
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE FARKLI AKIM ŞARTLARINDA MEYDANA GELEN TABAN OYULMALARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Gülay DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2018

Gülay DEMİR tarafından hazırlanan "AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE FARKLI AKIM ŞARTLARINDA MEYDANA GELEN TABAN OYULMALARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Başkan : Prof. Dr. A. Melih YANMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Üye : Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Tez Savunma Tarihi: 31/01/2018

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

…….……

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dökümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında 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.

Gülay DEMİR

31/01/2018

AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE FARKLI AKIM ŞARTLARINDA MEYDANA GELEN TABAN OYULMALARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gülay DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2018

ÖZET

Köprüler ulaşım ağının uzun süre ve yaygın biçimde kullanılan çok önemli elemanlarıdır. Taşkın dönemlerinde akarsu debisinin ani ve önemli miktarda artmasıyla birlikte su seviyesi yükselmekte, köprü ayakları etrafında ciddi oyulmalara ve bu oyulmalardaki artışlara bağlı olarak köprülerin yıkılmalarına veya ağır hasar görmelerine neden olabilmektedir. Bu araştırma kapsamında laboratuvar koşullarında 15°'lik verevlik açısı olan köprü modeli ile temiz su durumunda, basınçlı ve savak tipi akım şartlarında deneyler yapılmış ve verev köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru derinliği ve şekli ile bu büyüklükler üzerinde etkili olan parametreler incelenmiştir. Çalışmada yaklaşım akım derinliği, kiriş yüksekliği, basınçlı ve savak tipi akım durumları ile tabliyenin verevli olması durumlarının oyulma çukuru derinliğine etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Basınçlı ve savak tipi akım koşullarında temiz su oyulması durumunda elde edilen deney ölçümleri kullanılarak her iki akım durumu için regresyon analizi yapılmış ve iki adet ampirik bağıntı elde edilmiştir. Köprü tabliyesinin akıma dik olması ile 15° verevli olması durumlarındaki maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılarak verevliğin etkisi incelenmiştir. Kiriş yüksekliğinin artması, tabliyenin verevli olması ve yaklaşım akım derinliğinin küçülmesi maksimum oyulma çukuru derinliğini artıran etkenler olarak tespit edilmiştir. Savak tipi akımla karşılaştırıldığında aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı akım durumunda oyulma çukuru derinliğinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinden yararlanarak basınçlı akım durumunda oyulma çukurunun daha geniş olduğu saptanmıştır.

Bilim Kodu	:	91122
Anahtar Kelimeler	:	Basınçlı akım, savak tipi akım, maksimum oyulma çukuru derinliği, akarsu köprüleri, verevlik
Sayfa Adedi	:	97
Danışman	:	Yrd. Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SCOURING UNDER SKEWED BRIDGE DECK IN PRESSURIZED AND WEIR TYPE OF FLOW

(M. Sc. Thesis)

Gülay DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2018

ABSTRACT

Bridges are very important elements of transportation network that are broadly in use for long periods of time. During flooding, water level rises as a result of sudden and significant increase in the amount of the river flow, which can cause bridge failure or serious damage to the river bridges due to scouring around piers and increase in the magnitude of these scour holes. In the scope of this research, experiments were carried out in a flume under clear water, pressurized and weir type of flow conditions with a bridge model having a skewness angle of 15° and scour hole depth and shape formed under this skewed bridge deck were investigated in regard with the parameters that have influence on these quantities. Effects of approach flow depth, girder height, pressurized and weir type of flow conditions and skewness of bridge deck on scour hole depth were investigated separately. Regression analysis was performed for both flow conditions using experimental measurements obtained for clear water under pressure and weir type of flow conditions and two empirical equations were obtained. The effect of bridge skewness was investigated by comparing measured data of maximum scour depths formed under a similar bridge model located perpendicular to the flow and a bridge with a skewness angle of 15°. Increasing beam height, skewness of bridge deck and decreasing approach flow depth were identified as factors that increased the maximum depth of scour hole. It was noted that there was an increase in the scour hole depth under pressurized flow at the same approach flow depth when compared with weir type of flow. Furthermore, by using the dimensionless scour hole profiles, it was also shown that the width of the scour hole for pressurized flow was wider.

Science Code : 91122

Key Words : Pressurized flow, weir type of flow, maximum scour depth, river bridges, skewness

Page Number : 97

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, değerli bilgilerini, yardımını ve sabrını esirgemeyen değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'E, çalışma kapsamında yürütülen deneylerde yardımcı olan ağabeyim Erhan DEMİR'E ve arkadaşım İnşaat Mühendisi Çağrı DEMİRCİOĞLU'NA, hayatım boyunca desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen başta canım annem Ümmü DEMİR olmak üzere sevgili aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimince, yürütücülüğünü Yrd. Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'İN yaptığı 06/2016-07 kodlu proje ile desteklenmiştir. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar birimine verdiği destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE OYULMA MEKANİZMASI 5

2.1. Literatür Araştırması 5

2.2. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Koşullarında Oyulma Mekanizması 13

2.3. Boyut Analizi 15

3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ 23

3.1. Deney Düzeneği 23

3.2. Deney Elemanları 23

3.2.1. Taban malzemesi 23

3.2.2. Köprü tabliye modeli 26

3.3. Deneysel Ölçümler 29

3.4. Akım Özellikleri 29

3.5. Deney Prosedürü 31

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ 33

4.1. Genel 33

Sayfa

4.2. Yaklaşım Akım Derinliği Etkisinin İncelenmesi 36

4.3. Kiriş Yüksekliği Etkisinin İncelenmesi 40

4.4. Basınçlı ve Savak Tipi Akımı Durumlarının İncelenmesi..... 42

4.5. Verevlik Açısının Oyulma Çukuru Derinliğine Etkisinin İncelenmesi 50

4.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Tartışma 56

5. MAKSİMUM OYULMA ÇUKURU DERİNLİĞİNİ TAHMİN EDEN AMPİRİK BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ 65

5.1. Genel 65

5.2. Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi..... 65

5.2.1. Basınçlı akım için regresyon analizi..... 66

5.2.2. Savak tipi akım için regresyon analizi..... 69

6. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 75

6.1. Çalışma Özeti ve Sonuçlar..... 75

6.2. Yapılacak Çalışmalar için Öneriler 76

KAYNAKLAR 79

EKLER..... 81

EK-1. 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri..... 82

ÖZGEÇMİŞ 96

DİZİN 97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Türkiye'de bulunan verevlik açısına sahip akarsu köprülerine örnekler ... 2

Çizelge 3.1. Taban malzemesine ait karakteristik büyüklükler 26

Çizelge 4.1. Maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenen parametreler ve deney sayıları 34

Çizelge 4.2. Deney sonuçları özet tablosu 34

Çizelge 4.3. Yaklaşım akım derinlikleri ve maksimum oyulma çukuru derinlikleri 37

Çizelge 4.4. Kiriş yüksekliği değişiminin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi 41

Çizelge 4.5. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi 44

Çizelge 4.6. Akıma dik ve 15°'lik verevlik açısı olan tabliye altında tabanda oluşan maksimum oyulma çukuru derinlikleri 51

Çizelge 5.1. Basınçlı akım durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri 66

Çizelge 5.2. Basınçlı akım durumu için regresyon analizi sonuçları – 3 bağımsız değişkenli 67

Çizelge 5.3. Basınçlı akım durumu için regresyon analizi sonuçları – 2 bağımsız değişkenli 68

Çizelge 5.4. Basınçlı akım durumu için ölçülen ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri 69

Çizelge 5.5. Savak tipi akım durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri 70

Çizelge 5.6. Savak tipi akım durumu için regresyon analizi sonuçları – sabit katsayılı. 71

Çizelge 5.7. Savak tipi akım durumu için regresyon analizi sonuçları 72

Çizelge 5.8. Savak tipi akım durumu için ölçülen ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri 74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Basınçlı akım durumunda oluşan akım çizgileri ve hız profilleri..... 16

Şekil 2.2. Köprü tabliyesi geometrik parametreleri 17

Şekil 3.1. Deney düzeneğinin plan ve yandan görünümü..... 24

Şekil 3.2. Deney düzeneğinin üç boyutlu görünümü..... 25

Şekil 3.3. Test bölgesi ve tabliye modeli 26

Şekil 3.4. 50 mm kiriş yüksekliğindeki tabliye modeli 28

Şekil 3.5. Tabliye modeli plan görünümü..... 28

Şekil 3.6. 50 mm ve 75 mm'lik kiriş yüksekliklerine sahip tabliye modellerinin 3 boyutlu görünümü..... 29

Şekil 3.7. Ölçüm ağı..... 30

Şekil 4.1. Savak tipi akım durumu için köprü tabliye modeli ile ilgili parametreler..... 33

Şekil 4.2. Basınçlı akım durumu için köprü tabliye modeli ile ilgili parametreler..... 34

Şekil 4.3. Q_1=70 lt/sn için basınçlı akım koşulunda üç farklı yaklaşım akım derinliği için elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri 39

Şekil 4.4. Q_2=80 lt/sn için savak tipi akım koşulunda üç farklı yaklaşım akım derinliği için elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri..... 39

Şekil 4.5. Q_3=90 lt/sn için savak tipi akım koşulunda iki farklı yaklaşım akım derinliği için elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri..... 40

Şekil 4.6. Basınçlı ve savak tipi akımda farklı Froude sayılarında 5,0 ve 7,5 cm kiriş yüksekliklerinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,179 b) Fr=0,177 c) Fr=0,175 43

Şekil 4.7. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 70 lt/sn'lik debide farklı Froude sayılarında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,155 b) Fr=0,136 46

Şekil 4.8. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 80 lt/sn'lik debi ve farklı Froude sayılarında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,177 b) Fr=0,155 c) Fr=0,138 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.9. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, Froude sayısı 0,155 için tabliyenin dik ve verevli olması halinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri 48

Şekil 4.10. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 90 lt/sn'lik debi ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde farklı Froude sayılarında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,175 b) Fr=0,155 49

Şekil 4.11. Basınçlı akım durumunda, 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri 50

Şekil 4.12. Savak tipi akım durumunda, 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri 50

Şekil 4.13. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 70 lt/sn'lik debi ve 5,0 cm'lik kiriş yüksekliğinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Basınçlı akım ve Fr=0,179 b) Savak tipi akım ve Fr=0,155 c) Savak tipi akım ve Fr=0,121 54

Şekil 4.14. Üç farklı debi için tabliyenin verevli ve akıma dik olması durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin en fazla değişim gösterdiği deneyler için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) BQ1Y2K3 b) SQ2Y6K2 c) SQ3Y6K2 55

Şekil 4.15. Fr=0,155 için verevlik açısı 15° olan tabliye ile akıma dik olarak yerleştirilmiş tabliye (Karakurt, 2016) olması durumlarında savak tipi akım koşulunda tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru şekilleri 57

Şekil 4.16. Fr=0,155 için verevlik açısı 15° olan tabliye ile akıma dik olarak yerleştirilmiş tabliye (Karakurt, 2016) durumlarında basınçlı akım koşulunda tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru şekilleri 58

Şekil 4.17. Basınçlı akım durumunda, farklı densimetrik Froude sayısına ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi 61

Şekil 4.18. Basınçlı akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi 62

Şekil 4.19. Savak tipi akım durumunda, farklı densimetrik Froude sayısına ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi 62

Şekil 4.20. Savak tipi akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi 63

Şekil 5.1. Basınçlı akım için ölçülen ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması 70

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.2. Savak tipi akım için ölçülen ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması 73

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Deney kanalı ve tabliye modeli..... 27

Resim 3.2. Taban ölçümlerinde kullanılmış olan lazermetre ve hareketli çerçeve sistem 30

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
B	Basınçlı akım durumu
b	Kiriş yüksekliği
B_a	Akarsu genişliği
b_n	Kiriş sayısı
b_t	Kirişin genişliği
C	Kohezyon
C_c	Sediment derecelendirme sayısı
C_d	Daralma katsayısı
C_u	Sediment üniformluk katsayısı
cm	Santimetre
df	Serbestlik derecesi
D_{10}	Sedimentin %10'unun daha küçük olduğu tane çapı
D_{50}	Yatak malzemesi medyan tane çapı
D_{60}	Sedimentin %60'ının daha küçük olduğu tane çapı
$D_{84,1}$	Sedimentin %84,1'inin daha küçük olduğu tane çapı
F	Varyans analizi
Fr	Froude sayısı
Fr_b	Tabliye altındaki akıma ait Froude sayısı
Fr_{b*}	Parçacık densimetrik Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
H_b	Kirişin en alt kotu ile taban seviyesi arasındaki mesafe
H_t	Tabandan itibaren tabliye konumu
K	Toplam kiriş yüksekliği
K_a	Akarsu güzergahı etkisini gösteren katsayı
K_b	Memba taban pürüzlülüğü katsayısı
K_c	Şevlerin pürüzlülük katsayısı
K_d	En kesit geometri etkisini gösteren katsayı

Simgeler	Açıklamalar
K_f	Tane şekil faktörü
kW	Kilowatt
K_α	Verevlik açısının etki faktörü
lt	Litre
L	Boyut analizinde kullanılan uzunluk sembolü
L_t	Tabliye genişliği
m	Metre
mm	Milimetre
m^3	Metreküp
M	Boyut analizinde kullanılan kütle sembolü
MS	Ortalama kare
Q	Debi
R	Korelasyon katsayısı
R^2	Determinasyon katsayısı
Re_b	Köprü tabliyesi altında akıma ait Reynolds sayısı
S	Savak tipi akım
sn	Saniye
S_o	Taban eğimi
SS	Kareler toplamı
t	Oyulma süresi
t_1	Döşeme ile korkuluk arasındaki yükseklik
t_2	İlave korkuluk yüksekliği
T	Boyut analizinde kullanılan zaman sembolü
u_*	Kayma gerilmesi hızı
V_a	Ortalama yaklaşım akım hızı
V_b	Tabliye altındaki ortalama akım hızı
V_c	Yatak malzemesi için kritik hız
w_s	Tabliye üzerinden aşan savak akımı derinliği
x	Ölçüm noktasının test bölgesi başlangıcından uzaklığı
x_{max}	Maksimum oyulma çukuru derinliğinin konumu
X_t	Kirişin tabliyedeki konumu
Y	Savak tipi ve basınçlı akım için su seviyesi

Simgeler	Açıklamalar
y_a	Yaklaşım akım derinliği
y_d	Sediment yığılma yüksekliği
y_{max}	Ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliği
y_s	Oyulma çukuru derinliği
Δ	Sediment malzemesinin göreli yoğunluğu
ν	Suyun kinematik viskozitesi
ρ	Suyun yoğunluğu
ρ_s	Sediment yoğunluğu
σ_g	Sediment tane dağılımı standart sapması
°	Derece
%	Yüzde

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AU	Alexandria Üniversitesi
CFD	Computational Fluid Dynamics
DSİ	Devlet Su İşleri
IU	Iowa Üniversitesi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
PIV	Particle Image Velocimetry
PVC	Poli Vinil Klorür
TFHRC	Turner-Fairbank Highway Research Center
USBR	United States Bureau of Reclamation

1. GİRİŞ

Köprüler akarsu, yol, demiryolu vb. engelleri geçmek için ulaşım ağının uzun süre ve yaygın biçimde kullanılan çok önemli elemanlarıdır. Türkiye'de 2016 yıl sonu itibariyle Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) envanterinde kayıtlı 7809 adet köprü bulunmaktadır. Bunlardan yaklaşık %85'ini akarsu köprüleri oluşturmaktadır. Ülkemizdeki akarsu köprülerinin büyük bölümü basit açıklı elastomer mesnetli betonarme köprüler olup, akarsu yatağı içinde bir veya daha fazla orta ayağa sahip, köprü aksı ekseni akarsu akımına dik projelendirilen köprülerdir. Ancak bazen ulaşım güzergahı veya topoğrafik şartlar nedeniyle köprü tabliye ve orta ayak eksenleri akarsu yaklaşım akımına dik konumlandırılamamakta yani bu eksenler ile yaklaşım akım yönü arasında verevlik açısı denen bir açı meydana gelmektedir. KGM envanterinde yapılan incelemelerde farklı verevlik açısına sahip birçok akarsu köprüsü olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 1.1'de KGM envanterinde bulunan verevlik açısına sahip akarsu köprülerine örnekler verilmiştir.

Dünyada ve ülkemizde yapılmış olan birçok araştırmada akarsu köprülerinin yıkılma veya hasar görme sebeplerinin başında hidrolik etkenlerin geldiği belirlenmiştir. Özellikle taşkınlar sırasında akarsu debisi ve su seviyesi arttığından köprü basınçlı veya savak tipi akıma maruz kalmakta, köprüye etkiyen dinamik kuvvetler değişmekte, köprü açıklıkları akımla taşınan kütük, dal vb. malzemeyle tıkanarak akım alanını daraltmakta, akarsuda hidrolik sıçramaya neden olmakta ve özellikle köprü tabliyesi altında ve ayaklar etrafında meydana gelen oyulmaları ciddi şekilde etkilemektedir (Yanmaz, 2002).

Türkiye'de neredeyse her yıl dolaylı veya doğrudan akarsu köprü felaketleri nedeniyle ciddi maddi hasarın yanı sıra can kayıpları da söz konusu olmaktadır. Örneğin; Nisan 2012'de Zonguldak'ın Çaycuma ilçesinde Filyos Çayı üzerinde bulunan Çaycuma Köprüsü tabliyesinin bir bölümünün göçmesiyle 15 kişi hayatını kaybetmiştir. Aynı yıl Sinop'ta taşkın suyunun köprü üzerinden aşması ile köprü orta ve kenar ayaklarındaki oyulmalar artmış ve kenar ayaktaki oyulma nedeniyle Güzelceçay Köprüsü yıkılmıştır (Rizenin Sesi Habersitesi, 2013). Yine 2012'de ayaklar arasındaki açıklığın akımla taşınan malzemeyle küçülmesi sonucunda Antalya, Manavgat'ta Dolbazlar Köprüsü çökmüştür (Haberciniz Haber Sitesi, 2014). Temmuz 2013'te Sinop Ayancık-Erfelek'te orta ayaklarda oyulma sonucu Gebelit Köprüsü yıkılmıştır. Kasım 2015'te Artvin'in Borçka, Murgul ve Hopa

ilçelerinde meydana gelen ve üç kişinin hayatını kaybettiği, 11 kişinin de yaralandığı sel felaketinde Çoruh Nehri'nin yan kolu üzerindeki beton köprünün akım alanının ağaç ve diğer malzemelerle tıkanması sonucunda sel sularının mahalleye girdiği, buradaki tüm ev ve iş yerlerinin zemin ve bodrum katlarının sular altında kaldığı tespit edilmiştir (Milliyet Gazetesi, 2015). Temmuz 2016'da ise Ordu'da meydana gelen şiddetli yağış nedeniyle Altınordu'dan Perşembe ilçesine geçişi saplayan Akçaova Köprüsü ayaklarındaki oyulma nedeniyle çökmüştür (Birgün Haber Sitesi, 2016).

Çizelge 1.1. Türkiye'de bulunan verevlik açısına sahip akarsu köprülerine örnekler

Sıra No	Köprü Adı	İli	Proje Yılı	Verevlik Açısı (°)
1	Elmalı I	Erzurum	2014	60
2	İlke Deresi	Manisa	2014	30
3	Özlüce I-II	Erzurum	2014	50
4	Duroğlu Varyant II	Giresun	2014	40
5	Esece	Manisa	2014	50
6	Değirmencik	Bayburt	2014	52,7
7	Seme I	Sivas	2014	55
8	Çekerek I-II-III	Yozgat	2014	50,12
9	Kireçhane I	Trabzon	2012	62
10	Eşemgölü Deresi İnekçidere I	Sakarya	2012	62
11	Karapınar	Antalya	2012	60
12	Kanlı Pelit	Trabzon	2012	67,3
13	Küçükahmet	Giresun	2012	60
14	Kürtün	Giresun	2012	65,55
15	Gümüşhane	Gümüşhane	2012	60,67
16	Gürpınar	Van	2009	45
17	Köprübaşı (Çarksuyu)	Sakarya	2007	60
18	Gölcük I	Bursa	2008	54
19	Kuşçu Deresi	Elazığ	2005	55
20	Sansa II	Erzincan	2006	50
21	Alaşehir Çayı	Manisa	2001	58
22	Karasu II	Bilecik	1996	45
23	Azdavay II	Kastamonu	1994	50
24	Umurlar	Bolu	1988	45
25	Folderesi III	Trabzon	1978	58
26	Zap I (Depin)	Hakkari	1976	50
27	Değirmendere II - VII - III	Trabzon	1976	58 - 45 - 58
28	Kentderesi	Burdur	1956	60

Literatürde de akarsu köprüleri için benzer sonuçlar tespit edilmiştir. Örneğin, ABD'de 1950 yılından itibaren hasar gören 823 akarsu köprüsü üzerinde yapılan çalışmalarda hasar nedenlerinin %60 kadarı, taban seviyesinin alçalması ve köprü açıklığındaki yerel oyulmalar olmak üzere hidrolik etkenlere bağlanmıştır (Yanmaz, 2002). Bu nedenle, günümüzde birçok araştırmayla önemli gelişmeler elde edilmesine rağmen nehir yatağındaki akım ve katı madde hareketleri köprü güvenilirliği için hala önemini korumaktadır. Özellikle taşkın durumunda köprünün savak tipi veya basınçlı akıma maruz kalması halinde köprü tabliyesi altındaki akım ve oyulma mekanizması oldukça karmaşık olmakta ve çözümü zorlaştırmaktadır. Günümüzde gelişen fiziksel laboratuvar olanakları ve matematiksel çözüm yöntemlerinden yararlanılarak oyulma mekanizmasının modellenme çalışmaları devam etmektedir. Ancak literatürde verev akarsu köprü tabliyesi altında veya orta ayakları etrafında meydana gelmiş oyulma mekanizmasının veya verevlik açısının oyulma çukuru derinliğine etkisinin incelendiği bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, laboratuvar koşullarında verevlik açısı 15° olan bir akarsu köprü modeli kullanarak temiz su olması halinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarında, verev köprü tabliyesi altında kanal tabanında oluşan oyulma çukuru derinliğinin ve şeklinin incelenmesi, bu büyüklükleri etkileyen akım, sediment ve geometrik parametrelerin araştırılması ve maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin etmek için kullanılabilecek ampirik bir bağıntının elde edilmesidir. Ayrıca, çalışmadan elde edilen deney sonuçları ile literatürde bulunan aynı laboratuvar koşulları, akım ve sediment büyüklükleri kullanılarak akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine ait verilerin (Karakurt, 2016) karşılaştırılarak sadece verevlik açısının maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

İkinci bölümde, akım alanında düşey daralmadan dolayı köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru derinliği ve bu derinlik üzerinde etkili olan parametrelerle ilgili literatür çalışmaları, teorik ve ampirik yaklaşımlar özetlenmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında maksimum oyulma çukuru derinliği ile ilgili yapılmış boyut analizi sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında yürütülen laboratuvar çalışmaları, deney düzeneği, kullanılan malzemeler ve deney prosedürü ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, laboratuvar çalışması sonucunda elde edilen deney verileri irdelenmiş, köprü tabliyesi altında kanal tabanında meydana gelmiş olan maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve farklı akım, sediment ve geometrik parametrelerin bu derinlik üzerindeki etkileri incelenmiş ve bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca verevlik açısının maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisini doğrudan inceleyebilmek için elde edilen deney verileri Karakurt (2016)'ya ait deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bulgular tartışılmıştır.

Beşinci bölümde, araştırma sonucunda elde edilen deney verileri kullanılarak basınçlı ve savak tipi akım durumları için regresyon analizi yapılmış, maksimum oyulma çukuru derinliğini veren ampirik bağıntılar elde edilmiştir.

Altıncı bölümde ise tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve önerilen çalışmalar verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE OYULMA MEKANİZMASI

2.1. Literatür Araştırması

Çalışma kapsamında yapılmış olan literatür araştırmasında, verev akarsu köprüleri altında meydana gelen akım alanı, sediment hareketi veya oyulma çukurunun incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bunun yanında, özellikle taşkın sırasında meydana gelebilen basınçlı ve savak tipi akım durumları için de sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu nedenle bu bölümde akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyeleri kullanmak suretiyle yapılmış olan basınçlı ve savak tipi akımlarla ilgili çalışmalar özet olarak sunulmuştur.

Mostafa,Yassin, Ettema ve Melville (1993), dikdörtgen köprü ayaklarında verevlik açısının yerel oyulma derinliği üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırma kapsamındaki deneyler, Iowa Üniversitesi (IU) ile Mısır'daki Alexandria Üniversitesinde (AU) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, Iowa Üniversitesinde bulunan 25,0 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve 0,6 m derinliğindeki kanal ile Alexandria Üniversitesindeki 12,0 m uzunluğunda, 0,86 m genişliğinde ve 0,6 m derinliğindeki kanal kullanılmıştır. IU deneylerinde ortalama tane çapı 0,9 mm olan üniform taban malzemesi ve AU deneylerinde ortalama tane çapı 0,6 mm olan üniform olmayan taban malzemesi kullanılmıştır. Dikdörtgen kesitli ayağın genişliği 35 mm olup verevlik açısı 0°'den 90°'ye kadar 15°'lik dilimlerle değiştirilmiştir. Elde edilen deney verilerine göre verevlik açısı etki faktörü K_α'nın, sadece verevlik açısı ve ayağın genişlik/boy oranıyla değil, akım derinliği/ayak genişliği oranı, sediment tane çapı (D_{50}) ve sediment standart sapması (σ_g) ile değişmekte olduğu saptanmıştır. K_α verevlik faktörünün ayakların maksimum 75°'lik verevlik açısına kadar artması durumunda arttığı ve bu açıdan sonra nispeten azaldığı tespit edilmiştir.

Umbrell, Young, Stein ve Jones (1998), temiz su durumunda ve basınçlı akım koşulunda akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmaları incelemiştir. Deneyler Virginia, Mclean şehrinde bulunan ABD Federal Karayolu İdaresi'ne ait Turner-Fairbank Otoban Araştırma Merkezi'nde yürütülmüştür. Deneylerde, taban eğimi %0,0007 olan 21,3 m uzunluğunda, 1,8 m genişliğinde ve 0,6 m derinliğinde bir kanal kullanılmıştır.

Test bölgesi, 2,4 m uzunluğunda, 1,8 m genişliğinde ve 0,4 m derinliğinde olup kanalın 13,0 m mansabında konumlandırılmıştır. Çalışmada 1,830 m uzunluğunda, 0,610 m genişliğinde ve 0,095 m yüksekliğinde bir köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Deneyler akımın köprü tabliyesi üzerinden savaklandığı 6 farklı konumu için yapılmış, yaklaşım akım derinliği 0,305 m yüksekliğinde sabit tutularak H_b (kirişin en alt seviyesi ile bozulmamış taban seviyesi arasındaki mesafe) değişken olarak alınmıştır. Taban malzemesi olarak ortalama tane çapları 0,3 mm, 1,2 mm ve 2,4 mm olan üç farklı sediment kullanılmıştır. Deneylerde yaklaşım akım hızları 0,231 m/sn ile 0,636 m/sn değerleri arasında değişmiştir. Çalışma kapsamında 81 adet deney yapılmış ve deney süreleri 3,5 saat olarak belirlenmiştir. Süreklilik kanununa göre tabliye altından ve üstünden geçen toplam akım Eş. 2.1'de verilmiştir.

$$Q_{toplam} = Q_{savak} + Q_{tabliye} \tag{2.1}$$

Burada, Q_{toplam}=toplam debi (m^3/sn); Q_{savak}=tabliye üzerinden savaklanan debi (m^3/sn); $Q_{tabliye}$=tabliye altından geçen debiyi (m^3/sn) ifade etmektedir.

$$V_a y_a B = V_a w_s B + V_c (H_b + y_s) B \tag{2.2}$$

Burada, V_a=ortalama yaklaşım akım hızı (m/sn); y_a=yaklaşım akım derinliği (m); B=genişlik (m); w_s=köprü üzerinden aşan su yüksekliği (m); V_c=taban malzemesini harekete geçirecek kritik ortalama sürükleme hızı (m/sn); H_b=kirişin en alt seviyesi ile bozulmamış taban seviyesi arasındaki mesafe (m) ve y_s=maksimum oyulma çukuru derinliği (m) olup ortalama yaklaşım akım hızının köprü tabliyesi üzerinden aşan akım hızına eşit olduğu kabul edilmiştir. Buna göre Eş. 2.2 yeniden düzenlenip yaklaşım akım derinliğine bölünerek Eş. 2.3 elde edilmiştir.

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

Eş. 2.3'te tabliye üzerinden savaklanan su yükü olmaması durumunda w_s=0 olmaktadır.

Elde edilen deneysel veriler kullanılarak Eş. 2.3'teki değişkenler ile logaritmik regresyon analizi yapılmıştır. Buna göre regresyon analizinden bulunan katsayılar ile Eş. 2.3 tekrar düzenlenmiş ve Eş. 2.4 elde edilmiştir.

$$\frac{H_b + y_s}{y_a} = 1{,}102\left[\frac{V_a}{V_c}(1 - \frac{w_s}{y_a})\right]^{0{,}603} \tag{2.4}$$

Basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğini veren bağıntı Eş. 2.4'te verilen denklemin tekrar düzenlenmesiyle elde edilmiş ve Eş. 2.5'te verilmiştir.

$$y_s = y_a - \left\{1{,}102\left[\frac{V_a}{V_c}\left(1 - \frac{w_s}{y_a}\right)\right]^{0{,}603}\right\} - H_b \tag{2.5}$$

Arneson ve Abt (1998), akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında temiz su durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini, basınçlı akım için incelemişlerdir. Deneyler, Colorado Devlet Üniversitesi Mühendislik Araştırma Merkezi'nde uzunluğu 60,96 m ve genişliği 2,44 m olan bir kanalda yapılmıştır. Basınçlı akımın etkileri üç akım durumu için dört farklı sediment kullanılarak tabliyenin altı farklı konumunda incelenmiştir. Deneylerde, ortalama tane çapı 0,6 mm, 0,9 mm, 1,5 mm ve 3,3 mm olan dört farklı taban malzemesi kullanılmıştır. Test bölgesi uzunluğu 7,32 m ve genişliği de 2,44 m'dir. Araştırmacılar 116 deney ölçümünden elde ettikleri veriler ile regresyon analizi yapmışlardır. Regresyon analizinden elde edilen bağıntı Eş. 2.6'da verilmiştir.

$$\frac{y_s}{y_a} = -0{,}93 + 0{,}23\left(\frac{y_a}{H_b}\right) + 0{,}82\left(\frac{y_s + H_b}{y_a}\right) + 0{,}03\left(\frac{V_a}{V_c}\right) \tag{2.6}$$

Eş. 2.6 tekrar düzenlenmiş ve Eş. 2.7 elde edilmiştir.

$$\frac{y_s}{y_a} = -5{,}08 + 1{,}27\left(\frac{y_a}{H_b}\right) + 4{,}44\left(\frac{H_b}{y_a}\right) + 0{,}19\left(\frac{V_a}{V_c}\right) \tag{2.7}$$

Arneson ve Abt (1998), başlangıçtaki sediment hareketi ile ilgili y_a yaklaşım akım derinliğine bağlı olarak V_c kritik hızı Eş. 2.8 ile tanımlanmıştır.

$$V_c = -1{,}52\sqrt{g(\Delta - 1)D_{50}}\left(\frac{y_a}{D_{50}}\right)^{1/6} \quad (2.8)$$

Burada, g=yerçekimi ivmesi; D_{50}=taban malzemesi medyan tane çapı (m), Δ=sedimentin göreli yoğunluğu olup $(\rho_s-\rho)/\rho$ ile ifade edilmektedir. Neil (1973) tarafından geliştirilen kritik ortalama akım hızı denkleminde 1,58 olarak kullanılmış olan katsayı Arneson ve Abt (1998) tarafından Eş 2.8'de 1,52 olarak kullanılmıştır.

Verma, Setia ve Bhatia (2004), basınçlı akım durumunda hidrograf şeklinde verilen kararsız akım koşullarında köprü tabliyesi altında ve dairesel köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma çukurunu incelemişlerdir. Deneyler, Hindistan'ın Kurukshetra şehrinde yer alan Ulusal Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında, 12,5 m uzunluğunda, 0,4 genişliğinde ve 0,55 m derinliğinde kanal ile 0,4 m uzunluğunda, 0,2 m genişliğinde ve 0,15 m yüksekliğinde köprü tabliye modeli kullanarak yapılmıştır. Taban malzemesi olarak ortalama tane çapı 0,37 mm olan sediment kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 43 adet deney gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 90 mm, 105 mm ve 120 mm olmak üzere üç farklı akım derinliğinde, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm köprü açıklıklarında taban malzemesini harekete geçirecek başlangıç hızına karşılık gelen yaklaşım akım hızlarını kullanarak 13 farklı deney seti gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre akım derinliğindeki değişimin basınçlı akım oyulması üzerindeki etkisi, tabliye altındaki düşey daralmanın daha düşük olduğu durumlarda daha belirgin olarak artış göstermiştir. Akım derinliğindeki %33'lük bir artış için, 40, 50, 60 ve 70 mm köprü açıklıklarında (H_b) oyulma fraksiyonundaki ($y_s/(H_b+y_s)$) artışın sırasıyla %13,24; 18,50; 68,40 ve 277,98 olduğu görülmüştür.

Guo, Kerenyi, Pagan-Ortiz ve Flora (2010), temiz su koşullarında hem teorik hem deneysel olarak kirişli köprü tabliyesi altındaki basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulmayı incelemişlerdir. Deneylerde, 21,35 m uzunluğunda ve 1,83 m genişliğinde dikdörtgen kanal ile 5,8 cm yüksekliğinde altı kirişli ve 7,0 cm yüksekliğinde üç kirişli köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Test bölgesi 2,8 m uzunluğunda ve 0,63 m genişliğinde olup kanalın ortasında konumlandırılmıştır. Deneylerin süresi 32 ile 48 saat arasında değişmiştir. Elde edilen deney verileri ile iki boyutlu oyulma çukuru profilleri ve üç boyutlu oyulma çukuru yapısı incelenmiştir. Yürütülen deneylerde maksimum oyulma çukuru konumunun tabliyenin mansap kenarından tabliye genişliğinin %15'i kadar köprünün hemen altında

oluştuğunu; oyulmanın, yaklaşık bir tabliye genişliği kadar köprünün memba kısmından başlarken sediment depolama alanının ise yaklaşık tabliye genişliğinin 2,5 katı kadar köprü mansabında gerçekleştiğini ve maksimum oyulma çukuru derinliğinin sediment boyutu arttıkça azaldığını ancak taşkın sırasında artacağını ortaya koymuştur.

Hahn ve Lyn (2010), düşey daralma nedeniyle meydana gelen temiz su oyulmasını farklı deney süreleri için incelemişlerdir. Deneyler, Purdue Hidrodinamik Laboratuvarında, 11,0 m uzunluğunda, 0,45 m genişliğinde ve 0,72 m yüksekliğinde bir kanalda yapılmıştır. Test bölgesi kanal girişinden yaklaşık olarak 3,2 m'de konumlandırılmıştır. Test malzemesinin ortalama tane çapı 0,6 mm'dir. Deneyler 6 ile 48 saat arasında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, tek bir yaklaşım derinliği ve taban malzemesi ile iki farklı yaklaşım hızı kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre her iki yaklaşım hızında maksimum oyulma çukuru derinliği daralma bölgesi mansabında meydana gelmiştir. Ortalama akım hızının küçük olduğu durumlarda deney başlangıcından 48 saat sonra dahi oyulmanın devam ettiği görülmüştür. Ayrıca, en uzun deney süresinde oyulmanın sona ermediği, oyulma çukurunun dengeye ulaşmamış olsa dahi maksimum oyulma çukuru derinliğinin, farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş olan modellerle kıyaslandığında denge durumunda oyulma çukuru derinliği tahminlerini önemli ölçüde aştığı saptanmıştır.

Zhai (2010), tamamen basınçlı akım koşullarında köprü tabliyesi altında temiz su halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin zamana bağlı değişimini deneysel olarak araştırmış ve deney verilerinden yarı ampirik bir bağıntı geliştirmiştir. Deneyler, 21,35 m uzunluğa, 1,83 m genişliğe, 0,55 m derinliğe ve 0,0007 taban eğimine sahip kanal ile 0,63 m uzunluğunda, 0,26 m genişliğinde, 5,8 cm yüksekliğinde altı kirişli tabliye modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taban malzemesi olarak ortalama tane çapı 1,14 mm ve 2,18 mm olan iki farklı sediment kullanılmıştır. Deney süresi ise 42 saat olarak belirlenmiştir. Oyulma çukuru derinliğinin denge durumuna gelene kadar zamanla birlikte arttığını, değişim oranının zaman geçtikçe azaldığını ve denge durumuna gittikçe sıfıra yaklaştığını saptamıştır.

Shen, Shan, Suaznabar, Xie, Bojanowski, Lottes ve Kerenyi (2012), Turner-Fairbank Highway Research Center (TFHRC)'de yapılmış olan deney verilerinden yararlanarak farklı taşkın seviyelerinde tabliye altında oluşan temiz su oyulması derinliğini hesaplayan sayısal bir model ile kalibre etmişlerdir. Arneson ve Abt. (1998) ile Umbrell ve diğerleri

(1998) tarafından elde edilen deney verileri ile geliştirdikleri maksimum oyulma çukuru derinliği eşitliği ile bulunan tahmini verilerin kıyaslamasını yapmış ve deneysel veriler üzerindeki performansını incelemişlerdir.

Lança, Fael, Maia, Pego ve Cardoso (2012), farklı ayak aralıklarına ve verevlik açısına sahip farklı ayak grubu şekil kombinasyonlarının maksimum oyulma çukuru derinliği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında temiz su koşulları altında kararlı akım durumunda 7 ile 15 gün arasında değişen uzun süreli 26 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde aralık/ayak çapı oranı 1, 2, 3, 4, 5 ve 6; verevlik açıları 0°, 15°, 30°, 45° ve 90° olan dört ayrık silindirik ayak kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen verilerle verevlik açısı 0° için maksimum oyulma çukuru derinliğinin en membadaki ayakta olduğu saptanmıştır. Verevlik açısı 30° ve daha büyük olan ayak gruplarında aralık/ayak çapı oranı azaldıkça oyulma çukuru derinliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Selamoğlu, Yanmaz ve Köken (2014), çift silindirik ayak etrafında oyulma derinliği topoğrafyasının zamansal değişimini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, ayak boyutları ve ayak aralıklarının oyulma çukuru derinliğine etkisi temiz su koşulları altında incelenmiştir. Deneyler, Ortadoğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidromekanik Laboratuvarında 14,0 m uzunluğa, 0,72 m genişliğe ve 0,001 taban eğimine sahip dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Test bölgesi 4,5 m uzunluğunda olup, kanal ortasında yer almıştır. Deneyler, 12 lt/sn'lik sabit debide yapılmış olup densimetrik Froude sayısı 2,52'dir. Deney verilerine göre, maksimum oyulma derinliklerinin membadaki ayağın ön yüzlerinin merkezi etrafında meydana geldiğini ve arka ayaktaki oyulmanın ön ayağa göre daha az olduğunu saptamışlardır. Ayaklar arasındaki mesafe arttıkça ikili ayaklarda maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığını belirtmişlerdir.

Ahmad, Melville, Mohammad, Ali ve Yusuf (2016), kararlı akım koşulları altında uzun verevli dikdörtgen ayaklardaki temiz su durumunda meydana gelen oyulmaları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan farklı açıların verevlik etkisi ve iki farklı kohezyonsuz üniform taban malzemesi (D_{50}=0,23 ve D_{50}=0,80 mm) etkisi nedeniyle meydana gelen oyulma mekanizması 50,0 m uzunluğa, 1,5 m genişliğe ve 2,0 m derinliğe sahip bir kanalda araştırılmıştır. Elde edilen verilerle verevliğin oyulma çukuru üzerindeki etkisini göstermek amacıyla ayak en-boy oranı, verevlik açısı, akım derinliği, ortalama tane çapı gibi boyutsuz değişkenlere bağlı ampirik model geliştirilmiştir. Bu araştırma

kapsamında ve literatürden elde edilen deneysel veriler, mevcut yöntemler ile önerilen yöntemi karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen yöntemin kabul edilebilir tahmini oyulma çukuru derinlikleri verdiği saptanmış ve istatistiksel yöntemlerle doğrulanmış ortalama hata %53,6'dan %18,1'e düşmüştür.

