
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE ORTA AYAK ŞEKLİNİN BASINÇLI AKIM OYULMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Metin Yüksel AKINTÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2025

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.

Metin Yüksel AKINTÜRK

24/04/2025

AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE ORTA AYAK ŞEKLİNİN BASINÇLI AKIM OYULMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Metin Yüksel AKINTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Dünyada ve ülkemizde özellikle son yirmi yılda şiddetini ve frekansını artıran taşkınlar neticesinde akarsu köprülerinde meydana gelen hasarlarda ve yıkılmalarda ciddi can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Literatürde taşkın anında oluşan basınçlı akım durumu için sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada taşkın anında gelişen basınçlı akım halinde köprü ayakları etrafında ve tabliye altında oluşan oyulma mekanizmasının incelenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla laboratuvar ortamında çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yarım dairesel burunlu dikdörtgen orta ayak ve farklı arazi koşulları sebebiyle akıma dik olarak yerleştirilemeyen köprü tabliyeleri düşünülerek 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş bir köprü tabliyesi kullanılmıştır. Deneyler sadece tabliye, sadece ayak ve tabliye ile ayağın birlikte olduğu üç grupta farklı yaklaşım akım derinlikleri ve debi değerleri kullanılarak yapılmış ve oyulma mekanizmasının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre basınçlı akım halinde ayak etrafında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinin serbest akım durumundaki oyulma derinliğinden %27-37 arasında daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra aynı laboratuvar ortamında silindirik orta ayak kullanılarak gerçekleştirilen deney verileriyle karşılaştırma yapılarak basınçlı akım halinde yarım dairesel burunlu dikdörtgen orta ayağın %20 daha fazla oyulmaya sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Akıma dik tabliye kullanılarak yapılan deney verileriyle yapılan karşılaştırmalarda ise köprü tabliyesinin belli bir verevlik açısıyla yerleştirilmesi halinde değişen oranlarda daha çok oyulma oluştuğu görülmüştür. Elde edilen veriler ile gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda basınçlı akım halinde oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı elde edilmiş ve bu bağıntıda tabliyenin verevli olması durumu ile densimetrik Froude sayısının oyulma derinliğini arttırdığı belirlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91133
Anahtar Kelimeler	:	Akarsu köprüleri, verevlik açısı, basınçlı akım, savak tipi akım, maksimum oyulma derinliği
Sayfa Adedi	:	127
Danışman	:	Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PIER SHAPE ON PRESSURIZED FLOW SCOURING IN SKEWED RIVER BRIDGES

(M. Sc. Thesis)

Metin Yüksel AKINTÜRK

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

Over the world and in our country, especially in the last twenty years, floods that have increased in intensity and frequency have caused serious loss of life and economic losses due to the damages and failures of river bridges. There are a limited number of studies in the literature for the pressure flow condition that occurs during flood events. In this study, various experiments were carried out to examine and evaluate the scour mechanism that occurs around the bridge piers and beneath the deck under pressure flow condition that forms during floods. In the experiments, an oblong pier and a bridge deck with a skewness angle of 15° were used considering the bridge decks that cannot be designed perpendicular to the flow direction due to different topographic conditions. The experiments were carried out using different approach flow depths and discharge values in three groups, namely only the deck, only the pier and the deck and pier together, and the scour mechanism was thus observed. According to the results, it was noted that the maximum scour hole depth around the pier in the pressure flow condition was 27-37% more than the maximum scour depth in the free flow condition. Furthermore, it was found that the oblong pier caused 20% larger scour depths in the pressurized flow condition when the experimental data of current study was compared with the data of a cylindrical pier located in the same flume under same flow conditions. Comparisons of the current study data were also made with the experimental data of a deck located perpendicular to the flow under same conditions and it was observed that larger scour depths occurred at varying scales when the bridge deck was located at a skew angle of 15°. An empirical equation was developed by using regression analysis and all related data of pressure scour depths observed under same flow conditions. It was noted that the maximum scour depth increased with skewness angle of the deck and the densimetric Froude number.

Science Code	:	91133
Key Words	:	River bridges, skewness angle, pressure flow, weir flow, maximum scour depth
Page Number	:	127
Supervisor	:	Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim ve tez çalışma sürecimin başından sonuna kadar bana yol gösteren, her konuda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile rehberlik eden çok kıymetli danışman hocam sayın Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu süreçte ve özellikle laboratuvar çalışmalarımda bana büyük bir gayretle yardımcı olan ve yine bilgisi ile tez çalışmamda önemli katkıları bulunan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Önder KOÇYİĞİT'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalar esnasında yardımlarından dolayı İnşaat Mühendisi Sena PERGEL'e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sabırları, sevgileri ve destekleriyle bana güç veren aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. OYULMA MEKANİZMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Basınçlı Akım Durumunda Oyulma Mekanizması 5

2.2. Oyulma Çeşitleri 7

2.2.1. Daralma oyulması 10

2.2.2. Yerel oyulma 11

2.3. Boyut Analizi 12

2.4. Literatür Araştırması 17

3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ 27

3.1. Genel 27

3.2 Deney Düzeneği ve Kurulumu 29

3.2.1. Taban malzemesi 29

3.2.2. Köprü tabliyesi 30

3.2.3. Orta ayak 30

3.2.4. Taban batimetrisi ölçüm aleti 31

Sayfa

3.3. Deneylerin Kapsamı 32

3.4. Deney Prosedürü 34

4. DENEY SONUÇLARI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 37

4.1. Genel 37

4.2. Oyulma Çukuru Özelliklerinin İncelenmesi 38

4.2.1. Tabliye altında meydana gelen düşey daralma oyulması 38

4.2.2. Serbest akım halinde orta ayak etrafında oluşan yerel oyulmalar 49

4.3 Ayak Şeklinin Basınçlı Akım Oyulması Üzerine Etkisinin İncelenmesi 73

4.4. Verevlik Açısının Basınçlı Akım Oyulması Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 81

4.5. Maksimum Oyulma Çukuru Derinliğini Tahmin Eden Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi 90

4.6. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma 109

4.7. Çalışma Sonucunda Elde Edilen Bulguların Özeti 112

4.7.1. Basınçlı akım durumunda oyulma özellikleri 112

4.7.2. Ayak şeklinin basınçlı akım oyulmasına etkisi 114

4.7.3. Verevlik şeklinin basınçlı akım oyulmasına etkisi 114

4.7.4. Elde edilen verilerin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması 115

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 117

5.1. Özet ve Sonuçlar 117

5.2. Sonraki çalışmalar için öneriler 120

KAYNAKLAR 123

ÖZGEÇMİŞ 127

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. KGM envanterindeki verevli köprü tabliyesine sahip bazı köprüler (Demir, 2018) 1

Çizelge 3.1. Deneylerin gerçekleştirildiği akım özellikleri 33

Çizelge 3.2. Gerçekleştirilen deneylere ait veriler 35

Çizelge 4.1. Sadece köprü tabliyesinin olduğu durumda gerçekleşen daralma oyulması ölçümleri 40

Çizelge 4.2. Serbest akım halinde meydana gelen yerel oyulmalar ve konumları 50

Çizelge 4.3. Basınçlı akım halinde maksimum oyulma çukuru derinlikleri 58

Çizelge 4.4. $y_{spp,max}$ konumundaki daralma oyulması, yerel oyulma, basınçlı oyulma ve toplam basınçlı oyulma değerleri 65

Çizelge 4.5. Daralma oyulması, yerel oyulma, basınçlı oyulma ve toplam basınçlı oyulma değerleri 65

Çizelge 4.6. Serbest akım halinde YDB ve silindirik orta ayak bulunması halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları 75

Çizelge 4.7. Basınçlı akım halinde YDB ve silindirik orta ayak bulunması halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları 75

Çizelge 4.8. Verevli köprü tabliyesi ve akıma dik yerleştirilen köprü tabliyesi olması durumlarında basınçlı akım halinde daralma oyulması değerleri 82

Çizelge 4.9. Verevli köprü tabliyesi ve akıma dik yerleştirilen köprü tabliyesi olması durumlarında basınçlı akım oyulması değerleri 82

Çizelge 4.10. Regresyon analizinde kullanılan boyutsuz parametreler 90

Çizelge 4.11. Regresyon analizinde kullanılan Yalçın (2024)'a ait boyutsuz parametreler 92

Çizelge 4.12. Regresyon analizinde kullanılan Barakat (2022)'a ait boyutsuz parametreler 92

Çizelge 4.13. Regresyon analizinde kullanılan YDB orta ayak ve akıma dik tabliye deney verilerine bağlı olarak bulunan parametreler 93

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.14. Betimleyici istatistikler ve örneklem sayıları 94

Çizelge 4.15. Çarpıklık ve basıklık katsayıları 95

Çizelge 4.16. Shapiro-Wilk Testi 95

Çizelge 4.17. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon değerleri 97

Çizelge 4.18. Uç değer kontrolü 98

Çizelge 4.19. Durbin-Watson Katsayısı 100

Çizelge 4.20. Betimleyici istatistikler 100

Çizelge 4.21. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları 101

Çizelge 4.22. Regresyon Analizi Özet Tablosu 102

Çizelge 4.23. ANOVA Tablosu 102

Çizelge 4.24. Regresyon Analizi Sonuçları ve Denklem Katsayıları 103

Çizelge 4.25. Regresyon analizinde kullanılan değişkenler ile ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması 105

Çizelge 4.26. Regresyon analizinde kullanılan değişkenler ile ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması 106

Çizelge 4.27. Regresyon analizi özeti 108

Çizelge 4.28. Simülasyon Özeti 108

Çizelge 4.29. Regresyon analizi özeti 109

Çizelge 4.30. Simülasyon Özeti 109

Çizelge 4.31. Literatürdeki ilgili çalışmalar ve akım özelliklerine ait veriler 110

Çizelge 4.32. Literatürdeki ilgili çalışmaların ayak ve tabliye özelliklerine ait veriler 111

Çizelge 4.33. Ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru derinlikleri 111

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Serbest, kısmi basınçlı ve tam basınçlı (savak tipi) akımlar 5

Şekil 2.2. Basınçlı akım halinde gelişen akım çizgileri (Verma, Setia ve Bhatia, 2004) 6

Şekil 2.3. Savaklı akım halinde oluşan akım çizgileri (Shen ve diğerleri, 2012) 6

Şekil 2.4. Basınçlı akım halinde orta ayak etrafında meydana gelen çevrintiler (Dey ve diğerleri, 2008) 7

Şekil 2.5. Temiz ve hareketli su oyulması (Yanmaz, 2022) 8

Şekil 2.6. Köprü açıklığında toplam oyulma mekanizması (Yanmaz, 2022) 10

Şekil 2.7. Kesit daralması neticesinde akım çizgileri ve hız profilleri (Verma ve diğerleri, 2004) 10

Şekil 2.8. Köprü ayağı etrafında gelişen yerel oyulma mekanizması ve çevrintiler (Yanmaz, 2022) 11

Şekil 2.9. Oyulma mekanizması üzerinde etkili olan parametreler (plan kesiti) 13

Şekil 2.10. Oyulma mekanizması üzerinde etkili olan parametreler (profil kesiti) 13

Şekil 3.1. Deney düzeneği genel gösterimi 28

Şekil 3.2. Deney düzeneği plan görünüşü 28

Şekil 3.3. Deney düzeneği ve köprü modeli yerleşimi 28

Şekil 3.4. Test bölgesi ve ölçüm alınan koordinatlar 31

Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinlikleri ve akım şartları 32

Şekil 4.1. Köprü modeli ve parametreler 37

Şekil 4.2. Verevli köprü tabliyesi 39

Şekil 4.3. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 41

Şekil 4.4. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 44

Şekil 4.6. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 45

Şekil 4.7. 120 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde kısa ve uzun tabliye bulunması durumlarında meydana gelen boyuna ve enine doğrultularda oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 47

Şekil 4.8. 120 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliği için kısa ve uzun tabliye bulunması durumlarında meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 48

Şekil 4.9. Yarım daire burunlu dikdötgen kesitli orta ayak modeli..... 49

Şekil 4.10. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil 51

Şekil 4.11. 110 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x= 4,650 m'de enine profil..... 52

Şekil 4.12. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,530 m'de boyuna profil, (b) x= 4,650 m'de enine profil..... 53

Şekil 4.13. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil 55

Şekil 4.14. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna, b) x= 4,650 m'de enine 56

Şekil 4.15. Deneylerde kullanılan tabliye ve orta ayak modeli 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.16. Basınçlı akım halinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki o yulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650'de enine profil 60

Şekil 4.17. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650'de enine profil 61

Şekil 4.18. Basınçlı akım halinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil 63

Şekil 4.19. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil 64

Şekil 4.20. 34,5 cm yaklaşım akım derinliği ve 100 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 67

Şekil 4.21. 34,5 cm yaklaşım akım derinliği ve 110 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 68

Şekil 4.22. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğin ve 120 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 69

Şekil 4.23. 120 lt/sn'lik debi değeri ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 70

Şekil 4.24. 120 lt/sn'lik debi değeri ve 39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.25. 120 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil..... 73

Şekil 4.26. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 77

Şekil 4.27. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 78

Şekil 4.28. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 79

Şekil 4.29. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultuda meydana gelen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil..... 80

Şekil 4.30. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn ve 34,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 83

Şekil 4.31. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn ve 41,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 84

Şekil 4.32. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn ve 34,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 86

Şekil 4.33. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn ve 41,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil 87

Şekil 4.34. 120 lt/sn ve 34,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili..... 88

Şekil 4.35. 120 lt/sn ve 37,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili..... 88

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.36. 120 lt/sn ve 39,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili..... 89

Şekil 4.37. 120 lt/sn ve 41,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili..... 89

Şekil 4.38. Değişkenlere ait histogram grafikleri 96

Şekil 4.39. Hataların histogram grafiği..... 98

Şekil 4.40. Gözlenen ve beklenen değerler grafiği 99

Şekil 4.41. Tahmin ve hata değerleri saçılım grafiği 99

Şekil 4.42. Ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması 107

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Deneylerin gerçekleştirildiği kanalın membadan görünüşü 27

Resim 3.2. Deneylerin gerçekleştirildiği açık kanal 29

Resim 3.3. Tabandaki sedimentin düzeltilmesini sağlayan hareketli araç 30

Resim 3.4. Lazermetre 32

Resim 4.1. Düşey daralma oyulması..... 39

Resim 4.2. Serbest akım halinde meydana gelen yerel oyulmalar 49

Resim 4.3. YDB orta ayak ve verevli tabliye bulunması durumunda meydana gelen basınçlı taban oyulması 57

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a	Etkili kiriş yüksekliği
b	Döşeme, korkuluk ve kiriş yükseklikleri toplamı
B	Akarsu genişliği
b_t	Kiriş genişliği
b_n	Kiriş sayısı
cm	Santimetre
C	Kohezyon
C_c	Sediment derecelendirme sayısı
C_u	Sediment üniformluluk katsayısı
C_d	Daralma katsayısı
D	Köprü orta ayak genişliği
D_{30}	Zeminin %30'unun geçtiği tane çapı
D_{50}	Taban malzemesinin medyan çapı
d_f	Serbestlik derecesi
E	Özgül enerji
F	Kareler ortalamalarının oranı
Fr	Froude sayısı
Fr_a	Yaklaşım akım derinliğindeki Froude sayısı
Fr_d	Densimetrik 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_α	**A**kım ile köprü arasındaki verevlik etki faktörü
K_a	Akarsu etkisini gösteren katsayı
K_b	Memba taban pürüzlülük katsayısı

Simgeler	Açıklamalar
K_c	Akarsu şevlerinin pürüzlülük katsayısı
K_d	Akarsu en kesit etkisi katsayısı
K_f	Tane şekil faktörü
K_s	Köprü ayağı şekil parametresi
K_θ	Ayak aksı ile akım arasındaki açının etki faktörü
L	Uzunluk
L_p	Köprü ayak uzunluğu
L_t	Köprü tabliye genişliği
lt	Litre
M	Kütle
mm	Milimetre
m	Metre
Q	Debi
q	Birim debi
P	Basınç
Re_a	Yaklaşım akım derinliğinde Reynolds sayısı
R^2	Determinasyon Katsayısı
sn	**S**aniye
S_0	Taban eğimi
T	Zaman
t	Oyulma süresi
t_1	Döşeme ile korkuluk yüksekliği
V	Akım hızı
V_a	Yaklaşım akım hızı
V_b	Tabliye altında ortalama akım hızı
V_c	Malzemeyi harekete geçiren kritik ortalama akım hızı
X_t	Kirişin tabliyedeki konumu
y	Akım derinliği
y_a	Yaklaşım akım derinliği
y_s	Oyulma derinliği
y_{sc}	Düşey daralma oyulması derinliği

Simgeler	Açıklamalar
y_{spo}	Serbest akım durumunda yerel oyulma derinliği
y_{spp}	Basınçlı akım durumunda oyulma derinliği
$y_{sc,max}$	Maksimum daralma oyulması derinliği
$y_{spo,max}$	Serbest akımda maksimum yerel oyulma derinliği
$y_{spp,max}$	Basınçlı akımda maksimum oyulma derinliği
YDB	Yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli
°	Derece
α	Tabliye verevlik açısı
ρ	Suyun yoğunluğu
ν	Suyun kinematik viskozitesi
ρ_s	Sediment yoğunluğu
Δ	Sedimentin göreli yoğunluğu
θ	Akım ve ayak ekseni arasındaki açı
σ_g	Tane dağılımının geometrik standart sapması

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASCE	American Society of Civil Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
FHWA	Federal Highway Administration
HEC	Hydraulic Engineering Circular
KBA	Kısmi basınçlı akım
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
SG	Taban malzemesi özgül ağırlığı
SP	Kötü derecelendirilmiş kum
TBA	Tam basınçlı akım
USGS	United States Geological Survey

1. GİRİŞ

Akarsuların, nehirlerin ya da boğazların üzerinden ulaşımın devamlılığını sağlamak amacıyla inşa edilen köprüler ulaşım sisteminin en önemli elemanlarındandır. Türkiye'de 2024 yılı itibariyle Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) envanterinde 8189 adet köprü bulunmaktadır (KGM, 2025). Bu köprülerin büyük bir kısmını akarsu köprüleri oluşturmaktadır. Ülkemizdeki akarsu köprülerinin birçoğu akıma dik projelendirilen betonarme köprülerdir. Ancak güzergâh ve topoğrafyaya bağlı şartlar nedeniyle köprü tabliyesi akıma dik olarak tasarlanamayabilir. Bu durumda verevlik açısı olarak tanımlanan tabliye ekseni ile akım doğrultusu arasında meydana gelen açı ile köprü projelendirilebilir. Ülkemizde farklı verevlik açısına sahip birçok köprü bulunmaktadır. KGM envanterinde bulunan farklı verevlik açısına sahip bazı köprüler Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. KGM envanterindeki verevli köprü tabliyesine sahip bazı köprüler (Demir, 2018)

Köprü Adı	İli	Proje Yılı	Verevlik Açısı
İlke Deresi	Manisa	2014	30
Duroğlu Varyant II	Giresun	2014	40
Gürpınar	Van	2009	45
Değirmendere VII	Trabzon	1976	45
Özlüce I-II	Erzurum	2014	50
Azdavay II	Kastamonu	1994	50
Zap I	Hakkâri	1976	50
Çekerek I-II-III	Yozgat	2014	50,12
Değirmencik	Bayburt	2014	52,7
Gölcük I	Bursa	2008	54
Seme I	Sivas	2014	55
Alaşehir Çayı	Manisa	2001	58
Elmalı I	Erzurum	2014	60
Karapınar	Antalya	2012	60
Küçükahmet	Giresun	2012	60
Gümüşhane	Gümüşhane	2012	60,67
Kireçhane I	Trabzon	2012	62
Eşemgölü Deresi I	Sakarya	2012	62
Kürtün	Giresun	2012	65,55
Kanlı Pelit	Trabzon	2012	67,3

Uzun yıllar boyunca ağır hasar gören veya yıkılan akarsu köprüleri ile ilgili yapılmış olan istatistiksel çalışmalar, bu köprülerde yaşanan problemlerin daha çok hidrolik etkilerle ortaya çıktığını göstermektedir (Yanmaz, 2022). Bu sebeple akarsu köprülerinin plan ve projelerinin hazırlanması aşamasında yapısal koşullar kadar hidrolik etkenlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Köprülerde hasara neden olan etkilerin başında köprü kenar ve orta ayakları etrafında oluşan taban oyulmaları gelmektedir. Ayrıca taşkınlarda oluşan hidrodinamik etkiler, ayaklar arası açıklığın akımla taşınan malzemelerle dolması ve su seviyesinin yükselmesi, yığılan malzemenin ayaklara yaptığı dinamik itki, hidrolik sıçrama, basınçlı ve savak tipi akımların oluşması da bu hidrolik etkenler arasındadır (Yanmaz, 2022).

Özellikle taşkın zamanlarında artan akarsu debisi ve yükselen su seviyesi nedeniyle su köprü tabliyesine kadar ulaşmakta ve bazen de tabliyeyi aşıp köprü üzerinden savaklanarak akmaya devam etmektedir. Bu durumlarda oluşan akım sırasıyla kısmi basınçlı akım ve tam basınçlı akım veya savak tipi akım olarak adlandırılmaktadır. Yapılan çalışmalarda kısmi basınçlı ve savak tipi akımın meydana geldiği durumlarda hem tabliye altında hem de ayaklar etrafında meydana gelen oyulmalarda ciddi değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar daha çok serbest akım koşullarında ayaklar etrafındaki yerel oyulmalar ile tabliye altında oluşan daralma oyulmalarını incelemektedir. Ancak basınçlı akım halinde meydana gelen oyulmanın şeklini ve derinliğini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca yapılan çalışmaların büyük bir kısmında akıma dik olarak yerleştirilen köprü tabliyeleri kullanılmıştır. Verevli akarsu köprüleri ile ilgili yapılmış olan çalışma sayısı da dik olarak konumlandırılmış köprü tabliyelerine göre çok daha azdır. Bu nedenlerle basınçlı akım ve farklı köprü konfigürasyonları durumlarında meydana gelecek karmaşık basınç oyulmasının incelenmesi ve anlaşılması köprü tasarımı için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ile akıma dik yerleştirilmiş yarım dairesel burunlu diktörtgen kesitli orta ayağı olan bir akarsu köprü modeli kullanılarak kanal tabanında köprü tabliyesi altında ve ayak etrafında meydana gelen oyulma çukuru derinliği ile şeklinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneyler temiz su halinde serbest, kısmi basınçlı ve tam basınçlı yani savak tipi akım koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca oyulma üzerinde etkili olan akım ve geometrik parametrelerin tesirleri araştırılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen veriler ışığında oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı elde edilmiştir. Bunun yanı sıra çalışmadan elde edilmiş olan ölçümler aynı

laboratuvar şartlarında, aynı akım ve taban malzemesi özelliklerinde daha önceden yapılmış deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve verevlik açısı ile orta ayak şeklinin oyulma çukuruna etkisi basınçlı akım durumu için incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde serbest, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında oluşan oyulma mekanizması, çeşitleri ve bu oyulmalarda etkili olan parametreler özetlenmiştir. Sonrasında oyulma üzerinde etkili olan parametrelerin büyüklükleri arasındaki ilişkileri türetmek ve maksimum oyulma çukuruna etkilerini anlamak için boyut analizi yapılmıştır. Ayrıca basınçlı akım koşulunda meydana gelen oyulmalar ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar ve ampirik bağıntılar incelenerek bu bölümde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde deneylerin yürütüldüğü laboratuvar, deney kanalı ve deney elemanları ile ilgili bilgiler verilmiş, deney kapsam ve prosedürü anlatılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde deney sonuçları ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Sadece düşey daralma oyulması, sadece yerel oyulma ve her iki durumun birlikte olduğu basınçlı akım oyulmasına ait veriler kullanılarak farklı akım şartlarında tabliye ve ayak bulunması halinde oyulma çukuru şeklinin ve derinliğinin değişimi incelenmiştir. Bunun yanı sıra elde edilen yerel oyulma ve daralma oyulması sonuçları toplanmış ve bu değerlerle basınçlı oyulma sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylece uygulamada kullanılmakta olan bu yaklaşımın doğruluğu irdelenmiştir. Ayrıca ayak şeklinin basınçlı akım oyulmasına etkisinin incelenmesi amacıyla çalışma kapsamında kullanılmış olan yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesitli orta ayak kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen ölçümler ile tamamen aynı laboratuvar ve akım koşullarında silindirik orta ayak kullanılarak yapılan deney verileri (Yalçın, 2024) karşılaştırılmıştır. Verevlik açısının oyulma çukuruna etkisinin incelenmesi için de yine aynı laboratuvar koşullarında akıma dik yerleştirilmiş tabliye ile yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesitli orta ayağı olan çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak bu çalışma gözlemleriyle karşılaştırma yapılmış ve bulgular değerlendirilmiştir. Son olarak deneylerden elde edilen veriler kullanılarak kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden bağıntı çoklu regresyon analizi kullanılarak geliştirilmiştir.

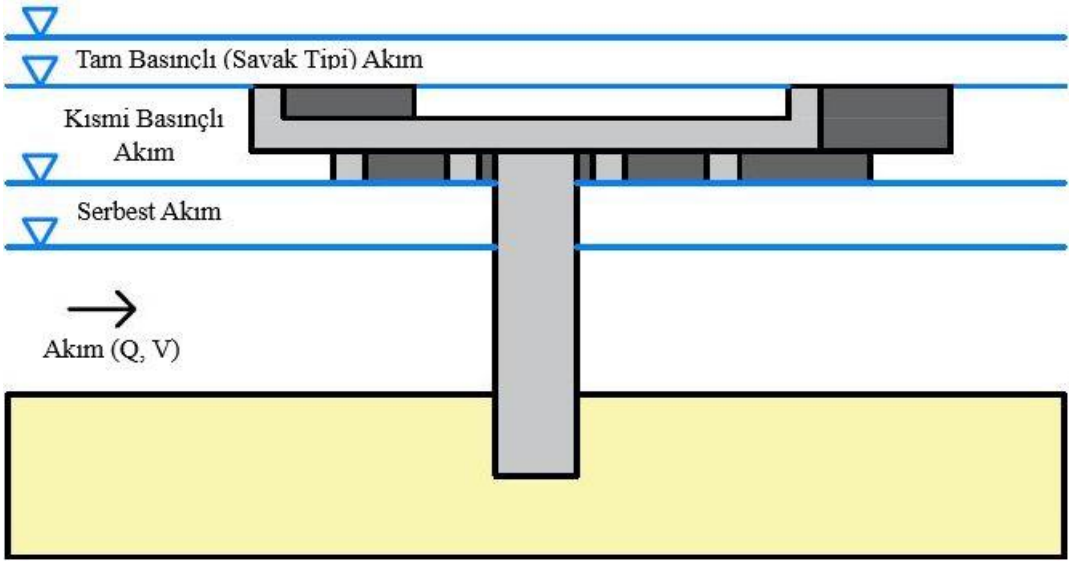
Beşinci bölümde yapılan deneyler için belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde ise problemin tanımı, çalışmanın amacı ve yapılan değerlendirmeler ışığında elde edilen sonuçlar özetlenmiş, bundan sonra konu ile ilgili yapılması önerilen çalışmalar sunulmuştur.

2. OYULMA MEKANİZMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Basınçlı Akım Durumunda Oyulma Mekanizması

Akarsularda köprü tabliyesi altında veya ayaklar etrafında meydana gelen oyulmayı etkileyen önemli parametrelerden biri yaklaşım akım derinliğine bağlı oluşan akım türüdür. Su seviyesinin köprü tabliyesiyle temas etmediği, akımın üzerinde atmosfer basıncı olan akımlar serbest akım olarak adlandırılmaktadır. Ancak özellikle taşkın anında akarsuda taşınan akım miktarı artarak su seviyesi köprü tabliyesine ulaşabilmektedir. Bu durumda tabliye kirişleri kısmen ya da tamamen suyla temas edebilir. Bu durumda köprüde oluşan akıma kısmi basınçlı akım denir. Su seviyesinin daha da artarak tabliyeyi aşması durumunda ise köprü tamamen su altında kalmaktadır. Bu durumda meydana gelen akım ise tam basınçlı akım veya savak tipi akım olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1'de akarsu köprülerinde karşılaşılabilecek her üç akım durumu gösterilmiştir.

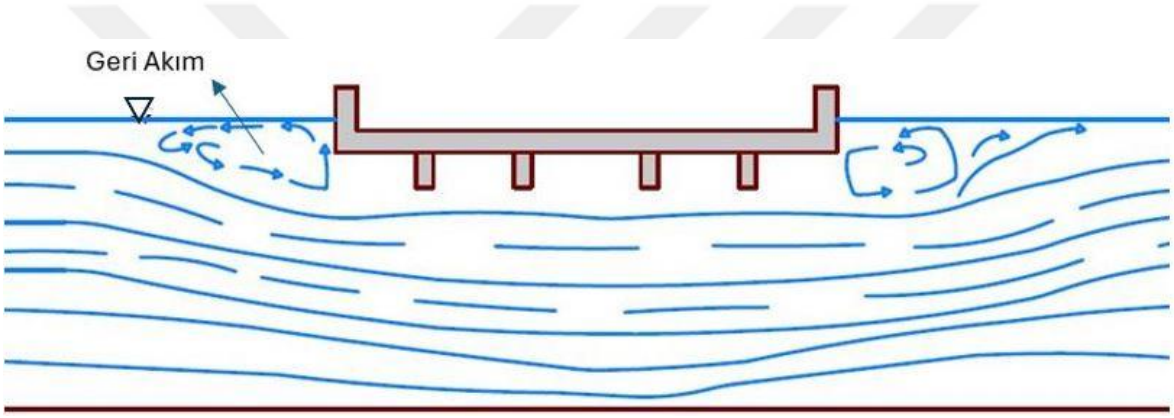


Şekil 2.1. Serbest, kısmi basınçlı ve tam basınçlı (savak tipi) akımlar

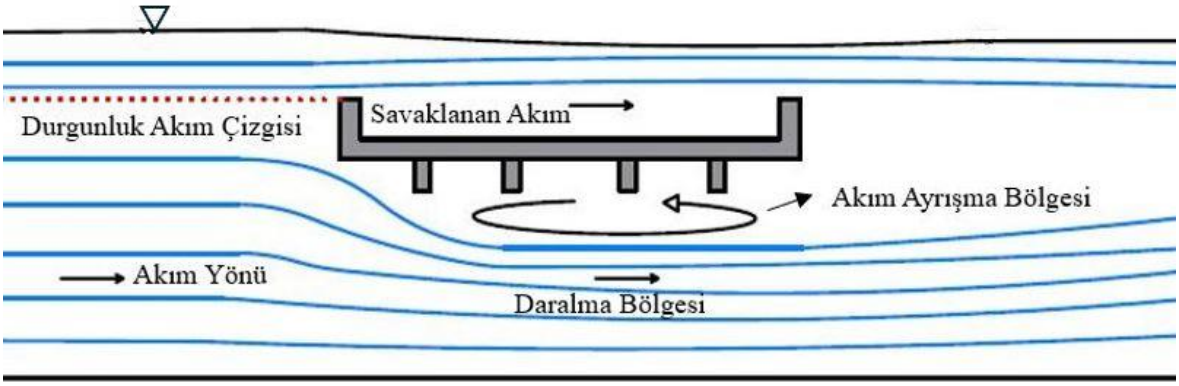
Yapılan çalışmalarda akarsu köprülerinde meydana gelen hasarların özellikle taşkın anında ya da hemen sonrasında oluştuğu görülmüştür. Bu durum basınçlı akım anında tabliye altından geçen akım hızı ile akımın tabanda oluşturduğu kayma gerilmelerinin serbest akım durumuna göre artması ve meydana gelen akım alanı ile taban malzemesi etkileşiminin çok daha karmaşık olması şeklinde açıklanabilir. Bu sebeple özellikle taşkın anında meydana gelen akım yapısının araştırılması ve tabliye ile ayaklar etrafında meydana gelebilecek

oyulmalar üzerindeki etkisinin incelenmesi önemlidir. Ancak literatürdeki çalışmaların ve uygulamadaki bağıntıların çoğu serbest akım durumunda meydana gelen oyulmalar için geliştirilmiştir.

Şekil 2.2'de kısmi basınçlı akım halinde köprü tabliyesi altında meydana gelen akım alanı daralmasına bağlı olarak oluşan akım çizgileri verilmiştir. Akım alanı daralması neticesinde artan akım hızları ve taban kayma gerilmeleri oyulmaları artırmaktadır. Bunun yanı sıra köprü tabliyesinin membaında ve mansabında çeşitli çevrintiler ve geri akımlar meydana gelmektedir. Şekil 2.3'te ise Shen, Suaznabar, Xie, Bojanowski, Lottes, Shan ve Kerenyi (2012)'ye göre tam basınçlı yani savak tipi akım halinde oluşan akım çizgileri verilmiştir.



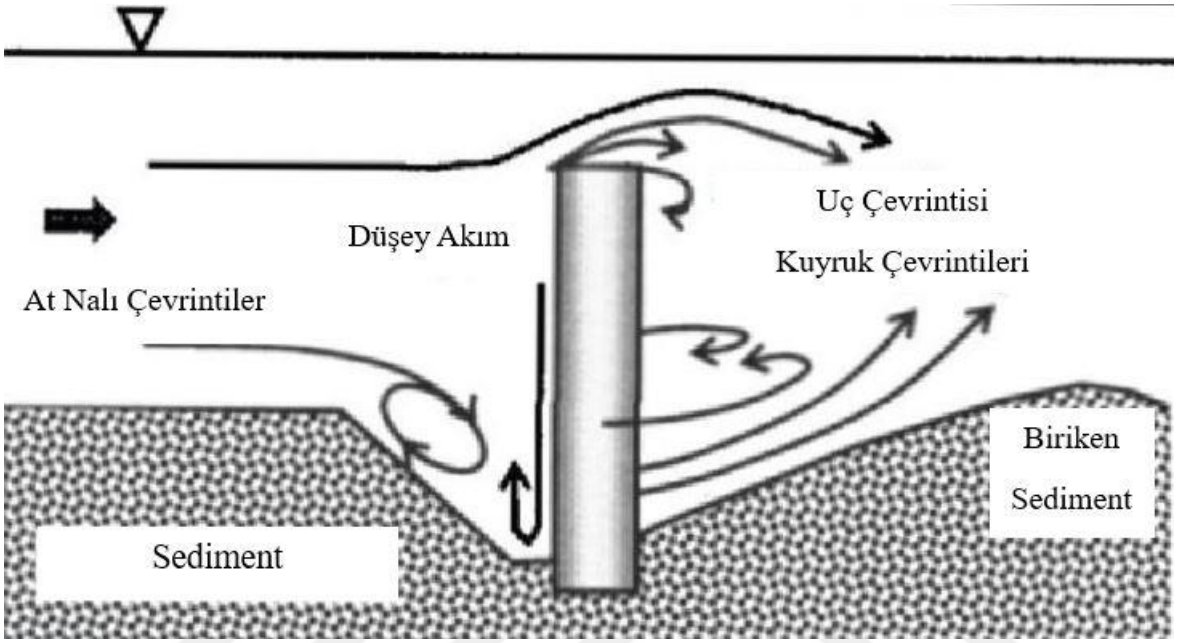
Şekil 2.2. Basınçlı akım halinde gelişen akım çizgileri (Verma, Setia ve Bhatia, 2004)



Şekil 2.3. Savaklı akım halinde oluşan akım çizgileri (Shen ve diğerleri, 2012)

Serbest akım halinde meydana gelen çevrintilerin yanı sıra Şekil 2.4'te gösterilen ve basınçlı akım durumunda meydana gelen uç çevrintileri benzeri yapılar da oluşmaktadır. Dey, Raikar ve Roy (2008) tarafından yapılan deneysel çalışmada orta ayağın su yüzeyine yakın kısmında meydana gelen bu çevrintiler sonucunda at nalı ve kuyruk çevrintilerinin

etkilerinin serbest akıma kıyasla azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla basınçlı akım durumunda köprü membaında ve açıklığında meydana gelen akım yapısı önemli ölçüde değişmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılmış detaylı literatür araştırması sonucunda basınçlı akım durumunda meydana gelen akım yapısını detaylı inceleyen çalışma bulunamamıştır.



Şekil 2.4. Basınçlı akım halinde orta ayak etrafında meydana gelen çevrintiler (Dey ve diğerleri, 2008)

2.2. Oyulma Çeşitleri

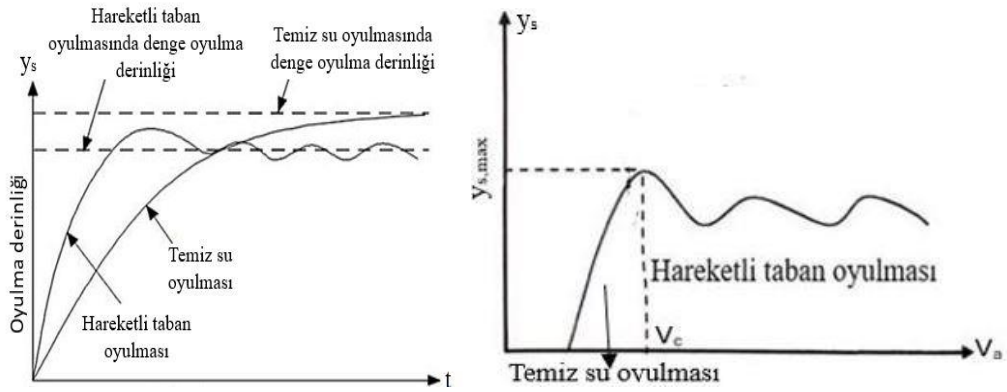
Oyulma, akımın tabandan veya köprü ayakları etrafından kum ve çakıl gibi taban malzemesini aşındırıcı etkiyle sürüklemesi olarak tanımlanmaktadır (Richardson ve Davis, 2001). Suyun bu aşındırıcı etkisiyle taban seviyesinde meydana getirdiği alçalma ise oyulma çukuru derinliği olarak adlandırılmaktadır.

Akarsu tabanında, köprü tabliyesi altında ya da köprü ayakları etrafında çeşitli sebeplerle oyulmalar ve yığılmalar meydana gelebilir. Taban seviyesinde meydana gelen oyulma ve birikme olayları üzerinde akarsuda taşınan malzeme cinsi, akım rejimi, akarsu geometrisi ve güzergâhı ile akarsuyun kullanım amacı etkilidir. Özellikle akımın katı madde taşıma gücünün arttığı yerlerde, örneğin kesit alanının bir köprü vasıtasıyla daraldığı yerlerde oyulmalar artmaktadır. Akarsuya yerleştirilen köprü tabliyeleri akımın geçtiği kesit alanında düşey daralmaya, duruma göre yerleştirilen kenar ve orta ayaklar ise hem yanal daralmaya

hem de akım yapısında önemli değişikliklere yol açmaktadır. Kesit daralması sebebiyle oluşan oyulmalara daralma oyulması, akarsuya yerleştirilen köprü ayakları etrafında oluşan, çevrintilerin meydana getirdiği oyulmalara ise yerel oyulma denmektedir (Yanmaz, 2022).

Kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında meydana gelen oyulmalar serbest akım durumunda oluşan oyulmalara kıyasla önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafında oluşan basınçlı akım oyulması basınçlı akımın düşey daralma etkisiyle yarattığı ve tabliye boyunca farklı derinliklerde oluşan oyulma derinliği ile membada artan akım derinliğinin etkisiyle ayaklar etrafında oluşan yerel oyulma derinliğinin toplamıdır (Yanmaz, 2022).

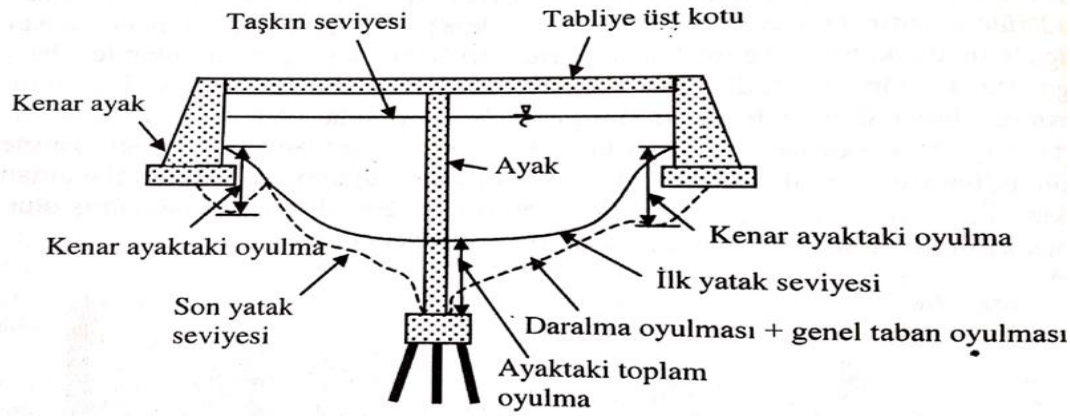
Akarsu yatağında meydana gelen oyulmalar, membadan gelen akımın malzeme taşıyıp taşımamasına bağlı olarak iki farklı şekilde oluşmaktadır. Tabanda kritik kayma gerilmesini aşacak akım koşulları oluşmadığında akımda sürüntü yükü hareketi de oluşmamaktadır. Bu durumda membadan gelen akım içerisinde sürüntü yükü bulunmamaktadır. Dolayısıyla meydana gelen oyulma sadece akım yapısı nedeniyle oluşmakta ve akımla taşınan sediment etkisi altında kalmamaktadır. Bu halde meydana gelen oyulmaya temiz su oyulması denmektedir. Temiz su oyulması halinde oyulmanın mertebesi, ayak geometrisine ve akımın ataletinden etkilenen oyulma çukurundaki akım özelliklerine bağlıdır. Membadaki taban kayma gerilmesinin kritik kayma gerilmesini aştığı durumda taban malzemesi bu gerilmeye karşı koyamaz ve membadan itibaren akım yönünde sürüntü hareketi başlar. Bu hareket çevrinti etkisiyle oluşan oyulma çukuruyla birleşir. Meydana gelen oyulma çukuru, çukur içerisindeki akım özelliklerinin dışında membadan gelen akımın özelliklerinden de etkilenir. Oluşan bu oyulma şekli de hareketli taban oyulması olarak adlandırılır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Temiz ve hareketli su oyulması (Yanmaz, 2022)

Başlangıçta hızla artan oyulma derinliği zamanla daha yavaş gelişir. Hareketli taban oyulması durumunda membada taban şekillerinden ötürü taban direnci zamanla değişim gösterdiğinden, oyulma çukurunda taşınan katı madde miktarı membada oluşan ilave kayma gerilmesine bağlıdır. Temiz su oyulması durumunda ise belli bir denge seviyesine ulaşıldıktan sonra oyulma çukuru şevlerindeki katı madde taneleri ileri geri kısa salınımlar yapsa da taban kayma gerilmesi değeri yeterince fazla olmadığından bu taneler akımla birlikte hareket etmez. Köprü ayakları etrafındaki temiz su oyulması ortalama akım hızının kritik ortalama akım hızının yaklaşık yarısı değerine ulaştığında başlamaktadır (Yanmaz, 2022). Hareketli taban durumunda oyulma derinliği kısa sürede maksimum değerine ulaşır. Daha sonra membada değişen taban direnç seviyesine göre katı madde debisinde artma ve azalma olacağından oyulma çukuru birbirini izleyen oyulma ve yığılma olaylarına maruz kalır. Bu nedenle, hareketli taban oyulması durumunda maksimum oyulma derinliğinden sonra artan ve azalan salınımlar görülmektedir. Temiz su oyulması durumunda ise akım şartları hareketli tabana göre daha sakin olduğundan oyulma derinliğinin zamansal değişimi daha yavaş gelişir. Membadan sürüntü yükü gelmediğinden oyulma derinliği değerlerinde bir salınım beklenmez. Oyulma derinliği zamanla yavaş yavaş artarak dengeli bir derinliğe erişir.

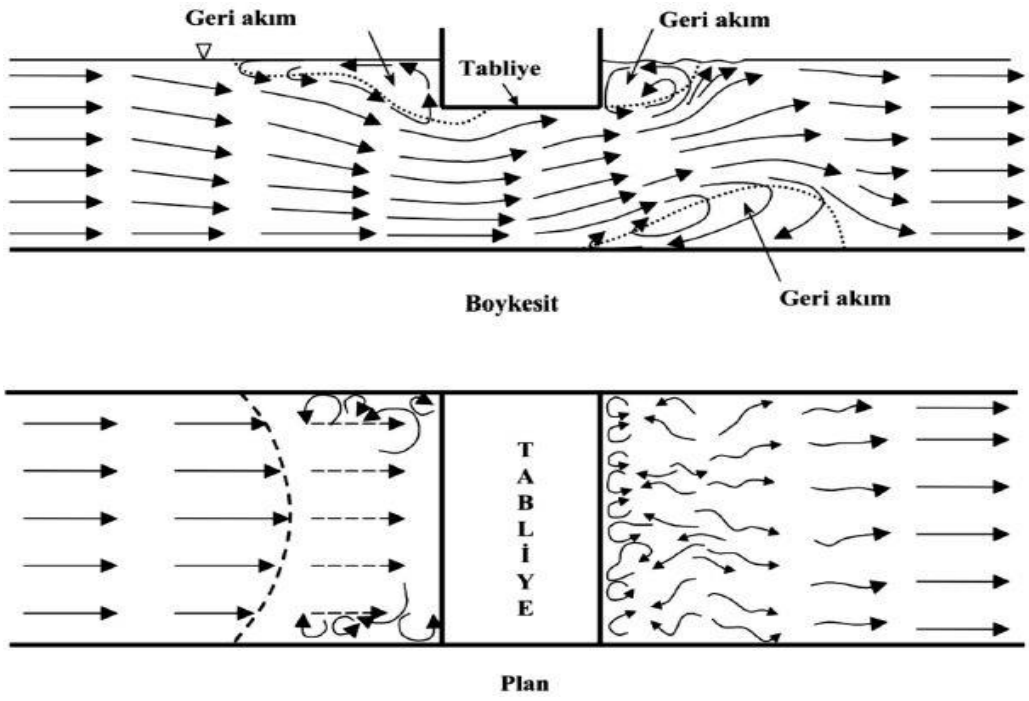
Köprü açıklığındaki toplam oyulma, genel taban oyulması, köprü açıklığındaki daralma oyulması ve ayaklar etrafındaki yerel oyulmalardan oluşmaktadır (Melville ve Coleman, 2000). Akarsudaki genel taban oyulması kısa veya uzun dönemli olabilir. Kısa dönemdeki taban oyulmasına taşkınlar neden olabilirken uzun dönemli taban oyulması akarsuyun morfolojik rejimine bağlı olarak sürekli taban oyulması ve şev erozyonu şeklinde meydana gelebilir. Sürekli taban alçalması özellikle insan kaynaklı etkenlerle meydana gelebilir. İnsan kaynaklı olarak gelişen sürekli taban alçalması akarsu üzerinde yapılan hidroelektrik santrali gibi yapılar, akarsu taban malzemesinin fazla miktarlarda çekilmesi ve akarsudan aşırı miktarda su çekilmesi gibi nedenlerden kaynaklanabilir (Yanmaz, 2022). Şekil 2.6'da köprü açıklığında meydana gelen toplam oyulma mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.6. Köprü açıklığında toplam oyulma mekanizması (Yanmaz, 2022)

2.2.1. Daralma oyulması

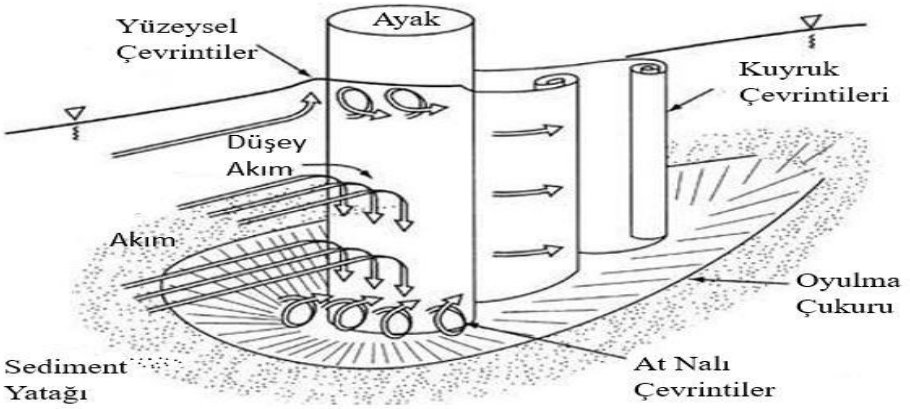
Akarsuya yerleştirilen köprü tabliyesi, orta ve kenar ayaklar akarsu kesitinde daralmaya neden olur. Taşkın yatağının geniş olduğu akarsularda yaklaşım dolgularının boyu ana kanala uzanacak kadar uzun olabilir. Bu gibi durumlarda akarsu kesitinde aşırı daralma nedeniyle tabliye altında azalan akım alanında ortalama akım hızı ve kayma gerilmeleri artarak oyulma meydana getirir (Şekil 2.7). Bu şekilde yatay ve düşey kesit daralmasının yol açtığı oyulmalar daralma oyulması olarak adlandırılır.



