
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

AKARSU KÖPRÜLERİNDE BASINÇLI AKIM KOŞULUNDA TOPLAM OYULMANIN İNCELENMESİ

Zayd Onur BARAKAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

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

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

İmza
Zayd Onur BARAKAT
27/12/2022

AKARSU KÖPRÜLERİNDE BASINÇLI AKIM KOŞULUNDA TOPLAM OYULMANIN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Zayd Onur BARAKAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Akarsu köprüleri ulaşım sisteminde yer alan çok önemli mühendislik yapılarıdır. Taşkın anında akarsu debisindeki artışın sonucunda meydana gelen basınçlı akım durumunda köprü ayakları etrafında aşırı oyulmalar ve bu oyulmalardaki artışlara bağlı olarak da köprülerin yıkılması veya ağır hasar görmesi söz konusu olabilmektedir. Bu araştırma kapsamında, kısmi ve tam basınçlı akım durumlarında köprü orta ayağı etrafında meydana gelen oyulma çeşitleri ve oyulma çukuru şekli farklı yaklaşım akım derinliği ile debi değerlerinde incelenmiştir. Çalışmada basınçlı akım durumunda sadece düşey daralma oyulması, serbest akım durumunda sadece yerel oyulma ve basınçlı akım durumunda köprü orta ayağı etrafında meydana gelen hem daralma hem de yerel oyulmanın oluştuğu basınçlı akım oyulma deneyleri yapılmıştır. Böylece aynı şartlarda gerçekleştirilmiş deneylerle basınçlı akım oyulmasının daralma ve yerel oyulma derinliklerinin ayrı ayrı hesaplanıp toplanmasıyla belirlendiği yaklaşımın doğruluğu irdelenmiştir. Basınçlı akım oyulması ile daralma ve yerel oyulma derinliklerinin toplamı ile elde edilen oyulma çukuru profilleri incelendiğinde enine doğrultuda kısmi basınçlı akım için önemli bir farklılık olmadığı, savak tipi akım durumunda ise iki profil arasında farklılığın arttığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde boyuna profil durumunda da özellikle savak tipi akımda orta ayak mansabında oyulma çukuru profilinde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca oyulma tipleri için literatürde bulunan ampirik bağıntıların doğrulukları istatistiksel parametreler yardımla irdelenmiş ve basınçlı akım oyulması için ampirik bir bağıntı önerilmiştir. Çalışma sonucunda basınçlı akım durumunda akım-ayak etkileşiminin artan türbülans etkisiyle daha karmaşık bir hale geldiği, oyulma çukuru derinliğinin literatürdeki bağıntılara kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91122

Anahtar Kelimeler : Akarsu Köprüleri, Basınçlı Akım, Maksimum Oyulma Çukuru Derinliği, Sediment Taşınımı, Temiz Su Oyulması, Yerel Oyulma

Sayfa Adedi : 142

Danışman : Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

INVESTIGATION OF THE TOTAL SCOUR AT RIVER BRIDGES UNDER PRESSURIZED FLOW CONDITION

(M. Sc. Thesis)

Zayd Onur BARAKAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

River bridges are very important engineering structures in the transportation system. In case of pressurized flow condition that may occur as a result of increase in the river flow during flooding, excessive scouring around bridge piers may occur leading to the collapse or severe damage of the bridges with the increase in scour depth. Within the scope of this research, types of scour around bridge piers and shape of the scour hole under partially and fully pressurized flow conditions were investigated with varying approach flow depths and discharges. In the study, three experimental series in which only vertical contraction scour under pressurized flow, only local scour in free flow, and pressurized bridge scour which involves both contraction and local scour were conducted. Thus, using the experiments carried out under same conditions, the accuracy of the approach in which the pressurized flow scour depth is determined by evaluating the contraction and local scour depths separately and then adding these up to determine the total scour depth was examined. When the scour hole profiles obtained from the contraction and local scour depths were compared with the measured pressurized flow scour hole profiles, it was observed that there is no significant difference for the pressurized flow in the transverse direction, while the difference between the two profiles increased for weir type of flow. Similarly, it was observed that there were differences in the longitudinal scour hole profiles for weir flow in the downstream of the pier. In the study, the accuracy of the empirical equations in the literature for various scour types were assessed with the help of statistical parameters and an empirical relation was proposed for pressurized flow scour. The study showed that the flow-pier interaction became more complex with the effect of increasing turbulence in case of pressurized flow condition, and the depth of the scour hole was observed to be larger when compared with the predictions of the relations in the literature.

Science Code : 91122

Key Words : River Bridge, Pressure flow, Maximum scour hole depth, Sediment transport, Clear water scour, Local scour

Page Number : 142

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımlarını, anlayışını ve desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'e, tezimin hazırlanmasında her türlü moral ve motivasyon kaynağım eşim ve kızıma, son olarak her daim yanımda olan aileme, çalıştığım kuruma ve değerli yöneticilerime teşekkürü borç bilirim.

Bu tez, vatanımıza ve milletimize armağan olsun. İlim ve irfan yolunda güzel ülkemizde bir daha can ve mal kaybı yaşanmaması dileklerimle.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. OYULMA MEKANİZMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7

2.1. Genel Tanımlar 7

2.2. Farklı Akım Koşullarında Oyulma Mekanizması 9

2.3. Basınçlı ve Savaklı Tip Akımlar 10

2.4. Boyut Analizi 12

2.5. Literatür Araştırması 17

2.5.1. Köprü orta ayaklarında meydana gelen yerel oyulmalarla ilgili çalışmalar 17

2.5.2. Kısmi basınçlı ve savaklı akım tip akım durumlarında oyulma bağıntıları 27

2.5.3. Basınçlı akım durumunda meydana gelen toplam oyulmanın incelenmesi 35

2.5.4. Çalışma kapsamında kullanılan bağıntılar 40

3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ 45

3.1. Genel 45

Sayfa

3.2. Deney Düzeneği 45

3.3. Deney Elemanları 46

3.3.1. Taban Malzemesi 46

3.3.2. Köprü Modeli 48

Tabliye Modeli 48

Orta ayak modeli 50

3.4. Deney Ölçümleri 51

3.5. Deney Programı ve Kurulumu 53

3.6. Deney Prosedürü 55

4. DENEY BULGULARI VE SONUÇLARININ İRDELENMESİ 57

4.1. Genel 57

4.2. Oyulma Çukuru Özelliklerinin İncelenmesi 59

4.2.1. Tabliye altında meydana gelen daralma oyulması özellikleri 60

4.2.2. Orta ayak etrafındaki yerel oyulma özellikleri 64

4.2.3. Tabliye ve orta ayağın beraber olduğu basınçlı oyulma özellikleri 70

4.3. Literatürdeki Bazı Ampirik Bağıntıların Deney Sonuçlarıyla Değerlendirilmesi 79

4.3.1. Düşey daralma oyulması 79

4.3.2. Serbest akım durumunda yerel oyulma 83

4.3.3. Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma 88

5. ÇALIŞMA KAPSAMINDAKİ BAĞINTILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 93

5.1. Çalışma Kapsamında Kullanılmış Olan İstatistiksel Parametreler 93

5.1.1. Ortalama hata (OH) 93

5.1.2. Ortalama yüzde hata (OYH) 94

Sayfa

5.1.3. Ortalama mutlak hata (OMH) 94

5.1.4. Ortalama kare hata (OKH) 95

5.1.5. Kök ortalama kare hata (KOKH). 95

5.1.6. Ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) 96

5.1.7. Determinasyon katsayısı R^2 96

5.1.8. Theil U istatistiği 97

5.1.9. Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı (NSEK) 97

5.1.10. Normalize kök ortalama kare hata (NKOKH) 97

5.2. İncelenen Bağıntıların İstatistiksel Değerleri 98

5.3. Sonuçların İrdelenmesi ve Tartışma 99

6. MAKSİMUM OYULMA ÇUKURU DERİNLİĞİNİ TAHMİN EDEN AMPİRİK BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ 117

6.1. Genel 117

6.2. Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi 117

6.2.1. y_{spp}/Hb için regresyon analizi 117

6.2.2. y_{spp}/D için regresyon analizi 119

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 123

7.1. Özet ve Sonuçlar 123

7.2. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler 125

KAYNAKLAR 126

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Yıkılan ve zarar gören köprüler 3

Çizelge 2.1. Orta ayaklarda maksimum oyulma derinliği bağıntıları 19

Çizelge 3.1. Taban malzemesine ait karakteristik büyüklükler 48

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan bazı parametreler 54

Çizelge 4.1. Çalışma kapsamında yapılmış deneyler ve ölçüm sonuçları…….. 59

Çizelge 4.2. Sadece tabliye olması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri ……..…….. 61

Çizelge 4.3. Serbest akım ve basınçlı akım durumunda ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları…… 65

Çizelge 4.4. Basınçlı akım olması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri……..……. 71

Çizelge 4.5. Maksimum daralma oyulması derinliği tahmini için kullanılan bağıntılar 80

Çizelge 4.6. Maksimum daralma oyulması derinliği tahmini için seçilen bağıntılar ve hata değerleri..... 81

Çizelge 4.7. Yerel oyulma durumunda kullanılan bağıntılar 84

Çizelge 4.8. Maksimum yerel oyulma derinliği tahmini için seçilen bağıntılar ve hata değerleri..... 85

Çizelge 4.9. Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma durumunda kullanılan bağıntılar.....…….. 88

Çizelge 4.10. Basınçlı akım durumunda ayak etrafında oluşan maksimum oyulma derinliği tahmini için seçilen bağıntılar ve hata değerleri..... 89

Çizelge 5.1. Sadece düşey daralma nedeniyle meydana gelen $y_{sc,max}$ için kullanılan bağıntıların istatistiksel parametre değerleri…….. 100

Çizelge 5.2. Serbest akım durumunda $y_{spo,max}$'ın tahmini için kullanılan bağıntıların istatistiksel parametrelerle değerlendirmesi ……..... 101

Çizelge 5.3. Düşey daralma ve yerel oyulma (Tabliye ve Orta Ayak) verilerinin istatistiksel parametrelerle değerlendirmesi…….. 102

Çizelge 5.4. Maksimum oyulma derinliklerinin kıyaslanması……..... 115

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.1. y_{spp}/H_b durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri 118

Çizelge 6.2. y_{spp}/H_b durumu için regresyon analizi sonuçları 118

Çizelge 6.3. y_{spp}/D durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri..... 120

Çizelge 6.4. y_{spp}/D durumu için regresyon analizi sonuçları..... 120

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Serbest akım durumunda bir köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve yerel oyulma (Yanmaz, 2002) 8

Şekil 2.2. Basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafındaki çevrintiler (Dey ve diğerleri, 2008)…… 9

Şekil 2.3. Oyulma derinliğinin zaman ve hız parametrelerince incelenmesi (Arved ve diğerleri, 1983) 10

Şekil 2.4. Kısmi basınçlı akım ve savaklı akım durumları 11

Şekil 1.5. Köprü ayağı ve tabliye parametreleri……..... 12

Şekil 2.6. Shan ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait deney parametreleri 31

Şekil 2.7. V_a/V_c=0.5 oranı için oyulmalar (Carnacina ve diğerleri, 2019) 39

Şekil 2.8. V_a/V_c=1 oranı için oyulmalar (Carnacina ve diğerleri, 2019)……..... 39

Şekil 3.1. Deney kanalı profili 47

Şekil 3.2. Kanal tabanı profili 47

Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan köprü modeli 49

Şekil 3.4. Köprü modelinin deney bölgesinde konumlandırılması 52

Şekil 4.1. Sadece tabliyenin olduğu deney düzeneği ve parametreler 57

Şekil 4.2. Sadece orta ayak modelinin olduğu deney düzeneği ve parametreler 58

Şekil 4.3. Köprü tabliye modeli ile silindirik orta ayak modelinin birlikte olduğu deney modeli ve parametreler 58

Şekil 4.4. 120 lt/sn'lik debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili…… 62

Şekil 4.5. 120 lt/sn'lik debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde (x=4,575 m'de) meydana gelen oyulma çukuru profili…… 62

Şekil 4.6. y_a=34,5 cm ve farklı debi değerlerinde (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili……. 63

Şekil 4.7. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği durumunda meydana gelen oyulma çukuru y_{sc} (m)…….. 63

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. 120 lt/sn'lik debi ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği durumunda meydana gelen oyulma çukuru y_{sc} (m)…… 64

Şekil 4.9. 120 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru profilleri……..…. 66

Şekil 4.10. 110 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru profilleri 66

Şekil 4.11. 100 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru profilleri 67

Şekil 4.12. y_a=34,5 cm ve farklı debi değerlerinde orta ayakta (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili……..… 67

Şekil 4.13. 120 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti……..... 68

Şekil 4.14. 110 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti 68

Şekil 4.15. 100 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti 69

Şekil 4.16. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spo} (m)……. 69

Şekil 4.17. 120 lt/sn'lik debi ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spo} (m)…….. 70

Şekil 4.18. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 100 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru……. 72

Şekil 4.19. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 110 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru..... 72

Şekil 4.20. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 120 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru..... 73

Şekil 4.21. Basınçlı akım durumunda y_a=34,5 cm ve farklı debi değerlerinde orta ayak etrafında (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili…. 73

Şekil 4.22. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 100 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti 74

Şekil 4.23. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 110 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti 74

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.24. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 120 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti 75

Şekil 4.25. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spo} (m)…….. 75

Şekil 4.26. 120 lt/sn'lik debi ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spo} (m)..... 76

Şekil 4.27. 100 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru boy profilleri 76

Şekil 4.28. 110 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru boy profilleri 77

Şekil 4.29. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru boy profilleri 77

Şekil 4.30. 100 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru en kesitleri..... 77

Şekil 4.31. 110 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru en kesitleri..... 78

Şekil 4.32. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru en kesitleri ……..…….. 78

Şekil 4.33. Ölçülmüş $y_{sc,max}$ ile farklı bağıntılarla tahmin edilen değerinin karşılaştırılması ……..…….. 82

Şekil 4.34. Gözlemlenen ve ölçülmüş $y_{sc,max}$/ H_b değerlerinin karşılaştırılması..... 82

Şekil 4.35. Gözlemlenen ve ölçülmüş $y_{sc,max}$/ y_a değerlerinin karşılaştırılması..... 83

Şekil 4.36. Ölçülmüş ve farklı bağıntılarla hesaplanmış $y_{spo,max}$ değerlerinin karşılaştırılması ……..……. 86

Şekil 4.37. Ölçülen y_{spo}/y_a ve hesaplanan y_{spo}/y_a değerlerinin karşılaştırılması …… 87

Şekil 4.38. Ölçülen y_{spo}/D ve hesaplanan y_{spo}/D değerlerinin karşılaştırılması ……..… 87

Şekil 4.39. Basınçlı akım durumunda ölçülen ve hesaplanmış olan $y_{spp,max}$ değerlerinin karşılaştırılması…… 89

Şekil 4.40. Basınçlı akım durumunda ölçülen ve hesaplanmış olan $y_{spp,max}/y_a$ değerlerinin karşılaştırılması……..…….. 90

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.41. Basınçlı akım durumunda ölçülen ve hesaplanmış olan $y_{spp,max}/D$ değerlerinin karşılaştırılması……..…….. 90

Şekil 5.1. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 104

Şekil 5.2. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 104

Şekil 5.3. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 105

Şekil 5.4. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 105

Şekil 5.5. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 106

Şekil 5.6. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 106

Şekil 5.7. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 106

Şekil 5.8. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 107

Şekil 5.9. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 108

Şekil 5.10. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması……. 108

Şekil 5.11. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 109

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.12. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 109

Şekil 5.13. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 110

Şekil 5.14. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 110

Şekil 5.15. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 110

Şekil 5.16. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 111

Şekil 5.17. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 112

Şekil 5.18. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 112

Şekil 5.19. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması…… 113

Şekil 5.20. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması……. 113

Şekil 5.21. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 114

Şekil 5.22. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 114

Şekil 5.23. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 114

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.24. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması……... 115

Şekil 5.25. Fark yüzdesinin debi ile değişimi…… 116

Şekil 6.1. Eş. 6.4'ün literatürdeki bağıntılarla karşılaştırılması……. 121

Şekil 6.1. Eş. 6.4'ün literatürdeki bağıntılarla karşılaştırılması……. 121

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Deneylerde kullanılan açık kanal..... 45

Resim 3.2. Deneylerde kullanılan tabliye modeli..... 49

Resim 3.3. Deneylerde kullanılan orta ayak modeli 50

Resim 3.4. Deneylerde kullanılan köprü modeli..... 51

Resim 3.5. DISTO D810 Lazermetre..... 52

Resim 4.1. Tabliye altında meydana gelen daralma oyulması deneyi 60

Resim 4.2. Orta ayak deneyinde suyun kanaldan desarjı 65

Resim 4.3. Tabliye ve orta ayak deneylerinde suyun kanaldan deşarjı sırasında çekilmiş görüntü…….... 71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a	Akım derinliği ile H_b arasındaki fark
a_p	Köprü ayak genişliği izdüşümü
b	Döşeme, korkuluk ve kiriş yükseklikleri toplamı
B	Akarsu genişliği
C	Kohezyon
C_c	Sediment derecelendirme sayısı
C_d	Daralma katsayısı
C_u	Sediment üniformluluk katsayısı
cm	Santimetre
D	Köprü orta ayak genişliği
D*	Efektif köprü orta ayak genişliği
D_{50}	Taban malzemesinin medyan çapı
d_f	Serbestlik derecesi
F	Kareler ortalamalarının oranı
F_d	Densimetrik Froude sayısı
Fr	Froude sayısı
Fr_a	Yaklaşım akım derinliğinde Froude sayısı
Fr_b	Köprü tabliyesi altındaki Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
H_b	Oyulma öncesi düşey köprü açıklığı yüksekliği
H_t	Tabandan itibaren tabliye konumu
h_w	Tabliye üst kotundan itibaren akım derinliği
K_a	Akarsu etkisini gösteren katsayı
K_b	Memba taban pürüzlülük katsayısı
K_c	Şevlerinin pürüzlülük katsayısı
K_d	Sediment Boyutu parametresi
K_f	Tane şekil faktörü
K_y	Akım derinliği parametresi
K_s	Köprü ayağı şekil parametresi

Simgeler	Açıklamalar
K_1	Akış yoğunluğu parametresi
K_θ	Köprü ayağı aksı ile yaklaşım akımı arasındaki açının etki faktörü
K_σ	Tane derecelenme (gradasyon) faktörü
L	Köprü ayak uzunluğu
mm	Milimetre
m^3	Metreküp
q_2	Daralan kesitteki debi şiddeti
Q	Debi
Q_t	Toplam debi
Re_a	Yaklaşım akım derinliğinde Reynolds sayısı
sn	Saniye
S_0	Taban eğimi
t	Oyulma süresi
u_*	Kayma gerilmesi hızı
u_c^*	Kritik kayma gerilmesi hızı
V	Zırhlama etkisinde yaklaşım akım hızı
V_a	Yaklaşım akım hızı
V_b	Tabliye altında ortalama akım hızı
V_c	Malzemeyi harekete geçiren kritik ortalama akım hızı
y_a	Yaklaşım akım derinliği
y_d	Kumul yüksekliği
y_s	Oyulma derinliği
y_{sc}	Daralma oyulması derinliği
y_{spo}	Serbest akım durumunda ayak etrafındaki yerel oyulma derinliği
y_{spp}	Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma derinliği
$y_{sc,\ max}$	Maksimum daralma oyulması derinliği
$y_{spo,\ max}$	Serbest akım durumunda ayak etrafındaki maksimum yerel oyulma derinliği

Simgeler	Açıklamalar
$y_{spp,\ max}$	Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliği
ρ	Suyun yoğunluğu
ν	Suyun kinematik viskozitesi
ρ_s	Sediment yoğunluğu
Δ	Sedimentin göreli yoğunluğu
τ_c	Kritik taban kayma gerilmesi
τ_1	Tabanda oluşan gerilmenin tane pürüzlülük bileşeni

Kısaltmalar	Açıklamalar
AASHTO	Amerika Birleşik Devletleri Karayolları Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CSU	California State University
DSİ	Devlet Su İşleri
FWHA	Federal Highway Administration
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HEC	Hydraulic Engineering Circular
KOKH	Kök Ortalama Kare Hata
NSEK	Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı
NKOKH	Normalize Kök Ortalama Kare Hata
OH	Ortalama Hata
OYH	Ortalama Yüzde Hata
OMH	Ortalama Mutlak Hata
OKH	Ortalama Kare Hata
OMYH	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
PIV	Partical Image Velocimetry
R^2	Determinasyon Katsayısı
SG	Specific Gravity
USGS	United States Geological Survey
WSPRO	Water Surface Profile
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Akarsu köprüleri ulaşım sistemi içerisinde yer alan büyük öneme sahip sanat yapılarıdır. Bu yapıların güvenli bir şekilde işletilmesi, özellike taşkın ve deprem gibi doğal afetler sırasında başta can güvenliğinin sağlanması olmak üzere, maddi kayıpların önlenmesi veya en aza indirgenmesi ulaşım sistemin sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Akarsu köprülerinin diğer köprü ve benzeri yapılardan farkı, akım şartları dinamik olan akarsular ve nehirler üzerine inşa edilmeleridir. Bu durum akarsu köprülerinin tasarımında statik ve dinamik etkilerin yanı sıra hidrolik etkilerin de göz önüne alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Köprünün stabilitesini sağlayan orta ve kenar ayaklar çoğu zaman akım ile temas halinde olduğundan bu elemanlar etrafında meydana gelebilecek öngörülmemiş aşırı oyulmalar nedeniyle köprünün stabilitesi risk altına girebilmektedir. Bu durum can ve mal kayıplarına yol açabilmekte ve ulaşım sisteminin güvenli ve ekonomik kullanımını önemli ölçüde sekteye uğratabilmektedir. Yapı-su-zemin etkileşiminin yeterince değerlendirilmemesi sonucunda yapısal açıdan çok sağlam olan bir akarsu köprüsü, şiddetli taşkın sonucunda ciddi hasara uğrayabilmekte ve hatta yıkılabilmektedir. Özellikle yerleşim yerlerinin yoğun olduğu bölgelerde akarsuları geçen ve yoğun trafik yükü bulunan köprülerde bu durum daha hayati bir boyut kazanmaktadır.

Yapılan istatistiksel çalışmalar ve değerlendirmeler, köprülerde meydana gelen yıkılma veya hasarların çoğunun oyulma sebebiyle olduğunu göstermiştir. Oyulma mekanizması çok karmaşık olup bir çok parametreye bağlı olarak gelişmektedir. Böylesine karmaşık bir akış-sediment hareketini analitik metodlarla tahkik etmek oldukça zordur. Bu da sistemlerin çözüm aşamalarında ilgili parametrelerin her zaman basite indirgenmesini gerektirmektedir (Yanmaz, 2002). Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda da ilgili değişkenlerin bir bölümü ihmal edilerek karmaşık akım ve oyulma mekanizması basitleştirilmekte ve böylece ampirik bağıntılar elde edilmektedir. Bu nedenle günümüzde evrensel nitelik taşıyan, farklı akım şartlarını karşılayan bir hesap yöntemi oluşturulamamıştır. Günümüzde laboratuvar ve sayısal benzeşim yöntemleriyle yapılan çalışmalarda bazı kabuller yapılarak yaklaşımlar geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Dünyada ve ülkemizde bahsi geçen oyulmalar neticesinde akarsu köprülerinde her yıl birçok yıkılma ve hasar felaketleri meydana gelmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Karayolları

Birliği'nce bu ülkede her yıl ortalama 50 köprünün hidrolik etkenlerle yıkıldığı belirtilmektedir (AASHTO, 1998). Shirhole ve Holt (1991) tarafından yürütülmüş bir çalışmada 1950 yılından itibaren Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D) yıkılan 823 köprüden %60'ının hidrolik etkenlerle yıkıldığı belirtilmiştir. Lagasse, Zevenbergen, Schall ve Clopper (2001) tarafından yapılan çalışmaya göre ise Şubat 1998 itibariyle 66000 akarsu köprüsünün orta ve kenar ayaklar etrafındaki oyulma problemine karşı hassas olduğu, 17000 kadarının ise oyulma problemine karşı kritik durumda olduğu tespit edilmiştir. Hasara duyarlı köprülerin temelleri sürekli gözlem altında tutulmakta, köprü ve çevresinde gerekli onarım çalışmaları sürdürülmektedir. Van Leeuwen ve Lamb (2014) tarafından yapılan araştırmada ise 1846-2013 yılları arasında Birleşik Krallık'da oyulma kaynaklı 140 demiryolu köprüsünün yıkıldığı belirtilmektedir.

Ülkemizde de her yıl çok sayıda akarsu köprüsünde hasar veya yıkılma olayları meydana gelmektedir. Bu felaketlerin birçoğunun özellikle taşkın zamanlarda ayaklar etrafında artan oyulma miktarıyla ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Geçtiğimiz yıllara ait zarar gören ve yıkılan köprülerden birkaçı Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Akarsu köprülerini etkileyebilecek hidrolik etkenler arasında köprü membasında ve köprü ayakları etrafında aşırı kabarma, köprü ayakları arasında sediment ve atık malzeme birikmesi, tabanda ve köprü ayakları etrafında artan oyulma miktarı, köprü açıklığında hidrolik sıçrama oluşması, vb. olaylar sıralanabilir (Yanmaz, 2002).

Köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulmalar üç grup halinde sınıflandırılabilir. Bunlar; nehir yatağının uzun ve kısa dönemli taban seviyesindeki alçalması, daralma oyulması ve yerel oyulmalardır.

Çizelge 1.1. Yıkılan ve zarar gören köprüler

Köprü	Lokasyon	Tarih	Sebep	Sonuç
Araklı,Of,Torul ilçe köprüleri	Trabzon-Türkiye	1990	Düşey ve yatay daralma	2640m duvar,1480m yol ve 2 köprü yıkıldı.
Solaklı Dere köprüleri	Trabzon,Rize-Türkiye	2005	Köprü ayaklarında oyulmalar	Solaklı deresindeki tüm köprüler yıkılmıştır.
İngiliz dönemi köprüleri	Mumbai,Hindistan	2016	Taşkın debisi kaynaklı oyulmalar	29 ölü. Köprü ağır hasar gördü.
Ünye, Fatsa sahil yolu köprüleri	Ordu,Türkiye	2018	Sel afeti kaynaklı oyulmalar	Toplamda 8 köprü yıkıldı.
Bishopsford köprüsü	Londra,İngiltere	2019	Köprü ayaklarında yerel oyulmalar	Köprüde ağır hasar meydana geldi
Batı Karadeniz sel felaketi	Kastamonu, Sinop,Bartın-Türkiye	2021	Meydana gelen daralma oyulması ve yerel oyulmalar	82 ölü,229 yaralı,5 köprü yıkıldı, 3 köprü ise ağır hasarlı
Kastamonu Akçay köprüleri	Kastamonu,Türkiye	2022	Meydana gelen daralma oyulması ve yerel oyulmalar	4 köprü yıkıldı.
Kastamonu İnebolu köprüleri	Kastamonu,Türkiye	2022	Meydana gelen daralma oyulması ve yerel oyulmalar	2 köprü yıkıldı.
Giresun Dereli köprüleri	Giresun,Türkiye	2022	Ani kar erimesi ve sağanak sonucu artan oyulmalar	1 köprü yıkıldı,1 köprü ağır hasar gördü

Bu araştırma kapsamında akarsu köprüleri ayaklarında meydana gelen daralma ve yerel oyulmalar birlikte incelenmiştir. Toplamda 36 adet deney Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği hidrolik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Araştıma kapsamında tamamlanmış olan deneyler üç gruba ayrılmıştır. Laboratuvar ortamında temiz su halinde, ilk olarak kısmi basınçlı ve tam basınçlı (savak tipi) akım durumlarında ayağı olmayan köprü tabliyesi altında, kanal tabanında meydana gelen oyulma çukuru üzerinde etkili olan akım ve sediment parametreleri incelenmiştir. İkinci olarak yine temiz su halinde, serbest akım durumunda silindirik orta ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma çukuru, çukur şekli ve derinliği üzerinde etkili olan parametreler incelenmiştir. Üçüncü ve son deneysel grupta temiz su ve basınçlı akım halinde orta ayak etrafında meydana gelen oyulma çukuru incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca basınçlı akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulma, daralma oyulması ve yerel oyulma bileşenlerinin de ayrı ayrı incelenmesiyle akım-ayak-tabliye etkileşimi değerlendirilmiştir. Böylece basınçlı akım durumunda orta ayaklarda daha gerçekçi bir yaklaşımla oyulma çukuru derinliği hesaplanarak köprü ayaklarının ve temellerinin boyutlandırma esaslarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmada hedeflenen amaçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Basınçlı akım durumunda meydana gelen yerel ve düşey daralma oyulmalarının ayrı ayrı ve birlikte incelenerek toplam oyulmayı nasıl etkilediğinin belirlenmesi,
- Kanal tabanında oluşan oyulma çukuru şeklini ve derinliğini etkileyen parametrelerin incelenmesi ve değerlendirilmesi,
- Çalışma bulgu ve sonuçlarının literatürde bulunan araştırmalarla karşılaştırılması.

İkinci bölümde, köprü tabliyesi altında meydana gelen sediment hareketi ve oyulma çukuru ile etkili olan mekanizmalar, orta ayakların sebep olduğu yerel oyulmalar ile ilgili yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca literatürde konuyla ilgili mevcut ampirik yaklaşımlar verilmiştir.

Üçüncü bölümde, araştırma kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında elde edilmiş olan deney verileri kullanılarak oyulma çukuru derinliği ile etkili olan parametreler incelenmiş, verilerden elde edilen bulgular ve gözlemler değerlendirilmiştir. Ayrıca yapılan laboratuvar çalışması sonucunda elde edilen

veriler kullanılarak günümüzde kılavuz niteliği taşıyan ve çoğu ülkede yaygın olarak kullanılan yönetmeliklerin baz aldığı yaklaşımlar değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, literatürdeki mevcut ampirik yaklaşımlar istatiksel olarak değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde, tez kapsamında elde edilmiş olan deney verileri kullanılarak oyulma çukuru derinliği tahmini için ampirik bir bağıntı önerilmiştir.

Yedinci bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar ve bundan sonra gerçekleştirilmesi önerilen çalışmalar verilmiştir.

2. OYULMA MEKANİZMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Genel Tanımlar

Genel olarak oyulma kavramı, akımın tabandan ya da köprü ayakları civarından taban malzemesi koparması ve sürüklemesi olarak ifade edilmektedir (Richardson ve Davis, 2001). Cheremisinoff, Cheremisinoff ve Cheng (1987) tarafından yapılmış olan bir diğer yaklaşımda oyulma, köprü gibi nehir yapılarının temelini açığa çıkarma eğiliminde olacak şekilde suyun aşındırması ve nehir yatağı seviyesinin alçaltılması olarak tanımlanmıştır. Araştırmacılara göre oyulmanın sebebi ya normal akış durumu ya da taşkın ve sel gibi afet olaylarıdır. Belirli bir doğal taban seviyesinden itibaren oluşan alçalma miktarı oyulma derinliği olarak isimlendirilmektedir.

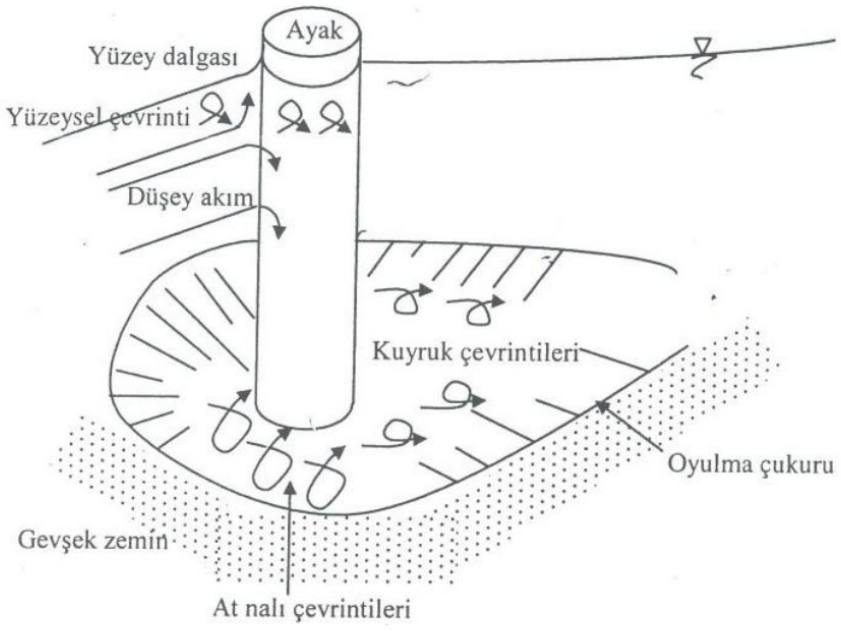
Bir akarsu köprüsünün ekonomik olarak tasarlanmasında en önemli kriterlerden biri, akımın en kısıtlı olduğu yerde mümkün olan minimum açıklığın seçilmesidir. Köprünün varlığı akıma bir rahatsızlık vermekte, bu rahatsızlık akım alanında düşeyde ve yatayda daralma olarak isimlendirilmektedir. Bu daralma sonucunda akım büyüklüğünde önemli bir artış meydana gelebilmektedir. Bunun sonucu olarak köprü açıklığında ve civarında oyulma oluşabilmektedir. Köprü temelindeki oyulmanın başlıca nedenleri akım şiddetindeki artış, köprü kesitinde değişen akım dinamiği, köprü elemanları civarında oluşan girdaplar ve çevrintiler, köprü elemanları ve yatağın yakınında meydana gelen aşırı türbülans gibi faktörlerdir (Yanmaz, 2002). A.B.D'de köprü hasarlarının ve yıkılma olaylarının %60'ının, orta ayak ve kenar ayak oyulması dahil olmak üzere hidrolik sebeplerden kaynaklandığı belirlenmiştir (Jau-Yau ve diğerleri, 2008).

Taban seviyesi alçalması doğal nedenlerle (akarsu morfolojik özellikleri, şev ve stabilite problemi ve yanal erozyonlar gibi) uzun dönemde gerçekleşebilirken, insan kaynaklı nedenler (akarsu regülasyonları, çeşitli inşaatlar, yatak malzemesinin çekilmesi, su çekilmesi) kısa ve orta dönemde gerçekleşebilmektedir (Bridge Scour Manual, 2013).

Akarsu yatağındaki oyulmaların, akarsu yatak kesitindeki düşey veya yanal yöndeki daralmalar sonucunda meydana gelmesine daralma oyulması denir. Köprü açıklığının dar olması veya dışardan etkiyen nedenlerle (köprü açıklığında sediment veya atık madde depolanması) daralması sonucu meydana gelen oyulmalardır. Toplam oyulma üzerindeki

etkisi genellikle diğer bir oyulma türü olan yerel oyulmalardan daha azdır. Akım alanının 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).

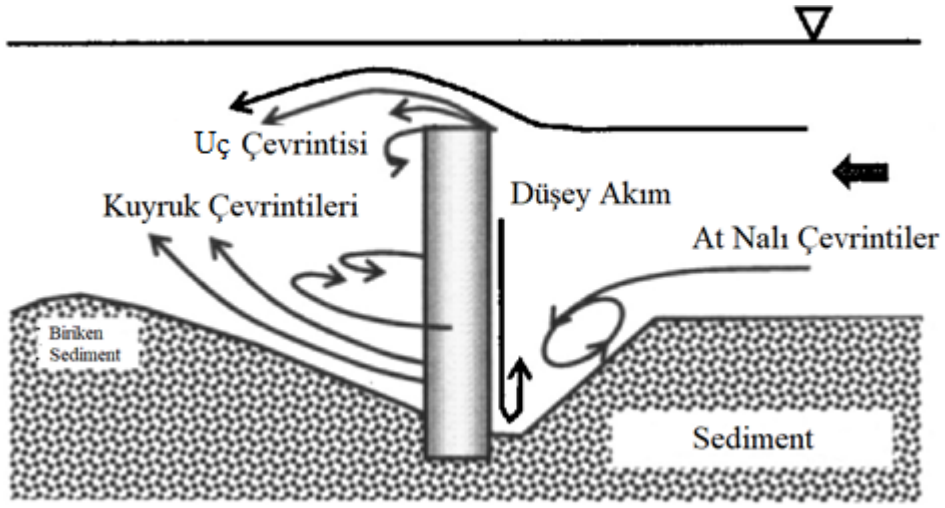
Akarsu yatağına yerleştirilmiş bir köprü ayağının etrafında oluşan çevrintiler nedeniyle meydana gelen oyulmaya ise yerel oyulma denir. Akım alanına yerleştirilen köprü ayağı akım çizgilerinde sapmalar meydana getirir ve bunun neticesinde ayak etrafındaki hız ve basınç alanlarında değişiklikler oluşur. 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 (Bridge Scour Manual, 2013). Yerel oyulma ile ilgili literatürde çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Şekil 2.1'de yerel oyulma ve oluşturduğu çevrintiler gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Serbest akım durumunda bir köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve yerel oyulma (Yanmaz, 2002)

Ayrıca Şekil 2.2'de, serbest akımda meydana gelen çevrintilere ek olarak basınçlı akım durumunda meydana gelen uç çevrintisi de görülmektedir. Orta ayağın hemen üst bölgesinde

meydana gelen bu çevrinti sonucu at nalı çevrintilerinin ve kuyruk çevrintilerinin etkilerinin serbest akıma kıyasla azaldığı bilinmektedir (Dey, Raikar ve Roy, 2008).

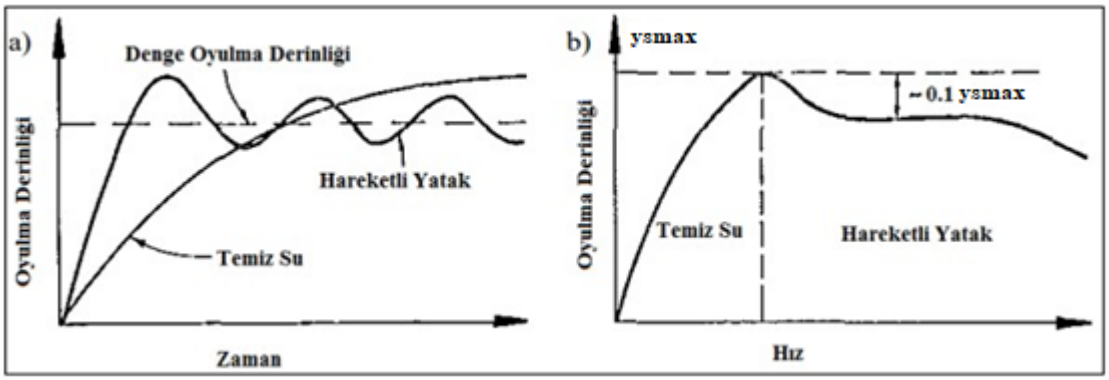


Şekil 2.2. Basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafındaki çevrintiler (Dey ve diğerleri, 2008)

2.2. Farklı Akım Koşullarında Oyulma Mekanizması

Farklı akım koşullarında meydana gelen oyulmalar iki grupta incelenebilir. Kayma gerilmesi hızının (u*), kritik kayma gerilmesi hızına (u_c*) oranı (u*/ u_c*) veya ortalama yaklaşım akım hızının (V_a), kritik ortalama akım hızına (V_c) oranı (V_a/V_c) olan akım yoğunluğu, akıma bağlı oyulma rejiminin belirlenmesinde kullanılır. Temiz su oyulması bu oranın 1'den küçük veya eşit olması durumunda ($V_a/V_c \leq 1$), hareketli taban oyulması ise bu oranın 1'den büyük olması durumunda ($V_a/V_c > 1$) gerçekleşir. Temiz su oyulması, oyulma alanının membasındaki yatak malzemesinin hareket etmediği ve oyulma çukuruna membadan yatak malzemesinin gelmediği durumda gerçekleşen oyulma türüdür. Bu durumda sedimentin ilk hareketini sağlayacak yatak kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesine eşit ya da küçüktür ($\tau_0 \leq \tau_c$). Temiz su oyulmasında maksimum oyulma derinliği, oyulmaya neden olan akımın artık oyulma çukurundan tane hareket ettiremediği ve oyulma derinliğinin değişmediği durumda elde edilir. Hareketli taban oyulması ise, akım tarafından yaklaşım kanalındaki sedimentin mansaba doğru taşınması durumunda gerçekleşen oyulma türüdür. Bu durumda ilk hareketi sağlayacak yatak kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesinden büyüktür ($\tau_0 > \tau_c$). Denge oyulma derinliğine, membadan oyulma çukuruna giren ile çıkan sediment miktarı eşit olduğunda ve oyulma çukuru geometrisinin değişmediği durumda ulaşılır. Temiz su oyulması ile hareketli taban oyulması ayrımında önemli fark; meydana gelen oyulma

derinliğinin zamanla ve akım hızı ile değişiminin farklı olmasıdır. Bu ilişki şematik olarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Hareketli taban oyulması durumunda, oyulma derinliği zamanla hızlıca artar ve sonra denge oyulma derinliği veya maksimum oyulma derinliği denilen ortalama bir değere ulaşıncaya kadar dalgalanır. Temiz su oyulmasında ise oyulma derinliğinin zamanla değişimi nispeten daha yavaştır ve maksimum oyulma derinliğine doğru asimtotik yaklaşır. Aynı köprü ayağı ve aynı sediment ile hareketli tabanda ulaşılan maksimum oyulma derinliği, temiz su durumunda ulaşılan maksimum oyulma derinliğinden daha azdır (Arved, Raudkivi ve Ettema, 1983).

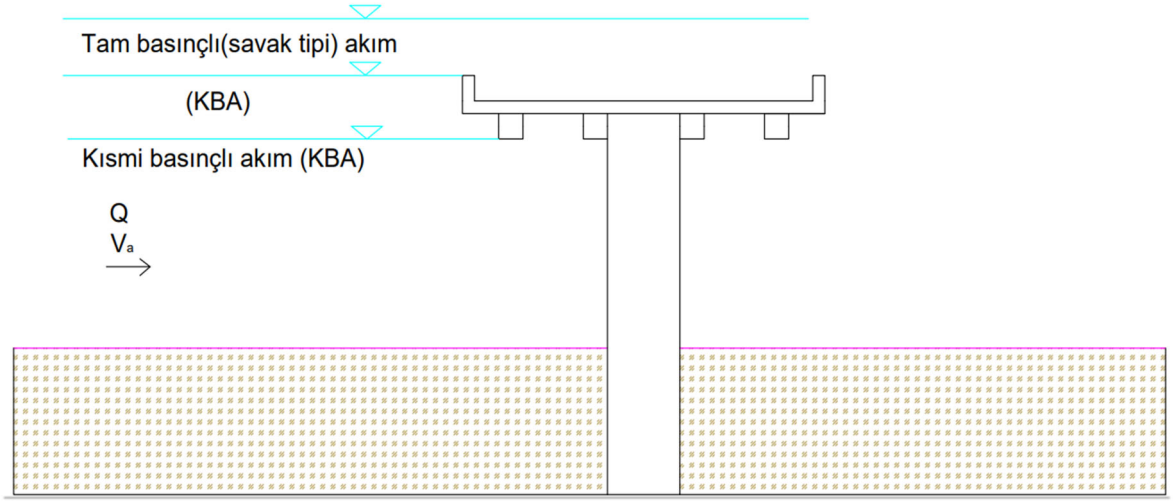


Şekil 2.3. Oyulma derinliğinin zaman ve hız parametrelerince incelenmesi (Arved ve diğerleri, 1983)

2.3. Basınçlı ve Savak Tipi Akımlar

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 olabilmektedir. Bu tip akım basınçlı akım olarak tanımlanmaktadır. Basınçlı akım da kısmi basınçlı akım ve tam basınçlı akım olarak tanımlanabilir. Taşkın debisinin artmaya devam etmesi durumunda su seviyesi köprü kirişlerini aşarak köprü tabliyesine kadar ulaşabilir. Kısmi basınçlı akım durumu olan bu durum 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 tam basınçlı akım veya savak tipi akım denmektedir. Şekil 2.4'te her iki akım tipi durumu gösterilmiştir. Her iki akım koşulu altında köprü altındaki akarsu yatağında oluşabilecek sediment hareketi önemli ölçüde etkilenmektedir. 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 (Sturm, Ettema ve Melville, 2011). Bu nedenle basınçlı akım koşullarında meydana gelecek sediment hareketinin ve oyulmada etkili olan parametrelerin araştırılması köprü stabilitesi bakımından son derece önemli hale gelmektedir (Demir, 2018).

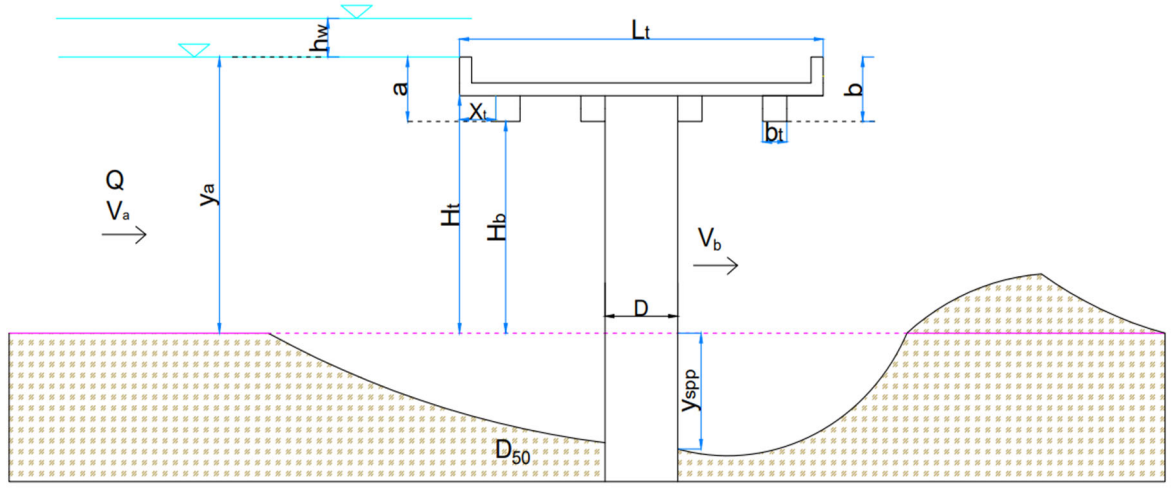


Şekil 2.4. Kısmi basınçlı akım ve savaklı akım durumları

Basınçlı akıma maruz kalmış, orta ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen taban oyulmasının başlıca nedeni sedimenti harekete geçiren kayma gerilmesindeki artıştır. Bunun nedeni kanal içerisindeki serbest akım seviyesinin tabliye kirişlerini aşmasıyla basınçlı akımın oluşması ve ıslak kesit alanının daralmasına bağlı olarak tabliye altından geçen akımın hızının artmasıdır. Ayrıca tabliye memba ve mansabında çevrintiler ile membada biriken su nedeniyle kabarma meydana gelmektedir. Kanal tabanındaki kayma gerilmesinin de bu bölgede artmasıyla tabanda sediment hareketi başlamaktadır. Kesitin daraldığı bölgeden taban malzemesinin taşınmasıyla köprü tabliyesinin altındaki akım alanı da artmaktadır. Bunun sonucunda akım hızı ve kayma gerilmeleri azalarak sediment hareketi gittikçe yavaşlamakta ve sonrasında durmakta, böylece oyulma çukuru dengeye ulaşmaktadır.

2.4. Boyut Analizi

Köprü ayağı ve tabliyenin birlikte olması halinde meydana gelen oyulmalar, birden çok etkenin neden olduğu karmaşık bir oluşumdur ve bu nedenle etkili olan parametre sayısı oldukça fazladır. Olayın karmaşıklığından dolayı yapılan çalışmalarda çoğunlukla parametrelerin bir bölümü ihmal edilmektedir. Oyulma çukurunu etkileyen tüm parametreler kütle (M), uzunluk (L) ve zaman (T) cinsinden aşağıda verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.5'te köprü ayağı ve tabliye parametreleri ile akım parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Köprü ayağı ve tabliye parametreleri

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

V_c : Sedimenti harekete geçiren kritik ortalama akım hızı (LT^{-1})

θ : akım ve ayak ekseni arasındaki açı (-)

u_* : kayma gerilmesi hızı (LT^{-1})

Akarsu parametreleri

S_0 : taban eğimi (-)

B : akarsu genişliği (L)

C_d : daralma katsayısı (-)

K_a : akarsu güzergâhı etkisini gösteren katsayı (-)

K_b : membada taban pürüzlülüğünü gösteren katsayı (-)

K_c : akarsu şevlerinin pürüzlülüğünü gösteren katsayı (-)

K_d : akarsu en kesit etkisini gösteren katsayı (-)

Taban malzemesi parametreleri

ρ_s : tane yoğunluğu (ML^{-3})

D_{50} : tane medyan çapı (L)

σ_g : tane dağılımının geometrik standart sapması (-)

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

K_f : tane şekil faktörü (-)

Köprü ayağı ve tabliye parametreleri

D : ayak genişliği (L)

K_s : ayak şekil faktörü (-)

K_Θ : köprü ayağı aksı ile yaklaşım akım arasındaki açının etki faktörü (-)

h_w : tabliye üstünden savaklanan su yüksekliği (L)

H_b : kirişin en alt noktası ile ilk taban seviyesi arasındaki mesafe (L)

a : yaklaşım akım derinliği ile H_b arasındaki fark (L)

b : döşeme, korkuluk ve kiriş yükseklikleri toplamı (L)

b_t : kirişin genişliği (L)

b_n : kiriş sayısı (-)

t_1 : döşeme ile korkuluk yüksekliği (L)

L_t : tabliye genişliği (L)

H_t : tabandan itibaren tabliye konumu (L)

X_t : kirişin tabliyedeki konumu (L)

y_{spp} : oyulma çukuru derinliği (L)

Zaman parametresi

t : akım süresi (T)

Basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında orta ayak etrafında oyulma mekanizmasını etkileyen bu parametreler Eş.2.1'de ifade edilmiştir:

$$f(y_{spp}, a, g, y_a, V_a, V_b, V_c, u^*, \rho, \nu, S_0, B, C_d, K_a K_b, K_c, K_d, K_s, K\theta, \rho_s, D_{50}, D, \sigma_g, C, K_f, b, b_t, b_n, t_1, L_t, H_t X_t, t, h_w, H_b) = 0 \quad (2.1)$$

Eş. 2.1'den görüldüğü üzere oyulma mekanizmasını etkileyen çok sayıda parametre vardır. Birçok değişkenden oluşan bu genel ifadeyi daha basit bir hale dönüştürmek amacıyla aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

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

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

Köprü tabliyesi ve ayakla ile ilgili kabuller:

- Kiriş genişliği (b_t), kiriş sayısı (b_n), tabliye kalınlığı ile korkuluk yüksekliği (t_1), tabliye genişliği (L_t), tabandan itibaren tabliye konumu (H_t) ve kirişin tabliyedeki konumu (X_t) sabit tutulmuştur.

Oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelerle ilgili yapılmış olan kabuller doğrultusunda Eş. 2.1 aşağıdaki bağıntıya dönüşmüştür.

$$f\left(y_{spp}, g, v, y_a, H_b, V_a, V_b, V_c, D_{50}, D, h_w, a, \rho_s, \rho, K_s, K_\theta, \sigma_g\right) \quad (2.2)$$

Boyutsuz parametreler Buckingum π-teoremi kullanılarak elde edilmiş olup, tekrar eden parametreler ρ, V_a, H_b olarak seçilmiştir. Böylece Eş. 2.3 elde edilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = f\left(Re, Fr_a, \frac{y_a}{H_b}, \frac{a}{H_b}, \frac{V_b}{V_a}, \frac{V_a}{V_c}, \frac{D_{50}}{H_b}, \frac{h_w}{H_b}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{H_b}{D}, K_s, K_\theta, \sigma_g\right) \quad (2.3)$$

Froude ve Reynolds sayılarının matematiksel ifadesi dikdörtgen kesite sahip kanallar için Eş. 2.4 ve Eş.2.5'te verilmektedir.

$$Fr_a = \frac{V_a}{\sqrt{g y_a}} \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{V_a y_a}{v} \quad (2.5)$$

Sedimenti harekete geçiren kritik ortalama akım hızı Neill (1973) tarafından önerilmiş olan ve Eş. 2.6'da verilen bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$V_c = 1{,}58[(SG-1)gD_{50}]^{0{,}5}\left(\frac{y_a}{D_{50}}\right)^{0{,}167} \quad (2.6)$$

Burada SG sedimentin özgül ağırlığı olup mevcut çalışmada 2,65 olarak alınmıştır.

Eşitlikte yer alan boyutsuz (V_a/V_b) parametresi köprü açıklığı yüksekliği H_b ile yaklaşım akım derinliğine bağlı olduğundan ihmal edilmiştir (Baduna Koçyiğit ve Karakurt, 2019). Taban malzemesi ortalama tane çapı D_{50} olarak tek bir malzeme kullanıldığından sabit tutulmuştur. ρ_s/ρ oranının ise çukur oluşumuna çok az etkisi olduğundan ihmal edilmiştir (Oliveto ve Hager, 2002).

Çalışmada olduğu gibi tamamen türbülanslı akım durumunda Reynolds sayısının etkileri ihmal edilebilir (Abed, 1991; Franzetti, Malavasi ve Piccinin, 1994). Ayrıca taban malzemesi olarak kullanılan sedimentin D_{50} değeri 0,8 mm olduğu için H_b ile kıyaslandığında değeri çok küçük kalmaktadır. Bu nedenle D_{50}/H_b parametresi de ihmal edilmiştir. Çalışmada hem H_b hem de D sabit olduğundan H_b/D oranı da ihmal edilmiştir. Böylece Eş. 2.3 , Eş. 2.7'ye indirgenmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = f\left(Fr_a, \frac{y_a}{H_b}, \frac{h_w}{H_b}, \frac{a}{H_b}, \frac{V_a}{V_c}, K_s, K_\theta, \sigma_g\right) \quad (2.7)$$

Bu çalışmaya benzer sediment modelleme çalışmalarında Froude sayısı yerine D_{50} parametresini ihtiva eden densimetrik Froude sayısı kullanılmaktadır. Densimetrik Froude sayısı Eş. 2.8'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_d = \frac{V_a}{\sqrt{\Delta g D_{50}}} \quad (2.8)$$

Böylece densimetrik Froude sayısı, köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmayı ifade eden bağıntılarda sıklıkla kullanılmakta olan akım şiddeti V_a/V_c parametresine indirgenebilmektedir. Dolayısıyla Froude sayısı da ihmal edilmiştir. a/H_b parametresi suyun köprü tabliyesi üzerinden savaklanamadığı ve akımın kısmi basınçlı olarak tanımlandığı akım durumunda, h_w/H_b parametresi ise suyun tabliye üzerinden savaklandığı savak tipi akım durumunda önem kazanmaktadır.

Yukarıda açıklanan kabuller sonrasında Eş. 2.7, Eş. 2.9'daki verilen bağıntıya indirgenmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, \frac{h_w}{H_b}, \frac{a}{H_b}, \frac{V_a}{V_c}, K_s, K_\theta, \sigma_g\right) \quad (2.9)$$

Çalışma kapsamında K_s, K_θ, σ_g değerleri sabit tutulduğundan bu parametreler de Eş. 2.9'da ihmal edilmiştir. Böylece bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, \frac{h_w}{H_b}, \frac{a}{H_b}, \frac{V_a}{V_c}\right) \quad (2.10)$$

Boyut analizi sırasında seçilmiş olan tekrar eden parametreler ρ, V_a, D olarak seçildiğinde oyulmayı ifade eden bağıntı

$$\frac{y_{spp}}{D} = f\left(Re, Fr_a, \frac{y_a}{D}, \frac{V_b}{V_a}, \frac{V_a}{V_c}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{h_w}{D}, \frac{a}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{H_b}{D}, K_s, K_\theta, \sigma_g\right) \quad (2.11)$$

şeklinde elde edilir. Yukarıda bahsedilmiş olan kabuller yapıldığında Eş. 2.11, Eş. 2.12'ye indirgenebilir.

$$\frac{y_{spp}}{D} = f\left(\frac{V_a}{V_c}, \frac{y_a}{D}, \frac{h_w}{D}, \frac{a}{D}\right) \quad (2.12)$$

2.5. Literatür Araştırması

Çalışma kapsamında, literatür araştırması üç bölümde incelenmiştir. İlk bölümde serbest akım durumunda köprü ayakları etrafındaki yerel oyulma derinliği tahmini için yapılmış olan çalışmalar ile araştırmalar sonucu önerilen bağıntılar incelenmiştir. İkinci bölümde köprü tabliyesinin düşey yönde akımda daralma oluşturması sebebiyle meydana gelen basınçlı akım durumunda yapılan araştırmalar incelenmiştir. Ayrıca literatürde bulunan sınırlı sayıdaki savak tipi akımlarla ilgili çalışmalar incelenmiştir. Son bölümde ise daralma ve yerel oyulmanın eş zamanlı incelendiği basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulmayla ilgili çalışmalar irdelenmiştir.

2.5.1. Köprü orta ayaklarında meydana gelen yerel oyulmalarla ilgili çalışmalar

Akarsularda sediment hareketi esnasında tabanda belirli bölgelerde oyulmalar belirli bölgelerde de yığılmalar meydana gelmektedir. Akım hızının ve dolayısıyla tabandaki kayma gerilmesinin arttığı bölgelerde oyulmalar meydana gelirken, akımın taşıma kapasitesinin düştüğü bölgelerde tabanda yığılmalar yani depolanmalar gözlemlenmektedir. Orta ayak civarında meydana gelen yerel oyulma mekanizması, ayağın memba tarafındaki düşük hızlı akım ve ayak etrafındaki çevrintiler sebebiyle meydana gelmektedir. Akım ayak yüzeyine yaklaşırken yavaşlamakta ve ayağın memba yüzünde sıfır olmaktadır. Bu da ayak yüzünde basıncın artmasına neden olmaktadır. Bu basınç değerleri yavaşlamanın en yüksek olduğu akım yüzeyinde en üst seviyeye ulaşırken tabana doğru azalmaktadır. Hızın akım yüzeyinden tabana doğru azalması sebebiyle, ayak yüzeyindeki basınç tabana doğru azalan basınç eğrisi şeklinde olmaktadır. Tabana doğru oluşan bu basınç farkından dolayı ayaklarda aşağıya doğru düşey bir akım meydana gelmektedir. Meydana gelen düşey akım tabana ulaşmakta ve ayak tabanı yakınında oyulmaya neden olmaktadır. Yatağa çarpan bu düşey akım oyulmanın en önemli nedenidir (Melville ve Raudkivi, 1977). Ayakların varlığından dolayı meydana gelen çevrintiler, ayak tabanı etrafındaki yatak malzemesini sürüklemektedir (Melville ve Coleman, 2000). Düşey akım, yaklaşan yatay akımla etkileşime girerek karmaşık çevrintili bir akım meydana getirmekte ve devamlı dönerek oyulma çukurunu oluşturmaktadır. Bu çevrinti at nalına olan benzerliği sebebiyle at nalı

çevrintisi olarak adlandırılmakta ve ayak kenarlarından mansaba ulaşmaktadır. (Breusers, Nicollet ve Shen, 1977). Oyulma derinliği belirli bir büyüklüğe ulaşınca kayma gerilmelerinin etkisi azalmaya başlar. Kayma gerilmesinin malzemeyi harekete geçiren kritik kayma gerilmesinin altına düşmesiyle oyulma çukurunun hacmi sabit kalır ve denge durumuna ulaşmış olur (Yanmaz, 2002). Ayak tabanının yakınlarında at nalı çevrintisinin dışında kuyruk çevrintileri olarak adlandırılan ayağın mansabında oluşan düşey çevrintiler de vardır. Ayak kenarlarında akımın ayrışması sonucu meydana gelirler (Dargahi, 1990). Bu kuyruk çevrintileri stabil değildir ve dönüşümlü olarak ayağın bir kenarından diğer kenarına döner (Şekil 2.1). At nalı çevrintileri kadar etkili olmamakla birlikte ayakların mansap bölgesinden taban malzemesini aşındırır. Kuyruk çevrintilerinin yoğunluğu mansaba doğru büyük ölçüde azalır.

Köprü orta ayaklarında maksimum oyulma derinliği tahmini için önerilmiş ilk çalışmalar ve yaygın olarak bilinen bazı bağıntılar Çizelge 2.1'de kronolojik sırayla verilmiştir. Bu çizelgede kullanılan parametreler; serbest akım durumunda ayak etrafındaki maksimum yerel oyulma derinliği ($y_{spo,max}$), yaklaşım akım derinliği (y_a), köprü orta ayak genişliği (D), malzemeyi harekete geçiren kritik ortalama akım hızı (V_c), yaklaşım akım hızı (V_a), Froude sayısı (F_r), taban malzemesinin medyan çapı (D_{50}), köprü ayak genişliği izdüşümü (a_p), köprü ayağı şekil parametresi (K_s) ve köprü ayağı aksı ile yaklaşım akımı arasındaki açının etki parametresi (K_Θ) olarak tanımlanmaktadır.

Günümüzde literatürde en yaygın olarak kullanılmakta olan ve bu çalışmada incelenen bağıntılar ise sırasıyla detaylı olarak verilmiştir. Bu bağıntılardan ilki Melville ve Sutherland (1988) tarafından önerilmiş, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı şekillerdeki köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su ve hareketli taban oyulmalarının maksimum derinliğini veren bağıntıdır. Araştırmacılar, yerel oyulma ile ilgili literatürdeki çalışmalarda elde edilmiş laboratuvar deneylerine ait parametreleri dikkate alarak söz konusu ampirik bağıntıyı geliştirmişlerdir. Çalışmada K_y, K_s ve K_v parametreleri için eğri abakları oluşturulmuştur. Çalışma neticesinde Eş. 2.13 önerilmiştir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = K_1 K_y K_v K_s K_\sigma K_\Theta \tag{2.13}$$

Çizelge 2.1. Orta ayaklarda maksimum oyulma derinliği bağıntıları

Araştırmacı (Yıl)	y_a/D	V_a/V_c	D_{50} (mm)	Bağıntı
Inglis (1949)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{y_{spo,max}+y_a}{D} = 2{,}32\left[\frac{q^{2/3}}{D}\right]^{0{,}78}$
Ahmad (1951)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max} + y_a = K_s q_2^{2/3}$
Laursen (1958)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{D}{y_a} = 5{,}5\frac{y_{spo}}{y_a}\left[\left(\frac{y_{spo,max}}{11{,}5y_a}+1\right)^{1{,}7} - 1\right]$
Chitale (1962)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{y_{spo,max}}{y_a} = 6{,}65F_r - 0{,}51 - 5{,}49F_r^2$
Laursen (1963)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{D}{y_a} = 5{,}5\frac{y_{spo,max}}{y_a}\left[\frac{\left(\frac{y_{spo,max}}{11{,}5y_a}+1\right)^{7/6}}{\left(\frac{\tau_1}{\tau_c}\right)^{0{,}5}} - 1\right]$
Larras (1963)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max} = 1{,}05K_sK_\Theta D^{0.75}$
Neill (1964)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max} = 1{,}5D^{0.7}{y_a}^{0{,}3}$
Breusers (1965)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max} = 1{,}4D$
Shen, Schneider ve Karaki (1969)	0,76~2.3	1,19~5,14	0,2~3	$y_{spo,max} = 0{,}000223\left(\frac{V_a}{v}\right)^{0{,}619}$
Coleman (1971)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{V_a}{\sqrt{2gy_{spo}}} = 0{,}6\left(\frac{V_a}{D}\right)^{0{,}9}$
Hancu (1971)	0,76~2	0,68~1,76	0,2~3	$\frac{y_{spo,,max}}{D} = 2{,}42\left(\frac{2V_a}{V_c}-1\right)\left(\frac{V_c^2}{gD}\right)^{1/3}$
Neill (1973)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max} = K_sD$
Breusers ve diğerleri (1977)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{y_{spo,max}}{D} = f\left(\frac{V_a}{V_c}\right)\left[2tanh\left(\frac{y_a}{D}\right)\right]K_sK_\Theta$
Chitale (1988)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max}=2{,}5D$
Froehlich (1988)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{y_{spo,max}}{D} = 0{,}32K_sF_r^{0,2}\left(\frac{a_p}{D}\right)^{0{,}62}\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0{,}46}\left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{0{,}08}+1$
Günyaktı (1988)	0,33~3	1~3	0,2~3	$\frac{y_{spo,max}}{D} = 1{,}183\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0{,}471}$
Ansari ve Qadar (1994)	0,33~3	1~3	0,2~3	$y_{spo,max} = 0{,}86a_p^3$ $a_p<2{,}2\ m$ $y_{spo,max} = 3{,}60a_p^{0.4}$ $a_p>2{,}2\ m$

Burada; K_I= akış yoğunluğu parametresi, K_y= akım derinliği parametresi, K_σ = tane derecelendirme katsayısı ve K_v= sediment boyutu parametresi olarak tanımlanmaktadır. Eş. 2.13'de yer alan faktörler aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

$$\left.\begin{array}{ll} \frac{V_a-(V-V_c)}{V_c} > 1 \text{ ise} & K_I = 2{,}4 \\ \frac{V_a-(V-V_c)}{V_c} < 1 \text{ ise} & K_I = 2{,}4\,\frac{V_a-(V-V_c)}{V_c} \end{array}\right\} \quad (2.13\text{ a})$$

Burada;

$$V_c = 0{,}03 D_{50}^{0.5} 5{,}75 \log\left(5{,}53\,\frac{y_a}{D_{50}}\right) \quad (2.13\text{ b})$$

$$\left.\begin{array}{ll} y_a/D > 2{,}6 \text{ ise} & K_y = 1 \\ y_a/D < 2{,}6 \text{ ise} & K_y = (y_a/D)^{0{,}255} \end{array}\right\} \quad (2.13\text{ c})$$

$$\left.\begin{array}{ll} D/D_{50} > 25 \text{ ise} & K_v = 1 \\ D/D_{50} < 25 \text{ ise} & K_v = 0{,}57 \log(2{,}24\, D/D_{50}) \end{array}\right\} \quad (2.13\text{ d})$$

K_s şekil parametresi ise silindirik orta ayaklar için 1, diğer ayakların şekline göre ise 1'den büyük değerler alır. K_s değeri 1'den küçük olmamalıdır. K_Θ ise Laursen'in (1958) çalışmalarındaki tablo yardımıyla belirlenmektedir.

Yanmaz (1989) laboratuvar ortamında bir dizi deney yapmıştır. Deneylerde silindirik ve kare şeklinde orta ayaklar kullanılmış, tek orta ayaklı, üniform taban malzemesi ve temiz su oyulması koşullarında yerel oyulma derinlikleri gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda oyulmayı boyutsuz olarak tahkik eden farklı akım ve sediment özelliklerini içeren bir abak önerilmiştir. Ayrıca çalışmada tek silindirik ve kare şeklindeki orta ayaklarda maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden bir eşitlik önerilmiş olup silindirik ve kare ayak için sırasıyla Eş. 2.14 ve Eş. 2.15'de verilmiştir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = 0{,}85\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0{,}686} \quad (2.14)$$

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = 0{,}111\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0{,}654} \quad (2.15)$$

Breusers ve Raudkivi (1991) yaptıkları çalışmada maksimum oyulma çukuru tahmini için Eş. 2.16'daki denklemi önermişlerdir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = 2{,}3K_y K_s K_v K_\sigma K_\Theta \tag{2.16}$$

Yanmaz ve Altınbilek (1991) yaptıkları çalışmada silindirik ve kare biçimindeki köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su yerel oyulma derinliklerinin zamana bağlı değişimini belirlemek amacıyla deneysel bir dizi çalışma gerçekleştirmiştir. Bu yöntem, köprü ayakları etrafındaki oyulma çukuruna sürüntü maddesi süreklilik denkleminin uygulanmasına dayanmaktadır. Çalışmada, köprü ayakları etrafındaki oyulma çukuru şeklinin zaman içerisinde neredeyse hiç değişime uğramadığını ortaya koymuştur. Değişimin hızı ise zaman geçtikçe azalan bir ivme ile devam etmiştir. Köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin zamana bağlı değişimi, oyulma çukuruna sürüntü maddesi süreklilik denkleminin uygulanması ile elde edilen diferansiyel denklemin çözülmesi ile belirlenmiştir.

Gao, Posada ve Nordin (1993) maksimum oyulma çukuru tahmini için Eş. 2.17'deki bağıntıyı önermiştir.

$$y_{spo,max} = 0{,}46K_s D^{0{,}6} {y_a}^{0{,}15} D_{50}^{-0{,}07} \left[\frac{V_a - V_c'}{V_c - V_c'}\right] \tag{2.17}$$

Burada;

$$V_c = \left(\frac{y_a}{D}\right)^{0{,}14} \left[17{,}6\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) D_{50} + 6{,}05x10^{-7}\left(\frac{10 + y_a}{D_{50}^{0{,}72}}\right)\right] \tag{2.18}$$

$$V_c' = 0{,}645\left(\frac{D_{50}}{D}\right)^{0{,}053} V_c \tag{2.19}$$

Gao ve diğerleri (1993) yaptığı deneylerde ortalama dane çapı olarak 0,21~70 mm aralığını, memba tarafındaki su yüksekliği olarak 0,5~6 m ve memba tarafındaki akım hızı olarak da 0,35~2,37 m/sn değerlerini kullanmıştır. Eş. 2.17'de verilen bağıntı Çin Halk Cumhuriyeti'nde oyulma çukuru derinliği tahmininde kullanılmakta olan denklemdir.

Richardson ve Davis (1995) maksimum oyulma çukuru tahmini için Eş. 2.20'yi önermiştir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = 2K_s K_\theta K_3 \left(\frac{y_a}{D}\right)^{0,35} F_r^{0,43} \quad (2.20)$$

Burada K_s, ayak şekil faktörü olup silindirik ayaklar için 1 alınmaktadır. K_θ, yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü olup $K_\theta = (\cos\theta + L/D \sin\theta)^{0,65}$ ile hesaplanabilir. K_θ bağıntısında kullanılan L, orta ayak uzunluğunu ifade etmektedir. K_3 ise taban şekil faktörü olup temiz su oyulması için 1,1 , küçük kum birikintileri için 1,1 ile 1,2 arasında bir değer, büyük kum birikintileri için 1,3 alınabilmektedir. Bağıntı hem temiz su hem de hareketli taban koşullarında kullanılabilmektedir. Bağıntıda yer alan parametreler geniş bir ölçekte tablolar halinde hesaplanabilmektedir. Fakat Eş. 2.20'nin tabanda taşkın sırasında oluşabilecek kumul tepelerinin varlığında kullanılmaması tavsiye edilmektedir. Ayrıca L/D =12'den büyük ayak şekilleri için de 12 değeri sabit kabul edildiğinden çok geniş açıklıklı tabliyeye sahip köprülerde K_θ parametresine dikkat edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Eş. 2.20'deki bağıntı HEC-18'in güncel olan (5.Basım) denklemi olarak da bilinmekte olup günümüzde oyulma çukuru derinliği tahmininde kullanılan en yaygın denklem olma özelliği taşımaktadır.

Richardson ve Davis (2001) yaptıkları diğer bir çalışma sonucunda maksimum oyulma çukuru tahmini için Eş. 2.21'i önermişlerdir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = 2K_s K_\theta K_3 K_4 \left(\frac{y_a}{D}\right)^{0,35} F_r^{0,43} \quad (2.21)$$

Eş. 2.21'de, Eş. 2.20'ye ilave olarak K_4, tabanda zırhlanma etkisi faktörü olup D_{50}<2 mm ya da D_{95}<20 mm durumu için 1 alınabilmektedir. Eş.2.21'deki bağıntı Colorado State University (CSU) denklemi ve HEC-18'in 4. Basımında yer alan denklem olarak da bilinmektedir.

Melville (1997) yaptığı deneysel çalışma ile maksimum oyulma çukuru derinliği tahmini için Eş. 2.22'deki bağıntıyı önermiştir. Bağıntı önerilirken Hancu (1971), Shen ve diğerleri

(1969) ile diğer birçok araştırmacının laboratuvar verileri değerlendirilmiştir. Orta ayaklarda y_a= 2 cm - 60 cm aralığında yaklaşım akım derinlikleri, V_a/V_c= 0,5 – 5,25 arasında hem temiz su hem de hareketli taban durumları, D_{50}= 0,24 mm- 5,35 mm aralığında değişken ortalama tane çapları ve D= 0,045- 0,15 m arasında değişken orta ayak çapları kullanılmıştır.

$$y_{spo,max} = K_y K_1 K_v K_s K_\Theta \tag{2.22}$$

Burada;

$$\left.\begin{array}{ll} K_y = 2{,}4D & \frac{y_a}{D} > 1{,}4 \\ K_y = 2(y_a D)^{0{,}5} & 0{,}2 < \frac{y_a}{D} < 1{,}4 \\ K_y = 4{,}5y & \frac{y_a}{D} < 0{,}2 \end{array}\right\} \tag{2.23}$$

$$\left.\begin{array}{ll} K_1 = \frac{V_a-(V-V_c)}{V_c} & eğer \quad \frac{V_a-(V-V_c)}{V_c} < 1 \\ K_1 = 1 & eğer \quad \frac{V_a-(V-V_c)}{V_c} > 1 \end{array}\right\} \tag{2.24}$$

$$\left.\begin{array}{ll} K_v = 0{,}57log_{10}^{\left(2{,}24\frac{D}{D_{50}}\right)} & eğer \quad \frac{D}{D_{50}} < 25 \\ K_v = 1 & eğer \quad \frac{D}{D_{50}} > 25 \end{array}\right\} \tag{2.25}$$

Sheppard, Odeh ve Glasser (2004) üniform taban malzemesi kullanarak köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını deneysel olarak incelemiş ve maksimum oyulma derinliğini veren bir bağıntı önermişlerdir. Deneylerini 6,1 m genişliğe, 6,4 m derinliğe ve 38,4 m uzunluğa sahip bir deney kanalında gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları silindirik orta ayak çapları 0,114, 0,305, 0,914 m'dir ve taban malzemeleri üniform olup, ortalama tane çapları 0,22, 0,80, 2,90 mm'dir. Yaklaşım akım derinliği y_a= 18 cm - 190 cm arasında değişmektedir. V_a/V_c= 0,75 – 1,21 değerleri arasında hem temiz su hem de hareketli taban koşullarında çalışmalar tamamlanmıştır. Her ne kadar geniş yaklaşım akım derinliğine sahip bir çalışma olsa da çalışma sadece silindirik orta ayakları içerdiğinden farklı tipte orta ayak şekilleri tasarımında referans alınması tavsiye edilmemektedir. Yapılan çalışmalar sonucu maksimum oyulma çukuru derinliği tahmini için aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2{,}5 f_1\left(\frac{y_a}{D^*}\right) f_2\left(\frac{V_a}{V_c}\right) f_3\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right) \quad (2.26)$$

Burada;

$$f_1\left(\frac{y_a}{D^*}\right) = tanh\left[\left(\frac{y_a}{D^*}\right)^{0,4}\right] \quad (2.27)$$

$$f_2\left(\frac{V_a}{V_c}\right) = \left\{1 - 1{,}75\left[ln\left(\frac{V_a}{V_c}\right)\right]^2\right\} \quad (2.28)$$

$$f_3\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right) = \left[\frac{\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)}{0{,}4\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)^{1,2} + 10{,}6\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)^{-0,13}}\right] \quad (2.29)$$

Eş. 2.26'da verilen D*, efektif köprü orta ayak genişliğidir.

Khwairakpam, Ray, Das, Das ve Mazumdar (2012) silindirik orta ayağın bulunduğu eğimli bir kanalda bir dizi temiz su oyulması deneyi yapmıştır. Densimetrik Froude sayısı ve memba akım derinliklerinin oluşturulduğu testlerde 50 mm çapında tek bir orta ayak kullanmıştır. Ortalama tane çapı D_{50} = 0,365 mm olan bir kanalda deneyler gerçekleştirilmiş olup tüm oyulma geometrisinin (oyulma derinliği, uzunluk, genişlik, alan ve hacim), densimetrik Froude sayısına (F_{d50}) ve memba akım derinliğine (y_a) bağlı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak oyulma derinliği, uzunluğu, genişliği ve alanı için ampirik denklemler önerilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde araştırmacılar aşağıdaki oyulma bağıntısını önermişlerdir.

$$y_{spo,max} = \left\{0{,}744\left(\frac{y_a}{D}\right) - 0{,}367\right\} F_{D50} + \left\{-2{,}438\left(\frac{y_a}{D}\right) + 2{,}683\right\} \quad (2.30)$$

Birleşik Krallık'da kullanılan ve 2012 yılında yayınlanan BD97/12 yönetmeliği orta ayaklarda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin hesaplanmasında Eş. 2.31'i önermektedir.

$$y_{spo,max} = 1{,}5 D K_s K_2 K_y \quad (2.31)$$

Ekuje (2020), BD97/12'deki bağıntının içerdiği parametre sayısından ötürü maksimum oyulma çukuru derinliği tahmininde yetersiz kaldığını ve Birleşik Krallık yönetmeliğinde yer alacak daha güncel bir denkleme ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir.

Sheppard, Melville ve Demir (2014), çalışmalarında kohezyonsuz sediment için yaygın olarak kullanılan maksimum yerel oyulma denklemlerinden yirmi üç tanesini değerlendirmişlerdir. Derlenmiş laboratuvar ve saha verilerinin kullanıldığı bu araştırmada 569 laboratuvar ve 928 saha verisi değerlendirilmiştir. Veriler incelendiğinde y_a/D= 0,05 – 21,05 ile D/D_{50}=3,65- 65,04 aralığında değişken boyutsuz parametreler kullanmışlardır. Ayrıca V_a/V_c= 0,4 – 7,58 değerleri arasında hem temiz su hem de hareketli taban durumları için geçerlidir. Fr_a= 0,03- 1,95 arasında değişmektedir. Sheppard ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmalar neticesinde maksimum oyulma çukuru tahmini için Eş. 2.32a, Eş. 2.32b ve Eş. 2.32c'yi önermişlerdir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2{,}5 f_1 f_2 f_3 \qquad eğer\ \ 0{,}4 < \frac{V_a}{V_c} < 1 \tag{2.32a}$$

$$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = f_1 \left[2{,}2 \left(\frac{\frac{V_a}{V_c} - 1}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) + 2{,}5 \left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c} - \frac{V_a}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) f_3 \right] \qquad eğer\ \ 1 < \frac{V_a}{V_C} < \frac{V_{lp}}{V_c} \tag{2.32b}$$

$$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2{,}2 f_1 \qquad \text{eğer } \frac{V_a}{V_C} > \frac{V_{lp}}{V_c} \tag{2.32c}$$

Burada;

$$f_1 = tanh\left[\left(\frac{y_a}{D^*} \right)^{0,4} \right] \tag{2.33}$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1{,}75 \left[ln\left(\frac{V_a}{V_c} \right) \right]^2 \right\} \tag{2.34}$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{D^*}{D_{50}} \right)}{0{,}4\left(\frac{D^*}{D_{50}} \right)^{1,2} + 10{,}6\left(\frac{D^*}{D_{50}} \right)^{-0,13}} \right] \tag{2.35}$$

Hong, Guo, Chiew ve Chen (2016) yaptıkları çalışmalar sonucunda maksimum oyulma çukuru tahmini için Eş. 2.36'yı önermişlerdir. Taşkın kaynaklı köprü orta ayak etrafındaki oyulmayı simüle etmek için Mingchu Köprüsü orta ayakları incelenmiştir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D_{50}} = 7{,}271\left(\frac{q}{\sqrt{\rho_s/\rho-1)gD_{50}^3}}\right)^{0{,}514} S_0^{0{,}071}\sigma_g^{-0{,}014} \quad (2.36)$$

Burada; S_0 kanal taban eğimini, σ_g ise taban malzemesine ait geometrik standart sapmayı ifade etmektedir.

Qi ve diğerleri (2016) literatürde hangi oyulma denkleminin en doğru sonuca yakın değerleri tahmin ettiğini bulmak için 126 laboratuvar verisi ile 408 saha ölçüm verisini inceleyip yaygın olarak kullanılan 4 bağıntı kullanmışlardır. Uygulanan denklemler; Çin Halk Cumhuriyeti oyulma denklemleri (Revize 65-1 ve 65-2 bağıntıları), HEC-18, Melville (1997) denklemleridir. Çalışma sonunda denklemler içerisinde HEC-18'in saha ve laboratuvar verilerini doğruya en yakın tahmin eden denklem olduğu belirtilmiştir.

Ettema, Constantinescu ve Melville (2017) yaptıkları araştırmada hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (HAD) kullanmışlardır. Ayaklar etrafındaki karmaşık akım alanlarını simüle etmede çok yararlı olan HAD'ın oyulma derinliğinin tahmininde önemli yer tuttuğunu ifade etmişlerdir. Ancak, HAD'ın bir ayak temelindeki oyulmayı simüle etme konusundaki sınırlı yeteneği, HAD'ın ayak etrafındaki yerel oyulma derinliğinin tasarım tahmini için pratikliğini engellediğini de belirlemişlerdir.

Link, Henríquez ve Ettmer (2019), ölçekli modellerde prototip köprü ayak oyulmasının nicelleştirilmesi için fiziksel modelleme tekniklerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Farklı genişlik ve derinliklere sahip üç kanalda, üç farklı sediment ve ortalama tane çapı boyutuna sahip taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen deneyler temiz su ve hareketli taban koşullarının yanı sıra kararlı akım koşullarını ve gerçek hidrografları içermekteydi. Sonuçlar, bir köprü ayağındaki oyulma işleminin boyutsuz etkin akım ve boyutsuz tane çapı tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. Zaman ölçeğinin, ayak çapına, sediment bağıl yoğunluğuna, sediment tane çapına ve akış hızına bağlı olduğu saptanmıştır.

Cao, Chen, Zhu ve Wei (2021) literatürde bulunan çok sayıda ampirik denklemin ve bunlardan hangisinin doğru sonuca en yakın sonuçlar verdiğini araştırmıştır. Araştırmada en yaygın kullanılan 6 denklem Çin Halk Cumhuriyeti oyulma denklemleri, HEC-18, Melville (1997) ve Wang (2017) denklemleri değerlendirilmiştir. Araştıma sonucunda en doğru

sonucu veren denklem önermek yerine farklı sediment aralıklarında farklı denklemlerin birbirlerine kıyasla daha doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar sediment çaplarını gruplayarak o aralık sınıfında önerilen denklemin kullanılmasının daha etkili olacağını savunmuşlardır.

2.5.2. Kısmi basınçlı ve savak tip akım durumlarında oyulma bağıntıları

Olası bir taşkın olayında akarsu köprü açıklıkları geçecek akım için yetersiz kalabilmektedir. Bu durum aynı zamanda köprünün işlevselliğini de sıkıntıya sokacağından dayanım ve durabilite konuları göz önünde bulundurulması gereken başlıca iki konu olmaktadır. Kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarına bağlı olarak köprü tabliyesi altında ve köprü ayakları etrafında gelişen oyulma çukurunun önceden analiz edilmesi köprülerin tasarımı, inşası ve bakımı için büyük önem taşımaktadır. Literatürde serbest akım durumunda köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma çukurunu inceleyen birçok araştırma mevcuttur. Ancak basınçlı akım durumunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Basınçlı akım durumunu inceleyen ilk çalışma Colorado Eyalet Üniversitesi laboratuvarlarında Abed (1991) tarafından yapılmıştır. Abed, serbest akım durumunda ayak etrafındaki oyulmayı incelemek için 10 adet, basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukurunu incelemek için ise 15 adet deney yapmıştır. Deneylerde kullanılan taban malzemesi ortalama tane çapı 3 mm olup, köprü tabliyesi ve ayaklarının boyutları sabit tutulmuştur. Deneyler, temiz su oyulması durumunda 0,24 m ile 0,61 m arasında değişen farklı yaklaşım akım derinlikleri ve 0,305 m/sn ile 0,9015 m/sn arasında değişen farklı ortalama yaklaşım akım hızları ile gerçekleştirilmiştir. Aynı yaklaşım akım özelliklerine sahip basınçlı akım durumundaki deneylerde meydana gelen oyulma çukuru ile serbest yüzeyli akım durumuna ait ayak etrafındaki oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında, basınçlı akım durumundaki maksimum oyulma çukuru derinliğinin serbest akım koşulundaki maksimum oyulma çukuru derinliğine göre 2,3-10 kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Diğer bir araştırma ise Fairbank Otoyolu Araştırma Merkezindeki Federal Karayolları İdaresinin laboratuvarlarında (FHWA), Umbrell, Young, Stein ve Jones (1998) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma Abed'in çalışmasının bir devamı niteliğinde olup, köprü tabliyesi altında oluşan düşey daralma oyulmasını incelemek için orta ve kenar ayakları olmayan bir

köprü tabliyesi kullanılarak bir dizi deney yapılmıştır. Çalışmada üç farklı çapa sahip taban malzemesi kullanılmıştır. Yaklaşım akım derinliği 0,305 m olarak sabit tutulmuş, 0,42 m/sn ile yaklaşık 1,0 m/sn arasında değişen farklı ortalama yaklaşım akım hızları ile deneyler yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde Q=120 lt/sn-318 lt/sn arasında değişen debi değerleri kullanılmıştır. Debi değeri geniş bir aralıkta değişse de yaklaşım akım derinliği sabit tutulmuştur. Yapılan deneylerde farklı taban malzemesi, ortalama yaklaşım akım hız ve akım derinliği, köprü tabliyesi konumu ve taban malzemesine ait kritik sürüklenme hızı parametreleri kullanılarak söz konusu parametrelerin oyulma çukuru üzerindeki etkileri incelenmiş ve basınçlı akım koşulunda kanal tabanında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin belirlenebilmesi için aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$\frac{H_b+y_{sc,max}}{y_a} = 1{,}1021\left[\left(1-\frac{h_w}{y_a}\right)\frac{V_a}{V_c}\right]^{0{,}6031} \tag{2.37}$$

Burada; y_{sc}= maksimum oyulma çukuru derinliğidir (m). Kritik ortalama akım hızı ise Eş. 2.6 ile hesaplanmıştır. Umbrell ve arkadaşlarının sunmuş oldukları bu bağıntı 81 adet deneyden elde edilmiş olup bağıntının korelasyon katsayısının karesi R^2=0,81 olarak hesaplanmıştır.

Anerson ve Abt (1998) yapmış oldukları deneysel çalışmalarda basınçlı akım koşullarında düşey yöndeki akım daralması sonucu köprü tabliyesi altında oluşan oyulmayı incelemişlerdir. Verilerin kalitesini değerlendirmek için çoklu doğrusal regresyon teknikleri ve çeşitli istatistiksel testler kullanarak ve laboratuvarda elde edilen verilerden ampirik bir ilişki geliştirmişlerdir. Geliştirilen bağıntıya ait debi değerleri Q=227 lt/sn- 991 lt/sn arasında değiştiğinden bağıntının düşük debilerde doğruya yakın tahmin yapabilme ihtimali düşük öngörülmektedir.

$$\frac{y_{sc,max}}{y_a} = -5{,}08 + 1{,}27\left(\frac{y_a}{H_b}\right) + 4{,}44\left(\frac{H_b}{y_a}\right) + 0{,}19\left(\frac{V_a}{V_c}\right) \tag{2.38}$$

$$V_c = 1{,}52[(SG-1)gD_{50}]^{0{,}5}\left(\frac{y_a}{D_{50}}\right)^{0{,}167} \tag{2.39}$$

Verma, Setia ve Bhatia (2004), basınçlı akım durumunda hidrograf şeklinde verilen kararsız akım koşullarında köprü tabliyesi altında ve silindirik köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma çukurunu incelemişlerdir. Çalışma kapsamında farklı akım derinliklerinde ve köprü açıklıklarında toplam 43 adet deney yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre akım derinliğindeki değişimin basınçlı akım oyulması üzerindeki etkisi incelenmiş, tabliye altındaki düşey daralmanın daha düşük olduğu durumlarda oyulma derinliğinde daha belirgin artış olduğu gözlemlenmiştir.

Lyn (2008) yaptığı çalışmada Umbrell ve diğerleri (1998) ile Arneson ve Abt (1998)'ın yapmış olduğu deney verilerini HEC-18'de yer alan bağıntı ile karşılaştırmıştır. Basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında oluşan oyulma çukuru için yapılan karşılaştırmalar neticesinde HEC-18 bağıntısının güvenilir sonuçlar vermediğini bildirmiştir. Lyn (2008) belirlenen sınırlar içinde Arneson ve Abt (1998)'in deneysel verilerini baz alarak farklı bir model geliştirmiş ve köprü ayakları olmaksızın yalnızca köprü tabliyesi altındaki temiz su oyulması için Eş. 2.40'ı önermiştir.

$$\frac{y_{sc,max}}{y_a} = \min\left(0{,}105\left(\frac{y_a}{H_b}\right)^{2{,}95}, 0{,}5\right) \tag{2.40}$$

Guo, Kerenyi, Pagan-Ortiz (2009) yaptıkları çalışmalarda temiz su oyulması halinde y_a= 25 cm sabit bir yaklaşım akım derinliğini, D_{50}= 1 mm ve 2 mm olmak üzere iki farklı sediment çapını, Q= 64,6 lt/sn ve 83,5 lt/sn olmak üzere iki farklı debiyi ve Fr_a= 0,26 ve 0,34 olmak üzere iki farklı Froude sayısını deneylerinde kullanmışlardır. Ayrıca, basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulmaları iki grupta incelemişlerdir. Kısmi basınçlı ve tam basınçlı akım (savak tipi akım) durumlarında meydana gelen oyulma çukuru profillerinin iki boyutlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu akım durumları için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir. Eş. 2.41'in sabit bir y_a değerinde önerildiği ve düşük debi ve Froude sayılarında kullanılabilir olduğu öngörülmektedir.

$$\frac{H_b+y_{sc,max}}{H_b+k} = \frac{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}368}{F_i^{2{,}409}}\right)}}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}866}{F_i^2}\right)}} \tag{2.41}$$

Burada;

$$k = y_a - (H_b + w) \tag{2.42}$$

$$F_i = \frac{V_{ce}}{\sqrt{g(y_a - H_b)}} \tag{2.43}$$

$$V_c = 1{,}52[(SG-1)gD_{50}]^{0{,}5}\left(\frac{y_a}{D_{50}}\right)^{0{,}167} \tag{2.44}$$

$$V_{ce} = V_c\left(\frac{y_a - w}{y_a}\right)^{0{,}85} \tag{2.45}$$

Hahn ve Lyn (2010), düşey daralma nedeniyle meydana gelen temiz su oyulmasını farklı deney süreleri için incelemişlerdir. Deneyler 6 ile 48 saat süreleri arasında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, tek bir yaklaşım derinliği ve taban malzemesi ile iki farklı yaklaşım akım 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 durumundaki oyulma çukuru derinliği tahminlerini önemli ölçüde aştığı saptanmıştır.

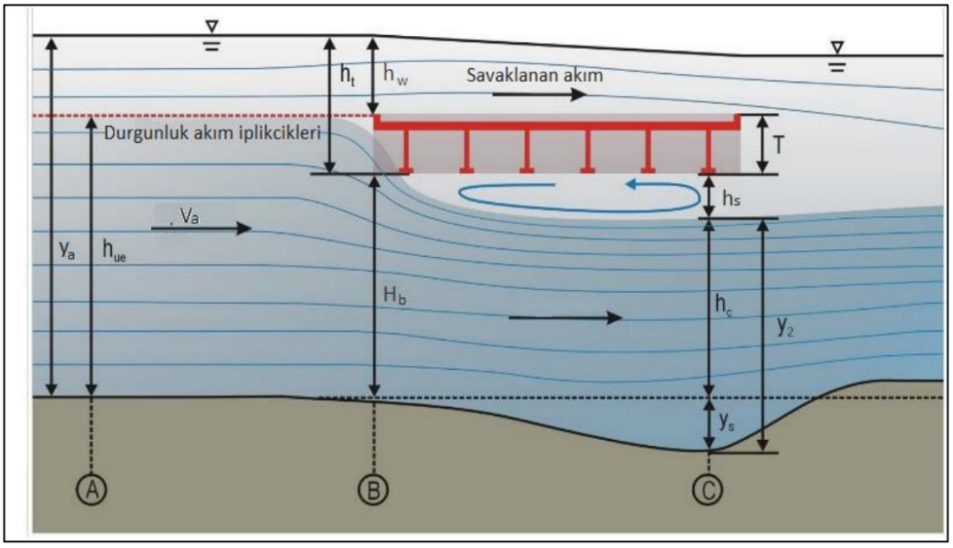
Zhai (2010), tamamen basınçlı akım koşullarında köprü tabliyesi altında temiz su halinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin zamana bağlı değişimini deneysel olarak araştırmış ve deney verilerinden yarı ampirik bir bağıntı geliştirmiştir. Zhai (2010), oyulma çukuru derinliğinin denge durumuna gelene kadar zamanla birlikte arttığını, değişim oranının zaman geçtikçe azaldığını ve denge durumuna gittikçe sıfıra yaklaştığını saptamıştır.

Shen, Suaznabar, Xie, Bojanowski, Lottes ,Shan ve Kerenyi (2012) yaptıkları çalışmada, kısmen veya tamamen su altında kalmış bir köprü tabliyesi altındaki oyulmayı tahmin etmek için yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu modele dayanarak, basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma için köprü temel tasarımını amaçlayan bir bağıntı önermişlerdir. Deneylerde yaklaşık Q= 70 lt/sn ve 80 lt/sn olmak üzere iki farklı debi, y_a= 25 cm sabit bir yaklaşım akım derinliği ve Fr_a= 0,17 ve 0,22 olmak üzere iki farklı Fr_a değeri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, PIV (Partical Image Velocimetry – Parçacık Görüntülemeli Akış Ölçüm Cihazı) ölçümleri ve HAD ile desteklenen bir dizi laboratuvar deneyi yapmışlardır.

Ayrıca çalışmada Umbrell ve diğerlerinin (1998) çalışmasına ait veriler ile Arneson ve Abt'in (1998) yapmış olduğu çalışmalara ait verilerden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda HAD çözümü desteğiyle ayrışma bölgesi kalınlığını hesaplayan ve köprülerin projelendirilmesinde kullanılabilecek Eş. 2.46'da verilmiş olan denklemi geliştirmişlerdir. Kısıtlı parametreler ve tek bir yaklaşım akım derinliği önerilen denklemde dikkate alınması gereken önemli noktalardır.

$$y_{sc,max} = \left[\frac{V_a(y_a - h_w)}{D_{50}^{1/3} * K_u}\right]^{6/7} \left(0{,}5\left(\frac{H_b H_t}{y_a^2}\right)^{0{,}2}\left(1 - \frac{h_w}{H_t}\right)^{-0{,}1} - 1\right) H_b \qquad (2.46)$$

Burada K_u=0.025 (SI birimi) olarak hesaba katılmaktadır. Ayrıca, T= köprüye ait tabliye kalınlığı, h_s= akım ayrışma bölgesi kalınlığı, H_b=kiriş alt kotunun bozulmamış tabana olan mesafesi, y_a= yaklaşım akım derinliği V_a= ortalama akım hızı, h_w= tabliye üst kotundan itibaren akım derinliği, h_{ue}= tabliye altına yönlendirilen etkili akım derinliği, H_t= tabliye kiriş alt kotunun akım yüzeyine olan uzaklığı, h_c= ayrışma bölgesinin tabana olan uzaklığı, y_{sc}= maksimum oyulma çukuru derinliği, y_2= ayrışma bölgesinin maksimum oyulma çukuru kotuna olan uzaklığıdır (Bkz. Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Shen ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait deney parametreleri

Arneson ve diğerleri (2012), yaptıkları çalışmada Shen ve diğerleri (2012)'nin önerdiği çalışmalara ilave olarak yeni bir bağıntı önermişlerdir. Bu bağıntı aynı zamanda HEC-18 5.Basım'da kullanılmaktadır.

$$y_{sc,max} = y_2 + h_s - H_b \tag{2.47}$$

Burada y_2 hesaplanırken akımın temiz su veya hareketli taban durumlarından hangisinin geçerli olduğu tespit edilmelidir çünkü iki durum için farklı denklemler kullanılmaktadır. Temiz su durumundaki daralma oyulması sonucu, oyulma çukuru derinliğinin hesaplanmasında Laursen (1963)'a ait içinde bazı kabullerin bulunduğu denklem kullanılmıştır.

$$y_2 = \left[\frac{V_a y_a}{D_{50}^{1/3} * K_u}\right]^{6/7} \tag{2.48}$$

Burada; y_2=daralan kesitte, daralma oyulmasının dengeye ulaştığında meydana gelen akım yüksekliği (m), Q=debi (m^3/s), Dm =daralan kesitte taşınamayan en küçük sedimentin çapı (m), D_{50}=medyan çap (m) ve Ku=0.025 (SI Birimi)'dir.

Eş. 2.47'de hesaplanması gereken bir diğer parametre ise h_s'dir. Bu parametre Eş.2.49 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{h_s}{H_b} = 0{,}5\left(\frac{H_b h_t}{y_a^2}\right)^{0{,}2}\left(1 - \frac{h_w}{h_t}\right)^{-0{,}1} \tag{2.49}$$

h_s hesaplandıktan sonra maksimum oyulma çukuru derinliği $y_{sc,max}$ hesaplanır. Bu denklem, bir taşkın olayı sırasında su altında kalmış bir tabliyenin altındaki oyulmanın tahmini için HEC-18'e dahil edilmiştir. Yukarıda açıklandığı gibi basınçlı akım durumundaki oyulma derinliği için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Eş. 2.47'nin kullanımı herhangi bir parametre değerince sınırlanmamıştır. Ancak, tüm çalışmalar yanal daralma olmaksızın dikdörtgen bir kanalda yapılmıştır.

Kumcu (2016), kararlı ve kararsız temiz su koşullarında basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmayı deneysel olarak incelemiştir. Deneyler, Devlet Su İşleri (DSİ) Hidrolik Laboratuvarı'nda 30,0 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve 0,001 taban eğimine sahip bir kanalda yapılmıştır. Deneylerde Q= 40-55 lt/sn aralığında değişken debi, V_a= 0,232-0,286 m/sn aralığında değişen yaklaşım akım hızı ve H_b= 5 cm ve 7,5 cm olmak üzere iki farklı H_b değeri kullanılmıştır. 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 depolanma yüksekliğinin, kararsız akım durumlarında kararlı akım durumuna göre %10-30 daha az olduğu belirlenmiştir. Kumcu (2016) yaptığı çalışmalar sonucu maksimum oyulma çukuru derinliği hesaplanması amacıyla aşağıdaki bağıntıları önermiştir. Eş. 2.50a ve Eş. 2.50b'nin çok düşük H_b değerlerinde ve düşük Q debi değerlerinde önerilen bağıntılar olduğu görüldüğünden tasarımda kullanılırken sınırlandırılmış bir çalışma aralığında kaldığı unutulmamalıdır.

$$\frac{y_{sc,max}+H_b}{y_a} = 0{,}65 + 0{,}5\frac{V_b}{V_c} \qquad \text{Eğer } 0{,}5 \leq \frac{V_b}{V_c} < 1 \tag{2.50a}$$

$$\frac{y_{sc,max}+H_b}{y_a} = 1{,}025 + 0{,}125\frac{V_b}{V_c} \qquad \text{Eğer } 1 \leq \frac{V_b}{V_c} < 1{,}8 \tag{2.50b}$$

Karakurt (2016), yaptığı çalışmada 10,00 m uzunluğunda, 1,0 m genişliğinde dikdörtgen kesitli bir deney kanalında köprü tabliyesi altında oluşan daralma oyulmasını incelemiştir. Çalışma kapsamındaki deneyler Q= 70 lt/sn-90 lt/sn debi aralığında, y_a= 25 cm-32,5 cm yaklaşım akım derinliği aralığında, Fr_a= 0,121-0,250 aralığında değişen Froude sayılarında gerçekleştirilmiştir. Kanal girişinden yaklaşık 4 m mansapta başlayan 2,5 m uzunluğunda 20 cm derinliğinde bir test bölgesi oluşturmuştur. Çalışmada basınçlı akım durumları için farklı yaklaşım akım derinlikleri, kiriş yüksekliği, tabliye konumu ve farklı yatak malzemelerinin oyulma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde edilen deneysel verilerle hem kısmi basınçlı hem de savak tipi akım durumu için, düşey daralma sebebiyle köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuruna ait derinliğin tahmininde kullanılabilecek iki farklı bağıntı önermiştir. Bağıntıların hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında düşük debi değerlerinde daha doğru maksimum oyulma çukuru tahmini yapabileceği öngörülmektedir. Kısmi basınçlı ve savak tipi akıma ait oyulma çukuru tahmini için elde edilen ampirik bağıntılar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$\frac{y_{sc,max}}{H_b} = -0{,}962 - 0{,}187\frac{y_a}{H_b} + 0{,}433Fr_b + 0{,}672\frac{b}{H_b} \quad (2.51)$$

$$\frac{y_{sc,max}}{H_b} = -1{,}002 - 0{,}190\frac{y_a}{H_b} + 0{,}439Fr_b + 0{,}925\frac{b}{H_b} \quad (2.52)$$

Burada Fr_b = köprü tabliyesi altındaki Froude sayısıdır.