Kumcu (2016), kararlı ve kararsız temiz su koşullarında basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmayı deneysel olarak incelemiştir. Deneyler DSİ Hidrolik Laboratuvarı'nda, 30,0 m uzunluğunda ve 1,5 m genişliğinde, 0,001 taban eğimine sahip bir kanalda yapılmıştır. Taban malzemesi ortalama tane çapı 0,9 mm'dir. Test bölgesi 7,0 m olup kanal girişinden 13,0 m mansapta yer almıştır. Deneyler 32 saate varan farklı deney sürelerinde yürütülmüştür. Deneylerde dört farklı yaklaşım akım hızı kullanılmıştır. Tüm kararsız akım oyulma derinliklerinin, kararlı akım koşullarından elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliklerinden daha az olduğu ve kararsız akım koşullarında zamanın oyulma gelişimine etkisinin sınırlı olduğu saptanmıştır. Maksimum sediment yığılma yüksekliğinin, kararsız akım durumlarında kararlı akım durumuna göre %10-30 daha az olduğu belirlenmiştir.

Karakurt (2016), temiz su halinde, basınçlı ve savak tipi akım durumlarında akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında kanal tabanında meydana gelebilecek maksimum oyulma çukuru derinliği ve şeklini belirlemek, bu büyüklükler üzerinde etkili olan akım, sediment ve geometrik parametreleri incelemek amacıyla 121 adet deney yapmıştır. Deneyler iki farklı tane çapına sahip sediment ile 70 lt/sn, 80 lt/sn ve 90 lt/sn olmak üzere üç farklı debi değerinde gerçekleştirilmiştir. Temiz su şartını sağlayacak şekilde 70 lt/sn'lik debi için 20,0 cm; 22,5 cm; 25,0 cm; 27,5 cm; 30,0 cm ve 32,5 cm olmak üzere altı, 80 lt/sn'lik debi için 25,0 cm; 27,5 cm; 30,0 cm ve 32,5 cm olmak üzere dört ve 90 lt/sn'lik debi için 30,0 cm ve 32,5 cm olmak üzere iki farklı yaklaşım akım derinliklerinde deneyler yürütülmüştür. Çalışmada Froude sayısı 0,121 ile 0,250 değerleri arasında değişmiştir. Çalışma kapsamında tabliye konumunun maksimum oyulma çukuru derinliği ve şekli üzerindeki etkisini incelemek amacıyla köprü tabliye modeli kanal tabanından 20,0 cm ve 17,5 cm yüksekliklerinde iki farklı konuma yerleştirilerek deneyler yürütülmüştür. Elde edilen deney verilerine göre köprü tabliye konumunun 2,5 cm kanal tabanına yaklaştırılması halinde her iki sediment durumunda oyulma çukuru derinliğinin arttığı; basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde fark edilebilir etkisininin olmadığı, ancak savak tipi akım durumunda ise oyulma çukuru

profilinin etkilendiği ve çukurun membaya ötelendiği gözlemlenmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek amacıyla altı farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır. Aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla oyulma çukuru derinliğinin azaldığı görülmüştür. Basınçlı akım durumunda oyulma çukuru profilinin, savak tipi akıma kıyasla daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kanal tabanında kullanılan katı madde ortalama tane çapının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenmiş ve bunun için iki farklı malzeme (D_{50}=1,1 mm ve D_{50}=1,5 mm) kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre sediment tane çapının maksimum oyulma çukuru derinliğine etki eden en önemli parametrelerden biri olduğu saptanmıştır. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında kanal tabanında ince malzeme olması halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin daha büyük ve şeklinin daha yayvan olduğu görülmüştür. Maksimum oyulma çukuru üzerinde düşey daralmanın etkisini inceleyebilmek amacıyla 5,0 cm ve 7,5 cm olmak üzere 2 farklı kiriş yüksekliği kullanılmıştır. Aynı akım şartlarında ve taban malzemesi durumunda kiriş yüksekliğinin artması halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin basınçlı ve savak tipi akım durumları için arttığı gözlemlenmiştir. Aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarının oyulma çukuru üzerine etkileri incelenmiş ve yaklaşım akım derinliğinin artması halinde basınçlı akım durumunda maksimum oyulma derinliğinde ciddi artışlar olduğu ancak savak tipi akım durumunda oyulma çukuru derinliğinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Akım yönünde tabliye kenarı ile kiriş arasındaki mesafenin oyulma çukuru derinliği üzerine etkisini incelemek amacıyla tekil kiriş tabliye ekseni membaına, ortasına ve mansabına olmak üzere üç farklı konuma yerleştirilmiştir. Elde edilen veriler, en büyük oyulma çukuru derinliğinin sırasıyla kirişin köprünün membaında, mansabında ve ortasında olduğu durumlarda meydana geldiğini göstermiştir. Çalışmada, savak tipi ve basınçlı akım durumlarında tabliye altında tabanda meydana gelebilecek oyulma çukuru derinliğini tahmin etmek için deney verileri kullanılarak uyumlu iki ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Söz konusu bağıntılar basınçlı akım için Eş. 2.9'da, savak tipi akım için ise Eş. 2.10'da verilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = -0{,}962 - 0{,}187\frac{y_a}{H_b} + 0{,}443Fr_{b*} + 0{,}672\frac{b}{H_b} \tag{2.9}$$

$$\frac{y_s}{H_b} = -1{,}002 - 0{,}190\frac{y_a}{H_b} + 0{,}439Fr_{b*} + 0{,}925\frac{b}{H_b} \tag{2.10}$$

Burada, F_{rb^*}= Tabliye altındaki akıma ait Froude sayısı ve b=kiriş yüksekliğini (m) ifade etmektedir.

2.2. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Koşullarında Oyulma Mekanizması

Akarsu yataklarında meydana gelen erozyon ve depolanma olayları, akım rejimine, katı madde cinsine, akarsu kesit özellikleri ile güzergahına ve akarsu kullanımına bağlı olarak oluşmaktadır. Akarsu yatağı bir köprü nedeniyle daraldığında yatağın doğal halinde değişim meydana gelmektedir. Yatağın daralmasından dolayı köprünün memba tarafında su kabarmakta ve su seviyesinin yükselmesi ile bölgedeki potansiyel enerji artmaktadır. Bu durumda köprü tabliyesi altındaki ortalama akım hızı ve bunun sonucunda tabandaki erozyon da artmaktadır. Su, akarsu yatağından kopardığı sediment parçacıklarını köprünün mansabına doğru sürüklemekte ve akarsu yatağının yeniden genişlediği yani ortalama akım hızının azaldığı bölgede depolamaktadır. Böylelikle akarsu yatağı boyunca sediment hareketi oluşmaktadır. Söz konusu erozyon ve depolama olayı yani sediment taşınımı ortalama akım hızının akarsu yatağını aşındırmayacak değere yani kritik ortalama kayma hızının altına ininceye kadar devam etmektedir.

Köprü altındaki oyulmalar üç başlık altında açıklanabilir.

- Nehir yatağının uzun dönemli taban seviyesindeki alçalması
- Daralma oyulması
- Yerel oyulmalar

Nehir rejimi koşullarında, akarsudaki insan yapımı veya doğal değişiklikler akarsu yatağı boyunca zamanla erozyona veya depolanmaya neden olmakta ve bu durum uzun dönemli taban alçalmasını ifade etmektedir. Akarsu yatağındaki oyulmaların, akarsu yatak kesitindeki düşey veya yanal daralma nedenleriyle meydana gelmesine daralma oyulması denir. Akım alanının fazla daralmasından dolayı daralmış kesitteki ortalama akım hızı ve dolayısıyla taban kayma gerilmeleri artmakta ve bu durum akarsu yatağında önemli oyulmaların meydana gelmesine neden olmaktadır (Bridge Scour Manual, 2013).

Akarsu yatağına yerleştirilmiş bir köprü ayağının etrafında oluşan çevrintiler nedeniyle meydana gelen oyulmaya ise yerel oyulma denir. Akım alanına yerleştirilen köprü ayağı

akım çizgilerinde sapmalar meydana getirir ve bunun neticesinde ayak etrafındaki hız ve basınç alanlarında değişiklikler oluşur. Bundan dolayı ayak etrafında oluşan sınır tabakasından ayrılmalar başlar ve çeşitli biçim ve büyüklükte vorteksler ile sekonder hareketler meydana gelir. Oluşan çevrintiler ve sekonder akım etkisi ile tabanda sediment hareketi söz konusu olur. Ayaklar etrafında meydana gelen bu çevrintiler ayak geometrisine ve akım hızına bağlıdır. Yerel oyulma ile ilgili literatürde çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Bridge Scour Manual, 2013).

Membadan sediment taşınıp taşınmadığı durumuna bağlı olarak akarsu yatağında başlıca iki tip oyulma oluşabilmektedir. Akım koşullarının akarsu yatağında kritik kayma gerilmesi değerini aşmayan kayma gerilmeleri yaratması halinde akarsu yatağında sediment hareketi meydana gelmemektedir. Bu durumda mansapta meydana gelebilecek oyulma için temiz su oyulması ifadesi kullanılmaktadır. Temiz su oyulması durumunda oyulmanın mertebesi, oluşan oyulma çukuru içindeki akım özelliklerine bağlı olup, oyulma çukurundaki akım, ayak geometrisinden ve akım özelliklerinden etkilenmektedir. Akım hızı arttığında membadaki taban kayma gerilmesinin, taban malzemesinin karşı koyabileceği kritik kayma gerilmesini aşması halinde membadan itibaren akım yönünde sediment hareketi meydana gelecek ve bu hareket, çevrinti etkisiyle oluşan oyulma çukurundaki akımla birleşecektir. Dolayısıyla, oyulma çukurunun gelişimi sadece çukur içindeki akım özelliklerine değil, aynı zamanda membadaki akım koşullarına da bağlı olacaktır. Bu tip oyulma ise hareketli taban oyulması olarak isimlendirilmektedir (Yanmaz, 2002).

Akarsu köprü tabliyesi altındaki veya orta ayakların etrafındaki sediment hareketini etkileyen diğer önemli bir parametre ise akım özelliğidir. Normal akım şartlarında köprü altındaki akım serbest akım olarak sınıflandırılmaktadır. Bu durumda su seviyesi köprü tabliyesi veya kirişleriyle temasta değildir ve su yüzeyinde atmosfer basıncı söz konusudur. Ancak büyük bir taşkının meydana gelmesi halinde akarsu debisinin artmasıyla su seviyesi de yükselmekte ve köprü tabliyesi kirişlerinin alt seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu durumda, köprü kirişleri kısmen veya tamamen su ile temasta olabilir. Bu tip akım basınçlı akım olarak tanımlanmaktadır. Taşkın debisinin daha da artması durumunda su seviyesi köprü kirişlerini de aşarak köprü tabliyesine kadar ulaşabilmektedir. Dolayısıyla basınçlı akım durumu su seviyesinin kiriş alt seviyesinde başlamakta ve köprü tabliyesi veya korkuluk seviyesine kadar devam etmektedir. Akarsu debisinin artmaya devam

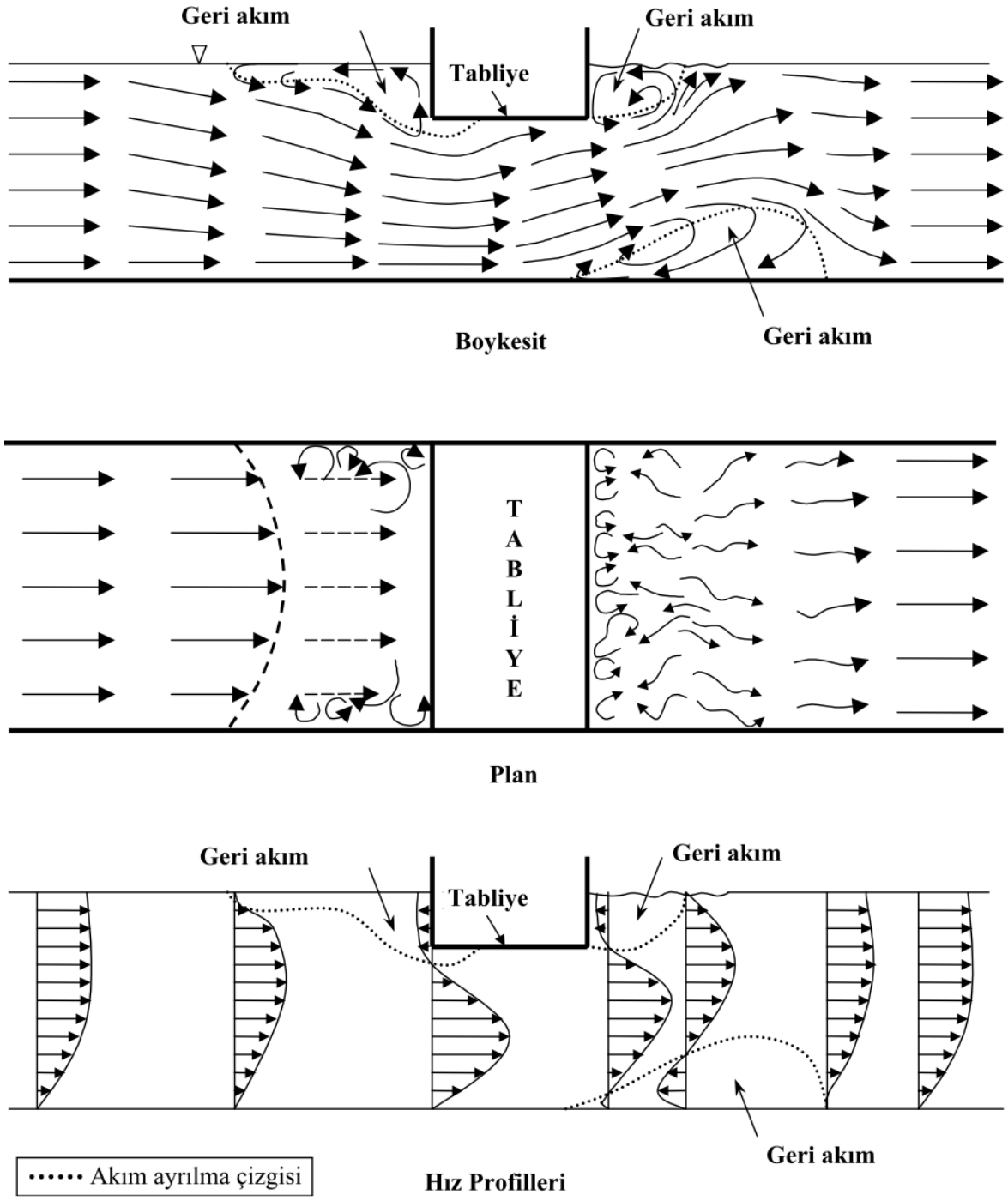
etmesi durumunda ise su tabliye üzerinden savaklanmaya başlamaktadır. Bu durumda, köprü geniş kretli bir savak gibi davranmakta ve bu akım tipine savak tipi akım denmektedir. Her iki akım koşulu altında köprü altındaki akarsu yatağında oluşabilecek sediment hareketi önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Yapılan gözlemler ve istatistiksel çalışmalar köprülerin özellikle taşkın sırasında veya sonrasında yıkıldığını veya hasar gördüğünü, bunlarında akarsu yatağında ve/veya köprü orta ayaklarında meydana gelen aşırı yerel oyulmalar nedeniyle oluştuğunu göstermiştir. Bu nedenle basınçlı ve savak tipi akım koşullarında meydana gelecek sediment hareketinin ve oyulmada etkili olan parametrelerin araştırılması köprü stabilitesi bakımından son derece önemli hale gelmektedir.

Basınçlı ve savak tipi akım koşullarında, tekil bir köprü tabliyesinin altındaki oyulmanın başlıca nedeni, sedimenti harekete geçiren kayma gerilmesinin artmasıdır. Akarsu kesitindeki debi, köprü tabliyesi ile karşılaşınca akım aşağıya doğru yönlendirilmekte ve akım alanı tabliye altında azalmaktadır. Bu nedenle tabliye altından geçen ortalama akım hızı artmaktadır. Dolayısıyla tabliye altında akarsu yatağındaki kayma gerilmesi artmakta ve bu da basınçlı akım oyulmasını başlatmaktadır. Tabliye altında akarsu yatağından taşınan taban malzemesi mansaba doğru daralma bölgesi dışına taşınmaktadır. Mansap bölgesinde akım alanı tekrar arttığında ortalama akım hızı ve tabandaki kayma gerilmesi azalmakta, böylece tabanda meydana gelen oyulma durmaktadır. Tabliye altındaki oyulma bu şekilde devam etmektedir. Oyulma çukuru derinliği arttıkça çukurdaki ortalama akım hızı ve kayma gerilmesi de azalmaktadır. Böylece bir süre sonra oyulma çukuru derinliği dengeye ulaşabilmektedir (Verma ve diğerleri, 2004). Verma ve diğerleri (2004) akıma dik bir köprü tabliyesi altında oluşan akım çizgilerini ve kanal boyunca oluşan hız profillerini yaptıkları deneysel çalışmayla Şekil 2.1'de görüldüğü gibi elde etmişlerdir.

2.3. Boyut Analizi

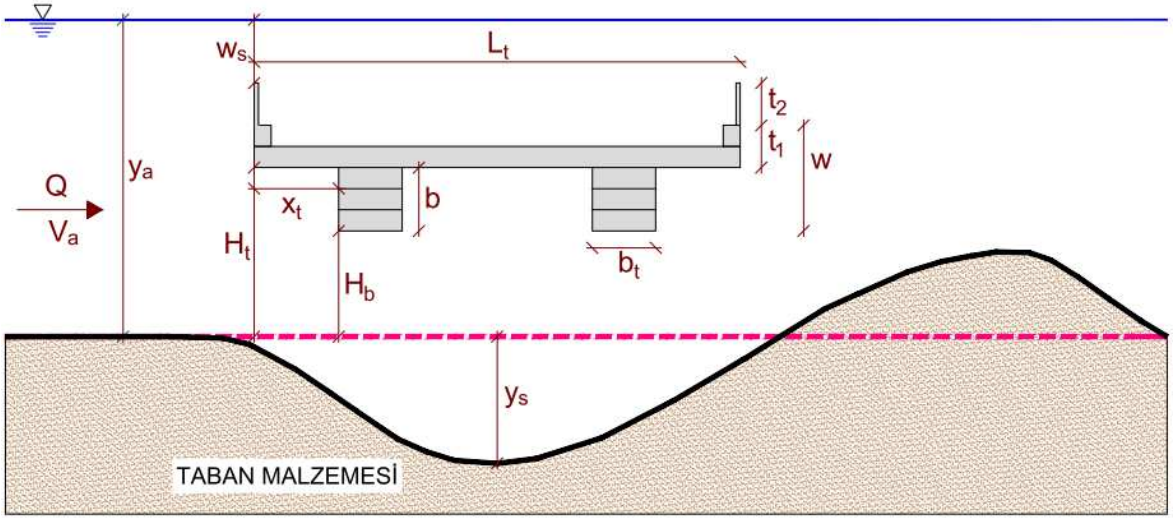
Köprü stabilitesini sağlamak için köprü temellerinin güvenli bir biçimde tasarlanması gerekmektedir. Bu yüzden, köprü tabliyesi altında meydana gelecek maksimum oyulma çukuru derinliğinin yaklaşık olarak tahmin edilmesi proje aşamasında çok önemlidir. Taşkın dönemlerinde meydana gelebilen basınçlı ve savak tipi akım koşullarında, köprü tabliyesi altında oluşabilecek sediment taşınımı serbest akım koşullarına göre çok daha karmaşık olup konu ile ilgili literatürde çok az araştırma yapılmış ve genel bir bağıntı

geliştirilememiştir. Bunun sebebi ise basınçlı ve savak tipi akım durumunda köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma mekanizmasına; akım, sediment, akışkan, akarsu ve köprünün geometrik parametrelerinden oluşan birçok değişkenin etki etmesidir.



Şekil 2.1. Basınçlı akım durumunda oluşan akım çizgileri ve hız profilleri (Verma ve diğerleri, 2004)

Basınçlı ve savak tipi akım koşullarının etkili olduğu bir köprü tabliyesinin altında meydana gelen ve oyulmaya neden olan etkili parametrelerin belirlenmesi için boyut analizi yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, kenar ve orta ayaklar bulunmadığından sadece köprü tabliyesinin yarattığı kesit daralması nedeniyle meydana gelen oyulma çukuru derinliğini etkileyen parametreler göz önüne alınmıştır. Daralmadan dolayı oluşan oyulma çukurunu etkileyen tüm parametreler kütle (M), uzunluk (L) ve zaman (T) cinsinden sınıflandırılarak aşağıda verilmiştir. Köprü tabliyesine ait geometrik parametreler ayrıntılı olarak Şekil 2.2'de verilmiştir (Karakurt, 2016).



Şekil 2.2. Köprü tabliyesi geometrik parametreleri (Karakurt, 2016)

Akışkan parametreleri

ρ : suyun yoğunluğu (ML^{-3})

ν : suyun kinematik viskozitesi (L^2T^{-1})

Akım parametreleri

g : yerçekimi ivmesi (LT^{-2})

y_a : yaklaşım akım derinliği (L)

V_a : ortalama yaklaşım akım hızı (LT^{-1})

V_b : tabliye kirişi altındaki ortalama akım hızı (LT^{-1})

u_* : tane direncini gösteren kayma gerilmesi hızı (LT^{-1})

Akarsu parametreleri

S_o : taban eğimi

B_a : akarsu genişliği (L)

C_d : daralma katsayısı

K_α : yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü

K_a : akarsu güzergahı etkisini gösteren katsayı

K_b : memba taban pürüzlülüğü katsayısı

K_c : akarsu şevlerinin pürüzlülüğü katsayısı

K_d : en kesit geometri etkisini gösteren katsayı

Taban malzemesi parametreleri

ρ_s : sediment yoğunluğu (ML^{-3})

D_{50} : tane medyan çapı (L)

Δ : göreli yoğunluk

σ_g : sediment tane dağılımı standart sapması

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

K_f : tane şekil faktörü

Köprü tabliyesi ve açıklığındaki geometrik parametreleri

y_s : oyulma çukuru derinliği (L)

w_s : tabliye üzerinden savaklanan su yüksekliği (L)

H_b : Kirişin en alt seviyesi ile ilk bozulmamış taban seviyesi arasındaki mesafe (L)

b : kiriş yüksekliği (L)

b_t : kirişin genişliği (L)

b_n : kiriş 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 : kirişin tabliyedeki konumu (L)

Zaman parametresi

t : oyulma süresi (T)

Köprü tabliye altında oluşan oyulma mekanizmasını etkileyen bu parametreler Eş.2.11'de verilmiştir:

$$f\begin{pmatrix}\rho, \nu, g, y_a, V_a, V_b, u_*, S_o, B_a, C_d, K_\alpha, K_a, K_b, K_c, K_d, \rho_s, D_{50}, \Delta, \sigma_g, \\ C, K_f, y_s, w_s, H_b, b, b_t, b_n, t_1, t_2, L_t, H_t, X_t, t\end{pmatrix} = 0 \qquad (2.11)$$

Eş. 2.11'de verilen oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelerin arasında çok sayıda boyutsuz parametre yer almaktadır. Yukarıda açıklanan değişkenlerden oluşan bu genel ifadeyi daha basit bir hale getirebilmek için aşağıda verilen kabuller yapılmıştır.

Akarsu ve taban malzemesi parametreleri ile ilgili kabuller (Yanmaz, 2002):

- Sabit şekil faktörlü, kohezyonsuz taban malzemesi bulunmaktadır (C=0).
- Katı madde ve su yoğunlukları sabittir. Kuvartz kumu için $\Delta \approx 1{,}65$ değerindedir.
- Akarsu, köprü geçişinde önemli bir daralma olmayacak kadar geniştir (C_d=1,0)
- Düzgün şevli akarsu tabanındaki taban şekillerinin etkisi ihmal edilmektedir (K_f=1,0)
- Taban pürüzlülüğü sadece D_{50} cinsinden ifade edilmektedir (K_b=1,0 ve K_c=1,0).
- Akarsu planda düz, prizmatik ve sabit genişliktedir (S_o=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 geometrisi parametreleri ile ilgili kabuller:

- Kiriş sayısı (b_n), kiriş genişliği (b_t), döşeme ile korkuluk yüksekliği (t_1), ilave korkuluk yüksekliği (t_2), tabliye genişliği (L_t), tabandan itibaren tabliye konumu (H_t) ve kirişin tabliyedeki konumu (X_t) sabit olarak alınmıştır.
- Oyulma çukuru derinliğinin kiriş sayısından (b_n) bağımsız olduğu kabul edilmiştir.

Köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma mekanizmasını etkileyen parametreler ile ilgili yapılan kabuller doğrultusunda Eş. 2.11 aşağıdaki eşitliğe dönüşmüştür.

$$y_s = f_1(\rho, \nu, g, y_a, V_a, V_b, u_*, K_\alpha, D_{50}, w_s, H_b, b) = 0 \qquad (2.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte boyutsuz parametreler Buckingum π-teoremiyle (Shames, 1992) bulunabilir. Buna göre bulunan boyutsuz parametreler tekrar düzenlenerek aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = f_2\left(Re_b, Fr_b, \frac{y_a}{H_b}, \frac{V_a}{V_b}, \frac{u_*}{V_b}, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}, \frac{b}{H_b}, K_\alpha\right) \tag{2.13}$$

Eş 2.13'te sabit tane çapında ve kanal taban eğiminde (u_*/V_b) oranı sadece köprü tabliyesi açıklığı yüksekliği H_b değerine bağlı olduğundan ve (u_*/V_b) parametresini içeren (y_a/H_b) ifadesi boyut analizinde yer aldığından dolayı ihmal edilmiştir (Yanmaz, 2002). Eşitlikte yer alan (V_a/V_b) parametreleri de köprü açıklığı yüksekliği H_b ile yaklaşım akım derinliğine bağlı olduğundan ihmal edilmiştir. Taban malzemesi ortalama çapı D_{50} olarak tek bir malzeme kullanıldığından sabit tutulmuştur.

$$\frac{y_s}{H_b} = f_3\left(Re_b, Fr_b, \frac{y_a}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}, \frac{b}{H_b}, K_\alpha\right) \tag{2.14}$$

Eş. 2.14'te verilen $Re_b=V_bH_b/\nu$ köprü tabliyesinin altındaki akım Reynolds sayısı ve ν suyun kinematik viskozitesidir. Çalışılan akım hidrolik pürüzlü bir akım olduğu için söz konusu boyutsuz büyüklük ihmal edilmiştir (Abed, 1991). Fr_b ise köprü tabliyesi altındaki Froude sayısı olup formülü Eş. 2.15'te verilmiştir.

$$Fr_b = \frac{V_b}{\sqrt{gH_b}} \tag{2.15}$$

Yukarıda açıklanan kabullere göre bağıntının son hali aşağıda verilen eşitlikteki gibidir:

$$\frac{y_s}{H_b} = f_4\left(Fr_b, \frac{y_a}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}, \frac{b}{H_b}, K_\alpha\right) \tag{2.16}$$

Eş. 2.16'da savak tipi akım durumu için köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma mekanizmasını etkileyen boyutsuz parametreler görülmektedir. Basınçlı akım durumunda ise tabliye üzerinden savaklanan su yüksekliği w_s olmayacağı için bağıntı aşağıdaki hale indirgenmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = f_5\left(Fr_b, \frac{y_a}{H_b}, \frac{b}{H_b}, K_\alpha\right) \tag{2.17}$$

Yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü K_α, tek bir açı için deneyler yapıldığından dolayı sabit olarak alınmıştır.

3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ

3.1. Deney Düzeneği

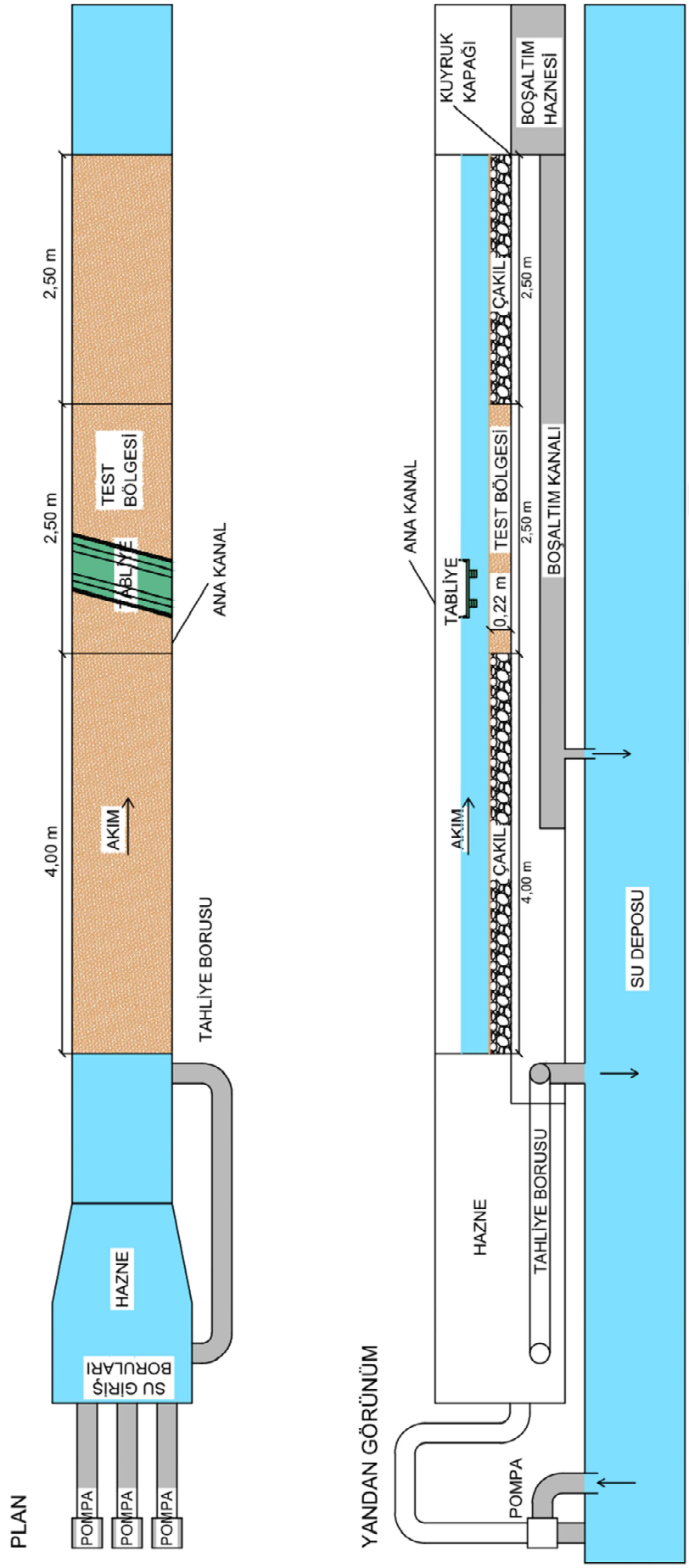
Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, tabanı pleksiglas malzemeden ve yan duvarları 1 cm kalınlığındaki temperli camdan yapılmış, yaklaşık olarak 10 m boyunda, genişliği ve yüksekliği 1'er m olan dikdörtgen kesitli bir kanalda yapılmıştır. Deney kanalı; giriş boruları, hazne, ana kanal, tahliye borusu ve boşaltım kanalından oluşmaktadır. Deney kanalı profili ve üstten görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir. Kanalın üç boyutlu çizimi ise Şekil 3.2'de verilmiştir. Kanala flanş ve dirsekler ile bağlanmış olan üç adet pompa yardımıyla deneyler için gerekli debinin su deposundan gelmesi sağlanmaktadır. Laboratuvarda 22,0 kW'lık pompaların yardımıyla yeraltı deposundan kanal başında bulunan hazneye ve oradan kanala su verilmekte, sonrasında ise su boşaltım haznesine ve boşaltım kanalına geçerek yeraltı deposuna akıtılmakta ve böylece suyun devir daimi sağlanmaktadır. Kanal mansabına yerleştirilmiş olan kapak yardımıyla kanaldaki akım derinliği istenilen değere ayarlanabilmektedir.

Köprü tabliye modelinin yerleştirildiği ve deney ölçümlerinin yapıldığı test bölgesi, 2,5 m uzunluğunda ve 1,00 m genişliğinde olup kanal girişinden 4,00 m mansapta yerleştirilmiştir.

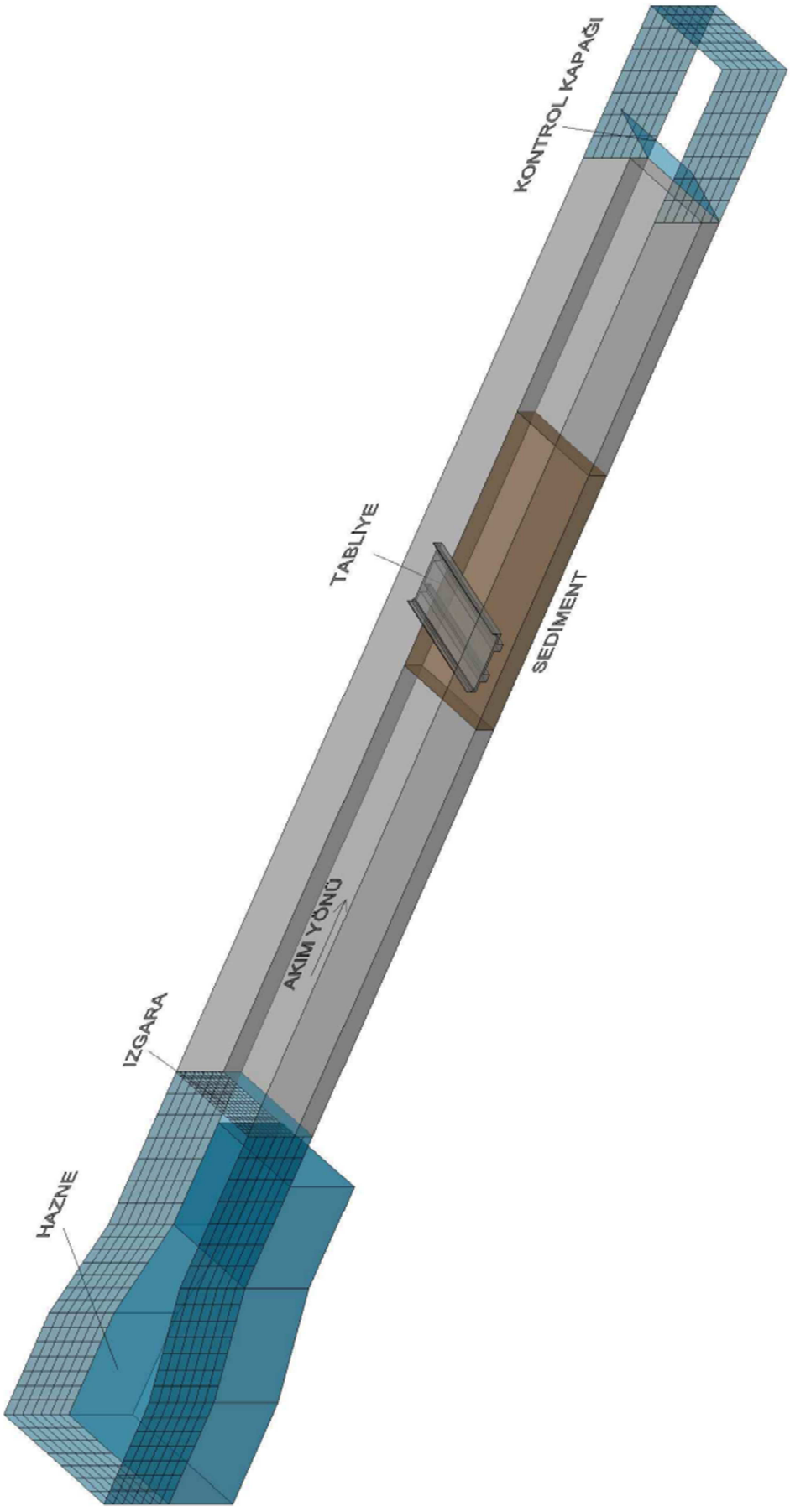
3.2. Deney Elemanları

3.2.1. Taban malzemesi

Taban malzemesi doğal dere yatağı malzemesi olup laboratuvarda elenerek mümkün olduğunca homojen bir malzeme elde edilmiş ve bu malzeme (D_{50}=1,1 mm) yıkandıktan sonra deney kanalındaki test bölgesine serilmiştir. Böylece Şekil 3.3'te görüldüğü üzere taban malzemesi 22,0 cm yüksekliğinde, 2,5 m uzunluğunda ve 1,0 m genişliğindeki test bölgesine yerleştirilmiştir. Deney kanalı taban eğimi yaklaşık olarak S_0=0,001'dir.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin plan ve yandan görünümü

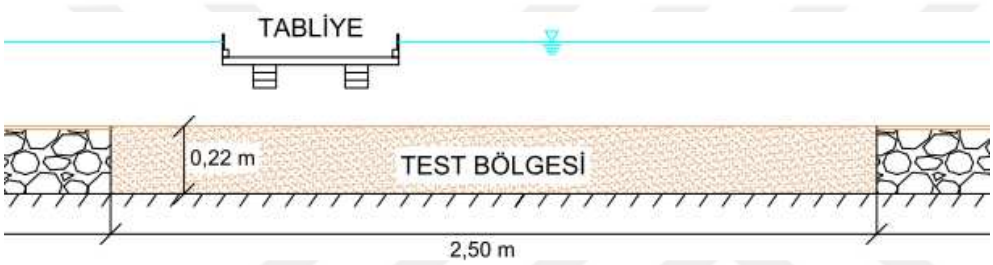


Şekil 3.2. Deney düzeneğinin üç boyutlu görünümü

Deneylerde kullanılmış olan taban malzemesi ortalama dane çapı (D_{50}) 0,0011 m olup, malzemeye ait diğer karakteristik büyüklükler Çizelge 3.1'de verilmiştir (Karakurt, 2016). Burada C_u üniformluk katsayısı, C_c derecelendirme sayısı ve σ_g geometrik standart sapma olup, $\sigma_g=D_{84,1}/D_{50}$ şeklinde hesaplanmıştır. Böylece Çizelge 3.1'de sunulan değerlere göre taban malzemesi üniform kabul edilebilir.

Çizelge 3.1. Taban malzemesine ait karakteristik büyüklükler

D_{10} (m)	D_{50} (m)	D_{60} (m)	$D_{84,1}$ (m)	C_u	C_c	σ_g
0,0006	0,0011	0,0013	0,0014	2,170	1,133	1,273



Şekil 3.3. Test bölgesi ve tabliye modeli

3.2.2. Köprü tabliye modeli

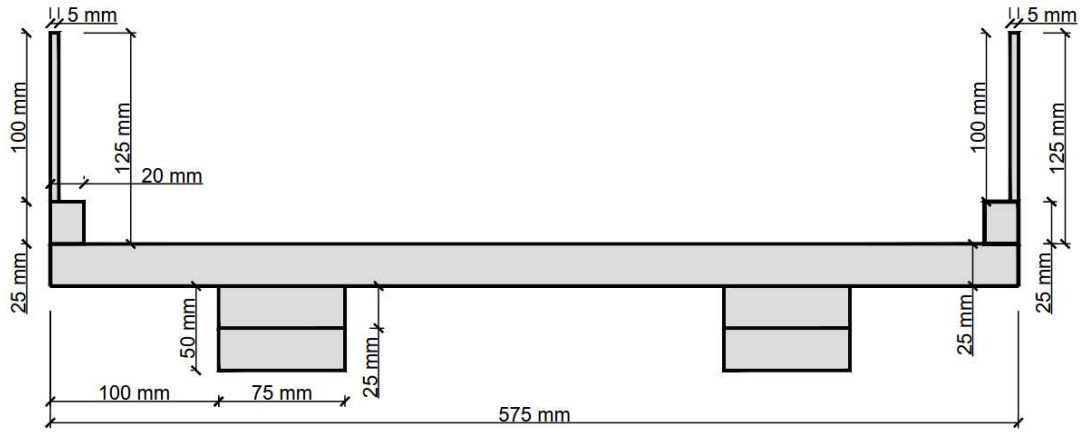
Deneylerde pleksiglas malzemeden yapılmış, ayakları olmayan köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Tabliye, planda akıma 15 °'lik verevlik açısıyla yerleştirilmiş olup iki kirişe sahiptir (Bkz. Resim 3.1). Ön deney aşamasında tabliyede hiç kiriş olmaması veya 25 mm yüksekliğinde iki adet kiriş olması durumlarında tabanda hiç veya çok az oyulma meydana geldiği gözlemlendiğinden kiriş yükseklikleri sırasıyla 50 mm ve 75 mm olarak belirlenmiştir. Deneylerde, aynı akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akımlarda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerini karşılaştırabilmek için tabliye üzerinde iki farklı korkuluk yüksekliği kullanılmıştır. Köprü tabliye modeli plan ve görünümü sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere tabliye korkuluk yüksekliği, eklenen 100 mm yüksekliğindeki bir PVC parçasıyla 25 mm'den 125 mm'ye çıkarılmıştır. Böylece aynı yaklaşım akım derinliğinde hem basınçlı hem de savak tipi akım durumları incelenebilmiştir.



