



**AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE BASINÇLI AKIM  
OYULMASININ İNCELENMESİ**

**Cihan YALÇIN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2024**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Cihan YALÇIN

19/04/2024

# AKARSUYU VEREV KESEN KÖPRÜLERDE BASINÇLI AKIM OYULMASININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Cihan YALÇIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2024

## ÖZET

Etkisini iyice hissettiren iklim değişikliğiyle birlikte taşkınların şiddetinde ve frekansında değişimler gözlemlenmektedir. Yaşanan ani ve şiddetli taşkınlar sonucunda akarsu köprülerinde özellikle son on yıllık dönemde tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de meydana gelen yıkılma ve hasar olayları artmakta, ciddi can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Dolayısıyla gerek mevcut köprülerin gerekse yeni projelendirilecek köprülerin ekonomik ömürleri içerisinde güvenli bir şekilde işletilmelerini sağlamak amacıyla taşkın sırasında meydana gelen basınçlı akım durumunda köprü ayaklarında oluşan oyulma mekanizmasının anlaşılması ve uygun bir uygulama kılavuzu geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde serbest akım şartlarında köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma derinliğinin hesaplanması için çok sayıda ampirik bağıntı bulunmaktadır. Ancak basınçlı akım şartlarında ayaklar etrafındaki oyulma mekanizmasını inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu araştırma kapsamında 15°’lik vevlik açısına sahip köprü tabliyesi ve silindirik bir orta ayaktan oluşan köprü modeli kullanılarak basınçlı akım durumunda ayak etrafında meydana gelen oyulma çukuru laboratuvar ortamında yapılan bir dizi deneyle incelenmiştir. Deneylerde farklı yaklaşım akım derinliği ve debi değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulma derinliği serbest akım durumunda oluşan oyulma derinliğinden daha büyüktür ve yaklaşım akım derinliğine ait Froude sayısı büyüdükçe oyulma derinliği de artmaktadır. Ayrıca akıma dik ve 15°’lik vevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyeleri altında basınçlı akım durumunda meydana gelen maksimum oyulma derinliklerinin karşılaştırılmasıyla vevlikten dolayı oyulma derinliklerinin %24’e kadar artış gösterebildiği gözlemlenmiştir. Tam basınçlı akım durumunda tabliye üstündeki su yüksekliğinin artmasıyla maksimum oyulma derinliğinin de arttığı belirlenmiştir. Bu tespitin, yüzeydeki çevrintiler ve türbülans nedeniyle orta ayağa sahip, üzerinden su aşma riski bulunan köprüler için son derece önemli olduğu düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 91122

Anahtar Kelimeler : Akarsu köprüleri, vevlik açısı, basınçlı akım, savak tipi akım, maksimum oyulma çukuru derinliği

Sayfa Adedi : 110

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Önder KOÇYİĞİT

İkinci Danışman : Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT



# INVESTIGATION OF SCOURING UNDER SKEWED BRIDGE DECK IN PRESSURIZED FLOW

(M. Sc. Thesis)

Cihan YALÇIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

## ABSTRACT

Especially in the last decade, changes are observed in the intensity and frequency of floods along with climate change, which has made its impact felt increasingly in Türkiye as well as throughout the world. As a result of sudden and severe floods, failure and damage incidents of river bridges are increasing, causing serious loss of life and economic loss. Therefore, it is crucial to understand the scour mechanism around bridge piers under pressure flow condition that occurs during floods and to develop design guidelines to ensure safe operation of both bridges in operation and those to be designed within their economic life span. There are many empirical equations in the literature that are used to evaluate the maximum scour depth around bridge piers under free-flow condition. However, the number of studies investigating the scour mechanism around piers under pressurized flow condition is rather limited. Within the scope of this research, the scour hole around a circular pier under a bridge deck with a skew angle of  $15^\circ$  was investigated under pressure flow condition with a series of laboratory experiments. Various approach flow depths and discharge values were used in the experiments. According to the results, the maximum scour depth around the pier under pressure flow condition is greater than that of the free flow condition. Furthermore, as the Froude number of the approach flow depth increased, the maximum scour depth also increased. In addition, the maximum scour depths under the bridge deck located perpendicular to the flow and with a skew angle of  $15^\circ$  were compared and it was observed that the scour depth increased up to 24% due to the skewness of the bridge deck. It was observed that the maximum scour depth increased as the water load above the deck is increased for fully pressurized flow. This finding is very important for bridges with piers that are at risk of flooding due to surface vortices and turbulence.

Science Code : 91122

Key Words : River bridges, skewness angle, pressure flow, weir type flow, maximum scour depth

Page Number : 110

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Önder KOÇYİĞİT

Co-supervisor : Assoc. Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecindeki değerli rehberliği ve unutulmaz destekleri ile yardımını ve sabrını esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Önder KOÇYİĞİT'e ve deneysel çalışmalarında beni cesaretlendiren, bilgisiyle aydınlatan ve deneyimleriyle yönlendiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'e, beni yetiştiren, hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini esirgemeyip bugünlere gelmemde büyük emekleri olan annem, babam ve ağabeylerime, akademik yolculukta her daim yanımda olan ve bana her türlü moral ve motivasyon kaynağı olan eşim Sena YALÇIN'a teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

|                                                     | Sayfa |
|-----------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                          | iv    |
| ABSTRACT.....                                       | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                       | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                   | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                          | ix    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                            | xi    |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                            | xv    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                        | xvi   |
| 1. GİRİŞ.....                                       | 1     |
| 2. OYULMA MEKANİZMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... | 5     |
| 2.1. Serbest ve Basıncılı Akım .....                | 5     |
| 2.2. Oyulma Mekanizması ve Çeşitleri .....          | 7     |
| 2.2.1. Genel oyulma.....                            | 9     |
| 2.2.2. Daralma oyulması.....                        | 9     |
| 2.2.3. Yerel oyulmalar .....                        | 10    |
| 2.3. Boyut Analizi .....                            | 14    |
| 2.4. Literatür Araştırması .....                    | 19    |
| 3. DENEY DÜZENEGİ VE PROSEDÜRÜ .....                | 25    |
| 3.1. Genel .....                                    | 25    |
| 3.2. Deney Düzenegi ve Kurulumu.....                | 27    |
| 3.2.1. Taban malzemesi .....                        | 27    |
| 3.2.2. Köprü modeli.....                            | 28    |
| 3.2.3. Deney ölçüm düzeneği .....                   | 30    |

**Sayfa**

|                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3. Deney Kapsam ve Prosedürü .....                                                                                | 32        |
| <b>4. DENEY SONUÇLARI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>                                                     | <b>39</b> |
| 4.1. Oyulma Çukuru Özelliklerinin İncelenmesi .....                                                                 | 39        |
| 4.1.1. Düşey daralma oyulmasının incelenmesi .....                                                                  | 39        |
| 4.1.2. Serbest akım şartlarında yerel oyulmanın incelenmesi .....                                                   | 48        |
| 4.1.3. Basınçlı akım şartlarında toplam oyulmanın incelenmesi .....                                                 | 56        |
| 4.2. Verevlik Açısının Basınçlı Akım Oyulmasına Etkisinin İncelenmesi .....                                         | 69        |
| 4.3. Basınçlı Akım Durumunda Maksimum Oyulma Çukuru Derinliğini Tahmin Eden Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi ..... | 78        |
| 4.4. Duyarlılık Analizleri .....                                                                                    | 93        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                                   | <b>99</b> |
| 5.1. Çalışma Özeti ve Sonuçlar .....                                                                                | 99        |
| 5.2. Yapılacak Çalışmalar için Öneriler .....                                                                       | 101       |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                     | 103       |
| EKLER.....                                                                                                          | 107       |
| EK-1. 110 lt/sn'de $y_{spo}$ için elde edilen oyulma çukuru derinlik haritaları.....                                | 108       |
| EK-2. 110 lt/sn'de $y_{spp}$ için elde edilen oyulma çukuru derinlik haritaları.....                                | 109       |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                      | 110       |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                                           | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1. Türkiye’deki vevrevli köprü tabliyesine sahip köprülere örnekler (Demir, 2018) .....                                                                 | 2     |
| Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan taban malzemesine ait tane çapı dağılım karakteristikleri .....                                                                | 27    |
| Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan yaklaşım akım derinliklerine ait akım parametreleri .....                                                                         | 34    |
| Çizelge 3.3. Deney serilerine ait özellikler .....                                                                                                                | 35    |
| Çizelge 4.1. Sadece vevrevli köprü tabliyesi olması durumunda gerçekleşen daralma oyulması ölçümleri .....                                                        | 41    |
| Çizelge 4.2. Serbest ve basınçlı akım durumlarında orta ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları .....                       | 50    |
| Çizelge 4.3. Basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları .....                                                                       | 58    |
| Çizelge 4.4. Akıma dik ve 15° vevrevlik açısıyla yerleştirilen tabliye açıklığında oluşan basınçlı maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması ..... | 70    |
| Çizelge 4.5. Ampirik bağıntının elde edilebilmesi için regresyon analizinde kullanılan çalışma kapsamındaki deney verilerine bağlı parametreler ....              | 79    |
| Çizelge 4.6. Ampirik bağıntının elde edilebilmesi için regresyon analizinde kullanılan Barakat (2022)’a ait deney verileri .....                                  | 80    |
| Çizelge 4.7. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren istatistiksel analiz tablosu .....                                                                          | 82    |
| Çizelge 4.8. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren istatistiksel analiz tablosu .....                                                                          | 83    |
| Çizelge 4.9. İstatistiksel analizi yapılan değişkenlere ait betimleyici istatistikler .....                                                                       | 84    |
| Çizelge 4.10. İstatistiksel analiz sonucu elde edilen hata istatistikleri tablosu .....                                                                           | 86    |
| Çizelge 4.11. İstatistiksel analizden elde edilen Durbin-Watson katsayısı .....                                                                                   | 88    |
| Çizelge 4.12. Regresyon Analizi Sonuçları- Betimleyici İstatistikler .....                                                                                        | 88    |
| Çizelge 4.13. Regresyon Analizi Sonuçları- Değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları .....                                                                    | 89    |
| Çizelge 4.14. Regresyon Analizi Özet Tablosu .....                                                                                                                | 90    |

| <b>Çizelge</b>                                                                                                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 4.15. Regresyon Analizi Sonuçları – ANOVA testi tablosu .....                                                                                           | 90           |
| Çizelge 4.16. Regresyon Analizi Sonuçları– Denklem Katsayıları .....                                                                                            | 91           |
| Çizelge 4.17. Regresyon analizinde kullanılan parametreler ile ölçülen ve ampirik<br>bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması. | 92           |
| Çizelge 4.18. Değişkenlerin ölçülen ve simülasyon değerlerine ait betimleyici<br>istatistikleri .....                                                           | 95           |



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                             | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Kısmi basınçlı ve tam basınçlı akım durumları .....                                                                                                                                    | 5     |
| Şekil 2.2. Basınçlı akım durumunda gelişen akım çizgileri ve hız profilleri (Verma ve diğerleri, 2004) .....                                                                                      | 6     |
| Şekil 2.3. Temiz su oyulması ile hareketli taban oyulması arasındaki fark (Yanmaz, 2022) .....                                                                                                    | 8     |
| Şekil 2.4. Bir köprü açıklığında meydana gelen toplam oyulma mekanizması (Yanmaz, 2022) .....                                                                                                     | 8     |
| Şekil 2.5. Kanal kesitinde daralma olduğu durumlarda birim debi ve su yüzü seviyesindeki değişim (Yanmaz, 2022) .....                                                                             | 9     |
| Şekil 2.6. Köprü ayağı etrafında meydana gelen hız ve basınç değişimleri (Yanmaz, 2022) .....                                                                                                     | 11    |
| Şekil 2.7. Köprü ayağında oluşan akım çevrintileri (Ettema, Melville ve Constantinescu, 2011) .....                                                                                               | 12    |
| Şekil 2.8. Basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafında meydana gelen çevrintiler (Dey ve diğerleri, 2008) .....                                                                                 | 13    |
| Şekil 2.9. Köprü modeline ve açık kanal düzeneğine ait parametreler .....                                                                                                                         | 15    |
| Şekil 3.1. Açık kanal düzeneğinin plan ve profiline ait şematik gösterimi .....                                                                                                                   | 26    |
| Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan köprü modeline ait ölçülerin şematik gösterimi (birimler mm cinsindendir) .....                                                                                  | 29    |
| Şekil 3.3. Test bölgesinde deney ölçümlerinin yapıldığı ızgara ağ sistemi .....                                                                                                                   | 31    |
| Şekil 3.4. Yaklaşım akım derinlikleri ile kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarının oluşumu .....                                                                                            | 33    |
| Şekil 4.1. Sadece verevli köprü tabliyesinin bulunduğu düzenek ve parametreler .....                                                                                                              | 40    |
| Şekil 4.2. Yaklaşım akım derinliği $y_a=34,5$ cm iken farklı debi değerlerinde meydana gelen daralma oyulması profilleri: (a) $y=0,5$ m’de boyuna profili, (b) $x=4,675$ m’de enine profili ..... | 42    |
| Şekil 4.3. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması çukuru: (a) $y=0,5$ m’de boyuna profili, (b) $x=4,675$ m’de enine profili .....                     | 43    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                     | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.4. Yaklaşım akım derinliği $y_a=34,5$ cm için farklı debi değerlerinde meydana gelen daralma oyulması boyutsuzlaştırılmış boyuna oyulma çukuru profili .                                          | 44    |
| Şekil 4.5. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması boyutsuzlaştırılmış boyuna oyulma çukuru profili .....                                                      | 45    |
| Şekil 4.6. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması çukuru derinliği haritası: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm, (c) $y_a=39,5$ cm, (d) $y_a=41,5$ cm ..... | 46    |
| Şekil 4.7. 110 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması çukuru derinliği haritası: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm, (c) $y_a=39,5$ cm, (d) $y_a=41,5$ cm ..... | 47    |
| Şekil 4.8. 100 lt/sn debi ve 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen daralma oyulması çukuru derinlik haritası .....                                                                             | 48    |
| Şekil 4.9. Silindirik orta ayak deneylerindeki deney düzeneği ve parametreler.....                                                                                                                        | 49    |
| Şekil 4.10. Yaklaşım akım derinliği $y_a=34,5$ cm olduğunda farklı debi değerlerinde meydana gelen oyulma çukuru (a) $y=0,525$ m'de boyuna profili, (b) $x=4,675$ m'de enine profili .....                | 51    |
| Şekil 4.11. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru (a) $y=0,525$ m'de boyuna profili, (b) $x=4,675$ m'de enine profili .....                               | 53    |
| Şekil 4.12. $y_a=34,5$ cm için farklı debi değerlerinde meydana gelen yerel oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış boyuna profili .....                                                                     | 53    |
| Şekil 4.13. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış boyuna profili .....                                                             | 54    |
| Şekil 4.14. 100 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru derinlik haritası: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm, (c) $y_a=39,5$ cm, (d) $y_a=41,5$ cm .....     | 55    |
| Şekil 4.15. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru derinlik haritası: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm, (c) $y_a=39,5$ cm, (d) $y_a=41,5$ cm .....     | 56    |
| Şekil 4.16. Köprü tabliyesi ve silindirik orta ayağın beraber olduğu köprü modeli ve değişken parametreler .....                                                                                          | 57    |
| Şekil 4.17. Yaklaşım akım derinliği $y_a=34,5$ cm olduğunda farklı debi değerlerinde meydana gelen basınçlı akım oyulmasının (a) $y=0,5$ m'de boyuna profili, (b) $x=4,675$ m'de enine profili .....      | 60    |



| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.18. Debi 120 lt/sn olduğunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen basınçlı akım oyulmasının (a) $y=0,5$ m’de boyuna profili, (b) $x=4,675$ m’de enine profili.....                                                                         | 61    |
| Şekil 4.19. Yaklaşım akım derinliği $y_a=34,5$ cm olduğunda farklı debi değerlerinde meydana gelen basınçlı oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış profilleri..                                                                                                    | 62    |
| Şekil 4.20. Debinin 120 lt/sn olduğu farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen basınçlı oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış profilleri.....                                                                                                            | 63    |
| Şekil 4.21. 100 lt/sn’lik debi ve 34,5 cm’lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri: (a) $y=0,5$ m’de boyuna profil, (b) $x=4,675$ m’de enine profil.....                                                                            | 64    |
| Şekil 4.22. 110 lt/sn’lik debi ve 34,5 cm’lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri: (a) $y=0,5$ m’de boyuna profil, (b) $x=4,675$ m’de enine profil.....                                                                            | 65    |
| Şekil 4.23. 120 lt/sn’lik debi ve 34,5 cm’lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri: (a) $y=0,5$ m’de boyuna profil, (b) $x=4,675$ m’de enine profil.....                                                                            | 66    |
| Şekil 4.24. 100 lt/sn debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen toplam oyulma çukuru derinliği haritaları: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm, (c) $y_a=39,5$ cm, (d) $y_a=41,5$ cm.....                                                      | 68    |
| Şekil 4.25. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen toplam oyulma çukuru derinlik haritaları: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm, (c) $y_a=39,5$ cm, (d) $y_a=41,5$ cm.....                                                          | 69    |
| Şekil 4.26. Debinin 100 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve $15^\circ$ verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen kısmi basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm..... | 71    |
| Şekil 4.27. Debinin 100 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve $15^\circ$ verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen tam basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a) $y_a=39,5$ cm, (b) $y_a=41,5$ cm.....   | 72    |
| Şekil 4.28. Debinin 110 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve $15^\circ$ verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen kısmi basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm..... | 73    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.29. Debinin 110 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen tam basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri:<br>(a) $y_a=39,5$ cm, (b) $y_a=41,5$ cm.....                                                                | 74    |
| Şekil 4.30. Debinin 120 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen kısmi basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri:<br>(a) $y_a=34,5$ cm, (b) $y_a=37,5$ cm.....                                                              | 75    |
| Şekil 4.31. Debinin 120 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen tam basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri:<br>(a) $y_a=39,5$ cm, (b) $y_a=41,5$ cm.....                                                                | 76    |
| Şekil 4.32. Akıma dik ve 15° verevli tabliyenin bulunduğu, 120 lt/sn için kısmi basınçlı akımda meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri haritası:<br>(a) $y_a=34,5$ cm, $\alpha=0^\circ$ ; (b) $y_a=34,5$ cm, $\alpha=15^\circ$ ; (c) $y_a=37,5$ cm, $\alpha=0^\circ$ ;<br>(d) $y_a=37,5$ cm, $\alpha=15^\circ$ .....    | 77    |
| Şekil 4.33. Akıma dik tabliye ve 15° verevli tabliyenin bulunduğu, 120 lt/sn için tam basınçlı akımda meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri haritası: (a) $y_a=39,5$ cm, $\alpha=0^\circ$ ; (b) $y_a=39,5$ cm, $\alpha=15^\circ$ ;<br>(c) $y_a=41,5$ cm, $\alpha=0^\circ$ ; (d) $y_a=41,5$ cm, $\alpha=15^\circ$ ..... | 78    |
| Şekil 4.34. Değişkenlere ait dağılım histogram grafikleri .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 85    |
| Şekil 4.35. Regresyon sonucu hatalarının dağılım grafiği.....                                                                                                                                                                                                                                                             | 86    |
| Şekil 4.36. Hatalara ait gözlenen ve beklenen değerler grafiği .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 87    |
| Şekil 4.37. Tahmin edilen değerler ile hata değerlerinin saçılım grafiği.....                                                                                                                                                                                                                                             | 87    |
| Şekil 4.38. Deneyler sonucunda ölçülen ve ampirik bağıntılar ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması .....                                                                                                                                                                                      | 93    |
| Şekil 4.39. Simülasyonda kullanılan $Fr_d$ değişkenine ait (a) $y_{spp}/y_a$ bağımlı değişkenine göre dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı.....                                                                                                                                                                 | 95    |
| Şekil 4.40. $h_w/y_a$ değişkenine ait (a) dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı.....                                                                                                                                                                                                                             | 96    |
| Şekil 4.41. $a/y_a$ değişkenine ait (a) dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı.....                                                                                                                                                                                                                               | 96    |
| Şekil 4.42. $K_\alpha$ değişkenine ait (a) dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı.....                                                                                                                                                                                                                            | 96    |
| Şekil 4.43. Monte Carlo Simülasyonu sonucu elde edilen $y_{spp}/y_a$ değerleri .....                                                                                                                                                                                                                                      | 97    |
| Şekil 4.44. Duyarlılık analizi sonucu elde edilen, değişkenlerin bağıntı etkisini gösteren tornado grafiği .....                                                                                                                                                                                                          | 98    |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                  | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 3.1. Çalışmalar kapsamında kullanılan açık kanal düzeneği .....                                                                  | 25    |
| Resim 3.2. Taban malzemesi tesviyesinin sağlanmasında kullanılan aparat.....                                                           | 28    |
| Resim 3.3. Deneylerde kullanılan silindirik orta ayağın konumlandırılması .....                                                        | 30    |
| Resim 3.4. Lazermetre ve deney ölçüm koordinat eksenleri .....                                                                         | 32    |
| Resim 4.1. Daralma oyulmasını incelemek üzere verevli köprü tabliyesinin deney<br>öncesi yerleşimi.....                                | 39    |
| Resim 4.2. Serbest akım durumunda köprü ayağı etrafındaki yerel oyulmaları<br>incelemek üzere yerleştirilen silindirik orta ayak ..... | 49    |
| Resim 4.3. Tabliye ile orta ayağın bulunduğu kısmi basınçlı akım koşulunda<br>meydana gelen taban oyulması .....                       | 57    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler              | Açıklamalar                                                            |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>a</b>              | Etkili giriş yüksekliği                                                |
| <b>b</b>              | Döşeme, korkuluk ve giriş yükseklikleri toplamı                        |
| <b>B</b>              | Akarsu genişliği                                                       |
| <b>b<sub>t</sub></b>  | Kiriş genişliği                                                        |
| <b>b<sub>n</sub></b>  | Kiriş sayısı                                                           |
| <b>cm</b>             | Santimetre                                                             |
| <b>C</b>              | Kohezyon                                                               |
| <b>C<sub>c</sub></b>  | Sediment derecelendirme sayısı                                         |
| <b>C<sub>u</sub></b>  | Sediment üniformaluluk katsayısı                                       |
| <b>C<sub>d</sub></b>  | Daralma katsayısı                                                      |
| <b>D</b>              | Köprü orta ayak genişliği                                              |
| <b>D<sub>xx</sub></b> | Zeminin %xx'inin geçtiği tane çapı                                     |
| <b>D<sub>30</sub></b> | Zeminin %30'unun geçtiği tane çapı                                     |
| <b>D<sub>50</sub></b> | Taban malzemesinin medyan çapı                                         |
| <b>d<sub>f</sub></b>  | Serbestlik derecesi                                                    |
| <b>E</b>              | Özgül enerji                                                           |
| <b>F</b>              | Kareler ortalamalarının oranı                                          |
| <b>Fr</b>             | Froude sayısı                                                          |
| <b>Fr<sub>a</sub></b> | Yaklaşım akım derinliğindeki Froude sayısı                             |
| <b>Fr<sub>d</sub></b> | Densimetrik Froude sayısı                                              |
| <b>g</b>              | Yerçekimi ivmesi                                                       |
| <b>H<sub>b</sub></b>  | Oyulma öncesi düşey köprü açıklığı yüksekliği                          |
| <b>H<sub>t</sub></b>  | Tabandan itibaren tabliye konumu                                       |
| <b>h<sub>w</sub></b>  | Tabliye üst kotundan itibaren akım derinliği                           |
| <b>K<sub>a</sub></b>  | Yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının (verevlik) etki faktörü |
| <b>K<sub>a</sub></b>  | Akarsu etkisini gösteren katsayı                                       |

**Simgeler****Açıklamalar**

|                         |                                                      |
|-------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>K<sub>b</sub></b>    | Memba taban pürüzlülük katsayısı                     |
| <b>K<sub>c</sub></b>    | Akarsu şevlerinin pürüzlülük katsayısı               |
| <b>K<sub>d</sub></b>    | Akarsu en kesit etkisi katsayısı                     |
| <b>K<sub>f</sub></b>    | Tane şekil faktörü                                   |
| <b>K<sub>s</sub></b>    | Köprü ayağı şekil parametresi                        |
| <b>K<sub>0</sub></b>    | Ayak aksı ile akım arasındaki açının etki faktörü    |
| <b>L</b>                | Uzunluk                                              |
| <b>L<sub>p</sub></b>    | Köprü ayak uzunluğu                                  |
| <b>L<sub>t</sub></b>    | Köprü tabliye genişliği                              |
| <b>lt</b>               | Litre                                                |
| <b>M</b>                | Kütle                                                |
| <b>mm</b>               | Milimetre                                            |
| <b>m</b>                | Metre                                                |
| <b>P</b>                | Basınç                                               |
| <b>P<sub>1</sub></b>    | Memba akımına ait statik basınç                      |
| <b>Q</b>                | Debi                                                 |
| <b>q</b>                | Birim debi                                           |
| <b>Re<sub>a</sub></b>   | Yaklaşım akım derinliğinde Reynolds sayısı           |
| <b>R<sup>2</sup></b>    | Determinasyon Katsayısı                              |
| <b>sn</b>               | Saniye                                               |
| <b>S<sub>0</sub></b>    | Taban eğimi                                          |
| <b>T</b>                | Zaman                                                |
| <b>t</b>                | Oyulma süresi                                        |
| <b>V</b>                | Akım hızı                                            |
| <b>V<sub>a</sub></b>    | Yaklaşım akım hızı                                   |
| <b>V<sub>b</sub></b>    | Tabliye altında ortalama akım hızı                   |
| <b>V<sub>c</sub></b>    | Malzemeyi harekete geçiren kritik ortalama akım hızı |
| <b>X<sub>t</sub></b>    | Kirişin tabliyedeki konumu                           |
| <b>y</b>                | Akım derinliği                                       |
| <b>y<sub>a</sub></b>    | Yaklaşım akım derinliği                              |
| <b>y<sub>s</sub></b>    | Oyulma derinliği                                     |
| <b>y<sub>smax</sub></b> | Maksimum oyulma derinliği                            |

**Simgeler****Açıklamalar**

|               |                                                                         |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $y_{sc}$      | Düsey daralma oyulması derinliği                                        |
| $y_{spo}$     | Serbest akım durumunda ayak etrafındaki yerel oyulma derinliği          |
| $y_{spp}$     | Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki oyulma derinliği               |
| $y_{sc,max}$  | Maksimum daralma oyulması derinliği                                     |
| $y_{spo,max}$ | Serbest akım durumunda ayak etrafındaki maksimum yerel oyulma derinliği |
| $y_{spp,max}$ | Basınçlı akım durumunda ayak etrafındaki maksimum oyulma derinliği      |
| $\phi$        | Derece                                                                  |
| $\alpha$      | Tabliye verevlik açısı                                                  |
| $\Delta$      | Sedimentin görelî yoğunluğu                                             |
| $\theta$      | Akım ve ayak ekseni arasındaki açı                                      |
| $\nu$         | Suyun kinematik viskozitesi                                             |
| $\rho$        | Suyun yoğunluğu                                                         |
| $\rho_s$      | Sediment yoğunluğu                                                      |
| $\sigma_g$    | Tane dağılımının geometrik standart sapması                             |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| <b>ASCE</b> | American Society of Civil Engineers |
| <b>CFD</b>  | Computational Fluid Dynamics        |
| <b>FHWA</b> | Federal Highway Administration      |
| <b>HEC</b>  | Hydraulic Engineering Circular      |
| <b>KBA</b>  | Kısmî basınçlı akım                 |
| <b>KGM</b>  | Karayolları Genel Müdürlüğü         |
| <b>SG</b>   | Taban malzemesi özgül ağırlığı      |
| <b>SP</b>   | Poorly graded sand                  |
| <b>TBA</b>  | Tam basınçlı akım                   |
| <b>USGS</b> | United States Geological Survey     |

## 1. GİRİŞ

Köprüler, ulaşım sistemlerinin en önemli yapı taşlarından bir tanesidir. Bu mühendislik yapıları, sadece coğrafi engelleri aşmakla kalmayıp aynı zamanda şehirler ve ülkeler arasında sürdürülebilir ulaşım ile güçlü bağlantılar kurarak toplumsal ve ekonomik etkileşimi de artırmaktadır. Sürdürülebilir ulaşımın yanı sıra ticaretin ve turizmin gelişimine de büyük katkı sağlamaktadır. Türkiye’de 2023 yılı itibariyle Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) köprü envanterinde kayıtlı devlet ve il yolları üzerinde 8210 adet köprü bulunmaktadır (KGM, 2023). Toplam köprü envanterinin yaklaşık %85’ini yani yaklaşık 7000 adetini, dereler ve nehirler gibi akarsular üzerine kurulmuş olan köprüler oluşturmaktadır (Koçyiğit ve Akay, 2018). Akarsular üzerine kurulu olan bu köprüler incelendiğinde, çoğunluğunun elastomer mesnete sahip basit açıklıklı betonarme köprüler olduğu, akarsu yatağı içerisinde bir veya birden fazla orta ayağının bulunduğu ve köprü tabliyesinin akıma dik halde konumlandırıldığı görülmektedir.

Normal şartlarda köprü tabliyesinin yerleşimi, akıma dik bir şekilde ve akarsuyun planda düz ve dar olan kesitine yapılmaktadır. Ancak topografik koşulların elverişsizliği, akarsuyun kurpta geçilmesi veya zorunlu güzergâh durumunun ortaya çıkması gibi nedenlerle köprü tabliyesi akıma dik konumlandırılmak yerine açılı yani verevli yerleştirilmek zorunda kalılabilmektedir. Ülkemizde de Karayolları Genel Müdürlüğü envanterine kayıtlı farklı açılarda verevliğe sahip birçok akarsu köprüsü bulunmaktadır. Söz konusu verevli köprülere örnekler Çizelge 1.1’de sıralanmıştır.

Her yıl dünya çapında büyük taşkınlar sırasında çok sayıda köprü yıkılabilmekte veya ciddi derecede hasar alabilmektedir. Bunun sonucunda çok sayıda istenilmeyen can kayıpları ve maddi hasar meydana gelebilmektedir. Akarsu köprü yıkılmalarının büyük çoğunluğu hidrolik etkenlerden kaynaklanmaktadır (Yanmaz, 2022). Bu hidrolik etkenlerin başında da köprü ayaklarındaki oyulmalar gelmektedir. Oyulma mekanizmasının anlaşılması, etkili parametrelerin belirlenmesi ve oyulma derinliğinin güvenli ve ekonomik olacak şekilde tahmin edilerek köprünün tasarlanması çok büyük önem arz etmektedir.

Çizelge 1.1. Türkiye’deki verevli köprü tabliyesine sahip köprülere örnekler (Demir, 2018)

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

Literatürde, serbest akım durumunda köprü altında meydana gelen daralma oyulmaları ile orta ve kenar ayaklar etrafındaki yerel oyulmaların araştırıldığı pek çok çalışma mevcuttur. Ancak basınçlı akım durumunda köprü açıklığında meydana gelen toplam oyulma mekanizmasının araştırıldığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile hem basınçlı akım durumunda oyulma mekanizmasını incelemek hem de oyulma derinliğinin tahmininde kullanılabilecek bir bağıntı geliştirmek amaçlanmıştır.



Çalışmanın amacı, laboratuvar şartlarında daire kesitli silindirik bir orta ayak ve 15°'lik verevlik açısı olan tabliyeye sahip köprü modeli kullanılarak temiz su durumunda, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğini ve şeklini incelemek, meydana gelen oyulmaya debi ve yaklaşım akım derinliği parametrelerinin etkisini değerlendirmektir. Ayrıca aynı deney düzeneğinde yapılmış olan başka bir çalışmaya ait sonuçlar kullanılarak verevlik açısının basınçlı akım durumunda oyulma çukuruna etkisi de incelenmiştir.

İkinci bölümde, kavramsal çerçeve oluşturmak ve mevcut çalışmaları değerlendirmek amacıyla oyulma mekanizması ve çeşitleri incelenmiş; serbest akım, kısmi basınçlı akım ve tam basınçlı yani savak tipi akım tanımları verilmiş, konu ile ilgili yapılmış olan literatür araştırması sonuçları ile boyut analizi sunulmuştur.

Çalışma kapsamında kurulan deney düzeneği ve deney ekipmanları ile ilgili bilgiler üçüncü bölümde verilmiş ve deney prosedürü anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler oyulma çeşitleri bakımından incelenmiş, oyulma şekli ve maksimum oyulma çukuru derinlikleri değerlendirilmiş, özellikle verevliğin oyulmaya etkisi irdelenmiştir. Oyulmaya etki eden parametrelerin değerlendirilmesinden sonra kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesinin silindirik orta ayağı etrafında meydana gelen oyulma çukuruna ait maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden bağıntı geliştirilmiştir. Ayrıca, deney sonuçlarının irdelenmesi ve bulguların değerlendirilmesi sonucu oyulmaya etki eden parametrelerin toplam oyulma derinliğine ne oranda etki ettiğinin araştırılması amacıyla geliştirilmiş olan ampirik bağıntılar kullanılarak duyarlılık analizleri yapılmıştır.

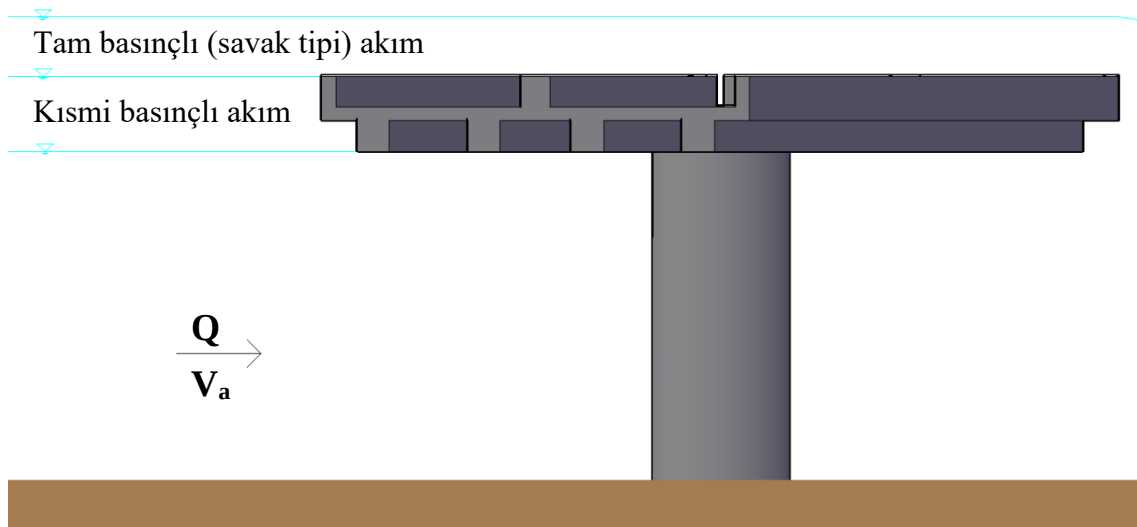
Beşinci bölümde, problem tanımına, çalışmanın amacına kısaca değinilerek çalışmanın sonucunda neler elde edildiği, hangi problemlere cevap verildiği, literatürde hangi boşluğu doldurduğu özetlenmiştir. Ayrıca bu konuda gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından bazı önerilerde bulunulmuştur.



## 2. OYULMA MEKANİZMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

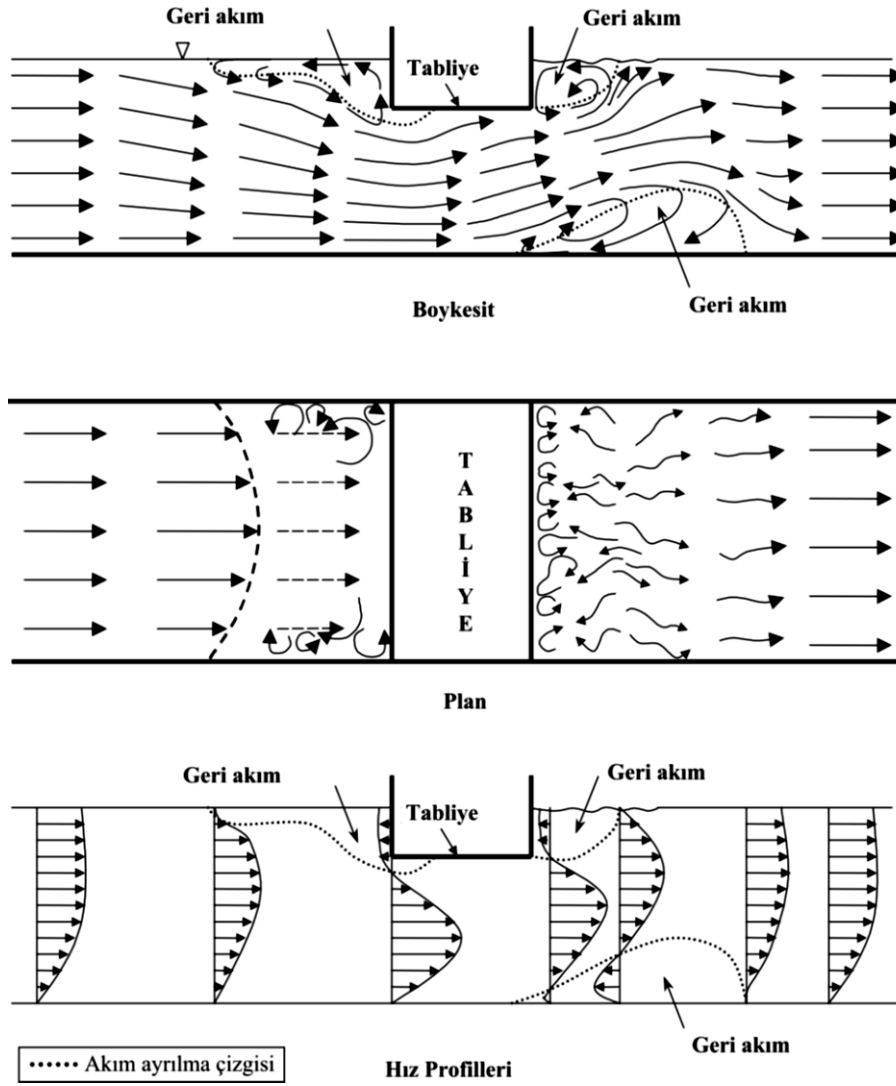
### 2.1. Serbest ve Basıncı Akım

Akarsular üzerine kurulmuş köprülerde, su seviyesi normal akım şartlarında köprü tabliyesine veya kirişlerine kadar ulaşmamaktadır. Köprü açıklığından geçen bu akım, serbest akım olarak adlandırılmaktadır. Böyle bir durumda köprü tabliyesi altındaki su yüzeyine atmosfer basıncı etki etmektedir. Ancak bir taşkın esnasında artan akarsu debisi ile birlikte, köprü alt açıklığı akarsu debisi için yetersiz kalabilmekte veya akarsuyla taşınan ağaç parçaları ve kaba taban malzemesi köprü açıklığında daralmaya ve tıkanmaya sebep olabilmektedir. Bunun sonucunda membada yükselen su seviyesi köprü tabliyesine ulaşabilmektedir. Köprü kirişlerinin kısmen veya tamamen su ile teması halinde oluşan akım tipine kısmi basınçlı akım, akarsu debisinin daha da artıp su seviyesinin köprü tabliyesini aşarak savaklandığı duruma tam basınçlı akım veya savak tipi akım denmektedir. Savak tipi akımda köprünün tamamı batık haldedir ve köprü bu durumda geniş kretli bir savak gibi davranmaktadır (Seçkin, 2020). Genel olarak literatürde yer alan ve oyulma derinliği tahmininde kullanılan ampirik bağıntılar serbest akım durumları için geliştirilmiş olup basınçlı akım durumu için oyulma derinliğini inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Şekil 2.1’de kısmi basınçlı akım ile tam basınçlı yani savak tipi akım durumları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kısmi basınçlı ve tam basınçlı akım durumları

Şekil 2.2’de verilen basınçlı akım durumunda gelişen akım çizgileri ve hız profilleri incelendiğinde köprü tabliyesi altında basınçlı akımın oluştuğu, akım alanının daralmasına bağlı olarak köprü açıklığında akım hızı ve taban kayma gerilmelerinin arttığı ve dolayısıyla tabandaki sediment hareketinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca köprü tabliyesinin hem membaında hem de mansabında çevrintiler ve geri akımlar oluşmaktadır (Verma, Setia ve Bhatia, 2004).



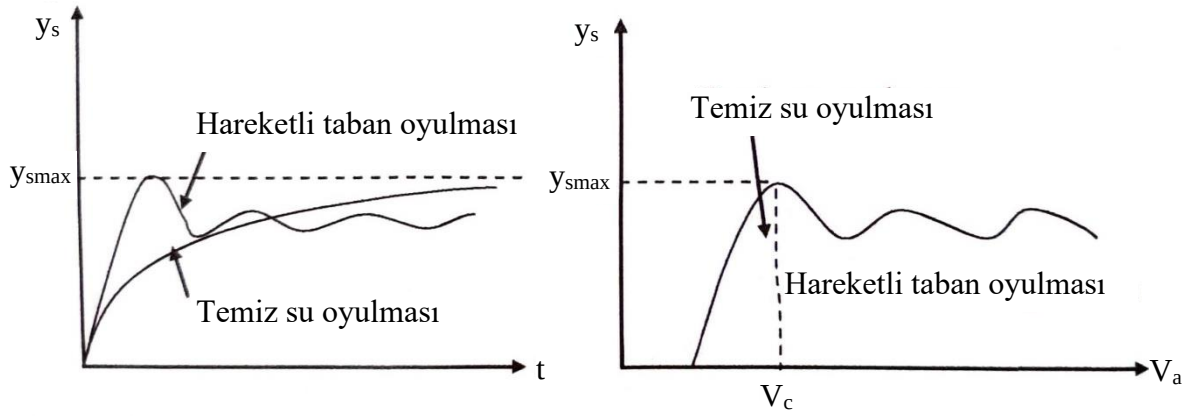
Şekil 2.2. Basınçlı akım durumunda gelişen akım çizgileri ve hız profilleri (Verma ve diğerleri, 2004)

## 2.2. Oyulma Mekanizması ve Çeşitleri

Akarsu üzerinde yer alan köprülerde en büyük hasarlar taşkın anında veya hemen sonrasında meydana gelmektedir. Hasar çeşitli sebeplerle oluşsa da ana neden köprü orta ve kenar ayak temellerinde meydana gelen oyulmalardır (Melville ve Coleman, 2000). Basit anlamda oyulma kavramı, akarsu yataklarında bulunan kum, çakıl gibi malzemenin akımın aşındırıcı etkisiyle tabandaki hareketi ve taşınımı olarak tanımlanabilir (Hamill, 2004). Bu taşınım sonucu ortaya çıkan akarsuyun doğal taban seviyesindeki alçalma miktarı da oyulma derinliği olarak isimlendirilmektedir.

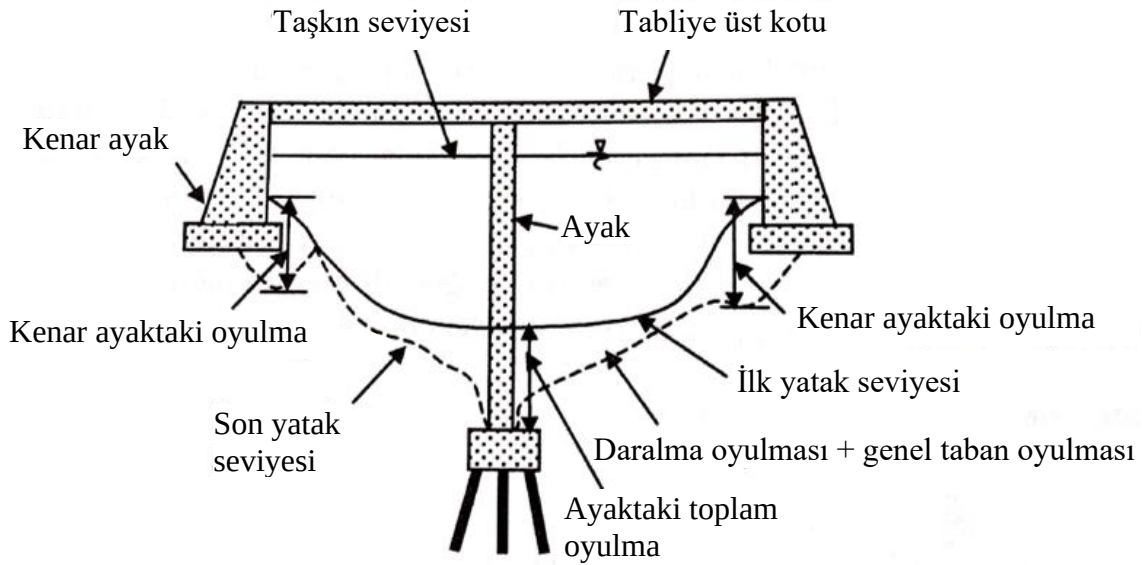
Alüvyonlu bir akarsularda, akım içerisinde membadan sediment taşınıp taşınmadığına bağlı olarak temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması diye adlandırılan başlıca iki tip oyulma meydana gelmektedir. Genel anlamda temiz su oyulması, mevcut akım şartları altında oluşan kayma gerilmelerinin kanal tabanındaki malzemenin karşı koyduğu kritik kayma gerilmesi değerini aşmadığı dolayısıyla akım içinde membadan taşınan katı madde olmadığı durumu ifade etmektedir. Akım şiddetinin artmasıyla artan kayma gerilmeleri, tabandaki kritik gerilmeleri aşınca membadan itibaren akım yönünde sediment yükü hareketi meydana gelmektedir. Bu oyulma tipi ise hareketli taban oyulması olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi temiz su oyulması durumunda akım içerisinde membadan sediment gelmediğinden oyulma derinliğinde herhangi bir salınım görülmeyp yavaş yavaş artan ve zamanla denge değerine ulaşan bir oyulma derinliği görülmektedir. Hareketli taban oyulmasında ise akım şiddetinden dolayı oyulma, temiz su oyulmasına göre daha kısa sürede maksimum değerine erişmektedir. Daha sonra membadan gelen akım içerisindeki sediment, oyulma çukurunda birbirini takip eden oyulma ve yığılma olaylarına sebep olmaktadır (Yanmaz, 2022).



Şekil 2.3. Temiz su oyulması ile hareketli taban oyulması arasındaki fark (Yanmaz, 2022)

Akarsular üzerindeki köprülerde meydana gelebilecek oyulma tipleri; genel oyulma, daralma oyulması ve yerel oyulma olmak üzere üç kategoride incelenmektedir (Melville ve Coleman, 2000). Bir köprü açıklığında ayak etrafındaki toplam oyulma birbirlerine bağımlı bu üç temel oyulma tipinin birleşimi sonucunda oluşmaktadır. Bu üç tip oyulma arasındaki ilişkinin derecesi tam olarak bilinemediğinden her bir oyulma tipi diğerlerinden bağımsız gibi düşünülerek değerleri hesaplanmakta ve toplamaları alınarak köprü açıklığındaki olası toplam maksimum oyulma derinliği yaklaşık olarak tahmin edilmektedir (Yanmaz, 2022). Köprü açıklığında meydana gelen toplam oyulma mekanizması Şekil 2.4'te verilmektedir.



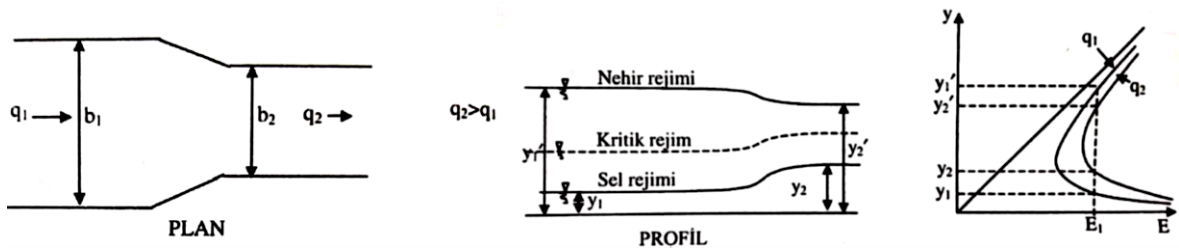
Şekil 2.4. Bir köprü açıklığında meydana gelen toplam oyulma mekanizması (Yanmaz, 2022)

### 2.2.1. Genel oyulma

Yanmaz (2022), genel oyulmanın uzun veya kısa vadede meydana gelebileceğini, kısa dönemdeki genel oyulmalara tek veya ardışık taşkınların neden olabileceğini, uzun dönemdeki taban oyulmasının ise yıllar mertebesinde oluştuğunu belirtmiştir. Uzun dönem taban oyulmasına akarsuyun morfolojik rejimi ve şev erozyonu neden olabilmektedir. Ayrıca akarsu üzerine yapılan rezervuar gibi yapılar, kum ocaklarının varlığı, aşırı miktarda su çekilmesi gibi insan kaynaklı etkenler de genel oyulmayı etkilemektedir. Genel oyulmanın zaman ölçeğinin olay eksenli olması ve bazen yıllar mertebesinde meydana gelmesi nedeniyle bu çalışma kapsamında dikkate alınmamıştır.

