

T.C.
AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
2021-YL-89

**PERVANE JET AKIMI ETKİSİNDE KİLLİ KARIŞIM
TABANDA MEYDANA GELEN EROZYON**

**Damla YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Ayşe YÜKSEL OZAN**

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 218M428 numaralı araştırma projesi ve Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 2018/074 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

AYDIN-2021

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1. Oyulma Mekanizması	5
2.2. Kohezyonsuz Zeminde Gerçekleşen Deneylerle İlgili Çalışmalar	8
2.2.1. Kohezyonsuz Zeminde Sınırlandırılmamış (Serbest Durum) Deney Çalışmaları	8
2.2.2. Kohezyonsuz Zeminde Sınırlandırılmış (Kazık Eşliğinde) Deney Çalışmaları	15
2.3. Kohezyon İçeren Tabanda Oyulma Mekanizması	21
2.3.1. Kohezyon İçeren Taban Özellikleri	21
2.3.2. Kohezyon İçeren Zeminde Oyulmayı Etkileyen Faktörler	24
2.3.2.1. Oyulmayı Etkileyen Fiziksel Özellikler	25
2.3.2.2. Oyulmayı Etkileyen Kimyasal Faktörler	28
2.3.2.3. Oyulmayı Etkileyen Biyolojik Faktörler	29
2.4. Kohezyon İçeren Zeminde Yapılan Deneysel Çalışmalar	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	40
3.1. Deney Düzenegi	40
3.2. Taban Malzemesi	41

3.2.1. Kohezyon İçermeyen Taban Malzemesi	41
3.2.2. Kohezyon İçeren Taban Malzemesi	42
3.3. Pervane Sistemi	43
3.3.1. Sistem Yapısı.....	44
3.3.1.1. Donanım	44
3.3.1.2. Yazılım	44
3.4. Pervane Özellikleri	45
3.5. Ölçüm Sistemi	50
3.6. Boyut Analizi.....	52
3.7. Deney Programı.....	55
3.8. Kil-kum Karışım Taban Hazırlama İşlemi	55
4. BULGULAR	56
4.1. Kohezyonsuz Tabana Ait Oyulma Deneyleri.....	56
4.2. Kum-Kil Karışımından Oluşan Tabana Ait Oyulma Deneyleri	62
4.2.1. %5 Oranında Koheziv Malzeme İçeren Kum-Kil Karışım Tabanda Oyulmanın İncelenmesi	62
4.2.2. %10 Oranında Koheziv Malzeme İçeren Kum-Kil Karışım Tabanda Oyulmanın İncelenmesi	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR.....	74
BİLİMSEL ETİK BEYANI.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Pervane disk alanı
A	: Kazıklar arasındaki mesafe
β	: Pervane kanat alanı oranı
C	: Pervane kanadının uç noktasının tabana olan uzaklığı
C_T	: Pervane itme katsayısı
D	: Kazık çapı
D_h	: Pervane göbek çapı
D_p	: Pervane çapı
d_a	: Karışım tabanın aritmetik ortalama boyutu
d_{16}	: Taban malzemesinin %16'ının geçtiği çap
d_{84}	: Taban malzemesinin %84'ünün geçtiği çap
d_{50}	: Medyan tane boyutu
d_0	: Jet çapı
$d_{s,t}$	: Zamana bağlı oyulma derinliği
E_0	:Pervane çıkış hızı katsayısı
ε_m	:İkiz pervaneler için t zamandaki max. oyulma derinliği
e	: Koheziv malzeme boşluk oranı
F_0	: Yoğunluk Froude sayısı
Fr^*	: Tane Froude sayısı
g	: Yerçekimi ivmesi
G	: Pervane açıklığı
H	: Su derinliği
k_1	: Katsayı

k_2	: Katsayı
k_3	: Katsayı
L_m	: Pervanenin karakteristik uzunluğu
n	: Pervane frekansı
N	:Pervane kanat sayısı
P_c	:Kil muhtevası
ρ	: Akışkanın özgül kütlesi
ρ_s	: Zemin özgül kütlesi
ρ_{kil}	: Kil özgül kütle
Re	: Reynold sayısı
Re^*	: Tane Reynolds sayısı
S_0	: Kazıkların membasında oluşan oyulma derin
S_d	: Kazığın mansabında oluşan oyulma derinliği
S_{max}	: Maksimum oyulma derinliği
t	: Zaman
τ_c	: Shieldsin kohezyonlu karışım zeminle aynı aritmetik ortalamaya sahip kohezyonsuz kritik kayma gerilmesi
τ_{kr}	: Kritik taban kayma gerilmesi
U_0	: Jet çıkış hızı
u^*_{kr}	: Kritik kayma hızı
ν	: Kinematik viskozite
X_i	: Etki mesafesi
θ	: Sedimentin şev açısı
X_s	: Temel oyulma çukuru uzunluğu
$X_{m,twin}$	: İkiz pervane bulunun durum için pervane ekseninden maksimum oyulma derinliğine olan yatay mesafe
W_c	: Su muhtevası

W_L	: Kil sıvı limiti
W_P	: Kil plastik limit
σ_g	: Tane geometrik standart sapma
$\Delta \gamma_s$	: Sedimanın ve akışın özgül ağırlığındaki fark
ADV	: Akustik Doppler Hız Ölçer
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BS	: Birleşik Krallık Ulusal Standartlar
FPP	: Sabit aralıklı Pervane
FHWA	: ABD Federal Karayolu İdaresi
LDV	: Lazer Doppler Hız Ölçer
LL	: Likit Limit
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot
PI	: Plastisite İndeksi
PL	: Plastik limit
TS	: Türk Standartı
UCS	: Serbest Basınç Dayanımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Shields Diyagramı (Bayazıt ve Avcı, 2010)	6
Şekil 2.2. Oyulma derinliğinin zamanla değişimi (Tsujimoto ve Mizukami, 1985).....	7
Şekil 2.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Hong vd., 2013).....	9
Şekil 2.4. (a) $D_p=10\text{cm}$, $G=10\text{cm}$, 745 rpm, (b) $D_p=6.5\text{cm}$, $G=10\text{cm}$, 745rpm.....	12
Şekil 2.5. İkiz pervaneler için oyulma süreçleri a)60s b)120s c)300s d)600s e)1200s f)1800s	14
Şekil 2.6. Bütün Tip Oyulma Profillerinin Bir Arada Gösterilmesi (Chin vd., 1996)	16
Şekil 2.7. $X_i \leq 2D$ için a) A-A kesiti b) plan görüntüsü.....	20
Şekil 2.8. Koheziv tortu mikro yapısının şematik gösterimi (Grabowski vd., 2011).....	21
Şekil 2.9. Oyulmayı etkileyen zemin özellikleri ve süreçler (Grabowski vd., 2011)	25
Şekil 2.10. Zemin Faz Diyagramı (Bozbey, 2016)	27
Şekil 2.11. Su muhtevasıyla değişen oyulma derinliği (Debnath ve Chaudhuri, 2010)	28
Şekil 2.12. Yatak malzemesini sıkıştırmak için kullanılan kanal genişliğine uyacak şekilde özel olarak üretilmiş silindir (Kothyari ve Jain, 2008)	32
Şekil 2.13. Başlangıç hareketinde gözlenen çukur erozyonu görüntüsü (Kothyari ve Jain, 2008)	33
Şekil 2.14. Başlangıç hareketinde gözlenen çizgi erozyonu görüntüsü a)test 53 b) test 44 (Kothyari ve Jain, 2008).....	34
Şekil 2.15. Başlangıç hareketinde gözlenen kütle erozyonu görüntüsü (Kothyari ve Jain, 2008)	35
Şekil 2.16. Gözlemlenen ve hesaplanan τ_{cc} / τ_c karşılaştırması (Kothyari ve Jain, 2008)...	36
Şekil 2.17. Erozyon kritik kayma gerilmesinin farklı tipteki koheziv materyale göre değişimi	37
Şekil 2.18. Farklı kaolinit/kum karışımlarında erozyon oranları	38
Şekil 3.1. Deney tankı görünümü.....	41

Şekil 3.2. Tane boyutu dağılımı (Hafızoğulları, 2019)	42
Şekil 3.3. Kil granülometre eğrişi	43
Şekil 3.4. Pervane sisteminin çalışma şeması	45
Şekil 3.5. Pervane kısımlarının genel görünümü (Güner vd., 1999).....	47
Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan pervane örneği (Maritime Models, 2013).....	47
Şekil 3.7. Wageningen B seri pervane için itme katsayısı, ilerleme katsayısı ve tork katsayısı arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler (Barnitsas vd., 1981).....	48
Şekil 3.8. İdeal bir aktüatör diski olarak pervane (Chadwick vd., 2005).....	49
Şekil 3.9. Örnekleme hacmi (Vectrino II, Manuel, 2019).....	51
Şekil 3.10. Vectrino II ADVP yazılımının ekran görüntüsü (Vectrino II, Manuel, 2019)....	52
Şekil 4.1. Denge Oyulma Profili Görünümü (Hong vd., 2013)	57
Şekil 4.2. 500,750 ve 1000 rpm için maksimum denge oyulma profilleri	58
Şekil 4.3. Hong vd. (2013) yöntemine göre hesaplanan ve ölçülen Smax değerlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 4.4. $G=0.06$ m ve 500 rpm için oyulma derinliklerinin zamansal gelişimi.....	60
Şekil 4.5. $G=0.06$ m için farklı rpm seviyelerinde denge oyulma çukurları	61
Şekil 4.6. Farklı rpm değerlerinde %5 kil içeren karışım taban deneyinde oluşan maksimum oyulma profilleri	63
Şekil 4.7. a) Kothyari ve Jain (2008) çalışmasında gözlenen b) Mevcut çalışmada gözlenen çukur erozyonu görüntüleri	64
Şekil 4.8. 750 rpm $G=0.06$ m ve $D_p=0.06$ m için tabana %5 kil eklenmesi durumunda gözlenen fark	65
Şekil 4.9. Maksimum oyulma derinliği eğimlerinin karşılaştırılması	66
Şekil 4.10. Farklı rpm değerlerinde %10 kil içeren karışım taban deneyinde oluşan maksimum oyulma profilleri	68
Şekil 4.11. 1000 rpm $G=0.06$ m için farklı kil yüzdelerinde oluşan oyulma alanı görüntüleri	69

Şekil 4.12. Farklı tabanlarda oluşan maksimum oyulma derinliği eğimlerinin karşılaştırılması

..... 70



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Deney şartları (Tan ve Yüksel, 2018).....	11
Tablo 2.2. Pervane özellikleri (Cui vd., 2019).....	13
Tablo 2.3. Deney 2 için Test Parametreleri (Chin vd., 1996).....	15
Tablo 2.4. Farklı standartlara göre tane boyutu sınıflandırma (Bozbey, 2016).....	22
Tablo 2.5. Kil minerallerine göre özgül yüzey ve kation değişim kapasitesi değer aralıkları (Kılıç, 2020)	22
Tablo 2.6. Kum, silt ve kil özelliklerinin karşılaştırılması (U.s. Dept. Of Agriculture, 1987)	23
Tablo 2.7. Zemin Türüne Göre Faz Geçiş Sınıflandırması (Kılıç,2020).....	24
Tablo 3.1. Kil özellikleri.....	43
Tablo 3.2. Pervane özellikleri	48
Tablo 3.3. Boyut analizi.....	53
Tablo 3.4. Değişken boyutları.....	53
Tablo 3.5. Boyutsuz büyüklüklerin üstel değerleri)	54
Tablo 3.6. Deney Programı.....	55
Tablo 4.1. Deney koşulları ve farklı taban malzemelerinde maksimum oyulma derinliği...	67
Tablo 4.2. Deney sonuç özeti.....	71

ÖZET

PERVANE JET AKIMI ETKİSİNDE KİLLİ KARIŞIM TABANDA MEYDANA GELEN EROZYON

Yılmaz D. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tezi, Aydın, 2021.

Amaç: Bu çalışmada, pervane jeti etkisinde deniz tabanında oluşan oyulma problemi kohezyon içeren karışım tabanda incelenmiş ve deney sonuçları kohezyonsuz tabanda oluşan oyulma derinlikleri ile karşılaştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem: Yapılan çalışmada 3,2 m uzunluğuna, 1,5 m genişliğine ve 1 m yüksekliğine sahip laboratuvar tankı inşa edilmiştir. Deniz tabanını benzeştirmek için kohezyon içermeyen kuvars kumu ve kohezyon içeren kaolinit kili kullanılmıştır. Deneyde pervane yüksekliği (G) ve pervane çapı (Dp) 0.06m olarak seçilmiştir. Deneylerde oyulma derinlikleri Akustik doppler hız ölçer (Acoustic Doppler Velocimeter-ADVP) ile ölçülmüştür.

Bulgular: Bu çalışma 3 ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak kohezyon içermeyen kum tabanda, sonrasında ise %5 ve %10 oranında kil içeren kil-kum karışım tabanda oyulma davranışı incelenmiştir. Deney sonunda sadece kumdan oluşan taban ile farklı yüzdelerde kil içeren karışım taban profilleri karşılaştırılmıştır. Kil oranı arttıkça oyulma derinliğinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç: Tabana farklı oranlarda kil eklenmesi halinde oyulma derinliği önemli ölçüde azalmıştır ve bazı durumlarda ikincil oyulma çukuru oluşmamıştır. Kum ile %10 kil içeren deneylerin oyulma derinliği arasında yaklaşık yarısı kadar azalma olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kil-kum karışım taban, Koheziv malzeme, Oyulma, Pervane jeti.

ABSTRACT

EROSION OCCURING ON THE CLAY MIXTURE BASE UNDER THE EFFECT OF PROPELLER JET FLOW

Yilmaz D. Aydın Adnan Menderes University, Graduate School of Natural and Applied Science,
Civil Engineering Program, Master's Thesis, Aydın, 2021.

Objective: In this study, the scour problem on the seabed under the effect of propeller jets was investigated at the cohesive base and the test results were compared with the scour depths on the cohesionless base.

Materials and Methods: In the study, a laboratory tank with a length of 3.2 m, a width of 1.5 m and a height of 1 m was constructed. Cohesionless quartz sand and cohesive kaolinite clay were used to simulate the seabed. In the experiment, the propeller height (G) and propeller diameter (Dp) were chosen as 0.06m. In the experiments, the scour depths were measured with an Acoustic Doppler Velocimeter (ADVP).

Results: This study consists of 3 main parts. Firstly, the scour behavior of the cohesionless sand base and then the clay-sand mixture base containing 5% and 10% clay were investigated. At the end of the experiment, only sand base and mixed base profiles containing different percentages of clay were compared. It was concluded that as the clay ratio increased, the scour depth decreased.

Conclusion: The scour depth was significantly reduced when different proportions of clay were added to the base, and in some cases no secondary scour was formed. It was determined that there was a decrease of approximately half the scour depth of the experiments containing sand and 10% clay

Key Words: Clay-sand mixture, Cohesive material, Propeller jet, Scouring.

1. GİRİŞ

Denizyolu ticaretinin en önemli halkası olan limanlar, mal ve yolcu aktarılmasını güvenli bir şekilde sağlayıp taşımacılık hacminin büyümesine ciddi katkılar sunan bir hizmet yeri olarak tanımlanmaktadır (Balık, 2014). Gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda gemi boyutlarının sürekli artması ve yüksek güce sahip motorların kullanılması ekonomik rekabet yönünden kaçınılmaz olmuştur. Gemi boyutlarının büyümesiyle birlikte yanaşma manevraları güçleşmektedir ve kullanılacak römorkör gücünün gemi kütlesiyle orantısız olması sonucunda birçok kaza meydana gelmektedir. Gerek ekonomik gerekse işletme açısından römorkör kullanımı azaltılıp yerine gemilerin yanaşma ve kalkış manevra kabiliyetini arttıran itici pervaneler kullanılmaya başlanmıştır (Arıkan vd., 2010).

Bu gelişmeyle birlikte çok sayıda iç deniz seyrüsefer kanalları, büyüyen gemi boyutlarından dolayı yeterli gereksinimi karşılayamamaktadır. Gemilerin ana ve bodoslama pervanelerinden çıkan akış hızındaki önemli artış, ciddi kıyı erozyonuna sebebiyet vermektedir. Konteyner ve ro-ro gibi büyük hacimli gemilerin taşımacılık alanında sağladıkları hız avantajına karşılık özellikle sığ sularda, körfezlerde ve dar kanal geçişlerinde oluşturdıkları izlerin kıyı yapılarında olumsuz etkileri gözlenmiştir. Gemilerin motor gücünün artması ve pervaneden çıkan türbülanslı jet akımdan ötürü yanaşma ve ayrılma bölgelerinde deniz tabanında katı madde hareketi gerçekleşmektedir. Bu katı madde hareketi yalnızca deniz tabanı erozyonuna sebep vermemekte ayrıca sürüklenme etkisiyle zeminde yığılmaları da meydana getirmektedir. Oluşan yığılmalar yanaşma bölgelerinin dengesini etkilemekte olup birçok limanda bu bölgelerdeki yanaşma ve ayrılma faaliyetlerinde geniş kapsamlı kısıtlamalara sebep olmaktadır. Deniz tabanı erozyonu sonucunda oluşan liman hasarlarının birçoğu geri döndürülemez derecede olup maddi olarak önemli ölçüde kayıplara neden olmaktadır. Liman tasarımı oldukça dikkate alınan bu hasarlar uluslararası mühendislik problemi haline gelmiştir (Balık, 2014). Limanlarda pervane jeti etkisinde meydana gelen oyulma derinliği tahmini son derece önemli olduğundan erozyon oluşumu ve alansal kapsamının eksik tahmin edilmesi, liman güvenliğini tehlikeye atacak ölçüde akışa maruz kalan sığ bir temel tasarımına neden olmaktadır. Oyulma derinliğinin fazla tahmin edilmesi ise ekonomik olmayan tasarıma sebebiyet vermektedir. Bu nedenle liman inşasının uygun bir şekilde tasarlanması için oluşabilecek maksimum oyulma derinliği bilgisi gerekmektedir. Birçok araştırmacı, oluşan mal ve can kaybının önüne geçebilmek adına

oyulma çukuru oluşumunu laboratuvar ortamlarında gözlemiş ve erozyon gelişimini etkileyen parametreleri araştırmaya başlamışlardır (Yüksel vd., 2005; Chin vd., 1996; Hamill vd., 1999). Pervane jetinden kaynaklanan yerel oyulma, başta akış ve zemin özellikleri olmak üzere çok sayıda değişkenden etkilenmektedir (Ansari vd., 2002).

Yapılan çalışmalarda pervane jeti etkisinde oluşan akım alanı kazık eşliğinde (sınırlandırılmış) ve kazık olmayan (sınırlandırılmamış) durumda incelenmiştir. Gemi pervanesi üç boyutlu türbülanslı ve oldukça karmaşık bir jet akım alanı yaratmaktadır (Çelikoğlu vd., 2011). Bu jet akım alanına bir kazık yerleştirildiğinde ise akım alanında sınırlandırılmamış duruma kıyasla daha karmaşık bir durum oluşmaktadır. Araştırmacılar bu değişimleri laboratuvar ortamında inceleyip oyulma alanı oluşumunun birçok parametreye bağlı olduğunu gözlemişlerdir. Oyulma alanının pervane çıkış hızına (U_0), pervane çapına (D_p), pervane ve taban arasındaki düşey mesafeye (G), pervane ile kazık arasındaki yatay mesafeye (X_i), tabanda bulunan tane çapına (d_{50}) ve daha birçok parametreye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir (Ansari vd., 2002).

Birçok araştırmacı tarafından kohezyonsuz zeminde yerel oyulmanın deneysel ve analitik araştırması yapılmış, konuyla ilgili kapsamlı literatür taramaları, çeşitli doktora çalışmaları ve araştırma raporları sunulmuş ve farklı akış koşullarında, farklı tane boyutlarında maksimum oyulma derinliğini tahmin etmek için bir dizi denklemler geliştirilmiştir (Jacobs vd., 2010; Ting vd., 2001). Fakat nehir yatakları, deniz tabanı gibi birçok su yapısının zemini genellikle kum, çakıl gibi kohezyonsuz malzemelerin yanı sıra kohezyon etkisi görülen tabanlardan oluşmaktadır (Jain ve Kothiyari, 2009). Örneğin, Britanya Kolumbiasında bulunan Britanya plajının tabanı ağırlıklı olarak kil ve çakıl karışımlarından oluşmaktadır (Bornhold ve Prior, 1989). Çoğu çalışmaların kohezyonsuz zeminlerle sınırlandırılmış olmasının sebebi kum ve çakıl gibi kohezyonsuz malzemenin fiziksel olarak hem karakterize edilmesi hem de modellenmesinin daha kolay olmasından kaynaklanmaktadır. Kohezyon içeren zeminlerde bulunan tanecikler arası güçlü çekimlerden dolayı oyulma mekanizmasını modellemek oldukça karmaşıktır (Molinas vd., 1999; Winterwerp vd., 2004). Dahası, araştırmacılar mevcut kil türlerinin, organik içerik, özgül kütle, sıcaklık ve pH dahil olmak üzere çok sayıda fizikokimyasal faktörün, kohezyonlu zeminlerin erozyona karşı direncini etkileyebileceğini gözlemişlerdir. Kilin içeriğindeki su muhtevası ve zemin konsolidasyon süresinin yanı sıra oyulmayı etkileyen birçok fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkin parametre bulunmaktadır. Oyulma sürecinin gözlenmesinde karmaşıklık yaratan bu maddeler sebebiyle araştırmacılara kohezyonlu malzeme ile çalışmak

zorluk yaratmaktadır. Pervane jetinin etkisiyle oluşan oyulma probleminde taban malzemesi olarak kohezyonlu malzeme kullanımının literatürde sınırlı örneği bulunmasından dolayı teorik bir temel henüz oluşmamıştır (Varol, 2015).

Kohezyon içeren malzemeler kullanılarak oyulma alanının sistematik olarak incelenmesi limanların hizmet ve tasarım ömrünü uzatmak için önemli bir adımdır. Bu nedenle kohezyonlu zeminde yer alan limanlarda sıkça karşılaşılan oyulma problemlerinin aydınlatılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada mevcut literatüre kıyasla pervane jet akım etkisinde gemilerin navigasyon kanal seyirlerinde kil-kum karışım taban kullanımının oyulma gelişimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Literatürde kil-kum karışım tabanlarda kilin kuru ağırlıkça kullanım oranının artmasıyla oyulma derinliğinde meydana gelen azalma dikkat çekilecek ölçüdedir (Ting vd., 2001; Mitchener ve Torfs, 1996; Grabowski, 2011; Najafzadeh ve Barani, 2014; Ansari vd., 2002; Varol, 2015). Bazı çalışmalarda kil içeriği artışının oyulma oranını yavaşlattığı fakat denge oyulma derinliğinin kohezyonsuz zemine kıyasla herhangi bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir (Ting vd., 2001). Deneylerin sonucunu etkileyen farklı kil yüzdeleri, su muhtevası, kritik kayma gerilmesi, nem içerikleri, organik bileşenler ve kullanılan kil cinsi gibi birçok değişkenden ötürü ortak bir sonuca varılması oldukça zor olmaktadır. Bu alanda yapılacak olan deney çalışmalarının çeşitlendirilmesi, mevcut literatürdeki kohezyonlu tabanda oluşan oyulma mekanizmasını anlamaya katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada, pervane jeti etkisiyle oluşan oyulma alanının kohezyonlu taban malzemesi kullanılarak pervane açıklığı (G), pervane dönüş hızı (rpm) ve karışım tabandaki kil oranı (P_c) gibi parametrelerin etkisiyle oyulma alanında gözlenen gelişimlerin aktarılması hedeflenmektedir.

Sunulan çalışmada her bölümün özeti aşağıda açıklanmıştır:

➤ 2. bölümde oyulma mekanizması oluşumu hakkında bilgi verilip mevcut literatürde kohezyonsuz zeminde sınırlanmış ve sınırlandırılmamış durumlardaki çalışmalar incelenmiştir. Oyulma alanına etki eden parametreler tanıtılarak oyulma gelişimi sonuçları aktarılmıştır. Ayrıca, kohezyon içeren tabanlarda yapılan deneylerde oyulma alanına etki eden parametrelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak ayrımı yapılmıştır. Literatürde kohezyonlu malzeme ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuş ve oyulma alanındaki gelişimler aktarılmıştır.

➤ 3. bölümde laboratuvar ortamı tanıtılmış, deney sisteminde kullanılan malzemeler ve deney sınır şartları sunulmuştur.

➤ 4. bölümde sınır şartları dahilinde yapılan deneylerin sonuçları aktarılmıştır. Kohezyonlu ve kohezyonsuz tabanda oluşan oyulma derinlikleri ve oyulma şeklinin karşılaştırılması verilmiş ve elde edilen veriler grafiklerle desteklenmiştir.

➤ 5. bölümde tez çalışması sürecinde ulaşılan sonuçlar sunulmuş ve ileride kohezyonlu tabanda gerçekleştirilecek deneyler için öneriler aktarılmıştır.



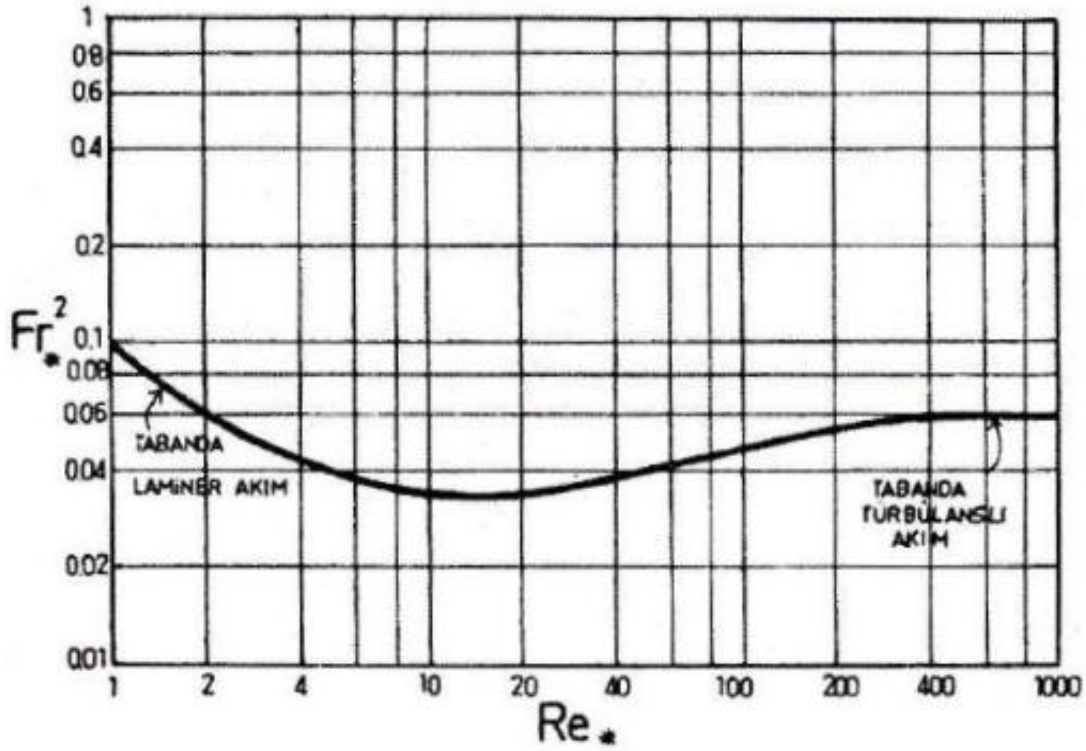
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Son yıllarda Dünya ticaretine ilişkin rakamlar doğrultusunda denizyolu taşımacılığına talebin giderek arttığı belirlenmiştir (Oğuz,2020). 15 yıllık süre boyunca 1987'ye kadar İsveç ve Finlandiya arasındaki feribot trafiğinde %500 artış bildirilmesi bunun bir örneğini göstermektedir. Artan ihtiyaçlarla beraber gemilerin yüksek hızda seyir yapabilmesi için daha yüksek motor kapasitesi ve manevra kabiliyetini kolaylaştıran itici pervaneler kullanılmaya başlanmıştır (Bergh ve Magnussen, 1987). Gemilerin motor gücünün artması ve pervaneden çıkan türbülanslı jet akımından ötürü yavaşma ve ayrılma bölgelerinde deniz tabanında katı madde hareketi gerçekleşmektedir. Bu katı madde hareketi deniz tabanı erozyonuna sebep olmakla birlikte oyulma alanı boyutlarının artmasıyla beraber sürüklenerek zemindeki yığılma bölgelerini de meydana getirmektedir. Deniz tabanında gerçekleşen erozyon oluşumunu etkileyen durumların incelenmesi mühendisler tarafından oldukça önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Araştırmacılar öncelikle oyulmanın başlaması için limit durumları incelemiş ve oyulma alanına etkiyen parametreleri laboratuvar deneylerinde test etmişlerdir. Elde ettikleri bilgilerden yola çıkarak bazı deneysel denklemler önermişlerdir. Her deneyde kullanılan sınır şartları farklılık gösterdiğinden çalışmaların daha iyi kavranabilmesi açısından öncelikle oyulma mekanizmasını detaylıca incelemek gerekmektedir.

