



Yazışma yazarı:

Veysi KARTAL,
vkartal@firat.edu.trVeysi Kartal¹, M. Emin Emiroğlu²¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye. ORCID: 0000-0003-4671-1281²Fırat Üniversitesi, Mühendislik, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye. ORCID: 0000-0002-3603-0274

Referans:

Kartal, V., Emiroğlu, M. E., (2021), Su jetlerinde oyulma karakteristiklerinin deneysel incelenmesi, Su Kaynakları, 6, (1) 15-29

Makale Gönderimi : 6 ŞUBAT 2021
Online Kabul : 16 MART 2021
Online Basım : 30 MART 2021

Özet Oyulma, hidrolik yapıların emniyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Su jetlerinden dolayı mansapta oluşan oyulma, hidrolik yapının ağır hasar görmesine sebep olabilmektedir. Bu çalışmada, dairesel ağızlıktan çıkan su jetlerinin eğimli bir şekilde mansap havuzuna çarpması sonucu oluşan oyulmanın karakteristiklerini belirlemek amacıyla bir dizi deneyler yürütülmüştür. Deneyler; üç adet jet çarpma açısı, üç adet ağızlık çapı, üç adet ağızlık çıkış hızı ve iki farklı çarpma mesafesi için yürütülmüştür. Dairesel su jeti nedeniyle çarpma havuzunda oluşan denge zamanındaki oyulma detaylı bir şekilde incelenmiştir. Su jeti nedeniyle oluşan oyulma karakteristikleri; çarpma açısı, boyutsuz çarpma mesafesi, denismetrik Froude sayısı, ağızlık çapı ve jetin ağızlıktan çıkış hızı dikkate alınarak incelenmiştir. Aynı koşullar altında çarpma açısı küçüldükçe oyulma çukuru karakteristiklerinin (maksimum oyulma derinliği tepe yüksekliği, oyulma çukuru uzunluğu, oyulma çukuru genişliği, vb.) arttığı özellikle büyük çıkış hızlarına sahip jetlerde bu durum daha da belirginleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Su jeti, oyulma, çarpma havuzu, nozul, hidrolik yapı emniyeti

Experimental investigation of scour characteristics in water jets

Abstract Scouring is of great importance for the safety of hydraulic structures. Local scour by water jets cause considerable damage around the hydraulic structures. In this study, a series of experiments were carried out in order to determine the characteristics of scour caused by the water jets from the circular nozzles obliquely impinged to the downstream pool. Experiments were conducted for three jet impingement angles, three nozzle diameters, three exit velocities of the nozzle and two different impingement distances. The scour in equilibrium time in the downstream pool caused by the circular water jet was studied in detail. Scour characteristics caused by water jet was investigated according to impingement angle, dimensionless impingement distance, the denismetrik Froude number, the nozzle diameter and the exit velocity of the jet from the nozzle. The study shows that as the impingement angle decreases, scour hole characteristics (maximum scour depth ridge height, scour hole length, scour hole width, etc.) increase, especially in jets with large exit velocities under the same conditions.

Keywords: Water jets, scour, downstream pool, nozzle, hydraulic structure safety

1. Giriş

Su jetleri inşaat, çevre ve diğer mühendislik dallarında kullanılan önemli bir hidrolik yapıdır. Su jeti, bir orifis veya boru ucundan atmosfere açılan akışkan akımı veya su demetidir. Su jeti hava ile çevrelendiği gibi başka bir sıvı akışkanı ile de çevrelenebilir. Eğer su jeti, su gibi başka bir akışkan ile çevrelenmişse bu tip su jeti, batık (*submerged*), değilse batmamış (*unsubmerged*) jet olarak tanımlanır. Ayrıca su jetleri, eğimli yatay veya düşey doğrultuda olabilmektedir. Akım jetlerinin tipine göre ayrıca laminer veya türbülanslı jetler olarak sınıflandırılır. Su jetleri özellikle havalandırma, oksijen transferi ve yüzdürme (flotasyon) işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Su jetleri; havanın sürüklenmesi, sürüklenen havanın su içinde hava kabarcıkları şeklinde dağılımı ve etkili bir şekilde su-hava etkileşiminin oluşmasında etkin bir şekilde rol oynamaktadır. Baraj dipsavaklarında su, jet şeklinde mansaba aktarılmaktadır. Kemer barajlarda dolusavaklara yardımcı olarak, ölü hacmin üst kotlarına yerleştirilen su jetleri ile rezervuarlardaki taşkın suları emniyetli bir şekilde mansaba aktarılmaktadır. Ayrıca barajlardaki kapakların altından çıkan jet akımları, menfezlerden çıkan jetler ve düşülerden şelale şeklinde düşen serbest su jetleri akarsu yatağında istenmeyen oyulmalara sebep olmaktadır.

Teknolojik gelişmeler ve artan ihtiyaçlar sonucunda son yıllarda dünyada ve ülkemizde yüksek düşümlü barajlar inşa edilmektedir. Yüksek düşümlü barajların projelendirilmesinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi de dolusavak veya kapaklar yardımıyla su jeti şeklinde mansaba verilen suyun enerjisinin etkili bir şekilde sönmülememesi sonucu mansapta oluşacak oyulma ve oluşan oyulmanın getireceği problemlerdir. Bu nedenle su jetleri uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Jetin kum, çakıl veya zayıf kayadan oluşan bir sediment yatağı ile etkileşimi oyulma ile sonuçlanır. Oyulma probleminin teorik olarak incelemek zor ve karmaşıktır. Hızla değişen bir oyulma çukurunun geometrisinin etrafındaki jet difüzyonunun ayrıntılı bir şekilde incelenmesi teorik olarak oldukça güçtür. Aynı şekilde jet nedeniyle oluşan oyulmanın farklı zamanlarındaki malzemelerin hareketini ve davranışını, sürüklenen havanın etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemek gerekir. Ayrıca, deşarj edilen akımın frekans, zaman, büyüklükleri ve türbülansındaki olası önemli farklılıkların oyulmanın büyümesi üzerindeki etkileri de kapsamlı bir şekilde anlaşılmalıdır. Bu nedenlerden dolayı araştırmacıların bu konuya genel yaklaşımı çoğunlukla deneysel olarak incelemek olmuştur. Su jeti nedeniyle oluşan oyulma, yapının bir kısmının veya tamamının stabilitesini tehlikeye sokacak kadar büyük olabilmektedir. Oyulmanın yapıda hasar veya göçme gibi zararlara yol açarak yapının ömrünü azaltmasıyla problemin ekonomik boyutu da söz konusudur. Bu nedenle hidrolik mühendisleri; mevcut hidrolik, hidrolojik ve jeolojik verilere dayanarak etkili ve ekonomik bir tasarım yaparak, suyun enerjisini dengeli dağıtma ve jetin mansap bölgesinde büyük oyulma oluşturmayacak şekilde bir tasarım yapmaya çalışmaktadırlar.

