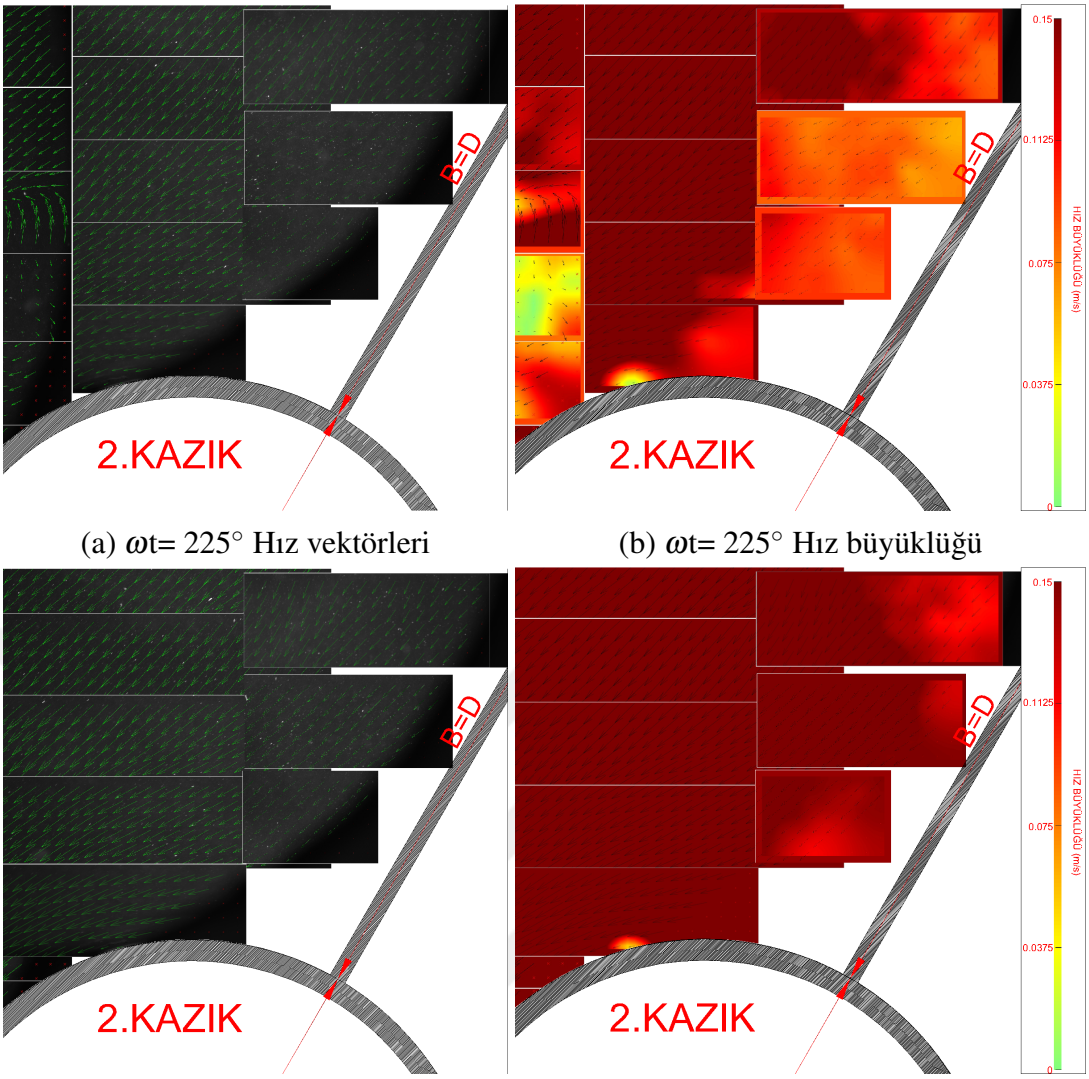


(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

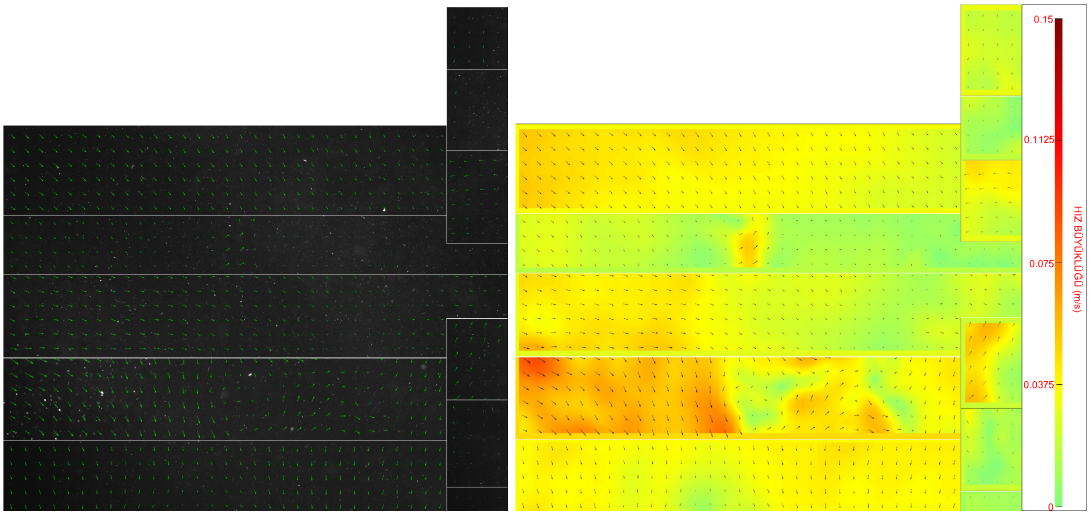
Şekil 40: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

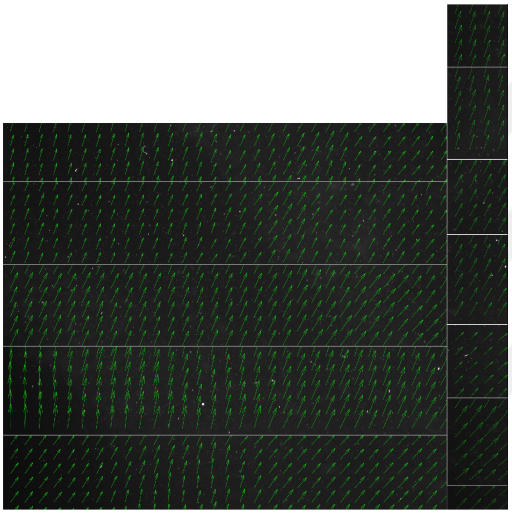
(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 41: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-5'te PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

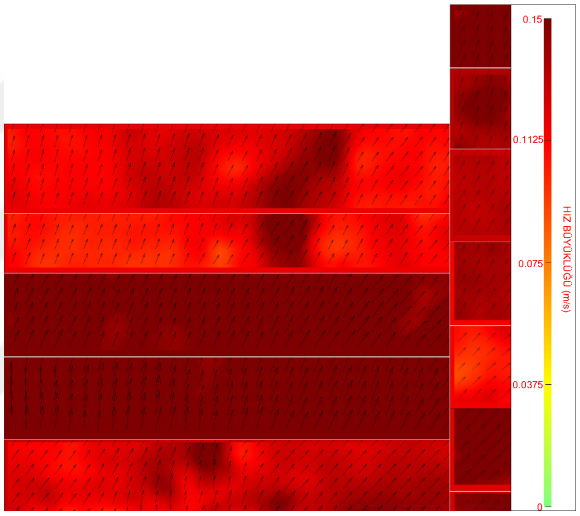


(a) ωt= 0° Hız vektörleri

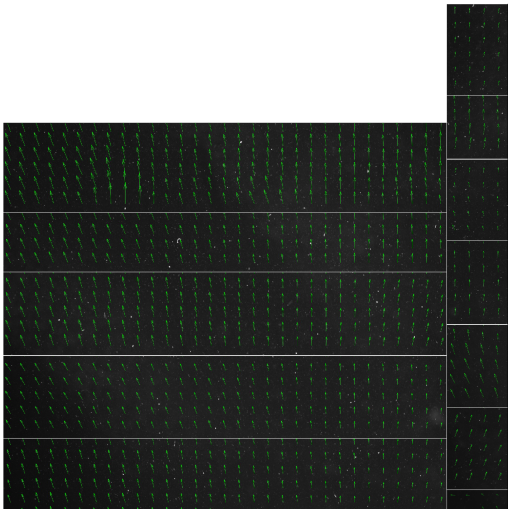
(b) ωt= 0° Hız büyüklüğü



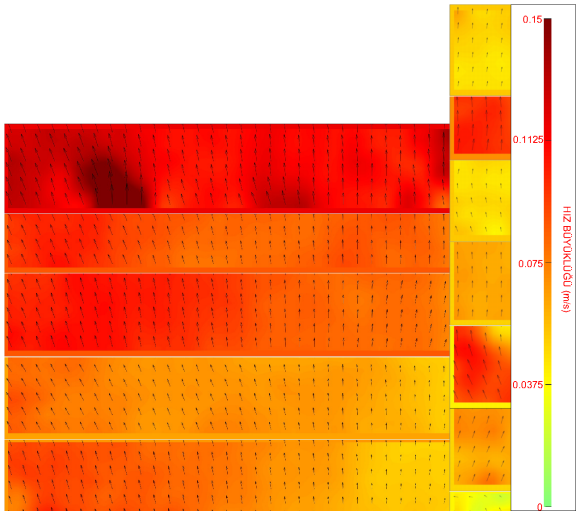
(c) ωt= 90° Hız vektörleri



(d) ωt= 90° Hız büyüklüğü

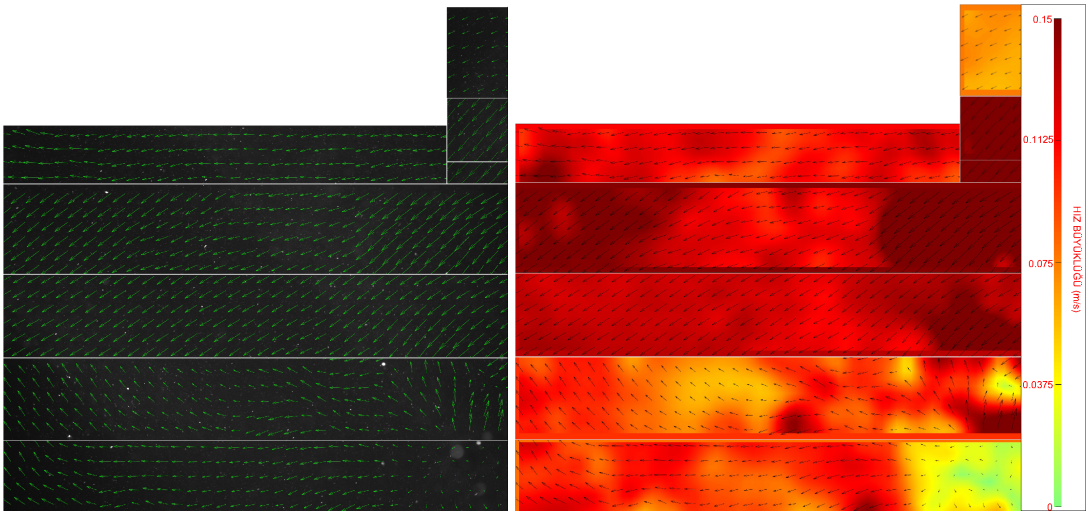


(e) ωt= 180° Hız vektörleri

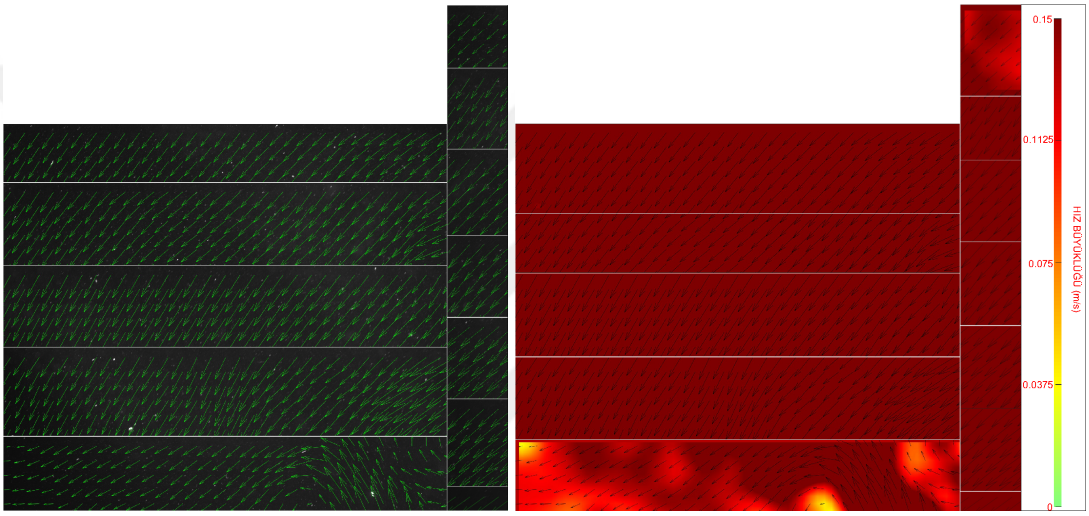


(f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

Şekil 42: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

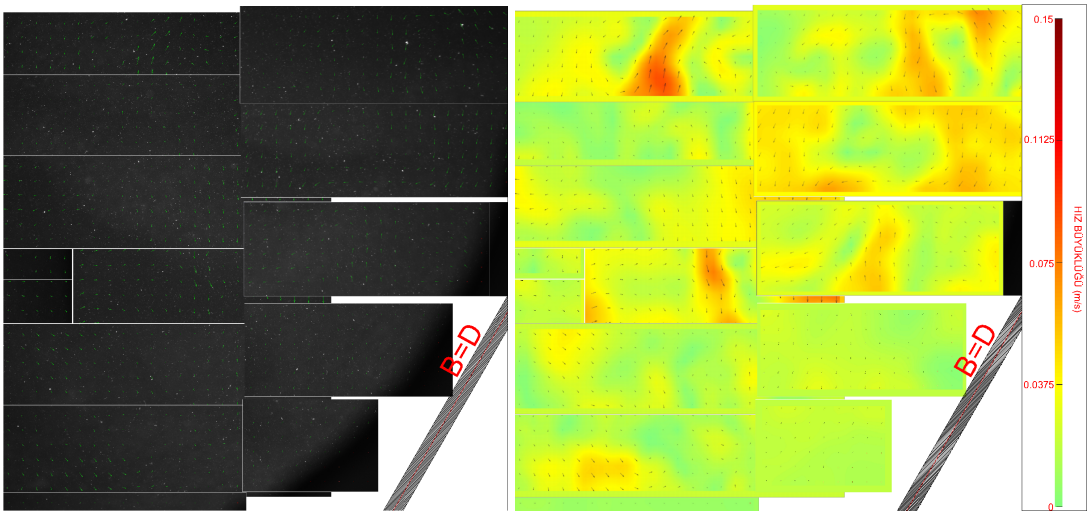


(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

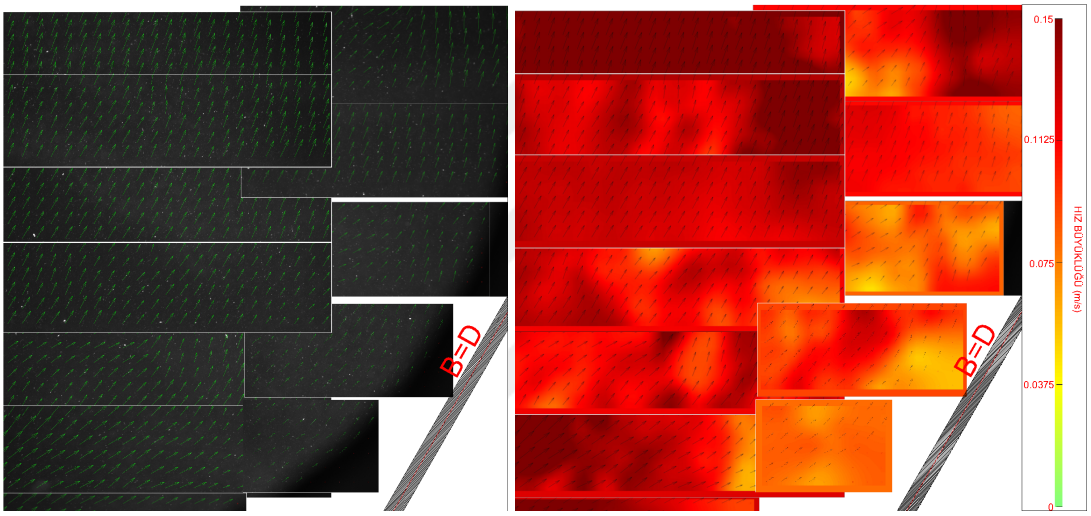


(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

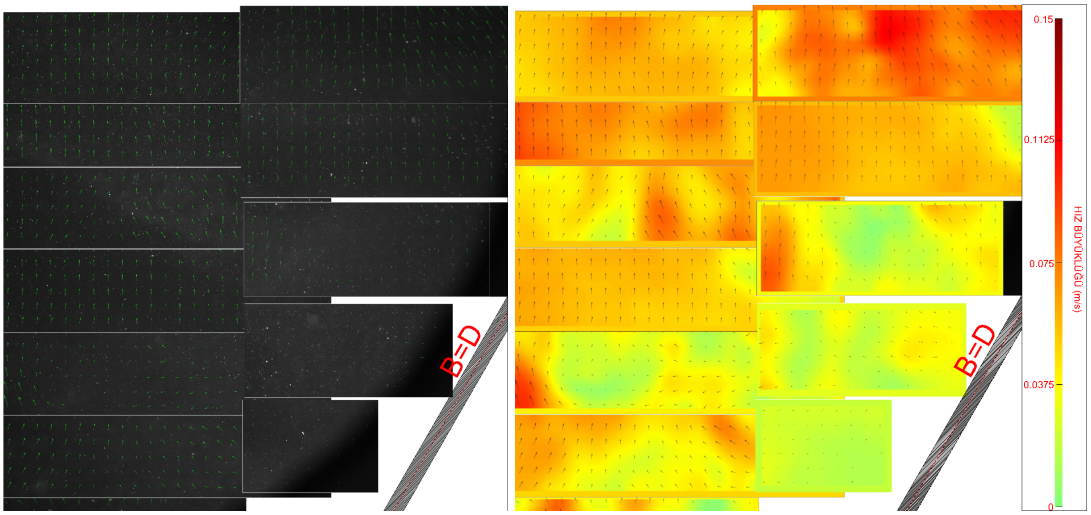
Şekil 43: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-6'da PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



(a) ωt= 0° Hız vektörleri (b) ωt= 0° Hız büyüklüğü

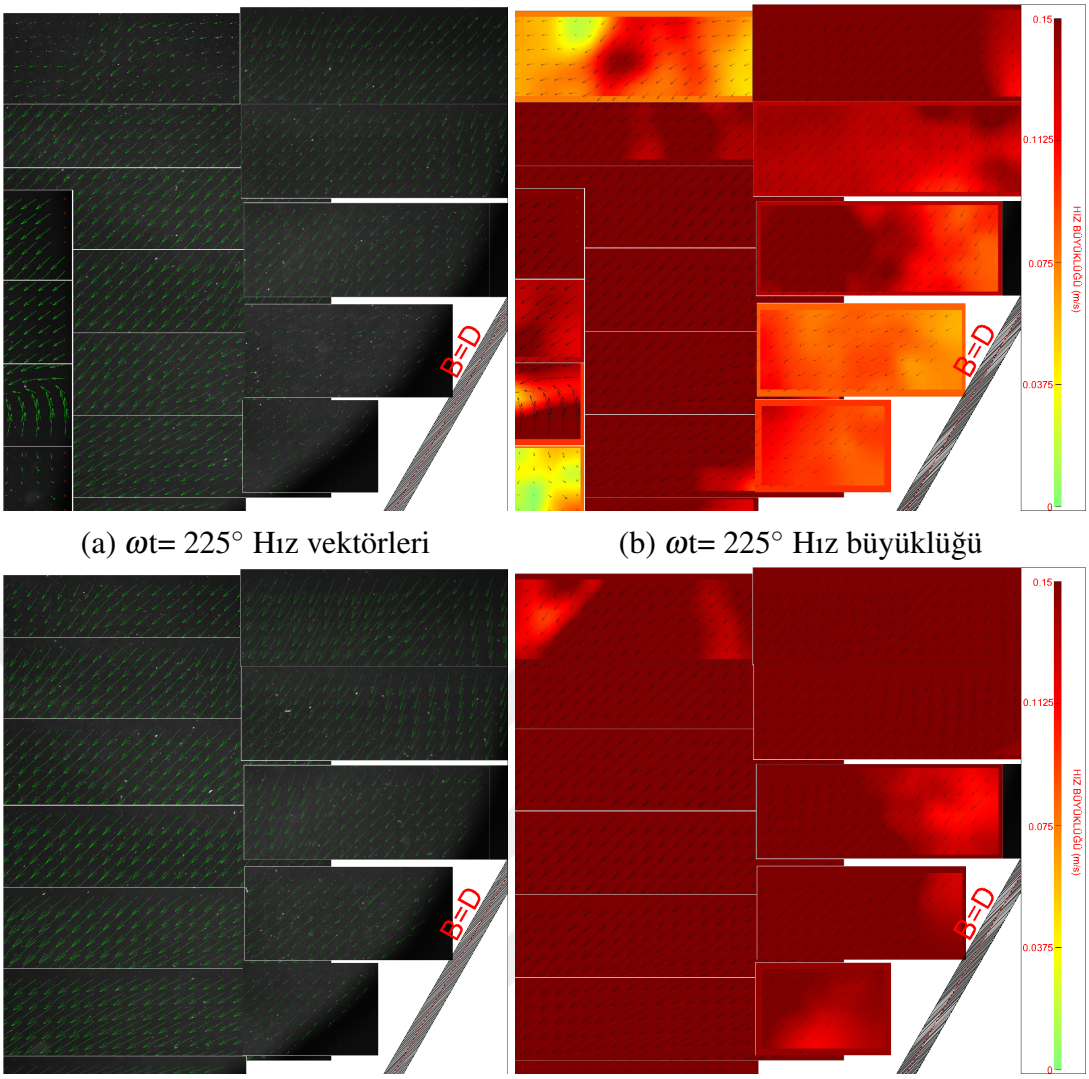


(c) ωt= 90° Hız vektörleri (d) ωt= 90° Hız büyüklüğü



(e) ωt= 180° Hız vektörleri (f) ωt= 180° Hız büyüklüğü

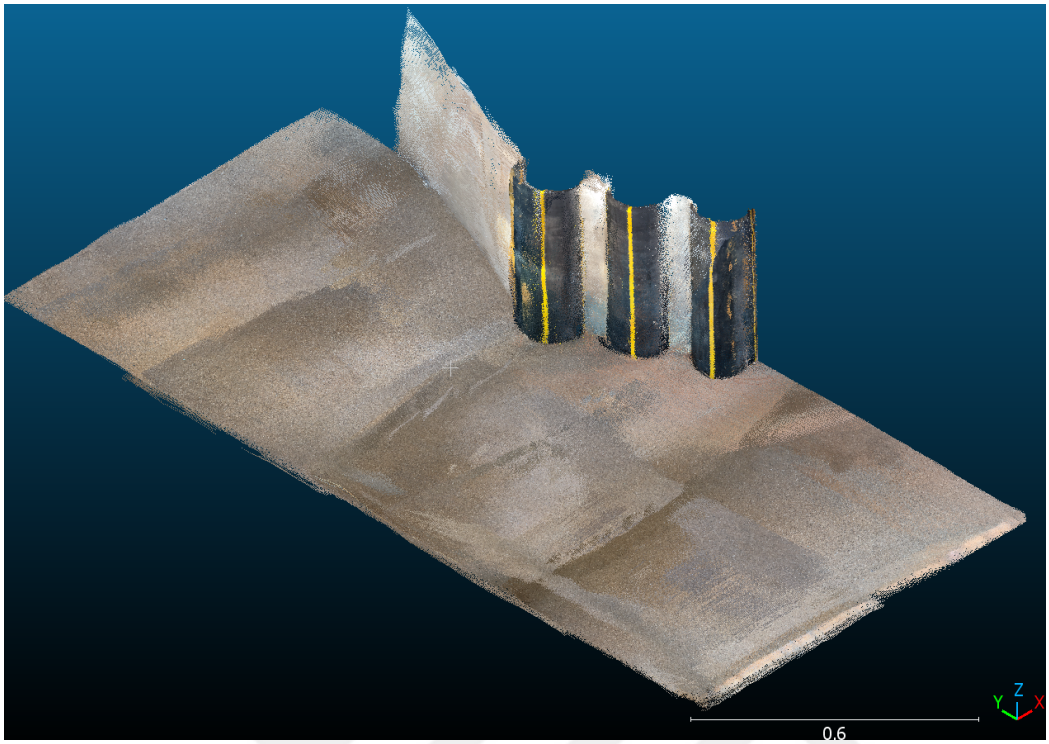
Şekil 44: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 0° – 90° ve 180° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.