2.1. Oyulma Mekanizması

Bir tanenin harekete geçmesi, taneye etki eden kuvvetlerin dengesinin bozulmasından kaynaklanmaktadır. Tabandaki denge durumunun bozulması dinamik kuvvetlere (sürtünme kuvveti, kaldırma kuvveti vb.) ve erozyona karşı koyan direnç kuvvetlerine (ağırlık vb.) bağlı olmaktadır. Sınır tabakası kayma gerilmesi ve akım özelliklerine bağlı olan kuvvetler erozyona sebep olan başlıca parametrelerdir. Akışkan hareketi sırasında tane yüzeylerinde kayma gerilmesi oluşmaktadır ve tanenin harekete başlama durumu akımın tabanda oluşturduğu kayma gerilmesinin, kritik kayma gerilmesini aşmasıyla meydana gelmektedir. Katı madde hareketi başladığında artık akım çift fazlı aşamaya geçtiğinden akım alanını incelemek oldukça zorlaşmaktadır (Yüksel, 2014). Araştırmacılar tabanda oluşan ilk

hareketin tespiti için çeşitli deneysel çalışmalar yapmış ve bazı yöntemler geliştirmişlerdir fakat içlerinden en yaygını 1936'da geliştirilen ve günümüzde de yararlanmaya devam edilen Shields diyagramıdır (Şekil 2.1).



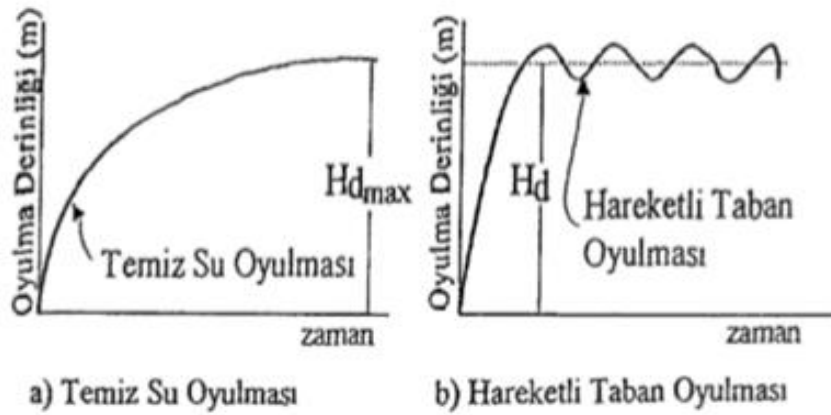
Şekil 2.1. Shields Diyagramı (Bayazıt ve Avcı, 2010)

Şekil 2.1’de gösterilen diyagramda hareketin başlangıcı olarak tane Reynolds sayısı (Re_*) ve tane Froude sayısı (Fr_*) esas alınmaktadır (Shields, 1936). Shields eğrisinde, tane hareket durumunu incelerken eğrinin üstündeki alanda hareketin olduğu, altındaki alanda ise hareketin olmadığı ifade edilmiştir. Kararlı akımda kum taneleri üzerine etkiyen kuvvetler arasındaki dengenin yorumu Shields tarafından Denklem (2.1)’de ifade edilmiştir (Yüksel, 2005):

$$\psi = \frac{\tau_{kr}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} = \frac{u_{*kr}^2}{\Delta g d_{50}} = f\left(\frac{u_{*kr} d_{50}}{\nu}\right) = f(Re_*) \quad (2.1)$$

Bu denklemde τ_{kr} , kritik taban kayma gerilmesi; ρ , suyun özgül kütlesi; ρ_s , zemin özgül kütlesi; g , yerçekimi ivmesi; d_{50} , tane çapı; ν , kinematik viskozite u_{*kr} kritik kayma hızı olarak tanımlanmıştır.

Oyulma alanı etrafında türbülansın etkisiyle çevrintiler meydana gelmektedir. Çevrinti sistemlerinin oluşumu birçok parametreye bağlı olarak gelişmektedir. Bu parametrelerin çeşitliliği oyulma mekanizmasını araştırmada büyük önem arz etmektedir. Oyulma derinliği incelemesinde kohezyonsuz zeminde yerel oyulma, temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Temiz su oyulması yukarı akıştan gelen sürüntü malzemesinin oyulma çukuruna aktarılmadığı durumlarda meydana gelmektedir. Bu durum temiz su oyulmasında denge durumuna ulaşılan kadar oyulma derinliğinin yavaş bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Hareketli taban oyulmasında ise sürüntü malzemesi sürekli olarak oyulma çukuruna iletilmektedir ve girdapın akış hızı ve gücü zemin kayma mukavemetine göre çok büyük olduğundan oyulma çukuru daha hızlı gelişmektedir. Ayrıca hareketli taban oyulmasının özelliklerinden biri de birincil oyulma derinliğinin denge oyulma derinliği değeri etrafında salınımlar göstermesidir. Şekil 2.2’de oyulma derinliğinin temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması durumunda zamansal değişimi verilmiştir (Ansari vd., 2002).



Şekil 2.2. Oyulma derinliğinin zamanla değişimi (Tsujimoto ve Mizukami, 1985)

Pervane jetinin neden olduğu oyulma problemi 2 ana grupta incelenecek olursa bunlardan ilki kohezyonsuz tabanda yapılan sınırlandırılmış (kazık eşliğinde) ve sınırlandırılmamış (serbest jet) durumlardaki deney çalışmaları, ikincisi ise kohezyon içeren karışım tabanda gerçekleştirilen deney çalışmalarıdır. Bölüm 2.2’de kohezyon içermeyen tabanda sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış durumlarda mevcut literatürdeki birtakım deney çalışmalarından bahsedilecektir. Bölüm 2.3’te kohezyon içeren taban malzemesi

özellikleri ve oyulma sürecine etki eden faktörlerden bahsedilecektir. Daha sonrasında literatürdeki çalışmaların sınır şartları dahilinde deney sonuçları irdelenecektir.

2.2. Kohezyonsuz Zeminde Gerçekleşen Deneylerle İlgili Çalışmalar

Deneylerde tabana serilen malzemeler genellikle uniform değildir ve bu durum oyulma profilini oluşturan taban malzemesinde belli bir sınıflandırmayı oluşturmaktadır. Taban malzemesi olarak kum kullanan araştırmacılar deneylerini 0.063-2 mm aralığındaki tane boyutlarını kullanarak oyulmanın kohezyonsuz zemin üzerindeki oluşumunu gözlemişlerdir.

2.2.1. Kohezyonsuz Zeminde Sınırlandırılmamış (Serbest Durum) Deney Çalışmaları

Hong vd. (2013) yaptığı çalışmada, asimptotik koşuldaki oyulma profilinin 3 aşamadan meydana geldiği belirtilmiş ve bazı etkin parametrelere göre oyulma çukuru aşamaları gösterilmiştir. Bu aşamalar (1) pervanenin altında küçük bir oyulma çukuru, (2) küçük oyulma çukurunun mansabında temel oyulma çukuru ve (3) temel oyulma çukurunun mansabında bir biriktirme tepesinden meydana gelmektedir (Şekil 2.3). Pervane jetinin neden olduğu zamana bağlı maksimum oyulma derinliği, yoğunluk Froude sayısı (F_0), pervane açıklığı (G) ve taban malzemesi boyutu (d_{50}) ile yakından ilişkilendirilmektedir. Çalışma, maksimum oyulma derinliğinin gelişimini tanımlamak için deneysel verilerle iyi bir uyum gösteren yarı-deneysel bir formül önermektedir. Bu çalışmanın amacı, pervane jetinin neden olduğu akım nedeniyle kohezyonsuz taban malzemesinin kullanıldığı oyulma profili gelişimini araştırmaktır.

Çalışmalar 1.8 m genişliğinde, 4 m uzunluğunda ve 1 m derinliğinde bir laboratuvar tankında gerçekleştirilmiştir. Kanalin içine 0.25 m derinliğinde, 1.8 m uzunluğunda ve 1.2 m genişliğinde taban malzemesi serilmiştir. Deneyde farklı çaplarda ($D_p = 10$ ve 21 cm) iki pervane ve iki farklı ortalama tane büyüklüğünde ($d_{50} = 0.24$ ve 0.34 mm) taban malzemesi kullanılmıştır. Üç farklı pervane açıklık oranı (G / D_p) ve dakikadaki devir (rpm) cinsinden altı farklı pervane dönüş hızı test edilmiştir. Oyulma çukuru, her testin başlamasından itibaren her 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 ve 64 saatte ölçülmüştür.

$$(d_{s,t})/D_p = k_1 [\log_{10}(U_0/D_p) - k_2]^{k_3} \quad (2.2)$$

$$k_1 = 0.014 F_0^{1.120} (G/D_p)^{-1.740} (G/d_{50})^{-0.170} \quad (2.3)$$

$$k_2 = 1.882 F_0^{-0.009} (G/D_p)^{2.302} (G/d_{50})^{-0.441} \quad (2.4)$$

$$k_3 = 2.477 F_0^{-0.073} (G/D_p)^{0.53} (G/d_{50})^{-0.045} \quad (2.5)$$

Burada $d_{s,t}$ zamana bağlı oyulma derinliğini, D_p pervane çapını, F_0 froude sayısını, G pervane yüksekliğini, d_{50} medyan tane boyutunu, U_0 pervane çıkış hızını ve G/d_0 açıklık oranını göstermektedir.

Tan ve Yüksel (2018) çalışmasında, gemi pervanelerinden çıkan jet akımından dolayı limanlarda oluşan oyulma ve yığılma etkisi incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı çaplarda kohezyonsuz malzemeye sahip tabanlar üzerinde pervane jeti etkisinde oluşan oyulmanın incelenmesini kapsamaktadır. Çalışmada değişen pervane açıklığı, pervane çapı ve pervane hızları kullanılarak kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Pervane jetinin meydana getirdiği oyulma çukuru boyutları dikkate alınarak oyulmanın gerçekleşmesi için limit durum incelenmiştir. Deneylerde üç farklı pervane, deniz tabanından farklı açıklıklarda yerleştirilmiş ve değişen pervane hızlarında deniz tabanındaki oyulmanın gelişimi belirlenmiştir. Deneylerde farklı taban malzemeleri için yoğunluk Froude sayısının $1.89 \leq F_0 \leq 15.01$ aralığında oyulma profilleri incelenmiştir. Bu çalışmada taban malzemesi ince kumdan kaba kum aralığına ($d_{50} = 0,52$ mm, 1,28 mm, 4,0 mm, 8,30 mm) kadar genişletilmiş ve Froude sayısı aralığı önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada pervane jet akımlarından kaynaklanan oyulmayı belirlemek için yeni formüller önerilmiştir.

Deneyler 0,2 m derinliğine, 1,56 m uzunluğuna ve 1,42 m genişliğine sahip bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde her pervane modeli 590, 670 ve 745 rpm olmak üzere üç farklı dönüş hızında çalıştırılmıştır. Pervaneler tabandan $G = 10, 15$ ve 20 cm açıklıklarda yerleştirilmiştir. Böylece tabandan olan açıklığın ve pervane hızının etkisi araştırılmıştır. Kum tabana farklı taban malzemeleri serilerek pervane jetinin meydana getirdiği oyulma gelişimi detaylı olarak incelenmiştir.

Çalışmada pervane çapları için olan ölçek 1:15 olarak dikkate alınmışlardır. Böylece, 6.5 cm, 10 cm ve 13 cm çaplarındaki pervaneler 590, 670, 745 rpm dönme hızlarına ayarlanmış sırasıyla 1.0 m, 1.5 m ve 2 m pervanelere karşılık gelen modelde kullanılmıştır.

Çalışmadaki deney şartları Tablo 2.2’de özetlenmiştir:

Tablo 2.1. Deney şartları (Tan ve Yüksel, 2018)

Medyan çapı (d_{50} ,mm)	Açıklık (G,cm)	Pervane hızı (Rpm)	Pervane çapı (D_p ,cm)	Yoğunluk Froude sayısı (F_0)	Akım reynolds sayısı ($Re_f \cdot 10^4$)	Pervane Reynolds sayısı ($Re_p \cdot 10^4$)
0.52	10/15/20	590/670/745	6.5/10	7.73-15.01	4.61-13.77	1.28-3.79
1.28	10	590/670/745	6.5/10/13	4.99-12.59	4.61-23.27	1.28-6.46
4.00	10	590/670/745	6.5/10/13	2.79-7.06	4.61-23.27	1.28-6.46
8.30	10/15/20	590/670/745	6.5/10/13	1.89-4.87	4.61-23.27	1.28-6.46

Bu çalışmada kullanılan pervanelerin geometrik özellikleri dikkate alınarak bir geminin manevra koşulları için Denklem (2.6) geliştirilmiştir. Bu Denklem dört kanatlı Wageningen B serisi $D_p = 6.5$ cm, 10 cm ve 13 cm pervane pervaneleri için türetilmiştir.

$$U_0 = 1,42nD_p\sqrt{C_T} \quad (2.6)$$

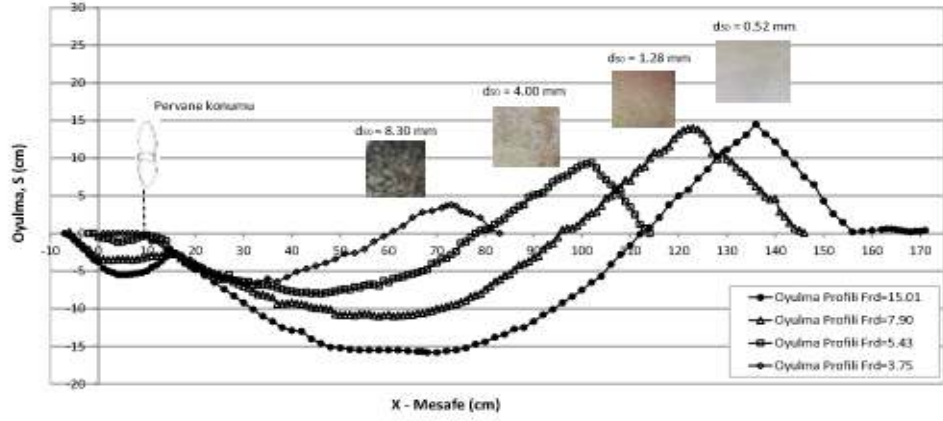
Burada U_0 akış hızıdır, n pervane hızıdır (rpm), D_p pervane çapıdır, C_T itme katsayısıdır.

Hong vd. (2013) çalışmasında, farklı tabanlar üzerinde farklı pervane çapı, pervane hızı ve açıklık için oluşan oyulma profilleri oyulma başlangıcı için kritik yoğunluk Froude sayısı (Fr_{dc}) $5.55 \leq F_0 \leq 11.1$ ve $0.5 < G/D_p < 2.87$ limitleri içinde gerçekleştirirken mevcut çalışmada yapılan deneylerde ise daha geniş aralıktaki ($1.89 \leq F_0 \leq 15.01$ ve $0.77 \leq G/D_p \leq 3.08$) veriler kullanılmıştır. Böylece Hong vd. (2013) tarafından tanımlanan sınır $1.89 \leq F_0 \leq 15.01$ çalışma aralığını kapsayacak şekilde sola kaydırılmıştır. Böylece daha geniş bir veri kümesi içindeki kritik koşulların dikkate alınmasıyla kullanılabilecek F_0 ve pervane açıklık oranı (G/D_p) için bir denklem önerilmiştir.

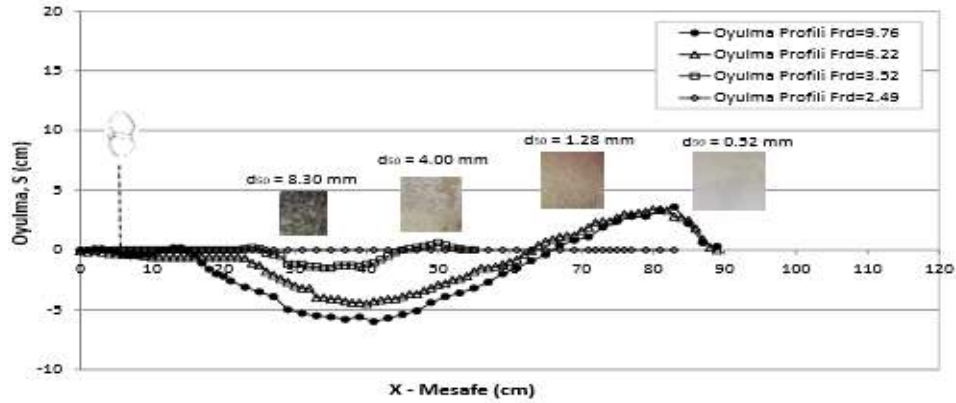
Pervane jetinin neden olduğu oyulmanın başlangıcı için kritik eğri $1.89 \leq F_0 \leq 15.01$ aralığı kapsamında Denklem (2.7) önerilmiştir.

$$3.08 \geq \frac{G}{D_p} \geq 0.77 \text{ için } Fr_{dc} = 2.1 \frac{G}{D_p} \quad (2.7)$$

Çalışmadaki bir diğer önemli parametre ise taban malzemesi medyan çapının değişimidir. Şekil 2.4’te görüldüğü gibi taban malzemesi medyan çapı arttığında oyulma miktarı azalırken, çapı küçük olan malzeme üzerinde oyulma miktarı artmaktadır.



(a) $D_p = 10$ cm, $G = 10$ cm, 745 rpm



(b) $D_p = 6.5$ cm, $G = 10$ cm, 745 rpm

Şekil 2.4. (a) $D_p=10$ cm, $G=10$ cm, 745 rpm, (b) $D_p=6.5$ cm, $G=10$ cm, 745rpm

Hong vd. (2013) çalışmasında pervane akımının neden olduğu zamana bağlı oyulma derinliğinin tahmini için aşağıdaki boyutsuz denklemi vermekte ve mevcut çalışma düzenleme yaparak ölçülen ve öngörülen değerler arasında Hong vd. (2013) makalesine kıyasla daha fazla tutarlılık elde ettiği belirtilmektedir:

$$\frac{s_{max}}{D_p} = k_1 \left[\log_{10} \left(\frac{U_0 t}{D_p} \right) - k_2 \right] k_3 \quad (2.8)$$

$$k_1 = 0.042 F_0^{1.12} \left(\frac{G}{D_p} \right)^{-0.4} \left(\frac{G}{d_{50}} \right)^{-0.17} \quad (2.9)$$

$$k_2 = 1.882 F_0^{-0.009} \left(\frac{G}{D_p} \right)^{2.302} \left(\frac{G}{d_{50}} \right)^{-0.441} \quad (2.10)$$

$$k_3 = 2.447 F_0^{-0.073} \left(\frac{G}{D_p} \right)^{0.53} \left(\frac{G}{d_{50}} \right)^{-0.045} \quad (2.11)$$

Burada S_{max} maksimum oyulma derinliğini (cm), U_0 akış hızını (cm/s), D_p pervane çapını (cm), F_0 yoğunluk Froude sayısını, d_{50} taban malzemesi medyan tane boyutu (cm), G pervane açıklığını (cm) ve t zamanı (s) temsil etmektedir.

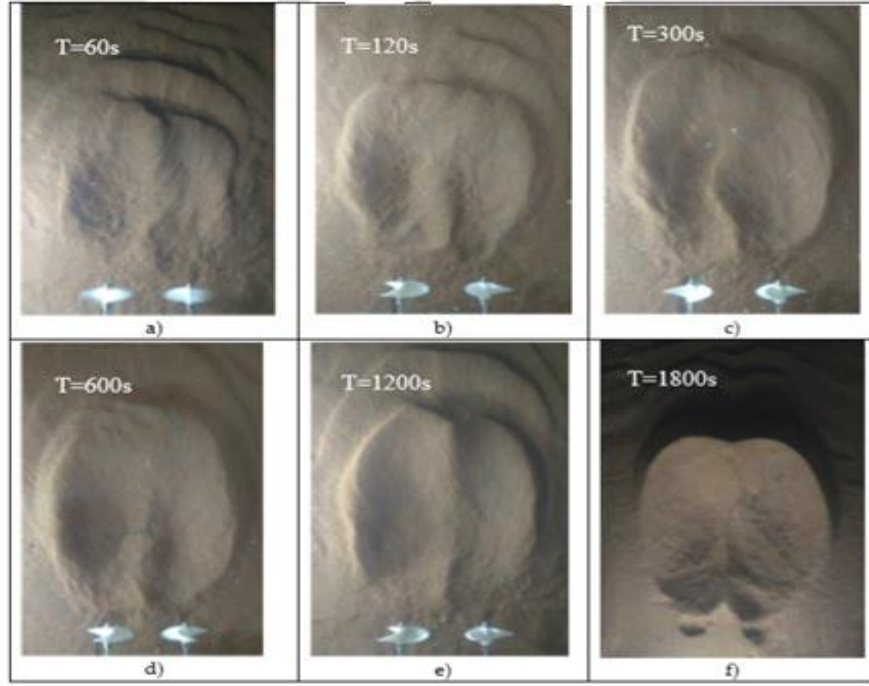
Cui vd. (2019) yaptığı çalışmada, tek ve çift pervane kullanılarak oyulma profilindeki gelişimler incelenmiştir. Deneyler, 1.2 m uzunluğunda, 0.8 m genişliğinde ve 0.45 m yüksekliğinde bir su tankında gerçekleştirilmiştir. Kanal tabanına 0,1 m yüksekliğinde kum serilmiştir ve taban malzemesi boyutu 0.2 mm olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan pervane karakteristikleri Tablo 2.3'te gösterilmektedir. Kullanılan mevcut pervane modeli pervane-A ve pervane-B olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.2. Pervane özellikleri (Cui vd., 2019)

Pervane	N	D_p (mm)	C_t	P'	B	D(mm)
A	3	55	0.4	1.00	0.47	11.5
B	6	55	0.56	1.14	0.922	11.5

C_t , itme katsayısı; β , Kanat alanı oranı; N, kanat sayısı; D_h , Pervane göbek çapı

Deneylerde ağırlıklı olarak ikiz pervane akımının sebep olduğu oyulma profili üzerine çalışılmıştır. 11 adet deneyin 10'u ikiz pervane ile geri kalan bir deney ise tek pervaneyle gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde ikiz pervane jet akışının neden olduğu maksimum oyulma derinliği için deneysel denklemler önerilmiştir. Şekil 2.5'te çift pervane bulunması durumunda gerçekleşen oyulma profili gösterilmiştir.



Şekil 2.5. İkiz pervaneler için oyulma süreçleri a)60s b)120s c)300s d)600s e)1200s f)1800s

Oyulma 3 ana bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler pervane altında oluşan ikincil oyulma çukuru, ikincil oyulma çukuru mansabında gerçekleşen birincil oyulma çukuru ve tanelerin sürüklenmesiyle meydana gelen yığılma tepesidir. Araştırmacılar deney sonucunda oluşan oyulma profiline göre ikiz pervane etkisi için Denklem (2.12), (2.13), (2.14)'i önermişlerdir.

$$-0.5 < X/X_{m,twin} < 0 : \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{max}} = -0.23 * \exp\left(-0.5 * \left(\frac{\frac{x}{x_s} + 0.14}{0.09}\right)^2\right) \quad (2.12)$$

$$0 < X/X_{m,twin} < 1.6 : \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{max}} = 0.04 + \left(-1.03 * \exp\left(-0.5 * \frac{\frac{x}{x_s} - 0.87}{0.36}\right)^2\right) \quad (2.13)$$

$$1.6 < X/X_{m,twin} < 2.6 : \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{max}} = -0.19 + \left(0.91 * \exp\left(-0.5 * \frac{\frac{x}{x_s} - 2.08}{0.22}\right)^2\right) \quad (2.14)$$

$X_{m,twin}$: ikiz pervane bulunun durum için pervane ekseninden maksimum oyulma derinliğine olan yatay mesafe , ε_m : t zamandaki max oyulma derinliği X_s : temel oyulma çukuru uzunluğudur.

2.2.2. Kohezyonsuz Zeminde Sınırlandırılmış (Kazık Eşliğinde) Deney Çalışmaları

Chin vd. (1996) yaptıkları çalışma, gemi pervanesinin neden olduğu düşey kazık yapısı etrafındaki yerel oyulma üzerine yapılan bir araştırmadır. Çalışmada, yerel oyulmayı etkileyen mekanizma ve karakteristik parametreler araştırılmıştır. Temel oyulma mekanizması kazık engeli ve jet akım etkisi olarak ikiye ayrılmış ve çeşitli deney düzeneklerinde mekanizmalar incelenmiştir. Düşey bir kazık etrafında pervanenin neden olduğu akımın karmaşıklığından dolayı, pervane jetinin eksenel bileşenini benzetmek için dairesel su jeti kullanmışlardır. Dört tip denge oyulma profili tanımlanmış ve her bir profil türü için kriterler, yoğunluk Froude sayısı (F_0) ve rölatif etki mesafesi (X_i/d_0) olarak belirlenmiştir. Yarı deneysel denklemler, farklı profiller için sınır limitlerini belirlemek amacıyla geliştirilmiş ve çalışma sonuçları, maksimum denge oyulma derinliği (S_{max}) ve kazık oyulma derinliğinin (d_{pe}) büyük ölçüde F_0 'ya bağımlı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmadaki temel amaç, düşey kazık etrafındaki oyulma mekanizmasını araştırmak ve belirlenmiş bu koşullar altında oyulma çukuru oluşumunu etkileyen karakteristik parametreleri tanımlamak olmuştur.

Kazıklı ve kazıksız koşullarda jet akım etkisini incelemek amacıyla iki dizi deney yapılmıştır fakat bu çalışmada sadece dairesel bir jetin neden olduğu düşey silindirik bir kazık etrafındaki yerel oyulma incelenecektir. Tablo 2.4'te deneyde kullanılan parametrelerin değer aralığı verilmiştir. Dengeye ulaşma süresi, jet çıkış hızına (U_0) ve etki mesafesine (X_i) bağlı olarak 36-48 saat arasında değişmiştir ve oyulma derinliğinin ilk 1 saat içinde maksimum denge oyulma derinliğinin %80'ine ulaştığı tespit edilmiştir.

Tablo 2.3. Deney 2 için Test Parametreleri (Chin vd., 1996)

Tank (1)	d_0 (mm) (2)	D (mm) (3)	d_{50} (mm) (4)	ρ (kg/m ³) (5)	θ (6)	σ (7)	U_0 (m/s) (8)	X_i (mm) (9)
A	50.8 25.4 18	150 100	0.31	2.650	30°	1.48	0.1-6.0	0-2.100
B	12.7 25.4	50	0.25	2.650	30°	1.46	0.5-5.0	25-1.100
C	15	38 320	1.65	2.650	32°	1.27	2.91	400

θ : Kum tanesinin şev açısı σ : geometrik standart sapma d_{50} : Medyan tane boyutu H : Su derinliği d_0 : jet çapı D : kazık çapı

Kazık eşliğinde yapılan deneyler, Froude sayısı değişimiyle beraber rölatif jet uzaklığı temel alınarak 4 farklı oyulma profilinde incelenmiştir.