Bu çalışmada, hidrolik yapılar üzerinden serbest düşen jetler, konu kapsamı dışında bırakılmıştır. Sadece basınçlı akım durumunda su jetleri dikkate alınmıştır. Su jetleri nedeniyle oluşan oyulma problemi inceleyen ilk öncü araştırmacı Rouse (1939)'tur. Rajaratnam vd. (1995) 10, 30, 45 ve 60° çarpma açılarında türbülanslı su jetlerini eğimli bir şekilde ve batık durum koşulları için kum yataklarına çarptırarak oluşan oyulmayı deneysel bir şekilde incelemişlerdir. Asimptotik durumda; oyulma çukuru profillerinin yaklaşık olarak benzer olduğunu ve erozyona uğramış yatak profilinin erozyonun maksimum derinliği (ϵ_m), oyulma çukurunun uzunluğu ve tepe yüksekliği (Δ) gibi ana karakterlerin çarpma mesafesi (H) cinsinden esas olarak erozyon parametresinin (E) bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Rajaratnam ve Mazurek (2002) çalışmalarında, kohezyonsuz bir yatak malzemesi üzerine eğimli dairesel hava jetini yatağa çarptırarak yatakta meydana gelen erozyonun oluşumunu deneysel olarak incelemişlerdir. Jet hızları 27,3 ile 86,8 m/s, nozul çapı 6,35 ve 12,6 mm olan hava jeti 7,5 ila 60° arası çarpma açısıyla polistiren yatak malzemesine çarptırılarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada oyulma çukurunun çeşitli karakteristik boyutları ölçülmüş, analiz edilmiş, oyulma çukurunun karakteristiklerinin çarpma açısı ve $F_0(H/d)$ 'e bağlı olduğunu bulmuşlardır. Bu araştırmacılar jetin yatağa çarpma uzaklığını ve eğim açısını değiştirerek oyulma derinliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Boyut analizi yapılarak oyulma derinliğini etkileyen değişkenler belirlenmiştir. Boyut analizi yapılarak Reynolds sayısının 10^4 'ten büyük olduğunda yani türbülanslı akım şartlarında Reynolds sayısının oyulma üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği Rajaratnam (1976) tarafından belirtilmiştir. Asimptotik durumda erozyonun ana karakteristikleri için korelasyonlar geliştirilmiştir. Araştırmacılar erozyonun maksimum derinliğinin jetin çarpma noktasının önünde meydana geldiğini vurgulamışlar ve düşey olarak çarptırılan jetlere göre eğimli jetlerin daha büyük oyulma çukuru oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Dabbagh vd. (2002) sürekli bir su jeti kullanarak toprak erozyonuna dair deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada, su jetinin aşındırıcı davranışını ve toprağa çarpmasının farklı etkilerini göstermiş; kopan toprağın hacmi, jet çapı, uzaklıkla genişlemesi (yayılması) ve aynı zamanda penetrasyon oranı ve değişen su jeti parametrelerine bağlı olarak erozyona uğrayan toprak kütesinin değişimlerine dair deneysel ilişkiler sunmuşlardır. Deneysel sonuçları, penetrasyon ve erozyonun meydana gelmediği kritik bir hız ortaya koymuştur. Bu kritik hızın, temelde toprak özelliklerine bağlı ve toprağın ölçülen direnciyle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Pagliara vd. (2006) çarpma havuzunda meydana gelen oyulma üzerine jetin şekli, jetin hızı, kuyruk suyu derinliği, malzemenin üniform olup olmaması, jet hava içeriği ve memba akımının etkilerini incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. 30, 45, 60 ve 90° çarpma açısında 0,07 m çapa sahip bir dairesel su jetinin batık ve batık olmayan durumda çarpma havuzunda meydana getirdiği oyulmayı incelemişlerdir. Bu çalışmada su jetine hava ilavesi yapılarak havalandırmanın da oyulmaya etkisi incelenmiştir. Jet hava içeriğinin oyulma üzerinde büyük bir etkisi olduğunu ve jetin şeklinin ise oyulma üzerinde küçük bir etkisi olduğunu söylemişlerdir. Malzemenin üniform olması durumunda üniform olmayan malzemeye göre daha derin oyulma derinliğinin oluştuğunu, jet çarpma açısının artmasıyla oyulma çukurunun derinliğinin arttığını ancak tepe yüksekliğinin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar kuyruk suyu derinliğinin maksimum oyulma derinliği üzerine etkisinin önemli olduğunu bildirmişlerdir.

Chakravarti vd. (2013) su altında düşey olarak yerleştirilmiş dairesel su jetinin çakıl malzemesinde oluşturduğu oyulmanın davranışını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, oyulma çukurunda hem dinamik hem de statik oyulma derinliği için ölçümler yapılmıştır. Asimptotik durumda dinamik oyulma derinliğinin statik oyulma derinliğine göre çok daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Oyulma derinliğinin zamanla değişimi ve maksimum statik oyulma derinliğini ölçmüşlerdir. Erozyon parametresi (E) ile dinamik ve statik oyulma derinliği arasındaki farkın değişimi, bu farkın erozyon parametresinin değeri ile doğrusal olarak arttığını ortaya koymuşlardır.

Koçak (2013) yüksek lisans çalışmasında kohezyonsuz zemin malzemesi kullanarak deneysel bir çalışma yapmıştır. Su jetinin oluşturduğu oyulma derinliği üzerinde zemin tabakası kalınlığının etkisini araştırmıştır. Jetin oluşturduğu oyulmayı etkileyen boyutsuz parametreler, boyut analizi yardımı ile belirlenmiş ve aralarındaki ilişkiyi belirlemek için deneyler yapılmıştır. Deney neticeleri göstermiştir ki zemin malzeme tabakası kalınlığı arttıkça su jetinin bu tabakada oluşturduğu oyulma derinliği en büyük olmaktadır. Eğer kum tabakasının kalınlığı belirli bir sınır değerinden büyük olursa oyulma derinliği değişmeyip sabit kalmaktadır. Su jeti tarafından oluşturulan oyulmanın en büyük derinliği üzerinde zemin tabakasının kalınlığının bir miktar etkisi var olmakla birlikte söz konusu etkinin aşırı büyük olmadığını belirtmiştir.

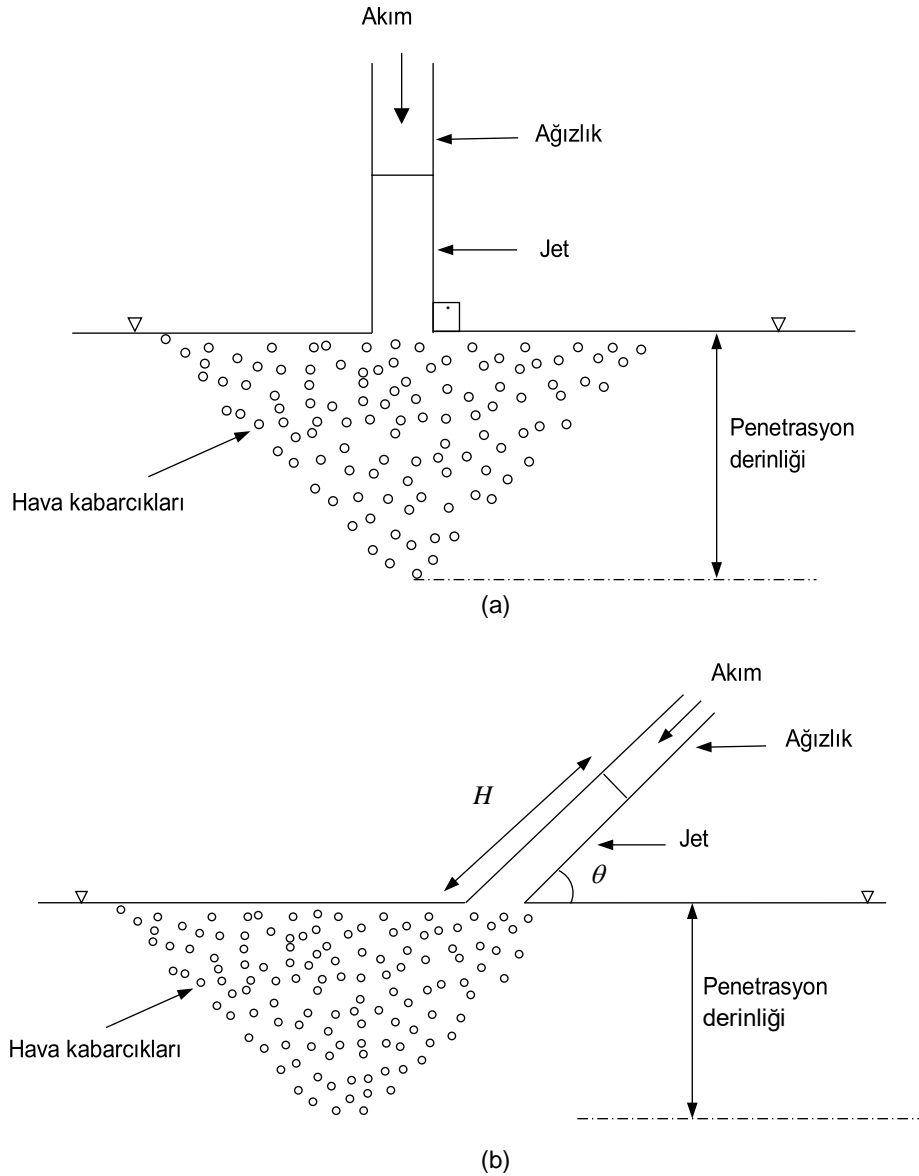
Tastan vd. (2016) su jetleri nedeni ile oluşan oyulma üzerine yatak malzemesi kalınlığının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Kohezyonsuz sediment ile yapılan deneylerde sediment tabakasının kalınlığının oyulma üzerine etkisinin olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir: (1) Zemin malzeme tabakası kalınlığı arttıkça maksimum oyulma derinliği artmıştır. Fakat belirli koşullar altında zemin malzeme tabakasının belirli bir sınırının üstündeki değerinde maksimum oyulma derinliğinin değişmediğini ve sürekli sabit olduğunu bulmuşlardır. (2) Oyulma derinliği üzerinde zemin malzeme tabakasının kalınlığının etkisinin küçük de olsa olduğunu belirtmişlerdir.

Kartal (2018) yüksek lisans çalışmasında üniform olan kuvars kumunu mansap havuzunda sererek dairesel ağızlıktan çıkan su jetlerinin sebep olduğu oyulmayı detaylı bir şekilde incelemiştir. Oyulma çukurunun karakteristiklerini (maksimum oyulma derinliği, tepe yüksekliği, oyulma çukuru genişliği, oyulma çukuru uzunluğu ve vb.) farklı çarpma açısı, farklı ağızlık çapları, farklı çıkış hızları ve farklı çarpma mesafeleri için değişimini deneysel olarak araştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, oyulma çukurunun uzunluğu ve oyulma çukurunun genişliğini aynı şartlar altında yaklaşık olarak doğrusal arttığını belirtmiştir. Bu çalışmada hem enine hem de boyuna ölçümler alınarak oyulmanın topografyası çıkarılmıştır. Küçük çarpma açısında test edilen deneylerde büyük çarpma açısında yapılan deneylere göre oyulmanın daha geniş bir alana yayıldığını ifade etmiştir.

