



**BASINÇLI VE SAVAK TİPİ AKIM DURUMLARINDA  
KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDAKİ OYULMANIN İNCELENMESİ**

**Onur KARAKURT**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2016**

Onur KARAKURT tarafından hazırlanan “BASINÇLI VE SAVAK TİPİ AKIM DURUMLARINDA KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDAKİ OYULMANIN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Başkan :** Prof. Dr. A. Melih YANMAZ

İnşaat Mühendisliği, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Prof. Dr. Ayşe Burcu ALTAN SAKARYA

İnşaat Mühendisliği, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Doç. Dr. Nihat EROĞLU

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 15/11/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Onur KARAKURT

15/11/2016



BASINÇLI VE SAVAK TİPİ AKIM DURUMLARINDA  
KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDAKİ OYULMANIN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Onur KARAKURT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2016

ÖZET

Taşkınlar sırasında akarsularda su seviyesinde ve debide ani ve önemli miktarda artışlar meydana gelmekte ve bu durumdan köprü ayakları etrafındaki oyulmalar ciddi şekilde etkilenecek köprülerin ağır hasar görmesine ve hatta yıkılmasına neden olabilmektedir. Çalışma kapsamında temiz su durumunda basınçlı ve savak tipi akıma maruz kalmış köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru şeklinin ve derinliğinin incelenmesi ve bu derinlikler üzerinde etkili olan parametrelerin araştırılması için laboratuvarında bir dizi deney yapılmıştır. Deneylerde oyulma çukuru derinliği üzerinde etkili olabilecek akım, taban malzemesi ve köprüye ait geometrik parametreler dikkate alınmıştır. Bu parametreler arasında yaklaşım akım derinliği, debi, giriş yüksekliği, sediment tane çapı, köprü tabliyesi ile giriş konumu olup bunların oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkileri basınçlı ve savak tipi akım durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Ölçüm verileri kullanılarak regresyon analizi yardımıyla basınçlı ve savak tipi akım durumları için maksimum oyulma çukuru derinliğinin tahmininde kullanılacak iki adet ampirik bağıntı elde edilmiştir. İnce taban malzemesi, tabliyenin tabana olan mesafesinin ve aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin küçülmesi etkenlerinin maksimum oyulma çukuru derinliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akımların maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde etkisi incelenmiş ve basınçlı akım koşullarında oyulma çukuru derinliğinde ciddi artışlar olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91122

Anahtar Kelimeler : Basınçlı akım, savak tipi akımı, akarsu köprüleri, yerel oyulma, temiz su oyulması, maksimum oyulma çukuru derinliği

Sayfa Adedi : 110

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

INVESTIGATION OF SCOURING UNDER BRIDGE DECK IN PRESSURED AND  
WEIR TYPE OF FLOW

(Ph. D. Thesis)

Onur KARAKURT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2016

ABSTRACT

During flooding, sudden and substantial increase in water level and discharge of rivers occurs and this in return may substantially affect scouring around bridge piers causing severe damage and even collapse of bridges. In this study, a series of experiments in a flume was conducted to investigate the shape and depth of the scour hole occurred on the base of the flume underneath a bridge deck that was subject to pressurized and weir type of flows under clear water conditions and to examine the effect of various parameters on the scour hole. In the experiments, parameters of flow, sediment and geometric features of the bridge that were considered to have effect on maximum scour hole depth were taken into consideration. Approach flow depth, discharge, girder depth, sediment size, position of bridge deck and girders are among those parameters whose effects on score hole depth for both pressurized and weir flow types were investigated separately. Two empirical equations were developed for both pressurized and weir flow types by using regression analysis of the measured data. It was observed that fine sediment, deck's location with respect to flume bed, and smaller depth of approach flow at constant discharge increase the depth of maximum scour hole. Furthermore the effect of flow type on the scour hole was examined at the same approach flow and it was found out that there was serious increase in the maximum scour hole depth under pressurized flow conditions.

Science Code : 91122

Key Words : Pressure flow, weir type of flow, river bridges, local scour, clear water scour, maximum scour hole depth

Page Number : 110

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her zaman değerli yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Yrd. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bilgi ve deneyimleriyle tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. A. Melih YANMAZ'a müteşekkirim.

Bu çalışma kapsamındaki deneyler Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimince desteklenmiş olan, yürütücülüğünü Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'in yaptığı 06/2011-16, 06/2011-29 ve 06/2011-46 nolu projeler ile yürütücülüğünü Dr. Önder KOÇYİĞİT'in yaptığı 06/2011-24, 06/2011-25 ve 06/2011-47 nolu projeler kapsamında inşa edilen açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar birimine ve ilgili projeler süresince desteği için Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU'na teşekkür ederim.

Tezin laboratuvar çalışmaları aşamasında yardımlarından dolayı Arş. Gör. Hüseyin AKAY'a, İnşaat Mühendisi Çağrı DEMİRCİOĞLU'na ve İnşaat Mühendisi Erdem IŞIKTAŞ'a teşekkür ederim.

Doktora programı sürecinde verdiği burs desteği nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Her konuda sabırla yardımcı olan eşim Şeyma KARAKURT'a ve aileme desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE OYULMA MEKANİZMASI .....	5
2.1. Literatür Araştırması.....	5
2.2. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Durumlarında Oyulma Mekanizması.....	13
2.3. Boyut Analizi.....	15
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	21
3.1. Deney Düzenegi.....	21
3.2. Deneylerin Kapsamı.....	27
3.3. Deney Prosedürü.....	29
4. DENEY BULGULARI VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	33
4.1. Genel.....	33
4.2. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	35
4.2.1. Köprü tabliye konumunun etkisi.....	35

	<b>Sayfa</b>
4.2.2. Yaklaşım akım derinliği etkisi.....	41
4.2.3. Kiriş yüksekliği etkisi.....	46
4.2.4. Taban malzemesi medyan tane çapı etkisi.....	51
4.3. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Davranışlarının İncelenmesi.....	55
4.4. Akım Yönünde Tabliye Kenarı ile Kiriş Arasındaki Mesafenin Oyulma Çukuru Derinliğine Etkisi.....	62
4.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Tartışma.....	69
<b>5. OYULMA ÇUKURU DERİNLİĞİNİ TAHMİN EDEN AMPİRİK BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>81</b>
5.1. Genel.....	81
5.2. Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi.....	82
5.2.1. Basınçlı akım için regresyon analizi.....	82
5.2.2. Savak tipi akım için regresyon analizi.....	85
5.3. Geliştirilmiş Olan Bağıntının Literatürdeki Bağıntılarla Karşılaştırılma.....	89
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>93</b>
6.1. Özet ve Sonuçlar.....	93
6.2. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler.....	96
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>97</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>101</b>
EK-1. Deney verileri.....	102
EK-2. Regresyon analizi için kullanılan deney verileri.....	105
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>108</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Taban malzemesine ait karakteristik büyüklükler .....	25
Çizelge 3.2. Temiz su durumu için belirlenmiş yaklaşım akım derinlikleri ve kritik hızlar.....	27
Çizelge 4.1. Maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenen parametreler .....	33
Çizelge 4.2. İki farklı köprü tabliye konumunda ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve değişim yüzdeleri.....	36
Çizelge 4.3. Farklı yaklaşım akım derinliklerinde ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinlikleri.....	42
Çizelge 4.4. Kiriş yüksekliğindeki değişimin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi.....	47
Çizelge 4.5. Katı madde tane çapının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi....	51
Çizelge 4.6. Basınçlı ve savak tipi akımların neden olduğu maksimum oyulma çukuru derinlikleri.....	57
Çizelge 4.7. Farklı giriş konumlarının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi...	62
Çizelge 4.8. Kiriş ile kanal tabanı arasındaki açıklığın ( $H_b$ ) sabit olması durumunda tabliye konumu ile giriş yüksekliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi.....	72
Çizelge 4.9. Farklı tabliye konumları ve akım şartlarında aynı yaklaşım akım derinliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi.....	76
Çizelge 4.10. Kaba taban malzemesi durumunda farklı akım şartları altında meydana gelmiş olan kumul yükseklikleri ve konumları .....	78
Çizelge 5.1. Basınçlı akım durumunda regresyon analizinde kullanılan deney verileri.....	83
Çizelge 5.2. Basınçlı akım durumu için regresyon analizi .....	84
Çizelge 5.3. Savak tipi akım durumunda regresyon analizinde kullanılan deney verileri.....	86
Çizelge 5.4. Savak tipi akım durumu için regresyon analizi .....	87

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Köprü tabliye model kesitinde akım durumu.....	15
Şekil 2.2. Köprü tabliyesine ait geometrik büyüklükler.....	16
Şekil 3.1. Deney kanalı şematik gösterimi .....	23
Şekil 3.2. Kanal tabanı ve test bölgesi .....	23
Şekil 3.3. Köprü tabliye modeli .....	24
Şekil 3.4 Deney bölgesi ölçüm ağ sistemi.....	29
Şekil 4.1. Deneyleerde kullanılan köprü tabliye modeli ve ilgili parametreler.....	34
Şekil 4.2. Basınçlı akım ve ince taban malzemesi durumunda $Q=70$ lt/s ve $Fr_a= 0,250$ için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	38
Şekil 4.3. Savak tipi akım ve ince taban malzemesi durumunda $Q=70$ lt/s ve $Fr_a= 0,155$ için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	38
Şekil 4.4. Basınçlı akım ve kaba taban malzemesi durumunda, $Q=70$ lt/s ve $Fr_a= 0,250$ için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	39
Şekil 4.5. Savak tipi akım ve kaba taban malzemesi durumunda $Q=80$ lt/s ve $Fr_a= 0,177$ için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	39
Şekil 4.6. Savak tipi akım ve ince taban malzemesi durumunda $Q=90$ lt/s ve $Fr_a=0,175$ için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	40
Şekil 4.7. $Q=70$ lt/s için basınçlı akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri....	43
Şekil 4.8. $Q=70$ lt/s için savak tipi akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri ...	43
Şekil 4.9. $Q=90$ lt/s için savak tipi akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri...	44
Şekil 4.10. $Q=70$ lt/s ve ince malzeme için basınçlı akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	45
Şekil 4.11. $Q=70$ lt/s ve ince malzeme için savak tipi akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	46

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.12. Basınçlı akım durumunda $Q=70$ lt/s'de 5,0 cm ve 7,5 cm giriş yüksekliklerinde ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	48
Şekil 4.13. Savak tipi akım durumda $Q=90$ lt/s'de 5,0 cm ve 7,5 cm giriş yüksekliklerinde ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	49
Şekil 4.14. Basınçlı akım $Q=70$ lt/s 5,0 cm ve 7,5 cm giriş yüksekliklerinde, ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	49
Şekil 4.15. Savak tipi akım $Q=90$ lt/s 5,0 cm ve 7,5 cm giriş yüksekliklerinde ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	50
Şekil 4.16. Basınçlı akım ve farklı taban malzemesi durumunda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	52
Şekil 4.17. Savak tipi akım ve farklı taban malzemesi durumunda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	53
Şekil 4.18. Savak tipi akım ve farklı taban malzemesi durumunda $Q=90$ lt/s ve 7,5 cm giriş yüksekliğinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri....	54
Şekil 4.19. Basınçlı akım ve farklı taban malzemesi durumunda $Q=70$ lt/s ve 7,5 cm giriş yüksekliğinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	55
Şekil 4.20. Savak tipi akım ve farklı taban malzemesi durumunda $Q=70$ lt/s ve 7,5 cm giriş yüksekliğinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri....	55
Şekil 4.21. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında, 27,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.	58
Şekil 4.22. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.	58
Şekil 4.23. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, 27,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	59
Şekil 4.24. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, $Y_5=30,0$ cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	59
Şekil 4.25. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	60

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.26. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, 32,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	60
Şekil 4.27. Basınçlı akım durumunda, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	61
Şekil 4.28. Savak tipi akım durumunda, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	62
Şekil 4.29. Basınçlı akım durumunda, ince taban malzemesi, 20,0 cm yaklaşım akım derinliği, $Q=70$ lt/s ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu .....	64
Şekil 4.30. Savak tipi akım durumunda, ince taban malzemesi, 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği, $Q=70$ lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu.....	65
Şekil 4.31. Basınçlı akım durumunda, ince taban malzemesi, 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği, $Q=80$ lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu.....	66
Şekil 4.32. Savak tipi akım durumunda, ince taban malzemesi, 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği, $Q=80$ lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu.....	67
Şekil 4.33. Basınçlı akım durumunda, ince taban malzemesi, 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği, $Q=90$ lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu.....	68
Şekil 4.34. Savak tipi akım durumunda, ince taban malzemesi, 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği, $Q=90$ lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu.....	69
Şekil 4.35. 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde farklı tabliye konumu ve giriş yüksekliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	74
Şekil 4.36. Aynı yaklaşım akım derinliğinde köprü tabliyesinin farklı konumlarda bulunması a) $H_1= 20,0$ cm ve b) $H_2= 17,5$ cm .....	75
Şekil 4.37. 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde farklı tabliye konumları ve akım şartlarında meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri .....	77
Şekil 4.38. Basınçlı akım durumunda, farklı parçacık densimetrik Froude sayısı ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim .....	79

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.39. Basınçlı akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim .....	79
Şekil 4.40. Savak tipi akım durumunda, farklı parçacık densimetrik Froude sayısı ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim .....	80
Şekil 4.41. Savak tipi akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim .....	80
Şekil 5.1. Ölçülmüş ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması .....	85
Şekil 5.2. Ölçülmüş ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması .....	88
Şekil 5.3. Basınçlı akım durumunda ölçülmüş ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması.....	89
Şekil 5.4. Savak tipi akım durumda ölçülmüş ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması.....	90
Şekil 5.5. Basınçlı akım durumu için farklı bağıntılarla tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması.....	91
Şekil 5.6. Savak tipi akım durumu için farklı bağıntılarla tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması.....	92

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Deneyde kullanılan açık kanal.....	21
Resim 3.2. Köprü tabliye modelinin deney bölgesinde konumlandırılması.....	25
Resim 3.3. Kullanılan lazermetre.....	30



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>B</b>	Genişlik
<b>b</b>	Kiriş yüksekliği
<b>b<sub>n</sub></b>	Kiriş sayısı
<b>b<sub>t</sub></b>	Kiriş genişliği
<b>C</b>	Kohezyon
<b>C<sub>c</sub></b>	Sediment derecelendirme sayısı
<b>C<sub>d</sub></b>	Daralma katsayısı
<b>C<sub>u</sub></b>	Sediment üniformaluluk katsayısı
<b>cm</b>	Santimetre
<b>D<sub>50</sub></b>	Taban malzemesinin medyan çapı
<b>df</b>	Serbestlik derecesi
<b>F</b>	Kareler ortalamalarının oranı
<b>Fr<sub>a</sub></b>	Yaklaşım akım derinliğinde Froude sayısı
<b>Fr<sub>b</sub></b>	Köprü tabliyesi altındaki Froude sayısı
<b>g</b>	Yerçekimi ivmesi
<b>H<sub>b</sub></b>	Oyulma öncesi düşey köprü açıklığı yüksekliği
<b>H<sub>t</sub></b>	Tabandan itibaren tabliye konumu
<b>K<sub>a</sub></b>	Akımla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü
<b>K<sub>a</sub></b>	Akarsu etkisini gösteren katsayı
<b>K<sub>b</sub></b>	Memba taban pürüzlülük katsayısı
<b>K<sub>c</sub></b>	Şevlerinin pürüzlülük katsayısı
<b>K<sub>d</sub></b>	Enkesit etkisini gösteren katsayı
<b>K<sub>f</sub></b>	Tane şekil faktörü
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>lt</b>	Litre

**Simgeler****Açıklamalar**

$L_t$	Tabliye genişliği
$mm$	Milimetre
$m^3$	Metreküp
$Q$	Debi
$Q_s$	Köprü tabliyesi altından geçen debi
$Q_t$	Toplam debi
$Q_w$	Köprü tabliyesini aşan debi
$R$	Korelasyon katsayısı
$Re_a$	Yaklaşım akım derinliğinde Reynolds sayısı
$Re_b$	Köprü tabliyesi altından geçen Reynolds sayısı
$s$	Saniye
$S_o$	Taban eğimi
$t$	Oyulma süresi
$t_1$	Döşeme yüksekliği
$t_2$	Korkuluk yüksekliği
$u^*$	Kayma gerilmesi hızı
$V_a$	Yaklaşım akım hızı
$V_b$	Tabliye altından geçen akım hızı
$V_c$	Malzemeyi harekete geçiren kritik ortalama akım hızı
$w_s$	Köprü tabliyesi üstünden aşan suyun yüksekliği
$X_t$	Kirişin tabliyedeki konumu
$y_a$	Yaklaşım akım derinliği
$y_d$	Kumul yüksekliği
$y_s$	Oyulma derinliği
$\rho$	Suyun yoğunluğu
$\nu$	Suyun kinematik viskozitesi
$\rho_s$	Sediment yoğunluğu
$\Delta$	Sedimentin görelî yoğunluğu
$\sigma_g$	Sediment tane dağılımı standart sapması

**Kısaltmalar****Açıklamalar****ABD**

Amerika Birleşik Devletleri

**ANOVA**

Analysis of Variance

**CFD**

Computational Fluid Dynamics

**MS**

Mean Square

**PIV**

Particle Image Velocimetry

**SS**

Sum of Squares

**TFHRC**

Turner-Fairbank Highway Research Center

**USCS**

Unified Soil Classification System





## 1. GİRİŞ

Dünya’da her yıl büyük taşkınlar nedeniyle çok sayıda köprü yıkılmakta veya ciddi hasar görmekte, bunların neticesinde istenmeyen can ve mal kayıpları meydana gelebilmektedir. Yapılan araştırmalarda akarsu su seviyesinin artmasıyla köprüye etkiyen dinamik kuvvetlerin değiştiği, akarsuda hidrolik sıçrama, basınçlı ve savak tipi akımlar meydana geldiği, köprü ayaklarında oyulmalar oluştuğu veya mevcut oyulmaların ciddi şekilde değişebildiği tespit edilmiştir (Yanmaz, 2002). Ülkemizde de bugüne kadar birçok köprünün yıkılmasına veya ağır hasar görmesine neden olan taşkın olayları yaşanmıştır. Örneğin son yıllarda taşkın nedeniyle hasar gören köprüler arasında 2016 yılında Karabük’te Bostanbükü ve Ordu’da Akçaova, 2015 yılında Muğla’da Karabükü ve 2014 yılında Sakarya’da Uludere köprüleri sayılabilir. Ancak son yıllarda köprü ayaklarındaki oyulma nedeniyle yaşanmış en büyük felaket Nisan 2012’de Zonguldak’ta Çaycuma köprüsünün kısmi çökmesiyle 15 kişinin hayatını kaybettiği köprü faciasıdır. Bu olayda köprü açıklığında aniden artan akım hızının köprü ayağı çevresindeki oyulmayı ciddi şekilde artırdığı ve bu durumun köprü ayak ve taşıyıcı sistemin yıkılmasına neden olduğu düşünülmektedir (TKIC, 2012). Bu nedenlerle su seviyesinin, akım hızının ve debinin ani ve büyük değişimler gösterdiği durumlarda meydana gelen hidrolik olayların akarsu köprülerine etkilerinin ve sonuçlarının detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Taşkın sırasında akarsu yatağında meydana gelen debideki artış nedeniyle su seviyesi artmakta ve öncelikle köprü tabliyesinin altında bulunan kirişe ulaşabilmektedir. Köprü alt girişlerine suyun ulaştığı durumda ise akım artık serbest değil basınçlı akım olarak tanımlanmaktadır. Debinin daha da artması durumunda ise su seviyesi alt giriş seviyesinden de yukarıya çıkarak köprü tabliyesini aşabilmekte ve su tabliyeden savaklanabilmektedir. Bu durumda köprü, kalın eşikli bir savak gibi davranmakta ve bu akıma savak tipi akım denmektedir. Bu koşullar altında tabanda oluşabilecek sediment hareketi önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Köprülerin çoğunun ayaklarındaki aşırı oyulmalar nedeniyle yıkıldığı gözlemlendiğinden basınçlı akım ve savak tipi akım durumlarında meydana gelecek sediment hareketinin ve dolayısıyla ayaklardaki oyulma derinliği ile etkili olan parametrelerin araştırılması kaçınılmaz olmaktadır (Yanmaz, 2002).

Bu çalışmanın amacı laboratuvar ortamında temiz su halinde, basınçlı ve savak tipi akım durumlarında çalışan bir köprü modelinde, köprü tabliyesi altında kanal tabanında meydana gelecek oyulma çukuru şeklinin ve derinliğinin tespiti ile bu büyüklükler üzerinde etkili olabilecek gerek akım ve sediment gerekse köprü geometrik (kiriş ve korkuluk yüksekliği vb.) büyüklüklerinin incelenmesi ve maksimum oyulma çukuru derinliği tahmininde kullanılabilecek ampirik bağıntının elde edilmesidir. Böylece farklı yinelemeli taşkın debilerinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru derinliğinin yaklaşık olarak hesaplanarak köprü ayaklarının boyutlarının belirlenmesinde katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmada hedeflenen amaçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında, köprü tabliyesi altında kanal tabanında oluşan oyulma çukuru şeklini ve derinliğini etkileyen parametrelerin incelenmesi,
- Basınçlı ve savak tipi akım etkilerini de içine alacak şekilde oyulma çukuru derinliğini tahmin edebilecek bağıntıların geliştirilmesi,
- Çalışma bulgu ve sonuçlarının literatürde bulunan araştırmalarla karşılaştırılması,

İkinci bölümde, köprü tabliyesi altında meydana gelen sediment hareketi ve oyulma çukuru ile etkili olan mekanizmalar üzerinde yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca konuyla ilgili teorik yaklaşımlar verilmiştir.

Üçüncü bölümde, araştırma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla ilgili bilgiler sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında oyulma çukuru derinliği ve etkili olan parametreler deney ölçümleri kullanılarak incelenmiş ve verilerden elde edilen bulgular sunulmuştur.

Beşinci bölümde ise yapılan laboratuvar çalışması sonucunda elde edilen veriler kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve hem basınçlı akım hem de savak tipi akım için maksimum oyulma çukuru derinliğini veren bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bağıntıların tahmin etme performansları incelenmiş ve literatürde bulunan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde ise tez çalışmasında ulaşılan sonuçlar ve bundan sonra gerçekleştirilmesi önerilen çalışmalar sunulmuştur.





## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ve OYULMA MEKANİZMASI

### 2.1. Literatür Araştırması

Literatürde köprü tabliye altı ile orta ve kenar ayaklar etrafındaki oyulma çukuru derinliği ve şekli ile ilgili farklı akım koşullarında özellikle serbest akım durumunda yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir:

- Oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelerin laboratuvar çalışmaları yapılarak incelendiği çalışmalar; çalışmalarda yer alan başlıca parametreler arasında yaklaşım akım derinliği, yaklaşım ortalama akım hızı, taban malzemesi boyutu ve dağılımı, zaman, ayak şekli ve boyutu, köprü aksının akım doğrultusuyla yaptığı açı yani verevilik bulunmaktadır. Ayrıca ayakların gruplar halinde düzenlenmesi durumunda grup etkisinin araştırıldığı çok sayıda çalışma söz konusudur.
- Kenar ve orta ayak oyulmalarında taşkın yatağının etkileri ile ayak temel geometrisinin oyulmaya etkilerinin incelendiği çalışmalar,
- Sayısal model çalışmaları (köprü tabliyesi ve köprü ayakları için) tahmin yöntemleri ve bilgisayarlı hesap yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar,
- Köprülerde yerel oyulmayı azaltmaya yönelik yapılan araştırmalar,

Serbest akım durumunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Lin, Bennett, Han, ve Parsons (2014); Peng ve Ram (2014); Link, Klischies, Montalva ve Dey (2013) çalışmalarında taban malzemesinin köprü ayaklarındaki yerel oyulmalara etkisini araştırmıştır. Fael, Lança ve Cardoso (2016); Vaghefi, Ghodsian ve Salımı (2016); Ismael, Gunal ve Hussein (2014); Chang, Constantinescu, Lien, Tsai, Lai, ve Loh (2013); S. Das, R. Das ve Mazumdar (2013) ise araştırmalarında köprü ayak şekillerinin oyulmaya etkisini incelemişlerdir. Wang, Tang, Xiao, Wang ve Jiang (2016); Akib, Jahangirzadeh ve Basser (2014); Özalp (2013) araştırmalarında ayak gruplarının yerel oyulmalara etkisini incelemişlerdir. Hong, Sturm ve Stoesser (2015); Barbhuiya ve Mazumder (2014) kenar ayaklar çevresindeki yerel oyulmaları araştırmışlardır. Xiong, Cai, Kong ve Kong (2014); Jahangirzadeh, Basser, Akib, Karami, Najji ve Shamshirband (2014); Khosronejad, Kang ve Sotiropoulos (2012) yaptıkları sayısal model çalışmalarıyla köprü ayaklarındaki oyulmaları analiz etmişlerdir. Nasr-Allah, Mohamed, Abdel-Aal ve Awad (2016); Zokaiei,

Zarrati, Salamatian ve Tabarestani (2013); M. Beg ve S. Beg (2013) köprü ayakları etrafında oyulmaların azaltılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır.

Basınçlı akım durumunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Zhao, Cheng ve Zang (2010), su altında kalacak şekilde tabana yerleştirdikleri dairesel silindirlerin etrafındaki yerel oyulmaları kararlı akım durumu için hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında iki farklı çapa sahip silindirik ayakların yüksekliğinin çapa oranının ayak etrafındaki oyulma çukuru derinliğine etkisini araştırmışlardır. Silindirik ayak yüksekliğinin çapa oranının ikiyi geçmesi durumunda oyulma çukuru derinliğinin ayak yüksekliğinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Dey, Raikar ve Roy (2008), kararlı akım durumunda üniform sedimente sahip kanal tabanına gömülmüş silindir ayaklar etrafında temiz su oyulması durumu için deneyler yapmışlardır. Aynı koşullar altında, aynı yatak ve ayak durumunda serbest akım şartlarında ayağın suya batık olduğu ve olmadığı durumlar için yapılmış olan deneylerde suya batıklık oranı ile oyulma durumları karşılaştırılmış ve batıklık oranı arttıkça oyulma çukuru derinliğinin azaldığı belirtilmiştir. Lu, Hong, Su, Wang ve Lai (2008), Taiwan'nın en uzun akarsuyu olan Cho-Shui üzerinde bulunan Si-Lo Köprüsü'nde toplam oyulma derinliklerini arazi çalışmalarıyla ölçmüş, elde edilen arazi verileri kullanılarak sayısal bir model geliştirmişler ve bir taşkın durumu için model sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar köprü ayaklarındaki yerel oyulma derinlikleri ile literatürde bulunan ve oyulma derinliği tahmininde kullanılan farklı denklemleri kullanarak elde ettikleri oyulma derinliği değerlerini karşılaştırmış ve birçok eşitliğin gerçekten daha büyük yerel oyulma derinliği verdiğini saptamışlardır.

İlk defa Abed (1991) tarafından basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında bir ayak olması durumunda tabanda meydana gelen yerel değişimler incelenmiştir. Deneyler serbest akım ve köprünün suya gömülü olduğu basınçlı akım durumları için 3 farklı yaklaşım akım derinliği, farklı kanal taban eğimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Abed (1991), 10 adet deneyde serbest akım ve 15 adet deneyde basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmayı incelemiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında ayak etrafında meydana gelen oyulmanın serbest akım durumunda meydana gelen oyulmaya göre 2,3 – 10,0 kat daha büyük olduğunu tespit etmiştir.

Umbrell, Young, Stein ve Jones, (1998), köprü ayaklarının olmadığı sadece köprü tabliyesinin bulunduğu durum için basınçlı akım koşullarında meydana gelen temiz su oyulmasını incelemiştir. Deneyler ABD Federal Karayolları İdaresi Turner-Fairbank Otoyol Araştırma Merkezi'ndeki (Federal Highway Administration Turner-Fairbank Highway Research Center - TFHRC) 21,3 m boyunda; 1,8 m genişliğinde ve 0,6 m derinliğinde %0,0007 kanal taban eğimine sahip açık kanalda yapılmıştır. Ölçümler kanal girişinden 13,0 m mansapta bulunan 2,4 m uzunluğunda; 1,8 m genişliğinde ve 0,4 m derinliğindeki test bölgesinde yapılmıştır. Deney için 1,83 m uzunluğunda; 0,61 m genişliğinde ve 0,095 m yüksekliğinde köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Deneylerde yaklaşım akım derinliği 0,305 m'de sabit tutularak suyun tabliye üstünden 6 farklı derinlikte savaklanması durumlarında tabanda meydana gelen oyulma çukuru derinliği ölçülmüştür. Tabanda medyan tane çapları 0,30 mm; 1,22 mm ve 2,40 mm olan üç farklı sediment kullanılmıştır. Araştırmacılar basınçlı akım durumu için köprü tabliyesi altında oyulma çukuru derinliğini 81 adet deney yaparak incelemiştir. Yapılan bu deneylerde tabandaki medyan tane çapı, yaklaşım akım hızı ve derinliği, köprü tabliyesi kalınlığı, köprü yüksekliği ve kritik oyulma hızı parametrelerinin oyulma çukuru ve şekline etkileri incelenmiş ve basınçlı akım durumunda tabandaki oyulma çukuru derinliğinin tahmini için bir bağıntı geliştirilmiştir. Deneyler 3,5 saat süreyle yapılmış ve bu nedenle maksimum oyulma çukuru derinliği ölçülememiştir. Bu nedenle araştırmacılar Laursen (1963) tarafından önerilmiş olan ve zamana bağlı olarak bir köprü ayağındaki toplam oyulma yüzdesini veren amprik formülü kullanarak her sediment için 3,5 saatte ulaşılan toplam oyulma yüzdelerini hesaplamışlardır. Daha sonra bu yüzdelere ve ölçüm değerleri kullanılarak maksimum oyulma çukuru derinlikleri elde edilmiştir.

Umbrell ve diğerleri (1998) farklı büyüklükteki basınçlı akım derinlikleri ve temiz su oyulması koşullarında köprü tabliyesi altında düşey daralma nedeniyle meydana gelen oyulma çukuru derinliğini teoriksel olarak süreklilikten Eş.2.1 ile ifade etmişlerdir.

$$Q_t = Q_w + Q_s \quad (2.1)$$

Burada  $Q_t$ =toplam debi ( $m^3/s$ ),  $Q_w$ = köprü tabliyesinden savaklanan debi ( $m^3/s$ ),  $Q_s$ =köprü tabliyesi altındaki akım ( $m^3/s$ ) debisidir.

$$V_a y_a B = V_a w B + V_c (H_b + y_s) B \quad (2.2)$$

Eşitliğe göre  $V_a$  = yaklaşım hızı (m/s),  $V_c$  = malzemeyi harekete geçirecek kritik ortalama sürüklenme hızı (m/s),  $w$  = köprü tabliyesi üstündeki su yüksekliği (m),  $y_a$  = yaklaşım akım derinliği (m),  $y_s$  = oyulma çukuru derinliği (m),  $B$  = genişlik (m),  $H_b$  = kirişin en alt noktası ile oyulma öncesindeki taban seviyesi arasındaki mesafe yani köprü açıklığı yüksekliği (m)'dir. Eşitlikte köprü tabliyesi üstünden geçen akım hızının yaklaşım hızına eşit olduğu kabul edilmekte ve yaklaşım akım derinliğine bölünerek Eş. 2.3 elde edilmektedir. Köprü tabliyesi üzerinden suyun savaklanmadığı durumda  $w=0$  olarak alınmıştır.

$$\frac{H_b + y_s}{y_a} = \frac{V_a}{V_c} \left( 1 - \frac{w}{y_a} \right) \quad (2.3)$$

Umbrell ve diğerleri (1998) Eş.2.3'teki değişkenleri deney sonuçları ile hesaplamış ve bu değerleri kullanarak üstel regresyon analizi yapmışlardır. Regresyon analizinden elde edilen katsayılar kullanılarak Eş.2.3 tekrar düzenlenmiş ve Eş.2.4'teki denklem elde edilmiştir.

$$\frac{H_b + y_s}{y_a} = 1.102 \left[ \left( 1 - \frac{w}{y_a} \right) \frac{V_a}{V_c} \right]^{0.603} \quad (2.4)$$

Eş. 2.4'te verilen denklem tekrar düzenlenerek basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğini ( $y_s$ ) tahmin eden aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$y_s = y_a \left\{ 1.102 \left[ \left( 1 - \frac{w}{y_a} \right) \frac{V_a}{V_c} \right]^{0.603} \right\} - H_b \quad (2.5)$$

Kritik ortalama akım hızı, ( $V_c$ ) Neil (1973) tarafından geliştirilmiş ve Richardson, Harrison, Richardson ve Davis (1993)'ün çalışmalarında da kullanılmış olan Eş. 2.6 ile hesaplanmıştır.

$$V_c = 1.58[(\Delta - 1)gD_{50}]^{0.50} \left( \frac{y}{D_{50}} \right)^{0.167} \quad (2.6)$$

Burada;  $g$  = yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ),  $y$  = akım derinliği (m) ve  $D_{50}$  = taban malzemesinin medyan tane çapı (m)'dir. Eş.2.6'da verilen  $\Delta$  = sedimentin görelî yoğunluğu (boyutsuz) olup  $(\rho_s - \rho)/\rho$  ile ifade edilmektedir. Bu terimde  $\rho_s$  = sediment tanesinin yoğunluğu ( $kg/m^3$ ) ve  $\rho$  = suyun yoğunluğu ( $kg/m^3$ )'dur.

Umbrell ve diğêrleri (1998), önerdikleri bağıntının korelasyon katsayısının karesini  $R^2 = 0,81$  olarak hesaplamış ve geliştirdikleri bağıntının yerel oyulmaların hesaplanmasında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Arneson ve Abt (1998) ABD Colorado Devlet Üniversitesi'ndeki açık kanalda köprü ayaklarının olmadığı bir köprü modeli kullanarak, sadece köprü tabliyesi altında basınçlı akım durumunda meydana gelen temiz su oyulmasını incelemişlerdir. Tabanda medyan tane çapları sırasıyla 0,889 mm; 3,302 mm; 0,610 mm ve 1,498 mm olan dört farklı malzeme kullanılarak farklı akım derinliklerinde ve akım hızlarında maksimum oyulma çukuru derinliği incelenmiştir. Araştırmacılar yaptıkları 72 adet verisini kullanarak regresyon analizi yapmışlar ve maksimum oyulma çukuru için bir denklem önermişlerdir.

Arneson ve Abt (1998), yaptıkları deneysel çalışmada basınçlı akım durumunda çalışan köprülerde düşey yönde meydana gelen daralmanın oluşturduğu oyulma çukuru derinliğini elde etmek için Eş.2.7'de verilen boyutsuz değişkenleri kullanmıştır.

$$\frac{y_s}{y_a} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, \frac{y_s + H_b}{y_a}, \frac{V_a}{V_c}\right) \quad (2.7)$$

Eş. 2.7'de tanımlanan boyutsuz değişkenleri ve çoklu lineer regresyon yöntemini kullanarak Eş. 2.8'i elde etmişlerdir.

$$\frac{y_s}{y_a} = -0.93 + 0.23\left(\frac{y_a}{H_b}\right) + 0.82\left(\frac{y_s + H_b}{y_a}\right) + 0.03\left(\frac{V_a}{V_c}\right) \quad (2.8)$$

Eş. 2.8 tekrar düzenlediğinde Eş.2.9'u elde etmişlerdir.

$$\frac{y_s}{y_a} = -5.08 + 1.27 \left( \frac{y_a}{h_b} \right) + 4.44 \left( \frac{H_b}{y_a} \right) + 0.19 \left( \frac{V_a}{V_c} \right) \quad (2.9)$$

Kritik ortalama akım hızı ( $V_c$ ) için, Arneson ve Abt (1998) aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$V_c = 1.52 \sqrt{g(\Delta - 1)D_{50}} \left( \frac{y_a}{D_{50}} \right)^{1/6} \quad (2.10)$$

Kritik ortalama akım hızını hesaplamak için Neil (1973) tarafından geliştirilen Eş. 2.6'da 1,58 olarak kullanılan katsayı, Arneson ve Abt (1998) tarafından Eş. 2.10'da 1,52 olarak kullanılmıştır.

Verma, Setia ve Bhatia (2004) kararlı akım ve belirledikleri hidrografa uygun olarak kararsız akım koşullarında basınçlı akım durumunda hem hareketli taban hem de temiz su şartlarında köprü tabliyesi altında ve köprünün silindirik ayakları etrafında oluşan oyulma çukurunu incelemişlerdir. Deneyler Hindistan National Institution of Technology'de İnşaat Mühendisliği Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında 12,50 m boyunda; 0,40 m genişliğinde ve 0,55 m derinliğindeki açık kanalda yapılmıştır. Deneyler için 0,40 m uzunluğunda; 0,20 m genişliğinde ve 0,15 m yüksekliğinde köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Deneylerde medyan tane çapı 0,37 mm olan sediment kullanılarak basınçlı akım koşulları altında 41 adet deney yapılmıştır. Deneylerde farklı yaklaşım akım derinlikleri, köprü tabliye açıklıkları ile yaklaşım akım hızları kullanılarak tabandaki oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Akım derinliğindeki değişimin basınçlı akım oyulması üzerinde etkisinin köprünün düşey daralmasını azaldığı durumlarda daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

ABD'de TFHRC'de sediment tane çapı ve köprü giriş sayısının oyulma çukuru üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılmış olan laboratuvar çalışmasında 1,14 mm ve 2,18 mm medyan tane çapına sahip sediment ve 3 ile 6 adet kirişe sahip iki köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Deneyler, Umbrell ve diğerlerinin (1998) deneylerini yaptığı açık kanalın tam orta kısmının daraltılması suretiyle elde edilen test bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Test bölgesi 3,04 m boyunda; 0,63 m genişliğinde olup, deneylerde kullanılan köprü tabliye

modeli 63 cm uzunluğunda ve 26 cm genişliğindeydi. Bu koşullar altında basınçlı akım durumu için köprü tabliyesi altındaki oyulma çukuru incelemek için 26 adet deney yapılmıştır. Deneylerde iki farklı debi değeri için sabit tutulan yaklaşım akım derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı iki köprü tabliye modeli ve iki farklı medyan tane çapı ile deneyler gerçekleştirilmiş ve oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği incelenmiştir. Sediment tane çapındaki artışın maksimum oyulma derinliğini azalttığını ve maksimum oyulma çukuru derinliğinin giriş sayısından bağımsız olduğunu gözlemlemişlerdir (Shan, Xie, Bojanowski, Suaznabar, Shen, Lottes, Kerényi, 2012a; Guo, 2011)

Shan, Xie, Bojanowski, Suaznabar, Shen, Lottes, Kerényi (2012b), ise TFHRC deney verilerinden yararlanarak basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altındaki oyulmaları sayısal olarak modellemişlerdir. Araştırmacılar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) yazılım ve hesap metotlarını kullanarak oyulma çukurunun gelişiminin benzeşimini yapmışlardır. Bunun yanında Umbrell ve diğerleri (1998) ile Arneson ve Abt (1998) tarafından yapılmış olan deneysel çalışmaların verilerini de geliştirdikleri hesap yönteminde test ederek, yöntemin gerçek veriler üstündeki performansını incelemişlerdir. Kullandıkları bu deneysel verilerin teorik modellerle tutarlı olduklarını bulmuşlardır. CFD çalışmasının ölçek etkilerinin olmadığı prototip akımlar için önerilen metodun uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Guo, Kerényi, Pagan-Ortiz, Flora, Afzal (2010), TFHRC'de yapılmış olan 26 adet deneyin verilerinden faydalanarak iki boyutlu boyuna oyulma çukuru profili ile üç boyutlu oyulma çukuru yapısını incelemiştir. Bu verilerden yararlanarak belirli sınır koşulları altında bir hipotez geliştirerek deneylerden elde edilen oyulma çukuru profillerini en iyi ifade eden iki adet denklem önermişlerdir. Guo (2011) aynı deney verilerini kullanarak zamana bağlı temiz su oyulması çukuru derinliği için üstel eksponansiyel bir eşitlik önermiştir. Araştırmacı köprünün suyun içinde batık olduğu akım durumu ile temiz su durumları için oyulma çukuru derinliğinin zamansal oranı ile ilgili bir hipotez oluşturarak, kısıtlı verilerle belirli sınır şartları altında kullanılacak bir eşitlik önermiştir.

Lin, Kao, Hsieh, Lo ve Raikar (2012), kısmen su altında bulunan köprü tabliyesi altındaki akım yapısını parçacık görüntülü hızölçer (Particle Image Velocimetry-PIV) ve akım görüntü teknikleri yardımıyla incelemiştir. Çalışmaları sonucunda köprü altında meydana gelen akım yapısını kritik olmayan akım durumu için dört farklı yaklaşım oranına (tabliye

altındaki açıklığın toplam köprü tabliyesi kalınlığına oranı) göre dört grupta tanımlanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda tanımladıkları farklı akım yapılarında köprü tabliyesi altında bulunan kirişler arasındaki boşlukların karşılaştırılması, akımların ortalama ve düşey hız bileşenlerine ait profil dağılımları ile türbülans karakteristiklerinin düşey dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Lyn (2008) yaptığı çalışmada Umbrell ve diğerleri (1998) ile Arneson ve Abt (1998)'in gerçekleştirdiği deneysel çalışmalardan elde edilmiş verilerin analizini tekrarlayarak, HEC-18'de önerilen eşitlikle karşılaştırmıştır. Köprü tabliyesinde basınçlı akım söz konusu olması halinde oyulma çukuru durumu için yapılan karşılaştırmalar sonucunda HEC-18 eşitliğinin güvenli sonuçlar vermediği belirtilmiştir. Belirlenen sınırlar içinde Arneson ve Abt (1998)'in deneysel verilerini esas alarak alternatif bir model geliştirmiş ve köprü ayaklarının olmadığı sadece köprü tabliyesi altındaki temiz su oyulmaları için bir bağıntı önermiştir.

