

Geniş başlıklı savağın membasındaki türbülanslı akımın deneysel olarak incelenmesi

Experimental investigation of turbulent flow upstream of the broad-crested weir

Elif Deniz ATLAS¹ , Mehmet Anıl KIZILASLAN^{2*} , Ender DEMİREL³ 

^{1,2,3}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
atlaselifdeniz@gmail.com, akizilaslan@ogu.edu.tr, edemirel@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.11.2018
Kabul Tarihi/Accepted: 14.05.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 20.03.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.09225
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Geniş başlıklı savaklar sulama kanallarında ve akarsularda akımı düzenlemek ve debiyi ölçmek amacıyla yaygın olarak kullanılan su yapılarıdır. Bu çalışmada, bir deney kanalına yerleştirilen ön yüzü köşeli geniş başlıklı savağın membasındaki farklı istasyonlarda Akustik Doppler Hızölçer ile ölçümler yapılarak akım yapısı araştırılmıştır. Hız ve türbülans gerilmelerinin derinlikle değişimleri incelendiğinde savaktan uzak istasyonlarda tam gelişmiş akım için logaritmik hız dağılımları görülürken, savağa yakın bölgelerde çevrinti etkilerinin akım yapısını önemli miktarda değiştirdiği gözlenmiştir. Yüksek çözünürlükteki fotoğraflar sayısallaştırılarak farklı debiler için savak üzerinden geçen akıma ait su yüzü profilleri elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen debi-derinlik ilişkileri ile Hall'un teorik sonuçları karşılaştırıldığında, sınır tabaka etkilerinin kuvvet yasasına göre hesaplandığı debi denkleminin hassasiyetinin düşük debide azaldığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Açık kanal, Geniş başlıklı savak, Türbülanslı akış, Akustik Doppler hızölçer (ADH).

Abstract

Broad crested weirs (BCW) are widely used hydraulic structures in streams and irrigation canals to control the flow and to measure the discharge. In this study, turbulent flow structure at the upstream of the sharp edged broad crested weir is investigated by means of Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) measurements at different stations. Vertical distributions of velocity and turbulence stresses revealed that, while fully developed velocity distributions are observed at stations far from the weir, turbulence effects significantly alter the flow structure as the flow approaches to the weir. High-resolution photographs are digitized to extract water surface profiles of the flow through the weir for different flow rates. Comparison of the experimental results with the theoretical results shows that the accuracy of the theoretical solutions decreases for low flow rates, in which boundary-layer effects are calculated based on the power law.

Keywords: Open channel, Broad-crested weir, Turbulent flow, Acoustic doppler velocimetry (ADV).

1 Giriş

Açık kanallarındaki akımı düzenlemek ve debiyi ölçmek amacıyla geniş başlıklı savaklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Üçgen, geniş başlıklı ve keskin kenarlı savaklar gibi kanal kesitinin tamamını kaplayan su yapıları güçlü akım-yapı etkileşiminden dolayı kanal içindeki akımın rejimini ve yapısını önemli miktarda değiştirmektedirler. Savak üzerinden geçen suyun debisini hassas olarak ölçebilmek ve membada oluşabilecek hidrodinamik etkileri inceleyebilmek için savak etrafında oluşan karmaşık çevrintili akım yapısının bilinmesi önemlidir. Su yüzü ölçümlerinin yapılarak debi-derinlik ilişkisinin incelendiği çalışmalar literatürde yaygın olmasına rağmen, geniş başlıklı savağın membasındaki akım yapısı az incelenmiştir [1].

Geniş başlıklı savaklar üzerine literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda farklı akım debisi ve savak geometrileri için savak katsayısı (Cd) ve su yüzü profillerinin değişimleri araştırılmıştır. Moss [2] ön yüzü köşeli geniş başlıklı savağın membasındaki akım yapısını türbülans sınır tabaka teorisini kullanarak incelemiş, savak girişindeki çevrintili akışın tek bir akım çizgisi boyunca değil bir türbülans bölgesi boyunca meydana geldiğini, bu durumun basınç artışına sebep olduğunu

göstermiştir. Ramamurthy ve diğ. [3] köşeli ve yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak akımlarını serbest ve batmış akım koşulları için araştırmışlardır. Yüksekliği P, uzunluğu L olan savak için debi katsayısını (Cd) memba enerji yüksekliği H ve yuvarlatma yarıçapı R'ye bağlı değişimini incelemişler, serbest akım koşullarında Cd, H/P ve R/P arasında momentum ilişkilerini kullanarak yarı-ampirik bir denklem geliştirmişlerdir. Ön yüzü köşeli savak için momentum denkleminin hidrostatik olmayan basınç terimlerini ilave ederek batmış akım koşullarında batma limitinin H/P ve R/P oranları ile değiştiğini, batmış akımda çevrinti uzunluğunun memba üst bölgesindeki yuvarlatma yarıçapına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Sarker ve Rhodes [4], geniş başlıklı savağın memba ve mansabında oluşan su derinliklerini ölçerek sayısal benzetim sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda basit geometrisinden dolayı ön yüzü köşeli geniş başlıklı savağı seçmişler, savak etrafındaki su derinliklerini noktasal ölçüm tekniğini kullanarak ölçmüşlerdir. Kanal içindeki türbülanslı akışın sayısal benzetimini, RONS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) tabanlı bir sayısal model kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Türbülans modeli olarak standart k-ε türbülans modelini, serbest yüzey hesaplamaları için VOF (Volume of Fluid) metodunu kullanmışlardır. Kanaldaki türbülanslı akışa ait iki