Kartal ve Emiroglu (2021) dairesel ağızlıkta plaka kullanmak suretiyle su jetini pürüzlendirerek su jetlerinden dolayı meydana gelen hava sürüklenme debisi ve oyulmayı incelemişlerdir. Araştırmacılar, ağızlıkta plaka kullanımının yani pürüzlülüğün su jetinin hızını azalttığı, mansap havuzuna daha çok hava kabarcığı soktuğunu (hava sürüklenme debisi arttığı) ve dolayısıyla mansap havuzunda oluşan oyulmayı daha geniş bir alana yayarak oyulma derinliklerinin azaldığını belirtmişlerdir. Özellikle plakalı ağızlıktan çıkan su jeti plakasız ağızlıklara göre jet çarpma mesafesinin artmasıyla gözle görülür şekilde oyulma derinliğinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Akımı oluşturan jetin ağızlıktan çıktıktan sonra çarpma havuzuna çarpma kadarki mesafede su jeti ile hava arasındaki sürtünmeden dolayı serbest jet boyunca bol miktarda hava jete girmektedir (Şekil 1). Bunun sonucunda serbest jetin kesiti hızla artar ve jet boyunca akışkan akımının hem ortalama yoğunluğu hem de hızı azalır. Serbest jetin çarpma havuzunda bulunan su yüzeyine göre potansiyel enerjisi, kinetik enerjiye dönüşmektedir. Ağızlıktan çıktıktan sonra su jeti, havada kalan kısmı yani serbest jet kısmı boyunca meydana gelen değişikliklerin, oyulmanın geometrik şekli üzerinde etkisi vardır. Çarpma havuzuna çarptırılan su jetinin ağızlıktan çıktıktan sonraki havada kalan kısmı yani serbest jetin, kuyruk suyu içine girdiği noktadaki özelliklerini teorik olarak bulmak veya ölçmek oldukça zordur. Havadaki serbest jet boyunca jet kesitinin nasıl ve ne kadar arttığına dair kesin bir analitik ifade olmayıp söz konusu kesit değişimi için çok sayıda yarı analitik veya deneylerle bulunan tamamen ampirik bağıntılar vardır (Yıldız, 2001). Genellikle bu ampirik ifadeler çalıştırıldığı deneylerin akım şartlarında geçerli olup birbirlerinden çok büyük farklılıklar göstermektedirler. Serbest jetin mansap havuzuna çarptığı noktadaki özellikleri jet akımının çarpma mesafesine (jetin eksen boyunca su yüzeyine olan mesafe), yer çekimine, jetin çarpma açısına, akışkanın viskozitesi ve yoğunluğuna, ağızlığın çıkış çapına ve serbest jetin maruz kaldığı hava koşullarına bağlıdır. Mansap havuzu içerisinde kalan batık jet kısmındaki akım oldukça karmaşık bir akım ortamına sahiptir. Bu jet kısmındaki akım içerisinde hem su, hem hava ve hem de zemin malzeme tabakasında jetten dolayı oluşan oyulma nedeniyle askıya geçmiş çok miktarda kum danesi bulunur. Ayrıca jetin dış sınırları ile çevresindeki su arasındaki sürtünme (viskozite) ve yüksek hız gradyanları nedeniyle batık jetin dış

sınırları boyunca çok kuvvetli ve sonsuz sayıda vorteksler (çevrıntiler) oluşur. Bu vorteksler ve çevresindeki su batık jete nüfuz ederek jet kesitinin büyümesine, jetin hızının düşmesine, jet enerjisinin kırılmasına ve özellikle jete giren vortekslerden dolayı jet akımının aşırı bir şekilde salınımlı (*unstable*) olmasına neden olur. Jet ortamında oluşan vorteksler akımın olduğu yerde çok güçlü türbülansın oluşmasına ve akım ortamının salınımına sebep olmaktadır. Bu yüzden bu iki faktör zemin malzeme tabakasında bulunan zemin danelerinin büyük ölçüde sarsılmasına, yerlerinden çıkmasına ve askıya kaldırılmasına neden olduğu gibi sediment danesinin her tarafa dağılmasına ve taşınması sonucu oyulma oluşur (Kocak, 2013). Su jetinin hızı, çarpma açısı gibi değişkenlere bağlı olarak belirli bir derinliğe kadar aşağı inebilirler. Bu derinlik, penetrasyon derinliği olarak tanımlanmaktadır. Su jeti ile hava taşınmasında düşey ($\theta=90^\circ$) ve eğimli su jetleri kullanılmaktadır. $\theta=90^\circ$ durumunda sürüklenen hava kabarcıkları bir koni şeklinde olmaktadır. $\theta<90^\circ$ olması durumunda ise sürüklenen hava kabarcıkları bir tabak şeklini almaktadır.



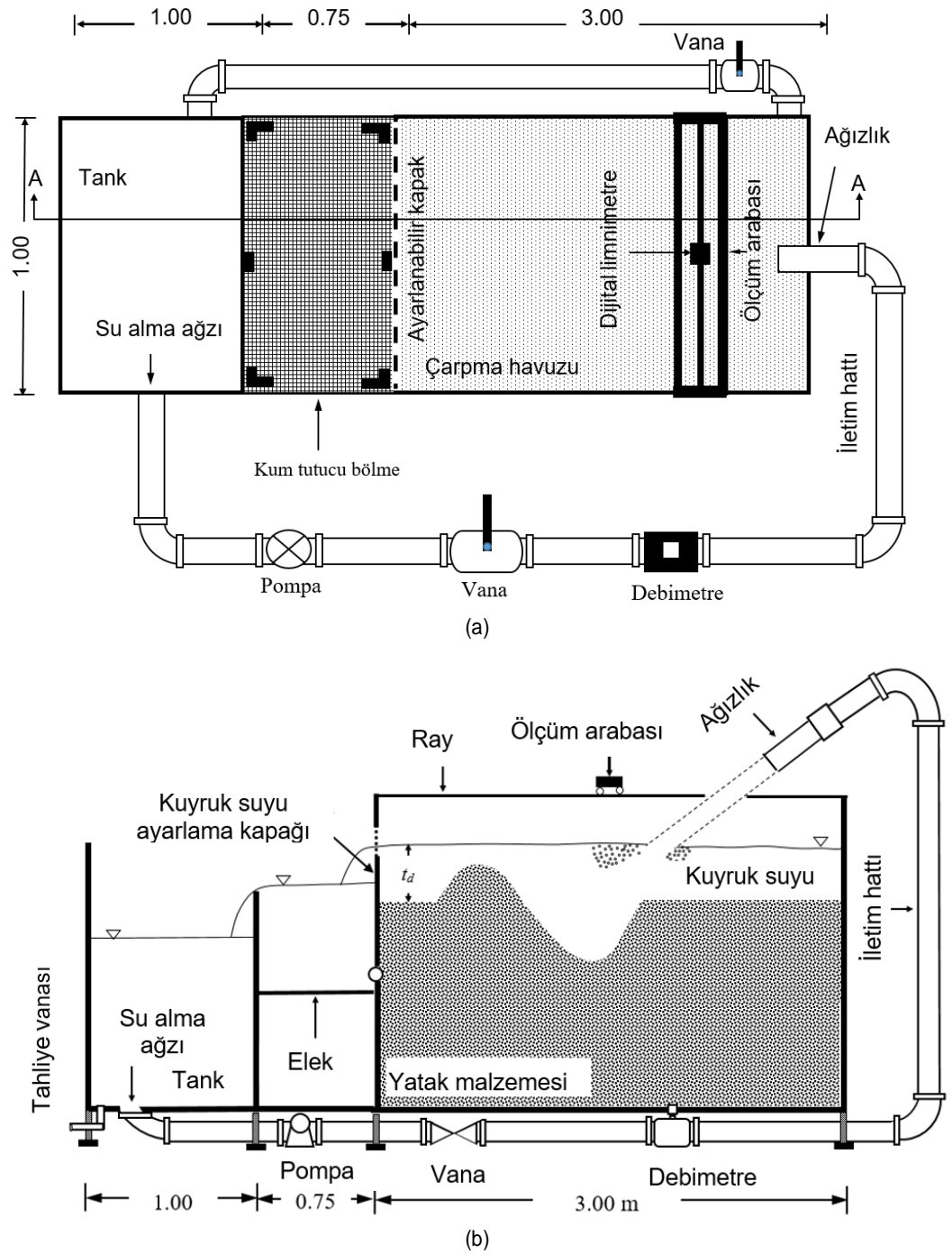
Şekil 1 Su jetleri: (a) Düşey su jeti, (b) Eğimli su jeti

Farklı akım koşullarına sahip su jetleri nedeniyle mansap havuzunda bulunan sediment tabakasında meydana gelen oyulma deneysel olarak incelenmiştir. Su jeti çarpma havuzuna çarptırıldığında oluşan oyulmanın karakteristikleri (maksimum oyulma derinliği, oyulma çukuru uzunluğu, oyulma çukuru genişliği ve tepe yüksekliğini) farklı akım koşulları için detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Mevcut çalışmada; ağızlık çapı, çarpma açısı, çarpma mesafesi ve jet çıkış hızının su jetleri nedeniyle mansapta oluşan oyulmanın karakteristikleri üzerinde etkisini araştırmak hedeflenmiştir.