### 2.2.2. Daralma oyulması

Köprü ayak ve tabliyesinden dolayı köprü altında akım alanında daralma meydana gelmektedir. Özellikle taşkın yatağının geniş olduğu akarsularda köprü yaklaşım dolgularının boyu büyük olabilmekte, hatta ana kanala kadar uzayabilmektedir. Köprü geçişinde meydana gelen gerek düşeydeki gerekse de yataydaki daralmalar nedeniyle akım alanında meydana gelen azalma, beraberinde köprü kesitindeki ortalama hızların ve kayma gerilmelerinin artışına neden olmaktadır (Bkz. Şekil 2.5). Bu da köprü kesitindeki erozif kuvvetleri artırarak köprü açıklığındaki sedimentin mansaba taşınmasına ve köprü kesitinin tabanının oyulmasına neden olmaktadır. Bu oyulma, daralma oyulması olarak adlandırılmaktadır.



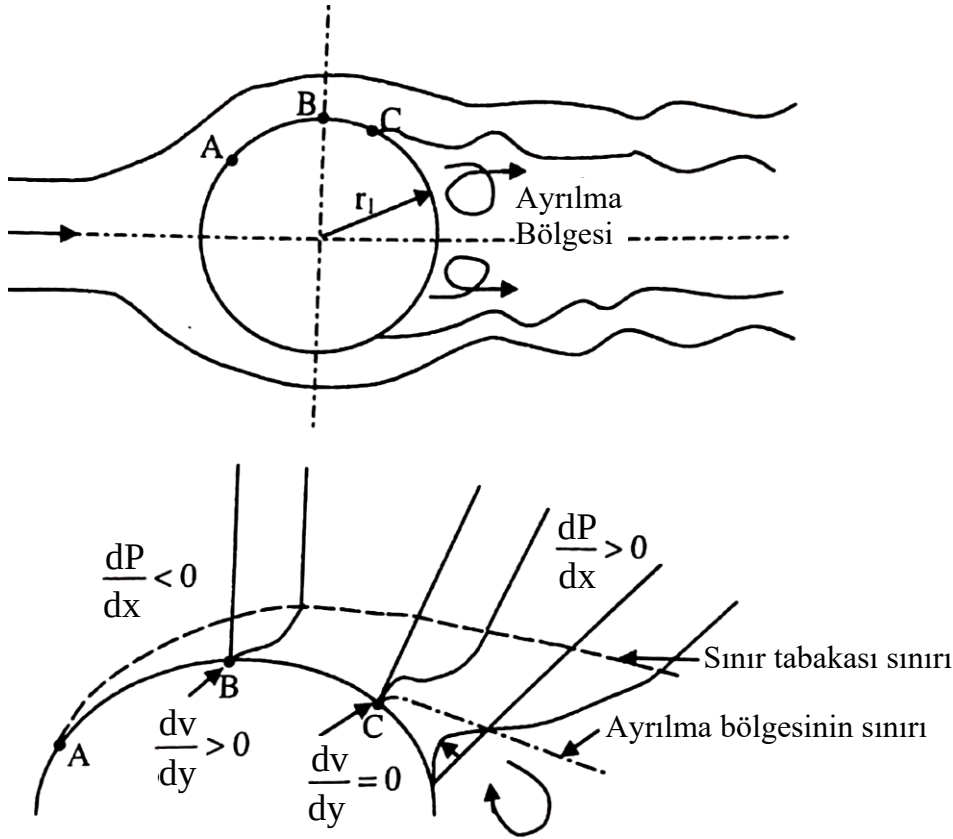
Şekil 2.5. Kanal kesitinde daralma olduğu durumlarda birim debi ve su yüzü seviyesindeki değişim (Yanmaz, 2022)

### 2.2.3. Yerel oyulmalar

Köprü orta ve kenar ayaklarında meydana gelen yerel oyulmalar köprü temelinde problem oluşturan ve köprü emniyetini azaltan hidrolik etkenlerin başında gelmektedir. Lagasse ve Richardson'a (2001) göre Amerika Birleşik Devletlerindeki köprü yıkılmalarının en büyük sebebi köprü orta ve kenar ayaklarının oyulmaya maruz kalmasıyla köprü temellerinin açığa çıkmasıdır. Köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulma mekanizmasının daha net anlaşılabilmesi için öncelikle akım içerisinde herhangi bir engel bulunduğu durumdaki hız ve basınç dağılımlarının nasıl geliştiğini incelemek gerekmektedir.

Şekil 2.6'da plan görüntüsü verilen akarsu akımı içerisinde yerleştirilmiş daire kesitli silindirik bir ayak incelendiğinde, A noktasından B noktasına doğru akım kesitinde meydana gelen daralma nedeniyle akım hızı artarken Bernoulli prensibi gereği basınç azalmaktadır. B noktasının devamında, akım kesitinde genişleme meydana gelmekte, bu sefer akım hızı azalmakta ve basınç artmaktadır. Sınır tabakası içerisinde hareket eden bir sediment tanesine etkiyen sürtünme kuvvetlerine ilave olarak artan basınç etkisi bu bölgedeki hareketi zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, C noktası sonrasında sınır tabakasında bulunan akışkanın bir kısmı mevcut akım doğrultusunun tersi yönünde çevrintiler şeklinde bir akım oluşturmaktadır. Bu çevrintilere kuyruk çevrintileri, bu sınıra ise ayrılma sınırı adı verilmektedir. Akım hızı arttıkça enerji de artacağından sınır tabakasının ve ayrılma bölgesi sınırının oluşumları, düşük hızlı akıma göre daha mansapta meydana gelmektedir. Ayrıca bu sınırların oluşumu önemli ölçüde ayak geometrisine de bağlıdır. Küt burunlu köprü ayaklarında ayrılma daha belirginleşmekte, hem yerel yük kaybı daha fazla olmakta hem de ayrılma bölgesinde oluşan çevrintiler artmaktadır. Bunun sonucunda akım alanı daha fazla rahatsız olmakta ve sediment taşınımı artmaktadır.

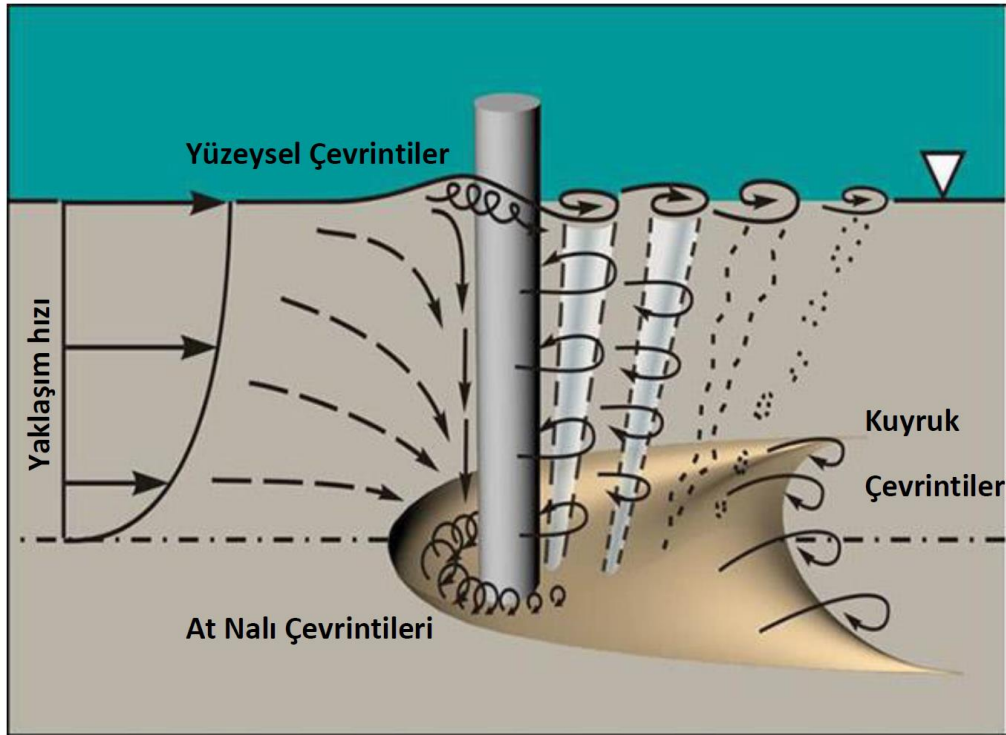




Şekil 2.6. Köprü ayağı etrafında meydana gelen hız ve basınç değişimleri (Yanmaz, 2022)

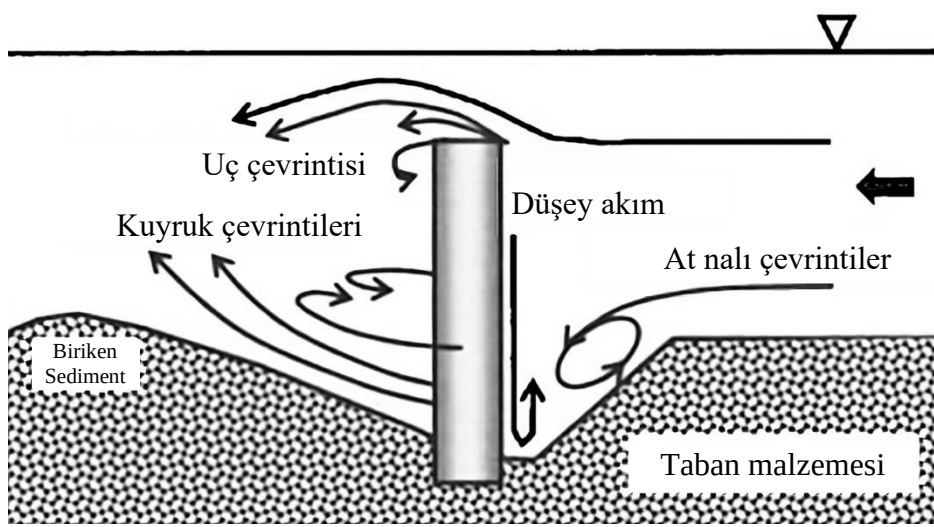
Şekil 2.7’de profil görüntüsü verilen silindirik bir köprü orta ayağı incelendiğinde, ayak akım içerisinde bir engel teşkil etmektedir. Bu engelden dolayı, köprü ayağının memba yüzündeki akımda ani bir hız azalması yaşanmaktadır. Bu ani hız düşmesinden dolayı köprü ayağının memba yüzünde akım su seviyesi artmakta ve burada bir çeşit durgunluk düzlemi oluşmaktadır. Su seviyesindeki bu artış bir önceki paragrafta bahsi geçen kuyruk çevrintilerinde olduğu gibi yaklaşım akım hızına ve köprü ayağının geometrik özelliklerine bağlıdır. Su seviyesindeki bu artış, ayağın memba yüzünde durgunluk basıncı adı verilen bir basınç artışına neden olmaktadır. Durgunluk düzlemindeki basıncın ani artışı ile ayağın memba tarafındaki türbülanslı sınır tabakası ayrılmaktadır. Akım hızı, derinlikle azaldığı için durgunluk basıncı da derinlik boyunca azalmaktadır. Bu durumda, yüzeyde yüksek basınç ve 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. Bu düşey akımın yaklaşım akımıyla girişimi sonucunda ayağın memba tarafında ve etrafında çevrintiler oluşmaktadır. Bu çevrintilerden dolayı köprü ayağının memba tarafında oyulmalar meydana gelmektedir. Bu çevrintilere, planda oluşturdukları oyulma çukurunun şekli nedeniyle at nalı çevrinti denir. Köprü ayakları

etrafındaki yerel oyulma mekanizmasını, bahsi geçen kuyruk çevrintileri ile ayağın memba tarafında oluşan at nalı çevrintileri oluşturmaktadır. Belirtildiği üzere, ayak memba tarafında oluşan düşey akım tabana çarpmakta ve tabanı oymaya başlamaktadır. Tabandan ayrılan sediment taneleri at nalı çevrintileri ve akım vasıtasıyla mansaba doğru taşınmaktadır. At nalı çevrintileri ayağın yanlarından geçerek ayak çapının birkaç katı kadar daha mesafe almakta ve etkilerini kaybetmektedir. Ayağın mansap tarafında meydana gelen kayma gerilmesindeki değişimler, kuyruk çevrintilerini oluşturmaktadır. Ayrılma bölgesinin sınırı mansaba doğru belli bir mesafe ilerlediğinden kuyruk çevrintilerinin etki uzunluğu at nalı çevrintilerinkinden daha fazla olmaktadır. Ancak at nalı çevrintilerinin şiddeti kuyruk çevrintilerinin şiddetinden daha fazla olduğundan maksimum oyulmalar ayağın memba yüzünde görülmektedir. Nihayetinde köprü ayağı etrafında oluşan oyulmalar Şekil 2.7'deki gibi bir şekil almaktadır. Oyulmanın ayak memba yüzünde daha derin görünmesinin bir başka nedeni de memba yüzünden taşınan sediment tanelerinin bir kısmının düşen akım hızı sebebiyle kuyruk çevrintilerinin açtığı çukura birikme potansiyelidir (Yanmaz, 2022).



Şekil 2.7. Köprü ayağında oluşan akım çevrintileri (Ettema, Melville ve Constantinescu, 2011)

Akım içerisinde yerleştirilen silindirik bir ayak etrafındaki çevrıntiler, basınçlı akım durumu için incelendiğinde serbest akım durumunda oluşan ve Şekil 2.7’de verilen çevrıntilere ek olarak ayağın batık kısmında Şekil 2.8’deki gibi uç çevrıntiler meydana geldiği görülmektedir (Dey, Raikar ve Roy, 2008). Dey ve diğerleri (2008) tarafından silindirik ayak kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde serbest akım durumunda meydana gelen yerel oyulma derinliğinin basınçlı akım durumundakine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ayağın batıklığı artırıldıkça at nalı çevrıntilerin etkisinin ve meydana gelen yerel oyulma çukuru derinliğinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.8. Basınçlı akım durumunda köprü ayağı etrafında meydana gelen çevrıntiler (Dey ve diğerleri, 2008)

Wang (1970) tabliye gibi çalışan yatay bir levhanın altına uygulanan basınçları incelemiş ve bu levha üzerine hidrostatik basıncın iki katına eşit büyüklükte bir basıncın uygulandığını belirlemiştir. Ayrıca Abed (1991) basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulmayı incelemek amacıyla yaptığı deneysel çalışmada taban ölçümlerinin yanı sıra basınçlı akım durumunda bir dizi hız ölçümü de yapmıştır. Deney sonuçlarına göre serbest ve batmış akım durumunda ölçülen hızlar karşılaştırıldığında köprü tabliyesi membaında hızda duvar yanında %13,7 ve kanal merkezinde %38,7; tabliye altında ayak membaında %28; ayak mansabında kanal merkezinde ise %49'lara ulaşan bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Abed (1991) hızdaki bu artışın nedeninin köprü tabliyesi olduğunu, artan oyulma derinliğinin de basınçlı akımın meydana getirdiği yüksek hızlar, güçlü çevrıntiler ve rahatsızlıklar sonucunda oluştuğunu belirtmiştir. Akım doğrultusuna dik, ayağa doğru yönelmiş normal akım bileşeninin tabliyenin neden olduğu basınç etkisinin bir göstergesi

olduğunu ve at nalı çevrıntilerin gücünü gösterdiğini ifade etmiştir. Abed (1991) ayrıca basınçlı akım durumunda ayağın memba yüzünde meydana gelen ve tabanda yönünü değiştiren düşey hız gradyanının ve yatay düzlemde oluşan at nalı çevrıntisinin dönme kuvvetinin tabliyenin neden olduğu basınç nedeniyle çok güçlü olduğunu belirtmiştir. Bu ölçümler ve gözlemler sonucunda tabliye altındaki hız alanının büyüdüğünü ve bu nedenle akımın oyma kapasitesinin arttığını belirtmiştir. Bununla birlikte köprü tabliyesinin membaındaki tüm kanal tabanı boyunca da alçalma olduğunu gözlemlemiştir. Abed (1991) deney sonuçlarına göre bu durumun köprü tabliyesi membaındaki kanal tabanında meydana gelen büyük yerel hızlar nedeniyle oluştuğu sonucuna varmıştır. Dey ve diğerleri (2008) tarafından elde edilen sonuçlarla Abed (1991) tarafından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında tabliyenin, akım alanı üzerinde çok ciddi etkisi olduğu görülmektedir.

### 2.3. Boyut Analizi

Basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında ayak etrafında meydana gelen toplam oyulma mekanizmasını etkileyen parametreler için boyut analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında 15°'lik verevlik açısına ve sabit geometrik özelliklere sahip köprü tabliyesi ile daire kesitli silindirik bir orta ayak kanal tabanına, akıma dik olacak şekilde monte edilmiştir. Tabliye konumu ve köprü ayağı tüm deneylerde sabittir. Ayrıca deneylerde tek bir taban malzemesi kullanılmıştır. Şekil 2.9'da çalışmada kullanılan parametrelerin bir bölümü görülmektedir. Bu parametreler kütle (M), uzunluk (L) ve zaman (T) cinsinden aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

Akışkan parametreleri:

$\rho$  : suyun yoğunluğu ( $ML^{-3}$ )

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

Akım parametreleri:

$g$  : yerçekimi ivmesi ( $LT^{-2}$ )

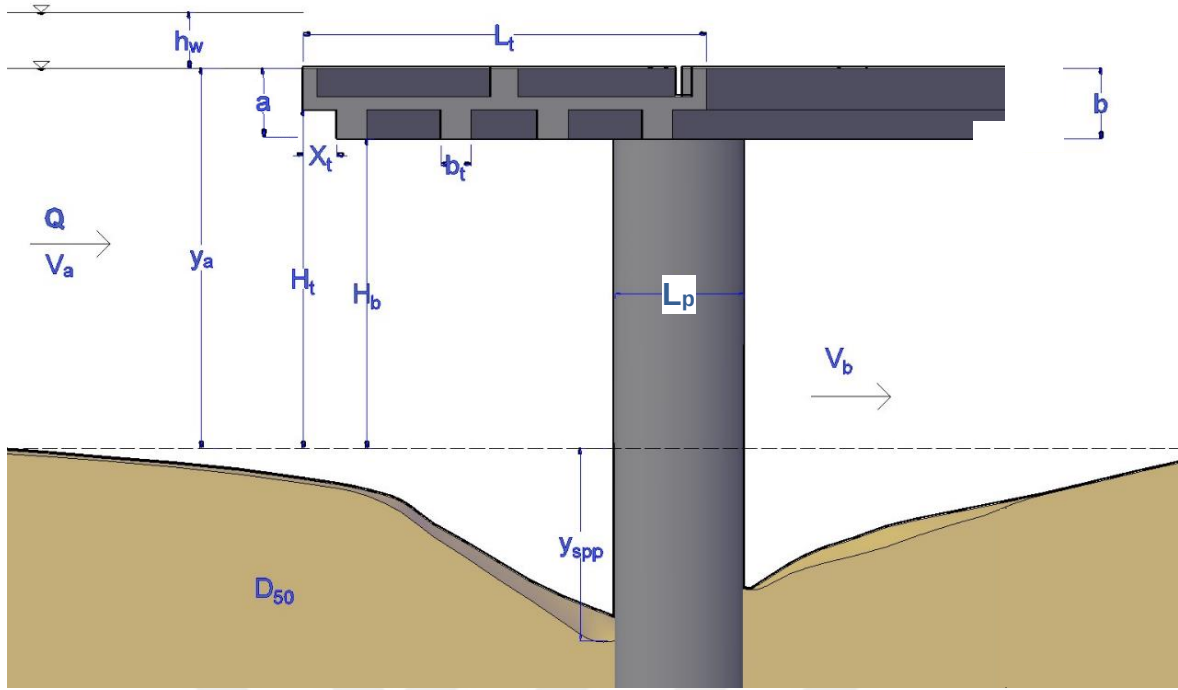
$y_a$  : yaklaşım akım derinliği (L)

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

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

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

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



Şekil 2.9. Köprü modeline ve açık kanal düzenneğine ait parametreler

Akarsu parametreleri:

$S_0$  : taban eğimi (-)

$B$  : akarsu genişliği (L)

$C_d$  : daralma katsayısı (-)

$K_\alpha$  : yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının (verevlik) etki faktörü (-)

$K_a$  : akarsu güzergâhı etkisini gösteren katsayı (-)

$K_b$  : membada taban pürüzlülüğünü gösteren katsayı (-)

$K_c$  : akarsu şevlerinin pürüzlülüğünü gösteren katsayı (-)

$K_d$  : akarsu en kesit etkisini gösteren katsayı (-)

Taban malzemesi parametreleri:

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

$D_{50}$  : tane medyan çapı (L)

$\sigma_g$  : tane dağılımının geometrik standart sapması (-)

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

$K_f$  : tane şekil faktörü (-)

$\Delta$  : relatif yoğunluk (-)

Köprü ayağı ve tabliye parametreleri:

$D$  : ayak genişliği (L)

$L_p$  : ayak uzunluğu (L)

$K_s$  : ayak şekil faktörü (-)

$K_\theta$  : köprü ayağı aksı ile yaklaşım akımı arasındaki açının etki faktörü (-)

$h_w$  : tabliye üstünden savaklanan su yüksekliği (L)

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

$a$  : etkili kiriş yüksekliği ( $a = \min(y_a - H_b, b)$ ) (L)

$b$  : kiriş, döşeme ve korkuluk yüksekliği toplamı (L)

$b_t$  : kirişin genişliği (L)

$b_n$  : kiriş sayısı (-)

$L_t$  : tabliye genişliği (L)

$H_t$  : tabandan itibaren tabliye konumu (L)

$X_t$  : kirişin tabliyedeki konumu (L)

$y_{spp}$  : basınçlı akım durumunda oyulma çukuru derinliği (L)

Zaman parametresi:

$t$  : akım süresi (T)

Deney koşulları göz önüne alındığında toplam oyulma mekanizmasını etkileyen parametreler Eş. 2.1'deki bağıntıyla ifade edilmiştir:

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

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

Sediment ve akarsu ile ilgili kabuller (Yanmaz, 2022):

- Sabit şekil faktörüne sahip, kohezyonsuz taban malzemesi bulunmaktadır ( $C=0$ ).
- Katı madde ve su yoğunlukları sabittir. Kuvartz kum için relatif yoğunluk 1,65 değerindedir.
- Akarsu, köprü geçişinde önemli bir daralma olmayacak kadar geniştir ( $C_d=1,0$ ).

- Düzgün şevli akarsu tabanındaki tane şekillerinin etkisi ihmal edilmektedir ( $K_f=1,0$ ).
- Taban pürüzlülüğü sadece  $D_{50}$  cinsinden ifade edilmektedir ( $K_b=1,0$ ,  $K_c=1,0$ ).
- Akarsu planda düz, prizmatik ve sabit genişliktedir ( $S_0=\text{sabit}$ ,  $B=\text{sabit}$ ,  $K_d=1,0$  ve  $K_a=1,0$ ).
- Taban malzemesi çapı akarsu genişliğinden çok küçüktür ( $D_{50}/B \approx 0$ ).
- Statik basınç  $P_1 = \rho g y_a$  olduğundan ve  $y_a$  ile  $a$  ilişkili olduğundan  $P_1$  ihmal edilmektedir.

Köprü tabliyesi ve ayakla ilgili kabuller:

- Kiriş genişliği ( $b_t$ ), kiriş sayısı ( $b_n$ ), tabliye kalınlığı ile korkuluk ve kiriş yüksekliği ( $b$ ), tabliye genişliği ( $L_t$ ), tabandan itibaren tabliye konumu ( $H_t$ ) ve kirişin tabliyedeki konumu ( $X_t$ ) sabit tutulmuştur.
- Ayak daire kesitli olduğu için uzunluğu ve genişliği eşittir. Bu nedenle  $L_p$  ihmal edilmiştir.
- Ayrıca çalışma kapsamında  $K_s$ ,  $K_\theta$ ,  $\sigma_g$  değerleri sabit tutulduğundan bu parametreler ihmal edilmiştir. Ancak çalışmada  $K_\alpha$  değeri yani verevlik açısı sabit olmasına rağmen regresyon analizinde bu çalışmaya ek başka deney verileri de kullanılacağından  $K_\alpha$  ihmal edilmemiştir.
- Benzer şekilde oyulma çukurunun nihai durumu incelendiğinden  $t$  zaman parametresi de ihmal edilmiştir.

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

$$f(y_{spp}, a, g, v, y_a, H_b, V_a, V_b, V_c, D_{50}, D, K_\alpha, h_w, \rho_s, \rho, \Delta) = 0 \quad (2.2)$$

Boyutsuz parametreler Buckingham  $\pi$ -teoremi kullanılarak elde edilmiştir. Tekrar eden parametreler  $\rho$ ,  $V_a$ ,  $y_a$  olarak seçilmiş ve böylece Eş. 2.3 elde edilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = f\left(\text{Re}, \text{Fr}_a, \frac{H_b}{y_a}, \frac{a}{y_a}, \frac{V_a}{V_b}, \frac{V_a}{V_c}, \frac{D_{50}}{y_a}, \frac{h_w}{y_a}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D}{y_a}, K_\alpha, \Delta\right) \quad (2.3)$$

Dikdörtgen kesitli deney kanallarında yaklaşım akımına ait Froude ve Reynolds sayıları sırasıyla Eş 2.4 ve Eş 2.5'te verilmiştir.

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

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

Ayrıca çalışmada sedimenti harekete geçiren kritik ortalama akım hızı Eş. 2.6'da verilen ve Neill (1973) tarafından önerilmiş olan bağıntı ile hesaplanmıştır.

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

Burada  $SG$  = taban malzemesinin özgül ağırlığı olup çalışma kapsamında kullanılan sediment için 2,65 olarak alınmıştır.

Eş. 2.3'te yer alan boyutsuz ( $V_a/V_b$ ) parametresi köprü açıklığı yüksekliği ile yaklaşım akım derinliğine bağlı olduğundan ihmal edilmiştir (Koçyiğit ve Karakurt, 2019). Taban malzemesi olarak tek bir malzeme kullandığından ortalama tane çapı  $D_{50}$  sabittir.  $\rho_s/\rho$  oranının çukur oluşumuna çok az etkisi vardır. Bu nedenle bu oran da ihmal edilmiştir (Oliveto ve Hager, 2002).

Çalışmadaki gibi tamamen türbülanslı akım durumunda Reynolds sayısının etkileri ihmal edilebilir (Abed, 1991). Ayrıca taban malzemesi olarak kullanılan sedimentin  $D_{50}$  değeri 0,8 mm olduğu için  $y_a$  ile kıyaslandığında değeri çok küçük kalmaktadır. Bu nedenle  $D_{50}/y_a$  parametresi de ihmal edilmiştir. Böylece Eş. 2.3, Eş. 2.7'ye indirgenmiştir.

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

Sediment modelleme çalışmalarında genellikle Froude sayısı yerine  $D_{50}$  parametresini ihtiva eden densimetrik Froude sayısı kullanılmaktadır. Buna ek olarak, akım şiddeti olan  $V_a/V_c$  parametresi, köprü ayağı etrafında meydana gelen oyulmayı ifade eden bağıntılarda sıklıkla densimetrik Froude sayısı  $Fr_d$  ile ifade edilmektedir (Karakurt, 2016; Demir, 2018). Dolayısıyla  $V_a/V_c$  yerine de  $Fr_d$  kullanılmıştır. Densimetrik Froude sayısı Eş. 2.8 ile hesaplanmaktadır.



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

Eş. 2.7’de bulunan  $a/y_a$  parametresi suyun köprü tabliyesi üzerinden savaklanamadığı ve akımın kısmi basınçlı olarak tanımlandığı akım durumunda,  $h_w/y_a$  parametresi ise suyun tabliye üzerinden savaklandığı savak tipi akım durumunda önem kazanmaktadır. Yukarıda açıklanan kabuller sonrasında Eş. 2.7, Eş. 2.9’da verilen bağıntıya indirgenmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = f\left(Fr_d, \frac{H_b}{y_a}, \frac{D}{y_a}, \frac{h_w}{y_a}, \frac{a}{y_a}, K_\alpha\right) \quad (2.9)$$

Çalışma kapsamında ölçülmüş deney sonuçları, tüm parametreleri aynı olmak üzere akıma dik yerleştirilmiş tabliye ( $\alpha=0^\circ$ ) altındaki ayak etrafında meydana gelen deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığından  $K_\alpha$  ihmal edilmemiştir.

## 2.4. Literatür Araştırması

Oyulma mekanizmasının karmaşık ve dinamik bir yapıya sahip olmasından dolayı yapılan araştırmaların birçoğu oyulma mekanizmasını anlamaya, etkiyen parametreleri belirlemeye yönelik gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarını ve gözlemleri içermektedir. Araştırmacılar, toplanan verilerin değerlendirilmesi ve bu veriler ışığında oyulma mekanizmasına etkiyen parametrelerin anlamlandırılması ile mühendislik açısından hayati öneme sahip olan maksimum oyulma derinliği tahmininin yapılmasına imkân tanıyan çok sayıda formülü süreç içerisinde geliştirmişlerdir.

Abed (1991) yapmış olduğu deneysel çalışmada, literatürde ilk defa basınçlı akım durumunda köprü ayaklarında meydana gelen yerel oyulmayı incelemiştir. Yaptığı deneylerden 10’u serbest akım, 15’i basınçlı akım koşulunda olmak üzere değişken akım derinlikleri ve ortalama akım hızları altında 25 adet deney gerçekleştirmiştir. Deney sonuçlarına göre basınçlı akım durumunda köprü ayaklarında oluşan yerel oyulmaların serbest akım durumundakilerine göre 2,3 ila 10 kat arasında daha büyük olduğunu saptamıştır.

Arneson ve Abt (1998) basınçlı akım oyulmasının daha iyi anlaşılması amacıyla yürüttükleri deneysel çalışmada sadece köprü tabliyesi kullanmışlardır. Köprü açıklığında

meydana gelen düşey daralma oyulmalarını basınçlı akım durumunda incelemiş ve oyulma tahmininde kullanılabilecek ampirik bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Umbrell, Young, Stein ve Jones (1998) yaptıkları deneysel çalışmada köprü ayaklarından kaynaklanan yerel oyulma olmaksızın, sadece köprü altında meydana gelen daralma oyulmasını incelemişlerdir. Yaklaşım akım hızı, debi, yaklaşım akım derinliği ve taban malzemesi boyutunun değişken parametreler olarak ele alındığı çalışma sonucunda basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulmayı tahmin etmede kullanılabilecek bir bağıntı geliştirilmiştir.

Robeson (2000), basınçlı akım koşulunda köprü açıklığındaki oyulmaları araştırmak üzere Colorado Eyalet Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında kenar ayaklara sahip bir köprü modeli ile bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Farklı batıklık seviyelerindeki basınçlı akım koşulunu inceleyebilmek adına yaklaşım akım derinliğini sabit tutmuş ve köprü tabliyesini altı farklı düşey seviyede kullanmıştır. Buna ek olarak, deneylerinde üç farklı debi değeri, iki farklı kenar ayak genişliği ve iki farklı sediment büyüklüğü kullanarak 69 adet deney gerçekleştirmiştir. Daha sonra çok değişkenli doğrusal regresyon yöntemi kullanarak basınçlı akım koşulunda oyulma tahmininin yapılmasını sağlayacak bir bağıntı geliştirmiştir. Ayrıca yapmış olduğu boyutsal analiz sonucunda, basınçlı akım koşulu için oyulma derinliklerinin tahmin edilmesinde baskın 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 Froude sayısı olduğunu belirtmiştir.

Verma ve diğerleri (2004) yapmış oldukları deneysel çalışmada; basınçlı akım durumunda, kararlı ve kararsız akım koşulları altında hareketli taban ile temiz su oyulmalarını incelemişlerdir. Bu amaçla kullandıkları köprü modeli, köprü tabliyesi ve silindirik ayaktan oluşmaktadır. Deneylerde farklı yaklaşım akım derinlikleri ve debi değerleri kullanmışlar, bu parametrelerin köprü açıklığındaki oyulma derinlikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Basınçlı akım koşulunda köprü düşey açıklığı azaldıkça oyulma derinliğinin arttığını belirtmişlerdir.

Shen, Shan, Xie, Bojanowski, Lottes ve Kerenyi (2012), literatürde bulunan deney verilerini kullanarak basınçlı akım durumunda köprü açıklığında meydana gelen

oyulmaları sayısal olarak modellemişlerdir. Computational Fluid Dynamics (CFD) yazılım ve hesap yöntemlerini kullanarak oyulma çukurunu simüle etmişler ve sayısal benzeşimin gerçek veriler üstündeki performansını incelemişlerdir. Teorik modelle elde edilen verilerin tutarlı olduğunu kaydetmişlerdir.

Kumcu (2016) yaptığı çalışmada kısmi ve tam basınçlı akım durumunda temiz su oyulması derinliğini ve köprünün mansap tarafında taşınan sedimentten dolayı meydana gelen depolamayı deneysel olarak incelemiştir. Önceden yapılan kararlı akım şartlarına sahip basınçlı akım oyulmalarını incelemiş ve bir akım hidrografi kullanarak kararsız akım şartlarında basınçlı akım koşulunda oyulma derinliklerini araştırmıştır.

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında konu ile ilgili bir dizi çalışma yapılmıştır. İlk olarak Karakurt (2016) yapmış olduğu çalışmada, temiz su halinde kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altında oluşan oyulmaları deneysel olarak incelemiştir. Akıma dik yerleştirilmiş ve sadece köprü tabliyesinden oluşan düzenekte tabanda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği ve şekli incelenmiş; oyulma derinliği üzerinde etkili olan akım özellikleri, sediment özellikleri ve geometrik parametreleri belirlemek amacıyla 121 adet deney gerçekleştirmiştir. Deney değişken parametreleri olarak iki farklı tane çapına sahip sediment, üç farklı debi değeri ve altı farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır. Ayrıca tabliye seviyesinin maksimum oyulma çukuruna etkisini daha iyi gözlemleyebilmek adına köprü tabliyesini düşeyde iki farklı seviyede konumlandırmıştır. Deneyler sonunda kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında maksimum oyulma derinliği tahmininde kullanılabilecek iki adet ampirik bağıntı önermiştir.

Carnacina, Pagliara ve Leonardi (2019) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada ölçümlerini yaptıkları basınçlı akım oyulma derinliklerini literatürdeki Umbrell ve diğerleri (1998), Arneson (1997), Lyn (2008), Kumcu (2016) tarafından geliştirilen bağıntılarla karşılaştırmışlardır. Özellikle büyük taşkınlar esnasında 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 Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında yapmış olduğu deneysel çalışmada akıma dik konumlandırılmış köprü tabliyesi ve silindirik orta ayağa sahip bir köprünün basınçlı akım durumundaki maksimum oyulma çukuru derinliği ve şeklini incelemiştir. Üç farklı debi değeri ve dört farklı yaklaşım akım derinliğinde yürüttüğü deneyler sonucunda oyulma mekanizmasına etki eden parametreleri incelemiş, maksimum oyulma derinliğini tahmin eden bir bağıntı geliştirmiş ve elde ettiği bağıntıyı literatürde bulunan diğer ampirik bağıntılarla istatistiksel parametreler yardımıyla karşılaştırarak bağıntıların maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin etme performanslarını incelemiştir. Daralma oyulması derinliği tahmini için Shen ve diğerleri (2012), serbest akım durumunda yerel oyulma derinliği tahmini için Melville ve Sutherland (1988), basınçlı akım durumunda ise Abed (1991)'e ait bağıntıların en iyi sonucu verdiğini kaydetmiştir.

Abdelhaleem, Mohamed, Shaaban, Ardakanian, Fahmy ve Ibrahim (2023) çalışmalarında temiz su durumunda kenar ayaklara sahip bir köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma derinliğini incelemişlerdir. Bu kapsamda hem kısmi basınçlı hem de serbest akım koşulları için yaklaşım akım derinliği, taban malzemesi boyutu, yanıl daralma uzunluğu ve genişliği ile köprü düşey açıklığını içeren 66 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonunda maksimum oyulma derinliğini belirlemek için ampirik bir bağıntı geliştiren araştırmacılar elde ettikleri deneysel verileri daha önceki kısmi basınçlı akım modellerinin tahmin hataları açısından performanslarını belirlemek için kullanmışlardır. Yaptıkları değerlendirmelerde basınçlı akım koşulu için maksimum oyulma derinliğinin serbest akım koşulu altındaki maksimum oyulma derinliğinin densimetrik Froude sayısı ve köprü açıklığına bağılı olarak 2,15 ve 9,81 katı kadar arttığını ortaya koymuşlardır. 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.

Literatürde serbest akım durumunda farklı ayak şekli, ayak eksenini ile akım doğrultusu arasındaki açı, akım ve taban malzemesi koşullarında çok sayıda çalışma yapılmış ve ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Ancak basınçlı akım durumunda köprü açıklığındaki oyulmaları inceleyen az sayıda çalışma olduğu gibi verevlik açısına sahip köprü tabliyesinin oyulmaya etkisinin incelendiği çalışmalar da oldukça sınırlıdır.

Fayyadh, Akib, Othman ve Razak (2011) çalışmalarında 34°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ile kenar ayaklara sahip köprü modeli kullanmışlardır. Farklı akım hızlarında oyulma derinliklerini hem deneysel olarak incelemişler hem de sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal benzeşimini yapmışlar ve köprünün yapısal davranışını incelemişlerdir.

Farhangi, Thamer, Ghazali ve Yusuf (2016) dikdörtgen ayağa sahip verevlik açısı olan köprü tabliyesi altında oluşan maksimum oyulma çukurunu basınçlı akım ve temiz su oyulması koşullarında incelemişlerdir. Araştırmacılar 16 adet deneyde; köprü tabliyesini 0°, 5°, 10°, 15°, 22,5° ve 30°'lik verevlik açılarıyla yerleştirmişler ve iki farklı sediment tane çapı kullanmışlardır. Daha sonra toplanan verilerin analizi için çoklu doğrusal regresyon yöntemini kullanarak maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Demir (2018), Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirmiş olduğu deneysel çalışmada, orta ve kenar ayaklar olmadan sadece 15°'lik verevlik açısına sahip köprü tabliyesi kullanarak basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliği ve şeklini incelemiştir. Özellikle kısmi basınçlı akım durumunda verevliğin oyulmaya etkisini araştırmıştır. Çalışmada farklı yaklaşım akım derinlikleri ve giriş yükseklikleri kullanarak kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşulları ile çalışmıştır. Deney verileri kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve köprü açıklığında maksimum oyulma derinliğini tahmin eden ampirik bir bağıntı elde etmiştir. Tabliyenin verevli olması durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğinin arttığını belirtmiştir.



### 3. DENEY DÜZENEĞİ VE PROSEDÜRÜ

#### 3.1. Genel

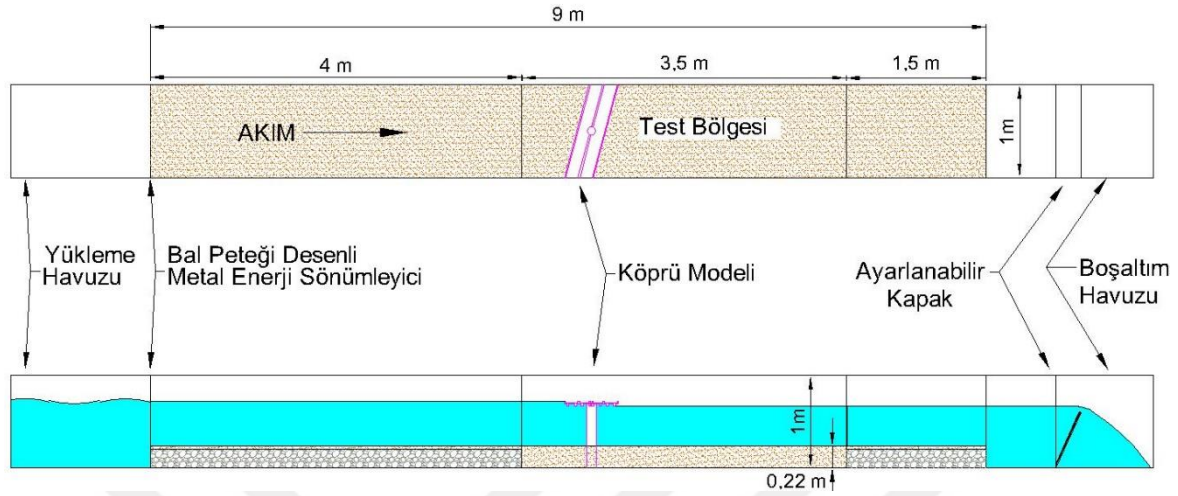
Çalışma kapsamında yürütülen açık kanal deneyleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi içerisinde bulunan Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan açık kanal düzeneğine ait genel görünüm Resim 3.1’de verilmektedir. Akıma ait farklı karakteristiklerin incelenebileceği bu açık kanal düzeneği, yaklaşık 10 m uzunluğunda, 1 m eninde ve 1 m yüksekliğinde dikdörtgen bir kesite sahiptir. Kanalın genel taşıyıcı aksamı çelik konstrüksiyon olup yan duvarları 10 mm kalınlığında temperli cam kullanılarak imal edilmiştir.



Resim 3.1. Çalışmalar kapsamında kullanılan açık kanal düzeneği

Açık kanal düzeneğine ait plan ve profil, şematik olarak Şekil 3.1’de verilmiştir. Kanalın yükleme havuzuna bağlı bulunan birbirinden bağımsız 3 adet pompa sayesinde istenilen debi değerlerinde su kanala sağlanabilmektedir. Kanalın su sistemi kapalı bir devridaim sistemine sahiptir: Kanaldan tahliye olan su, deney düzeneğinin alt katında bulunan yer altı

tankında toplanmakta tekrar buradan pompalar vasıtasıyla açık kanal düzeneğine aktarılmaktadır.



Şekil 3.1. Açık kanal düzeneğinin plan ve profiline ait şematik gösterimi

Pompalardan kanala aktarılan suyun kararlı akıma dönüşebilmesi için bir dizi önlem alınmıştır. Pompalardan çıkan suyun türbülansının ve enerjisinin kırılması amacıyla su ilk etapta susturucuların da bulunduğu yükleme havuzuna aktarılmaktadır. Daha sonra su, açık kanala geçerken akımdaki yüzey salınım ve dalgalanmalarından arınması amacıyla akıma dik yerleştirilmiş bal peteği desenli metal enerji sönümleyiciden geçmektedir. Akım, kanala girdikten sonra yaklaşık 4 m uzunluğunda, test bölgesi öncesinde bir bölümden geçmektedir. Bu kısmın altına 20 cm çakıl doldurulmuş üzerine ise 18 mm kalınlığında, yüzeyi taban malzemesi ile kaplı, suya dayanıklı levhalar yerleştirilmiştir. Levhaların yüzeyine deneylerde kullanılan taban malzemesi yapıştırıldığı için test bölgesi ile aynı, kanal boyunca üniform bir pürüzlülük elde edilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında temiz su oyulmasının olması sağlanmıştır. Çakıllar arasına hapsolmuş havanın akıma etkisini önlemek amacıyla levhalara düzensiz olarak delikler açılmış, özellikle deney başlangıcında kanala su verilirken bu hava kabarcıklarının dışarı çıkışı sağlanarak test bölgesinin bozulması engellenmiştir. Kanalda uzunluğu 4 m olan levha kaplı bölümün ardından 3,5 m uzunluğundaki test bölgesi yer almaktadır. Bu bölüm önceki bölümün aksine çakıl ve levha ile değil sadece deneyde kullanılan taban malzemesi ile doldurulmuştur. Deney kapsamında kullanılacak köprü tabliyesi ve köprü ayakları bu alana konumlandırıldığından oyulma çukuru profilinin incelenmesi ve derinliklerin okunması bu bölümde gerçekleşmektedir. Akım, test bölgesini geçtikten sonra yaklaşık 1,5 m uzunluğunda çakıl dolgu malzemesi ve sediment kaplı levha bulunan bölümü geçerek kanal sonunda bulunan



ayarlanabilir kapağa ulaşmaktadır. Bu kapak sayesinde yaklaşım akım derinliği yani su seviyesi istenilen değerlere ayarlanabilmektedir. Ayrıca, akımla birlikte kanalın mansap tarafına taşınabilecek sediment olması durumunda ayarlanabilir kapağın hemen memba tarafında oluşturulan sediment tuzak bölgesi ile sediment tanelerinin boşaltım havuzuna geçmesi engellenmektedir. Ayarlanabilir kapaktan savaklanan su, boşaltım havuzuna oradan da yer altı su deposuna geçerek bir devridaimi tamamlamış olmaktadır.

### 3.2. Deney Düzenegi ve Kurulumu

#### 3.2.1. Taban malzemesi

Deneylerde kullanılan taban malzemesi, doğal dere yatağından alınan sedimenttir. Çalışma kapsamında tek bir taban malzemesi kullanılmış olup homojen bir dağılıma sahip olması için bir dizi işleminden geçirilmiştir. Doğal malzeme öncelikle kil, silt ve organik materyalden yıkanarak arındırılmış ardından kurutularak ortalama tane çapı 0,8 mm olacak şekilde elenmiştir. Çizelge 3.1 deneylerde kullanılmış olan taban malzemesine ait elek analizi sonucunda elde edilmiş tane çapı karakteristiklerini göstermektedir.

Taban malzemesinin deneylerde kullanılabilirliğinin kontrolü amacıyla literatürde üniformluğu ifade eden büyüklükler kullanılarak homojenliği kontrol edilmiştir. Dey ve diğerleri (2008) sediment tane çapı dağılımına ait geometrik standart sapma değerini  $\sigma_g = D_{84,1} / D_{50}$  olarak vermiştir. Bu değer 1,4'ten küçük olması halinde üniform tane dağılımı elde edileceği kabul edilmiştir. Çizelge 3.1 incelendiğinde kullanılan taban malzemesi dağılımına ait geometrik standart sapma değerinin 1,19 olarak bulunduğu ve böylece üniformluğun sağlandığı görülmüştür. Buna ek olarak üniformluluk katsayısı  $C_u = D_{60} / D_{10} = 1,0$  olarak saptanmış, bu değer 3,0'ten küçük olması nedeniyle tane dağılımının üniform olarak tanımlanabileceği belirlenmiştir (Yanmaz, 2022).

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan taban malzemesine ait tane çapı dağılım karakteristikleri

| D <sub>10</sub> (mm) | D <sub>30</sub> (mm) | D <sub>50</sub> (mm) | D <sub>60</sub> (mm) | D <sub>84,1</sub> (mm) | C <sub>u</sub> | C <sub>c</sub> | $\sigma_g$ |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------|----------------|------------|
| 0,8                  | 0,8                  | 0,8                  | 0,8                  | 1,0                    | 1,0            | 1,0            | 1,19       |

Deneyleerde kullanılan taban malzemesinin zemin dağılımı Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne göre değerlendirildiğinde, içeriğinde ince malzemenin % 0-5 olduğu, kum ve üniformluluk katsayısı  $C_u < 6$  olduğundan “SP” yani kötü derecelendirilmiş temiz kum sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Deneyleerde kullanılacak taban malzemesi elde edildikten sonra Şekil 3.1’de belirtilen test bölgesine düz ve homojen bir şekilde yerleştirilmiştir. Taban malzemesi seviyesinin, test bölgesinde her noktada eşit olabilmesi amacıyla açık kanal düzeneği için özel tasarlanmış, kanal platformu üzerinde hareket edebilen bir tesviye aparatı kullanılmıştır (Bkz. Resim 3.2). Her deney öncesi tesviye edilen taban malzemesinin, lazermetre yardımıyla batimetrik ölçümü gerçekleştirilmiş ve deney öncesi taban seviyesi ölçümü olarak kaydedilmiştir.