Çalışma sonucunda aynı debi değerlerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin azaldığını bildirmiştir. Kısmi basınçlı akım durumundaki oyulma çukuru profilinin savak tipi akıma göre daha geniş olduğunu gözlemlemiştir. Sediment çapının küçülmesiyle hem kısmi basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru derinliğinin ve genişliğinin daha büyük olduğunu tespit etmiştir. Aynı taban malzemesi ve aynı akım koşullarında kiriş yüksekliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin hem kısmi basınçlı hem de savak tipi akım durumları için artış gösterdiğini, tabliyenin tabana yaklaştırılmasıyla her iki yatak malzemesi durumunda da oyulma çukuruna ait derinliğin arttığını bildirmiştir.

Demir (2018), kanala verev yerleştirilmiş bir köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukurunu kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumları için temiz su oyulması halinde incelemiştir. Kanalda oyulmayı incelemek üzere ortalama tane çapı D_{50}=1,1 mm olan taban malzemesiyle 20 cm derinliğinde bir test bölgesi oluşturmuştur. Yapmış olduğu çalışma sonunda elde edilen verilerle oyulma çukuru derinliğinin tahmini için savak tipi ve kısmi basınçlı akım durumları için aşağıdaki denklemleri önermiştir.

$$\frac{y_{sc,max}}{H_b} = -1{,}0633 - 0{,}4792\frac{y_a}{H_b} + 0{,}433Fr_{b*} + 2{,}3869\frac{b}{H_b} \quad (2.53)$$

$$\frac{y_{sc,max}}{H_b} = -1{,}1275 - 0{,}0411\frac{y_a}{H_b} + 0{,}405Fr_{b*} + 1{,}4292\frac{b}{H_b} \quad (2.54)$$

Aynı debi değerlerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığını kiriş yüksekliğinin artması ile maksimum oyulma çukuru derinliklerinin de artış gösterdiğini belirtmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin artmasına bağlı olarak kısmi basınçlı akım koşulundaki maksimum oyulma çukuru derinliklerinde önemli artışlar gözlenirken, savak tipi akımlarda ise savak yükünün artışına bağlı olarak oyulma

çukuru derinliğinin azaldığını bildirmiştir. Yapmış olduğu çalışmadan elde edilen sonuçları daha önceden Karakurt (2016) tarafından yapılan, aynı deney koşullarına sahip akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Verev yerleştirilmiş tabliye durumunda elde edilen sonuçlar akıma dik yerleştirilmiş tabliye durumundan elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında maksimum oyulma çukuru derinliğinde genel olarak artış olduğunu bildirmiştir.

2.5.3. Basınçlı akım durumunda meydana gelen toplam oyulmanın incelenmesi

Literatürde basınçlı akım durumunda köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin belirlenmesi için iki tip yaklaşım bulunmaktadır. Bazı araştırmacılar ve yönetmelikler yerel ve daralma oyulması etkisinin ayrı ayrı belirlenip bunların toplanması ile maksimum oyulma derinliği hesabı yapmanın doğru olduğunu savunmaktadır (HEC-18, BD97/12). Bir diğer grup araştırmacı ise iki farklı oyulma tipinin birbirini etkilediğini ve süperpoze yapmanın doğru olamayacağını belirtmektedir (Carnacina, Pagliara ve Leonardi, 2019). Tabliye-ayak-akım etkileşiminin daha iyi anlaşılması için birkaç çalışma yapılmış olsa da bu karmaşık olayın doğru şekilde yorumlanması için literatürde yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Akarsu köprülerinin maruz kaldığı aşırı oyulma özellikle taşkın durumunda karşılaşıldığından basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukuru oluşumunun ve özelliklerinin daha iyi anlaşılması ve tahmini için yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir.

Abed (1991) basınçlı akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulmaları laboratuvar ortamında yaptığı deneysel çalışmalarla incelemiştir. Toplam 25 deney temiz su durumunda y_a= 0,24~0,6 m yaklaşım akım derinliği, V_a= 0,3~0,9 m/sn yaklaşım akım hızı ve Fr_a=0,129-0,59 aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan debi değerleri Q= 170 lt/sn-1400 lt/sn olduğundan özellikle taşkın debileri simüle edebilmeye çalışılmıştır. 0,24~0,6 m yaklaşım akım derinliği aralığında ve 0,3~0,9 m/sn yaklaşım akım hızıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların sonucunda basınçlı akım durmunda ayak etrafında meydana gelen toplam oyulmanın Froude sayısıyla doğru orantılı, yaklaşım akım derinliği y_a ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Abed (1991) elde ettiği deney verilerine çoklu regresyon uygulaması sonucunda Eş. 2.55'i önermiştir.

$$\frac{y_{spp,max}}{y_a} = K_1 K_s \left(4{,}92 Fr_a + 0{,}46 \frac{H_b}{y_a} - 0{,}74\right) \quad (2.55)$$

Burada $y_{spp,max}$ basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliğidir.

Holnbeck, Parrett ve Tillinger (1993) saha çalışmalarında Montana'daki Razor Creek üzerinde ölçülen daralma ve kenar ayak oyulmasını, ampirik bağıntıdan hesaplanan oyulma derinliği ile karşılaştırdı. Hidrolik değişkenlerin hesaplanması için Water Surface Profile (WSPRO) bilgisayar modeli kullanıldı ve daralma oyulması Laursen (1963)'in hareketli taban yatağı bağıntısı ile hesaplandı. Kenar ayak oyulması ile orta ayaklarda meydana gelen yerel oyulma için sırasıyla Froehlich (1988) hareketli taban yatağı denklemi ile Colorado Eyalet Üniversitesi (CSU) denklemi kullanıldı. Daha sonra her bir oyulma derinliği (orta ayak, kenar ayak ve daralma oyulması derinliği) için ayrı denklemlerden hesaplanan sonuçlar toplanarak toplam oyulma derinliği elde edildi. Sonuçlar, ampirik bağıntılardan hesaplanan toplam oyulma derinliklerinin sahada gözlemlenen oyulma derinliklerinden daha büyük olduğunu göstermiştir.

Hong (2005) tarafından düşey daralma oyulması ile yerel oyulmanın etkileşimi Georgia, Macon'daki Ocmulgee Nehri köprüsünün 1:45 ölçekli hidrolik modeli kullanılarak incelenmiştir. Etkileşimi araştırmak için ayaklı ve ayağı olmayan köprü tabliyeleri kullanılmıştır. Hong (2005), düşey daralma oyulması ile yerel oyulma arasındaki etkileşimden dolayı daralma oyulması derinliğinin köprü ayakları olmadan meydana gelen oyulma derinliği ile karşılaştırıldığında köprü ayakları ile olan oyulma derinliğinden daha az olduğunu bulmuştur. Hong (2005) bunun, yerel oyulmanın daralma oyulmasından çok daha hızlı gelişmesi ve yerel oyulmanın daralma oyulması tam olarak gelişmeden önce köprü kesiti boyunca debinin dağılımını değiştirdiğinden kaynaklandığını savunmuştur.

Sturm, Ettema ve Melville (2011), mevcut kenar ayak ve orta ayak oyulma bağıntılarının uygulanmasında yerel oyulma ve daralma oyulmasının bağımsız oyulma süreçleri olduklarının varsayılamayacağını belirlemişlerdir. Çünkü, köprü açıklığı boyunca akım alanındaki daralma oyulma süreçlerinin aynı anda gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple de daralma ile yerel oyulma süreçlerini ayırmanın zor olduğunu savunmuşlardır.

Farhangi, Thamer, Ghazali ve Yusuf (2016) yaptıkları laboratuvar çalışmalarında basınçlı akım durumunda yerel ve daralma oyulmalarının birlikte incelenmesinin oyulma çukuru üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında belirlenen akım durumunda orta ayakların verevlilik açısının da oyulmayı nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada toplam oyulma derinliğini veren tek bir denklem elde edilmiştir. 24 adet deney temiz su şartlarında iki farklı medyan çapına sahip taban malzemesiyle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yaklaşım akım hızları V_a= 0,23-0,42 m/s , V_c=0,31-0,47 m/s aralığında ve yaklaşım akım derinliği y_a=19 cm- 33 cm aralığında değişmektedir. Çalışmada çoklu doğrusal regresyon yöntemiyle elde edilen bağıntı Eş. 2.56'da verilmiştir.

$$\frac{y_{spp,max}}{H_b} = \left[1{,}74819\left(\frac{V_a}{V_c}\right) + 2{,}63834\left(\frac{H_t}{y_a}\right) + 1{,}52073\left(\frac{D}{y_a}\right) - 1{,}55321\right] K_s \qquad (2.56)$$

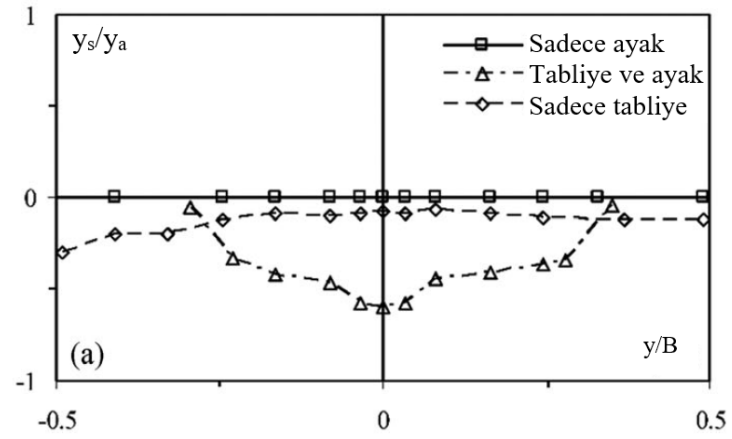
Araştırmacılar basınçlı durumda kompleks bir oyulma mekanizmasının gerçekleştiği ve oyulmanın ayrı ayrı belirlenip süperpoze edildiği yaklaşımın doğru sonuç veremeyeceği sonucuna varmışlardır.

Hong ve Abid (2016) yaptıkları deneysel çalışmalarda orta ve kenar ayaklarda meydana gelen oyulmaları ve ilgili parametreleri, bu parametrelerin birbirlerine olan etkilerini incelemişlerdir. Orta ayaklarda meydana gelen yerel oyulma derinliği ile daralma oyulması sonucu meydana gelen oyulma derinliğini karşılaştırarak bir değerlendirme yapmışlardır. Maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin ederken kullanılan ampirik bağıntılar yardımıyla ayrı ayrı hesaplanıp elde edilen toplam oyulma derinliğinin nispeten doğru olduğunu fakat ortak etkinin beraber incelediği durumda daha fazla toplam oyulma çukuru derinliğine yol açtığını kanıtlamıştır.

Saha, Lee ve Hong (2018) Gürcistan Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirdikleri bir dizi deney sonucunda yerel oyulma ve daralma oyulma etkilerini ayrı ayrı inceleyip değerlendirmişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde daralma oyulması ve yerel oyulmanın beraber incelendiği durumda basınçlı akım etkisiyle serbest akıma göre daha fazla oyulma gerçekleştiği ve oyulma çukuru derinliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Bahsedilen iki oyulma derinliğinin ayrı ayrı toplanmasından ziyade tek bir denklem kullanılarak belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir.

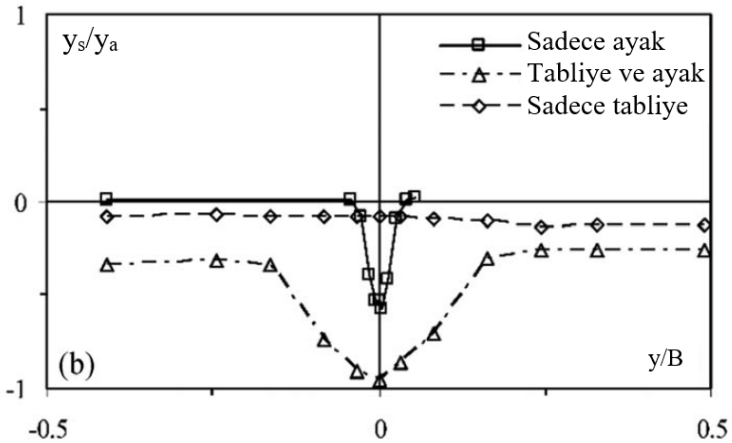
Hong ve Lee (2018) taşkın durumunda meydana gelen akımı kısmi basınçlı akım ve savak tipi akım olarak ayırmış ve bu durumların aşırı oyulmalara neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında laboratuvar ortamında temiz su durumunda oyulma türlerinin birbirleriyle olan ilişkileri incelenmiştir. Bunun için araştırmacılar 3 ayrı köprü seçmişler ve bunların modelini yaparak laboratuvar ortamında kanala yerleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda yerel oyulmanın ve daralma oyulmasının ayrı incelenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca oyulma türleri içerisinde düşey daralma oyulmasının toplam daralma üzerinde önemli bir yeri olduğu sonucuna varmışlardır.

Carnacina ve diğerleri (2019) yaptıkları laboratuvar çalışmasıyla basınçlı akım durumunda yerel ve daralma oyulma mekanizmalarının etkileşimlerinin oyulma çukuru özelliklerini etkilediğini ve ayrı ayrı değerlendirilmesinden ziyade beraber değerlendirdiklerinde etkinin oyulma çukuru derinliğini artırıcı yönde olduğunu belirlemişlerdir. Deneyler 0,61 m genişliğinde ve 7,6 m uzunluğundaki bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 3 cm çapında silindirik bir orta ayak kullanılmıştır. Yapılan testlerde farklı debi, köprü açıklığı yüksekliği ve yaklaşım akım derinlikleri kullanılmıştır. Araştırmacıların elde ettiği oyulma çukuruna ait sonuçlar Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, V_a/V_c=0,5 oranı için sadece düşey daralma durumunda ve sadece yerel oyulma durumunda neredeyse hiç oyulma derinliği gözlemlenmemiştir. Fakat ikisinin beraber incelendiği basınçlı akım durumunda meydana gelen yerel oyulmada oyulma çukuru derinliği büyük bir değişimle üçüncü boyuta ulaşmıştır. V_a/V_c=1 oranı içinse, yerel oyulma sonucu oluşan oyulma derinliğinin daralma oyulması sonucu oluşan derinliğe kıyasla fazla olduğu belirlenmiştir. Yine, basınçlı akım durumunda meydana gelen yerel oyulmada çukur derinliğinde büyük bir artış gözlemlenmiş olup iki oyulma türünün bağımsız değerlendirilme durumunun yetersiz kalacağı belirlenmiştir.



Şekil 2.7. V_a/V_c=0.5 oranı için oyulmalar (Carnacina ve diğerleri, 2019).

Orta ayak ve köprü tabliyesinin varlığı durumunda oyulma çukurunun toplam derinliği incelendiğinde V_a/V_c'den bağımsız olarak, daralma oyulması ve yerel oyulmanın sebep olduğu oyulma çukuru derinlikleri ayrı ayrı toplanmış ve değerlendirilmiştir. Ayrı ayrı toplam sonucu bulunan değer orta ayak ve köprü tabliyesinin doğrusal olmayan etkileşimden doğan etkiyi ihmal ettiği için daha düşük ve gerçekçi olmayan bir değeri gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 2.8. V_a/V_c=1 oranı için oyulmalar (Carnacina ve diğerleri, 2019).

Nasiri-Dehsorkhi, Chamani ve Kabiri-Samani (2021) laboratuvar ortamında gerçekleştirdikleri deneylerle basınçlı ve serbest akım durumlarında meydana gelen yerel oyulmaları karşılaştırmışlardır. Tabliye varlığında silindirik orta ayak etrafında meydana gelen oyulmaların serbest akım durumunda meydana gelen oyulmadan daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Türbülans şiddetindeki ve kinetik enerjideki artışın orta ayak etrafında

ilave zayıf çevrintilere sebep olduğu ve bunun da oyulma çukurunun derinleşmesine neden olduğunu savunmuşlardır.

2.5.4. Çalışma kapsamında kullanılan bağıntılar

Literatürde yer alan araştırmalar incelendiğinde, köprü ayağı etrafındaki oyulmalar göz önüne alındığında ayağın memba tarafında oluşan oyulmanın mansap tarafı ile yanlarında oluşan oyulmalardan daha büyük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla en büyük oyulma derinliğinin köprü ayağının membasında oluştuğu, oyulma sırasında akımın hareket ettirdiği taban malzemesinin taşınarak mansap bölgesinde yığıldığı, akım şiddeti (V_a/V_c), ortalama akım hızı ve derinliği, köprü ayak çapı ve hidrograf süresi gibi parametrelerde meydana gelen artışla oyulma derinliğinin arttığı belirlenmiştir (Yanmaz, 2002).

Çalışmaların geçmişten günümüze gelişimi incelendiği zaman, ilk zamanlarda oyulma için önerilen bağıntıların daha basit ve daha az parametreye bağlı oldukları göze çarpmaktadır. Birçok önemli etkiyi ya göz önünde bulundurmayan ya da oldukça basitleştiren bu araştırmalar sonucu elde edilen ampirik bağıntıların, arazi ölçümlerinden elde edilen oyulma çukuru derinlikleri ve laboratuvar ölçümleri ile kıyaslandığında çoğu zaman gerçek değerlerin dışında daha küçük sonuçlar verdiği saptanmıştır.

1949 yılından 2017 yılına kadar yapılan araştırmalarda önerilmiş olan denklemlerin incelenmesi sonucunda ortak bazı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Inglis (1949), Ahmad (1951) ve Chitale (1962) tarafından önerilen denklemler zaman zaman negatif oyulma derinlikleri vermektedir. Hatta bilinenin aksine zamanla artan oyulma çukuru derinliğini azaltan sonuçlar bile elde edilebilmektedir. Coleman (1971)'ın önerdiği bağıntı ise köprü orta ayağı boyutlarındaki artışla gerçekçi sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Laboratuvar sonuçlarında sahada ölçülen oyulma derinlikleri ile karşılaştırıldığında büyük sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Hancu (1971) ile Shen ve diğerleri (1969)'nin önerdiği bağıntılar incelendiğinde ise kabul edilebilir olmayan, çok yüksek değerlerde oyulma çukuru derinliği hesaplandığı görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmaların yerel oyulma ve maksimum oyulma çukuru derinliği tahmininde kullanılmasının güvenilir sonuçlar elde etmek açısından uygun olmayacağı sonucuna varılmıştır.

Yerel oyulma derinliği tahmini için yapılmış olan çalışmalar oyulma denklemi içerisindeki boyutsuz parametrelerin sayısının artmasıyla gerçek oyulma derinliğine yaklaşıldığını göstermektedir.

Laursen (1958,1963), Larras (1963), Neill (1964, 1973), Breusers (1965), Jain (1981), Chitale (1988), Ansari ve Qadar (1994), Briaud ve diğerleri (2004) ile Kothyari ve diğerleri (2007) gibi araştırmacıların bağıntıları incelendiğinde sadece birkaçında az sayıda boyutsuz parametre olduğu, birçoğunda ise hiç boyutsuz parametre olmadığı görülmektedir. Bu da yerel oyulma ve maksimum oyulma çukuru derinliği için önerilmiş olan bağıntıların iyi sonuç vermelerini olumsuz etkilemektedir. Gao ve diğerleri (1993)'nin önerdiği bağıntı ise özellikle tane çapı küçük olan malzemeler için çok büyük oyulma derinliği hesapladığı için önerilmemektedir.

Breusers ve diğerleri (1977), Breusers ve Raudkivi (1991), Richardson ve Davis (1995) tarafından önerilen bağıntılar yerini daha idealleştirilmiş olan Melville (1997), Richardson ve Davis (2001) tarafından önerilen denklemlere bırakmıştır. Dolayısıyla 1980'li yıllardan başlayıp 2000'li yıllara kadar literatürdeki çok sayıdaki bağıntı daha gerçekçi sonuçlar veren yedi adet bağıntya indirgenebilir. Bunlar; Froehlich (1988), Wilson (1995), Melville (1997), Richardson ve Davis (2001), Sheppard ve diğerleri (2004) ile Sheppard ve diğerleri (2014)'ne ait bağıntılardır. Yapılan çalışmalarla daha önce de bahsedildiği üzere içerisinde boyutsuz parametreyi barındıran ve daha genel şartlarda uygulanabilen dört bağıntının günümüzde daha doğru tahminler yapabildiği belirlenmiştir. Bunlar, Richardson ve Davis (2001), Sheppard ve diğerleri (2004) ile Sheppard ve diğerleri (2014) bağıntılarıdır.

Potansiyel maksimum oyulma çukuru derinliği tahmininde öncül iki boyutsuz parametre sırasıyla efektif orta ayak genişliği ve yaklaşım akım derinliğidir. Bunlar sırasıyla D* ve y_a olarak bağıntıda yer almaktadır. (Sheppard, Melville ve Demir, 2014). Efektif orta ayak genişliği D* şekil faktörü K_s ile orta ayağın izdüşüm genişliği ile çarpımına eşit olup hem şekil faktörünü hem de verevliliği eş zamanlı inceleyen bir orta ayak parametresidir. Orta ayak tiplerinin etkisinin belirlenmesi ve nasıl katılacağına karar verilmesi bu iki parametrenin birbirine oranı kullanılarak karar verilmektedir. Yani y_a/D^* oranı kullanılarak köprü ayakları tanımlanmaktadır. $y_a/D^*>1,4$ ise dar orta ayaklar, $0,2 \leq y_a/D^*<1,4$ ise geçiş orta ayakları ve $y_a/D^*<0,2$ ise geniş orta ayaklar olarak tanımlanmaktadır. Dar tipten geniş tipe doğru oyulma mekanizmasının kompleksliği arttığı için doğru çözüm de amprik

yaklaşımlardan HAD analizlerine kaymaya başlamaktadır. Ancak günümüzde halen bu karmaşık olayı HAD ile istenen düzeyde çözmek tam anlamıyla gerçekleştirilememiştir.

Oyulma tahmini için ampirik denklemlerin geliştirilmesi devam ederken, başka bir oyulma tahmini yaklaşımına da özellikle son yıllarda ilgi artmıştır. Akım benzeşimi ve oyulma tahmini amacıyla yapay sinir ağları (YSA) ve HAD kullanımı başlatılmıştır. Ayak etrafında maksimum oyulma çukuru derinliğinin tahmini için en yaygın kullanılan denklem HEC-18 denklemidir (Eş. 2.19). HEC-18 denklemi hem temiz su hem de hareketli taban koşulları için kullanılabilmektedir (Deng ve Cai, 2010). CSU denklemi (HEC-18'in 4.Basımı) başlangıçta Shen ve diğerleri (1969) dahil olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen laboratuvar veri setleri kullanılarak geliştirilmiştir. İlk geliştirmeden sonra, HEC-18 denklemi yıllar içinde aşamalı olarak değiştirilmiş ve şu anda Federal Highway Administration (FHWA) tarafından basit ayaklarda denge oyulma derinliklerinin tahmin edilmesi için tavsiye edilmektedir (Arneson, Zevenbergen, Lagasse ve Clopper, 2012).

Nadiren oyulma çukuru derinliğini olduğundan az tahmin eden bu yaklaşım, çoğu zaman gereğinden fazla oyulma derinliği tahmini yapmaktadır (Guo, 2012). Mueller (1996), Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından gözlemlenen oyulma derinliklerinin tipik olarak CSU denklemi kullanılarak hesaplanan oyulma derinliklerinden daha küçük olması nedeniyle tasarım amaçlı olarak kullanılmasının uygun olacağını belirtmiştir. Ancak daha büyük oyulma çukuru derinliği yapması nedeniyle inşaat maliyeti daha yüksek olmaktadır. Başka bir çalışmada, Johnson (1995), yüksek Froude sayıları ($Fr > 0,8$) için öngörülen oyulma derinliklerinin sahada gözlemlenen oyulmadan önemli ölçüde daha büyük olduğu, ancak çok düşük Froude sayılarında iyi sonuç verdiği sonucuna varmıştır.

Çeşitli araştırmalar, bu denklemleri deneysel sonuçlar ve/veya alan ölçümleri ile karşılaştırmaya ve varsa bunlardan hangisinin köprü oyulması için doğru bir tahmin sunduğunu belirlemeye çalışmışlardır. Kullanılabilirlik endişeleri için, güvenli tarafta kalan tahminler, küçük tahminlerden açıkça daha fazla tercih edilmektedir. Ancak böyle bir tahminin ekonomik olmayan bir tasarım ortaya çıkarabileceği unutulmamalıdır (Guo, 2009). Görüldüğü üzere yüksek tahmin değerleri, çeşitli karmaşık olayların bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Halihazırda kullanılan maksimum oyulma çukuru derinliği tahmin yöntemlerinin birincil zayıflığı olan bunlardan biri, bazı ilgili etkileri içerme veya ifade

etmedeki başarısızlıklarında yatmaktadır (Ettema, Melville ve Constantinescu, 2011). Ancak doğal akarsu yataklarının birçoğu menderesli ve birleşik kesite sahip olup doğal veya insan yapımı daralmalara sahiptir. Bu nedenle, bu denklemlerden yerel oyulma derinliğinin gerçekçi bir tahminini elde edebilmek için bu ilgili parametrelerin etkisinin dikkate alınması gerekmektedir.

Toplam oyulma çukurunun derinliğinin ve şeklinin birçok parametreye bağlı olduğu gerek laboratuvar çalışmaları gerek saha çalışmaları sonucu belirlenmiştir. Günümüzde yerel oyulma ve daralma oyulmasının eş zamanlı meydana geldiği basınçlı akım oyulması köprü tasarımındaki önemi nedeniyle güncel bir araştırma konusu olmaktadır.

Çalışma kapsamında daralma oyulması derinliği tahmini için Shen ve diğerleri (2012) (Eş. 2.46), Koçyiğit ve Karakurt (2019) (Eş. 2.51 ve Eş. 2.52), Kumcu (2016) (Eş. 2.50a ve Eş. 2.50b), Umbrell (1998) (Eş. 2.37), Arneson ve Abt (1998) (Eş. 2.38), Lyn (2008) (Eş. 2.40), Guo (2009) (Eş. 2.41) ve HEC-18 5.Basım (Arneson ve diğerleri, 2012) (Eş. 2.47) bağıntıları kullanılmıştır. Yerel oyulma derinliği tahmini için kullanılmış olan bağıntılar ise; HEC-18 (Eş. 2.20), Melville ve Sutherland (1988) (Eş. 2.13), Yanmaz (1989) (Eş. 2.14 ve Eş. 2.15), Melville (1997) (Eş. 2.22), Sheppard ve diğerleri (2004) (Eş. 2.26) ve Sheppard ve diğerleri (2014) (Eş. 2.32a, 2.32b, 2.32c)'dir. Ayrıca çalışmada kıyaslama amacıyla kullanılmak üzere basınçlı oyulma için Abed (1991) (Eş. 2.55) ve Fahrangi (2016) (Eş. 2.56)'nin önerdiği bağıntılar kullanılmıştır.

3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ

3.1. Genel

Çalışma kapsamındaki deneyler, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada basınçlı akım durumunda tabliye etkisi ile tabanda meydana gelen daralma oyulması, orta ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma ve bunların aynı anda bulunması durumları incelenmiştir. Bu nedenle deneyler sadece tabliye, sadece orta ayak ve tabliye ve orta ayak olması durumları için aynı akım koşulları altında yapılmıştır.

3.2. Deney Düzeneği

Deneyler, tabanı pleksiglas malzemeden ve yan duvarları 1 cm kalınlığındaki temperli camdan yapılmış, yaklaşık olarak 10 m uzunluğunda, genişliği ve yüksekliği 1'er m olan dikdörtgen kesitli bir kanalda yapılmıştır (Bkz. Resim 3.1).



Resim 3.1. Deneylerde kullanılan açık kanal

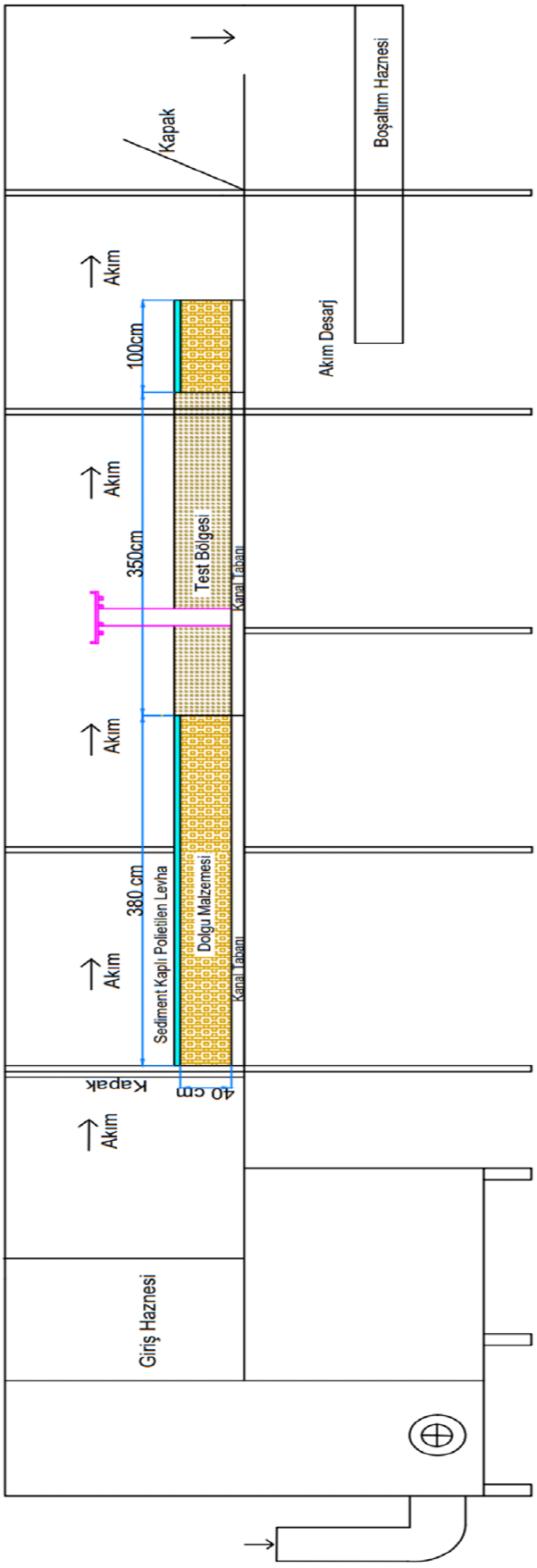
Deney kanalı giriş boruları, hazne, ana kanal, tahliye borusu ve boşaltım kanalından oluşmaktadır. Deney kanalı profili Şekil 3.1'de verilmiştir. Kanala flanş ve dirsekler ile bağlanmış olan üç adet pompa yardımıyla deneyler için gerekli debinin su deposundan gelmesi sağlanmaktadır.

Kanala su verilirken kanal girişinden önce yerleştirilmiş bal petekleri yardımıyla akımın enerjisi kırılmaya çalışılmıştır. Akım memba ve test bölgesi sonrasında boşaltım kanalına geçerek yeraltı su deposuna akıtılmakta ve böylece suyun devir daimi sağlanmaktadır. Kanal sonunda toplama havuzundan tahliye olan su keskin kenarlı dikdörtgen savaktan geçerken debi ölçümü yapılmaktadır. Toplanma havuzuna kanaldan gelen akımın enerjisini kırmak ve akım iplikçiklerinin mümkün mertebe birbirine paralel olduğu sakin bir akım elde edebilmek için havuzun içerisinde şaşırtmalı olarak bims yerleştirilmiştir. Kanal sonuna yerleştirilmiş kapak yardımıyla kanaldaki akım derinliği istenilen değere ayarlanabilmektedir. Köprü tabliye ve orta ayak modelinin yerleştirildiği ve taban ölçümlerinin yapıldığı test bölgesi 3,5 m uzunluğunda ve 1,00 m genişliğinde olup kanal girişinden 3,8 m mansapta yerleştirilmiştir (Bkz. Şekil 3.1). Test bölgesi dışındaki diğer alanlar belirli bir seviyeye kadar çakıl ile doldurulmuş olup üzerine 10 mm kalınlığında polietilen levha yerleştirilmiştir. Bu polietilen levhaların üzerine de test bölgesinde kullanılan sedimentten yapıştırılarak, akımın aynı pürüzlülük özelliğindeki malzemeyle kaplı tabandan akması amaçlanmıştır. Levhalara rastgele delikler açılarak deney başlangıcında kanala su verilmesi sırasında kanal tabanı ile levhalar arasındaki boşluklarda kalabilecek özellikle test bölgesinden çıkabilecek hava kabarcıklarının çıkışı engellenerek akım yapısının bozulması önlenmiştir.

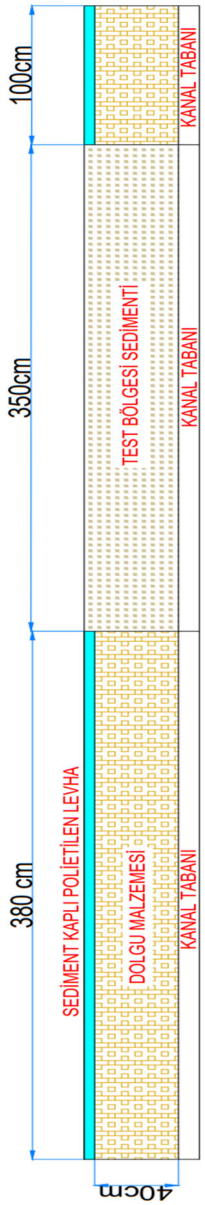
3.3. Deney Elemanları

3.3.1. Taban malzemesi

Taban malzemesi doğal dere yatağı malzemesi olup laboratuvarda elenerek ortalama tane çapı 0,8 mm olan, mümkün olduğunca homojen bir malzeme haline getirilmiştir. Malzeme yıkandıktan sonra Şekil 3.2'de görülen 40,0 cm yüksekliğinde, 3,5 m uzunluğunda ve 1 m genişliğindeki test bölgesine yerleştirilmiştir. Deney kanalı taban eğimi yaklaşık olarak 0,001'dir



Şekil 3.1. Deney kanalı profili



Şekil 3.2. Kanal taban profili

Çizelge 3.1'de deneylerde kullanılmış olan taban malzemesine ait tane boyutları verilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemenin homojenliği önemli olduğundan farklı parametreler hesaplanarak bu değerlerin istenen sınırlar içerisinde oldukları kontrol edilmiştir. Çizelgede verilen geometrik standart sapma $\sigma_g = D_{84.1}/D_{50}$ şeklinde hesaplanmış olup $\sigma_g < 1,4$ olduğundan tane dağılımının üniform olduğu kabul edilmiştir (Dey ve diğerleri, 2008). Ayrıca üniformluluk katsayısı olarak bilinen $C_u = D_{60}/D_{10}$ şeklinde hesaplanmış ve her iki gruba ait değerler $C_u < 3,0$ olduğundan tane dağılımları üniform olarak belirlenmiştir (Yanmaz, 2002).

Çizelge 3.1. Taban malzemesine ait karakteristik büyüklükler

D_{10} (m)	D_{30} (m)	D_{50} (m)	D_{60} (m)	$D_{84,1}$ (m)	C_u	C_c	σ_g
0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,001	1,00	1,00	1,19

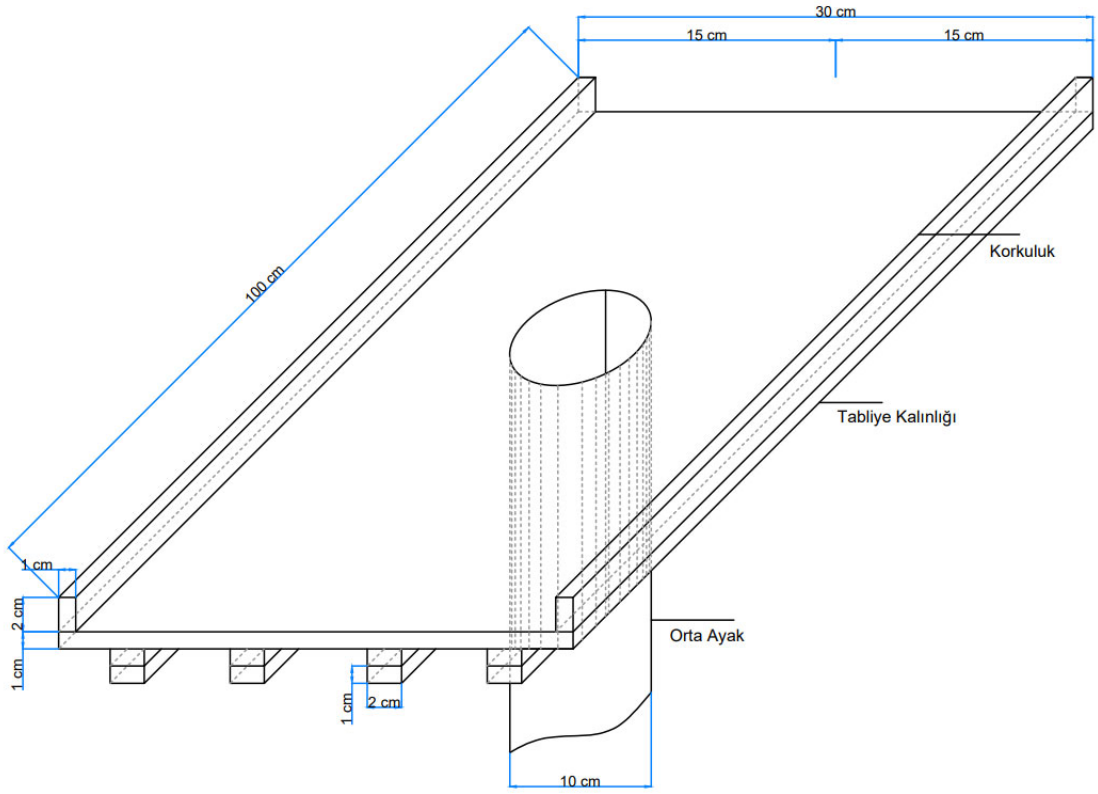
Derecelendirme sayısı $C_c = (D_{30})^2/(D_{10}.D_{60})$ şeklinde hesaplanmaktadır. Buna göre taban malzemesi için $C_c<1,5$ olarak belirlenmiştir (Shen ve diğerleri, 2012). Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (Unified Soil Classification System - USCS) göre deneylerde kullanılan malzemenin grup sembolü SP olup, zemin cinsi olarak kötü derecelendirilmiş temiz kumlar sınıfına girmektedir.

3.3.2. Köprü modeli

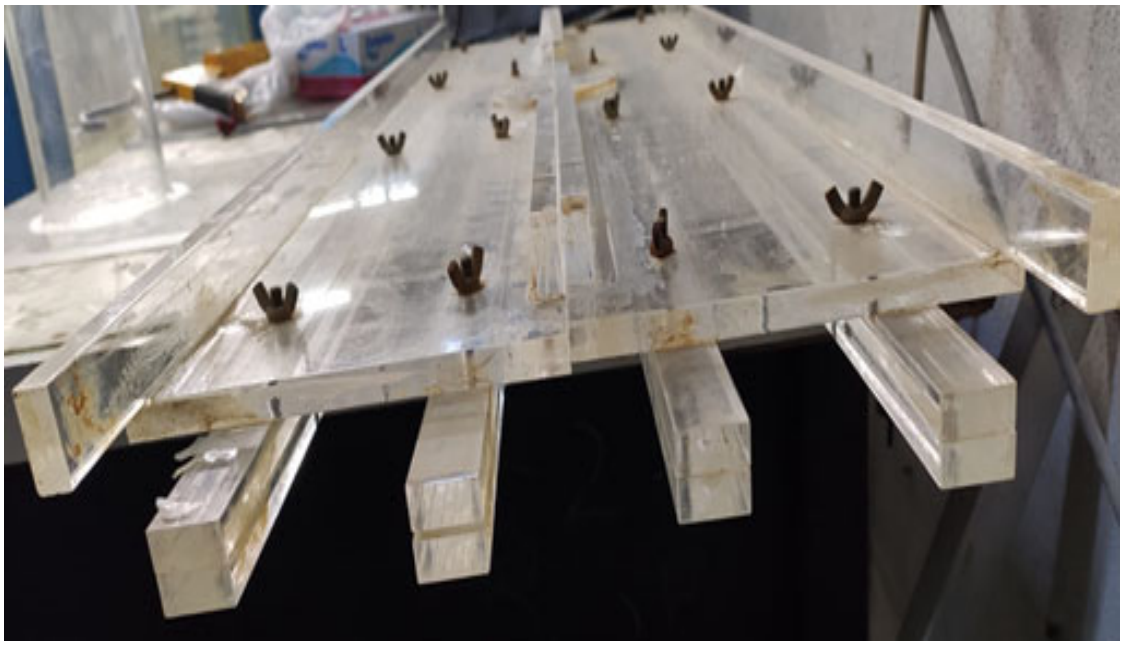
Tez kapsamında kullanılan tüm model elemanları pleksiglas malzemeden imal edilmiştir. Her deney öncesi birleşim bölgeleri sızıntıya mahal vermeme ve akımda herhangi bir rahatsızlık yaratmaması için kontrol edilmiştir. Köprü modelinin şematik çizimi Şekil 3.3'te verilmiştir.

Tabliye modeli

Deneylerde, Resim 3.2'de görülen pleksiglas malzemeden imal edilmiş, ayakları olmayan köprü tabliye modeli kullanılmıştır. Tabliye, planda akıma dik bir şekilde yerleştirilmiş olup dört kirişe sahiptir.



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan köprü modeli



Resim 3.2. Deneylerde kullanılan tabliye modeli

Köprü tabliye modeli, 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 bu parçalar üzerinden kaydırılarak çıkartılmış ve böylece taban ölçümleri gerçekleştirilebilmiştir. Söz konusu parçalar köprü tabliye modelinin birer parçası olduğundan tabliye modeli kanala yerleştirildiğinde bütün bir tabliye modeli oluşturulmuştur. Tabliye aynı zamanda boyuna ekseninde 4 adet vida ile birleştirilebilir şekilde iki parça halinde üretilmiştir. Böylece hem tabliye hem de orta ayağın olduğu temsili deneyler için ekle-çıkar sistemiyle kurulabilmesine olanak sağlamıştır.

Orta ayak modeli

Deneylerde pleksiglas malzemeden yapılmış 10 cm çapında silindirik orta ayak modeli kullanılmıştır. Orta ayak planda deney alanı başlangıcından 85 cm uzakta ve kanal kesitinin merkezinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Aynı zamanda tabliye ile birlikte olan deneylerde beraber kullanılacağından mevcut tabliye modelinin de tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Resim 3.4 ise orta ayağı içeren köprü tabliye modelini göstermektedir.



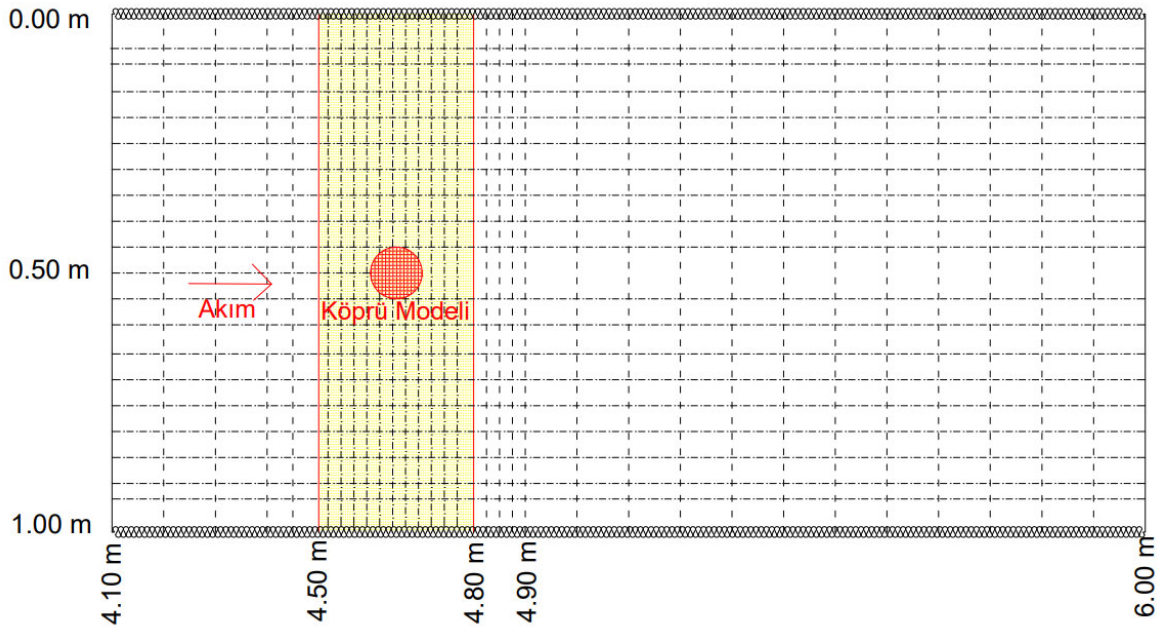
Resim 3.3. Deneylerde kullanılan orta ayak modeli



Resim 3.4. Deneylerde kullanılan köprü modeli

3.4. Deney Ölçümleri

Tez kapsamında köprü tabliyesi, köprü orta ayağı ve ikisinin beraber incelendiği durumlarda tabanda meydana gelen oyulma çukuru şekli ve derinliğinin belirlenmesi batimetrik ölçümelerle yapılmıştır. Köprü tabliyesinin yerleştirildiği deney bölgesi Şekil 3.4'te görüldüğü gibi gözlere bölünmüştür. Ölçümler yapılırken kanal boyuna doğrultusunda (x=4.10 m ~ x=6.00 m) test bölgesi başlangıcında 10 cm ve 5 cm aralıklarla, köprü tabliye bölgesinde ise 2,5 cm aralıklarla ölçüm alınmıştır. Kanal enine doğrultusundaki (y=0.00 m ~ y=1.00 m) ölçümler içinse sabit olarak 5 cm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Taban ölçümleri Leica DISTO D810 Lazermetre ile yapılmıştır (Bkz. Resim 3.5). Bu aletin tipik ölçü töleransı ± 1,0 mm olup yapılan ölçümler anında bluetooth bağlantısı ile bilgisayara aktarabilmektedir. Lazermetre kanal üzerinde hareket eden çerçeve sisteme 90°'lik açıyla ölçüm yüksekliği sabit olacak şekilde monte edilmiştir. Taban ölçümleri deney başlangıcı ve sonunda olmak üzere iki kez gerçekleştirilmiş, bu değerlerin farkı alınarak tabanda oluşan oyulma ve birikme yükseklikleri tespit edilebilmiştir.



Şekil 3.4. Köprü modelinin deney bölgesinde konumlandırılması



Resim 3.5. DISTO D810 Lazermetre

3.5. Deney Programı ve Kurulumu

Deneyler, 100 lt/sn, 110 lt/sn ve 120 lt/sn olmak üzere üç farklı debi, tek tabliye ve orta ayak konumu için gerçekleştirilmiştir. Tüm debi değerlerinde 34,5 cm, 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm olmak üzere 4 adet yaklaşım akım derinliği ile 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 belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinlikleri bu değerlerden büyük alınarak temiz su durumu sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinliklerinden 34,5 cm ve 37,5 cm değerleri kısmi basınçlı akım durumunu, 39,5 cm ve 41,5 cm değerleri ise savak tipi akım durumunu ifade etmektedir. Çizelge 3.2'de verilen akım özelliklerine göre yaklaşım akım hızının (V_a) kritik akım hızına (V_c) oranının 0,344 ile 0,497 arasında değiştiği belirlenmiştir. Burada kritik akım hızı (V_c) Eş. 2.6 ile hesaplanmıştır (Neil, 1973). Tüm deneylerde V_a/V_c oranın 1'den küçük olması kanalda temiz su durumunun sağlandığını göstermektedir (Umbrell ve diğerleri, 1998).