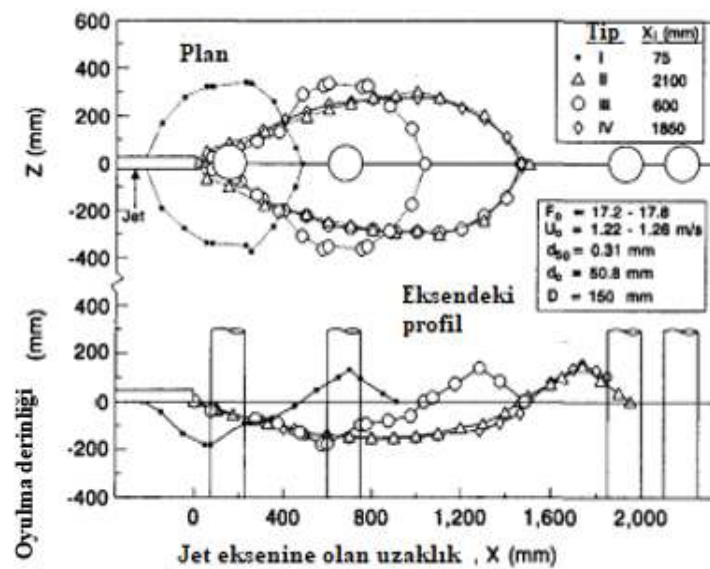
- 1.tip oyulma profilinde büyük Fr sayısı ve küçük rölatif jet uzaklığı göz önüne alınmıştır. Maksimum oyulma daima kazığın ön kısmında meydana geldiği gözlenmiştir.

- 2.tip oyulma profilinde çok büyük rölatif jet uzaklığı söz konusudur. Kazık, oyulmanın gelişimini etkilemeyecek kadar uzağa konulmuştur. Bu profil, kazık olmadan meydana gelen oyulma profili ile aynıdır.

- 3.tip oyulma profilinde orta değerde Froude sayısı dikkate alınmıştır. Burada etki mesafesi küçüldüğünden maksimum denge oyulma derinliği kazık membasında gerçekleşmiştir.

- 4.tip oyulma profilinde kazık jet akımdan uzaklaşmıştır ve yığılma bölgesine yerleştirilmiştir. Bu yığılma diğer profillere kıyasla daha zayıftır.

Denge halindeki bir oyulma çukuru, oyulma bölgesi ve yığılma bölgesi olarak ikiye ayrılmıştır. Oyulma mekanizması, rölatif jet uzaklığı (X_i/d_0) temel alınarak 4 farklı şekilde belirlenmiştir. Rölatif jet uzaklığı mesafesi ve büyük, orta, küçük olmak üzere kullanılan Froude sayılarına ilişkin deneylerde oluşan farklı oyulma profilleri incelenmiştir. Elde edilen profiller incelendiğinde, maksimum denge oyulma derinliğinin (S_{max}), jet uzaklığı göz ardı edildiğinde bütün profiller için aynı olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Bütün Tip Oyulma Profillerinin Bir Arada Gösterilmesi (Chin vd., 1996)

Araştırmacılar bu 4 profili karşılaştırdığında Froude sayısı ve rölatif jet uzaklığının oyulma profili belirlemede en önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla oyulma profilini bu iki parametre açısından geniş bir şekilde sınıflandırmak için yarı deneysel sınır limitleri belirlemişlerdir.

Deneysel veriler kullanılarak belirlenen Tip I ve Tip III oyulma profilleri sınır limiti,

$$F_0 = 2.86 \frac{X_i}{d_0} \quad (2.15)$$

Tip IV ve Tip III oyulma profilleri sınır limiti,

$$F_0 = 0.49 \frac{X_i}{d_0} \quad (2.16)$$

Son olarak Tip II ve Tip IV oyulma profilleri sınır limiti,

$$F_0 = 0.38 \frac{X_i}{d_0} \quad (2.17)$$

Çalışma, F_0 'ın kazık maksimum denge oyulma derinliği olan $S_{\max} / d_0$ 'yı etkileyen etkin parametre olduğunu göstermektedir. Kazık etrafındaki yerel oyulma derinliği için fonksiyonel ilişki $S_{\max} / d_0 = 0.21 F_0$ şeklindedir. $\frac{X_i}{d_0}$ boyutsuz etki mesafesinin $S_{\max} / d_0$ üzerinde çok az etkisi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kazık d_{pe} / d_0 'deki maksimum oyulma derinliği, hem F_0 hem de $\frac{X_i}{d_0}$ ile önemli derecede bağlantılı olduğunu göstermektedir. Oyulma profillerinde görüldüğü üzere genellikle büyük F_0 değeri için kazık önündeki oyulma profili maksimum oyulma derinliğine eşit ve kazık çapının hem $S_{\max} / d_0$ hem de d_{pe} / d_0 üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu belirtilmiştir.

Yüksel vd. (2018) çalışmasında tek bir kazık yapısı etrafındaki pervane jetinin neden olduğu oyulma, dört farklı kohezyonsuz taban malzemesi üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Oyulma başlangıcının, pervane eksenini ile taban arasındaki düşey mesafe olan pervane açıklığı (G), yoğunluk Froude sayısı (F_0), pervane çapı (D_p) ile ilişkili olduğu sunulmuştur. Çalışma, kazıkların membasında oluşan oyulma derinliğine (S_0), ve kazığın mansabında oluşan oyulma derinliğine (S_d) göre sınıflandırılabilen üç tip oyulma profili tanımlamıştır. Ayrıca oyulma profillerinin yoğunluk Froude sayısına ve kazık çapına (D) önemli derecede bağlı olduğu belirlenmiştir. Kazık membasındaki oyulma derinlikleri farklı kazık konumları ile pervane yüzü arasındaki mesafe (X_i), kazık çapı (D), taban malzeme boyutu (d_{50}), pervane çapı (D_p), pervane hızı (rpm) ve açıklığında (G) araştırılmıştır. Kazığın membasındaki oyulma derinliğinin hesaplanması için yeni ampirik denklemler önerilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kazık destekli iskele tipi rıhtım yapısı için yanaşma ve/veya ayrılma sırasında gemi pervanesi jetlerinin neden olduğu oyulma üzerine laboratuvar testlerini genişletmeyi amaçlamaktadır.

Deneyde 6.02m uzunluğunda, 1.42m genişliğinde ve 1.1m yüksekliğinde dikdörtgen bir kanal kullanılmıştır. Su 0,5 m derinliğe kadar doldurulmuştur ve kanal zeminine 0,2 m derinliğinde taban malzemesi serilmiştir. Profiller denge durumuna ulaştığında (160dk olarak belirlenmiştir) pervane eksenindeki oyulma profilleri bir limnometre ile ölçülmüştür. Silindirik kazık, pervane yüzünden $X_i = 10$ cm uzağa yerleştirildiğinde, çalışmada farklı kazık çapları, farklı taban malzemesi, farklı pervane hızları ve açıklığı kullanılarak test edilen koşullar için üç farklı oyulma profili gözlenmiştir.

Tip 1(a) ve Tip 2(b) oyulma profilleri karşılaştırıldığında aynı değerdeki pervane yüzü ile kazık arasındaki yatay mesafe ($X_i = 10$ cm), kazık çapı ($D = 4$ cm), pervane hızı (745rpm), taban malzemesi boyutu ($d_{50} = 0.52$ mm) kullanıldığı ancak farklı pervane açıklık yükseklikleri (tip 1 için $G = 15$ cm, tip 2 için $G = 10$ cm) tercih edildiği görülmüştür. Tip 1 ve 2 için oyulma profilinin belirlenmesinde pervane açıklığı tek parametre olarak değerlendirilmemiştir. Bunun nedeni, Tip 1 ve 2 için pervane jetleri tarafından indüklenen ikincil oyulma derinliği oluşumunun pervane boyutu ve hızına da bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Tip 2 profili, geçiş profili tipi olarak sınıflandırılmaktadır. Pervane hızlarının ve boyutlarının artırılması, daha güçlü at nalı girdaplarına neden olmakta ve kazığın memba yüzündeki ters akışı arttırmaktadır. Bu nedenle Tip 2 ve 3 oyulma profilleri için pervane altında oluşan ikincil oyulma çukuru kaybolmakta ve kazık çevresinde daha büyük oyulma çukuru oluşmasına neden olmaktadır.

Tip 3(c) ve tip 3(d) profillerine ait grafikler incelendiğinde, pervane yüzü ile kazık arasındaki yatay mesafe ($X_i = 10$ cm), pervane hızı (745rpm), taban malzemesi boyutu (0.52mm), pervane açıklık yükseklikleri ($G = 15$ cm) aynı değerler olduğu ancak bu sefer kazık çaplarının farklı seçildiği görülmüştür. Kazık çapları etkisini belirlemek için yapılan bu deneyde memba tarafındaki oyulmanın (S_0) daha derin olduğu belirlenmiş ve bunun nedeni, kazık çapındaki artışın, kazığın ön ucunda daha şiddetli aşağı akışlara ve girdap mekanizmalarına neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Araştırmacılar kazık önünde (S_0) oyulma gelişimlerini incelemiş ve buna uygun olarak, $X_i = 10$ cm'de sabit bir kazık konumu için boyutsuz parametreler kullanılarak oyulma tahmininde denklem (2.18) önerilmiştir.

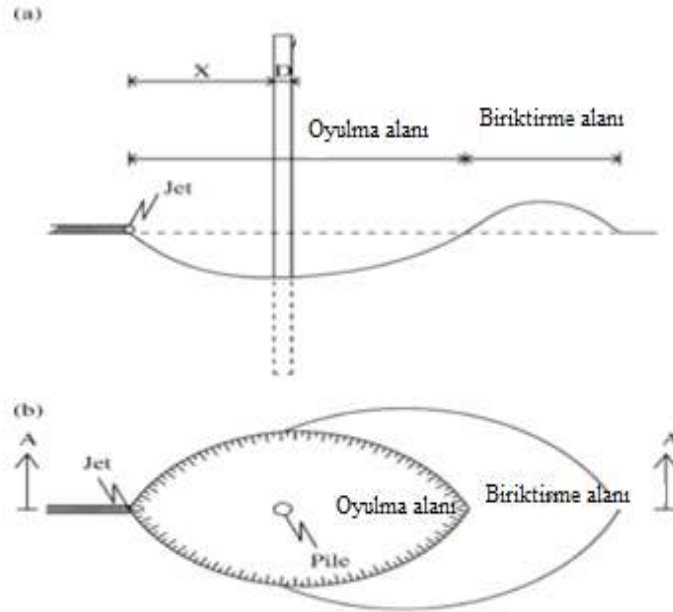
$$\frac{S_0}{D_p} = 0.232 F_0^{1.911} \left(\frac{G}{d_{50}} \right)^{-0.577} \left(\frac{D_p}{D} \right)^{-0.914} \quad (2.18)$$

Bu denklem, kazık ile pervane yüzünden $0.72 \leq X_i / D \leq 2.5$ için sabit bir mesafede bulunduğu ve sadece $1.89 \leq F_0 \leq 15.01$ aralığındaki değerler için elde edilmiştir.

Yüksel vd. (2005) yaptığı çalışmada, tek kazık ve kazık grupları etrafındaki yerel oyulma araştırılmıştır. Araştırmacılar, kazıkların grup halinde olması durumunda oyulma alanındaki değişimi gözlemlemiş ve kazıklar arasındaki aralığın (α) oyulma alanına olan etkisini araştırmışlardır. Pervane jeti, bu çalışmada kohezyonsuz taban malzemesi üzerinde dairesel bir su jeti kullanılarak basitleştirilmiştir. Çalışma, bir kazık yapısı etrafındaki maksimum denge oyulma derinliğinin temel olarak yoğunluk Froude (F_0) sayısının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Kazık grupları etrafındaki oyulma işleminin aynı zamanda açıklık oranı olarak tanımlanan kazıklar arasındaki mesafenin kazık çapına oranı (α/D) ile kazık çapının dairesel su jeti çapı oranına (D/d_0) bağlı olduğu gösterilmiştir.

Deneyler 1 m derinliğinde, 0.65 m genişliğinde ve 3 m uzunluğundaki laboratuvar kanalında gerçekleştirilmiştir. Dairesel su jetinin çıkış ağzı çapları $d_0 = 22$ ve 16 mm olarak belirlenmiştir. Kazık çapı olarak $D=33$ ve 48 mm kullanılmış ve D/d_0 parametresi 1.5 ile 5.6 arasında ayarlanmıştır. Deneylerde yoğunluk Froude sayıları (F_0) 10.63 ile 28.79 arasında belirlenmiştir. Kullanılan taban malzemesi çapları ise $d_{50}=1.28, 1.43, 1.89$ mm dir.

Deneylerde ilk olarak tek kazık halinde jet çıkışı ile kazık konumu arasındaki mesafenin (X_i) oyulma alanına etkisi incelenmiştir. $X_i > 2D$ ve $X_i < 2D$ için oyulma alanı gözlemlenmiş ve tipik olarak denge oyulma alanının bir oyulma çukuruna ve bir de yığılma tepesine ayrıldığı görülmüştür. Oyulma alanı, $X_i < 2D$ için neredeyse simetrikken $X_i > 2D$ için alanın memba kısmının simetrik olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 2.7. $X_i \leq 2D$ için a) A-A kesiti b) plan görüntüsü

Deneyin ikinci adımında farklı etki mesafelerinde (X_i/D) kazık önündeki rölatif maksimum oyulma derinliği için ($S_{\max}/d_0$) yoğunluk Froude sayısının etkisi gösterilmiştir. Etki mesafesi değeri 1 ile 6 aralığında ($X_i/D=1, 2, 3 \dots, 6$) alınmıştır ve çalışma için belirlenen Froude sayısı aralığında ($F_0=10.6-28.79$) 8 farklı değer verilerek kazık önündeki maksimum oyulma derinliğine ($S_{\max}/d_0$) etkisi incelenmiştir. Deney sonucunda aynı değerdeki etki mesafesi için Froude sayısı arttıkça maksimum oyulma derinliğinde artış gözlenmiştir.

Kazık gruplarını dikkate alan deneyde ise oyulma etkileşimini göstermek için açıklık oranı (a/D), Froude sayısı (Fr) ve kazık çapının jet çıkış ağzı çapına oranı (D/d_0) parametreleri kullanılmıştır. İkinci kazığın önündeki maksimum oyulma derinliği ($S_{2\max}$) ile birinci kazığın önündeki maksimum oyulma derinliği ($S_{1\max}$) oranına ($S_{2\max}/S_{1\max}$) karşı açıklık oranı (a/D) yoğunluk Froude sayısına bağlı olduğu gözlenmiştir. Elde edilen verilere göre oluşturulan grafiklerde belirli bir F_0 değeri için, ilk olarak a/D değeri arttıkça $S_{2\max}/S_{1\max}$ azaldığı gözlemlenmiş ve daha büyük bir a/D değeri için $S_{2\max}/S_{1\max}$ ikinci kazık etrafında taban malzemesi birikimi nedeniyle negatif olacağı görülmüştür.

Aynı zamanda kazık gruplarındaki bir diğer deney ise göreceli kazık çaplarının ($D/d_0 = 1.5-5.6$) farklı değerlerine sahip farklı F_0 değerleri için $S_{2\max}/S_{1\max}$ ile a/D arasındaki etkileşimi göstermektedir. Ön kazıklardan dolayı jet enerjisinin azalması nedeniyle, arka kazıklardaki oyulma derinliğinin gelişimi daima öndeki kazıktan daha az olduğu

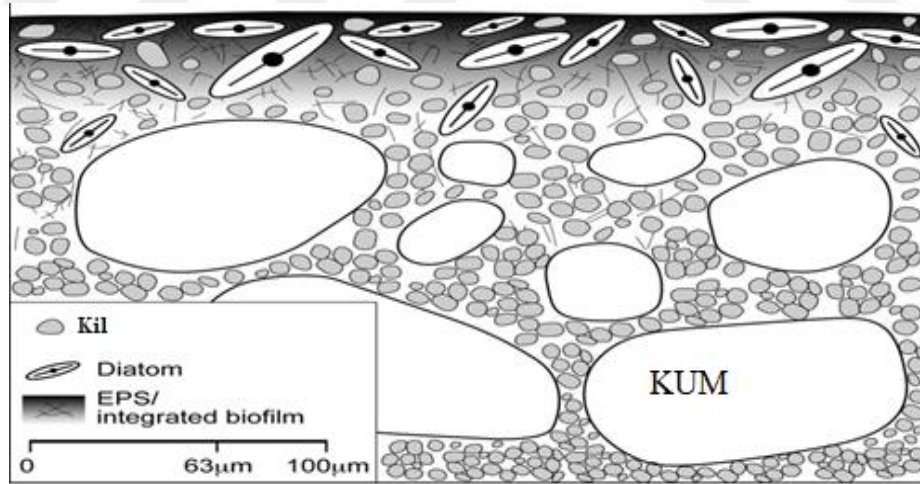
belirlenmiştir. F_0 değeri arttıkça, tüm D/d_0 değerleri için maksimum katı madde yığılması aynı seviyede kalacağı ve bu maksimum yığılma (S_{2max}/S_{1max} negatif olduğu durum) artan jet akımının enerjisinden dolayı sabit bir değerde kaldığı belirlenmiştir.

2.3. Kohezyon İçeren Tabanda Oyulma Mekanizması

Bölüm 2.3'te kohezyon içeren zemin özellikleri incelenecek ve kohezyonlu zeminde oyulma alanına etki eden parametreler tanıtılacaktır. Oyulma mekanizması detaylıca irdelendikten sonra mevcut literatür çalışmalarından örnekler verilecektir.

2.3.1. Kohezyon İçeren Taban Özellikleri

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi koheziv madde, katı, sıvı ve gaz fazlarından oluşan heterojen ve gözenekli bir yapıya sahiptir (Grabowski vd., 2011).



Şekil 2.8. Koheziv tortu mikro yapısının şematik gösterimi (Grabowski vd., 2011)

0,06 mm'den daha küçük boyuta sahip tanecikler normalde koheziv malzeme olarak davranmaktadırlar. Bu malzemeler Tablo 2.5'te görüldüğü gibi tane boyutlarına göre ince, orta ve kaba olarak sınıflandırılmaktadırlar. İnce taneli malzemeler kil ve siltleri içermektedir (Kothyari ve Jain, 2010).

Tablo 2.4. Farklı standartlara göre tane boyutu sınıflandırma (Bozbey, 2016)

	TS	ASTM	BS
	mm	Mm	mm
TAŞ,BLOK	>60	>75	>60
ÇAKIL	60-2	75-4.75	60-2
KUM	2-0.075	4.75-0.075	2-0.06
SİLT	0.075-0.002	0.075-0.002	0.06-0.002
KİL	<0.002	<0.002	<0.002

Kohezyon içeren malzemeler esas olarak kil minerallerinden oluşmaktadır. Yüzey aktivitesi kohezyon ve plastisite geliştirecek şekilde olan kristal minerallerine kil mineralleri denilmektedir. Bu kil mineralleri çoğunlukla alüminyum ve / veya demir ve magnezyum silikatlarıdır. En yaygın kil minerallerinden bazıları kaolinit, illit ve montmorillonittir. Kilde bulunan bu minerallerin oranları kilin diğer katı taban malzemeleriyle etkileşimindeki davranışını etkilemektedir (Kothyari ve Jain, 2010). Kil mineralleri öncelikle kristal yapılarına ve mineralojik bileşimlerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Kil minerallerinin kristal yapıları yaprak kalınlığını, su alıp şişme ve katyonların yer değiştirebilme durumunu etkilemektedir. Kil minerallerinin kimyasal bileşimi oluştukları ana materyalin mineralojik bileşimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Demiral, 2013). Mineraller arasındaki önemli farklılıklardan biri de özgül yüzeydir. Özgül yüzey birim kütleye gelen yüzey alanı olarak tanımlanmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe özgül yüzey artmakta ve dolayısıyla su içeriğinde artış meydana gelmektedir. Kaolinit kilinden montromollit kiline doğru özgül kütle artmaktadır. Kaolinit mineralinin tabakalar arasındaki bağları kuvvetlidir ve ayırmak zordur. Illit minerali kaolin mineraline göre bağları daha zayıftır. Montromonollit mineralinin tabakalar arasındaki bağları zayıf Van der waals bağları olduğundan tabakalar arasına giren su kolaylıkla ayrılabilir (Tolunay,2020). Tablo 2.6’da kil minerallerine göre katyon değişim kapasitesi ve özgül alan değerleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Kil minerallerine göre özgül yüzey ve katyon değişim kapasitesi değer aralıkları (Kılıç, 2020)

Kil Minerali	Özgül yüzey(m ² /g)	Katyon değişim kapasitesi(meq/100g)
Kaolinit	10-20	3-10
Illite	80-100	20-30
Montmorillonite	800	80-120
Klorit	80	20-30

Tablo 2.6'dan da görüldüğü gibi kohezyon içeren malzemeler kum gibi kohezyon içermeyen tanelerin aksine, büyük spesifik alana, yani birim hacimdeki partikül başı alana sahip küçük partiküllerden oluşmaktadır. Bu nedenle yüzey fizikokimyasal kuvvetleri tane ağırlığına göre çok daha önemli hale gelmektedir. Fizikokimyasal kuvvetler arasında çekici Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağı, kat-iyon bağı, çeşitli bileşiklerle partiküller arasında kimyasal sementasyon, kil-su ortamında çift katman ve partikül etkileşim kuvvetleri vb. gibi diğer bağlama kuvvetleri yer almaktadır. Tablo 2.7'de kum, silt ve kilin fiziksel özelliklerinde görülen farklılıklar sunulmuştur.

Tablo 2.6. Kum, silt ve kil özelliklerinin karşılaştırılması (U.s. Dept. Of Agriculture, 1987)

ÖZELLİK	KUM	SİLT	KİL
Özgül Yüzey	Küçük	Orta	Yüksek
Plastiklik	NP	NP-az plastik	Plastik-Çok plastik
Yapışkanlık	Yapışkan değil	Yapışkan değil-Az	Yapışkan-Çok
Mineoroloji	Kayaç Parçaları	-	Kil Mineralleri
Görsellik	Göz	İri taneler Lup ile	Elektron mikroskop
Şekil	Yuvarlak	Düzensiz	Düz
Su emme	Düşük	Düşük-orta	Yüksek
Boyut	2-0.05mm	0.05-0.002mm	<0.002mm

İnce taneli zeminlerin özellikleri içeriğindeki su muhtevasına bağlı olarak bulundukları fazlara göre değişmektedir. Kurudan sıvıya kadar genişleyen su içeriğine göre hemen her fazda bulunan zeminlerin bu faz geçişleri Atterberg tarafından 1911'de limitlerle tanımlanmıştır.

- Likit Limit (LL): Zeminin likit fazdan plastik faza geçtiği andaki su içeriğine denir. Bu fazda zeminde hacim azalması meydana gelmektedir

- Plastik Limit (PL): Zeminin plastikten yarı katı faza geçtiği andaki su içeriğidir.

- Plastisite indeksi: (PI): Kohezyon içeren tanelerin su yüzdesinin değişim göstermesiyle ölçülen kıvam aralığıdır. Plastisite indeksi, plastik durumu sağlar ve kohezyon içeren zeminin nem oranı sınırlarını koymaktadır. Denklem (2.19)'da plastisite indeksi bağıntısı verilmiştir.

$$PI=LL-PL \quad (2.19)$$

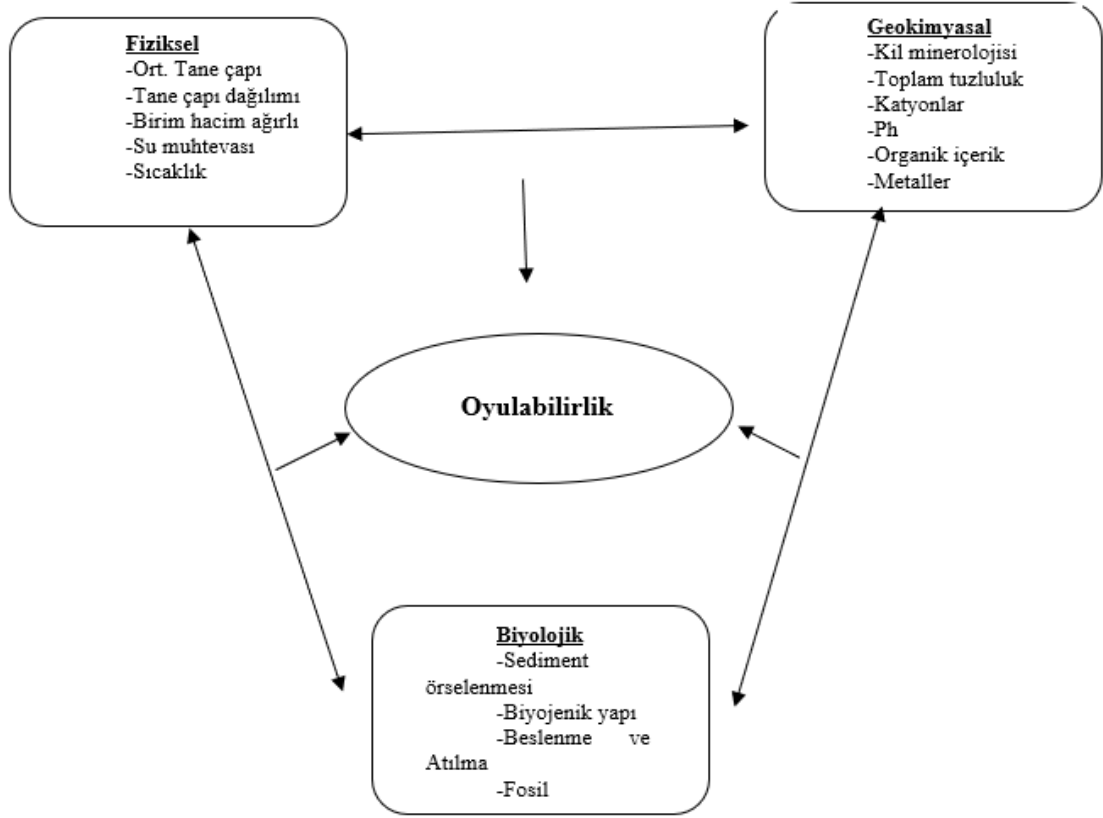
Tablo 2.8'de zemin türlerinin plastik limit, likit limit ve plastisite indeksi gösterilmiştir.

Tablo 2.7. Zemin Türüne Göre Faz Geçişi Sınıflandırması (Kılıç,2020)

Zemin Türü	LL (%)	PL (%)	PI (%)
Kum	Plastik Değil		
Silt	30-40	20-25	10-15
Kil	40-150	25-50	15-100

2.3.2. Kohezyon İçeren Zeminde Oyulmayı Etkileyen Faktörler

Kohezyon içeren zeminde oyulma araştırılırken kohezyon içermeyen zemine kıyasla çok daha fazla parametrenin incelenmesi gerekmektedir çünkü kohezyon içeren zeminin oyulma mekanizması, alt bileşenlerinin fiziksel yapısına ve etkileşimlerine bağlı olmaktadır. Belirli bir akış koşulu altında kohezyon içeren zeminin erozyon oranını etkileyen temel faktörlerin anlaşılması için kil partikülünün doğası ve davranışı hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Kohezyonlu zeminde oyulabilirliği etkileyen başlıca faktörler su muhtevası, plastisite indeksi, nem oranı, ortalama tane boyutu gibi parametreler olsa da daha birçok madde fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak oyulmayı etkilemektedir. Şekil 2.9’da kohezyon içeren zeminde oyulmayı etkileyen 3 ana grup sunulmuştur.



Şekil 2.9. Oyulmayı etkileyen zemin özellikleri ve süreçler (Grabowski vd., 2011)

2.3.2.1. Oyulmayı Etkileyen Fiziksel Özellikler

Kohezyon içeren zeminin fiziksel özellikleri, oyulmayı etkileyen parametreler arasında en yaygın araştırma konusudur. Bu özellikler, kohezyonlu tanenin boyutundaki veya miktarındaki değişiklikler yoluyla oyulmayı etkilemekte ve tane boyutu dağılımı , kütle yoğunluğu ve su muhtevasını içermektedir (Grabowski vd., 2011). Aşağıda oyulmayı etkileyen fiziksel özelliklerden kısaca bahsedilmektedir.

