



DOLUSAVAK YAPILARININ FİZİKSEL VE SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Ş. Yurdağül KUMCU ^{1,*}, Muhammed UÇAR ²

^{1,2} İnş. Müh. Böl., Müh. Fak., Necmettin Erbakan Üniversitesi, 42140 Meram, Konya

ÖZET

Adana il sınırları içerisinde bulunan ve Kavşak Bendi Hidroelektrik Santralının 20 km membaında kurulan Köprü Barajı Seyhan Nehrinin Göksu kolu üzerinde inşaa edilmiştir. 155,85 MW kurulu gücü ile yıllık 381 GWh elektrik üretimi hedeflenmiştir. Hidrolik yapıların tasarlanması aşamasında, projeyi etkileyen parametrelerin tamamının matematiksel olarak tanımlanması mümkün olmadığı için, yapım maliyeti oldukça yüksek olan bu yapılarda hatalardan kaçınmak ve en uygun çözümü bulmak için fiziksel model çalışmaları yapılarak projenin uygunluğunun test edilmesi mümkündür. Bu amaçla, Köprü Barajı dolusavak yapısının da fiziksel model çalışmaları yapılmıştır. Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı (TAKK) Hidrolik Laboratuvarında yürütülen fiziksel deneyler 1/60 model ölçeği ile inşa edilmiştir. Köprü Barajı, 100 metre yüksekliğinde olup gövde dolgusu silindire sıkıştırılmış beton (SSB) ile yapılmıştır. Dolusavak yapısı 125 metre genişliğinde ve kontrolsüz olarak karşıdan alışıdır. Enerji kırıcı yapısı ise batık çalışan sıçratma eşiği seçilmiş olup, hidrolik sıçramaların kontrol altına alınması, memba aşınmalarının engellenmesi, işletme süresi boyunca baraj stabilizesinin ve mansap yapılarının korunması hedeflenmiştir. Akım derinliği, debi ve basınç okumaları üç farklı debi için yapılmış olup bunlar; 500 m³/s, 2/3*Q_{FYEYZAN} ve Q_{FYEYZAN}'dır. Basınç ölçümlerinden de piezo-elektrik basınç vericisi, akım derinliği ölçümlerinde limnometre, hız ölçümlerinde ise mikro-muline kullanılmıştır. İnşaatı tamamlandıktan sonra işletmeye alınan su yapılarında oluşabilecek sıkıntıların yaşanmaması, deneysel çalışmalarda oluşabilecek ölçek etkisi gibi sorunlar ile karşılaşılması için; deneysel çalışmalara destek ve alternatif olarak sayısal modellemeler de yapılmaktadır. Bu çalışmada, laboratuvarında yapılan deneysel çalışmaların doğrulanması için sayısal modelleme yapılmış ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri çözen FLOW-3D ticari matematiksel programı kullanılmıştır. Fiziksel ve sayısal model çalışmalarından elde edilen anahtar eğrisi, hız ve basınç ölçümleri karşılaştırılmış, benzerlikler ve farklılıklar tespit edilmiştir. Deneysel çalışma ve matematiksel modelleme sonuçlarının %2 farklılıkla oldukça birbirine yakın oldukları görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Dolusavak tasarımı, CFD, Sayısal modelleme, Fiziksel modelleme