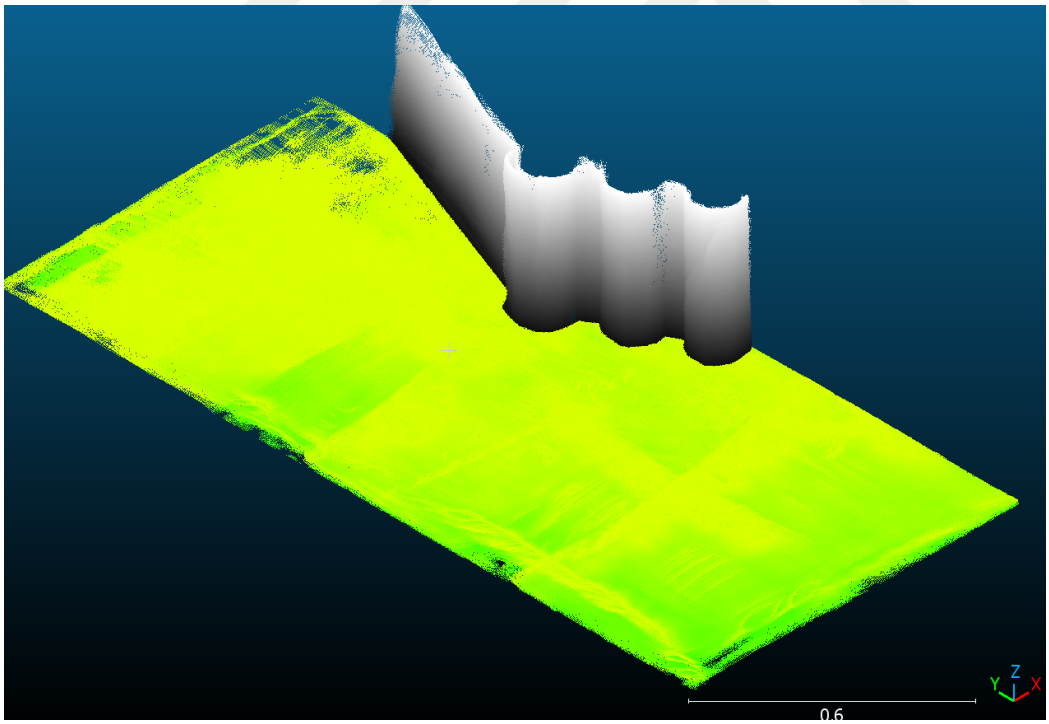
(a) ωt= 225° Hız vektörleri (b) ωt= 225° Hız büyüklüğü

(c) ωt= 270° Hız vektörleri (d) ωt= 270° Hız büyüklüğü

Şekil 45: Konf. 2'de θ= 60° ve T= 1.25 deneyinde K-7'de PIV ile elde edilen dalga fazı= 225°– ve 270° 'lerdeki hız vektörleri ve büyüklükleri.

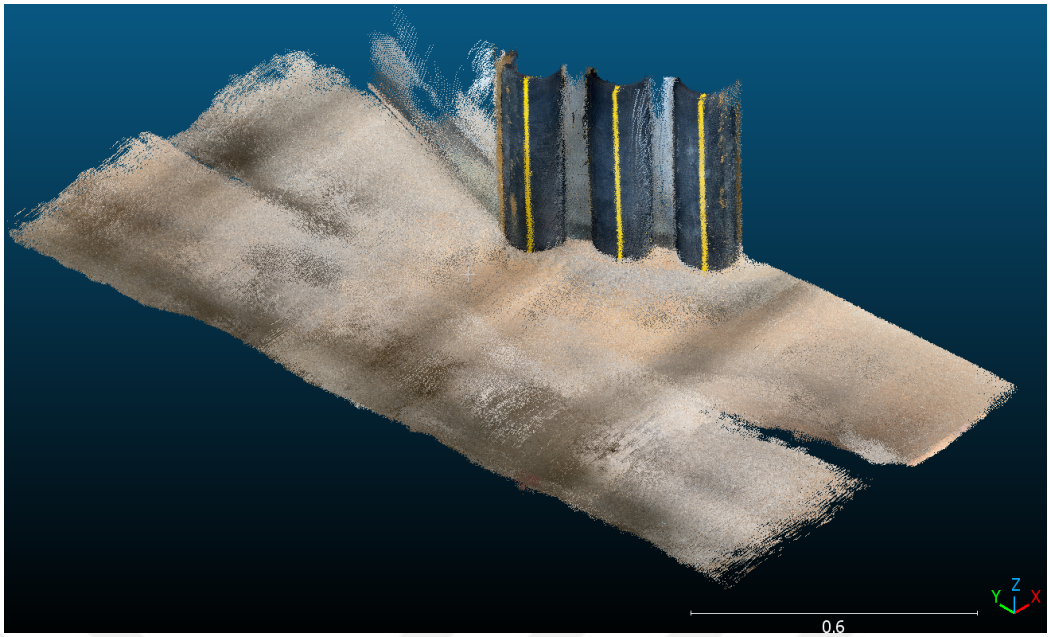


(a) RBG ölçeği

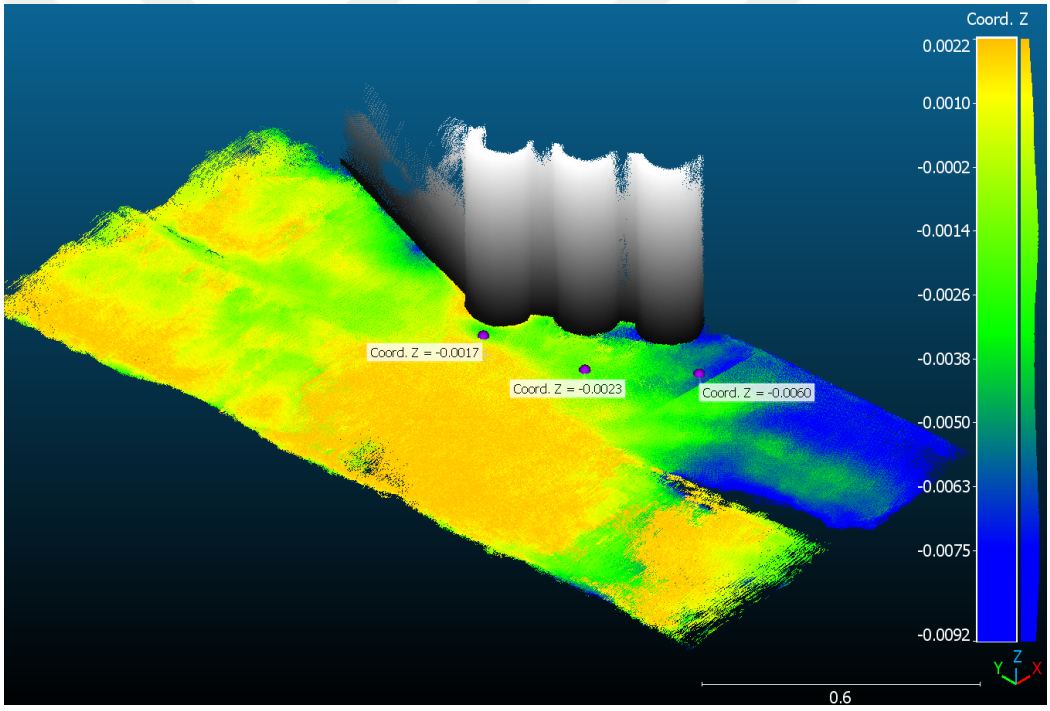


(b) Sf ölçeği

Şekil 46: Deney no: 5-6-7-8 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



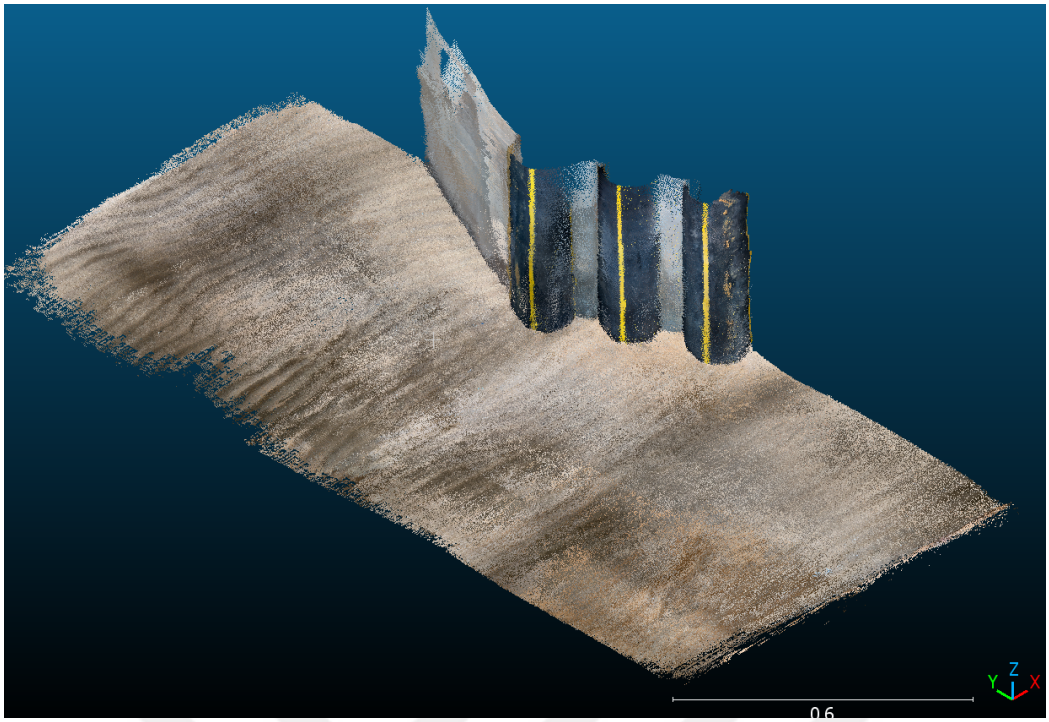
(a) RBG ölçeği



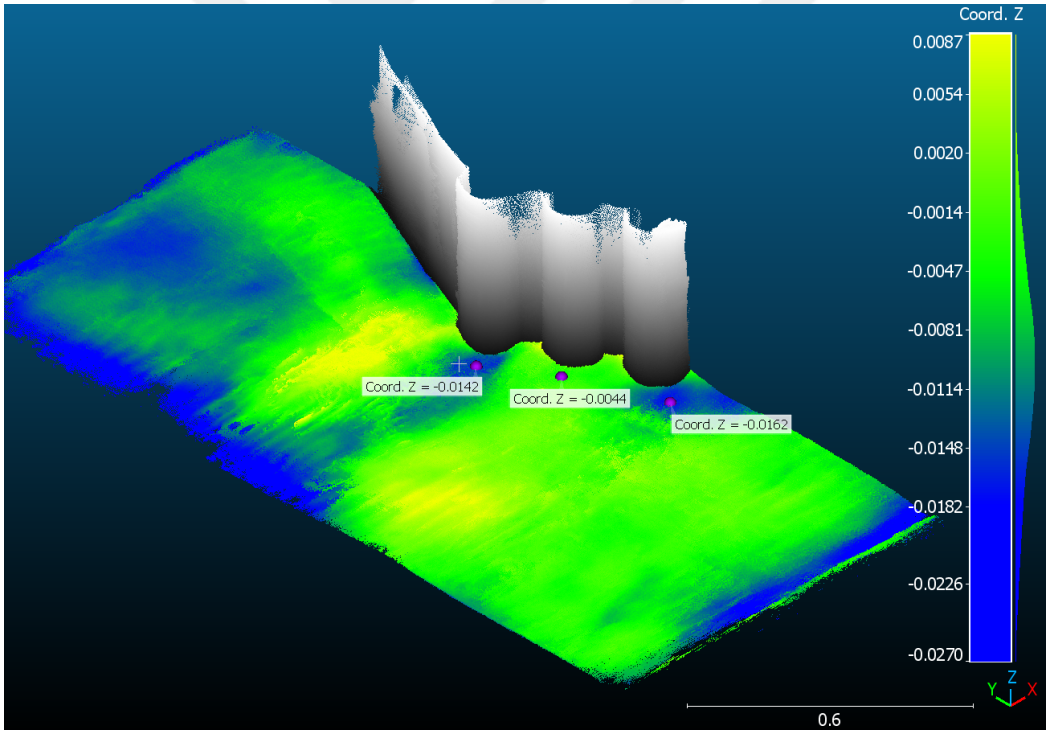
(b) Sf ölçeği

Şekil 47: Deney no: 5 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 47'de Deney No: 5'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 0.6$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.23$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.17$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



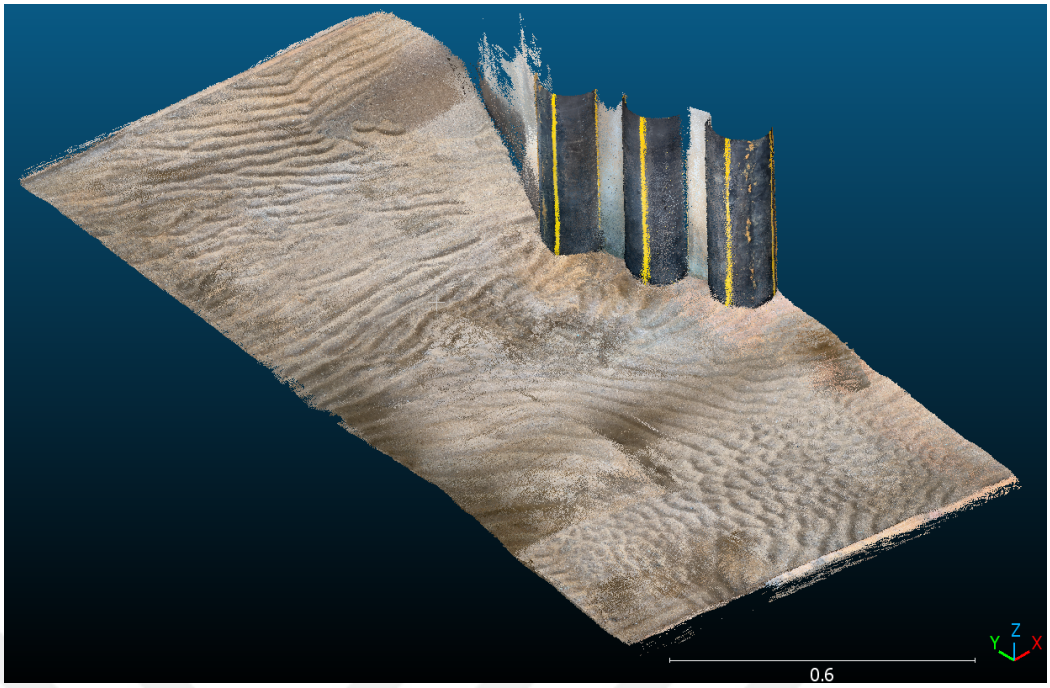
(a) RBG ölçeği



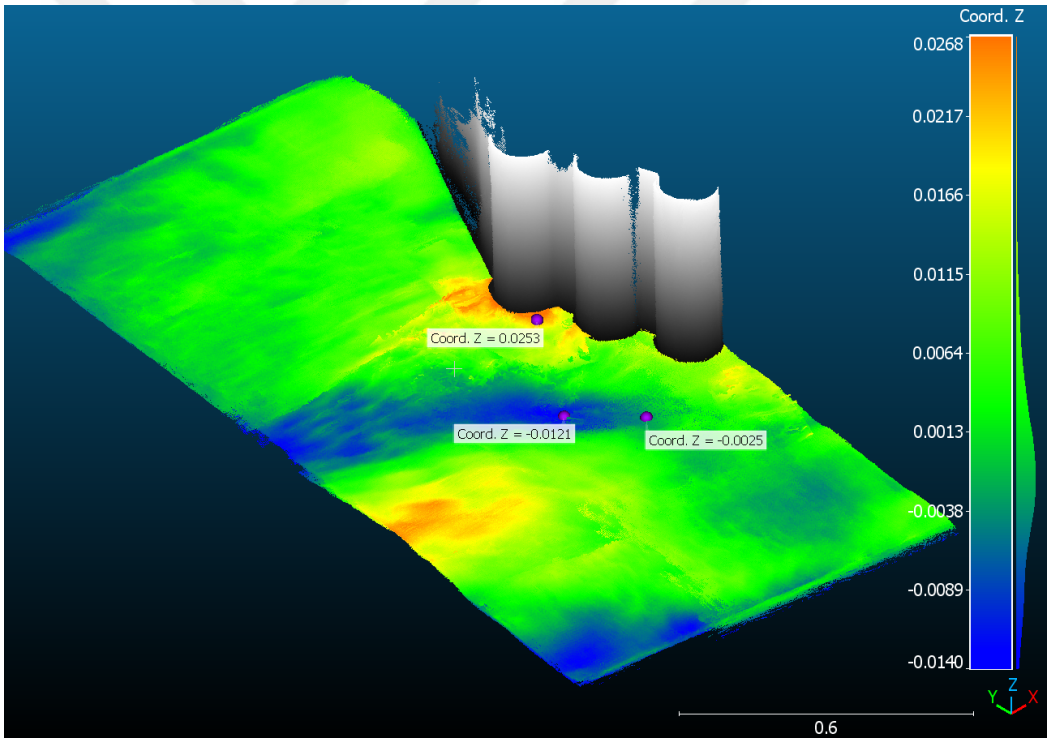
(b) Sf ölçeği

Şekil 48: Deney no: 6 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 48'de Deney No: 6'da yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 1.62$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.44$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 1.42$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



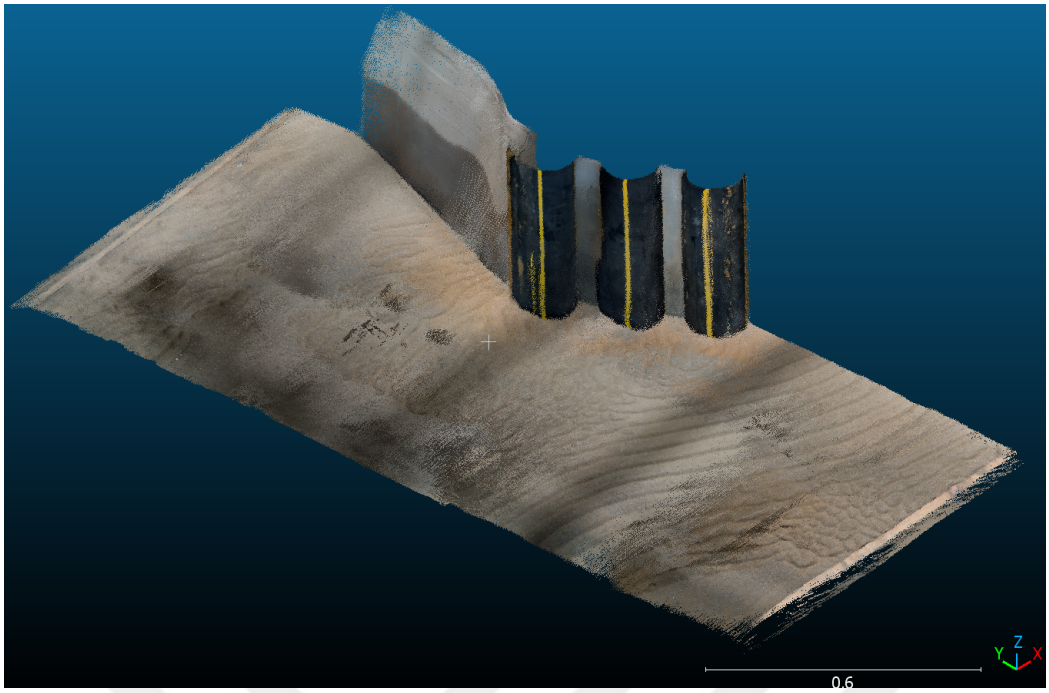
(a) RBG ölçeği



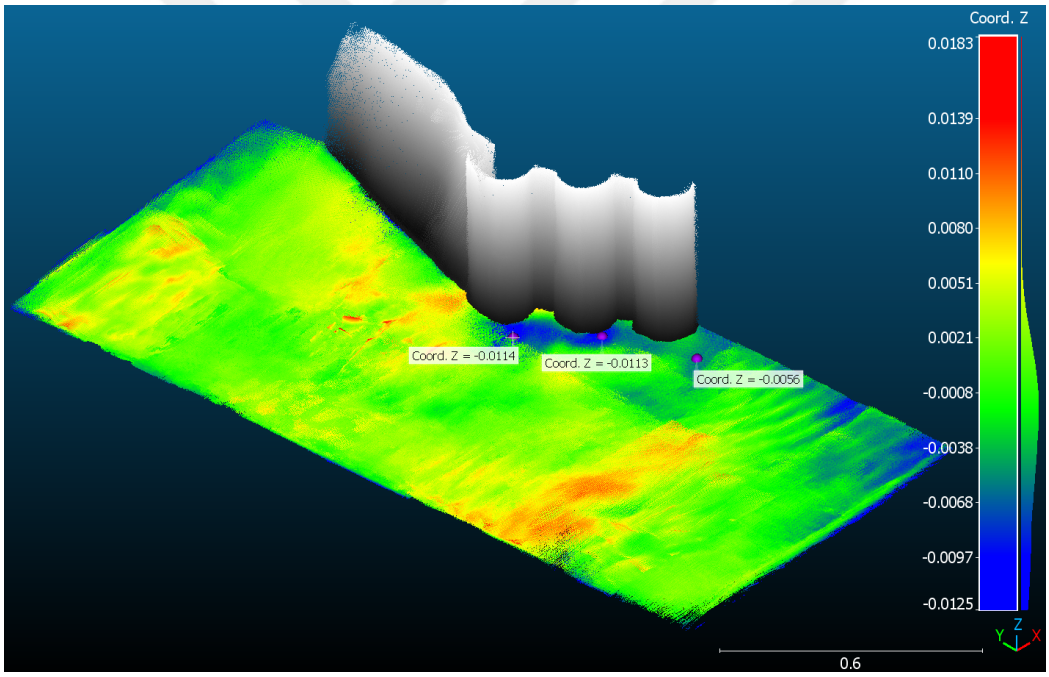
(b) Sf ölçeği

Şekil 49: Deney no: 7 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 49'de Deney No: 7'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği ikinci kazık önünde $S_{max} = 1.21$ cm olarak ölçülmüştür. Birinci kazık önünde $S = 0.25$ cm oyulma derinliği ve üçüncü kazık önünde ise $S = 2.53$ cm dolma gözlemlenmiştir.