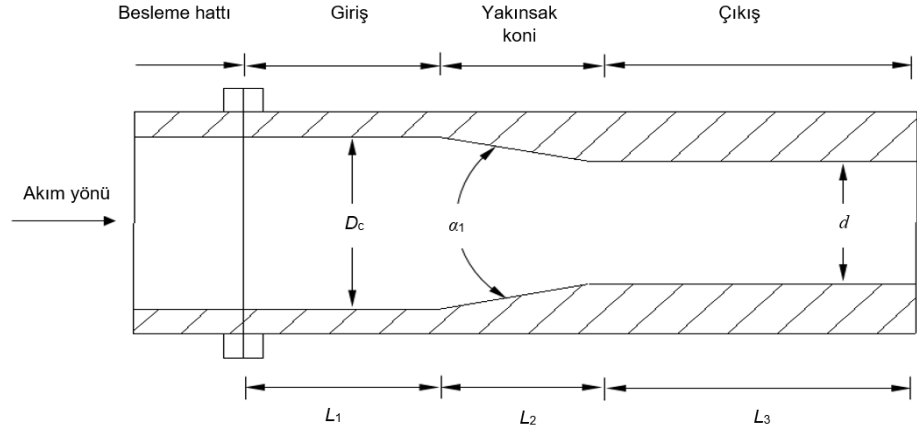
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmayı yürütmek için, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında birbirlerine yapışık olan bir adet çarpma havuzu, bir adet kum tutucu bölme ve

bir adet su tankı olmak üzere üç bölmeden oluşan bir deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait şematik görünüm Şekil 2(a, b)'de verilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmada kullanılan dairesel ağızlıkların detayları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2 Deney düzeneği: (a) Plan, (b) Deney düzeneğinin A-A enkesiti.



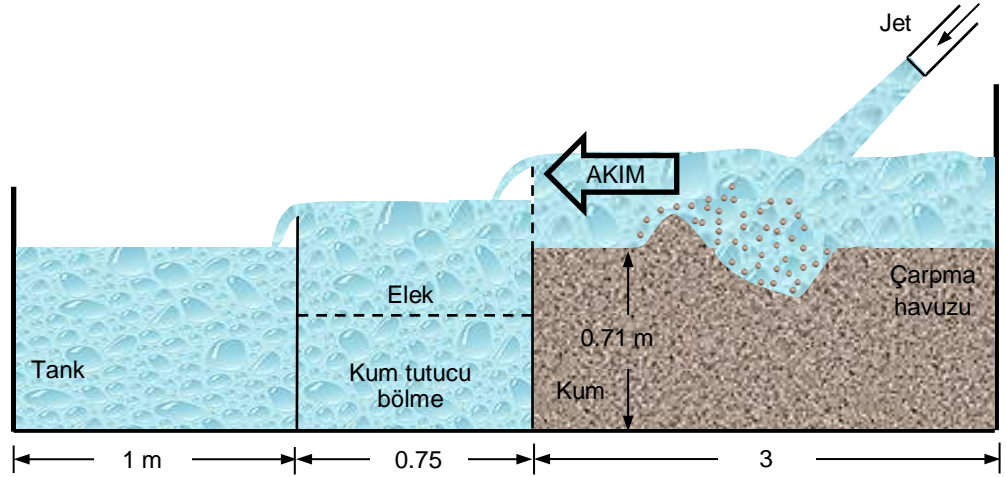
Şekil 3 Deneylerde kullanılan dairesel ağızlık tipinin detayları.

Mevcut çalışmada çarpma havuzundaki tabana serilen malzeme olarak kuvars kumu ($D_{16}=1,08$ mm, $D_{50}=1,28$ mm, $D_{84}=1,92$ mm, $\sigma_g=(D_{84}/D_{16})^{1/2}=1,33$ ve $\rho_s=2650$ kg/m³) kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kuvars kumun üniform olması temin edilmiş ve bu şekliyle deneysel çalışmada kullanılmıştır. Bir başka değişle sediment boyut dağılımının standart sapması $(D_{84}/D_{16})^{1/2}$ değeri 1,4'ten daha azdır. Bu çalışmada test edilen debiler Krohne marka elektromanyetik debimetre ile belirlenmiş ve su jeti pompa kullanılarak mansap havuzuna çarptırılmıştır. Su jeti nedeniyle çarpma havuzunda oluşan oyulmayı incelemek için yapılmış olan bütün deneylerde deney setine bağlanan hortumlar yardımıyla deneyler musluk suyu kullanılarak yapılmıştır. Her bir deneyde deneylere başlamadan önce çarpma havuzundaki kum yatak, mastar ve terazi yardımıyla düzleştirme işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan her bir deney için çarpma açısı, ağızlık çapı, jet çarpma mesafesi ve hızların ayarlanması ile deney düzeneği deneylere hazır hale getirilmiştir. Deneylere, çalışılmak istenen kuyruk suyu derinliğini elde etmek için şebekeden bağlanan hortumlar yardımıyla sediment yüzeyini bozmayacak şekilde çarpma havuzuna musluk suyu doldurmakla başlanmıştır. Bütün gerekli hazırlıklar yapıldıktan sonra pompa çalıştırılarak küresel vananın yavaş yavaş açılması ile elektromanyetik debimetre yardımıyla sistemin debisi kısa süre içerisinde ayarlanarak deneyler başlatılmıştır. Su çarpma havuzuna çarptırıldıktan sonra akışa geçip tekrar tanka gelmesi ile su devridaim ettirilmiştir. Dairesel ağızlıkta jet hızı çıkış çapı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu deneysel çalışmada, deney sistemine monte edilen ölçüm arabası ile hem enine hem de boyuna ölçümler Mitutoyo marka dijital limnimetre ile yapılmıştır.

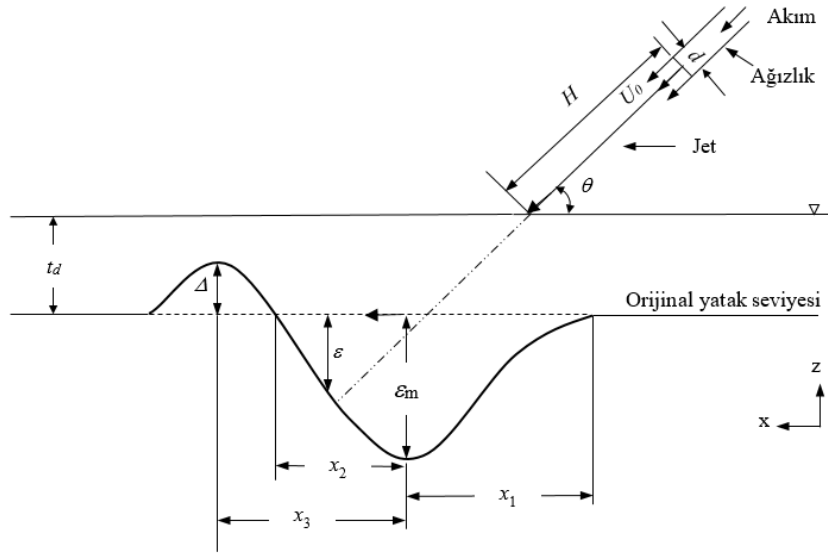
Tüm deneyler Şekil 2(a, b)'de sırasıyla planı, kesiti verilen deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada su jeti olarak dairesel ağızlıklar kullanılarak deneyler yürütülmüştür. Üç farklı çapta dairesel ağızlık kullanılmıştır. (jetin çıkış çapı: 28, 34, 40 mm). Şekil 2(a, b)'de görüldüğü üzere su jetinin çıktığı boru, çarpma havuzunun bulunduğu kısmın başına monte edilmiş 360° dönebilen yatay bir mil yardımıyla jet borusuna dolayısıyla su jetine istenilen çarpma açısı (θ) verilebilmiştir. Jet, çarpma havuzunun merkez eksenine göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu çalışmada jetin, çarpma havuzuyla yaptığı eğim açısı (θ) 30, 45 ve 60° olmak üzere üç farklı çarpma açısı değeri çalışılmış ve 360° dönebilen mil sayesinde istenilen açılar ayarlanabilmiştir. Özel vidalı bağlantılar aracılığıyla jet borusu ileri-geri hareket ettirilerek jetin çarpma mesafesi (H) ayarlanabilmiştir. Çarpma havuzuna serilen kum tabakası kalınlığı $h_k=71$ cm ve kuyruk suyu derinliği $t_d=41,2$ cm seçilmiştir. Yapılan ön deneyler sonucu çarpma açısı, jet çarpma mesafesi ve ağızlık çapları için jet nedeniyle mansap havuzunda oluşan oyulmanın geometrisini etkilemeyecek optimum değerler olduğuna deneme yanılma yoluyla karar verilmiştir. Jet çıkış noktasının çarpma havuzundaki su yüzeyine jet eksenini boyunca olan mesafesi $H=15$ ve 30 cm özel vidalar yardımıyla ileri-geri hareket ettirilerek bu değerlerde ayarlanmıştır. Gücü 11 kW olan pompanın çalıştırılmasıyla su jeti, çarpma havuzunda bulunan kum malzeme tabakasında oyulmayı başlatmıştır. Pompa yardımıyla çarpma havuzuna çarptırılan su jeti havuza çarptıktan sonra önce kum tutucu bölmeye oradan da su tankına doğru cazibeli bir şekilde doğru akışa geçmiştir (Şekil 4). Bu şekilde her deney için aynı akım şartlarında denge oyulma durumunun oluşup oluşmaması durumuna göre altı (6) ile sekiz (8) saat arasında su jeti havuza çarptırılmıştır. Bu süre zarfında çarpma havuzunda jetten dolayı meydana gelen oyulmanın 15, 30, 45, 60, 180 ve 480'inci dakikalardaki maksimum oyulma değerleri ölçüm arabasına monte edilen dijital limnimetre ile okunmuştur. Pompa kapatıldıktan sonra jetten dolayı çarpma havuzunda meydana gelen oyulma çukurunun karakteristiklerinin değerleri dijital limnimetre ile okunmuştur.