Tulimilli, Lottes, Majumdar ve Kostic (2011), TFHRC'de elde edilen deneysel verilerle geliştirilmiş olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımını kullanarak basınçlı akım durumu için üç-boyutlu taban oyulma modelini geliştirmiştir. Söz konusu model yardımı ile basınçlı akım durumu için köprü tabliyesi altındaki kanal taban oyulmasının üç boyutlu analizi yapılmıştır. Araştırmacılar kullanılan modeli sınırlı deneysel veriyle test etmelerine rağmen kabul edilebilir sonuçlar verdiğini ve bu modele eklenen hesaplama aracıyla pratik olarak oyulma çukuru risk analizi ve değerlendirmesi yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Kumcu (2016), kararlı ve kararsız akım durumlarında temiz su koşullarında köprü tabliyesi altında basınçlı akım oyulmasını araştırmıştır. Deneylerde medyan tane çapı 0,9 mm olan sediment kullanılarak basınçlı akım koşulunda kademeli taşkın hidrografi tanımlayarak farklı akım koşullarında deneylerini gerçekleştirmiştir. Akım koşulları ile basınçlı akım oyulması arasındaki ilişki incelenmiş ve elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Literatürde mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunda yerel oyulma ve etkili mekanizmalar serbest akım durumunda incelenmektedir. Basınçlı ve savak tipi akım durumları için literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardaki deneylerden toplanan verilerin kullanılması suretiyle çeşitli araştırmacılar farklı tahmin yöntem ve

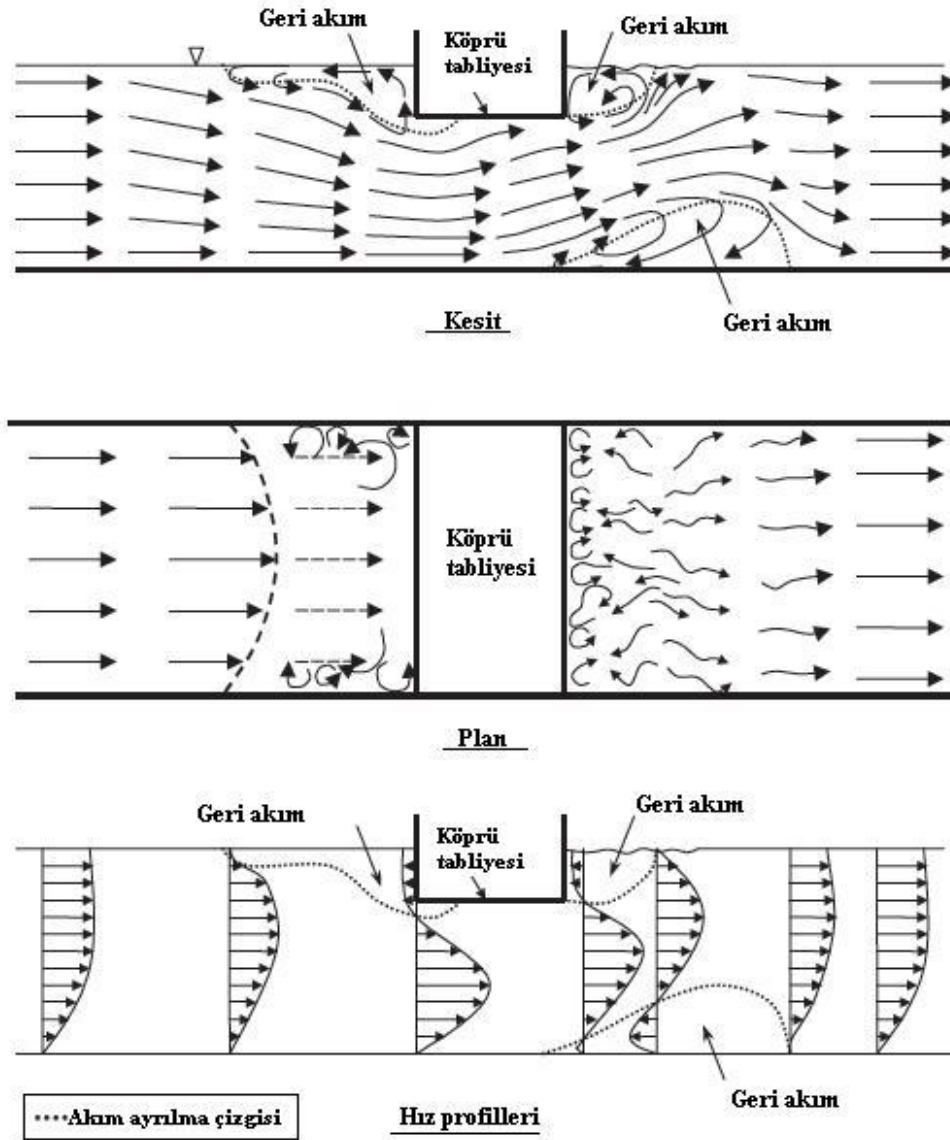
eşitlikler üstünde çalışmıştır. Bu nedenle basınçlı ve savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru derinliğini ve şeklini etkileyen mekanizmaların ve parametrelerin araştırılması ve literatüre katkıda bulunulması önemlidir.

## **2.2. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Durumlarında Oyulma Mekanizması**

Akarsularda akım rejimine, taban malzeme cinsine, akarsu kesit özelliklerine, güzergahına ve akarsu kullanımına bağlı olarak tabanda oyulmalar veya yığılmalar oluşmaktadır. Akımın katı madde taşıma gücünün arttığı yerlerde örneğin kesit alanının bir köprü vasıtasıyla daraldığı yerlerde tabanda oyulmalar meydana gelmektedir. Oyulmanın, kesit daralması nedeniyle olduğu durumlara daralma oyulması denilmektedir. Kesit alanının aşırı daralması nedeniyle kanaldaki hızlar ve dolayısıyla kayma gerilmelerinin artması tabanda önemli oyulmalar oluşturur. Akım alanına yerleştirilmiş bir köprünün ayakları etrafında oluşan çevrıntilerin neden olduğu oyulmaya ise yerel oyulma denilmektedir. Ayaklar etrafında oluşan bu çevrıntiler akım hızına ve ayak geometrisine bağlıdır. Akım hızındaki ani düşme nedeniyle köprü ayağı memba yüzünde su seviyesi artmakta ve tabana doğru düşey bir akım oluşmaktadır. Bu düşey akımın yaklaşım akımıyla girişimi sonucunda membada çevrıntiler oluşmaktadır. Bu çevrıntilere planda meydana gelen oyulma çukuru şeklinden dolayı at nalı çevrıntiler denilmektedir. Ayağın mansap tarafındaki kayma gerilmeleri gradyanlarından ötürü de kuyruk çevrıntıleri oluşmaktadır. Köprü kenar ayakları da akım alanında belli bir daralma oluşturmaktadır. Kenar ayaklarının memba yüzünden itibaren ortalama hız artmakta ve akımda ayrılmalar oluşmaktadır. Düşey akımla birlikte de tabanda memba ve kuyruk çevrıntıleri meydana gelmektedir (Yanmaz, 2002). Tüm bu oyulmalarda su seviyesi köprü tabliyesi ve kirişleri altında bulunmakta yani serbest akım durumu söz konusu olmaktadır. Ancak özellikle taşkın dönemlerinde akarsudaki su seviyesinin hızla arttığı ve köprüyü aştığı durumlarla sıklıkla karşılaşmaktadır. Taşkın sırasında su seviyesinin köprünün tabliye yüksekliğine ulaştığı veya köprü tabliyesini aştığı durumlarda, köprü tabliyesi alt kısmı basınçlı akıma maruz kalmakta ve tabliye altından geçen akımın hızı ile taban kayma gerilmelerinin büyüklükleri artmaktadır. Böylece tabanda meydana gelen sediment hareketi de artmaktadır. Bu durum basınçlı akım oyulması olarak ifade edilmektedir. Debinin daha da artması durumunda ise su seviyesi alt kiriş seviyesinden de yukarıya çıkarak köprü tabliyesini aşabilmekte ve su tabliyeden savaklanabilmektedir. Bu durumda köprü, kalın

eşikli bir savak gibi davranmakta ve bu akıma savak tipi akım denmektedir. Genel olarak literatürde bulunan ve oyulma derinliğini veren ampirik eşitlikler serbest akım durumunda geliştirilmiştir. Basınçlı ve savak tipi akım durumları için köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmayı inceleyen çalışma sayısı ise oldukça azdır. Bu çalışmalarda laboratuvar imkanları dahilinde çoğunluğu temiz su durumunda yapılmış deneylerden bir takım ampirik bağıntılar elde edilmiş veya sayısal benzeşim çalışmaları yapılmıştır.

Basınçlı ve savak tipi akıma maruz kalmış, orta ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen taban oyulmasının başlıca nedeni sedimenti harekete geçiren kayma gerilmesindeki artıştır. Kanal içerisindeki serbest akım köprü tabliyesiyle karşılaştığında, su seviyesinin tabliye girişlerini aşmasıyla basınçlı akım oluşmakta ve ıslak kesit alanının daralmasına bağlı olarak tabliye altından geçen akımın hızı artmaktadır. Ayrıca tabliye memba ve mansabında çevrıntiler ve geri akım oluşmaktadır. Kanal tabanındaki kayma gerilmesinin de bu bölgede artması nedeniyle tabanda sediment hareketi başlamaktadır. Kesitin daraldığı bölgeden taban malzemesinin taşınmasıyla köprü tabliyesinin altındaki akım alanı da artmaktadır. Bunun sonucunda akım hızı ve kayma gerilmeleri azalarak sediment hareketi durmakta ve oyulma çukuru dengeye ulaşmaktadır. Köprü tabliyesi altındaki akım çizgileri ve kanal boyunca oluşan hız profilleri Şekil 2.1’de verilmiştir (Verma ve diğerleri, 2004).

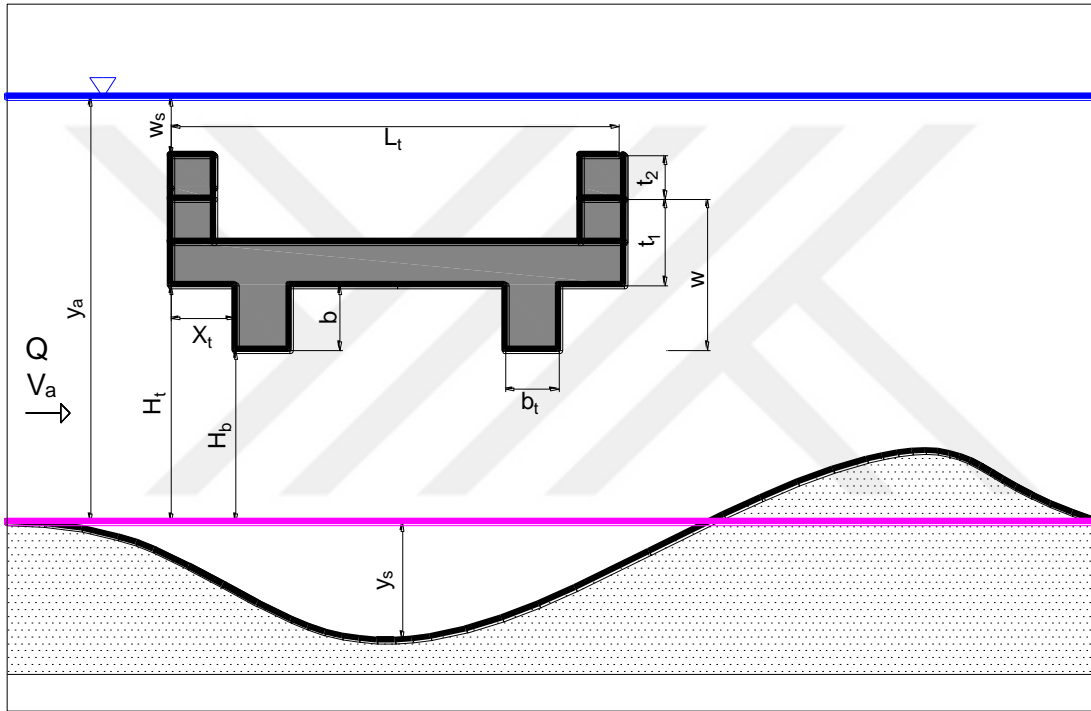


Şekil 2.1. Köprü tabliye model kesitinde akım durumu (Verma ve diğerleri, 2004)

### 2.3. Boyut Analizi

Köprülerin temellerinin emniyetli bir şekilde tasarlanması için taşkın durumlarında maksimum oyulma çukuru derinliğinin tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle taşkın durumlarında basınçlı ve savak tipi akıma maruz kalan köprü tabliyesinin altında oyulma mekanizması serbest akım koşullarına göre çok daha karmaşıktır. Literatürde konu ile ilgili çok az araştırma yapılmış ve henüz genel bir bağıntı geliştirilememiştir. Bunun nedeni ise köprü tabliyesi altında basınçlı ve savak tipi akımda oyulma mekanizmasının; akım, akışkan, sediment, akarsu ve köprü'nün geometrik parametrelerinden etkilenmesidir.

Basınçlı ve savak tipi akıma maruz kalmış bir köprü tabliyesinin altında meydana gelen ve oyulmaya neden olan mekanizmayı etkileyen parametreler için boyut analizi yapılmıştır. Bu çalışmada kenar ve orta ayaklar bulunmadığı için sadece köprü tabliyesi nedeniyle gelişen oyulma çukurunu yani daralma oyulmasını etkileyen parametreler göz önüne alınmıştır. Oyulma çukurunu etkileyen tüm parametreler kütle (M), uzunluk (L) ve zaman (T) cinsinden aşağıda sınıflandırılmış ve köprü tabliyesi geometrik parametreleri ayrıntılı olarak Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Köprü tabliyesine ait geometrik büyüklükler

### Akım parametreleri

- g : yerçekimi ivmesi ( $LT^{-2}$ )
- $y_a$  : yaklaşım akım derinliği (L)
- $V_a$  : ortalama yaklaşım akım hızı ( $LT^{-1}$ )
- $V_b$  : tabliye altındaki ortalama akım hızı ( $LT^{-1}$ )
- $u^*$  : kayma gerilmesi hızı ( $LT^{-1}$ )

### Akışkan parametreleri

- $\rho$  : suyun yoğunluğu ( $ML^{-3}$ )  
 $\nu$  : suyun kinematik viskozitesi ( $L^2T^{-1}$ )

### Köprü tabliyesi ve açıklığındaki geometrik parametreleri

- $y_s$  : oyulma çukuru derinliği (L)  
 $w_s$  : tabliye üstünden savaklanan su yüksekliği (L)  
 $H_b$  : girişin en alt noktası ile ilk taban seviyesi arasındaki mesafe (L)  
 $b$  : giriş yüksekliği (L)  
 $b_t$  : girişin genişliği (L)  
 $b_n$  : giriş sayısı  
 $t_1$  : döşeme ile korkuluk yüksekliği (L)  
 $t_2$  : ilave korkuluk yüksekliği (L)  
 $L_t$  : tabliye genişliği (L)  
 $H_t$  : tabandan itibaren tabliye konumu (L)  
 $X_t$  : girişin tabliyedeki konumu (L)

### Akarsu parametreleri

- $S_o$  : taban eğimi  
 $B$  : akarsu genişliği (L)  
 $C_d$  : daralma katsayısı  
 $K_a$  : yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü  
 $K_a$  : akarsu güzergahı etkisini gösteren katsayı  
 $K_b$  : memba taban pürüzlülüğü katsayı  
 $K_c$  : şevlerinin pürüzlülüğü katsayı  
 $K_d$  : en-kesit geometri etkisini gösteren katsayı

### Sediment parametreleri

- $\rho_s$  : sediment yoğunluğu ( $ML^{-3}$ )

$D_{50}$  : medyan tane çapı (L)

$\Delta$  : relatif yoğunluk

$\sigma_g$  : sediment tane dağılımı standart sapması

$C$  : kohezyon ( $ML^{-1}T^{-2}$ )

$K_f$  : tane şekil faktörü

### Zaman parametresi:

$t$  : oyulma süresi (T)

Köprü tabliyesi altındaki oyulma mekanizmasını etkileyen bu parametreler Eş.2.11'de ifade edilmiştir:

$$f(y_s, g, y_a, V_a, V_b, u_*, \rho, \nu, S_0, B, C_d, K_a, K_b, K_c, K_d, \rho_s, D_{50}, \Delta, \sigma_g, G, C, K_f, b, b_t, b_n, t_1, t_2, L_t, H_t, X_t, t, w_s, H_b) = 0 \quad (2.11)$$

Eş. 2.11'den görüldüğü üzere oyulma mekanizmasını etkileyen çok sayıda boyutsuz parametre vardır. Birçok değişkenden oluşan bu genel ifadeyi daha basit bir hale getirmek amacıyla aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

Sediment ve akarsu ile ilgili kabuller (Yanmaz, 2002):

- Sabit şekil faktörüne sahip, kohezyonsuz taban malzemesi bulunmaktadır ( $C=0$ ).
- Katı madde ve su yoğunlukları sabittir. Kuvartz kum için relatif yoğunluk  $\Delta : 1,65$  değerindedir.
- Akarsu, köprü geçişinde önemli bir daralma olmayacak kadar geniştir ( $C_d=1,0$ ).
- Düzgün şevli akarsu tabanındaki tane şekillerinin etkisi ihmal edilmektedir ( $K_f=1,0$ ).
- Taban pürüzlülüğü sadece  $D_{50}$  cinsinden ifade edilmektedir ( $K_b=1,0, K_c=1,0$ ).
- Akarsu planda düz, prizmatik ve sabit genişliktedir ( $S_0$ =sabit,  $B$ =sabit,  $K_d=1,0$  ve  $K_a=1,0$ ).
- Taban malzemesi çapı akarsu genişliğinden çok küçüktür ( $D_{50}/B \approx 0$ )

Köprü geometrisiyle ilgili kabuller:

- Kiriş genişliği ( $b$ ), kiriş sayısı ( $b_n$ ), döşeme ile korkuluk yüksekliği ( $t_1$ ), ilave korkuluk yüksekliği ( $t_2$ ), tabliye genişliği ( $L_t$ ) ve kirişin tabliyedeki konumu ( $X_t$ ) sabit tutulmuştur.
- Yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açı sabit olduğundan etki faktörü  $K_q=1.0$  kabul edilmiştir.
- Oyulma çukuru derinliğinin kiriş sayısından ( $b_n$ ) bağımsız olduğu kabul edilmiştir (Guo ve diğerleri, 2010).

Oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelerle ilgili yapılmış olan kabuller doğrultusunda Eş.2.11 aşağıdaki bağıntıya dönüşmüştür.

$$y_s = f(y_a, V_a, V_b, u_*, \rho, \nu, g, D_{50}, H_t, H_b, b, w_s) = 0 \quad (2.12)$$

Boyutsuz parametreler Buckingham  $\pi$ -teoremi kullanılarak elde edilmiş olup, tekrar eden parametreler ( $\rho, V_a, H_b$ ) olarak seçilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, Re_b, \frac{u_*}{V_b}, Fr_b, \frac{V_a}{V_b}, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{H_t}{H_b}, \frac{b}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}\right) \quad (2.13)$$

Eş 2.13'te sabit tane çapında ve kanal taban eğiminde  $\left(\frac{u_*}{V_b}\right)$  oranı sadece köprü açıklığı

yüksekliği ( $H_b$ ) değerine bağlı olduğundan ve  $\left(\frac{u_*}{V_b}\right)$  parametresini içeren  $\left(\frac{y_a}{H_b}\right)$  ifadesi

boyut analizinde olduğundan ihmal edilmiştir (Yanmaz, 2002). Eşitliklerde yer alan  $\left(\frac{V_a}{V_b}\right)$

parametreleri de köprü açıklığı yüksekliği ( $H_b$ ) ile yaklaşım akım derinliği ( $y_a$ ) bağlı olduğundan ihmal edilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, Re_b, Fr_b, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{H_t}{H_b}, \frac{b}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}\right) \quad (2.14)$$

Eş. 2.14'te verilen  $Re_b = V_b H_b / \nu$  köprü tabliyesinin altındaki Reynolds sayısı olup, çalışılan akım hidrolik pürüzlü bir akım olduğu için bu eşitlikte söz konusu boyutsuz büyüklük ihmal edilmiştir (Abed, 1991).  $Fr_b = \frac{V_b}{(gH_b)^{1/2}}$  köprü tabliyesi altındaki Froude sayısıdır. Eş.

2.14'te verilen bağıntıya göre denklemler aşağıdaki bağıntıya indirgenmiştir:

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, Fr_b, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{H_t}{H_b}, \frac{b}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}\right)$$

(2.15)

Yukarıda verilen eşitlikler savak tipi akım durumu için köprü tabliyesi altındaki oyulma mekanizmasını etkileyen boyutsuz parametrelerdir. Köprü tabliyesi üstünden suyun savaklanmadığı yani basınçlı akım durumunda tabliye üstünden savaklanan su yüksekliği ( $w_s$ ) olmayacağından Eş.2.15 aşağıdaki hale indirgenmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, Fr_b, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{H_t}{H_b}, \frac{b}{H_b}\right) \quad (2.16)$$

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmaya ait deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda inşa edilen yaklaşık olarak 10 metre uzunluğunda, genişliği ve yüksekliği 1'er metre olan dikdörtgen kesitli bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir (Bkz. Resim 3.1). Deney kanalına ait şematik gösterim Şekil 3.1'de verilmiştir. Açık kanal tabanı paslanmaz çelikten yapılmış, taşıyıcı sistemi ise çelik konstrüksiyondan imal edilmiştir. Kanal tabanı üzerinde ve yan duvarlarda 10 mm kalınlığında temperli cam kullanılmıştır. Kanala flanş ve dirsekler ile 3 adet pompa bağlanmıştır. Laboratuvarda mevcut 22 kW'lık pompalar ile yeraltı deposundan kanala su verilerek suyun devir daimi sağlanmıştır. Pompalardan gelen suyun enerjisinin kırılması ve düzgün akım elde edilebilmesi için yükleme havuzuna susturucular yerleştirilmiştir. Ayrıca yükleme havuzunun açık kanalla birleşiminden önce ve açık kanalın başına akımı düzğünleştirmek için ızgaralı kafesler yerleştirilmiştir.

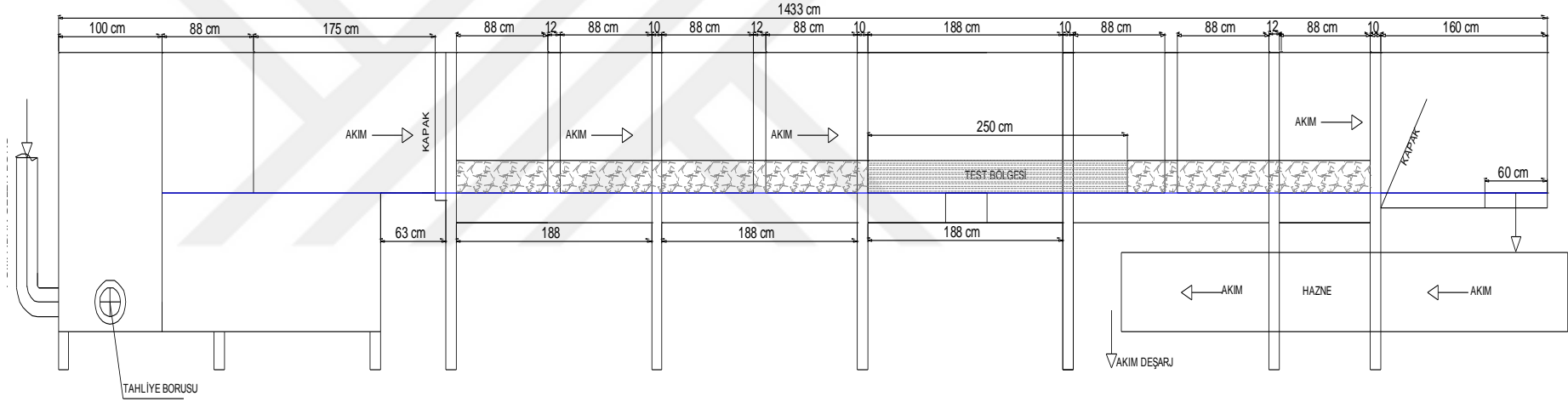


Resim 3.1. Deneyde kullanılan açık kanal

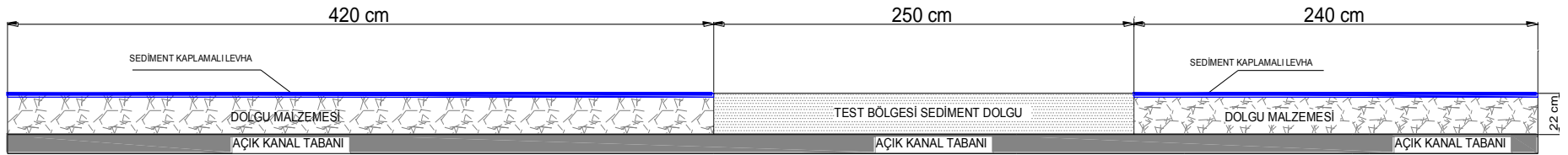
Açık kanal tabanında ölçüm yapılacak deney bölgesi için kanal başlangıcından yaklaşık 4,00 m mansapta bulunan 2,50 m boyunda, 1,00 m genişliğinde ve 0,22 m derinliğinde bir

alan oluşturulmuştur. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere kanal tabanı test bölgesi dışında 0,20 m yüksekliğinde çakıltaşı ile doldurulmuştur. Çakıl taşlı bölümlerin üzerine 18 mm kalınlığında suya dayanıklı levhalar konularak kanal tabanı oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 3.2). Kanal boyunca üniform pürüzlülüğün sağlanması için levhalara silikonla deneylerde kullanılan sediment yapıştırılmıştır. Böylece gerek kanal boyunca gerekse deney bölgesinde tabanda aynı pürüzlülük elde edilmiştir. Levhalara rastgele delikler açılarak özellikle deney başlangıcında kanala su verilmesi sırasında kanal tabanı ile levhalar arasında boşluklarda kalabilecek hava kabarcıklarının çıkışı sağlanarak akım yapısının bozulması önlenmiştir.

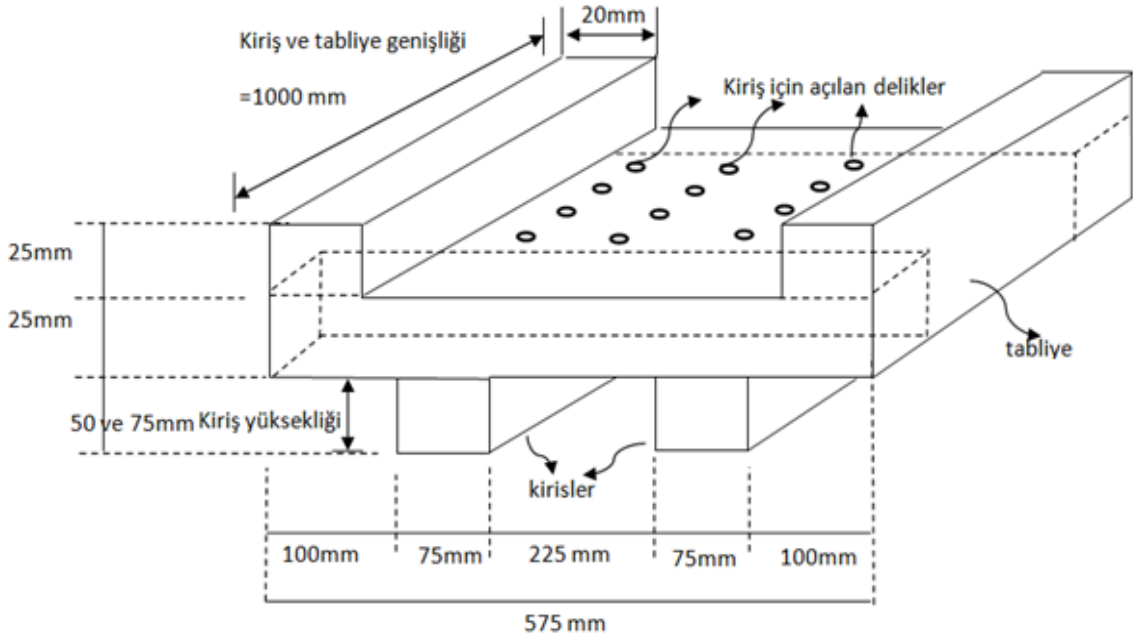
Deneylerde kullanılan köprü tabliyesi iki şeritli köprü boyutları göz önüne alınarak 1/100 ölçeğinde belirlenmiştir. Pleksiglas malzemedan yapılmış olan tabliye Şekil 3.3’te verilen boyutlarda imal edilmiştir. Deneylerde giriş yüksekliği ile giriş konumu etkisinin incelenebilmesi için tabliye merkezi, memba ve mansap taraflarına üç kesit boyunca delikler açılmıştır. Böylece giriş konumlarının istenildiğinde değiştirilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca çalışmada kullanılacak giriş yüksekliklerinin belirlenmesi için ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde mevcut akım şartlarında hiç giriş olmaması veya 2,5 cm kalınlığında giriş olması durumlarında tabanda çok az oyulma meydana geldiği görülmüştür. Bu nedenle deneylerde giriş yükseklikleri 5,0 cm ile 7,5 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Deney kanalı şematik gösterimi

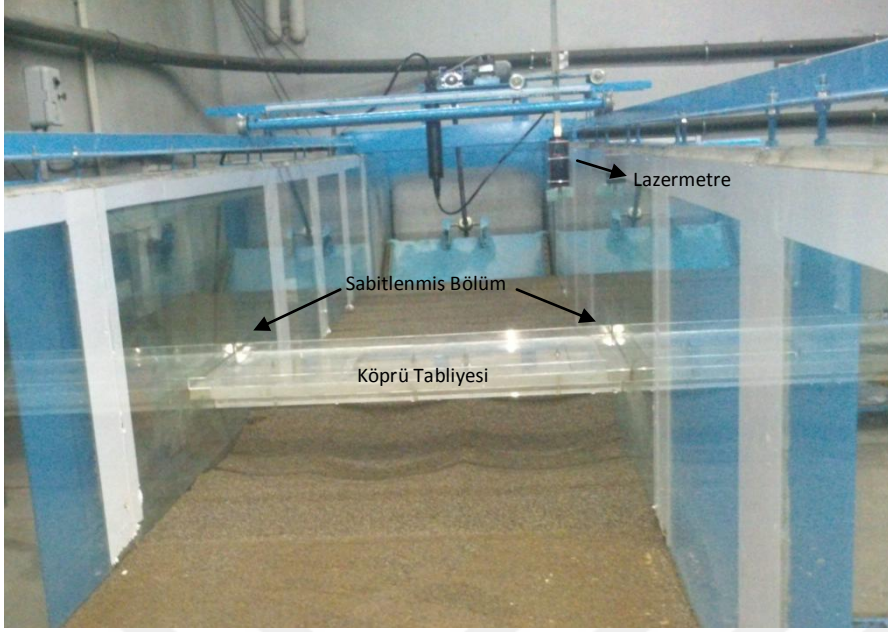


Şekil 3.2. Kanal tabanı ve test bölgesi



Şekil 3.3. Köprü tabliye modeli

Köprü tabliyesi kanal başlangıcından yaklaşık 4,5 m mesafede, deney bölgesi içerisine kanal tabanından 20,0 cm ve 17,5 cm yüksekliklerde olacak şekilde iki farklı açıklıkta kanal yan duvarlarına sabitlenerek kızaklı bir sistem üzerine oturtulmuştur (Bkz. Resim 3.2). Böylece deneyin tamamlanmasından sonra tabliye çıkartılarak tabanda meydana gelen değişimler lazermetreyle ölçülmüştür. Tabliye ile kanal tabanı arasındaki açıklığın köprü tabliyesi altındaki oyulma çukuru üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için tabliyenin oturacağı kızaklı sistem kanal yan duvarları üzerinde iki farklı konumda yapılandırılmıştır.



Resim 3.2. Köprü tabliye modelinin deney bölgesinde konumlandırılması

Deneylerde kullanılan sediment ardiye ocaklarından temin edilmiş olup doğal dere yatağı malzemesidir. Kum ocağından alınan doğal sediment özel olarak imal edilmiş eleklerden elenerek mümkün olduğunca homojen taban malzemesi elde edilmiştir. Elenerek elde edilen sediment kanal tabanına serilmeden önce temiz suyla yıkanarak tanelere yapışmış olabilecek kir ve partiküllerden tamamen arındırılmıştır. Deneylerde kullanılmış olan taban malzemelerine ait karakteristik büyüklükler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Taban malzemesine ait karakteristik büyüklükler

	D <sub>10</sub> (m)	D <sub>50</sub> (m)	D <sub>60</sub> (m)	D <sub>84,1</sub> (m)	C <sub>u</sub> (-)	C <sub>c</sub> (-)	σ <sub>g</sub> (-)
Sed-1	0,0006	0,0011	0,0013	0,0014	2,170	1,133	1,273
Sed-2	0,0011	0,0015	0,0016	0,0018	1,454	0,960	1,200

Çizelge 3.1’de deneylerde kullanılmış olan iki sediment grubuna ait çeşitli tane büyüklükleri ile dağılımları verilmiştir. Deneylerde kullanılan katı madde dağılımı önemli olduğundan üniformluğu ifade eden farklı katsayılar hesaplanarak bu değerlerin istenen aralıkta olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Çizelgede verilen geometrik standart sapma  $\sigma_g = D_{84,1}/D_{50}$  şeklinde hesaplanmış ve her iki malzeme grubu için  $\sigma_g < 1,4$  olduğundan sediment üniform kabul edilmiştir (Dey ve diğerleri, 2008). Ayrıca üniformluk katsayısı olarak bilinen  $C_u = D_{60}/D_{10}$  şeklinde hesaplanmış ve her iki gruba ait değerler  $C_u < 3,0$  olduğundan tane dağılımları üniform olarak belirlenmiştir (Yanmaz, 2002).

Derecelendirme sayısı ise  $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$  şeklinde hesaplanmış ve her iki malzeme grubu için  $C_c < 1,5$  olarak belirlenmiştir (Shen ve diğerleri, 2012). Böylece kanal tabanında kullanılan malzemelerin uygunlukları belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (Unified Soil Classification System - USCS) göre deneylerde kullanılan malzemenin grup sembolü “SP” olup, zemin cinsi olarak kötü derecelendirilmiş temiz kumlar sınıfına girmektedir. Yani malzemeler ağırlıklı olarak deney için belirlediğimiz tane çaplarından oluşmaktadır.

Çalışma kapsamında yapılması planlanan deneylere karar verilirken laboratuvar imkanları ile literatür çalışmaları dikkate alınmıştır. Kanala verilebilecek debi göz önüne alındığında deneylerde 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s kullanılmasına karar verilmiştir. Deneyler temiz su durumunda yapılacağından ön deneyler yardımıyla söz konusu debilerde tabanda katı madde hareketinin başladığı akım derinlikleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinlikleri bu değerlerden büyük alınarak temiz su durumu sağlanmıştır. Çizelge 3.2’de verilen akım özelliklerine göre yaklaşım akım hızının ( $V_a$ ) kritik akım hızına ( $V_c$ ) oranının 0,395 ile 0,696 arasında değiştiği belirlenmiştir. Burada kritik akım hızı ( $V_c$ ) Eş. 2.6 ile hesaplanmıştır (Neil, 1973). Tüm deneylerde  $V_a/V_c$  oranının 1’den küçük olması kanal tabanında temiz su durumunun sağlandığını göstermiştir (Umbrell ve diğerleri, 1998).

Deneylerde debi, dikdörtgen kesitli keskin kenarlı bir savak kullanılarak ölçülmüştür. Yaklaşım akım derinliği de kanal boyunca hareket edebilen bir sisteme monte edilmiş limnimetre yardımıyla ve kanal yan duvarlarına cam üzerine yapıştırılmış transparan cetveller yardımıyla belirlenmiştir. Tabanda meydana gelen oyulma çukuru ise Bölüm 3.3’te anlatılacağı üzere lazermetre ile yapılmıştır.

Çizelge 3.2 Temiz su durumu için belirlenmiş yaklaşım akım derinlikleri ve kritik hızlar

Debi (lt/s)	D <sub>50</sub> (m)	y <sub>a</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	V <sub>c</sub> (m/s)	V <sub>a</sub> /V <sub>c</sub> (-)	Fr <sub>a</sub> (-)
70	0,0011	0,200	0,350	0,503	0,696	0,250
	0,0011	0,225	0,311	0,513	0,607	0,209
	0,0011	0,250	0,280	0,522	0,537	0,179
	0,0011	0,275	0,255	0,530	0,480	0,155
	0,0011	0,300	0,233	0,538	0,434	0,136
	0,0011	0,325	0,215	0,545	0,395	0,121
	0,0015	0,200	0,350	0,557	0,628	0,250
	0,0015	0,225	0,311	0,568	0,547	0,209
	0,0015	0,250	0,280	0,579	0,484	0,179
	0,0015	0,275	0,255	0,588	0,433	0,155
80	0,0011	0,250	0,320	0,522	0,613	0,204
	0,0011	0,275	0,291	0,530	0,549	0,177
	0,0011	0,300	0,267	0,538	0,496	0,155
	0,0011	0,325	0,246	0,545	0,452	0,138
	0,0015	0,250	0,320	0,579	0,553	0,204
	0,0015	0,275	0,291	0,588	0,495	0,177
	0,0015	0,300	0,267	0,596	0,447	0,155
	0,0015	0,325	0,246	0,604	0,407	0,138
90	0,0011	0,300	0,300	0,538	0,558	0,175
	0,0011	0,325	0,277	0,545	0,508	0,155
	0,0015	0,300	0,300	0,596	0,447	0,175
	0,0015	0,325	0,277	0,604	0,458	0,155

### 3.2. Deneylerin Kapsamı

Çalışma kapsamında 121 adet deney yapılmıştır. Deneylerde temiz su halinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği ve şekli lazermetreyle yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Deneyler, temiz su durumu için farklı yaklaşım akım derinlikleri, giriş yükseklikleri, taban açıklığı ve taban tane çapı ile Ek-1’de verilen seriler çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Deneyler Çizelge 3.1’de karakteristikleri verilen iki farklı tane çapına sahip sediment ile 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s olmak üzere üç farklı debi değerinde gerçekleştirilmiştir. Temiz su şartını sağlayacak şekilde 70lt/s’lik debi için 20,0 cm; 22,5 cm; 25,0 cm; 27,5 cm; 30,0 cm ve 32,5 cm; 80lt/s’lik debi için 25,0 cm; 27,5 cm; 30,0 cm ve 32,5 cm ve 90lt/s’lik debi için 30,0 cm ve 32,5 cm yaklaşım akım derinlikleri kullanılmıştır. Deneylerde Froude sayısı 0,121 ile 0,250 arasında değişmiştir. Çizelge 3.2’de yaklaşım akım derinlikleri ile Froude sayıları verilmiştir.

Deney sırasında yapılan gözlemlere göre 1 nolu sediment durumunda 2 saat sonunda oyulma çukuru derinliklerinin yaklaşık %80'inin, 2 nolu sedimentin ise yaklaşık %90'nının tamamlandığı görülmüştür. Deney başlangıcında köprü tabanındaki sediment taşınım miktarı son derece hızlıyken zamanla taşınım miktarı beklendiği gibi azalmıştır. Umbrell ve diğerleri (1998) tarafından yapılmış deneylerde deney süresi 3,5 saat olarak belirlenmiş ve deney süresi sonunda kullandıkları 0,3 mm, 1,2 mm ve 2,4 mm medyan tane çapına sahip sedimentlere ait oyulma çukuru derinliklerinin Laursen (1963)'e göre sırasıyla %68,2; %91,8 ve %98,6'sını tamamladığını belirtmişlerdir. Deney sırasında hemen tabliye membainda oluşan vorteksler ve bunların mansaba taşınımının hız dağılımını ve dolayısıyla sediment taşınımını etkilediği görülmüştür. Köprü tabliyesi altında sadece akım yapısının incelendiği çalışmalarda PIV sistemi kullanılarak köprü tabliye açıklığına ve Froude sayısına bağlı olarak hız profilleri ve akımın kırılganlığa bağlı olarak su yüksekliklerindeki kavitasyonlar incelenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarakta türbülans karakteristikleri elde edilmeye çalışılmıştır (Lin ve diğerleri, 2012). Bu çalışma kapsamında sadece taban oyulmaları incelenmiş, herhangi bir hız ölçümü yapılmamıştır. Çalışma kapsamında yapılan ön deneysel çalışmalarda debi, yaklaşım akım derinliği ve katı madde çapı gibi büyüklüklere bağlı olarak oyulmanın ilk 1-2 saat içerisinde çok hızlı olduğu, sonraki saatlerde yavaşladığı ve 6-7 saat içerisinde oyulma çukuru derinliğinin denge durumuna geldiği görülmüştür. Deneylerin sonlandırılmasında kriter olarak tabandaki hareketin neredeyse gözle görülemeyecek derecede azalması, deney yan duvarlarına yapıştırılmış olan milimetrik kareli transparan slayt yardımıyla tabanda alçalmanın gözle fark edilebilecek birkaç milimetrik seviyelere inmesi belirlenmiştir. Bu koşullar altında çalışma kapsamında yapılmış tüm deneyler 8 saatlik süre sonunda zamansal değişimini neredeyse tamamlamıştır. Bu sürenin tüm deneylerde belirlenen şartlarda oyulma çukurunun denge durumuna ulaşması için yeterli olduğu görülmüştür.