Şekil 2.7. Kesit daralması neticesinde akım çizgileri ve hız profilleri (Verma ve diğerleri, 2004)

2.2.2. Yerel oyulma

Akım alanına yerleştirilmiş bir köprü ayağı, açıklıktaki net akım alanını azaltacağından ortalama akım hızını artırır. Böylece daralmış kesitte katı madde taşıma kapasitesi artar. Bunun yanında akarsuya yerleştirilen ayak, akım alanında bir engel oluşturarak akım hızında ani düşmeye sebep olur ve köprü ayağı memba yüzünde su seviyesi artar. Bunun sonucunda burada bir durgunluk düzlemi oluşur. Su seviyesindeki bu artış yaklaşım akım hızına ve ayak geometrik özelliklerine bağlıdır. Durgunluk düzlemindeki ani basınç artışı sebebiyle ayak memba tarafındaki türbülanslı sınır tabakası ayrılır. Bu ayrılmanın şiddeti küt burunlu ayaklarda daha fazladır. Akım hızı derinlikle azaldığı için durgunluk basıncı da derinlik boyunca azalmaktadır. Bu durumda, yüzeyde büyük basınç, tabana doğru ise gittikçe azalan bir basınç oluşmaktadır. Böylece yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru, yani yüzeyden tabana doğru düşey bir akım meydana gelmektedir. Ayak memba tarafında oluşan bu düşey akım bir jet etkisi ile tabana çarpar ve taban oyulmaya başlar. Düşey akımın yaklaşım akımıyla girişimi sonucunda tabanda ayağın memba tarafında çevrintiler oluşur. Bu çevrintilere, planda oluşturdukları oyulma çukuru şekli nedeniyle at nalı çevrintisi denir. Tabandan sökülen taneler at nalı çevrintileri vasıtasıyla akımla birlikte mansaba taşınır. Bu taşınımın derecesi, yaklaşım akımının türbülans şiddetine, yani Reynolds sayısının mertebesine bağlıdır. At nalı çevrintiler ayağın yanlarından geçerek ayak çapının birkaç katı kadar daha mesafe alır ve etkilerini kaybederler. Bu çevrintiler akım hızına ve ayak şekline bağlıdır. Ayak geometrisinin mümkün olduğu kadar akım ipçiklerini bozmayacak şekilde seçilmesiyle çevrintilerin etkisi azalır (Yanmaz, 2022). Şekil 2.8'de köprü ayağı etrafında oluşan oyulmalar ve çevrintiler gösterilmiştir.



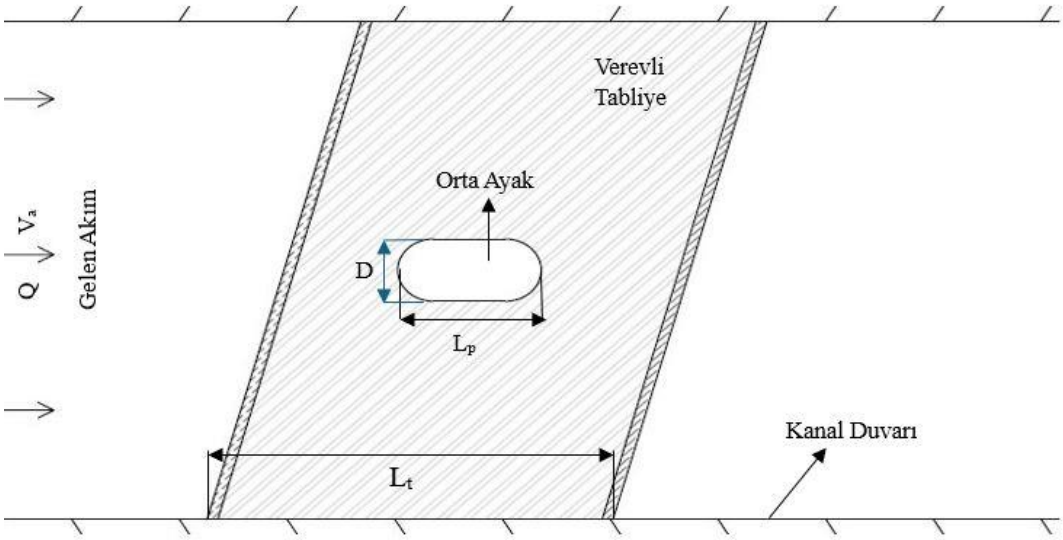
Şekil 2.8. Köprü ayağı etrafında gelişen yerel oyulma mekanizması ve çevrintiler (Yanmaz, 2022)

Oyulma çukuru büyüdükçe çukur içindeki kayma gerilmesi azalmaktadır. Bu değer çukur içindeki taban malzemesini harekete geçirecek kritik kayma gerilmesi değerinden daha düşük seviyeye indiği zaman oyulma çukuru teorik olarak denge durumuna ulaşmakta ve daha fazla oyulma beklenmemektedir. Bu durumda çukurun içindeki kayma gerilmeleri ve türbülans gerilmelerinin yarattığı kayma kuvvetiyle suyun ağırlığının akım yönündeki bileşeninin dengede olması gerekmektedir (Yanmaz, 2022).

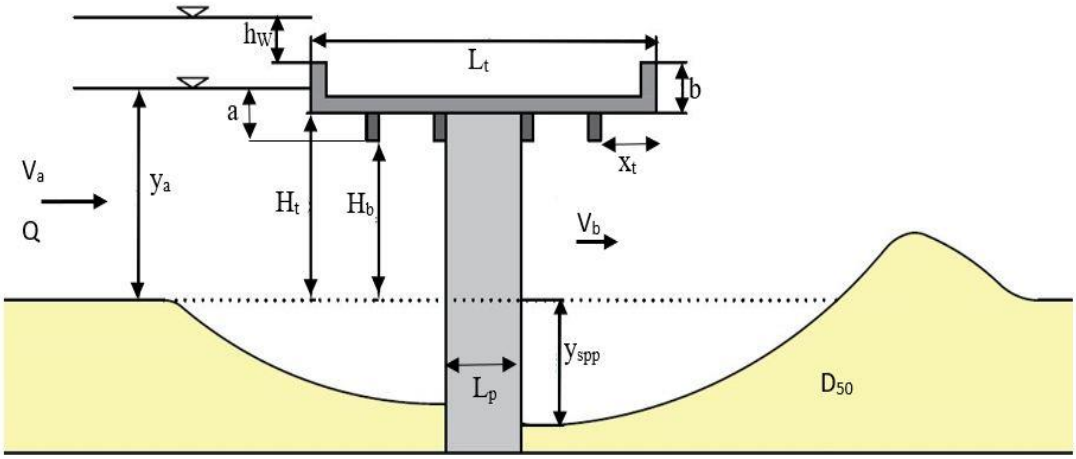
2.3. Boyut Analizi

Köprüler tasarlanırken özellikle köprünün işletim süresi içerisinde maruz kalacağı en büyük taşkın debisi göz önüne alınarak bunun yaratacağı maksimum oyulma derinliklerinin tahmin edilmesi ayak derinliğinin projelendirilmesi açısından önemlidir. Çünkü taşkın anında söz konusu olabilen kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmalar serbest akım halinde meydana gelen oyulmalara kıyasla daha fazla değişkenin etki ettiği karmaşık bir mekanizmanın sonucunda oluşmaktadır. Bu karmaşık akım durumunda akarsuyun geometrisi, köprü geometrisi, akım, akışkan ve sediment özellikleri gibi parametreler etkili olmaktadır (Yanmaz, 2022).

Çalışma kapsamında, sabit geometrik özellikleri bulunan köprü tabliyesi akıma 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesitli orta ayak ise kanal tabanında akıma dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Tabliyenin ve orta ayağın konumu tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Şekil 2.9 ve 2.10'da oyulma mekanizması üzerinde etkili olan parametreler gösterilmiştir. Oyulma mekanizmasını etkileyen bu parametreler kullanılarak boyut analizi yapılmıştır.



Şekil 2.9. Oyulma mekanizması üzerinde etkili olan parametreler (plan kesiti)



Şekil 2.10. Oyulma mekanizması üzerinde etkili olan parametreler (profil kesiti)

Akarsu parametreleri:

S_0 : taban eğimi (-)

B : akarsu genişliği (L)

K_a : akarsu güzergâh etkisini gösteren katsayı (-)

K_b : membada taban pürüzlülük faktörü (-)

K_c : akarsu şevlerinin pürüzlülük faktörü (-)

K_d : akarsu en kesit etkisini gösteren katsayı (-)

C_c : daralma katsayısı (-)

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})

P_1 : memba akımına ait statik basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)

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 (-)

Δ : rölatif yoğunluk (-)

Köprü Ayağı Parametreleri

D : ayak genişliği (L)

L_p : ayak uzunluğu (L)

K_s : ayak şekil faktörü (-)

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

Tabliye Parametreleri

K_α : yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının etki faktörü (-)

y_{spp} : oyulma çukuru derinliği (L)

h_w : tabliye üstünden savaklanan su yüksekliği (L)

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

a : etkili kiriş yükseliği ($a=y_a-H_b$ ya da b ifadelerinden en küçüğü) (L)

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

b_t : kiriş genişliği (L)

b_n : kiriş sayısı (-)

t_l : döşeme ile korkuluk yüksekliği (L)

L_t : tabliye genişliği (-)

H_t : tabandan itibaren tabliye konumu (L)

X_t : kirişin tabliyedeki konumu (L)

Zaman Parametresi

t : akım süresi (T)

Köprü tabliyesi altında orta ayak etrafında kısmi basınçlı ve savak tipi akım halinde meydana gelen oyulmaları etkileyen parametreler Eş. 2.1'de belirtilmiştir:

$$f(y_{spp}, S_0, B, K_a, K_b, K_c, K_d, C_c, \rho, \nu, g, y_a, V_a, V_b, V_c, L_p, P_1, \rho_s, D_{50}, \sigma_g, C, K_f, \Delta, D, K_s, K_\theta, K_\alpha, h_w, H_b, a, b, b_t, b_n, t_l, L_t, H_t, X_t, t) = 0 \quad \text{(Eş. 2.1)}$$

Eş. 2.1'de görüldüğü üzere oyulma mekanizmasını etkileyen parametre sayısı oldukça fazladır. Aşağıdaki kabuller yapılarak parametre sayısının azaltılması ve daha basit bir ifade elde edilmesi amaçlanmıştır.

Akarsu ve taban malzemesi parametreleri ile ilgili yapılmış kabuller şöyledir (Yanmaz, 2022):

- Taban malzemesi kohezyonsuz ve sabit şekil faktörüne sahiptir (C=0).
- Katı madde ve su yoğunlukları sabittir. Kuvartz kum için rölatif yoğunluk $\Delta=(\rho_s-\rho)/\rho=1.65$ değerindedir.
- Akarsu köprü geçişinde önemli bir daralma olmayacak kadar geniştir ($C_c=1$).
- Düzgün şevli akarsu tabanındaki tane şekillerinin etkisi ihmal edilmektedir (Tane şekil faktörü $K_f=1$).
- Taban pürüzlülüğü sadece D_{50} cinsinden ifade edilmektedir ($K_b=1$, $K_c=1$).
- Akarsu planda düz, prizmatik ve sabit genişliktedir. Dolayısıyla S_0=Sabit, B=Sabit, $K_a=1$ ve $K_d=1$'dir.
- Taban malzemesi çapı akarsu genişliğinden çok küçüktür yani $D_{50}/B\approx0$
- Statik basınç $P_1=\rho g y_a$ olduğundan ve y_a ile a ilişkili olduğundan P_1 ihmal edilmektedir (Baduna Koçyiğit ve Koçyiğit, 2024).

Köprü tabliyesi ve ayakla ilgili kabuller:

- Kiriş genişliği (b_t), kiriş sayısı (b_n), tabliye genişliği (L_t), tabliye kalınlığı ile korkuluk yüksekliği (t_1), kirişin tabliyedeki konumu (X_t) ve tabandan itibaren tabliye konumu (H_t) sabittir. Bu nedenle bu parametreler dikkate alınmamıştır.
- Taban malzemesi sabit olduğundan σ_g değeri de ihmal edilmiştir.
- Oyulma çukuru derinliğinin kiriş sayısından (b_n) bağımsız olduğu kabul edilmiştir.
- Ayak uzunluğu L_p sabit olduğundan ihmal edilmiştir.
- Çalışmada oyulma çukurunun zamanla değişimi dikkate alınmamış, sadece denge durumundaki derinliği dikkate alınmıştır. Bu nedenle zaman parametresi t ihmal edilmiştir.

Yapılan kabuller doğrultusunda Eş. 2.1 ifadesi aşağıdaki ifadeye dönüşmüştür.

$$f(y_{spp}, \rho, \nu, g, y_a, V_a, V_b, V_c, \rho_s, D_{50}, D, K_s, K_\alpha, h_w, H_b, a, \Delta) \quad \text{(Eş. 2.2)}$$

Tekrar eden parametreler ρ, V_a, y_a seçilerek Buckingum π- teoremi ile boyutsuz parametreler belirlenmiştir (Eş. 2.3).

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = f\left(\frac{\nu}{y_a * V_a}, \frac{{V_a}^2}{g * y_a}, \frac{H_b}{y_a}, \frac{h_w}{y_a}, \frac{a}{y_a}, \frac{V_b}{V_a}, \frac{V_c}{V_a}, \frac{D_{50}}{y_a}, \frac{D}{y_a}, \frac{\rho_s}{\rho}, K_s, K_\alpha\right) \quad \text{(Eş. 2.3)}$$

Dikdörtgen kesitler için Eş. 2.2 ve 2.3'te verilen Fr_a ve Re sayıları sırasıyla

$$Fr_a = \frac{V_a}{\sqrt{g\, y_a}} \quad \text{(Eş. 2.4)}$$

$$Re = \frac{V_a\, y_a}{\nu} \quad \text{(Eş. 2.5)}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Böylece Eş. 2.3 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{y_{spp}}{H_b} = f\left(Re, Fr_a, \frac{H_b}{y_a}, \frac{h_w}{y_a}, \frac{a}{y_a}, \frac{V_b}{V_a}, \frac{V_c}{V_a}, \frac{D_{50}}{y_a}, \frac{D}{y_a}, \frac{\rho_s}{\rho}, K_s, K_\alpha\right) \quad \text{(Eş. 2.6)}$$

Eş. 2.6'daki Re değeri akımın tamamen türbülanslı akım olması nedeniyle ihmal edilebilir. Akım şiddeti olan V_a/V_c ifadesi sabit tane çapı ve taban eğiminde densimetrik Froude sayısı cinsinden ifade edilebilir. Bu durumda densimetrik Froude sayısı Fr_d Eş. 2.7 ile hesaplanır.

$$Fr_d = \frac{V_a}{\sqrt{\Delta g D_{50}}} \quad \text{(Eş. 2.7)}$$

V_a/V_b ise köprü açıklığı ve yaklaşım akım derinliğine bağlı olduğu için ihmal edilir (Baduna Koçyiğit ve Karakurt, 2019). Ayrıca deneylerde kullanılan ayağın çapı bütün deneylerde sabit olduğundan D değeri de ihmal edilmiştir. 0,8 mm olan taban malzemesi ortalama tane çapı D_{50} yaklaşım akım derinliğine kıyasla çok küçüktür. Bu nedenle D_{50}/y_a ifadesi de ihmal edilmiştir. ρ_s/ρ ifadesi ise oyulma sürecindeki düşük etkisinden dolayı (Oliveto ve Hager, 2002), H_b değeri de tek bir tabliye kullanıldığı için ihmal edilmiştir. Yapılan kabullerin ardından Eş. 2.8 elde edilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = f(Fr_d\ , \frac{h_w}{y_a}\ , \frac{a}{y_a}\ ,\ K_s, K_\alpha\ ) \quad \text{(Eş. 2.8)}$$

2.4. Literatür Araştırması

Yapılan literatür araştırması sonucunda akarsuya verevli olarak yerleştirilen köprüler altında meydana gelen oyulmalarla ilgili yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Ayrıca tam ve kısmi basınçlı akım şartlarında meydana gelen oyulmalarla ilgili de sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Literatürde daha çok serbest akım koşulunda, akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyeleri altında meydana gelen oyulma çukuru derinliklerinin incelendiği çalışmalar ile serbest akım durumunda farklı geometrilere sahip orta ayaklar etrafında oluşan yerel oyulma çalışmaları bulunduğu görülmüştür.

Abed (1991), kısmi basınçlı akım halinde orta ayak etrafında meydana gelen oyulmayı inceleyen ilk çalışmayı yapmıştır. Gerçekleştirdiği deneylerde hem serbest akım hem de kısmi basınçlı akım halinde orta ayak etrafında meydana gelen oyulmaları incelemiştir. Colorado Eyalet Üniversitesi'nde temiz su oyulması halinde ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde çeşitli deneyler gerçekleştirmiştir. Abed deneylerinde bu çalışmadaki orta ayak şekli ile aynı olan yarım dairesel burunlu dikdörtgen şeklinde orta ayak kullanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre kısmi basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında ayak etrafında meydana gelen oyulmanın serbest akım durumunda meydana gelen oyulmaya göre 2,3 – 10,0 kat daha büyük olduğunu tespit etmiştir. Bunun yanında elde edilen verilerden yararlanarak maksimum oyulma derinliklerini tahmin eden ampirik bağıntılar geliştirmiştir.

$$y_{spp} = H_t K_s K_\theta \left[4{,}92 Fr_a + 0{,}46 \left(\frac{H_b}{H_t}\right) - 0{,}74\right] \quad \text{(Eş. 2.9)}$$

$$y_{spp} = H_b K_s K_\theta \left[2{,}31 \left(\frac{H_t}{H_b}\right)^{1{,}5} Fr_a - 1{,}14 \left(\frac{H_t}{H_b}\right) + 1{,}16\right] \quad \text{(Eş. 2.10)}$$

Dikdörtgen köprü ayaklarında verevlik açısının yerel oyulma derinliği üzerindeki etkisini Iowa Üniversitesi ile Alexandria Üniversitesinde gerçekleştirdikleri deneylerle inceleyen Mostafa, Yassin, Ettema ve Melville (1993), deneylerde farklı tane çapında taban malzemelesi ile 35 mm genişliğe sahip dikdörtgen kesitli ayak kullanmışlardır. Deneylerde verevlik açısı 0°'den 90°'ye kadar 15°'lik dilimler halinde değiştirilmiştir. Deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara göre verevlik açısı etki faktörü K_α'nın, sadece verevlik açısı ve ayağın genişlik/boy oranıyla değil, akım derinliği/ayak genişliği oranı, sediment tane çapı (D_{50}) ve sediment standart sapması (σ_g) ile de değiştiği saptanmıştır. K_α verevlik faktörünün ayakların maksimum 75°'lik verevlik açısına kadar arttığı, bu açıdan sonra ise nispeten azaldığı tespit edilmiştir (Demir, 2018).

Umbrell, Young, Stein ve Jones (1998) temiz su olması halinde basınçlı akım koşullarında orta ayağı olmayan tabliye altında meydana gelen oyulmaları incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneyler ABD'de Turner Fairbank Otoban Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Test bölgesi 2,4 m uzunluğunda, 1,8 m genişliğinde ve 0,4 m derinliğinde olup kanal 21,3 m uzunluğunda, 1,8 m genişliğinde ve 0,6 m derinliğindedir. Test bölgesi kanal başlangıcından 13 m mansapta oluşturulmuştur. Çalışmada yaklaşım akım derinliği 0,305 m'de sabit tutularak savak tipi akım halinde meydana gelen oyulmalar ile yaklaşım akım derinliğinin tabliyeyi aşmadığı derinliklerde yani kısmi basınçlı akım halinde oluşan oyulmalar incelenmiştir. Ayrıca yaklaşım akım hızının, tabandaki tane medyan çapının, yaklaşım akım derinliğinin, köprü tabliyesi kalınlığının, köprü yüksekliğinin ve kritik oyulma hızının oyulma çukuru derinliği ve şekline etkileri incelenmiş, oyulmayı tahmin etmek için bir bağıntı geliştirilmiştir.

Arneson ve Abt (1998), orta ve kenar ayağı olmayan köprü tabliyesi altıda meydana gelen oyulmaları temiz su halinde basınçlı akım koşulunda incelemiştir. Çalışma kapsamında Colorado Devlet Üniversitesi'nde farklı medyan tane çapları kullanılarak farklı akım derinlikleri ile hızlarında 72 adet deney yapılmış ve oyulma çukuru derinlikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen verilerle regresyon analizi yapılarak köprü tabliyesi altında

basınçlı akım halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı önerilmiştir.

Colorado Eyalet Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında basınçlı akım halinde köprü açıklığındaki oyulmaları araştırmak üzere kenar ayağı bulunan bir köprü modeliyle deneyler gerçekleştiren Robeson (2000), farklı batıklık seviyelerinde meydana gelen basınçlı akım durumunu inceleyebilmek için yaklaşım akım derinliğini sabit tutarak köprü tabliyesini farklı yüksekliklerde konumlandırmıştır. Üç farklı debi değeri kullanarak gerçekleştirdiği deneylerde iki farklı genişlikte kenar ayak ve iki farklı sediment büyüklüğü kullanmıştır. Elde ettiği veriler neticesinde oyulma derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı geliştirerek basınçlı akım halinde oyulma derinliklerinin tahmin edilmesinde etkili parametrelerin taban malzemesine ait kritik hız, köprü tabliyesi altındaki ortalama akım hızı, köprü tabliyesi ile taban seviyesi arasındaki mesafe, köprünün memba tarafındaki su yüksekliği ve yaklaşım akım derinliğine ait Froud sayısı olduğunu belirtmiştir.

Verna, Setia ve Bhatia (2004), Hindistan Ulusal Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında hareketli ve temiz su koşullarında basınçlı akım halinde dairesel orta ayağı bulunan köprü tabliyesi modeli ile gerçekleştirdikleri deneylerde meydana gelen oyulmaları incelemişlerdir. Deneyler 12,5 uzunluğunda, 0,4 m genişliğinde ve 0,55 m derinliğindeki kanalda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda tabliye altındaki düşey daralmanın daha düşük olduğu durumlarda akım derinliğinin basınçlı akım oyulmasına etkisinin daha fazla olduğu belirtilmiştir.
Guo, Kerenyi, Pagan Ortiz ve Flora (2010), kirişli köprü tabliyesi altındaki basınçlı akım oyulmasını temiz su koşullarında incelemişlerdir. Deneyler 21,35 m uzunluğunda ve 1,83 m genişliğinde bir kanalda üç kirişli ve beş kirişli köprü tabliyeleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ile iki ve üç boyutlu oyulma çukuru profilleri incelenerek oyulmanın köprü tabliyesinin mansabında %15'lik kısmında maksimum noktaya ulaştığını ve oyulmanın tabliyenin bir tabliye genişliği kadar membada başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca maksimum oyulma çukuru derinliğinin sediment boyutunun azalmasıyla arttığı belirlenmiştir.

Hahn ve Lyn (2010), temiz su koşullarında düşey daralma oyulmasını inceledikleri deneyleri Purdue Hidrodinamik Laboratuvarında 11 m uzunluğunda 0,45 m genişliğinde ve 0,72 m derinliğindeki kanalda gerçekleştirmiştir. Tabanda kullanılan sedimentin 0,6 mm çapında

olduğu deneyler 6 ile 48 saat aralığındaki deney süreleriyle gerçekleştirilmiştir. Yaklaşım akım derinliği bütün deneylerde sabit tutulmuş ve iki farklı yaklaşım akım hızı kullanılmıştır. Ortalama akım hızının düşük olduğu durumlarda 48 saat sonunda bile oyulmanın devam ettiği tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinin daralma bölgesinin mansabında meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Fayyadh, Akib, Othman ve Razak (2011), 34°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ile kenar ayaklara sahip köprü modeli kullanarak gerçekleştirdikleri deneylerde farklı akım hızlarıyla oyulma derinliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen veriler ışığında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal benzeşim yapmışlar ve köprünün yapısal davranışını değerlendirmişlerdir.

Shen, Shan, Xie, Bojanowski, Lottes ve Kerenyi (2012), Arneson ve Abt (1998) ile Umbrell ve diğerleri (1998) tarafından elde edilen deney verilerini kullanarak basınçlı akım durumunda köprü açıklığında meydana gelen oyulmaları sayısal olarak modellemişlerdir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) hesap yöntemlerini kullanarak oyulma çukurunu simüle etmişler ve sayısal benzeşimin gerçek veriler üstündeki performansını incelemişlerdir. Teorik modelle elde edilen verilerin tutarlı olduğunu kaydetmişlerdir.

Lança, Fael, Maia, Pego ve Cardoso (2012), çeşitli ayak aralıklarına ve verevlik açısına sahip farklı ayak grubu şekil kombinasyonlarının maksimum oyulma çukuru derinliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Temiz su koşulları altında kararlı akım durumunda 7 ile 15 gün arasında değişen sürelerde 26 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde verevlik açıları 0°, 15°, 30°, 45° ve 90° olan dört ayrık silindirik ayak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda verevlik açısı 0° için maksimum oyulma çukuru derinliğinin en membadaki ayakta olduğu saptanmıştır. Verevlik açısı 30° ve daha büyük olan ayak gruplarında aralık/ayak çapı oranı azaldıkça oyulma çukuru derinliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Kumcu (2016), kararlı ve kararsız akım koşullarında temiz su olması halinde meydana gelen basınçlı akım oyulmasını incelemek amacıyla Devlet Su İşleri (DSİ) Hidrolik Laboratuvarında çeşitli deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler 30 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve 0,001 taban eğimine sahip kanalda yapılmıştır. Test bölgesi kanal başından 13 m mesafede ve 7 m uzunluğuna oluşturulmuştur. Deneyler dört farklı yaklaşım akım

hızında ve 32 saati bulan sürelerde gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda kararsız akım durumunda meydana gelen maksimum oyulmaların kararlı akım durumuna göre daha az olduğu görülmüştür.

Farhangi, Thamer, Ghazali ve Yusuf (2016) basınçlı akım ve temiz su oyulması koşullarında dikdörtgen ayağa sahip verevlik açısı olan köprü tabliyesi altında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliklerini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen 16 adet deneyde; köprü tabliyesi 0°, 5°, 10°, 15°, 22,5° ve 30°'lik verevlik açılarıyla yerleştirilmiş ve iki farklı sediment tane çapı kullanılmıştır. Elde edilen veriler analiz edilerek maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir.

Karakurt (2016) temiz su halinde, kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru derinliklerini ve şekillerini incelemek amacıyla Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında 121 adet deney yapmıştır. Deneyler 10 m uzunluğunda ve 1 m genişliğindeki kanalda, 2,5 m uzunluğunda ve 20 cm derinliğindeki test bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda köprü tabliyesinin tabana daha yakın olduğu durumda oyulma çukuru derinliğinin arttığı ve savak tipi akım durumunda oyulmanın membaa ötelendiği görülmüştür. Aynı debi değerinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde akım derinliğinin artmasıyla oyulma çukuru derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Akımın savak tipi olması durumunda ise yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükünün de arttığı ve meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin azaldığı görülmüştür. İnce taban malzemesi olması halinde meydana gelen oyulma çukuru derinliği ve şeklinin daha büyük olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca tabliyede kullanılan kiriş yüksekliğinin artmasıyla oyulma çukuru derinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen veriler ışığında kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumunda meydana gelen oyulmaları tahmin eden ampirik bağıntılar geliştirilmiştir.

Demir (2018), Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında orta ve kenar ayağı olmayan, akıma 15°'lik verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmaları incelemiştir. Çalışma kapsamında Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında 40 adet deney gerçekleştirmiştir. Deneyler 10 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 1 m derinliğindeki bir kanalda yapılmıştır. 15°'lik verevlik açısı olan köprü tabliyesi altında meydana gelen maksimum oyulma çukuru

derinliği üzerinde yaklaşım akım derinliğinin etkisini inceleyebilmek için altı farklı yaklaşım akım derinliğinde kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre artan kiriş yüksekliği daha fazla oyulmaya sebep olmuştur. Tabliye altında kısmi basınçlı akım halinde meydana gelen oyulmanın savak tipi akıma göre daha fazla olduğu, artan yaklaşım akım derinliğinin oyulma derinliğinde azalmaya sebep olduğunu gözlemlemiştir. Aynı debide yaklaşım akım derinliği arttıkça ortalama akım hızının ve Froude sayısının küçüldüğünü, buna bağlı olarak da maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca verevlik açısının oyulma çukuru derinliğine etkisini incelemek için literatürde bulunan akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile yapılan çalışmada (Karakurt, 2016) elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda akıma verevli olarak yerleştirilen tabliye altında meydana gelen oyulmalar ile akıma dik olarak yerleştirilen tabliye altında oluşan oyulmalar arasındaki farkın %65 oranına kadar çıktığı ve köprü tabliyesinin verevli olması halinde akıma dik tabliyeye göre daha fazla oyulmanın gerçekleştiği belirlenmiştir. Deney verileri kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve maksimum oyulma derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı önerilmiştir.

Carnacina, Pagliara ve Leonardi (2019) basınçlı akım koşulunda gerçekleştirdikleri deneyler neticesinde elde ettikleri oyulma derinliklerini literatürdeki Arneson (1997), Umbrell ve diğerleri (1998), Lyn (2008) ile Kumcu (2016) tarafından geliştirilen bağıntılarla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalar sonucunda elde edilen bulgulara göre özellikle büyük taşkınlar sırasında basınçlı akım durumunda meydana gelen toplam oyulmanın doğrusal olmayan bir yapıda olduğunu; basınçlı akım durumundaki daralma oyulması ile yerel oyulma derinliklerinin ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen oyulma derinliğinden çok daha büyük oyulma derinliği meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Barakat (2022), Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirdiği deneyler ile temiz su oyulması halinde kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında silindirik orta ayak etrafında ve tabliye altında meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri ile şekillerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre ayak ve tabliyenin birlikte olduğu durumlarda oyulma değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla oyulma çukuru derinliklerinde azalma olduğu görülmüştür.

Abdelhaleem, Mohamed, Shaaban, Ardakanian, Fahmy ve Ibrahim (2023) temiz su durumunda kenar ayağı bulunan bir köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru derinliklerini serbest ve basınçlı akım koşullarındaki deneylerle incelemişlerdir. Deneyler sonunda maksimum oyulma derinliğini belirlemek için ampirik bir bağıntı geliştirmişler, elde ettikleri deneysel verileri kullanarak daha önceki kısmi basınçlı akım modellerinin tahmin hatalarını hesaplamışlar ve bu modellerin performanslarını değerlendirmişlerdir. Yaptıkları değerlendirmeler sonucunda basınçlı akım koşulu için maksimum oyulma derinliğinin serbest akım koşulu altındaki maksimum oyulma derinliğinin densimetrik Froude sayısı ve köprü açıklığına bağlı olarak 2,15 ve 9,81 katı kadar arttığını belirlemişlerdir. Köprü düşey açıklığı ve taban malzemesi boyutu arttıkça oyulmanın azaldığını; aynı akım derinliğinde, köprü uzunluğu arttıkça maksimum oyulma derinliğinin azaldığını; köprü genişliği azaldığında ise maksimum oyulma derinliğinin artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Baranwal, Bhabani ve Baldev (2023) Kurukshetra Ulusal Teknik Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında, temiz su koşulunda, sabit taban eğiminde, 12 m uzunluğa, 0,7 m derinliğe ve 0,6 genişliğe sahip bir kanalda gerçekleştirdikleri deneylerde farklı orta ayak şekillerinin akım derinliklerine etkisini incelemiştir. Deneyler 6 saat süreyle yapılmıştır. Deneylerde 0,0168 m^3/sn ile 0,0355 m^3/sn arasında değişen debiler ve 0,17 m/sn ile 0,30 m/sn arasında değişen akım hızları kullanılmıştır. Deneyler neticesinde dikdörtgen orta ayağın bulunduğu durumlarda en fazla, keskin burunlu orta ayağın bulunduğu durumda ise en az oyulmaların görüldüğünü belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra oval orta ayağın olduğu durumda silindirik orta ayağa göre daha az oyulmanın meydana geldiğini ve hızdaki artışa bağlı olarak oyulmalardaki artışın en fazla silindirik ayakta en az ise oval ayakta görüldüğünü belirlemişlerdir.

Yalçın (2024) gerçekleştirdiği çalışma kapsamında 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ile daire kesitli silindirik bir orta ayak kullanarak temiz su ve basınçlı akım koşullarında deneyler yapmıştır. Deneylerde köprü açıklığında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği ve şeklini incelemiş, debi, yaklaşım akım derinliği ve tabliye verevliğinin kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında toplam oyulma mekanizmasına etkisini araştırmıştır. 3 farklı debi ve 4 farklı yaklaşım akım derinliği kullanarak gerçekleştirdiği deneylerde; köprü tabliyesi nedeniyle oluşan düşey daralma oyulmasını, silindirik orta ayak nedeniyle meydana gelen yerel oyulmaları ve tabliye ile orta ayağın beraber bulunduğu

basınçlı akım oyulmasını incelemiştir. Deneyler sonucunda tabliye ile orta ayağın beraber bulunduğu basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin, küçük debi değerlerinde düşey daralma oyulması ile yerel oyulma derinliklerinin ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen oyulma derinliğinden daha büyük olduğunu belirtmiştir. Verevli tabliyenin kullanıldığı deneylerde debinin arttığı ve yaklaşım akım derinliğinin azaldığı durumlarda memba talveğinde daha fazla oyulma olduğu, böylece membada taban alçalmaları meydana geldiğini gözlemlemiştir. Debi veya yaklaşım akım hızlarındaki artışın maksimum oyulma çukuru derinliğinde de artışa sebep olduğunu ve kısmi basınçlı akım ile savak tipi akım durumlarında maksimum oyulma derinliğinin serbest akıma kıyasla artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Verevliğin oyulmaya etkisini incelemek için Barakat (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada elde edilen veriler ile karşılaştırma yapmıştır. Elde ettiği sonuçlarda verevliğin maksimum oyulma çukuru derinliğinde artışa neden olduğunu belirlemiştir. Deney sonunda elde edilen veriler kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirmiş ve oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı önermiştir.

Literatürden de görüldüğü üzere basınçlı akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen oyulmaların incelendiği araştırma sayısı oldukça sınırlıdır. Günümüzde Hidrolik Mühendislik Genelgesi (Hydraulic Engineering Circular, HEC-18) gibi standartlarda köprü temel derinliğinin belirlenebilmesi için basınçlı akım durumunda oluşan daralma oyulması derinliği ile serbest akım durumunda oluşan yerel oyulma derinlikleri hesaplanmakta ve bu değerler toplanarak maksimum oyulma derinliği elde edilmektedir. Ancak bu yaklaşımın ne kadar güvenilir sonuçlar verdiği ile ilgili henüz detaylı çalışmalar gerçekleştirilmemiştir. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda çok sayıda ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Örneğin düşey daralma oyulması için en çok bilinen çalışmalar Eş 2.11'de verilen Umbrell, Young, Stein ve Jones (1998)'a ait denklem ile Eş. 2.12'de verilen Arneson ve Abt (1998)'a ait denklemlerdir.

$$\frac{H_b+y_{sc,max}}{y_a} = 1{,}021\left[\left(1-\frac{h_w}{y_a}\right)\frac{V_a}{V_c}\right]^{0{,}6031} \qquad \text{Eş. 2.11}$$

$$\frac{y_{sc,max}}{y_a} = -5{,}08 + 1{,}27\left(\frac{y_a}{H_b}\right) + 4{,}44\left(\frac{H_b}{y_a}\right) + 0{,}19\left(\frac{V_a}{V_c}\right) \qquad \text{Eş. 2.12}$$

Burada $y_{sc,max}$ maksimum oyulma çukuru derinliğini ifade etmektedir.

Serbest akım durumunda ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma derinliğinin tahmini için geliştirilmiş çok sayıda ampirik bağıntı bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olarak bilinen ve kullanılan denklem Eş. 2.13'te verilen, Colorado State University (CSU) denklemi olarak da bilinen ve Richardson ve Davis (2001) tarafından geliştirilmiş denklem olup Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal Karayolları İdaresi (FHWA) tarafından Hidrolik Mühendisliği Genelgesi -18 (Hydraulic Engineering Circular No.18 - HEC-18) 4. baskısında yer almaktadır. Serbest akım durumunda yerel oyulma derinliğinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer denklem ise Eş 2.14'te verilen Sheppard, Melville ve Demir (2014)'e ait denklemdir.

$$\frac{y_{spo,max}}{D} = 2K_S K_\theta K_3 K_4 \left(\frac{y_a}{D}\right)^{0,35} Fr^{0,43} \quad \text{(Eş. 2.13)}$$

$$\frac{y_{spo,max}}{D^*} = 2{,}5 f_1 f_2 f_3 \quad \text{(Eş. 2.14)}$$

Burada;

$$f_1 = tanh\left[\left(\frac{y_a}{D^*}\right)^{0,4}\right] \quad \text{(Eş. 2.15)}$$

$$f_2 = \left\{1 - 1{,}75\left[ln\left(\frac{V_a}{V_c}\right)\right]^2\right\} \quad \text{(Eş. 2.16)}$$

$$f_3 = \left[\frac{\frac{D^*}{D_{50}}}{0{,}4\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)^{1,2} + 10{,}6\left(\frac{D^*}{D_{50}}\right)^{-0,13}}\right] \quad \text{(Eş. 2.17)}$$

Burada $y_{spo,max}$ ayaklar etrafında meydana gelen maksimum yerel oyulma derinliğini ifade etmektedir. Ayrıca K_s ayak şekil faktörü olup silindirik ayaklar için 1 alınmaktadır. K_θ, yaklaşım akımı ile köprü aksı arasındaki açının etki faktörü olup $K_\theta = (\text{Cos}\theta + \text{L/D Sin}\theta)^{0,65}$ ile hesaplanmaktadır. K_3 ise taban şekil faktörü olup temiz su oyulması için 1,1 değerinde, küçük kum birikintileri için 1,1 ile 1,2 değerleri arasında bir değer, büyük kum birikintileri için 1,3 değerinde alınabilmektedir. Bağıntı hem temiz su hem de hareketli taban koşullarında kullanılabilmektedir. K_4, tabanda zırhlanma etkisi faktörü olup D_{50}<2 mm ya da D_{95}<20 mm durumları için 1 alınabilmektedir.

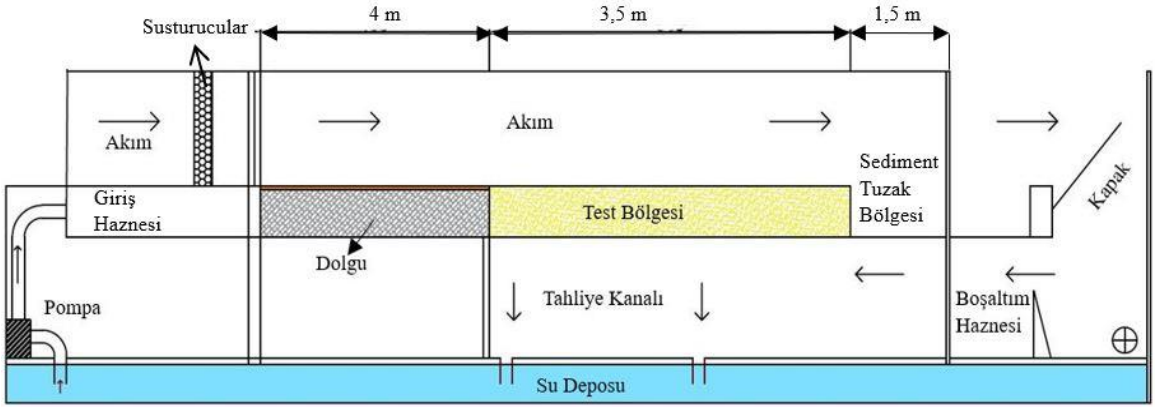
3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ

3.1. Genel

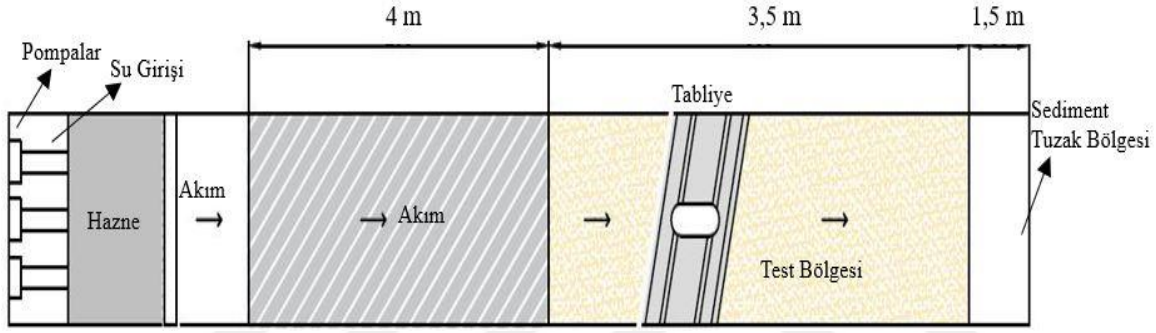
Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda yapılan deneyler Resim 3.1'de verilen 10 metre uzunluğa, 1 metre yüksekliğe ve 1 metre genişliğe sahip dikdörtgen kesitli kanalda gerçekleştirilmiştir. Deney kanalının taban eğimi yaklaşık olarak 0,001'dir. Kanal yan duvarları ile tabanı 1 cm kalınlığında temperli camdan yapılmıştır. Giriş boruları, hazne, ana kanal, boşaltım havuzu ve tahliye borusu kanalın ana bileşenleridir. Su deposundan gerekli debinin gelmesini sağlayan üç adet pompa da flanş ve dirsekler ile kanala bağlanmıştır. 22 kW'lık güce sahip pompalar su deposundan alınan suyun borular ile kanal başında bulunan hazneye aktarılmasını sağlamaktadır. Hazneye gelen su açık kanala ve oradan da boşaltım havuzuna ulaştıktan sonra tahliye borusu aracılığıyla tekrar su deposuna aktarılmaktadır. Kanalın başındaki hazne ile ana kanal arasındaki kısımda bulunan bal peteği şeklindeki susturucu görevi gören elemanlar ile pompadan gelen suyun enerjisi kırılarak daha düzgün bir akım elde edilmektedir. Kanalın mansabında suyun boşaltım havuzuna aktarıldığı kısımda bulunan ve yaklaşım akım derinliğini ayarlamak için kullanılan bir kapak bulunmaktadır. Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'te deney düzeneği plan ve profil detayları verilmiştir.



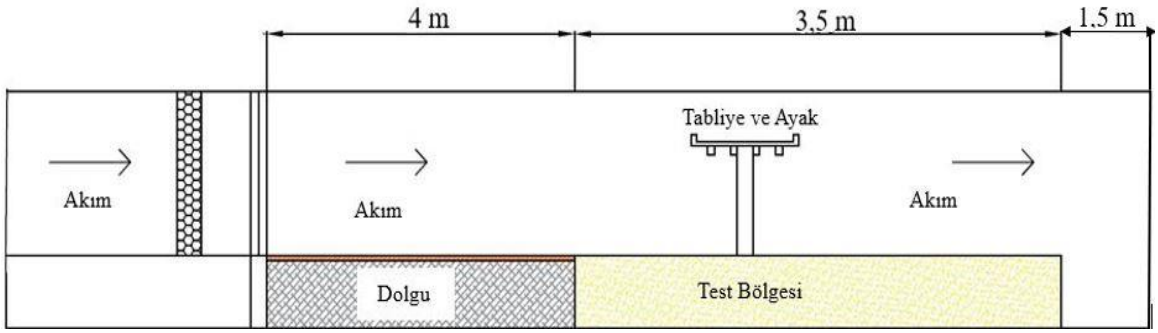
Resim 3.1. Deneylerin gerçekleştirildiği kanalın membadan görünüşü



Şekil 3.1. Deney düzeneği genel gösterimi



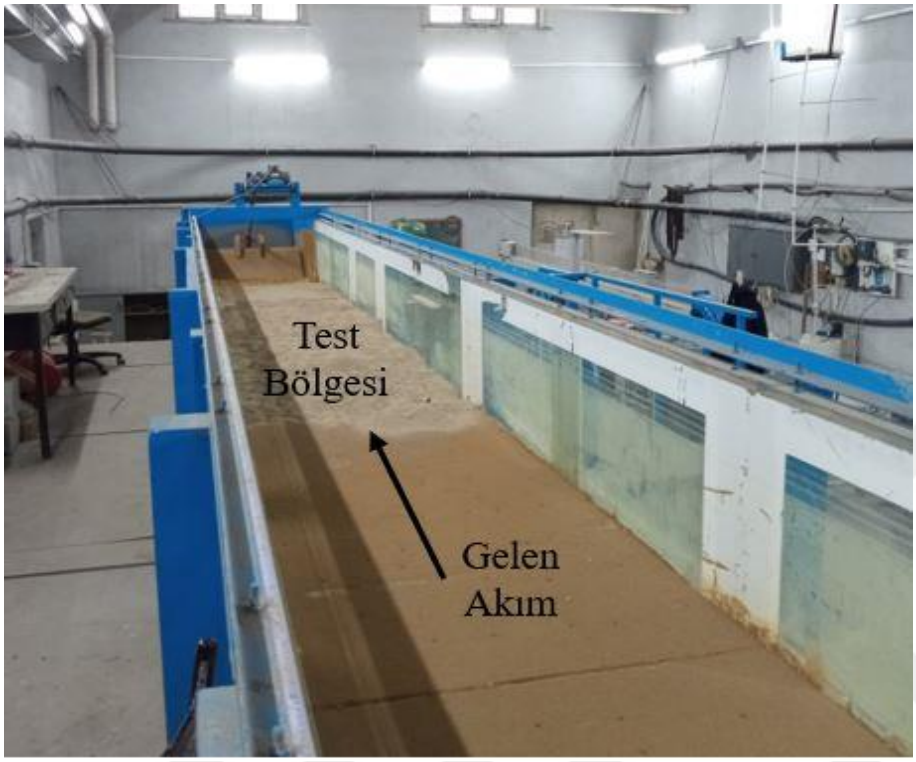
Şekil 3.2. Deney düzeneği plan görünüşü



Şekil 3.3. Deney düzeneği ve köprü modeli yerleşimi

Resim 3.2'de görüldüğü üzere kanalda ölçüm yapılan deney bölgesi açık kanal başlangıcından 4 m ile 7,5 m arasında oluşturulmuş olan test bölgesidir. Ölçüm bölgesine kadar olan ilk 4 metrelik kanal tabanına akımın test bölgesinde maruz kaldığı pürüzlülüğü sağlamak amacıyla deneyde kullanılan taban malzemesi yapıştırılmıştır. Bu bölümde kanal tabanına rastgele delikler açılarak kanala su verilmesi sırasında taban ile levhalar arasında sıkışmış, akımı bozabilecek hava kabarcıklarının çıkışı sağlanmıştır. Bunun yanında sediment tanelerinin akımla birlikte kanalın mansap tarafına taşınarak boşaltım havuzuna

geçmesini engellemek amacıyla ayarlanabilir kapağın hemen memba tarafında sediment tuzak bölgesi oluşturulmuştur.



Resim 3.2. Deneylerin gerçekleştirildiği açık kanal

3.2 Deney Düzeneği ve Kurulumu

3.2.1. Taban malzemesi

Deneylerde taban malzemesi olarak doğal dere yatağından alınarak laboratuvar ortamında elenmiş ve homojen hale getirilmiş 0,8 mm ortalama tane çapına sahip sediment kullanılmıştır. Sediment yıkandıktan sonra Resim 3.2'de gösterilen açık kanaldaki 3,5 m uzunluğunda, 1 metre genişliğinde ve 40 cm derinliğindeki test bölgesine serilmiştir.

Test bölgesindeki her noktada taban malzemesi seviyesinin aynı olması için açık kanal düzeneğine yerleştirilebilen hareketli bir düzleme aracı kullanılmıştır (Resim 3.3). Taban malzemesi bu araç ile düzeltildikten sonra lazermetre ile taban seviye ölçümleri alınmış ve bulunan değerler deney öncesi taban seviyesi olarak kaydedilmiştir.



Resim 3.3. Tabandaki sedimentin düzeltilmesini sağlayan hareketli araç

3.2.2. Köprü tabliyesi

Deneylerde kullanılan tabliye pleksiglas malzemeden yapılmıştır. İki parça halinde imal edilen tabliye alt kısmında bulunan kirişlere takılan vidalar yardımıyla tek bir parça olarak kanala yerleştirilmiştir. Tabliye kanal başlangıcından 4,450 m- 5,100 m arasında akıma 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiştir. Kanal yan duvarlarına silikon ile yapıştırılan ve tabliye ile aynı malzemeden yapılmış parçalar tabliyenin kolay bir şekilde kaydırılarak takılıp çıkarılmasını sağlamıştır.

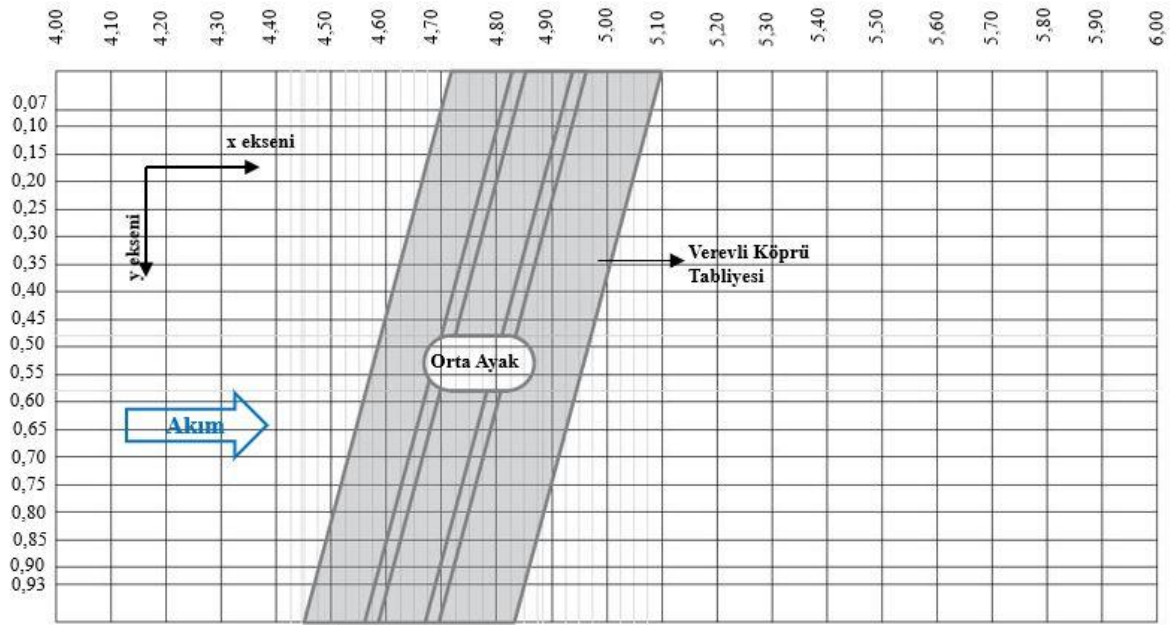
3.2.3. Orta ayak

Deneylerde kullanılan orta ayak, pleksiglas malzemeden yapılmış yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesitli şekle sahip, 10 cm çapında ve 20 cm uzunluğundadır. Literatürde bu şekildeki ayaklara oblik, uçları yuvarlatılmış dikdörtgen kesitli ayak vb. isimler verilmektedir. Çalışmada kullanılan ayağı en doğru şekilde tarif etmesi nedeniyle yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesitli (YDB) ayak ifadesi kullanılmıştır. İfade uzun olduğu için tezin bu bölümünden sonra ayak şekli için YDB kısaltması kullanılacaktır. Çalışmada orta ayak hem tek başına hem de tabliye ile birlikte kullanıldığı deneylerde kanal başlangıcından itibaren 4,675 m mesafeye yerleştirilmiştir. Tabliyenin verevli olması nedeniyle ayak ekseni

1 m genişliğindeki kanalda akım doğrultusundan bakıldığında 0,53 m'de konumlandırılmıştır.