Çarpma havuzundaki kuyruk suyu derinliği havuzun en sonunda kum tutucu bölmeye bitişik olan çıkarılabilir/takılabilir kapaklar ve ek iletim hattı üzerindeki küresel vana yardımıyla ayarlanabilmiştir (Şekil 2(a, b)). Su jeti akımı, 11 kW gücündeki pompa yardımıyla su tankındaki su alma ağzından borular yardımıyla alınarak çarpma havuzuna çarptırılması ile sağlanmıştır. Çarptırılan su jetinin

mansap havuzundan sonra kum tutucu bölmeye ardından tekrar su tankına cazibeli bir şekilde akışa geçmesi temin edilmiştir. Bu şekilde yapılarak deneyde kullanılan suyun devridaimi sağlanmıştır. Pompanın basma ve iletim borusu üzerine yerleştirilmiş bulunan bir küresel vana ve elektro manyetik debimetre yardımıyla su jetinin debisi ayarlanabilmiş ve ölçülmüştür (Şekil 2(a, b)). Çarpma havuzunun yan duvarlarının en üstünde havuz boyunca devam eden ray üzerinde hareket edebilen tekerlekli ölçüm arabası üzerinde monte edilmiş olan dijital limnometre ile oluşan oyulmanın enine ve boyuna ölçümler yapılmıştır. Ayrıca kuyruk suyu ayarlama kapaklarının yanında jet akıma geçtiğinde sabit kuyruk suyu derinliğinin sağlanması için ilaveten küresel vana monte edilmiş olan bir ek bağlantı yapılmıştır. Bu bağlantı borusu ile jetin mansap havuzuna çarptırılmasıyla kapak üzerindeki su napının artması ile birlikte yükselen kuyruk suyu, akış boyunca sürekli sabit kalması temin edilmiştir. Şekil 4'te deney düzeneğinin görsel olarak boy kesiti verilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneği üç bölmeden oluşmaktadır. Şekil 5'te oyulma geometrisinin parametreleri şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4 Deney sistemi uygulama düzeneği



Şekil 5 Oyulma çukuru en kesiti

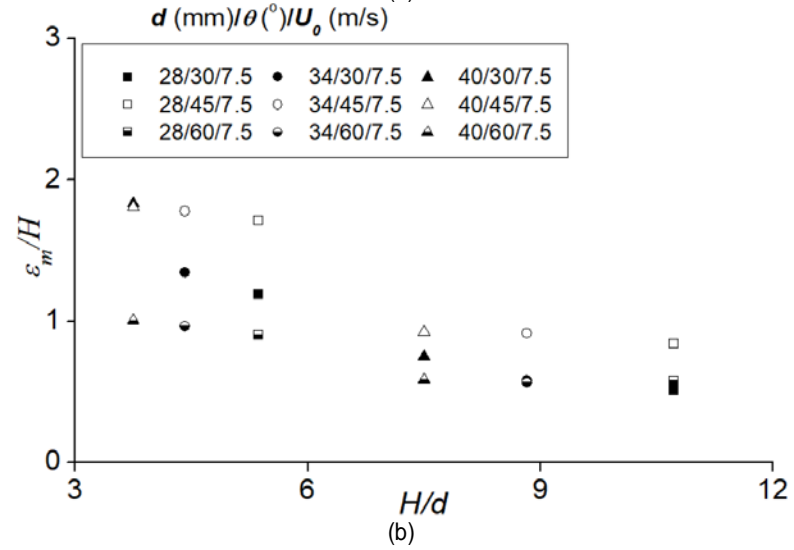
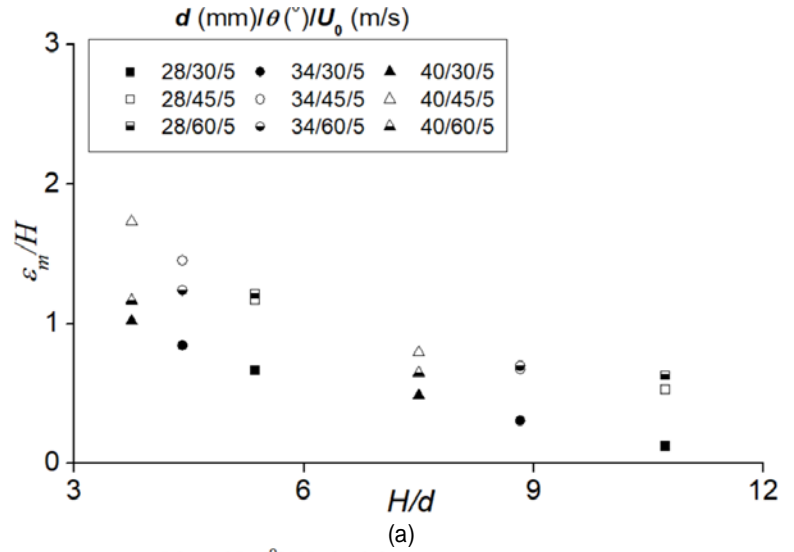
3. Sonuç ve Tartışma

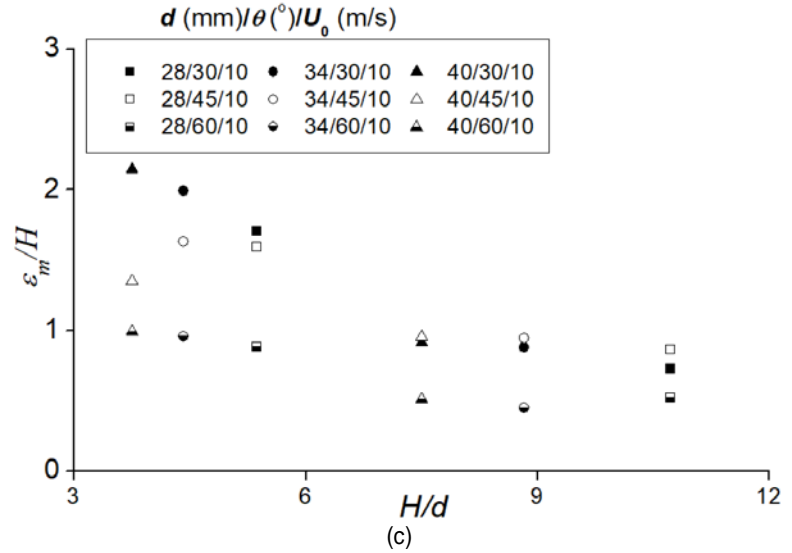
Dairesel ağızlıktan çıkan su jeti çarpma mesafesi ($H=0,30$ ve $0,15$ m), çarpma açısı ($\theta=30, 45$ ve 60°), ağızlık çapı ($d=28, 34$ ve 40 mm), jet çıkış hızları $U_0=5, 7,5$ ve 10 m/s akım koşulları için mansap havuzunda oluşan oyulma çukurunun karakteristikleri boyut analizi sonucu grafiklere dökülerek tartışılmıştır.

Şekil 6'da farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için boyutsuz maksimum oyulma derinliğinin boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi verilmiştir. Su jetinin hızının artmasıyla aynı zamanda jetin

momentumu da artmaktadır. Jet hızının artması ile penetrasyon derinliğinin arttığı literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Böylece mansap havuzu içerisine dalan su jeti, yüksek hızlarda daha fazla oyulma derinliği oluşturmaktadır. Su jetinin hızının artması ile mansap havuzuna giren hava kabarcıklarının miktarı da artmaktadır (Bagatur ve Sekerdag, 2003).