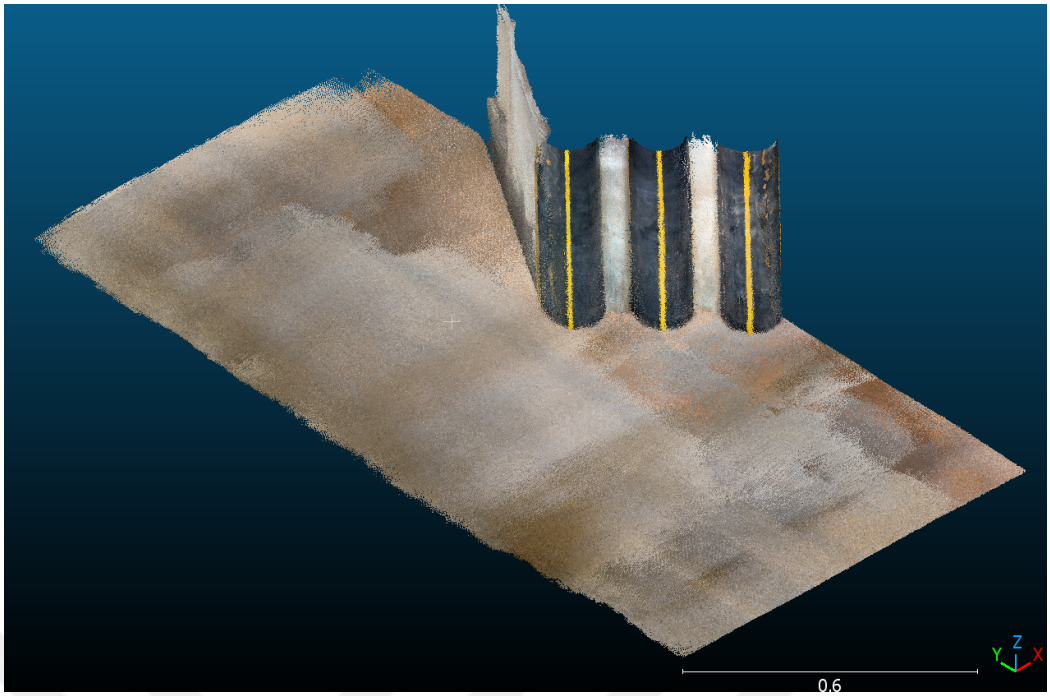
(a) RBG ölçeği



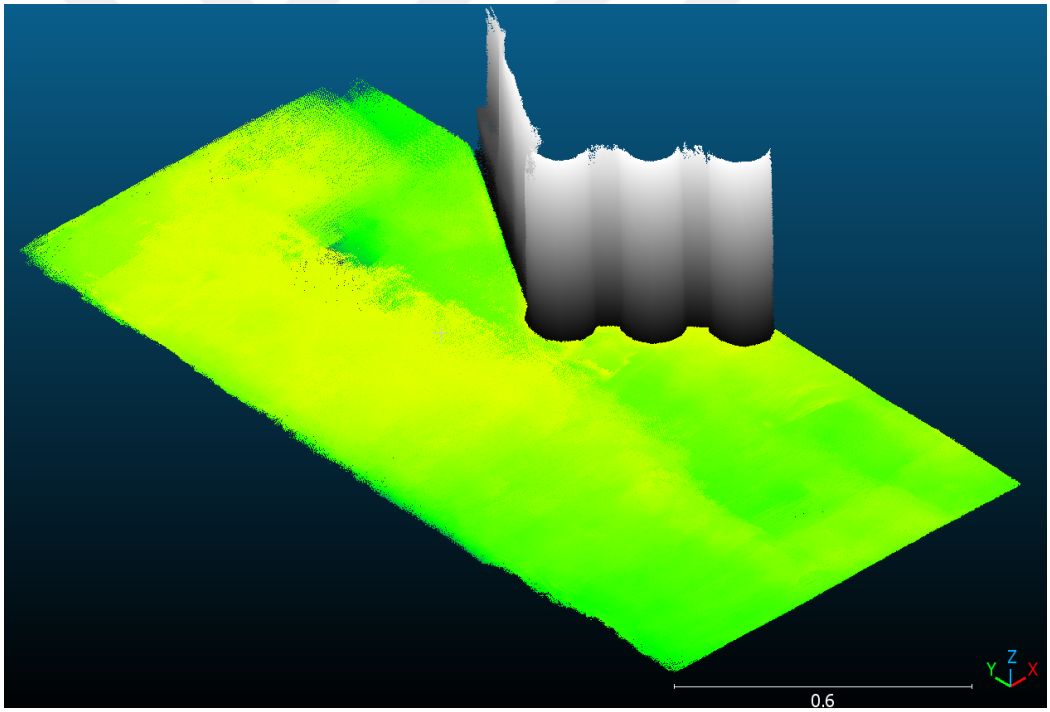
(b) Sf ölçeği

Şekil 50: Deney no: 8 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 50'de Deney No: 8'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 1.14$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 1.13$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 0.5$ cm oyulma derinliği gözlemlenmiştir.

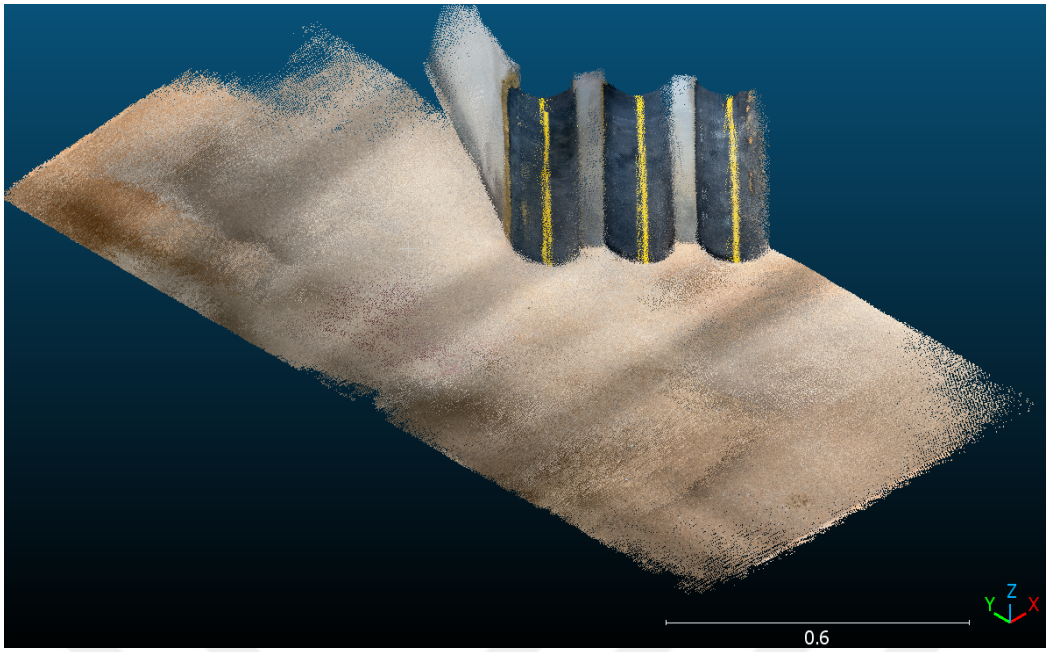


(a) RBG ölçeği

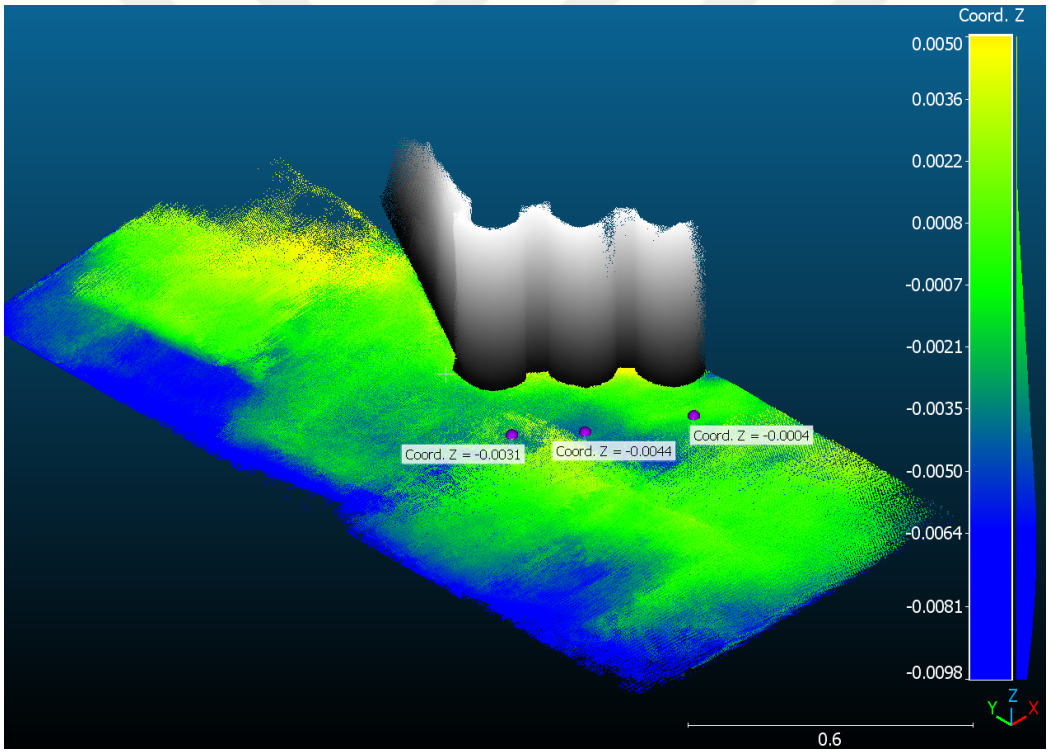


(b) Sf ölçeği

Şekil 51: Deney no: 9-10-11-12 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



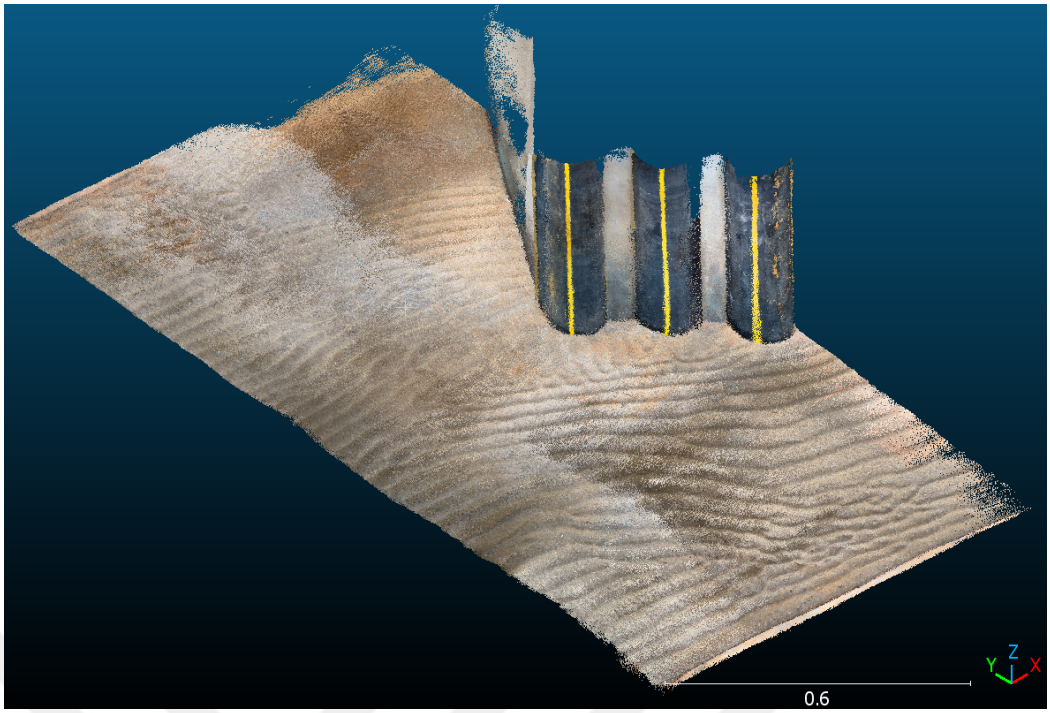
(a) RBG ölçeği



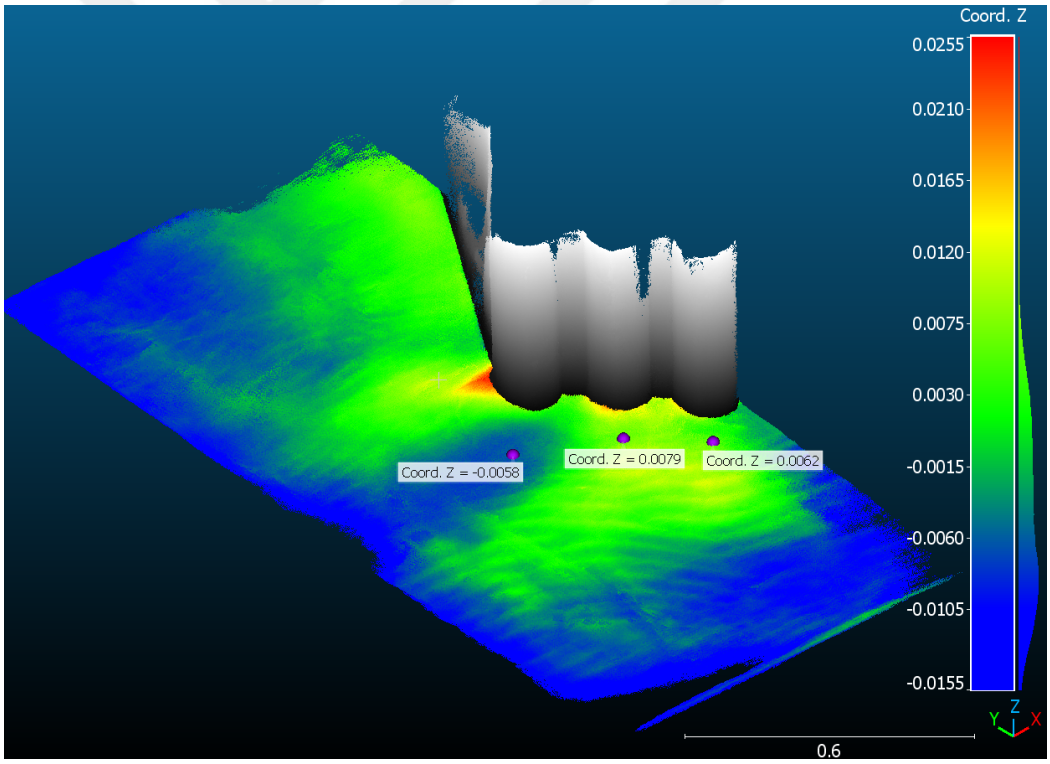
(b) Sf ölçeği

Şekil 52: Deney no: 9 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 52'de Deney No: 9'da yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği ikinci kazık önünde $S_{max} = 0.44$ cm olarak ölçülmüştür. Birinci kazık önünde $S = 0.04$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.31$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



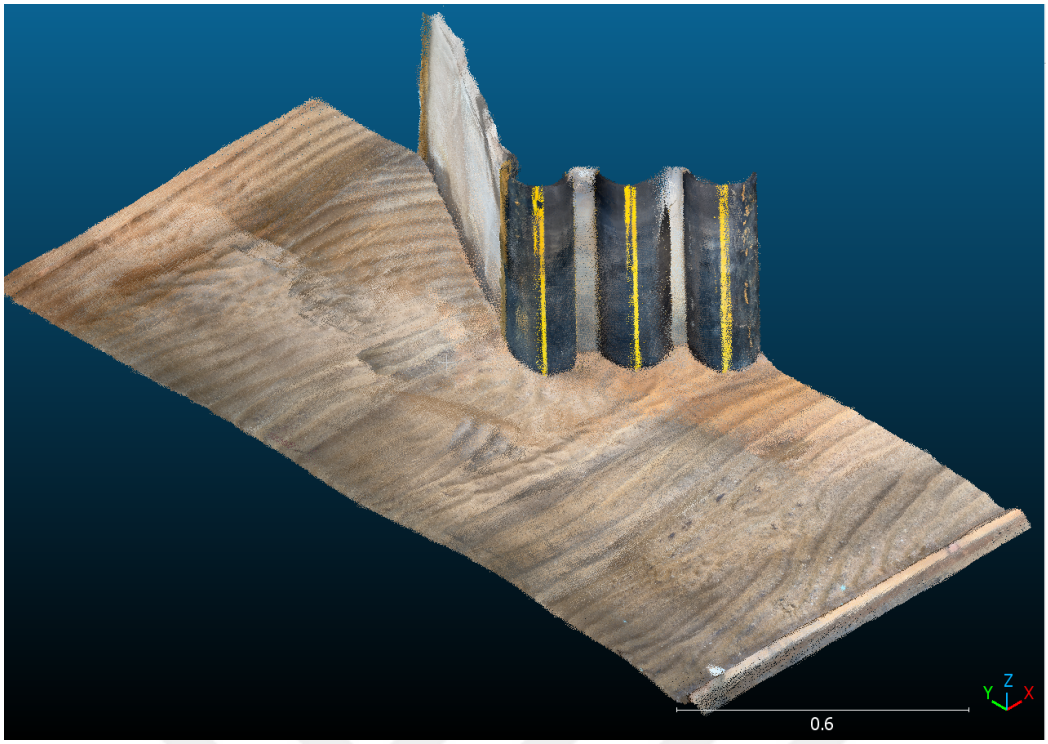
(a) RBG ölçeği



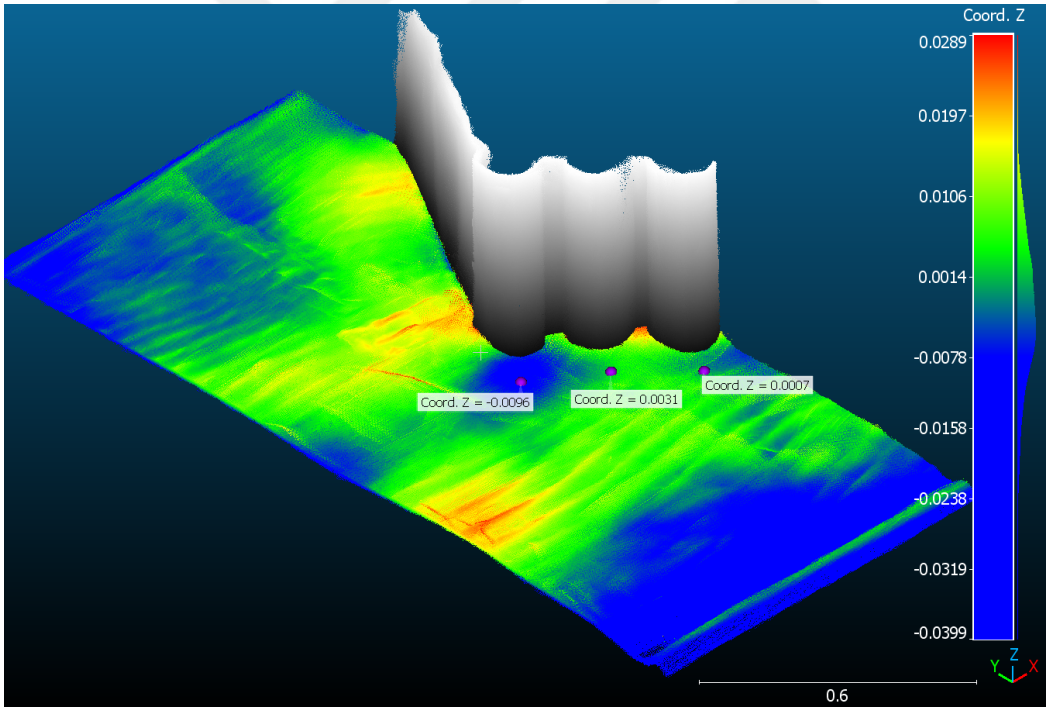
(b) Sf ölçeği

Şekil 53: Deney no: 10 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 53'da Deney No: 10'da yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.58$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.79$ cm ve birinci kazık önünde de $S = 0.62$ cm dolma gözlemlenmiştir.