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan bazı parametreler

Q	Yaklaşım akım derinliği	V_a	Froude sayısı	D_{50}	V_c	V_a/V_c
(lt/sn)	y_a (m)	(m/sn)	-	(m)	(m/sn)	-
100	0,345	0,290	0,158	0,0008	0,495	0,585
	0,375	0,267	0,139	0,0008	0,502	0,531
	0,395	0,253	0,129	0,0008	0,507	0,500
	0,415	0,241	0,119	0,0008	0,511	0,472
	0,345	0,290	0,158	0,0008	0,495	0,585
	0,375	0,267	0,139	0,0008	0,502	0,531
	0,395	0,253	0,129	0,0008	0,507	0,500
	0,415	0,241	0,119	0,0008	0,511	0,472
	0,345	0,290	0,158	0,0008	0,495	0,585
	0,375	0,267	0,139	0,0008	0,502	0,531
	0,395	0,253	0,129	0,0008	0,507	0,500
	0,415	0,241	0,119	0,0008	0,511	0,472
110	0,345	0,319	0,173	0,0008	0,495	0,644
	0,375	0,293	0,153	0,0008	0,502	0,584
	0,395	0,278	0,141	0,0008	0,507	0,550
	0,415	0,265	0,131	0,0008	0,511	0,519
	0,345	0,319	0,173	0,0008	0,495	0,644
	0,375	0,293	0,153	0,0008	0,502	0,584
	0,395	0,278	0,141	0,0008	0,507	0,550
	0,415	0,265	0,131	0,0008	0,511	0,519
	0,345	0,319	0,173	0,0008	0,495	0,644
	0,375	0,293	0,153	0,0008	0,502	0,584
	0,395	0,278	0,141	0,0008	0,507	0,550
	0,415	0,265	0,131	0,0008	0,511	0,519
120	0,345	0,348	0,189	0,0008	0,495	0,702
	0,375	0,320	0,167	0,0008	0,502	0,637
	0,395	0,304	0,154	0,0008	0,507	0,600
	0,415	0,289	0,143	0,0008	0,511	0,566
	0,345	0,348	0,189	0,0008	0,495	0,702
	0,375	0,320	0,167	0,0008	0,502	0,637
	0,395	0,304	0,154	0,0008	0,507	0,600
	0,415	0,289	0,143	0,0008	0,511	0,566
	0,345	0,348	0,189	0,0008	0,495	0,702
	0,375	0,320	0,167	0,0008	0,502	0,637
	0,395	0,304	0,154	0,0008	0,507	0,600
	0,415	0,289	0,143	0,0008	0,511	0,566

3.6. Deney Prosedürü

Deney prosedürü aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

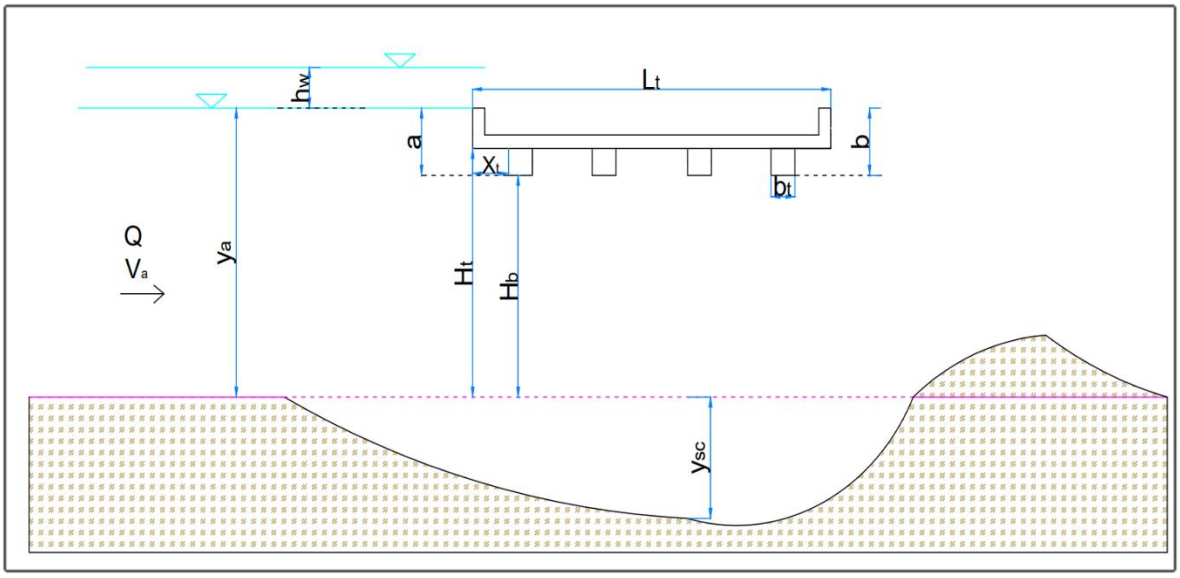
1. Deney kanalı test bölgesine yerleştirilen sediment sabit yükseklikli mastar yardımıyla düzleltilir. Sonra lazermetreyle deney öncesi taban ölçümü yapılarak kanal taban batimetrisi belirlenir.
2. Pompaların debisini ayarlamaya yarayan küresel vana yardımıyla çok yavaş bir şekilde sedimenti mümkün olduğunca rahatsız etmeden kanala su verilir ve debi ayarlanır.
3. Kanalın sonunda bulunan kapak yardımıyla yaklaşım 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 dokuz saat olarak belirlenmiştir. Deney süreleri belirlenirken yerinde gözlemleme yapılmıştır. Dolayısıyla dokuz saatlik deney süresi sonunda oyulma çukurunda çıplak gözle hareket tespit etmek neredeyse mümkün olamamıştır.
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 çukuru elde edilir.
8. Test bölgesindeki kum karıştırılıp düzenlendikten sonra bir sonraki deney için Adım 1'den yeniden başlanır.

Deney sıralaması olarak öncelikle düşük debiden ve düşük derinlikten başlayarak sırasıyla önce sadece tabliye sonra sadece orta ayak ve en son ikisinin beraber olduğu deney seti tamamlanmıştır. Sadece orta ayaktaki oyulmanın incelendiği ve tabliye-orta ayak deneylerinin beraber incelendiği deneylerin tümünde orta ayak sabit kalmıştır. Sadece tabliye deney sonrası sökülüp okumalar yapılmış, ardından tabliye tekrar yerleştirilmiştir.

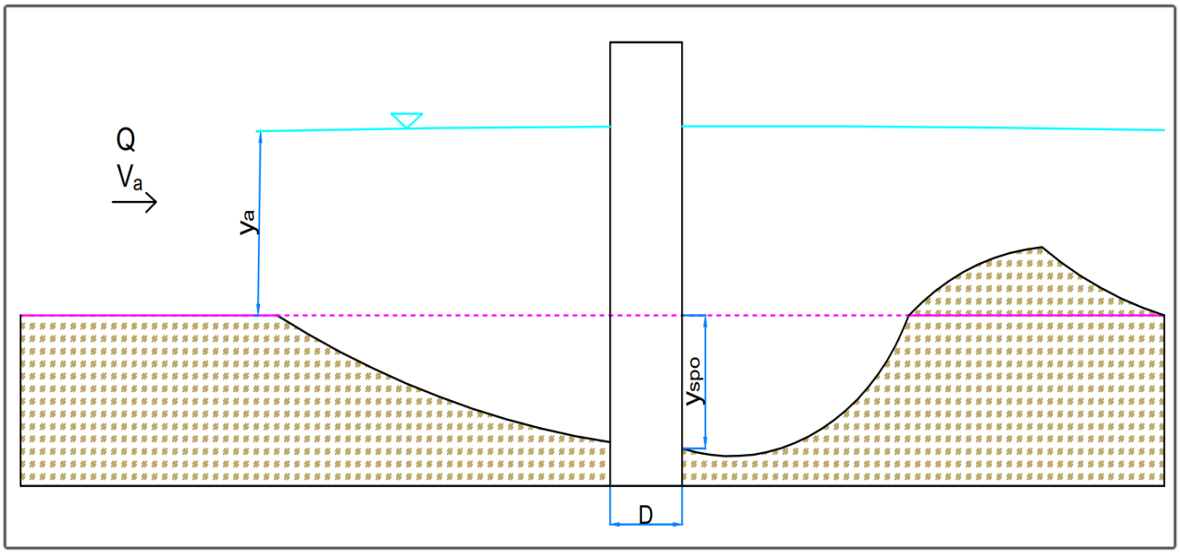
4. DENEY BULGULARI VE SONUÇLARININ İRDELENMESİ

4.1. Genel

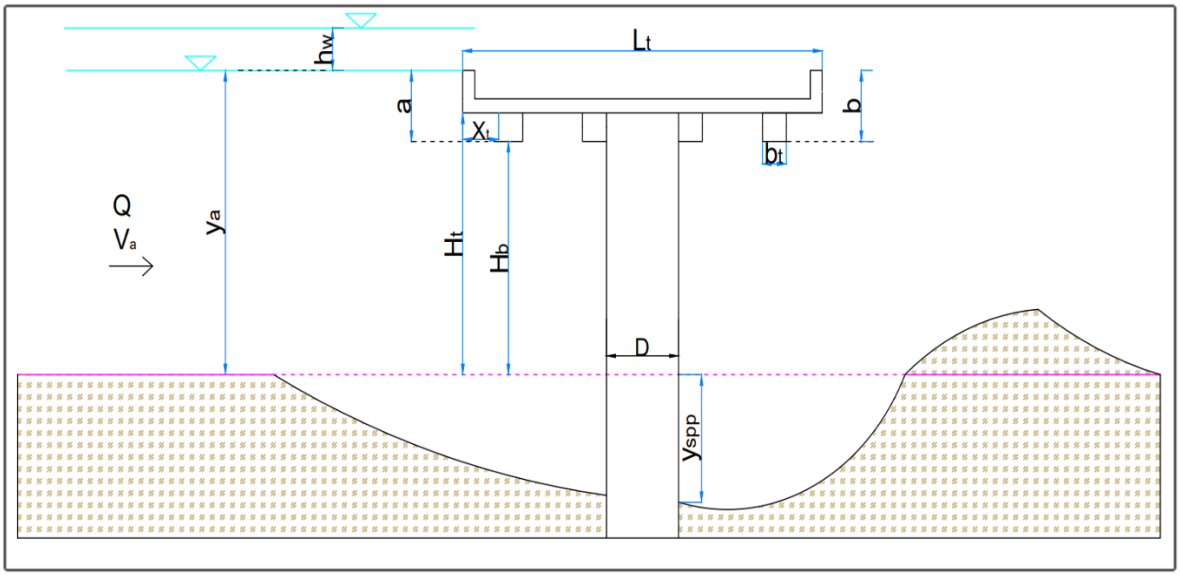
Çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneylerin ilk bölümünde, temiz su oyulması durumunda kısmi basınçlı ve tam basınçlı yani savak tipi akım şartlarında sadece köprü tabliyesi olması halinde tabliye altında meydana gelen daralma oyulma çukuru derinliği ve şekli incelenmiştir. İkinci grup deney setinde serbest akım durumunda silindirik orta ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma çukuru derinliği ve şekli incelenmiştir. Son olarak tabliye ve orta ayak eş zamanlı olarak kanala yerleştirilmiş, kısmi basınçlı ve tam basınçlı savak tipi akım şartlarında meydana gelen oyulma çukuru derinliği ve şekli incelenmiştir. Çalışma kapsamında her bölümde 12 adet olmak üzere toplam 36 adet deney yapılmıştır. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te deneylerde kullanılan köprü tabliye modeli ve ilgili parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sadece tabliyenin olduğu deney düzeneği ve parametreler



Şekil 4.2. Sadece orta ayak modelinin olduğu deney düzeneği ve parametreler



Şekil 4.3. Köprü tabliye modeli ile silindirik orta ayak modelinin birlikte olduğu deney modeli ve parametreler

Şekil 4.1- 4.3'te görülen y_{sc}= düşey daralma oyulma çukuru derinliğini, y_{spo}= serbest akım durumunda sadece ayak olması durumunda ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliğini ve y_{spp}: basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma derinliğini ifade etmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere birçok yönetmelikte $y_{spp}= y_{sc} + y_{spo}$ ile basınçlı durumda ayak etrafındaki basınçlı oyulma derinliği hesaplanmaktadır. Ayrıca a= etkili kiriş yüksekliği olup $a=\min(y_a-H_b,b)$ şeklinde belirlenmektedir.

Tüm deneylerde köprü tabliyesi tabana göre tek bir konuma (H_t=34,5 cm) yerleştirilmiştir. Tüm deneylerde tabliyedeki kirişlerin konumu ve adedi sabit tutulmuştur. Deneylerde kısmi basınçlı ve tam basınçlı yani savak tipi akım şartları 34,5 cm ile 41,5 cm aralığında dört farklı yaklaşım akım derinliği kullanılarak elde edilmiştir. Yerel oyulma deneylerinde 10 cm çapında tek silindirik orta ayak kullanılmıştır. Laboratuvar imkanları dahilinde deneylerde Fr_a = 0,119-0,189 arasında değişmektedir. Çizelge 4.1'de çalışma kapsamında yapılmış deneyler ve ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çalışma kapsamında yapılmış deneyler ve ölçüm sonuçları

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a (-)	$y_{spo,max}$ (cm)	$y_{sc,max}$ (cm)	$y_{spp,max}$ (cm)
100	34,5	0,158	13,6	0,5	15,6
	37,5	0,139	11	0,4	14,8
	39,5	0,129	9,9	0,3	13,7
	41,5	0,119	8,4	0,3	12,7
110	34,5	0,173	14,7	1,2	17,3
	37,5	0,153	13,2	1	17
	39,5	0,141	12	0,5	15,7
	41,5	0,131	10,7	0,4	14,2
120	34,5	0,189	15,8	3,3	18,9
	37,5	0,167	14,5	2,8	17,4
	39,5	0,154	13,5	2,2	16,7
	41,5	0,143	12,8	1,3	15,4

4.2. Oyulma Çukuru Özelliklerinin İncelenmesi

Tez kapsamında yapılmış olan deneylerde oluşan oyulma çukuru profilleri ve özellikleri oyulma tipine göre gruplandırılarak sunulmuştur.

4.2.1. Tabliye altında meydana gelen daralma oyulması özellikleri

Öncelikle orta veya kenar ayağı olmayan köprü tabliyesinin basınçlı akıma maruz kalması durumunda tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru incelenmiştir (Bkz. Resim 4.1). Çizelge 4.2'de sadece tabliyenin olması durumunda yapılan deney ölçümleri verilmiştir.



Resim 4.1. Tabliye altında meydana gelen daralma oyulması deneyi

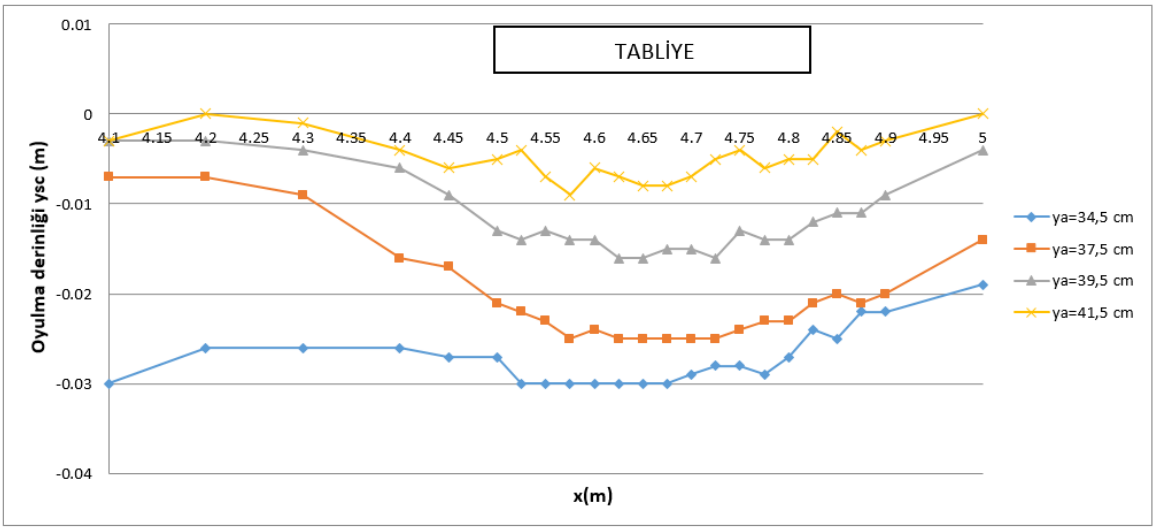
Ölçüm değerleri incelendiğinde kısmi basınçlı akım ve savak tipi akım durumlarında aynı debi değerinde artan yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, farklı debi değerlerinde aynı yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin debi ile birlikte arttığı görülmüştür. Maksimum oyulma çukuru derinliğinin oluştuğu yer ile ilgili olarak sabit bir nokta gözlemlenmemiş olup, çoğunlukla $y_{sc,max}$'ın tabliyenin altında kalan bölge sınırları içerisinde meydana geldiği tespit edilmiştir (Guo ve diğerleri, 2010). Çalışmada $y_{sc,max}$ değerleri $y_{spo,max}$ ile $y_{spp,max}$ değerlerinin oluştuğu konumlardan farklı noktalarda meydana gelmiştir. Bu nedenle hem maksimum oyulma değeri $y_{sc,max}$'ın meydana geldiği nokta özellikleri hem de $y_{spp,max}$'ın meydana geldiği y_{sc} değerleri süperpoze edilerek toplam

derinlikler incelenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu nedenle Çizelge 4.2'de sadece tabliye olması durumunda meydana gelen $y_{sc,max}$ değeri ve konumu ile basınçlı oyulma durumunda meydana gelen $y_{spp,max}$'ın konumundaki y_{sc} değerleri verilmiştir.

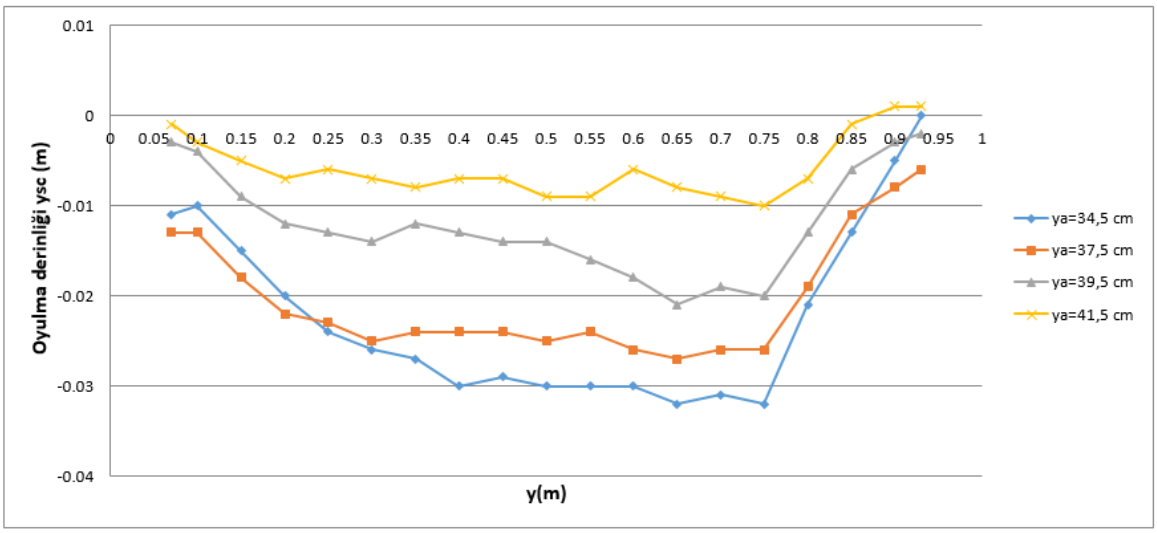
Çizelge 4.2. Sadece tabliye olması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Sadece tabliye olması durumunda daralma oyulması özellikleri			Tabliye ve orta ayak durumundaki $y_{spp,max}$ konumundaki y_{sc} oyulma özellikleri		
		$y_{sc,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	y_{sc} (cm)	x (m)	y (cm)
100	34,5	0,5	4,650	0,70	0,4	4,575	0,50
	37,5	0,4	4,575	0,75	0,3	4,575	0,50
	39,5	0,3	4,700	0,70	0,2	4,575	0,50
	41,5	0,3	4,575	0,60	0,1	4,575	0,50
110	34,5	1,2	4,600	0,70	0,9	4,575	0,50
	37,5	1,0	4,650	0,65	0,6	4,575	0,50
	39,5	0,5	4,600	0,60	0,3	4,575	0,50
	41,5	0,4	4,500	0,50	0,2	4,575	0,50
120	34,5	3,3	4,550	0,70	3,0	4,575	0,50
	37,5	2,8	4,650	0,60	2,5	4,575	0,50
	39,5	2,2	4,750	0,70	1,4	4,575	0,50
	41,5	1,3	4,650	0,75	0,9	4,575	0,50

Yaklaşım akım derinliğinin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için 34,5 cm, 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm olmak üzere dört farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır. Aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla ortalama akım hızı ve dolayısıyla Froude sayısının küçüldüğü ve meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin de azaldığı görülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde ölçülmüş en büyük maksimum oyulma çukuru derinliğinin en büyük debi olan 120 lt/sn'de en küçük yaklaşım akım derinliği 34,5 cm'de meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.4'te 120 lt/sn'de farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri, Şekil 4.5'te ise aynı debi için kanal en kesitindeki oyulma çukuru profilleri görülmektedir.



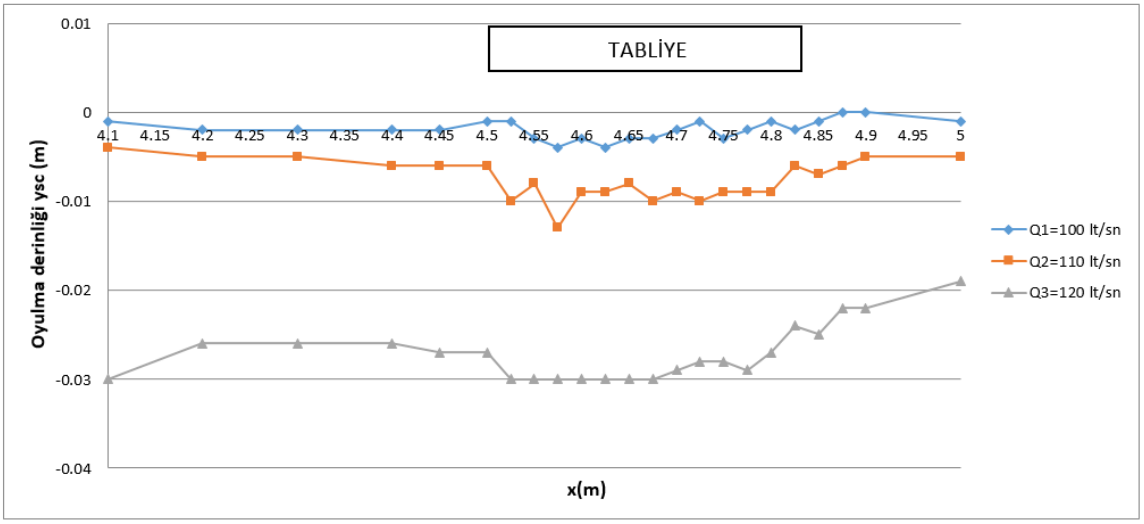
Şekil 4.4. 120 lt/sn'lik debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili



Şekil 4.5. 120 lt/sn'lik debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde (x=4,575 m'de) meydana gelen oyulma çukuru profili

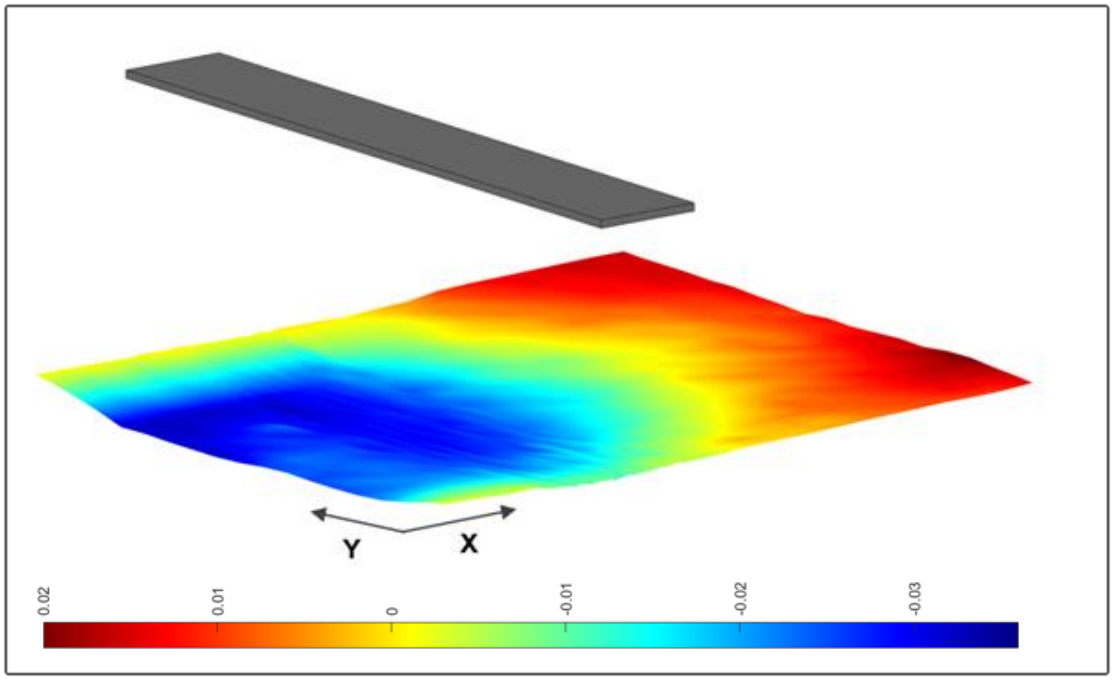
Dolayısıyla yaklaşım akım derinliğinin en küçük olduğu 34,5 cm'de en büyük oyulma çukuru derinliğinin meydana geldiği gözlemlenmiştir (Bkz. Çizelge 4.2, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Akımın savak tipi olması durumunda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükünün de arttığı ve maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Aynı şekilde sabit y_a ve artan debi değerlerinde hız ve Froude değeri arttığından $y_{sc,max}$'da artmıştır. Şekil 4.6'da en büyük maksimum oyulma çukuru derinliklerinin gözlemlendiği 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Oyulma çukuru şekli incelendiğinde ise basınçlı

akım durumunda oyulma çukuru profilinin, savak tipi akıma kıyasla daha geniş olduğu ve özellikle mansap şevlerinin daha dik olduğu görülmüştür.

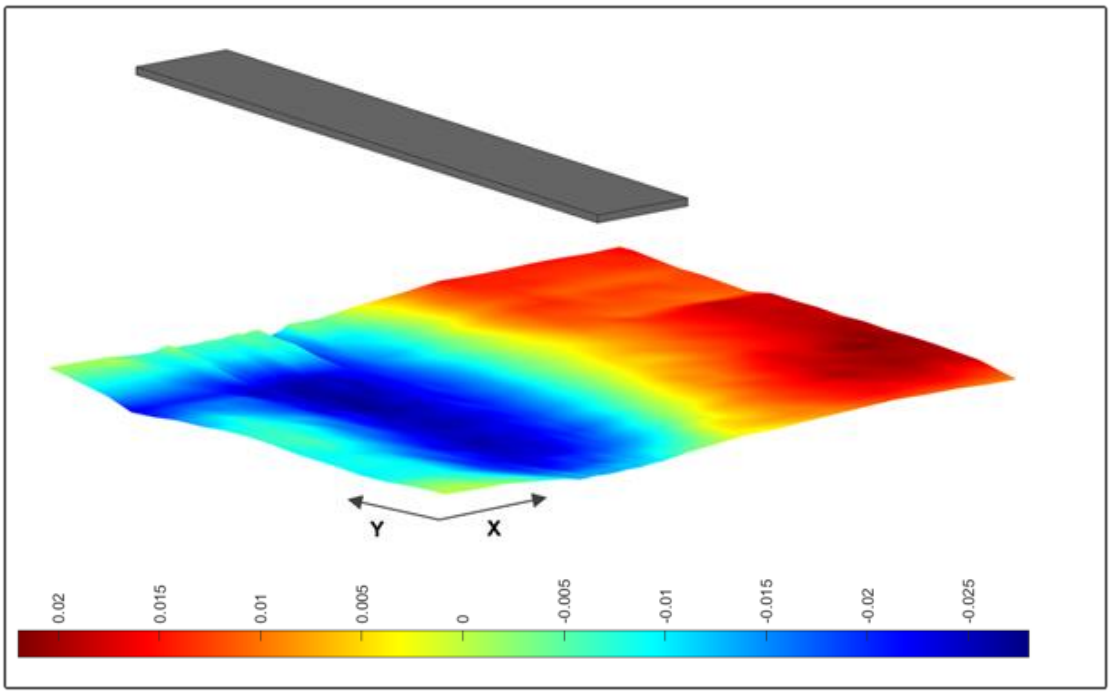


Şekil 4.6. y_a=34,5 cm ve farklı debi değerlerinde (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de en büyük maksimum oyulma derinliklerinin gözlemlendiği oyulma çukuru haritaları görülmektedir. Grafik üzerinde temsili olarak gösterilen tabliye genişliği gerçek boyutlarda olup tabliye kalınlığı ölçekli çizilmemiştir.



Şekil 4.7. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği durumunda meydana gelen oyulma çukuru y_{sc} (m)



Şekil 4.8. 120 lt/sn'lik debi ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği durumunda meydana gelen oyulma çukuru y_{sc} (m)

4.2.2. Orta ayak etrafındaki yerel oyulma özellikleri

Çalışmanın ikinci grup deney setinde sadece orta ayağın olması durumunda meydana gelen yerel oyulma çukuru incelenmiştir. Deneylerde tam kanal merkezine yerleştirilmiş 10 cm çapında silindirik bir ayak kullanılmıştır. Resim 4.2'de serbest akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulma çukuru görülmektedir. Çizelge 4.3'te ise serbest akım durumunda meydana gelen maksimum yerel oyulma çukuru derinliği $y_{spo,max}$ ve konumu ile tabliye ve ayak olması durumunda ölçülen $y_{spp,max}$ değerinin ölçüldüğü konumdaki y_{spo} değerleri verilmiştir.

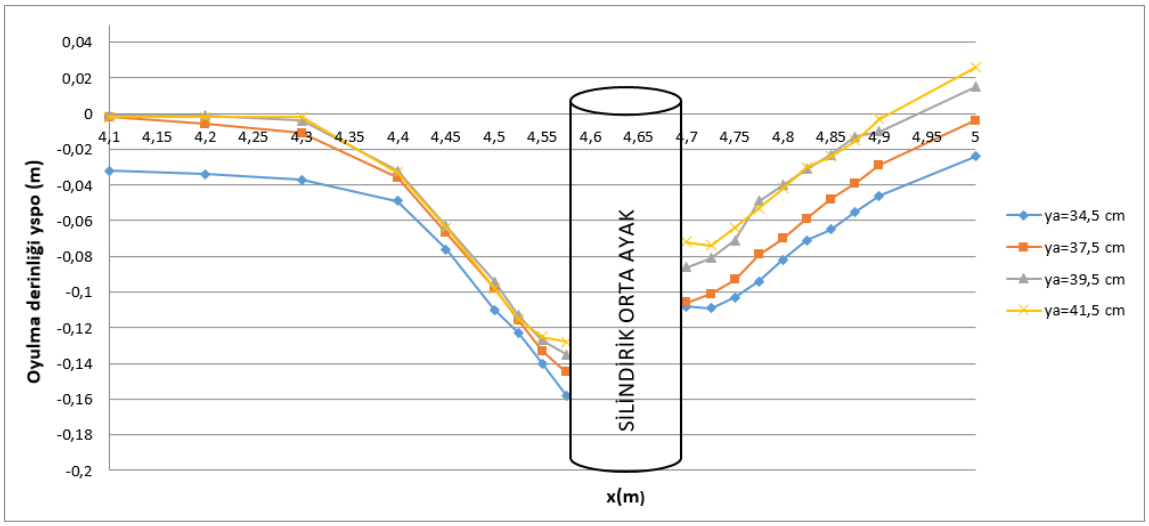
Deney sonuçları incelendiğinde ölçülmüş en büyük maksimum oyulma çukuru derinliğinin 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.9-4.11'de sırasıyla 120 lt/sn, 110 lt/sn ve 100 lt/sn'lik debilerde farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere serbest akım durumunda aynı debi değerinde artan yaklaşım akım derinliği durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinde azalma olduğu görülmektedir.



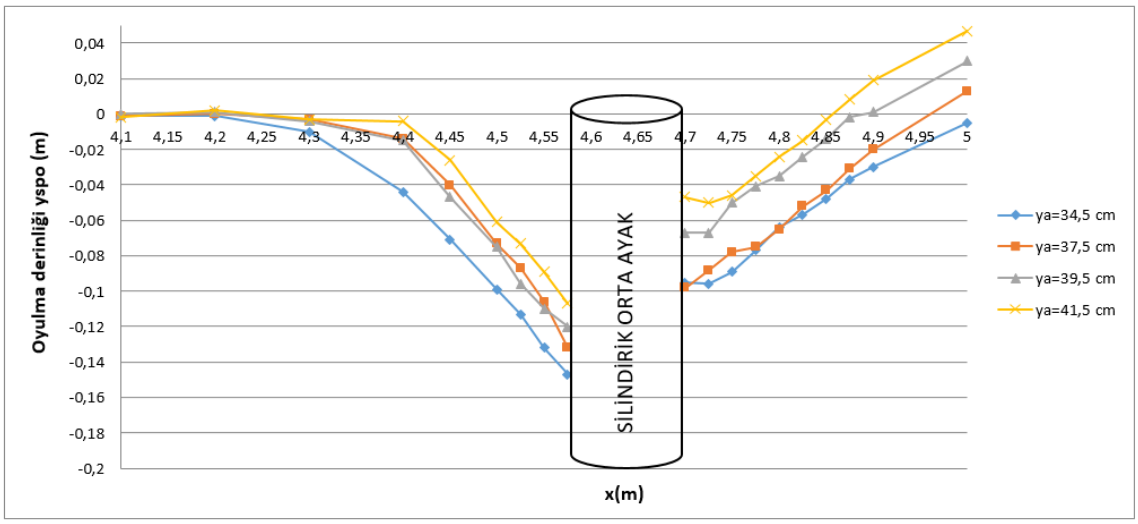
Resim 4.2. Orta ayak deneyinde suyun kanaldan deşarjı

Çizelge 4.3. Serbest ve basınçlı akım durumlarında ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Serbest akım durumunda yerel oyulma özellikleri		
		$y_{spo,max}$ (cm)	x (m)	y (m)
100	34,5	13,6	4,575	0,50
	37,5	11,0	4,575	0,50
	39,5	9,9	4,575	0,50
	41,5	8,4	4,575	0,50
110	34,5	14,7	4,575	0,50
	37,5	13,2	4,575	0,50
	39,5	12,0	4,575	0,50
	41,5	10,7	4,575	0,50
120	34,5	15,8	4,575	0,50
	37,5	14,5	4,575	0,50
	39,5	13,5	4,575	0,50
	41,5	12,8	4,575	0,50

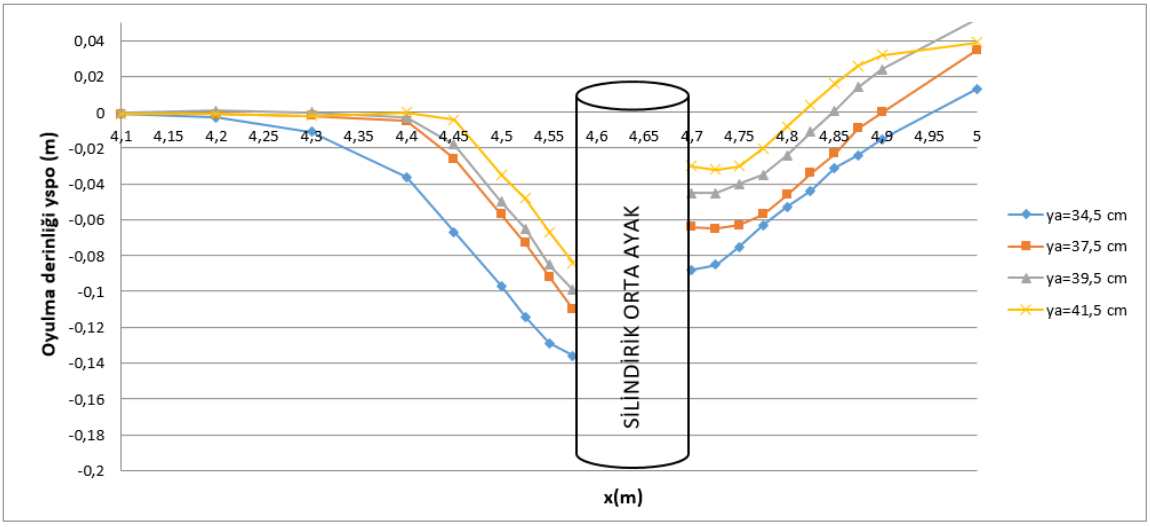


Şekil 4.9. 120 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru profilleri

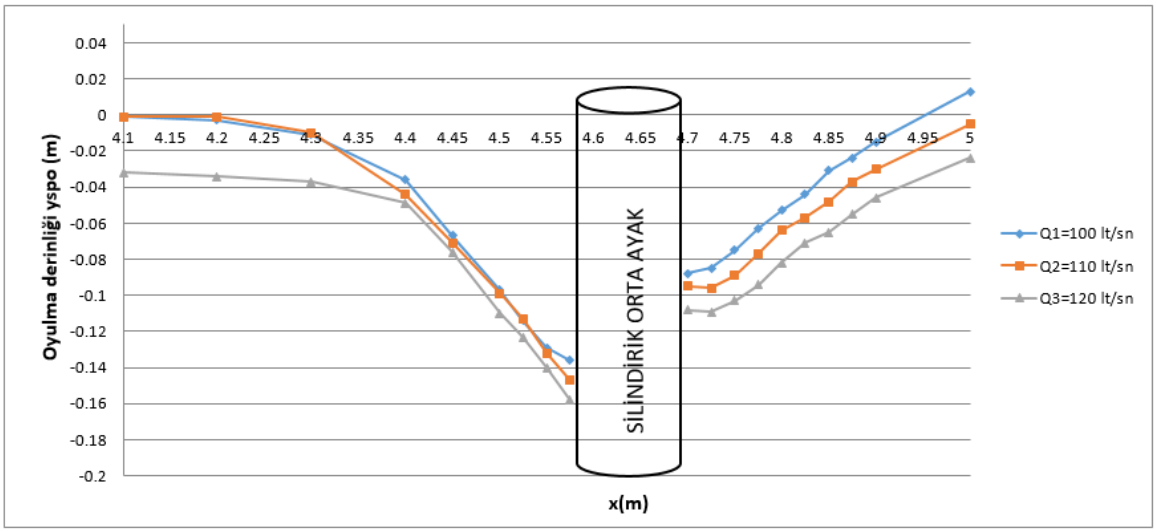


Şekil 4.10. 110 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru profilleri

Şekil 4.12'de en büyük oyulma çukuru derinliğinin gözlemlendiği yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, farklı debilerde aynı yaklaşım akım derinliğinde artan debi değeri ile maksimum oyulma çukuru derinliğinde artış olduğu görülmektedir. Tüm deneylerde gözlemlenen özellik ise maksimum oyulma çukuru derinliğinin oluştuğu konum olup, literatürdeki çalışmalarda gözlemlendiği gibi $y_{spo,max}$ orta ayağın hemen ön kısmında tam kanal merkezinde meydana gelmektedir.



Şekil 4.11. 100 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru profilleri

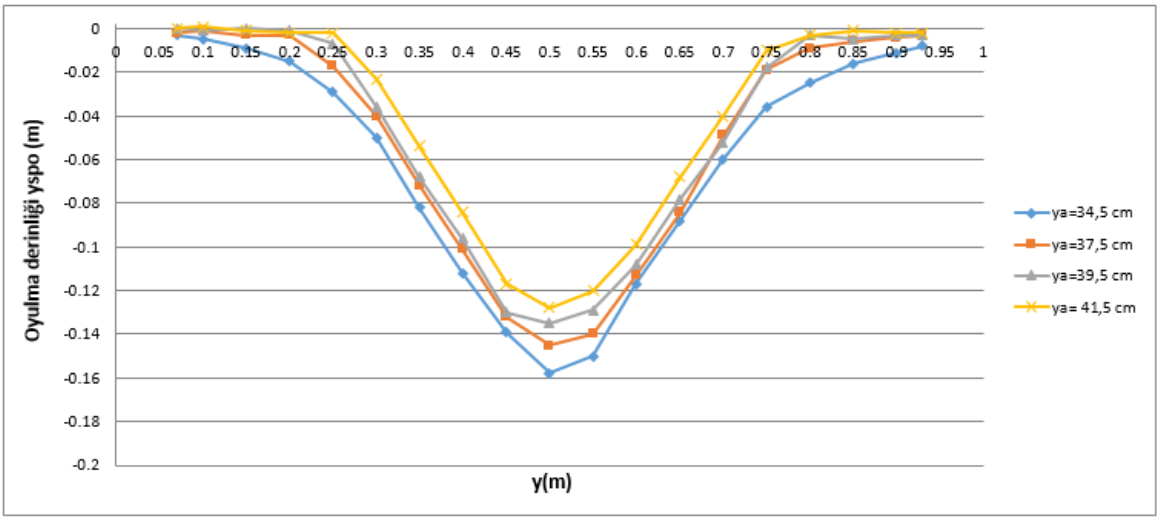


Şekil 4.12. y_a=34,5 cm ve farklı debi değerlerinde orta ayakta (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili

Serbest akım durumunda sabit bir debi değerinde artan yaklaşım akım derinliğinde ıslak alan artmakta, dolayısıyla yaklaşım akım hızı azalmaktadır. Böylece azalan akım hızından ötürü maksimum oyulma çukuru derinliği de azalmaktadır. Aynı şekilde yaklaşım akım derinliğinin sabit olduğu durumlarda artan debi ile yaklaşım akım hızı da doğru orantılı olarak artmakta böylece tabandaki sürtünme gerilmesi ve maksimum oyulma çukuru derinliği de artmaktadır.

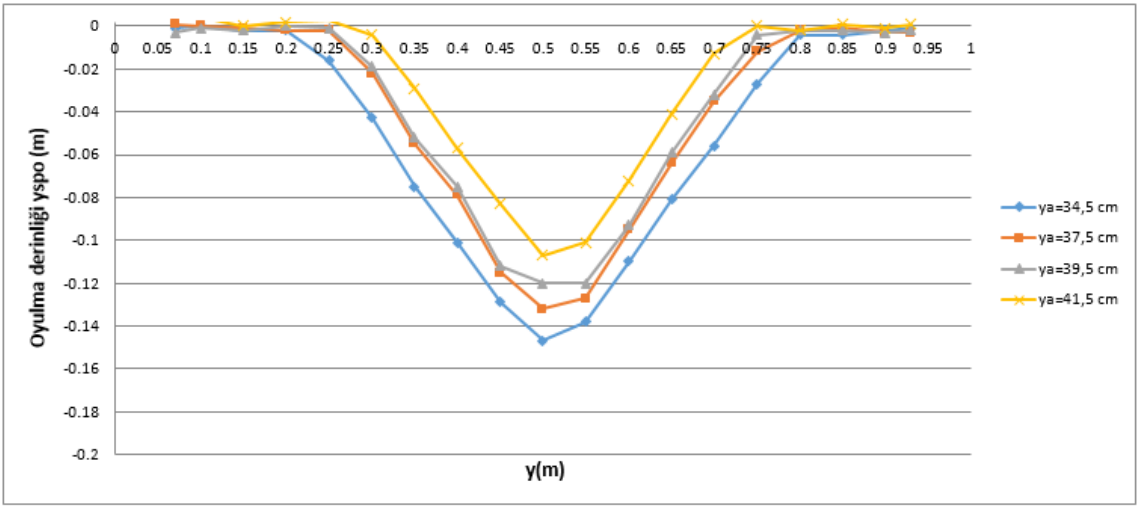
Şekil 4.13-4.15'te farklı debi değerlerinde kanal en kesitinde meydana gelmiş olan oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Yapılmış olan tüm deneylerde maksimum oyulma derinliği

kanal boyuna profilinde 4,575 m'de ve en kesitin merkezi olan 50 cm'de meydana gelmiştir. En kesitte 19 ölçüm, boyuna doğrultuda da aralıklara bağlı olarak toplamda 33 ölçüm birleştirilerek oyulma çukuru şekli elde edilmiştir.

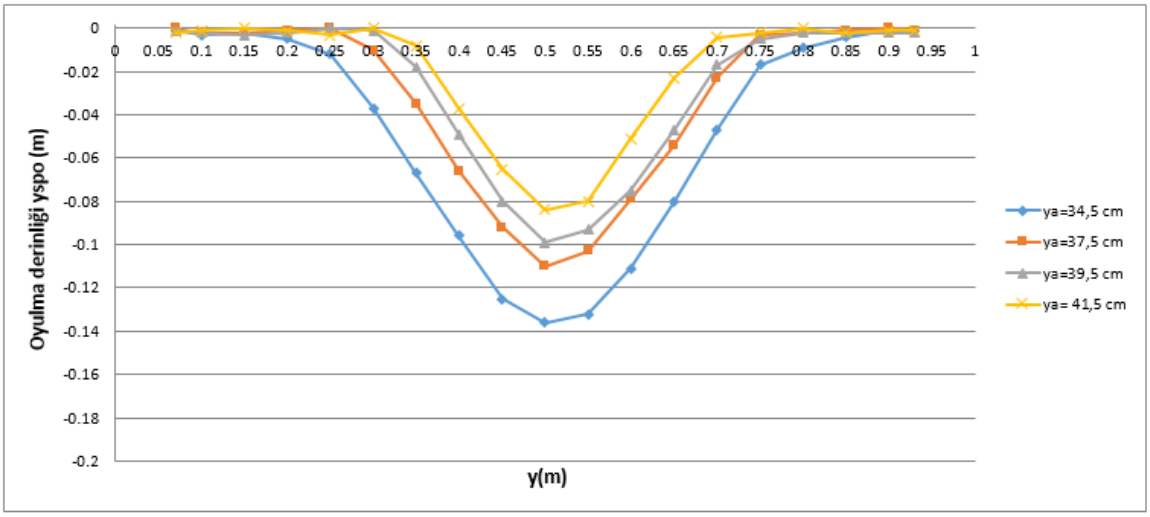


Şekil 4.13. 120 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti

Deney verileriyle çizilmiş olan şekiller incelendiğinde tüm debi değerlerinde ve yaklaşım akım derinliklerinde oyulma çukuru ve şeklinin literatürdeki araştırmalarla benzer olduğu gözlemlenmiştir. Tüm orta ayak deneylerinde orta ayağın memba tarafındaki oyulma çukuru derinliği orta ayağın mansaba yakın olan yüzeyindeki derinliğinden daha büyüktür.