3.2.4. Taban batimetrisi ölçüm aleti

Çalışma kapsamında meydana gelen taban değişimlerini belirleyebilmek amacıyla deney öncesi ve sonrasında test bölgesi içerisinde belirlenen noktalarda ölçümler yapılmıştır. Ölçümler köprü membaında 4,10 m'den başlayarak akım doğrultusunda her 10 cm'de bir, tabliyeye yaklaştıkça, tabliyede ve hemen sonrasında her 2,5 cm'de bir ve tabliyenin mansabında yine her 10 cm'de bir olacak şekilde Şekil 3.4'te verilen ağın köşe noktalarında yapılmıştır. Enine doğrultudaki ölçümler 7 cm ve 93 cm konumları dışında 10 cm konumundan itibaren 5 cm aralıklarla yapılmıştır. Deney öncesi ve sonrası yapılan okumalar arsındaki fark hesaplanarak okuma yapılan her noktadaki taban değişimi belirlenmiş ve böylece test bölgesi batimetrisi elde edilmiştir. Bütün deneylerde taban okumaları hareketli bir çerçeve üzerine monte edilmiş, tabana 90° olacak şekilde konumlandırılmış Leica DISTO D810 model lazermetre ile yapılmıştır. ±1 mm hassasiyete sahip olan Leica lazermetre aracılığıyla ölçüm verileri doğrudan bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Resim 3.4).



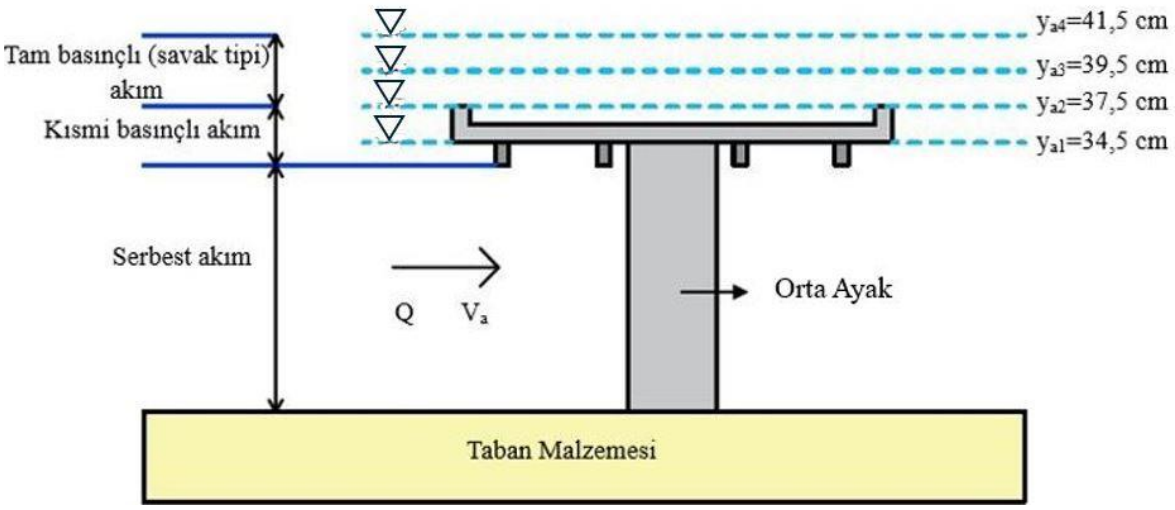
Şekil 3.4. Test bölgesi ve ölçüm alınan koordinatlar



Resim 3.4. Lazermetre

3.3. Deneylerin Kapsamı

Yapılan çalışma kapsamında 36 adet deney gerçekleştirilmiştir. Temiz su halinde gerçekleştirilen deneylerde Şekil 3.5'te gösterilen 4 farklı yaklaşım akım derinliği ve 3 farklı debi değeri kullanılmıştır. Her debi değeri için 34,5 cm ve 37,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde kısmi basınçlı akım, 39,5 cm ve 41,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde tam basınçlı yani savak tipi akım oluşturularak meydana gelen taban batimetrisi lazermetre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinlikleri ve akım şartları

Çizelge 3.1'de deneylerin gerçekleştirildiği debi değerleri, yaklaşım akım derinlikleri, ortalama akım hızları (V_a), kritik ortalama akım hızları (V_c) ve yaklaşım akım derinliğine ait Froude sayıları verilmiştir. Çizelgede verilen kritik akım hızları literatürde yaygın olarak kullanılan ve Neill (1973) tarafından önerilmiş bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca ortalama akım hızı ile kritik ortalama akım hızının oranı belirlenerek temiz su oyulması koşulunun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Umbrell ve diğerlerine (1998) göre akımın temiz su durumunu sağlaması için bu oranın 1'den küçük olması gerekmektedir. Ayrıca yapılmış olan ön hazırlık deneylerinde çalışmadaki debi ve yaklaşım akım derinliklerinde tabanda sediment hareketinin olmadığı kontrol edilmiştir.

Ortalama akım hızları ve kritik ortalama akım hızları Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'de verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_a = \frac{Q*10^{-3}}{y_a*b} \quad \text{(Eş. 3.1)}$$

$$V_c = 1{,}58 * [(SG-1) * g * D_{50}]^{0,5} \left(\frac{y_a}{D_{50}}\right)^{0,167} \quad \text{(Eş. 3.2)}$$

Burada b = kanal genişliğini (=1 m), SG = taban malzemesinin özgül ağırlığı olan 2,65 değerini ifade etmektedir.

Çizelge 3.1. Deneylerin gerçekleştirildiği akım özellikleri

Debi, Q (lt/sn)	Yaklaşım akım derinliği, y_a (m)	Ortalama akım hızı, V_a (m/s)	Froude sayısı, Fr_a (-)	Densimetrik Froude sayısı, Fr_d (-)	Kritik ortalama akım hızı, V_c (m/s)	V_a/V_c (-)
100	0,345	0,290	0,158	2,548	0,495	0,585
	0,375	0,267	0,139	2,346	0,502	0,531
	0,395	0,253	0,129	2,223	0,507	0,500
	0,415	0,241	0,119	2,118	0,511	0,472
110	0,345	0,319	0,173	2,803	0,495	0,644
	0,375	0,293	0,153	2,575	0,502	0,584
	0,395	0,278	0,141	2,443	0,507	0,550
	0,415	0,265	0,131	2,329	0,511	0,519
120	0,345	0,348	0,189	3,058	0,495	0,702
	0,375	0,320	0,167	2,812	0,502	0,637
	0,395	0,304	0,154	2,671	0,507	0,600
	0,415	0,289	0,143	2,540	0,511	0,566

Gerçekleştirilen 36 adet deney sadece orta ayağın bulunduğu durum, sadece tabliyenin bulunduğu durum ve orta ayak ile tabliyenin birlikte bulunduğu durum olmak üzere 3 ayrı bölümde gerçekleştirilmiştir. Sadece orta ayağın bulunduğu deney setinde serbest akım koşulunda farklı debi değerleri ile yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri 12 ayrı deneyle incelenmiştir. Sadece tabliyenin bulunduğu ve tabliye ile orta ayağın birlikte bulunduğu durumlarda ise kısmi basınçlı akım ile savak tipi akım koşullarında meydana gelen oyulmalar her bir bölümde 12 deney olacak şekilde incelenmiştir. Bu deney bölümleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Yapılan ön deneyler ve çalışmalar ışığında deneyler sırasında meydana gelen maksimum oyulma derinliklerinin tüm deney setlerinde mevcut laboratuvar şartları da dikkate alındığında yaklaşık 17 saat sonunda oluştuğu gözlemlenmiştir. Deney kanalı camlarına oyulma değişiminin gözlemlenerek sayısal olarak değerlendirilebilmesi amacıyla ölçekli şeffaf kareli kağıtlar yapıştırılmış ve tabandaki sediment hareketi buradan gözlemlenmiştir. Meydana gelen değişimler bir saatte gözle gözlemlenemeyecek kadar küçük olduğunda deneye son verilmiştir. Bu yaklaşımla yapılan ön deneyler sonucunda çalışma kapsamında gerçekleştirilen 36 adet deneyin 17 saat sonunda sonlandırılabileceğine karar verilmiştir.

3.4. Deney Prosedürü

1. Deney kanalı test bölgesinde bulunan sediment malzemesi her deney öncesi karıştırılır ve deney yan duvarlarına kayar bir sistemle yerleştirilen hareketli bir düzeltme aracı yardımıyla düzeltilir.
2. Düzeltilen tabanda lazermetre ile belirlenen noktalarda yükseklik okuması yapılarak taban batimetresi belirlenir ve böylece deney öncesi ölçüm tamamlanır.
3. Basınçlı akım için gerçekleştirilen deneylerde köprü tabliyesi kanal yan duvarlarında bulunan parçaların üzerine oturtularak kanala yerleştirilir.
4. Pompalar çalıştırılarak kanala gelen debiyi kontrol eden vanalar yardımıyla kanal tabanında sediment hareketinin başlamasını önleyecek kadar yavaş bir şekilde kanala su verilir ve mansaptaki kapak kaldırılarak kanalın su ile dolması sağlanır. Sonrasında debi ayarlanır.
5. Gerekli debi ayarlandıktan sonra kanal sonunda bulunan hareketli kapak yardımıyla yaklaşım akım derinliği ayarlanır.

Çizelge 3.2. Gerçekleştirilen deneylere ait veriler

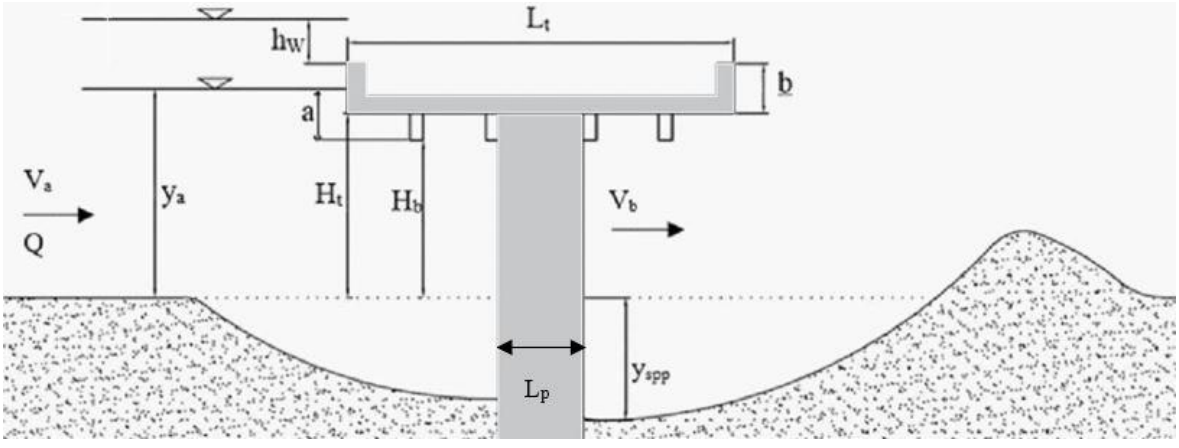
Deney No	y_a (cm)	Akım Durumu	Q (lt/sn)	Köprü Modeli	Oyulma Tipi
1	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	100	Sadece Tabliyenin Bulunduğu Durum	Daralma Oyulması
2	37,5				
3	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
4	41,5				
5	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	110		
6	37,5				
7	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
8	41,5				
9	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	120		
10	37,5				
11	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
12	41,5				
13	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	100	Sadece Orta Ayağın Bulunduğu Durum	Yerel Oyulma
14	37,5				
15	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
16	41,5				
17	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	110		
18	37,5				
19	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
20	41,5				
21	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	120		
22	37,5				
23	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
24	41,5				
25	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	100	Tabliye ve Orta Ayağın Birlikte Bulunduğu Durum	Daralma ve Yerel Oyulma
26	37,5				
27	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
28	41,5				
29	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	110		
30	37,5				
31	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
32	41,5				
33	34,5	Kısmi Basınçlı Akım	120		
34	37,5				
35	39,5	Tam Basınçlı (Savak Tipi) Akım			
36	41,5				

6. Deney süresi olan 17 saat sonunda pompalar kapatılarak kanaldaki su taban malzemesini hareket ettirmeyecek kadar yavaş şekilde tahliye edilir. Ölçümler için kullanılan lazermetre kanalda su varken çalışmadığından öncelikle su tahliye edilmektedir.
7. Köprü tabliyesi çıkarılır.
8. Test bölgesinde lazermetre ile yeniden ölçüm yapılarak deney sonrası taban batimetrisi ölçümü aynı noktalarda tekrar yapılır. Deney öncesi ölçümler ile deney sonrası ölçümler arasındaki fark hesaplanarak oyulma derinlikleri belirlenir.
9. Sediment karıştırılıp 1. Adım tekrar edilerek deney yeniden başlatılır.

4. DENEY SONUÇLARI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Genel

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda üç farklı debi ve dört farklı yaklaşım akım derinliğinde 36 adet deney yapılmıştır. Deneyler temiz su oyulması durumunda her birinde 12 deney olan üç grup halinde serbest, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında gerçekleştirilmiştir. İlk gruptaki deneylerde kanala sadece köprü tabliyesi yerleştirilmiş, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında tabliye nedeniyle akım alanında oluşan düşey daralma halinde meydana gelen oyulma çukuru incelenmiştir. İkinci grupta serbest akım koşulunda yarım dairesel burunlu dikdörtgen kesitli (YDB) orta ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma çukuru şekli ve derinliği incelenmiştir. Üçüncü grupta ise YDB orta ayağı olan ve kanala 15° verevlik açısıyla yerleştirilen köprü tabliyesi altında ayak etrafında düşey daralma ve yerel oyulmanın birlikte meydana geldiği basınç oyulması incelenmiştir. Deneyler sonucunda oluşan oyulma çukuru derinlikleri ile şeklinin yanı sıra köprü tabliyesinin verevlik açısı ile ayak şeklinin oyulmaya etkisi aynı kanal düzeneğinde yapılmış çalışmadan elde edilen veriler ve Yalçın (2024) tarafından elde edilen deney verileri kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4.1'de bu çalışmada deneylerin yapıldığı köprü tabliyesi ve orta ayak modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Köprü modeli ve parametreler

Deneylerde 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi tabandan H_t=34,5 cm yüksekliğinde yerleştirilmiştir. Tabliyede kullanılan kiriş yüksekliği 2 cm'dir. Kanala yerleştirilen orta ayak çapı 10 cm ve uzunluğu 20 cm'dir (Şekil 2.9). Yapılan çalışmada 34,5 cm ve 37,5 cm

yaklaşım akım derinliklerinde kısmi basınçlı akım, 39,5 cm ve 41,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde savak tipi akım koşulları elde edilmiştir.

4.2. Oyulma Çukuru Özelliklerinin İncelenmesi

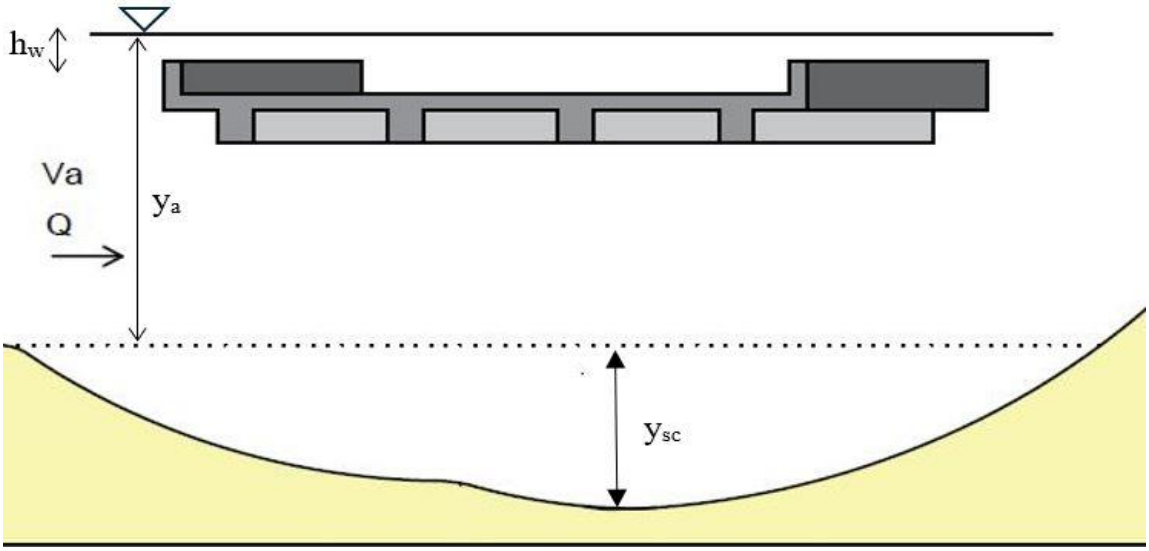
Yapılan çalışmada oyulma çukuru özellikleri sadece tabliye, sadece orta ayak ve tabliye ile orta ayağın birlikte olması durumları için ayrı ayrı incelenmiştir.

4.2.1. Tabliye altında meydana gelen düşey daralma oyulması

Orta veya kenar ayağı olmayan, akıma 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmalar kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında incelenmiştir (Resim 4.1). Köprü tabliyesi altında sadece düşey daralma nedeniyle oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği $y_{sc,max}$ değerleri ile konumları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede tabliye ve orta ayağın beraber olduğu, hem düşey daralma hem de yerel oyulmanın birlikte gerçekleştiği grup 3 deneylerinde ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliği $y_{spp,max}$'ın meydana geldiği konumdaki düşey daralma oyulması y_{sc} değerleri de verilmiştir. Böylece aynı akım koşullarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen maksimum düşey daralma ve yerel oyulma derinlikleri toplanarak bu değerin hem orta ayağın hem de tabliyenin birlikte olduğu basınçlı oyulma durumunda elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliği $y_{spp,max}$ ile karşılaştırılarak değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca çizelgede verilen maksimum düşey daralma oyulması $y_{sc,max}$ değerleri ile daha sonra verilen maksimum yerel oyulma derinlikleri $y_{spo,max}$ değerleri toplanarak bir başka toplam basınçlı oyulma derinliği elde edilmiş ve basınçlı oyulma derinliği $y_{spp,max}$ ile karşılaştırılarak aynı yaklaşım iki farklı şekilde değerlendirilmiştir.



Resim 4.1. Düşey daralma oyulması



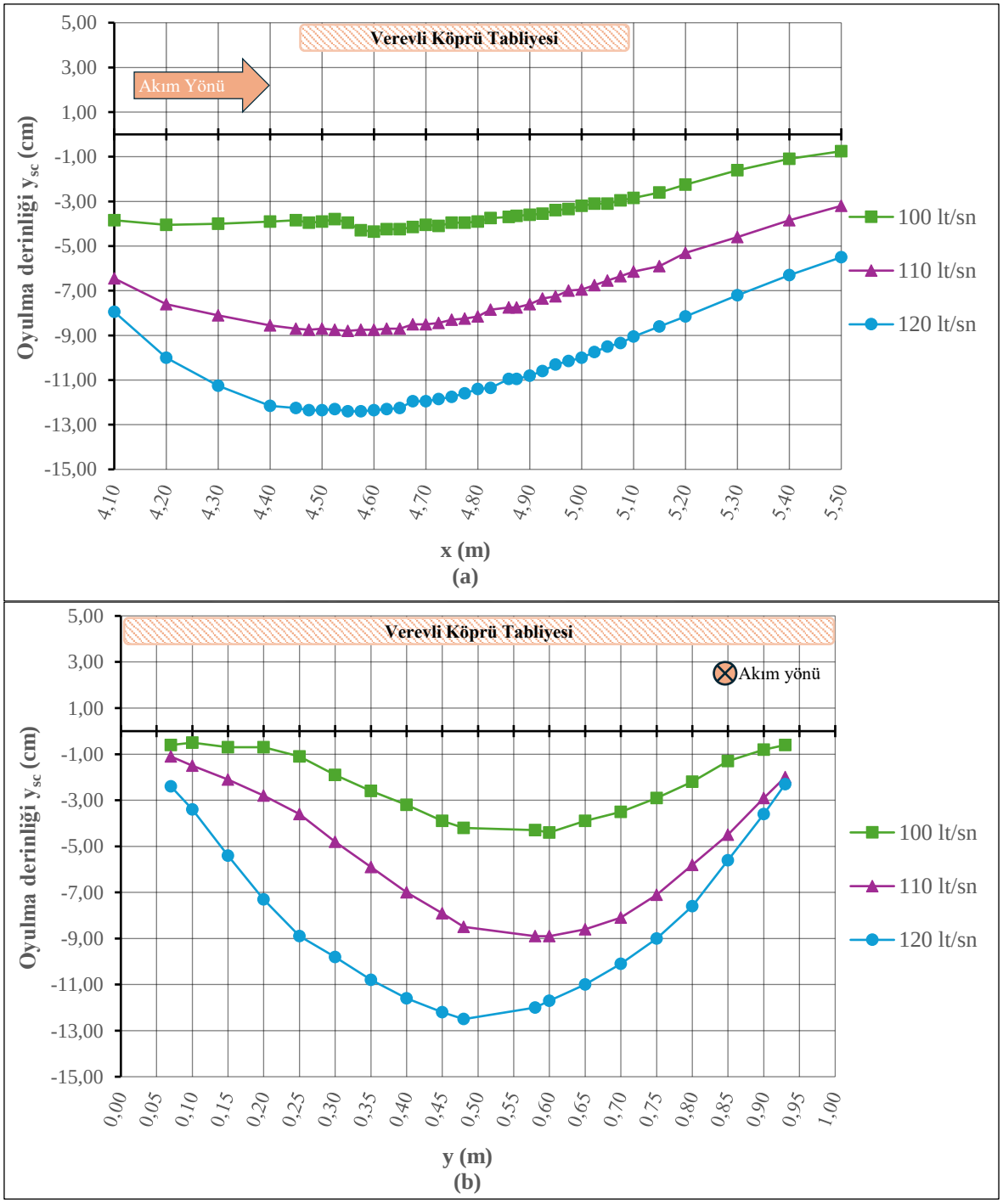
Şekil 4.2. Verevli köprü tabliyesi

Çizelge 4.1. Sadece köprü tabliyesinin olduğu durumda gerçekleşen daralma oyulması ölçümleri

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a (-)	Sadece tabliyenin olduğu düşey daralma oyulmasına ait değerler			Aynı akım şartlarında $y_{spp,max}$ konumundaki y_{sc} değerleri		
			$y_{sc,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	y_{sc} (cm)	x (m)	y (m)
100	34,5	0,158	4,4	4,650	0,60	4,2	4,650	0,53
	37,5	0,139	3,7	4,800	0,55	3,2	4,675	0,53
	39,5	0,129	3,1	4,800	0,55	2,4	4,650	0,53
	41,5	0,119	2,3	4,800	0,55	1,7	4,650	0,53
110	34,5	0,173	8,9	4,650	0,55	8,9	4,650	0,53
	37,5	0,153	8,6	4,575	0,55	8,1	4,650	0,53
	39,5	0,141	6,1	4,725	0,60	5,6	4,675	0,53
	41,5	0,131	3,2	4,775	0,50	2,8	4,675	0,53
120	34,5	0,189	12,5	4,650	0,50	12,5	4,650	0,53
	37,5	0,167	10,5	4,575	0,55	10,3	4,650	0,53
	39,5	0,154	8	4,675	0,60	7,1	4,675	0,53
	41,5	0,143	6,1	4,675	0,60	6	4,650	0,53

Çizelge 4.1'e göre farklı debi ve yaklaşım akım derinliklerinde maksimum daralma oyulması derinliği $y_{sc,max}$'ın meydana geldiği x ve y konumlarının verevli köprü tabliyesinin hemen membaında ya da altında kalan bölgede oluştuğu gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda alınan ölçümlerde aynı debi değerinde meydana gelen oyulma çukuru derinliklerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla %48-64 arasında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Hem kısmi basınçlı hem de savak tipi akımda bu durum değişmeyip yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla oyulma derinliğinde azalma olmuştur. Yaklaşım akım derinliği sabit tutulup oyulma çukuru derinliğinin debiyle değişimi değerlendirildiğinde ise debinin artmasıyla oyulma çukuru derinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum oyulma derinliğinin meydana geldiği konum her deney için farklı olsa da genelde hemen tabliye önünde ya da tabliye altındaki bölgede oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar Demir (2018)'in, Barakat (2022)'ın ve Yalçın (2024)'ın sonuçları ile de uyum içerisindedir.

En büyük maksimum oyulma çukuru derinlikleri $y_{sc,max}$'ın gözlemlendiği y_a=34,5 cm'lik akım derinliğinde üç farklı debi değerinde oluşan oyulma çukuru enine ve boyuna doğrultudaki profilleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

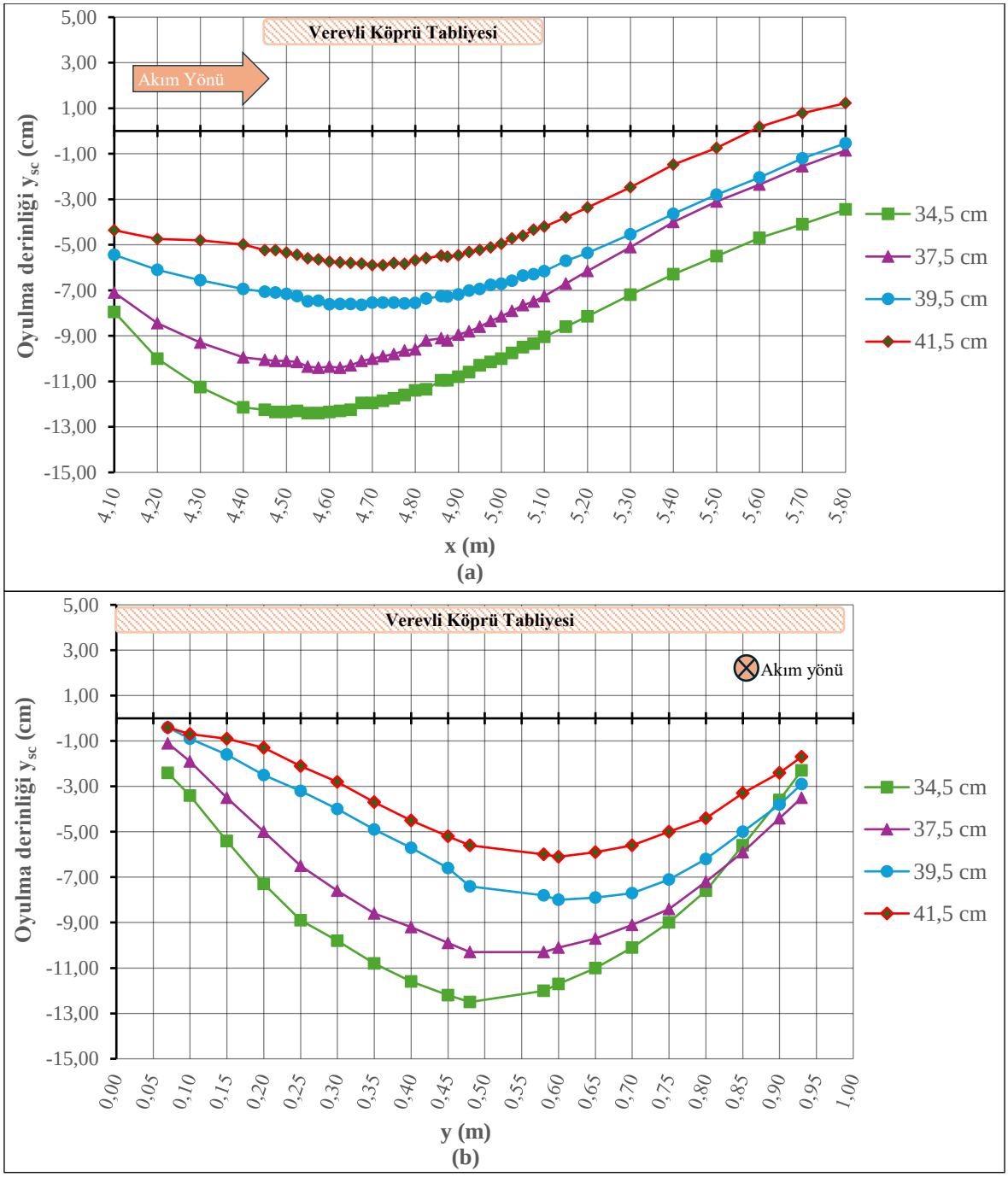
Şekiller üzerinde gösterilen köprü tabliyesinin yataydaki konumu yaklaşık olarak, düşeydeki konumu ve tabliye kalınlığı temsili ve ölçeksiz olarak verilmiştir. Verilen profillerden görüldüğü üzere debi değeri arttıkça oyulma çukuru derinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu da artan debi değeriyle tabliye altındaki ortalama akım hızı V_b'nin arttığını ve dolayısıyla

kanal tabanında tanelere uygulanan kayma gerilmesinin de büyüdüğünü ifade etmektedir. Köprü memba talveğinde gözlemlenen taban alçalması Gou ve diğerleri (2010) tarafından gerçekleştirilen deneylerde de gözlemlenmiştir.

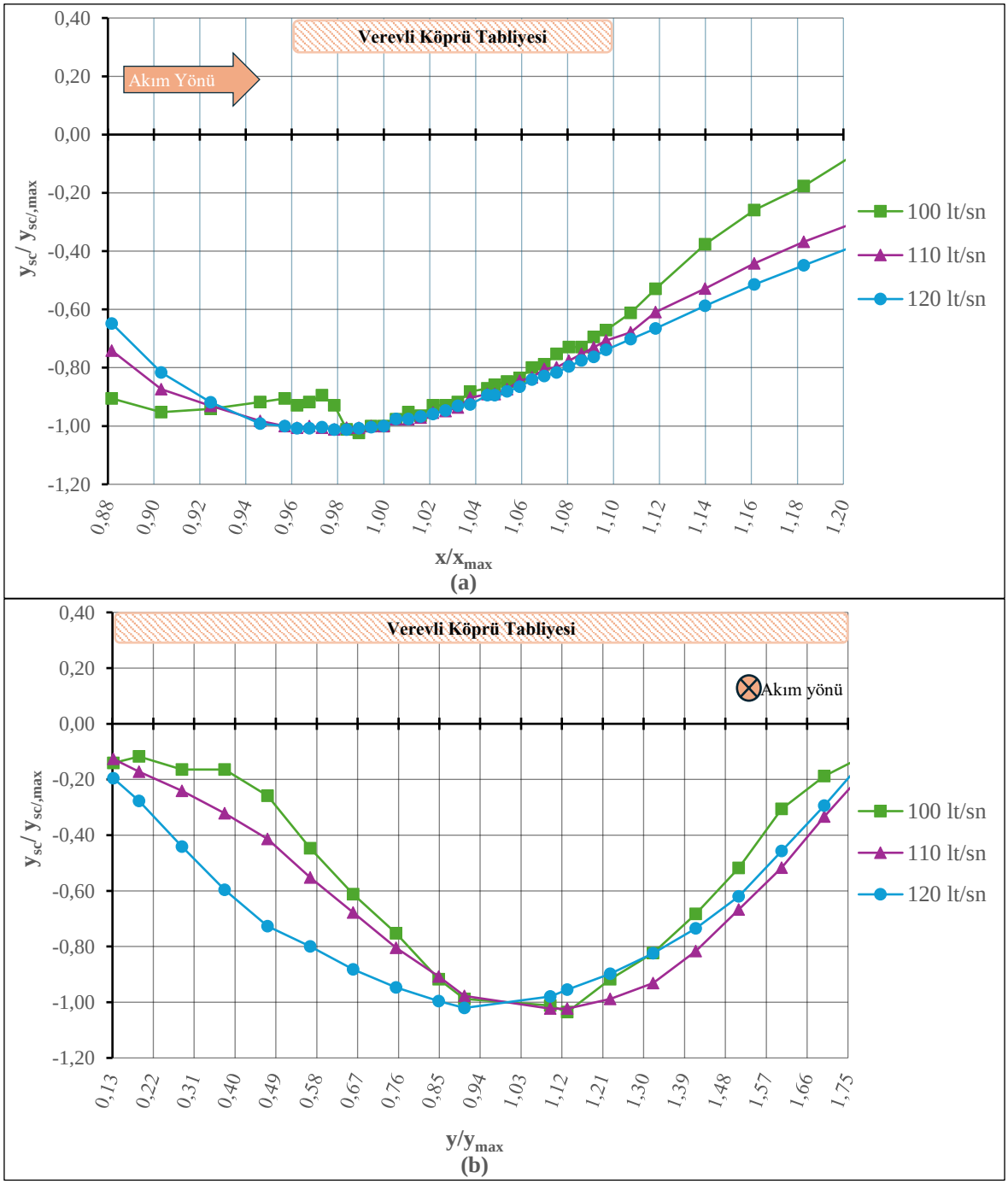
Maksimum oyulma çukuru derinliklerinin gözlemlendiği 120 lt/sn'lik debi değerinde oluşan oyulma çukuru profilleri dört farklı yaklaşım akım derinliği için Şekil 4.4'te verilmiştir. 34,5 ve 37,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde kısmi basınçlı akım, 39,5 cm ve 41,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde ise tam basınçlı (savak tipi) akım meydana gelmiştir. Bu profiller incelendiğinde sabit debi değerinde yaklaşım akım derinliği azaldıkça oyulma derinliklerinin arttığı görülmüştür. Kısmi basınçlı akım durumundaki oyulma derinlikleri tam basınçlı durumdaki oyulma derinliklerinden daha büyüktür. Bunun nedeni akımın tamamının tabliye altından geçmesi nedeniyle akım hızı ve taban gerilmesindeki artış olarak açıklanabilir. Savak tipi akım durumunda ise akımın bir bölümü tabliye üzerinden savaklandığından tabliye altındaki hızlar ve dolayısıyla kayma gerilmesi daha küçük değerlerde oluşmaktadır. Ayrıca meydana gelen oyulmaların özellikle en düşük akım derinlikleri olan 34,5 ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde memba tarafında daha etkili olduğu, oyulmaların kanaldaki test bölgesinin başlangıcında diğer akım derinliklerine göre daha fazla oluştuğu gözlemlenmiştir. Özet olarak debinin sabit kaldığı ve yaklaşım akım derinliğinin arttığı durumlarda ortalama akım hızı V_a ve Froude sayısı Fr_a azalmakta, bunun sonucunda daha küçük oyulma çukuru derinlikleri oluşmaktadır. Kısmi ve tam basınçlı akımlar kıyaslandığında ise her iki durumda da y_a değeri azaldıkça oyulmanın arttığı görülmüştür.

Şekil 4.5 ve 4.6'da sırasıyla, maksimum oyulma derinliklerinin görüldüğü 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için üç farklı debi değerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri ile 120 lt/sn için dört farklı yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyutsuzlaştırılmış boyuna ve enine doğrultudaki oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Boyutsuzlaştırılmış profiller oyulma derinliklerinin maksimum oyulma derinliğiyle, x ve y ekseninin ise maksimum oyulma çukuru derinliklerinin görüldüğü noktalar olan x_{max} ve y_{max} değerleri ile bölünmesiyle elde edilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde köprü memba tabanında da oyulma meydana geldiği ve debi değerindeki artışla oyulma çukuru mansap şevinin yayvanlaştığı görülmüştür. Bu nedenle 120 lt/sn'lik debi durumunda oyulma çukuru mansap şevi diğer debi değerlerine göre daha yumuşak eğime sahip olmuştur. En küçük debi değeri olan 100 lt/sn'de ise akım tabliye mansabında sediment tanelerini taşıyamadığı için mansap

şevi diğer debi değerlerinde gözlemlenen şevlere kıyasla daha dik oluşmuştur. Enine doğrultudaki profilden de akımın tabliye ile ilk temas ettiği (y/y_{max}=0,58~0,93) bölgede daha fazla taban alçalması olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum köprü tabliyesi boyunca meydana gelen türbülanslı akım yapısı ve akımın tabliye ile etkileşimi sonucunda oluşan çevrintilerle açıklanabilir.

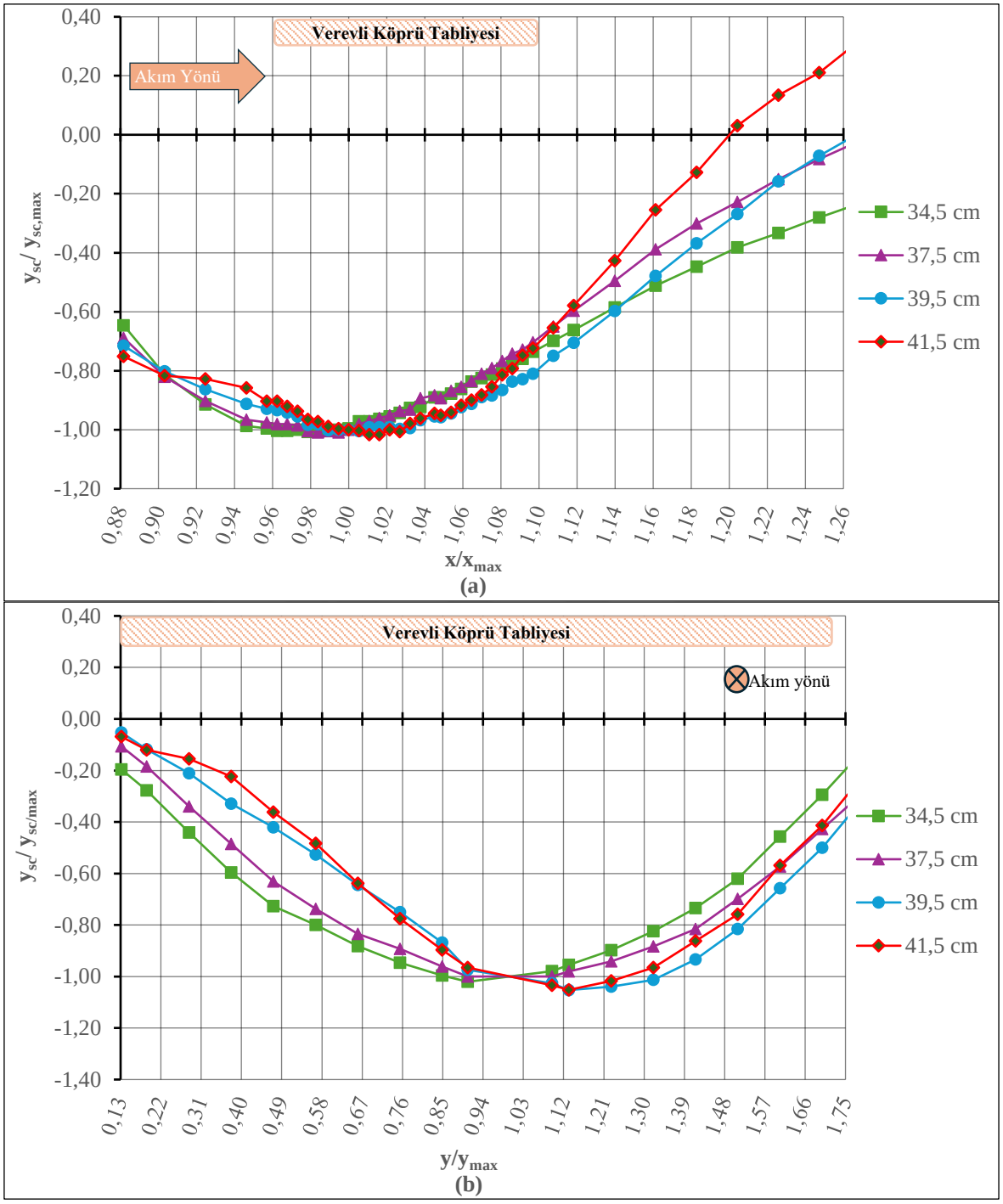


Şekil 4.4. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



Şekil 4.5. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

Şekil 4.6'da 120 lt/sn'lik debi değerinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyutsuzlaştırılmış profiller incelendiğinde tam basınçlı yani savak tipi akım durumunda en az oyulmaların gözlemlendiği ve akımın askıdaki sediment tanelerini taşıyamadığı için hemen tabliye sonrasında oluşan oyulma çukuru mansap şevinin dikleştiği görülmüştür.



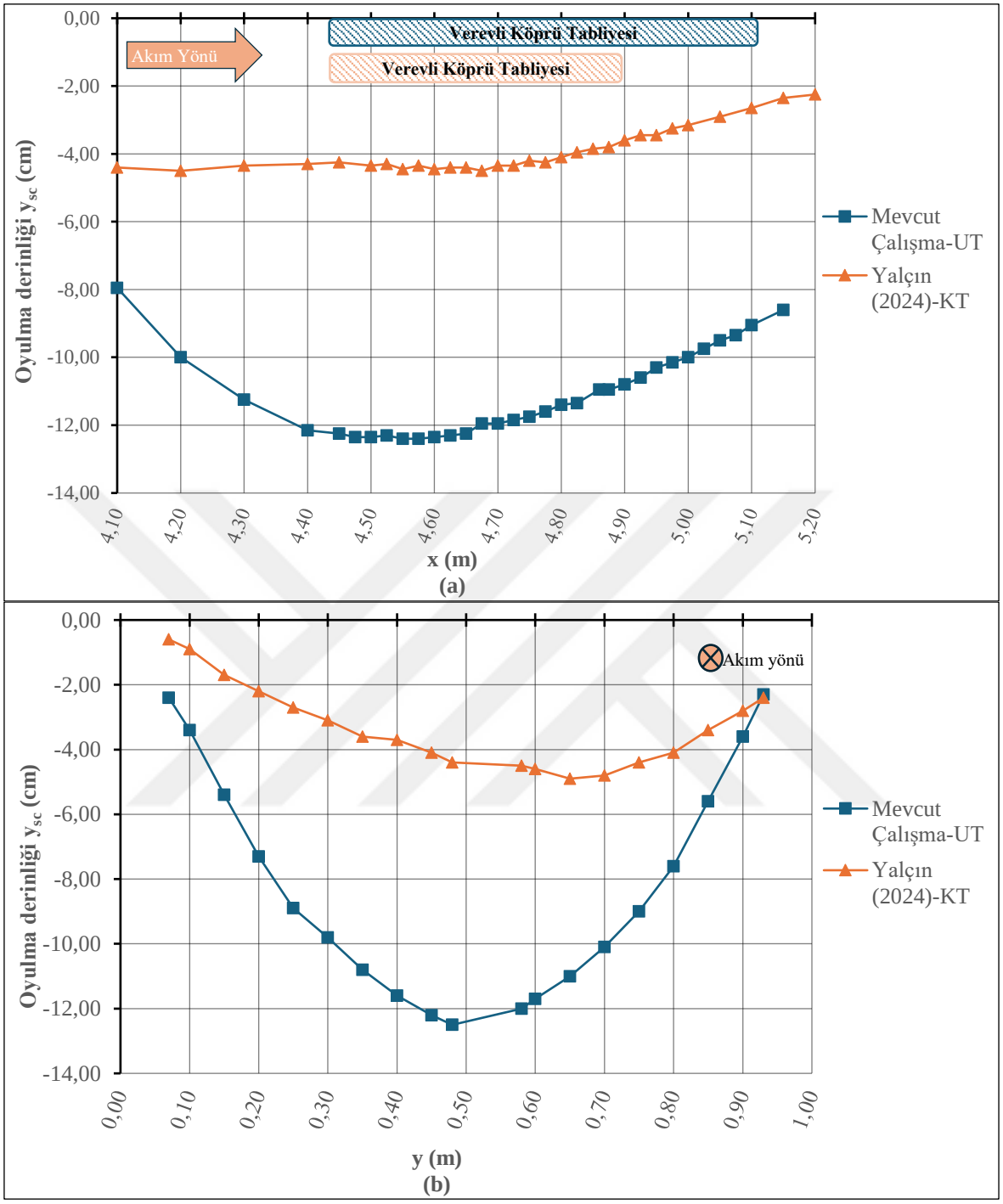
Şekil 4.6. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

Çizelge 4.1 ve verilen oyulma çukuru profilleri incelendiğinde sadece tabliyenin olması durumunda ölçülen en büyük oyulma çukuru derinliğinin 120 lt/sn için 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca debinin sabit tutulup yaklaşım akım derinliklerinin oyulma üzerindeki etkisinin incelendiği şekillere bakıldığında en düşük

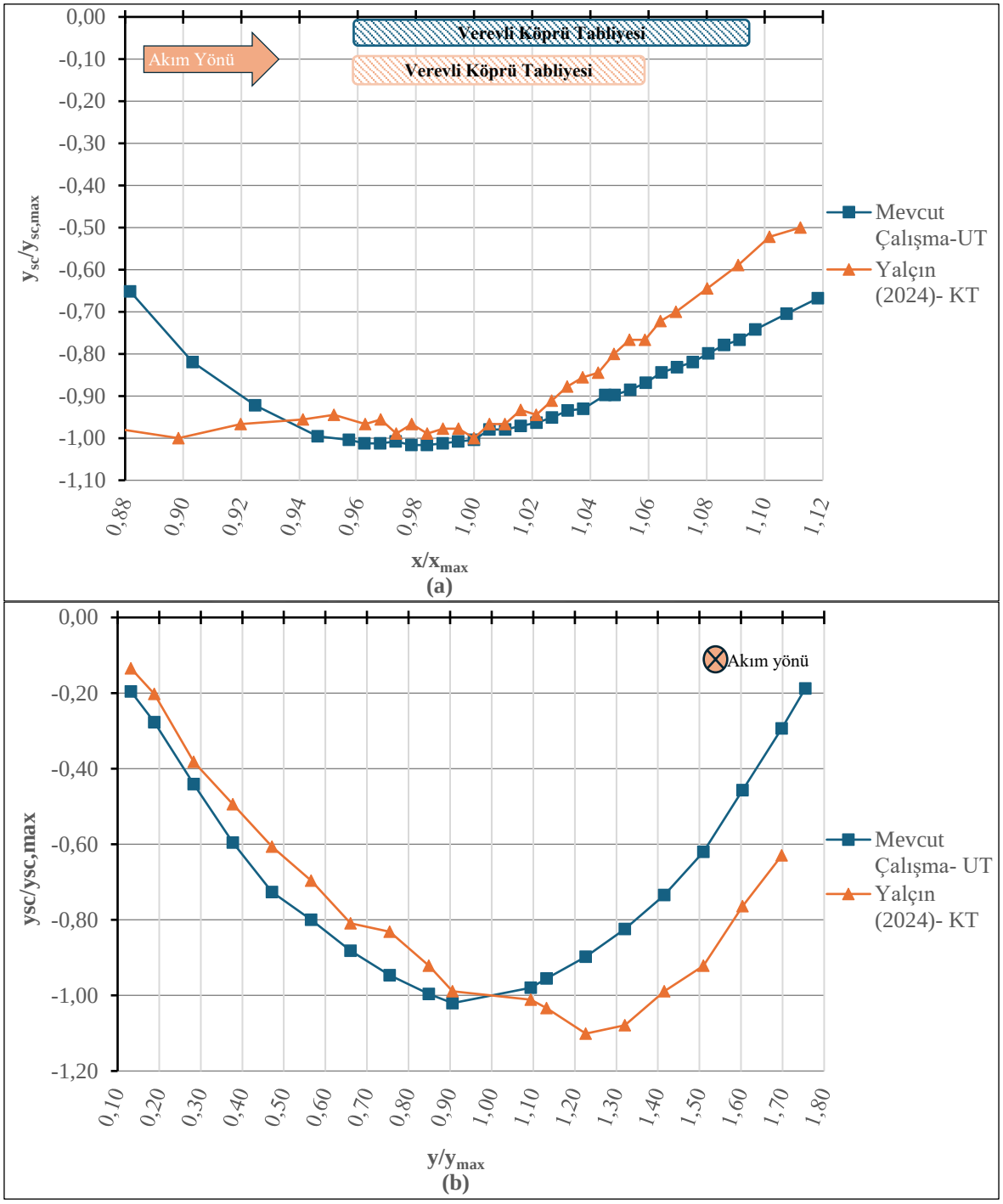
oyulmaların 41,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde meydana geldiği ve kısmi basınçlı akım halinde oluşan oyulmaların tam basınçlı (savak tipi) akımlarda meydana gelen oyulmalardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç savak tipi akım durumunda suyun bir bölümünün tabliye üzerinden savaklanarak tabliye altından geçen akımın tanelere uyguladığı azalan sürükleme gerilmesiyle açıklanmıştır.