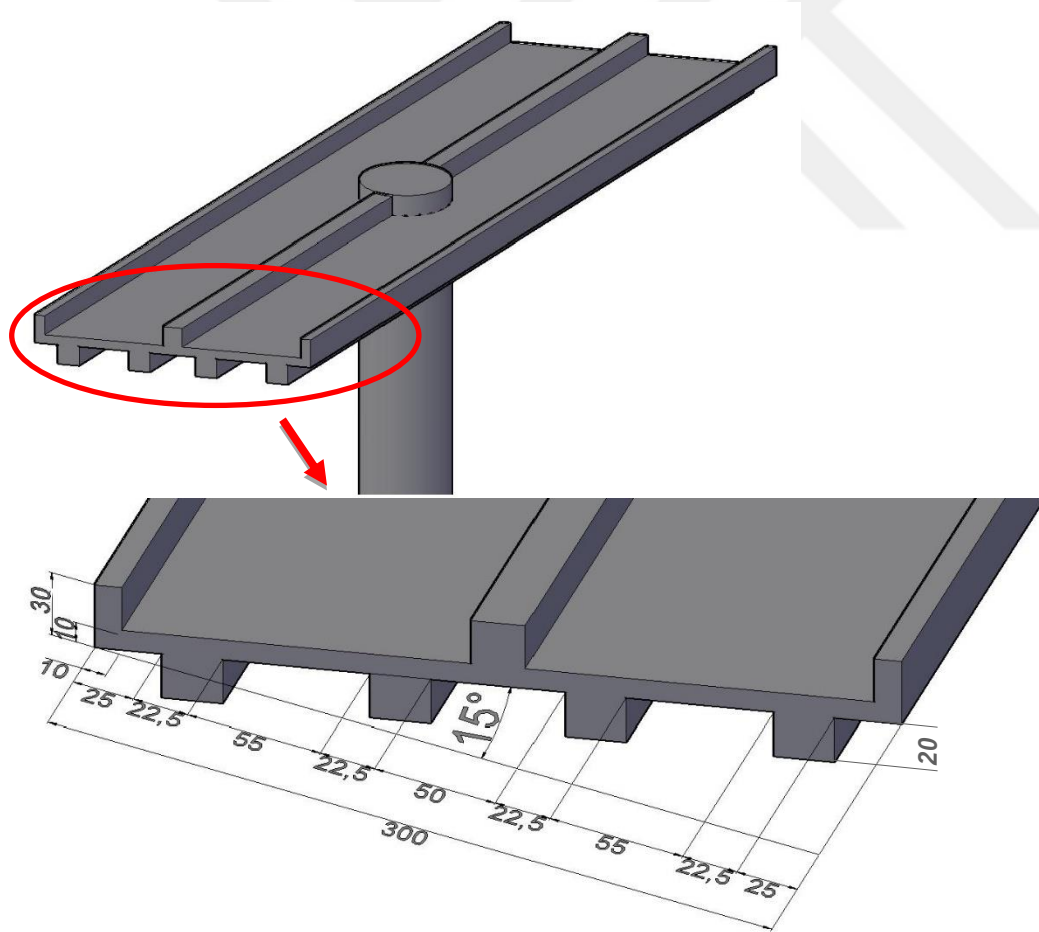
Resim 3.2. Taban malzemesi tesviyesinin sağlanmasında kullanılan aparat

### 3.2.2. Köprü modeli

Deneyleerde kullanılan köprü modelinin boyutlandırılmasında laboratuvar imkanları, açık kanal düzeneğine ait karakteristikler ve önceki deneylere ait tecrübeler göz önünde bulundurularak literatür çalışmaları ve boyut analizi ile karar verilmiştir. Köprü modeli, köprü tabliyesi ve silindirik orta ayak olmak üzere iki temel unsurdan oluşmaktadır.

Deneylerde kullanılan köprü tabliyesi ölçülerine ait şematik gösterim Şekil 3.2’de verilmiştir. Çalışmanın ana amaçlarından bir tanesi tabliye verevlik açısının oyulma çukuru derinliği ve profiline etkisini araştırmaktır. Bu parametrenin daha iyi araştırabilmesi ve etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla aynı koşullar altında ancak akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesinin kullanıldığı Barakat (2022)’ye ait deney sonuçları kullanılmıştır. Dolayısıyla Barakat (2022) tarafından kullanılan köprü modelinin yatayda  $15^\circ$ ’lık verevlik açısına sahip hali bu çalışmada köprü tabliyesi olarak kullanılmıştır.

Tabliyenin altında dört adet kiriş bulunmaktadır. Kiriş yüksekliği ve tabliyenin korkuluk yüksekliği 20 mm’dir. Kısmi basınçlı akım durumunda su seviyesi korkuluğu aşmazken tam basınçlı yani savak tipi akım durumunda, akım korkuluk seviyelerini de aşarak tabliye üstünden mansaba doğru savaklanmaktadır.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan köprü modeline ait ölçülerin şematik gösterimi (birimler mm cinsindendir)

Deneylerde kullanılan orta ayak modeli 10 cm çapında ve daire kesitli silindirik yapıdadır. Köprü tabliyesinin merkez noktasında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Deney esnasında konumunun değişmemesi için açık kanalın tabanına oturtulmuş, daha sonra taban malzemesiyle sabitlenmiştir (Bkz. Resim 3.3).



Resim 3.3. Deneylerde kullanılan silindirik orta ayağın konumlandırılması

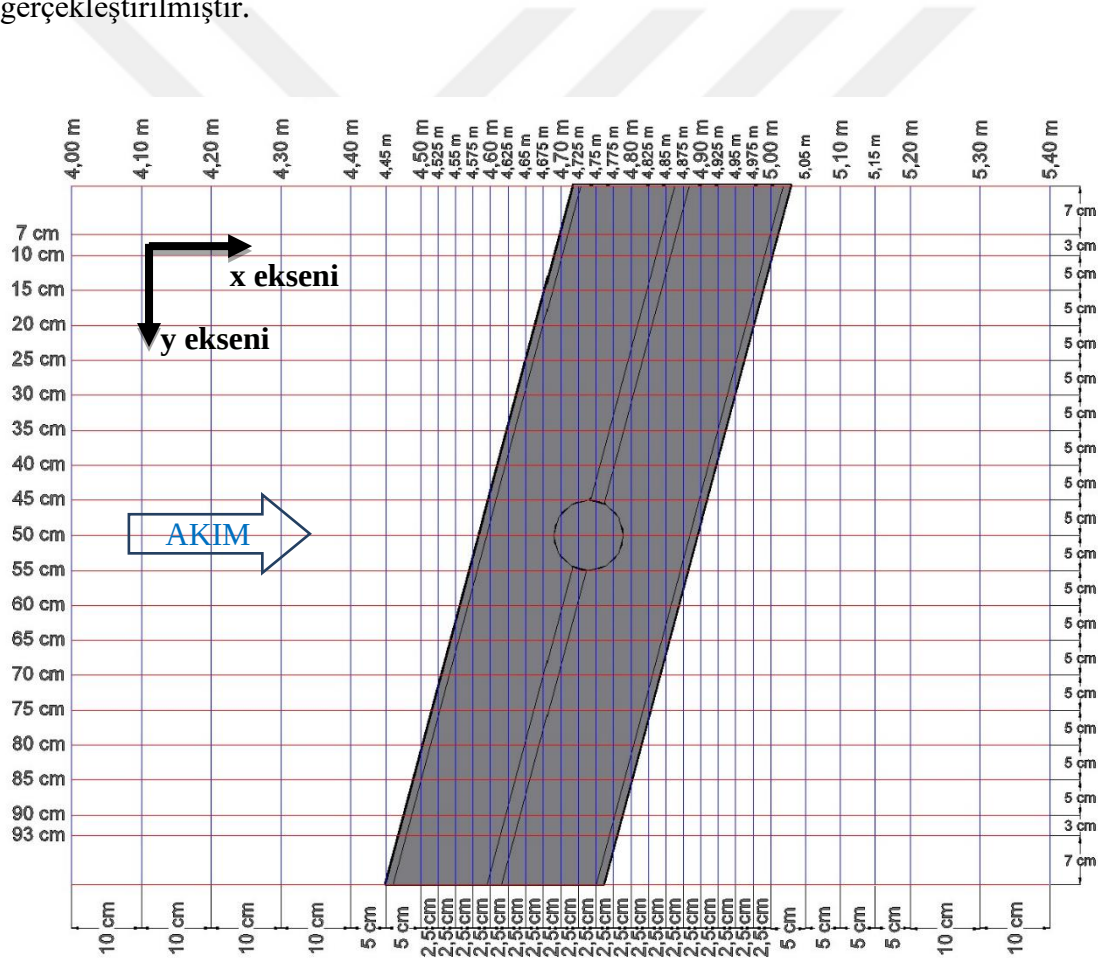
### 3.2.3. Deney ölçüm düzeneği

Deneyler gerçekleştirildikten sonra köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru profilinin incelenmesi için batimetrik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerin yapılmasında açık kanal düzeneğindeki test bölgesi Şekil 3.3'te görüldüğü gibi ızgara biçiminde bölümlere ayrılmış ve bu ağ kesişim noktalarında  $\pm 1$  mm hassasiyete sahip Leica DISTO D810 model Lazermetre ile batimetrik ölçümler yapılmıştır. Resim 3.4'te gösterilen lazermetre, açık kanal düzeneği üzerinde tekerlekler yardımıyla enine ve boyuna hareket edebilen bir platform üzerine sabitlenmiştir.

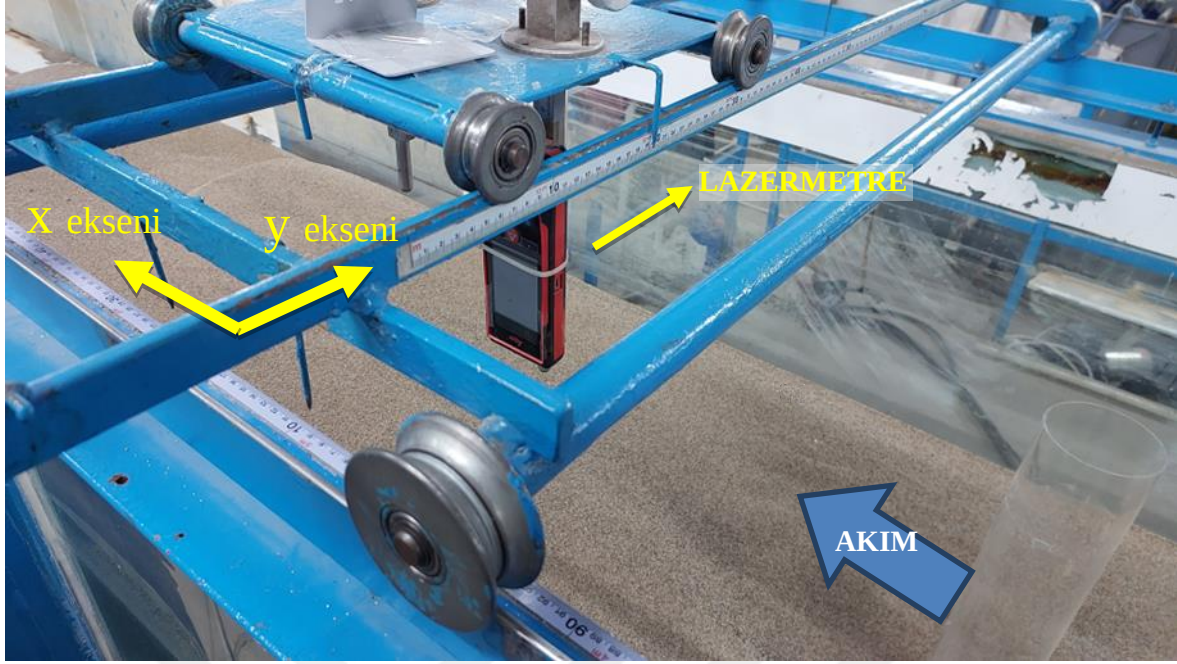
Lazermetrenin istenilen noktada konumlandırılıp okuma yapılabilmesi amacıyla lazermetre platformuna ve açık kanal düzeneğinin üzerine Resim 3.4'te görülen şerit metreler yapıştırılmıştır. Açık kanal boyunca uzanan eksen, x ekseni; açık kanalın enine kesiti ise y



ekseni olarak kabul edilmiştir (Bkz. Şekil 3.3 ve Resim 3.4). Test bölgesinde kaydedilen oyulma derinlikleri; boyuna uzunlukta yani x ekseninde 4,0 – 5,4 m arasında, enine uzunlukta yani y ekseninde ise 0,07 – 0,93 m arasında ölçülmüştür. x eksenine göre ölçüm noktaları arasındaki mesafe, başlangıçta memba tarafında 10 cm iken köprü tabliyesine yaklaştıkça 5 cm'ye ve köprü tabliyesi altında 2,5 cm'ye kadar düşürülerek köprü tabliyesi altında alınan oyulma çukuru derinlik ölçümlerinin daha hassas olması sağlanmıştır. Köprü tabliyesinin mansap tarafında 2,5 cm'de bir alınan ölçümler köprü modelinden uzaklaştıkça 5 cm'de bir ve 10 cm'de bir ölçüm alınarak x=5,4 m'ye kadar devam etmiştir. Toplam uzunluğu 1 m olan y ekseninde ise her 5 cm'de bir ölçüm alınmış, yalnızca açık kanal düzeneğinin duvarlarına yakın noktalarında kanal duvarından 7 cm ötede ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Test bölgesinde deney ölçümlerinin yapıldığı ızgara ağ sistemi



Resim 3.4. Lazermetre ve deney ölçüm koordinat eksenleri

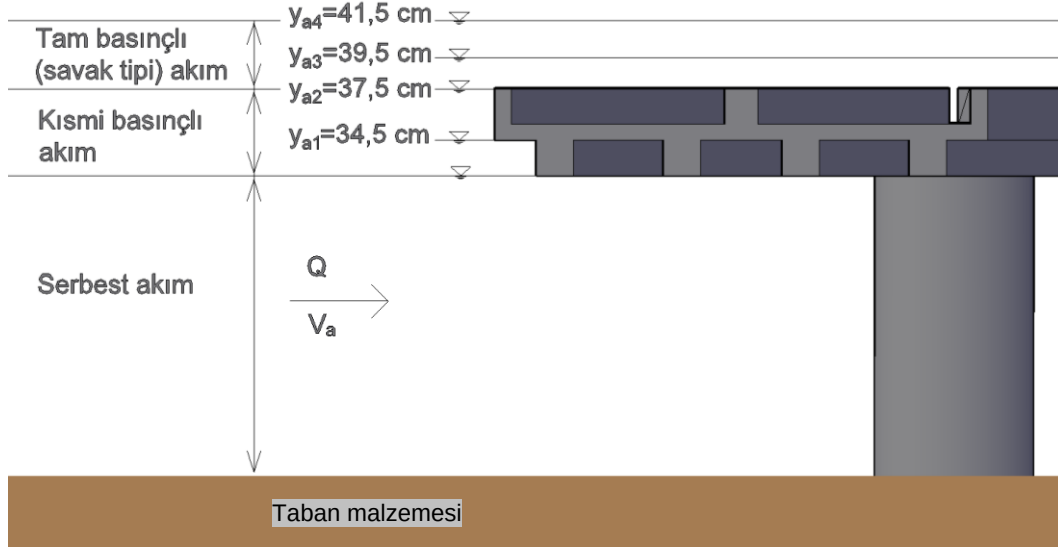
Taban seviye ölçümü her bir deney seti için deney öncesinde ve deney sonrasında yapılmıştır. Nihayetinde, alınan ölçüm değerleri arasındaki fark, tabanda oluşan oyulma çukuru şeklinin ve derinliğinin sağlıklı bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır.

### 3.3. Deney Kapsam ve Prosedürü

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde  $Q = 100 \text{ lt/sn}$ ,  $Q = 110 \text{ lt/sn}$  ve  $Q_3 = 120 \text{ lt/sn}$  olmak üzere üç farklı debi değeri ve  $y_a = 34,5 \text{ cm}$ ,  $y_a = 37,5 \text{ cm}$ ,  $y_a = 39,5 \text{ cm}$  ve  $y_a = 41,5 \text{ cm}$  olmak üzere dört farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır.

Söz konusu debi değerleri ve yaklaşım akım derinlikleri, deney öncesi hazırlık aşamasında yapılan ön çalışmalar ile belirlenmiştir. Ön çalışmalar esnasında yapılan deneylerle her bir debi değeri için tabanda sediment hareketinin meydana gelmediği yani kanal boyunca temiz su oyulmasının sağlandığı yaklaşım akım derinlikleri belirlenmiştir. Dolayısıyla deneylerde uygulanan yaklaşım akım derinliklerinde tabanda sediment taşınımı olmamaktadır. 34,5 cm ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde su seviyesi köprü tabliye alt sınırı ile üst sınırına gelmekte böylece kısmi basınçlı akım meydana gelmektedir. Yaklaşım akım derinliklerinin 39,5 cm ve 41,5 cm olduğu durumlarda ise su

seviyesi köprü tabliyesi üzerine çıktığından tam basınçlı akım veya savak tipi akım oluşmakta ve akım tabliye üzerinden savaklanmaktadır (Bkz. Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Yaklaşım akım derinlikleri ile kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarının oluşumu

Deney sırasında yapılan gözlemlerde oyulma derinliğinin deney başlangıcında hızla arttığı ve zamanla oyulma hızının yavaşladığı görülmüştür. Başlangıçta köprü tabliyesi altında daralan akım alanı, söz konusu bölgeden sedimentin taşınması ile zamanla artmakta, böylece akım hızı ve kayma gerilmeleri azalarak oyulma çukurunun dengeye ulaşmasına neden olmaktadır. Çalışmada yapılmış olan ön deneylerde sediment taşınımının ilk 2-3 saatte oldukça hızlı olduğu, sonraki süreçte yavaşladığı ve gözle görülemeyecek kadar azalarak denge durumuna geldiği kabul edilmiştir. Tabandaki hareketin ve oyulma derinliğindeki değişimin gözlemlenemeyecek duruma geldiği 16 saatlik zaman dilimi her bir deney seti için deney süresini oluşturmuştur.

Deneylerde kullanılan debi değerleri ve yaklaşım akım derinliklerine karşılık gelen yaklaşım akım hızları ( $V_a$ ) ve kritik akım hızları ( $V_c$ ) Çizelge 3.2’de verilmektedir. Ortalama kritik akım hızının ( $V_c$ ) hesaplanmasında Neill (1973) tarafından geliştirilmiş olan ve Eş. 2.6’da verilen bağıntı kullanılmıştır. Ortalama yaklaşım akım hızının ( $V_a$ ) hesaplanmasında Eş. 3.1’de verilen süreklilik denklemi kullanılmıştır.

$$V_a = \frac{Q \cdot 10^{-3}}{y \cdot b} \quad (3.1)$$

Burada; Q = debiyi (lt/sn), y = yaklaşım akım derinliğini (m) ve b = kanal genişliğini (=1 m) ifade etmektedir.

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan yaklaşım akım derinliklerine ait akım parametreleri

| Debi, Q<br>(lt/sn) | Yaklaşım akım<br>derinliği, $y_a$<br>(m) | Ortalama<br>akım hızı, $V_a$<br>(m/s) | Froude<br>sayısı, $Fr_a$<br>(-) | Kritik ortalama<br>akım hızı, $V_c$<br>(m/s) | $V_a/V_c$<br>(-) |
|--------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|------------------|
| 100                | 0,345                                    | 0,290                                 | 0,158                           | 0,495                                        | 0,585            |
|                    | 0,375                                    | 0,267                                 | 0,139                           | 0,502                                        | 0,531            |
|                    | 0,395                                    | 0,253                                 | 0,129                           | 0,507                                        | 0,500            |
|                    | 0,415                                    | 0,241                                 | 0,119                           | 0,511                                        | 0,472            |
| 110                | 0,345                                    | 0,319                                 | 0,173                           | 0,495                                        | 0,644            |
|                    | 0,375                                    | 0,293                                 | 0,153                           | 0,502                                        | 0,584            |
|                    | 0,395                                    | 0,278                                 | 0,141                           | 0,507                                        | 0,550            |
|                    | 0,415                                    | 0,265                                 | 0,131                           | 0,511                                        | 0,519            |
| 120                | 0,345                                    | 0,348                                 | 0,189                           | 0,495                                        | 0,702            |
|                    | 0,375                                    | 0,320                                 | 0,167                           | 0,502                                        | 0,637            |
|                    | 0,395                                    | 0,304                                 | 0,154                           | 0,507                                        | 0,600            |
|                    | 0,415                                    | 0,289                                 | 0,143                           | 0,511                                        | 0,566            |

Çizelge 3.2’den görüldüğü üzere, deneylerde yaklaşım akım Froude sayısı ( $Fr_a$ ) 0,119 ile 0,189 arasında değişmektedir. Ayrıca deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinliklerine göre akım hız parametreleri incelendiğinde ortalama akım hızının ortalama kritik akım hızına oranının,  $V_a/V_c$  0,472 ile 0,702 değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Umbrell ve diğerlerine (1998) göre bu oranın 1’den küçük olmasıyla akımın temiz su durumu sağlanmış olmaktadır.

Deneylerde, farklı debi değerlerinin, yaklaşım akım derinliklerinin ve verevlik açısının daralma oyulmasına, yerel oyulmaya ve her ikisinin birlikte olduğu basınçlı oyulmaya etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen 36 adet deney, Çizelge 3.3’te verilen seriler çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler kapsamında, temiz su oyulması durumunda kısmi basınçlı ve savak tipi akım şartlarında verevlik açısı olan köprü tabliyesi ve silindirik orta ayağa sahip köprü altında meydana gelmiş olan maksimum oyulma çukuru derinliği ile profili incelenmiştir. Ayrıca oyulma çukuru derinliği üzerinde etkili



olan debi, yaklaşım akım derinliği ve verevlik açısı gibi parametrelerin etkisi incelenebilmiştir.

Çizelge 3.3. Deney serilerine ait özellikler

| Deney No                                                           | Q (lt/sn) | y <sub>a</sub> (cm) | Akım durumu  | Köprü modeli         | Oyulma Tipi             |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------|--------------|----------------------|-------------------------|
| 1                                                                  | 100       | 34,5                | KBA          | Sadece Tabliye       | Daralma Oyulması        |
| 2                                                                  |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 3                                                                  |           | 39,5                | TBA          |                      |                         |
| 4                                                                  |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 5                                                                  | 110       | 34,5                | KBA          |                      |                         |
| 6                                                                  |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 7                                                                  |           | 39,5                | TBA          |                      |                         |
| 8                                                                  |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 9                                                                  | 120       | 34,5                | KBA          |                      |                         |
| 10                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 11                                                                 |           | 39,5                | TBA          |                      |                         |
| 12                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 13                                                                 | 100       | 34,5                | Serbest Akım | Sadece Orta Ayak     | Yerel Oyulma            |
| 14                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 15                                                                 |           | 39,5                |              |                      |                         |
| 16                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 17                                                                 | 110       | 34,5                |              |                      |                         |
| 18                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 19                                                                 |           | 39,5                |              |                      |                         |
| 20                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 21                                                                 | 120       | 34,5                |              |                      |                         |
| 22                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 23                                                                 |           | 39,5                |              |                      |                         |
| 24                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 25                                                                 | 100       | 34,5                | KBA          | Tabliye ve Orta Ayak | Daralma ve Yerel Oyulma |
| 26                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 27                                                                 |           | 39,5                | TBA          |                      |                         |
| 28                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 29                                                                 | 110       | 34,5                | KBA          |                      |                         |
| 30                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 31                                                                 |           | 39,5                | TBA          |                      |                         |
| 32                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| 33                                                                 | 120       | 34,5                | KBA          |                      |                         |
| 34                                                                 |           | 37,5                |              |                      |                         |
| 35                                                                 |           | 39,5                | TBA          |                      |                         |
| 36                                                                 |           | 41,5                |              |                      |                         |
| KBA: Kısmi basınçlı akım<br>TBA: Tam basınçlı yani savak tipi akım |           |                     |              |                      |                         |

Çalışma kapsamında yapılmış olan deneylerde takip edilen deney prosedürü aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Test bölgesi tabanına serilen sediment, her yönde eşit seviye elde edilecek şekilde tesviye aparatı kullanılarak düzlenir.
2. Düzlenen taban sedimentinin deney öncesi taban batimetrisi lazermetre yardımıyla ölçülür.
3. Deney setinde köprü tabliyesi bulunuyorsa köprü tabliyesi, açık kanal düzeneğindeki yerine monte edilir. Bu işlem sonrasında deney düzeneği, kanala su verilmesi için hazır durumdadır.
4. Pompalar çalıştırılır ve pompalar su deposundan aldığı suyu yükleme havuzuna doldurmaya başlar. Deneyin ilk safhalarında, yükleme havuzuna bağlı bulunandeşarj vanası ile ayarlama yapılarak akımın açık kanal düzeneğinde mümkün olduğunca yavaş bir şekilde ilerlemesi sağlanır. Bu şekilde tabanda bulunan sediment rahatsız edilmeden kanalın su ile yavaş yavaş dolması sağlanır. Kanalda yükselen su seviyesi mansap tarafında bulunan ayarlanabilir kapak seviyesine kadar yükselir. Seviyesi daha da artan su, kapak üzerinden savaklanmaya oradan da boşaltım havuzuna akmaya başlar. Boşaltım havuzunda bulunandeşarj vanası yardımıyla su deposuna aktarılır. Bundan böyle deney düzeneğindeki suyun akışı ve devridaimi sağlamış olur.
5. Açık kanala verilen suyun devridaimi sağlandıktan sonra,deşarj vanaları yardımıyla akımın istenilen debi değerine ulaşması ve kanal sonundaki ayarlanabilir kapak yardımıyla akımın istenilen yaklaşım akım derinliğine ulaşması sağlanır.
6. Deneyler için belirlenmiş olan süre geçince pompalar durdurulur. Tıpkı deney başlangıcında olduğu gibi kanal tabanındaki sediment rahatsız edilmeden suyun kanaldan tahliyesi sağlanır.
7. Düzeneğe monte edilmiş köprü tabliyesi, düzenekten çıkartılır.
8. Deney sonrası taban batimetrisi lazermetre yardımıyla ölçülür.

9. Deney öncesi ve sonrası alınan batimetri değerlerinin farkı taban seviyesindeki değişimi yani oyulma çukuru derinliklerini ve mansap tarafındaki birikme yüksekliklerini vermektedir.
10. Bir sonraki deney seti gerçekleştirilmek üzere adım 1'e dönülür.





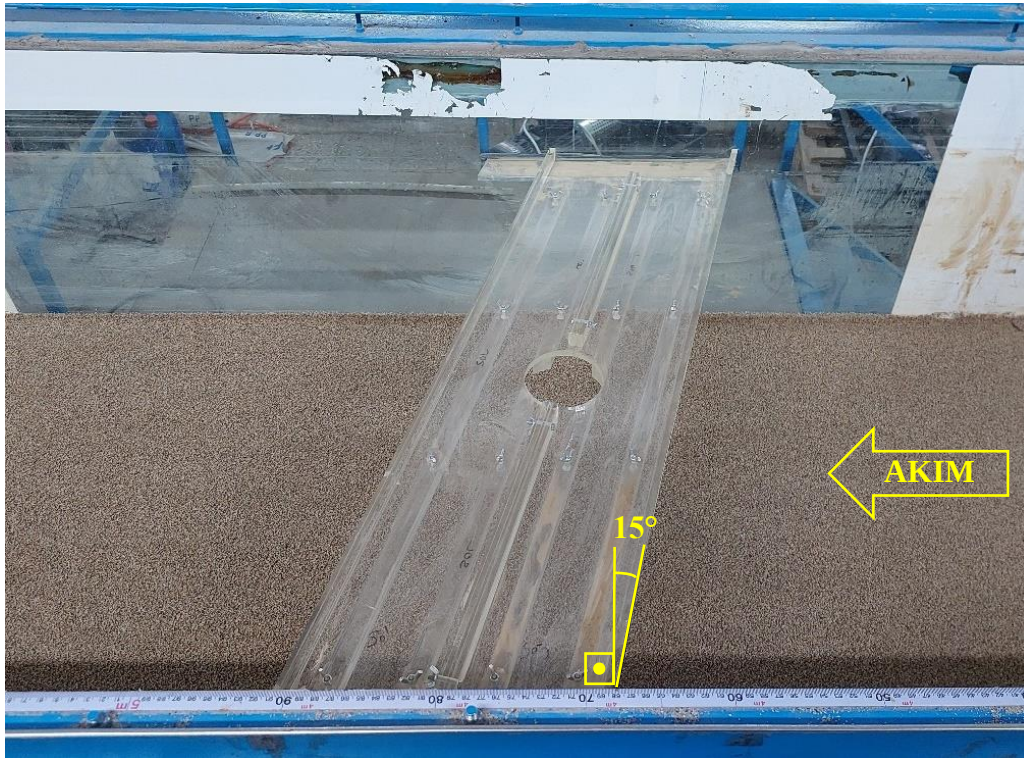
## 4. DENEY SONUÇLARI VE BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1. Oyulma Çukuru Özelliklerinin İncelenmesi

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen oyulma çukuru profil ve özellikleri, oyulma tiplerine göre gruplandırılarak sunulmuştur.

#### 4.1.1. Düşey daralma oyulmasının incelenmesi

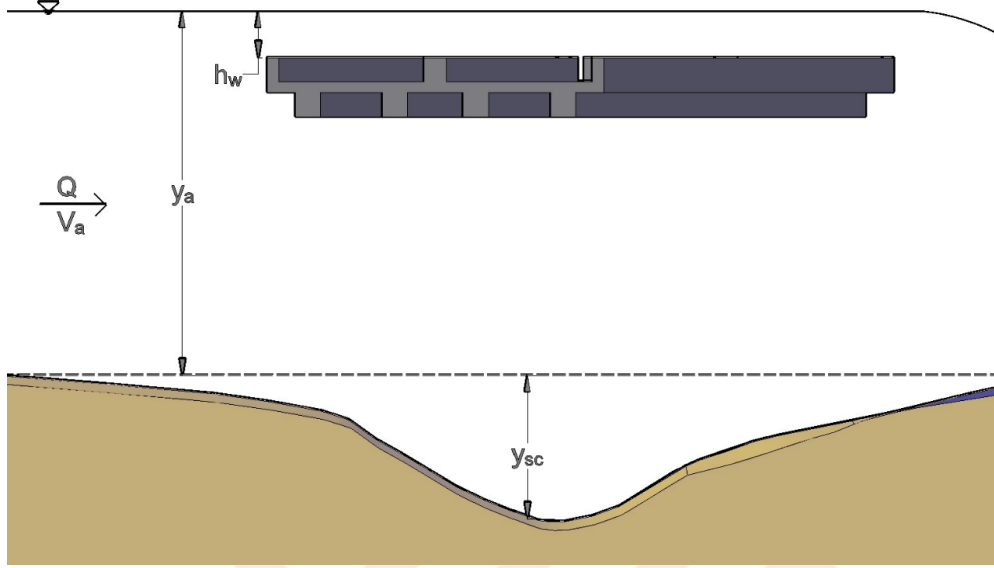
Deneyisel çalışmanın ilk grubunda verevli köprü tabliyesi, Resim 4.1’de görüldüğü gibi orta ayak olmadan kanala yerleştirilmiştir. Farklı debi ve yaklaşım akım derinlikleri kullanılarak kısmi basınçlı ve tam basınçlı akım koşullarında temiz su oyulması meydana gelmiştir.



Resim 4.1. Daralma oyulmasını incelemek üzere verevli köprü tabliyesinin deney öncesi yerleşimi

Çalışma kapsamında, sadece köprü tabliyesinin bulunduğu bu deney grubunda 12 adet deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de düşey daralma oyulmasının incelendiği deneylere ait köprü tabliye modeli ve ilgili değişken parametreler gösterilmiştir. Deney kapsamında

sabit tutulan parametreler burada yer almayıp Bölüm 2.3'te verilen boyut analizinde bulunabilir.



Şekil 4.1. Sadece verevli köprü tabliyesinin bulunduğu düzenek ve parametreler

Çizelge 4.1'de köprü tabliyesi altında sadece daralma oyulması durumunda ölçülen maksimum oyulma derinliği  $y_{sc,max}$  değerleri ile konumları verilmiştir. Ayrıca tabloda hem daralma hem de yerel oyulmanın meydana geldiği deneylerde ölçülen maksimum oyulma derinliği  $y_{spp,max}$ 'ın olduğu konumdaki  $y_{sc}$  değerleri görülmektedir. Bu değerlerin verilmesinin nedeni aynı akım koşullarında ayrı ayrı meydana gelen daralma ve yerel oyulma derinlikleri toplamalarının hem tabliye hem de orta ayağın bulunduğu deneylerde ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliği  $y_{spp,max}$  ile karşılaştırılabilmesini sağlamaktır.

Literatüre bakıldığında köprü orta ayak derinliğinin belirlenmesinde dikkate alınan toplam maksimum oyulma çukuru derinliği hesabında iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki, HEC-18 (Hydraulic Engineering Circular Evaluating Scour at Bridges) (FHWA Resource Center Hydraulics, 2012) ve BD 97/12 (The Assessment of Scour and Other Hydraulic Actions at Highway Structures) (United Kingdom National Highways, 2012) gibi belli başlı yönetmeliklerde de uygulama bulan, toplam maksimum oyulma çukuru derinliğinin maksimum düşey daralma oyulma derinliği ile maksimum yerel oyulma derinliğinin ampirik bağıntılardan hesaplanarak toplanmasıyla belirlendiği yaklaşımdır. Diğer yaklaşım ise her iki oyulma tipinin birlikte meydana geldiği birleştirici oyulma teorisine göre belirlenecek toplam maksimum oyulma çukuru derinliğini göz

önüne almaktadır (Raudkivi ve Ettema, 1983). Bu nedenle çalışmada bu yaklaşımların değerlendirmesinin de yapılabilmesi için tabloda verilen  $y_{sc}$  değerleri de dikkate alınmıştır.

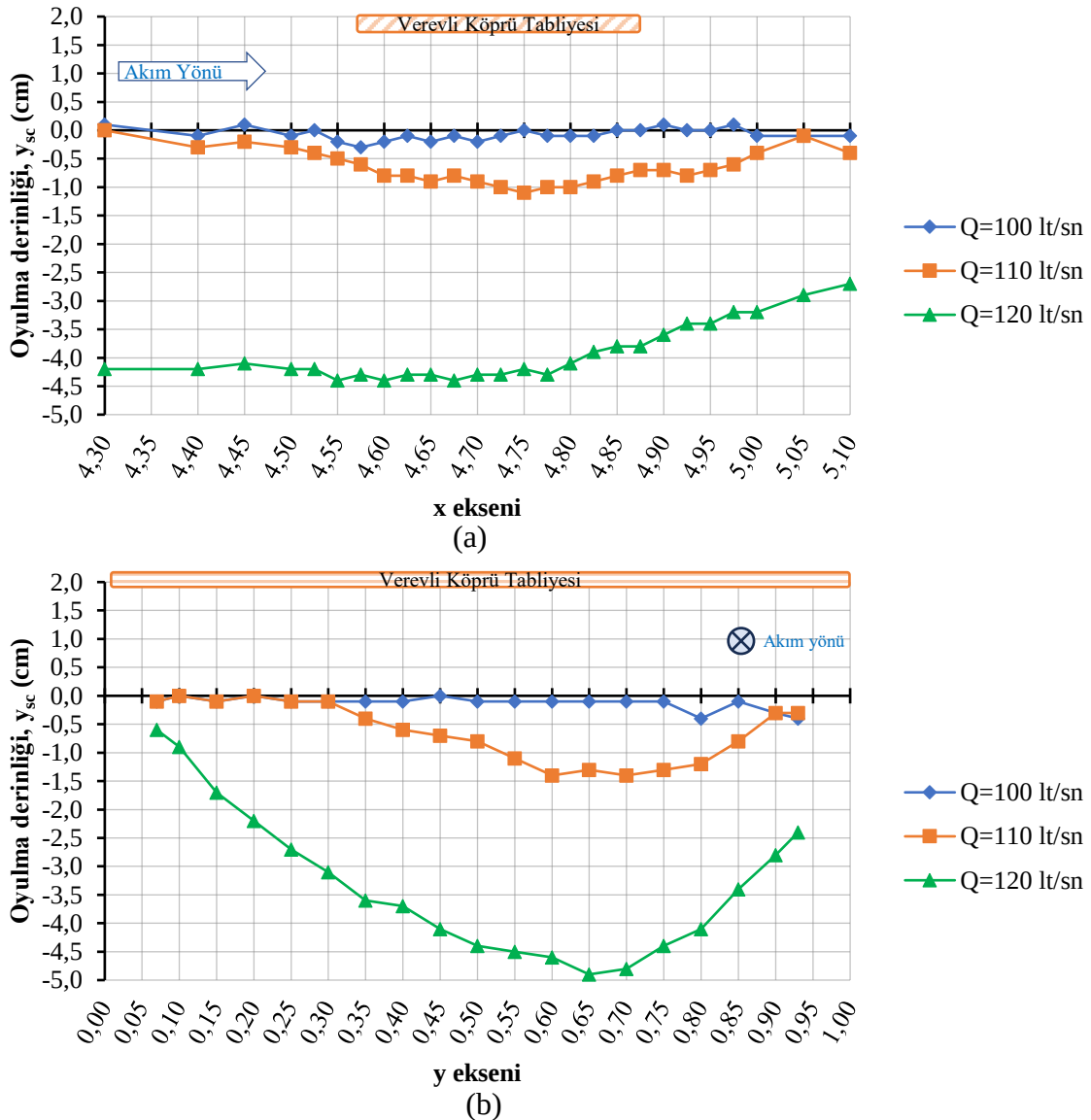
Çizelge 4.1. Sadece verevli köprü tabliyesi olması durumunda gerçekleşen daralma oyulması ölçümleri

| Q<br>(lt/sn) | $y_a$<br>(cm) | $Fr_a$<br>(-) | Sadece tabliye olması durumunda düşey daralma oyulmasına ait özellikler |          |          | Aynı akım şartlarındaki $y_{spp,max}$ konumundaki $y_{sc}$ 'ye ait özellikler<br>(Verevlik açısı $\alpha=15^\circ$ ) |          |          |
|--------------|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
|              |               |               | $y_{sc,max}$<br>(cm)                                                    | x<br>(m) | y<br>(m) | $y_{sc}$<br>(cm)                                                                                                     | x<br>(m) | y<br>(m) |
| 100          | 34,5          | 0,158         | 0,4                                                                     | 4,650    | 0,80     | 0,1                                                                                                                  | 4,675    | 0,55     |
|              | 37,5          | 0,139         | -                                                                       | -        | -        | -                                                                                                                    | 4,675    | 0,55     |
|              | 39,5          | 0,129         | -                                                                       | -        | -        | -                                                                                                                    | 4,675    | 0,50     |
|              | 41,5          | 0,119         | -                                                                       | -        | -        | -                                                                                                                    | 4,675    | 0,55     |
| 110          | 34,5          | 0,173         | 1,4                                                                     | 4,675    | 0,70     | 0,8                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |
|              | 37,5          | 0,153         | 1,3                                                                     | 4,725    | 0,70     | 0,9                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |
|              | 39,5          | 0,141         | 0,8                                                                     | 4,675    | 0,70     | 0,5                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |
|              | 41,5          | 0,131         | 0,4                                                                     | 4,700    | 0,60     | 0,2                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |
| 120          | 34,5          | 0,189         | 4,9                                                                     | 4,675    | 0,65     | 4,4                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |
|              | 37,5          | 0,167         | 4,0                                                                     | 4,675    | 0,65     | 3,7                                                                                                                  | 4,675    | 0,55     |
|              | 39,5          | 0,154         | 3,1                                                                     | 4,750    | 0,65     | 2,4                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |
|              | 41,5          | 0,143         | 1,9                                                                     | 4,750    | 0,65     | 1,4                                                                                                                  | 4,675    | 0,50     |

Çizelge 4.1 incelendiğinde, değişen debi ve yaklaşım akım derinliklerine göre maksimum oyulma çukuru derinliği  $y_{sc,max}$ 'ın meydana geldiği x ve y konumlarının verevli köprü tabliyesinin altında kalan bölgede meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.3'te bulunan ölçüm noktalarını gösteren koordinat şeması göz önüne alındığında maksimum daralma oyulması derinliklerinin genellikle tabliye eksenini altında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Debi arttıkça maksimum oyulmanın gerçekleştiği y koordinatının küçüldüğü yani maksimum oyulmanın gerçekleştiği noktanın verevli köprü tabliyesinin ortasına doğru yaklaştığı görülmüştür.

Sadece köprü tabliyesinin olduğu bu deney grubunda sabit yaklaşım akım derinliğinde debinin oyulmaya etkisini incelemek amacıyla 100, 110 ve 120 lt/sn olmak üzere üç farklı debi değerindeki ölçümler değerlendirilmiştir. Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere, beklenildiği gibi debi arttıkça ortalama akım hızı ve Froude sayısı artmakta, dolayısıyla

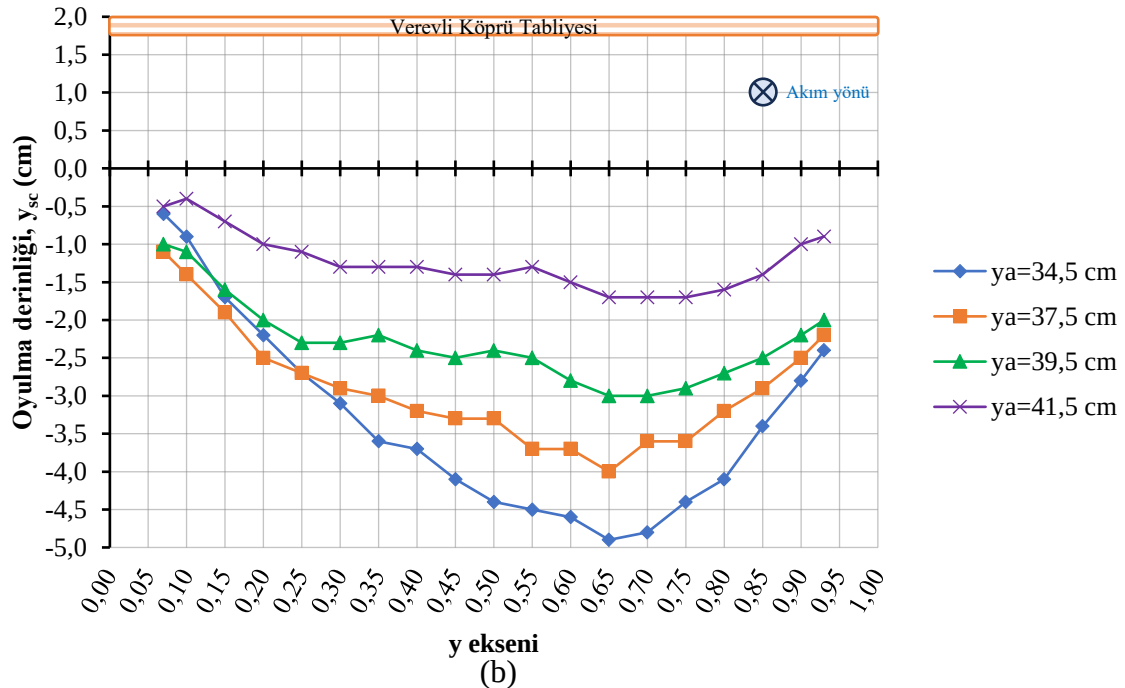
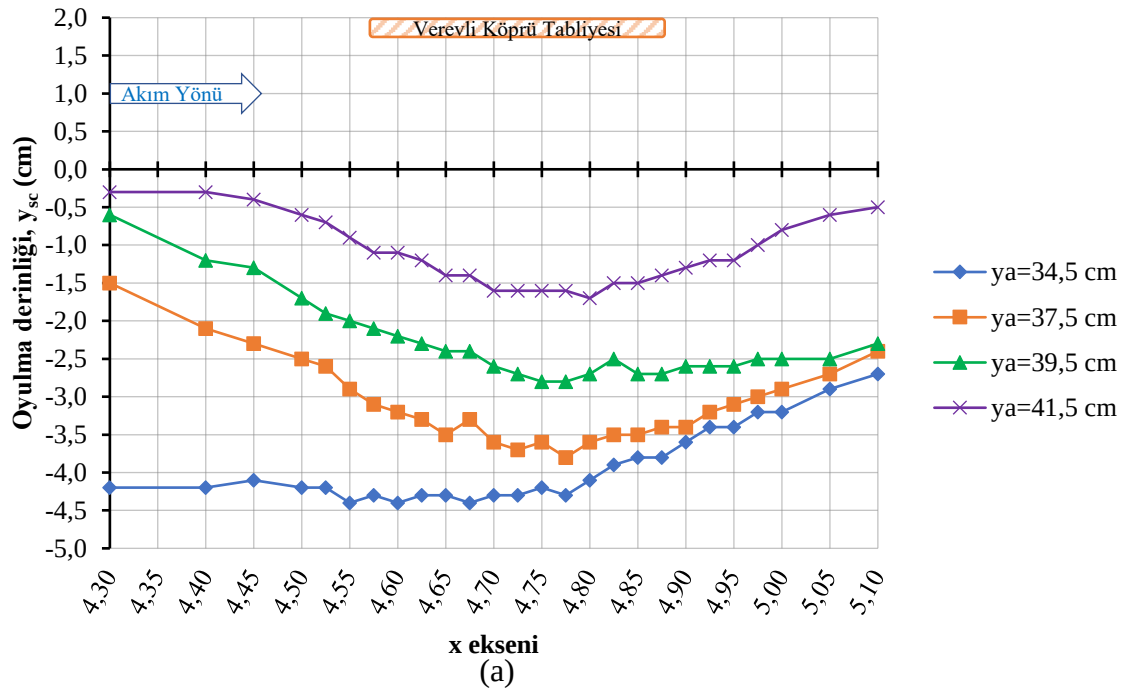
oyulma derinliği de artmaktadır. En büyük maksimum oyulma çukuru derinliğinin ölçüldüğü  $y_a=34,5$  cm değerinde farklı debi büyüklüklerinde meydana gelen oyulma çukurunun kanal boyuna ve enine doğrultularındaki profilleri Şekil 4.2’de görülmektedir. Şekiller üzerinde bulunan verevli köprü tabliyesi temsili olarak çizilmiş olup yataydaki konumu yaklaşık olarak doğru yerinde olmakla birlikte düşeydeki konumu ve tabliye kalınlığı sadece gösterim amaçlı olup ölçekli değildir. Şekil 4.2’den görüldüğü üzere debinin 120 lt/sn olması durumunda oyulma çukuru oldukça yayvanlaşmakta ve membada da taban alçalması oluşmaktadır. Debinin 120 lt/sn olduğu durumda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği değeri, debinin 100 lt/sn olduğu durumdaki 0,4 cm değerinden %1125 artarak 4,9 cm değerine yükseliş göstermiştir.



Şekil 4.2. Yaklaşım akım derinliği  $y_a=34,5$  cm iken farklı debi değerlerinde meydana gelen daralma oyulması profilleri: (a)  $y=0,5$  m’de boyuna profili, (b)  $x=4,675$  m’de enine profili

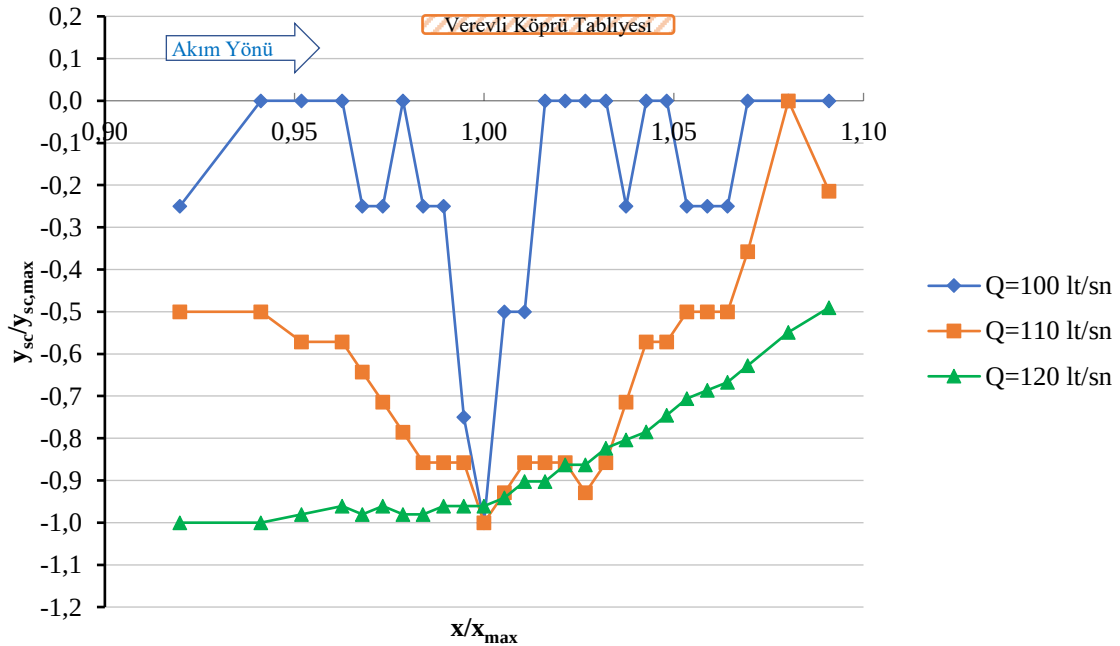


Benzer şekilde, sabit debi değerinde yaklaşım akım derinliğinin oyulmaya etkisini incelemek amacıyla 34,5 cm, 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği değerlerinde meydana gelen oyulma çukuru kanal boyuna ve enine yöndeki profilleri sırasıyla Şekil 4.3'te verilmiştir. 34,5 ve 37,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde su seviyesi köprü tabliyesi alt kotunu geçerek köprü açıklığında kısmi basınçlı akım oluşturmuştur. 39,5 ve 41,5 cm yaklaşım akım derinliklerinde ise su seviyesi tablie korkuluğu üst kotunu geçmekte ve akım tablie üzerinden savaklanmaktadır.