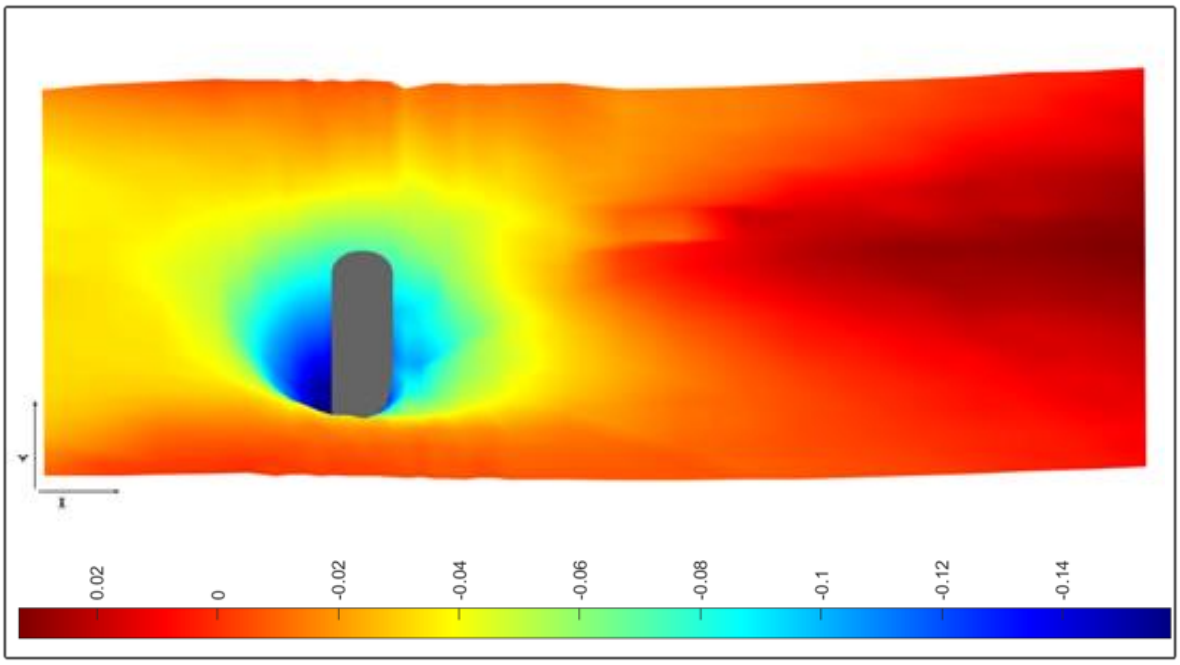


Şekil 4.14. 110 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti

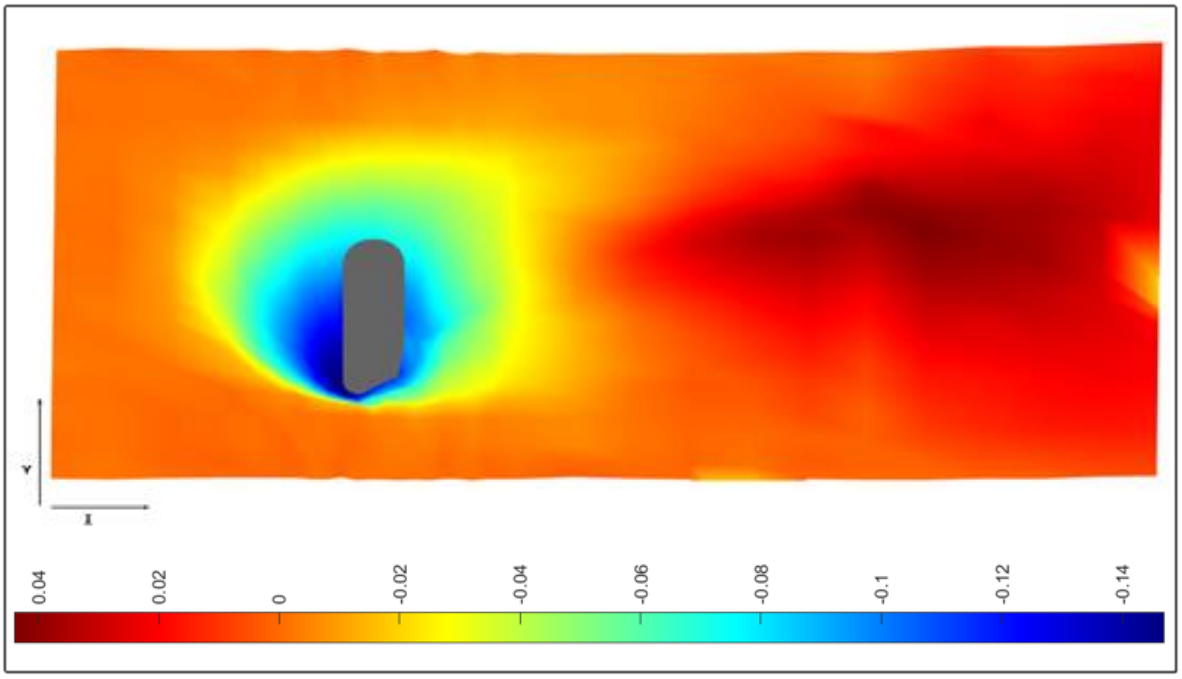


Şekil 4.15. 100 lt/sn'lik debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti

Şekil 4.16 ve 4.17'de sırasıyla 120 lt/sn ve 110 lt/sn'lik debi değerlerinde 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş oyulma çukurları görülmektedir. Şekiller üzerindeki silindirik orta ayak ölçeksiz olup temsili olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 4.16. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spo} (m)



Şekil 4.17. 120 lt/sn'lik debi ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spo} (m)

4.2.3. Tabliye ve orta ayağın beraber olduğu basınçlı oyulma özellikleri

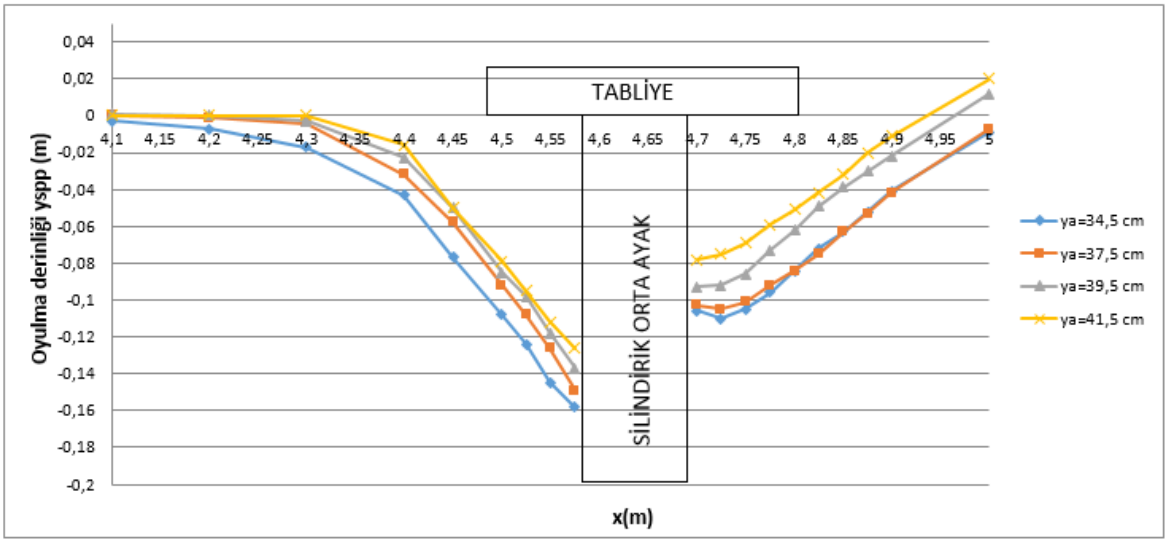
Tabliye ve orta ayağın beraber incelendiği basınçlı akım durumunda yerel oyulma ile daralma oyulması birlikte meydana gelmektedir. Çalışmanın ana amaçlarından biri bu durumda meydana gelen oyulmanın incelenmesidir. Basınçlı akım deneylerinde de sadece tabliye ve sadece ayak deneylerindeki akım değerleri kullanılarak meydana gelen oyulma çukuru incelenmiştir. Daha sonra her üç deney setinde ölçülmüş oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır. Resim 4.3'te tabliye ve orta ayağın yer aldığı deneyden görüntü verilmiştir. Çizelge 4.4'te basınçlı akım durumunda tabliye ve orta ayağın birlikte olması halinde ölçülmüş olan maksimum oyulma çukuru derinlikleri görülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde ölçülmüş en büyük maksimum oyulma çukuru derinliğinin 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20'de sırasıyla 100 lt/sn, 110 lt/sn ve 120 lt/sn'lik debi değerlerinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelmiş oyulma çukuru profilleri görülmektedir.



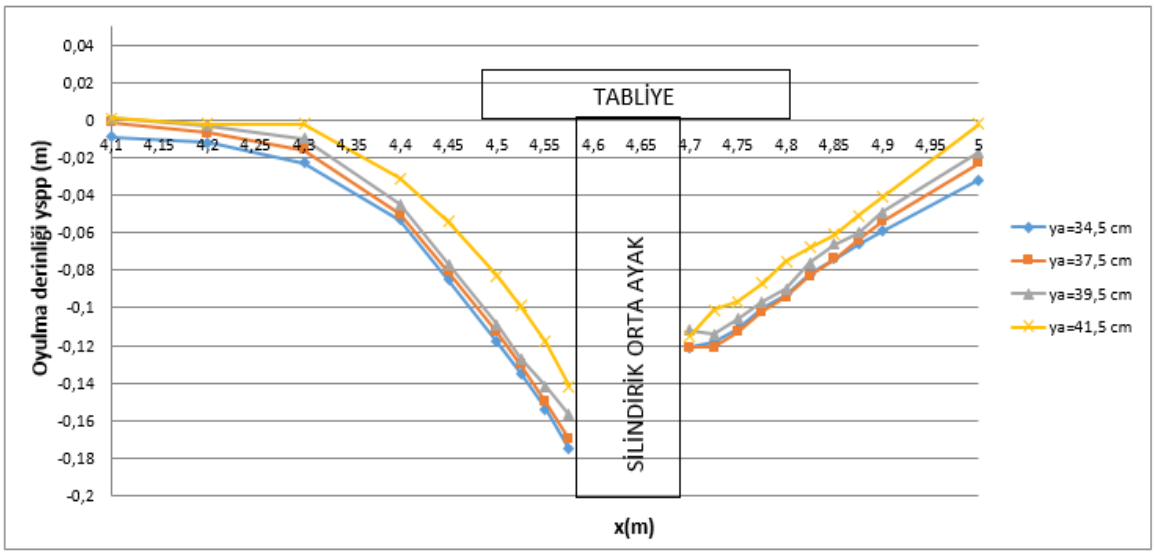
Resim 4.3. Tabliye ve orta ayak deneylerinde suyun kanaldan deşarjı sırasında çekilmiş görüntü

Çizelge 4.4. Basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinlikleri

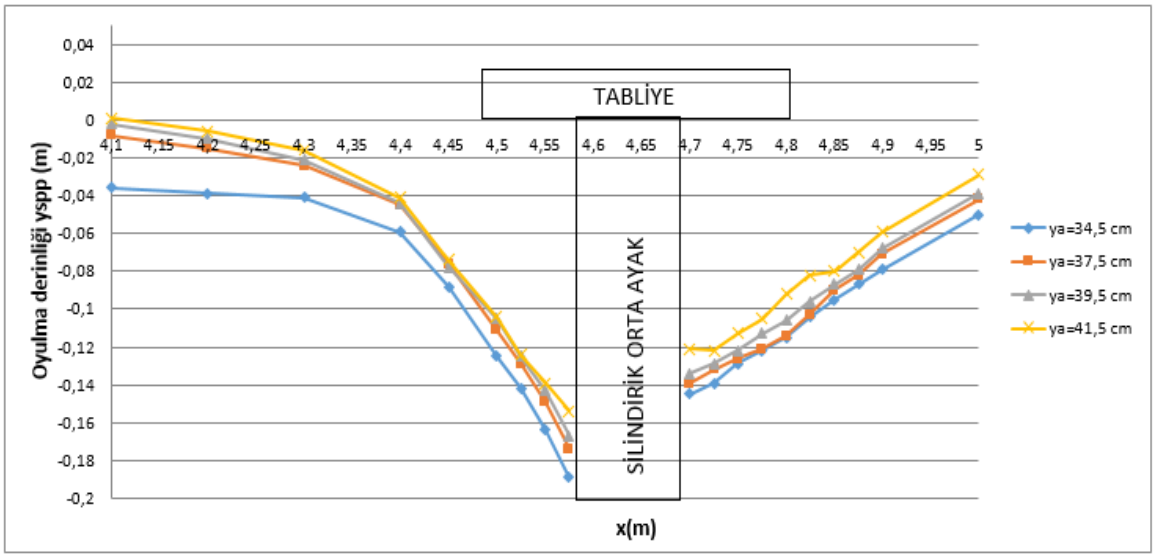
Q (lt/sn)	y_a (cm)	Basınçlı akım durumunda $y_{spp,max}$ özellikleri			$y_{spp,max}$ noktasın daki y_{spo} değeri	$y_{spp,max}$ noktasın daki y_{sc} değeri	Toplam y_{spo}+ y_{sc} değeri	Fark Yüzdesi
		$y_{spp,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	y_{spo} (cm)	y_{sc} (cm)	y_{spo}+ y_{sc} (cm)	%
100	34,5	15,6	4,575	0,50	13,6	0,4	14	11,43
	37,5	14,8	4,575	0,50	11,0	0,3	11,3	30,97
	39,5	13,7	4,575	0,50	9,9	0,2	10,1	35,64
	41,5	12,7	4,575	0,50	8,4	0,1	8,5	49,41
110	34,5	17,3	4,575	0,50	14,7	0,9	15,6	10,9
	37,5	17,0	4,575	0,50	13,2	0,6	13,8	23,19
	39,5	15,7	4,575	0,50	12,0	0,3	12,3	27,64
	41,5	14,2	4,575	0,50	10,7	0,2	10,9	30,28
120	34,5	18,9	4,575	0,50	15,8	3,0	18,8	0,53
	37,5	17,4	4,575	0,50	14,5	2,5	17	2,35
	39,5	16,7	4,575	0,50	13,5	1,4	14,9	12,08
	41,5	15,4	4,575	0,50	12,8	0,9	13,7	12,41



Şekil 4.18. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 100 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru

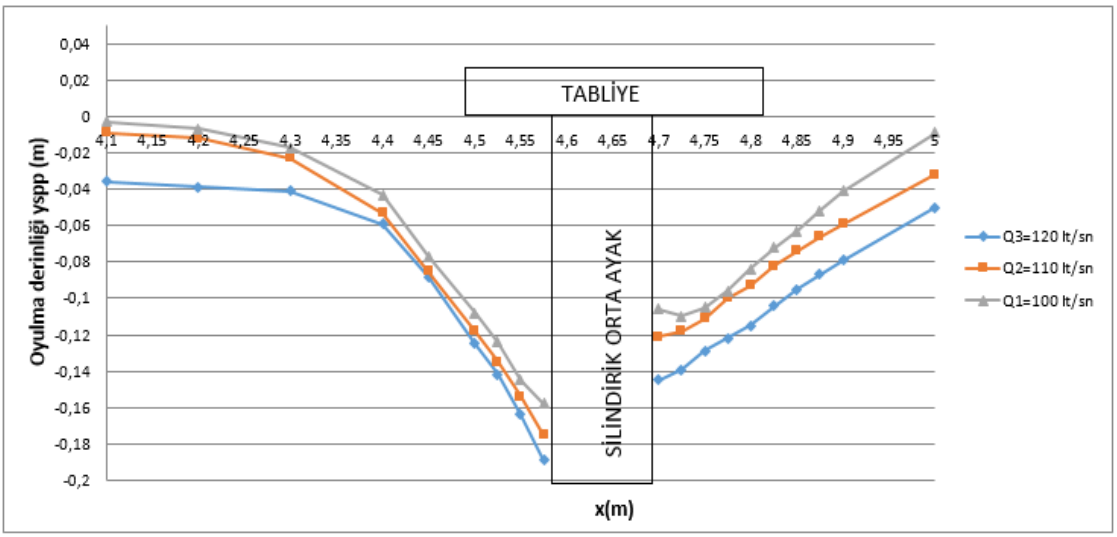


Şekil 4.19. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 110 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru



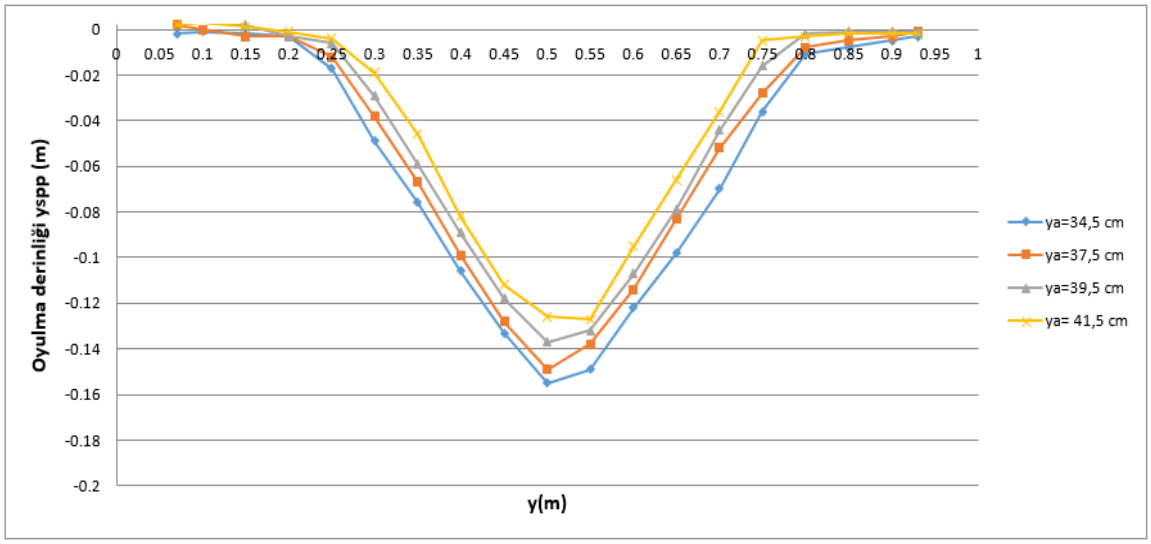
Şekil 4.20. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 120 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru

Basınçlı akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulmanın aynı debi değerinde artan yaklaşım akım derinliğinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.21'de ise 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiş olan oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Şekil 4.21'de görüldüğü üzere farklı debilerde aynı yaklaşım akım derinliğinde artan debi ile meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Serbest akım deneylerinde gözlemlendiği gibi basınçlı akım deneylerinde de maksimum oyulma çukuru derinliği yine orta ayağın hemen memba kısmında ve tam ayak merkezinde meydana gelmiştir.

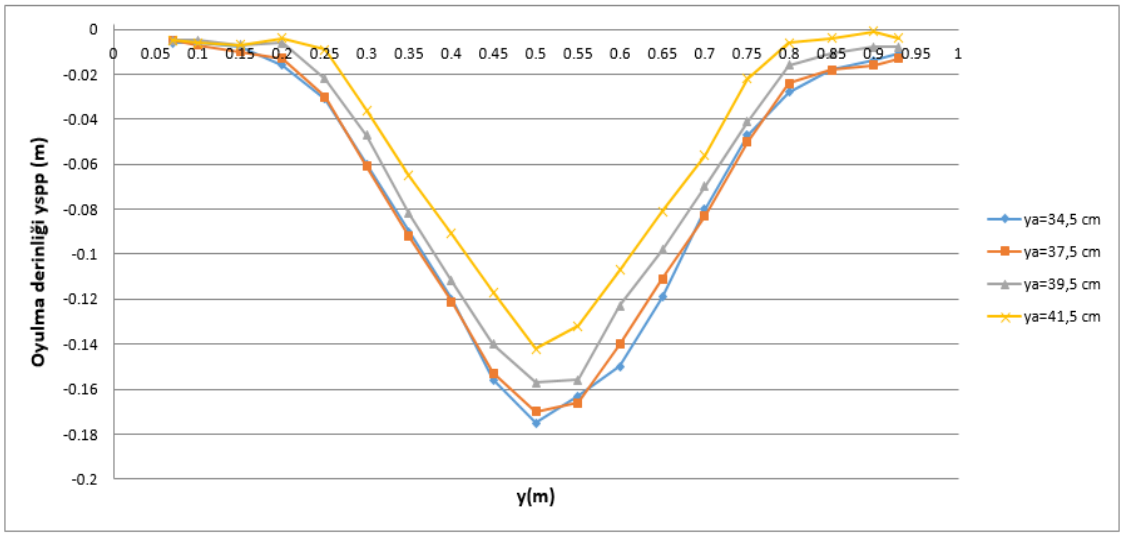


Şekil 4.21. Basınçlı akım durumunda y_a=34,5 cm ve farklı debi değerlerinde orta ayak etrafında (y=50 cm'de) meydana gelen oyulma çukuru profili

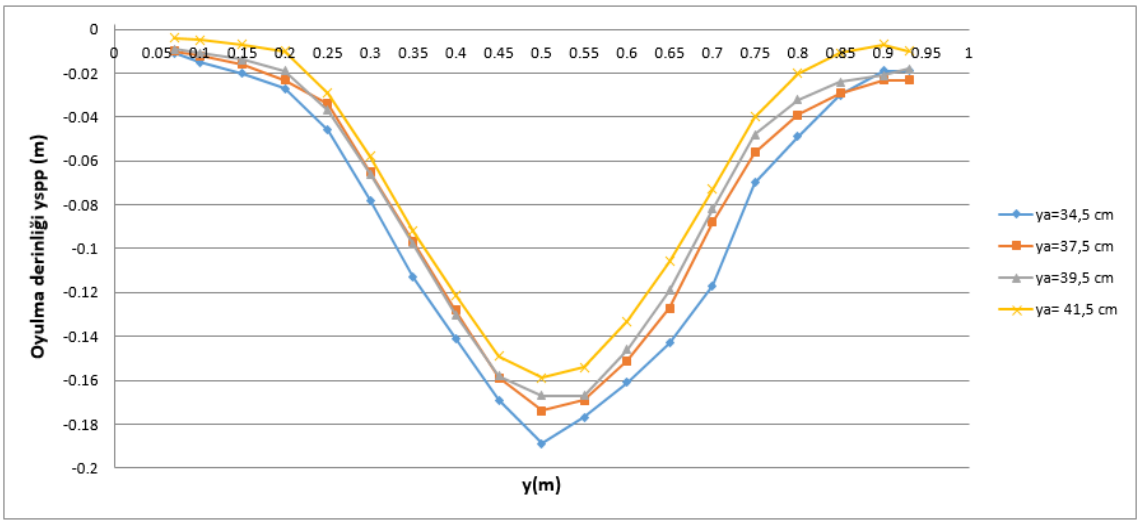
Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te sırasıyla 100 lt/sn, 110 lt/sn ve 120 lt/sn'lik debi değerlerinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen en kesitler görülmektedir. Maksimum oyulma çukuru profili kanal boyuna uzunluğunda 4,575 m'de ve en kesit 50 cm'de oluşmuştur.



Şekil 4.22. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 100 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti

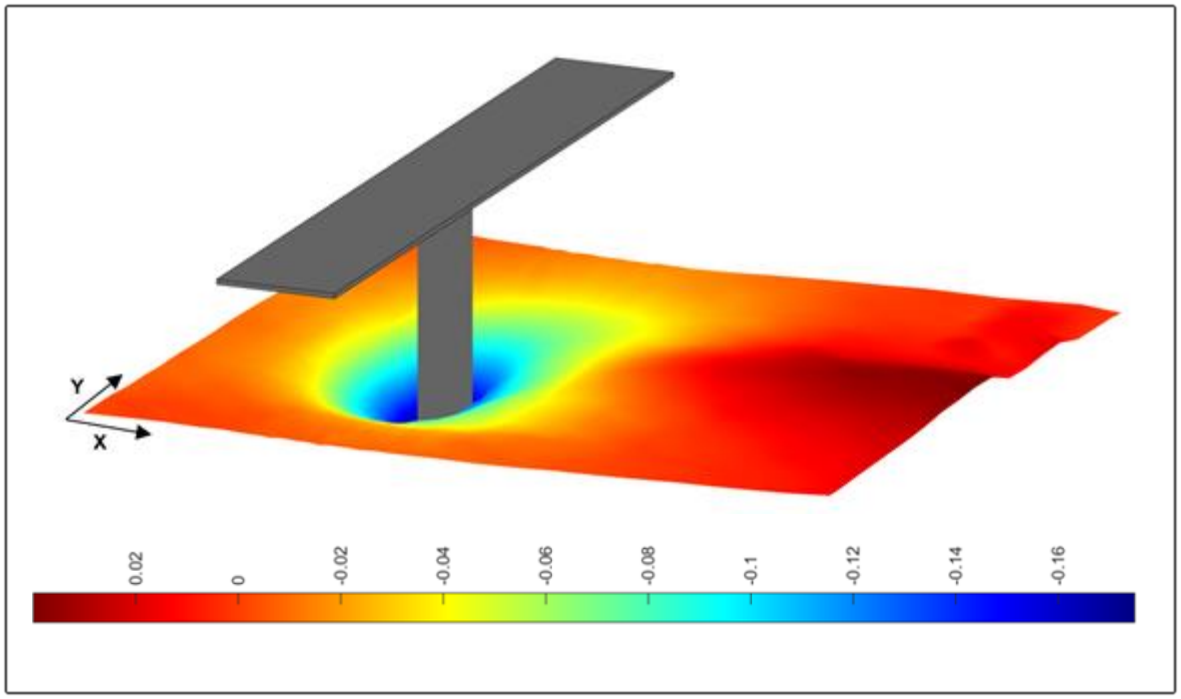


Şekil 4.23. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 110 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti

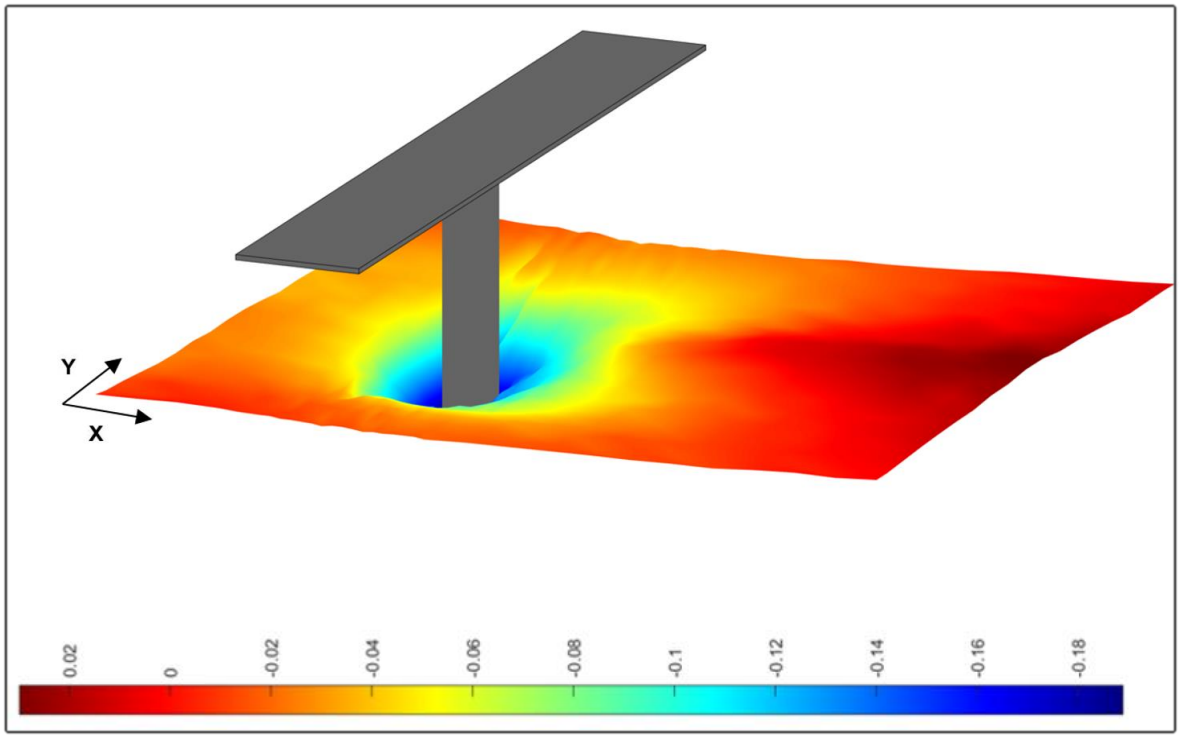


Şekil 4.24. Köprü ayağında basınçlı akım durumunda 120 lt/sn'lik debi geçmesi halinde meydana gelen oyulma çukuru en kesiti

Şekil 4.25 ve 4.26'da sırasıyla 120 lt/sn'deki debi değerinde 34,5 cm ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde oluşan oyulma çukuru profilleri görülmektedir. Grafik üzerinde temsili olarak gösterilen silindirik ayak ve tabliye genişlikleri gerçek boyutlarda olup derinlikleri ölçekli çizilmemiştir.

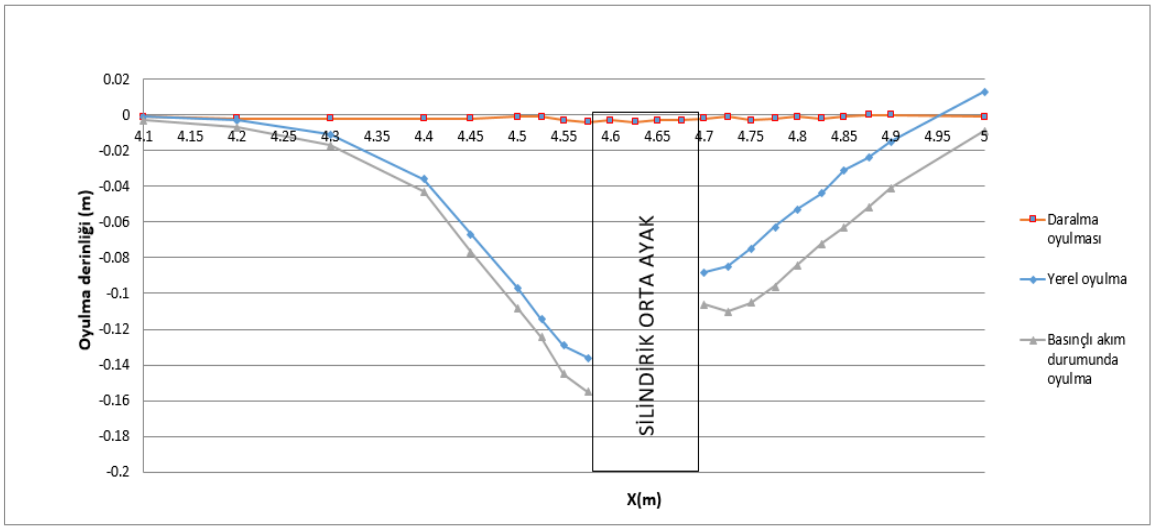


Şekil 4.25. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spp} (m)

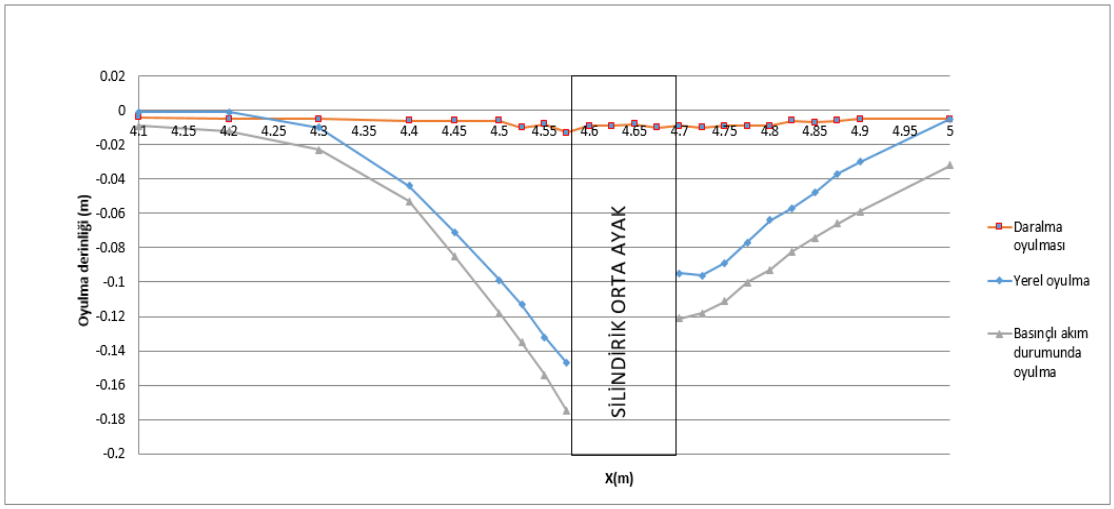


Şekil 4.26. 120 lt/sn'lik debi ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen yerel oyulma çukuru y_{spp} (m)

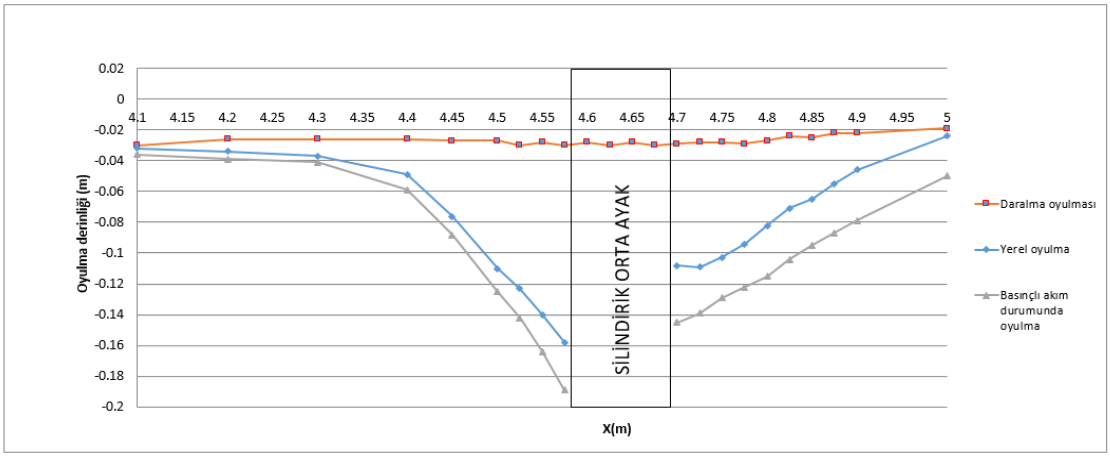
Çalışma kapsamında yapılmış olan üç grup deney setine ait sonuçların bir bölümü Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'da 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği ve sırasıyla 100 lt/sn, 110 lt/sn ile 120 lt/sn'lik debi değerleri için verilmiştir. Şekil 4.27-4.29'daki oyulma çukurlarına ait kanalın 4,575 m'de en kesitindeki oyulma çukuru profilleri ise Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir.



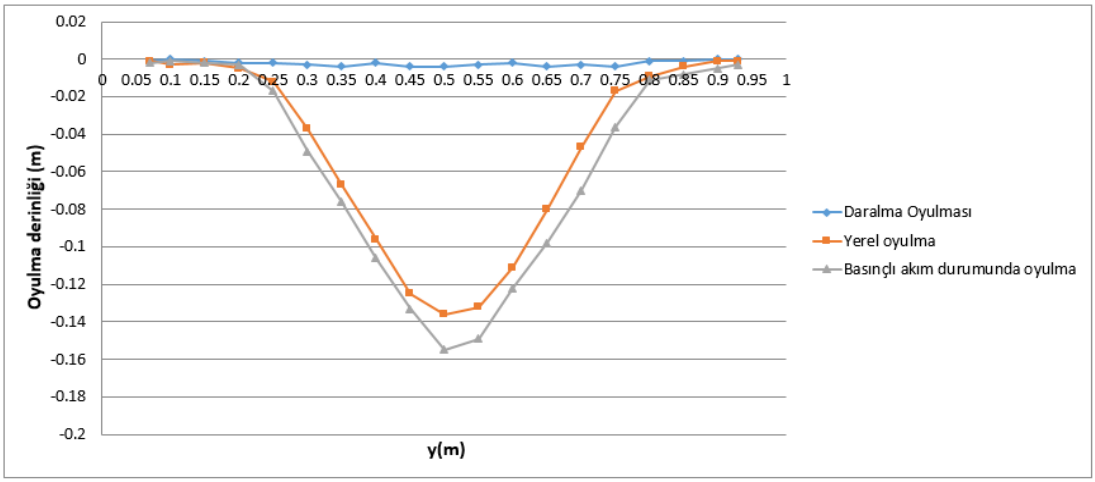
Şekil 4.27. 100 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru boy profilleri



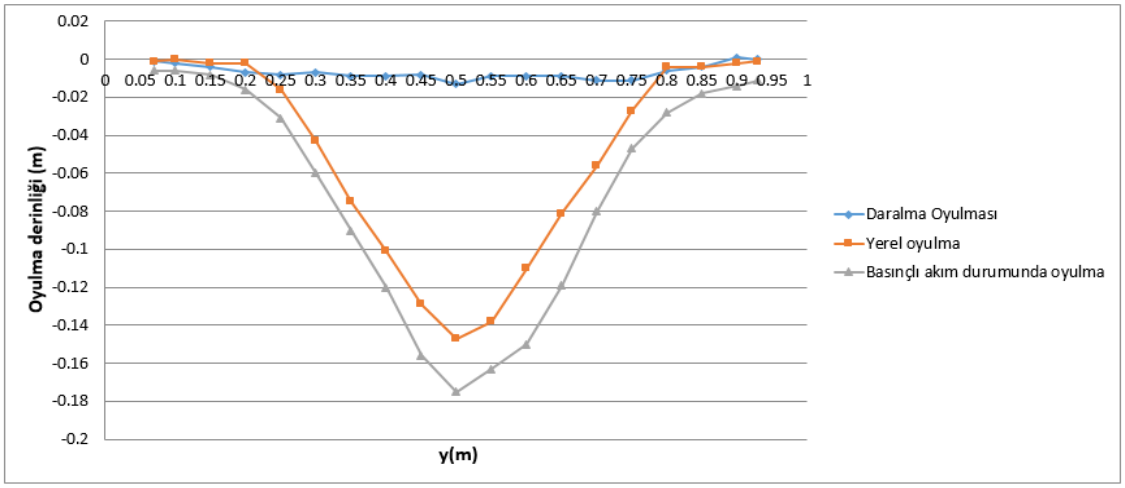
Şekil 4.28. 110 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru boy profilleri



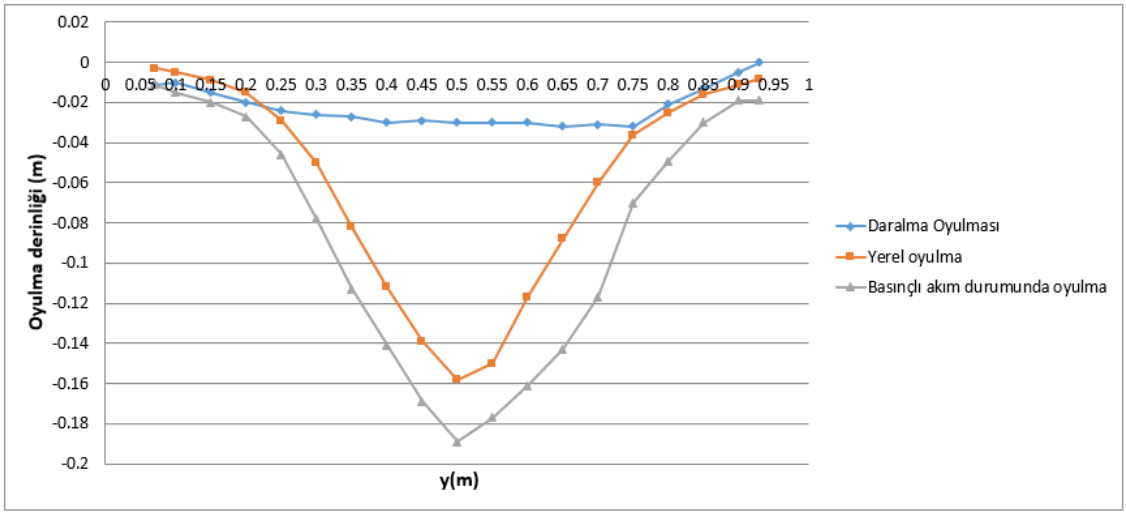
Şekil 4.29. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru boy profilleri



Şekil 4.30. 100 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru en kesitleri



Şekil 4.31. 110 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru en kesitleri



Şekil 4.32. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru en kesitleri

Şekillerden görüldüğü üzere aynı debi ve akım koşullarında meydana gelen daralma oyulması yerel oyulmanın yanında çok küçük değerlerde meydana gelmektedir. Debi arttıkça maksimum oyulma derinliği de artmaktadır. Derinliğin yanı sıra basınçlı akım oyulması durumunda özellikle oyulma çukuru şeklinin oldukça yayvanlaştığı görülmektedir. Bu durumun özellikle grup şeklinde tasarlanmış olan ayaklarda meydana gelen oyulmayı daha da artırarak ciddi problemler oluşturacağı sonucunu akla getirmektedir.

4.3. Literatürdeki Bazı Ampirik Bağıntıların Deney Sonuçlarıyla Değerlendirilmesi

Bu bölümde literatürde bulunan ve yaygın olarak kullanılan bazı denklemlerin sonuçları ile deney verileri karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler sadece düşey daralma oyulması, serbest akım durumunda yerel oyulma ve hem tabliye hem de ayak olması durumundaki basınçlı akım halindeki toplam oyulma için ayrı ayrı yapılmıştır.

4.3.1. Düşey daralma oyulması

Çalışma kapsamında seçilmiş olan sadece maksimum düşey daralma oyulması derinliğinin tahmininde kullanılan bağıntılar Çizelge 4.5'de verilmiştir. Çizelge 4.6'daki hata yüzdelerine göre Arneson ve Abt (1998) gerçek ölçüm değerinden çok büyük oyulma derinlikleri tahmini yaparken Umbrell ve diğerleri (1998) gerçek değerlerden çok küçük oyulma derinlikleri tahmin etmektedir. HEC-18 ile Shan (2012)'ın hata yüzdeleri geniş bir aralıkta değişirken, en güvenilir ve nispeten küçük hata yüzdeleri Kumcu (2016) ile Koçyiğit ve Karakurt (2019) eşitlikleriyle tahmin edilmiştir. Ayrıca denklemlerin kısmi basınçlı akım ile savak tipi akım durumlarında tahmin yeteneklerinin değişebildiği ve genel olarak daha kötü tahminler yaptıkları görülmektedir. Bağıntılara ait detaylı sonuçlar Ek-1'de verilmiştir. Şekil 4.33'te çalışma kapsamında dikkate alınan bağıntıların tahminleriyle deneysel verilerin grafiksel olarak karşılaştırılması verilmiştir. Grafik incelendiğinde ölçülen değerlerin çoğu denklemde hesaplanan değerle uyum çizgisinden uzakta dağıldığı, yani ölçülen değerlerden daha büyük değerler tahmin edildiği görülmüştür. Umbrell ve diğerleri (1998) tarafından önerilen bağıntıdan elde edilen tahmin değerlerinin mevcut çalışmadaki deneylerdeki parametrelerle tümünün negatif oyulma verdiği yani birikme olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin H_b parametresi olduğu gözlemlenmiştir. Umbrell ve diğerleri (1998) bağıntısının belirli H_b çalışma aralıklarında doğru sonuca ulaşabileceği düşünülmektedir. Arneson ve Abt (1998) , Guo (2009) ile Kumcu (2016) tarafından önerilen bağıntılarda ise mevcut parametrelerle güvenli bir oyulma derinliği hesaplandığı ancak oyulma çukur derinliğini olduğundan çok daha büyük tahmin ettikleri görülmüştür. HEC-18, Shan ve diğerleri (2012), Lyn (2008) ile Koçyiğit ve Karakurt (2019)'un önerdiği bağıntılar ile elde edilen sonuçların nispeten ölçüm değerlerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te sırasıyla henüz oyulma olmamış taban ile köprü arasındaki düşey yükseklik (H_b) ve yaklaşım akım derinliği (y_a) ile boyutsuzlaştırılmış, ölçülmüş ve tahmin edilen maksimum daralma oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre Shan (2012)'ın ölçüm

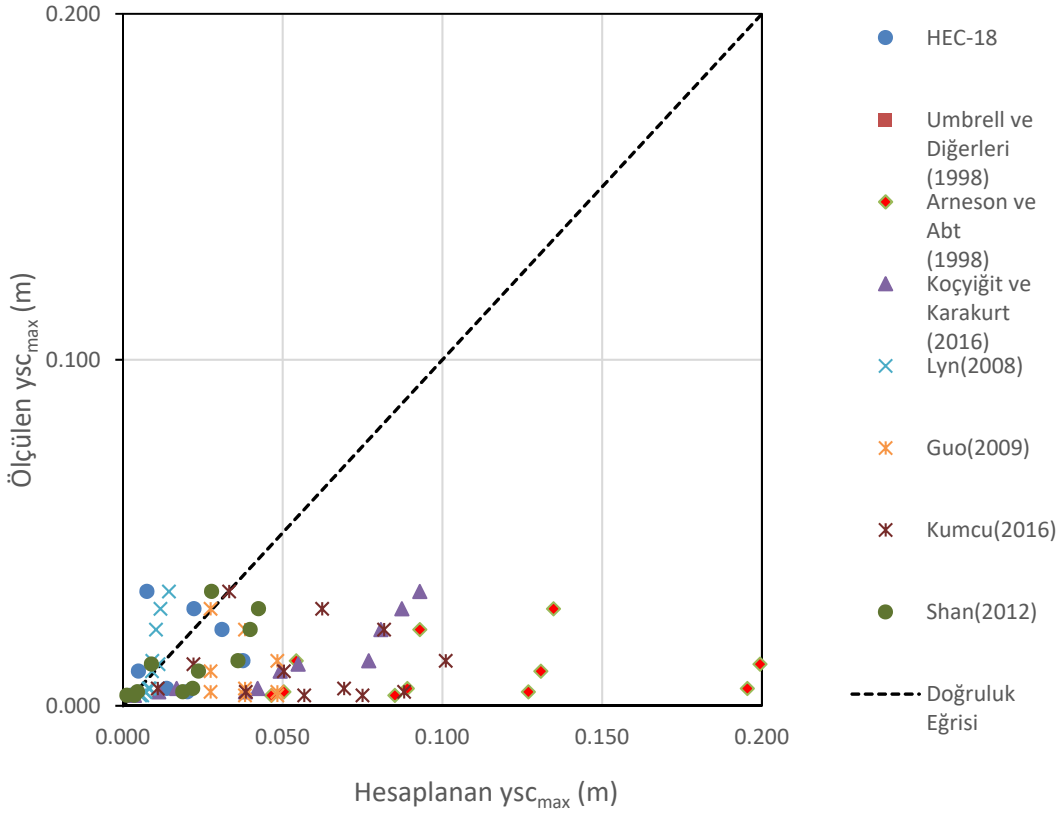
sonuçlarına en yakın ama daha büyük oyulma derinlikleri tahmin ederek güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. Arneson ve Abt (1998) çok büyük oyulma derinlikleri tahmin ederken Lyn (2008) gerçek oyulma derinliğinden daha küçük değerler tahmin etmektedir.

Çizelge 4.5. Maksimum daralma oyulması derinliği tahmini için kullanılan bağıntılar

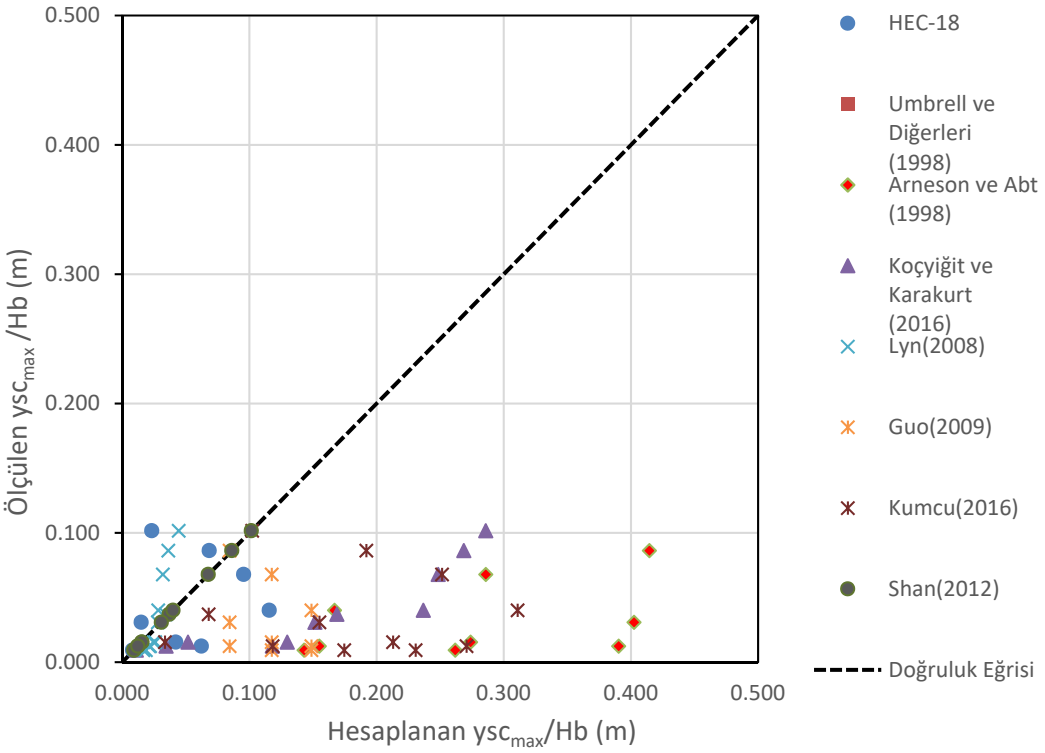
Araştırmacı	Kısaltma	Bağıntı	Bağıntı No
Arneson ve Abt (1998)	AA91	$\frac{y_{sc,max}}{y_a} = -5{,}08 + 1{,}27\left(\frac{y_a}{H_b}\right) + 4{,}44\left(\frac{H_b}{y_a}\right) + 0{,}19\left(\frac{V_a}{V_c}\right)$	2.38
Umbrell ve diğerleri (1998)	UD98	$\frac{H_b+y_{sc,max}}{y_a} = 1{,}1021\left[\left(1-\frac{h_w}{y_a}\right)\frac{V_a}{V_c}\right]^{0{,}6031}$	2.37
Lyn (2008)	L08	$\frac{y_{sc,max}}{y_a} = \min(0{,}105\left(\frac{y_a}{H_b}\right)^{2{,}95}, 0{,}5)$	2.40
Guo ve diğerleri (2009)	GD09	$\frac{H_b+y_{sc,max}}{H_b+k} = \frac{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}368}{F_i^{2{,}409}}\right)}}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}866}{F_i^2}\right)}}$	2.41
Shen ve diğerleri (2012)	SD12	$y_{sc,max} = \left[\frac{V_a(y_a-h_w)}{D_{50}^{1/3} * K_u}\right]^{6/7}\left(0{,}5\left(\frac{H_b h_t}{y_a^2}\right)^{0.2}\left(1-\frac{h_w}{h_t}\right)^{-0.1}-1\right)H_b$	2.46
HEC-18, Arneson (2012)	HEC-18	$y_{sc,max} = y_2 + t - H_b$	2.47
Kumcu, (2016)	K16	$\frac{y_{sc,max}+H_b}{y_a} = 0{,}65 + 0{,}5\frac{V_b}{V_c}$ $\frac{y_{sc,max}+H_b}{y_a} = 1{,}025 + 0{,}125\frac{V_b}{V_c}$	2.50a 2.50b
Koçyiğit ve Karakurt (2019)	KK19	$\frac{y_{sc,max}}{H_b} = -0962 - 0{,}187\frac{y_a}{H_b} + 0{,}433Fr_{b*} + 0{,}672\frac{b}{H_b}$ $\frac{y_{sc,max}}{H_b} = -1{,}002 - 0{,}190\frac{y_a}{H_b} + 0{,}439Fr_{b*} + 0{,}925\frac{b}{H_b}$	2.51 2.52

Çizelge 4.6. Maksimum daralma oyulması derinliği tahmini için seçilen bağıntıla ve hata değerleri

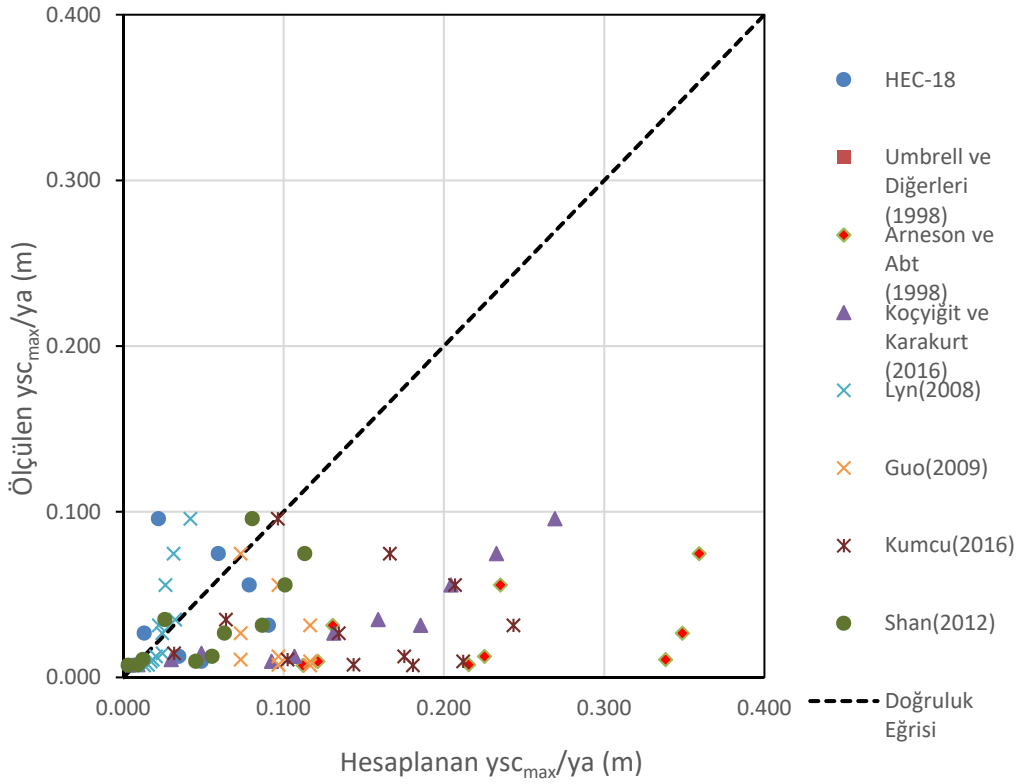
Q (lt/sn)	ya (m)	$y_{sc,max}$ (m)	AA98		UD98		L08		GD09		HEC-18		SD12		K16		KK19	
			$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %	$y_{sc,max}$ (m)	Hata %
100	0,345	0,005	0,195	3807,9	-0,050	-1094,5	0,008	68,29	-0,012	-344,2	-0,027	-648,4	-0,010	-302,5	0,011	117,7	0,017	235,7
	0,375	0,004	0,127	3071,2	-0,043	-1171,1	0,007	71,61	0,027	585,3	-0,013	-418,2	0,005	14,15	0,038	860,5	0,011	179,3
	0,395	0,003	0,085	2736,3	-0,047	-1677,0	0,006	101,5	0,038	1173,3	-0,004	-230,7	0,004	20,52	0,057	1790,6	0,004	19,43
	0,415	0,003	0,046	1449,1	-0,051	-1816,2	0,005	78,65	0,048	1511,0	0,003	-12,69	0,001	-57,47	0,075	2398,9	0,000	-107,2
110	0,345	0,012	0,199	1561,5	-0,033	-378,6	0,011	-7,11	-0,012	-201,7	-0,010	-181,8	0,009	-25,46	0,022	83,78	0,055	356,9
	0,375	0,010	0,131	1207,8	-0,026	-361,5	0,009	-9,06	0,027	174,1	0,005	-51,33	0,024	136,3	0,050	403,9	0,049	392,2
	0,395	0,005	0,089	1679,7	-0,031	-717,6	0,008	60,19	0,038	663,9	0,014	173,4	0,022	337,1	0,069	1284,3	0,042	743,2
	0,415	0,004	0,050	1158,5	-0,035	-982,6	0,007	77,49	0,048	1108,3	0,020	405,4	0,019	368,9	0,088	2099,7	0,038	859,0
120	0,345	0,033	0,203	516,2	-0,018	-153,7	0,014	-56,33	-0,012	-137,0	0,008	-77,13	0,028	-15,85	0,033	0,60	0,093	181,4
	0,375	0,028	0,135	381,1	-0,010	-135,8	0,012	-58,02	0,027	-2,08	0,022	-20,58	0,042	51,64	0,062	122,7	0,087	211,7
	0,395	0,022	0,093	322,2	-0,015	-168,3	0,010	-52,93	0,038	73,63	0,031	41,11	0,040	81,17	0,082	271,4	0,081	266,9
	0,415	0,013	0,054	316,9	-0,020	-251,5	0,009	-29,40	0,048	271,7	0,038	189,1	0,036	177,0	0,101	677,0	0,077	491,8



Şekil 4.33. Ölçülmüş $y_{sc,max}$ ile farklı bağıntılarla tahmin edilen değerinin karşılaştırılması



Şekil 4.34. Gözlemlenen ve ölçülmüş $y_{sc,max}$/ H_b değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.35. Gözlemlenen ve ölçülmüş $y_{sc,max}$/ y_a değerlerinin karşılaştırılması

Bağıntıların tümünde kısmi basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği tahminlerinin ölçüm değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, artan debi değerlerinde hesaplanan hata yüzdelerinin giderek azaldığı görülmüştür. Bu nedenle denklemlerin çoğunun artan debi değerinde daha doğru oyulma derinliği tahmini yapabildiği düşünülmektedir. Son olarak, Umbrell ve diğerleri (1998) haricindeki denklemlerin hepsi tüm debi ve akım yüksekliklerinde oyulma çukuru tahminini ölçülen değerlerden daha fazla tahmin etmiştir. Bu da yaygın olarak kullanılan denklemlerin özellikle düşük debilerde aşırı derecede güvenli tahmin yaptığını göstermiştir.