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL MODELING ANALYSIS OF THE KOPRU DAM SPILLWAY STRUCTURES

ABSTRACT

The Koprü Dam spillway, constructed on the Seyhan River - Göksu branch at the 20 km upstream of Kavşak Dam in Adana province of Turkey, produces 381 GWh energy per year with 155,85 MW installed capacity. Since it is not possible to define all the parameters that affect the project in the design phase of the hydraulic structures, it is possible to test the suitability of the project by physical model studies in order to avoid mistakes and to investigate the most suitable solution. For this purpose, physical model studies of the spillway structure of the Köprü Dam have been carried out. The physical model experiments, executed in Hydraulic Laboratory of State Hydraulic Works in Turkey, is constructed with 1/60-scale. The dam consists of a 100 m high RCC dam body, uncontrolled 125 m spillway chute located on the dam body, and a 155,85 MW installed capacity power house. At the end of the chute the submerged flip bucket was selected for energy dissipater in order to control of hydraulic jump, prevention of downstream erosion, protection of dam stability and downstream structures during operation period. Flow depth, discharge and pressure data were recorded for 3 different flow conditions as; 500 m³/s, 2/3 of Q_{PMF} and Q_{PMF}. Piezo-electric pressure transmitter for pressure, Limnimeter for flow depth and micro-muline for velocity measurements are utilized. Although the hydraulic modeling is still widely accepted and utilized mechanism for the experimental investigation of flow over a spillway structure, numerical simulations for hydrodynamic processes became alluring with increasing computer processing capacity and without the necessity of time & budget consuming physical build-up progress. In this study, FLOW 3D, a commercially available CFD program, solves the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yurdagulcumcu@gmail.com
Geliş / Recieved: 20.01.2019 Kabul / Accepted: 23.09.2019 doi: 10.28948/ngumuh.515220

Ş. Y. Kumcu, M. Uçar

equations, used for the numerical modeling. To compare the results of the physical model and the numerical model; discharge rating curves and pressures are used. The reasonably agreement with 2 % difference between the physical and the numerical is observed in the study.

Keywords: Spillway design, CFD, Numerical modelling, Physical modelling

1. GİRİŞ

Taşkın zamanında barajların depolama kapasitesini aşan suların, baraj güvenliğini tehlikeye atmadan akarsu mansabına güvenle bırakılmasını sağlamak amacı ile inşa edilen, dolusavakların tasarımı hidrolik mühendisliğinin en önemli çalışma alanlarından biridir. Taşkın sularının baraj mansabına güvenli bir şekilde aktarılabilmesini sağlayan, baraj emniyet yapısı olan dolusavakların tasarımı son derece önemlidir.

Dolusavak yapısının tasarım aşamasında fiziksel modellemenin önemi çok büyüktür. İnşaatı tamamlandıktan sonra işletmeye alınan su yapılarında projeden kaynaklı problemlerin yaşanmaması için alınacak önlemlerden bir tanesi fiziksel modelledir. Fiziksel model, bir su yapısına ait gerçek değerlerin, yapının çalışma prensibine uygun olarak belirli bir ölçekte küçültülmesi, her ölçüm parametresinin uygun benzeşim yasaları ile orantılı hale getirilerek, yapı inşa edilmeden önce test edilmesine imkan vermesini sağlayan yapıdır. Fiziksel modelleme, her yapıya özgün, uygun benzeşim kanunları kullanılarak tasarlanırsa, su yapısına ait çalışmalar deneysel olarak test edilebilir. Gerekli gözlemler, ölçümler ve hesaplamalar yapılsa, yapının prototipi yapılmadan önce modeli ile çalışılarak, gerçek davranışı tahmin edilebilir. Sonuçlar alındıktan sonra yapıya ait gerekli revizyonlar yapılabilir.

İnşaatı tamamlandıktan sonra işletmeye alınan su yapılarında oluşabilecek sıkıntıların yaşanmaması için alınacak önlemlerden bir diğeri de matematiksel modelledir. Son zamanlarda hızla gelişen işlemci kapasiteleri ve yazılımlar ile bilgisayar uygulamalı çözümlerle geliştirilen sayısal modellemeler de oldukça önem kazanmıştır ve yaygınlaşmıştır. Laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar iyi sonuçlar verse de zaman alan, ağır işçilik isteyen ve yüksek maliyetlere sebep olan çalışmalardır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında deneysel çalışmalara destek ve alternatif olarak sayısal modellemeler de yapılabilmektedir. Sayısal çözüm metodunda ise, çözümlenecek olan probleme ait akışkanlar mekaniği denklem sistemleri matematiksel yöntemlerle beraber bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir. Akışkanların davranışlarını inceleyen sayısal modelleme alanına özel olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) adı verilmiştir. Mühendislik alanlarında kullanılan birçok ticari veya açık bilgisayar programı bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan FLOW-3D programı 1 ve 2 boyutlu akışkan çözüm programlarına göre çok daha karmaşık 3 boyutlu çözüm kapasitesine sahiptir (Kumcu, 2017).