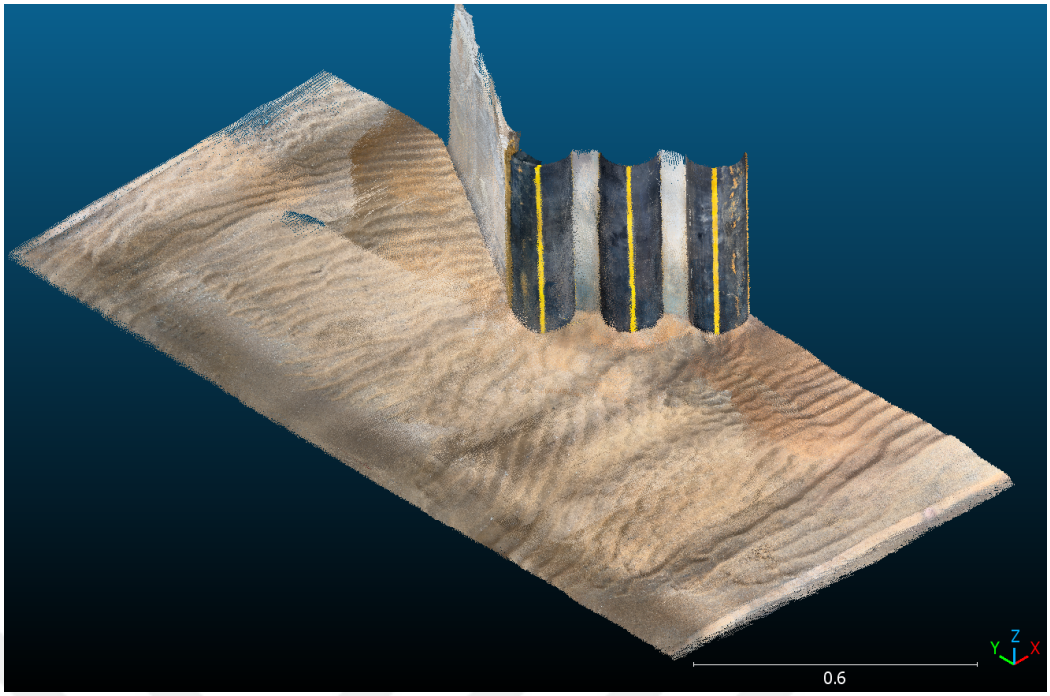
(a) RBG ölçeği



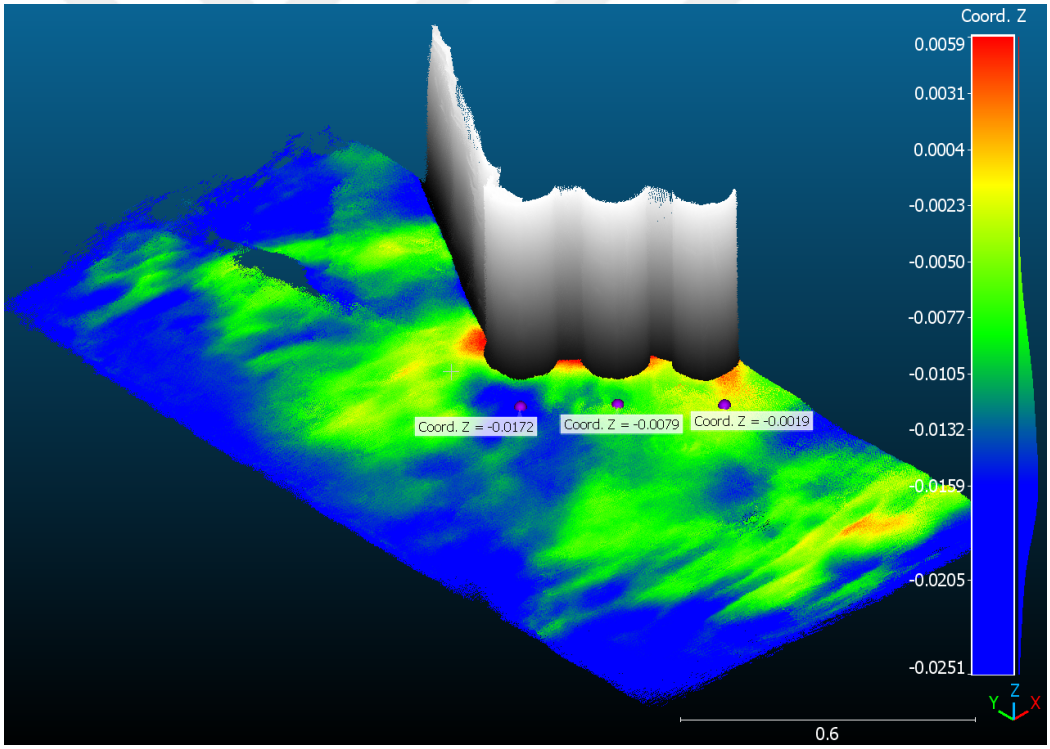
(b) Sf ölçeği

Şekil 54: Deney no: 11 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 54'da Deney No: 11'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.96$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.31$ cm ve birinci kazık önünde de $S = 0.07$ cm dolma gözlemlenmiştir.



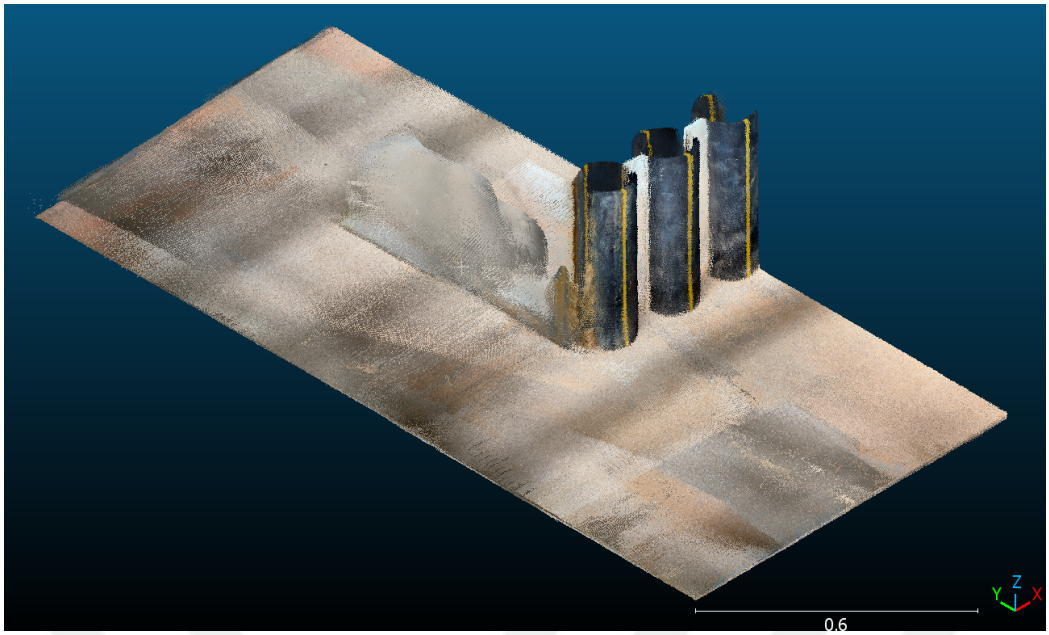
(a) RBG ölçeği



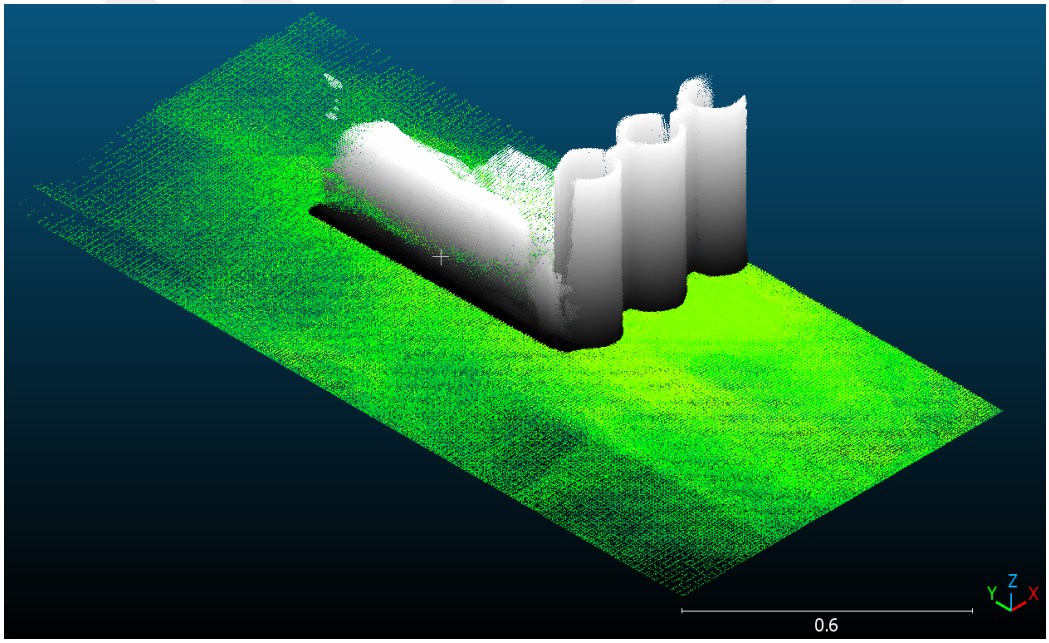
(b) Sf ölçeği

Şekil 55: Deney no: 12 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 55'de Deney No: 12'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 1.72$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.79$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 0.19$ cm oyulma gözlemlenmiştir.

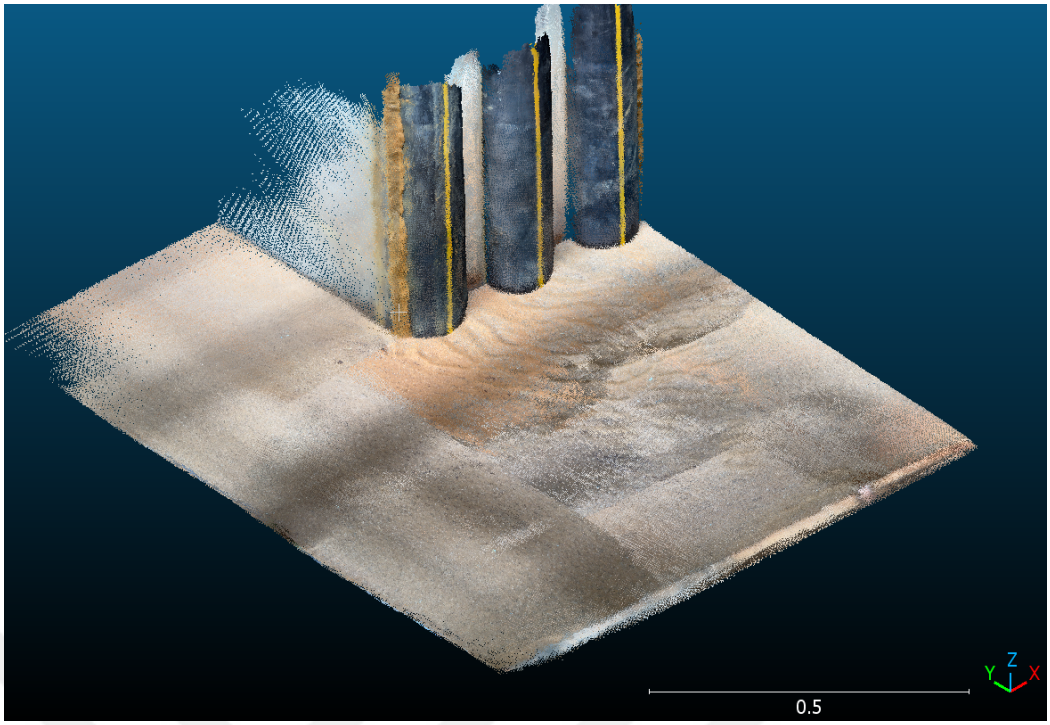


(a) RBG ölçeği

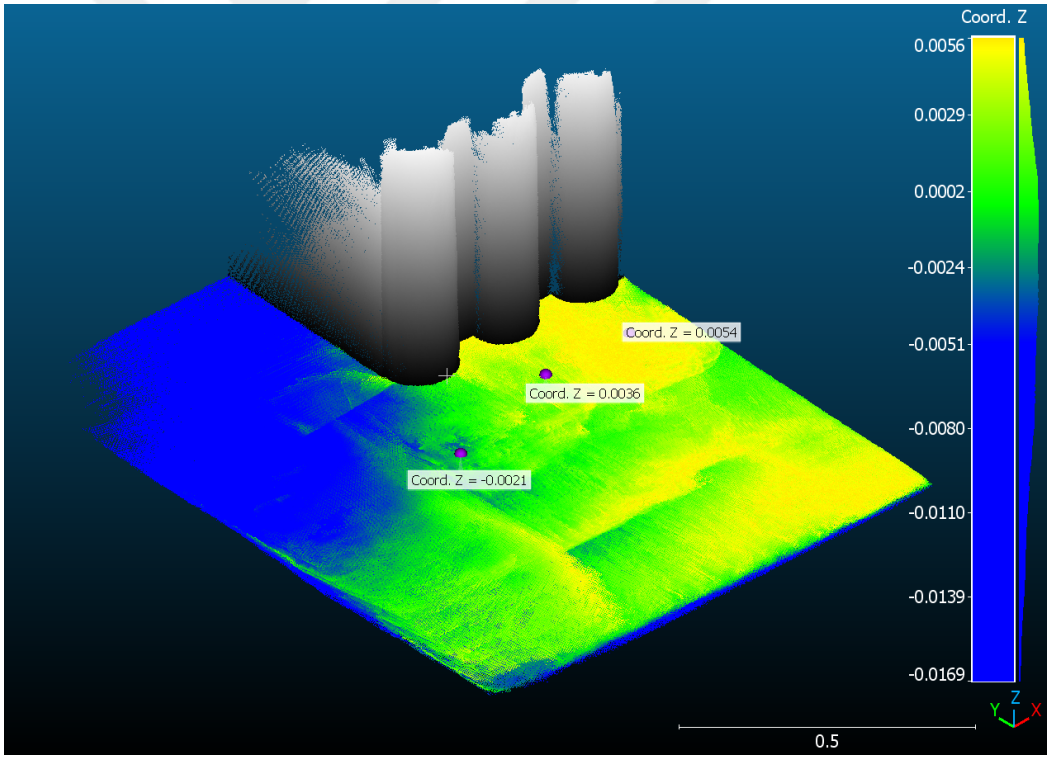


(b) Sf ölçeği

Şekil 56: Deney no: 13-14-15-16 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



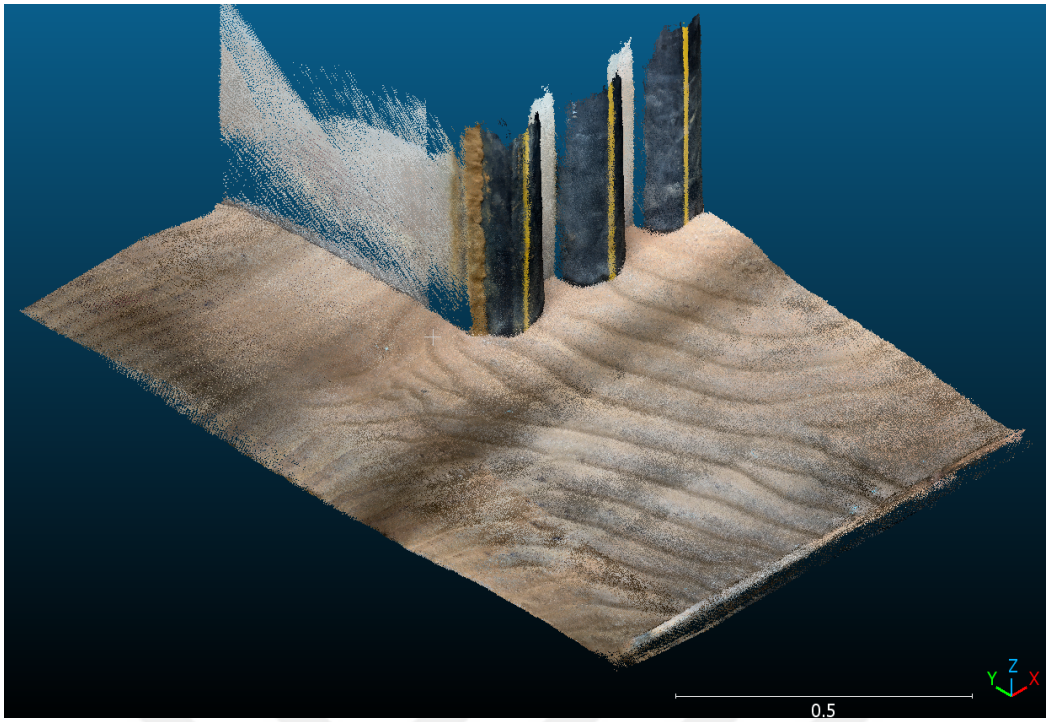
(a) RBG ölçeği



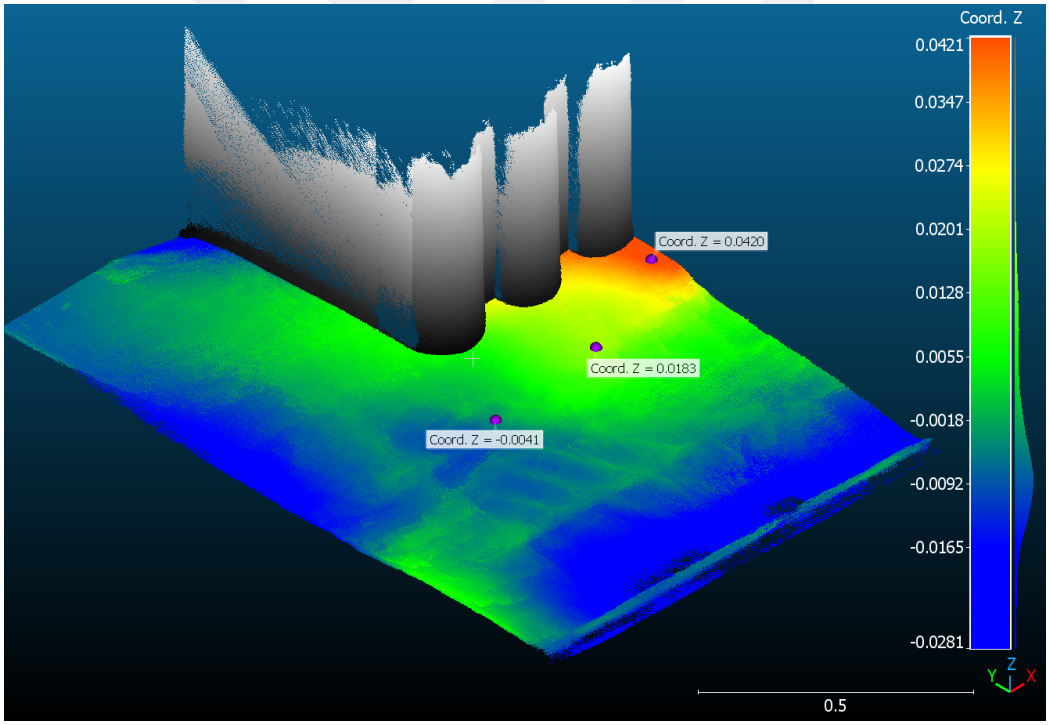
(b) Sf ölçeği

Şekil 57: Deney no: 13 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 57'de Deney No: 13'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.21$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.36$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 0.54$ cm dolma gözlemlenmiştir.



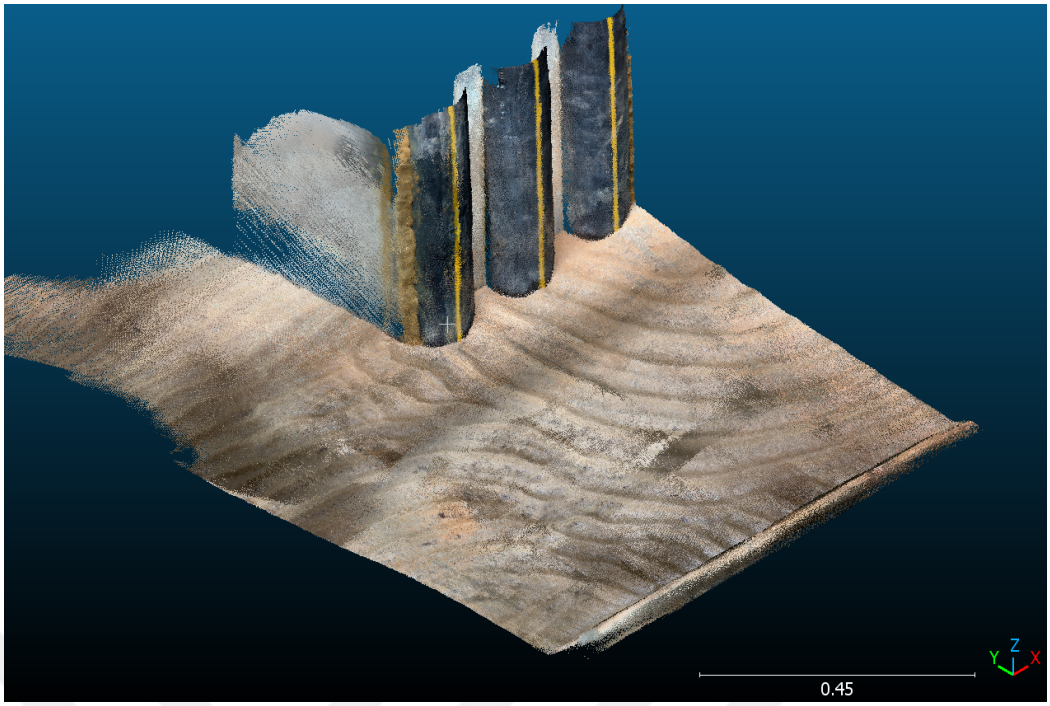
(a) RBG ölçeği



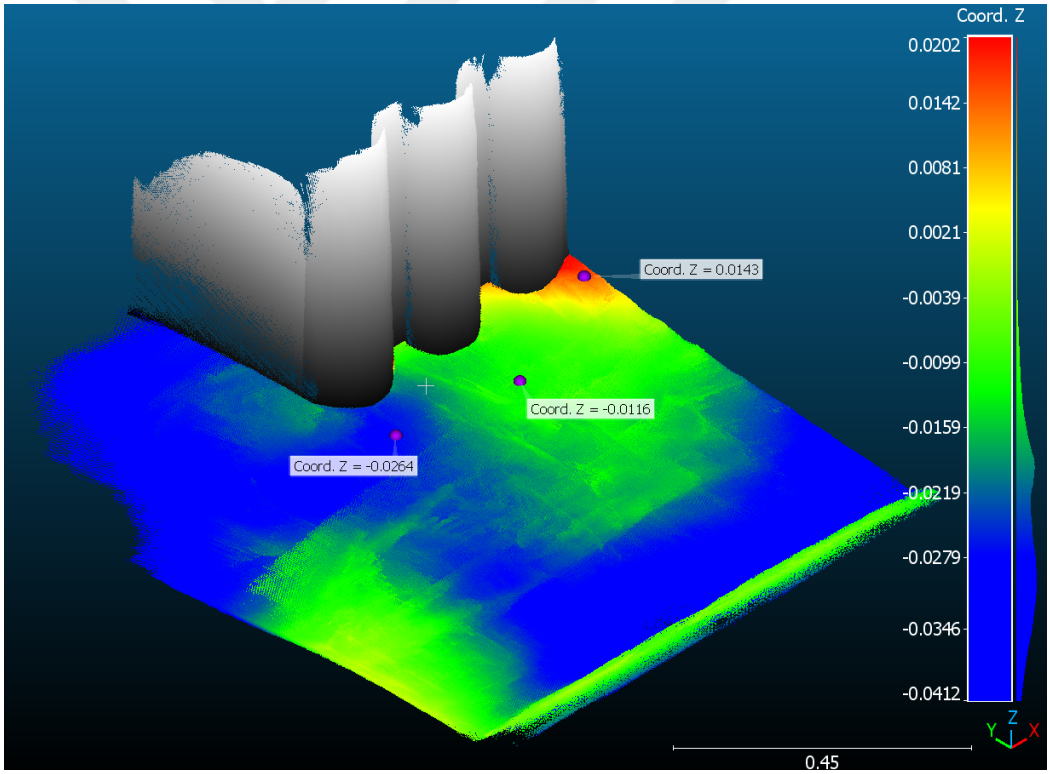
(b) Sf ölçeği

Şekil 58: Deney no: 14 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 58'de Deney No: 14'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.41$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 1.83$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 4.20$ cm dolma gözlemlenmiştir.



