

KÖPRÜ AYAK TİPİ VE VEREVLİĞİNİN SU YÜZÜ PROFİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

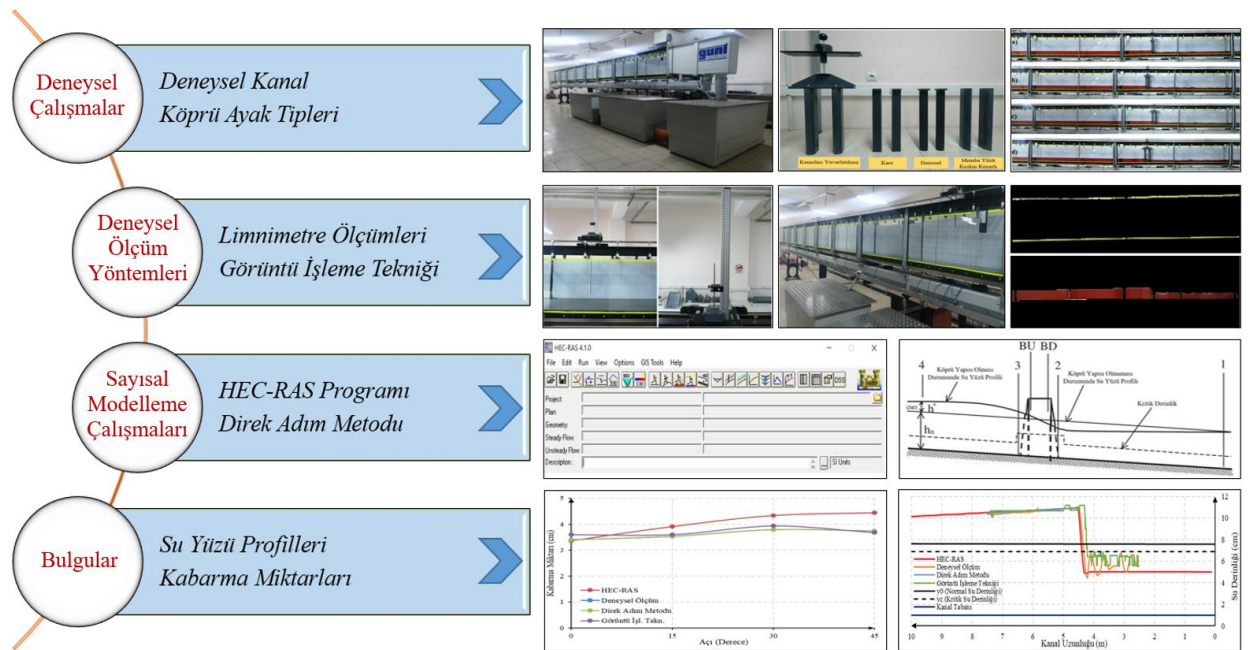
¹Kutsi Savaş ERDURAN , ²Uğur ÜNAL , ³Ahmet Şakir DOKUZ , ⁴Mustafa Çağrı NAS 

^{1,2}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE
³Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE
⁴Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, TÜRKİYE
¹kserduran@ohu.edu.tr, ²ugurunal@ohu.edu.tr, ³adokuz@ohu.edu.tr, ⁴mcgr072@gmail.com

Önemli Katkılar (Highlights)




- Farklı enkesitlerdeki köprü ayağı tipleri ve verevlik açıları için deneysel ölçümler ve sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar uyumludur.
- Köprü ayaklarından dolayı köprü membanda oluşan kabarma miktarları genel olarak verevlik açısının artışı ile artmıştır.
- Görüntü işleme tekniği gerek köprü membanda tedrici değişken akım bölgesinde ve gerekse mansapta oluşan ani değişken akım bölgesinde ölçüm sonuçlarına uyumlu ve yakın değerler vermiştir.

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)





KÖPRÜ AYAK TİPİ VE VEREVLİĞİNİN SU YÜZÜ PROFİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

¹Kutsi Savaş ERDURAN , ²Uğur ÜNAL , ³Ahmet Şakir DOKUZ , ⁴Mustafa Çağrı NAS 

^{1,2}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE
³Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE
⁴Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, TÜRKİYE

¹kserduran@ohu.edu.tr, ²ugurunal@ohu.edu.tr, ³adokuz@ohu.edu.tr, ⁴mcgr072@gmail.com

(Geliş/Received: 05.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2022)

ÖZ: Köprülerin yapısal güvenliği açısından oldukça önemli olan köprü ayaklarının tasarımının, hidrolik açıdan da analizi gerekmektedir. Köprü ayakları, akım alanını daraltarak köprü membaında kabarmalara ve beraberinde taşkınlarla neden olabilmektedir. Dolayısıyla farklı akım koşullarında köprü ayaklarının etkisi altında oluşan su yüzü profillerinin ve kabarma miktarlarının deneysel ve sayısal çalışmalar ışığı altında en doğru şekilde belirlenmesi köprü hidrolik tasarımının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu çalışmada, farklı enkesitlerdeki köprü ayaklarının ve verevlik açısının köprü etrafında oluşan su yüzü profili ve köprü membaındaki kabarma miktarı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve boyutları 10x0.309x0.45 m olan deneysel kanal üzerinde yürütülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda 4 farklı köprü ayağı tipi (kare, dairesel, kenarları yuvarlatılmış ve memba yüzü keskin kenarlı) ve 4 farklı verevlik açısı (0°, 15°, 30° ve 45°) kullanılarak kanalda akım ölçümleri yapılmış ve ayrıca her bir deneye ait video kayıtları alınarak elde edilen görüntüler görüntü işleme tekniği yardımıyla sayısal verilere dönüştürülmüştür. Deneysel çalışmaların yanı sıra HEC-RAS yazılımı ve direkt adım metodu kullanılarak sayısal modelleme çalışmaları da yapılmış, su yüzü profilleri ve kabarma miktarları karşılaştırma amaçlı elde edilmiştir. Elde olunan sayısal sonuçlar karşılaştırılmış, benzer problemlerde HEC-RAS yazılımının kullanılabilirliği ile görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliği ile ilgili çıkarımlara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kabarma, Köprü Ayağı Tipi, Verevlik Açısı, Görüntü İşleme Tekniği, Su Yüzü Profilleri

Experimental and Numerical Investigation of the Effect on the Water Surface Profiles of Bridge Pier Type and Skew Angle

ABSTRACT: Design of bridge piers is so much important for the structural safety of bridges, however, at least at the same extent, hydraulic analysis of bridge piers is also required. Bridge piers are structures that obstruct the flow by narrowing the flow area and can cause flooding in the bridge upstream. Therefore, with the light of numerical and experimental studies, accurate estimations of the occurrence of water surface profiles and affluxes resulted from the construction of bridge piers under different flow conditions are the major part of bridge hydraulics. In this study, the effects of bridge piers with four different cross-sections and four different skew angles on the water surface profiles and the affluxes were experimentally and numerically investigated. The experimental study has been conducted in a flume with dimensions of 10x0.309x0.45m in Department of Civil Engineering Hydraulics Laboratory at Niğde Ömer Halisdemir University. The experimental measurements were taken using 4 different shapes of bridge piers (square, circular, oblong and ogival upstream face) and 4 different skew angles (0°, 15°, 30° and 45°), and the images obtained from video recordings of each experiment were converted into numerical values using an image processing technique. In addition, commercial package program HEC-RAS software and a direct step

*Corresponding Author: Uğur ÜNAL ugurunal@ohu.edu.tr

method were also used for the numerical modelling and the numerical water surface profiles and affluxes were also obtained for the purpose of comparisons. In the conclusion part, the comments on the applicability of HEC-RAS software and the suitability of the image processing technique were given for the similar problems.

Keywords: *Afflux, Bridge Pier Type, Bridge Position Angle, Image Processing Technique, Water Surface Profiles*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Köprüler; nehir veya vadi gibi yeryüzünün iki yakasını birbirinden ayıran engellerin kolaylıkla geçilmesini sağlayan ve genellikle akarsular, denizler veya karayolları üzerine inşa edilen önemli sanat yapılarıdır. Bu yapılar inşa edilirken hidrolik ve yapısal etkilerin bir bütün olarak değerlendirilmesi ve buna uygun olarak gerekli tasarımın yapılması gerekmektedir [1]. Oysaki geçmişten günümüze kadar hasar gören veya yıkılan köprüler incelendiğinde yapısal endişeler düşünülerek hidrolik açıdan analizler ikinci plana atılmış ve bunun sonucunda köprü yıkılmaları veya ciddi hasarlar meydana gelmiştir [2]. Yıkılmanın nedenleri araştırıldığında çoğunlukla, köprü ayak kesitlerinin gereğinden fazla büyük tasarlanması sonucu köprü ayakları arasındaki açıklığın azalması ve buna bağlı olarak oluşan kabarmalar ve oyulmalar gibi hidrolik etkiler ilk sırada gelmektedir [3-4]. Diğer yıkılma nedenleri incelendiğinde ise köprü ayağına olan çarpmalar, aşırı yükleme ve yangın kaynaklı olduğu görülmektedir [3, 5-6].