Bu çalışma kapsamında, DSİ Hidrolik Model Laboratuvarında gerçekleştirilen Köprü Barajına ait fiziksel model çalışmalardan elde edilen ölçümler ile FLOW-3D programından elde edilen sonuçlar ve orijinal projeye ait hesaplamalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Köprü Barajın tamamlanmasından sonra elde edilen dolusavak uygulamasına ait görüntü Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Köprü Barajı inşaatının tamamlanmış hali (Özaltın, 2019)

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Fiziksel Model

1/60 ölçeğinde modellenen Köprü Barajı Dolusavak yapısı DSİ TAKK dairesinde inşa ve test edilmiştir (Özcan, 2011). Yapımında geleneksel inşaat malzemelerinin yanında hidrolik deney çalışmalarında sıklıkla kullanılıp, dayanıklılık ve kolay

DOLUSAVAK YAPILARININ FİZİKSEL ve SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ ile ANALİZİ

işlenmesinin yanında gözlemlemeyi kolaylaştıran flexiglas malzeme kullanılmıştır (Şekil 2 ve 3). Dolusavak genişliği kret seviyesinde 125 metre iken batık çalışan sıçratma ucuna gelene kadar simetrik daralarak 100 metreye düşmektedir. Deşarj kanalı yaklaşık 72 metre uzunluğunda olup eğimi 0.8/1 oranındadır. Batık çalışan sıçratma ucu da 15 metre yarıçapındadır.



Şekil 2. 1/60 ölçekli model çalışmasının üstten görünüşü (Özcan, 2011)

Fiziksel çalışma kapsamında, debi ölçümleri için 1,5 metrelik keskin kenarlı dikdörtgen kesitli savak kullanılmış olup, uniform akım elde edilebilmesi, dalgalanmaların önlenmesi ve enerjinin kırılması için akım sönümleyici susturucular kullanılmıştır (Şekil 1). Dolusavak üzerinde oluşan basınç ölçümleri için, dolusavak üzerine piezo-elektrik basınç vericisi kullanılmıştır. Akım derinliğini ölçmek için ± 1 mm hassasiyetli limnometre, hız ölçümleri için ise $\pm 2\%$ hassasiyetli olan ve sığ su seviyelerinde kullanılan mikro-muline hız ölçüm aleti kullanılmıştır. Model çalışmalarında test edilen akım debilerine ait memba ve mansap koşulları Tablo 1'de verilmiştir. Kuyruksuyu derinlikleri ise mansap tarafına yerleştirilen bir kapak ile ayarlanmıştır (Özcan, 2011)

Tablo1. Orijinal projeye ait rezervuar ve kuyruksuyu akım koşulları

Özellik	Debi (m ³ /s)	Rezervuar	Kuyruksuyu
		su kotu (m)	su kotu (m)
Q ₅₀₀	500	411,70	319,50
2/3 Q _{feyezan}	3500	415,72	328,30
Q _{feyezan}	5223	417,31	331,00

Model çalışmaları sırasında, yaklaşım kanalı, deşarj kanalı duvarları, sıçratma ucu gibi muhtelif yerlerde yapılan değişiklikler neticesinde uniform akım koşulları elde edilmiştir. Kaviteasyon hesabı için dolusavak üzerinde belirli konumlardan alınan basınç ölçümleri ile ortalama akım derinliğinin etkisi gözlenmiş ve orijinal projede gösterilen havalandırıcı performansının yetersiz olduğu görülerek, havalandırma bacalarından oluşan sisteme sıçratma rampası (Bureau of Reclamation, 1990) eklenmesi uygun görülmüştür (Şekil 2 ve 3). Bütün bu düzeltmelerin sonucunda yapılan ölçümlerde Feyezan debisinin sağlıklı bir şekilde mansaba ulaştırıldığı gözlenmiş ve çalışma son halini almıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Final projeye ait model düzeneği (Ozcan, 2011).

2.2. Sayısal Modelleme

Köprü Barajına ait proje verileri ile matematiksel modelleme yapılmıştır. Sayısal modellemede, 3 boyutlu akım modellemesi yapan FLOW-3D ticari programı kullanılmıştır. Flow-3D yazılımı, Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde sonlu hacim yöntemi kullanılmaktadır. Serbest yüzeyli akımların, Akım Hacmi (Volume of Fluid – VOF) yöntemi ile çözülmesi 1975 yılında ortaya konulmuş olup daha ileri çalışmalar ise 1981’de yapılmıştır (Nichols ve Hirt, 1975; Nichols ve Hirt, 1981). Bu yöntem, serbest yüzeyli akımların çözümünde aşağıdaki fonksiyonlarından dolayı iyi sonuçlar vermektedir.