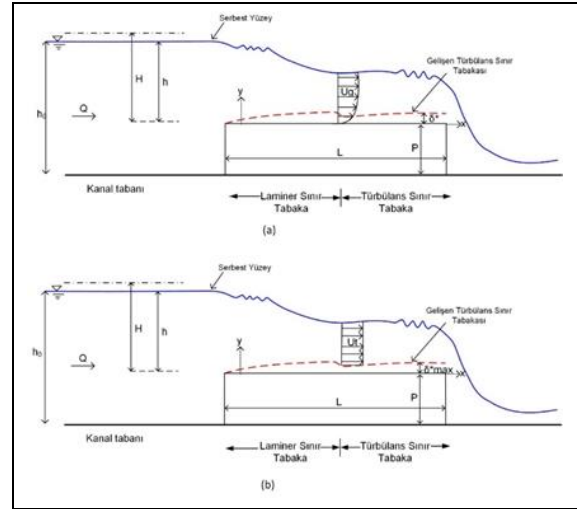
*Yazışılan yazar/Corresponding author

boyutlu sayısal benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlarını karşılaştırdıklarında ortalama serbest yüzey yüksekliğinde memba $\%0.32$, savak üzerinde $\%4.2$, mansapta ise $\%5$ fark gözlemişler, savak etrafında oldukça karmaşık bir akım oluştuğu için üç boyutlu sayısal benzetimlerin yapılması gerektiğini rapor etmişlerdir. Göğüş ve diğ. [5] savak üst genişliği ve eşik yüksekliğinin debi katsayısına etkisini araştırmak için 9 farklı dikdörtgenel birleşik kesitli ve 1 dikdörtgen geniş başlıklı savak modeli üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Başlık genişliğinin 8 cm, memba su yüksekliği H/L oranı 0.5'ten küçük olarak belirlenen debilerde eşik yüksekliğinin debi katsayısına etkisinin olmadığını, H/L 'nin 0.5'ten küçük değerlerinde başlık genişliği/eşik yüksekliği ile debi katsayısının birlikte artıp azaldığını vurgulamışlardır. Emiroğlu ve Baylar [6] çalışmalarında farklı enkesitli geniş başlıklı savakların üzerindeki akışı ve bunların hava tutma oranlarını incelemişlerdir. Hava tutma oranının en yüksek değerini üçgen geniş başlıklı savağın verdiğini ispatlamış ve bu savak için amprik bir korelasyon hesaplamışlardır. Ölçülmüş ve hesaplanmış hava tutma oranı değerlerinde yüksek bir uyum belirlemişlerdir. Gonzales ve Chanson [7] farklı geometrilere sahip dört adet geniş başlıklı savağın membasındaki hız ve basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda memba bölgesi bitimindeki hız ve basınç dağılımlarında etkin bir çevrinti bölgesi gözlemişler ve çevrinti bölgesinin oluşumunu türbülans sınır tabakası ile ilişkilendirmişlerdir. Bal [8], deney kanalı içine yerleştirilen geniş başlıklı savak üzerinde, iki farklı Reynolds sayısı için deneysel ve teorik çalışmalar yaparak hız alanını bir boyutlu L.D.A. (Laser Doppler Velocimetry) ile ölçmüştür. Serbest su yüzü profilini VOF yöntemi ile hesaplamış ve akımı yöneten temel denklemleri Standard $k-\epsilon$ (SKE), Renormalization-Group $k-\epsilon$ (RNG), Realizable $k-\epsilon$ (RKE), modifiye $k-\omega$ (MKW), Shear Stress Transport (SST) ve Reynolds Stress Model (RSM) türbülans modelleri kullanarak sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programı ile çözmüştür. Ortaya çıkan akım çizgilerinin topolojisinin iki farklı Reynolds sayısı için de birbirine benzer olduğunu, akım hızı arttıkça türbülans şiddetinin arttığını göstermiştir. Goodarzi ve diğ. [9] farklı memba yüzü eğimlerine sahip dikdörtgenel geniş başlıklı savaklar üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Eğimleri 90° ile 10° arasında değişen 8 farklı savak tasarlayarak memba yüzeyi eğiminin debi katsayısı, yaklaşık hız profili ve ayrışma bölgesi üzerine etkilerini inceleyerek debi katsayısı için yeni bir düzeltme faktörü önermişlerdir. Felder ve Chanson [10] yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savakların su yüzeyi profillerini, basınç ve hız dağılımlarını deneysel olarak incelemişler, savak kretindeki türbülans sınır tabakası gelişimini hız ve basınç dağılımlarını kullanarak belirlemişlerdir. Boyutsuz debi katsayısının savak yükündeki artışa karşılık etkili bir artış göstermediğini, savak yükünün çok yüksek değerleri için savağın geniş başlıklı savak özelliklerini taşımadığını, debi katsayısının dairesel ve Ogee tipi yuvarlatılmış savakların debi katsayısı değerlerine yaklaştığını belirtmişlerdir. Memba bitiminde akımın çevrintili olduğunu, hız ve basınç dağılımlarının akım çizgileri ve su yüzeyi profilinin eğriliğinden etkilendiğini vurgulamışlardır. Zachoval ve diğ. [11] çalışmalarında dikdörtgenel geniş başlıklı savak akım yapısını savağın memba köşesindeki akım ayrışması ile detaylandırarak incelemişlerdir. Akım karakteristiğini PIV yöntemiyle su yüzeyi seviyesi ölçümleri, basınç yükü ve hız alanı ile tanımlamışlardır. Akıma ait verileri boyutsuz olarak taşkın enerji yüksekliği ve kritik derinlikle ilişkilendirmişlerdir.