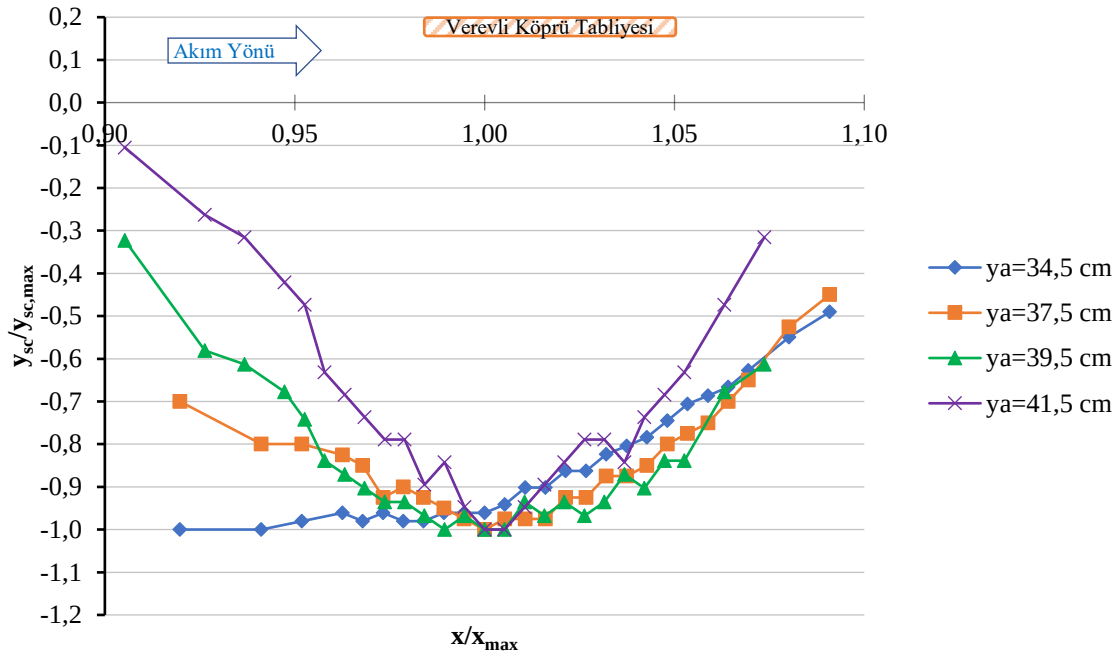


Şekil 4.3. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması çukuru: (a)  $y=0,5$  m'de boyuna profili, (b)  $x=4,675$  m'de enine profili

Çizelge 4.1 ve şekiller incelendiğinde kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında literatürdeki çalışmalara paralel olarak sabit debi değerinde yaklaşım akım derinliği arttıkça oyulmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, debinin 120 lt/sn ve yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu durumda meydana gelen maksimum daralma oyulma çukuru derinliği olan 4,9 cm, yaklaşım akım derinliğinin 41,5 cm'ye çıktığı durumda 1,9 cm maksimum oyulma derinliği değeri ile %61,2 azalış göstermiştir. Kısmi basınçlı akım durumundaki oyulma derinlikleri savaklı akım durumundakine göre daha büyüktür. Bunun sebebi, yaklaşım akım derinliğinin azalmasıyla köprü tabliyesi altından geçen akım hızının artması ve tabliye altında meydana gelen akım alanındaki çevrintilerin de etkisiyle taban malzemesine uygulanan kayma gerilmesinin büyümesi olarak açıklanabilir. Ayrıca yaklaşım akım derinliği küçüldükçe yüzey ve taban çevrintilerinin birbirleriyle girişim yapması oyulmanın artmasına sebep olmaktadır (Yanmaz, 2022). Özellikle en küçük yaklaşım akım derinliği  $y_a=34,5$  cm değerinde oyulma çukurunun membada da kendini hissettirdiği ve bu değerde taban alçalmasının diğer  $y_a$  değerlerine göre çok daha fazla olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Membada tabanda gözlemlenen alçalma basınçlı akım çalışmalarının yapıldığı Karakurt (2016), Demir (2018) ve Barakat (2022)'a ait çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te bulunan  $Q=100$  lt/sn'deki boyutsuzlaştırılmış eğride değişim büyük olmuş gibi görünse de oyulma derinliklerinin çok küçük olması nedeniyle değişimler nokta bazlı çok büyükmiş algısı oluşturmaktadır.

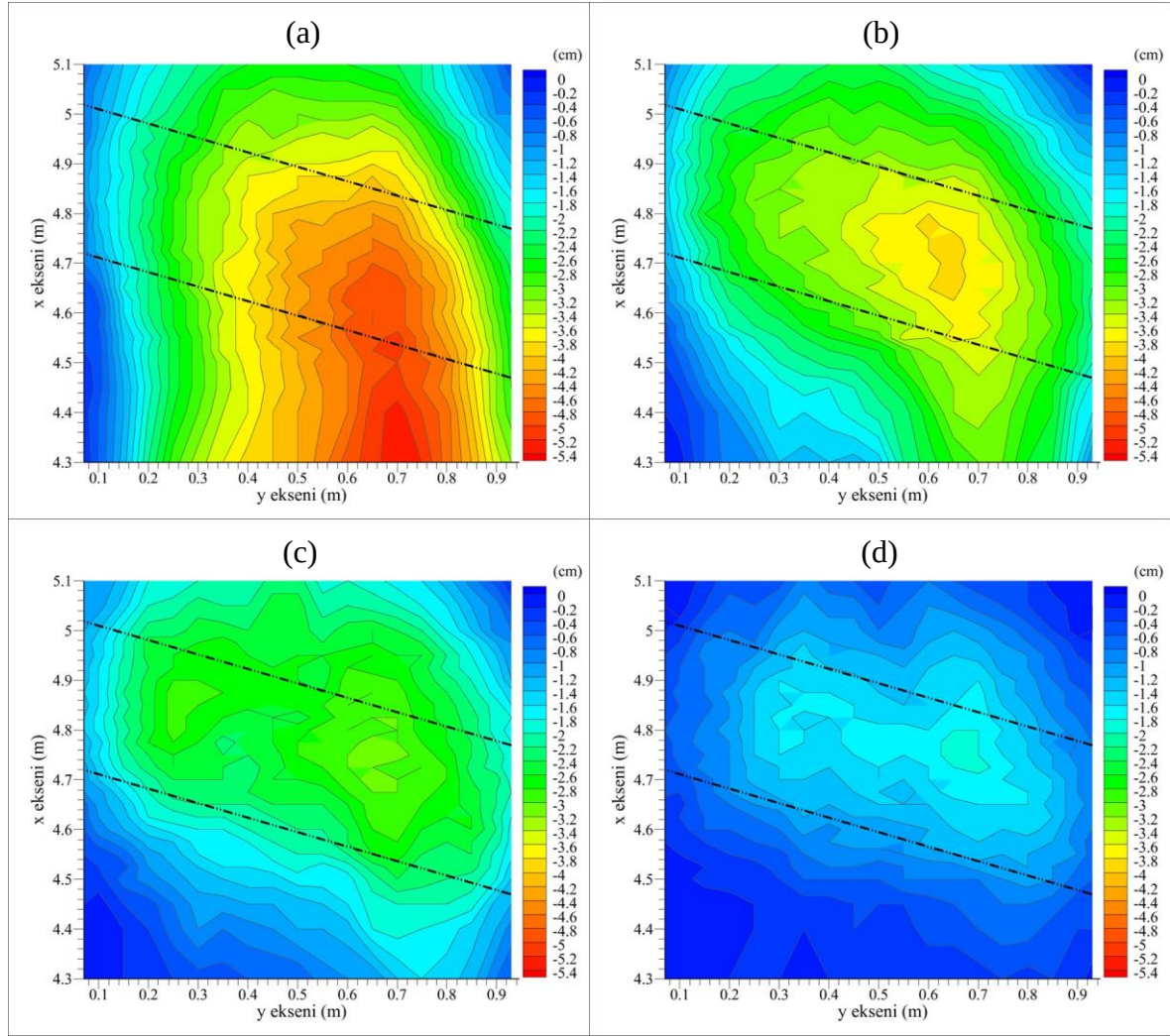


Şekil 4.4. Yaklaşım akım derinliği  $y_a=34,5$  cm için farklı debi değerlerinde meydana gelen daralma oyulması boyutsuzlaştırılmış boyuna oyulma çukuru profili

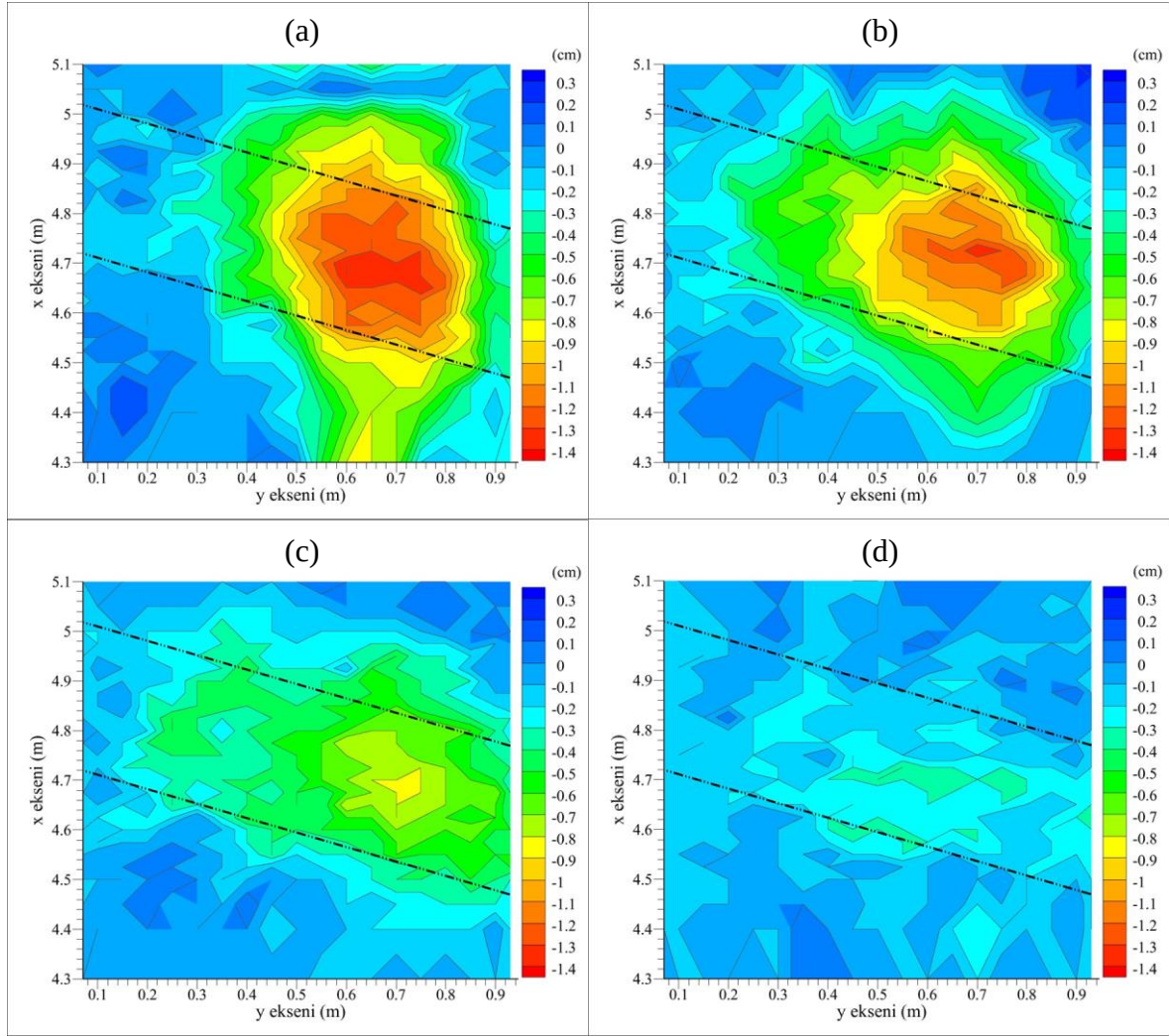


Şekil 4.5. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması boyutsuzlaştırılmış boyuna oyulma çukuru profili

Şekil 4.6'da verilen daralma oyulmasına ait çukur derinliği haritası da göz önünde bulundurulduğunda deneylerde gözlemlenmiş en büyük oyulma çukuru derinliği  $Q = 120$  lt/sn'lik debi ve  $y_a = 34,5$  cm'lik yaklaşım akım derinliğinde elde edilmiştir. Benzer biçimde, Şekil 4.7'de debinin 110 lt/sn olduğu ve farklı yaklaşım akım derinlikleriyle yapılan deneylerde, en büyük daralma oyulması yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu durumda gerçekleşmiştir. Yaklaşım akım derinliklerinin maksimum oyulma derinliğine etkisinin incelenmesiyle ortaya çıkan diğer bir sonuç da Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görüldüğü üzere kısmi basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulmaların tam basınçlı yani savak tipi akım durumundakine göre daha büyük olmasıdır. Ayrıca, savak tipi akım durumunda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla savak yükünün de arttığı ve maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığı sonucu çıkarılabilir. Oyulmalar genel itibariyle vervli köprü tabliyesi eksenine paralellik göstermiştir. Böylece oyulma çukuru dağılımı da derinlik haritalarında vervli bir şekilde meydana gelmiştir. Ayrıca, kısmi basınçlı akım durumunda, tabliyenin memba tarafında oluşan alçalmalar da düşünüldüğünde, oyulmaların daha düzensiz ve yayvan şekilde olduğu tam basınçlı akım durumunda ise oyulmaların tabliye altında ve mansaba doğru daha düzenli bir şekilde gerçekleşmiş olduğu görülmektedir.



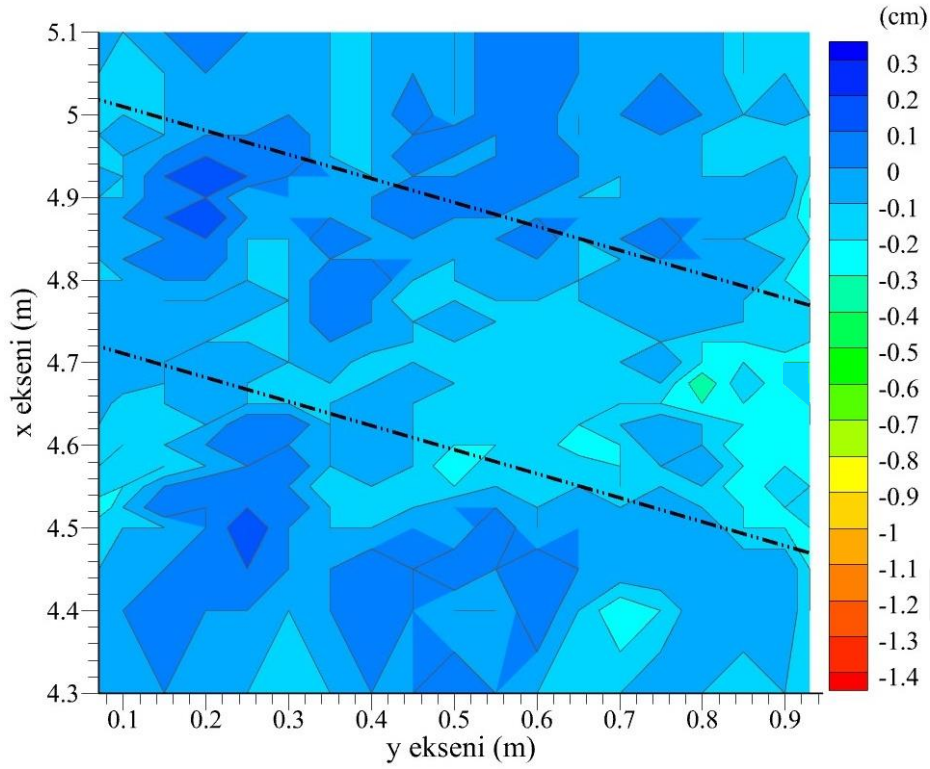
Şekil 4.6. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması çukuru derinliği haritası: (a)  $y_a = 34,5$  cm, (b)  $y_a = 37,5$  cm, (c)  $y_a = 39,5$  cm, (d)  $y_a = 41,5$  cm



Şekil 4.7. 110 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen daralma oyulması çukuru derinliği haritası: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm

Debinin 100 lt/sn ve yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu durumda, Çizelge 4.1’de belirtildiği üzere maksimum oyulma çukuru derinliği 0,4 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.8’de verilen oyulma çukuru haritası incelendiğinde söz konusu derinlik değerinin yalnızca bir noktada gözlemlendiği görülmektedir. Çalışmada ölçüm için kullanılan lazermetrenin ölçüm hassasiyetinin  $\pm 0,1$  cm olduğu göz önünde bulundurulduğunda diğer yaklaşım akım derinlikleri olan 37,5 cm, 39,5 cm ve 41,5 cm değerlerinde oyulma neredeyse ölçülemez olacağından bu deney setleri yapılmamıştır. Barakat (2022) tarafından yapılan deneylerde de bu durumun meydana geldiği, lazermetre hassasiyeti civarında oyulma çukuru derinlikleri ölçüldüğü görülmektedir.





Şekil 4.8. 100 lt/sn debi ve 34,5 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen daralma oyulması çukuru derinlik haritası

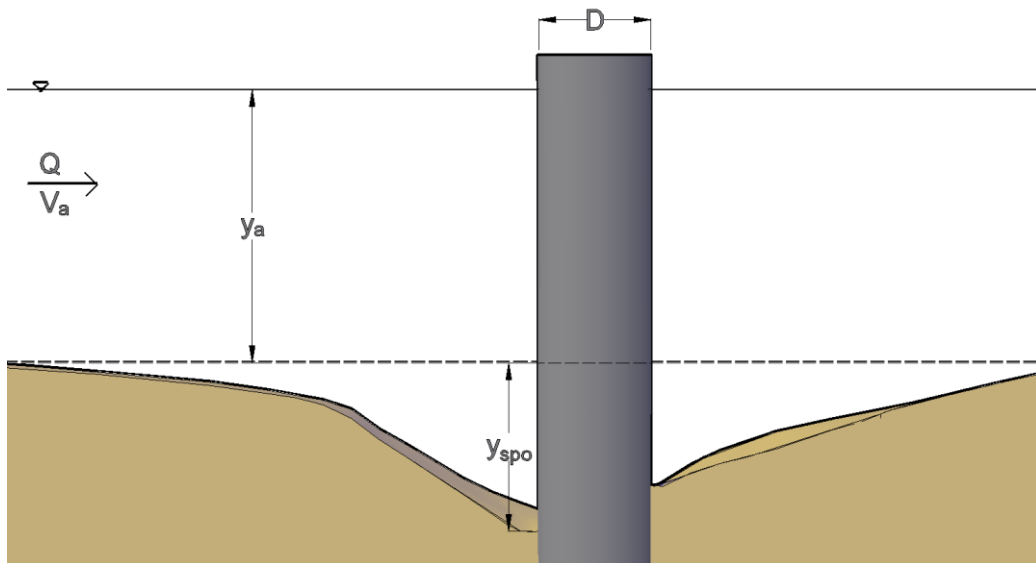
#### 4.1.2. Serbest akım şartlarında yerel oyulmanın incelenmesi

Çalışmanın ikinci deney grubunda verevli köprü tabliyesine ait silindirik orta ayak, Resim 4.2’de görüldüğü gibi kanala tek başına yerleştirilip değişen debi ve yaklaşım akım derinlikleri altında serbest akım koşullarına maruz bırakılarak etrafında meydana gelen yerel oyulma özellikleri incelenmiştir. Resim 4.2’de yer alan fotoğrafta debinin 100 lt/sn ve yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu durumda meydana gelmiş yerel oyulma çukuru görülmektedir.



Resim 4.2. Serbest akım durumunda köprü ayağı etrafındaki yerel oyulmaları incelemek üzere yerleştirilen silindirik orta ayak

Deneysel çalışma kapsamında, açık kanal düzeneğinde sadece dairesel kesitli silindirik orta ayağın bulunduğu 12 adet deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9’da yerel ayak oyulmasının incelendiği deneylere ait silindirik orta ayak ve ilgili değişken parametreler gösterilmiştir. Burada en kesit çapı  $D$  sabit olup 10 cm’dir. Diğer sabit tutulan parametreler Bölüm 2.3’te verilen boyut analizinde bulunabilir.



Şekil 4.9. Silindirik orta ayak deneylerindeki deney düzeneği ve parametreler

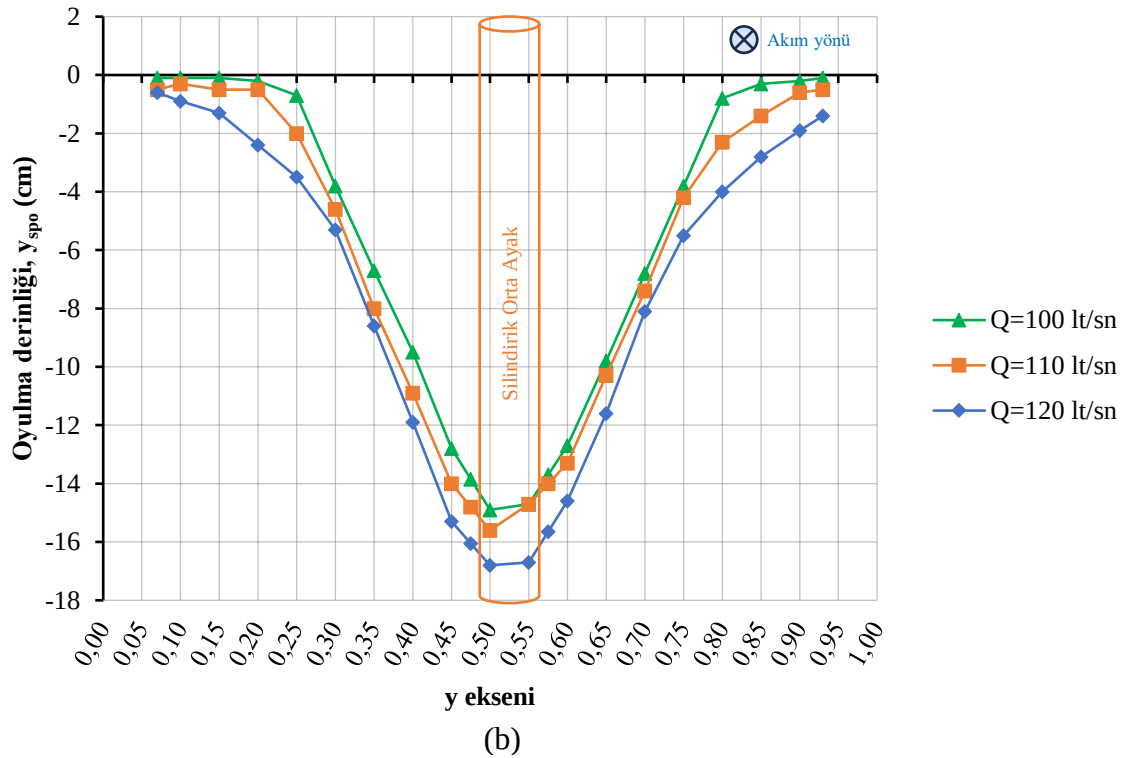
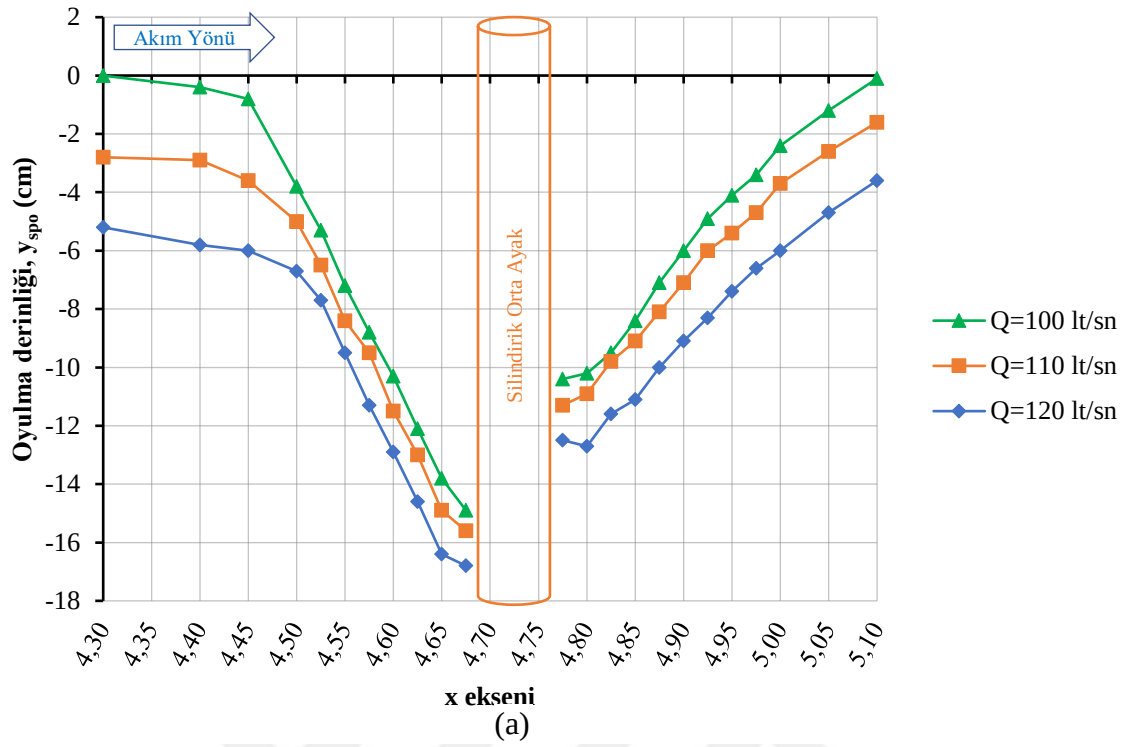
Serbest akım durumunda meydana gelen maksimum yerel oyulma derinlikleri  $y_{spo,max}$  Çizelge 4.2’de verilmiştir. Burada  $y_{spo,max}$  serbest akım durumunda orta ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma derinliğini;  $y_{spo}$  ise  $y_{spp,max}$  konumundaki serbest akım durumunda meydana gelen yerel oyulma derinliğini ifade etmektedir.

Çizelge 4.2. Serbest ve basınçlı akım durumlarında orta ayak etrafında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları

| Q<br>(lt/sn) | $y_a$<br>(cm) | $Fr_a$<br>(-) | Serbest akım durumunda<br>yerel oyulma özellikleri |          |          | Basınçlı akım durumunda<br>$y_{spp,max}$ konumundaki $y_{spo}$<br>özellikleri |          |          |
|--------------|---------------|---------------|----------------------------------------------------|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
|              |               |               | $y_{spo,max}$<br>(cm)                              | x<br>(m) | y<br>(m) | $y_{spo}$<br>(cm)                                                             | x<br>(m) | y<br>(m) |
| 100          | 34,5          | 0,158         | 14,9                                               | 4,675    | 0,50     | 17,4                                                                          | 4,675    | 0,55     |
|              | 37,5          | 0,139         | 12,4                                               | 4,675    | 0,50     | 17,7                                                                          | 4,675    | 0,55     |
|              | 39,5          | 0,129         | 11,9                                               | 4,675    | 0,50     | 16,6                                                                          | 4,675    | 0,50     |
|              | 41,5          | 0,119         | 10,9                                               | 4,675    | 0,55     | 14,7                                                                          | 4,675    | 0,55     |
| 110          | 34,5          | 0,173         | 15,6                                               | 4,675    | 0,50     | 17,5                                                                          | 4,675    | 0,50     |
|              | 37,5          | 0,153         | 15,3                                               | 4,675    | 0,55     | 19,6                                                                          | 4,675    | 0,50     |
|              | 39,5          | 0,141         | 14,9                                               | 4,675    | 0,50     | 18,5                                                                          | 4,675    | 0,50     |
|              | 41,5          | 0,131         | 13,0                                               | 4,675    | 0,55     | 17,7                                                                          | 4,675    | 0,50     |
| 120          | 34,5          | 0,189         | 16,8                                               | 4,675    | 0,50     | 18,8                                                                          | 4,675    | 0,50     |
|              | 37,5          | 0,167         | 15,6                                               | 4,675    | 0,50     | 19,9                                                                          | 4,675    | 0,55     |
|              | 39,5          | 0,154         | 15,4                                               | 4,675    | 0,50     | 19,6                                                                          | 4,675    | 0,50     |
|              | 41,5          | 0,143         | 14,8                                               | 4,675    | 0,50     | 20,1                                                                          | 4,675    | 0,50     |

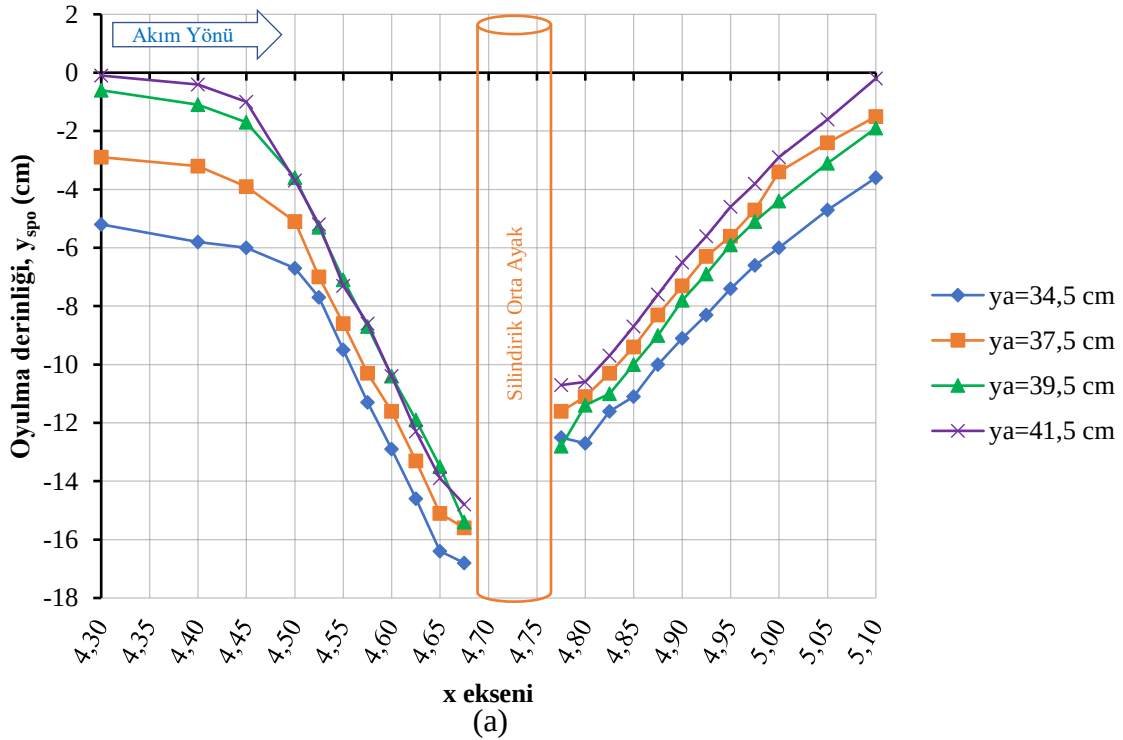
Çizelge 4.2’de verilen serbest akım durumundaki maksimum yerel oyulma derinlikleri ile konumları incelendiğinde en büyük oyulma derinliğinin 120 lt/sn’lik debi ve yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu durumda gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.10’dan görülebileceği üzere yaklaşım akım derinliği sabit iken debi artırıldığında oyulma derinlikleri de artmıştır.  $Q=120$  lt/sn ve  $y_a=34,5$  cm olduğu durumda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği değeri,  $Q=100$  lt/sn ve  $y_a=34,5$  cm olduğu durumdaki 14,9 cm değerinden %12,75 artarak 16,8 cm değerine yükselmiştir. Şekiller üzerinde bulunan silindirik orta ayak temsili olarak çizilmiş olup yataydaki konumu yaklaşık olarak doğrudur. Ayak yüksekliği ve ayak genişliği sadece gösterim amaçlı olup ölçekli değildir.

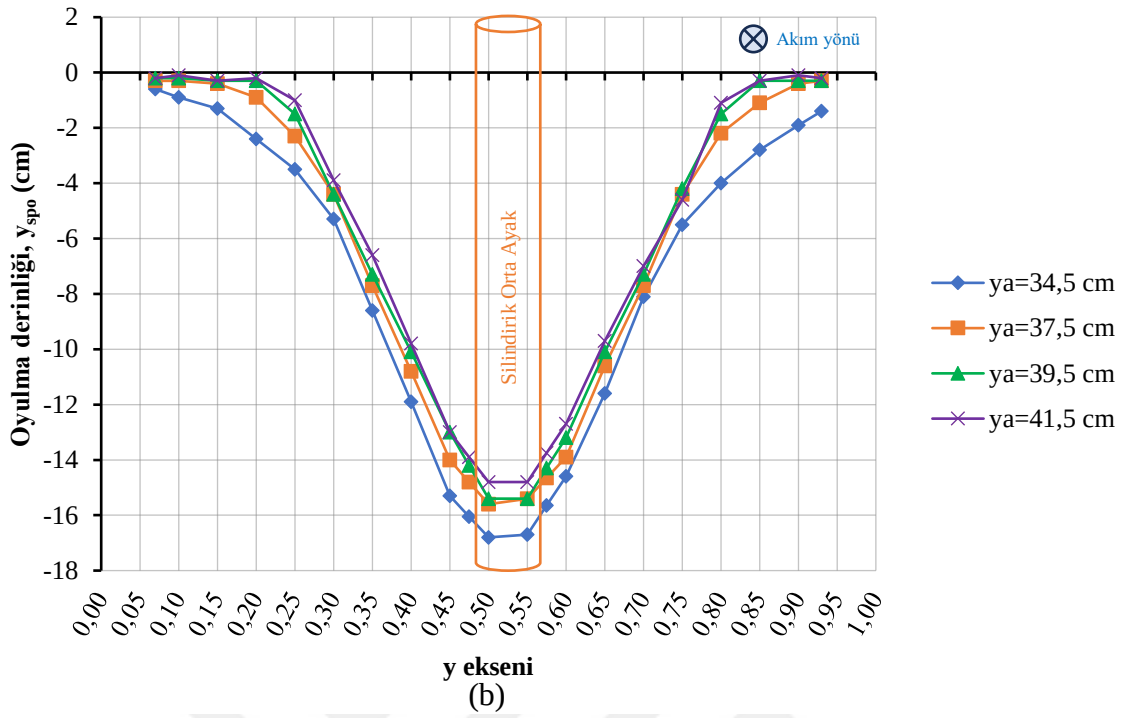




Şekil 4.10. Yaklaşım akım derinliği  $y_a=34.5$  cm olduğunda farklı debi değerlerinde meydana gelen oyulma çukuru (a)  $y=0.525$  m’de boyuna profili, (b)  $x=4.675$  m’de enine profili

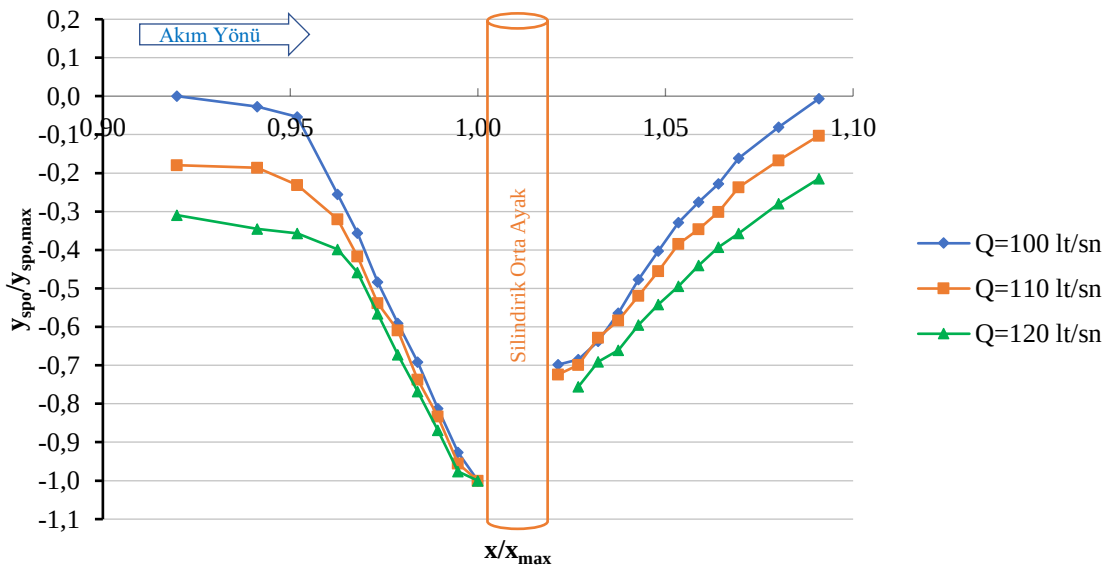
Yaklaşım akım derinliği sabit tutulduğunda akımın geçtiği ıslak alan aynı kalmaktadır. Buna karşın debinin artması, akım hızının doğru orantılı bir şekilde artmasına ve oyulmaların daha derin olmasına yol açmaktadır. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere debinin sabit olduğu durumda yaklaşım akım derinliği arttıkça oyulma derinliği azalmaktadır. Örneğin,  $Q=120$  lt/sn ve  $y_a=41,5$  cm olduğu durumda meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği değeri,  $Q=120$  lt/sn ve  $y_a=34,5$  cm olduğu durumdaki 16,8 cm değerinden %11,90 azalarak 14,8 cm değerine düşmüştür. Aynı şekilde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla akımın geçtiği ıslak alan artmakta debi sabit olduğundan akım hızının azalmasına neden olmaktadır. Bu sonuçlar da literatürdeki benzer çalışmalarla aynıdır (Yanmaz, 2022). Deneylerde kullanılan silindirik orta ayak verevli köprü tabliye modeli nedeniyle  $y=0,5$  m yerine  $y=0,525$  m’de konumlandırılmıştır. Bu nedenle  $y_{spo,max}$  değerleri  $y=0,525$  m’de orta ayağın hemen önünde merkez noktasında meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 4.11 (a) incelendiğinde oyulma çukurunun memba şevinin daha dik olduğu, mansap şevinin ise daha yayvan olduğu görülmektedir.



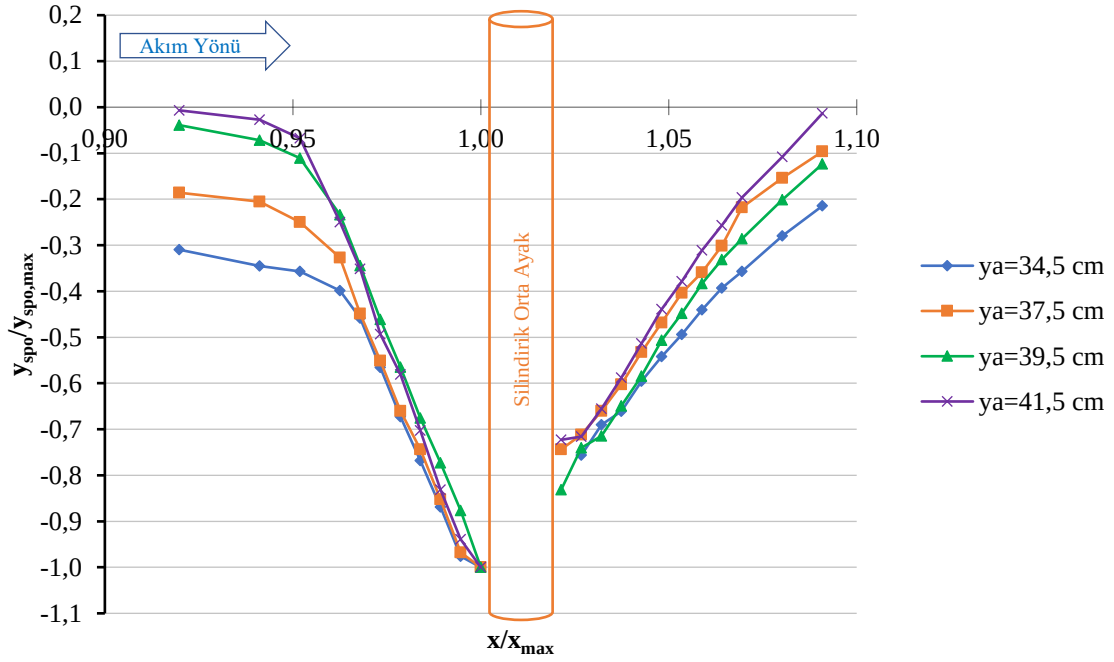


Şekil 4.11. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru (a)  $y=0,525$  m'de boyuna profili, (b)  $x= 4,675$  m'de enine profili

Şekil 4.12 ve 4.13'te sırasıyla sabit  $y_a = 34,5$  cm ve değişen debi değerleri ile sabit 120 lt/sn debi değerindeki farklı  $y_a$  değerlerinde ölçülmüş boyuna oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü üzere debi değeri arttıkça ve yaklaşım akım derinliği azaldıkça mansap şevinde bir miktar yayvanlaşma olmuş ancak memba şevinde bir değişim meydana gelmemiştir.

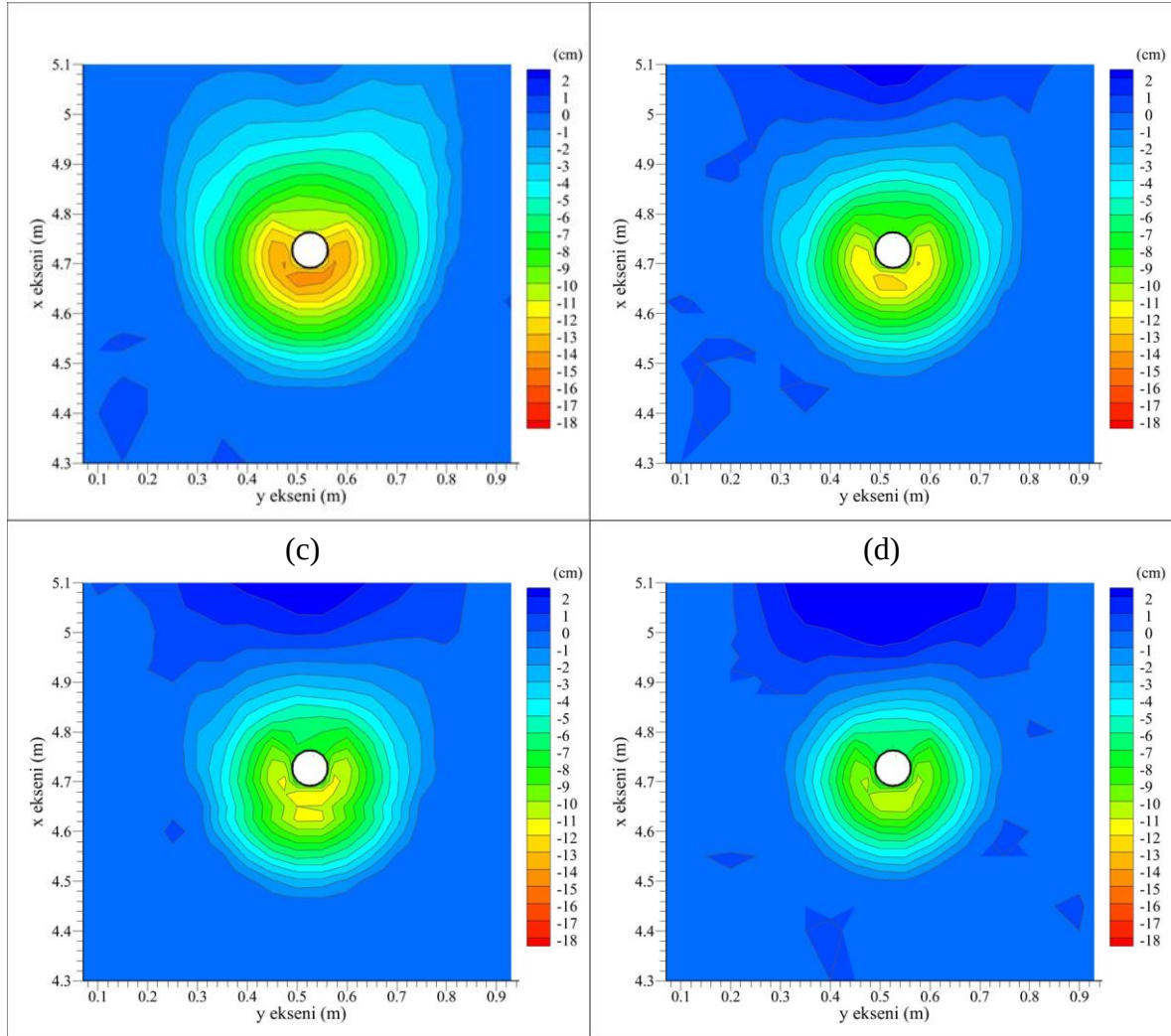


Şekil 4.12.  $y_a=34,5$  cm için farklı debi değerlerinde meydana gelen yerel oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış boyuna profili



Şekil 4.13. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış boyuna profili

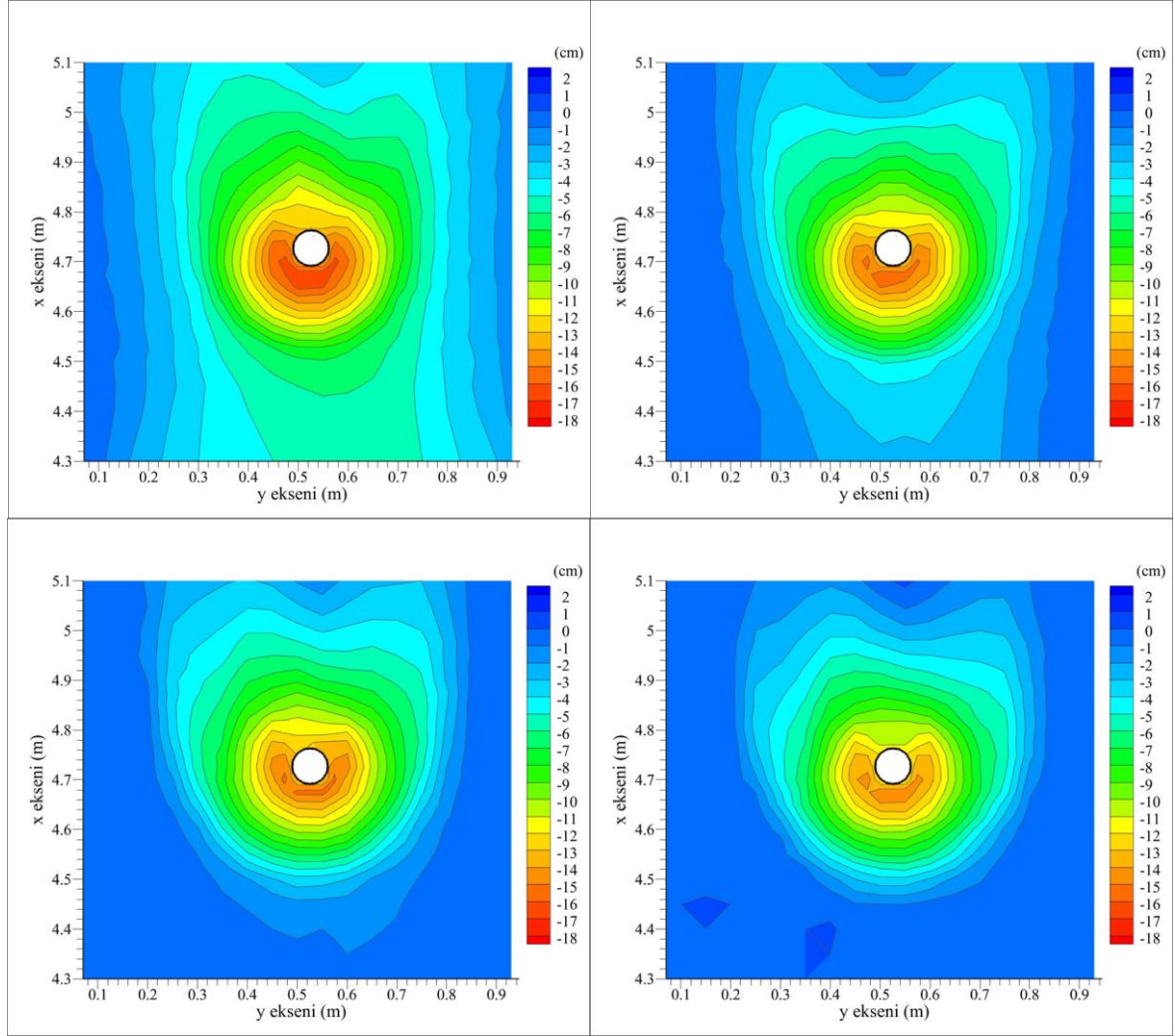
Sonuç olarak, yerel oyulma çukuru özellikleri incelendiğinde artan debi ve azalan yaklaşım akım derinliğiyle birlikte düzenli bir biçimde artan oyulma çukuru derinliği gözlemlenmektedir. Bu durum Şekil 4.14'te debinin 100 lt/sn olduğu durum için elde edilen oyulma çukuru derinliği haritasında da görülmektedir. Yerel oyulma mekanizması ile ilgili bölümde bahsedildiği biçimde, literatürde olduğu gibi maksimum yerel oyulma çukuru derinlikleri ayak merkezinin hemen memba tarafında meydana gelmiştir (Yanmaz, 2022). Ayağın konumlandırılmasında verevli tabliyenin kanaldaki yerleşimine ve üzerindeki orta ayağın denk geldiği boşluk kısma uyulduğu için silindirik orta ayağın merkezi  $y=0,5$  m doğrultusuna konumlandırılmak istenmiş ancak yaklaşık olarak  $y=0,525$  m doğrultusunda gerçekleşmiştir. Bu konumlandırmadan dolayı, mansapa doğru bakıldığında ayağın sağ tarafındaki yatay mesafe ve akım alanı sol tarafındaki yatay mesafe ve akım alanından daha küçük olmuştur. Aynı debi durumunda akım alanındaki daralma hızları artıracığından, özellikle ayağın mansap tarafında etkili olan at nalı çevrintileri etkilediği düşünülmüştür. Dolayısıyla, Şekil 4.14'te özellikle  $y_a=34,5$  cm olduğu durumda göze çarpan, ayağın mansap tarafında  $y=0,525 - 0,8$  m yatay konum aralığında meydana gelen oyulmaların  $y=0,2 - 0,525$  m aralığındaki oyulmalara göre daha da mansaba doğru uzamış olması bu durum ile açıklanabilir.