Çalışmada yapılmasına karar verilen deneylerle aşağıda verilen amaçlara ulaşılması hedeflenmiştir:

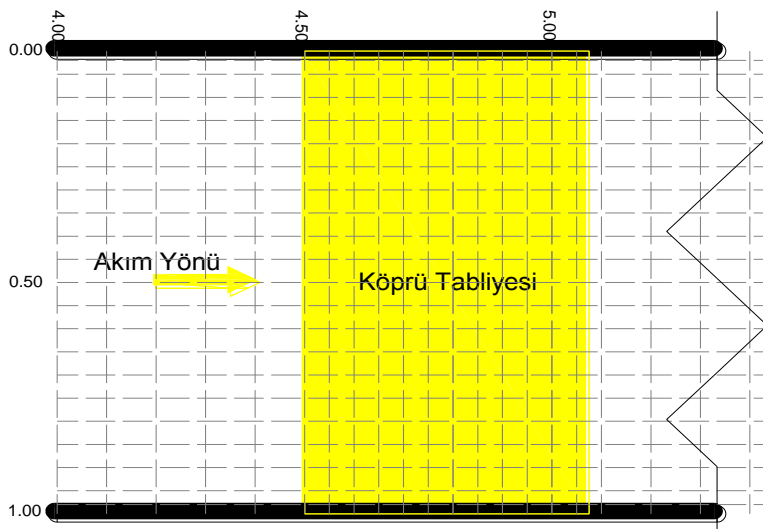
- 1- Boyut analizi yardımıyla oyulma çukuru derinliği üzerinde etkili olduğu belirlenen önemli parametrelerin göz önüne alınarak basınçlı ve savaklı tipi akım durumlarında maksimum oyulma çukuru derinliğinin ölçülmesi ve bu deney verilerinin kullanılmasıyla yapılacak regresyon analizi ile maksimum oyulma çukuru tahmini için ampirik bir bağıntı elde etmek,

- 2- Tabliye korkuluk üstü su yüksekliğinin aynı olduğu basınçlı ve savak tipi akım durumlarında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerini incelenmek (basınçlı akım durumunun elde edilebilmesi için köprü korkuluğu üzerine ek korkuluk konmuş ve böylece suyun savaklanması engellenmiştir).
- 3- Köprü tabliyesinde özellikle giriş konumu ile tabliye arasındaki mesafenin maksimum oyulma çukuruna etkisini incelemek,

Madde 1’de hedeflenen amprik bağıntının elde edilmesi Bölüm 5’te, diğer maddelerle ilgili elde edilen sonuçlar detaylı olarak Bölüm 4’te verilmiştir.

### 3.3. Deney Prosedürü

Deneyle başlamadan önce test bölgesinde bulunan sediment, kanal boyunca hareket edebilen kayar sistemli aparatla düzlenmiştir. Köprü tabliyesinin yerleştirildiği deney bölgesi Şekil 3.4’te verildiği gibi gözle bölünmüştür. Lazermetre kanal boyunca hareket edebilen kayar sistemli aparata Resim 3.3’te görüldüğü gibi  $90^0$  açıyla ölçüm yüksekliği sabit olacak şekilde monte edilmiştir. Belirlenmiş olan ağ köşe noktalarında deneyden önce ve deney sonrası taban okumaları lazermetreyle yapılarak, deney süresince meydana gelen taban değişimleri belirlenmiştir. Kullanılan lazermetre Leica DISTO D810’un tipik ölçüm toleransı  $\pm 1,0$  mm olup ölçülen değerler doğrudan bilgisayara aktarılmıştır. Böylece ölçümlerde olabilecek hataların minimuma indirgenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.4 Deney bölgesi ölçüm ağ sistemi



Resim 3.3. Kullanılan lazermetre

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere ölçüm yapılan ağ köşe noktaları köprü tabliyesinin bulunduğu bölümde beşer cm'lik aralıklarla (5,0 cm x 5,0 cm) belirlenmiş ve ölçümler bu noktalarda yapılmıştır. Tabliyenin yerleştirildiği 5,0 cm enindeki askı elemanları nedeniyle kanalın sol yan duvarlarından 7,00 cm'den başlamak üzere 93,00 cm'e kadar kanal genişliği boyunca ölçümler yapılmıştır. Deney bölgesinde tabliye dışındaki bölümler 5,0 cm x 10,0 cm şeklinde ağ gözlerine bölünmüş ve yine ağ gözleri köşe noktalarında ölçümler yapılmıştır.

Her deney öncesi test bölgesindeki taban malzemesi karıştırılarak sediment düzlenip taban okumaları yapılmıştır. Deney başlangıcında su kanala çok yavaş şekilde, deney bölgesindeki sedimenti mümkün olduğunca hareket ettirmeyecek şekilde verilmiştir. Kanala verilen debi kanalın sonuna yerleştirilmiş keskin kenarlı dikdörtgen savak yardımıyla ayarlanmıştır. Sonra kanal sonunda bulunan otomatik kapak yardımıyla köprü tabliyesi membasında istenen yaklaşım akım derinliği ayarlanmıştır. Köprü tabliyesi akımı ve tabandaki malzemeyi mümkün olduğunca rahatsız etmeden kanala yerleştirilmiştir. Yaklaşım akım derinliği tekrar kontrol edilerek deney başlatılmıştır. Belirlenen 8 saatlik deney süresi sonunda pompalar durdurulmuş ve kanaldaki su tabandaki sedimentin hareketine neden olmayacak şekilde çok yavaş olarak kanaldan tahliye edilmiştir. Daha sonra köprü tabliyesi kızağından kaydırılarak çıkarılmıştır. Deney bölgesinde Şekil 3.4'de verilen ölçüm ağ sistemine göre lazermetreyle yeniden ölçümler yapılmıştır. Böylece

deney ölçüm noktalarında deney öncesi ve sonrası yapılan ölçüm farkları deney sırasında meydana gelen sedimet taşınımının 3-boyutlu haritasını vermiştir. Ölçümler tamamlandıktan sonra test bölgesindeki sediment karıştırılmış ve kanal tabanı düzlenip bir sonraki deneye hazır hale getirilmiştir.

Köprü tabliyesinin bir savak gibi davrandığı yani akımın tabliye üzerinden savaklandığı durumdaki yaklaşım derinliği ile aynı akım derinliğinde basınçlı akım oluşturabilmek için tabliye korkuluğunun yüksekliği köprü korkuluğu üzerine ilave parça eklenmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Buna göre mevcut 2,5 cm olan korkuluk yüksekliğine ilave yapılarak 5,0 cm, 7,5 cm ve 10,0 cm olan üç farklı korkuluk yüksekliği elde edilmiştir.

Tabliye başlangıcı ile ilk kirişin arasındaki mesafenin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için tek kirişin tabliyenin ortasına ve sonuna yerleştirildiği deneyler yapılmıştır. Böylece köprü tabliyesi altındaki oyulma çukuruna etki eden yaklaşım akım derinliği, kiriş yüksekliği, yaklaşım akım hızı, kirişlerin konumu ve aynı koşullar altında savak tipi akım ile basınçlı akım tipinin karşılaştırılmasının incelenmesine imkan veren deney setleri hazırlanmıştır.



## 4. DENEY BULGULARI VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ

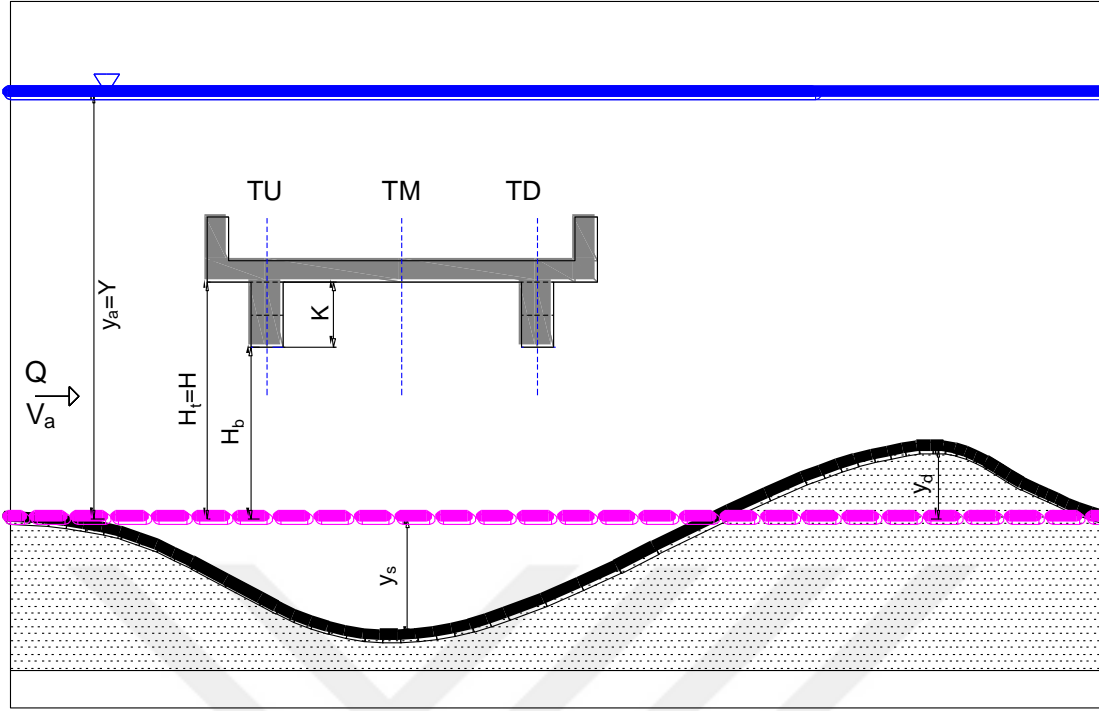
### 4.1. Genel

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olan deneylerde, temiz su oyluması durumunda basınçlı ve savak tipi akım şartlarında köprü tabliyesi altında meydana gelmiş olan maksimum oyluma çukuru derinliği, şekli ve bu büyüklükler üzerinde etkili olan yaklaşım akım derinliği, giriş yüksekliği, taban malzemesi, tane çapı gibi parametreler incelenmiştir. Çalışma kapsamında toplam 121 adet deney yapılmıştır. Çizelge 4.1'de çalışma kapsamında yapılmış olan deneylerde oyluma çukuru derinliğine etkisi incelenmiş parametreler, bu parametrelerin aldıkları değerler ve ilgili deney sayıları verilmiştir. Şekil 4.1'de ise deneylerde kullanılan köprü tabliye modeli ve ilgili parametreler gösterilmiştir. Kullanım kolaylığı sağlaması açısından deneylerde  $H_b$  yerine  $H$ ,  $y_a$  yerine  $Y$  sembolü kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Maksimum oyluma çukuru derinliğine etkisi incelenen parametreler

Parametre	Sembol	Parametre değeri		Deney sayısı
1- Tabliye ile taban arasındaki fark	H	$H_1$	20,0 cm	87
		$H_2$	17,5 cm	34
2- Yaklaşım akım derinliği	Y	$Y_1$	20,0 cm	11
		$Y_2$	22,5 cm	9
		$Y_3$	25,0 cm	19
		$Y_4$	27,5 cm	30
		$Y_5$	30,0 cm	31
		$Y_6$	32,0 cm	21
3- Giriş yüksekliği	K	$K_2$	5,0 cm	51
		$K_3$	7,5 cm	70
4- Taban malzemesi medyan katı madde çapı	$D_{50}$	$D_{50-1}$	$D_{50}=1,1$ mm (Sed-1)	77
		$D_{50-2}$	$D_{50}=1,5$ mm (Sed-2)	44
5- Debi	Q	$Q_1$	70 lt/s	53
		$Q_2$	80 lt/s	42
		$Q_3$	90 lt/s	26
6- Akım tipi <sup>1</sup>	B	Basınçlı akım - B		52
	S	Savak tipi akım - S		50
7- Tabliye kenarı ile giriş arası mesafe (Tek girişin konumu)	T	TU	Kiriş membada	6
		TM	Kiriş ortada	7
		TD	Kiriş mansapta	6

1) Aynı yaklaşım akım derinliğinde ilave korkuluk eklenmesiyle basınçlı ve savak tipi akım etkisinin incelendiği deneyler



Şekil 4.1. Deneysel köprü tabliye modeli ve ilgili parametreler

Deneysel köprü tabliyesi  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm olmak üzere tabana göre iki farklı konumda yerleştirilmiştir. Kiriş konumunun etkisinin incelendiği deneyler dışında tüm deneylerde yükseklikleri  $K_2=5,0$  cm ve  $K_3=7,5$  cm olan ve TU ile TD konumlarına yerleştirilmiş iki adet kiriş kullanılmıştır. Ayrıca taban malzemesinin etkisinin incelenebilmesi için medyan tane çapı  $1,1$  mm ( $D_{50-1}$ ) ve  $1,5$  mm ( $D_{50-2}$ ) olan iki farklı katı maddeyle çalışılmıştır. Çalışmada yapılan ön deneylerde mevcut laboratuvar ve köprü tabliye modeli koşullarında tabliyede hiç kiriş olmaması veya  $2,5$  cm'lik kiriş yüksekliğinin bulunması durumlarında tabanda neredeyse hiç veya çok küçük derinlikte oyulma çukurunun meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle deneylerde  $5,0$  cm ve  $7,5$  cm'lik kiriş yüksekliği kullanılmıştır. Aynı şekilde deneylerde elde edilen ortalama akım hızı ile Fr sayısı aralığı nedeniyle tabanda daha büyük katı madde çapı kullanılmamıştır. Deneysel basınçlı (B) ve savak (S) tipi akım şartları  $20,0$  ile  $32,5$  cm aralığında  $2,5$  cm'lik artışlarla altı farklı yaklaşım akım derinliği ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5$  ve  $Y_6$ ) kullanılarak elde edilmiştir. Aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akımın neden olduğu oyulmaları inceleyebilmek için tabliyeye ek parça yapıştırılarak korkuluk yüksekliği artırılmıştır. Böylece aynı yaklaşım akım derinliğinde hem basınçlı hem de savak tipi akımlar elde edilebilmiş ve bunların oyulma çukuru derinliğine etkileri incelenebilmiştir. Bu deneylerin yanı sıra köprü tabliye kenarı ile kiriş arasındaki

mesafenin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisinin incelenebilmesi için tek kirişin kullanıldığı 19 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan tek kiriş akım yönünde tabliye ekseninin membana (TU), merkezine (TM) ve mansabına (TD) yerleştirilerek meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği incelenmiştir. Laboratuvar imkanları dahilinde deneyler  $Fr_a = 0,121-0,250$  aralığında 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s'lik debiler kullanılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Farklı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde parametrelerin kolaylıkla takip edilmesini sağlamak için deneylere yukarıda bahsedilmiş olan semboller kullanılarak isimler verilmiştir. Örneğin BH1Q1Y1K3-Sed1 deneyinin basınçlı akım durumunda, tabliye konumunun  $H_1=20,0$  cm, debinin  $Q_1=70$  lt/s, yaklaşım akım derinliğinin  $Y_1= 20,0$  cm ve kiriş yüksekliğinin  $K_3= 7,5$  cm olduğu ve tabanın medyan tane çapı  $D_{50-1} = 1,1$  mm olan malzemenin olduğunu göstermektedir. Ek-1'de çalışma kapsamında yapılmış deneyler ve ölçüm sonuçları verilmiştir.

## **4.2. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi**

### **4.2.1. Köprü tabliye konumunun etkisi**

Tabliye konumunun maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için köprü tabliye modeli kanal tabanından  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm yüksekliğinde iki farklı konuma yerleştirilmiş ve aynı koşullar altında meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde ölçülmüş en büyük maksimum oyulma çukuru derinliğinin  $H_2=17,5$  cm tabliye konumu ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde meydana geldiği görülmüştür. Çizelge 4.2'de aynı koşullar altında ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde köprü tabliye modeli konumunun maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisinin en fazla gözlemlendiği deney sonuçları verilmiştir. Örneğin yaklaşım akım derinliğinin  $Y_1=20,0$  cm olduğu basınçlı akım durumunda tabliye konumunun  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm olduğu durumlarda maksimum oyulma çukuru derinliği 13,4 cm'den %5,97'lik artışla 14,2 cm değerine ulaşmıştır.

Çizelge 4.2'de verilmiş olan sonuçlara göre köprü tabliyesinin kanal tabanına yaklaşması durumunda iki deney hariç deneylerin tümünde oyulma çukuru derinliğinde artış gözlemlenmiştir. İki istisnai durumdan biri çizelgede en küçük Froude sayısı olan 0,136 ile

en büyük savak yükü olan 7,5 cm'lik akım koşullarının geçerli olduğu deneydir. Bu durumda tabliyenin kanal tabanına yaklaşmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinde bir azalma görülmüştür. Bu durumda artan savak yüküyle birlikte köprü tabliyesi üzerinden savaklanan debinin miktarı artmış, dolayısıyla tabliye altından geçen akımın hızının küçülmesiyle daha küçük oyulma derinliği meydana gelmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere savak tipi akım durumunda savak yükünün artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliği değişim yüzdelerinde de azalma meydana gelmiştir. İkinci istisnai durumda ise yine 7,5 cm'lik savak yükü durumunda 1,5 mm medyan çapına sahip katı madde için aynı maksimum oyulma çukuru derinlikleri elde edilmiştir. Bu sonuçta da küçülen tabliye altı ortalama akım hızının etkisi olduğu düşünülmüştür.

Çizelge 4.2. İki farklı köprü tabliye konumunda ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve değişim yüzdeleri

Debi (lt/s)	Yaklaşım derinliği (cm)	Fr <sub>a</sub> (-)	Medyan tane çapı (mm)	Savak yükü (cm)		Maksimum oyulma çukuru derinliği (cm)		Değişim yüzdesi (%)	
				w <sub>s</sub> (H <sub>1</sub> )	w <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> )	y <sub>s</sub> (H <sub>1</sub> )	y <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> )		
70	Y <sub>1</sub> =20,0	0,250	1,1	-	-	13,4	14,2	5,97	
		0,250	1,5	-	-	8,8	12,0	36,36	
	Y <sub>2</sub> =22,5	0,209	1,1	-	-	12,0	15,4	28,33	
		0,209	1,5	-	-	8,9	12,5	40,45	
	Y <sub>3</sub> =25,0	0,179	1,1	-	2,5	13,1	13,6	3,82	
		0,179	1,5	-	2,5	8,3	8,9	7,22	
	Y <sub>4</sub> =27,5	0,155	1,1	2,5	5,0	11,6	12,3	6,03	
		0,155	1,5	2,5	5,0	7,6	7,7	1,32	
	Y <sub>5</sub> =30,0	0,136	1,1	5,0	7,5	11,2	10,4	-7,14	
		-	-	-	-	-	-	-	
	80	Y <sub>3</sub> =25,0	0,204	1,1	-	2,5	14,1	14,4	2,13
			0,204	1,5	-	2,5	10,3	11,4	10,68
Y <sub>4</sub> =27,5		0,177	1,1	2,5	5,0	13,0	13,6	4,60	
		0,177	1,5	2,5	5,0	8,1	11,1	37,04	
Y <sub>5</sub> =30,0		0,155	1,1	5,0	7,5	10,5	12,9	22,86	
		0,155	1,5	5,0	7,5	-	7,1	-	
90	Y <sub>5</sub> =30,0	0,175	1,1	5,0	7,5	13,0	13,2	1,54	
		0,175	1,5	5,0	7,5	8,0	8,0	-	

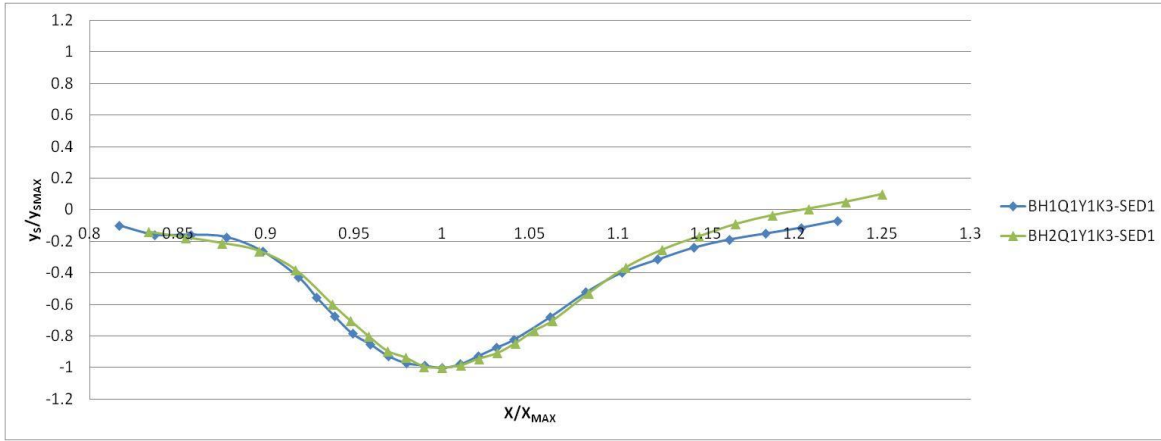
Aynı yaklaşım akım derinliği ve taban malzemesi koşullarında gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında tabliye konumunun 2,5 cm tabana yaklaştırılması halinde her iki katı madde durumunda da

maksimum oyulma çukuru derinliğinin küçük bir miktar etkilendiği görülmektedir. Tabliye konumunun özellikle taban malzemesi medyan çapının daha büyük olması ( $D_{50-2}=1,5$  mm) durumlarında oyulma çukuru derinliği üzerinde daha etkili olduğu ve Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere değişimin %36,36 ile % 40,45 seviyelerine ulaştığı belirlenmiştir. Her iki durumda da basınçlı akım söz konusudur. Bu durumlarda tabliye altındaki ortalama akım hızının artması oyulmayı artırmaktadır. Ayrıca beklendiği gibi tane çapı büyüdükçe oyulma çukuru derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum iki nedenle açıklanabilir. Bunlardan ilki tane çapının büyümesiyle taneyi harekete geçirmek için gerekli kritik sürüklenme gerilmesinin artmasıdır. Dolayısıyla aynı akım şartlarında daha büyük medyan tane çapına sahip kanal tabanında daha küçük oyulma çukuru meydana gelmektedir. İkinci neden ise oyulma başladığında önce yüzeydeki ince tanelerin taşınması, taşınmayan daha büyük tanelerin ise alttaki daha ince taneler için bir zırh tabakası oluşturması olarak açıklanabilir. Bu durumda da oyulma çukuru derinliği daha küçük olmaktadır.  $H_1=20,0$  cm tabliye konumunda 25,0 cm'den büyük yaklaşım akım derinliklerinde savak tipi akım ve en küçük maksimum oyulma çukuru derinliği yine  $D_{50}=1,5$  mm'lik taban malzemesinde meydana gelmiştir. Buna karşın oyulma çukuru derinliğindeki değişim oranı (%37,04) daha fazla olmuştur. Bu da akım tipi ister basınçlı ister savak tipi olsun tabliye konumunun özellikle medyan tane çapının büyümesiyle çok daha büyük öneme sahip olduğunu göstermektedir.

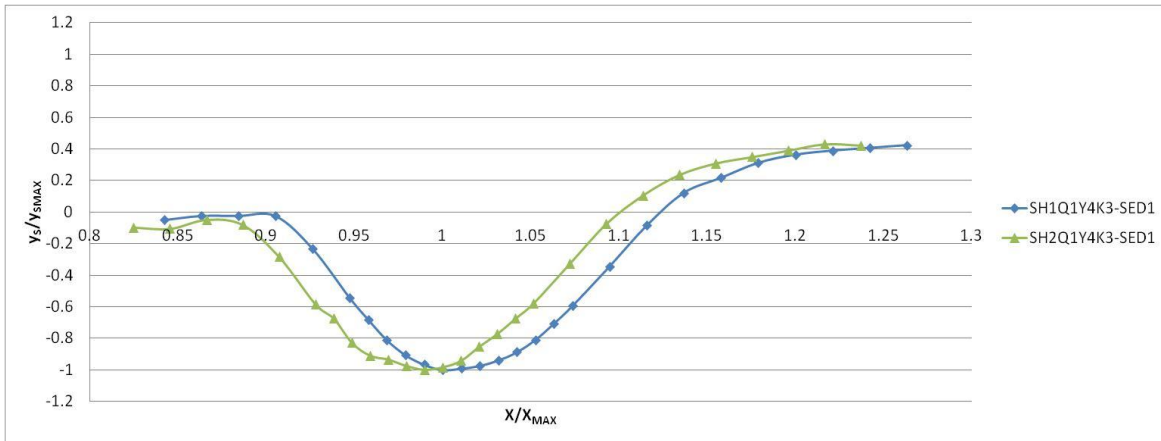
Oyulma çukuru profillerinin incelendiği şekillerde "x" ölçüm yapılan kanal boyuna konumu, " $x_{max}$ " ise maksimum oyulmanın meydana geldiği konumu göstermektedir. " $y_s$ " oyulma çukuru derinliğini ifade etmekte olup, " $y_{smax}$ " maksimum oyulma çukuru derinliğini göstermektedir. Böylece bu parametreler kullanılarak maksimum oyulma çukuru profilleri boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 4.2'de basınçlı akım durumunda köprü tabliyesinin tabandan  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm konumlarında olması durumlarında meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış maksimum oyulma çukuru profilleri görülmektedir.  $D_{50}=1,1$  mm'lik taban malzemesi durumunda her iki tabliye konumu için oyulma çukuru şeklinde ciddi bir farklılık olmadığı görülmüştür. Şekil 4.3'te ise savak tipi akım durumunda her iki tabliye konumunda ölçülmüş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Buna göre savak tipi akım durumunda oyulma çukuru biraz daha daralmış ve membaya doğru ötelenmiştir. Oyulma çukurunun daralmasıyla çukur derinlikleri de artmıştır. Profillerden de görüleceği üzere

$D_{50}=1,1$  mm taban malzemesi durumunda tabliye konumunun oyulma çukuru üzerinde herhangi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Ancak savak tipi akım durumunda, oyulma çukuru şekli değişmese de membaya doğru bir ötelenme söz konusu olmuştur. Bu durum geçen akımın köprü tabliyesi üzerinden savaklanmasıyla tabliye altındaki akım alanının etkilendiğini ve böylece oyulmanın membaya ötelendiğini göstermektedir. Dolayısıyla tabliye altında meydana gelen akım yapısı ve bunu etkileyen etkenler oyulma üzerinde son derece önemlidir.



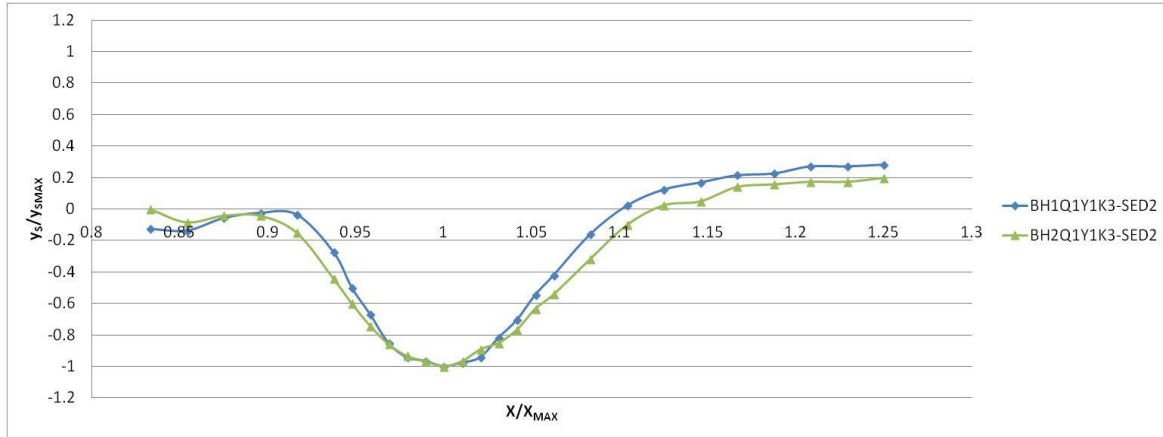
Şekil 4.2. Basınçlı akım ve ince taban malzemesi durumunda  $Q=70$  lt/s ve  $Fr_a= 0,250$  için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 4.3. Savak tipi akım ve ince taban malzemesi durumunda  $Q=70$  lt/s ve  $Fr_a= 0,155$  için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

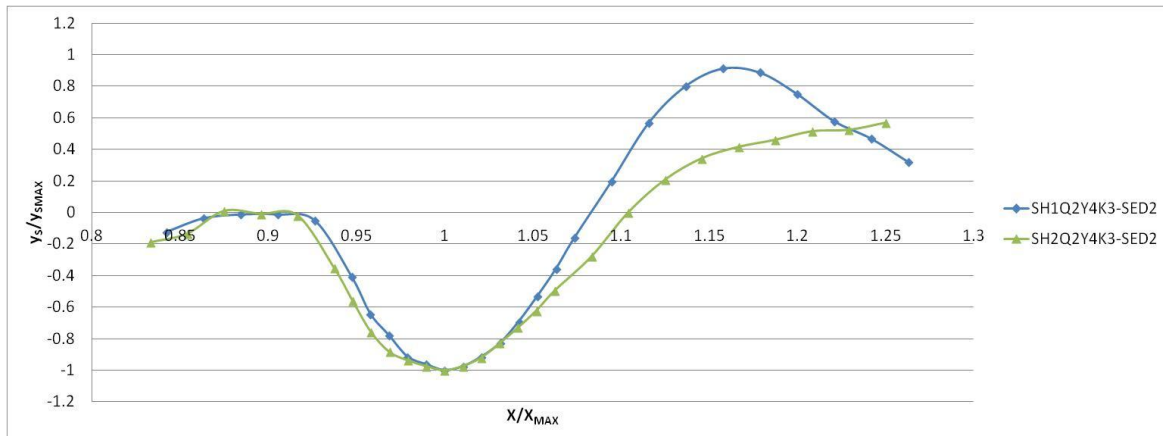
Şekil 4.4'te basınçlı akım için aynı şartlar altında (BH1Q1Y1K3) ama  $D_{50}=1,5$  mm'lik katı maddenin kullanılması halinde elde edilmiş boyutsuz maksimum oyulma çukuru profilleri gösterilmiştir. Bu şartlarda Çizelge 4.2'ye göre tabliye konumunun  $H_1=20,0$  cm olduğu

durumda maksimum oyulma çukuru derinliği  $Y_1=20,0$  cm yaklaşım derinliğinde 8,80 cm, tabliye konumunun  $H_2=17,5$  cm olduğu durumda ise 12,00 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere oyulma çukuru profilleri birbirine oldukça benzemekte, tabliye konumunun  $H_2=17,5$  cm olduğu durumda %36,36'lık artışla maksimum oyulma çukuru derinliği elde edilmektedir.



Şekil 4.4. Basınçlı akım ve kaba taban malzemesi durumunda,  $Q=70$  lt/s ve  $Fr_a= 0,250$  için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

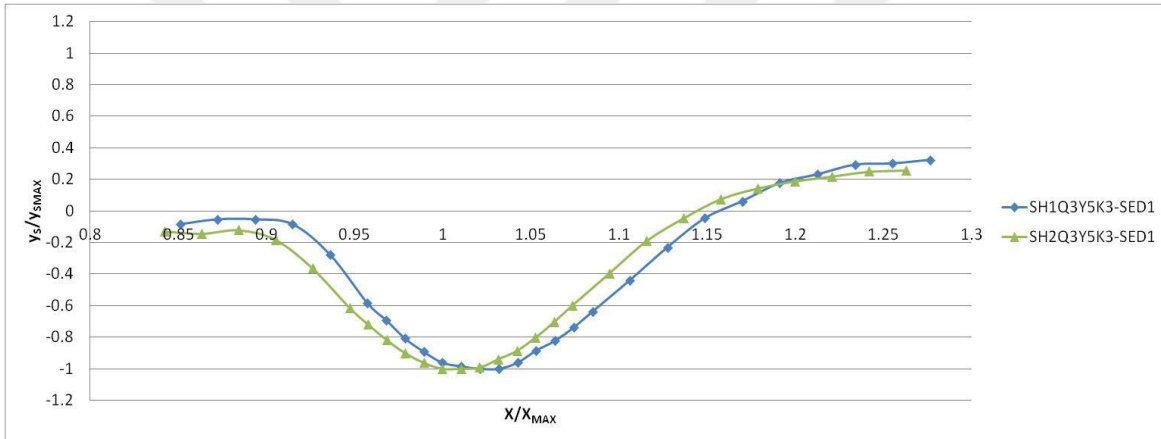
Şekil 4.5 ise savak tipi akım durumu için, 1,5 mm'lik taban malzemesi ile köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm konumlarında bulunması,  $Q_2=80$  lt/s'lik debi ve  $Y_4= 27,5$  cm'lik yaklaşım akım derinliği koşullarındaki boyutsuz oyulma çukuru profillerini göstermektedir.



Şekil 4.5. Savak tipi akım ve kaba taban malzemesi durumunda  $Q=80$  lt/s ve  $Fr_a = 0,177$  için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Çizelge 4.2'den de görüleceği üzere  $Y_4=27,5$  cm'lik yaklaşım akım derinliği 80 lt/s'lik debi ve tabliyenin  $H_1=20,0$  cm'den  $H_2=17,5$  cm konumuna getirilmesi durumunda  $D_{50}=1,5$  mm taban malzemesi olması halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin %37,04 oranında arttığı görülmektedir. Debinin 70 lt/s'den 80 lt/s'ye artması halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinde bir miktar artış olmuş ancak oyulma çukuru şeklinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir.

Savak tipi akım durumunda,  $D_{50}=1,1$  mm'lik taban malzemesi olması halinde,  $Q_3=90$  lt/s'lik debi ve  $Y_5= 30,0$  cm yaklaşım akım derinliği koşullarında  $Fr_a=0,175$  olarak elde edilmiştir. Bu durumda elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış maksimum oyulma çukuru profilleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Savak tipi akım ve ince taban malzemesi durumunda  $Q=90$  lt/s ve  $Fr_a=0,175$  için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Bu durumda maksimum oyulma çukuru derinliği %1,54 oranında artmıştır (Bkz. Çizelge 4.2). Köprü tabliyesinin konum etkisinin oyulma çukuru derinliğine etkisi çok az olmuştur. Şekil 4.6'da oyulma çukuru profillerin davranışı incelendiğinde oyulma çukurunun küçük bir miktar membaya doğru ötelendiği görülmektedir. Bu davranış Şekil 4.3'te verilen oyulma çukuru profilleriyle benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla savaklı akım durumlarında köprü tabliyesinin düşey konumunun oyulma çukuru profilini etkilediğini ve membaya ötelenmesine neden olduğunu göstermektedir.

Genel olarak sonuçlardan da görüldüğü üzere taban ile tabliye arasındaki mesafe azaldıkça ve katı madde medyan tane çapı arttıkça maksimum oyulma çukuru derinliğindeki değişim

oranı artmaktadır. Özellikle medyan tane çapı 1,5 mm olan malzeme durumunda oyulma çukuru derinliğinde %37,04'ü bulan artış meydana gelmiştir.

#### 4.2.2. Yaklaşım akım derinliği etkisi

Yaklaşım akım derinliğinin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için altı farklı yaklaşım akım derinliğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Bölüm 3'te anlatıldığı üzere yapılan ön deneyler yardımıyla 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s'lik debilerde temiz su koşulunu sağlayan akım derinlikleri belirlenmiştir. Bu değerlerden büyük olacak şekilde kanala sağlanabilecek debi değerleri göz önünde tutularak altı adet yaklaşım akım derinliğiyle çalışılmıştır. Bunlar  $H_1$  ve  $H_2$  tabliye konumunda ve 70 lt/s'lik debide yaklaşım akım derinliğinin tam tabliye altından başladığı ve basınçlı akımın meydana geldiği  $Y_1=20,0$  cm,  $Y_2=22,5$  cm ve tam korkuluk üst sınırına karşılık gelen  $Y_3=25,0$  cm derinlikleri ile savak tipi akımın olduğu  $Y_4=27,5$  cm,  $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm derinlikleridir. Deneylerde 80 lt/s için  $Y_3=25,0$  cm,  $Y_4=27,5$  cm,  $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm derinlikleri, 90 lt/s için ise  $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm derinlikleriyle çalışılmıştır. Çizelge 4.3'te yaklaşım akım derinliğindeki değişimin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisinin en fazla olduğu basınçlı ve savak tipi akım durumlarındaki deney sonuçları görülmektedir. Çizelgede sonuçları verilen tüm deneylerde giriş yükseklikleri 7,5 cm'dir. Çünkü en büyük oyulma değerleri söz konusu giriş yüksekliğinde elde edilmiştir.

Medyan tane çapı 1,1 mm olan taban malzemesi kullanılması halinde köprü konumundan bağımsız olarak basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinin yaklaşım akım derinliğinin yaklaşık olarak tam tabliye seviyesinde veya korkuluk hizasında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin tam tabliye alt sınırında olması durumunda  $Fr_a=0,250$  olmakta ve tabliye altında 13,4 cm derinliğinde bir oyulma çukuru meydana gelmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla oyulma çukuru derinliğinin azalma eğilimi gösterdiği ve akım derinliğinin tam korkuluk hizasında olması halinde yine arttığı görülmüştür. Yaklaşım akım derinliğinin tam tabliye hizasında olması halinde söz konusu debi değeri için en büyük  $Fr_a$  ile tabliye altı akım hızı elde edilmiştir. Akım derinliğinin korkuluk hizasında olması durumunda ise  $Fr_a$  ve yaklaşım akım hızında azalma olsa da en büyük basınçlı akım yüksekliği söz konusudur. Böylece mimbada basınçlı akım durumunda meydana gelen en büyük basınç yüksekliği tabliye altında kinetik enerjiye dönüşmüş ve dolayısıyla oyulmayı artırmıştır.

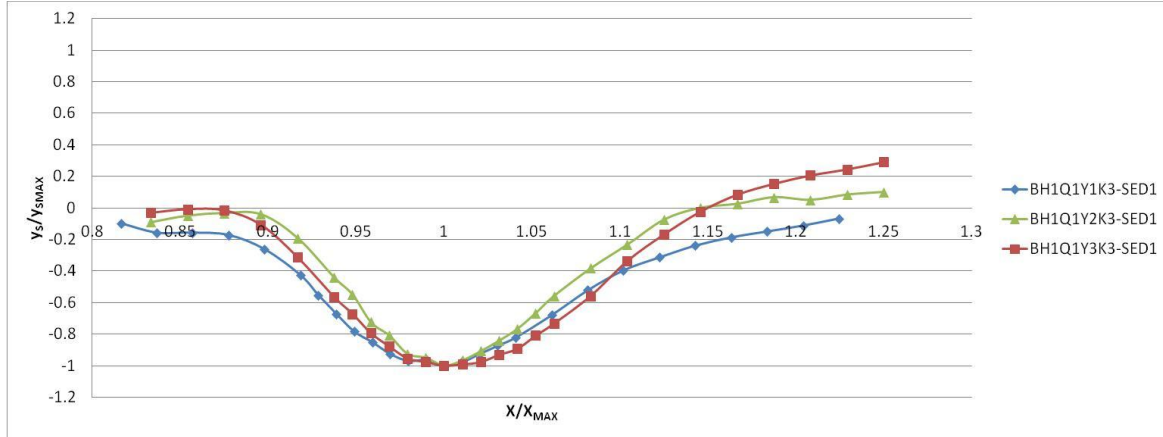
Çizelge 4.3. Farklı yaklaşım akım derinliklerinde ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Tabliye konumu (cm)	Debi (lt/s)		Y <sub>1</sub> 20,0cm	Y <sub>2</sub> 22,5cm	Y <sub>3</sub> 25,0cm	Y <sub>4</sub> 27,5cm	Y <sub>5</sub> 30,0cm	Y <sub>6</sub> 32,5cm
H <sub>1</sub> =20,0	70	Akım Tipi	Basınçlı	Basınçlı	Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı
		Fr <sub>a</sub> Sayısı	0,250	0,209	0,179	0,155	0,136	0,121
		D <sub>50</sub> =1,1mm	13,4	12,0	13,1	11,6	11,2	5,9
		D <sub>50</sub> =1,5mm	8,8	8,9	8,3	7,6	-	-
	80	Akım Tipi	-	-	Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı
		Fr <sub>a</sub> Sayısı	-	-	0,204	0,177	0,155	0,138
		D <sub>50</sub> =1,1mm	-	-	14,1	13,0	10,5	9,0
		D <sub>50</sub> =1,5mm	-	-	10,3	8,1	-	-
	90	Akım Tipi	-	-	-	-	S	S
		Fr <sub>a</sub> Sayısı	-	-	-	-	0,175	0,155
		D <sub>50</sub> =1,1mm	-	-	-	-	13,0	10,6
		D <sub>50</sub> =1,5mm	-	-	-	-	8,0	6,1
H <sub>2</sub> =17,5	70	Akım Tipi	Basınçlı	Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı	-
		Fr <sub>a</sub> Sayısı	0,250	0,209	0,179	0,155	0,136	-
		D <sub>50</sub> =1,1mm	14,2	15,4	13,6	12,3	10,4	-
		D <sub>50</sub> =1,5mm	12,0	12,5	8,9	7,7	-	-
	80	Akım Tipi	-	-	Savaklı	Savaklı	Savaklı	
		Fr <sub>a</sub> Sayısı	-	-	0,204	0,177	0,155	
		D <sub>50</sub> =1,1mm	-	-	14,4	13,6	12,9	-
		D <sub>50</sub> =1,5mm	-	-	11,4	11,1	7,1	-
	90	Akım Tipi	-	-	-	-	Savaklı	
		Fr <sub>a</sub> Sayısı	-	-	-	-	0,175	
		D <sub>50</sub> =1,1mm	-	-	-	-	13,2	-
		D <sub>50</sub> =1,5mm	-	-	-	-	8,0	-

Medyan tane çapı 1,5 mm olan malzeme durumunda ise tüm yaklaşım akım derinliklerinde daha küçük maksimum oyulma çukuru derinliği olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi daha önce de ifade edildiği gibi tabanda oyulmanın başlamasıyla daha ince tanelerin taşınması ve geride kalan daha büyük tanelerin bir zırh görevi görerek oyulmayı azaltması olarak açıklanabilir.