İlkentapar [12] açık kanallar üzerinde dört farklı geniş başlıklı savak ve beş farklı debi durumu için akım yapısını sayısal benzetimler ve deneysel çalışmalar yaparak incelemiştir. Geniş başlıklı savak akımını yöneten temel denklemleri $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D programı ile çözmüş, serbest su yüzü profillerini VOF yöntemi ile hesaplamıştır. Geniş başlıklı savaklarda düzgün akım profilinin oluşması için belirtilen $0.07 \leq H/L \leq 0.5$ şartını yirmi farklı akım durumunda belirlenen deneysel veriler ile hesaplanan sonuçlarla karşılaştırmıştır. Savak uzunluğu azaldıkça su yüksekliğinin ve hızın azaldığını gözlemlemiştir. İlkentapar ve Öner [13], dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savak akımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmalarda SKE türbülans modelini kullanarak benzetimleri FLOW-3D programı ile gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve sayısal verileri karşılaştırarak savak membasında ve üzerinde farkların oldukça küçük olduğunu ancak mansap kısmında farkların nispeten arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca SKE türbülans modelinin savak akımlarının sayısal benzetiminde kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada ön yüzü köşeli geniş başlıklı savağın membasında oluşan türbülanslı akım yapısı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda farklı debiler için savak üzerinde oluşan su yüzü profilleri elde edilmiş, savağın membasındaki farklı istasyonlarda ve su derinliklerinde Akustik Doppler Hızölçer (ADH) ile akım bileşenleri ölçülerek ortalama akım hızının ve türbülans gerilmelerinin derinlikle değişimleri elde edilmiştir. Deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak debi değişiminin akım yapısı üzerindeki etkisi, geri dönen akım ile ana akımın etkileşimi sonucu oluşan çevrinti bölgelerinin değişimleri detaylı olarak araştırılmıştır.

2 Geniş başlıklı savak üzerindeki akım

Ön yüzü köşeli geniş başlıklı savak üzerindeki akım şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Geniş başlıklı savak üzerinde oluşan türbülanslı akım. (a): Gerçek akım, (b): İdeal akım modeli.

Figure 1. Turbulent flow over the broad-crested weir. (a): Real flow, (b): Ideal flow model.

Burada g yerçekimi ivmesi, h_0 memba su yüksekliği, h kret üzerindeki memba su derinliği, H enerji yüksekliği, Q savak üzerinden geçen debi, P savak yüksekliği, L savak uzunluğu ve δ^* ise sınır tabakası kalınlığıdır. Savak kretinde gelişen türbülans sınır tabaka etkilerinden dolayı savağın giriş ve

çıkışında serbest yüzeyde dalgalanma meydana gelmektedir [14]. Savağın geniş başlıklı savak olarak sınıflandırılabilmesi için savak üzerinde hidrostatik basınç dağılımına yakın bir basınç dağılımının olması beklenmektedir. Bu nedenle savak üzerindeki su derinliğinin savak boyuna oranının $0.08 \leq h/L \leq 0.4$ aralığında olması önerilmektedir [15]. Şimdiki çalışmada kullanılan deneysel koşullar bu ölçütü sağlamaktadır.

Hall sınır tabaka etkilerini dikkate alarak geliştirdiği debi denklemi, geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın debisinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hall akış mekanizmasının basitleştirilmiş bir modelini kullanarak (Şekil 1b) iki boyutlu geniş başlıklı savak üzerinde teorik çalışmalar yapmıştır [15].

Şekil 1'de verilen savağın üzerinden geçen ideal debi, gerçek debi ve savak katsayısı Denklem 1-11 ile hesaplanabilir [15].

$$q_i = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} (g)^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Savağın üzerinden geçen debi gerçekte aşağıdaki gibi olacaktır.

$$q_g = C_d \sqrt{\frac{8g}{27}} h^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

Debi katsayısı C_d

$$C_d = \left(1 - \frac{\delta_{max}^*}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

veya $C_d = \delta_{max}^*/H$ ile hesaplandığından değeri oldukça küçüktür.

$$C_d = 1 - \frac{3\delta_{max}^*}{2H} \quad (4)$$

$$1 - C_d = \left[\frac{3\delta_{max}^*}{2l}\right] \frac{l}{H} \quad (5)$$

Burada, l krette akım yönünde oluşan sınır tabakanın etkili uzunluğudur. Sınır tabakadaki hız dağılımının kuvvet yasasını sağladığı kabul edilirse

$$1 - C_d = \frac{3}{2} \left(\frac{l}{H}\right) \left(\frac{0.046}{Re^{0.2}}\right) \quad (6)$$

Veya

$$1 - C_d = 0.069 \left(\frac{l}{H}\right)^{0.8} R_H^{-0.2} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Reynolds sayısı $Re = U_t l / \nu$ ve $R_H = U_g H / \nu$ şeklinde tanımlanır. Burada U_g Şekil 1a'da verildiği üzere savak kreti üzerinde oluşan gerçek hız, U_t ise bu bölgede hızın üniform olduğu varsayımı yapılarak belirlenen teorik hız ve ν kinematik viskozitedir.