Akarsu üzerine inşa edilen köprülerin yapısal tasarımlarında yaygın olarak köprü açıklığı boyunca ayaklar kullanılmaktadır. Akım alanının bir kısmını kapatan köprü ayakları etrafındaki akımın incelenmesi bir hayli karmaşık bir olaydır [7]. Ayakların akım alanını daraltması sonucu ayaklar arasındaki açıklıkta ani değişen akım koşulları oluşmakta ve köprü membaında açıklığın azalmasından dolayı su yüzünde kabarmalar meydana gelmektedir [8]. Bu kabarmaların en iyi şekilde tayin edilmesi köprü membaında bulunan tarım arazilerinin, meskun yerlerin ve diğer değerli ve stratejik öneme sahip alanların korunmasını sağlayacaktır. Bunun için su yüzü profillerinin doğru şekilde tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Çünkü bu profiller hidrolik yapıların planlanması, tasarımı ve yönetiminde gerekli olan verilerin sağlanması hususunda bizlere yardımcı olmaktadır [9].

Günümüzde su yüzü profillerinin hesaplanmasında çeşitli deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları kullanılmaktadır [10-11]. Bu çalışmalarda çoğunlukla köprü inşaat aşamasından önce, köprüler etrafında oluşması muhtemel akım karakteristiklerini gösterir farklı senaryolar üretilir. Bu şekilde elde edilen ön bilgiler yardımıyla köprü yıkılmaları veya hasarlarının önüne geçilmesi veya en azından olumsuz etkilerinin minimuma indirilmesi amaçlanır.

Bu çalışmada kare, dairesel, kenarları yuvarlatılmış ve memba yüzü keskin kenarlı olmak üzere dört farklı köprü ayağı tipi ve 0°, 15°, 30° ve 45°'lik dört farklı verevlik açısının köprü etrafında oluşan su yüzü profili ve köprü membaındaki kabarma miktarı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan deneysel kanal kullanılmıştır. Sayısal modelleme çalışmaları Hidrological Engineering Centers - River Analysis System (HEC-RAS) programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fiziksel deneylerde kullanılan aletsel akım ölçümlerine alternatif olarak, akıma müdahale etmeden akıma ait sayısal bilgilerinin elde edilmesini sağlayan görüntü işleme tekniği kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde, çalışmada kullanılan deneysel kanal, köprü ayak tipleri, limnometre ölçüm aleti ve görüntü işleme tekniği ile sayısal modelleme çalışmaları anlatılmıştır.

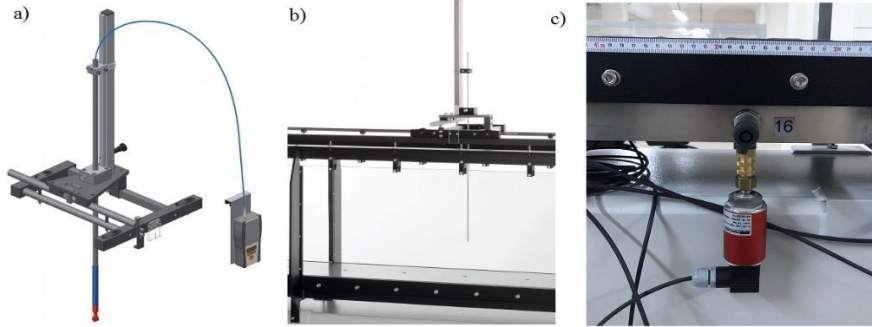
2.1. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Köprü ayak tiplerinin su yüzü profilleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan deneysel kanal kullanılmıştır. Bu kanal 10 m uzunluğunda, 0,309 m genişliğinde ve 0,45 m derinliğinde olup dikdörtgen en kesitlidir (Şekil 1). Kanal, kontrol panosundan ayarlanabilen farklı eğimlerde ($-0,5$ ile $2,5$ aralığında değişen eğimler) ve debilerde (0 m³/sa ile 100 m³/sa aralığında) çalışabilmektedir. Bunun yanı sıra derinlik, hız ve basınç ölçümleri için limnometre, hız ölçer ve basınç ölçüm sensörleri bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Deneysel kanal

Figure 1. Experimental flume



Şekil 2. Kullanılan akım ölçüm aletleri a) hız ölçer b) limnometre c) basınç ölçüm sensörü

Figure 2. Used measuring instruments a) velocimetry b) limnimeter c) pressure measurement sensor

Deneysel çalışmalarda nehir rejimi oluşturacak şekilde kanal taban eğimi $0,2$ ve akım debisi 50 m³/sa olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan köprü ayak tipleri Şekil 3'te gösterilmiş, boyutları ise Çizelge 1'de verilmiştir. Akım derinlikleri, köprü ayağı yakınlarında 5 cm aralıklarla, köprüden uzakta ise 10 cm aralıklarla limnometre yardımıyla ölçülmüştür. Köprü ayakları kanal membaından itibaren $5,65$ m uzağa yerleştirilmiş ve ayaklara dört farklı verevlik açısı verilmiştir (Şekil 4). Her farklı durum için deneyler üçer defa tekrarlanmıştır. Limnometre ölçümlerinin yanı sıra görüntü işleme tekniği kullanılarak da akım derinlikleri elde edilmiştir. Bunun için saniyede 30 çerçeve (30 fps) yakalama özelliğine sahip 1280×720 p çözünürlüklü iki adet telefon kamerası ile deneysel çalışmalar kayıt altına alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliğini kolaylaştırmak için suya kırmızı renkli gıda boyası eklenerek renklendirilmiş ve kanalın arka duvarı beyaz renkli kağıtlar ile kapatılmıştır (Şekil 4). Bu şekilde su-hava ara kesiti belirginleştirilmiş ve kırmızı renkli suyun takibi görüntü işleme tekniği ile daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 3. Köprü ayak tipleri

Figure 3. Types of bridge piers



Şekil 4. Görüntü işleme tekniğine uygun koşullar ve farklı verevlik açılarında yerleştirilmiş örnek bir köprü ayağı a) 0° b) 15° c) 30° d) 45°

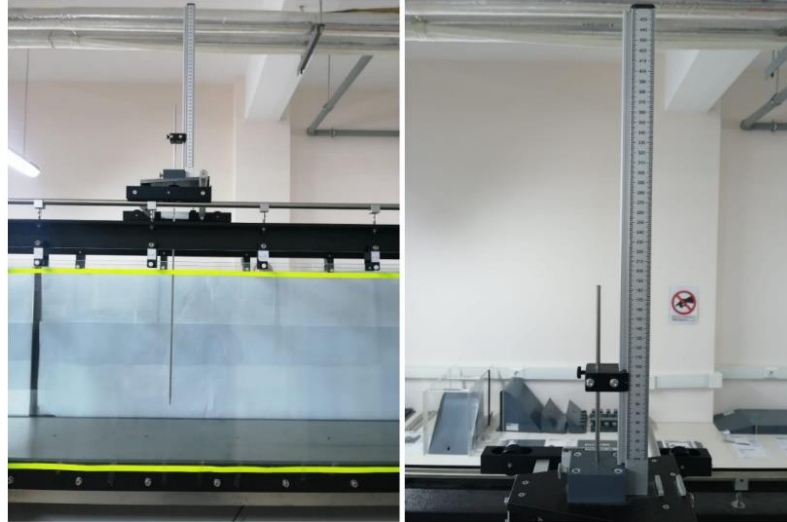
Figure 4. Provided suitable conditions for the application of the image processing technique and an example of a bridge pier with four different skew angles a) 0° b) 15° c) 30° d) 45°

Çizelge 1. Köprü ayak tipleri ve boyutları*Table 1. Bridge pier types and dimensions*

Köprü Ayağı Tipi	Genişlik (cm)	Uzunluk (cm)	Çap (cm)
Kare	4	4	-
Dairesel	-	-	4
Kenarları Yuvarlatılmış	4	8	-
Mamba Yüzü Keskin Kenarlı	4	8	-

2.2. Limnimetre ile Ölçüm (Measurement for Limnimeter)

Akım derinlikleri ilk olarak deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan limnimetre ile ölçülmüştür (Şekil 5). Bu cihaz kanal boyunca hareket ettirilebilmekte ve istenilen noktadan ölçüm alınmasını sağlamaktadır. İstenilen noktadaki akım derinliği, limnimetrenin ucunda bulunan iğnenin su yüzeyine temasının sağlandığı anda limnimetre üzerinde bulunan metre üzerinden okuma yapılmasıyla ölçülmektedir.

**Şekil 5.** Limnimetre*Figure 5. Limnimeter*

2.3. Görüntü İşleme Tekniği (Image Processing Technique)

Laboratuvar ortamında akım özellikleri belirlenirken akıma müdahale eden veya etmeyen olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Akıma müdahale eden yöntemler akım alanının içine batırılan ve genellikle elektrik iletkenliğine dayalı olarak ölçüm yapan metal çubuklar (dalga probları gibi) veya ölçüm sensörlerinden oluşmaktadır. Akıma müdahale etmeyen yöntemler ise ultrasonik sensörler, akım alanını lazerlerle tarama, parçacık izleme ve görüntü işleme tekniklerini kapsamaktadır. Bu sensör ve teknikler akım alanına hiçbir şekilde müdahale etmediğinden ölçüm sonuçları daha güvenilir olmaktadır. Çalışmada, limnimetre kullanımının yanı sıra su derinlikleri akıma müdahale etmeksizin görüntü işleme tekniği yardımıyla da belirlenmiştir.