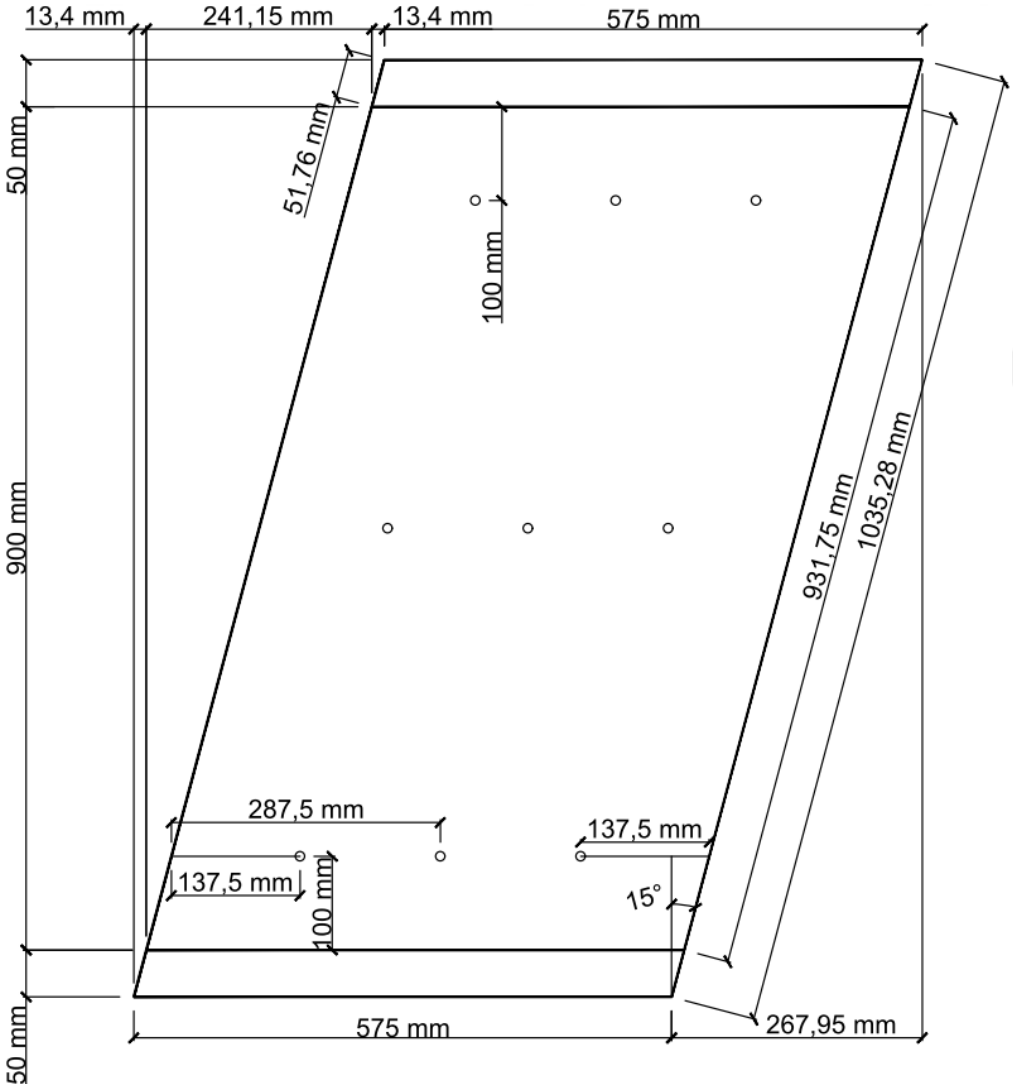
Resim 3.1. Deney kanalı ve tabliye modeli

Deneylerde pratik olması açısından kirişler için 25 mm kalınlığında PVC levhalar kullanılmış ve kiriş yüksekliği yeni bir levhanın tabliye modeline eklenip çıkarılmasıyla değiştirilmiştir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi tabliyede açılan delikler yardımıyla kirişlerin model üzerine sabitlenmesi sağlanmıştır. Şekildeki üç sıra halindeki delikler istenilmesi halinde kiriş sayısının ve konumunun değiştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada tüm deneylerde iki adet kiriş kullanılmıştır. Şekil 3.6'da 50 mm ve 75 mm'lik kiriş yüksekliklerine sahip tabliye modelleri görülmektedir.

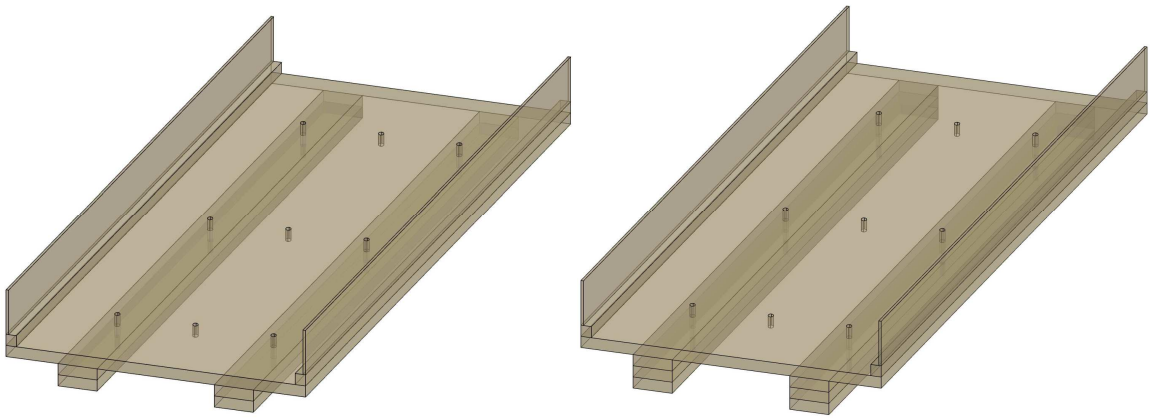
Köprü tabliye modeli, Şekil 3.5'te görüldüğü üzere tabliyenin birer parçası olan ve kanal yan duvarlarına silikonla yapıştırılmış 50 mm genişliğindeki parçalar üzerine yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında köprü modeli bu parçalar üzerine oturtulmuş, deney sona erdikten sonra ise yine bu parçalar üzerinden kaydırılarak model çıkartılmış ve böylece taban ölçümleri gerçekleştirilebilmiştir. Söz konusu parçalar köprü tabliye modelinin birer parçası olduğundan tabliye modeli kanala yerleştirildiğinde bütün bir tabliye modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.4. 50 mm kiriş yüksekliğindeki tabliye modeli



Şekil 3.5. Tabliye modeli plan görünümü



Şekil 3.6. 50 mm ve 75 mm'lik kiriş yüksekliklerine sahip tabliye modellerinin 3 boyutlu görünümü

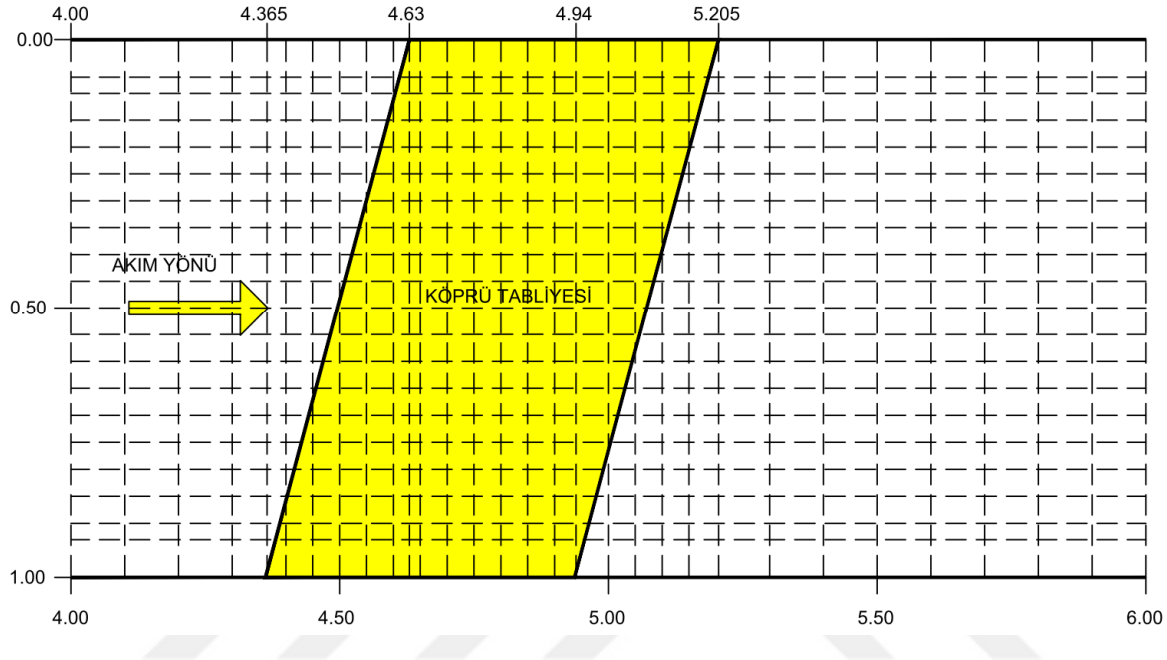
3.3. Deneysel Ölçümler

Çalışma kapsamında köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru şekli ve derinliğinin ölçümü yapılmıştır. Taban ölçümleri deney bölgesinde Şekil 3.7'de görülen ölçüm ağı köşe noktalarında gerçekleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere ölçüm yapılan ağ köşe noktaları köprü tabliyesinin kapladığı alanı, yani memba ve mansaptaki en uç iki nokta arasında 5'er cm'lik aralıklarla (5,0 cm x 5,0 cm), test bölgesindeki diğer ağ köşe noktaları ise 10'ar cm'lik aralıklarla (10,0 cm x 10,0 cm) yerleştirilmiş ve ölçümler bu köşe noktalarında gerçekleştirilmiştir. Taban ölçümleri Leica DISTO D810 Lazermetre ile yapılmıştır. Bu aletin tipik ölçüm töleransı ± 1,0 mm olup yapılan ölçümler anında bilgisayara aktarılabilmektedir. Lazermetre kanal üzerinde hareket eden çerçeve bir sisteme 90°'lik açıyla ölçüm yüksekliği sabit olacak şekilde monte edilmiştir. Taban ölçümleri deney başlangıcı ve sonunda olmak üzere aynı ağ köşe noktalarında iki kez gerçekleştirilmiş, bu değerlerin farkı alınarak tabanda oluşan erozyon veya birikme yükseklikleri tespit edilebilmiştir.

3.4. Akım Özellikleri

Deneyler, 70 lt/sn, 80 lt/sn ve 90 lt/sn olmak üzere üç farklı debi ve tek tabliye konumu için gerçekleştirilmiştir. 70 lt/sn'lik debi için 0,20 ile 0,325 m arasında altı, 80 lt/sn'lik debi için 0,25 ile 0,325 m arasında dört ve 90 lt/sn'lik debi için 0,30 ile 0,325 m olmak üzere iki farklı yaklaşım akım derinliği (y_a) için deneyler yapılmıştır. Bu değerler deney programı başlamadan önce yapılmış olan ön deneyler yardımıyla belirlenmiştir. Söz

konusu ön deneylerde her debi değeri için tabanda sediment hareketi meydana getirmeyecek yani temiz su şartını kanal boyunca sağlayacak derinlikler olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinlikleri ise ön deneylerde belirlenen değerlerden daha büyük değerler olacak şekilde seçilmiştir (Karakurt, 2016).



Şekil 3.7. Ölçüm ağı



Resim 3.2. Taban ölçümlerinde kullanılmış olan lazermetre ve hareketli çerçeve sistem

Debi ölçümü boşaltım kanalına yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli keskin kenarlı bir savak yardımıyla yapılmıştır. Yaklaşım akım derinliği de hareketli sistem üzerine monte edilmiş bir limnimetre yardımıyla saptanmıştır. Hareketli sistemlerin konumları kanal yan duvarlarına yapıştırılmış cetveller yardımıyla belirlenmiştir.

3.5. Deney Prosedürü

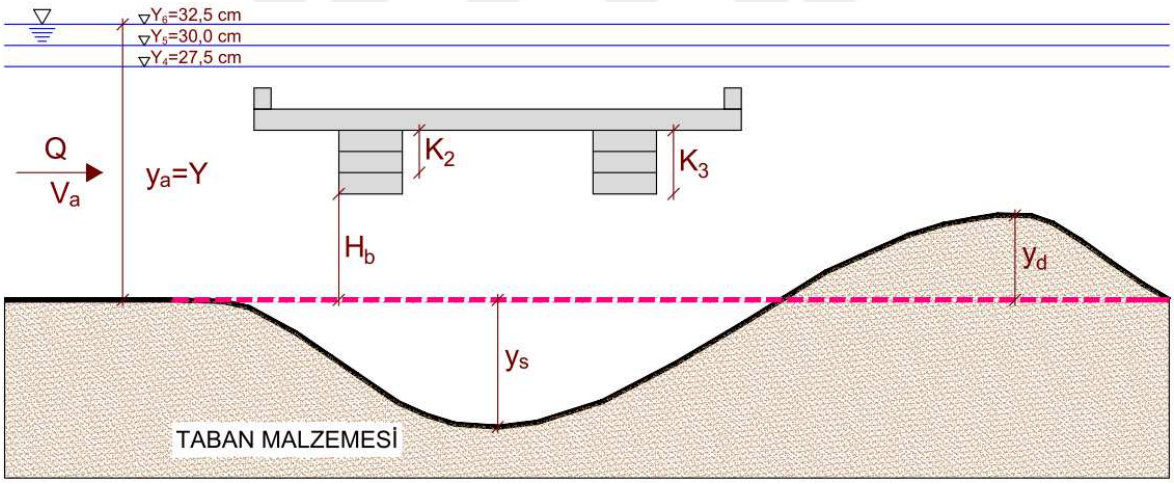
Deney prosedürü aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Deney kanalı test bölgesine yerleştirilen sediment düzlendikten sonra lazermetreyle istenilen ağ köşe noktalarında taban yükseklik ölçümü yapılarak kanal tabanı belirlenir.
2. Pompalar yardımıyla çok yavaş bir şekilde sedimenti mümkün olduğunca rahatsız etmeden kanala su verilir ve debi ayarlanır.
3. Kanalın sonunda bulunan kapak yardımıyla akım derinliği ayarlanır.
4. Tabliye, kanal yan duvarlarında silikonla yapıştılmış kızaklara yavaşça yerleştirilir ve yaklaşım akım derinliği tekrar kontrol edilerek deney başlatılmış olur.
5. Çalışma kapsamında tüm deneyler için deney süresi ön deney ve gözlemler sonucunda sekiz saat olarak belirlenmiştir. Deneyin ilk yarım saatinde köprü tabliye altındaki oyulmanın çok hızlı olduğu daha sonra ise bu oyulma hızının azaldığı ve altı saatten sonra çok yavaşladığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla sekiz saatlik deney süresi sonunda oyulma çukurunda çıplak gözle hareket tespit etmek neredeyse mümkün olmamıştır.
6. Deney süresi sonunda pompalar kapatılır ve su giriş haznesindeki vana yardımıyla çok yavaş bir şekilde sedimenti rahatsız etmeden kanaldan tahliye edilir.
7. Tabliye yavaşça kızaklarından kaydırılarak çıkarılır ve lazermetre yardımıyla ağ köşe noktalarında yeniden yükseklik ölçümü yapılır. Böylece deney öncesi ve sonrasında yapılan iki ölçüm arasındaki fark tabandaki değişimi verir. Böylece oyulma çukurunun boyutsuz grafiği elde edilir.
8. Test bölgesindeki kum karıştırılıp düzenlendikten sonra bir sonraki deney için Adım 1'den yeniden başlanır.

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

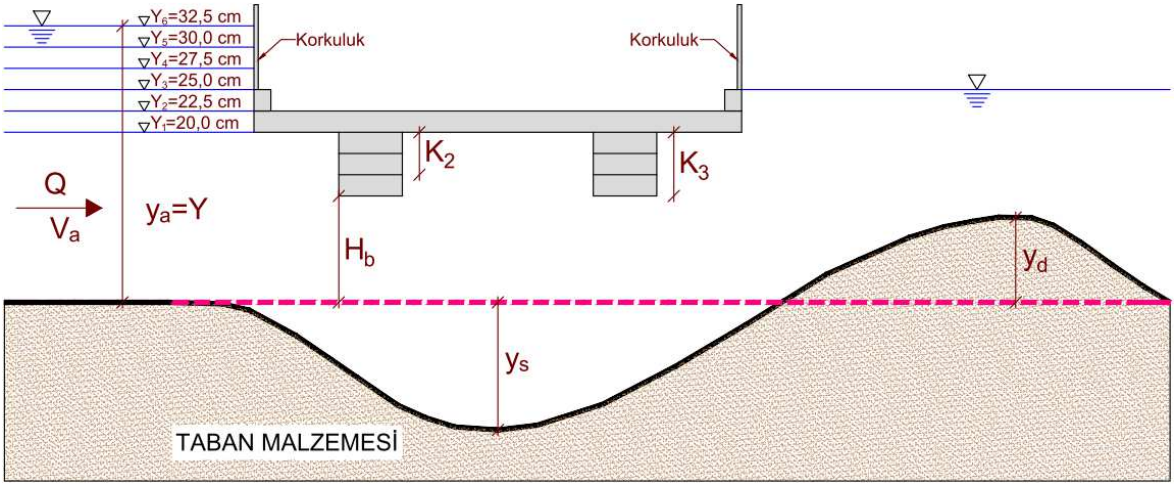
4.1. Genel

Araştırma kapsamında, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda 40 adet deney gerçekleştirilmiştir. Yürütülen deneylerde, temiz su oyulması durumunda basınçlı ve savak tipi akım koşullarında 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında gerçekleşen sediment hareketi incelenmiştir. Deneyler sonucunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği, şekli ve bu büyüklüklere etki eden yaklaşım akım derinliği, kiriş yüksekliği, akım koşulları ve özellikle tabliyenin akıma verevli olması gibi parametreler irdelenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verevlik açısı 15° olan köprü tabliye modeli ve kullanılan parametreler sırasıyla savak tipi akım ve basınçlı akım için gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Savak tipi akım durumu için köprü tabliye modeli ile ilgili parametreler

Çizelge 4.1'de, araştırma kapsamında verevlik açısı 15° olan köprü tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenen parametreler, bu parametreler için kullanılan semboller, parametre değerlerine göre deney sayıları ile değerleri verilmiştir. Parametrelere verilen semboller ile deney sonuçlarının değerlendirilmesinde parametrelerin kolaylıkla takip edilebilmesini sağlamak amacıyla deneylere isimler verilmiştir. Örneğin, SQ1Y4K3 deneyin savak tipi akım durumunda, 70 lt/sn'lik debi, Y_4=27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği ve K_3=7,5 cm'lik kiriş yüksekliği değerlerinde yapıldığını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Çizelge 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Basınçlı akım durumu için köprü tabliye modeli ile ilgili parametreler

Çizelge 4.1. Maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenen parametreler ve deney sayıları

Parametre	Sembol	Parametre Değeri		Deney Sayısı
Yaklaşım Akım Derinliği	Y	Y_1	20,0 cm	2
		Y_2	22,5 cm	2
		Y_3	25,0 cm	4
		Y_4	27,5 cm	8
		Y_5	30,0 cm	12
		Y_6	32,5 cm	12
Kiriş Yüksekliği	K	K_2	5 cm	20
		K_3	7,5 cm	20
Debi	Q	Q_1	70 lt/sn	18
		Q_2	80 lt/sn	14
		Q_3	90 lt/sn	8
Akım Tipi	B		Basınçlı akım - B	24
	S		Savak tipi akım - S	16

Çizelge 4.2. Deney sonuçları özet tablosu

Deney seri no	Deney no	D_{50} (m)	Kiriş yüksek-liği b (m)	Kiriş-taban arasın-daki fark H_b (m)	Yaklaşım akım derinliği y_a (m)	Q_{top} (lt/s)	Korkuluk üstü su yüksekliği w_s (m)	Yaklaşım akım hızı V_a (m/s)	Yaklaşım akımı Froude Fr	Neil 1973 kritik hız V_c (m/s)	y_{smax} ölçülen (m)
BQ1Y1K2	1	0,0011	0,050	0,150	0,200	70	-0,050	0,350	0,250	0,503	0,097
BQ1Y1K3	2	0,0011	0,075	0,125	0,200	70	-0,050	0,350	0,250	0,503	0,187
BQ1Y2K2	3	0,0011	0,050	0,150	0,225	70	-0,025	0,311	0,209	0,513	0,100
BQ1Y2K3	4	0,0011	0,075	0,125	0,225	70	-0,025	0,311	0,209	0,513	0,182
BQ1Y3K2	5	0,0011	0,050	0,150	0,250	70	0,000	0,280	0,179	0,522	0,071

Çizelge 4.2. (devam) Deney sonuçları özet tablosu

Deney seri no	Deney no	D_{50} (m)	Kiriş yüksek-liği b (m)	Kiriş-taban arasın-daki fark H_b (m)	Yaklaşım akım derinliği y_a (m)	Q_{top} (lt/s)	Korkuluk üstü su yüksekliği w_s (m)	Yaklaşım akım hızı V_a (m/s)	Yaklaşım akımı Froude Fr	Neil 1973 kritik hız V_c (m/s)	y_{smax} ölçülen (m)
BQ1Y3K3	6	0,0011	0,075	0,125	0,250	70	0,000	0,280	0,179	0,522	0,141
BQ1Y4K2	7	0,0011	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,082
BQ1Y4K3	8	0,0011	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,153
BQ1Y5K2	9	0,0011	0,050	0,150	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,093
BQ1Y5K3	10	0,0011	0,075	0,125	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,158
BQ1Y6K2	11	0,0011	0,050	0,150	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,108
BQ1Y6K3	12	0,0011	0,075	0,125	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,159
SQ1Y4K2	13	0,0011	0,050	0,150	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,049
SQ1Y4K3	14	0,0011	0,075	0,125	0,275	70	0,025	0,255	0,155	0,530	0,132
SQ1Y5K2	15	0,0011	0,050	0,150	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,040
SQ1Y5K3	16	0,0011	0,075	0,125	0,300	70	0,050	0,233	0,136	0,538	0,102
SQ1Y6K2	17	0,0011	0,050	0,150	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,024
SQ1Y6K3	18	0,0011	0,075	0,125	0,325	70	0,075	0,215	0,121	0,545	0,078
BQ2Y3K2	19	0,0011	0,050	0,150	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,121
BQ2Y3K3	20	0,0011	0,075	0,125	0,250	80	0,000	0,320	0,204	0,522	0,198
BQ2Y4K2	21	0,0011	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,102
BQ2Y4K3	22	0,0011	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,190
BQ2Y5K2	23	0,0011	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,128
BQ2Y5K3	24	0,0011	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,189
BQ2Y6K2	25	0,0011	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,159
BQ2Y6K3	26	0,0011	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,191
SQ2Y4K2	27	0,0011	0,050	0,150	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,107
SQ2Y4K3	28	0,0011	0,075	0,125	0,275	80	0,025	0,291	0,177	0,530	0,170
SQ2Y5K2	29	0,0011	0,050	0,150	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,082
SQ2Y5K3	30	0,0011	0,075	0,125	0,300	80	0,050	0,267	0,155	0,538	0,132
SQ2Y6K2	31	0,0011	0,050	0,150	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,053
SQ2Y6K3	32	0,0011	0,075	0,125	0,325	80	0,075	0,246	0,138	0,545	0,107
BQ3Y5K2	33	0,0011	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,158
BQ3Y5K3	34	0,0011	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,204
BQ3Y6K2	35	0,0011	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,173
BQ3Y6K3	36	0,0011	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,207
SQ3Y5K2	37	0,0011	0,050	0,150	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,106
SQ3Y5K3	38	0,0011	0,075	0,125	0,300	90	0,050	0,300	0,175	0,538	0,171
SQ3Y6K2	39	0,0011	0,050	0,150	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,094
SQ3Y6K3	40	0,0011	0,075	0,125	0,325	90	0,075	0,277	0,155	0,545	0,150

Yapılan deneylerde, verevli köprü tabliyesi kanal yatağından 20,0 cm yüksekliğe yerleştirilmiş ve test bölgesinde ortalama tane çapı (D_{50}) 1,1 mm olan taban malzemesi kullanılmıştır. Kiriş yüksekliği etkisinin incelenebilmesi için tabliyede yükseklikleri K_2=5,0 cm ve K_3=7,5 cm olan çift kiriş kullanılarak deneyler yapılmıştır. Çizelgede verilen basınçlı akım, aynı yaklaşım akım derinliğinde tabliye üzerine korkuluk eklenmesi ile elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, savak tipi akım (S) koşullarını elde etmek için 27,5 cm, 30,00 cm ve 32,5 cm üç farklı yaklaşım akım derinliği (Y_4, Y_5, Y_6) kullanılmıştır. Basınçlı akım (B) ise 20,0 cm ile 32,5 cm arasında 2,5 cm'lik artışlarla altı farklı yaklaşım akım derinliği (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6) kullanılarak elde edilmiştir. Basınçlı ve savak tipi akımların neden olduğu oyulmaları karşılaştırmalı olarak inceleyebilmek için savak tipi akım koşulları için kullanılmış olan yaklaşım akım derinlikleri, basınçlı akım koşulları için de oluşturulmuştur. Söz konusu yaklaşım akım derinliklerinde basınçlı akım elde edebilmek amacıyla tabliye korkuluğu üzerine ek parça yapıştırılarak 25 mm yüksekliğideki korkuluk 125 mm yüksekliğine artırılmıştır. Deneyler 70 lt/sn, 80 lt/sn ve 90 lt/sn olmak üzere üç farklı debi için yapılmış, Froude sayısı ise 0,250 ile 0,155 değerleri arasında değişmiştir.

Oyulma çukuru derinliğine etki eden parametrelerin incelenebilmesi için deneyler farklı parametre değerleri için yapılmış ve elde edilen taban ölçümlerinden oyulma çukuru profilleri çıkarılmıştır. Oyulma çukuru profillerinde ifade edilen "x" ölçüm yapılan noktanın test bölgesi başlangıcından uzaklığını, "x_{max}" ise maksimum oyulma çukuru derinliğinin oluştuğu noktanın konumunu, "y_s" x noktasındaki oyulma çukuru derinliğini ve "y_{smax}" ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliğini göstermektedir. Böylelikle her bir deney için bu parametreler kullanılarak maksimum oyulma çukuru profilleri boyutsuzlaştırılmıştır.

4.2. Yaklaşım Akım Derinliği Etkisinin İncelenmesi

Köprü tabliyesi altında gerçekleşen maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde yaklaşım akım derinliği etkisini inceleyebilmek amacıyla altı farklı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akım koşullarında deneyler yapılmıştır. Bu derinlikler, basınçlı akım koşulunun oluştuğu tabliye alt kotunda Y_1=20,0 cm, Y_2=22,5 cm ve tam tabliye korkuluk

üst kotuna karşılık gelen Y_3=25,0 cm derinlikleri ile savak tipi akım koşulunun meydana geldiği ve suyun köprü tabliyesi üzerinden savaklandığı Y_4=27,5 cm, Y_5=30,0 cm ve Y_6=32,5 cm'dir.

Çizelge 4.3'te yaklaşım akım derinlikleri ve tabliye altında oluşan maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere, basınçlı ve savak tipi akım koşullarında yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla genel olarak maksimum oyulma çukuru derinliğinde azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. Yaklaşım akım derinlikleri ve maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Kiriş Yüksekliği	Debi (lt/sn)		Y_1 20,0 cm	Y_2 22,5 cm	Y_3 25,0 cm	Y_4 27,5 cm	Y_5 30,0 cm	Y_6 32,5 cm
K_2= 5,0 cm	70	Akım Tipi	Basınçlı	Basınçlı	Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı
		Fr Sayısı	0,250	0,209	0,179	0,155	0,136	0,121
		y_{smax} (cm)	9,7	10,0	7,1	4,9	4,0	2,4
	80	Akım Tipi			Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı
		Fr Sayısı	-	-	0,204	0,177	0,155	0,138
		y_{smax} (cm)	-	-	12,1	10,7	8,2	5,3
	90	Akım Tipi	-	-	-	-	Savaklı	Savaklı
		Fr Sayısı	-	-	-	-	0,175	0,155
		y_{smax} (cm)	-	-	-	-	10,6	9,4
K_3= 7,5 cm	70	Akım Tipi	Basınçlı	Basınçlı	Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı
		Fr Sayısı	0,250	0,209	0,179	0,155	0,136	0,121
		y_{smax} (cm)	18,7	18,2	14,1	13,2	10,2	7,8
	80	Akım Tipi			Basınçlı	Savaklı	Savaklı	Savaklı
		Fr Sayısı	-	-	0,204	0,177	0,155	0,138
		y_{smax} (cm)	-	-	19,8	17,0	13,2	10,7
	90	Akım Tipi	-	-	-	-	Savaklı	Savaklı
		Fr Sayısı	-	-	-	-	0,175	0,155
		y_{smax} (cm)	-	-	-	-	17,1	15,0

Basınçlı akım durumunda yaklaşım akım derinliğinin tabliye alt sınırında veya korkuluk orta yüksekliğinde olması durumlarında oyulma çukuru derinlikleri birbirine çok yakın değerlerde meydana gelmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin korkuluk üst sınırında olması durumunda ise maksimum oyulma çukuru derinliğinde azalma görülmüştür. Bunun sebebi yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla ortalama akım hızının azalması ve böylece oyulma çukuru derinliğinin azalması olarak açıklanabilir. Akım alanının daha küçük olduğu 7,5

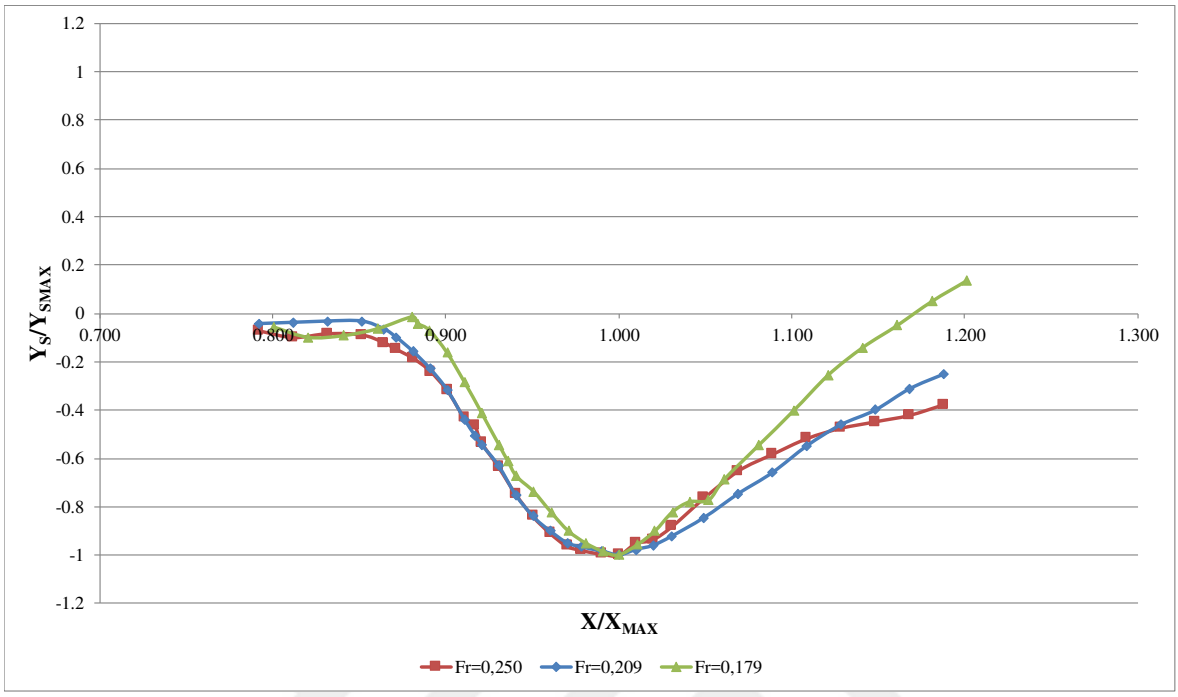
cm'lik kiriş yüksekliğinde ise daha büyük maksimum oyulma çukuru derinlikleri meydana gelmiştir.

Akımın savak tipi olması durumunda, yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla beraber savak yükünün de arttığı ancak maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, artan savak yükü ile tabliye üzerinden aşan debinin arttığını, tabliye altından geçen debinin ise azaldığını göstermiştir. Böylece ortalama akım hızı da azalmıştır. Hem savak hem de basınçlı akım durumlarında yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum ise aynı debide yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla birlikte Fr sayısının küçülmesi yani ortalama akım hızının azalması ve bunun neticesinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin de azalması olarak açıklanabilir. Tabliye üstünde oluşan savak yükü arttıkça tabliye altından geçen debi ve dolayısıyla ortalama akım hızı ve oyulma çukuru derinliği de azalmaktadır.

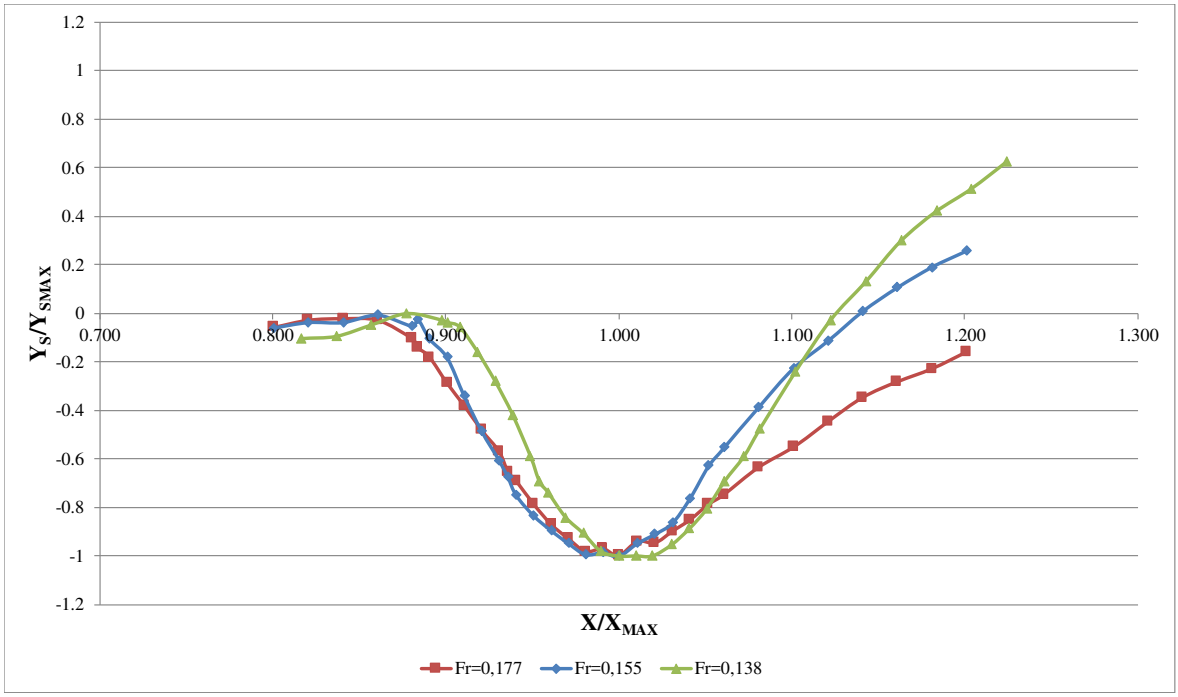
Kanaldan Q_1=70 lt/sn'lik debi geçmesi durumunda, 7,5 cm'lik kiriş yüksekliği ve basınçlı akım için Y_1=20,0 cm, Y_2=22,5 cm ve Y_3=25,0 cm'lik üç farklı yaklaşım akım derinliğinde maksimum oyulma çukuru profilleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru profillerinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde önemli bir değişim olmamaktadır. Y_1=20,0 cm ve Y_2=22,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru memba şevi aynı olup, mansap şevinde birbirine çok yakın profiller elde edilmişken Y_3=25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde hem memba hem de mansap şevlerinin daha dik olduğu ve oyulma çukurunun küçük miktar da olsa mansaba ötelendiği görülmüştür. Ayrıca köprü tabliyesinin mansabında sediment taşınımının Y_1=20,0 cm yaklaşım akım derinliğinde daha fazla olduğu mansap şevinin yatıklığından görülmektedir. Bunun nedeni de 20,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daha yüksek olan ortalama akım hızıyla açıklanabilir. Böylece yaklaşım akım derinliği arttıkça maksimum oyulma çukuru derinliği ile beraber genişliğinin ve konumunun da etkilendiği gözlemlenmiştir.

Q_2=80 lt/sn ve Q_3=90 lt/sn'lik debiler için sadece savak tipi akım koşulları incelenmiş ve Çizelge 4.3'te Q_2=80 lt/sn için üç farklı yaklaşım akım derinliği (Y_4=27,5 cm, Y_5=30,0 cm ve Y_6=32,5 cm) ve Q_3=90 lt/sn için iki farklı yaklaşım akım derinliği (Y_5=30,0 cm ve Y_6=32,5 cm) değerlerinde maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelenmiştir. Boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri, Q_2=80 lt/sn'lik debi için Şekil 4.4'te, Q_3=90

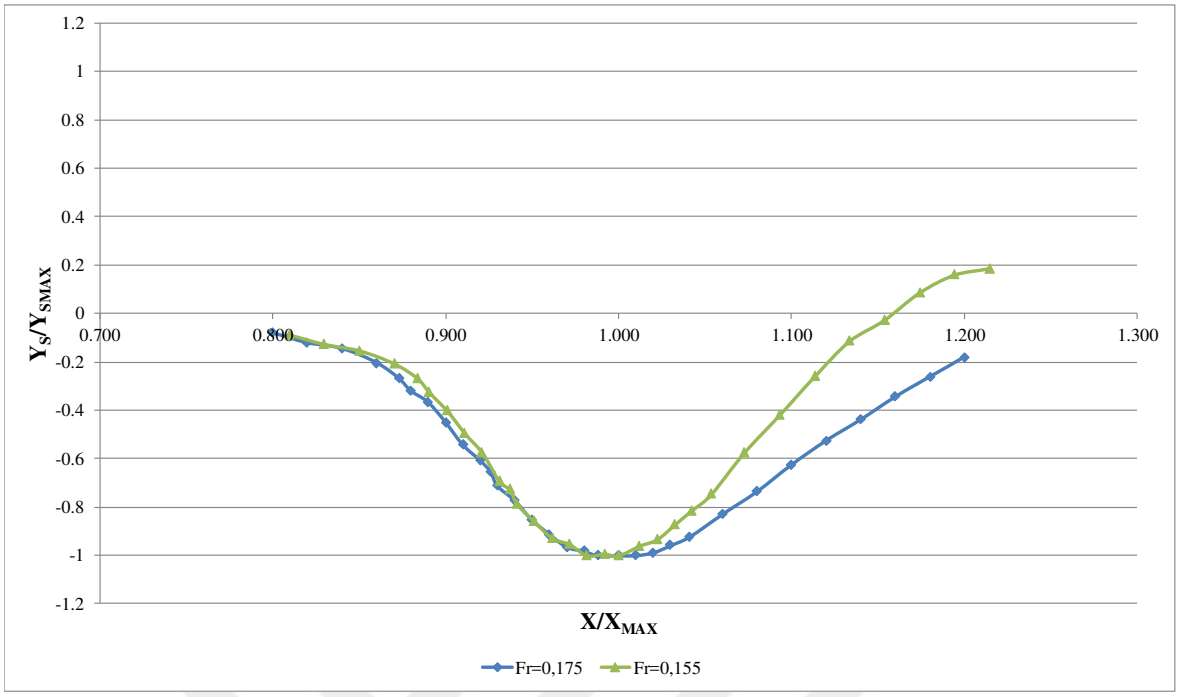
lt/sn'lik debi için ise Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Q_1=70 lt/sn için basınçlı akım koşulunda üç farklı yaklaşım akım derinliği için elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 4.4. Q_2=80 lt/sn için savak tipi akım koşulunda üç farklı yaklaşım akım derinliği için elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 4.5. Q_3=90 lt/sn için savak tipi akım koşulunda iki farklı yaklaşım akım derinliği için elde edilmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerinden de görüldüğü üzere savak tipi akım durumunda artan akım derinliğiyle birlikte dikleşen mansap şevi görülmektedir. Bunun nedeni artan yaklaşım akım derinliğiyle birlikte tabliye altından geçen akımın ortalama hızının ve katı madde taşıma kapasitesinin küçülmesidir. Böylece akım katı maddeyi hemen tabliye sonrasında depolamaya başlamakta ve daha dik mansap şev açısı meydana gelmektedir.