$U_t = (2gH/3)^{0.5}$ şeklinde teorik olarak hesaplanabilirken U_g değeri ancak deneysel ölçümler ile hesaplanabilir [15]. Yukarıdaki denklemin pratikte kullanılabilmesi için l/H teriminin L/H ve R_H terimleri ile ifade edilmesi gerekmektedir. Denklem (3)'te $L/H=1$ iken:

$$C_0 = (1 - 0.109)^{\frac{3}{2}} = 0.841 \quad (8)$$

Bu değer denklem (7)'de kullanılırsa:

$$1 - 0.841 = 0.069 \left(\frac{l_0}{H}\right) (R_H)^{-0.2} \quad (9)$$

$$\left(\frac{l_0}{H}\right)^{0.8} = \frac{0.159}{0.069} R_H^{0.2} \quad (10)$$

Denkleminde dönüşmektedir. Buradan elde edilecek l_0/H değeri denklem (7)'de kullanılırsa:

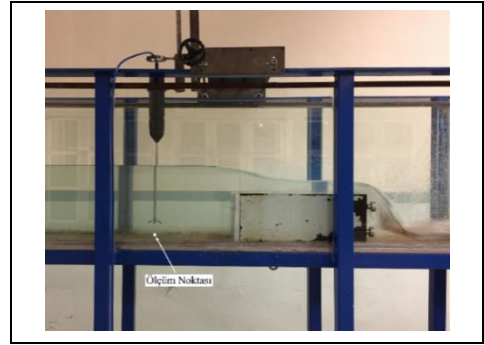
$$1 - C_d = 0.069 \left(\frac{L}{H} - 1.00 + 2.84 R_H^{0.25}\right)^{0.8} (R_H)^{-0.2} \quad (11)$$

Savak katsayısı için gerekli denklem elde edilir.

3 Deneysel çalışma

Deneysel çalışmalar Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan 10 m uzunluğunda, 40 cm genişliğinde ve 60 cm yüksekliğindeki, yan duvarları temperli cam, tabanı paslanmaz çelik olan deney kanalında gerçekleştirilmiştir. Kanaldaki su, 100 m³ net depolama hacmine sahip su deposundan maksimum iletim debisi $Q_{max}=100$ lt/s olan pompa ile sağlanmaktadır. Kanaldan geçen debi kanal girişindeki vana ile ayarlanarak kanalı besleyen borunun üzerine monte edilmiş ultrasonik debimetre ile hassas bir şekilde ölçülebilmektedir.

Farklı yuvarlatma yarıçaplarına sahip savaklar üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirebilmek için Şekil 2'de gösterildiği gibi savağın ön yüzü polietilenden yapılan malzeme değiştirilebilmektedir.



Şekil 2. Deneysel ölçüm sistemi.

Figure 2. Experimental measurement system.

Bu çalışmada ön yüzü köşeli savak üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Savağın membasındaki akıma ait hız ve türbülans büyüklükleri kanal üzerinde hareket eden platforma monte edilmiş 25 Hz veri toplama frekansına sahip Nortek Vectrino modeli ADH ile ölçülmüştür. Hızölçer sensörlerin birleşim noktasından düşey yönde 5 cm altındaki örnekleme hacmi içindeki hızın üç boyutlu bileşenlerinin zamanla değişimlerini ölçmektedir. Akustik prensiple çalışan hız ölçümlerinde oluşabilecek gürültüyü azaltabilmek için hızölçere ait parametreler sinyal/gürültü oranı üretici firma tarafından da önerilen 20 değerinden büyük olacak şekilde seçilmiştir. ADH'ye ait ayarlar ölçülecek hızın mertebesini belirleyen Nominal Velocity Range (NVR), cihaz tarafından üretilen ses dalgasının boyu Transmit Length (TL) ve ölçüm yapılacak noktanın etrafında dikkate alınacak silindirik hacmin yüksekliği Sampling Volume (SV) parametreleridir. Deney sırasında NVR = 0.3 m/s, TL = 0.6 mm ve SV = 1.3 mm seçildiğinde en yüksek sinyal/gürültü oranı elde edilmiş, özellikle tabana yakın bölgede ortaya çıkan gürültü azaltılmıştır. Ölçüm sonuçlarının kalitesini gösteren bir diğer parametre ise korelasyon değeridir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda korelasyon değeri yaklaşık %90 mertebesindedir [16]. Kanal tabanına yaklaştıkça hız ölçümlerinde gözlenen gürültü etkilerini filtrelemek için WinADV yazılımı kullanılmıştır. WinADV ile sinyal/gürültü oranının 5'ten az ve korelasyon değerinin %70'den az olduğu

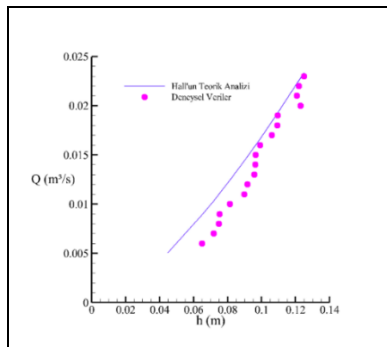
ölçümler filtrelenmiştir. Hız ve türbülans büyüklüklerine ait ortalama verileri elde edebilmek için gerekli veriyi toplayabilmek amacıyla her ölçüm noktasında 180 s boyunca hız ölçümü yapılarak ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Savaşın deneysel çalışmalar sırasında hareket etmemesi için her biri 250 kg çekme kapasiteli üç adet manyetik mıknatıs kullanarak savak deney kanalında sabitlenmiştir.

Su yüzü profilleri oluşturulurken zamanla değişmeyen akım koşulları oluşana kadar beklenmiş, ardından savak membasını ve kretini bir arada gösteren fotoğraf çekimi su terazili üçayak kullanılarak dik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ardından bu resim kullanılarak su yüzeyi GetData programı ile sayısallaştırılmış ve böylece su yüzü profilleri elde edilmiştir. Daha sonra debinin 23.6 lt/s ve 15 lt/s olduğu durumlarda savak membasındaki hız ve türbülans ölçümleri ADH kullanılarak farklı istasyonlarda gerçekleştirilmiştir. Tabandan 1 mm yükseklikten başlanarak ADH'nin ölçüm yaptığı sensörlerin tamamının akım içerisinde kaldığı yüksekliğe kadar farklı derinliklerde hız ve türbülans büyüklükleri ölçülerek derinlikle değişimlerini gösteren profiller elde edilmiştir.