• Ortalama tane boyutu

Ortalama tane boyutu, kohezyon içeren tanenin oyulabilirliğini gösteren en yaygın parametrelerden birisidir. Hidrolik mühendisleri tarafından yapılan ilk çalışmalarda, partikül boyutları ile tanenin aşınması için gereken minimum su hızı arasındaki korelasyon tanımlanmıştır. Bulguları göstermek için oluşturdukları Hjulström ve Postma grafikleri, standart referans araçları haline gelmiştir. Bu diyagramda 20µm'den küçük olan ince tanelerle çalışılmıştır. Kohezyon içermeyen tanelerin aksine kohezyon içeren zeminlerde tane boyutu

ve kritik kayma gerilmesi arasında negatif korelasyon olduğu belirtilmiştir.

- **Tane boyutu dağılımı (kil, çamur ve kum içerikleri):**

Katı maddeyi ortalama tane boyutuyla tarif etmek uygun olsa da, çoğu doğal kohezyonlu zemin bir dizi tane boyutundan oluşmakta ve bu farklı boyutlu tanelerin oranları oyulabilirliği büyük ölçüde etkilemektedir. Bir kum zemine % 30-50 oranında kil eklemek, onu maksimum erozyon eşiğine kadar erozyona karşı daha dirençli hale getirmektedir (Mitchener ve Torfs , 1996; Grabowski vd., 2011). Erozyon eşiğindeki artış, hidrodinamik pürüzsüzleşme, kil/kum adhezyonu ve kil kohezyonunun kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Araştırmacılar kil-kum karışım tabanda kil yüzdesinin artışıyla erozyon başlangıç hareketinin daha geç olduğunu ve erozyon oranının da aynı şekilde yavaş ilerlediğini belirlemişlerdir (Mitchener ve Torfs,1995; Jain ve Kothyari, 2010).

Mitchener ve Torfs (1996) ‘da kum-kil karışım tabanda yaptığı çalışmada kil muhtevası %40 arttırıldığında oyulma derinliğinde önemli ölçüde azalma görüldüğünü ve oyulma hacminin de kil muhtevasının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir.

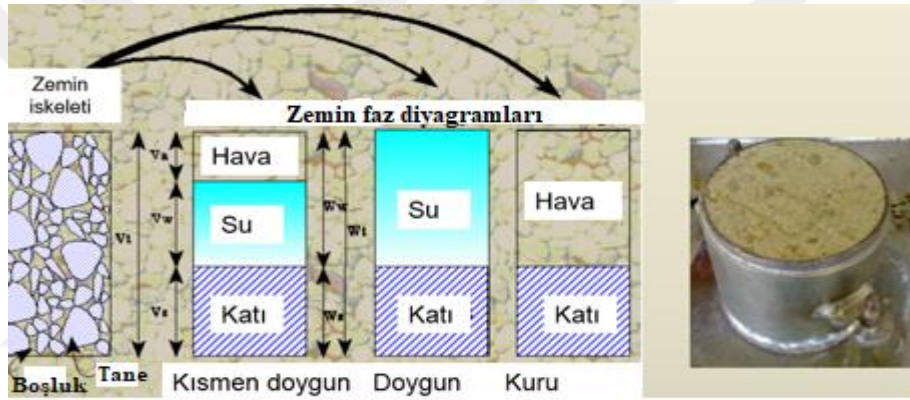
Jain ve Kothyari (2010) yaptığı çalışmada yaklaşık % 40 veya daha yüksek kil muhtevası değerlerine sahip zemin için erozyon oranının çok yavaş hızda ilerlediği ifade edilmiştir.

Mitchener ve Torfs (1995) yaptığı çalışmada kum ağırlıklı bir zemine kil eklendiğinde sadece katı madde hareketi için gerekli eşik koşullarını artırarak oyulma başlangıcını geciktirmekle kalmadığı aynı zamanda deney süresince oyulma oranında da yavaşlama görüldüğü tespit edilmiştir. Kum zemine % 3'ten fazla kil muhtevası eklendiğinde, kil-kum karışım tabanın oyulma oranının 5 kat azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

- **Özgül kütle ve su muhtevası**

Özgül kütle ve su muhtevası, kohezyon içeren taban oyulmasındaki laboratuvar ve saha çalışmalarında yoğun bir şekilde incelenen katı sıvı oranının ölçüleridir. Özgül kütle birim hacime düşen ağırlık olarak tanımlanmakta (g/cm^{-3}) ve tane yoğunluğuna, su muhtevasına , gaz/hava ceplerinin varlığına bağlı olmaktadır. Özgül kütle zemin oyulabilirliğiyle negatif olarak ilişkilidir veya başka bir deyişle, yoğun zeminler daha düşük yoğunluğa sahip zeminlere göre 100 kata kadar daha düşük erozyon oranına sahiptirler (Lick ve Mcneil vd., 2001).

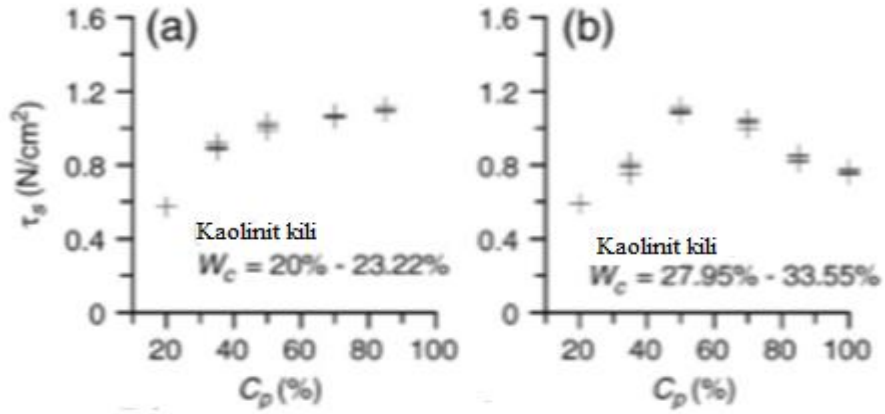
Çalışmalarda özellikle su muhtevasını belirlemek zeminin oyulmaya karşı göstereceği davranış açısından oldukça önemlidir. Zemin içerisinde bulunan su, hava ve tane oranları her zeminde farklılık göstermektedir ve yüzdesel değişim neticesinde zeminler 3 farklı fazda bulunmaktadır (Şekil 2.10). Zemindeki boşlukların tamamı su ile dolu ise doymuş zemin olarak ifade edilmekte ve doymuş bir zeminde değişimler lineer olarak gerçekleşmektedir. Eğer zemindeki boşlukların bir kısmı su ile diğer kısmı hava ile dolmuşsa doymamış zemin olarak tanımlanmaktadır (Öntürk vd., 2016). Doymuş zeminlerde fazla suyun dışarı atılması ve zamana bağlı zemin oturmasını sağlamak adına zemin konsolidasyon özellikleri dikkate alınmaktadır. Doymamış zeminlerdeki değişimler lineer olmayan şekilde ilerlediğinden zemin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi doymuş bir zemine göre daha zordur.



Şekil 2.10. Zemin Faz Diyagramı (Bozbey, 2016)

Dilek (2011) yaptığı çalışmada ,konsolidasyon süresinin oyulma derinliğine etkisini gözlemlemek adına 4 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu 4 deney grubunda kum,kil ve su muhtevası aynı değerlerde tutulup sadece konsolidasyon süreleri farklılık gösterilmiştir. Deney konsolidasyon süreleri 19.5 saat ile 27 saat aralığında gerçekleşmiştir. Deney sisteminde % 35 kil muhtevası ve % 45 kum muhtevası kullanılıp konsolidasyonun etkisini incelemek için deney sonuna kadar aynı oranlarla devam edilmiştir. Farklı konsolidasyon sürelerinde ilk saat içerisinde oyulma derinliğinin lineer olarak arttığı, daha sonra konsolidasyon süresinin değişimine bağlı olarak farklı oyulma derinliklerinin meydana geldiği gözlenmiştir. 1 saatten sonra konsolidasyon süresindeki kısalmayla beraber oyulma derinliğindeki artışın daha hızlı gerçekleştiği ve denge derinliğine ulaştığı belirlenmiştir. Deney sonunda konsolidasyon süresinin kısalması oyulmanın hızlı gerçekleşmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Debnath ve Chaudhuri (2010) yaptığı çalışmada, %24'ten daha az su içeriği için, kil-kum karışımının kil içeriğindeki artışla birlikte maksimum denge oyulma derinliğinin azaldığını ortaya koymuştur. Kil içeriğindeki artışla birlikte %27'den daha büyük su içeriği için, ilk önce maksimum denge oyulma derinliğinin kil içeriğiyle birlikte %50-70'e kadar azaldığı ve daha sonra oyulmanın arttığı belirlenmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Su muhtevasıyla değişen oyulma derinliği (Debnath ve Chaudhuri, 2010)

• Sıcaklık

Sıcaklığın oyulma oranı ile pozitif ilişkili olduğu teorize edilmiş ancak bu konuda çok az deneysel çalışma olduğundan henüz bir temele oturtulamamıştır (Kelly ve Gularte, 1981). Sıcaklığın $10^\circ C$ 'den $30^\circ C$ 'ye çıkarıldığında oyulma oranının 3 kat arttığı gözlenilmiştir. Sıcaklıkla birlikte oyulmanın artması, taneler arası bağların zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Oyulma üzerinde sıcaklığın etkisini açıklığa kavuşturmak adına bu konuda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

2.3.2.2. Oyulmayı Etkileyen Kimyasal Faktörler

Katı maddenin kimyasal özellikleri, taneciklerin elektrokimyasal çekiciliğini etkilemekte ve tanecik mineralojisi, su jeokimyası ve organik içeriği içermektedir. Bu bölümde, kohezyon içeren çalışmaların kimyasal parametreleri oldukça az çalışıldığından başlıca faktörler detaya girilmeden tanıtılacaktır.

- **Kil minerolojisi**

Toprak bilimlerinde toprak erozyonu önemli etkileri nedeniyle uzun süredir tanınmasına rağmen, kil minerolojisi oyulabilirlik literatüründe çok az ilgi görmüştür. Kohezyon içeren malzeme erozyonu ile ilgili çoğu laboratuvar çalışması, ya ticari olarak temin edilebilen bir kil mineralini ya da bir çalışma sahasından toplanan doğal çamuru kullanmakta ve mineralojinin sonuçları üzerinde sahip olabileceği potansiyel etkileri açıkça dikkate alınmamaktadır.

- **Suyun kimyası**

Yapılan birçok araştırmada su içerisindeki taneler arasındaki bağlar suyun kimyasını etkilediği için oyulmayı üzerinde etkin bir parametre olduğu belirlenmiştir fakat zeminler için yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı kalmaktadır (Grabowski vd., 2011).

- **Ph**

Çok sayıda biyojeokimyasal süreci önemli ölçüde etkileyen su kalitesinin çok önemli bir göstergesi olmasına rağmen, pH'ın zemin oyulması üzerindeki rolü hakkında çok az şey bilinmektedir. Winterwerp ve van Kesteren (2004), yüksek bir pH'ın zemin oyulabilirliğini artıracığını, çünkü H⁺ iyonlarındaki azalmanın daha büyük çift tabaka kalınlıklarına ve daha fazla itme kuvvetine neden olacağını öne sürmektedir.

- **Organik içerik**

Organik içerik uzun zamandır zemin oyulabilirliğini belirleyen kritik bir faktör olarak kabul edilmiş ve bunun koheziv taban malzemes üzerindeki dengeleyici rolü, saha ve laboratuvar çalışmaları tarafından ilk olarak desteklenmiştir. % 2'den daha az organik içeriğe sahip zemin oyulabilir olarak kabul edilmekte ve oyulabilirlik, % 0 ile % 10 organik içerik ile negatif olarak ilişkilendirilmektedir. Birçok çalışmada EPS nin artmasıyla oyulmanın azalacağı belirlenmiştir (Grabowski vd., 2011).

2.3.2.3. Oyulmayı Etkileyen Biyolojik Faktörler

Biyolojik faktörler adına yapılan çalışmalarda araştırmacılar henüz ortak bir kanıya varamamışlardır. Organizmaların oluşturdukları fosil izleri ve benzeri biyolojik faktörler zemin oyulabilirliğini etkilediği düşünülmektedir (Grabowski vd., 2011).

2.4. Kohezyon İçeren Zeminde Yapılan Deneysel alışmalar

Mevcut literatürde tabanda gerçekleşen oyulma problemi araştırılırken oyulma mekanizması iki grupta incelenmektedir. Bunlardan ilki oyulmanın başlaması için gerekli olan erozyon sınırı, ikincisi ise erozyonun zamansal gelişimi doğrultusunda incelenen erozyon oranıdır.

Erozyon sınırı, katı madde erozyonunu başlatan akış hızı ve kritik kayma gerilmesi olarak tanımlanırken erozyon oranı ise birim zamanda aşınan katı madde kütlesi olarak tanımlanmaktadır (Grabowski vd., 2011). Bu durumda yüksek oyulma oranına sahip katı maddenin düşük erozyon eşiğine sahip olması beklenmektedir. Örnek verilecek olursa kohezyon içermeyen kum malzemesinin oyulabilirliğinin daha yüksek olması daha düşük kritik kayma gerilmesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır ve neticesinde erozyon eşiğinin düşük ve erozyon oranının yüksek olması beklenmektedir.

Kohezyon içermeyen zeminde oluşan oyulmayı modellemek oldukça gelişmiş olsa da, kohezyon içeren zeminin mekanizmasını tahmin etmek oldukça zor olmaktadır. Bu durumun temel nedenlerinden biri, kohezyonlu malzemede bulunan tanecikler arası güçlü çekimlerin kritik kayma gerilmesini etkilemesinden kaynaklanmaktadır (Winterwerp vd, 2004). Oyulabilirliği tahmin etmeye yönelik deneysel yaklaşımlar bu sebepten dolayı sınırlı kalmıştır.

Kothyari ve Jain (2008) yaptıkları çalışmada katı madde hareketine sebep olan ana mekanizmaları, türbölanslı akıştan kaynaklanan akış hızı, kayma gerilmesi ve hidrodinamik kuvvetler olarak belirlemiştir. Kohezyon içeren bir zeminde kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesini aştığında, katı madde zeminden ayrılmaya başlamakta ve akan su bulanıklaşmaktadır. Erozyonun başlaması ile karakterize edilen bu aşama, çalışmada kohezyon içeren zeminin başlangıç hareket durumu olarak tanımlanmaktadır. Kayma gerilimindeki artışla birlikte, zeminden daha fazla katı maddenin ayrıldığı ve akım tarafından taşındığı ifade edilmiştir. Kohezyon içeren karışım tabanlarda başlangıç hareket koşulunun kritik kayma gerilmesi , kohezyonlu malzemeyle benzer aritmetik ortalama boyutuna sahip kohezyonsuz malzemenin kritik kayma geriliminden 50 kat daha büyük olabileceğini ifade etmişlerdir.

Kothyari ve Jain (2010)'da yaptığı çalışmada kohezyonsuz taban malzemesi için kritik kayma gerilmesinin tane yoğunluğu, tane boyutu ve akışkan özellikleri bilgisinden Shield

diyagramının herhangi bir versiyonu kullanılarak güvenilir bir şekilde belirlenebileceğini fakat kohezyonlu tabanların başlangıç hareketi, hem kayma gerilmesi gibi karmaşık mekanik özelliklere hem de kohezyonlu tabanların fiziko-kimyasal özelliklerine bağlı olduğu ifade edilmektedir. Bu nedenle, kil miktarı ve türü, nem içeriği, özgül kütle, sınırlandırılmamış basınç dayanımı vb. araştırmacılar tarafından kohezyonlu tabanların erozyonunu belirleyebilmek için ölçülebilen değişkenler olarak kabul edilmiştir.

Jowett ve Elliott (2009) yaptığı çalışmada, kritik kayma geriliminin ölçülmesiyle ilgili en önemli problemin oyulma başlangıcını belirlemekte yaşanan zorluk olduğu ifade edilmiştir. Partiküller çıplak gözle görüldüğünde ilk partikül hareket ederken oyulmayı tespit etmenin kolay olduğunu fakat kilin suyu bulandırmasıyla beraber bu gözlemin yetersiz kalmasından bahsedilmektedir. Bu yüzden çeşitli araştırmacıların "su çamurlu hale geldiğinde" oyulmanın başladığını varsaydıklarını belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmaların neticesinde kohezyon içeren tabanda oyulma mekanizmasının başlaması için gerekli olan kritik kayma gerilmesinin belirlenmesinin bir çok etkene bağlı olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, oyulma mekanizmasını incelerken daha çok tabanda gözlenen gelişimleri ve kohezyon içermeyen tabana kıyasla oyulma oranı veya denge oyulma derinliğindeki değişimleri aktarmışlardır.

Kothyari ve Jain (2008)'de yaptığı çalışmada kil-çakıl ve kil-kum-çakıl karışımlarından oluşan kohezyonlu zeminlerin başlangıçtaki hareket durumuna yönelik deneysel çalışmalar sunulmuştur. Başlangıç hareket durumunun üç aşaması belirlenmiş ve fotoğraflarla desteklenmiştir. Bu 3 aşama sırasıyla çukur erozyonu, çizgi erozyonu ve kütle erozyonu olarak tanımlanmıştır. Hareketin başlama durumu, esas olarak karışımdaki kil yüzdeleri, karışım nem özellikleri ve uygulanan kayma gerilmesi ile değiştiği ifade edilmiştir. Zeminin kil muhtevası, boşluk oranı ve serbest basınç dayanımı, karışım tabanların başlangıç hareket koşullarını belirleyen ana parametreler olarak görülmüştür.

Bu deneyler, Hindistan Teknoloji Enstitüsü Roorkee, İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Zemin 2.0 m derinliğe kadar kazılarak bulunan kil, deneyde koheziv malzeme olarak kullanılmıştır. Kil özelliklerinin belirlenmesi için testler, Hindistan standart (IS) koduna göre yapılmıştır. Kil materyalinin medyan boyutu (d_{50}) 0,0039 mm'ye, geometrik standart sapma (σ_g) ise 1,7'ye eşittir. Kum medyan boyutu (d_{50}) 0.23 mm ve (σ_g) 1.53 iken, çakıl medyan boyutu (d_{50}) 3.1 mm ve (σ_g) 1.23 idir. Kil malzemesinin diğer mühendislik özellikleri, Sıvı limiti (W_L) % 38, plastik limit

(W_p) % 24, plastisite indeksi (PI) % 14, maksimum kuru yoğunluk (γ_{dmax}) 18.27 kN/m³, optimum nem içeriği (OMC) % 16 şeklinde verilmiştir.

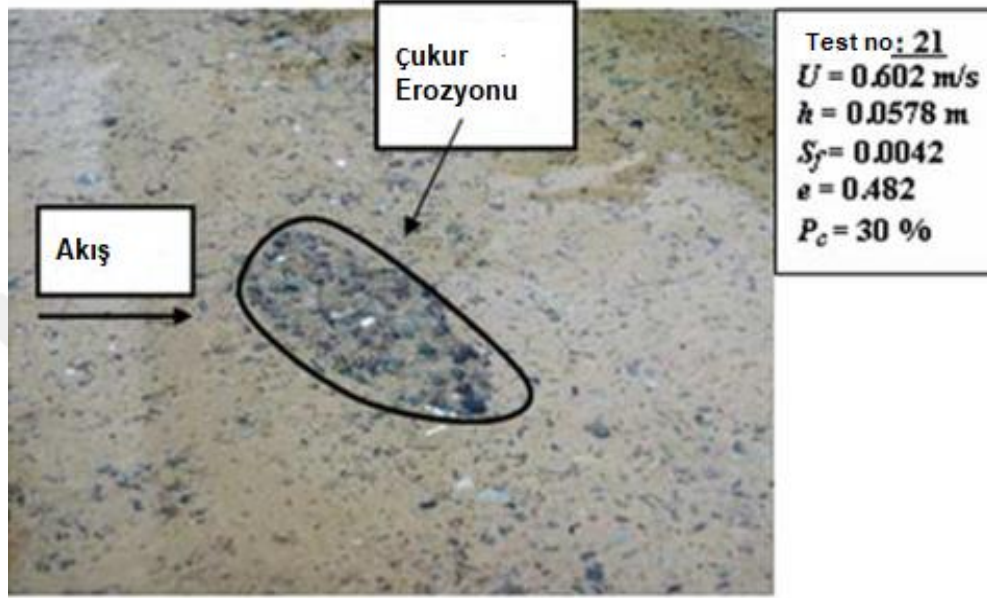
Deneyler 16 m uzunluğunda, 0,75 m genişliğinde ve 0,5 m derinliğinde eğimli bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal girişinden itibaren 8.0 m mesafeden başlayarak 6.0 m uzunluğunda, 0.75 m genişliğinde ve 0.13 m derinliğinde test kesiti mevcuttur. Karıştırılan malzemeler polietilen ile kaplanıp homojen bir nem dağılımı elde etmek için 24 saat dinlenmeye bırakılmıştır. Dinamik sıkıştırma yöntemiyle karışım, her biri 0.04 m kalınlığa sahip üç farklı tabaka halinde kanal test bölümünde sıkıştırılmıştır. Her katman, kanal genişliğine uyacak şekilde özel olarak imal edilmiş 0.23 m çapında ve 0.63 m uzunluğunda Şekil 2.12’de gösterilen silindir ile sıkıştırılmıştır. Kanal böylece deneye başlamak üzere hazır hale getirilmiştir. Her testte kanala yavaşça su doldurulup su akışını kontrol eden kapak da aynı anda çalıştırılarak düzenli bir akış sağlanmaktadır.



Şekil 2.12.Yatak malzemesini sıkıştırmak için kullanılan kanal genişliğine uyacak şekilde özel olarak üretilmiş silindir (Kothyari ve Jain, 2008)

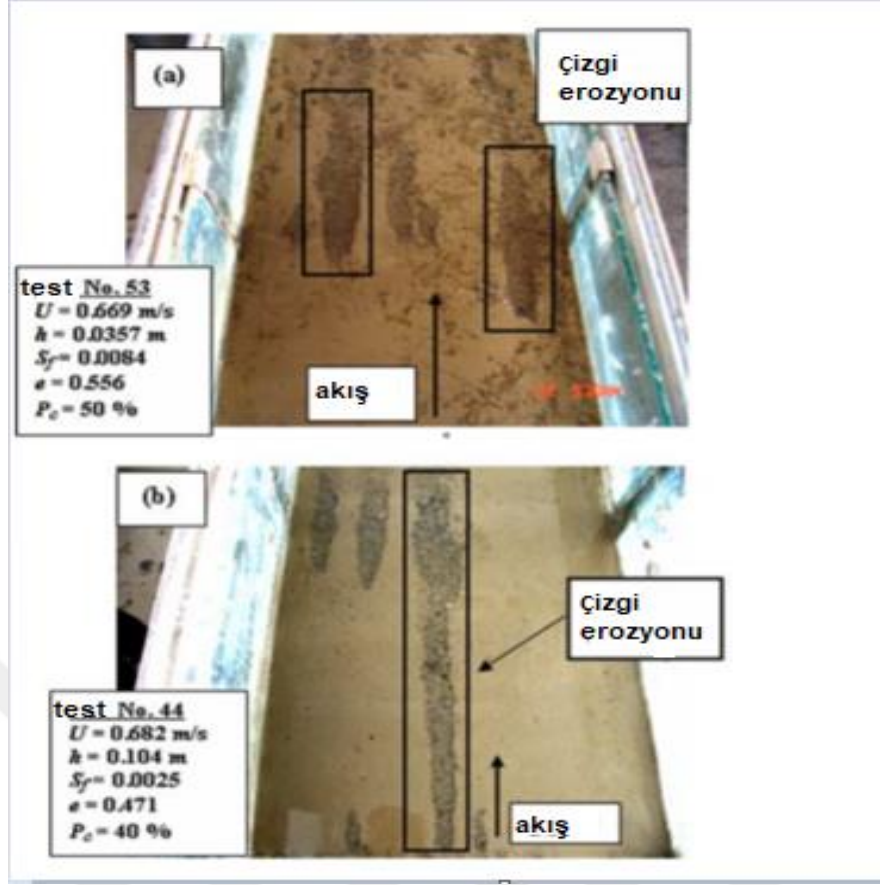
Çalışmada başlangıç hareket durumu için üç tür tip tanımlanmış ve bu tipler her biri yeni başlayan hareket durumunda belirlenmiştir.

1. İlki çukur erozyonudur. Karışım tabanda düşük kil muhtevasında (% 30'a kadar) tabandan ayrılma genellikle küçük parçacıklar şeklinde olduğu ve tabanın farklı yerlerinde zemin yüzeyi üzerinde çukurlar olduğu gözlenmiştir. Bu çukurlar 4 ile 5 cm uzunluğunda ve birkaç cm genişliğinde olup zaman ilerledikçe boyutları arttığı belirtilmiştir (Şekil 2.13).



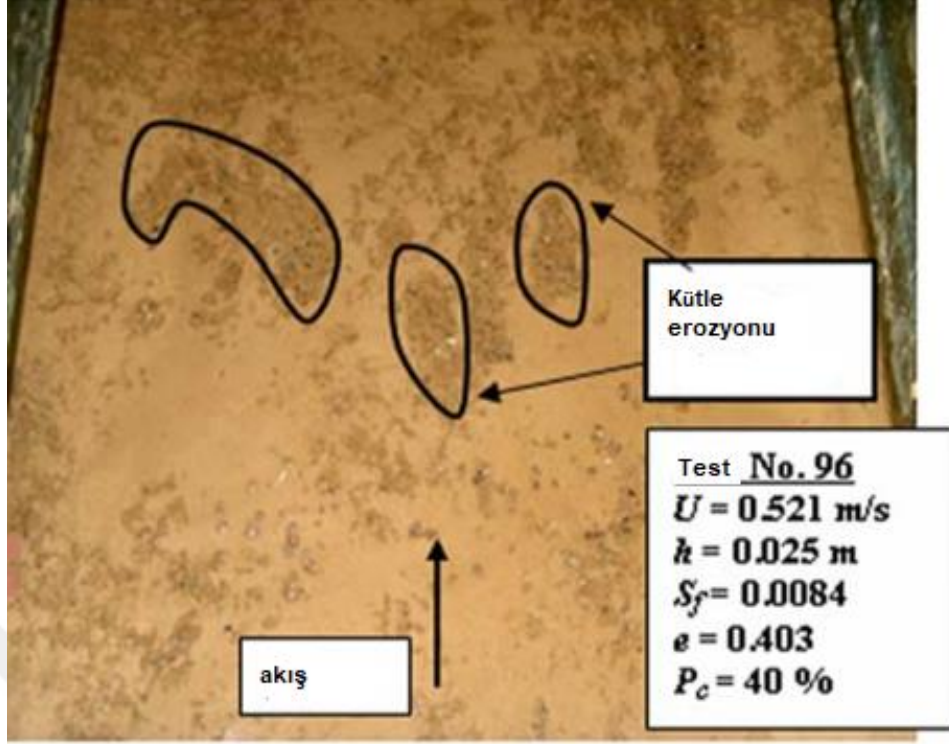
Şekil 2.13. Başlangıç hareketinde gözlenen çukur erozyonu görüntüsü (Kothyari ve Jain, 2008)

2. Diğeri, çizgi erozyonudur. Karışım tabanda daha yüksek kil muhtevasında (% 30'dan fazla), ayrılma zemin yüzeyinden ince tabaka parçasının ayrılmasıyla başladığı ve bu ayrılma hem uzunlamasına hem de yanlamasına devam ederek ilerlediği gözlenmiştir. Bu çizgilerin daha sık olarak kanal test bölümünün yukarı akış kısmında görüldükleri ancak ara sıra test bölümünün diğer bölümlerinde de ortaya çıktıkları fark edilmiştir. Boyutları 2 ila 3 cm genişliğinde ve uzunlamasına yaklaşık olarak 30 40 cm'ye çıkacak kadar büyük olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Başlangıç hareketinde gözlenen çizgi erozyonu görüntüsü a)test 53 b) test 44
(Kothyari ve Jain, 2008)

3. Son olarak gözlenen aşama ise kütle erozyonudur. Bu tip durum, özellikle daha yüksek enerji değerleri için kil-kum-çakıl karışımlarında ve % 30'dan fazla kil yüzdelere sahip karışımlar için sıklıkla gözlemlenmiştir. Burada, oyulmanın değişen boyutlarda yığınlar şeklinde meydana geldiği fark edilmiştir. Bu yığınlar yeterli kalınlığa, 1 ile 2 cm uzunluğa ve birkaç milimetre genişliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda, şekilde gösterildiği gibi zemin yüzeyinde bir dizi çukur görüldüğü tespit edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Başlangıç hareketinde gözlenen kütle erozyonu görüntüsü (Kothyari ve Jain, 2008)

Karışım taban üzerinde toplam 108 deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunların 62 tanesi kil ve çakıl karışımlarından oluşan kohezyonlu zemin için başlangıç hareket durumuna karşılık gelirken, kalan 46 tanesi kil, kum ve çakıl karışımlarından oluşan kohezyonlu zemin için başlangıç hareket durumunu incelemiştir.