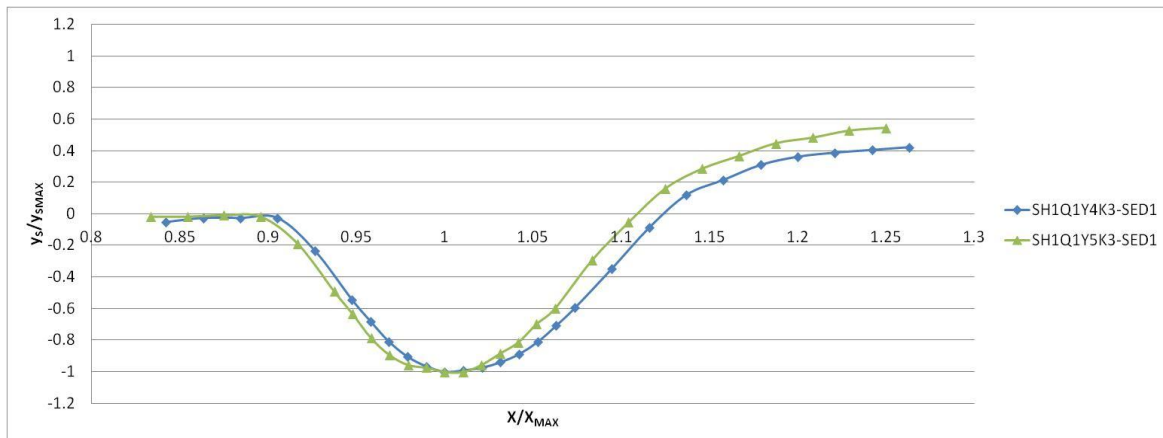
Akımın savak tipi olması durumunda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükünün de arttığı ve oyulma derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak deneylerde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla basınçlı ve savak tipi akım durumlarında maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni ise aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla küçülen tabliye altı akım hızının daha küçük maksimum oyulma çukuru derinliğine yol açması olarak açıklanabilir.

Köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm konumunda bulunması halinde  $Q_1=70$  lt/s'lik debi değerinde basınçlı akım için  $Y_1=20,0$  cm,  $Y_2=22,5$  cm,  $Y_3=25,0$  cm ve savak tipi akım için aynı debide yine  $Y_4=27,5$  cm,  $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm olmak üzere maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenmiş ve sırasıyla Şekil 4.7 ile Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.7.  $Q=70$  lt/s için basınçlı akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

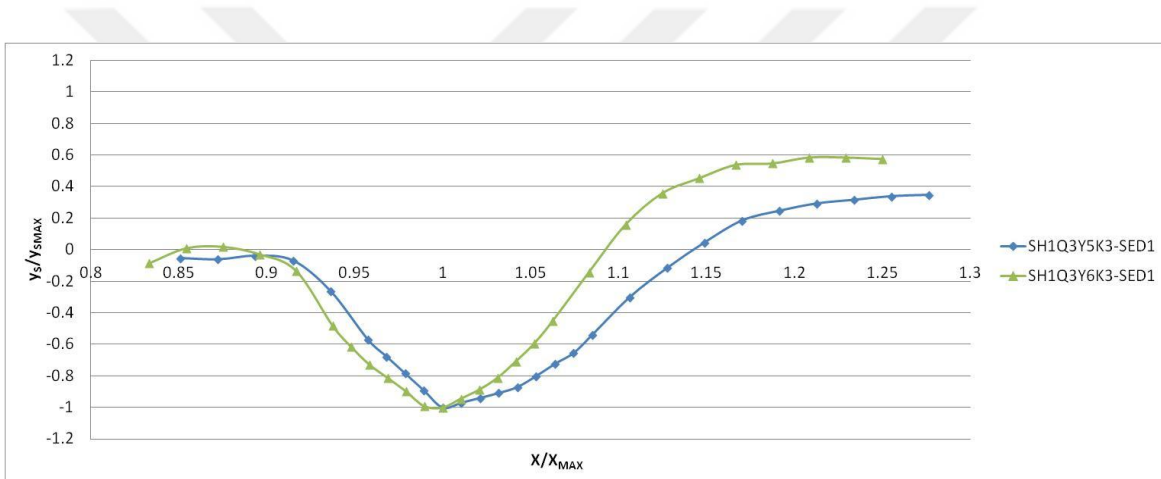
Şekil 4.7'de verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinde önemli bir değişim gözlenmemektedir.  $Y_1=20,0$  cm yaklaşım akım derinliğinde oyulma çukuru genişliğinin daha geniş, köprü tabliyesinin hem memba hem de mansap bölgesinde sediment taşınımının daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8.  $Q=70$  lt/s için savak tipi akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Şekil 4.8’de verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerine göre yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla oyulma çukuru az da olsa yine memba yönüne doğru ötelenmiştir.

Savak tipi akım durumunda, köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm konumunda bulunması halinde  $Q_3=90$  lt/s’lik debi için iki farklı yaklaşım akım derinliğinin ( $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm) oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenmiştir. Söz konusu debiye ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Mevcut laboratuvar koşullarında 90 lt/s’lik debi değerinde köprü geometrisi ve tabliyesi konumunda temiz su oyulması incelendiğinden basınçlı akım durumu ile çalışılmamıştır. Dolayısıyla sadece savak tipi akım durumu için yaklaşım akım derinliğinin etkisi incelenmiştir.

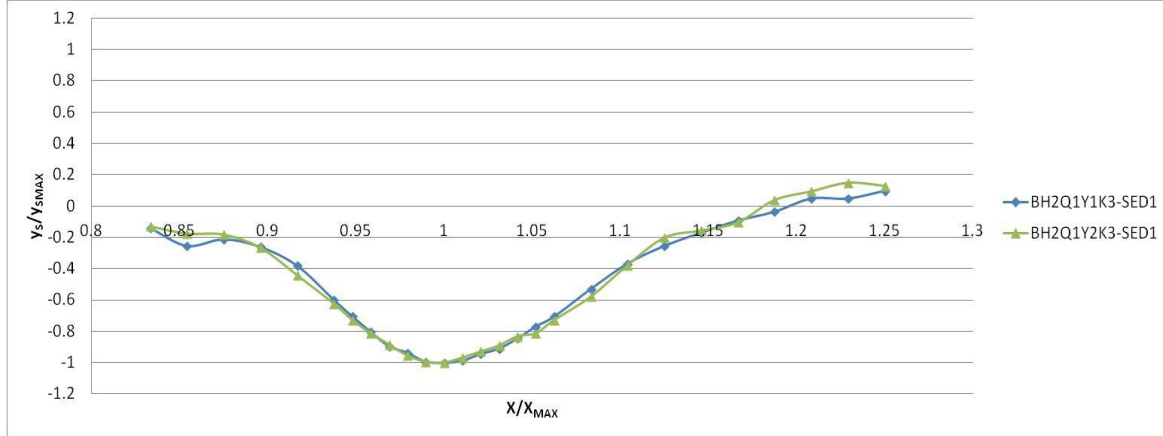


Şekil 4.9.  $Q=90$  lt/s için savak tipi akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Çizelge 4.3’e göre savak tipi akım durumunda  $Q_3=90$  lt/s’lik debi ve ince taban malzemesi için  $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm yaklaşım akım derinliğinde oyulma çukuru derinlikleri sırayla; 13,0 cm ve 10,6 cm olarak ölçülmüştür. Bu şartlar altında yaklaşım akım derinliğinin artması maksimum oyulma çukuru derinliğini yaklaşık olarak %23,00 oranında azaltmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilen farklı büyüklükteki debi değerlerinde savak tipi akım nedeniyle meydana gelen oyulma çukuru profilleri karşılaştırıldığında tabandaki oyulma davranışının benzerlik gösterdiği görülmektedir.

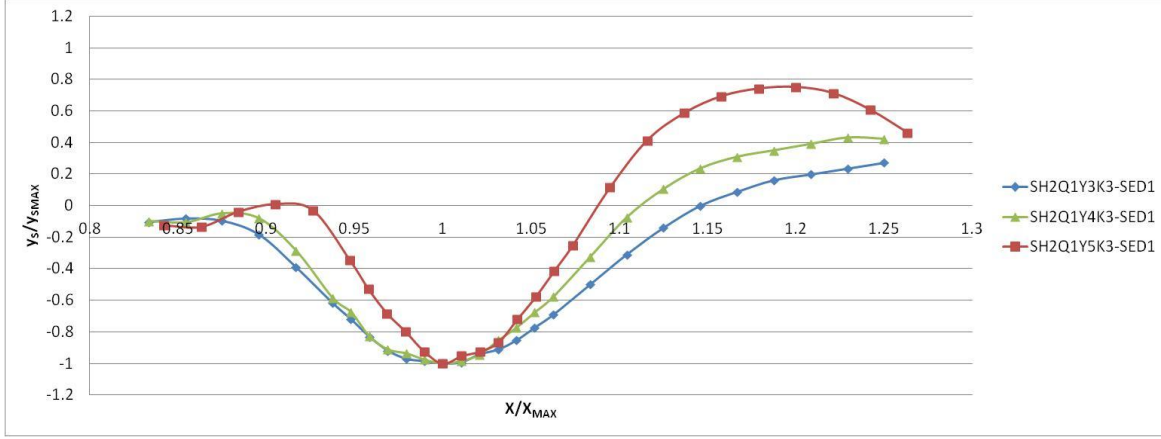
Basınçlı akım durumunda, köprü tabliyesinin  $H_2=17,5$  cm konumunda bulunması halinde  $Q_1=70$  lt/s’lik debi için iki ( $Y_1=20,0$  cm,  $Y_2=22,5$  cm) ve savak tipi akım durumunda aynı

debi için üç farklı yaklaşım akım derinliğinin ( $Y_3=25,0$  cm  $Y_4=27,5$  cm,  $Y_5=30,0$  cm) maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenmiştir (Bkz. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11).



Şekil 4.10.  $Q=70$  lt/s için basınçlı akım ve ince malzeme durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Çizelge 4.3'e göre basınçlı akım durumunda,  $Q_1=70$  lt/s'lik debi ve ince taban malzemesi durumunda  $Y_1=20,0$  cm ve  $Y_2=22,5$  cm yaklaşım akım derinliğinde maksimum oyulma çukuru derinlikleri sırayla; 14,2 cm, ve 15,4 cm olarak ölçülmüştür. Bu şartlarda yaklaşım akım derinliğinin oyulma çukuru derinliğine etkisinin çok az olduğu ve bu derinliğin artmasıyla oyulma çukuru derinliğinde yaklaşık %8,45 oranında artış olduğu görülmüştür. Burada 15,4 cm'lik oyulmanın daha önce de gözlemlendiği gibi su seviyesinin tam tabliye korkuluğu seviyesinde meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere basınçlı akım durumunda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri benzer oyulma çukuru genişliğine ve derinliğine sahiptir. Ancak savak tipi akım durumunda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla nispeten daha dar oyulma çukurları meydana gelmiştir.



Şekil 4.11. Q=70 lt/s ve ince malzeme için savak tipi akım durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

#### 4.2.3. Kiriş yüksekliği etkisi

Bilindiği üzere kanaldaki akımın köprü tabliyesi veya kirişleriyle temas etmesi durumunda akım basınçlı akım olarak tanımlanmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan ön deneylerde tabliyede giriş olmaması yani kanaldaki akımın tabliyeye tam dokunması durumunda basınçlı akımın meydana geldiği ancak tabanda neredeyse ayırt edilemeyecek kadar az sediment hareketi olduğu görülmüştür. Aynı şekilde 2,5 cm yüksekliğinde giriş olması durumunda da tabliye altında çok fazla oyulma gözlemlenmemiştir. Bu nedenle giriş yüksekliğinin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için  $K_2=5,0$  cm ve  $K_3=7,5$  cm yüksekliklerinde iki farklı giriş yüksekliği kullanılmıştır. Çizelge 4.4'te köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm konumlarında, farklı debi, yaklaşım akım derinliği ve taban malzemesi koşullarında giriş yüksekliğindeki değişimin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisinin en fazla olduğu basınçlı ve savak tipi akım durumlarındaki deney sonuçları verilmiştir.

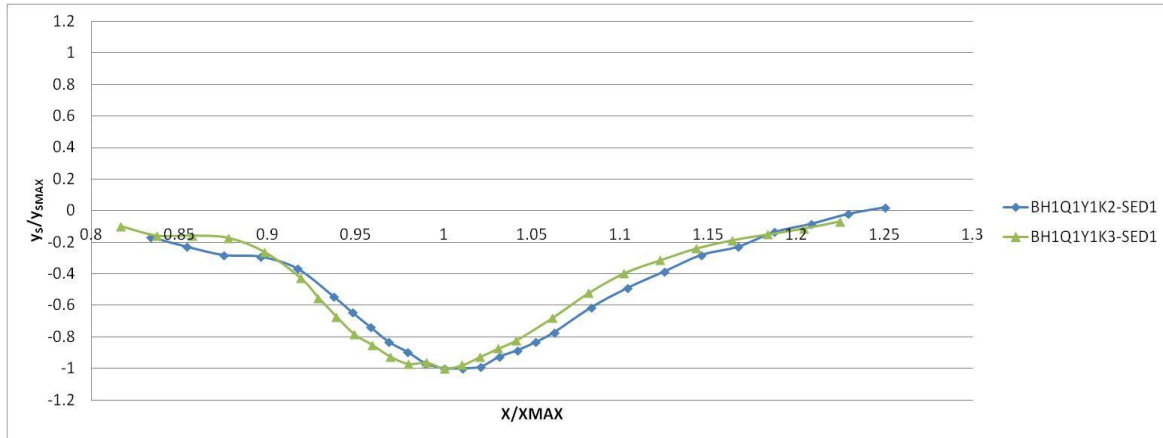
Çizelge 4.4. Kiriş yüksekliğindeki değişimin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Tabliye konumu (cm)	Debi (lt/s)	Yaklaşım akım derinliği (cm)	Fr <sub>a</sub> sayısı (-)	Medyan tane çapı (mm)	Akım durumu	Kiriş yüksekliği		Değişim yüzdesi (%)	
						K <sub>2</sub> (5,0 cm)	K <sub>3</sub> (7,5 cm)		
H <sub>1</sub> =20,0	70	Y <sub>1</sub> =20,0	0,250	1,1	Basınçlı	9,6	13,4	39,58	
				1,5	Basınçlı	5,4	8,8	62,96	
		Y <sub>2</sub> =22,5	0,209	1,1	Basınçlı	7,7	12,0	55,84	
				1,5	Basınçlı	3,8	8,9	134,21	
		Y <sub>3</sub> =25,0	0,179	1,1	Basınçlı	8,1	13,1	61,73	
				1,5	Basınçlı	6,6	8,3	25,76	
		Y <sub>4</sub> =27,5	0,155	1,1	Savaklı	7,9	11,6	46,84	
				1,5	Savaklı	1,5	7,6	406,67	
		Y <sub>5</sub> =30,0	0,136	1,1	Savaklı	4,7	11,2	138,30	
				1,5	Savaklı	-	-		
		Y <sub>6</sub> =32,5	0,121	1,1	Savaklı	4,1	5,9	43,90	
				1,5	Savaklı	-	-		
	80	Y <sub>3</sub> =25,0	0,204	1,1	Basınçlı	10,9	14,1	29,36	
				1,5	Basınçlı	5,6	10,3	83,93	
		Y <sub>4</sub> =27,5	0,177	1,1	Savaklı	8,5	13,0	52,94	
				1,5	Savaklı	3,3	8,1	145,45	
		Y <sub>5</sub> =30,0	0,155	1,1	Savaklı	5,6	10,5	87,50	
				1,5	Savaklı	-	-		
	Y <sub>6</sub> =32,5	0,138	1,1	Savaklı	3,2	9,0	181,25		
			1,5	Savaklı	-	-			
	90	Y <sub>5</sub> =30,0	0,175	1,1	Savaklı	7,7	13,0	68,83	
				1,5	Savaklı	2,9	8,0	175,86	
		Y <sub>6</sub> =32,5	0,155	1,1	Savaklı	6,6	10,6	60,61	
				1,5	Savaklı	1,0	6,1	510,00	
H <sub>2</sub> =17,5	70	Y <sub>1</sub> =20,0	0,250	1,1	Basınçlı	12,3	14,2	15,45	
				1,5	Basınçlı	6,8	12,0	76,45	
		Y <sub>2</sub> =22,5	0,209	1,1	Basınçlı	9,8	15,4	57,14	
				1,5	Basınçlı	7,3	12,5	71,23	
		Y <sub>3</sub> =25,0	0,179	1,1	Savaklı	12,1	13,6	12,40	
				1,5	Savaklı	4,0	8,9	122,50	
		Y <sub>4</sub> =27,5	0,155	1,1	Savaklı	6,5	12,3	89,23	
				1,5	Savaklı	2,3	7,7	234,78	
		Y <sub>5</sub> =30,0	0,136	1,1	Savaklı	5,0	10,4	108,00	
				1,5	Savaklı	-	-		
		80	Y <sub>3</sub> =25,0	0,204	1,1	Savaklı	13,7	14,4	5,11
					1,5	Savaklı	5,8	11,4	96,55
	Y <sub>4</sub> =27,5		0,177	1,1	Savaklı	8,7	13,6	56,32	
				1,5	Savaklı	2,5	11,1	344,00	
	Y <sub>5</sub> =30,0		0,155	1,1	Savaklı	7,6	12,9	69,74	
				1,5	Savaklı	2,9	7,1	144,83	
	90	Y <sub>5</sub> =30,0	0,175	1,1	Savaklı	8,5	13,2	55,29	
				1,5	Savaklı	2,9	8,0	175,86	

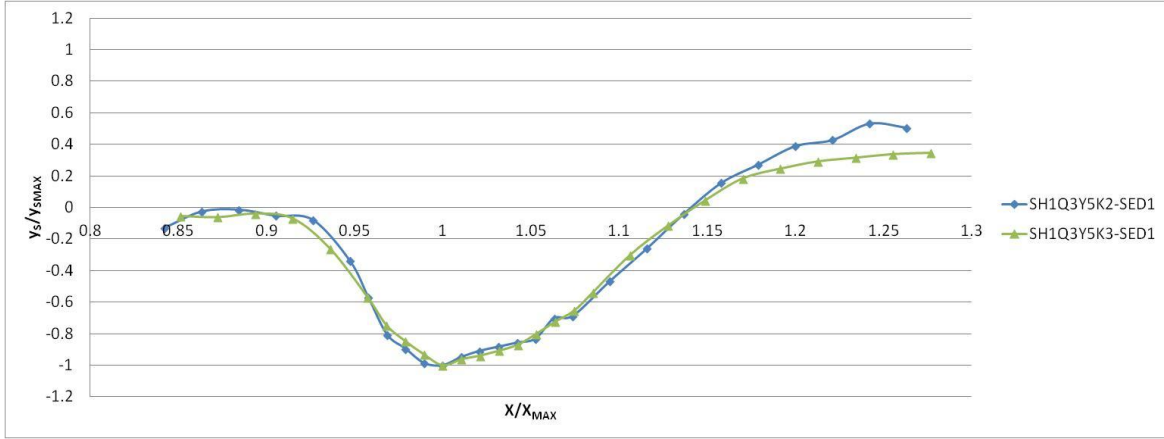
Çizelge 4.4'te belirtilen deney koşulları altında kiriş yüksekliklerinin 5,0 cm'den 7,5 cm'e artırılmasıyla köprü tabliyesi altındaki düşey daralmanın büyümesi sonucunda meydana gelmiş maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile değişim yüzdeleri verilmiştir. Sonuçlara göre kiriş yüksekliğinin artmasıyla tüm deney setlerinde maksimum oyulma çukuru derinliklerinde artış olduğu görülmüştür. Özellikle oyulmanın daha az gerçekleştiği

$H_1=20,0$  cm tabliye konumunda, tabanda 1,5 mm medyan tane çapına sahip malzemenin olduğu 70 lt/sn ve 90 lt/sn'lik debilerde sırasıyla oyulma çukuru derinliklerinde %406,67 ve %510,00'a varan ciddi artışların olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu büyük farkların özellikle savak tipi akım durumunda ve 7,5 cm'lik giriş yüksekliğinde meydana geldiği görülmüştür. Bu durum giriş yüksekliğinin artmasıyla tabliye altındaki hız alanının önemli derecede değiştiği ve taban gerilmelerinin arttığını göstermiştir. Lin ve diğ. (2012) yaptıkları deneysel çalışmada düz kirişli bir köprü tabliyesi altındaki akım alanlarını ve kirişler arasındaki boşluklarda etkili olan vorteksleri incelemiştir. Araştırmacıların bulguları ve çalışma ışığında yapılan ölçümlerle giriş yüksekliğinin akım yapısını önemli derecede etkilediği ve giriş yüksekliğinin artmasıyla meydana gelen akım yapısının oyulmayı artırdığı tespit edilmiştir.

Köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm konumunda, 1,1 mm'lik medyan tane çapına sahip taban malzemesi,  $Q_1=70$  lt/s'lik debi ile basınçlı akım olması durumunda Şekil 4.12'de  $Y_1=20,0$  cm'lik ve Şekil 4.13'te savak akım tipinde  $Q_3=90$  lt/s'lik debi ve  $Y_5=30,0$  cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde 5,0 cm ve 7,5 cm giriş yüksekliklerinde köprü tabliyesi altında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir.



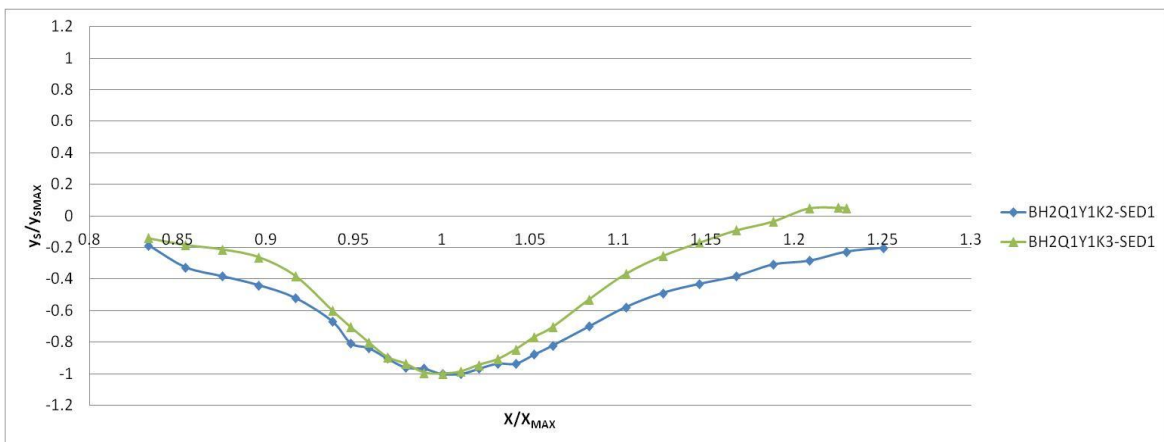
Şekil 4.12. Basınçlı akım durumunda  $Q=70$  lt/s'de 5,0 cm ve 7,5 cm giriş yüksekliklerinde ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 4.13. Savak tipi akım durumunda  $Q=90$  lt/s'de 5,0 cm ve 7,5 cm kiriş yüksekliklerinde ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Şekil 4.12 ve 4.13'ten görüldüğü üzere gerek basınçlı gerekse savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru profillerinde kiriş yüksekliğinin artması halinde ciddi bir değişiklik meydana gelmemiştir.

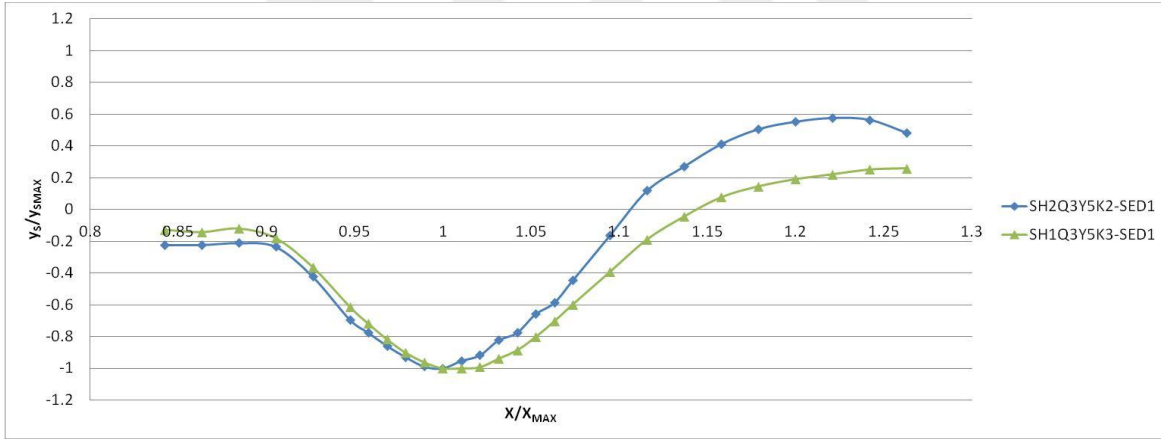
Şekil 4.14'te ise aynı şartlar altında köprü tabliyesinin  $H_2=17,5$  cm konumunda ve  $Y_1=20,0$  cm yaklaşım akım derinliğinin olması durumunda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri 5,0 cm ve 7,5 cm kiriş yükseklikleri için verilmiştir. Çizelge 4.4'e göre bu şartlar altında 5,0 cm ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliklerinde maksimum oyulma çukuru derinlikleri sırasıyla 12,3 cm ve 14,2 cm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14. Basınçlı akım  $Q=70$  lt/s 5,0 cm ve 7,5 cm kiriş yüksekliklerinde, ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Şekil 4.12’te verilen oyulma çukuru profilleri ile Şekil 4.14’te verilen maksimum oyulma çukuru profilleri karşılaştırıldığında köprü tabliyesinin  $H_2=17,5$  cm konumunda oyulma çukuru genişliğinin arttığı görülmektedir. Ayrıca köprü tabliyesinin altındaki düşey daralmanın artması kiriş yüksekliğinden kaynaklanan daralmanın etkisini azaltmakta ve maksimum oyulma çukuru derinliklerini her iki kiriş yüksekliği için birbirine yaklaştırmaktadır.

Şekil 4.15’te ise aynı şartlar altında köprü tabliyesinin  $H_2=17,5$  cm konumunda  $Q_3=90$  lt/s’lik debi ve  $Y_5=30,0$  cm’lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Şekil 4.15’te verilen oyulma çukuru profillerine göre en fazla oyulma genişliği 7,5 cm kiriş yüksekliğinin kullanıldığı durumda meydana gelmiş, kiriş yüksekliğinin oyulma çukuru derinliğini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.15. Savak tipi akım  $Q=90$  lt/s 5,0 cm ve 7,5 cm kiriş yüksekliklerinde ince taban malzemesi kullanılması halinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Savak tipi akım durumunda aynı şartlar altındaki Şekil 4.13 ile Şekil 4.15’te verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinde taşıma ve birikme bölgelerinin davranışının birbirine benzerlik gösterdiği, maksimum oyulma çukuru derinliklerinin de birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Savak tipi akım için kiriş yüksekliği etkisinin köprü tabliyesi konum etkisinden daha etkili olduğu görülmüştür. Basınçlı akım durumunda aynı şartlar altında Şekil 4.12 ile Şekil 4.14’te verilen oyulma çukuru profillerinde 7,5 cm kiriş yüksekliğinde taşıma ve birikme bölgelerinin davranışı birbirine benzerlik göstermekte, 5,0 cm’lik kiriş yüksekliğinde köprü tabliyesi konumundan

kaynaklanan daralmadan oyulma çukuru profiline taşıma ve birikme bölgesi etkilenmekte ve böylece daha geniş bir oyulma çukuru elde edilmektedir. Basınçlı akım durumunda da giriş yüksekliğinin etkisinin köprü tabliyesinin konum etkisinden daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.2.4. Taban malzemesi medyan tane çapı etkisi

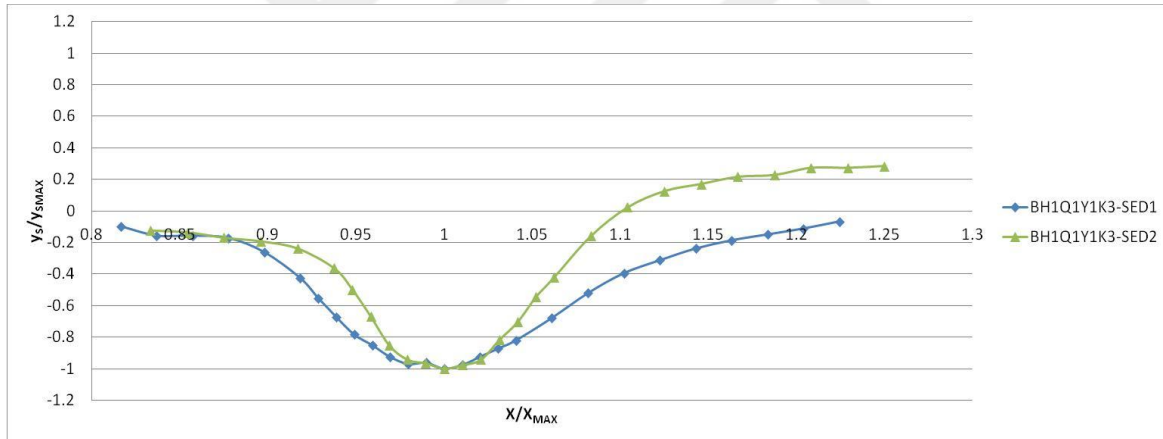
Katı madde büyüklüğünün maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisini inceleyebilmek için kanal tabanında medyan tane çapı ( $D_{50}$ ) 1,1 mm ve 1,5 mm olan iki farklı malzeme kullanılmıştır. Çizelge 4.5'te köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm konumlarında 7,5 cm giriş yüksekliğinde, farklı debi ve yaklaşım akım derinliklerinde yani  $Fr_a$  sayılarında maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Katı madde tane çapının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Tabliye konumu (cm)	Debi (lt/s)	$Fr_a$ sayısı (-)	Yaklaşım akım derinliği (cm)	Akım tipi	Medyan tane çapı		Değişim yüzdesi (%)
					1,1 mm	1,5 mm	
$H_1=20,0$	70	0,250	$Y_1=20,0$	Basınçlı	0,134	0,088	-65,67
		0,209	$Y_2=22,5$	Basınçlı	0,120	0,089	-74,17
		0,179	$Y_3=25,0$	Basınçlı	0,131	0,083	-63,36
		0,155	$Y_4=27,5$	Savaklı	0,116	0,076	-65,52
		0,136	$Y_5=30,0$	Savaklı	0,112	-	-
		0,121	$Y_6=32,5$	Savaklı	0,059	-	-
	80	0,204	$Y_3=25,0$	Basınçlı	0,141	0,103	-73,05
		0,177	$Y_4=27,5$	Savaklı	0,130	0,081	-62,31
		0,155	$Y_5=30,0$	Savaklı	0,105	-	-
		0,138	$Y_6=32,5$	Savaklı	0,09	-	-
	90	0,175	$Y_5=30,0$	Savaklı	0,130	0,080	-61,54
		0,155	$Y_6=32,5$	Savaklı	0,106	0,061	-57,55
$H_2=17,5$	70	0,250	$Y_1=20,0$	Basınçlı	0,142	0,120	-84,51
		0,209	$Y_2=22,5$	Basınçlı	0,154	0,125	-81,17
		0,179	$Y_3=25,0$	Savaklı	0,136	0,089	-65,44
		0,155	$Y_4=27,5$	Savaklı	0,123	0,077	-62,60
		0,136	$Y_5=30,0$	Savaklı	0,104	-	-
	80	0,204	$Y_3=25,0$	Savaklı	0,144	0,114	-79,17
		0,177	$Y_4=27,5$	Savaklı	0,136	0,111	-81,62
		0,155	$Y_5=30,0$	Savaklı	0,129	0,071	-55,04
	90	0,175	$Y_5=30,0$	Savaklı	0,132	0,080	-60,61

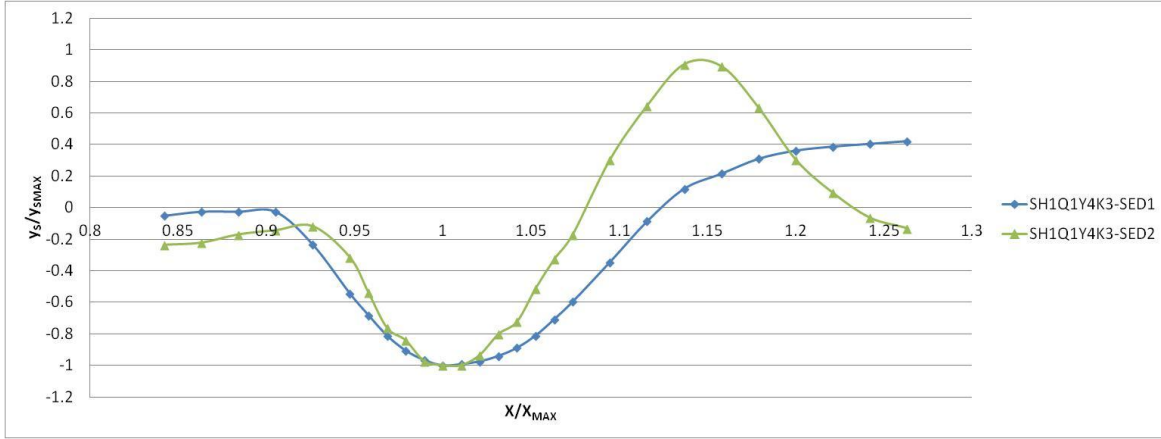
Çizelge 4.5'te verilen deney sonuçları karşılaştırıldığında medyan tane çapı 1,1 mm olan sedimentte maksimum oyulma çukuru derinliği hem basınçlı akım hem de savak tipi akım durumlarında daha fazla olmuştur. Medyan tane çapının 1,1 mm'den 1,5 mm'ye artması halinde basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinin yaklaşık %65 ile %85 oranında, savak tipi akım durumunda ise yaklaşık %60 ile %80 oranında azaldığı görülmüştür. Sediment medyan tane çapının maksimum oyulma çukuru derinliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu saptanmıştır.

Köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm konumunda,  $Q_1=70$  lt/s'lik debi ve 7,5 cm kiriş yüksekliğinde olması durumunda Şekil 4.16 yaklaşım akım derinliğinin  $Y_1=20$  cm olması halinde basınçlı akım, Şekil 4.17 ise yaklaşım akım derinliğinin 27,5 cm olması halinde savak tipi akım şartlarında meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerini göstermektedir.



Şekil 4.16. Basınçlı akım ve farklı taban malzemesi durumunda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Çizelge 4.5'e göre basınçlı akım durumunda, maksimum oyulma çukuru derinliği ince taban malzemesi için 13,4 cm, kaba taban malzemesi için 8,8 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.16'da verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinde kaba malzemeye ait oyulma çukuru genişliğinin çok dar olduğu gözlemlenmiştir. İnce malzemenin olması durumunda ise sediment taşınımına bağlı olarak oyulma çukuru genişliği çok daha fazla olmuştur.

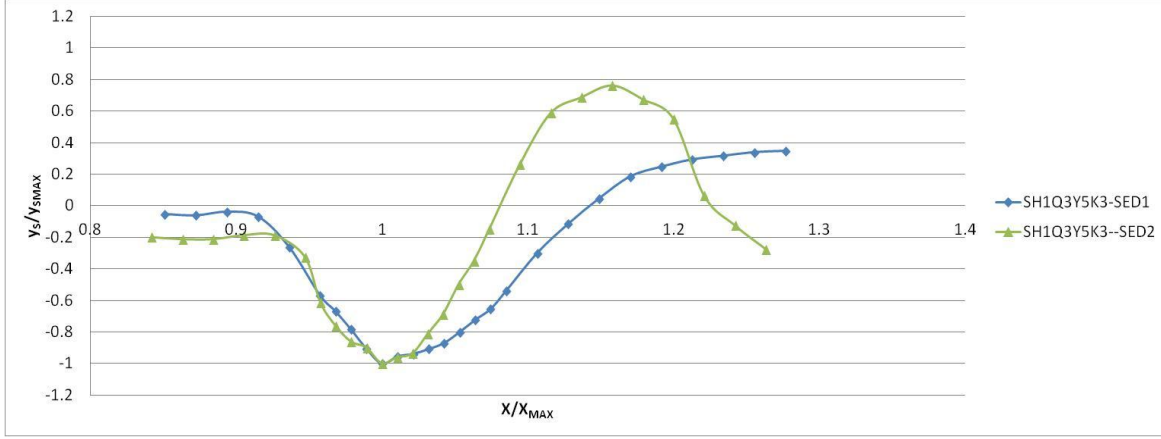


Şekil 4.17. Savak tipi akım ve farklı taban malzemesi durumunda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Savak tipi akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği medyan tane çapı 1,1 mm olan malzeme için 11,6 cm, medyan tane çapı 1,5 mm olan malzeme için ise 7,6 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.17’de verilen oyulma çukuru profillerinde en az oyulma çukuru genişliği 1,5 mm’lik malzemede meydana gelmiştir. İlgili sedimente ait birikme bölgesi köprü tabliyesi mansabı çıkışına çok yakın dar bir bölgede oluşmuştur. Akım, köprü tabliyesi nedeniyle meydana gelen daralma etkisinden çıktığı anda sediment depolaması başlamıştır.

Çalışma kapsamında ayrıca deneylerde kullanılmış olan medyan tane çapı ( $D_{50}$ ) 1,1 mm ve 1,5 mm olan iki malzemeden numuneler alınarak 3 eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu malzemelerin sırasıyla içsel sürtünme açıları  $32,44^{\circ}$  ile  $35,44^{\circ}$  olarak belirlenmiştir. Deney sonrası meydana gelen oyulma çukuru şev açıları ise medyan tane çapı ( $D_{50}$ ) 1,1 mm ve 1,5 mm olan iki malzeme için sırasıyla ortalama  $14,20^{\circ}$  ile  $14,50^{\circ}$  olarak hesaplanmıştır. Düşey yönde daralmaya bağlı olarak her iki malzemedeki taşınım nedeniyle oyulma çukuru şev açılarının önemli miktarlarda azaldığı ve içsel sürtünme açısından daha düşük şev açıları elde edildiği görülmüştür.

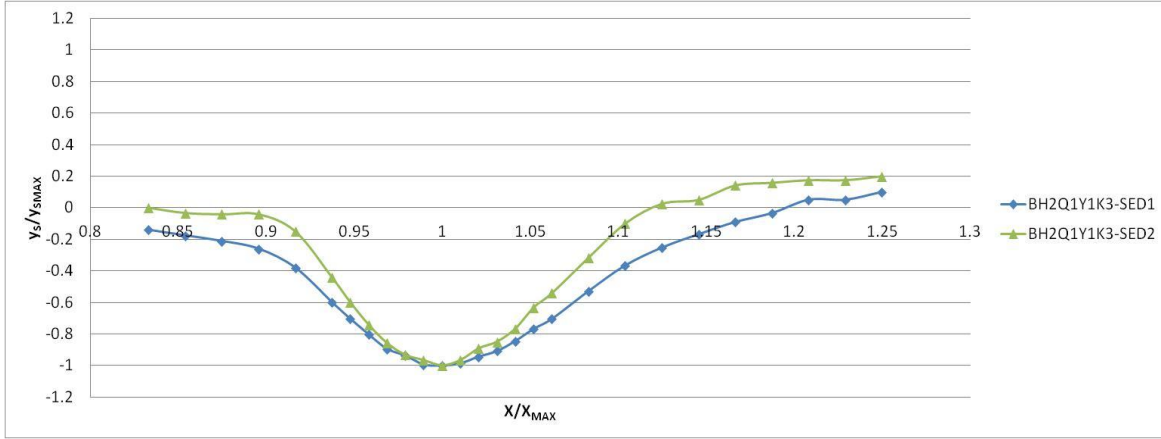
Köprü tabliyesinin  $H_1=20,0$  cm konumunda,  $Q_3=90$  lt/s’lik debi için savak tipi akım durumunda en fazla oyulma derinliğinin olduğu  $Y_5=30,0$  cm yaklaşım derinliğinde ince sediment için 7,5 cm kiriş yüksekliğindeki köprü tabliyesi altındaki oyulma çukuru Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Savak tipi akım ve farklı taban malzemesi durumunda  $Q=90$  lt/s ve 7,5 cm kiriş yüksekliğinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

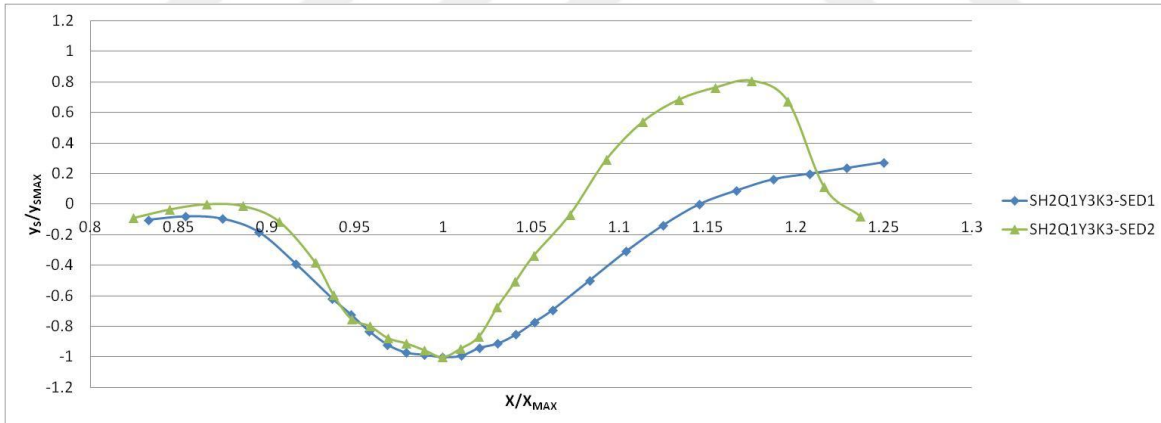
Şekil 4.18'de verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinde en az oyulma çukuru genişliğinin  $D_{50}=1,5$  mm'lik çapa sahip sedimentte olduğu görülmüştür. Savak tipi akım için Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri incelendiğinde hem ince malzeme hem de kaba malzemenin farklı akım koşullarında oyulma çukuru profillerinin birbirine benzer davranış eğiliminde olduğu görülmüştür. Köprü tabliyesi altında daralmış kesitte akımın katı madde taşıma kapasitesi ortalama akım hızının artmasına bağlı olarak artmıştır. Ancak savak tipi akım durumunda akımın kaba malzeme taşıma kapasitesi, kesitin genişlediği yani akımın serbest hale geldiği bölgede ani olarak azalmış ve kaba malzemeyi ince malzemede olduğu gibi daha mansaba taşıyamamıştır. Bu nedenle katı madde birikme bölgesi hemen köprünün mansap bölgesinde oluşmuştur. Bu durumda ince taban malzemesine kıyasla daha dar bir oyulma çukuru meydana gelmesine neden olmuştur.