4.3. Kiriş Yüksekliği Etkisinin İncelenmesi

Çalışma kapsamında, maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde kiriş yüksekliği etkisini inceleyebilmek için K_2=5,0 cm ve K_3=7,5 cm olmak üzere iki farklı kiriş yüksekliği kullanılarak deneyler yapılmıştır. Basınçlı ve savak tipi akım koşulları altında faklı debi ve yaklaşım akım derinlikleri için iki farklı kiriş yüksekliğinde ölçülmüş olan maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile değişim yüzdeleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre kiriş yüksekliğinin 5,0 cm'den 7,5 cm'e artırılmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliklerinin tüm debi ve yaklaşım akım derinliklerinde arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni; köprü tabliyesi altında artan düşey daralmayla ıslak alanda meydana gelen küçülme sonucunda ortalama akım hızı ile kayma gerilmelerinin büyümesi ve buna bağlı

olarak sediment taşınımının artması olarak açıklanabilir.

Çizelge 4.4'ten de görüldüğü üzere en büyük değişimler en küçük debi değerinde yani 70 lt/sn'lik debide meydana gelmiştir. Bunun sebebi söz konusu debi ve yaklaşım akım derinliklerinde akımın test bölgesindeki sedimenti hareketi geçirip taşıyabilmesi için yeterli hıza ve taşıma kapasitesine sahip olmadığı ancak tabliye altında kiriş yüksekliğinin artmasıyla ortalama akım hızının artması ve böylece oyulmanın meydana gelmesi olarak açıklanabilir. Diğer debi değerlerinde de artan hızlarla artış meydana gelmiş ancak 70 lt/sn'lik debide olduğu kadar yüksek olmamıştır.

Çizelge 4.4. Kiriş yüksekliği değişiminin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Debi (lt/sn)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Fr Sayısı	Akım Tipi	y_{smax} (cm)		Değişim Yüzdesi (%)
				K_2=5,0 cm	K_3=7,5 cm	
70	Y_1=20,0 cm	0,250	Basınçlı	9,7	18,7	92,78
	Y_2=22,5 cm	0,209	Basınçlı	10,0	18,2	82,00
	Y_3=25,0 cm	0,179	Basınçlı	7,1	14,1	98,59
	Y_4=27,5 cm	0,155	Savaklı	4,9	13,2	169,39
	Y_5=30,0 cm	0,136	Savaklı	4,0	10,2	155,00
	Y_6=32,5 cm	0,121	Savaklı	2,4	7,8	225,00
80	Y_3=25,0 cm	0,204	Basınçlı	12,1	19,8	63,64
	Y_4=27,5 cm	0,177	Savaklı	10,7	17,0	58,88
	Y_5=30,0 cm	0,155	Savaklı	8,2	13,2	60,98
	Y_6=32,5 cm	0,138	Savaklı	5,3	10,7	101,89
90	Y_5=30,0 cm	0,175	Savaklı	10,6	17,1	61,32
	Y_6=32,5 cm	0,155	Savaklı	9,4	15,0	59,57

Çizelge 4.4'te görüleceği üzere en büyük değişim 70 lt/sn'lik debide Y_6=32,5 cm'lik akım derinliği ile savaklı akım durumunda meydana gelmiş, maksimum oyulma çukuru derinliklerindeki değişim %225 olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, kiriş yüksekliğinin artması durumunda tabliye altındaki hız alanının önemli ölçüde değiştiği ve taban gerilmelerinin arttığı, bu durumun da tabliye altında en küçük ortalama akım hızıyla en az oyulmanın meydana geldiği savaklı akımda açıkça gözlemlendiği görülmektedir.

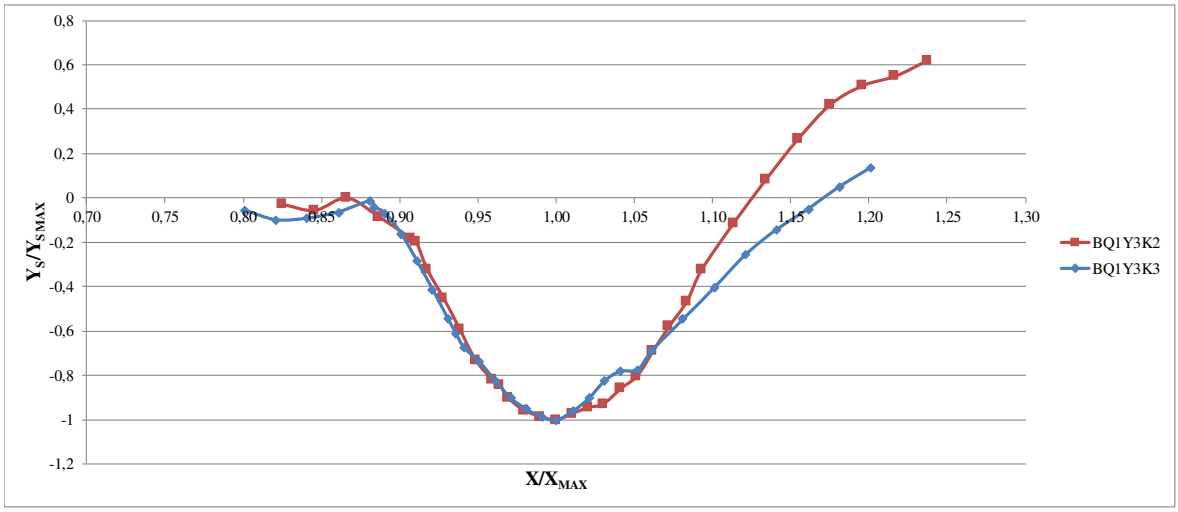
Şekil 4.6'da basınçlı ve savak tipi akım durumlarında farklı debi ve yaklaşım akım derinliklerinde, 5,0 cm ve 7,5 cm kiriş yüksekliklerinde köprü tabliyesi altında meydana gelmiş olan oyulma çukuruna ait boyutsuzlaştırılmış profiller görülmektedir. Çizelge 4.4'te verilen değerler ile birlikte değerlendirildiklerinde maksimum oyulma çukuru derinliklerinde önemli değişmeler olsa da verilen boyutsuzlaştırılmış profillerde sadece mansap şevinde kiriş yüksekliğinden bir miktar etkilenme olduğu görülmüştür.

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere basınçlı ve savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru profillerine göre kiriş yüksekliğinin artması halinde mansapta biriken sediment miktarında azalma ve oyulma çukuru genişliklerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca, savak tipi akım durumunda kiriş yüksekliği 5,0 cm olduğunda maksimum oyulma çukuru derinliği yeri tabliye altına doğru kaymıştır. Ancak 7,5 cm kiriş yüksekliği için maksimum oyulma çukuru derinliği yeri tabliye mansap uç bölgesinde meydana gelmiştir.

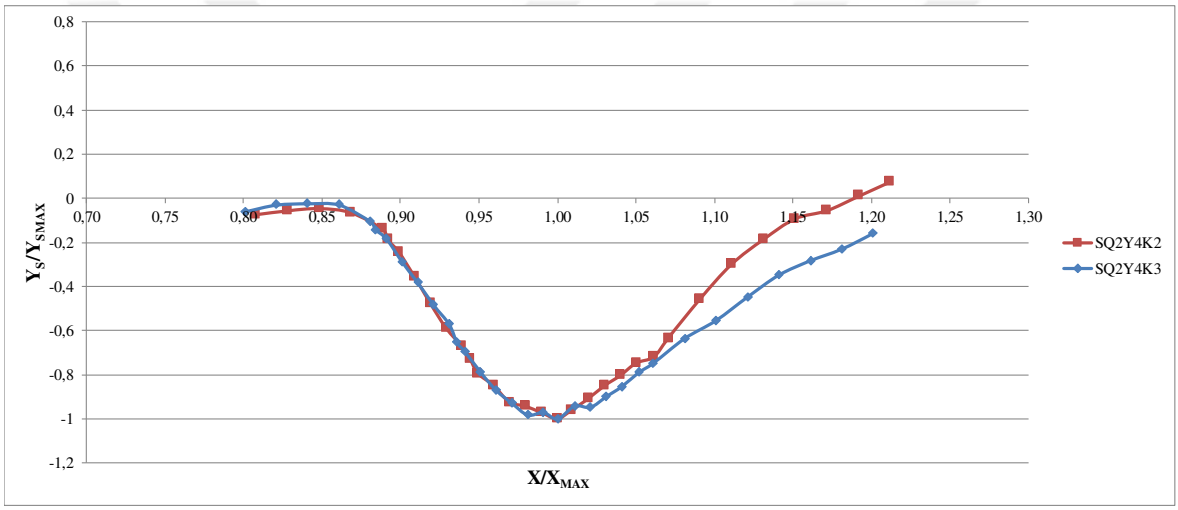
4.4. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Durumlarının İncelenmesi

Basınçlı ve savak tipi akım koşullarının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkilerini inceleyebilmek için aynı yaklaşım akım derinliği ve debi değerlerinde hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin yapılabilmesi için köprü tabliyesi korkuluk yüksekliğini artırmak amacıyla 10,0 cm yüksekliğinde ek bir PVC parça silikonla yapıştırılmış ve böylece aynı yaklaşım akım derinliği için savak tipi akım yanında basınçlı akım da elde edilmiştir. Deney ölçümlerine göre tabliye altında oluşan maksimum oyulma çukuru şekli ve derinlikleri incelenmiştir. Aynı yaklaşım akım derinliği koşullarında elde edilmiş basınçlı ve savak tipi akımlarda köprü tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri farklı debi ve yaklaşım akım derinlikleri için Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

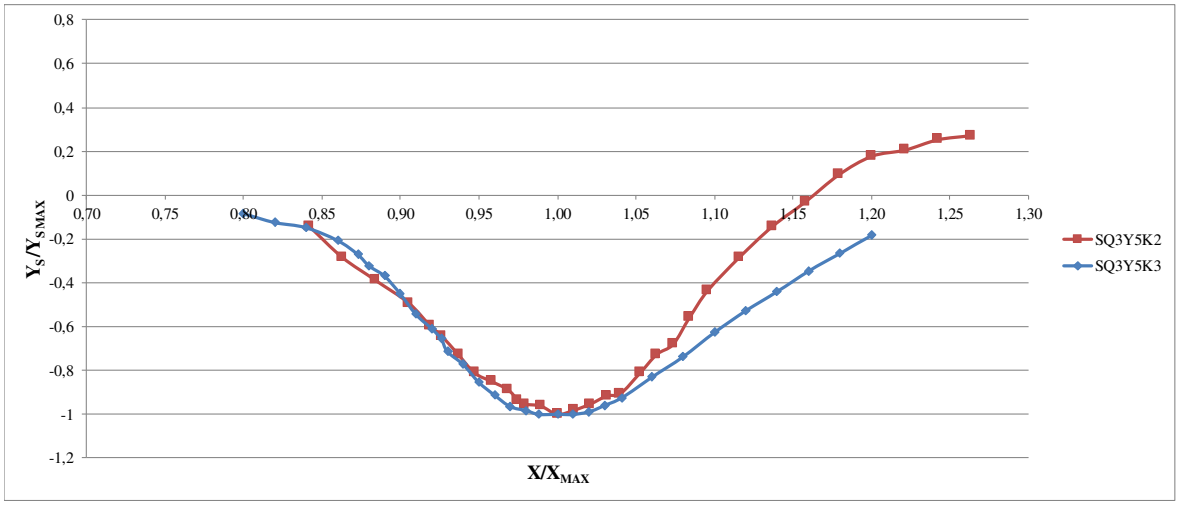
Köprü modeli tabliye alt seviyesi bozulmamış taban seviyesinden 20,0 cm'lik bir yükseklikte (Y_1=20,0 cm) konumlandırılmıştır. Yaklaşım akım derinliğinin Y_1=20,0 cm - Y_3=25,0 cm değerlerinde basınçlı akım, 25,0 cm'den büyük yaklaşım akım derinlikleri için ise savak tipi akım koşulları meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu bölümdeki deneyler 25,0 cm'den büyük yaklaşım akım derinlikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.6. Basınçlı ve savak tipi akımda farklı Froude sayılarında 5,0 ve 7,5 cm kiriş yüksekliklerinde meydana gelmiş boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,179 b) Fr=0,177 c) Fr=0,175

Çizelge 4.5. Basınçlı ve savak tipi akım durumlarının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Debi (lt/sn)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Fr Sayısı	Kiriş Yüksekliği	Oyulma Derinliği y_{smax} (cm)		Değişim Yüzdesi (%)
				Savaklı	Basınçlı	
70	Y_4=27,5 cm	0,155	K_2=5,0 cm	4,9	8,2	67,35
			K_3=7,5 cm	13,2	15,3	15,91
	Y_5=30,0 cm	0,136	K_2=5,0 cm	4,0	9,3	132,50
			K_3=7,5 cm	10,2	15,8	54,90
	Y_6=32,5 cm	0,121	K_2=5,0 cm	2,4	10,8	350,00
			K_3=7,5 cm	7,8	15,9	103,85
80	Y_4=27,5 cm	0,177	K_2=5,0 cm	10,7	10,2	-4,67
			K_3=7,5 cm	17,0	19	11,76
	Y_5=30,0 cm	0,155	K_2=5,0 cm	8,2	12,8	56,10
			K_3=7,5 cm	13,2	18,9	43,18
	Y_6=32,5 cm	0,138	K_2=5,0 cm	5,3	15,9	200,00
			K_3=7,5 cm	10,7	19,1	78,50
90	Y_5=30,0 cm	0,175	K_2=5,0 cm	10,6	15,8	49,06
			K_3=7,5 cm	17,1	20,4	19,30
	Y_6=32,5 cm	0,155	K_2=5,0 cm	9,4	17,3	84,04
			K_3=7,5 cm	15,0	20,7	38,00

Çizelge 4.5'te verilen deney sonuçları incelendiğinde savak tipi akım durumunda kiriş yüksekliğinin oyulma çukuru derinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve tüm deney serilerinde oyulma derinliğini artırdığı görülmüştür. Aynı yaklaşım akım derinliğinde ise basınçlı akım durumunda savak tipi akıma kıyasla oyulma çukuru derinliğinin neredeyse tüm deneylerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Değişim yüzdesinin debi arttıkça azaldığı ancak %350'ye varan oranlarda basınçlı akım durumunda arttığı gözlemlenmiştir.

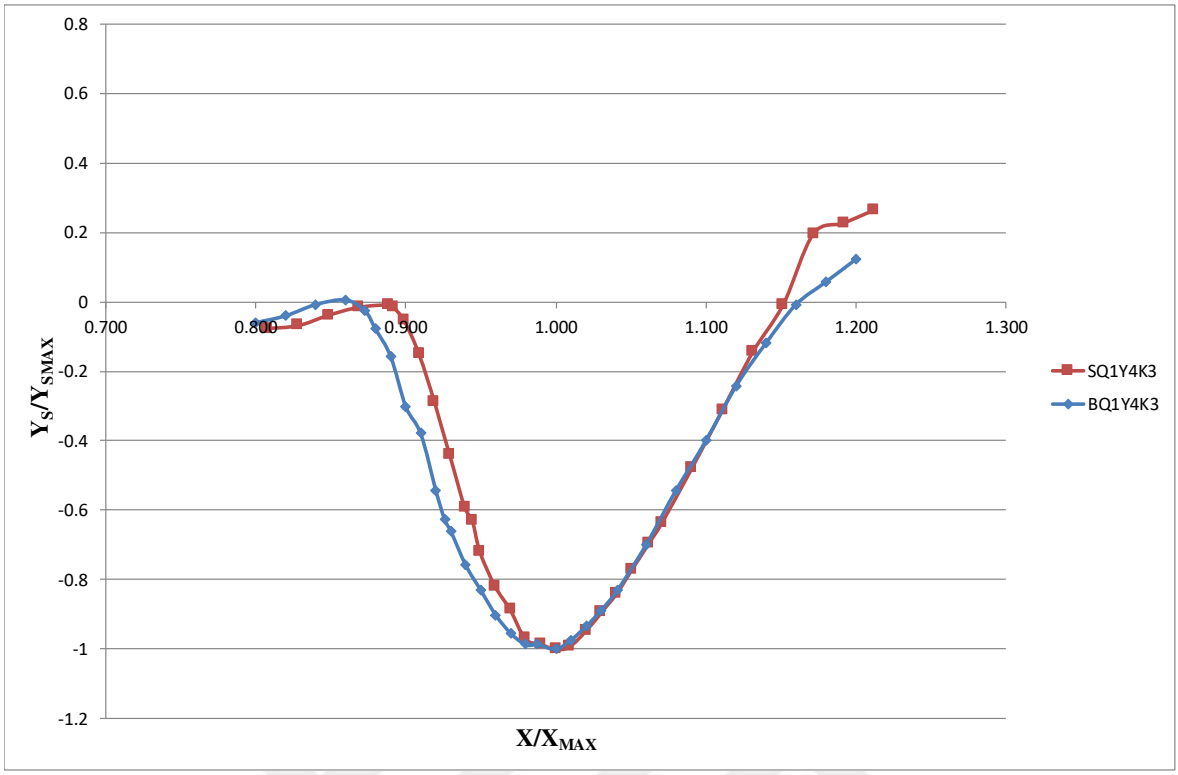
Yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla basınçlı akım koşulundaki maksimum oyulma derinliğinde çok fazla artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, basınçlı akım koşullarında köprü tabliyesi membaında yaklaşım akım derinliğinin artması ile akımın potansiyel enerjisinin artması ve bunun sonucunda köprü tabliyesi altından geçen ortalama

akım hızının ve taban kayma gerilmelerinin artması olarak açıklanabilir. Bu durumda köprü tabliyesi altında kanal tabanında meydana gelen oyulma çukuru derinliğinde de artış görülmüştür. Savak tipi akım durumunda ise yaklaşım akım derinliği ile maksimum oyulma çukuru derinliği ters orantılı olarak değişmektedir. Yani yaklaşım akım derinliği artarken oyulma çukuru derinliği azalmaktadır. Bunun nedeni ise savak tipi akım koşullarında yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla köprü tabliyesi üzerinden savaklanan debi miktarının artması, dolayısıyla tabliye altından geçen debinin ve ortalama akım hızının azalması olarak açıklanabilir. Buna bağlı olarak meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği de azalmaktadır.

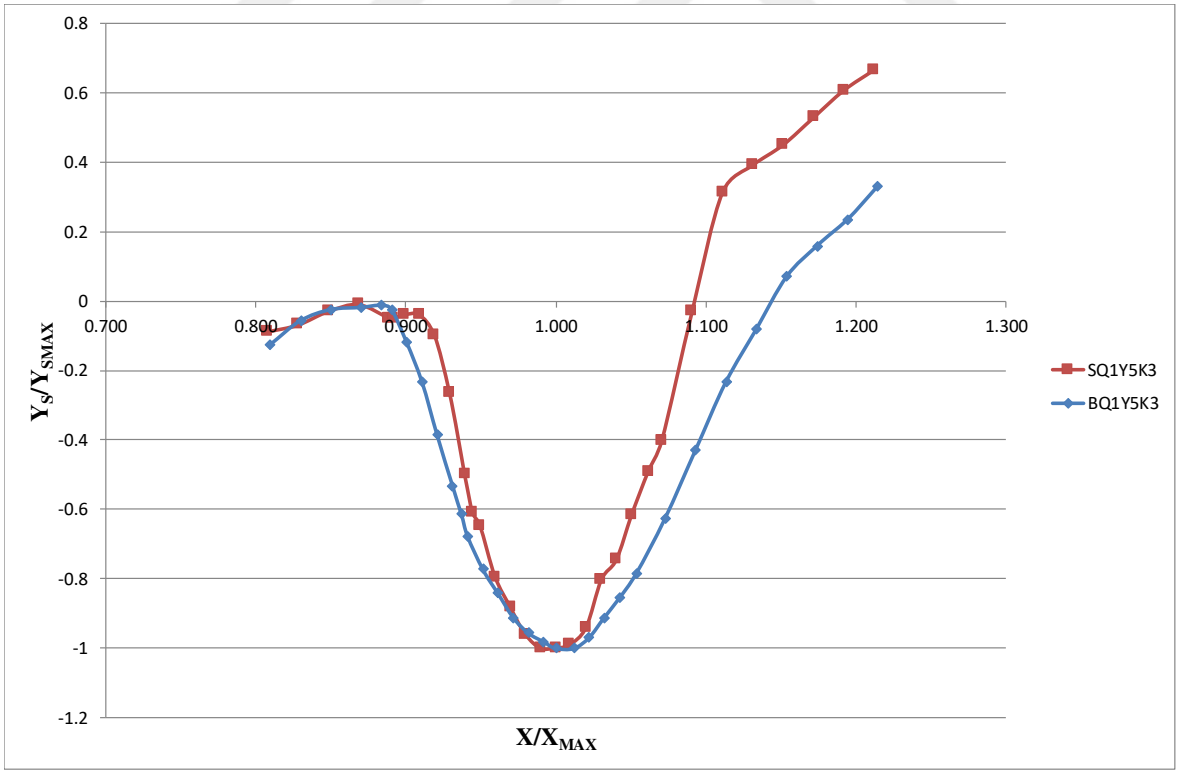
Çizelge 4.5.'te görüldüğü gibi maksimum oyulma çukuru derinlikleri savak tipi akım durumlarında 7,5 cm yüksekliğindeki kiriş durumunda meydana gelirken, basınçlı akım durumunda en büyük değişim 5,0 cm'lik kiriş yüksekliğinde oluşmuştur. Şekil 4.7'de 70 lt/sn'lik debi ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği üzere yaklaşım akım derinliği arttıkça öncelikle oyulma çukurunun mansap şevi etkilemekte ve savak tipi akım durumunda daha dik eğimli bir şev oluşmaktadır. Bu profilin en üstündeki değişim ise tabliye altından ayrılan akımın hemen tabliye mansabında sedimenti taşıyamadığı için burada depolamaya başlaması olarak açıklanabilir. Bu durum akım derinliği arttıkça daha da belirginleşmektedir.

Şekil 4.8 ise, 80 lt/sn'lik debi ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliği için farklı yaklaşım akım derinliklerindeki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profillerini göstermektedir.

Çizelge 4.5'e göre Q_2=80 lt/sn'lik debide basınçlı akım koşulları için maksimum oyulma çukuru derinliği 19,1 cm olarak 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiştir. Bu yaklaşım akım derinliğinde savak tipi akım koşullarında 10,7 cm'lik maksimum oyulma çukuru derinliği meydana gelmiştir. Şekil 4.8 (c)'de verilen oyulma çukuru profilinde görüldüğü gibi oyulma çukuru genişliği basınçlı akım tipi için daha fazladır. Yani daha yayvan bir çukur meydana gelmekte, savak tipi akım durumunda ise daha dik şev eğimleri söz konusu olmaktadır. Bu da yine akımın hemen tabliye mansabında katı maddenin depolanmasına neden olmasıyla açıklanabilir.

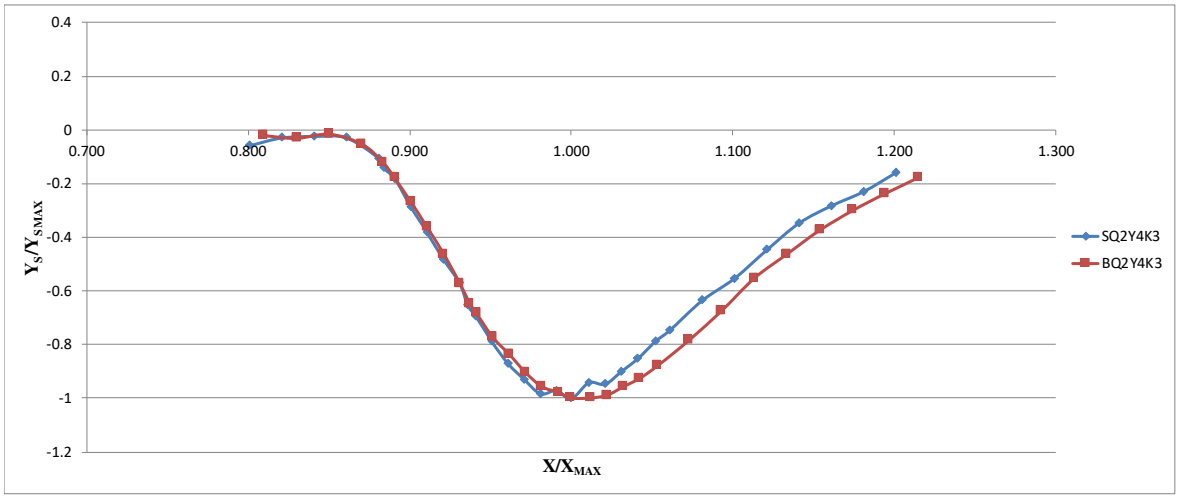


(a)

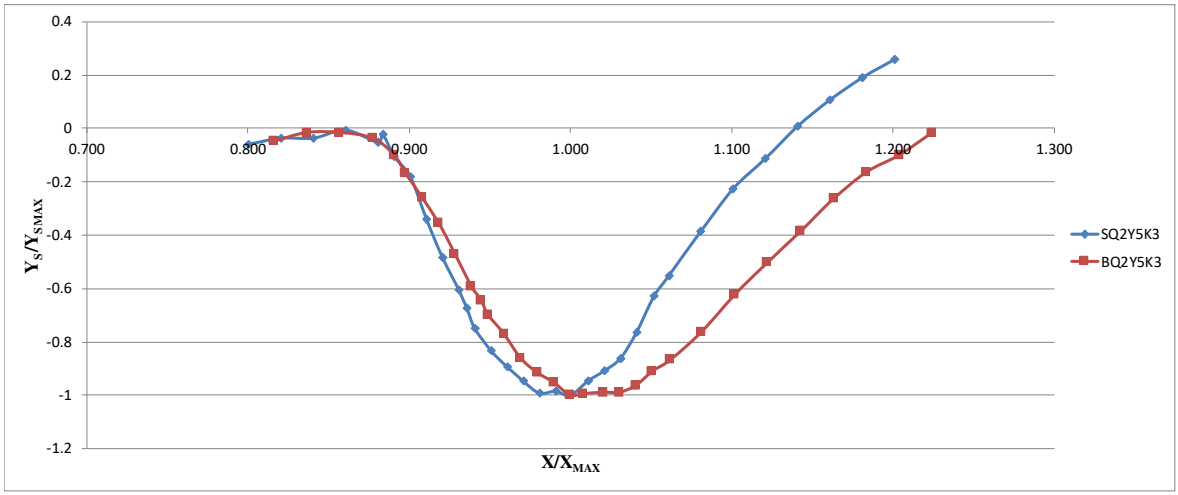


(b)

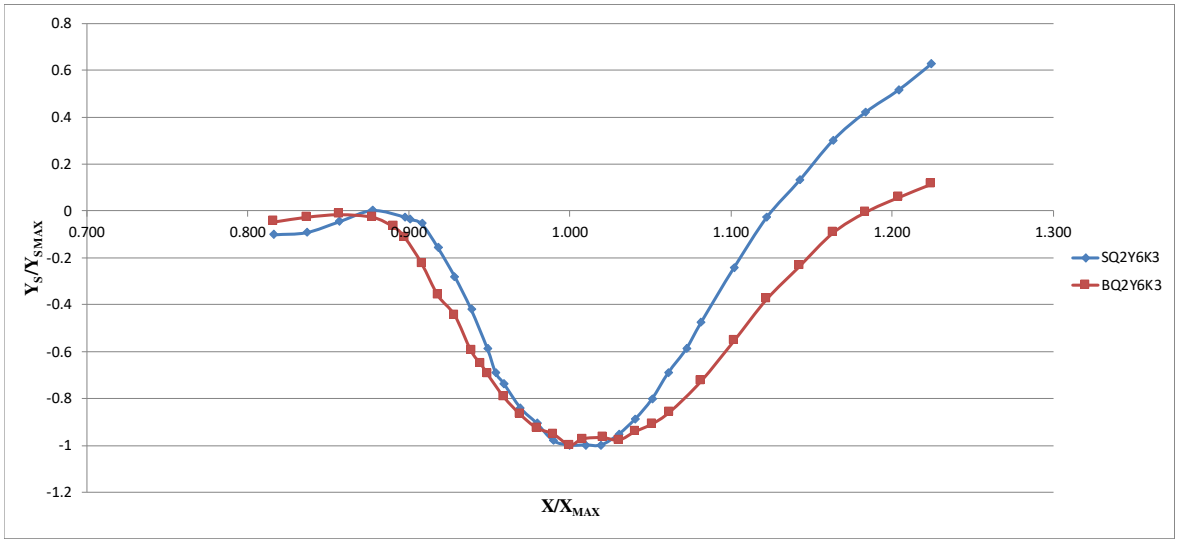
Şekil 4.7. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 70 lt/sn'lik debide farklı Froude sayılarında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,155 b) Fr=0,136



(a)



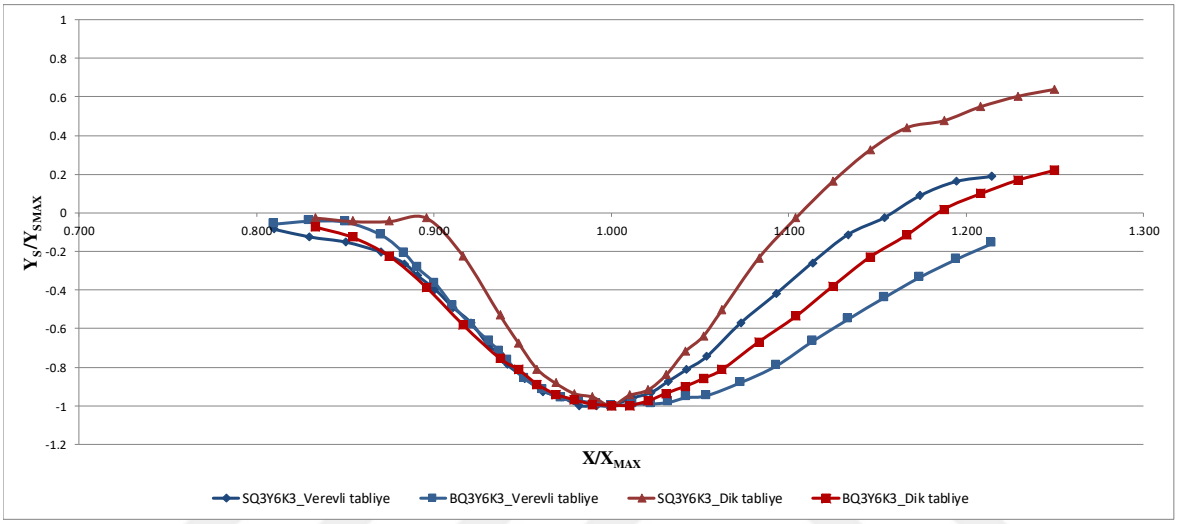
(b)



(c)

Şekil 4.8. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 80 lt/sn'lik debi ve farklı Froude sayılarında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,177 b) Fr=0,155 c) Fr=0,138

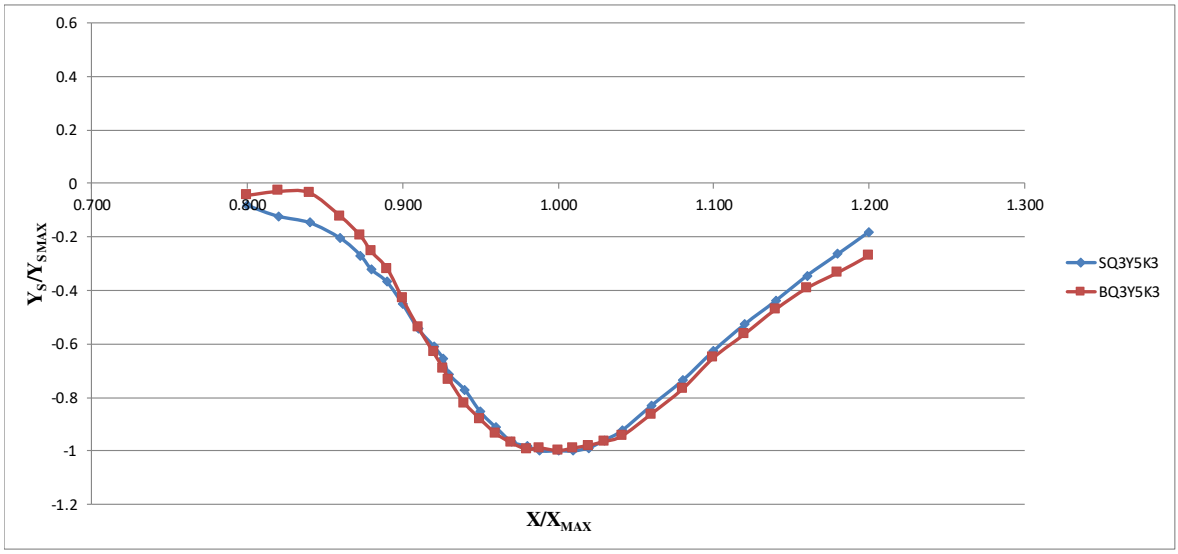
Şekil 4.8'de görüleceği üzere debi değeri ve yaklaşım akım derinliği arttıkça savak tipi akım ile basınçlı akım arasındaki oyulma çukuru genişliğindeki fark da artmaktadır. Bu değerler arttıkça mansap şev eğimi savak tipi akım durumunda oldukça dikleşmektedir. Bu sonuç, akımın köprü tabliyesine dik geldiği durumda da gözlenmiş olup oyulma çukuru genişliğindeki farkın artması ve savak tipi akımda mansap şevinin dikleşmesi durumunun dik tabliye olması halinde daha da belirginleştiği görülmüştür (Karakurt, 2016).



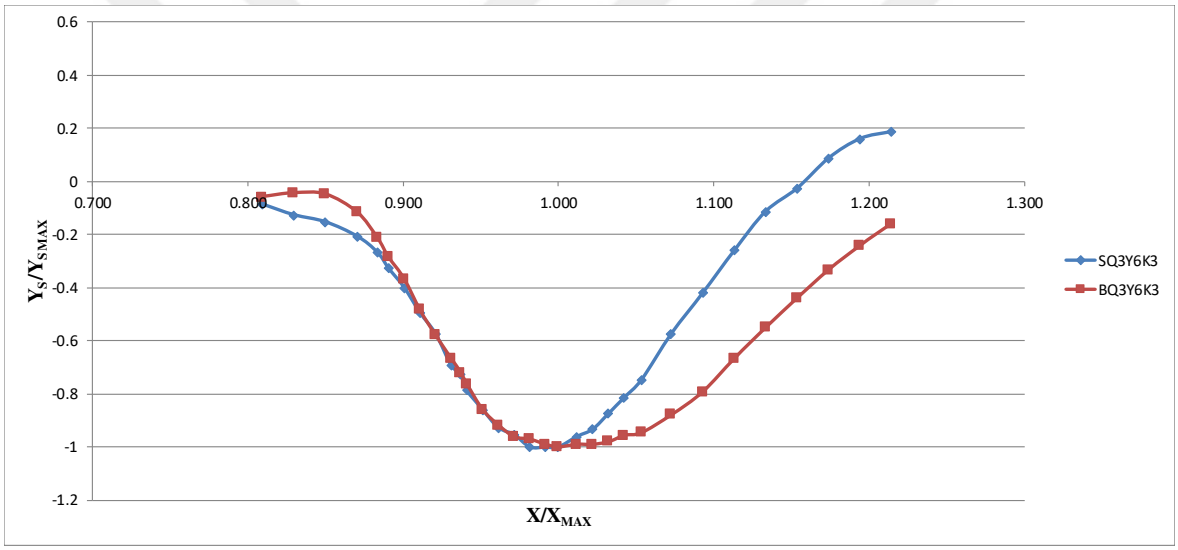
Şekil 4.9. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, Froude sayısı 0,155 için (90 lt/sn'lik debi) tabliyenin dik ve verevli olması halinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

90 lt/sn'lik debide maksimum oyulma çukuru derinliği, basınçlı akım durumunda Y_6=32,5 cm yaklaşım akım derinliğinde 20,7 cm, savak tipi akım durumu için ise 15,0 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.10 (a)'da akım tipinin oyulma çukuru profilleri üzerinde etkisi neredeyse hiç olmamıştır. Şekil 4.10 (b)'de ise yaklaşım akım derinliği 32,5 cm olduğu durumda basınçlı akım koşullarında tabanda oyulma daha fazla olmuş ve oyulma çukuru genişliği savak tipi akımdakine göre artmıştır.

Çizelge 4.5'te verilen deney sonuçlarına ve Şekil 4.7 - Şekil 4.10'da verilen oyulma çukuru profillerine bakıldığında, aynı debi değerinde ve kiriş yüksekliğinde basınçlı akım, savak tipi akıma göre maksimum oyulma çukuru derinliğini ve oyulma çukuru şeklini daha çok etkilemektedir. Özellikle yaklaşım akım derinliğinin 30,0 cm ve 32,5 cm olduğu durumlarda, basınçlı akım koşulu maksimum oyulma çukuru derinliklerinin artmasında önemli rol oynamaktadır.