Çalışmada ayrıca kohezyon içeren melzemelerin başlangıç hareketi için boyutsal değerlendirme yapılmıştır. Çok sayıda birbirine bağlı değişken, kohezyonlu karışımların hareket koşullarının başlaması için kayma gerilimindeki değişimi etkilemektedir. Bu tür varyasyonları analitik yöntemlerle araştırmak zor olduğundan parametreleri incelemek için boyutsal analiz kullanılmaktadır. Kohezyonlu taban karışımları için kritik kayma geriliminin esas olarak Denklem (2.20)'de gösterilen değerlerden etkilendiği düşünülmektedir.

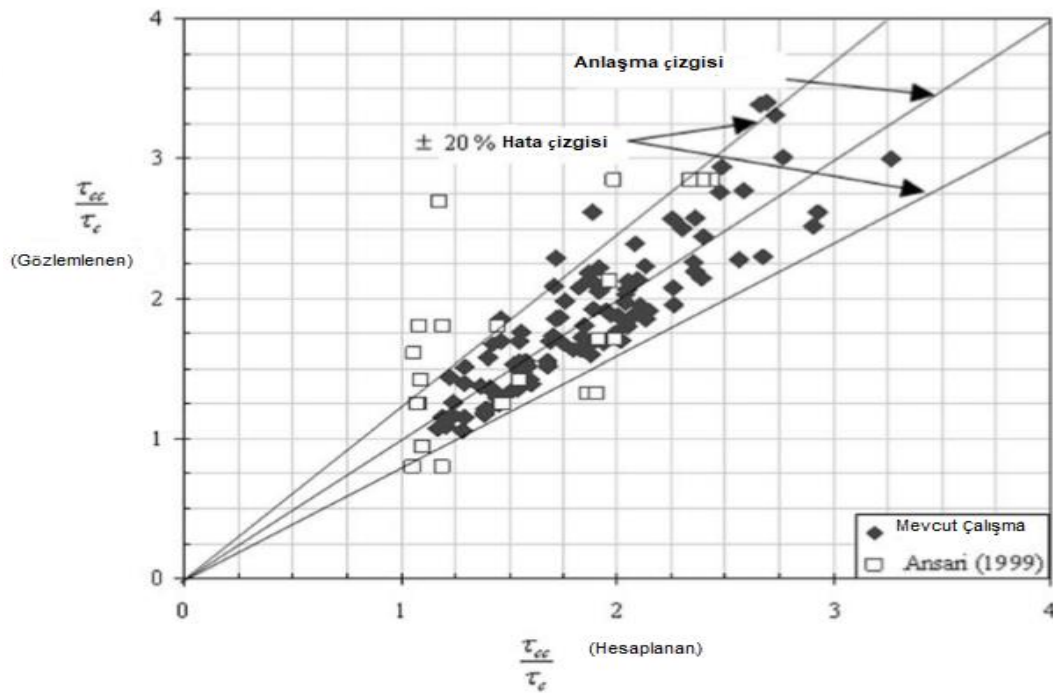
$$\tau_{cc}=f(P_c,e,d_a,\Delta\gamma_s,UCS,\tau_c) \quad (2.20)$$

Burada P_c kil yüzdesi, e boşluk oranı, $\Delta\gamma_s$ Ktı maddenin ve akışın özgül ağırlığındaki fark, UCS kohezyon içeren zeminde serbest basınç dayanımı, d_a karışım tabanın aritmetik ortalama boyutu τ_c Shields'in kohezyonlu karışım zeminle aynı aritmetik ortalamaya sahip kohezyonsuz kritik kayma gerilmesi değeridir.

Araştırmacılar tüm ilgili boyutsuz parametreleri kullanarak bir dizi deneme yaptıktan sonra τ_{cc} için Denklem (2.21) önerilmiştir.

$$\frac{\tau_{cc}}{\tau_c} = 0.94 (1 + P_c)^{3/2} e^{-1/6} (1 + 0.001 UCS^*)^{9/20} \quad (2.21)$$

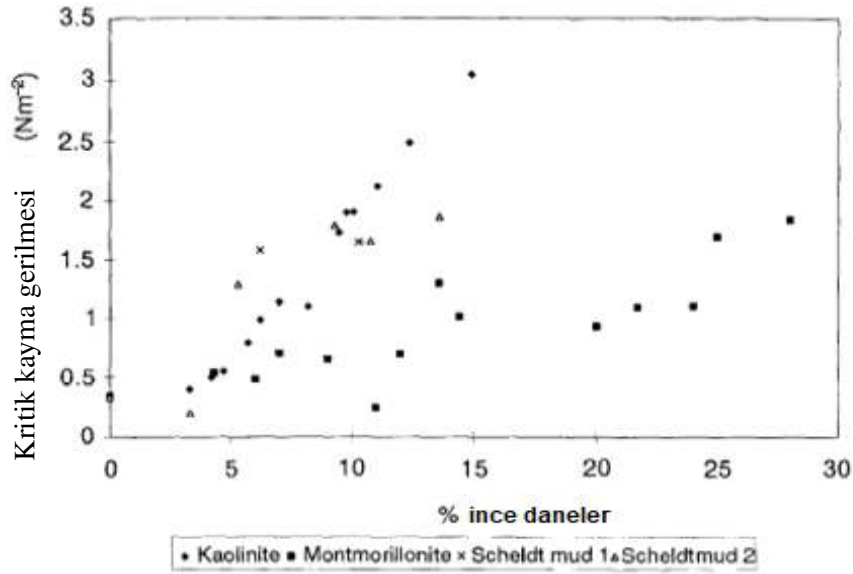
Grafiksel bir karşılaştırma için gözlenen τ_{cc} / τ_c değerleri, denklem (2.21) ile hesaplanan değerlere karşı Şekil 2.16’da Ansarin (1999)’da yaptığı çalışma baz alınarak grafiğe aktarılmıştır. Denklem (2.21), $10 \leq P_c (\%) \leq 50$ aralığında geçerli olan ve karışımda çakıl içeren koheziv zeminler için kolayca ölçülebilen parametreler cinsinden τ_{cc}/τ_c tahmini için önerilmiştir.



Şekil 2.16. Gözlemlenen ve hesaplanan τ_{cc} / τ_c karşılaştırması (Kothyari ve Jain, 2008)

Mitchener ve Torfs (1995) ‘çamur/kum karışımında erozyon’ başlıklı çalışmasında karışım tabanların erozyon davranışı karakterize edilmiştir. Bu çalışmada, Katholieke Universiteit Leuven (KUL) Hidrolik Laboratuvarı ve HR Wallingford Ltd (HR) tarafından gerçekleştirilen çok sayıda laboratuvar ve saha testine dayalı farklı katı maddelerin erozyonu incelenmektedir. Kil-kum karışım tabanların erozyon davranışının temel özellikleri, oyulma problemlerine uygulanabilmeleri için KUL ve HR Wallingford'dan alınan verilere dayalı olarak sunulmaktadır. Testlerde kullanılan taban malzemeleri farklı konumlardan çeşitli doğal çökeltilerden ve ayrıca farklı mineral türlerinden oluşmaktadır.

HR Carousel'de, Hong Kong çamurunun konsolide zeminin üst 5 mm'sine farklı kum yüzdelерinin eklendiği erozyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu derinlikte homojen bir şekilde karışım bir taban elde edilmiştir. Kullanılan çamur, Hong Kong'daki Victoria Limanı'ndan gelen deniz kabukları ve büyük organik parçacıkları çıkarmak için 200 µm'lik bir elekten elenmiştir. Kum, ortalama çapı 230 µm olan King's Lynn kumu kullanılmıştır. şekil 2.17'de %0 ile %60 kum yüzdesinde farklı tipteki koheziv malzemelerin kayma gerilmesindeki değişimin belirlenmesi hedeflenmiştir.

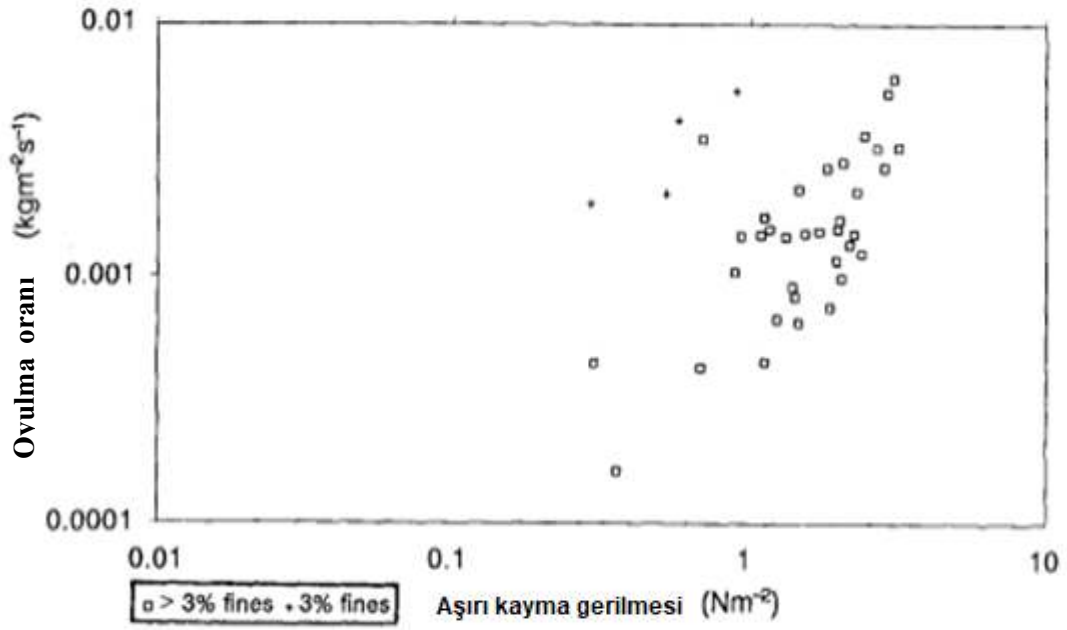


şekil 2.17. Erozyon kritik kayma gerilmesinin farklı tipteki koheziv materyale göre değişimi

Kum mevcudiyetinin hem yüzey erozyonu kayma gerilimini arttırdığı hem de uygulanan belirli bir kayma geriliminde oyulma derinliğini azalttığını gözlemişlerdir. Erozyon kayma gerilmesi, karışım tabanlar için derinlikle birlikte sadece çamur olan tabana göre daha hızlı arttığı görölmüştür. Kritik kayma gerilmesi % 0 ile %11 kum içeriği için yaklaşık 0.1 Nm⁻² iken %20 ve daha yüksek kum içeriğinde 0.2 Nm⁻² olarak sonuçlandığı bildirilmiştir. Kum içeren karışım tabanlarda erozyon hızlarının da sadece çamur içeren zeminlere göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

KUL'da yapılan kanal testleri, kuma artan miktarlarda koheziv malzemenin eklendiği homojen karışımların erozyon oranını araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Bu testler için kullanılan koheziv malzemeler, kaolinit, montmorillonit ve Belçika'daki Scheldt Estuary'den

iki tür doğal tortu idir. Bu testler için kullanılan kum, 230 μm 'lik d_{50} ince kumdur. Kuma eklenen ince malzeme miktarı ($<62,5 \mu\text{m}$ ϕ) %0 ile %30 arasında değişmiş ve tüm numunelere karşılık gelen kritik kayma gerilmeleri yaklaşık 0,35 ila 2,6 Nm^{-2} arasında değer almaktadır. Test sonuçları, kum içeren karışım zemindeki erozyon direncinin genel olarak eklenen çamurla arttığını, ancak artış oranının farklı türde koheziv malzeme için değiştiğini göstermektedir.



Şekil 2.18. Farklı kaolinit/kum karışımalarında erozyon oranları

Şekil 2.18, kaolinit ve kumdan oluşan homojen karışımalar için aşırı kayma gerilimine karşı oyulma oranını göstermektedir. Hesaplanan erozyon oranları, % 3 kil içeren tabanlar için, daha fazla koheziv malzeme içerenlerden ($>\% 3$) daha yüksektir. Sonuçlar, kuma yaklaşık % 3'ten fazla kaolinit eklendiğinde erozyon oranının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.

Laboratuvarda hazırlanan karışım tabanlarda elde edilen sonuçların özeti ise şu şekilde sıralanmıştır:

- Erozyon için kritik kayma gerilimi, çamura kum eklendiğinde, bölgede kum içeriği ile (% 0 ila % 50 arasında) çok az artış göstermektedir.

- Çamur kuma eklendiğinde (%0 ile %30 çamur) kritik kayma gerilmesi önemli ölçüde artmakta ve bu da oyulma derinliğindeki azalışa sebep olmaktadır. Bu durum, çamur fraksiyonunun kohezivliğine ve kumun tane boyutuna bağlı olmaktadır.

- Kum içermeyen homojen çamur tabanlarında, ağırlıkça % 50'ye kadar ilave kum içeren tabanlar için hesaplanan oyulma oranlarından büyük bir mertebeye kadar daha yüksek oranlarda aşıldığı görülmektedir. Küçük miktarlarda çamurun (ağırlıkça yüzde birkaç) kuma eklenmesi bile erozyon oranını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

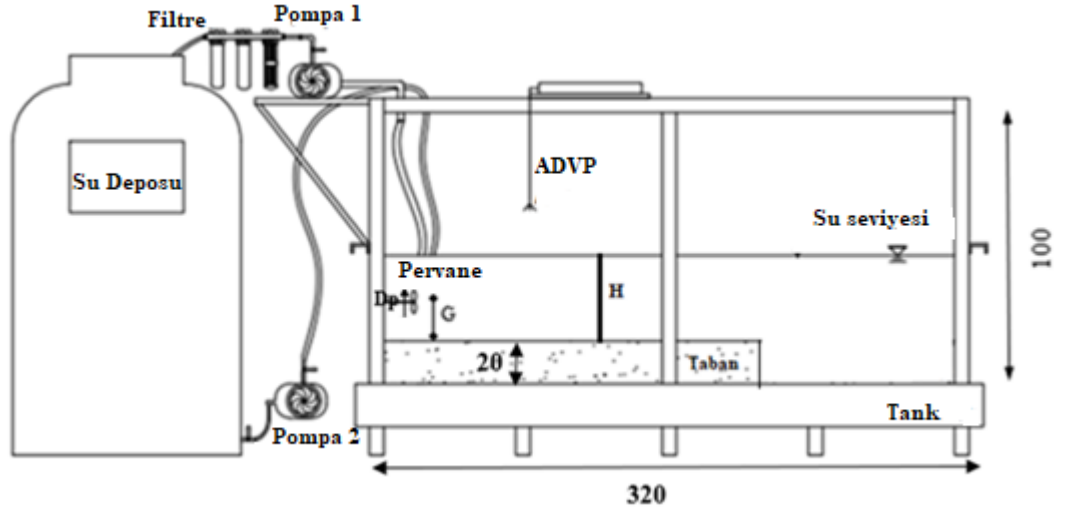
- Kuma % 3'ten fazla çamur eklendiğinde, karışım bir tabanın oyulma oranı 5 kat kadar azaltılabileceğini ve çamur tabana % 20'den fazla kum eklenirse de 10 kat azaltılabileceğini belirlemişlerdir.



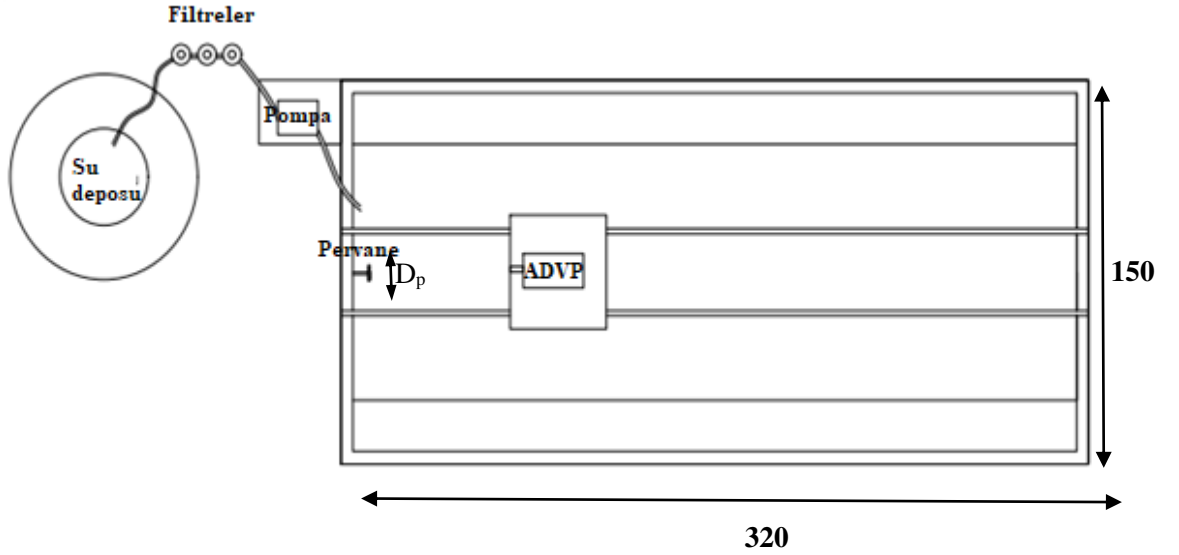
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Düzenegi

Kırıkkale Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında 3,2 m uzunluğuna, 1,5 m genişliğine ve 1 m yüksekliğine sahip laboratuvar tankı inşa edilmiştir. Bu tankın tek yüzü camdan diğer 3 yüzü ise çelikten oluşmaktadır. Tankı su ile doldurmak için 2 adet pompa ve 1 adet depo kullanılmıştır. Tankın sağ köşe kısmında 1 adet tahliye noktası bulunmakta ve ayrıca kanal dolum ve boşaltım işlemine yardımcı tankın yan kısmındaki havuz kullanılmaktadır. Deniz tabanını benzeştirmek için tankın içine 0,20 m yüksekliğinde, 2 m uzunluğunda ve 1,5 m genişliğinde kum veya kil-kum karışım taban yerleştirilmiştir. Deney tankı üzerine inşa edilmiş X ve Y doğrultularında hareket edebilen kızaklı bir ölçüm arabası mevcuttur. Bu sistem üzerine ADVP (Akustik Doppler Hızölçer) yerleştirilmiş ve kızak mekanizması sayesinde X-Y yönlerinde hareket sağlanmıştır. Deneyde su derinliği 0.40 m seviyesinde sabit tutulmuştur. Hareketli taban malzemelerinin depoya girişini engellemek için kanal ile depo arasında 3 adet filtre yerleştirilmiştir. Bu filtreler ortalama tane boyutu 10^{-3} mm'den büyük olan taban malzemesinin filtre içine hapsolmasını sağlamaktadır. Şekil 3.1'de deney tankının çizimi gösterilmiştir. Şekildeki birimler cm cinsinden ölçeklendirilmiştir.



a) Deney düzeneğinin karşıdan görünüşü



b) Deney düzeneğinin üstten görünüşü

Şekil 3.1. Deney tankı görünümü

3.2. Taban Malzemesi

3.2.1. Kohezyon İçermeyen Taban Malzemesi

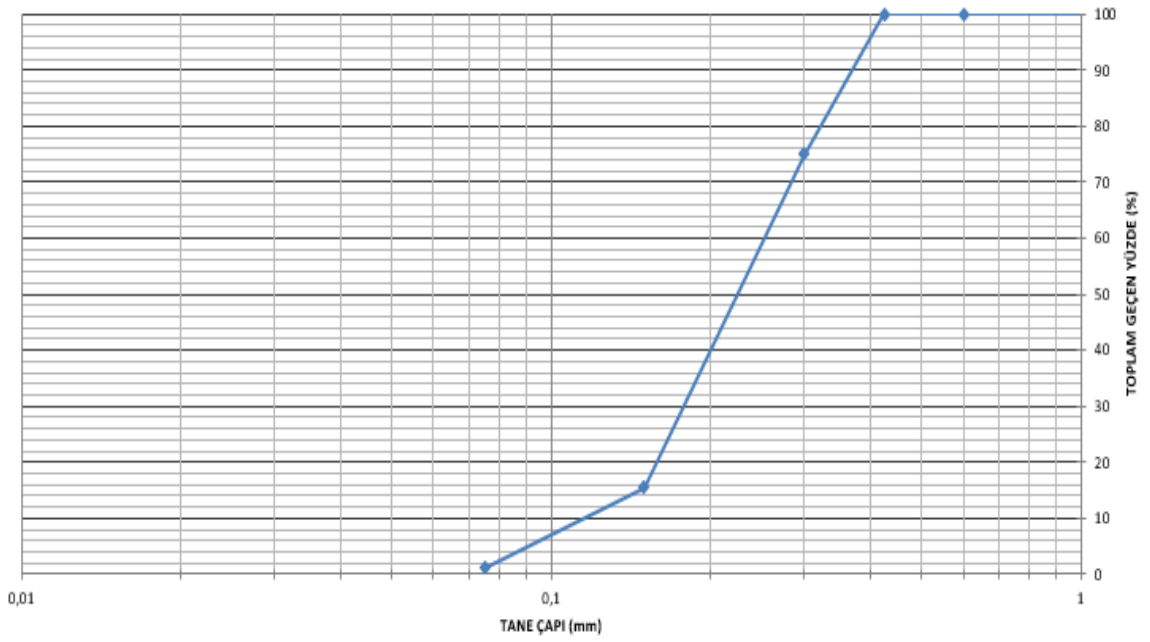
Deniz tabanını benzeştirmek için kohezyonsuz malzeme olan kuvars kumu kullanılmıştır. Kumun ortalama elek çapı 0.24 mm ($d_{50}=0.24\text{mm}$) olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.2, kullanılan malzemenin elek analizini göstermektedir. Kuvars kumunun geometrik

standart sapması (σ_g) denklem (3.2) ile elde edilmiştir.

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (3.2)$$

Burada d_{16} : ağırlıkça %16'nın geçtiği çapı ve d_{84} : ağırlıkça %84'ün geçtiği çapları ifade etmektedir.

Kuvars kumunun geometrik standart sapması (σ_g) denklem (3.2) kullanılarak hesaplandığında 1,5 olarak bulunmaktadır.



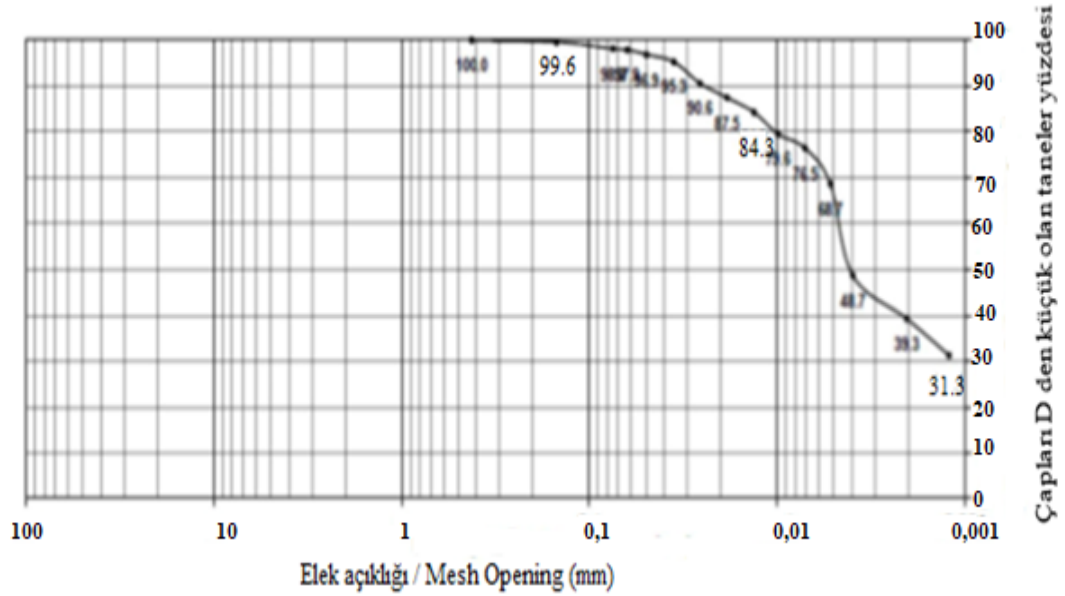
Şekil 3.2. Tane boyutu dağılımı (Hafızoğulları, 2019)

3.2.2. Kohezyon İçeren Taban Malzemesi

Bu çalışma kapsamında yapılacak olan karışım deneyleri için seçilen Kaolinit kili özellikleri laboratuvar deneyleri ile elde edilmiştir. Tablo 3.2'de kilin özellikleri özetlenmiş ve Şekil 3.3'de kilin hidrometri deneyi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.1. Kil özellikleri

Özgöl kütle (ρ_{kil}) (t/m ³)	2.77
Likit limit (LL%)	43.7
Plastik limit (PL%)	20.1
Plastisite indisi	23.6
Medyan tane çapı (d_{50}) (mm)	0.0042



Şekil 3.3. Kil granülometre eğrişi

3.3. Pervane Sistemi

Deneyde farklı hız aralığında ve farklı çaplarda veri almayı sağlayan Endura Mina tipi su altında çalışabilen bir pervane sistemi kullanılmıştır. Bu tip motorun dönüş hızı kontrolünü sağlayabilmek için bazı sistemler kurulmuştur. Bölüm 3.3.1’de bu sistemden bahsedilecektir.

3.3.1. Sistem Yapısı

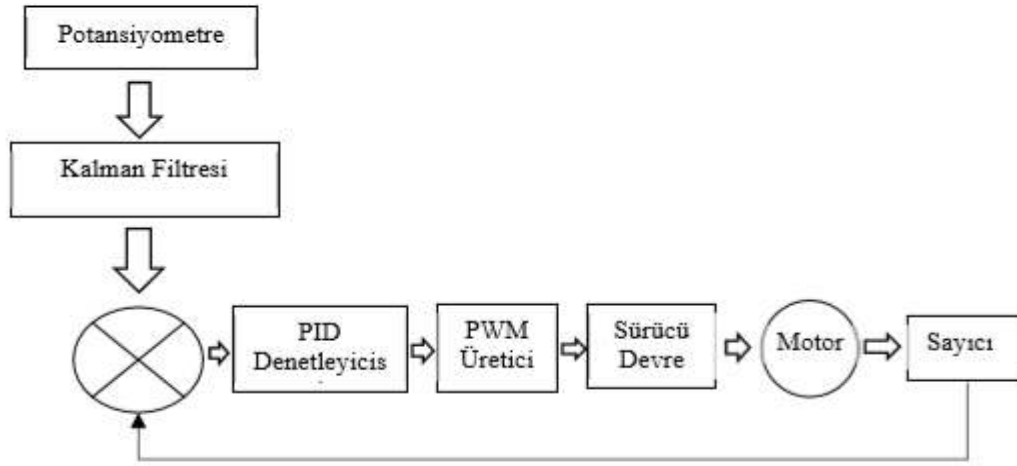
Motorun farklı hız aralığında çalışmasını sağlayan sistem, yazılım ve donanım olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Donanım 12V DC motor, 12V güç kaynağı, sürücü, arduino kartları ve LCD ekranından meydana gelmektedir. Yazılım kısmında ise fiziksel uygulama platformu olan arduino kullanılmıştır.