Şekil 4.14. 100 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru derinlik haritası: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm

Şekil 4.15'ten de görüldüğü üzere yerel oyulma çukuru derinlik ve profilleri incelendiğinde deneylerde gözlemlenmiş en büyük oyulma çukuru derinliği  $Q = 120$  lt/sn'lik debi ve  $y_a = 34,5$  cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelmiştir. Maksimum oyulma çukuru derinliğine ek olarak Şekil 4.15 incelendiğinde yaklaşım akım derinliğinin azalmasıyla taban alçalmasının ayağın memba ve mansap taraflarına doğru yatayda yayvanlaşıp uzadığı görülmektedir.

Bu kısımda sadece en küçük ve en büyük debi değerlerindeki oyulma çukuru haritaları verilmiş olup debinin 110 lt/sn olduğu durum için yerel oyulma çukuru derinlik haritası Ek-1'de bulunabilir.



Şekil 4.15. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru derinlik haritası: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm

#### 4.1.3. Basınçlı akım şartlarında toplam oyulmanın incelenmesi

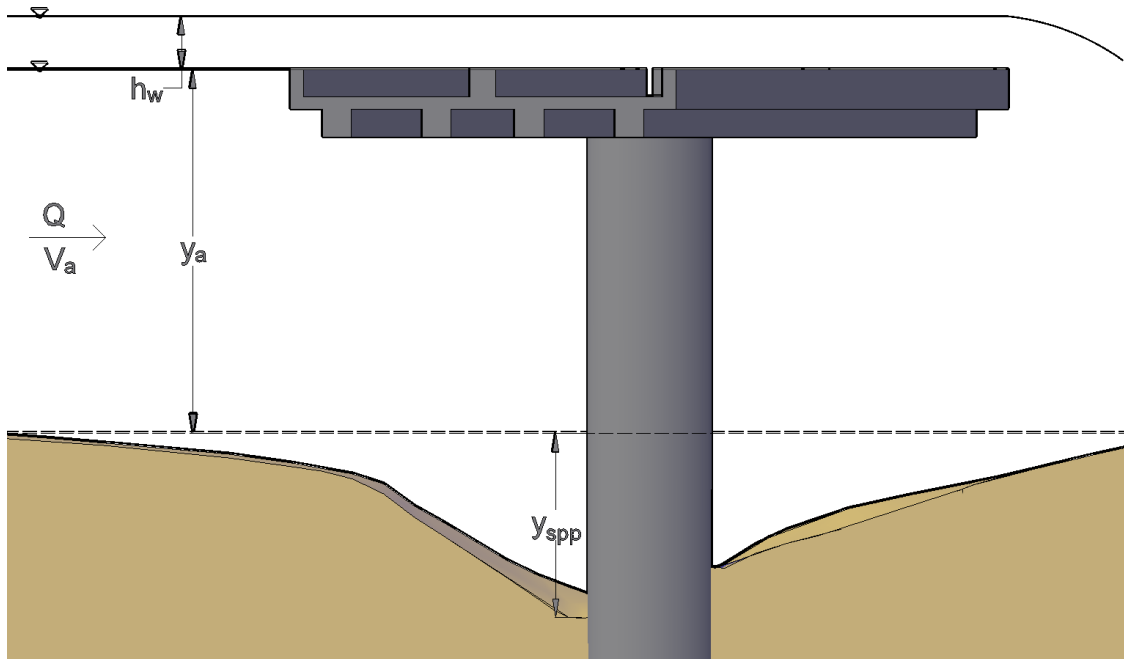
Deneylerin üçüncü grubunda, farklı debi ve yaklaşım akım derinliklerinde, kısmi basınçlı ve tam basınçlı akım koşullarında, temiz su oyulması durumunda verevlik açısı  $15^\circ$  olan köprü tabliyesi ile daire kesitli silindirik orta ayağın bulunduğu 12 adet deney gerçekleştirilmiştir. Verevli köprü tabliyesi ile silindirik orta ayak, Resim 4.3'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Resim 4.3'te 100 lt/sn debi ve 37,5 cm yaklaşım akım derinliğinde yani kısmi basınçlı akım durumunda meydana gelmiş oyulma çukuru görülmektedir.





Resim 4.3. Tabliye ile orta ayağın bulunduğu kısmi basınçlı akım koşulunda meydana gelen taban oyulması

Şekil 4.16'da toplam oyulma mekanizmasının incelendiği deneylere ait köprü tabliyesi ve orta ayak modeli ile ilgili değişken parametreler gösterilmiştir. Oyulmaya etki eden ancak deney kapsamında sabit tutulan parametreler için Bölüm 2.3'te verilen boyut analizi incelenebilir.



Şekil 4.16. Köprü tabliyesi ve silindirik orta ayağın beraber olduğu köprü modeli ve değişken parametreler

Çizelge 4.3'te basınçlı akım durumunda hem daralma hem de yerel oyulma etkilerinin birlikte meydana geldiği oyulma çukuruna ait maksimum oyulma derinliği  $y_{spp,max}$  değerleri ile bu değer oluştuğu konum verilmiştir. Ayrıca aynı konum için daralma oyulma derinliği  $y_{sc}$  ile yerel oyulma derinliği  $y_{spo}$  değerleri verilmiştir. Böylece bu büyüklüklerin ayrı ayrı hesaplanıp toplanmasıyla elde edilen oyulma derinliği ile ölçülen  $y_{spp,max}$  karşılaştırılarak ilgili kılavuzlarda yer alan yaklaşımın doğruluğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.3. Basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinlikleri ve konumları

| Q<br>(lt/sn) | $y_a$<br>(cm) | $h_w$<br>(cm) | $Fr_a$<br>(-) | Basınçlı akım<br>durumunda $y_{spp,max}$<br>özellikleri |          |          | $y_{spp,max}$<br>noktasındaki<br>$y_{spo}$ değeri | $y_{spp,max}$<br>noktasındaki<br>$y_{sc}$ değeri | $y_{spo}+y_{sc}$<br>değeri | $y_{spp,max}$ ile<br>$y_{spo}+y_{sc}$<br>arası fark |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------------------------------------|----------|----------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|
|              |               |               |               | $y_{spp,max}$<br>(cm)                                   | x<br>(m) | y<br>(m) | $y_{spo}$<br>(cm)                                 | $y_{sc}$<br>(cm)                                 | $y_{spo}+y_{sc}$<br>(cm)   | %                                                   |
| 100          | 34,5          | -             | 0,158         | 17,4                                                    | 4,675    | 0,55     | 14,9                                              | 0,1                                              | 15,0                       | 16                                                  |
|              | 37,5          | -             | 0,139         | 17,7                                                    | 4,675    | 0,55     | 12,4                                              | -                                                | 12,4                       | 43                                                  |
|              | 39,5          | 2             | 0,129         | 16,6                                                    | 4,675    | 0,50     | 11,9                                              | -                                                | 11,9                       | 39                                                  |
|              | 41,5          | 4             | 0,119         | 14,7                                                    | 4,675    | 0,55     | 10,9                                              | -                                                | 10,9                       | 35                                                  |
| 110          | 34,5          | -             | 0,173         | 17,5                                                    | 4,675    | 0,50     | 15,6                                              | 0,8                                              | 16,4                       | 7                                                   |
|              | 37,5          | -             | 0,153         | 19,6                                                    | 4,675    | 0,50     | 15,3                                              | 0,9                                              | 16,2                       | 21                                                  |
|              | 39,5          | 2             | 0,141         | 18,5                                                    | 4,675    | 0,50     | 14,9                                              | 0,5                                              | 15,4                       | 20                                                  |
|              | 41,5          | 4             | 0,131         | 17,7                                                    | 4,675    | 0,50     | 13,0                                              | 0,2                                              | 13,2                       | 34                                                  |
| 120          | 34,5          | -             | 0,189         | 18,8                                                    | 4,675    | 0,50     | 16,8                                              | 4,4                                              | 21,2                       | -11                                                 |
|              | 37,5          | -             | 0,167         | 19,9                                                    | 4,675    | 0,55     | 15,6                                              | 3,7                                              | 19,3                       | 3                                                   |
|              | 39,5          | 2             | 0,154         | 19,6                                                    | 4,675    | 0,50     | 15,4                                              | 2,4                                              | 17,8                       | 10                                                  |
|              | 41,5          | 4             | 0,143         | 20,1                                                    | 4,675    | 0,50     | 14,8                                              | 1,4                                              | 16,2                       | 24                                                  |

Çizelge 4.3'te verilen köprü tabliyesi ile orta ayağın olduğu basınçlı akım durumunda ölçülmüş oyulma çukuruna ait maksimum oyulma derinlikleri ve konum bilgileri incelendiğinde  $y_{spp,max}$ 'ın beklendiği gibi orta ayak merkezinin membainde meydana geldiği ve debi değerindeki artışla arttığı görülmektedir. Özellikle savak tipi akım durumunda meydana gelen oyulma derinliğinin akım derinliği arttıkça arttığı görülmüştür. Örneğin, 100 lt/sn ve 110 lt/sn'lik debiler ile 110 lt/sn ve 120 lt/sn'lik debilerdeki değişimler incelendiğinde savak tipi akım durumunda  $y_a=39,5$  cm ile 41,5 cm arasındaki oyulma farkı yüzdesinin sırasıyla yaklaşık %11'den %20'ye ve %6'dan %14'e çıktığı görülmektedir. Yani savak yükü arttıkça oyulma derinliği de artmıştır. Bu sonuç ayak

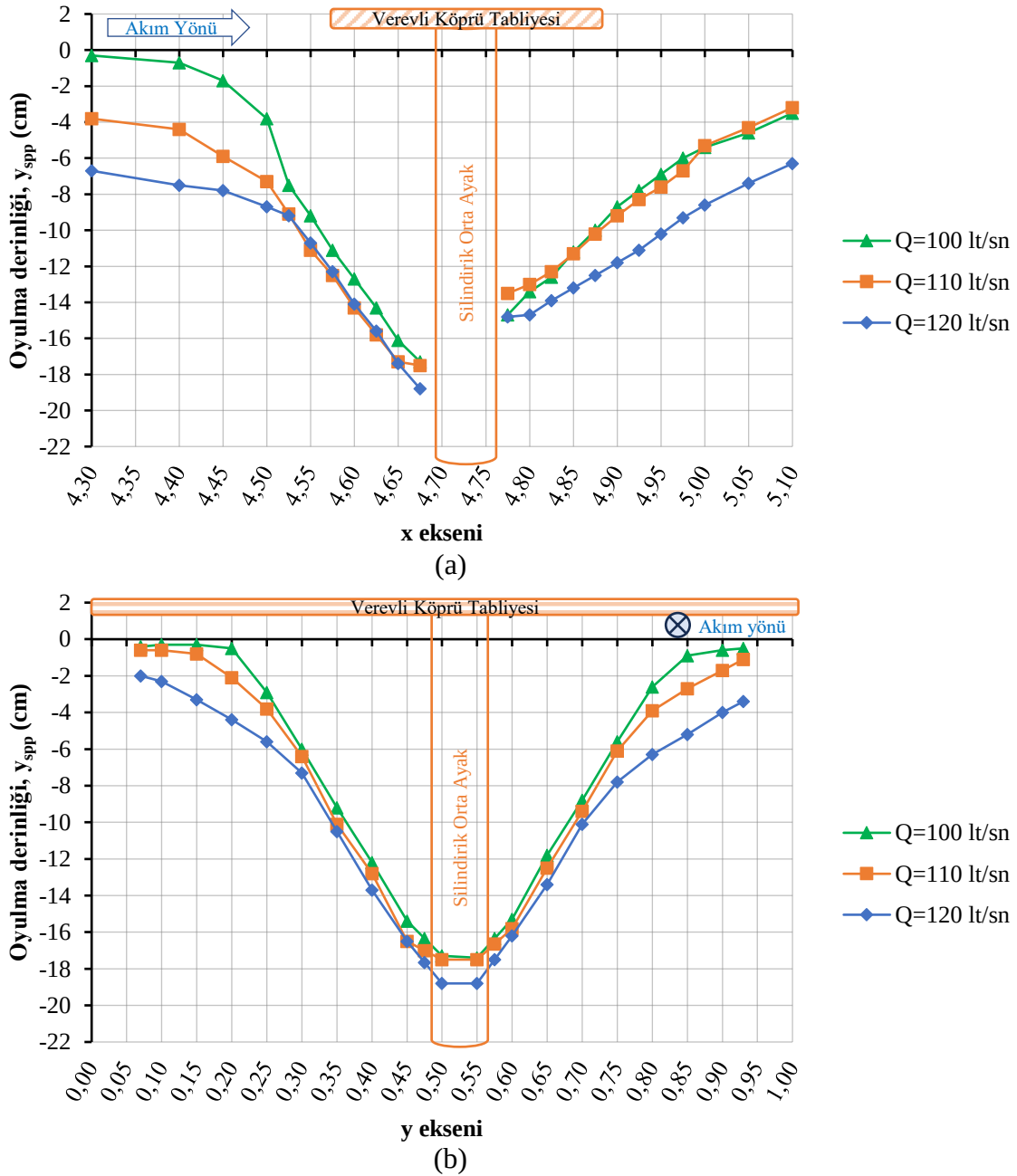


olmadan yapılmış Karakurt (2016) ve Demir (2018)'e ait çalışma sonuçlarından farklıdır. Söz konusu çalışmalarda savak yükünün artmasıyla oyulma çukuru derinliğinde azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın sadece daralma oyulmasının incelendiği bölümünde de aynı sonuca varılmıştır. Bunun nedeni tabliye altından geçen akım hızının azalmasıyla taban malzemesini hareket ettirme gücünün de azalmasıdır. Ancak mevcut çalışmada orta ayak olması durumunda tam tersi durum söz konusu olmuştur. Bu da sadece tabliye altındaki akımın sedimenti oyma gücü, türbülans ve çevrıntilerin değil yüzeyde meydana gelen çevrıntilerin de çok önemli ve etkin olduğunu göstermektedir (Yanmaz, 2022).

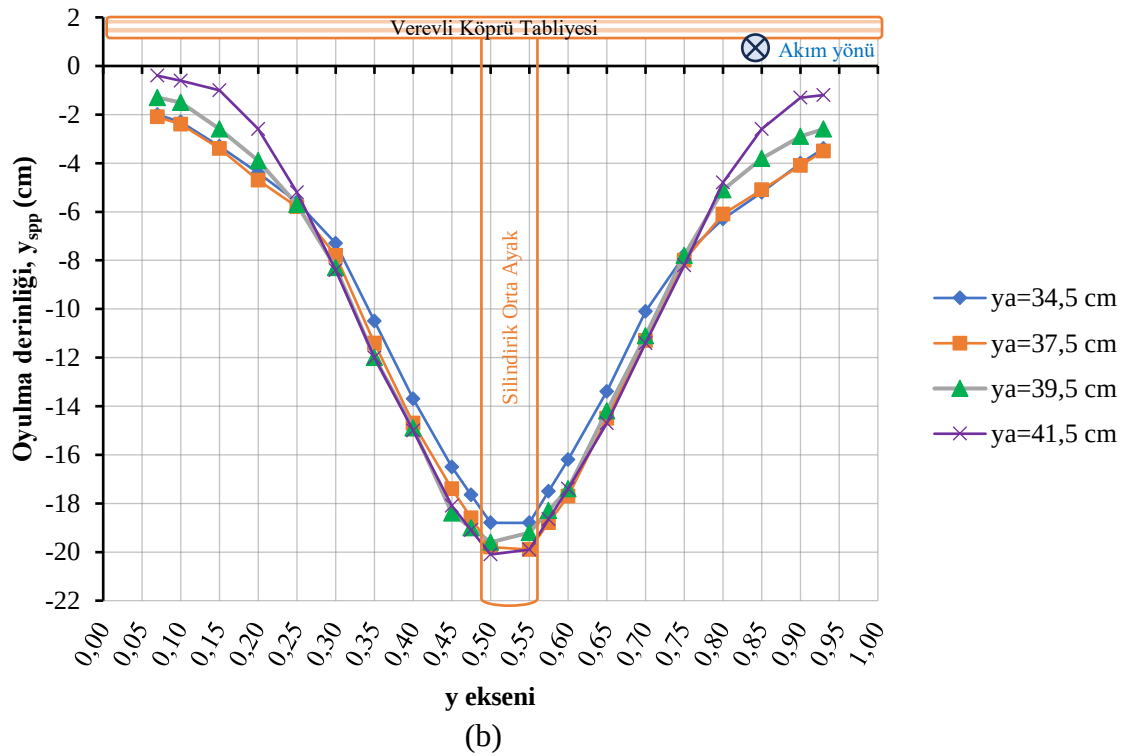
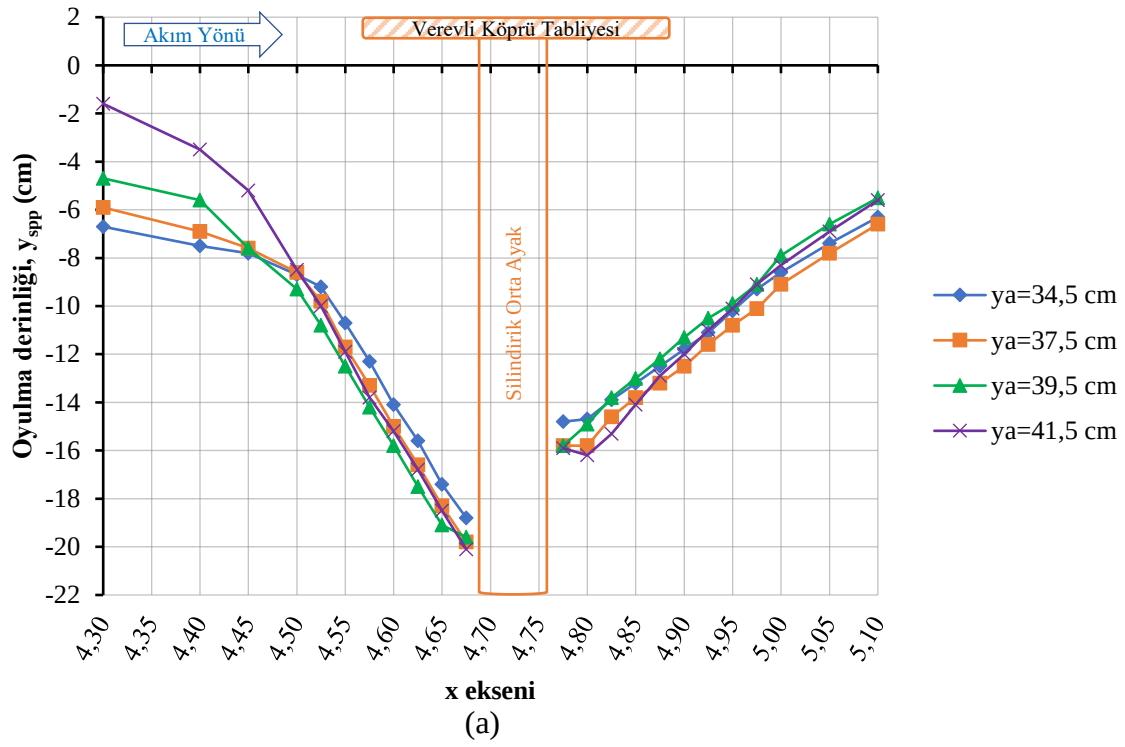
HEC-18 (FHWA Resource Center Hydraulics, 2012) ve BD 97/12 (United Kingdom National Highways, 2012) gibi yönetmeliklerde uygulanan yaklaşıma göre daralma ve yerel oyulma derinlikleri ayrı ayrı hesaplanıp toplanmakta ve böylece basınçlı akım durumunda meydana gelebilecek toplam oyulma derinliği belirlenmektedir. Bu yaklaşımın doğruluğunu irdelemek amacıyla sadece daralma ve sadece yerel oyulma derinliklerinin belirlendiği grup 1 ve 2 deneyleri yapılarak bunların toplamaları Çizelge 4.3 'te görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Çizelgede, sadece tabliyenin bulunduğu deney setine ait maksimum daralma oyulması değerleri  $y_{sc}$ , sadece orta ayağın bulunduğu deney setine ait maksimum yerel oyulma değerleri  $y_{spo}$  olarak verilmiştir.  $y_{sc}$  ve  $y_{spo}$  değerleri toplamı ile elde edilen oyulma derinliğinin, tabliye ve orta ayağın beraber bulunduğu durumdaki maksimum oyulma çukuru  $y_{spp,max}$  değerleri ile kıyaslanmasıyla oyulma derinliği  $y_{spp,max}$ 'ın, daralma ve yerel oyulmanın ayrı ayrı toplandığı değerden çoğunlukla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Farkın özellikle savak tipi akım durumunda daha fazla olduğu, savak yükü arttıkça farkın da arttığı görülmektedir. Kısmi basınçlı akım durumunda da  $y_a$  değeri arttıkça farkın arttığı belirlenmiştir. Carnacina ve diğerleri (2019) de yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçlara ulaşmış ve basınçlı akım durumundaki oyulmanın daralma oyulması ile yerel oyulma derinliklerinin ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen oyulma derinliğinden çok daha büyük oyulma derinliği meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Şekil 4.17 ve 4.18'de maksimum oyulma derinlikleri sırasıyla yaklaşım akım derinliğinin sabit ve debinin değişken olduğu durum ile debinin sabit, yaklaşım akım derinliğinin değişken olduğu durumlar için verilmiştir. Yukarıda belirtilmiş olan oyulma durumu Şekil 4.17 ve 4.18'de de gözlemlenmektedir. Şekiller üzerinde bulunan verevli köprü tabliyesi ile orta ayak temsili çizilmiş olup yataydaki konumu yaklaşık olarak doğru yerindedir.

Düseydeki konumları, tabliye kalınlığı, orta ayak genişliği ise sadece gösterim amaçlı olup ölçekli değildir. Şekil 4.17'den görüldüğü üzere debi değerinin artmasıyla özellikle mansap şevi yayvanlaşmaktadır. 120 lt/sn'de ise Şekil 4.18'de görüldüğü üzere tam basınçlı akım durumunda oluşan oyulma profili Şekil 4.3 ve Şekil 4.11'de verilen sırasıyla sadece daralma ve yerel oyulma profillerinden dahi büyük oyulmaya sahiptir. Bu sonuçlar özellikle orta ayağı olan akarsu köprülerinde tam basınçlı akım durumunda oyulmanın önemli derecede arttığını göstermektedir.

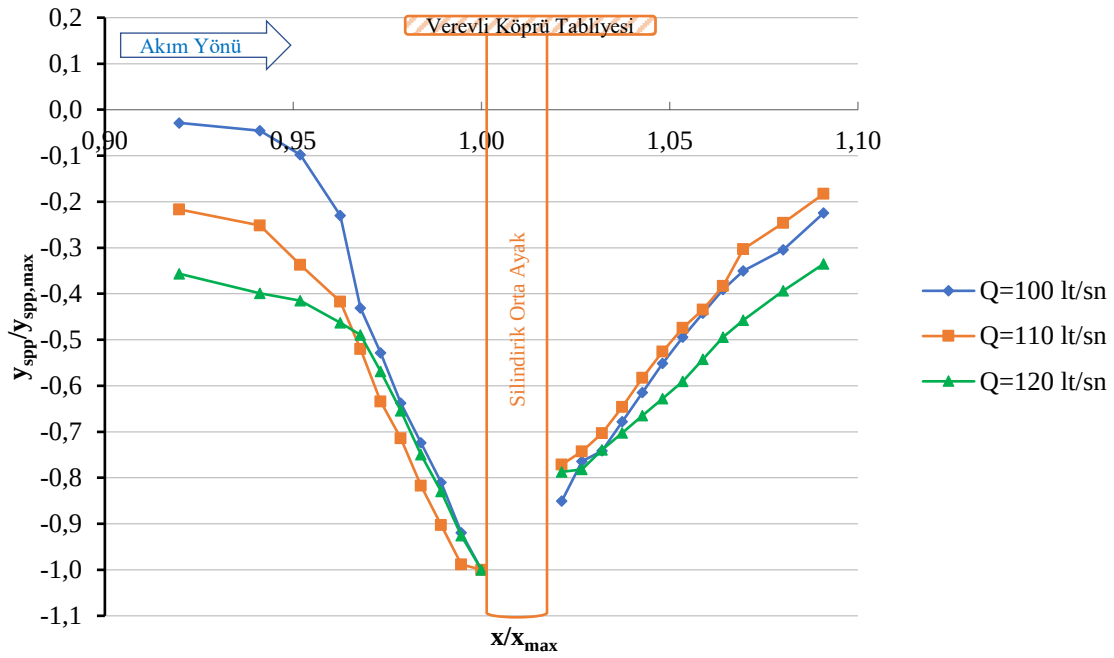


Şekil 4.17. Yaklaşım akım derinliği  $y_a=34,5$  cm olduğunda farklı debi değerlerinde meydana gelen basınçlı akım oyulmasının (a)  $y=0,5$  m'de boyuna profili, (b)  $x=4,675$  m'de enine profili



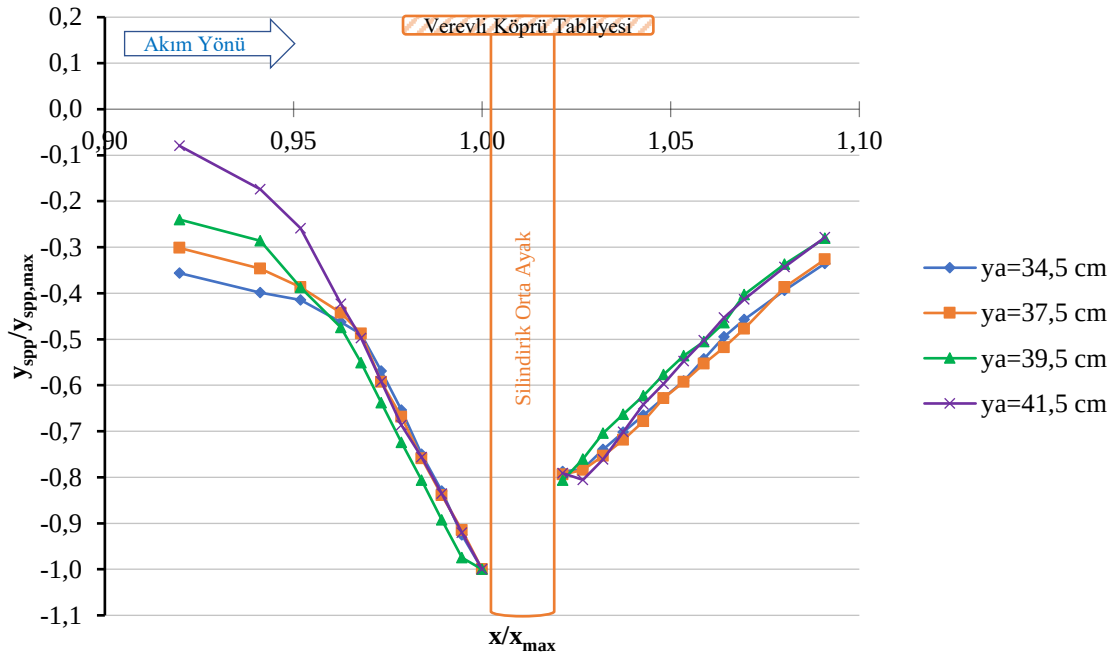
Şekil 4.18. Debi 120 lt/sn olduğunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen basınçlı akım oyulmasının (a)  $y=0,5$  m’de boyuna profili, (b)  $x= 4,675$  m’de enine profili

Şekil 4.19’da yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu farklı debi değerlerinde boyuna oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış profilleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere farklı debi değerlerinde birbirleriyle benzer memba şevleri meydana gelmiştir. Ancak debi artıkça mansap şevinde yayvanlaşma meydana gelmiştir. Ayrıca oyulmaların artan debi ile membada daha da hissedildiği ve özellikle 120 lt/sn’de memba tabanında önemli alçalmaların meydana geldiği görülmüştür.



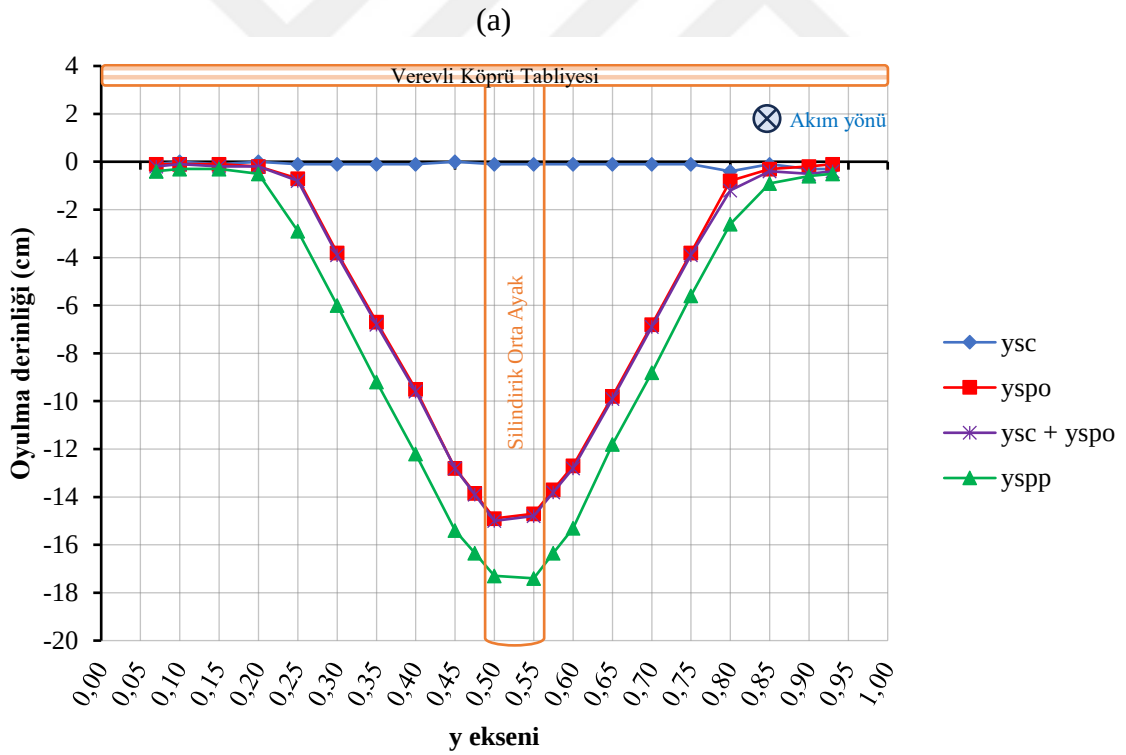
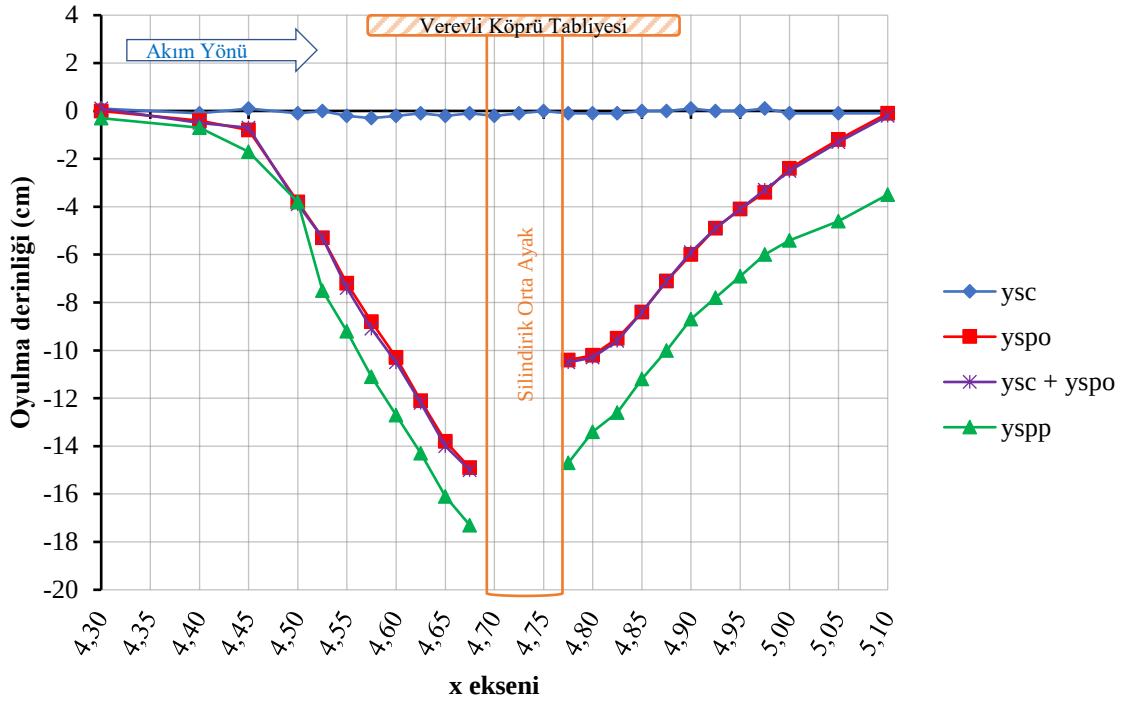
Şekil 4.19. Yaklaşım akım derinliği  $y_a=34,5$  cm olduğunda farklı debi değerlerinde meydana gelen basınçlı oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış profilleri

Şekil 4.20’de debinin 120 lt/sn olduğu durumda değişen yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyuna oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış profilleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde farklı yaklaşım akım derinliklerinde benzer oyulma çukuru şev eğimleri meydana geldiği görülmektedir. Ancak yaklaşım akım derinliği azaldıkça mansap şevinde kısmen yayvanlaşma meydana gelmektedir.



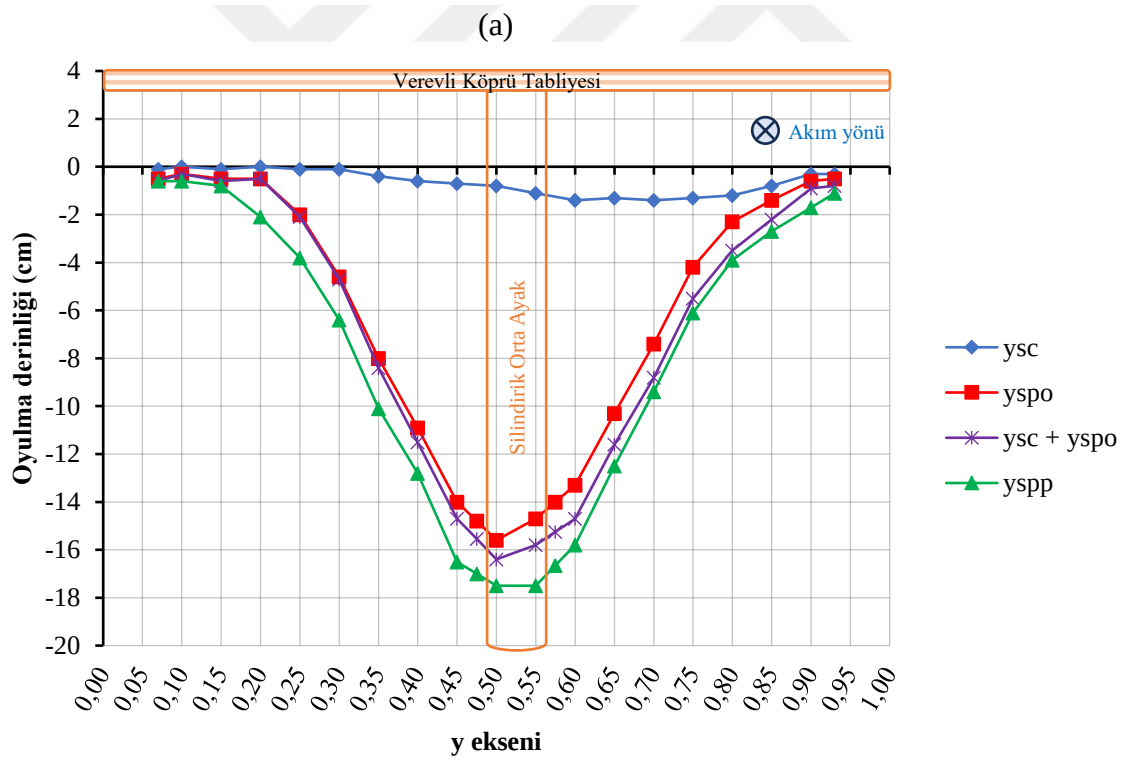
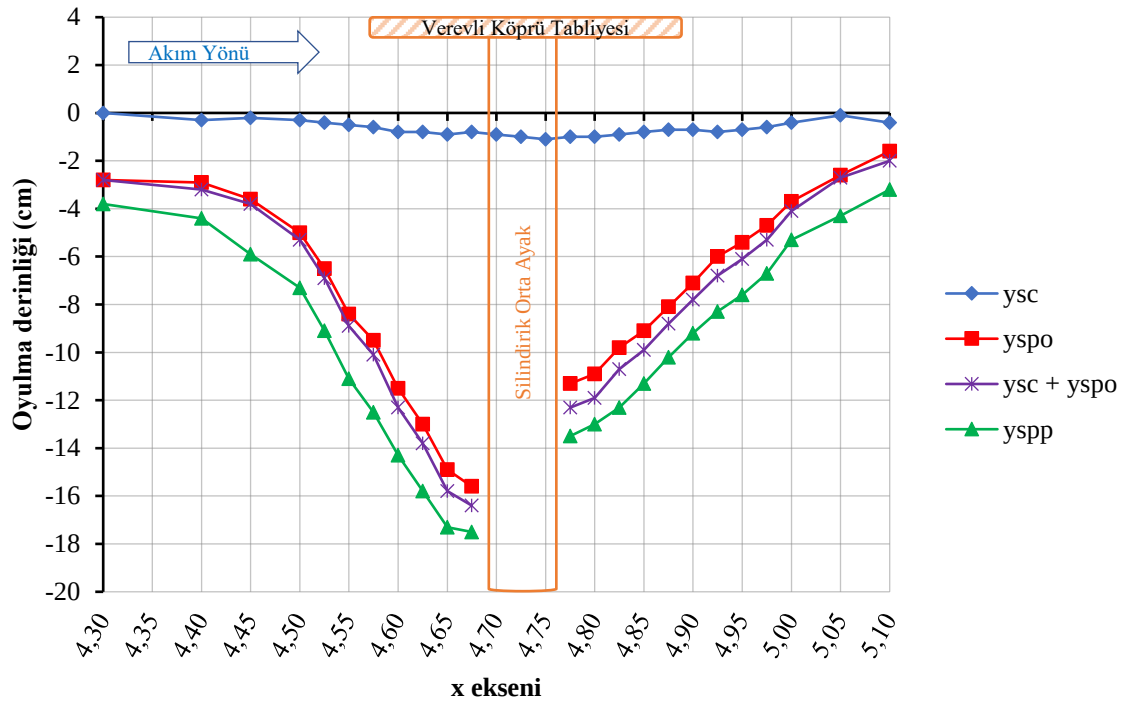
Şekil 4.20. Debinin 120 lt/sn olduğu farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen basınçlı oyulma çukurunun boyutsuzlaştırılmış profilleri

Çalışma kapsamında yapılmış olan üç grup deney sonucunda ölçülen daralma oyulması derinliği  $y_{sc}$ , yerel oyulma derinliği  $y_{spo}$ , basınçlı akım oyulma derinliği  $y_{spp}$  ile daralma oyulması ve yerel oyulma toplamının ( $y_{sc} + y_{spo}$ ) değerleri yaklaşım akım derinliğinin 34,5 cm olduğu derinlik için Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23'te sırasıyla 100 lt/sn, 110 lt/sn ile 120 lt/sn'lik debi değerleri için verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere aynı akım koşullarındaki daralma oyulması çukuru derinliği yerel oyulmaya göre çok daha küçük değerlerde meydana gelmiştir. Çizelge 4.3'ten ve şekillerden anlaşıldığı üzere basınçlı akım durumunda meydana gelen toplam oyulma derinliği  $y_{spp}$ , aynı akım koşullarında meydana gelen daralma oyulması ve yerel oyulma derinlikleri toplamı ( $y_{sc} + y_{spo}$ ) değerlerinden daha büyük değerlerde gelişmektedir.

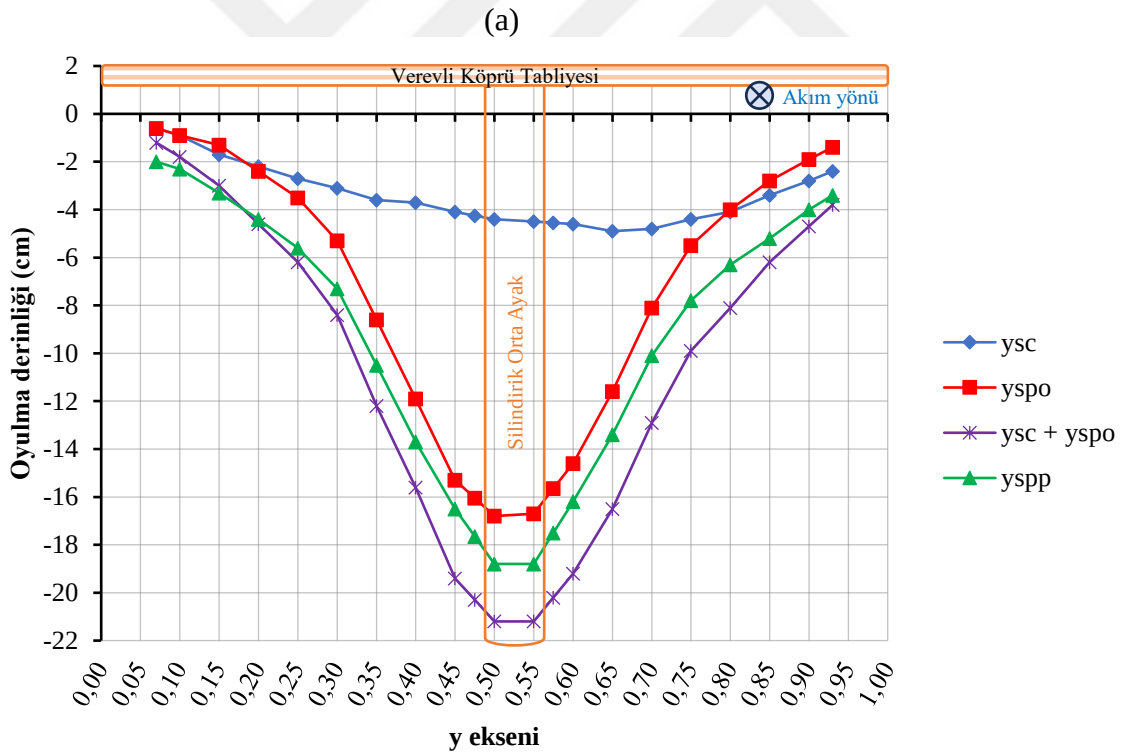
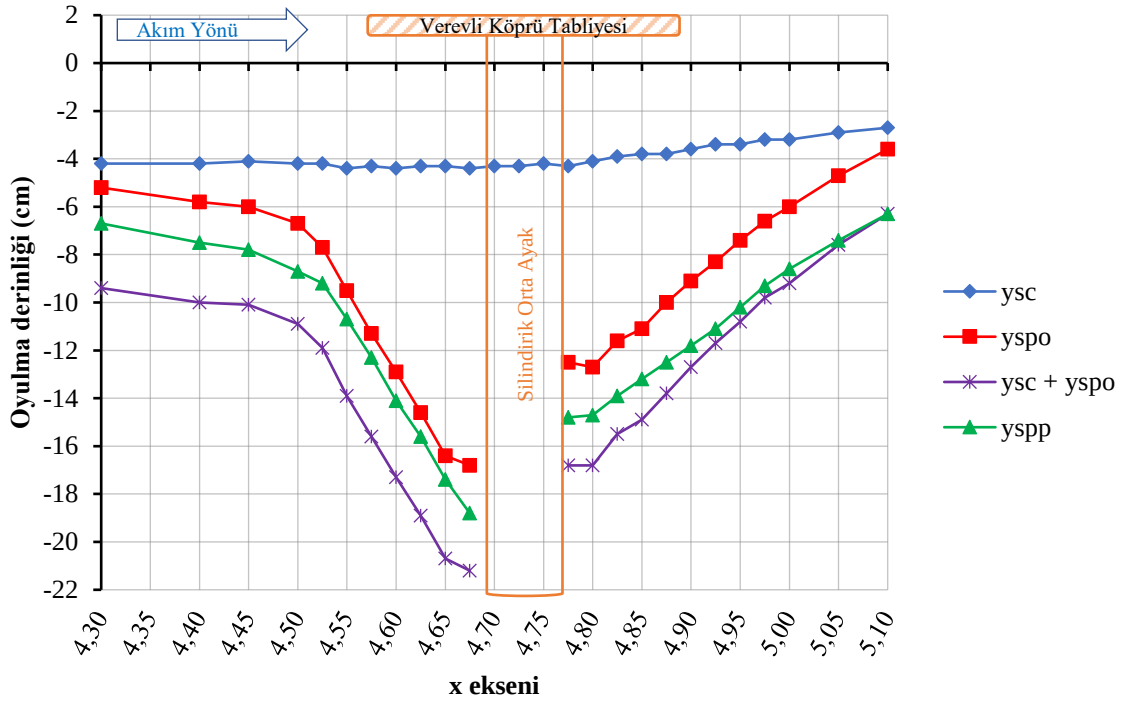


(b)

Şekil 4.21. 100 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri: (a)  $y=0,5$  m'de boyuna profil, (b)  $x=4,675$  m'de enine profil



Şekil 4.22. 110 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri: (a)  $y=0,5$  m'de boyuna profil, (b)  $x=4,675$  m'de enine profil



(b)

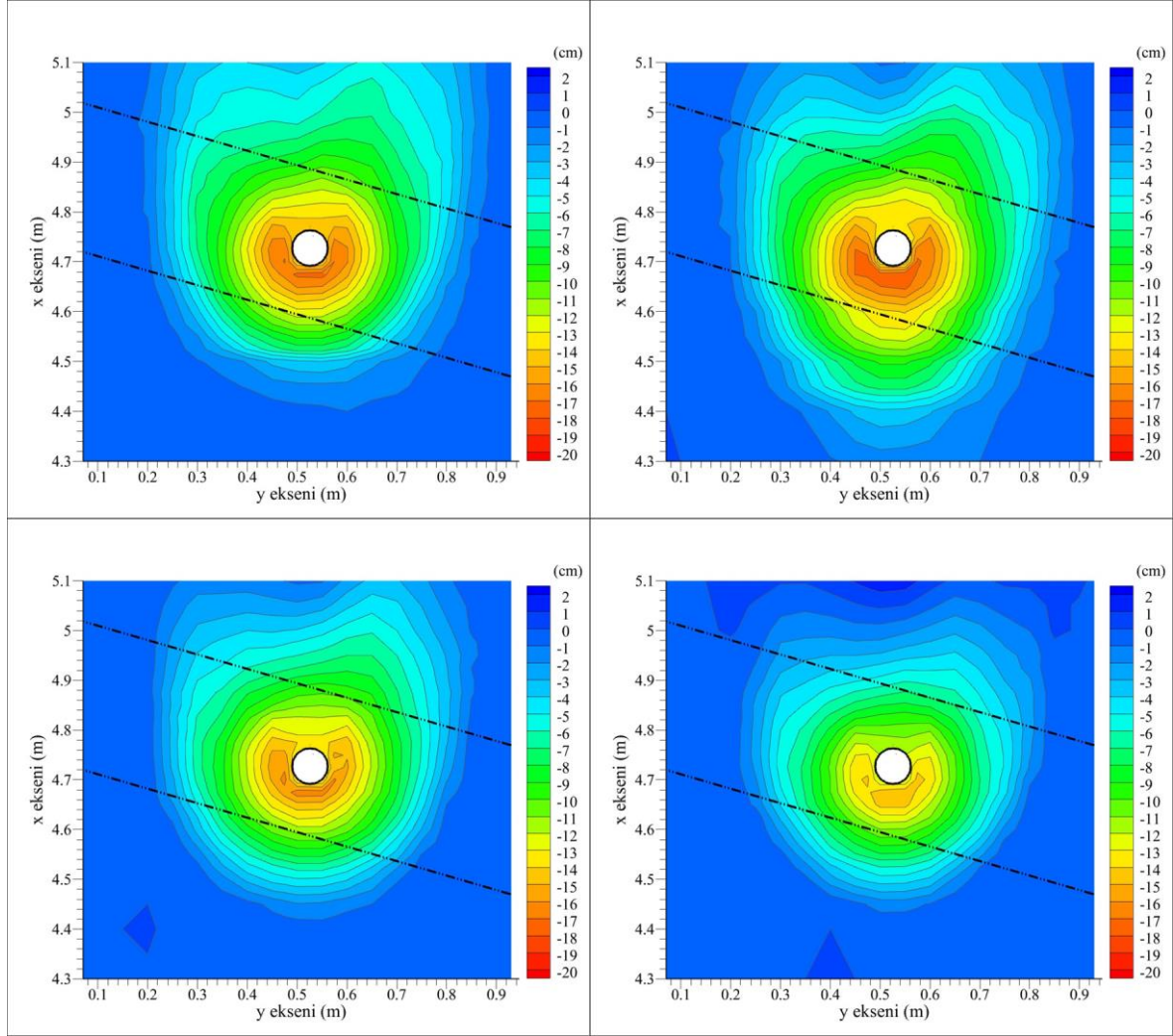
Şekil 4.23. 120 lt/sn'lik debi ve 34,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen oyulma çukuru profilleri: (a)  $y=0,5$  m'de boyuna profil, (b)  $x=4,675$  m'de enine profil



En küçük debi değeri olan 100 lt/sn'de daralma oyulması derinliği neredeyse ihmal edilebilecek kadar küçükken debideki artışla artış göstermiştir ve verevliliğin etkisiyle oyulma çukuruna ait  $y_{sc,max}$ 'ın kaydıgı görölmüştür. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'den göröldüğü üzere 100 lt/sn ve 110 lt/sn için ( $y_{sc}+y_{spo}$ ) değeri basınçlı akım oyulma derinliği  $y_{spp}$ 'den küçük oluşmuştur. Ancak Şekil 4.23'ten göröldüğü üzere 120 lt/sn için bu durum değışmiş ve  $y_{spp}$  değeri ( $y_{sc}+y_{spo}$ ) değerinden daha küçük meydana gelmiştir. Bu sonuç küçük debi değerlerinde HEC-18'de (FHWA Resource Center Hydraulics, 2012) uygulama bulan yaklaşımın güvenli olmayabileceğini ancak artan debi değerleriyle durumun tam tersine döndüğünü göstermiştir.