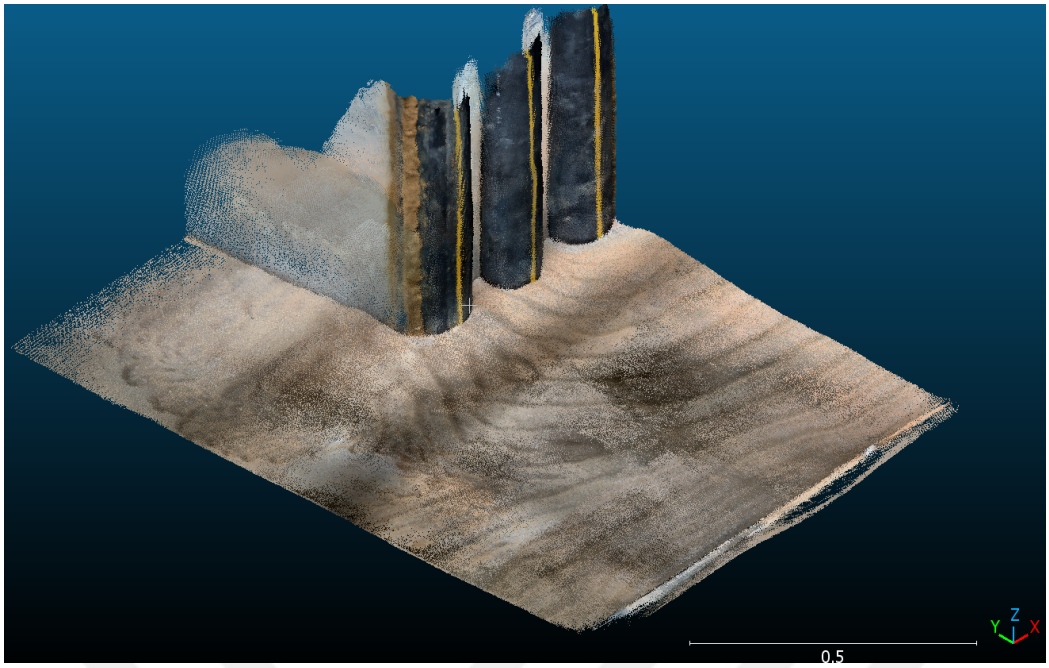
(a) RBG ölçeği



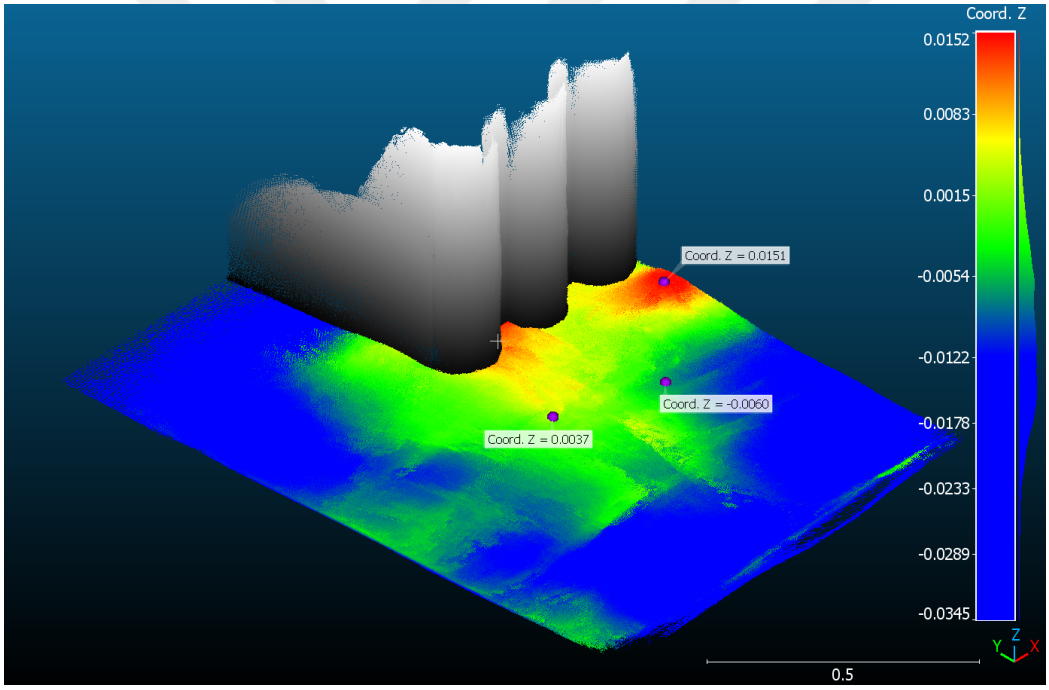
(b) Sf ölçeği

Şekil 59: Deney no: 15 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 59'de Deney No: 15'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 2.64$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 1.16$ cm oyulma ve birinci kazık önünde ise $S = 1.43$ cm dolma gözlemlenmiştir.



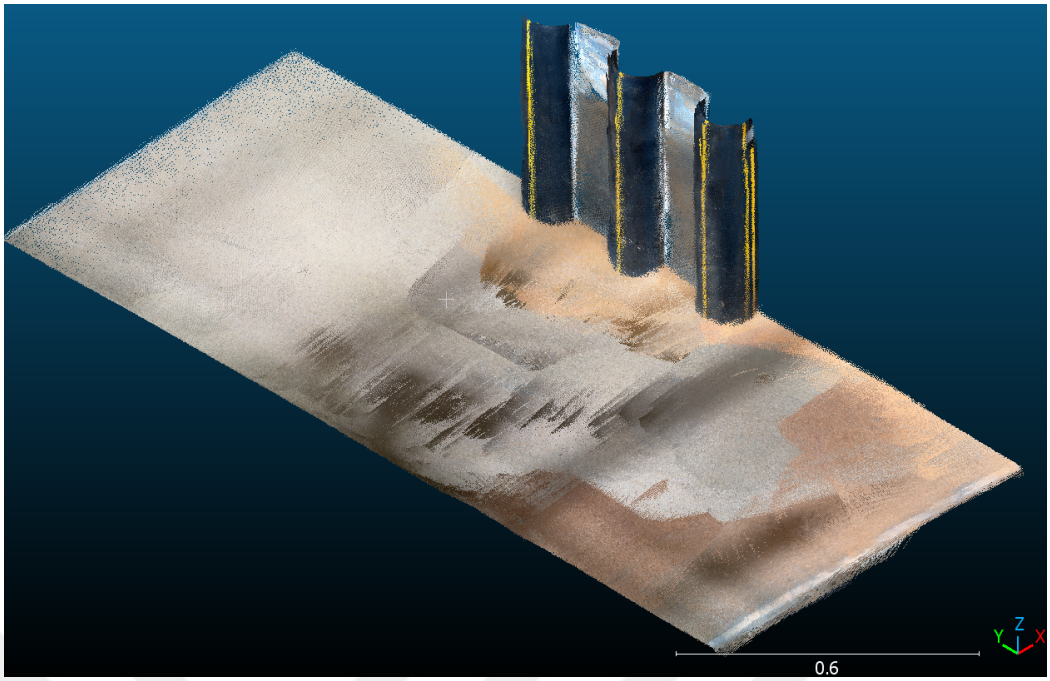
(a) RBG ölçeği



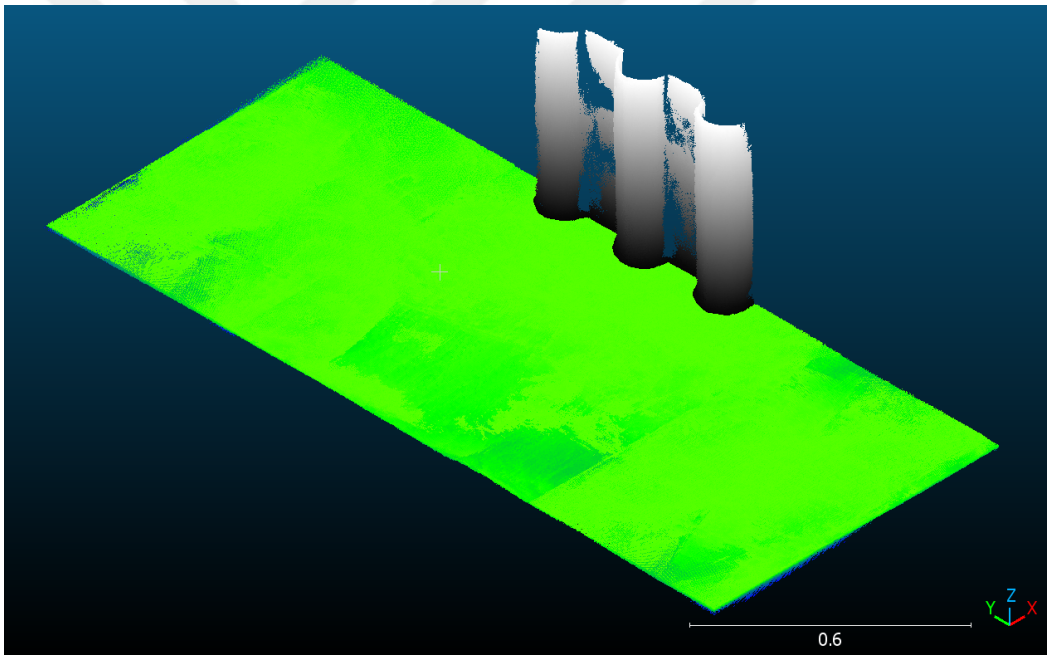
(b) Sf ölçeği

Şekil 60: Deney no: 16 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 60'de Deney No: 16'da yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği ikinci kazık önünde $S_{max} = 0.6$ cm olarak ölçülmüştür. Birinci kazık önünde $S = 1.51$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.37$ cm dolma gözlemlenmiştir.

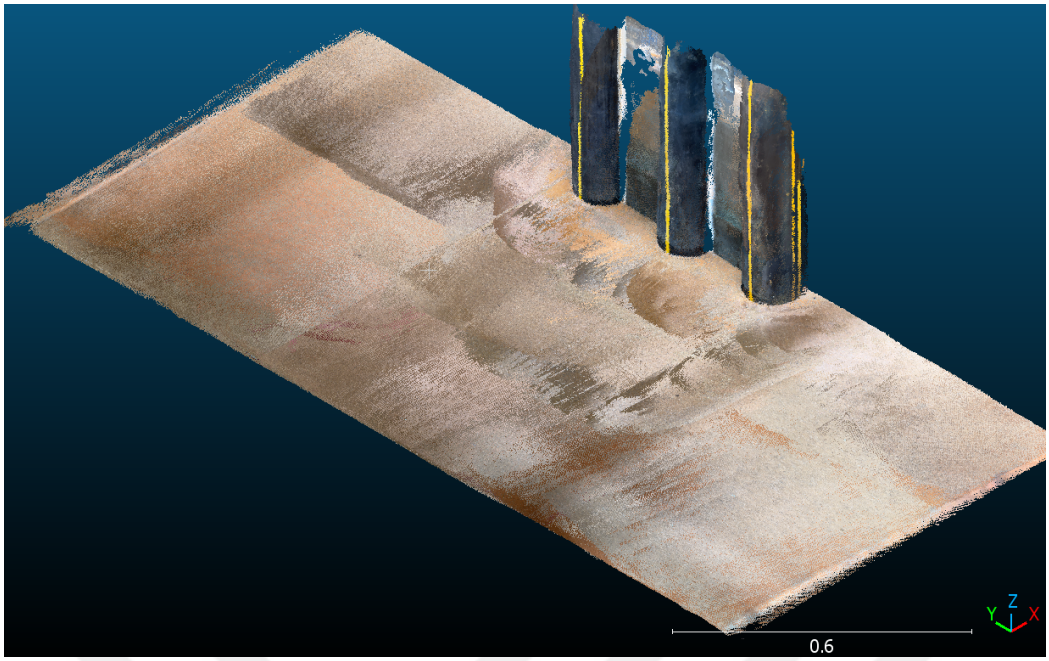


(a) RBG ölçeği

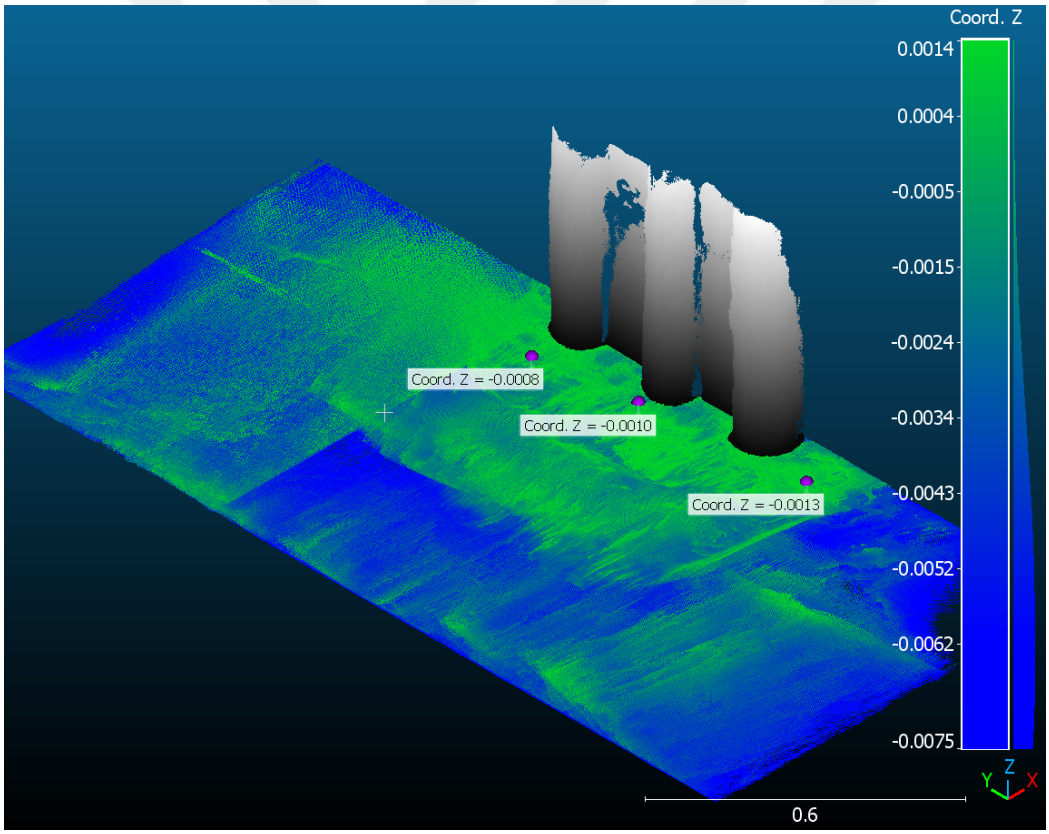


(b) Sf ölçeği

Şekil 61: Deney no: 17-18-19-20 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



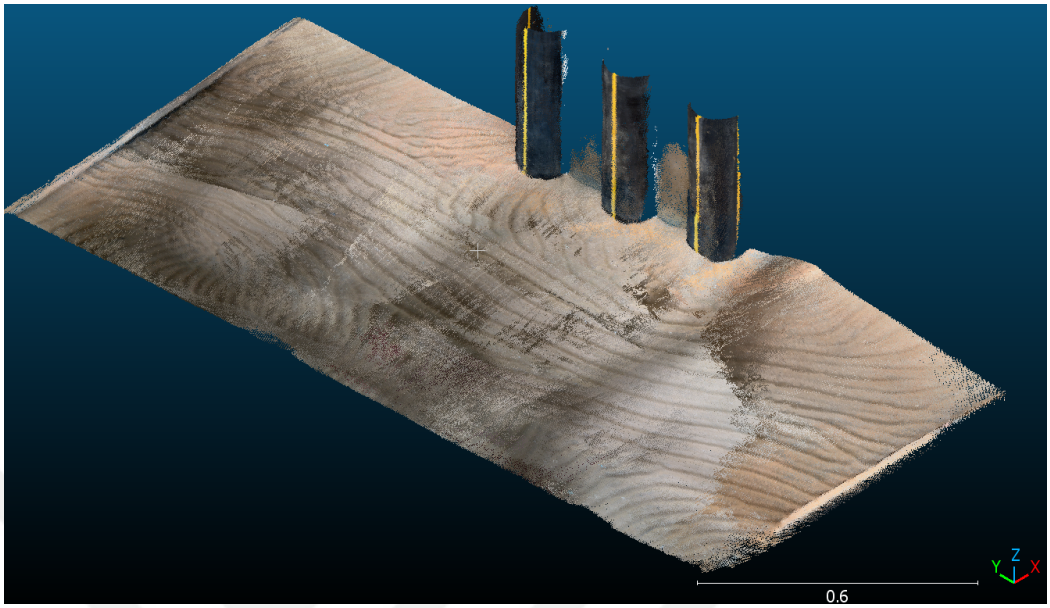
(a) RBG ölçeği



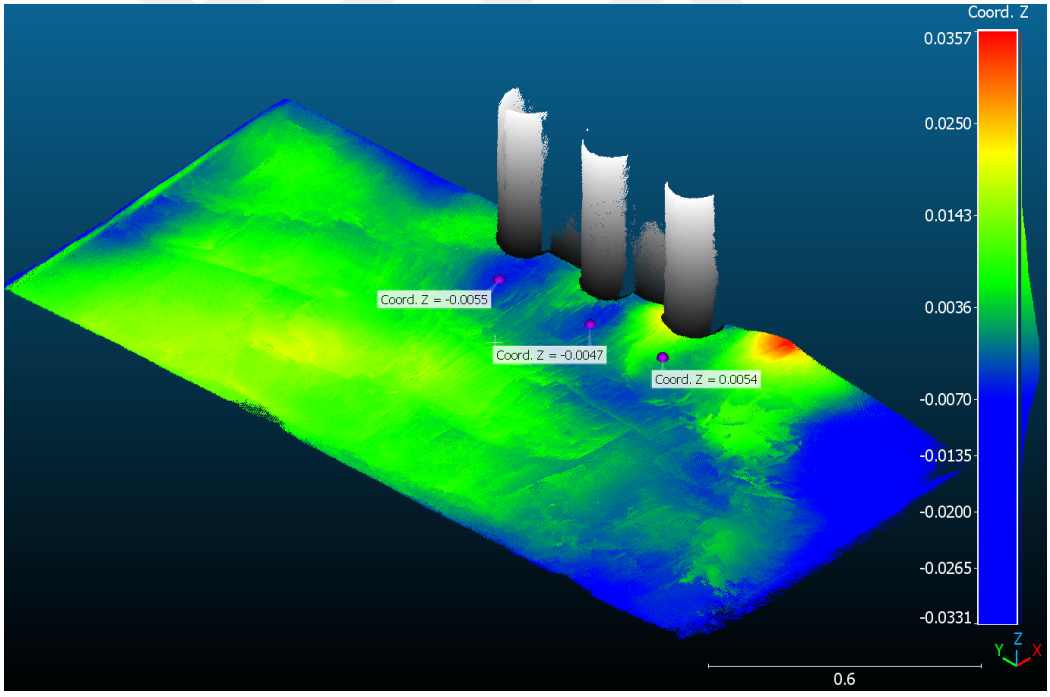
(b) Sf ölçeği

Şekil 62: Deney no: 17 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 62'de Deney No: 17'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 0.13$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.1$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.08$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



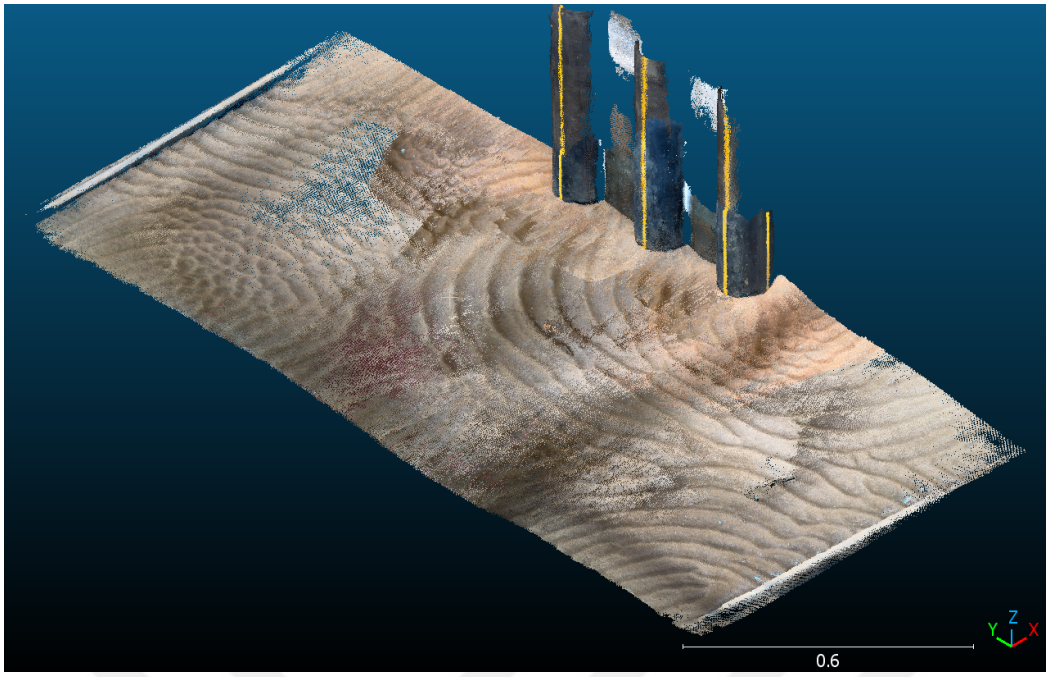
(a) RBG ölçeği



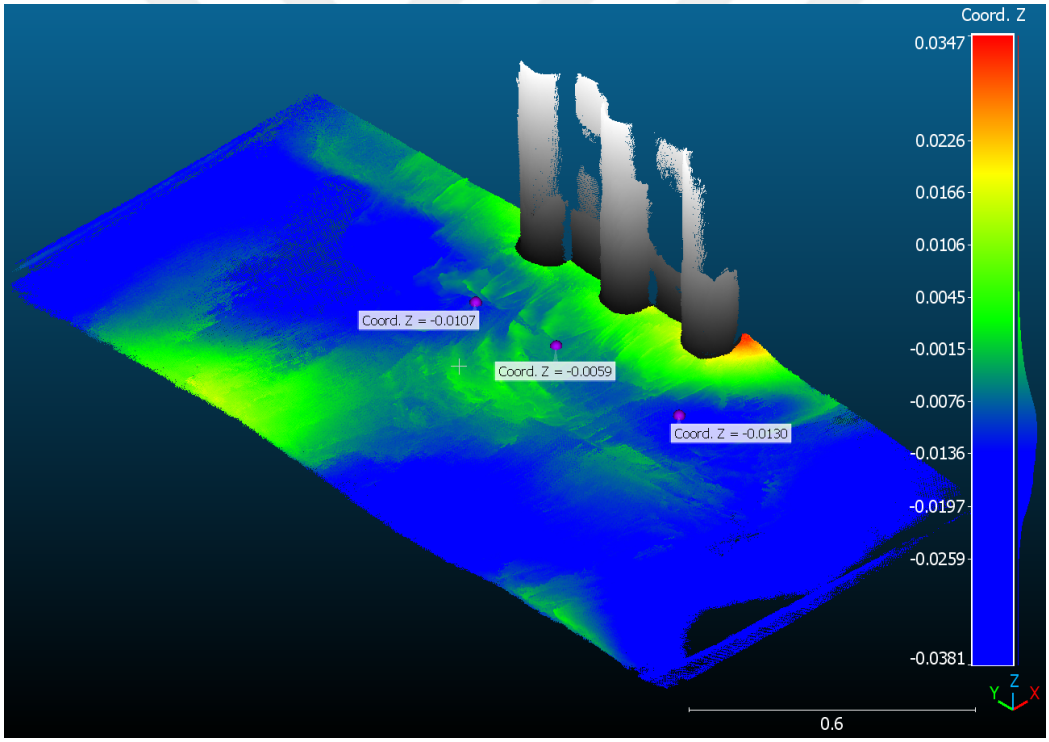
(b) Sf ölçeği

Şekil 63: Deney no: 18 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 63'de Deney No: 18'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.55$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.47$ cm oyulma ve birinci kazık önünde ise $S = 0.54$ cm dolma gözlemlenmiştir.