Köprü tabliyesinin  $H_2=17,5$  cm konumunda  $Q_1=70$  lt/s'lik debi, basınçlı ve savak tipi akımlar için ince ve kaba sediment durumlarında köprü tabliyesi altındaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Köprü tabliye konumunun tabana yaklaştırılmasıyla artan daralma ince sedimentten daha ziyade kaba sedimentin oyulma çukuru profilini önemli derecede etkilemiştir. Aynı koşullarda köprü tabliyesi altındaki açıklıkta meydana gelen değişim ince taban malzemesinden daha çok kaba taban malzemesinin oyulma çukuru derinliğini artırmıştır.



Şekil 4.19. Basınçlı akım ve farklı taban malzemesi durumunda  $Q=70$  lt/s ve 7,5 cm kiriş yüksekliğinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Şekil 4.20’de verilen oyulma çukuru profillerinde en az oyulma çukuru genişliğinin kaba sedimentte olduğu gözlenmektedir. Kaba sedimente ait depolama bölgesi köprü tabliyesi mansabı çıkışına çok yakın dar bir bölgede oluşmuştur. Oyulma çukuru profilleri diğer savak tipi akım koşulları için elde edilen oyulma çukuru profilleriyle aynı davranışı göstermiştir (Bkz. Şekil 4.17 ve 4.18 ).



Şekil 4.20. Savak tipi akımda farklı taban malzemesi durumunda  $Q=70$  lt/s ve 7,5 cm kiriş yüksekliğinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

### 4.3. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Davranışlarının İncelenmesi

Basınçlı ve savak tipi akımların oyulma çukuru derinliği ve şekli üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için aynı yaklaşım akım derinliğinde ve şartlarda her iki akım tipi için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde köprü tabliyesi korkuluk yüksekliği artırılarak aynı yaklaşım akım derinliğinde hem basınçlı hem de savak tipi akım elde edilmiş ve köprü

tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve şekilleri incelenmiştir.

Basınçlı ve savak tipi akımların incelendiği deneyler ve ölçüm sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Deneyler  $H_1=20,0$  cm tabliye konumu, 1,1 mm ile 1,5 mm'lik medyan tane çapına sahip sediment ve farklı giriş yükseklikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.6'da oyulma çukuru derinliğinin maksimum olduğu  $H_1=20,0$  cm'lik köprü tabliye konumunda ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiş deney sonuçları görülmektedir.

Köprü tabliye modelinin  $H_1=20,0$  cm'e yerleştirilmesi ve yaklaşım akım derinliğinin 25,0 cm'den büyük olması durumunda savak tipi akım meydana gelmektedir. Bu nedenle korkuluğa yerleştirilen ek parça ile 25,0 cm'den büyük yaklaşım akım derinliklerinde de basınçlı akım elde edilmesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.6'da verilen değerler incelendiğinde  $Y_4=27,5$  cm'lik yaklaşım akım derinliğinde her iki akımın da benzer oyulma derinlikleri meydana getirdiği ancak yaklaşım akım derinliğinin büyümesiyle basınçlı akımlarda oyulma çukuru derinliğinde çok ciddi artışlar olduğu görülmüştür. Basınçlı akım durumunda hemen köprü tabliyesi membaında artan yaklaşım akım derinliğiyle akımın potansiyel enerjisi artmaktadır. Dolayısıyla köprü tabliyesi altından geçen akımın hızı taban kayma gerilmeleri ve dolayısıyla tabliye altında tabanda oluşan oyulma çukuru derinliği artmıştır. Debinin artması durumunda her iki akım tipinde de oyulma çukuru derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Savak tipi akımlarda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükü yani köprü tabliyesi üzerinden savaklanan debi artmış, süreklilik göz önüne alındığında köprü tabliyesi altından geçen debi ve dolayısıyla akım hızı azalmıştır. Bu durumda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği deney sonuçlarından da görüldüğü üzere azalmıştır.

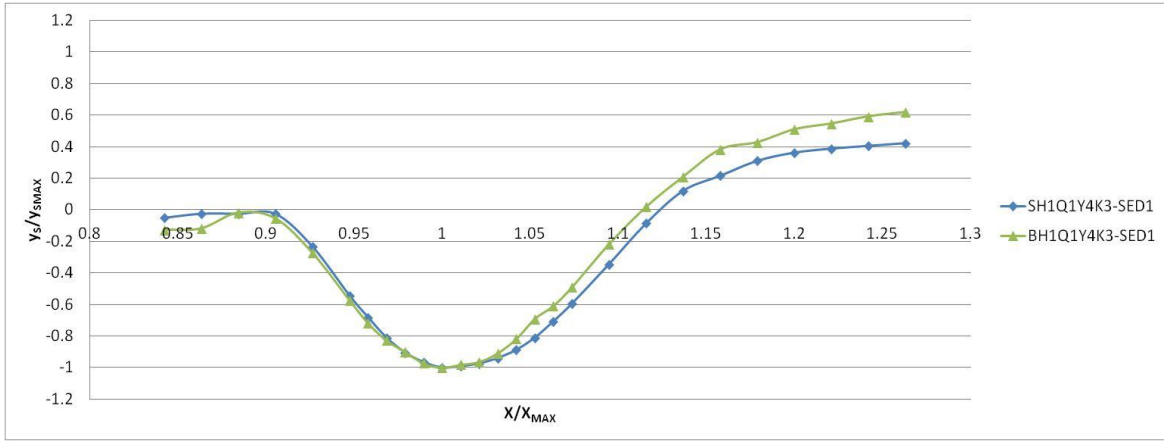
Çizelge 4.6'ya göre tabliye konumunun  $H_1=20,0$  cm olduğu durumda 70 lt/s için maksimum oyulma çukuru derinliği  $Y_4=27,5$  cm yaklaşım derinliğinde savak tipi akım durumu için 11,6 cm, basınçlı akım durumu için 11,0 cm olarak ölçülmüştür. Aynı koşullarda debinin artmasıyla yaklaşım akım hızı ve oyulma çukuru derinliği artmış ancak basınçlı akım durumundaki oyulma çukuru derinliği savak tipi akıma kıyasla daha büyük olmuştur. Bu durum yaklaşım akım hızının artmasıyla basınçlı akım tipinin oyulma çukuru

derinliği üzerindeki etkisinin daha da arttığını göstermiştir. Özellikle tabanda ince malzeme olması halinde oyulma çukuru derinliğini oldukça artırmıştır.

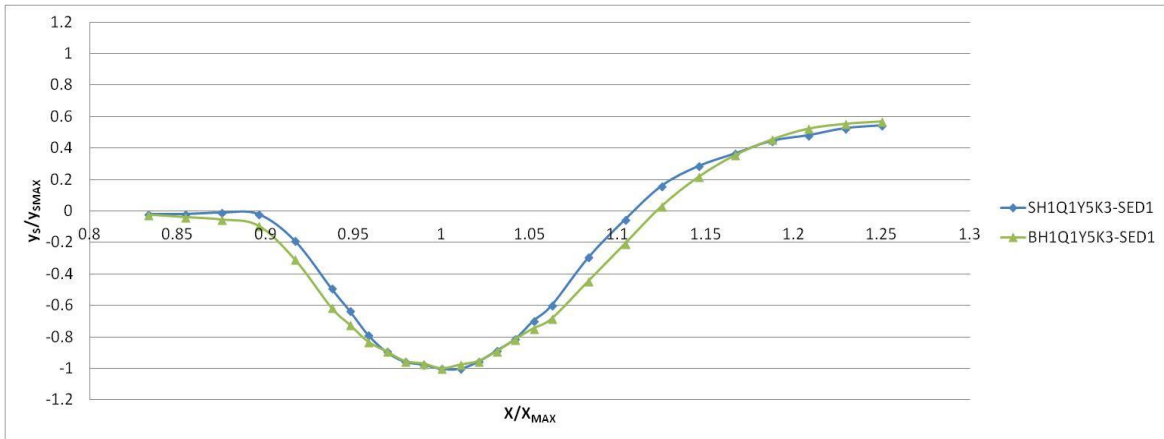
Çizelge 4.6. Basınçlı ve savak tipi akımların neden olduğu maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Tabliye konumu (cm)	Debi (lt/s)	Fr <sub>a</sub> sayısı (-)	Yaklaşım akım derinliği (cm)	Medyan tane çapı (mm)	Kiriş yüksekliği (cm)	Basınçlı	Savaklı	Değişim yüzdesi (%)	
						y <sub>s</sub> (cm)	y <sub>s</sub> (cm)		
H <sub>1</sub> =20,0	70	0,155	Y <sub>4</sub> =27,5	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	7,2	7,9	-8,86	
					K <sub>3</sub> =7,5	11,0	11,6	-5,17	
				1,5	K <sub>2</sub> =5,0	1,5	1,5	0,00	
		0,136	Y <sub>5</sub> =30,0	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	8,3	4,7	76,60	
					K <sub>3</sub> =7,5	13,0	11,2	16,07	
				1,5	K <sub>2</sub> =5,0	-	-	-	
	0,121		Y <sub>6</sub> =32,5	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	7,5	4,1	82,93	
					K <sub>3</sub> =7,5	11,8	5,9	100,00	
				1,5	K <sub>2</sub> =5,0	-	-	-	
		80	0,177	Y <sub>4</sub> =27,5	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	8,7	8,5	2,50
						K <sub>3</sub> =7,5	13,0	13,0	0,00
					1,5	K <sub>2</sub> =5,0	5,9	3,3	78,79
	0,155		Y <sub>5</sub> =30,0	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	10,5	5,6	87,50	
					K <sub>3</sub> =7,5	13,4	10,5	27,62	
				1,5	K <sub>2</sub> =5,0	4,7	-	-	
			0,138	Y <sub>6</sub> =32,5	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	10,1	3,2	215,62
						K <sub>3</sub> =7,5	13,3	9,0	47,78
					1,5	K <sub>2</sub> =5,0	4,8	-	-
	90		0,175	Y <sub>5</sub> =30,0	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	11,9	7,7	54,55
						K <sub>3</sub> =7,5	16,5	13,0	26,92
					1,5	K <sub>2</sub> =5,0	7,9	2,9	172,41
		0,155	Y <sub>6</sub> =32,5	1,1	K <sub>2</sub> =5,0	14,2	6,6	115,15	
					K <sub>3</sub> =7,5	17,3	10,6	63,21	
				1,5	K <sub>2</sub> =5,0	7,6	1,0	660,00	
					K <sub>3</sub> =7,5	12,1	6,1	98,36	

Şekil 4.21’de, basınçlı ve savak tipi akım durumlarında,  $D_{50}=1,1$  mm medyan tane çapındaki taban malzemesi, 27,5 cm’lik yaklaşım akım derinliği,  $Q=70$  lt/s’lik debi ile 7,5 cm kiriş yüksekliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Şekil 4.22’de ise aynı koşullar altında  $Y_5=30,0$  cm’lik yaklaşım akım derinliği olması durumunda oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Buna göre akım tipinin değişimi oyulma çukuru derinliğindeki gibi çukur profilinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır.



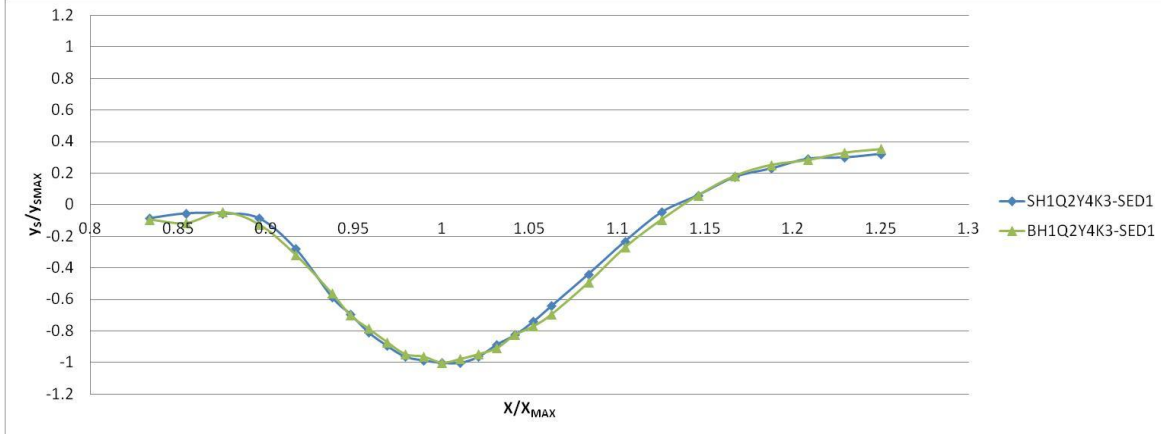
Şekil 4.21. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında, 27,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



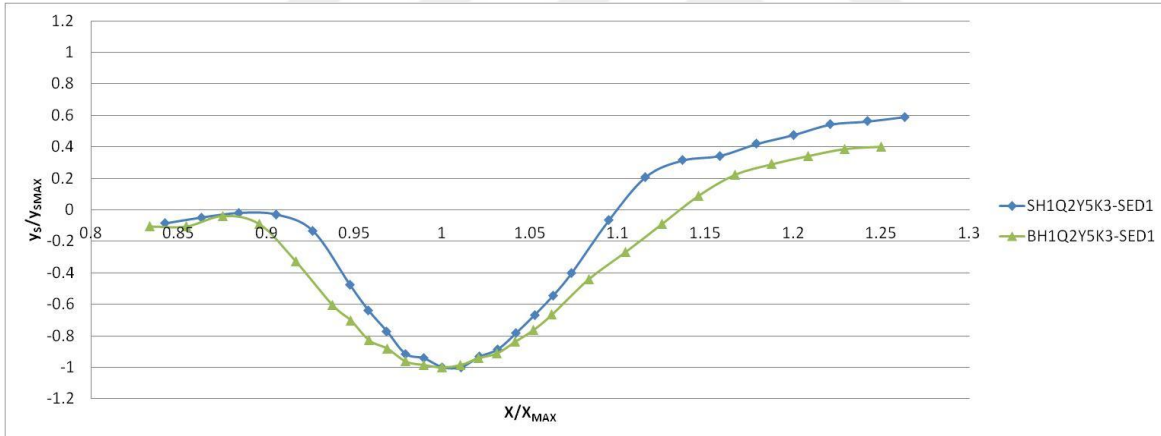
Şekil 4.22. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Basınçlı ve savak tipi akım durumları için  $Y_4=27,5$  cm’lik yaklaşım akım derinliği,  $Q=80$  lt/s’lik debi ve 7,5 cm kiriş yüksekliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri  $D_{50}=1,1$  mm için Şekil 4.23’te, aynı koşullarda  $Y_5=30,0$  cm’lik yaklaşım

akım derinliği durumunda oluşan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, 27,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

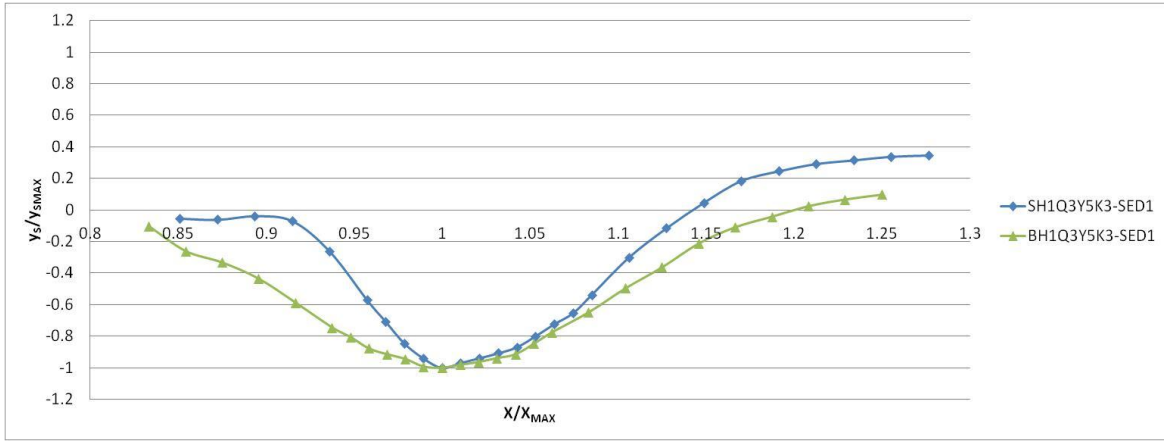


Şekil 4.24. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, Y5=30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

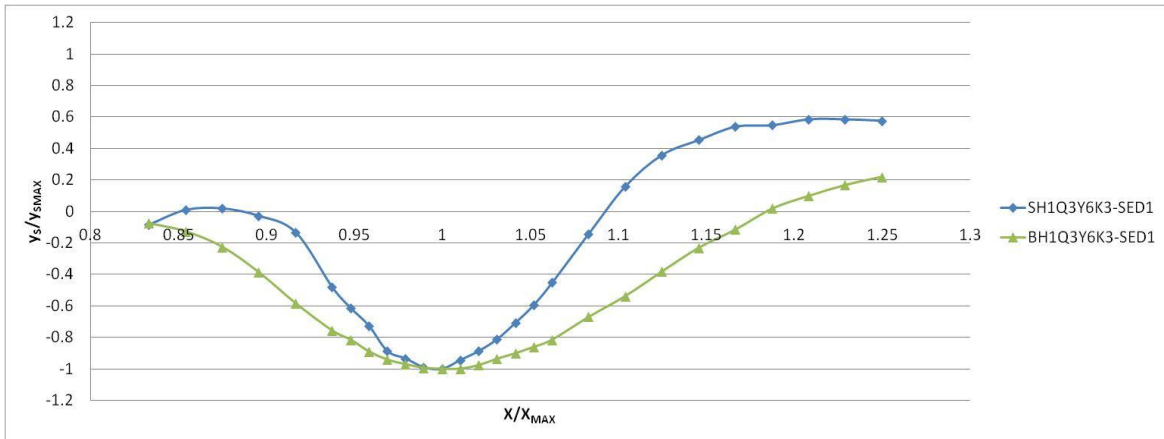
Şekil 4.23'te görüldüğü üzere  $Y_4=27,5$  cm'lik yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarında elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinde akım türündeki değişimin oyulma çukuru genişliğine ve derinliğine etkisinin çok küçük olduğu ve çukur profillerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Yaklaşım akım derinliğinin  $Y_5=30,0$  cm'e artması durumunda ise basınçlı akımın oyulma çukuru genişliğini artırdığı Şekil 4.24'te görülmüştür. Yaklaşım akım derinliğindeki artışla basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altındaki akımın katı madde taşınım kapasitesi

artmış ve böylece savak tipi akıma göre daha fazla oyulma çukuru derinliği elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 4.6).

Aynı köprü tabliyesi konumunda Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da sırasıyla 30,0 cm ve 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde  $D_{50}= 1,1$  mm'lik taban malzemesi için basınçlı ve savak tipi akım durumlarında,  $Q=90$  lt/s'lik ve 7,50 cm kiriş yüksekliğinde maksimum oyulma çukuru profilleri verilmektedir.



Şekil 4.25. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

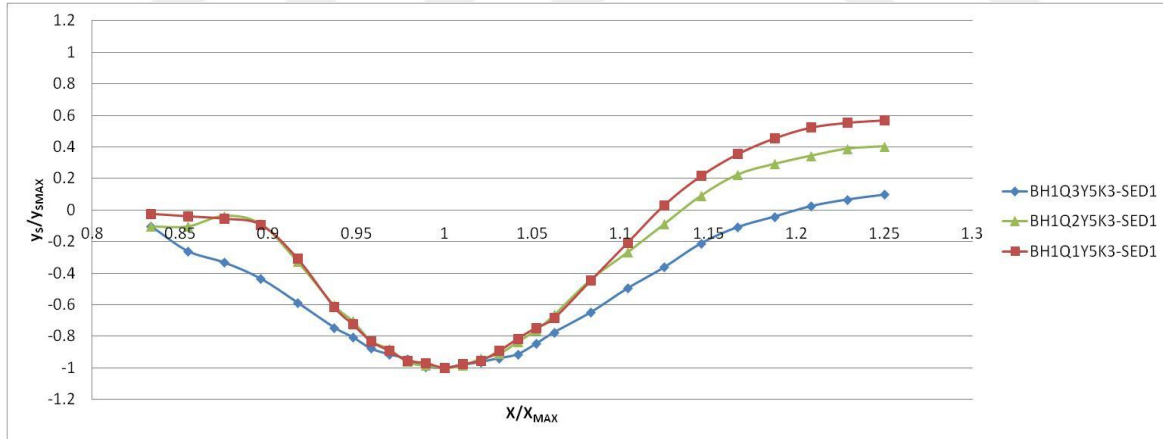


Şekil 4.26. Basınçlı ve savak tipi akım durumunda, 32,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

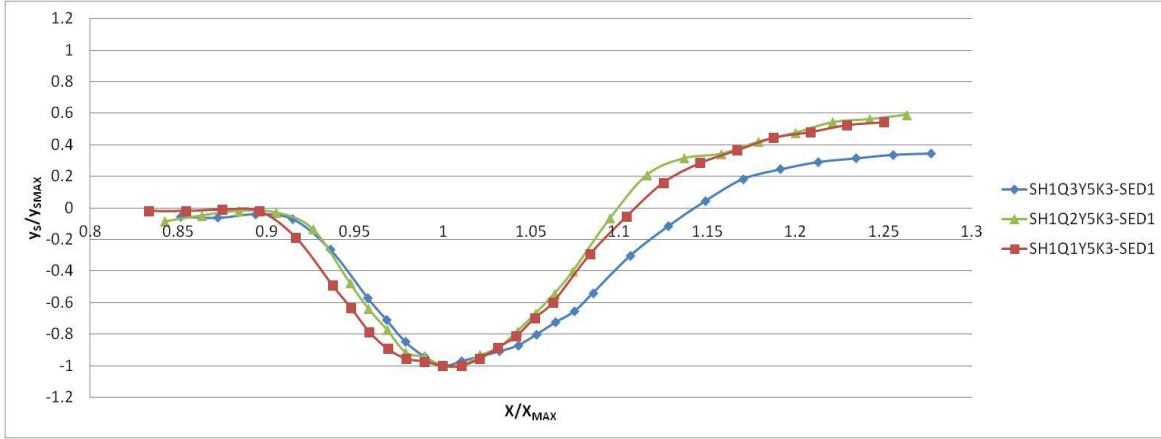
Oyulma çukuru profilleri her iki akım durumu için karşılaştırıldığında oyulma çukuru genişliğinin basınçlı akım durumunda daha büyük olduğu Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da görülmüştür. Özellikle yaklaşım akım derinliğinin  $Y_6=32,5$  cm'e yükseltilmesi durumunda basınçlı akımın etkisiyle maksimum oyulma çukuru derinliği %63,21 oranında artmış ve

oyulma çukuru profilleri karşılaştırıldığında oyulma çukuru genişliğinin basınçlı akımda çok ciddi şekilde arttığı Şekil 4.26'da görülmüştür. Yaklaşım akım derinliklerinin artırılması durumunda basınçlı akımın, savak tipi akıma kıyasla oyulma çukuru profiline etkisi de artmıştır.

Sonuç olarak aynı koşullar altında basınçlı akım tipinin savak tipi akıma göre hem oyulma çukuru derinliğini hem de şeklini daha çok etkilediği görülmüştür. Özellikle yaklaşım akım derinliğinin artırıldığı  $Y_5=30,0$  cm ve  $Y_6=32,5$  cm derinliklerinde basınçlı akım tipinin maksimum oyulma çukuru derinliklerinin artışında ciddi etkisi olmuştur. Basınçlı akım durumu için bu yaklaşım derinliklerinde köprü membanda artan potansiyel enerji köprü tabliyesi altından geçen akımın hızını artırdığından oyulma çukuru derinliğini de artırdığı gözlemlenmiştir. Aynı yaklaşım derinliğinde ( $Y_5=30,0$  cm) basınçlı ve savak tipi akım durumlarında farklı debiler ( $Q=70$  lt/s,  $80$  lt/s ve  $90$  lt/s) için oyulma çukuru profilleri Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir. Hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında en geniş oyulma çukuru sediment taşıma kapasitesinin en yüksek olduğu  $90$  lt/s'lik debide elde edilmiştir.



Şekil 4.27. Basınçlı akım durumunda, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 4.28. Savak tipi akım durumunda, 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

#### 4.4. Akım Yönünde Tabliye Kenarı ile Kiriş Arasındaki Mesafenin Oyulma Çukuru Derinliğine Etkisi

Akım yönünde tabliye kenarı ile kiriş arasındaki mesafenin tabliye altındaki vorteks yapısını, dolayısıyla akım alanını etkileyebileceği düşüncesinden hareketle oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için aynı yaklaşım akım derinliği, Fr sayısı ve taban malzemesi kullanılarak bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneylerde, köprü tabliyesi  $H_1=20,0$  cm konumuna yerleştirilmiş ve 7,5 cm kiriş yüksekliğinde tekil kiriş kullanılmıştır. Söz konusu kiriş köprü tabliyesi enine eksenine göre tabliye membama (TU), ortasına (TM) ve mansabına (TD) konumlandırılarak tabliye altında meydana gelen oyulma çukurunun kiriş konumundan nasıl etkilendiği incelenmiştir (Bkz. Şekil 4.1). Kirişin tabliyenin memba, orta ve mansap taraflarına yerleştirilmesi durumlarında akım yönünde tabliye kenarı ile kiriş arasındaki mesafe sırasıyla 10,00 cm, 28,75 cm ve 47,5 cm olmuştur. Çizelge 4.7'de kirişin farklı konumlandırılması durumunda ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir.

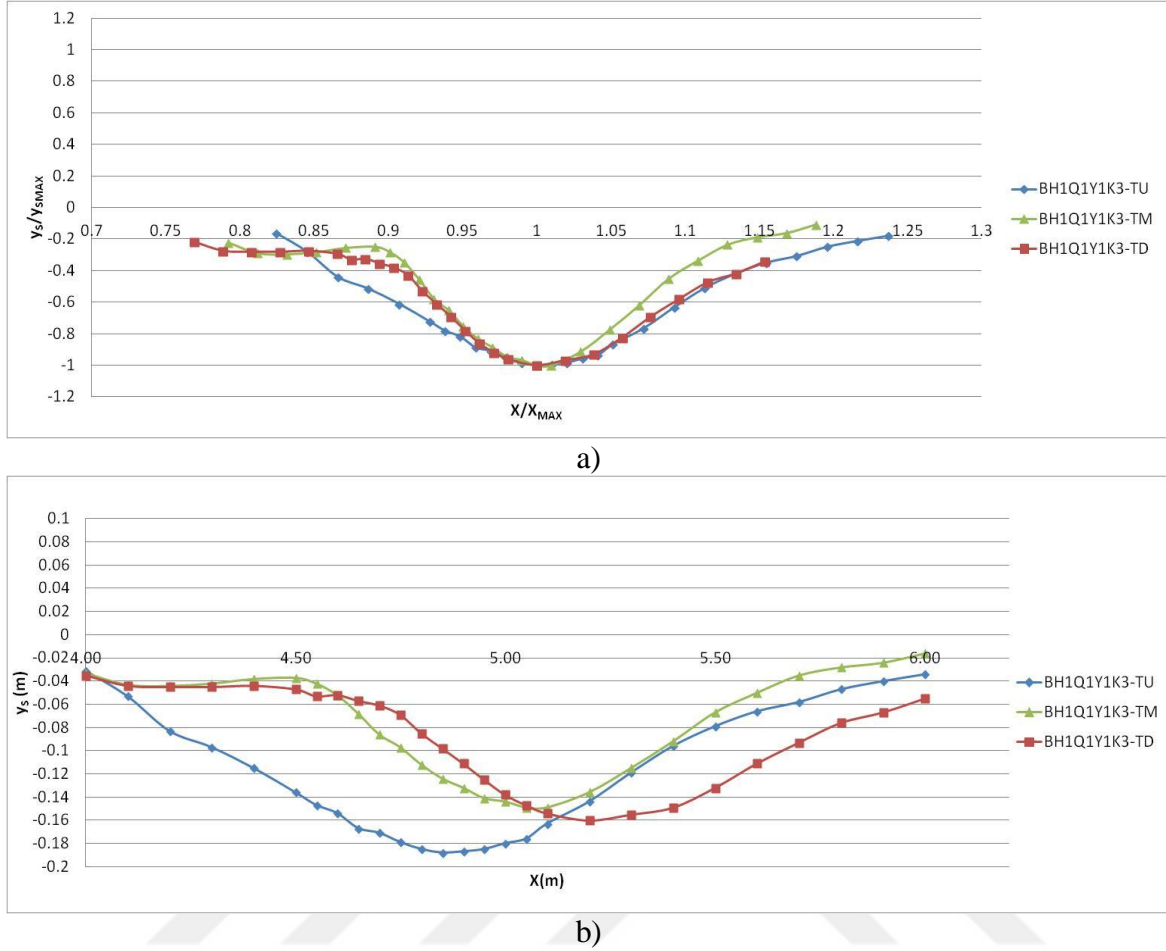
Çizelge 4.7. Kiriş konumlarının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Debi (lt/s)	Fr <sub>a</sub> sayısı (-)	Yaklaşım akım derinliği (cm)	Akım tipi	Oyulma çukuru derinliği (cm)			Değişim yüzdesi (%)		
				Memba (TU)	Orta (TM)	Mansap (TD)	TM-TU	TD-TU	TM- TD
70	0,250	Y1=20,0	Basınçlı	18,8	14,9	16,0	-20,74	-14,89	-6,87
	0,155	Y4=27,5	Savaklı	12,4	8,1	8,5	-34,68	-31,45	-4,71
80	0,204	Y3=25,0	Basınçlı	17,0	12,4	12,1	-27,06	-28,82	2,48
	0,177	Y4=27,5	Savaklı	13,5	9,2	11,9	-31,85	-11,85	-22,69
90	0,155	Y6=32,5	Basınçlı	17,8	13,2	16,3	-25,84	-8,43	-19,02
	0,175	Y5=30,0	Savaklı	14,1	8,3	11,0	-41,13	-21,99	-24,55

Tekil kirişin farklı konumlarında tabliye altında meydana gelmiş olan maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında tekil kirişin köprü ekseninin membasına (TU) yerleştirilmesi durumunda en büyük oyulma çukuru derinliğinin olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin oyulmanın en az olduğu  $Fr_a=0,155$  değerinde savak tipi akım durumunda tekil kirişin konumunun değiştirilmesiyle maksimum oyulma çukuru derinliği 12,4 cm'den merkez ve mansap konumlarına göre sırasıyla %34,68 ve % 31,45'lik bir azalma ile 8,1 cm ve 8,5 cm derinliklerine azaldığı görülmüştür. Bu durum kiriş tabliyesiyle ilk kez temas eden akımda akım alanının bozulması ve enerji kayıplarının meydana gelmesi olarak açıklanabilir. Kirişin tabliye kenarına yakın olması sebebiyle vorteksler oluşmakta ve meydana gelen karmaşık ve üç boyutlu akım yapısı oyulmayı artırmaktadır. Kirişin mansap tabliye uçuna daha yakın olduğu durumda da yine akımın vorteks yapısı ve kuyruk çevrintileri etkili olduğundan merkez konuma göre oyulma daha fazla olmaktadır. Ancak memba konumundaki değerine göre akım enerjisi bir miktar kırılmış olduğundan memba konumuna nazaran oyulma çukuru derinliğinde %8,43 ile %31,45 oranında azalma meydana gelmiştir.

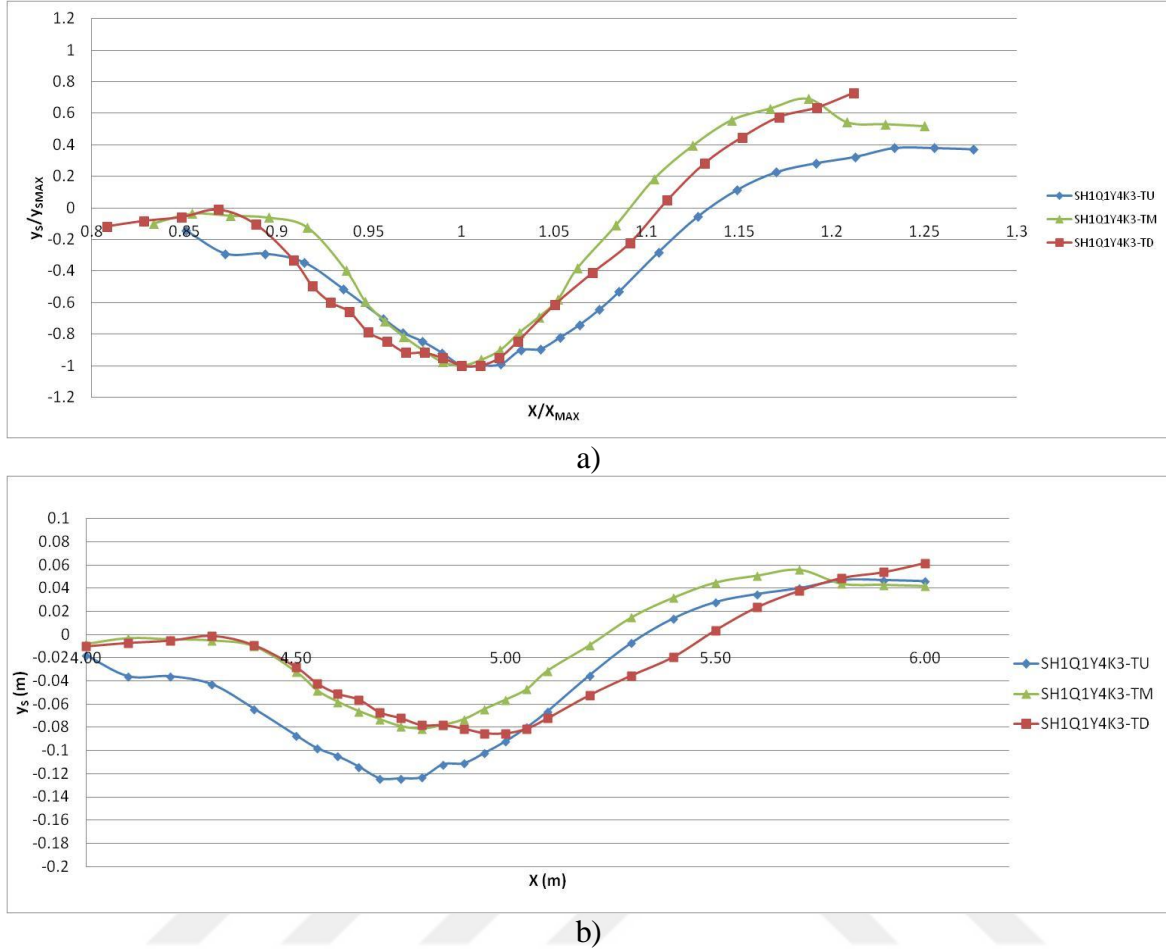
Oyulma çukurunun şekli ve derinliğinin de tekil kirişin konumuna bağlı olarak değiştiği ve kirişin bulunduğu kısımda yani daralmanın arttığı ve ıslak alanın azaldığı bölgede maksimum oyulma çukuru derinliği oluşmuştur. Şekil 4.29'da verilen oyulma çukuru profilleri incelendiğinde hem basınçlı hem de savak tipi akım durumu için benzer oyulma çukuru profillerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Oyulma çukuru genişliği ve derinliği, tekil kirişin konumuna bağlı olarak sırasıyla kirişin ortada, mansapta ve membada bulunması durumlarına göre artış göstermiştir (Bkz. Şekil 4.29 - 4.34).

Basınçlı akım durumunda,  $D_{50}=1,1$  mm taban malzemesi, 20,0 cm yaklaşım akım derinliği,  $Q=70$  lt/s'lik debi ile farklı kiriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri Şekil 4.29'da verilmiştir. Çizelge 4.7'ye göre tekil kirişin akım doğrultusunda tabliye ekseninin memba bölümünde olduğu durumda (TU) maksimum oyulma çukuru derinliği gerçekleşmiş ve değeri 18,8 cm olarak ölçülmüştür. Ayrıca Şekil 4.29'dan görüldüğü üzere tekil kirişin membaya yerleştirilmesi durumunda oyulma çukurunun özellikle memba tarafındaki seviye daha yayvan olmuştur. Dolayısıyla önce tabliye ve hemen sonrasında kiriş nedeniyle akım alanı bozulmuş ve tabanda daha fazla oyulmaya neden olmuştur.



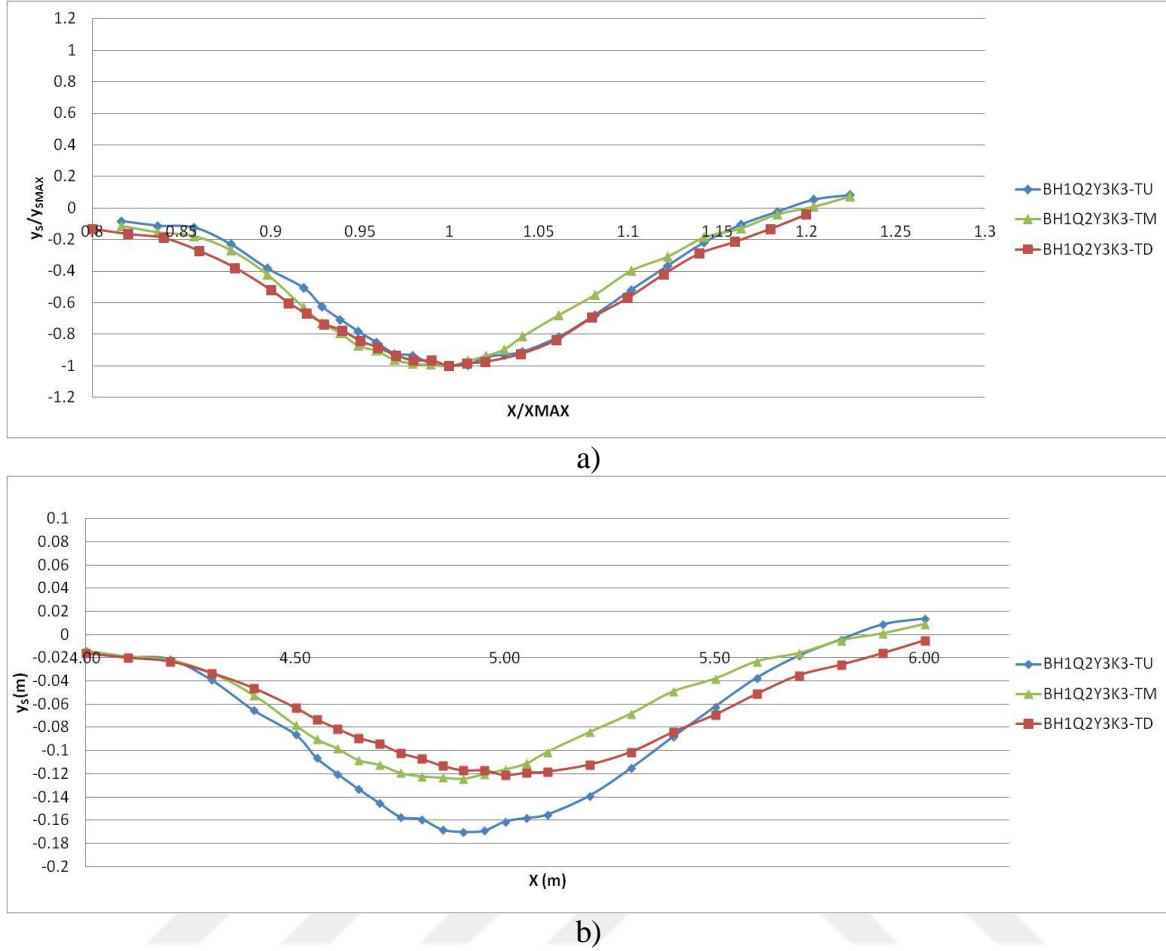
Şekil 4.29. Basıncılı akım durumunda, ince taban malzemesi, 20,0 cm yaklaşım akım derinliği,  $Q=70$  lt/s ile farklı kiriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu

Aynı koşullarda savak tipi akım durumunda meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri ise Şekil 4.30'da verilmiştir. Tekil kirişin membada olduğu durumda (TU) maksimum oyulma çukuru derinliği 12,4 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.30'dan da görüldüğü gibi maksimum oyulma çukurunun konumu beklendiği üzere kirişe bağlı olarak değişmekte, ayrıca çukurun mansap şevi de aynı membada olduğu gibi etkilenmiş; kirişin membadan mansaba doğru ilerlemesi durumunda daha yayvan olmuştur. Bununla birlikte çukurun memba şev açısından fark edilebilir bir değişim olmamıştır.