Kanal boyunca tek boyutlu akım durumu göz önüne alınarak uygulanan görüntü işleme tekniği algoritması şu şekilde çalışmaktadır. Öncelikle kanalın yan duvarları üzerinde 0. ve 42. santimetrelere yeşil şeritli işaretleyiciler yapıştırılmıştır (Şekil 6). Bu şeritler, renk filtresi kullanarak kanal boyunca su yüzü profilini oluşturan su derinliklerinin sayısal değerlerini daha doğru bir şekilde elde etmek amacıyla yerleştirilmiştir (Şekil 7). Benzer şekilde kanal boyunca su yüzünün daha net bir şekilde tanımlanabilmesi için su kırmızı renkte gıda boyası ile renklendirilmiş ve kırmızı renk filtresi kullanılarak su yüzü

ayrıklaştırılmıştır. Şekil 8’de verilen görsel deney kanalınının sağ ve sol tarafına yerleştirilen kameralardan elde olunan görüntülerin birleştirilmesi ve kırmızı renk filtresi ile filtrenmesi sonucu elde olunmuştur. Şekil 8’de kanal boyunca kanaldaki suyu gösterir kırmızı renkli görüntülerdeki kesiklikler kanalın yan duvarlarını destekleyen dikmelerden dolayı oluşmuştur.

Bu çalışmada 1 boyutlu akım analizlerinde kullanılan görüntü işleme tekniğinin algoritması kısaca aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır.

Adım 1: Köprü ayağı tipi ve verev açısına ait deneyin video görüntüsü çerçevelere ayrılarak her bir çerçeve için Adım 2-Adım 5 işletilir.

Adım 2: Kanal içerisinde 0. ve 42. cm yüksekliklere yerleştirilen yeşil şeritler yeşil renk filtresi aracılığıyla tespit edilir ve her sütun için bir pikselin cm türünden karşılığı hesaplanır.

Adım 3: Kırmızı gıda boyasıyla renklendirilmiş olan su kırmızı renk filtresi aracılığıyla tespit edilir ve ilgili çerçevede suyun bulunduğu tüm sütunlardaki en yüksek değerleri belirlenir.

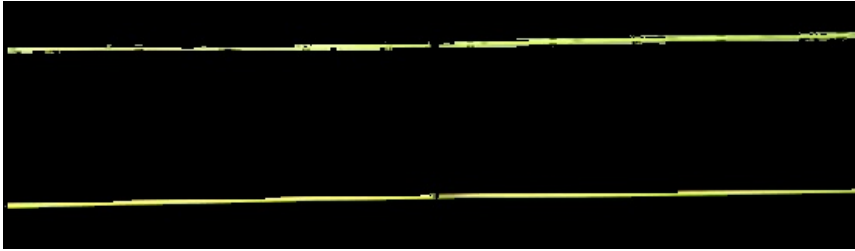
Adım 4: Belirlenen su yüksekliğinin cm türünden karşılığı hesaplanır.

Adım 5: İlgili çerçeveye ait sonuçlar bir metin dosyasına kaydedilir.



Şekil 6. Yeşil şerit uygulaması

Figure 6. Application of green tapes



Şekil 7. Yeşil şeritli işaretleyicilerin yeşil renk filtresi ile tespit edilmesi

Figure 7. Detection of green tapes using a green filter



Şekil 8. Su yüzü profilinin kırmızı renk filtresi ile tespit edilmesi

Figure 8. Detection of the water surface profile using a red filter

2.4. Sayısal Modelleme (Numeric Modelling)

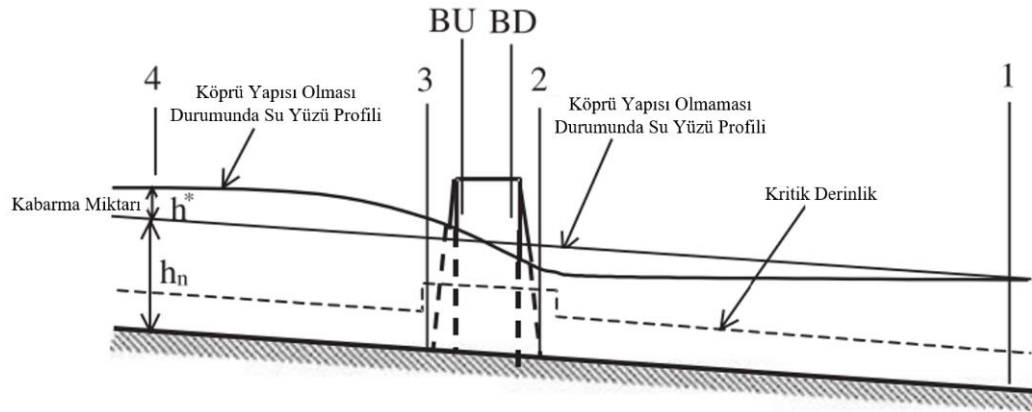
Günümüzde teknolojiye olan erişimin artması ve teknolojinin hızla gelişimi sayesinde hidrolik mühendisliğindeki pek çok karmaşık akım problemi hızlı ve kolay bir şekilde sayısal modeller ile

çözülebilmektedir. Bu sayısal modeller, problemleri pek çok farklı açıdan inceleme ve problemlere ait detaylı bilgi elde etme imkânı da sağlamaktadırlar. Ancak sayısal model çıktıların güvenilirliğinin deneysel çalışmalar ile desteklenmesi gerekir.

Bu çalışmada köprü ayak tiplerinin akım üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çıktılar, laboratuvar ortamına benzer koşulların oluşturulduğu hesap alanının ticari bir paket program olan HEC-RAS yazılımı ile modellenmesi ile elde olunan çıktılar ile karşılaştırılmıştır. HEC-RAS programı, çeşitli hidrolik yapıları da içeren kararlı ve kararsız akım problemlerinin çözümünde ve sediment ve su kalitesi analizlerinde kullanılmaktadır [12]. Program köprü yapılarının hidrolik açıdan analizinde enerji denklemi (standart adım), momentum prensibi, Yarnell metodu, Water Surface Profile (WSPRO) ve USBPR gibi yöntemleri kullanmaktadır [13-14]. Bu çalışmada köprü ayaklarının analizinde enerji (Denklem 1), momentum (Denklem 2-4) ve Yarnell (Denklem 5) yöntemlerinden yararlanılmıştır.

$$WS_u + \alpha_u \frac{v_u^2}{2g} = WS_d + \alpha_d \frac{v_d^2}{2g} + L\bar{S}_f + C \left| \alpha_u \frac{v_u^2}{2g} - \alpha_d \frac{v_d^2}{2g} \right| \quad (1)$$

Burada; u memba, d mansap kesitlerini, WS kıyas düzleminde itibaren su yüzü kotuna kadar olan düşey mesafeyi, α kinetik enerji düzeltme katsayısını, V ortalama hızı, g yerçekimi ivmesini, L memba ve mansap kesitleri arasındaki uzaklığı, \bar{S}_f ortalama enerji çizgisi eğimini ve C daralma veya genişleme katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 9. Köprü ayağı etrafındaki su yüzü profilleri (Seçkin ve Atabay, 2005)

Figure 8. Water surface profiles around the bridge piers

Momentum yöntemi üç adımda gerçekleşmektedir [15]. İlk adımda 2. kesit (Şekil 9) ile köprü mansabı arasında Denklem 2, ikinci adımda köprü mansabı ile köprü membaı arasında Denklem 3 ve 3. adım ise köprü membaı ile 3. kesit (Şekil 9) arasında Denklem 4 ile verilen momentum denklemleri uygulanmaktadır.

$$A_{BD} * \bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD} * Q_{BD}^2}{g * A_{BD}} = A_2 * \bar{Y}_2 - A_{P2} * \bar{Y}_{P2} + \frac{\beta_2 * Q_2^2}{g * A_2} + F_f - W_x \quad (2)$$

$$A_{BU} * \bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} * Q_{BU}^2}{g * A_{BU}} = A_{BD} * \bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD} * Q_{BD}^2}{g * A_{BD}} + F_f - W_x \quad (3)$$

$$A_3 * \bar{Y}_3 + \frac{\beta_3 * Q_3^2}{g * A_3} = A_{BU} * \bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} * Q_{BU}^2}{g * A_{BU}} + A_{P3} * \bar{Y}_{P3} + \frac{1}{2} * C_d * \frac{A_{P3} * Q_3^2}{g * A_3^2} + F_f - W_x \quad (4)$$

Burada; A_{BD} köprü mansabındaki ve A_2 2. kesitteki akıma ait aktif alanı, A_{P2} köprü ayağının mansap tarafında suyu engellediği alanı, \bar{Y}_2 ve \bar{Y}_{BD} su yüzünden A_2 ve A_{BD} alanlarının ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, \bar{Y}_{P2} mansap tarafındaki su yüzünden köprü ayağının suyla temas ettiği alanın ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, β_2 ve β_{BD} momentum için hız düzeltme katsayılarını, Q_2 ve Q_{BD} 2. kesitteki ve köprü mansabındaki debileri, g yerçekimi ivmesini, F_f sürtünme katsayısını ve W_x akım yönündeki su ağırlığının oluşturduğu kuvveti, A_{BU} köprü membaını, A_3 3. kesitteki akıma ait aktif alanı,

A_{P3} köprü ayağının memba tarafında suyu engellediği alanı, \bar{Y}_3 ve \bar{Y}_{Bu} su yüzünden A_3 ve A_{Bu} alanlarının ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, \bar{Y}_{P3} memba tarafındaki su yüzünden köprü ayağının suyla temas ettiği alanın ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, β_3 ve β_{Bu} momentum için hız düzeltme katsayılarını, Q_3 ve Q_{Bu} 3. kesitteki ve köprü membaındaki debileri ve C_d köprü ayakları için direnç katsayısını ifade etmektedir.

$$H_{3-2} = 2 * K * (K + 10 * w - 0,6)(\alpha + 15 * \alpha^4) * (V_2^2 / 2 * g) \quad (5)$$

Burada; H_{3-2} Şekil 9'a göre 3 numaralı kesitten 2 numaralı kesite olan su seviyesindeki azalmayı, K Yarnell köprü ayak şekil katsayısını, w 2 numaralı kesitteki hız yükünün derinliğe oranını, α köprü ayaklarının suyla temas ettiği kesit alanının toplam engellenmemiş su kesit alanına oranını, V_2 kesit 2'deki hızı, g yer çekimi ivmesini ifade etmektedir.