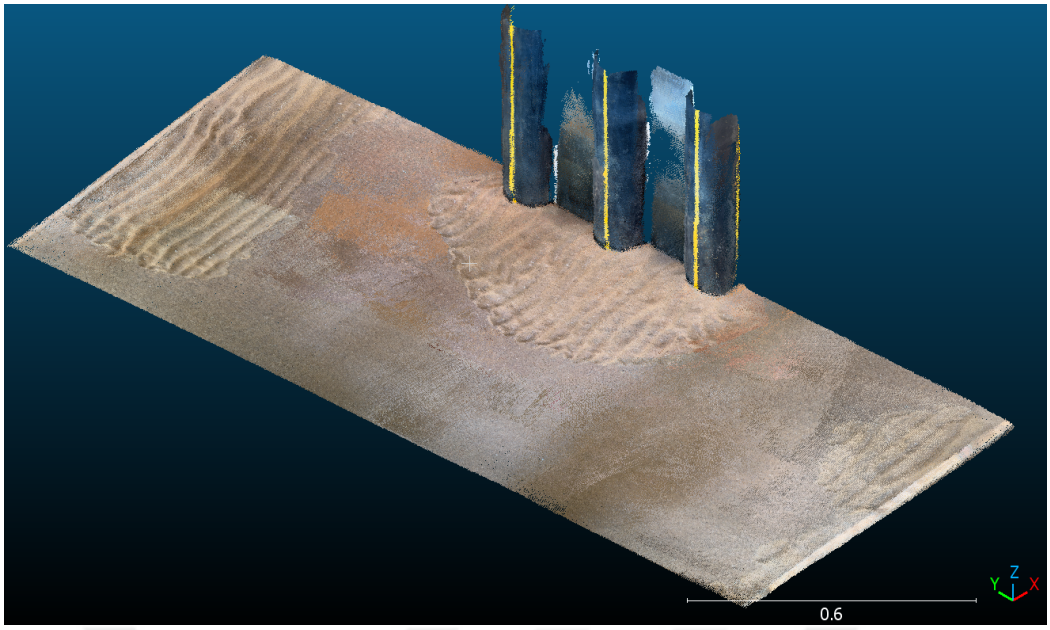
(a) RBG ölçeği



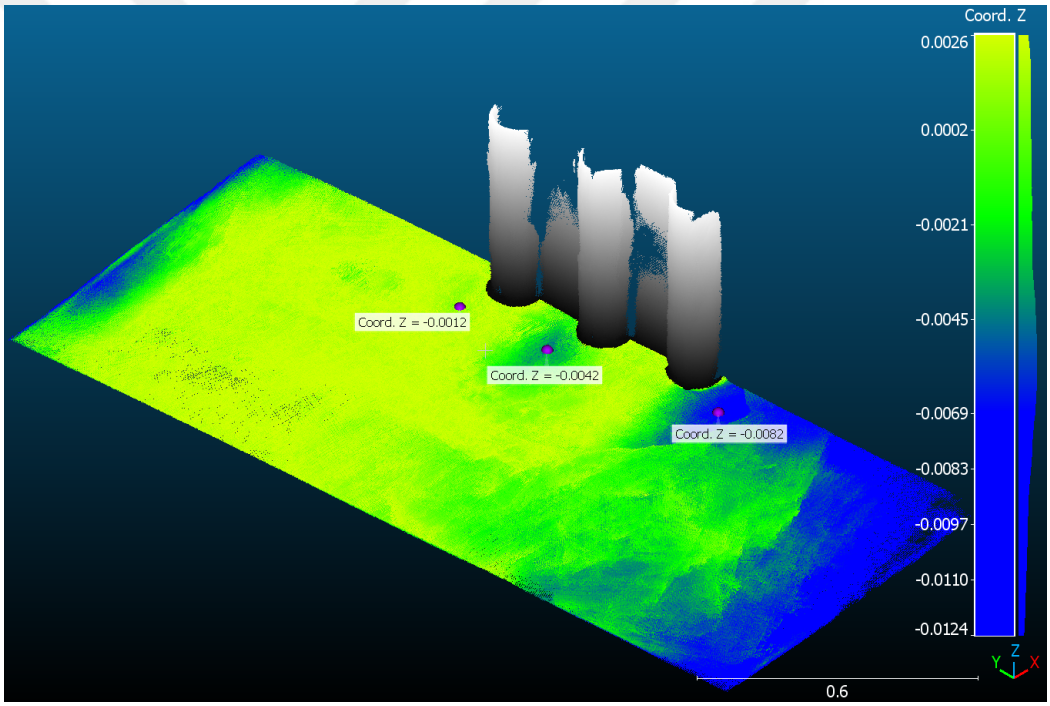
(b) Sf ölçeği

Şekil 64: Deney no: 19 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 64'de Deney No: 19'da yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 1.30$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.59$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 1.07$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



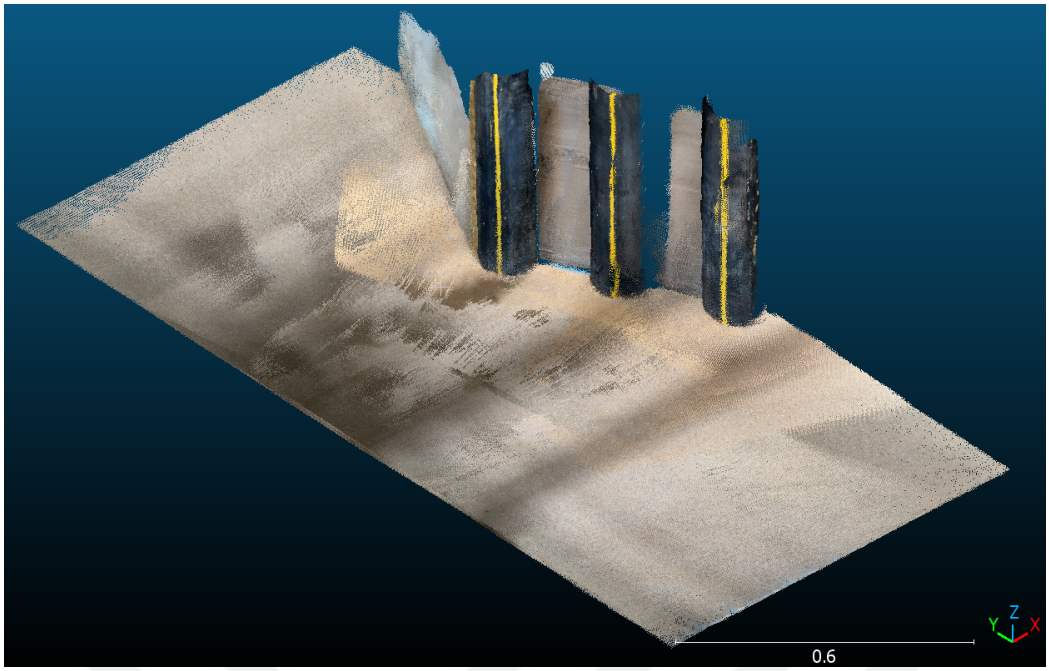
(a) RBG ölçeği



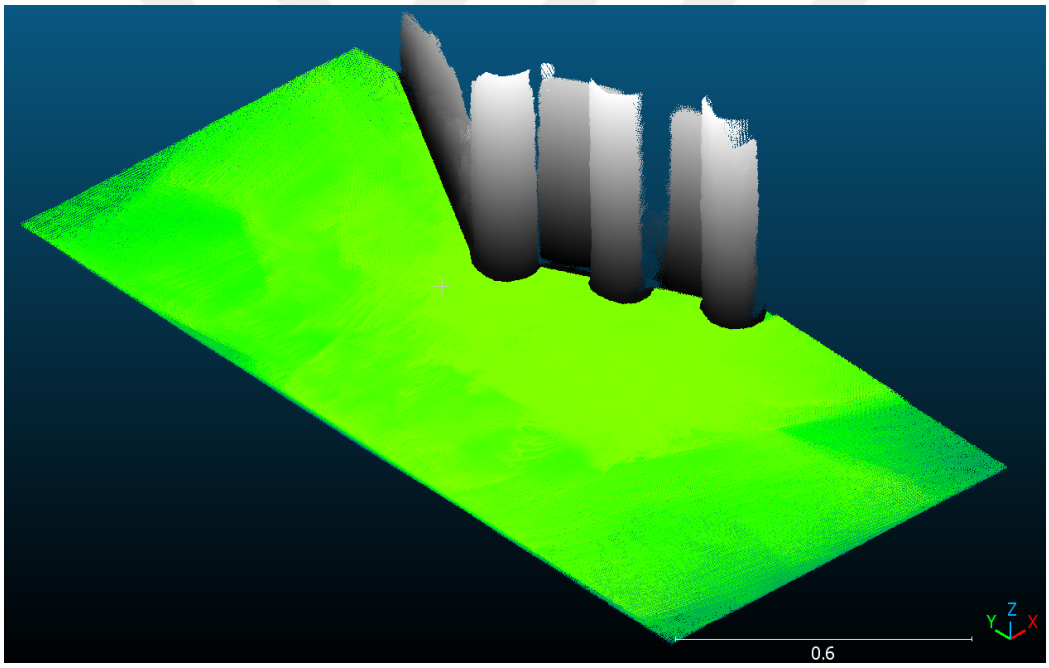
(b) Sf ölçeği

Şekil 65: Deney no: 20 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 65'de Deney No: 20'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 0.82$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.42$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.12$ cm oyulma gözlemlenmiştir.

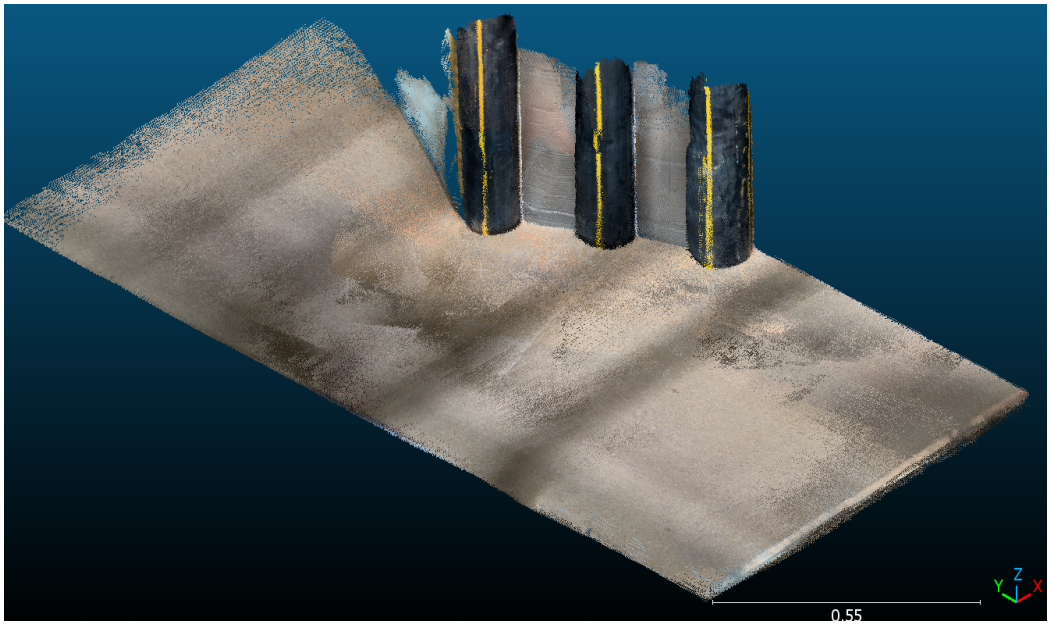


(a) RBG ölçeği

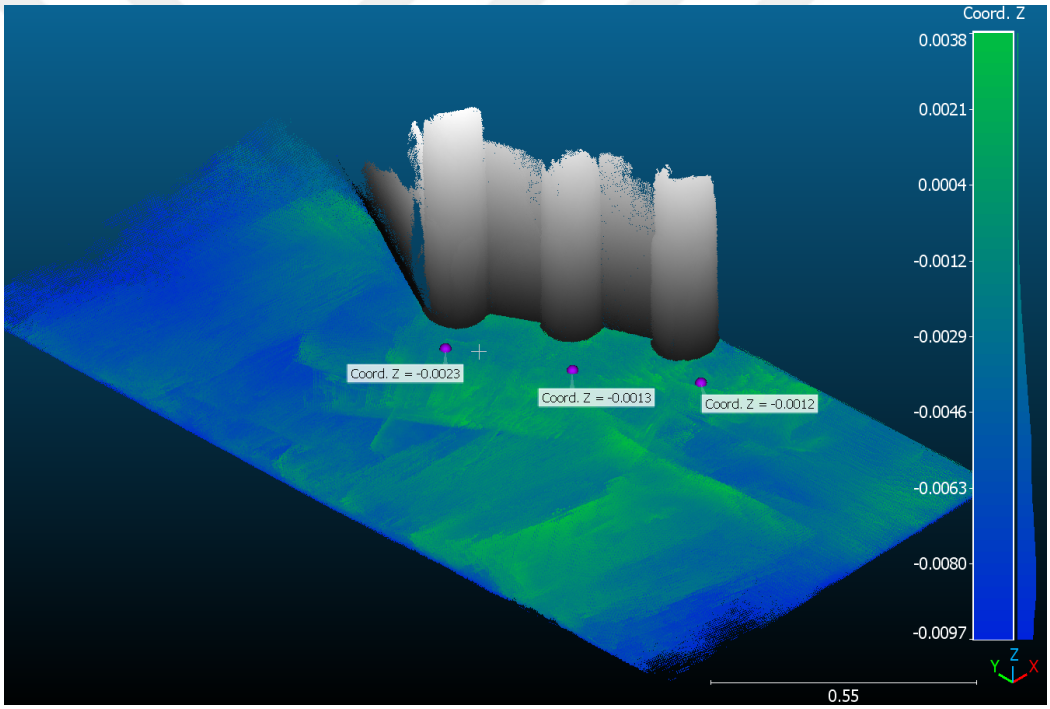


(b) Sf ölçeği

Şekil 66: Deney no: 21-22-23-24 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



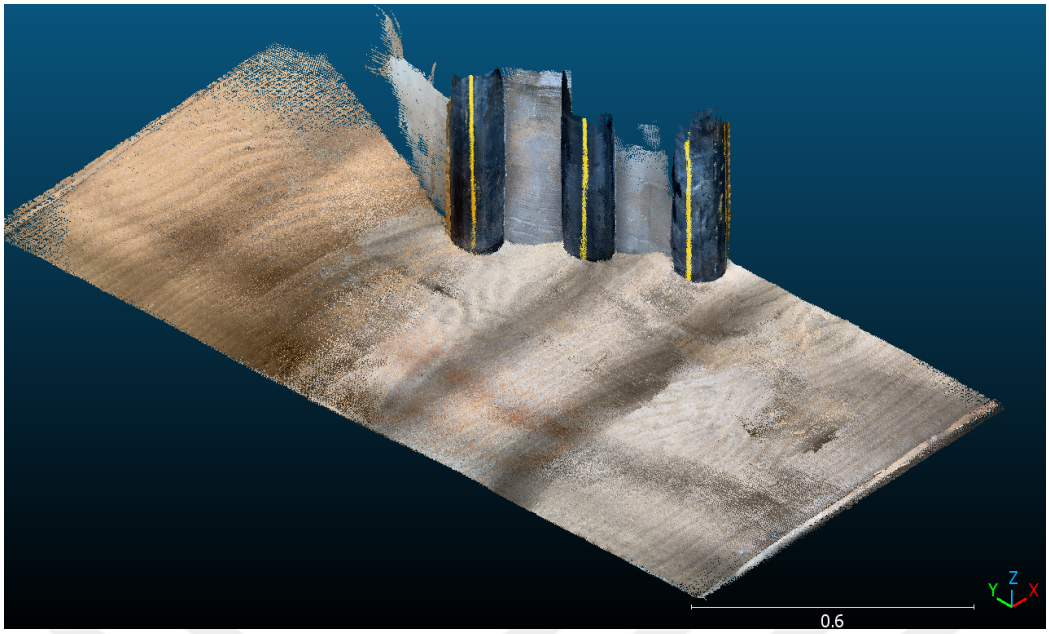
(a) RBG ölçeği



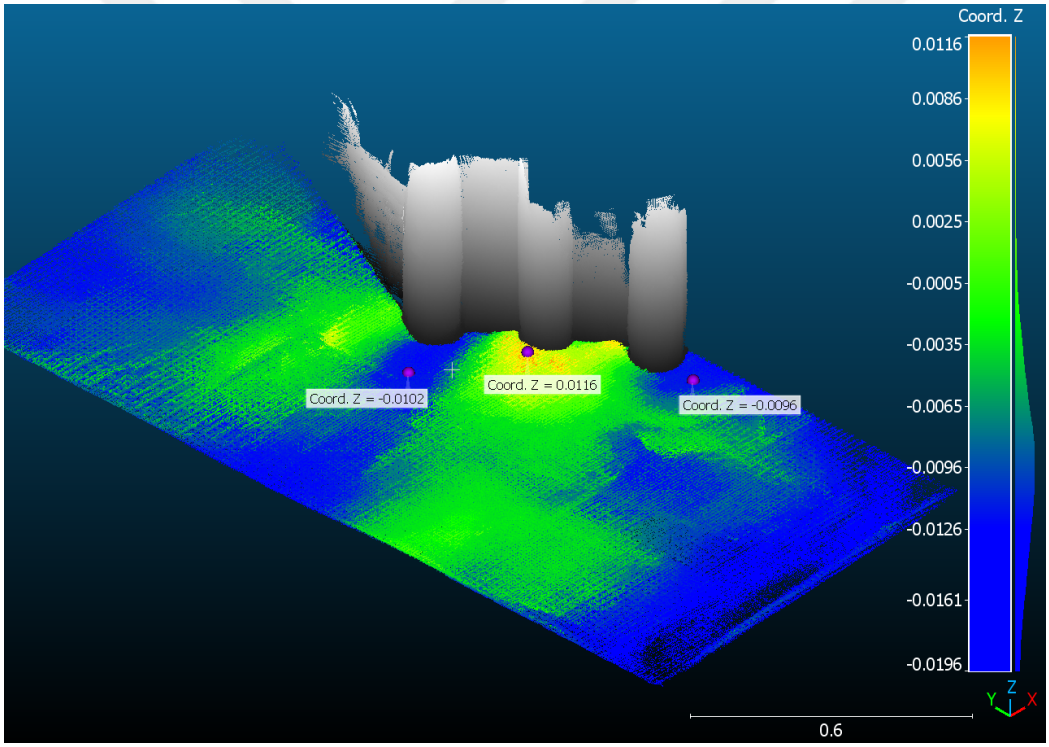
(b) Sf ölçeği

Şekil 67: Deney no: 21 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 67'de Deney No: 21'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.23$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.13$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 0.12$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



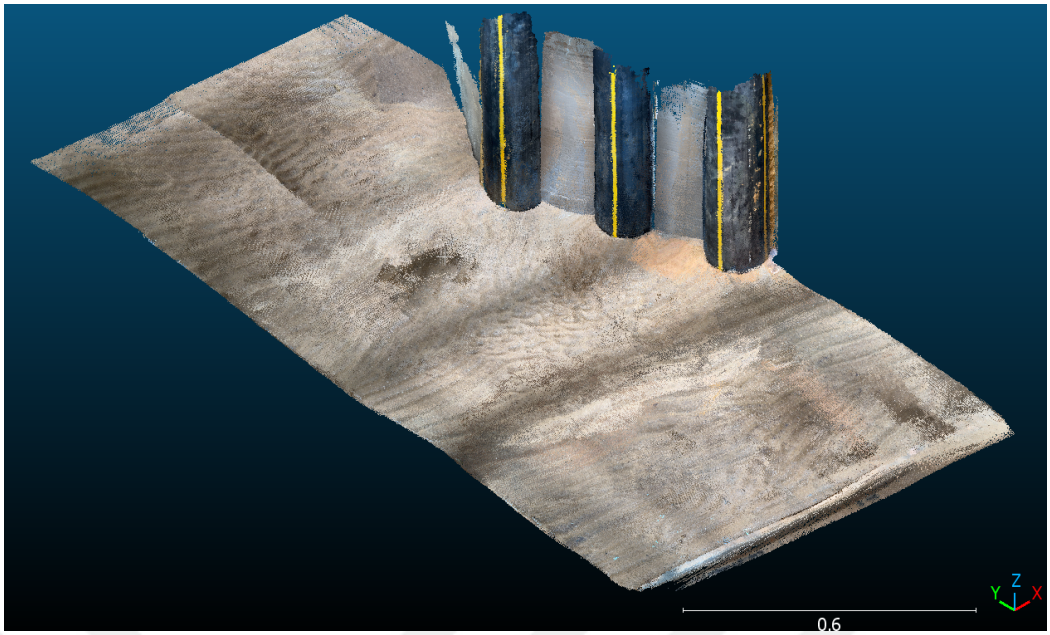
(a) RBG ölçeği



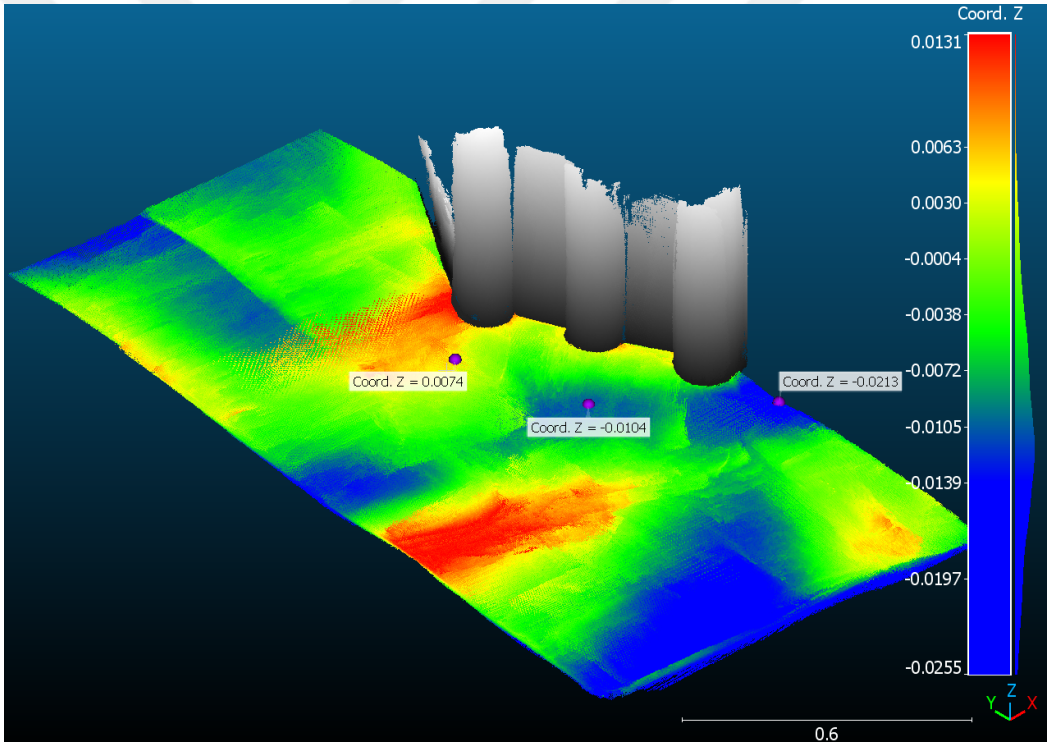
(b) Sf ölçeği

Şekil 68: Deney no: 22 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 68'de Deney No: 22'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 1.02$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 1.16$ cm dolma ve birinci kazık önünde ise $S = 0.96$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