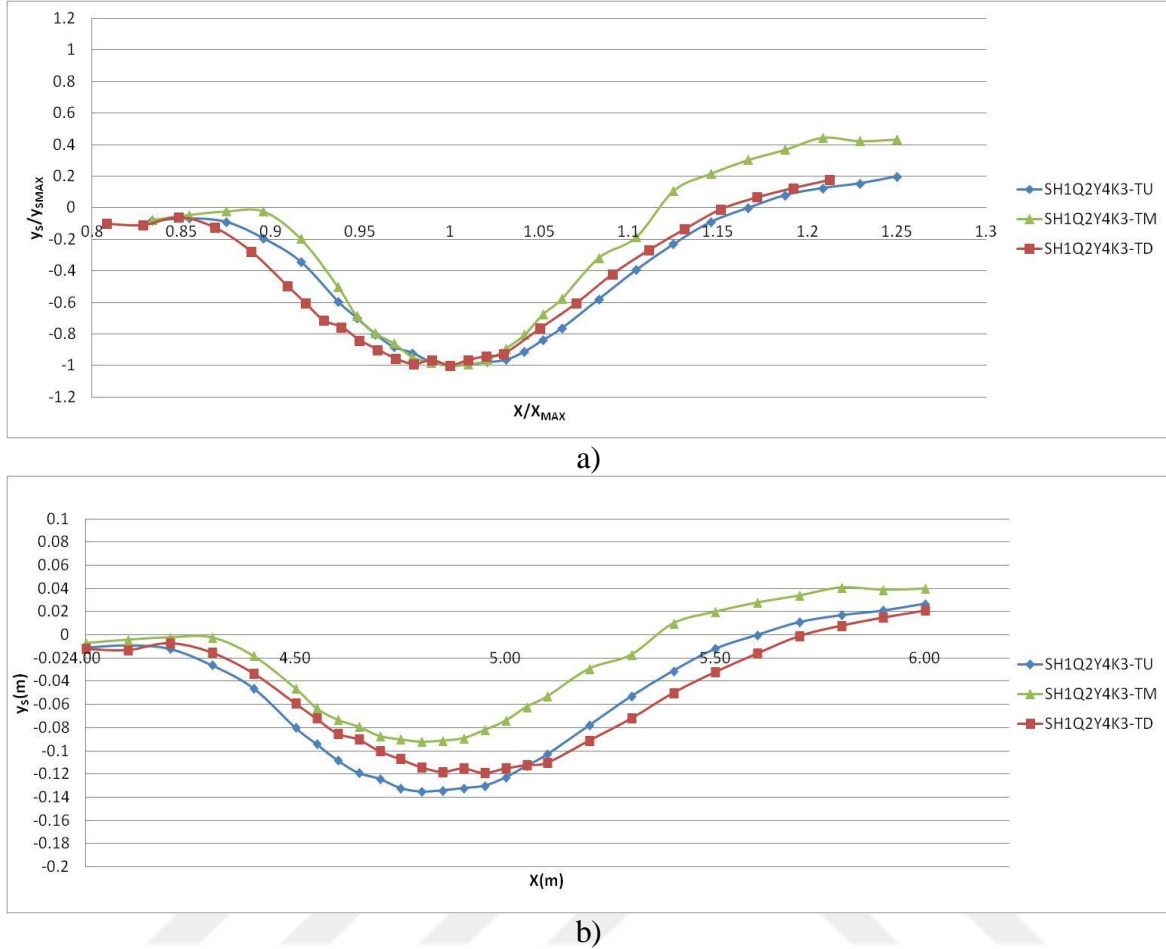
Şekil 4.30. Savak tipi akım durumunda, ince taban malzemesi, 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği,  $Q=70$  lt/s'lik debi ile farklı kiriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu

Basıncılı akım durumunda,  $D_{50}=1,1$  mm taban malzemesi, 25,0 cm yaklaşım akım derinliğinde,  $Q=80$  lt/s'lik debi ile farklı kiriş konumlarında oyulma çukuru profilleri Şekil 4.31'de verilmiştir. Bu durumda da maksimum oyulma çukuru derinliğinin tekil kirişin memba kısmında olduğu (TU) ve oyulma çukuru derinliğinin 17,0 cm olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.29'da verilen oyulma çukuru profillerine benzer şekilde tekil kirişin köprü tabliyesinin membasına yerleştirilmesi oyulma çukurunun memba şevini daha çok etkilemiştir. Ayrıca akım alanının kiriş konumuna bağlı olarak aniden değişmesi tabanda daha fazla oyulmaya neden olmuştur.



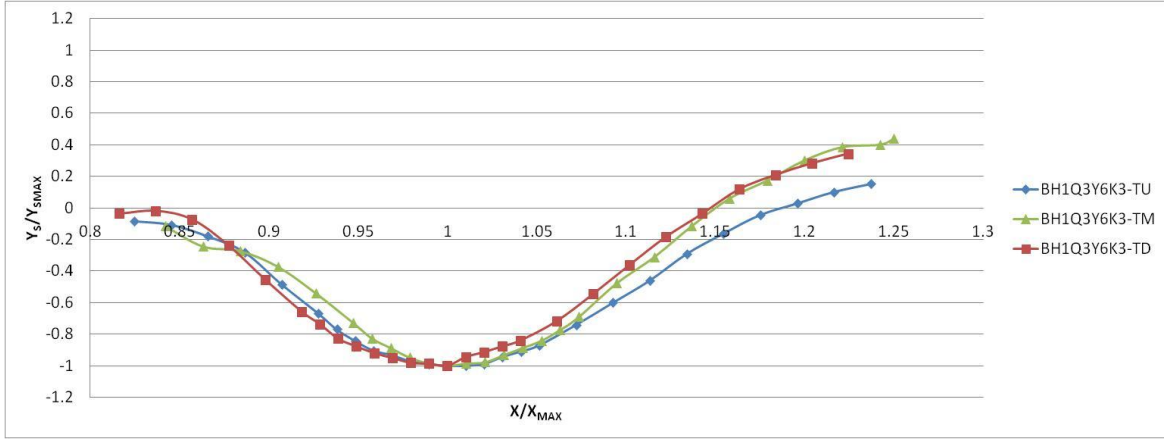
Şekil 4.31. Basınçlı akım durumunda, ince taban malzemesi, 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği,  $Q=80$  lt/s'lik debi ile farklı kiriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu

Çizelge 4.7'ye göre tekil kirişin memba kısmında olduğu durumda (TU) maksimum oyulma çukuru derinliği 13,5 cm olarak ölçülmüştür. Aynı şartlarda 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinin olması durumunda meydana gelmiş olan oyulma çukuru profili Şekil 4.32'de verilmiştir. Savak tipi akım durumu için Şekil 4.30'da incelenen oyulma çukuru profillerinin davranışına benzer profiller Şekil 4.32 için de elde edilmiştir. Kirişin tabliye kenarına olan mesafesinin oyulma çukurunu etkilediği görülmüştür.

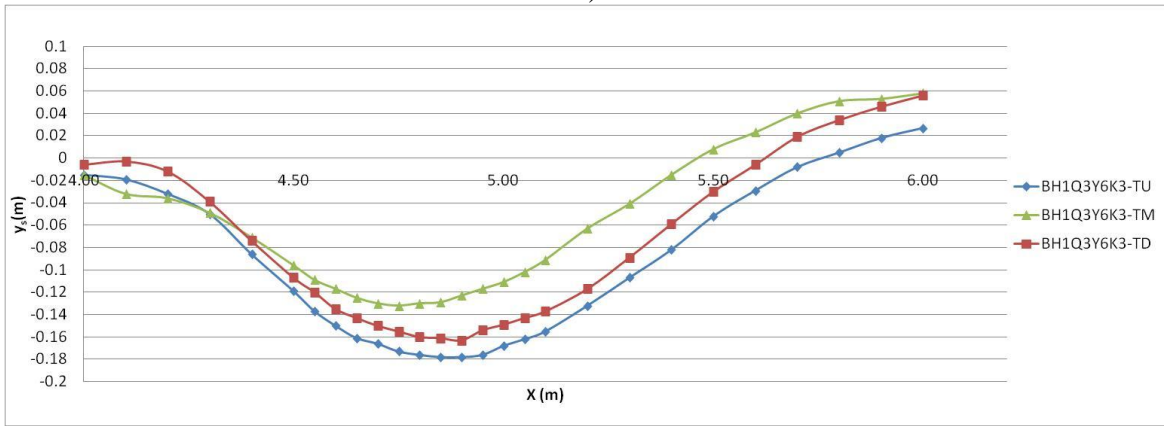


Şekil 4.32. Savak tipi akım durumunda, ince taban malzemesi, 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği,  $Q=80$  lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu

Şekil 4.33'te basınçlı akım durumunda, 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde,  $Q=90$  lt/s'lik debi ile farklı giriş konumlarında oyulma çukuru profilleri görülmektedir. 90 lt/s debide kullanılabilen yaklaşım derinlikleri sadece savak tipi akım koşullarını sağladığından, basınçlı akım tipini elde edebilmek için mevcut korkuluk yüksekliği artırılmış ve bu koşullarda 32,5 cm yaklaşım derinliğinde tabanda meydana gelmiş olan maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır. Tekil girişin tabliye ekseninin memba kısmında olduğu durumda (TU) maksimum oyulma çukuru derinliği 17,8 cm olarak ölçülmüştür. Aynı şartlar altında savak tipi akım olması durumunda 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinin sonuçları Şekil 4.34'te görülmektedir.



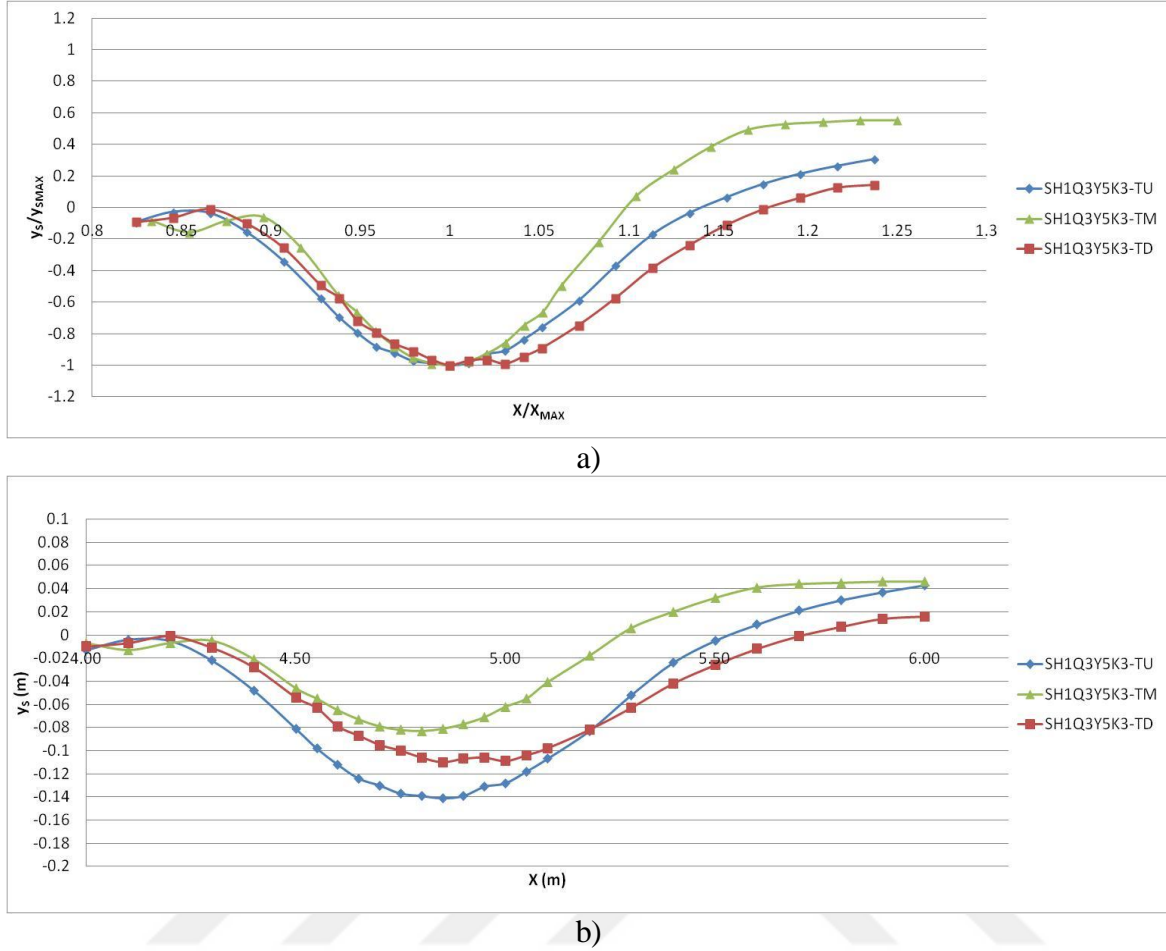
a)



b)

Şekil 4.33. Basınçlı akım durumunda, ince taban malzemesi, 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği,  $Q=90$  lt/s'lik debi ile farklı kiriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu

Tekil kirişin membada olduğu durumda (TU) maksimum oyulma çukuru derinliği 14,1 cm olarak ölçülmüştür. Deney sonuçları karşılaştırıldığında hem basınçlı hem de savak tipi akım durumları için maksimum oyulma çukuru derinliğinin kirişin köprünün membada (TU) olduğu anda oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.34. Savak tipi akım durumunda, ince taban malzemesi, 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği, Q=90 lt/s'lik debi ile farklı kiriş konumlarında meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri a) boyutsuz b) boyutlu

Yukarıda verilen şekiller incelendiğinde tekil kirişin konumundan kaynaklı maksimum oyulma çukuru derinliklerinin kirişin sırasıyla tabliye ekseninin membaında (TU), mansabında (TD) ve ortasında (TM) olma durumunda elde edildiği görülmüştür. Kirişin tabliye kenarlarına yakın olması sebebiyle daha fazla vorteks oluşmuş ve akım yapısı etkilenmiştir.

#### 4.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Tartışma

Çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmada köprü tabliyesi konumunun, yaklaşım akım derinliğinin, kiriş yüksekliğinin, taban malzemesi medyan tane çapının ve akım tipinin oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenmiştir.

Köprü tabliye konumunun maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için köprü tabliye modeli kanal tabanından  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm yüksekliklerinde iki konuma yerleştirilmiş ve aynı akım ve taban malzemesi koşullarında deneylerden elde edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır. Hem basınçlı hem de savak tipi akımlar için tabliye konumunun 2,5 cm tabana yaklaştırılması halinde her iki sediment durumunda da maksimum oyulma çukuru derinliğinin arttığı, tabanda kaba malzemenin ( $D_{50}=1,5$  mm) bulunması halinde hem basınçlı hem de savak tipi akım koşullarında maksimum oyulma çukuru derinliğindeki değişimin %1,32'den başlayıp %40,45'e kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Köprü tabliyesi konumundan kaynaklı düşey daralma nedeniyle artan kayma gerilmeleri ve akım hızı kaba malzemenin daha fazla taşınmasına ve oyulma derinliğinin artmasına neden olmuştur. İnce malzeme durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğindeki değişim oranının 1,54 ile 28,33 arasında nispeten sınırlı kaldığı görülmüştür.

Yaklaşım akım derinliğinin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için altı farklı yaklaşım akım derinliğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Medyan tane çapı 1,1 mm olan ince taban malzemesinin kullanılması durumunda yaklaşım akım derinliğinin tam tabliye altında veya korkuluk hizasındayken yani basınçlı akım olması halinde en büyük oyulma çukuru derinliklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Medyan tane çapı 1,5 mm olan kaba malzeme sonuçları ile ince malzeme sonuçları kıyaslandığında tüm yaklaşım akım derinliklerinde kaba malzeme durumunda daha küçük oyulma çukuru derinlikleri olduğu görülmüştür. Özellikle akımın savak tipi akım olduğu durumda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla her iki taban malzemesinde de oyulma çukuru derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla ortalama akım hızının küçülmesi dolayısıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin azalması olarak açıklanabilir.

Katı madde büyüklüğünün oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için kanal tabanında medyan tane çapı ( $D_{50}$ ) 1,1 mm ve 1,5 mm olan iki farklı malzeme kullanılmıştır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında medyan tane çapı 1,1 mm olan sedimentte maksimum oyulma çukuru derinliğinin hem basınçlı akım hem de savak tipi akım durumlarında daha fazla olduğu, medyan tane çapının da maksimum oyulma çukuru derinliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu görülmüştür. Aynı koşullarda

köprü tabliyesi konumundaki değişimin ince taban malzemesinden daha çok kaba taban malzemesinin oyulma çukuru derinliğini etkilediği saptanmıştır.

Basınçlı ve savak tipi akımların oyulma çukuru üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için aynı yaklaşım akım derinliklerinde her iki akım tipinin elde edildiği deneyler yapılmıştır. Aynı akım koşullarında elde edilmiş maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde yaklaşım akım derinliğinin büyümesiyle basınçlı akımlarda oyulma çukuru derinliğinde çok ciddi artışlar olduğu görülmüştür. Savak tipi akımda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükü artmakta; dolayısıyla köprü tabliyesi altından geçen akımın hızı azaldığından oyulma çukuru derinliği de azalmaktadır. Basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğindeki artışların nedeni artan yaklaşım akım derinliğiyle birlikte akımın potansiyel enerjisinin artması ve dolayısıyla köprü tabliyesi altından geçen akımın hızındaki artışla sediment hareketinin artması olarak açıklanabilir.

Akım yönünde tabliye kenarı ile giriş arasındaki mesafenin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için diğer deneylerden farklı olarak iki giriş değil tekil giriş kullanılmış ve bu giriş köprü tabliye ekseninin membama (TU), ortasına (TM) ve mansabına (TD) konumlandırılmıştır. Tekil girişin farklı konumlarında meydana gelmiş maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında en büyük oyulma çukuru derinliğinin sırasıyla köprünün membamında (TU), mansabında (TD) ve en küçük derinliklerin girişin tabliyenin ortasına (TM) yerleştirilmesiyle elde edildiği görülmüştür. Bunun nedeni girişin tabliye kenarına yakın olması durumunda daha güçlü vortekslerin oluşması ve meydana gelen karmaşık akım yapısının oyulmayı artırması olarak açıklanabilir. Aynı durum girişin mansap tabliye ucuna daha yakın olduğu durumda da görülmüştür. Bu konumda da akım yapısı daha çok etkilendiğinden merkez konuma göre oyulma çukuru derinliği daha büyük olmuştur. Ancak mansap konumundaki oyulmalar memba konumuna kıyasla daha küçük kalmıştır. Bunun nedeni de akımın enerjisinin bir miktarını kaybetmiş olması olarak açıklanabilir. Dolayısıyla akım yönünde tabliye kenarı ile giriş arasındaki mesafe oyulma çukurunun derinliğini ve oluşan bu çukurun memba veya mansap şev açısını etkilemektedir.

Çalışma kapsamında köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru derinliğine tabliye konumu, yaklaşım akım derinliği, Froude sayısı, taban katı madde çapı ve akım tipi parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Her parametrenin farklı şartlarda oyulma çukuru

derinliği üzerindeki etkisinin değiştiği tespit edilmiştir. Örneğin tabliyenin  $H_1=20,0$  cm ve kiriş yüksekliğinin  $K_3=7,5$  cm olması halinde kiriş altı ile kanal tabanı arasında  $H_b=12,5$  cm'lik bir mesafe meydana gelmiştir. Aynı şekilde  $H_2=17,5$  cm ve kiriş yüksekliğinin  $K_2=5,0$  cm olması durumunda da  $H_b=12,5$  cm'lik bir mesafe söz konusu olmuştur. Bu iki tabliye ve kiriş konumunda aynı yaklaşım akım derinliğinde tabliye altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelenmiş ve sonuçlar izelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Kiriş ile kanal tabanı arasındaki açıklığın ( $H_b$ ) sabit olması durumunda tabliye konumu ile kiriş yüksekliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

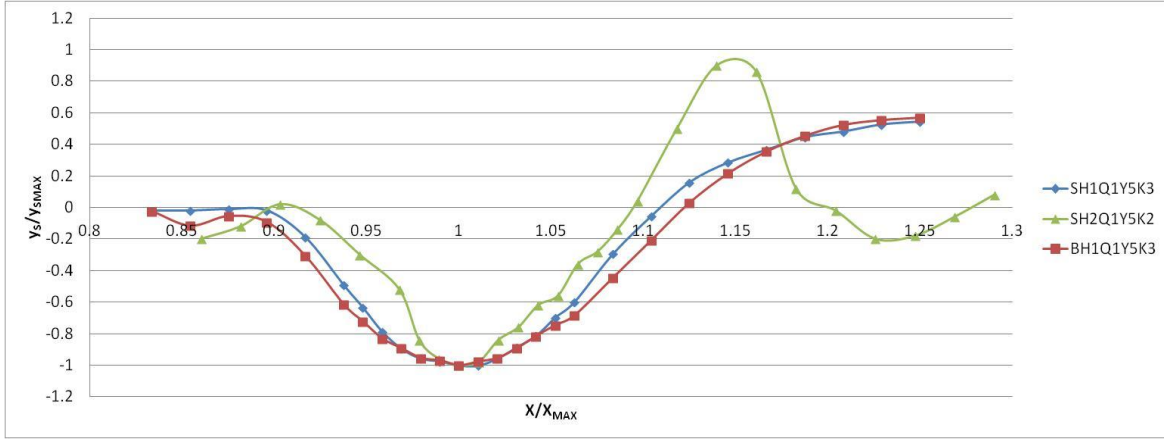
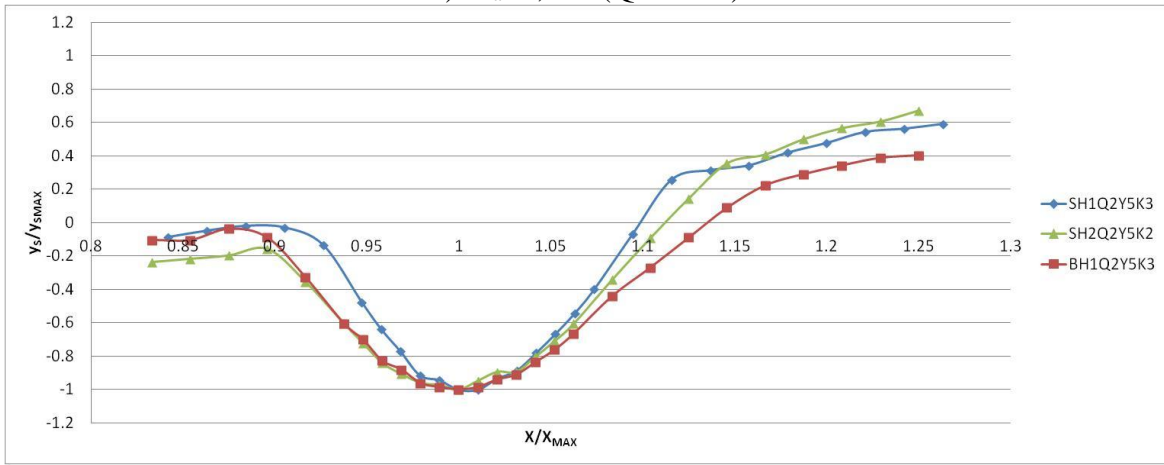
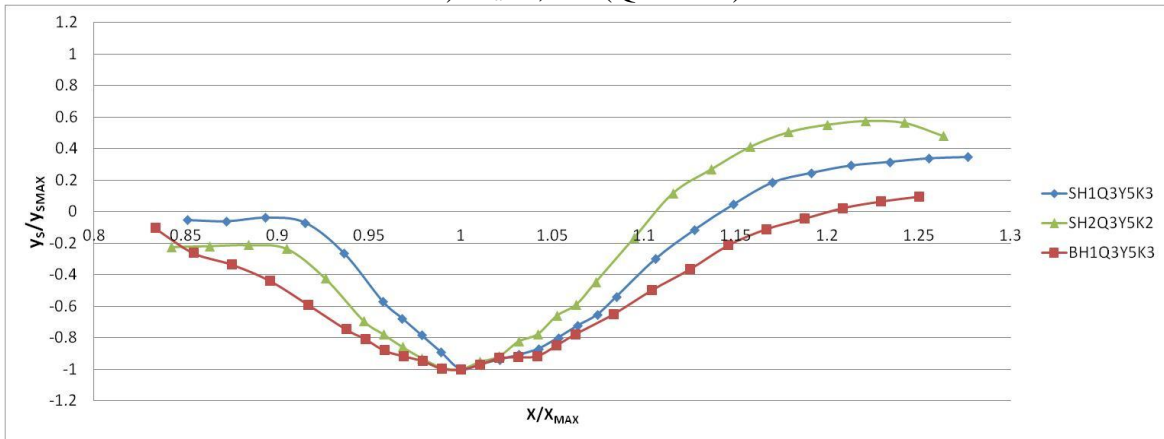
Q (lt/s)	Yaklaşım akım Froude $Fr_a$ (-)	Yaklaşım akım derinliği $y_a$ (cm)	$H_1=20$ cm		$H_2=17,5$ cm		Değişim yüzdesi (%)
			$K_3=7,5$ cm		$K_2=5,0$ cm		
			$y_s$ (cm)	Akım tipi	$y_s$ (cm)	Akım tipi	
70	0,250	$Y_1=20,0$	13,4	Basınçlı	12,3	Basınçlı	8,94
	0,209	$Y_2=22,5$	12,0	Basınçlı	9,8	Basınçlı	22,45
	0,179	$Y_3=25,0$	13,1	Basınçlı	12,1	Basınçlı	8,26
	0,155	$Y_4=27,5$	11,6 11,0	Savaklı Basınçlı(*)	6,5	Savaklı	78,46 69,23
	0,136	$Y_5=30,0$	11,2 13,0	Savaklı Basınçlı(*)	5,0	Savaklı	124,00 160,00
80	0,204	$Y_3=25,0$	14,1	Basınçlı	13,7	Savaklı	2,92
	0,177	$Y_4=27,5$	13,0 13,0	Savaklı Basınçlı(*)	8,7	Savaklı	49,43 49,43
	0,155	$Y_5=30,0$	10,5 13,4	Savaklı Basınçlı(*)	7,6	Savaklı	38,16 76,32
90	0,175	$Y_5=30,0$	13,0 16,5	Savaklı Basınçlı(*)	8,5	Savaklı	52,94 94,12

(\*) Korkuluk yüksekliğinin, ek parça konularak arttırıldığı deneyler

Tabliye kirişleri ile taban arasındaki deney mesafenin yani daralmanın ve yaklaşım akım derinliğinin aynı olduğu durumlarda maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde

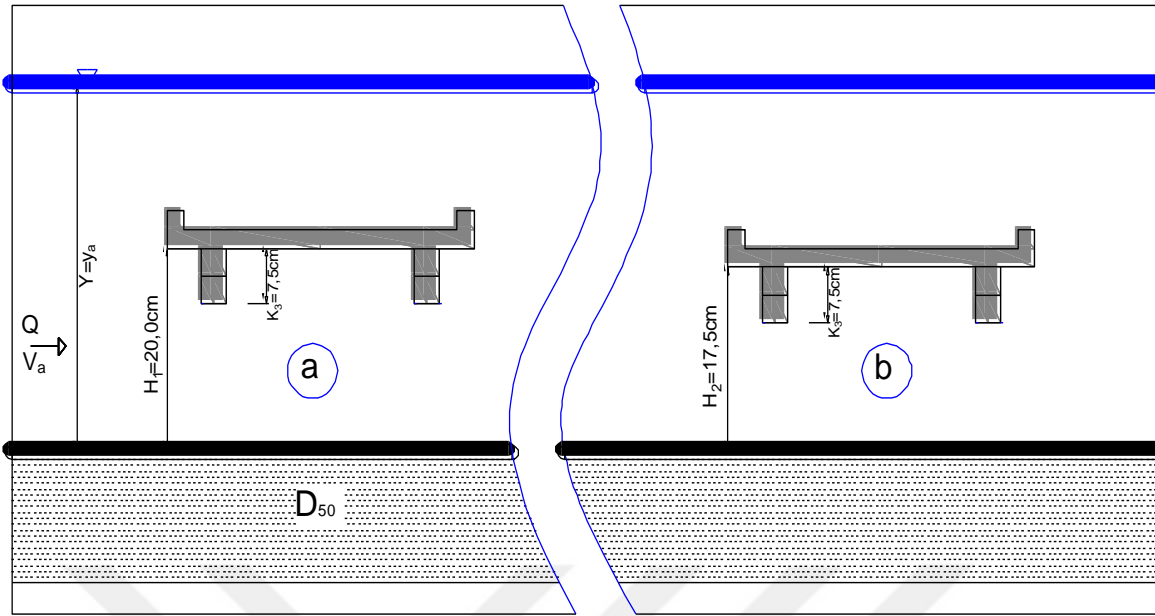
kiriş yüksekliğindeki artışın tüm ıslak alanlarda meydana getirdiği düşey daralmanın köprü tabliyesi konumundan kaynaklanan düşey daralmadan daha etkin olduğu görülmüştür. Kiriş yüksekliği nedeniyle oluşan daralma her iki akım tipi durumunda oyulma çukuru derinliğini daha fazla artırmıştır. En büyük artış  $Q=70$  lt/s ve  $Y_5=30,0$  cm yaklaşım akım derinliğinde belirlenmiştir. Oyulma çukuru değişim yüzdelerindeki artışın %160'ı bulunduğu  $Y_5=30,0$  cm yaklaşım akım derinliğinde tabliye konumu ve giriş yüksekliği etkisi altında oluşan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s için Şekil 4.35'te verilmiştir.

Şekil 4.35'ten görüldüğü üzere sadece maksimum oyulma çukuru derinliklerinde değil oyulma çukuru şekillerinde de farklılıklar söz konusu olmuştur. Özellikle SH2Q1Y5K2 deney serisinde oyulma çukuru oldukça daralmış, bu da hemen mansabında depolanma bölgesi oluşturmuş ve dik bir şeve sahip olmasına neden olmuştur. Diğer akım şartlarında da şevlerde farklılıklar söz konusu olmuştur. Şekil 4.35-c'de görüldüğü gibi Froude sayısının en büyük değerinde basınçlı akım durumunda daha yayvan bir çukur elde edilmişken her iki savak tipi akım durumunda şev eğimleri daha dik eğimlidir. Bu durum Şekil 4.35-b'de de gözlemlenmiştir. Çizelge 4.8'deki veriler ile Şekil 4.35'te verilen oyulma çukuru profilleri incelendiğinde giriş yüksekliği nedeniyle oluşan köprü açıklığındaki düşey daralma etkisinin köprü tabliye daralma etkisinden daha baskın olduğu söylenebilir. Bunun nedeni giriş yüksekliğinin akım yapısını bozması ve giriş ile tabliye arasında oluşan ıslak alanda daha fazla çevrinti oluşturmasıdır. Akım alanındaki bu tür çevrintiler ve vortekslerde oyulma çukuru derinliğinin artmasına neden olmaktadır.

a)  $Fr_a=0,136$  ( $Q=70$  lt/s)b)  $Fr_a=0,155$  ( $Q=80$  lt/s)c)  $Fr_a=0,175$  ( $Q=90$  lt/s)

Şekil 4.35. 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde farklı tabliye konumu ve giriş yüksekliğinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Aynı yaklaşım akım derinliğinde yani aynı Froude sayısına sahip akım durumunda farklı konumlarda tabliye modelinin tabanda meydana getirdiği oyulma çukurunu incelemek için Şekil 4.36'da gösterildiği şekilde tabliye "a" konumundan "b" konumuna getirilmiştir. Tabliyenin bu konumlarında ve mevcut akım şartlarında tabanda meydana gelmiş olan oyulma çukuru derinlikleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



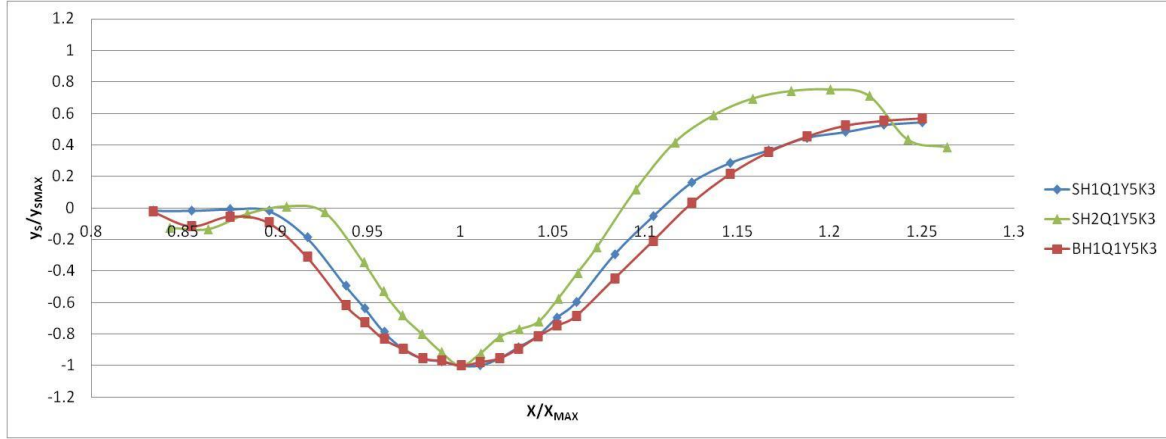
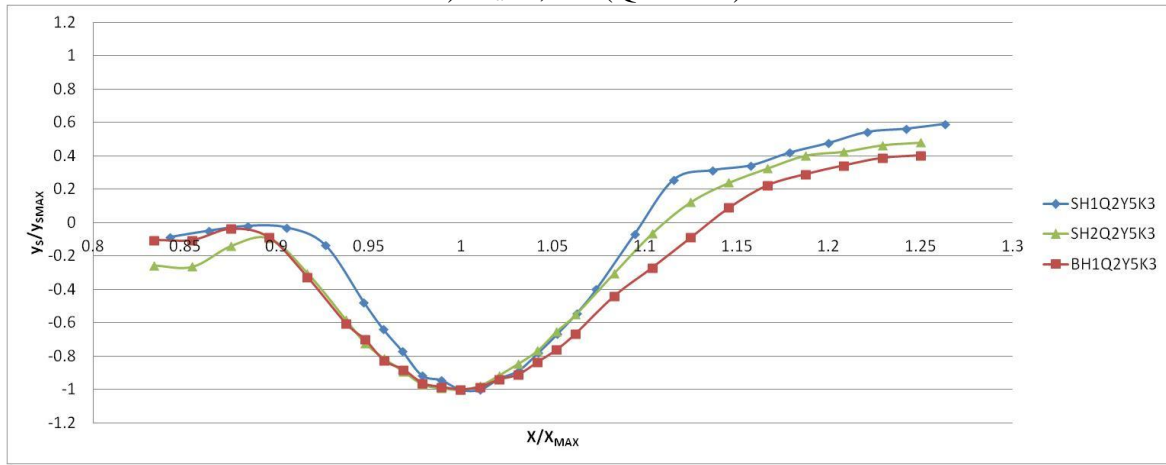
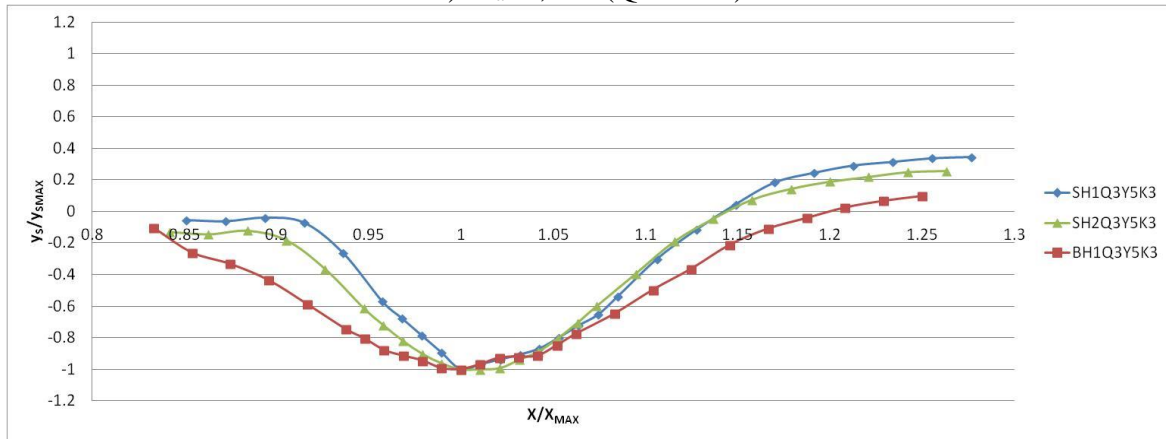
Şekil 4.36. Aynı yaklaşım akım derinliğinde köprü tabliyesinin farklı konumlarda bulunması a)  $H_1 = 20,0$  cm ve b)  $H_2 = 17,5$  cm

Sonuçlara göre her iki tabliyede basınçlı akım olması halinde tabana daha yakın olan tabliyede daha fazla oyulma meydana gelmiştir. Bu durum artan yaklaşım akım hızıyla artmaya devam etmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin 25,0 cm olması halinde basınçlı ve savak tipi akım akımlarda benzer derinliklerde oyulma çukuru olduğu görülmüştür. Savak yükünün artmasıyla ( $y_a = 27,5$  cm; savak yükleri 2,5 cm ile 5,0 cm) oyulma çukuru derinlikleri tabana yakın tabliyede yine %6,03 gibi küçük bir farkla daha büyük olmuştur. Ancak yaklaşım akım derinliğinin daha da artmasıyla ( $y_a = 30,0$  cm; savak yükleri 5,0 cm ile 7,5 cm) daha büyük savak yükü durumunda tabanda daha az oyulma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu da savak tipi akım durumunda savak yükünün artması halinde oyulma çukuru derinliğinin doğrusal olarak savak yüküyle artmadığını göstermiştir. Yaklaşım akım hızının daha büyük olduğu durumda savak tipi akımda aynı savak yükü için daha büyük oyulma çukuru derinliği olduğu saptanmıştır. Her durumda aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı akım savak tipi akıma kıyasla daha fazla oyulmaya neden olmuştur.

Çizelge 4.9. Farklı tabliye konumları ve akım şartlarında aynı yaklaşım akım derinliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Q (lt/s)	Yaklaşım akım Froude $Fr_a$ (-)	Yaklaşım akım derinliği $y_a$ (cm)	$H_1=20\text{cm}$		$H_2=17,5\text{cm}$		Değişim yüzdesi (%)
			$K_3=7,5\text{cm}$		$K_3=7,5\text{cm}$		
			$y_s$ (cm)	Akım tipi	$y_s$ (cm)	Akım tipi	
70	0,250	$Y_1=20,0$	13,4	Basınçlı	14,2	Basınçlı	5,97
	0,209	$Y_2=22,5$	12,0	Basınçlı	15,4	Basınçlı	28,33
	0,179	$Y_3=25,0$	13,1	Basınçlı	13,6	Savaklı	3,81
	0,155	$Y_4=27,5$	11,6 11,0	Savaklı Basınçlı(*)	12,3	Savaklı	6,03 11,82
	0,136	$Y_5=30,0$	11,2 13,0	Savaklı Basınçlı(*)	10,4	Savaklı	-7,14 -20,00
80	0,204	$Y_3=25,0$	14,1	Basınçlı	14,4	Savaklı	2,13
	0,177	$Y_4=27,5$	13,0 13,0	Savaklı Basınçlı(*)	13,6	Savaklı	4,61 4,61
	0,155	$Y_5=30,0$	10,5 13,4	Savaklı Basınçlı(*)	12,9	Savaklı	22,86 3,73
90	0,175	$Y_5=30,0$	13,0 16,5	Savaklı Basınçlı(*)	13,2	Savaklı	1,54 -20,00

Savak yükünün en büyük olduğu durumda ( $y_a=30,0$  cm), Şekil 4.37’de oyulma çukuru profilleri gösterilmiştir. Debi değerindeki artışın yani Froude sayısının büyümesinin oyulma çukuru şev açılarını ve genişliklerini etkilediği görülmüştür. Debinin 90 lt/s’ye çıkarıldığı durumda ise basınçlı akımın savak tipi akıma göre oyulma çukuru şeklinde daha etkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak tabliyenin tabana mesafesi oyulma çukuru derinliğini ve şeklini etkilese de akım tipinin ve tabliye altından geçen akım hızının daha etkili olduğu görülmüştür.

a)  $Fr_a=0,136$  ( $Q=70$  lt/s)b)  $Fr_a=0,155$  ( $Q=80$  lt/s)c)  $Fr_a=0,175$  ( $Q=90$  lt/s)

Şekil 4.37. 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde farklı tabliye konumları ve akım şartlarında meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Ayrıca yapılan deneylerde meydana gelen oyulma çukuru şeklinin yanı sıra oluşan kumullarda incelenmiştir.  $D_{50} = 1,1$  mm olan ince malzemeyle yapılan deneylerde oyulma çukuru sonrasında ince malzeme akım tarafından hemen köprü mansabına taşınmış, bu nedenle ciddi bir kumul oluşumu söz konusu olmamıştır. Ancak  $D_{50} = 1,5$  mm kaba malzeme durumunda hemen tabliye mansabında kumul oluşumları gözlemlenmiştir.