- Hesap hücreleri içerisinde tanımlanan serbest yüzeyin konum ve yönelimlerinin bilinmesi
- Serbest yüzeyin hücreler boyunca takip edilebilmesi
- Sınır koşullarının gerçek akım şartları ile uyumlu olması.

FAVOR metodu, tanımlanan her bir akım hücresinin su ile doluluğuna bağlı olarak, akışa engel teşkil eden cisimlerin konumlarının ve şekillerinin tanımlanmasını sağlamaktadır (Hirt, 1992). Kademeli olarak yapılan ızgara tekniği ile her bir hücrede ortalama akım parametreleri (özellikle basınç ve hız) belirlenen zaman aralıklarında hesaplanmaktadır. Bu ortalama akım değerleri, hücre yan duvarları ile yapılan hesaplamaların hesap hücreleri merkezi ile kontrol edilmesi ile tekrar kontrol edildikten sonra sonuca ulaşır (Vesteege and Malalasekera, 1996, Johnson ve Savage, 2006). Kartezyen koordinat sistemine göre sıkıştırılmaz 3 boyutlu akımlar için temel akım denklemi 2010 yılında Kim ve arkadaşları tarafından aşağıdaki denklemdeki gibi verilmiştir:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

Bu denklemde, (u, v, w) sırasıyla (x, y, z) koordinat sisteminde hız parametrelerini; (A_x, A_y, A_z) her bir hesap hücreindeki akım alanlarını, ρ akım yoğunluğunu ve R_{SOR} ise yoğunluk terimini temsil etmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (2b)$$

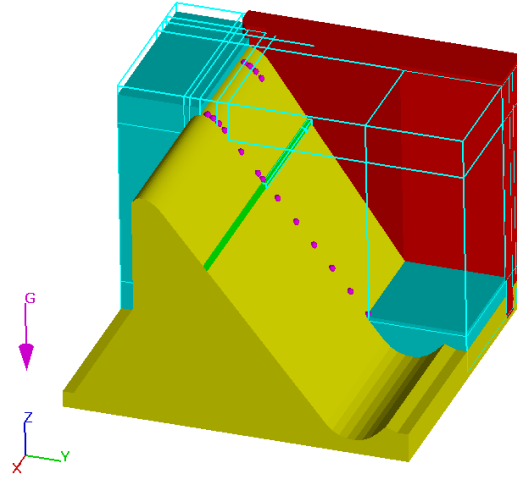
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (2c)$$

2a, 2b ve 2c denklemlerinde ise; V_F akım hacmini; p basıncı; (G_x, G_y, G_z) (x,y,z) koordinat sistemindeki akım kütlelerinin ivmesini, f_x, f_y ve f_z ise 3 boyutlu koordinat sistemindeki viskoz ivmeleri göstermektedir. VOF yönteminde iki fazlı akımlarda hava-su karışımının olmadığı kabul edilmektedir. Her bir akım hücresinin fazı, her bir akışkan fazının yüzde olarak tarif edildiği bir oranla ifade edilmektedir. Bu orana hacim oranı olarak adlandırılır. Her bir hesap hücrelerinde $F(x, y, z, t)=1$ ise akım hücreleri su ile doludur, $(x, y, z, t) = 0$ ise akım hücrelerinde su yoktur. Akımın hava ile birleştiği durumlarda, F , 0 ile 1 arasında bir değer alır. Bu durumda F denklem 1’de yerine konursa temel akım denklemi,

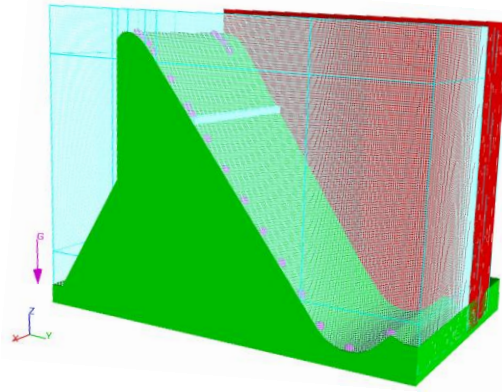
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x}(FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(FwA_z) \right] = 0 \quad (3)$$

şeklini alır. Çalışmalarda hava giriş oranı $C_{air}=0.5$ alınmıştır.