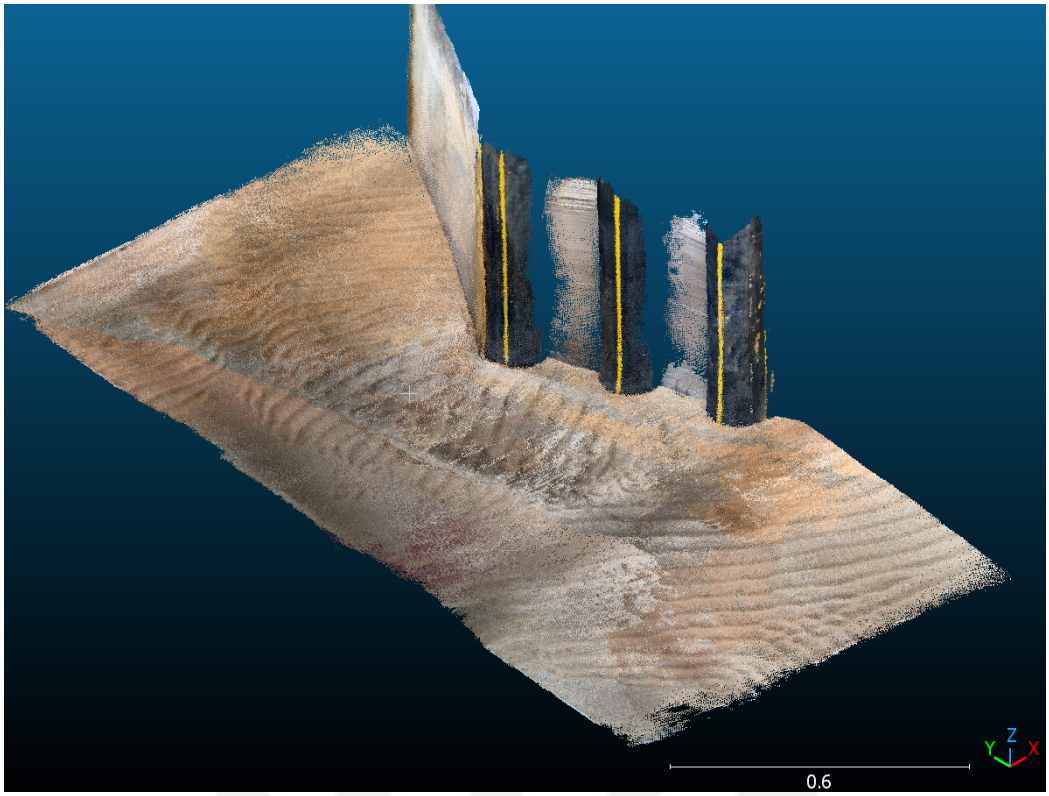
(a) RBG ölçeği



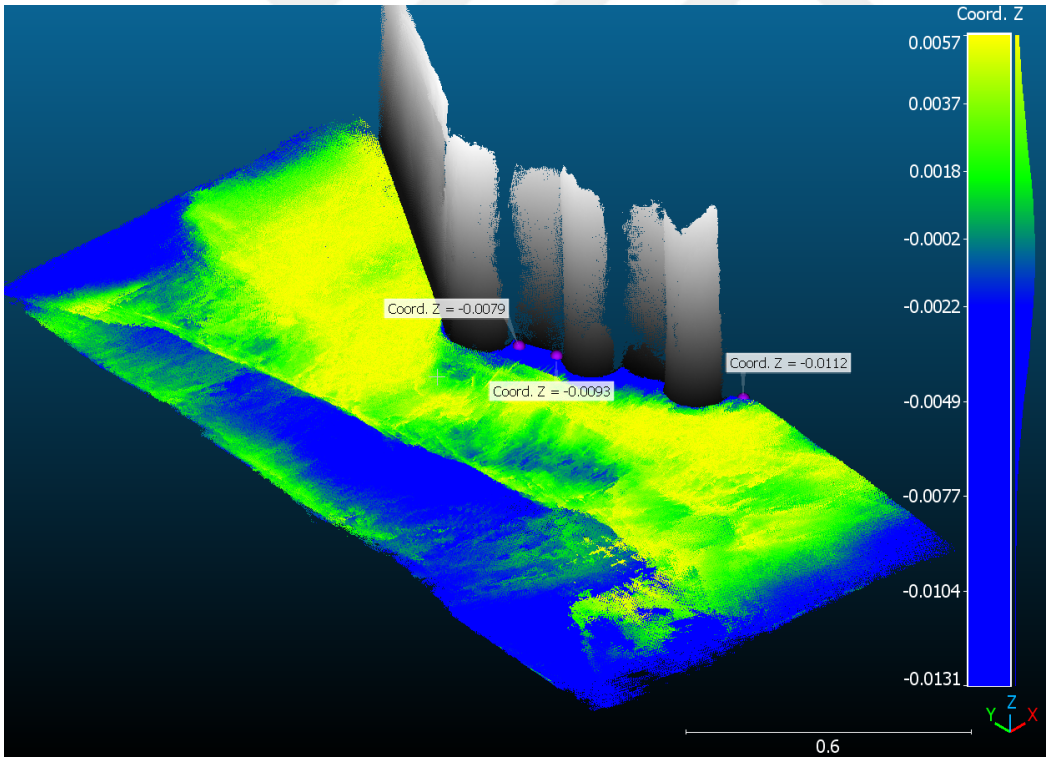
(b) Sf ölçeği

Şekil 69: Deney no: 23 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 69'de Deney No: 23'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 2.13$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 1.04$ cm oyulma ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.74$ cm dolma gözlemlenmiştir.



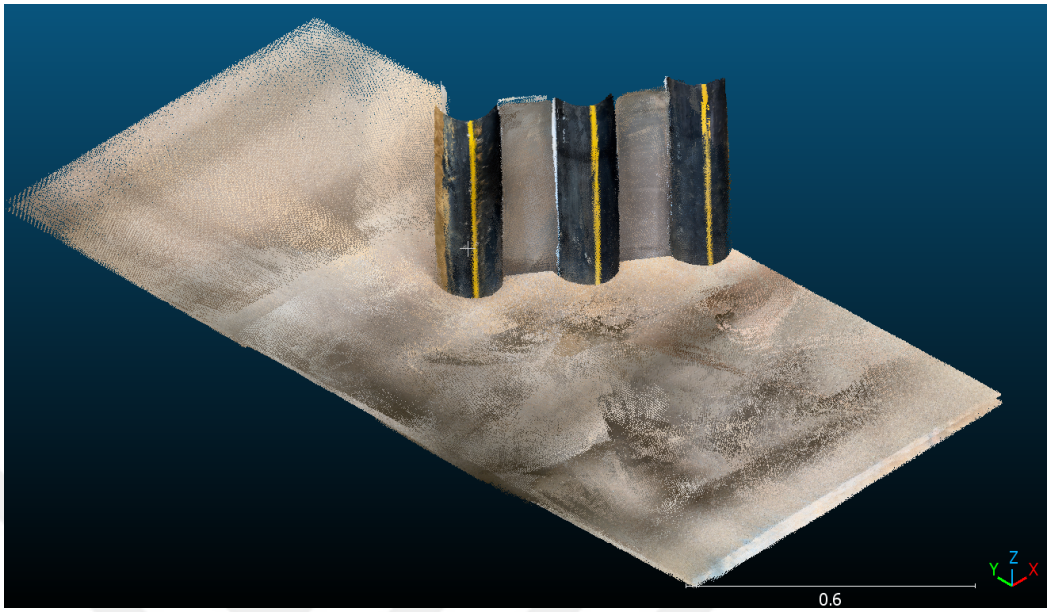
(a) RBG ölçeği



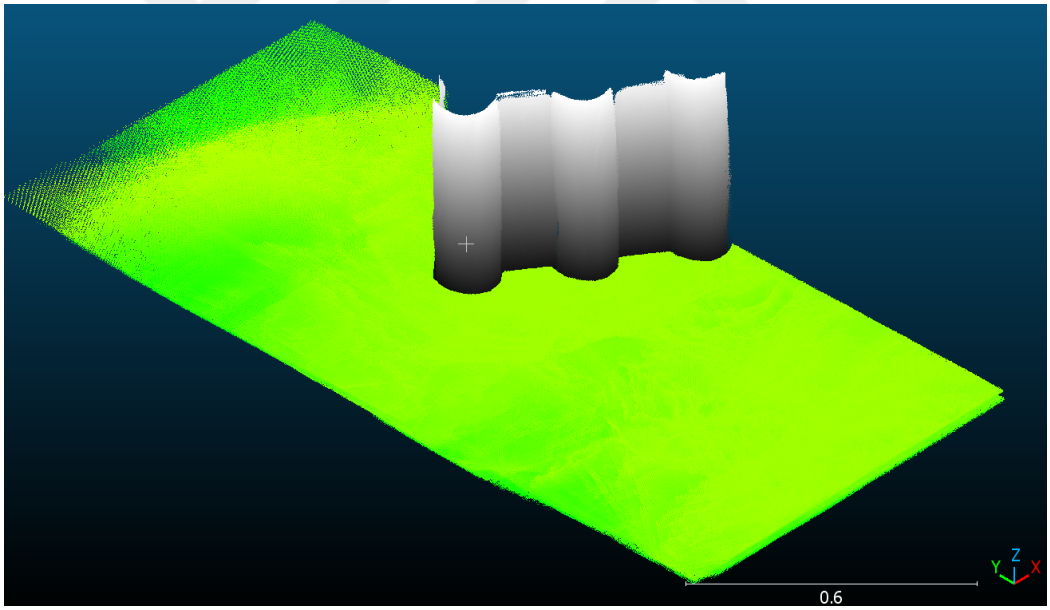
(b) Sf ölçeği

Şekil 70: Deney no: 24 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 70'de Deney No: 24'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği birinci kazık önünde $S_{max} = 1.12$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.93$ cm ve üçüncü kazık önünde ise $S = 0.79$ cm oyulma gözlemlenmiştir.

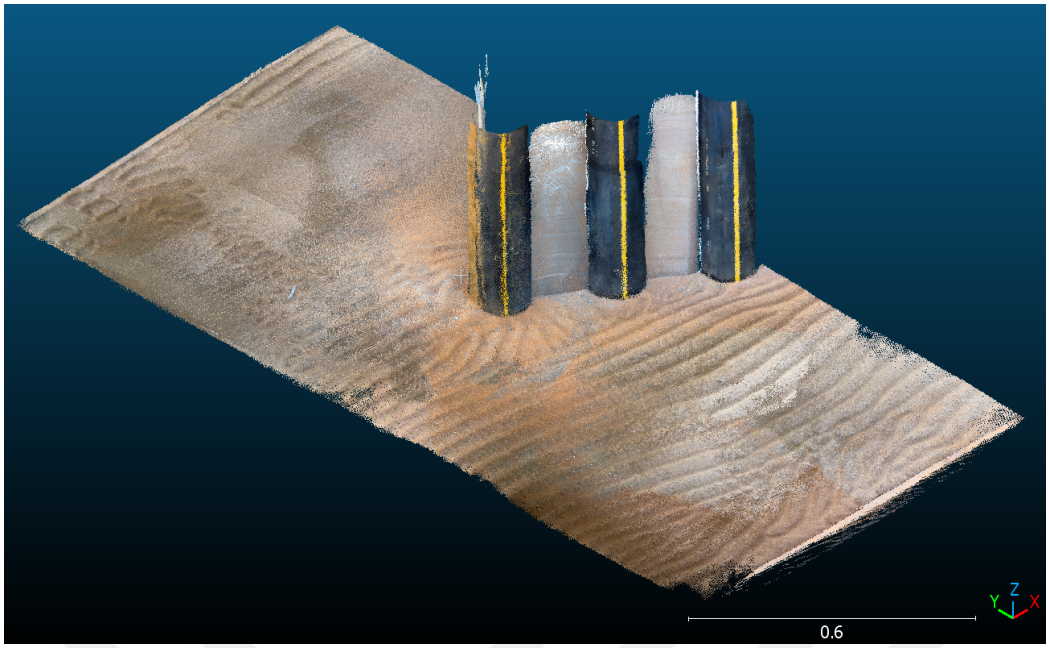


(a) RBG ölçeği

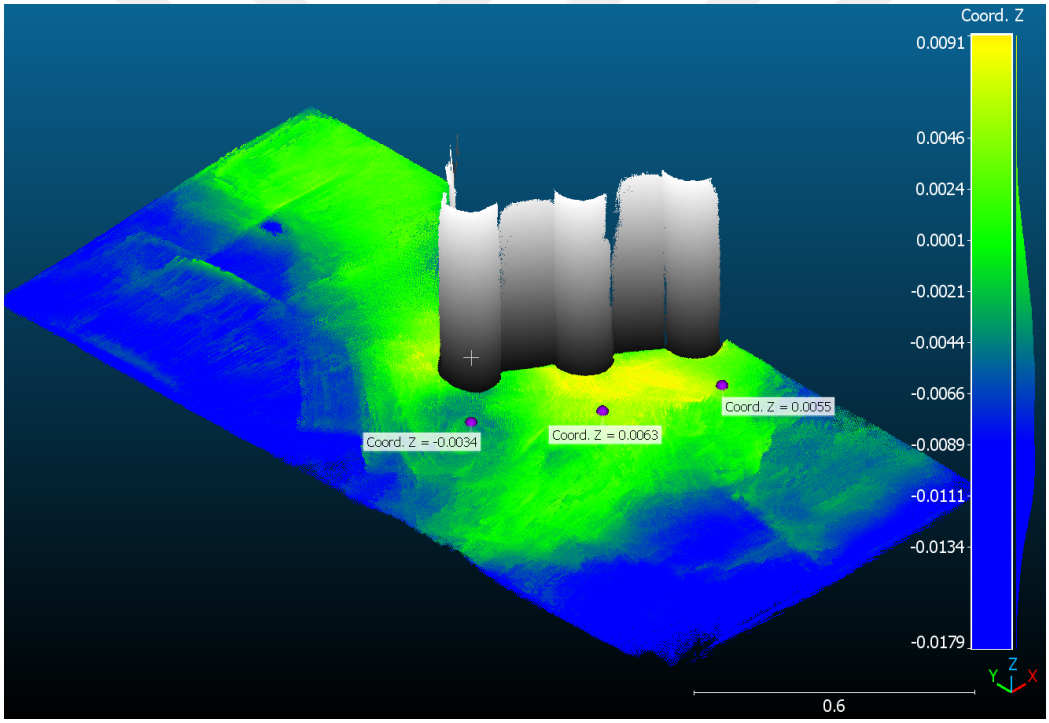


(b) Sf ölçeği

Şekil 71: Deney no: 25-26-27-28 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



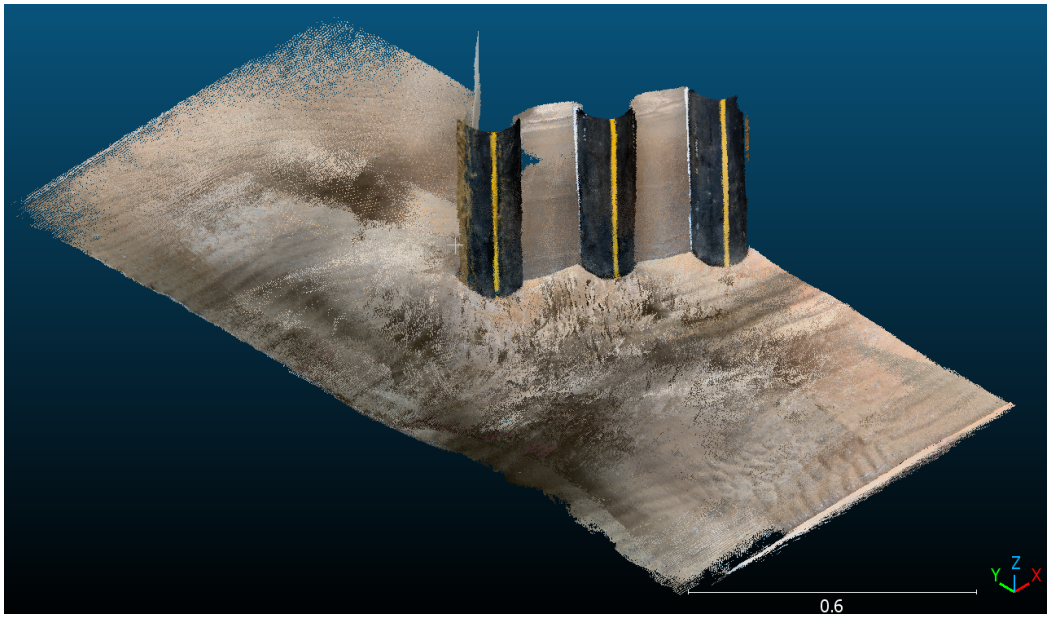
(a) RBG ölçeği



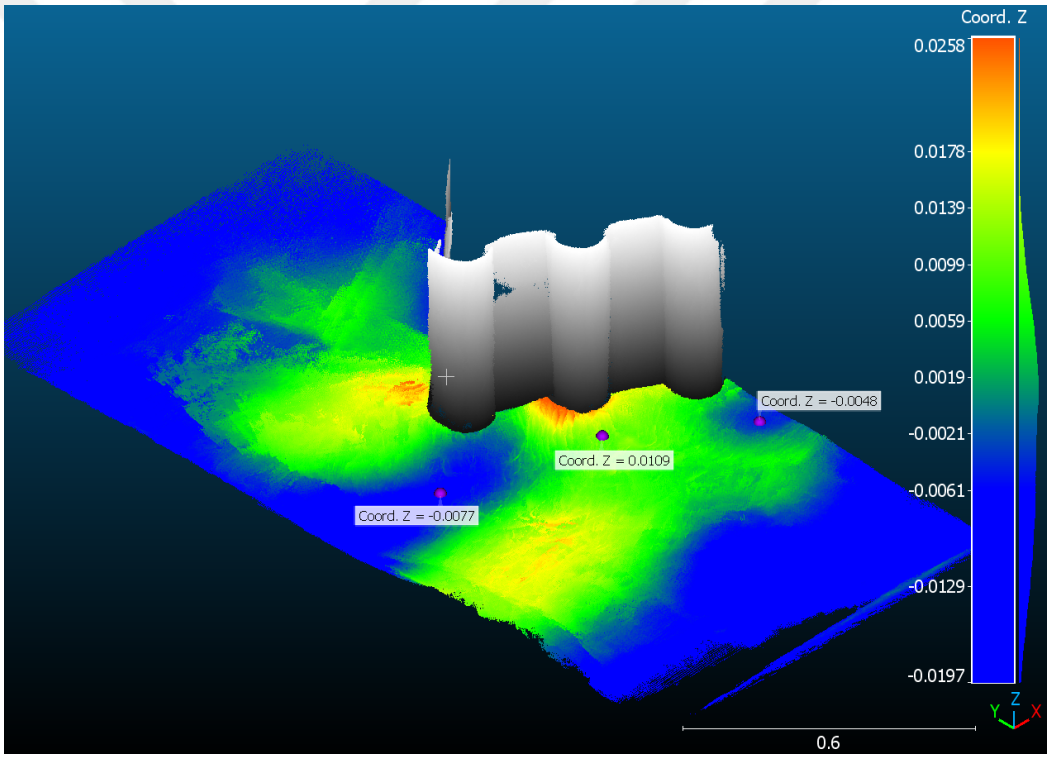
(b) Sf ölçeği

Şekil 72: Deney no: 25 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 72'de Deney No: 25'te yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.34$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.63$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 0.55$ cm dolma gözlemlenmiştir.