3.1 Su yüzeyi ölçümleri

3.1.1 Deney sonuçları ile teorik sonuçların karşılaştırılması

Farklı debi geçişlerinde oluşacak su yüzü profillerini incelemeyen önce debimetre ölçümünün ve su yüzü profilinin sayısallaştırılmasının doğrulanması amacıyla deney sonuçları ile Hall'un teorik sonuçları karşılaştırılmıştır. Savaşın boyutları dikkate alındığında deneysel çalışmalarda kullanılacak en küçük debi $Q=5$ lt/s olarak belirlenmiştir. Savaşın membasında oluşabilecek en büyük su derinliği dikkate alındığında deneysel çalışmalarda kullanılacak en büyük debi 23.6 lt/s olarak belirlenmiş, kanaldan daha büyük debi geçtiğinde taşma oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 3'te savak membasında savak yüküne karşılık debi değerleri noktasal olarak gösterilmiş, Hall'un teorik sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi geniş başlıklı savak için Hall'un teorik analizinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçları oldukça yakın olup farklı debiler için yapılan bu ölçümlerde savak yükü teorik verilerle uyumludur. Hall tarafından geliştirilen debi denkleminin hassasiyetinin küçük debilerde düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni, düşük debilerde savak üzerindeki sınır tabaka etkileri tam olarak oluşmadığı için teorik analizde kullanılan güç yasasının geçerliliği kaybolmakta, böylece Denklem (11)'in elde edilmesinde kullanılan varsayımlardan dolayı ortaya çıkan hata artmaktadır.



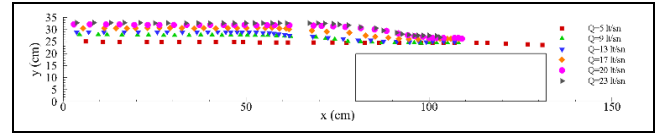
Şekil 3. Deneyel ve teorik debi-derinlik ilişkilerinin karşılaştırılması.

Figure 3. Comparison of experimental and theoretical discharge-depth relationships.

3.1.2 Debi-derinlik ilişkisi

Laboratuvarında dikdörtgen geniş başlıklı savak için deney koşullarına bağlı olarak minimum ve maksimum debiler belirlenmiş, farklı debiler için ölçümler yapılarak su yüzü profilleri elde edilmiştir.

Şekil 4'te savak üzerinden geçirilmiş seçilmiş debilere ait su yüzü profilleri görülmektedir. Deneysel olarak incelenen tüm debilerde savak membasında sabit su seviyesi görülmekte, akım krete ulaşıldığında su seviyesi düşmekte ve savak kreti üzerinde akım koşullarına ait kritik su derinliği oluşmaktadır. Laboratuvar koşulları ve savak geometrisi düşünüldüğünde en fazla 35 cm memba su derinliği oluşmaktadır.



Şekil 4. Farklı debilerde su yüzü profilleri.

Figure 4. Water surface profiles for different discharges.

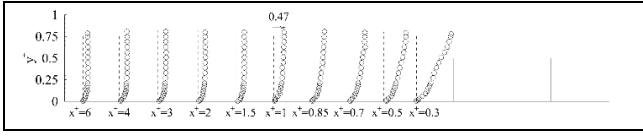
Deneysel olarak incelenen ve sayısallaştırılan su yüzü profillerinde özellikle yüksek debilerde kret üzerinde akım yapısının oldukça değiştiği, buna karşılık düşük debilerde savaşın akımı zorlanmadan geçirdiği gözlenmiştir. Savaşın ön yüzü köşeli olduğu için debi arttıkça savak kretinde oluşan ayrışma etkileri de artmakta, buna bağlı olarak savaşın debi iletim kapasitesi de azalmaktadır.

3.2 Hız ve türbülans ölçümleri

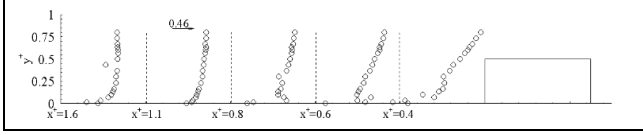
Hız ölçümleri $Q=23.6$ lt/s ve $Q=15$ lt/s olmak üzere iki farklı debi için gerçekleştirilmiştir. Kanal membasındaki akıma ait ortalama hızı ve türbülans gerilmeleri 25 Hz veri toplama kapasitesine sahip Nortek Marka ADH ile ölçülmüştür. ADH'nin kanal içerisinde herhangi bir derinliğe sabitlenbilmesi için kanal üzerinde raylı bir sistem vardır. ADH üç boyutlu hız bileşenlerini yüksek frekanslarda ölçebilmekte, böylece bir noktadaki ortalama akım hızı ve türbülans gerilmeleri elde edilebilmektedir.

Seçilen iki farklı debi için savak membasında hız ve türbülans ölçümleri farklı istasyonlarda ADH kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak $Q=23.6$ lt/s için savak membasında farklı istasyonlarda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ardından değişimin yüksek olduğu mesafeler belirlenerek $Q=15$ lt/s debi için yalnızca bu istasyonlarda hız ve türbülans okumaları yapılmış, böylece akım yapılarındaki farkın ortaya çıktığı istasyonların incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan savak $L=52$ cm uzunluğunda ve $P=20$ cm yüksekliğindedir.