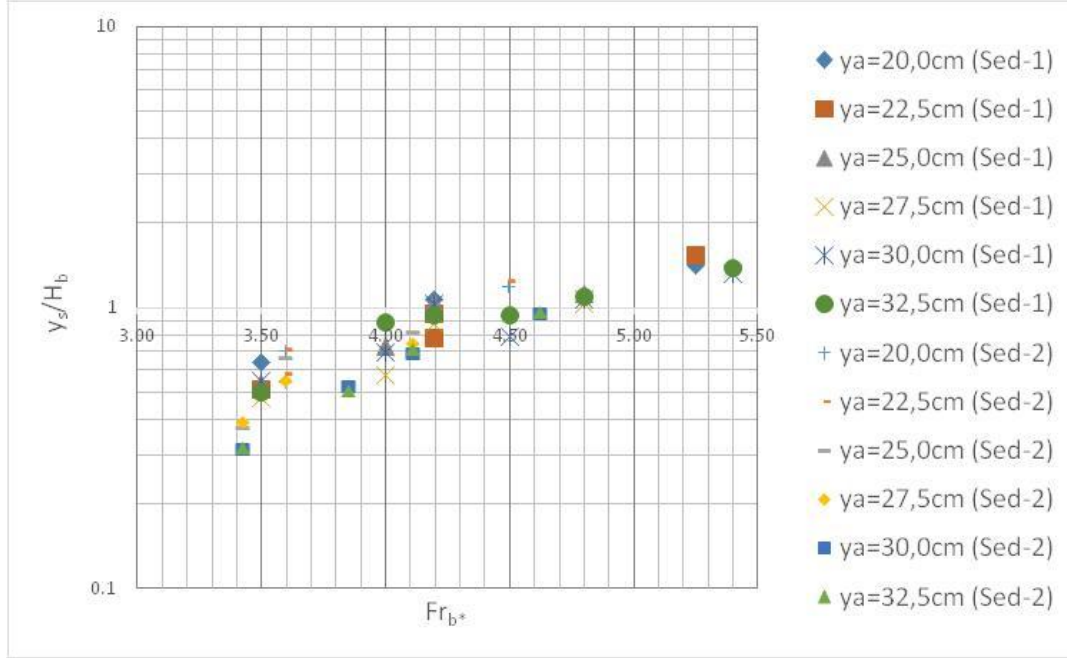
Çizelge 4.10. Kaba taban malzemesi durumunda farklı akım şartları altında meydana gelmiş olan kumul yükseklikleri ve konumları

Q (lt/s)	Yaklaşım akım Froude $Fr_a$ (-)	Yaklaşım akım derinliği $y_a$ (cm)	$H_1=20\text{cm}$				$H_2=17,5\text{cm}$			
			$K_3=7,5\text{cm}$				$K_3=7,5\text{cm}$			
			$y_s$ (cm)	$y_d$ (cm)	$x$ (m)	Akım tipi	$y_s$ (cm)	$y_d$ (cm)	$x$ (m)	Akım tipi
70	0,179	$Y_3=25,0$	8,3	7,0	5,7	Basınçlı	8,9	7,2	5,7	Savaklı
	0,155	$Y_4=27,5$	7,6	6,9	5,4	Savaklı	7,7	8,3	5,5	Savaklı
80	0,177	$Y_4=27,5$	8,1	7,4	5,5	Savaklı	-	-	-	-
	0,155	$Y_5=30,0$	-	-	-	-	7,1	7,8	5,4	Savaklı
90	0,175	$Y_5=30,0$	8,0	6,1	5,5	Savaklı	8,0	6,8	5,5	Savaklı
	0,155	$Y_6=32,5$	6,1	7,8	5,4	Savaklı	-	-	-	-

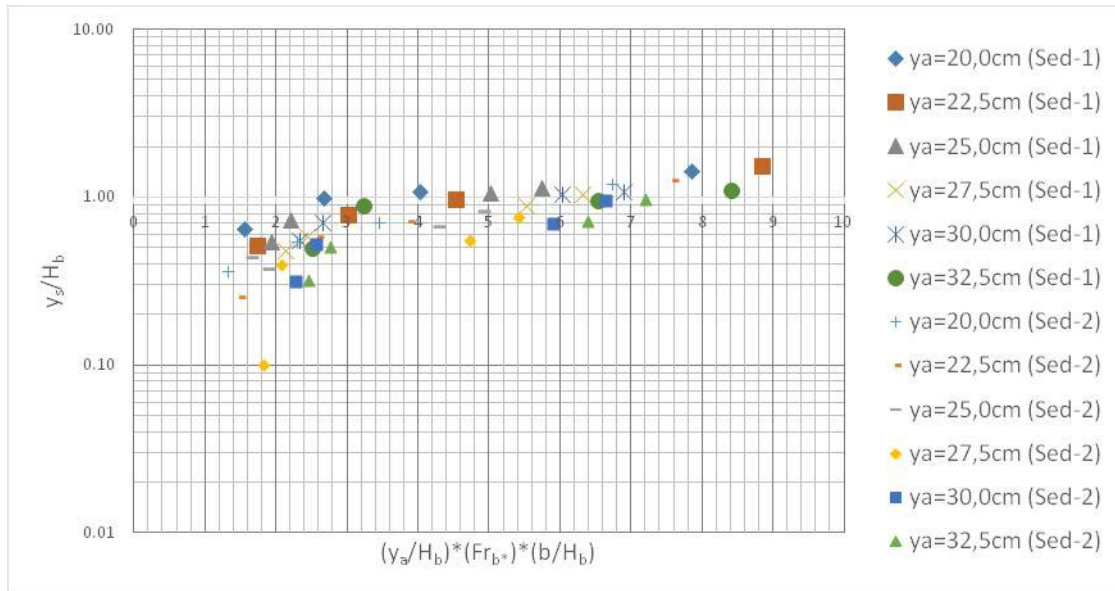
Çizelge 4.10'da kaba taban malzemesi durumunda farklı akım şartları altında meydana gelmiş olan kumul yükseklikleri ve konumları verilmiştir. Bu sonuçlara göre savaklı akım durumunda farklı akım şartları altında dahi kumul tepesi kanal boyunca neredeyse hep aynı konumda kanalda yaklaşık 5,4-5,5 m'lerde meydana gelmiştir. Bu sonuç savak tipi akım durumunda tabliye genişliğinin son bulunduğu noktadan yaklaşık 33 cm mansapta akımın köprü tabliye etkisinden kurtularak öncesindeki akım şartlarına döndüğü ve sedimenti taşıyamadığı için yaklaşık aynı noktada depolamaya neden olduğunu göstermiştir. Kumul yüksekliğinin ise akım şartlarına bağlı olarak farklılık gösterdiği, özellikle köprü tabliye konumunun  $H_1=20$  cm'den  $H_2=17,5$  cm'e değiştirilmesi halinde savak tipi akım durumunda  $Q_1=70\text{lt/s}$  ve  $Fr_a=0,155$  için % 20,29;  $Q_3=90$  lt/s ve  $Fr_a=0,175$  için %11,48'lik artış olduğu saptanmıştır. Çizelge 4.10'dan da görüleceği üzere  $H_1=20$  cm için basınçlı akım durumuyla  $H_2=17,5$  cm için savak tipi akım durumundaki artış ise %2,86 olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında Bölüm 2'de yapılan boyut analizi sonucunda boyutsuz oyulma çukuru derinliği  $\frac{y_s}{H_b}$ 'nin  $\frac{y_a}{H_b}, Fr_b, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{H_t}{H_b}$  ve  $\frac{b}{H_b}$  boyutsuz parametrelerle değiştiği belirtilmiştir. Bölüm 5'te yapılan regresyon analizi için bağımsız değişkenler tekrar düzenlenerek bağımlı değişken olan boyutsuz oyulma çukuru derinliği  $\frac{y_a}{H_b}, Fr_{b*}$  ve  $\frac{b}{H_b}$  parametreleriyle tanımlanmıştır. Regresyon analizinde bağımsız değişken sayısını azaltmak için  $D_{50}$  değişkeni de parçacık densimetrik Froude sayısı ( $Fr_{b*}$ ) içinde

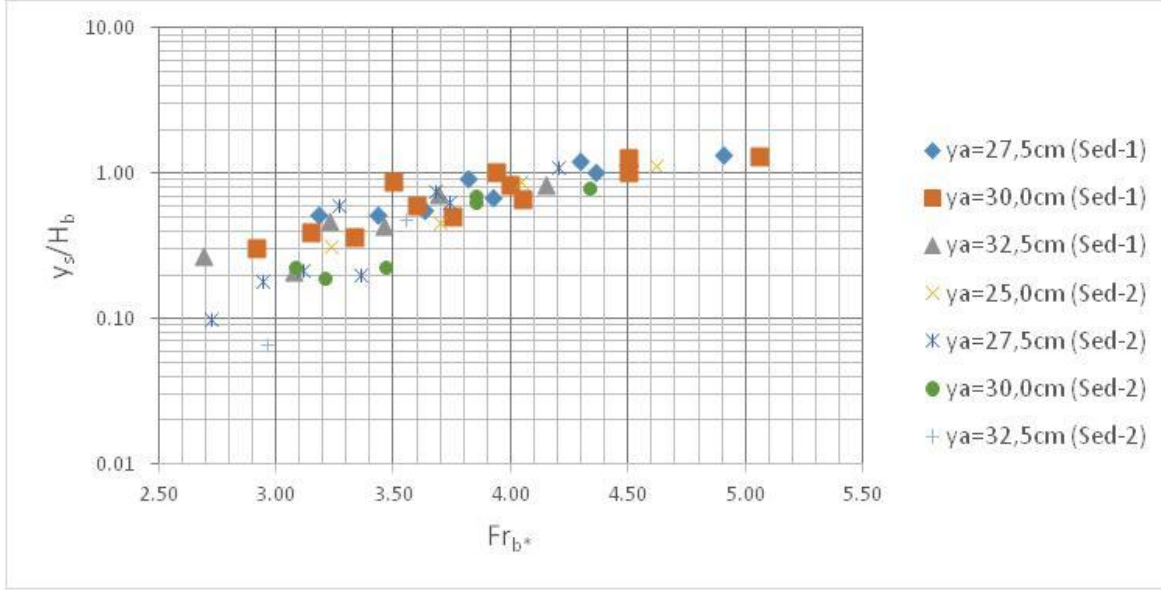
tanımlanmıştır. Boyutsuz oyulma çukuru derinliğinin, belirtilmiş boyutsuz parametrelerle değişimi Şekil 4.38-Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



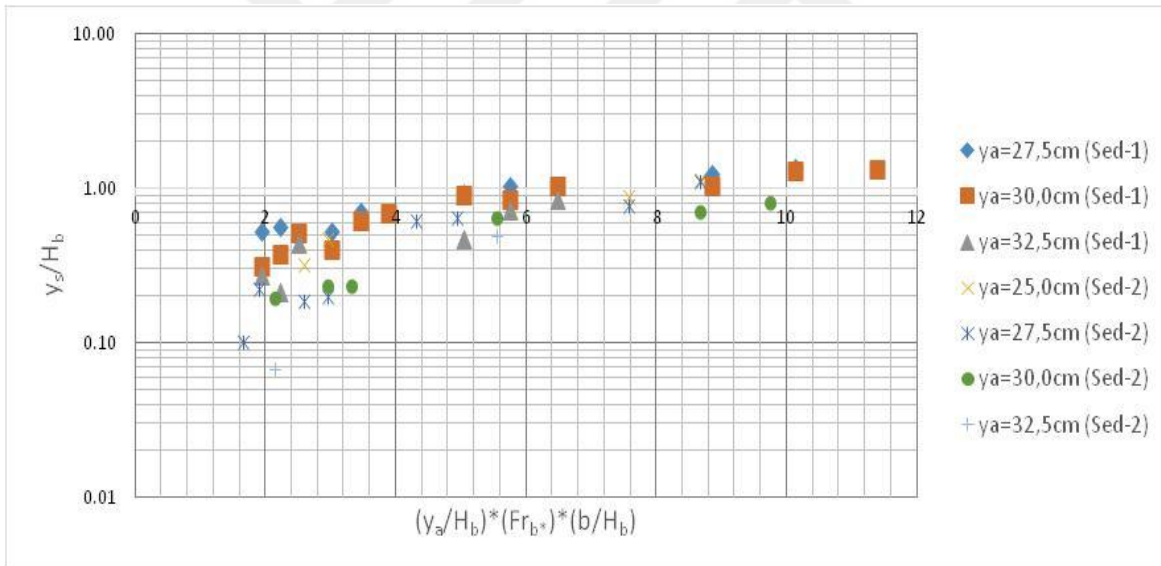
Şekil 4.38. Basınçlı akım durumunda, farklı parçacık densimetrik Froude sayısı ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim



Şekil 4.39. Basınçlı akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim



Şekil 4.40. Savak tipi akım durumunda, farklı parçacık densimetrik Froude sayısı ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim



Şekil 4.41. Savak tipi akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenler ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliğindeki değişim

Yapılan çalışmada debi sabit tutularak yaklaşım akım derinliği arttırılmış, böylece hem Froude sayısı hem de yaklaşım akım hızı ve dolayısıyla oyulma çukuru derinliği azalmıştır. Yukarıda verilen şekillerden görüleceği gibi maksimum görelî oyulma çukuru derinliği de  $(y_s/H_b)$  yaklaşım akım derinliği arttıkça küçülmüştür. Sadece aynı yaklaşım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarının incelendiği deney koşullarında basınçlı akım durumu için görelî oyulma derinliği  $(y_s/H_b)$  artmıştır.

## 5. OYULMA ÇUKURU DERİNLİĞİNİ TAHMİN EDEN AMPİRİK BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ

### 5.1. Genel

Basınçlı ve savak tipi akım koşullarında köprü tabliyesi altında düşey daralma nedeniyle meydana gelen temiz su oyulma derinliğini teoriksel olarak ifade edebilecek ampirik bir bağıntı geliştirebilmek için çoklu lineer regresyon analizinden yararlanılmıştır. Bölüm 2’de oyulma çukuru derinliğini etkileyen değişkenlere ait fonksiyonel ilişki boyut analizinde ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu değişkenlerden yararlanılarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır.

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, Fr_b, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{H_t}{H_b}, \frac{b}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}\right) \quad (5.1)$$

$y_s/H_b$  bağımlı değişken seçilip diğer bağımsız değişkenler de düzenlenerek regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan düzenlemelerde  $H_t=H_b-b$  olduğu için  $H_t$ ,  $b$  değişkenine bağlıdır.  $b$  değişkeni de regresyon analizinde kullanıldığından  $H_t$  değişkeni regresyon analizi dışında tutulmuştur.  $D_{50}$  değişkeni de parçacık densimetrik Froude sayısı içinde Eş.5.2’de verildiği şekilde tanımlanmış ve böylece  $D_{50}$  değişkeni regresyon analizi dışında tutularak bağımsız değişken sayısı azaltılmıştır.

$$Fr_{b^*} = \frac{V_b}{(1,65gD_{50})^{1/2}} \quad (5.2)$$

Bu düzenlemelerden sonra regresyon analizinde kullanılan değişkenlerden Eş. 5.3’te ki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, Fr_{b^*}, \frac{b}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}\right) \quad (5.3)$$

## 5.2. Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi

Çalışma kapsamında yapılan deneylerden tek kirişin kullanılarak kiriş konum etkisinin incelendiği deney setleri çıkarılmış ve kalan verilerle regresyon analizi yapılmıştır. Böylece iki kirişli köprü tabliye modelini kapsayan deney verileri analizde kullanılmıştır. EK-2’de çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş ve maksimum oyulma çukuru deriliğinin tahmininde kullanılmış olan deney setleri verilmiştir. Analizde basınçlı ve savak tipi akım durumları için ayrı ayrı bağıntılar elde edilmiştir.

### 5.2.1. Basınçlı akım için regresyon analizi

Basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi nedeniyle akımda meydana gelen düşey daralma sonucunda temiz su oyulması halinde tabliye altında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğini teorik olarak ifade edebilecek ampirik bir bağıntı geliştirebilmek için çoklu lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan değişken girdileri Çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1’de özetlenen deneysel veriler kullanılarak yapılan çoklu lineer regresyon analizinden basınçlı akım durumu için Eş.5.4’te verilen bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = -0,962 - 0,187 \frac{y_a}{H_b} + 0,443Fr_{b^*} + 0,672 \frac{b}{H_b} \quad (5.4)$$

Regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.2’de özetlenmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,96 olarak elde edilmiş olup değişkenler arasındaki ilişkinin derecesinin çok iyi olduğunu ifade etmektedir. Determinasyon katsayısı (korelasyon sayısının karesi) ise 0,92 olup bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki değişimi açıklama oranının çok yüksek olduğunu göstermektedir. R değerinin anlamlılığını sınavan varyans analizi (ANOVA) tablosu incelendiğinde F’nin anlamlılık testi p (Sig.=0,000) değerinin 0,05’ten küçük olması regresyon modelindeki bağımlı ve bağımsız değişkenler arası ilişki için hesaplanan R=0,96 değerinin anlamlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1. Basıncılı akım durumunda regresyon analizinde kullanılan deney verileri

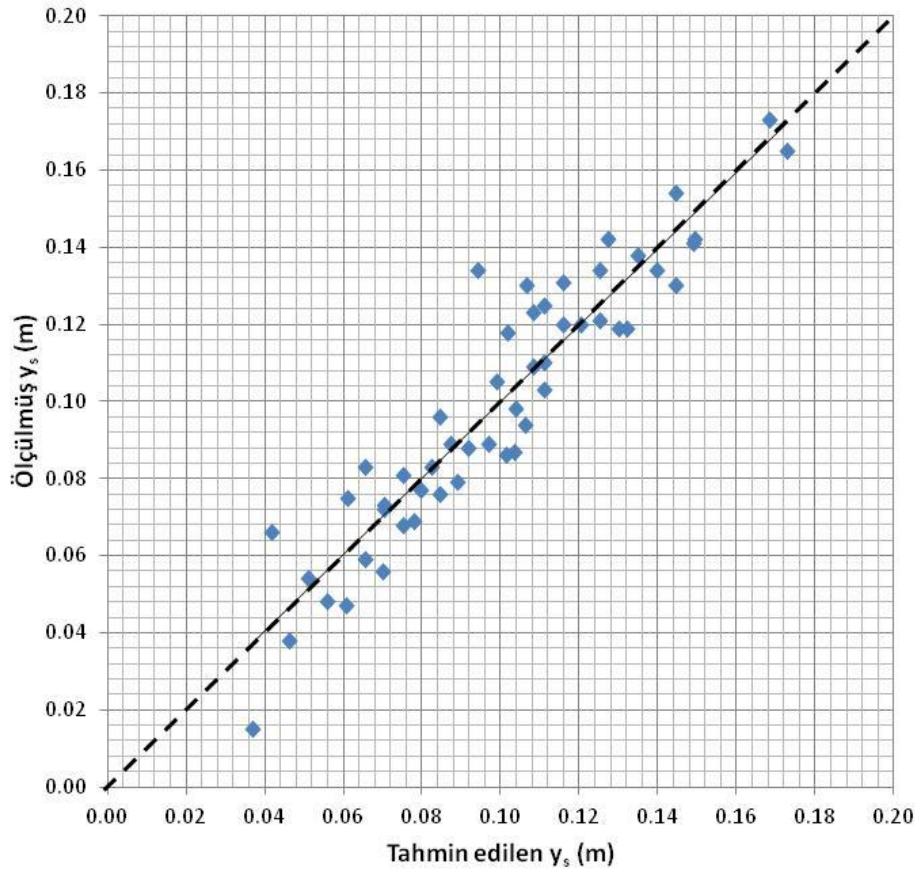
Deney No	$y_s/H_b$	$Y_a/H_b$	$Fr_{b*}$	$b/H_b$
1	0,640	1,3333	3,4973	0,3333
2	1,072	1,6000	4,1968	0,6000
3	0,513	1,5000	3,4973	0,3333
4	0,960	1,8000	4,1968	0,6000
5	0,540	1,6667	3,4973	0,3333
6	1,048	2,0000	4,1968	0,6000
13	0,480	1,8333	3,4973	0,3333
14	0,880	2,2000	4,1968	0,6000
15	0,553	2,0000	3,4973	0,3333
16	1,040	2,4000	4,1968	0,6000
17	0,500	2,1667	3,4973	0,3333
18	0,944	2,6000	4,1968	0,6000
26	0,727	1,6667	3,9969	0,3333
27	1,128	2,0000	4,7963	0,6000
34	0,580	1,8333	3,9969	0,3333
35	1,040	2,2000	4,7963	0,6000
36	0,700	2,0000	3,9969	0,3333
37	1,072	2,4000	4,7963	0,6000
38	0,893	2,1667	3,9969	0,3333
39	1,104	2,6000	4,7963	0,6000
50	0,793	2,0000	4,4965	0,3333
51	1,320	2,4000	5,3958	0,6000
52	0,947	2,1667	4,4965	0,3333
53	1,384	2,6000	5,3958	0,6000
60	0,984	1,6000	4,1968	0,4000
61	1,420	2,0000	5,2460	0,7500
62	0,784	1,8000	4,1968	0,4000
63	1,540	2,2500	5,2460	0,7500
78	0,360	1,3333	2,9949	0,3333
79	0,704	1,6000	3,5939	0,6000
80	0,253	1,5000	2,9949	0,3333
81	0,712	1,8000	3,5939	0,6000
82	0,440	1,6667	2,9949	0,3333
83	0,664	2,0000	3,5939	0,6000
86	0,100	1,8333	2,9949	0,3333
87	0,552	2,2000	3,5939	0,6000
88	0,373	1,6667	3,4228	0,3333
89	0,824	2,0000	4,1073	0,6000
92	0,393	1,8333	3,4228	0,3333
93	0,752	2,2000	4,1073	0,6000
94	0,313	2,0000	3,4228	0,3333
95	0,688	2,4000	4,1073	0,6000
96	0,320	2,1667	3,4228	0,3333
97	0,712	2,6000	4,1073	0,6000
102	0,527	2,0000	3,8506	0,3333
103	0,952	2,4000	4,6207	0,6000
104	0,507	2,1667	3,8506	0,3333
105	0,968	2,6000	4,6207	0,6000
106	0,544	1,6000	3,5939	0,4000
107	1,200	2,0000	4,4924	0,7500
108	0,584	1,8000	3,5939	0,4000
109	1,250	2,2500	4,4924	0,7500

Çizelge 5.2. Basınçlı akım durumu için regresyon analizi

Regresyon İstatistikleri					
Çoklu R	0,96093905				
R <sup>2</sup>	0,92340385				
Ayarlı R <sup>2</sup>	0,91861659				
Standart Hata	0,09263642				
Gözlem	52				
Bağımlı Değişken	y <sub>s</sub> /H <sub>b</sub>				
Bağımsız Değişkenler	Y <sub>a</sub> /H <sub>b</sub> , Fr <sub>b</sub> *, b/H <sub>b</sub>				
ANOVA					
	df	SS	MS	F	Sig.(p)
Regresyon	3	4,966	1,655	192,888	0,000
Fark	48	0,412	0,009		
Toplam	51	5,378			
MODEL					
	Katsayılar	Standart Hata	Beta	t	Sig.(p-değeri)
Sabit	-0,962	0,094		-10,200	0,000
Y <sub>a</sub> /H <sub>b</sub>	-0,187	0,050	-0,193	-3,731	0,000
Fr <sub>b</sub> *	0,443	0,031	0,844	14,139	0,000
b/H <sub>b</sub>	0,672	0,120	0,305	5,607	0,000

Eş.5.4'teki bağıntının katsayılarının elde edildiği Çizelge 5.2 incelendiğinde, regresyon denklemindeki sabitin ve bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları Sig. (p-değeri) değeri 0,05'in altında olduğundan elde edilen katsayıların anlamlı derecede katkı sağladığı görülmektedir. Eş.5.4'teki üç bağımsız değişken içinde en etkili değişken Fr<sub>b</sub>\* olup beta katsayısı 0,844 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.1'de basınçlı akım durumu için Eş. 5.4 kullanılarak tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile ölçümlerden elde edilmiş oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Ölçülmüş ve tahmin edilmiş olan değerler arasındaki ilişki R<sup>2</sup>=0,87 olarak hesaplanmıştır. Bu durum basınçlı akım durumu için elde edilen bağıntının oyulma çukuru derinliği tahmin kabiliyetinin yüksek olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 5.1. Ölçülmüş ve tahmin edilmiş maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

### 5.2.2. Savak tipi akım için regresyon analizi

Savak tipi akım durumunda köprü tabliyesi altında oluşan düşey daralma nedeniyle temiz su oyulma derinliğini teoriksel olarak ifade eden ayrı bir ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Regresyon analizinde kullanılmış olan değişken girdileri Çizelge 5.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 5.3'te özetlenen deneysel veriler kullanılarak yapılan çoklu lineer regresyon analizinden savak tipi akım durumu için Eş.5.5'teki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = -1,002 - 0,190 \frac{y_a}{H_b} + 0,439 Fr_{b^*} + 0,925 \frac{b}{H_b} \quad (5.5)$$

Çizelge 5.3. Savak tipi akım durumunda regresyon analizinde kullanılan deney verileri

Deney No	$y_s/H_b$	$Y_a/H_b$	$Fr_b^*$	$b/H_b$	$w_s/H_b$
7	0,527	1,8333	3,4973	0,3333	0,1667
8	0,928	2,2000	4,1968	0,6000	0,2000
9	0,313	2,0000	3,4973	0,3333	0,3333
10	0,896	2,4000	4,1968	0,6000	0,4000
11	0,273	2,1667	3,4973	0,3333	0,5000
12	0,472	2,6000	4,1968	0,6000	0,6000
28	0,567	1,8333	3,9969	0,3333	0,1667
29	1,040	2,2000	4,7963	0,6000	0,2000
30	0,373	2,0000	3,9969	0,3333	0,3333
31	0,840	2,4000	4,7963	0,6000	0,4000
32	0,213	2,1667	3,9969	0,3333	0,5000
33	0,720	2,6000	4,7963	0,6000	0,6000
46	0,513	2,0000	4,4965	0,3333	0,3333
47	1,040	2,4000	5,3958	0,6000	0,4000
48	0,440	2,1667	4,4965	0,3333	0,5000
49	0,848	2,6000	5,3958	0,6000	0,6000
64	0,968	2,0000	4,1968	0,4000	0,2000
65	1,360	2,5000	5,2460	0,7500	0,2500
66	0,520	2,2000	4,1968	0,4000	0,4000
67	1,230	2,7500	5,2460	0,7500	0,5000
68	0,400	2,4000	4,1968	0,4000	0,6000
69	1,040	3,0000	5,2460	0,7500	0,7500
70	1,096	2,0000	4,7963	0,4000	0,2000
71	1,440	2,5000	5,9954	0,7500	0,2500
72	0,696	2,2000	4,7963	0,4000	0,4000
73	1,360	2,7500	5,9954	0,7500	0,5000
74	0,608	2,4000	4,7963	0,4000	0,6000
75	1,290	3,0000	5,9954	0,7500	0,7500
76	0,680	2,4000	5,3958	0,4000	0,6000
77	1,320	3,0000	6,7448	0,7500	0,7500
84	0,100	1,8333	2,9949	0,3333	0,1667
85	0,608	2,2000	3,5939	0,6000	0,2000
90	0,220	1,8333	3,4228	0,3333	0,1667
91	0,648	2,2000	4,1073	0,6000	0,2000
98	0,193	2,0000	3,8506	0,3333	0,3333
99	0,640	2,4000	4,6207	0,6000	0,4000
100	0,067	2,1667	3,8506	0,3333	0,5000
101	0,488	2,6000	4,6207	0,6000	0,6000
110	0,320	2,0000	3,5939	0,4000	0,2000
111	0,890	2,5000	4,4924	0,7500	0,2500
112	0,184	2,2000	3,5939	0,4000	0,4000
113	0,770	2,7500	4,4924	0,7500	0,5000
114	0,464	2,0000	4,1073	0,4000	0,2000
115	1,140	2,5000	5,1341	0,7500	0,2500
116	0,200	2,2000	4,1073	0,4000	0,4000
117	1,110	2,7500	5,1341	0,7500	0,5000
118	0,232	2,4000	4,1073	0,4000	0,6000
119	0,710	3,0000	5,1341	0,7500	0,7500
120	0,232	2,4000	4,6207	0,4000	0,6000
121	0,800	3,0000	5,7759	0,7500	0,7500

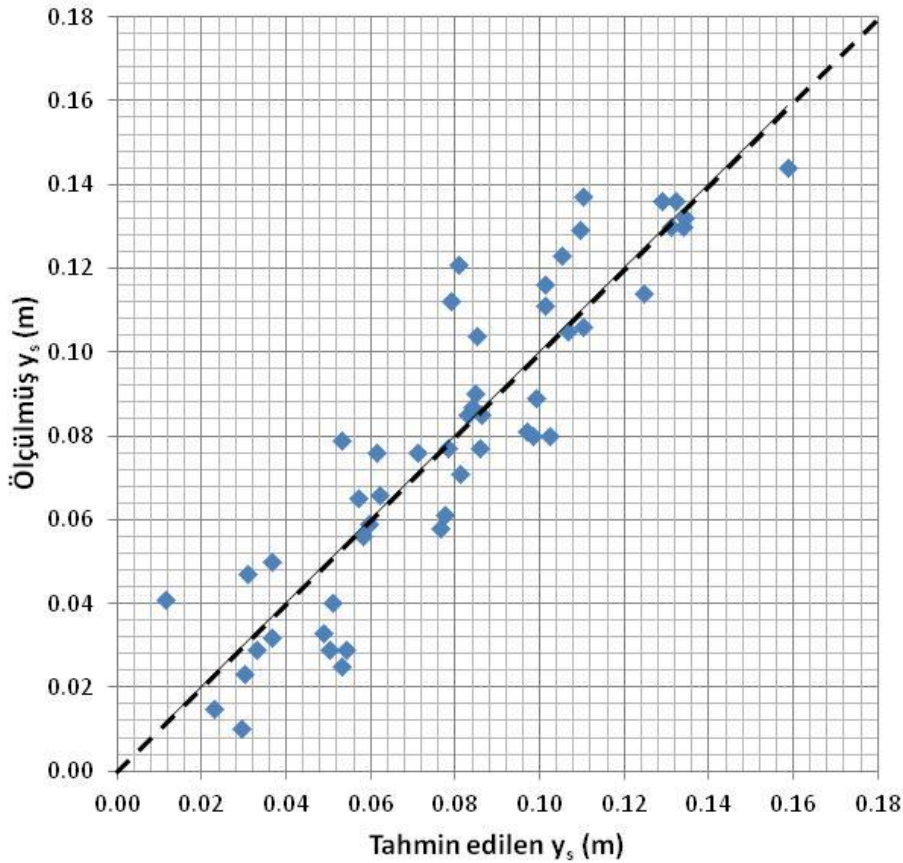
Çizelge 5.4. Savak tipi akım durumu için regresyon analizi

Regresyon İstatistikleri					
Çoklu R	0,940564419				
R <sup>2</sup>	0,884661426				
Ayarlı R <sup>2</sup>	0,877139345				
Standart Hata	0,132527802				
Gözlem	50				
Bağımlı Değişken	y <sub>s</sub> /H <sub>b</sub>				
Bağımsız Değişkenler	Y <sub>a</sub> /H <sub>b</sub> , Fr <sub>b</sub> *, b/H <sub>b</sub>				
ANOVA					
	df	SS	MS	F	Sig.(p)
Regresyon	3	6,197	2,066	117,609	0,000
Fark	46	0,808	0,0176		
Toplam	49	7,005			
MODEL					
	Katsayılar	Standart Hata	Beta	t	Sig.(p-değeri)
Sabit	-1,002	0,209		-4,805	0,000
Y <sub>a</sub> /H <sub>b</sub>	-0,190	0,105	-0,168	-1,809	0,000
Fr <sub>b</sub> *	0,439	0,046	0,715	9,609	0,000
b/H <sub>b</sub>	0,925	0,254	0,409	3,636	0,000

Yapılan analizde  $w_s/H_b$  değişkeni  $Y_a/H_b$  değişkeni içinde ifade edilmektedir. Çünkü yaklaşım akım derinliği tabliye üzerindeki savak yükünü de kapsamaktadır. Bu nedenle değişkenler arasında değişim periyotları birbirine benzemektedir. Dolayısıyla değerler arasındaki ilişkiden kaynaklı otokorelasyonu önlemek için  $w_s/H_b$  boyutsuz parametresi analiz dışında tutulmuştur. Regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.4'te özetlenmiştir. Savak tipi akım durumu için bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,94 olarak elde edilmiş olup değişkenler arasındaki ilişkinin derecesinin çok iyi olduğunu ifade etmektedir. Korelasyon sayısının karesi (R<sup>2</sup>) ise 0,88 olup bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki değişimi açıklama oranının çok yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen korelasyon katsayısının anlamlılığını sınavan varyans analizi tablosu incelendiğinde F'nin anlamlılık testi p (Sig.=0,000) değerinin 0,05'ten küçük olması modelde kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler arası ilişki için hesaplanan R=0,94 değerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Eş.5.5 kullanılan katsayıların elde edildiği tablo incelendiğinde, denklemdeki sabit ve bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları Sig. (p-değeri) değeri de 0,05'in altında olduğundan elde edilen

katsayıların anlamlı derecede katkı sağladığı görülmüştür. Eşitlikteki üç bağımsız değişken içinde en etkili değişkenin basınçlı akım durumunda olduğu gibi  $Fr_{b*}$  olduğu beta katsayısı 0,715 değerinde belirlenmiştir..

Savak tipi akım durumu için Eş. 5.5 kullanılarak elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliği ile ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinliğinin karşılaştırılması Şekil 5.2’de verilmiştir. Değerler arasındaki ilişki incelendiğinde  $R^2=0,82$  olarak elde edilmiştir. Savak tipi akım için elde edilen Eş.5.5’in ölçülmüş oyulma çukuru derinliklerinin tahmininde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.



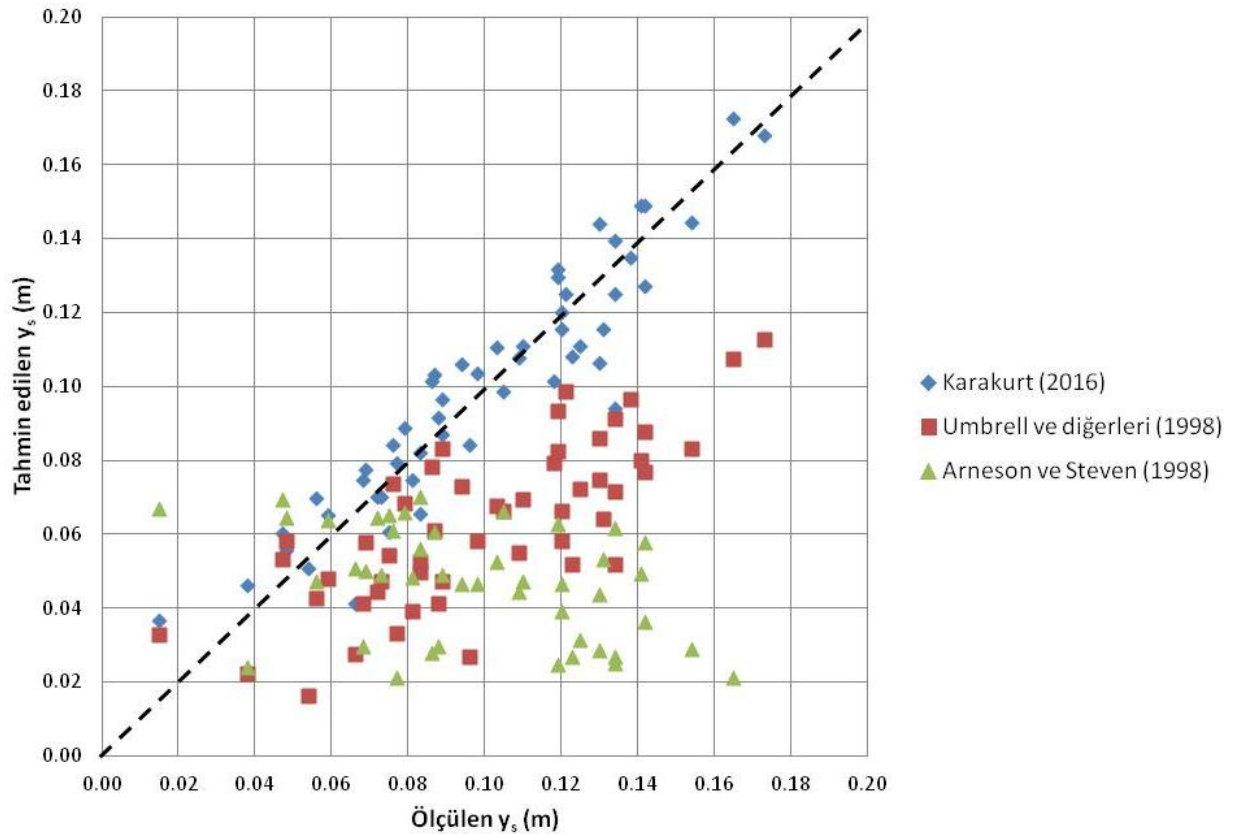
Şekil 5.2. Ölçülmüş ve tahmin edilmiş maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

### 5.3. Geliştirilmiş Olan Bağıntının Literatürdeki Bağıntılarla Karşılaştırılması

Literatürde basınçlı ve savak tipi akım durumları için köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma derinliğini inceleyen araştırma sayısı oldukça azdır. Mevcut araştırmalarda

da bu çalışmada olduğu gibi laboratuvar imkanları dahilinde yapılmış deneylerden ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Bu araştırmalar ile elde edilmiş bağıntılar Bölüm 2’de literatür bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

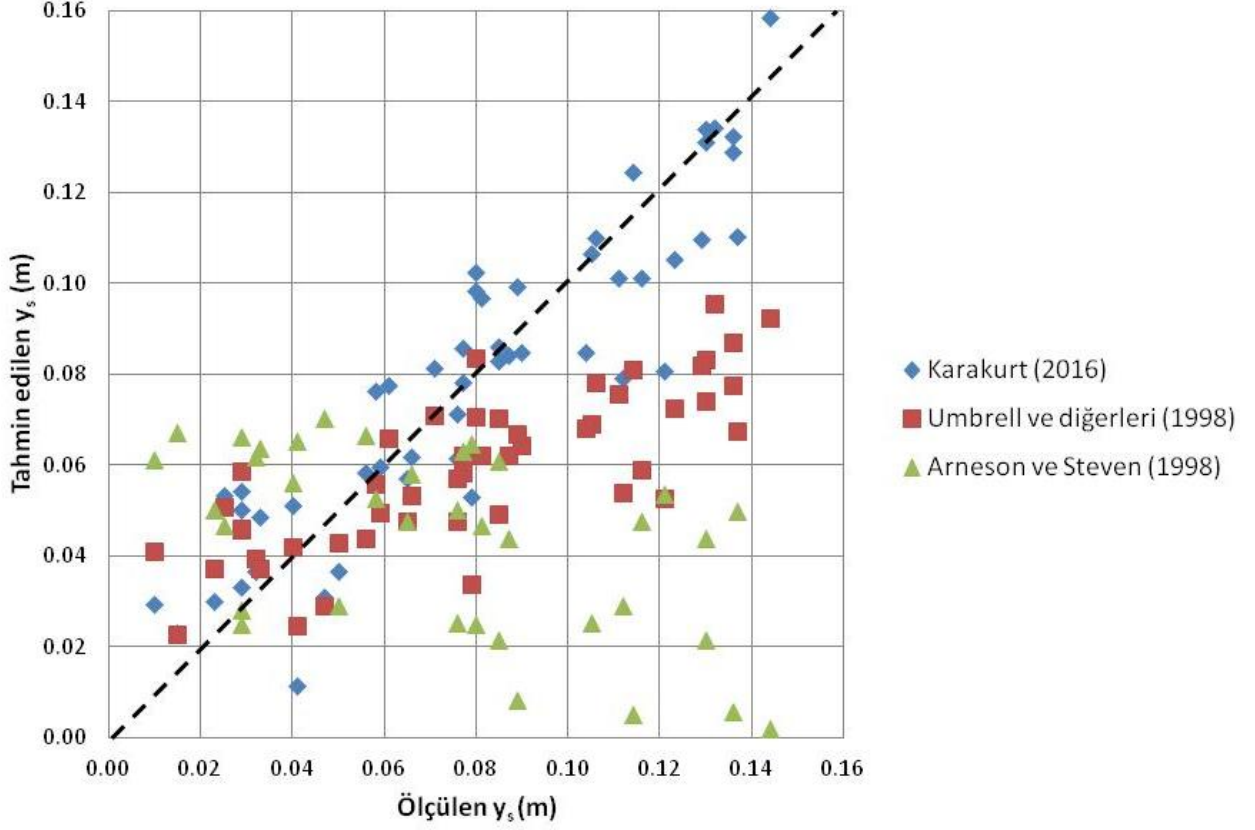
Çalışma kapsamındaki deney verileri kullanılarak basınçlı ve savak tipi akımlar için elde edilmiş olan bağıntılar literatürde Umbrell ve diğerleri (1998) ile Arneson ve Steve (1998) tarafından önerilmiş olan eşitliklerle karşılaştırılmış olup sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir. Karşılaştırmada basınçlı akım durumunda 52 deney verisi, savak tipi akım durumunda ise 50 deney verisi kullanılmıştır. Basınçlı ve savak tipi akım koşullarında bu deney verileri ile tahmin için kullanılan bağıntılardan elde edilen oyulma çukuru verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 5.3. Basınçlı akım durumunda ölçülmüş ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