DOLUSAVAK YAPILARININ FİZİKSEL ve SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ ile ANALİZİ



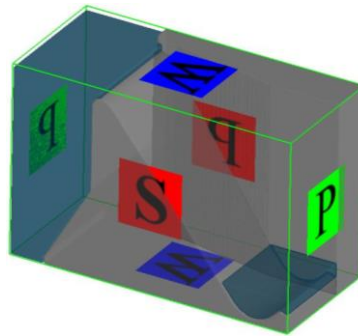
a) Katı Model



b) Hücre sistemi

Şekil 4. Köprü Barajı sayısal modeli

Sayısal modellemenin yapıldığı çalışmada türbülans modeli olarak, $k - \varepsilon$ ve $k - w$ türbülans modeli ile RNG (Renormalized Group) modeli kullanılmıştır. Sayısal modelin çözümünde, akım şartlarını tarif eden *viscosity and turbulence* (viskozite ve türbülans), *gravity* (yerçekimi), *air-entrainment* (hava girişi) ve *density evaluation* (yoğunluk hesaplaması) modülleri tarif edilmiştir. Modellemede kullanılan temel sayısal parametreler Tablo 2’de gösterilmiştir. Çözüm süresi ve sonuçların doğruluğu arasındaki ilişkiyi optimize etmek için üniform dağılımda olmayan dikdörtgen hücreler oluşturulmuştur (Şekil 4). Izgara düzlemleri (mesh planes) belirlenerek her iki düzlem arası ızgara boyutlandırması kontrol edilmiştir. Çalışmada yaklaşık olarak $6,82E+06$ adet dikdörtgen prizma ızgara kullanılmıştır. Kullanılan hücre boyutları ise $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.4$ m seçilmiştir ve her bir test yaklaşık 40 saat sürmüştür. Akımın modellenmesi aşamasında kartezyen koordinatlar tanımlandığı için, hesaplama ağı alanında altı farklı sınır şartı vardır. Sayısal modellemede, üç boyutlu kartezyen koordinat hücre sisteminin sınır şartları; y_{min} – simetri eksenini, y_{max} – duvar, z_{min} – duvar, z_{max} – atmosferik basınç, x_{min} – memba su seviyesi ve x_{max} - kuyruk suyu seviyesi şekilde tanımlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Sayısal modelde kullanılan sınır koşulları

Tablo 2. -Sayısal modellemelerde kullanılan başlıca parametreler.

ek	Seçen	Tercih
an	Akışk	Incompressible
zite	Visko	Newtonian Fluid
ans modeli	Türbül (RNG)	Renormalized Group
çözücü	Basınç (GMRES)	General Minimal Residual
ntum aktarımı	Mome Explicit Scheme	First-Order, Upwind
hacmi aktarım metodu	Akım (One Fluid Free Surface)	Standard Method
adım kontrolü	Zaman	Automatic

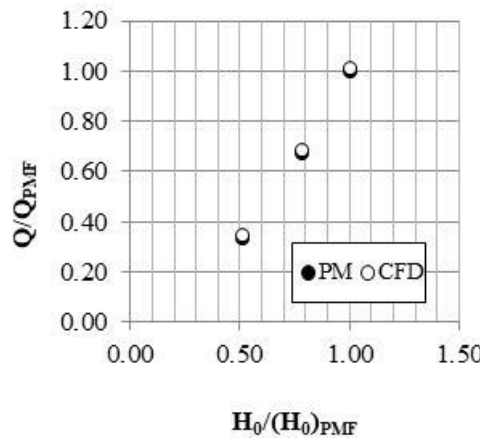
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sayısal modelleme ile fiziksel model deney sonuçlarından elde edilen akıma ait ölçümler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Fiziksel çalışmadan ölçülen debiler (Q_{FM}) ve sayısal modelden edinilen debi verileri (Q_{CFD}) Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Sayısal model ile fiziksel modele ait debi değerleri