2.5. Direk Adım Metodu (Direct Step Method)

Direk adım metodu prizmatik enkesitli kanallarda oluşan su yüzü profillerinin hidrolik hesabında kullanılan bir yöntemdir [16]. Yöntem, kolay ve kullanışlı olması nedeniyle pek çok araştırmacı tarafından tedrici olarak değişen su yüzü profillerinin hesabında tercih edilmektedir. Yöntemde belirlenen iki ardışık kesitteki su derinliklerinin arasındaki mesafe Denklem 6'da verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_0 - \bar{S}_f} \quad (6)$$

Burada; S_0 taban eğimini, \bar{S}_f iki ardışık kesit arasındaki ortalama enerji çizgisi eğimini, ΔE iki ardışık kesit arasındaki enerji seviyesi farkını ve Δx iki ardışık kesit arasındaki mesafeyi göstermektedir. \bar{S}_f ve E Denklem 7 ve Denklem 8 ile hesaplanmaktadır.

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (7)$$

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (8)$$

Burada; Q kesitten geçen debiyi, n yüzeyin Manning katsayısını, A kesit alanını, R (A/P) hidrolik yarıçapı, y su derinliğini ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Ayak Tipi ve Verevlik Açısının Su Yüzü Profil Üzerindeki Etkisi (Effect of Pier Type and Skew Angle on the Water Surface Profile)

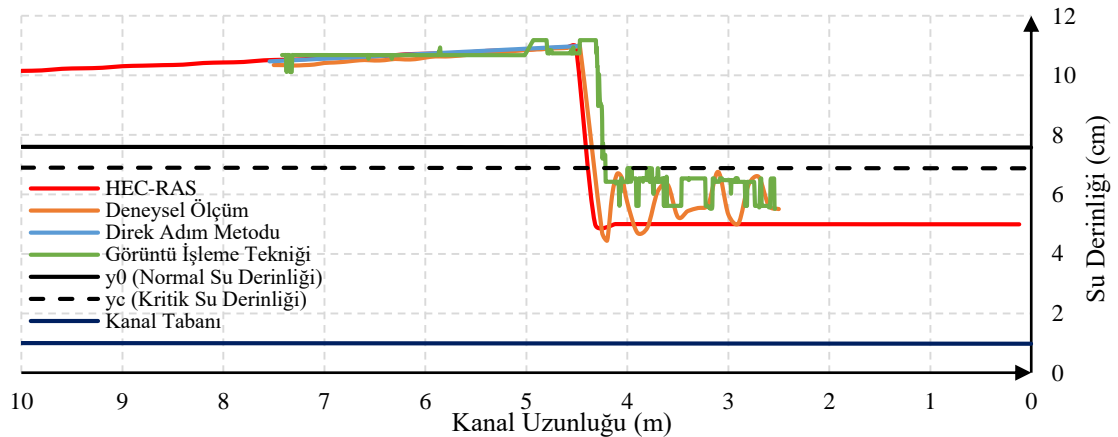
Şekil 10 – Şekil 22'de ayak tipi ve verevlik açısı değiştirilerek elde edilmiş su yüzü profillerini verilmiştir. Ayrıca, her bir şekilde 4 farklı yöntemle elde edilmiş su yüzü profilleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekillerde verilen 4 yöntem sırasıyla HEC-RAS, deneysel ölçüm, direk adım metodu ve görüntü işleme tekniği olarak adlandırılmıştır. Deneysel ölçüm sonuçları her bir deneyin üçer kez tekrar edilmesinden elde edilen sonuçların aritmetik ortalamasıdır.

Şekil 10 – Şekil 22 ve Çizelge 2'den HEC-RAS sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu, köprü memba bölgesi için deneysel sonuçlar baz alınarak hesaplanan maksimum bağıl hatanın %10, 81 ile kare ayak ve verevlik açısının 45° olduğu durumda meydana geldiği görülmüştür. Diğer ayak tipleri ve verevlik açılarında oluşan farkların bu değer altında olduğu tespit olunmuştur. Mansap bölgesi için ise

HEC-RAS'ın ortalama değerler olarak hesap yapması ve su yüzeyinde oluşan dalgalanmaları hesaplamaması nedeniyle bu tür bir karşılaştırma yapılamamıştır.

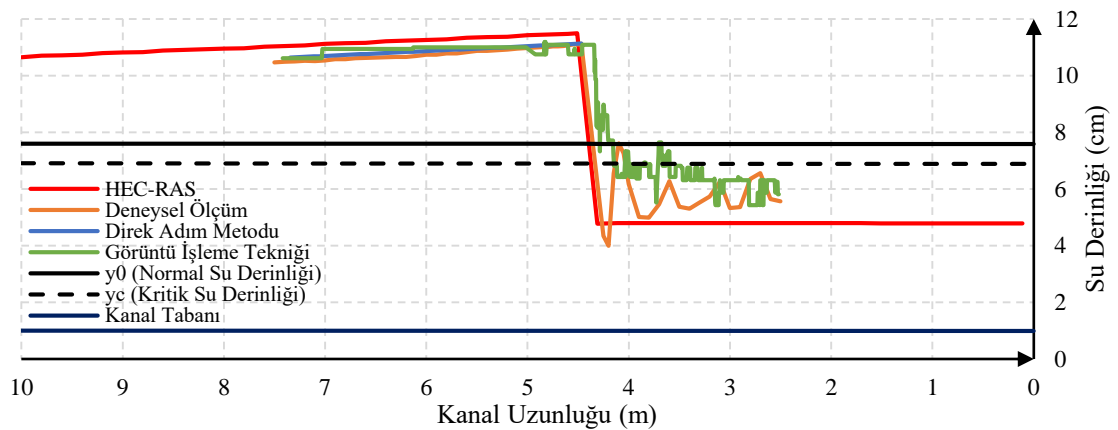
Köprü memba bölgesinde, görüntü işleme tekniği ile deneysel ölçüm sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve hesaplanan maksimum bağıl hatanın %4,37 ile kare ayak tipi ve verevlik açısının 15° olduğu durumda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Diğer durumlar için görüntü işleme tekniği sonuçlarına dayalı hesaplanan bağıl hatalar %5'in altında kalmıştır. Mansap bölgesinde su yüzündeki ani değişimlerin görüntü işleme tekniği yardımıyla elde edilmesinde birtakım zorluklar (akımda sıçramalar ve oluşan süreksizlikler gibi) yaşansa da belirli oranda deneysel ölçümlerle uyumlu olduğu söylenebilir. Noktasal olarak hesaplanan bağıl hataların bahsedilen zorluklardan ötürü mansap bölgesinde yüksek çıkacağı da açıktır. Ancak su yüzündeki dalgalanmaların ortalaması baz alındığında görüntü işleme tekniğinden elde olunan sonuçların deneysel sonuçlara HEC-RAS sonuçlarından daha yakın olacağı da görülmektedir.

Köprü memba bölgesinde direk adım metodu sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları arasında %3,83'lük bir maksimum bağıl hata hesaplanmıştır. Bu fark memba yüzü keskin kenarlı ayak tipi ve verevlik açısının 0° olduğu durumda meydana gelmiştir. Diğer tüm ayak tipleri ve açı durumlarında maksimum farkın bu değer altında olduğu tespit edilmiştir. Direk adım metodu tedrici değişken akım özelliği taşıyan bölgelere uygulanırken profillerin kontrol noktalarındaki bilinen su derinlikleri (hesap başlangıcındaki su derinlikleri) olarak deneyler sırasında o noktalarda ölçülen su derinlikleri alındığından direk adım metodu sonuçları diğer yöntemlere göre deneysel sonuçlara daha yakın çıkmıştır. Direk adım metodu ani değişen akımların görüldüğü mansap bölgesine uygulanamayacağından karşılaştırma yapılamamıştır.



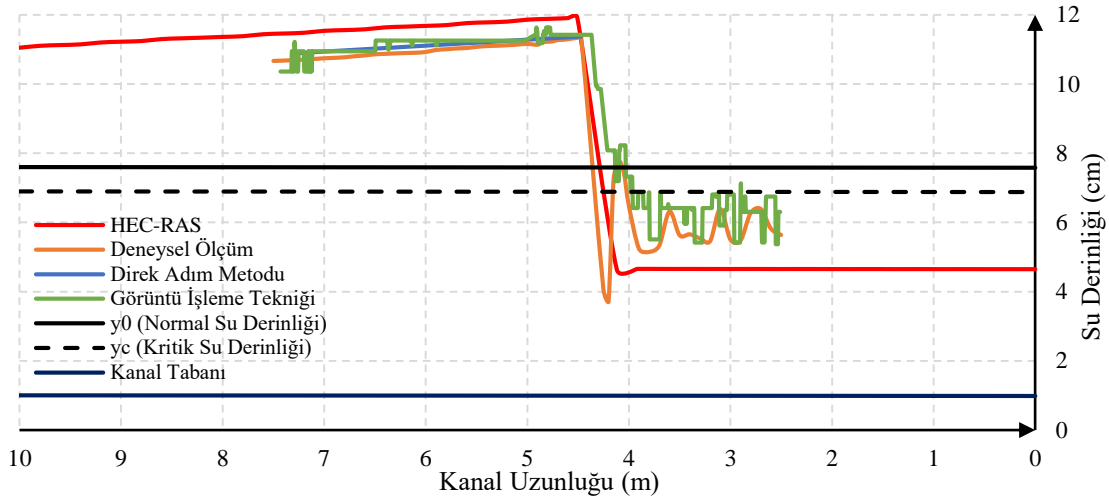
Şekil 10. Su yüzü profili; kare ayak ve verevlik açısı = 0°