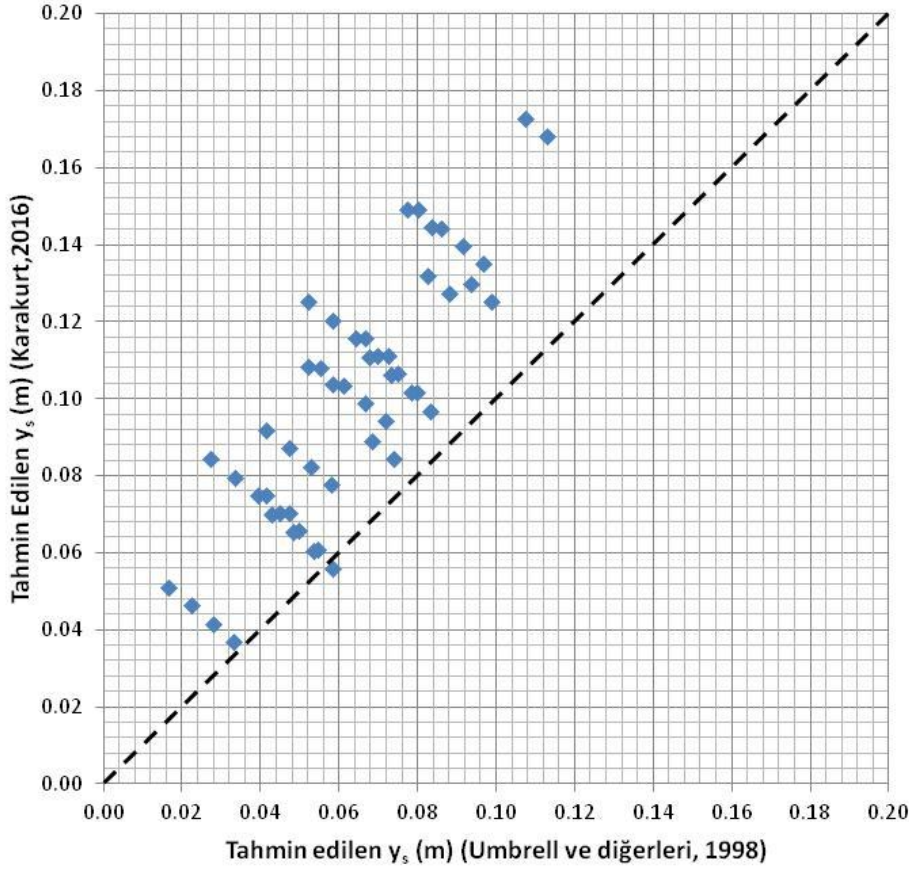
Şekil 5.3’te verilen dağılımlar incelendiğinde önerilen bağıntının tahmin değerlerinin uyum çizgisine daha yakın dağıldığı görülmüştür. Umbrell ve diğerleri (1998) tarafından önerilen eşitlikten elde edilen tahmin değerlerinin ise Arneson ve Steve (1998) tarafından

geliştirilmiş olan eşitlikten elde edilen tahmin değerlerinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 5.4. Savak tipi akım durumunda ölçülmüş ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

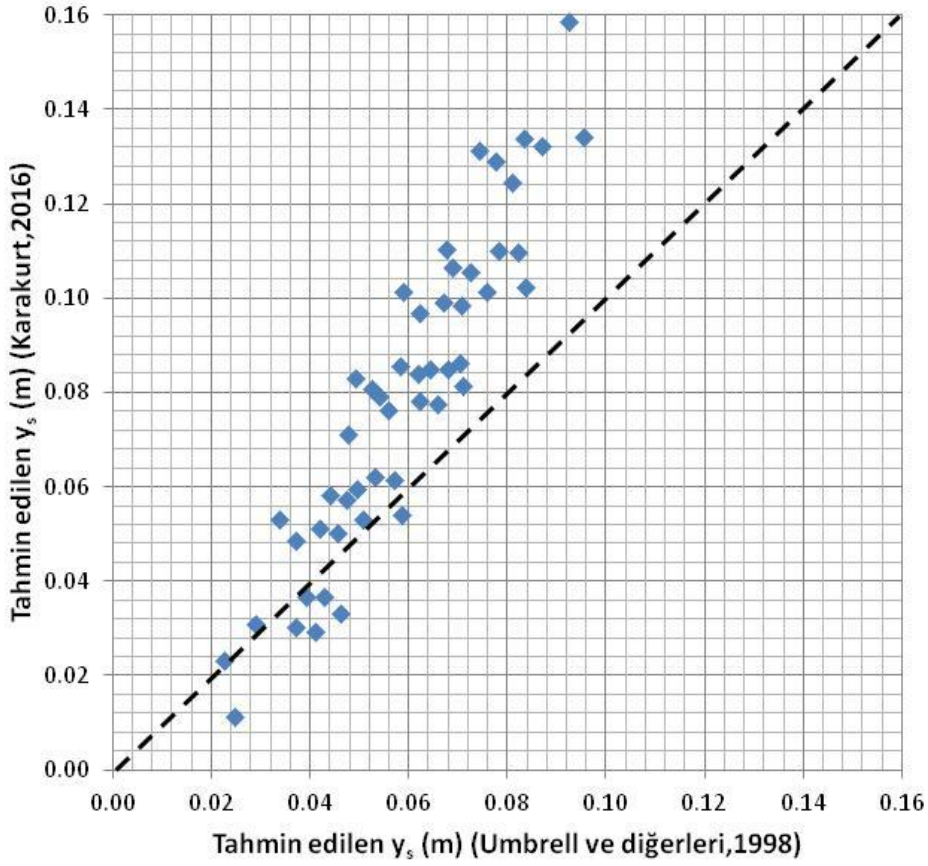
Şekil 5.4'te verilen dağılımlar incelendiğinde ise savak tipi akım durumunda da önerilen bağıntının tahmin değerlerinin uyum çizgisine daha yakın dağıldığı görülmüştür. Basınçlı akım durumunda olduğu gibi Umbrell ve diğerleri (1998) tarafından önerilen eşitlikten elde edilen tahmin değerleri Arneson ve Steve (1998) tarafından önerilen eşitlikten edilen tahmin değerlerinden daha iyi sonuç vermiştir. Umbrell ve diğerleri (1998) ile Arneson ve Steve (1998) tarafından önerilen eşitliklerde kullanılan deneysel veriler Shan ve diğerleri (2012) tarafından geliştirilen matematiksel modelde de kullanılıp test edilmiştir. Bu test sonucunda Shan ve diğerleri (2012) en iyi uyumu ve en yüksek güvenilebilirlik endeksini Umbrell ve diğerleri (1998)'nin eşitliğinden elde ettiklerini belirtmişlerdir. Umbrell ve diğerleri (1998)'nin eşitliği ile elde edilen bağıntıdan tahmin edilen oyulma çukuru derinlikleri basınçlı ve savak tipi akım durumları için ayrıntılı karşılaştırılması sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. Basınçlı akım durumu için farklı bağıntılarla tahmin edilmiş olan oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.5'e göre basınçlı akım durumu için elde edilmiş olan bağıntı ile Umbrell ve diğerleri (1998)'nin eşitliğinden tahmin edilmiş olan oyulma çukuru derinliklerinin doğrusal eğilim çizgisine göre korelasyon sayısının karesi ( $R^2$ ) 0,693 olup veriler arasındaki ilişkinin olduğunu göstermektedir.

Savak tipi akım durumu için Umbrell ve diğerleri (1998)'nin eşitliğinden ve elde edilen bağıntıdan tahmin edilen oyulma çukuru derinliğine ait veriler düzenlendiğinde, Şekil 5.6'da verilen dağılım elde edilmiştir. Tahmin edilen verilere ait doğrusal eğilim çizgisine göre  $R^2 = 0,862$  olup, veriler arasındaki ilişkinin savaklı durum için çok daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.6. Savak tipi akım durumu için farklı bağıntılarla tahmin edilmiş olan oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

Çalışma kapsamında basınçlı ve savak tipi akımlar için elde edilmiş olan bağıntılar ile Umbrell ve diğerleri (1998)'nin önerdiği bağıntı kullanılarak bağıntıların tahmin edebilme yetenekleri incelenmiştir. Veriler arasındaki uyumun savak tipi akım durumu için daha yüksek olduğu görülmüştür. Karşılaştırılan bağıntılara ait gerek laboratuvar şartları (kanal boyutları, pompa güçleri, deney sonlandırma süresi) gerekse deneyde kullanılan malzemelerin (köprü tabliye modeli, tabanda kullanılan katı madde tane çapı vb.) farklı olmasına rağmen önerilmiş olan bağıntının hem savak tipi hem de basınçlı akım durumları için maksimum oyulma çukuru derinliklerini tahmin etme başarısının yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte Umbrell ve diğerleri (1998)'nin deney sürelerinin 3,5 saat gibi kısa bir süreyle olduğu ama nihai oyulma çukuru derinliklerinin Laursen (1963)'ün denkleminde hesaplanan oyulma yüzdeleri kullanılmak suretiyle elde edildiği unutulmamalıdır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6. 1. Özet ve Sonuçlar

Bu çalışmada, basınçlı ve savak tipi akıma maruz kalmış iki şeritli köprüde, tabliye altında kanal tabanında meydana gelen oyulma çukuru şekli ve derinliği deneylerle incelenmiş ve oyulma çukuru üzerinde etkili olduğu düşünülen gerek akım gerekse köprüye ait geometrik parametreler incelenmiştir. Çalışmada köprü tabliyesi altındaki oyulma çukuruna etki eden parametreler arasında yaklaşım akım derinliği, giriş yüksekliği, sediment tane çapı, köprü tabliyesi konumu, giriş konumu etkileri ile basınçlı ve savak tip akım durumları yer almaktadır. Tüm deneyler temiz su durumunda gerçekleştirilmiştir.

Köprü tabliye konumunun oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için köprü tabliye modeli kanal tabanından  $H_1=20,0$  cm ve  $H_2=17,5$  cm yükseklikte olmak üzere iki farklı konuma yerleştirilmiştir. Tabliyenin 2,5 cm tabana yaklaştırılması halinde her iki sediment durumunda da oyulma çukuru derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Kaba taban malzemesinde oyulma çukuru derinliğindeki değişimin yaklaşık %40,45'e, ince taban malzemesinde ise en fazla oyulma çukuru derinliğindeki değişimin yaklaşık %28,33'e ulaştığı belirlenmiştir. Tabliye altında meydana gelen oyulma çukurunun şekli incelendiğinde ise basınçlı akım durumunda tabliye konumunun oyulma çukuru şekli üzerinde fark edilebilir bir etkisinin olmadığı ancak savak tipi akım durumunda köprü tabliyesinin düşey konumunun oyulma çukuru profilini etkileyerek çukurun membaya ötelenmesine neden olduğu görülmüştür.

Yaklaşım akım derinliğinin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için altı farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır. Aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla ortalama akım hızı ve dolayısıyla Froude sayısı küçülmüş ve meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin de azaldığı görülmüştür. Böylece yaklaşım akım derinliğinin en küçük olduğu yani tam tabliye altında olduğu durum ile korkuluk hizasında yani basınçlı akım olması halinde en büyük oyulma çukuru derinliklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Akımın savak tipi olması durumunda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükünün de arttığı ve oyulma çukuru derinliğinin azaldığı

gözlemlenmiştir. Oyulma çukuru şekli incelendiği ise basınçlı akım durumunda oyulma çukuru profilinin, savak tipi akıma kıyasla daha geniş olduğu görülmüştür.

Kanal tabanında kullanılan katı madde büyüklüğünün oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için iki farklı malzeme ( $D_{50}=1,1$  mm ve  $D_{50}=1,5$  mm) kullanılmıştır. Sediment medyan tane çapının maksimum oyulma çukuru derinliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu saptanmıştır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında ince taban malzemesi olması halinde hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru derinliğinin ve genişliğinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Kaba taban malzemesi durumunda ise öncelikle daha ince malzemeler harekete geçerek oyulmakta, tabanda kalan daha büyük taneler ise bir zırh tabakası gibi davranarak oyulma çukuru derinliğinin artmasını önlemektedir. Kaba taban malzemesi olması halinde savak tipi akım durumunda oyulma tabliye altında başlamakta ve akım tarafından taşınan sediment taneleri daralma etkisinin ortadan kalktığı anda hızın azalmasına bağlı olarak tabliye mansabında depolama meydana gelmiştir. Bu durumda oyulma çukuru şeklini önemli ölçüde etkilemiştir. Basınçlı akım durumunda ise tabliye altında oluşan akım alanı taşınmakta olan sediment tanelerini daha ileriye taşıyarak daralmanın hemen bittiği yerde depolama olmasını engellemiştir.

Düşey daralmanın oyulma çukuru üzerindeki etkisinin incelendiği bir diğer parametre ise giriş yüksekliği olmuştur. Aynı akım şartları ve taban malzemesi durumunda giriş yüksekliğinin artması maksimum oyulma çukuru derinliğini hem basınçlı hemde savak tipi akım için arttırmıştır. Özellikle savak tipi akım ve kaba taban malzemesi için maksimum oyulma çukuru derinliği değişim oranlarının yaklaşık 4-5 katına kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir. Oyulma çukuru şeklinde ise ince malzeme ile basınçlı ve savak tipi akım durumları için önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir.

Aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akımların oyulma çukuru üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aynı şartlarda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla basınçlı akım koşulunda oyulma çukuru derinliklerinde ciddi artışlar olduğu görülmüştür. Basınçlı akım durumunda oyulma çukuru derinliğinde meydana gelmiş olan bu artışların nedeni ise artan yaklaşım akım derinliğiyle akımın potansiyel enerjisinin artması ve bu enerjinin köprü tabliyesi altında oluşan akım hızını arttırarak daha fazla sedimentin taşınımını sağlaması olarak açıklanabilir. Savak tipi akım durumunda savak yükü ile

birlikte önceleri oyulma çukuru derinliği artsa da, savak yükünün büyümesiyle oyulma çukuru derinliğinde azalma gözlemlenmiştir. Bu ise süreklilik nedeniyle debisi artan savak akımı sonucunda, tabliye altındaki akım hızının azalması ve böylece daha küçük oyulma derinliklerinin meydana gelmesiyle açıklanabilir.

Akım yönünde tabliye kenarı ile giriş arasındaki mesafenin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için tekil giriş üç farklı konuma (tabliye eksenine menbana, ortasına ve mansabına) yerleştirilmiştir. Oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında en büyük oyulma çukuru derinliği sırasıyla köprünün menbana, mansabında ve ortasında elde edilmiştir. Bunun nedeni girişin tabliye kenarına yakın olması sebebiyle daha fazla vorteks oluşması ve karmaşık akım yapısı olarak açıklanabilir.

Ayrıca giriş ile kanal tabanı arasındaki açıklığın sabit olması halinde tabliye konumu ile giriş yüksekliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelendiğinde, giriş yüksekliğindeki artışın tüm ıslak alanda meydana getirdiği düşey daralmanın köprü tabliyesi konumundan kaynaklanan düşey daralmadan daha etkin olduğu görülmüştür.

Farklı tabliye konumları ve akım şartlarında aynı yaklaşım akım derinliğinin etkisi incelendiğinde basınçlı akım olması durumunda tabana daha yakın olan tabliye altında daha fazla oyulma meydana geldiği, savak tipi akım durumunda da benzer oyulma çukuru derinlikleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Ancak her durumda aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı akım savak tipi akıma kıyasla daha fazla oyulmaya neden olmuştur. Bu da tabliyenin tabana mesafesi oyulma çukuru derinliğini etkilese de, akım tipinin ve tabliye altından geçen akım hızının daha etkili olduğunu göstermiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen deneysel veriler kullanılarak hem basınçlı ve hem de savak tipi akım koşullarında köprü tabliyesi altında düşey daralma nedeniyle meydana gelen temiz su oyulma çukuru derinliğinin tahmininde kullanılabilecek iki bağıntı elde edilmiştir. Literatürde basınçlı ve savak tipi akım durumları için köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmayı inceleyen çalışma sayısı çok az olduğundan sadece deneysel verilerden elde edilmiş Umbrell ve diğerleri (1998)'nin önerdiği eşitlik ile elde edilen bağıntıdan çıkan veriler karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen veriler arasındaki uyumun yüksek olduğu, uyumun özellikle savak tipi akım durumları için çok daha iyi olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmayla literatüre deneysel olarak elde edilmiş ve köprü tasarımının ön projelendirmesinde kullanılabilecek iki yeni bağıntı sunulmuştur. Böylece basınçlı ve savak tipi akım durumlarında oyulma derinliğinin yaklaşık olarak hesaplanmasının tasarım sorunlarından kaynaklanan problemlerin azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca literatürde bu konuda yapılan deneysel çalışmalar çok kısıtlıdır. Yapılan bu çalışmayla literatüre yeni ölçüm verileri sağlanarak özellikle sayısal model simülasyonlarının gerçekleştirilebileceği düşünülmüştür.

## 6. 2. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Bu çalışma kapsamında kenar veya orta ayağı olmayan köprü tabliyesi altında kesit alanının daralması nedeniyle meydana gelmiş oyulma çukuru derinliği ve şekli laboratuvar imkanları dahilinde temiz su oyulması durumu için farklı akım şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın devamında yapılması önerilen çalışmalar aşağıda kısaca özetlemiştir:

- 1- Yaklaşım akımına ait Froude sayısı aralığı arttırılarak farklı akım hızlarında meydana gelen derinlikler incelenebilir.
- 2- Farklı taban malzemesi ve sediment tane boyutları kullanılabilir.
- 3- Basınçlı ve savak tipi akımlarda köprü tabliyesine ayak ilave edilerek bağıntılar geliştirilebilir.
- 4- Oyulma çukuru derinliği üzerinde özellikle hız alanının etkili olduğu düşünüldüğünden PIV ölçümleri ile hız alanları belirlenerek değerlendirme yapılabilir.
- 5- Temiz su oyulması yerine hareketli taban oyulması durumlarında deneyler yapılabilir.
- 6- Köprü tabliyesinin akıma dik olmadığı yani verevli olduğu durumda meydana gelecek oyulma çukuru derinliği incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Abed, L.M. (1991). *Local scour around bridge piers in pressure flow*, Ph.d. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, 43-63.
- Akib, S., Jahangirzadeh, A., Basser, H. (2014). Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(2), 108–116.
- Arneson, L. A. and Abt, S. R. (1998). Vertical contraction scour at bridges with waterflowing under pressure conditions. *Transportation Research Record*, 1647, 10-17.
- Barbhuiya, A.K., Mazumder, M.H. (2014). Live-bed local scour around vertical-wall abutments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20(3), 339-351.
- Beg, M. ve Beg, S. (2013). Scour Reduction around Bridge Piers: A Review. *International Journal of Engineering Inventions*, 2(7), 07-15.
- Chang, W., Constantinescu, G., Lien, H., Tsai, W., Lai, J., and Loh, C. (2013). Flow Structure around Bridge Piers of Varying Geometrical Complexity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8), 812-826.
- Das, S., Das, R., Mazumdar, A. (2013). Comparison of Characteristics of Horseshoe Vortex at Circular and Square Piers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(17), 4373-4387.
- Dey, S., Raikar, R.V. and Roy, A. (2008). Scour at Submerged Cylindrical Obstacles under Steady Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 105-109.
- Fael, C., Lança, R., Cardoso, A. (2016). Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium scour depth at single piers. *International Journal of Sediment Research*, 31(3), 244–250.
- Gua, J. (2011). Time-dependent clear-water scour for submerged bridge flows. *Journal of Hydraulic Research*, 49 (6), 744–749.
- Guo, J., Kerényi, K., Pagan-Ortiz, J.-E., Flora, K. and Afzal, B. (2010). Submerged-Flow Bridge Scour under Maximum Clear Water Conditions (I) Experiment. *International Conference on Scour and Erosion 2010 (ICSE-5)*, 807-814.
- Hong, S., Sturm, T., and Stoesser, T. (2015). Clear Water Abutment Scour in a Compound Channel for Extreme Hydrologic Events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(6).
- Ismael, A., Gunal, M. and Hussein, H. (2014). Influence of bridge pier position according to flow direction on scour reduction. *International Journal of Structural Analysis & Design – IJSAD*, 1(2), 1-5.

- İnternet: TKIC, Çaycuma Köprüsünün Çökmesi Üzerine Görüşler. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tkc.org.tr%2Fdocuments%2Fçaycuma.pdf&date=2016-11-23>, Son Erişim Tarihi: 10.10.2016.
- Jahangirzadeh, A., Basser, H., Akib, S., Karami, H., Naji, S., Shamshirband, S. (2014). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Different Shapes of Collars on the Reduction of Scour around a Single Bridge Pier. *PLoS ONE*, 9(6), 1-7.
- Khosronejad, A., Kang, S., Sotiropoulos, F. (2012). Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources*, 37, 73-85.
- Kumcu, S. Y. (2016). Steady and Unsteady Pressure Scour under Bridges at Clear-Water Conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(4), 334-342.
- Laursen, E. M. (1963). Analysis of relief bridge scour. *Journal of Hydraulic Division.*, 89(3), 93-118.
- Lin, C., Kao, M. J., Hsieh, S. C., Lo, L. F. and Raikar, R. V. (2012). On The Flow Structures Under A Partially Inundated Bridge Deck. *Journal of Mechanics*, 28 (1), 191-207.
- Lin, C., Bennett, C., Han, J. and Parsons, R. (2014). Effect of Soil Stress History on Scour Evaluation of Pile-Supported Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6), 913-921.
- Link, O., Klischies, K., Montalva, G. and Dey, S. (2013). Effects of Bed Compaction on Scour at Piers in Sand-Clay Mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9), 1013-1019.
- Lu, J. Y., Hong, J. H. and Su, C., Wang, C. and Lai, J. (2008). Field Measurements and Simulation of Bridge Scour Depth Variations during Floods, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 810-821.
- Lyn, D.A. (2008). Pressure-Flow Scour: A Reexamination of the HEC-18 Equation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 1015-1020.
- Mia, F. and Nago, H. (2000). Effect of liquefaction on local scour around a circular bridge pier under sudden water pressure drop, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 44, 516-526.
- Nasr-Allah, T.H., Mohamed, Y.A., Abdel-Aal, G.M., Awad, A.S. (2016). Experimental and numerical simulation of scour at bridge abutment provided with different arrangements of collars, *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1455-1463.
- Neill, C. R. (1973). *Guide to Bridge Hydraulics*, Toronto: University of Toronto Press, 1-25.

- Özalp, M.C. (2013). *Experimental Investigation Of Local Scour Around Bridge Pier Groups*, M.S. Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Ankara, 87-89.
- Peng, W. and Ram, B. (2016). Local scour around bridge abutments including effects of relative bed coarseness and blockage ratio. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(1), 51-59.
- Richardson, E.V., Harrison, L. J., Richardson, J. R. and Davis, S. R. (1993). *Evaluating scour at bridges*. Hydraulic Engineering Circular 18, Federal Highway Administration, April 1993 (No.FHWA.IP.90.017). Washington, 5-53.
- Shan, H., Xie, Z., Bojanowski, C., Suaznabar, O., Shen, J. and Lottes, S. (2012a). *Submerged-Flow Bridge Scour under Clear-Water Conditions*. Federal Highway Administration, August 2012 (No.FHWA.HRT.12.034). Georgetown Pike, 1-40.
- Shen, J., Shan, H., Xie, Z., Bojanowski, C., Lottes, S. and Kerenyi, K. (2012b). *Submerged-Flow Bridge Scour Under Clear-Water Conditions*, Paper presented at the ICSE6, Paris, 755-760.
- Tulimilli, B. R., Lottes, S. A., Majumdar P. and Kostic, M. (2011). *Three-Dimensional Scouring Analysis For Open Channel Pressure Flow Scour Under Flooded Bridge Decks*, Paper presented at the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2011), 1-7.
- Umbrell, E. R., Young G. K., Stein, S.M. and Jones, J.S. (1998). Clear-Water Contraction Scour Under Bridges In Pressure Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 236-240.
- Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salimi, S. (2016). The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour, *Sadhana*, 41(1), 75-86.
- Verma, D. V. S., Setia, B. and Bhatia, U. (2004). Constriction Scour In Pressurized Flow Condition. *Scientific Information Database (SID)*, 17(3), 237-246.
- Wang, H., Tang, H., Xiao, J., Wang, Y. and Jiang, S. (2016). Clear-water local scouring around three piers in a tandem arrangement. *Science China Technological Sciences*, 59(6), 888-896.
- Xiong, W., Cai, C., Kong, B. and Kong, X. (2014). CFD Simulations and Analyses for Bridge-Scour Development Using a Dynamic-Mesh Updating Technique. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 887-993.
- Yanmaz, A. M. (2002). *Köprü Hidroliği*. Ankara: METU Press, 143-210.
- Zhao, M., Cheng, L. and Zang, Z. (2010). Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents. *Coastal Engineering*, 57, 709-721.

Zokaei, M., Zarrati, A. R., Salamatian, S. A. and Tabarestani, M.K. (2013). Study on scouring around bridge piers protected by collar using low density sediment. *International Journal of Civil Engineering*, 11(3), 199-205.





**EKLER**

## EK-1. Deney verileri

Seri No	No	D <sub>50</sub> (m)	H <sub>i</sub> (m)	b (m)	H <sub>b</sub> (m)	Y <sub>a</sub> (m)	Q <sub>top</sub> (lt/s)	w <sub>s</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	Fr <sub>a</sub>	V <sub>c</sub> (Neil, 1973) (m/s)	y <sub>s</sub> (m)
BH1Q1Y1K2	1	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,096
BH1Q1Y1K3	2	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,134
BH1Q1Y2K2	3	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,513	0,077
BH1Q1Y2K3	4	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,513	0,120
BH1Q1Y3K2	5	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,250	70	0,000	0,280	0,179	0,522	0,081
BH1Q1Y3K3	6	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,250	70	0,000	0,280	0,179	0,522	0,131
SH1Q1Y4K2	7	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,079
SH1Q1Y4K3	8	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,116
SH1Q1Y5K2	9	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,047
SH1Q1Y5K3	10	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,112
SH1Q1Y6K2	11	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,041
SH1Q1Y6K3	12	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,059
BH1Q1Y4K2	13	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,072
BH1Q1Y4K3	14	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,110
BH1Q1Y5K2	15	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,083
BH1Q1Y5K3	16	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,130
BH1Q1Y6K2	17	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,075
BH1Q1Y6K3	18	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,118
BH1Q1Y1K3-TM	19	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,149
BH1Q1Y1K3-TU	20	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,188
BH1Q1Y1K3-TD	21	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,160
BH1Q1Y2K3-TM	22	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,513	0,127
SH1Q1Y4K3-TM	23	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,081
SH1Q1Y4K3-TU	24	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,124
SH1Q1Y4K3-TD	25	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,085
BH1Q2Y3K2	26	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,109
BH1Q2Y3K3	27	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,141
SH1Q2Y4K2	28	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,085
SH1Q2Y4K3	29	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,130
SH1Q2Y5K2	30	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,056
SH1Q2Y5K3	31	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,105
SH1Q2Y6K2	32	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,032
SH1Q2Y6K3	33	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,090
BH1Q2Y4K2	34	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,087
BH1Q2Y4K3	35	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,130
BH1Q2Y5K2	36	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,105
BH1Q2Y5K3	37	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,134
BH1Q2Y6K2	38	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,134
BH1Q2Y6K3	39	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,138

## EK-1. (devam) Deney verileri

Seri No	No	D <sub>50</sub> (m)	H <sub>i</sub> (m)	b (m)	H <sub>b</sub> (m)	Y <sub>a</sub> (m)	Q <sub>top</sub> (lt/s)	w <sub>s</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	Fr <sub>a</sub>	V <sub>c</sub> (Neil, 1973) (m/s)	y <sub>s</sub> (m)
BH1Q2Y3K3-TM	40	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,124
BH1Q2Y3K3-TU	41	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,170
BH1Q2Y3K3-TD	42	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,115
SH1Q2Y4K3-TM	43	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,092
SH1Q2Y4K3-TU	44	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,135
SH1Q2Y4K3-TD	45	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,119
SH1Q3Y5K2	46	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,077
SH1Q3Y5K3	47	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,130
SH1Q3Y6K2	48	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,066
SH1Q3Y6K3	49	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,106
BH1Q3Y5K2	50	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,119
BH1Q3Y5K3	51	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,165
BH1Q3Y6K2	52	0,0011	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,142
BH1Q3Y6K3	53	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,173
SH1Q3Y5K3-TM	54	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,083
SH1Q3Y5K3-TU	55	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,141
SH1Q3Y5K3-TD	56	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,110
BH1Q3Y6K3-TM	57	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,132
BH1Q3Y6K3-TU	58	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,178
BH1Q3Y6K3-TD	59	0,0011	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,163
BH2Q1Y1K2	60	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,123
BH2Q1Y1K3	61	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,503	0,142
BH2Q1Y2K2	62	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,513	0,098
BH2Q1Y2K3	63	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,513	0,154
SH2Q1Y3K2	64	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,250	70	0,025	0,280	0,179	0,522	0,121
SH2Q1Y3K3	65	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,250	70	0,025	0,280	0,179	0,522	0,136
SH2Q1Y4K2	66	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,275	70	0,050	0,255	0,155	0,530	0,065
SH2Q1Y4K3	67	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,275	70	0,050	0,255	0,155	0,530	0,123
SH2Q1Y5K2	68	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,300	70	0,075	0,233	0,136	0,538	0,050
SH2Q1Y5K3	69	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,300	70	0,075	0,233	0,136	0,538	0,104
SH2Q2Y3K2	70	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,250	80	0,025	0,320	0,204	0,522	0,137
SH2Q2Y3K3	71	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,250	80	0,025	0,320	0,204	0,522	0,144
SH2Q2Y4K2	72	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,275	80	0,050	0,291	0,177	0,530	0,087
SH2Q2Y4K3	73	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,275	80	0,050	0,291	0,177	0,530	0,136
SH2Q2Y5K2	74	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,300	80	0,075	0,267	0,155	0,538	0,076
SH2Q2Y5K3	75	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,300	80	0,075	0,267	0,155	0,538	0,129
SH2Q3Y5K2	76	0,0011	0,175	0,050	0,125	0,300	90	0,075	0,300	0,175	0,538	0,085
SH2Q3Y5K3	77	0,0011	0,175	0,075	0,100	0,300	90	0,075	0,300	0,175	0,538	0,132
BH1Q1Y1K2	78	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,557	0,054
BH1Q1Y1K3	79	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,557	0,088
BH1Q1Y2K2	80	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,568	0,038
BH1Q1Y2K3	81	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,568	0,089

## EK-1. (devam) Deney verileri

Seri No	No	D <sub>50</sub> (m)	H <sub>t</sub> (m)	b (m)	H <sub>b</sub> (m)	Y <sub>a</sub> (m)	Q <sub>top</sub> (lt/s)	w <sub>s</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	Fr <sub>a</sub>	V <sub>c</sub> (Neil, 1973) (m/s)	y <sub>s</sub> (m)
BH1Q1Y3K2	82	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,250	70	0,000	0,280	0,179	0,579	0,066
BH1Q1Y3K3	83	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,250	70	0,000	0,280	0,179	0,579	0,083
SH1Q1Y4K2	84	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,588	0,015
SH1Q1Y4K3	85	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,588	0,076
BH1Q1Y4K2	86	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,588	0,015
BH1Q1Y4K3	87	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,588	0,069
BH1Q2Y3K2	88	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,579	0,056
BH1Q2Y3K3	89	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,579	0,103
SH1Q2Y4K2	90	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,588	0,033
SH1Q2Y4K3	91	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,588	0,081
BH1Q2Y4K2	92	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,588	0,059
BH1Q2Y4K3	93	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,588	0,094
BH1Q2Y5K2	94	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,596	0,047
BH1Q2Y5K3	95	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,596	0,086
BH1Q2Y6K2	96	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,604	0,048
BH1Q2Y6K3	97	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,604	0,089
SH1Q3Y5K2	98	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,596	0,029
SH1Q3Y5K3	99	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,596	0,080
SH1Q3Y6K2	100	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,604	0,010
SH1Q3Y6K3	101	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,604	0,061
BH1Q3Y5K2	102	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,596	0,079
BH1Q3Y5K3	103	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,596	0,119
BH1Q3Y6K2	104	0,0015	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,604	0,076
BH1Q3Y6K3	105	0,0015	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,604	0,121
BH2Q1Y1K2	106	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,557	0,068
BH2Q1Y1K3	107	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,200	70	0,000	0,350	0,250	0,557	0,120
BH2Q1Y2K2	108	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,568	0,073
BH2Q1Y2K3	109	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,225	70	0,000	0,311	0,209	0,568	0,125
SH2Q1Y3K2	110	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,250	70	0,025	0,280	0,179	0,579	0,040
SH2Q1Y3K3	111	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,250	70	0,025	0,280	0,179	0,579	0,089
SH2Q1Y4K2	112	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,275	70	0,050	0,255	0,155	0,588	0,023
SH2Q1Y4K3	113	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,275	70	0,050	0,255	0,155	0,588	0,077
SH2Q2Y3K2	114	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,250	80	0,025	0,320	0,204	0,579	0,058
SH2Q2Y3K3	115	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,250	80	0,025	0,320	0,204	0,579	0,114
SH2Q2Y4K2	116	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,275	80	0,050	0,291	0,177	0,588	0,025
SH2Q2Y4K3	117	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,275	80	0,050	0,291	0,177	0,588	0,111
SH2Q2Y5K2	118	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,300	80	0,075	0,267	0,155	0,596	0,029
SH2Q2Y5K3	119	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,300	80	0,075	0,267	0,155	0,596	0,071
SH2Q2Y5K2	120	0,0015	0,175	0,050	0,125	0,300	90	0,075	0,300	0,175	0,596	0,029
SH2Q2Y5K3	121	0,0015	0,175	0,075	0,100	0,300	90	0,075	0,300	0,175	0,596	0,080

EK-2. Regresyon analizi için kullanılan deney verileri

Deney No	D <sub>50</sub> (m)	Akım Durumu	H <sub>t</sub> (m)	b (m)	H <sub>b</sub> (m)	Y <sub>a</sub> (m)	Q <sub>top</sub> (lt/s)	w <sub>s</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	Fr <sub>a</sub>
1	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,200	70	0,000	0,350	0,250
2	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250
3	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,225	70	0,000	0,311	0,209
4	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209
5	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,250	70	0,000	0,280	0,179
6	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,250	70	0,000	0,280	0,179
7	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155
8	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155
9	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,300	70	0,050	0,233	0,136
10	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,300	70	0,050	0,233	0,136
11	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,325	70	0,075	0,215	0,121
12	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,325	70	0,075	0,215	0,121
13	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155
14	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155
15	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,300	70	0,050	0,233	0,136
16	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,300	70	0,050	0,233	0,136
17	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,325	70	0,075	0,215	0,121
18	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,325	70	0,075	0,215	0,121
26	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,250	80	0,000	0,320	0,204
27	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204
28	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177
29	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177
30	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155
31	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155
32	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138
33	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138
34	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177
35	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177
36	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155
37	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155
38	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138
39	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138
46	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175
47	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175
48	0,0011	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155
49	0,0011	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155
50	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175
51	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175
52	0,0011	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155
53	0,0011	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155
60	0,0011	Basınçlı	0,175	0,050	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250

## EK-2 (devam) Regresyon analizi için kullanılan deney verileri

Deney No	D <sub>50</sub> (m)	Akım Durumu	H <sub>t</sub> (m)	b (m)	H <sub>b</sub> (m)	Y <sub>a</sub> (m)	Q <sub>top</sub> (lt/sn)	w <sub>s</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	Fr <sub>a</sub>
61	0,0011	Basınçlı	0,175	0,075	0,100	0,200	70	0,000	0,350	0,250
62	0,0011	Basınçlı	0,175	0,050	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209
63	0,0011	Basınçlı	0,175	0,075	0,100	0,225	70	0,000	0,311	0,209
64	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,250	70	0,025	0,280	0,179
65	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,250	70	0,025	0,280	0,179
66	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,275	70	0,050	0,255	0,155
67	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,275	70	0,050	0,255	0,155
68	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,300	70	0,075	0,233	0,136
69	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,300	70	0,075	0,233	0,136
70	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,250	80	0,025	0,320	0,204
71	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,250	80	0,025	0,320	0,204
72	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,275	80	0,050	0,291	0,177
73	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,275	80	0,050	0,291	0,177
74	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,300	80	0,075	0,267	0,155
75	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,300	80	0,075	0,267	0,155
76	0,0011	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,300	90	0,075	0,300	0,175
77	0,0011	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,300	90	0,075	0,300	0,175
78	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,200	70	0,000	0,350	0,250
79	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250
80	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,225	70	0,000	0,311	0,209
81	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209
82	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,250	70	0,000	0,280	0,179
83	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,250	70	0,000	0,280	0,179
84	0,0015	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155
85	0,0015	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155
86	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155
87	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155
88	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,250	80	0,000	0,320	0,204
89	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204
90	0,0015	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177
91	0,0015	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177
92	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177
93	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177
94	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155
95	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155
96	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138
97	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138
98	0,0015	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175
99	0,0015	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175
100	0,0015	Savaklı	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155
101	0,0015	Savaklı	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155
102	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175
103	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175
104	0,0015	Basınçlı	0,200	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155

## EK-2 (devam) Regresyon analizi için kullanılan deney verileri

Dene y No	D <sub>50</sub> (m)	Akım Durumu	H <sub>t</sub> (m)	b (m)	H <sub>b</sub> (m)	Y <sub>a</sub> (m)	Q <sub>top</sub> (lt/sn)	w <sub>s</sub> (m)	V <sub>a</sub> (m/s)	Fr <sub>a</sub>
105	0,0015	Basınçlı	0,200	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155
106	0,0015	Basınçlı	0,175	0,050	0,125	0,200	70	0,000	0,350	0,250
107	0,0015	Basınçlı	0,175	0,075	0,100	0,200	70	0,000	0,350	0,250
108	0,0015	Basınçlı	0,175	0,050	0,125	0,225	70	0,000	0,311	0,209
109	0,0015	Basınçlı	0,175	0,075	0,100	0,225	70	0,000	0,311	0,209
110	0,0015	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,250	70	0,025	0,280	0,179
111	0,0015	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,250	70	0,025	0,280	0,179
112	0,0015	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,275	70	0,050	0,255	0,155
113	0,0015	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,275	70	0,050	0,255	0,155
114	0,0015	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,250	80	0,025	0,320	0,204
115	0,0015	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,250	80	0,025	0,320	0,204
116	0,0015	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,275	80	0,050	0,291	0,177
117	0,0015	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,275	80	0,050	0,291	0,177
118	0,0015	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,300	80	0,075	0,267	0,155
119	0,0015	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,300	80	0,075	0,267	0,155
120	0,0015	Savaklı	0,175	0,050	0,125	0,300	90	0,075	0,300	0,175
121	0,0015	Savaklı	0,175	0,075	0,100	0,300	90	0,075	0,300	0,175

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARAKURT, Onur  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 13.04.1982, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (505) 501 64 42  
 e-mail : karakurtonur@yahoo.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İnşaat Müh. A.B.D	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Müh. A.B.D	2009
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Müh. Bölümü	2005
Lise	Fatih Sultan Mehmet Lisesi	2000

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015 - Halen	Türkiye Kalkınma Bankası AŞ	Kıdemli Uzman
2010 - 2015	Türkiye Kalkınma Bankası AŞ	Uzman
2007 - 2010	Türkiye Kalkınma Bankası AŞ	Uzman Yardımcısı
2005 - 2007	Su Yapı Müh. Müş. AŞ	Proje Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Erdal, H. İ. and Karakurt, O. (2012). Advancing Monthly Streamflow prediction accuracy of CART Models Using Ensemble Learning Paradigms. *Journal of Hydrology*, 477, 119-128.

Erdal, H.İ., Karakurt, O., and Namlı, E. (2012). High Performance Concrete Compressive Strength Forecasting Using Ensemble Models Based on Discrete Wavelet Transform. *Engineering Applications Of Artificial Intelligence*, 26, 1246-1254.

Karakurt, O., Erdal, H.İ., Namlı, E., Aydogmus, H.Y., and Turkkan, Y.S. (2013). Comparing Ensembles of Decision Trees and Neural Networks For One-Day-Ahead Streamflow Prediction. *Scientific Research Journal*, 1 (4), 43-55.

Aydogmus, H.Y., Erdal, H.İ., Karakurt, O. (2015), Namlı, E., Turkkan, Y.S., and Erdal, H. (2015). A Comparative Assessment of Bagging Esemble Models for Modeling Concrete Slump Flow. *Computers and Concrete*, 16 (5), 741-757.

Baduna Koçyiğit, M., and Karakurt, O. (2015). *Basınçlı ve Savak Tipi Akım Durumlarında Köprü Tabliyesi Altındaki Oyulmaların İncelenmesi*, 4. Su Yapıları Sempozyumu, Antalya.

### **Hobiler**

Resim, Spor, El Sanatları, Kitap Okumak

## DİZİN

**A**

Abstract · v  
Açık kanal · 21,23  
Ağ sistemi · 30  
ANOVA · 86

**B**

Başınçlı akım · 13, 14, 57, 58  
Beta · 88, 91  
Boyut analizi · 15, 16, 17, 18, 19

**C**

CFD · 11

**Ç**

Çizelge listesi · ix

**D**

Derecelendirme sayısı · 26

**E**

EKLER · 105

**F**

F · 88, 91  
Froude sayısı · 19, 28

**G**

Geometrik standart sapma · 25  
Giriş · 1

**H**

Hız profili · 14

**İ**

İçindekiler · vii

**K**

Katsayılar · 88, 91  
Kaynaklar · 101  
Kısaltmalar · xvii  
Kiriş konumu · 64, 65  
Kiriş yüksekliği · 47, 48

**L**

Literatür · 5, 6  
Lazermetre · 28, 29

**M**

Model · 88, 91  
MS · 88, 91

**Ö**

Özet · iv  
Özgeçmiş · 112

**P**

Parçacık densimetrik Forude · 85  
p-değeri · 88, 91  
PIV · 11, 100

**R**

Regresyon · 86, 87, 88, 89, 90, 91  
Resimlemelerin listesi · xvi  
Reynolds sayısı · 19

**S**

Savaklı akım · 13, 14  
Simgeler ve Kısaltmalar · xv, xvi  
Sonuç ve öneriler · 97,100  
SS · 88, 91  
Standart hata · 88, 91

**Ş**

Şekiller listesi · x, xi, xii, xiii

**T**

Taban malzemesi · 52, 53  
Taban malzemesi · 52, 53  
Tabliye · 24, 25  
Teşekkürler · vi

**U**

Uniformluluk sayısı · 25

**Y**

Yaklaşım akım derinliği · 41, 42



*GAZİ GELECEKTİR..*