Q_{FM} (m^3/s)	Q_{CFD} (m^3/s)	Fark (m^3/s)	Yüzde fark
500	513	13	% 2,60
3500	3579	79	% 2.26
5223	5284	61	% 1.17

Şekil 6'da fiziksel modelleme ve sayısal modellemeye ait anahtar eğrisi parametreleri, feyezan debisi ve feyezan debisinde elde edilen akım derinliği ile normalize edilerek boyutsuz hale getirilerek; normalize edilmiş debi y-ekseninde, rezervuar akım derinliği, H_0 ise x-ekseninde gösterilmiştir. Normalizasyon hesabında feyezan debisi (Probable Maximum Flood - PMF) parametreleri (H_0) $_{FEYEZAN}=7.31$ metre ve $Q_{FEYEZAN}=5223$ m^3/s olarak kullanılmıştır. Bağlı yüzde fark $(Q_{CFD}- Q_{FM})/Q_{FM} \times 100$ eşitliğiyle tanımlanmıştır. Fiziksel model ile sayısal model arasındaki fark %1,17 ile %2,60 arasında değişmektedir.

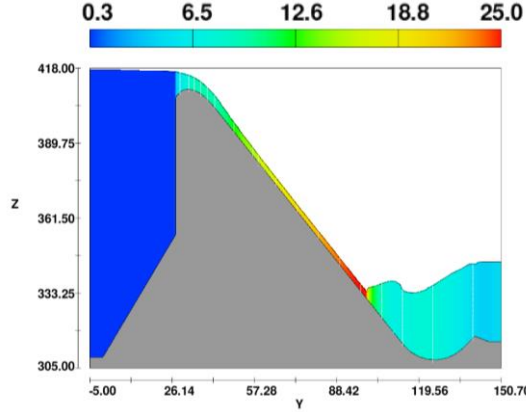
**Şekil 6.** Fiziksel (FM) ve sayısal (CFD) modellemelerin normalize parametreleri

Derinlik ortalamalı hız verileri $Q=5223$ m^3/s feyezan debisi için alınmış olup Şekil 7'de gösterilmiştir. Dolusavak üzerinde, dolusavak kretinden başlanarak, dolusavak uzunluğu boyunca basınç ölçümleri de yapılmıştır. Yapılan kaviteasyon

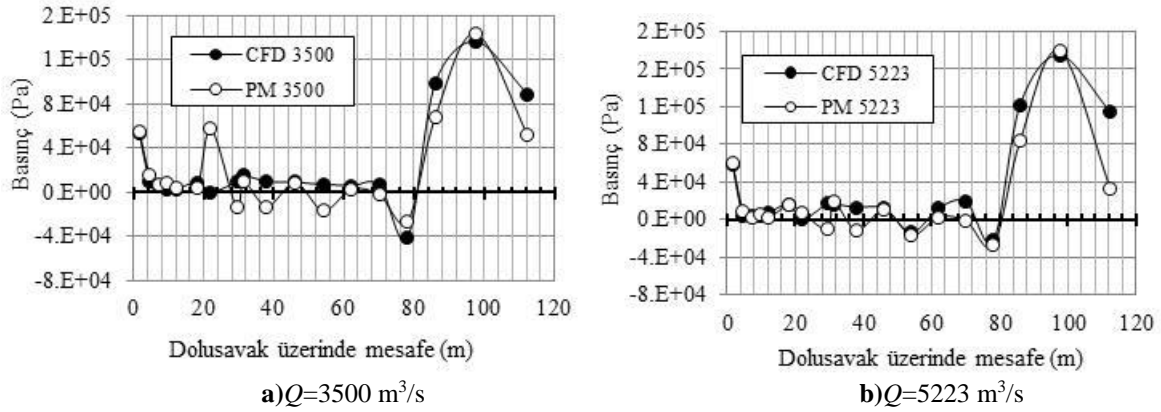
DOLUSAVAK YAPILARININ FİZİKSEL ve SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ ile ANALİZİ

hesaplarında, ortalama hızın 25 m/s değerlerine ulaştığı ölçümlerde kavitasyon riski görülmüş olup, fiziksel model çalışmalarından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Basınç ölçüm noktaları ve dolusavak üzerindeki yerleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. $Q_{FEYZAN}=5223 \text{ m}^3/\text{s}$ için simetri ekseninden alınan 2 boyutlu ortalama hız ölçümleri