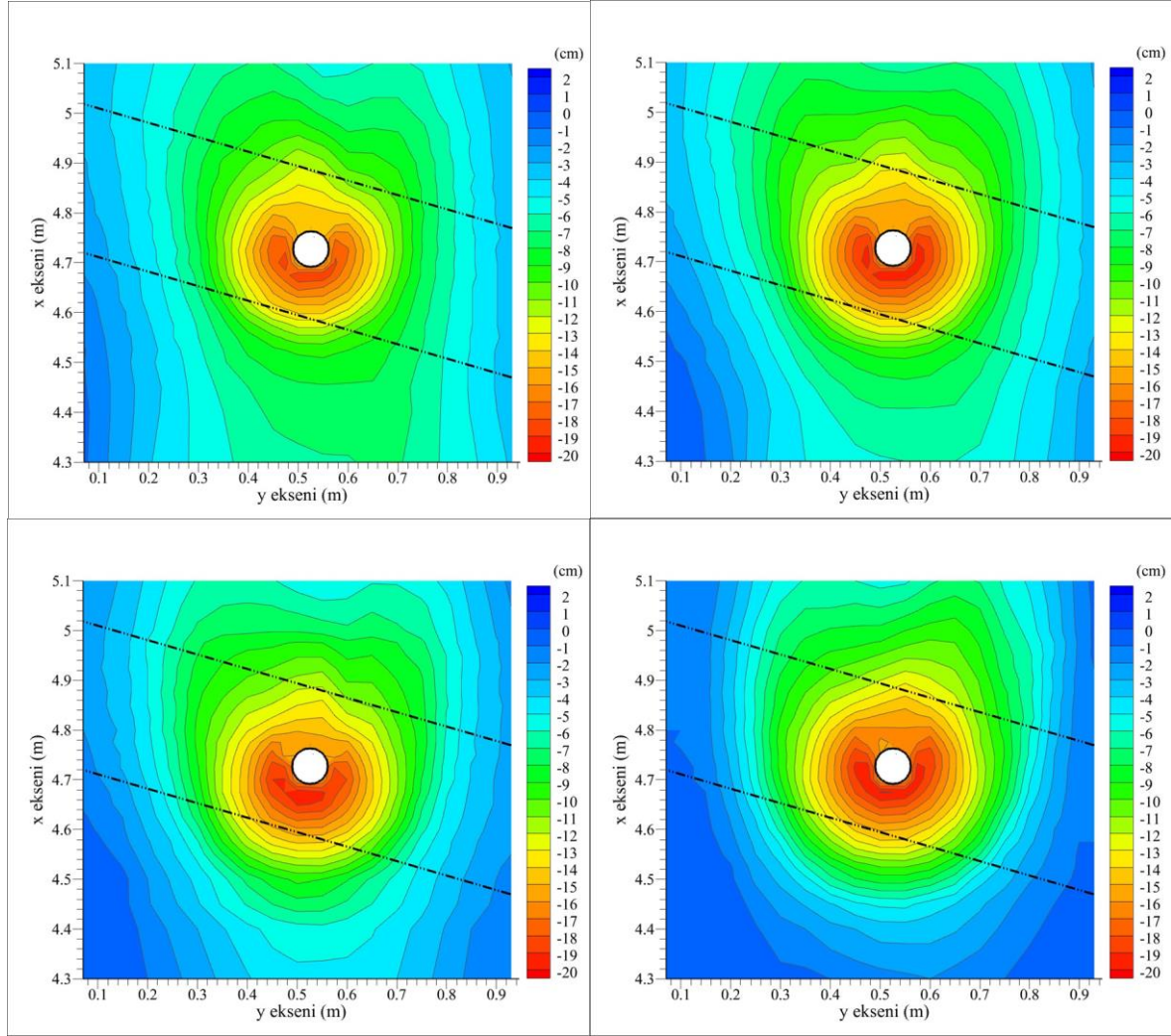
Şekil 4.24'te verilen oyulma çukuru derinliği haritaları ile Çizelge 4.3 incelendiğinde 100 lt/sn'lik debide deneylerde gözlemlenmiş maksimum oyulma çukurunun yaklaşım akım derinliğinin 37,5 cm olduğı durumda meydana gelmiş olduğı Şekil 4.18 ve Şekil 4.20'de de görölmektedir. Benzer şekilde, debinin 110 lt/sn olduğı durumda da maksimum oyulma çukuru derinliği 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğindeki kısmi basınçlı akım durumunda meydana gelmiştir. Debinin 110 lt/sn olduğı durum için elde edilen oyulma çukuru derinliği haritaları Ek-2'de verilmiştir.

Şekil 4.25'te çalışmadaki en büyük debi değeri olan 120 lt/sn'de meydana gelen toplam oyulma çukuru derinliği haritaları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde debinin 100 lt/sn ve 110 lt/sn olduğı durumların aksine çalışma kapsamında meydana gelen en büyük oyulma çukuru derinliğinin 120 lt/sn'de ve 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde, savak tipi akım durumunda meydana geldiğı görölmektedir. Bu durumun oluşmasında artan savak yükü ile tabliye altındaki çevrıntilerin yanı sıra yüzey çevrıntilerinin etkinliğinin artması olduğı düşünülmektedir. Bununla birlikte özellikle 34,5 cm ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde gözlemlenen memba tarafındaki büyük taban alçalmalarında membadan taşınan sediment tanelerinin bir kısmının köprü açıklığındaki oyulma çukurunda biriktiğı ve bu sebeple 34,5 ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğinin, 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliğine göre daha küçük olmasına neden olduğı değerlendirilmiştir. Zira 41,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinin olduğı oyulma çukuru derinlik haritası incelendiğinde memba tarafındaki taban alçalmalarının  $y_a = 34,5$  cm ve 37,5 cm olduğı durumdakine göre daha küçük meydana geldiğı görölmektedir.



Şekil 4.24. 100 lt/sn debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen toplam oyulma çukuru derinliği haritaları: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm

Sadece verevli köprü tabliyesinin bulunduğu deney sonuçlarında oyulmalar verevli köprü tabliyesi eksenine benzer verevlikte dağılım göstermiştir (Bkz. Şekil 4.6 ve 4.7). Ancak Şekil 4.24 ve 4.25'teki gibi verevli köprü tabliyesi ile orta ayağın beraber olduğu durumda çukurluk haritaları incelendiğinde sadece tabliyenin bulunduğu deney sonuçlarına benzer verevlikte bir oyulma dağılımı açık bir şekilde görülememektedir. Bu durum çalışma boyunca yerel oyulmaların düşey daralma oyulmalarından daha büyük değerlerde olması, bir başka deyişle aynı akım koşullarında yerel oyulmaların daralma oyulmasına göre çukur üzerinde daha etkili olması ile açıklanabilir. Dolayısıyla, verevli köprü tabliyesiyle orta ayağın bulunduğu deneylerde yerel oyulmalar baskın gelmiş ve Şekil 4.24 ile 4.25'teki toplam oyulma çukuru derinliği haritaları Şekil 4.14 ve 4.15'te yer alan yerel oyulma çukuru haritalarındaki oyulma şekline benzer bir dağılım göstermiştir.



Şekil 4.25. 120 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen toplam oyulma çukuru derinlik haritaları: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm

#### 4.2. Vervlik Açısının Basınçlı Akım Oyulmasına Etkisinin İncelenmesi

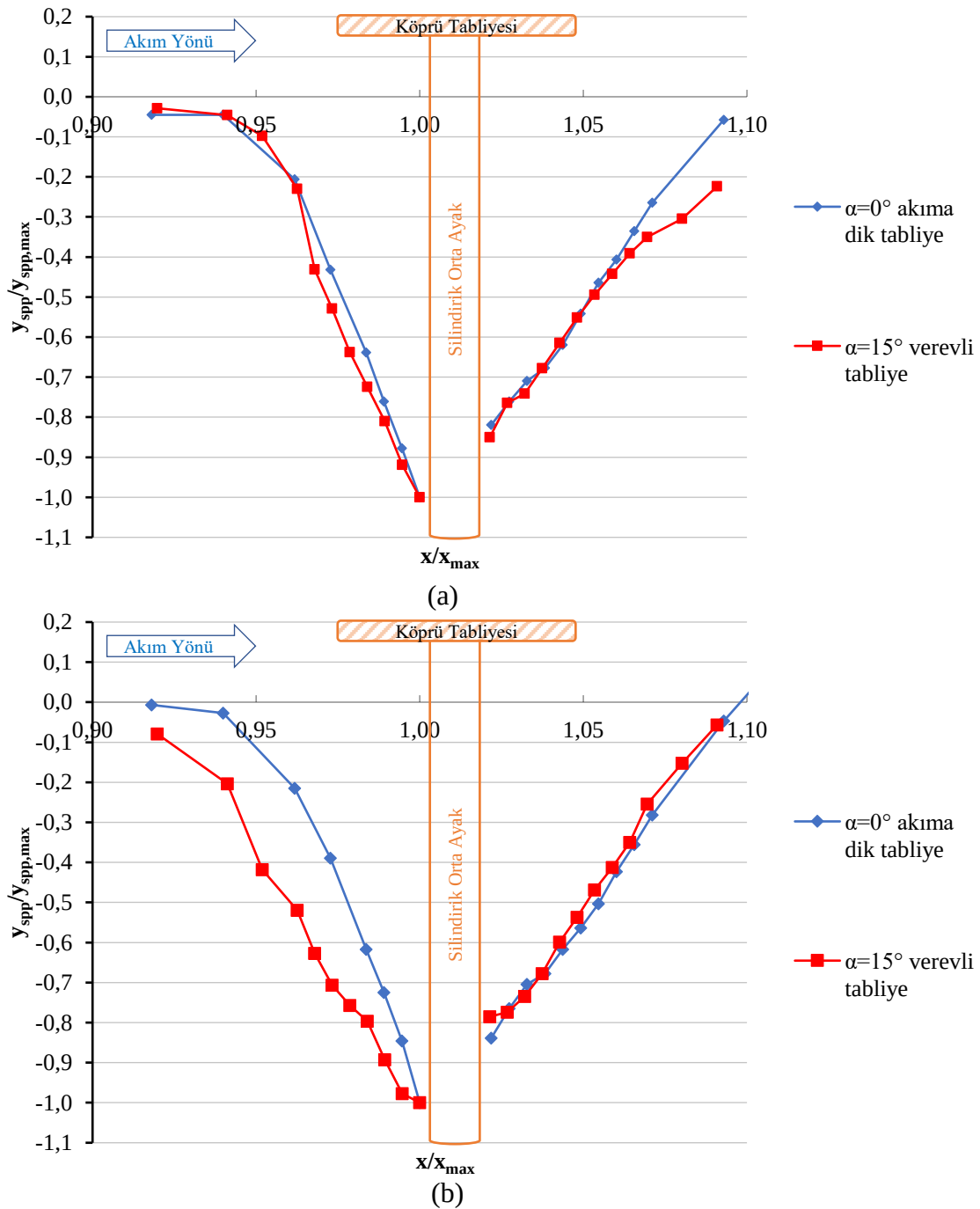
Köprü tabliyesindeki  $15^\circ$  vervlik açısının, oyulma çukuru derinlik ve şekline etkisinin incelenmesi amacıyla tamamen aynı akım ve laboratuvar koşullarında, akıma dik yerleştirilmiş benzer ebatlardaki köprü modeli ile Barakat (2022) tarafından yapılmış çalışma kapsamındaki deney verilerinden yararlanılmıştır. Çizelge 4.4'te akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile elde edilmiş olan deney verileri ve mevcut çalışma kapsamında vervli köprü tabliyesi durumunda elde edilmiş olan deney verileri görülmektedir. Her iki çalışmada da aynı açık kanal düzeneği, taban malzemesi, debi ve yaklaşım akım derinlikleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Akıma dik ve 15° verevlik açısıyla yerleştirilen tabliye açıklığında oluşan basınçlı maksimum oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

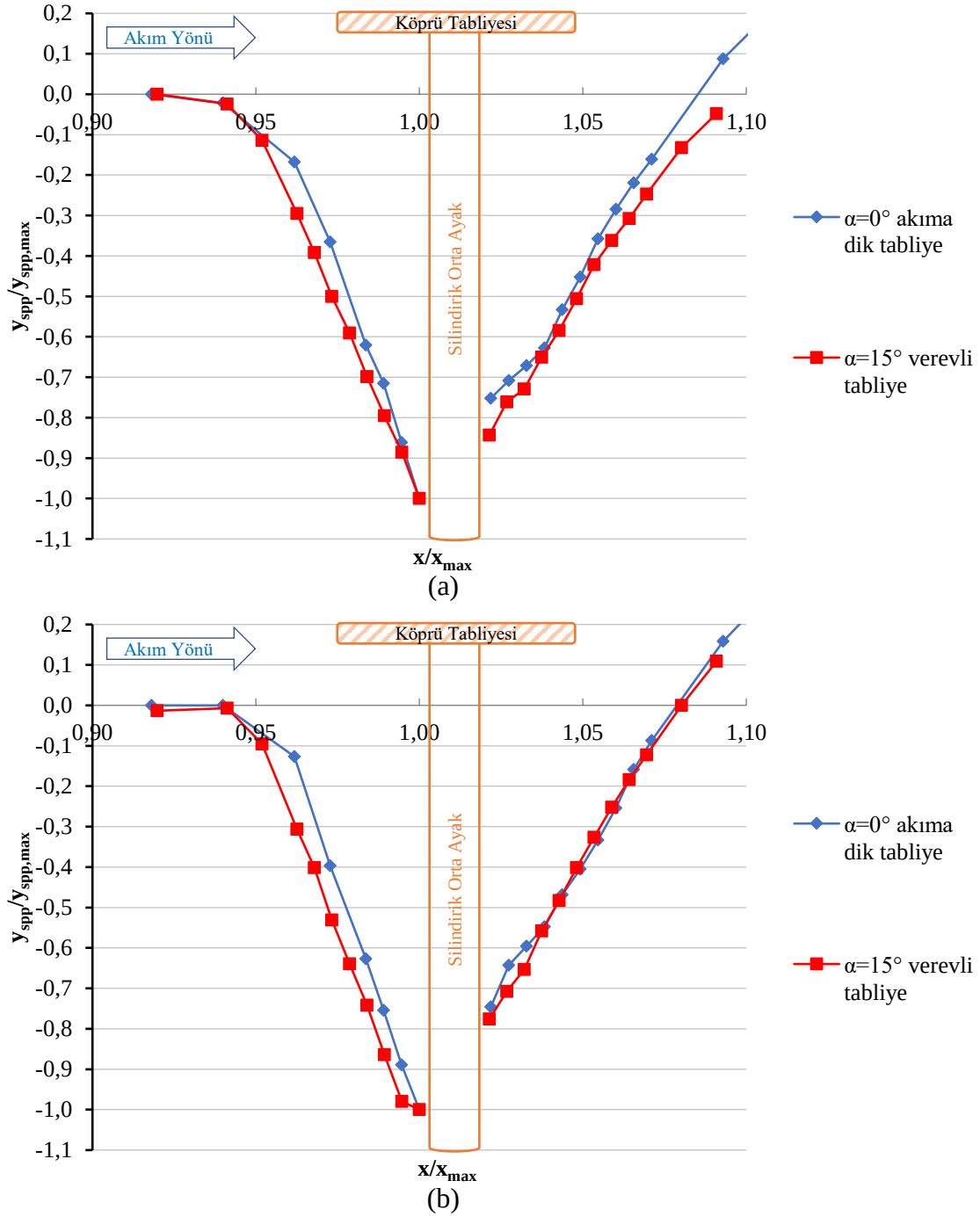
| Debi<br>(lt/sn)                                                                                                | Yaklaşım<br>akım<br>derinliği<br>(cm) | Fr <sub>a</sub><br>sayısı<br>(-) | Kulla-<br>nılan<br>köprü<br>modeli | Akım<br>tipi | 15° verevli tabliye |          |                              | Akıma dik tabliye |          |                              | Değişim<br>Yüzdesi<br>(%) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------|---------------------|----------|------------------------------|-------------------|----------|------------------------------|---------------------------|
|                                                                                                                |                                       |                                  |                                    |              | x<br>(m)            | y<br>(m) | y <sub>spp,max</sub><br>(cm) | x<br>(m)          | y<br>(m) | y <sub>spp,max</sub><br>(cm) |                           |
| 100                                                                                                            | 34,5                                  | 0,158                            | T                                  | KBA          | 4,650               | 0,80     | 0,4                          | 4,650             | 0,70     | 0,5                          | -20,0                     |
|                                                                                                                | 37,5                                  | 0,139                            |                                    |              | -                   | -        | -                            | 4,575             | 0,75     | 0,4                          | -                         |
|                                                                                                                | 39,5                                  | 0,129                            |                                    | TBA          | -                   | -        | -                            | 4,700             | 0,70     | 0,3                          | -                         |
|                                                                                                                | 41,5                                  | 0,119                            |                                    |              | -                   | -        | -                            | 4,575             | 0,60     | 0,3                          | -                         |
| 110                                                                                                            | 34,5                                  | 0,173                            |                                    | KBA          | 4,675               | 0,70     | 1,4                          | 4,600             | 0,70     | 1,2                          | 16,7                      |
|                                                                                                                | 37,5                                  | 0,153                            |                                    |              | 4,725               | 0,70     | 1,4                          | 4,650             | 0,65     | 1,0                          | 40,0                      |
|                                                                                                                | 39,5                                  | 0,141                            |                                    | TBA          | 4,675               | 0,70     | 0,8                          | 4,600             | 0,60     | 0,5                          | 60,0                      |
|                                                                                                                | 41,5                                  | 0,131                            |                                    |              | 4,700               | 0,60     | 0,6                          | 4,500             | 0,50     | 0,4                          | 50,0                      |
| 120                                                                                                            | 34,5                                  | 0,167                            |                                    | KBA          | 4,675               | 0,65     | 4,9                          | 4,550             | 0,70     | 3,3                          | 48,5                      |
|                                                                                                                | 37,5                                  | 0,154                            |                                    |              | 4,675               | 0,65     | 4,0                          | 4,650             | 0,60     | 2,8                          | 42,8                      |
|                                                                                                                | 39,5                                  | 0,127                            |                                    | TBA          | 4,750               | 0,65     | 3,1                          | 4,750             | 0,70     | 2,2                          | 40,9                      |
|                                                                                                                | 41,5                                  | 0,143                            |                                    |              | 4,750               | 0,65     | 1,9                          | 4,650             | 0,75     | 1,3                          | 46,2                      |
| 100                                                                                                            | 34,5                                  | 0,158                            | T+A                                | KBA          | 4,675               | 0,55     | 17,4                         | 4,575             | 0,50     | 15,5                         | 12,3                      |
|                                                                                                                | 37,5                                  | 0,139                            |                                    |              | 4,675               | 0,55     | 17,7                         | 4,575             | 0,50     | 14,8                         | 19,6                      |
|                                                                                                                | 39,5                                  | 0,129                            |                                    | TBA          | 4,675               | 0,50     | 16,6                         | 4,575             | 0,50     | 13,7                         | 21,2                      |
|                                                                                                                | 41,5                                  | 0,119                            |                                    |              | 4,675               | 0,55     | 14,7                         | 4,575             | 0,50     | 12,7                         | 15,7                      |
| 110                                                                                                            | 34,5                                  | 0,173                            |                                    | KBA          | 4,675               | 0,50     | 17,5                         | 4,575             | 0,50     | 17,3                         | 1,2                       |
|                                                                                                                | 37,5                                  | 0,153                            |                                    |              | 4,675               | 0,50     | 19,6                         | 4,575             | 0,50     | 17,0                         | 15,3                      |
|                                                                                                                | 39,5                                  | 0,141                            |                                    | TBA          | 4,675               | 0,50     | 18,5                         | 4,575             | 0,50     | 15,7                         | 17,8                      |
|                                                                                                                | 41,5                                  | 0,131                            |                                    |              | 4,675               | 0,50     | 17,7                         | 4,575             | 0,50     | 14,2                         | 24,6                      |
| 120                                                                                                            | 34,5                                  | 0,167                            |                                    | KBA          | 4,675               | 0,50     | 18,8                         | 4,575             | 0,50     | 18,9                         | -0,5                      |
|                                                                                                                | 37,5                                  | 0,154                            |                                    |              | 4,675               | 0,55     | 19,9                         | 4,575             | 0,50     | 17,3                         | 15,0                      |
|                                                                                                                | 39,5                                  | 0,127                            |                                    | TBA          | 4,675               | 0,50     | 19,6                         | 4,575             | 0,50     | 16,7                         | 17,4                      |
|                                                                                                                | 41,5                                  | 0,143                            |                                    |              | 4,675               | 0,50     | 20,1                         | 4,575             | 0,50     | 16,4                         | 22,5                      |
| T: Tabliye<br>T+A: Tabliye ve ayak beraber<br>KBA: Kısmi basınçlı akım durumu<br>TBA: Tam basınçlı akım durumu |                                       |                                  |                                    |              |                     |          |                              |                   |          |                              |                           |

Çizelge 4.4'te verilen deney sonuçları incelendiğinde köprü modeli olarak 15° verevlik açısı olan tabliye kullanıldığında hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında akıma dik yerleştirilen tabliyeye göre maksimum oyulma çukuru derinliklerinde artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle orta ayağın olmadığı durumda verevlik açısı nedeniyle kısmi basınçlı akım durumunda maksimum oyulma derinliklerinde %60'ı bulan artışlar olduğu görülmektedir. Aynı akım durumunda orta ayağın da olduğu deney verileri ile karşılaştırıldığında ise meydana gelen oyulmalardaki farkın %17,8'e gerilediği görülmektedir. Ayak olması durumunda ise savak tipi akımlarda meydana gelen oyulma çukuru derinliklerinde artış olduğu görülmektedir. Şekil 4.26'da tabliye ile orta ayağın olduğu kısmi basınçlı akım oyulması durumunda, 100 lt/sn'lik debide 34,5 cm ve 37,5 cm'lik yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru

profilleri, tabliyenin akıma dik ve  $15^\circ$  verevlik açısıyla yerleştirilmesi durumları için verilmiştir. Şekillerde yer alan köprü tabliyesi ile orta ayak temsili çizilmiş olup yataydaki konumu yaklaşık olarak doğru olmasına karşın düşeydeki konumları, tabliye kalınlığı, orta ayak genişliği gösterim amaçlı olup ölçekli değildir. Benzer şekilde Şekil 4.27’de de aynı akım koşullarının tam basınçlı yani savak tipi akım durumundaki boyutsuzlaştırılmış profilleri görülmektedir.



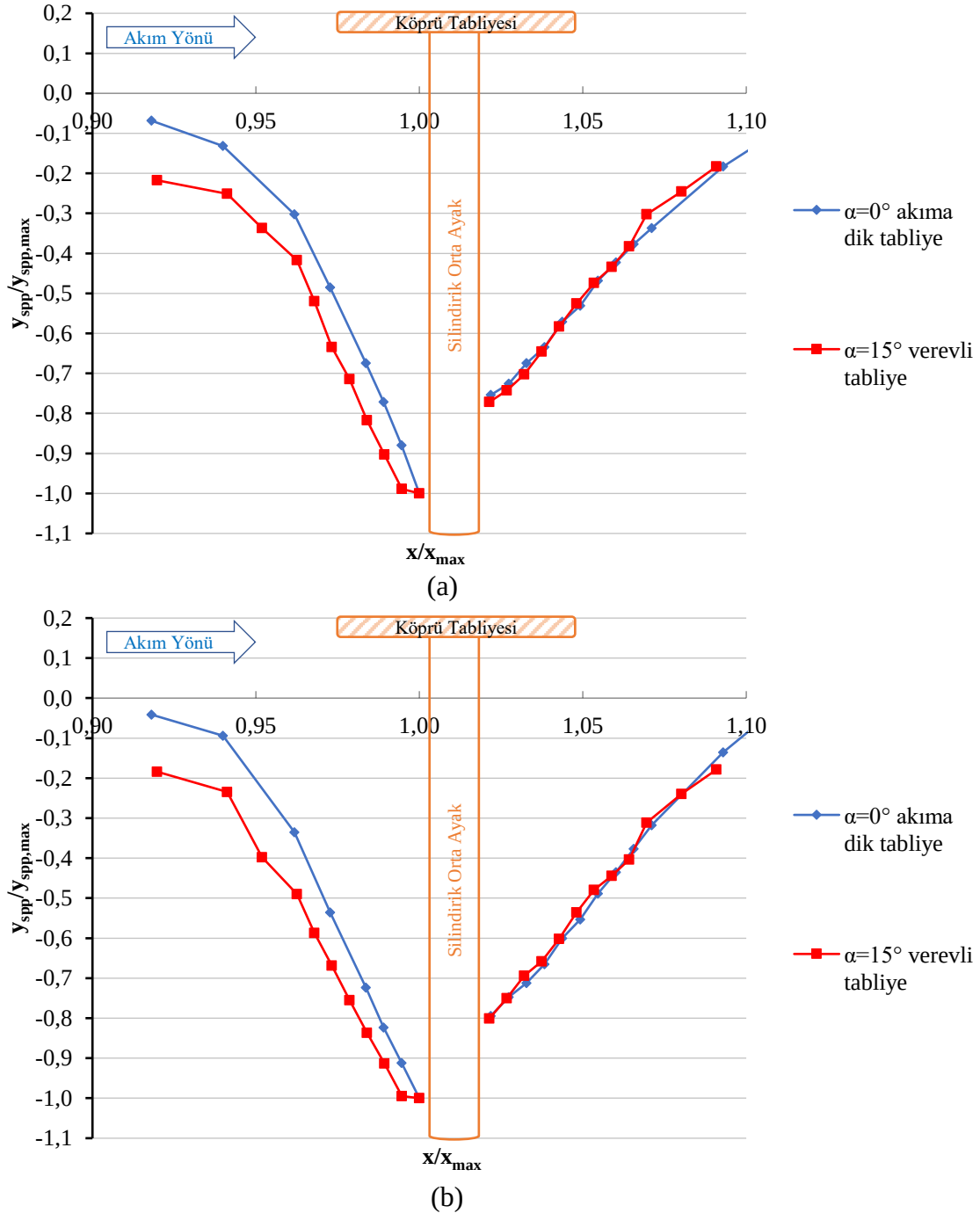
Şekil 4.26. Debinin 100 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve  $15^\circ$  verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen kısmi basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm



Şekil 4.27. Debinin 100 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen tam basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a)  $y_a = 39.5$  cm, (b)  $y_a = 41.5$  cm

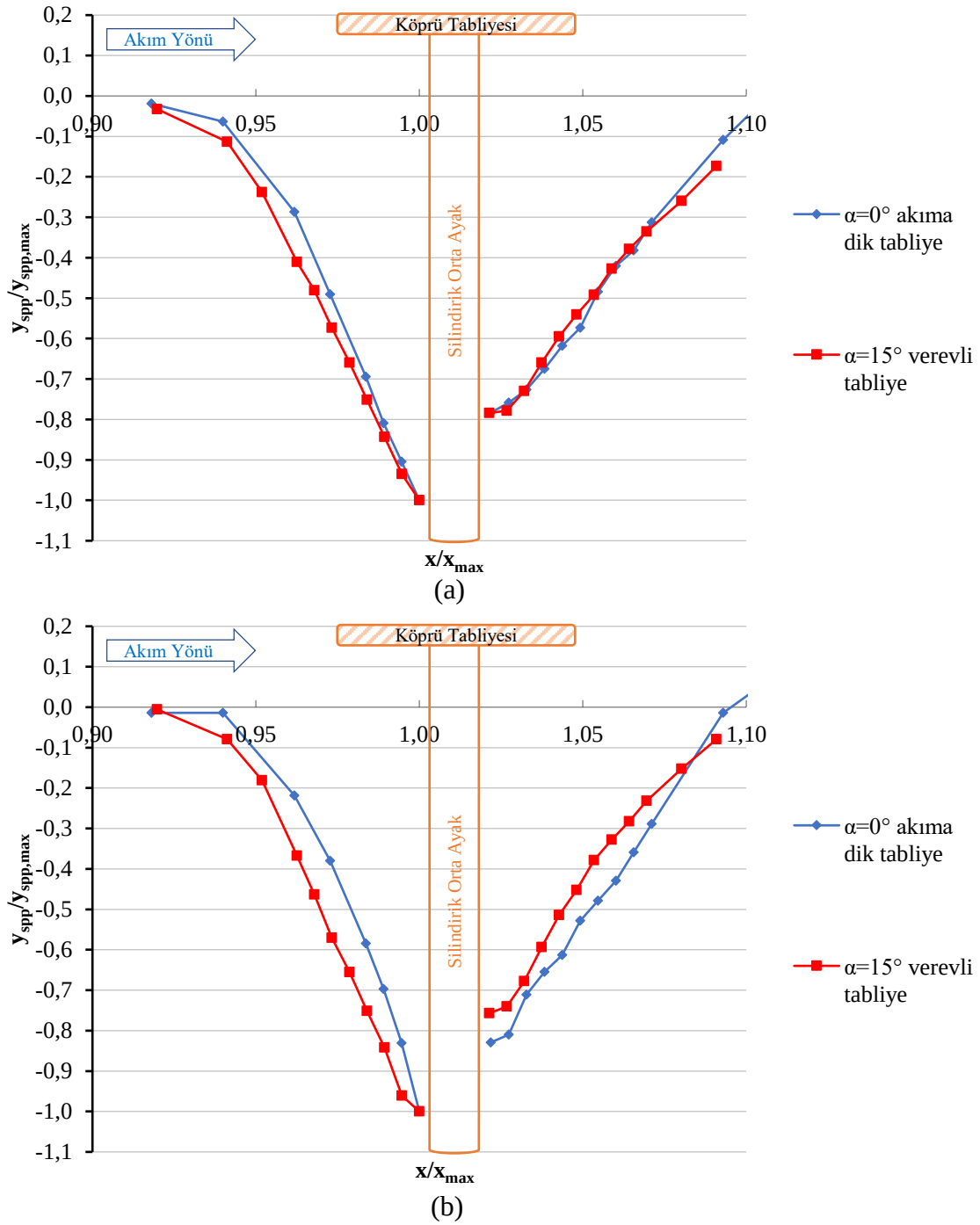
Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 tabliyenin verevlik açısındaki değişim göz önünde bulundurularak incelendiğinde, oyulma çukuru memba ve mansap şevlerinin benzer olduğu görülmektedir. Ancak 37,5 cm'lik akım derinliğinde verevli köprü tabliyesi için elde edilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profili incelendiğinde memba şevinin akıma dik tabliyeye nazaran daha fazla etkilendiği görülmektedir. Şekil 4.28 ve 4.29'da 110 lt/sn'de

farklı yaklaşım akım derinlikleri ve farklı tabliye verevliklerinde elde edilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde artan debi ile beraber verevli tabliyenin bulunduğu durumda oyulmaların membadaki etkisinin arttığı ve membada taban alçalmalarının akıma dik tabliye durumuna göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28. Debinin 110 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen kısmi basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm

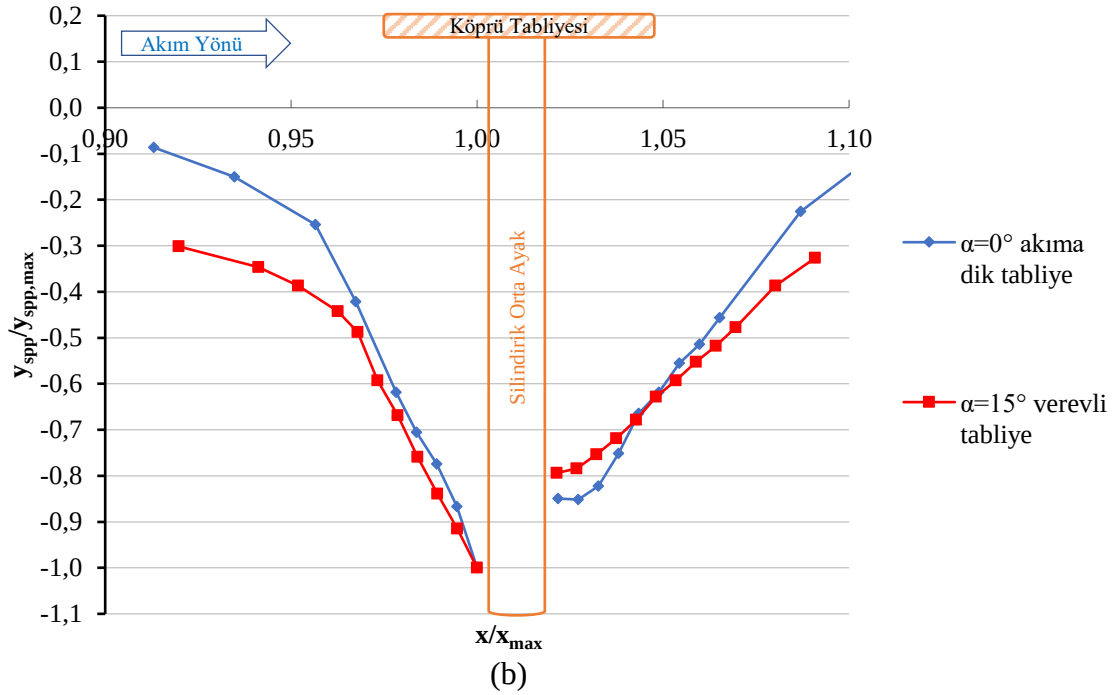
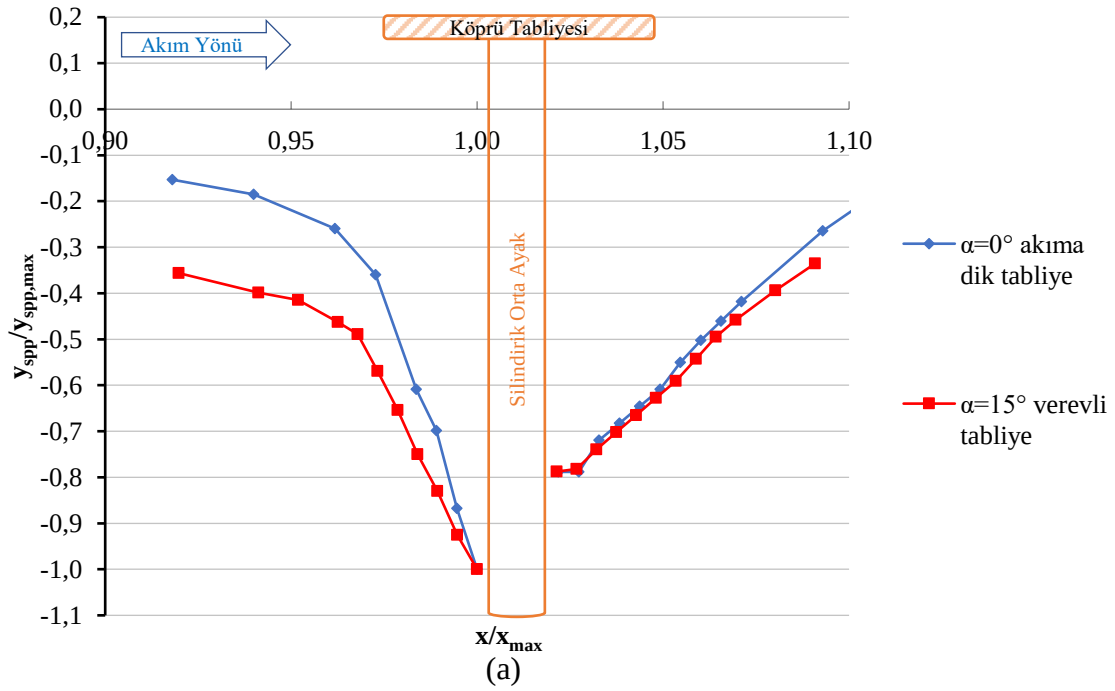




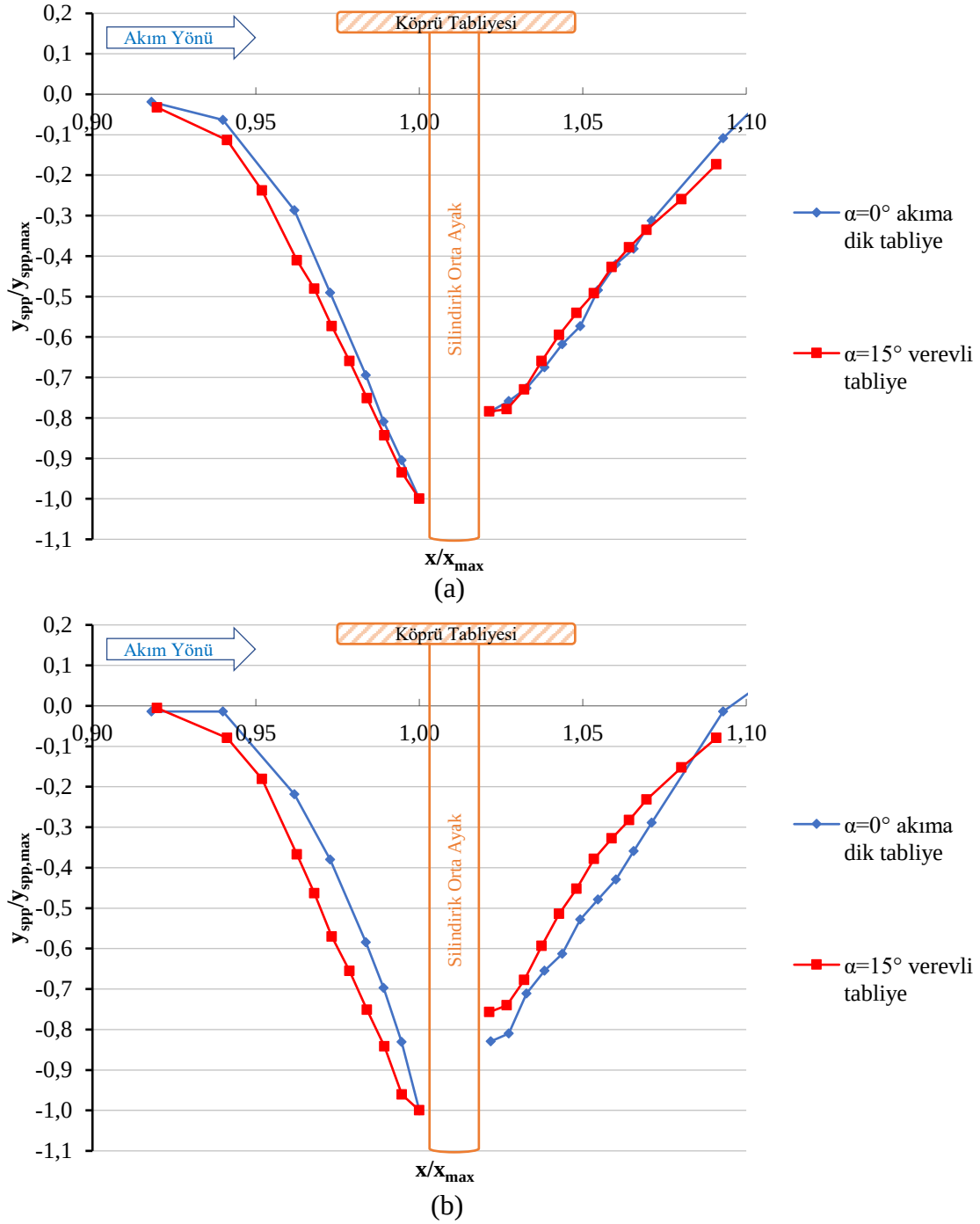
Şekil 4.29. Debinin 110 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve  $15^\circ$  verevlik açıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen tam basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a)  $y_a = 39,5$  cm, (b)  $y_a = 41,5$  cm

Şekil 4.30 ve 4.31’de debinin 120 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve  $15^\circ$  verevlik açıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen oyulmaların boyutsuzlaştırılmış profilleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde verevli tabliyenin bulunduğu deneylerde savak tipine kıyasla kısmi basınçlı akım durumunda özellikle membadaki taban alçalmalarının büyük oranda etkilendiği gözlemlenmektedir.





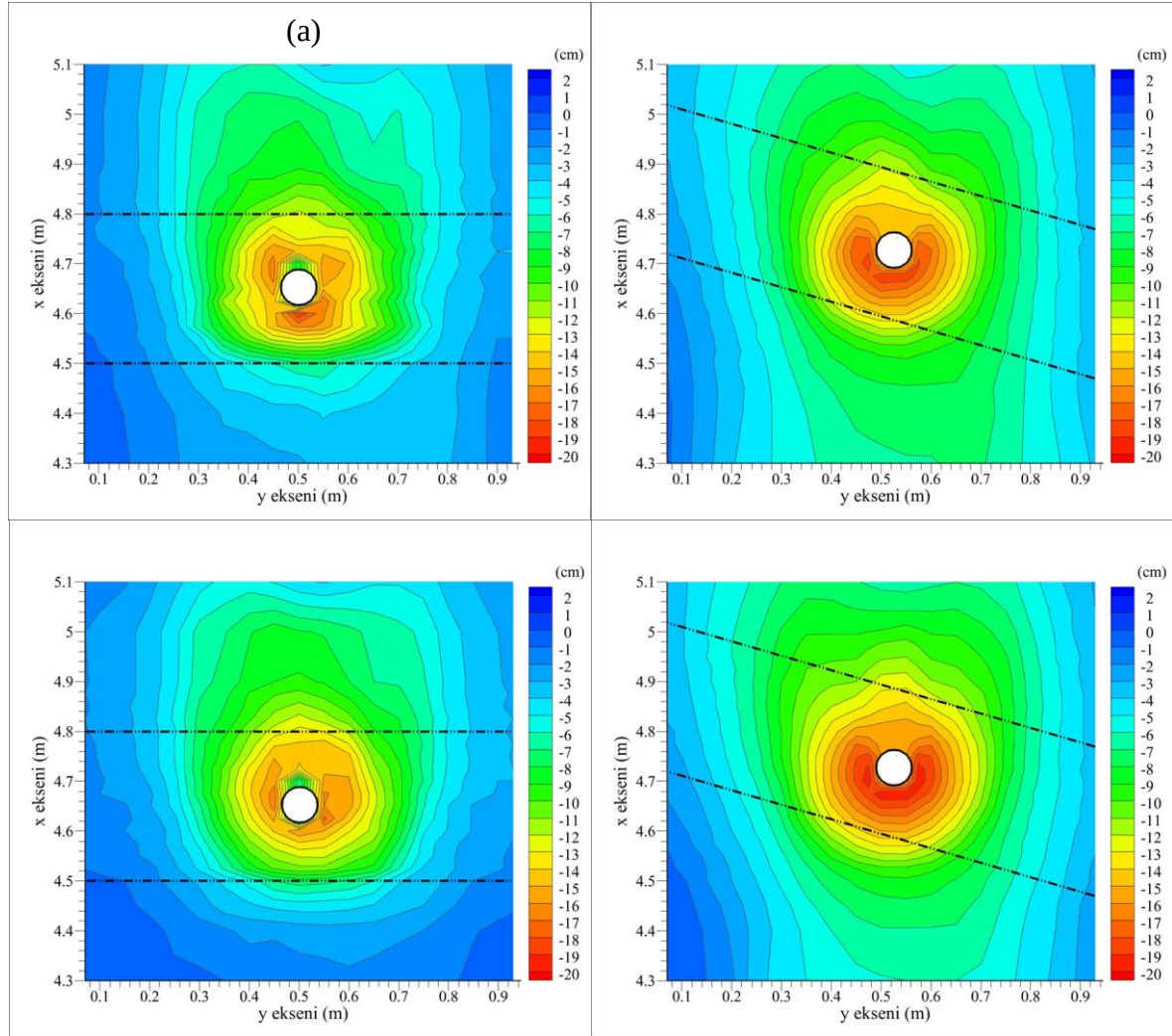
Şekil 4.30. Debinin 120 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen kısmi basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm



Şekil 4.31. Debinin 120 lt/sn olduğu durumda akıma dik ve 15° verevlik açısıyla yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile orta ayak için meydana gelen tam basınçlı akım oyulmasının boyutsuzlaştırılmış profilleri: (a)  $y_a=39,5$  cm, (b)  $y_a=41,5$  cm

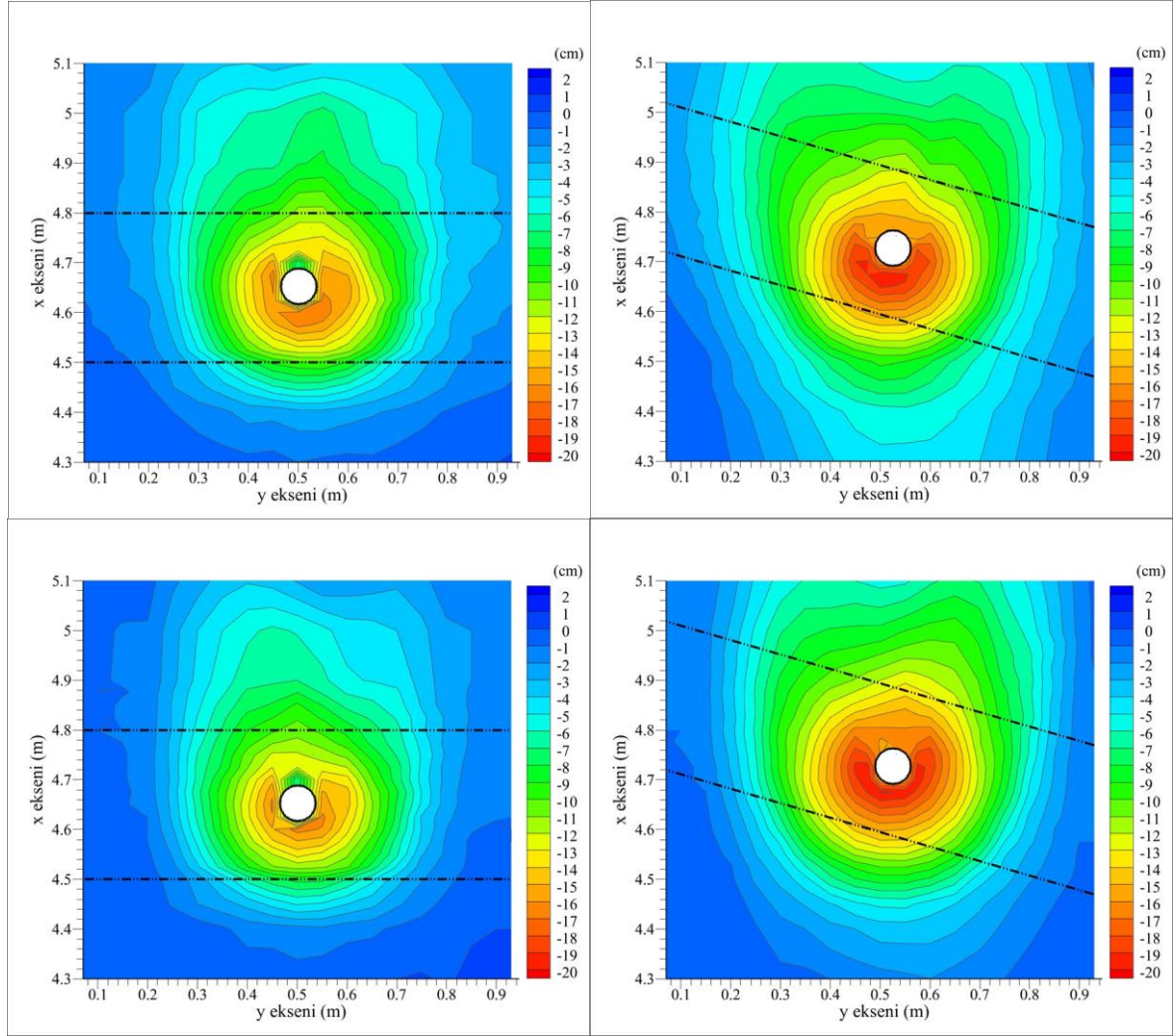
Barakat (2022)'ın akıma dik yerleştirilmiş tabliye modeli ile silindirik orta ayağın olduğu çalışma verileri ve aynı koşullarda 15° verevli tabliyenin olduğu deney verileri kullanılarak Şekil 4.32'de 120 lt/sn için kısmi basınçlı akım durumundaki oyulma çukuru derinlik haritası elde edilmiştir. Aynı akım koşullarında verevli tabliyenin kullanıldığı durumdaki oyulmaların dik tabliyenin kullanıldığı durumdaki oyulmalara göre daha büyük olduğu

görülmektedir. Ayrıca verevli köprü tabliyesi durumunda oyulmaların yayvanlaşmış olduğu, memba tarafındaki taban alçalmalarının da daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.32. Akıma dik ve  $15^\circ$  verevli tabliyenin bulunduğu, 120 lt/sn için kısmi basınçlı akımda meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri haritası: (a)  $y_a=34,5$  cm,  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $y_a=34,5$  cm,  $\alpha=15^\circ$ ; (c)  $y_a=37,5$  cm,  $\alpha=0^\circ$ ; (d)  $y_a=37,5$  cm,  $\alpha=15^\circ$

Şekil 4.33'te akıma dik tabliye ile  $15^\circ$  verevli tabliyenin bulunduğu, 120 lt/sn'lik debi için tam basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukuru derinlik haritaları verilmiştir. Şekil incelendiğinde verevli köprü tabliyesinin olduğu durumda oyulmaların membada hissedilmesinin akıma dik yerleştirilmiş tabliyeye göre daha belirgin olduğu ve her iki tabliye durumunda da artan savak yükü ile membadaki bu etkinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, verevli köprü tabliyesinin olduğu durumda dik tabliyeye göre oyulmaların mansaba doğru daha yayvanlaştığı görülmektedir.