Tabliye uzunluğunun oyulma üzerinde nasıl bir etkisinin olduğunu incelemek için Yalçın (2024)'a ait verevli tabliye kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilen daralma oyulması değerleriyle karşılaştırma yapılmıştır. Yalçın (2024) çalışmasında 15˚ verevlik açısı olan 30 cm uzunluğunda bir tabliye kullanmıştır. Mevcut çalışmadaki tabliye ise YDB orta ayak kullanılması nedeniyle 38 cm'dir. Dolayısıyla iki tabliye arasında %27'lik fark söz konusudur. Şekil 4.7'de 120 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliği için kısa ve uzun tabliye bulunması durumlarında meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Şekil 4.8'de ise bu profillerin boyutsuzlaştırılmış şekilleri verilmiştir. Şekillerdeki tabliye gösterimleri ölçeksiz olarak verilmiştir. Şekil 4.7'deki profiller incelendiğinde bu çalışmada tabliye boyunun uzun (UT) olması halinde meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin kısa tabliyeye (KT) (Yalçın, 2024) göre yaklaşık %200 daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca uzun tabliyenin bulunduğu durumda oluşan oyulma çukuru şevinin kısa tabliyeye göre daha dik oluştuğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.8'de verilen boyutsuzlaştırılmış boyuna ve enine profiller incelendiğinde tabliye uzunluğunun meydana gelen oyulma çukurunun genişliğini ve özellikle $y_{sc,max}$'ın konumunu etkilediğini göstermiştir. Uzun tabliye durumunda memba talveğinde daha fazla alçalma ve mansap şevinde ise dikleşme gözlemlenmiştir. Bu durumun akım yapısı ve çevrintilerde meydana gelen değişiklikler nedeniyle oluştuğu, köprü geometrik özelliklerinin çalışma kapsamındaki akım parametrelerini ne derece etkilediğini göstermiştir. Bu durum özellikle trafik yoğunluğundaki artış nedeniyle bir akarsu köprüsü mansabına hemen başka bir köprü yapılması durumunda hem mevcut hem de yeni yapılacak köprü ayaklarındaki oyulmanın basınçlı akım durumunda daha fazla etkilenebileceğini göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 4.7. 120 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde kısa ve uzun tabliye bulunması durumlarında meydana gelen boyuna ve enine doğrultularda oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



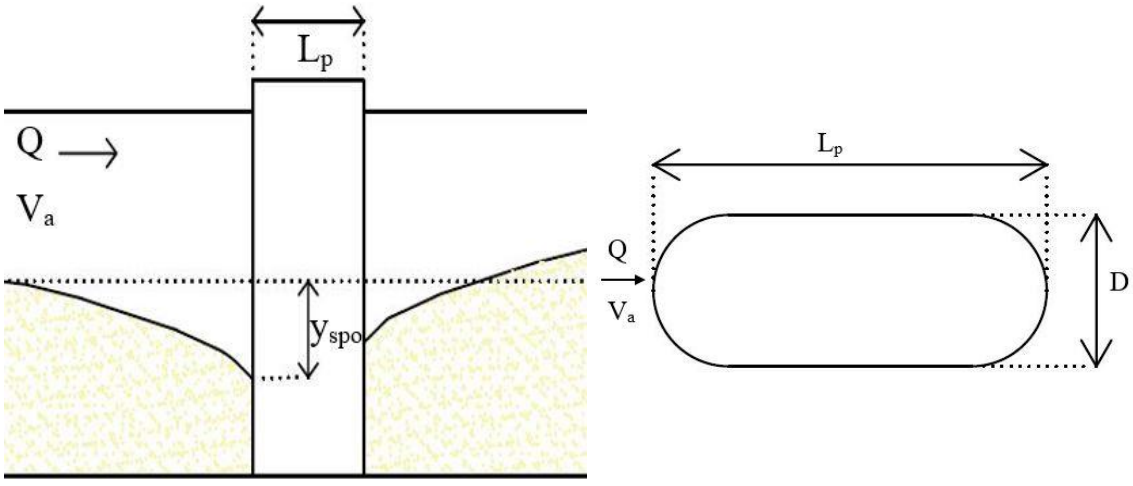
Şekil 4.8. 120 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliği için kısa ve uzun tabliye bulunması durumlarında meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

4.2.2. Serbest akım halinde orta ayak etrafında oluşan yerel oyulmalar

Kanala yerleştirilen YDB orta ayak etrafında meyana gelen (Resim 4.2) yerel oyulmaları incelemek için serbest akım halinde üç farklı debi ve dört farklı yaklaşım derinliği kullanılarak 12 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan orta ayak modeli özellikleri ve ilgili parametreler Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Resim 4.2. Serbest akım halinde meydana gelen yerel oyulmalar



Şekil 4.9. Yarım daire burunlu dikdötgen kesitli orta ayak modeli

Çizelge 4.2'de serbest akım halinde orta ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri $y_{spo,max}$ ve bu oyulmaların meydana geldiği konumlar verilmiştir. Ayrıca

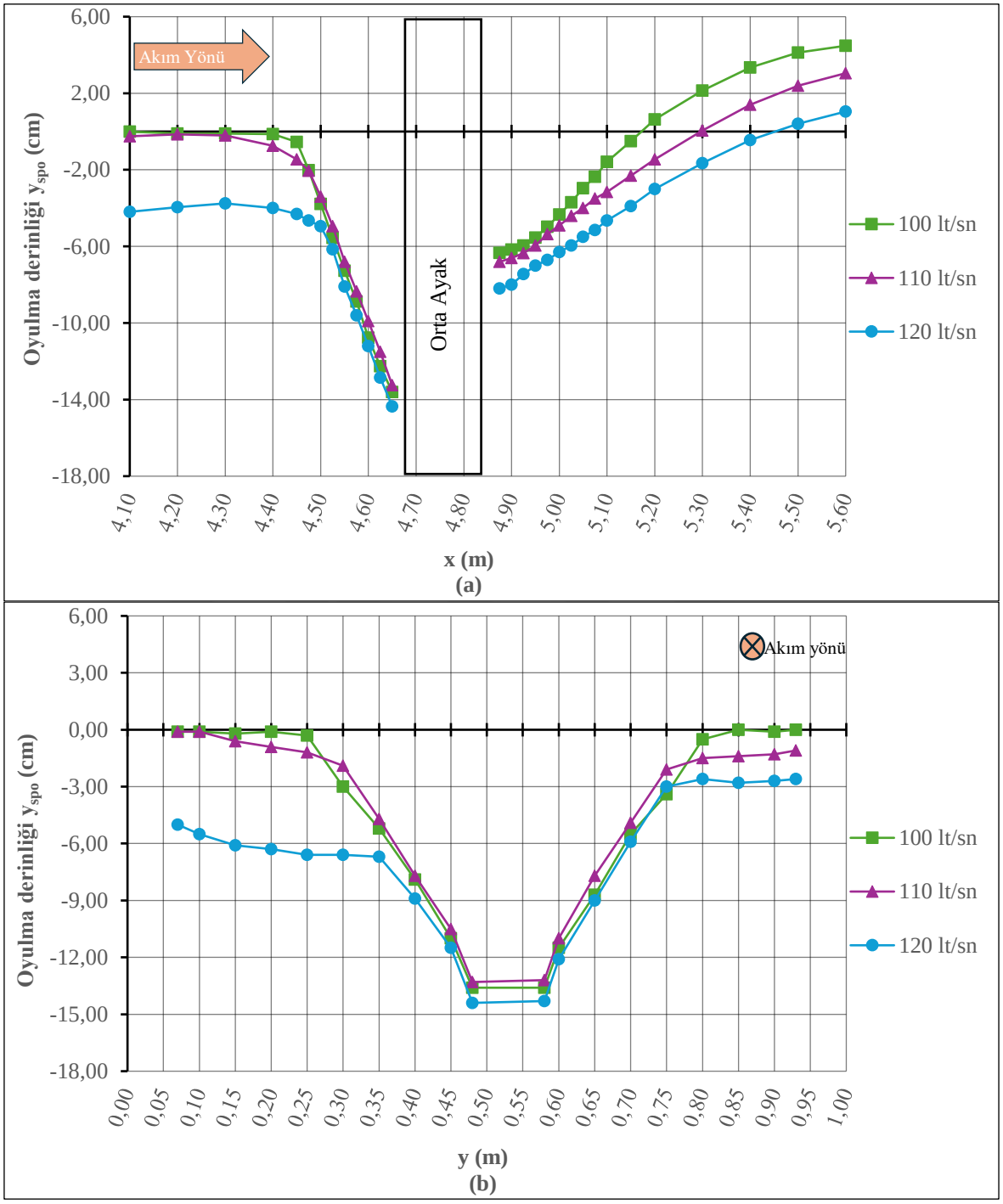
hem tabliye hem de orta ayağın birlikte bulunduğu basınçlı akım oyulması halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri $y_{spp,max}$'ın oluştuğu konumdaki yerel oyulmalar olan y_{spo} değerleri de Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Serbest akım halinde meydana gelen yerel oyulmalar ve konumları

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a (-)	Sadece YDB orta ayak durumunda yerel oyulmalara ait değerler			Basınçlı akım durumunda $y_{spp,max}$ konumundaki y_{spo} değerleri		
			$y_{spo,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	y_{spo} (cm)	x (m)	y (m)
100	34,5	0,158	13,6	4,650	0,50	13,6	4,650	0,50
	37,5	0,139	10,8	4,650	0,55	10,1	4,675	0,50
	39,5	0,129	10,6	4,650	0,55	10,6	4,650	0,55
	41,5	0,119	7,4	4,650	0,55	7,4	4,650	0,55
110	34,5	0,173	13,3	4,650	0,50	13,2	4,650	0,55
	37,5	0,153	15,0	4,650	0,55	14,7	4,650	0,50
	39,5	0,141	14,3	4,650	0,55	14,0	4,675	0,50
	41,5	0,131	12,7	4,650	0,55	12,4	4,675	0,50
120	34,5	0,189	14,4	4,650	0,50	14,4	4,650	0,50
	37,5	0,167	16,6	4,650	0,55	15,9	4,650	0,50
	39,5	0,154	13,8	4,675	0,55	13,5	4,675	0,50
	41,5	0,143	15,0	4,650	0,55	15,0	4,650	0,55

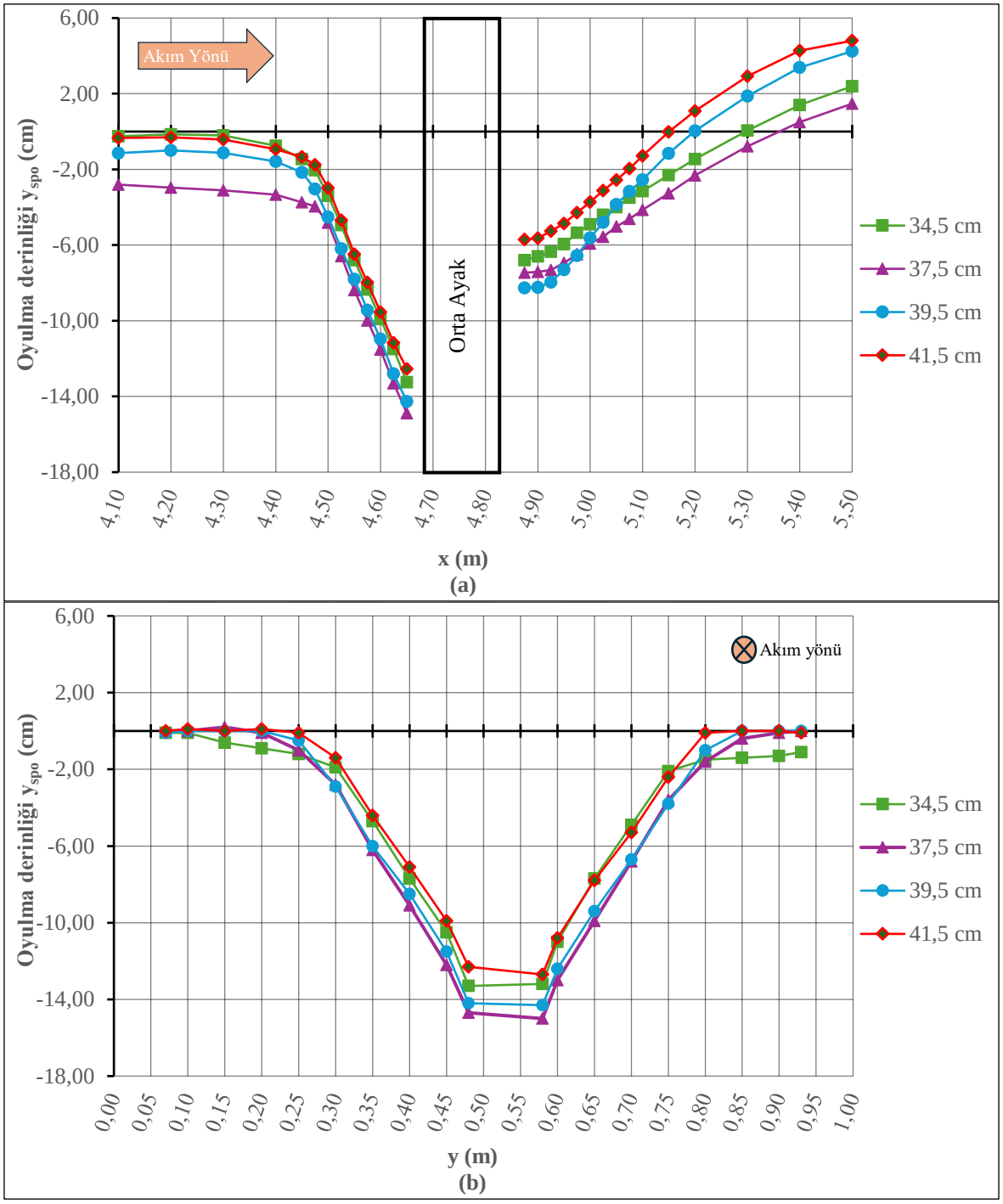
Çizelge 4.2 incelendiğinde en büyük maksimum oyulma çukuru derinliğinin 120 lt/sn debisi ve 37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca 100 lt/sn debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin artması oyulma derinliklerinde azalmaya sebep olmuş ancak diğer debi değerlerinde böyle bir değişim gözlenmemiştir.

Oyulma çukuru derinliklerinin debi değerine göre değişimini gösteren oyulma çukuru boyuna ve enine doğrultudaki profilleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu profiller incelendiğinde y_a=34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde debi değerinin artmasına bağlı olarak oyulma çukuru derinliklerinde artış gözlenmiştir. Boyuna profil incelendiğinde membada en büyük oyulma derinliğinin 120 lt/sn'de oluştuğu, orta ayağın mansabında ise en yayvan eğimin yine bu debi değerinde meydana geldiği görülmüştür.



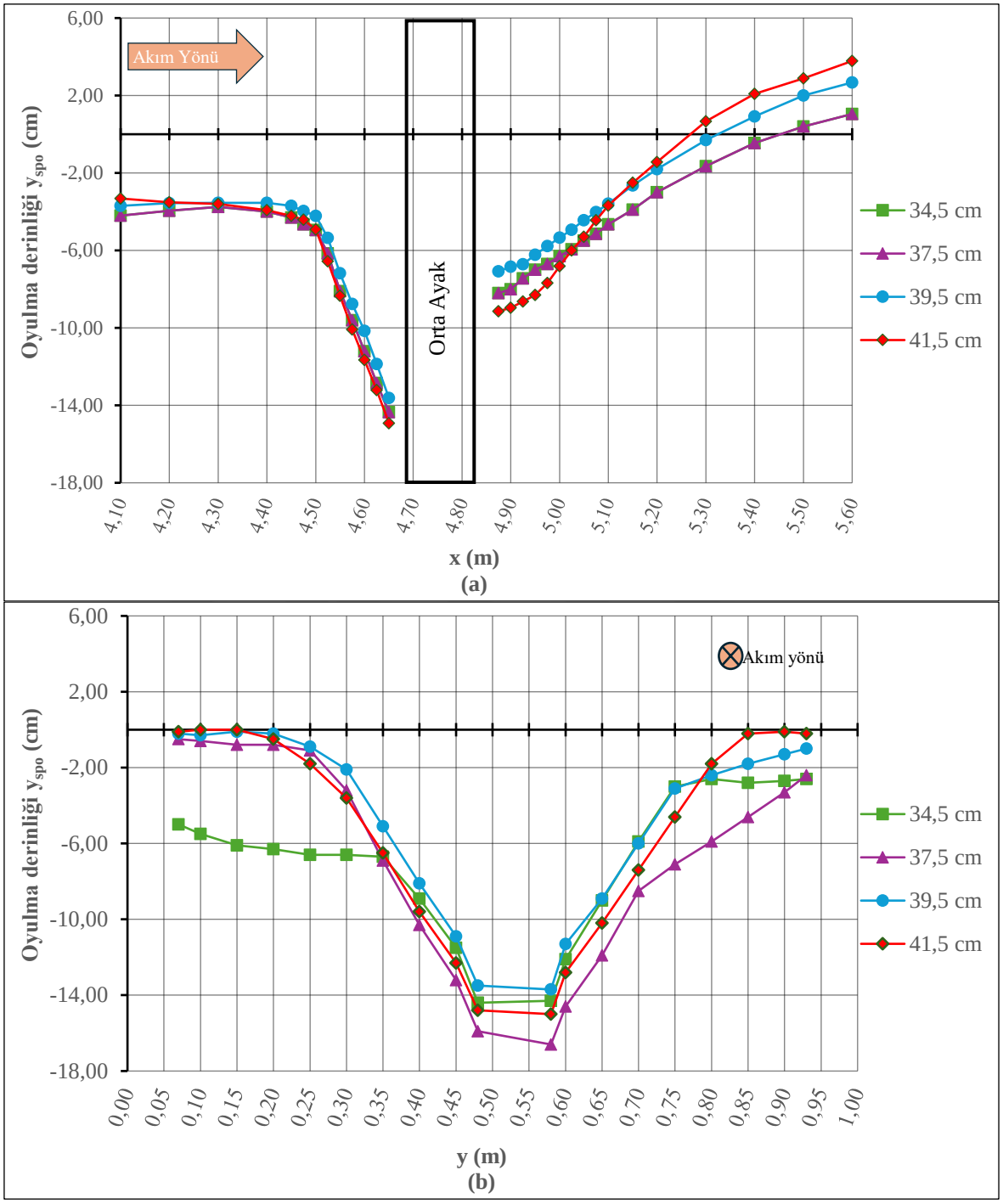
Şekil 4.10. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil

En büyük oyulma derinliklerinin görüldüğü 110 lt/sn ve 120 lt/sn debi değerlerine ait oyulma çukuru profilleri farklı yaklaşım akım derinliklerine karşı boyuna ve enine doğrultuda sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. 110 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x= 4,650 m'de enine profil

Şekil 4.11'de verilen 110 lt/sn'lik debi için farklı akım derinliklerine bağlı oluşan oyulma çukurlarındaki değişim incelendiğinde 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin en fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca bu akım derinliğinde oluşan oyulmalar memba tarafında kanal başlangıcında da etkisini daha fazla göstermiştir.

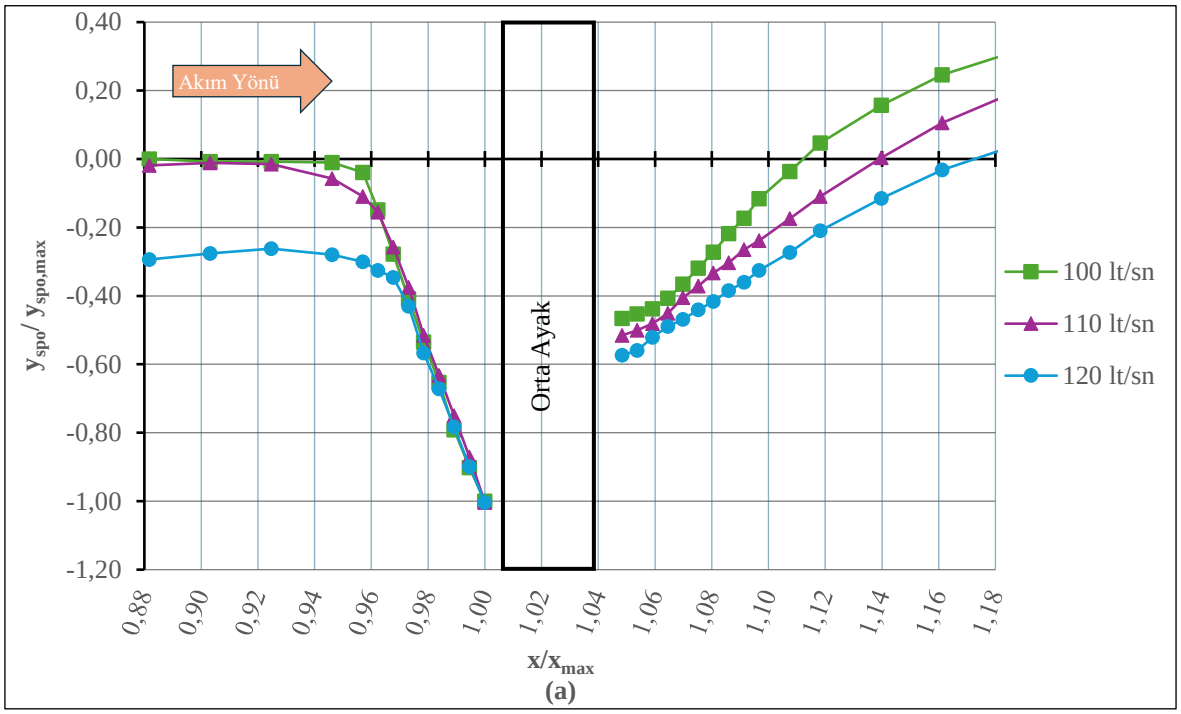


Şekil 4.12. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,530 m'de boyuna profil, (b) x= 4,650 m'de enine profil

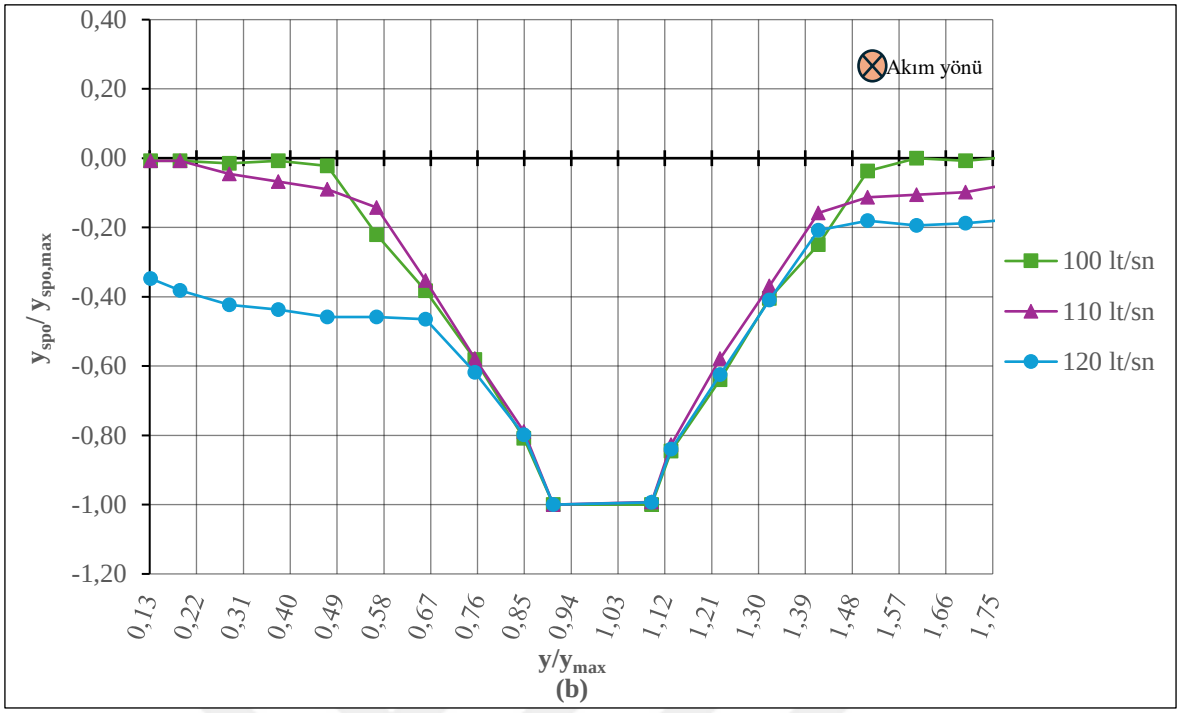
Şekil 4.12 (a)'da 120 lt/sn'lik debide oluşan maksimum oyulma çukuru memba şev değerlerinin birbirine yakın olduğu ancak ayağın mansabında beklendiği üzere artan y_a değeri ile oyulma derinliğinin azaldığı görülmüştür. Şekil 4.12 (b)'de enine doğrultuda

verilen oyulma çukuru profilleri incelendiğinde maksimum oyulmaların ayağın hemen önünde gerçekleştiği belirgin bir şekilde görülmüştür.

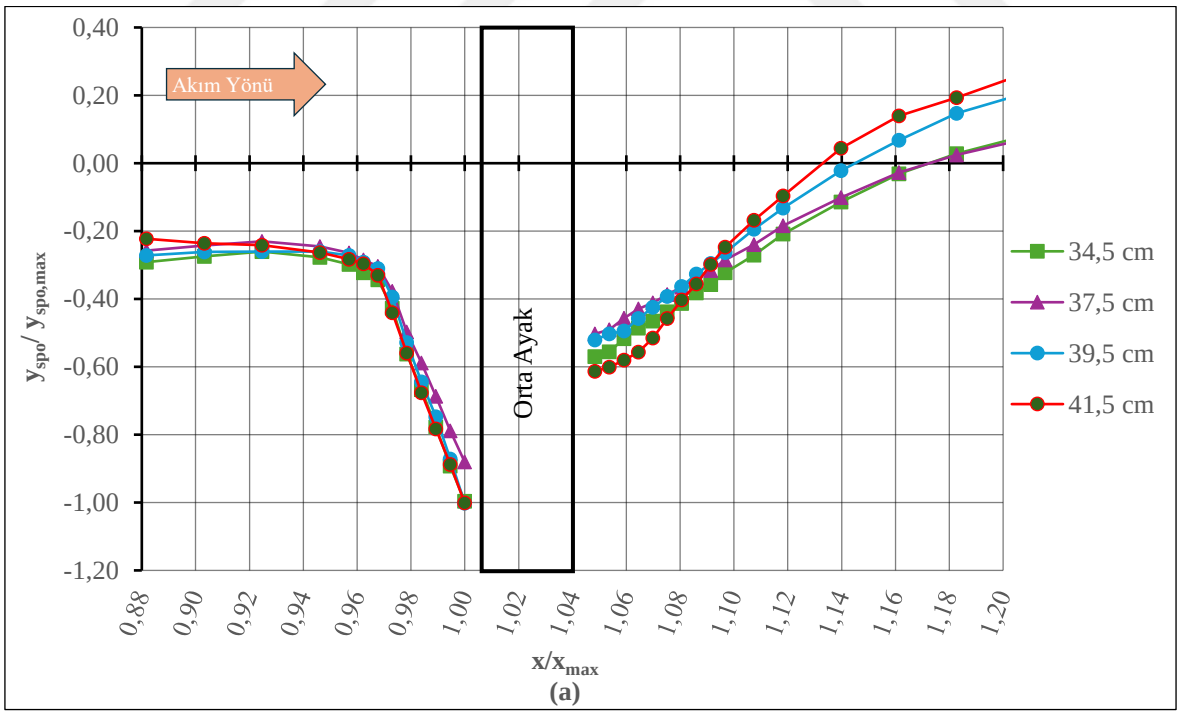
Şekil 4.13'te 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerleri ve Şekil 4.14'te 120 lt/sn debi değerinde farklı yaklaşım akım derinlikleri için boyuna ve enine doğrultuda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Boyutsuzlaştırılmış boyuna ve enine profillerde en büyük oyulma derinliği 120 lt/sn'de özellikle orta ayağın membaında meydana gelmiştir.



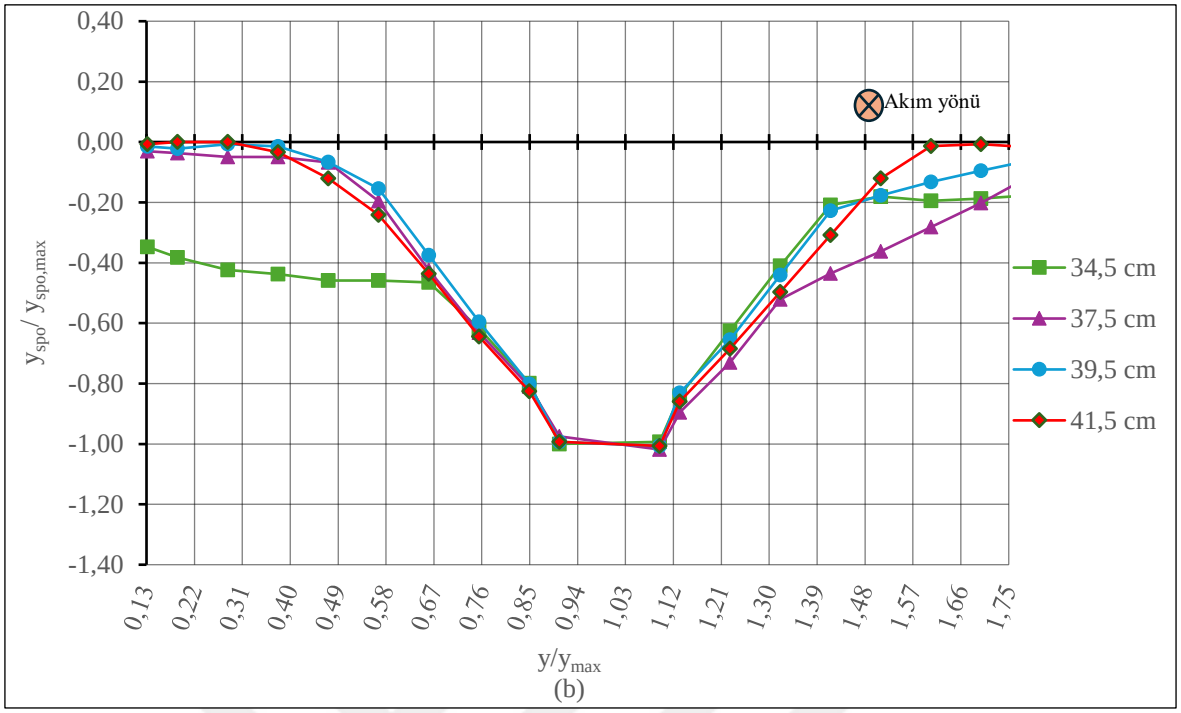
Şekil 4.13. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



Şekil 4.13. (devam) 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



Şekil 4.14. 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil

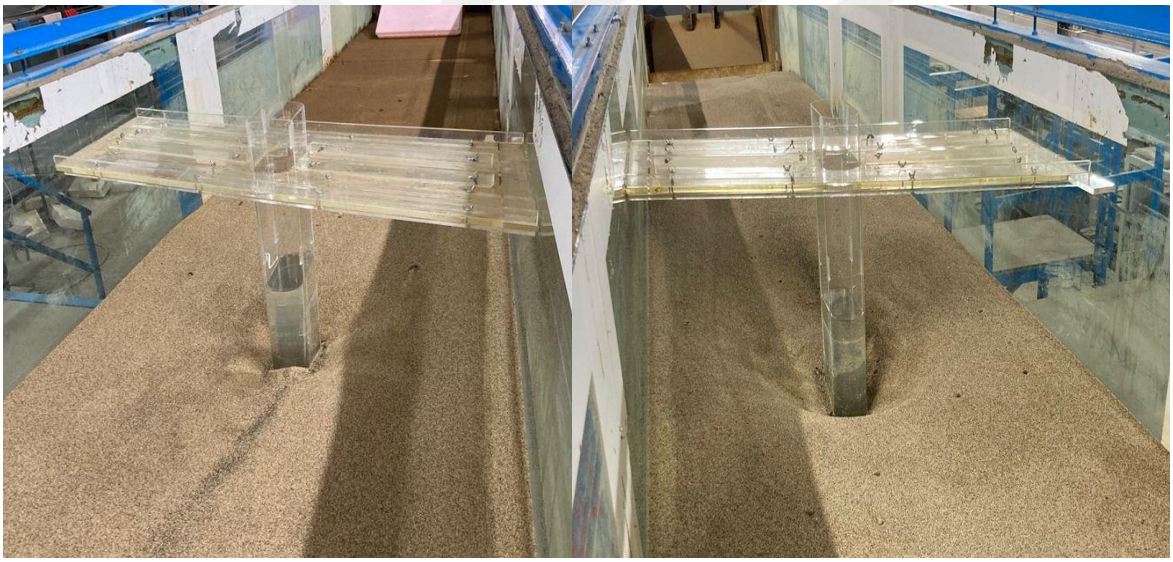


Şekil 4.14. (devam) 120 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna, (b) x= 4,650 m'de enine

Yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli orta ayak etrafında meydana gelen yerel oyulmaların değerlendirildiği bu kısımda Çizelge 4.2 ve verilen oyulma profilleri incelendiğinde 100 lt/sn debi değerinde küçülen yaklaşım akım derinliği ile oyulmalarda artış gözlemlendiği, 110 lt/sn ve 120 lt/sn debi değerlerinde ise aynı durumun oluşmadığı gözlemlenmiştir. 110 lt/sn'lik debide 34,5 cm ile 37,5 cm'lik akım durumunda artan yaklaşım akım derinliği sonucunda oyulmalarda artış meydana gelmişken 39,5 cm ile 41,5 cm'lik akım durumunda yaklaşım akım derinliğinin artması halinde oyulmalarda azalma gözlemlenmiştir. 120 lt/sn'lik debide ise her dört y_a değerinde yaklaşım akım derinliğinin artması durumunda oyulmaların da arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin 120 lt/sn için 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği 14,4 cm olurken 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oyulma miktarının 16,6 cm olduğu görülmüştür. Benzer şekilde 39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinin 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinden daha küçük olduğu belirlenmiştir. Tüm yerel oyulma deneylerinde maksimum oyulma çukuru derinliği orta ayağın hemen önünde ayak ekseninde meydana gelmiştir. Bu da literatürde serbest akım durumunda meydana gelen yerel oyulmada gözlemlenen durumdur.

4.2.3. Tabliye ve orta ayağın birlikte olduğu durumda basınçlı akım oyulması

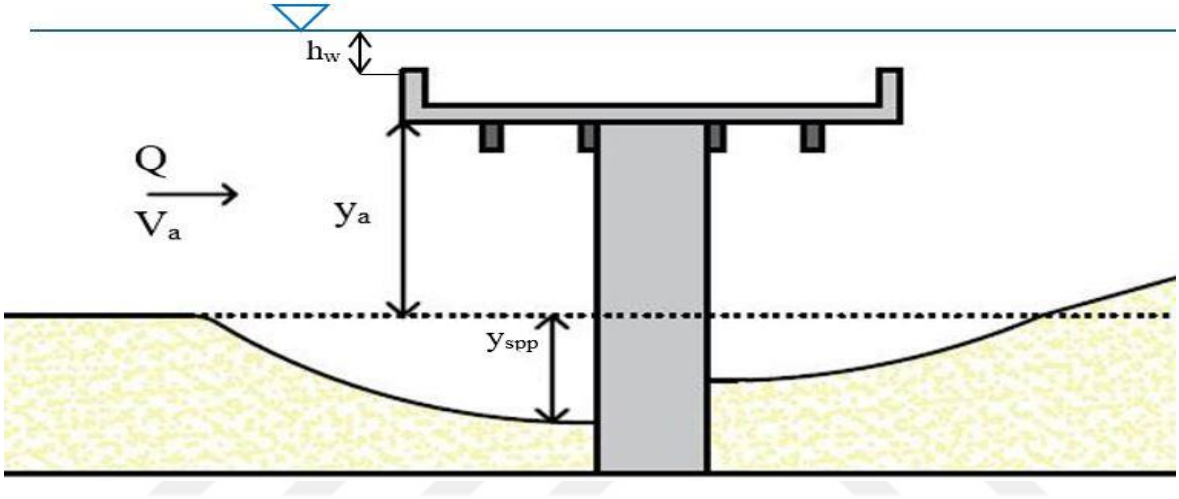
Çalışmanın bu bölümünde YDB orta ayağı olan 15° verevlik açısına sahip köprü tabliye modelinin kanala yerleştirilmesi ile temiz su oyulması durumunda kısmi basınçlı ve savak tipi akımlar için düşey daralma oyulması ve yerel oyulmanın birlikte gerçekleştiği basınçlı akım oyulması şekli ve derinliği incelenmiştir. Gerçekleştirilen 12 farklı deneyde daha önceki deney gruplarında olduğu gibi üç farklı debi ve dört farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır. Resim 4.3'te kanala yerleştirilen orta ayak ve verevli köprü tabliyesi ile meydana gelen oyulmaların memba ve mansap tarafından görünüşleri verilmiştir. Şekil 4.15'te deneylerde kullanılan orta ayak ve köprü tabliye modeli ile ilgili parametreler gösterilmiştir.



Resim 4.3. YDB orta ayak ve verevli tabliye bulunması durumunda meydana gelen basınçlı taban oyulması

Çizelge 4.3'te tabliye ve YDB orta ayağın birlikte bulunduğu durumda basınçlı akım halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği $y_{spp,max}$ değerleri ile bu oyulmaların oluştuğu konumlar verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilen $y_{spp,max}$ değerinin meydana geldiği konumdaki daralma oyulması değeri olan y_{sc} ile yerel oyulma değeri olan y_{spo} değerleri de verilmiştir. Çizelge 4.3 incelendiğinde tabliye ve orta ayağın birlikte bulunduğu durumda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği $y_{spp,max}$'ın ayağın hemen önünde memba tarafında oluştuğu görülmüştür. Yalnızca 120 lt/sn'lik debide meydana gelen oyulmalarda artan yaklaşım akım derinliğiyle oyulmalarda azalma görülmüştür. 100 lt/sn ve 110 lt/sn'lik debilerde ise kısmi basınçlı akım halinde artan

yaklaşım akım derinliği oyulmalarda artışa sebep olurken tam basınçlı yani savak tipi akımda artan yaklaşım akım derinliğiyle oyulma çukuru derinliği azalmıştır. Bu sonuçlar Yalçın (2024)'a ait çalışma ile kıyaslandığında 120 lt/sn'lik debi değerinde YDB orta ayak bulunması halinde yaklaşım akım derinliğinin artmasına bağlı olarak maksimum oyulma çukuru derinliklerinde azalma gerçekleştiği ancak silindirik orta ayak bulunması halinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliklerinde de artış olduğu belirlenmiştir.

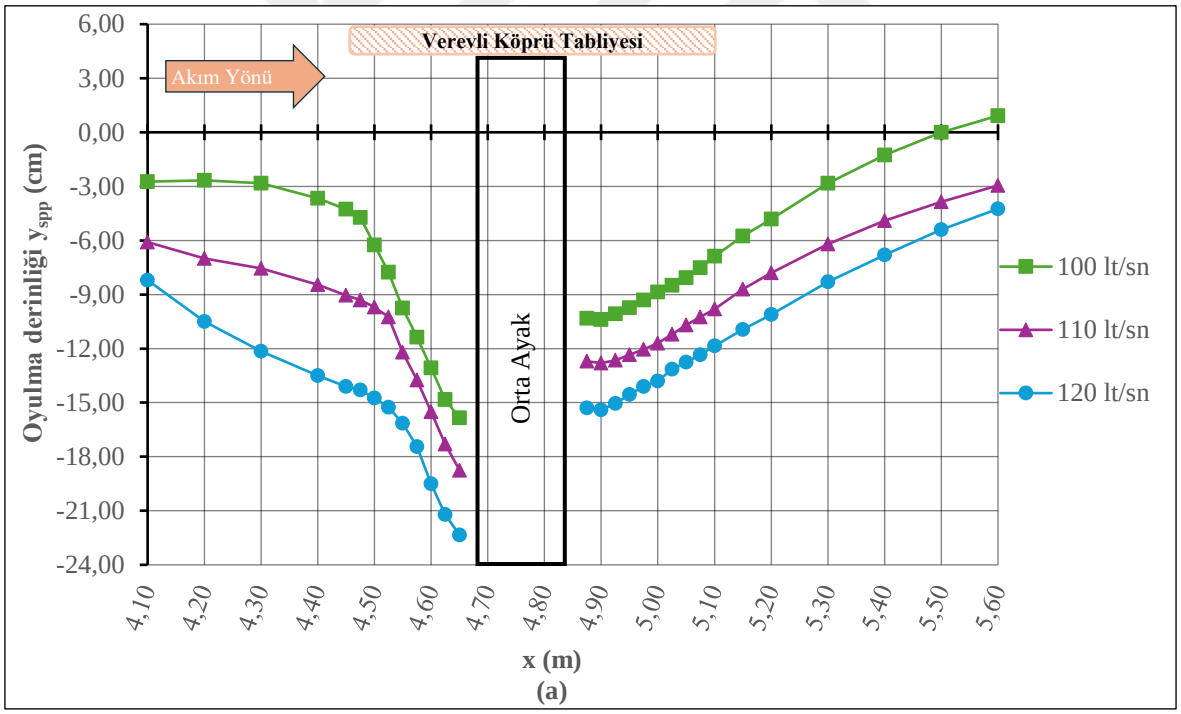


Şekil 4.15. Deneylerde kullanılan tabliye ve orta ayak modeli

Çizelge 4.3. Basınçlı akım halinde maksimum oyulma çukuru derinlikleri

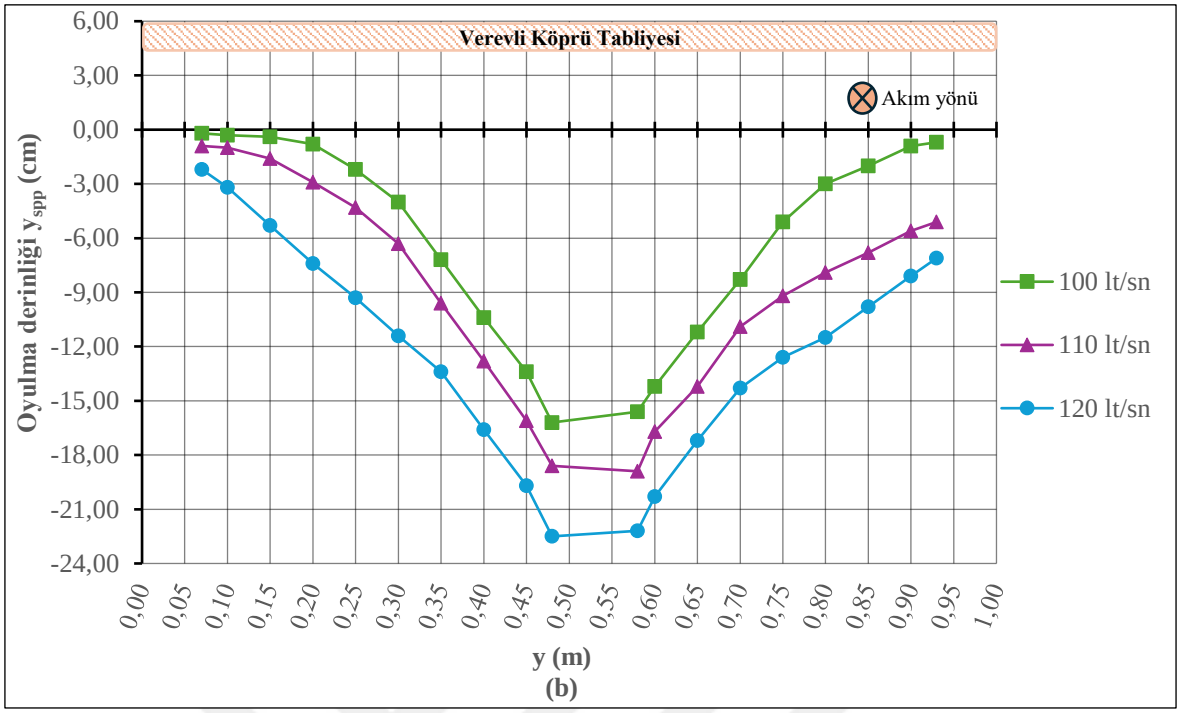
Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a (-)	Basınçlı akım halinde $y_{spp,max}$ değerleri			$y_{spp,max}$ konumundaki y_{spo} değeri	$y_{spp,max}$ konumundaki y_{sc} değeri
			$y_{spp,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	y_{spo} (cm)	y_{sc} (cm)
100	34,5	0,158	16,2	4,650	0,50	13,6	4,2
	37,5	0,139	18,3	4,675	0,50	10,1	3,2
	39,5	0,129	18,6	4,650	0,55	10,6	2,4
	41,5	0,119	17,6	4,650	0,55	7,4	1,7
110	34,5	0,173	18,9	4,650	0,55	13,2	8,9
	37,5	0,153	19,1	4,650	0,50	14,7	8,1
	39,5	0,141	18,8	4,675	0,50	14,0	5,6
	41,5	0,131	18,3	4,675	0,50	12,4	2,8
120	34,5	0,189	22,5	4,650	0,50	14,4	12,5
	37,5	0,167	19,2	4,650	0,50	15,9	10,3
	39,5	0,154	19,0	4,675	0,50	13,5	7,1
	41,5	0,143	18,7	4,650	0,55	15,0	6,0

Şekil 4.16'da oyulma çukuru derinliğinin debiye bağlı değişimini inceleyebilmek için 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri boyuna ve enine doğrultularda farklı debi değerleri için verilmiştir. Oyulma çukuru profillerinden görüldüğü üzere debi değerinin artmasıyla oyulma derinlikleri de artmıştır. 120 lt/sn'lik debide meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği 110 lt/sn'lik debide meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine göre %19, 100 lt/sn'lik debide meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine göre ise %33 oranında artmıştır. 110 ve 100 lt/sn'lik debilerde ise bu fark %17 oranında gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra özellikle memba talveğinde debi değerindeki artışla beraber alçalma olduğu, mansapta da daha yayvan, şev eğimi küçük oyulma çukuru oluştuğu görülmüştür. Aynı şekilde enine doğrultudaki profiller incelendiğinde de maksimum oyulma çukuru derinliklerinde, en büyük oyulmaların görüldüğü 120 lt/sn'lik debide en küçük oyulmaların görüldüğü 100 lt/sn'lik debiye göre %40'a varan artışlar olduğu belirlenmiştir.