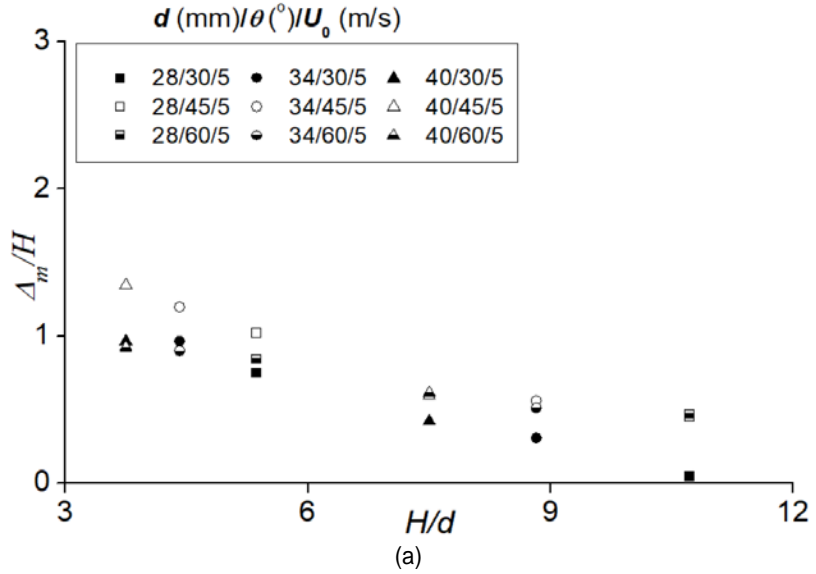
$\theta=60^\circ$ çarpma açısı için yapılan deneylerde mansap havuzuna içerisine dalan su jeti diğer açılara göre çok daha fazla sedimenti askı durumuna geçirmektedir. Bunun nedeni $\theta=60^\circ$ için yapılan deneylerde akım içerisine sokulan hava kabarcıkları yatak malzemesi içerisine geçirgenlik nedeniyle girmektedir. Yatak malzemesi içerisine giren hava kabarcıkları sedimenti yukarı doğru kaldırmaktadır. Böylece hava kabarcıkları, büyük miktardaki sedimenti bir kaynama durumuna benzer şekilde sedimenti askı halinde tutar. Statik oyulma durumunda (pompanın kapatılması) askı durumundaki sediment yer çekimi kuvveti etkisiyle yatak malzemesi üzerine çökeltmektedir. Bunun sonucunda bu çarpma açısında test edilen deneylerde test edilen diğer deneylere göre oyulma çukuru daha dar bir alanda oluşmak ve daha düşük oyulma derinlikleri elde edilmiştir.

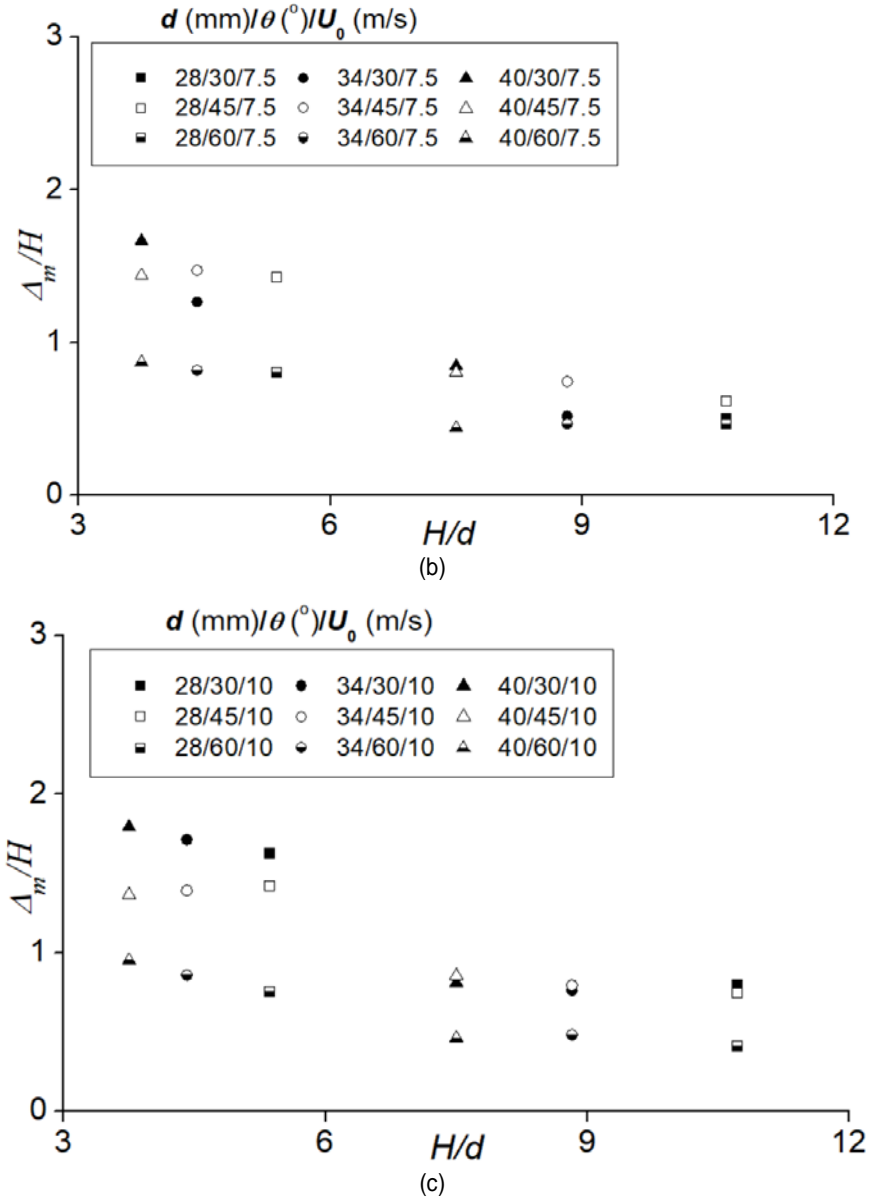




Şekil 6 Farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için boyutsuz maksimum oyulma derinliğinin boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi: (a) $U_0=5$ m/s, (b) $U_0=7,5$ m/s, (c) $U_0=10$ m/s

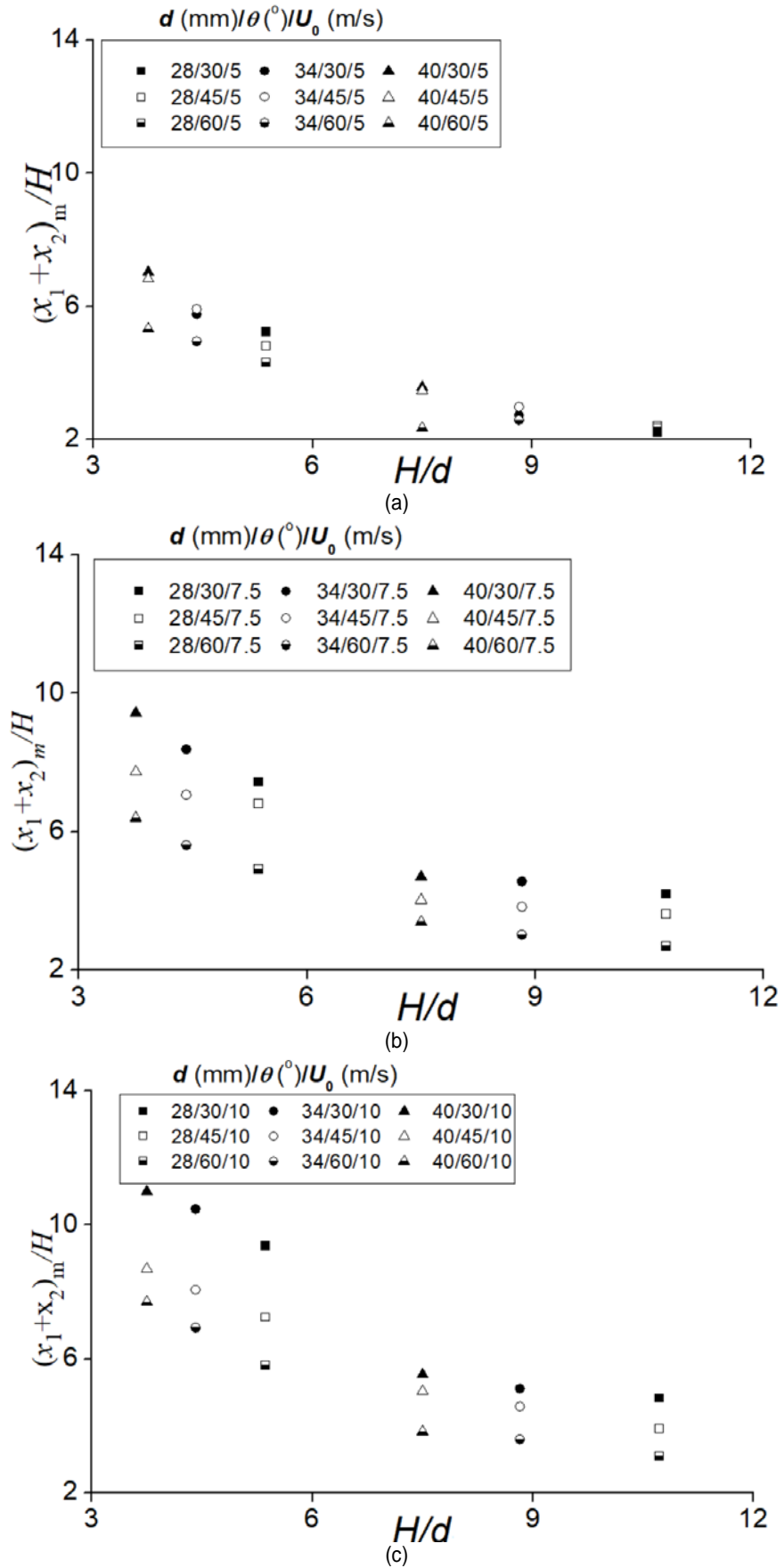
Şekil 7'de farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için boyutsuz maksimum tepe yüksekliğinin boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi verilmiştir. Şekil 7'den görüldüğü gibi aynı şartlara sahip su jetinin oluşturduğu oyulma çukurunda, çarpma mesafesinin azalmasıyla bütün çarpma açıları için maksimum tepe yükseklikleri artmıştır. Test edilen deneylerde en büyük tepe yükseklikleri değerleri hemen hemen $\theta=45^\circ$ çarpma açısında meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 7'deki grafiğe göre de teyit edilmiştir.