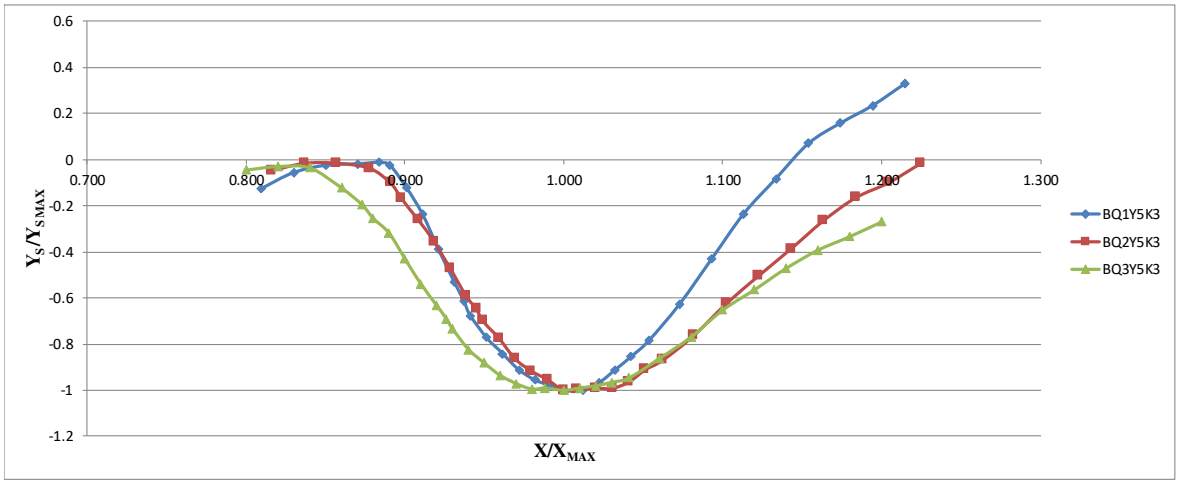
(a)



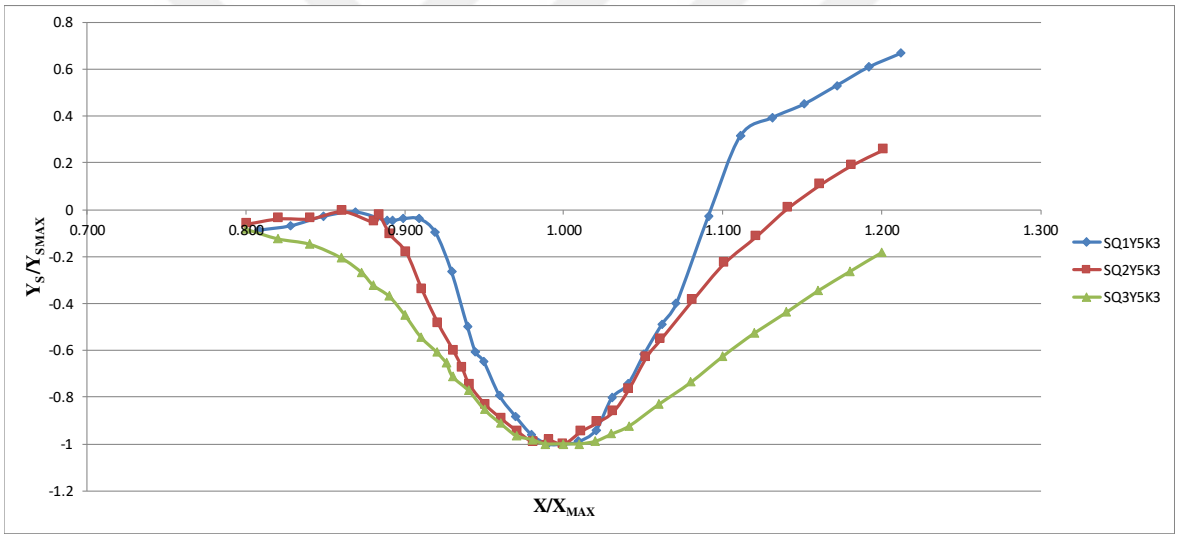
(b)

Şekil 4.10. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 90 lt/sn'lik debi ve 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde farklı Froude sayılarında meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Fr=0,175 b) Fr=0,155

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sırasıyla basınçlı ve savak tipi akım durumlarında 7,5 cm'lik kiriş yüksekliği ve 30 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere basınçlı akım durumunda oyulma çukuru mansap şevinde debiyle birlikte artış olmakta hatta 90 lt/sn'lik debide oyulma çukuru membaya doğru genişlemektedir. Savak tipi akım durumunda ise basınçlı akıma kıyasla daha dar oyulma çukurları elde edilmekte, debi arttıkça oyulma çukuru genişliği membaya doğru hareket etmektedir.



Şekil 4.11. Basınçlı akım durumunda, 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 4.12. Savak tipi akım durumunda, 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

4.5. Verevlik Açısının Oyulma Çukuru Derinliğine Etkisinin İncelenmesi

Tabliyenin akımla arasında verevlik açısı olması durumunda bu açının oyulma çukuru derinliğine ve şekline etkisini inceleyebilmek için tamamen aynı akım ve sediment şartlarında aynı laboratuvar kanalında yapılmış deney verilerinden yararlanılmıştır. Mevcut çalışma kapsamında 15°'lik verevlik açısı olan köprü tabliye modeli kullanılarak basınçlı ve savak tipi akım şartlarında deneyler yapılmıştır. Bu sonuçlar akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliye modelinin kullanıldığı çalışma sonuçlarıyla (Karakurt, 2016)

karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.6'da akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi kullanılarak elde edilmiş deney verileri ile bu çalışma kapsamında yapılmış deney sonuçları görülmektedir. Her iki deney grubunda da aynı taban malzemesi, debi değerleri ile akım koşulları geçerlidir.

Çizelge 4.6'da verilen deney sonuçları incelendiğinde 80 lt/sn ve 90 lt/sn'lik debilerin kullanılması durumunda hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında verevlik açısı olan tabliye durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinde %65,63'leri bulan artışlar olduğu gözlemlenmiştir. 70 lt/sn debide ise genel olarak basınçlı akım koşullarında verevli tabliye halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinde artış, savak tipi akım koşullarında ise azalma olduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu tüm oyulmaların ise 5,0 cm'lik kiriş yüksekliğinde meydana geldiği görülmüştür.

Çizelge 4.6. Akıma dik ve 15°'lik verevlik açısı olan tabliye altında tabanda oluşan maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Debi (lt/s)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Fr Sayısı	Kiriş Yüksekliği	Akım Tipi	y_{smax} (cm)		Değişim Yüzdesi (%)
					Verevli Tabliye	Akıma Dik Tabliye (Karakurt,2016)	
70	Y_1=20,0 cm	0,250	K_2=5,0 cm	Basınçlı	9,7	9,6	1,04
			K_3=7,5 cm	Basınçlı	18,7	13,4	39,55
	Y_2=22,5 cm	0,209	K_2=5,0 cm	Basınçlı	10,0	7,7	29,87
			K_3=7,5 cm	Basınçlı	18,2	12,0	51,67
	Y_3=25,0 cm	0,179	K_2=5,0 cm	Basınçlı	7,1	8,1	-12,35
			K_3=7,5 cm	Basınçlı	14,1	13,1	7,63
	Y_4=27,5 cm	0,155	K_2=5,0 cm	Savaklı	4,9	7,9	-37,97
				Basınçlı	8,2	7,2	13,89
			K_3=7,5 cm	Savaklı	13,2	11,6	13,79
				Basınçlı	15,3	11,0	39,09
	Y_5=30,0 cm	0,136	K_2=5,0 cm	Savaklı	4,0	4,7	-14,89
				Basınçlı	9,3	8,3	12,05
			K_3=7,5 cm	Savaklı	10,2	11,2	-8,93
				Basınçlı	15,8	13,0	21,54
	Y_6=32,5 cm	0,121	K_2=5,0 cm	Savaklı	2,4	4,1	-41,46
				Basınçlı	10,8	7,5	44,00

Çizelge 4.6. (devam) Akıma dik ve 15°'lik verevlik açısı olan tabliye altında tabanda oluşan maksimum oyulma çukuru derinlikleri

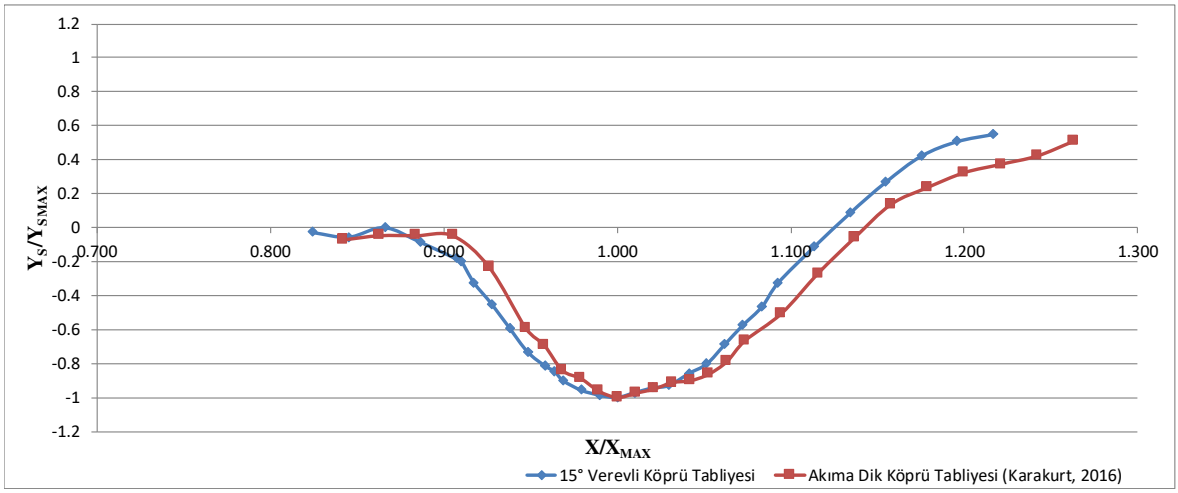
Debi (lt/s)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Fr Sayısı	Kiriş Yüksekliği	Akım Tipi	y_{smax} (cm)		Değişim Yüzdesi (%)
					Verevli Tabliye	Akıma Dik Tabliye (Karakurt,2016)	
70	Y_6=32,5 cm	0,121	K_3=7,5 cm	Savaklı	7,8	5,9	32,20
				Basınçlı	15,9	11,8	34,75
80	Y_3=25,0 cm	0,204	K_2=5,0 cm	Basınçlı	12,1	10,9	11,01
			K_3=7,5 cm	Basınçlı	19,8	14,1	40,43
	Y_4=27,5 cm	0,177	K_2=5,0 cm	Savaklı	10,7	8,5	25,88
				Basınçlı	10,2	8,7	17,24
			K_3=7,5 cm	Savaklı	17,0	13,0	30,77
				Basınçlı	19,0	13,0	46,15
	Y_5=30,0 cm	0,155	K_2=5,0 cm	Savaklı	8,2	5,6	46,43
				Basınçlı	12,8	10,5	21,90
			K_3=7,5 cm	Savaklı	13,2	10,5	25,71
				Basınçlı	18,9	13,4	41,04
	Y_6=32,5 cm	0,138	K_2=5,0 cm	Savaklı	5,3	3,2	65,63
				Basınçlı	15,9	10,1	57,43
			K_3=7,5 cm	Savaklı	10,7	9,0	18,89
				Basınçlı	19,1	13,3	43,61
90	Y_5=30,0 cm	0,175	K_2=5,0 cm	Savaklı	10,6	7,7	37,66
				Basınçlı	15,8	11,9	32,77
			K_3=7,5 cm	Savaklı	17,1	13,0	31,54
				Basınçlı	20,4	16,5	23,64
	Y_6=32,5 cm	0,155	K_2=5,0 cm	Savaklı	9,4	6,6	42,42
				Basınçlı	17,3	14,2	21,83
			K_3=7,5 cm	Savaklı	15,0	10,6	41,51
				Basınçlı	20,7	17,3	19,65

Şekil 4.13'te 70 lt/sn'lik debi ve 5,0 cm'lik kiriş yüksekliğinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri basınçlı ve savak tipi akımlar için verilmiştir. Şekil 4.13 (a)'dan görüldüğü üzere basınçlı akım durumunda verevlik açısı nedeniyle oyulma çukurunda memba yönüne yani tabliye altına doğru bir hareket söz konusudur. Mansap şev eğimi daha dik olurken memba şevi basınçlı akım durumunda daha yumuşak bir eğime sahiptir. Şekil 4.13 (b) ve (c)'den görüldüğü

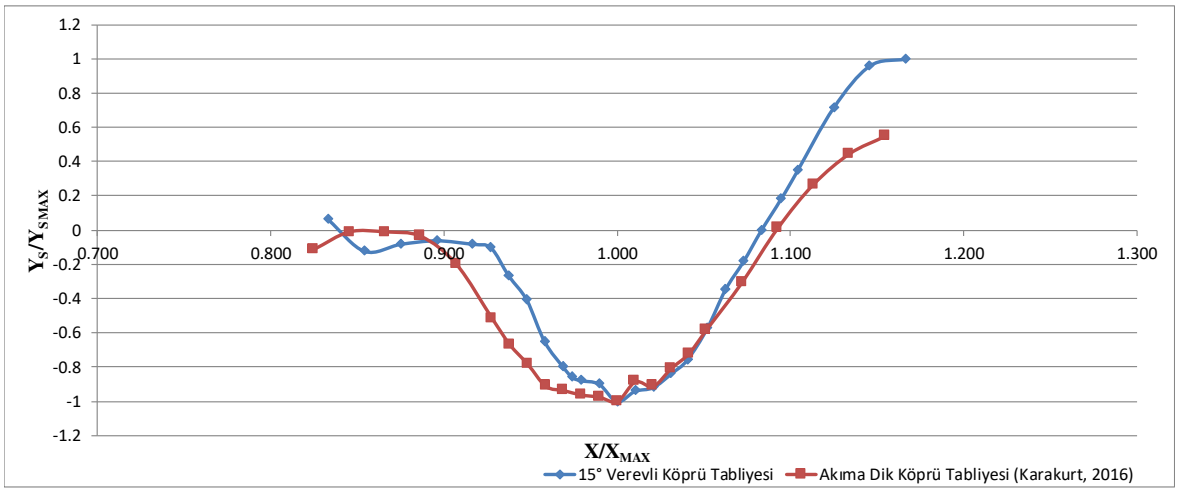
üzere ise savak tipi akım durumunda savak yükünün artmasıyla her iki köprü tabliyesi için de eğimlerin dikleştiği ve oyulma çukurunun darlaştığı görülmektedir. Fr=0.122 olması halinde hemen köpürü tabliyesi sonrasında ortalama akım hızının yeniden küçülmesiyle askıdaki sediment maddesi bu bölgede depolanmaya başlamakta, böylece tabliye mansabında depolanma yüksekliği artarak şevin daha da dik olmasına neden olmaktadır. Bu durum verevli köprü tabliyesi için daha belirgindir. Şekil 4.14'te ise tabliyenin verevli ve akıma dik yerleştirilmesi durumlarında tabliye altında meydana gelen oyulma çukurunda gözlemlenen en büyük değişikliklerin olduğu boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Buna göre küçük debi değerinde (Q_1=70 lt/sn) oyulma çukuru profilinde çok ciddi bir farklılık görülmemiştir. Ancak debi değeri arttıkça (Q_2=80 lt/sn ve Q_3=90 lt/sn) özellikle mansap şevinde farklılıklar dikkat çekmektedir.

Deney verileri ve Çizelge 4.6'daki değişim yüzdeleri köprü tabliyesi altından geçen ortalama akım hızının küçük olması durumunda verevlik açısı etkisinin de küçük olacağı ve özellikle oyulmanın basınçlı akıma göre daha az meydana geldiği savak tipi akım durumunda yaklaşım akım derinliği arttıkça maksimum oyulma çukuru derinliğindeki azalmanın da arttığı söylenebilir. Şöyle ki 70 lt/sn'lik debi için su seviyesinin tam korkuluk üst noktasında olması halinde verevli köprü tabliyesi altındaki maksimum oyulma çukuru derinliğindeki değişim yüzdesi 5,0 cm'lik kiriş yüksekliği için %12,35 oranında azalırken, bu oran Y_4=27,5 cm için %37,97 ve Y_6=32,5 cm için %41,46 olarak hesaplanmıştır. Bu durumlar dışında ise tüm deney setlerinde, özellikle de debi ve yaklaşım akım derinliği değerlerinin artması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğindeki artış %65,63'ü bulabilmektedir. Bu sonuçlar özellikle taşkın olması durumunda verevli köprü tabliyeleri altındaki taban oyulmalarının savaklı akım durumunda %25-%61, basınçlı akım durumunda ise %17-%57 seviyelerine kadar çıkabileceğini göstermektedir. Taşkının büyüklüğü arttıkça maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde verevlik açısının olumsuz etkisi de artmaktadır.

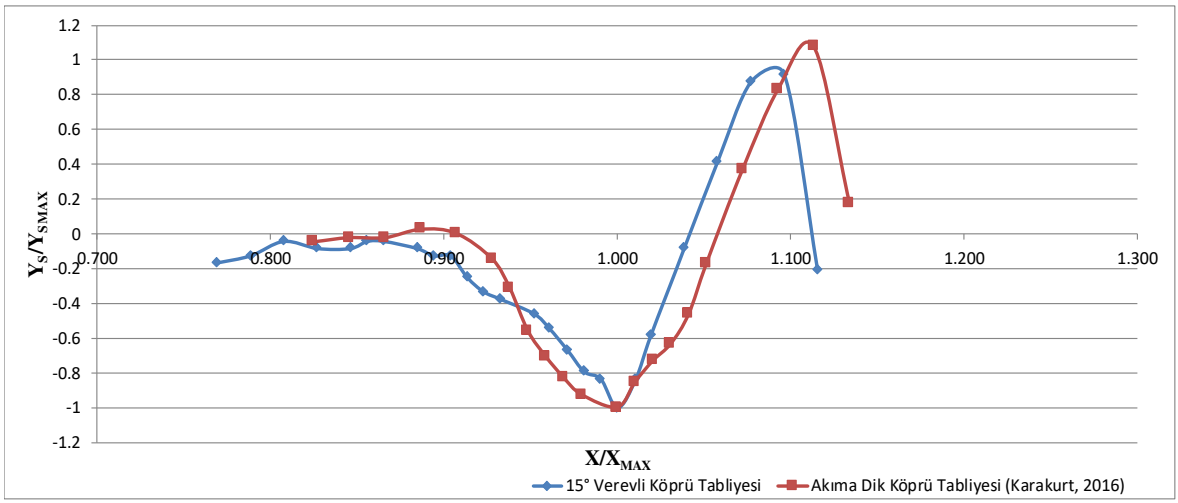
Çizelge 4.6'da genel olarak 15°'lik verevlik açısına sahip tabliye durumunda gerçekleşen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin tabliyenin akıma dik olması durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, verevlik açısı olan tabliye altında meydana gelen akım yapısının dik tabliye durumundakine kıyasla daha karmaşık olması ve oluşan vortekslerle açıklanabilir.



(a)

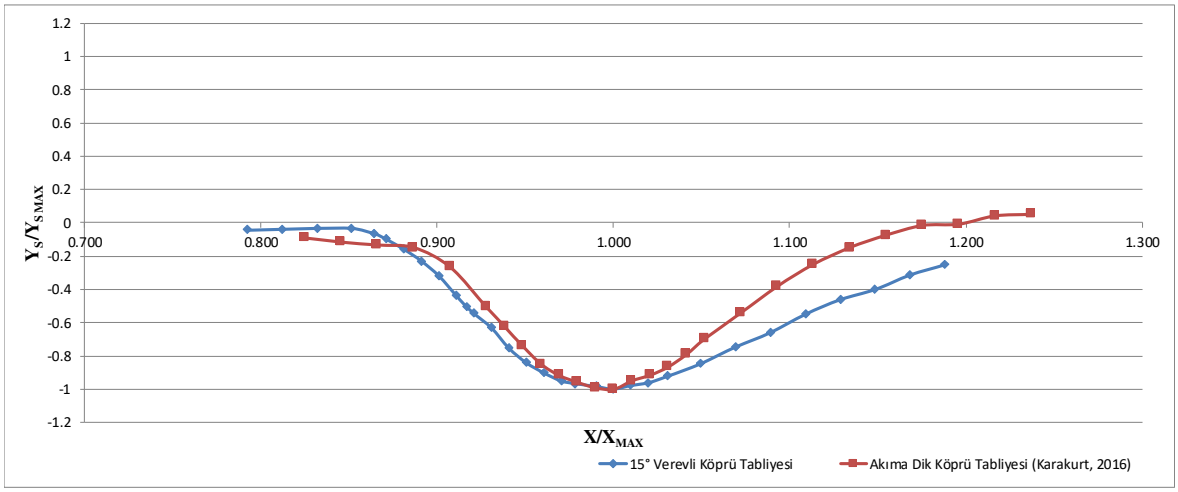


(b)

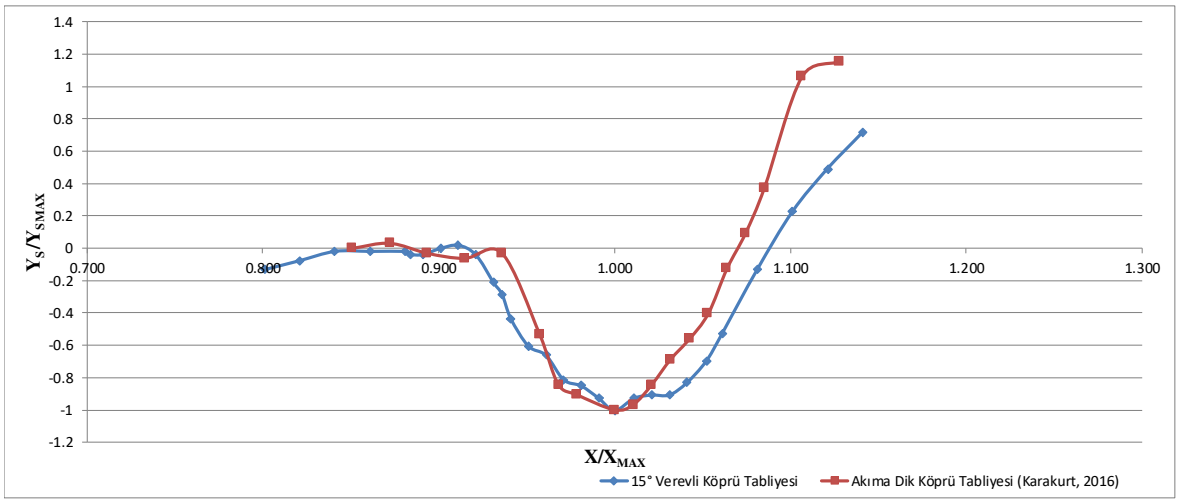


(c)

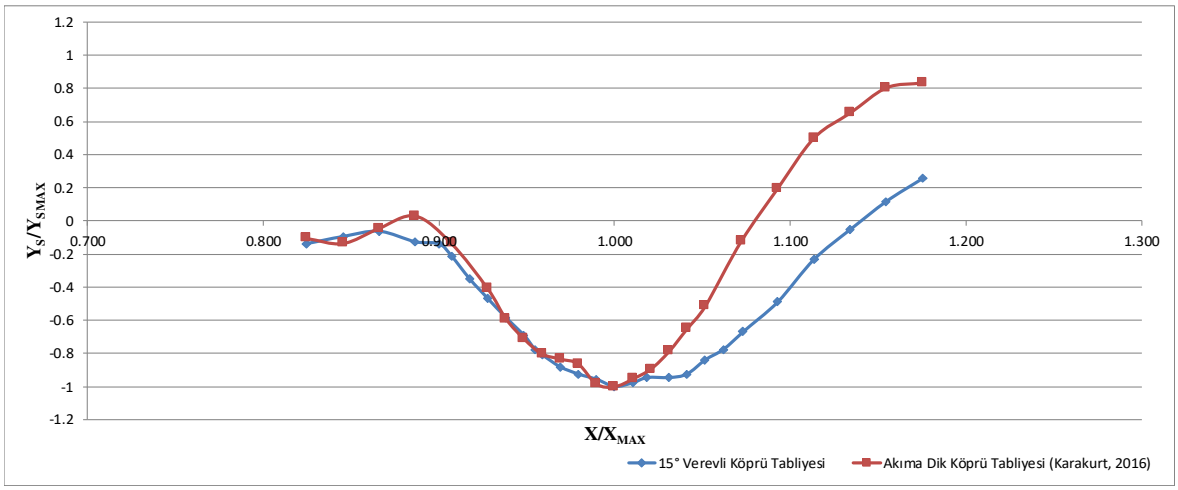
Şekil 4.13. Savak tipi ve basınçlı akım durumlarında, 70 lt/sn'lik debi ve 5,0 cm'lik kiriş yüksekliğinde meydana gelmiş olan boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) Basınçlı akım ve Fr=0,179 b) Savak tipi akım ve Fr=0,155 c) Savak tipi akım ve Fr=0,121



(a)



(b)



(c)

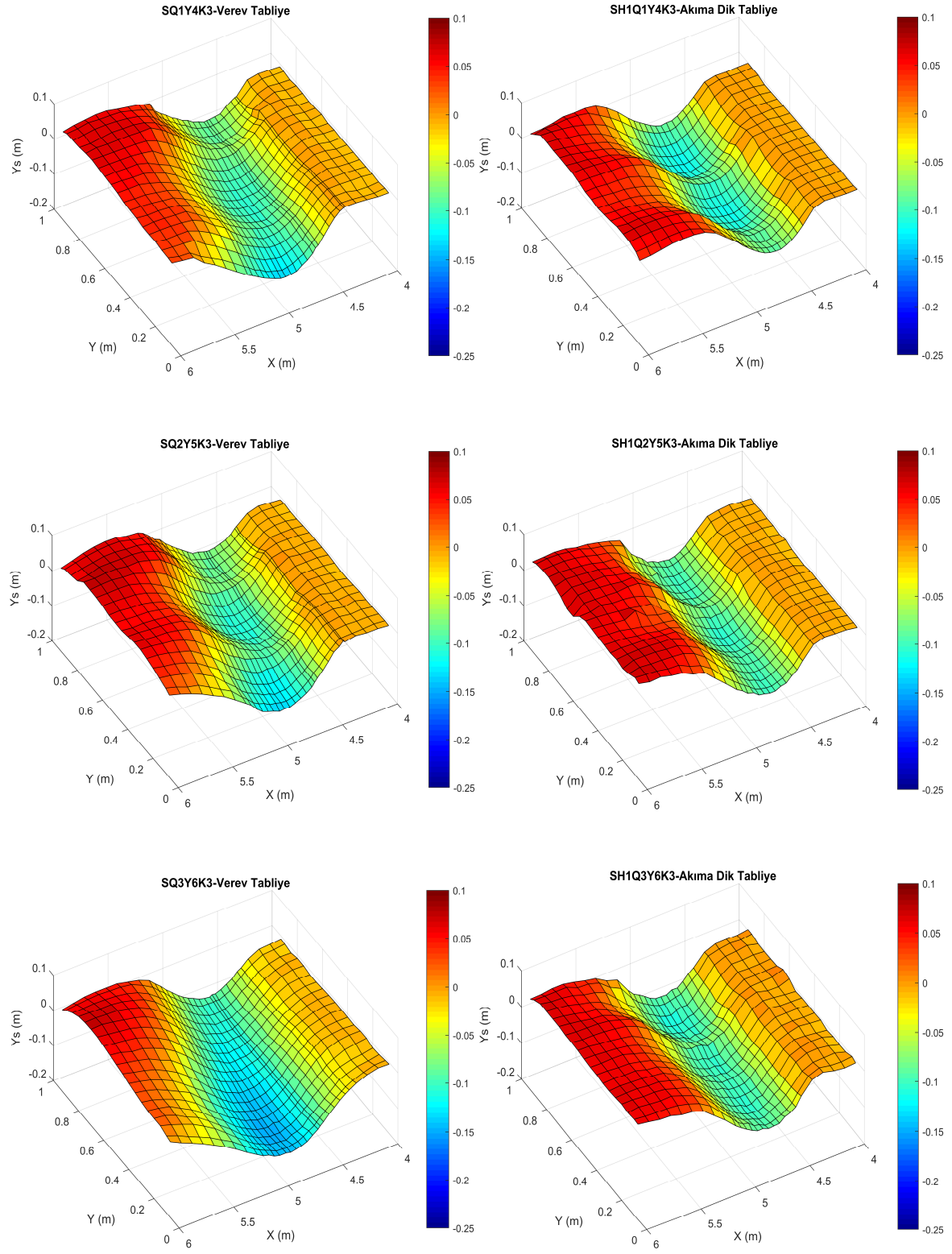
Şekil 4.14. Üç farklı debi için tabliyenin verevli ve akıma dik olması durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin en fazla değişim gösterdiği deneyler için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri a) BQ1Y2K3 b) SQ2Y6K2 c) SQ3Y6K2

Tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru şekli üzerinde verevlik etkisinin incelenebilmesi için akıma verev ve dik olarak yerleştirilmiş tabliye durumlarında oluşan aynı Froude sayısında hem savak tipi hem de basınçlı akım durumları için oyulma çukuru şekilleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.15'te savak tipi akım durumu için verilen oyulma çukuru şekillerinde, tabliyenin akıma dik olması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinin tabliye ortasında oluştuğu, verev tabliye durumunda ise maksimum oyulma çukuru derinliğinin tabliye mansap uç bölgesine kaydığı ve çukur genişliğinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca, tabliyenin akıma verev yerleştirilmesi durumunda meydana gelen oyulmaların da tabliye eksenine paralel olacak şekilde akıma verev şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Oyulma çukuru şeklinin memba uç bölgesinden mansap uç bölgesine verev biçimde artarak genişlediği gözlemlenmiştir. 15°'lik verevlik açısına sahip tabliye durumunda savak tipi ve basınçlı akım durumlarında meydana gelen oyulma çukuru şekilleri Ek-1'de verilmektedir. Ek-1'de verilen taban oyulma çukuru şekilleri incelendiğinde görüldüğü üzere genel olarak hem savak tipi akım hem de basınçlı akım durumunda tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru şekli tabliye doğrultusunda memba ucundan mansap ucuna artarak ilerlemekte ve en büyük derinlik tabliye mansap ucunda meydana gelmektedir.

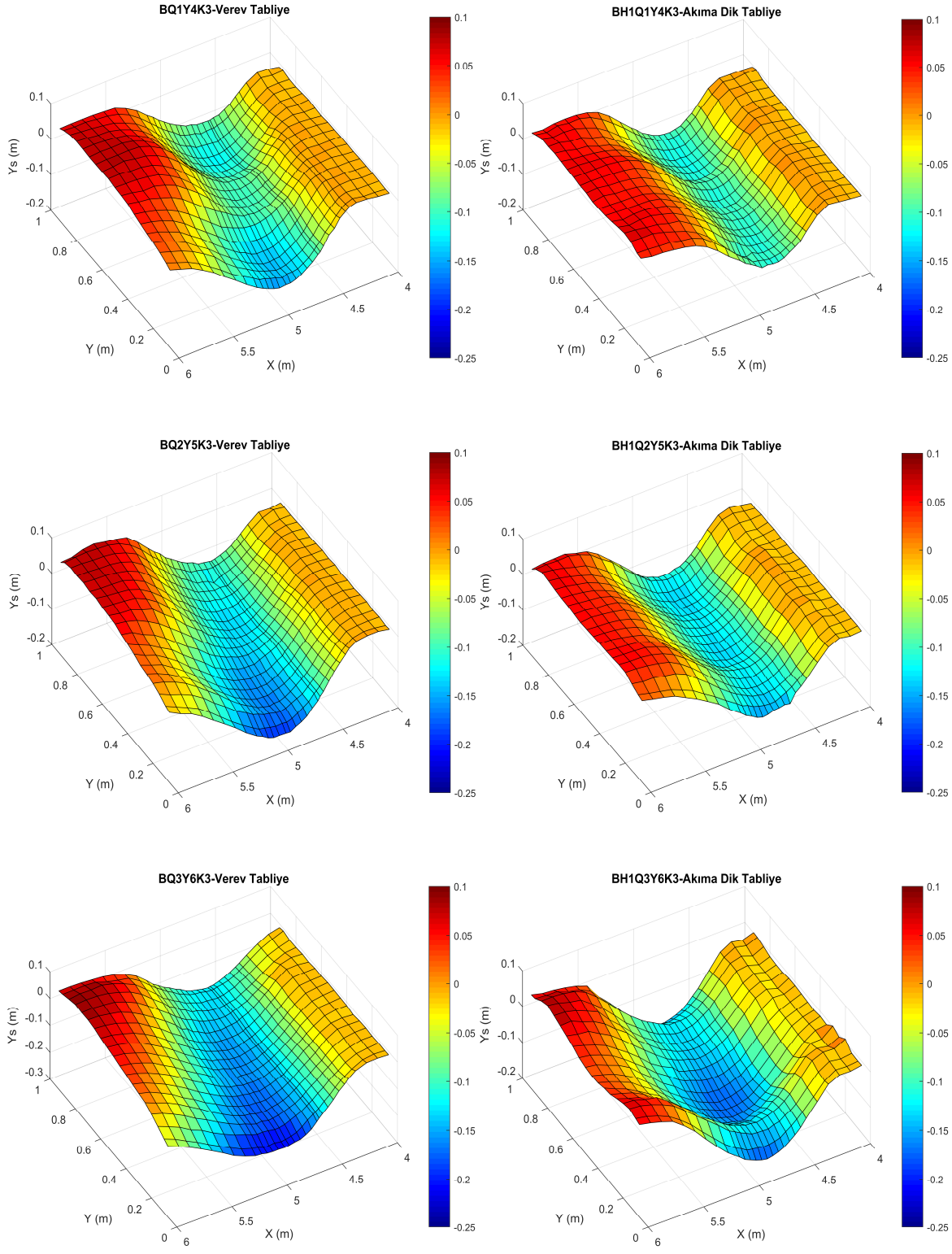
Şekil 4.16'da görüldüğü üzere basınçlı akım durumunda verevlik etkisinin daha da etkili olduğu görülmektedir. Savak tipi akım durumunda olduğu gibi oyulma çukuru şekli tabliyenin verevliği doğrultusunda oluşmaktadır. Akıma dik tabliye durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği tabliye ortası yakınlarında meydana gelmişken verev tabliye durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinin tabliye mansap uç kısmında meydana geldiği gözlemlenmektedir.

4.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Tartışma

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde 15°'lik verevlik açısı ile akıma yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında tabanda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği ve buna etki eden yaklaşım akım derinliği, kiriş yüksekliği ve akım tipi parametrelerinin etkileri incelenmiştir.



Şekil 4.15. Fr=0,155 için verevlik açısı 15° olan tabliye ile akıma dik olarak yerleştirilmiş tabliye (Karakurt, 2016) olması durumlarında savak tipi akım koşulunda tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru şekilleri



Şekil 4.16. Fr=0,155 için verevlik açısı 15° olan tabliye ile akıma dik olarak yerleştirilmiş tabliye (Karakurt, 2016) durumlarında basınçlı akım koşulunda tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru şekilleri

Yaklaşım akım derinliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek amacıyla altı farklı yaklaşım akım derinliğinde (Y_1=20,0 cm, Y_2=22,5 cm, Y_3=25,0 cm,

Y_4=27,5 cm, Y_5=30,0 cm ve Y_6=32,5 cm) savak tipi ve basınçlı akım koşullarında deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; basınçlı akım koşullarında maksimum oyulma çukuru derinliğinin, yaklaşım akım derinliğinin yaklaşık olarak tabliye korkuluk üst kotu seviyesinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin tam tabliye korkuluk üst kotunda olması durumunda F_r=0,204 ve maksimum oyulma çukuru derinliği 19,8 cm olmuştur. Basınçlı akım durumunda yaklaşım akım derinliği arttıkça akımın potansiyel enerjisi artmakta, bu da tabliye altından geçen ortalama akım hızını artırmaktadır. Savak tipi akım olması durumunda ise, yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla beraber savak yükü artmakta ve buna bağlı olarak maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı görülmektedir. Bu da savaklanan debideki artışla birlikte tabliye altındaki ortalama akım hızında meydana gelen küçülmeden kaynaklanmaktadır. Karakurt (2016), çalışmasında akıma dik yerleştirilen köprü tabliyesi için de benzer sonuçlar elde etmiş olup yapılan deneylerle verevlik açısı 15° olan tabliyenin maksimum oyulma derinliğine ve şekline etkisinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Tabliye kiriş yüksekliğinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisini inceleyebilmek için deneylerde K_2=5,0 cm ve K_3=7,5 cm yüksekliğinde iki farklı kiriş kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre kiriş yüksekliğinin 5,0 cm'den 7,5 cm'ye yükselmesiyle maksimum oyulma çukuru derinliğinin her debi ve yaklaşım akım derinliği için arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni; köprü tabliyesi altındaki düşey daralmanın artmasıdır. Çizelge 4.4'te görüleceği üzere maksimum oyulma çukuru derinliklerindeki değişimin en fazla, 70 lt/sn'lik debide Y_4=27,5 cm ve Y_6=32,5 cm akım derinlikleri ile savak tipi akım koşulunun olduğu durumlarda sırasıyla %169,39 ve %225,00 olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre meydana gelen bu büyük farklar, kiriş yüksekliğinin artması durumunda tabliye altındaki hız alanının önemli ölçüde değiştiğini ve taban gerilmelerinin arttığını ifade etmektedir. Karakurt (2016), akıma dik köprü tabliyesi ile yaptığı çalışmada 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinin 5,0 cm kiriş yüksekliğine göre oyulmayı artırdığını saptamıştır.

Aynı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen deney sonuçları incelendiğinde Y_4=27,5 cm yaklaşım akım derinliğindeki maksimum oyulma çukuru derinliğinin her iki akım durumu için de diğer deneylere göre daha yakın değerler verdiği görülmüştür. Yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla birlikte basınçlı akım koşulundaki maksimum oyulma çukuru derinliklerinde çok fazla artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, basınçlı

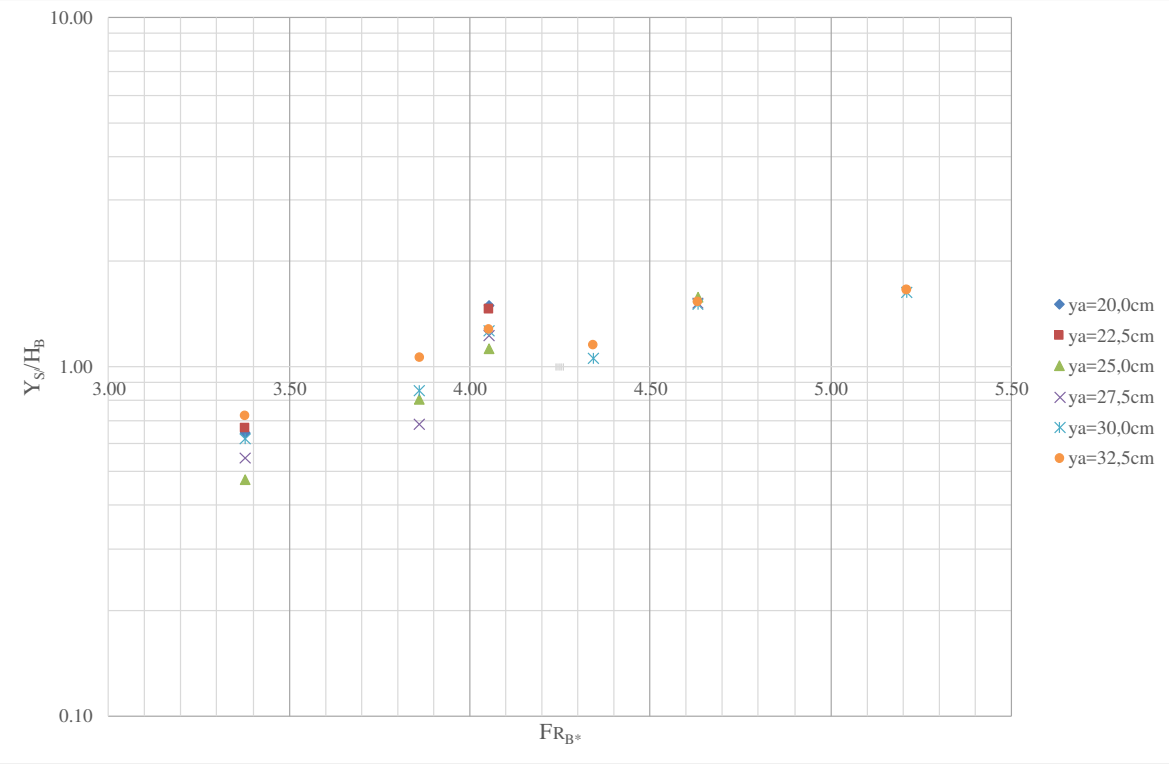
akım koşullarında köprü tabliyesi membaında yaklaşım akım derinliğinin artması ile akımın potansiyel enerjisinin artması ve bunun sonucunda köprü tabliyesi altından geçen akımın hızı, taban kayma gerilmeleri ve dolayısıyla oyulma çukuru derinliğinin de artması olarak açıklanabilir. Savaklı akım durumunda ise yaklaşım akım derinliği ile maksimum oyulma derinliği ters orantılı olarak azalmaktadır. Bunun nedeni, köprü tabliyesi üzerinde savak yükünün artmasıyla tabliye altından geçen debi ve bununla birlikte ortalama akım hızı azalmaktadır. Buna bağlı olarak meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği de azalmaktadır. Tabliyenin akıma dik olması durumunda ise oyulma çukuru derinliği ve şekli üzerinde basınçlı akım durumunun daha etkili olduğu görülmüştür. Yaklaşım akım derinliği arttıkça maksimum oyulma çukuru derinliği artmış olup 90 lt/sn'lik debide ve 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde savak tipi akım durumu için maksimum oyulma çukuru derinliği 10,6 cm olarak meydana gelmişken basınçlı akım durumu için maksimum oyulma çukuru derinliği 17,3 cm'ye çıkmıştır (Karakurt, 2016).