(a)

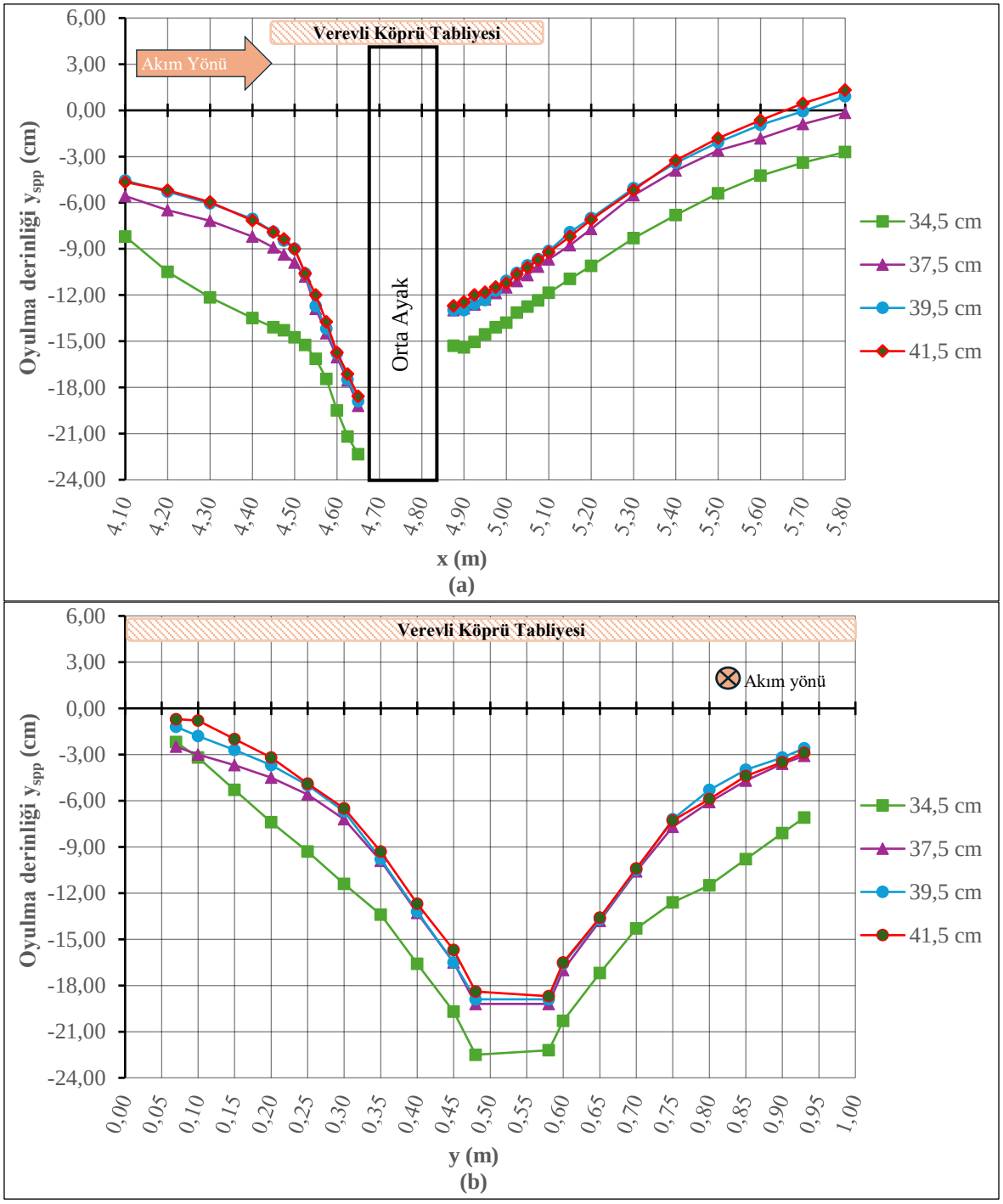
Şekil 4.16. Basınçlı akım halinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



(b)

Şekil 4.16. (devam) Basınçlı akım halinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650'de enine profil

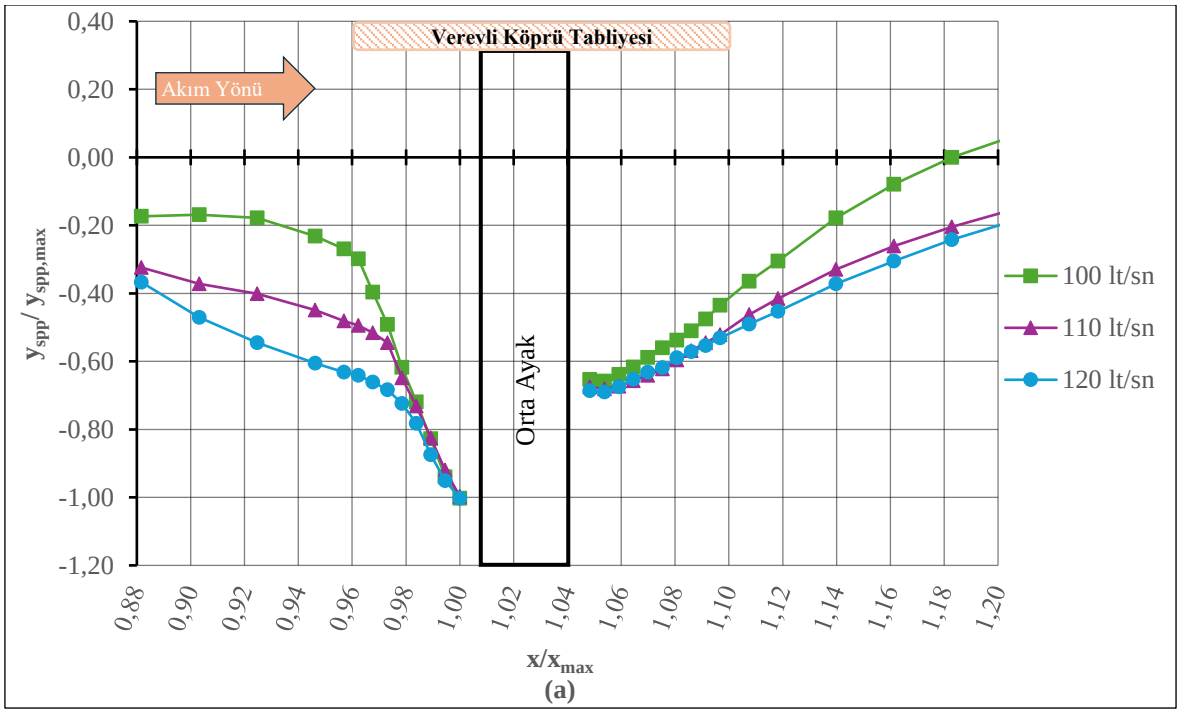
Şekil 4.17'de oyulma çukuru derinliğinin yaklaşım akım derinliğine bağlı değişimini inceleyebilmek için 120 lt/sn'lik debi değerinde farklı yaklaşım akım derinliklerine göre oyulma çukuru profilleri boyuna ve enine doğrultularda verilmiştir. En fazla oyulmanın gözlemlendiği 120 lt/sn'lik debide farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri incelendiğinde en çok oyulmanın en küçük yaklaşım akım derinliğinde oluştuğu görülmüştür. En küçük yaklaşım akım derinliği olan 34,5 cm'de meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin en büyük yaklaşım akım derinliği olan 41,5 cm'de meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine göre %20 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar tabliye altında oluşan akım alanı büyüklüğünün arttıkça oluşan çevrinti ve türbülans yapısının da daha güçlü olduğunu ve dolayısıyla meydana gelen oyulmanın daha derin ve oyulma çukurunun da daha yayvan olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar sadece tabliye ve sadece ayak olması durumunda meydana gelen oyulma çukuru sonuçlarıyla karşılaştırıldığında sadece tabliye olan durumda oluşan daralma oyulması derinlikleri yaklaşım akım derinliği küçüldükçe artış göstermiş ancak sadece ayağın olduğu durumda oluşan yerel oyulma derinlikleri yalnızca 100 lt/sn'lik debide yaklaşım akım derinliğinin küçülmesiyle artış göstermiştir.



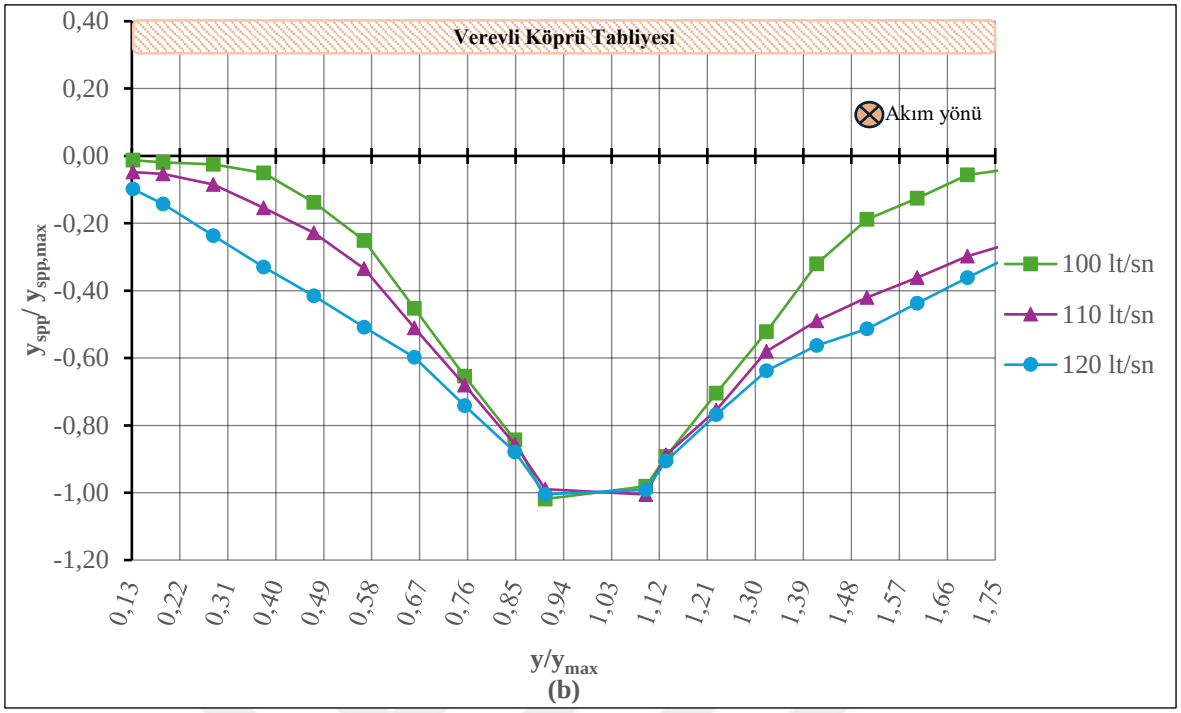
Şekil 4.17. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650'de enine profil

Şekil 4.18'de 34,5 cm için farklı debi değerlerinde oluşan oyulma çukuru profilleri boyuna ve enine doğrultularda, Şekil 4.19'da ise 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde oluşan oyulma çukuru profilleri boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış olarak verilmiştir. Şekil 4.18'de verilen profillerde debi değerinin arttığı durumda memba tarafında

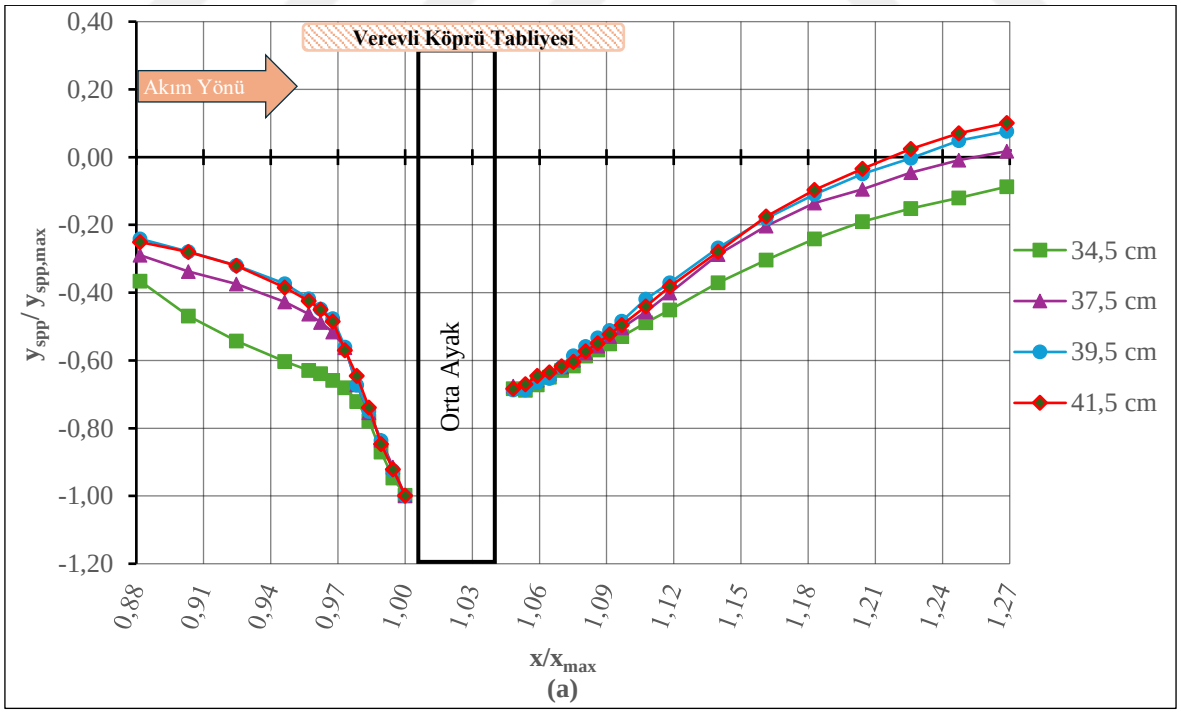
oluşan oyulma çukuru şevi daha yayvan oluşurken küçük debilerde daha dik eğimli bir şevin oluştuğu görülmüştür. Mansap tarafında ise birbirine benzer oyulma şekli ve şevi oluştuğu görülmüştür. 120 lt/sn'lik debide farklı yaklaşım akım derinliğine bağlı olarak boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilinin verildiği Şekil 4.19'da en büyük oyulmaların oluştuğu 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde daha yayvan bir oyulma çukuru şekli oluşurken diğer yaklaşım akım derinliklerinde birbirine benzer oyulma çukurları ve şev açıları görülmüştür. Debi değeri arttıkça özellikle tabliye membaında taban alçalması gözlemlenmiştir. Mansapta ise bu fark özellikle tabliye sonrası akımın artık sedimenti taşıyamaması nedeniyle meydana gelen birikmelerle oluştuğu düşünülmüştür.



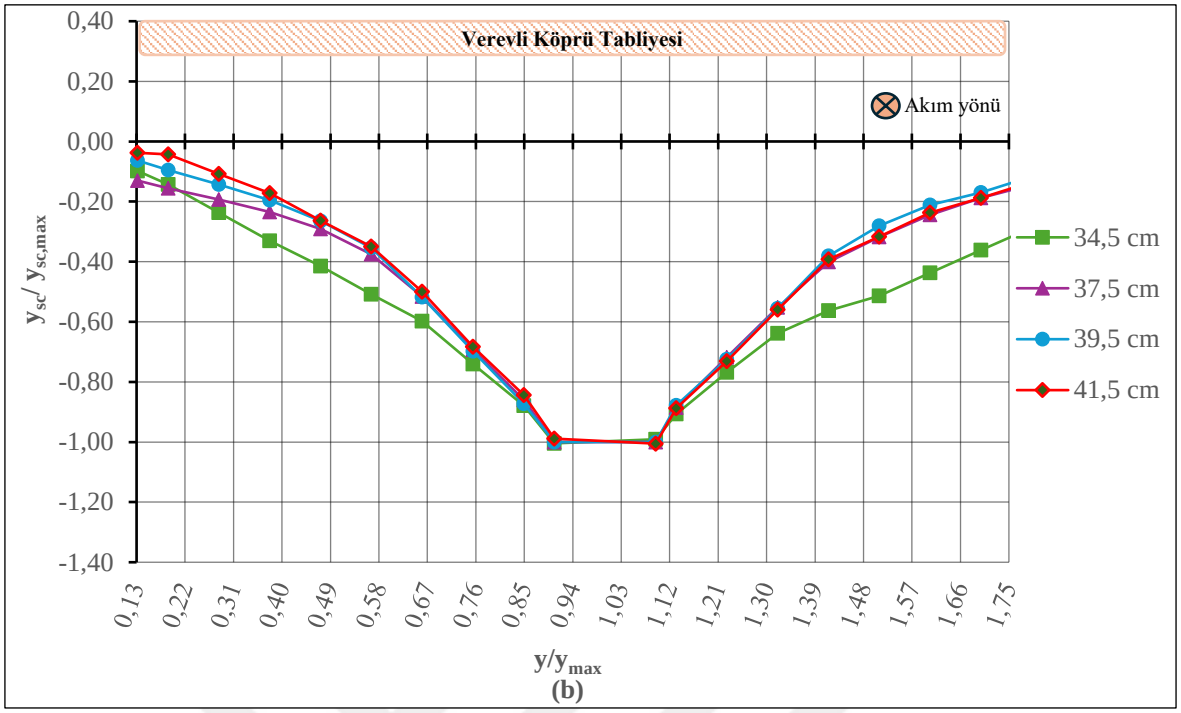
Şekil 4.18. Basınçlı akım halinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



Şekil 4.18. (devam) Basınçlı akım halinde 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde farklı debi değerlerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



Şekil 4.19. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



Şekil 4.19. (devam) Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil

HEC-18 (FHWA Resource Center Hydraulics, 2012) ve BD 97/12 (United Kingdom National Highways, 2012) gibi yönetmeliklerde uygulanan yaklaşıma göre daralma ve yerel oyulma derinlikleri ayrı ayrı hesaplanıp toplanmakta ve böylece basınçlı akım durumunda meydana gelebilecek toplam oyulma derinliği belirlenmektedir (Yalçın, 2024). Bu yaklaşımın doğruluğunun veya geçerliliğinin tahkiki için literatürde yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu kıyaslama bahsi geçen yaklaşımın doğruluğunu incelemek için gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada aynı akım şartlarında, farklı köprü özelliklerinde (sadece tabliye, sadece ayak ve tabliye ile ayak beraber) gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.4'te özet olarak bulunan sonuçlar maksimum oyulma çukuru derinliğinin gözlemlendiği, $y_{spp,max}$ konumundaki ayağın hemen memba eksen noktası için verilmiştir. Sadece daralma oyulmasına ait maksimum oyulma çukuru derinliği farklı noktalarda meydana gelmiştir. Bu nedenle daralma oyulması değeri için de ayağın membaındaki eksen noktası alınmıştır. Çizelge 4.5'te ise maksimum daralma oyulması derinlikleri $y_{sc,max}$, maksimum yerel oyulma derinlikleri $y_{spo,max}$ ile bu değerlerin toplamları toplam basınçlı oyulma (TBO) değerleri ve ölçülen maksimum basınçlı oyulma derinlikleri $y_{spp,max}$ değerleri verilmiştir. İki farklı durum için bu yaklaşım incelenerek aradaki farklar değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.4. $y_{spp,max}$ konumundaki daralma oyulması, yerel oyulma, basınçlı oyulma ve toplam basınçlı oyulma değerleri

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a (-)	y_{sc} (cm)	y_{spo} (cm)	Toplam Basınçlı Oyulma (TBO)	y_{spp} (cm)	y_{spp} ile $y_{spo}+y_{sc}$ arasındaki fark
100	34,5	0,158	4,2	13,6	17,8	16,2	-10
	37,5	0,139	3,2	10,1	13,3	18,3	27
	39,5	0,129	2,4	10,6	13,0	18,6	30
	41,5	0,119	1,7	7,4	9,1	17,6	48
110	34,5	0,173	8,9	13,2	22,1	18,9	-17
	37,5	0,153	8,1	14,7	22,8	19,1	-19
	39,5	0,141	5,6	14,0	19,6	18,8	-4
	41,5	0,131	2,8	12,4	15,2	18,3	17
120	34,5	0,189	12,5	14,4	26,9	22,5	-20
	37,5	0,167	10,3	15,9	26,2	19,2	-36
	39,5	0,154	7,1	13,5	20,6	19,0	-8
	41,5	0,143	6,0	15,0	21,0	18,7	-12

Çizelge 4.5. Daralma oyulması, yerel oyulma, basınçlı oyulma ve toplam basınçlı oyulma değerleri

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_a (-)	y_{sc} (cm)	y_{spo} (cm)	Toplam Basınçlı Oyulma (TBO)	y_{spp} (cm)	y_{spp} ile $y_{spo}+y_{sc}$ arasındaki fark
100	34,5	0,158	4,4	13,6	18	16,2	-11
	37,5	0,139	3,7	10,8	14,5	18,3	21
	39,5	0,129	3,1	10,6	13,7	18,6	26
	41,5	0,119	2,3	7,4	9,7	17,6	45
110	34,5	0,173	8,9	13,3	22,2	18,9	-17
	37,5	0,153	8,6	15	23,6	19,1	-24
	39,5	0,141	6,1	14,3	20,4	18,8	-9
	41,5	0,131	3,2	12,7	15,9	18,3	13
120	34,5	0,189	12,5	14,4	26,9	22,5	-20
	37,5	0,167	10,5	16,6	27,1	19,2	-41
	39,5	0,154	8	13,8	21,8	19	-15
	41,5	0,143	6,1	15	21,1	18,7	-13

Çizelge 4.4'te verilen sadece YDB orta ayak bulunması halinde meydana gelen yerel oyulma derinlikleri y_{spo} ve sadece tabliye bulunması halinde meydana gelen daralma oyulması derinlikleri y_{sc} toplanarak toplam basınçlı oyulma (TBO) çukuru derinliği elde edilmiştir. Ayrıca çizelgede her iki durumun birlikte gerçekleştiği yani hem tabliyenin hem de orta ayağın olduğu durumda oluşan basınçlı oyulma çukuru derinlikleri verilerek bunlar arasında karşılaştırma yapılmış ve elde edilen farklar da yüzdesel olarak çizelgede verilmiştir. 100 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği hariç diğer akım derinliklerinde

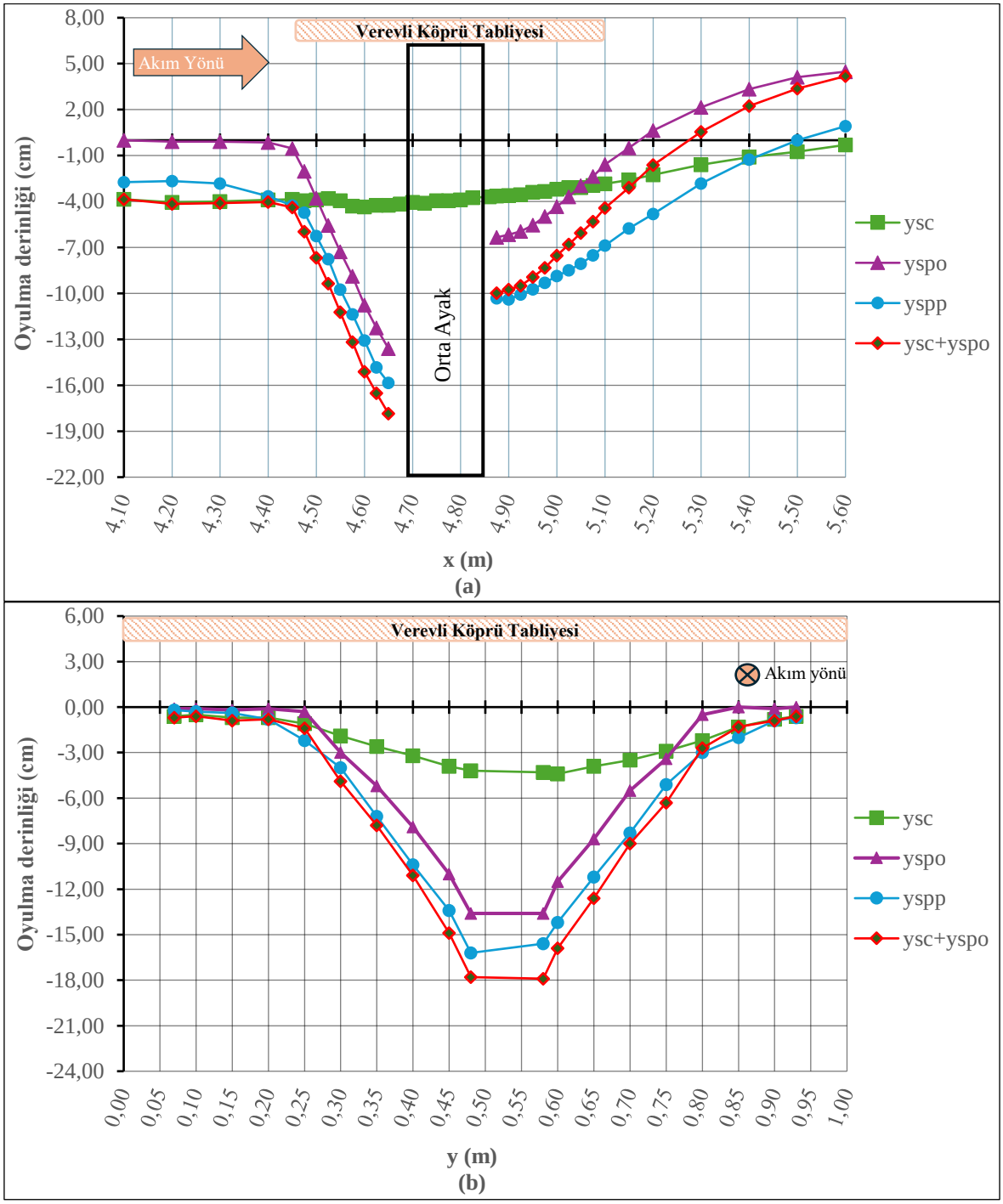
basınçlı akım halinde elde edilen oyulma çukuru derinliklerinin (y_{spp}) yerel (y_{spo}) ve daralma (y_{sc}) oyulmaları toplamları ile elde edilen TBO derinliği değerlerinden büyük olduğu belirlenmiştir. 110 lt/sn'lik debide ise sadece en büyük yaklaşım akım derinliği olan 41,5 cm'lik akım derinliğinde basınçlı akım halinde oluşan oyulma çukuru derinliği (y_{spp}) TBO derinliklerinden fazladır. Bunun dışında bu debi değerindeki diğer yaklaşım akım derinliklerinde ve 120 lt/sn'lik debi değerindeki bütün akım derinliklerinde elde edilen toplam basınçlı oyulmalar (TBO) basınçlı akım halinde meydana gelen oyulmalardan daha büyük değerlerde gözlemlenmiştir. Özellikle 100 lt/sn'de yaklaşım akım derinliği arttıkça elde edilen farkın arttığı görülmüştür. Diğer debi değerleri için böyle bir yorum yapılamamıştır. Ayrıca basınçlı oyulmalar ve TBO arasında meydana gelen farkların -%36 ile %48 arasında değiştiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.5'te verilen TBO ve $y_{spp,max}$ değerlerine bakıldığında ise Çizelge 4.4'te olduğu gibi 100 lt/sn'lik debi değerinde $y_{spp,max}$ değerleri daha fazla iken 110 ve 120 lt/sn'lik debi değerlerinde TBO değerleri daha fazladır. Basınçlı akım oyulmaları ile TBO arasındaki farkların -%24 ile %45 arasında değiştiği belirlenmiştir. Çizelge 4.4'te verilen $y_{spp,max}$ konumundaki değerlerle kıyaslandığında ise farkların çok az da olsa azaldığı görülmüştür.

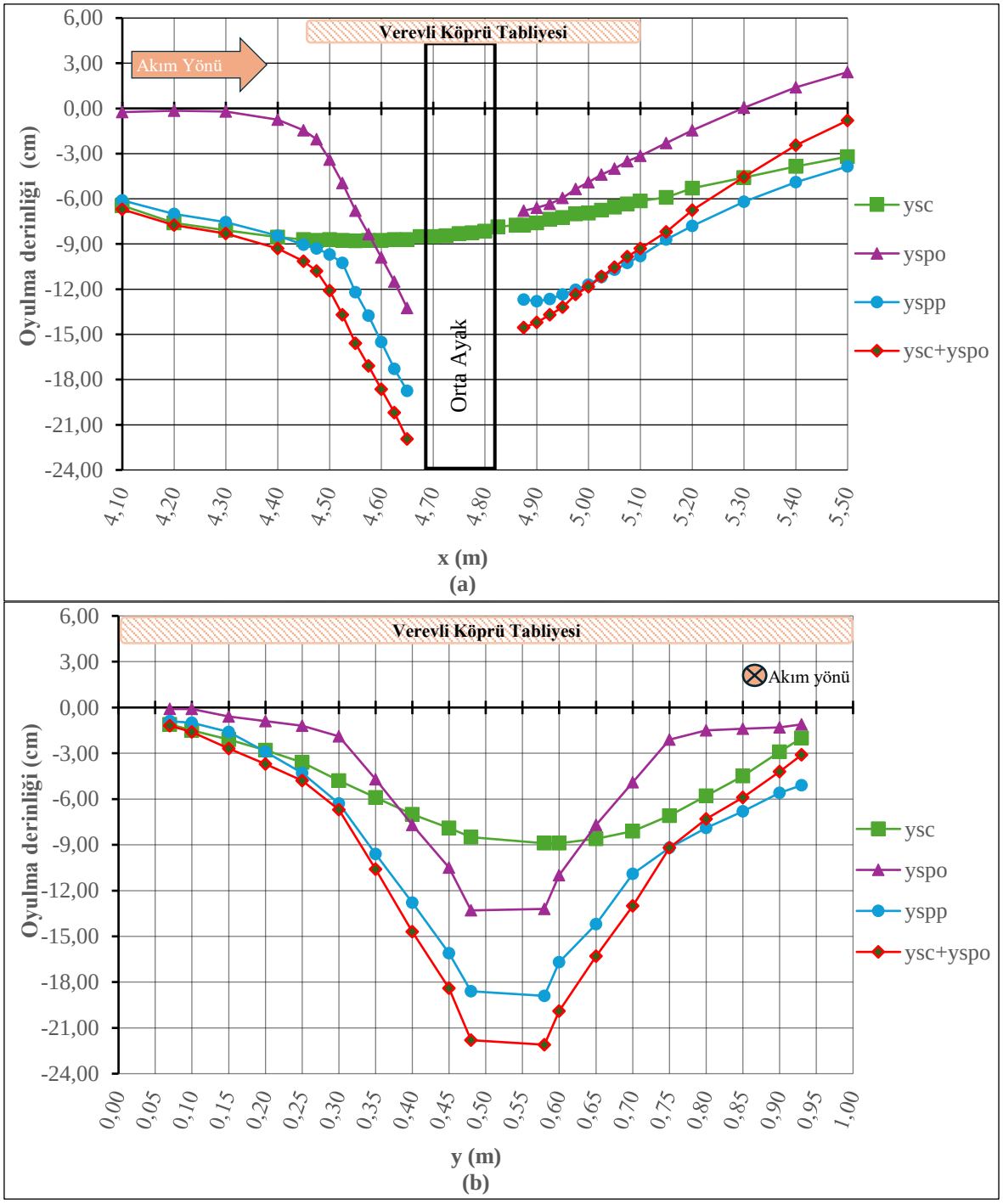
Sadece verevli tabliyenin bulunduğu durumda gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen daralma oyulması derinlikleri y_{sc}, sadece orta ayağın bulunduğu durumda gerçekleştirilen deneylerde elde edilen yerel oyulma derinlikleri y_{spo} ve hem verevli tabliyenin hem de orta ayağın bulunduğu durumda yapılan deneyler ile elde edilen basınçlı oyulma derinlikleri y_{spp} değerleri ile $y_{sc}+y_{spo}$ (TBO) değerlerinin karşılaştırmalı olarak oyulma çukuru profilleri boyuna ve enine doğrultularda Şekil 4.20- 4.25'te verilmiştir. Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de 34,5 cm derinliği için sırasıyla 100, 110 ve 120 lt/sn'lik debilerde gerçekleşen oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'te ise en büyük debi olan 120 lt/sn için sırasıyla 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm'de gerçekleşen oyulma çukuru profilleri verilmiştir.

Şekil 4.20'den görüldüğü üzere 100 lt/sn ve 34,5 cm için ayak membaında TBO değeri y_{spp} değerinden daha fazla iken mansapta tam tersi durum söz konusu olmuştur. Bunun nedeni basınçlı akım durumunda oluşan türbülanslı akım yapısı ve çevrintilerinin askıda taşınan taneleri tabliye sonrasında çok daha uzağa taşıyabilecek kadar güçlü olmamaları şeklinde açıklanabilir. Ancak bu durumun debi değerindeki artışla değişmeye başladığı (Şekil 4.21)

ve en büyük debi değeri olan 120 lt/sn'de TBO profillerinin daha derin ve yayvan oyulma çukuru oluşturdukları görülmüştür.



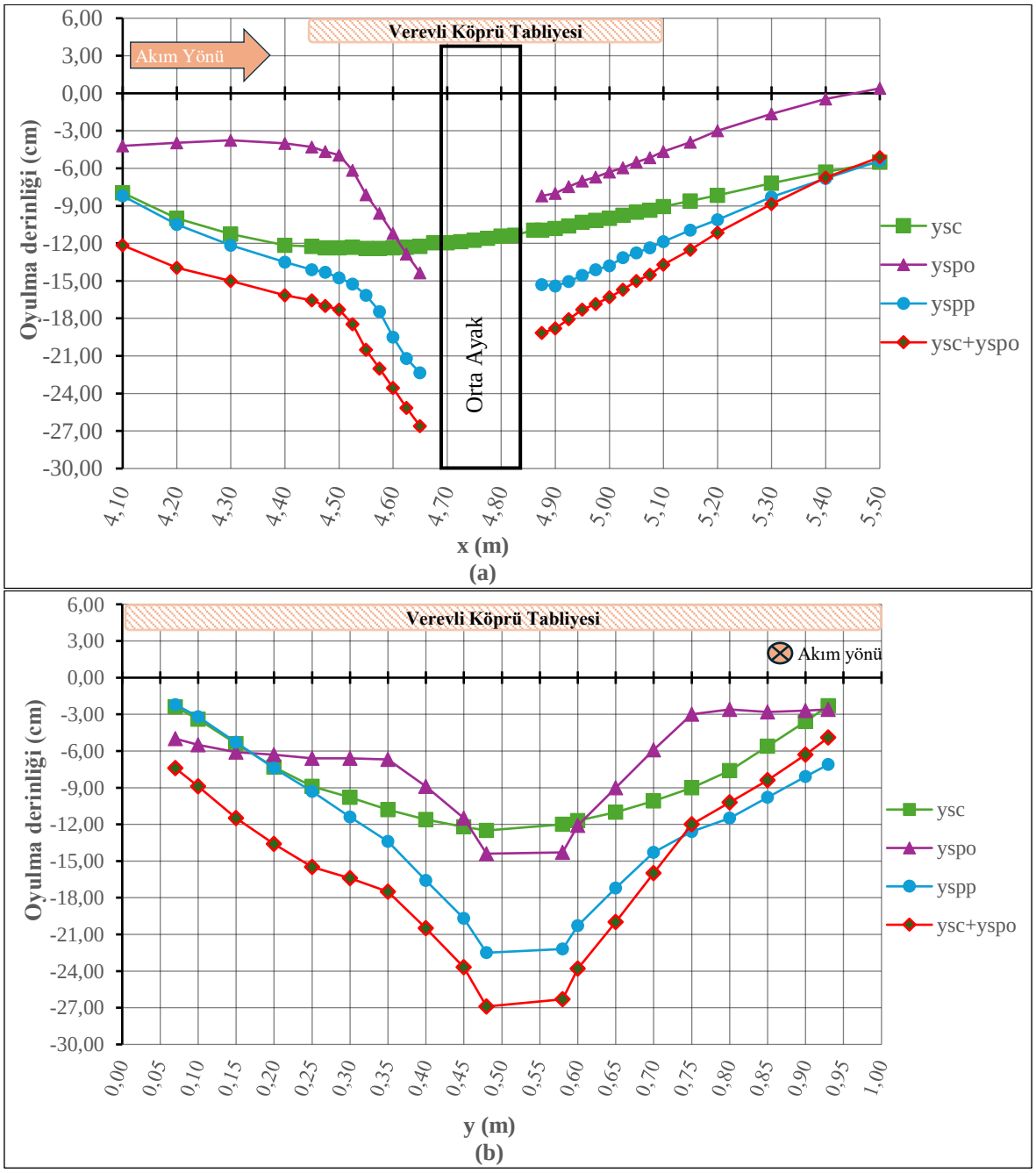
Şekil 4.20. 34,5 cm yaklaşım akım derinliği ve 100 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



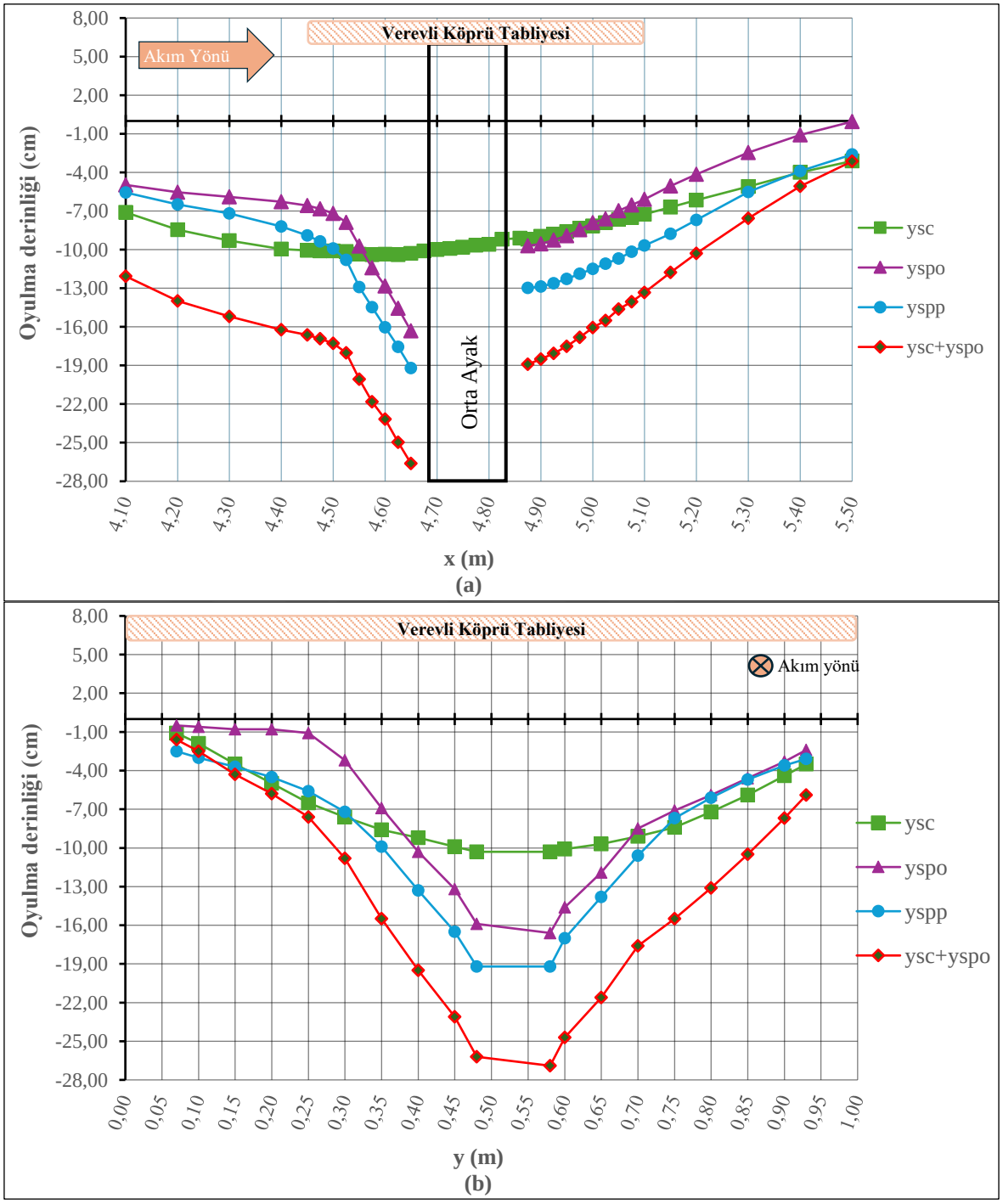
Şekil 4.21. 34,5 cm yaklaşım akım derinliği ve 110 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

En büyük debi değeri olan 120 lt/sn'de meydana gelen basınçlı oyulmaların genel olarak TBO'dan daha küçük oluşması nedeniyle bu debi değerinde yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri Şekil 4.22-4.25'te verilmiştir. Oyulma çukuru profillerinin y_a ile değişimleri incelendiğinde 120 lt/sn'lik debi değerinde kısmi basınçlı

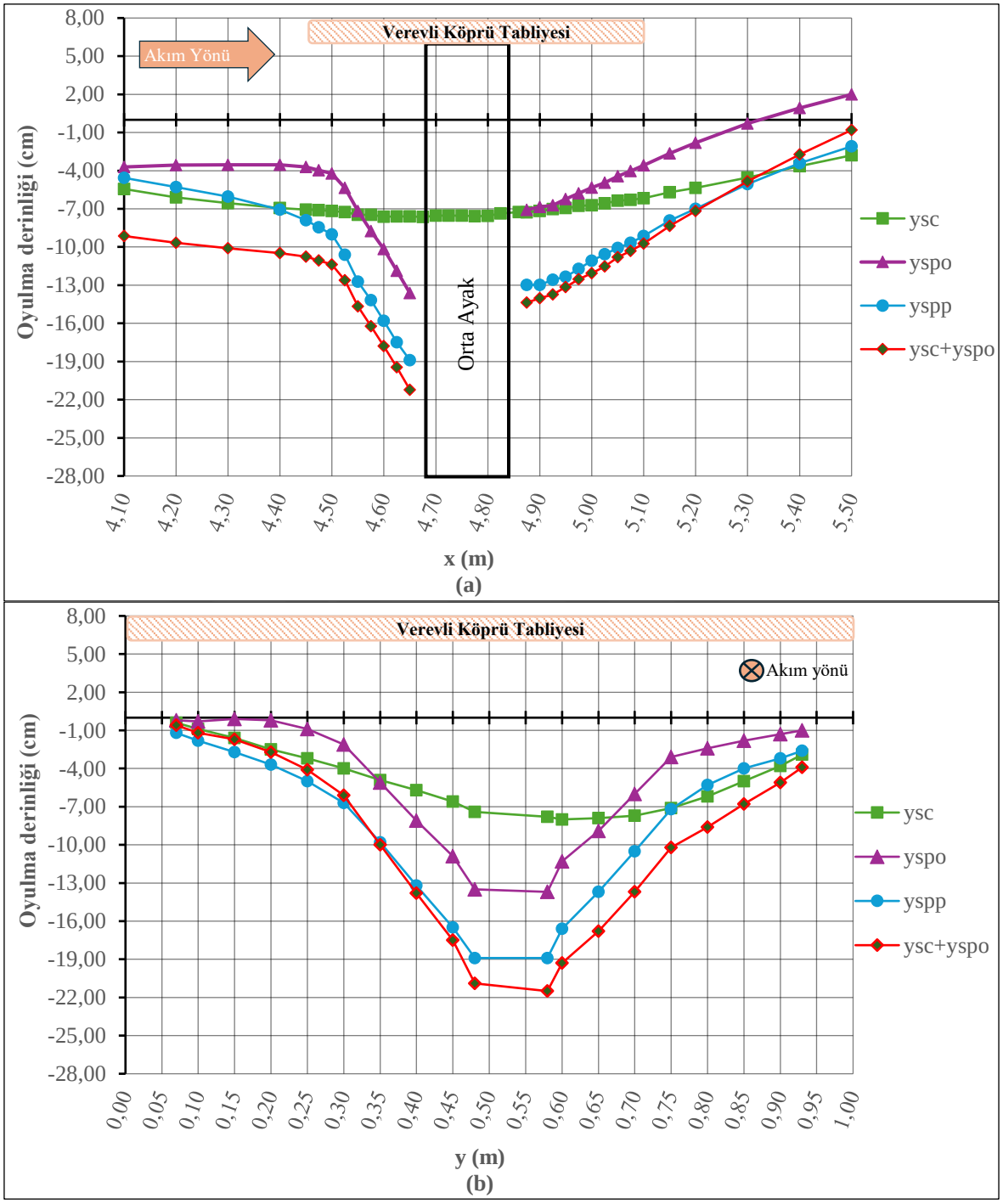
akım olması durumunda yaklaşım akım derinliği arttıkça TBO değerinin basınçlı akım oyulma derinliğinden daha büyük değerlerde olduğu, özellikle köprü membaında bu farkın açıldığı görülmüştür. Enine doğrultudaki profiller incelendiğinde akımın tabliye ile ilk temasta olduğu bölgede (y=0,55 m – 0,90 m) farkın daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum da verevli köprü tabliyesi boyunca oluşan çevrintilerin oyulma derinliğini artırdığını göstermektedir.



Şekil 4.22. 34,5 cm yaklaşım akım derinliğin ve 120 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



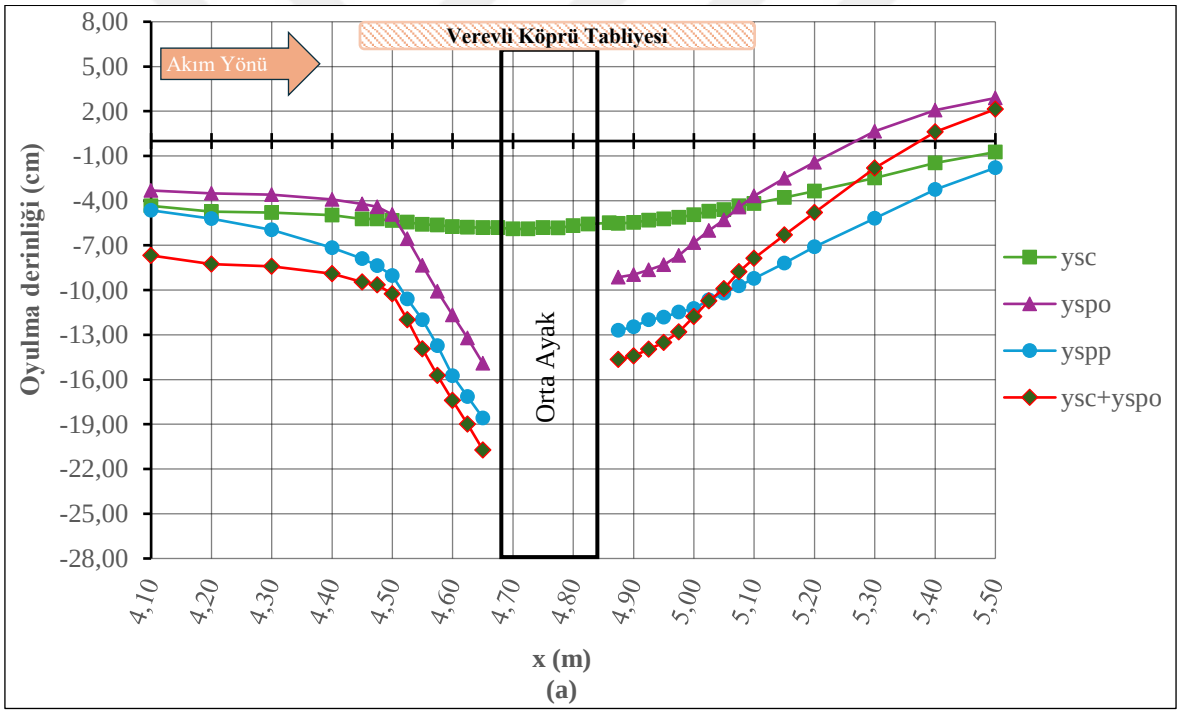
Şekil 4.23. 120 lt/sn'lik debi değeri ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



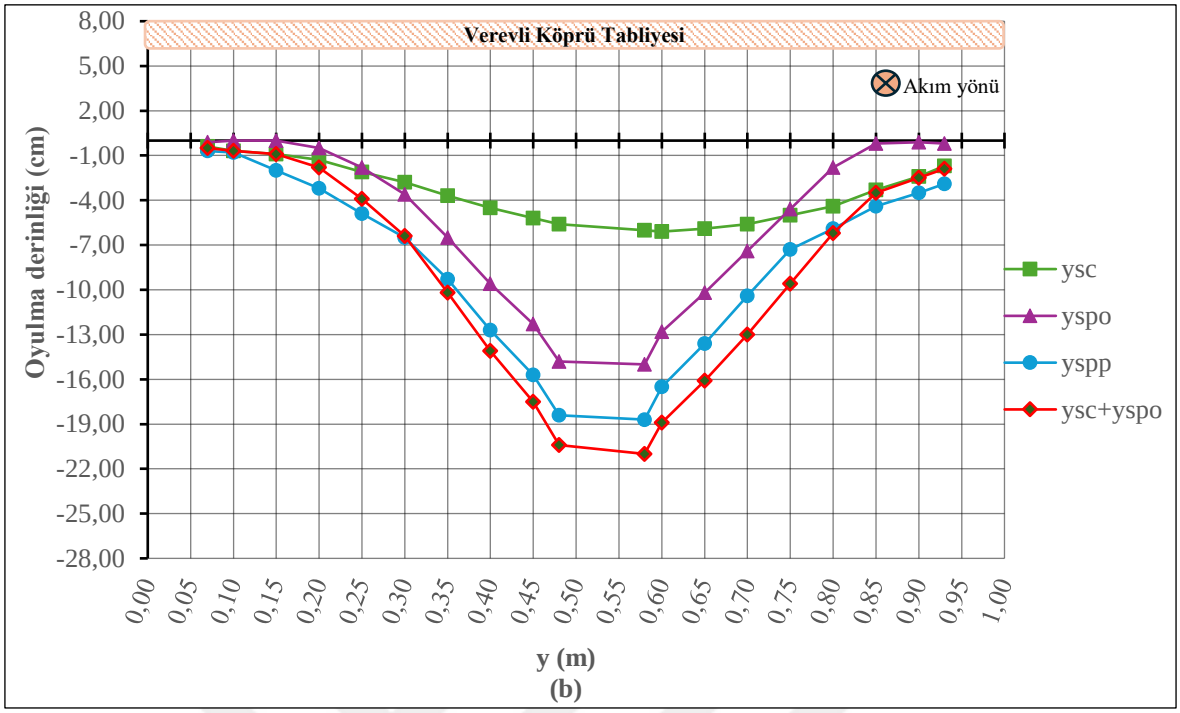
Şekil 4.24. 120 lt/sn'lik debi değeri ve 39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

Tam basınçlı akım durumunda TBO ile basınçlı akım oyulması arasındaki farkların 100 lt/sn'lik debide kısmi basınçlı akım durumuna göre daha büyük olduğu ve bu farkın savak yükü arttıkça arttığı görülmüştür. 110 lt/sn'lik debi değerinde ise TBO ile basınçlı akım oyulması arasındaki en büyük farkın en yüksek yaklaşım akım derinliği değerinde yani savak

yükünün en fazla olduğu durumda oluştuğu ve basınçlı oyulma derinliğinin fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar silindirik orta ayak ve verevli köprü tabliyesi kullanarak aynı laboratuvar ortamında çalışma gerçekleştiren Yalçın (2024)'a ait ''farkın özellikle savak tipi akım durumunda daha fazla olduğu, savak yükü arttıkça farkın da arttığı görülmektedir'' değerlendirmesiyle benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca 110 lt/sn'lik debi değerinde 41,5 cm dışındaki diğer akım derinliklerinde TBO derinliklerinin basınçlı oyulma derinliklerinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. En büyük TBO değerlerinin görüldüğü 120 lt/sn'lik debi değerinde kısmi basınçlı akım halinde bu farkların tam basınçlı akıma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yaklaşım akım derinliği arttıkça oyulma çukuru mansap şevinde mambaya göre kıyasla dikleşme olduğu yani oyulup akımla taşınan malzemenin artık akımla taşınamaması nedeniyle hemen tabanda depolandığı görülmüştür.