3.3.1.1. Donanım

PID (orantılı-integral-türev) kontrol sisteminde yapılan toplam hatayı hesaplayarak giderme yöntemidir (Gökçe vd., 2021). PID kontrolünde gereken geri besleme sinyalini sağlamak adına motor çıkış miline mıknatıs ve hall sensörü yerleştirilmiştir. Vnh2sp30 kodu 16V 30a kapasiteli motor sürücü devresi ile motor çalıştırılmıştır. Motor devri aralığı ayarlaması için dışarıdan fiziksel müdahale ile devri kolayca değiştirilebilen potansiyometre kullanılmıştır. İstenilen hız ve anlık hız değerlerinin elde edilebilmesi için OLED (Organik Işık Yayan Diyot) grafik ekranı kullanılmıştır.

3.3.1.2. Yazılım

Motorun kararlı çalışması için gerekli olan PID kontrolcü ve Kalman filtreleri kullanılmıştır. Sisteme giriş bildirisi olarak potansiyometreden çıkan değer kullanılmıştır. Giriş sinyali pervane hızını belirlediğinden pervane hızında oluşan dalgalanmaların azaltılması adına kalman filtresi kullanılmıştır. Motorun istenilen hız aralığında çalışmasını sağlamak için PID kontrolcü uygulanmıştır. Bu sistem sayesinde motor istenilen hıza kolayca ulaşabilmekte ve sabit bir şekilde aynı hızda kalabilmektedir. Şekil 3.4'te pervane sistemini çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 3.4. Pervane sisteminin çalışma şeması

3.4. Pervane Özellikleri

Bu bölümde pervane kısımlarından kısaca bahsedilecek ve daha sonra pervane özellikleri incelenecektir (Güner vd., 1999).

- Pervane Göbeği

Disk şeklinde olup pervanenin merkezinde bulunmaktadır. Bu göbek pervanenin şafta montajını sağlamaktadır. Pervane göbeği itme görevinde bulunmadığı için göbeği olmayan bir pervane istenmektedir fakat bu mümkün olamamaktadır. Pervanenin göbek çapı pervane çapının %14'ünün altına düştüğü pek nadir olmaktadır.

- Pervane Siğili, Kaması, Yuvası

Pervaneye kama yuvasının açılma nedenleri vardır bunlardan birkaçı pervaneye şafttan gelen gücün pervanenin göbek içerisinde dönmesine engel olmak ve tork yükünü taşıma amaçlıdır. Bu oluğa kama oturtturulup şaftın göbekte kayması engellenmesi gerekmektedir.

- Pervane Kanatları

Geminin hareketini gerçekleştiren bu parçalar pervane göbeğinden çıkmakta ve basınç dağılımıyla itme kuvvetinin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Pervanenin kavitasyon, kanat sayısı, titreşim, pervane monte yerinin kısıtları gibi nedenlere göre tespit edilmektedir. Bazı pervanelerin kanat uçlarının pala şeklinde olma zorunluluğu meydana gelmektedir.

- Kanat Yüzü, Kanat Sırtı

Pervane kanadının yüzü en çok yüksek basınca maruz kalan kısımdır. Gemi kıç tarafından baş tarafına bakıldığı zaman kanat yüzü görülmektedir. Düşük basınca maruz kalan kısım ise kanat sırtıdır. Bu kısma vakum kısmı da denmektedir.

- Kanat Ucu, Kanat Kökü

Kanadın şaft noktasından en uzak kısmına kanat ucu denmektedir. Pervane kanatlarının göbek ile birleştiği kısım ise kanat kökü olarak tanımlanır.

- Önder Kenar (Pervane Kanat Giriş Ucu) ve Takip Kenar (Kanat Çıkış Ucu)

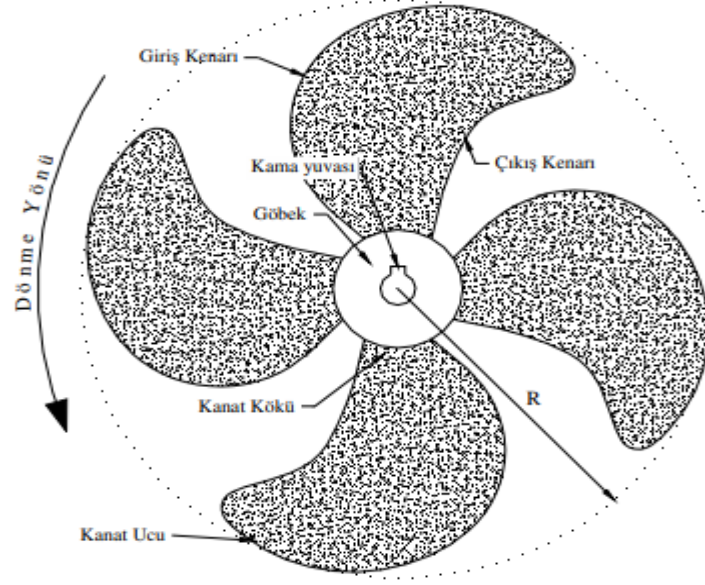
Pervane dönerken kanat kesitinin suya temasında suyu yardığı kısma önder kenar, suyun kanat yüzeyinden çıkışı olduğu kısma ise takip kenar denilmektedir.

- Pervane Dönüş Yönü

Pervane dönüş yönleri sağa pervane ve sola pervane olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu özellik pervanenin en önemli özelliklerindendir. Dönüş yönü, pervanenin hareketinde gemiyi ileri iterken hangi yöne döndüğüdür. Gemiye kıç tarafından bakan biri sağa dönüşlü bir pervaneyi saat yönünde döndüğünü, gemiyi ileri götüren pervane olarak, sola dönüşlü pervanede de saatin tersi yönde döndüğünde gemiyi ileri götüren pervane olarak gözlemlemektedir.

- Piç (Hatve)

Pervanenin su içerisinde ilerleyişi bir vidanın yumuşak bir tahtaya girişindeki ilerlemesine benzer olmaktadır. Bir vidada gözlemlenen gibi pervanede de her dönüşte sabit bir miktar ilerleme gözlenecektir. Pervanenin tam bir dönüşünde ilerlediği mesafeye pervane hatvesi veya pervane piçi olarak tanımlanır. Tanımladığımız bu piç, nominal piç olarak bilinmektedir. Aslında, pervane akışkan bir ortamda ilerlediği için her tur dönüşünde tanımlanan piç değerinden daha az ilerleme durumu söz konusudur. Bu ilerleme durumu gerçek piç olarak tanımlanmaktadır. Gerçek piç ile nominal piç arasında oluşan farka kayma (slip) denmektedir.



Şekil 3.5. Pervane kısımlarının genel görünümü (Güner vd., 1999)

Deneylede kullanılan pervane çapı 0.06m olarak seçilmiştir. Pervane pirinçten üretilmiştir. Pervane açıklığı yani pervane göbeğinden itibaren kanal tabanına olan düşey mesafe (G) 0.06m olarak seçilmiştir. Pervaneye ait özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir.

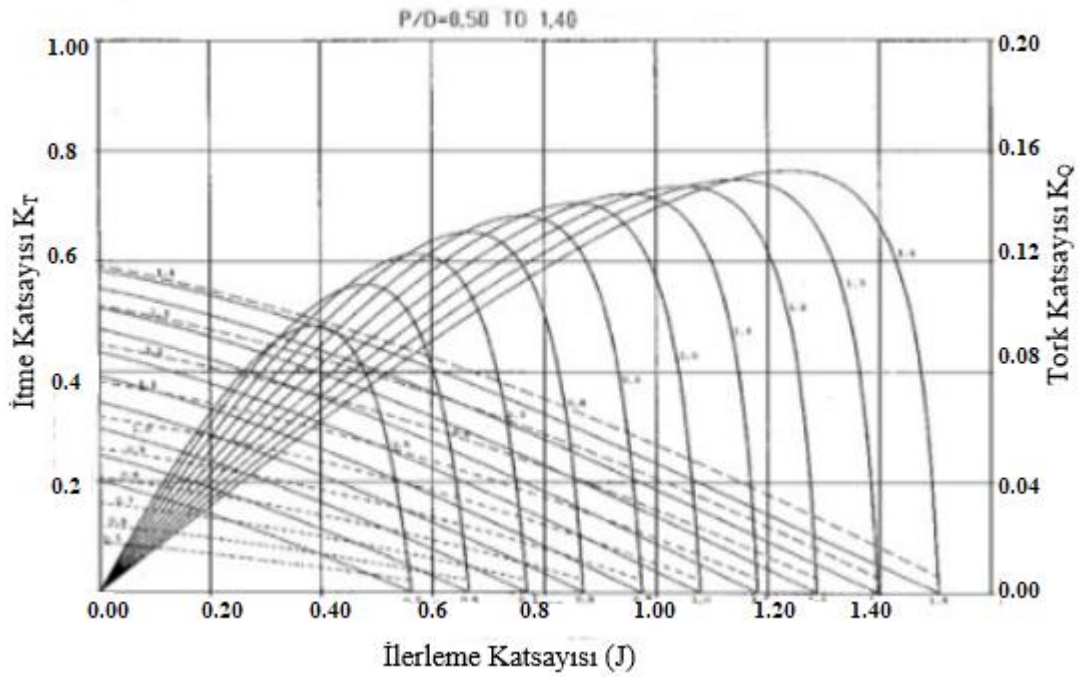


Şekil 3.6. Deneylede kullanılan pervane örneği (Maritime Models, 2013)

Tablo 3.2. Pervane özellikleri

Çap (D_p), (m)	0,06
Kanat Sayısı (N)	4
Kanat Alanı Oranı (β)	0,60
Hatve Oranı (P/D_p)	1,025
İtme Katsayısı (C_T)	0,35
Malzeme	Pirinç

Kullanılan pervane tipi B serisi Wageningen pervanesi olduğundan Şekil 3.7 kullanılarak itme katsayısı 0.35 olarak bulunmuştur.



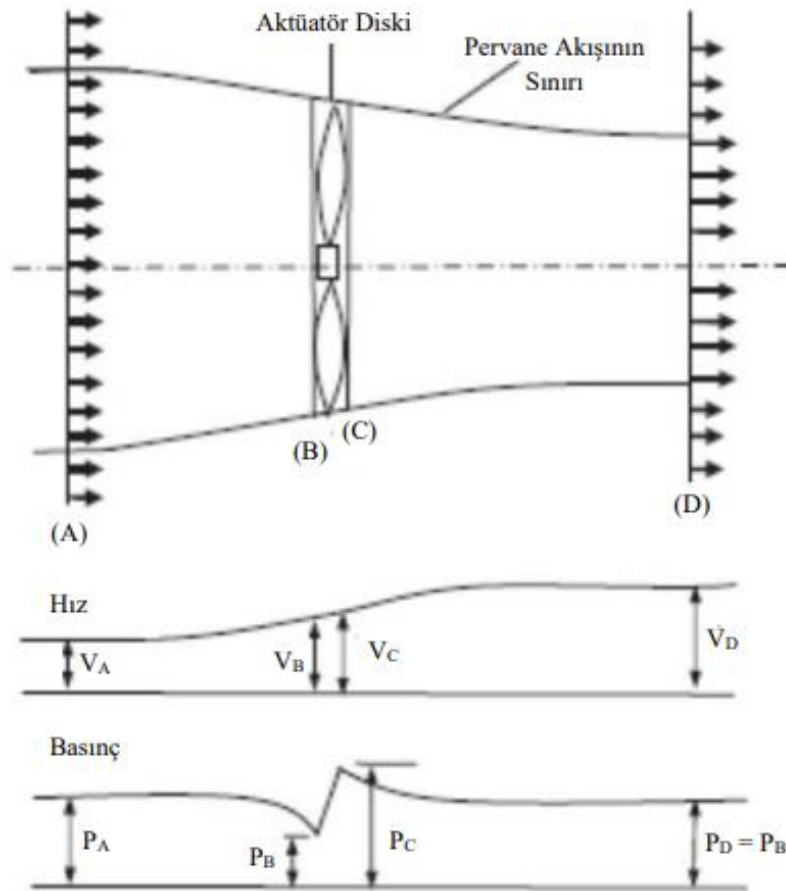
Şekil 3.7. Wageningen B seri pervane için itme katsayısı, ilerleme katsayısı ve tork katsayısı arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler (Barnitsas vd., 1981)

Pervane jet akımını tanımlayan en önemli parametre pervane çıkış hızıdır. Bu hızın belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmış ve çeşitli formüller elde edilmiştir. Günümüzde en yaygın kullanılan yöntem, eksenel momentum yöntemidir. Blaauw ve Van de Kaa (1978)

alışmalarında pervane jeti karakteristiklerini belirlerken eksenel momentum teorisini kullanmışlardır. Bu teori kabulleri şunlardır (Lam vd., 2012):

- Pervane aynı çapa sahip bir disk olarak kabul edilmektedir.
- Disk, ideal akışkan içinde batık bir haldedir.
- Disk kalınlığı ihmal edilebilir.
- Diske verilen enerji, dönüş hareketi meydana gelmeksizin sıvıya verilmektedir.
- Disk sonsuz sayıda dönen kanattan oluşmuştur ve sonsuz hızda dönmektedir.

Şekil 3.8, pervaneyi ve pervaneyi çevreleyen akışkanı göstermektedir. Bu basit hale getirilmiş görselde, pervane akım sınırı, üzerinde basınç ve hız süreksizliğinin olduğu bir yüzeydir. Aslında pervane akımının kenarındaki basınç ve hızın azalma nedeni hareketsiz ortam akışkanı ile akımın karışmasından kaynaklanmaktadır (Chadwick vd., 2005).



Şekil 3.8. İdeal bir aktüatör diski olarak pervane (Chadwick vd., 2005)

Şekil 3.8’te momentum değişimi sonucunda bir itme kuvveti oluşmaktadır. Bernoulli denklemi uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilmiştir (Stewart, 1992):

$$T = \frac{1}{2} \rho A (V_D^2 - V_A^2) \quad (3.3)$$

Burada T, pervane itmesi; ρ , akışkanın özgül ağırlığı; A, disk alanı; V_D ve V_A , D ve A noktalarındaki hızları göstermektedir.

Pervane itmesi boyut analizi kullanılarak elde edilmiştir (Stewart, 1992):

$$T = C_T \rho n^2 D_p^4 \quad (3.4)$$

Burada C_T , itme katsayısını; n, pervanenin saniyedeki dönüş hızını ve D_p pervane çapını göstermektedir. Denklem (3.3) ile Denklem (3.4) beraber irdelendiğinde Denklem (3.5) elde edilmektedir.

$$\frac{1}{2} \rho A (V_D^2 - V_A^2) = K_T \rho n^2 D_p^4 \quad (3.5)$$

İlerleme hızın düşük olduğu durumda $V_A = 0$ ve $A = \frac{\pi D^2}{4}$ olarak kabul edilir ve Denklem (3.6) elde edilir.

$$V_D = U_0 = 1.59 n D_p \sqrt{C_t} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6), pervane çıkış hızı denklemdir. U_0 çıkış hızı PIANC (2015) tarafından verilen Denklem (3.7) ile hesaplanabilmektedir.

$$U_0 = E_0 n D_p \sqrt{C_t} \quad (3.7)$$

PIANC (2015) çalışmasında E_0 katsayısı 1.6 olarak verilmiştir.

3.5. Ölçüm Sistemi

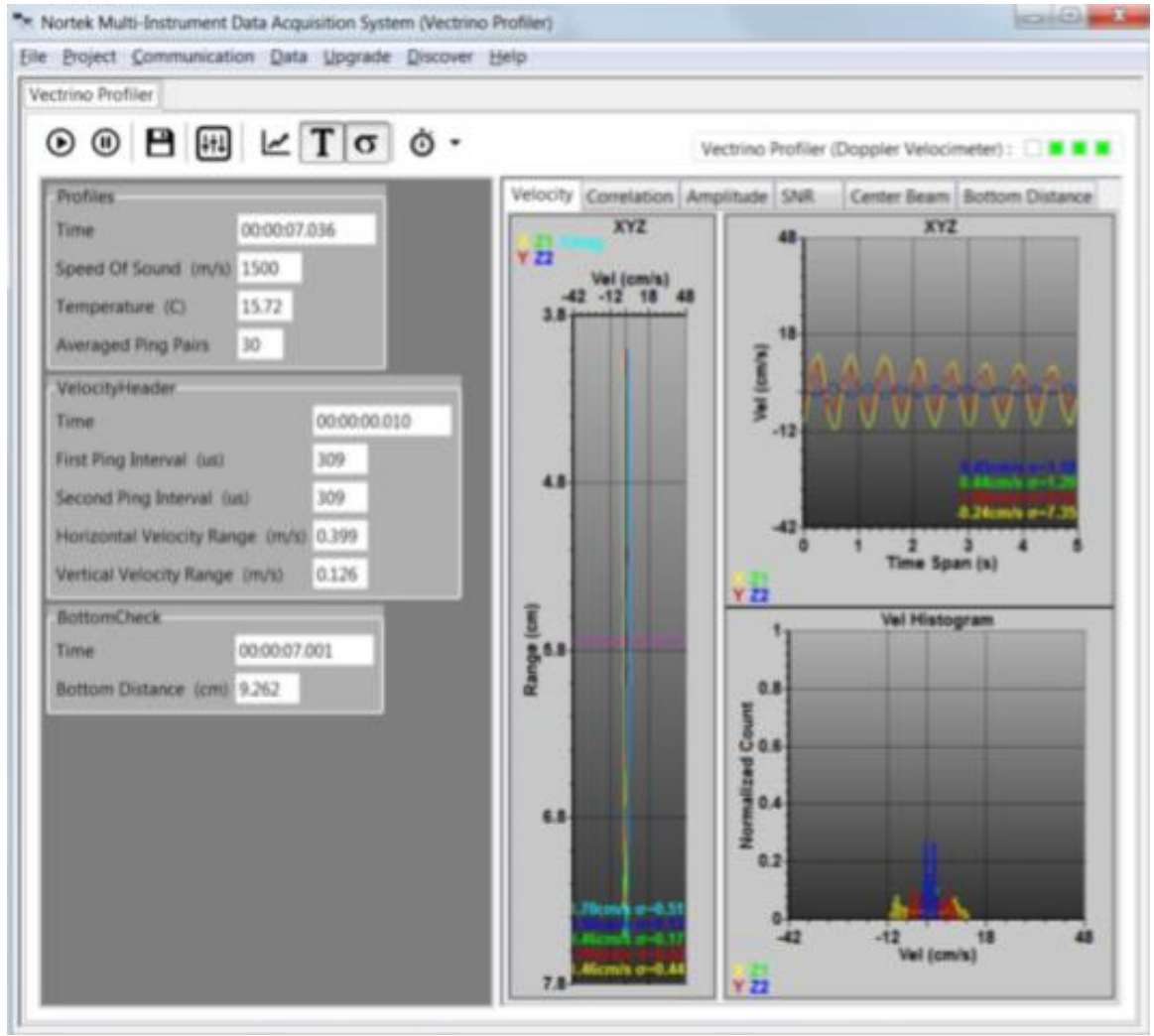
Deneylerde deniz tabanı topografyasındaki değişimleri belirlemek adına oyulma derinliği ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler kızaklı sistem üzerine yerleştirilen Nortek Vectrino II model Akustik Doppler Hızölçer (ADVP) ile gerçekleştirilmiştir. ADVP; pervaneli ve elektromanyetik ölçüm cihazları, Laser Doppler Hız ölçerler (LDV) gibi diğer ölçüm cihazlarına alternatif olarak üretilmiş bir cihazdır (Sarker, 1998). Bu cihaz ses iletimi sağlayarak yüksek doğruluğa sahip ve üç doğrultuda hız bileşenlerini ölçebilen bir hız ölçeridir. ADVP’de bir adet merkez hatta bulunan iletici ve dört adet alıcı bulunmaktadır.

Çalışma prensibinde merkez transdüserden sinyal iletilir ve sonucunda suda askıda olan partiküllerden gelen yansımalarla Doppler kayması, dört alıcı tarafından alınmaktadır. Akustik sinyaller, alıcı ve iletili sinyallerin örnekleme hacminden 5 cm aşağıda birleşmesini sağlayacak şekilde yönlendirilmişlerdir (Hafizoğulları, 2019). Bu sinyallerin veri aldığı hacim örnekleme hacmi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.9). Probun kırmızı uzantısı, x yönündeki pozitif hızı göstermektedir ve akım doğrultusu yönünde yerleştirilmektedir. Bu çalışmada yapılan deneylerde aşağı yönlü prob kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Örnekleme hacmi (Vectrino II, Manuel, 2019)

ADVP ile ölçüm alınırken kullanılan Vectrino II yazılımında anlık olarak grafik, hız, derinlik ve birçok farklı ölçümü aynı anda gösterebilmektedir. Deney esnasında alınan ölçümler Vectrino II yazılımına kaydedilip verilerin dışa aktarımı için MATLAB programı kullanılmıştır. Bu programda kaydedilen verilerin ortalaması alınarak her noktadaki ortalama değer elde edilmiştir. Şekil 3.10’da kullanılan yazılımın ara yüz ekran görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Vectrino II ADVP yazılımının ekran görüntüsü (Vectrino II, Manuel, 2019)

ADVP'nin akustik frekansı 10MHzdir. Hız ölçümlerinde örnekleme frekansın değeri 100 Hzdir ve taban mesafe ölçümlerinde ise maksimum 10Hzlik frekans değerinde deney gerçekleştirilmiştir. ADVP'nin ses iletimi sağlayarak elde ettiği veriler sayesinde deney sırasında su ile dolu laboratuvar tankı boşaltılmadan tabanda oluşan oyulma profili ölçümünü mümkün kılmaktadır.

3.6. Boyut Analizi

Pervanelerin neden olduğu oyulmanın üzerindeki etkin boyutsuz parametrelerin belirlenmesi için boyut analizi yöntemi uygulanmaktadır. Dikdörtgen en kesitli ve kohezyonlu taban malzemesine sahip bir kanalda meydana gelen oyulma derinliğine etki eden

değişkenler Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3.Boyut analizi

	Büyüklik	Sembol	Birim	Boyut
1. Akışkana ait değişkenler	- Akışkanın özgül kütlesi - Akışkanın dinamik viskozitesi	ρ μ	Kg/m^3 Ns/m^2	ML^{-3} $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$
2. Akıma ait değişkenler	- Pervane jetinin çıkış hızı - Pervanenin frekansı - Pervane çapı - Su derinliği - Pervanenin karakteristik uzunluğu	U_0 n D_p H L_m	m/s $1/\text{s}$ m m m	LT^{-1} T^{-1} L L L
3. Taban malzemesine ait değişkenler	- Taban malzemesi boyutu - Taban malzemesi rölatif özgül kütlesi - Kil muhtevası - Başlangıç su muhtevası	d_{50} ρ'_s P_c W_c	m kg/m^3 ---- ----	L ML^{-3} ---- ----
4. Geometriye ait değişkenler	Pervane ekseninin tabana olan düşey uzaklığı	G	m	L
5. Diğer değişkenler	Yerçekimi ivmesi	g	m/sn^2	LT^{-2}

Tablo 3.4 Değişken boyutları

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
	$S_{\max}$	ρ_s	G	P_c	W_c	L_m	H	μ	g	n	D_p	d_{50}	ρ	U_0
M	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
L	1	-3	1	0	0	1	1	-1	1	0	1	1	-3	1
T	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-1	0	0	0	-1

$$k_2+k_{13}+k_8=0 \quad (3.8)$$

$$k_1-3k_2+k_3+k_6+k_7-k_8+k_9+k_{11}+k_{12}-3k_{13}+k_{14}=0 \quad (3.9)$$

$$-k_8-2k_9-k_{10}-k_{14}=0 \quad (3.10)$$

Bu ifadelerden,

$$k_{13}=-k_2-k_8 \quad (3.11)$$

$$k_{14}=-k_8-2k_9-k_{10} \quad (3.12)$$

$$k_{12}=-k_1+3k_2-k_3-k_6-k_7+k_8-k_9-k_{11}+3k_{13}-k_{14} \quad (3.13)$$

Denklem (3.11), (3.12), (3.13) ifadeleri kullanılarak Tablo 3.6’da gösterilen boyutsuzların üstel değerleri bulunmaktadır.

Tablo 3.5. Boyutsuz büyüklüklerin üstel değerleri

	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	k ₁₀	k ₁₁	k ₁₂	k ₁₃	k ₁₄
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-1	-1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0

Tabloda 3.6’da belirlenen boyutsuz büyüklükler şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Pi_1 = S_{\max} d_{50}^{-1} \quad (3.14)$$

$$\Pi_2 = \rho_s \rho^{-1} \quad (3.15)$$

$$\Pi_3 = G d_{50}^{-1} \quad (3.16)$$

$$\Pi_4 = P_c \quad (3.17)$$

$$\Pi_5 = W_c \quad (3.18)$$

$$\Pi_6 = L_m d_{50}^{-1} \quad (3.19)$$

$$\Pi_7 = H d_{50}^{-1} \quad (3.20)$$

$$\Pi_8 = \mu d_{50}^1 \rho^{-1} U_0^{-1} \quad (3.21)$$

$$\Pi_9 = G d_{50}^{-1} \quad (3.22)$$

$$\Pi_{10} = n d_{50} U_0^{-1} \quad (3.23)$$

$$\Pi_{11} = D_p d_{50}^{-1} \quad (3.24)$$

Böylece etkili olan boyutsuz parametreler belirlenmiştir.

3.7. Deney Programı

Deneydeki her bir test için uygulanan deney şartları detaylandırılmış şekilde Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.6. Deney Programı

Pervane Çapı D_p (m)	Pervane açıklığı G (m)	Kil oranı P_c (%)	Pervane hızı Rpm (dev/dk)	Tabanın aritmetik tane boyutu d_a (mm)	Pervane çıkış hızı U_0 (m/s)	Deney süresi (saat)
0,06	0,06	0	500	0,24	0,47	15
0,06	0,06	0	750	0,24	0,7	15
0,06	0,06	0	1000	0,24	0,94	15
0,06	0,06	5	500	0,228	0,47	15
0,06	0,06	5	750	0,228	0,7	15
0,06	0,06	5	1000	0,228	0,94	15
0,06	0,06	10	500	0,216	0,47	13
0,06	0,06	10	750	0,216	0,7	15
0,06	0,06	10	1000	0,216	0,94	15

Burada D_p , pervane çapı; G , pervane açıklığı; d_a tabanın aritmetik medyan tane boyutu, U_0 akış hızıdır.