Şekil 7 Farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için boyutsuz maksimum tepe yüksekliğinin boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi: (a) $U_0=5$ m/s, (b) $U_0=7,5$ m/s, (c) $U_0=10$ m/s

Şekil 8'de farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için maksimum oyulma çukurunun boyutsuz uzunluğunun boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi verilmiştir. Şekil 8'den görüldüğü gibi aynı şartlara sahip su jetinin oluşturduğu oyulma çukurunda, çarpma mesafesinin azalmasıyla bütün çarpma açıları için maksimum oyulma derinlikleri artmıştır. Test edilen deneylerde en büyük oyulma derinlikleri büyük hızlara sahip jet $\theta=30^\circ$ çarpma açısında meydana gelmiştir. Küçük hızlarda ise jet diğer açılara kıyasla sediment tabakasına ulaşmak için daha çok yol alması sonucu jetin kinetik enerjisi azalmış dolayısıyla enerjisi kırılan jet yani hızı azalan jet daha küçük oyulma derinlikleri oluşturmasına neden olmuştur. $\theta=30^\circ$ için yapılan deneylerde maksimum oyulma derinliği, $\theta=45^\circ$ için test edilen deneylere göre daha düşük tepe yükseklikleri elde edilmesiyle jet daha çok sediment danesinin taşınmasına ve böylece daha büyük maksimum oyulma derinlikleri oluşmasına neden olmuştur. Ancak, $\theta=60^\circ$ için yapılan deneylerde oyulma derinlikleri, oyulma çukuru içinde jet tarafından hareket ettirilen sediment daneleri su içinde askıda kalmasıyla sediment daneleri taşınmamış dolayısıyla daha düşük oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Özellikle pompanın kapatılmasıyla askıda olan sediment daneleri yerçekimi etkisiyle tekrar oyulma çukurunun içine düşmüşlerdir.



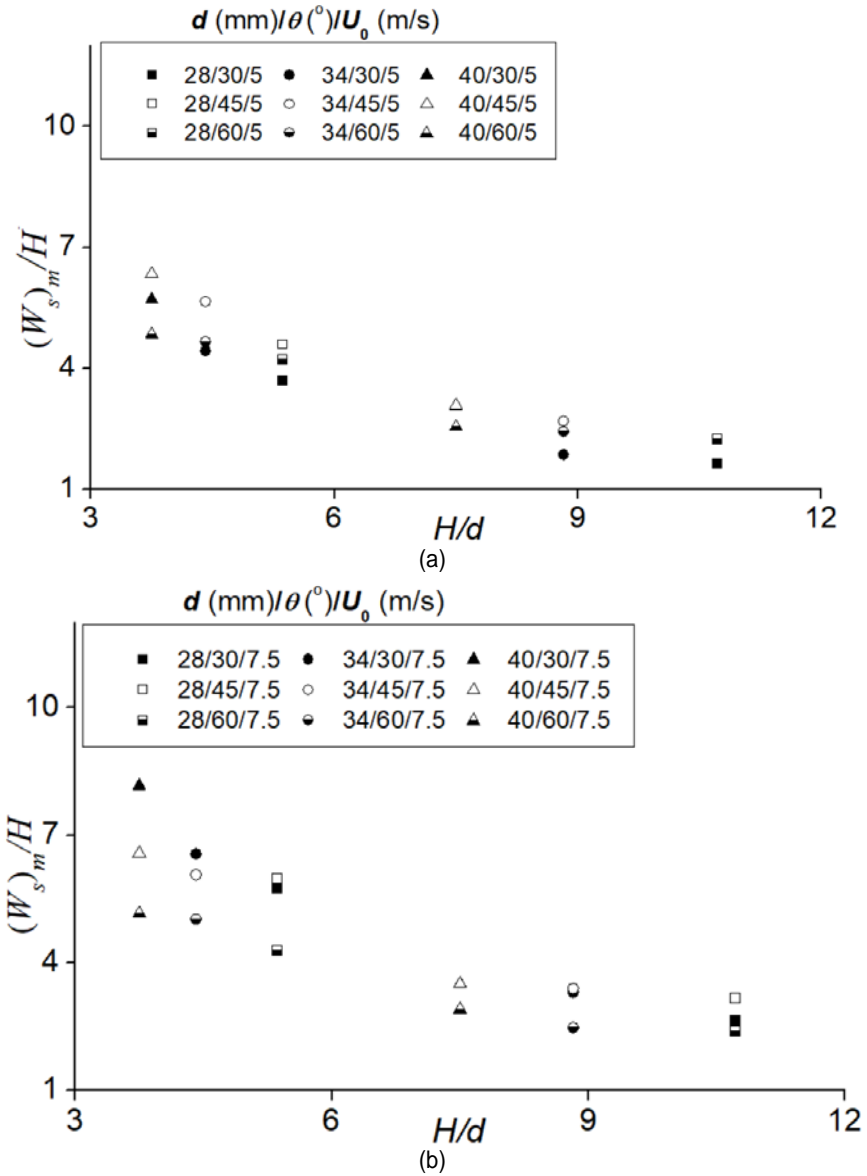
Şekil 8 Farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için maksimum oyulma çukurunun boyutsuz uzunluğunun boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi: (a) $U_0=5$ m/s, (b) $U_0=7,5$ m/s, (c) $U_0=10$ m/s

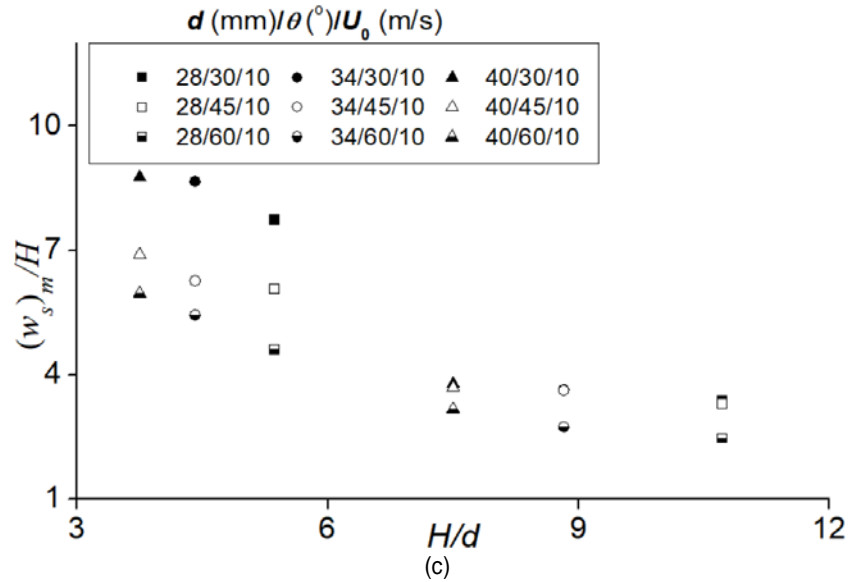
Şekil 9'da farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için maksimum oyulma çukurunun boyutsuz genişliğinin boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi verilmiştir. Test edilen küçük çarpma açıları ve büyük çaplarda (d) daha büyük oyulma genişlikleri elde edilmiştir. Özellikle $\theta=30^\circ$ de oyulma çukuru

genişliğinin, düşük hızlarda küçük olmasının nedeni su jetinin diğer açılardaki test edilenlere göre daha uzun yol alması sonucu jetin kinetik enerjisinin azalması gösterilebilir. $\theta=60^\circ$ çarpma açısında oyulma çukurunun genişliğinin diğer açılara oranla değerinin küçük olması, sedimentin askıda kalıp taşınmaması olarak gösterilebilir.