Şekil 4.33. Akıma dik tabliye ve  $15^\circ$  verevli tabliyenin bulunduğu,  $120 \text{ lt/sn}$  için tam basınçlı akımda meydana gelen oyulma çukuru derinlikleri haritası: (a)  $y_a=39,5 \text{ cm}$ ,  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $y_a=39,5 \text{ cm}$ ,  $\alpha=15^\circ$ ; (c)  $y_a=41,5 \text{ cm}$ ,  $\alpha=0^\circ$ ; (d)  $y_a=41,5 \text{ cm}$ ,  $\alpha=15^\circ$

#### 4.3. Basınçlı Akım Durumunda Maksimum Oyulma Çukuru Derinliğini Tahmin Eden Ampirik Bağıntının Geliştirilmesi

Bu bölümde ölçüm verileri kullanılarak silindirik bir orta ayağa ve verevlik açısı  $15^\circ$  olan bir tabliyeye sahip köprüde, temiz su koşullarında kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında düşey daralma oyulması ve yerel oyulmanın beraber gerçekleşmesi halinde tabanda oluşabilecek maksimum oyulma çukuru derinliğinin tahmin edilebilmesi amacıyla oyulma mekanizmasını etkileyen boyutsuz parametreler kullanılarak çoklu lineer regresyon analizi yapılmıştır. Dolayısıyla, çalışma kapsamında hem kısmi basınçlı hem de tam basınçlı akım durumlarında oyulma çukuru derinliğini tahmin edebilen tek bir bağıntının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Toplam oyulma çukuru derinliği  $y_{spp}$ , bağımlı değişken olmak üzere boyut analizinden elde edilen fonksiyonel ilişkiler aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = f\left(Fr_d, \frac{H_b}{y_a}, \frac{D}{y_a}, \frac{h_w}{y_a}, \frac{a}{y_a}, K_\alpha\right) \quad (4.1)$$

Çalışmada 15°'lik verevli köprü tabliyesi ile silindirik orta ayağın beraber kullanıldığı durum için elde edilen deney verilerine dayanan ve çoklu doğrusal regresyon analizinde kullanılan boyutsuzlaştırılmış parametreler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Ampirik bağıntının elde edilebilmesi için regresyon analizinde kullanılan çalışma kapsamındaki deney verilerine bağlı parametreler

| Q<br>(lt/sn) | $y_a$<br>(cm) | $y_{spp}/y_a$<br>(-) | $Fr_d$<br>(-) | $H_b/y_a$<br>(-) | $D/y_a$<br>(-) | $h_w/y_a$<br>(-) | $a/y_a$<br>(-) |
|--------------|---------------|----------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 100          | 34,5          | 0,504                | 2,548         | 0,942            | 0,290          | 0,000            | 0,058          |
|              | 37,5          | 0,472                | 2,346         | 0,867            | 0,267          | 0,000            | 0,133          |
|              | 39,5          | 0,420                | 2,223         | 0,823            | 0,253          | 0,051            | 0,127          |
|              | 41,5          | 0,354                | 2,118         | 0,783            | 0,241          | 0,096            | 0,120          |
| 110          | 34,5          | 0,507                | 2,803         | 0,942            | 0,290          | 0,000            | 0,058          |
|              | 37,5          | 0,523                | 2,575         | 0,867            | 0,267          | 0,000            | 0,133          |
|              | 39,5          | 0,468                | 2,443         | 0,823            | 0,253          | 0,051            | 0,127          |
|              | 41,5          | 0,427                | 2,329         | 0,783            | 0,241          | 0,096            | 0,120          |
| 120          | 34,5          | 0,545                | 3,058         | 0,942            | 0,290          | 0,000            | 0,058          |
|              | 37,5          | 0,531                | 2,812         | 0,867            | 0,267          | 0,000            | 0,133          |
|              | 39,5          | 0,496                | 2,671         | 0,823            | 0,253          | 0,051            | 0,127          |
|              | 41,5          | 0,484                | 2,540         | 0,783            | 0,241          | 0,096            | 0,120          |

Barakat (2022)'ın çalışmasında yer alan, akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile silindirik orta ayağın beraber bulunduğu deney setine ait veriler, regresyon analizine dahil edilmiştir. Böylece hem girilen örneklem sayısı artırılarak daha güçlü bir istatistiksel yaklaşım elde edilmiş hem de istatistiksel analizde verevlik açısı da değişken olarak bağıntıya dahil edilebilmiştir. Çünkü mevcut çalışma ile Barakat (2022)'a ait deneysel çalışma arasındaki en önemli fark köprü tabliyesinin verevlik açısına sahip olmasıdır. Dolayısıyla Eş. 4.1'de yaklaşım akımıyla köprü aksı arasındaki açının (verevlik) etki faktörü yani  $K_\alpha$  bağımsız değişkeni bulunmaktadır. Regresyon analizinde kullanılan Barakat (2022)'ın elde ettiği deney sonuçlarına dayanan boyutsuzlaştırılmış parametre değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Ampirik bağıntının elde edilebilmesi için regresyon analizinde kullanılan Barakat (2022)’a ait deney verileri

| Q<br>(lt/sn) | $y_a$<br>(cm) | $y_{spp}/y_a$<br>(-) | $Fr_d$<br>(-) | $H_b/y_a$<br>(-) | $D/y_a$<br>(-) | $h_w/y_a$<br>(-) | $a/y_a$<br>(-) |
|--------------|---------------|----------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 100          | 34,5          | 0,449                | 2,548         | 0,942            | 0,290          | 0,000            | 0,058          |
|              | 37,5          | 0,395                | 2,346         | 0,867            | 0,267          | 0,000            | 0,133          |
|              | 39,5          | 0,347                | 2,223         | 0,823            | 0,253          | 0,051            | 0,127          |
|              | 41,5          | 0,306                | 2,118         | 0,783            | 0,241          | 0,096            | 0,120          |
| 110          | 34,5          | 0,501                | 2,803         | 0,942            | 0,290          | 0,000            | 0,058          |
|              | 37,5          | 0,453                | 2,575         | 0,867            | 0,267          | 0,000            | 0,133          |
|              | 39,5          | 0,397                | 2,443         | 0,823            | 0,253          | 0,051            | 0,127          |
|              | 41,5          | 0,342                | 2,329         | 0,783            | 0,241          | 0,096            | 0,120          |
| 120          | 34,5          | 0,548                | 3,058         | 0,942            | 0,290          | 0,000            | 0,058          |
|              | 37,5          | 0,464                | 2,812         | 0,867            | 0,267          | 0,000            | 0,133          |
|              | 39,5          | 0,423                | 2,671         | 0,823            | 0,253          | 0,051            | 0,127          |
|              | 41,5          | 0,395                | 2,540         | 0,783            | 0,241          | 0,096            | 0,120          |

Barakat (2022)’a ait deney sonuçlarının istatistiksel analize dahil edilmesi ile toplamda 24 adet örnekleme ulaşılmıştır. Çoklu regresyon analizinde bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkinin genellenebilir bir anlamlıkta olabilmesi için belirli bir örneklem sayısının olması gerektiğini savunan araştırmacılar vardır. Bu hususta kesin bir kural olmamakla birlikte, genel anlamda bağımsız değişken sayısının 5 katı kadar sayıda örnekleme sahip olunması önerilmektedir (Ho, 2006). Çalışma kapsamında yapılan istatistiksel analizde “ $y_{spp}/y_a$ ” değeri bağımlı değişken olmak üzere “ $Fr_d$ ”, “ $H_b/y_a$ ”, “ $D/y_a$ ”, “ $h_w/y_a$ ”, “ $a/y_a$ ” ve “ $K_a$ ” boyutsuz parametreleri bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, istatistiksel analizde kullanılan 6 bağımsız değişkene nispetle en az 30 örneklemin olması önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında 24 adet örneklem kullanılmıştır.

Normal şartlar altında bağımlı ve bağımsız değişkenlerin tümünün nicel değişken olması beklenirken bağımsız değişkenlerden  $K_a$ , nitel bir değişken olarak ele alınmıştır.  $K_a$  değişkeni sayesinde elde edilecek olan ampirik bağıntıya, yaklaşım akımı ile köprü aksı arasındaki vevlik açısının etkisi yansıtılmıştır. Örneklem içerisinde  $0^\circ$  ve  $15^\circ$ ’lik iki farklı vevlik değeri,  $K_a$  nitel değişkeni için, vevliğin olduğu ve olmadığı durumu yansıtması açısından, iki kategorili nitel değişken tanımlaması yapılmıştır. Böylece akım dik tabliye kullanıldığında  $K_a=0$  alınmış,  $15^\circ$ ’lik vevli tabliye kullanıldığında  $K_a=1$  alınmıştır.

Çoklu regresyon analizinin yapılabilmesi, doğru sonuçlar vermesi ve ortaya çıkan regresyon denkleminin güvenilirliğinin sağlanması adına bazı ön şartlar bulunmaktadır (Büyüköztürk, 2005; Can, 2020). Bu ön şartlar çalışma için kontrol edilmiştir.

Regresyon analizi için ön şartlardan bir tanesi bağımsız değişkenler arasında çoklu bağlantılılık (multicollinearity) olmaması gerekliliğidir. Yani bağımsız değişkenlerin kendi aralarında yüksek derecede ilişki bulunmamalıdır. Bu ilişkinin belirlenebilmesi için değişkenler arasındaki korelasyona bakılabileceği gibi SPSS tarafından hesaplanan Varyans Büyütme Faktörü (VIF: Variance Inflation Factor) ve Tolerans Değerine (Tolerans =  $1/VIF$ ) bakılarak da karar verilebilir (Field, 2005). Burada ön şart kontrolü, Çizelge 4.7’de verilen ve İstatistiksel Analiz çıktılarından olan Korelasyonlar (Correlations) ile yapılmıştır. Bu çizelgede Pearson Korelasyon Analizi satırında, değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları yer almaktadır. Örneğin, bağımsız değişkenlerden  $Fr_d$  ile  $h_w/y_a$  arasındaki korelasyon katsayısının  $-0,602$  olduğu görülmektedir. Buradaki korelasyon katsayılarının mutlak değerinin  $0,80$ ’den büyük olması durumunda bağımsız değişkenler arasındaki bağılılık yüksek derecede olmakta ve çoklu bağlantılılık problemi ortaya çıkmaktadır. Böyle bir durumda, bağımsız değişkenler birbirlerini çok fazla etkilediklerinden bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri net bir şekilde görülememekte ve regresyon analizi sonucu da yanlış olmaktadır. Çizelge 4.7’de verilen  $Fr_d$ ,  $H_b/y_a$ ,  $D/y_a$ ,  $h_w/y_a$ ,  $a/y_a$ ,  $K_a$  bağımsız değişkenleri arasındaki korelasyon katsayıları incelenmiştir. Bağımsız değişkenlerden  $H_b/y_a$  ile  $D/y_a$  değişkenleri arasında  $1,000$  değeri ile mükemmel korelasyon olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, köprü açıklığı yüksekliğini ifade eden  $H_b$  ile silindirik orta ayak çapını ifade eden  $D$  değişkenlerinin deney boyunca sabit bir değere sahip olmasıdır. Dolayısıyla, bu değişkenler farklı değerlerde olmasına rağmen tekrar eden sabit parametreler olduğundan analizde bağımsız bir değişkeni ifade edememiş ve aralarında çok yüksek ilişki ortaya çıkmıştır. Ayrıca  $H_b/y_a$  ve  $D/y_a$  değişkenleri ile tabliye üstü su yüksekliğini yansıtan  $h_w/y_a$  değişkeni arasında korelasyon katsayılarının sırasıyla  $-0,885$  ve  $-0,886$  olduğu ve bu iki değişken ile  $h_w/y_a$  arasında da yüksek derecede bağılılık olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, söz konusu değişkenler kullanılarak regresyon analizinin yapılabilmesi için çoklu bağlantılılık şartının sağlanamadığı görülmektedir.

Çizelge 4.7. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren istatistiksel analiz tablosu

| Korelasyonlar                    |               |               |        |           |         |           |         |       |
|----------------------------------|---------------|---------------|--------|-----------|---------|-----------|---------|-------|
|                                  |               | $y_{spp}/y_a$ | $Fr_d$ | $H_b/y_a$ | $D/y_a$ | $h_w/y_a$ | $a/y_a$ | $K_a$ |
| Pearson<br>Korelasyon<br>Analizi | $y_{spp}/y_a$ | 1,000         | 0,824  | 0,693     | 0,693   | -0,678    | -0,451  | 0,444 |
|                                  | $Fr_d$        | 0,824         | 1,000  | 0,682     | 0,682   | -0,602    | -0,532  | 0,000 |
|                                  | $H_b/y_a$     | 0,693         | 0,682  | 1,000     | 1,000   | -0,885    | -0,777  | 0,000 |
|                                  | $D/y_a$       | 0,693         | 0,682  | 1,000     | 1,000   | -0,886    | -0,776  | 0,000 |
|                                  | $h_w/y_a$     | -0,678        | -0,602 | -0,885    | -0,886  | 1,000     | 0,394   | 0,000 |
|                                  | $a/y_a$       | -0,451        | -0,532 | -0,777    | -0,776  | 0,394     | 1,000   | 0,000 |
|                                  | $K_a$         | 0,444         | 0,000  | 0,000     | 0,000   | 0,000     | 0,000   | 1,000 |

Çoklu bağlantılılık sorununun olduğu durumlarda regresyon analizinin yapılabilmesi için aralarında yüksek korelasyon bulunan bağımsız değişkenlerden bazıları analizden çıkarılmalı veya bu değişkenler yeni bir değişkende birleştirilmelidir (Can, 2020). Abed (1991) de çalışmasında, basınçlı akım durumu için bağıntı geliştirirken yapmış olduğu regresyon analizinde oyulma çukuru derinliği için önemli etkiye sahip ancak diğer değişkenlerle aralarında yüksek ilişki bulunan değişkenleri regresyon analizinden çıkarmıştır. Dolayısıyla, yüksek korelasyonun olduğu  $H_b/y_a$  ve  $D/y_a$  değişkenleri regresyon analizinden çıkarılmıştır.

Yeni durumda, regresyon analizinin gerçekleştirilmesi için  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişken olmak üzere 4 adet bağımsız değişken ( $Fr_d$ ,  $h_w/y_a$ ,  $a/y_a$ ,  $K_a$ ) tanımlanmıştır. Böylece, Ho (2006)'nın regresyon analizinde bağımsız değişken sayısının 5 katı kadar sayıda örnekleme sahip olunması önerisi de sağlanmıştır. Zira 4 bağımsız değişkene karşın analizde en az 20 örneklem olması önerilirken çalışmada 24 örneklem kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.8'de regresyon analizinde kullanılan bağımsız değişkenlere ait veriler görülmektedir.

Regresyon analizinin yapılabilmesi için ön şartlardan bağımsız değişkenler arasındaki çoklu bağlantılılık (multicollinearity) durumu yeniden kontrol edilmiştir. Çizelge 4.8'de verilen korelasyon katsayıları incelendiğinde bağımsız değişkenler arasındaki tüm korelasyon katsayılarının 0,80'den küçük olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, söz konusu bağımsız değişkenler kullanılarak regresyon analizinin yapılabilmesi için çoklu bağlantılılık şartı böylece sağlanmıştır.



Çizelge 4.8. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren istatistiksel analiz tablosu

| Korelasyonlar                    |               |               |        |           |         |            |
|----------------------------------|---------------|---------------|--------|-----------|---------|------------|
|                                  |               | $y_{spp}/y_a$ | $Fr_d$ | $h_w/y_a$ | $a/y_a$ | $K_\alpha$ |
| Pearson<br>Korelasyon<br>Analizi | $y_{spp}/y_a$ | 1,000         | 0,824  | -0,678    | -0,451  | 0,444      |
|                                  | $Fr_d$        | 0,824         | 1,000  | -0,602    | -0,532  | 0,000      |
|                                  | $h_w/y_a$     | -0,678        | -0,602 | 1,000     | 0,394   | 0,000      |
|                                  | $a/y_a$       | -0,451        | -0,532 | 0,394     | 1,000   | 0,000      |
|                                  | $K_\alpha$    | 0,444         | 0,000  | 0,000     | 0,000   | 1,000      |

Regresyon analizi için bir diğer ön şart, bağımlı değişkenin eşit aralıklı veya eşit oranlı ölçme düzeyinde ve sürekli değişken olması gerekliliğidir. Burada yer alan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin tamamı eşit oranlı ölçme düzeyinde yani en üst ölçme düzeyinde yer almakta ve sürekli değişken özelliği göstermektedir. Bu sebeple bu şart da sağlanmış olmaktadır.

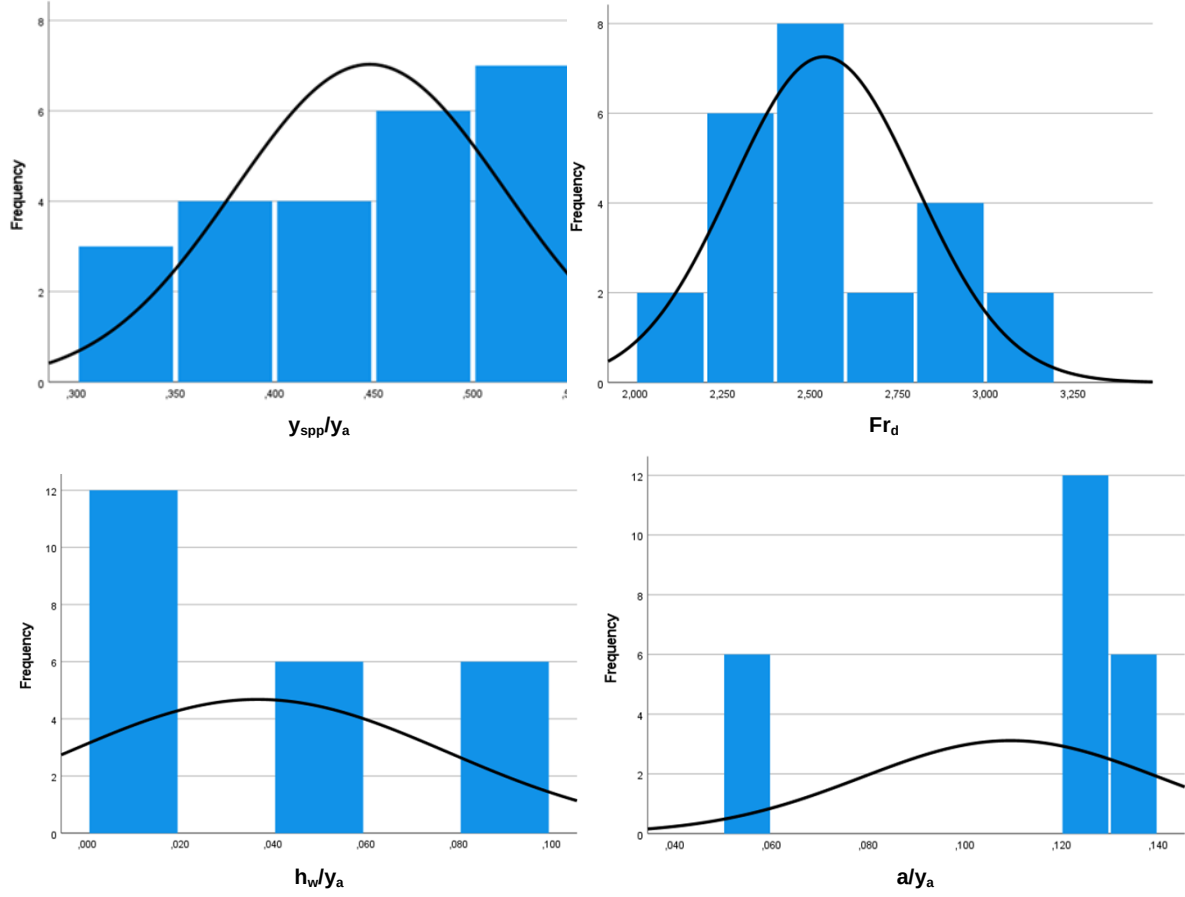
Regresyon analizinin yapılabilmesi için şartlardan biri de normallik şartının sağlanması yani değişkenlerin tamamının normal dağılıma sahip olmasıdır. Araştırma kapsamında yapılan istatistiksel parametrik test sonuçlarının güvenilirliği ve genellenebilirliği açısından verilerin normal dağılım göstermesi istenen bir durumdur. Ayrıca, seçilecek olan testler verilerin normal dağılıp dağılmamasına göre de farklılık göstermektedir. Örneğin, veriler normal dağılıyorsa t-testi, Anova, Korelasyon testleri gibi testler kullanılabilirken normal dağılmıyorsa Mann-Whitney ve Kruskal Wallis gibi istatistiksel testlerin kullanılması gerekmektedir. Veriler normal dağılmıyorsa regresyon analizi yapmak yanlış sonuçlar verecektir. Konu ile ilgili kaynaklar incelendiğinde verilerin normal dağılıp dağılmadığı ile ilgili farklı yöntemlerin uygulanabildiği görülmüştür. Örneğin, çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) değerlerinin incelenmesi, uç değerlerin kontrolü ve Kolmogorov Smirnov ve Sahpiro Wilk testleri gibi testler normal dağılım testleridir.

Normal dağılım kontrolünün yapılabilmesi için, değişkenlere ait betimleyici istatistiklerin istatistiksel analiz programı çıktıları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Normalliği test edilmek istenen verilerin ortalama, ortanca ve tepe değerlerine bakılarak normal dağılım hakkında bilgi edinilebilir. Ortalama, ortanca ve tepe değer birbirine ne kadar yakınsa dağılım o derece normal dağılım özelliği göstermektedir. Bu üç parametrenin çakışık olduğu ideal durumda ne çok sivri ne de çok basık tam simetrik bir çan eğrisi elde edilmektedir. Dolayısıyla, değişkenlere ait dağılım histogramı ve grafiği çizdirilip grafiğin simetrik çan

eğrisine olan benzerliğine bakılarak normal dağılım gösterip göstermediği görsel olarak değerlendirilebilir. Çizelge 4.9 incelendiğinde  $y_{spp}/y_a$  ve  $Fr_d$  değişkenlerinin ortalama, ortanca ve tepe değerlerinin birbirine yakın değerler almış olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.34'te verilen, değişkenlere ait dağılım histogramları ve grafikleri incelendiğinde de  $y_{spp}/y_a$  ve  $Fr_d$  değişkenlerinin yukarıda ifade edildiği gibi normal dağılıma benzer dağılım gösterdikleri gözlemlenmektedir. Çizelge 4.9,  $h_w/y_a$  ve  $a/y_a$  değişkenleri için incelendiğinde ise ortalama ve ortanca değerlerin birbirine yakın olduğu ancak tepe değerinin düşük kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, tepe değerinin ortalama ve ortanca değere göre düşük kalması Şekil 4.34'te de görüleceği üzere normal dağılım eğrilerinin nispeten basık görünmesine yol açmıştır. Histogram grafiklerinin incelenmesi her ne kadar normallik konusunda bilgi verse de çalışma kapsamında normal dağılım şartının kontrolü, simetrikliğin ve basıklığın sayısal ölçütü olan çarpıklık ve basıklık katsayılarının literatür ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu anlamda, çarpıklık ve basıklık katsayısının -1,50 ile +1,50 arasında kalması durumunda dağılımın normal olacağını değerlendiren araştırmacılar (Tabachnick ve Fidell, 2013) olduğu gibi çarpıklık ve basıklık katsayısının -2,00 ile +2,00 arasında olması durumunda da dağılımın normal kabul edildiğini değerlendiren araştırmacılar da (George ve Mallery, 2010) bulunmaktadır. Bu doğrultuda, Çizelge 4.9 incelendiğinde, değişkenlere ait çarpıklık ve basıklık değerlerinin referans değerler arasında kaldığı görülmüş ve değişkenlerin normal dağılıma sahip olduğuna karar verilmiştir. Ayrıca, burada  $K_a$  değişkeni nitel bir değişken olduğundan normallik testine dahil edilmemiştir.

Çizelge 4.9. İstatistiksel analizi yapılan değişkenlere ait betimleyici istatistikler

| Betimleyici İstatistikler                                              |          |               |                    |           |                    |
|------------------------------------------------------------------------|----------|---------------|--------------------|-----------|--------------------|
|                                                                        |          | $y_{spp}/y_a$ | $Fr_d$             | $h_w/y_a$ | $a/y_a$            |
| Örneklem Sayısı                                                        | Geçerli  | 24            | 24                 | 24        | 24                 |
|                                                                        | Geçersiz | 0             | 0                  | 0         | 0                  |
| Ortalama (Mean)                                                        |          | 0,4479        | 2,5388             | 0,0367    | 0,1095             |
| Ortanca (Median)                                                       |          | 0,4585        | 2,5440             | 0,0255    | 0,1235             |
| Tepedeğer (Mode)                                                       |          | 0,395         | 2,118 <sup>a</sup> | 0,000     | 0,058 <sup>a</sup> |
| Çarpıklık (Skewness)                                                   |          | -0,414        | 0,299              | 0,464     | -1,148             |
| Çarpıklık Standard Sapması                                             |          | 0,472         | 0,472              | 0,472     | 0,472              |
| Basıklık (Kurtosis)                                                    |          | -0,699        | -0,446             | -1,498    | -0,608             |
| Basıklık Standard Sapması                                              |          | 0,918         | 0,918              | 0,918     | 0,918              |
| a. Birden fazla tepedeğer mevcut olup en küçük değer gösterilmektedir. |          |               |                    |           |                    |



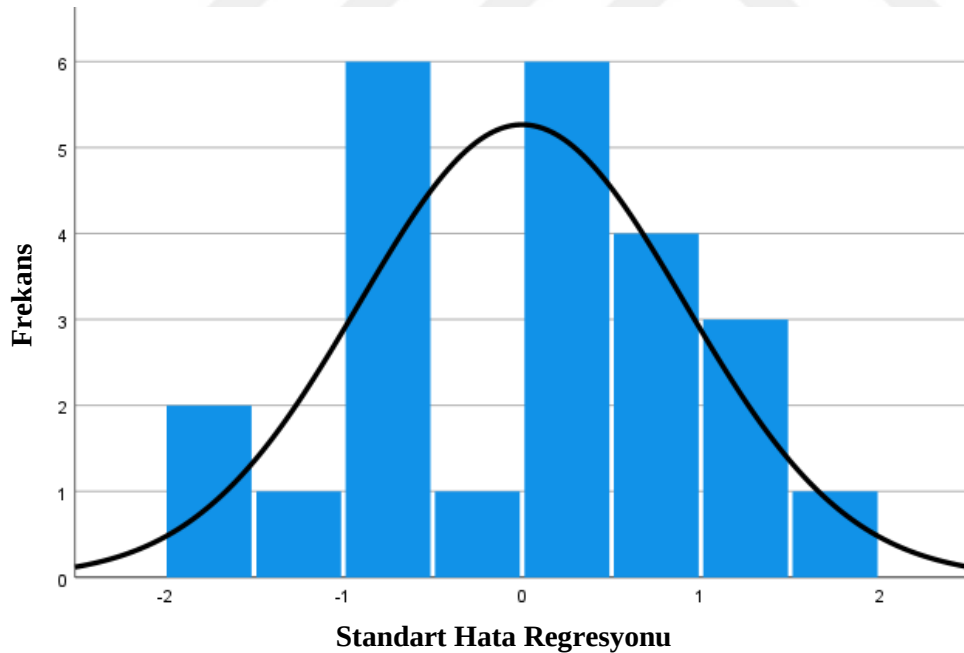
Şekil 4.34. Değişkenlere ait dağılım histogram grafikleri

Regresyon analizinin yapılabilmesi için diğer bir ön şart, gözlem değerleri içinde uç değerlerin olmamasıdır. Bu ön şartı sağlamak adına, istatistiksel analiz çıktılarından Çizelge 4.10'da verilen hata istatistiklerini (Residuals Statistics) gösteren tablo incelenmiştir. Burada standart hata (Std. Residuals) satırında yer alan minimum ve maksimum değerlerin -3,29 ile +3,29 değerleri arasında yer alması gerekmektedir (Can, 2020). Çizelge incelendiğinde minimum standart hata değerinin -1,848 olduğu, maksimum standart hata değerinin ise 1,706 değeri ile -3,29 ve +3,29 aralığında olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, diğer bir yöntem, Cook uzaklığı satırındaki maksimum değerin +1,00'den büyük olmamasıdır. Bu değerden daha büyük bir değer olduğunda burada bir uç değer olduğu anlaşılmakta ve bu durumda regresyon analizi yapıldığında analizin yanlış sonuç vermesine yol açmaktadır. Böyle bir durumda uç değerlerin tespit edilmesi ve örnekleminden kaldırılması gerekmektedir. Cook uzaklığının 0,379 değeri ile 1,00'den küçük olduğu, dolayısıyla gözlem değerleri içinde uç değer olmaması şartı sağlanmıştır.

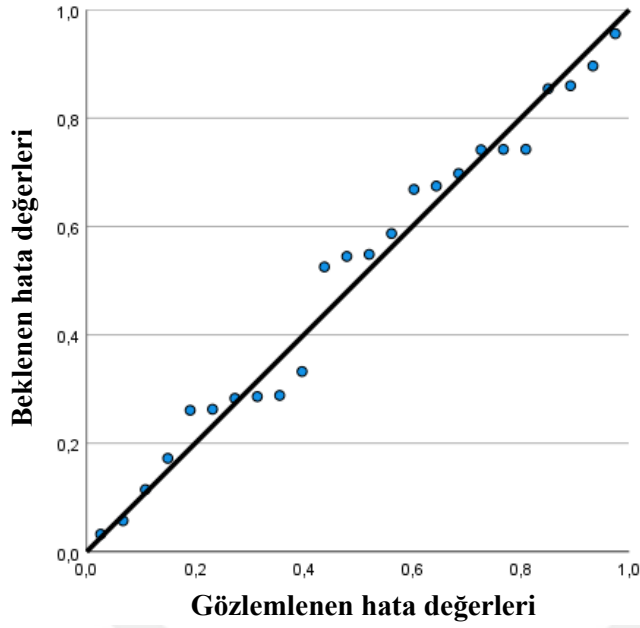
Çizelge 4.10. İstatistiksel analiz sonucu elde edilen hata istatistikleri tablosu

| Hata İstatistikleri |         |          |          |                |    |
|---------------------|---------|----------|----------|----------------|----|
|                     | Minimum | Maksimum | Ortalama | Standart Sapma | N  |
| Standart Hata       | -1,848  | 1,706    | 0,000    | 0,909          | 24 |
| Cook Uzaklığı       | 0,000   | 0,379    | 0,064    | 0,091          | 24 |

Regresyon analizi için diğer bir ön şart tahminlere ait hataların normal dağılım göstermesidir. Bunun tespiti için Şekil 4.35'te verilen regresyona ait standart hata verileri ile frekans değerleri grafiği incelenmiştir. Şekildeki sütunların bir bütün halinde normal dağılıma uyacak şekilde, çan eğrisi oluşturması beklenmektedir. Şekil 4.35'te verilen grafik incelendiğinde hataların normal dağıldığı görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 4.36'da verilen hatalara ait gözlenen ve beklenen değerler grafiği incelendiğinde değerlerin mümkün olduğunca mutlak eşitlik doğrusu etrafında dağılım gösterdiği görülmekte böylelikle tahminlere ait hatalarda uç değer olmadığı, normal dağılım gösterdiği yorumu yapılabilmektedir. Dolayısıyla, regresyon analizi için gerekli bu ön şart da sağlanmıştır.

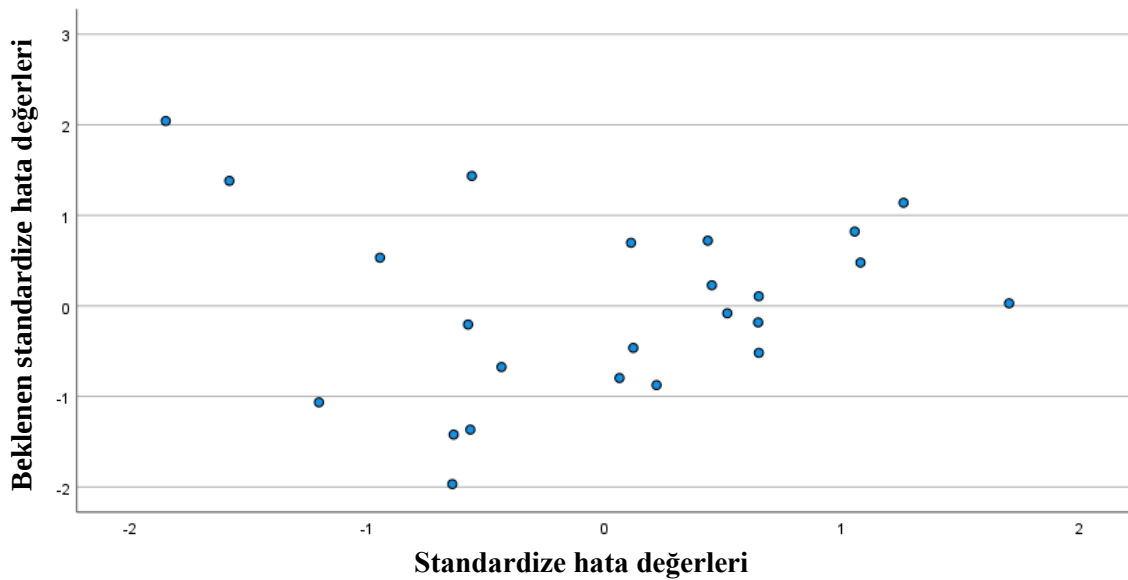


Şekil 4.35. Regresyon sonucu hatalarının dağılım grafiği



Şekil 4.36. Hatalara ait gözlenen ve beklenen değerler grafiği

Regresyon analizinin ön şartlarından birisi de eş varyanslılıktır (homoskedastiklik). Eş varyanslılık durumu sağlanmadığında heteroskedastisite yani hata varyansının değişkenlik göstermesi ortaya çıkmakta ve regresyon modelinin güvenilirliğini zayıflatmaktadır (Büyüköztürk, 2005). Bunun kontrolü için bağımlı değişkene ait Şekil 4.37’de verilen saçılım grafiği incelenmiştir. Noktaların grafik üzerine bir dikdörtgen oluşturacak şekilde mümkün olduğunca yayılmış olmaları gerekmektedir. Grafik incelendiğinde bu şartın sağlanmış olduğu görülmektedir.



Şekil 4.37. Tahmin edilen değerler ile hata değerlerinin saçılım grafiği

Regresyon analizi için son ön şart ise hataların birbirinden bağımsız olmasıdır. Durbin-Watson katsayısı bu hususun değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel bir değer olup 1 ile 3 arasında olması ve mümkün olduğu kadar orta değer olan 2'ye yakın olması istenmektedir (Can, 2020). Çizelge 4.11'de verilen istatistiksel model özeti tablosu incelendiğinde Durbin-Watson katsayısının 1,813 olduğu görülmektedir. Bu değer 2'ye oldukça yakın olup hataların birbirlerinden oldukça bağımsız olduklarını göstermektedir. Dolayısıyla bu son ön şart da sağlanmıştır.

Çizelge 4.11. İstatistiksel analizden elde edilen Durbin-Watson katsayısı

| Model | Durbin-Watson Katsayısı |
|-------|-------------------------|
| 1     | 1,813                   |

Yukarıda bahsedilen tüm ön şartlar sağlandığı için çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarından ilk olarak tanımlayıcı istatistikler diğer adıyla betimleyici istatistik sonuçları Çizelge 4.12'de sunulmuştur. Burada, değişkenlere ait ortalama değerler ve standart sapmaları ile kaç gözlem sonucunun analize dahil edildiği bilgisi yer almaktadır.

Çizelge 4.12. Regresyon Analizi Sonuçları- Betimleyici İstatistikler

| Betimleyici İstatistikler |         |                |    |
|---------------------------|---------|----------------|----|
|                           | Mean    | Std. Deviation | N  |
| $y_{spp}/y_a$             | 0,44796 | 0,068115       | 24 |
| $Fr_d$                    | 2,53883 | 0,263760       | 24 |
| $h_w/y_a$                 | 0,03675 | 0,040907       | 24 |
| $a/y_a$                   | 0,10950 | 0,030734       | 24 |
| $K_a$                     | 0,50    | 0,511          | 24 |

Çoklu doğrusal regresyon analizi sonuçlarından bir diğeri bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin yorumlanmasıdır. Çizelge 4.13'te verilen korelasyon tablosu incelendiğinde,  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişkeni ile  $Fr_d$  bağımsız değişkeni arasındaki korelasyonun pozitif bir değer aldığı görülmektedir. Dolayısıyla  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişkeni ile  $Fr_d$  bağımsız değişkeni arasında pozitif bir ilişki var denilebilir. Yani bunun anlamı,  $Fr_d$  arttıkça  $y_{spp}/y_a$  artmakta,  $Fr_d$  azaldıkça  $y_{spp}/y_a$  da azalmaktadır. Daha açık ifadeyle,

densimetrik Froude sayısında meydana gelen artış oyulma çukuru derinliğini artırmaktadır. Ayrıca aralarındaki korelasyon katsayı olan 0,824 değeri ile bu iki değişken arasında güçlü bir ilişki vardır denilebilir. Aynı şekilde  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişkeni ile  $h_w/y_a$  bağımsız değişkeni arasındaki korelasyon katsayısı olan -0,678 değeri incelendiğinde;  $y_{spp}/y_a$  ile  $h_w/y_a$  arasında negatif bir ilişki olduğu söylenebilir. Yani tabliye üstü su yüksekliğinin değeri arttıkça oyulma çukuru derinliğinin azaldığı; bu değer azaldığında ise oyulma çukuru derinliğinin arttığı anlamını taşımaktadır. Korelasyon katsayısı mutlak değeri 0,30 ila 0,70 değerleri arasında yer aldığından oyulma çukuru derinliği ile tabliye üstü su yüksekliği değeri arasında orta düzeyde korelasyon olduğu söylenebilir. Aynı şekilde,  $a/y_a$  değişkeni ile  $y_{spp}/y_a$  değişkeni arasında da negatif bir ilişki olduğu ve bu ilişkinin orta düzeyde olduğu söylenebilir. Son olarak,  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişkeni ile  $K_\alpha$  bağımsız değişkeni arasındaki korelasyon katsayısı olan 0,444 değeri incelendiğinde;  $y_{spp}/y_a$  ile  $K_\alpha$  arasında pozitif bir ilişki olduğu, yani tabliyede verevlik olduğunda oyulma çukuru derinliğinin ( $y_{spp}$ ) arttığı; verevlik olmayıp akıma dik olduğunda ise oyulma çukuru derinliğinin azaldığı anlaşılmaktadır. Oyulma çukuru derinliği ile tabliye verevliği arasında orta düzeyde korelasyon olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.13. Regresyon Analizi Sonuçları- Değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları

| Korelasyonlar                    |               |               |        |           |         |            |
|----------------------------------|---------------|---------------|--------|-----------|---------|------------|
|                                  |               | $y_{spp}/y_a$ | $Fr_d$ | $h_w/y_a$ | $a/y_a$ | $K_\alpha$ |
| Pearson<br>Korelasyon<br>Analizi | $y_{spp}/y_a$ | 1,000         | 0,824  | -0,678    | -0,451  | 0,444      |
|                                  | $Fr_d$        | 0,824         | 1,000  | -0,602    | -0,532  | 0,000      |
|                                  | $h_w/y_a$     | -0,678        | -0,602 | 1,000     | 0,394   | 0,000      |
|                                  | $a/y_a$       | -0,451        | -0,532 | 0,394     | 1,000   | 0,000      |
|                                  | $K_\alpha$    | 0,444         | 0,000  | 0,000     | 0,000   | 1,000      |

Regresyon analizi sonucunun özeti niteliğindeki tablo Çizelge 4.14’te verilmiştir. Burada, “R” korelasyon katsayısını ifade etmektedir. Buradaki korelasyon katsayısı bağımsız değişkenlerin tamamı ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Korelasyon katsayısının 1,00 olduğu durumun mükemmel korelasyon anlamına geldiği göz önünde bulundurulduğunda;  $R=0,964$  korelasyon katsayısının 1,00’e oldukça yakın olduğu ve bağımlı değişken ile bağımsız değişkenlerin tümü arasında çok güçlü bir korelasyon olduğu çıkarımı yapılabilir. “ $R^2$ ” değeri ile R korelasyon katsayısının karesi hesaplanmıştır. Buna determinasyon katsayısı veya açıklanan varyans da denilmektedir. Ancak genelde çoklu regresyon hesaplamalarında bu değer dikkate alınmayıp bunun yerine “Adjusted Square” ile ifade edilen “Ayarlanmış  $R^2$ ” değeri dikkate alınmaktadır (Can,

2020). Buradaki Ayarlanmış  $R^2$  değerinin 0,914 olduğu görülmektedir. Bunun anlamı, bağımsız değişkenler hep birlikte bağımlı değişkendeki değişimin %91,4'ünü açıklayabilmektedir. Diğer bir ifadeyle bağımlı değişkendeki değişimin %91,4'ü analize dahil ettiğimiz bağımsız değişkenlerin bütünü tarafından açıklanabilmektedir. Geriye kalan %8,6'lık kısım ise analize dahil edilememiş, ön görülememiş başka bilinmeyen değişkenlerden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.14. Regresyon Analizi Özet Tablosu

| Regresyon modeli özeti <sup>b</sup>                                    |                    |       |                  |                        |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------|------------------|------------------------|
| Model                                                                  | R                  | $R^2$ | Ayarlanmış $R^2$ | Standart Tahmin Hatası |
| 1                                                                      | 0,964 <sup>a</sup> | 0,929 | 0,914            | 0,020024               |
| a. Bağımsız değişkenler: (Sabit), $Fr_d$ , $h_w/y_a$ , $a/y_a$ , $K_a$ |                    |       |                  |                        |
| b. Bağımlı değişken: $y_{spp}/y_a$                                     |                    |       |                  |                        |

ANOVA testine ait sonuçlar tablosu Çizelge 4.15'te verilmiştir. Bu tabloda anlamlılık düzeyi ile ifade edilen “Sig.” değeri 0,05'ten küçük olduğu için model içerisine dahil ettiğimiz bağımsız değişkenlerden en az birisi bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkiye sahip, yani anlamlı bir etkide bulunmaktadır anlamına gelmektedir (Can, 2020). Hangi bağımsız değişkenin veya değişkenlerin anlamlı olduğunu bulmak için ise Çizelge 4.16'da verilen tablo incelenmiştir.

Çizelge 4.15. Regresyon Analizi Sonuçları – ANOVA testi tablosu

| ANOVA <sup>a</sup>                                                          |           |                    |    |                  |        |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|----|------------------|--------|----------------------|
| Model                                                                       |           | Kareler<br>Toplamı | df | Ortalama<br>Kare | F      | Anlamlılık<br>Düzeyi |
| 1                                                                           | Regresyon | 0,099              | 4  | 0,025            | 61,784 | <0,001 <sup>b</sup>  |
|                                                                             | Artık     | 0,008              | 19 | 0,000            |        |                      |
|                                                                             | Toplam    | 0,107              | 23 |                  |        |                      |
| a. Bağımlı değişken: $y_{spp}/y_a$                                          |           |                    |    |                  |        |                      |
| a. Bağımsız değişkenler: (Sabit), $Fr_d$ , $h_w/y_a$ , $a/y_a$ , $K_\alpha$ |           |                    |    |                  |        |                      |



Çoklu doğrusal regresyon analizinin nihai çıktısı,  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$  türünden doğrusal regresyon denkleminin elde edilmesidir. Bu denklemde  $y$ , bağımlı değişkeni;  $x$ , bağımsız değişkenleri;  $b$  ise sabit katsayıları ifade etmektedir. Çizelge 4.16’da verilen katsayılar kullanılarak söz konusu regresyon denklemi elde edilmiştir. Yukarıda  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  ile ifade edilen denkleme ait katsayılar, “standardize edilmemiş katsayılar” sütununda bulunan değerlerden oluşmaktadır. Her bir bağımsız değişkenin denklemde anlamlı bir etkide bulunup bulunmadığı Sig. (significance) değerlerinden okunmaktadır. Sig. değerleri 0,05’ten küçük olduğu durumda denkleme anlamlı bir etkide bulunmaktadır. Sig. değerleri incelendiğinde özellikle  $Fr_d$ ,  $h_w/y_a$ ,  $K_\alpha$  değişkenlerinin denkleme katkısı daha anlamlıdır denilebilir.

Çizelge 4.16. Regresyon Analizi Sonuçları– Denklem Katsayıları

| Katsayılar <sup>a</sup>            |            |                                  |           |        |       |                              |       |
|------------------------------------|------------|----------------------------------|-----------|--------|-------|------------------------------|-------|
| Model                              |            | Standardize Edilmemiş Katsayılar |           | t      | Sig.  | Eşdoğrusallık İstatistikleri |       |
|                                    |            | B                                | Std. Hata |        |       | Tolerans                     | VIF   |
| 1                                  | (Sabit)    | 0,001                            | 0,066     | 0,017  | 0,987 |                              |       |
|                                    | $Fr_d$     | 0,170                            | 0,022     | 7,858  | 0,001 | 0,535                        | 1,869 |
|                                    | $h_w/y_a$  | -0,476                           | 0,129     | -3,704 | 0,002 | 0,630                        | 1,587 |
|                                    | $a/y_a$    | 0,027                            | 0,161     | 0,166  | 0,870 | 0,709                        | 1,411 |
|                                    | $K_\alpha$ | 0,059                            | 0,008     | 7,248  | 0,001 | 1,000                        | 1,000 |
| a. Bağımlı değişken: $y_{spp}/y_a$ |            |                                  |           |        |       |                              |       |

Çoklu lineer regresyon yöntemi ile elde edilen, kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşulları altında maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bağıntı Eş. 4.3 ile verilmiştir.

$$\frac{y_{spp}}{y_a} = 0,001 + 0,170Fr_d - 0,476\frac{h_w}{y_a} + 0,027\frac{a}{y_a} + 0,059K_\alpha \quad (4.3)$$

Burada,  $K_\alpha$  değeri tabliye verevliğinin oyulmaya etkisini gösteren değişken olup verevlik açısının  $\alpha=0^\circ$  olduğu tabliyenin akıma dik olduğu durumda  $K_\alpha=0$  değerini alırken tabliye verevlik açısının  $\alpha=15^\circ$  olduğu durumda ise bağıntıdaki  $K_\alpha=1$  değerini almaktadır.