Ortalama hız profillerinin boyutsuz yatay mesafe ile değişimleri Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Burada x^* boyutsuz mesafesi, savaşın memba yüzeyinden ölçülen x mesafesinin deneysel olarak belirlenen memba su seviyesi h_0 'a oranı şeklinde belirlenmiştir. Boyutsuz y^* değeri de yine y su yüksekliğinin memba su seviyesine oranıyla hesaplanmıştır. Hızın x yönündeki bileşeni ise girişteki ortalama akım hızına (U_0) göre boyutsuzlaştırılmıştır. Burada U_0 hızı debinin savak membasındaki ıslak alana oranı şeklinde hesaplanan ortalama hızı değeri olarak alınmıştır. Savak membasındaki su yüksekliği kanal genişliği ile çarpılarak ıslak alan hesaplanmıştır. Bu akım koşulları için Reynolds sayıları 23.6 lt/s debi için 58.960 ve 15 lt/s debi için 37.500 hesaplanmıştır. Reynolds sayılarına göre akımın türbülanslı olduğu görülmektedir.

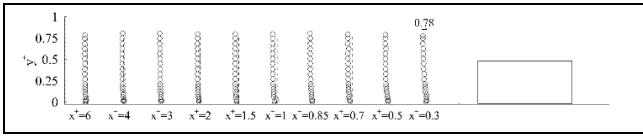


Şekil 5. Q=23.6 lt/s için savak membasındaki hız profilleri.
Figure 5. Velocity profiles upstream of the broad-crested weir for Q=23.6 lt/s.



Şekil 6: Q=15 lt/s için savak membasındaki hız profilleri.
Figure 6. Velocity profiles upstream of the broad-crested weir for Q=15 lt/s.

Savak membasından uzaklaştıkça boyutsuz x mesafesinin 1.5'ten büyük olması durumunda hız profillerinde yatayda değişim görülmemiştir (Şekil 7).

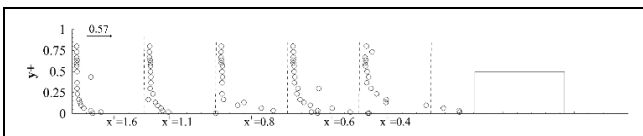


Şekil 7. Q=23.6 lt/s için yatay yöndeki Reynolds normal gerilmesinin ($\sqrt{u'^2}/U_0^2$) derinlikle değişimi.

Figure 7. The variation of horizontal Reynolds stress ($\sqrt{u'^2}/U_0^2$) with depth for Q=23.6 lt/s

Bu nedenle Q=15 lt/s için gerçekleştirilen ADV ölçümleri savak membasından itibaren 5 boyutsuz uzaklıkta gerçekleştirilmiştir. Hız profilleri incelendiğinde özellikle savağa yakın bölümde akımın hızlandığı, Q=23.6 lt/s'de $x^+=0.85$ boyutsuz mesafesinden sonra akım hızında serbest yüzeye yaklaştıkça artış görülmektedir. Yine bu istasyondan membaya doğru açık kanallarda görülen tam gelişmiş akım özellikleri ortaya çıkmaktadır. Aynı durum Q=15 lt/s' de $x^+=1.1$ noktasında görülmektedir. Bu durumda savak yükünün artmasıyla birlikte savak kretinde daha düşük hızların görülmesini sağlamaktadır. İki farklı debi için boyutsuz hız profilleri karşılaştırıldığında savağa yaklaştıkça akım hızındaki artışın düşük debide daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Türbülans gerilmelerinin akım yönündeki normal bileşenin u'^2 kanal boyunca değişimi iki farklı debi için Şekil 7 ve 8'de akıma ait parametreler boyutsuzlaştırılarak gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi savağa yaklaştıkça türbülans gerilmeleri çevrinti etkilerinden dolayı artmaktadır.



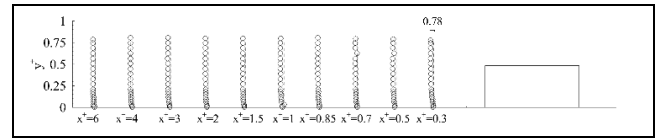
Şekil 8. Q=15 lt/s için yatay yöndeki Reynolds normal gerilmesinin ($\sqrt{u'^2}/U_0^2$) derinlikle değişimi.

Figure 8. The variation of horizontal Reynolds stress ($\sqrt{u'^2}/U_0^2$) with depth for Q=15 lt/s.

Türbülanslı akımda hız büyüklüklerindeki çalkantılardan dolayı ortaya çıkan türbülans gerilmelerinin savak civarında artması bu bölgedeki dinamik etkilerin de büyük olacağını ve

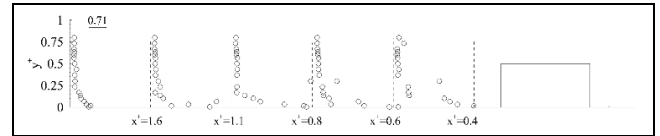
buna bağlı olarak da savağın hemen membasındaki bölgede taban malzemesini harekete geçirebileceği görülmektedir. Bu durum taban oyulmalarına neden olabileceği için savağın ekonomik ömrünü de azaltmaktadır.