Figure 10. Water surface profile; square pier and skew angle = 0°



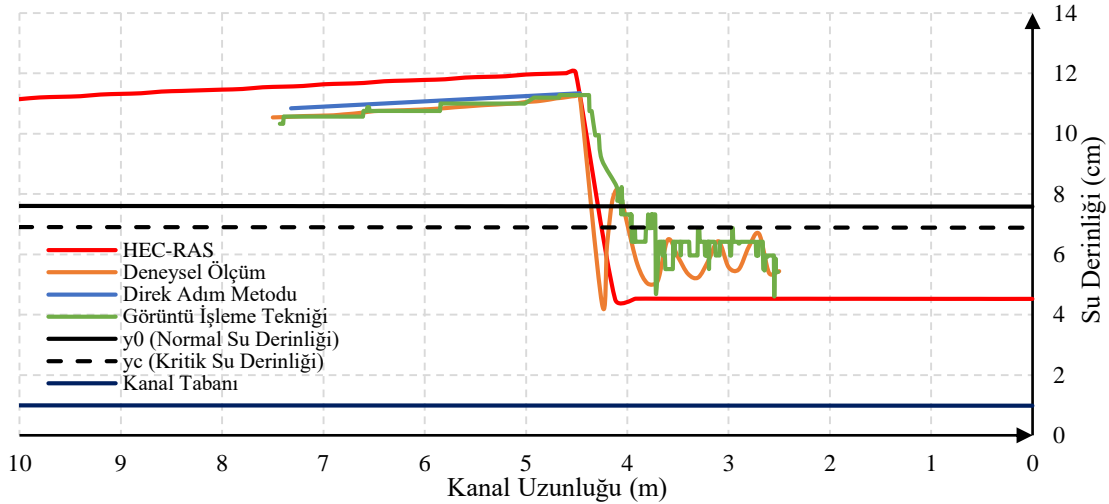
Şekil 11. Su yüzü profili; kare ayak ve verevlik açısı = 15°

Figure 11. Water surface profile; square pier and skew angle = 15°



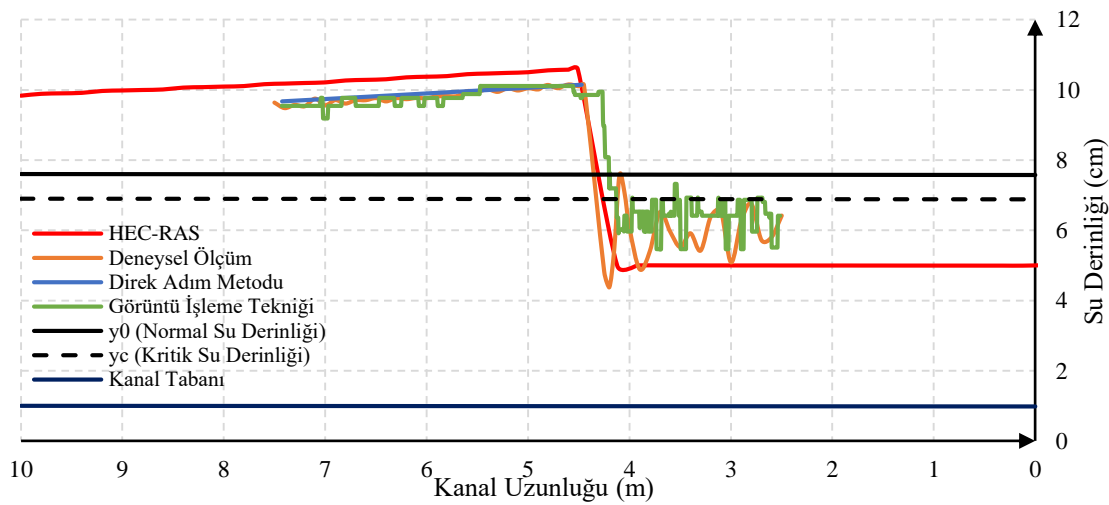
Şekil 12. Su yüzü profili; kare ayak ve verevlik açısı = 30°

Figure 12. Water surface profile; square pier and skew angle = 30°



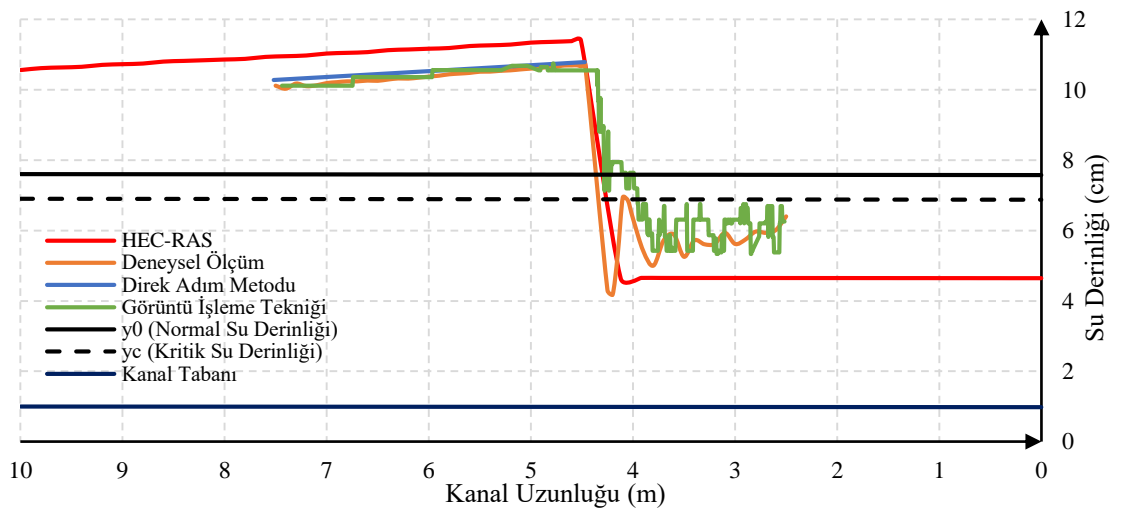
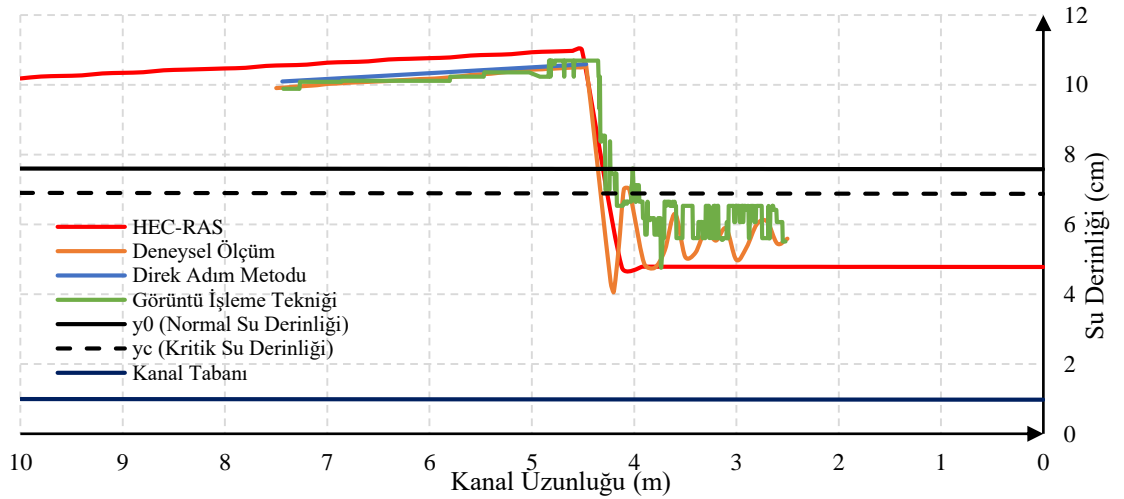
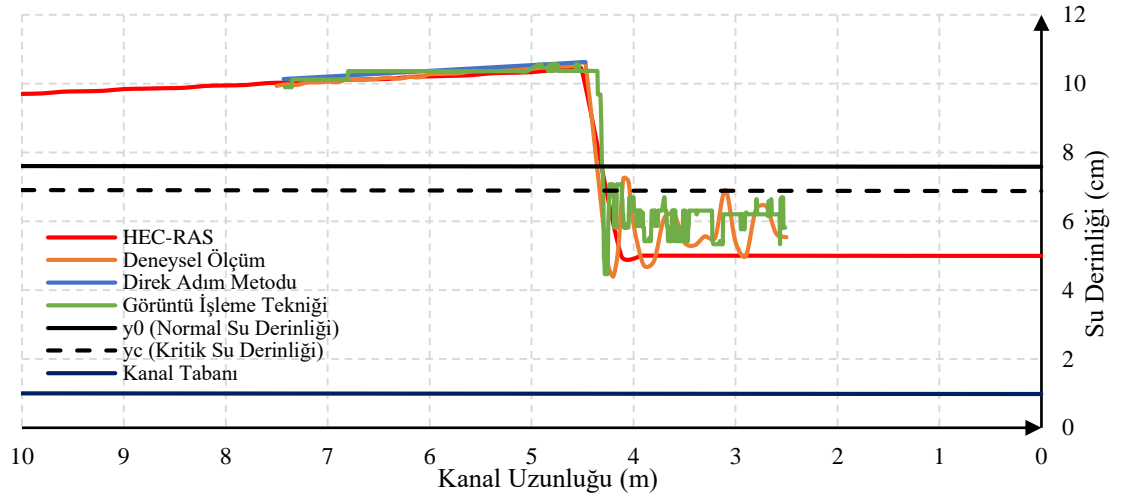
Şekil 13. Su yüzü profili; kare ayak ve verevlik açısı = 45°