Deney sonuçları incelendiğinde Q_2=80 lt/sn ve Q_3=90 lt/sn'lik debilerin kanaldan geçmesi durumunda hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında verevli tabliye durumunda oyulma çukuru derinliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Q_1=70 lt/sn debide ise genel olarak basınçlı akım koşullarında verevli olması halinde artış olduğu görülmüş, savak tipi akım koşullarında ise azalma gözlemlenmiştir. Çizelge 4.6'ya göre en büyük değişim, Q_2=80 lt/sn debide 5,0 cm kiriş yüksekliği ve savak tipi akım koşullarında %65,63'lük artış olarak belirlenmiştir. Tabliyenin 15°'lik verevlik açısı ile konumlandırılması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği Q_3=90 lt/sn'lik debi olması durumunda 7,5 cm kiriş yüksekliği ile basınçlı akım koşullarında 20,7 cm olarak ölçülmüştür. Tabliyenin akıma dik olması durumunda ise yine aynı akım koşullarında 17,3 cm olarak ölçülmüştür. Yani büyük taşkınlarda verevlik etkisi oyulmayı artırmaktadır.

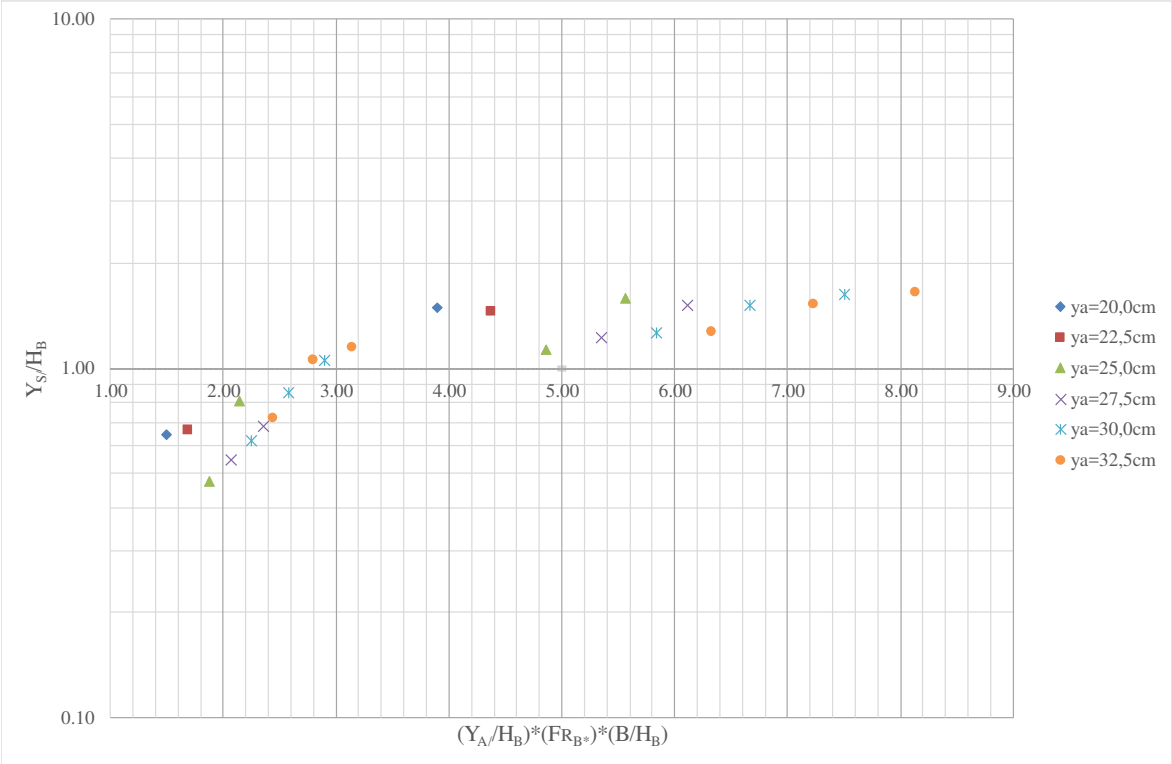
15°'lik verevlik açısına sahip tabliye durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru mansap şev eğimleri maksimum oyulma çukuru derinliği arttıkça yayvanlaşmış olup memba şev eğimleri 23°'ye kadar çıkmıştır. Maksimum oyulma çukuru derinliğinin az, sediment birikiminin ise fazla olduğu deneylerde sediment birikiminin mansap şev eğimi 27°'ye kadar çıkmıştır. Kum için batık durumda şev açısı 29° ile 34° arasında (USBR, 1950) alınmış olup maksimum oyulma çukuru derinliğinin artmasıyla şev eğimi de artmış ve şev açılarında bir yakınsama meydana gelmiştir.

Bu çalışma kapsamında boyut analizi Bölüm 2'de yapılmış olup bu boyut analizi sonucunda boyutsuz maksimum oyulma çukuru derinliği $\frac{y_s}{H_b}$'nin $\frac{y_a}{H_b}$, Fr_b, $\frac{w_s}{H_b}$ ve $\frac{b}{H_b}$ boyutsuz parametreleriyle değiştiği belirlenmişti. Bölüm 5'te yapılmış olan regresyon analizi için bağımsız değişkenler tekrar düzenlenerek bağımlı değişken olan boyutsuz oyulma çukuru derinliği $\frac{y_a}{H_b}$, Fr_{b*} ve $\frac{b}{H_b}$ boyutsuz parametreleriyle tanımlanmıştır. Boyutsuz oyulma çukuru derinliğinin belirtilen boyutsuz parametrelerle değişimi basınçlı akım durumu için Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de, savak tipi akım durumu için ise Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir.

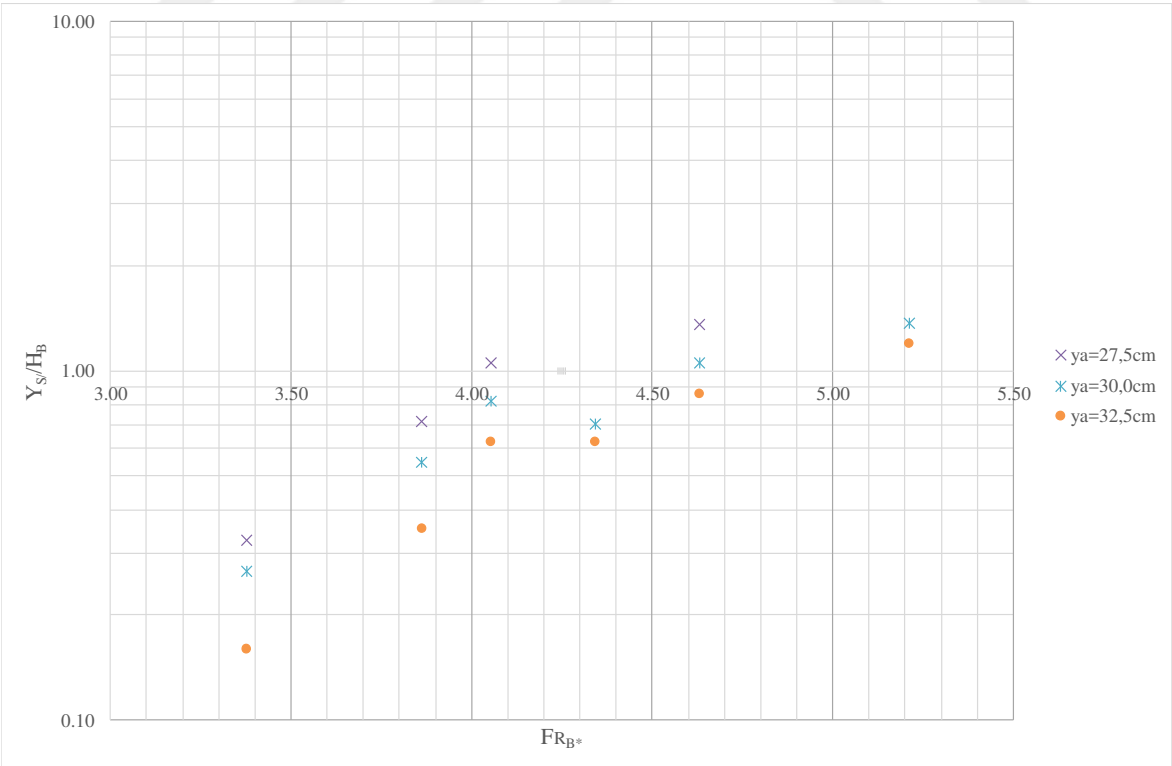
Şekil 4.17 - Şekil 4.20'de görüldüğü üzere boyutsuz maksimum oyulma çukuru derinliği (y_s/H_b), yaklaşım akım derinliği arttıkça küçülmüştür. Sadece aynı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarının incelendiği deney koşullarında basınçlı akım durumu için boyutsuz oyulma çukuru derinliği (y_s/H_b) artmaktadır.



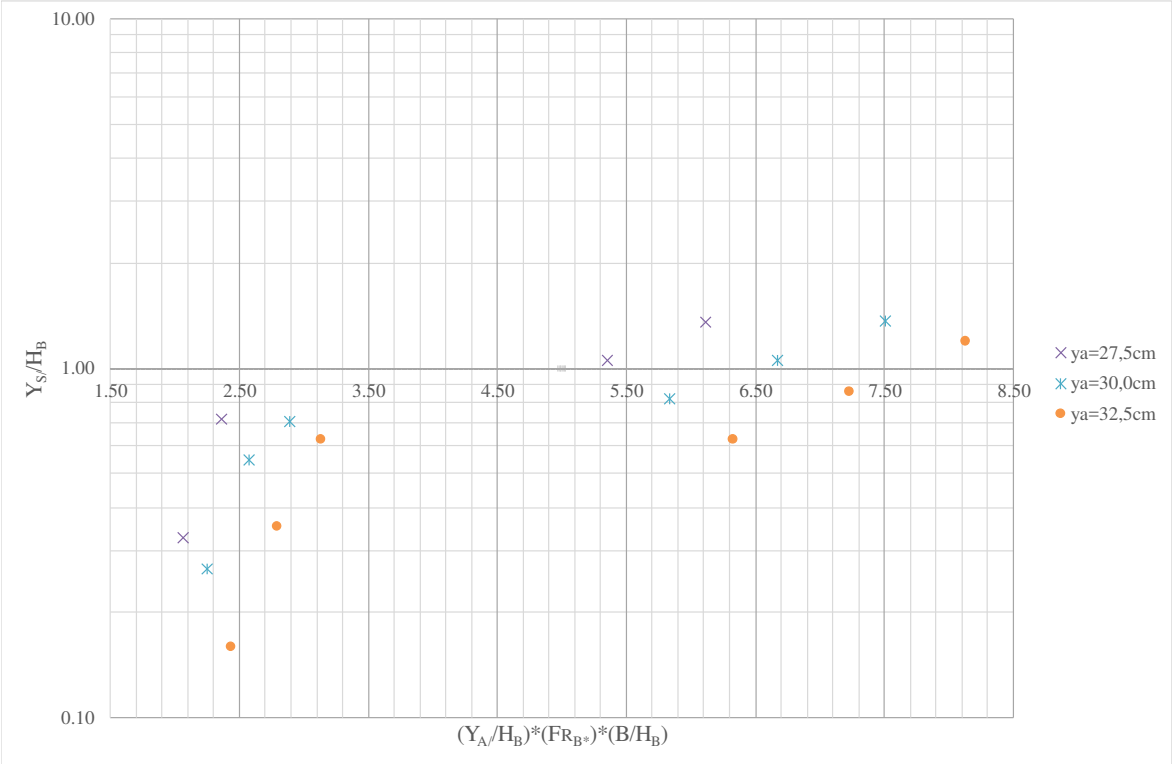
Şekil 4.17. Basınçlı akım durumunda, farklı densimetrik Froude sayısına ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi



Şekil 4.18. Basınçlı akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi



Şekil 4.19. Savak tipi akım durumunda, farklı densimetrik Froude sayısına ve yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi



Şekil 4.20. Savak tipi akım durumunda, tüm boyutsuz değişkenlere ve farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru derinliği değişimi

5. MAKSİMUM OYULMA ÇUKURU DERİNLİĞİNİ TAHMİN EDEN AMPİRİK BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ

5.1. Genel

Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında temiz su oyulması halinde köprü tabliyesi altında düşey daralmadan dolayı oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğini ifade edebilecek ampirik bir bağıntı geliştirebilmek amacıyla çoklu lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Bölüm 2'de tabliye altında meydana gelen oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelere ait fonksiyonel ilişki ayrıntılı olarak incelenmiştir. Boyut analizi sonucunda belirlenen bu değişkenlerden yararlanılarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır.

$$\frac{y_s}{H_b} = f\left(Fr_b, \frac{y_a}{H_b}, \frac{w_s}{H_b}, \frac{b}{H_b}, K_\alpha\right) \tag{5.1}$$

Regresyon analizi için y_s/H_b bağımlı değişken seçilmiş ve diğer bağımsız değişkenler de düzenlenmiştir. İçinde D_{50} değişkenin de bulunduğu parçacık densimetrik Froude sayısı, Fr_{b*} sayısı Eş 5.2'de verildiği şekilde tanımlanmıştır (Karakurt, 2016).

$$Fr_{b*} = \frac{V_b}{\sqrt{\Delta g D_{50}}} \tag{5.2}$$

Burada, Δ=1,65 olup sedimentin su içindeki göreli yoğunluğudur.

Eş. 5.1'de K_α boyutsuz parametresi akımla köprü tabliye ekseni arasındaki verevlik açısını ifade etmektedir. Ancak deneylerde tek bir verevlik açısı kullanıldığından regresyon analizinde boyutsuz parametrelerden K_α çıkarılmıştır.

5.2. Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen, basınçlı ve savak tipi akım koşullarındaki deneyler için analiz yapılmış, analizlerde her iki akım durumu için ayrı ayrı bağıntı elde edilmiştir.

5.2.1. Basınçlı akım için regresyon analizi

Basınçlı akım ve temiz su oyulması durumunda köprü tabliyesi altında düşey daralma nedeniyle meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini ifade edebilmek için ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir. Bağıntıyı çıkarabilmek için çoklu lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan değişkenler Çizelge 5.1'de, 3 bağımsız değişkenli regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Basınçlı akım durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri

Deney No	Deney Adı	y_s/H_b	y_a/H_b	Fr_{b*}	b/H_b
1	BQ1Y1K2	0,647	1,333	3,378	0,333
2	BQ1Y1K3	1,496	1,600	4,054	0,600
3	BQ1Y2K2	0,667	1,500	3,378	0,333
4	BQ1Y2K3	1,456	1,800	4,054	0,600
5	BQ1Y3K2	0,473	1,667	3,378	0,333
6	BQ1Y3K3	1,128	2,000	4,054	0,600
7	BQ1Y4K2	0,547	1,833	3,378	0,333
8	BQ1Y4K3	1,224	2,200	4,054	0,600
9	BQ1Y5K2	0,620	2,000	3,378	0,333
10	BQ1Y5K3	1,264	2,400	4,054	0,600
11	BQ1Y6K2	0,720	2,167	3,378	0,333
12	BQ1Y6K3	1,272	2,600	4,054	0,600
19	BQ2Y3K2	0,807	1,667	3,861	0,333
20	BQ2Y3K3	1,584	2,000	4,633	0,600
21	BQ2Y4K2	0,680	1,833	3,861	0,333
22	BQ2Y4K3	1,520	2,200	4,633	0,600
23	BQ2Y5K2	0,853	2,000	3,861	0,333
24	BQ2Y5K3	1,512	2,400	4,633	0,600
25	BQ2Y6K2	1,060	2,167	3,861	0,333
26	BQ2Y6K3	1,528	2,600	4,633	0,600
33	BQ3Y5K2	1,053	2,000	4,343	0,333
34	BQ3Y5K3	1,632	2,400	5,212	0,600
35	BQ3Y6K2	1,153	2,167	4,343	0,333
36	BQ3Y6K3	1,656	2,600	5,212	0,600

Basınçlı akım durumu için Çizelge 5.1'de özetlenen deneysel veriler kullanılarak yapılan çoklu lineer regresyon analizinden elde edilen bağıntı Eş. 5.3 ile verilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = -1{,}1275 - 0{,}0411\frac{y_a}{H_b} + 0{,}4057Fr_{b*} + 1{,}4292\frac{b}{H_b} \quad (5.3)$$

Çizelge 5.2. Basınçlı akım durumu için regresyon analizi sonuçları – 3 bağımsız değişkenli

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0,961733036
R^2	0,924930433
Ayarlı R^2	0,913669998
Standart Hata	0,114746176
Gözlem	24
Bağımlı Değişken	y_s/H_b
Bağımsız Değişkenler	y_a/H_b
	Fr_{b*}
	b/H_b

ANOVA					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Sig.*
Regresyon	3	3,2445	1,0815	82,1398	7,86E-06
Fark	20	0,2633	0,0132		
Toplam	23	3,5079			

MODEL					
	Katsayılar	*Standart Hata*	*Beta*	*t*	*P-değeri (Sig.)*
Sabit	-1,1275	0,1888		-5,9715	1,16E-05
y_a/H_b	-0,0411	0,0919	-0,0371	-0,4473	0,6594
Fr_{b*}	0,4057	0,0670	0,5760	6,0588	1,13E-05
b/H_b	1,4292	0,2434	0,4985	5,8721	1,26E-05

Çizelge 5.2'de verilen regresyon analizi sonuçlarına göre bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,96 olarak elde edilmiştir. Bu değer, değişkenler arasındaki ilişkinin derecesinin çok iyi olduğunu göstermektedir. Determinasyon katsayısı (korelasyon sayısının karesi) ise 0,92 olup bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki değişimi açıklama oranının çok yüksek olduğunu göstermektedir. R değerinin anlamlılığını test eden varyans analizi (ANOVA) tablosu incelendiğinde F testi p (sig=7,86E-06) değerinin 0,05'ten küçük olması regresyon analizinde bulunan korelasyon katsayısının R=0,96 anlamlı olduğunu göstermektedir. Eş. 5.3'teki bağıntının katsayılarının elde edildiği Çizelge 5.2'de sabit ve bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları p-değerinin (sig.) y_a/H_b bağımsız değişken haricinde 0,05'in altında olduğu görülmektedir. p-değerleri regresyon analizinden elde edilen bu katsayıların

anlamlı derecede katkı sağladığını göstermektedir. Ancak, y_a/H_b bağımsız değişkeni için p-değeri çok yüksek çıkmıştır. Bu nedenle y_a/H_b bağımsız değişkeni çoklu regresyon analizinden çıkartılarak analiz tekrarlanmıştır. 2 bağımsız değişken ile yapılan regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Basınçlı akım durumu için regresyon analizi sonuçları – 2 bağımsız değişkenli

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0,961342455
R^2	0,924179316
Ayarlı R^2	0,916958299
Standart Hata	0,112539625
Gözlem	24
Bağımlı Değişken	y_s/H_b
Bağımsız Değişkenler	Fr_{b*}
	b/H_b

ANOVA					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Sig.*
Regresyon	2	3,2419	1,6209	127,9846	1,73E-12
Fark	21	0,2660	0,0127		
Toplam	23	3,5079			
MODEL					
	Katsayılar	*Standart Hata*	*Beta*	*t*	*P-değeri (Sig.)*
Sabit	-1,1454	0,1809		-6,3310	2,81E-06
Frb*	0,3915	0,0578	0,5558	6,7704	1,07E-06
b/Hb	1,4112	0,2354	0,4922	5,9943	5,99E-06

Çizelge 5.3'te verilen regresyon analizi sonuçlarına göre bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,96 olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.3'te, bağıntının sabit ve bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları p-değerinin (sig.) 0,05'in altında olduğu görülmektedir. p-değerleri, regresyon analizinden elde edilen bu katsayıların anlamlı derecede katkı sağladığını göstermektedir.

Üç bağımsız değişkenli ve iki bağımsız değişkenli regresyon analizleri sonucunda tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri yaklaşık olarak aynı çıkmaktadır. Boyut analizinde, maksimum oyulma çukuru derinliğinin y_a/H_b bağımsız değişkenine de bağlı olduğu dikkate alınarak üç bağımsız değişkenli regresyon analizi sonucu elde edilen bağıntı kullanılmıştır. Eş. 5.3'te verilen bağıntıda üç bağımsız değişken arasından en etkili

olanı Fr_b^* olup bu değişken için beta sayısı 0,576 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.4'te regresyon analizinden elde edilen bağıntı kullanılarak hesaplanan tahmini maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile ölçümlerden elde edilmiş maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir. Şekil 5.1'de ise Çizelge 5.4'te verilen ölçülen ve tahmini maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Ölçülmüş ve tahmin edilmiş olan değerler arasındaki ilişki ise R^2=0,88 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.4. Basınçlı akım durumu için ölçülen ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri

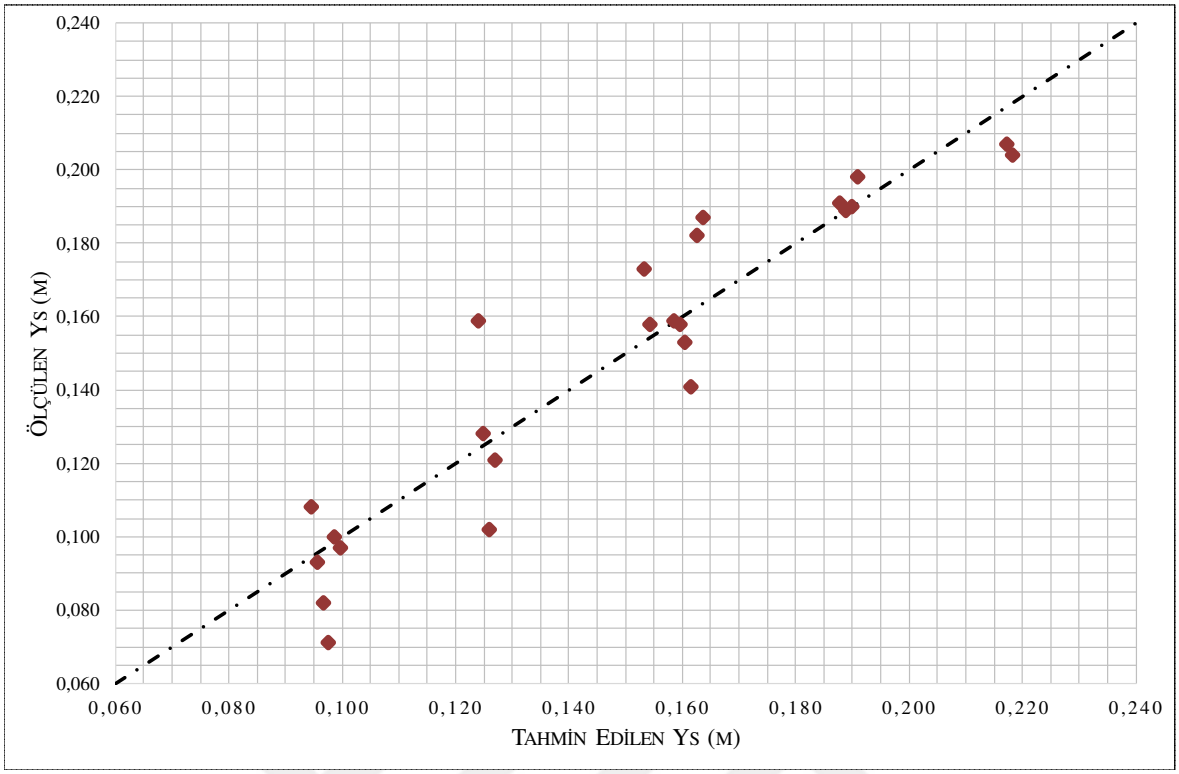
Ölçülen y_s (m)	Tahmini y_s (m)	Ölçülen y_s (m)	Tahmini y_s (m)
0,097	0,100	0,121	0,127
0,187	0,164	0,198	0,191
0,100	0,099	0,102	0,126
0,182	0,163	0,190	0,190
0,071	0,098	0,128	0,125
0,141	0,162	0,189	0,189
0,082	0,097	0,159	0,124
0,153	0,161	0,191	0,188
0,093	0,096	0,158	0,154
0,158	0,159	0,204	0,218
0,108	0,095	0,173	0,153
0,159	0,158	0,207	0,217

5.2.2. Savak tipi akım için regresyon analizi

Savak tipi akım ve temiz su oyulması durumunda köprü tabliyesi altında düşey daralma nedeniyle meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini ifade edebilmek için ayrı bir ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Kullanılan çoklu lineer regresyon analizi için gerekli olan değişken girdileri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5'te sunulan deney verileri kullanılarak yapılan çoklu lineer regresyon analizi sonucunda savak tipi akım koşulları için Eş. 5.4'te verilen bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = -1{,}0633\frac{y_a}{H_b} + 0{,}4792Fr_{b*} + 2{,}3869\frac{b}{H_b} \tag{5.4}$$



Şekil 5.1. Basınçlı akım için ölçülen ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.5. Savak tipi akım durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri

Deney No	Deney Adı	y_s/H_b	y_a/H_b	Fr_{b*}	b/H_b	w_s/H_b
13	SQ1Y4K2	0,327	1,833	3,378	0,333	0,167
14	SQ1Y4K3	1,056	2,200	4,054	0,600	0,200
15	SQ1Y5K2	0,267	2,000	3,378	0,333	0,333
16	SQ1Y5K3	0,816	2,400	4,054	0,600	0,400
17	SQ1Y6K2	0,160	2,167	3,378	0,333	0,500
18	SQ1Y6K3	0,624	2,600	4,054	0,600	0,600
27	SQ2Y4K2	0,713	1,833	3,861	0,333	0,167
28	SQ2Y4K3	1,360	2,200	4,633	0,600	0,200
29	SQ2Y5K2	0,547	2,000	3,861	0,333	0,333
30	SQ2Y5K3	1,056	2,400	4,633	0,600	0,400
31	SQ2Y6K2	0,353	2,167	3,861	0,333	0,500
32	SQ2Y6K3	0,856	2,600	4,633	0,600	0,600
37	SQ3Y5K2	0,707	2,000	4,343	0,333	0,333
38	SQ3Y5K3	1,368	2,400	5,212	0,600	0,400
39	SQ3Y6K2	0,627	2,167	4,343	0,333	0,500
40	SQ3Y6K3	1,200	2,600	5,212	0,600	0,600

Yapılan çoklu lineer regresyon analizinde w_s/H_b değişkeni y_a/H_b değişkeni içinde ifade

edilmektedir. Bunun nedeni, yaklaşım akım derinliğinin tabliye üzerindeki savak yükünü de kapsamasıdır. Bu nedenle değişkenler arasındaki değişim periyotları birbirine benzemektedir. Dolayısıyla değişkenler arasındaki ilişkiden kaynaklı otokorelasyonu önlemek için w_s/H_b boyutsuz parametresi regresyon analizi dışında tutulmuştur (Karakurt, 2016). Savak tipi akım için regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Savak tipi akım durumu için regresyon analizi sonuçları – sabit katsayılı

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0,992611428
R^2	0,985277448
Ayarlı R^2	0,981596809
Standart Hata	0,05139796
Gözlem	16
Bağımlı Değişken	y_s/H_b
Bağımsız Değişkenler	y_a/H_b
	Fr_{b*}
	b/H_b

ANOVA					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Sig.*
Regresyon	3	2,1215	0,7072	267,6920	2,96754E-11
Fark	12	0,0317	0,0026		
Toplam	15	2,1532			

MODEL					
	Katsayılar	*Standart Hata*	*Beta*	*t*	*P-değeri (Sig.)*
Sabit	-0,1766	0,1548		-1,1411	0,2761
y_a/H_b	-0,9831	0,0919	-0,6641	-10,6977	1,72E-07
Fr_{b*}	0,4928	0,0317	0,8200	15,5285	2,61E-09
b/H_b	2,2584	0,1762	0,7573	12,8155	2,32E-08

Çizelge 5.6'da verilen savak tipi akım için regresyon analizi sonuçlarına bakıldığında bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı R, 0,99 olarak elde edilmiştir. Bu değer, değişkenler arasındaki ilişki derecesinin çok iyi olduğunu ifade etmektedir. Korelasyon katsayısının karesi R^2 ise 0,98 olarak bulunmuş olup bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki değişimi açıklama oranının çok yüksek olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.6'da görüldüğü üzere sabit ve bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları p-değeri (sig.) sabit katsayı haricinde 0,05'in altında olduğundan elde edilen katsayıların anlamlı derecede katkı sağladığı görülmüştür. Sabit

katsayının p-değeri yüksek çıktığından dolayı sabit katsayı dahil edilmeden çoklu regresyon analizi tekrarlanmış olup analizinin sonuçları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Savak tipi akım durumu için regresyon analizi sonuçları

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0,998431006
R^2	0,996864474
Ayarlı R^2	0,919459008
Standart Hata	0,051991724
Gözlem	16
Bağımlı Değişken	y_s/H_b
Bağımsız Değişkenler	Y_a/H_b
	Fr_{b*}
	b/H_b

ANOVA					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Sig.*
Regresyon	3	11,1722	3,7241	1377,6781	1,72E-15
Fark	13	0,0351	0,0027		
Toplam	16	11,2073			

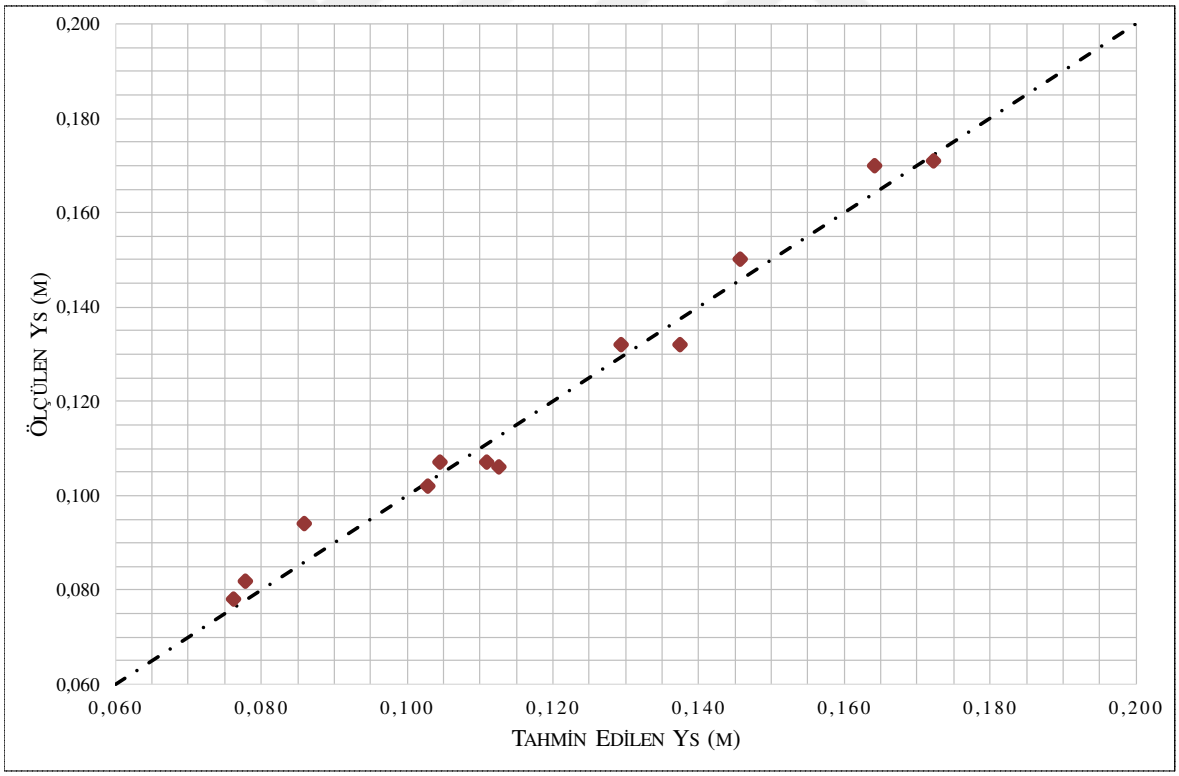
MODEL					
	Katsayılar	*Standart Hata*	*Beta*	*t*	*P-değeri (Sig.)*
Sabit	-	-		-	-
Y_a/H_b	-1,0633	0,0599	-2,8383	-17,7616	1,69E-10
Fr_{b*}	0,4792	0,0297	2,4157	16,1138	5,69E-10
b/H_b	2,3869	0,1371	1,3803	17,4109	2,17E-10

Çizelge 5.7'de verilen ve sabit katsayı dahil edilmeden yapılan savak tipi akım için regresyon analizi sonuçlarına bakıldığında bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı R, 0,998 olarak elde edilmiştir. Bu değer, değişkenler arasındaki ilişki derecesinin çok iyi olduğunu ifade etmektedir. Korelasyon katsayısının karesi R^2 ise 0,997 olarak bulunmuş olup bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki değişimi açıklama oranının çok yüksek olduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısı R değerinin anlamlılığını test eden varyans analizi (ANOVA) tablosu incelendiğinde F'nin anlamlılık testi p (sig=1,72E-15) değerinin 0,05'ten küçük olması regresyon analizinde elde edilen korelasyon katsayısının R=0,998 anlamlı olduğunu göstermektedir.

Eş. 5.4'teki verilen bağıntıda kullanılan katsayıların belirlendiği regresyon analizi

incelendiğinde denklemdeki bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları p-değeri (sig.) 0,05'in altında olduğundan elde edilen katsayıların anlamlı derecede katkı sağladığı görülmüştür. Eşitlikteki üç bağımsız değişken içerisinde en etkili değişkenin, 2,84 değeriyle beta katsayısının en yüksek olduğu y_a/H_b olduğu görülmektedir.

Savak tipi akım durumu için regresyon analizinden elde edilen bağıntı kullanılarak hesaplanan tahmini maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile ölçümlerden elde edilmiş maksimum oyulma çukuru derinlikleri Çizelge 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.2'de ise Çizelge 5.8'de verilen ölçülen ve tahmini maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişki R^2=0,975 olarak elde edilmiştir. Bu değer, savak tipi akım durumu için elde edilen bağıntının ölçülmüş olan maksimum oyulma çukuru derinliklerinin tahmininde başarılı sonuç verdiğini göstermektedir.



Şekil 5.2. Savak tipi akım için ölçülen ve tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.8. Savak tipi akım durumu için ölçülen ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Ölçülen y_s (m)	Tahmini y_s (m)	Ölçülen y_s (m)	Tahmini y_s (m)
0,049	0,070	0,082	0,078
0,132	0,129	0,132	0,138
0,040	0,043	0,053	0,051
0,102	0,103	0,107	0,111
0,024	0,017	0,106	0,113
0,078	0,076	0,171	0,172
0,107	0,104	0,094	0,086
0,170	0,164	0,150	0,146

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Çalışma Özeti ve Sonuçlar

Çalışma kapsamında, akımla 15°'lik verevlik açısı olan köprü tabliyesinin altında kanal tabanında meydana gelen maksimum oyulma çukuru temiz su durumunda basınçlı ve savak tipi akım koşulları altında deneyler yapılarak incelenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ile maksimum oyulma çukuru derinliği, şekli ve maksimum oyulma çukuru derinliğine etki eden akım ve köprüye ait parametreler incelenmiştir. Çalışma kapsamında, maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenen parametreler yaklaşım akım derinliği, kiriş yüksekliği, basınçlı ve savak tipi akım durumları ile verevlik açısıdır.

15°'lik verevlik açısı olan köprü tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine, yaklaşım akım derinliğinin etkisini inceleyebilmek için altı farklı yaklaşım akım derinliğinde basınçlı ve savak tipi akım koşullarında deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre 7,5 cm'lik kiriş yüksekliğinde 5,0 cm'lik kiriş yüksekliğine göre daha fazla oyulma meydana geldiği görülmüştür. Tabliye altında oyulma çukuru derinlikleri basınçlı akımda daha büyük olup maksimum oyulma çukuru derinliği 19,8 cm ile 80 lt/sn'lik debide ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiştir. Aynı debide yaklaşım akım derinliği arttıkça ortalama akım hızı ve Fr sayısı küçülmekte, buna bağlı olarak da maksimum oyulma çukuru derinliği azalmaktadır. Ayrıca oyulma çukuru profillerine bakıldığında basınçlı akımda daha geniş yani şev eğimlerinin daha yumuşak olduğu oyulma çukuru meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde kiriş yüksekliği etkisini inceleyebilmek için deneylerde 5,0 cm ve 7,5 cm yüksekliklerinde iki farklı kiriş kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre savak tipi ve basınçlı akım koşullarında kiriş yüksekliğinin artması maksimum oyulma çukuru derinliklerini artırmıştır. Değişim yüzdelerine bakıldığında ise savak tipi akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliklerinde daha fazla artış olduğu görülmüştür.

Savak tipi ve basınçlı akım durumlarının etkisini incelemek için aynı yaklaşım akım derinliğinde her iki akım koşulunda deneyler yapılmıştır. Aynı debide yaklaşım akım

derinliğinin artışına bağlı olarak basınçlı akım koşullarında maksimum oyulma çukuru derinliklerinde önemli ölçüde artış olduğu gözlemlenmiştir. Savak tipi akım durumunda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla birlikte savak yükü artmış ve maksimum oyulma derinliği azalmıştır.

Akımla 15°'lik verevlik açısı olan köprü tabliyesi durumunda verevlik açısının maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkileri, aynı koşullar altında ancak akıma dik yerleştirilmiş bir köprü tabliye modeli ile deneylerin yapıldığı doktora çalışmasına (Karakurt, 2016) ait deney verileri ile karşılaştırılmak suretiyle incelenmiştir. Aynı şartlar altında yapılan deneylerde verevli köprü tabliyesi durumu akıma dik köprü durumu ile kıyaslandığında maksimum oyulma çukuru derinliklerinde genel olarak artış olduğu, özellikle debinin ve köprü tabliyesi altından geçen ortalama akım hızının artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Bu araştırma kapsamında temiz su halinde basınçlı ve savak tipi akım koşullarında 15°'lik verevlik açısı olan köprü tabliyesi altında düşey daralmadan dolayı kanal tabanında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerini incelemek amacıyla deneyler yapılmış olup elde edilen deney verileri kullanılarak her iki akım koşulu için oyulma çukuru derinliği tahmininde kullanılabilecek iki bağıntı elde edilmiştir. Böylelikle, köprülerin tasarım aşamasında basınçlı ve savak tipi akım koşullarında oyulma çukuru derinlikleri tahmin edilerek köprü emniyetine fayda sağlanacağı düşünülmektedir.

6.2. Yapılacak Çalışmalar için Öneriler

Bu araştırma kapsamında 15°'lik verevlik açısı olan ve ayağı bulunmayan basit bir köprü tabliyesi altında düşey daralmadan dolayı oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği ve şeklini incelemek için temiz su halinde basınçlı ve savak tipi akım durumlarında deneyler yürütülmüştür. Bu çalışmanın devamı olarak yapılması önerilen araştırmalar aşağıda sunulmuştur:

1- Farklı verevlik açıları kullanarak açı ile maksimum oyulma çukuru derinliği arasındaki ilişki incelenebilir.
2- Köprü tabliye modeli için farklı tabliye konumu ile farklı sayıda ve konumda kirişin olması durumları incelenebilir.

3- Farklı taban malzemesi kullanılarak taban malzemesinin etkisi incelenebilir.
4- Maksimum oyulma çukuru derinliğine yaklaşım akım derinliğinin etkisinin incelenebilmesi için farklı yaklaşım akım derinlikleri ile deneyler yapılabilir.
5- Akım çizgileri ve hız profilleri belirlenerek literatürde bulunan akıma dik tabliye modeli sonuçları ile karşılaştırılabilir. Ancak bunun için gerekli olan parçacık görüntülemeli akış ölçüm hızı olan PIV (Particle Image Velocimetry)'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu hız ölçer yardımıyla tabliye altındaki hız alanı belirlenerek değerlendirmelerin daha sağlıklı bir şekilde yapılabileceği düşünülmektedir.
6- Hareketli taban oyulması durumu için deneyler yapılması da araştırmaya farklı bir boyut katacaktır. Ancak söz konusu deney koşulunun sağlanması için deney düzeneğinin sediment tutma özelliğine sahip olması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Abed, L. M. (1991). *Local scour around bridge piers in pressure flow*, Ph.d. Thesis, Colarado State University, Fort Collins, 43-63.