3.8. Kil-kum Karışım Taban Hazırlama İşlemi

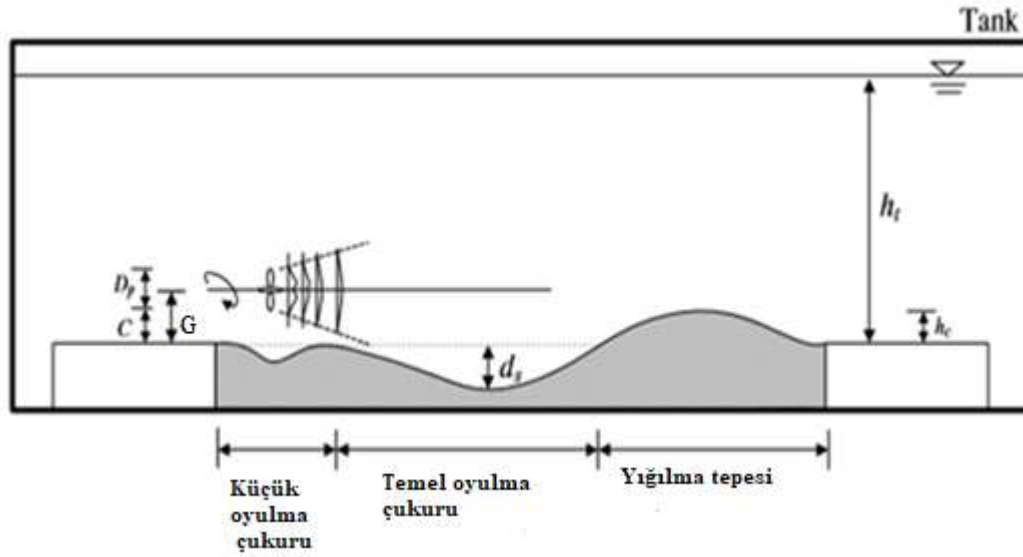
Karışım hazırlama işlemi şu şekilde olmuştur. Öncelikle kil oranı hesabı kilin kuru ağırlığını karışımın toplam ağırlığına bölünmesiyle elde edilmiştir. İstenilen kil yüzdesindeki kil ağırlığı ve kum ağırlığı hesaplandıktan sonra genişçe bir kaba belirlenen miktarda kuru kil eklenmiştir. Kil’in likit limit değeri dikkate alınarak belli bir miktar suyla karıştırılmıştır. Ardından ağırlıkça belirlenen miktarda kohezyon içermeyen taban malzemesi (kum) yavaşça kil olan kaba eklenmiştir. Bu iki malzeme mikser yardımıyla homojen bir dağılım elde edilene kadar karıştırılmış ve kanal tabanına yayılmıştır. Taban karışım malzeme ile doldurulduktan sonra zemindeki fazla suyun dışarı atılması ve beraberinde zeminin oturması için bir süre beklenmiştir. Tanka su doldurulduktan sonra deney başlamaya hazır hale getirilmiştir. Her deney sonunda kanal temiz su ile yıkanmış ve kanal zeminine yapışmış olabilecek kil taneleri tahliye edilmiştir. Depo ile kanal arasında yer alan 3 adet filtre kanala suyu aktarırken hortumdan geçebilecek kum ve kil tanesini tutarak suyun bulanmasını engellemiştir.

4. BULGULAR

4.1. Kohezyonsuz Tabana Ait Oyulma Deneyleri

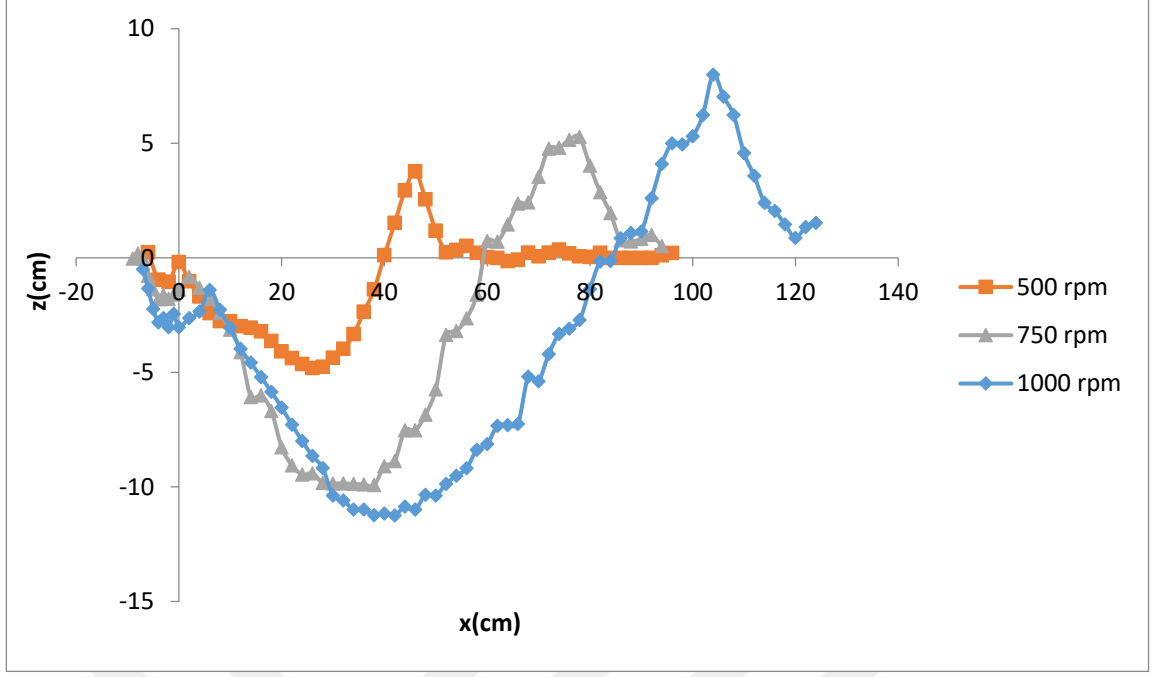
Bu deneylerde taban malzemesi olarak sadece kuvars kumu kullanılmıştır. Kohezyon içermeyen deneylerde seçilen parametreler, kohezyon içeren deneylerle kıyaslanabilmesi açısından diğer testlerde de sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılan pervane çapı (D_p) 0.06 m olarak seçilmiştir ve pervane göbeğinden tabana kadar olan düşey mesafe (G) 0.06 m olarak ayarlanmıştır. Bu deneylerde 3 farklı pervane dönüş hızı (rpm) 500, 750 ve 1000 olarak seçilmiştir. Tank içinde duvar etkisini etkisiz hale getirebilmek için kanal sonuna sönümlendiren pürüzlü yüzey oluşturularak sönümlendirme gerçekleştirilmiştir. Kum zeminde oyulmanın denge şartının belirlenmesi için ön deneyler yapılmış ve ana deneyler için deneyin kaç saat süreceği bilgisi edinilmiştir. Maksimum oyulma derinliklerinin arasındaki fark ± 1 mm olduğu anda denge şartı sağlanmış ve deney sonlandırılmıştır. Çeşitli araştırmacılar denge şartını deney koşullarına göre daha uzun veya kısa tutarak belirlemişlerdir. Hong vd., (2013) çalışmasında asimptotik aşamaya 64 saatin sonunda ulaşıldığı belirtilmiştir. Tan ve Yüksel (2018) ise oyulma çukurunu incelerken denge süresinin 160 dakika olarak belirlemişlerdir. Ayrıca toplam deney süresinin yaklaşık olarak %30'u geçtiğinde maksimum oyulma derinliğinin (S_{max}) %70'inden fazlasına ulaştığını gözlemişlerdir.

Denge şartını sağlayan bir oyulma profili 3 bölgeye ayrılmaktadır. Bu bölgeler pervanenin altında oluşan küçük oyulma çukuru (ikincil), küçük oyulma çukurunun mansabında oluşan temel (birincil) oyulma çukuru ve tanelerin sürüklenmesiyle meydana gelen yığılma tepesidir (Hong vd., 2013).



Şekil 4.1. Denge Oyulma Profili Görünümü (Hong vd., 2013)

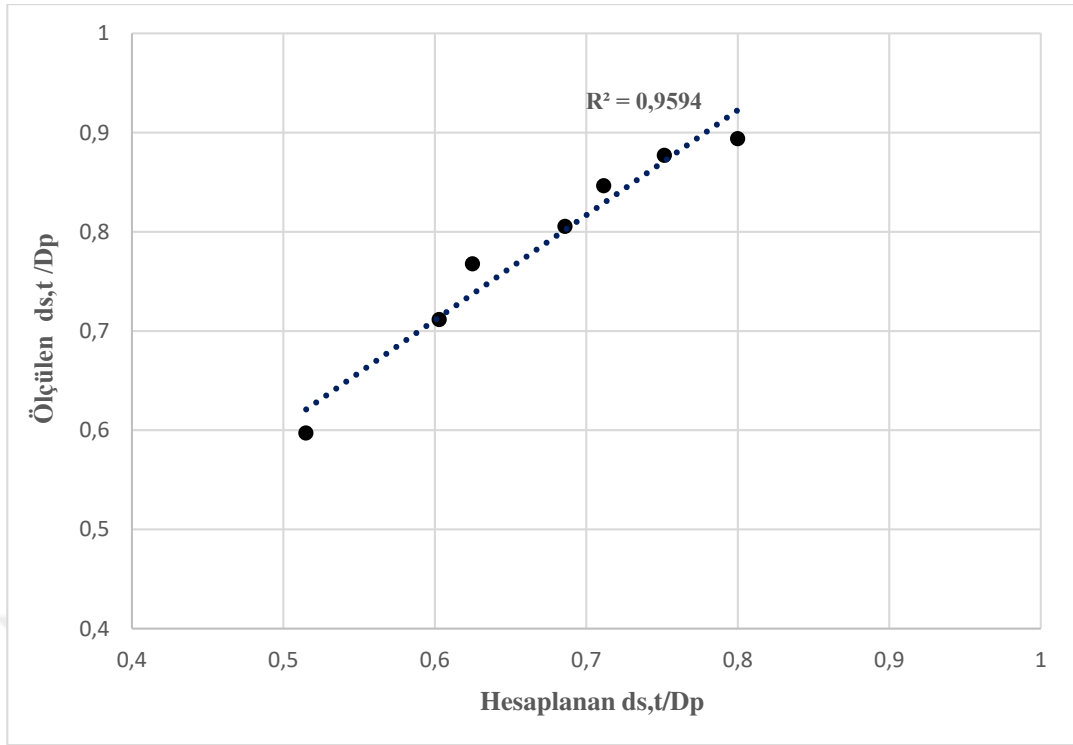
Deneyde oyulma derinliğinin gelişimi zamansal olarak incelenmiş ve derinliğin ardışık saatlerde 1mm farkı geçmediği durumda deney sonlandırılmıştır. Her deneyde oyulma profili gelişimini takip etmek amacıyla 5.dk, 15.dk, 30.dk, 45.dk ve 2 saatte bir devam etmek suretiyle 15.saatin sonuna kadar ölçüm alınmıştır. Derinlikler pervane jeti ekseninde oyulma profilinin uzunluğuna göre her 2 cm'de bir ADVP cihazı ile ölçülmüştür. Bu ölçümler doğrultusunda şekil 4.2'de 15 saatin sonunda 3 farklı rpm için dengeye ulaşmış oyulma profilleri verilmiştir.



Şekil 4.2. 500,750 ve 1000 rpm için maksimum denge oyulma profilleri

Önceden bahsedildiği gibi oyulma profili 3 ana bölgeye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, pervane altında oluşan ikincil oyulma çukuru 0.06m açıklığında her oyulma profilinde görülmüştür. Tan ve Yüksel (2018) çalışmasında pervanenin kum zeminden uzaklaştırılmasıyla bazı rpm değerlerinde ikincil oyulma çukurunun kaybolduğu ifade edilmiştir. Mevcut çalışmada ise 3 farklı rpm değerinde de ikincil çukur belirgin şekilde oluşmuştur. Rpm değeri arttıkça ikincil oyulma çukurunun derinleşmekte olduğu görülmüştür (Şekil 4.2). Ayrıca profilde gözlenen diğer durum ise rpm değeri arttıkça taban hareketinin olduğu bölge x eksenine yönünde uzamaktadır.

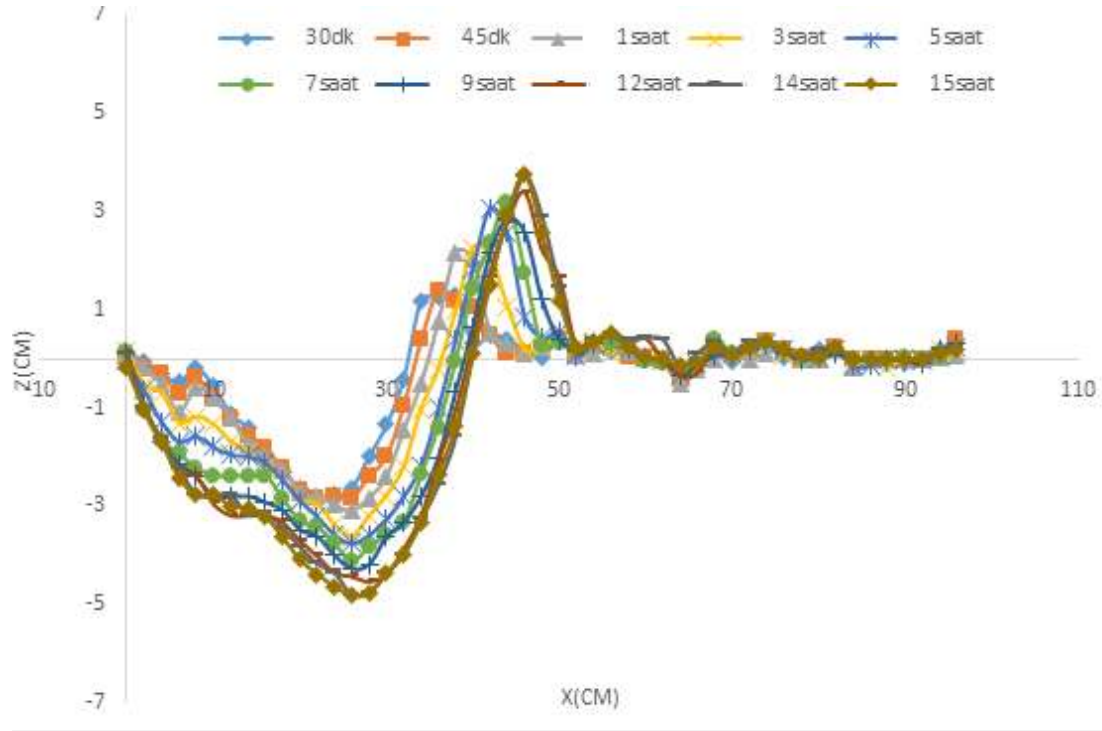
Deneylerde oyulma profillerinin son hali incelenirken literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur. Hong vd. (2013) tarafından $0.5 < G/D_p < 2.87$ ve $5.55 < F_0 < 11.1$ sınır şartları dahilinde zamana bağlı maksimum oyulma derinliği tahmin edilmiştir. Verilen denklem ile mevcut çalışmadaki maksimum oyulma derinliği korelasyonu belirlenmiştir (Şekil 4.3). Ölçülen ve hesaplanan S_{max} değerleri için elde edilen determinasyon katsayısı Hong vd. (2013) tarafından önerilen yöntem için 0.95 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Hong vd. (2013) yöntemine göre hesaplanan ve ölçülen S_{max} değerlerinin karşılaştırılması

Bununla birlikte ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki en küçük hata tespiti için Kök Ortalama Kare Hata (KOKH) değeri hesaplanmıştır. Hong vd. (2013) tarafından önerilen yöntemin kullanılmasıyla elde edilen KOKH değeri 0,12 olarak bulunmuştur.

Chin vd. (1996) çalışmalarında oyulma profilinin zamansal gelişimi incelenmiş ve temel oyulma çukurunun derinliği ilk 1 saat içerisinde maksimum denge oyulma derinliğinin yaklaşık %80'ine ulaştığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada yapılan deneyler incelendiğinde aynı durumun belirdiği hesaplanmıştır. Şekil 4.4'te 500 rpm için oyulma profilinin zamansal gelişimi sunulmuştur.



Şekil 4.4. $G=0.06$ m ve 500 rpm için oyulma derinliklerinin zamansal gelişimi

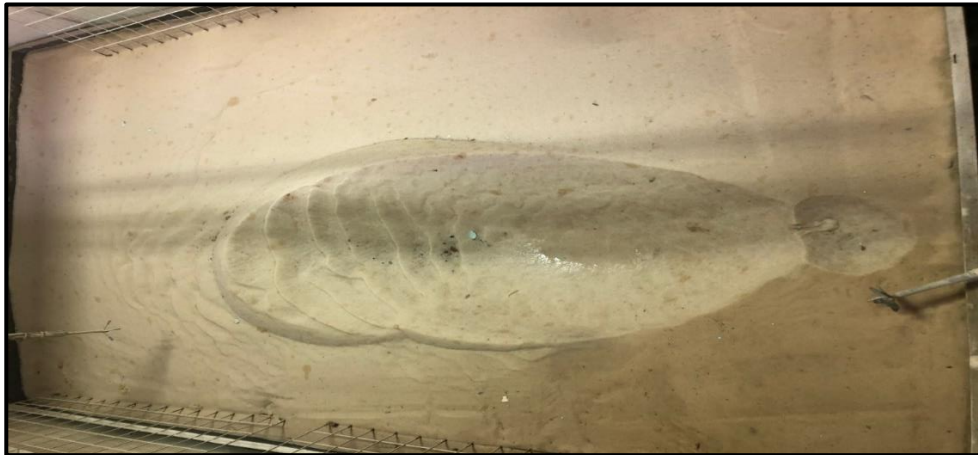
Şekil 4.5'te 15 saatin sonunda gerçekleşen denge oyulma çukurlarının görüntüsü ve tabanda oluşan desenler verilmiştir.



a) 500 rpm



b) 750 rpm



c) 1000 rpm

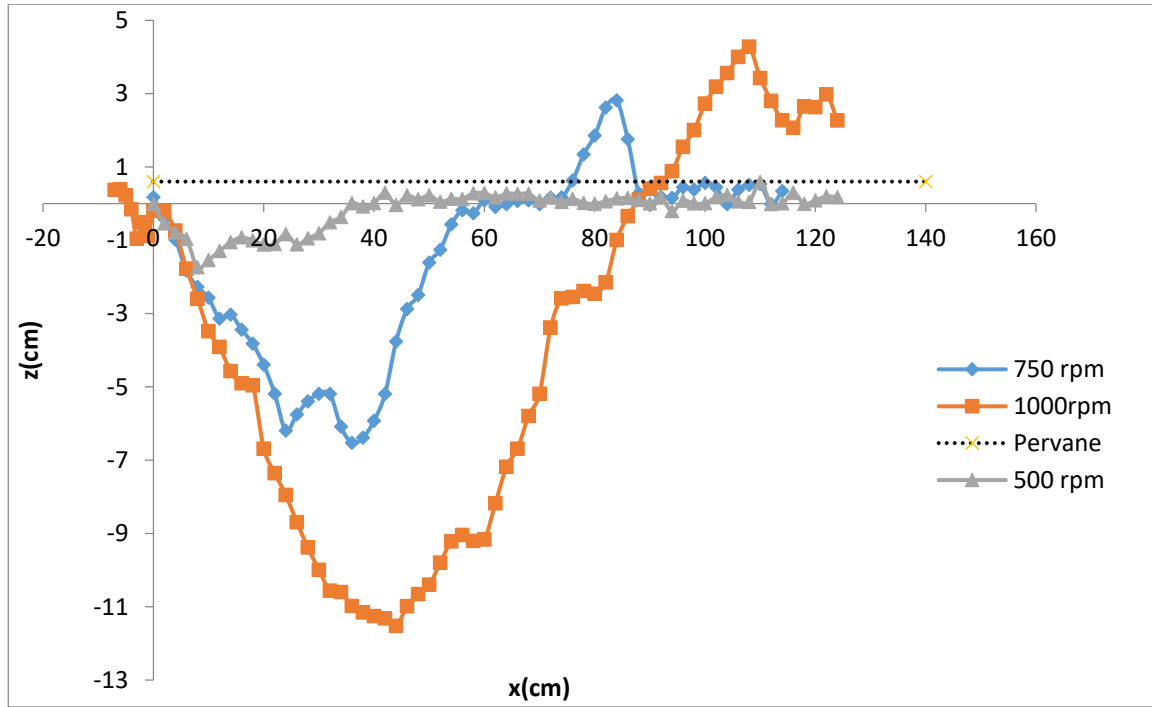
Şekil 4.5. $G=0.06$ m için farklı rpm seviyelerinde denge oyulma çukurları

4.2. Kum-Kil Karışımdan Oluşan Tabana Ait Oyulma Deneyleri

Karışım taban deneylerinde kohezyonsuz taban deneylerinde kullanılan parametreler sabit tutulmuş sadece tabana farklı oranlarda kil eklenmiştir. Karışım tabanda gerçekleşen deneylerde de pervane çapı (D_p) 0.06 m olarak seçilmiş ve pervanenin tabana olan düşey mesafesi (G) 0.06 m olarak ayarlanmıştır. Bu deneylerde kohezyonsuz tabana ait deneylerde olduğu gibi 3 farklı pervane dönüş hızı (rpm) 500,750 ve 1000 olarak seçilmiştir. Karışımda kil oranları %5 ve %10 olarak iki grupta incelenecektir.

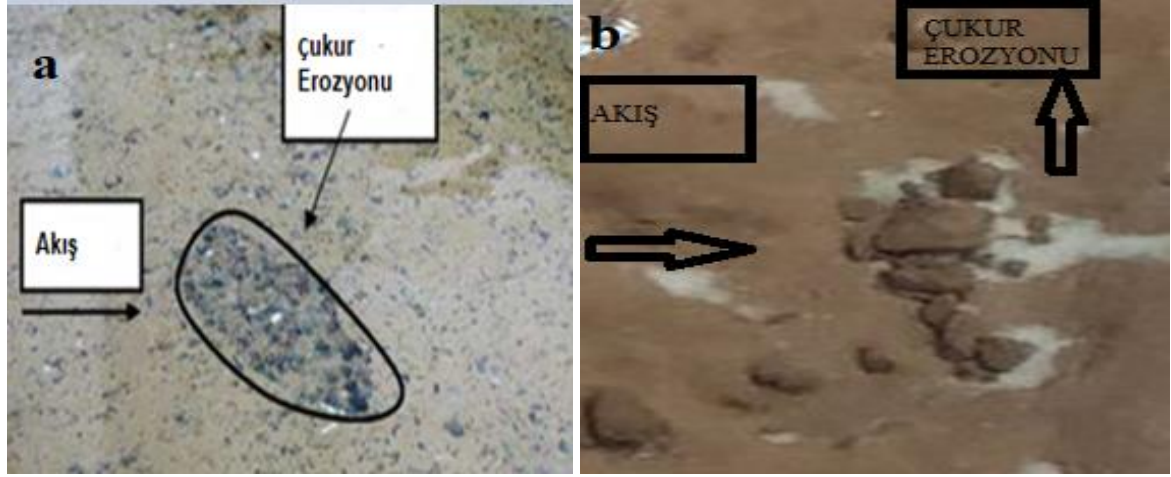
4.2.1. %5 Oranında Koheziv Malzeme İçeren Kum-Kil Karışım Tabanda Oyulmanın İncelenmesi

Kohezyonsuz taban deneylerinde 500, 750 ve 1000 rpm için ikincil oyulma çukuru belirgin bir şekilde oluşurken %5 kil içeren karışım tabanda 500 ve 750 rpm testlerinde oluşmamaktadır. Şekil 4.6'da 3 farklı rpm değerinde maksimum denge oyulma profilleri verilmiştir. Profiller incelendiğinde kohezyonsuz taban deneylerinde simetrik bir dağılım söz konusuken %5 kil içeren karışım taban deneylerinde simetrik bir dağılımın yanı sıra daha çok dik eğimli ve çift çukurlu bir profil görülmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Farklı rpm değerlerinde %5 kil içeren karışım taban deneyinde oluşan maksimum oyulma profilleri

Ayrıca kohezyonsuz taban deneylerinden farklı olarak oyulma alanında kopuk kil parçaları halinde oluşumlar belirmiştir. Kothiyari ve Jain (2008)'in kil-çakıl ve kil-kum-çakıl karışımlarından oluşan koheziv zeminlerin başlangıçtaki hareket durumuna yönelik çalışmasında benzer bir durum belirmiştir. Karışım tabanlarda oluşan 3 aşama sırasıyla çukur erozyonu, çizgi erozyonu ve kütle erozyonu olarak tanımlanmıştır. Karışım tabanda düşük kil muhtevasında (% 30'a kadar) tabandan ayrılma genellikle küçük parçacıklar şeklinde olduğu ve tabanın farklı yerlerinde zemin yüzeyi üzerinde çukurlar oluştuğu belirtilmiştir (Kothiyari ve Jain, 2008). Bu çukurların 4 ile 5 cm uzunluğunda ve birkaç cm genişliğinde olup zaman ilerledikçe boyutlarının arttığı ifade edilmiştir. Şekil 4.7'de mevcut çalışmada oluşan çukur erozyonu ile Kothiyari ve Jain (2008)'de yaptığı çalışmadaki çukur erozyonu görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.7. a) Kothiyari ve Jain (2008) çalışmasında gözlenen b) Mevcut çalışmada gözlenen çukur erozyonu görüntüleri

Deneylerde ayrıca oyulma alan görüntüsünün kohezyonsuz tabanda yapılan deneylerden oldukça farklı olduğunu incelemek adına karşılaştırmalar yapılmıştır. Şekil 4.8’de aynı rpm değeri, aynı pervane çapı ve aynı pervane açıklığına sahip deneylerin taban malzemesine kil eklenmesiyle oluşan desen farklılıkları gösterilmiştir.



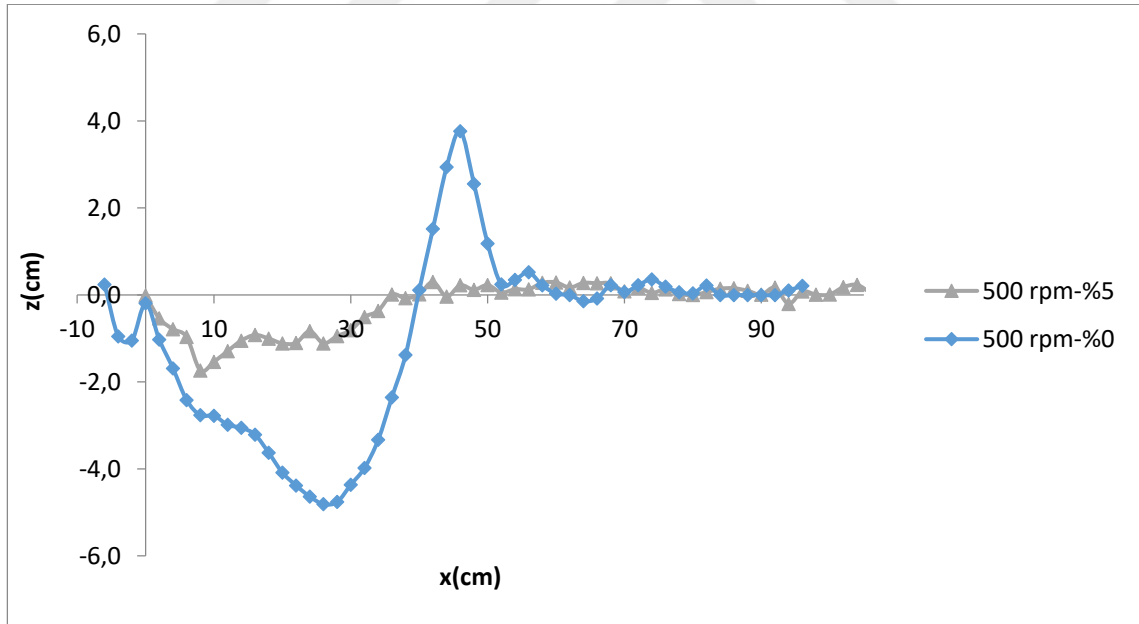
a) 750 rpm $G=0.06m$ $D_p=0.06m$ %0 kil b) 750 rpm $G=0.06m$ $D_p=0.06m$ %5 kil

Şekil 4.8. 750 rpm $G=0.06m$ ve $D_p=0.06m$ için tabana %5 kil eklenmesi durumunda gözlenen fark

Şekil 4.8’de 750 rpm değerinde ikincil oyulma çukuru kum tabanda belirgin bir şekilde görülürken karışım tabanda ikincil çukur oluşmamıştır. Kohezyon içermeyen kum deneylerinde oyulma alanı simetrik dağılmışken tabana %5 oranında kil eklenmesi durumunda oyulma alanındaki simetrik görünüm kaybolmuş ve oyulma çukuru daha dik bir eğimle oluşmuştur. Ayrıca karışım tabanda yer yer gözlenen küçük kopuk parçalar çukur erozyonu oluşumu belirtilerini göstermektedir. Bir diğer farklılık olarak kil-kum karışım tabandaki yığılma bölgesinde kil malzemenin yıkandığı görülmektedir (Şekil 4.8). Pervane jeti etkisiyle jete yakın olan bölgedeki kil taneleri hareket ederek oyulma çukuruna yerleştiği ve oyulma çukurunun mansabında oluşan yığılma bölgesinde ise kilin sıyrılarak kum tanelerini belirgin hale getirdiği düşünülmektedir. Yığılma bölgesindeki davranış artık kum

tabanda gerçekleştirilen oyulma deneylerine benzerlik göstermektedir. Her deneyden sonra yığılma bölgesinden sıyrılan kilin taban test alanından kanal zemine yapışmasını önlemek amacıyla kanal temiz su ile yıkanmıştır.