Şekil 4.25. 120 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,650 m'de enine profil



Şekil 4.25. (devam) 120 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

4.3 Ayak Şeklinin Basınçlı Akım Oyulması Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Ayak şeklinin, basınçlı akım halinde meydana gelen oyulma çukuru şekline ve derinliğine etkisini incelemek amacıyla, 15˚ verevlik açısına sahip köprü tabliyesi, aynı taban mazlemesi ve akım şartlarında silindirik orta ayak kullanılarak Yalçın (2024) tarafından gerçekleştirilmiş deneysel çalışmadan elde edilen deney verileri kullanılmıştır. Çizelge 4.6'da YDB orta ayak kullanılarak elde edilmiş mevcut çalışma sonuçları ile Yalçın (2024) tarafından silindirik orta ayak kullanılarak gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelgede hem serbest hem de basınçlı akım halinde meydana gelen yerel oyulmalar verilmiştir. Her iki çalışmada da 100 lt/sn, 110 lt/sn ve 120 lt/sn'lik debiler ile 34,5 cm, 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinlikleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.6 incelendiğinde serbest akım halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin silindirik orta ayak olduğu durumda daha fazla olduğu görülmüştür. Serbest akım durumunda YDB ve silindirik orta ayak deneylerine ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde 100 ve 110 lt/sn'lik debi değerlerinde silindirik orta ayak olması

durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinde YDB orta ayak olması durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerine göre %2 ile %32 arasında değişen oranlarda artış gözlemlenmiştir. 120 lt/sn'lik debi için 34,5 ve 39,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri silindirik orta ayakta YDB orta ayağa göre sırasıyla %14 ve %10 daha fazla oluşmuştur. Ancak 37,5 ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri YDB orta ayak için silindirik orta ayağa göre sırasıyla %6 ve %1 oranlarında artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.7 incelendğinde basınçlı akım koşulunda 100 lt/sn debi değerinde savak tipi akım durumunda YDB orta ayak etrafında silindirik orta ayağa göre %12 ve %20 oranında oyulma çukuru derinliğinde artış olmuştur. Aynı debide kısmi basınçlı akım halinde 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde silindirik ayak etrafındaki oyulma derinliği YDB ayak etrafında meydana gelen derinlikten %7 oranında daha fazla olmuştur. 110 lt/sn'lik debide oluşan maksimum oyulma çukuru derinliklerinde 37,5 cm yaklaşım akım derinliği haricindeki akım derinliklerinde YDB orta ayağın olması oyulmalarda artışa sebep olmuştur. 120 lt/sn debi değerinde ise 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde YDB orta ayak kullanıldığında meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin silindirik ayağa göre %20 oranında fazla olduğu görülmüştür. Bunun dışındaki akım derinliklerinde ise silindirik ayak durumunda oluşan maksimum oyulma çukuru derinlikleri %3-7 oranında artış göstermiştir. Özet olarak 120 lt/sn'de yaklaşım akım derinliği arttıkça YDB orta ayak etrafındaki oyulma çukuru derinlikleri silindirik ayağa kıyasla azalırken 100 ve 110 lt/sn'lik debi değerlerinde aynı doğrusal ilişki gözlemlenmemiştir.

Çizelge 4.6. Serbest akım halinde YDB ve silindirik orta ayak bulunması halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları

Akım Tipi	Köprü Modeli	Debi (lt/sn)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Silindirik Ayak (Yalçın, 2024)			YDB Ayak (Mevcut Çalışma)			Fark (%)
				x (m)	y (m)	$y_{spo,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	$y_{spo,max}$ (cm)	
Serbest Akım	Sadece Ayak	100	34,5	4,675	0,50	14,9	4,650	0,50	13,6	-9
			37,5	4,675	0,50	12,4	4,650	0,55	10,8	-13
			39,5	4,675	0,50	11,9	4,650	0,55	10,6	-11
			41,5	4,675	0,55	10,9	4,650	0,55	7,4	-32
		110	34,5	4,675	0,50	15,6	4,650	0,50	13,3	-15
			37,5	4,675	0,55	15,3	4,650	0,55	15,0	-2
			39,5	4,675	0,50	14,9	4,650	0,55	14,3	-4
			41,5	4,675	0,55	13,0	4,650	0,55	12,7	-2
		120	34,5	4,675	0,50	16,8	4,650	0,50	14,4	-14
			37,5	4,675	0,50	15,6	4,650	0,55	16,6	6
			39,5	4,675	0,50	15,4	4,675	0,55	13,8	-10
			41,5	4,675	0,50	14,8	4,650	0,55	15,0	1

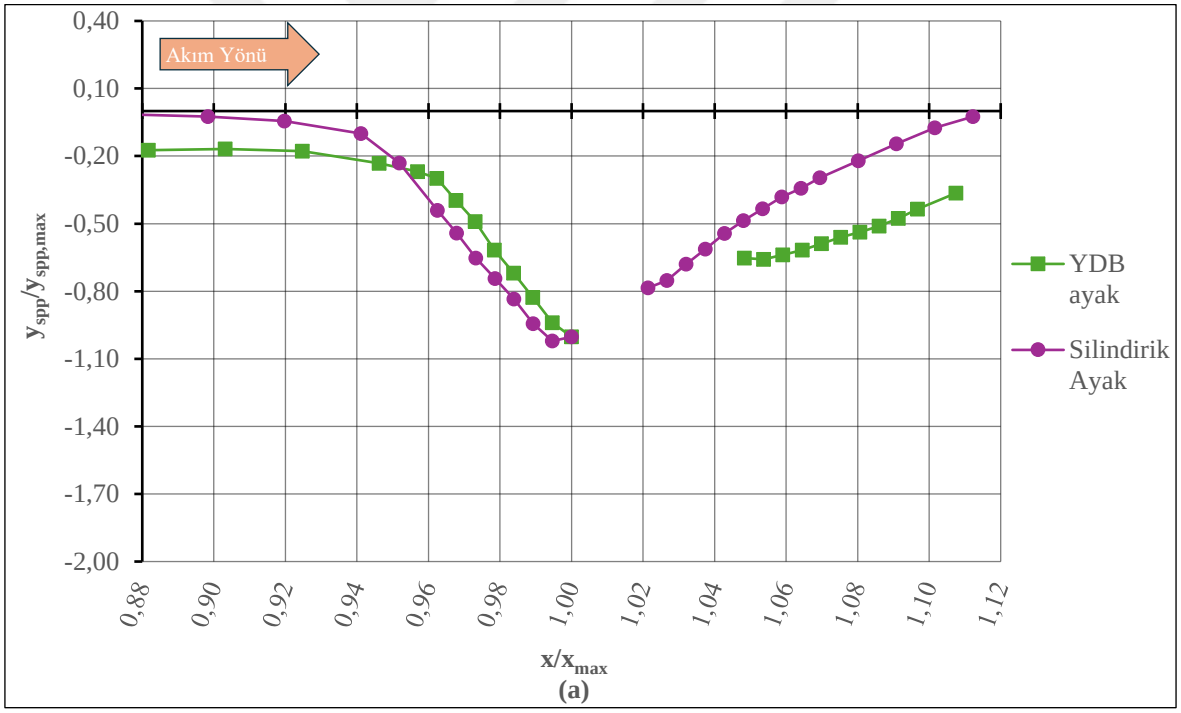
Çizelge 4.7. Basınçlı akım halinde YDB ve silindirik orta ayak bulunması halinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları

Köprü Modeli	Debi (lt/sn)	Akım Tipi	Yaklaşım Akım Derinliği	Silindirik Ayak (Yalçın, 2024)			YDB Ayak (Mevcut Çalışma)			Fark (%)
				x (m)	y (m)	$y_{spp,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	$y_{spp,max}$ (cm)	
Ayak ve Tabliye	100	Kısmi Basınçlı	34,5	4,675	0,55	17,4	4,650	0,50	16,2	-7
			37,5	4,675	0,55	17,7	4,675	0,50	18,3	3
		Tam Basınçlı	39,5	4,675	0,50	16,6	4,650	0,55	18,6	12
			41,5	4,675	0,55	14,7	4,650	0,55	17,6	20
	110	Kısmi Basınçlı	34,5	4,675	0,50	17,5	4,650	0,55	18,9	8
			37,5	4,675	0,50	19,6	4,650	0,50	19,1	-3
		Tam Basınçlı	39,5	4,675	0,50	18,5	4,675	0,50	18,8	2
			41,5	4,675	0,50	17,7	4,675	0,50	18,3	3
	120	Kısmi Basınçlı	34,5	4,675	0,50	18,8	4,650	0,50	22,5	20
			37,5	4,675	0,55	19,9	4,650	0,50	19,2	-3
		Tam Basınçlı	39,5	4,675	0,50	19,6	4,675	0,50	19,0	-3
			41,5	4,675	0,50	20,1	4,650	0,55	18,7	-7

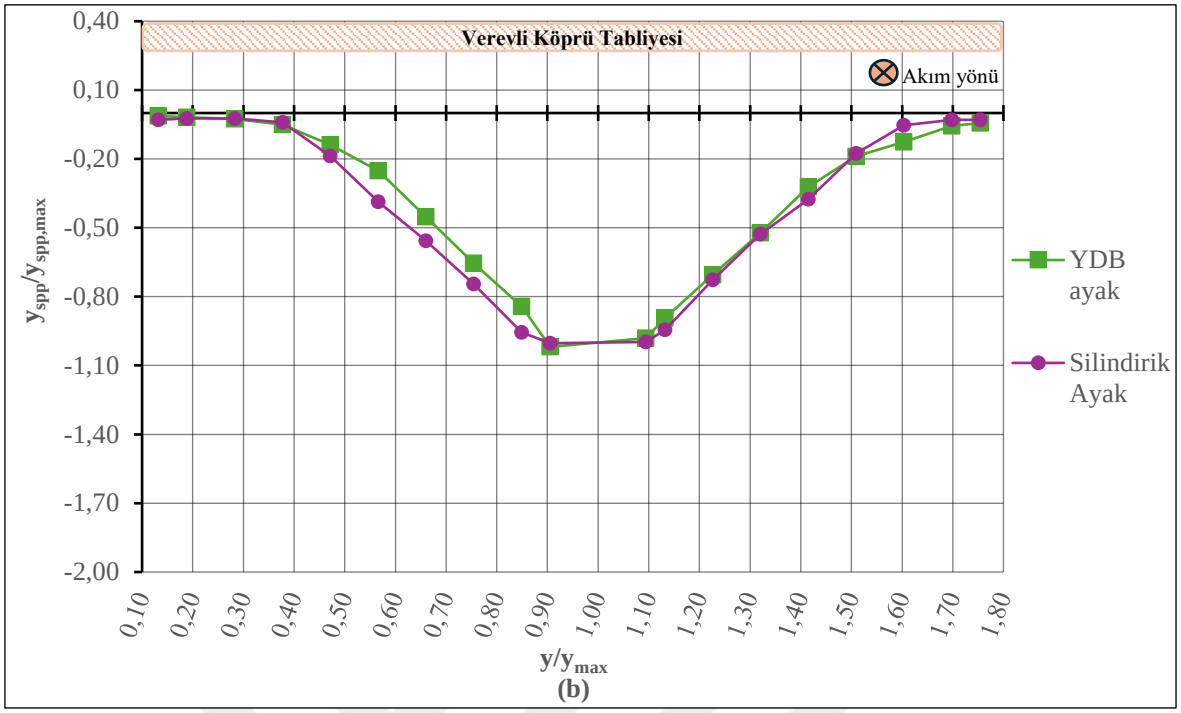
Şekil 4.26'da 100 lt/sn'lik debi değerinde 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için YDB ve silindirik orta ayak durumlarında meydana gelen oyulma çukuru boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış profilleri verilmiştir. Şekil 4.26'da görüldüğü üzere 34,5 cm'de YDB orta ayak olması durumunda meydana gelen oyulmaların köprü membaında daha fazla olduğu, memba ve mansap şevlerinin birbirine yakın eğimlerde oluştuğu ve ayağa yaklaştıkça meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin silindirik orta ayak durumunda YDB ayağa göre daha fazla olduğu görülmüştür. Köprü mansabında ise YDB ayağın olduğu

durumda daha fazla oyulma meydana gelmiş, daha yayvan bir çukur oluşmuştur. Şekil 4.27'de 100 lt/sn'lik debi değerinde 41,5 cm'lik yani en büyük yaklaşım akım derinliği için YDB ve silindirik orta ayak durumlarında meydana gelen oyulma çukuru boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış profilleri verilmiştir. Şekil 4.27 incelendiğinde köprü membaında meydana gelen oyulma çukuru derinliklerinde ciddi farklar olmadığı, köprü mansabında oluşan oyulma çukuru şev eğiminin YDB orta ayak olması durumunda silindirik orta ayağa göre çok daha yayvan şekilde oluştuğu görülmüştür.

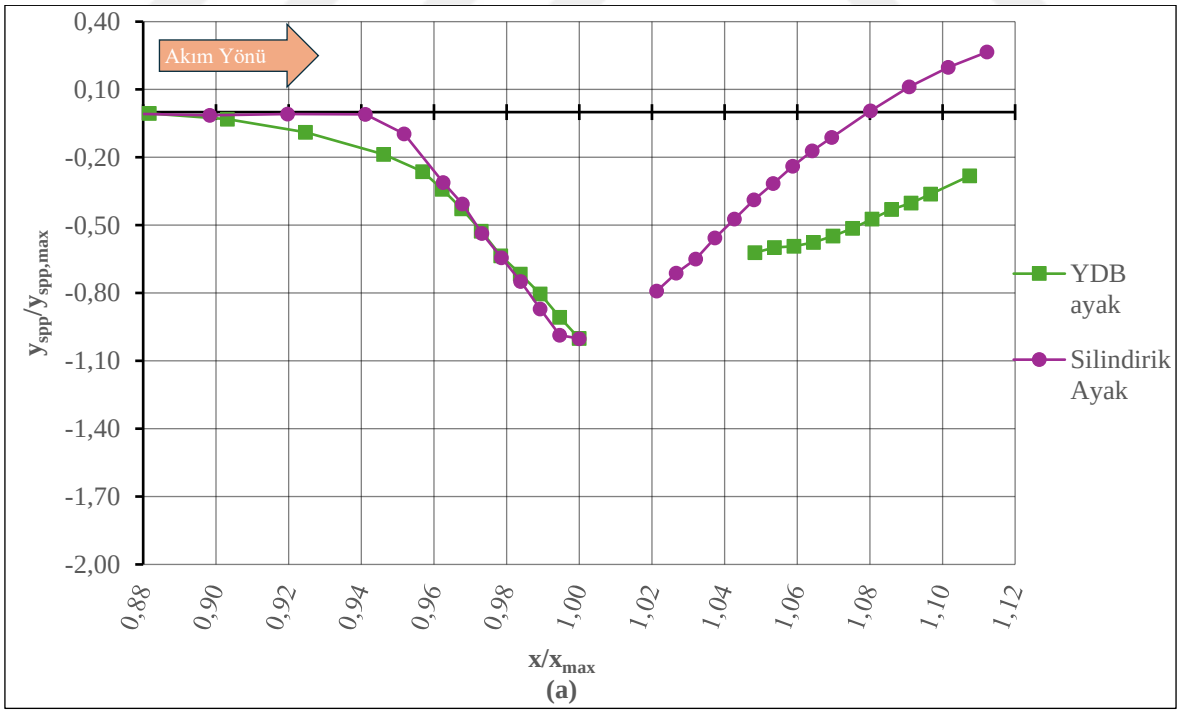
Kısmi basınçlı akım ile savak tipi akımda oluşan profiller karşılaştırıldığında ise en fazla oyulmanın gözlemlendiği 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde ayak şeklinin oyulma üzerinde daha büyük öneme sahip olduğu ancak derinlik arttıkça bu farkın çok azaldığı gözlemlenmiştir.



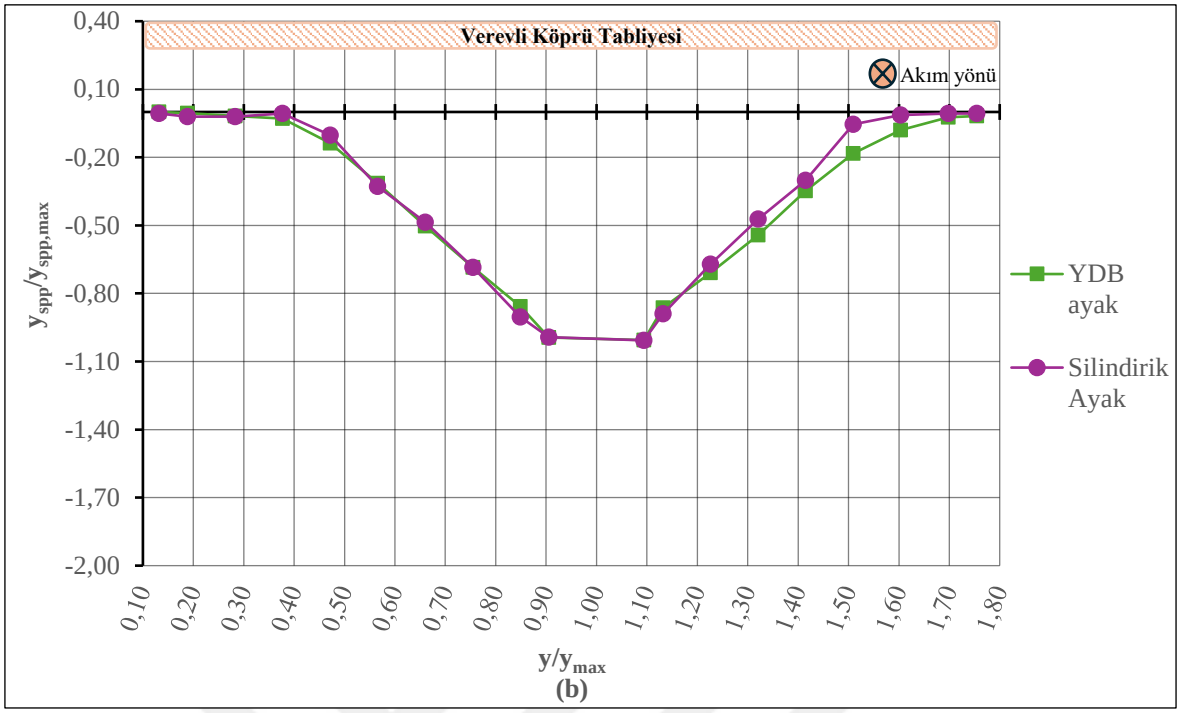
Şekil 4.26. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultlardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



Şekil 4.26. (devam) Basınçlı akım halinde 100 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



Şekil 4.27. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

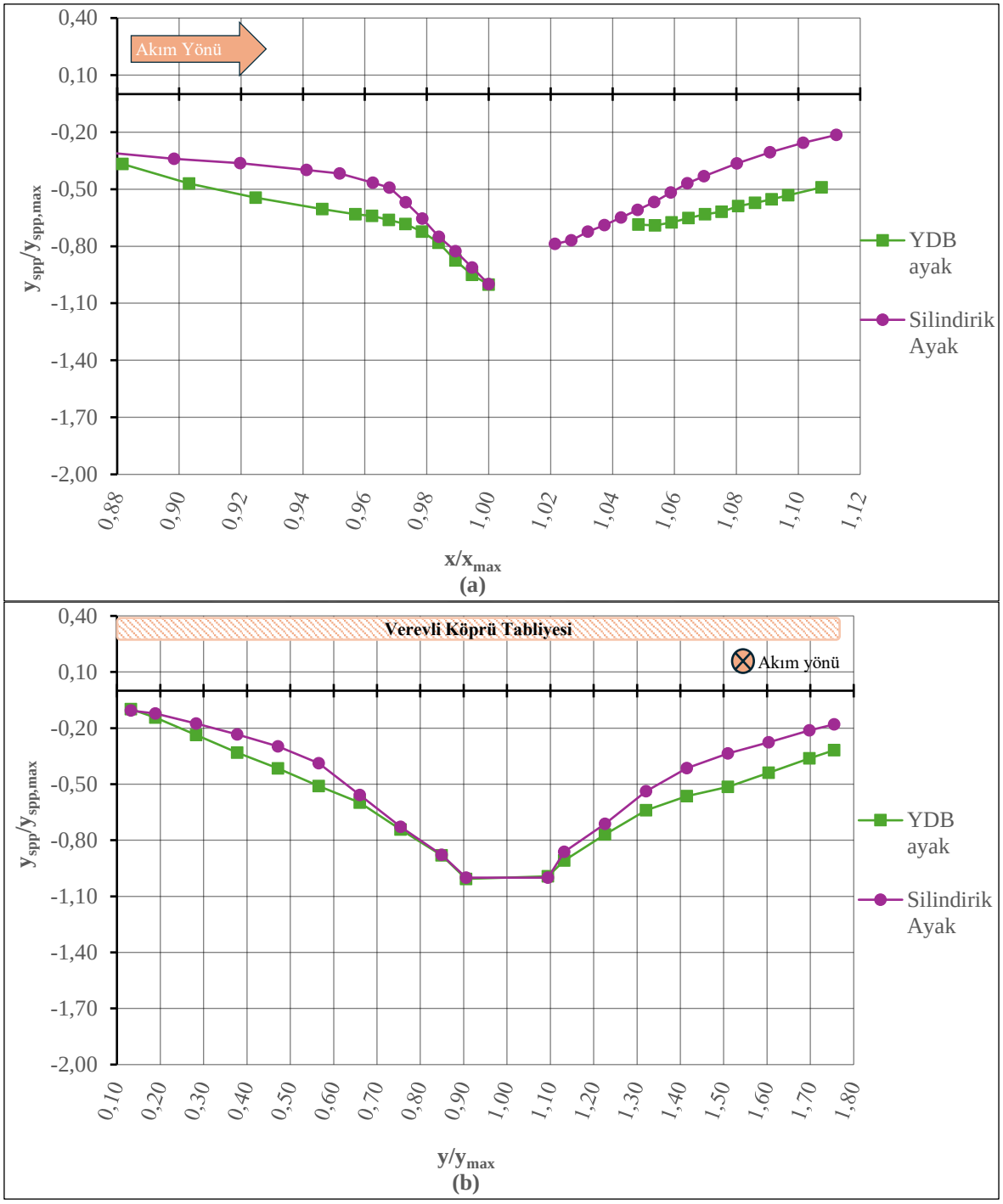


Şekil 4.27. (devam) Basınçlı akım halinde 100 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

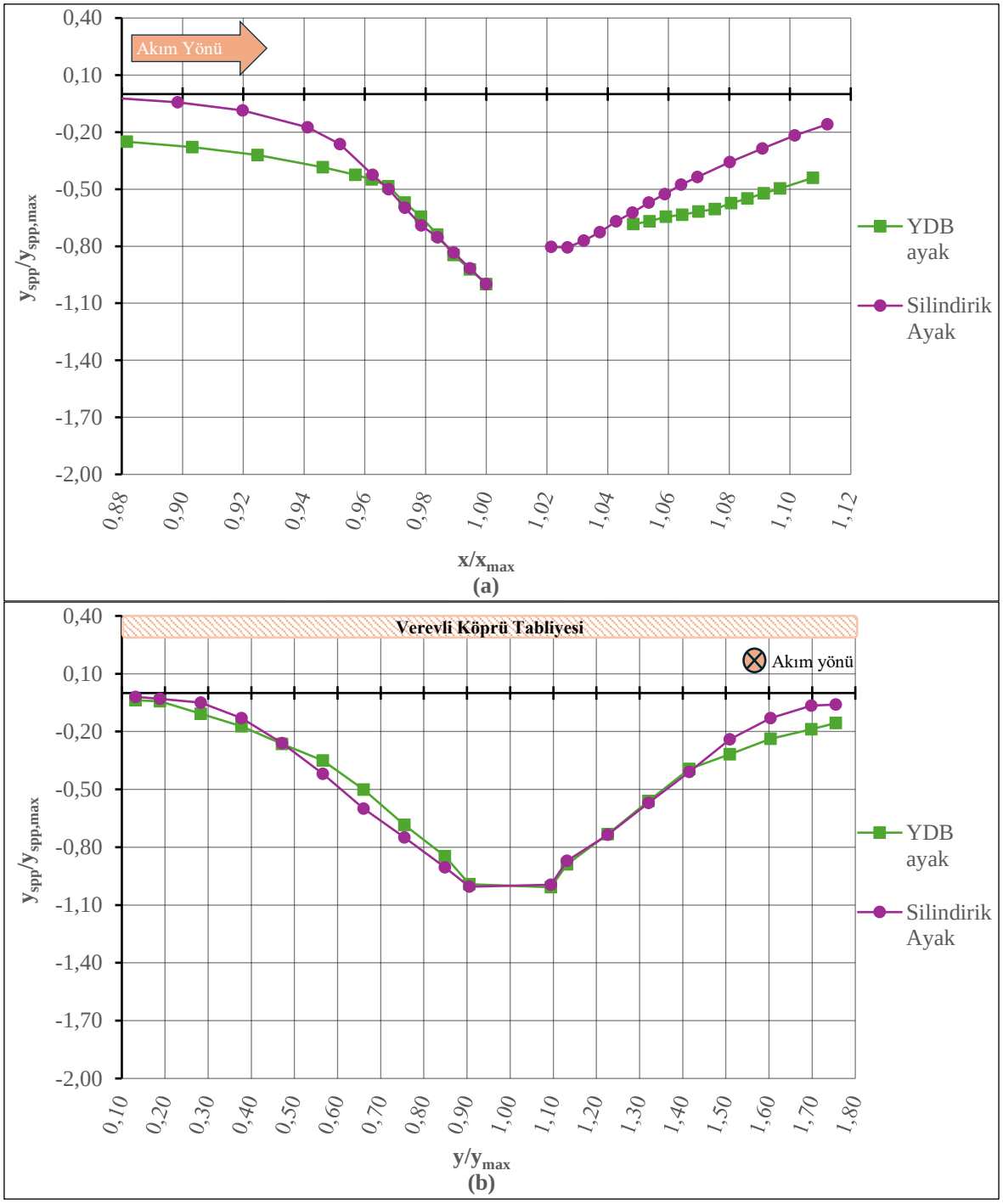
Şekil 4.28 ve 4.29'da 120 lt/sn'lik debi için 34,5 cm ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde YDB ve silindirik orta ayak olması halinde meydana gelen oyulma çukuru derinliklerinin boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış profilleri verilmiştir.

100 lt/sn (Şekil 4.26) ile 120 lt/sn (Şekil 4.28) debi değerlerinde 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerindeki profiller karşılaştırıldığında boyuna doğrultudaki profillerin 120 lt/sn'lik debi durumunda yayvanlaştığı, özellikle oyulma çukuru memba şevinin oldukça etkilendiği ve oyulmanın azaldığı görülmüştür. Enine doğrultudaki profiller kıyaslandığında ise YDB orta ayak profillerinin membada ve mansapta şev eğimlerinin azaldığı görülmüştür.

41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için 100 lt/sn (Şekil 4.27) ile 120 lt/sn (Şekil 4.29) debi değerlerine ait boyutsuzlaştırılmış boyuna ve enine doğrultudaki profiller karşılaştırıldığında da YDB orta ayak durumunda hem memba hem de mansap yönlerinde daha fazla oyulma meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.28. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultulardaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil



Şekil 4.29. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn'lik debi değeri ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen boyuna ve enine doğrultuda meydana gelen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

4.4. Verevlik Açısının Basınçlı Akım Oyulması Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Akıma 15° verevlik açısıyla yerleştirilen köprü tabliyesinin basınçlı akım oyulması durumunda meydana gelen oyulma çukuru şekli ve derinliği üzerindeki etkisinin incelenmesi için bu çalışmada elde edilen veriler ile daha önce akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyesi kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli deneyler de ölçülmüş oyulma verileri karşılaştırılmıştır. Bu iki çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler aynı laboratuvarda, aynı akım koşullarında ve aynı YDB orta ayak kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.8 ve 4.9'da her iki çalışma sonucunda elde edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir. Çizelgede sadece verevli veya akıma dik olarak yerleştirilmiş köprü tabliyelerinin bulunduğu durumda elde edilen daralma oyulması çukuru derinlikleri $y_{sc,max}$ ile YDB orta ayak ve tabliyenin birlikte bulunduğu durumlarda elde edilen oyulma çukuru derinlikleri $y_{spp,max}$ verilmiştir.

Çizelge 4.8 ve 4.9'da verilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde basınçlı akım oyulması halinde oluşan oyulma çukuru derinliklerinin genellikle köprü tabliyesinin akıma verevli olarak yerleştirildiği durumda dik olarak yerleştirildiği duruma kıyasla daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum hem YDB orta ayağın tabliye ile birlikte yerleştirildiği hem de sadece tabliyenin bulunduğu durumlarda değişmemiştir. Sadece tabliyenin bulunduğu durumda oluşan oyulma derinliğindeki farklara bakıldığında verevli tabliyenin meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğini %100'den daha fazla artırdığı gözlemlenmiştir. YDB orta ayak ve tabliyenin birlikte bulunduğu durumda maksimum oyulma çukuru derinlikleri farkının %25 oranında oluştuğu, bu farkın debinin artışına bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Yalnızca 120 lt/sn'lik debide 37,5 cm ve 39,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde akıma dik olarak yerleştirilen tabliyenin bulunduğu durumda oluşan maksimum oyulma çukuru derinlikleri verevli köprü tabliyesinin olduğu duruma göre fazla olduğu gözlemlenmiştir.

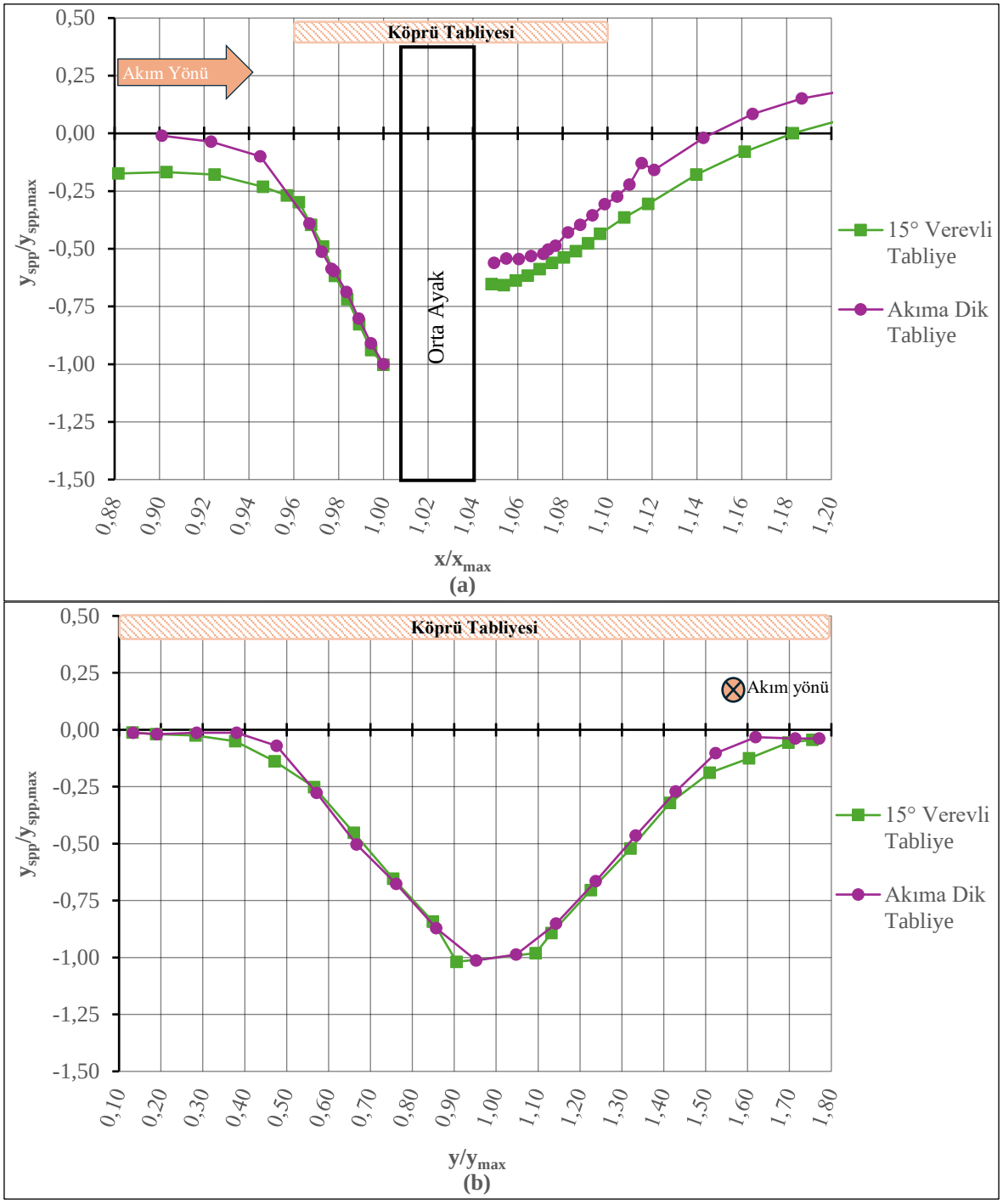
Çizelge 4.8. Verevli köprü tabliyesi ve akıma dik yerleştirilen köprü tabliyesi olması durumlarında basınçlı akım halinde daralma oyulması değerleri

Akım Tipi	Köprü Modeli	Debi (lt/sn)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Akıma Dik Tabliye α=0			Verevli Tabliye (Mevcut Çalışma) α=15			Fark (%)
				x (m)	y (m)	$y_{sc,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	$y_{sc,max}$ (cm)	
Kısmi Basınçlı	Sadece Tabliye	100	34,5	4,650	0,70	1,2	4,650	0,60	4,4	267
			37,5	-	-	-	4,800	0,55	3,7	-
Tam Basınçlı			39,5	-	-	-	4,800	0,55	3,1	-
			41,5	-	-	-	4,800	0,55	2,3	-
Kısmi Basınçlı		110	34,5	4,650	0,60	2,4	4,650	0,55	8,9	271
			37,5	-	-	-	4,575	0,55	8,6	-
Tam Basınçlı			39,5	-	-	-	4,725	0,60	6,1	-
			41,5	-	-	-	4,775	0,50	3,2	-
Kısmi Basınçlı		120	34,5	4,550	0,60	6,6	4,650	0,50	12,5	89
			37,5	4,675	0,60	4,9	4,575	0,55	10,5	114
Tam Basınçlı			39,5	4,725	0,65	3,8	4,675	0,60	8,0	110
			41,5	4,725	0,60	3,1	4,675	0,60	6,1	97

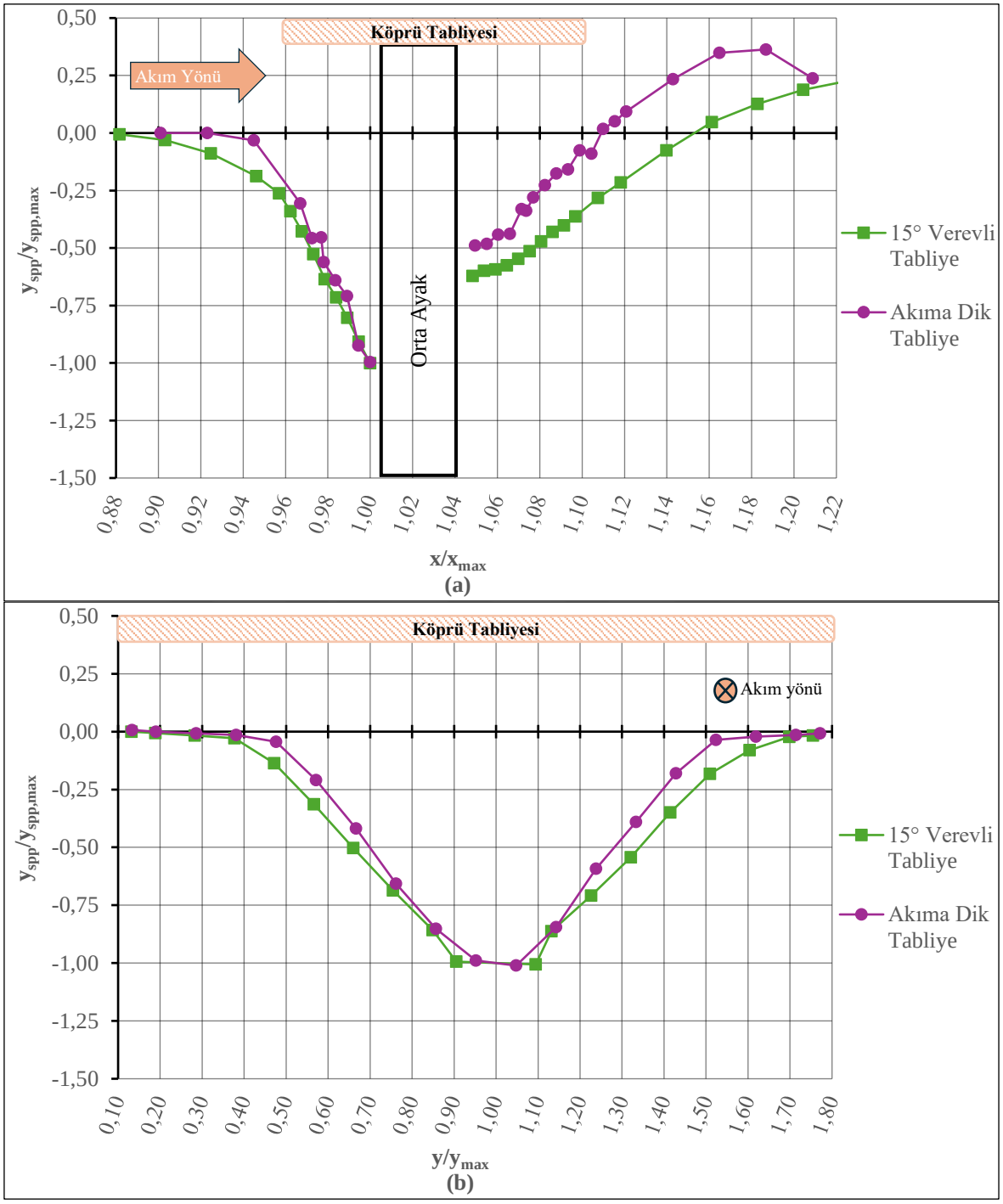
Çizelge 4.9. Verevli köprü tabliyesi ve akıma dik yerleştirilen köprü tabliyesi olması durumlarında basınçlı akım oyulması değerleri

Akım Tipi	Köprü Modeli	Debi (lt/sn)	Yaklaşım Akım Derinliği (cm)	Akıma Dik Tabliye α=0			Verevli Tabliye (Mevcut Çalışma) α=15			Fark (%)
				x (m)	y (m)	$y_{spp,max}$ (cm)	x (m)	y (m)	$y_{spp,max}$ (cm)	
Kısmi Basınçlı	Ayak Ve Tabliye	100	34,5	4,550	0,50	15,7	4,650	0,50	16,2	3
			37,5	4,625	0,45	14,7	4,675	0,50	18,3	24
Tam Basınçlı			39,5	4,550	0,50	14,8	4,650	0,55	18,6	26
			41,5	4,550	0,55	14	4,650	0,55	17,6	26
Kısmi Basınçlı		110	34,5	4,550	0,55	16,5	4,650	0,55	18,9	14
			37,5	4,575	0,55	18,0	4,650	0,50	19,1	6
Tam Basınçlı			39,5	4,550	0,50	17,6	4,675	0,50	18,8	7
			41,5	4,550	0,50	17,1	4,675	0,50	18,3	7
Kısmi Basınçlı		120	34,5	4,550	0,50	19,3	4,650	0,50	22,5	17
			37,5	4,550	0,50	19,5	4,650	0,50	19,2	-1
Tam Basınçlı			39,5	4,550	0,50	19,6	4,675	0,50	19,0	-3
			41,5	4,550	0,50	18,3	4,650	0,55	18,7	2

Şekil 4.30 ve 4.31'de 100 lt/sn'lik debi için 34,5 cm ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış olarak verilmiştir. Şekillerdeki köprü tabliye modeli ve orta ayak ölçeksiz olarak verilmiştir. Tabliyenin akıma dik ve verevli olması durumları için farklı konumlarda yerleştirildiğinden şekil üzerindeki gösterimi temsilidir.



Şekil 4.30. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn ve 34,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

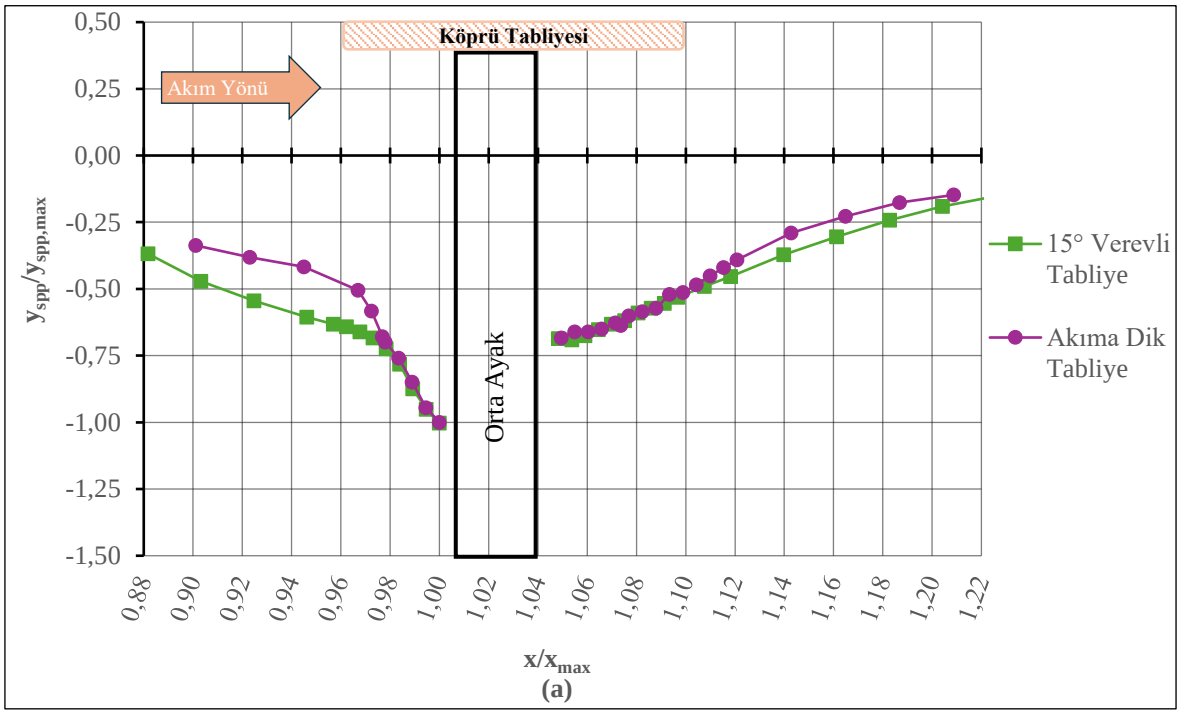


Şekil 4.31. Basınçlı akım halinde 100 lt/sn ve 41,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

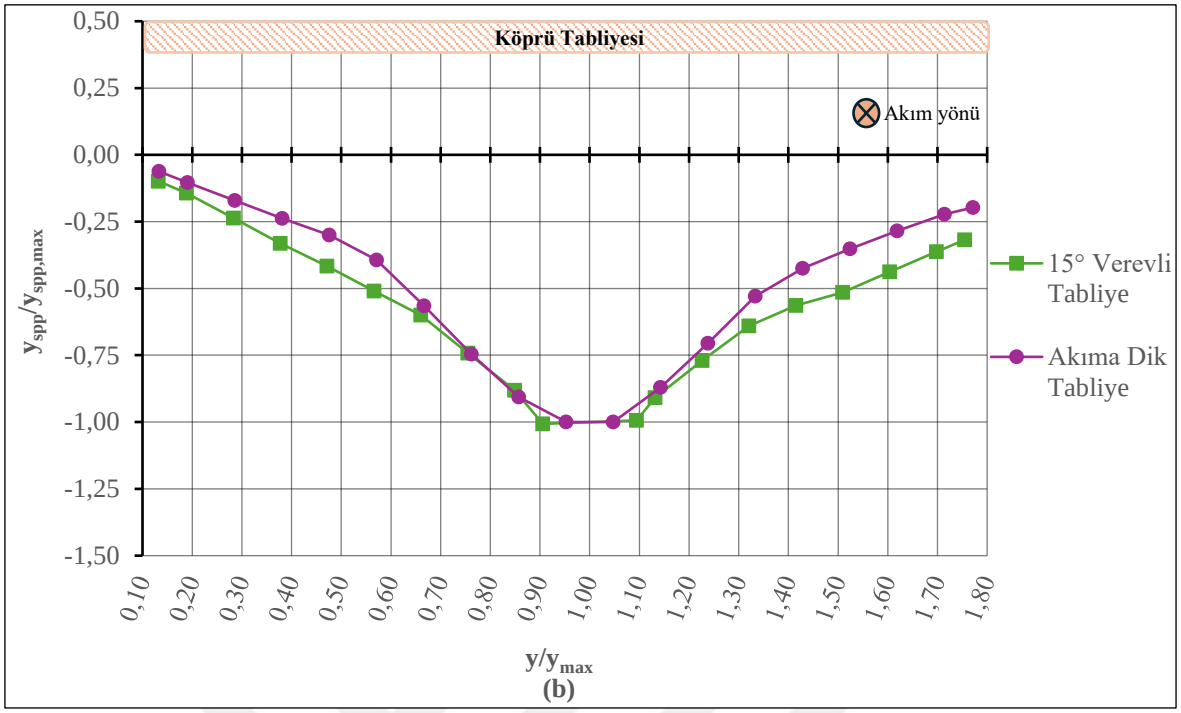
Şekil 4.30 (a) ve 4.31 (a)'da verilen 100 lt/sn'lik debi ve 34,5 ile 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulmaların boyuna doğrultudaki profillerine bakıldığında 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesinin bulunduğu durumlarda kanal başlangıcında oyulmaların akıma dik tabliyeye göre daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Bunun yanında

verevli köprü tabliyesi bulunması halinde meydana gelen oyulma derinliklerinin akıma dik tabliyeye göre daha fazla olduğu, özellikle mansap tarafında oyulma farklarının arttığı gözlenmiştir.

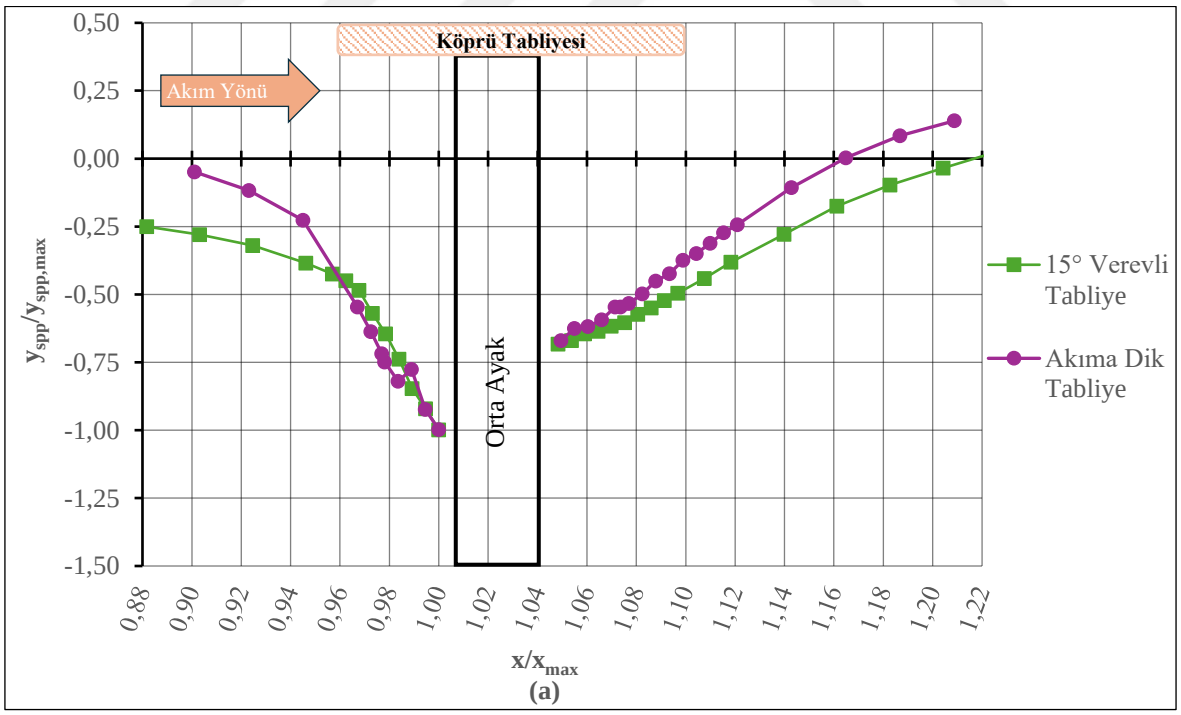
Şekil 4.32 ve 4.33'te 120 lt/sn'lik debi için 34,5 ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ve akıma dik olarak yerleştirilen köprü tabliyesi bulunması durumlarına göre boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış olarak verilmiştir.