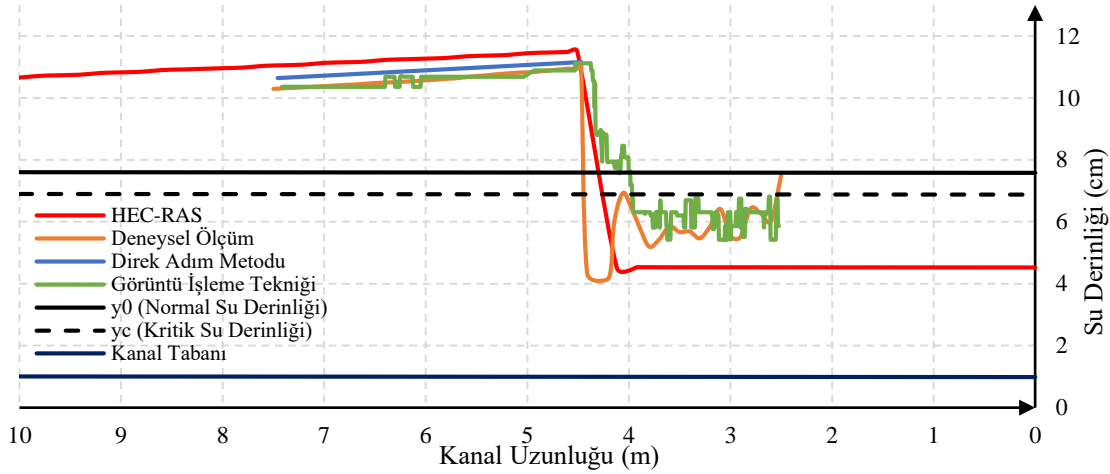
Figure 13. Water surface profile; square pier and skew angle = 45°



Şekil 14. Su yüzü profili; dairesel ayak

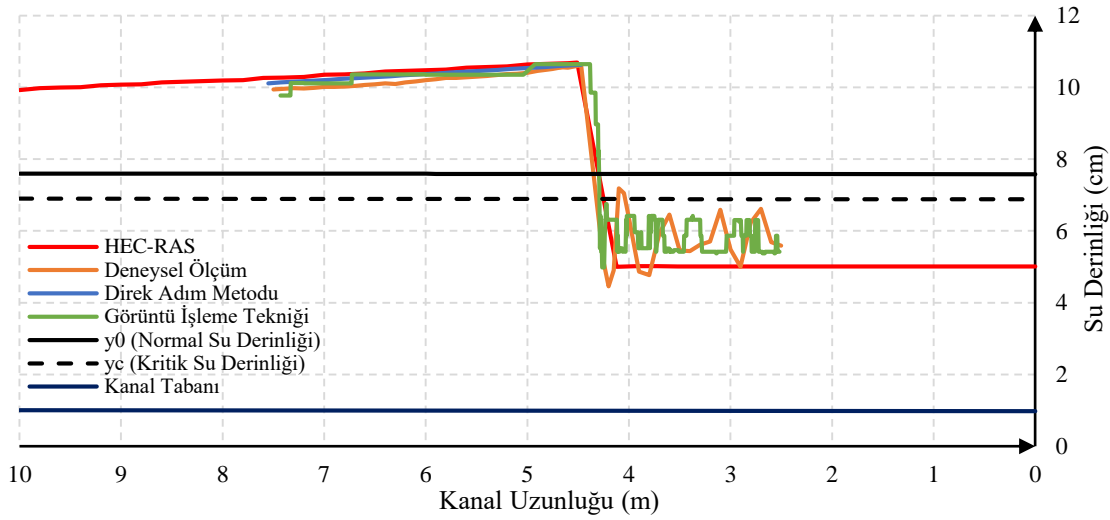
Figure 14. Water surface profile; circular pier





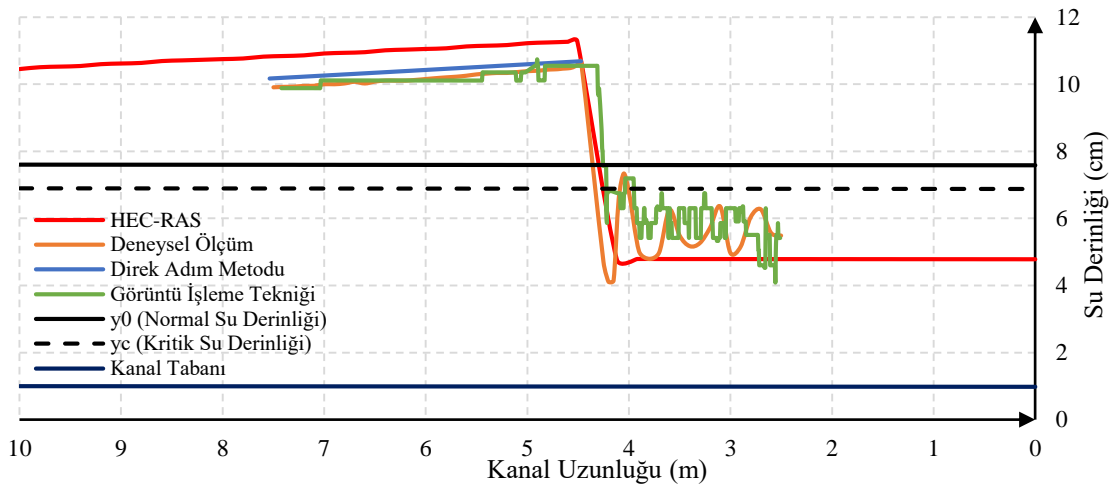
Şekil 18. Su yüzü profili; kenarları yuvarlatılmış ayak ve verevlik açısı = 45°

Figure 18. Water surface profile; oblong pier and skew angle = 45°



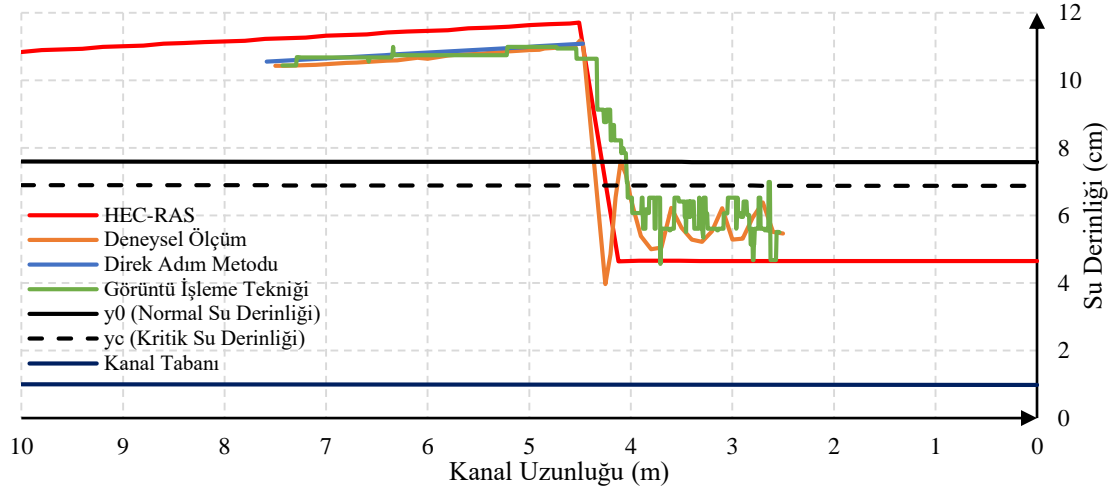
Şekil 19. Su yüzü profili; memba yüzü keskin kenarlı ayak ve verevlik açısı = 0°

Figure 19. Water surface profile; ogival upstream face pier and skew angle = 0°



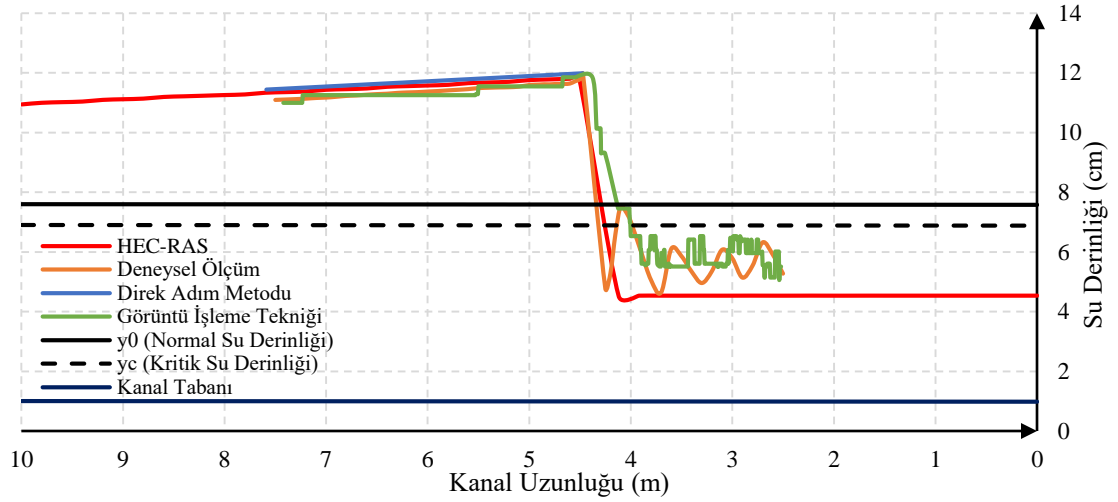
Şekil 20. Su yüzü profili; memba yüzü keskin kenarlı ayak ve verevlik açısı = 15°