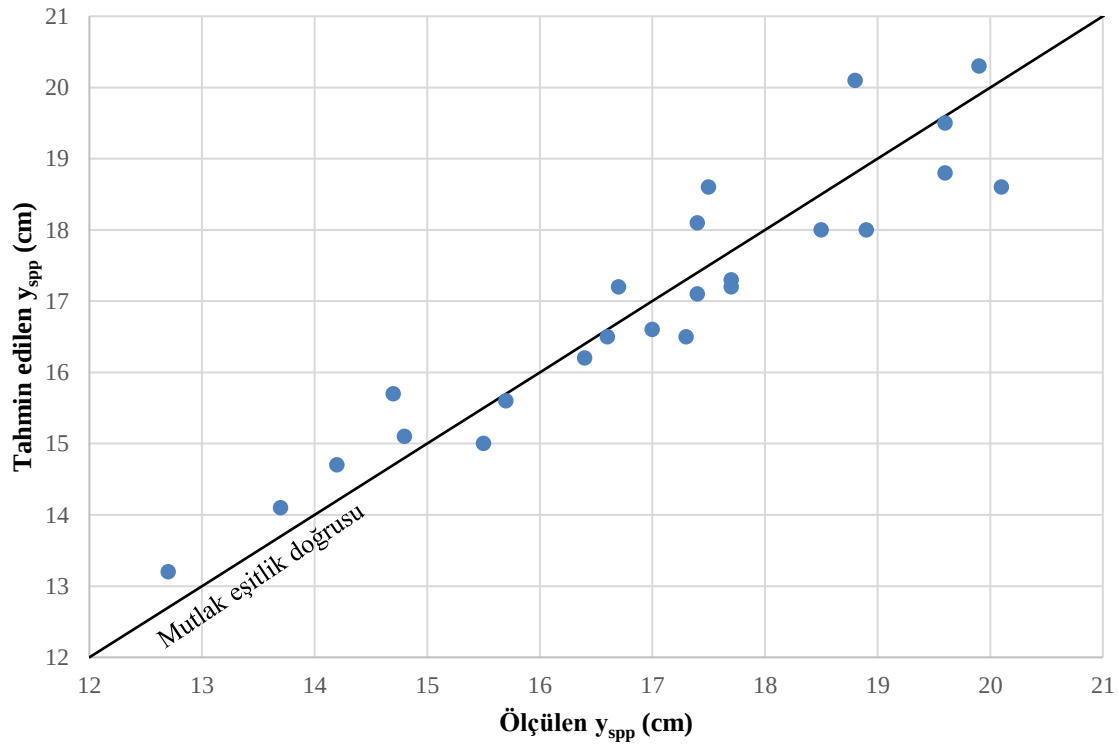
Regresyon analizine dahil edilen verilerden, akıma dik yerleştirilmiş tabliyenin bulunduğu ve Çizelge 4.6'da verilen Barakat (2022)'in çalışmasına ait parametreler ile çalışma kapsamında kullanılan 15°'lik verevlik açısına sahip tabliyenin kullanıldığı durumdaki Çizelge 4.5'te verilen parametreler bir arada Çizelge 4.17'de görülmektedir. Ayrıca, Çizelge 4.17'de bu deney verileri Eş. 4.3'te verilen ampirik bağıntıda yerlerine yazılmış, elde edilen tahmini maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile ölçülen maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.17. Regresyon analizinde kullanılan parametreler ile ölçülen ve ampirik bağıntı ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

| Deney No | Q (lt/sn) | $y_a$ (cm) | $Fr_d$ (-) | $h_w/y_a$ (-) | $a/y_a$ (-) | $K_\alpha$ (-)             | Ölçülen $y_{spp}$ (cm) | Eş. 4.3'e göre $y_{spp}$ (cm) | Fark (%) |
|----------|-----------|------------|------------|---------------|-------------|----------------------------|------------------------|-------------------------------|----------|
| 1        | 100       | 34,5       | 2,548      | 0,000         | 0,058       | 0<br>( $\alpha=0^\circ$ )  | 15,5                   | 15,0                          | -3,2     |
| 2        |           | 37,5       | 2,346      | 0,000         | 0,133       |                            | 14,8                   | 15,1                          | 2,0      |
| 3        |           | 39,5       | 2,223      | 0,051         | 0,127       |                            | 13,7                   | 14,1                          | 2,9      |
| 4        |           | 41,5       | 2,118      | 0,096         | 0,120       |                            | 12,7                   | 13,2                          | 3,9      |
| 5        | 110       | 34,5       | 2,803      | 0,000         | 0,058       |                            | 17,3                   | 16,5                          | -4,6     |
| 6        |           | 37,5       | 2,575      | 0,000         | 0,133       |                            | 17,0                   | 16,6                          | -2,4     |
| 7        |           | 39,5       | 2,443      | 0,051         | 0,127       |                            | 15,7                   | 15,6                          | -0,6     |
| 8        |           | 41,5       | 2,329      | 0,096         | 0,120       |                            | 14,2                   | 14,7                          | 3,5      |
| 9        | 120       | 34,5       | 3,058      | 0,000         | 0,058       |                            | 18,9                   | 18,0                          | -4,8     |
| 10       |           | 37,5       | 2,812      | 0,000         | 0,133       |                            | 17,4                   | 18,1                          | 4,0      |
| 11       |           | 39,5       | 2,671      | 0,051         | 0,127       |                            | 16,7                   | 17,2                          | 3,0      |
| 12       |           | 41,5       | 2,540      | 0,096         | 0,120       |                            | 16,4                   | 16,2                          | -1,2     |
| 13       | 100       | 34,5       | 2,548      | 0,000         | 0,058       | 1<br>( $\alpha=15^\circ$ ) | 17,4                   | 17,1                          | -1,7     |
| 14       |           | 37,5       | 2,346      | 0,000         | 0,133       |                            | 17,7                   | 17,3                          | -2,3     |
| 15       |           | 39,5       | 2,223      | 0,051         | 0,127       |                            | 16,6                   | 16,5                          | -0,6     |
| 16       |           | 41,5       | 2,118      | 0,096         | 0,120       |                            | 14,7                   | 15,7                          | 6,8      |
| 17       | 110       | 34,5       | 2,803      | 0,000         | 0,058       |                            | 17,5                   | 18,6                          | 6,3      |
| 18       |           | 37,5       | 2,575      | 0,000         | 0,133       |                            | 19,6                   | 18,8                          | -4,1     |
| 19       |           | 39,5       | 2,443      | 0,051         | 0,127       |                            | 18,5                   | 18,0                          | -2,7     |
| 20       |           | 41,5       | 2,329      | 0,096         | 0,120       |                            | 17,7                   | 17,2                          | -2,8     |
| 21       | 120       | 34,5       | 3,058      | 0,000         | 0,058       |                            | 18,8                   | 20,1                          | 6,9      |
| 22       |           | 37,5       | 2,812      | 0,000         | 0,133       |                            | 19,9                   | 20,3                          | 2,0      |
| 23       |           | 39,5       | 2,671      | 0,051         | 0,127       |                            | 19,6                   | 19,5                          | -0,5     |
| 24       |           | 41,5       | 2,540      | 0,096         | 0,120       |                            | 20,1                   | 18,6                          | -7,5     |

Çizelge 4.17 incelendiğinde tahmin edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri ile ölçülen maksimum oyulma çukuru derinlikleri arasında -%7,5 ile %6,9 arasında değişen bir farkın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla ampirik bağıntı en az %92,5'e yakın bir oranda ölçülen oyulma çukuru derinliklerini doğru tahmin etmektedir. Bu oran beklenildiği

üzere regresyon analizi sonucunda elde edilen  $R=0,964$  (%96,4) model benzeşim değerine yakın çıkmıştır. Regresyon analizindeki örneklem sayısının ve çalışmada kullanılan oyulmaya etki eden değişken sayısının artırılması ile ampirik bağıntıyla elde edilen tahminlerin ölçülen verilere uyumu artırılabilir ve öngörülemeyen belirsizliklerin oranı azaltılabilir. Çizelge 4.17’de verilen deneyler sonucunda ölçülen maksimum oyulma çukuru derinliği ile ampirik bağıntı kullanılarak elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri Şekil 4.38’de verilmektedir. Şekil incelendiğinde tahmin edilen oyulma derinliklerinin mutlak eşitlik doğrusuna yakın ve paralel bir dağılım sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.38. Deneyler sonucunda ölçülen ve ampirik bağıntılar ile tahmin edilen oyulma çukuru derinliklerinin karşılaştırılması

#### 4.4. Duyarlılık Analizleri

Duyarlılık analizi, bir bağımsız değişkenin farklı değerlerinin, belirli bir varsayımlar dizisi altında belirli bir bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini belirlemede kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Field, 2005). Bir başka deyişle duyarlılık analizinde amaç, bağımlı değişkeni etkileyen her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişkene olan göreceli katkısını belirlemektir.

Deney verileri kullanılarak kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin edebilen bağıntıyı geliştirmek üzere çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Burada, regresyon analizi istatistiksel tahmin modellerini geliştirmek için kullanılmıştır. İstatistiksel tahmin modellerinin bir sonucu veya hedef değeri tahmin edebilmesi için bu çalışmada olduğu üzere deney verileri gibi bir giriş değer kümesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan regresyon analizi sonucunda basınçlı akım durumunda maksimum oyulma derinliği tahmini yapabilen Eş. 4.3'te verilen ampirik bağıntı elde edilmiştir. Elde edilen bu ampirik bağıntı, istatistiksel tahmin modelini oluşturmaktadır. Duyarlılık analizinde ise istatistiksel simülasyondan yararlanılmaktadır. İstatistiksel simülasyon, giriş değerlerindeki yani deney verilerindeki belirsizliğin tahmin modellerine yani ampirik bağıntılara dahil edilmesine ve bu belirsizlik varlığında modelin çeşitli sonuçlarının olasılığının değerlendirmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, duyarlılık analizi ampirik bağıntıdaki yaklaşım akım derinliğine oranlanan densimetrik Froude sayısı, tabliye üstü su yüksekliği, etkili kiriş yüksekliği ile tabliye verevliği gibi parametrelere değişken değerler atayarak tahmin edilen oyulma çukuru derinliği sonuçlarına ne denli etki ettiğini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Diğer bir ifadeyle girdi parametrelerinin bağıntıdaki önem dereceleri duyarlılık analizi ile test edilmiştir.

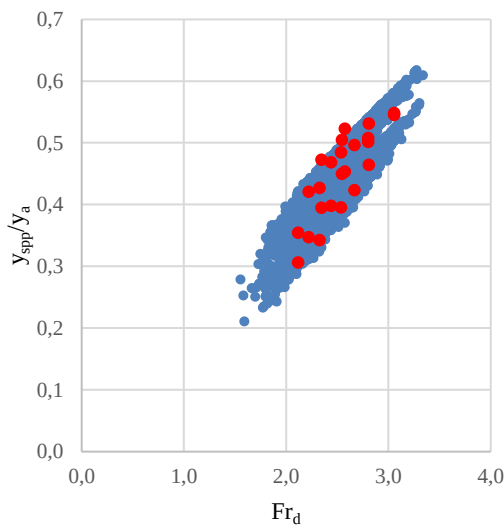
Çalışma kapsamında istatistiksel simulasyon yöntemi olarak Monte Carlo yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen ampirik bağıntıya dahil olan değişken parametrelere ait değerler olasılık dağılımlarıyla modellenmektedir. Bu yöntemde, her simulasyon vakasında bazı değişkenler bilinen sabit değerinde tutulup diğer değişkenlerin olası hedefleri aralarındaki korelasyon dikkate alınarak hesap edilmektedir. Bu işlem çok defa tekrar edilerek hedef değerlere ait dağılım kümesi elde edilmektedir (McCormick, Salcedo, Peck, & Wheeler, 2017). Bu sayede, sonuca etki eden parametrelerin ne oranlarda etki ettikleri ortaya çıkmış olmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan duyarlılık analizinde, SPSS İstatistiksel Analiz Programı sayesinde istatistiksel simulasyon kullanılarak 10000 farklı durumda elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliği simüle edilmiştir.

Çizelge 4.18'de değişkenlerin ölçülen ve simüle edilen değerlerine ait betimleyici istatistikler bulunmaktadır. Elde edilen ampirik bağıntının güvenilirlik aralığı çalışma kapsamında kullanılan değişken değerlerine bağlı olduğundan, değişkenlerin simulasyonda kullanılan değerleri ile çalışma kapsamında ölçülen değerlerinin birbirlerine yakın dağılımlara sahip olması amaçlanmıştır. Bunun için ölçülen ve simüle edilen değişken

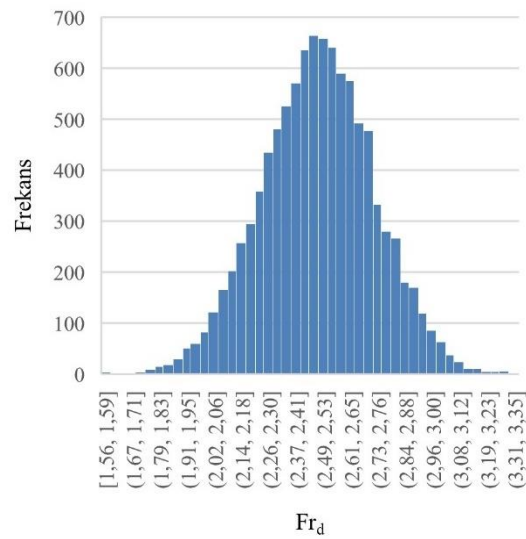
değerlerin birbirlerine yakın ortalama, ortanca ve tepe değerlere sahip olması sağlanmıştır.  $Fr_d$ ,  $h_w/y_a$ ,  $a/y_a$  ve  $K_\alpha$  bağımsız değişkenlerine ait simülasyon değerlerinin  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişkenine göre dağılım grafikleri ile çokluk dağılım histogramları sırasıyla Şekil 4.39, 4.40, 4.41 ve Şekil 4.42’de yer almaktadır. Dağılım grafiklerinde yer alan kırmızı noktalar değişkenlere ait çalışma kapsamında deneylerden elde edilmiş değerleri gösterirken mavi noktalar değişkenlere ait simülasyon değerlerini göstermektedir. Görüldüğü üzere simülasyon değerleri, ölçülen değerlerle benzer dağılıma sahip olacak şekilde atanmıştır.

Çizelge 4.18. Değişkenlerin ölçülen ve simülasyon değerlerine ait betimleyici istatistikleri

|                            | Değer Sayısı (N) | Ortalama (Mean) | Ortanca (Median) | Tepe Değer (Mode) | En Küçük (Minimum) | En Büyük (Maximum) |
|----------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| $y_{spp}/y_a$ (Ölçülen)    | 24               | 0,448           | 0,459            | 0,395             | 0,306              | 0,548              |
| $y_{spp}/y_a$ (Simülasyon) | 10000            | 0,433           | 0,434            | 0,446             | 0,211              | 0,618              |
| $Fr_d$ (Ölçülen)           | 24               | 2,539           | 2,544            | 2,118             | 2,118              | 3,058              |
| $Fr_d$ (Simülasyon)        | 10000            | 2,490           | 2,493            | 2,514             | 1,556              | 3,340              |
| $h_w/y_a$ (Ölçülen)        | 24               | 0,037           | 0,026            | 0,000             | 0,000              | 0,096              |
| $h_w/y_a$ (Simülasyon)     | 10000            | 0,050           | 0,046            | 0,032             | 0,000              | 0,185              |
| $a/y_a$ (Ölçülen)          | 24               | 0,110           | 0,124            | 0,058             | 0,058              | 0,133              |
| $a/y_a$ (Simülasyon)       | 10000            | 0,113           | 0,113            | 0,111             | 0,007              | 0,230              |
| $K_\alpha$ (Ölçülen)       | 24               | 0,500           | 0,500            | 0                 | 0                  | 1                  |
| $K_\alpha$ (Simülasyon)    | 10000            | 0,500           | 0,500            | 0                 | 0                  | 1                  |

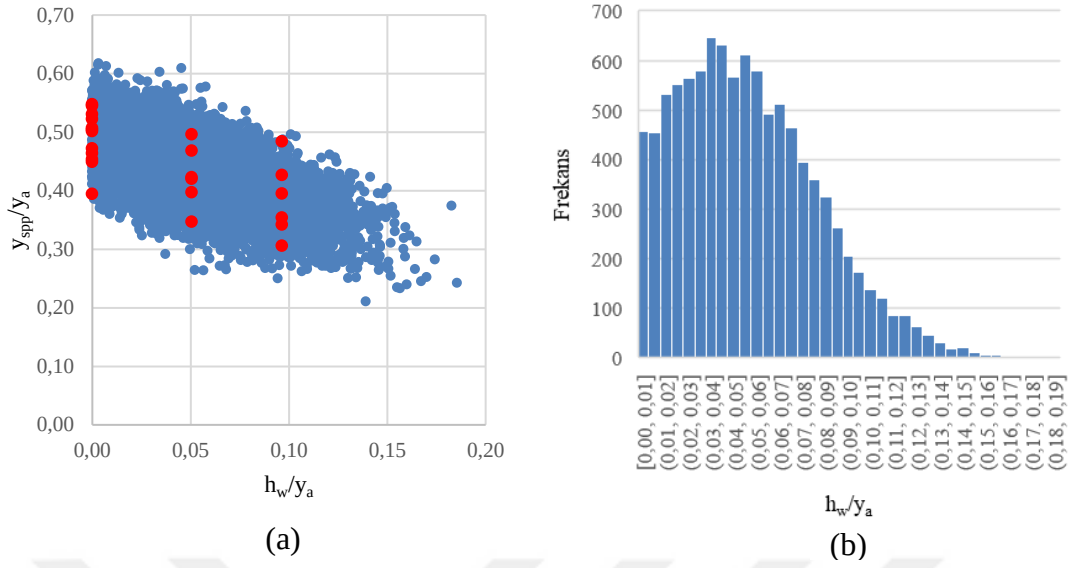


(a)

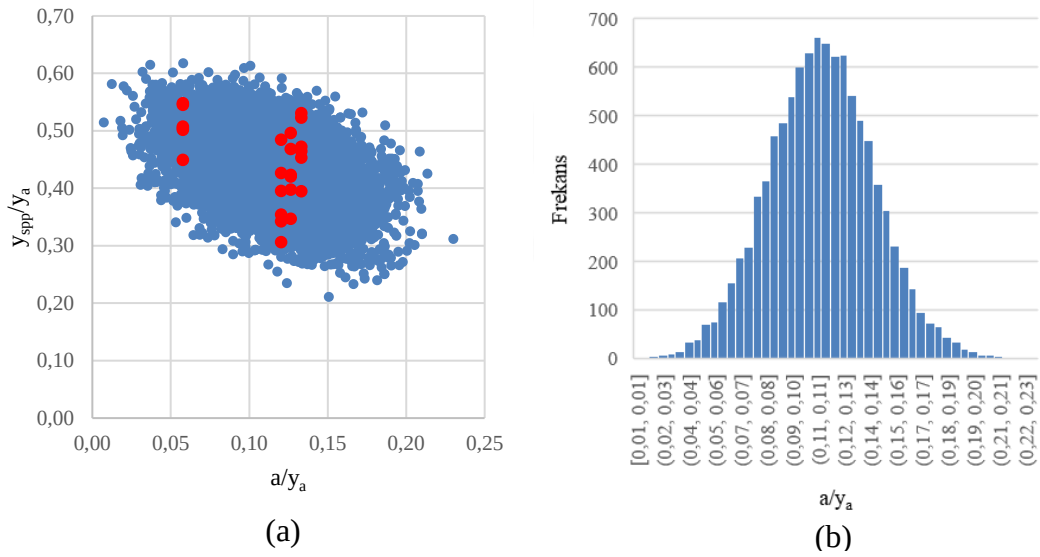


(b)

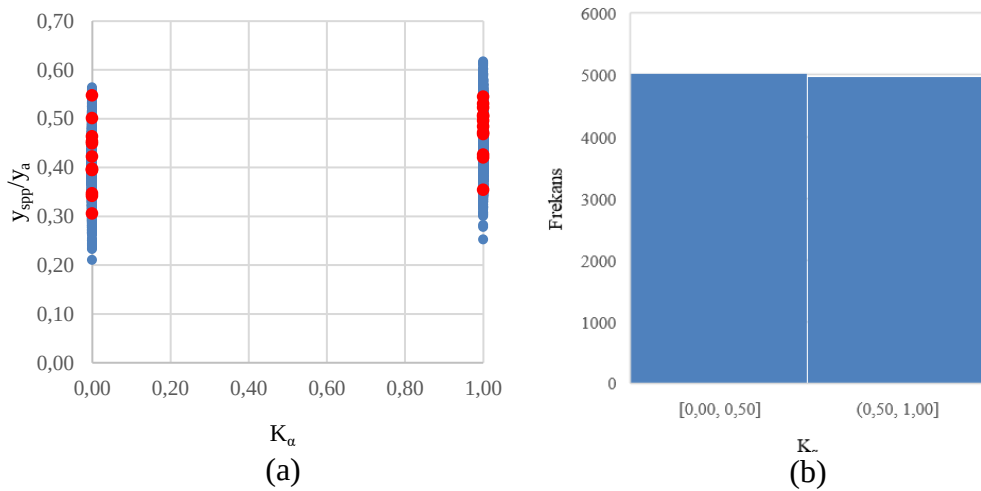
Şekil 4.39. Simülasyonda kullanılan  $Fr_d$  değişkenine ait (a)  $y_{spp}/y_a$  bağımlı değişkenine göre dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı



Şekil 4.40.  $h_w/y_a$  değişkenine ait (a) dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı

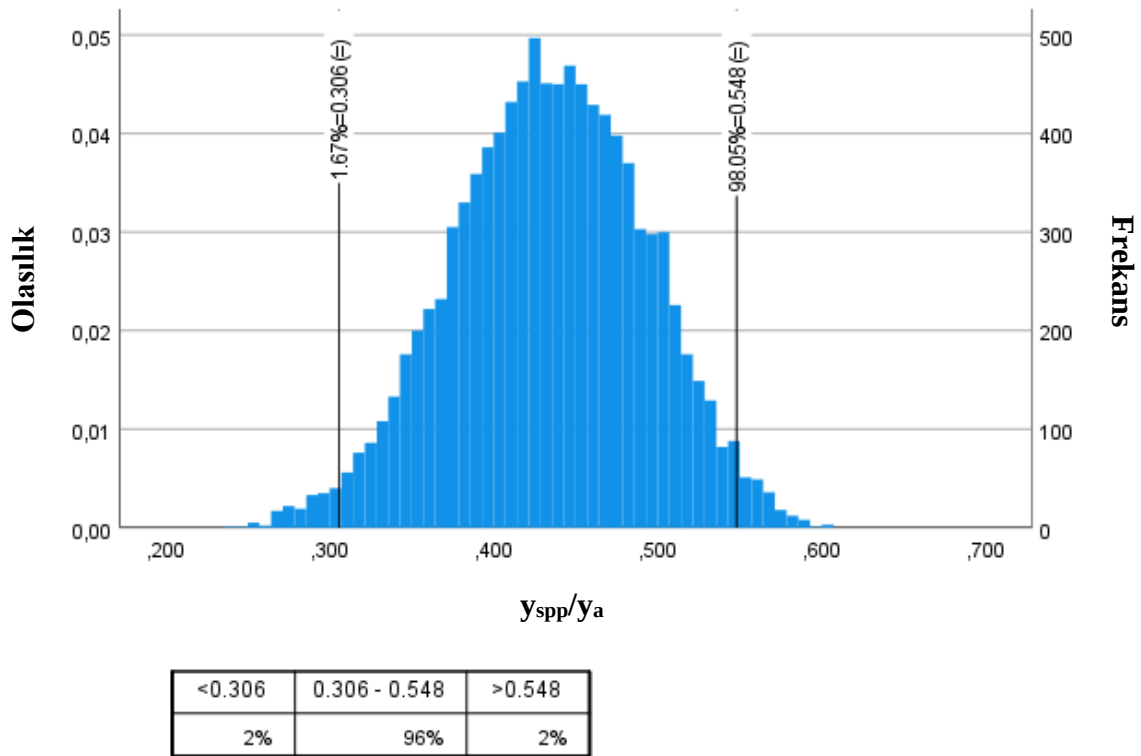


Şekil 4.41.  $a/y_a$  değişkenine ait (a) dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı



Şekil 4.42.  $K_\alpha$  değişkenine ait (a) dağılım grafiği, (b) çokluk dağılım histogramı

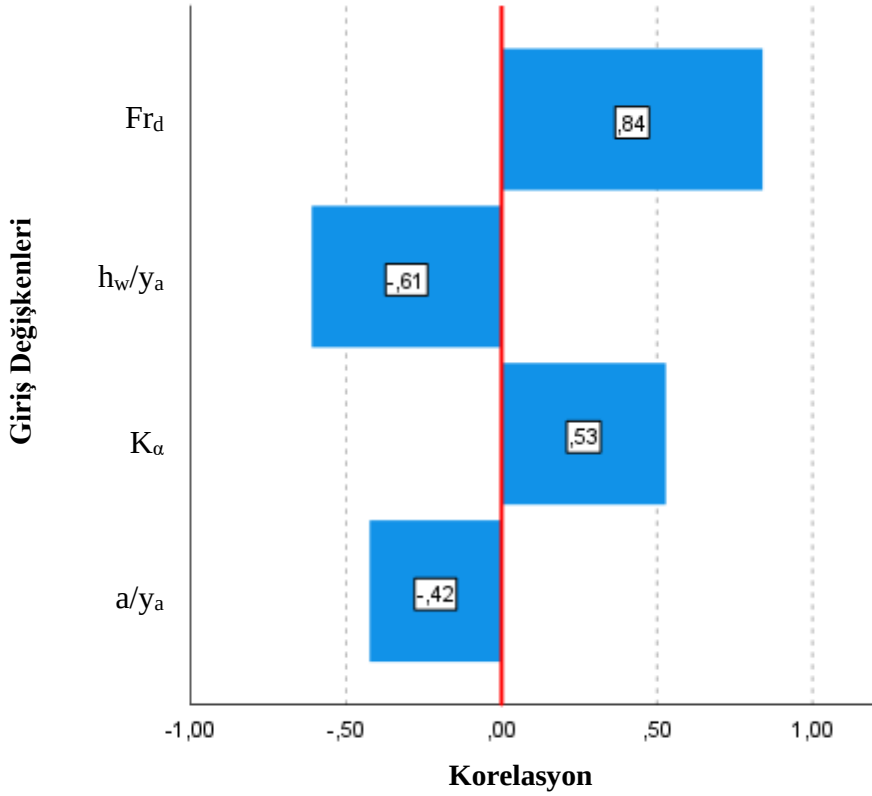
Bağımsız değişkenlere ait 10000 farklı simülasyon değeri Eş. 4.3'te verilen ampirik bağıntıda yerlerine konularak Şekil 4.43'te verilen olasılık yoğunluk histogramı elde edilmiştir. Şekil 4.43'te dağılım histogramı üzerinde 0,306 ve 0,548 değerlerine karşılık gelen iki adet referans çizgisi bulunmaktadır. Bu referans çizgileri Çizelge 4.18'de verilen  $y_{spp}/y_a$ 'nın ölçülen en küçük ve en büyük değerlerine aittir. Şekil 4.43'te görüldüğü gibi simülasyon sonucu elde edilen  $y_{spp}/y_a$  değerlerinin %96'sı, çalışma kapsamında kullanılan en küçük ve en büyük  $y_{spp}/y_a$  değerleri aralığında bulunmaktadır.



Şekil 4.43. Monte Carlo Simülasyonu sonucu elde edilen  $y_{spp}/y_a$  değerleri

Ortaya çıkan duyarlılık analizi sonucu Şekil 4.44'te verilen tornado grafiği ile ifade edilmiştir. Şekilde, Eş. 4.3'te verilen ampirik bağıntılara ait değişken parametrelerin bağıntıdaki maksimum oyulma derinliğine olan göreceli etkileri görülmektedir. Buna göre, bağıntılardaki  $Fr_d$  değişkeninin etkisi %84,  $h_w/y_a$  değişkeninin etkisi -%61,  $K_a$  değişkeninin etkisi %53 ve  $a/y_a$  değişkeninin etkisi ise -%42 bulunmuştur.  $Fr_d$  ve  $K_a$  değişkenleri  $y_{spp}/y_a$  değişkeni ile pozitif ilişkiye sahipken  $h_w/y_a$  ve  $a/y_a$  değişkenleri negatif ilişkiye sahiptir. Bir başka deyişle,  $Fr_d$  ve  $K_a$  değişkenlerindeki artış  $y_{spp}/y_a$  değişkeninde artışa sebep olurken  $h_w/y_a$  ve  $a/y_a$  değişkenlerindeki artış  $y_{spp}/y_a$  değişkeninde azalmaya neden olmaktadır. Analiz sonucunda  $Fr_d$  değişkeninin bağıntıdaki en duyarlı parametre olduğu

yani bağıntıdaki etkisinin yüksek olduğu, bu değişkeni  $h_w/y_a$ , onu da  $K_a$  değişkeninin takip ettiği görülmektedir. Buna karşılık,  $a/y_a$  değişkeni bağıntıdaki en az duyarlı parametre olmuştur.



Şekil 4.44. Duyarlılık analizi sonucu elde edilen, değişkenlerin bağıntı etkisini gösteren tornado grafiği

Debi veya akım hızının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisini yansıtan  $Fr_d$  değişkeninin bağıntıdaki en duyarlı değişken olması Gaudio, Tafarojnoruz ve De Bartolo (2013)'ün yaptığı çalışma sonuçlarıyla da uyumludur. Gaudio ve diğerleri (2013) literatürde yerel oyulma derinliğinin tahmininde kullanılan altı ampirik bağıntı için duyarlılık analizleri yapmıştır. Ampirik bağıntıların çoğunda debi veya yaklaşım akım hızının en duyarlı parametre olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca beklenildiği üzere, duyarlılığı yüksek bir değişkendeki ölçüm, okuma ve hesap hatalarının maksimum oyulma çukuru derinliği tahminindeki hata oranını daha fazla etkileyeceği; bağıntıdaki duyarlılığı düşük parametrelerde meydana gelen hataların ise maksimum oyulma çukuru derinliği tahmininde daha düşük hatalara yol açacağı belirtilmiştir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Çalışma Özeti ve Sonuçlar

Akarsular üzerinde yer alan köprü yıkılmaları ve hasarları çoğunlukla hidrolik etkenlerden kaynaklanmakta ve bu etkenlerin başında da köprü ayaklarındaki oyulmalar gelmektedir (Yanmaz, 2022). Özellikle ani ve şiddetli taşkınlarda su seviyesi köprü tabliyesine kadar yükselmekte ve üzerinden aşabilmektedir. Alt açıklığının tam dolu aktığı bu durumda köprü, basınçlı akıma maruz kalmaktadır. Basınçlı akım durumunda köprü ayaklarındaki oyulma mekanizmasının incelenmesi ve oyulma derinliğinin doğru tahmin edilerek köprü ayağı temel tasarımının buna göre yapılması büyük önem arz etmektedir. Ancak literatürde serbest akım şartlarında köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulma derinliğinin hesaplanması için çok sayıda ampirik bağıntı bulunurken basınçlı akım durumunda ayak etrafında meydana gelen oyulma mekanizmasının incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Çalışma kapsamında 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesi ve daire kesitli silindirik orta ayak kullanılarak oluşturulmuş köprü modelinin, temiz su durumunda ve kısmi basınçlı ve savak tipi akım koşullarında, köprü açıklığında meydana gelen maksimum oyulma çukuru derinliği ve şekli incelenmiş; debi, yaklaşım akım derinliği ve tabliye verevliğinin kısmi basınçlı ve savak tipi akım durumlarında toplam oyulma mekanizmasına etkileri araştırılmıştır. Bu etkilerin incelenebilmesi amacıyla deneylerde 3 farklı debi ve 4 farklı yaklaşım akım derinliği kullanılmıştır.

Deneylerde; köprü tabliyesinin varlığından kaynaklanan düşey daralma oyulması, silindirik orta ayağın varlığından kaynaklanan yerel oyulma ve tabliye ile orta ayağın beraber bulunduğu toplam oyulma basınçlı akım durumları için incelenmiştir. Tabliye ile orta ayağın beraber bulunduğu basınçlı akım durumunda meydana gelen toplam oyulma çukuru derinliğinin, küçük akım değerlerinde (100 lt/sn ve 110 lt/sn) düşey daralma oyulması ile yerel oyulma derinliklerinin ayrı ayrı toplanmasıyla elde edilen oyulma derinliğinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu akım değerlerinde oyulma derinlikleri arasındaki farkın %43'e kadar çıkabildiği görülmüştür. Ayrıca verevli tabliyenin kullanıldığı deneylerde debinin arttığı ve yaklaşım akım derinliğinin azaldığı durumlarda memba talveginde daha

fazla oyulma olduğu böylece, membada taban alçalmaları meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında maksimum oyulma çukuru derinliğine debideki değışimlerin etkisi incelendiğinde beklenildiği şekilde artan debi veya yaklaşım akım hızları ile maksimum oyulma çukuru derinliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Kısmi basınçlı akım ve savak tipi akım durumlarında maksimum oyulma derinliğinin serbest akıma kıyasla artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Kısmi basınçlı akım ile savak tipi akım kıyaslandığında ise kısmi basınçlı akım koşullarında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinin sadece verevli tabliyenin ve sadece orta ayağın kullanıldığı deneylerde savak tipi akıma göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Yani yaklaşım akım derinliği azaldıkça maksimum oyulma çukuru derinliği artmıştır. Ancak verevli tabliye ile orta ayağın beraber bulunduğu deneylerde artan debi ile beraber yaklaşım akım derinliğindeki artışla savak yükünün de artması, maksimum oyulma çukuru derinliğinde artışa neden olmuştur. Dolayısıyla çalışma kapsamında meydana gelen en büyük oyulma çukuru derinliği, debinin ve yaklaşım akım derinliğinin en büyük olduğu durumda elde edilmiştir. Diğer bir deyişle çalışmadaki en büyük oyulma çukuru derinliği 20,1 cm ile 120 lt/sn’lik debi ve 41,5 cm’lik yaklaşım akım derinliğinde ölçölmüştür. Bu durum orta ayağa sahip köprülerde taşkın sırasında suyun tabliye üstünden aşması halinde köprü ayaklarında ciddi oyulmaların olabileceğini ifade etmektedir. Aynı durum orta ayağı olmayan köprüler için söz konusu değildir (Karakurt, 2016). Çünkü bu durumda savak yükünün artmasıyla oyulma derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç basınçlı akım durumunda yüzey çevrintilerinin ve türbölansın oyulmayı ne kadar arttırdığının da bir göstergesidir. Bu gözlem Abed (1991) tarafından da yapılmıştır.

Verevliğin oyulmaya etkisini incelemek üzere aynı deney koşullarında akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesine sahip deney verileri (Barakat, 2022) ile mevcut çalışmadaki 15° verevlik açısına sahip köprü tabliyesinin kullanıldığı deney verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda verevliğin maksimum oyulma çukuru derinliğinde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Sadece tabliyenin olduğu deneylerde verevliğin etkisiyle maksimum oyulma çukuru derinliğinde %60’ı bulan artışlar meydana gelmiş, tabliye ile beraber orta ayağın da bulunduğu deneylerde verevliğin etkisiyle maksimum oyulma çukuru derinliğinde ise %24,6’ya varan artışların yaşandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sadece verevli köprü tabliyesinin kullanıldığı deneylerde meydana gelen oyulmalar yatayda

tabliye verevliğı ile paralel bir dağılım göstermiştir. Bu durum, yerel oyulmaların düşey daralma oyulmasına göre daha etkin olduğu verev tabliye ile orta ayağın beraber kullanıldığı deney sonuçlarındaki oyulma çukuru şekline bariz bir şekilde yansımamış, oyulmalar orta ayak kenarlarında yoğunlaşmıştır.

Boyut analizinde belirlenen oyulma mekanizmasını etkileyen parametreler ile çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait veriler kullanılarak çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Hem kısmi basınçlı hem de savak tipi akım durumunda maksimum oyulma derinliğini tahmin eden bir ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Ampirik bağıntının geliştirilmesinde Barakat (2022)'ın deneysel çalışmasına ait veriler de kullanılarak ampirik bağıntılara hem akıma dik tabliye durumunda hem de 15° verevli tabliyenin varlığında maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin etme özelliği kazandırılmıştır.

Geliştirilen ampirik bağıntılar duyarlılık analizi ile incelenerek bağıntılardaki maksimum oyulma çukuru derinliğini en fazla etkileyen parametre diğer bir deyişle bağıntının en duyarlı parametresi belirlenmeye çalışılmıştır. Monte Carlo simülasyonu yöntemi ile yapılan duyarlılık analizinde bağıntılardaki parametrelerden debi yani yaklaşım akım hızı ile ilişkili olan densimetrik Froude sayısı en duyarlı parametre olurken sırasıyla tabliye üstü su yüksekliğinin etkisi, verevliğin etkisi ve etkili giriş yüksekliğinin etkisi onu takip etmiştir.

## 5.2. Yapılacak Çalışmalar için Öneriler

Basınçlı akım durumunda maksimum oyulma çukuru derinliğini tahmin eden ampirik bağıntının geliştirilmesinde bahsedildiği üzere mevcut çalışmada bağımsız değişkenlerin hep birlikte bağımlı değişkendeki değişimin %91,4'ünü açıklayabildiği geriye kalan %8,6'lık kısmı açıklayamadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla burada söz konusu açıklanabilirliğin artmasını, belirsizlik oranının düşmesini sağlayacak öneriler verilmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak yapılması önerilen araştırmalar aşağıdaki gibidir:

- 1- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde laboratuvar koşullarına bağlı olarak  $Fr_a$  ve  $V_a/V_c$  değerleri küçük bir aralıkta değişmektedir. Öncelikle bu parametrelerin geniş aralıktaki değerleri ve özellikle  $V_a/V_c$ 'nin mümkün olduğunca bire yakın değerleri için deneyler yapılmalıdır.

- 2- Farklı verevlik açılarına sahip köprü tabliyeleri kullanılarak verevlik açısındaki değişimin maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi incelenebilir.
- 3- Köprü tabliyesinin verevlik açısının yanı sıra tabliye ölçülerinde değişiklikler yapılarak oyulmaya etkisi değerlendirilebilir.
- 4- Orta ayağın çapı, geometrik şekli ve boyutları değiştirilerek orta ayak özelliklerinin değişimi ile basınçlı durumda maksimum oyulma çukuru derinliği arasındaki ilişki araştırılabilir.
- 5- Taban malzemesine ait özellikler değiştirilerek taban malzemesinin oyulmaya etkisi incelenebilir.



## 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), 404-424.
- 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.
- Barakat, Z. O. (2022). *Akarsu Köprülerinde Basınçlı Akım Koşulunda Toplam Oyulmanın İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 56-87.
- Bui, M. D., Kaveh, K., Penz, P. ve Rutschmann, P. (2015). Contraction scour estimation using data-driven. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 3(2), 143-156.
- 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 steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 105-109.
- Ettema, R., Melville, B. W. ve Constantinescu, G. (2011). Evaluation of bridge scour research: Pier scour processes and predictions. *Transportation Research Board of the National Academies*. Washington, 31-45.
- 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. *United States Department of Transportation*. Colorado, 42-61.
- Field, A. (2005). *Discovering Statistics using SPSS*. (2. Baskı). London: Sage Publications, 56-72.
- Gaudio, R., Tafarojnoruz, A. ve De Bartolo, S. (2013). Sensitivity analysis of bridge pier scour depth predictive formulae. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 939-951.
- 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.
- Hamill, L. (2004). *Bridge Hydraulics*. (1. Baskı). London: Spon Press, 102-108.
- Ho, R. (2006). *Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS*. (1. Baskı) London: Chapman and Francis Group, 67-76.
- İnternet: KGM. (Mart, 2023,). Köprü Envanter Bilgileri: URL: <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/KoprueTunelBilgileri/koprueenvanterbilgileri.pdf> Son Erişim Tarihi:15.03.2024.
- Karakurt, O. (2016). *Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altındaki oyulmanın incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 34-55.
- Koçyiğit, M. B. ve Akay, H. (2018, 21-22 Haziran). *Verevli Akarsu Köprülerinde Taban Oyulmalarının İncelenmesi*. 3. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresinde sunuldu, Gaziantep, 2160-2167.
- Koçyiğit, M. B. ve Karakurt, O. (2019). Pressure flow and weir scour beneath a bridge deck. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(6), 534-543.
- Kumcu, Ş. Y. (2016). Steady and unsteady pressure scour under bridges at clear-water conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(4), 334-342.
- Lagasse, P. F. ve Richardson, E. V. (2001). ASCE Compendium of stream stability and bridge, scour papers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(7), 531-533.
- Lyn, D. A. (2008). Pressure-Flow Scour: A Reexamination of the HEC-18 Equation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 1015-1020.
- McCormick, K., Salcedo, J., Peck, J. ve Wheeler, A. (2017). *SPSS Statistics for Data Analysis and Visualization*. (1. Baskı). Indiana, US: Wiley, 44-49.

- Melville, B. W. ve Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. (5. Baskı). Colorado: Water Resources Publications, 346-387.
- Melville, B. W. ve Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.
- 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 evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 82(3), 811-820.
- Raudkivi, A. J. ve Ettema, R. (1983). Clear-Water Scour at Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.
- Robeson, M. D. (2000). *Pressure flow effects on scour at bridges*. Yüksek Lisans Tezi, Colorado State University, Colorado, 63-78.
- Seçkin, G. (2020). *Köprü Hidroliği*. (1. Baskı). Ankara: Akademisyen Yayınevi, 188-201.
- Shen, J., Shan, H., Xie, Z., Bojanowski, C., Lottes, S. ve Kerenyi, K. (2012, 14-16 Ağustos). *Submerged-Flow Bridge Scour Under Clear-Water Conditions*. ICSE6 Konferansında sunuldu, Paris, 755-760.
- Tabachnick, B. G. ve Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics*. (6. Baskı). Boston: Pearson Education, 211-220.
- 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. *UKNH*. London, 123-129.
- Verma, D. V., Setia, B. ve Bhatia, U. (2004). Constriction scour in pressurized flow condition. *Scientific Information Database*, 17(3), 237-246.
- Wang, H. (1970). Water wave pressure on horizontal plate. *Journal of Hydraulic Division*, 96(10), 1997-2017.
- Yanmaz, M. A. (2022). *Köprü Hidroliği*. (2. Baskı) Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 150-198.

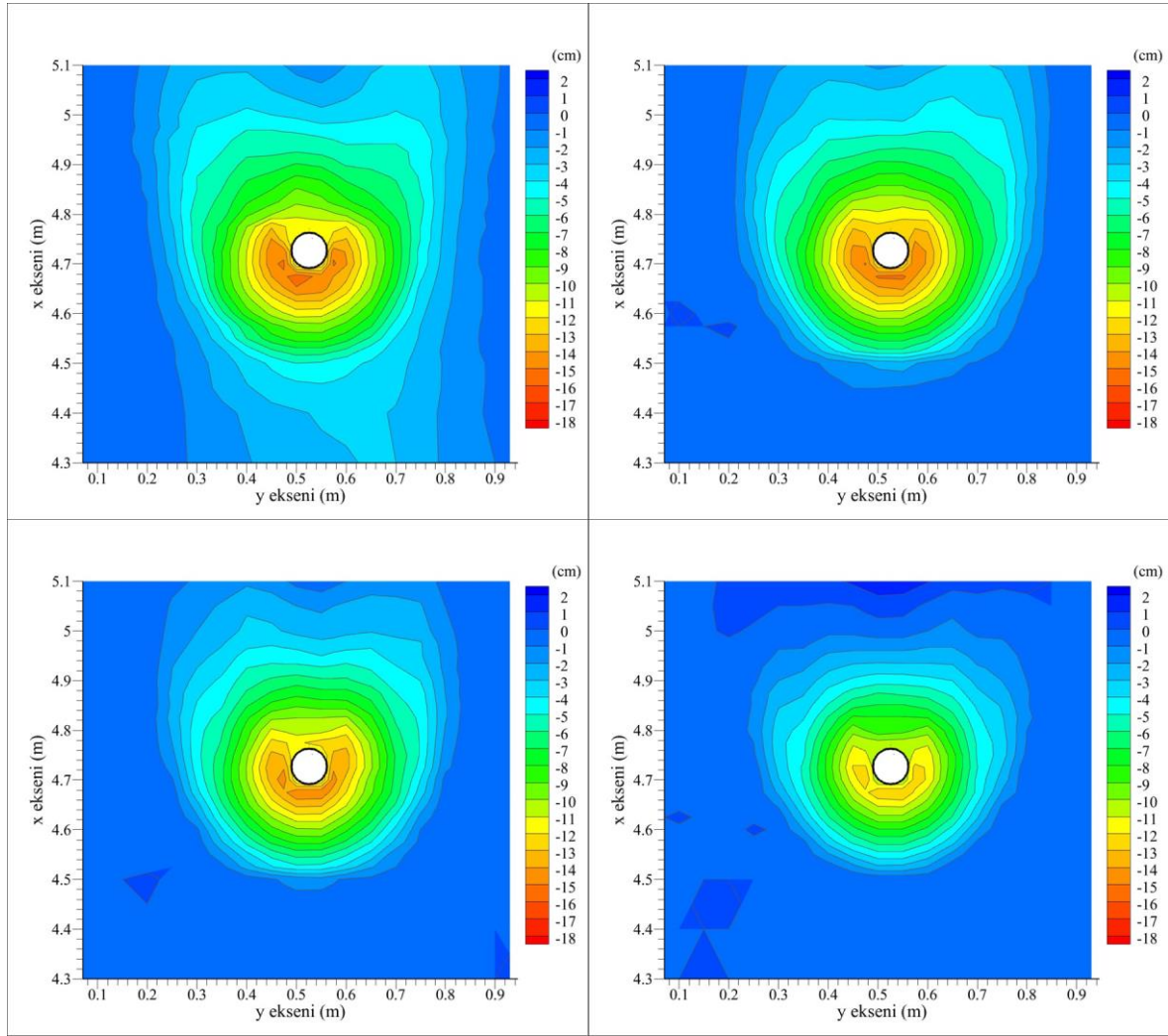






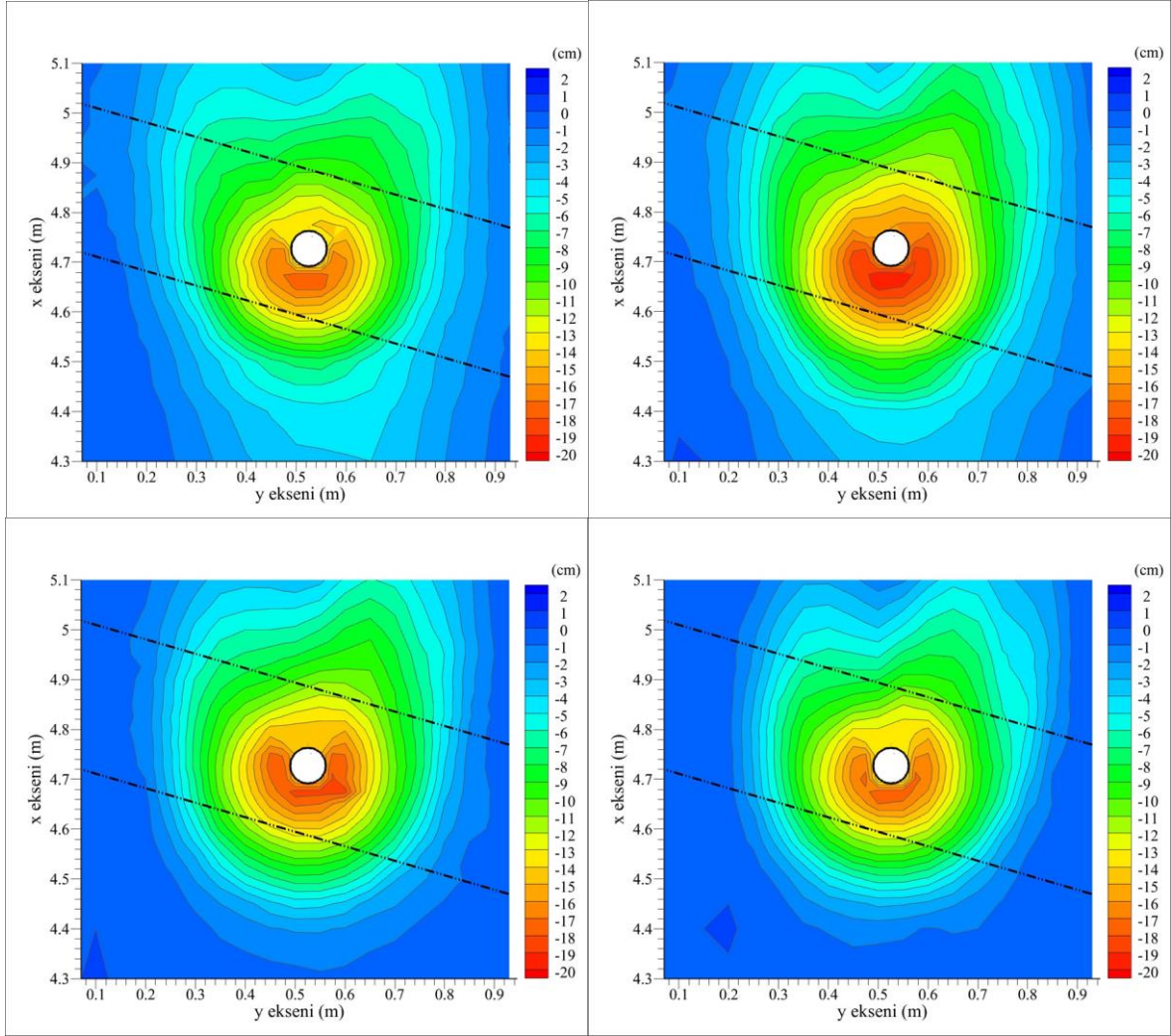
**EKLER**

EK-1. 110 lt/sn'de  $y_{spo}$  için elde edilen oyulma çukuru derinlik haritaları



Şekil Ek-1. 110 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen yerel oyulma çukuru derinlik haritası: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm

EK-2. 110 lt/sn'de  $y_{spp}$  için elde edilen oyulma çukuru derinlik haritaları



Şekil Ek-2. 110 lt/sn debi ve farklı yaklaşım akım derinliklerinde meydana gelen toplam oyulma çukuru derinlik haritaları: (a)  $y_a=34,5$  cm, (b)  $y_a=37,5$  cm, (c)  $y_a=39,5$  cm, (d)  $y_a=41,5$  cm



*Gazili olmak ayrıcalıktır*