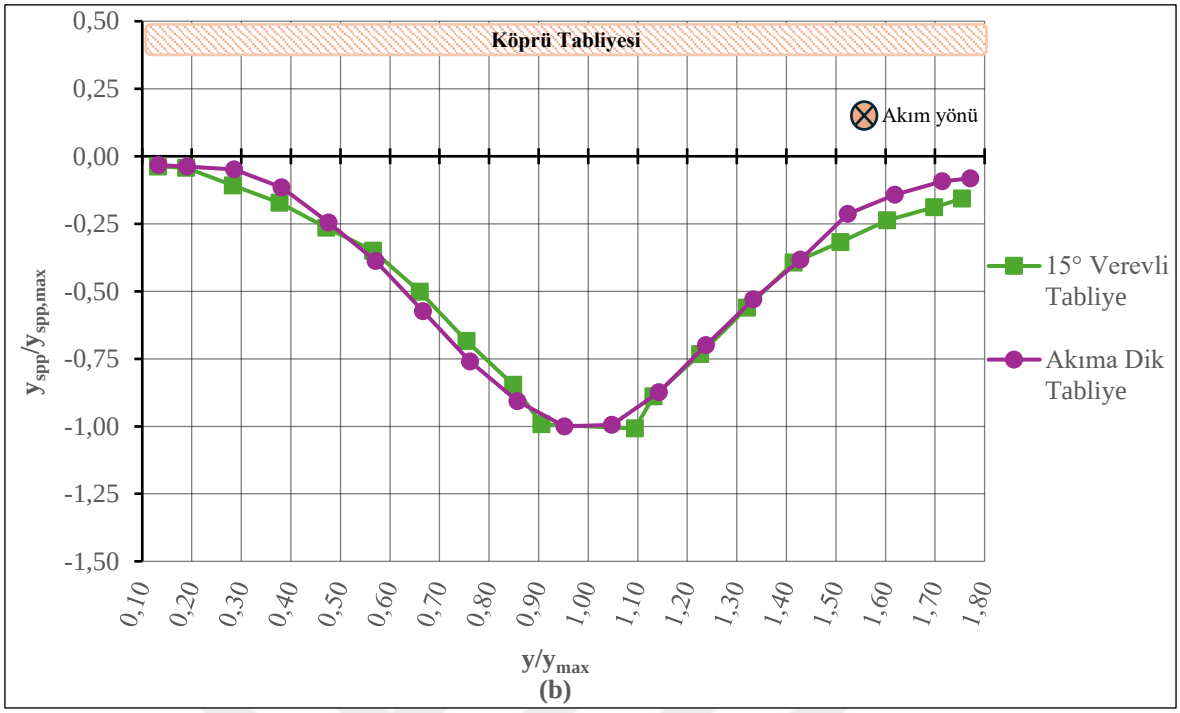
Şekil 4.32. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn ve 34,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutusuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b), x=4,675 m'de enine profil



Şekil 4.32. (devam) Basınçlı akım halinde 120 lt/sn ve 34,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

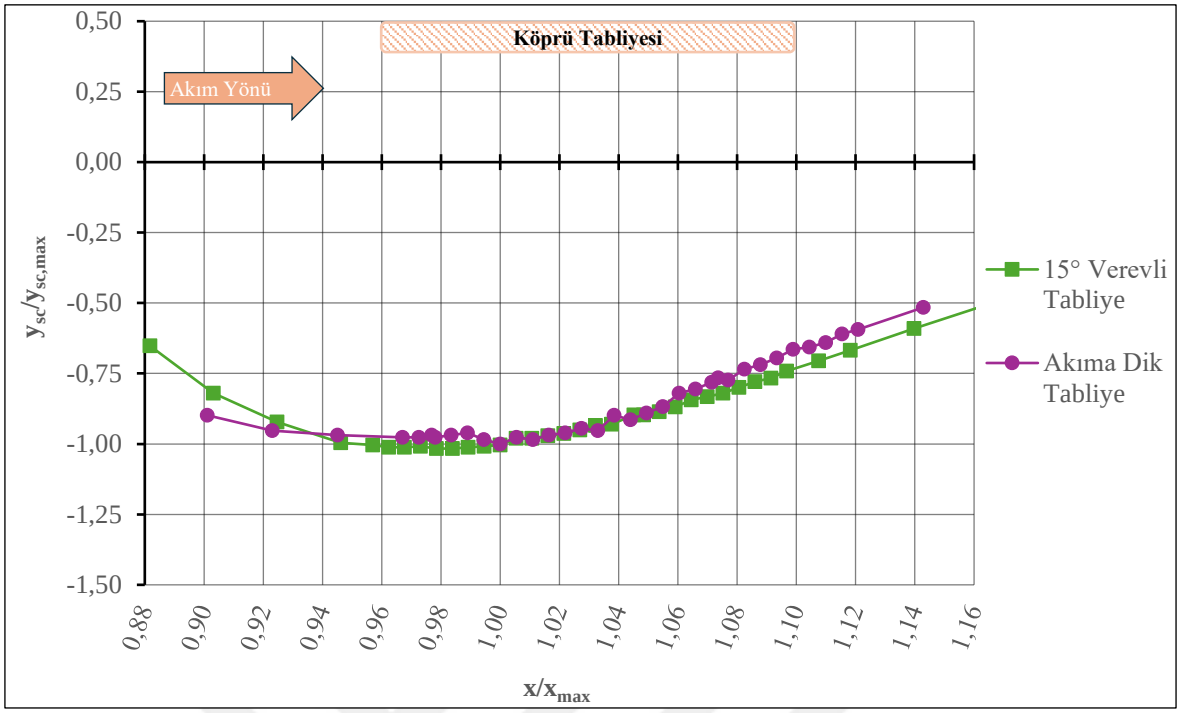


Şekil 4.33. Basınçlı akım halinde 120 lt/sn ve 41,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

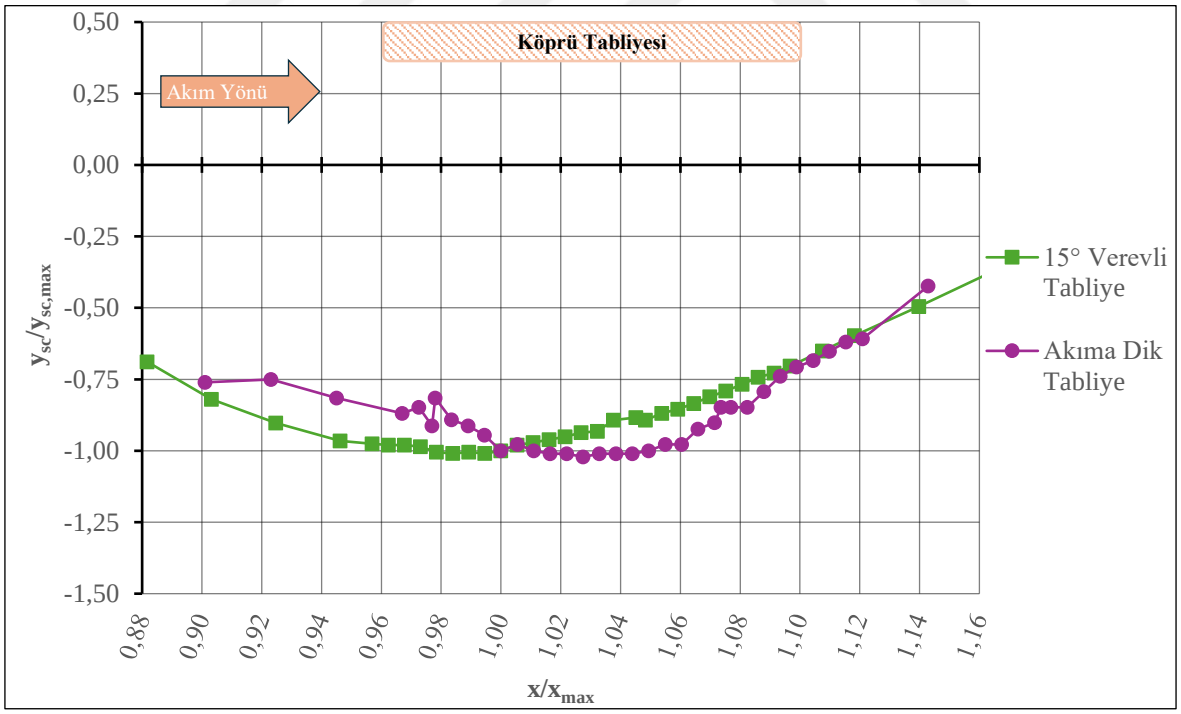


Şekil 4.33. (devam) Basınçlı akım halinde 120 lt/sn ve 41,5 cm'deki boyuna ve enine doğrultularda boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri: (a) y=0,53 m'de boyuna profil, (b) x=4,675 m'de enine profil

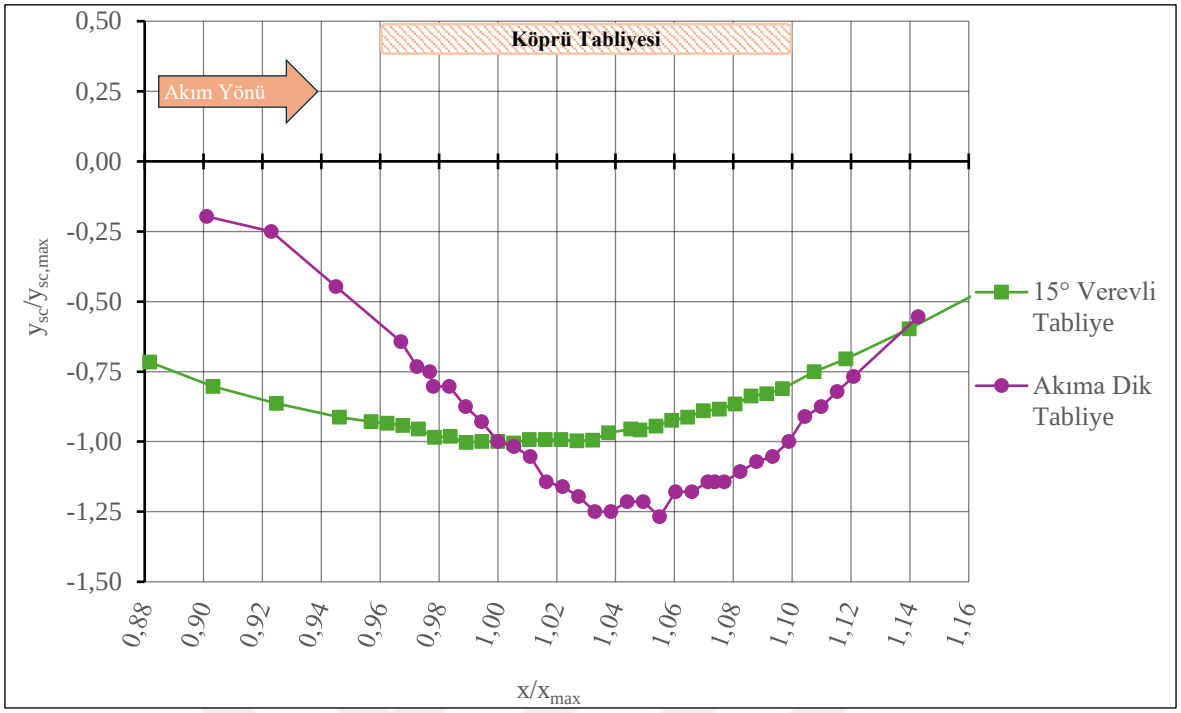
Şekil 4.34-4.37'de YDB orta ayağın olmadığı durumlarda 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ile akıma dik yerleştirilen köprü tabliyesi durumlarında 120 lt/sn'lik debi değerinde oluşan boyutsuzlaştırılmış boyuna oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Verevli ve akıma dik yerleştirilen köprü tabliyelerinin konumları farklı olup şekillerdeki gösterimi ölçeksiz olarak verilmiştir. Şekil 4.34 ve 4.35'te verilen 34,5 cm ve 37,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen oyulma çukuru profillerine bakıldığında her iki durumda da yani kısmi basınçlı akım durumunda benzer oyulma çukuru şekillerinin oluştuğu ve oyulmaların köprü membaında da etkili olduğu görülmüştür. Savak tipi akımın meydana geldiği 39,5 cm ve 41,5 cm'lik akım derinliklerinde oluşan oyulma profillerinden ise akıma dik tabliye olması durumunda köprü membaındaki oyulma etkisinin verevli tabliyeye kıyasla daha az olduğu görülmüştür.



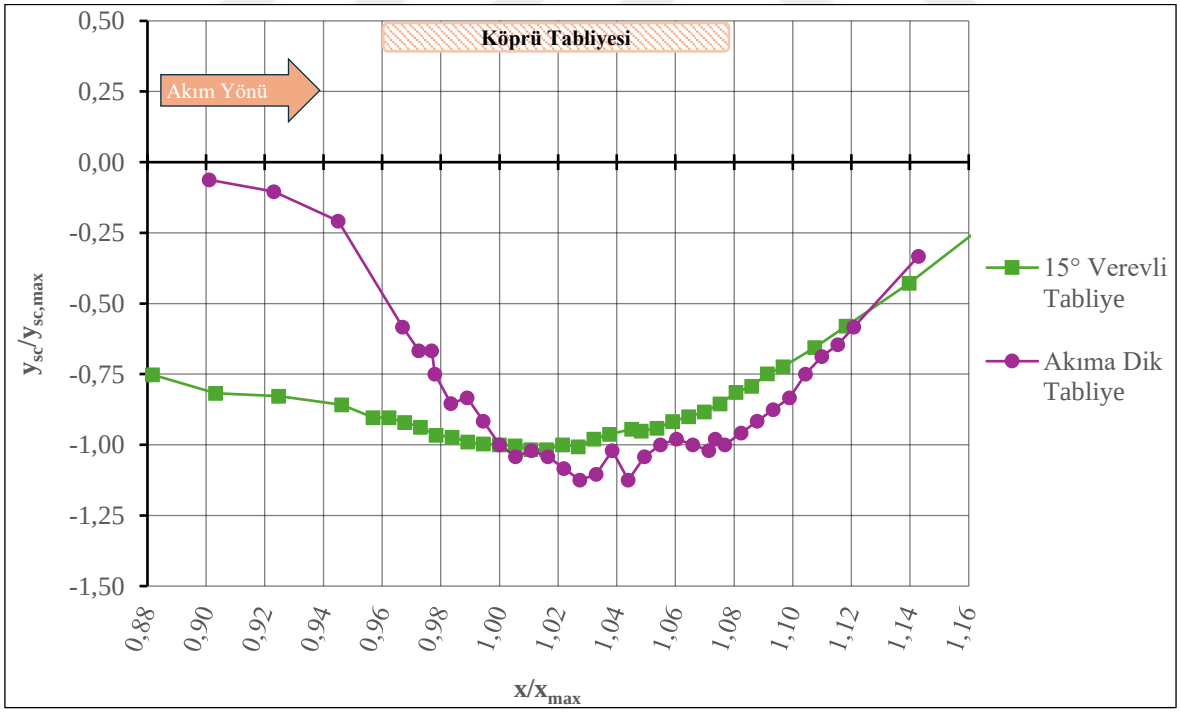
Şekil 4.34. 120 lt/sn ve 34,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili



Şekil 4.35. 120 lt/sn ve 37,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili



Şekil 4.36. 120 lt/sn ve 39,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili



Şekil 4.37. 120 lt/sn ve 41,5 cm'de meydana gelen y=0,53 m'de boyuna doğrultudaki boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili

4.5. Maksimum Oyulma Çukuru Derinliğini Tahmin Eden Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi

Temiz su oyulması halinde, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında, verevli köprü tabliyesi ile yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli orta ayak olması durumunda köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmaları tahmin etmek için bir bağıntı geliştirilmiştir. Bu bağıntıyı geliştirmek için çoklu lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Analizde kullanılacak parametreleri elde etmek amacıyla Bölüm 2'de verilen boyut analizi yardımıyla Eş. 4.1'de verilen ifade elde edilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = f(Fr_d, \frac{h_w}{y_a}, \frac{a}{y_a}, K_s, K_\alpha) \quad \text{(Eş. 4.1)}$$

Çizelge 4.10'da bu çalışma kapsamında YDB orta ayak ve 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen maksimum oyulma derinliği sonuçları kullanılarak hesaplanmış ve boyutsuzlaştırılmış oyulma derinliği üzerinde etkili parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.10. Regresyon analizinde kullanılan boyutsuz parametreler

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_d (-)	y_{spp}/y_a (-)	h_w/y_a (-)	a/y_a (-)	K_α (-)
100	34,5	2,547	0,470	0	0,058	1
	37,5	2,343	0,488	0	0,133	1
	39,5	2,225	0,471	0,051	0,127	1
	41,5	2,118	0,424	0,096	0,120	1
110	34,5	2,802	0,548	0	0,058	1
	37,5	2,578	0,509	0	0,133	1
	39,5	2,447	0,476	0,051	0,127	1
	41,5	2,329	0,441	0,096	0,120	1
120	34,5	3,057	0,652	0	0,058	1
	37,5	2,812	0,512	0	0,133	1
	39,5	2,670	0,481	0,051	0,127	1
	41,5	2,541	0,451	0,096	0,120	1

Çizelge 4.10'da verilen K_α köprü tabliyesi verevlik açısı etki faktörünü ifade etmektedir. Literatürde bu katsayıların basınçlı akım durumunda aldıkları değerlerle ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Literatürde sadece Farhangi ve diğerleri (2016) farklı verevlik açıları kullanarak dikdörtgen kesitli bir orta ayağın bulunduğu çok az sayıda deney yapmış ve bir bağıntı önermiştir. Ancak kare ayak şekli serbest akım durumunda dahi oyulmayı çok etkilediğinden bu çalışma kapsamında araştırmacıların önerdiği K_α bağıntısından yararlanılmamıştır. Bu nedenle ilk yaklaşım olarak bu katsayıların serbest akım durumundaki değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Regresyon analizine silindirik ayak ve akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesinin kullanıldığı deney verileri de dahil edilmiştir. Böylece regresyon analizinde Çizelge 4.10'da verilen YDB orta ayak ve verevli köprü tabliyesi durumunda elde edilen oyulma derinliklerine ait 12 örneklemin yanı sıra 36 adet örneklem daha ilave edilmiştir. Bu örneklemlerin 12'şer tanesi Yalçın (2024) tarafından silindirik ayak ve 15° verevlik açısına sahip tabliye ile Barakat (2022) tarafından silindirik ayak ve akıma dik yerleştirilmiş tabliye kullanılarak gerçekleştirilmiş deney verilerinden oluşturulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında yapılan deneylerle aynı laboratuvar ortamında, akıma dik tabliye ve YDB orta ayak kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen 12 farklı örneklem daha analize dahil edilerek toplam 48 adet örneklem ile regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece analiz neticesinde geliştirilen ampirik bağıntı hem tabliyenin akıma göre verevlik açısını hem de ayak şekil etkisini dikkate almıştır. Bunun yanında örneklem sayısının arttırılmasıyla bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki genelleştirilerek bağıntı ile tahmin edilecek oyulma sonuçlarının daha sağlıklı elde edilebilmesi amaçlanmıştır (Ho, 2006).

Regresyon analizinde kullanılan silindirik orta ayak ve verevli köprü tabliyesinin kullanıldığı Yalçın (2024)'a ait veriler Çizelge 4.11'de, silindirik orta ayak ve akıma dik tabliyenin kullanıldığı Barakat (2022)'a ait veriler Çizelge 4.12'de ve YDB orta ayak ve akıma dik tabliye kullanılarak gerçekleştirilmiş deney verileri Çizelge 4.13'te verilmiştir.

IBM SPSS Versiyon 25 programında gerçekleştirilen çoklu lineer regresyon analizinde bütün değişkenler nicel değişken olarak atanırken K_α ve K_s nitel değişken olarak atanmıştır. Tabliye verevlik etki faktörü olan K_α, akıma dik durumlarda 0, verevli köprü tabliyesinin olduğu durumlarda 1 olarak tanımlanmıştır. Ayak şekil faktörü K_s silindirik ve YDB orta ayak için 1 olarak alınmış ve bütün ayak şekillerinde (silindirik ve YDB) akımın ayakla temas eden kesit alanı aynı olduğundan analiz neticesinde bu parametre ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.11. Regresyon analizinde kullanılan Yalçın (2024)'a ait boyutsuz parametreler

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_d (-)	y_{spp}/y_a (-)	h_w/ y_a (-)	a/y_a (-)	K_α (-)
100	34,5	2,547	0,504	0	0,058	1
	37,5	2,343	0,472	0	0,133	1
	39,5	2,225	0,420	0,051	0,127	1
	41,5	2,118	0,354	0,096	0,120	1
110	34,5	2,802	0,507	0	0,058	1
	37,5	2,578	0,523	0	0,133	1
	39,5	2,447	0,468	0,051	0,127	1
	41,5	2,329	0,426	0,096	0,120	1
120	34,5	3,057	0,545	0	0,058	1
	37,5	2,812	0,531	0	0,133	1
	39,5	2,670	0,496	0,051	0,127	1
	41,5	2,541	0,484	0,096	0,120	1

Çizelge 4.12. Regresyon analizinde kullanılan Barakat (2022)'a ait boyutsuz parametreler

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_d (-)	y_{spp}/y_a (-)	h_w/ y_a (-)	a/y_a (-)	K_α (-)
100	34,5	2,547	0,452	0	0,058	0
	37,5	2,343	0,395	0	0,133	0
	39,5	2,225	0,347	0,051	0,127	0
	41,5	2,118	0,306	0,096	0,120	0
110	34,5	2,802	0,501	0	0,058	0
	37,5	2,578	0,453	0	0,133	0
	39,5	2,447	0,397	0,051	0,127	0
	41,5	2,329	0,342	0,096	0,120	0
120	34,5	3,057	0,549	0	0,058	0
	37,5	2,812	0,464	0	0,133	0
	39,5	2,670	0,423	0,051	0,127	0
	41,5	2,541	0,371	0,096	0,120	0

Çizelge 4.13. Regresyon analizinde kullanılan YDB orta ayak ve akıma dik tabliye deney verilerine bağlı olarak bulunan parametreler

Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_d (-)	y_{spp}/y_a (-)	h_w/ y_a (-)	a/y_a (-)	K_α (-)
100	34,5	2,547	0,449	0	0,058	0
	37,5	2,343	0,363	0	0,133	0
	39,5	2,225	0,375	0,051	0,127	0
	41,5	2,118	0,335	0,096	0,120	0
110	34,5	2,802	0,478	0	0,058	0
	37,5	2,578	0,440	0	0,133	0
	39,5	2,447	0,451	0,051	0,127	0
	41,5	2,329	0,412	0,096	0,120	0
120	34,5	3,057	0,559	0	0,058	0
	37,5	2,812	0,517	0	0,133	0
	39,5	2,670	0,491	0,051	0,127	0
	41,5	2,541	0,453	0,096	0,120	0

Regresyon analizinin yapılabilirliğini test etmek ve elde edilecek bağıntının doğruluğunu ölçmek için çeşitli ön şartlar kontrol edilmiştir (Büyüköztürk, 2005). Bu ön şartlardan normallik testi analiz öncesinde, multicollinearity yani çoklu bağlantılılık ve veriler arasında uç değer olup olmadığı kontrolü analiz sonuçları kullanılarak test edilmiştir. Bunun yanında tahminlere ait hataların normal dağılıma uygunluğu, hataların birbirinden bağımsız olup olmadığı ve eş varyanslılık yani homoskedastikliğin sağlanıp sağlanmadığı yine analiz sonuçları kullanılarak test edilmiştir.

Analiz öncesinde yapılan normal dağılım testi neticesinde çeşitli kriterler değerlendirilerek verilerin normal dağılıp dağılmadığı belirlenmiştir. Değişkenlerin normal dağılıma uygunluğunu test etmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan ilki çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) değerlerine göre normalliğin test edilmesidir. George ve Mallery (2010)'ye göre çarpıklık ve basıklık değerlerinin -2 ve +2 arasında olması değişkenlerin normal dağıldığını göstermektedir. Normal dağılımın test edilmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise çarpıklık ve basıklık değerlerinin standart hatalarına bölünerek elde edilen çarpıklık ve basıklık katsayılarının -1,96 ile +1,96 değerleri arasında olmasıdır (Büyüköztürk, 2005). Bunların yanında normallik testi neticesinde elde edilen Kolmogorov-Smirnova ve Shapiro-Wilk testlerinin gerçekleştirilmesiyle de normal dağılıma uygunluk belirlenebilmektedir. Razali (2011)'ye göre örneklem sayısı elliden az

olan testlerde Shapiro-Wilk testine göre değerlendirme yapılmakta ve değişkenin anlamlılık düzeyinin 0,05'ten büyük olması normal dağılımın sağlandığını göstermektedir. Bu sayısal testlerin yanısıra değişkenlere ait histogram grafiklerinin de çan eğrisine benzer şekilde eşit dağılım göstermesi normallik testinin sağlandığını göstermektedir.

Çizelge 4.14'te değişkenlere ait tüm örneklemlerin istatistksel verilerinin, çarpıklık ve basıklık değerlerinin gösterildiği betimleyici istatistikler verilmiştir. Çizelge incelendiğinde çarpıklık değerlerinin bütün değişkenler için -2 ve +2 arasında olduğu görülmüştür. Aynı şekilde basıklık değerilerinin de sınır değerler olan -2 ve +2 arasında olduğu ve bu kriterlerin normal dağılıma uygun olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.14. Betimleyici istatistikler ve örneklem sayıları

Betimleyici İstatistikler				
	y_{spp}/y_a	h_w/y_a	a/y_a	Fr_d
Geçerli Örneklem Sayısı	48	48	48	48
Geçersiz Örneklem Sayısı	0	0	0	0
Toplam Örneklem Sayısı	48	48	48	48
Ortalama	0,458	0,037	0,110	2,539
Ortalama Standart Hata	0,010	0,006	0,004	0,038
Ortanca	0,466	0,025	0,123	2,544
Standart Sapma	0,068	0,041	0,030	0,260
En Düşük Değer	0,306	0,000	0,058	2,117
En Büyük Değer	0,652	0,096	0,133	3,057
Çarpıklık	-0,006	0,460	-1,111	0,282
Çarpıklık Standart Sapması	0,343	0,343	0,343	0,343
Basıklık	0,495	-1,455	-0,671	-0,530
Basıklık Standart Sapması	0,674	0,674	0,674	0,674

Çizelge 4.15'te çarpıklık değerinin çarpıklık standart hatasına, basıklık değerinin ise basıklık standart hatasına bölünmesiyle elde edilen çarpıklık ve basıklık katsayıları verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında y_{spp}/y_a ve Fr_d değişkenlerinde hem çarpıklık hem de basıklık katsayısının sınır değerler olan -1,96 ve +1,96 değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Ancak tabliye üzerinden savaklanan su yüksekliğine bağlı olarak elde edilen h_w/y_a için basıklık katsayısının ve etkili kiriş yüksekliğine bağlı a/y_a için çarpıklık katsayısının sınır değerler dışında kaldığından normal dağılıma uymadığı görülmüştür. Bütün deney setlerinde savaklanan su yüksekliği ve tabliye kirişi aynı şekilde değiştiğinden bu değerlerde yeterli

çeşitlilik sağlanamamış ve normal dağılıma uygunluk sağlanamamıştır. Bu katsayılar sınır değerleri aşmış olsa da tek tek incelendiğinde çarpıklık ve basıklık değerlerinin gerekli sınırlar içerisinde bulunması sebebiyle analize devam edilmiş ve diğer kriterlerin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir.

Çizelge 4.15. Çarpıklık ve basıklık katsayıları

Değişkenler	y_{spp}/y_a	h_w/y_a	a/y_a	Fr_d
Çarpıklık (Skewness)	-0,006	0,46	-1,111	0,282
Çarpıklık Standart Sapması	0,343	0,343	0,343	0,343
Çarpıklık Katsayısı	-0,017	1,341	-3,239	0,822
Basıklık (Kurtosis)	0,495	-1,455	-0,671	-0,530
Basılık Standart Sapması	0,674	0,674	0,674	0,674
Basıklık Katsayısı	0,734	-2,158	-0,996	-0,786

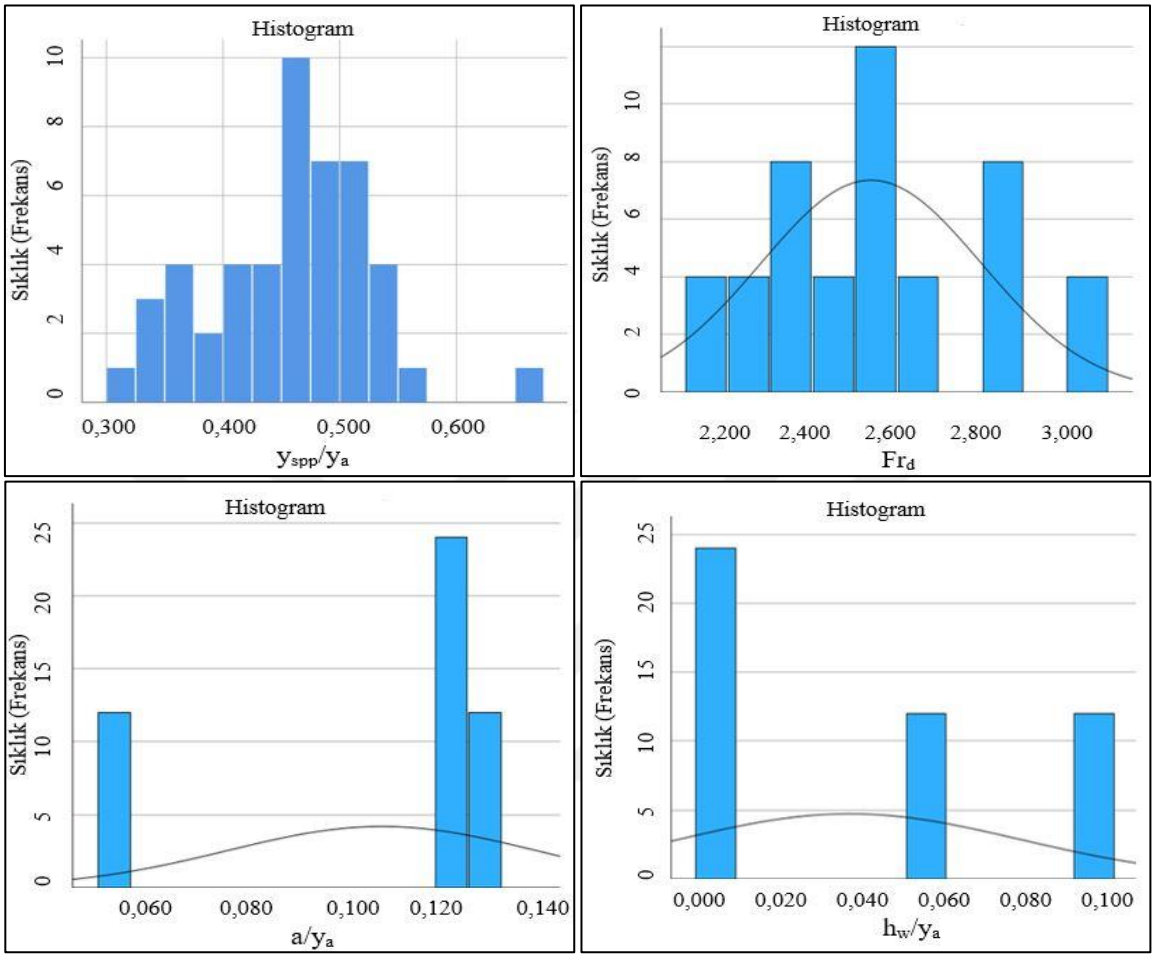
Çizelge 4.16'da Kolmogorov-Smirnova ve Shapiro-Wilk test sonuçları verilmiştir. Veri sayısının elliden az olduğu durumlarda Shapiro-Wilk testi yapılmaktadır. Analizde 48 örneklem kullanıldığı için Shapiro-Wilk testi ile verilerin anlamlılık düzeyleri değerlendirilerek normal dağılımın olup olmadığı kontrol edilmiştir. Çizelge 4.16'da verilen sonuçlar incelendiğinde Shapiro-Wilk testinde y_s/y_a ve Fr_d değerleri için anlamlılık düzeyini 0,05'ten büyük olduğu görülmüştür. Çarpıklık ve basıklık katsayılarında olduğu gibi h_w/y_a ve a/y_a değerleri için anlamlılık düzeyi sınır değer olan 0,05'in altında kalmış ve yeterli anlamlılık değerini sağlamamıştır.

Çizelge 4.16. Shapiro-Wilk Testi

	Kolmogorov-Smirnova	Shapiro-Wilk
	Anlamlılık Düzeyi	Anlamlılık Düzeyi
y_{spp}/y_a	0,200	0,527
h_w/y_a	<0,001	<0,001
a/y_a	<0,001	<0,001
Fr_d	0,200	0,050

Son olarak Şekil 4.38'de histogram grafikleri verilmiştir. Grafiklere bakıldığında y_{spp}/y_a ve Fr_d ifadeleri için elde edilen histogram grafiklerinin dengeli dağıldığı ve çan eğrisine yakın

bir şekil oluştuğu ancak h_w/y_a ve a/y_a parametreleri için aynı durumun sağlanmadığı görülmüştür.



Şekil 4.38. Değişkenlere ait histogram grafikleri

Normal dağılım testi gerçekleştirildikten sonra yapılan regresyon analiziyle elde edilen verilerle sağlanması gereken çeşitli ön şartların kontrolü yapılmıştır. Bunlardan ilki değişkenler arası çoklu bağlantılılık (multicollinearity) problemi olup olmadığıdır. Özellikle bağımsız değişkenler arasında çoklu bağlantılılık problemi bulunması yani değişkenler arasında yüksek oranda ilişki bulunması analiz neticesinde elde edilen bağıntının doğruluk oranını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu şartın test edilmesi için SPSS versiyon 25 üzerinden gerçekleştirilen analiz neticesinde elde edilen korelasyon değerlerinden faydalanılmıştır. Çizelge 4.17'de Pearson Korelasyon kısmında bulunan ve değişkenler arasında ilişki oranlarını gösteren değerler verilmiştir. Burada her bir değişkenin diğer değişkenler ile arasında hangi oranda ilişki bulunduğu verilmiştir. İlişki oranlarının mutlak değerinin 0,80'den büyük olması halinde değişkenler arasında kuvvetli ilişki oluşmakta ve

çoklu bağlantılılık problemi ortaya çıkmaktadır. Çizelgeye bakıldığında 0,80'den büyük herhangi bir değerin bulunmadığı ve değişkenler arasında çoklu bağlantılılık probleminin oluşmadığı belirlenmiştir. Çalışmada ayak şekil faktörü tüm örneklemler için aynı olduğundan K_s analizin dışında tutulmuş ve bu sebeple diğer değişkenler ile ilişki oranları test edilmemiştir. Bunun yanı sıra tabliye verevlik açısı etki faktörü olan K_α'nın oyulma derinliğine bağlı olarak oluşturulan değişken olan y_{spp}/y_a haricinde diğer değişkenler ile arasında pozitif ya da negatif bir ilişki oluşmamıştır.

Çizelge 4.17. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon değerleri

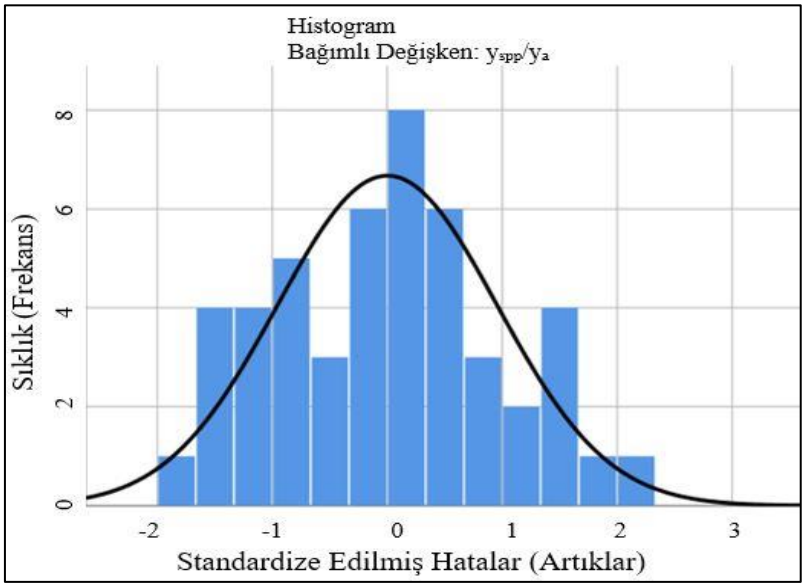
Korelasyonlar							
		y_{spp}/y_a	h_w/y_a	a/y_a	K_α	K_s	Frd
Pearson Korelasyon Analizi	y_{spp}/y_a	1,000	-0,594	-0,453	0,413	-	0,812
	h_w/y_a	-0,594	1,000	0,394	0	-	-0,601
	a/y_a	-0,453	0,394	1,000	0	-	-0,531
	K_α	0,413	0	0	1,000	-	0
	K_S	-	-	-	-	-	-
	Fr_d	0,812	-0,601	-0,531	0	-	1,000

Regresyon analizi için gerekli olan bir diğer ön şart ise değişkenlere ait örneklemlerin içerisinde uç değerlerin olmamasıdır. Bu şartın sağlanması için analiz neticesinde elde edilen ve Çizelge 4.18'de verilen hata istatistikleri tablosundaki standartize edilmiş hataları gösteren maksimum ve minimum değerlerin -3,29 ile +3,29 arasında bir değer alması gerekmektedir (Can, 2020). Çizelge 4.18'e bakıldığında -1,715 ve 2,156 olan minimum ve maksimum değerlerin bu sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca Cook Uzaklığı satırındaki minimum ve maksimum değerlere bağlı olarak da uç değer bulunup bulunmadığı test edilebilmektedir. Bu değerlerin 1'den küçük olması halinde veriler arasında uç değer olmadığı belirlenmektedir. Çizelge 4.18'de bu değerlerin 0 ve 0,179 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu ön şartın da sağlandığı belirlenmiştir.

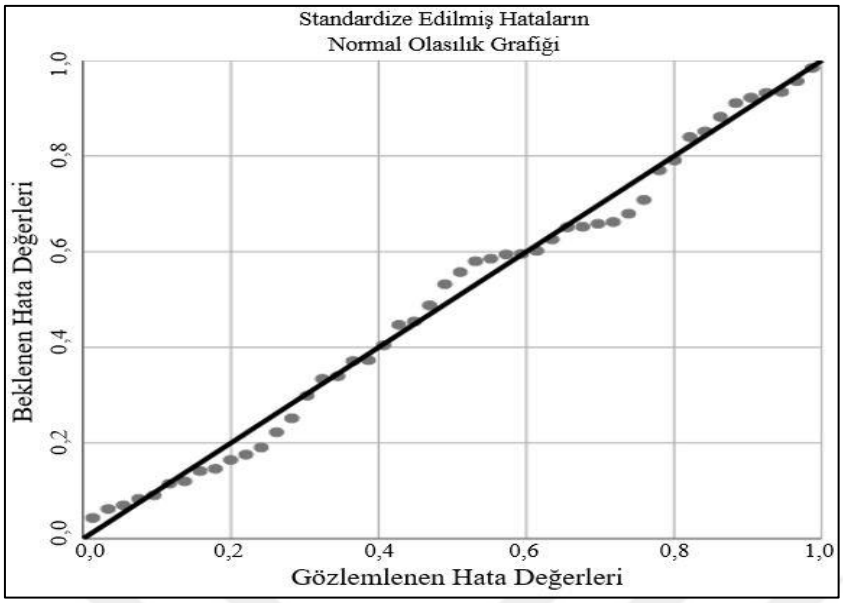
Çizelge 4.18. Uç değer kontrolü

Hata İstatistikleri (Residual Statistics)					
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	N
Tahmin Değerleri	0,336	0,592	0,458	0,062	48
Tahmin Değerleri Standart Sapma	0,006	0,010	0,009	0,001	48
Hatalar	-0,047	0,060	0,000	0,027	48
Standardize Edilmiş Hatalar	-1,715	2,156	0,000	0,957	48
Cook Mesafesi (Distance)	0,000	0,179	0,025	0,034	48

Regresyon analizindeki ön şartlardan bir diğeri de tahminlere ait hata oranlarının normal dağılıma sahip olmasıdır. Bu kontrolün gerçekleştirilmesi için Şekil 4.39'da verilen regresyona ait standardize edilmiş hata verilerinin frekans değerlerine bağlı grafiği ile Şekil 4.40'ta verilen hataların gözlenen ve beklenen değerlerinin karşılaştırıldığı dağılım grafiğinden faydalanılmıştır. Şekil 4.39'a bakıldığında regresyona ait standardize edilmiş hataların grafik üzerinde eşit dağıldığı ve frekanslarına bağlı olarak oluşturulan histogram eğrisinin çan eğrisine benzerliğiyle normal dağılımı sağladığı görülmüştür. Şekil 4.40'a bakıldığında ise gözlenen ve beklenen hatalar arasında önemli sapmalar olmadığı, standardize edilmiş regresyon hata grafiğinin oldukça dengeli dağıldığı görülmüştür. Bu iki grafiğin değerlendirilmesi neticesinde tahminlere ait hataların normal dağıldığı ve bu ön şartın da sağlandığı belirlenmiştir.

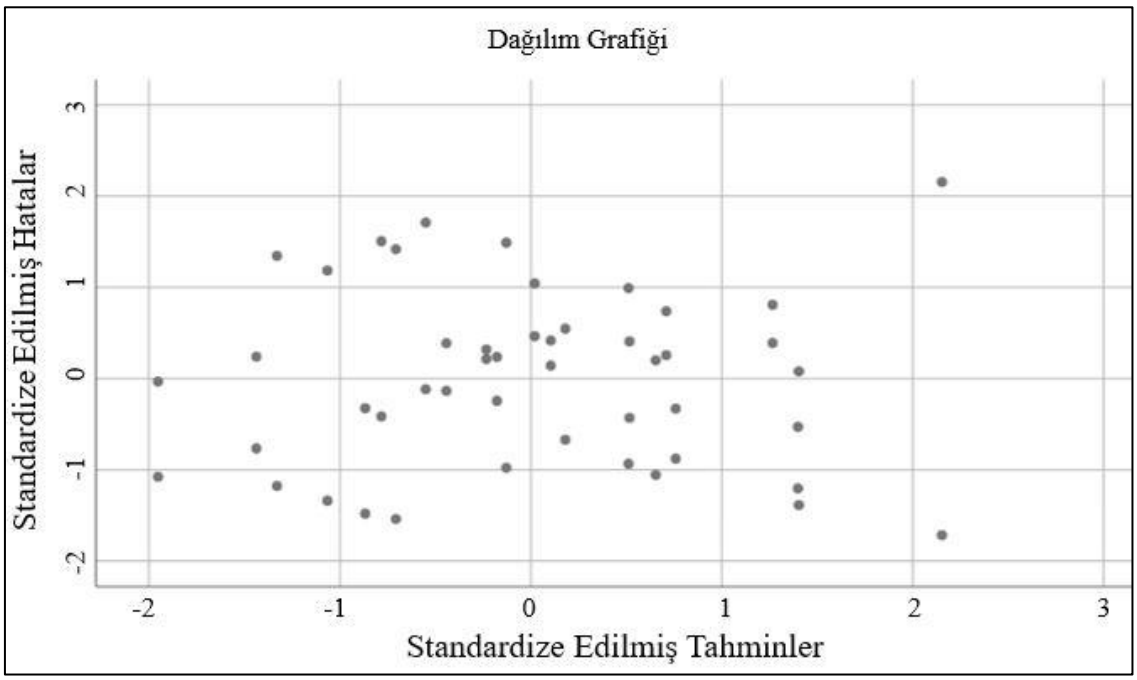


Şekil 4.39. Hataların histogram grafiği



Şekil 4.40. Gözlenen ve beklenen değerler grafiği

Regresyon analizinin güvenilirliğinin test edilmesi açısından önemli olan homoskedastiklik yani eş varyanslılık, değişkenlere ait hata varyanslarının değişkenlik gösterip göstermediğini ortaya koyan ve sağlanması gereken bir diğer ön şarttır (Büyüköztürk, 2005). Şekil 4.41'de verilen ve bağımlı değişken olan y_{spp}/y_a'nın dağılım grafiğine bakıldığında tahmin değerleri ile hata değerlerinin grafiğe dengeli yayıldığı ve eş varyanslılık şartının sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 4.41. Tahmin ve hata değerleri saçılım grafiği

Regresyon analizinde sağlanması gereken son ön şart ise hataların birbirinden bağımsız olmasıdır. Bu şart çizelge 4.19'da verilen regresyon analiz model özetindeki Durbin-Watson katsayısına bağlı olarak test edilmektedir. Durbin-Watson katsayısının 2 ya da 1 ile 3 arasında bir değer alması hataların birbirinden bağımsız olduğunu göstermektedir (Can, 2020). Diğer bir deyişle hatalar arasında otokorelasyon bulunmamaktadır. Çizelge 4.19'a bakıldığında bu değerin 1,270 yani 1 ile 3 arasında bir değerde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak hataların birbirinden bağımsız olduğu ve bu ön şartın da sağlandığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.19. Durbin-Watson Katsayısı

Model	Durbin-Watson
1	1,270
Bağımsız Değişkenler	Fr_d, K_α, h_w/y_a, a/y_a
Bağımlı Değişken	y_{spp}/y_a

Ön şartların sağlandığı belirlendikten sonra oyulmaları tahmin eden ampirik bağıntıyı elde etmek için çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen verilerden ilki tanımlayıcı ya da betimleyici istatistiklerdir. Çizelge 4.20'de her bir değişkene ait ortalamalar, standart sapmalar ve veri sayısı görülmektedir.

Çizelge 4.20. Betimleyici istatistikler

Betimleyici İstatistikler			
	Mean	Standart Sapma	N
y_{spp}/y_a	0,4579	0,0679	48
h_w/y_a	0,0368	0,0406	48
a/y_a	0,1096	0,0305	48
K_α	1,50	0,505	48
K_s	1,00	0,000	48
Fr_d	2,539	0,2605	48

Regresyon analizi neticesinde değerlendirilmesi gereken önemli noktalardan birisi değişkenler arasındaki korelasyon katsayısıdır. Korelasyon katsayıları değişkenlerin birbiri üzerinde pozitif ya da negatif anlamda nasıl bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.21'de değişkenler ve her bir değişkenin diğer değişkenler ile ilişkisini gösteren korelasyon katsayıları verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında bağımlı değişken olan y_{spp}/y_a üzerinde tabliye verevlik etki faktörü olan K_α ve densimetrik Froude sayısı olan Fr_d'nin pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Yani 0,812 oranında katsayıya sahip Fr_d'nin ve 0,413 oranında katsayıya sahip

olan K_α'nın artması halinde y_{spp}/y_a da artış göstermektedir. Diğer taraftan sırasıyla -0,594 ve -0,453 oranında negatif katsayılara sahip olan h_w/y_a ve a/y_a'nın artması y_{spp}/y_a değerinde azalmaya sebep olmaktadır. Bunun yanında korelasyon katsayısı 0,70'ten büyük olan y_{spp}/y_a ve Fr_d arasında güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir. Korelasyon katsayısının 0,30 ile 0,70 arasında değiştiği diğer durumlarda ise değişkenler arasında orta düzeyde bir ilişki söz konusudur.

Çizelge 4.21. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları

Korelasyonlar							
		y_{spp}/y_a	h_w/y_a	a/y_a	K_α	K_s	Fr_d
Pearson Korelasyon Analizi	y_{spp}/y_a	1,000	-0,594	-0,453	0,413	-	0,812
	h_w/y_a	-0,594	1,000	0,394	0	-	-0,601
	a/y_a	-0,453	0,394	1,000	0	-	-0,531
	K_α	0,413	0	0	1,000	-	0
	K_S	-	-	-	-	-	-
	Fr_d	0,812	-0,601	-0,531	0	-	1,000

Regresyon analizi sonucunda oluşturulan ampirik bağıntı ile bağımlı değişken y_{spp}/y_a ile bağımsız değişkenler h_w/y_a, a/y_a, Fr_d ve K_α arasındaki ilişkinin kuvvetli olması elde edilecek bağıntının ve tahminlerin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arasıdaki bu ilişki Çizelge 4.22'de bulunan regresyon analizi model özetinde bulunan çoklu korelasyon katsayısı değeri olan R ve düzeltilmiş korelasyon katsayısı değeri olan düzeltilmiş R^2 ile değerlendirilmiştir. Çoklu korelasyon katsayısı R regresyonda bağımlı değişkenin gözlem değerleri ile tahmin değerleri arasındaki Pearson korelasyon katsayısı olup bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişki derecesini göstermektedir. Çizelge incelendiğinde R değerinin 0,921 yani çok güçlü ilişkiyi gösteren 0,90 değerinden büyük olduğu görülmüştür. R değerinin 1 olduğu durumda korelasyon mükemmel 0,921 olması durumunda ise bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasında çok güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkende meydana gelen değişimleri hangi oranda açıkladığını gösteren ifade olan R^2 değeri 0,848 olarak bulunmuştur. Ancak Can (2020)'a göre çoklu doğrusal regresyon analizlerinde bu değer yerine düzeltilmiş R^2 değerinin dikkate alınması gerekmektedir. Regresyon denklemine ilgisi olmayan bağımsız değişkenler eklendiğinde, çoklu belirtme katsayısında düzeltme yapılmaktadır. Örneklem R^2 modelin anakütleye ne kadar uyduğu ile ilgilidir ve bunun için düzeltilmiş R^2 kullanılarak modelin anakütleye uyum iyiliği daha iyi

yansıtılmaktadır. Çizelgeden düzeltilmiş R^2 değerinin 0,833 olduğu görülmüştür. Buna göre bağımlı değişkendeki yüzde 83,3 oranındaki değişimler bağımsız değişkenler ile açıklanabilir. Yani bağımlı değişkenin yüzde 83,3'lük kısmı üzerinde bağımsız değişkenlerin tamamı etkiliyken yüzde 16,7'lik kısmında analize dahil edilmeyen, gözardı edilen ya da bilinmeyen değişkenler etkili olmuştur.

Çizelge 4.22. Regresyon Analizi Özet Tablosu

Model Özeti[b]					
Model	R	R^2	Düzeltilmiş R^2	Tahminlere ait standart hata	Durbin-Watson
1	0,921[a]	0,848	0,833	0,028	1,270
a Bağımsız Değişkenler: (Sabit), Fr_d, K_α, a/y_a, h_w/y_a					
b Bağımlı Değişken: y_{spp}/y_a					

Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösteren diğer bir büyüklük de analiz neticesinde elde edilen ANOVA tablosundaki anlamlılık oranıdır. Çizelge 4.23'te verilen ANOVA tablosuna bakıldığında regresyona ait anlamlılık değerinin 0,001'den küçük bir değere sahip olduğu görülmüştür. Burada 0,05'ten küçük bütün değerlerde bağımsız değişkenlerden en az birisinin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu anlaşılabilir (Can, 2020). Analizin sonraki bölümlerinde hangi bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde ne oranda anlamlı bir etkiye sahip olduğu verilmiştir.