4.3.2. Serbest akım durumunda yerel oyulma

Çalışma kapsamında serbest akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulma derinliğinin tahmininde yaygın olarak kullanılan ve bilinen bağıntılardan seçilmiş olanlar Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelge 4.8'de çalışma kapsamında seçilmiş olan bağıntıların tahminleri ile gerçek ölçüm değerlerinden sapmalarını ifade eden hata yüzdeleri görülmektedir.

Çizelge 4.7. Yerel oyulma durumunda kullanılan bağıntılar

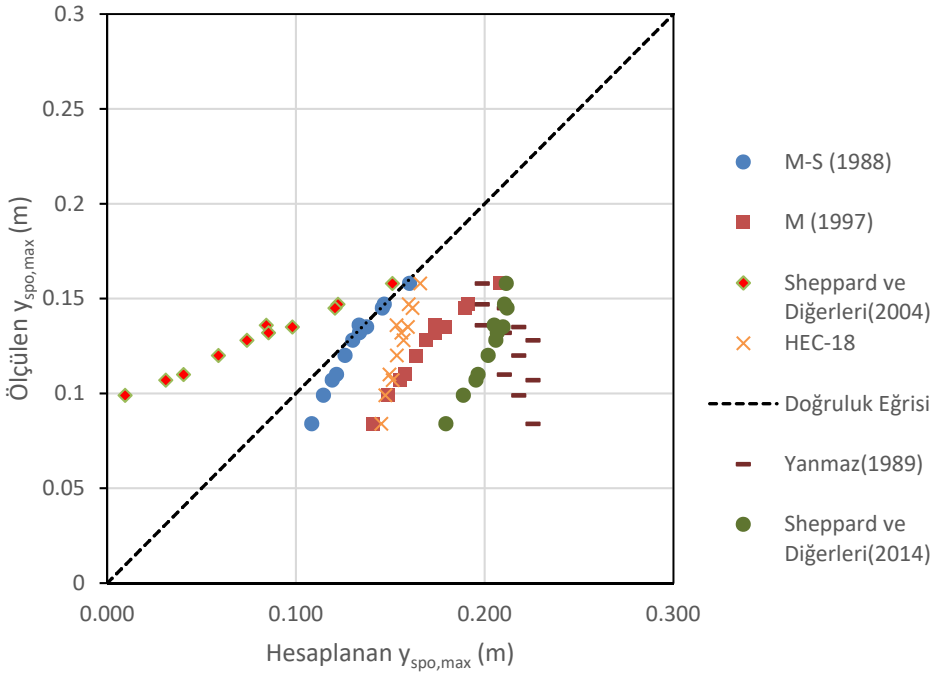
Araştırmacı	Kısaltma	Bağıntı	Bağıntı No
Melville ve Sutherland (1988)	MS88	$\frac{y_{spo,max}}{D} = K_1 K_y K_v K_s K_\Theta$	2.13
Yanmaz (1989)	Y89	$\frac{y_{spo,max}}{D} = 0.85\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0.686}$ $\frac{y_{spo,max}}{D} = 0.111\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0.654}$	2.14 2.15
Melville (1997)	M97	$y_{spo,max} = K_y K_1 K_v K_s K_\Theta$	2.22
Sheppard ve diğerleri (2004)	SD04	$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2.5 f_1\left(\frac{y_a}{D^*}\right) f_2\left(\frac{V_a}{V_c}\right) f_3\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)$	2.26
HEC-18, Arneson (2012)	HEC-18	$\frac{y_{spo,max}}{D} = 2K_s K_3 K_4\left(\frac{y_a}{D}\right)^{0.35} F_r^{0.43}$	2.20
Sheppard ve diğerleri (2014)	SD14	$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2.5 f_1\left(\frac{y_a}{D^*}\right) f_2\left(\frac{V_a}{V_c}\right) f_3\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)$ $\frac{y_{spo,max}}{D^*} = f_1\left[2.2\left(\frac{\frac{V_a}{V_c}-1}{\frac{V_{lp}}{V_c}-1}\right)+2.5\left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c}-\frac{V_a}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c}-1}\right) f_3\right]$ $\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2.2 f_1$	2.32a 2.32b 2.32c

Çizelge 4.8 incelendiğinde maksimum yerel oyulma derinliğinin tahmini için geliştirilmiş bağıntıların düşey daralma oyulması tahmini yapan denklemlere kıyasla çok daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durum bağıntılarda kullanılan boyutsuz büyüklüklerin yeterli olmadığını ve oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelerin eksik veya yetersiz olabileceğini ifade etmektedir. Çizelge 4.8 sonuçlarına göre bağıntıların Sheppard ve diğerleri (2004) hariç çoğunlukla güvenli tahminler yaptığını, en iyi tahminlerin Melville ve Sutherland (1988) ve HEC-18 tarafından yapıldığını göstermiştir. Ayrıca MS97 ve HEC-18 hata yüzdeleri incelendiğinde bağıntıların akım derinliğinin artmasıyla hata oranlarının arttığı ancak debi değerinin artması durumunda ise hata yüzdelerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.8. Maksimum yerel oyulma derinliği tahmini için seçilen bağıntılar ve hata değerleri

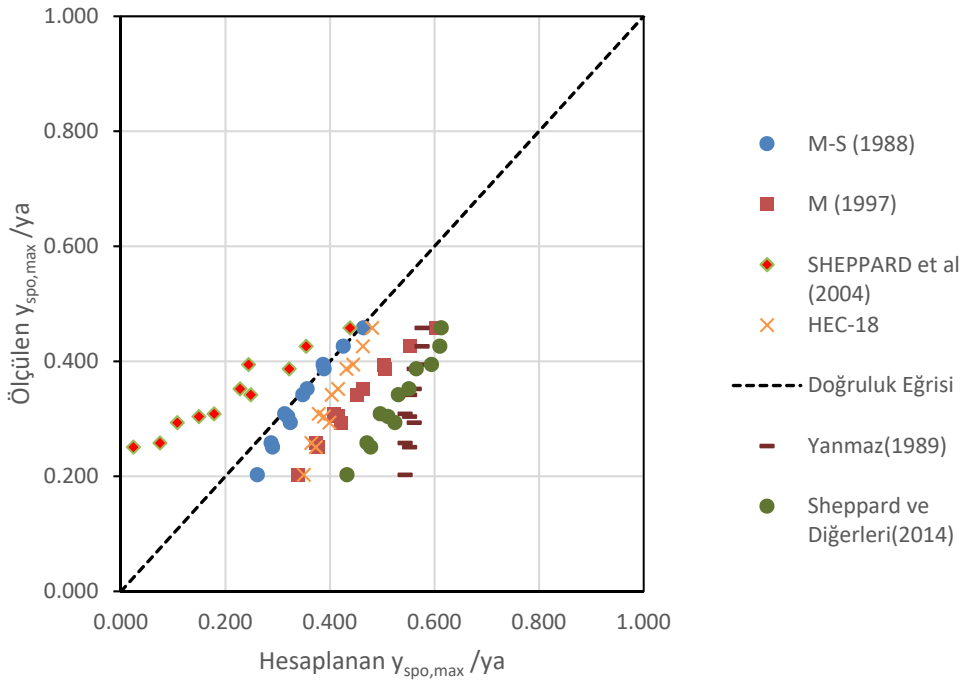
Q (lt/sn)	y_a (m)	$y_{spo,max}$ (m)	MS88 $y_{spo,max}$ (m)	MS88 Hata %	Y89 $y_{spo,max}$ (m)	Y89 Hata %	M97 $y_{spo,max}$ (m)	M97 Hata %	SD04 $y_{spo,max}$ (m)	SD04 Hata %	HEC-18 $y_{spo,max}$ (m)	HEC-18 Hata %	SD14 $y_{spo,max}$ (m)	SD14 Hata %
100	0,345	0,136	0,133	-1,84	0,199	46,16	0,173	27,57	0,084	-38,09	0,153	12,72	0,205	50,79
100	0,375	0,11	0,122	10,47	0,210	91,34	0,158	43,57	0,040	-63,29	0,150	35,98	0,197	78,67
100	0,395	0,099	0,115	15,76	0,218	120,32	0,149	50,45	0,009	-90,50	0,147	48,79	0,189	90,64
100	0,415	0,084	0,108	29,05	0,226	168,61	0,141	67,72	-0,023	-127,01	0,145	72,83	0,180	113,71
110	0,345	0,147	0,147	-0,10	0,199	35,22	0,191	29,83	0,122	-16,84	0,160	8,65	0,211	43,22
110	0,375	0,132	0,134	1,26	0,210	59,45	0,174	31,60	0,085	-35,29	0,156	18,06	0,207	56,59
110	0,395	0,12	0,126	5,05	0,218	81,76	0,164	36,53	0,059	-50,97	0,153	27,89	0,202	68,21
110	0,415	0,107	0,119	11,44	0,226	110,87	0,155	44,84	0,031	-71,08	0,151	41,35	0,195	82,68
120	0,345	0,158	0,160	1,39	0,199	25,81	0,208	31,77	0,151	-4,37	0,166	4,94	0,211	33,86
120	0,375	0,145	0,146	0,56	0,210	45,16	0,190	30,70	0,121	-16,82	0,162	11,57	0,212	46,15
120	0,395	0,135	0,138	1,87	0,218	61,57	0,179	32,40	0,098	-27,4	0,159	18,01	0,210	55,37
120	0,415	0,128	0,130	1,63	0,226	76,27	0,169	32,08	0,074	-42,24	0,157	22,67	0,206	60,88

Şekil 4.36'de ölçülen ve hesaplanan maksimum oyulma çukuru derinlikleri görülmektedir. Yanmaz (1989), Melville (1997), Sheppard ve diğerleri (2004), Sheppard ve diğerleri (2014) ile HEC-18 ölçülen değerlere yakın sonuçlar vermektedir. Melville ve Sutherland (1988) eşitliğinin y_{spo} değerinin artmasıyla ölçüme daha yakın tahminler yaptığı görülmüştür.

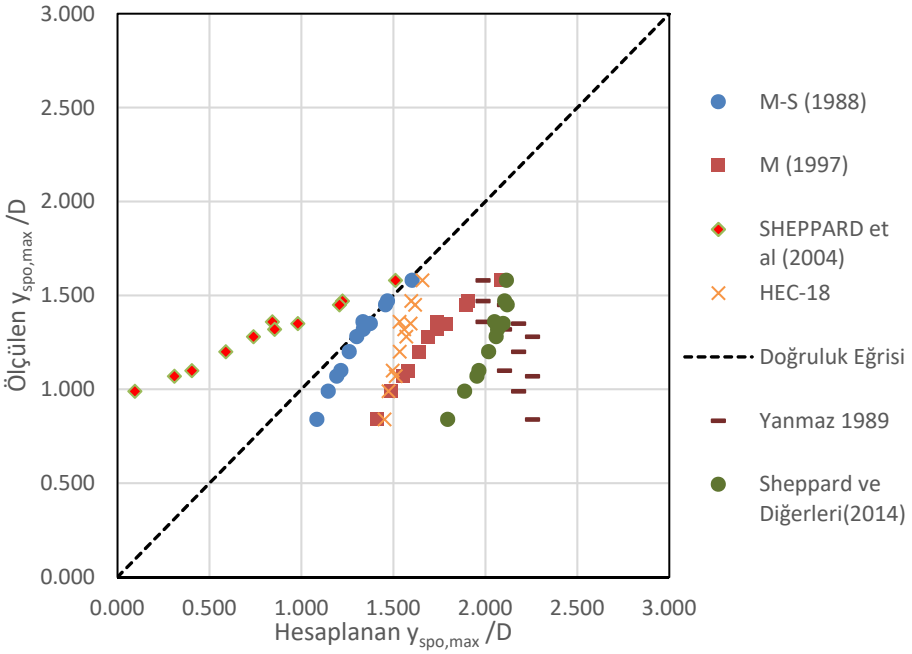


Şekil 4.36. Ölçülmüş ve farklı bağıntılarla hesaplanmış $y_{spo,max}$ değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de sırasıyla y_a ile ayak çapı D ile boyutsuzlaştırılmış ölçülmüş ve hesaplanmış maksimum yerel oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir. Sonuçlar yorumlandığında, debi arttıkça hesaplanan maksimum oyulma çukuru derinliğinin ölçülen değerlere yakınsadığı gözlemlenmiştir. Sabit debi değerinde ise artan akım yüksekliğinde ölçülen değer ile hesaplanan değerin arasındaki farkın arttığı gözlemlenmiştir. Bu da doğru sonuçtan uzaklaşıldığına işaret etmektedir. Aynı zamanda Sheppard ve diğerleri (2004) haricindeki tüm denklemlerde maksimum oyulma çukuru derinliği tahminlerinin ölçülen değerlerden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu da güvenli tarafta kalarak hesap yapıldığına işaret etmektedir.



Şekil 4.37. Ölçülen $y_{spo,max}/y_a$ ve hesaplanan $y_{spo,max}/y_a$ değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.38. Ölçülen $y_{spo,max}/D$ ve hesaplanan $y_{spo,max}/D$ değerlerinin karşılaştırılması

4.3.3. Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma

Konu ile ilgili literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan literatür çalışmasında konu ile ilgili ilk çalışma olan Abed (1991) ile Farhangi (2016) olmak üzere iki bağıntı belirlenmiş ve çalışmada bu bağıntılar kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 4.9'da söz konusu bağıntılar, Çizelge 4.10'da ise basınçlı akım durumunda ayak etrafında meydana gelmiş maksimum oyulma derinliğinin $y_{spp,max}$, hesaplanan değerleri ile ölçüm sonuçları ve bunlar arasındaki farklar görülmektedir. Çizelge 4.9 incelendiğinde Abed (1991)'in önerdiği bağıntının Farhangi (2016)'ye kıyasla çok daha iyi tahminler yapabildiğini göstermiştir. Abed (1991) en küçük y_a değerlerinde ölçülenden daha büyük $y_{spp,max}$ tahmini yaparken, y_a arttıkça artan hata oranları ile gerçek değerden daha küçük tahminler yaptığı ve güvenli tarafta kalmadığı görülmüştür. Debi değeri arttıkça hata oranlarında azalma olduğu ancak halen daha küçük tahminler yapıldığı görülmektedir. Şekil 4.39'da ise basınçlı akım durumunda ayak etrafında ölçülen ve hesaplanan maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır.

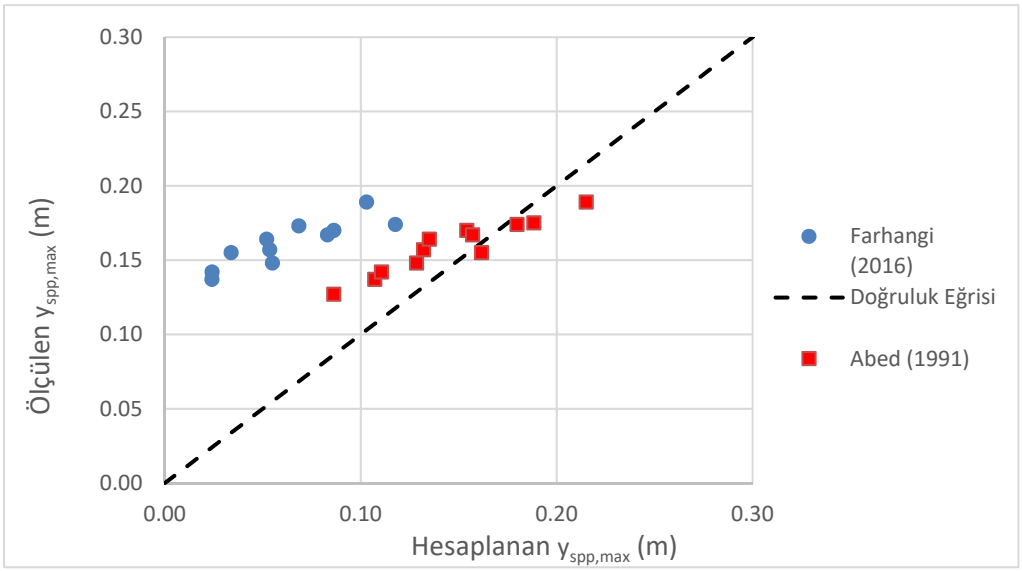
Çizelge 4.9. Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma durumunda kullanılan bağıntılar

Araştırmacı	Kısaltma	Bağıntı	Bağıntı No
Abed (1991)	A91	$\frac{y_{spp,max}}{y_a} = K_1 K_S (4{,}92 Fr_a + 0{,}46 \frac{H_b}{y_a} - 0{,}74)$	2.65
Farhangi (2016)	F16	$\frac{y_{spp,max}}{H_b} = \left[1{,}74819 \left(\frac{V_a}{V_c}\right) + 2{,}63834 \left(\frac{H_t}{y_a}\right) + 1{,}52073 \left(\frac{D}{y_a}\right) - 1{,}55321\right] K_s$	2.56

Çizelge 4.10. Basınçlı akım durumunda ayak etrafında oluşan maksimum oyulma derinliği tahmini için seçilen bağıntılar ve hata değerleri

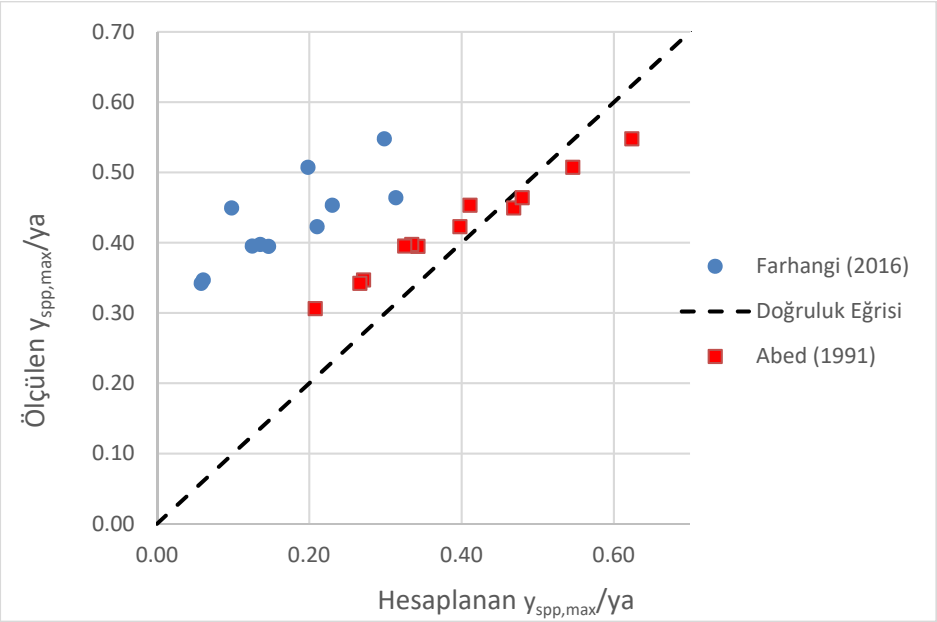
Q (lt/sn)	y_a (m)	Fr_a (-)	$y_{spp,max}$ (m)	A91		F16	
				$y_{spp,max}$ (m)	Hata (%)	$y_{spp,max}$ (m)	Hata (%)
100	0,345	0,158	0,156	0,162	4,28	0,034	-78,15
	0,375	0,139	0,148	0,129	-13,16	0,055	-62,85
	0,395	0,129	0,137	0,107	-21,79	0,024	-82,44
	0,415	0,119	0,127	0,086	-32,09	-0,004	-102,94
110	0,345	0,173	0,173	0,188	7,64	0,068	-60,89
	0,375	0,153	0,170	0,154	-9,31	0,086	-49,21
	0,395	0,141	0,157	0,132	-15,84	0,054	-65,87
	0,415	0,131	0,142	0,111	-22,09	0,024	-83,01
120	0,345	0,189	0,189	0,215	13,82	0,103	-45,50
	0,375	0,167	0,174	0,180	3,34	0,118	-32,35
	0,395	0,154	0,167	0,157	-5,91	0,083	-50,24
	0,415	0,143	0,154	0,135	-17,67	0,052	-68,29

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de sırasıyla y_a ile ayak çapı D ile boyutsuzlaştırılmış ölçülmüş ve hesaplanmış basınçlı akım durumundaki grafikler verilmiştir.

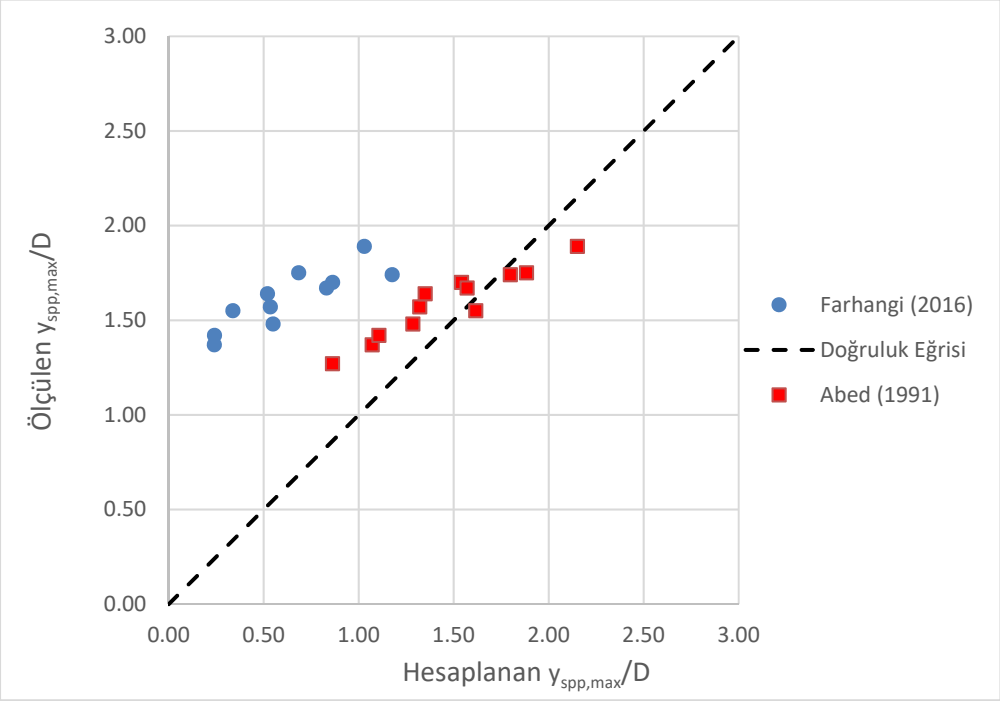


Şekil 4.39. Basınçlı akım durumunda ölçülen ve hesaplanmış olan $y_{spp,max}$ değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.40 ve 4.41'de basınçlı akım durumunda ölçülmüş ve hesaplanmış maksimum oyulma çukuru derinlikleri $y_{spp,max}$'ın sırasıyla yaklaşım akım derinliği y_a ve ayak çapı D ile boyutsuzlaştırılmış değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4.40. Basınçlı akım durumunda ölçülen ve hesaplanmış olan $y_{spp,max}/y_a$ değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.41. Basınçlı akım durumunda ölçülen ve hesaplanmış olan $y_{spp,max}/D$ değerlerinin karşılaştırılması

Sonuçlar incelendiğinde Abed (1991)'in önerdiği bağıntıda, deney verileriyle hesaplanan değerlerin ölçülen değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak her ne kadar uyumlu sonuçlar elde edilmiş olsa da bu bağıntıda orta ayak çapının (D) yer almadığı göz ardı edilmemelidir. Farhangi (2016)'nın hesaplanan sonuçlarına göre ise, basınçlı durumda artan akım yüksekliğinde oyulma çukuru derinliği de artmış göstermekte ancak değerler gerçek ölçüm değerlerinden çok küçük hesaplanmaktadır. Bu tez kapsamında ölçülen deney verileriyle çeliştiği gözlemlenmiştir. Fakat savaklı durumda artan akım yüksekliğinde azalan oyulma derinliği çalışma bulgularını doğrular niteliktedir. Farhangi (2016) tez kapsamında tek bir orta ayak tipi ile çalışmış ve yaptığı deneylerde de tabliye konumlarında verevlilik konularına da yer vermiştir. Bu nedenle de hataların daha büyük olduğu düşünülmektedir.

5. ÇALIŞMA KAPSAMINDAKİ BAĞINTILARIN İSTATİKSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında incelenen bağıntıların oyulma çukuru derinliğini tahmin edebilme güçlerini değerlendirebilmek amacıyla hata dağılım karakteristikleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla deney ölçümleri kullanılarak Bölüm 4.3'te verilen bağıntıların bazı istatiksel parametre değerleri belirlenmiştir.

5.1. Çalışma Kapsamında Kullanılmış Olan İstatistiksel Parametreler

Bu bölümde, özellikle tez kapsamında kullanılmış olan istatistiksel parametrelerin anlamları ve sonuçlarının ne anlama geldiği açıklanmıştır. Bağıntılarda kullanılan değişkenler sırasıyla aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

O_i: Gözlemlenen değer (ölçüm değeri)
$O_{i\ min}$: Gözlemlenen minimum değer
$O_{i\ max}$: Gözlemlenen maksimum değer
O_{ort}: Gözlemlenen değerlerin ortalaması
P_i: Tahmin edilen değer (bağıntıdan hesaplanmış olan değer)
P_{ort}: Tahmin edilen değerlerin ortalaması
E_i: O_i- P_i değeri

5.1.1. Ortalama hata (OH)

Bağıntılarda hesaplanan değerler ile gerçek ölçüm değerleri arasındaki ortalama hatayı ifade etmektedir. Bu bağlamda, bir ölçümdeki belirsizlik veya tahmini değer ile gerçek değer arasındaki farkı belirlemekte kullanılır (Fisher, 1920). Literatürde ME (Mean Error) olarak bilinen OH, Eş. 5.1 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$OH = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} E_i \tag{5.1}$$

Bu denklemde n: veri sayısını ifade etmektedir. OH<0 ise tahmin edilen değerler gözlemlenen değerlerden büyüktür ve tahmin gerçekten uzaklaşmaktadır. Eğer, OH=0 ise tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler eşittir. Böylece maksimum doğruluk

gerçekleşmiş olmaktadır. OH>0 ise tahmin edilen değerler gözlemlenen değerlerden küçüktür. Bu değer ile hata doğru orantılıdır.

5.1.2. Ortalama yüzde hata (OYH)

Tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki farkın ortalama yüzdesidir. OYH değeri hesaplanırken tahmin hatalarının mutlak değerlerinden ziyade gerçek değerleri kullanıldığı için pozitif ve negatif tahmin hataları birbirini dengeleyebilir. Literatürde MPE (Mean Percentage Error) olarak bilinen OYH, daha çok hızlı tahmin çözümlemelerinde tercih edilmektedir.(Khan ve diğerleri, 2003). Eş. 5.2'de ortalama hata yüzdesi olarak verilmiştir.

$$OYH = \frac{100}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{E_i}{O_i} \tag{5.2}$$

Bu denklemde; OYH < 0 ise tahmin edilen değerler gözlemlenen değerlerden büyüktür ve tahmin gerçekten uzaklaşmaktadır. OYH=0 ise maksimum doğruluk sorgulanmalıdır. Çünkü daha önce de bahsedildiği gibi pozitif ve negatif tahmin hataları birbirini dengeleyebilir. Bu da yanlış bir doğruluk verebilir. OYH >0 ise tahmin edilen değerler gözlemlenen değerlerden küçüktür. Bu değer ile hata doğru orantılıdır.

5.1.3. Ortalama mutlak hata (OMH)

Tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki farkın mutlak değerinin ortalamasıdır. Literatürde MAE (Mean Absolute Error) olarak bilinen OMH, pozitif ve negatif değerleri dikkate almadan bir dizi tahmindeki hataların ortalama büyüklüğünü ölçen, tüm tekil hataların ortalamada eşit olarak yayıldığı doğrusal bir sonucu ifade eder. OMH değeri 0'dan ∞'a kadar değişebilir (Chai ve Draxler, 2014). Eş. 5.3 ortalama mutlak hata bağıntısı olup,

$$OMH = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}|E_i| \tag{5.3}$$

ile verilmektedir. Bu denklemde OH=0 ise tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler eşittir. Maksimum doğruluk gerçekleşmiş olmaktadır. OMH>0 koşulu her daim sağlanmaktadır. Bu durumda 0'dan uzaklaştıkça doğruluk azalmaktadır.

5.1.4. Ortalama kare hata (OKH)

Ortalama kare hata, bir regresyon eğrisinin bir dizi noktaya ne kadar yakın olduğunu ifade eder. Literatürde MSE (mean square error) olarak bilinmektedir. OKH, tahmin edilen değerlerin performansını ölçer ve her zaman pozitif değerlidir. OKH değeri sıfıra yakın olan sonuçların daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir (Fisher, 1920). Eş. 5.4 ortalama kare hata bağıntısı olup,

$$OKH = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} E_i^2 \tag{5.4}$$

ile verimektedir. Bu denklemde OKH >0 koşulu her daim sağlanmaktadır. Bu durumda 0'dan uzaklaştıkça doğruluk azalmaktadır.

5.1.5. Kök ortalama kare hata (KOKH)

Kök ortalama kare hata, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki uzaklığın bulunmasında sıklıkla kullanılan, hatanın büyüklüğünü ölçen kuadratik bir metriktir. Literatürde RMSE (Root Mean Square Error) olarak bilinen KOKH tahmin hatalarının (kalıntıların) standart sapmasıdır. Yani kalıntılar, regresyon hattının veri noktalarından ne kadar uzakta olduğunun bir ölçüsüdür; KOKH ise bu kalıntıların ne kadar yayıldığının bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle, verilere en iyi uyan çizgi etrafında o verilerin ne kadar yoğun olduğunu ifade eder. KOKH değeri 0'dan ∞'a kadar değişebilir. KOKH değerinin sıfır olması modelin hiç hata yapmadığı anlamına gelir (Willmott ve Matsuura, 2005). Eş. 5.5 kök ortalama kare hata bağıntısı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$KOKH = \sqrt{OKH} \tag{5.5}$$

Bu denklemde KOKH >0 koşulu her daim sağlanmaktadır. Bu durumda 0'dan uzaklaştıkça doğruluk azalmaktadır.

5.1.6. Ortalama mutlak yüzde hata (OMYH)

Literatürde MAPE (Mean Absolute Percentage Error) olarak bilinen OMYH farklı birim değerlere sahip modellerin karşılaştırılmasında ortaya çıkabilecek dezavantajları elimine etmektedir. Ayrıca öngörü hatalarını yüzde olarak ifade etmesi nedeni ile tek başına da bir anlamının olması diğer kriterlere göre üstünlük olarak kabul edilmektedir (Tofallis, 2015). Eş. 5.6 ortalama mutlak yüzde hata bağıntısı.

$$OMYH = \frac{100}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{|E_i|}{|O_i|} \tag{5.6}$$

ile verilmektedir. Bu denklemde OMYH > 0 koşulu her daim sağlanmaktadır. Bu durumda 0'dan uzaklaştıkça doğruluk azalmaktadır.

5.1.7. Determinasyon katsayısı-R²

Literatürde R² (Coefficent of Determination) olarak bilinen belirleme katsayısı, belirli bir olayın sonucunu tahmin ederken, bir değişkendeki farklılıkların ikinci bir değişkendeki farkla nasıl açıklanabileceğini inceleyen istatistiksel bir ölçümdür. Diğer bir deyişle, deneysel verilerin doğrusal bir eğriye ne kadar iyi uyduğunun en iyi ölçütü, regresyon analiz işleminde hesaplanmış determinasyon katsayısıdır (Devore, 2011).

Eş. 5.7 determinasyon katsayısı bağıntısı olup,

$$R^2 = \frac{(\sum(O_i - O_{ort})(P_i - P_{ort}))^2}{\sum(O_i - O_{ort})^2(P_i - P_{ort})^2} \tag{5.7}$$

ile verilmektedir. Bu denklemde $R^2 > 0$ koşulu her daim sağlanmaktadır. R² değeri 0 ile 1 arasında değişen bir değer aralığındadır. 0 iki değişken arasındaki ilişkinin hiç olmadığını, 1 ise ilişkinin mükemmel olduğu ifade etmektedir.

5.1.8. Theil U istatistiği

Theil U istatistiği kompleks bir tahmin modelinde daha belirleyici rol oynamaktadır. (Mizrach, 1992). Buna göre; U=1 ise gözlemlenen değerler tahmin edilen değerler ile aynıdır. U>0 ise tahmin edilen değerler gözlemlenen değerlerden daha azdır. Yaklaşımda güvenli tarafta kalmamaktadır. Eş. 5.8 Theil U bağıntısını vermektedir.

$$U = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)}{\sum O_i}} \tag{5.8}$$

5.1.9. Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı (NSEK)

Literatürde yaygın olarak kullanılan NSEK, NNSE (Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficent) olarak da bilinmektedir. Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı genellikle hidrolojik modellerde kullanılan bir tahmin metodur (Nash ve Sutcliffe, 1970). NNSE

$$NNSE = \frac{1}{2 - \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{\sum(O_i - O_{i\,ort})^2}} \tag{5.9}$$

bağıntısı ile verilmektedir. NNSE değeri pozitif değerler için 1'e ne kadar yakınsa yaklaşım o kadar doğru olmaktadır. Negatif değerlerde ise 0'a olan yakınlığı tatmin edici sonuçlar hakkında fikir vermektedir.

5.1.10. Normalize kök ortalama kare hata (NKOKH)

NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) olarak literatürde bilinen kök ortalama kare hatadan elde edilen sonuçların daha genel bir bakış açısıyla nasıl yorumlanması gerektiği hakkında ip uçları elde etmeye yarayan yaklaşımdır (Mentaschi ve diğerleri, 2013).

NKOKH, Eş. 5.10 ile hesaplanmaktadır.

$$NKOKH = \frac{RMSE}{O_{i\,max} - O_{i\,min}} \tag{5.10}$$

NKOKH değeri 0'a ne kadar yakınsa yaklaşım o kadar doğru olmaktadır.

5.2. İncelenen Bağıntıların İstatistiksel Değerleri

Çizelge 5.1'de sadece daralma oyulması derinliği tahmininde kullanılan bağıntıların deneysel veriler kullanılarak hesaplanmış istatistiksel parametre değerleri görülmektedir. OH değerleri dikkate alındığında en iyi sonuçları 0,003 ile Lyn (2008), sonrasında ise 0,005 ile HEC-18 (Arneson ve diğerleri, 2012) tahmin etmektedir. Ancak bu değerler hesaplanan $y_{sc,max}$ değerlerinin ölçülen değerlerden daha küçük olduklarını gösterdiğinden tasarım açısından güvenli tarafta kalmamaktadırlar. Bu açıdan değerlendirildiğinde güvenli ve en doğru sonuçları Shan ve diğerleri (2012) vermektedir. OYH % hataları, tüm bağıntılar için sıfırdan oldukça uzaklaşmıştır. Ancak tasarım açısından en güvenilir sonuçları Lyn (2008) ile Shan ve diğerleri (2012) vermektedir. Deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan R^2 incelendiğinde doğruya en yakın tahminleri Lyn (2008) ile Koçyiğit ve Karakurt (2016) bağıntıları yapmaktadır. Ancak bu değerler de yeterli yakınlıkta tahmin yapamamaktadır. Theil U istatistik değerine göre ise hiçbir bağıntı güvenli tahmin yapamamaktadır. NNSE ve NKOKH parametrelerine göre de en iyi sonuçları hesaplayan bağıntı Lyn (2008)'dir. Ancak Çizelge 4.6'da verilen sonuçlarla istatiksel parametre değerleri incelendiğinde her ne kadar Lyn (2008) bağıntısının istatiksel parametre değerleri daha iyi gözükse de tahminlerinin genellikle güvenli tarafta kalmadığı görülmektedir.

Çizelge 5.2'de ise serbest akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliğini hesaplamak için kullanılan bağıntıların deney verileri kullanılarak elde edilmiş istatistiksel büyüklükler görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde Arneson ve diğerleri (2012)'ne ait bağıntının OH, OYH, OMH ve OKH değerlerine göre en iyi tahminleri verdiği görülmektedir. KOKH (RMSE) değeri incelendiğinde ise en iyi sonucu 0,01 değeri ile Melville ve Sutherland (1988) vermekte, hemen bu değeri 0,034 ile Arneson ve diğerleri (2012) takip etmektedir. En iyi R^2 değerini ise 0,93 ile Melville ve Sutherland (1988) takip etmektedir. NNSE ve NKOKH parametrelerine göre en iyi sonuçları Melville ve Sutherland (1988) eşitliği vermektedir. Bu değerlerle Çizelge 4.8'de verilen hata yüzdeleriyle birlikte

değerlendirildiğinde Melville ve Sutherland (1988) ile HEC-18'in en iyi tahminleri yapan denklem olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.3' te basınçlı akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen, daralma ve yerel oyulmanın birlikte meydana geldiği oyulma çukuru derinliği tahmininde kullanılan bağıntılara ait istatiksel parametre sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde Abed (1991)'e ait bağıntının tüm parametre değerlerine göre en iyi tahminleri verdiği görülmektedir. Özellikle R^2 değerinde 0,75 ile yine Abed (1991)'in iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Farhangi (2016)'nin sonuçları istatiksel olarak değerlendirildiğinde, R^2 ve RMSE gibi yaygın kullanılan parametreler ışığında oyulma çukuru derinliği hesabında kullanım için yeterli olmadığı yorumu yapılmıştır. Ayrıca tahmin edilen oyulma derinlikleri gözlemlenen değerlerden az olduğu için tasarımda da tercih edilmesi tavsiye edilmemektedir.

5.3. Sonuçların İrdelenmesi ve Tartışma

Genel olarak, basınçlı akım durumunda meydana gelen toplam oyulma derinliği y_{spp} mevcut yönetmeliklerde (HEC-18 ve BD97/12) daralma oyulmasının ve yerel oyulmanın ayrı ayrı hesaplanıp toplanması şeklinde belirlenmektedir. Raudkivi ve Ettema (1983) ise tasarımcıların oyulma derinliği tahminlerine gerçekçi bir çözüm bulabilmeleri için birleştirici bir oyulma teorisine bağlı kalması gerektiğini belirtmişlerdir.

Literatürde kabul gören yaklaşımlardan ilkinde toplam oyulma çukuru derinliği (YPO) daralma oyulması derinliği ile serbest akım durumundaki yerel oyulma derinliklerinin toplanmasıyla elde edilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada bu yaklaşımdan esinlenerek deneyler aynı akım şartları için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Deneylerde tabandan yapılan okumalar aynı noktalarda yapıldığından bu noktalardaki oyulma derinlikleri toplanarak yapılan yaklaşımın doğruluğu irdelenmiştir.

Çizelge 5.1. Sadece düşey daralma nedeniyle meydana gelen $y_{sc,max}$ için kullanılan bağıntıların istatistiksel parametre değerleri

Araştırmacı	OH (ME)	OYH % (MPE)	OMH (MAE)	OKH (MSE)	KOKH (RMSE)	OMYH (MPAE)	Determinasyon Katsayısı-R^2	Theil U İstatistiği	NSEK (NNSE)	NKOKH (NRMSE)
Arneson ve Abt (1998)	-0.106	-1518.78	0.106	0.014	0,117	1518,7	0,03	-	-0,00	3,92
Umbrell ve diğerleri (1998)	0.043	736.78	0.043	0,002	0,043	736,78	0,5	1,917	-0,058	1,45
Lyn (2008)	0.003	-20.41	0.006	0,0001	0,008	55,89	0,71	-	0,760	0,27
Guo ve Diğerleri (2009)	-0.014	-408.09	0.028	0,001	0,031	522,13	0,02	-	-0,127	1,04
HEC-18, Arneson (2012)	0.005	69.32	0.014	0,0001	0,017	204,19	0,03	0,629	-0,984	0,57
Shan ve diğerleri (2012)	-0.006	-65.47	0.011	0,0001	0,013	132,35	0,27	0,592	3,263	0,43
Kumcu, (2016)	-0.046	-842.63	0.046	0,003	0,054	842,63	0,01	0,89	-0,036	1,79
Koçyiğit ve Karakurt (2019)	-0.039	-372.75	0.040	0,002	0,046	390,63	0,68	-	-0,050	1,54

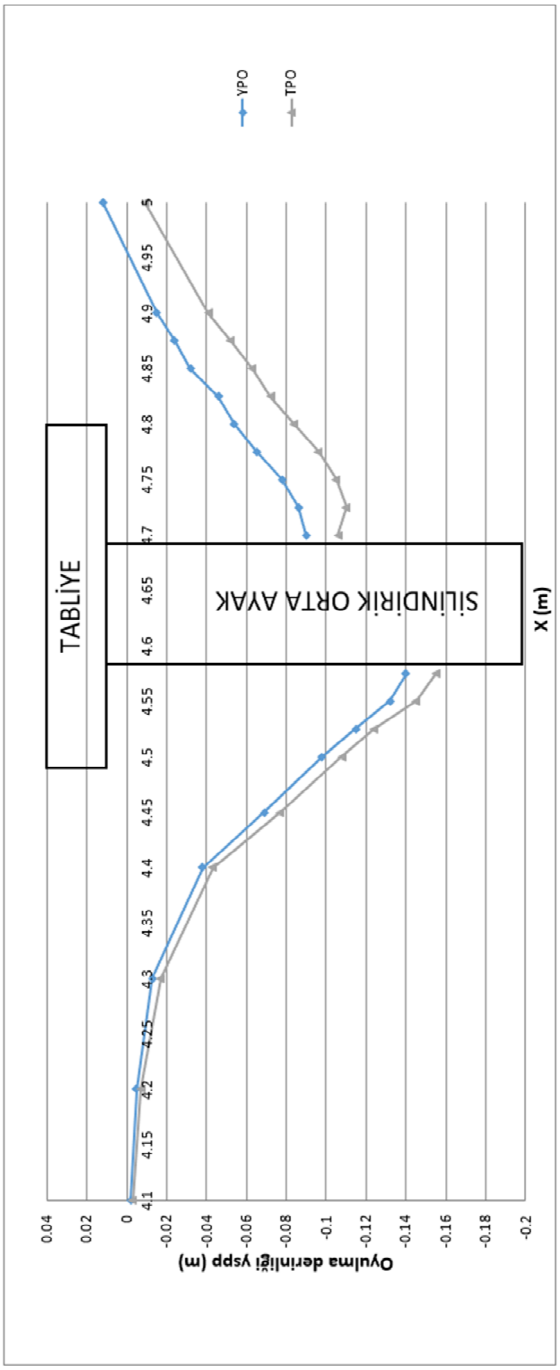
Çizelge 5.2. Serbest akım durumunda $y_{spo,max}$'ın tahmini için kullanılan bağıntıların istatistiksel parametrelerle değerlendirmesi

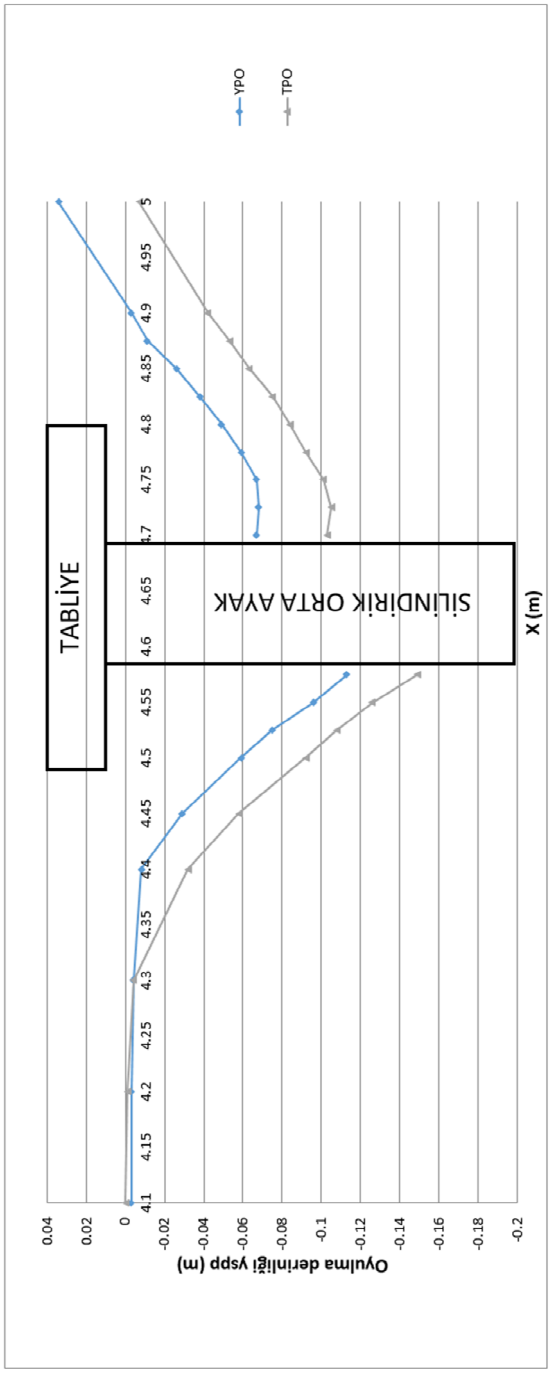
Araştırmacı	OH (ME)	OYH % (MPE)	OMH (MAE)	OKH (MSE)	KOKH (RMSE)	OMYH (MPAE)	Determinasyon Katsayısı-R^2	Theil U İstatistiği	NSEK (NNSE)	NKOKH (NRMSE)
Melville ve Sutherland (1988)	-0,006	-6,378	0,007	0,0001	0,010	6,703	0,93	-	0,564	0,134
Yanmaz (1989)	-0,088	-76,878	0,088	0,009	0,093	76,878	0,40	-	-0,056	1,253
Melville (1997)	-0,046	-38,255	0,046	0,002	0,046	38,255	0,48	-	-0,344	0,622
Sheppard ve diğerleri (2004)	0,054	48,657	0,054	0,004	0,061	48,657	0,40	0,657	-0,153	0,820
Arneson ve diğerleri (2012)	-0,030	-26,956	0,030	0,001	0,034	26,956	0,72	-	-1,640	0,454
Sheppard ve diğerleri (2014)	-0,077	-65,063	0,077	0,006	0,078	65,063	0,76	-	-0,083	1,051

Çizelge 5.3. Düşey daralma ve yerel oyulma (Tabliye ve Orta Ayak) verilerinin istatistiksel parametrelerle değerlendirmesi

Araştırmacı	OH (ME)	OYH % (MPE)	OMH (MAE)	OKH (MSE)	KOKH (RMSE)	OMYH (MPAE)	Determinasyon Katsayısı-R^2	Theil U İstatistiği	NSEK (NNSE)	NKOKH (NRMSE)
Abed (1991)	0,012	9,067	0,021	0,001	0,024	13,916	0,750	0,280	0,506	0,380
Farhangi (2016)	0,101	65,150	0,101	0,011	0,103	65,150	0,238	0,796	-0,030	1,655

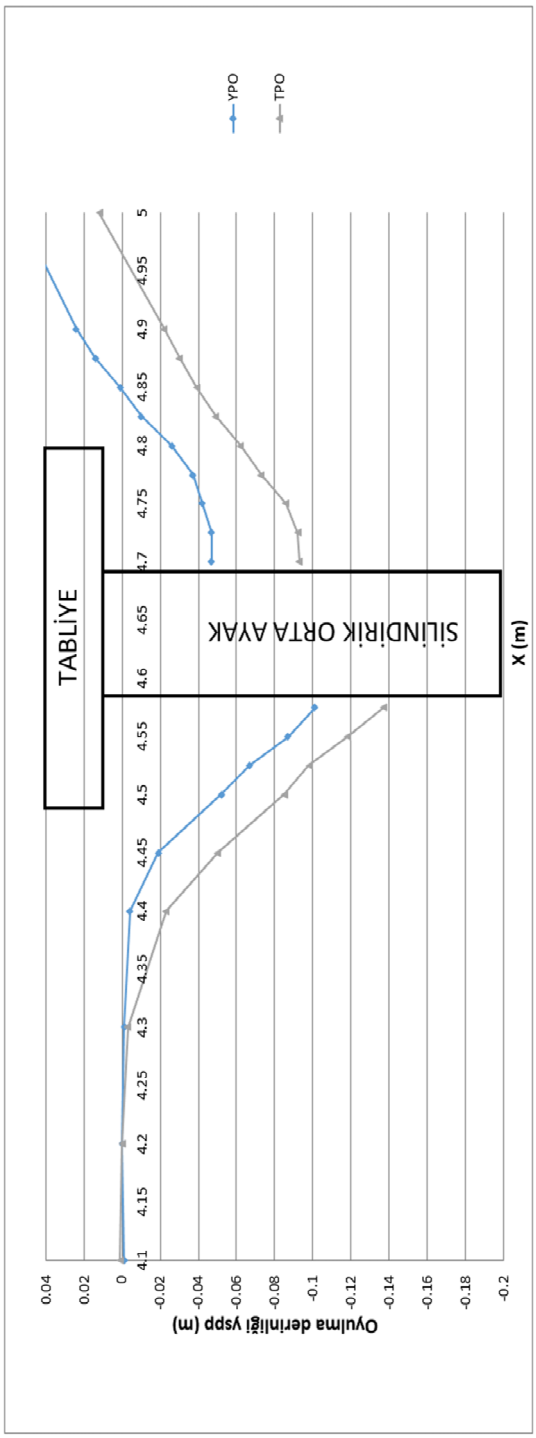
Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4 ‘te 100 lt/sn’lik debi için sırasıyla 34,5 cm, 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulma derinliği ve serbest akım durumundaki oyulma derinliklerinin toplamıyla oluşan oyulma çukuru ile toplam ölçülen oyulma çukuru karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılırken çizilen grafiklerde tüm x noktalarında y=0,5 m’deki değerler kullanılmıştır. Şekillerden de görüldüğü üzere tüm yaklaşım akım derinliklerinde basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukuru derinliği (TPO), ayağın hem memba hem mansap taraflarında ayrı ayrı deney setlerinde ölçülmüş daralma ve yerel oyulma toplamlarından (YPO) daha büyük olmaktadır. Yaklaşım akım derinliği arttıkça ayağın mansap tarafındaki oyulma çukuru ve şev açısı azalmaktadır. Memba tarafında ise oyulma çukuru derinliği artan y_a ile azalmakta ama TPO ile YPO arasındaki fark artmaktadır. Bu da hem mevcut çalışma hem de literatürdeki diğer çalışmalarda gerek daralma oyulması gerekse serbest akım durumundaki yerel oyulma durumunda artan y_a değeri ile o bölgedeki akım hızında ve Fr sayısında azalma meydana geldiği, bunun da oyulma derinliğinin daha küçük olmasına neden olduğu şeklinde açıklanmaktadır. Ancak basınçlı akım durumunda y_a arttıkça nispeten y_{spp}’nin de azaldığı görülse de her y_a değerinde $y_{spp} > y_{sc}+y_{spo}$ sağlanmaktadır. Bu da basınçlı akım durumunda meydana gelen çevrintili akım yapısıyla açıklanabilir. Şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de 100 lt/sn’lik debi ve dört farklı yaklaşım akım derinliğinde oluşan enine profiller incelendiğinde yine y_a’nın arttığı durumlarda özellikle savak tipi akımın söz konusu olduğu hallerde TPO ile YPO farkı daha büyük olmaktadır. Ayrıca oyulma çukuru şevleri de daha dik oluşmaktadır. Özellikle savak tipi akım durumunda oyulma çukuru derinliği ve şeklindeki farklılıklar bu akım şartlarında oluşan çevrintilerin ve akım-yapı etkileşiminin etkisinin arttığını göstermektedir.