Düşey yöndeki normal türbülans gerilmelerinin v'^2 akım yönündeki değişimleri iki farklı debi için Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Düşey yöndeki türbülans gerilmeleri incelendiğinde tabana yakın bölgede düşey yöndeki türbülans gerilmeleri büyük olmasına rağmen tabandan uzaklaştıkça etkisinin azaldığı görülmektedir. Hem düşey hem de akım yönündeki türbülans gerilmeleri beraber düşünüldüğünde savağın memba yüzeyinde katı-akışkan etkileşimi sebebiyle oluşan karmaşık akım yapısının hem x yönünde hem de y yönünde çalkantılı bir akış oluşturduğunu ortaya çıkarmaktadır. Burada, Q=15 lt/s olması durumunda Reynolds gerilmelerinin daha büyük etkisinin görülmesi akımı yönlendiren hızın hem düşey hem de yatay yönde olmasıdır. Debi değeri 23.6 lt/s'ye yükseldiğinde akım yalnızca x yönündeki hızların etkisi altına girmiştir.



Şekil 9. Q=23.6 lt/s için düşey yöndeki Reynolds normal gerilmesinin ($\sqrt{v'^2}/U_0^2$) derinlikle değişimi.

Figure 9. The variation of vertical Reynolds stress ($\sqrt{v'^2}/U_0^2$) with depth for Q=23.6 lt/s



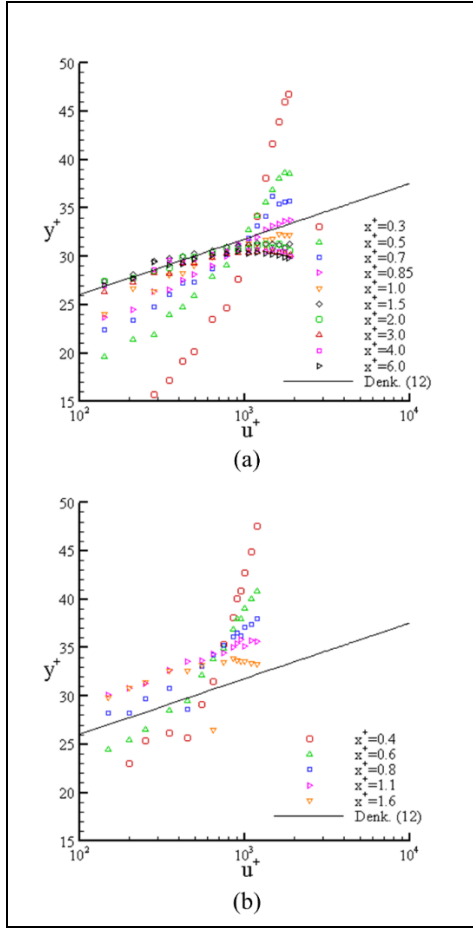
Şekil 10. Q=15 lt/s için düşey yöndeki Reynolds normal gerilmesinin ($\sqrt{v'^2}/U_0^2$) derinlikle değişimi.

Figure 10. The variation of vertical Reynolds stress ($\sqrt{v'^2}/U_0^2$) with depth for Q=15 lt/s.

Pürüzlü yüzeyler üzerindeki akıma ait hız profili Nikuradse'nin tam pürüzlü boru içerisindeki akıma ait denklemi ile tanımlanabilir [17]:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} = 2.5 \ln \frac{z}{k_s} + 8.5 \quad (12)$$

Burada z katı yüzeyden uzaklık, k_s is Nikuradse'nin kum zemin için belirlemiş olduğu pürüzlülük yüksekliğidir [18]. Deneysel kanalı tabanı metal yan yüzeyleri ise cam malzemeden olduğundan deneyler sırasında bir pürüzlülük elemanı kullanılmasa dahi pürüzlü bir yüzey oluşmaktadır. Bu nedenle Denklem 12'de verilen boyutsuz hız kullanılarak değerlendirme yapılabilmektedir. Kayma hızı u_τ 'ya göre boyutsuzlaştırılmış ve y ekseninde ölçüm istasyonunun savaktan mesafesine göre y^+ değeri belirli oranda büyütülmüş, hız profilleri farklı debiler için Şekil 11'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi savaktan uzaklaştıkça akım tam gelişmiş akım koşullarına ulaşmakta, savağa yaklaştıkça katı-akışkan etkileşiminden dolayı akım üniform olmayan bir yapıya dönüşmekte ve teorik sonuçlardan uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 11. Logaritmik yasa hız profili ile deneysel sonuçların karşılaştırılması. (a): $Q=23.6$ lt/s. (b): $Q=15$ lt/s.

Figure 11. Comparison of log law velocity profile with experimental results. (a): $Q=23.6$ lt/s. (b): $Q=15$ lt/s.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada ön yüzü köşeli geniş başlıklı savak üzerindeki türbülanslı akım deneysel olarak araştırılmıştır. Ön yüzü köşeli geniş başlıklı savak üzerinden farklı debiler geçirilerek görüntü sayısallaştırılmasıyla debi-derinlik eğrileri elde edilmiştir. Deneysel ölçüm sonuçları ile Hall'un teorik sonuçları karşılaştırıldığında, düşük debilerde savak üzerindeki sınır tabaka tam gelişmediği için güç yasasına göre belirlenen debi denkleminin hassasiyetinin de azaldığı, büyük debilerde ise savak üzerinden geçen debi ile teorik sonuçların birbirine yaklaştığı gözlenmiştir.