Şekil 8. Fiziksel ve CFD model çalışmalarından elde edilmiş basınç ölçüm değerlerinin karşılaştırılması (simetri eksenini üzerinden)

Şekil 8’den görülebileceği gibi deneysel çalışma sırasında basınç okuması yapılan dolusavak üzerindeki piyezometre ucu yerleştirilen noktalardan, sayısal modelleme ile de basınç ölçümleri yapılmıştır. Fiziksel modelleme ile elde edilen basınç değerleri ile sayısal modellemeden elde edilen basınç değerleri birbiri ile örtüşmektedir. Dolusavak üzerindeki Km:80+00 m’de hızın 25 m/s’ye (Şekil 6) ulaştığı noktada basınç çok değeri çok düşmektedir ve negatif değerlere ulaşmaktadır (Şekil 7). Bu değerler, $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $5223 \text{ m}^3/\text{s}$ akım değerleri için deneysel çalışmalarda sırası ile -4,56 m ile -4,82 m iken; sayısal model çalışmalarda ise -4.00 m ile -4.80 m elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

CFD sayısal modellemeler ile deneysel çalışmalara ait akım özellikleri karşılaştırılmıştır.

Fiziksel modelleme ve sayısal modellemeye ait anahtar eğrisi değerleri hemen hemen birbiri ile örtüşmekte olup aralarındaki fark %1,17 ile %2,60 arasında değişmektedir.

$Q=5223 \text{ m}^3/\text{s}$ feyzan debisi için alınmış kavitasyon hesaplarında, ortalama hızın 25 m/s değerlerine ulaştığı ölçümlerde kavitasyon riski görülmüş olup, piyezometre değerleri, $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $5223 \text{ m}^3/\text{s}$ akım değerleri için deneysel çalışmalarda sırası ile -4,56 m ile -4,82 m iken; sayısal model çalışmalarda ise -4.00 m ile -4.80 m elde edilmiştir. Fiziksel ve sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar benzerlik göstermekte olup fark %2 mertebesinde.

Sayısal yöntemler ile yapılan hesaplamalar, gelişen bilgisayar teknolojileri ve matematiksel hesaplamalar ile birlikte daha doğru ve daha hızlı sonuçlar veren bir hesaplama yöntemidir. Bununla beraber, akışkanlar dinamiği problemleri için fiziksel modellemeler de hala tercih edilen, başarılı sonuçlar veren bir yöntemdir.

KAYNAKLAR

- [1] S.Y. Kumcu, M.A. Kokpınar, and I.O. Guler, "Investigation of flow over spillway modelling and comparison between experimental data and CFD analysis," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol.21, no.3, May, pp. 994-1003, 2017.
- [2] Ozaltın. [Online]. Available: <http://www.ozaltin.com.tr/insaat/barajlar/kopru-baraji-ve-hes>[Accessed: Jan. 19, 2019].
- [3] C. Ozcan, *Hydraulic Model Studies of Kopru Dam and HPP*. Hi-1011, Ankara: General Directorate of State Hydraulic Works, 2011.
- [4] Bureau of Reclamation, "Cavitation in chute and spillways," *Engineering Monograph*, no.42, 1990.
- [5] B.D. Nichols, and C.W. Hirt, "Methods for calculating multi-dimensional," *Proc. of First Intern. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, Transient Free Surface Flows Past Bodies '10*, 1975, pp. 20-23.
- [6] C.W. Hirt, and B.D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *Journal of Computational Physics*, vol. 39, no. 1, Jan., pp. 201-225, 1981.
- [7] C.W. Hirt, "Volume-fraction techniques: Powerful tools for flow modeling," *Flow Science Report*, no. FSI-92-00-02, Flow Science Inc., Santa Fe, N.M., 1992.
- [9] H.K. Vesteg, and W. Malalasekera, Eds., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Longman Scientific and Technical, New York: Pearson Education Limited, 1996.
- [10] M.C. Johnson, and B.M. Savage, "Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater," *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 132, no. 12, Jan., pp. 1353-1357, 2006.