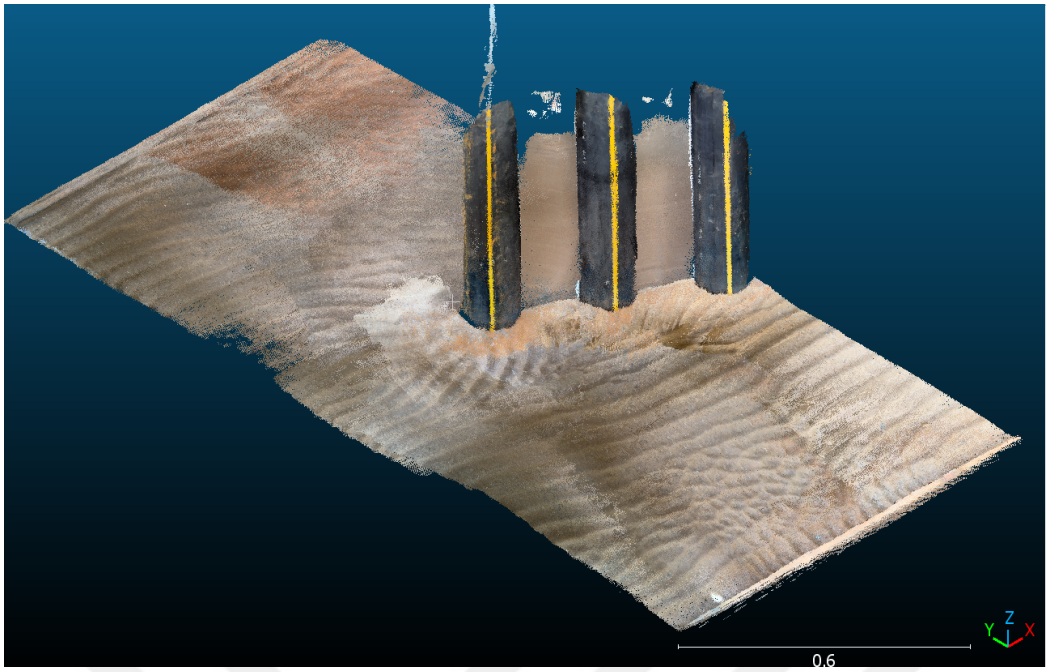
(a) RBG ölçeği



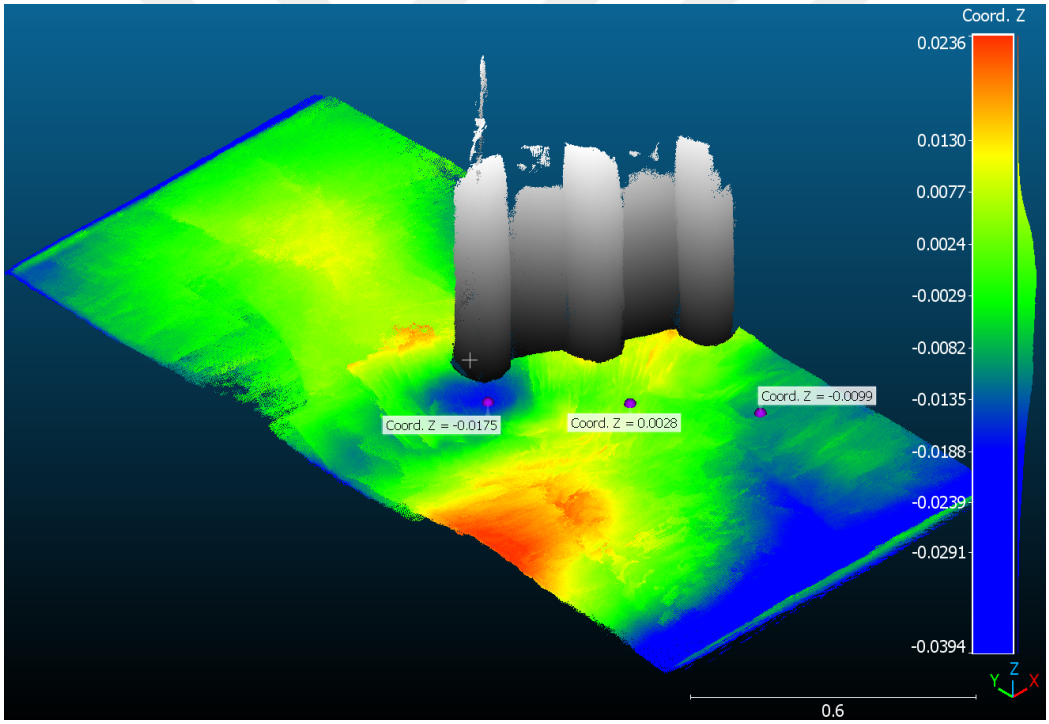
(b) Sf ölçeği

Şekil 73: Deney no: 26 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 73'de Deney No: 26'da yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 0.77$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 1.09$ cm dolma ve birinci kazık önünde ise $S = 0.48$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



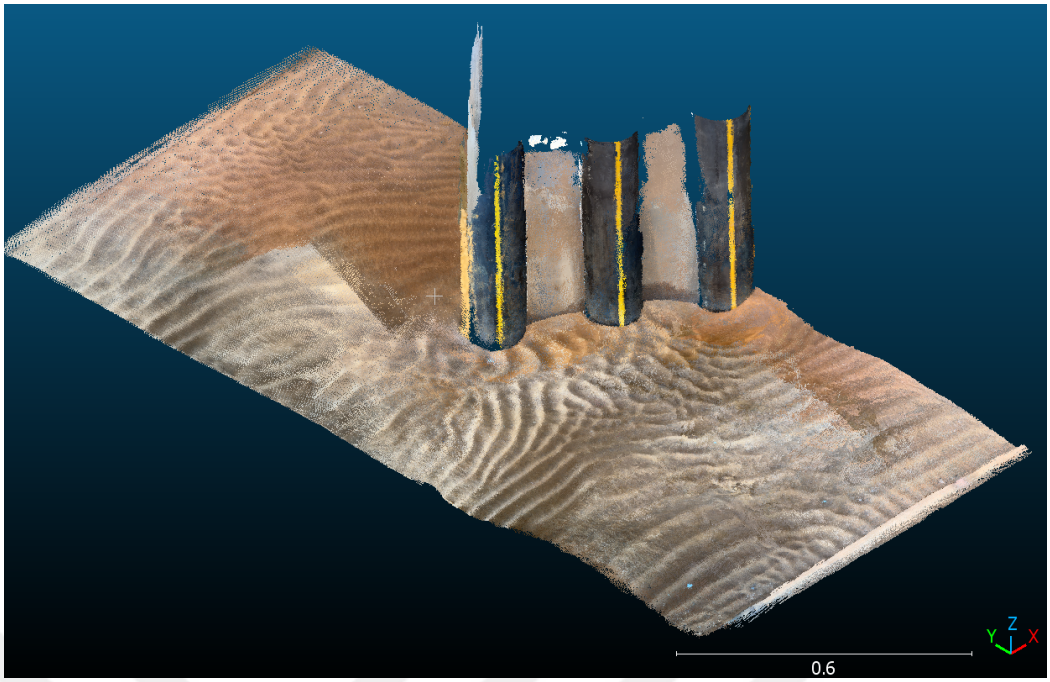
(a) RBG ölçeği



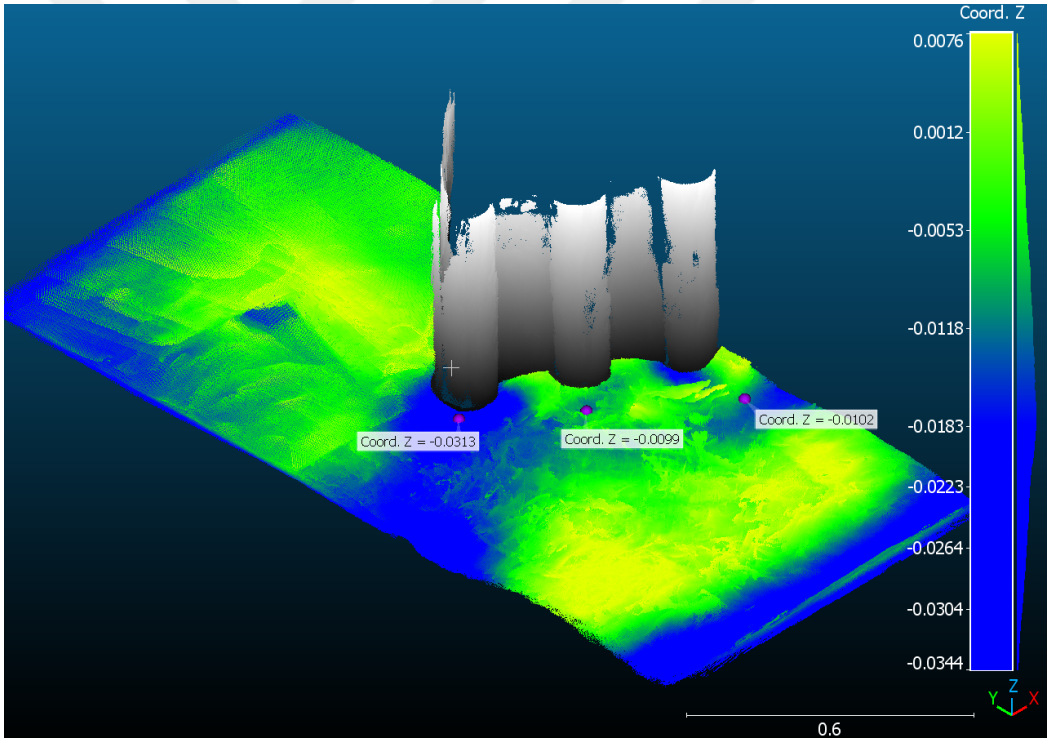
(b) Sf ölçeği

Şekil 74: Deney no: 27 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 74'de Deney No: 27'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 1.75$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.28$ cm dolma ve birinci kazık önünde ise $S = 0.99$ cm oyulma gözlemlenmiştir.



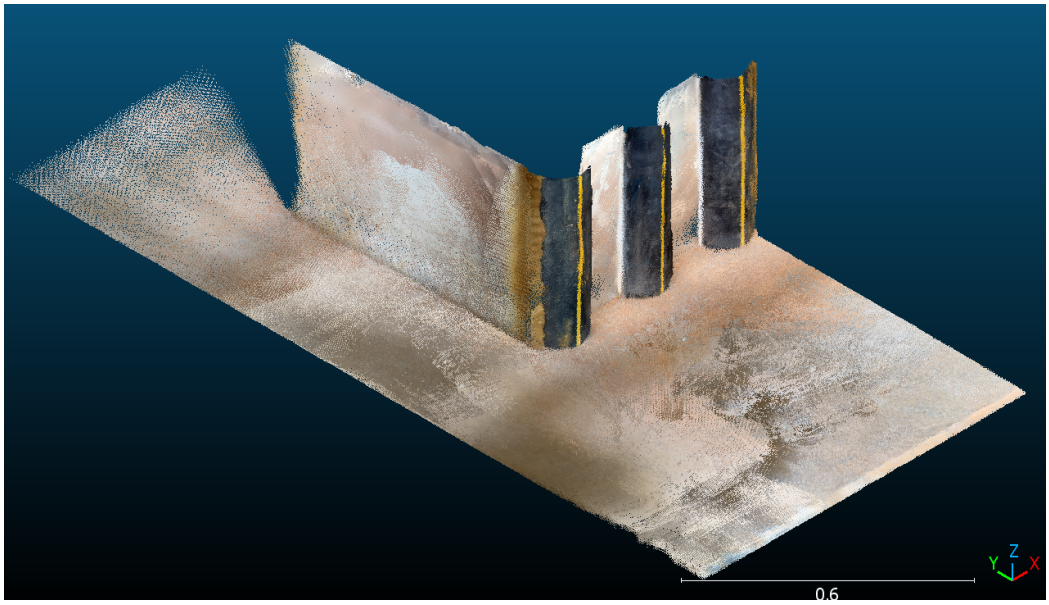
(a) RBG ölçeği



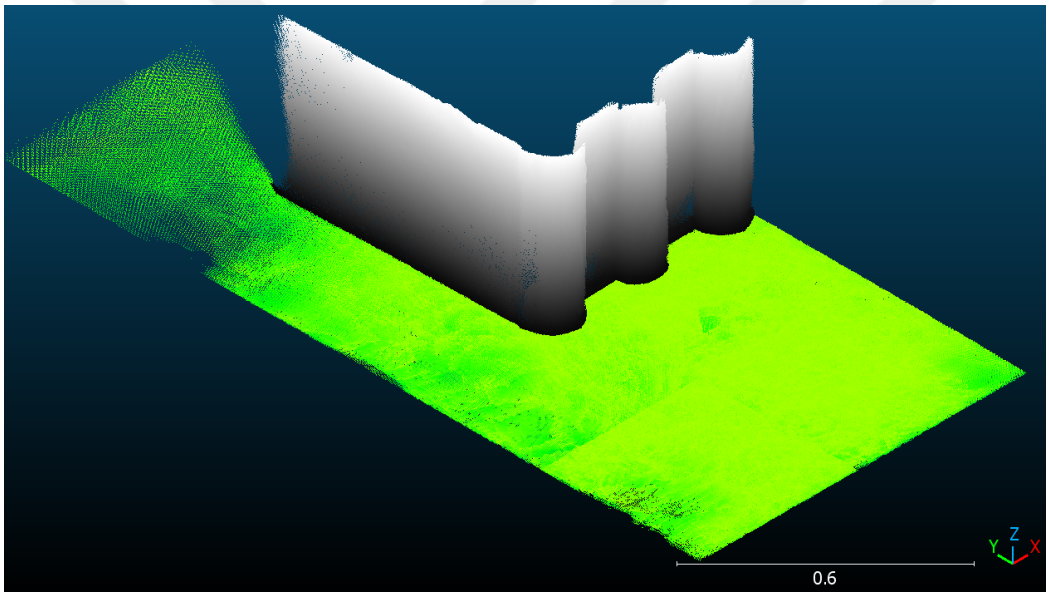
(b) Sf ölçeği

Şekil 75: Deney no: 28 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 75'de Deney No: 28'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 3.13$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.99$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 1.02$ cm oyulma gözlemlenmiştir.

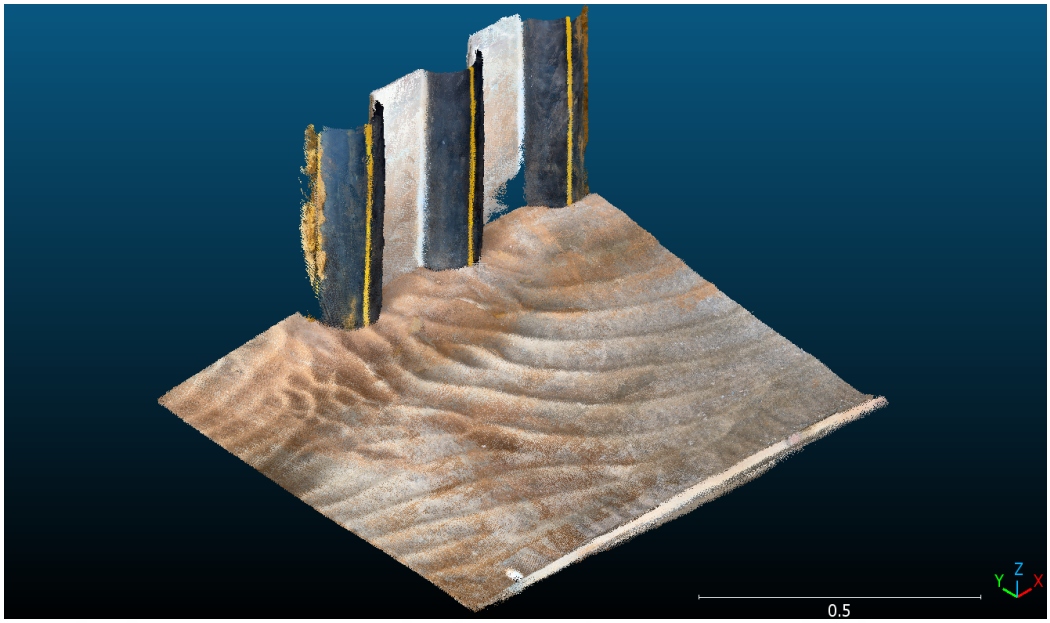


(a) RBG ölçeği

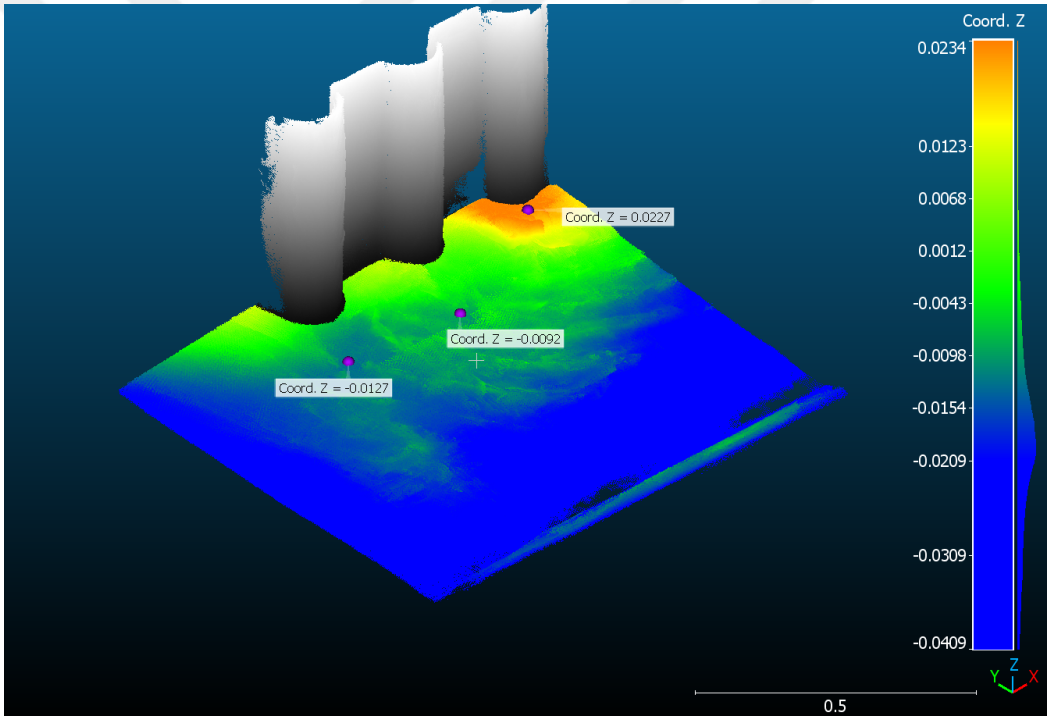


(b) Sf ölçeği

Şekil 76: Deney no: 29-30-31-32 için başlangıç Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.



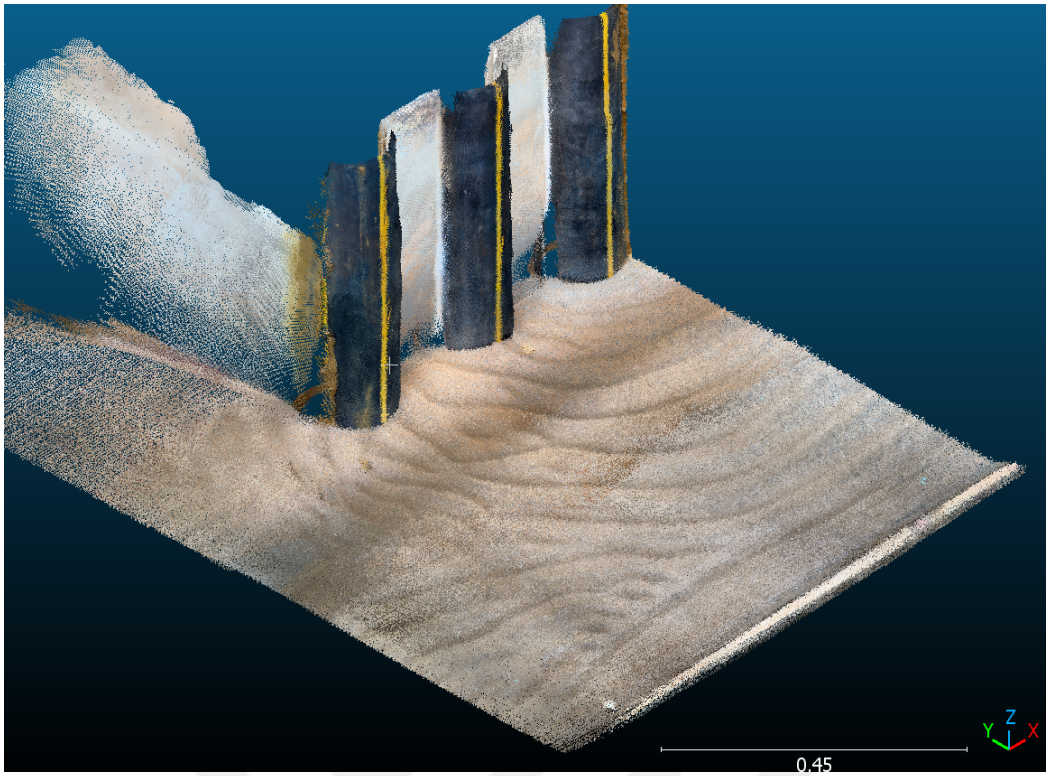
(a) RBG ölçeği



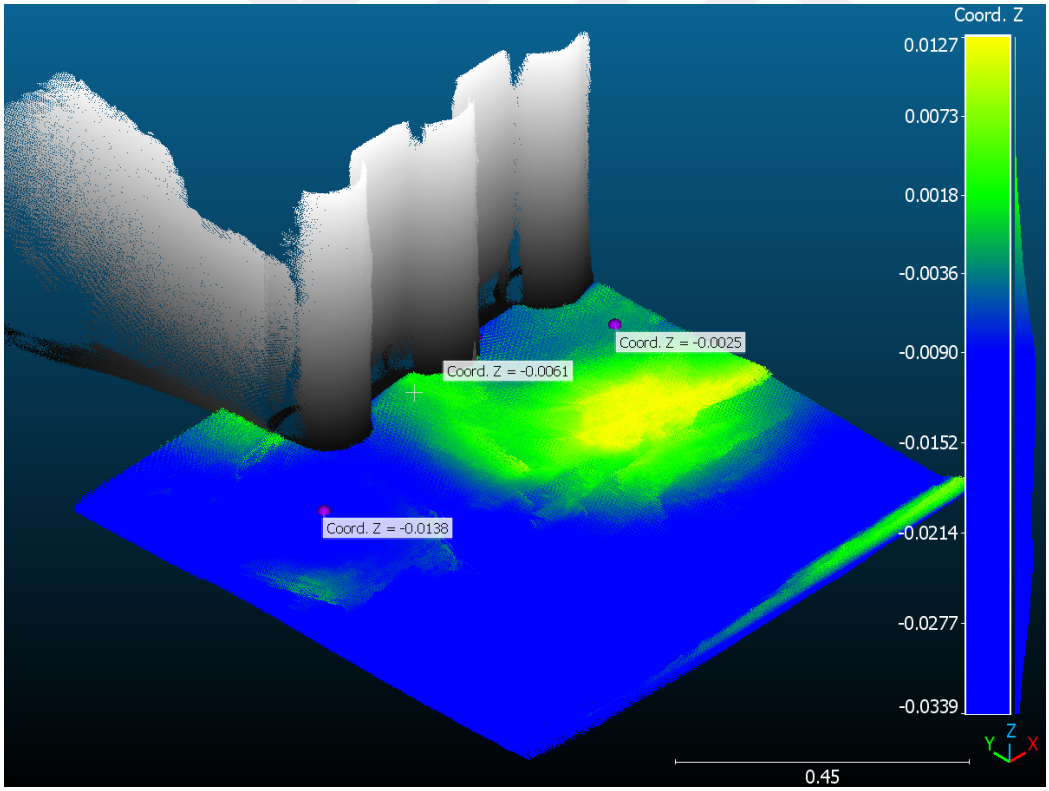
(b) Sf ölçeği

Şekil 77: Deney no: 31 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 77'de Deney No: 31'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 1.27$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.92$ cm oyulma ve birinci kazık önünde ise $S = 2.27$ cm dolma gözlemlenmiştir.



(a) RBG ölçeği



(b) Sf ölçeği

Şekil 78: Deney no: 32 için Lidar ile elde edilen yüzey batimetrik haritaları.

Şekil 78'de Deney No: 32'de yapılan lidar tarama sonuçlarına göre, maksimum oyulma derinliği üçüncü kazık önünde $S_{max} = 1.38$ cm olarak ölçülmüştür. İkinci kazık önünde $S = 0.61$ cm ve birinci kazık önünde ise $S = 0.25$ cm oyulma gözlemlenmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Ahmet Ferhat BASTEM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2021, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Y. Lisans:** 2025, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2023-2024 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda deneysel kıyı mühendisliği üzerine çalıştı.