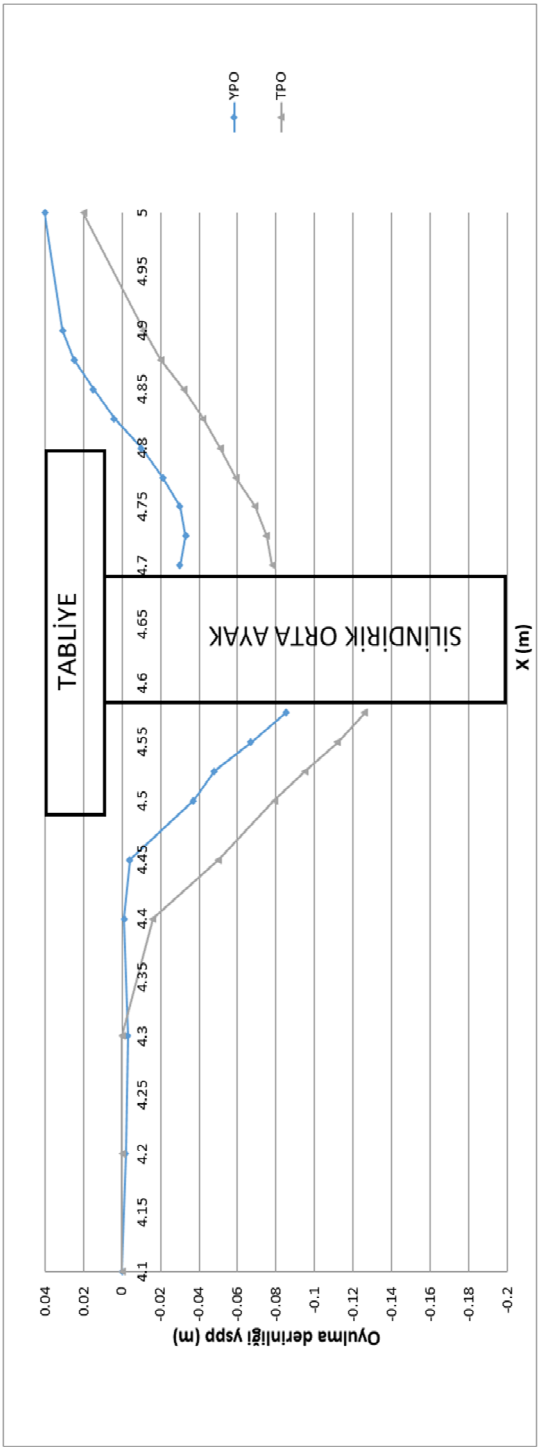




Şekil 5.1. (Solda) 100 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması

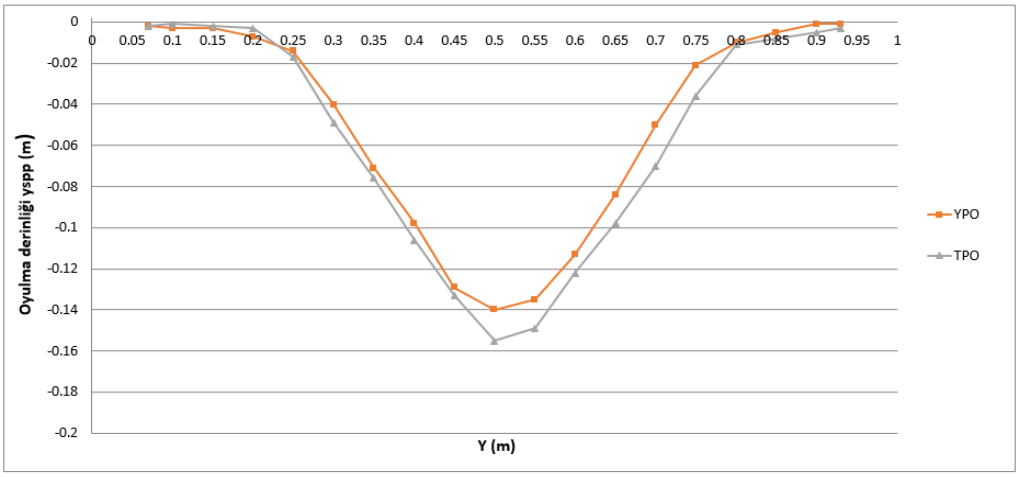
Şekil 5.2. (Sağda) 100 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması



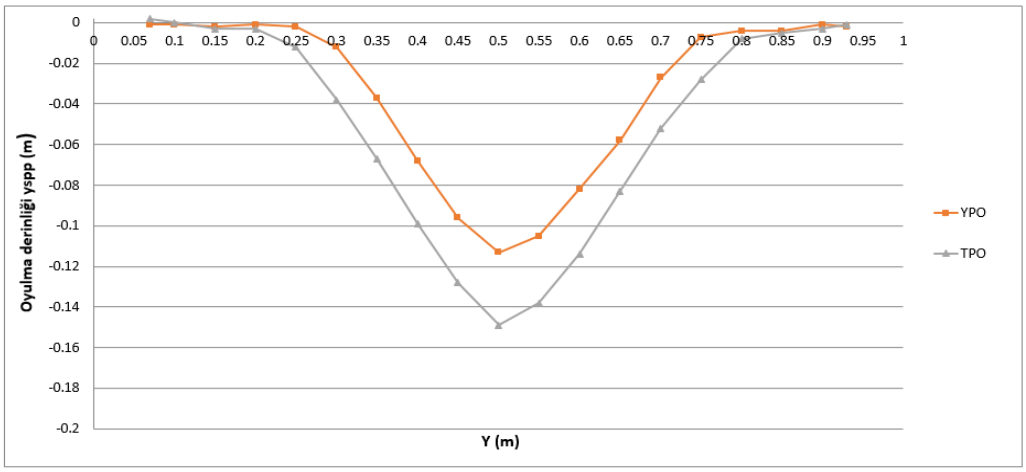


Şekil 5.3. (Solda) 100 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması

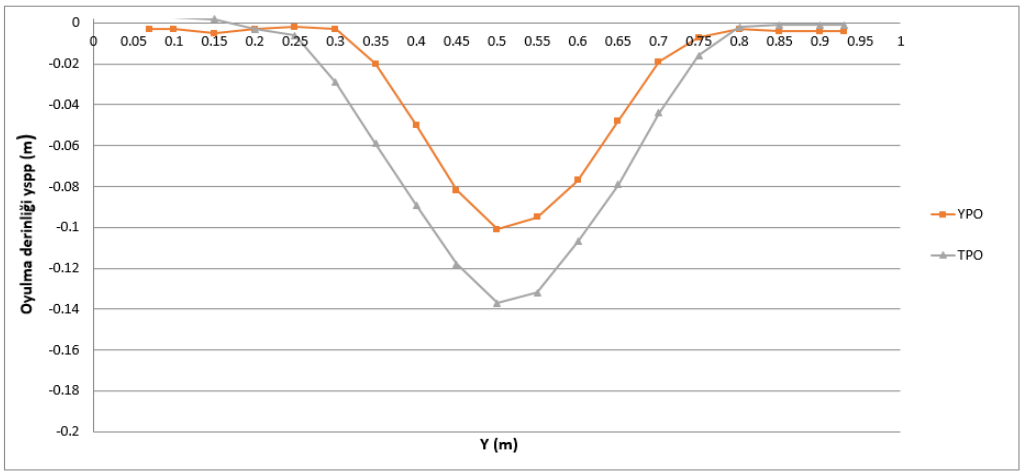
Şekil 5.4. (Sağda) 100 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması



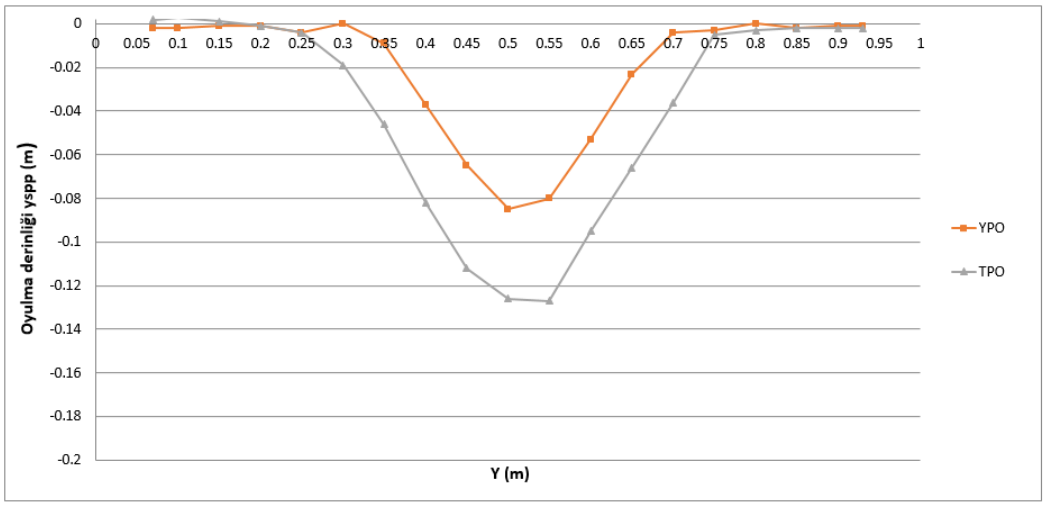
Şekil 5.5. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.6. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması

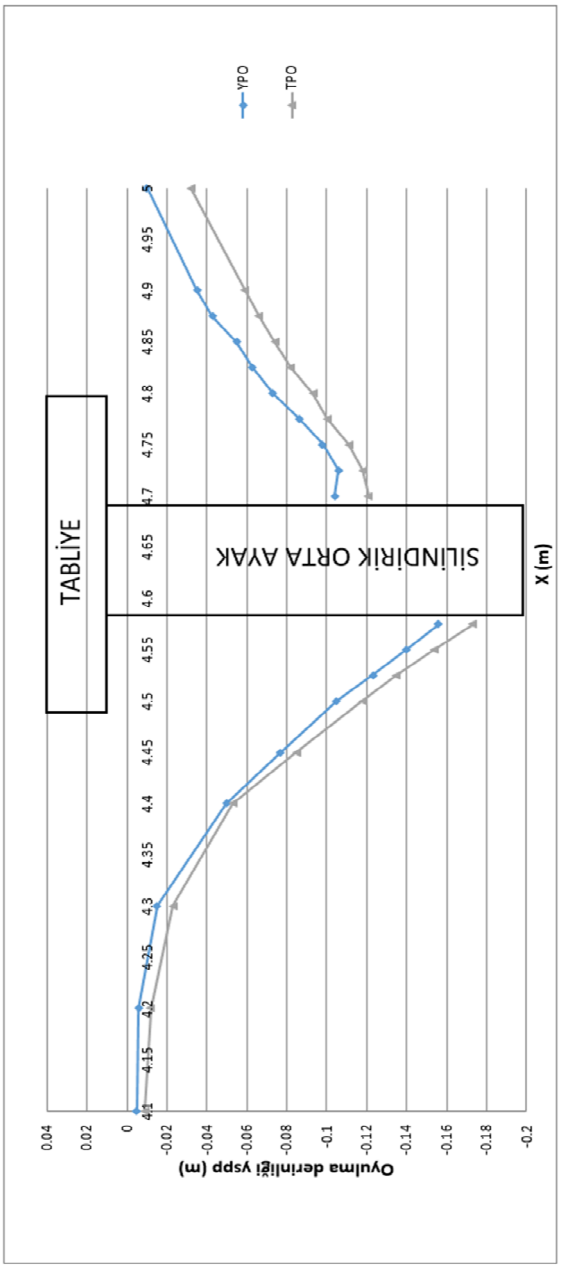


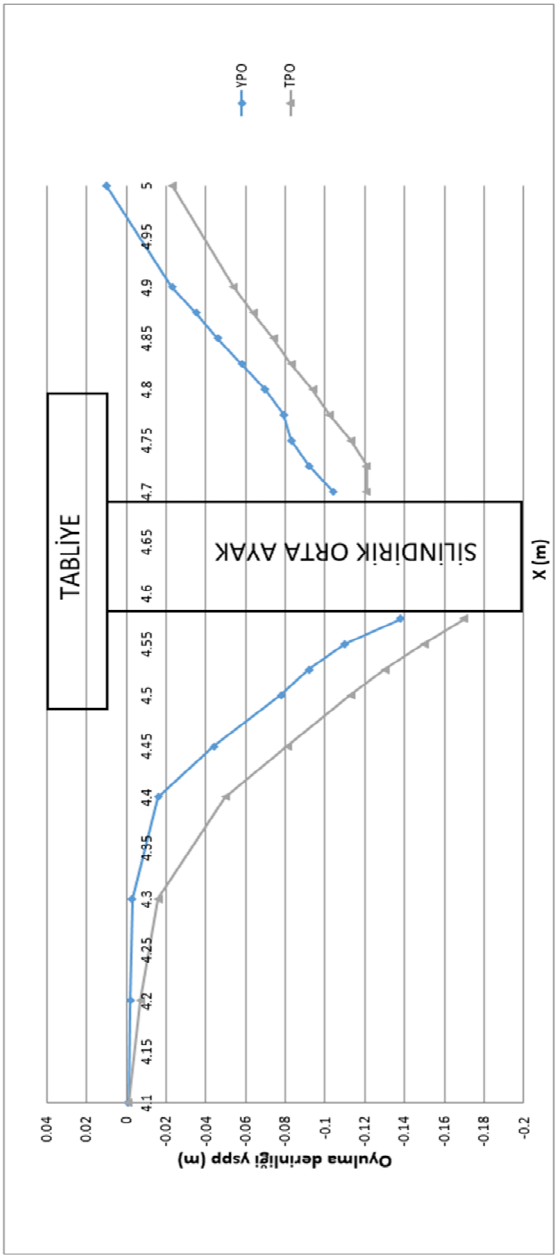
Şekil 5.7. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.8. 100 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması

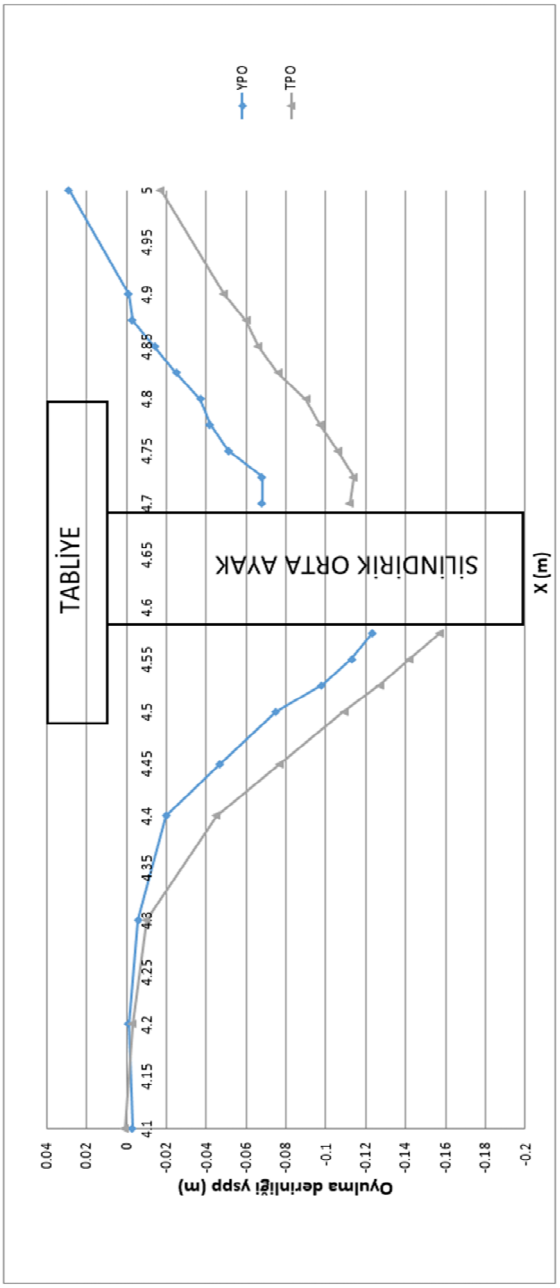
Benzer grafikler 110 lt/sn'lik debi için Şekil 5.9-5.16'da, 120 lt/sn'lik debi için ise Şekil 5.17-5.24'te verilmektedir. Şekiller incelendiğinde 100 lt/sn'lik debide gözlemlenen oyulma çukuru derinliği ve şev açıları ile ilgili oluşumların benzer şekilde meydana geldiği görülmektedir. Ancak artan debi değeriyle birlikte 110 lt/sn için YPO ve TPO arasındaki farkın azaldığı, 120 lt/sn debi değerinde ise küçük y_a değerlerinde bu farkın neredeyse kapandığı, daha büyük y_a değerlerinde yani savak tipi akım durumlarında orta ayak membasında nispeten daha derin ve yayvan oyulma çukuru oluşmaya devam ettiği görülmektedir. Bu durum açıkça orta ayağa sahip köprülerde taşkın sırasında daha büyük TPO meydana geldiğini ancak artan debi değeriyle bu farkın önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bunun özellikle oyulma çukuru mansap şevini etkilediği görülmüştür. Bu durum ayrıca Froude sayısının artmasıyla akım-ayak-tabliye etkileşimiyle oluşan akımın oyulma çukuru üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir.

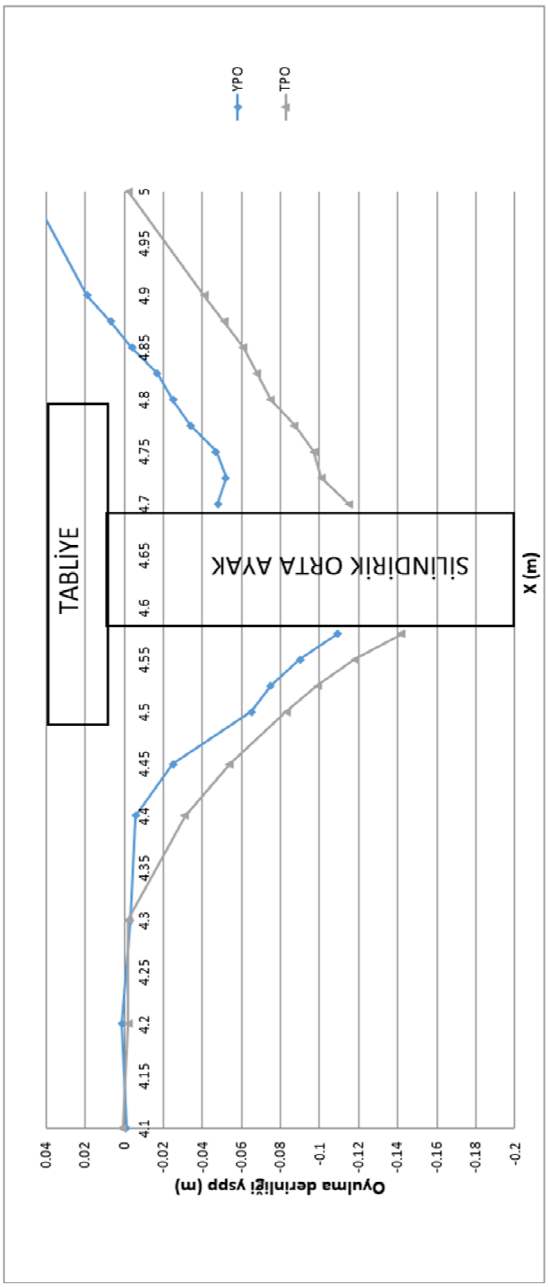




Şekil 5.9. (Solda) 110 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması

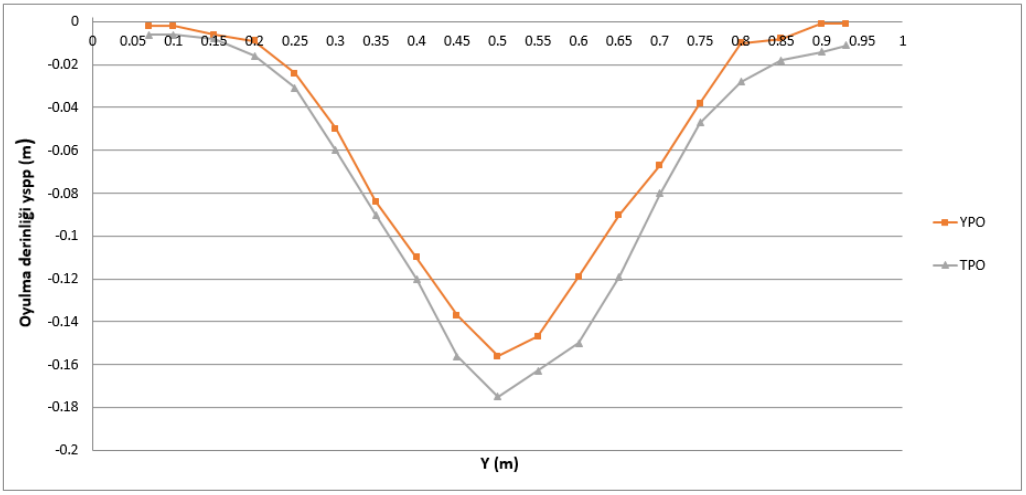
Şekil 5.10. (Sağda) 110 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması



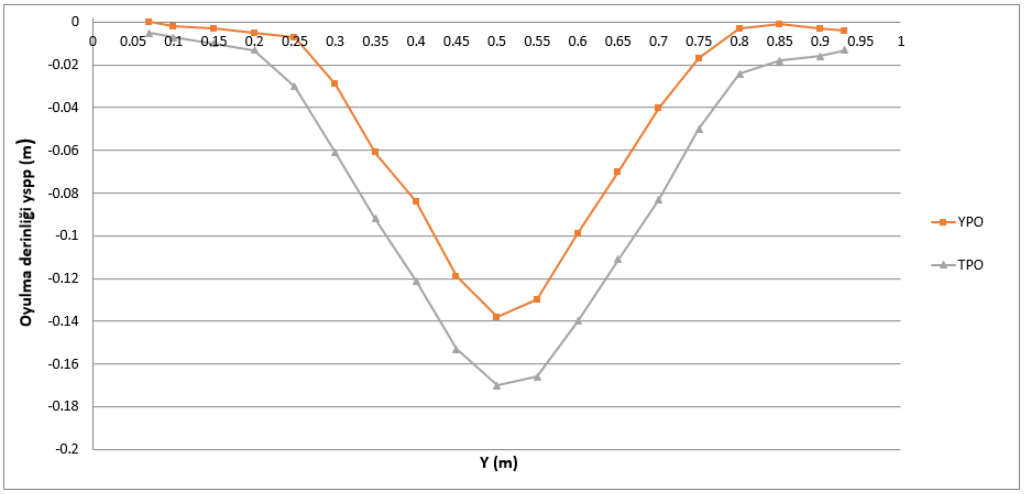


Şekil 5.11. (Solda) 110 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması

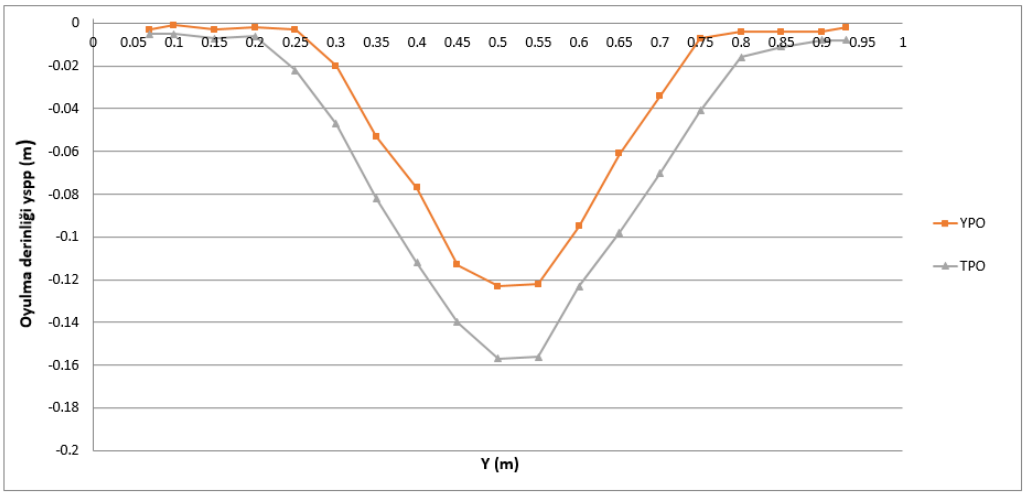
Şekil 5.12. (Sağda) 110 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerinin karşılaştırılması



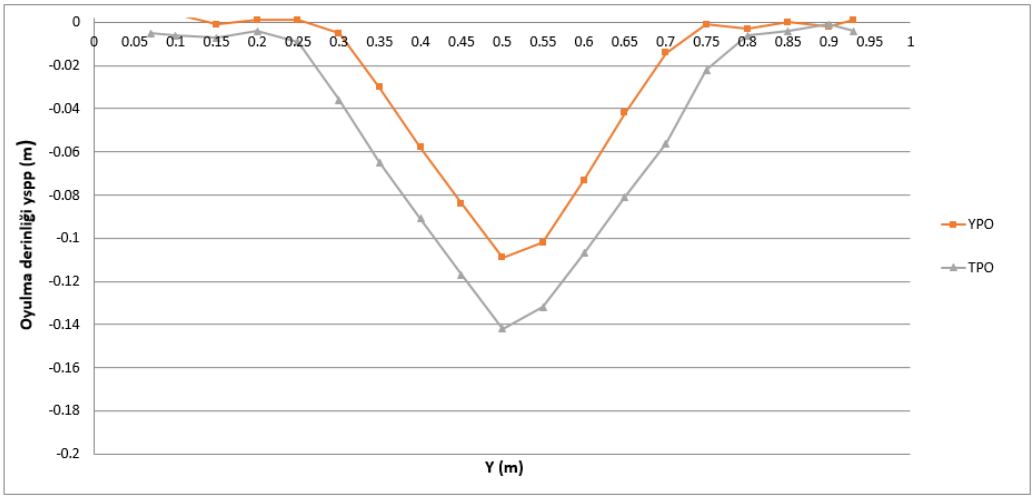
Şekil 5.13. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



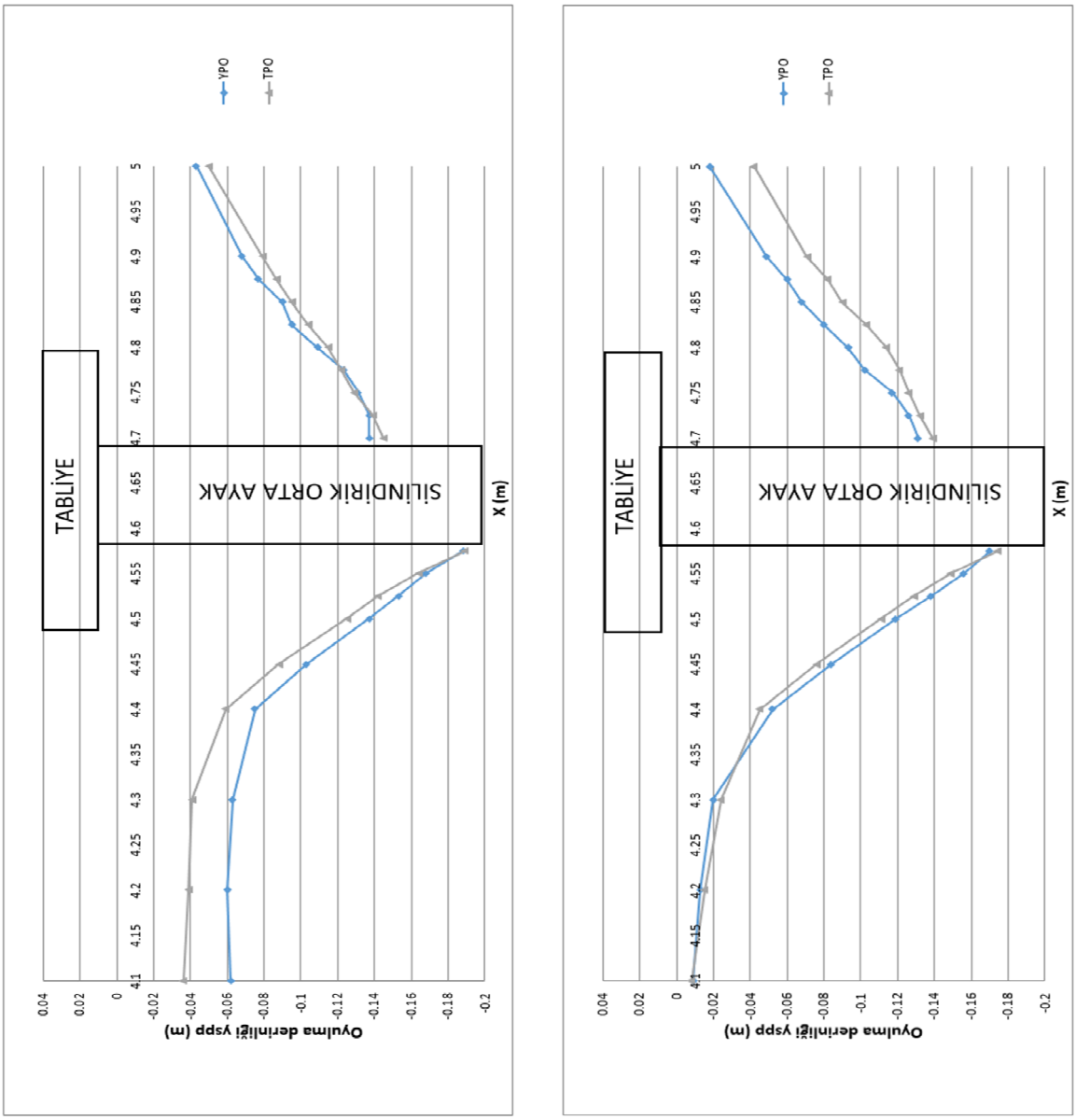
Şekil 5.14. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.15. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması

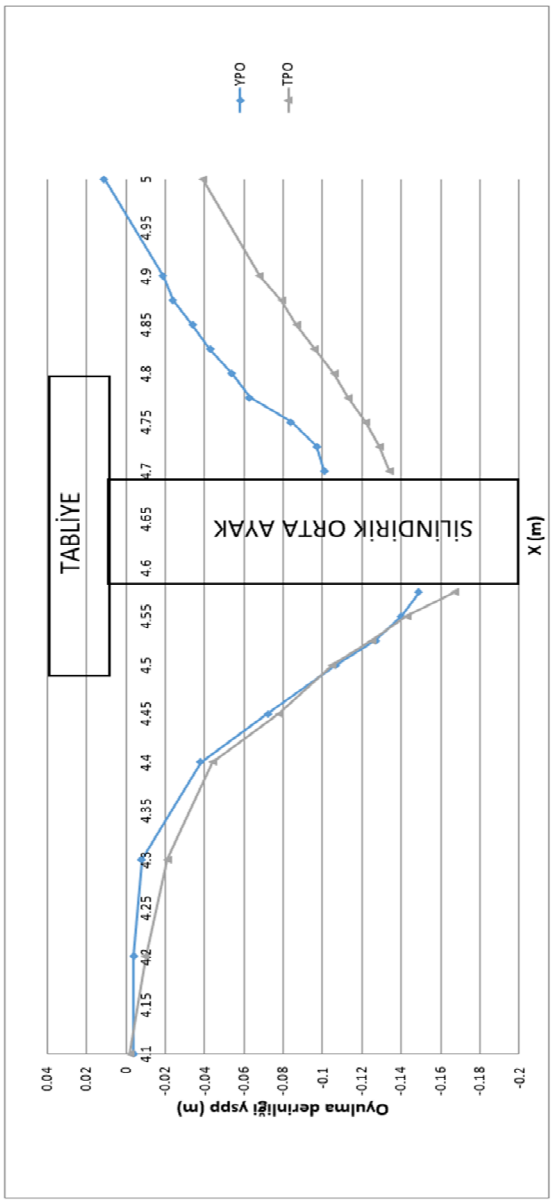


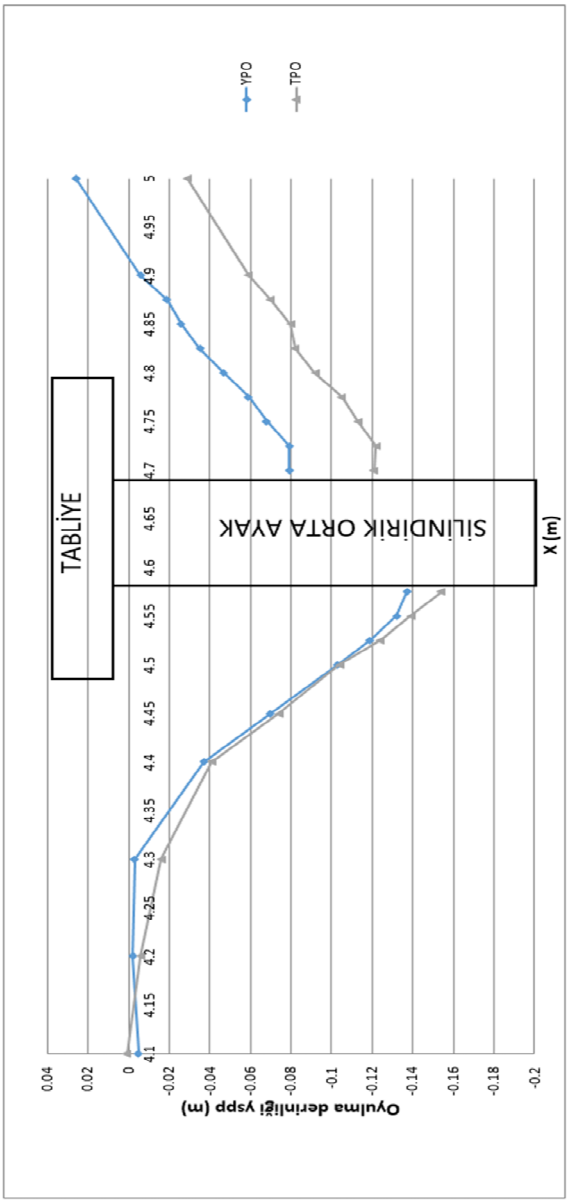
Şekil 5.16. 110 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.17. (Solda) 120 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerin karşılaştırılması

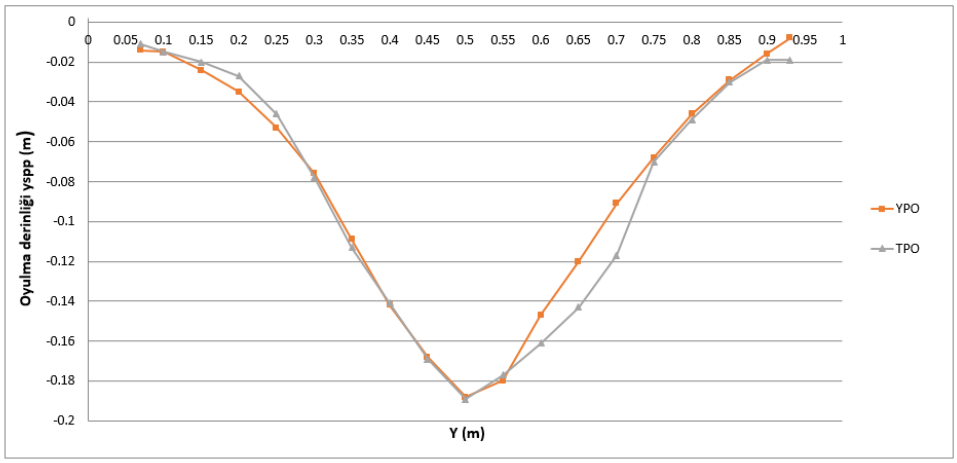
Şekil 5.18. (Sağda) 120 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerin karşılaştırılması



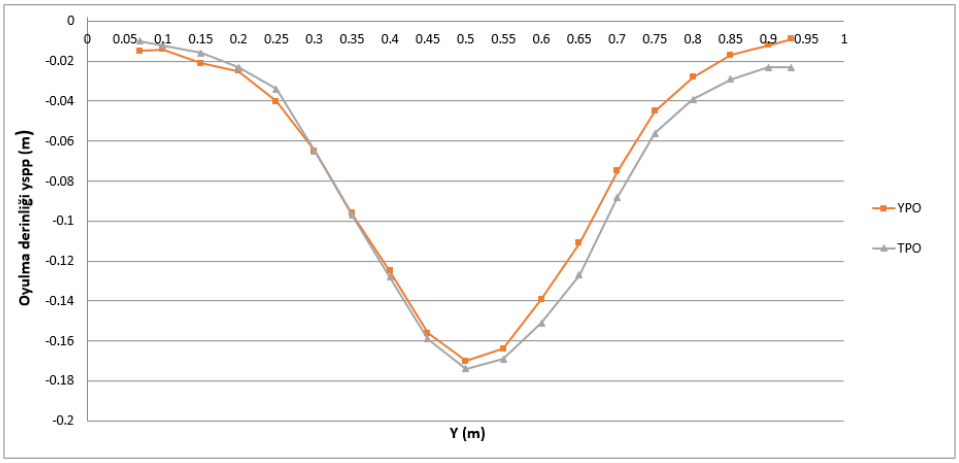


Şekil 5.19. (Solda) 120 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerin karşılaştırılması

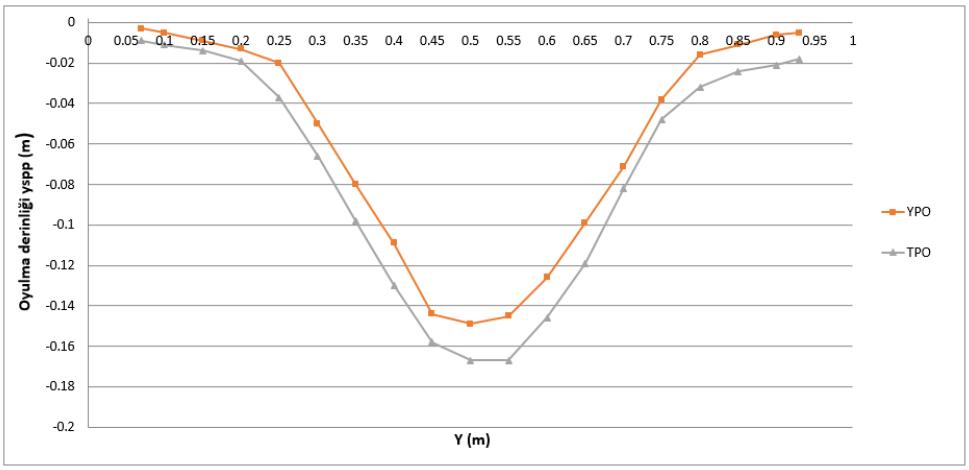
Şekil 5.20. (Sağda) 120 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun boy profillerin karşılaştırılması



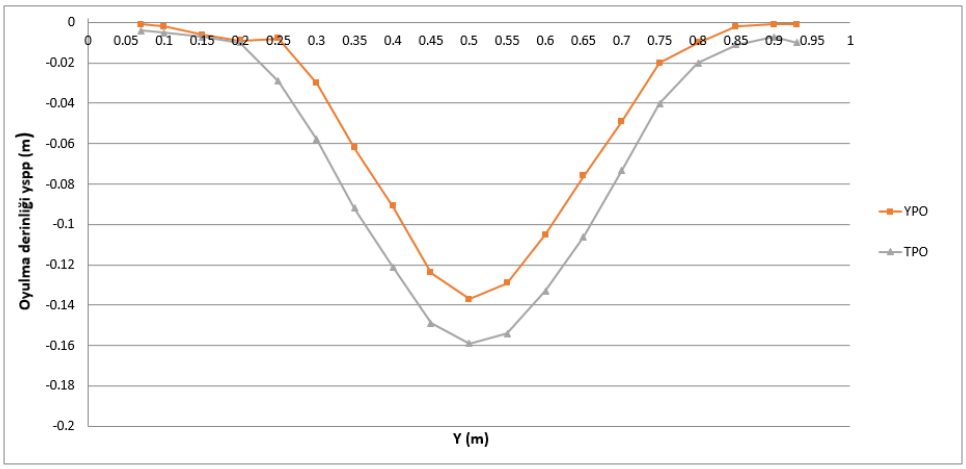
Şekil 5.21. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.22. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.23. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=39,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması



Şekil 5.24. 120 lt/sn'lik debi ve y_a=41,5 cm yaklaşım akım derinliğinde daralma+yerel oyulma ile toplam oyulma çukurunun enine profillerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.4'te TPO ve YPO arasındaki fark, deney verileri kullanılarak konu ile ilgili en yaygın bilinen ve uygulanmakta olan süperpoze yaklaşımının yer aldığı HEC-18 sonuçları ve meydana gelen farklar görülmektedir.

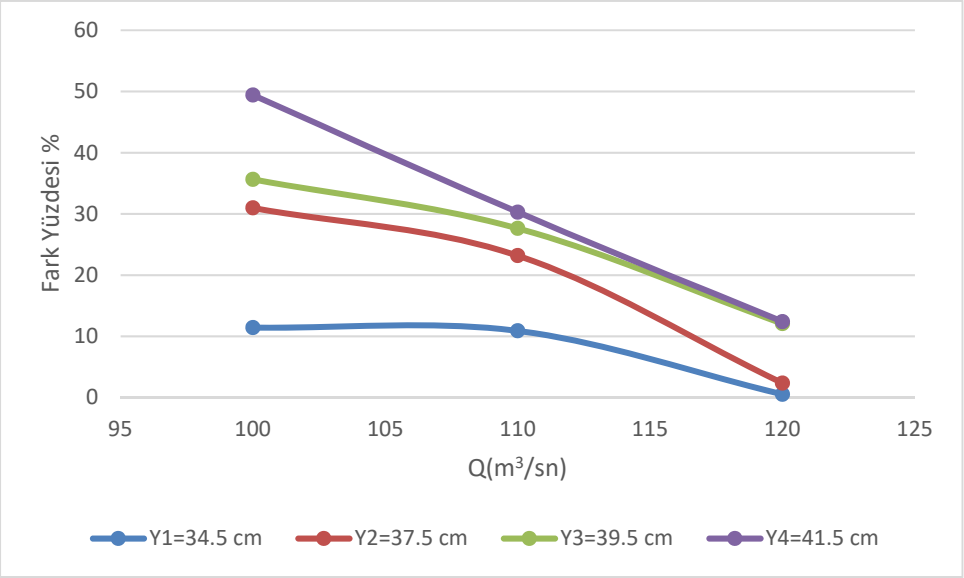
Çizelge 5.4. Maksimum oyulma derinliklerinin kıyaslanması

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a	y_{sc} (cm)	y_{spo} (cm)	YPO (cm)	TPO $y_{spp,max}$ (cm)	Fark (%)	HEC-18 $y_{sc,max}$ (cm)	HEC-18 $y_{spo,max}$ (cm)	HEC-18 YPO (cm)	Fark (%)
100	34,5	0,158	0,4	13,6	14,0	15,6	11,43	-2,7	15,3	12,6	23,02
	37,5	0,139	0,3	11,0	11,3	14,8	30,97	-1,3	15,0	13,7	8,03
	39,5	0,129	0,2	9,9	10,1	13,7	35,64	-0,4	14,7	14,3	-4,20
	41,5	0,119	0,1	8,4	8,5	12,7	49,41	0,3	14,5	14,8	-14,19
110	34,5	0,173	0,9	14,7	15,6	17,3	10,90	-1,0	16,0	15,0	15,33
	37,5	0,153	0,6	13,2	13,8	17,0	23,19	0,5	15,6	16,1	5,59
	39,5	0,141	0,3	12,0	12,3	15,7	27,64	1,4	15,3	16,7	-5,99
	41,5	0,131	0,2	10,7	10,9	14,2	30,28	2,0	15,1	17,1	-16,96
120	34,5	0,189	3,0	15,8	18,8	18,9	0,53	0,8	16,6	17,4	8,62
	37,5	0,167	2,5	14,5	17,0	17,4	2,35	2,2	16,2	18,4	-5,43
	39,5	0,154	1,4	13,5	14,9	16,7	12,08	3,1	15,9	19,0	-12,11
	41,5	0,143	0,9	12,8	13,7	15,4	12,41	3,8	15,7	19,5	-21,03

Çizelge 5.4 incelendiğinde tüm debi ve yaklaşım akım derinliklerinde toplam oyulma derinliği (TPO) süperpoze oyulma derinliğinden (YPO) daha büyük değerlerde meydana gelmiştir. Sabit debi değerinde artan yaklaşım akım derinliği ile birlikte farkın da arttığı görülmektedir. Debi değeri arttıkça da farkın azaldığı belirlenmiştir. Bu durum küçük debi değerlerinde süperpoze yaklaşımının ölçüm değerleri göz önüne alındığında daha küçük sonuçlar verdiğini, debinin artmasıyla bu farkın azaldığı görülmektedir. HEC-18'de yer alan

bu yöntem değerlendirildiğinde ise düşük debi değerlerinde daha küçük TPO tahmini yapıldığını ancak debi arttıkça TPO değerinden daha büyük YPO değerleri elde edildiği görülmektedir. Böylece HEC-18'de kabul gören yaklaşımın özellikle debi değeri arttıkça güvenli tarafta kalındığı görülmektedir. Sonuçlar süperpoze yönteminin özellikle debi arttıkça daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Şekil 5.25'te deney verileri kullanılarak TPO ve YPO arasında oluşan farkların debi değerleriyle nasıl değiştiği gösterilmiştir. Buna göre debi değeri arttıkça fark azalmaktadır. Sonuçlara göre basınçlı durumdaki farkların ortalaması yaklaşık %13,23 savaklı akımların ortalaması ise yaklaşık %27,91 olarak hesaplanmıştır. Savaklı durumdaki farkların daha büyük olmasının sebebi ayak olmaması durumunda savak yükünün artmasıyla oyulmanın azalması olabilir. Ancak TPO'nun ölçümü sırasında daralma ve yerel oyulma ile ilgili herhangi bir ayrım yapılamadığından net bir sonuca varılamamaktadır.