Çizelge 4.23. ANOVA Tablosu

ANOVA[a]						
Model		Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Anlamlılık
1	Regresyon	0,184	4	0,046	59,8	<0,001[b]
	Hata (artık)	0,033	43	0,001		
	Toplam	0,217	47			
a: Bağımlı Değişken: y_{spp}/y_a						
b: Bağımsız Değişkenler: (Sabit), Fr_d, K_α, a/y_a, h_w/y_a						

Ön şartların kontrolü ve regresyon analizi çıktılarının incelenmesinin ardından, analizin asıl amacı olan oyulma derinliklerini tahmin edebilen ampirik bağıntının elde edilmesi için Çizelge 4.24 değerlendirilmiştir. Çizelge 4.24'te analiz neticesinde elde edilen katsayılar

tablosu verilmiştir. Çoklu doğrusal regresyon analizi neticesinde elde edilen ampirik bağıntı, bağımlı değişken, bağımsız değişkenler ve sabit değerlerden oluşmaktadır. Çizelge 4.24'te bulunan katsayılar $y = B_0 + B_1*x_1 + B_2 * x_2 + \ldots\ldots + B_n * x_n$ formatına uygun şekilde oyulma derinliğini tahmin eden denklemi oluşturmuştur. Burada y, bağımlı değişkeni; B_0, sabiti; B_i değerleri bağımsız değişken katsayılarını; x_i değerleri bağımsız değişkenleri; n ise bağımsız değişken adedini ifade etmektedir.

Çizelge 4.24. Regresyon Analizi Sonuçları ve Denklem Katsayıları

Katsayılar[a]						
Model		Standardize Edilmemiş Katsayılar		t	Anlamlılık	VIF
		B	Std. Error			
1	Constant	-0,023	0,065	-0,361	0,72	
	hw/ya	-0,277	0,125	-2,208	0,033	1,584
	a/ya	-0,029	0,157	-0,185	0,854	1,409
	Kalfa	0,055	0,008	6,935	0	1,000
	Frd	0,184	0,021	8,689	0	1,862
a: Bağımlı Değişken: y_{spp}/y_a						

Çizelge 4.24'e bakıldığında "standardize edilmemiş katsayılar" sütununda bağımsız değişkenlere ait katsayılar ve bunlara ait hata oranları görülmektedir. Ayrıca bağımsız değişkenlerin denklem üzerinde anlamlı bir etkisi olup olmadığını gösteren değerler anlamlılık sütununda verilmiştir. Bunun yanında tabloda bulunan ve varyans enflasyon faktörü olan "variance ınflation factor'' (VIF) değerlerinin 10'dan küçük olması analizin ön şartlarından biri olan çoklu bağlantılılık probleminin olmadığının bir başka göstergesidir.

Bütün değerlendirmeler ve yapılan çoklu doğrusal regresyon analizi sonucunda elde edilen denklem Eş. 4.2'de verilmiştir. Denklem incelendiğinde Fr_d ve K_α değerlerinin oyulma derinliğiyle doğru orantılı, h_w/y_a ve a/y_a değerlerinin oyulma derinliğiye ters orantılı olduğu görülmüştür. Tabliye verevlik açısına bağlı olarak değişen K_α değeri tabliyenin akıma dik olarak yerleştirildiği durumlarda 0, 15° verevlik açısıyla yerleştirildiği durumlarda 1 olarak alınmıştır. Bu da tabliyenin akıma belli bir açıyla yerleştirildiği durumlarda dik olduğu duruma göre daha fazla oyulmanın meydana geldiğini göstermektedir.

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = -0{,}023 + 0{,}184Fr_d - 0{,}277\frac{h_w}{y_a} - 0{,}029\frac{a}{y_a} + 0{,}055K_\alpha \qquad \text{(Eş. 4.2)}$$

Oyulma derinliğini tahmin eden bağıntının geliştirilmesinin ardından ölçülen oyulma derinlikleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan dört farklı deney setine ait örneklemler için iki farklı grup olacak şekilde kullanılan parametreler ve karşılaştırmalı olarak ölçülen ve tahmin edilen değerler Çizelge 4.25 ve 4.26'da verilmiştir. Çizelge 4.25'te bu çalışma kapsamında 15° verevlik açısıyla yereleştirilmiş köprü tabliyesi ve YDB orta ayak kullanılarak elde edilen veriler ile 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ve silindirik orta ayak kullanılarak elde edilen Yalçın (2024)'a ait veriler birlikte verilirken Çizelge 4.26'da ise akıma dik olarak yereleştirilmiş tabliye ve silindirik orta ayak kullanılarak elde edilen Barakat (2022)'a veriler ile aynı laboratuvar ortamında akıma dik tabliye ve YDB orta ayak kullanılarak gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen veriler birlikte verilmiştir. Bu gruplama yalnızca gösterim açısından bu şekilde yapılmış olup analiz ve değerlendirmeler bütün olarak yapılmıştır.

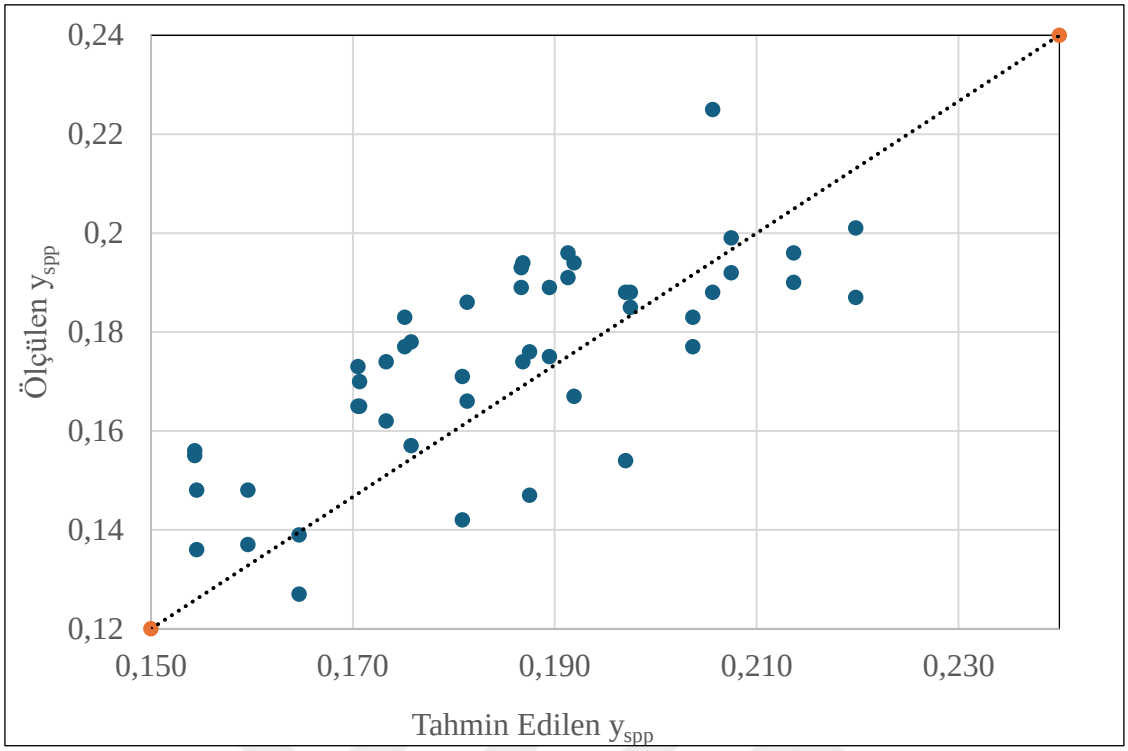
Çizelge 4.25 ve 4.26 incelendiğinde ölçülen ve tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri arasındaki farkın -%9 ile %23 arasında değiştiği görülmüştür. Bu durumda elde edilen tahmin değerlerinin yaklaşık olarak %77 oranında doğru olduğu belirlenmiştir. Bu tahmin doğruluk oranının regresyon analizi neticesinde elde edilen R değeri olan %92,1'e ve R kare değeri olan %83,3'e yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.42'de Çizelge 4.25 ve 4.26'da verilen ölçülen maksimum oyulma derinlikleri ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri dağılım grafiği üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.42 incelendiğinde tahmin edilen oyulma derinliklerinin grafikte eşit dağıldığı ve mutlak eşitlik doğrusuna oldukça yakın oldukları görülmüştür.

Çizelge 4.25. Regresyon analizinde kullanılan değişkenler ile ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

No	Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_d	h_w/y_a	a/y_a	K_α	Ölçülen y_{spp} (cm)	Eş. 4.2 ile tahmin Edilen y_{spp} (cm)	Fark (%)
1	100	34,5	2,55	0,00	0,06	1	16,2	17,3	7
2		37,5	2,34	0,00	0,13	1	18,3	17,5	-4
3		39,5	2,22	0,05	0,13	1	18,6	18,1	-3
4		41,5	2,12	0,10	0,12	1	17,6	18,8	6
5	110	34,5	2,80	0,00	0,06	1	18,9	18,9	0
6		37,5	2,58	0,00	0,13	1	19,1	19,1	0
7		39,5	2,45	0,05	0,13	1	18,8	19,7	5
8		41,5	2,33	0,10	0,12	1	18,3	20,4	10
9	120	34,5	3,06	0,00	0,06	1	22,5	20,6	-9
10		37,5	2,81	0,00	0,13	1	19,2	20,7	7
11		39,5	2,67	0,05	0,13	1	19	21,4	11
12		41,5	2,54	0,10	0,12	1	18,7	22,0	15
13	100	34,5	2,55	0,00	0,06	1	17,4	17,3	0
14		37,5	2,34	0,00	0,13	1	17,7	17,5	-1
15		39,5	2,22	0,05	0,13	1	16,6	18,1	8
16		41,5	2,12	0,10	0,12	1	14,7	18,8	22
17	110	34,5	2,80	0,00	0,06	1	17,5	18,9	8
18		37,5	2,58	0,00	0,13	1	19,6	19,1	-2
19		39,5	2,45	0,05	0,13	1	18,5	19,7	6
20		41,5	2,33	0,10	0,12	1	17,7	20,4	13
21	120	34,5	3,06	0,00	0,06	1	18,8	20,6	9
22		37,5	2,81	0,00	0,13	1	19,9	20,7	4
23		39,5	2,67	0,05	0,13	1	19,6	21,4	8
24		41,5	2,54	0,10	0,12	1	20,1	22,0	9

Çizelge 4.26. Regresyon analizinde kullanılan değişkenler ile ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

No	Q (lt/sn)	y_a (cm)	Fr_d	h_w/y_a	a/y_a	K_α	Ölçülen y_{spp} (cm)	Eş. 4.2 ile Tahmin Edilen y_{spp} (cm)	Fark (%)
25	100	34,5	2,55	0,00	0,06	1	15,6	15,4	-1
26		37,5	2,34	0,00	0,13	1	14,8	15,5	4
27		39,5	2,22	0,05	0,13	1	13,7	16,0	14
28		41,5	2,12	0,10	0,12	1	12,7	16,5	23
29	110	34,5	2,80	0,00	0,06	1	17,3	17,1	-1
30		37,5	2,58	0,00	0,13	1	17	17,1	0
31		39,5	2,45	0,05	0,13	1	15,7	17,6	11
32		41,5	2,33	0,10	0,12	1	14,2	18,1	21
33	120	34,5	3,06	0,00	0,06	1	18,9	18,7	-1
34		37,5	2,81	0,00	0,13	1	17,4	18,7	7
35		39,5	2,67	0,05	0,13	1	16,7	19,2	13
36		41,5	2,54	0,10	0,12	1	15,4	19,7	22
37	100	34,5	2,55	0,00	0,06	1	15,5	15,4	0
38		37,5	2,34	0,00	0,13	1	13,6	15,5	12
39		39,5	2,22	0,05	0,13	1	14,8	16,0	7
40		41,5	2,12	0,10	0,12	1	13,9	16,5	16
41	110	34,5	2,80	0,00	0,06	1	16,5	17,1	3
42		37,5	2,58	0,00	0,13	1	16,5	17,1	3
43		39,5	2,45	0,05	0,13	1	17,8	17,6	-1
44		41,5	2,33	0,10	0,12	1	17,1	18,1	5
45	120	34,5	3,06	0,00	0,06	1	19,3	18,7	-3
46		37,5	2,81	0,00	0,13	1	19,4	18,7	-4
47		39,5	2,67	0,05	0,13	1	19,4	19,2	-1
48		41,5	2,54	0,10	0,12	1	18,8	19,7	5



Şekil 4.42. Ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

Regresyon analizinde tabliye verevlik etki faktörü olan K_α akıma dik tabliyeler için 0 ve akıma verevli tabliyeler için 1 olarak alınmıştır. Ayrıca ayak şekil faktörü olan K_s hem YDB hem de silindirik orta ayak için 1 alınmıştır. Bu çalışmada genel regresyon analizine ek olarak deneylerde elde edilen sonuçlar ışığında K_α ve K_s için değerlendirme yapmak amacıyla farklı bir analiz daha gerçekleştirilmiştir. Çünkü literatürde bu katsayılarla ilgili herhangi bir çalışma veya bilgi bulunamamıştır.

4 farklı deney setinde yalnızca tabliyenin bulunduğu durumda gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen 39 farklı veri kullanılarak yeni bir regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve içerisinde tabliye verevlik etki faktörü K_α'nın da bulunduğu yeni bir denklem elde edilmiştir (Eş. 4.3). Elde edilen bu denklemde K_α için belirli bir aralıkta 1000 adet rastgele değer verilerek tahmin edilen oyulma derinliği ile ölçülen oyulma derinliği arasındaki oluşan farklar incelenmiştir. İnceleme neticesinde K_α değerinin 1,07 olduğu durumda ölçülen ve tahmin edilen oyulma derinliği farkının en az olduğu görülmüştür. Belirlenen bu K_α değerinin verevli köprü tabliyelerinde en uygun etki faktörü olabileceği düşünülerek ayak şekil faktörü için bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Çizelge 4.27'de elde edilen

denkleme ait regresyon analizi özeti ile Çizelge 4.28'de minimum farkların görüldüğü simülasyon verileri ile ilgili değerler sunulmuştur.

$$\frac{y_s}{y_a} = -0{,}547 + 0{,}216Fr_d - 0{,}001\frac{h_w}{y_a} - 0{,}372\frac{a}{y_a} + 0{,}071K_\alpha \quad \text{(Eş. 4.3)}$$

Çizelge 4.27. Regresyon analizi özeti

Model Özeti[b]				
Model	R	R^2	Düzeltilmiş R^2	Durbin-Watson
1	0,703[a]	0,494	0,434	0,57
a (bağımsız değişkenler)	K_α, Fr_d, h_w/y_a, a/y_a			
b (bağımlı değişken)	y_{spp}/y_a			

Çizelge 4.28. Simülasyon Özeti

Rastgele Üretilen K_α	Ölçülen y_{spp}/y_a	Eş. 4.3 ile elde edilen y_{spp}/y_a	Fark (%)
1,07	0,077	0,079	0,3

K_s ayak şekil faktörünü belirlemek amacıyla daha önce bulunan K_α =1,07 değeri kullanılarak tabliye ve orta ayağın birlikte bulunduğu deney verileri ile yeni bir regresyon analizi yapılmıştır. Bu analizde K_s ayak şekil faktörü denklemde etkili bir parametre olması açısından YDB orta ayak için 1,1 ve silinidirik orta ayak için 1 olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda yeni bir denklem elde edilmiş (Eş. 4.4) ve bu denklemde K_s ayak şekil faktörü için belirli bir aralıkta 1000 farklı değer verilerek ölçülen ve tahmin edilen oyulma derinlikleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak K_s ayak şekil faktörünün 1,2 olduğu durumda tahmin edilen ve ölçülen oyulma derinlikleri arasındaki farkın en az olduğu belirlenmiştir. Çizelge 4.29'da elde edilen denkleme ait regresyon analizi özeti ve Çizelge 4.30'da minimum farkların görüldüğü simülasyon verisi ile ilgili değerler verilmiştir.

$$\frac{y_s}{y_a} = -0{,}248 + 0{,}184Fr_d - 0{,}277\frac{h_w}{y_a} - 0{,}029\frac{a}{y_a} + 0{,}052K_\alpha + 0{,}214K_s \quad \text{(Eş. 4.4)}$$

Çizelge 4.29. Regresyon analizi özeti

Model Özeti[b]				
Model	R	R^2	Düzeltilmiş R^2	Durbin-Watson
1	0,934[a]	0,873	0,858	1,520
a (bağımsız değişkenler)	K_α, Fr_d, h_w/y_a, a/y_a , K_s			
b (bağımlı değişken)	y_{spp}/y_a			

Çizelge 4.30. Simülasyon Özeti

Rastgele Üretilen K_s	Ölçülen y_{spp}/y_a	Eş. 4.4 ile elde edilen y_{spp}/y_a	Fark (%)
1,2	0,507	0,347	46,1

Özet olarak yapılan bu kısa analiz neticesinde K_α tabliye verevlik etki faktörünün verevli tabliyeler için 1,07 değerine ve K_s ayak şekil faktörünün YDB orta ayaklar için 1,2 değerine eşit olabileceği düşünülmüş ve literatüre farklı bir değerlendirme kazandırılmak istenmiştir. Ancak bu parametrelerin basınçlı akım durumunda serbest akıma kıyasla oyulma derinliği üzerinde çok daha etkili olduğu ve bu konuda deneysel verilere ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır.

4.6. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma

Bu bölümde çalışma kapsamında elde edilmiş veriler ile literatürdeki çalışmalardan elde edilmiş bağıntıların sonuçları karşılaştırılmıştır. Tam ve kısmi basınçlı akım şartlarında elde edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri kullanılarak literatürdeki dört farklı ampirik bağıntı ve altı farklı deney setinden elde edilen sonuçlar kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Abed (1991)'in Eş. 4.5 ve 4.6, Farhangi ve diğerleri (2016) tarafından önerilmiş Eş. 4.7 ile Yalçın (2024) tarafından geliştirilmiş Eş. 4.8 bağıntıları kullanılmıştır. Bu denklemlerde çalışma kapsamındaki akım şartları, ayak ve tabliye şekline bağlı değerler kullanılarak maksimum oyulma derinlikleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.31'de literatürdeki çalışmalar ve bu çalışmaların akım özelliklerine ait veriler, Çizelge 4.32'de ise bu çalışmalara ait köprü ayağı ve tabliye özellikleri verilmiştir. Çizelge 4.33'te literatürdeki çalışmalarda ölçülen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile birlikte çalışmalar neticesinde geliştirilen ampirik bağıntılar ve mevcut çalışma kapsamında geliştirilen ampirik bağıntı kullanılarak hesaplanan maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir.

$$y_s = H_t K_s K_\theta \left[4{,}92 Fr_a + 0{,}46\left(\frac{H_b}{H_t}\right) - 0{,}74\right] \quad \text{(Eş. 4.5)}$$

$$y_s = H_b K_s K_\theta \left[2{,}31\left(\frac{H_t}{H_b}\right)^{1{,}5} Fr_a - 1{,}14\left(\frac{H_t}{H_b}\right) + 1{,}16\right] \quad \text{(Eş. 4.6)}$$

$$y_s = H_b \left[1{,}74819\left(\frac{V_a}{V_c}\right) + 2{,}63834\left(\frac{a}{y_a}\right) + 1{,}52073\left(\frac{D}{y_a}\right) - 1{,}55321\right] \quad \text{(Eş. 4.7)}$$

$$\mathrm{y_{spp}} = \mathrm{y_a}\left[0{,}001 + 0{,}170\mathrm{Fr_d} - 0{,}476\frac{\mathrm{h_w}}{\mathrm{y_a}} + 0{,}027\frac{\mathrm{a}}{\mathrm{y_a}} + 0{,}059\mathrm{K_\alpha}\right] \quad \text{(Eş. 4.8)}$$

Çizelge 4.31. Literatürdeki ilgili çalışmalar ve akım özelliklerine ait veriler

Çalışma		Akım Özellikleri							
		Akım Tipi	Q (lt/sn)	y_a (m)	V_a (m/sn)	Fr_a	V_c	Deney Süresi (saat) (t)	D_{50} (mm)
1	Abed (1991)	PP	0,362	0,488	0,305	0,139	2,883	3	3,2
		PP	0,651	0,579	0,457	0,194	2,966	3	3,2
2	Barakat (2022)	PP	0,100	0,375	0,267	0,139	2,410	9	0,8
		FP	0,110	0,395	0,278	0,141	2,431	17	0,8
3	Dik Tabliye Oval Orta Ayak	PP	0,100	0,375	0,267	0,139	2,410	17	0,8
		FP	0,110	0,395	0,278	0,141	2,431	17	0,8
4	Yalçın (2024)	PP	0,100	0,375	0,267	0,139	2,410	17	0,8
		FP	0,110	0,395	0,278	0,141	2,431	17	0,8
5	Mevcut Çalışma	PP	0,100	0,375	0,267	0,139	2,410	17	0,8
		FP	0,110	0,395	0,278	0,141	2,431	17	0,8
6	Farhangi ve Diğerleri	PP	0,117	0,2	0,39	0,278	0,460	9-12	0,8
		FP	0,129	0,22	0,39	0,265	0,460	9-12	0,8
		FP	0,107	0,31	0,23	0,132	0,320	9-12	0,23
		FP	0,107	0,31	0,23	0,132	0,320	9-12	0,23

PP: Kısmi Basınçlı
FP: Tam Basınçlı (Savak Tipi)

Çizelge 4.32. Literatürdeki ilgili çalışmaların ayak ve tabliye özelliklerine ait veriler

Çalışma	Köprü Ayağı ve Tabliye Özellikleri								
	Ayak Şekli	Ayak Uzunluğu (m)	Ayak Çapı (m)	α	L_t (m)	H_t (m)	H_b (m)	Tabliye Verevlik Açısı	K_θ
1	YDBDK	1,83	0,15	0	1,83	0,488	0,381	0	1,000
	YDBDK	1,83	0,15	0	1,83	0,579	0,472	0	1,000
2	Silindirik	0,10	0,10	0	1	0,345	0,325	0	1,000
	Silindirik	0,10	0,10	0	1	0,345	0,325	0	1,000
3	YDBDK	0,20	0,10	0	1	0,345	0,325	0	1,000
	YDBDK	0,20	0,10	0	1	0,345	0,325	0	1,000
4	Silindirik	0,20	0,10	0	1	0,345	0,325	15	1,431
	Silindirik	0,20	0,10	0	1	0,345	0,325	15	1,431
5	YDBDK	0,20	0,10	0	1	0,345	0,325	15	1,431
	YDBDK	0,20	0,10	0	1	0,345	0,325	15	1,431
6	Dikdörtgen	0,4	0,04	15	-	0,15	0,15	15	1,431
	Dikdörtgen	0,4	0,04	0	-	0,13	0,13	0	1,000
	Dikdörtgen	0,4	0,04	0	-	0,23	0,23	0	1,000
	Dikdörtgen	0,4	0,04	15	-	0,22	0,22	15	1,431

Çizelge 4.33. Ölçülen ve hesaplanan oyulma çukuru derinlikleri

Çalışma	Akım Tipi	Ölçülen y_{spp} (cm)	Tahmin Edilen (Hesaplanan) y_{spp}				
			Abed (1991) Eş. 4.5 (cm)	Abed (1991) Eş. 4.6 (cm)	Farhangi (2016) Eş. 4.7 (cm)	Yalçın (2024) Eş. 4.8 (cm)	Mevcut Çalışma Eş. 4.2 (cm)
Abed (1991)	PP	1,92	14,8	6,3	12,3	11,4	10,6
	PP	13,4	34,1	17,5	19	20,1	19,8
Barakat (2022)	PP	14,9	13	9,8	25,6	15,1	15,2
	FP	15,7	13,3	9,9	21,9	15,6	16,1
Dik Tabliye Oval Orta Ayak	PP	13,6	13	9,8	25,6	15,1	15,2
	FP	17,6	13,3	9,9	21,9	15,6	16,1
Yalçın (2024)	PP	17,2	13	9,8	25,6	17,3	17,3
	FP	18,4	13,3	9,9	21,9	18,0	18,3
Mevcut Çalışma	PP	17,7	13	9,8	25,6	17,3	17,3
	FP	18,7	13,3	9,9	21,9	18,0	18,3
Farhangi ve Diğerleri	PP	18,9	40,4	24,6	19,9	13,0	13,1
	FP	12,6	14,6	9	12,4	13,0	13,2
	FP	8,6	9,3	8,2	9,4	20,1	20,6
	FP	11,5	20,1	17,7	12,8	21,9	22,3

Çizelge 4.33'te verilen maksimum oyulma derinlikleri incelendiğinde Farhangi ve diğerlerine (2016) ait 15° verevlik açısına sahip dikdörtgen kesitli orta ayağı olan köprü tabliyesi durumunda kısmi basınçlı akım halinde en fazla oyulma derinliğinin meydana

geldiği görülmüştür. Bu çalışmada yaklaşım akım derinliği y_a ile ortalama akım hızı V_a'nın dolayısıyla Fr_a'nın diğer çalışmalardaki ölçümlerden fazla olması oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinin de fazla olmasında etkilidir. Bu deney setindeki Fr_a'ya daha yakın Fr_a değerlerinin bulunduğu deneyler karşılaştırıldığında YDB ayak ve 15° verevlik açısıyla gerçekleştirilen deneylerde elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliğinin diğer çalışmalarda elde edilen oyulma derinliklerine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca Farhangi ve diğerlerine (2016) ait çalışma haricinde diğer çalışmalarda ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliğinin tam basınçlı akım durumunda kısmi basınçlı akıma göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Abed (1991)'in geliştirdiği Eş. 4.5'den elde edilen sonuçlar incelendiğinde Abed (1991)'in ve Farhangi ve diğerlerinin (2016) elde ettiği deney sonuçları dışında diğer deneylerde ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliklerinin denklemlerle hesaplanan oyulma derinliği sonuçlarından daha büyük olduğu görülmüştür. Abed (1991) Eş. 4.6'da elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında da aynı durum görülmüştür. Eş. 4.5 ve 4.6 denklemlerinden elde edilen sonuçlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde Farhangi ve diğerlerinin kısmi basınçlı akım halinde en yüksek Froude sayısında gerçekleştirdiği deneylerde meydana gelen oyulmaların diğer oyulmalardan fazla olduğu görülmüştür.

Farhangi ve diğerlerinin (2016) elde ettiği Eş. 4.7 denkleminde ise maksimum oyulmalar YDB orta ayak, silindirik orta ayak, dik tabliye ve verevli tabliye durumları için değişmeyip kısmi basınçlı akım halinde meydana gelmiştir. Bu denklemden elde edilen sonuçların ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliklerinden daha büyük olduğu görülmüştür.

4.7. Çalışma Sonucunda Elde Edilen Bulguların Özeti

Çalışmanın bu bölümünde çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler neticesinde yapılan bütün değerlendirmelere yönelik bir özet verilmiştir.

4.7.1. Basınçlı akım durumunda oyulma özellikleri

- Basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri olan $y_{spp,max}$'ın ayağın hemen önünde memba tarafında meydana geldiği görülmüştür.

- 120 lt/sn'lik debi değerinde yaklaşım akım derinliği büyüdükçe yani tam basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliklerinde %17'ye varan oranlarda azalma gerçekleşmiştir.
- 100 ve 110 lt/sn'lik debi değerlerinde kısmi basınçlı akım halinde meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde yaklaşım akım derinliğinin arttığı durumlarda oyulma çukuru derinliklerinin de arttığı, tam basınçlı akım durumunda ise artan yaklaşım akım derinliğiyle birlikte oyulma çukuru derinliklerinde azalma olduğu görülmüştür.
- Kısmi basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin tam basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine göre %18 daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Oyulma çukuru şekillerine bakıldığında memba talveğinde debi değerindeki artışla beraber alçalma olduğu, mansapta da daha yayvan, şev eğimi küçük oyulma çukuru oluşmuştur. Ayrıca debi değerindeki artışla membada oluşan oyulma çukuru şevi daha yayvan oluşurken küçük debilerde daha dik eğimli bir şevin oluştuğu görülmüştür.
- Sadece verevli tabliyenin olduğu durumda meydana gelen daralma oyulması derinlikleri ile sadece YDB orta ayağın olduğu durumda meydana gelen yerel oyulma derinliklerinin toplanması ile elde edilen toplam basınçlı oyulma derinliklerinin tabliye ve ayağın birlikte olduğu durumda meydana gelen basınçlı oyulma derinliğine göre 110 ve 120 lt/sn'lik debilerde fazla olduğu ve oluşan oyulma farklarının %4 ile %27 arasında değiştiği görülmüştür. En büyük farkların görüldüğü 100 lt/sn'lik debi değerinde ise basınçlı oyulma derinliğinin toplam basınçlı oyulmaya göre %38 ile %93 arasında daha fazla olduğu belirlenmiştir. 120 lt/sn'lik debi değerinde en büyük farkların kısmi basınçlı akım halinde oluştuğu ve kısmi basınçlı akım ile tam basınçlı akım hallerinde artan yaklaşım akım derinliklerinde farkların da arttığı görülmüştür. 110 lt/sn'lik debi değerinde yalnızca en büyük akım derinliği olan 41,5 cm'de basınçlı oyulma derinliği y_{spp}'nin toplam basınçlı oyulma derinliği olan TBO'dan daha büyük olduğu, diğer akım derinliklerinde ve özellikle kısmi basınçlı akım durumunda en büyük farkların oluştuğu gözlemlenmiştir. Basınçlı oyulma derinliklerinin toplam basınçlı oyulmaya göre fazla olduğu 100 lt/sn'lik debi değerinde ise artan yaklaşım akım derinlikleriyle oyulma farkları artmış ve tam basınçlı akım durumunda kısmi basınçlı akıma göre daha fazla fark oluşmuştur.

4.7.2. Ayak şeklinin basınçlı akım oyulmasına etkisi

- Serbest akım halinde meydana gelen yerel oyulma derinliklerinde silindirik orta ayağın bulunda durumda YDB orta ayağa göre %30'a kadar artışlar görülmüştür.
- Basınçlı akım durumunda 100 lt/sn'lik debi değeri için farklı yaklaşım akım derinliklerine bakıldığında savak tipi akım durumunda meydana gelen oyulmaların YDB orta ayakta silindirik ayağa göre %12-20 oranlarında fazla olduğu görülmüştür.
- 110 lt/sn'lik debi değerinde YDB orta ayağın bulunduğu durumlarda genellikle silindirik orta ayağa göre oyulmaların arttığı ve bu artışın %8'e ulaştığı belirlenmiştir.
- 120 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelen oyulmalarda ise en düşük akım derinliği olan 34,5 cm'de gelişen kısmi basınçlı akımda YDB orta ayak durumundaki oyulmanın silindirik ayağa göre %20 fazla olduğu ancak diğer akım derinliklerinde silindirik ayak durumunda daha fazla oyulmanın olduğu görülmüştür.
- YDB orta ayağın bulunduğu durumlarda meydana gelen oyulmaların köprü membaında silindirik ayağa göre daha fazla, ayağa yaklaştıkça oyulma çukuru derinliğinin silindirik ayakta YDB orta ayağa göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

4.7.3. Verevlik şeklinin basınçlı akım oyulmasına etkisi

- Sadece tabliyenin olduğu durumlarda meydana gelen daralma oyulması derinliklerine bakıldığında verevli tabliye bulunması halinde oluşan oyulma çukuru derinliklerinin akıma dik tabliyeye göre %100'ü aşan oranlarda fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca bu oranın debi değerindeki artışla azaldığı belirlenmiştir. Bu durum Demir (2018) tarafından gerçekleştirilen ve Karakurt (2016)'a ait veriler ile karşılatırmanın yapıldığı çalışmada verevli köprü tabliyesinin olduğu durumlarda akıma dik tabliyenin olduğu durumlara göre 80 ve 90 lt/sn'lik debi değerlerinde %65'leri bulan artışlar olduğu belirlenmiştir.
- Tabliye ve ayağın birlikte bulunduğu durumda 100 ve 110 lt/sn'lik debi değerlerinde meydana gelen oyulmalarda verevli tabliye bulunması halinde akıma dik tabliyeye göre %3-26 oranlarında artış olduğu ancak 120 lt/sn'lik debide en düşük akım derinliği olan 34,5 cm yaklaşım akım derinliği haricindeki diğer akımlarda dik tabliye durumunda verevli tabliyeye göre daha fazla oyulmanın gerçekleştiği görülmüştür.

- Verevli köprü tabliyesinin olduğu durumlarda kanal başlangıcında oyulmaların akıma dik tabliyeye göre daha fazla etkili olduğu ve mansap tarafında oyulma farklarının arttığı gözlemlenmiştir.
- Tabliye verevlik şekline ek olarak tabliye uzunluğunun oyulma üzerindeki etkisinin incelendiği ve aynı verevlik açısına fakat farklı uzunluklara sahip tabliyelerin karşılaştırılması neticesinde uzun tabliyenin bulunduğu durumlarda meydana gelen daralma oyulması derinliklerinin kısa tabliyeye göre yaklaşık olarak %200 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uzun tabliye olması durumunda oluşan oyulma çukuru şev eğiminin kısa tabliyeye göre daha dik olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra uzun tabliye olması durumunda oyulmaların membada daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

4.7.4. Elde edilen verilerin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında benzer Fr_a değerine sahip çalışmalar arasında yapılan karşılaştırmada YDB orta ayak ve 15˚ verevlik açısına sahip tabliyenin bulunduğu durumda en büyük oyulma çukuru derinliklerinin meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak literatürde kıyaslanabilecek deney sayısı yetersiz ve mevcut çalışma ile uyumlu deney olmadığından bulgular sadece yorumlanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Özet ve Sonuçlar

Son yıllarda şiddetini ve frekansını artıran akarsu taşkınları sebebiyle akarsu köprülerinde ciddi can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Ani gelişen ve su seviyesinin köprü tabliyesine kadar ulaştığı taşkınlarda basınçlı akım meydana gelmekte ve köprü ayakları etrafında oluşan oyulmalar artmaktadır. Bu sebeple basınçlı akım halinde gelişen oyulma mekanizmasının incelenmesi ve köprü tasarımlarının bu bağlamda gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Bu alanda literatürdeki çalışma sayısının oldukça sınırlı kaldığı ve genellikle serbest akım halinde gelişen oyulma mekanizmasının incelenerek ampirik bağıntılar geliştirildiği görülmektedir. Yine literatürdeki çalışmaların birçoğu akıma dik olarak yerleştirilen köprü tabliyeleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple akıma verevlik açısıyla yerleştirilen köprü tabliyelerinde oyulmaların nasıl etkilendiğinin belirlenmesi de köprü tasarımı güvenliği açısından önemlidir.

Bu çalışmada basınçlı akım halinde meydana gelen oyulma çukuru derinlik ve şeklini incelemek ve bu akım şartında ampirik bağıntı elde etmek amacıyla 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ve yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli orta ayağı bulunan bir köprü modeli kullanılarak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler temiz su halinde, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında, farklı debi ve yaklaşım akım derinliklerinde yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında debinin ve yaklaşım akım derinliğindeki değişimlerin oyulma çukurunu nasıl etkilediği araştırılmıştır. Yalnızca köprü tabliyesinin bulunduğu durumlarda düşey daralma oyulması, orta ayağın bulunduğu durumlarda ayak etrafındaki yerel oyulmalar ve hem köprü tabliyesi hem de orta ayağın birlikte bulunduğu durumlarda toplam basınçlı akım oyulmaları incelenmiştir. Bunun yanında Yalçın (2024) tarafından yapılan çalışmada, aynı laboratuvar ortamında silindirik orta ayak kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle karşılaştırma yapılarak ayak şeklinin oyulmalar üzerinde etkisi araştırılmıştır. Köprü tabliyesi verevlik açısının oyulma üzerindeki etkisini incelemek amacıyla ise akıma dik tabliye ve bu çalışmadaki orta ayak kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen oyulma sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın sonunda tüm bu veriler ışığında regresyon

analizi gerçekleştirilerek ampirik bir bağıntı elde edilmiş ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır.

Sadece tabliyenin bulunduğu düşey daralma oyulması durumunda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla oyulmalarda azalma olduğu görülmüştür. Örneğin 100 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği 4,4 cm, 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru derinliği 2,3 cm olarak ölçülmüştür. Bunun yanı sıra aynı yaklaşım akım derinliğinde 110 ve 120 lt/sn'lik debi değerleri için meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri sırasıyla 8,9 cm ve 12,5 cm olarak ölçülmüş yani artan debi değerlerinin de oyulmalarda artışa sebebiyet verdiği görülmüştür. Kısmi basınçlı akım halinde meydana gelen oyulma çukuru derinliklerinin tam basınçlı yani savak tipi akım halinde meydana gelen oyulma çukuru derinliklerine göre 100 lt/sn'lik debi değerinde %42, 110 lt/sn'lik debi değerinde %46 ve 120 lt/sn'lik debi değerinde %56 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Özellikle 34,5 ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde köprü tabliyesi membaında talvegde meydana gelen oyulmaların daha fazla olduğu görülmüştür. Gelen akımın tabliyeye ilk temas ettiği yerde de oluşan oyulmaların fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tam basınçlı yani savak tipi akım halinde oluşan oyulma çukuru şev eğiminin mansapta daha dik olduğu gözlemlenmiştir. En küçük debi değeri olan 100 lt/sn'lik debi değerinde ise oyulma çukuru mansap şevi diğer debi değerlerine göre daha dik meydana gelmiştir.

Serbest akım halinde sadece yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli orta ayağın bulunduğu ve ayak etrafındaki yerel oyulmaların incelendiği deneyler neticesinde 100 lt/sn'lik debi değerinde artan yaklaşım akım derinliğiyle oyulmaların azaldığı görülürken 110 ve 120 lt/sn'lik debilerde yaklaşım akım derinliğinin doğrusal bir değişiklik yaratmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca oyulma miktarlarının artan debi değerleriyle birlikte arttığı görülmüştür. Maksimum oyulma çukuru derinliklerinin 120 lt/sn'lik debi değeri ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde en fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca membada en büyük oyulma çukuru derinliği ve orta ayağın mansabında en yayvan eğim 120 lt/sn'lik debi değerinde meydana gelmiştir.

Tabliye ve orta ayağın birlikte bulunduğu durumda meydana gelen basınçlı akım oyulması incelendiğinde 100 ve 110 lt/sn'lik debi değerlerinde kısmi basınçlı akım halinde yaklaşım akım derinliğinin arttığı durumda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği

artmış, tam basınçlı yani savak tipi akım halinde ise azalmıştır. 120 lt/sn'lik debi değerinde kısmi ve tam basınçlı akım halinde yaklaşım akım derinliğinin artması durumunda oyulmaların azaldığı görülmüştür. Sabit yaklaşım akım derinliklerinde ise artan debi değeriyle meydana gelen oyulmaların arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra memba talveğinde debi değerindeki artışla beraber alçalma olduğu mansapta da daha yayvan şev eğimi ve küçük oyulma çukuru oluştuğu görülmüştür. Ayrıca düşük debi değerlerinde daha dike yakın şev eğimleri gözlemlenmiştir.

Basınçlı akım halinde meydana gelen oyulma değerleri ile yerel oyulma ve düşey daralma oyulmasının ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen toplam basınçlı oyulmalar karşılaştırıldığında 100 lt/sn'lik debide ölçülen basınçlı oyulma derinliğinin yerel ve düşey daralma oyulmalarının ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen oyulmaya göre %93 ulaşan oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ancak 110 ve 120 lt/sn'lik debi değerlerinde yerel ve düşey daralma oyulmalarının ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen oyulma değerlerinin %4-27 oranlarında daha yüksek miktarda olduğu belirlenmiştir.

Orta ayağın oyulmalar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli orta ayak ile silindirik orta ayak için gelişen oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmış ve sadece ayağın bulunduğu serbest akım koşullarında silindirik ayağın yarım daire burunlu dikdörtgen kesitli (YDB) orta ayağa göre daha fazla oyulmaya sebep olduğu görülmüştür. Kısmi ve tam basınçlı akım halinde ise YDB ayağın bulunduğu durumlarda meydana gelen oyulmaların silindirik ayağa göre %20 oranına kadar daha fazla olduğu görülmüştür.

Köprü tabliyesi açısının oyulma üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılan karşılaştırmalarda sadece tabliyenin bulunduğu durumda verevli köprü tabliyesinde oluşan oyulma miktarının akıma dik tabliyeye göre 100 ve 110 lt/sn'lik debilerde %200'üzerinde bir oranda, 120 lt/sn'lik debide ise %100'e yakın oranlarda daha fazla olduğu görülmüştür. Sadece tabliyenin bulunduğu durumda en fazla oyulmaların oluştuğu 120 lt/sn'lik debi değeri ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru derinliği akıma dik tabliye durumunda 6,6 cm olurken akıma verevli tabliye durumunda 12,5 cm olmuş ve %90'lık bir fark oluşmuştur. Hem tabliyenin hem de ayağın birlikte bulunduğu basınçlı akım halinde ise meydana gelen oyulma çukuru derinliği verevli köprü tabliyesinde 22,5 cm ve akıma dik tabliyede 19,3 cm olmuş ve %17'lik fark oluşmuştur.

Tabliye uzunluğunun oyulma üzerindeki etkisinin incelendiği ve aynı verevlik açısına fakat farklı uzunluklara sahip tabliyelerin karşılaştırılması neticesinde uzun tabliyenin bulunduğu durumlarda meydana gelen daralma oyulması derinliklerinin kısa tabliyeye göre yaklaşık olarak %200 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uzun tabliye olması durumunda oluşan oyulma çukuru şev eğiminin kısa tabliyeye göre daha dik olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen boyut analiziyle elde edilen bağımlı ve bağımsız değişkenlere bağlı olarak YDB orta ayak ve verevli köprü tabliyesinin kullanıldığı deneylerden elde edilen verilerle birlikte YDB orta ayak ve akıma dik köprü tabliyesi, silindirik orta ayak ve verevli köprü tabliyesi, silindirik orta ayak ve akıma dik tabliyenin kullanıldığı deneylerde elde edilen veriler kullanılarak 48 örneklemden oluşan bir veri grubu oluşturulmuştur. Bu sayede yapılan regresyon analizi neticesinde tabliye verevlik açısının da etkisinin görüldüğü ampirik bir bağıntı elde edilmiştir. Analiz sonucunda geliştirilen ampirik bağıntı üzerinde Fr_d ve tabliye verevlik etki faktörü K_α oyulma çukuru derinliğinde pozitif etki, tabliye üzerinden savaklanan akım yüksekliğine bağlı oluşturulan h_w/y_a ve etkili kiriş yüksekliğine bağlı oluşturulan a/y_a parametreleri negatif etki yapmıştır. Yani tabliye verevliliği ve Froude sayısı oyulma derinliklerinde artmaya sebep olurken tabliye üzerinden savaklanan su azalmaya sebep olmuştur.

Son olarak elde edilen ampirik bağıntının belirsizlik analizi Monte Carlo simülasyonu kullanılarak yapılmış ve parametrelere ait belirsizlik oranları araştırılmış, her bir değişkenin denklem üzerindeki etkisi incelenmiştir.

5.2. Sonraki çalışmalar için öneriler

Basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve tasarım yaklaşımlarının geliştirilebilmesi için aşağıdaki çalışmaların yapılması önerilmektedir.

- Froude sayısı (Fr_a) ve V_a/V_c oranı değerlerinin daha geniş aralıklarda değiştiği deneyler yapılarak belirsizlikler azaltılabilir. Özellikle V_a/V_c'nin 1'e yakın değerlerinde deneyler yapılması oyulma açısından en kritik durumun incelenmesi açısından önemlidir.

- Farklı taban malzemeleri ile sediment tane boyutları kullanılarak oyulmaya etkileri incelenebilir. Ayrıca hareketli taban oyulması durumu için de deneyler yapılarak farklı akım koşulları için akım etkisi incelenebilir.
- Köprü orta ayaklarının akıma dik olmadığı durumlarda meydana gelen oyulma çukuru oluşumu ve değişimi incelenebilir. Orta ayağın çapı, geometrik şekli ve boyutları değiştirilerek oyulmaya etkisi incelenebilir. Ayrıca kenar ayak olması durumu da aynı şekilde incelenebilir.
- Farklı tabliye konumlarında deneyler gerçekleştirilebilir. Akım çizgileri ve hız profilleri belirlenerek literatürde bulunan akıma dik tabliye modeli sonuçları ile karşılaştırılabilir.
- Basınçlı akım durumunda farklı tabliye, ayak, taban malzemesi ve akım şartlarında meydana gelen akım alanının belirlenmesi de basınçlı akım oyulmasının anlaşılması için çok önemlidir.

KAYNAKLAR

Abdelhaleem, F. S., Mohamed, I. M., Shaaban, I. G., Ardakanian, A., Fahmy, W. ve Ibrahim, A. (2023). Pressure-Flow Scour under a Bridge Deck in Clear Water Conditions. *Water, 15*(3), 404.

Abed, L. M. (1991). *Local Scour Around Bridge Piers in Pressure Flow.* Doktora Tezi. Colorado State University, Colorado, 115-124

Arneson, L. A. (1997). *The effect of pressure-flow on local scour in bridge openings.* Doktora Tezi, Colorado State University, Colorado, 70-76

Arneson, L. A. ve Abt, S. R. (1998). Vertical contraction scour at bridges with water flowing under pressure conditions. *Transportation Research Record, 1647*(1), 10-17.

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

Baduna Koçyiğit, M. ve Koçyiğit, Ö. (2024). Experimental Investigation of Bridge Scour under Pressure Flow Conditions. *Water*. 16(19), 4-6.

Barakat, Z. O. (2022). *Akarsu Köprülerinde Basınçlı Akım Koşulunda Toplam Oyulmanın İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 56-87

Baranwal, A., Bhabani, S. D. ve Baldev, S. (2023). A comparative study of scour around various shaped bridge pier. *Engineering Research Express* 5, 2-17

Büyüköztürk, Ş. (2005). *Sosyal Bilimler için Veri Analizi El Kitabı: İstatistik, Araştırma Deseni, SPSS Uygulamaları ve Yorum.* (7. Baskı) Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık, 93-119

Can, A. (2020). *SPSS ile Bilimsel Araştırma Sürecinde Nicel Veri Analizi.* (9. Baskı) Ankara: Pegem Akademi, 277-298

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

Demir, G. (2018). *Akarsuyu Verev Kesen Köprülerde Farklı Akım Şartlarında Meydana Gelen Taban Oyulmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 2-13

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

Farhangi, A., Thamer, A. A., Ghazali, A. H. ve Yusuf, B. (2016). Maximum scour depth at submerged skewed bridge and pier. *Malaysian Journal of Civil Engineering, 28*(1), 20-34.

Fayyadh, M. M., Akib, S., Othman, I. ve Razak, H. A. (2011). Experimental investigation and finite element modelling of the effects of flow velocities on a skewed integral bridge. *Simulation Modelling Practice and Theory, 19*(9), 1795-1810.

FHWA Resource Center Hydraulics. (2012). *Hydraulic Engineering Circular No.18 Evaluating Scour at Bridges.* Colorado: United States Department of Transportation, 42-61.

George, D. ve Mallery, P. (2010). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 Update.* (10. Baskı) Boston: Allyn ve Bacon, 58-65.

Guo, J., Kerenyi, K., Pagan-Ortiz, J. E., Flora, K. ve Afzal, B. (2010). *Submerged-Flow Bridge Scour under Maximum Clear-Water Conditions*. 5th International Conference on Scour and Erosion. San Francisco, 6-8.

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

Ho, R. (2006). *Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS.* (1. Baskı) London: Chapman and Francis Group, 67-76

Karakurt, O. (2016). *Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altındaki oyulmanın incelenmesi.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 34-55.

İnternet: KGM. (2025, Ocak). *Karayolları Genel Müdürlüğü*. Köprü Envanter Bilgileri: URL:https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/KopruveTunelBilgileri/kopruenvanterbilgileri.pdf Son Erişim Tarihi:01.01.2025

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

Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pego, J. ve Cardoso, A. H. (2012). *Effect of spacing and skew-angle on clear-water scour at pier alignments*. London: Taylor and Francis Group 927-933.

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. ve Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour.* (5. Baskı) Colorado: Water Resources Publications, 346-387.

Mostafa, E. A., Ettema, R., Yassin, A. A. ve Melville, B. M. (1993). *Local Scour at Skewed Bridge Piers.* Iowa: Iowa Institute of Hydraulic Research, 124(7), 756-760.

Nornadiah, M. R., (2011) *Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests.* Selangor: MARA University of Technology, 1-5.

Neill, C. R. (1973). *Guide to bridge hydraulics.* (1. Baskı) Toronto: University of Toronto Press, 20-23.

Oliveto, G. ve Hager, W. H. (2002). Temporal evoluation of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering, 82*(3), 811-820.

Richardson, E. V. ve Davis, S. R. (2001). *Evaluating Scour At Bridges.* Colorado: Ayres Associates, 41-96

Robeson, M. D. (2000). *Pressure flow effects on scour at bridges.* Yüksek Lisans Tezi, Colorado State University, Colorado, 63-78

Shen, J., Shan, H., Xie, Z., Bojanowski, C., Lottes, S. ve Kerenyi, K. (2012). *Submerged-Flow Bridge Scour Under Clear-Water Conditions*. ICSE6 Konferansında sunuldu, Paris, 755-760

Shepard, D. M., Melville, B. ve Demir, H. (2014). Evaluation of existing equations for. *Journal of Hydraulic Engineering, 140 (1)*, 14-23.

Umbrell, E. R., Young, G. K., Stein, S. M. ve Jones, J. S. (1998). Clear-Water Contraction Scour under Bridges in Pressure Flow. *Journal of Hydraulic Engineering, 124*(2), 236-240.

United Kingdom National Highways. (2012). *The Assessment of Scour and Other Hydraulic Actions at Highway Structures.* United Kingdom Design Manual for Roads and Bridges, 123-129.

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

Yalçın, C. (2024). *Akarsuyu verev kesen köprülerde basınçlı akım oyulmasının incelenmesi.* Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 39-77.

Yanmaz, M. A. (2022). *Köprü Hidroliği*. (2. Baskı) Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 150-198.



Gazili olmak ayrıcalıktır