Tabanda oluşan dik eğimlerin belirlenebilmesi adına aynı rpm değerinde farklı tabanlarda oluşan oyulmanın profilleri çizilmiştir. Şekil 4.9’da %0 ve %5 kil içeren tabanda gerçekleşen oyulma şekillerinin birbirinden farkı dikkat çekecek ölçüdedir. Tabana kil eklenmesiyle oyulma derinliğinin azalmakta olduğu belirlenmiş ve beraberinde referans çizgisinden maksimum oyulma derinliğine kadar olan oyulma derinliği eğimi ciddi oranda artmıştır. Kohezyonsuz zeminde oyulma derinliğinin doğrusal bir oranla arttığı fakat kil-kum karışım tabanda oluşan oyulma derinliğinin daha çok dik eğimlerle devam ettiği belirlenmiştir. Kohezyonsuz zeminde gerçekleşen deneyde eğim 0,15 iken %5 kil içeren karışım deneyinde 0,21 olarak ölçülmüştür. Bu durum tabanda kil oranının artmasıyla daha dik eğime sahip profillerin oluştuğunu ve maksimum oyulma derinliği eğimi ile kil oranı arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. Maksimum oyulma derinliği eğimlerinin karşılaştırılması

Tabana eklenen kil, oyulma derinliğinde gözle görülür bir azalmaya sebep olmuştur. ADVP ile alınan ölçümler sonucunda aşağıdaki Tablo 4.2’de %0 kil ve %5 kil içeren deneyler arasındaki maksimum oyulma derinliğinin (S_{max}) karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney koşulları ve farklı taban malzemelerinde maksimum oyulma derinliği

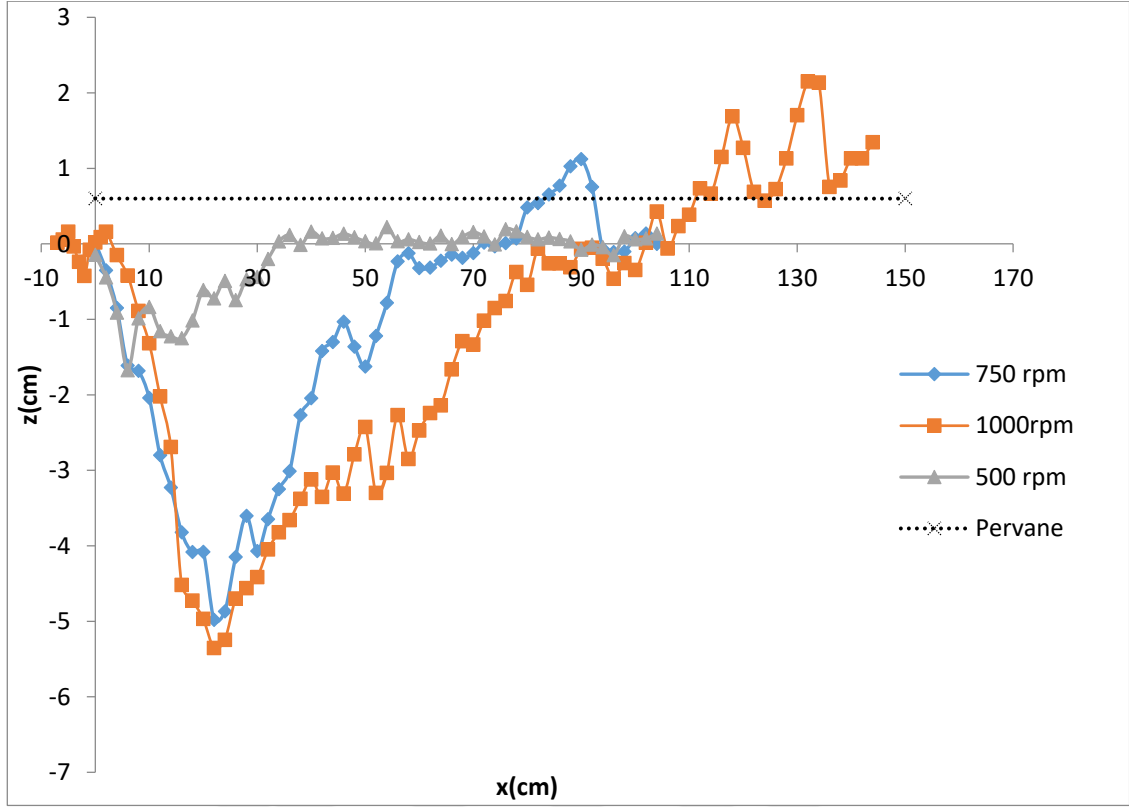
D _p (m)	P _c (%)	G(m)	Rpm (dev/dk)	U ₀ (m/s)	S _{max} (cm)	Deney süresi(saat)
0.06	0	0.06	500	0,47	4,81	15
			750	0,71	9,84	15
			1000	0,94	11,15	15
0.06	5	0.06	500	0,47	1,73	15
			750	0,71	6,53	15
			1000	0,94	11,2	15

Tablo 4.2’den de görüleceği gibi karışım tabanda gözlenen maksimum oyulma derinliği (S_{max}) sadece kum içeren tabana göre azalmıştır. 1000 rpm deneylerinde ölçülen oyulma derinliklerinin yaklaşık aynı değerde olması, yüzdesel olarak az kil içeren (%5) karışım tabanda yüksek rpm değerinde oluşan jet akımının kil malzemesini yıkayarak tabanın kum davranışı sergilemesiyle ilişkilendirilmektedir.

4.2.2. %10 Oranında Koheziv Malzeme İçeren Kum-Kil Karışım Tabanda Oyulmanın İncelenmesi

%10 kil oranına sahip karışım tabanda pervane jeti etkisiyle oluşacak oyulma problemini incelemek için %5 kil oranına sahip karışım tabanda uygulanan deney koşulları kullanılmıştır. Pervane yüksekliği ve pervane çapı 0.06m olarak seçilmiş ve üç farklı pervane hızında (500, 750, 1000 rpm) deneyler gerçekleştirilmiştir. 500 rpm deneyinde oyulma dengeye ulaştığından 13. Saatin sonunda deney sonlandırılmıştır. Deney süresinin kısalma nedeni, kil tanelerinin kohezyon etkisiyle birbirini tutmasından dolayı denge oyulma derinliğine daha kısa bir zaman diliminde ulaşılmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.10’da 500,750 ve 1000 rpm için oluşan oyulma profillerinin zamansal gelişimi gösterilmiştir. Deneylerde %5 kil içeren deneydekine benzer çukur erozyonları gözlenmiştir. Oyulma alanı görüntüsü kohezyonsuz tabandan oldukça farklı olmasına rağmen %5 kil içeren karışım tabana benzer olduğu görülmüştür. Pervane altında oluşan ikincil oyulma çukuru 750 ve 1000 rpm deneylerinde belirmiştir. 750 rpm deneyinde ikincil oyulma çukuru oluşumu, pervane altındaki bölgede kil-kum karışımını tabana yayarken diğer bölgelere göre daha gevşek bırakılmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Asıl beklenen ikincil oyulma çukurunun yalnızca 1000 rpm deneyinde belirmesidir.



Şekil 4.10. Farklı rpm değerlerinde %10 kil içeren karışım taban deneyinde oluşan maksimum oyulma profilleri

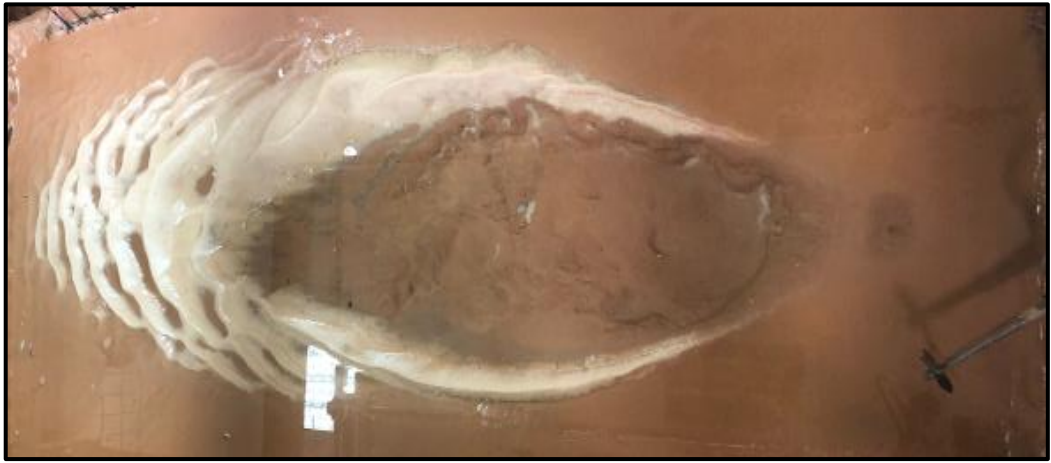
Şekil 4.11’de aynı rpm değeri, aynı pervane çapı, aynı pervane yükseklik değeri kullanılıp farklı tabanlardaki oyulma profilleri sunulmuştur. Kum ve kil-kum karışım tabanının her ikisinde de 1000 rpm deneylerinde pervane altında ikincil oyulma çukuru oluşmuştur fakat oyulma çukurunun derinliği kil oranı arttıkça azalmıştır. %5 ve %10 kil içeren karışım tabanda kohezyonsuz tabandan farklı olarak keskin eğimler yer almaktadır. Kil oranındaki artışla beraber oyulma şeklinin düzensizleşip oyulma derinliğinin de azaldığı belirlenmiştir.



a) 1000 rpm $G=0.06m$ %0 kil, kum tabanda oyulma alanı



b) 1000 rpm $G=0.06m$ %5 kil karışım tabanda oyulma alanı

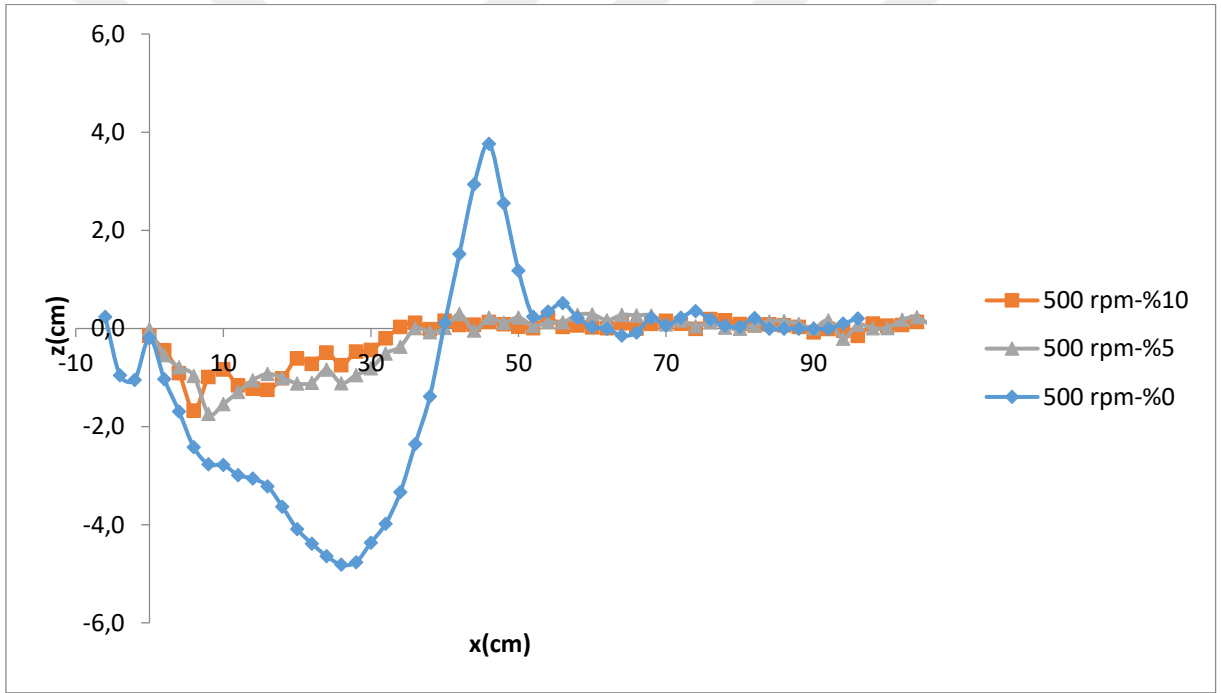


c) 1000 rpm $G=0.06m$ %10 kil karışım tabanda oyulma alanı

Şekil 4.11. 1000 rpm $G=0.06m$ için farklı kil yüzdelerinde oluşan oyulma alanı görüntüleri

%10 kil içeren deneylerde yığılma bölgesi %5 deneylerine kıyasla bazı farklılıklar göstermiştir. %5 kil içeren karışım tabanda kil tamamen yıkanıp kum davranışı sergilemiştir fakat %10 deneyinde kum dalgacıkları arasındaki killer tamamen yıkanmamıştır. Bunun nedeninin tabana daha fazla oranda kil eklenmesiyle yığılma bölgesi kum davranışı sergilemekten çıktığı düşünülmektedir.

Şekil 4.12’de tabana eklenen kil oranının artmasıyla oluşan dik eğimli oyulma profilleri gösterilmiştir. %5 ve %0 kil içeren deneylerde olduğu gibi %10 kil içeren karışım tabanda da kil oranı artışıyla maksimum oyulma derinliği arasında pozitif bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Kohezyonsuz tabanda eğim 0,15 iken %5 kil içeren karışım tabanda 0.21 ve %10 kil içeren karışım taban deneyinde ise 0.41tir. Bu durum bize tabanda oluşan dik eğimlerin ispatını vermektedir.



Şekil 4.12. Farklı tabanlarda oluşan maksimum oyulma derinliği eğimlerinin karşılaştırılması

Tablo 4.3’de her 3 durum için elde edilen deney koşulları ve maksimum oyulma derinliğindeki değişim gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi %10 kil içeren karışım tabanda oyulma derinliği sadece kum içeren tabana kıyasla yaklaşık yarısı kadar azalmıştır ve bu durum da karışım tabanda gerçekleştirilen deneylerin kil oranı ile oyulma derinliği arasında ters orantılı bir bağıntı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2. Deney sonuç özeti

D_p(m)	P_c (%)	G(m)	Rpm (dev/dk)	U₀ (m/s)	S_{max} (cm)	Deney süresi(saat)
0.06	0	0.06	500	0,47	4,81	15
			750	0,71	9,84	15
			1000	0,94	11,15	15
0.06	5	0.06	500	0,47	1,73	15
			750	0,71	6,53	15
			1000	0,94	11,24	15
0.06	10	0.06	500	0,47	1,67	13
			750	0,71	4,97	15
			1000	0,94	5,38	15

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda gemi boyutları ve motor gücünün giderek artması liman içerisinde bazı problemlere yol açmaktadır. Deniz tabanında oluşan oyulma yapı ömrünü azaltmakla kalmayıp birçok mal ve can kaybına sebebiyet vermektedir. Pervane jet akımının tabandaki taneleri sürükleyerek yığılmaya neden olması ise bağlantılı sorunlardan biridir. Bu durumun incelenip çözüme kavuşturulması oldukça önemli hale gelmiştir. Deniz tabanında oluşan bu oyulmayı benzeştirmek için laboratuvar tankı hazırlanmıştır. Pervane sistemi kurulmuş ve taban malzemeleri serilmiştir. Liman içindeki taneler koheziv ve koheziv olmayan karışımlardan oluştuğu için bu deneyde kil-kum karışım taban kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmaların çoğu kum tabanda gerçekleştirildiği için bu deneyde öncelikle kum deneyleri gerçekleştirilip önceki çalışmalarla arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Daha sonra %5 ve %10 olmak üzere iki gruba ayrılan kil-kum karışım taban deneyleri yapılmıştır. Deney sonunda sadece kum içeren testler ile farklı kil oranlarında oluşan karışım taban testleri karşılaştırılmıştır ve deney sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

1) Deneylerde rpm seviyesinin artmasıyla beraber maksimum oyulma derinliğinde (S_{max}) artış gözlenmiştir. Sadece birincil oyulma çukuru derinliği değil pervane altında oluşan ikincil oyulma çukuru derinliğinde de artış görülmektedir.

2) Kohezyonlu ve kohezyonsuz taban deneyleri karşılaştırmasında oyulma şekillerinin oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Kohezyon içermeyen kum deneyleri simetrik bir oyulma alanına sahipken kil-kum karışım taban deneylerinde çukur erozyonu oluşumları, dik eğimler ve simetrik dağılımdan sapma olduğu fark edilmiştir.

3) Tabana farklı oranlarda kil eklenmesi halinde oyulma derinliği önemli ölçüde azalmıştır ve bazı durumlarda ikincil oyulma çukuru gözlenmemiştir. Kum ile %10 kil içeren deneylerin oyulma derinliği arasında yaklaşık yarısı kadar azalma olduğu belirlenmiştir.

4) Tabanda oluşan keskin eğimlerin hesaplaması yapılmış ve tabandaki kil oranının artmasıyla beraber maksimum oyulma derinliği eğiminin de arttığı belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre kil-kum karışım taban üzerine deney çalışmalarının arttırılması literatüre katkı sağlayacaktır. Tane hareketinin başlaması için gerekli olan kayma gerilmesinin kil-kum karışım tabanda belirlenmesi mevcut çalışmaları geliştirecektir. Ayrıca

daha yüksek kil oranına sahip tabanların oyulma davranışındaki etkisi incelenmelidir. Karışım tabanda kazık eşliğinde oluşan oyulma alanı üzerine çalışılması yanaşma ve ayrılma bölgelerinde oluşan hasarların belirlenmesi açısından büyük önem teşkil etmektedir. Numerik modelleme kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırması ileride yapılacak olan çalışmalara önemli derecede katkı sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Ansari S. A., Kothyari, U. C., Ranga Raju, K.G. (2002). Influence Of Cohesion On Scour Around Bridge Piers. *Journal Of Hydraulic Research*, 40-6.
- Arıkan, Y., Doğrul A., Çelik, F. (2010). Podlu Sevk Sistemlerinin Çevreye Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi* ,s-186.
- Balık, İ. (2014). Limanlar ve Liman Yeri Seçimi. *Journal of Urban Culture and Management*, 7-2.
- Barnitsas, M., Ray, D., Kinley, P. (1981). *KQ And Efficiency Curves For The Wageningen B-Series Propellers*, University of Michigan. No.237
- Bayazıt, M. ve Avcı, İ. (2010). *Akarsularda Akım Ve Sediment Taşınımı*. İstanbul: Birsen yayınevi.
- Bergh, H. ve Magnussen, N. (1987). *Propeller Erosion And Protection Methods Used In Ferry Terminals In The Port Of Stockholm*, Permanent International Association Of Navigation Congresses. 58, Belgium.
- Bornhold B. D. ve Prior, D.B. (1989). Sediment Blocks On The Sea Floor In British Columbia Fjords. *Geo-Marine Letters*, 9-135.
- Bozbey, İ. (2016). Zemin Sınıflandırması ve Zemin Özellikleri-İMO Geoteknik kursu, İstanbul.
- Blaauw, H. K. ve Van de Kaa, E.J. (1978). *Erosion of Bottom and Sloping Banks Caused by the Screw Race of Manoeuvring Ships*. 7th International Harbour Congress, 22-26.
- Chadwick, A. K. (2005). A New Analysis of the Slaption Barrier Beach System. *Proceeding Of The Instituion Of Civil Engineers-Maritime Engineering*, 158(4),147-161.
- Chin, C.O., Lim, S.Y., Chiew, Y. M. (1996). Jet Scour Around Vertical Pile. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 122(2): 59-67.
- Cui, Y., Lam, W. H., Zhang, T., Sun, C., Hamill, G. (2019). Scour Induced by Single and Twin Propeller Jets. *Water*,11(5)-1097

- Çelikoğlu, Y., Yüksel, Y., Şahin, E., Boston, T. (2011). *Kazıklı Yapılar Etrafındaki Akım Alanının Araştırılması*. 7.Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, ss.179-188
- Debnath, K. ve Chaudhuri S. (2010). Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds. *Engineering Geology*, 111(1-4),51-61.
- Demiral, A. (2013). *Killerin Elektrokinetik Özellikleri Ve Flokülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
- Dilek, Y. (2011). *Kohezyonlu Malzeme Tabanlı Akarsulara Yerleştirilen Yan Savak Etrafındaki Oyulma Derinliğinin Deneysel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- Gökçe, B., Koca, Y. B., Aslan, Y., Y. B. (2021). Doğru Akım Motorunun PID ile Hız Kontrolü ve Zorlamalı Yükler Altında Performans Analizi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 549-554.
- Grabowski, R. C., Droppo, I.G., Wharton, G. (2011). Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth Science Reviews*, 105(3), p. 101-120.
- Güner, M., Kükner, A., Bayka, M.A. (1999). *Gemi Pervaneleri ve Sevk Sistemi*. İTÜ yayımları.
- Hafizoğulları, A. H. (2019). *Düz Dairesel Plaka Kullanılarak Bir Kazık Etrafında Pervane Jet Akımı Oyulmasının Azaltılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi
- Hamill, G. A., Johnston, H. T., Stewart, D.P. (1999). Propeller Wash Scour Near Quay Walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 170-175.
- Hong, J.-H., Chiew, Y-M., Cheng, N.-S. (2003). Scour Caused by a Propeller Jet. *Journal Of Hydraulic Engineering*, 139(9): 1003-1012.
- Jacobs, W., Hiri P. L., Van Kesteren, W., Cann, P. (2010). Erosion Thresold Of Sand-Mud Mixtures. *Continental Shelf Research* s.14-25.
- Jain, R.K. ve Kothyari U. C. (2009). Cohesion influences on erosion and bed load transport. *Water Resources Research* 45(6).
- Jowett, I.G., ve Elliott, A. (2009). Erosion Parameters for Cohesive Sediment in Auckland Streams. *Auckland Regional Council*.
- Kelly, W.E. ve Gularte, R. C. (1981). Erosion Resistance of Cohesive Soils. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109-1

- Kılıç, R. (2020). Zemin Sınıflama. <https://acikders.ankara.edu.tr/Zemin-siniflama.pdf>.
- Kothyari U.C. ve Jain, R.K. (2008). Influence of cohesion on the incipient motion condition of sediment mixtures . *Water Resources Research*, 44-4.
- Kothyari, U. C. ve Jain, R. (2010). Experimental and numerical investigations on degradation of channel bed of cohesive sediment mixtures . *Water Resourches Research*, 46.
- Kothyari U.C. ve Jain, R.K. (2010). Erosion characteristics of cohesive sediment mixtures . *River Flow- Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer*.
- Lam, W-H., Hamill, G., Robinson, D., Ragnuhathan, S., Song, Y. (2012). Analysis Of The 3D Zone Of Flow Establishment From Ship's Propeller. *KSCE Journal Of Civil Engineering*, 16(4),465-477.
- Lick, W. ve McNeil, J. (2001). Effects Of Sediment Bulk Properties On Erosion Rates. *Science of The Total Environment*, 266(1-3):41-8.
- Molinas, A., Jones, S., Hosny, M. (1999). Effects of Cohesive Material Properties on Local Scour Around Piers. *Transportation Research Record*, doi: 10.3141/1690-19
- Mitchener H.J. ve Torfs, H. (1995). Erosion of mud/sand mixtures . *Coastal Engineering*, 29, 1-25.
- Najafzadeh, M. ve Barani, G-A. (2014). Experimental Study Of Local Scour Around A Vertical Pier İn Cohesive Soils. *Scientia Iranica* , 21(2), 241-250.
- Öntürk, K., Bol, E., Özocak, A., Özsağır, M. (2016). *Doygun Olmayan İnce Taneli Zeminlerin Kayma Direnci*. Istes2015/Valencia,Spain.
- Penna, N., D'alessandro, F., Gaudio, R., Tomassichio, G.R. (2019). Three Dimensional Analysis Of Local Scouring Induced By A Rotating Ship Propeller. *Ocean Engineering*, 188.
- Sarker, A. (1998). Flow Measurement Around Scoured Bridge Piers Using Acoustic-Doppler Velocimeter(ADV), Flow measurement and Instrumentation. 9,217-227.
- Shields, A., Ott, V.P., Van Uchelen, J.C. (1936). Application Of Similarity Principles And Turbulence Research To Bed-Load Movement. *Soil Conservation Service*.
- Shirole, A.M. ve Holt, R.C. (1991). *Planning For Comprehensive Bridge Safety Assurance Program*. Third Bridge Engineering Conference 1:39–50 (s. Transportation Research Record No.1290).

- Sonia Devi, Y. ve Barbhuiya, A. K. (2017). Bridge pier scour in cohesive soil: a review. *Sadhana* , 42-10. Doi 10.1007/s12046-017-0698-5
- Stewart, D.P.J. (1992). *Charasteristics of a Ship Screw Wash and the Influence of Quay wall Proximity*. PhD Thesis, Queen's University of Belfast, Northend Ireland,UK,.
- Tan, R.,, Yüksel, Y. (2018). Seabed Scour İnduced By Propeller Jet. *Ocean Engineering*, 132-142.
- Ting, F.C.K., Briaud, J-L., Chen, H.C., Gudavalli R. (2001). Flume Test for Scour In Clay at Circular Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11): 969-978 .
- Tolunay, D. (2020). Toprağın Genel Yapısı. *Toprak Sistematiği ve Haritacılığı*. İstanbul Üniversitesi. [http ://www.Toprak%20sistemati%C4%9Fi%203%20Hafta%20\(5\).pdf](http://www.Toprak%20sistemati%C4%9Fi%203%20Hafta%20(5).pdf) [Erişim Tarihi :23/05/2021]
- Tsujimoto, T. ve Mizukami, T. (1985). Effect of migration to local scour araond a bridge pier. *Memoirs Of The Faculty Of Technology Kanazawa Univercsity*,, 19(1): 23-24.
- Varol, F. A. (2015). *Yan Savak Akımlarının Etkisindeki Kohezyonlu Taban Malzemesinin Oyulma Probleminin Deneysel İncelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Winterwerp, J. C. (2004). *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment: Developments in Sedimentology*. V.56 Amsterdam: Elsevier Science.
- Yanmaz, A.M. (2002). *Köprü Hidroliği (1.Baskı)*. Ankara: Özkan Matbaası .
- Yüksel, Y. (2005). *Deniz tabanı hidrodinamiği ve kıyı morfolojisi: Taban hareketinin başlangıcı*. İstanbul: Arıkan Yayınevi.
- Yüksel, Y. (2014). *Akışkanlar mekaniği ve Hidrolik: Taban Hareketi Mekaniği*. Beta yayınevi.
- Yüksel, Y. ve Tan, R. I. (2018). Propeller Jet flow Scour Around a Pile Structure. *Ocean Research*, s 160-172.
- Yüksel, Y., Tan, R.İ., Celikoğlu, Y. (2018). Propeller Jet Flow Scour Around A Pile Structure. *Applied Ocean Research*, 79,160-172.
- Yüksel Ozan, A., Celikoğlu, Y., Yüksel, Y., Cevik, E. (2005). Jet Scour Around Vertical Piles And Pile Groups. *Ocean Engineering*, 32(3-4):349-362. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.08.002

Zengin, Ş. (2010). Katı Madde Taşınımı ve Dinamik Yüklerin Etkisi Altında Köprü Ayaklarının, Optimum Boyutlandırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Sakarya Üniversitesi,.

Toprak Kolloidleri: 9. Bölüm. <https://acikders.ankara.edu.tr/-%20%20Kolloidler.pdf> [Erişim Tarihi : 02/11/2021]

Maritime Models: 4 Blade Fabricated Propellers. <https://www.maritime-models.co.uk/acatalog/4-blade-ship-boat-props.html> [Erişim Tarihi: 10/09/2021]