Şekil 5.25. Fark yüzdesinin debi ile değişimi

6. BASINÇLI OYULMA ÇUKURU DERİNLİĞİNİ TAHMİN EDEN AMPİRİK BAĞINTININ GELİŞTİRİLMESİ

6.1. Genel

Basınçlı akım ve temiz su oyulması durumlarında daralma ve yerel oyulmanın beraber gerçekleşmesi ile oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğini ifade edebilecek ampirik bir bağıntı geliştirebilmek amacıyla çoklu lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Bölüm 2.3'te oyulma mekanizmasını etkileyen parametrelere ait fonksiyonel ilişki ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümde de hem H_b için hem de D için ayrı ayrı çalışma yapılmıştır. Regresyon analizi için y_{spp}/H_b ve y_{spp}/D bağımlı değişken seçilmiş ve diğer bağımsız değişkenler düzenlenmiştir. Böylece Eş. 6.1 ve Eş. 6.2 elde edilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = f\left(\frac{y_a}{H_b}, \frac{h_w}{H_b}, \frac{a}{H_b}, \frac{V_a}{V_c}\right) \tag{6.1}$$

$$\frac{y_{spp}}{D} = f\left(\frac{V_a}{V_c}, \frac{y_a}{D}, \frac{h_w}{D}, \frac{a}{D}\right) \tag{6.2}$$

6.2. Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarındaki deneyler için birlikte analiz yapılmış, analizlerde akım koşulundan bağımsız tek bir bağıntı elde edilmiştir. Çoklu regresyon analizinde Eş. 6.1 ve Eş. 6.2 bağıntılarında bulunan a/D ve a/H_b bağımsız değişkenlerine ait katsayı değeri 0'a yakınsadığı için analizler diğer bağımsız değişkenler ile tamamlanmıştır.

6.2.1. y_{spp}/H_b için regresyon analizi

Temiz su oyulması ve basınçlı akım durumunda 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 6.1'de, 3 bağımsız değişkenli regresyon analizinin sonuçları ise Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. y_{spp}/H_b durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri

Q (lt/sn)	y_a (cm)	y_{spp}/H_b	V_a/V_c	y_a/H_b	h_w/H_b
100	34,5	0,477	0.585	1,062	0,000
	37,5	0,455	0.531	1,154	0,000
	39,5	0,422	0.500	1,215	0,062
	41,5	0,391	0.472	1,277	0,123
110	34,5	0,532	0.644	1,062	0,000
	37,5	0,523	0.584	1,154	0,000
	39,5	0,483	0.550	1,215	0,062
	41,5	0,437	0.519	1,277	0,123
120	34,5	0,582	0.702	1,062	0,000
	37,5	0,535	0.637	1,154	0,000
	39,5	0,514	0.600	1,215	0,062
	41,5	0,505	0.566	1,277	0,123

Çizelge 6.2. y_{spp}/H_b durumu için regresyon analizi sonuçları

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.9803
R Kare	0.9611
Ayarlı R Kare	0.9464
Standart Hata	0.0126
Gözlem	12

ANOVA					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Sig*
Regresyon	3	0.03154	0.01051	65.798	5.57485E-06
Fark	8	0.00128	0.00016		
Toplam	11	0.03282			

MODEL				
	Katsayılar	*Standart Hata*	*t Stat*	*P-değeri*
Kesişim	-0.4096	0.16497	-2.48330	0.03792
ya/Hb	0.3227	0.12070	2.67362	0.02820
hw/Hb	-0.3231	0.16728	-1.93174	0.08948
Va/Vc	0.9277	0.08533	10.87287	0.00000

y_{spp}/H_b durumu için Çizelge 6.1'de özetlenen deneysel veriler kullanılarak yapılan çoklu lineer regresyon analizinden elde edilen bağıntı Eş. 6.3 ile verilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = -0{,}409 + 0{,}322\frac{y_a}{H_b} - 0{,}323\frac{h_w}{H_b} + 0{,}927\frac{V_a}{V_c} \quad (6.3)$$

Çizelge 6.2'de verilen regresyon analizi sonuçlarına göre bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayısı (R) 0,98 olarak elde edilmiştir. Bu değer, değişkenler arasındaki ilişkinin derecesinin çok iyi olduğunu göstermektedir. Determinasyon katsayısı (korelasyon sayısının karesi) ise 0,96 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=2,11E-06) değerinin 0,05'ten küçük olması regresyon analizinde bulunan korelasyon katsayısının R=0,98 anlamlı olduğunu göstermektedir. Eş. 6.3'teki bağıntının katsayılarının elde edildiği Çizelge 6.2'de sabit ve bağımsız değişken katsayılarının anlamlılık test sonuçları p-değerinin (sig.) h_w/H_b bağımsız değişken haricinde 0,05'in altında olduğu görülmektedir. p-değerleri regresyon analizinden elde edilen bu katsayıların anlamlı derecede katkı sağladığını göstermektedir.

6.2.2. y_{spp}/D için regresyon analizi

Temiz su oyulması ve basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini ifade edebilmek için ampirik başka bir bağıntı daha geliştirilmiştir. Bağıntıyı çıkarabilmek için çoklu lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan değişkenler Çizelge 6.3'de, 3 bağımsız değişkenli regresyon analizinin sonuçları Çizelge 6.4'de verilmiştir.

y_{spp}/D durumu için Çizelge 6.3'de özetlenen deneysel veriler kullanılarak yapılan çoklu lineer regresyon analizinden elde edilen bağıntı Eş. 6.4 ile verilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{D} = -1{,}331 + 0{,}322\frac{y_a}{D} - 0{,}323\frac{h_w}{D} + 3{,}015\frac{V_a}{V_c} \quad (6.4)$$

Eş. 6.3 ve Eş.6.4 bağıntılarının Fr=0,119-0,189 değerleri arasında sabit H_b ve D değerlerinde uygulanabilir olduğu unutulmamalıdır.

Çizelge 6.3. y_{spp}/D durumu için regresyon analizinde kullanılan deney verileri

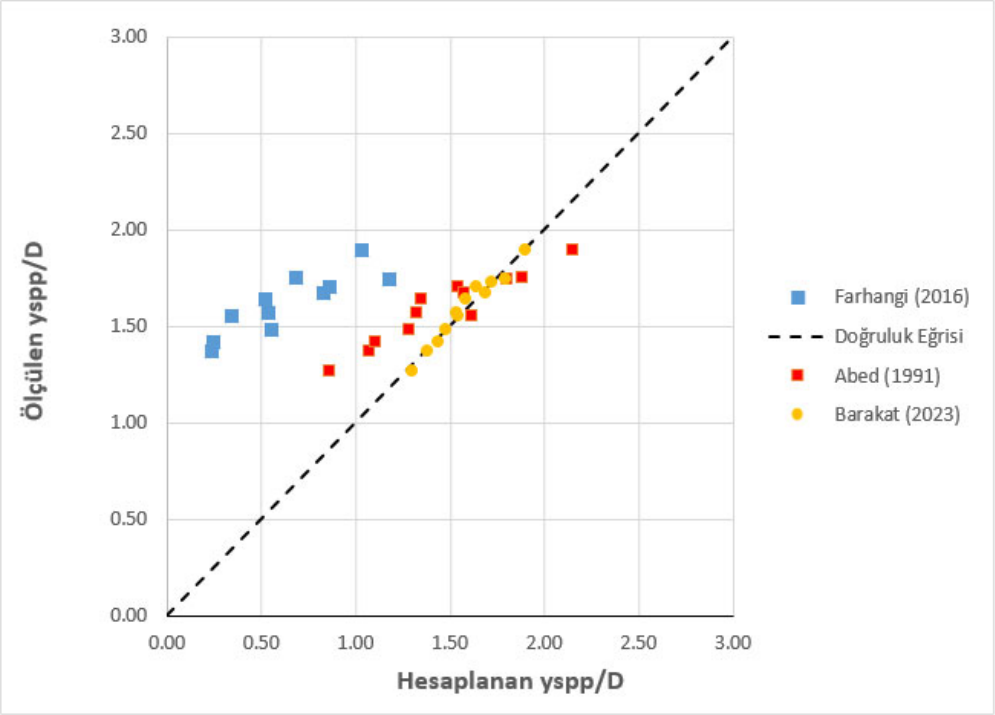
Q (lt/sn)	y_a (cm)	y_{spp}/D	Va/Vc	y_a/D	h_w/D
100	34,5	1,550	0.585	3,450	0,000
	37,5	1,480	0.531	3,750	0,000
	39,5	1,370	0.500	3,950	0,200
	41,5	1,270	0.472	4,150	0,400
110	34,5	1,730	0.644	3,450	0,000
	37,5	1,700	0.584	3,750	0,000
	39,5	1,570	0.550	3,950	0,200
	41,5	1,420	0.519	4,150	0,400
120	34,5	1,890	0.702	3,450	0,000
	37,5	1,740	0.637	3,750	0,000
	39,5	1,670	0.600	3,950	0,200
	41,5	1,640	0.566	4,150	0,400

Çizelge 6.4. y_{spp}/D durumu için regresyon analizi sonuçları

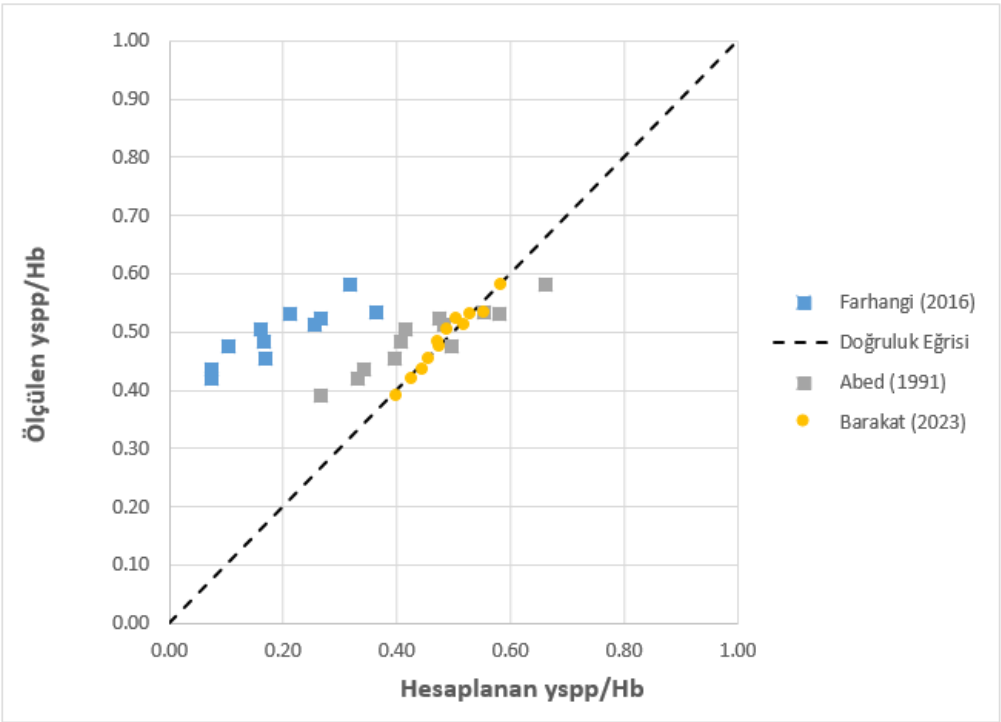
Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.9803
R Kare	0.9611
Ayarlı R Kare	0.9464
Standart Hata	0.0411
Gözlem	12

ANOVA					
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Sig*
Regresyon	3	0.33319	0.11106	65.79799	5.5749E-06
Fark	8	0.01350	0.00169		
Toplam	11	0.34669			
MODEL					
	Katsayılar	*Standart Hata*	*t Stat*	*P-değeri*	
Kesişim	-1.33142	0.53615	-2.48330	0.03792	
Va/Vc	3.01528	0.27732	10.87287	0.00000	
ya/D	0.32270	0.12070	2.67362	0.02820	
hw/D	-0.32314	0.16728	-1.93174	0.08948	

Çizelge 6.4'de verilen regresyon analizi sonuçlarına göre y_{spp}/D regresyon analizinde de Bölüm 6.2.1'de belirlenen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.1. Eş. 6.4'ün literatürdeki bağıntılarla karşılaştırılması



Şekil 6.2. Eş. 6.3'ün literatürdeki bağıntılarla karşılaştırılması

Ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişki R^2=0,98 olarak elde edilmiştir. Bu değer hem y_{spp}/D hem de y_{spp}/H_b bağıntılarında kısmi basınçlı tip ve savak tipi akım durumu için elde edilen bağıntının ölçülmüş olan maksimum oyulma çukuru derinliklerinin tahmininde başarılı sonuç verdiğini göstermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Özet ve Sonuçlar

Bu çalışmada, basınçlı akıma maruz kalmış temsili bir köprü modelinde, tabliye varlığından kaynaklı daralma oyulması, orta ayak varlığı sebebiyle meydana gelen yerel oyulma ve hem tabliye hem de orta ayağın olduğu durumda meydana gelen basınçlı akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulma çukuru şekli ve derinliği deneylerle incelenmiş, oyulma çukuru üzerinde etkili olduğu düşünülen akım parametreleri irdelenmiştir. Çalışmada oyulma çukuru şekline ve derinliğine etki eden parametreler arasında yaklaşım akım derinliği, kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumları ile debi yer almıştır. Tüm deneyler temiz su durumunda gerçekleştirilmiştir.

Tabliye, orta ayak ve iki durumun beraber incelendiği deneyler gerçekleştirilmiş ve ölçümlerle oyulma çukuru belirlenmiştir. Tasarımda kullanılan bağıntılar yardımıyla daralma ve yerel oyulma derinlikleri ayrı ayrı hesaplanarak toplanmış ve basınçlı akım durumundaki deney ölçümleriyle kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre tabliye ve orta ayağın beraber incelendiği durumdan nispeten daha fazla oyulma olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise, orta ayak etrafında tabliye varlığı neticesinde oluşan ilave türbülans etkisi ve ayak etrafında meydana getirdiği ilave çevrintiler ile yapı-ayak-akım etkileşiminin artması şeklinde yorumlanmıştır.

Yaklaşım akım derinliğinin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için dört farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır. Aynı debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla ortalama akım hızı ve dolayısıyla Froude sayısı küçülmüş ve meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin de azaldığı görülmüştür. Böylece yaklaşım akım derinliğinin en küçük olduğu durumda en büyük oyulma çukuru derinliğinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Akımın savak tipi olması durumunda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükünün de arttığı ve oyulma çukuru derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Oyulma çukuru şekli incelendiğinde ise basınçlı akım durumunda oyulma çukuru profilinin, savak tipi akıma kıyasla daha geniş olduğu belirlenmiştir.

Debinin oyulma çukuru derinliğine etkisini inceleyebilmek için üç farklı debi kullanılmıştır. Aynı yaklaşım akım derinliğinde debinin artmasıyla ortalama akım hızı ve dolayısıyla Froude sayısı artmış ve meydana gelen oyulma çukuru derinliği de artmıştır. Böylece aynı akım derinliğinde debinin en küçük olduğu durumda en küçük oyulma çukuru derinliğinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Oyulma çukuru şekli incelendiği ise yine artan debi ile doğru orantılı ve daha geniş olduğu saptanmıştır.

Çalışmada ayrıca literatürde bulunan bağıntıların en yaygın kullanılan ve bilinenleri istatistiksel parametre yardımıyla değerlendirilmiştir. Buna göre sadece daralma oyulması durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini en iyi Lyn (2008) tahmin ettiği ancak ölçüm değerlerinden küçük değerler tahmin ettiği için güvenli tarafta kalmadığı bu nedenle hem güvenli hem de en iyi tahmini Shan ve diğerleri (2012)'nin yaptığı görülmüştür. Serbest akım durumunda maksimum yerel oyulma derinliği ise en iyi Melville ve Sutherland (1988) bağıntısı ile hesaplanmıştır. Literatürde basınçlı oyulma ile ilgili olarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunabilmiştir. Çalışma Abed (1991) ve Farhangi (2016)'ye ait bağıntılar değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre Abed (1991)'in önerdiği bağıntı en iyi tahminleri yapmıştır.

Çalışmada ayrıca literatürde kabul gören yaklaşımlardan biri olan toplam oyulma çukuru derinliğinin (TPO) daralma oyulması derinliği ile serbest akım durumundaki yerel oyulma derinliklerinin (YPO) toplanmasıyla elde edilmesi yaklaşımı irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm yaklaşım akım derinliklerinde basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukuru derinliği (TPO) , ayağın hem memba hem mansap taraflarında ayrı ayrı deney setlerinde ölçülmüş daralma ve yerel oyulma toplamlarından (YPO) daha büyük olmaktadır. Yaklaşım akım derinliği arttıkça ayağın mansap tarafındaki oyulma çukuru ve şev açısı azalmaktadır. Memba tarafında ise oyulma çukuru derinliği artan y_a ile azalmakta ama TPO ile YPO arasındaki fark açılmaktadır. Bu da hem mevcut çalışma hem de literatürdeki diğer çalışmalarda gerek daralma oyulması gerekse serbest akım durumundaki yerel oyulma durumunda artan y_a değeri ile o bölgedeki akım hızında ve Fr sayısında azalma meydana geldiği, bunun da oyulma derinliğinin daha küçük olmasına neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Yapılan bu çalışmayla literatüre deneysel olarak elde edilmiş ve köprü tasarımının ön projelendirmesinde kullanılabilecek basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma

çukuru derinliği ile ilgili olarak yeni veriler kazandırılmıştır. Köprü tasarımlarında tabliye ve orta ayak için oyulma derinliğinin ayrı ayrı hesaplanıp tasarım yüksekliğinin belirlenmesinin özellikle küçük debi ve Froude sayılarında doğru sonuç vermediği belirlenmiştir.

7.2. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Bu çalışma kapsamında köprü tabliyesi ve orta ayak varlığında basınçlı akım durumunda ayak etrafında meydana gelmiş oyulma çukuru derinliği ve şekli laboratuvar imkânları dâhilinde temiz su oyulması durumu için farklı akım şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın devamında yapılması önerilen çalışmalar aşağıda kısaca özetlemiştir.

- Daha geniş Froude sayısı aralığında ve $V_a/V_c=1$ değerlerine yakın değerlerde deneyler yapılması
- Farklı taban malzemesi kullanılması
- Kısmi basınçlı ve savak tipi akımlarda kenar ayak için benzer çalışmaların yapılması
- Farklı ayak tipleri ve çaplar ile farklı H_b değerleri eklenerek meydana gelen oyulmaların incelenmesi
- Köprü tabliyesinin ve ayakların akıma dik olmadığı yani verevli olduğu durumda meydana gelecek oyulma çukurunun incelenmesi

KAYNAKLAR

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

Ahmad, M. (1951). Spacing and projection of spurs for bank protection. *Civil Engineering and Public Work Review*, March, 172-174, April, 256-258.

Ansari, S. A. and Qadar, A. (1994), Ultimate depth of scour around bridge piers. *National Hydraulics Conference*, 51-55.

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

Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., Lagasse, P. F., and Clopper, P. E. (2012). Evaluating scour at bridges (No. FHWA-HIF-12-003). *National Highway Institute* (US).

Arved, J., Raudkivi, J. and Ettema, R. (1983). Clear-Water Scour at Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.

Baduna Kocyigit, M., and Karakurt, O. (2019). Pressure flow and weir scour beneath a bridge deck. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(6), 534-543.

Breusers, H. N. C. (1965), Scour around drilling platforms. *Bulletin Hydraulic Research* 1964 and 1965, IAHR, 19.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen, H. W. (1977), Local scour around cylindrical piers, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 15(3), 211-252.

Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991), *Scouring, Hydraulic Structures Design Manual, No. 2*, I.A.H.R., Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Briaud, J, Chen, H.Cl. (2004a), Pier and contraction scour in cohesive soils, *NCHRP Report 516, Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C.

Briaud J.-L., Chen H.-C., Li Y., Nurtjahyo, P., Wang J., (2004b), The SRICOS-EFA method for complex piers in fine grained soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* 130(11), 1180-1191.

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

Cao, J., Chen, J., Zhu, D., and Wei, S. (2021). Evaluation of Local Scour Calculation Equations for Bridge Piers in Sandy Riverbed, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 692(4), 042022. IOP Publishing.

Carnacina, I., Pagliara, S., and Leonardi, N. (2019). Bridge pier scour under pressure flow conditions, *River Research and Applications*, 35(7), 844-854.

Chai, T., and Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error MAE). *Geoscientific Model Development Discussions*, 7(1), 1525-1534.

Cheremisinoff, N. P., Cheremisinoff, P. N., and Cheng, S. L. (Eds.). (1987). *Structures*, Volume I. CRC Press.

Chitale, S. V. (1962), Scour at bridge crossings, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127 (1), 191-196.

Chitale, W. S. (1988) Estimation of scour at bridge piers, *Journal of Irrigation and Power, India*, January, 57-68

Coleman, N. L. (1971), *Analyzing laboratory measurements of scour at cylindrical piers in sand beds*, 14th Congress, IAHR, 3, 307-313.

Dargahi, B. (1990). Controlling mechanism of local scouring, *Journal of Hydraulic Engineering,* 116(10), 1197-1214.

Demir, G. (2018). Akarsuyu verev kesen köprülerde farklı akım şartlarında meydana gelen taban oyulmalarının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 69.

Deng, L., and Cai, C. S. (2010). Bridge scour: Prediction, modeling, monitoring, and countermeasures. *Practice periodical on structural design and construction*, 15(2), 125-134.

Devore, J. L. (2011). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Cengage learning.

Dey, S., Raikar, R. V., and Roy, A. (2008). Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 105-109.

Ekuje, F. T. (2020). *Bridge scour: climate change effects and modelling uncertainties,* Doctoral dissertation, University of Surrey.

England, H. (2012). The Assessment of Scour and Other Hydraulic Actions at Highway Structures (BD 97/12). *Design Manuals for Roads and Bridges (DMRB), Standards for Highways. London: Highways England*.

Ettema, R., Melville, B. W., and Constantinescu, G. (2011). *Evaluation of bridge scour research: Pier scour processes and predictions*. Washington, DC, USA: Transportation Research Board of the National Academies.

Ettema, R., Constantinescu, G., & Melville, B. W. (2017). Flow-field complexity and design estimation of pier-scour depth: Sixty years since Laursen and Toch, *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 03117006.

Farhangi (2016), Maximum scour depth at submerged skewed bridge and pier, *Malaysian Journal of Civil Engineering,* 28(1):20-34

Fisher, R. A. (1920). A Mathematical Examination of the Methods of Determining the Accuracy of an Observation by the Mean Error, and by the Mean Square Error.

Franzetti, S., Malavasi, S., and Piccinin, C. (1994). Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare. In XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche 1-13.

Froehlich, D. C. (1988). Analysis of onsite measurements of scour at piers. In *Hydraulic engineering: proceedings of the 1988 national conference on hydraulic engineering,* 534-539.

Gao, D., Posada, G. L. and Nordin, C. F. (1993), Pier scour equations used in the Peoples Republic of China - Review and Summary. *National Hydraulics Conference,* San Francisco, CA, 1031-1036.

Guo, J., Kerenyi, K., & Pagan-Ortiz, J. E. (2009). *Bridge pressure flow scour for clear water conditions* (No. FHWA-HRT-09-041). Turner-Fairbank Highway Research Center.

Günyaktı, A. (1988). Köprü ayakları etrafında oyulma derinliğinin grafik yöntemle tayini. *Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi, TÜBİTAK*, *12*(1), 96-108.

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

Hancu, S. (1971). Sur le calcul des affouillements locaux dams la zone des piles des ponts. In *Proceedings of the 14th IAHR congress, Paris, France* 3(1), 299-313.

Hildreth, W. B. (Ed.). (2003). *Case Studies in Public Budgeting and Financial Management, Revised and Expanded*. CRC Press.

Holnbeck, S. R., Parrett, C., & Tillinger, T. N. (1993). Bridge scour and change in contracted section, Razor Creek. In *Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering,* 2249-2255.

Hong, S. (2005). *Interaction of bridge contraction scour and pier scour in a laboratory river model,* Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology.

Hong, J. H., Guo, W. D., Chiew, Y. M., & Chen, C. H. (2016). A new practical method to simulate flood-induced bridge pier scour—A case study of Mingchu bridge piers on the Cho-Shui River. *Water*, *8*(6), 238.

Hong, S., Abid, I. (2016). Physical Model Study of Bridge Contraction Scour. *KSCE Journal of Civil Engineering,* 20(6), 2578–2585.

Hong, S. H., and Lee, S. O. (2018). Insight of bridge scour during extreme hydrologic events by laboratory model studies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8), 2871-2879.

Inglis, S. C. (1949). Maximum depth of scour flatheads of guide bands and groynes, pier noses, and downstream bridges-the behavior and control of rivers and canals. *Indian Waterways Experimental Station,* Poona, India, 327-348.

Jain, S. C. (1981). Maximum clear-water scour around circular piers. *Journal of the Hydraulics Division*, *107*(5), 611-626.

Lu, J. Y., Hong, J. H., Su, C. C., Wang, C. Y., & Lai, J. S. (2008). Field measurements and simulation of bridge scour depth variations during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, *134*(6), 810-821.

Johnson, P. A. (1995). Comparison of pier-scour equations using field data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8), 626-629.

Khwairakpam, P., Ray, S.S., Das, S., Das, R., Mazumdar, A. (2012). Scour hole characteristics around a vertical pier under clearwater scour conditions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* 7(6), 649-654.

Karakurt, O. (2016). *Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altındaki oyulmanın incelenmesi*, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 82-85.

Kothyari, U. C., Hager, W. H., & Oliveto, G. (2007). Generalized approach for clear-water scour at bridge foundation elements. *Journal of hydraulic Engineering*, *133*(11), 1229-1240.

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

Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D., & Clopper, P. E. (2001). *Bridge scour and stream instability countermeasures. experience, selection, and design guidance* (No. FHWA/NHI-01-003). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.

Larras, J. (1963). Profondeurs Maximales d'Erosion des Fonds Mobiles Autour des Piles en Rivere. *Ann. Ponts Chaussees*, *133*, 411-424.

Laursen, E. M. (1960). Scour at bridge crossings. *Journal of the Hydraulics Division*, *86*(2), 39-54.

Laursen, E. M. (1963), Analysis of relief bridge scour, *Journal of the Hydraulics Division*, 89 (3), 93-118.

Link, O., Henríquez, S., and Ettmer, B. (2019). Physical scale modelling of scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2), 227-237.

Lyn, D.A. (2008). Pressure-Flow Scour: A Reexamination of the HEC-18 Equation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 1015-1020.

Melville, B. W. (1997), Pier and abutment scour - An integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 125-136.

Melville, B. W. and Dongol, D. M. S. (1992), Bridge scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1306-1310.

Melville, B. W. and Coleman, S. E. (2000), *Bridge scour*, Water Resources Publications, Littleton, CO.

Melville, B. W. and Raudkivi, A. J. (1996), Effects of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(4), 203-209.

Melville, B. W. and Sutherland, A. J. (1988), Design method for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013, April). Why NRMSE is not completely reliable for forecast/hindcast model test performances. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 15).

Mizrach, B. (1992). The distribution of the Theil U-statistic in bivariate normal populations. *Economics Letters*, *38*(2), 163-167.

Mueller, D. S. (1996). *Local scour at bridge piers in nonuniform sediment under dynamic conditions.* Colorado State University.

Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.

Nasiri-Dehsorkhi, E., Chamani, M. R., & Kabiri-Samani, A. (2021, August). Characteristics of flow around a cylindrical pier under a partially submerged bridge deck. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (174(4), 159-172). Thomas Telford Ltd.

Neill, C. R. (1964). *River-bed scour*. Canadian Good Roads Assoc Tech Bull.

Neill, C. R. (1973). *Guide to bridge hydraulics*, University of Toronto Press

Oliveto, G. and Hager, W. H. (2002), Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (9), 811-820.

Qi M, Li J, Chen Q (2016a) Comparison of existing equations for local scour at bridge piers: parameter influence and validation. *Nat Hazards*, 82(3):2089–2105

Richardson, E. V., & Davies, S. R. (1995). *Evaluating scour at bridges. Rep. No*. FHWAIP-90-017 (HEC 18), Federal Administration, US Department of Transportation, Washington, DC.

Richardson, E. V., & Davis, S. R. (2001). *Evaluating scour at bridges* (No. FHWA-NHI-01-001). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.

Saha, R., Lee, S. O., and Hong, S. H. (2018). A comprehensive method of calculating maximum bridge scour depth. *Water*, 10(11), 1572.

Shan, H., Xie, Z., Bojanowski, C., Suaznabar, O., Lottes, S., Shen, J., & Kerenyi, K. (2012). *Submerged flow bridge scour under clear water conditions* (No. FHWA-HRT-12-034). Turner-Fairbank Highway Research Center.

Shen, H. W., Schneider, V. R. and Karaki, S. S. (1969), Local scour around bridge piers, *Journal of the Hydraulics Division*, 95(HY6), 1919-1940.

Sheppard, D. M., Odeh, M., and Glasser, T. (2004). Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (10)

Sheppard, D. M., Melville, B., and Demir, H. (2014). Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.

Shirole, A. M., & Holt, R. C. (1991). Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. *Transportation Research Record*, *1290*, 39-50.

Sturm, T. W., and Janjua, N. S. (1994). Clear-water scour around abutments in floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 956-972.

Sturm, T. W., Ettema, R., & Melville, B. W. (2011). *Evaluation of bridge-scour research: Abutment and contraction scour processes and prediction* (pp. 24-27). Washington, DC, USA: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.

Tejada, S. (2013). *Effects of Blockage and Relative Coarseness on Clear Water Bridge Scour*. MA Sc. Thesis, Faculty of Engineering, University of Windsor, Canada.

Tofallis, C. (2015). A fbetter measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation. *Journal of the Operational Research Society*, 66(8), 1352-1362.

Transportation Officials. (2002). *Standard specifications for highway bridges*. AASHTO.

Umbrell, E. R.,Young G. K., Stein, S.M. and Jones, J.S. (1998). Clear-Water Contraction Scour Under Bridges In Pressure Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 236-240.

Van Leeuwen, Z., & Lamb, R. (2014). Flood and scour related failure incidents at railway assets between 1846 and 2013. *Railway Safety & Standards Board*.

Verma, D. V. S., Setia, B., & Bhatia, U. (2004). Constriction scour in pressurized flow condition. *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, *17*(3), 235-244.

Wang, C., Yu, X., and Liang, F. (2017). A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures. *Natural Hazards*, 87(3), 1881-1906.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, *30*(1), 79-82.

Van Wilson, K. (1995). *Scour at selected bridge sites in Mississippi* (Vol. 94, No. 4241). US Department of the Interior, US Geological Survey.

Yanmaz, A. M., (1989). *Time dependent analysis of clear water scour around bridge piers*, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

Yanmaz, A. M. and Altinbilek H. D. (1991), Study of time-dependent local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (10), 1247-1268.

Yanmaz, A. M. (2002), *Köprü Hidroliği*. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.

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

EKLER

Ek-1. Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 1.1 Umbrell ve diğerleri (1998) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	h_w (m)	V_a (m/s)	V_c (m/s)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0	0,290	0,495	0,005	-0,050	-1094,57
	0,375	0	0,267	0,502	0,004	-0,043	-1171,15
	0,395	0,02	0,253	0,507	0,003	-0,047	-1677,00
	0,415	0,04	0,241	0,511	0,003	-0,051	-1816,26
110	0,345	0	0,319	0,495	0,012	-0,033	-378,68
	0,375	0	0,293	0,502	0,010	-0,026	-361,52
	0,395	0,02	0,278	0,507	0,005	-0,031	-717,60
	0,415	0,04	0,265	0,511	0,004	-0,035	-982,63
120	0,345	0	0,348	0,495	0,033	-0,018	-153,73
	0,375	0	0,320	0,502	0,028	-0,010	-135,89
	0,395	0,02	0,304	0,507	0,022	-0,015	-168,33
	0,415	0,04	0,289	0,511	0,013	-0,020	-251,51

Çizelge 1.2. Arneson ve Abt (1998) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	h_w (m)	V_a (m/s)	V_c (m/s)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0	0,290	0,476	0,005	0,195	3807,92
	0,375	0	0,267	0,483	0,004	0,127	3071,27
	0,395	0,02	0,253	0,487	0,003	0,085	2736,31
	0,415	0,04	0,241	0,491	0,003	0,046	1449,12
110	0,345	0	0,319	0,476	0,012	0,199	1561,53
	0,375	0	0,293	0,483	0,010	0,131	1207,84
	0,395	0,02	0,278	0,487	0,005	0,089	1679,77
	0,415	0,04	0,265	0,491	0,004	0,050	1158,52
120	0,345	0	0,348	0,476	0,033	0,203	516,28
	0,375	0	0,320	0,483	0,028	0,135	381,13
	0,395	0,02	0,304	0,487	0,022	0,093	322,21
	0,415	0,04	0,289	0,491	0,013	0,054	316,98

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 4.13 Lyn (2008) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_c (m/s)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,290	0,005	0,008	68,29
	0,375	0,267	0,004	0,007	71,61
	0,395	0,253	0,003	0,006	101,55
	0,415	0,241	0,003	0,005	78,65
110	0,345	0,319	0,012	0,011	-7,11
	0,375	0,293	0,010	0,009	-9,06
	0,395	0,278	0,005	0,008	60,19
	0,415	0,265	0,004	0,007	77,49
120	0,345	0,348	0,033	0,014	-56,33
	0,375	0,320	0,028	0,012	-58,02
	0,395	0,304	0,022	0,010	-52,93
	0,415	0,289	0,013	0,009	-29,40

Çizelge 4.14. Guo (2009) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_c (m/s)	V_a (m/s)	k (m)	F_i	V_{ce}	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,476	0,290	0,02	1,076	0,476	0,005	-0,012	-344,27
	0,375	0,483	0,267	0,05	0,690	0,483	0,004	0,027	585,39
	0,395	0,487	0,253	0,05	0,563	0,466	0,003	0,038	1173,32
	0,415	0,491	0,241	0,05	0,480	0,451	0,003	0,048	1511,07
110	0,345	0,476	0,319	0,02	1,076	0,476	0,012	-0,012	-201,78
	0,375	0,483	0,293	0,05	0,690	0,483	0,010	0,027	174,15
	0,395	0,487	0,278	0,05	0,563	0,466	0,005	0,038	663,99
	0,415	0,491	0,265	0,05	0,480	0,451	0,004	0,048	1108,30
120	0,345	0,476	0,348	0,02	1,076	0,476	0,033	-0,012	-137,01
	0,375	0,483	0,320	0,05	0,690	0,483	0,028	0,027	-2,08
	0,395	0,487	0,304	0,05	0,563	0,466	0,022	0,038	73,63
	0,415	0,491	0,289	0,05	0,480	0,451	0,013	0,048	271,78

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 4.15. HEC-18 bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	h_w (m)	V_a (m/s)	y_2 (m)	h_s (m)	H_t (m)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0	0,290	0,207	0,091	0,02	0,005	-0,027	-648,46
	0,375	0	0,267	0,207	0,106	0,05	0,004	-0,013	-418,27
	0,395	0,02	0,253	0,207	0,114	0,07	0,003	-0,004	-230,76
	0,415	0,04	0,241	0,207	0,121	0,09	0,003	0,003	-12,69
110	0,345	0	0,319	0,224	0,091	0,02	0,012	-0,010	-181,87
	0,375	0	0,293	0,224	0,106	0,05	0,010	0,005	-51,33
	0,395	0,02	0,278	0,224	0,114	0,07	0,005	0,014	173,49
	0,415	0,04	0,265	0,224	0,121	0,09	0,004	0,020	405,42
120	0,345	0	0,348	0,242	0,091	0,02	0,033	0,008	-77,13
	0,375	0	0,320	0,242	0,106	0,05	0,028	0,022	-20,58
	0,395	0,02	0,304	0,242	0,114	0,07	0,022	0,031	41,11
	0,415	0,04	0,289	0,242	0,121	0,09	0,013	0,038	189,13

Çizelge 4.16. Shan (2012) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	h_w (m)	V_a (m/s)	H_t (m)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0	0,290	0,02	0,005	-0,010	-302,52
	0,375	0	0,267	0,05	0,004	0,005	14,15
	0,395	0,02	0,253	0,07	0,003	0,004	20,52
	0,415	0,04	0,241	0,09	0,003	0,001	-57,47
110	0,345	0	0,319	0,02	0,012	0,009	-25,46
	0,375	0	0,293	0,05	0,010	0,024	136,36
	0,395	0,02	0,278	0,07	0,005	0,022	337,10
	0,415	0,04	0,265	0,09	0,004	0,019	368,97
120	0,345	0	0,348	0,02	0,033	0,028	-15,85
	0,375	0	0,320	0,05	0,028	0,042	51,64
	0,395	0,02	0,304	0,07	0,022	0,040	81,17
	0,415	0,04	0,289	0,09	0,013	0,036	177,05

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçlar

Çizelge 4.17. Kumcu (2016) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_b (m/s)	V_c (m/s)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,308	0,475	0,005	0,011	117,79
	0,375	0,308	0,482	0,004	0,038	860,57
	0,395	0,308	0,486	0,003	0,057	1790,61
	0,415	0,308	0,490	0,003	0,075	2398,99
110	0,345	0,338	0,475	0,012	0,022	83,78
	0,375	0,338	0,482	0,010	0,050	403,90
	0,395	0,338	0,486	0,005	0,069	1284,30
	0,415	0,338	0,490	0,004	0,088	2099,72
120	0,345	0,369	0,475	0,033	0,033	0,60
	0,375	0,369	0,482	0,028	0,062	122,70
	0,395	0,369	0,486	0,022	0,082	271,42
	0,415	0,369	0,490	0,013	0,101	677,02

Çizelge 4.18. Baduna Koçyiğit ve Karakurt (2019) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	Fr_{b*}	V_a (m/s)	y_{sc} (m) ölçülen	y_{sc} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	2,704	0,290	0,005	0,017	235,70
	0,375	2,704	0,267	0,004	0,011	179,38
	0,395	2,704	0,253	0,003	0,004	19,43
	0,415	2,704	0,241	0,003	0,000	-107,23
110	0,345	2,974	0,319	0,012	0,055	356,96
	0,375	2,974	0,293	0,010	0,049	392,23
	0,395	2,974	0,278	0,005	0,042	743,22
	0,415	2,974	0,265	0,004	0,038	859,03
120	0,345	3,245	0,348	0,033	0,093	181,47
	0,375	3,245	0,320	0,028	0,087	211,70
	0,395	3,245	0,304	0,022	0,081	266,99
	0,415	3,245	0,289	0,013	0,077	491,84

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 4.19. Melville ve Sutherland (1988) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_a (m/s)	Fr	V_c (m/s)	V_{ca} (m/s)	0,8* V_{ca} (m/s)	$V_a(<V_c)$	KI	y_{spo} (m) ölçülen	y_{spo} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,290	0,158	0,521	0,068	0,054	0,521	1,335	0,136	0,133	-1,84
	0,375	0,267	0,139	0,527	0,073	0,058	0,527	1,215	0,11	0,122	10,47
	0,395	0,253	0,129	0,530	0,076	0,061	0,530	1,146	0,099	0,115	15,76
	0,415	0,241	0,119	0,533	0,079	0,063	0,533	1,084	0,084	0,108	29,05
110	0,345	0,319	0,173	0,521	0,068	0,054	0,521	1,468	0,147	0,147	-0,10
	0,375	0,293	0,153	0,527	0,073	0,058	0,527	1,337	0,132	0,134	1,26
	0,395	0,278	0,141	0,530	0,076	0,061	0,530	1,261	0,12	0,126	5,05
	0,415	0,265	0,131	0,533	0,079	0,063	0,533	1,192	0,107	0,119	11,44
120	0,345	0,348	0,189	0,521	0,068	0,054	0,521	1,602	0,158	0,160	1,39
	0,375	0,320	0,167	0,527	0,073	0,058	0,527	1,458	0,145	0,146	0,56
	0,395	0,304	0,154	0,530	0,076	0,061	0,530	1,375	0,135	0,138	1,87
	0,415	0,289	0,143	0,533	0,079	0,063	0,533	1,301	0,128	0,130	1,63

Çizelge 4.20. Yanmaz (1989) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	y_{spo} (m) ölçülen	y_{spo} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,136	0,199	46,16
	0,375	0,11	0,210	91,34
	0,395	0,099	0,218	120,32
	0,415	0,084	0,226	168,61
110	0,345	0,147	0,199	35,22
	0,375	0,132	0,210	59,45
	0,395	0,12	0,218	81,76
	0,415	0,107	0,226	110,87
120	0,345	0,158	0,199	25,81
	0,375	0,145	0,210	45,16
	0,395	0,135	0,218	61,57
	0,415	0,128	0,226	76,27

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 4.21. Melville (1997) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_a (m/s)	Fr	V_c (m/s)	V_{ca} (m/s)	V_a (m/s)	V_a hesap (m/s)	KI	y_{spo} (m) ölçülen	y_{spo} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,290	0,158	0,401	0,474	0,379	0,401	0,723	0,136	0,173	27,57
	0,375	0,267	0,139	0,405	0,479	0,383	0,405	0,658	0,11	0,158	43,57
	0,395	0,253	0,129	0,408	0,482	0,386	0,408	0,621	0,099	0,149	50,45
	0,415	0,241	0,119	0,410	0,485	0,388	0,410	0,587	0,084	0,141	67,72
110	0,345	0,319	0,173	0,401	0,474	0,379	0,401	0,795	0,147	0,191	29,83
	0,375	0,293	0,153	0,405	0,479	0,383	0,405	0,724	0,132	0,174	31,60
	0,395	0,278	0,141	0,408	0,482	0,386	0,408	0,683	0,120	0,164	36,53
	0,415	0,265	0,131	0,410	0,485	0,388	0,410	0,646	0,107	0,155	44,84
120	0,345	0,348	0,189	0,401	0,474	0,379	0,401	0,867	0,158	0,208	31,77
	0,375	0,320	0,167	0,405	0,479	0,383	0,405	0,790	0,145	0,190	30,70
	0,395	0,304	0,154	0,408	0,482	0,386	0,408	0,745	0,135	0,179	32,40
	0,415	0,289	0,143	0,410	0,485	0,388	0,410	0,704	0,128	0,169	32,08

Çizelge 4.22. Sheppard ve diğerleri (2004) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_a (m/s)	Fr	V_c (m/s)	f1 (y_a/D*)	f2 (V_a/V_c)	f3 (D*/D_{50})	y_{spo} (m) ölçülen	y_{spo} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,290	0,158	0,521	0,928	0,398	0,913	0,084	0,136	-38,09
	0,375	0,267	0,139	0,527	0,935	0,189	0,913	0,040	0,11	-63,29
	0,395	0,253	0,129	0,530	0,939	0,044	0,913	0,009	0,099	-90,50
	0,415	0,241	0,119	0,533	0,943	-0,105	0,913	-0,023	0,084	-127,01
110	0,345	0,319	0,173	0,521	0,928	0,578	0,913	0,122	0,147	-16,84
	0,375	0,293	0,153	0,527	0,935	0,400	0,913	0,085	0,132	-35,29
	0,395	0,278	0,141	0,530	0,939	0,275	0,913	0,059	0,12	-50,97
	0,415	0,265	0,131	0,533	0,943	0,144	0,913	0,031	0,107	-71,08
120	0,345	0,348	0,189	0,521	0,928	0,714	0,913	0,151	0,158	-4,37
	0,375	0,320	0,167	0,527	0,935	0,565	0,913	0,121	0,145	-16,82
	0,395	0,304	0,154	0,530	0,939	0,457	0,913	0,098	0,135	-27,4
	0,415	0,289	0,143	0,533	0,943	0,344	0,913	0,074	0,128	-42,24

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 4.24. HEC-18 bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_a (m/s)	Fr_a (-)	V_c (m/s)	y_{spo} (m) ölçülen	y_{spo} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,290	0,158	0,481	0,136	0,153	12,72
	0,375	0,267	0,139	0,488	0,11	0,150	35,98
	0,395	0,253	0,129	0,492	0,099	0,147	48,79
	0,415	0,241	0,119	0,496	0,084	0,145	72,83
110	0,345	0,319	0,173	0,481	0,147	0,160	8,65
	0,375	0,293	0,153	0,488	0,132	0,156	18,06
	0,395	0,278	0,141	0,492	0,12	0,153	27,89
	0,415	0,265	0,131	0,496	0,107	0,151	41,35
120	0,345	0,348	0,189	0,481	0,158	0,166	4,94
	0,375	0,320	0,167	0,488	0,145	0,162	11,57
	0,395	0,304	0,154	0,492	0,135	0,159	18,01
	0,415	0,289	0,143	0,496	0,128	0,157	22,67

Çizelge 4.25. Sheppard ve diğerleri (2014) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_a (m/s)	V_c (m/s)	V1p2 (m/s)	V1p (m/s)	f1	f2	f3	y_{spo} (m) ölçülen	y_{spo} (m) hesaplanan	Hata yüzdesi (%)
100	0,345	0,290	0,340	1,104	1,702	0,928	0,969	0,913	0,136	0,205	50,79
	0,375	0,267	0,344	1,151	1,722	0,935	0,921	0,913	0,11	0,197	78,67
	0,395	0,253	0,347	1,181	1,735	0,939	0,881	0,913	0,099	0,189	90,64
	0,415	0,241	0,349	1,211	1,747	0,943	0,834	0,913	0,084	0,180	113,71
110	0,345	0,319	0,340	1,104	1,702	0,928	0,995	0,913	0,147	0,211	43,22
	0,375	0,293	0,344	1,151	1,722	0,935	0,969	0,913	0,132	0,207	56,59
	0,395	0,278	0,347	1,181	1,735	0,939	0,942	0,913	0,12	0,202	68,21
	0,415	0,265	0,349	1,211	1,747	0,943	0,908	0,913	0,107	0,195	82,68
120	0,345	0,348	0,340	1,104	1,702	0,928	0,999	0,913	0,158	0,211	33,86
	0,375	0,320	0,344	1,151	1,722	0,935	0,994	0,913	0,145	0,212	46,15
	0,395	0,304	0,347	1,181	1,735	0,939	0,979	0,913	0,135	0,210	55,37
	0,415	0,289	0,349	1,211	1,747	0,943	0,957	0,913	0,128	0,206	60,88

Ek-1. (devam) Çalışma kapsamında değerlendirilen bazı ampirik bağıntıların sonuçları

Çizelge 4.26. Abed (1991) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	Fr_a (-)	y_{spp} (m) ölçülen	y_{spp} (m) hesaplanan	Fark yüzdesi (%)
100	0.345	0.158	0.155	0.162	-4.106
	0.375	0.139	0.148	0.129	15.160
	0.395	0.129	0.137	0.107	27.873
	0.415	0.119	0.127	0.086	47.262
110	0.345	0.173	0.175	0.188	-7.103
	0.375	0.153	0.170	0.154	10.269
	0.395	0.141	0.157	0.132	18.821
	0.415	0.131	0.142	0.111	28.362
120	0.345	0.189	0.189	0.215	-12.144
	0.375	0.167	0.174	0.180	-3.236
	0.395	0.154	0.167	0.157	6.285
	0.415	0.143	0.164	0.135	21.473

Çizelge 4.27. Farhangi (2016) bağıntısındaki parametreler ve sonuçlar

Q (lt/sn)	y_a (m)	V_c (m/s)	V_a (m/s)	H_t (m)	y_{spp} (m) ölçülen	y_{spp} (m) hesaplanan	Fark yüzdesi (%)
100	0,345	0,476	0,290	0,02	0,155	0,034	-78,15
	0,375	0,483	0,267	0,05	0,148	0,055	-62,85
	0,395	0,487	0,253	0,05	0,137	0,024	-82,44
	0,415	0,491	0,241	0,05	0,127	-0,004	-102,94
110	0,345	0,476	0,319	0,02	0,175	0,068	-60,89
	0,375	0,483	0,293	0,05	0,170	0,086	-49,21
	0,395	0,487	0,278	0,05	0,157	0,054	-65,87
	0,415	0,491	0,265	0,05	0,142	0,024	-83,01
120	0,345	0,476	0,348	0,02	0,189	0,103	-45,50
	0,375	0,483	0,320	0,05	0,174	0,118	-32,35
	0,395	0,487	0,304	0,05	0,167	0,083	-50,24
	0,415	0,491	0,289	0,05	0,164	0,052	-68,29



Gazili olmak ayrıcalıktır