Figure 20. Water surface profile; ogival upstream face pier and skew angle = 15°



Şekil 21. Su yüzü profili; memba yüzü keskin kenarlı ayak ve verevlik açısı = 30°

Figure 21. Water surface profile; ogival upstream face pier and skew angle = 30°



Şekil 22. Su yüzü profili; memba yüzü keskin kenarlı ayak ve verevlik açısı = 45°

Figure 22. Water surface profile; ogival upstream face pier and skew angle = 45°

Çizelge 2. Hesaplanan maksimum bağıl hatalar

Table 2. Computed maximum relative errors

Açı	HEC-RAS				Görüntü İşleme Tekniği				Direk Adım Metodu			
	Kare	Dairesel	Kenarları Yuvarlatılmış	Memba Yüzü Keskin Kenarlı	Kare	Dairesel	Kenarları Yuvarlatılmış	Memba Yüzü Keskin Kenarlı	Kare	Dairesel	Kenarları Yuvarlatılmış	Memba Yüzü Keskin Kenarlı
0°	2,25	7,81	1,31	3,75	2,40	4,33	2,80	3,48	1,96	0,70	2,12	3,83
15°	5,91	-	6,68	10,06	4,37	-	2,26	3,21	1,76	-	1,71	3,40
30°	8,16	-	9,18	8,92	2,99	-	1,72	4,13	2,09	-	2,27	1,83
45°	10,81	-	8,01	2,47	1,47	-	2,24	2,27	3,19	-	3,64	3,13

3.2. Ayak Tipi ve Verevlik Açısının Kabarma Miktarı Üzerindeki Etkisi (Effect of Pier Type and Skew Angle on the Afflux)

Köprü yerleştirildikten sonra köprü membandaki su derinliği ile köprü öncesi kanaldaki normal derinlik arasındaki fark olan kabarma miktarı her bir durum için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kanalda oluşan normal derinlik 6,60 m olarak ölçülmüştür. Her bir ayak tipi ve verevlik açısı için hesaplanan kabarma miktarları Çizelge 3 - Çizelge 6'da verilmiştir. Beklenen şekilde dairesel enkesitli ayak tipi hariç verevlik açısı arttıkça akıma direnç gösteren yüzey alanı artmakta ve beraberinde kabarma miktarları da artmaktadır (Şekil 23-25). Kabarma miktarının en fazla olduğu köprü ayak tipi kare enkesitli ayak ve en düşük olduğu ise dairesel enkesitli ayak tipidir. Kare enkesitli ayak ve memba yüzü keskin kenarlı ayak tipinde verevlik açısının 15°'den 30°'ye çıktığı durumda kabarma miktarlarında HEC-RAS model sonuçları hariç daha büyük bir artış gözlenirken, kenarları yuvarlatılmış ayak tipinde 30°'den sonra etkili bir artış oluşmuştur (Şekil 23-25). HEC-RAS model sonuçları 30°'den sonra kabarma miktarlarında azalan bir oranda artış göstermiştir. Kare enkesitli ayak da 30°'den sonra HEC-RAS sonuçları hariç diğer yöntemlerden elde edilen kabarma miktarlarında azalış gözlenmiştir. Normal derinlik baz alınarak hesaplanan ve Çizelge 3-6'da yüzdelik olarak verilen kabarma miktarlarına göre en düşük %38 ve en yüksek %67'lik bir artış görülmüştür. Direk adım metodu ve deneysel ölçüme dayalı kabarma miktarlarının çakışmasının nedeni; bulgular bölümünde belirtildiği üzere, direk adımda su yüzü hesap başlangıcında kullanılan deneysel ölçüm değerinin aynı zamanda kabarma miktarının hesabında kullanılmasıdır.

Çizelge 3. Dört değişik yöntemle elde edilmiş kare köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%)

Table 3. Afflux and % afflux for square bridge pier obtained from four different methods

Ölçüm Yöntemi	Kare							
	0°		15°		30°		45°	
	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı
Deneysel Ölçümler	3,40	51,52	3,53	53,48	3,79	57,42	3,74	56,67
HEC-RAS	3,36	50,91	3,91	59,24	4,34	65,76	4,44	67,27
Görüntü İşleme Tekniği	3,60	54,55	3,60	54,55	3,94	59,70	3,68	55,76
Direk Adım Metodu	3,40	51,52	3,53	53,48	3,79	57,42	3,74	56,67

Çizelge 4. Dört değişik yöntemle elde edilmiş dairesel köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%)

Table 4. Afflux and % afflux for circular bridge pier obtained from four different methods

Ölçüm Yöntemi	Dairesel	
	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı
Deneysel Ölçümler	2,56	38,79
HEC-RAS	3,01	45,61
Görüntü İşleme Tekniği	2,52	38,18
Direk Adım Metodu	2,56	38,79

Çizelge 5. Dört değişik yöntemle elde edilmiş kenarları yuvarlatılmış köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%)

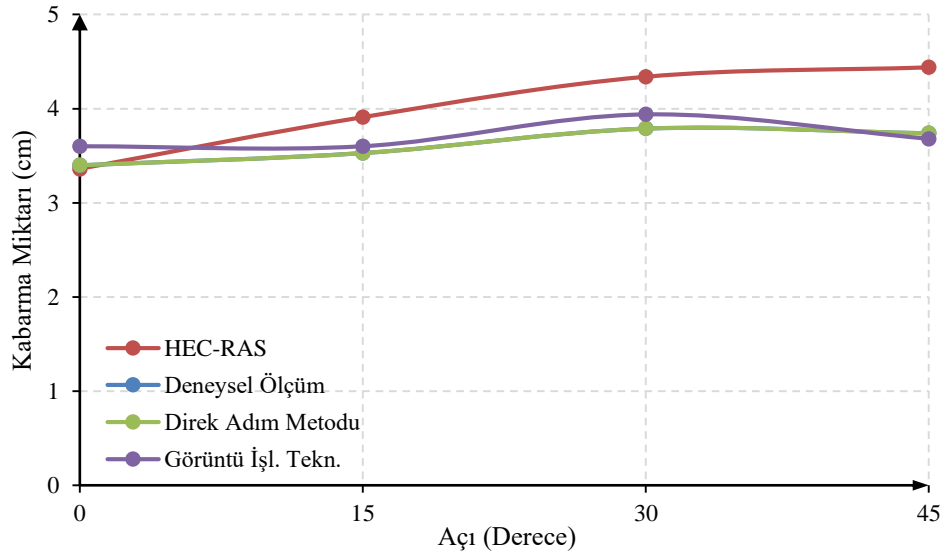
Table 5. Afflux and % afflux for oblong bridge pier obtained from four different methods

Ölçüm Yöntemi	Kenarları Yuvarlatılmış							
	0°		15°		30°		45°	
	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı
Deneysel Ölçümler	3,04	46,06	3,00	45,45	3,18	48,18	3,58	54,24
HEC-RAS	2,83	42,88	3,40	51,52	3,82	57,88	3,92	59,39
Görüntü İşleme Tekniği	2,86	44,85	3,10	46,97	3,09	46,82	3,53	53,48
Direk Adım Metodu	3,04	46,06	3,00	45,45	3,18	48,18	3,58	54,24

Çizelge 6. Dört değişik yöntemle elde edilmiş memba yüzü keskin kenarlı köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%)

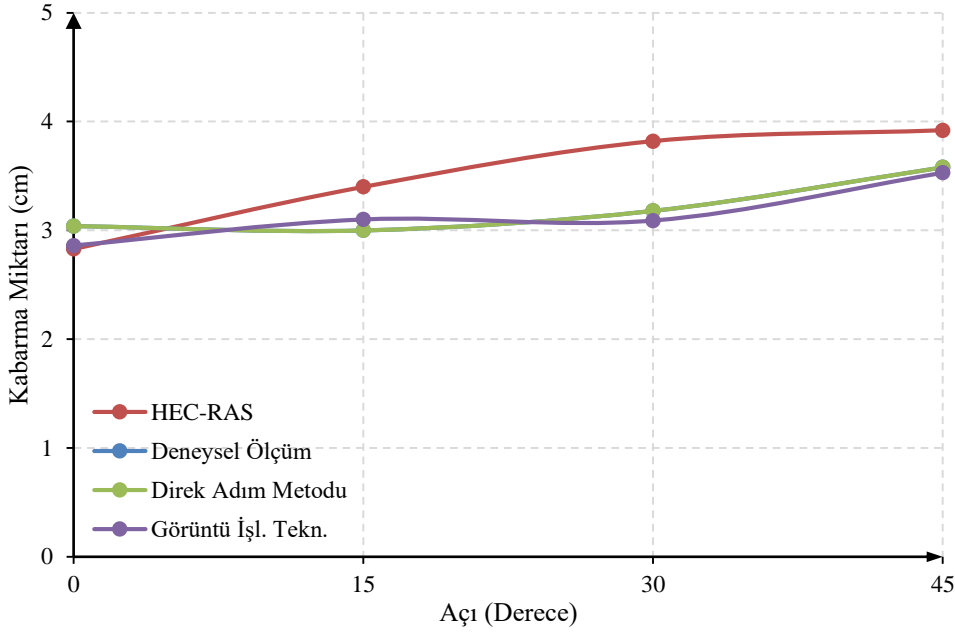
Table 6. Afflux and % afflux for ogival upstream face bridge pier obtained from four different methods