Her bir jet çarpma açısı için oyulma çukurunun geometrisi farklı olmuştur. Jetin mansap havuzuna çarpma şekli, jetin çarpma noktasındaki genişliği ve hızı, jet uzunluğu ve çarpma açısı oyulma çukurunun geometrik şeklini etkileyen önemli parametreler olmuştur. Küçük çarpma açılarında oluşan tepe yüksekliği mansap havuzunun sonlarına doğru gerçekleşirken, büyük çarpma açılarında su jetinin çarpma noktasına daha yakın bölgede oluştuğu gözlemlenmiştir.

Özellikle küçük çarpma açıları için yapılan deneylerde elde edilen oyulma çukuru geometrisi test edilen diğer deneylerden farklı olduğu ve akım içerisine sokulan hava kabarcıklarının sedimenti yukarı doğru kaldırdığı ve böylece oyulma çukurunun daha geniş bir bölgeye yayılmasına neden olmaktadır.





Şekil 9 Farklı çap, farklı hız ve farklı çarpma açıları için maksimum oyulma çukurunun boyutsuz genişliğinin boyutsuz çarpma mesafesi ile değişimi: (a) $U_0=5$ m/s, (b) $U_0=7,5$ m/s, (c) $U_0=10$ m/s

Farklı akım koşullarına sahip su jeti nedeniyle mansap havuzunda oluşan oyulma çukurunun maksimum oyulma derinlikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Mevcut çalışmada farklı akım koşulları için elde edilen maksimum oyulma derinlikleri

d (mm)	H (mm)	θ (°)	U_0 (m/s)	ε_m (mm)	d (mm)	H (mm)	θ (°)	U_0 (m/s)	ε_m (mm)
28	300	30	5	39	34	150	45	7,5	267
28	150	30	5	101	34	300	45	10	284
28	300	30	7,5	154	34	150	45	10	245
28	150	30	7,5	179	34	300	60	5	210
28	300	30	10	220	34	150	60	5	186
28	150	30	10	257	34	300	60	7,5	170
28	300	45	5	160	34	150	60	7,5	145
28	150	45	5	176	34	300	60	10	136
28	300	45	7,5	253	34	150	60	10	144
28	150	45	7,5	258	40	300	30	5	146
28	300	45	10	262	40	150	30	5	153
28	150	45	10	240	40	300	30	7,5	225
28	300	60	5	191	40	150	30	7,5	275
28	150	60	5	183	40	300	30	10	275
28	300	60	7,5	176	40	150	30	10	322
28	150	60	7,5	136	40	300	45	5	239
28	300	60	10	158	40	150	45	5	260
28	150	60	10	133	40	300	45	7,5	277
34	300	30	5	92	40	150	45	7,5	271
34	150	30	5	127	40	300	45	10	287
34	300	30	7,5	175	40	150	45	10	203
34	150	30	7,5	202	40	300	60	5	195
34	300	30	10	264	40	150	60	5	175
34	150	30	10	299	40	300	60	7,5	176
34	300	45	5	203	40	150	60	7,5	151
34	150	45	5	218	40	300	60	10	154
34	300	45	7,5	275	40	150	60	10	149

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı akım koşullarına sahip dairesel ağızlıktan çıkan su jetinin mansap havuzunda oluşturduğu oyulmanın çukurunun karakteristikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Genellikle küçük jet çarpma açılarında maksimum oyulma derinliği test edilen diğer jet çarpma açılarına göre daha büyük değerler elde edilmiştir.
- Jet kalınlığının, ağızlık çapının, jet genişliğinin, çarpma mesafesinin, jet çıkış hızının ve jet çarpma açısının mansap havuzunda oluşan oyulma çukuru üzerinde etkili olan önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir.

- Oyulma çukurunun uzunluğu, maksimum oyulma derinliği, maksimum oyulma çukuru genişliği ve maksimum tepe yüksekliği küçük çarpma açısı, küçük çarpma mesafesi ve büyük jet çıkış hızları için test edilen deneylerde en büyük değerlerini almıştır.
- Su jeti, küçük çarpma açılarında ve küçük hız değerlerinde diğer açılara kıyasla daha çok yol aldığından jetin kinetik enerjisi azalmakta dolayısıyla küçük çarpma açılarında ve küçük çıkış hızı değerlerinde oyulma çukuru diğer açılarda test edilenlere göre daha dar bir alanda olduğu gözlemlenmiştir.
- Büyük çarpma açılarında jetin sedimenti askıda tuttuğu ve sedimentin taşınmadığı gözlemlenmiş bu çalışmada elde edilen bulgulara göre de bu durum teyit edilmiştir.
- Su jeti, çarpma mesafesi arttığında jetin hava ile temas etmesi sonucu jet hızı azalmış dolayısıyla oyulma çukuru karakteristiklerinin değerleri küçülmüştür.
- Su jeti küçük çarpma açılarında akım içerisine daha çok hava kabarcığı sokması sonucu hava kabarcıkları sediment danelerini yukarı doğru kaldırdığı ve oyulma çukurunun daha geniş bir bölgeye yayılmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.
- Oyulma çukurunun uzunluğu ve oyulma çukuru genişliği, aynı koşullar altında dairesel ağızlıktan çıkan su jetinin hız değerlerinin artmasıyla yaklaşık olarak doğrusal arttığı görülmüştür.

5. Teşekkürler

Desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FUBAP)'a teşekkür ederiz. Proje numarası MF.17.38'dir.

6. Kaynaklar

- Rouse, H., (1939), Criteria for similarity in the transportation of sediment, University of Iowa Studies in Engineering, 20, 33-49.
- Rajaratnam, N., (1976), Turbulent Jets, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 304.
- Rajaratnam, N., Aderibigbe, O. and Pochylko, D., (1995), Erosion of sand beds by oblique plane water jets, Water Maritime&Energy, 112, 31-38.
- Yıldız, D., (2001), Barajların mansabındaki oyulmalar, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, 51-82.
- Rajaratnam, N., Mazurek, K.A., (2002) Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets, Journal of Hydraulic Research, 40(6), 709-716.
- Dabbagh, A.A., Gonzales, A.S. and Pena, A.S., (2002), Soil erosion by a continuous water jet, Soils and Foundations, 42(5), 1-13.
- Pagliara, S., Hager, W.H., and Minor, H.E., (2006), Hydraulics of plane plunge pool scour, Journal of Hydraulic Engineering, 132(5), 450-461.
- Chakravarti, A., Jain, R.K., and Kothiyari, U.C., 2013. Scour under submerged circular vertical jets in cohesionless sediments, ISH Journal of Hydraulic Engineering, 20(1), 32-37.
- Koçak, P.P., (2013), Su jetinden dolayı oluşan oyulma derinliği üzerinde zemin malzeme tabakası kalınlığının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tastan, K., Kocak, P.P., and Yıldırım, N., (2016), Effect of the bed-sediment layer on the scour caused by a jet, Arabian Journal for Science and Engineering, 41(10), 4029-4037.
- Kartal, V., (2018), Su jetlerinde ağızlık türünün oyulma geometrisine etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kartal V., Emiroglu, M.E., (2021), Local scour due to water jet from a nozzle with plates, Acta Geophysica, <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00521-1>

7. Simgeler Listesi

d	Dairesel ağızlık çapı (L)
D	Yatak malzemesi çapı (L)
D_c	Redüksiyon borusunun çapı (L)
D_{16}	%16'dan geçen sediment çapı (L)
D_{50}	%50'den geçen sediment çapı (L)
D_{84}	%84'ten geçen sediment çapı (L)
F_0	Densimetrik Froude sayısı (-) $(U_0/\sqrt{g(\frac{\Delta\rho}{\rho})D_{50}})$
Re	Reynold sayısı (-)
g	Yerçekimi ivmesi (LT^{-2})
h_k	Zemin malzeme tabakasının kalınlığı (L)
H	Çarpma mesafesi (L)

U_0	Jetin ağızlık çıkışındaki hızı (LT^{-1})
ε_m	Maksimum oyulma derinliği (L)
Δ_m	Maksimum tepe yüksekliği (L)
x_1+x_2	Oyulma çukuru uzunluğu (L)
w_s	Oyulma çukuru genişliği (L)
ν	Kinematik viskozite (L^2T^{-1})
ρ	Akışkanın özgül kütlesi (ML^{-3})
ρ_s	Sedimentin özgül kütlesi (ML^{-3})
$\Delta\rho$	Akışkan ile sediment arasındaki rölatif özgül kütle (-)
Q_w	Suyun debisi (L^3T^{-1})
q	Birim debi ($L^3L^{-1}T^{-1}$)
t_d	Kuyruk suyu derinliği (L)
σ_g	Yatak malzemesinin geometrik standart sapması (-)
θ	Çarpma açısı (jet ekseninin su yüzeyi ile yaptığı açı) ($^{\circ}$)