Ahmad, N., Melville, B., Mohammad, T., Ali, F. and Yusuf, B. (2016). Clear-water scour at long skewed bridge piers. *Journal of the Chinese Institute of Engineers,* 40, 10-18.

Arneson, L. A. and Abt, S. R. (1998). Vertical contraction scour at bridges with water flowing under pressure conditions. *Transportation Research Record*, 1647, 10-17.

Guo, J., Kerenyi, K., Flora, K. and Afzal, B. (2010). *Submerged-flow bridge scour under maximum clear-water conditions*. 5th International Conference on Scour and Erosion, San Francisco, CA.

Hahn, E. M. and Lyn, D. A. (2010). Anomalous contraction scour? Vertical-contraction case. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(2), 137-141.

Bridge Scour Manual. (2013). Hydraulics and Marine Studies. *Department of Transport and Main Roads*, 1-20.

İnternet: Birgün Haber Sitesi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.birgun.net%2Fhaber-detay%2Fordu-da-sel-felaketi-kopruler-coktu-yollar-kapandi-evler-yikildi-118854.html&date=2017-12-25, Son Erişim Tarihi: 29.08.2016.

İnternet: Haberciniz Haber Sitesi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fhaberciniz.biz%2Fmanavgatta-etkili-yagmur-sele-sebep-oldu-2565804h.htm&date=2017-12-26, Son Erişim Tarihi: 27.01.2014.

İnternet: Karayolları Genel Müdürlüğü. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kgm.gov.tr%2FSayfalar%2FKGM%2FSiteTr%2FRoot%2Fdefault.aspx&date=2018-02-19, Son Erişim Tarihi: 29.08.2016.

İnternet: Milliyet Gazetesi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.milliyet.com.tr%2Fkopru-ayaklari-tikandi-sel-oldu-gundem-2147742%2F&date=2018-02-19, Son Erişim Tarihi: 29.08.2016.

İnternet: Rizenin Sesi Haber Sitesi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.rizeninsesi.net%2F2013%2F07%2F28%2Fsaganak-yagmur-kopruleri-yikti-gecti-video&date=2017-12-26, Son Erişim Tarihi: 29.08.2016.

Karakurt, O. (2016). *Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altındaki oyulmanın incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kumcu, S. Y. (2016). Steady and unsteady pressure scour under bridges at clear-water conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(4), 334-342.

Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pego, J. and Cardoso, A. H. (2012). Effect of spacing and skew-angle on clear-water scour at pier alignments. *River Flow 2012 International Conference on Fluvial Hydraulics, London*, 927-933.

Mostafa, E. A., Yassin, A. A., Ettema, R. and Melville, B. M. (1993). Local scour at skewed bridge piers. *Iowa Institute of Hydraulic Research*, The University of Iowa, Iowa.

Neill, C. R. (1973). *Guide to Bridge Hydraulics*, Toronto: University of Toronto Press, 1-25.

Selamoğlu, M., Yanmaz, A. M. and Köken, M. (2014). Temporal variation of scouring topography around dual bridge piers. *7th International Conference on Scour and Erosion*, Perth, Western Australia.

Shames, I. H. (1992). *Mechanics of fluids*. Singapore: McGraw Hill.

Shen, J., Shan, H., Suaznabar, O., Xie, Z., Bojanowski, C., Lottes, S. and Kerenyi, K. (2012). Submerged-flow bridge scour under clear-water conditions. *TFHRC*, Mclean, VA.

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*, 124(2), 236-240.

Verma, D. V. S., Setia, B. and Bhatia, U. (2004). Constriction scour in pressurized flow condition. *Scientific Information Database (SID)*, 17(3), 237-246.

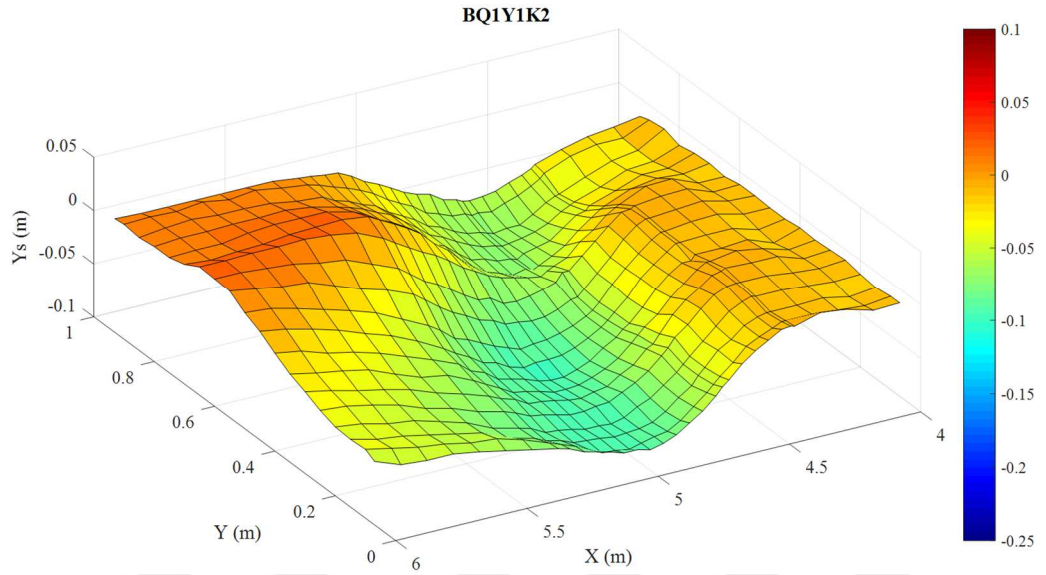
United States Bureau of Reclamation. (1950). *Angle of repose of noncohesive material*. Bureau of Reclamation Hydraulic Laboratory, HYD-299, Denver, Colorado.

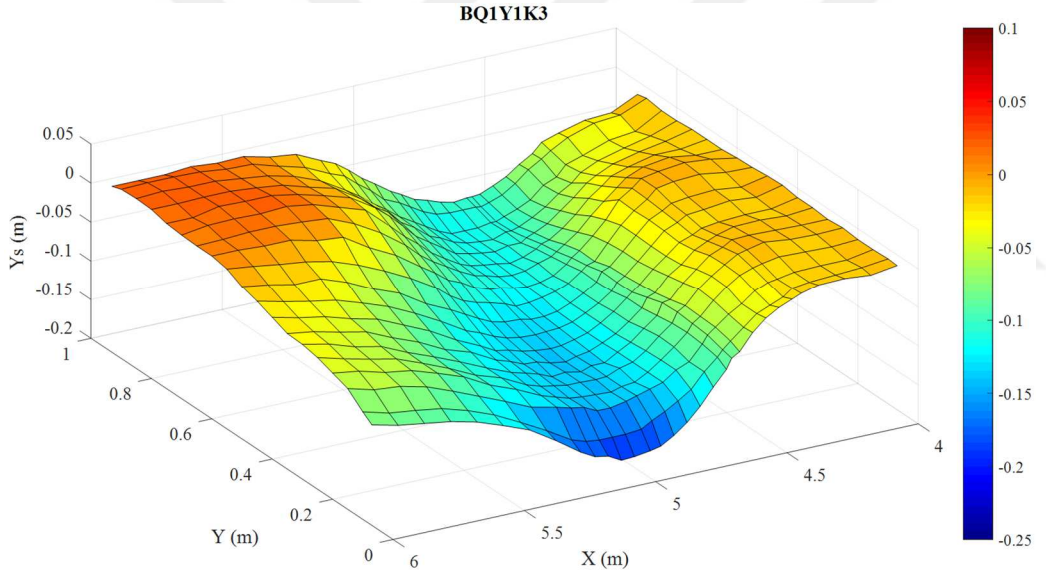
Yanmaz, A. M. (2002). *Köprü Hidroliği*. Ankara: METU Press, 143-210.

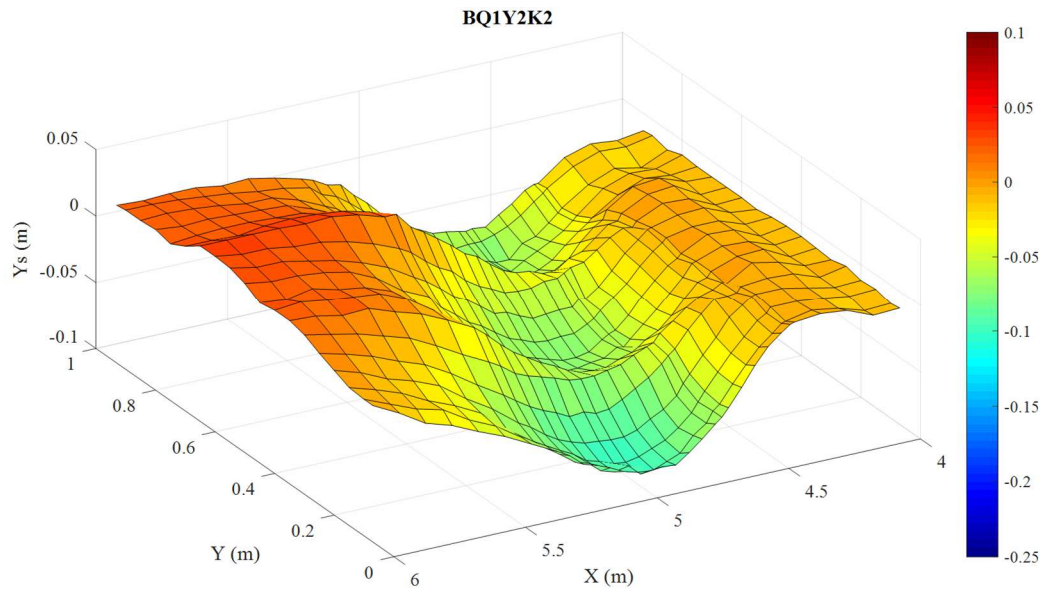
Zhai, Y. (2010). *Time-dependent scour depth under bridge submerged flow*. Ph.d. Thesis, University of Nebraska, Lincoln.

EKLER

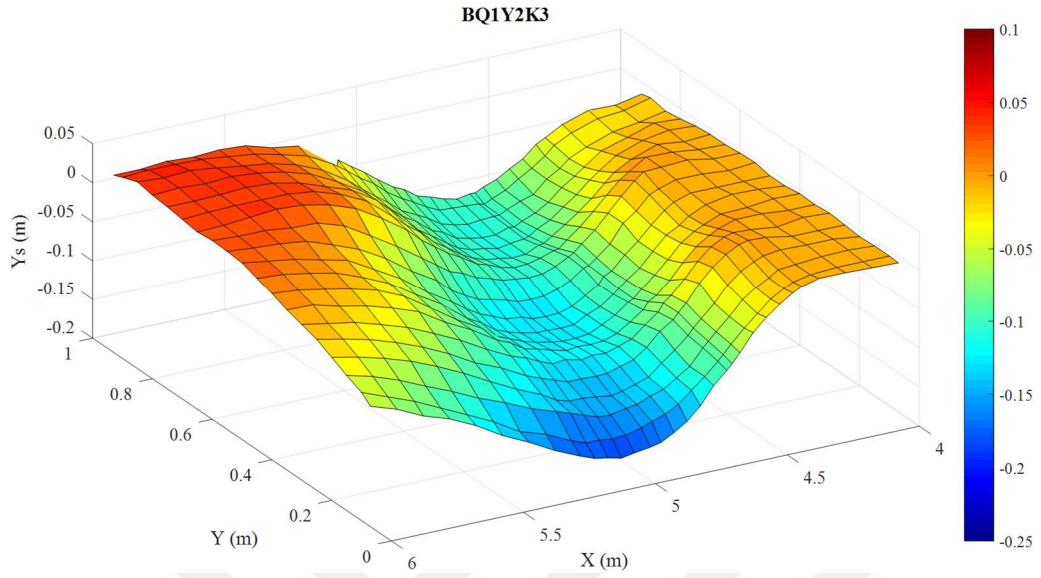
EK-1. 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

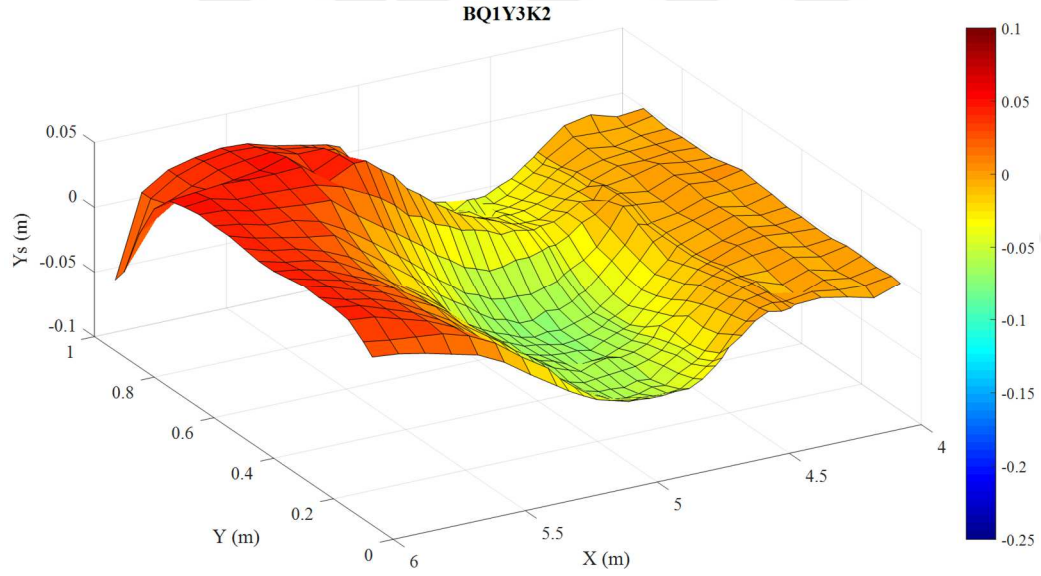


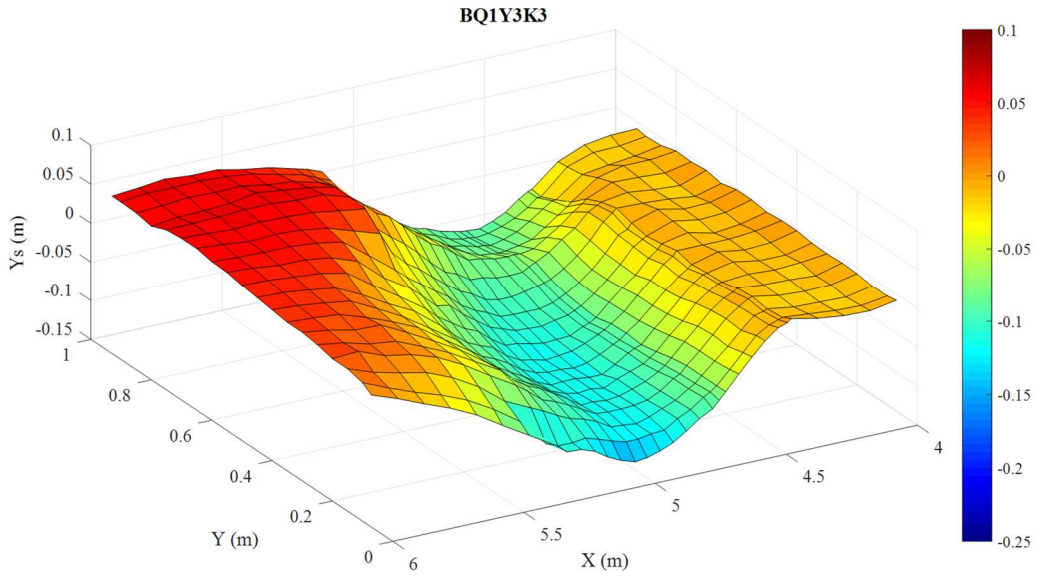




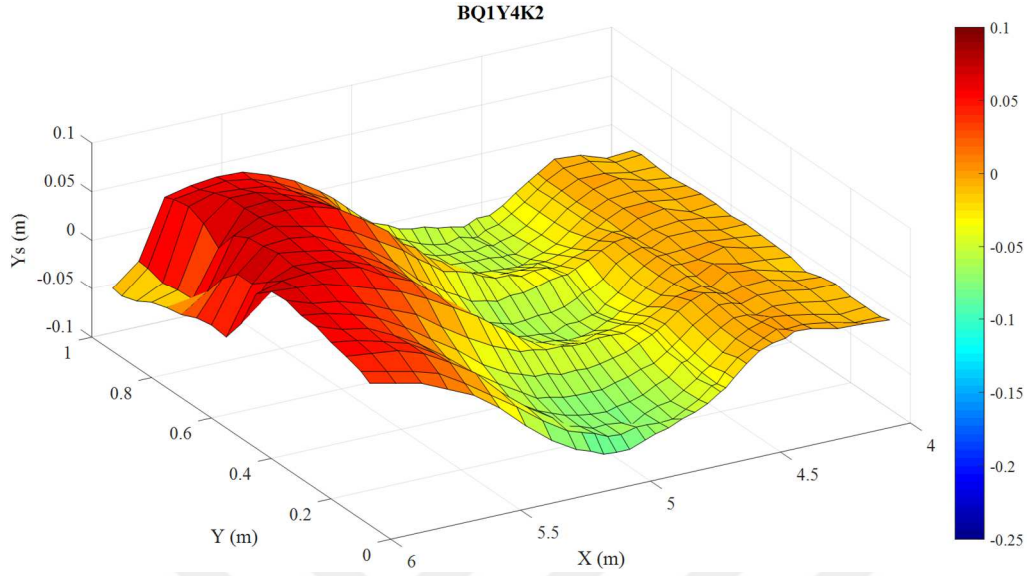
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

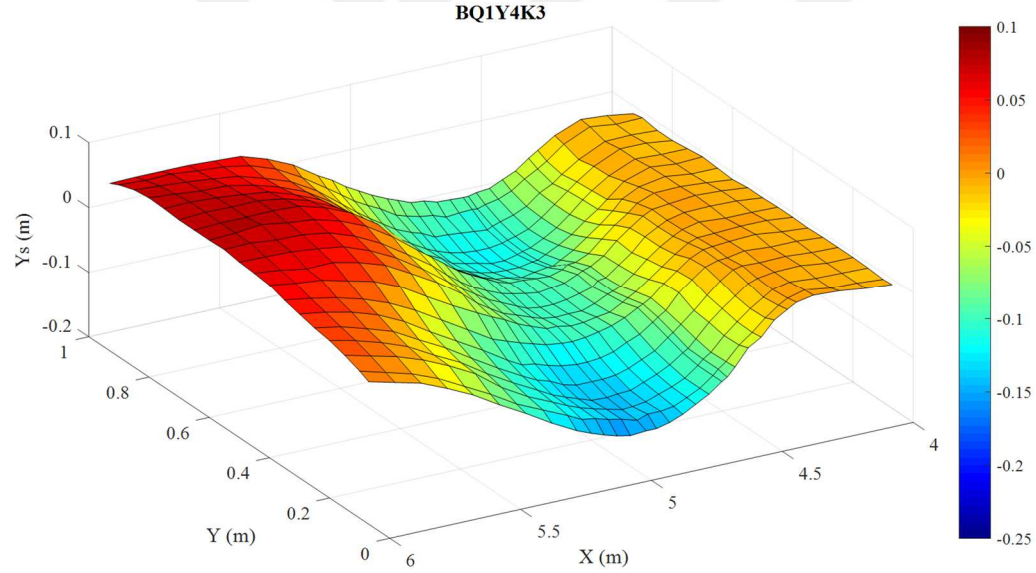


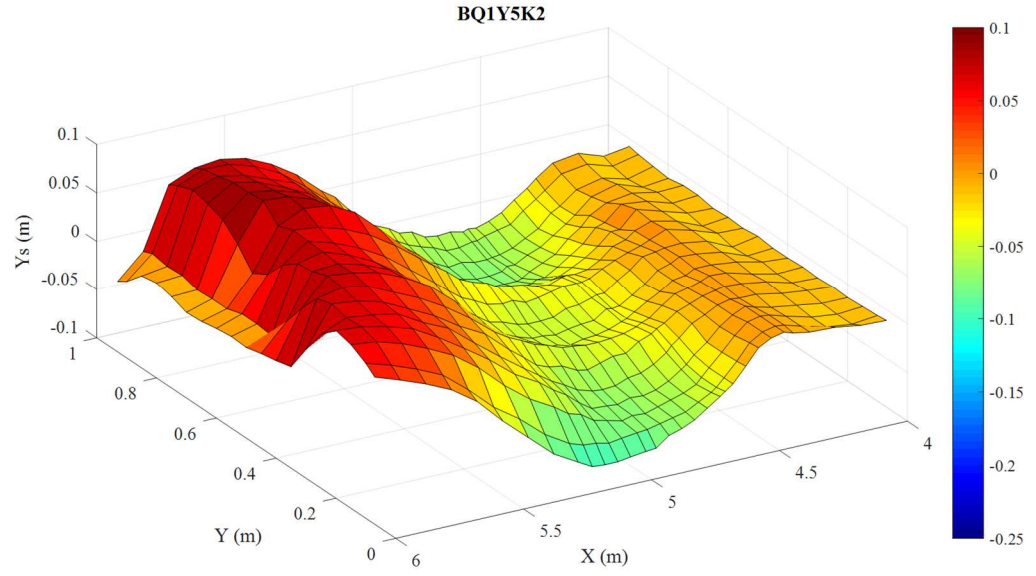




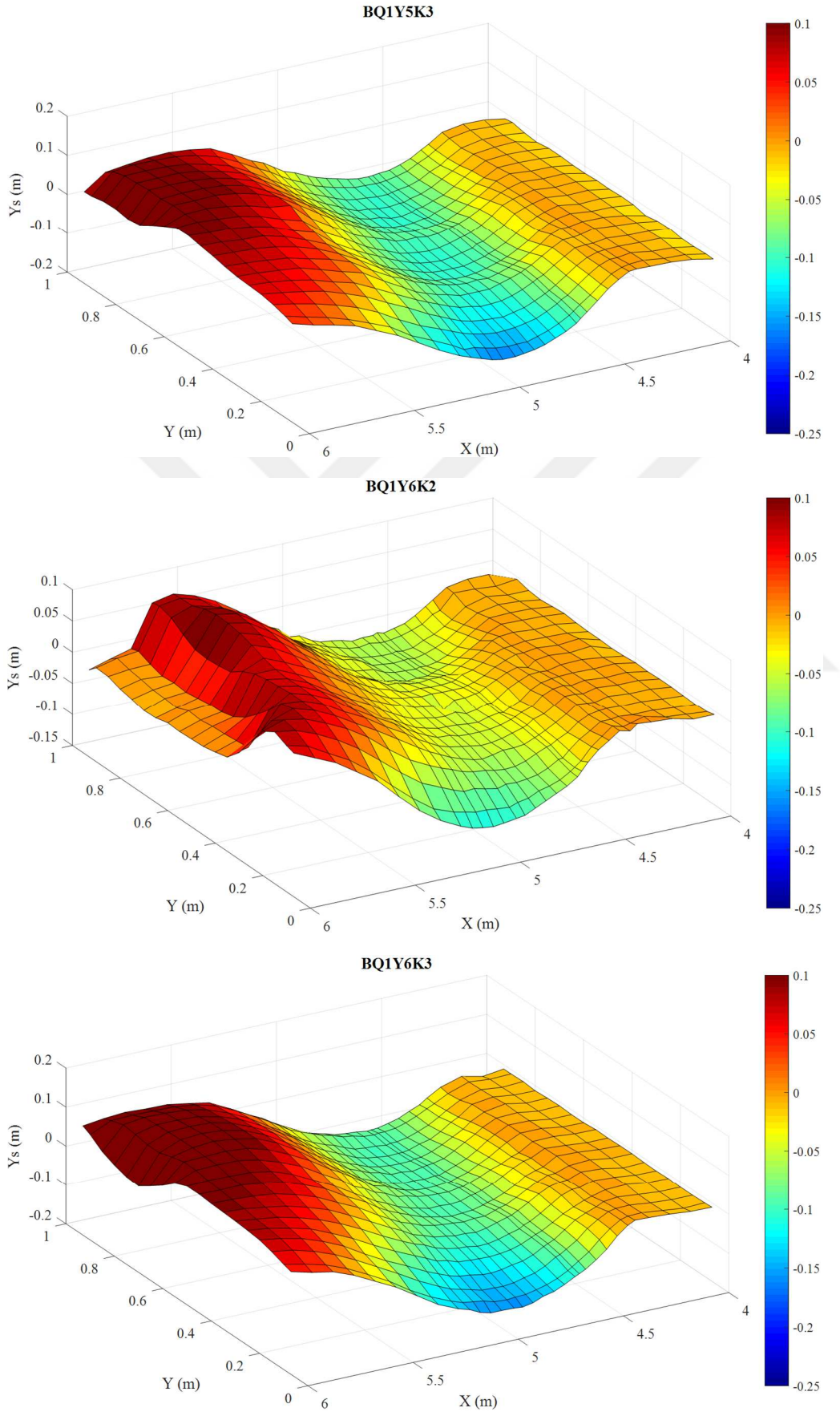
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri



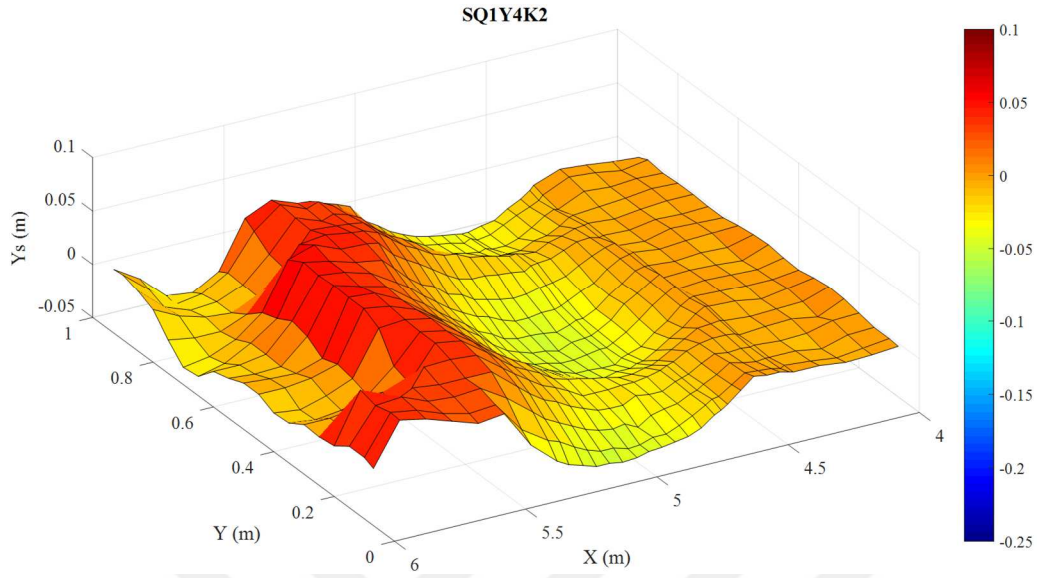


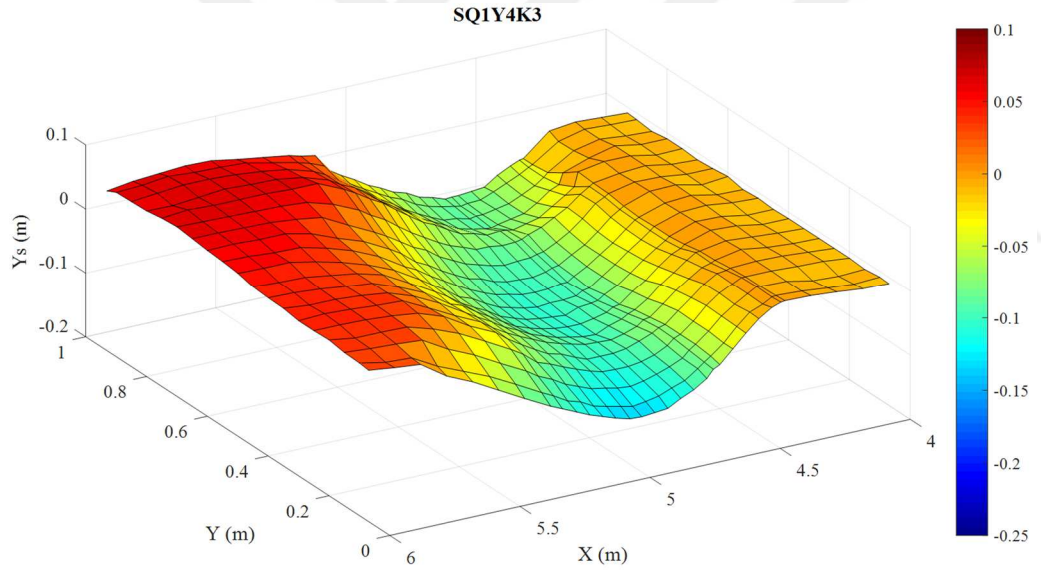


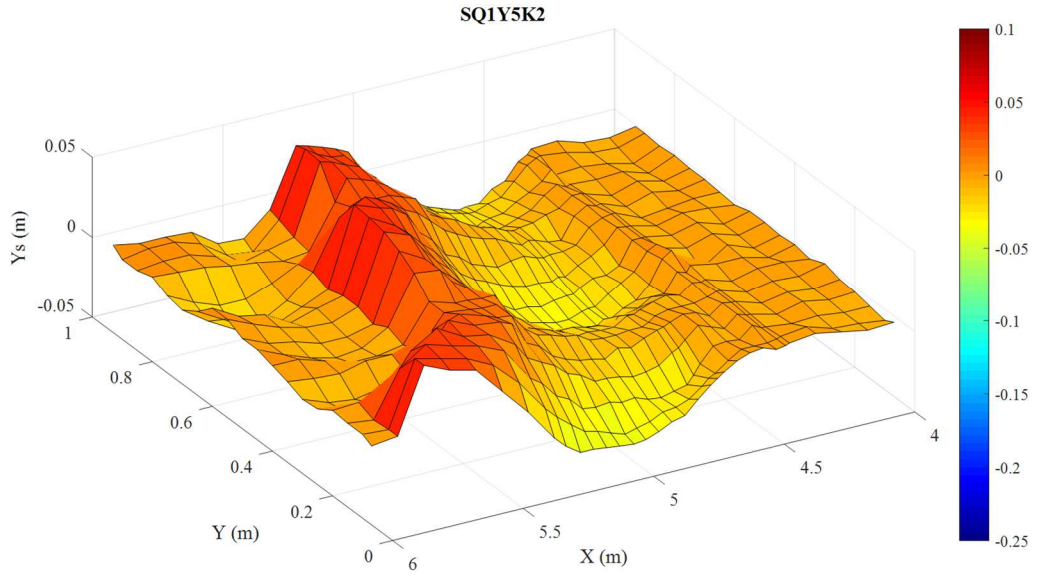
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri



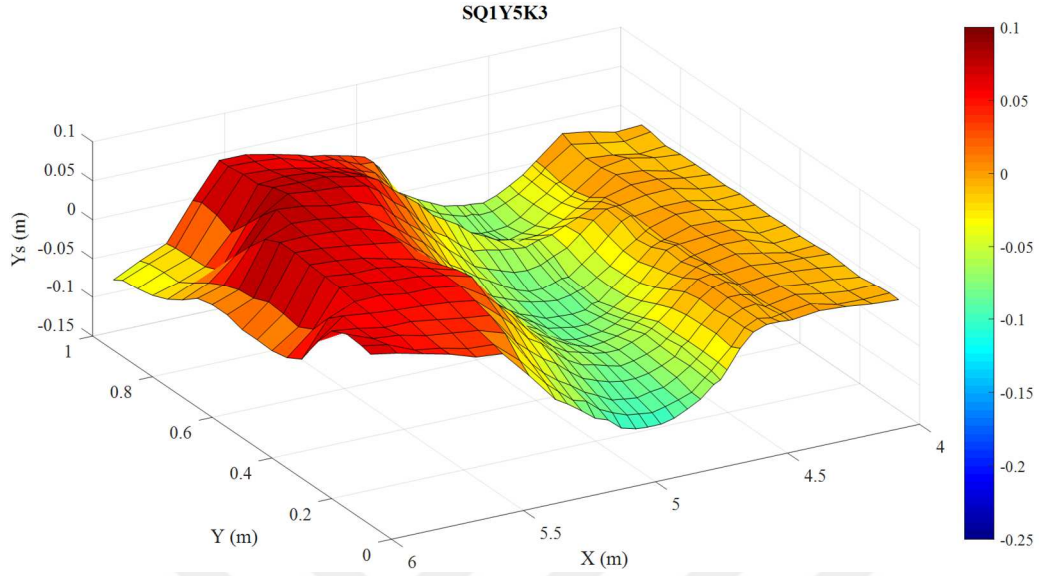
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

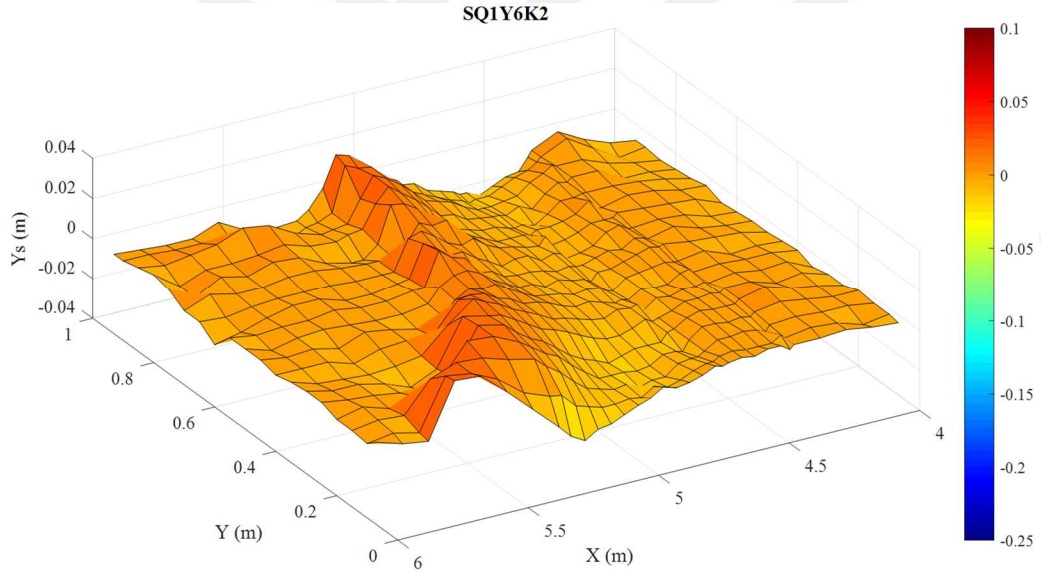


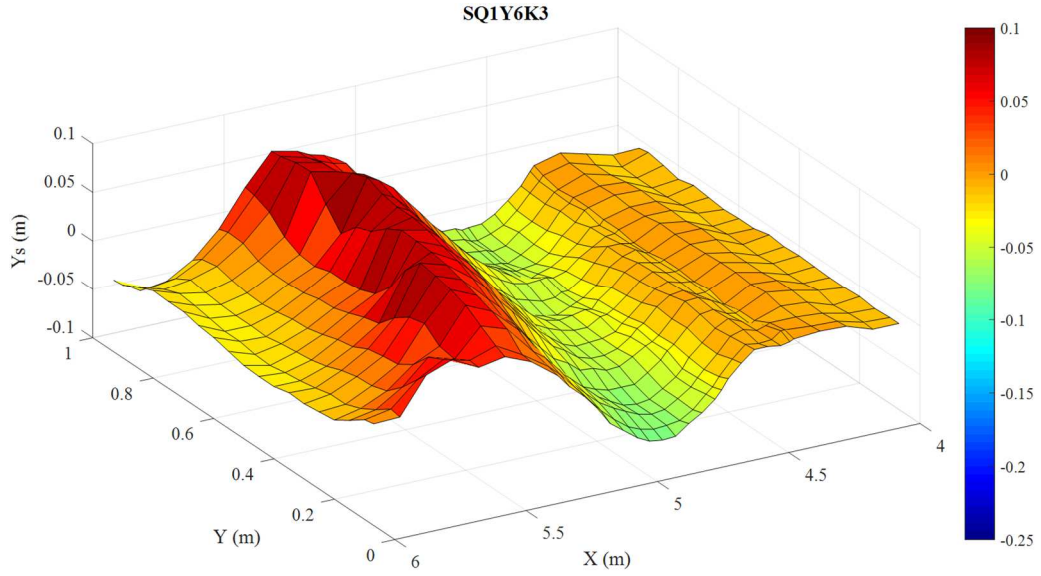




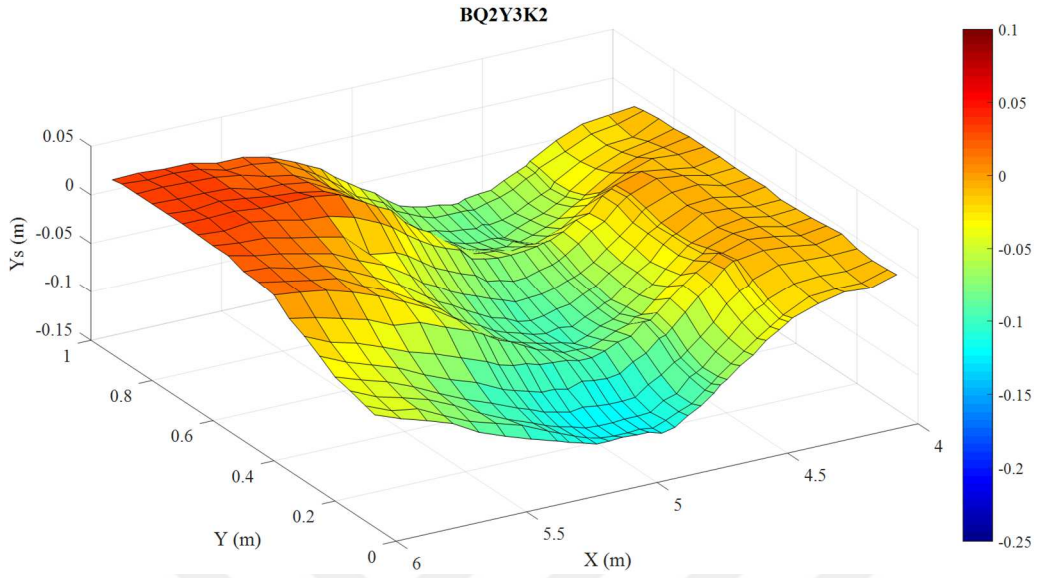
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