Ölçüm Yöntemi	Memba Yüzü Keskin Kenarlı							
	0°		15°		30°		45°	
	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı
Deneysel Ölçümler	3,04	46,06	3,10	46,97	3,50	53,03	4,38	66,36
HEC-RAS	3,11	47,12	3,70	56,06	4,12	62,42	4,22	63,94
Görüntü İşleme Tekniği	3,06	46,36	2,96	44,85	3,42	51,82	4,26	64,55
Direk Adım Metodu	3,04	46,06	3,10	46,97	3,50	53,03	4,38	66,36

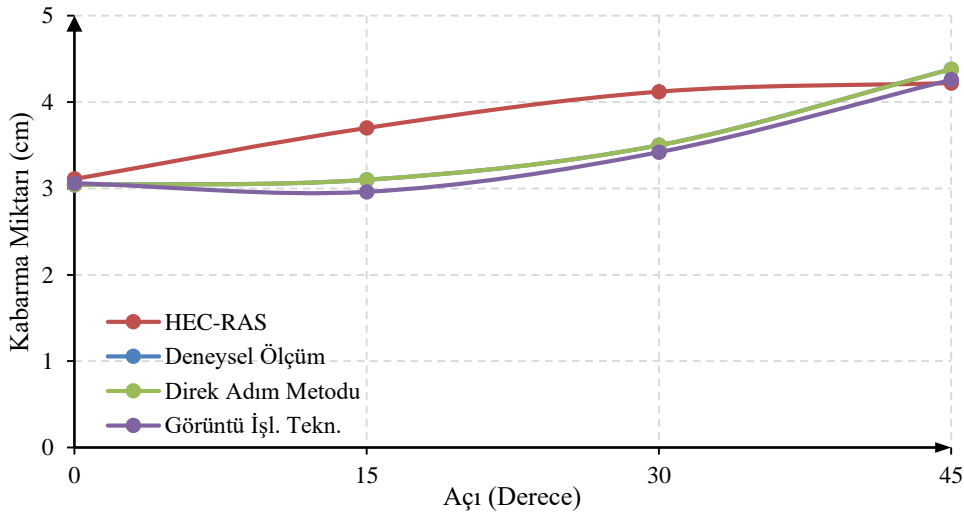


Şekil 23. Kabarma miktarı ve verevlik açısı ilişkisi; kare enkesitli ayak

Figure 23. Afflux versus skew angle for square bridge pier



Şekil 24. Kabarma miktarı ve verevlik açısı ilişkisi; kenarları yuvarlatılmış ayak
Figure 24. Afflux versus skew angle for oblong bridge pier



Şekil 25. Kabarma miktarı ve verevlik açısı ilişkisi; memba yüzü keskin kenarlı ayak
Figure 25. Afflux versus skew angle for ogival upstream face bridge pier

4. SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Dört farklı köprü ayak tipi ve dört farklı verevlik açısı uygulanarak dört farklı yöntemle köprü ayaklarının akım üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmadan elde olunan sonuçlar şunlardır;

- Deneysel ölçümlerden elde olunan su yüzü profilleri ile diğer yöntemlerden elde olunan su yüzü profillerinin görsel olarak oldukça uyumlu ve sayısal değerlerinin de oldukça yakın olduğu görülmüştür. Hesaplanan maksimum bağıl hata %10,81 ile HEC-RAS sonuçlarına dayalı elde olunan su yüzü profillerinde görülmüştür.
- HEC-RAS'dan elde olunan kabarma miktarları ile verevlik açısı ilişkisi iç bükey bir eğri çizerek açının artmasıyla birlikte kabarma miktarlarının artış oranında azalma göstermiştir. Diğer yöntemlerde ise dış bükey şeklinde bir eğri ve kabarma miktarlarında artan oranlar görülmüştür. Ayrıca, diğer

yöntemlerle karşılaştırıldığında, HEC-RAS modelinin genel olarak daha yüksek değerler ürettiği de görülmüştür. Ancak, bu farklılıkların, HEC-RAS yazılımının benzer problemler için memba bölgesinde su yüzü profillerinin ve kabarma miktarlarının belirlenmesinde kullanımını engelleyecek boyutta olmadığı düşünülmektedir. HEC-RAS mansap bölgesinde ölçülen değerlerden farklı sonuçlar vermiştir. Bu bölgede çok daha iyi bir performans beklenmemiştir. Köprü ayaklarının etrafında ve mansap bölgesinde oluşan vorteks ve türbülans akımlarının detaylı çalışmaları için bir boyutlu modellerin uygun olmadığı bilinmektedir.

- Köprü ayaklarından dolayı köprü membaında oluşan kabarma miktarları genel olarak verevlik açısının artışı ile artmıştır. Kabarma miktarlarının verevlik açısı ile artış oranı özellikle 30°'den sonra daha fazla olmuştur. Kare enkesitli ayak tipinde ise 30°'den sonra bir düşüş görülmüştür.
- Görüntü işleme tekniği gerek köprü membaında tedrici değişken akım bölgesinde ve gerekse mansapta oluşan ani değişken akım bölgesinde ölçüm sonuçlarına uyumlu ve yakın değerler vermiştir. Görüntü kalitesinin iyileştirilmesi ve filtreleme algoritmalarının geliştirilmesi ile birlikte çok daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Yazarlar deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarının yürütülmesinde, ilgili literatürün taranmasında ve verilerin toplanmasında etik ilkelere ve standartlara bağlı kaldığını ve makalenin özgün olduğunu beyan eder.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Bu çalışma; Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran, Arş. Gör. Uğur Ünal ve Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz tarafından yazılmış ve Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran tarafından eleştirel olarak incelenerek gerekli düzenlemeler/düzeltilmeler yapılmıştır. Çalışmanın görüntü işleme tekniği ile ilgili kısımları Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz tarafından gerçekleştirilmiş ve Arş. Gör. Uğur Ünal ile Mustafa Çağrı Nas tarafından deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışma, Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa Çağrı Nas'ın Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran danışmanlığında yürütülen yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında herhangi bir kurum veya kuruluştan maddi bir destek alınmamıştır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Yazarlar bu çalışmadan elde edilen verilerin diğer araştırmacılar tarafından kullanılabilirliğini ifade etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. D'Angelo, A. Menghini, P. Borlenghi, L. Bernardini, L. Benedetti, F. Ballio, M. Belloli, and C. Gentile, "Hydraulic safety evaluation and dynamic investigations of baghetto bridge in Italy," *Infrastructures*, vol. 7, no. 53, pp. 2-19, 2022.
- [2] H. Akay, ve M. Baduna Koçyiğit, "Akarsu köprülerinde gözle muayene ve güvenlik değerlendirme çalışmaları," 4. Su Yapıları Sempozyumu, 2015, pp. 205-214.

- [3] I. E. Harik, A. M. Shaaban, H. Gesund, G. Y. S. Valli, and S. T. Wang, "United States bridge failures, 1951–1988", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 4, no. 4, pp. 272–277, 1990.
- [4] N. Yılmaz, ve H. Bozkurt, Y. Bayazıt, "Akarsu köprülerinin HEC-RAS programı ile hidrolik analizi: Fidanlık köprüsü örneği," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 896-910, 2020.
- [5] B. Melville and S. E. Coleman, *Bridge Scour*. Colorado: Water Resources Publications, 1-2, 2000.
- [6] M. M. Flint, O. Fringer, S. L. Billington, D. Freyberg, and N. S. Duffenbaugh, "Historical analysis of hydraulic bridge collapses in the continental United States," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1-16, 2017.
- [7] U.C. Kothyari, and K.G. Ranga Raju, "Scour around spur dikes and bridge abutments," *Journal of Hydraulic Research*, vo. 39, no. 4, pp. 367-374, 2001.
- [8] A. H. Mahmoud, and A. M. Mobasher, "Assessment of high-velocity free surface flow interaction with a bridge pier in a curved channel," *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 15, no. 1, pp. 1-11, 2019.
- [9] K. S. Erduran, G. Seçkin, S. Kocaman, and S. Atabay, "3D numerical modelling of flow around skewed bridge crossing," *Engineering Application of Computational Fluid Mechanics*, vol. 6, no. 3, pp. 475-489, 2012.
- [10] A.M.A. Shaymaa, A.T.A. Sanaa, and M. Saad, "Water surface profile and flow pattern simulation over bridge deck slab," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 291-304, 2020.
- [11] Y. W. Jeong, and W. Jeong, "Experimental and numerical investigation of water-surface characteristics at crossing connected non-orthogonally to four flat channels," *Journal Hydrology and Hydromechanic*, vol. 69, no. 2, pp. 232-242, 2021.
- [12] G. W. Brunner, *River analysis system user's manual, Version 4.1*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2010.
- [13] G. W. Brunner, and J. H. Hunt, *A comparison of the one-dimensional bridge hydraulic routines from HEC-RAS, HEC-2 and WSPRO*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 1995.
- [14] G. Seçkin, and S. Atabay, "Experimental backwater analysis around bridge waterways," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 1015-1029, 2005.
- [15] A. S. Subedi, S. Sharma, A. Islam, and N. Lamichhane, "Quantification of the effect of bridge pier encasement on headwater elevation using HEC-RAS," *Hydrology*, vol. 6, no. 1, pp. 1-18, 2019.
- [16] A. R. Vatankhah, "Direct integration of gradually varied flow equation in parabolic channels," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 22, no. 3, pp. 235-241, 2011.