Su yüzü profilleri incelendiğinde, tüm debi değerlerinde savak membasında sabit su seviyesinin oluştuğu, savak girişinde su seviyesinin azaldığı ve bu bölgede dalgalanmaların meydana geldiği görülmüştür.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde $Q=15$ lt/s ve 23.6 lt/s debiler için ADH ile savağın membasındaki farklı istasyonlarda hız ve türbülans gerilmeleri ölçülerek akım yönündeki değişimleri elde edilmiştir. $Q=15$ lt/s için boyutsuz $x^+=1.1$ ve $Q=23.6$ lt/s için boyutsuz $x^+=0.85$ istasyonlarından sonra akım hızlarının serbest yüzeye doğru yaklaştıkça arttığı ve kret üzerindeki sınır tabaka üzerinde hızlanan akımın serbest yüzeyde dalgalanma oluşturduğu görülmüştür. Savak kretindeki ayrışma ve buna bağlı olarak yeniden tutunma

etkilerinden dolayı ön yüzü köşeli savaklarda dalgalanma etkilerinin yüksek olduğu gözlenmiştir.

Akım yönündeki ve düşey yöndeki normal türbülans gerilmelerinin kanal boyunca değişimleri incelendiğinde savağın hemen membasında türbülans etkileri arttığı için türbülans gerilmelerinin büyüdüğü, buna bağlı olarak da savağın membasında dinamik bir çevrintili akım yapısının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen deneysel verinin ileride geliştirilecek üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerin doğrulanması için kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

5 Results

In this study, the turbulent flow on the angular front face broad-crested weir was investigated experimentally. Flow-depth curves were obtained by digitizing the image for different flow rates over the angular front face broad-crested weir. When the experimental and Hall's theoretical results were compared, it was observed that the sensitivity of the flow equation determined according to the law of power decreases as the boundary layer on the weir does not develop at low flow rates, and the flow passing through the weir and the theoretical results approach to each other as the flow rate increase.

When the water face profiles were examined, stationary water level observed in the upstream of the weir at all flow rates, the water level decreased at the beginning of the weir and fluctuations occurred in this region.

In the second part of the experimental studies, the changes throughout the flow direction were obtained by measuring the velocity and turbulence stresses at different stations on the upstream of the weir using ADV for $Q=15$ lt/s and 23.6 lt/s flow rates. After the dimensionless $x^+=1.1$ station for $Q=15$ lt/s and $x^+=0.85$ station for $Q=23.6$ lt/s, the stream velocity increased as it approached the free surface, and the accelerating flow over the crest above the boundary layer induced fluctuation on the free surface. It was observed that the fluctuation effects were high in the corners of the angular sides due to the separation above the crest of the weir and the retaining effects.

When the changes of the normal turbulence stresses in vertical and the flow direction along the channel, it was observed that the turbulence stresses increased due to the increase in the turbulence effects on the upstream of the weir, and a dynamic swirl flow structure appeared on this region. It is evaluated that the experimental data obtained in this study can be used to verify the three-dimensional computational fluid dynamics models to be developed in the future

6 Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 201715007 Sayılı Proje kapsamında desteklenmiştir.

7 Kaynaklar

- [1] Kızılaslan MA, Demirel, E. "Numerical investigation of the recirculation zone length upstream of the round-nosed broad crested weir". 6th International Conference on Urban Design, Transportation, Architectural and Environmental Engineering (UTAAE-17), Istanbul, Turkey, 8-10 September 2017.

- [2] Moss WD. "Flow separation at upstream edge of a square-edge broad-crested weir". *Journal of Fluid Mechanics*, 52(2), 307-320, 1972.
- [3] Ramamurthy AS, Tim US, Rao MVJ. "Characteristics of square-edged and round-nosed broad-crested weirs". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(1), 61-73, 1988.
- [4] Sarker MA, Rhodes DG. "Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir". *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 215-219, 2004.
- [5] Göğüş M, Defne Z, Özkandemir V. "Broad-Crested weirs with rectangular compound cross sections". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3), 272-280, 2006.
- [6] Emiroğlu ME, Baylar A. "The Effect of broad-crested weir shape on air entrainment". *Journal of Hydraulic Research*, 41(6), 649-655, 2003.
- [7] Gonzales CA, Chanson H. "Experimental measurements of velocity and pressure distributions on a large broad-crested weir". *Flow Measurement and Instrumentation*, 18, 107-113, 2007.
- [8] Bal H. Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2011.
- [9] Goodarzi E, Farhoudi J, Shokri N. "Flow characteristic of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face". *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60(2), 87-100, 2012.
- [10] Felder S, Chanson H. "Free-Surface profiles, velocity and pressure distributions on a broad-crested weir: a physical study". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(12), 1068-1074, 2012.
- [11] Zachoval Z, Mistrová, Roušar L, Šulc J, Zubíc P. "Zone of flow separation at the upstream edge of a rectangular broad-crested weir". *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 4, 288-298, 2012.
- [12] İlkentapar M. Açık Kanallarda Geniş Başlıklı Savaklar Üzerindeki Akımın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2015.
- [13] İlkentapar M, Öner AA. "Geniş Başlıklı Savak Etrafındaki Akımın İncelenmesi". *Ömer Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 615-626, 2017.
- [14] Hager, WH, Schwalt, M. "Broad-crested weir". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 13-26, 1994.
- [15] Hall GW. "Analytical determination of the discharge boundary layer theory characteristics of broad-crested weirs using". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 22(2), 172-190, 1962.
- [16] VECTRINO. "Velocimeter User Guide". https://www.nortekgroup.com/assets/software/N3015-013-NQG_VECTRINO_1017.pdf (09.10.2018).
- [17] Nikuradse J. *Stromungsgesetze in Rauhen Rohren*. 1st ed. Berlin, ALMANYA, Forschungsheft auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1933.
- [18] Kirkgöz, S. "Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow". *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 1543-1561, 1989.