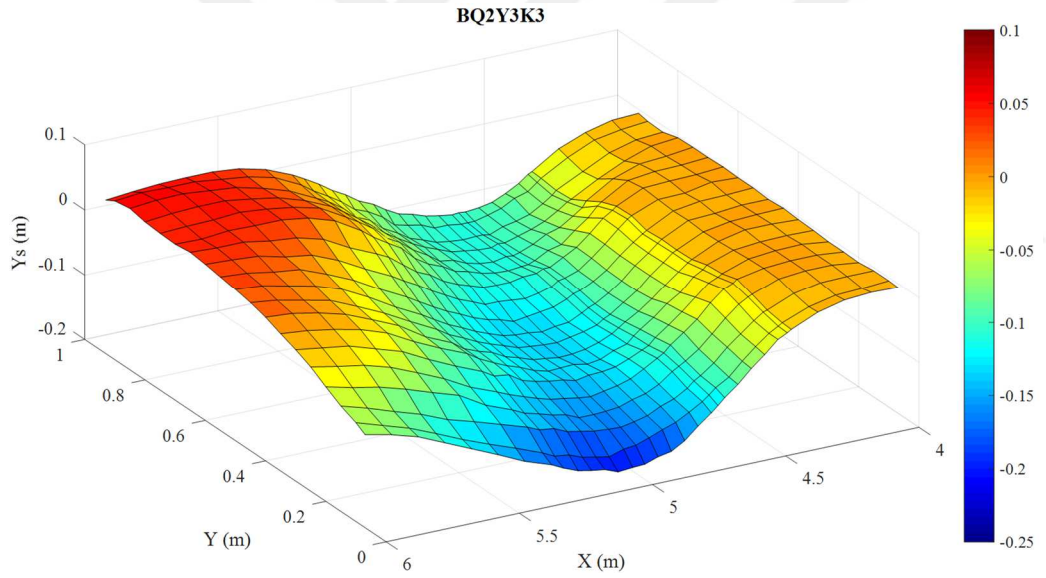


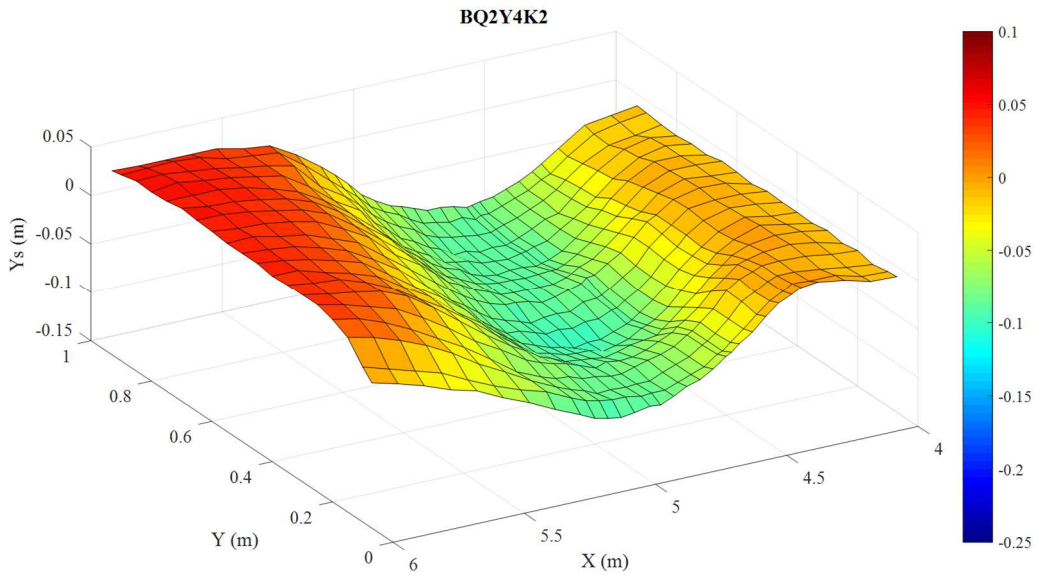




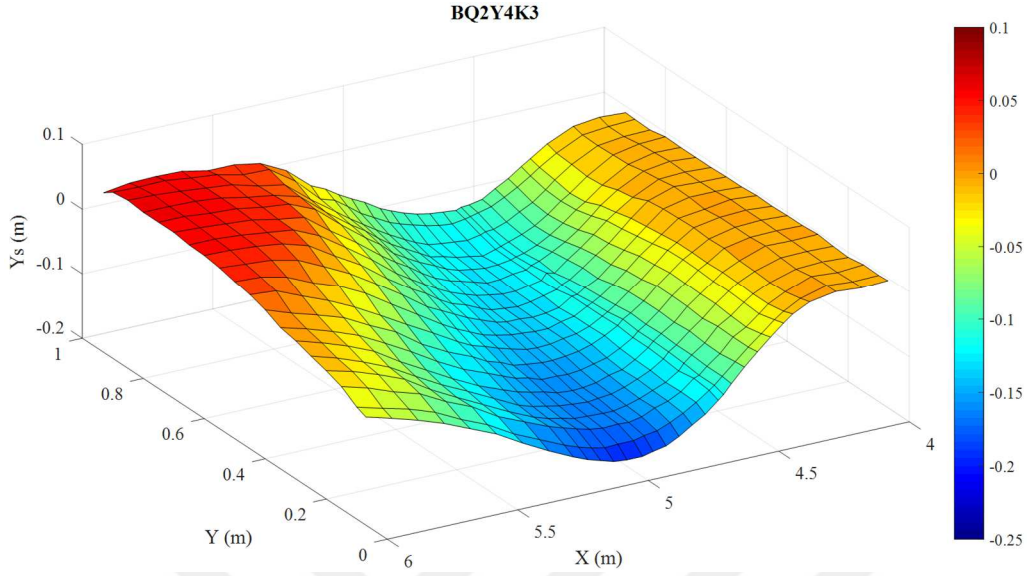
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

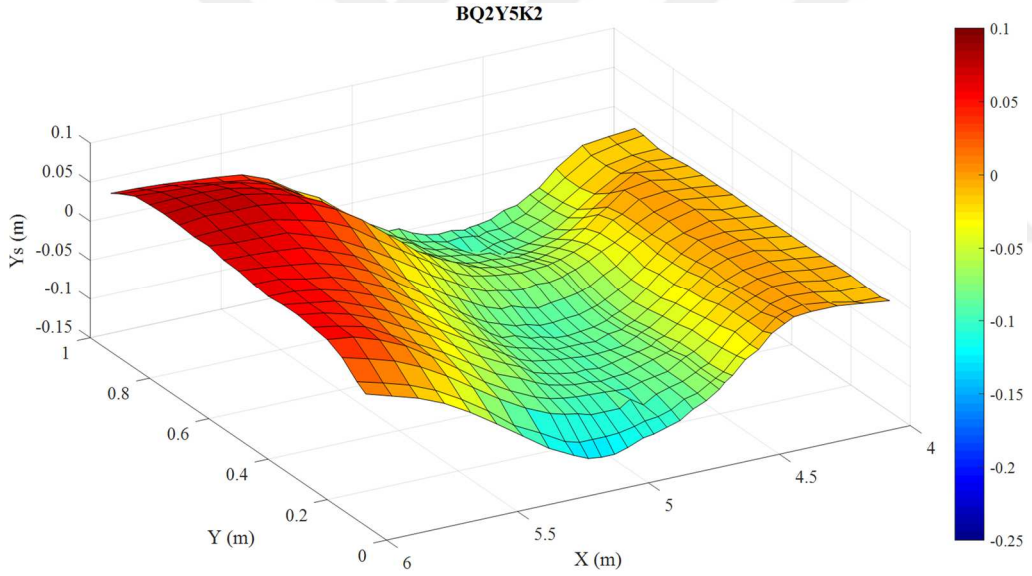


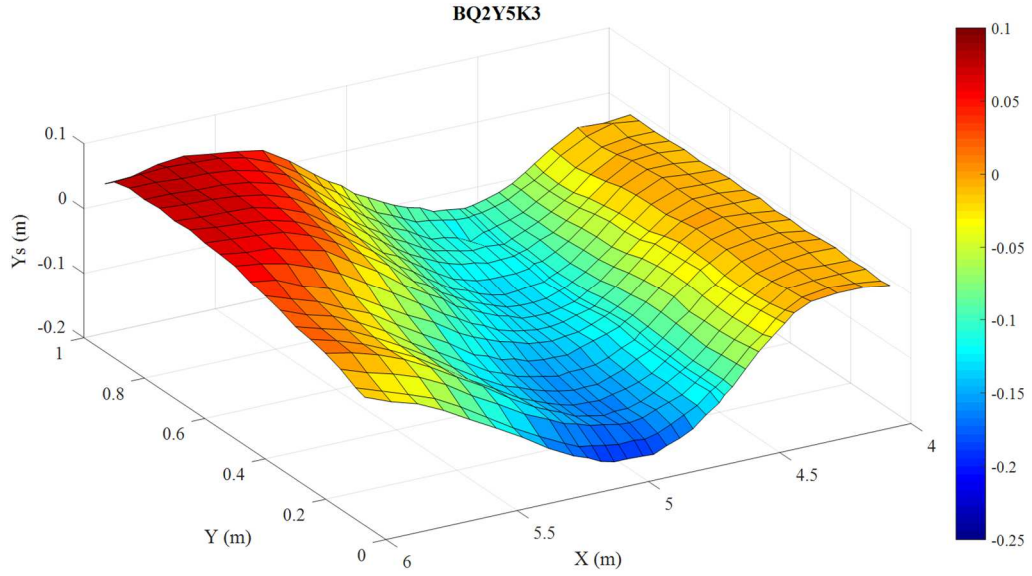




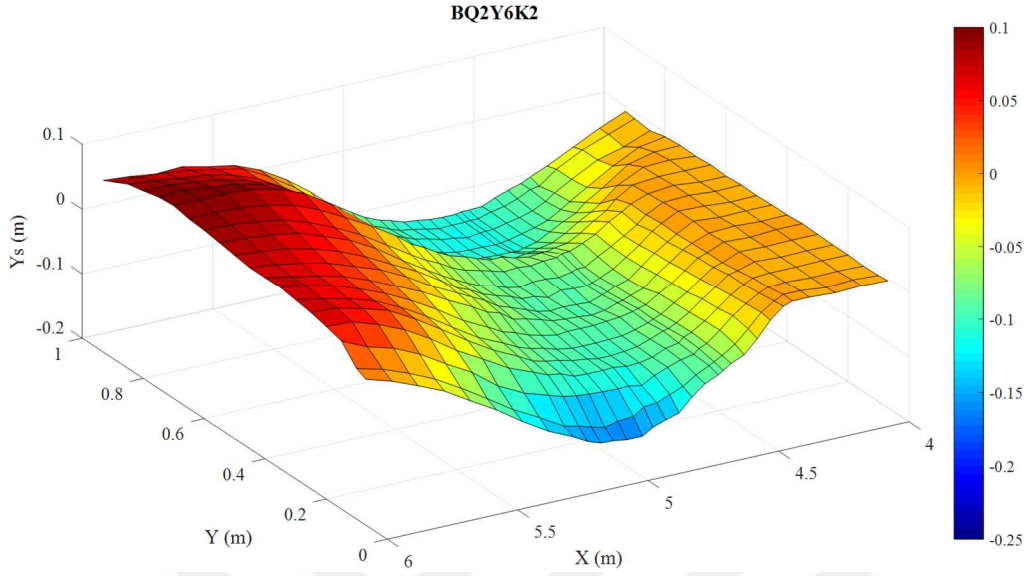
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

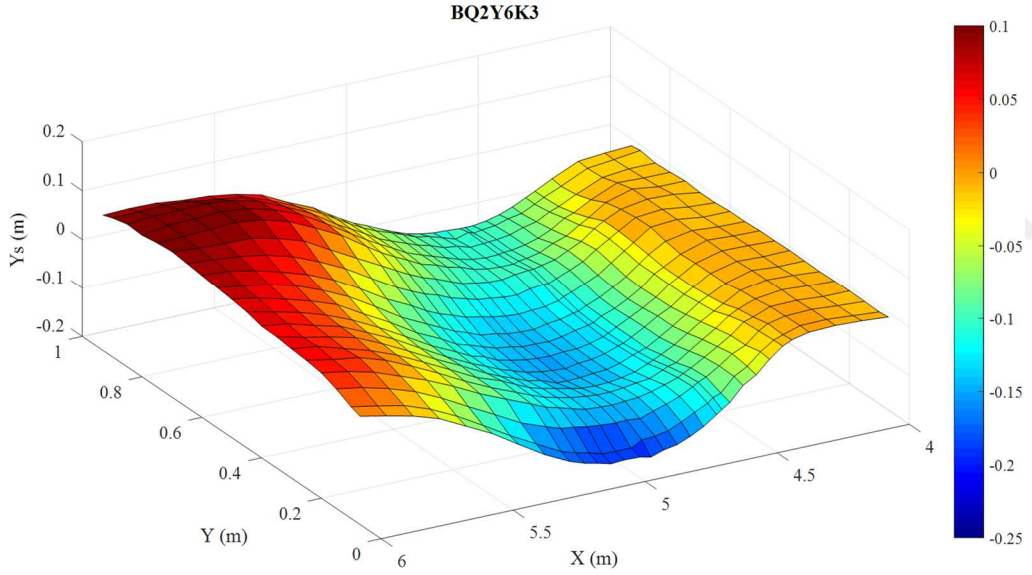


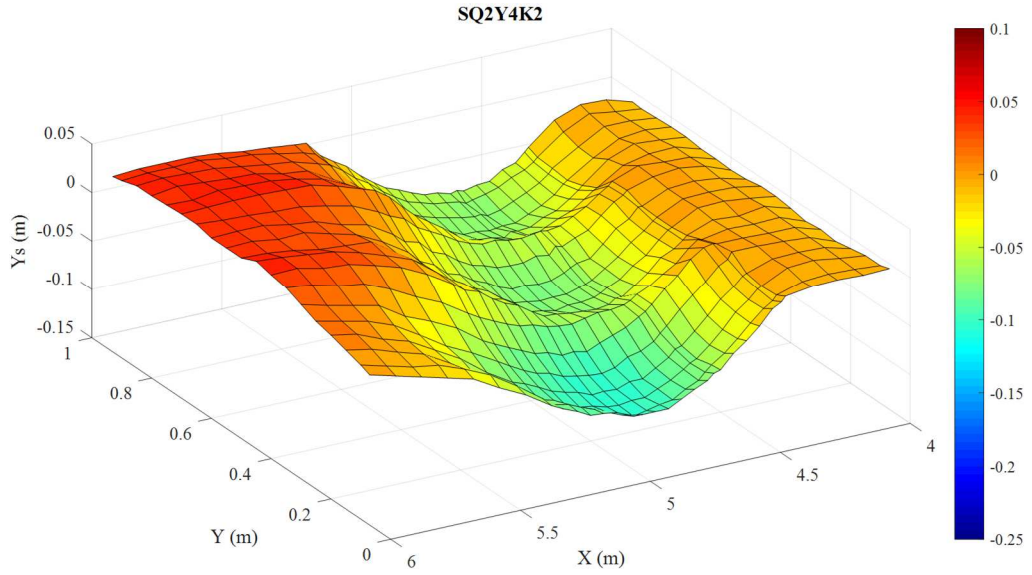




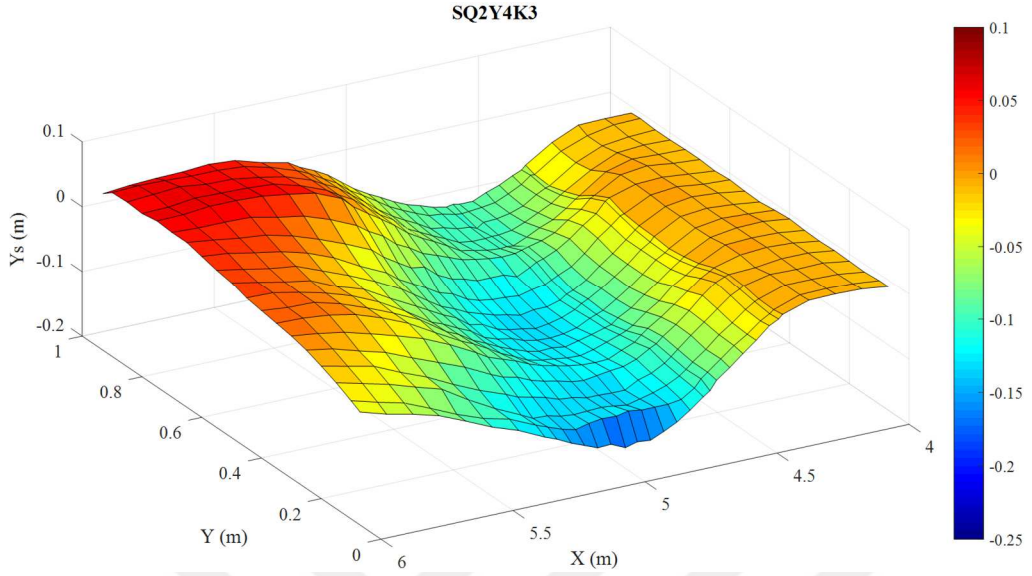
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

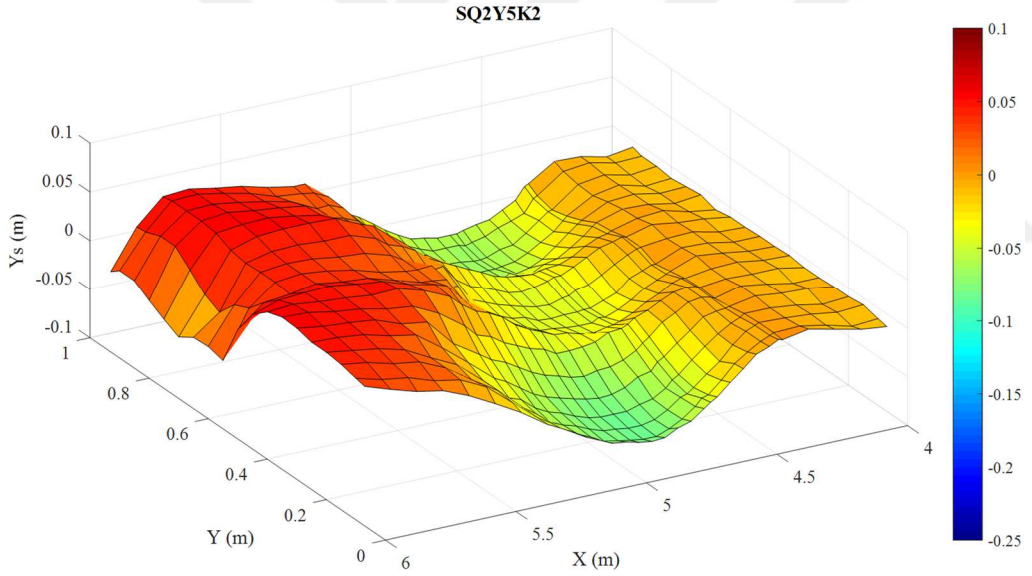


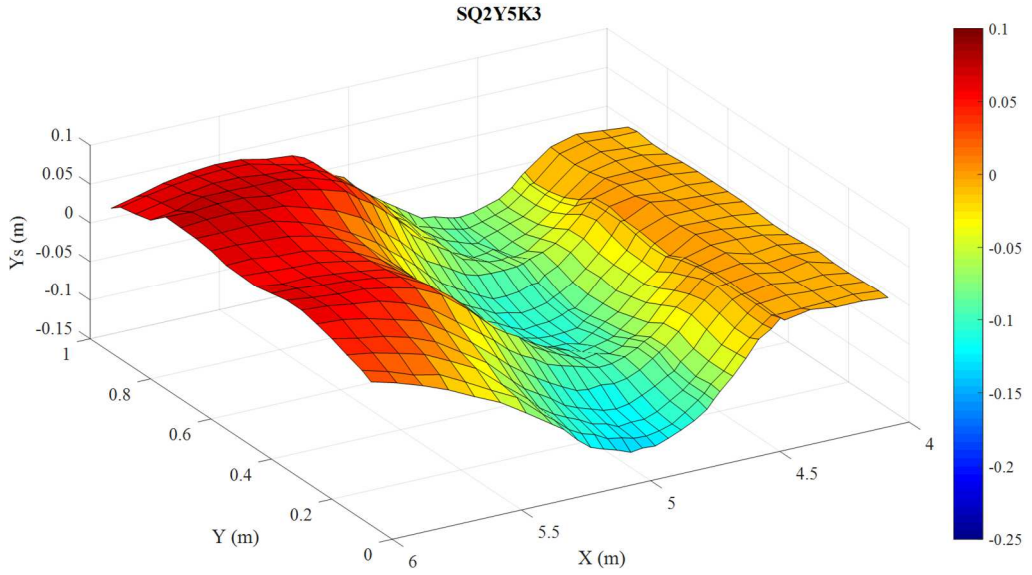




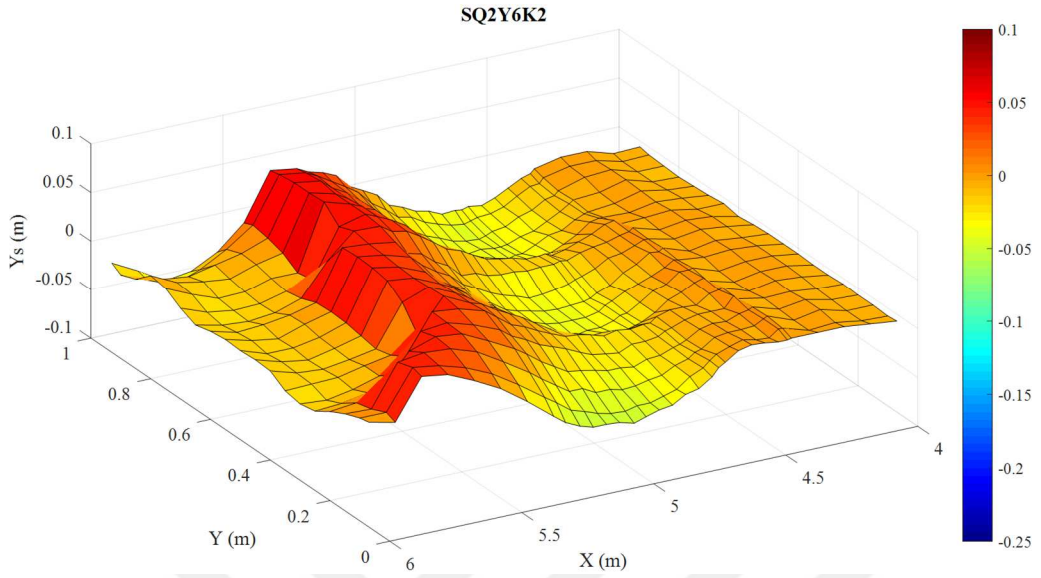
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

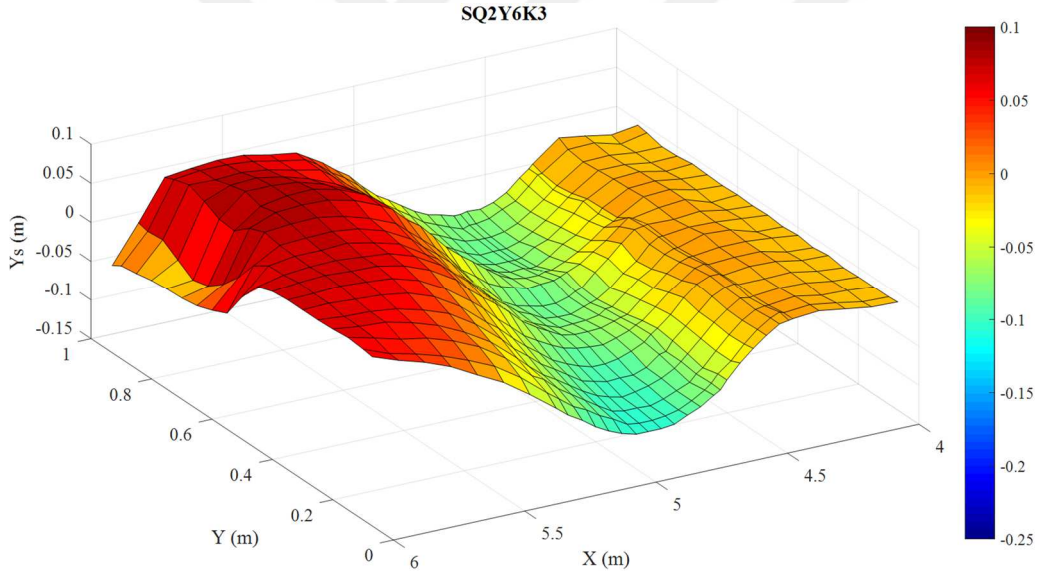


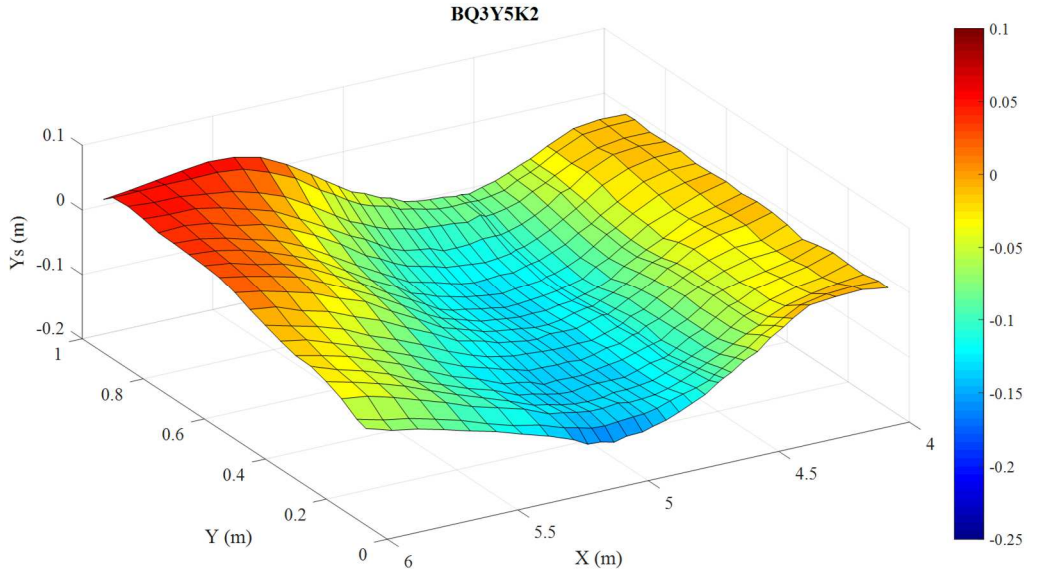




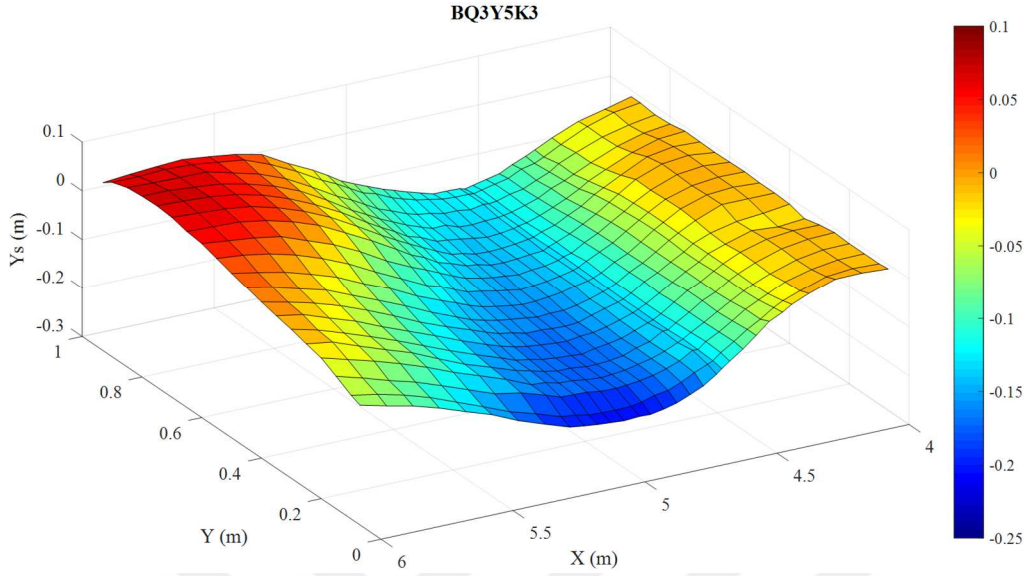
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

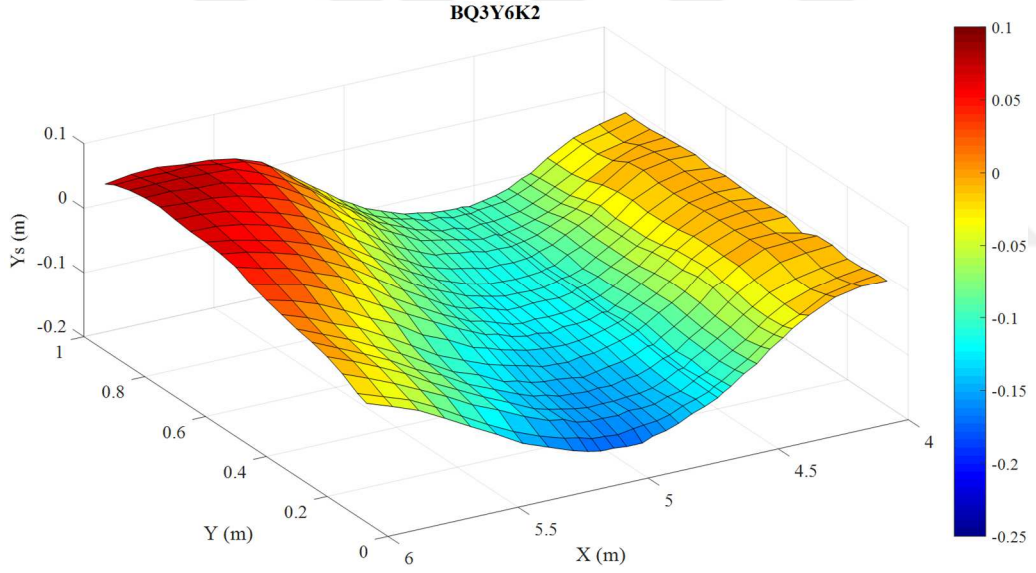


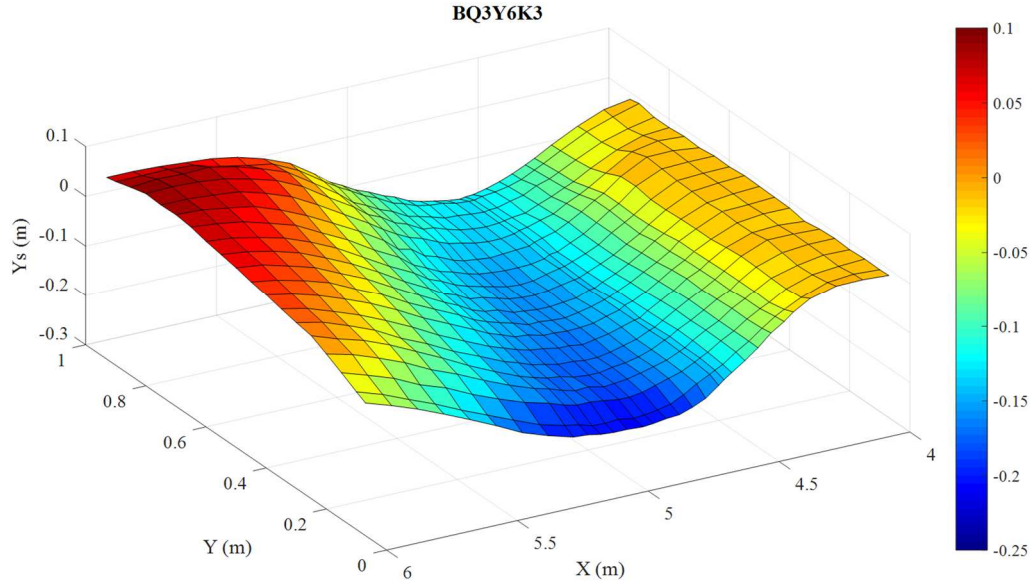




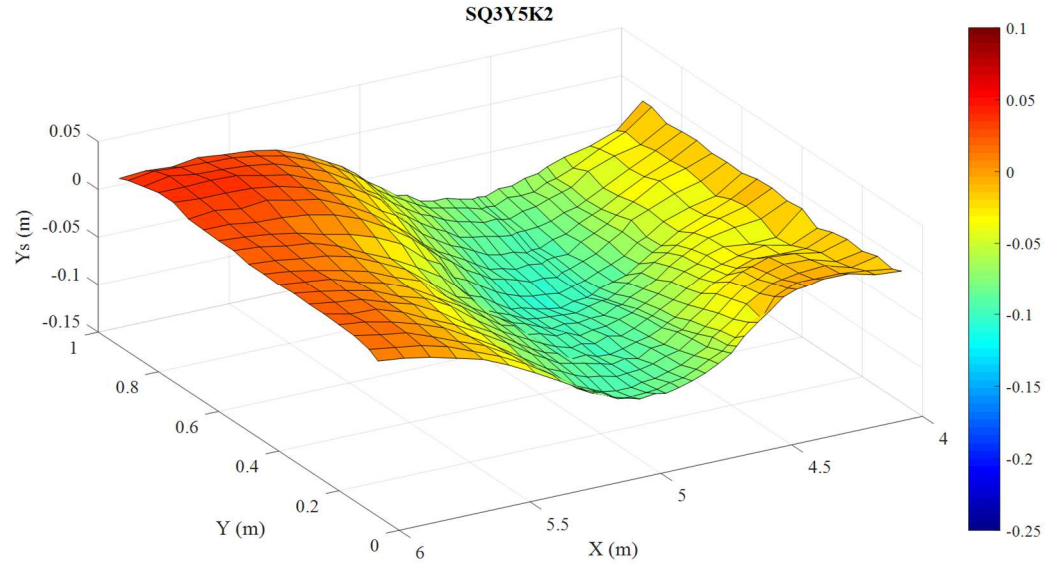
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri

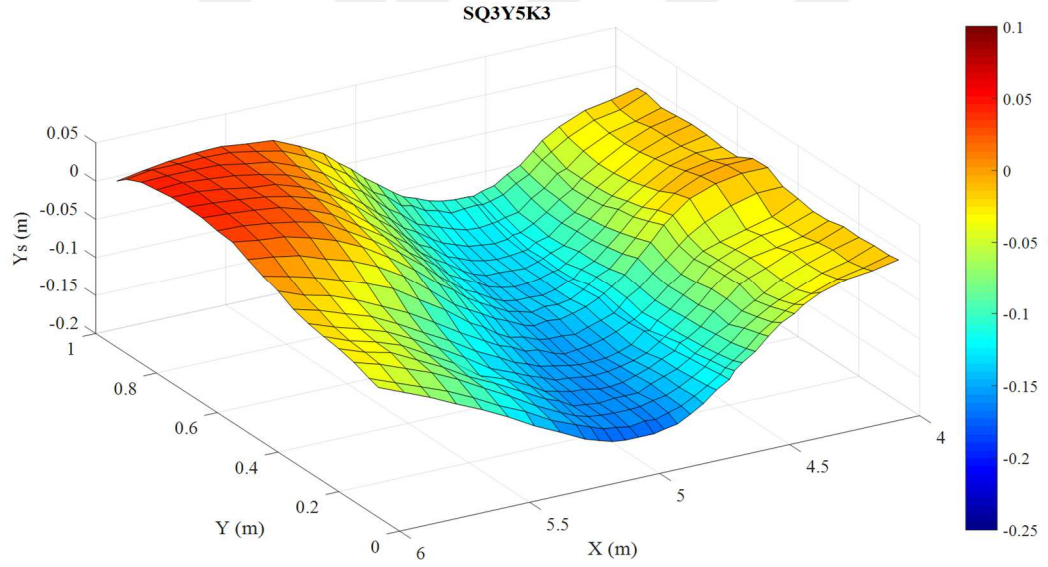


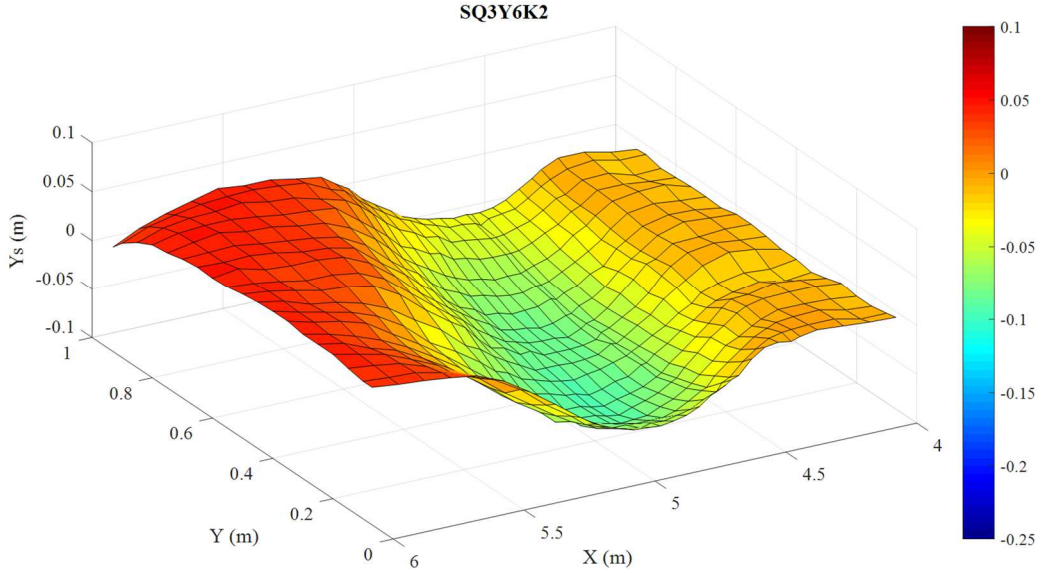




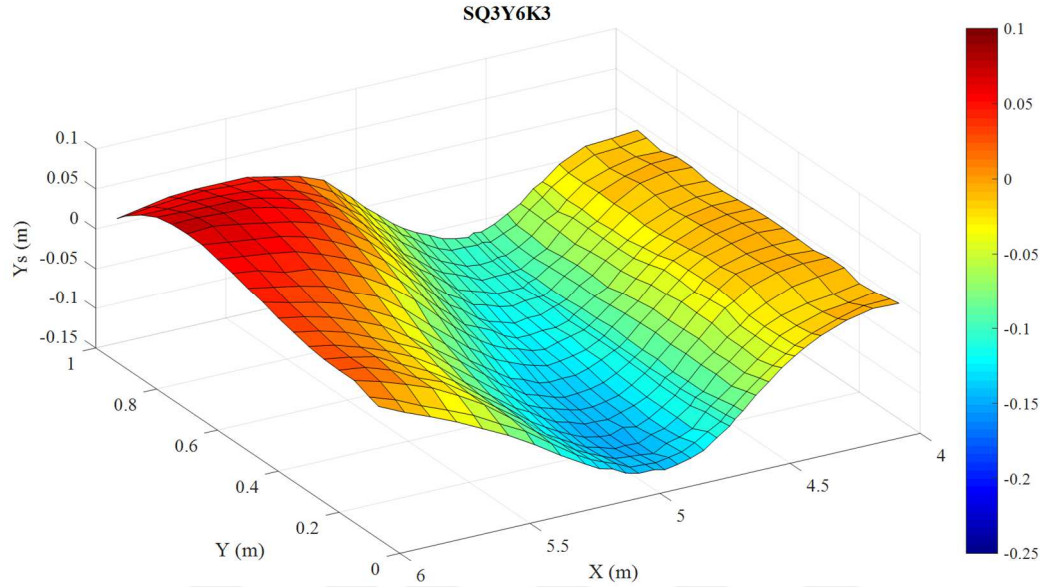
EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri







EK-1. (devam) 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma şekilleri



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : DEMİR, Gülay

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 24.12.1988, Kayseri

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (541) 523 69 77

e-mail : gulaydemir3338@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2011
Lise	Kalaba YDA Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Dolsar Mühendislik	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Kitap okuma

DİZİN

A

Abstract · 25, 66, 68
Akım özellikleri · 27
ANOVA · 60, 63

B

Basınçlı akım · 13, 39, 59
Boyut analizi · 15

C

CFD · 5

Ç

Çizelgelerin listesi · ix
Çalışma özeti 66

D

Deney düzeneği · 21
Deney elemanları 21
Deney prosedürü 29
Dizin · 72

F

Froude sayısıt · 30, 53
F · 60, 63

G

Giriş · 1, 2, 3, 4
Geometrik standart sapma 24

H

Hız profilleri · 16
Hareketli taban oyulması 14

İ

İçindekiler · vii, viii
İspat · 11

K

Kısaltmalar · xv, xvi, xvii
Kaynak · 69, 70
Köprü taliye modeli · 24
Kiriş yüksekliği · 37, 38, 39, 40

L

Literatür araştırması · 5
Lazermetre 27, 28

M

MS · 60, 63

O

Oyulma mekanizması · 13, 14, 15, 16

Ö

Özet · iv,
Özgeçmiş · 71
Ölçüm ağı 28

P

Parçacık densimetrik Froude · 55, 56
p-değeri · 60, 61, 63, 64
PVC · 24, 25, 39
PIV · 68

R

Resimlerin listesi · xiv
Reynold sayısı · 20
Regresyon analizi · 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65
R^2 60, 61, 63, 64

S

Simgeler ve kısaltmalar · xv, xvi, xvii
Savak tipi akım · 13, 39, 61
Standart hata 60, 63
Sonuç ve öneriler · 66, 67, 68

Ş

Şekiller listesi · xii, xiii

T

Teşekkür · vi
Taban malzemesi · 21, 24
Tabliye · 24, 25, 26, 27
Test Bölgesi · 21, 27

U

Uniformluk katsayısı · 24

V

Verevlik açısı · 3, 24, 25, 26, 48

Y

Yaklaşım akım derinliği · 33, 34



GAZİ GELECEKTİR...